

引用格式: 王容容, 伍济钢, 葛吉民, 等. 航空用复合材料制孔缺陷检测技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(2): 13-25.  
WANG Rongrong, WU Jigang, GE Jimin, et al. Research progress of hole-making defect detection technology for aerospace composite materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(2): 13-25.

## 航空用复合材料制孔缺陷检测技术研究进展

王容容<sup>1,2</sup>, 伍济钢<sup>1,2\*</sup>, 葛吉民<sup>1,2</sup>, 苏飞<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)因其轻质高强特性在航空航天领域具有重要应用价值,但其制孔过程中因材料各向异性易引发分层、毛刺等缺陷,影响构件的服役性能与装配质量。因此,需要对其进行高精高效检测。本文基于制孔缺陷机理分析,深入探讨无损检测技术在CFRP制孔缺陷检测领域的适用性,分析传统机器视觉检测与基于深度学习检测的方法特性,并指出多模态数据融合的智能检测技术在提升检测精度与效率方面具有显著优势。此外针对当前CFRP制孔缺陷检测技术面临的挑战,提出开发各向异性自适应检测算法、构建标准化的缺陷分级体系及实现制孔过程的在线监测等发展路径,旨在为航空复合材料制造领域的智能化、高精度化检测提供革新的理论支撑与技术方向。

**关键词:** 碳纤维复合材料; 制孔缺陷; 无损检测; 机器视觉检测; 智能检测

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000057

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000057

中图分类号: V258; TP274

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)02-0013-13

## Research progress of hole-making defect detection technology for aerospace composite materials

WANG Rongrong<sup>1,2</sup>, WU Jigang<sup>1,2\*</sup>, GE Jimin<sup>1,2</sup>, SU Fei<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of High-Efficiency Precision Machining of Difficult-to-Machine Materials, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

**Abstract:** Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has significant application value in the aerospace field due to its lightweight and high-strength characteristics. However, during the hole-making process, the material's anisotropic nature makes it susceptible to defects such as delamination and burrs, which can adversely affect the service performance and assembly quality of components. Therefore, it is necessary to conduct high-precision and high-efficiency detection on it. Based on the analysis of the defect mechanisms associated with hole-making in CFRP, this paper thoroughly examines the applicability of non-destructive testing technologies for CFRP hole-making defect. It analyzes the characteristics of traditional machine vision detection methods with those based on deep learning techniques. Furthermore, it emphasizes that intelligent detection technology utilizing multimodal data fusion provides significant advantages in enhancing both detection accuracy and efficiency. In addition, in response to the challenges currently faced by CFRP hole-making defect detection technologies, it proposes several development paths. These include the creation of an anisotropic adaptive detection algorithm, the establishment of a standardized defect classification system, and the implementation of online monitoring for the hole-making process. The aim is to provide innovative theoretical support and technical direction for intelligent and high-precision detection in the field of aerospace composite material manufacturing.

**Key words:** CFRP; hole-making defect; non-destructive testing; machine vision detection; intelligent detection

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)是以碳纤维为增强体、环氧树脂等为基体,通过热压罐成型、自动铺丝等工艺制备而成的先进复合材料<sup>[1]</sup>。该材料具备低密度、高比强度、高比模量、耐腐蚀、抗冲击等优异的力学性能<sup>[2]</sup>,目前已逐步取代钛、铝、镁合金,成为战斗机机体、大型客机机翼等航空装备的核心结构材料<sup>[3]</sup>。CFRP具有净成型特性,不需要通过冲压、锻造等工艺就可直接加工出形状复杂的航空构件<sup>[4]</sup>,但在总装时需通过高锁螺栓连接实现可靠装配,使制孔加工成为保障结构安全的关键环节<sup>[5]</sup>。但复合材料存在各向异性与非均质性<sup>[6]</sup>,易引发毛刺、撕裂等缺陷,降低材料服役性能,还会因应力集中导致结构失效进而威胁航空装备运行安全。因此,需要对CFRP制孔缺陷进行精确、高效的检测<sup>[7]</sup>。

目前,声发射检测、红外热成像检测等无损检测技术(non-destructive testing, NDT)已广泛应用于复合材料的缺陷检测领域<sup>[8]</sup>,这类检测技术对缺陷信息进行处理时主要依赖人工进行判读,受主观因素影响,检测精度与效率低<sup>[9]</sup>。随着工业智能化转型加速,航空复合材料构件检测面临新的挑战:一是对于复杂结构缺陷的识别能力要求高;二是检测系统的工程精度与运行稳定性需达到工业级标准;三是需要满足航空复合材料构件的高效批量检测要求<sup>[10]</sup>。在此背景下,融合人工智能的机器视觉检测技术在CFRP制孔缺陷检测领域发挥愈发重要的作用。机器视觉检测技术包括基于传统机器视觉和基于深度学习的检测技术两类,前者易受环境因素干扰且难以检测形状复杂的缺陷<sup>[11]</sup>,后者在实际应用中对数据集要求高<sup>[12]</sup>。近年来,为突破单一检测技术的局限性,国内外学者将研究重点转向融合了无损检测与机器视觉检测技术的智能检测技术<sup>[13]</sup>,本文主要综述无损检测传统机器视觉与深度学习检测技术的原理、应用现状及优劣特征,阐明

多源检测技术融合的智能检测体系的构建路径与核心优势,并针对当前技术挑战提出相应发展路径。

## 1 CFRP 常见的制孔缺陷

CFRP由有机高分子基体与高性能纤维增强材料复合而成,具有各向异性导致层间结合强度较弱<sup>[14]</sup>。此外,在制孔过程中,切削刃与铺层间的摩擦产生热量,引发力热耦合效应,进而易诱发复合材料出现毛刺、撕裂、分层等制孔缺陷<sup>[15-16]</sup>,如图1所示。这些缺陷会显著影响航空构件的使用寿命,因此需要对其进行精确检测,并通过优化工艺参数与刀具结构等手段,抑制分层、毛刺等缺陷的发生,为航空复合材料构件的高精度加工与可靠性保障提供关键技术支撑。

