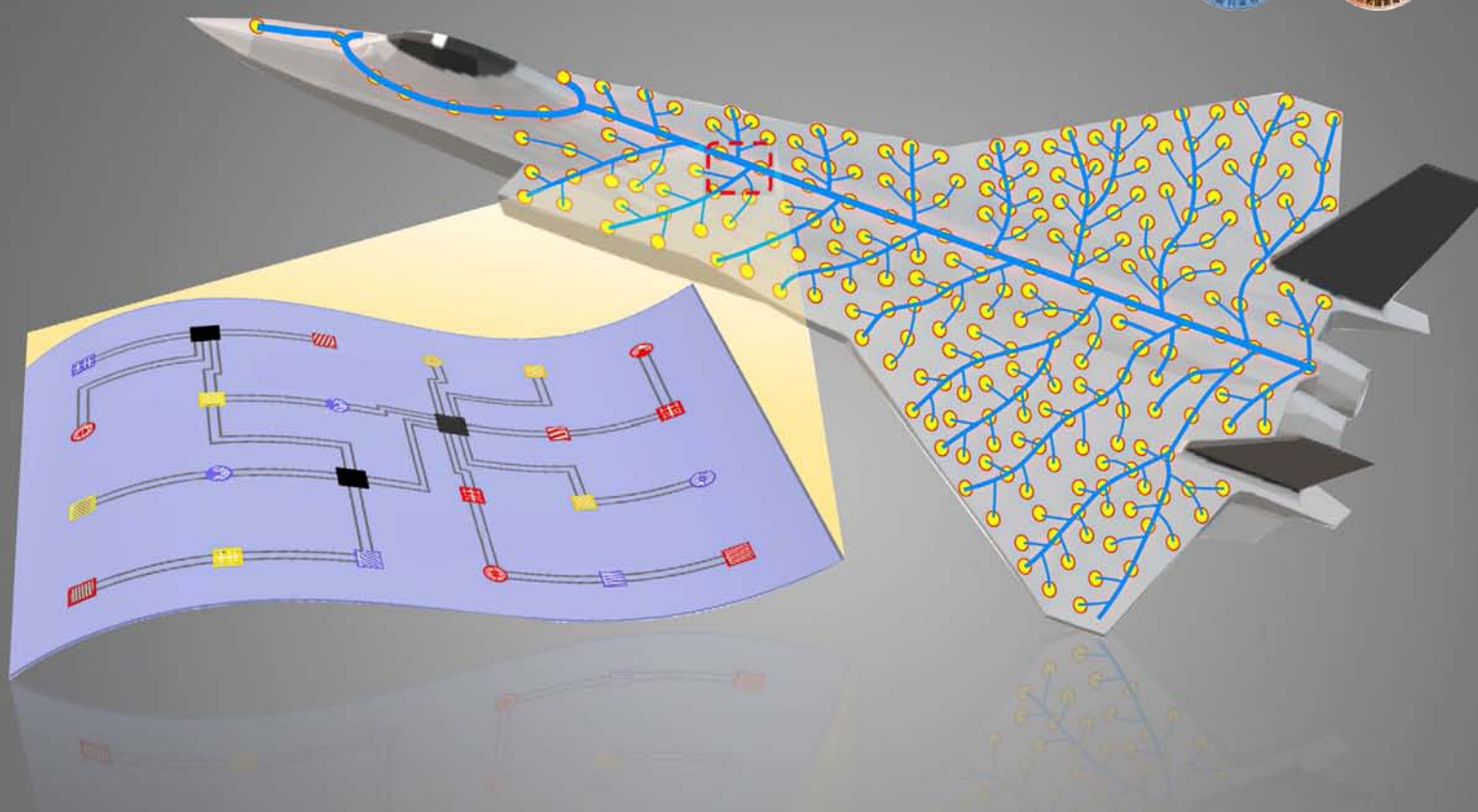


航空制造技术

2024年 第13期

Vol.67 No.13



封面文章

基于分布式光纤传感与U-Net网络的 复合材料分层损伤定量识别方法

专稿

协同双面搅拌摩擦焊接技术

论坛

结构健康监测

www.amte.net.cn

ISSN 1671-833X



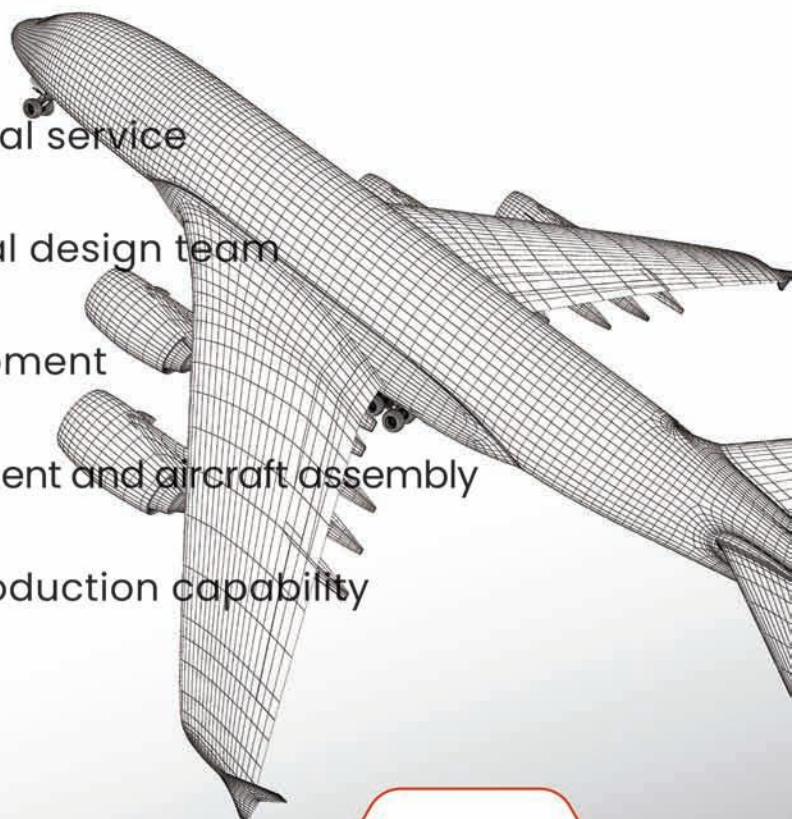
ISSN 1671-833X CN 11-4387/V



全球领先复合材料综合解决方案提供商 Global Leading Composite Solution Provider

核心优势 / Core Strength

- 完整的专业服务链
Complete chain of professional service
- 卓越的飞机结构设计团队
Outstanding aircraft structural design team
- 领先的制造设备
Leading manufacturing equipment
- 丰富的部段和整机装配经验
Extensive experience in component and aircraft assembly
- 突出的工业化量产能力
Prominent industrial mass production capability



产品案例 / Cases



电动垂直起降
eVTOL



舱门
Cabin Door



无人机 UAV



垂尾侧壁板
Vertical Tail Skin





WEINGÄRTNER
MASCHINENBAU

vario+

铣削，剥皮铣&旋风铣

全新升级
结构更紧凑&功能更强大

weingartner.com



国际金属加工展览会



魏因加特纳机械制造有限公司

座机 Tel: +86 10 8639 3011 服务热线: +86 18311248638 邮箱 E-Mail: china@weingartner.com

地址 Address: 北京市朝阳区建国路 118 号招商局大厦 13E19 室, 邮编 100020 广告索引号 24-1032

2024.9.10-14 | 6号展馆, B15

斯图加特展馆-德国

complete
SOLUTION

编委会
Editorial Board

主任 Director	李志强 Li Zhiqiang
常务副主任 Executive Vice-Director	王向明 Wang Xiangming
副主任 Vice-Director	李涤尘 隋少春 Li Dicheng Sui Shaochun

国内编委
Domestic Members

包建文	毕运波	陈 玮
Bao Jianwen	Bi Yunbo	Chen Wei
程普强	丁国智	董绍明
Cheng Puqiang	Ding Guozhi	Dong Shaoming
冯 晶	高兰宁	郭洪波
Feng Jing	Gao Lanning	Guo Hongbo
赫晓东	晋严尊	李金山
He Xiaodong	Jin Yanzun	Li Jinshan
李克明	李 黎	李文龙
Li Keming	Li Li	Li Wenlong
刘黎明	刘雪峰	刘战强
Liu Liming	Liu Xuefeng	Liu Zhanqiang
卿新林	沈洪才	师俊东
Qing Xinlin	Shen Hongcai	Shi Jundong
石竖鯤	史玉升	宋晓国
Shi Shukun	Shi Yusheng	Song Xiaoguo
陶 飞	王俊升	王立平
Tao Fei	Wang Junsheng	Wang Liping
王清江	王先模	夏峥嵘
Wang Qingjiang	Wang Xianmo	Xia Zhengrong
肖贵坚	肖世宏	邢丽英
Xiao Guijian	Xiao Shihong	Xing Liying
徐九华	徐正扬	杨 辉
Xu Jiuhua	Xu Zhengyang	Yang Hui
杨树明	姚 为	曾元松
Yang Shuming	Yao Wei	Zeng Yuansong
张 博	张文武	张振宇
Zhang Bo	Zhang Wenwu	Zhang Zhenyu
章顺虎	赵安安	朱继宏
Zhang Shunhu	Zhao An'an	Zhu Jihong
朱嘉琦	朱利民	
Zhu Jiaqi	Zhu Limin	

国际编委
International Members

Chrsitoph Hartl (Germany)	Dae-Cheol Ko (Korea)
Jim Williams (U.S.)	John Dear (UK)
Lihui Wang (Sweden)	Paulo Martins (Portugal)

AERONAUTICAL MANUFACTURING TECHNOLOGY

航空制造技术



1958年创刊·中文核心期刊·中国科技核心期刊·中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊

主管单位
Competent Authority
中国航空工业集团有限公司
Aviation Industry Corporation of China, Ltd.

主办单位
Sponsor
中国航空制造技术研究院
AVIC Manufacturing Technology Institute

出版人 李志强
Publisher Li Zhiqiang

总编辑	罗京华
Chief Editor	Andy Luo
执行主编	孙秀云
Executive Editor-in-Chief	Sharon Sun
学术编辑	崔 静/王燕萍
Academic Editor	Jaime Cui/Emma Wang
文字编辑	李 明/郝 爽/程学平
Text Editor	Winne Li/Seven Hao/Linda Cheng
市场总监	何 欣
Marketing Director	Xin He
设计/排版	王 艳
Art Supervisor/Art Editors	Yan Wang
编辑出版	《航空制造技术》编辑部
Edition	Aeronautical Manufacturing Technology Magazine
广告总代理	北京贝特里技术发展有限公司
Advertising Agent	Beijing BAMTRI Technology and Development Co., Ltd.
通信地址	北京市340信箱(100024)
Address	P.O.Box 863.Beijing 100024 China
邮发代号	82-26
Subscription Code	82-26
国外发行	中国国际图书贸易集团有限公司
Distributor Abroad	China International Book Trading Corporation
国外代号	BM6680
Code Abroad	BM6680
印刷	北京荣华世纪印刷有限公司
Printing	Beijing Ronghuashiji Printing Co., Ltd.
刊号	ISSN 1671-833X CN 11-4387/V CODEN HGJIEO
电话	(010)85700465
传真	(010)85700466
在线投稿	http://www.amte.net.cn
电子信箱	zscbyyjb@amte.net.cn

国内定价: 20.00元 国外定价: 16.00美元

版权声明: 凡投稿本刊或允许本刊登载的作品, 均视为已授权上载于www.amte.net.cn, 以及本刊授权的合作媒体使用。

PO 900 BF型数控多轴整体叶盘精密电解加工设备



低刀具成本



无热影响



高精度

Ra 0,2

粗糙度
(取决于材料)

亮点

- + 机床底座由MINERALIT®高级矿物浇铸而成
- + 配置有无间隙精密驱动的振荡器
- + 十字滑板用于承接叶轮, 附带有Z轴, Y轴, B轴及C轴
- + 液压式零点夹紧系统
- + 机床控制系统采用西门子 SINUMERIK 840D sl



埃马克(中国)机械有限公司

地址: 太仓市陈门泾路101号工业园区2号厂房

邮编: 215400 · 电话: 0512-53574098 · 传真: 0512-53575399

网址: www.emag.com · 邮箱: info.china@emag.com

广告索引号24-1022



官方微信



编-读-往-来

READERS & EDITORS



结构健康监测是一个集材料科学与工程、新型传感器、大数据和信息技术、材料力学、结构设计、人工智能、结构健康管理于一体的交叉学科问题。飞机结构健康监测具有实时性、在线性等优势,是提高装备安全性、战备完好率、快速出动能力,实现视情维修、快捷维修、精准维修、降低维修费用的关键技术。

本期“结构健康监测”专题,邀请到大连理工大学、同济大学、华中科技大学、南京航空航天大学、沈阳航空航天大学等单位的科研团队介绍相关技术的研究前沿以及各自的最新成果。专稿由西北工业大学李文亚教授阐述协同双面搅拌摩擦焊接技术的研究进展。在此,对各位专家学者的支持表示衷心的感谢。

学术编辑 崔 静

《航空制造技术》是一本专业报道航空制造领域研究成果、研究进展、前沿动态的综合性技术刊物,重点关注特种加工技术、焊接/连接、表面工程、塑性加工、数字化制造等专业方向的新材料、新工艺、新技术进展与突破。期刊办刊历史悠久,编委及审稿专家团队学术水平卓越,审稿及刊发速度快,文章质量高、排版优,内容先进性与实用性兼备,是航空技术人员、高校师生交流学习的优质平台。

三峡大学 吕奇钊



《航空制造技术》是航空领域综合性科技期刊,聚焦报道航空领域先进制造技术的研究成果、研究进展和前沿动态,为航空制造领域科技人员提供了很好的学习交流的平台,在业界具有良好的影响力。期刊投稿平台设置合理,审稿周期短、效率高,审稿专家有较高的学术造诣,审稿意见中肯,期刊内容涉及多领域前沿制造技术,为行业积累了众多优质学术论文和知识成果。

中国航发北京航空材料研究院 任海水



starrag

Engineering precisely what you value

—
Starrag

安全性至关重要

斯达拉格为您的高效精确加工
保驾护航



5倍提速

更高机床动态性能
实现更迅速地进排气边加工



www.starrag.com

广告索引号24-1014

专稿 Feature

14 协同双面搅拌摩擦焊接技术

Synergistically Double-Sided Friction Stir Welding

李文亚 唐益爽 邹阳帆 王卫兵

LI Wenya TANG Yishuang ZOU Yangfan WANG Weibing

封面文章 Cover Story

20 基于分布式光纤传感与U-Net 网络的复合材料分层损伤定量识别方法

Quantitative Identification Method of Composite Material Delamination Damage Based on Distributed Optical Fiber Sensing and U-Net Network

武湛君 董珊珊 李建乐 朱明睿 张仕承
刘海涛 孙亮 李汉克 董孜劭 徐浩

WU Zhanjun DONG Shanshan LI Jianle ZHU Mingrui ZHANG Shicheng
LIU Haitao SUN Liang LI Hanke DONG Zimai XU Hao

论坛 Forum

结构健康监测 Structural Health Monitoring

30 复合材料结构健康监测中机器学习方法研究进展

Research Progress on Machine Learning Methods in Structural Health Monitoring of Composite Materials

蒋孝伟 章文瑾 刘玲

JIANG Xiaowei ZHANG Wenjin LIU Ling

41 飞行器结构健康监测技术研究进展

Research Progress of Structural Health Monitoring Technology for Aircraft

田童 李建乐 邓德双 曾旭 林奎旭
董珊珊 杨雷 徐浩 杨正岩 武湛君

TIAN Tong LI Jianle DENG Deshuang ZENG Xu LIN Kuixu
DONG Shanshan YANG Lei XU Hao YANG Zhengyan WU Zhanjun

68 飞行器智能蒙皮异质多层电路制造技术进展

Advances in Manufacturing Technologies for Heterogeneous Multilayer Circuit of Aircraft Smart Skin

戈家影 文钧民 叶冬 黄永安

GE Jiaying WEN Junmin YE Dong HUANG Yongan

HEIDENHAIN



TS 460

保护周到 探测精准

海德汉TS 460工件测头新增机械防撞保护功能，因此，可安全可靠地在机床内装夹、测量工件。当测头与工件发生轻微碰撞时，测头与刀柄间的适配器可安全退让测头。同时数控系统停止探测操作，可有效保护机床和测头，确保其安全无虞。同时，适配器不仅提供碰撞保护功能，还提供隔热功能。在测头长时间探测和执行大量探测循环时，可避免主轴发热造成测头热负荷过载。TS 460有效提高工作效率和可靠性。

缩短
机床设置
时间达
30%

www.heidenhain.com/ts460

广告索引号24-1038

约翰内斯·海德汉博士(中国)有限公司
www.heidenhain.com.cn

地址：北京市顺义区天竺空港工业区A区天纬三街6号
电话：010-80420000
传真：010-80420010
E-mail: sales@heidenhain.com.cn



84	基于电学成像与深度学习的蜂窝结构冲击损伤识别研究	周登 李雪峰 严刚 黄再兴
	Impact Damage Identification for Honeycomb Sandwich Structure by Using Electrical Tomography and Deep Learning	ZHOU Deng LI Xuefeng YAN Gang HUANG Zaixing

92	基于MXene/CNT薄膜传感器阵列的复合材料冲击定位及损伤监测	汪英 卢少微 张璐
	Impact Localization and Damage Monitoring of Composite Materials Based on MXene/CNT Thin Film Sensor Array	WANG Ying LU Shaowei ZHANG Lu

Research

100	振荡热压烧结 ZrB_2-SiC 陶瓷的力学性能	李冰 赵科 刘佃光 刘金铃
	Mechanical Properties of ZrB_2-SiC Ceramics Sintered by Hot Oscillatory Pressing	LI Bing ZHAO Ke LIU Dianguang LIU Jinling

106	喷丸覆盖率对2024-T351铝合金表面完整性的影响	徐刚 薛涛 胡彦华 肖雄 曹一 张琪
	Effect of Shot Peening Coverage on Surface Integrity of 2024-T351 Aluminum Alloy	XU Gang XUE Tao HU Yanhua XIAO Xiong CAO Yi ZHANG Qi

113	二维超声复合电解/放电展成加工试验研究	李晶 陈湾湾 朱永伟
	Experimental Study of Two-Dimensional Ultrasound Combined Electrolysis/Discharge Generating Machining	LI Jing CHEN Wanwan ZHU Yongwei

119	压气机叶片激光熔化沉积修复的机器人路径自动规划和试验研究	梁旭峰 蔡振华 刘琦 牟梓鑫 曾春年 牛少鹏 邓春明
	Laser Melting Deposition Repair for Compressor Blades: Robotic Path Automatic Planning and Experimental Research	LIANG Xufeng CAI Zhenhua LIU Qi MU Zixin ZENG Chunnian NIU Shaopeng DENG Chunming

SF-4

精密数控电火花成形机床

配置 windows 系统,自动升降油槽、兼容机械手、电极物料架等,可方便的实现自动化及无人加工。兼容柔性线及工厂自动化系统,可配备高精度 C轴、B轴,能进行五轴五联动精密加工,并预留六轴六联动接口。

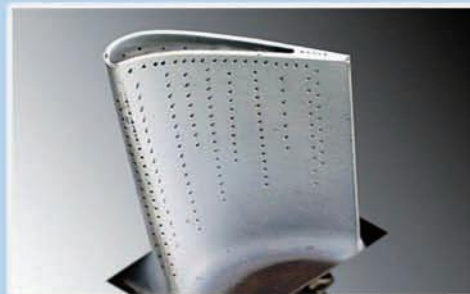
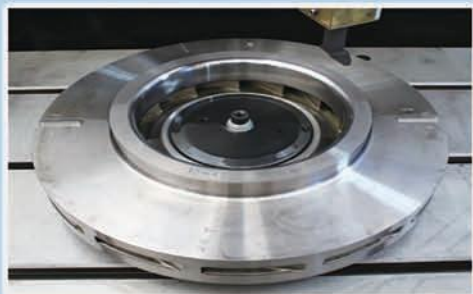
主要用于航空航天发动机整体叶轮、机匣、环件、等封闭扭曲型腔,及各种高温合金、钛合金、导电陶瓷等难加工材料的零件加工。



HS 600

精密数控电火花小孔机床

配置windows系统、自动安全门, 具有电容增爆、微精低损加工回路, 具备穿透检测、电极自动更换等功能, 可方便的实现自动化及无人加工, 无缝对接工厂自动化系统。



可重构4D打印领域取得新进展

近日,南方科技大学机械与能源工程系教授葛琦团队在可重构4D打印技术领域取得重要进展,相关成果以“Reconfigurable 4D printing

via mechanically robust covalent adaptable network shape memory polymer”为题目发表在*Science Advances*上。

4D打印作为新兴跨学科前沿研究领域,已成为国内外热点研究方向之一。形状记忆聚合物(Shape Memory Polymers, SMPs)因较高的模量已被广

泛用于4D打印。然而,大多数用于4D打印的SMPs为热固性材料,只能“记忆”一种永久形状。

近年来,一些研究将共价适应性网络引入到SMPs中,以实现其形状的多次重构。但是,现有的动态共价SMPs难以兼顾形状记忆性能、变形重构能力和高精度可打印性。

对此,葛琦团队开发了高力学性能的共价适应性网络SMP,即MRC-SMP,能够用于数字光处理高分辨率3D打印,实

现可重构、大变形、高精度4D打印。

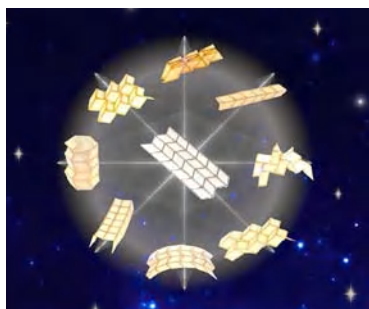
共价适应性网络还赋予了MRC-SMP高强粘接能力。例如,3个高精度打印的MRC-SMP点阵结构通过焊接和形状重构后形成了1个抓取状态的夹爪,该夹爪可以先编程为展开状态,再通过形状记忆恢复到抓取状态并提起重物。

此外,MRC-SMP可重构性能与多材料打印的结合能够制造任何三

维形状的记忆折纸结构,并极大地缩短了制造复杂SMP折纸结构的时间。多材料折纸是MRC-SMP作为变形铰链和耐高温高强度光固化树脂作为刚性板面制成的。MRC-SMP的显著可变形性允许快速将1张打印折纸重新配置为多个SMP折纸。MRC-SMP的高玻璃化转变温度确保了3D折纸结构在室温下具有高刚度和重负载能力。

左图为本文研究示意。

(本刊记者 逸飞)



天津大学团队通过“界面置换”新策略制备耐500℃超强铝合金

天津大学材料学院教授何春年团队创新地提出了一种“界面置换”分散策略,成功实现了约5 nm的氧化物颗粒在铝合金中的单粒子级均匀分布,从而使所制备的氧化物弥散强化铝合金在高达500℃的温度下仍然具有史无前例的抗拉强度(约200 MPa)与抗高温蠕变性能。该工艺过程简单、物料成本低廉、易于规模化生产,因而具有显著的工业应用价值。

相关研究成果以“Heat-resistant super-dispersed oxide strengthened aluminium alloys”为题,近期发表于*Nature Materials*期刊上。

航空航天、交通运输等领域提速减重的重大需求对轻质金属材料的耐热性能提出了更高要求,传统铝合金由于高温下析出相粗化,力学性能急剧下降,300℃以上服役性能已达瓶颈,300℃抗拉强度小于200 MPa,500℃抗拉强度则小于50 MPa。对于当前航空航天等重要领域最为关心的300~500℃

温度区间,铝合金服役时出现的力学性能迅速衰退成为大动力/大功率工作条件下制约结构设计、影响服役安全的关键短板。

何春年团队提出并通过“界面置换”分散策略,制备了5 nm级氧化物弥散强化铝合金,首先利用金属盐前驱体分解过程中的自组装效应制得了少层石墨包覆的超细氧化物颗粒,将纳米颗粒之间较强结合的化学键替换为石墨包覆层之间较弱的范德华力结合,从而使纳米颗粒之间的粘附力降低2~3个数量级;在此基础上,通过简单的机械球磨-粉末冶金工艺实现了高体积分数的单粒子级超细氧化物颗粒在铝基体内的均匀分

AI监管下的自动化实验室找到高效新激光材料

一个由6个自动化实验室组成的全球联盟,试图寻找新的激光材料。这些材料从合成到测试,都在人工智能(AI)的监管下进行。

近日,研究人员在*Science*上发表了题为

“Delocalized, asynchronous, closed-loop discovery of organic laser emitters”的文章,报道了上述工作合成的一种能以创纪录效率发射激光的化合物。该成果连同联盟近期的其他成果表明,在某些领域,自动化实验室能超越最优秀的科学家,找到被人类错过的发现。

过去10年间,实验室已经利用机器人使许多重复的步骤自动化。例如,2015年,美国伊利诺伊大学香槟分校的化学家Martin Burke推出了一种合成小分子的自动化系统。后来,通过引入AI,研究人员添加了反馈回路,使新化合物的表征数据可以指导下一步合成。而发现新材料并将其组装成设备,需要机器人在更多步骤中实现协同工作,但这很难在一个实验室内完成。

下图为材料优异的高温稳定性。

(本刊记者 逸飞)

散,并使铝合金展示出极其突出的高温力学性能与抗高温蠕变性能,在300℃和500℃下的抗拉强度分别为420 MPa和200 MPa;在500℃和80 MPa的蠕变条件下,稳态蠕变速率为 10^{-7} s^{-1} ,大幅超越了国际上已报道的铝基材料的最好水平。

下图为材料优异的高温稳定性。

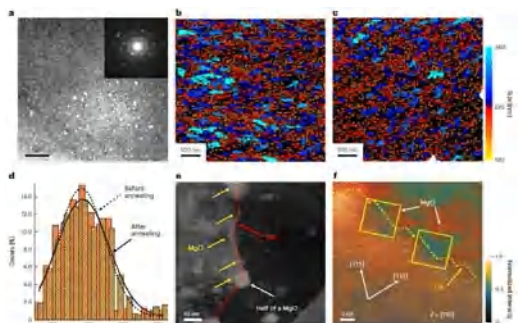
Burke和Aspuru Guzik,与韩国基础科学研究所、英国格拉斯哥大学、加拿大不列颠哥伦比亚大学以及日本九州大学的实验室合作,专注于一个特定的目标:发现可以发射高纯激光的有机化合物。

这种材料可以制成薄而柔软的发光薄膜,为先进显示器和电信设备供能。

在研究过程中,格拉斯哥大学和不列颠哥伦比亚大学的实验室制作了许多方糖大小的材料结构块。它们被送到Burke和Aspuru Guzik的研究小组,在那里被机器人以不同的组合方式编织成候选发射器。接着,这些候选发射器被送往不列颠哥伦比亚大学的实验室,表征其在溶液中的发光特性,并确定其中表现最好的发射器合成和纯化制造所需的大量物质。随后,这些材料以几克为一批地运往九州大学实验室,纳入到工作激光器中,进行性能测试。

上述整个操作流程均由一个基于云的AI平台监督。该平台从每个试验中学习,并将反馈数据纳入后续迭代中。最终,合作取得了成效。该研究产生了621种新化合物,其中21种可以与最先进的激光发射器相媲美,还有一种甚至能比任何其他有机材料更有效地发射蓝色激光。

(本刊记者 逸飞)





DIC[®]-305

电火花钻孔液

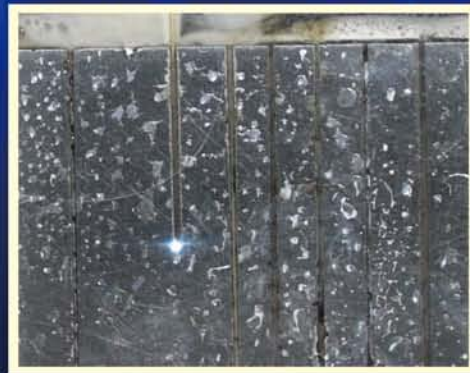
EDM drilling fluid

无锥度 电极损耗小

加工中电极不产生锥度 加工所得孔腔无锥度



采用水穿孔



采用 DIC[®]-305 钻孔液穿孔

钛合金变质层小于0.5 μ m

北京东兴润滑剂有限公司

电话: 010-64368739 13901051209 传真: 010-64343485 邮编: 100102 广告索引号24-1004

地址: 北京市东直门外东辛店 网址: www.dic.cn/www.bjdxr.com E-mail: rh6816@163.com

产品执行标准: Q/CY DSR 0004-2023

环境体系证书编号: 00121E35199R4S/1100
质量体系证书编号: 00121Q312103R5S/1100

西安交通大学科研人员在抗氧脆钛合金强化化方面取得新进展

西安交大金属材料强度国家重点实验室孙军院士和张金钰教授团队提出了一种违反直觉的设计策略,在 Ti-Cr-Zr-Al 马氏体钛合金中有意掺杂间隙 O (质量分数高达 0.5%),即利用间隙原子-位错交互作用显著扭曲热机械加工预先引入刃位错的平面应力场,使其转变为非平面应力场,这促使多个马氏体变体沿富 O 的刃位错线同时形核,从而构筑出间隙 O 强化的纳米孪晶 α' 马氏体新型微观结构。更为重要的是,借助富 O 位错线原位相变形成的纳米孪晶马氏体可以吸收 β 基体中的氧原子来抑制界面处的氧偏析,进而提高

钛合金中的抗氧脆能力。因此,间隙原子-位错交互作用介导的间隙 O 纳米孪晶马氏体设计策略结合了间隙强化、共格 α'/α' 孪晶界和共格 α'/β 相界面的优点,从而使得该钛合金的综合力学性能优于以前报道的钛合金。特别是,该钛合金具有超高的应变硬化能力,其比韧性高约为同等强度钛合金的 10 倍。

此外,合金设计的初衷充分考虑了循环经济的思想,即考虑到海绵钛生产中的低等级海绵钛产品、来自残钛回收过程中高氧含量的剩余钛料或氧含量高的加工“废料”,均可作为当下钛合金的原

料,从而带来巨大的降低成本空间。团队提出的策略展示了一种先进的设计原则,即通过操纵位错特征,例如刃位错或螺位错及其应力场,可有效构筑纳米孪晶结构,并为钛合金工业生产设计低成本、高性能的高氧耐受性钛合金提供了新的见解。

该研究成果以“Oxygen-dislocation interaction-mediated nanotwinned nanomartensites in ultra-strong and ductile titanium alloys”为题在线发表于 *Materials Today* 上。该工作得到了国家自然科学基金、陕西省青年创新团队项目等的共同资助。

(本刊记者 逸飞)

美国普林斯顿大学和北卡罗来纳州立大学新研究让软体机器人能轻松转向

美国普林斯顿大学和北卡罗来纳州立大学工程师,将古代折纸技术和现代材料科学结合起来,创造出一种软体机器人,可轻松穿过迷宫。该研究以“Modular multi-degree-of-freedom soft origami robots with reprogrammable electrothermal actuation”为题发表在 *PNAS* 杂志上,研究人员描述了他们用模块化的圆柱形部件创建机器人的过程。

软体机器人的转向一直具有挑战性,因为传统的转向设备会增加机器人的刚性并降低其灵活性。此次新设计将转向系统直接内置于机器人体内,克服了这些问题。模块化软体机器人的概念还让人们进一步了解未来可生长、可修复和可开发新功能的机器人。

新创建的机器人具有在移动过程中组装和拆分的能力,既能够作为单个

机器人,也能作为群体工作。每个部分都是一个独立单元,可相互通信并根据命令进行组装,也可轻松分离,再使用磁铁连接起来。

研究人员用被称为克雷布林图案的折纸形式的圆柱形部分,建造出这种机器人。该图案允许每个片段扭曲成扁平的圆盘并扩展回圆柱体。这种扭转、伸展运动是机器人具有爬行和改变方向能力的基础。通过折叠圆柱体的一部分,机器人还能在前进时改变方向。

这项工作最具挑战性之处,是要开发出一种机制来驱动和操纵机器人的弯曲和折叠运动。研究人

员使用了两种在加热时有不同反应的材料:液晶弹性体(加热时收缩)和聚酰亚胺(加热时膨胀),并将它们沿着克雷布林图案的折痕组合成细条。每个折叠处安装了一个由银纳米线制成的可拉伸加热器。纳米线加热器上的电流加热控制条,使得两种材料因不同的热膨胀系数而发生形变,进而引发折叠。通过调整电流和控制条,研究人员可精确控制折叠和弯曲,驱动机器人精准移动和转向。

下图显示软体机器人由多个部分组成,这些部分可折叠成扁平圆盘并延伸成圆柱体。

(本刊记者 逸飞)



西北工业大学团队研制成功频率、能量和波形可调的电磁加载冲击疲劳试验机

材料结构的冲击疲劳问题在航空工程中大量存在,舰载机的弹射起飞、拦阻着舰都是典型的冲击疲劳问题。研究冲击疲劳问题对于工程安全、充分发挥机器性能以及节约经济成本等具有重要意义。冲击疲劳试验机是冲击疲劳问题研究的关键设备。现有冲击疲劳试验设备一般采用电机带动凸轮旋转实现冲击加载,存在冲击能量调节困难、冲击频率及可调范围小、冲击波形无法改变等问题,制约着冲击疲劳研究工作的进展。

近日,一种频率、能量和波形可调的冲击疲劳试验机由西北工业大学曹增强教授带领的电磁加载技术研究及应用团队在陕西大工旭航电磁科技有限公

司研制成功。这种电磁加载冲击疲劳试验设备创新性地利用电磁感应原理研制而成,能够满足冲击能量、频率和波形可调的要求,可以实现大能量、高频率的冲击疲劳试验,单次冲击能量最大可达 150 J,频率最高到 100 Hz 连续可调,冲击波形的脉宽可选择。电磁加载的冲击疲劳试验机的研制成功彻底解决了高能、高频冲击疲劳试验的难题。

下图为西工大团队电磁加载冲击疲劳试验设备。

(本刊记者 逸飞)



数字孪生模型可增强系统自控能力

美国俄亥俄州立大学的研究人员使用机器学习工具创建了一个表现出混沌行为的电子电路的数字孪生模型。他们借此成功地预测了电子电路的行为并对其进行控制。近日,相关研究以“Controlling chaos using edge computing hardware”为题发表在 *Nature Communications* 上。

研究的主要作者——俄亥俄州立大学物理学研究生罗伯特·肯特表示,大多数基于机器学习的问题,是它们使用了大量的能源或电力,而且需要很长时间进行评估。因为它们开发传统控制器也很困难,因为混沌系统对微小变化极其敏感。

肯特表示,在几 ms 就可以决定生死的情况下,

比如自动驾驶车辆必须决定刹车以防止事故发生时,实现快速控制等问题变得至关重要。现在,新开发的高效数字孪生模型可能会对未来研究自主控制系统产生全面影响。

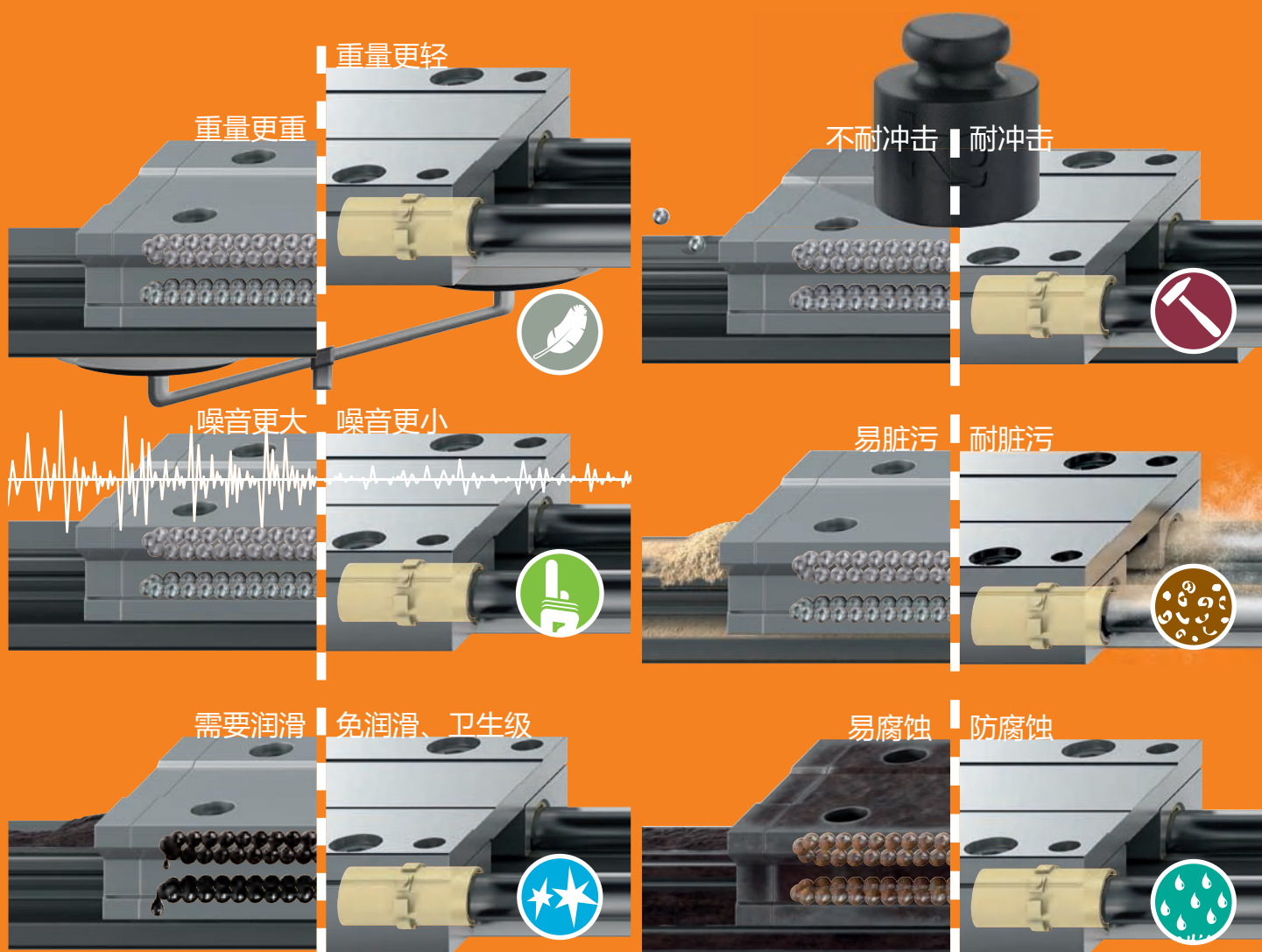
数字孪生模型系统足够紧凑,可以安装在一个廉价的计算机芯片上。该芯片能在没有连接互联网的情况下运行,并可以降低控制器功耗。

为了验证这一理论,研究人员让新模型完成复杂的控制任务,并将其结果与以前的控制技术进行比较。结果表明,新方法比线性方法相比,实现了更高的准确度,且比以前的基于机器学习的控制器的计算复杂性显著降低。

(本刊记者 逸飞)

运动应用？用塑料！

...drylin®直线轴承为您节约40%成本...



易格斯工程塑料轴承可在线计算其使用寿命：www.igus.cn/zh-CN/linear



引文格式: 李文亚, 唐益爽, 邹阳帆, 等. 协同双面搅拌摩擦焊接技术[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 14–19.

LI Wenya, TANG Yishuang, ZOU Yangfan, et al. Synergistically double-sided friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 14–19.

协同双面搅拌摩擦焊接技术*

李文亚¹, 唐益爽¹, 邹阳帆¹, 王卫兵²

(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 北京索德瀚智能科技有限公司, 北京 100089)

[摘要] 协同双面搅拌摩擦焊接(SDS-FSW)作为搅拌摩擦焊接技术的一种新的改进形式,显著改善了传统搅拌摩擦焊接变形大、焊接效率低等问题,对焊接质量也有提升作用,适用于大尺寸、大厚度的板材或型材的焊接。但目前 SDS-FSW 仍处于初始研发阶段,相关的理论及应用研究较少,研究成果主要集中在 6061 铝合金上。本文主要介绍 SDS-FSW 技术的发展历程、技术特点与典型研究结果及应用前景,以期对 SDS-FSW 技术的发展及实际工程推广提供参考。

关键词: 搅拌摩擦焊接(FSW); 协同双面搅拌摩擦焊接(SDS-FSW); 铝合金; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.014



李文亚

教授, 博士生导师, 主要从事先进固相焊接技术研究。

搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明的一种固相连接技术^[1-3]。在FSW过程中,旋转的搅拌头与焊件摩擦生热,将材料加热到塑性状态。同时,塑性材料在搅拌头旋转作用下发生迁移且受到轴肩的顶锻作用,最终形成致密焊缝^[4]。使用FSW焊接铝合金、镁合金等可以解决传统熔化焊接时出现的热裂纹、气孔、元素偏析等缺陷,现已被广泛应用于多个行业中^[5-6]。在航空航天领域,美国的波音公司首先将FSW应用在了Delta系列运载火箭铝合金贮箱中间舱段的连接制造中,该火箭于1999年成功发射升空;2002年中国航空制造技术研究院与英国焊接研究所合作成立了中国搅拌摩擦焊中心,从而使FSW技术正式引入中国。目前,FSW技术已经在国内航空航天、轨道交通、新能源汽车等领域获得广泛应用。

随着制造业的快速发展,对大尺寸、大厚度、高质量、高效率的FSW焊接需求越来越高。研究表明,在生产中采用FSW对铝合金挤压型材进行焊接,能够有效提高焊接质量与制造效率^[7]。但传统的单面FSW(Single-sided FSW, SS-FSW)沿厚度方向产生了不均匀的热-力耦合作用,因而焊后冷却阶段易产生较大的变形与残余应力,不仅增加了焊后矫形工序,提高生产成本,严重时甚至导致产品不合格,因此亟需研发更灵活、更先进的FSW工艺^[8]。协同双面搅拌摩擦焊接(Synergistically double-sided FSW, SDS-FSW)是FSW的一种新的改进形式,在焊接过程中通过两面双搅拌头的同时使用,可以实现焊件上下表面的同步焊接成形,显著减小焊后变形,提高焊接效率,在大型/特殊铝合金、镁合金部件的焊接过程中有着广泛的应用前景。

* 基金项目: 陕西省重点科技创新团队项目(2024RS-CXTD-20)。

1 协同双面搅拌摩擦焊接原理与发展历程回顾

经过 30 多年的发展, FSW 已广泛应用于铝合金、镁合金等轻质材料的连接。但正如前文所述, SS-FSW 在焊接过程中搅拌头轴肩只作用于工件单一表面, 沿厚度方向不均匀的热-力耦合作用不仅容易产生较大的变形与残余应力, 而且在焊接厚板和中厚板时, 还容易产生不均匀的微观组织和根部缺陷, 影响接头力学性能^[9]。此外, SS-FSW 需要额外添加背部刚性支撑, 不仅提高了对工装和设备刚度的要求, 还使得 SS-FSW 难以实现中空型材等特殊结构的焊接。因此, 有学者开始了双面搅拌摩擦焊接(Double-sided FSW, DS-

FSW) 技术的研究, 除本文所介绍的 SDS-FSW 外, 双轴肩搅拌摩擦焊接(Bobbin tool FSW, BT-FSW) 和顺序双面搅拌摩擦焊接(Conventional sequentially double-sided FSW, CDS-FSW) 是目前研究较为广泛的两种 DS-FSW 技术^[10]。

DS-FSW 技术原理如图 1 所示^[11-13], 其中, 图 1 (a) 和(b)为 BT-FSW 焊接原理和搅拌头形貌^[11-12]。与 SS-FSW 相比, BT-FSW 通过增加下轴肩实现自支撑, 同时降低了接头沿厚度方向的温度梯度, 减小了接头组织的不均匀性, 避免了根部缺陷的产生^[4,14]。但在 BT-FSW 过程中, 上、下轴肩沿相同方向以相同转速旋转, 搅拌针承受较大的拉应力、扭矩及弯矩, 极易断裂且容易磨损, 大大

限制了其焊接速度及应用范围^[14]。虽然目前根据 BT-FSW 进一步研发出了可调间隙式、逆向旋转式及轴肩静止式 BT-FSW 等特种双轴肩搅拌摩擦焊接技术, 但都只能在一定程度上优化 BT-FSW 焊接工艺^[4]。

其实, 早在 1991 年英国 TWI 就提出了双面搅拌摩擦焊接的概念, 指出可以同时使用两个或两个以上的搅拌摩擦焊接工具对同一个工件进行焊接, 也提到了可以在工件的上表面和下表面同时使用两个工具进行焊接^[15]。在 2009 年, 日本三菱日立制铁机械株式会社申请了一项双面搅拌摩擦焊接工艺专利^[16]。该专利采用分离式的双搅拌头在工件两面同时焊接, 其中一个搅拌头前端部分存在突起部, 而另一个搅拌头前端具有收纳该突起部的凹部, 通过这两个搅拌头的相对配置实现工件上、下表面的同步搅拌。2012 年, 国内哈尔滨工业大学刘会杰教授团队^[17]也提出了一种双面对称搅拌摩擦焊接工艺, 该工艺所使用的上下搅拌头几何尺寸相同, 在焊接过程中, 上下搅拌头相对于被焊工件始终处于对称位置。

此后, 日本大阪大学 Fujii 教授团队^[18-19]利用双面搅拌摩擦焊接的原理成功实现了镁合金的焊接, 焊接所使用的下搅拌头有平面(Flat-DFSW) 和凹形(Concave-DFSW) 两种, 图 2 为 Concave-DFSW 搅拌头形貌。研究表明, 使用双面搅拌摩擦焊接能够获得更加复杂和充分的材料流动, 在镁合金接头的搅拌区获得随机组织, 从而提高了接头的力学性能。

随着对铝合金焊接质量和生产效

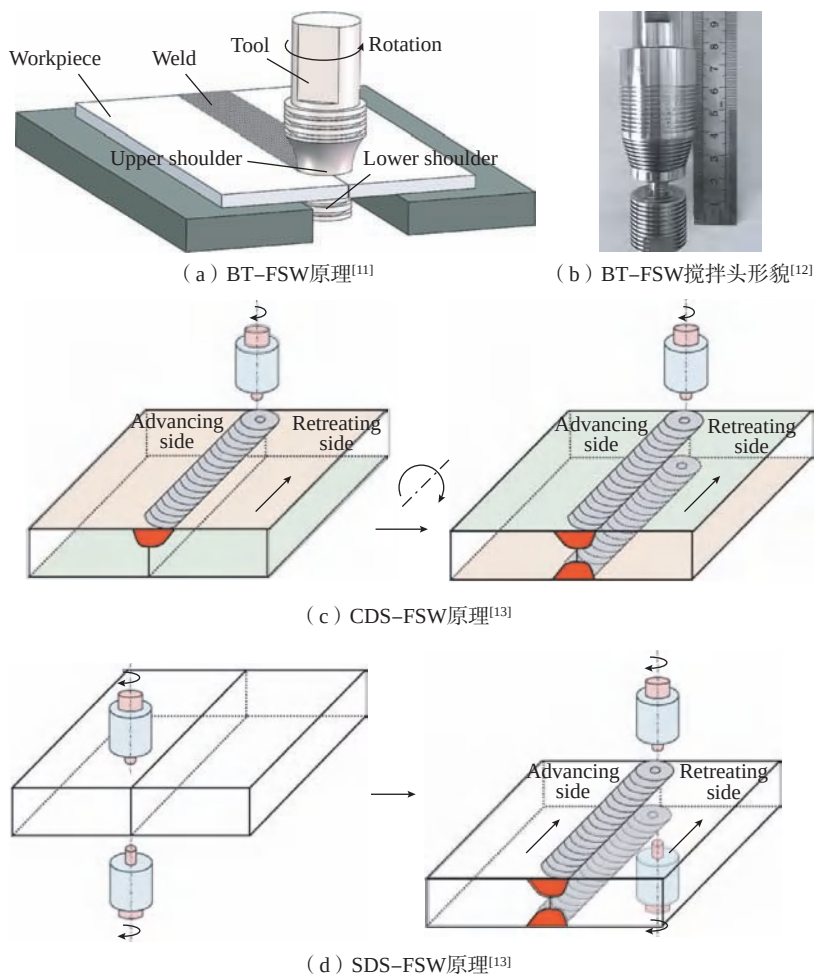


图 1 DS-FSW 示意图

Fig.1 Schematic view of DS-FSW



上搅拌头形貌 下搅拌头形貌

图 2 Concave-DFSW 搅拌头形貌^[19]

Fig.2 Morphology of Concave-DFSW welding tools^[19]

率要求的不断提高,西北工业大学李文亚教授团队^[13]率先开始了 SDS-FSW 技术在铝合金应用上的研究,并与北京索德瀚智能科技有限公司合作开发了一种新型的 SDS-FSW 设备。图 3 为焊接设备和焊接过程中的装夹示意图,该设备具有上下两个机头,并分别由两个主轴控制,通过程序调控可实现精确控制与智能化对中。因此 SDS-FSW 技术在焊接过程中可根据实际需要改变上下搅拌头的尺寸形貌、旋转速度、旋转方向、焊接倾角及相对位置,达成灵活焊接与协同控制,从而实现大型/特殊铝合金部件的高质量焊接。与目前国内外研究较多的 CDS-FSW 技术相比,SDS-FSW 只需进行一次焊接,而 CDS-FSW 是先完成一面的焊接,然后翻转工件焊接另一面,因此 SDS-FSW 可以显著提高焊接效率,减小焊后变形^[20-25]。

2 协同双面搅拌摩擦焊接技术特点

2.1 协同双面搅拌摩擦焊接铝合金接头显微组织及力学性能

SDS-FSW 的整体焊缝轮廓呈现

“沙漏型”,表现为两个 SS-FSW 焊缝的叠加,图 4 所示为 SS-FSW、CDS-FSW 及 SDS-FSW 接头焊缝横截面在光镜下的显微形貌。根据不同的热力学过程,SDS-FSW 接头的显微组织与 SS-FSW 接头相同,可划分为焊核区(Weld nugget zone, WNZ)、热力影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(Heat-affected zone, HAZ)和母材(Base material, BM)4 个区域。此外,由图 4 可知,在相同的焊接速度和搅拌头转速下,采用 SDS-FSW 与 SS-FSW 相比可以减少接头缺陷,与 CDS-FSW 相比,材料流动更加充分,显微组织沿厚度方向的均匀性提高。

图 5 为相同焊接参数下 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头典型拉伸试样的应力-应变曲线,可知 SDS-FSW 在提高焊接效率的同时,拉伸性能可以达到与 CDS-FSW 相当的水平,强度和延伸率与 SS-FSW 相比分别提升了约 30% 和 250%。此外,Zou 等^[13]根据实际需要,对 8 mm 厚的 6061-T6 铝合金进行了 SDS-FSW 和 CDS-FSW 焊接试验,选择搅拌针长度为 3 mm 的搅拌头;虽然两种

焊接方式都没有焊透(产品需要),但结果表明与 CDS-FSW 相比,SDS-FSW 焊后变形量明显减小,接头横截面上的显微硬度分布更加均匀(图 6),拉伸性能在不同焊接参数下始终优于 CDS-FSW 接头。

2.2 协同双面搅拌摩擦焊接铝合金接头温度场

焊接过程中温度场的分布对 FSW 接头的微观组织演变和焊接质量起着重要作用,随着有限元方法和计算机技术的发展,数值模拟已成为

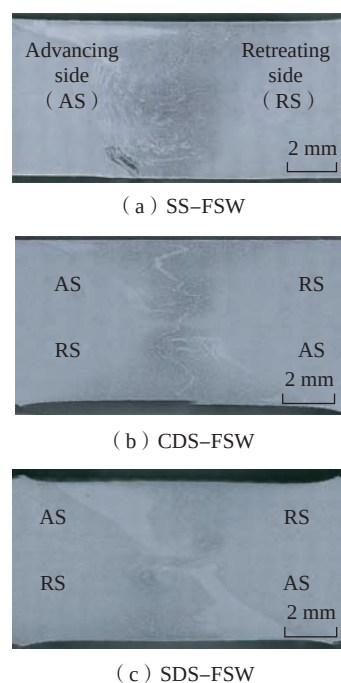


图 4 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头横截面宏观形貌

Fig.4 Cross-section morphology of SS-FSW, CDS-FSW and SDS-FSW joints

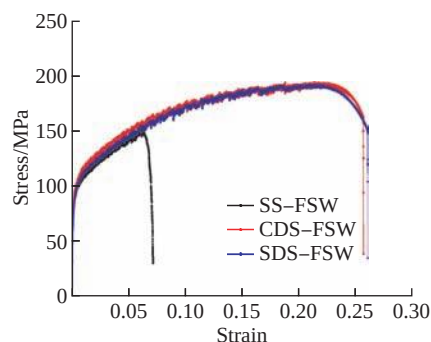


图 5 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves for SS-FSW, CDS-FSW and SDS-FSW joints

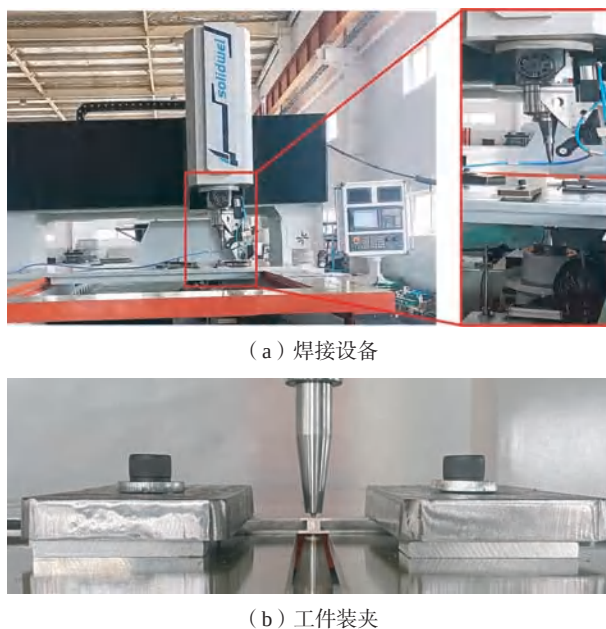


图 3 SDS-FSW 焊接设备和工件装夹

Fig.3 Welding equipment of SDS-FSW and workpiece clamping

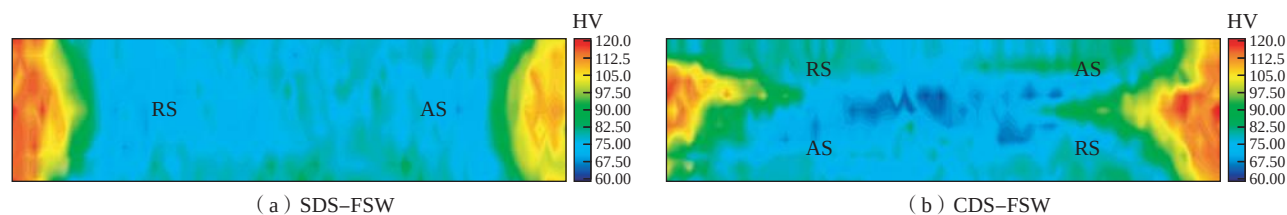


图6 SDS-FSW 和 CDS-FSW 接头显微硬度云图^[13]
Fig.6 Hardness maps of SDS-FSW and CDS-FSW joints^[13]

研究 FSW 焊接过程的重要辅助方法,主要分为在焊件上施加焊接热源模型的方法^[26]、基于计算固体力学(Computational solid mechanics, CSM)的方法^[27-28]与基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)的方法^[29-31]。基于 CSM 的方法又分为任意拉格朗日-欧拉方法(Arbitrary Lagrange-Euler, ALE)与耦合欧拉-拉格朗日方法(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)等,其中 CEL 适用于处理大变形问题,可以模拟 FSW 的全过程,且随着计算机技术的快速发展,目前该方法的仿真耗时已处于可接受的范围内。

图7为采用欧拉-拉格朗日热力耦合模型获得的 SDS-FSW 和 CDS-FSW 接头横截面及其中心线上的温度分布规律。可知,在相同的焊接参数下,SDS-FSW 与 CDS-FSW 接头温度分布的相同点:(1)高温区位于搅拌头直接接触区域,随着到搅拌头中心距离的增加,高温区向周围扩散形成明显的温度梯度;(2)前进侧(AS)和后退侧(RS)的温度以非对称的方式分布,RS 的温度高于 AS。两者的不同点:(1)在 SDS-FSW 焊接过程中,由于焊件同时受到了上下对称的两个搅拌头的影响,接头沿厚度方向的温度梯度减小,焊缝横截面的温度分布沿水平方向基本对称,同时峰值温度升高;(2)对于 SDS-FSW,当上下搅拌头转动方向相同时(图7),上下焊缝中温度较高的 RS 位于同一侧,因此温度场不对称性较为明显,但当上下搅拌头转动方向相反时,该现象会被改

善;(3)在 CDS-FSW 焊接过程中有“瞬时孔洞”形成,而 SDS-FSW 焊接过程中双搅拌头的使用可以促进材料的充分流动与混合。

3 协同双面搅拌摩擦焊接技术应用展望

通过对铝合金 SDS-FSW 的试验研究,可以看到 SDS-FSW 作为 FSW 的一种新的改进形式,与 SS-FSW、BT-FSW 和 CDS-FSW 等搅拌摩擦焊接技术相比具有以下优点。(1)提高焊接效率:SDS-FSW 具有两个搅拌头同时产热,且仅需进行一次装夹,工序简单;(2)减小变形:SDS-FSW 从焊件两侧平衡地施加热量和压力,可以减小焊接件的变形和残余应力,有助于保持焊接件的尺寸稳定性和几何形状;(3)改善焊缝质量:SDS-FSW 采用两个搅拌头分别作用于被焊工件上下表面,避免了根部缺陷的产生,提高了接头沿厚度方向受到热-力耦合作用的均匀性,从而提高接头微观组织均匀性和力学性能;(4)适用性广泛:SDS-FSW 焊接过程中可以灵活地调整两个搅拌头的相对位置、旋转方向和尺寸形貌,从而可以实现大型复杂部件的焊接;(5)提高经济效益:SDS-FSW 改善了设备和搅拌头的受力情况,延长了设备和搅拌头的使用寿命。因此,SDS-FSW 适用于大尺寸、大厚度的铝合金、镁合金等板材或型材的焊接。但目前 SDS-FSW 还处于基础研发阶段,对于焊接性较好的 6061 铝合金实现了良好焊接,但对于 2024 及 7075 等高强铝合金缺乏

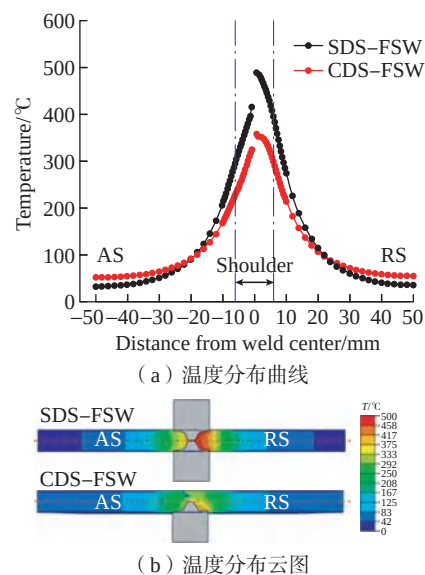


图7 SDS-FSW 和 CDS-FSW 接头焊缝横截面及其中心线温度分布

Fig.7 Temperature distribution on the cross section and its center line of SDS-FSW and CDS-FSW joints

可行性试验验证,其技术成熟度也远不如 SS-FSW。

在航空、航天及汽车制造等领域中,轻量化已成为目前的主要发展趋势,其中铝合金被视为是实现轻量化的首选材料之一。SDS-FSW 可以很好地解决大型/特殊铝合金部件焊接变形大、焊接效率低的问题,提高了 FSW 对结构的适应性,同时降低了制造成本,因而引起了广泛关注。目前,国内北京索德瀚智能科技有限公司已研制出可直接与机器人衔接的 SDS-FSW 设备,截至 2022 年,该设备已进驻多家企业,投入量产^[32]。图8所示为北京索德瀚智能科技有限公司分别采用 CDS-FSW 和 SDS-FSW 焊接工艺生产的新能源汽车电池托盘及生产流程。可知,当采用



(a) 采用CDS-FSW焊接 (正面FSW→打磨飞边→压力机矫形→反面FSW→打磨飞边→最后整形)



(b) 采用SDS-FSW焊接 (正反面同时FSW→打磨飞边)

图8 采用两种焊接方式的新能源汽车电池托盘

Fig.8 New energy vehicle battery trays by two welding methods

CDS-FSW 焊接时,焊后平面度变形为几厘米,需要进行两次矫形工艺,不仅工序繁琐、效率低、成本高,而且影响了产品质量;而当采用 SDS-FSW 焊接时,焊后平面度 ≤ 1.5 mm,工序简化、效率提高,且产品质量有所提升。此外,英国焊接研究所在 2023 年 5 月展示了 SDS-FSW 技术在钢材制造中的应用^[33]。Matsushita 等^[34]通过研究也证实了可采用 SDS-FSW 焊接先进高强度钢用于生产汽车零件。随着对铝合金焊接质量、效率和多功能性要求的不断提高,SDS-FSW 技术在铝合金上的应用将逐步拓展,从而为航空航天铝合金材料的焊接提供更高效、更可靠的解决方案。

4 结论

本文从协同双面搅拌摩擦焊接原理、发展历程、技术特点以及发展前景 4 个方面介绍了这项新技术。(1) SDS-FSW 与传统 FSW 具有相同的工作原理,但采用双搅拌头使其展现出了显著的优越性与灵活性,适用于大尺寸、大厚度的板材或型材的焊接,能够显著减小焊后变形并提高焊接效率。(2) 目前对 SDS-FSW 技术的研究仍处于起步阶段,虽然在 6061 铝合金上取得了很好的试验验证,但其实际应用还相对有限。(3) 为了进一步优化焊接工艺以提升不同系列合金 SDS-FSW 的接头性能,需要深入挖掘焊接工艺参数、组织演变、接头性能之间的相互关系,了解焊接过程中温度场演变及材料流动规律,从而促进 SDS-FSW 在航空航

天等工程中的实际应用。

参考文献

- [1] VICTOR CHRISTY J, ISMAIL MOURAD A H, SHERIF M M, et al. Review of recent trends in friction stir welding process of aluminum alloys and aluminum metal matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3281–3309.
- [2] MA Z Y, FENG A H, CHEN D L, et al. Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: Microstructural evolution and mechanical properties[J]. Critical Reviews in Solid State & Material Sciences, 2018, 43(4): 269–333.
- [3] LIU H H, MORISADA Y, FUJII H. Friction stir welding: Process, temperature, microstructure and properties[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(8): 619–632.
- [4] 温泉, 李文亚, 王非凡, 等. 双轴肩搅拌摩擦焊接方法研究进展 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 16–23.
- [5] WEN Quan, LI Wenya, WANG Feifan, et al. Research progress on bobbin tool friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 16–23.
- [6] LIU X C, WANG Q, PEI X J, et al. Microstructural evolution of 6061-T6 aluminum alloy in vortex-friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2023, 195: 112544.
- [7] HEIDARZADEH A, MIRONOV S, KAIBYSHEV R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100752.
- [8] LU X, ZHANG C S, ZHAO G Q, et al. State-of-the-art of extrusion welding and proposal of a method to evaluate quantitatively welding quality during three-dimensional extrusion process[J]. Materials & Design, 2016, 89: 737–748.
- [9] XU W F, ZHANG W, WU X L.

Corrosion behavior of top and bottom surfaces for single-side and double-side friction stir welded 7085-T7651 aluminum alloy thick plate joints[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(3): 1078–1091.

[9] LU X H, LUAN Y H, QIAO J H, et al. Optimization of process parameters in friction stir welding of 2219 aluminum alloy thick plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(9): 4201–4215.

[10] 杨夏炜, 孟廷曦, 褚强, 等. 铝合金双面搅拌摩擦焊接的研究进展 [J/OL]. 机械工程学报, 2024 (2024-03-11). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240310.1726.004.html>.

YANG Xiawei, MENG Tingxi, CHU Qiang, et al. Research progress in double-sided friction stir welding of aluminum alloy[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2024 [2024-03-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240310.1726.004.html>.

[11] WEN Q, LI W Y, PATEL V, et al. Investigation on the effects of welding speed on bobbin tool friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(12): 1830–1840.

[12] YANG C, NI D R, XUE P, et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 20–28.

[13] ZOU Y F, LI W Y, TANG Y S, et al. A comparative study of microstructure and mechanical properties of conventional and synergistic double-sided FSW joints of 6061 zialuminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(8): 784–791.

[14] WANG G Q, ZHAO Y H, TANG Y Y. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33(1): 13–29.

[15] STAINES D J, WATTS E R, NORRIS I M. The simultaneous use of two or more

friction stir welding tools[EB/OL]. (2005-01-13)[2024-03-05]. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005>.

[16] KAGA S, ONOSE M, TOMINAGA N, et al. Two-surface friction stir welding method and device, tool set for two-surface friction stir: JPWO 2011061826A1[P]. 2013-04-04.

[17] 赵运强, 刘会杰, 李金全, 等. 双面 对称搅拌摩擦焊接方法: CN102601516A[P]. 2012-07-25.

ZHAO Yunqiang, LIU Huijie, LI Jinquan, et al. Method of double-sided symmetric friction stir welding: CN102601516A[P]. 2012-07-25.

[18] CHEN J, FUJII H, SUN Y F, et al. Fine grained Mg-3Al-1Zn alloy with randomized texture in the double-sided friction stir welded joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580: 83-91.

[19] CHEN J, UEJI R, FUJII H. Double-sided friction-stir welding of magnesium alloy with concave-convex tools for texture control[J]. Materials & Design, 2015, 76: 181-189.

[20] XU W F, LU H J, LI X H, et al. Microstructure evolution and stress corrosion cracking sensitivity of friction stir welded high strength AA7085 joint[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110297.

[21] GARG A, RATURI M, GARG A, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of double-sided friction stir welding between AA6061-T6 and AA7075-T651[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 31: 431-438.

[22] YANG C, ZHANG J F, MA G N, et al. Microstructure and mechanical properties of

double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 41: 105-116.

[23] RATURI M, BHATTACHARYA A. Electrochemical corrosion of AA6061-AA7075 double sided FSW joints prepared with and without secondary heating[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 38: 590-612.

[24] DU C C, PAN Q H, CHEN S J, et al. Effect of rolling on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 DS-FSW plate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138692.

[25] 陈玉华, 钟宇, 谢吉林, 等. AZ31 厚板镁合金双面搅拌摩擦焊接头组织及性能研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 38-44, 53.

CHEN Yuhua, ZHONG Yu, XIE Jilin, et al. Microstructure and mechanical properties investigation of AZ31 thick plate magnesium alloy double-shield friction stir welding joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 38-44, 53.

[26] MIAH M H, CHAND D S, MALHI G S. Friction stir welding on temperature field for aluminum alloy based on combined HSM[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 675-680.

[27] CONG S, LI N, ZHU Z, et al. A comparative study of conventional, dynamic rotation and heat-assisted friction stir welding of Ti-6Al-4V plates to reduce welding defects[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 323: 118217.

[28] SALIH O S, OU H G, SUN W. Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy[J]. International Journal of Mechanical

Sciences, 2023, 238: 107827.

[29] QIN D Q, FU L, SHEN Z K. Visualisation and numerical simulation of material flow behaviour during high-speed FSW process of 2024 aluminium alloy thin plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(4): 1901-1912.

[30] YANG C L, DAI Q L, SHI Q Y, et al. Flow-coupled thermo-mechanical analysis of frictional behaviors at the tool-workpiece interface during friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 394-404.

[31] SU H, WU C S. Numerical simulation for the comparison of thermal and plastic material flow behavior between symmetrical and asymmetrical boundary conditions during friction stir welding[J]. Advances in Manufacturing, 2023, 11(1): 143-157.

[32] 北京索德瀚智能科技有限公司. 双面焊产业化应用[EB/OL]. (2023-01-30)[2024-03-05]. <https://www.solidwel.com/sys-nd/52.html>.

Beijing Solidwel Intelligent Technology Co., Ltd. Industrialized application of double-sided friction stir welding[EB/OL]. (2023-01-30)[2024-03-05]. <https://www.solidwel.com/sys-nd/52.html>.

[33] TWI. TWI demonstrates breakthrough in FSW of Steel[EB/OL]. (2023-05-25)[2024-03-05]. <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2023/twi-demonstrates-breakthrough-in-fsw-of-steel>.

[34] MATSUSHITA M, YAMAGISHI D, IGI S, et al. Development of double-sided friction stir welding of advanced high strength steel sheets[J]. Welding in the World, 2023, 67(3): 561-571.

Synergistically Double-Sided Friction Stir Welding

LI Wenya¹, TANG Yishuang¹, ZOU Yangfan¹, WANG Weibing²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Solidwel Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 100089, China)

[ABSTRACT] Synergistically double-sided friction stir welding (SDS-FSW) is a significant variant of friction stir welding (FSW). The problems of large deformation and time-consuming of traditional FSW are greatly suppressed by SDS-FSW. SDS-FSW has prompted considerable scientific and technological interests due to its advantages in welding large-sized and thick plates or profiles. At present, the research and application of SDS-FSW are still in the initial development stage, and relevant research results are mainly limited to 6061 aluminum alloy. This paper provides an overview of this new technology, including its development history, technical characteristics, typical research results and application prospects. The aim is to provide a reference for the further development and engineering application of SDS-FSW.

Keywords: Friction stir welding (FSW); Synergistically double-sided FSW (SDS-FSW); Aluminum alloy; Microstructure; Mechanical property (责编 逸飞)

引文格式: 武湛君, 董珊珊, 李建乐, 等. 基于分布式光纤传感与 U-Net 网络的复合材料分层损伤定量识别方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 20-27.

WU Zhanjun, DONG Shanshan, LI Jianle, et al. Quantitative identification method of composite material delamination damage based on distributed optical fiber sensing and U-Net network[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 20-27.

基于分布式光纤传感与 U-Net 网络的 复合材料分层损伤定量识别方法^{*}

武湛君¹, 董珊珊², 李建乐², 朱明睿², 张仕承², 刘海涛², 孙 亮², 李汉克², 董孜勋², 徐 浩¹

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024;

2. 大连理工大学力学与航空航天学院, 大连 116024)

[摘要] 结构健康监测(SHM)是确保飞行器复合材料结构安全性和完整性的重要手段。基于背向瑞利散射的分布式光纤传感器可以通过测量高密度的应变分布为复合材料损伤监测提供数据支持。然而, 结构应变分布特征和损伤的映射关系较为复杂, 无法直接根据应变分布准确判定损伤的定量信息。另外, 分布式光纤传感器数据量大, 通过人为分析应变数据识别损伤较为耗时且准确性偏低。为了应对这一挑战, 提出了一种基于分布式光纤传感数据与 U-Net 神经网络的智能损伤识别方法, 旨在自动精确识别复合材料中常见的分层损伤。首先, 通过有限元仿真构建 U-Net 神经网络的训练集与验证集; 随后进行含分层损伤复合材料板的悬臂加载试验, 通过分布式光纤传感器采集结构应变分布数据作为测试集。损伤识别结果表明, U-Net 神经网络可以对分层损伤的位置、尺寸与形状进行较为精确的定量识别。
关键词: 结构健康监测(SHM); 复合材料结构; 分布式光纤传感器; 深度学习; U-Net 神经网络

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.020



武湛君

教授, 博士生导师, 研究方向为结构健康监测与飞行器结构/材料性能表征。

复合材料因高比强度和比刚度广泛应用于各种航空航天结构^[1]。然而航空航天结构的服役环境严苛, 在结构服役过程中容易产生结构损伤, 威胁结构的安全运行。分层损伤是复合材料结构中最常见的损伤形式之一^[2], 损伤发生在结构内部, 会给损伤检测带来困难。结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)基于先进传感器网络, 在损伤在线识别、结构状态感知与安全评估等领域发挥至关重要的作用。光纤传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干扰和耐久性强等诸多优点, 因此广泛应用于各类航空航天结构的健康监测任务中^[1,3]。而分布式光纤传感器(Distributed fiber optic sensor, DFOS)测点密度高, 在结构应变分

布监测及损伤定量识别方面具有较强的应用前景。单一男^[4]通过分布式光纤传感器组成应变监测网络对绝热泡沫胶接铝合金板的脱粘和翼梢小翼的接缝凹坑进行了损伤监测, 验证了利用高密度应变信息识别结构损伤方法的有效性。钟照振等^[5]构建了基于高空间分辨率分布式光纤传感器的冲击监测系统, 将监测到的复合材料层合板结构应变响应幅值作为特征量实现了冲击位置辨识, 得到了约 8.44 mm 的平均定位误差。孙晓明等^[6]开发了一套基于光纤传感探测的直升机修理异常振动源定位系统, 通过直升机的振动源动态监控, 识别了直升机的主要振动源。Klute 等^[7]将分布式光纤传感器网络埋入到碳纤维复合材料压力容器

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(12072056)。

中,测量不同压力水平下的层间应变水平,通过冲击造成的残余应变识别出损伤缺陷的大致位置。Tan 等^[8]利用分布式光纤传感器测得的应变数据对三维变形薄壁金属平板试件进行了屈曲检测和三维变形重建。

近年来,在传感器技术、数据处理和高性能计算的共同推动下,SHM 从传统基于模型的方法逐步发展到数据驱动的方法。通过适当的训练和优化技术,深度学习可以从大量的数据中自动提取与结构损伤相关的特征^[9-10]。将光纤传感技术与人工智能(Artificial intelligence, AI)技术结合,基于结构的应变信息识别结构中存在的损伤是目前 SHM 领域的研究热点。Loutas 等^[11-12]使用 4 根光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器来采集碳纤维复合材料加筋板结构动态应变数据,通过在结构不同区域改变质量模拟结构损伤,并使用支持向量机(Support vector machine, SVM)模式识别方法和人工神经网络(Artificial neural network, ANN)识别到了损伤位置。Karypidis 等^[13]采用深度自编码器(Deep autoencoder, DAE)构建了一个异常检测系统,用于监测钢筋混凝土结构的健康状态,研究中采用了分布式光纤传感器,通过应变测量检测结构裂纹,并结合深度自编码器算法 DAE 分析数据;该试验表明,DAE 能够成功量化由横向裂纹导致的损伤,为早期检测裂纹位置、钢筋腐蚀及其他类型损伤提供了新途径。Song 等^[14]提出了一种基于布里渊散射的分布式光纤传感器检测结构微裂纹的深度学习算法,网络架构由 21 层的卷积神经网络构成,使用一根 15 m 长的含人工缺陷宽翼缘钢梁进行方法验证,结果表明该方法能够从应变分布中提取出微裂纹特征,并能从噪声中区分裂纹诱发的局部峰值,能够检测到小至 23 μm 的裂纹。与传统支持向量机和

多层感知器(Multilayer perceptron, MLP)相比,这种基于深度学习的方法表现出更优越的性能。Zhuang 等^[15]在头盔中嵌入光纤布拉格光栅传感器来捕捉撞击时头盔的变形和受力情况,使用了 5 种独立的机器学习(Machine learning, ML)模型及 2 种集成 ML 模型,包括支持向量机、高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)、随机森林(Random forest, RF)、基于 K 近邻实例的学习器(Instance-based K , IBK)、弹性网络回归(Elastic net regression, ENR)、投票(Voting)和加性回归随机森林(Additive regression-random forest, AR-RF);基于 FBG 传感器监测到的应变变化,经过训练的 ML 模型能够准确预测冲击类型,以及冲击力的大小和方向。Liu 等^[16]开发了一个使用分布式光纤传感器和深度学习技术监测结构中裂缝的方法,使用改进的 YOLO 模型识别和定位到了空间分布裂缝。

现有基于光纤信号的机器学习方法,大多仅能识别结构损伤的位置、类型等信息,关于进一步获取损伤的二维尺寸、形状等定量信息的研究较少。图像分割方法为损伤定量信息识别提供了新的思路。目前较为常用的图像分割模型包括 FCN、Segnet、U-Net 等,其中, U-Net 网络融合并扩展了 FCN 和 Segnet 在全卷积网络方面的创新,将跳跃连接贯穿整个网络结构,通过其独特的结构优化了图像分割的性能。U-Net 网络最初由 Ronneberger 等^[17]在 2015 年提出,初衷是为了解决医学图像分割的问题,因其网络结构酷似“U”形而得名。

鉴于 U-Net 神经网络在医学图像处理领域中表现出的优异性能,本文将其与分布式光纤传感技术相结合用于碳纤维层合板分层损伤的定量识别。首先,本文基于有限元模拟的应变数据训练 U-Net 网络,随后通过使用密集布设的分布式光纤传感

器测量得到碳纤维复材板的表面应变数据,将测得的应变数据输入到训练后的 U-Net 网络中,具有像素级识别精度的 U-Net 神经网络对每个数据点进行分类,进而实现对复合材料分层损伤的定量识别。

1 分布式光纤传感与 U-Net 神经网络

1.1 基于背向瑞利散射的分布式光纤应变传感原理

分布式光纤传感器能够把沿光纤长度上的任何点当作测点进行物理场变化的监测,具有连续高密度测量的优点。本文使用的是基于背向瑞利散射的分布式光纤传感器。对于每根光纤,都有与之对应的背向瑞利散射光信号作为其固有信息,这种信号在光纤状态不变时保持稳定。当光纤在某位置经历变形或温度发生改变时,该处的背向瑞利散射光信号的波长会相应地出现变化。通过比较光纤改变前后的背向瑞利散射光信息,就能够定位到光纤状态改变的位置^[4]。

在光纤测量起始阶段首先需要保存一个基准状态的瑞利散射信号,因为光纤局部应变和温度的变化会造成背向瑞利散射光反射光谱的局部漂移,用应变 ε 和温度 T 的函数来表示光谱的漂移,可以测量出光纤局部的应变或温度变化,得到

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon \quad (1)$$

式中, λ 为平均光波波长; ν 为频率; $\Delta\lambda$ 为波长偏移量; $\Delta\nu$ 为频率变化量; K_T 和 K_ε 分别是温度和应变的常数系数。

如果忽略温度变化,应变可以写为

$$\varepsilon = \frac{c}{\lambda} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) \quad (2)$$

式中, c 为光在真空状态下的传播速度; $\bar{\lambda}$ 为光纤解调仪扫描时的中心波长。从式(2)可以看出,通过对比当

前测量时的光纤与基准状态时的光谱偏移,就可以得出应变的测量值。

1.2 U-Net 网络模型

最初的网络是基于 512×512 大小的图像^[17],本文中输入的是 160×80 的应变场数值矩阵,通过对矩阵进行填充,确保经过卷积层后特征矩阵的大小不变,模型中特征矩阵的缩小使用池化层来实现。若采用上述方法,在特征提取部分和上采样对应部分的特征矩阵大小完全一致,在做特征融合时较为便利。本文所采用的 U-Net 网络结构如图 1 所示。该网络由捕捉图像特征的收缩路径和提供定位的对称扩展路径组成。该结构共 5 层,每层包含一对收缩(下采样)路径和扩展(上采样)路径。在收缩路径中,每层使用零填充执行两个 3×3 卷积运算,保持矩阵的原始大小不变。每个卷积运算后面都有一个校正线性单元 ReLU。在第一层中,卷积运算将 3 通道的二维数值矩阵生成 64 个特征通道;在其余层中,特征通道的数量是上一层的两倍。从上一层到下一层,通过 2×2 最大池化操作以 2 的步长对特征通道进行下采样。在最后一步中,总共有 1024 个 10×5 大小的特征二维矩阵。在扩展路径中,每一层特征矩阵的大小都会加倍,同时使用 2×2 反卷积运算,反卷积层通过设置 $\text{stride}=2$ 参数放大特征矩阵,放大后的特征矩阵大小为原来的 2 倍,同时将特征通道数量减半。在每层上采样的开始,来自收缩路径的输出特征通道与对应相同层的扩展路径的特征通道叠加。叠加之后使用零填充执行两个 3×3 卷积运算以保持原始矩阵大小。在最后一层,使用 1×1 卷积运算将 64 个特征通道映射到期望数量的类,与论文中最后输出的通道为 2 不同,由于处理的是 3 分类问题,所以模型最后输出的通道为 3,每个通道对应一个类别的预测分数(Logits)。

2 数据集获取

本文所使用的神经网络架构 U-Net 是从计算机视觉图像分割领域引入的,一般用于图像数据的语义分割,在图像分割领域,研究人员为了获得更大的数据集通常采用对现有图像数据进行平移、旋转、翻转、裁剪等数据增强策略。考虑到结构损伤会引起应变重分布,不同大小的分层损伤在碳纤维层合板中不同位置引起的应变变化,不仅表现为图片上的位置平移和尺寸的放大缩小,应变场的变化也会更为复杂,在本文中不采用图像学中的数据扩充方式,而是通过有限元模拟来获取大量数据。以有限元仿真模拟得到的应变数据作为 U-Net 网络模型的训练集和验证集,再利用分布式光纤传感器测得的真实试件的应变数据作为 U-Net 网络的测试集。

2.1 碳纤维复材板分层损伤有限元模拟

利用 ABAQUS 有限元软件,在复合材料板表面提取与光纤测量路径相对应的应变分布。通过参数化脚本,自动完成模型创建、损伤设置及光纤路径应变提取。针对 100 个

不同分层损伤形状模型施加 10 种载荷,总共得到了 1000 组数据。

复合材料板尺寸为 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,单层厚度为 0.1 mm ,共 30 层,应用实体单元建模。复合材料采用正交铺层,属性如表 1 所示(E 为不同方向的弹性模量; μ 为泊松比; G 为剪切模量)。分层损伤通过复制节点的方式引入,即在同一个空间位置处存在 2 个节点,分别隶属于上下两层单元。分层位置在距离上表面 0.2 mm 与 0.3 mm 处,即在 2~3 层或 3~4 层之间设置损伤。损伤形状为随机四边形,图 2 所示为 100 个损伤形状里随机抽取的损伤形状,损伤大小设置在 $400 \sim 410 \text{ mm}^2$ 范围内,加载方式设置为悬臂弯曲。板左端固支,右端采用面外位移加载,最小为 5 mm ,最大为 50 mm ,间隔 5 mm 。

针对图 2 中的损伤,有限元模拟的应变分布结果如图 3 所示,可以看到分层损伤位置的应变分布发生一定扰动,但应变分布特征与损伤区域并不存在精确对应的关系。

将从 ABAQUS 导出的光纤路径上的表面节点应变 ϵ^{sim} 通过插值拟合的方式得到 80×160 的全场应变 $\epsilon_{\text{D}}^{\text{sim}}$,处理过程如图 4 所示,然后把应变场

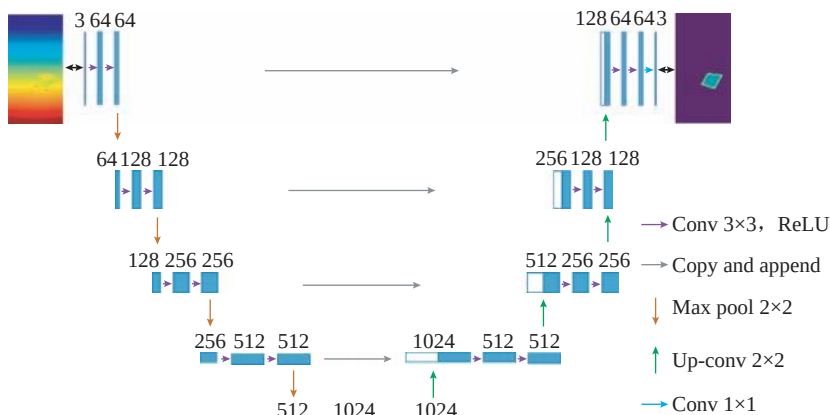


图 1 U-Net 网络结构

Fig.1 U-Net network architecture

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa
144	9.3	9.3	0.312	0.312	0.32	4.68	4.68	4

数据 ε_{2D}^{sim} 复制成 $80 \times 160 \times 3$ 的三维数值矩阵作为模型的训练数据集。

2.2 基于密集布设分布式光纤传感网络的碳纤维复材板应变数据采集

2.2.1 预埋分层损伤的碳纤维复材板试件制作

试验试件大小为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 厚度为 12 层, 采用 T700 单向预浸料进行正交铺设, 通过在 2~3 层碳纤维之间添加 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的正方形脱模布设置分层损伤, 损伤位置如图 5 所示。碳纤维复材板试件固化工艺流程为: 首先将试件加热至 100°C 并保温 1 h, 完成预固化处理; 随后将温度升至 130°C 固化 2 h; 最后将温度升至 160°C 固化 2 h。整个固化过程中试件在抽真空条件下施加压力, 以确保树脂的充分渗透和空气的排除。

2.2.2 高密度光纤布设

为了得到准确可靠的复材板表面应变场, 将分布式光纤传感器进行高密度布设。考虑到试验过程中夹具和光纤弯折对测量信号的影响, 只对试件的局部区域进行光纤布设, 光纤监测范围为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 区间, 光纤相邻间隔为 5 mm , 采用螺旋方式布设光纤。光纤布设路径设计如图 6 (a) 所示, 共 17 条光纤测量段,

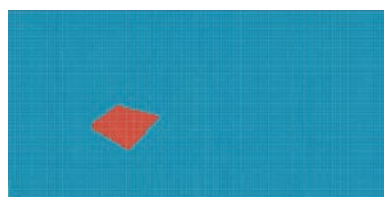


图 2 损伤形状

Fig.2 Damage shape



图 3 沿光纤方向的表面应变场云图

Fig.3 Cloud map of surface strain field along the fiber optic direction

其中有 5 条 (第 2、4、6、8、10 测量段) 通过损伤区域; 3 条 (第 4、6、8 测量段) 通过损伤区域的内部, 2 条 (第 2、10 测量段) 位于损伤区域的边界。光纤布设完成后的复材板试件如图

6 (b) 所示。

需要指出的是, 图 6 中采用光纤的二维致密布设, 让光纤尽可能覆盖结构表面, 这使得光纤在垂直测量路径方向也需要采用高密度布设, 可能

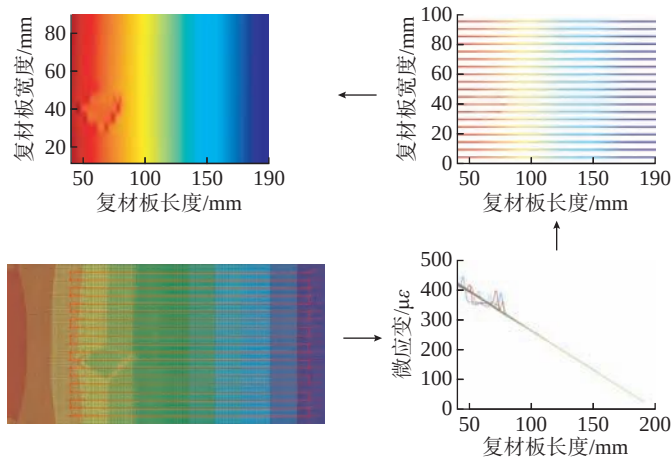


图 4 复合材料层合板多路径密集应变提取与二维插值结果

Fig.4 Multi-path dense strain extraction and two-dimensional interpolation results in composite laminate

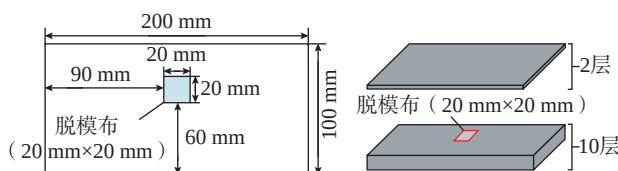
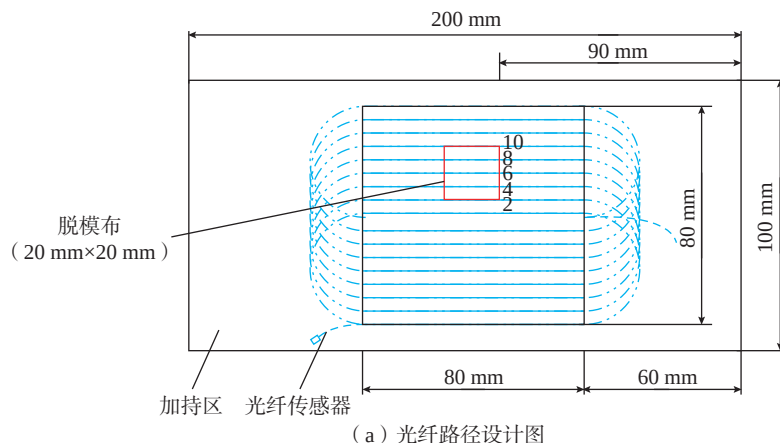
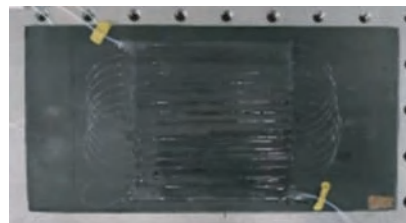


图 5 分层损伤设计

Fig.5 Layered damage design



(a) 光纤路径设计图



(b) 复材板试件

图 6 复材板试验件及光纤路径

Fig.6 Composite board test piece and optical fiber path

带来工程适用性的问题。实际应用中,需要根据检测损伤大小(如分层尺寸、裂纹长度等)设定布设密度。另外,实际工程中可以在需要重点监测的关键局部区域(如应力集中区域、螺孔周边等)进行二维致密布设,而在非关键区域采用稀疏布设,只测量一维高密度应变。

2.2.2.3 应变采集

采用悬臂弯曲加载,试件一端固支,另一端采用悬挂砝码的方式进行加载,如图7所示。试验所采用的应变采集装置是LUNA公司的ODISI分布式光纤采集系统,测量时光纤路径上的应变测点间距设置为1 mm,传感器标距为7 mm。设备连接调试好后在无载荷状态下采集光纤基准信号,试验包含4个载荷等级:载荷步1,载荷大小5 N;载荷步2,载荷大小10 N;载荷步3,载荷大小15 N;载荷步4,载荷大小20 N。

2.2.2.4 光纤应变数据分析处理

鉴于试验所测得的4个载荷步的应变数据呈线性变化,文中只给出最大载荷下的应变曲线,如图8所示,为20 N载荷下光纤实测的复材板表面应变数据 $\epsilon^{\text{measured}}$ 曲线,可以明显看出应变数据呈循环变化的趋势,这与光纤的环绕布设方式相符。应变曲线中极小值点的应变数值小于0,原因是该位置对应光纤弯折路径区域中点。由于悬臂加载下复材板表面单向受拉,横向根据泊松关系收缩,故存在应变负值。此外,光纤弯折处的应变分布较复杂,容易带来误差,因此在应变分析时忽略此区域。在监测区域的应变数据中可以看出由于分层损伤造成的应变扰动现象,通过试验测得分层损伤应变特征与有限元模拟基本一致。在损伤边界处的应变扰动特征不如损伤内部明显。

将光纤采集到的一维应变数据 $\epsilon^{\text{measured}}$ 根据光纤布设路径映射到二维平面中对应位置,同时采用插值拟合的方式将应变数据插值

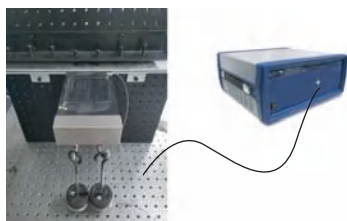


图7 试验加载装置及设备
Fig.7 Experimental loading device and equipment

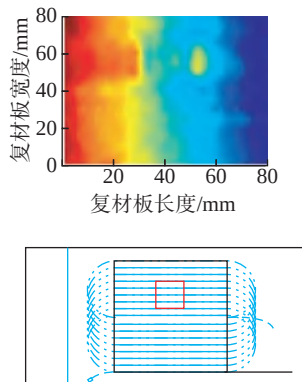


图9 复合材料层合板多路径密集应变测量与二维插值结果
Fig.9 Multi-path dense strain measurement and two-dimensional interpolation results in composite laminate

为1 mm间隔的 80×80 的应变场数值矩阵 $\epsilon_{2D}^{\text{measured}}$,处理过程如图9所示,然后把应变场数据 $\epsilon_{2D}^{\text{measured}}$ 复制成 $3 \times 80 \times 80$ 的三维数值矩阵保存为.npy文件作为模型的输入数据。

2.2.5 U-Net网络的训练和验证试验
为了评估本文所提方法的有效性,搭建了神经网络训练平台训练U-Net网络并进行验证。

(1) U-Net网络训练平台搭建。

碳纤维复材板分层损伤识别U-Net网络训练平台主要硬件配置为:CPU, AMD Ryzen Threadripper PRO 3955WX 16-Cores; GPU, NVIDIA GeForce RTX 3090; 内存为32 G。

相比传统算法,神经网络模型结构更复杂,为了高效、便捷、灵活地实现网络模型搭建,需要借助高质量的深度学习框架,Pytorch和Tensorflow是目前最主流的两个现代化深度学习框架,极大地提高了神经网络搭建的效率。本文所使用的软件环境如表2所示。

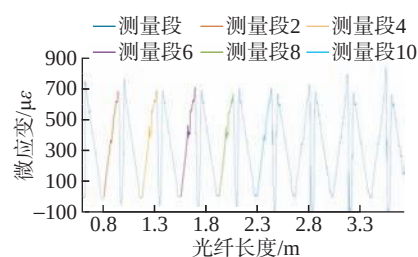


图8 光纤实测应变曲线
Fig.8 Fiber optic measured strain curve

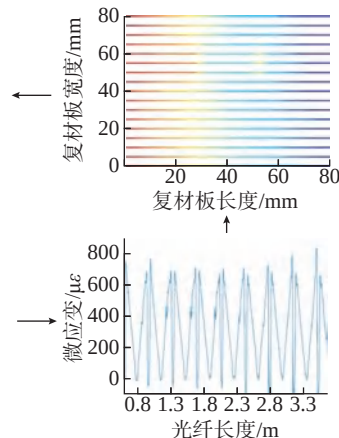


表2 主要软件环境及其对应的版本号
Table 2 Main software environments and their corresponding version numbers

软件平台	版本号
操作系统	Linux
深度学习框架	Pytorch 2.0.1
集成平台	Conda 4.8.3
编译语言	Python 3.8.3
GPU 运算平台	CUDA 11.6

(2) 损失函数。

U-Net网络模型为输入数据的每个数据点输出一个相应的Logits向量,向量的长度为总类别数 C ,向量中的每个元素代表该数据点属于各个类别的原始分数。本文采用经典的交叉熵损失函数CrossEntropyLoss,其计算过程为:首先自动对每个数据点对应的Logits向量应用Softmax函数,将每个数据点的预测(模型输出的每一行)Logits转换为概率分布,其中每个元素的值在0~1之间,且所有元素的和等于1;然后计算每个数

据点的真实类别标签对应的预测概率的负对数,得到单个数据点的交叉熵损失;最后取所有损失的平均值作为损失函数 CrossEntropyLoss 最终的计算结果。

单个数据点的交叉熵损失计算公式为

$$-\log(p_c) = -\log\left(\frac{e^{s_c}}{\sum_{j=1}^C e^{s_j}}\right) \quad (3)$$

式中, p_c 为通过 Softmax 函数计算的第 c 个类别的概率; C 是类别的总数; s_j 是模型输出中 j 个类别的 Logit; s_c 是真实类别 c 对应的 Logit。

(3) 评价指标。

为了评估复合材料分层损伤识别的 U-Net 网络模型的训练结果,需要对模型的数据点级识别结果给出评价指标。IoU (Intersection over union) 交并比定义如图 10 所示,用于测量模型的预测区域与实际目标之间的重叠程度,是计算机视觉中一种广泛用于评估神经网络模型识别准确性的指标。本文通过计算 IoU 值对分层损伤识别结果进行定量分析。

IoU 的计算公式为

$$\text{IoU} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (4)$$

式中,真阳性 TP (True positives) 为网络预测损伤与真实损伤的重合部分;假阳性 FP (False positives) 为非损伤区域网络错误判断为损伤的部分;假阴性 FN (False negatives) 为真实损伤区域网络未检测出的部分。

把有限元模拟得到的数据集按照 9:1 划分为训练集和验证集,放入 U-Net 网络进行训练和模型评估,采用 Adam 优化算法,学习率 (Learning rate) 设置为 0.0005,迭代的批量大小 (Batchsize) 设置为 16,网络训练对本集的学习次数 (Epoch) 设置为 500。



图 10 IoU 定义
Fig.10 IoU definition

3 U-Net 网络分层损伤识别结果

训练集的损失曲线和验证集的损失曲线如图 11 和 12 所示。可以看出,损失不断降低并最终趋于平缓,模型训练表现良好。接下来,使用光纤传感器测得的真实复材板的表面应变数据,测试模型对分层损伤的识别效果,网络模型的预测结果如图 13 所示。图 13 为 U-Net 网络对 4 个加载等级下复材板试验件分层损伤的识别结果,红色框为设计的分层损伤所在位置,黄色和蓝绿色区域为网络模型的预测结果;根据网络模型的测试结果可知,本文所提出的深度学习损伤识别方法识别到了应变数据中存在的损伤特征,对分层损

伤的位置和形状有良好的识别准确性,但因为试验中存在一些误差,例如复材板切割尺寸不精准、脱模布裁剪与粘贴偏移、光纤布设路径偏移、光纤标定不够精确、噪声等都会对损伤最终的识别准确性有所影响,造成对部分点的误判,出现损伤边界位置处识别准确度较低的问题。

U-Net 网络对 4 种加载等级下的碳纤维层合板分层损伤的 IoU 计算结果为 0.6374、0.6523、0.6523 和 0.6457,其中最大为 0.6523,最小为 0.6374,平均 IoU 得分为 0.6469。

为了更进一步定量描述损伤识别精度,将预测损伤的面积大小和形心位置作为损伤结果定量表征的判定标准,得到如表 3 所示的误差分析,最大定位误差为 2.0 mm,最大面

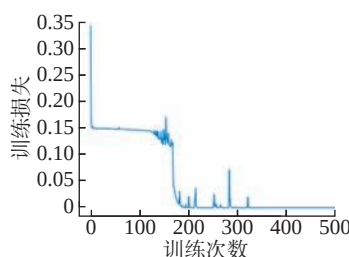


图 11 训练集的损失曲线

Fig.11 Loss curve of the training set

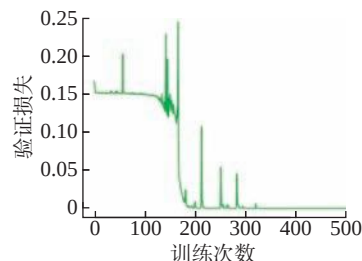


图 12 验证集的损失曲线

Fig.12 Loss curve of validation set

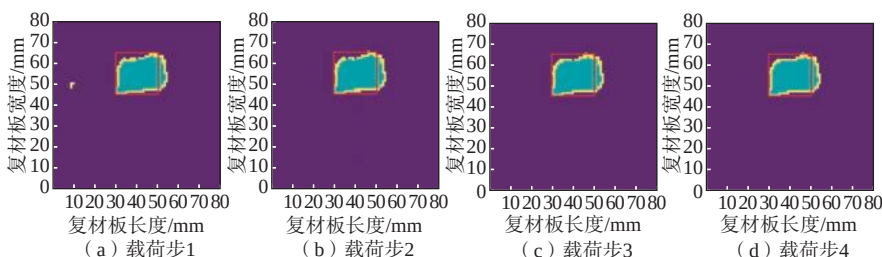


图 13 U-Net 网络对损伤的预测结果

Fig.13 Prediction results of U-Net network for damage

表 3 损伤量化表征误差结果

Table 3 Error of quantitative characterization of damage

加载等级 /N	损伤位置(x,y)/mm		定位误差 /mm	损伤尺寸/mm ²		面积误差 /mm ²
	真实	识别		真实	识别	
5	(40,55)	(41.7,55.1)	1.7	400	399	1.0
10	(40,55)	(41.9,55.2)	1.9	400	400	0
15	(40,55)	(41.9,55.3)	1.9	400	400	0
20	(40,55)	(42.0,55.3)	2.0	400	395	5.0

积误差为 5.0 mm^2 , 平均定位误差为 1.9 mm , 平均面积误差为 1.5 mm^2 。

4 U-Net 与 FCN 的损伤识别结果对比

为了验证 U-Net 网络相比于其他深度学习模型的优越性, 采用另外一种图像分割网络 FCN 进行了分层损伤识别, 网络结构如图 14 所示。该网络结构中包含卷积层、池化层与反卷积层, 在反卷积过程中将 p5 层的输出进行 2 倍的上采样后与 p4 层的输出进行逐像素相加, 之后进行 2 倍的上采样与 p3 层的输出再次进行逐像素相加, 最后将通过加法获得的特征矩阵进行 4 倍的上采样, 获得与输入同尺寸的输出。FCN 网络数据训练时采用与 U-Net 完全相同的数据集, 所采用的学习率、迭代批量大小、学习次数都保持一致。

50 N 加载下的损伤识别对比结果如图 15 所示, 可以看到, FCN 网络对复合材料分层的识别精度明显低于 U-Net 网络, 分割结果不够精

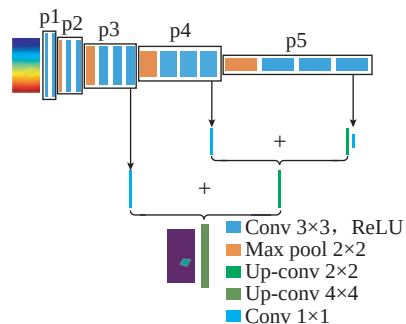


图 14 FCN 网络结构

Fig.14 FCN network structure

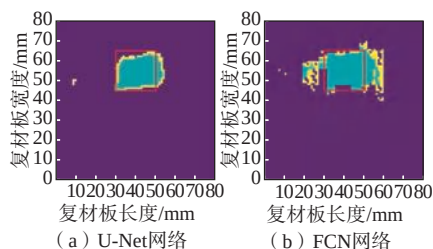


图 15 U-Net 网络与 FCN 网络的损伤识别结果对比

Fig.15 Comparison of damage identification results between U-Net and FCN networks

细, 并且在无损区域存在错误的损伤预报。其原因是 FCN 网络结构跳跃连接主要出现在网络的后半部分, 并不像 U-Net 在整个网络中系统地应用; 此外, 与 FCN 的矩阵加法不同, U-Net 网络通过其独特的对称结构和跳跃连接将下采样路径中的每一层输出与上采样路径中相应层级的特征进行通道融合; 通过这种方式, 系统性地融合不同层次的特征, 在图像分割中保持空间信息的完整性。这使得 U-Net 在需要精确边缘细节的分割任务中表现出更优异的性能。

5 结论

本文通过有限元仿真获取 U-Net 神经网络训练所需的大量数据, 降低了通过试验来获取数据的成本, 将分布式光纤传感器测得的含分层损伤复合材料层合板的表面应变数据作为 U-Net 网络的测试集, 通过计算每次 U-Net 网络输出结果的 IoU 来描述 U-Net 网络对复材板分层损伤识别的准确性, 并且引入了损伤预测区域的形心位置和面积大小进一步评估 U-Net 网络对损伤识别的精确性, 通过综合表征手段评价分层损伤的识别效果。

自主编写的参数化建模脚本高效地实现了模型的前后处理和损伤设置, 通过有限元模拟得到的含损伤结构应变分布特征与真实复合材料板的应变分布特征基本一致。U-Net 神经网络模型训练过程中, 训练集的损失曲线和验证集的损伤曲线都很好收敛, 训练后的模型准确识别到了光纤监测数据的分层损伤。在测试集中, 损伤识别结果为平均 IoU 得分 0.6469, 平均定位误差为 1.9 mm , 平均面积误差为 1.5 mm^2 。结果表明, U-Net 神经网络可以对分层损伤的位置、尺寸与形状进行较为精确的定量识别。

本文基于仿真构建的数据集解决了试验数据的稀缺性问题。但仿

真模型在铺层、固化工艺、损伤特征等方面与实际结构存在差异, 可能导致样本库的不适用问题。针对这个问题, 可以采取少量试验数据加大量仿真数据的形式构建数据集, 并结合数据扩充、引入噪音等方式, 加强 U-Net 网络的模型泛化能力。此外, 分布式光纤损伤识别的本质是捕捉 (损伤造成的) 材料局部不连续带来的应变奇异性, 与损伤大小、严重程度、载荷大小和光纤标距等多种因素相关。未来将开展精细的理论与试验研究, 对损伤敏感性、鲁棒性等做深入分析, 并结合机器学习方法对损伤发生具体铺层位置等关键信息进行定量识别。

参考文献

- [1] 龚煜廉, 张建国, 李文博. 光纤传感在航天复材结构健康监测中的应用 [J]. 航天器工程, 2022, 31(5): 60-66.
- [2] GONG Yulian, ZHANG Jianguo, LI Wenbo. Application of optical fiber sensing in health monitoring of aerospace composite structure [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(5): 60-66.
- [3] 王梓尧. 复合材料分层损伤疲劳扩展监测与预测研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [4] WANG Ziyao. Research on monitoring and prediction of delamination damage fatigue extension of composite materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [5] DI S R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications [J]. Sensors, 2015, 15(8): 18666-18713.
- [6] 单一男. 基于分布式光纤传感的典型结构状态监测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [7] SHAN Yinan. Study of structural states monitoring method for typical structures based on distributed optical fiber sensing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [8] 钟照振, 曾捷, 李艳芬, 等. 复合材料层板 OFDR 分布式光纤冲击判位方法研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(5): 1005-1010, 1044.
- [9] ZHONG Zhaozhen, ZENG Jie, LI Yanfen,

et al. OFDR distributed optical fiber impact localization method of composite laminate[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(5): 1005–1010, 1044.

[6] 孙晓明, 苏世伟, 尹华光, 等. 基于光纤传感探测的直升机修理异常振动源定位研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 128–137.

SUN Xiaoming, SU Shiwei, YIN Huaguang, et al. Location of abnormal vibration source in helicopter repair based on optical fiber sensing detection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 128–137.

[7] KLUTE S M, METREY D R, GARG N, et al. In-situ structural health monitoring of composite-overwrapped pressure vessels[J]. Sampe Journal, 2016, 52(2): 7–17.

[8] TAN X, GUO P W, ZOU X X, et al. Buckling detection and shape reconstruction using strain distributions measured from a distributed fiber optic sensor[J]. Measurement, 2022, 200: 111625.

[9] AZAD M M, KIM S, BIN CHEON Y, et al. Intelligent structural health monitoring of composite structures using machine learning,

deep learning, and transfer learning: A review[J]. Advanced Composite Materials, 2024, 33(2): 162–188.

[10] AZIMI M, ESLAMLOU A D, PEKCAN G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2778.

[11] LOUTAS T H, PANOPOULOU A, ROULIAS D, et al. Intelligent health monitoring of aerospace composite structures based on dynamic strain measurements[J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(9): 8412–8422.

[12] PANOPOULOU A, ROULIAS D, LOUTAS T H, et al. Health monitoring of aerospace structures using fibre Bragg gratings combined with advanced signal processing and pattern recognition techniques[J]. Strain, 2012, 48(3): 267–277.

[13] KARYPIDIS D F, BERROCAL C G, REMPLING R, et al. Structural health monitoring of RC structures using optic fiber strain measurements: A deep learning approach[C]//Proceedings of IABSE Congress.

New York, 2019.

[14] SONG Q S, ZHANG C, TANG G W, et al. Deep learning method for detection of structural microcracks by Brillouin scattering based distributed optical fiber sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 075008.

[15] ZHUANG Y Y, YANG Q B, HAN T H, et al. Fiber optic sensor embedded smart helmet for real-time impact sensing and analysis through machine learning[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2021, 351: 109073.

[16] LIU Y M, BAO Y. Intelligent monitoring of spatially-distributed cracks using distributed fiber optic sensors assisted by deep learning[J]. Measurement, 2023, 220: 113418.

[17] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham: Springer, 2015.

通讯作者: 徐浩, 副教授, 博士, 研究方向为结构健康监测和复合材料结构设计。

Quantitative Identification Method of Composite Material Delamination Damage Based on Distributed Optical Fiber Sensing and U-Net Network

WU Zhanjun¹, DONG Shanshan², LI Jianle², ZHU Mingrui², ZHANG Shicheng², LIU Haitao²,
SUN Liang², LI Hanke², DONG Zimai², XU Hao¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

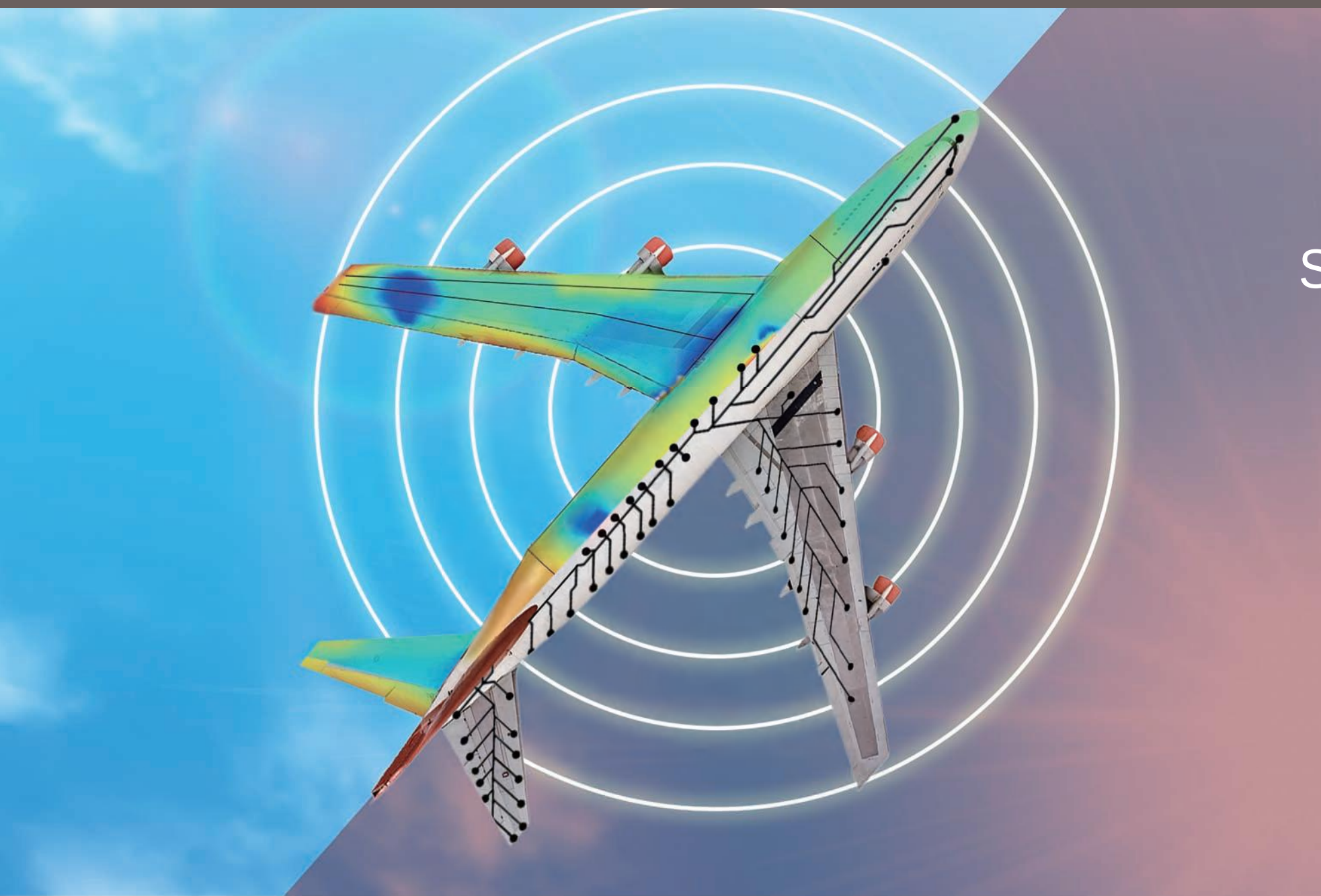
2. College of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] Structural health monitoring is a crucial approach for ensuring the safety and integrity of composite material structures in aircraft. Distributed fiber optic sensors based on backscattered Rayleigh scattering provide data support for composite material damage monitoring by measuring high-density strain distributions. However, the mapping relationship between structural strain distribution characteristics and damage is complex, making it challenging to accurately determine the quantitative information of damage based solely on strain distribution. Additionally, the large volume of data from distributed fiber optic sensors makes manual analysis of strain data time-consuming and less accurate. To address this challenge, an intelligent damage identification method based on distributed fiber optic sensing data and the U-Net neural network is proposed. It aims to automate the precise identification of common delamination damage in composite materials. Initially, training and validation sets for the U-Net neural network are constructed through finite element simulations. Subsequently, cantilever loading tests of composite material plates with delamination damage are conducted, and structural strain distribution data are collected as a test set using distributed fiber optic sensors. The damage identification results demonstrate that the U-Net neural network can accurately quantify the position, size, and shape of delamination damage.

Keywords: Structural health monitoring (SHM); Composite structures; Distributed fiber optic sensors; Deep learning;

U-Net neural network

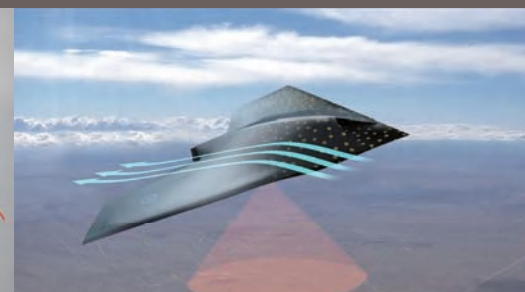
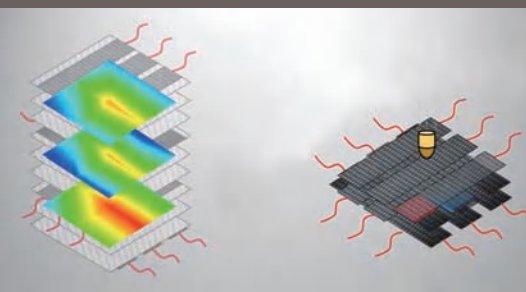
(责编 逸飞)



结构健康监测

Structural Health Monitoring

结构健康监测技术利用集成在结构内部或表面的传感器,在线实时获取与结构健康状态相关的信号,通过特定的信号处理和力学建模分析方法,提取与结构损伤状态相关的信号特征,再利用损伤诊断方法实现对结构健康状态及损伤扩展的评估及对结构剩余寿命的预测,以指导任务决策和后勤维护保障。



引文格式: 蒋孝伟, 章文瑾, 刘玲. 复合材料结构健康监测中机器学习方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 30–40.

JIANG Xiaowei, ZHANG Wenjin, LIU Ling. Research progress on machine learning methods in structural health monitoring of composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 30–40.

复合材料结构健康监测中机器学习方法研究进展^{*}

蒋孝伟, 章文瑾, 刘玲

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 纤维增强树脂基复合材料(Fiber reinforced plastics, FRPs)因其高模高强、可设计强、耐腐蚀等优异性能,已广泛应用于航空航天等高性能领域。结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)对于保障复合材料结构的安全运行至关重要。随着人工智能技术的进步,机器学习方法在复合材料结构健康监测领域也得到快速发展,以数据驱动方法代替传统模型对结构状态进行判断,使得基于各类传感器的结构健康监测技术具有更高的准确性、鲁棒性及高效性。基于此,本文首先阐述了在复合材料结构健康监测领域中常用的机器学习算法,其次总结了机器学习方法在复合材料损伤模式识别、损伤位置识别和损伤程度识别几个方面的研究进展,最后讨论了基于机器学习的复合材料结构健康监测的未来发展趋势。

关键词: 复合材料; 传感器; 结构健康监测(SHM); 损伤; 机器学习

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.030



蒋孝伟

博士研究生,研究方向为基于机器学习的复合材料结构健康监测。

纤维增强树脂基复合材料(Fiber reinforced plastics, FRPs)具有比强度和比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能,在航空航天、风力发电、轨道交通等领域得到了广泛应用。使用FRPs已成为大型结构减重和降低运行成本的有效途径。尽管FRPs具有显著的性能优势,但在实际服役工况下,FRPs不仅要承受复杂的疲劳载荷和意外的冲击载荷,还要承受高温、潮湿等恶劣外部环境因素的影响。这些因素无论是单独作用还是协同作用,都会导致FRPs机械性能的显著下降,尤其是结构强度和疲劳寿命的显著降低。因此,对FRPs进行结构健康监测(Structural health monitoring, SHM),对于避免FRPs发生突发性损伤和结构破坏,以及提高FRPs服役的可靠性具有重要的

实际意义。

当前,随着先进传感器技术、采集系统、信号分析处理等研究的快速发展,各种监测方法在复合材料SHM领域得到了越来越深入的研究,如振动监测、应变监测、声发射监测(Acoustic emission, AE)和兰姆波监测等。在不影响FRPs结构机械性能的前提下,将先进的传感器网络集成在结构表面或嵌入结构内部,从而实现全周期的SHM。欧洲空客公司研究了SHM在A350和A380等客机上的可行性,并针对飞机不同部件提出了相应的SHM需求,包括碳纤维舱门冲击载荷监测、垂尾连接孔的拉伸应力监测等^[1]。然而,复合材料SHM技术存在监测数据庞大、监测数据复杂、多尺度效应等亟待解决的问题。这些问题使得模态分析

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(11972256, 12272268)。

和有限元分析等传统的分析方法在提取有效信息、实现精确的状态诊断等方面存在一定困难。随着人工智能时代的到来,以数据驱动为主导的机器学习具有解决大规模数据处理、复杂模式识别、多尺度建模等问题的潜力,从而可以提高复合材料 SHM 技术的准确性和可靠性。因此,机器学习在复合材料 SHM 领域的应用变得极具吸引力。

本文基于机器学习方法在 FRPs 结构监测领域的应用进展,首先阐述了在复合材料 SHM 领域中常用的机器学习算法,其次概括了机器学习方法在 FRPs 损伤模式识别、损伤位置识别和损伤程度识别 3 个方面的研究进展,最后展望了机器学习方法在复合材料 SHM 领域的发展趋势。通过系统地阐述机器学习方法在 FRPs 结构监测领域的最新研究进展和发展趋势,将有助于研究者了解和把握 SHM 领域的最新研究动态、获取新的研究思路或灵感,从而更好地推动复合材料 SHM 技术的快速发展和工程应用。

1 复合材料 SHM 领域常用的机器学习算法

1.1 无监督学习算法

复合材料 SHM 领域主要采用无监督学习和有监督学习两种机器学习算法。图 1(a)给出了无监督学习算法的基本流程。首先,收集与 SHM 相关的无标签数据集(没有经过人工标记或分类的数据样本),如表格数据等结构化数据或者如文本等非结构化数据;其次,对数据进行预处理,包括清洗数据和数据特征提取等操作;然后,将数据输入到选定的无监督学习算法对数据进行训练;最后输出聚类结果。无监督学习算法会自行寻找数据集的模式,然后将数据划分为不同的组进行聚类,使得每组中的数据相似性高,因此该算法多用于复合材料

损伤模式的识别。图 1(b)给出了基于无监督学习算法的损伤模式识别流程。以 AE 监测为例,首先,提取 AE 特征参数,采用主成分分析法对数据进行降维处理;其次,通过 K-均值(K-means)等算法对降维后数据进行聚类分析;然后,通过轮廓系数、邓恩指数、戴维森堡丁指数等评价指标对聚类效果进行评价;最后,分析损伤机制的基本物理特性,结合聚类中心的特征参数,为每一种聚类标记出相应的损失模式标签。如图 1(c)所示,常见的无监督学习算法包括 K-means、模糊 C 均值(Fuzzy C-means, FCM)、自组织映射(Self-organizing maps, SOM)、卷积自动编码器(Convolutional autoencoders, CAE)、基于快速搜索与寻找密度峰值聚类(Clustering by fast search and find of density peaks, CFSFDP)等。而表 1 还对上述算法的聚类方式、数据类型及优缺点进行了比较。

K-means 是基于样本集合划分的聚类算法, K-means 算法将样本集合划分为 k 个子集,构成 k 个类,并将 n 个样本分到 k 个类中,每个样本到其所属类的中心距离最小,且每个样本仅属于一个类。针对初始化时选择的聚类中心,计算所有样本到每个中心的距离,将每个样本聚集到与其最近中心的类中,构成聚类结果^[2]。K-means 算法的最大优点是简单高效^[3],但缺点是每个数据点只能聚类到最近的类中,即每个数据点只属于一个类,因此被归类为硬聚类算法。

相对于硬聚类 K-means 算法, FCM 算法提供了更加灵活的聚类分析。在大部分情况下,数据集的对象不能划分成为明显分离的类,指派 1 个对象到 1 个特定的类有些生硬,也可能会出错。因此,对每个对象和每个类赋予 1 个权值,指明对象属于该类的隶属度。在硬聚类方法(如 K-means)中,对象肯定是或者不是某类的成员,其隶属度分别为 1 或 0。

而在软聚类算法(如 FCM)中,对象可以在 0 到 1 之间的任何隶属度范围内属于 1 个聚类^[4]。因此, FCM 算法的最大优点是允许数据点按照一定的隶属度分布到多个类中,提供了更灵活的聚类方式,适用于处理数据点不明确属于某一类的情况^[5],但缺点是计算过程复杂,在处理大规模数据集时需要耗费较多计算资源。

SOM 算法是一种自组织竞争的神经网络。在训练过程中, SOM 网络中的神经元相互竞争,当给定 1 个输入向量时, SOM 中的神经元会竞争并选择与输入向量最相似的神经元作为获胜神经元^[6];然后,获胜神经元及其邻近神经元会更新其权重向量,使其更接近输入向量^[7]。通过这种竞争学习过程, SOM 可以在低维网格上形成输入数据的拓扑映射。在 SOM 算法中,每个数据点只能被分配到最近的神经元或节点,即每个数据点只属于 1 个类,因此也属于硬聚类算法。SOM 算法最大优点是可视化能力强,可将高维数据映射到二维或三维网格中,便于可视化理解数据的特征和分布,但其缺点是对初始参数敏感,不同参数可能导致不同的聚类结果。

CAE 算法是一种基于神经网络的无监督学习模型(非聚类算法),由编码器和解码器两部分组成。编码器负责将输入数据编码映射到一个低维的表示空间,解码器负责将编码后的低维表示重新映射到原始数据的空间,以重构输入数据^[8]。在训练过程中,通过最小化重构误差(通常使用均方误差)来优化模型参数,使重构数据尽可能接近原始数据。CAE 算法的优点是能有效学习图像数据的特征表示,尤其适用于处理具有空间结构的图像数据^[9],但其缺点是 CAE 所需的参数较多,模型容易发生拟合,需要使用正则化技术等来减少过拟合的影响。

CFSFDP 算法旨在识别具有不



图 1 无监督学习算法步骤及基于无监督学习算法的损伤模式识别流程

Fig.1 Unsupervised learning algorithms steps and damage pattern recognition process based on unsupervised learning algorithms

表 1 无监督学习算法类型及优缺点

Table 1 Types and advantages/disadvantages of unsupervised learning algorithms

算法	聚类方式	数据类型	优点	缺点
K-means	硬聚类	数值型	简单高效	对异常值敏感
FCM	软聚类	数值型	聚类方式灵活	计算复杂度高
SOM	硬聚类	数值型	适用于高维数据	对初始参数敏感
CAE	—	图像型	适用于处理图像数据	模型容易发生过拟合
CFSFDP	密度聚类	数值型	无需预先指定类的数量	计算复杂度较高

同密度的数据点,并根据数据点密度来进行聚类。该算法的基本思想是通过快速搜索数据中的密度峰值点来发现数据中的类。密度峰值点是指在局部区域内具有相对高密度的数据点,被视为潜在的类中心。该算法首先计算每个数据点的局部密度和与其他数据点的最短距离;然后

确定密度峰值点,并根据密度峰值点之间的距离和密度信息,将数据点分配到最近的密度峰值点所属的类中;最后,对可能具有重叠的类进行合并或分割,以获得最终的聚类结果^[10]。CFSFDP 算法无需预先指定类的数量,而是通过密度峰值寻找数据中的类结构,因此适用于处理不确定类数

量的数据^[11],但缺点是需要通过一些启发式方法或经验来选择合适的密度峰值,这可能会因数据的不同而导致聚类结果的不同。

1.2 有监督学习算法

常见的有监督学习算法包括支持向量机(Support vector machine, SVM)、人工神经网络(Artificial neural network, ANN)、卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)等。图 2(a)给出了有监督学习算法(SVM, ANN, CNN)的基本流程。首先,收集有标签数据集(指经过人工标记或分类的数据样本)时,需获取包含输入特征及相对应的标签,图 2(a)中明确了每种数据标签,分别为三角形、圆形和正方形;其次,对数据进行特征提取或直

接输入到有监督学习模型中进行训练;然后,使用准确率等指标对模型进行评估,并利用交叉验证等技术对模型进行调优,并选择最佳的超参数组合以提高模型的泛化能力;最后,使用测试集对最终模型进行验证,评估其对未见过数据上的性能。有监督学习算法分为分类和回归。分类问题预测的是分类型数据,如损伤模式、损伤程度等,预测结果以混淆矩阵形式展示,混淆矩阵是在分类问题中用于评估模型性能的一种工具,其展示了分类模型在每个类别上的预测结果与实际情况之间的对应关系。混淆矩阵是一个二维表格,其“行”表示实际类别,“列”表示预测类别。每个单元格的值表示模型在实际类别和预测类别的组合下的样本数量。通过分析混淆矩阵,可以计算出多种性能指标,如准确率、精确率、召回率和F1分数,从而全面评估分类模型的性能。而回归问题预测的是连续型数据(如损伤位置),模型通过优化参数来最小化预测损伤位置与真实损伤位置之间的差异,以实现给定输入的准确预测。以损伤模式识别为例,对有监督学习算法的分类预测进行说明,如图2(b)所示^[12-14],首先,通过试验构建已知标签的数据集,将数据集进行特征提取或直接输入到机器学习模型;然后,通过算法对数据集进行训练和测试,并输出预测的标签类别;最后,通过混淆矩阵,利用准确率对分类模型进行评价。表2对上述算法的类型、优缺点及适用范围进行了比较。

SVM 算法的核心思想是利用核函数将原始特征空间映射到一个更高维的特征空间,从而使原本线性不可分的数据变为线性可分数据^[15]。常见的核函数包括线性核、多项式核、高斯核等^[16]。在分类问题中,SVM 算法的目标是找到一个能够将不同类别的数据点尽可能分开的超平面,这意味着 SVM 要最大化两个

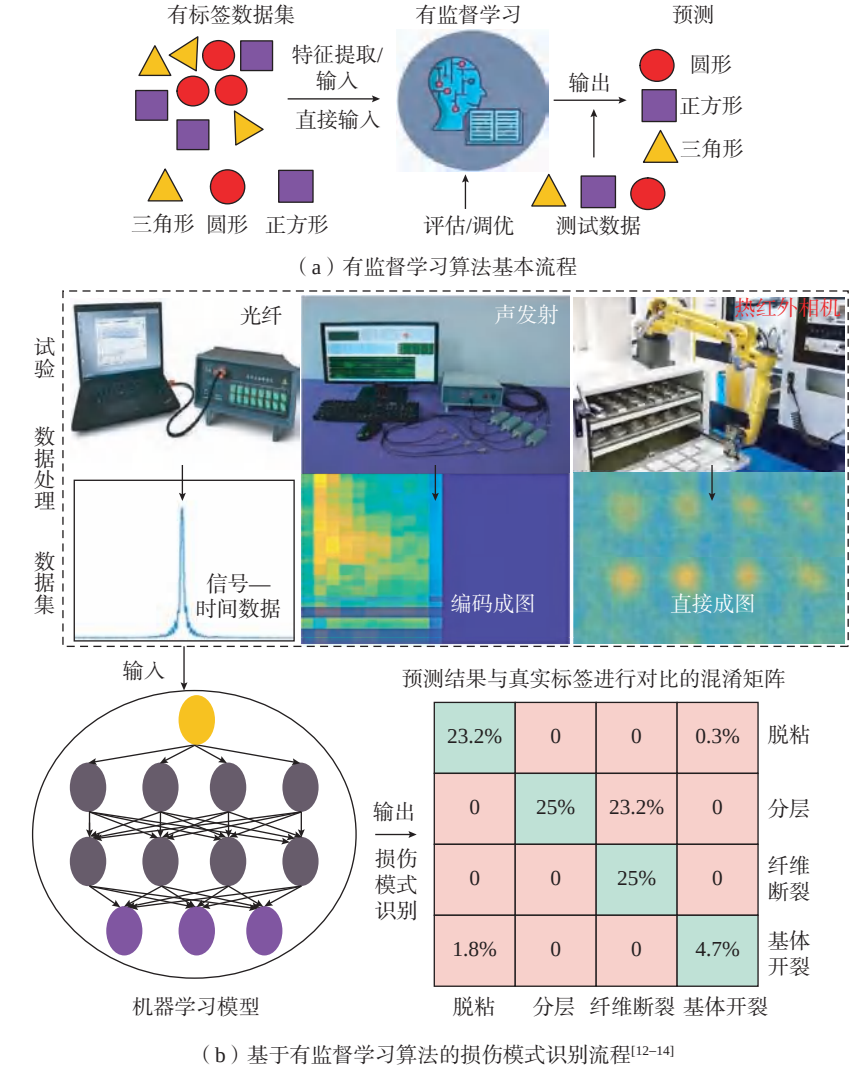


图2 有监督学习算法及基于有监督学习算法的损伤模式识别流程
Fig.2 Supervised learning algorithms and damage pattern recognition based on supervised learning algorithms

表2 有监督学习算法类型及优缺点
Table 2 Types and advantages/disadvantages of supervised learning algorithms

算法	类型	优点	缺点	适用范围
SVM	监督学习	计算效率高	处理非线性问题表现不佳	损伤模式、程度识别
ANN	深度学习	非线性建模能力	易于过拟合	损伤模式、程度识别及损伤定位
CNN	深度学习	学习能力强	依赖计算资源	损伤模式、程度识别及损伤定位

不同类别之间的间隔,同时尽量减小误分类的数量。这样的超平面被称为最大间隔超平面,而数据点位于超平面附近的样本点被称为支持向量。SVM 算法优点是计算效率高,具有较好的泛化能力,但其缺点是在处理非线性可分且类别重叠数据时表现

不佳。ANN 算法是一种受到生物神经网络启发而设计的计算模型,用于模拟人脑神经元之间的信息传递和处理过程。ANN 由多个神经元组成,分为输入层、隐藏层和输出层^[12]。每个神经元接收来自上一层神经元

的输入,并将其加权求和后通过激活函数进行处理,最后得到结果后输出。通过调整神经元之间的连接权重和激活函数,ANN算法能够学习和适应输入数据之间的复杂关系,并能够对新的未见数据进行预测和分类^[13]。ANN算法具有强大的非线性建模能力和适应性,但其缺点是参数调节困难且易于过拟合。

CNN算法设计灵感来自于动物视觉系统的工作原理,是一种深度学习模型,特别设计用于处理具有二维结构的数据,例如图像^[14]。CNN算法由多个层次组成,包括卷积层、池化层和全连接层。卷积层负责提取输入图像中的局部特征,通过对图像进行卷积操作,可以有效地捕捉到图像的空间局部性,使模型能够学习到图像的局部结构和特征;池化层则用于对卷积层输出的特征图进行下采样,减少特征图的维度和计算量,同时保留重要的特征信息。通过多个卷积层和池化层的堆叠,CNN能够逐渐提取出越来越抽象和高级的特征表示,形成了特征的层次化结构。在训练过程中,CNN通过前向传播和反向传播来逐渐学习和调整网络参数,使得网络能够适应数据的复杂特征并提高预测准确性。最后,通过全连接层将提取的特征映射到输出空间,进行分类或回归任务。CNN算法能对图像等二维数据进行特征的高效提取,并具有较好的层次结构学习能力^[17],但缺点是需要大量的数据和计算资源,且模型结构复杂难以解释。

2 机器学习方法在复合材料 SHM 领域的应用进展

复合材料的 SHM 主要指损伤的在线监测与预报,复合材料的损伤包括损伤模式、损伤位置和损伤程度,其中损伤模式又包括基体裂纹、纤维断裂、纤维/基体界面开裂和层间分层。因此,基于机器学习的 SHM 主

要包括损伤模式识别、损伤位置识别和损伤程度识别。本节将具体介绍基于机器学习的损伤模式识别、损伤位置识别和损伤程度识别的 SHM 方法。

2.1 损伤模式识别

对于 FRPs 的损伤模式识别,现有研究主要是从无监督学习和有监督学习两个角度开展。基于无监督学习的损伤模式识别,目前大多研究主要是针对 AE 传感技术进行了探讨^[2,8,10,18-21]。AE 波形数据包括振幅、能量、上升时间、持续时间、峰值频率、振铃计数和阈值等不同特征信号。FRPs 中不同的损伤模式会引起不同特征的 AE 信号,通过对 AE 信号进行分析可描述 FRPs 内部的损伤机制^[7]。其中,基体开裂对应的 AE 信号特征是振幅小、频率低、持续时间长、上升时间长和振铃计数大;分层对应的 AE 信号特征为振幅大、频率低、持续时间长;纤维断裂的 AE 信号特征是振幅高、频率高和上升时间短。由于 FRPs 破坏过程中各种损伤模式同时发生并相互作用^[2,22-25],仅通过分析将 AE 信号与损伤模式进行关联并不简单。采用无监督学习,通过聚类分析可将 AE 信号与损伤模式建立起映射关系。

Gutkin 等^[21]通过 K-means、SOM 和 CNN 3 种算法对峰值振幅、峰值频率、能量、上升时间和持续时间这 5 个特征 AE 信号进行聚类分析,得到了基体开裂、分层、纤维/基体脱粘、纤维断裂和纤维拔出的近似峰值频率分布。Godin 等^[7]提出了一种集成 SOM 和 K-means 的无监督学习算法,能对玻璃纤维/环氧树脂材料拉伸试验中基体开裂、纤维/基体界面脱粘和分层的 AE 信号进行有效聚类。Bohmann 等^[23]采用 AE 监测复合材料拉伸和 I 型分层试验,发现 K-means 对两种试验中的基体开裂、分层和纤维断裂 3 种 AE 信号的聚类效果良好。Sayer 等^[4]采用 FCM

算法对碳/环氧树脂材料开孔拉伸的 AE 信号进行聚类分析,成功识别出基体开裂、纤维断裂、纤维拔出、纤维/基体界面脱粘和分层。根据上述研究可以分析出,AE 传感器是进行损伤模式识别所需数据的主要来源,这是因为 AE 数据维度较高,能更好区分不同的损伤模式;而电阻传感器和光纤光栅传感器(Fiber Bragg grating sensors, FBGs)数据维度低,并通常采用平均值和方差等简单统计特征进行聚类分析,因而损伤模式识别的精度较低。

然而,基于有监督学习算法的损伤模式识别,其数据集来源不局限于 AE 的波形数据,还可以通过 FBG 和振动传感器等构建带有标签的一维监测数据集^[26-29]。如将 AE 监测数据通过连续小波变换编码方法生成二维图像,或者直接利用 X 光^[30]、Micro-CT^[31]、热成像^[32-37]等无损检测技术来构建二维图像数据集,然后通过深度学习方法也可以对损伤模式进行识别^[38-43]。Rajabzadeh 等^[44]对玻璃纤维试样进行拉压疲劳试验和 I 型分层试验,通过嵌入的 FBGs 来监测基体开裂和分层损伤,并采用 SVM 算法对损伤模式进行分类识别,识别准确率分别为 97.2% 和 93.8%。Helwing 等^[45]使用 Micro-CT 对各向同性碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber reinforced plastics, CFRPs)的损伤演化进行了分析,如图 3(a)所示,首先使用 X-射线对循环拉伸载荷后的试样进行损伤检测,并对 Micro-CT 图像进行切片和图像分割,将图像中的不同损伤机制区域标记出来;图 3(b)为将 Micro-CT 图像中的损伤机制进行标记后的 3D 渲染图,利用 CNN 从 Micro-CT 图像中学习损伤机制的特征并进行分类;最后,利用 Micro-CT 图像的密度信息,从刚度降低角度对纤维断裂、基体裂纹、分层等损伤模式进行了定量分析,如图 3(c)所示。

研究表明,二维数据集可提供比一维数据集更全面的特征表达。例如:(1)对于 AE 波形数据,二维数据集可由时间和频率构成,而一维数据集只能提供时间信息;(2)Micro-CT 和 X 射线等无损检测技术生成的二维图像数据集具有更丰富的特征,包括密度差异、几何形状、边缘信息、纹理特征和局部细节等。二维数据集可将这些不同方面的信息整合在一起,将更全面的特征表达提供给机器学习模型,有助于机器学习模型更好地区分不同的损伤模式,并提高模型的准确性和泛化能力。特别是 CNN 等深度学习模型,由于在图像处理和分析方面表现出色,已经成为许多领域机器学习的标配工具。

2.2 损伤位置识别

基于 AE、导波、压阻传感器等先进的 SHM 技术^[46-49],利用机器学习算法可以在不考虑物理特性的非线性变化的情况下预测损伤位置^[50-51]。当前,应用在 FRPs 损伤定位上的机器学习模型主要有 ANN、CNN 和传统的机器学习算法。在基于 ANN 模型的损伤定位研究方面, Farhangdoust 等^[52]将 ANN 与外差效应法相结合用于复合材料板的缺陷定位,利用振动传感器采集 8 个位置的振幅响应作为数据集并用于训练 ANN 神经网络,最后通过神经网络预测脱粘点的位置,得到 ANN 的线性相关系数为 0.99,从而验证了该定位方法的有效性。Tran-Ngoc 等^[47]通过进化算法进一步提高了 ANN 对 CFRP 损伤定位的精度,优化后的 ANN 相比于传统的 ANN,其输出损伤位置的均方误差由 0.1038 降低至 0.0661。Fu 等^[51]提出了一种基于反向传播 ANN 的 AE 源定位智能算法,将 4 个 AE 传感器埋入到 CFRP 层合板中,用来定位撞击点位置,试验结果表明,该算法的最大误差为 6.3 mm。

在 CNN 模型用于损伤定位研究方面,Cui 等^[48]设计了一种 1D-CNN

算法,结合超声导波技术实现了对复合材料层合板的损伤成像,能够对蒙皮和翼缘等关键区域进行损伤定位。Lin 等^[53]从构建的全尺寸复合材料机翼数字孪生有限元模型中提取应变数据,输入 CNN 模型用于损伤定位预测,并设置了损伤坐标误差阈值为 1.5、2 和 2.5,结果发现预测损伤坐标误差阈值的总体准确率分别提高到 83%、95% 和 99%。为了对比不同 CNN 结构的定位精度, Park 等^[14]将大尺寸 CFRP 层合板分为 16 个部分,每个部分又包含 5 个子集,由此对 80 个位置施加循环弯曲载荷(图 4(a));按照图 4(b)的流程,根据导电 CFRP 的自感知电阻获取了图像数据集。在此基础上,采用 CNN (80 classes)、Hierarchical CNN 和 CNN (2 coordinates) 3 种网络结构

分别进行了损伤定位的研究,如图 5(a)~(c)所示^[14]。其中,图 5(a)表示该 CNN 被设计成直接对 80 个损伤位置进行分类以确定损伤位置;图 5(b)表示该 CNN 结构是先对 16 个子部分进行分类,然后再对每个子部分的 5 个子集部分进行分类,从而来识别损伤位置;图 5(c)表示该 CNN 结构与上述两种 CNN 不同,采用回归层 (Regression) 直接计算出 CFRP 中的弯曲位置坐标;而图 5(d)给出了预测结果,表明 CNN (80 classes) 展示出最低的损伤定位误差,定位距离误差小于 50 mm。

在应用传统机器学习算法进行损伤定位研究方面, Gwon 等^[54]使用 SVM 算法识别了复合材料板上的加载位置,混淆矩阵显示该模型对负载位置的分类准确率达 99.8%。

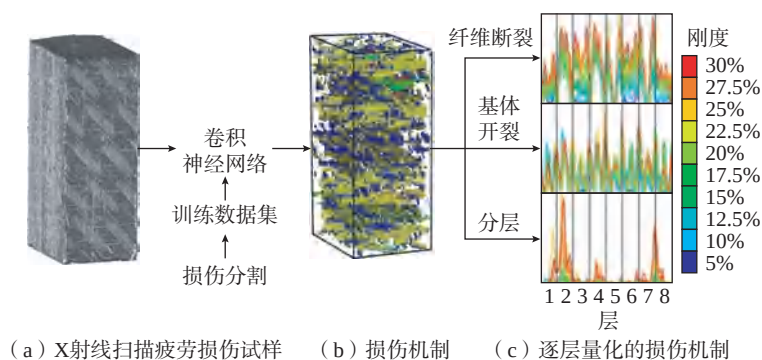


图 3 应用深度学习方法分析 CFRPs 疲劳试件的 Micro-CT 断层扫描图片^[45]

Fig.3 Applying deep learning methods to analyze Micro-CT tomography images of CFRPs fatigue specimens^[45]

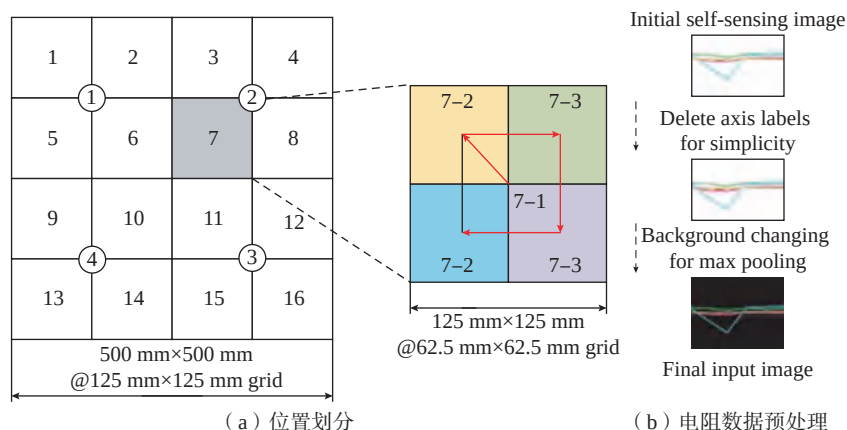


图 4 损伤位置及自感知数据预处理^[14]

Fig.4 Schematic of damage localization section division and pre-processing of self-sensing input image data^[14]

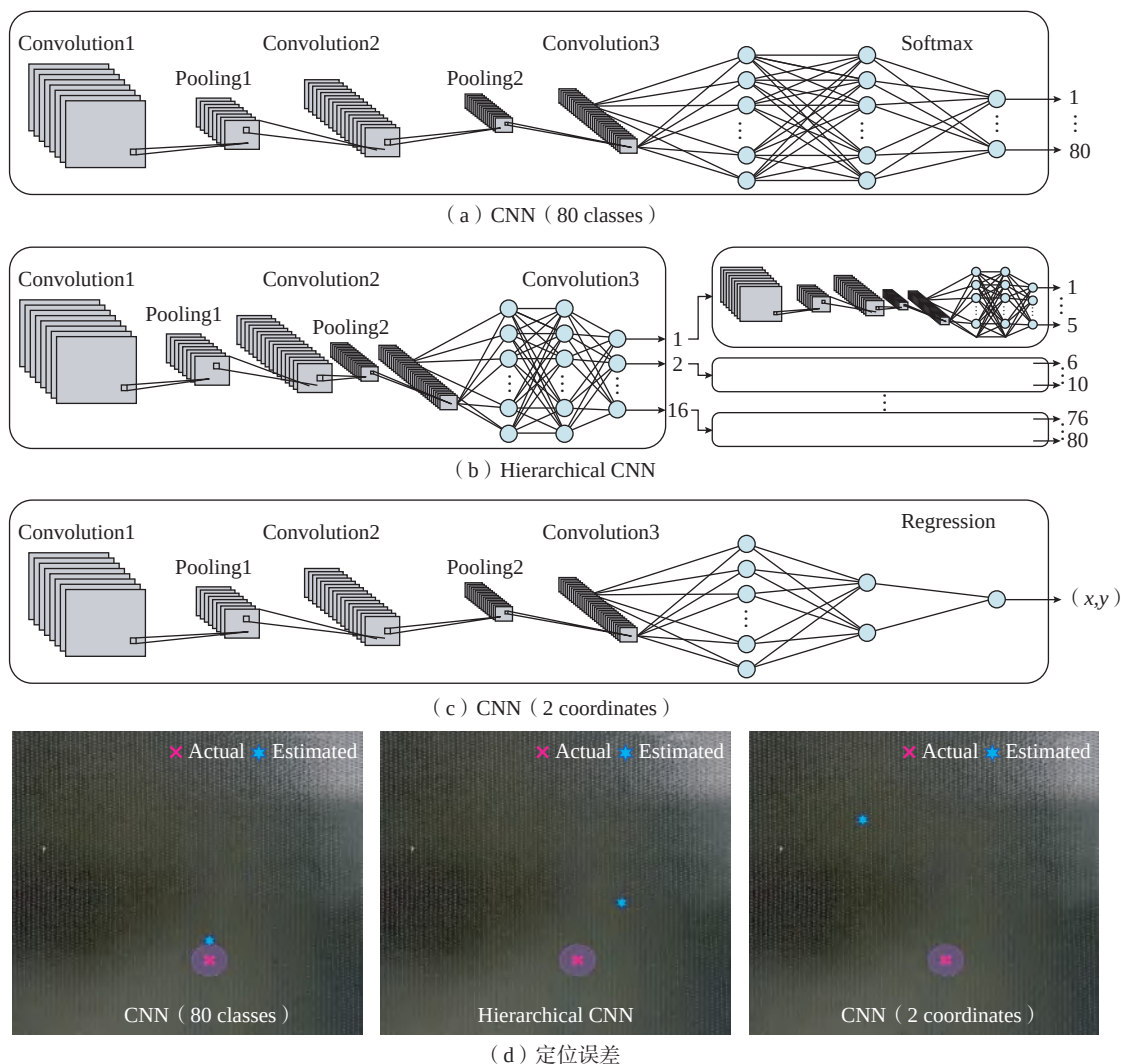


图5 采用不同 CNN 结构下的平均定位距离误差^[14]

Fig.5 Average localization distance error according to different CNN architectures^[14]

Lu 等^[55]对 CFRP 层合板进行落球冲击试验并使用 FBG 传感器采集包含损伤信息的响应信号,利用 SVM 对损伤位置的识别准确率达到 90% 以上。与传统机器学习算法相比,深度学习算法可自动学习数据中的特征表示,无需人工设计。

对于复合材料结构损伤定位这样的复杂任务,数据可能具有高度的非线性和抽象性,传统机器学习算法可能需要手动选择和提取特征,这将导致信息丢失或不完整。而深度学习算法通常具有较大的灵活性和扩展性,可通过调整网络结构、优化算法和增加训练数据等方式来改进模型性能。相比之下,传统机器学习算

法可能受限于特定的数据和特征表示,难以在复杂任务中表现出理想的性能^[52,56-58]。

2.3 损伤程度识别

当前,机器学习方法在 FRPs 损伤程度识别上的研究可以归纳为两个方面:基于传统特征的机器学习方法和基于深度学习的端到端方法^[59-61]。基于传统特征的机器学习方法,主要是利用传统的特征提取技术(例如时域特征、频域特征或小波特征等)将 FRPs 损伤监测的信号数据转化为数值特征表示,然后利用 SVM、多层感知器、决策树等机器学习算法对 FRPs 的损伤状态进行评估。Mardanshahi 等^[15]对基体裂纹密度

分别为 0.05、0.15 和 0.25 的玻璃纤维试样进行拉伸试验和导波监测,并从采集信号中提取时/频域特征用于模型训练,结果表明,SVM、线性向量量化算法和多层感知器对基体裂纹的分类准确率分别为 91.7%、88.9% 和 77.8%。Marani 等^[62]提出了一种通过脉冲热成像对复合材料缺陷进行自动分类的新方法,使用决策树、集成决策树和 K-means 3 种分类器对 CFRP 中预设的两种不同尺寸缺陷进行分类,结果表明,集成决策树分类器在三者之中分类效果最好,模型的精确率和召回率分别为 89.87% 和 73.67%。Datta 等^[63]对 CFRP 层合板进行落球冲击试验并

使用 FBGs 采集包含损伤信息的结构动力响应信号,提取信号的峰值、平均值、标准偏差和能量指数 4 个特征作为最小二乘 SVM 模型的输入,结果显示该模型能够以约 3 J 的平均误差预测撞击能量。

在应用深度学习进行损伤程度研究方面,除数据集标签不同外,损伤识别程度与图 2 (b) 所示的有监督损伤模式识别流程并无差别。如图 6 所示,Guha 等^[14]使用 3 种不同质量的砝码代表 3 个损伤级别,分别对 3 种 CFRP 层合板进行弯曲试验,并利用 CFRP 的自感知电阻数据构建数据集。由于损伤级别共有 3 种,所以将电阻数据集经过卷积及池化后输出为 3 个类别来对 3 种损伤程度进行预测(图 6 (a)),其损伤程度识别准确率超过 88% (图 6 (b)),并且不受 CFRP 类型和铺层顺序的影响。Damm 等^[64]利用压电传感器对 CFRP 冲击试验进行实时监测,使用自动冲击台设置了 3 种冲击能量水平,通过 CNN 实现了对冲击能量的识别,模型预测准确率达 98.68%。不同于从试验中获取数据集,Lin 等^[53]基于不同飞行载荷情况下的应变数据样本,在有限元模型中以 20% 的增量将全尺寸复合材料机翼的模量(或刚度)从 80% 降低到 20% 来生成应变数据,利用 CNN 模型对机翼的损伤程度进行识别,总体损伤程度识别准确率最高可达 99.9%。

目前,机器学习仅能对裂纹密度、缺陷尺寸、载荷水平等单一损伤程度指标进行识别。然而,FRPs 损伤程度识别涉及不同类型、形状、尺寸的损伤,并且受到各种不同工况和环境因素的影响,这增加了对模型泛化能力的要求。未来应考虑采用多任务学习、联合模型设计和数据融合等方法,实现基于深度学习的复合材料损伤程度的多目标识别,并能够更全面、更准确地评估复合材料的损伤情况。

3 机器学习算法在复合材料 SHM 领域的发展趋势

3.1 多源异构数据库平台的建立和管理

随着人工智能水平的不断发展和计算机性能的不断提高,基于机器学习的复合材料 SHM 研究将越来越深入。由于 FRPs 复杂的损伤机制和服役环境的多样性,监测数据还存在样本容量不足问题,这使机器学习的自动学习优势不能完全体现,进而影响机器学习模型的泛化学习能力^[65]。随着自动化程度提高、传感技术进步、数据采集系统采样频率及计算能力提升,越来越多的传感技术可用于监测复合材料的结构损伤,监测数据的类型和规模将显著增长。不同监测数据源所在的操作系统和管理系统不同,数据的存储模式和逻辑结构不同,数据的产生时间、使用场所和代码协议等不同,这造成了数据的“多源”特征。不同类型的数据在形成过程中没有统一的标准,因此造成了数据“异构”的特征。因此,应当建立复合材料 SHM 数据库平台,对复合材料 SHM 数据集进行整合,实现不同结构、不同类型、不同

研究方向的数据之间的信息资源、硬件设备资源和人力资源的合并和共享。

3.2 多源融合数据的特征提取技术

当前研究中所采用的数据获取技术较为单一,因此获得的关于复合材料结构健康状况的信息仍然十分局限,仅依靠一种技术难以完全实现复合材料的损伤表征和结构的状态监测^[66]。因此,有必要将声发射、应变测量、振动分析和机器视觉等不同类型的监测技术结合使用,从多个角度实现结构健康状况的解读和信息获取。为了发挥多源异构监测数据的优势,需要发展先进的信号处理技术来分析和提取多源传感器数据的固有特征,降低噪声、环境变异性及环境激励对信号特征提取的影响,采用适当的机器学习算法在数据级、特征级和决策级方面进行多层次融合,从而提高复合材料结构损伤诊断的可靠性。

3.3 基于多种深度学习方法融合的复合材料结构损伤模式识别体系

当前基于机器学习的复合材料 SHM 研究还存在一定局限性,单一的诊断模型及有限的监测数据会导致模型无法预测损伤标签以外的情况^[67]。然而,创建一个涵盖所有可

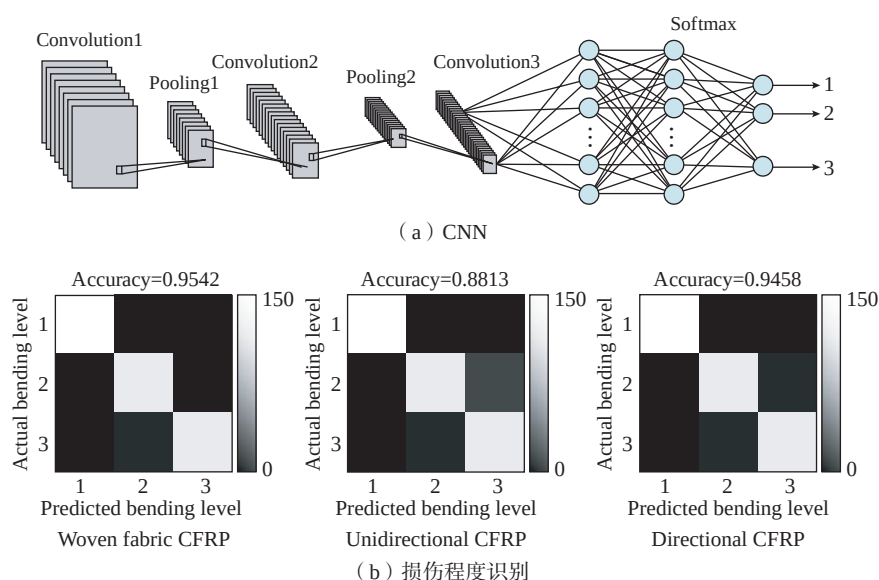


图 6 损伤程度识别的 CNN 模型和混淆矩阵^[14]

Fig.6 CNN model and confusion matrix for bending severity classification^[14]

能的损伤特征并包含所有意外现象的训练数据集是不切实际的。未来应考虑利用先进的特征提取技术对多源异构监测数据进行特征提取,通过强化学习、迁移学习、深度学习等多种机器学习算法的集成,构建复合材料结构损伤多特征自适应表征和定量识别的深度诊断网络。

3.4 基于数字孪生的复合材料结构全生命周期管理

随着测试技术和信息技术的快速发展,复合材料 SHM 应不断向可视化、智能化和数字化方向转变。数字孪生以数字化的形式可在虚拟空间中构建与物理世界一致的高保真复合材料结构模型,进而突破物理条件的限制^[68]。通过对测量数据和机器学习模型双驱动的仿真、预测、监控、优化和控制,从复合材料结构全生命周期管理的需求出发,对复合材料结构在设计、制造、应用和自修复各阶段进行分析。同时,将数字孪生技术与云计算、5G、大数据、区块链、AI 等技术手段相结合,可形成复合材料结构的智能诊断系统。

4 结论

本文首先介绍了机器学习的常用算法,然后从复合材料损伤模式识别、损伤位置识别和损伤程度识别 3 个方面简述了机器学习在树脂基复合材料 SHM 领域的研究进展,最后从数据库建立、特征提取技术、先进深度学习算法和数字孪生技术 4 个角度讨论了机器学习在树脂基复合材料 SHM 领域的发展趋势。目前,机器学习在树脂基复合材料 SHM 领域的研究还处于起步阶段,但已经展示出了非凡的潜力。机器学习的应用,为提高复杂服役环境下复合材料结构损伤模式识别和损伤定量监测的准确性和鲁棒性提供了有效途径。有理由相信,随着人工智能技术突飞猛进的发展,下一代针对纤维增强树脂基复合材料的健康预测管理

系统将会在航空航天等领域得以高效应用。

参考文献

- [1] 白生宝,肖迎春,刘国强,等.飞机结构健康监测策略研究[J].兵器装备工程学报,2024,45(2):24-36.
- BAI Shengbao, XIAO Yingchun, LIU Guoqiang, et al. Research on aircraft structural health monitoring strategy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(2): 24-36.
- [2] ZHOU W, ZHAO W Z, ZHANG Y N, et al. Cluster analysis of acoustic emission signals and deformation measurement for delaminated glass fiber epoxy composites[J]. Composite Structures, 2018, 195: 349-358.
- [3] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. Information Sciences, 2023, 622: 178-210.
- [4] SAYAR H, AZADI M, GHASEMI-GHALEBAHMAN A, et al. Clustering effect on damage mechanisms in open-hole laminated carbon/epoxy composite under constant tensile loading rate, using acoustic emission[J]. Composite Structures, 2018, 204: 1-11.
- [5] EMADEDIN HASHEMI S, GHOLIAN-JOUYBARI, MOSTAFA H K. A fuzzy C-means algorithm for optimizing data clustering[J]. Expert Systems With Applications, 2023, 227: 120377.
- [6] LICEN S, ASTEL A, TSAKOVSKI S. Self-organizing map algorithm for assessing spatial and temporal patterns of pollutants in environmental compartments: A review[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 878: 163084.
- [7] GODIN N, HUGUET S, GAERTNER R. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites[J]. NDT & E International, 2005, 38(4): 299-309.
- [8] RAUTELA M, SENTHILNATH J, MONACO E, et al. Delamination prediction in composite panels using unsupervised-feature learning methods with wavelet-enhanced guided wave representations[J]. Composite Structures, 2022, 291: 115579.
- [9] JANA D, PATIL J, HERKAL S, et al. CNN and Convolutional Autoencoder

(CAE) based real-time sensor fault detection, localization, and correction[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2022, 169: 108723.

[10] XU D, LIU P F, CHEN Z P. Damage mode identification and singular signal detection of composite wind turbine blade using acoustic emission[J]. Composite Structures, 2021, 255: 112954.

[11] ZHANG C H, XIE B, ZHANG Y R. Reverse-nearest-neighbor-based clustering by fast search and find of density peaks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2023, 32(6): 1341-1354.

[12] ROY A, CHAKRABORTY S. Support vector machine in structural reliability analysis: A review[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 233: 109126.

[13] MARDANSHAHI A, NASIR V, KAZEMIRAD S, et al. Detection and classification of matrix cracking in laminated composites using guided wave propagation and artificial neural networks[J]. Composite Structures, 2020, 246: 112403.

[14] GUHA S, JANA R K, SANYAL M K. Artificial neural network approaches for disaster management: A literature review[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 81: 103276.

[15] HRAIBA A, TOUIL A, MOUSRIJ A. Artificial neural network based hybrid metaheuristics for reliability analysis[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(1): 654-660.

[16] LEE I Y, JANG J, PARK Y B. Advanced structural health monitoring in carbon fiber-reinforced plastic using real-time self-sensing data and convolutional neural network architectures[J]. Materials & Design, 2022, 224: 111348.

[17] KHERRAKI A, EL OUAZZANI R. Deep convolutional neural networks architecture for an efficient emergency vehicle classification in real-time traffic monitoring[J]. IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI), 2022, 11(1): 110.

[18] LEE I Y, ROH H D, PARK H W, et al. Advanced non-destructive evaluation of impact damage growth in carbon-fiber-reinforced plastic by electromechanical analysis and machine learning clustering[J]. Composites Science and Technology, 2022, 218: 109094.

[19] MCCRORY J P, AL-JUMAILI S K, CRIVELLI D, et al. Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 68:

424–430.

[20] SAUSE M, MÜLLER T, HOROSCHENKOFF A, et al. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 72(2): 167–174.

[21] GUTKIN R, GREEN C J, VANGRATTANACHAI S, et al. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(4): 1393–1407.

[22] MONTI A, EL MAHI A, JENDLI Z, et al. Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 100–110.

[23] BOHMANN T, SCHLAMP M, EHRLICH I. Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics[J]. *Composites Part B*, 2018, 155: 444–451.

[24] HAO W F, YUAN Z R, TANG C, et al. Acoustic emission monitoring of damage progression in 3D braiding composite shafts during torsional tests[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 141–149.

[25] OZ F E, ERSOY N, LOMOV S V. Do high frequency acoustic emission events always represent fibre failure in CFRP laminates?[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 103: 230–235.

[26] CHANDRASHEKHAR M, GANGULI R. Damage assessment of composite plate structures with material and measurement uncertainty[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 75: 75–93.

[27] PANOPOULOU A, LOUTAS T, ROULIAS D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(7–8): 445–457.

[28] CHUKWUJEKWU OKAFOR A, CHANDRASHEKHARA K, JIANG Y P. Delamination prediction in composite beams with built-in piezoelectric devices using modal analysis and neural network[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(3): 338–347.

[29] TIBADUIZA D, TORRES-ARREDONDO M Á, VITOLA J, et al. A damage classification approach for structural health monitoring using machine learning[J]. *Complexity*, 2018, 2018: 5081283.

[30] GONG Y F, LUO J, SHAO H L, et al. A transfer learning object detection model for defects detection in X-ray images of spacecraft composite structures[J]. *Composite Structures*, 2022, 284: 115136.

[31] SAMMONS D, WINFREE W P, BURKE E, et al. Segmenting delaminations in carbon fiber reinforced polymer composite CT using convolutional neural networks[C]// *AIP Conference Proceedings*. Minneapolis: AIP Publishing LLC, 2016: 110014.

[32] CHENG L L, TONG Z F, XIE S J, et al. IRT-GAN: A generative adversarial network with a multi-headed fusion strategy for automated defect detection in composites using infrared thermography[J]. *Composite Structures*, 2022, 290: 115543.

[33] BANG H T, PARK S, JEON H. Defect identification in composite materials via thermography and deep learning techniques[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112405.

[34] SARHADI A, ALBUQUERQUE R Q, DEMLEITNER M, et al. Machine learning based thermal imaging damage detection in glass-epoxy composite materials[J]. *Composite Structures*, 2022, 295: 115786.

[35] SAEED N, KING N, SAID Z, et al. Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 102: 103048.

[36] LUO Q, GAO B, WOO W L, et al. Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection[J]. *NDT & E International*, 2019, 108: 102164.

[37] ZHENG K Y, CHANG Y S, WANG K H, et al. Thermographic clustering analysis for defect detection in CFRP structures[J]. *Polymer Testing*, 2016, 49: 73–81.

[38] BHAT C, BHAT M R, MURTHY C R L. Characterization of failure modes in CFRP composites—An ANN approach[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(3): 257–276.

[39] WIRTZ S F, BEGANOVIC N, SÖFFKER D. Investigation of damage detectability in composites using frequency-based classification of acoustic emission measurements[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(4): 1207–1218.

[40] DOAND D, RAMASSO E, PLACET V, et al. An unsupervised pattern recognition approach for AE data originating from fatigue tests on polymer-composite materials[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 64–65: 465–478.

2015, 64–65: 465–478.

[41] TANG J L, SOUA S, MARES C, et al. A pattern recognition approach to acoustic emission data originating from fatigue of wind turbine blades[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2507.

[42] ECH-CHOUDANY Y, ASSARAR M, SCIDA D, et al. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 123: 123–132.

[43] BANERJEE P, PALANISAMY R P, HAQ M, et al. Data-driven Prognosis of fatigue-induced delamination in composites using optical and acoustic NDE methods[C]// *2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*. San Francisco: IEEE, 2019.

[44] RAJABZADEH A, HENDRIKS R C, HEUSDENS R, et al. Classification of composite damage from FBG load monitoring signals[J]. *SPIE*, 2017: 1016831.

[45] HELWING R, HÜLSBUSCH D, WALTHER F. Deep learning method for analysis and segmentation of fatigue damage in X-ray computed tomography data for fiber-reinforced polymers[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 230: 109781.

[46] KHATIR S, TIACHACHT S, LE THANH C, et al. An improved artificial neural network using arithmetic optimization algorithm for damage assessment in FGM composite plates[J]. *Composite Structures*, 2021, 273: 114287.

[47] TRAN-NGOC H, KHATIR S, HO-KHAC H, et al. Efficient Artificial neural networks based on a hybrid metaheuristic optimization algorithm for damage detection in laminated composite structures[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113339.

[48] CUI R T, AZUARA G, LANZA DI SCALEA F, et al. Damage imaging in skin-stringer composite aircraft panel by ultrasonic-guided waves using deep learning with convolutional neural network[J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(3): 1123–1138.

[49] ZENZEN R, KHATIR S, BELAIDI I, et al. A modified transmissibility indicator and artificial neural network for damage identification and quantification in laminated composite structures[J]. *Composite Structures*, 2020, 248: 112497.

[50] MORTEZA S, RAMAZAN-ALI J T, MOHAMMAD-HADI P, et al. Damage

detection on rectangular laminated composite plates using wavelet based convolutional neural network technique[J]. *Composite Structures*, 2021, 278: 114656.

[51] FU T, ZHANG Z C, LIU Y J, et al. Development of an artificial neural network for source localization using a fiber optic acoustic emission sensor array[J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(2): 168–177.

[52] FARHANGDOUST S, TASHAKORI S, BAGHALIAN A, et al. Prediction of damage location in composite plates using artificial neural network modeling[C]//*Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* 2019. Denver: SPIE, 2019: 1097001.

[53] LIN M X, GUO S J, HE S, et al. Structure health monitoring of a composite wing based on flight load and strain data using deep learning method[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115305.

[54] GWON Y S, FEKRMANDI H. A data-driven approach of load monitoring on laminated composite plates using support vector machine[C]//*SPIE Smart Structures and Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. Denver, 2018, 10602: 21–28.

[55] LU S Z, JIANG M S, SUI Q M, et al. Damage identification system of CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 400–406.

[56] MOGHADDAM M, CHEN Q L, DESHMUKH A V. A neuro-inspired computational

model for adaptive fault diagnosis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 140: 112879.

[57] KESAVAN A, JOHN S, HERSZBERG I. Structural health monitoring of composite structures using artificial intelligence protocols[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008, 19(1): 63–72.

[58] JUST-AGOSTO F, SERRANO D, SHAFIQ B, et al. Neural network based nondestructive evaluation of sandwich composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(1): 217–225.

[59] GANGULI R. A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2001, 12(6): 397–407.

[60] SU Z Q, YE L. Quantitative damage prediction for composite laminates based on wave propagation and artificial neural networks[J]. *Structural Health Monitoring*, 2005, 4(1): 57–66.

[61] RAMU S A, JOHNSON V T. Damage assessment of composite structures—A fuzzy logic integrated neural network approach[J]. *Computers & Structures*, 1995, 57(3): 491–502.

[62] MARANI R, PALUMBO D, RENÒ V, et al. Modeling and classification of defects in CFRP laminates by thermal non-destructive testing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 135: 129–141.

[63] DATTA A, AUGUSTIN M J,

GUPTA N, et al. Impact localization and severity estimation on composite structure using fiber Bragg grating sensors by least square support vector regression[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(12): 4463–4470.

[64] DAMM A M, SPITZMULLER C, RAICHLE A T S, et al. Deep learning for impact detection in composite plates with sparsely integrated sensors[J]. *Smart Material Structures*, 2020, 29(12): 125014.

[65] PAN Z Z, ZHANG Z Y, MENG Z, et al. A novel fault classification feature extraction method for rolling bearing based on multi-sensor fusion technology and EB-1D-TP encoding algorithm[J]. *ISA Transactions*, 2023, 142: 427–444.

[66] MEHENNI T, MOUSSAOUI A. Data mining from multiple heterogeneous relational databases using decision tree classification[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(13): 1768–1775.

[67] YANG B, LEE C G, LEI Y G, et al. Deep partial transfer learning network: A method to selectively transfer diagnostic knowledge across related machines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107618.

[68] WANG Y C, TAO F, ZUO Y, et al. Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials[J]. *Engineering*, 2023, 22: 23–33.

通讯作者: 刘玲, 教授, 博士, 研究方向为复合材料结构与力学、功能复合材料。

Research Progress on Machine Learning Methods in Structural Health Monitoring of Composite Materials

JIANG Xiaowei, ZHANG Wenjin, LIU Ling
(Tongji University, Shanghai 200092, China)

[ABSTRACT] The use of fiber reinforced plastics (FRPs) is on the rise in aerospace and other high-tech fields, owing to their high specific strength/stiffness, design flexibility, and corrosion resistance. Structural health monitoring (SHM) is therefore crucial to ensure structural safety. Recently, machine learning has emerged as a promising approach for SHM of FRPs. Data-driven methods that employ machine learning algorithms have shown higher accuracy, robustness, and efficiency in SHM. After the brief introduction of the machine learning algorithms commonly used in SHM of FRPs, the applications of machine learning in SHM are reviewed mainly from the following aspects: Damage pattern recognition, damage localization, and damage degree recognition of FRPs. Finally, the future development trend of SHM based on machine learning in FRPs are discussed.

Keywords: Composite materials; Sensor; Structural health monitoring (SHM); Damage; Machine learning

(责编 晓月)

引文格式: 田童, 李建乐, 邓德双, 等. 飞行器结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 41–67, 98.

TIAN Tong, LI Jianle, DENG Deshuang, et al. Research progress of structural health monitoring technology for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 41–67, 98.

飞行器结构健康监测技术研究进展*

田童¹, 李建乐¹, 邓德双¹, 曾旭¹, 林奎旭¹, 董珊珊¹, 杨雷¹, 徐浩², 杨正岩³, 武湛君²

(1. 大连理工大学力学与航空航天学院, 大连 116024;

2. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024;

3. 江南大学, 无锡 214122)

[摘要] 结构健康监测技术有望在飞行器设计、服役和维护中发挥关键作用, 提高飞行器结构效率, 确保飞行器结构的安全性和可靠性。本文首先概述结构健康监测的基本概念及其适用范围, 强调其在航空航天领域中的重要性。随后, 针对结构健康监测技术在飞行器典型结构中的研究工作情况, 重点围绕冲击监测、超声导波损伤监测以及光纤传感器应变监测等先进技术进行详细讨论, 总结国内外研究现状、技术能力以及典型应用。最后, 指出飞行器结构健康监测面临的挑战性问题, 展望该技术在航空航天领域的应用前景。

关键词: 结构健康监测 (SHM); 冲击监测; 超声导波; 光纤光栅; 分布式光纤; 损伤诊断

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.041



田童

博士研究生, 研究方向为超声导波结构健康监测、深度学习。

当前, 新一代航空航天飞行器大量采用先进材料, 如高性能轻质合金和复合结构。纤维增强复合材料具有比强度 / 比刚度高、抗疲劳性能优异、可剪裁设计等诸多优点, 目前已广泛应用于飞行器主承力结构^[1]。空客 A350 与波音 787 的复合材料用量均超过 50%, F-35 战斗机的复合材料用量达 35%。我国针对 C929、歼-20 等多个在研与服役型号开展了关于先进复合材料的大量研究工作。然而, 航空航天飞行器结构服役期内撞击事件频繁, 易导致结构内部出现大面积分层、裂纹等多种不同类型的损伤, 当损伤积累到一定程度时将造成飞行器结构材料性能退化, 结构承载能力降低, 从而严重威胁飞行器结构的安全与完整性。为及时发现飞行器结构内部的损伤, 结构健康监测 (SHM) 技术应运而生。

结构健康监测技术依托先进传

感器网络, 在线获取结构健康状态相关信息, 通过先进的信号处理技术分析信号参数以此判断结构状态, 获得结构损伤与性能退化状态, 评估结构剩余寿命。结构健康监测技术可以降低装备的维护成本, 缩短结构装备维护时间^[2]。为确保结构的安全性、延长使用寿命、降低维护成本、提高飞行效率、满足监管要求, 在飞行器设计和运营中采用结构健康监测技术至关重要。结构健康监测为结构设计提供了重要的反馈机制, 通过实时监测和结构性能评估, 设计者能够获得关键数据, 了解结构实际运行状态。这有助于验证设计的可靠性和耐久性, 发现潜在问题并进行改进, 从而优化设计, 提高结构的安全性、可维护性和寿命, 推动结构工程领域的持续进步。同时, 可根据损伤诊断结果定制个性化单机运维方案, 相比传统的定期维护, 结构健康监测技术

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3402500, 2018YFA0702800); 国家自然科学基金 (12072056, 12102075, 12372129); 中国科协青年人才托举工程 (2022QNRC001)。

可大幅缩减运维成本,提升飞行时长。

为确保飞行器运行效率,需要深入关注一些关键结构位置,如机翼、机身、发动机部位、起落架、油箱等^[3-4]。这些结构面临疲劳、腐蚀、碰撞和设计缺陷等典型失效问题,可应用多种先进监测技术及时发现潜在问题,以便采取预防性措施,确保飞行器在长期运行中保持良好的状态及安全性。这些技术的协同应用旨在全面监测飞行器各处可能的损伤,以提高飞行器结构的可靠性、耐久性,确保整体运行的安全性。针对飞行器主要结构中健康监测的关键问题,本文介绍了基于飞行器结构常用的健康监测技术,包括飞行器结构状态监测和损伤诊断方法,重点阐述了各项技术的研究现状、关键问题和主要挑战,最后讨论了飞行器结构中的结构健康监测技术的发展趋势。

1 结构健康监测技术概述

结构健康监测技术通过实时监测飞行器结构的变化和性能状况,提前发现潜在问题,从而预测结构的健康状况,为维修和维护决策提供科学依据,保障飞行器的服役安全性和可靠性^[5]。多国逐步面向飞行器的结构监测技术领域开展立项研究^[6-7]。结构健康监测技术采用压电片、光纤、声发射等先进的传感器网络实时监测飞行器结构的疲劳裂纹、冲击引起的损伤、腐蚀和热疲劳等问题,及时地为损伤诊断提供关键信息,以确保采取必要的修复和维护措施,维持结构的健康状态,保障飞行器安全运行。可用于飞行器结构的健康监测技术可概括为表1^[8]。

结构健康监测是确保飞行器安全运行的关键环节,它聚焦于多个关键结构位置,包括机翼、机身、发动机部位、尾翼与升降舵、起落架、油箱等^[9]。在这些关键结构位置可能发生各种类型损伤,如疲劳裂纹、结构

变形、层间剥离和纤维断裂等^[4]。为及时发现这些问题并准确评估,采用了多种监测技术,包括超声导波检测、光纤光栅传感器、振动传感器、红外热成像、电流传感器及位移传感器等。可用于飞行器常见结构的材料及其损伤形式和监测技术可概括为表2^[4,9]。

2 飞行器结构冲击监测技术

航空航天复合材料结构在运输、服役过程中会不可避免地受到外部

撞击,使结构产生目不可检的损伤,严重威胁结构的安全性和完整性^[10-11]。实时监测复合材料结构遭受的外部撞击对保障结构安全性、降低结构维护费用等具有重要意义^[12]。冲击监测技术原理如图1所示,结构的监测区域内发生冲击事件时,会在结构中激发出导波信号,通过布置传感器网络(一般为压电^[13]、应变^[14]和加速度传感器^[15])接收结构中传播的导波信号,再利用先进的信号处理结合特定的算法即可实现对冲击位置的

表1 可用于飞行器的结构健康监测技术

Table 1 Structural health monitoring technologies applicable to aircraft

方法	缺点	优点	应用场合
应变片	局部信息、 线缆多	成本低、 可靠性较高	试验测试
光纤	横向信息少、 高频信号调制难	轻质、监测的范围大、 抗腐蚀、电磁兼容	试验或现场 热点区域
涡流	监测区域小、 局部信息	灵敏度高、 近表面或表面裂纹	金属结构
声发射	对环境噪声敏感、 信号解释难	布置灵活、 适用于复杂形状	在线监测 裂纹产生或扩展
机械阻抗	局部信息	成本低、 机械连接松动	在线监测 机械连接结构
超声导波	信号解释复杂、 易受环境影响	监测面积大、效率高、 离线或在线、主被动	大面积金属/复合材料 热点区域

表2 飞行器常见结构的材料类型和损伤监测技术手段^[4,9]

Table 2 Material types and damage monitoring techniques for common aircraft structures^[4,9]

飞行器结构	结构材料类型	主要损伤类型	现有监测技术
机翼(翼面、尾翼)	铝合金、碳纤维增强 复合材料(CFRP)	疲劳、裂纹、凹陷、 扭曲、纤维断裂	超声导波检测、光纤光栅 传感器、应变测量
机身(外壳、桁架)	铝合金、钛合金、 复合材料	腐蚀、裂纹、疲劳	振动传感器、C扫描
起落架	高强度的钢、铝合金 或钛合金	磨损、腐蚀、疲劳	位移传感器、应变测量
发动机	镍基合金、钢合金等 高温合金材料	磨损、裂纹、疲劳	红外热成像
贮箱	金属材料、复合材料	腐蚀、裂纹	超声检测、涡流检测、 光纤检测

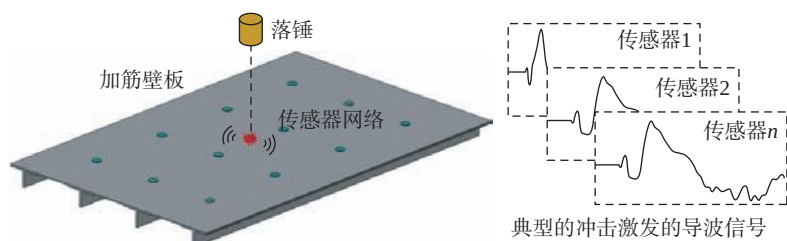


图1 冲击监测技术的原理

Fig.1 Principle of impact monitoring technology

估计及对冲击载荷历程的重构^[16]。

2.1 冲击定位及冲击载荷重构

2.1.1 冲击定位

时差法由于简单易行,是发展最早的冲击定位方法^[17-18]。它利用传感器和冲击源的几何位置关系建立非线性方程组,通过优化算法求解方程组来确定冲击位置。在这类方法中,最常用的是三角测量法^[19],它适用于各向同性结构^[20],而对于各向异性的航空航天复合材料结构,则需要事先获取各方向的波速分布。因此, Kundu 等^[21-23]对三角测量法进行了改进,使其适用于各向异性的复合材料结构而不需要全方位波速。此外,赵刚等^[24]提出了四点圆弧算法来定位碳纤维层合板上的冲击源,与三角测量法相比,该算法提高了定位精度。这类方法受到测量噪声和边界反射的影响,常常难以获取精准的波达时间差,导致应用受到限制。

时间反转法的优势是不需要传播媒介的先验知识,并且具有良好的抗噪性能和成像聚焦度。该方法基于弹性波传播的互易性,对传感器接收到的信号根据“先至后发,后至先发”的原则进行时间反转聚焦来确定冲击源位置。邱雷等^[25]采用香农复数小波变换计算 Lamb 的相速度,提出基于相位合成的虚拟时间反转聚焦成像方法,通过在飞机翼盒上进行冲击概率成像来确定冲击位置。Miniaci 等^[26]发展了基于时间反转和激光测振全波场测量的冲击定位方法,该方法不需要计算波速就能预

测加筋铝板上的冲击位置。不过上述时间反转方法要么需要测定波速,要么依赖于全波场测量设备,从而不利于在结构冲击监测领域的工程应用。

多重信号分类算法目前已在无线通信、雷达、医学影像等领域得到广泛的应用。苏永振等^[27]将其引入到冲击定位中,该方法的核心是利用冲击信号的信号子空间和噪声子空间的正交性估计冲击应力波的人射方向等参数。然而,该方法是以前场假设作为前提的,对距离传感器较近区域的冲击源定位精度较低。为此,钟永腾等^[28]研究了一种基于梅花阵列的多重信号分类算法,该算法能够实现监测区域全方位角度的冲击定位。可是这类方法一般计算复杂度较高,后续研究可以考虑对算法进行优化。

参考数据库法是从结构上划分训练点获取参考信号并建立数据库的,通过对比收集到的冲击信号与参考信号之间的相似度确定冲击位置,采用较少传感器就可实现可接受的定位精度。Jang 等^[29]提出了一种基于均方根的冲击位置识别方法,以当前冲击信号与参考信号的均方根度量相似性来预测冲击位置,在含加强筋的壁板上布置 4 个传感器就可识别冲击位置。Liu 等^[30]应用一种两步法提高这类方法在传感器低采样率情况下的冲击定位精度。然而,参考数据库法的定位效果取决于训练点的数量,缺乏参考点时定位误差大。

实际工程应用中的飞行器结构十分复杂,基于上述物理模型的方法定位

效果较差。因此,包括人工神经网络(ANN)^[31-32]、多项式回归^[33]、广义回归神经网络(GRNN)^[34]、径向基函数网络(RBFN)^[35-36]、极限学习机(ELM)^[37-38]、支持向量回归(SVR)^[39-40]、卷积神经网络(CNN)^[41-42]等在内的机器学习方法逐渐被一些学者引入到冲击定位当中。这类方法一般把冲击定位转化为回归问题实现冲击位置识别。例如, Ghajari 等^[43]将冲击应力波的到达时间作为输入,将冲击位置的坐标作为输出,通过超参数调优并训练人工神经网络,在含加强筋的复材板上实现了冲击定位。为了减小机器学习方法的冲击定位误差, Liu 等^[39]提出了一种基于多域特征融合的支持向量回归算法。但是,这类方法的难点在于:对于大面积的真实构件,需要建立庞大的数据库和大量的计算资源,使得这类方法目前难以实现工程应用。

上述 5 种冲击定位的特点及优缺点比较见表 3^[17, 25, 27, 29-30]。对于不同的结构形式,需要综合考虑传感器能够布置的区域以及不同冲击定位方法的优缺点,选择合适的冲击定位方法进行研究和应用。

2.1.2 冲击载荷重构

一旦确定了冲击位置,可以通过不同的算法进一步重建冲击载荷的时间历程。例如,许龙涛等^[44]利用改进的系统辨识方法,实现了对含加强筋的复合材料圆筒结构的冲击载荷历程重构。乔百杰等^[45]通过基于 L1 范数的正则化方法,利用收集到的传递函数重构悬臂薄板结构的冲击载荷,研究表明基于 L1 范数的正则化方法的计算稳定性比 Tikhonov 正则化方法要高。Samagassi 等^[46]提出了一种基于相关向量机的冲击载荷重建方法,该方法不但考虑了不确定性因素的影响,还能够同时重建多个冲击力。此外,如图 2 所示, Zargar 等^[42]应用一种 CNN-RNN 架构对加筋铝板进行冲击诊断,全波场

图像被输入到架构中的同时用于冲击定位和冲击载荷波形重构,这项研究促进了基于视觉的冲击监测系统在结构健康监测领域的发展。同时,Zargar 等^[47]提出一种基于物理信息网络的波场重建方法,通过分析重建的冲击产生波场,解决了推断冲击位置和冲击力历史的数学逆问题,预测的冲击位置精度为 93%。

冲击能量通常也可以看作是冲击载荷的输入,冲击能量的识别有助于预测结构损坏的程度、降低结构维护成本。Wu 等^[48]提出了一种基于基向量的冲击能量识别方法,运用理论和试验建立了传感器信号和冲击载荷之间的关系,首先采用位置基向量

识别冲击位置,然后使用能量基向量进一步识别冲击能量,该方法在复合材料板上识别精度较高。Wang 等^[49]将冲击响应信号看作时间序列,结合机器学习方法实现了铝合金机身结构的冲击能量识别。虽然冲击载荷重构方面已经取得了重要的进展,但是上述研究基本不考虑冲击损伤的影响。

2.2 时变环境及操作条件下的冲击监测

飞行器结构在服役环境中受变温度环境、测量噪声和动载荷等因素影响^[50-56],给冲击监测技术在实际工程中的应用带来了巨大的挑战。在实验室适用的算法在实际的工程应

用中往往可靠性较差甚至完全失效。为此,研究人员近年来为了推动冲击监测技术在时变环境及操作条件下的发展做出了巨大的努力。

变温度下的冲击监测方面, Kim 等^[57]提出了一种适用于不同温度的基于修正误差离群值的冲击定位算法,该算法在复合材料板上冲击定位的平均误差仅为 2.0 mm。武湛君等^[58]提出了一种自适应时间反转方法,该方法构建了以群速度和冲击位置坐标为变量的时间反转成像函数,在变温环境下依然能够识别加筋板上的冲击源位置。如图 3 所示,为了克服测量噪声对冲击识别的影响, Yu 等^[59-60]基于时间反转技术的时空聚焦性和时域谱单元孪生模型,同步实现了冲击定位和载荷波形重构,研究结果表明该方法在存在测量噪声的情况下依然能够精确识别复合材料板的冲击载荷。考虑动载荷的作用, Zhang 等^[61]开发了一种自适应滤波增强多重信号分类方法,该方法将冲击信号分解成不同频带的窄带波信号,以此来削弱动载荷分量的影响,在不同频率振动载荷作用下冲击识别鲁棒性较好。

此外, Seno 等^[62-66]采用数据驱动的方法来补偿时变环境及操作条件的影响,对于冲击位置及载荷幅值识别,在复杂的加筋板上做了大量验证工作。但是就目前而言,上述时变环境和操作条件都是人为模拟的,结构大部分为样件级,还缺乏典型航空航天结构在真实服役条件下的冲击监测技术的验证研究^[67-68]。

由于不同的冲击监测方法具有不同的优缺点,在不同应用场景下量化指标对冲击监测方法的选取具有重要意义。数据驱动方法方面, Liu 等^[30]采用基于小波包能量特征的参考数据库方法在监测区域范围为 320 mm × 320 mm 内使用 4 个 FBG 传感器进行冲击监测,传感器采样率仅为 5 kHz,最大定位误差只有 9.3 mm。

表 3 不同冲击定位方法的对比

Table 3 Comparison of different impact localization methods

方法	原理	优点	缺点
时差法 ^[17]	几何关系	简单易实现	易受测量噪声和边界反射干扰
时间反转 ^[25]	时间互易性	聚焦性强,无需结构的先验知识	需要较多的传感器数量或全波场测量设备
多重信号分类 ^[27]	信号子空间和噪声子空间的正交特性	成像分辨率高,抗噪声	计算复杂度高
参考数据库 ^[29]	信号相似度	消耗传感器数量较少	缺乏参考点时误差大
机器学习 ^[30]	回归	适用于复杂结构	需要大量数据样本,模型训练时间长

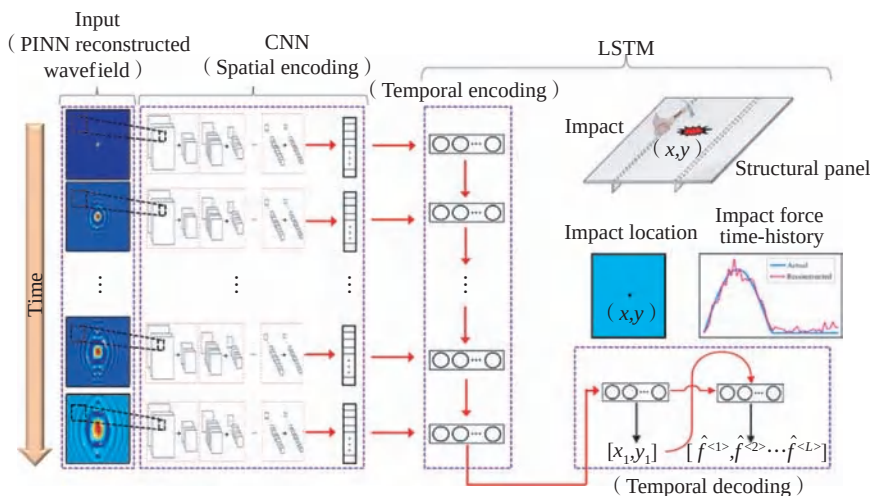


图 2 结合卷积神经网络-递归神经网络架构的冲击诊断^[42]

Fig.2 Impact diagnosis combined with convolutional neural network and recurrent neural network structure architecture^[42]

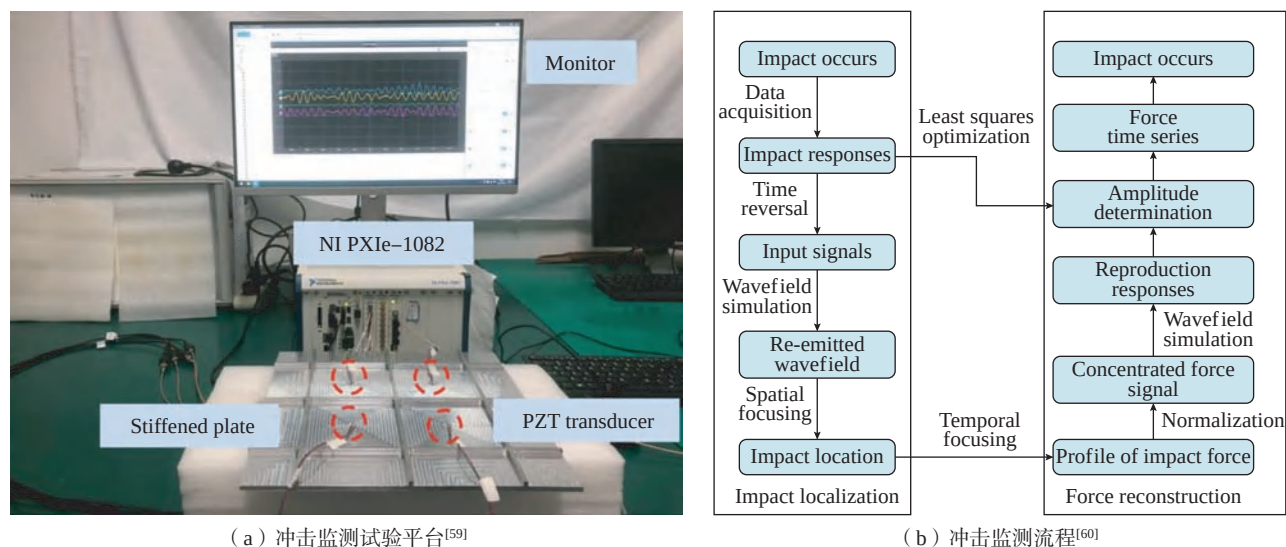


图3 基于虚拟时间反转技术和时域谱单元孪生模型的冲击监测

Fig.3 Impact monitoring based on virtual time reversal technique and time-domain spectral element twin model

Feng 等^[69] 将一维信号转化为二维图像,应用卷积神经网络模型在监测区域范围为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 内使用 4 个压电传感器进行冲击识别,最大误差为 23.7 mm 。物理方法方面, Sai 等^[70] 在 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的复合材料板上安装了 4 个 FBG 传感器,根据时间反转原理进行冲击定位的最大误差为 7.3 mm ,而采样率需要达到 1 MHz 。Jang 等^[71] 利用 4 个 FBG 传感器在 $600\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的加筋壁板上根据几何原理冲击定位,最大定位误差达到 90 mm 。Zhang 等^[72] 在 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的复合材料板上应用 7 个密集排列的线型压电阵列,基于多重信号分类原理实现了冲击位置识别,平均定位误差为 0.7 mm 。不同方法关于冲击监测的量化具体指标如表 4 所示^[30, 69-72]。可以看出,物理方法相比于数据驱动方法在采样率方面要求更高;数据驱动方法在使用少量传感器的情况下可以达到较高的定位精度,但是需要较多的训练样本。

本节综述了基于冲击监测技术的国内外进展。冲击监测技术主要分为冲击定位和冲击载荷重构两部分。目前,无论是在基于物理模型还

表4 不同方法关于冲击监测的量化指标

Table 4 Quantitative indicators of impact monitoring of different methods

方法	传感器数量 / 个	监测区域 / ($\text{mm} \times \text{mm}$)	训练样本	采样率 / kHz	平均定位误差 / mm	最大定位误差 / mm
参考数据库 ^[30]	4	320×320	289	5	5.0	9.3
机器学习 ^[69]	4	200×200	117	1×10^3	10.2	23.7
时间反转 ^[70]	4	400×400	—	1×10^3	10.8	7.3
几何方法 ^[71]	4	600×500	72	100	42	90
多重信号分类 ^[72]	7	500×500	—	1×10^4	0.7	12

是在机器学习的冲击诊断方面,都取得了大量应用。此外,考虑到时变环境及操作条件的影响,近年来国内外学者在实验室也开展了一些人为模拟服役环境的冲击监测方法研究。冲击监测技术功能性验证方面有望在典型航空航天结构的真实服役环境条件下取得重大突破。

3 基于超声导波的损伤诊断技术

基于超声导波的损伤诊断技术通过压电传感器引入外部激励,激发结构内的超声导波,并通过灵敏的压电传感器实时监测传播过程中的波形变化。超声导波技术作为一种先进且有效的结构健康监测手段,能够实现结构内部微小缺陷、损伤和疲

劳裂纹的高灵敏度监测,为飞行器的安全运行提供了有力支持。

3.1 超声导波原理

超声导波是由于波导介质中边界的存在,体波(纵波和横波)在上下边界发生多次反射、折射、模态转换和相互叠加形成的波^[73]。复合结构中传播的导波通常具有多模态特性、频散特性、衰减特性、方向性等复杂的传播特性。在线状态下超声导波的传播会发生变化,尤其受温度和应力的影响,会导致损伤的误判。超声导波不仅与材料参数相关,还与边界条件有关,这导致超声导波比传统超声体波更加复杂,具有多模态和频散特性,例如板中传播的 Lamb 波。Lamb 波有对称模态和反对称模态,其 Rayleigh-Lamb 频散方程如下。

对称模式:

$$\begin{array}{c} \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \\ \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \end{array}$$

反对称模式:

$$\begin{array}{c} \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \\ \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \\ \square\square\square\square\square\square \quad \square\square\square\square\square\square \end{array} \quad (1)$$

式中, h 、 k 、 c_L 、 c_T 、 ω 分别为板厚、波数、纵波声速、横波声速、角频率。

国内外对结构导波传播特性分析方法开展了研究,利用矩阵法^[74]、有限元法^[75]、波有限元法^[76-77]和半解析有限元法^[78-80]等对导波传播过程进行求解。北京工业大学何存富教授课题组^[81]通过研究波有限元结合勒让德正交多项式展开法对复合材料导波传播问题进行高效仿真。上海交通大学李富才教授课题组^[82]提出三维谱元模型处理复杂的结构问题。虽然有限元方法易于实现,并且适用于碳纤维复合材料层合板的多个铺层方向,但其计算时间较长。目前,传递矩阵法和全局矩阵法被广泛采用,传递矩阵法使用方便,但在处理大频厚积时可能出现数值不稳定的问题;而全局矩阵法则可以克服这种不稳定现象。

3.2 基于物理模型的损伤诊断技术

在较早期的损伤诊断技术中,通常采用几何形状的声源定位方法,包括三角测量法^[83]、四点圆弧法^[84]等,通过提取飞行时间(Time-of-flight, TOF)来解决目标声源,即损伤的定位问题。这种几何定位算法通常得到确定声源的几何坐标和其他目标声源的特征参数,比较而言,目前常用的诊断成像方法是以概率化图像幅值为特征参数来表征损伤存在的可能性大小的。下文简要介绍这几种冲击定位方法的原理及研究现状。

相控阵^[85]是一种由多个独立换能器元件(通常为PZT元件)组成的

阵列,可通过电子控制系统实现对各元件的精准时序控制,形成新的波阵面,从而可利用相控阵技术实现缺陷诊断。其主要原理:将各单元发射超声波至某聚焦点或扫描方向的波程差转为相位差,再由时序控制弥补相位差,从而控制总声场的声束焦点和轴线。相控阵波束成形可以看作是一种时空滤波过程,一系列来自不同方向的波经过相移加权后得到聚焦,使各阵元激励的波阵面发生同相叠加,可显著提高信噪比。Yu等^[86]研究了不同类型的阵列参数对相控阵的影响,包括阵列单元的个数、间距和几何排列。Malinowski等^[87]通过对传感器阵列进行优化,提出了二维阵列相控阵方法,与一维阵列相比,其角度盲区和近场盲区都缩小了。Wandowski等^[88]进一步将传感器布置设计与延时设置结合起来,得到了方向性更好的人射信号,实现了扫描区域的单点聚焦。在研究了相控阵方法在各向同性金属材料中的应用后,许多学者随后对相控阵在各向异性复合材料中的实现进行了研究^[89-91]。然而大多数相控阵方法没有考虑导波的色散,因此Kudela等^[92]提出了一种基于色散补偿的全焦相控阵损伤成像方法,经色散预补偿和后补偿的响应信号具有较高的成像精度。Yang等^[93]提出了一种基于频响函数(FRF)的相控阵成像方法,该方法将多重物理激励转化为虚拟激励,并在虚拟激励中实现弥散预补偿和后补偿,大大降低了损伤成像的复杂性。

空间-波数滤波器^[94]原理是当滤波器波数谱的方向与目标声源波数谱的方向一致时,声源的阵列空间采样信号可以通过,否则无法通过。波数是指在一个单位长度内有多少个波长,不仅反映了波动的空间频率,还间接包含了波的传播速度和方向等物理信息。空间-波数滤波器方法通过对结构中布置的压电传感

器阵列进行虚拟偏转,即对时域信号进行相位移动,实现对损伤散射信号的相干聚焦,继而实现对损伤的监测,具有无监测盲区、方法简单易行等优点,被广泛研究和应用。Engholm等^[95]提出一种基于最小方差无失真响应波束形成的空间波数滤波识别算法,该算法利用理论计算的色散曲线对色散进行补偿,具有良好的分辨率和抗干扰性能。刘彬等^[96]提出了一种无需导波传播速度的空间-波数域滤波损伤识别算法,该算法融合多维线性传感器阵列信息,可以有效识别出碳纤维层合板的损伤。Lakshmi^[97]提出了一种将模态滤波器与逆算法相结合的方法,该方法将损伤逆检测问题转化为约束优化问题,并采用多聚类混合自适应差分搜索算法进行求解,能够在减轻环境噪声干扰因素影响的同时,实现对损伤程度的定量识别。常琦等^[98]提出了一种基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法,在结构中央布置环形压电传感器阵列实现对结构的全方位扫描监测,消除了主动Lamb波空间滤波器监测方法中盲区及远场对监测效果的影响。

时间反转技术^[99]利用波传播过程中的时序信息,对信号进行时间反演,使信号在传播路径上的波前得到逆向传播,最终在目标位置上实现波的聚焦。时间反转技术的基本原理:利用介质中传播的波动的时间可逆性,即波在介质中沿相同路径反向传播时会重新聚焦到最初的波源位置,实现信号的时间反转和空间聚焦。Agrahari等^[99]应用希尔伯特变换提高损伤判别的灵敏度,研究了各向同性板中时间反转波的有效性,有效解决了时域中信号重建的问题。Huang等^[100]为了减轻时间反转算子的影响,提出了一种改进的时间反转方法,该方法可大大提高复合材料的时间可逆性,并能准确定位复合材料板中的损伤。Wang等^[101]针对导波信

号空间分辨率不高的问题,从原始导波信号重构出新的线性色散信号,充分减小了中心频率处的群速度,以获得满意的信号空间分辨率并将它应用于高分辨率损伤成像。

逆时偏移成像^[102]根据惠更斯原理,将散射波场逆推偏移(与时间反转概念类似)至损伤作为次级波源发出散射波的时刻,此时空间波场的振幅、相位等特征信息将为损伤评估提供有效依据。严刚等^[103]提出了一种应用导波对板结构中多部位损伤源进行被动成像识别的方法,基于 Mindlin 板理论,推导了板结构中弥散性导波频率-波数域的快速偏移方法,结合爆炸成像原理,对损伤源发出的导波信号进行回传成像,通过最小熵原理确定最优图像,识别出损伤源的位置和发生时刻。由于逆时偏移成像需捕获波场信息,因此传感器阵列中两个相邻阵元间距应小于激励波长的一半,以满足空间奈奎斯特采样率。实际应用中可通过适当的插值获取无传感器位置的散射场,既减小传感器密度,也能在一定程度上保证成像分辨率^[104]。He 等^[105]提出了一种利用 A0 模式对各向同性板进行损伤成像的最小二乘逆时偏移技术,用激光多普勒测振仪采集波场信息,提高成像分辨率并有效抑制伪影。

导波层析成像技术^[106]类似于医学 CT,仅把媒介 X 射线替换成导波。在该方法中,通常在待测区域包围线上密集布置传感器,其原理是将导波的 TOF(或能量衰减)作为投影数据,再将其与传播路径和结构的声速参数(或能量吸收参数)分布组成模型方程,求解后可对结构损伤情况进行评估。Chan 等^[107]研究出了适用于混合模式兰姆波成像的衍射层析成像,数值模拟和试验结果表明衍射层析成像方法能够有效评估复材板结构的分层损伤。Shi 等^[108]提出了一种使用虚拟换能器的迭代

方法来实现低采样测量的高分辨率层析成像,提高了欠采样数据情况下的超声断层成像的鲁棒性和准确性。Druet 等^[109]提出了一种基于鲁棒性胸部超声层析扫描混合算法(HARBUT)的欠采样数据薄板腐蚀缺陷成像方法,使用嵌入式导波传感器的亚采样阵列,引入 HARBUT 的扩展以补偿欠采样引起的混叠,从而有效识别损伤。

概率成像算法^[110]不需要导波在结构中传播的先验知识,如导波传播的态、该模式传播的群速度、慢度图和 TOF 等,而是需要表征损伤引起的信号变化程度的损伤因子(Damage index, DI)和路径加权函数的综合得到成像点(x, y)处的概率幅值,幅值越高,代表出现损伤的概率越大。尽管这个概率并非严格意义上的概率值,但归一化后可有效衡量损伤存在的概率情况。Su 等^[111]利用希尔伯特能谱计算损伤信号与无损信号信号的差值,将其确定为损伤因子,并采用概率成像算法实现损伤的定位成像,该方法避免了复杂反射信号的提取过程,在复合材料的损伤定位与识别中具有很大的潜力。Sun 等^[112]提出了一种基于相似路径的无基准损伤识别方法,该方法通过比较计算相似路径的第一波包能量并

计算损伤指数,结合概率成像用于损伤识别。Liu 等^[113]提出了一种基于权重补偿的概率的诊断成像方法,以提高相同传感器配置下的损伤定位精度。通过补偿各路径交叉点和其他成像点的权重差,该算法能有效识别加筋复合材料板上不同位置的损伤。以上几种基于超声导波的损伤识别方法各自适用结构及优缺点如表 5 所示^[85,97,100,106,110]。真实飞行器结构及服役环境是复杂多样的,要综合分析可布置传感器的区域、待测损伤特性、导波作用方式和各个识别方法的优势及限制,从而选择准确高效的损伤识别方法。

3.3 基于超声导波和机器学习方法的损伤诊断技术

近年来,许多研究人员将机器学习算法与损伤诊断相结合,并取得了良好的效果。这主要分为两个方向:一是基于损伤指标的机器学习方法,二是无需特征提取的深度学习算法^[114-115]。常见的损伤指标有上升时间、能量、幅度等^[116]。Liu 等^[117]利用多元线性模型、支持向量机等机器学习算法建立了复合材料循环载荷引起的导波信号特征与分层损伤之间的关系,并通过 X 射线损伤进行验证。Rizvi 等^[118]提取能量、时频通量、能量方差系数等时频信号的 3

表 5 基于超声导波的损伤识别方法

Table 5 Damage identification method based on ultrasonic guided wave

方法	适用结构	优点	限制
相控阵 ^[85]	简单结构	具备聚焦能力,高精度	前处理硬件复杂,需保证时延剖面精确度
空间-波数滤波器 ^[97]	简单结构	波数域处理	计算复杂,涉及多域转换
时间反转 ^[100]	简单和复杂结构	具备聚焦能力,适用无基准方法	依赖时反算子稳定性
逆时偏移成像	简单和复杂结构	消除频散效应,适用多损伤	需结构先验知识及保证波场采集完整性
导波层析成像 ^[106]	结构热点区域	高精度	工程应用有局限,反演求解计算用时长
概率成像 ^[110]	复杂和大面积结构	算法简单,无需结构先验知识	成像效果受损伤因子参数选择和传感器网络密度影响

个损伤特征作为数据集,利用5个机器学习模型定量评价裂纹严重程度。Sun等^[119]设计电磁声换能器采集信号,然后计算若干物理特征作为神经网络的输入,最终建立它与微裂纹的映射关系。Su等^[120]提出了一种基于导波的复合材料层合板损伤识别的前馈神经网络。这种基于机器学习的损伤诊断方法可以有效地处理大量数据,减少对专家的依赖^[121-122]。

深度神经网络具有强大的数据挖掘能力,可以学习高维信号特征,并与损伤建立映射关系^[123]。Rautela等^[124-125]首先进行了基于物理模型的信号预处理,以降低超声导波数据维数,然后使用两级机器学习模型分别对碳纤维增强聚合物板上的损伤进行识别和定位。Shao等^[126]建立多级损伤分类模型,共享部分权值参数,提高了参数利用率,节约了训练时间。Zhao等^[127]将超声导波与概率重建算法相结合进行冰感成像,并在单层铝板和碳纤维增强板上进行了验证,但同时断层扫描技术需要借助更多的换能器来更全面地覆盖信号路径,这增加了试验的时间成本和财力。延时叠加(DAS)是一种广泛应用于损伤诊断的成像技术,通过补偿传感器路径上的时间延迟并叠加散射信号的振幅确定损伤位置。Yu等^[128]在DAS损伤诊断成像的基础上研究自动降噪算法,提高了损伤定位精度。Song等^[129]将导波数据转换为DAS数据集,结合贝叶斯神经网络对全局和局部损伤进行缺陷识别。这些研究大多是在实验室环境下进行损伤判断的,与实际服役环境下的损伤判断有一定的差距。

在实际工程应用中,结构健康监测技术会受到温度、噪声等复杂因素的影响。Rautela等^[130]提出一种基于自监督深度学习的温度补偿方法,采集20~60℃温度下的复合损伤导波信号,采用编码器-解码器技术进行温度补偿。Zoubi等^[131]考虑了不

同温度下的无监督损伤诊断方法,该方法包含一个自动编码器模型来提取引导信号的特征并利用一个支持向量机来识别损伤。对温度、噪声等真实环境因素进行研究是困难的,但这些研究具有重要意义。Lin^[132]和Wang^[133]等利用监督学习算法建立超声导波与腐蚀成像之间的映射关系,利用色散曲线建立损伤厚度之间的关系。Wang等^[134]利用导波在各向同性板中的传播理论,引入波场与速度图、厚度图之间的关系,并利用CNN学习这种映射关系。铝板的腐蚀损伤验证了CNN模型的可靠性。这些方法可以直观地检测出损伤的位置甚至大小。杨宇等^[135-137]深入探索了深度学习技术在复合材料结构导波损伤识别领域的应用,针对导波信号的特点,综合考虑监测数据的整体趋势特征和其中各个数据片段的局部特征,采用基于分布式时序卷积神经网络、基于最小边际系数的结构状态识别等多种机器学习方法,增强了从原始导波信号提取损伤特征的能力,从而减轻对专家经验的过度依赖,提升了结构损伤识别的准确率。Zhang等^[138]提出基于导波健康监测的多任务迁移学习方法,实现了

板结构中监控任务的迁移,但不同损伤模式之间的泛化能力较弱。Zhang等^[139]提出了基于注意力机制的可解释原型网络的框架,将针孔、裂纹、腐蚀等不同损伤类型的导波信号输入到网络中,并采用带注意力机制模块的网络进行小样本损伤识别,如图4所示。不同机器学习损伤诊断模型对比如表6所示^[126,128,133,139-141]。

3.4 基于超声导波的量化损伤诊断与重复性试验研究

针对超声导波损伤的量化研究,Lomazzi等^[142]提出了一种无监督损伤识别方法,分别在大型结构和小尺寸复材板上利用压电传感器测得导波信号,结果表明该方法在大型结构上可检测损伤的最小尺寸约为11 mm,小型结构上可检测的损伤尺寸约为3.7 mm。Yuan等^[143]利用有限元模型和深度学习算法开展金属曲面板结构中的微小损伤检测和定位研究,可检测损伤的最小尺寸为5 mm。Xu等^[144]研究了针对6 mm尖端裂纹和8 mm空洞损伤的检测算法,结果表明所提出的基于波场数据的非线性特征增强和疲劳裂纹成像方法可以抑制基频,从而提高微损伤成像结果的信噪比。在飞行器结构

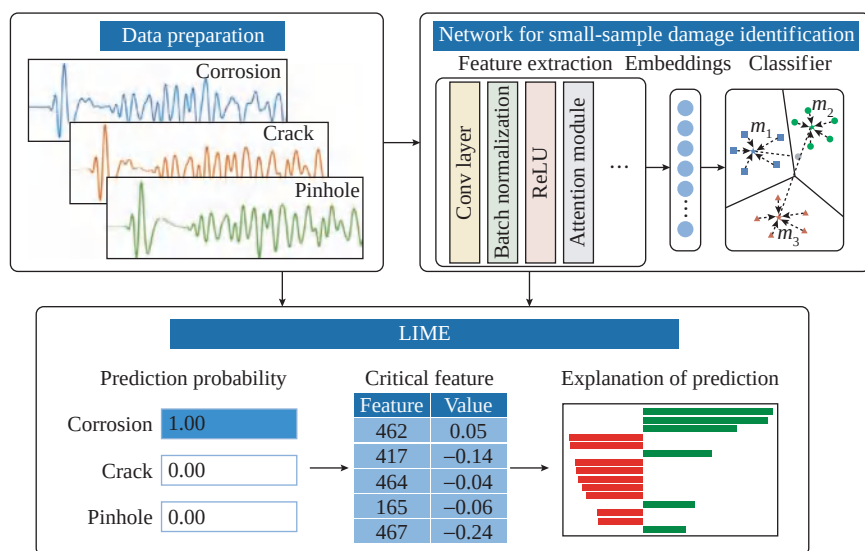


图4 基于注意力机制的损伤分类器^[139]

Fig.4 Damage classifier based on attention mechanism^[139]

上布置智能传感器实现实时自动监测的结构健康监测方法能够有效提高检测效率、降低人工成本,是当前航空结构健康监测技术重要的发展方向。众多研究学者的关注焦点在于对结构损伤位置或损伤等级的判断。他们致力于开发高效的算法和技术,对飞行器结构中的损伤进行精确定位、分类和评估^[145-147]。这些努力旨在提高对潜在风险的识别能力,从而及时采取必要的维修和保养措施,确保飞行器的安全性和可靠性。

在实验室条件下,许多传感器系统显示出极好的重复性,但在实际应用中,环境因素(如温度、湿度、振动等)可能影响重复性。因此很多研究学者对结构健康监测系统中重复性进行了研究^[148-150]。Qing等^[151]为了确定基于压电传感器的主动结构健康监测系统在低温和振动载荷等典型液体火箭发动机工作条件下的生存能力和功能,进行了一系列测试,首先研究了不同压电传感器和低温胶粘剂在低温下的性能,对液体火箭发动机主动结构健康监测系统进行飞行振动和冲击试验,结果表明,所研制的监测系统能够承受典型火箭发动机导管组件的工作振动和冲击能量,并能在低温和振动联合环境下正常工作。Ren等^[152]面对航天

结构健康监测的长期耐久性要求,通过将传感器与复材结构共同固化,实现了大规模 PZT 网络与复合材料结构的原位集成:首先在理论分析和试验研究的基础上,通过机电阻抗分析来评估集成对功能完整性的影响;然后对集成的大型 PZT 网络的导波信号进行了采集和分析,证明了该网络具有良好的信号重复性和一致性。

4 基于光纤传感的监测技术

随着科技的不断进步,以光作为信息传递的媒介已经在通信和测量领域得到了较为广泛的应用。光纤技术自 20 世纪 60 年代起便在能源、通信、运输等多个领域中得到广泛采用,成为一种普遍、稳定且高效的信息传输方式^[153]。在通信领域,往往会降低周围环境对光的传播影响,保证信息传递的准确性;而在光纤传感器领域,会诱导外部影响的增强,从而通过光的前后变化解调出环境中的物理信息。

光纤传感技术利用光在光纤中传播时的物理特性,检测温度、声音、振动和应变的变化。与传统的电子传感器相比,光纤传感器具有传输带宽高、抗电磁干扰强、体积小、质量轻等优点。紧凑的几何形状和轻量化使它在对空间要求较高

的应用中具有极高的自由度。光纤传感器可以贴附在结构的表面或埋入复合材料结构内,与被检测的结构得到良好融合,解决了传统传感器在结构运行时难以进行原位监测的问题。目前,光纤传感器广泛应用于结构健康监测领域,尤其在复合材料健康监测方面展现出了卓越的应用前景。

4.1 光纤监测技术分类

光纤传感器按其测点分布可以分为点式传感器、准分布式传感器和分布式光纤传感器。点式传感器只能进行单点测量,准分布式传感器将测点串联形成具有一定空间分布的一系列测点,对于这两者,具有代表性的是光纤光栅传感器。分布式光纤传感器可以进行整个光纤长度分布的信号测量,其测点具有连续性。

4.1.1 光纤光栅

光纤光栅是近年来迅速发展的新型无源光器件。利用特定方法使纤芯形成永久性的折射率周期变化,从而形成光纤光栅。加拿大的 Hill 等^[154]于 1978 年发现光纤纤芯掺铈后,光纤具有光敏性,并利用驻波干涉法首次制备出了光纤光栅,因其谐振波长满足 Bragg 方程,所以命名为光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)。相位掩模和载氢技术的发明使得光纤光栅的批量生产成为可能,同时极大地降低了生产成本,为光纤光栅在传感领域的广泛应用创造了基础条件。

FBG 是对等效折射率(n_{eff})的周期性调制,其基本原理:当外界待测量发生变化时,这种变化以某种形式传递到光纤光栅上,引起光纤光栅谐振波长的变化,通过建立谐振波长变化量与待测量变化量之间的线性对应关系,就可以通过光纤光栅测得待测量的变化。这一过程实现了对待测量的高灵敏度检测。当外界参量(温度、应变等)变化时,会引起 FBG 的中心波长的变化,因此通过

表 6 机器学习损伤诊断模型对比

Table 6 Comparison of machine learning damage diagnosis models

机器学习模型	研究对象	输入	输出	优势	不足
CNN ^[126]	铝板	导波信号	损伤位置和大小	多级损伤、分类模型	类别少
Autoencoder+DAS ^[128]	复材分层损伤识别和钻孔	导波信号	损伤定位	多损伤定位	提取信号的模态
CNN ^[133]	铝板腐蚀	导波信号	速度图	快速成像	传感器数量多
CWT+CNN ^[139]	复材板上损伤识别	时频图	损伤区域	同时包括时域和频域信息	类别少
CNN+Attention ^[140]	铝板损伤分类模型	导波信号	损伤类别	少量样本数据	类别少
SVM ^[141]	玻璃纤维损伤等级评估	导波信号	损伤等级	少量样本数据	需特征提取

检测 FBG 中心波长的变化实现对外界物理量直接或间接的测量。FBG 的传感原理如图 5 所示^[155]。

4.1.2 分布式光纤传感器

分布式光纤系统通过光纤本身检测物理量(如应变或温度)局部变化引起的沿光纤长度的散射光特性变化。光纤传感中使用的弹性(能量转移可忽略)和非弹性光散射的主要机制包括瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。瑞利散射是密度变化引起的弹性物理现象。由于瑞利散射是弹性的,散射光的光谱集中在入射光频率处,如图 6 所示^[156]。而布里渊散射和拉曼散射是非弹性物理现象,因此带有一定程度的频移。布里渊散射是声波在相反方向传播的相互作用造成的。两个光谱分量与布里渊散射有关。降频分量称为斯托克斯分量,而升频分量称为反斯托克斯分量。拉曼散射是一种非弹性散射,其产生是因为光波与传输介质中的分子振动相互作用。由于各向异

性分子取向的波动,拉曼峰的频率可能会振荡。

对于应变测量,瑞利散射和布里渊散射是当前的研究热点,而拉曼散射主要用于温度测量^[157]。瑞利散射和布里渊散射可以在时域和频域中进行检测。光时域反射(OTDR)技术基于时域检测,可用于两种类型的散射。瑞利散射的 OTDR^[158-160]在结构健康监测应用方面受到一定限制,主要是因为测量位置的不确定性,以及为了达到毫米分辨率,需要非常大的频率带宽。以上限制可以通过光频域解调(OFDR)来克服^[161-163]。可调谐激光源可在长度小于 100 m 的光纤上实现毫米分辨率。尽管布里渊散射信号比瑞利信号低 20 dB,但布里渊散射信号的应变测量方法是基于布里渊光谱分量频移的,不需要互相关操作,测量量为绝对值。此外,基于布里渊散射的 OTDR 传感长度大于 150 km。这样的优势使得布里渊分布式传感器在监测大型结

构方面具有极大优势^[164-168]。

4.2 基于光纤传感器的损伤监测研究

分布式光纤传感器自诞生以来就成为研究和应用的热门,不管是在局部还是在整体上都能进行有效监测^[169]。光纤光栅被认为可以替代传统应变传感器,具有复用能力更强、耐久性更好和应变量程更大等优点。Webb 等^[170]应用动态全光谱解调仪研究动态加载下埋入搭接界面中的 FBG 传感器光谱响应。Karabacak^[171]和 Hotate^[172-174]等使用布里渊光学相关域分析(BOCDA)系统检测 CFRP 螺栓接头损伤。Minakuchi 等^[175-176]在加强筋和 CFRP 蒙皮之间嵌入了一根光纤,使用 PPP-BOTDA 技术有效估计制造残余应变和冲击试验造成的损伤。Güemes 等^[177]通过使用基于瑞利散射的 OFDR 系统进行了类似试验,特别研究了加强筋在一侧受弯时造成的渐进脱粘。Leung 等^[178]使用分布式光纤传感器监测混凝土结构中的裂缝,并成功检测到结构中分布的裂缝,包括窄至 0.1 mm 的细裂缝。Kulpa 等^[179]探讨了一种用于应变和位移测量的分布式光纤传感系统,该系统能够准确、可靠和分布式地测量应变,并可以评估形状和位移。Murayama 等^[180]使用光纤传感器开发了具有高空间分辨率的应变监测系统,该系统能够提供结构中应变的高密度信息,根据光纤传感器在胶粘剂层损伤检测和简支梁载荷识别中的应用,证实了提高传感器空间分辨率对增强结构健康监测性能的重要性。陈帅等^[181]提出了一种改进的主成分分析(MPCA)方法,在预制了裂纹损伤的铝合金板拉伸试验中,表面粘贴的分布式光纤传感器测量到了结构应变变化,在依据监测数据对方法的验证中,精确识别到了铝合金板内的损伤位置。吕睿^[182]基于分布式光纤传感网络,以异形截面薄壁梁为主要研究对象,实现了复杂载荷耦合作用下对结构损

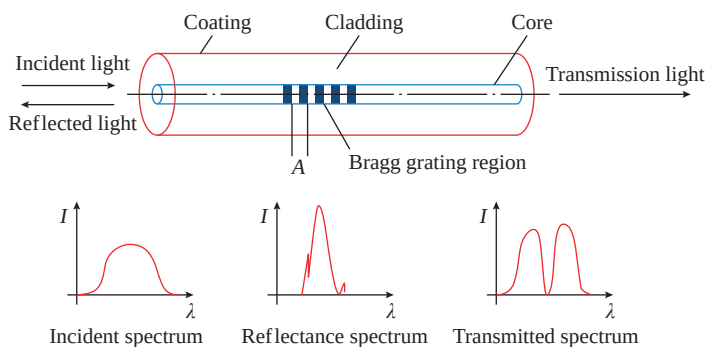


图 5 光纤布拉格光栅测量原理^[155]

Fig.5 Measurement principle of fiber Bragg grating^[155]

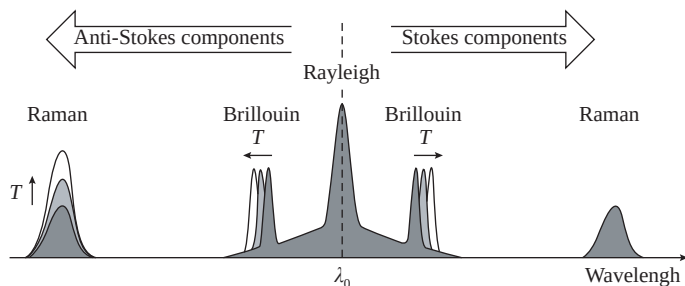


图 6 光纤中自发散射的典型光谱^[156]

Fig.6 Typical spectra of spontaneous scattering in optical fibers^[156]

伤、形状、应力、应变分布等多参量信息的在线联合识别。单一男^[183]在翼梢小翼上通过布设分布式光纤传感器组成应变监测网络对复合材料构件接缝凹坑进行了识别,结果如图7所示。

Liu等^[184]开发了一个使用分布式光纤传感器(DFOS)和深度学习技术监测结构中裂缝的新方法,使用改进的YOLO模型高效识别和定位到了基于DFOS测量的空间分布裂缝。Song等^[185]使用一种基于布里渊散射的分布式光纤传感器来检测结构微裂纹的深度学习方法,网络架构由21层的卷积神经网络构成。Karypidis等^[186]采用深度自编码器(DAE)构建了一个异常检测系统,用于监测钢筋混凝土结构的健康状况。研究中采用分布式光纤传感器,通过光纤应变测量来检测结构微裂纹,并结合深度自编码器算法来分析数据。

4.3 基于光纤传感的变形重构方法

随着航空航天结构的大型化、轻质化发展,结构柔性提高、变形量增加,较大的变形会引发严重的安全事故^[187]。重建结构的三维位移场,即形状传感,是结构健康监测过程中的重要环节^[188-189]。通过对结构部件(如机翼)变形的识别,可以判断结构的气动力分布等重要信息,并可以根据全场的位移分布反演出全局应变与应力场分布,为结构的健康评估、主动控制等提供关键信息。迄今为止,结构形变测量方式多样,根据测量系统传感器的物理性质可分为两大类:(1)非接触式测量系统,包括摄影测量法、摄像测量法、激光跟踪仪等;(2)接触式测量系统,包括应变传感器、加速度传感器、位移传感器、光纤传感器等。

非接触式测量系统一般以影像捕捉和激光扫描跟踪为主^[190]。这种测量手段主要是视觉测量,对环境光线要求苛刻,同时测量设备复杂^[191],

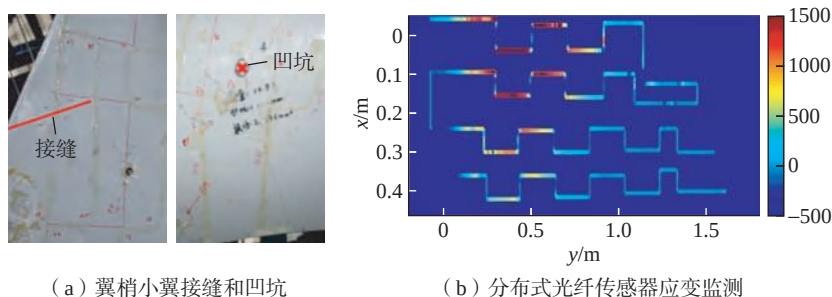
难以实现在线实时监测结构变形;相比之下,接触式测量系统可将结构与传感器一同封装,形成拥有自我感知能力的智能结构,如图8所示^[192],这种方法对环境适应性强,前景良好。

由于传感器等方面限制,结构位移测量很难在线开展,近年来基于光纤应变测量的变形重构方法引起了人们的广泛关注。其中最常用的方法包括Ko位移理论与逆有限元法(iFEM)。

Ko等^[193-195]在2011年开始研究适用于工程化应用的非线性应变-位移理论,即Ko位移理论。基于经典的材料力学假设和结构变形的几何、位移关系,利用分段线性(非

线性)假设将大展弦比的复合材料梁结构变形问题转化为求和问题(图9^[195])。Richards等^[196]以“捕食者-B”原型机Ikhana为对象,将FBG应变传感系统埋入其机翼主承力梁中,验证了基于Ko位移理论的结构变形重构算法的可行性。Nicolas^[197]在复合材料机翼结构主梁上布置大量FBG应变传感器,结合Ko位移理论对结构的变形以及载荷重构进行研究。

夏力等^[198]将OFDR技术与Ko位移理论相结合,凭借分布式光纤传感器更高的测点密度,显著提高变形重构的准确性。Ko位移理论也可用于高温结构的变形重构与预测,通过



(a) 翼梢小翼接缝和凹坑

(b) 分布式光纤传感器应变监测

图7 分布式光纤翼梢小翼检测^[183]

Fig.7 Distributed fiber optic wingtip detection^[183]

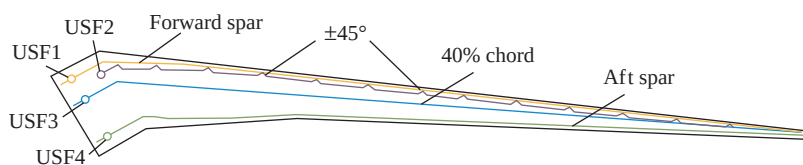


图8 智能机翼结构^[192]

Fig.8 Intelligent wing structure^[192]

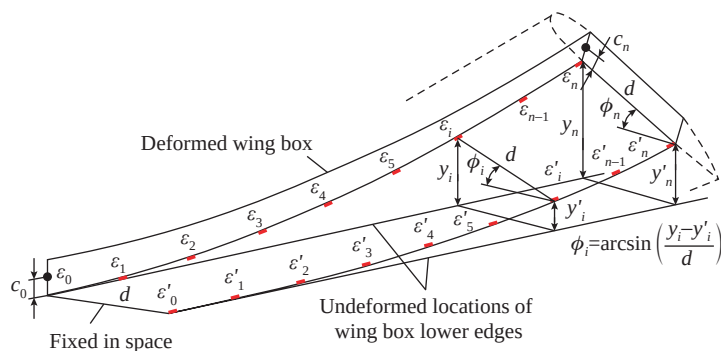


图9 基于Ko位移理论的翼盒变形重构^[195]

Fig.9 Wing box deformation reconstruction based on Ko displacement theory^[195]

光纤对结构进行实时应变测量。利用 Ko 位移理论可对典型热防护结构^[199]和高温涡轮叶片^[200]进行位移场实时重构,为高温结构的安全运行提供保障。针对标准的梁结构,赵飞飞等^[201]提出了一种基于 Ko 位移理论的 Timoshenko 梁变形场重构方法,提高梁结构变形重构的准确性。袁慎芳等^[202]将 Ko 位移理论与有限元模型相结合,通过最小化结构的总应变能进行机翼结构的变形重构,显著提高机翼变形重构的精度。吕睿^[182]以槽型截面薄壁梁承受斜弯曲与扭转组合变形为例,通过采用弯曲变形和扭转变形的重构算法,建立变形解耦方程组,根据采集的应变测量数据重构了开口薄壁梁结构的变形。

基于传统力学的变形重构方法往往难以考虑结构的复杂拓扑,针对复杂结构存在局限性。一些算法还需要足够精确的载荷和(或)结构的材料信息,仅适合在实验室条件下实现对特定结构形状的传感计算。针对此类问题, Tessler 等^[203]提出了一种新的变形重构方法,即 iFEM。图 10^[204]为 iFEM 中具有代表性的逆壳单元结构,该算法基于测量应变和数值应变之间的加权最小二乘误差函数的最小化来构建节点位移求解方程,重建结构变形。iFEM 在推导过程中仅使用了应变-位移关系,不受结构的材料属性以及载荷条件的限制。此外, iFEM 还具有对不同复杂结构适用性强、精确度高的优势^[205-206]。因此借助应变数据, iFEM 具备实时重建全场结构变形、应变和应力的能力。

应变的测点位置对逆有限元算法的精度至关重要。胡明月等^[204]以飞行器进气道典型三维壁板结构为对象,开展有关超静定状态下结构变形场重构方法的研究,将子区域划分与逆有限元法相结合,实现了基于实测应变数据的超静定结构全场变形重构。黄辉^[207]和曹开拓^[208]采用

数值模拟和试验相结合的方法,研究了测点布置、数据噪声对重构算法精度的影响。尤润州^[209]开发了平面逆梁单元 iBeam3 和空间逆梁单元 iEBT2,为光纤形状传感器的研发提供了理论基础;研发了一种温度不敏感型光纤形状传感器,设计了集数据“测量、采集、处理、存储、读取”为一体的结构变形监测系统。赵勇^[210]以大口径天线副反射面位姿的实时测量为研究背景,提出了一种基于应变信息重构支撑刚架结构变形,进而确定副反射面位姿偏离的创新接触式测量方案。周富^[211]基于光纤光栅传感器和逆有限元法,对机床立柱进行变形重构研究,研究了基于单向单侧应变信息的逆有限元法。闫宏生等^[212]提出的改进遗传算法为测点选择方法提供了依据,利用 iFEM 对多种案例的船体加筋板结构进行位移重构。

4.4 基于光纤传感的温度监测方法

温度场是空间中各点温度的集合,是时间与空间的函数。工业生产中异常的温度往往是故障及灾害的预兆及表现,因此对温度进行实时准确的监测是十分必要的。目前不同原理的测温装置较多,如红外测温仪、热敏电阻等^[213]。许多场合下传统温度探测器无法满足要求,例如长距离的电缆温度监测、液化气管道温度监测、大坝内部温度监测等。光纤传感技术的发展为新型测温系统提供了支持,光纤传感技术是将光纤作

为媒介,利用光波感应外界信号的传感技术。经过 30 多年的研究,光纤传感技术不断完善,人们发现了光纤中瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射与温度及应变等物理量之间的关系,研发出了用于温度应力等物理量监测的传感器^[214]。拉曼散射对光纤应变不敏感,避免了结构热应变对测量结果的影响,成为光纤温度测量的重要手段^[215]。随着对拉曼测温系统的不断研究,各种新型技术也不断加入^[216]。Soto 等^[217]于 2007 年利用相关编码技术,克服了分辨率与信噪比二者之间的相互制约,进一步提高了分布式拉曼测温精度,在 8 km 的传感距离下实现了 3 m 的空间分辨率测量,在 4 km 的传感距离下实现了 1 m 的空间分辨率测量,接连研制出多模光纤和单模光纤,并将它们分别作为传感光纤的拉曼分布式温度传感器(DTS)系统,在 7 km 的距离内,温度测量精度可达 1℃。

我国许多高等院校和科研机构也开展了关于分布式光纤测温技术的研究工作。其中电子科技大学设计的半导体激光器在长约 1 km 的测温光纤上实现了 6℃温度分辨率和 4 m 空间分辨率的分布式光纤温度测量^[218]。黄尚廉等^[219]在 1991 年开始了对 DTS 系统的研究,成功研制出测温距离高达 10 km 的 DTS 系统。张小丽等^[220]研究出了一种增加 DTS 系统温度分辨率的校准装置,通过采取不同基点、不同光纤长

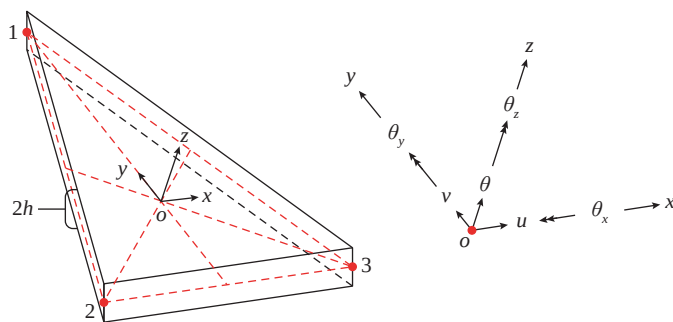


图 10 逆有限元三节点逆壳单元^[204]

Fig.10 Three-node inverse shell element of inverse finite element^[204]

度进行试验,结果稳定性好且满足精度需求。光纤传感器的一大优点是体积微小,可埋入复合材料内部进行数据采集,能够获取其他传感器得不到的数据。Francesco 等^[221]将直径为 125 μm 的分布式光纤传感器埋入复合材料 DCB 试件中,用于监测结构 I 型和 II 型裂纹的扩展。Kulpa 等^[179]将直径为 250 μm 的分布式光纤传感器埋入蜂窝夹层复合材料内部,通过应变测量对蜂窝结构的形状和受力位移进行评估。李建乐等^[222]将拥有聚酰亚胺涂层的分布式光纤(直径为 160 μm)埋入酚醛树脂层合板中,根据应变特征对结构脱粘损伤进行识别,该方法的损伤定位精度可达 4 mm。2019 年,吉林大学 Guo 等^[223]使用飞秒激光逐点扫描方法在直径为 60 μm 的单晶蓝宝石光纤上制造了 FBG 传感器,该传感器可进行最高达到 1600 $^{\circ}\text{C}$ 的温度传感。

5 其他结构健康监测技术与前沿技术

5.1 声发射技术和机电阻抗技术

上文主要综述了在工程上应用比较成熟的健康监测技术,包括基于超声导波、冲击应力波、光栅光纤等的检测手段,以及基于机器学习算法的损伤检测方法,除此之外还有声发射技术、机电阻抗技术等。声发射技术是一种利用材料在受力或被破坏时产生的微小声波(声发射信号)来监测材料或结构状态的非破坏性检测方法。当材料或结构受到外力作用(如拉伸、压缩、弯曲等)时,其内部会发生微观结构变化(如裂纹扩展、纤维断裂、界面脱离等),伴随着能量的快速释放,产生声波。这些声波通过材料传播,可以被安装在材料或结构表面的声发射传感器捕捉到^[224-226]。机电阻抗技术是一种基于压电效应的结构健康监测技术,其核心思想在于利用安装在结构表面的小型压电传感器(如 PZT 传感器)

来探测结构内部微裂纹的形成和发展。这些传感器在高频激励下同时充当激励器和监测器,通过分析结构局部的阻抗变化,即可对结构的微裂纹初始阶段进行有效的识别和评估^[227-229]。当结构发生微小的裂纹或其他损伤时,其机电特性会发生变化,这些变化通过压电传感器的阻抗信号被捕捉,从而实现对结构健康状况的实时监控。这种方法通过精确监测结构局部阻抗的微小变化,为早期损伤检测提供了一种高效的技术路径。由于传感器的布设性和信号的复杂性,基于声发射和机电阻抗的结构健康监测技术尚未被大范围应用于工程中。

5.2 数字孪生技术

结构健康监测为结构的安全运行提供了保障,目前已经发展了多种结构健康监测方法,从结构状态、寿命、安全性方面做出了众多研究。但这些研究大都局限于个别方面,没有系统地进行结合,针对复杂结构难以进行综合考虑。为了解决多种因素的耦合问题,在此基础上引入结构数字孪生方法,充分发挥结构健康监测的优势,扩展了结构健康监测的思路。数字孪生技术创建一个物理实体的虚拟模型,通过这个虚拟模型可以模拟、分析和预测结构的行为,从而实现更加高效的健康监测。结构数字孪生的三要素包括结构物理实体、数字孪生模型,以及更为关键的两者的信息交互通道,也就是检测与传感手段。通过传感技术形成数据传输,模型能够实时镜像实体的状态。同时通过模型仿真,该技术可以预判结构的状态演变及服役寿命,为安全预警、失效防控、运维以及优化设计提供有力依据。通过数字孪生模型,将实际飞行器的结构特征与虚拟模型相对应,提高了实时监测和预测结构健康状态的能力。该技术能够提高对飞行器结构损伤、疲劳和裂纹等问题的检测精度和效率,为飞

行安全提供可靠保障^[230-232]。同时,数字孪生技术还能够帮助优化飞行器的维护计划和修复方案,降低维护成本,提高飞行器的可用性和可靠性。

5.3 新型传感技术与信息融合技术

新型传感技术提供了更高的灵敏度和更广的监测范围,能够实时捕捉结构的微小变化,为早期损伤预警提供数据支持。信息融合技术通过整合来自不同传感器的数据,提高了监测的准确性和可靠性。目前很多研究学者开展了诸如柔性薄膜传感器、纳米传感器等小型、易于飞行器结构集成的传感器的研究^[233-236],旨在实时监测应力、应变和振动等参数,以及在微观尺度上精确检测结构的微小变化(如裂纹、磨损等),为早期故障预测和预防提供数据支持。它们的高灵敏度和低能耗特性使得监测系统更加精准和可靠。这些传感器技术的应用不仅有助于提高飞行器结构健康监测的准确性和实时性,也为飞行器的安全性和可靠性提供了重要保障。在结构健康监测系统中,通常会采用多种方法来收集关于结构状态的数据。然而,不同来源的信号之间,其相互关系仍然不是很清楚。如何有效处理海量数据、提升算法的鲁棒性是当前面临的主要挑战。通过多传感器数据信息融合,可以更加全面和精确地评估结构的健康状态^[237-239]。这样不仅能提高监测系统的灵敏度和可靠性,还能增强它在实际工程应用中的适用性。

6 结构健康监测系统的典型应用

6.1 国外典型应用

国外很多航空、航天、空天飞行器设计制造机构提出了相应的健康管理计划,其中最具代表性的就是美国 NASA 应用的综合健康管理计划(IVHM)和作为其补充的日本 HSFD 健康管理计划;另外一些企业

和工业界也提出了结构信息在线获取技术,或称结构状态自感知技术。面向新技术前沿的国外学术机构针对设计制造需求,致力于提取科学问题,揭示结构响应机理,设计传感器网络与状态识别算法。飞行器健康状态是对其系统、子系统、部件等工作状态的描述,综合健康管理系统通过综合各种飞行器健康管理技术和工具,实现对飞行器的整体健康状态的掌握和自动化管理^[240]。如图11所示,从传统飞行器故障诊断技术到飞行器综合健康管理技术的进化途径包括:硬件的集成化、标准化、网络化,目的是降低设备重量与耗能,增强数据存储、处理与天地系统传输能力,统一信息交互接口形式;软件自动化、空地操作系统集成化、传感器数据处理精细化,目的是高效快速利用结构状态信息数据,准确识别结构的健康状态并进行未来状态预测。

空客公司目前正在利用智能层传感器网络在A350上构建监测系统,利用此监测系统对碳纤维复合材料舱门周围壁板进行飞行撞击监测试验。试验所用到的手持型诊断设备可以与智能层传感器网络通过智能层结构的外接卡槽连接,如图12所示^[241]。

Qing等^[242]使用基于压电智能层的超声导波结构健康监测技术对F-16复合材料粘贴补片和直升机尾桁在一个高应力关键区域下的疲劳裂纹及其扩展进行了监测,并且对纤维缠绕复合材料压力容器-空间飞行器贮箱的完整性进行监测,图13所示为埋入压电智能层的贮箱监测试验。据报道,基于压电智能层的结构健康监测设备已在A350的复合材料机身壁板和波音的全尺寸复合材料机身上得到安装。

航天飞行器的燃料贮箱既受液氢/液氧燃料低温的影响,又要受到太空冷热极端环境的作用。而随着

复合材料的迅速发展,复合材料燃料贮箱已成为趋势。本就复杂的载荷环境再加上复合材料结构的复杂性,使得复合材料贮箱安全性必须有可靠的监测保障。NASA的Smart COPV(Composite overwrapped pressure vessel)项目就是以智能复合材料压力容器为对象对复合材料贮箱结构进行监测研究的。第二代智能复合材料压力容器结构监测方

案通过在其圆柱部分的顶部、中心和底部布置环形布拉格光纤光栅阵列、应变片以及宽频声发射传感器进行智能监测,如图14所示^[243]。

以综合健康管理系统为基础,主要空天飞行器都配备了健康管理系统为其安全运行与有效保障保驾护航。在国外学术研究与实际应用的经验中,结构在线信息提取与感知是结构健康管理的研究基础与重要挑



图11 从传统飞行器故障诊断技术到飞行器综合健康管理技术的进化途径

Fig.11 Evolution path from traditional aircraft fault diagnosis technology to integrated aircraft health management technology

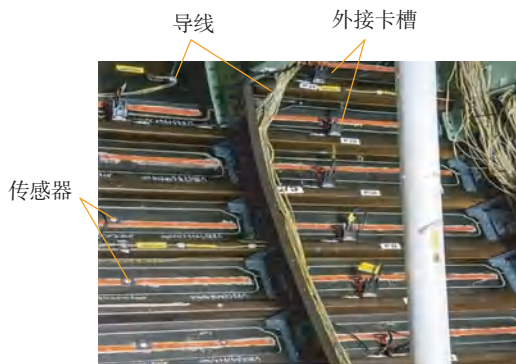


图12 空客A350舱门周围壁板飞行撞击监测^[241]

Fig.12 Airbus A350 cabin door surrounding wall panel flight impact monitoring^[241]

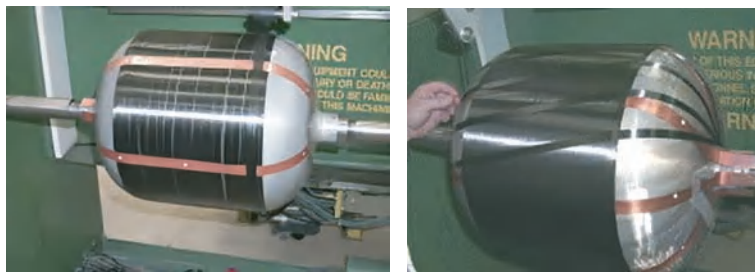


图13 埋入压电智能层的复合材料贮箱^[242]

Fig.13 Composite material storage tank embedded with piezoelectric intelligent layer^[242]

战。它主要关注的结构特征参量包括结构部件应变场、结构表面与内部温度分布、结构振动模态、结构损伤扩展,以及结构外部环境变化等。主要的信息获取方式包括利用光纤传感器(布拉格光纤光栅与瑞利分布式光纤)感知结构物理场、利用分布式压电传感器网络识别结构损伤状态与受冲击历程等。

6.2 国内大型结构上的典型应用

在我国飞行器发展的规划中,为了提高飞行器的可靠性与安全性、降低维护保障成本,需要针对飞行器的结构特征与失效模式开发全寿命健康管理技术。该技术包括在线管理与地面检修两个模块,具备对飞行器的在线智能检测,系统级评估、控制和管理,结构全寿命信息收集,以及基于状态的运行与维护决策等能力。应用全寿命健康管理技术可以提高飞行器的安全性、可靠性及可维护性并有效地降低运行维护成本。我国飞行器全寿命健康管理技术的研究需要与飞行器的发展同步进行,争取在空天运载领域实现与国际先进水平并行。

大连理工大学在大面积结构损伤监测的稀疏传感器网络优化布设^[244]、损伤成像^[113,116]、温度补偿^[245]、贮箱结构损伤识别^[246]等领域开展了深入研究,并且在我国第一个全尺寸民机复合材料尾翼的静力加载试验、第一个复合材料机身壁板原型结构中验证了超声导波结构健康监测技术的有效性;与宇航系统工程研究所合作开发了火箭贮箱智能壁板与智能桁条,为结构健康管理技术走向应用提供前期的工作基础和技术积累。在全尺寸复合材料机身及尾翼健康监测技术研究中,大连理工大学团队分析了复杂结构形式对超声导波传播特性的影响机理,提出了基于超声导波的复杂结构传感器网络布置方法、变温度下复合材料结构健康监测方法以及局部多损伤诊断方法。复合材料飞行器结构健康监测

结果如图 15 所示^[247]。

图 15 结果显示,在 120% 载荷条件下加强筋-蒙皮界面出现了大量的健康状态变化,上翼面的损伤情况比下翼面严重,这与理论分析、无损检测结果一致。复合材料全尺寸尾翼结构静力加载损伤诊断试验结果验证了超声导波主动式损伤诊断技术在航空航天复合材料结构中应用的有效性和可行性。按照结构在线信息提取分析结果,实现了对地面维护保障阶段无损检测结构的指导,提高了维护保障阶段的效率。

大连理工大学武湛君教授团队利用分布式光纤传感器对大型贮箱结构进行了健康监测研究,将基于瑞利散射的分布光纤传感器粘贴在某型号金属燃料贮箱表面,在内压模拟试验中进行了应变测量,布设的分布式光纤传感器网络很好地采集了筒段焊缝邻域的高密度应变数据,比较精确地反映了筒段在常温状态下的表面应变和应力分布,如图 16 所示。高密度的应变数据比较直观地显示了焊接区在支撑状态下的应变分布特点,为评价贮箱结构状态、确保试

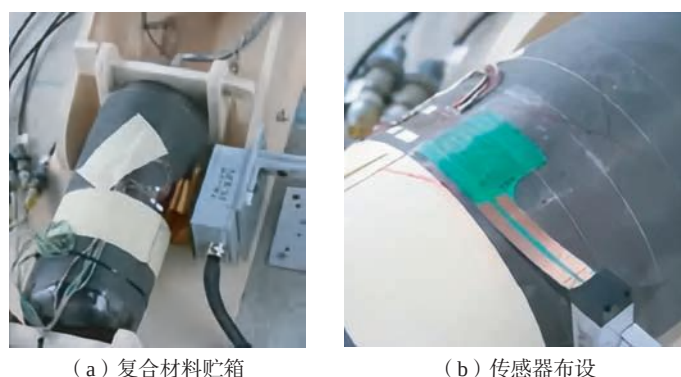
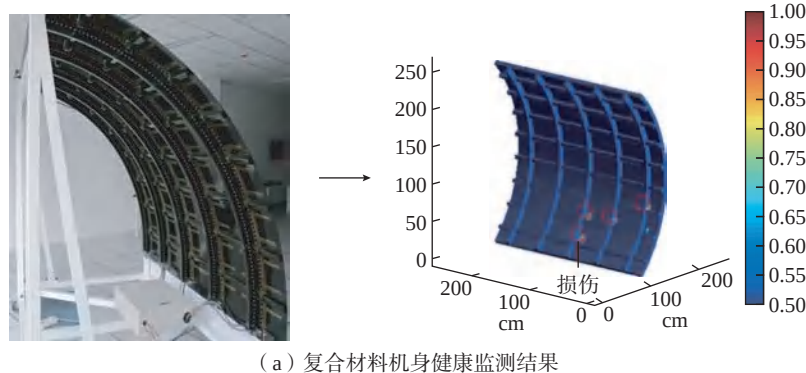
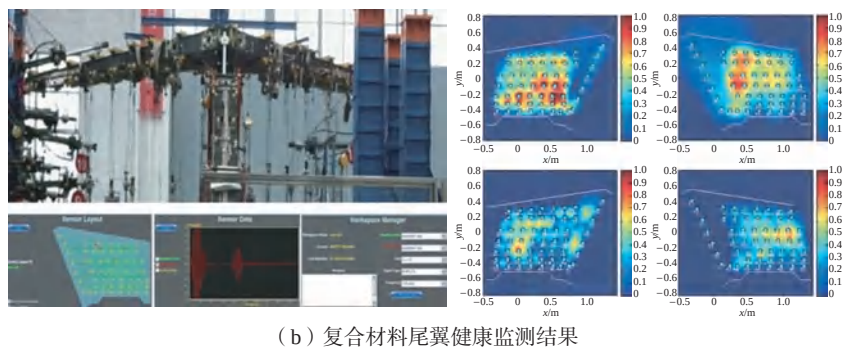


图 14 第二代 Smart COPV 智能监测系统^[243]

Fig.14 Second generation Smart COPV intelligent monitoring system^[243]



(a) 复合材料机身健康监测结果



(b) 复合材料尾翼健康监测结果

图 15 全尺寸复合材料机身及尾翼结构健康监测技术研究^[247]

Fig.15 Research on health monitoring technology for full-scale composite panel and tail wing structures^[247]

验顺利进行提供有力保障。

由于航天结构的减重需求,复合材料贮箱得到了大力发展,但由于复合材料的分散性大,生产和运行过程中容易产生损伤,更加需要进行结构健康监测。武湛君团队与中国运载火箭技术研究院和上海航天技术研究院合作,利用分布式光纤进行了复合材料贮箱的应变监测,在常温水压和低温液氮环境下均获得了良好的应变监测数据,是国内首个利用分布式光纤传感器在极端环境下对大型复合材料贮箱进行监测的团队,并研发了健康分析软件对贮箱结构进行分析评估,形成了完整的贮箱结构健康监测系统,如图 17 所示。

哈尔滨工业大学庞宝君教授^[248]带领的空间碎片高速撞击研究中心早在 2004 年就在国内率先提出并开展基于声发射的空间碎片撞击在轨感知技术研究,如图 18 所示。该团队历时 7 年,进行了百余次小尺寸试件及近两百次大尺寸舱壁结构件超高速撞击试验,开发并优化感知识别算法,确定感知识别关键参数。研究人员开展各阶段舱体结构撞击定位算法开发及验证试验,获得数万组数据,完成了样本库建立及定位算法优化,突破了大型复杂几何体结构撞击的快速定位、多舱段组合体模糊区域撞击的判别、复杂舱壁结构中撞击声发射信号的参数识别等关键技术。最终成功实现了空间碎片撞击在轨感知技术的工程应用,并研制了空间碎片撞击在轨感知系统原理样机,为在天和核心舱上的工程应用奠定了技术基础。

南京航空航天大学袁慎芳教授团队^[249]对冲击引起的导波信号进行精密处理,并提取频谱和窄带信号,通过时间反转成像方法,成功实现了在复合材料结构上的冲击成像定位,如图 19 所示。这项技术创新地使监测系统能够更全面识别结构中外部冲击引起的潜在问题(如裂纹

和损伤),为结构健康监测提供更深层次的信息。这不仅有助于更准确地定位和评估结构的健康状况,也为及时采取修复措施提供了关键的数据支持,从而进一步提升飞行器结构的可靠性和安全性。

总之,近年来世界各国空军和民

航公司围绕提升飞行器可用水平、降低全寿命维修保障成本开展了许多研究工作。国内结构信息获取技术发展比较完备,涵盖了传感器、识别算法、寿命预测等多个门类,信息获取技术介入了设计、制造、评价、预测与维护等结构寿命阶段。借助国内

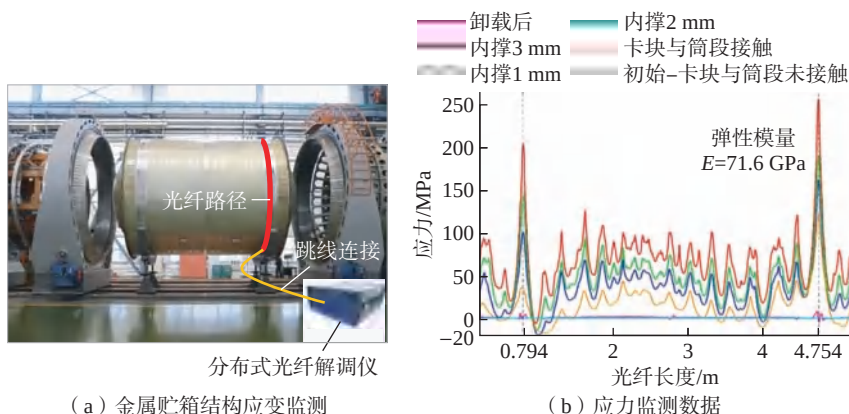


图 16 筒段内撑试验各级应力分布

Fig.16 Stress distribution of each level in internal support test of the cylinder section

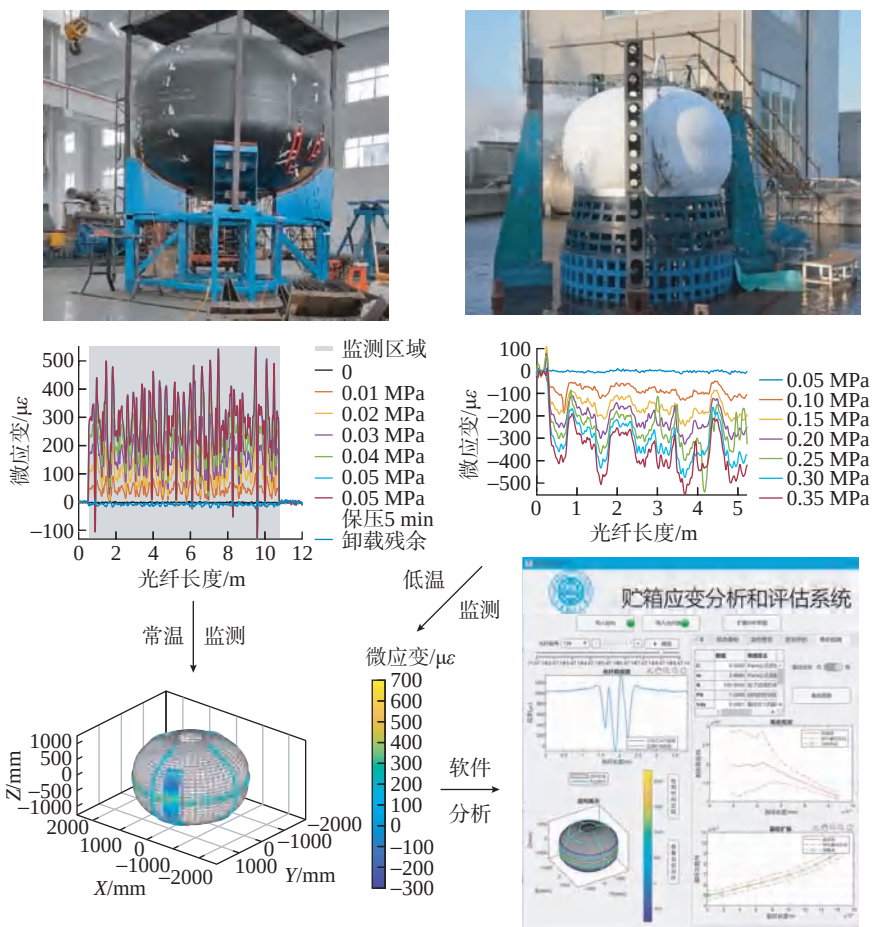
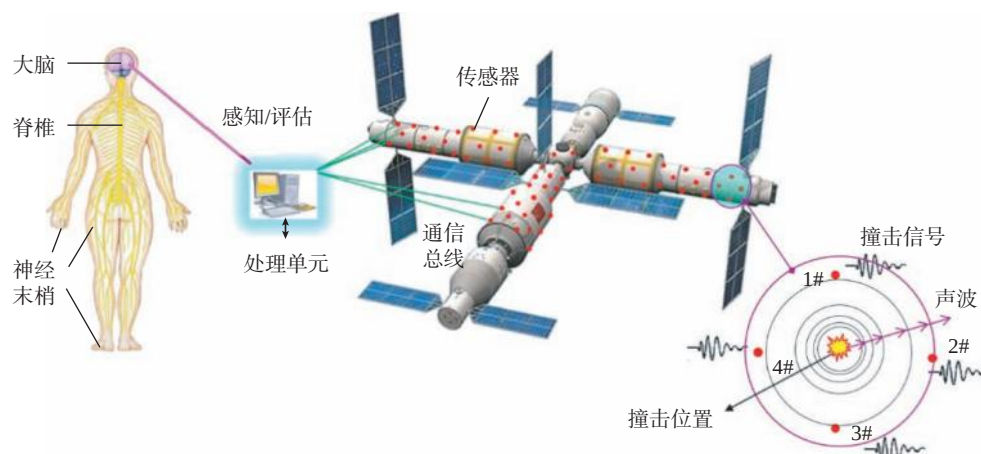


图 17 复合材料贮箱光纤监测系统

Fig.17 Fiber optic monitoring system for composite material storage tanks

图 18 基于声发射的空间碎片撞击在轨感知技术^[248]Fig.18 Space debris impact sensing technology in orbit based on acoustic emission^[248]

(a) 复合材料壁板冲击成像

(b) 频谱和窄带信号

图 19 复合材料壁板冲击成像技术^[249]Fig.19 Impact imaging technique of composite panels^[249]

技术基础可以迅速开展我国飞行器结构健康管理技术的研究工作。

6.3 国内外应用技术对比

美国 NASA 已将声发射、超声导波及光纤光栅阵列技术综合应用于航空航天飞行器状态信息获取领域,构建了一个包含传感器、损伤量化与故障诊断算法、信号处理软硬件及数据存储传输系统的结构健康管理体系,该体系已在多型空间飞行器中获得成功应用,实现了空天飞行器健康状态的在线管理^[250]。Rolls-Royce 公司通过改进航空发动机健康监测数据的收集和分析方式,最大限度地发挥发动机的使用寿命,并帮

助和指导操作员维修和更换飞机发动机,使用微软公司的 Azure 云计算进行发动机信息收集和存储,从而更快地维护发动机并保持最高级别的可用性^[251]。

主要的民用飞机制造商,包括空中客车公司、波音公司和中国商用飞机有限责任公司等,都在密切关注并评估结构健康监测技术的发展,但是这些技术尚未完全成功应用于民用飞机中。在飞行器上应用结构健康监测系统时需解决传感器布局优化、传感器信号对环境变化敏感、传感信号冗余等问题,中国的相关研究与应用正处于发展阶段,并逐步开

始实施。国内学者对损伤检测的技术方法及新型传感技术进行深入研究,取得了积极成果。在国内航空器地面故障维护保障领域,针对提高维修效率、增强保障效益及提升维修验证能力等方面,开展了众多卓有成效的研究。这些研究成果为未来飞行器结构健康监测技术的发展提供了重要指导。

7 主要挑战和未来的发展方向

未来发展中,针对飞行器健康监测工程应用需求,设计高稳定性能、耐极端环境、易于集成的轻量化传感器尤为重要。其关键目标是通过少

量传感器的布设实现对大范围结构状态的监测。同时针对多源监测数据的信息融合技术也是关键的一步。在飞行器的应用场景中,多种传感器信息融合技术不仅能够提高数据的准确性和可靠性,而且能够实现更为精确的环境感知和决策支持。对于小尺寸、难以检测的结构如油管、螺栓等,研究小型、高灵敏度的监测系统至关重要。这些系统可实现精准监测,并提前发现结构微小变化,从而预防潜在故障。在不妨碍飞行器性能的前提下,这些传感器的轻量化设计使之易于集成,同时高稳定性和耐久性确保它在极端环境中可靠运行。这些方向的研究将为飞行器的安全性、可靠性和性能提升提供关键支持。结构健康监测系统利用冲击监测、主动损伤识别以及光纤传感应变监测3种手段采集状态数据,然后利用先进的信号处理技术进行结构状态的评估,为后续的维护提供技术支撑。然而,这种多监测传感器作为关键的监测组件在工程应用中面临诸多挑战,尽管结构健康监测技术发展迅速,仍具有一些局限性。

(1) 传感层面。

在结构健康监测技术中,在传感器设计方面仍存在一些不足之处。首先,传感器在高温、高湿等环境下受限;其次,传感器的尺寸和重量问题对飞行器的性能产生一定影响,特别是对于小型机或无人机等,需要轻量化的应用。光纤传感器需要克服反射弱和信号丢失等问题,以确保在结构健康监测中更好地满足需求。在未来的工作中可以通过研发更耐高温、高湿等恶劣环境的传感器,适应各种飞行器的实际运行条件,并致力于轻量化的传感器设计研发,以降低对飞行器性能的影响。

(2) 数据层面。

在结构健康监测系统中,采用被动冲击监测信号、主动式超声导波信号及光纤传感应变信息这3种手段

采集结构状态,该冲击损伤信息与损伤诊断结果相关联。然而对信号之间的关系尚未研究,需要挖掘异构数据之间的深层关系。机器学习技术的快速发展为结构健康监测提供了新机遇,但在复杂使用环境下,如何应对大量数据、提高算法鲁棒性需要重视。整合多传感器数据,采用智能算法和人工智能技术,能够更全面、准确地评估结构健康,同时提高监测系统的灵敏性和可靠性以及实际工程中的适用性。

(3) 系统层面。

在结构健康监测系统设计方面,轻量化是当前的一个关键研究方向。这包括对传感器、数据采集装置和相关设备的设计,降低重量、减少尺寸,减少对飞行器性能的负面影响。同时,与飞行器之间的适配度也是重要的考虑因素,确保监测系统可以无缝集成到不同类型和规模的飞行器中。另外,系统需要实现及时准确的结构状态监测反馈,以便飞行器运营方能迅速响应任何潜在问题,采取适当的维护和修复措施,确保结构的安全性和可靠性。因此,轻量化和飞行器的良好适配度,以及实现高效的监测反馈,共同构成了结构健康监测系统设计的关键要素。

(4) 应用层面。

结构健康监测技术的发展将有助于保证大型工程结构的安全和运行效率。然而,由于结构的复杂性、环境的敏感性和材料的衰减性,结构健康技术在实际工程应用中存在局限。首先,系统需要适应极端多变的环境条件,包括噪声、温度变化;其次,轻量化设计成为必要,以满足飞行器对质量的极高要求。大量的监测数据催生了对有效数据管理和分析工具的需求,同时要平衡数据的实时性和准确性。此外,能耗和电源管理、数据安全性等方面也是必须考虑的重要因素。解决这些挑战需要不断创新技术,以确保结构健康监测系

统在飞行器设计、运营和维护中能够稳健可靠地发挥关键作用。

8 结论

综合考虑飞行器结构健康监测技术中常用的损伤监测技术手段,本文对冲击损伤监测、主动超声导波损伤监测、光纤光栅及分布式光纤技术进行了深入综述,详细探讨了它们的原理及在飞行器结构健康监测领域中的发展现状。对声发射技术、机电阻抗技术、数字孪生技术及新型传感技术和信息融合技术进行了介绍。对国内外在大型结构上的结构健康监测系统的应用现状做了总结。通过对这些技术的综合分析,不仅明确了它们在结构健康监测方面的优劣势,也为未来研究和应用提供了有益的启示。值得注意的是,不同技术在特定应用场景下可能呈现出差异化的性能,因此在飞行器结构健康监测系统的设计中,应充分结合多种技术手段,以实现更全面、准确的损伤识别与状态监测。当前,国内外在该领域的研究和应用呈现出蓬勃的发展态势,为飞行器安全运行提供了可靠的技术支持。

飞行器结构健康监测的实际工程应用也存在一些挑战,如在极端环境下的性能稳定性、实时监测的准确性、异构数据的整合分析等问题。未来的研究方向可以聚焦于高性能传感器制备、技术整合、性能优化等方面,从而不断提升飞行器结构健康监测系统的可靠性和智能化水平。

参考文献

- [1] YANG H J, YANG L, YANG Z Y, et al. Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: A review[J]. Composite Structures, 2023, 324: 117554.
- [2] YANG Z Y, YANG H J, TIAN T, et al. A review on guided-ultrasonic-wave-based structural health monitoring: From fundamental

theory to machine learning techniques[J]. *Ultrasonics*, 2023, 133: 107014.

[3] KAMATH G M, MANGALGIRI P D, SHET A. A quantitative assessment of the impact of corrosion on fatigue life of aircraft components[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 133: 105973.

[4] 李鹏涛, 左洪福, 肖文, 等. 航空发动机叶片损伤及其修复技术与展望[J]. *航空学报*, 2023, 44(11): 1–27.

LI Pengtao, ZUO Hongfu, XIAO Wen, et al. Research and prospect of aero engine blade damage and its repair technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(11): 1–27.

[5] 黄领才. 纤维增强聚合物复合材料无损检测方法进展[J]. *航空学报*, 2024, 45(5): 98–124.

HUANG Lingcai. Review of nondestructive testing methods for fiber-reinforced polymer composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(5): 98–124.

[6] 王赤, 邹自明, 胡晓彦, 等. 空间科学大数据与航天强国[J]. *科学通报*, 2024, 69(9): 1132–1136.

WANG Chi, ZOU Ziming, HU Xiaoyan, et al. Big data in space science and great power of space[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(9): 1132–1136.

[7] TANG X L, YUNG K L, HU B. Reliability and health management of spacecraft[M]//IoT and Spacecraft Informatics. Amsterdam: Elsevier, 2022: 307–335.

[8] 张佳奇. 面向飞行器典型构件的超声导波传播特性影响分析与损伤诊断研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

ZHANG Jiaqi. Influence analysis of ultrasonic guided wave propagation characteristics and damage diagnosis for typical components of aircraft[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[9] 张彦军, 王斌团, 宁宇, 等. 基于健康监测的飞机结构寿命预测技术[J]. *航空工程进展*, 2024, 15(1): 1–14.

ZHANG Yanjun, WANG Bintuan, NING Yu, et al. Life prediction technology of aircraft structures based on structural health monitoring[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2024, 15(1): 1–14.

[10] GIURGIUTIU V, SANTONI-BOTTAI G. Structural health monitoring of composite structures with piezoelectric-wafer

active sensors[J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(3): 565–581.

[11] TRACY M, CHANG F K. Identifying impact load in composite plates based on distributed piezoelectric sensor measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996(2717): 231–236.

[12] SHARIF-KHODAEI Z, GHAJARI M, ALIABADI M H. Determination of impact location on composite stiffened panels[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(10): 105026.

[13] YAN S, LI B W. Impact localization of thin plate structures using PZT-array based passive wave method[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 283(1): 012040.

[14] FRIEDEN J, CUGNONI J, BOTSIS J, et al. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors—Part I: Impact detection and localization[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 438–445.

[15] PENG T, CUI L, HUANG X, et al. Error-index-based algorithm for low-velocity impact localization[J]. *Shock and Vibration*, 2022, 2022: 2703789.

[16] QING X L, LI W Z, WANG Y S, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 545.

[17] TOBIAS A. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors[J]. *Non-Destructive Testing*, 1976, 9(1): 9–12.

[18] GAUL L, HURLEBAUS S. Identification of the impact location on a plate using wavelets[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, 12(6): 783–795.

[19] COVERLEY P T, STASZEWSKI W J. Impact damage location in composite structures using optimized sensor triangulation procedure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12(5): 795–803.

[20] AHMARI S, YANG M J. Impact location and load identification through inverse analysis with bounded uncertain measurements[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 85024.

[21] KUNDU T, NAKATANI H, TAKEDA N. Acoustic source localization in anisotropic plates[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(6): 740–746.

[22] KUNDU T, YANG X, NAKATANI H, et al. A two-step hybrid technique for

accurately localizing acoustic source in anisotropic structures without knowing their material properties[J]. *Ultrasonics*, 2015, 56: 271–278.

[23] SEN N, KUNDU T. A new wave front shape-based approach for acoustic source localization in an anisotropic plate without knowing its material properties[J]. *Ultrasonics*, 2018, 87: 20–32.

[24] 赵刚, 李书欣, 刘立胜, 等. 应变片在复合材料低能量冲击定位中的应用[J]. *振动测试与诊断*, 2018, 38(3): 526–530.

ZHAO Gang, LI Shuxin, LIU Lisheng, et al. Low energy impact localization of composite materials based on resistance strain gauge[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(3): 526–530.

[25] 邱雷, 袁慎芳, 苏永振, 等. 基于 Shannon 复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法[J]. *航空学报*, 2010, 31(12): 2417–2424.

QIU Lei, YUAN Shenfang, SU Yongzhen, et al. Multiple impact source imaging and localization on composite structure based on Shannon complex wavelet and time reversal focusing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(12): 2417–2424.

[26] MINIACI M, MAZZOTTI M, RADZIEŃSKI M, et al. Application of a laser-based time reversal algorithm for impact localization in a stiffened aluminum plate[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 30.

[27] 苏永振, 袁慎芳, 王瑜. 基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(3): 105–110.

SU Yongzhen, YUAN Shenfang, WANG Yu. Impact localization in composite using multiple signal classification method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(3): 105–110.

[28] 钟永腾, 袁慎芳, 邱雷. 基于梅花阵列的复合材料全方位冲击定位方法[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(5): 1369–1374.

ZHONG Yongteng, YUAN Shenfang, QIU Lei. Omni-directional impact localization method on composite structure using plum blossom array[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(5): 1369–1374.

[29] JANG B W, LEE Y G, KIM C G, et al. Impact source localization for composite structures under external dynamic loading condition[J]. *Advanced Composite Materials*,

2015, 24(4): 359–374.

[30] LIU Q, WANG F D, LIU M X, et al. A two-step localization method using wavelet packet energy characteristics for low-velocity impacts on composite plate structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 188: 110061.

[31] ARENA M, VISCARDI M. Vibration parameters for impact detection of composite panel: A neural network based approach[J]. Journal of Composites Science, 2021, 5(7): 185.

[32] FU T, ZHANG Z C, LIU Y J, et al. Development of an artificial neural network for source localization using a fiber optic acoustic emission sensor array[J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14(2): 168–177.

[33] DIPIETRANGELO F, NICASSIO F, SCARSELLI G. Structural health monitoring for impact localisation via machine learning[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 183: 109621.

[34] LIU Z H, PENG Q L, LI X, et al. Acoustic emission source localization with generalized regression neural network based on time difference mapping method[J]. Experimental Mechanics, 2020, 60(5): 679–694.

[35] HOSSAIN M S, ONG Z C, ISMAIL Z, et al. A comparative study of vibrational response based impact force localization and quantification using radial basis function network and multilayer perceptron[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 85: 87–98.

[36] CUOMO S, DE SIMONE M E, ANDREADES C, et al. Machine learning for impact detection on composite structures[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 34: 93–98.

[37] XU Q S. A comparison study of extreme learning machine and least squares support vector machine for structural impact localization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 906732.

[38] FU H M, VONG C M, WONG P K, et al. Fast detection of impact location using kernel extreme learning machine[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(1): 121–130.

[39] LIU Q, WANG F D, LI J D, et al. A hybrid support vector regression with multi-domain features for low-velocity impact localization on composite plate structure[J].

Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107547.

[40] DATTA A, AUGUSTIN M J, GUPTA N, et al. Impact localization and severity estimation on composite structure using fiber Bragg grating sensors by least square support vector regression[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4463–4470.

[41] HESSER D F, MOSTAFAVI S, KOCUR G K, et al. Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning[J]. Neurocomputing, 2021, 453: 1–12.

[42] ZARGAR S A, YUAN F G. Impact diagnosis in stiffened structural panels using a deep learning approach[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(2): 681–691.

[43] GHAJARI M, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI F M H. Impact detection using artificial neural networks[J]. Key Engineering Materials, 2011, 488–489: 767–770.

[44] 许龙涛, 王奕首, 武湛君, 等. 加筋复合材料圆筒结构的撞击识别[J]. 复合材料学报, 2013, 30(5): 218–225.

XU Longtao, WANG Yishou, WU Zhanjun, et al. Impact identification on a cylindrical stiffened composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5): 218–225.

[45] 乔百杰, 陈雪峰, 刘金鑫, 等. 机械结构冲击载荷稀疏识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 81–89.

QIAO Baijie, CHEN Xuefeng, LIU Jinxin, et al. Sparse identification of impact force acting on mechanical structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 81–89.

[46] SAMAGASSI S, KHAMLI CHI A, DRIOUACH A, et al. Reconstruction of multiple impact forces by wavelet relevance vector machine approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 359: 56–67.

[47] ZARGAR S A, YUAN F G. Physics-informed deep learning for scattered full wavefield reconstruction from a sparse set of sensor data for impact diagnosis in structural health monitoring [J/OL]. Structural Health Monitoring, 2024, 1–18[2024–03–04]. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14759217231202547>.

[48] WU Z J, XU L T, WANG Y S, et al. Impact energy identification on a composite plate using basis vectors[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(9): 095007.

[49] WANG Y S, WANG M H, WU D, et al. Time series analysis and sparse sensor network-based impact monitoring for aircraft complex structures[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(6): 4069–4088.

[50] 彭涛, 崔立林, 黄秀峰, 等. 低信噪比下针对平板结构冲击的快速定位算法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 180–187.

PENG Tao, CUI Lilin, HUANG Xiufeng, et al. Fast localization algorithm for impact of flat plate structure under low SNR[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(10): 180–187.

[51] DING G P, CHANG L, ZHOU N H, et al. Localization of low velocity impact on CFRP laminate using normalized error outlier-based algorithm cooperating with Db3-wavelet threshold noise reduction and FBG sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103455.

[52] GORGIN R, WANG Z P, WU Z J, et al. Probability based impact localization in plate structures using an error index[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 157: 107724.

[53] NIRI E D, FARHIDZADEH A, SALAMONE S. Adaptive multisensor data fusion for acoustic emission source localization in noisy environment[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(1): 59–77.

[54] JANG B W. Robust low-velocity impact localization algorithm on composite plate to dynamic operating conditions using fiber optic sensors[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114881.

[55] ZHANG Z H, ZHONG Y T, XIANG J W. TAM and MUSIC approach for impact-source localization under deformation conditions[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3151.

[56] GORGIN R, LUO Y, WU Z J. Environmental and operational conditions effects on Lamb wave based structural health monitoring systems: A review[J]. Ultrasonics, 2020, 105: 106114.

[57] KIM M G, KIM S W. Impact localization for composite plate using the modified error-outlier algorithm with Pugh's concept selection under various temperatures[J]. Composite Structures, 2021, 272: 114226.

[58] 武湛君, 曾旭, 邓德双, 等. 基于自适应时间反转聚焦的加筋复材板冲击定位[J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 507–520.

WU Zhanjun, ZENG Xu, DENG Deshuang, et al. Impact localization on stiffened

composite plate based on adaptive time reversal focusing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1): 507–520.

[59] YU Z X, SUN J Y, XU C, et al. Locating of acoustic emission source for stiffened plates based on stepwise time-reversal processing with time-domain spectral finite element simulation[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(2): 927–947.

[60] YU Z X, XU C, SUN J Y, et al. Impact localization and force reconstruction for composite plates based on virtual time reversal processing with time-domain spectral finite element method[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(6): 4149–4170.

[61] ZHANG Z H, ZHONG Y T, XIANG J W, et al. Research on the performance and improvement of uniform linear sensors array-based impact localization method under vibration conditions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(24): 14932–14939.

[62] SENO A H, ALIABADI M H F. Impact localisation in composite plates of different stiffness impactors under simulated environmental and operational conditions[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3659.

[63] SENO A H, FERRI ALIABADI M H. Multifidelity data augmentation for data driven passive impact location and force estimation in composite structures under simulated environmental and operational conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 195: 110288.

[64] SENO A H, SHARIF KHODAEI Z, FERRI ALIABADI M H. Passive sensing method for impact localisation in composite plates under simulated environmental and operational conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 129: 20–36.

[65] SENO A H, ALIABADI M F. Uncertainty quantification for impact location and force estimation in composite structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(3): 1061–1075.

[66] SENO A H, FERRI ALIABADI M H. A novel method for impact force estimation in composite plates under simulated environmental and operational conditions[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(11): 115029.

[67] ABBAS S, LI F C, QIU J X. A review on SHM techniques and current challenges for characteristic investigation of

damage in composite material components of aviation industry[J]. *Materials Performance and Characterization*, 2018, 7(1): 224–258.

[68] HASSANIS, MOUSAVI, GANDOMI A H. Structural health monitoring in composite structures: A comprehensive review[J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 153.

[69] FENG B, CHENG S, DENG K X, et al. Localization of low-velocity impact in CFRP plate using time–frequency features of guided wave and convolutional neural network[J]. *Wave Motion*, 2023, 119: 103127.

[70] SAI Y Z, JIANG M S, SUI Q M, et al. Multi-source acoustic emission localization technology research based on FBG sensing network and time reversal focusing imaging[J]. *Optik*, 2016, 127(1): 493–498.

[71] JANG B W, KIM C G. Acoustic emission source localization in composite stiffened plate using triangulation method with signal magnitudes and arrival times[J]. *Advanced Composite Materials*, 2021, 30(2): 149–163.

[72] ZHANG Z H, ZHONG Y T, XIANG J W, et al. Phase correction improved multiple signal classification for impact source localization under varying temperature conditions[J]. *Measurement*, 2020, 152: 107374.

[73] LAMB H. On waves in an elastic plate[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1917, 93(648): 114–128.

[74] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(2): 89–93.

[75] NG C T, VEIDT M, ROSE L R F, et al. Analytical and finite element prediction of Lamb wave scattering at delaminations in quasi-isotropic composite laminates[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(22): 4870–4883.

[76] LI C L, HAN Q, LIU Y J, et al. Investigation of wave propagation in double cylindrical rods considering the effect of prestress[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 353: 164–180.

[77] LI C L, HAN Q, LIU Y J. Simplified elastic wave modeling in seven-wire prestressed parallel strands[J]. *Acta Mechanica*, 2017, 228(9): 3251–3263.

[78] BAROUNI A K, SARAVANOS D A. A layerwise semi-analytical method for

modeling guided wave propagation in laminated and sandwich composite strips with induced surface excitation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 51: 118–141.

[79] MU J, ROSE J L. Guided wave propagation and mode differentiation in hollow cylinders with viscoelastic coatings[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(2): 866–874.

[80] MEI H F, GIURGIUTIU V. Predictive 1D and 2D guided-wave propagation in composite plates using the SAFE approach[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018: 106000P.

[81] 刘宏业, 刘申, 吕炎, 等. 纤维增强复合板中声弹 Lamb 波的波结构分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 221–229.

LIU Hongye, LIU Shen, LÜ Yan, et al. Wave structure analysis of acoustoelastic lamb waves in fiber reinforced composite lamina[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8): 221–229.

[82] 李富才, 彭海阔, 孙学伟, 等. 基于谱元法的板结构中导波传播机理与损伤识别[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(21): 57–66.

LI Fucui, PENG Haikuo, SUN Xuewei, et al. Guided wave propagation mechanism and damage detection in plate structures using spectral element method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(21): 57–66.

[83] LU Y, YE L, SU Z Q. Crack identification in aluminium plates using Lamb wave signals of a PZT sensor network[J]. *Smart Material Structures*, 2006, 15(3): 839–849.

[84] DING G, XIU C B, WAN Z K, et al. Location of tensile damage source of carbon fiber braided composites based on two-step method[J]. *Molecules*, 2019, 24(19): 3524.

[85] GIURGIUTIU V, BAO J J. Embedded-ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2004, 3(2): 121–140.

[86] YU L Y, GIURGIUTIU V. In-situ optimized PWAS phased arrays for lamb wave structural health monitoring[J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2007, 2(3): 459–488.

[87] MALINOWSKI P, WANDOWSKI T, OSTACHOWICZ W. Damage detection potential of a triangular piezoelectric configuration[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(7): 2722–2732.

[88] WANDOWSKI T, MALINOWSKI

P H, OSTACHOWICZ W M. Circular sensing networks for guided waves based structural health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66: 248–267.

[89] YU L Y, TIAN Z H. Guided wave phased array beamforming and imaging in composite plates[J]. Ultrasonics, 2016, 68: 43–53.

[90] PUREKAR A S, PINES D J. Damage detection in thin composite laminates using piezoelectric phased sensor arrays and guided lamb wave interrogation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(10): 995–1010.

[91] LELEUX A, MICHEAU P, CASTAINGS M. Long range detection of defects in composite plates using lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(2): 200–214.

[92] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W, et al. Structural Health Monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 21–32.

[93] YANG Z B, ZHU M F, LANG Y F, et al. FRF-based lamb wave phased array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 166: 108462.

[94] 王瑜, 袁慎芳, 邱雷, 等. 主动 Lamb 波中的空间滤波器结构健康监测 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 794–797, 817–818.

WANG Yu, YUAN Shenfeng, QIU Lei, et al. Direction filter method in active lamb wave structural health monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 794–797, 817–818.

[95] ENGHOLM M, STEPINSKI T, OLOFSSON T. Imaging and suppression of Lamb modes using adaptive beamforming[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(8): 085024.

[96] 刘彬, 邱雷, 袁慎芳, 等. 基于多维阵列和空间滤波器的损伤无波速成像定位方法 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 835–844.

LIU Bin, QIU Lei, YUAN Shenfeng, et al. Damage imaging and localization method based on multi-dimension arrays and spatial filter without wave velocity[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 835–844.

[97] LAKSHMI K. Detection and

quantification of damage in bridges using a hybrid algorithm with spatial filters under environmental and operational variability[J]. Structures, 2021, 32: 617–631.

[98] 常琦, 徐勇, 赵恒. 基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 221–229.

CHANG Qi, XU Yong, ZHAO Heng. Research on the spatial filter structure damage scanning monitoring method based on circular array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 221–229.

[99] AGRAHARI J K, KAPURIA S. A refined Lamb wave time-reversal method with enhanced sensitivity for damage detection in isotropic plates[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(10): 1283–1305.

[100] HUANG L P, ZENG L, LIN J, et al. An improved time reversal method for diagnostics of composite plates using Lamb waves[J]. Composite Structures, 2018, 190: 10–19.

[101] WANG X P, CAI J, ZHOU Z Q. A Lamb wave signal reconstruction method for high-resolution damage imaging[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1087–1099.

[102] LIN X, YUAN F G. Damage detection of a plate using migration technique[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2001, 12(7): 469–482.

[103] 严刚, 周丽. 基于频率–波数域偏移的损伤被动成像识别研究 [J]. 固体力学学报, 2011, 32(S1): 273–279.

YAN Gang, ZHOU Li. Passive imaging and identification of damages using migration technique in frequency–wavenumber domain[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(S1): 273–279.

[104] ZHOU L, YUAN F, MENG W. A pre-stack migration method for damage identification in composite structures[J]. Smart Structures and Systems, 2007, 3: 439–454.

[105] HE J Z, ROCHA D C, LESER P E, et al. Least-squares reverse time migration (LSRTM) for damage imaging using Lamb waves[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 065010.

[106] ZHAO X, ROYER R L, OWENS S E, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 105002.

[107] CHAN E, FRANCIS ROSE L R,

WANG C H. A comparison and extensions of algorithms for quantitative imaging of laminar damage in plates. II. Non-monopole scattering and noise tolerance[J]. Wave Motion, 2016, 66: 220–237.

[108] SHI F, HUTHWAITE P. Ultrasonic wave-speed diffraction tomography with undersampled data using virtual transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(7): 1226–1238.

[109] DRUET T, TASTET J L, CHAPUIS B, et al. Autocalibration method for guided wave tomography with undersampled data[J]. Wave Motion, 2019, 89: 265–283.

[110] ZHAO X L, GAO H D, ZHANG G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(4): 1208–1217.

[111] SU C H, JIANG M S, LIANG J Y, et al. Damage identification in composites based on Hilbert energy spectrum and lamb wave tomography algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11562–11572.

[112] SUN H, ZHANG A J, WANG Y S, et al. Baseline-free damage imaging for metal and composite plate-type structures based on similar paths[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(4): 1550147719843054.

[113] LIU K H, MA S Y, WU Z J, et al. A novel probability-based diagnostic imaging with weight compensation for damage localization using guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(2): 162–173.

[114] CANTERO-CHINCHILLA S, WILCOX P D, CROXFORD A J. Deep learning in automated ultrasonic NDE—developments, axioms and opportunities[J]. NDT & E International, 2022, 131: 102703.

[115] QING X L, LIAO Y L, WANG Y H, et al. Machine learning based quantitative damage monitoring of composite structure[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2022, 13(2): 167–202.

[116] WU Z J, LIU K H, WANG Y S, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J].

Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(16): 2181–2195.

[117] LIU H, LIU S, LIU Z, et al. Data-driven approaches for characterization of delamination damage in composite materials[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2532–2542.

[118] RIZVI SYED HAIDER M, MUNTAZIR A. Lamb wave damage severity estimation using ensemble-based machine learning method with separate model network[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(11): 115016.

[119] SUN H Y, PENG L S, LIN J M, et al. Microcrack defect quantification using a focusing high-order SH guided wave EMAT: The physics-informed deep neural network GuwNet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 3235–3247.

[120] SU Z Q, YE L. Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm[J]. Composite Structures, 2004, 66(1–4): 627–637.

[121] PERFETTO D, DELUCA A, PERFETTO M, et al. Damage detection in flat panels by guided waves based artificial neural network trained through finite element method[J]. Materials, 2021, 14(24): 7602.

[122] FENG B, PASADAS D J, RIBEIRO A L, et al. Locating defects in anisotropic CFRP plates using ToF-based probability matrix and neural networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1252–1260.

[123] YU Y, BINWEN W, SHUAISHUAI L, et al. A deep-learning-based method for damage identification of composite laminates[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 102–108.

[124] RAUTELA M, SENTHILNATH J, MOLL J, et al. Combined two-level damage identification strategy using ultrasonic guided waves and physical knowledge assisted machine learning[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106451.

[125] RAUTELA M, SENTHILNATH J, MONACO E, et al. Delamination prediction in composite panels using unsupervised-feature learning methods with wavelet-enhanced guided wave representations[J]. Composite Structures, 2022, 291: 115579.

[126] SHAO W H, SUN H, WANG Y S,

et al. A multi-level damage classification technique of aircraft plate structures using Lamb wave-based deep transfer learning network[J]. Smart Material Structures, 2022, 31(7): 075019.

[127] ZHAO X, ROSE J L. Ultrasonic guided wave tomography for ice detection[J]. Ultrasonics, 2016, 67: 212–219.

[128] YU Y H, LIU X, WANG Y H, et al. Lamb wave-based damage imaging of CFRP composite structures using autoencoder and delay-and-sum[J]. Composite Structures, 2023, 303: 116263.

[129] SONG H, YANG Y C. Uncertainty quantification in super-resolution guided wave array imaging using a variational Bayesian deep learning approach[J]. NDT & E International, 2023, 133: 102753.

[130] RAUTELA M, JAYAVELU S, MOLL J, et al. Temperature compensation for guided waves using convolutional denoising autoencoders[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11593: 1159319.

[131] ZOUBI A B, MATHEWS V J. Unsupervised damage detection in time varying environmental conditions using an autoencoder and support vector data description[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 329(12): 2306–2322.

[132] LIN M, LIU Y. Guided wave tomography based on supervised descent method for quantitative corrosion imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(12): 3624–3636.

[133] WANG X C, LI J, WANG D P, et al. Sparse ultrasonic guided wave imaging with compressive sensing and deep learning[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 178: 109346.

[134] WANG X C, LIN M, LI J, et al. Ultrasonic guided wave imaging with deep learning: Applications in corrosion mapping[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 169: 108761.

[135] 杨宇, 王彬文, 吕帅帅, 等. 一种基于深度学习的复合材料结构损伤导波监测方法[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 102–108.

YANG Yu, WANG Binwen, LÜ Shuaishuai, et al. A deep-learning-based method for damage identification of composite laminates[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 102–108.

[136] 杨宇, 周雨熙, 王莉. 一种集成多个机器学习模型的复合材料结构损伤识别方

法[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(2): 278–287.

YANG Yu, ZHOU Yuxi, WANG Li. Integrated method of multiple machine-learning models for damage recognition of composite structures[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(2): 278–287.

[137] 王莉, 刘国强, 杨宇, 等. 基于神经网络的复合材料结构分层损伤定量监测方法[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(3): 50–54.

WANG Li, LIU Guoqiang, YANG Yu, et al. Quantitative monitoring method for delamination damage of composite panel based on neural network[J]. Fiber Composites, 2020, 37(3): 50–54.

[138] ZHANG B, HONG X B, LIU Y. Multi-task deep transfer learning method for guided wave-based integrated health monitoring using piezoelectric transducers[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(23): 14391–14400.

[139] ZHANG H, LIN J, HUA J D, et al. Attention-based interpretable prototypical network towards small-sample damage identification using ultrasonic guided waves[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 188: 109990.

[140] SIKDAR S, LIU D Z, KUNDU A. Acoustic emission data based deep learning approach for classification and detection of damage-sources in a composite panel[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 228: 109450.

[141] TANG L Q, LI Y H, BAO Q, et al. Quantitative identification of damage in composite structures using sparse sensor arrays and multi-domain-feature fusion of guided waves[J]. Measurement, 2023, 208: 112482.

[142] LOMAZZI L, JUNGES R, GIGLIO M, et al. Unsupervised data-driven method for damage localization using guided waves[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 111038.

[143] YUAN Q, WANG Y, SU Z Q, et al. Quantitative damage evaluation of curved plates based on phased array guided wave and deep learning algorithm[J]. Ultrasonics, 2024, 137: 107176.

[144] XU H M, LIU L S, LI X, et al. Wavefield imaging of nonlinear ultrasonic Lamb waves for visualizing fatigue micro-cracks[J]. Ultrasonics, 2024, 138: 107214.

[145] LV S S, WEI J T, JIANG M S. Damage localization method for plate-like

composite structure based on valid path optimization and search point matching[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 182: 109562.

[146] PINEDA ALLEN J C, NG C T. Damage detection in composite laminates using nonlinear guided wave mixing[J]. Composite Structures, 2023, 311: 116805.

[147] LI D, NIE J H, WANG H, et al. Loading condition monitoring of high-strength bolt connections based on physics-guided deep learning of acoustic emission data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 206: 110908.

[148] GULIZZI V, RIZZO P, MILAZZO A. On the repeatability of electromechanical impedance for monitoring of bonded joints[J]. AIAA Journal, 2015, 53(11): 053682.

[149] OLIVERA J, GONZÁLEZ M, FUENTE J V, et al. An embedded stress sensor for concrete SHM based on amorphous ferromagnetic microwires[J]. Sensors, 2014, 14(11): 19963–19978.

[150] AHMED S, BODAGHI M, NAUMAN S, et al. Additive manufacturing of flexible strain sensors based on smart composites for structural health monitoring with high accuracy and fidelity[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(22): 2300763.

[151] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. The performance of a piezoelectric-sensor-based SHM system under a combined cryogenic temperature and vibration environment[J]. Smart Material Structures, 2008, 17(5): 055010.

[152] REN Y Q, ZHANG S F, YUAN S F, et al. In-situ integration and performance verification of large-scale PZT network for composite aerospace structure[J]. Smart Material Structures, 2023, 32(5): 055010.

[153] 黄建, 陈陆平, 丁凌杰. 光纤传感器在隧道结构中的应用[J]. 中国科技信息, 2023(21): 75–77.

HUANG Jian, CHEN Luping, DING Lingjie. Application of optical fiber sensor in tunnel structure[J]. China Science and Technology Information, 2023(21): 75–77.

[154] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647–649.

[155] YAN S, ZHANG J J, SUN B Z, et al. In situ measurement of strains at different locations in 3-D braided composites with FBG sensors[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111527.

[156] NIKLES M, VOGEL B H, BRIFFOD F, et al. Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5384: 18–25.

[157] BROWN G A, HARTOG A. Optical fiber sensors in upstream oil & gas[J]. Journal of Petroleum Technology, 2002, 54(11): 63–65.

[158] BARNOSKI M K, ROURKE M D, JENSEN S M, et al. Optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 1977, 16(9): 2375–2379.

[159] ROGERS A J. Polarisation optical time domain reflectometry[J]. Electronics Letters, 1980, 16(13): 489–490.

[160] JUAREZ J C, TAYLOR H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3284–3286.

[161] DI LELLA A, DESBIENS N, BOUTIN A, et al. Molecular simulation studies of water physisorption in zeolites[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2006, 8(46): 5396–5406.

[162] SUCHA G D, FERMANN M E, HARTER D J. Scanning temporal ultrafast delay and methods and apparatuses: US05778016A[P]. 1998–07–07.

[163] SOLLER B J, GIFFORD D K, WOLFE M S, et al. Measurement of localized heating in fiber optic components with millimeter spatial resolution[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. New York: IEEE Press, 2006: 3.

[164] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152–4187.

[165] SHIMIZU K, HORIGUCHI T, KOYAMADA Y, et al. Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber[J]. Optics Letters, 1993, 18(3): 180–185.

[166] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296–1302.

1995, 13(7): 1296–1302.

[167] DEMERCHANT M D, BROWN A W, BAO X, et al. Automated system for distributed sensing[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3330: 315–322.

[168] SMITH J, BROWN A W, DEMERCHANT M, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a Brillouin-scattering-based distributed sensor[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3670: 366–373.

[169] 夏力. 基于分布式光纤传感器的损伤后加固桥梁的监测研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.

XIA Li. Research on Monitoring of reinforced steel beams after damage based on distributed optical fiber sensors[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021.

[170] WEBB S, SHIN P, PETERS K, et al. Nondestructive inspection of CFRP adhesively bonded joints using embedded FBG sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8722: 43–51.

[171] KARABACAK D M, IBRAHIM S K, KOUMANS Y, et al. High-speed system for FBG-based measurements of vibration and sound[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9852: 98520I.

[172] HOTATE K, LENG S O S. A correlation-based continuous-wave technique for measurement of dynamic strain along an optical fiber using Brillouin scattering with fully distributed ability[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. New York: IEEE Press, 2002: 615–618.

[173] HOTATE K. Correlation-based continuous-wave technique for optical fiber distributed strain measurement using Brillouin scattering (Invited Paper)[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 623429.

[174] HOTATE K. Brillouin scattering accompanied by acoustic grating in an optical fiber and applications in fiber distributed sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7753: 775307.

[175] MINAKUCHI S, NAKAMURA T, NADABE T, et al. Damage detection of CFRP bolted joints using embedded optical fibers with BOCDA system[J]. Journal of the JAPAN Society for Aeronautical and Space Sciences, 2011, 59(690): 176–182.

[176] MINAKUCHI S, TAKEDA N,

- TAKEDA S I, et al. Life cycle monitoring of large-scale CFRP VARTM structure by fiber-optic-based distributed sensing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(6): 669–676.
- [177] GÜEMES A, FERNANDEZ-LOPEZ A, FERNANDEZ P. Damage detection in composite structures from fibre optic distributed strain measurements[C]//7th European Workshop on Structural Health Monitoring. 2014: 528–535.
- [178] LEUNG C K Y, ELVIN N, OLSON N, et al. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 65(2–3): 133–148.
- [179] KULPA M, HOWIACKI T, WIATER A, et al. Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel[J]. *Measurement*, 2021, 175: 109099.
- [180] MURAYAMA H, WADA D, IGAWA H. Structural health monitoring by using fiber-optic distributed strain sensors with high spatial resolution[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(4): 355–376.
- [181] 陈帅, 黄念, 李建乐, 等. 基于分布式光纤传感信号的结构损伤识别主成分分析方法[J]. *实验力学*, 2022, 37(6): 838–846.
- CHEN Shuai, HUANG Nian, LI Jianle, et al. Principal component analysis for structural damage identification based on distributed optical fiber sensing signals[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(6): 838–846.
- [182] 吕睿. 基于分布式光纤的飞行器典型构件多参量识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- LÜ Rui. Multi-parameter identification of typical aircraft components based on distributed optical fiber[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [183] 单一男. 基于分布式光纤传感的典型结构状态监测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- SHAN Yinan. Study of structural states monitoring method for typical structures based on distributed optical fiber sensing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [184] LIU Y M, BAO Y. Automatic interpretation of strain distributions measured from distributed fiber optic sensors for crack monitoring[J]. *Measurement*, 2023, 211: 112629.
- [185] SONG Q, ZHANG C, TANG G, et al. Deep learning method for detection of structural microcracks by Brillouin scattering based distributed optical fiber sensors[J]. *Smart Materials*, 2020, 29(7): 075008.
- [186] KARYPIDIS D, BERROCAL C G, REMPLING R, et al. Structural health monitoring of RC structures using optic fiber strain measurements: A deep learning approach[C]//2019 IABSE Congress. Denmark: IABSE, 2019: 114.
- [187] DERKEVORKIAN A, MASRI S F, ALVARENGA J, et al. Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(9): 2231–2240.
- [188] OBOED, COLOMBOL, SBARUFATTI C, et al. Shape sensing of a complex aeronautical structure with inverse finite element method[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1388.
- [189] MENG M, CHUA Y J, WOUTERSON E, et al. Ultrasonic signal classification and imaging system for composite materials via deep convolutional neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2017, 257: 128–135.
- [190] BARTLEY-CHO J, WANG D, KUDVA J. Shape estimation of deforming structures[C]//19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Reston: AIAA, 2001.
- [191] LUNG S F, KO W L. Applications of displacement transfer functions to deformed shape predictions of the G-III swept-wing structure[C]//Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Hampton: NTRS, 2016.
- [192] PENA F. Fiber-optic strain-based deflection and twist sensing for a high-aspect-ratio swept wing[R]. Hampton: NTRS, 2020.
- [193] KO W L, FLEISCHER V T. Extension of Ko straight-beam displacement theory to deformed shape predictions of slender curved structures[R]. Hampton: NTRS, 2011.
- [194] KO W L, FLEISCHER V T. Large-deformation displacement transfer functions for shape predictions of highly flexible slender aerospace structures[R]. Hampton: NTRS, 2013.
- [195] KO W L, RICHARDS W, TRAN V T. Displacement theories for In-flight deformed shape predictions of aerospace structures[R]. Hampton: NTRS, 2013.
- [196] RICHARDS L, PARKER A, KO W, et al. Fiber optic wing shape sensing on NASA's ikhona UAV[C]//NAVAIR Meeting. Hampton: NTRS, 2008.
- [197] NICOLAS M J. Structural analysis and testing of a carbon-composite wing using fiber Bragg gratings[D]. Mississippi: Mississippi State University, 2013.
- [198] 夏力, 王大鹏. 结合 OFDR 与 Ko 位移理论的变形估算研究[J]. *光通信技术*, 2021, 45(7): 53–55.
- XIA Li, WANG Dapeng. Study of deformation estimation combining OFDR and Ko displacement theory[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(7): 53–55.
- [199] 胡明月, 吴邵庆, 董蓁良. 基于实测应变的典型热防护结构位移场实时重构[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(4): 664–671.
- HU Mingyue, WU Shaoqing, DONG Eliang. Real-time displacement field reconstruction of typical thermal protection structures based on measured strain[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(4): 664–671.
- [200] 李恒春. 基于光纤光栅的高温涡轮叶片变形重构研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- LI Hengchun. Research on deformation detection and reconstruction of high temperature turbine blade based on FBG sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [201] 赵飞飞, 曹开拓, 保宏, 等. Timoshenko 梁的变形场重构及传感器位置优化[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 1–11.
- ZHAO Feifei, CAO Kaituo, BAO Hong, et al. Deformation field reconstruction of Timoshenko beam and optimization of sensor placement[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 1–11.
- [202] 袁慎芳, 闫美佳, 张巾巾, 等. 一种适用于梁式机翼的变形重构方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(6): 825–830.
- YUAN Shenfang, YAN Meijia, ZHANG Jinjin, et al. Shape reconstruction method of spar wing structure[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(6): 825–830.
- [203] TESSLER A, SPANGLER J L. A least-squares variational method for full-field reconstruction of elastic deformations in shear-deformable plates and shells[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194(2–5): 327–339.

- [204] 胡明月, 吴邵庆, 董萼良. 基于逆有限元法的三维壁板结构变形场重构[J]. 工程力学, 2024, 41(6): 235–245.
- HU Mingyue, WU Shaoqing, DONG Eliang. Reconstruction of deformation field of three-dimensional panel structure based on inverse finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(6): 235–245.
- [205] KEFALA A, OTERKUS E, TESSLER A, et al. A quadrilateral inverse-shell element with drilling degrees of freedom for shape sensing and structural health monitoring[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016, 19(3): 1299–1313.
- [206] KEFALA A, OTERKUS E. Displacement and stress monitoring of a chemical tanker based on inverse finite element method[J]. Ocean Engineering, 2016, 112: 33–46.
- [207] 黄辉. 基于逆有限元方法的板梁结构变形重构的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- HUANG Hui. Research on deformation reconstruction of plate and beam structure based on iFEM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [208] 曹开拓. 基于逆有限元的天线桁架结构变形重构研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- CAO Kaituo. Deformation reconstruction of array antenna truss structure based on inverse finite element method[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [209] 尤润州. 基于逆有限元法的结构变形重构技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- YOU Runzhou. Research on shape sensing technology of engineering structures based on inverse finite element method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [210] 赵勇. 基于逆有限元法的天线副面支撑结构变形重构研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- ZHAO Yong. Research on reconstructing the supporting structure deformation of sub-reflector based on inverse finite element method[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [211] 周富. 基于逆有限元法的大型数控机床立柱变形重构研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- ZHOU Fu. Study on deformation reconstruction of column of heavy-duty NC machine tool based on inverse FEM[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [212] 闫宏生, 白超迪, 贾同宇, 等. 逆有限元法在船体加筋板结构变形重构中的应用[J]. 中国造船, 2023, 64(1): 168–179.
- YAN Hongsheng, BAI Chaodi, JIA Tongyu, et al. Application of inverse finite element in structural deformation reconstruction of ship reinforced plate[J]. Shipbuilding of China, 2023, 64(1): 168–179.
- [213] 费芹. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统的设计与优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- FEI Qin. Design and optimization of distributed optical fiber temperature measurement system based on Raman scattering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [214] 夏建春. 分布式光纤拉曼温度与准分布式光纤光栅应力融合传感技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- XIA Jianchun. Research on hybrid technology of distributed Raman temperature and discrete FBG strain sensing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [215] 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 光纤中光散射及在分布式传感技术中的应用[J]. 传感器技术, 1995, 14(2): 49–51.
- HUANG Minshuang, CHEN Weimin, HUANG Shanglian. Light scattering in optical-fiber and its application in distributed optical-fiber sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 1995, 14(2): 49–51.
- [216] 徐子珩. 分布式拉曼光纤温度传感系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- XU Ziheng. Research of distributed Raman optical fiber temperature sensing system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [217] SOTO M A, SAHU P K, FARALLI S, et al. Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes[J]. Electronics Letters, 2007, 43(16): 862–864.
- [218] 石超. 分布式光纤测温系统及其软件表现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- SHI Chao. Distributed optical fiber temperature measurement system and software performance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [219] 黄尚廉, 梁大巍, 刘龚. 分布式光纤温度传感器系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 1991, 12(4): 359–364.
- HUANG Shanglian, Liang Dawei, Liu Gong. A study on the distributed fiber optic temperature sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1991, 12(4): 359–364.
- [220] 张小丽, 陈乐, 孙坚, 等. 一种分布式光纤温度传感器的校准方法[J]. 自动化仪表, 2011, 32(12): 32–35.
- ZHANG Xiaoli, CHEN Le, SUN Jian, et al. Calibration methods for distributed optical fiber temperature sensor[J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(12): 32–35.
- [221] FRANCESCO F, DEMETRIO C, NAN Y, et al. Qualification of distributed optical fiber sensors using probability of detection curves for delamination in composite laminates[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(5): 2972–2986.
- [222] 李建乐, 张佳奇, 黄念, 等. 基于深度学习的分布式光纤损伤识别方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 88–95.
- LI Jianle, ZHANG Jiaqi, HUANG Nian, et al. Distributed optical fiber damage identification method based on deep learning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 88–95.
- [223] GUO Q, YU Y S, ZHENG Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019, 18: 208–211.
- [224] ZHOU W, PAN Z B, WANG J, et al. Review on acoustic emission source location, damage recognition and lifetime prediction of fiber-reinforced composites[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(2): 583–607.
- [225] 王奕首, 王明华, 刘德博, 等. 声发射在复合材料贮箱上的应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 1–17.
- WANG Yishou, WANG Minghua, LIU Debo, et al. Research progress on the application of acoustic emission to composite tanks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 1–17.
- [226] GHADARAH N, AYRE D. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6945.
- [227] 朱健健. 基于圆形压电传感器机电阻抗耦合模型的结构健康监测技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.
- ZHU Jianjian. Structural health monitoring

Technology based on electromechanical impedance coupling model of circular piezoelectric transducer[D]. Xiamen: Xiamen University, 2020.

[228] AI D M, CHENG J B. A deep learning approach for electromechanical impedance based concrete structural damage quantification using two-dimensional convolutional neural network[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2023, 183: 109634.

[229] CAO P, ZHANG S L, WANG Z Q, et al. Damage identification using piezoelectric electromechanical Impedance: A brief review from a numerical framework perspective[J]. *Structures*, 2023, 50: 1906–1921.

[230] 王子一, 栗华, 龚春林, 等. 数字孪生机翼损伤模式快速识别与监测方法[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(6): 20220395.

WANG Ziyi, SU Hua, GONG Chunlin, et al. Rapid identification and monitoring of digital twin wing damage modes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(6): 20220395.

[231] LAI X N, YANG L L, HE X W, et al. Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: An aircraft wing example[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 69: 76–90.

[232] YE Y M, YANG Q, ZHANG J G, et al. A dynamic data driven reliability prognosis method for structural digital twin and experimental validation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 240: 109543.

[233] 卿新林, 黄媛, 颜佳佳, 等. 先进碳纤维增强复合材料螺栓连接结构损伤监测技术[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(17): 14–25.

QING Xinlin, HUANG Yuan, YAN Jiajia, et al. Damage monitoring technology for advanced carbon fiber reinforced composite bolted joints[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(17): 14–25.

[234] KANG J Y, LIU T, LU Y, et al. Polyvinylidene fluoride piezoelectric yarn for real-time damage monitoring of advanced 3D textile composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 245: 110229.

[235] YUAN L J, FAN W, YANG X, et al. Piezoelectric PAN/BaTiO₃ nanofiber membranes sensor for structural health monitoring of real-time damage detection in composite[J]. *Composites Communications*,

2021, 25: 100680.

[236] WANG X Q, LU J, LU S W, et al. Health monitoring of repaired composite structure using MXene sensor[J]. *Composites Communications*, 2021, 27: 100850.

[237] BROER A A R, BENEDICTUS R, ZAROUCHAS D. The need for multi-sensor data fusion in structural health monitoring of composite aircraft structures[J]. *Aerospace*, 2022, 9(4): 183.

[238] ELEFTHEROGLOU N, ZAROUCHAS D, LOUTAS T, et al. Structural health monitoring data fusion for in situ life prognosis of composite structures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 178: 40–54.

[239] KORDESTANI M, ORCHARD M E, KHORASANI K, et al. An overview of the state of the art in aircraft prognostic and health management strategies[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 3505215.

[240] 张博, 孟宝林, 栾书平. 用于无人飞行器系统的综合健康管理 (IVHM) 架构设计[J]. *科技创新与应用*, 2017(8): 63–64.

ZHANG Bo, MENG Baolin, LUAN Shuping. Integrated health management (IVHM) architecture design for unmanned aerial vehicle system[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(8): 63–64.

[241] LUCAS B. Airbus technical magazine[N/OL]. *Flight Airworthiness Support Technology*, 2014–08(54)[2024–03–04]. <https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2022-04/FAST-054.pdf>.

[242] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(11–12): 1694–1702.

[243] RUSSELL R, GRUNDY D, JABLONSKI D, et al. Health monitoring of composite overwrapped pressure vessels (COPVs) using meandering winding magnetometer ((MWM(registered trademark)) eddy current sensors[C]//Aircraft Airworthiness and Sustainment Conference. 2011.

[244] GAO D Y, WANG Y S, WU Z J, et al. Design of a sensor network for structural health monitoring of a full-scale composite horizontal tail[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(5): 055011.

[245] LU Y H, MICHAELS J E. A

methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(9): 717–731.

[246] GAO D Y, WU Z J, ZHENG Y B, et al. The performance of a surface-bonded PZT sensor based rocket tanks SHM system under the cryogenic temperature operating environment[M]//CHANG F K, FOTIS K. *Structural health monitoring 2015*. Lancaster: Destech Publications, Inc, 2015: 2945–2953.

[247] 武湛君, 渠晓溪, 高东岳, 等. 航空航天复合材料结构健康监测技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016(15): 92–102, 109.

WU Zhanjun, QU Xiaoxi, GAO Dongyue, et al. Research progress of structural health monitoring technology for aerospace Composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(15): 92–102, 109.

[248] 庞宝君. 空间站天和核心舱遭到空间碎片撞击时如何避免? [EB/OL]. (2021–06–15)[2021–06–24]. <https://mp.weixin.qq.com/s/AsaLuqBDzcZil3QLTsQNCQ>.

PANG Baojun. How can the space station and the core module avoid being hit by space debris?[EB/OL]. (2021–06–15)[2021–06–24]. <https://mp.weixin.qq.com/s/AsaLuqBDzcZil3QLTsQNCQ>.

[249] 鲍峤, 邱雷, 袁慎芳. 飞行器结构健康监测中压电–导波成像技术的发展与挑战[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(3): 15–33.

BAO Qiao, QIU Lei, YUAN Shenfang. Development and challenges of PZT–guided wave based imaging technique in aircraft structural health monitoring[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(3): 15–33.

[250] ROBINSON J A, THUMM T L, THOMAS D A. NASA utilization of the international space station and the vision for space exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61: 176–184.

[251] TAČCI T, HÖSCHLER K, PANNIER S, et al. A structural health monitoring (SHM) approach using a multidisciplinary digital twin for high-pressure turbine discs in civil aviation[J]. *Proceedings IRF2020*, 2020: 491–502.

通讯作者: 武湛君, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构健康监测与飞行器结构 / 材料性能表征。

(下转第 98 页)

引文格式: 戈家影, 文钧民, 叶冬, 等. 飞行器智能蒙皮异质多层电路制造技术进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 68–83.

GE Jiaying, WEN Junmin, YE Dong, et al. Advances in manufacturing technologies for heterogeneous multilayer circuit of aircraft smart skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 68–83.

飞行器智能蒙皮异质多层电路制造技术进展*

戈家影, 文钧民, 叶冬, 黄永安

(华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 智能蒙皮在飞行器承载结构蒙皮表面集成异质多功能电路系统,是实现未来变体飞行器“Fly-by-Feel”的使能技术。飞行器智能蒙皮涉及多功能分布式传感系统、共形天线、频率选择表面、防/除冰等功能模块,这提升了飞行器态势感知能力并促进其结构向轻量化发展,其技术关键在于复杂3D结构表面异质多层电路的成型制造。针对智能蒙皮多功能电路制造难题,本文对不同种类曲面功能单元制造中的难点进行详细分析,并对比阐述适用于不同类型结构的制造技术,包括共形打印、通孔互联、曲面贴装、薄膜制备等。最后总结和展望了智能蒙皮异质多层电路制造技术面临的挑战和潜在解决方案,为下一代飞行器智能蒙皮制造技术的突破提供有益的参考。

关键词: 智能蒙皮; 多层电路; 共形打印; 通孔互连; 曲面贴装; 薄膜制备

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.068



戈家影

博士研究生,主要从事大面积曲面电路机器人化3D共形打印研究。

随着飞行器巡航速度、机动性能、飞行升力等要求不断提高,且面临越来越高的气动布局和隐身要求,实时改变飞行器气动外形或通信策略成为理想的解决方案^[1]。对环境的感知是飞行器做出决策的前提,因此需要在机身布置分布式传感系统,使飞行器具有自诊断、自学习、自修复、自适应等功能,能够像鸟类一样根据周围环境改变飞行姿态,即“Fly-by-Feel”^[2]。作为一种革命性的技术,飞行器智能蒙皮被各国广泛关注。2001年, NASA 提出了2030年的变体飞行器概念,要求飞行器可以实时感知飞行载荷和改变机翼形状^[3]。欧盟于2015年8月完成的“灵巧智能飞机结构”项目集成了大量传感器,采用了可监测外形、探测损伤,以及影响敏感涂层的光纤和超声技术,实现了飞机的结构健康监测功能^[4]。近年来,我国公布的“南天门计划”中的“白帝”空天战机有望实

现全频段隐身,还能根据飞行高度和气动状态进行机翼变形。

智能蒙皮是实现飞行器“Fly-by-Feel”的关键技术,它主要是将传感、驱动、微处理器等功能器件集成于飞行器蒙皮结构表面,使结构不仅具有承载能力,而且还具有感知、处理、通信控制等多种功能。智能蒙皮可以通过感知监测应变、冲击、振动、温度等信息主动做出变形或加热等措施来保证飞行器空气动力学性能的最优化^[5],在无人机中可以利用共形承载天线实现探测、通信、导航、对抗、态势感知等功能^[6],利用主动频率选择表面可实现选择性透波,优化隐身性能^[7]。

实现飞行器蒙皮智能化的关键在于蒙皮表面贴装或在内部嵌入各种电子元器件,使之具有传感、信号处理、反馈控制等功能^[5]。电子元器件集成制造的精度和一致性决定着智能蒙皮的可靠性和环境适应性。智能蒙皮中的功能结构包含大量的

* 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3200700); 国家自然科学基金(52188102, 11932009)。

智能传感器、刚性芯片和面积互连电路,飞行器不同部位的结构形式与曲率半径差异巨大,电子器件类型、规模与集成度变化多样,对制造技术和制造装备提出了较大的挑战^[8]。本文首先介绍飞行器智能蒙皮系统及其异质多层电路,然后介绍其共形制造中的关键技术,最后总结和展望飞行器智能蒙皮制造所面临的挑战。

1 智能蒙皮中的曲面多功能电路

曲面异质多层电路是飞行器智能蒙皮的显著特征,包括大规模传感系统、共形承载天线、主动频率选择表面、电加热系统等,如图1所示^[9-11]。飞行器智能蒙皮功能结构的成型制造需用到多种曲面电路制备工艺,涉及共形打印、通孔互联、曲面贴装和薄膜制备等。

智能蒙皮传感技术是一种将分

布式多功能传感系统嵌入飞机蒙皮结构的技术,用以实现飞机对外部环境、飞行状态、气动性能和内部结构状态的感知和监测^[8,12-13]。为了实现这一目标,NASA在2013—2015年期间对G-III飞机进行了多种传感器的集成试验^[14]。根据其结构特点,智能蒙皮传感系统可以分为两类,即柔性电路板表贴式传感系统和结构嵌入式传感系统。柔性电路板表贴式传感系统的制造是在柔性基底材料(如聚酰亚胺和聚对苯二甲酸乙二醇酯)上集成传感器、芯片和电路等元件,形成一个大面积轻质的传感网络,然后贴合至机翼蒙皮以实现功能^[15]。这些集成的传感器包括应变传感器、压力传感器、剪应力传感器、流量传感器和多功能传感器等^[2]。结构嵌入式传感系统的制造方式主要包括两类:一种是通过喷墨打印在3D结构表面印刷传感器;另一种是在复合材料树脂基体中掺

杂碳纳米材料形成热力敏感层来实现^[15]。目前,柔性电路板表贴式传感系统的制造工艺较为成熟,而结构嵌入式传感系统主要为了实现传感系统的轻量化。智能蒙皮传感系统的尺寸往往需要达到米级,因此大规模传感网络的制造尤为关键^[16-19]。

蒙皮天线技术旨在实现机载天线与飞机承载蒙皮结构共形化、一体化,在不影响飞行器空气动力学性能的前提下增大天线探测口径。自20世纪80年代以来,各国纷纷推出智能蒙皮共形天线研制计划,例如,NASA在F/A-18飞机上安装了用于空地通信的智能蒙皮天线,显著提高了信噪比和通信范围,且飞机质量减轻了约113.4~453.6 kg^[20]。中国电子科技集团公司第三十八所研制的JY-300无人预警机已经在机身两侧和机翼前缘集成了共形天线。蒙皮天线通常由外蒙皮、蜂窝板、天线单元阵列、射频及波束控制电路、散热

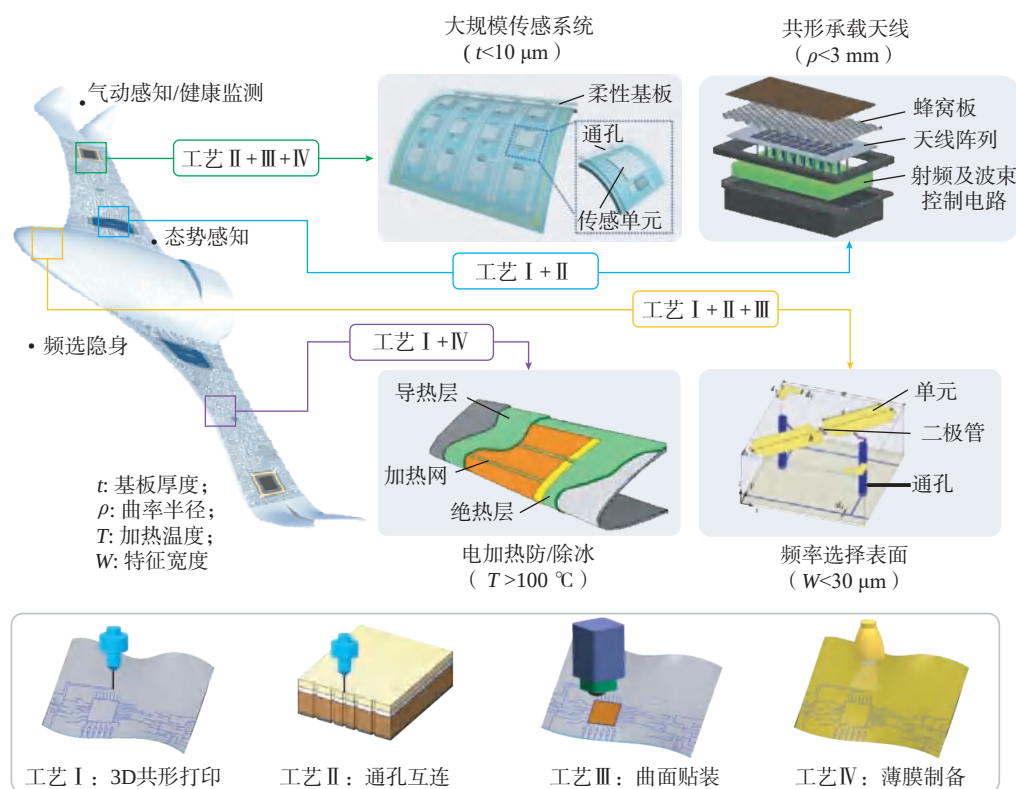


图1 飞行器智能蒙皮系统^[9-11]

Fig.1 Aircraft smart skin^[9-11]

微通道等结构组成^[11]。外蒙皮通常采用透波性能良好的树脂基复合材料,蜂窝板则通常选用低介电常数的Nomex材料。天线单元阵列将天线辐射贴片集成到具有馈电通孔的介质板上。为提高集成度,射频及波束控制电路和散热微通道也可以安装到天线内部^[21-23]。传统的印刷电路板工艺难以实现多层曲面介电和导电结构的制造,因而曲面多层电路的制备技术备受关注,结合3D打印和喷墨打印技术一体化打印制造的方式被认为是未来曲面共形天线制造的重要途径^[24-26]。

隐身蒙皮技术主要涉及主动频率选择表面,用于控制电磁波通带的开关和中心频点的调控,以实现敌方雷达电磁波的吸收或反射,从而提高飞行器的隐身性能。2012年,美国雷神公司通过调控可变电容上的偏置电压来控制主动频率选择表面,发出“透波率可控的人工复合蒙皮材料”。主动频率选择表面通常由加载有源器件的周期性导电图案组成,可分为背面馈电和共面馈电两类。背面馈电需要利用互通孔将偏置电路和有源器件相连,共面馈电利用串并联混合电路在电路板边缘实现馈电,馈线数量相对较少。大面积曲面阻抗单元阵列图案化和大规模有源器件贴装是飞行器隐身蒙皮研制的主要挑战。目前,激光振镜刻蚀是主动频率选择表面图案化的主要途径,但其工艺流程复杂、存在损伤介质层等问题^[27-29]。此外,有源器件的大规模曲面贴装仍然没有找到合适的解决方案。

防/除冰蒙皮技术是关系飞行安全和飞行器整体性能的关键技术。当飞行器穿越云层中含有低于冰点温度的液态水滴时,迎风面可能发生结冰现象,导致气动外形改变或操纵机构故障^[30]。现有的防/除冰技术包括被动防/除冰和主动防/除冰两种。被动防/除冰通常指在飞机上

喷洒低冰点的液态防/除冰剂,但这种方法存在浪费和环境污染的问题^[31]。传统机型通常使用发动机引气对机翼前缘进行主动防/除冰,但会增加机身的质量。为实现轻量化,波音787采用电加热毯来进行电加热防/除冰^[32]。电加热系统通常由加热层、导热层和绝热层组成,层间由胶层连接,并配备温度传感器以实时监测机翼表面温度。传统的加热元件主要是金属电阻丝,而石墨烯和碳纳米材料等新型加热材料可以显著提高加热效率和升温速度^[33-34]。

综上所述,飞行器智能蒙皮异质多层电路制造涉及4个关键制造技术:大面积曲面电路图案化、曲面大规模通孔互连、曲面高密度芯片与传

感贴装、大面积薄膜制备。

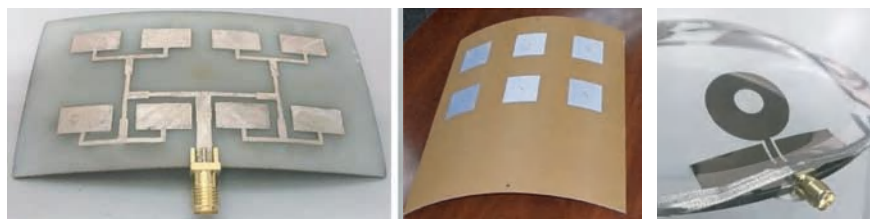
2 3D 结构表面电路共形打印技术

智能蒙皮中需要进行曲面图案化的结构包括共形天线、频率选择表面、加热网格、互连导线等。对于共形天线和频率选择表面,需要根据工作频段选择电导率满足要求的导电材料以及介电常数和损耗正切值满足要求的介质材料。对于加热网格,需要根据功率密度等参数选择电导率合适的导电材料和耐高温的基板材料。相关制造对象的材料选择、制造指标要求如表1所示^[24-29,33-36]。各制造对象根据图案形式主要分为两类,如图2所示^[37-42]。共形天线

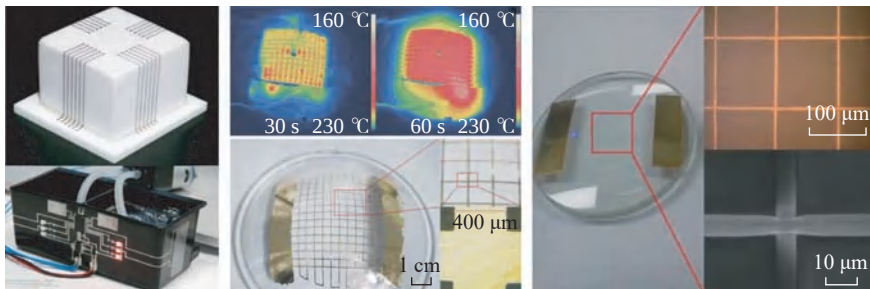
表1 智能蒙皮打印制造对象对比

Table 1 Comparison of smart skin printing fabrication objects

制造对象	导电材料	介质材料	制造指标要求
共形天线 ^[24-26,35-36]	银纳米墨水、导电银浆、石墨烯、铜	AgCite UV 固化型介电墨水、环氧树脂、聚酰亚胺	单元尺寸精度 50 μm (频点 <10 GHz)
频率选择表面 ^[27-29]	用于打印的银纳米墨水、用于刻蚀的金属(铜、铝、铬等)、石墨烯	聚乳酸(PLA)、碳纤维增强聚酰亚胺树脂基复合材料、F4B	单元尺寸精度 50 μm , 单元间距误差 50 μm (频点 <10 GHz)
加热网格 ^[33-34]	石墨烯、铜	玻璃纤维复合材料、聚酰亚胺	功率密度 >16 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$



(a) 填充打印类型^[37-39]



(b) 线条打印类型^[40-42]

图2 打印制备曲面电路分类

Fig.2 Classification of printing-prepared curved circuits

和频率选择表面属于填充打印类型图案(图 2 (a)),加热网格属于线条打印类型图案(图 2 (b))。对于填充打印类型图案,需要通过工艺优化提升图形边缘精度和降低表面粗糙度^[37-39]。对于线条打印类型图案,要求具有高分辨率的同时保证良好的电学性能^[40-42]。

共形打印技术是一种非接触、无需掩模版的增材制造方式,其制造结构和基板具有通用性,可满足异质多层曲面电路制造需求^[43-44]。常见的打印技术包括挤出类打印技术(直写打印、熔融沉积打印)和喷墨打印技术(压电喷墨打印、气溶胶喷印、电流体喷印)。不同打印技术对比如表 2 所示^[45-53],打印制造技术原理见图 3^[54,60,65,70,76]。

2.1 挤出类打印技术

挤出式直写打印(图 3 (a))^[54]是一种简单易行的曲面共形打印技术,在实验室中实现较为便利。

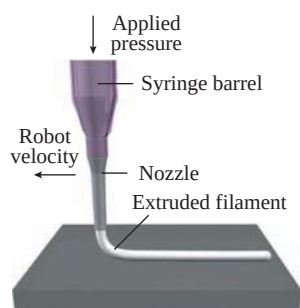
然而,由于对墨水的流变性要求较高,微结构的打印分辨率不佳^[54]。Alkadi^[55]和 Emon^[56]等成功地在球面和任意曲面上实现了多层打印图案的制备,并且在一个手指模型上打印了多种材料,包括离子液体基压敏聚合物膜、碳纳米管基导电电极和

软聚合物绝缘层,实现了聚合物触觉传感器的制备;在打印过程中,研究人员利用了曲面共形切片方法来避免平面切片所带来的阶梯效应。Kucukdeger 等^[57-58]采用基于点云数据的路径规划算法,在褶皱表面上制备了微带天线,并通过激光位移传感

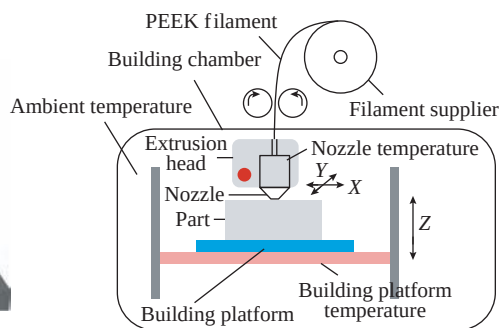
表 2 不同打印技术对比

Table 2 Comparison of different printing technologies

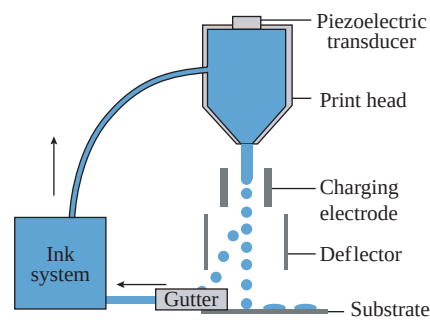
打印方法	墨水黏度 / ($10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	特征尺寸 / μm	优点	缺点
熔融沉积打印 ^[45-46]	—	>200	高打印速度,无咖啡环效应	精度低,打印不稳定
直写打印 ^[47]	$10^2 \sim 10^8$	>0.63	能够打印多种材料,工艺简单	依赖墨水和基底之间的流变性,导电性能差
压电喷墨打印 ^[48-49]	10~20	>30	适用于各种材料基底,低污染	喷嘴容易堵塞,适用墨水黏度低
气溶胶喷印 ^[50-51]	1~2500	10~200	可打印曲面,高精度	存在咖啡环效应,需要供墨系统
电流体喷印 ^[52-53]	1~10000	>0.05	高精度,兼容材料及墨水黏度范围广	高度依赖基底导电性,出墨速度慢



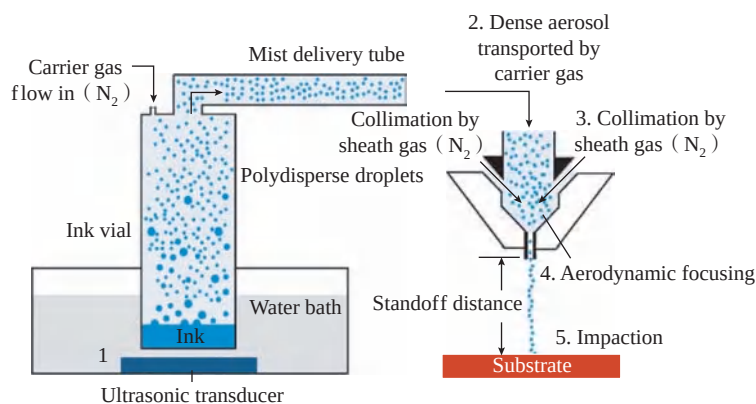
(a) 直写打印^[54]



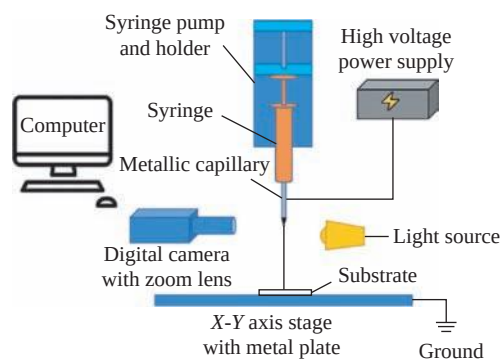
(b) 熔融沉积打印^[60]



(c) 压电喷墨打印^[65]



(d) 气溶胶喷印^[70]



(e) 电流体喷印^[76]

图 3 打印制造技术原理

Fig.3 Principles of print technologies

器实时补偿打印高度,从而实现了动态表面上的图案打印。这种方法能够解决曲面共形打印时轨迹与实际曲面模型不匹配导致的打印高度变化问题,但是由于喷嘴尖端与激光位移传感器焦点无法处于同一位置,因此在打印过程中需要频繁抬刀,导致打印效率较低。为提升共形打印效率,Uzel等^[59]利用线激光位移传感器扫描重构曲面形状,并利用滑轮机构单独控制阵列化喷嘴的每只喷嘴伸长量,使得每只喷嘴与曲面间距相等,从而可应用于皮肤伤口和结构缺陷修复。

熔融沉积打印(图3(b))^[60]可以通过喷嘴下方或基板上方的加热器,按需切换打印材料为固态或熔融态^[61],通常适用于结构件打印,其特征尺寸通常在200 μm以上^[60]。Xie等^[62]提出了一种基于人工势场的曲面共形结构打印轨迹生成方法,通过B-样条曲线平滑算法去除共形打印路径上的尖角,并优化进给速率,实现了曲面表面多层结构的高效率打印。该方法有利于提升打印结构的表面质量。Peng等^[63]提出了一种新型的电场驱动微尺度3D打印技术,用于制备高分辨率的熔融聚合物结构,并在圆周上制备了用于生物医学工程的网状支架,其线宽为80 μm。该方法通过电场力拉力的作用减小了打印分辨率,突破了传统熔融沉积的打印精度。Hong等^[64]利用五轴共形3D打印技术在具有不同倾斜角度和曲率的曲面上打印了能够导电的聚乳酸材料,结果显示,与传统三轴打印相比,在垂直面上制备的导线电阻率降低了约90%。

2.2 喷墨打印技术

相比于挤出类打印工艺,喷墨打印技术能够获得更高的打印分辨率,更适合导电结构打印。压电喷墨打印(图3(c))^[65]利用压电膜的机械振动产生液滴,是比较成熟的喷墨打印工艺,对曲面基底的适应性较强,且可以

获得高分辨率图案^[65]。在此领域,西安电子科技大学黄进团队专注于利用压电打印技术制备共形微带天线等器件,并已成功实现具有良好电磁性能的共形天线^[66];针对单喷头打印,该团队通过降维切片算法将曲面分区打印,并通过实时烧结固化的方式防止液滴滑移现象的发生^[37];针对阵列化喷头打印,通过液滴沉积间距优化算法以提升导电图形的边界准确性^[67];从计算流体力学的角度出发,考虑液滴物理参数、基底粗糙度以及液滴撞击角度等因素,建立了准确的曲面液滴沉积预测模型,以提升图案形貌的精度^[68];此外,该团队还开发了一套随机偏移量喷嘴补偿算法,结合激光视觉扫描方法,通过调整随机算法参数获取喷嘴堵塞信息并对样本缺陷进行补偿,从而降低图案的表面粗糙度^[69]。

气溶胶喷印技术(图3(d))^[70]首先将功能墨水雾化成直径为2~5 μm的气溶胶微滴^[71],随后将气溶胶微滴在喷头处通过同轴鞘气聚焦到10~100 μm的准直光束射流上,并以约80 m/s的速度发射。该技术可兼容 $1 \times 10^{-3} \sim 2500 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 黏度范围的墨水,包括金/银等纳米颗粒墨水、胶黏剂、陶瓷、聚合物和生物活性物质等多种喷印材料;其应用广泛^[72],可用于制造纳米传感器^[73]和天线^[74]等功能结构。气溶胶喷印对曲面结构的适应性强,对打印高度不敏感,可以在沟槽、台阶、轮廓,甚至面间成锐角的曲面基底上打印,可在飞机机翼/机身等构件上实现共形喷印图案化结构^[75]。

电流体喷印(图3(e))^[76]是一种利用电场力将墨水喷出的喷印工艺,具备点喷、纺丝、雾化多模式打印能力,可满足点、线、面制造的多样需求。华中科技大学黄永安研究团队致力于五轴/六轴机器人化电流体喷印技术研究,专注于解决实际工程应用中飞行器曲面等大面积电

路制造难题,开发了集成原位测量、视觉定位等技术的机器人化曲面共形制造平台^[8]。该平台包含了等离子前处理和光子烧结后处理工艺模块^[77];为解决不可展曲面图案投影映射难题,提出了一种基于剪纸理论的曲面图案映射方法^[78]。在电流体直写喷印工艺沿曲面法向轨迹误差容忍度大的情况下,提出误差转移算法,以提升图案在曲面切向的位置精度,该算法使轨迹几何误差平均减小了20.85%^[79]。将电流体喷印技术与光刻工艺相结合,形成了电流体光刻技术,使得曲面打印图形分辨率能够达到5 μm以下,利用该工艺制备的透明共形天线透光率达到了55%^[39]。该创新方法可应用于飞行器座舱罩上的透明电磁屏蔽网的制造。

目前,各种曲面电路打印技术受限于打印效率低和一致性差的问题,尚未实现大规模工程应用,利用多喷头、多材料共形打印工艺实现曲面电路一体化制备是未来的发展趋势。

3 异质多层电路通孔互连技术

通孔互连是实现智能蒙皮曲面多层电路层间电压供给和信号传输的关键技术。互通孔主要包括硅通孔、玻璃通孔、PCB通孔等(图4^[80-82])。硅通孔主要用于芯片封装,玻璃通孔主要用于射频模块和传感器封装,PCB通孔主要用于背面馈电和射频传输。不同类型互通孔孔径、深径比及应用领域对比如表3所示^[80-82]。与平面互通孔不同,在制备曲面多层电路互通孔时需要保证互通孔垂直曲面法线,且层间孔壁不可错位,否则会改变互通孔的特性阻抗,影响电磁波传输。通孔互连的工艺流程包括微孔制备、通孔填充金属化和烧结固化,其中通孔填充金属化是最关键的步骤。通孔填充金属化技术主要包括电镀填充、真空/压力填充、喷墨打印填充,不同通孔填充金属化工艺对比如表4所示^[83-88]。

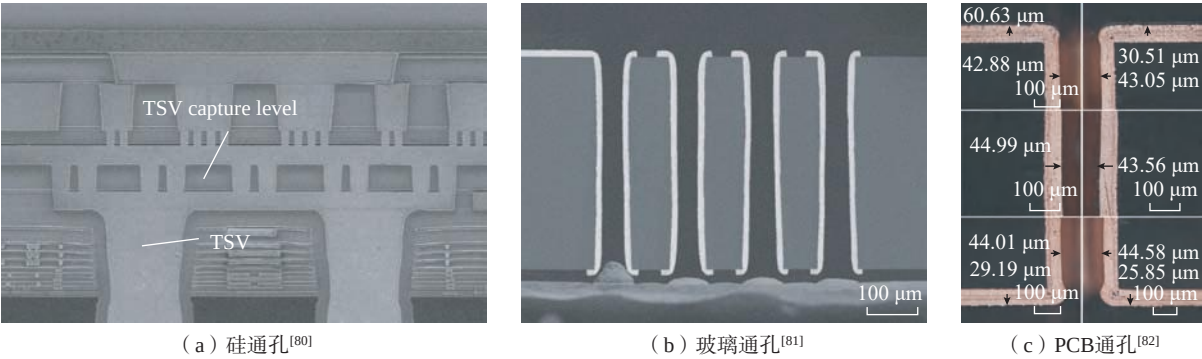


图 4 不同类型互通孔

Fig.4 Different types of via-holes

表 3 不同类型互通孔对比

Table 3 Comparison of different types of via-holes

互通孔类型	孔径范围 / μm	深径比范围	用途
硅通孔 ^[80]	20~100	4~10	在芯片和芯片之间、晶圆和晶圆之间制作垂直导通
玻璃通孔 ^[81]	10~100	4~10	射频模块、传感器等器件封装中的转接基板互连
PCB 通孔 ^[82]	200~1000	1~12	用于射频线路馈电、电磁波传输等

表 4 通孔填充技术对比

Table 4 Comparison of via-hole filling processes

工艺名称	填充时间	填充材料	特点
电镀填充 ^[83-84]	3 min~4 h	铜	可靠性高,有污染
真空 / 压力填充 ^[85-86]	10~30 min	银、锡	易产生空洞,仅适用于平面
喷墨打印填充 ^[87-88]	单孔 >5 s	银、金	能够填充曲面通孔,效率低

3.1 电镀与真空 / 压力填充金属化技术

电镀填充采用的原理是向溶液中提供电子,将铜离子转换为金属形式(图 5 (a)^[83-84])。铜电镀成本低廉,可应用于各种尺寸和形状的孔填充,是通孔填充的主流工艺之一。然而,电镀铜工艺的工序复杂,耗时较长^[15]。在进行电化学镀铜之前,需要沉积绝缘层,并制作黏附层、阻挡层和种子层,填充的时间与孔的尺寸相关^[13]。程万^[84]对高深径比的 TSV 电镀铜填充技术展开研究,电解电镀铜沉积速率约 2 $\mu\text{m}/\text{min}$,填充直径 10 μm 、深度 100 μm 的通孔用时为 85 min。Hwang 等^[83]用电镀铜填充技术制备了直径 1 μm 、深径比 7 和直径 1.5 μm 、深径比 6 的通孔,

电镀耗时约 30 min。此外,对于开放结构,铜更可能停留在开口区域而不是底部,因此,在整个通道被完全填满之前,可能就已经被封闭,无法通过一次电镀完整填充不同孔径的微孔^[16]。值得注意的是,电解液中通常需要添加各种化学添加剂,其中硫酸铜、硫酸、氯离子和其他有机元素可能导致环境污染,甚至影响复合材料基底的性能。

真空 / 压力填充法是在真空环境下将填料压入通孔。其填充效率较电镀填充要高得多(图 5 (b)^[89])。Park 等^[86]通过施加 2 MPa 以上的外部渗透压,在 5 s 内成功用熔融锡填充硅通孔,且填充速率与通孔大小无关。Qiu 等^[85]采用真空吸附的方式将银基环氧树脂填充至硅通孔,

在 1.6 kPa 吸附压力下,3 s 内可填充超过 450 μm 的深度,制备得到直径 100 μm 、间距 500 μm 的互通孔,该方法无需任何添加剂即可实现 100% 的填充率,填充过程不会造成环境污染。Gu 等^[89]提出一种基于表面张力夹断效应的硅通孔填充方法,采用压力辅助的硅通孔焊料填充。填充过程中缓慢将真空室抽为真空,直到通过显微镜观察到焊料突然填充通孔,随后将腔室压力稳定 1 min,再用氮气缓慢恢复腔室压力,直到达到大气压,晶圆夹层和焊料池一起被冷却,整个过程可以在几分钟内完成。然而,这类通过将熔化焊料池中的焊料压入通孔的填孔工艺面临着压力差引起的晶片断裂以及从焊料池中切断焊孔的问题。尽管真空 / 压力填充方法具有效率高的优势,但是其设备复杂,需要真空环境,不适用于大面积和复杂曲面基材的通孔填充。

3.2 喷墨打印填充金属化技术

作为近年来应用于通孔填充的新兴技术,喷墨打印填充技术具备无需掩模版、快速制造、低成本、无材料浪费、环保等诸多优势,为大面积曲面通孔填充提供了可行性(图 5 (c)^[87-88])。2013 年,美国加州大学伯克利分校的 Quack 等^[87]首次展示了喷墨打印填充在硅通孔中的成功应用,展现了该技术在同一制程中制备硅通孔和热压键凸起的潜力,突显了该技术在异质结构集成方面的优势。此后,Khorrarnadel 等^[88]通过

采用不同种类的油墨和打印工艺进行了深入的喷墨打印填充金属化研究。油墨的选择对金属与孔壁的黏附性及连通后的导电性起着关键作用。高金属含量的墨水容易导致喷嘴堵塞,因此,较低金属含量的纳米浆料成为更为理想的选择,既能确保填充后的强黏附性,又更容易实现通孔的完全填充。除了采用压电喷墨打印工艺,研究团队还尝试利用气溶胶喷印进行沟槽填充互连。通过在 MEMS 加速计的晶圆级沟槽中喷射铝墨水,实现了每个通孔的电阻小于 $4\ \Omega$ 的连通效果。这一方法简单且成本较低,同时避免了额外的晶圆封装工艺步骤。值得注意的是,在喷墨打印填充过程中,由于咖啡环效应,通常将孔的深径比设定在

小于 5 的范围,以满足馈电通孔的互连需求^[87,90]。

传统喷墨打印可填充的孔径通常会受到液滴尺寸的限制,电流体喷印技术因其高分辨率、兼容高黏度墨水的优点,成为一种极具潜力的微孔填充技术^[91]。华中科技大学黄永安团队在提升电流体喷印技术分辨率和打印稳定性等方面开展了广泛的研究,并持续努力拓展其应用领域^[92-94]。目前已成功将电流体喷印技术用于微孔填充,实现了深径比大于 5 的玻璃或 PCB 微孔金属化,层间互连电阻率达 $3.44 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$ 。如图 5(d) 所示,在通孔填充过程中将金属层连接到高压电极上,使纳米银墨水自下而上均匀沉积至微孔内部,从而避免孔内气泡的产生。借助曲面多轴加

工制造设备,该技术还能够实现飞行器智能蒙皮多层电路的高可靠性层间互连。

4 多功能芯片传感曲面贴装技术

智能蒙皮异质多层电路中需要贴装的器件种类繁多,如图 6 所示^[2,5,95-96],主要包含传感器和芯片。传感器包含大规模分布式贴片传感器^[2]和柔性薄膜传感器^[5];芯片包含 TR 组件芯片^[95]和数据处理芯片等^[2]。大规模传感网络通常是传感器阵列集成到柔性薄膜后共形贴装到蒙皮曲面上^[17]。芯片贴装通常需要利用转印技术或者贴片技术在薄膜或曲面上直接贴装,并保证芯片引脚与焊盘或馈电通孔位置精确对准^[95]。

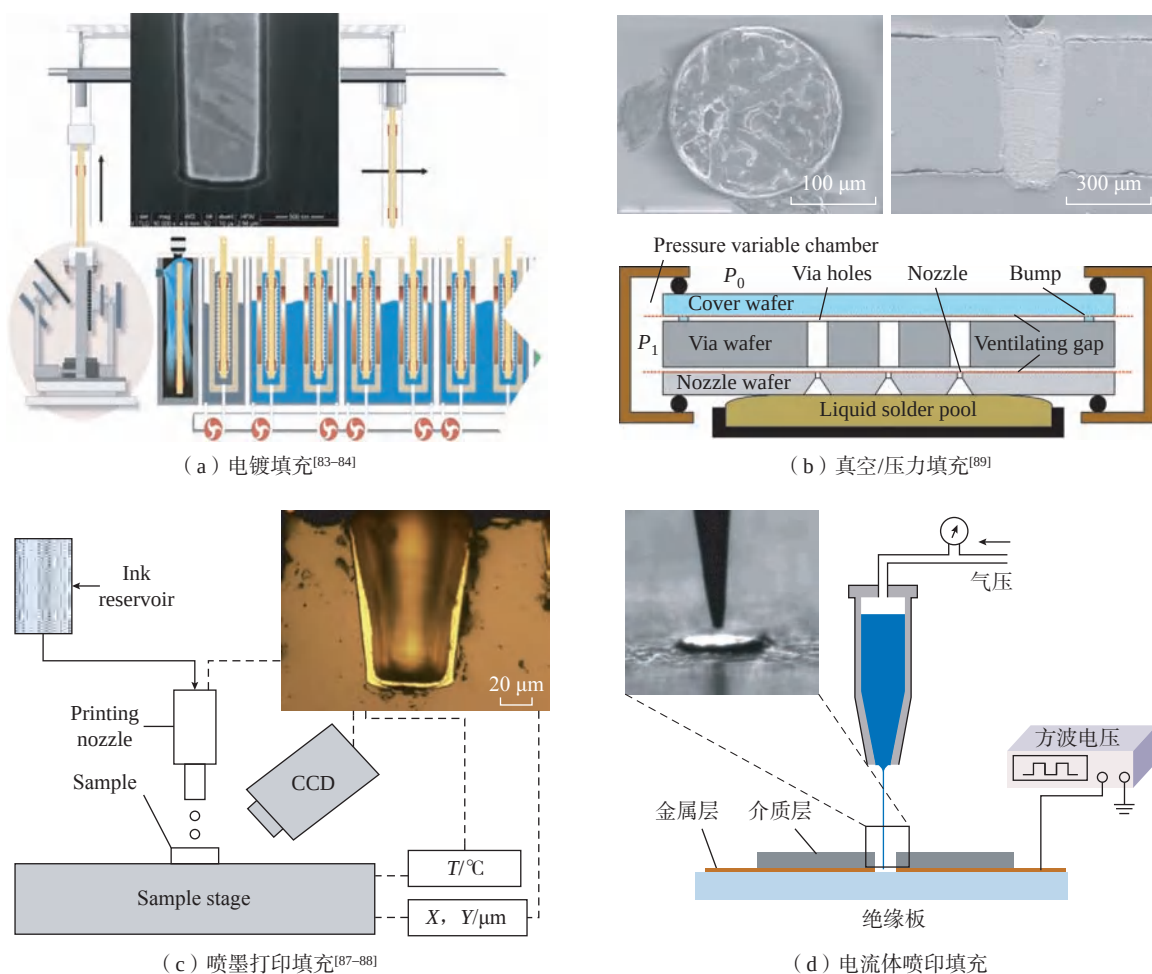


图 5 通孔填充技术

Fig.5 Via-hole filling technology

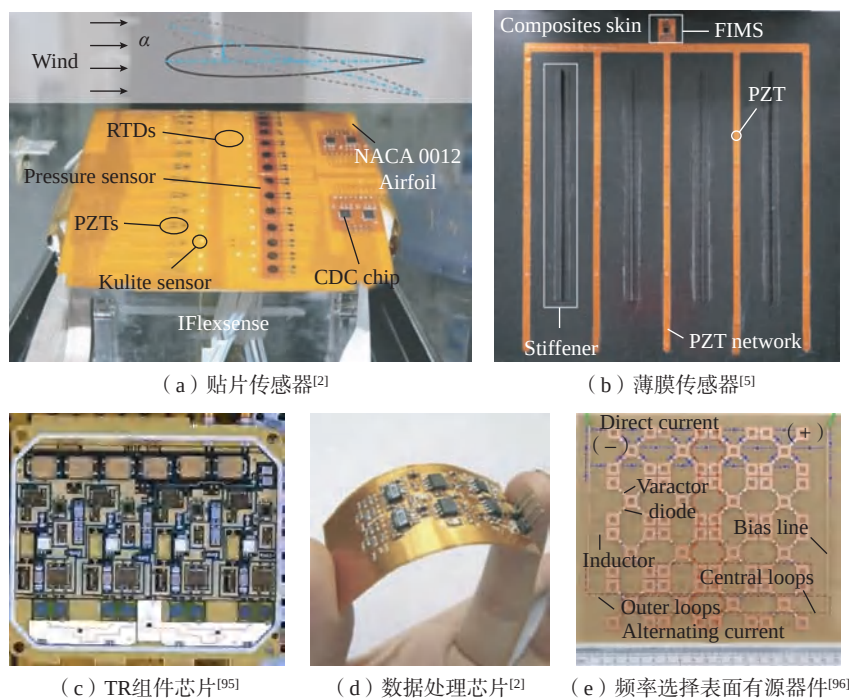
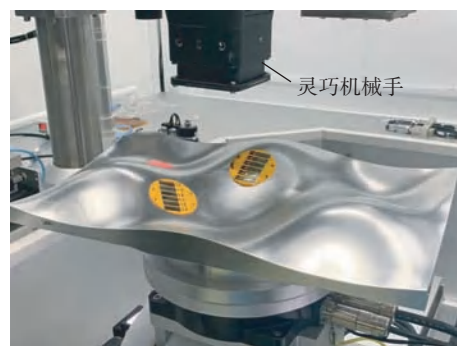
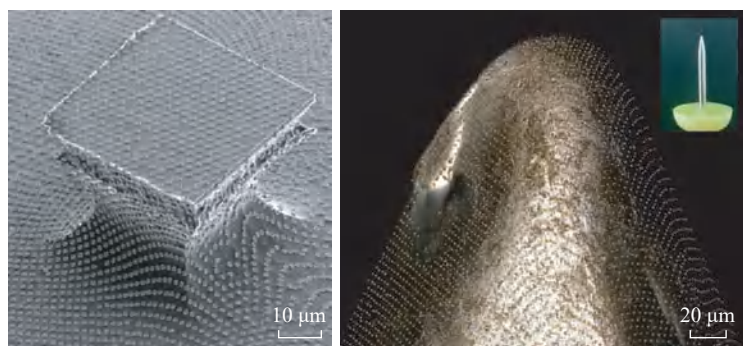
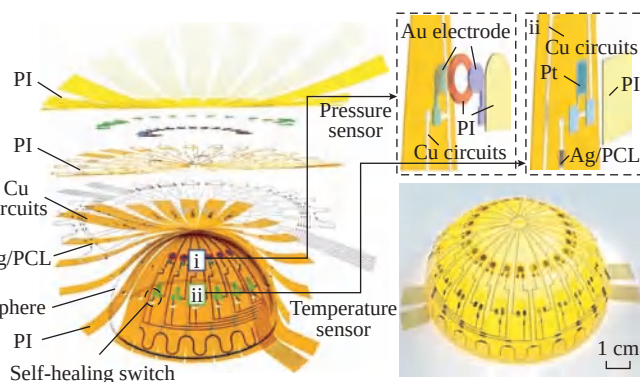
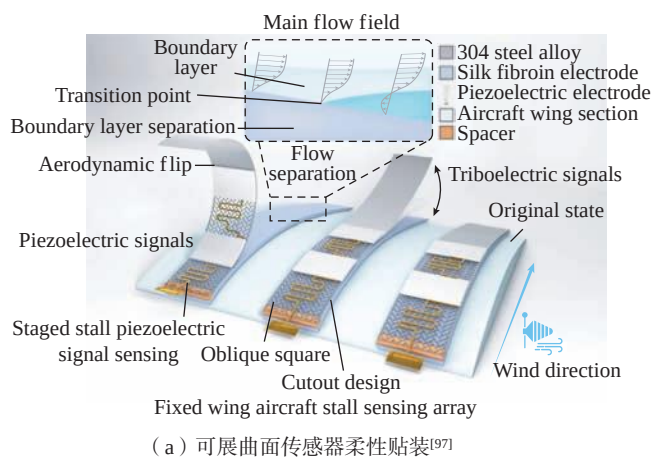


图6 不同类型传感器及芯片
Fig.6 Different types of sensors and chips

4.1 可展曲面贴装技术

目前柔性智能蒙皮的集成制造主要是将能够监测不同物理量的传感器贴装到柔性薄膜上,形成传感网络,再集成到机翼曲面上(图7(a)^[97])。这种方法在可展机翼曲面上展现了卓越的可靠性和实用性。为实现飞行器蒙皮复合材料的多参量结构健康监测,美国斯坦福大学的 Kopsaftopoulos 等^[16]在 $0.86\text{ m} \times 0.235\text{ m}$ 的复合材料机翼上贴装集成了4组传感网络,每组包括148个微节点,其中包括应变片、RTD和压电片。该传感网络被贴装到碳纤维复合材料机翼蒙皮上,并在其上表面覆盖贴装了一层透明玻璃纤维,形成了嵌入式结构,以确保传感网络的绝缘与防护。南京航空航天大学邱雷等^[18]利用柔性电路板制造工艺制备了大面积的柔性冲击监测传感网



(c) 曲面微结构回流焊贴装^[103]

(d) 灵巧机械手曲面传感器贴装^[8]

图7 传感器及芯片贴装技术
Fig.7 Sensor and chip placement technology

络,并采用真空-共固化耦合工艺将传感网络与面积为 $1000\text{ mm}\times 1000\text{ mm}$ 的碳纤维复合材料蒙皮集成在一起,形成了稳定可靠的飞行器智能蒙皮。华中科技大学黄永安团队将自主设计制造的电容传感器、热膜传感器、电阻式温度传感器、应变传感器以及压电传感器等贴装集成到柔性聚酰亚胺薄膜上,并共形贴装到机翼模型表面,形成柔性智能蒙皮传感网络;这一传感网络使飞行器蒙皮具备类似于生物的多种感知能力,实现了蒙皮表面多物理量(风压、壁面剪应力、表面温度、结构应变、动态冲击等)的同时测量感知^[98]。

4.2 不可展曲面贴装技术

相比于可展曲面上的传感网络贴装,在不可展复杂曲面上难以直接共形贴装薄膜,因此更具有挑战性。为了将传感网络薄膜共形贴装到曲面上,通常需使用高弹性材料或者将器件设计为“岛-桥”等可拉伸结构,提升器件的共形能力^[99-101]。然而,传感网络贴合至曲面后,电路本身仍要经受较大的应力应变,因此会降低飞行器在极端服役环境下的可靠性。为了解决曲面贴装产生的应力应变问题,Liu等^[78]提出了一种新的曲面电路共形贴装方式(图7(b))。在结构层面上通过剪纸设计将不可展曲面裁剪成可以展开为平面的片体,在平面片体上制备电路后拼接贴装至曲面上,可以使不可拉伸的平面片体完全共形包裹在曲面上。采用自愈材料在接缝处连接片体,能够实现曲面电路的功能以及连接可靠性。这种方法在工程应用中更具有可行性。

对于大曲率的复杂曲面或者自由曲面,柔性薄膜贴装难度大,而且柔性薄膜及胶层可能会对射频电路的电磁性能产生影响,需要直接在曲面基底上贴装芯片和传感器。目前主流的平面贴片技术是回流焊技术,其工艺过程包括锡膏印刷、贴装和回

流焊等^[102]。如图7(c)所示^[103],将回流焊技术和转印技术相结合可实现棱边和针尖等大曲率复杂曲面的微结构曲面共形贴装,但是其贴装位置精度难以保证。为了解决大面积曲面多层电路单元结构集成难题,华中科技大学研究团队开发了五轴协同曲面共形喷印-转印混合制造装备,集成了三维曲面测量、多目视觉立体定位以及曲面轨迹规划与误差补偿软件等,结合激光剥离、共形转印等技术,实现了超薄传感器阵列、微处理器芯片、电加热网等功能单元的曲面贴附集成,并应用于飞行器表面状态监测验证。图7(d)^[8]为利用该装备上集成的灵巧机械手在自由曲面上进行传感器贴装的过程。

5 曲面薄膜共形制备技术

智能蒙皮异质多层电路制造与测试过程中,涉及大量绝缘、介电、封装、粘贴等功能薄膜的制备,不同类型薄膜如图8所示。在飞行器发动机及机体风洞测试中,喷涂热敏漆及压敏漆涂层可实现快速响应^[104-105](图8(a)^[105])。多层结构层间需要通过刮涂胶膜实现可靠连接(图8(b)^[15])。制备高精度传感器件时通常需要进行光刻胶薄膜旋涂来实现图案化(图8(c)^[106])。采用共形喷涂^[107-109]的方式进行电子元器件封装,可实现封装的自动化和轻量化(图8(d)^[107,109])。飞行过程中的复杂工况对薄膜质量提出了较高要求,包括耐高温性、耐腐蚀性、抗疲劳强度等。而且飞机智能蒙皮表面多为曲面结构,曲面三维形状的复杂性对曲面薄膜的共形制造提出了挑战。目前具有代表性的曲面介电薄膜制造工艺包括物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、旋涂、电流体喷雾等。不同薄膜制备工艺对比如表5所示^[110-118]。

5.1 传统薄膜制备技术

物理气相沉积、化学气相沉积和

旋涂法是薄膜制备中常用的表面涂层技术。在物理气相沉积过程中,材料从固体源中加热,转变为气态原子,然后在目标表面冷却并沉积形成薄膜。这一工艺需要在真空环境下进行,适用于金属、陶瓷和一些复材的沉积,例如耐腐蚀涂层(图8(e)^[110])。在化学气相沉积过程中,化学前驱体在表面发生化学反应,形成薄膜。前驱体通常是气态的分子,通过热分解或化学反应在表面生成固体薄膜。化学气相沉积通常在高温高压环境下进行,所使用的材料范围更广,除了金属和陶瓷之外,还能直接沉积半导体等材料。因此,化学气相沉积在半导体制造领域应用广泛,可用于晶圆薄膜的制备(图8(f)^[113])。此外,化学气相沉积还可在球面等复杂曲面衬底上制备高质量钙钛矿等材料的薄膜^[112]。旋涂法作为实验室常用的镀膜手段,主要用于光刻胶等平面薄膜涂覆^[114],其工艺步骤简单,将溶液滴在基材表面后旋转基材即可使液体在离心力作用下蔓延形成均匀薄膜。

虽然上述传统制备技术非常成熟,但这些技术还各自存在缺陷。物理气相沉积无法沉积厚度较大的薄膜,而且在曲面基材上薄膜均匀性一般不佳。化学气相沉积操作环境较为复杂,设备成本高,且薄膜制备过程中产生的废气可能含有害物质。旋涂法在离心力作用下形成薄膜,薄膜存在边缘效应,即薄膜边缘处不均匀。此外,旋涂法的厚度不容易控制,材料浪费多,且无法用于曲面基材。因此,传统薄膜制备技术无法完全满足飞行器智能蒙皮异质多层电路中的薄膜制备需求。对于不同应用需求,选择合适的薄膜制备技术至关重要。

5.2 电流体喷雾薄膜制备技术

喷雾技术具有灵活性高的特点,更适合曲面表面薄膜制备。其中电流体喷雾技术可使用高黏度墨水制

备薄膜,制备的薄膜表面平整均匀,利用阵列喷头可高效制备超疏水功能薄膜(图8(g))^[119]。电流体喷雾可调控的变量非常多,除了常规的工艺参数以外,还可以添加多种多样的辅助工艺,从而扩展其应用场景。通过选择高极性、低黏度的溶液,适当增加电压或降低流速,可以提高雾化的稳定性^[120-123]。通过合理添加辅助性工艺,可克服电流体喷雾工艺的固有限制。例如通过气体辅助工艺可以

提升高导电溶液的喷射稳定性^[117],通过超声辅助工艺可以提升雾化颗粒均匀性^[118],通过提高基板表面能、合理设置流量和加热温度等措施可以提高薄膜平整度^[124-125]。

电流体喷雾制膜技术在曲面制膜领域已初步展现优势。大连理工大学王立志团队采用五轴电流体喷印运动平台进行曲面厚膜制备。制备过程中保证喷嘴垂直于曲面基底,从而在均匀分布电场下实现均匀厚膜制备。

该团队在毫米级直径的半球形结构上成功制备了压电厚膜,其厚度达到 $50\text{ }\mu\text{m}$,且压电性能优于丝网印刷制备的厚膜^[126]。如前所述,华中科技大学黄永安团队利用电流体喷雾工艺直接在曲面电路/多层结构上进行3D结构覆盖光刻胶/PI的喷雾镀膜,可制备出厚度 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 且均匀致密的曲面表面涂层,所制备的PI介电薄膜表现出低表面粗糙度、高界面黏附力以及卓越的介电性能。电流体喷雾

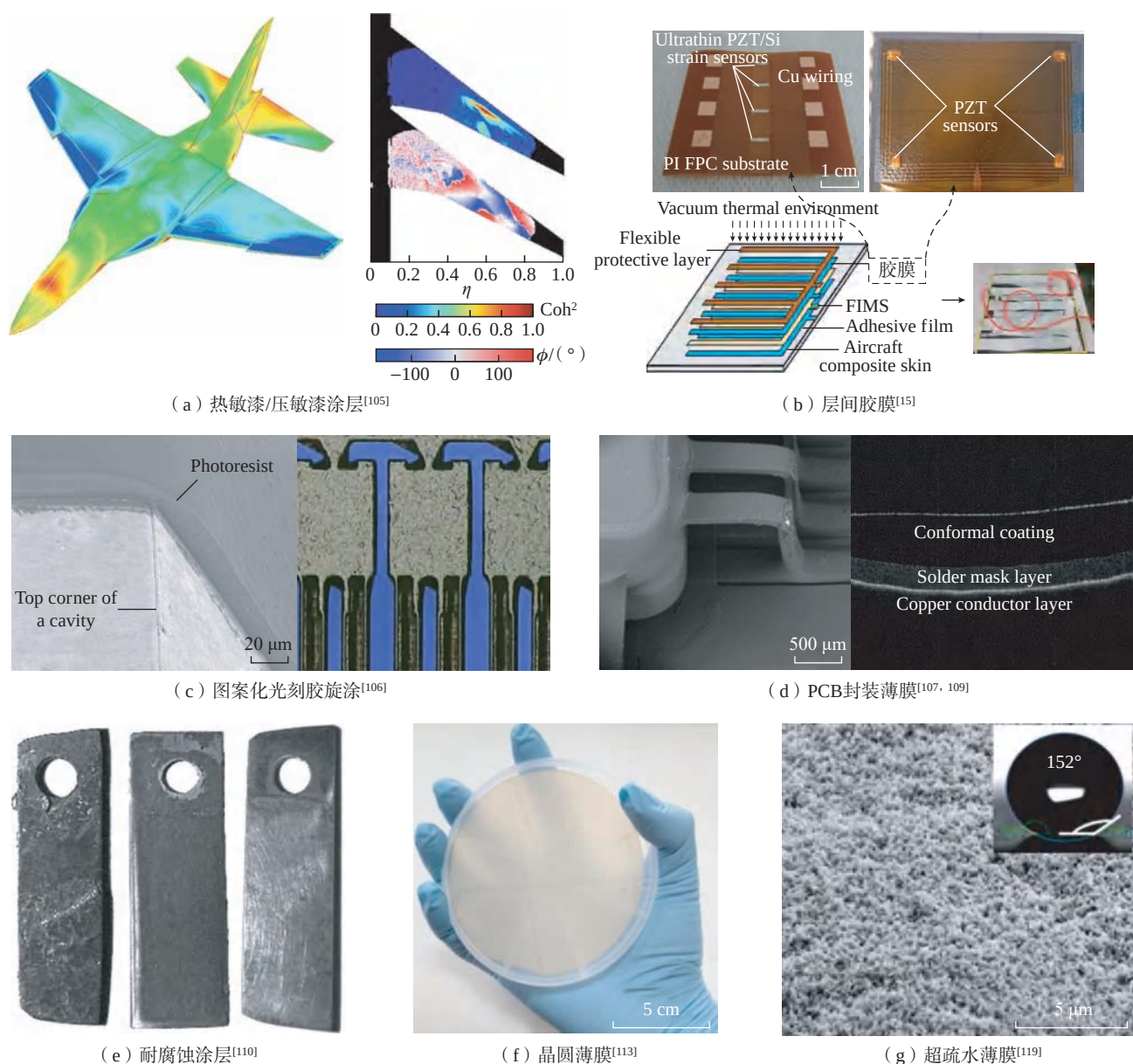


图8 不同类型薄膜

Fig.8 Different types of thin film

表 5 不同薄膜制备技术对比

Table 5 Comparison of thin film fabrication technologies

薄膜制备方法	制备效率	厚度控制	薄膜质量	共形能力
物理气相沉积 (PVD) ^[110-111]	中等	容易, 可达 5 nm	针孔数量多, 均匀性好	阶梯覆盖能力弱
化学气相沉积 (CVD) ^[112-113]	中等	容易, 0.5~2 nm	针孔数量少, 均匀性好	阶梯覆盖能力中等
旋涂 ^[114-115]	高	困难, 1~100 μm	致密薄膜, 均匀性好	差, 只适用平面
电流体喷雾 ^[116-118]	较高	容易, 15 nm 及以上	可调控, 均匀性好	可共形沉积

制备的厚度约为 17 μm 的 PI 薄膜, 其介电常数在 4 左右, 介电损耗稳定在 0.02 附近, 与商用 PI 膜特性相仿。通过百格刀对薄膜进行黏附力测试, 其界面黏附性能超过 4B 等级, 满足常用电子器件中的黏附力要求。此外, 随着喷涂次数的增加, 其表面粗糙度不断减小, 薄膜表面粗糙度可达到纳米级。

6 结论

实现飞行器智能蒙皮集成制造的关键在于曲面异质多层电路的高精度、跨尺度制造, 其中包括承载结构表面的大面积传感阵列、频率选择表面、共形天线、电加热防 / 除冰系统等。多功能集成和结构功能一体化是智能蒙皮发展的重要方向, 然而电路功能与承载结构的无缝集成则需要依赖曲面异质多层电路制造技术。为满足飞行器智能蒙皮制造需求, 本文总结了 4 类曲面异质多层电路制造的关键技术, 包括曲面电路的图案化、通孔互连、曲面贴装以及薄膜制备; 同时梳理出与之对应的具有潜力的解决方案, 主要包括曲面共形打印、喷印打印填充、剪裁 - 拼接薄膜贴装、共形转印以及电流体喷雾镀膜。这些技术的发展将为飞行器智能蒙皮的制造提供可行而高效的手段。将现有异质多层曲面电路制造技术应用于实际工程时, 仍然面临一系列问题和挑战, 主要涉及以下几个方面。

(1) 共形打印存在精度和效率方面的不足。喷墨打印技术在制备高分辨率曲面电路方面取得了显著进展, 但在打印结构尺寸精度、打印稳定性和效率等方面仍然面临挑战。液滴沉积受多种因素影响, 如喷嘴直径、堵塞情况、基板润湿性等, 难以准确控制。此外, 目前的研究主要侧重于单个喷头打印, 而在大面积加工场景中效率可能无法满足要求。

(2) 微孔填充金属化效率和一致性仍需提高。喷墨打印微孔填充金属化技术虽然灵活适应复杂曲面电路的多层互连, 但单喷嘴填充方式难以满足大面积曲面多层电路互连需求。在填充过程中, 喷嘴与微孔的对准及单孔墨水填充量的一致性都是挑战, 尤其在曲面剖面较高或倾斜较大时, 墨水流动可能导致孔壁填充不均匀。

(3) 芯片或传感器贴装的可靠性和效率仍需提高。采用柔性薄膜集成芯片 / 传感器的方式可能会增加蒙皮结构层间的间隔, 影响结构强度。一些需要裸露在蒙皮表面的传感器在极端环境下的封装和固定具有挑战性。

(4) 雾化镀膜技术制备厚膜仍然是一个难题。尽管电流体喷雾制备工艺在实现复杂曲面表面的薄膜制备方面取得了一定进展, 但对于厚度较大的导电 / 介电层制备仍然存在困难, 而且薄膜在曲面表面的黏附

强度仍需提升。

(5) 大面积曲面电路制造装备及其控制技术需要提升。为实现大面积曲面电路的跨尺度制造, 需要具备大行程、多自由度的曲面加工装备。随着装备行程和自由度的增加, 运动精度难以保证, 这对共形打印、通孔互连、芯片贴装等微米级高精度制造提出了极大挑战。

在面对上述挑战时, 有必要结合飞行器智能蒙皮的特征和制造工艺展开深入的研究。首先, 为提高制造效率, 可以采用阵列化喷头, 以优化图案打印和微孔填充效率。针对大面积曲面电路的加工, 多机器人多工位的协同作业也是提高效率的有效途径。其次, 为解决制造中的精度和一致性问题, 需要通过原位测量和在线 / 离线轨迹补偿来提升加工路径与曲面基板的匹配度, 建立液滴沉积几何尺寸的预测模型, 并结合视觉传感技术实时测量反馈, 以确保图案 / 薄膜的几何尺寸接近设计值, 提高通孔填充的一致性。最后, 为提高异质多层电路的服役可靠性, 需深入研究烧结 / 共固化等方法, 以增强异质界面结合强度, 实现曲面多层电路的嵌入式制备。在追求高可靠性防护的同时, 可借助喷雾封装方法来减轻结构质量, 从而提升承载结构 - 功能电路复合系统的性能。这些研究点有机地结合起来, 有望推动智能蒙皮技术更好地满足实际应用需求, 进一步拓展曲面异质多层电路制造技术的应用领域。

参考文献

- [1] CHU L L, LI Q, GU F, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(5): 220-246.
- [2] HUANG Y A, ZHU C, XIONG W N, et al. Flexible smart sensing skin for "Fly-by-Feel" morphing aircraft[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(1): 1-29.
- [3] BARBARINO S, BILGEN O, AJAJ

R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 823–877.

[4] 张旭辉, 解春雷, 刘思佳, 等. 智能变形飞行器发展需求及难点分析[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 8–34.

ZHANG Xuhui, XIE Chunlei, LIU Sijia, et al. Development needs and difficulty analysis for smart morphing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 8–34.

[5] 汪玉, 邱雷, 黄永安. 面向飞行器结构健康监测智能蒙皮的柔性传感器网络综述[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 60–69, 80.

WANG Yu, QIU Lei, HUANG Yongan. Review of flexible sensor networks for structural health monitoring of aircraft smart skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(15): 60–69, 80.

[6] LOCKYER A J, ALT K H, KUDVA J N, et al. Conformal load-bearing antenna structures (CLAS): Initiative for multiple military and commercial applications[C]//Proc SPIE 3046, Smart Structures and Materials 1997: Smart Electronics and MEMS. San Diego: SPIE, 1997.

[7] GUO Q X, LI Z R, SU J X, et al. Active frequency selective surface with wide reconfigurable passband[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38348–38355.

[8] HUANG Y A, WU H, ZHU C, et al. Programmable robotized ‘transfer-and-jet’ printing for large, 3D curved electronics on complex surfaces[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2021, 3(4): 045101.

[9] SUN Q J, KIM D H, PARK S S, et al. Transparent, low-power pressure sensor matrix based on coplanar-gate graphene transistors[J]. Advanced Materials, 2014, 26(27): 4735–4740.

[10] TIAN J H, CAO X Y, GAO J, et al. A reconfigurable ultra-wideband polarization converter based on metasurface incorporated with PIN diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(13): 135105.1–135105.9.

[11] ZHOU J Z, LI H T, KANG L, et al. Design, fabrication, and testing of active skin antenna with 3D printing array framework[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2017, 2017: 7516323.

[12] SALOWITZ N, GUO Z Q, ROY S, et al. Recent advancements and vision toward stretchable bio-inspired networks for intelligent structures[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(6): 609–620.

[13] SURYAKUMAR V S, BABBAR Y, STRGANAC T W, et al. Control of a nonlinear wing section using Fly-by-Feel sensing[C]//Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Reston: AIAA, 2015.

[14] ELLSWORTH J C. Dynamic leading edge stagnation point determination utilizing an array of hot-film sensors with unknown calibration[C]//Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 2017.

[15] WANG Y, HU S G, XIONG T, et al. Recent progress in aircraft smart skin for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5): 2453–2480.

[16] KOPSAFTOPOULOS F, NARDARI R, LI Y H, et al. A stochastic global identification framework for aerospace structures operating under varying flight states[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 425–447.

[17] XIONG W N, GUO D L, YANG Z X, et al. Conformable, programmable and step-linear sensor array for large-range wind pressure measurement on curved surface[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(10): 2073–2081.

[18] QIU L, LIN X D, WANG Y, et al. A mechatronic smart skin of flight vehicle structures for impact monitoring of light weight and low-power consumption[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106829.

[19] BUDER U, PETZ R, KITTEL M, et al. AeroMEMS polyimide based wall double hot-wire sensors for flow separation detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(1): 130–137.

[20] 吴波, 谈腾. 机载智能蒙皮天线技术的研究进展[J]. 军民两用技术与产品, 2018(7): 55–58, 61.

WU Bo, TAN Teng. Research progress of airborne smart skin antenna technology[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(7): 55–58, 61.

[21] 何庆强. 智能蒙皮天线分布式设计研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(17): 123–127.

HE Qingqiang. Research on distributed design of smart skin antenna[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(17): 123–127.

[22] 戴福洪, 王广宁. 埋微带天线蜂窝夹层结构的力电性能分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 231–234.

2011, 28(2): 231–234.

DAI Fuhong, WANG Guangning. Analysis of mechanical and electric performance of honeycomb sandwich structures embedded with the microstrip antenna[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 231–234.

[23] 周海峰, 鞠金山, 薛伟峰, 等. 结构功能一体化球载天线反射板制造工艺[J]. 电子工艺技术, 2016, 37(3): 166–167, 174.

ZHOU Haifeng, JU Jinshan, XUE Weifeng, et al. Manufacturing technology of structure and function integral airship antenna reflective board[J]. Electronics Process Technology, 2016, 37(3): 166–167, 174.

[24] 史则颖, 叶冬, 彭子寒, 等. 飞行器共形天线新型制造工艺及应用研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524812.

SHI Zeyang, YE Dong, PENG Zihan, et al. Research progress on novel manufacturing approaches of conformal antenna for aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524812.

[25] 韩垒, 王刚, 蒋维旭, 等. 3D 打印技术在机载超宽带共形天线中的应用研究[J]. 电波科学学报, 2024, 39(1): 134–141.

HAN Lei, WANG Gang, JIANG Weixu, et al. Application research on the 3D printing technology in airborne ultra-wideband conformal antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(1): 134–141.

[26] 刘秀丽, 苑博, 孙凤林. 3D 打印在智能蒙皮天线中的应用发展[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(6): 311–313, 332.

LIU Xiuli, YUAN Bo, SUN Fenglin. Application and development of 3D printing in smart skin antenna[J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(6): 311–313, 332.

[27] 王向峰, 高炳攀, 任志英, 等. 一体化曲面共形频率选择表面雷达罩[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1362.

WANG Xiangfeng, GAO Bingpan, REN Zhiying, et al. Integrated curved-surface conformal frequency selective surface radome[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1362.

[28] 魏鑫磊. 雷达罩频率选择表面的设计及激光精密加工技术研究[D]. 温州: 温州大学, 2016.

WEI Xinlei. Design and laser precision machining technologies for frequency selective surface radome[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2016.

[29] 方家萌. 不可展频率选择表面的加

工方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

FANG Jiameng. Research on the processing method of non-developable frequency selective surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[30] 毛杨础, 苏向辉. 电热防冰过程中复合材料机翼传热数值分析 [J]. 航空计算技术, 2017, 47(5): 32–36, 45.

MAO Yangchu, SU Xianghui. Numerical analysis of heat transfer for composite wing skin during aircraft electrothermal anti-icing process[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(5): 32–36, 45.

[31] 曹毓鹏, 张贺. 航空飞行器防 / 除冰技术研究进展及展望 [C]// 第五届中国航空科学技术大会论文集. 青岛: 中国航空总会, 2021.

CAO Yupeng, ZHANG He. Research progress and prospect of anti-icing and de-icing technology for aeronautical aircraft[C]// Collection of the 5th China Aviation Science and Technology Conference. Qingdao: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2021.

[32] 刘广锋, 王路瑶, 袁文科. 波音 787 飞机新型大翼防冰系统及其维护 [J]. 航空维修与工程, 2022(7): 93–95.

LIU Guangfeng, WANG Luyao, YUAN Wenke. Introduction of new type wing anti-ice system for B787[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(7): 93–95.

[33] 魏杰, 李昊, 张亚男, 等. 石墨烯复合材料在电热防 / 除冰领域研究进展 [J]. 中国材料进展, 2022, 41(6): 487–496.

WEI Jie, LI Hao, ZHANG Yanan, et al. Research progress of graphene composites in the field of electrothermal anti-icing/deicing[J]. Materials China, 2022, 41(6): 487–496.

[34] 林浩宇. 碳纳米纸复合材料及其结构电加热性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

LIN Haoyu. Study on electrical heating properties of carbon nano-paper composite and its structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[35] 曹彤, 黄进, 茅德旺. 基于 3D 打印微带贴片天线的近红外烧结研究 [J]. 火控雷达技术, 2023, 52(2): 105–110.

CAO Tong, HUANG Jin, MAO Dewang. Research on near-infrared sintering based on 3D printed microstrip patch antenna[J]. Fire Control Radar Technology, 2023, 52(2): 105–110.

[36] 张颖. 微笔直写 3D 打印天线阵面的工艺 [J]. 电子工艺技术, 2022, 43(6): 357–

360.

ZHANG Ying. 3D printing with micropen direct writing in antennas array[J]. Electronics Process Technology, 2022, 43(6): 357–360.

[37] ZHANG H Y, HUANG J, WANG J J, et al. Development of a path planning algorithm for reduced dimension patch printing conductive pattern on surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5): 1645–1654.

[38] PAULSEN J A, RENN M, CHRISTENSON K, et al. Printing conformal electronics on 3D structures with aerosol jet technology[C]//2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1–4.

[39] YE D, XIE H, TIAN Y, et al. Electrohydrodynamic lithography of metallic mesh for optically transparent flexible and conformal antennas[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(1): 2–12.

[40] HUANG Y A, WU H, XIAO L, et al. Assembly and applications of 3D conformal electronics on curvilinear surfaces[J]. Materials Horizons, 2019, 6(4): 642–683.

[41] SEONG B, YOO H, DAT NGUYEN V, et al. Metal-mesh based transparent electrode on a 3-D curved surface by electrohydrodynamic jet printing[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(9): 097002.

[42] LIU J P, XIAO L, RAO Z F, et al. High-performance, micrometer thick/conformal, transparent metal-network electrodes for flexible and curved electronic devices[J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 3(8): 1800155.

[43] KHONDOKER M A H, OSTASHEK A, SAMEOTO D. Direct 3D printing of stretchable circuits via liquid metal co-extrusion within thermoplastic filaments[J]. Advanced Engineering Materials 2019, 21: 1900060.

[44] YESHUA T L, LAYANI M, DEKHTER R, et al. Micrometer to 15 nm printing of metallic inks with fountain pen nanolithography[J]. Small, 2018, 14(1): 1702324.

[45] WU W. Inorganic nanomaterials for printed electronics: A review[J]. Nanoscale, 2017, 9(22): 7342–7372.

[46] KIM K, PARK J, SUH J H, et al. 3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments[J]. Sensors and Actuators A:

Physical, 2017, 263: 493–500.

[47] GOH G L, ZHANG H N, CHONG T H, et al. 3D printing of multilayered and multimaterial electronics: A review[J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(10): 2100445.

[48] KIM J, KUMAR R, BANDODKAR A J, et al. Advanced materials for printed wearable electrochemical devices: A review[J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(1): 1600260.

[49] FURLANI E P. Fluid mechanics for inkjet printing[M]//Hoath S D. Fundamentals of inkjet printing: The science of inkjet and droplets. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016.

[50] JUNG W, JUNG Y H, PIKHITSA P V, et al. Three-dimensional nanoprinting via charged aerosol jets[J]. Nature, 2021, 592(7852): 54–59.

[51] CAO C Y, ANDREWS J B, FRANKLIN A D. Completely printed, flexible, stable, and hysteresis-free carbon nanotube thin-film transistors via aerosol jet printing[J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(5): 1700057.

[52] GALLIKER P, SCHNEIDER J, EGHLIDI H, et al. Direct printing of nanostructures by electrostatic autofocussing of ink nanodroplets[J]. Nature Communications, 2012, 3: 890.

[53] HAN Y W, DONG J Y. Electrohydrodynamic (EHD) printing of molten metal ink for flexible and stretchable conductor with self-healing capability[J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 3(3): 1700268.

[54] WAN X, LUO L, LIU Y J, et al. Direct ink writing based 4D printing of materials and their applications[J]. Advanced Science, 2020, 7(16): 2001000.

[55] ALKADI F, LEE K C, BASHIRI A, et al. Conformal additive manufacturing using a direct-print process[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100975.

[56] EMON O F, ALKADI F, KIKI M, et al. Conformal 3D printing of a polymeric tactile sensor[J]. Additive Manufacturing Letters, 2022, 2: 100027.

[57] KUCUKDEGER E, JOHNSON B N. Closed-loop controlled conformal 3D printing on moving objects via tool-localized object position sensing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 89: 39–49.

[58] KUCUKDEGER E, TONG Y X,

SINGH M, et al. Conformal 3D printing of non-planar antennas on wrinkled and folded kapton films using point cloud data[J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2021, 6(4): 044002.

[59] UZEL S G M, WEEKS R D, ERIKSSON M, et al. Multimaterial multinozzle adaptive 3D printing of soft materials[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7(8): 2101710–2101719.

[60] ZHAO F, LI D C, JIN Z M. Preliminary investigation of poly-ether-ether-ketone based on fused deposition modeling for medical applications[J]. *Materials*, 2018, 11(2): 288.

[61] LU B H, LAN H B, LIU H Z. Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(1): 17000401–17000410.

[62] XIE F B, CHEN L F, LI Z Y, et al. Path smoothing and feed rate planning for robotic curved layer additive manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 65: 101967.

[63] PENG Z L, WANG M J, LV H, et al. Electric field-driven microscale 3D printing of flexible thin-walled tubular mesh structures of molten polymers[J]. *Materials & Design*, 2023, 225: 111433.

[64] HONG F, LAMPRET B, MYANT C, et al. 5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103546.

[65] ZHANG H N, MOON S K, NGO T H. 3D printed electronics of non-contact ink writing techniques: Status and promise[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2020, 7(2): 511–524.

[66] LI Z, HUANG J, YANG Y P, et al. Additive manufacturing of conformal microstrip antenna using piezoelectric nozzle array[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3082.

[67] MENG F B, HUANG J, ZHAO P B. 3D-printed conformal array patch antenna using a five-axes motion printing system and flash light sintering[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2019, 6(2): 118–125.

[68] PING B, HUANG J, MENG F B. Prediction model of part topography in curved surface inkjet 3D printing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(7): 3371–3384.

[69] MENG F B, HUANG J, PING B, et al. Intelligent control system for 3D inkjet

printing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024, 35(2): 575–586.

[70] SRIKANTHAN R, CHAITANYA M, SAM G, et al. Numerical and experimental investigation of aerosol jet printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59(PA): 103090.

[71] CHEN G, GU Y, TSANG H, et al. The effect of droplet sizes on overspray in aerosol–jet printing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(8): 1701084.

[72] HONG K, KIM Y H, KIM S H, et al. Aerosol jet printed, sub-2 V complementary circuits constructed from P- and N-type electrolyte gated transistors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(41): 7032–7037.

[73] CANTÙ E, TONELLO S, ABATE G, et al. Aerosol jet printed 3D electrochemical sensors for protein detection[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3719.

[74] CHIETERA F P, COLELLA R, VERMA A, et al. Laser-induced graphene, fused filament fabrication, and aerosol jet printing for realizing conductive elements of UHF RFID antennas[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2022, 6: 601–609.

[75] BLUMENTHAL T, FRATELLO V, NINO G, et al. Conformal printing of sensors on 3D and flexible surfaces using aerosol jet deposition[C]//*SPIE Smart Structures and Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. Proc SPIE 8691, Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems. San Diego, CA: SPIE, 2013: 118–126.

[76] ESA Z, ABID M, ZAINI J H, et al. Advancements and applications of electrohydrodynamic printing in modern microelectronic devices: A comprehensive review[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(9): 780.

[77] YE D, PENG Z H, LIU J X, et al. Self-Limited ultraviolet laser sintering of liquid metal particles for μm -thick flexible electronics devices[J]. *Materials & Design*, 2022, 223: 111189.

[78] LIU J P, JIANG S, XIONG W N, et al. Self-healing kirigami assembly strategy for conformal electronics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(12): 2109214.

[79] WU H, LUO H B, WANG K X, et al. Enhanced geometric precision of non-contact, conformal 3D printing via “error-transferred” towards jetting-direction[J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 1–12.

[80] FAROOQ M G, GRAVES-ABE T L, LANDERS W F, et al. 3D copper TSV integration, testing and reliability[C]//2011 International Electron Devices Meeting. Washington, DC: IEEE, 2011: 7.1.1–7.1.4.

[81] SHOREY A B, LU R. Progress and application of through glass via (TGV) technology [C]//2016 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). Big Island, HI: IEEE, 2016: 1–6.

[82] REN P H, AN M Z, YANG P X, et al. Inhibition of multi-site adsorption of polyethylene glycol during copper via-filling process[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 652: 129823.

[83] HWANG G, MIAO J H, RAO B S S C. Development of metallization process for fine pitch TSV[C]//2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore: IEEE, 2021: 633–636.

[84] 程万. 高深宽比的 TSV 电镀铜填充技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

CHENG Wan. The study on copper electro-deposition in high aspect ratio through silicon vias[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[85] QIU Y, YUE S C, MOUSSA W A, et al. Vacuum-assisted through silicon via filling method with Ag-based epoxy[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2016, 6(10): 1475–1481.

[86] PARK D, KIM J H, OH T S. Formation of through-silicon-vias by Tin filling processes using pressure infiltration and electrodeposition/reflow[C]//2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Yamagata: IEEE, 2017: 28–29.

[87] QUACK N, SADIE J, SUBRAMANIAN V, et al. Through silicon vias and thermocompression bonding using inkjet-printed gold nanoparticles for heterogeneous MEMS integration[C]//2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII). Barcelona: IEEE, 2013: 834–837.

[88] KHORRAMDEL B, MÄNTYSALO M. Inkjet filling of TSVs with silver nanoparticle ink[C]//*Proceedings of the 5th Electronics*

System-integration Technology Conference (ESTC). Helsinki: IEEE, 2014: 1–5.

[89] GU J B, JIANG X, YANG H, et al. Capillary effect based TSV filling method[C]//2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). San Francisco, CA: IEEE, 2014: 1115–1118.

[90] YANG J H, TSOU K L, FU Y M, et al. Process development of low resistive Ag-based through silicon vias using inkjet printing technique for 3D microsystem integration[C]//2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Seoul: IEEE, 2019: 376–379.

[91] WANG Q L, ZHANG G N, ZHANG H Y, et al. High-resolution, flexible, and full-color perovskite image photodetector via electrohydrodynamic printing of ionic-liquid-based ink[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(28): 2100857.

[92] DUAN Y Q, ZHANG G N, YU R, et al. Inkjet printing for scalable and patterned fabrication of halide perovskite-based optoelectronic devices[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(39): 14379–14398.

[93] DUAN Y Q, LI H Y, YANG W L, et al. Mode-tunable, micro/nanoscale electrohydrodynamic deposition techniques for optoelectronic device fabrication[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(37): 13452–13472.

[94] LI H Y, YANG W L, DUAN Y Q, et al. Residual oscillation suppression via waveform optimization for stable electrohydrodynamic drop-on-demand printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102849.

[95] 王杨婧, 秦绪嵘, 冯小晶, 等. 一种星载大功率 T/R 组件的高密度组装技术[J]. *空间电子技术*, 2021, 18(6): 75–79.

WANG Yangjing, QIN Xurong, FENG Xiaojing, et al. High density assembly technology of high-power T/R module for satellite[J]. *Space Electronic Technology*, 2021, 18(6): 75–79.

[96] GHOSH S, SHEOKAND H, SRIVASTAVA K V. A polarization-independent tunable microwave absorber with wide tuning range[C]//2018 24th National Conference on Communications (NCC). Hyderabad: IEEE, 2018: 1–4.

[97] XU Z J, CAO L N Y, LI C Y, et al. Digital mapping of surface turbulence status and aerodynamic stall on wings of a flying

aircraft[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2792.

[98] XIONG W N, ZHU C, GUO D L, et al. Bio-inspired, intelligent flexible sensing skin for multifunctional flying perception[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106550.

[99] FLOREANO D, PERICET-CAMARA R, VIOLLET S, et al. Miniature curved artificial compound eyes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(23): 9267–9272.

[100] SIM K, CHEN S, LI Z W, et al. Three-dimensional curvy electronics created using conformal additive stamp printing[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2: 471–479.

[101] XU X, DAVANCO M, QI X F, et al. Direct transfer patterning on three dimensionally deformed surfaces at micrometer resolutions and its application to hemispherical focal plane detector arrays[J]. *Organic Electronics*, 2008, 9(6): 1122–1127.

[102] LEE S. Fundamentals of bonding technology and process materials for 2.5/3D packages[M]. Singapore: Springer, 2021.

[103] ZABOW G. Reflow transfer for conformal three-dimensional microprinting[J]. *Science*, 2022, 378(6622): 894–898.

[104] PENG D, JIAO L R, YU Y L, et al. Single-shot lifetime-based PSP and TSP measurements on turbocharger compressor blades[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(9): 127.

[105] LIU T S, SULLIVAN J P, ASAI K, et al. Pressure and temperature sensitive paints[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.

[106] PHAM N P, BOELLAARD E, BURGHARTZ J N, et al. Photoresist coating methods for the integration of novel 3-D RF microstructures[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, 13(3): 491–499.

[107] HAN S, OSTERMAN M, MESCHTER S, et al. Evaluation of effectiveness of conformal coatings as tin whisker mitigation[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, 41(9): 2508–2518.

[108] RATHINAVELU U, JELLESEN M S, MOLLER P, et al. Effect of no-clean flux residues on the performance of acrylic conformal coating in aggressive environments[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(4): 719–728.

[109] SHAO X, CHEN X J, YU X J, et al. Nondestructive measurement of conformal coating thickness on printed circuit board with ultra-high resolution optical coherence tomography[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18138–18145.

[110] MIORIN E, MONTAGNER F, ZIN V, et al. Al rich PVD protective coatings: A promising approach to prevent T91 steel corrosion in stagnant liquid lead[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 377: 124890.

[111] GAONA-TIBURCIO C, MONTOYA-RANGEL M, CABRAL-MIRAMONTES J A, et al. Corrosion resistance of multilayer coatings deposited by PVD on Inconel 718 using electrochemical impedance spectroscopy technique[J]. *Coatings*, 2020, 10(6): 521.

[112] 罗派峰, 周圣稳, 夏伟, 等. 曲面大面积高质量 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 钙钛矿薄膜的制备研究 [C]// 第三届新型太阳能电池学术研讨会论文集. 北京: 中国可再生能源学会, 2016.

LUO Paifeng, ZHOU Shengwen, XIA Wei, et al. Preparation of large-area high-quality $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite film on curved surfaces[C]// Collection of the 3rd Conference on New Generation Solar Cells. Beijing: China Renewable Energy Society, 2016.

[113] LI J W, WANG S P, LI L, et al. Chemical vapor deposition of 4 inch wafer-scale monolayer MoSe_2 [J]. *Small Science*, 2022, 2(11): 2200062.

[114] MUSTAFA H A M, JAMEEL D A. Modeling and the main stages of spin coating process: A review[J]. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2021, 2(2): 119–123.

[115] LIM J S, LEE H W. Movement control method of magnetic levitation system using eccentricity of non-contact position sensor[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2396.

[116] WU H, TIAN Y, LUO H B, et al. Fabrication techniques for curved electronics on arbitrary surfaces[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 2000093.

[117] HAN S, KIM H, LEE S, et al. Efficient planar-heterojunction perovskite solar cells fabricated by high-throughput sheath-gas-assisted electrospray[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(8): 7281–7288.

[118] RUTKOWSKI S, SI T Y, GAI M Y, et al. Magnetically-guided hydrogel capsule motors produced via ultrasound assisted hydrodynamic electrospray ionization jetting[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019,

541: 407–417.

[119] ABU MOSA M, KIM S H, KWON K S. Multinozzle electrospray method for high-throughput and uniform coating: Application of superhydrophobic coating[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2023, 20(3): 1069–1081.

[120] BARRERO A, LÓPEZ-HERRERA J M, BOUCARD A, et al. Steady cone-jet electrosprays in liquid insulator baths[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 272(1): 104–108.

[121] JAWOREK A, SOBCZYK A T, KRUPA A. Electrospray application to powder production and surface coating[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, 125: 57–92.

[122] KIMOTO A, TAKAKU H, HAYAKAWA H, et al. Multilayer organic

photovoltaic devices fabricated by electrospray deposition technique and the role of the interlayer[J]. *Thin Solid Films*, 2017, 636: 302–306.

[123] LI W W, LIN J H, WANG X, et al. Electrospray deposition of ZnO thin films and its application to gas sensors[J]. *Micromachines*, 2018, 9(2): 66.

[124] ZHAO X Y, DENG W W. Printing photovoltaics by electrospray[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(6): 190038.

[125] JOSHI B, SAMUEL E, KIM Y I, et al. Electrostatically sprayed nanostructured electrodes for energy conversion and storage devices[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(14): 2008181.

[126] 赵奎鹏. 电流体喷印压电厚膜关键技术及器件研究 [D]. 大连: 大连理工大学,

2022.

ZHAO Kuipeng. Research on key technologies and devices of piezoelectric thick film based on electrohydrodynamic jet printing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

通讯作者: 叶冬, 副教授, 博士, 主要从事多功能电磁超材料/机器人电子皮肤等复杂曲面电子器件制造与应用、等离子体增减材制造工艺技术等方面研究。

黄永安, 教授, 博士, 主要从事柔性电子器件与系统(穿戴式电子系统、飞行器智能蒙皮、机器人电子皮肤、柔性显示等)和柔性电子制造与装备(高精度喷印制造、激光剥离/巨量转移、复杂曲面电子制造、微等离子体加工、机器人化制造等)相关研究。

Advances in Manufacturing Technologies for Heterogeneous Multilayer Circuit of Aircraft Smart Skin

GE Jiaying, WEN Junmin, YE Dong, HUANG Yongan

(State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] Smart skin seamlessly integrates a heterogeneous multifunctional circuit system on the surface of the load-bearing structure of an aircraft, serving as an enabling technology for achieving the “Fly-by-Feel” capability in future variant aircraft. The smart skin of the aircraft involves various functional modules, including multifunctional distributed sensing systems, conformal antennas, frequency-selective surfaces, and anti/de-icing. This integration enhances the aircraft’s situational awareness and promotes the development of lightweight structures, and the technical key is the fabrication of heterogeneous multilayer circuits on the intricate 3D surfaces. In addressing the manufacturing challenges associated with the multifunctional circuits of smart skin, this paper provides a detailed analysis of the difficulties encountered in the manufacturing of different types of curved functional units. Additionally, it compares and elucidates manufacturing technologies applicable to diverse structural types, encompassing conformal printing, via-hole interconnection, curved surface attach, and thin-film fabrication. Finally, the paper summarizes and forecasts the challenges and potential solutions confronting the manufacturing technology for heterogeneous multilayer circuits in smart skin, offering valuable insights for the breakthrough of next-generation aircraft smart skin manufacturing processes.

Keywords: Smart skin; Multilayer circuits; Conformal printing; Via-hole interconnection; Curved surface attach; Film fabrication

(责编 向阳)

引文格式: 周登, 李雪峰, 严刚, 等. 基于电学成像与深度学习的蜂窝结构冲击损伤识别研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 84–91.

ZHOU Deng, LI Xuefeng, YAN Gang, et al. Impact damage identification for honeycomb sandwich structure by using electrical tomography and deep learning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 84–91.

基于电学成像与深度学习的蜂窝结构冲击损伤识别研究^{*}

周 登, 李雪峰, 严 刚, 黄再兴

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

[摘要] 针对蜂窝夹层结构遭受外物冲击的情况, 提出结合电学成像和深度学习的方法, 对冲击损伤进行在线监测和识别, 为结构完整性评估和决策提供准确信息。首先通过丝网印刷技术, 使用碳油墨和银浆油墨在结构表面分别制备感应层和导电路径; 然后对不同数量、位置和尺寸的冲击损伤进行数值仿真, 获取对应的感应层电导率变化与边界电压变化数据样本, 由残差神经网络进行深度学习, 建立二者的映射关系; 最后在结构遭受冲击前后分别测量感应层的边界电压数据, 通过训练好的残差神经网络重建感应层电导率变化分布的图像, 实现损伤信息的识别。通过对蜂窝夹层结构进行低速冲击试验, 验证了所提出技术和方法的可行性和有效性。

关键词: 蜂窝夹层结构; 冲击损伤识别; 印刷感应层; 电学成像; 深度学习

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.084



周 登

博士研究生, 研究方向为复合材料结构健康监测。

蜂窝夹层结构因其比强度高、比模量大等优点被广泛应用于航空航天飞行器结构中^[1]。但在飞行器制造与服役期间, 不可避免会出现因工具跌落、砂石撞击、冰雹冲击等意外状况而造成的冲击损伤, 显著降低蜂窝夹层结构的强度和稳定性^[2]。因此, 发展结构健康监测技术对蜂窝夹层结构进行在线监测, 及时识别获取冲击损伤的信息用于结构完整性评估和决策, 对提高飞行安全具有重要意义。

经过多年的发展, 国内外学者已提出了较多针对蜂窝夹层结构的损伤监测和识别方法^[3–7]。如 Siivola 等^[3]将分布式光纤传感器内置于夹层结构面板中, 通过传感器获得的应变数据来识别冲击损伤区域, 但应变对损伤不太敏感, 需要在结构中布置比较密集的光纤传感器。Sikdar 等^[4]

采用超声导波对蜂窝夹层结构中的冲击损伤进行监测, 通过比较冲击前和冲击后在结构中传播的超声导波, 定义信号差异系数作为损伤指标, 结合概率成像算法对冲击损伤进行成像识别, 从而获得损伤的位置等信息; 但研究也表明, 蜂窝夹层会对面板中传播的导波产生一定的干扰, 影响损伤识别的效果。Rellinger 等^[7]综合使用多种监测方法对蜂窝夹层结构的冲击损伤进行识别, 先由电涡流技术识别出落锤撞击点, 再通过红外热成像技术获取分层损伤情况, 最后使用激光扫描技术测量表面损伤尺寸, 结果表明, 这些方法的组合可以有效识别出蜂窝夹层结构受冲击后芯层、面板等部位多种形式的损伤, 但难以与结构集成, 无法实现对损伤的在线监测。

近年来, 电学成像这种非侵入方

^{*} 基金项目: 航空科学基金(2017ZA52005); 航空航天结构力学及控制全国重点实验室开放课题(MCMS-E-0423G02)。

式的低成本检测技术被应用到复合材料结构损伤监测中,其原理是通过获取导电物体的边界电压信息重建物体内部的电性能分布以反映损伤的状态^[8]。如 Nonn 等^[9]在碳纤维复合材料层合板周边布置了电极,输入电流并测量电极的电压,结合三维有限元仿真重建层合板内部各向异性的电导率分布从而确定损伤区域。Thomas 等^[10]在炭黑改性的玻璃纤维圆柱壳结构的两端布置电极,通过对电流激励和电压测量模式进行改进,应用电学成像方法重建了冲击损伤引起的复合材料电导率变化分布图像,监测和识别出多个部位不同冲击能量造成的损伤。此外,也有研究者通过在复合材料结构表面或内部集成感应层,结合电学成像对损伤进行监测和识别。如 Yan 等^[11]通过丝网印刷技术在玻璃纤维层合板上印制了智能传感层,并利用基于 Tikhonov 正则化的电学成像技术成功识别出了准静态压痕损伤,结果表明,智能传感层的电导率变化与实际损伤情况较为一致。束嘉俊等^[12]将碳纳米管薄膜共固化在蜂窝夹层结构的面板中,并采用电学成像技术对高速冲击造成的损伤进行识别,结果表明,该方法可以有效重建冲击损伤的数量、位置和近似尺寸。

对于电学成像,重建算法对其使用效果具有重要的影响。当前在复合材料损伤识别中应用的电学成像技术大多使用基于正则化的算法,最常用的是 L2 范数与 L1 范数正则化。L2 范数正则化计算简单,但对重建结果过度平滑,导致识别精度偏低;而 L1 范数正则化虽然精度较高,但是计算时间相对较长。同时这些正则化方法对正则化参数的选取也较为敏感。随着计算机算力的飞跃及人工智能的再度兴起,深度学习方法因其超强拟合能力逐渐成为了各学科领域的研究热点,近年来也涌现出许多基于深度学习的电学成

像方法^[13-18]。如 Tan 等^[13]采用基于 LeNet 的卷积神经网络结构进行电学成像,结果表明,该方法优于传统的 LBP、Tikhonov 和 Landweber 算法。赵少峰等^[15]采用基于二维卷积神经网络的电学成像方法对不同形状、大小和位置的目标物体进行仿真研究,结果表明,该方法可以有效重建图像,相对于 Tikhonov 和深度学习网络算法具有伪影少、分辨率高、成像质量高、抗噪声能力强等优势。Fan 等^[17]采用基于密集连接的特征融合卷积神经网络的电学成像方法对碳纤维层合板的损伤进行识别,结果表明,该方法可以有效识别不同类型的损伤且优于 Tikhonov 和传统的卷积神经网络方法。

本文提出电学成像和深度学习结合的方法,对蜂窝夹层结构冲击损伤进行在线监测和识别。首先,通过丝网印刷技术在结构表面制备感应层,然后建立损伤对应的数据样本并由残差神经网络进行深度学习,最后,测量信息并通过训练好的残差神经网络重建感应层电导率变化分布的图像,实现损伤信息的识别。

1 电学成像方法

在电学成像中,通过 Maxwell 方程可以建立感应层内部电导率 σ 和电势 φ 的关系。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

本文采用相邻激励相邻测量的方式在感应层注入电流并测量边界电压,因而符合 Neumann 边界条件。

$$\begin{cases} \int_{\Gamma_+} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = +I, \text{电流注入电极处} \\ \int_{\Gamma_-} \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -I, \text{电流流出电极处} \end{cases} \quad (2)$$

式中, E 为电极表面; $\mathbf{n}$ 为感应层边界 S 的单位法向矢量; I 为电极处的电流。

结合式(1)和(2),在已知感应层内部电导率分布与边界条件的前

提下,可以求解感应层内电势分布,从而获得感应层的边界电压情况,此问题是电学成像的正问题,正问题是偏微分方程的边值问题,通常采用有限元方法进行求解。如果采用三角形单元对感应层进行划分,且默认单元内的电导率为常数,此时各单元的泛函为^[19]

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_V \sigma \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi \, dV - \int_B \varphi \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (3)$$

式中, V 为单元场域; B 为单元边界; $\mathbf{J}$ 为电流密度。

在三角形单元中建立坐标系,则单元电势分布函数 φ^e 可表示为

$$\varphi^e(x, y) = N_1(x, y) \varphi_1 + N_2(x, y) \varphi_2 + N_3(x, y) \varphi_3 \quad (4)$$

式中, $N_1(x, y)$ 、 $N_2(x, y)$ 和 $N_3(x, y)$ 为单元上线性插值的基函数; φ_1 、 φ_2 和 φ_3 为三角形单元顶点处的电势值。

对 $F^e(\varphi)$ 求极值,使其对单元各节点电势 φ_i 的一阶偏导数为 0。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_i} = 0 \quad (5)$$

结合式(3)~(5),可以得到单元方程:

$$\mathbf{K}^e \boldsymbol{\varphi}^e = \mathbf{C}^e \quad (6)$$

式中, $\mathbf{K}^e$ 为单元系数矩阵; $\boldsymbol{\varphi}^e$ 为单元电势矩阵; $\mathbf{C}^e$ 为单元电流密度矩阵。

对感应层进行单元划分,并将各个单元方程按照“对号入座”的原则进行叠加,可得电学成像正问题的总有限元方程。

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{C} \quad (7)$$

通过求解式(7),可以获得感应层内电势分布 $\boldsymbol{\varphi}$,从而获得感应层的边界电压数据。

在感应层受到冲击损伤后,其损伤部位电导率会发生显著变化,可以通过测量感应层边界电压变化 ΔU 来重建感应层内电导率变化分布 $\Delta \sigma$ 的情况,以此识别冲击损伤,这属于电学成像的逆问题,该问题可以被表示为

$$\Delta U = A \Delta \sigma \quad (8)$$

式中, A 为灵敏度矩阵, 可以由电学成像的正问题计算求得。

由于灵敏度矩阵具有很强的病态性, 因此, 传统的电学成像方法使用正则化方法来求得稳定的近似解:

$$R_\lambda(\Delta \sigma) = \Delta \sigma + \lambda \Delta \sigma \quad (9)$$

式中, $R_\lambda(\Delta \sigma)$ 为正则化项; λ 为正则化参数 ($\lambda > 0$)。通常选用 Tikhonov 正则化项进行求解, 但是该方法会造成解的过度平滑, 效果并不理想。

2 残差神经网络

深度学习是指通过深层非线性网络结构来表征样本数据并以此进行预测。此方法的非线性表达能力较强, 适用于电学成像逆问题的求解。残差神经网络是 He 等^[20]针对卷积神经网络中的退化现象提出的网络结构。与传统的卷积神经网络相比, 残差神经网络独创的快捷连接可以有效解决深度神经网络中的梯度消失和梯度爆炸现象, 在减小计算负担的同时大大提升准确率。本文通过残差神经网络 ResNet18 建立感应层边界电压变化 ΔU 与电导率变化分布 $\Delta \sigma$ 之间的映射关系, 由此完成冲击损伤的识别。

ResNet18 由 20 个卷积层、1 个最大池化层和 1 个全连接层组成, 其结构如图 1 所示。“conv”表示卷积层, 以第 1 层为例, “ $7 \times 7 \text{conv}, 64, s2$ ”表示该层使用 64 个 7×7 大小的卷积核, 并以 2 为步长进行卷积操作; “maxpool”表示最大池化层, “ $3 \times 3 \text{maxpool}, s2$ ”表示使用 3×3 大小的过滤器, 并以 2 为步长进行最大池化操作; “fc”表示全连接层; 弧线箭头表示快捷连接, 可以实现信息的跨层传递, 提高网络中信息传递的效率, 降低网络的训练难度。

该网络可以分成 6 个部分 (I ~ VI)。以输入大小为 20×20 的边界

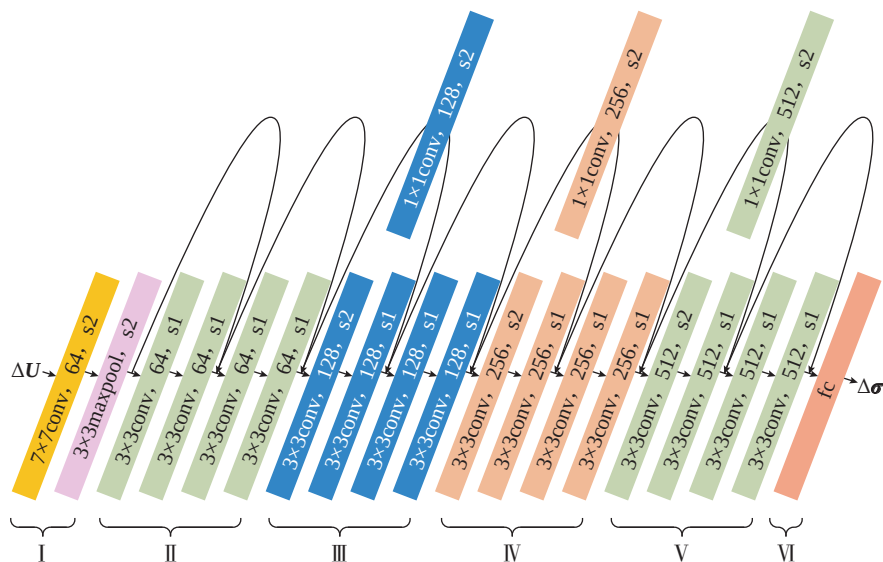


图 1 ResNet18 结构

Fig.1 Structure of ResNet18

电压数据为例, 经过第 I 部分的操作变为 64 个 5×5 大小的数据; 第 II 部分的操作不改变数据维度; 第 III 部分的操作使之变为 128 个 3×3 大小的数据; 第 IV 部分的操作使之变为 256 个 2×2 大小的数据; 第 V 部分的操作使之变为 512 个 1×1 大小的数据; 第 VI 部分是全连接层, 输出数据的大小为 $m \times 1$, 表示感应层被划分成 m 个单元后对应的电导率变化分布, 如表 1 所示。

3 数据集的生成与训练

使用有限元方法建立感应层的电学分析模型, 依据损伤情况设置感应层中对应单元的电导率变化值, 感应层被划分成 m 个单元, 感应层在损伤前后的电导率变化分布 $\Delta \sigma$ 可表示为^[21]

$$\Delta \sigma = [\Delta \sigma'_1, \Delta \sigma'_2, \dots, \Delta \sigma'_m] \quad (10)$$

$$\Delta \sigma'_k = \frac{\sigma_k^{\text{basis}} - \sigma_k^{\text{damage}}}{\sigma_k^{\text{basis}}} \quad (11)$$

式中, $\Delta \sigma'_k$ 为归一化的电导率变化值; σ_k^{basis} 与 σ_k^{damage} 分别为感应层中第 k 个单元在无损状态和损伤后的电导率值。

感应层周围布置有 n 个电极, 在

表 1 ResNet18 参数

Table 1 Parameters of ResNet18

划分部分	输出大小	数量
输入	20×20	1
I	5×5	64
II	5×5	64
III	3×3	128
IV	2×2	256
V	1×1	512
VI	$m \times 1$	1
输出	$m \times 1$	1

第 i 组相邻电极处施加电流激励, 可以测得第 j 组的边界电压值 u_{ij} , 由此, 损伤前后边界电压变化 ΔU 可表示为

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_{11} & \Delta u_{12} & \Delta u_{13} & \Delta u_{14} \\ \Delta u_{21} & \Delta u_{22} & \Delta u_{23} & \Delta u_{24} \\ \Delta u_{31} & \Delta u_{32} & \Delta u_{33} & \Delta u_{34} \\ \Delta u_{41} & \Delta u_{42} & \Delta u_{43} & \Delta u_{44} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,

$$\Delta u_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{测量电极遇到激励电极} \\ \frac{\Delta u_{ij}^{\text{basis}} - \Delta u_{ij}^{\text{damage}}}{\Delta u_{ij}^{\text{basis}}}, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\Delta u'_{ij}$ 为归一化的边界电压变化值; u_{ij}^{bais} 与 u_{ij}^{damage} 分别为无损状态和损伤后测得的边界电压值。

以此方式获得的电导率变化分布 $\Delta\sigma$ 是 1 个 $m \times 1$ 的向量, 边界电压变化 ΔU 是 1 个 $n \times n$ 的矩阵, 便于后续导入残差神经网络进行训练。

由于通过残差神经网络建立 ΔU 与 $\Delta\sigma$ 之间的映射关系属于回归问题, 因此损失函数为

$$\text{Loss} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_i^*\|^2 \quad (14)$$

式中, $\Delta\sigma^*$ 为通过残差神经网络求解得到的电导率变化分布。

设置适当的超参数并进行训练, 可以获得网络的各项参数, 据此可进行电学成像。同时本文使用图像相关系数 (ICC) [13-17] 对单个样本的成像效果进行评估。ICC 越接近 1, 说明预设损伤和识别损伤图像的相关程度越高, 识别效果越好。ICC 的定义为

$$\text{ICC} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})(\Delta\sigma_i^* - \overline{\Delta\sigma^*})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})^2 \sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i^* - \overline{\Delta\sigma^*})^2}} \quad (15)$$

式中, $\Delta\sigma_k^*$ 与 $\Delta\sigma_k$ 分别为感应层中第 k 个单元处识别和预设的电导率变化值; $\overline{\Delta\sigma^*}$ 与 $\overline{\Delta\sigma}$ 分别为感应层中识别和预设的电导率变化平均值。

4 试验研究

4.1 结构与感应层

本文制备的蜂窝夹层结构由蜂窝芯层、面板和胶膜构成, 如图 2 所示。面板采用两种预浸料进行铺层, 靠近蜂窝芯层部分的面板使用威海光威复合材料生产的 T300-3K 碳纤维预浸料, 铺层顺序为 $[\pm 45/(0, 90)]_4$, 在此基础上, 在外侧加铺 3 层斜纹高强度玻璃布预浸料, 铺层顺序为 $[(0, 90)/\pm 45/(0, 90)]$, 上、下共计 22 层; 蜂窝芯层采用 Nomex® 芳纶纸蜂窝, 厚度为 15

mm; 胶膜为环氧树脂胶膜。固化切割后的蜂窝夹层结构尺寸为 300 mm × 300 mm, 厚度为 19.3 mm。

印刷感应层由感应区、电极和导电路径组成, 其设计如图 3 所示。感应区是 1 个尺寸为 200 mm × 200

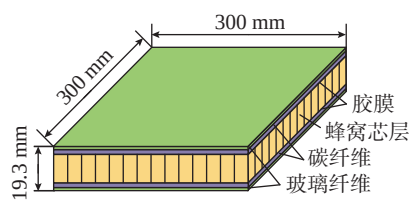


图2 蜂窝夹层结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of honeycomb sandwich structure

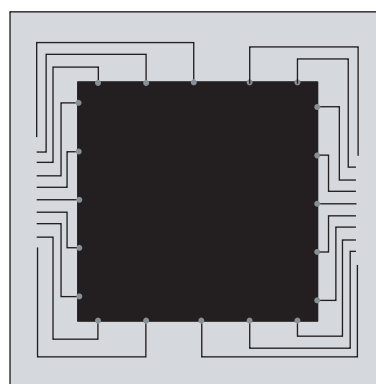
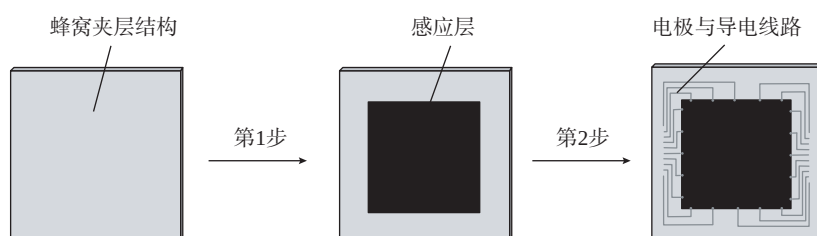
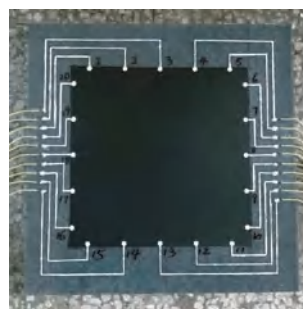


图3 印刷感应层设计图

Fig.3 Design of printed sensing layer



(a) 感应层制备流程



(b) 带有感应层的蜂窝夹层结构

图4 印刷感应层的制备

Fig.4 Fabrication of printed sensing layer

mm 的正方形, 在感应区的各边均匀布置 5 个半径为 2.5 mm 的圆形电极并与导电路径连接。导电路径的末端分布在感应区的两侧, 可以通过导线将印刷感应层与电学成像测试系统连接到一起。印刷时, 感应区使用导电碳油墨, 电极和导电路径则使用银浆油墨。

如图 4 (a) 所示, 感应层的制备流程大致可分为两步: 第 1 步, 将蜂窝夹层结构固定到丝网印刷工作台上, 并将绘有感应区的丝网印版固定在试验件上, 用刮板将导电碳油墨均匀地印刷到试验件的表面, 然后将印有感应区的试验件放到 50 °C 的烘箱中, 加热 120 min 使碳油墨固化; 第 2 步, 待试验件冷却至室温后, 将绘有电极和导电路径的丝网印版放置到试验件的相应位置上, 并将银浆油墨印刷到试验件的表面, 再将印刷后的试验件放入 50 °C 的烘箱中, 加热 120 min 固化银浆油墨。冷却后得到带有印刷感应层的蜂窝夹层结构如图 4 (b) 所示。

4.2 训练网络

根据印刷感应层的形状与尺寸

建立有限元模型,如图5所示。该模型的电极数量为20,各边节点数为81,使用三角形单元进行划分,单元数量为12800个。

蜂窝夹层结构的冲击损伤有多种形式,作为初步研究,本文仅考虑冲击能量较大、蜂窝夹层结构面板被冲破的情况。这时对于表面印刷的感应层,表现为孔洞形式的损伤,因而将损伤形状简化为圆形。假设在同一感应层最多存在3处损伤,损伤半径在5~30 mm之间,损伤区域单元的电导率下降50%^[16]。本文对单、双、三孔损伤情况建立冲击损

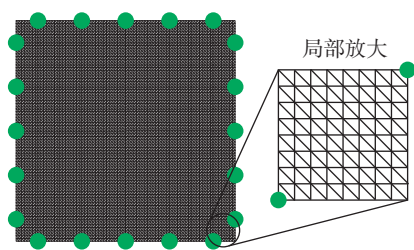


图5 有限元模型示意图
Fig.5 Schematic diagram of finite element model

伤样本,如图6所示。以单孔损伤为例,在有限元模型中随机生成符合上述条件的圆形,并将该圆形对应单元的电导率变化数值设为-0.50,如图6(a)所示。通过求解电学成像的正问题,可以获得相应的边界电压变化,对边界电压施加信噪比为60 dB的高斯白噪声并进行归一化处理,如图6(d)所示。通过该方法可以建立单个样本中感应层损伤的尺寸和位置、对应的电导率变化分布 $\Delta\sigma$ 、边界电压变化 ΔU 这三者之间的对应关系。同样地,可以建立双孔损伤和三孔损伤的样本,如图6(b)、(e)和图6(c)、(f)所示。由此,可以分别建立单孔损伤、双孔损伤和三孔损伤的样本各30000个,将这90000个样本打乱重排后按照6:2:2的比例分成训练集、验证集与测试集。

本文使用的计算机处理器为Intel Core i7-10875H,内存为16 G,显卡为NVIDIA GeForce RTX 2060;训练平台为Matlab深度学习工具箱Deep Network Designer。批量大小设为128,初始

学习率设为0.001,每进行8420次迭代后学习率降至原先的20%。使用Adam优化求解器进行训练,其过程如图7所示。经过98000次迭代训练,训练集和验证集的损失函数分别降至0.0659和0.0863。

为了评估训练效果,对测试集分别使用深度学习方法与Tikhonov正则化方法进行成像并计算各样本的ICC值,如图8所示。可以看出,使用深度学习方法成像的样本ICC值较为集中,大部分样本的ICC值大于0.6,仅有少量样本成像效果较差;而使用Tikhonov正则化方法成像的样本ICC值则更为分散,出现了大量成像效果不佳的样本。通过计算可得,两者的平均ICC值分别为0.88与0.59,说明本文使用的深度学习方法的成像效果较好,所获取的ResNet18网络结构的各项参数可以用于实际损伤识别。

4.3 试验结果

为了验证本文制备的感应层以及深度学习算法对损伤识别的有效

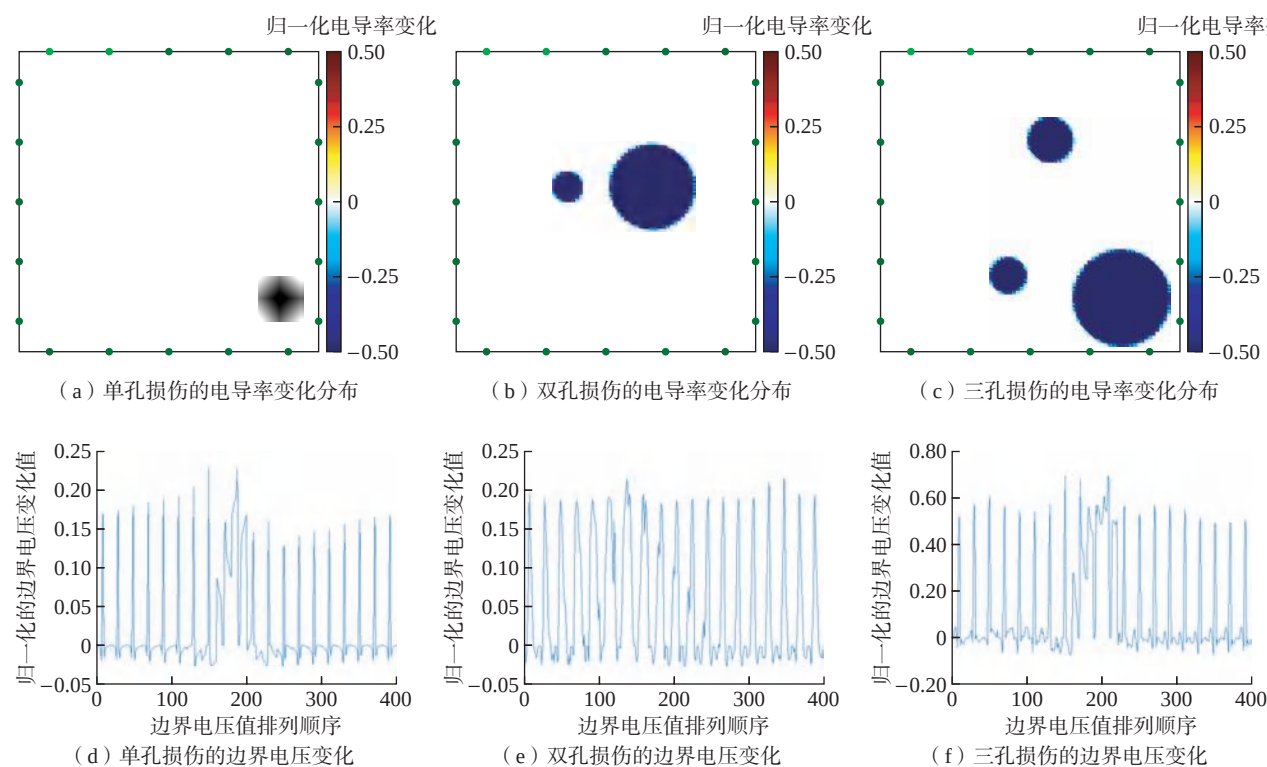


图6 冲击损伤样本示例
Fig.6 Samples of impact damage

性,使用 Instron CEAST 9350 落锤试验机对带有印刷感应层的蜂窝夹层结构进行低速冲击试验,选用直径

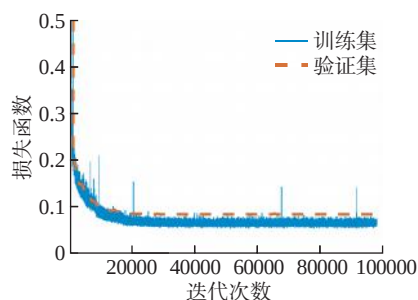


图7 训练过程中的损失曲线

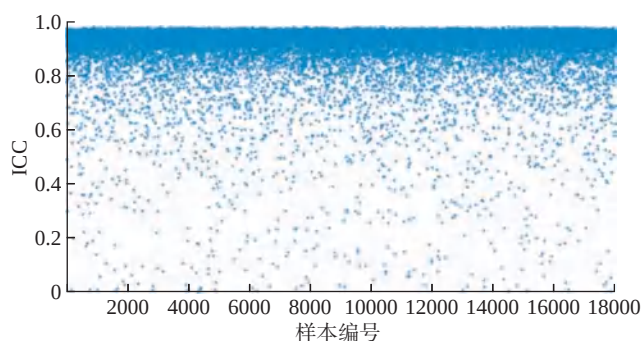
Fig.7 Loss curves in the training process

为 16 mm 的落锤冲头,以 35 J 与 45 J 的能量依次对结构的两个位置(冲击点 I 和冲击点 II)进行低速冲击并记录冲击载荷。经过两次低速冲击后的结构损伤情况如图 9 (a) 所示。两次冲击的最大冲击载荷分别为 5314.9 N 和 5416.1 N,如图 9 (b) 所示。

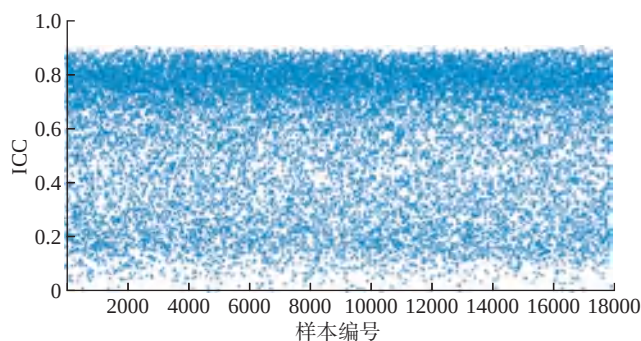
通过测量损伤前后的边界电压,可以获得其边界电压变化 ΔU ,将之代入训练后的 ResNet18 网络,可得相应的电导率变化分布 $\Delta\sigma$,由此重建感应层损伤的图像如图 10 所示,

测量实际损伤的位置与尺寸并在图中以黄色圆圈标示。从图 10 可以看出,经过训练的 ResNet18 网络成功识别出了单个和两个电导率显著降低的区域,即为损伤区域,且损伤的位置和尺寸与实际情况较为一致。

使用 Tikhonov 正则化也可求得相应的电导率变化,由此重建感应层损伤的图像如图 11 所示。为了定量分析识别效果,在图 10 和 11 中建立以感应层左下角为原点,下边界为 x 轴,左边界为 y 轴的坐标系;对重建图像进行二值化处理,提取轮廓并拟合成圆形,以此作为识别损伤,并在图中以红色圆圈进行标示。将两种成像方法的识别损伤和实际损伤信息绘制成表格,如表 2 所示。表 2 中给出了损伤中心位置坐标 (x_i, y_i) 、损伤半径 r_i 、识别损伤与实际损伤中心位置的圆心距 $d_i (i=1,2)$ 以及识别



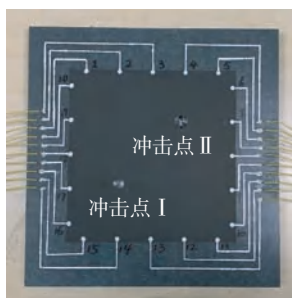
(a) 深度学习方法



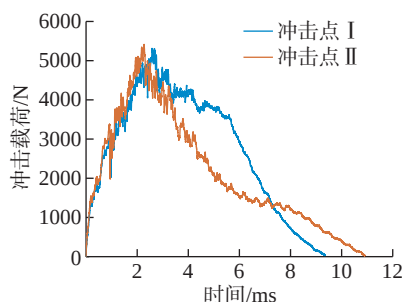
(b) Tikhonov正则化方法

图8 ICC值散点图

Fig.8 Scatter plot of ICC value



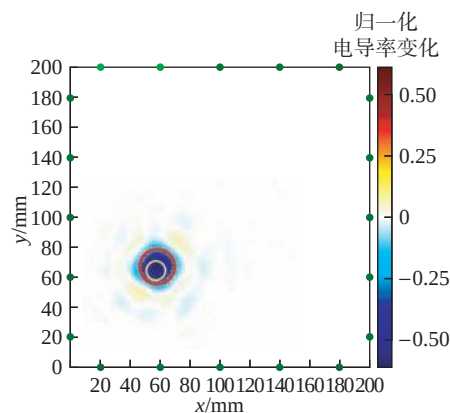
(a) 损伤情况



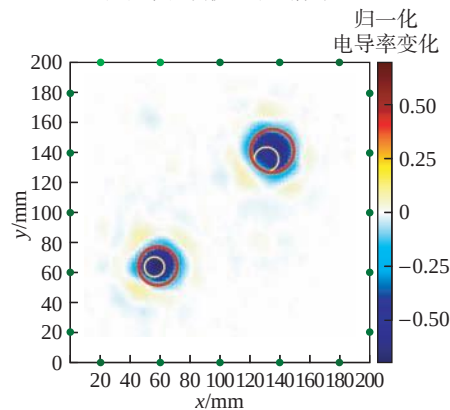
(b) 冲击载荷随时间的变化曲线

图9 冲击试验结果

Fig.9 Results of impact test



(a) 单孔损伤电学成像结果



(b) 双孔损伤电学成像结果

图10 ResNet18 损伤识别结果

Fig.10 Results of damage identification by ResNet18

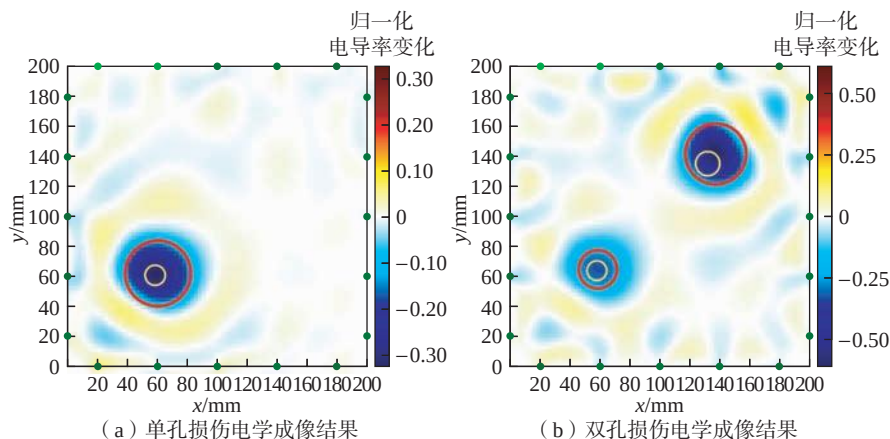


图 11 Tikhonov 正则化损伤识别结果

Fig.11 Results of damage identification by Tikhonov regularization

表 2 识别损伤和实际损伤信息

Table 2 Information of identified and actual damage

成像方法	损伤情况	冲击点 I					冲击点 II				
		x_1/mm	y_1/mm	r_1/mm	d_1/mm	$\delta_1/\%$	x_2/mm	y_2/mm	r_2/mm	d_2/mm	$\delta_2/\%$
—	实际损伤	57.38	64.34	6.44	—	—	130.78	134.79	7.82	—	—
ResNet18	单孔损伤	58.45	67.19	11.97	3.04	85.87	—	—	—	—	—
	双孔损伤	59.83	65.13	12.72	2.57	97.52	134.84	140.52	14.25	7.02	82.23
Tikhonov 正则化	单孔损伤	59.33	65.73	21.22	2.39	229.50	—	—	—	—	—
	双孔损伤	58.16	65.36	12.68	1.28	96.89	136.31	141.36	20.18	8.59	158.06

损伤半径的相对误差 δ_i ($i=1,2$)。

可以看出,本文使用基于 ResNet18 网络的电学成像方法效果明显优于传统的基于 Tikhonov 正则化的电学成像方法,前者的识别损伤更接近实际损伤,且伪像更少。由于感应层自身电导率以及冲击造成的损伤区电导率变化并不均匀,且在测量边界电压时有噪声影响,因此该方法识别的损伤尺寸与实际尺寸仍有一定的偏差,后续将提高感应层电导率的均匀性、改进样本的多样性以减小识别误差。

5 结论

本文提出在蜂窝夹层结构表面制备印刷感应层并结合电学成像和

深度学习的方法对冲击损伤进行监测和识别。建立了感应层的有限元模型,计算获取损伤对应的感应层电导率变化与边界电压变化数据样本,由残差神经网络进行深度学习并建立二者的映射关系,通过训练好的残差神经网络重建感应层电导率变化分布的图像,实现损伤信息的识别。对制备了感应层的蜂窝夹层结构进行了低速冲击和电学成像试验,主要得出如下结论。

(1) 利用丝网印刷制备感应层并结合电学成像对蜂窝夹层结构进行冲击损伤识别是可行的,损伤识别的结果能够较好地反映损伤的个数、位置和尺寸。

(2) 与传统基于 Tikhonov 正则

化方法的电学成像相比,采用基于深度学习 ResNet18 的电学成像可以更好地重建感应层中电导率变化的图像,并提取损伤信息,特别是在损伤尺寸的定量识别方面,基于深度学习的电学成像方法具有明显的优势。

参考文献

- [1] 林晓虎,杨庆生. 航空航天夹层结构抗冲击性能的研究现状 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(10): 71-74.
- [2] LIN Xiaohu, YANG Qingsheng. Research review on anti-impact property of sandwich structures in aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(10): 71-74.
- [3] 陈韩青,徐志远,屈仲毅,等. 蜂窝夹层结构无损检测方法研究综述 [J]. 材料导报, 2024, 38(10): 22090208-15.
- [4] CHEN Hanqing, XU Zhiyuan, QU Zhongyi, et al. Review of nondestructive testing methods for honeycomb sandwich structures[J]. Materials Reports, 2024, 38(10): 22090208-15.
- [5] [3] SHIVOLA J T, MINAKUCHI S, MIZUTANI T, et al. Evaluation of damage detectability in practical sandwich structure application conditions using distributed fiber optic sensor[J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(1): 3-20.
- [6] SIKDAR S, MIRGAL P, BANERJEE S, et al. Damage-induced acoustic emission source monitoring in a honeycomb sandwich composite structure[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 158: 179-188.
- [7] FIBOREK P, KUDELA P. Model-assisted guided-wave-based approach for disbond detection and size estimation in honeycomb sandwich composites[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8183.
- [8] SU C, ZHANG W, LIANG L, et al. Damage imaging identification of honeycomb sandwich structures based on lamb waves[J]. Materials, 2023, 16(13): 4658.
- [9] RELINGER T, UNDERHILL P R, KRAUSE T W, et al. Combining eddy current, thermography and laser scanning to characterize low-velocity impact damage in aerospace composite sandwich panels[J]. NDT & E International, 2021, 120: 102421.
- [10] TALLMAN T N, SMYL D J. Structural health and condition monitoring via electrical impedance tomography in self-sensing materials: A review[J]. Smart Material

Structures, 2020, 29(12): 123001.

[9] NONN S, SCHAGERL M, ZHAO Y J, et al. Application of electrical impedance tomography to an anisotropic carbon fiber-reinforced polymer composite laminate for damage localization[J]. Composites Science and Technology, 2018, 160: 231–236.

[10] THOMAS A J, KIM J J, TALLMAN T N, et al. Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 177: 107276.

[11] YAN G, ZHENG Y F. A printed electrical impedance tomography sensor for detection of damage in composites[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1–4): 1011–1017.

[12] 束嘉俊, 周登, 严刚, 等. 基于电学成像的蜂窝夹层结构超高速撞击损伤监测[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(4): 69–76.

SHU Jiajun, ZHOU Deng, YAN Gang, et al. Monitoring of hypervelocity impact damage to honeycomb sandwich structures by using electrical tomography[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(4): 69–76.

[13] TAN C, LV S H, DONG F, et al.

Image reconstruction based on convolutional neural network for electrical resistance tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(1): 196–204.

[14] FU R, WANG Z C, ZHANG X Y, et al. A regularization-guided deep imaging method for electrical impedance tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(9): 8760–8771.

[15] 赵少峰, 李静. 基于二维卷积神经网络的电阻抗成像算法[J]. 仪表技术与传感器, 2022(7): 85–88, 105.

ZHAO Shaofeng, LI Jing. Electrical impedance tomography algorithm based on two-dimension convolution neural network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(7): 85–88, 105.

[16] 范文茹, 王勃, 李靓瑶, 等. 基于电阻抗层析成像的CFRP结构损伤检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2177–2183.

FAN Wenru, WANG Bo, LI Jingyao, et al. Damage detection of CFRP structure based on electrical impedance tomography[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(11): 2177–2183.

[17] FAN W R, QIAO L. Convolutional neural network method for damage detection of CFRP in electrical impedance tomography[J].

Measurement Science and Technology, 2023, 34(2): 025401.

[18] KO Y F, CHENG K S. U-Net-based approach for automatic lung segmentation in electrical impedance tomography[J]. Physiological Measurement, 2021, 42(2): 025002.

[19] 魏颖, 夏靖波, 王师, 等. 电阻层析成像(ERT)敏感场的仿真计算[J]. 东北大学学报, 2000, 21(4): 372–375.

WEI Ying, XIA Jingbo, WANG Shi, et al. Simulation & computing study of electrical resistance tomography (ERT) sensitive field[J]. Journal of Northeastern University, 2000, 21(4): 372–375.

[20] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016.

[21] ADLER A, DAI T, LIONHEART W R B. Temporal image reconstruction in electrical impedance tomography[J]. Physiological Measurement, 2007, 28(7): S1–S11.

通讯作者: 严刚, 副教授, 博士, 研究方向为复合材料结构健康监测和飞行器结构强度。

Impact Damage Identification for Honeycomb Sandwich Structure by Using Electrical Tomography and Deep Learning

ZHOU Deng, LI Xuefeng, YAN Gang, HUANG Zaixing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aiming at the situation of honeycomb sandwich structure impacted by external objects, this study proposes a method to detect and identify the impact damage with electrical tomography and deep learning, and provide precise information for structural integrity evaluation and decision-making. The sensing layer and corresponding circuits are first printed on the surface of honeycomb sandwich structure with carbon ink and silver ink through silk-screen printing technique. Then numerical simulation is performed by considering impact damage with different quantities, positions and sizes to obtain training data of conductivity change and boundary voltage change of the corresponding sensing layer. Deep learning is carried out by a residual neural network to establish the mapping relationship between conductivity change and boundary voltage change of the sensing layer. Finally, the boundary voltage data of the sensing layer is measured before and after impact, and tomographic image of the conductivity change caused by impact damage is reconstructed by a trained residual neural network, identifying the locations and sizes of the damage. Low velocity impact test for a honeycomb sandwich structure is conducted to demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Honeycomb sandwich structure; Impact damage identification; Printed sensing layer; Electrical tomography; Deep learning

(责编 向阳)

引文格式: 汪英, 卢少微, 张璐. 基于 MXene/CNT 薄膜传感器阵列的复合材料冲击定位及损伤监测[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 92-98.

WANG Ying, LU Shaowei, ZHANG Lu. Impact localization and damage monitoring of composite materials based on MXene/CNT thin film sensor array[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 92-98.

基于 MXene/CNT 薄膜传感器阵列的复合材料冲击定位及损伤监测*

汪英¹, 卢少微², 张璐²

(1. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

[摘要] 复合材料层合板在服役过程中易受到冲击损伤, 对结构产生不利影响。冲击引发的复合材料内部结构损伤能够缩短复合材料的使用寿命。因此, 对于复合材料层合板冲击定位及损伤监测是必要的。以碳纳米管(CNT)和MXene薄膜为代表的新型碳纳米材料具有独特的纳米级结构和优良的物理性能。将MXene/CNT薄膜传感器阵列布置于监测范围内, 提出了一种适用于传感器阵列的定位算法, 该算法可以准确地计算和定位到监测区域的冲击位置。同时, 可根据传感器相对电阻变化率判断试件损伤情况。最后, 使用超声C扫描设备对结果进行对比验证。试验结果表明, 传感器阵列响应计算结果与实际冲击位置吻合, 且传感器相对电阻变化率与损伤严重程度相关。

关键词: 复合材料; 冲击定位; 损伤监测; MXene/CNT 薄膜传感器; 冲击定位算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.092



汪英

博士研究生, 研究方向为复合材料结构健康监测。

纤维增强塑料(Fiber reinforced plastic, FRP)具有轻质、高强等优越的力学性能, 广泛应用于航空航天、工业制造、轨道交通等各个领域^[1-3]。在全寿命服役过程中, FRP不可避免地受到冲击载荷。由于FRP结构是非均匀的, 具有各向异性和脆性的特征, 所以对冲击损伤较为敏感^[4]。冲击损伤包括不同的破坏机理, 如基体开裂、纤维失效、分层和渗透等^[5-6], 可以降低结构的力学性能, 导致灾难性的后果^[7-8]。

结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)技术通常用于复合材料结构服役过程中的损伤监测, 也可以实时监测结构的应变、温度等参数^[9-10]。传统的监测方法有声发射、射线、超声、热成像等^[11-14]。此类监测手段在监测时要求设备停止工

作, 取下试样并进行检查。因此, 监测流程耗费时间长、步骤多, 存在明显的缺点。近年来, 随着多功能传感器的研发, 在线监测已成为研究的热点。压电传感技术是一种较为成熟的结构健康监测手段。Qiu等^[15]提出一种基于时间反转聚焦的复合材料结构冲击定位的冲击成像方法, 提取压电陶瓷(Pb/Zr/Ti, PZT)传感器阵列冲击响应信号, 生成冲击图像并进行冲击定位。胡宇豪等^[16]采用自主研发的压电换能器(Piezoelectric transducer, PZT)铺设于T型板表面, 并由传感器接收反射波和透射波, 根据反射回波分辨裂纹缺陷, 实现了钢桥面板的疲劳裂纹在线监测。此外, 光纤传感器在结构健康监测中也有较多应用, 例如, Yu等^[17]提出了一种基于布拉格光栅传感器的递归定

*基金项目: 航空科学基金项目(20220003054001); 教育部春晖计划国际合作项目(HZKY20220428); 沈阳市关键技术攻关计划项目(23-407-3-39)。

量分析(RQA)冲击定位算法,并根据冲击与最近布拉格光栅传感器间的距离,通过遗传算法计算冲击定位结果;Sai等^[18]提出了一种基于光纤布拉格光栅传感器阵列的冲击定位系统,根据可用频带的信号建立了训练速度快、参数少的冲击监测损伤定位模型。然而,压电陶瓷传感器和光纤光栅传感器的尺寸较大,不能与复合材料结构一体成型,且传感器的嵌入行为会对结构的完整性产生不利影响^[11]。由于FRP的各向异性具有良好的可塑性,许多研究尝试将功能材料结合到复合材料的成型过程中,以赋予复合材料自传感的能力^[19-20]。此方案可以解决FRP复合材料中传感器嵌入对结构完整性造成影响的问题。然而,正如Irfan等^[21]在综述文章中所指出的,在复合材料中添加功能纳米材料可能会影响复合材料的成型工艺,存在一定的不利因素。随着碳纳米传感器的问世,这些问题得到了很好的解决。

碳纳米薄膜具有良好的延展性和强度,以及独特的纳米结构,可以与复合材料结构一体成型且对结构整体影响不大。Loh等^[22]将碳纳米传感器布置于金属结构板材上,根据电阻扫描映射获得的表层应变和损伤情况,实现了冲击定位。Wan等^[23]将碳纳米传感器嵌入层压板中,形成传感网络。记录试验中传感器的电阻变化,编写数据处理算法,显示冲击位置,从而完成纳米传感器对层压板的冲击定位监测。然而,一维材料的碳纳米传感器通过碳纳米管的重叠形成导电网络,没有良好的重叠区域,导致传感器稳定性低,对复合结构冲击造成的不可见损伤的捕获不够精确。

本研究设计了一种由二维材料MXene片层和碳纳米管(Carbon nanotube, CNT)交替堆叠组成的夹层复合纳米薄膜传感器,增加了导电网络的重叠面积,进而提高了传感器

的稳定性。设计了一种传感器阵列,提出了适合于传感器阵列的冲击定位计算方法。根据传感器阵列的电阻变化率可以计算出复合材料层合板受冲击的位置,同时根据电阻相对变化率估计损伤尺寸,对复合材料结构全寿命服役过程进行实时健康监测。

1 试验及方法

1.1 MXene/CNT 薄膜传感器的制备

混合研磨 700 mg CNT (纯度高于 95%, 中国科学院; CNT 的长度和直径分别为 10~30 nm 和 5~12 nm) 和 10 mL Triton X-100, 加入 1200 mL 去离子水进行机械搅拌, 进行超声破碎和高速离心得到碳纳米管分散液。取 Ti_3AlCl_2 粉末 2 g、浓盐酸 5 mL 和氟化锂粉 1.5 g 进行搅拌, 反应完成后, 高速离心, 用去离子水反复清洗溶液, 直至上清液 $\text{pH} \approx 7$, 再高速离心得到 MXene 分散液。将 CNT 分散液与 MXene 分散液交替过滤形成夹层结构。图 1 为制备 MXene/CNT 薄膜的工艺示意图。将过滤制成的薄膜进行干燥处理。此过程隔绝氧气, 这是因为空气中的氧气会氧化 MXene, 并降低传感器的性能。将所制备的薄膜切成合适大小的圆片, 并使用导电银浆将薄膜粘贴到一个柔性印刷电路上, 从而组装

成一个完整的传感器。传感器和数据采集器通过导线连接, 将传感器布置于试样表面或者嵌入试样内部, 然后开始监测。

1.2 MXene/CNT 薄膜传感器的传感机理及表征

MXene/CNT 薄膜传感器是一种压阻式传感器。当受到冲击和振动时, 外部机械能转化为复合材料层合板的内能, 能量沿纤维方向传递, 当达到破坏强度极限时, 层间会产生肉眼不可见的损伤。MXene/CNT 传感器接收随纤维方向传递的能量, 微观结构发生变化, 导致电阻发生变化。在 MXene/CNT 传感器中, MXene 薄片的电阻变化规则为

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R_i} \quad (1)$$

式中, R' 为 MXene 片层的总电阻; R'_n 为 MXene 片层中第 n 个导电分支网络的电阻。此外, Simmons^[24]提出了薄膜电荷隧穿效应, 并给出了 CNT 接触节点上的隧穿类型接触电阻为 R_M , 碳纳米管的 R_M 变化规律为

$$R_M = \frac{h}{e^2} \frac{1}{\sqrt{A}} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \sqrt{\frac{h}{e^2}} \right) \quad (2)$$

式中, h 为普朗克常数; A 为隧道连接的横截面积(这里采用平均截面面

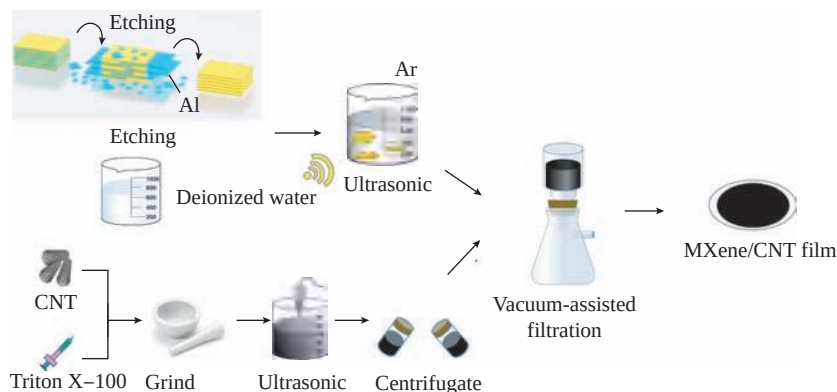


图 1 MXene/CNT 薄膜的制备

Fig.1 Preparation of MXene/CNT thin film

积); d 为相邻的碳纳米管之间的距离; m 为电子的质量; e 为单电子电荷; λ 为碳纳米薄膜体系的能垒高度; L 是粒子个数; N 为纳米薄膜的传导路径数量。纳米管网络有两个电阻来源,即沿纳米管本身的本征电阻和纳米管结点处的接触电阻。后一种电阻主要是由碳纳米管之间的隧穿接触引起的,即当纳米管间基质区域的厚度足够小时,电子可以通过电隧穿效应穿过该区域,由此产生隧道电阻。

进一步分析了薄膜颗粒的接触力学模型,采用微量元素法对薄膜颗粒进行了建模和分析^[25]。颗粒间的作用力可分解为法向接触力 f_c^n 和切向接触力。法向接触力由法向弹性力 f_{cd}^n 和法向阻尼力 f_{cn}^n 组成,可表示为

$$f_c^n = f_{cd}^n + f_{cn}^n = k_n g_s + \beta_n v_s \quad (3)$$

式中, k_n 为法向刚度; β_n 为法向阻尼系数; g_s 为颗粒间的表面间隙; v_s 为相对法向平移速度。对于颗粒状材料,颗粒间的法向接触力是压缩力,不存在张力。因此,在整个颗粒系统中,所有颗粒的法向接触力都是正值,即 $f_c^n \geq 0$ 。

当两个接触的颗粒产生滑移时,遵循库仑摩擦定律。

$$|f_{cd}^s| \leq \mu_c f_c^n \quad (4)$$

式中, μ_c 为颗粒间的滑动摩擦系数; f_c^s 为颗粒间的切向力,只有满足公式两端相等的前提下才允许颗粒间的相对滑动。因此,加入 MXene 片层增大了颗粒之间的表面间隙 g_s ,提高了薄膜传感器的稳定性。采用扫描电镜对薄膜结构进行观察,传感器的微观机理如图 2 所示, CNT 均匀分散至 MXene 片层中,并互相搭接共同形成导电网络, MXene 片层与 CNT 之间形成较多空腔,验证了上述微观颗粒力学模型。对薄膜传感器进行了稳定性测试(图 2 (b)),其中, R 表示传感器的实时电阻; R_0 表示传感器的初始电阻, ΔR 为 R 与 R_0

的差值,可以看出,在 7200 s 内传感器稳定性良好。

1.3 MXene/CNT 薄膜传感器阵列设计及定位算法

对传感器的冲击响应进行测试试验。将 7 个 MXene/CNT 薄膜传感器布置于试样的同一直线上,阵列设计如图 3 所示。薄膜传感器直径为 10 mm,传感器间距为 10 mm。冲击中间传感器(4 号),获得两侧传感器的电阻响应变化值,记录冲击过程中的最大电阻变化率,得到一维传感器组的电阻变化率曲线函数,称为冲击传导函数,如图 3 (a) 所示。根据冲击传导函数可知,传感器的监测范围是有限的,且冲击点附近

的电阻变化率相对较大。随着距离的增加,电阻变化率呈下降趋势。试验结果表明, MXene/CNT 薄膜传感器在 20 mm 的监测范围内相对准确。

根据上述试验结论,设计了一种 MXene/CNT 薄膜传感器的三角形阵列,如图 3 (b) 所示。该传感器阵列由 3 个 MXene/CNT 薄膜传感器组成,分别位于长度为 20 mm 的等边三角形的 3 个顶点处。3 个 MXene/CNT 薄膜传感器为 1 组,依次交替排列,形成传感器阵列。共设计了 23 个传感器,共计组成 28 个监测区域。根据传感器的工作原理,当复合材料层合板受到冲击时,更靠近冲

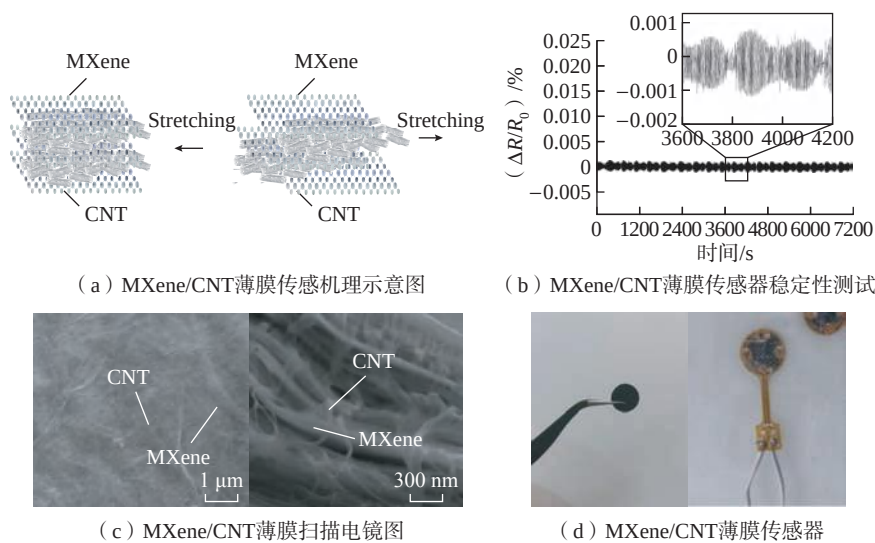


图 2 MXene/CNT 薄膜传感器传感机理及表征

Fig.2 Sensing mechanism and characterization of the MXene/CNT thin-film sensor

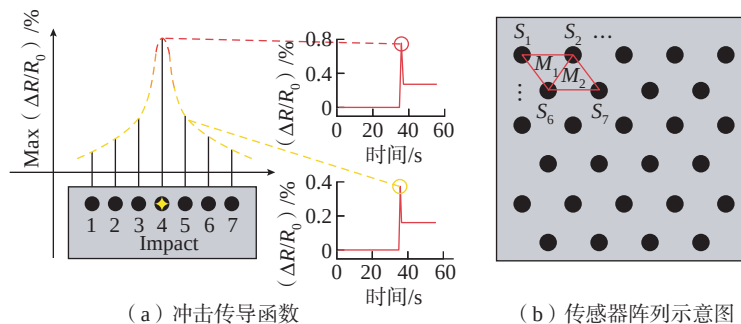


图 3 传感器阵列设计

Fig.3 Sensor array design

击点的传感器电阻变化率较大。记录 23 个传感器冲击响应数据。当监测到冲击时,记录 23 个传感器的最大电阻变化率,将每组 3 个传感器求和,得到各区域传感器的电阻变化率总和。电阻变化率总和最大的区域则为冲击位置。具体的数学表达式为

$$\square_i = \sum_{j=1}^n \square_{ij} \quad (5)$$

$$M = \max(M_1, M_2, \dots, M_n) \quad (6)$$

式中, M_i 为第 i 个监测区域的电阻变化率之和; S_j 为第 j 个传感器的最大电阻变化率; M 为计算出的冲击点位置。

2 结果与讨论

2.1 冲击试样制备

将玻璃纤维预浸料切割成 120 mm × 120 mm 的矩形,并交替堆叠 10 层(铺层顺序为 $[0/90]_{10}$)。柔性印刷电路(FPC)是一种基于聚酯薄膜或聚酰亚胺的电路板,具有可靠性高、灵活性高、质量轻等优点。将 MXene/CNT 薄膜裁剪为直径 10 mm 的单片,在柔性电路板电极上涂上导电银浆,组装传感器后按设定好的传感器阵列位置粘贴于试样表面,然后放入平板硫化机中固化。设定加载 3 MPa 压力,使玻璃纤维预浸料完成固化过程。冲击试样制备过程如图 4 所示。根据玻璃纤维预浸料供应商的建议,将温度调至 140 °C,然后恒温 3 h。

2.2 试验设计及结果分析

设计并建立一个冲击试验台(图 5(a)),将 23 个传感器依次连接到两个数据采集器上,使用螺旋夹紧工具将复合材料层合板固定在冲击底座上,将冲头对准预设的冲击点,并将冲头提升到 30 mm 高度。运行数据采集器开始记录,释放冲头使其自由落体。冲头冲击复合材料层合板后,记录停止。对 23 个传感器的数据进行了分析计算,试验过程和

结果如图 5(b)~(d)所示。

从试验数据可以看出,冲击点附近的传感器响应值较大。根据传感器定位算法对图 5(b)中的结果进行计算,得出图 5(c)中的传感器阵列响应云图。其中,传感器阵列各组的最大传感器响应值之和为 M_{17} 区域,响应值之和为 1.914,由此判断冲击点在 M_{17} 区域内,其余区域响应值求和结果为

$$\square = \square_{11}, \square_{12}, \dots, \square_{17} =$$

$$\begin{bmatrix} \square_{11} & \square_{12} & \square_{13} & \square_{14} \\ \square_{21} & \square_{22} & \square_{23} & \square_{24} \\ \square_{31} & \square_{32} & \square_{33} & \square_{34} \\ \square_{41} & \square_{42} & \square_{43} & \square_{44} \\ \square_{51} & \square_{52} & \square_{53} & \square_{54} \\ \square_{61} & \square_{62} & \square_{63} & \square_{64} \\ \square_{71} & \square_{72} & \square_{73} & \square_{74} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \end{bmatrix}$$

图 5(d)展示了传感器受冲击响应的完整信号变化。当受到冲击时试件发生形变,传感器电阻变化率升高。冲击完成时,试件发生弹性形

变,有部分回弹现象,传感器也会跟随试件发生回弹,电阻变化率降低,且电阻变化率降低幅度是由试件所受冲击能量决定的。冲击能量越大,造成试件损伤越严重,回弹越小,电阻变化率更大。根据电阻变化率的大小可估算试样的损伤情况,对复合材料层合板冲击损伤进行实时监测,统计了 23 个传感器受冲击响应的电阻变化率,发现在冲击点附近的电阻变化率大于 0.28,且距离冲击点越远,电阻变化率越小。

2.3 试验结果验证

超声 C 扫描^[26-27]是传统的冲击定位监测方法之一,其原理简单,广泛应用于离线状态下的复合材料冲击损伤监测。取出冲击试验的复合材料层合板,并进行超声 C 扫描检测。在图 6(a)中,红色方框区域是传感器阵列响应计算给出的定位点。图 6(b)为超声 C 扫描的检测结果。可以看出,超声 C 扫描成像的冲击点位置与传感器冲击定位算法的计算位置相同,均为 M_{17} 区域内,验证了传感器冲击定位算法的有效性。此外,传感器电阻变化率越大,附近分层越明显。以上结果表明, MXene/CNT 纳米传感器能够进行复合材料层合板的冲击定位,对复合材料损伤具有监测能力。

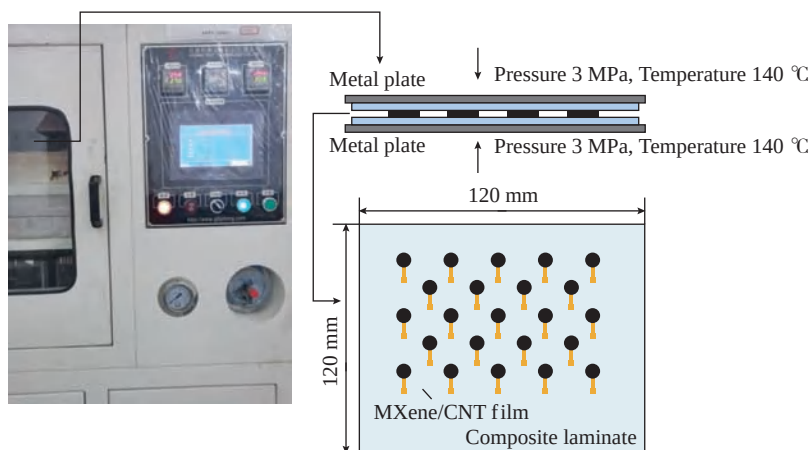


图 4 冲击试样制备

Fig.4 Preparation of impact samples

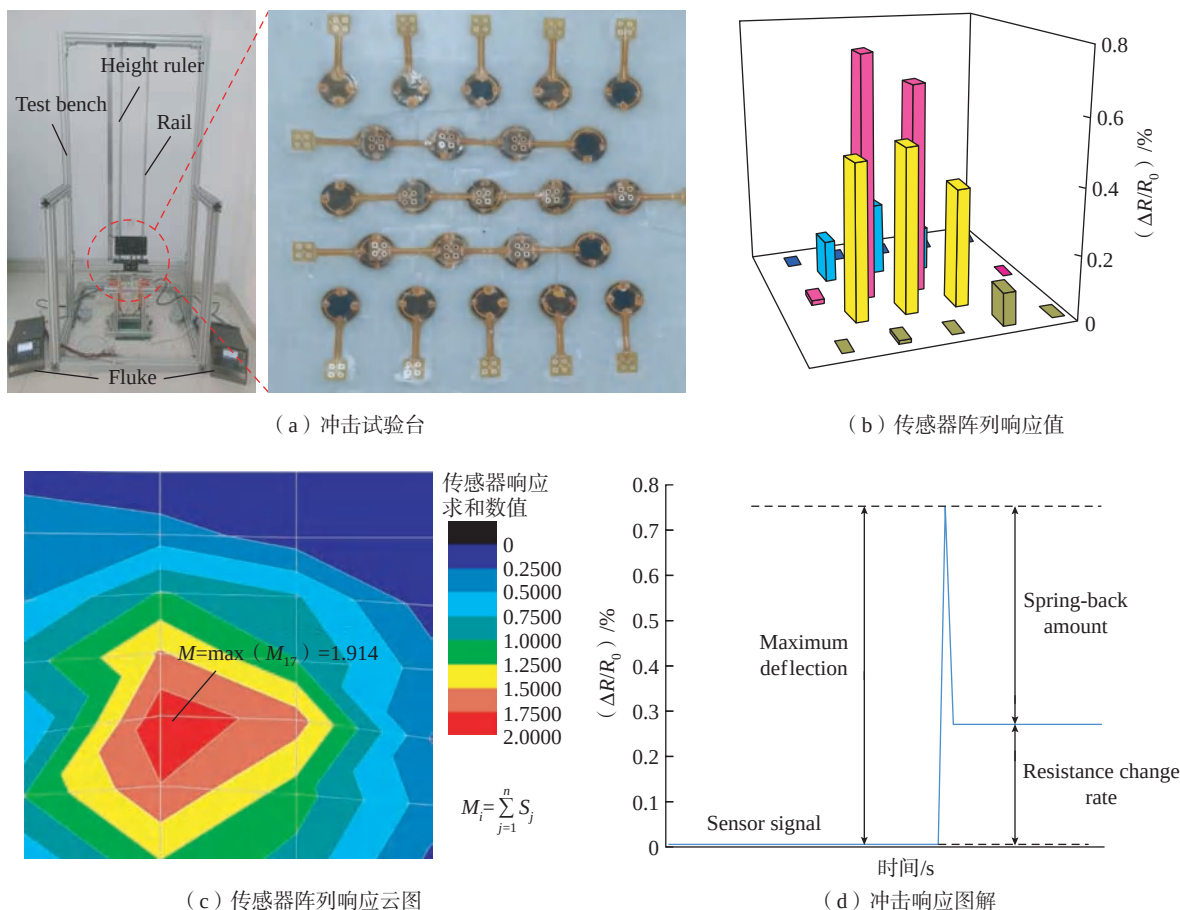


图5 冲击试验过程及数据分析
Fig.5 Impact experiment process and data analysis

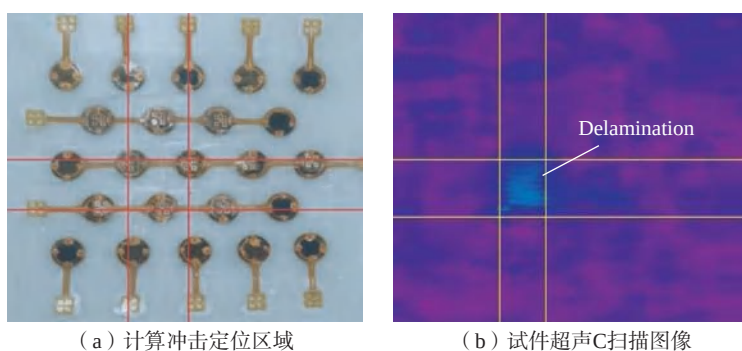


图6 冲击定位算法结果与超声 C 扫描图像对比
Fig.6 Comparason between impact localization algorithm results and the ultrasound C-scan images

3 结论

本文介绍了 MXene/CNT 薄膜传感器的制备方案,设计了一种由等边三角形排列的 MXene/CNT 薄膜传感器阵列,提出了适用于该阵列

的传感器冲击定位算法,并制备了冲击试样进行冲击试验。根据传感器阵列响应值计算冲击点,并计算传感器阵列电阻变化率,对试件冲击损伤进行实时监测。最后采用超声 C 扫描对结果进行验证,得出结

论如下。

(1) 传感器阵列电阻变化率之和最大区域为 $M_{17}=1.914$,与超声 C 扫描检测的冲击位置完全一致,验证了传感器阵列冲击定位算法的有效性。

(2) 传感器阵列计算云图结果与复合材料层合板冲击损伤吻合,证明 MXene/CNT 薄膜传感器阵列能够对复合材料进行损伤监测。但是传感器阵列响应对复合材料损伤量化识别还需进一步研究。

综上,所制备的 MXene/CNT 薄膜传感器在冲击试验中表现出了良好的稳定性和准确性,能够应用于复合材料层合板服役过程中的实时冲击定位,对复合材料冲击损伤具有一定的监测能力。

参考文献

- [1] SÁNCHEZ D M, GRESIL M, SOUTIS C. Distributed internal strain measurement during composite manufacturing using optical fibre sensors[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 120: 49–57.
- [2] CHANDARANA N, SANCHEZ D M, SOUTIS C, et al. Early damage detection in composites during fabrication and mechanical testing[J]. *Materials*, 2017, 10(7): 685.
- [3] JEONG C, LEE T H, NOH S M, et al. Real-time in situ monitoring of manufacturing process and CFRP quality by relative resistance change measurement[J]. *Polymer Testing*, 2020, 85: 106416.
- [4] CAMINERO M A, LOPEZ-PEDROSA M, PINNA C, et al. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 53: 76–91.
- [5] RICHARDSON M, WISHEART M. Review of low-velocity impact properties of composite materials[J]. *Composites Part A*, 1996, 27(12): 1123–1131.
- [6] GARCEA S C, WANG Y, WITHERS P J. X-ray computed tomography of polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 156: 305–319.
- [7] LIU Q, GUO B Q, CHEN P W, et al. Investigating ballistic resistance of CFRP/polyurea composite plates subjected to ballistic impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 166: 108111.
- [8] STEINKE K, GROO L, SODANO H A. Laser induced graphene for in situ ballistic impact damage and delamination detection in aramid fiber reinforced composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 202: 108551.
- [9] 卿新林, 黄媛, 颜佳佳, 等. 先进碳纤维增强复合材料螺栓连接结构损伤监测技术[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(17): 14–25.
- QING Xinlin, HUANG Yuan, YAN Jiajia, et al. Damage monitoring technology for advanced carbon fiber reinforced composite bolted joints[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(17): 14–25.
- [10] LU S W, DU K, WANG X Q, et al. Real-time monitoring of low-velocity impact damage for composite structures with the omnidirection carbon nanotubes' buckypaper sensors[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(2): 454–465.
- [11] ZHANG D, YANG B, TAN J P, et al. Impact damage localization and mode identification of CFRPs panels using an electric resistance change method[J]. *Composite Structures*, 2021, 276: 114587.
- [12] SAEEDIFAR M, AHMADI NAJAFABADI M, YOUSEFI J, et al. Delamination analysis in composite laminates by means of acoustic emission and bi-linear/tri-linear cohesive zone modeling[J]. *Composite Structures*, 2017, 161: 505–512.
- [13] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRÍGUEZ G P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 131–142.
- [14] LISLE T, PASTOR M, BOUVET C, et al. Damage of woven composite under trans laminar cracking tests using infrared thermography[J]. *Composite Structures*, 2017, 161: 275–286.
- [15] QIU L, YUAN S F, ZHANG X Y, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. *Smart Material Structures*, 2011, 20(10): 105014.
- [16] 胡宇豪, 苗鸿臣, 张清华, 等. 基于水平剪切导波的钢桥面板疲劳裂纹在线识别方法[J]. *固体力学学报*, 2023, 44(4): 458–469.
- HU Yuhao, MIAO Hongchen, ZHANG Qinghua, et al. SH guided wave-based inspection method for crack localization in orthotropic steel bridge decks[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2023, 44(4): 458–469.
- [17] YU J S, LIANG D K. Impact localization system of composite structure based on recurrence quantification analysis by using FBG sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 49: 7–15.
- [18] SAI Y Z, ZHAO X X, WANG L L, et al. Impact localization of CFRP structure based on FBG sensor network[J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(1): 88–96.
- [19] ALY K, BRADFORD P D. Real-time impact damage sensing and localization in composites through embedded aligned carbon nanotube sheets[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 522–531.
- [20] LAZARIDOU I, KOURKOULIS S K, ALEXOPOULOS N D. Damage monitoring of different concentration carbon nanotube/epoxy glass fiber reinforced composites under quasi-static incremental loadings[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 12: 262–270.
- [21] IRFAN M S, KHAN T, HUSSAIN T, et al. Carbon coated piezoresistive fiber sensors: From process monitoring to structural health monitoring of composites—A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 141: 106236.
- [22] LOH K J, HOU T C, LYNCH J P, et al. Carbon nanotube sensing skins for spatial strain and impact damage identification[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2009, 28(1): 9–25.
- [23] WAN Y, DIAO C Y, YANG B, et al. GF/epoxy laminates embedded with wire nets: A way to improve the low-velocity impact resistance and energy absorption ability[J]. *Composite Structures*, 2018, 202: 818–835.
- [24] SIMMONS J G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(6): 1793–1803.
- [25] 张雪洁. 密集颗粒系统剪切流变特性的瞬态演变及微观机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- ZHANG Xuejie. Transient evolution and microscopic mechanism of shear rheological properties of dense granular systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [26] 孙晋茹, 姚雪玲, 李亚丰, 等. 碳纤维增强树脂复合材料在多重连续雷电流冲击下的损伤特性[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2764–2771.
- SUN Jinru, YAO Xueling, LI Yafeng, et al. Damage properties of carbon fiber reinforced epoxy composite subjected to multiple continuous lightning current strikes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2764–2771.
- [27] ELLISON A, KIM H. Shadowed delamination area estimation in ultrasonic C-scans of impacted composites validated by X-ray CT[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(4): 549–561.

通讯作者: 卢少微, 教授, 博士, 研究方向为复合材料结构健康监测。

Impact Localization and Damage Monitoring of Composite Materials Based on MXene/CNT Thin Film Sensor Array

WANG Ying¹, LU Shaowei², ZHANG Lu²

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] Composite laminates are vulnerable to impact damage during service, which has adverse effects on the structure. The internal structural damage of composite materials caused by impact can shorten the service life of composite materials. Therefore, it is necessary for impact localization and damage monitoring of composite laminates. New carbon nanomaterials represented by carbon nanotubes (CNT) and MXene films have unique nanoscale structures and excellent physical properties. The MXene/CNT thin film sensor array is arranged in the monitoring range, and a localization algorithm suitable for the sensor array is proposed. The algorithm can accurately calculate and orientate the impact position of the monitoring area. At the same time, the damage of the workpiece can be judged according to the relative resistance change rate of the sensor. Finally, the results were compared and verified by ultrasonic C-scan equipment. The experimental results show that the sensor array response calculation matches the actual impact position, and the resistance change rate of the sensor is related to the damage severity.

Keywords: Composite materials; Impact localization; Damage monitoring; MXene/CNT thin film sensor;
Impact localization algorithm

(责编 向阳)

(上接第 67 页)

Research Progress of Structural Health Monitoring Technology for Aircraft

TIAN Tong¹, LI Jianle¹, DENG Deshuang¹, ZENG Xu¹, LIN Kuixu¹, DONG Shanshan¹, YANG Lei¹,
XU Hao², YANG Zhengyan³, WU Zhanjun²

(1. College of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

[ABSTRACT] Structural health monitoring (SHM) technology is poised to play a pivotal role in the design, service, and maintenance of aircraft, enhancing structural efficiency and ensuring the safety and reliability of aircraft structures. This article begins by outlining the fundamental concepts and applicability of SHM, emphasizing its significance in the aerospace industry. Subsequently, it delves into the research landscape of SHM technology in typical aircraft structures, focusing on advanced techniques such as impact monitoring, ultrasonic guided wave damage detection, and strain monitoring using fiber optic sensors. The review encompasses an overview of international and domestic research progress, technological capabilities, and typical applications. Lastly, it highlights the challenging issues facing structural health monitoring in aircraft structures and provides insights into its promising future applications in the aerospace field.

Keywords: Structural health monitoring (SHM); Impact monitoring; Ultrasonic guided wave; Fiber grating;
Distributed optical fiber; Damage diagnosis

(责编 青燕)



第五届 中国国际复合材料科技大会

主办单位：中国复合材料学会

2024年7月25-28日

乌鲁木齐

大会网站：<https://cccm5.csfc.org.cn>

引文格式: 李冰, 赵科, 刘佃光, 等. 振荡热压烧结 ZrB_2 -SiC 陶瓷的力学性能[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 100-105, 112.

LI Bing, ZHAO Ke, LIU Dianguang, et al. Mechanical properties of ZrB_2 -SiC ceramics sintered by hot oscillatory pressing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 100-105, 112.

振荡热压烧结 ZrB_2 -SiC 陶瓷的力学性能

李冰, 赵科, 刘佃光, 刘金铃

(西南交通大学, 成都 611756)

[摘要] 采用振荡热压烧结(HOP)和热压烧结(HP)工艺制备了 ZrB_2 -SiC 陶瓷, 研究了振荡压力对 ZrB_2 -SiC 陶瓷致密化及力学性能的影响。结果表明, 与采用 HP 工艺制备 ZrB_2 -SiC 陶瓷相比, HOP 工艺的致密化速率有显著提升; ZrB_2 与 SiC 两相界面结合良好; HOP 工艺制备的 ZS30 样品的硬度和断裂韧性分别达到了 21.1 GPa 和 7.3 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 较采用 HP 工艺在相同烧结参数下制备的试样有大幅提升。HOP 在制备高性能 ZrB_2 -SiC 陶瓷方面展现出良好发展前景。

关键词: 超高温陶瓷(UHTCs); ZrB_2 ; 烧结; 致密化; 力学性能

Mechanical Properties of ZrB_2 -SiC Ceramics Sintered by Hot Oscillatory Pressing

LI Bing, ZHAO Ke, LIU Dianguang, LIU Jinling

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

[ABSTRACT] ZrB_2 -SiC ceramics were prepared using hot oscillatory pressing (HOP) and hot pressing (HP) processes, and the effect of oscillatory pressure on the densification and mechanical properties of ZrB_2 -SiC ceramics was investigated. The results have shown that compared to using the HP process to fabricate ZrB_2 -SiC ceramics, the densification rate of HOP process has been improved significantly, and the interface between ZrB_2 and SiC is well bonded; The hardness and fracture toughness of the ZS30 sample prepared by the HOP process reached 21.1 GPa and 7.3 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, respectively, which were significantly improved compared to the samples prepared by the HP process under the same sintering parameters. HOP has shown good development prospects in the preparation of high-performance ZrB_2 -SiC ceramics.

Keywords: Ultra-high temperature ceramics (UHTCs); ZrB_2 ; Sintering; Densification; Mechanical properties

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.100

现代空天飞行器, 例如高超音速飞机、导弹、再入飞行器等, 正朝着高推力、高速度和远距离的方向发展。制造空天飞行器的鼻锥、前缘、超燃冲压发动机燃烧室等部件必须用到超高温材料, 这些部件在使用过程中都需要承受 2500 °C 以上的高温, 这使得超高温材料的发展需求越来越迫切^[1-3]。

ZrB_2 是一种具有良好发展前景的超高温陶瓷(Ultra-high temperature ceramics)材料, 具有优异的综合性能, 如较低的密度、高熔点、高硬度、高热导率和电导率、良好的抗氧化性能, 以及较高的力学性能等^[2]。 ZrB_2 在高

温下与氧气发生反应形成的液相 B_2O_3 在 1100 °C 以下能有效阻挡氧原子的扩散, 使得 ZrB_2 陶瓷展现出优异的抗氧化能力^[2-6]。当温度超过 1200 °C 后, B_2O_3 的快速挥发会使其对 ZrB_2 陶瓷的保护能力急剧降低^[2-3]。研究发现, 往 ZrB_2 陶瓷中添加 SiC 能够在 1200 °C 以上形成 Si-B-O/SiO₂ 玻璃相, 可大幅提高其抗高温氧化性能^[5-6]。同时, SiC 的引入对提高 ZrB_2 陶瓷的室温与高温力学性能、抗烧蚀性能及抗热冲击性能有显著效果^[2-4]。此外, SiC 还可以有效阻碍 ZrB_2 的晶粒长大, 提升 ZrB_2 陶瓷的烧结性能^[2-3]。因此, ZrB_2 -SiC 体系是目前最受关

注的超高温陶瓷材料之一。

制备 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷通常采用无压烧结、热压烧结 (HP)、反应热压烧结,以及放电等离子烧结等方法^[7-15]。振荡热压烧结 (Hot oscillatory pressing, HOP) 是新发展的一种压力烧结技术^[16],如图 1 所示,采用振荡压力替代了传统热压烧结中的恒定压力。振荡热压烧结已在制备 Al_2O_3 ^[17-18]、 ZrO_2 ^[19-20]、 B_4C ^[21]、 Si_3N_4 ^[22]、 AlN ^[23] 等多种单相陶瓷中有广泛研究。Liu^[17] 和 Yuan^[18] 等发现,相比于热压烧结,采用 HOP 制备的 Al_2O_3 陶瓷致密度更高、晶粒尺寸更小,且具有更高的硬度和弯曲强度。Liu 等^[17] 发现在 Al_2O_3 陶瓷的各烧结阶段施加振荡压力对样品力学性能的提升都有明显效果,且烧结温度越高,振荡热压烧结的 Al_2O_3 陶瓷的力学性能越好。Fan 等^[19] 认为在氧化锆陶瓷坯体相对密度 <90% 的条件下,由 HOP 制备氧化锆陶瓷的致密化机制由晶界滑移主导。Li 等^[20] 采用 HOP 工艺制备氧化锆陶瓷,发现采用 HOP 和 HP 时晶粒快速生长的起始温度相同,但 HOP 制备的晶粒生长速率低于 HP,并认为当烧结温度高于某一临界值时, HOP 比 HP 更有利于致密化,得到的样品具有更高的硬度。

HOP 工艺在制备复相陶瓷方面也显现出了良好效果,研究人员采用 HOP 工艺获得了高性能的 ATZ^[24]、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ^[25]、 $\text{ZrO}_2\text{-ZrO}_2$ ^[25]、 $\text{SiC}_w\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ^[26]、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ (SiC_w 体积分数 25%)^[27]、ZTA^[28] 和 $\text{SiC}_w\text{-Si}_3\text{N}_4$ ^[29] 等复相陶瓷材料。采用 HOP 工艺制备 ATZ 陶瓷能够显著抑制晶粒生长,获得比 HP 工艺更细小的晶粒,表明 HOP 是一种比 HP 更有优势的烧结工艺^[30]; HOP 制备的 $\text{SiC}_w\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 的弯曲强度相比 HP 提高了 10%,硬度从 12.59 GPa 增加到 13.19 GPa,断裂韧性从 $6.31 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 $6.67 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ^[26]; HOP 制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ (SiC_w 体积分数 25%) 陶瓷的弯曲强度和硬度比 HP 制备的分别高出 10% 和 3.5%^[27]; HOP 制备的 $\text{SiC}_w\text{-Si}_3\text{N}_4$ 的弯曲强度和断裂韧性相比 HP 制备的分别增加了 14.7% 和 11.6%^[29]。上述研究结果表明, HOP 工艺可以降低烧结温度、缩短烧结时间、抑制晶粒生长; HOP 工艺还可以促进颗粒重排、晶界滑移和塑性变形,有利于消除残余气孔,从而提高材料的烧结密度和力学性能, HOP 工艺为制备高性能陶瓷材料提供了一种新方法。

本文采用 HOP 工艺制备 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 超高温陶瓷,研究了振荡压力对 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷致密化的影响,并对其室温弯曲性能、断裂韧性和硬度进行了测试,分析了振荡压力在 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷烧结中的有益效果,为 HOP 应用于制备高性能 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷奠定了基础。

1 试验及方法

本文选用市售 ZrB_2 粉体(平均尺寸约为 $1\sim 3 \mu\text{m}$,质量分数 99.9%,北京华威锐科有限公司)和 SiC 粉体(平均尺寸约为 $0.6 \mu\text{m}$,质量分数 99.9%,上海超威纳米科技有限公司)为原料,两种粉体按照 $\text{ZrB}_2\text{:SiC}=7\text{:}3$ 的体积配比(以下简称 ZS30)称重后置于聚四氟乙烯球磨罐中,加入 200 mL 无水乙醇作为球磨介质配成悬浮液,磨球为高纯 ZrO_2 球,通过罐磨机混合均匀。 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 复合粉体微观形貌如图 2 所示。

采用 HOP 制备 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷的过程如下。称取 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 粉体约 20 g,放入内径为 30 mm 的石墨模具中,采用 2 MPa 的压力经电动压片机预压粉体,再将其放置在振荡热压烧结炉 (OPS-2020,成都易飞得材料科技有限公司)中进行烧结。先将炉内真空度抽至 10 Pa 以下,然后以 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,再降低升温速率,以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在温度到达烧结温度之前,将施加在样品上的压力缓慢升高至 30 MPa 或 40 MPa,然后在保温阶段分别施加 30 MPa (相当于 HP 工艺)、 $(30 \pm 5) \text{ MPa}$ 、 $(30 \pm 10) \text{ MPa}$

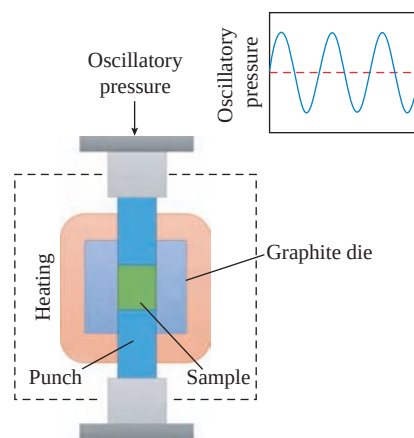


图 1 振荡热压烧结装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot oscillating pressing device

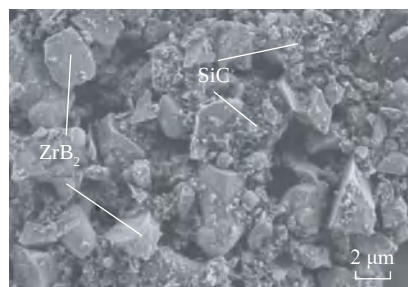


图 2 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 复合粉体形貌

Fig.2 Morphology of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composite powder

和 (40 ± 5) MPa 的振荡压力,振荡频率均为 2 Hz;保温 1 h 后停止加热并去除外加压力,降温速率设定为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度降至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,降温速率设定为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,直至炉温降至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$;然后关闭加热电源,样品随炉冷却至室温后取出。

采用阿基米德排水法测量试样的密度;采用 X 射线衍射仪(Panalytical Empyrean 型,荷兰帕纳科公司)对烧结后试样的物相成分进行分析;采用扫描电子显微镜(Sigma 500,德国蔡司公司)观察试样表面及断口的微观结构;采用光学显微镜(BX51 型,日本奥林巴斯公司)分析试样表面平整度,观察试样表面维氏硬度压痕。

将烧结的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷样品加工成尺寸为 $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的长条试样,采用三点弯曲法在万能试验机(INSTRON LEGEND 2367 型,美国英斯特朗公司)上测试试样的抗弯强度,加载速率设置为 $0.5\text{ mm}/\text{min}$,跨距设置为 15 mm ,试样断裂立即终止试验。采用单边切口梁法(SENBB)表征陶瓷材料的断裂韧性,首先将烧结的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷样品加工成尺寸为 $2\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ 的试样,并对试样表面进行打磨和抛光;然后在试样中间位置加工 1 个宽度约 0.2 mm 、深度约 2 mm 的“U”形切口,通过三点弯曲法测试试样的断裂韧性(加载速率 $0.05\text{ mm}/\text{min}$ 、跨距 16 mm)。采用维氏硬度计(200HV-5,莱州华银实验仪器有限公司)测试 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷的硬度,试验力为 5 kg ,保压时间为 15 s 。

2 结果与讨论

2.1 致密化过程

图 3 展示了采用不同振荡压力制备 ZS30 陶瓷时,试样相对密度随保温时间的变化曲线。可以发现,所有样品在保温阶段的起始相对密度差别不大,约为 87% 。施加振荡压力烧结的样品,其致密化速率比未施加振荡压力的样品要高得多,但是振荡压力的大小对致密化速率的影响不太明显。施加振荡压力的样品在 30 min 左右达到几乎完全致密;而施加恒定压力的样品,其达到完全致密的时间需要 50 min 以上,这说明振荡压力能够大幅缩短致密化时间。当试样的相对密度为 $87\%\sim 90\%$ 时,振荡压力对致密化速率的影响较小,振荡压力对致密化的作用呈现出随保温时间延长先增强后减弱的趋势。此时,恒定压力烧结和振荡压力烧结具有相同的致密化机理,都是原子扩散占主导,所以两者的致密化速率没有显著差异。随着相对密度的增加,气孔逐渐封闭,成为不连续状态,振荡压力激活了晶界滑移和等塑性变形等机制,增加了扩散通道,有利于气孔的

排出,使得致密化速率加快。

2.2 力学性能与断口表征

表 1 为采用 HOP 方式在不同烧结条件下制备的 ZS30 样品的相对密度和弯曲强度。可以看出所有样品都达到了较高的相对密度,但是 HOP 制备的样品密度均高于恒定压力烧结的样品,其相对密度达到了 99% 以上。相比采用恒定压力烧结的样品,HOP 制备样品的弯曲强度都要低。HOP 的烧结时间和振荡压力幅值对弯曲强度的影响比较显著。可以发现采用 (30 ± 5) MPa 振荡压力烧结获得的样品,其弯曲强度随保温时间的缩短有明显提升,最高达到了 (998 ± 58) MPa。在相同保温时间的条件下,采用 10 MPa 振荡压力幅值烧结的样品,其弯曲强度达到了 (910 ± 23) MPa,相比振荡压力幅值为 5 MPa 的样品提高了 4.7% 。采用 (40 ± 5) MPa 振荡压力烧结获得的样品,其弯曲强度没有明显变化。

图 4 展示了三一点弯曲试样的断口形貌。可以看出,所有试样内部都很致密,没有观察到明显的气孔,这和密度测试结果一致。恒定压力烧结的样品晶粒尺寸较

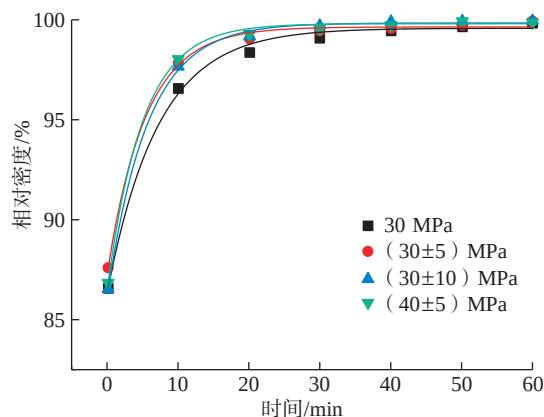


图 3 不同振荡压力烧结的 ZS30 样品相对密度随保温时间的变化曲线

Fig.3 Curves of relative density varying with holding time of ZS30 samples sintered by different oscillatory pressures

表 1 不同烧结条件下 ZS30 样品弯曲性能

Table 1 Flexural strength of ZS30 samples under different sintering conditions

烧结条件	相对密度 /%	弯曲强度 σ/MPa
$1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 30 MPa 、 60 min	99.8	1083 ± 92
$1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(30 \pm 5)\text{ MPa}$ 、 30 min	99.9	998 ± 58
$1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(30 \pm 5)\text{ MPa}$ 、 60 min	99.9	869 ± 148
$1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(30 \pm 10)\text{ MPa}$ 、 60 min	99.9	910 ± 23
$1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(40 \pm 5)\text{ MPa}$ 、 60 min	99.9	874 ± 148

小,振荡热压烧结的样品晶粒尺寸明显较大。根据图3的致密化曲线可知,振荡热压烧结的样品在保温30 min后,就基本达到了完全致密,后续的保温过程可能会造成显著的晶粒生长,这和图4所展示的断口晶粒尺寸相符。晶粒尺寸增大,会导致 ZrB_2 -SiC陶瓷的弯曲强度降低,这可以部分解释保温60 min的HOP制备样品弯曲强度较低的原因。另一方面,振荡热压烧结相比恒定压力烧结更容易引入晶体缺陷^[32-35],会造成晶粒的动态长大,这也可能导致HOP制备的样品具有较大的晶粒尺寸。从图4中还可以看出,在HOP制备的ZS30样品中,大量灰黑色的SiC晶粒被包裹在灰白色的 ZrB_2 晶粒中(图4中圆圈所示的位置),这是 ZrB_2 晶粒发生了明显的晶粒生长所产生的结果。由于 ZrB_2 和SiC的热膨胀系数存在差异,在试样降温过程中会在 ZrB_2 晶粒内部产生残余热应力,这也会造成HOP制备样品弯曲强度降低。

通过分析三点弯曲试样的断口形貌可以发现,恒定压力烧结的ZS30样品呈现穿晶断裂和沿晶断裂共存的现象,灰白色的 ZrB_2 晶粒和灰黑色的SiC晶粒都有明显的沿晶断裂特征。而振荡热压烧结的ZS30样品主要

以穿晶断裂为主,尤其是粗大的灰白色的 ZrB_2 晶粒几乎观察不到沿晶断裂的特征,且在部分区域发现SiC晶粒嵌入 ZrB_2 晶粒中, ZrB_2 、SiC都为穿晶断裂。一般而言,接近完全致密的复相陶瓷试样,由于晶粒间形成了较强的键合作用,其断裂面以穿晶断裂为主^[31]。这也说明HOP相比恒定压力烧结可以达到更高的烧结密度和更强的界面结合,为制备高性能 ZrB_2 -SiC陶瓷提供了新途径。

表2给出了30 MPa恒定压力烧结和 (30 ± 5) MPa、 (30 ± 10) MPa、 (40 ± 5) MPa HOP制备的ZS30样品的硬度和断裂韧性,并和文献[32-37]中的数据进行了对比。可以看出,HOP制备的ZS30样品的维氏硬度最高,达到了 (21.1 ± 0.7) GPa,相比恒定压力烧结的样品有显著提升。维氏硬度测试是一种压入测试方法,反映的是试样微区的力学性能,结合图4所展示的显微结构可知,HOP制备的样品中 ZrB_2 晶粒尺寸相比恒定压力烧结的样品要粗大,其硬度提升的原因很可能是由于引入了晶体缺陷^[38-40]。图5展示了采用 (30 ± 10) MPa的振荡压力烧结60 min后试样的TEM照片。可以看出,在HOP过程样品中引入了位错、层错和孪晶等晶体

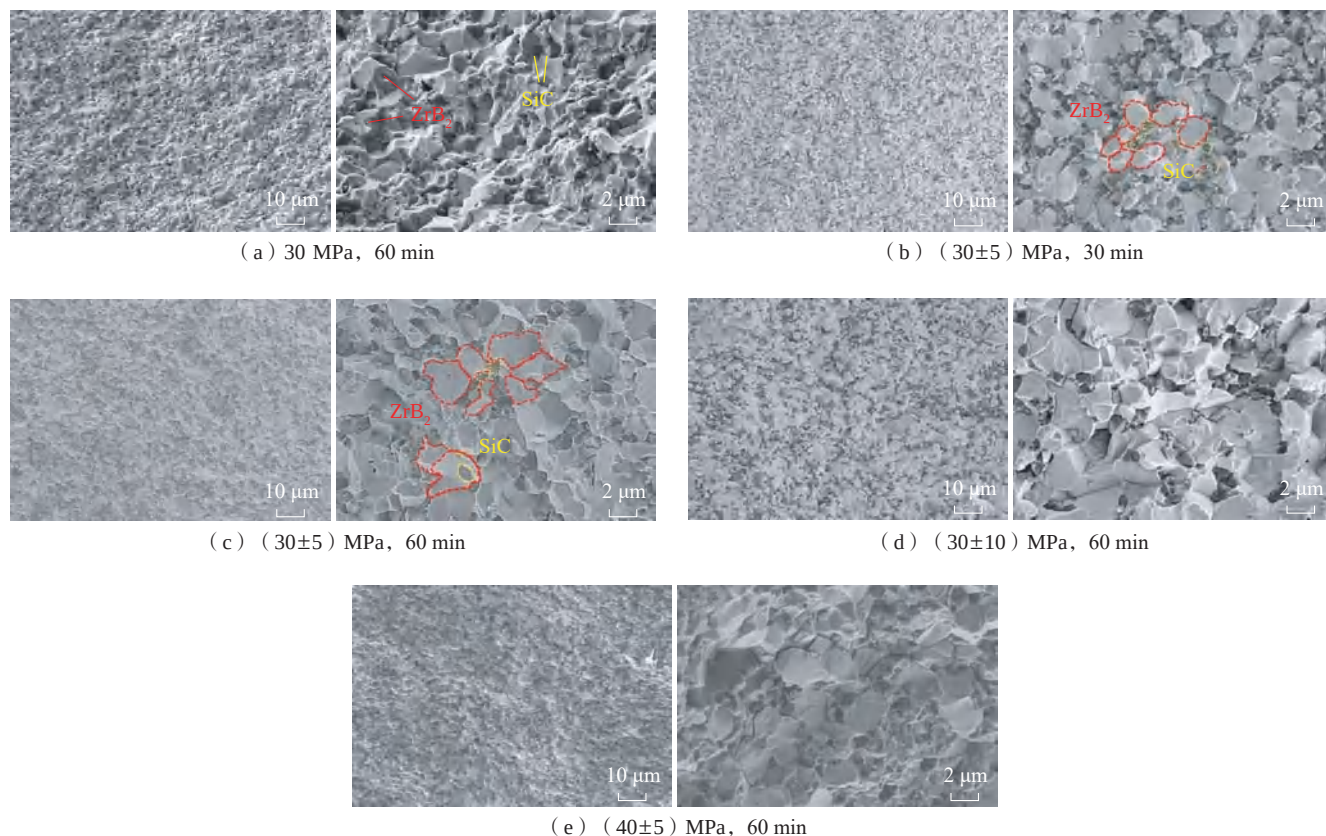


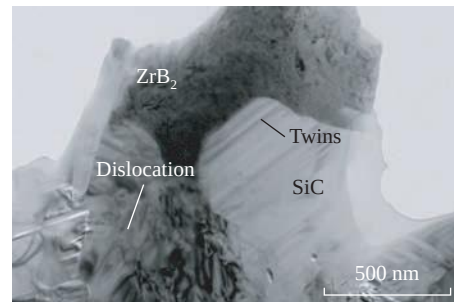
图4 三点弯曲试样的断口形貌

Fig.4 Fractographs of three-point bending specimens

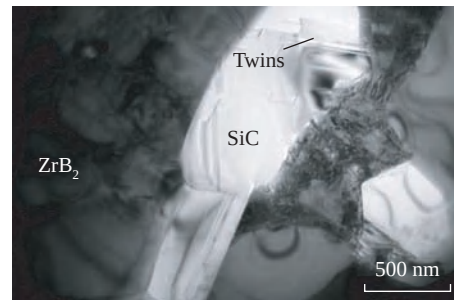
表 2 ZS30 样品的硬度和断裂韧性
Table 2 Hardness and fracture toughness of ZS30 specimens

烧结方式	颗粒尺寸 / μm		烧结条件			维氏硬度 /GPa	断裂韧性 K_{IC} / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	来源
	ZrB ₂	SiC	温度 / $^{\circ}\text{C}$	振荡压力 /MPa	时间 /min			
HOP	1~3	0.6	1800	30	60	17.6 ± 0.5 (5 kgf)	5.5 ± 0.6	本文试验
	1~3	0.6	1800	30 ± 5	60	20.1 ± 0.5 (5 kgf)	6.6 ± 0.5	本文试验
	1~3	0.6	1800	30 ± 10	60	21.1 ± 0.7 (5 kgf)	7.3 ± 0.1	本文试验
	1~3	0.6	1800	40 ± 5	60	20.8 ± 0.7 (5 kgf)	7.0 ± 0.1	本文试验
HP	2	0.5	1950	30	60	19.6 ± 0.9 (5 kgf)	5.6 ± 0.5	[32]
	6	0.45	1900	32	45	19.3 ± 0.6 (0.2 kgf)	4.2 ± 0.2	[33]
	6	0.7	1900	32	45	20.7 ± 1.0 (0.2 kgf)	4.6 ± 0.1	[34]
	2	0.5	1950	30	60	—	5.6 ± 0.5	[35]
	0.8	0.5	1950	30	60	—	4.3 ± 0.3	[36]
	~3.2	0.31	1900	32	45	—	5.4 ± 1.1	[37]

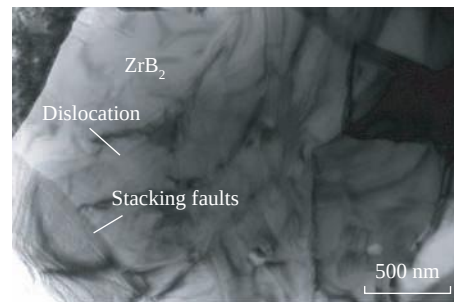
缺陷, SiC 晶粒中的缺陷以孪晶为主,而与 SiC 相邻的 ZrB₂ 晶粒中存在高密度的位错和层错,未与 SiC 相邻的 ZrB₂ 晶粒中缺陷较少,说明在 HOP 过程中, SiC 的塑性变形比 ZrB₂ 的塑性变形更加显著。需要指出的是,本文测试得到的恒定压力烧结的 ZS30 样品的硬度值明显低于文献报道的热压烧结的 ZS30 样品的数据,产生这种差异的原因可能是原料不同或者压痕测试所用载荷不同。从表 2 中数据可知,采用单边切口梁法测试通过 HOP 制备的 ZS30 样品断裂韧性达到了(7.3 ± 0.1) $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,远远高于恒定压力烧结的样品,也高于文献报道的热压烧结的 ZS30 样品的数据。而图 4 所展示的断口形貌也表明, HOP 制备样品的穿晶断裂特征更明显,说明裂纹在穿晶断裂过程中可能出现了其他的能量耗散方式,例如裂纹尖端产生塑性变形^[41],使得 HOP 制备的 ZS30 样品相比恒定压力烧结样品具有更好的断裂韧性。相比恒定压力烧结, HOP 同时提高了 ZrB₂-SiC 陶瓷的硬度和断裂韧性。根据图 5 的 TEM 分析结果可知, HOP 制备样品的硬度和断裂韧性提升应主要源于 ZrB₂ 和 SiC 晶粒中所产生的位错、层错和孪晶等晶体缺陷。Xu 等^[42]的研究表明, ZrB₂ 陶瓷中的位错密度和位错组态对位错滑移和裂纹扩展会产生显著的影响,从而提高材料的硬度和断裂韧性;同时孪晶片层也会使得裂纹扩展过程中的能量耗散增加,从而提高材料的力学性能。由此可见,振荡压力对材料力学性能的影响非常显著,通过 HOP 获得高性能的 ZrB₂-SiC 超高温陶瓷还需要进一步对工艺参数进行优化,合理调控晶粒尺寸和振荡压力引起的晶体缺陷。



(a) 局部明场TEM图像



(b) 包含位错的ZrB₂晶粒的明场TEM图像



(c) 包含层错的ZrB₂晶粒的明场TEM图像

图 5 HOP 样品的 TEM 表征

Fig.5 TEM characterization of the HOP samples

3 结论

本文探索了采用 HOP 制备高性能 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 超高温陶瓷的新工艺。振荡压力可以加速致密化过程,缩短烧结时间,获得烧结密度更高的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷。相比传统 HP 工艺, HOP 制备的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷的硬度和断裂韧性同时提升,这可能是因为 HOP 工艺达到了更高的烧结密度和更强的界面结合,甚至引入了大量的位错、层错或孪晶等晶体缺陷。HOP 为调控 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷的力学性能提供了新的维度,在制备高性能 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 超高温陶瓷方面有良好的发展前景。

参考文献

- [1] 杨亚政, 杨嘉陵, 方岱宁. 高超声速飞行器热防护材料与结构的研究进展 [J]. 应用数学和力学, 2008, 29(1): 47–56.
- YANG Yazheng, YANG Jialing, FANG Daining. Research progress on the thermal protection materials and structures in hypersonic vehicles[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(1): 47–56.
- [2] 陈玉峰, 洪长青, 胡成龙, 等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料 [J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 311–390.
- CHEN Yufeng, HONG Changqing, HU Chenglong, et al. Ceramic-based thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(5): 311–390.
- [3] 张幸红, 胡平, 韩杰才, 等. 超高温陶瓷复合材料的研究进展 [J]. 科学通报, 2015, 60(3): 257–266.
- ZHANG Xinghong, HU Ping, HAN Jiecai, et al. Research progress on ultra-high temperature ceramic composites[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(3): 257–266.
- [4] 张幸红, 胡平, 韩杰才, 等. 超高温陶瓷材料抗热冲击性能及抗氧化性能研究 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(1): 27–31, 26.
- ZHANG Xinghong, HU Ping, HAN Jiecai, et al. Study on thermal shock resistance and oxidation resistance of ultra-high temperature ceramics[J]. Materials China, 2011, 30(1): 27–31, 26.
- [5] WANG Y G, LUO L, SUN J, et al. $\text{ZrB}_2\text{-SiC(Al)}$ ceramics with high resistance to oxidation at 1500 °C [J]. Corrosion Science, 2013, 74: 154–158.
- [6] HE J B, WANG Y G, LUO L, et al. Oxidation behaviour of $\text{ZrB}_2\text{-SiC (Al/Y)}$ ceramics at 1700 °C [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(15): 3769–3774.
- [7] ZHANG X H, QU Q, HAN J C, et al. Microstructural features and mechanical properties of $\text{ZrB}_2\text{-SiC-ZrC}$ composites fabricated by hot pressing and reactive hot pressing[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(7): 753–756.
- [8] LÜ Z H, JIANG D L, ZHANG J X, et al. Processing and properties of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composites obtained by aqueous tape casting and hot pressing[J]. Ceramics International, 2011, 37(1): 293–301.
- [9] HU P, WANG Z. Flexural strength and fracture behavior of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ultra-high temperature ceramic composites at 1800 °C [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(4): 1021–1026.
- [10] ZHU M, WANG Y G. Pressureless sintering $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ceramics at low temperatures[J]. Materials Letters, 2009, 63(23): 2035–2037.
- [11] MASHHADI M, KHAKSARI H, SAFI S. Pressureless sintering behavior and mechanical properties of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composites: Effect of SiC content and particle size[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4(4): 416–422.
- [12] PADOVANO E, BADINI C, BIAMINO S, et al. Pressureless sintering of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composite laminates using boron and carbon as sintering aids[J]. Advances in Applied Ceramics, 2013, 112(8): 478–486.
- [13] POPOV O, VLEUGELS J, ZEYNALOV E, et al. Reactive hot pressing route for dense $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ and $\text{ZrB}_2\text{-SiC-CNT}$ ultra-high temperature ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(15): 5012–5019.
- [14] ZHANG G J, DENG Z Y, KONDO N, et al. Reactive hot pressing of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(9): 2330–2332.
- [15] YAN X J, JIN X C, LI P, et al. Microstructures and mechanical properties of $\text{ZrB}_2\text{-SiC-Ni}$ ceramic composites prepared by spark plasma sintering[J]. Ceramics International, 2019, 45(13): 16707–16712.
- [16] XIE Z P, LI S, AN L. A novel oscillatory pressure-assisted hot pressing for preparation of high-performance ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(4): 1012–1015.
- [17] LIU D G, ZHANG X C, FAN J Y, et al. Sintering behavior and mechanical properties of alumina ceramics exposed to oscillatory pressure at different sintering stages[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 23682–23685.
- [18] YUAN Y, FAN J Y, LI J S, et al. Oscillatory pressure sintering of Al_2O_3 ceramics[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15670–15673.
- [19] FAN J Y, LIU D G, ZHAO K, et al. Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing[J]. Open Ceramics, 2023, 13: 100323.
- [20] LI J S, FAN J Y, YUAN Y, et al. Effect of oscillatory pressure on the sintering behavior of ZrO_2 ceramic[J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13240–13243.
- [21] FAN L, LI J H, HUANG Y B, et al. Hot oscillatory pressing of B_4C ceramics for improving densification and mechanical properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2022, 105(8): 5039–5044.
- [22] LI S S, XIE Z, XUE W J, et al. Sintering of high-performance silicon nitride ceramics under vibratory pressure[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98: 698–701.
- [23] FENG B, ZHOU Y, PENG C, et al. Vibration assisted hot-press sintering of AlN ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(6): 1711–1713.
- [24] FAN J Y, YUAN Y, LI J S, et al. Densification and grain growth in oscillatory pressure sintering of alumina toughened zirconia ceramic composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 155644.

(下转第 112 页)

引文格式: 徐刚, 薛涛, 胡彦华, 等. 喷丸覆盖率对 2024-T351 铝合金表面完整性的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 106–112.
XU Gang, XUE Tao, HU Yanhua, et al. Effect of shot peening coverage on surface integrity of 2024-T351 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 106–112.

喷丸覆盖率对 2024-T351 铝合金表面完整性的影响

徐 刚¹, 薛 涛¹, 胡彦华¹, 肖 雄¹, 曹 一², 张 琪²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089;

2. 西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 喷丸覆盖率对零件的服役性能具有十分重要的影响。本文以 2024-T351 铝合金作为研究对象, 通过调整喷丸进给速度获得 4 种喷丸覆盖率: 88.3%、100%、200%、400%。使用扫描电子显微镜、粗糙度仪、残余应力分析仪、微观硬度计等研究了喷丸覆盖率对表面形貌、表面粗糙度、残余应力和微观硬度的影响。随着喷丸覆盖率的增加, 试样表面粗糙度先升高后下降。100% 覆盖率的喷丸试样表面粗糙度 R_a 达到最大值 $4.601\text{ }\mu\text{m}$ 。在 400% 的覆盖率下, 试样表面出现较多的褶皱及微裂纹。喷丸覆盖率的增加导致残余压应力最大值的提高和残余应力场深度的增大。喷丸试样的微观硬度和硬化层深度随覆盖率的增加而增大, 对应于 88.3%、100%、200% 和 400% 覆盖率的喷丸试样表面微观硬度分别增加了 18.4%、22.8%、25.1%、27.2%。

关键词: 喷丸覆盖率; 表面完整性; 表面粗糙度; 残余应力; 微观硬度

Effect of Shot Peening Coverage on Surface Integrity of 2024-T351 Aluminum Alloy

XU Gang¹, XUE Tao¹, HU Yanhua¹, XIAO Xiong¹, CAO Yi², ZHANG Qi²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] Peening coverage has essential effects on the service performance of parts. In this paper, aluminum alloy 2024-T351 was subjected to pneumatic shot peening with different coverage of 88.3%, 100%, 200% and 400% by adjusting feeding speed. The surface topography and microstructure, roughness, residual stress and microhardness were investigated using a scanning electron microscope, roughness tester, residual stress instrument and Vickers hardness tester. The surface roughness increases first and then decreases with the increase of peening coverage. The average surface roughness of peened sample with 100% coverage is $4.601\text{ }\mu\text{m}$, which is the highest value. Moreover, the peened surface shows significant folds and microcracks owing to the high coverage of 400%. The increase of peening coverage leads to the enlargement of the maximum compressive residual stress and depth of the compressive residual stress layer. Similarly, the maximum hardness and hardened layer depth are enhanced with peening coverage. The maximum hardness corresponding to peening coverage of 88.3%, 100%, 200% and 400% is increased by 18.4%, 22.8%, 25.1% and 27.2%, respectively.

Keywords: Shot peening coverage; Surface integrity; Surface roughness; Residual stress; Microhardness

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.106

2024-T351 铝合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点, 广泛应用于航空航天领域^[1-3]。在零件的服役过程中, 疲劳、腐蚀及磨损等不同种类的失效通常起源于材料表面, 因此, 需要合适的表面处理工艺来提

高其综合性能。喷丸是一种常见且高效的表面处理工艺, 可以有效提高材料的表面性能^[4-6]。然而, 喷丸覆盖率的不同引起的材料表面完整性的变化将造成零件综合性能的差异^[7]。因此, 研究喷丸覆盖率对表面完整性

的影响具有十分重要的意义。

在喷丸过程中,大量弹丸撞击材料表面引起微观结构演变,包括晶粒细化^[8]、位错增殖、残余应力^[9]、粗糙度增加^[10]等,进而影响材料的综合性能。常用的喷丸方法包括气动喷丸^[11]、超声喷丸^[12]、激光喷丸^[13]、空化喷丸^[14]等,已被应用于钛合金^[15]、铝合金^[16]、镁合金^[17]和不锈钢^[18]等材料的表面强化。在晶粒细化方面,Liu等^[19-20]研究了高能气动喷丸对TC4钛合金微观结构的影响,指出位错运动及其演化主导了 α Ti纳米晶的形成,而孪晶和相变在晶粒细化过程中起辅助作用。Li等^[21]同样指出高能喷丸TC17钛合金晶粒细化机制为位错运动。Ao等^[22-23]利用超声滚压在TC4钛合金表面制备出纳米晶-超细晶-细晶-粗晶的梯度纳米结构。由于晶粒细化、晶格畸变、位错增殖等,材料表层的硬度明显增大,耐磨损性提高^[24-25]。Zhang等^[26]发现喷丸产生的纳米晶抑制了AZ31镁合金在磨损过程中材料的软化和熔化,磨损量显著降低。相比于原始试样,喷丸处理后的17Cr2Ni2MoVNB钢具备较低的摩擦系数和较好的耐磨损性^[27]。而喷丸产生的残余压应力场可以有效延缓零件表面裂纹萌生,减小裂纹扩展速率,有利于疲劳寿命的提高^[28-31]。Luo等^[32]指出,位错强化、残余应力和晶粒细化的协同作用可使喷丸强化的TC4钛合金疲劳寿命显著提高。然而,不恰当的喷丸参数会导致表面粗糙度显著增加,甚至引起表面微裂纹萌生,对疲劳性能产生不利影响^[33-34]。Gao等^[35]研究发现,喷丸造成的较深凹坑和微裂纹等缺陷降低了材料的超高周疲劳寿命。Liu等^[36]指出抛光处理降低了喷丸试样的表面粗糙度,显著提高了试样的疲劳性能。

覆盖率作为喷丸强化的重要参数之一,对材料表层微观结构演变和综合性能具有十分重要的影响。因此,本文以2024-T351铝合金为研究对象,通过改变喷丸进给速度,研究喷丸覆盖率的变化对表面形貌、表面粗糙度、残余应力、微观硬度的影响规律。

1 材料及试验步骤

试验材料为2024-T351铝合金。在喷丸处理之前采用砂纸对试样进行抛光处理,砂纸目数依次为#400、#800、#1200、#2000、#4000。对抛光后的试样进行气动喷丸处理,喷丸处理的各项参数分别为陶瓷弹丸(型号AZB425)、弹丸直径0.425 mm、弹丸流量4 kg/min、喷丸气压0.25 MPa和喷丸距离300 mm。通过调节喷嘴的进给速度实现覆盖率的变化(喷丸覆盖率是指喷丸强化后,试样表面弹痕所占面积与总面积之比)。经过测量,喷嘴进给速度为2 m/min时,喷丸覆盖率为99.6%,因此以2 m/min的进给速度重复2次和4次喷

丸,对应的喷丸覆盖率分别为200%和400%。进给速度为4 m/min时,喷丸试样的覆盖率为88.3%。对应于88.3%、100%、200%及400%喷丸覆盖率的A型Almen试片弧高值分别为0.199 mm、0.223 mm、0.245 mm、0.253 mm。

使用Tescan Clara扫描电子显微镜(SEM)对原始和喷丸试样进行表面形貌观察,加速电压为15 kV。采用吉泰TR210表面粗糙度仪测量原始和喷丸试样的表面轮廓并计算表面粗糙度。使用Bruker D8 X射线衍射仪对原始和喷丸试样进行物相鉴定和微观结构分析。选用Cu靶 $K\alpha$ 辐射,2 θ 角范围为30°~80°,扫描速率2°/min。采用Jade 9.0软件进行XRD数据分析,选用高斯函数拟合各衍射峰^[37]。试样表层残余应力采用Proto iXRD便携式残余应力测试仪测量,测试条件为Co靶、电压20 kV、电流5 mA,测定Al(311)衍射峰。为获得沿深度分布的残余应力,采用化学腐蚀方法对试样进行剥层处理,腐蚀液选用质量分数为16.9%的NaOH溶液,温度为80℃。将原始和喷丸试样侧面进行抛光后,使用MHVS-1000Z维氏硬度计测量沿深度方向的硬度,载荷大小0.245 N、保载时间10 s,相邻测试点间距离为50 μ m。

2 试验结果与讨论

2.1 表面形貌及粗糙度

原始和喷丸试样的表面形貌如图1所示。图1(a)中的原始试样经过#4000砂纸打磨后,磨痕较浅且方向一致,试样表面光滑。从图1(b)可以看出,弹丸对试样表面的撞击使其产生了明显的弹痕,同时,弹痕之间重叠及挤压等相互作用导致相邻弹痕交界处的凸起。此时,试样表面仍然存在未喷丸区域。随着喷丸覆盖率增加至100%、200%、400%,试样表面被弹痕完全覆盖,未见原始试样表面的打磨痕迹,如图1(c)~(e)所示。然而,随着喷丸覆盖率的提高,试样表面逐渐出现褶皱、微裂纹等缺陷。覆盖率100%的喷丸试样表面(图1(c))已出现少量的褶皱^[37],覆盖率200%的喷丸试样表面的褶皱数量明显增加,覆盖率400%的喷丸试样在褶皱数量进一步增加的同时出现了微裂纹^[7]。Zhou等^[12]在气动喷丸和超声喷丸对比试验中指出,气动喷丸覆盖率的增加将导致微裂纹的产生。

原始及喷丸试样的表面轮廓曲线及表面粗糙度如图2所示。可以看出,经过抛光的原始试样表面光滑,试样喷丸前后表面轮廓曲线值(图2(a))与图1(a)所示的试样表面形貌基本一致,原始试样表面粗糙度 R_a 为0.144 μ m。由于弹丸的撞击,喷丸试样表面轮廓曲线高低起伏明显,且转角尖锐,因此喷丸试样的表面粗糙

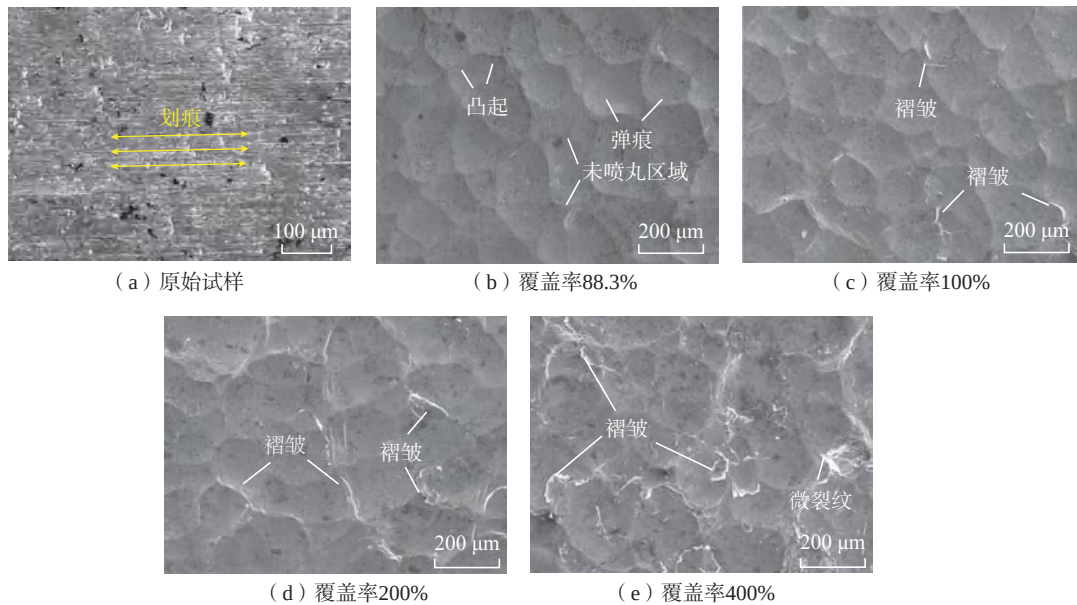


图1 原始试样及不同覆盖率喷丸试样的表面形貌
Fig.1 Surface morphology of initial and shot peened samples with different coverage

度显著增加,覆盖率 88.3%、100%、200% 和 400% 的喷丸试样表面粗糙度 R_a 分别为 $4.263\ \mu\text{m}$ 、 $4.601\ \mu\text{m}$ 、 $4.090\ \mu\text{m}$ 、 $4.052\ \mu\text{m}$ 。如图 2(b) 所示,随着喷丸覆盖率的增加,喷丸试样的表面粗糙度 R_a 先增加后减小。当喷丸覆盖率为 88.3% 时,弹痕未完全覆盖试样表面,喷丸试样表面粗糙度增加但未到最大值。随着喷丸覆盖率增加,弹痕之间的相互作用逐渐加剧,导致表面粗糙度的进一步提高,当覆盖率为 100% 时喷丸试样表面粗糙度最大。然而,后续弹丸的撞击减小了凸起区域的高度,在弹痕轮廓变得模糊的同时,表面粗糙度下降。因此,覆盖率为 200% 的喷丸试样表面粗糙度降低。同时,大量弹丸的多次撞击也导致褶皱出现的频率增加。而当覆盖率进一步增加时,后续弹丸对试样表面的撞击将进一步减小表面轮廓的高度差,因此覆盖率为 400% 的喷丸试样表面轮廓曲线的波动程度显著减小。然而,由于过高的喷丸覆盖率,试样表面的褶皱数量显著增加。同时,由于塑性应变的累积超过了材料的强度极限,导致微裂纹的产生,这将显著降低材料的服役性能。

2.2 XRD 分析

原始和喷丸试样的 XRD 图谱及其半峰全宽 (FWHM) 如图 3 所示。通过与标准 XRD 数据 (ICCD PDF 编号 01-085-1327) 对比,喷丸前后 2024-T351 铝合金试样的物相保持不变。然而,喷丸处理导致衍射峰的宽化。图 3(b) 所示为 Al (111)、Al (200)、Al (220) 的 FWHM 随喷丸覆盖率的变化规律,可以看出相比于原始试样,喷丸引起衍射峰的宽化,且随喷丸覆盖率的增加,各衍射峰的 FWHM 逐渐增大。X 射线衍射峰的宽

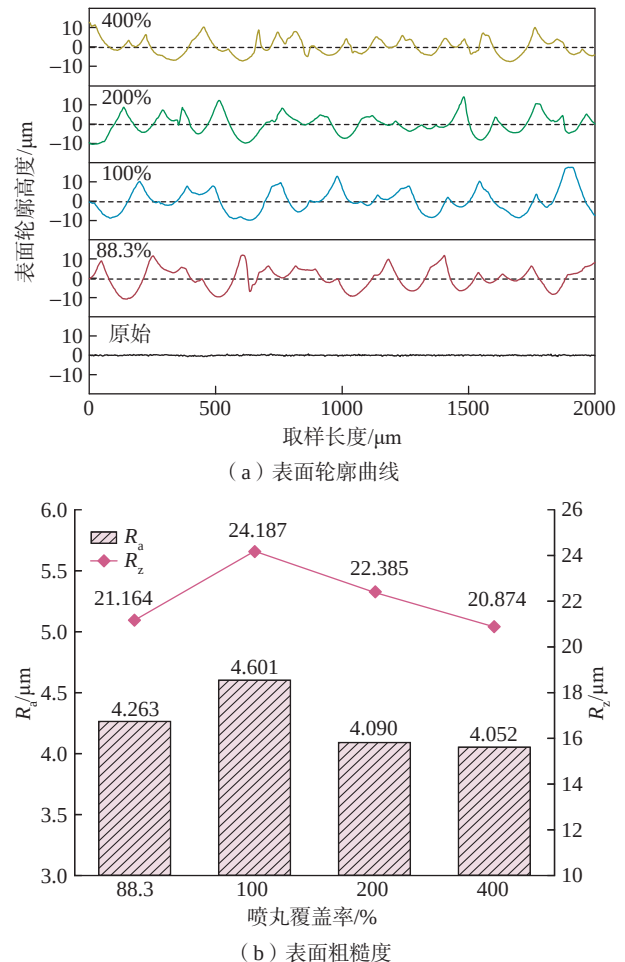


图2 原始及喷丸试样的表面轮廓曲线和表面粗糙度
Fig.2 Surface contours and surface roughness of initial and shot peened samples

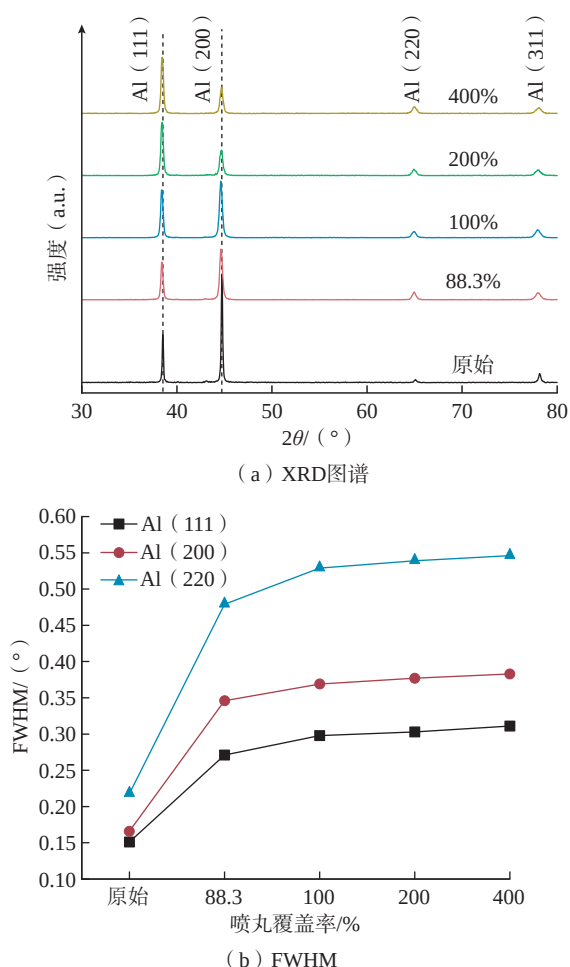


图3 原始试样与不同喷丸覆盖率试样的 XRD 图谱及 FWHM
Fig.3 XRD patterns and FWHM of initial and shot peened samples with various coverage

度包括仪器宽度和结构展宽两部分,二者满足卷积关系^[38]。而结构展宽由晶粒细化和微观应变的增加导致。因此,晶粒尺寸和微观应变可用式(1)计算^[1,39]:

$$\beta_h^2 - \beta_0^2 = \frac{\lambda^2}{D_h \cos \theta} + \varepsilon^2 \tan^2 \theta \quad (1)$$

式中, β_h 为衍射峰的 FWHM; β_0 为仪器宽度; λ 为入射线波长; D_h 为微晶尺寸; θ 为入射角; ε 为微观应变。经过计算,原始试样和覆盖率为 88.3%、100%、200%、400% 的喷丸试样微晶尺寸分别为 338 nm 和 246 nm、218 nm、178 nm、166 nm。相应的微应变分别为 0.045、0.289、0.313、0.341、0.377。由于微晶尺寸均大于 100 nm,喷丸试样的衍射峰宽化归因于微观应变的增加^[10]。同时可以看出,微晶尺寸随喷丸覆盖率的增加而减小,而微观应变随喷丸覆盖率增加而增大。这与喷丸过程中的塑性变形有关,喷丸覆盖率的增加导致更加剧烈的塑性变形,进一步诱发位错增殖及晶粒细化等。Liu 等^[19]研究也指出喷丸时间的延长将产生更加显著的加工硬

化和晶粒细化。

2.3 残余应力

图 4 为原始试样和喷丸试样的残余应力场。原始试样中几乎不存在残余应力。试样经过喷丸处理后,不同覆盖率试样表面均产生残余压应力场。残余压应力沿深度方向先增大后逐渐减小。喷丸过程中,大量、高速弹丸的撞击使材料表面产生塑性变形层,其膨胀变形的趋势被周围材料的弹性响应抑制,在喷丸表面产生了残余压应力。而残余压应力最大值所在位置影响因素较多。Feng 等^[40]研究喷丸强化双相不锈钢的残余应力分布,指出奥氏体中残余应力最大值出现在次表层,而铁素体中的残余应力最大值出现在表层。Li 等^[41]指出,残余压应力的数值与位错密度有关。表层的位错湮灭和重排导致残余压应力数值减小,因此残余压应力最大值位于次表层。Feng 等^[42]认为 Hertz 动态压缩与塑性延展的竞争机制决定了残余压应力场的分布,当 Hertz 动态压缩占主导地位时,残余应力最大值出现在次表面^[43]。

残余压应力场可由 4 个特征参数确定:表面残余压应力、残余压应力最大值、残余压应力最大值所在深度、残余压应力层深度^[42]。如图 4 所示,残余压应力场的特征参数总体上随喷丸覆盖率的增加而增大。然而,覆盖率 400% 的喷丸试样表面残余压应力为 -337.9 MPa,小于覆盖率 200% 喷丸试样的 -344.0 MPa,可能与 400% 覆盖率试样产生表面褶皱及微裂纹有关^[7]。覆盖率 88.3%、100%、200%、400% 的喷丸试样残余压应力最大值分别为 -346.4 MPa、-364.1 MPa、-378.2 MPa、-385.6 MPa,随喷丸覆盖率的增加而增大。残余压应力最大值所在深度及残余压应力层深度随覆盖率的增加显著增加,覆盖率 88.3%、100%、200%、400% 的喷丸试样残余压应力层深度分别为 176.5 μm 、190.2 μm 、201.5 μm 、210.5 μm 。随着喷丸覆盖率的增大,塑性变形层沿深度方向扩展,弹性响应的区域随之扩大,因此残余压应力

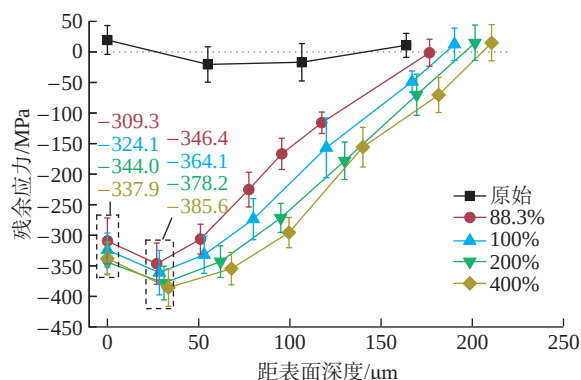


图4 原始及喷丸试样残余应力场
Fig.4 Residual stress field of initial and shot peened samples

层深度显著增大。

2.4 微观硬度

原始试样和喷丸试样沿深度方向的维氏硬度曲线如图 5 (a) 所示。原始试样的微观硬度稳定在 $160\text{HV}_{0.025}$ 附近。气动喷丸后,试样表层微观硬度均明显增加,最大值出现在试样表面,并沿深度方向逐渐减小至基体硬度。同时,随喷丸覆盖率的增加,微观硬度最大值和硬化层深度明显增大。图 5 (b) 为微观硬度最大值和硬化层深度随喷丸覆盖率的变化趋势。相比于原始试样,覆盖率 88.3%、100%、200%、400% 的喷丸试样微观硬度分别增加了 18.4%、22.8%、25.1% 和 27.2%。材料的强化机制包括细晶强化、应变强化、第二相强化和固溶强化 4 种方式。如 2.2 节所述,在喷丸过程中,高速弹丸的撞击引起了试样表面细化和微应变增加,使试样微观硬度增加^[19]。同时,由于应变和应变速率随深度的增加而减小,晶粒细化程度和位错密度同时降低^[43],形成了沿深度方向的梯度结构^[20,22],因此喷丸试样的硬

度值沿深度逐渐减小。随着覆盖率的增加,试样表面的晶粒更加细化,微应变显著增大,因此微观硬度上升。

3 结论

本文研究了喷丸覆盖率对 2024-T351 铝合金的表面完整性的影响,主要结论如下。

(1) 表面粗糙度随喷丸覆盖率的增加先增大后减小。覆盖率 100% 的喷丸试样表面粗糙度最大 ($R_a=4.601\mu\text{m}$)。随着覆盖率增加,喷丸试样表面褶皱数量增多。覆盖率 400% 的喷丸试样表面出现大量的褶皱,且形成了微裂纹。

(2) 喷丸试样表面存在残余压应力场。随喷丸覆盖率的提高,残余压应力最大值、残余压应力场深度逐渐增大。

(3) 喷丸引起试样微观硬度的提高。喷丸覆盖率的增大促进了微观硬度的提高及硬化层深度的增加。

参考文献

- [1] SUN Q Q, LIU X T, HAN Q Y, et al. A comparison of AA2024 and AA7150 subjected to ultrasonic shot peening: Microstructure, surface segregation and corrosion[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 337: 552–560.
- [2] ALHAMIDI A, HORITA Z. Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high-pressure torsion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622: 139–145.
- [3] LIU Z, CHONG P H, BUTT A N, et al. Corrosion mechanism of laser-melted AA 1014 and AA 2024 alloys[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1–4): 294–299.
- [4] KUMAR P, MAHOBIA G S, MANDAL S, et al. Enhanced corrosion resistance of the surface modified Ti–13Nb–13Zr alloy by ultrasonic shot peening[J]. Corrosion Science, 2021, 189: 109597.
- [5] 胡英俊, 黄小波, 高玉魁. 喷丸处理对铝合金微动磨损及抗腐蚀性能的影响 [J]. 表面技术, 2020, 49(7): 238–244, 254.
- HU Yingjun, HUANG Xiaobo, GAO Yukui. Effect of shot peening on fretting wear and corrosion resistance of zirconium alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 238–244, 254.
- [6] ZHANG J Y, PENG P, SHE J, et al. A study of the corrosion behavior of AZ31 Mg alloy in depth direction after surface nanocrystallization[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 396: 125968.
- [7] QIN Z, LI B, ZHANG H, et al. Effects of shot peening with different coverage on surface integrity and fatigue crack growth properties of 7B50–T7751 aluminum alloy[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 133: 106010.
- [8] LI J, ZHOU J Z, FENG A X, et al. Analysis of microstructure and tensile properties produced by cryogenic laser peening on 2024–T351 aluminum alloy[J]. Vacuum, 2018, 158: 141–145.
- [9] HU Y X, CHENG H, YU J H, et al. An experimental study on crack closure induced by laser peening in pre-cracked aluminum alloy

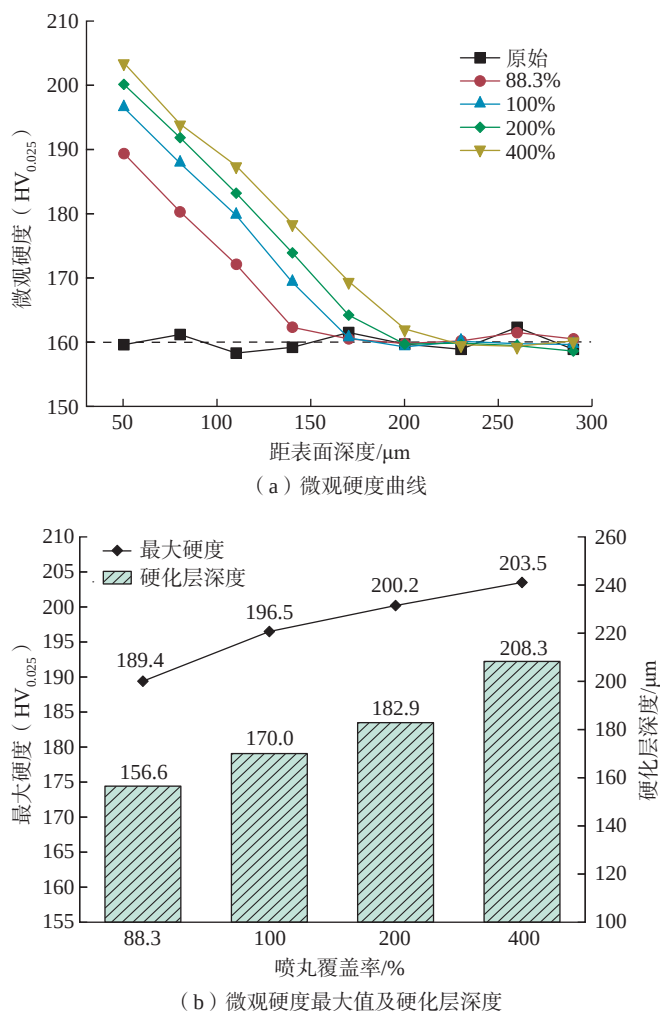


图 5 原始试样和喷丸试样的微观硬度

Fig.5 Microhardness of initial and peened samples

2024-T351 and fatigue life extension[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 105232.

[10] ZHANG Q, DUAN B B, ZHANG Z Q, et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1090-1099.

[11] SOYAMA H, CHIGHIZOLA C R, HILL M R. Effect of compressive residual stress introduced by cavitation peening and shot peening on the improvement of fatigue strength of stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116877.

[12] ZHOU J, RETRAINT D, SUN Z, et al. Comparative study of the effects of surface mechanical attrition treatment and conventional shot peening on low cycle fatigue of a 316L stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 556-566.

[13] MALEKI E, UNAL O, GUAGLIANO M, et al. The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 810: 141029.

[14] MASAYOSHI K, CURD MATTHEW E, HITOSHI S, et al. Depth-profiling of residual stress and microstructure for austenitic stainless steel surface treated by cavitation, shot and laser peening[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 813: 141037.

[15] YANG C, LI M Q, LIU Y G. Further refinement mechanisms of nanograins in nanocrystalline surface layer of TC17 subjected to severe plastic deformation[J]. Applied Surface Science, 2021, 538: 147941.

[16] SUN Q Q, HAN Q Y, LIU X T, et al. The effect of surface contamination on corrosion performance of ultrasonic shot peened 7150 Al alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 328: 469-479.

[17] WANG H T, YAO H L, ZHANG M X, et al. Surface nanocrystallization treatment of AZ91D magnesium alloy by cold spraying shot peening process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 374: 485-492.

[18] XU G, LUO K Y, DAI F Z, et al. Effects of scanning path and overlapping rate on residual stress of 316L stainless steel blade subjected to massive laser shock peening treatment with square spots[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 1053-1063.

[19] LIU Y G, LI H J, LI M. Roles for shot dimension, air pressure and duration in the fabrication of nanocrystalline surface layer in TC17 alloy via high energy shot peening[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 562-570.

[20] LIU Y G, LI M Q, LIU H J. Surface nanocrystallization and gradient structure developed in the bulk TC4 alloy processed by shot peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 186-193.

[21] LI H M, LIU Y G, LI M Q, et al. The gradient crystalline structure and microhardness in the treated layer of TC17 via high energy shot peening[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 197-203.

[22] AO N, LIU D X, XU X C, et al. Gradient nanostructure evolution and phase transformation of α phase in Ti-6Al-4V alloy induced by ultrasonic surface rolling process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 820-834.

[23] AO N, LIU D X, ZHANG X H, et al. Surface nanocrystallization of body-centered cubic beta phase in Ti-6Al-4V alloy subjected to

ultrasonic surface rolling process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 35-41.

[24] 杨诗婷, 邢永明, 郎凤超, 等. 喷丸强化 316L 不锈钢表面的摩擦磨损性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 35-39.

YANG Shiting, XING Yongming, LANG Fengchao, et al. Friction and wear properties of 316L stainless steel after shot peening[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(11): 35-39.

[25] 蔡雨晴, 胡雄风, 屈盛官, 等. 喷丸强化对 CF53 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(5): 27-33, 38.

CAI Yuqing, HU Xiongfeng, QU Shengguan, et al. Effect of shot peening on friction and wear properties of CF53 steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(5): 27-33, 38.

[26] ZHANG J Y, JIAN Y X, ZHAO X Z, et al. The tribological behavior of a surface-nanocrystallized magnesium alloy AZ31 sheet after ultrasonic shot peening treatment[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(4): 1187-1200.

[27] ZHANG Y L, LAI F Q, QU S G, et al. Effect of shot peening on residual stress distribution and tribological behaviors of 17Cr2Ni2MoVNb steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 386: 125497.

[28] KLUMPP A, RUF M, DIETRICH S, et al. Long crack propagation and closure in DC(T) specimens of Ni-based superalloy Inconel 718 and stainless steel AISI 301 after shot peening[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 269: 108551.

[29] 孟宪凯, 张正烨, 周建忠, 等. 激光喷丸强化 TC6 钛合金的振动疲劳寿命及断口形貌分析[J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 73-79.

MENG Xiankai, ZHANG Zhengye, ZHOU Jianzhong, et al. Analysis of vibration fatigue life and fracture topography of TC6 titanium alloy by laser peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 73-79.

[30] 黄舒, 胡磊, 盛杰, 等. 激光喷丸强化对电化学充氢 316L 奥氏体不锈钢振动疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(2): 579-587.

HUANG Shu, HU Lei, SHENG Jie, et al. Effect of laser peening on vibration fatigue performance of electrochemically hydrogen-charged 316L austenitic stainless steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2): 579-587.

[31] 王成, 李开发, 胡兴远, 等. 喷丸强化残余应力对 AISI 304 不锈钢疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 81-90, 151.

WANG Cheng, LI Kaifa, HU Xingyuan, et al. Effects of shot peening-induced residual stresses on fatigue crack propagation behavior of AISI 304 stainless steel[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 81-90, 151.

[32] LUO X K, WANG Y M, DANG N, et al. Gradient microstructure and foreign-object-damaged fatigue properties of Ti6Al4V titanium alloy processed by the laser shock peening and subsequent shot peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 849: 143398.

[33] FERREIRA N, JESUS J S, FERREIRA J A M, et al. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al7475-T7351 specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105521.

[34] YANG S, ZENG W, YANG J S. Characterization of shot

peening properties and modelling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 137: 105621.

[35] GAO T, SUN Z D, XUE H Q, et al. Effect of surface mechanical attrition treatment on high cycle and very high cycle fatigue of a 7075-T6 aluminium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139: 105798.

[36] LIU Z G, WONG T I, HUANG W, et al. Effect of surface polishing treatment on the fatigue performance of shot-peened Ti-6Al-4V alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(7): 630-640.

[37] ZHANG Q, XU S, ZHANG Z Q, et al. Residual stress and microhardness evolution induced by conventional and ultrasonic shot peening[J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(7): 436-443.

[38] WILLIAMSON G K, HALL W H. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram[J]. Acta Metallurgica, 1953, 1(1): 22-31.

[39] SUN Q Q, HAN Q Y, XU R, et al. Localized corrosion behaviour of AA7150 after ultrasonic shot peening: Corrosion depth vs. impact energy[J]. Corrosion Science, 2018, 130: 218-230.

[40] FENG Q, WU X Y, JIANG C H, et al. Surface layer investigation of a shot-peened duplex stainless steel utilizing X-ray diffraction[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(7): 2005-2011.

[41] LI K, FU X S, LI R D, et al. A mechanism study on characteristic curve of residual stress field in Ti-6Al-4V induced by wet peening treatment[J]. Materials & Design, 2015, 86: 761-764.

[42] FENG B X, MAO X N, YANG G J, et al. Residual stress field and thermal relaxation behavior of shot-peened TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 512(1-2): 105-108.

[43] FU P, JIANG C H, WU X Y, et al. Surface modification of 304 steel using triple-step shot peening[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(6): 693-698.

通讯作者: 徐刚, 高级工程师, 研究方向为大型金属零件喷丸加工技术。

(责编 晓月)

(上接第 105 页)

[25] HE H T, SHAO G, ZHAO R, et al. Effects of oscillatory pressure mode on the sintering behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ composite in hot oscillatory pressing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2022, 105(12): 7778-7784.

[26] ZHANG J, ZHU T B, CHENG Y, et al. Fabrication and mechanical properties of $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC(w)}$ composites by oscillatory pressure sintering[J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 25719-25725.

[27] ZHU T B, XIE Z P, HAN Y, et al. Improved mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-25vol\% SiC}_w$ composites prepared by oscillatory pressure sintering[J]. Ceramics International, 2017, 43(17): 15437-15441.

[28] ZHU T B, XIE Z P, HAN Y, et al. Microstructure and mechanical properties of ZTA composites fabricated by oscillatory

pressure sintering[J]. Ceramics International, 2018, 44(1): 505-510.

[29] HAN Y, LI S, ZHU T B, et al. Enhanced toughness and reliability of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}_w$ composites under oscillatory pressure sintering[J]. Ceramics International, 2018, 44(11): 12169-12173.

[30] YANG S L, ZHU Y X, FAN L, et al. Preparation and mechanical properties of $\text{SiC}_w\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-YAG}$ ceramic composite by hot oscillatory pressing[J]. Ceramics International, 2021, 47(15): 21231-21235.

[31] SHAHEDI ASL M, GHASSEMI KAKROUDI M, GOLESTANI-FARD F, et al. A Taguchi approach to the influence of hot pressing parameters and SiC content on the sinterability of ZrB_2 -based composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 51: 81-90.

[32] LIU D G, FAN J Y, ZHAO K, et al. Preparation of super-strong ZrO_2 ceramics using dynamic hot forging[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(2): 733-737.

[33] ZHAO K, FENG P, TAN J, et al. A new route to fabricate high-performance binderless tungsten carbide: Dynamic sinter forging[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(6): 3343-3350.

[34] FAN L, SONG X W, ZHAO P F, et al. Super strong B_4C ceramics prepared by dynamic sinter forging[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(9): 4209-4214.

[35] ZHU T B, XIE Z P. Ultrastrong tough zirconia ceramics by defects-engineering[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2022, 105(3): 1617-1621.

[36] ZHOU P, HU P, ZHANG X H, et al. R-curve behavior of laminated $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ceramic with strong interfaces[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 52: 12-16.

[37] ZHU S M, FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Influence of silicon carbide particle size on the microstructure and mechanical properties of zirconium diboride-silicon carbide ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(4): 2077-2083.

[38] ZHOU P, HU P, ZHANG X H, et al. Laminated $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ceramic with improved strength and toughness[J]. Scripta Materialia, 2011, 64(3): 276-279.

[39] WEI C C, ZHANG Z Y, MA X F, et al. Mechanical and ablation properties of laminated $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ceramics with Si_3N_4 whisker interface[J]. Corrosion Science, 2022, 197: 110051.

[40] LÜ Z H, JIANG D L, ZHANG J X, et al. $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ laminated ceramic composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(7): 1435-1439.

[41] FANG X, BISHARA H, DING K, et al. Nanoindentation pop-in in oxides at room temperature: Dislocation activation or crack formation?[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104: 4728-4741.

[42] XU H Y, JI W, GUO W M, et al. Enhanced mechanical properties and oxidation resistance of zirconium diboride ceramics via grain-refining and dislocation regulation[J]. Advanced Science, 2022, 9(6): e2104532.

通讯作者: 刘金铃, 教授, 博士, 研究方向为材料场辅助制造技术、陶瓷基复合材料、金属基复合材料和材料强韧化机理。

(责编 晓月)

引文格式: 李晶, 陈湾湾, 朱永伟. 二维超声复合电解/放电展成加工试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 113–118.

LI Jing, CHEN Wanwan, ZHU Yongwei. Experimental study of two-dimensional ultrasound combined electrolysis/discharge generating machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 113–118.

二维超声复合电解/放电展成加工试验研究*

李 晶, 陈湾湾, 朱永伟

(扬州大学, 扬州 225127)

[摘要] 为了提高铝基复合材料的表面成型质量和加工效率, 提出了应用低电压、低电流密度的二维超声复合电解/放电展成加工(2UE/DM)技术。利用镀覆金刚石磨粒的工具侧面对复合材料进行3种不同工艺对比试验和3组参数下的性能试验, 测量了铝基陶瓷增强复合材料(SiC_p/Al)在质量分数0.5%的 NaNO_3 溶液中展成加工时的电流、材料去除率(MRR)和表面粗糙度, 探究了工具转速、电压和振幅对加工效率和质量的影响。结果表明, 工件振动周期性改变加工间隙, 单位周期内的放电频率增加了2倍; 5000 r/min时放电频率减少, 而表面粗糙度比1000 r/min降低了13.2%; 在电压为6 V时, 材料去除率达到 $0.89 \text{ mm}^3/\text{min}$, 比3 V电压时增加45.9%, 但较高电压导致裸露更多增强颗粒, 比3 V时的表面粗糙度高出 $1.4 \mu\text{m}$; 振幅增至 $5 \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度比 $2 \mu\text{m}$ 时降低了17.5%, 具有较高的加工质量。

关键词: 二维超声; 电解/放电; 复合加工; 表面质量; 材料去除率(MRR)

Experimental Study of Two-Dimensional Ultrasound Combined Electrolysis/Discharge Generating Machining

LI Jing, CHEN Wanwan, ZHU Yongwei

(Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

[ABSTRACT] To improve the surface forming quality and machining efficiency of aluminum matrix composites, a two-dimensional ultrasonic combined electrolysis/discharge generating machining technology (2UE/DM) with low voltage and low current density was proposed. Using the side of a tool coated with diamond grains, three different processing contrast tests and performance tests under three sets of parameters were carried out on the composite. The current, material removal rate (MRR) and surface roughness of SiC_p/Al composites processed in 0.5% NaNO_3 (mass fraction) solution were measured, and the effects of tool rotation speed, voltage and amplitude on processing efficiency and quality were explored. The results showed that the vibration of the workpiece periodically changed the machining gap, and the discharge frequency increased by 2 times per vibration period. At 5000 r/min, the discharge frequency decreased, the surface roughness decreased by 13.2% compared with 1000 r/min. At the voltage of 6 V, the material removal rate reached $0.89 \text{ mm}^3/\text{min}$, which was 45.9% higher than 3 V, but more reinforcing particles were exposed at the higher voltage, and the surface roughness was $1.4 \mu\text{m}$ higher than 3 V. When the amplitude increases to $5 \mu\text{m}$, the surface roughness was 17.5% lower than $2 \mu\text{m}$, and the technology had higher machining quality.

Keywords: Two-dimensional ultrasound; Electrolysis/discharge; Combined machining; Surface quality; Material remove rate (MRR)

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.113

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175438, 51775484); 江苏省研究生集萃研究计划资助(2021–2022)。

颗粒增强铝基复合材料具有密度小、比强度及比模量高、耐磨性好、热膨胀系数低等优点,广泛用于航空、航天领域重要零件的制造^[1]。然而,对于复合材料这类典型的难加工导电材料,采用单一的加工方法如磨削、电解、放电等会造成表面损伤严重、材料去除率低、只能加工部分导电材料等问题^[2-3],往往不能获得满意的加工效率和质量,且刀具磨损严重^[4]。近年来,小电流密度下电解/放电加工成为解决难加工材料成形加工问题中最具前景的技术^[5-6]。同样是利用电解/放电现象,但结合了金属电解加工、非导电材料放电加工以及电解放电加工的特点和优势。以金属的电解去除为主,工具与工件之间的火花放电及气膜与工件之间的电解放电为辅进行加工。高温熔化和热加速化学蚀刻复合材料,而电解虽然溶解凹坑凸起高度,却留下增强颗粒“骨架”,无法提高表面质量。

在电解放电工艺中使用增加了镀覆金刚石磨粒的工具辅助磨削^[7],可消除重铸层、减小表面粗糙度。而增加工具振幅和振频^[8-9],强化了极间瞬态空化,放电次数显著增加,材料去除率(Material removal rate, MRR)和表面质量改善效果明显^[10-11]。采用二维超声振动“加宽”沟槽、碾压表面^[12],可降低甚至消除相邻沟槽的凸起高度。

本研究在低电压、低电流密度下,利用工具轴向振动、工件切向振动的二维超声复合电解/放电加工(2UE/DM)技术进行了铝基陶瓷增强复合材料(SiC_p/Al)展成平面加工的试验研究。通过不同工艺下的电流、材料去除率和表面形貌验证了二维超声复合电解/放电展成加工(2UE/DM)机理,并探究了工具转速、电压、工件振动对材料去除率和表面质量的影响。

1 二维超声复合电解/放电展成加工原理

二维超声复合电解/放电展成加工是二维超声振动辅助磨削加工、电解加工和放电加工的有机复合。假设加工间隙内气体、流体在两相超声作用下处于均匀、一致的状态,且忽略浓度差异、热量和气体对电导率的影响。将镀覆金刚石磨粒的导电工具连接到电源的负极,而工件连接到电源的正极,极间充满低导电率的钝性电解液。当使用微电流密度($5\sim 15\text{ A/cm}^2$)、微电压($U<10\text{ V}$)进行加工时,工具电极转速为 n ,同时沿轴向(Z 向)超声振动,并以一定进给速度 v 沿展成成型面的切向进给,而工件沿工具进给切向超声振动(X 向),展成加工机理如图1所示。在工件单位进给时间内,加工间隙 $G(t)$ 受工具轴向振动、旋转运动影响较小,主要随工件振动而周期性变化,可表示为

$$G(t) = G(0) + A_x \sin(2f_x t) \quad (1)$$

式中, $G(t)$ 为加工间隙; $G(0)$ 为初始加工间隙,其值约为磨粒高度; A_x 为工件振幅; f_x 为工件振频; t 为时间。

工件表面材料的去除形式随工件振动位移的变化而变化,如图2所示。根据法拉第电解定律,工件距离工具表面振动位移最大时(t_1)增大加工间隙,避免极间短路或阻塞。同时,在泵吸及更新电解液后,排出加工产物和热量,可改善并稳定加工环境;而间隙最小时(t_2),金属基材料的电解溶解速度最大,实现低电压下较高的材料去除率和较高的定域加工能力。

极间放电加工形式有电解放电加工和火花放电加工两种。当 $G(t)$ 随工件振动增加而大于气膜厚度(气膜厚度一般在 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$)时,气膜将工具与电解质隔离,在工件和电解质之间发生电解放电^[13];当 $G(t)$ 小于气膜厚度,气膜将工具与电极绝缘隔离,极间间隙小于放电间隙值约 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 时,工具与工件之间发生火花放电,产生凹坑,如图2(c)所示。虽然静态电解液有利于形成稳定的绝缘气膜,但超声运动的电解液或工具有助于更快地形成气膜,降低气膜厚度,从而使较低电压下的放电加工成为可能,且工件在振动下极间距离的变化,增加了放电的概率和频率,有效去除电解液难溶点,提高材料去除率。

二维超声辅助作用下,磨粒对工件表面进行间断性椭圆“微磨削”加工,如图2(d)所示。磨粒周期性锤击工件表面,软化了材料,增加了“微磨削”的切削深度;工具轴向振动延长了磨粒切削弧长,提高了增强碳化硅材料延性域去除比例,增宽了磨粒划出的沟槽宽度;对工件表面进行类似碾压,作用覆盖率更高,降低了磨削加工后的沟槽和增强陶瓷颗粒断裂凸起的高度,刮除电解液难溶点,提高了表面质量^[14]。

2 二维旋转超声辅助电解加工系统

图3为二维超声复合电解/放电加工试验装置,该装置在普通磨床上进行改装,包含1个由BT30刀柄改

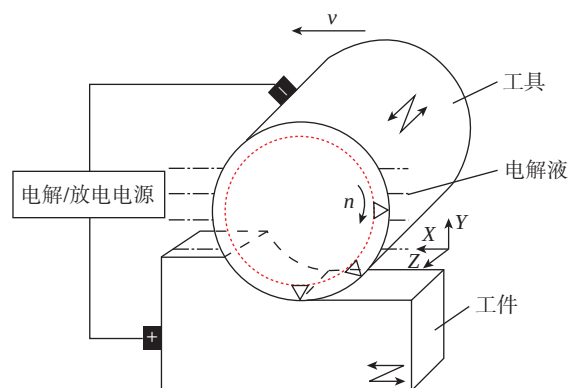


图1 展成加工机理

Fig.1 Generating machining mechanisms

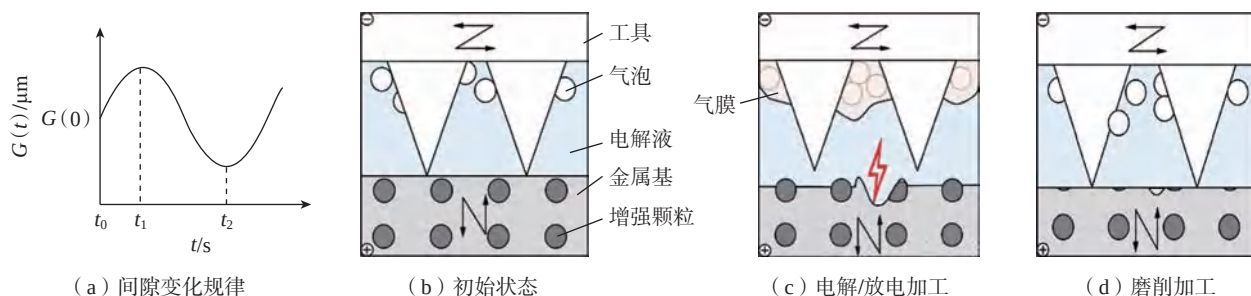


图2 二维超声复合电解/放电加工原理示意图

Fig.2 Principle scheme of 2D ultrasonic combined electrolysis/discharge machining

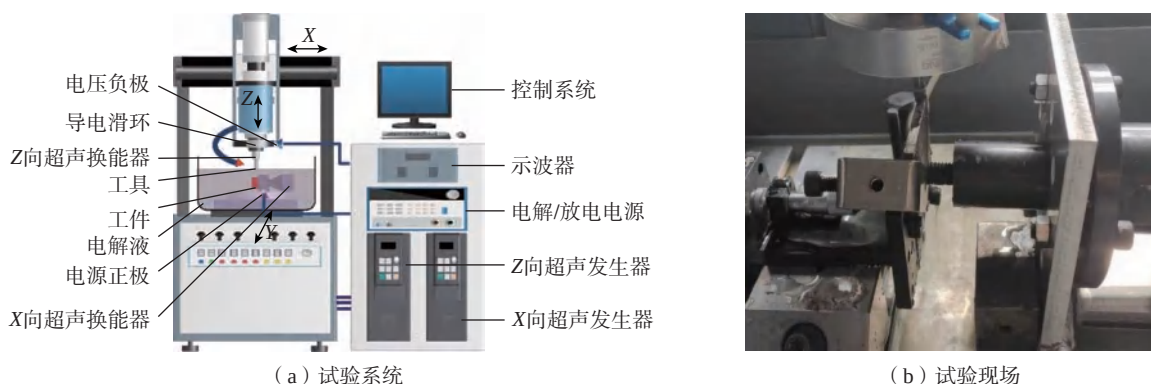


图3 二维超声复合电解/放电加工试验装置

Fig.3 2D ultrasonic combined electrolysis/discharge machining test device

造而成的轴向超声振动工具头。工件装夹在 X 方向滑动的弹性支撑架上,通过 X 方向超声发生装置将振动传递至工件。

工件为颗粒增强铝基复合材料,碳化硅 (SiC) 增强颗粒的体积分数为 40%,平均粒径为 $5\ \mu\text{m}$,铝基材料为 6061,电解液采用质量分数 0.5% 的 NaNO_3 和水的溶液。工具表面材料为直径 6 mm 的镀覆金刚石磨粒,粒度为 100 目。工件样品的初始尺寸为 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$,加工前对 $50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 的加工面进行研磨处理,并清理干净。设计 3 组不同工艺的对比试验,分别为普通磨削加工 (Grinding machining, GM)、轴向超声复合电解/放电 (Z-direction ultrasonic combined electrolysis/discharge machining, ZUE/DM) 及二维超声复合电解/放电加工 (2D ultrasonic combined electrolysis/discharge machining, 2UE/DM) 的机理对比试验,如表 1 所示。设计 3 组不同参数下的展成平面加工性能试验,分析工具转速、电压和振幅等对材料去除率、表面粗糙度的影响规律,试验参数如表 2 所示。

3 试验研究分析

3.1 不同工艺机理对比分析

ZUE/DM 电解电流值与 2UE/DM 基本相同,尽管

表 1 对比试验加工参数

Table 1 Processing parameters of comparative tests

加工参数	普通磨削加工	ZUE/DM	2UE/DM
初始压力/ N	—	5	—
电解液质量分数/%	—	0.5	0.5
工具转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	—	1000	—
进给速度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	—	12	—
加工深度/ mm	—	0.01	—
电压/ V	0	4	4
工件振幅/ μm	0	0	4
工具振幅/ μm	0	4	4

工件振动导致加工间隙理论上产生周期性变化,但工具上磨粒高度约为 $0.15\ \text{mm}$,远大于工件振幅,因此电解电流值没有显著的周期性变化趋势,如图 4 所示。从图 4 (b) 中可知,2UE/DM 单位周期内的放电次数显著多于 ZUE/DM,约为 3 倍。表明二维超声辅助作用增加了放电概率和频率,提高了材料去除率,熔融去除难溶凸点和增强陶瓷基颗粒断裂凸点,提高了表面质量,还避

免了在同一点上放电,减少短路、拉弧等现象的产生。

不同工艺的材料去除率和表面粗糙度如图 5 所示。只有工具振动或无振动时,加工间隙内材料去除量和气泡的增多会导致环境复杂,工作液电导率得不到有效更新反而降低了电解/放电加工的材料去除率,最终降低了表面质量。工件振动位移变化周期性改变了加工间隙值,泵吸作用促进更新电解液、排出加工产物,提高电解加工稳定性和材料去除效率。而磨粒不仅可以刮磨、活化工件表面,也会因工件切向振动,使磨粒锤击工件表面,增加了磨削深度,从而使增强颗粒更易被整颗刮除或被拔出,试验表明 2UE/DM 的材料去除率比 ZUE/DM 和 GM 时分别增加了 7.8% 和 16.9%,材料去除效率显著提高。

二维超声作用下工具和工件的相对运动产生不同运

表 2 性能试验加工参数

Table 2 Processing parameters of performance tests

序号	工具转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	电压/V	工具振幅/ μm	工件振幅/ μm
1	1000、2000 3000、5000	4	4	4
2	1000	3、4、5、6	4	4
3	1000	4	4	2、3、4、5

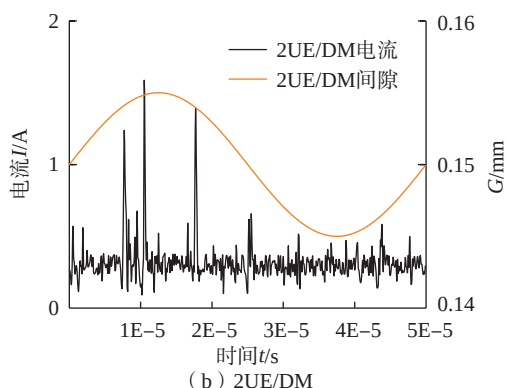
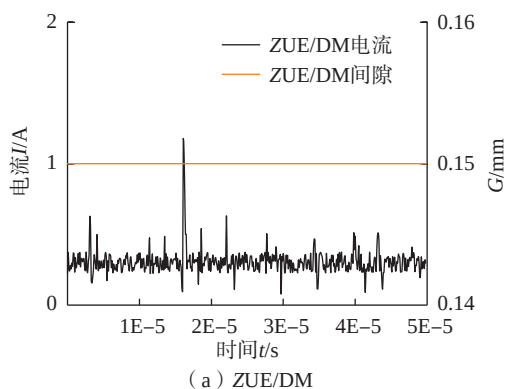


图 4 电解/放电加工电流

Fig.4 Current of electrolysis/discharge machining

动轨迹的同时,也增强了磨削、电解/放电加工对工件表面的整平效果,如图 6 所示。在图 6 (a)中,磨粒的切削痕迹明显,呈沟槽形状,且三维形貌最大高度差约为 155 μm ; 两相材料交错出现,同时可见较多凹坑和陶瓷颗粒断裂痕迹,表面质量较差, R_a 值高达 11.1 μm ; 在图 6 (b)中,切向超声振动的冲击作用增加了加工区域中陶瓷颗粒的多层次微裂纹,在电解作用下颗粒周围的金属被电解蚀除,颗粒在磨削力作用下拔起、塑性磨削去除,但磨削表面在振动的作用下,重复刮磨凸起边缘,残余高度降低明显,三维形貌高度差约为 130 μm ; 图 6 (c)中,磨粒压入深度随超声振动位移而变化,最大切削深度比普通磨削时更深,但成形表面主要由塑性颗粒磨削区和金属基电解区组成^[15]。金属基电解导致塑性加工沟槽痕迹减少,塑性加工区域比例较大。说明在二维振动复合作用下,金属基材料的快速溶解加快了复合材料的去除、轴向振动塑性域磨削加工、切向振动塑性碾压,使三维形貌最大高度差降低至 125 μm ,表面粗糙度降至约 3.4 μm ,比前两种工艺的表面质量提高了 226.4% 和 20.6% (图 5 (b)),工件表面更加平整,表面质量明显改善。

3.2 工艺参数对 2UE/DM 材料去除率的影响

不同工艺参数下的 2UE/DM 材料去除率如图 7 所示。如图 7 (a)所示,材料去除率并不随工件转速增

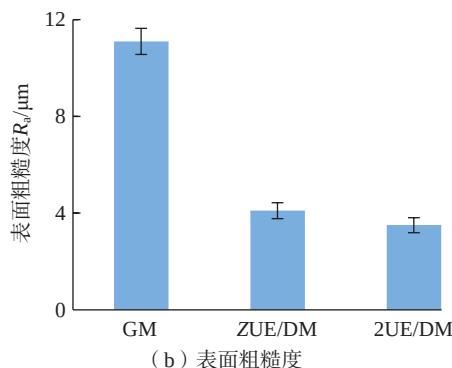
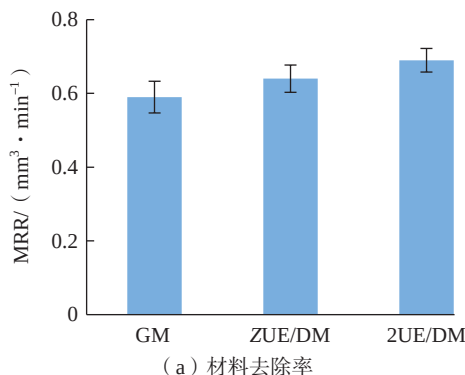


图 5 不同工艺下的材料去除率及表面粗糙度

Fig.5 Material removal rate and surface roughness under different processes

加而增加,且在工具转速达到 3000 r/min 时材料去除率迅速降低,这是由于极间气泡在离心力作用下并不易形成气膜,放电次数降低导致放电熔蚀体积减少。电压和

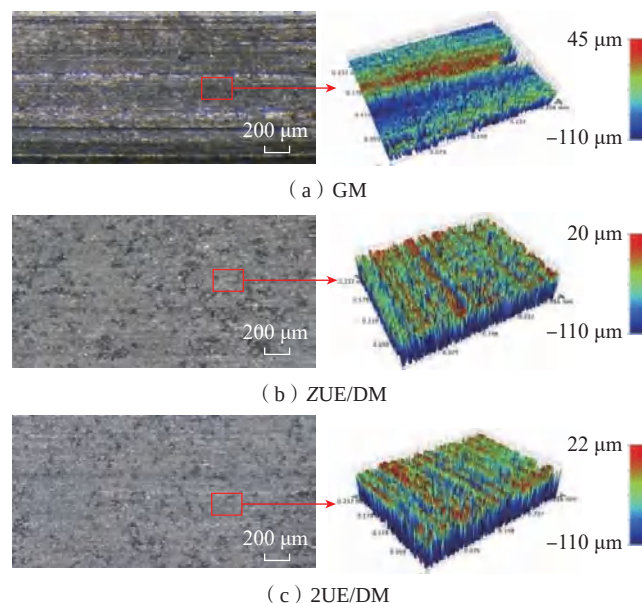


图6 加工表面及三维形貌

Fig.6 Machining surface and 3D morphology

振幅与材料去除率正相关。如图 7 (b) 所示,在电压 6 V 时,材料去除率达到 0.89 mm³/min,比 3 V 电压时增加了 45.9%,说明电压增加,极间电解/放电作用增强,电解/放电加工去除体积随着电压增加而增大。工件超声振幅增加到 5 μm 时的材料去除率是 2 μm 振幅时的 1.2 倍,如图 7 (c) 所示。这是由于加工间隙变化较大,更有利于放电通道的形成、电解效率的提高,而磨粒锤击增加磨削深度,提高材料去除体积量。因此,为了获得复合材料较高的材料去除率,应采用较低的转速、较高的电压和二维超声振幅^[16]。

3.3 工艺参数对 2UE/DM 表面质量的影响

不同工艺参数下的 2UE/DM 表面粗糙度如图 8 所示。如图 8 (a) 所示,随着转速的增加,单位时间内参加研磨的颗粒数量增加,当转速从 1000 r/min 增加到 5000 r/min,表面粗糙度下降了 13.2%。而较高电压时,金属基材料的蚀除速度深度较大,增强颗粒更容易裸露;高电压下电解产生的气泡更多,极间更易发生放电形成凹坑,导致表面粗糙度增加显著,6 V 时表面粗糙度比 3 V 时高出 1.4 μm,如图 8 (b) 所示。随着工件振幅的增加,磨粒往复碾压,降低了残余高度,从而降低了

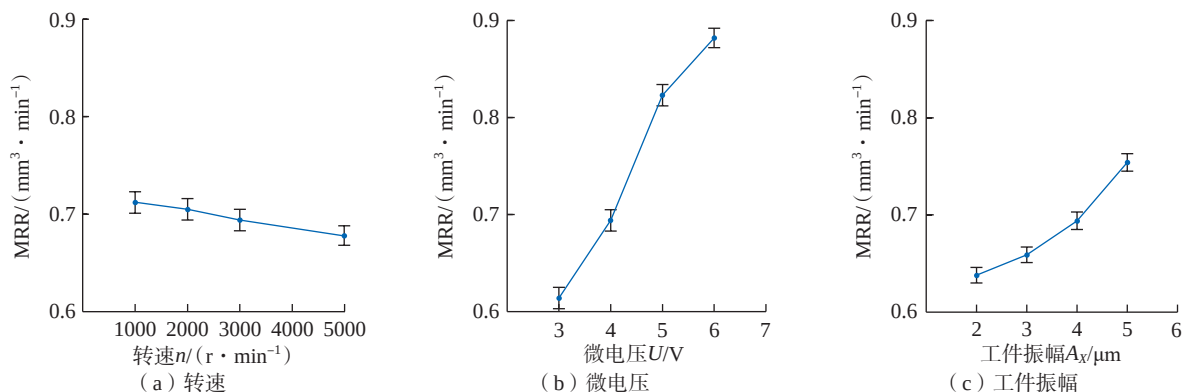


图7 参数对材料去除率的影响

Fig.7 Effect of parameters on material removal rate

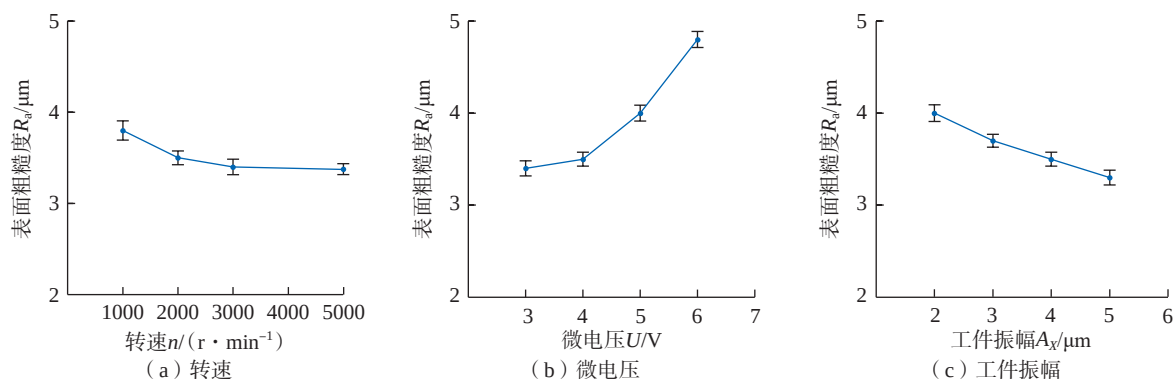


图8 工艺参数对表面粗糙度的影响

Fig.8 Effect of process parameters on surface roughness

表面粗糙度。当振幅增至与增强颗粒近似的 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,表面粗糙度比 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时降低了 17.5%,如图 8(c)所示。在磨粒磨削工件时,电解/放电加工可以减小磨粒单次实际切削深度,较大振幅时会加速材料去除,特别是降低二次加工表面上切削余高,从而改善加工后的形貌质量^[17]。因此,为了获得复合材料较高的表面质量,应采用较高的转速、较低的电压和较大的二维超声振幅。

4 结论

采用镀覆金刚石磨粒工具对 SiC_p/Al 复合材料进行二维超声复合电解/放电展成加工试验,根据试验结果得出以下结论。

(1) 二维超声可以提高复合材料磨削复合电解/放电的加工性能,其材料去除率比普通磨削和轴向超声复合电解/放电加工分别增加了 7.8% 和 16.9%,表面质量提高了 226.4% 和 20.6%。

(2) 工件超声振动改变加工间隙,增加了放电频率和概率,是无工件超声时的 3 倍, $5\text{ }\mu\text{m}$ 时的材料去除率是 $2\text{ }\mu\text{m}$ 振幅时的 1.2 倍。

(3) 较高转速影响了工具气膜的生成,材料去除率有所降低。但电压增加,极间电解/放电作用增强,电解/放电加工去除体积随着电压增加而增大。在电压 6 V 时,材料去除率达到 $0.89\text{ mm}^3/\text{min}$,比 3 V 电压时增加 45.9%。

(4) 转速和振幅的增大都可以提高表面质量, 5000 r/min 时的表面粗糙度值比 1000 r/min 下降 13.2%;振幅增至 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,表面粗糙度比 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时降低了 17.5%;但较高电压裸露更多增强颗粒,6 V 时表面粗糙度比 3 V 时高出 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

参考文献

[1] 吴琼,邓瑛,姚罡,等. 颗粒增强铝基复合材料结构高阶振型疲劳试验技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 91–96.

WU Qiong, DENG Ying, YAO Gang, et al. Research on high order vibration mode fatigue test technology of particle reinforced aluminum matrix composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 91–96.

[2] KUMAR P, JADHAV P, BELDAR M, et al. Review paper on ECM, PECM and ultrasonic assisted PECM[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 6381–6390.

[3] SUN F, LI X, WANG Y, et al. Studies on the grinding characteristics of SiC particle reinforced aluminum-based MMCs[J]. Key Engineering Materials, 2006, 304–305: 261–265.

[4] GE Y C, ZHU Z W, WANG D Y, et al. Study on material removal mechanism of electrochemical deep grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 510–519.

[5] WANG M H, CHEN X, TONG W J, et al. Influences of gap pressure on machining performance in radial ultrasonic rolling

electrochemical micromachining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1–2): 157–166.

[6] GHOSHAL B, BHATTACHARYA B. Vibration assisted electrochemical micromachining of high aspect ratio micro features[J]. Precision Engineering, 2015, 42: 231–241.

[7] LIU J W, YUE T M, GUO Z N. An analysis of the discharge mechanism in electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 86–96.

[8] 赵建社,李龙,王峰,等. 振动进给对微尺度群缝电解加工过程的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(1): 44–48, 78.

ZHAO Jianshe, LI Long, WANG Feng, et al. Influence of tool vibration feeding on ECM process in machining micro multi-grooves[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(1): 44–48, 78.

[9] ELHAMI S, RAZFAR M R. Application of nano electrolyte in the electrochemical discharge machining process[J]. Precision Engineering, 2020, 64: 34–44.

[10] SCHUBERT A, ZEIDLER H, OSCHÄTZCHEN M H, et al. Cing micro-EDM using ultrasonic vibration and approaches for machining of nonconducting ceramics[J]. Strojnicki Vestnik–Journal of Mechanical Engineering, 2013, 59(3): 156–164.

[11] 王峰. 异形孔、槽振动进给脉冲电流电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

WANG Feng. Research on key technology of vibrating feed and pulse current electrochemical machining of special-shaped holes and grooves[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[12] 李晶,陈湾湾,朱永伟. 超声振动辅助电解加工成形规律研究及试验[J]. 现代制造工程, 2020(8): 13–19.

LI Jing, CHEN Wanwan, ZHU Yongwei. Study and experiment of forming law in ultrasonic assisted electrochemical machining[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(8): 13–19.

[13] LIU J J, JIANG X G, HAN X, et al. Effects of rotary ultrasonic elliptical machining for side milling on the surface integrity of Ti–6Al–4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5–8): 1451–1465.

[14] KOLHEKAR K R, SUNDARAM M. Study of gas film characterization and its effect in electrochemical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2018, 53: 203–211.

[15] LI J, CHEN W W, ZHU Y W. Study on generating machining performance of two-dimensional ultrasonic vibration–composited electrolysis/electro–discharge technology for MMCs[J]. Materials, 2022, 15(2): 617.

[16] CHEN W W, LI J, ZHU Y W, et al. Study on an ultrasonic combined electro-machining control system with composite material experiments[J]. Electronics, 2022, 11(4): 637.

[17] 吴帮福,丁文锋,曹洋. 颗粒增强钛基复材轴向超声振动辅助磨削试验研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 96–102.

WU Bangfu, DING Wenfeng, CAO Yang. Experimental study on axial ultrasonic vibration-assisted grinding of particle-reinforced titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 96–102.

通讯作者: 朱永伟,教授,博士,研究方向为机电控制及特种加工技术。

(责编 晓月)

引文格式: 梁旭峰, 蔡振华, 刘琦, 等. 压气机叶片激光熔化沉积修复的机器人路径自动规划和试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 119–126.

LIANG Xufeng, CAI Zhenhua, LIU Qi, et al. Laser melting deposition repair for compressor blades: Robotic path automatic planning and experimental research[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 119–126.

压气机叶片激光熔化沉积修复的机器人路径自动规划和试验研究*

梁旭峰¹, 蔡振华¹, 刘琦^{2,3,4}, 牟梓鑫¹, 曾春年¹, 牛少鹏⁵, 邓春明⁵

(1. 武汉理工大学自动化学学院, 武汉 430070;

2. 中国航空制造技术研究院高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024;

3. 高能束流增量制造技术与装备北京市重点实验室, 北京 100024;

4. 增材制造航空科技重点实验室, 北京 100024;

5. 广东省科学院新材料研究所, 广州 510651)

[摘要] 针对航空发动机 TC17 高压压气机叶片服役损伤后的修复问题, 本文基于工业机器人的激光熔化沉积路径生成策略, 提出使用模型布尔运算来分析叶片损伤区域, 并在 RobotStudio 离线编程软件中嵌入二次开发插件分别生成 Zigzag 轴向扫描、中心线偏移扫描和边缘螺旋扫描路径。路径的仿真和沉积形貌分析表明, 在设定扫描速度 5 mm/s、沉积层厚度 0.3 mm、搭接率 50% 时, 中心线偏移扫描在 95.97% 时间内保持速度稳定, 折返点处的速度下降幅度更小, 同时沉积后表面高度接近 0.3 mm, 高度波动方差更小, 保持了较高的平整度。此外, 矩形平板区域的沉积模拟和试验表明, 类似 Zigzag 扫描的连续路径可以显著降低成形表面的残余应力。

关键词: 压气机叶片; 激光熔化沉积技术; 工业机器人; 模型布尔运算; 路径规划

Laser Melting Deposition Repair for Compressor Blades: Robotic Path Automatic Planning and Experimental Research

LIANG Xufeng¹, CAI Zhenhua¹, LIU Qi^{2,3,4}, MU Zixin¹, ZENG Chunnian¹, NIU Shaopeng⁵, DENG Chunming⁵

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of High Power Beam Additive Manufacturing Technology and Equipment, Beijing 100024, China;

4. Aeronautical Key Laboratory for Additive Manufacturing Technologies, Beijing 100024, China;

5. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China)

[ABSTRACT] This paper studies a laser melting deposition path generation strategy based on industrial robots to address the repair problem of aero-engine TC17 high-pressure compressor blades after service damage. This method can analyze the blade damage area with model Boolean operations and embeds a secondary development plug-in in the RobotStudio offline programming software to generate Zigzag-axial, centerline-offset, and edge-helical scanning paths. The path simulation and deposition topography analysis show that when the scanning speed is 5 mm/s, the deposition layer thickness is 0.3 mm, and the overlap ratio is 50%, the centerline-offset scanning path can maintain the speed stable for 95.97% of time, and the speed decline of turning point is tinier. Simultaneously, the formed height after deposition is close to 0.3 mm, and the height fluctuation variance is relatively small with excellent flatness. Furthermore, simulations and experiments on rectangular flat-plate regions show that a continuous path, such as Zigzag scanning path, can dramatically reduce residual stress on the formed surface.

Keywords: Compressor blades; Laser melting deposition; Industrial robot; Model Boolean operation; Path planning

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.119

* 基金项目: 航空科学基金(2019ZE025001); 国防基础科研计划(JCKY2019205A002); 北京市自然科学基金(3172042)。

航空装备为达到轻量化和高可靠性要求,其重要部件必须由高性能材料制成^[1]。钛合金因其质量轻、比强度高、耐腐蚀和耐高温等优异特性被广泛应用于航空航天领域^[2]。但其变形抗力大、切削加工工艺性能差,采用锻造或机械加工方法制造钛合金构件存在周期长、成本高、制造难度大的问题^[3],因此由钛合金材料制造的航空发动机叶盘、叶片等部件的附加值很高。由于其使用环境恶劣,航空发动机服役过程中会遇到外物撞击或因叶片振动而出现的磨损裂纹等不同程度损伤^[4],亟需高效高质量的修复技术对关键零部件进行修复,延长服役寿命。

激光熔化沉积技术(Laser melting deposition, LMD)是一种实体自由成形技术,以金属粉末为原料,采用高功率激光使原料快速熔化、凝固并逐层堆积,能够快速完成全致密、高性能大型复杂金属结构件的直接近净成形,是一种低成本、高性能、高效率和高材料利用率的绿色数字制造技术,在高附加值金属零件的修复行业中具有广泛的应用前景^[5-6]。激光熔化沉积修复的钛合金构件力学性能高,比直接零件置换成本节约75%以上^[7-8],采用激光熔化沉积技术修复后的部件强度可以达到原强度的90%以上,既缩短了修复时间,又解决了航空发动机转动部件快速抢修的难题^[8]。

工业机器人因其工作空间大、运动灵活、定位精度高、成本低及易于拓展等特点被广泛应用于智能制造产业中^[9]。机器人技术和激光技术的结合,带动了激光熔化沉积加工产业的发展。针对机器人激光沉积路径的生成方法,国内外学者和研究机构展开了一系列研究。Hayasi等^[10]提出了一种直接切片方法,提取形成模型的凸出特征和减法特征,识别每个特征与XY平面的交点,找到内部和外部循环,结合快速成形工艺要求,生成所需格式的路径。Zhang等^[11]介绍了一种考虑模型厚度方向和切片方向的无支撑机制的自适应分层技术。Vijayaraghavan等^[12]研究了不同沉积成形平台的程序转换算法,提出了相应的沉积路径自动生成方法。Zheng等^[13]通过STL模型的几何信息和法向量信息,生成相交边缘信息,建立模型的拓扑关系,并对STL模型的冗余点去除和机器人路径点进行排序,得到机器人路径点的位置信息。杨光等^[14]采用有限元参数化设计语言研究了不同激光扫描路径对修复基体残余应力与变形的影响,为提高激光修复质量提供了参考依据。谢乐春等^[15]提到扫描策略不同会引起扫描道的冷却时间、热输入位置、温度梯度等发生变化,使得柱状晶的生长趋势也随之发生改变。然而,航空发动机中的叶片曲面构型复杂,常规规则区域多采用固定方向的路径生成方法,不能根据叶片形状和轮廓灵活生成合适的沉积

路径。

本文针对TC17钛合金高压压气机叶片的修复路径规划问题,利用工业机器人和激光熔化沉积装置,进行路径智能规划方法研究,借助ABB RobotStudio软件的二次开发功能开发路径智能规划插件,对多种扫描方式生成的路径及沉积后表面形貌进行仿真,结合矩形平板区域沉积模拟和试验,分析不同路径扫描方式下叶片的修复效果。

1 试验及方法

1.1 试验材料与设备

激光熔化沉积技术通过计算机分析待修复零件的CAD模型,对模型进行切片处理,从每一层切片中获取合适的扫描路径,将路径转换为指令以控制运动机构运动。同步送粉装置将金属粉末送入激光光斑形成的熔池中,激光熔化金属粉末并与基体材料(当沉积第一层时)或之前沉积层(当沉积后续各层时)呈冶金结合。每当沉积完一层后,运动机构携带激光头上升一层高度,沉积下一层,直至完成整个零件的沉积。最后对成形后的金属零件进行适当的后续工艺加工即可得到符合要求的零件^[16-17]。

激光熔化沉积装置的结构示意图如图1所示,主要包含激光器、送粉系统、ABB工业机器人、冷却系统、惰性气体保护装置和运动控制系统等^[18]。工业机器人作为运动机构,可以携带激光头按照预定沉积路径完成在空间三维方向的移动,采用TC17钛合金粉末作为修复材料完成零件修复。气雾化法制备的TC17粉末为球状,表面分布着少量微型粉末、少量卫星球和非球形颗粒,未发现空心粉末。对粉末进行60目(孔径250 μm)和800目(孔径18 μm)的人工筛分,筛分后的粉末用于后续激光熔化沉积工艺试验,粉末流动性为25.85 s/g。

1.2 路径扫描方式

在送粉式激光熔化沉积修复过程中,送出的粉末和叶片的部分基体被高能激光加热至熔化后快速凝固,随着激光头的移动在叶片待修复表面留下一道沉积层^[19]。

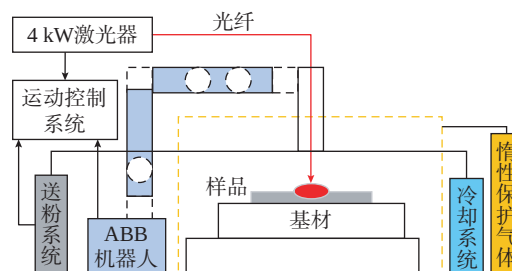


图1 机器人激光熔化沉积装置结构图

Fig.1 Structure diagram of robotic laser melting deposition device

单道沉积层横截面的形貌及尺寸大小被称为激光熔化沉积层的形貌特征,与沉积过程中熔池的表面形状有关,由作用于熔池内部的平衡力决定,沿熔池表面上任一点的法线方向,自由表面方程可表示为

$$\gamma \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p} \right) = P_{hg} + \rho_{hg} g z + \gamma K_s \quad (1)$$

式中, γ 为表面张力系数; K_s 为表面曲率; P_{hg} 为自由表面上的液体压力; $P_{p,g}$ 为自由表面上的粉末颗粒的冲击力; $\rho_{hg} g z$ 为自由表面上的重力; $\frac{\gamma}{R_s}$ 为液态剪切力和 γK_s 为表面张力^[20]。Cheikh 等^[21]通过不同参数的试验与仿真数据,分析和预测了单个激光熔化沉积轨迹横截面的形状和几何特征,由于表面张力的存在,沉积层横截面轮廓一般为圆弧形,预测任何情况下横截面的高度 h 、宽度 W 、半径 R 、表面积 A (图 2) 一般应满足

$$\begin{cases} \frac{W}{R} = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{R^2}}} \\ \frac{h}{R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{W^2}{4R^2}}} \end{cases} \quad (2)$$

为了模拟单层多道激光沉积过程,采用将熔道离散为三维点集的方式,在单一平面上按照设定的扫描方式进行堆积,对实际激光熔化沉积的结果进行仿真,如图 3 所示。单层多道的沉积过程是单道激光熔化沉积过程的不断重复,后一道熔道会对前一道熔道有明显的热影响,会使得前一道熔道部分区域发生重熔,相邻熔道之间存在重合区域,使用搭接率对该区域大小进行描述。搭接率用来描述激光熔化沉积中相邻熔道之间的相互重叠程度,定义为相邻熔道重叠宽度与熔道宽度之比。图 3 (d)、(e) 和 (f) 分别为搭接率为 75%、50% 和 25% 的多道沉积效果,可以看出搭接率越高,沉积层的表面越平整,但表面材料堆积高度越高,选择不同的搭接率会产生不同的沉积层厚度与均匀度,对沉积修复效率及表面堆积质量有着重要的影响。

在单层沉积层中,常用的激光熔化扫描路径规划方式如图 4 所示^[22-23],灰色区域为叶片截面。图 4 (a) 的单向扫描方式是指激光沿着指定的水平方向 (如 X 或 Y

方向) 扫描,这种扫描方式简单、易实现,但是路径间不连续,激光头需要多次启停,对激光功率控制和送粉响应时间有较高要求,从而影响加工效果和效率。图 4 (b) 的 Zigzag 轴向扫描是指激光沿某个给定方向做往复的“S”型扫描,相比于单向扫描,路径完整连续,减少了激光停止的空扫行程,激光熔化沉积过程减少了激光停止启动节点,但是路径间折返点过多。图 4 (c) 的中心线偏移扫描方式是通过先计算叶片的中心轮廓线,然后根据叶片厚度使路径按中心线前后偏移若干次,路径的连续性更强,且减少了折返点,可以达到较好的填充效果。图 4 (d) 为轮廓螺旋扫描方式,沿着叶片的外轮廓开始,由外至内渐进扫描,算法实现较为复杂。

以矩形待沉积区域为例,设计单向扫描填充路径和 Zigzag 扫描填充路径,观察激光熔化沉积扫描路径对平面动态变形和整体变形的影响。采用单点沉积进行线性叠加方式模拟沉积过程,并保持 50% 的搭接率,在沉积过程中不同的扫描方式会在表面形成不同程度的起

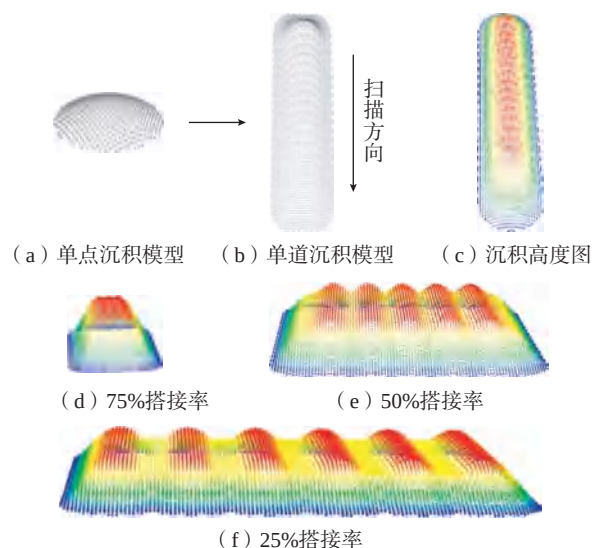


图 3 单道沉积模型和不同搭接率下的沉积效果

Fig.3 Single-track deposition model and deposition effects under different overlap ratios

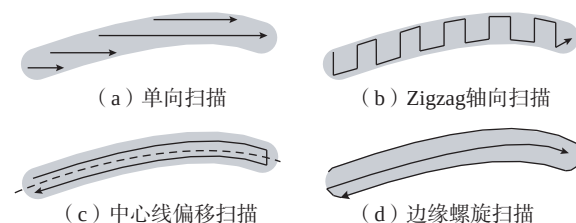


图 4 常用激光熔化沉积扫描路径方式示意图

Fig.4 Schematic diagram of typically used laser melting deposition scanning path

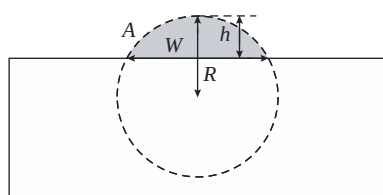


图 2 沉积轨迹的圆弧截面模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the circular arc section model of deposition trajectory

伏以及厚度的变化,如图 5 所示。

1.3 沉积路径生成方法

机器人离线编程利用计算机图形学成果建立机器人及其工作环境的三维模型,通过图形化虚拟车间进行机器人路径规划。与传统的示教编程方式相比,离线编程技术可以在不中断生产的情况下更加高效、精确地生成机器人路径。目前机器人路径规划方法大多基于离线编程技术展开,国内外学者针对机器人路径规划问题进行了研究。这些研究大多集中于将自由曲面喷涂问题抽象为含有约束条件的变分问题,并以涂层厚度方差最小为优化目标,求解轨迹点的瞬间扫描速度和空间位置,这类基于求解非线性微分方程组的方法由于其计算量较大而无法实现喷涂机器人路径的快速生成,难以发挥工业机器人高效率生产的优势。

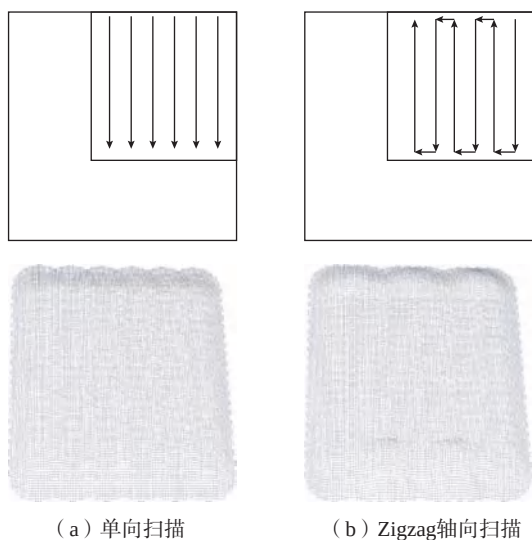


图 5 两种扫描方式的表面形貌模拟

Fig.5 Surface topography simulation of two scanning methods

本文针对性地提出了一种以实体 CAD 模型布尔运算为依据的机器人激光熔化沉积路径自动生成策略,其主要原理是通过对几何模型布尔运算生成的一系列切分曲线进行离散化处理,优化拾取机器人路径点。

激光熔化沉积路径由一系列基于时间序列的离散目标点组成,其中目标点主要由位置、方向、时间序列 3 个要素组成。在沉积过程中,由机械手控制激光头,并按照目标点的时间序列使机器人 TCP 的位置、方向与目标点一一吻合,从而完成材料沉积任务。机器人激光熔化沉积路径生成策略的基本流程如图 6 所示,步骤为:(1)首先在离线编程软件中对叶片的数字模型进行分析,得到模型的最小包围盒(Bounding box);(2)移动包围盒,使受损区域移至包围盒外,并采用布尔运算中的切除运算(Cut),将模型作为运算对象 A,包围盒作为运算对象 B, $A.Cut(B)$ 表示用 B 物体切除 A 物体,随后计算受损部位的最小包围盒;(3)选择路径扫描方式;(4)设定沉积路径参数,包括路径间距 L_s 、沉积层厚 L_h 、扫描速度 V 和转弯半径 Z 等;(5)在提取出的最小包围盒上进行沉积路径规划,其中,沉积路径的自动生成过程采用自动切片法生成垂直于最小包围盒底面的全覆盖路径,鉴于从待修复区域的底面开始沉积,按照沉积层厚度依次提升高度以沉积下一层,路径仿真中直接将不规则的底面作为布尔相交运算的运算对象 A,构建垂直于底面的平面作为运算对象 B, $A.Intersect(B)$ 表示两个面的相交直线段;(6)检查底面路径是否合理,如果合理则生成路径,根据底面的参数设置依次向上迭代,完成整个待修复区域的路径生成,否则回到步骤(3)重新设置路径参数再次进行仿真和判断。步骤(4)中涉及沉积参数的设定,其中的路径间距 L_s 是指在单层沉积层中,每条沉积路径之间的间距;沉积层厚 L_h 表示逐层熔化沉积过程中,层间固定的高度差值,通过

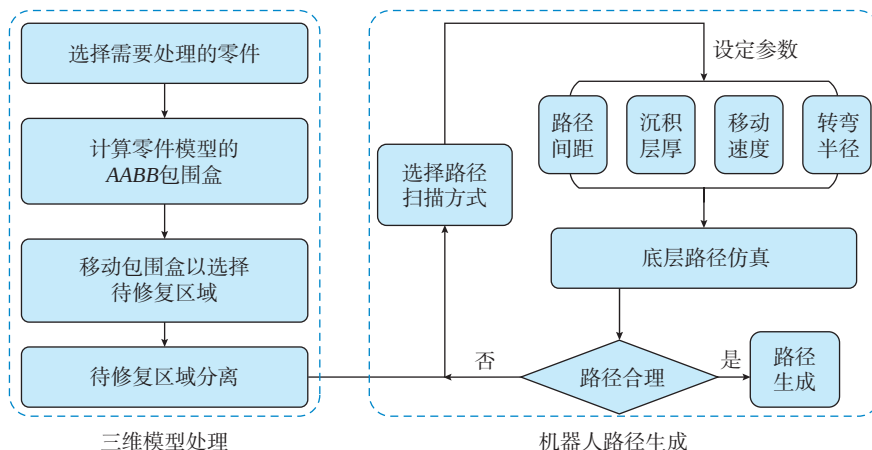


图 6 机器人激光熔化沉积路径生成流程图

Fig.6 Flow chart of robot laser melting deposition path generation process

设定的层厚 L_h 和包围盒计算所得的待修复区域高度 H , 计算待沉积的总层数 $N = \lceil H/L_h \rceil$; 扫描速度 V 为机器人携带激光头进行熔化沉积的过程中, 激光头末端的工具中心点相对于固定工件的速度; 转弯半径 Z 是 ABB 机器人运动指令中的区域数据, 用于规定如何结束一个位置, 即在朝下一个位置移动之前, 轴必须如何接近编程位置。此外, 沉积距离 L_t 是指激光头与材料撞击中心点之间的相对高度, 它决定着激光聚焦的距离, 进而影响沉积的效率和效果。

以离线编程软件 ABB RobotStudio 的二次开发技术为实现手段, 设计人机交互软件, 用以加载上述路径生成策略, 同时控制修复区域和沉积参数, 快速生成满足 ABB 工业机器人激光熔化沉积作业的 Rapid 程序, 从而实现叶片复杂曲面上机器人路径快速、精准自动生成。该软件交互界面及路径生成策略采用 C# 语言开发, 并采用动态链接库形式加载至 RobotStudio 的 AddIn 功能选项卡中, 可以实现如下功能: (1) 自定义选择待修复的叶片, 导入其 CAD 模型; (2) 提供不同的沉积路径扫描方式进行选择; (3) 自定义路径和轨迹参数; (4) 预先进行路径仿真, 并选择合适的路径进行生成。

2 结果与讨论

本文策略的可行性将通过以下试验仿真和结果分析进行验证。如图 7 所示, 在 ABB RobotStudio 离线编

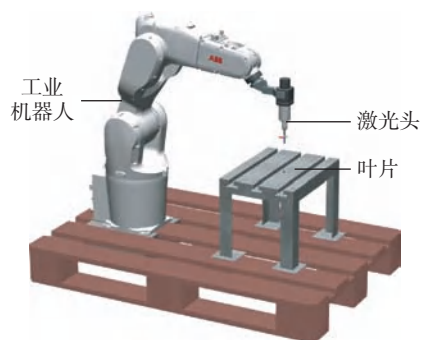


图 7 仿真工作站示意图

Fig.7 Schematic diagram of simulation workstation

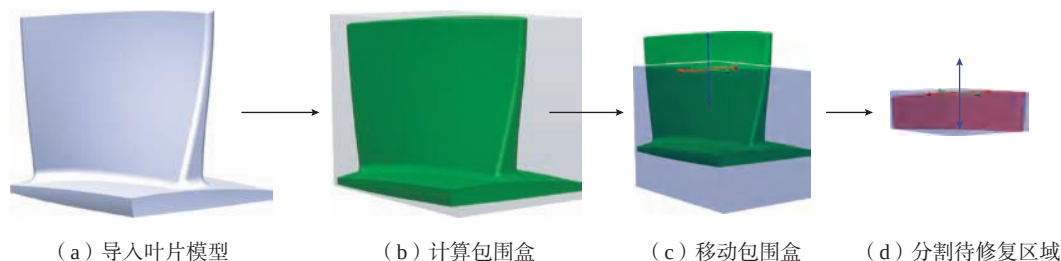


图 8 叶片模型处理

Fig.8 Blade model processing

程软件中进行路径仿真, 仿真空间包括 ABB 工业机器人、叶片和模拟激光头的工具。由机器人携带激光头对叶片上的沉积路径进行可达性验证, 同时在路径仿真中观察设定参数下激光头 TCP 的速度和位置数据。

2.1 叶片三维模型处理

导入图 8 (a) 中叶片的 CAD 模型, 对叶片的数字模型进行分析计算, 得到模型的最小有向包围盒 (Bounding box), 如图 8 (b) 所示。为得到待修复区域的部分模型, 使用实体移动功能将灰色包围盒沿 Z 轴方向移动, 直至损伤区域完全离开包围盒区域 (图 8 (c))。在该位置上, 叶片模型与包围盒进行布尔 Cut 运算, 截期待修复区域, 即图 8 (d) 中的红色部分的实体模型。

2.2 机器人路径生成

叶片模型经分割后得到待修复区域的部分实体模型, 机器人路径的规划以此区域为模型输入。在对常用的几种扫描路径方式进行分析后, 选取 Zigzag 轴向扫描方式、中心线偏移扫描方式和边缘螺旋扫描方式分别进行路径规划。以待修复部分的矩形体包围盒的底面为例, 设定沉积参数中的路径间距 L_s 为 1.0 mm, 沉积层厚 L_h 为 0.3 mm, 扫描速度 V 为 5 mm/s, 搭接率约为 50%, 得到底层的沉积路径如图 9 所示。图 9 (a) 为沿水平轴向的切分线段以 Zigzag 方式依次连接形成的路径; 图 9 (b) 为计算底面内部薄壁中心线, 将中心线分别向中点的法线方向偏移固定距离得到两条曲线后, 从曲线上取点并顺序连接得到的路径; 图 9 (c) 为由底面边缘曲线取点, 顺序连接形成的路径。

基于底面路径的方向、起点以及设定参数, 可以获取待修复区域的完整沉积修复路径, 如图 10 所示。沉积层间的距离 L_h 为设定层厚 0.3 mm, 通过底面所在平面抬升一个单位层厚高度后重新与待修复区域实体进行一系列布尔运算获取下一层沉积路径, 重复这一过程直至累积沉积层厚超过待修复区域的高度, 即可得到完整路径。

2.3 路径仿真结果及分析

在仿真空间中, 对生成的路径进行仿真和验证。工

具数据选用图 7 中的工具中心点,工件坐标系与叶片模型坐标系同步,信号监测中添加了工具中心点在当前工件坐标系下的相对速度和位置。机器人从沉积路径起点开始按规划路径运动,直至完成图 10 中的完整路径。根据信号分析器中获取的信号数据,统计路径特征(表 1)并绘制速度变化的曲线图(图 11)。

表 1 数据表明,在设定的 5 mm/s 扫描速度下,3 种扫描方式得到的路径总长度中,Zigzag 轴向扫描更小,与之相关的扫描用时更短,但与其他两种方式相比差别不大。若将 (5 ± 0.1) mm/s 的范围视作速度稳定区间,则 3 种扫描方式的速度稳定的时间占比以中心线偏移扫描方式最佳,达到了 95.97%,优于边缘螺旋扫描方式的 94.27% 和 Zigzag 轴向扫描方式的 83.10%。速度不稳定主要表现为瞬时速度的下降,中心线偏移扫描方式速度下降达到的最低值为 4.49 mm/s,优于边缘螺旋扫描方式的 4.30 mm/s 和 Zigzag 轴向扫描方式的 2.51 mm/s。根据路径曲线的形状统计路径中的折返点数量,发现中心线偏移扫描和边缘螺旋扫描方式均为 6 处折返点,而 Zigzag 轴向扫描方式存在 44 处折返点。

从图 11 中的 3 种扫描方式的路径曲线趋势可以看

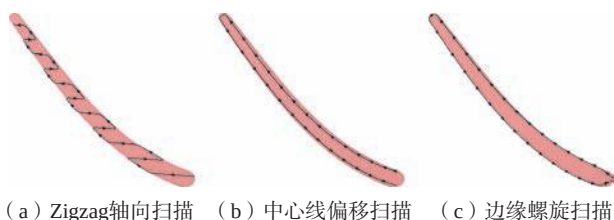


图 9 不同扫描方式的底层路径仿真结果

Fig.9 Bottom path simulation results of different scanning methods

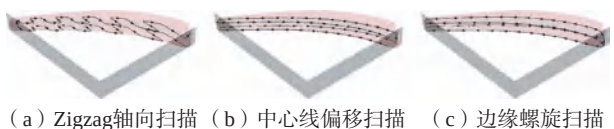


图 10 不同扫描方式的完整沉积路径生成结果

Fig.10 Complete deposition path generation results of different scanning methods

出,Zigzag 轴向扫描方式的速度变化频繁,存在大量极短时间内的速度陡降-回复现象,且速度下降幅度甚至超过了设定速度的 20%;边缘螺旋扫描和中心线偏移扫描方式下的速度相比 Zigzag 轴向扫描更为稳定,虽然存在少数位置的速度下降-回复情况,但下降幅度较小,尤其是中心线偏移扫描的速度最低值也更接近设定速度。结合图 10 中的路径形态和表 1 中的统计特征综合分析发现,速度的下降现象一般出现在路径折返点,且折返点前后方向变化的角度越大,速度下降越明显,体现在 Zigzag 轴向扫描路径中存在多处折返角度超过 90° 的目标点处速度下降幅度超过 20%。

2.4 沉积形貌模拟分析

激光熔化沉积层的形貌尺寸既是加工时激光扫描路径设计的重要参考因素,也是描述加工后成形件尺寸精度的重要特征之一^[19]。根据圆弧横截面熔池模型对上述 3 种沉积路径进行模拟,得到单层沉积层的三维形貌,如图 12 所示。灰色阴影部分表示叶片基材所在的有效区域,外围无阴影部分为便于加工而进行增厚的区域,在形貌分析中不考虑增厚区域。在有效区域内观察 3 种扫描路径的沉积形貌可以发现,Zigzag 轴向扫描后的形貌高度起伏变化较多,尤其是在折返点处搭接率偏高;边缘螺旋扫描后的形貌在叶片截面较宽的一侧搭接率较低,较窄的一侧搭接率较高,整体沉积高度不均匀;中心线偏移扫描后的沉积层形貌则较为平整。

3 种扫描路径有效区域内沉积层形貌数据对比如表 2 所示。

设定沉积层厚度 L_h 为 0.3 mm,3 种扫描路径的形貌数据差异较大。沉积后表面的平均高度表现为中心线偏移扫描 < 边缘螺旋扫描 < Zigzag 轴向扫描,以中心线偏移扫描最优,接近设定层厚 0.3 mm。沉积层的高度范围和方差表明,中心线偏移扫描路径的沉积表面平整程度优于其余两种路径。

仿真中的叶片厚度约为设定熔道宽度的 2 倍,两条中心线偏移路径即可满足沉积修复要求。若截面宽度超过熔道宽度的 2 倍,中心线向前后多次偏移后保留叶

表 1 不同扫描方式的沉积路径特征统计

Table 1 Statistical data of deposition path characteristics of different scanning methods

扫描方式	设定扫描速度 / (mm·s ⁻¹)	路径总长 / mm	总时间 /s	速度稳定的 时间 /s	速度稳定的 时间占比	速度最小值 / (mm·s ⁻¹)	折返点数量
Zigzag 轴向扫描	5.00	70.7830	13.068	10.860	83.10%	2.51	44
中心线偏移扫描	5.00	73.4665	14.484	13.900	95.97%	4.49	6
边缘螺旋扫描	5.00	76.4867	15.288	14.412	94.27%	4.30	6

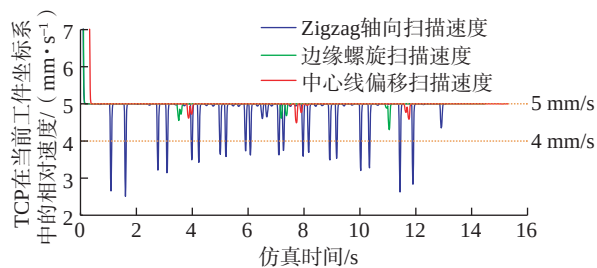


图 11 沉积路径仿真速度曲线图

Fig.11 Simulation velocity curve of deposition paths

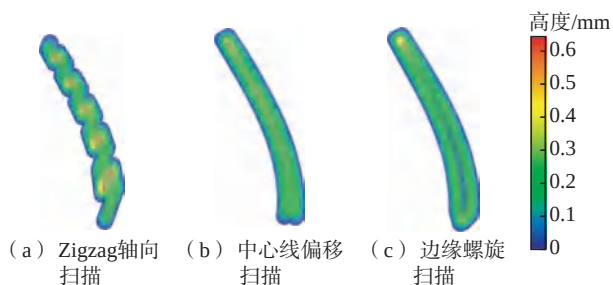


图 12 沉积层形貌模拟结果

Fig.12 Simulation results of deposition layer topography

表 2 沉积层形貌数据对比

Table 2 Comparison of deposition layer topography data

扫描方式	设定层厚 / mm	高度范围 / mm	平均高度 / mm	高度方差 / mm ²
Zigzag 轴向扫描	0.30	[0.12, 0.61]	0.38	0.0732
中心线偏移扫描	0.30	[0.21, 0.38]	0.30	0.0064
边缘螺旋扫描	0.30	[0.15, 0.43]	0.31	0.0252

片有效区域内路径点,并按前后次序连接偏移路径线后得到沉积路径。

2.5 矩形区域沉积试验

采用厚度为 10 mm 的平板锻件作为激光熔化沉积标准基板,分别对单向扫描路径和 Zigzag 轴向扫描路径进行沉积试验,沉积结束后表面状态如图 13 所示。由于空行程的增加,单向扫描用时约为 Zigzag 扫描的 2 倍,并需要由机器人 IO 口不断控制激光的启停,效率不足。在 Zigzag 扫描中的矩形区域左右折返点处,沉积高度偏高,影响了整体平整度。

采用 X 射线衍射法测量扫描试样的表面残余应力,测量图 13 中块状试样 4 个典型位置的表面残余应力,如表 3 所示,试验结果表明激光熔化沉积表面残余应力是拉应力。通过残余应力测试发现, Zigzag 扫描残余应力低于单向扫描。

通过叶片模型的沉积路径仿真和模拟,以及矩形区

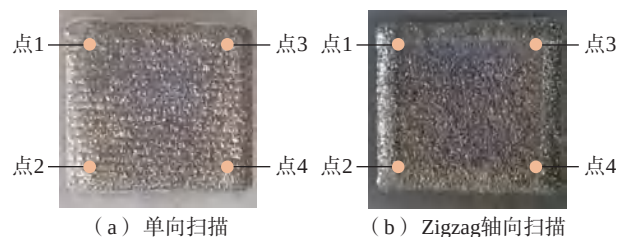


图 13 激光熔化沉积试验后表面状态

Fig.13 Surface state after laser melting deposition

表 3 激光熔化沉积成形表面残余应力分布

Table 3 Residual stress distribution on the formed surface by laser melting deposition

扫描方式	点 1/N	点 2/N	点 3/N	点 4/N
单向扫描	133 ± 13	102 ± 18	155 ± 34	125 ± 13
Zigzag 扫描	108 ± 14	95 ± 12	116 ± 25	98 ± 23

域沉积试验验证可以发现,单向扫描方式存在效率低、残余应力高等不足; Zigzag 扫描可以有效降低表面残余应力,但在路径的折返点处搭接率偏高,沉积高度不均匀;边缘螺旋扫描不利于保证搭接率的稳定,且对于截面较厚区域需要向内多次螺旋渐进的情况较难处理;中心线偏移扫描可以保持固定的搭接率,并通过多次前后偏移生成截面较厚的叶片修复路径。

3 结论

面向航空发动机 TC17 高压压气机叶片损伤修复问题,提出了一种基于模型布尔运算的机器人激光熔化沉积路径自动规划方法,分析了沉积模型,研究了机器人离线编程软件的二次开发方法,通过仿真和试验分析得到结论如下。

(1) 从扫描速度的稳定性上,中心线偏移扫描方式可以在 95.97% 占比的时间内保持速度在稳定的 (5 ± 0.1) mm/s 区间中,且速度下降的最低值为 4.49 mm/s,相较于 Zigzag 轴向扫描和边缘螺旋扫描路径的速度更稳定。

(2) 结合路径形态和速度曲线发现,速度下降一般发生在路径的折返点处,折返方向的角度变化越大速度下降越明显。

(3) 相比于 Zigzag 轴向扫描和边缘螺旋扫描方式,中心线偏移扫描的沉积高度更接近设定层厚 0.3 mm,且高度变化范围和方差更小。Zigzag 轴向扫描和边缘螺旋扫描存在搭接率偏高或不足的现象。

(4) 矩形平板区域的沉积模拟和试验表明,类似 Zigzag 扫描的连续扫描方式可以有效降低成形表面的残余应力。

参考文献

- [1] GISARIO A, KAZARIAN M, MARTINA F, et al. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53: 124–149.
- [2] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1684–1691.
- [3] 陈博, 邵冰, 刘栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 57–63.
- [4] CHEN Bo, SHAO Bing, LIU Dong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 57–63.
- [5] ZHAO Z H, WANG L F, LU K N, et al. Effect of foreign object damage on high-cycle fatigue strength of titanium alloy for aero-engine blade[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104842.
- [6] 汤海波, 吴宇, 张述泉, 等. 高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势 [J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 58–63.
- [7] TANG Haibo, WU Yu, ZHANG Shuquan, et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 58–63.
- [8] 佟永军, 张鑫. 高温合金叶片的激光熔覆修复技术研究 [J]. 航空维修与工程, 2016(8): 60–61.
- [9] TONG Yongjun, ZHANG Xin. Research on laser cladding repairing technology of high temperature alloy blade[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(8): 60–61.
- [10] 刘珍峰, 李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用 [J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 37–40.
- [11] LIU Zhenfeng, LI Zhengjia. Application of laser cladding in aviation industry[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(1): 37–40.
- [12] 李嘉宁, 陈传忠. 激光熔覆技术在航空领域中的研究现状 [J]. 航空制造技术, 2010, 53(5): 51–54.
- [13] LI Jianing, CHEN Chuansong. Research situation of laser cladding technology in aviation manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(5): 51–54.
- [14] ZHU Z R, TANG X W, CHEN C, et al. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(2): 22–46.
- [15] HAYASI M T, ASIABANPOUR B. Machine path generation using direct slicing from design-by-feature solid model for rapid prototyping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(1–2): 170–180.
- [16] ZHANG J, LIOU F. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2004, 126(2): 254–261.
- [17] VIJAYARAGHAVAN V, GARG A, LAM J S L, et al. Process characterisation of 3D-printed FDM components using improved evolutionary computational approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5–8): 781–793.
- [18] ZHENG H, WANG C, FEI Z, et al. Robot posture generation method for laser melting deposition[J]. Industrial Robot, 2020, 47(6): 859–866.
- [19] 杨光, 丁林林, 王向明, 等. 扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2926–2932.
- [20] YANG Guang, DING Linlin, WANG Xiangming, et al. Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 2926–2932.
- [21] 谢乐春, 刘兵亮, 孙轩, 等. 激光熔化沉积钛合金及其复合材料组织力学性能研究进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(1/2): 49–66.
- [22] XIE Lechun, LIU Bingliang, SUN Xuan, et al. Research progress on microstructure and mechanical properties of titanium alloy and titanium matrix composites by laser melting deposition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 49–66.
- [23] 邓琦林. 激光熔覆成形金属零件的实验研究 [J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(5): 9–12.
- [24] DENG Qilin. The precision analysis on metal parts formed by laser cladding[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(5): 9–12.
- [25] 邓琦林. 致密金属零件的激光近形制造 [J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(1): 25–28.
- [26] DENG Qilin. LENS of compact parts[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(1): 25–28.
- [27] LIU Q, WANG Y D, ZHENG H, et al. TC17 titanium alloy laser melting deposition repair process and properties[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 82: 1–9.
- [28] 王予. IN718 合金同轴送粉激光沉积层与熔池形貌特征的模拟研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [29] WANG Yu. Numerical study on deposition layer and molten pool characteristics of IN718 coaxial powder feeding laser deposition[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [30] 宫新勇. 激光熔覆沉积修复 TC11 钛合金叶片的基础问题研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014.
- [31] GONG Xinyong. Fundamental research on repairing of TC11 Titanium alloy blades by laser cladding deposition[D]. Beijing: GRINM Group Corporation Limited, 2014.
- [32] CHEIKH H E, COURANT B, BRANCHU S, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 413–422.
- [33] 刘吉. 自动化增材制造路径规划与算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [34] LIU Ji. Research on path planning and algorithm of automated arc additive manufacturing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [35] 翟晓雅. 增材制造中的结构设计与路径规划问题 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [36] ZHAI Xiaoya. Structural design and path planning in additive manufacturing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.

通讯作者: 刘琦, 高级工程师, 博士, 研究方向为激光加工、增材制造、激光直接沉积、激光选区熔化和喷射打印。

(责编 晓月)

创造价值 贡献航空

“大飞机专刊” 征稿

选题背景

随着全球经济活动的发展，航空技术推动着航空运输在过去几十年中保持增长态势。专家预测，未来10年全球航空运力短缺，新飞机交付量将达2.06万架。为应对世界石油危机、全球变暖及其导致的极端气候，实现碳达峰和碳中和，未来大型民机将会朝着新能源化、低能耗化和超声速化的方向发展。本刊继续策划和推出“大飞机专刊”，从飞机构型、结构设计、制造工艺、新材料、新动力形式、新能源化等方面阐述大飞机的关键技术和发展趋势，欢迎专家学者们提供优秀稿件。

征稿范围

大型整体结构件成形制造、高性能薄壁结构控形控性制造、大型飞机新构型设计、轻质材料与轻量化结构、结构件拓扑优化设计与增材制造、智能化装配、飞机结构疲劳寿命与健康检测、新能源技术与绿色航空、高效航空发动机、高超声速飞行器、翼身融合布局、仿生减阻技术、智能制造技术与数字工厂等。

投稿要求

1. 综述/研究论文均可，体现出创新性，论点明确、论证充分、结构可靠。
2. 保证投稿论文的原创性，无抄袭、剽窃和侵权等行为，不一稿多投。
3. 投稿本专题，请提前与学术编辑联系，稿件投递到收稿邮箱（cuij068@avic.com）。

截稿日期

本征稿于2024年12月31日截止。

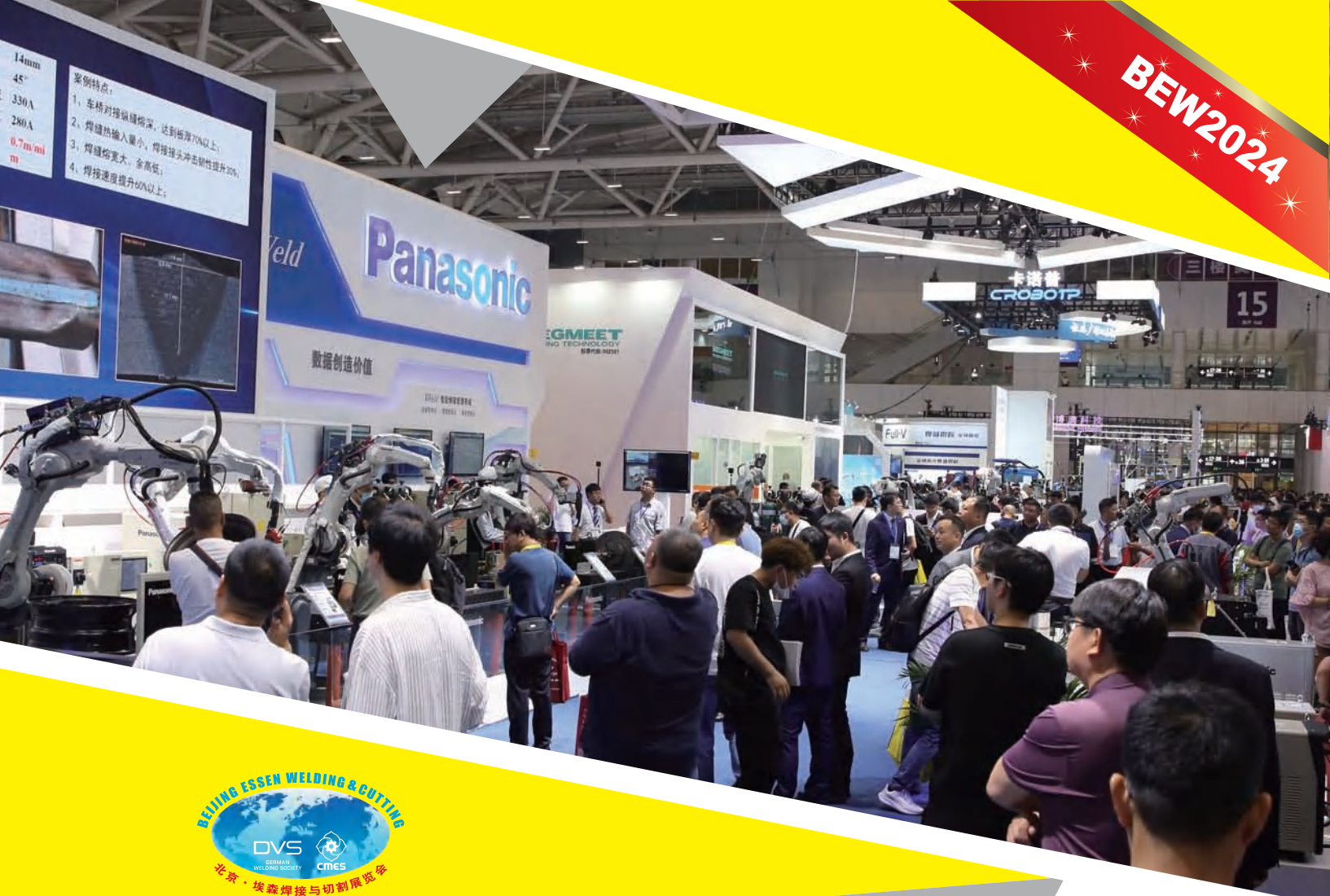
联系方式

责任编辑：崔逸飞

联系电话：15901138813

公司名称	位 置	索引号
HRC	封二	24-1072
北京韦林意威特工业内窥镜有限公司	封三	24-1005
SANDVIK	封底	24-1064
魏因加特纳机械制造有限公司	1	24-1032
埃马克（中国）机械有限公司	3	24-1022
斯达拉格公司	5	24-1014
约翰内斯·海德汉博士（中国）有限公司	7	24-1038
北京迪蒙数控技术有限责任公司	9	24-1011
北京东兴润滑剂有限公司	11	24-1004
易格斯（上海）拖链系统有限公司	13	24-1051
第27届北京·埃森焊接与切割展览会	128	24-1080

BEW2024



第27届 北京·埃森 焊接与切割展览会

2024年8月13-16日 上海

诚邀您莅临参观！

展会信息
时间：2024年8月13-16日
地点：上海新国际博览中心 N1-N5



扫码了解更多

www.beijing-essen-welding.com
www.埃森焊接展.com



广告索引号24-1080



Part of Waygate Technologies, Baker Hughes

Everest Mentor Visual iQ™ VideoProbe™ 系列

韦林超级一体化手持式工业视频内窥镜系统

一直被模仿，从未被超越



可搭载ADR人工智能辅助缺陷判断系统

单物镜相位扫描三维立体测量系统

整机一体化手持机式便携型设计

CCD原生像素值可达120万

叶片智能计数分析功能

北京韦林意威特工业内窥镜有限公司

贝克休斯检测科技业务美国韦林工业内窥镜产品及服务中国专门经销商

中国北京亚运村北辰汇欣大厦B座0901室至0907室 电话 (8610) 8499 1572 手机 (86) 13901023370 网站 www.everestbj.com



广告索引号24-1005

材质GC1205 和GC1210 高温合金的 可靠车削



SANDVIK
coromant

广告索引号24-1064

对于航空发动机零件的车削，表面要求非常高，但是现在凭借新材质GC1205和GC1210，这些要求再也不难达到。

这些材质专为加工经时效处理的镍基高温合金而研制，覆盖包括最后阶段加工(LSM) 和中间阶段加工 (ISM)的很大应用范围。