CFRP制孔过程中,钻削产生的拉/剪切应力超过材料层间强度时将引发分层缺陷<sup>[17]</sup>,根据缺陷位置差异可分为入口剥离分层与出口推出分层<sup>[18]</sup>:剥离分层会导致孔周区域的压缩强度下降,显著削弱结构承载能力;推出分层则会在装配过程中因应力集中加速裂纹扩展,使疲劳寿命降低,影响航空构件服役性能<sup>[19]</sup>。由于分层通常出现在材料内部,需采用声发射检测和X射线CT成像等无损检测方法进行检查。毛刺缺陷是在CFRP制孔中因材料去除不充分而导致的一类损伤,多集中于制孔出口顺纤维方向<sup>[20]</sup>,其不规则形态会降低装配表面质量,引发紧固件应力集中并加速疲劳失效,威胁航空安全,可结合高分辨率光学检测与智能图像识别对其精准检测<sup>[21]</sup>。撕裂是在CFRP制孔加工过程中发生纤维剥离或基体开裂而产生的一类缺陷,CFRP在逆纤维方向上刀具和材料间的相互作用力更大,撕裂现象明显<sup>[22]</sup>。该缺陷易引发孔周微裂纹扩展,导致局部应力集中与疲劳寿命衰减,严重威

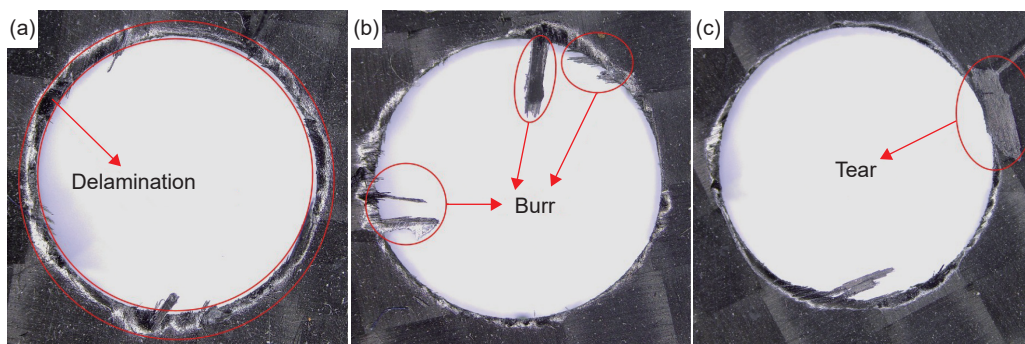


图1 CFRP制孔缺陷示意图 (a)分层;(b)毛刺;(c)撕裂

Fig. 1 Example diagram of CFRP hole-making defect (a) delamination; (b) burr; (c) tear

胁航空构件服役可靠性与经济性<sup>[23]</sup>,可通过基于长度或面积的方法来评价撕裂严重程度<sup>[24]</sup>。

除分层、毛刺及撕裂等典型缺陷外,CFRP 制孔过程中还会引发孔壁损伤、热损伤以及尺寸/几何误差等缺陷。孔壁损伤包括纤维拔出、表面凹坑、树脂涂覆等,会导致装配接触应力分布不均,显著降低航空结构疲劳寿命<sup>[25]</sup>;热损伤则因基体与纤维热膨胀系数差异,引发微裂纹扩展,加速材料性能退化<sup>[26]</sup>;尺寸误差与几何误差会影响航空构件的装配精度与服役稳定性<sup>[27]</sup>。

## 2 CFRP 制孔缺陷的无损检测技术

无损检测是一种基于光、声、电磁等物理场作用,结合现代科学技术对材料表面及内部缺陷进行检测的技术,该技术可在不损伤材料结构完整性和服役性能的前提下有效识别缺陷信息<sup>[28]</sup>,目前已形成声发射、超声检测、红外热成像等针对 CFRP 制孔缺陷的成熟检测技术。

### 2.1 声发射检测技术

声发射检测原理如图 2 所示,材料受应力或变形时释放弹性应力波,经声发射传感器转换为电信号后,通过波形分析实现对缺陷的实时定位与表征。该技术能够突破复合材料破坏机制的复杂性,通过捕捉不同损伤类型对应的显著差异化声发射信号,实现对复合材料多种失效模式的有效区分<sup>[29]</sup>。近年来,模态声发射分析与多源信息融合等技术成为声发射检测技术突破的关键方向:前者通过解析兰姆波模态的频散特性及全波形特征,实现不同传播模式应力波的解耦,将缺陷定位精度提升至亚毫米级;后者通过声发射、振动和切削力等多传感器数据协同,构建跨物理场关联模型,以此降低制孔

缺陷的误判率<sup>[30]</sup>。Liu 等<sup>[31]</sup>针对不同铺层顺序和中心孔径的 CFRP 层合板开展声发射实验,揭示 CFRP 层合板中基体开裂、脱粘、分层及纤维断裂对应的应力波幅值分别为 40~60 dB、50~70 dB、60~80 dB 和 80~100 dB。Barile 等<sup>[32]</sup>采用声发射检测碳纤维增强塑料层压板缺陷,通过增强型 K 均值算法对声发射的振幅、计数、持续时间等进行处理,得到复合材料缺陷类型信息。

在航空工程实践中,美国通过声发射系统实现 C-130 运输机机身、F-15 战斗机主梁螺栓孔微裂纹的高精度监测;俄罗斯建立声发射监测网络,成功识别飞机翼梁断裂、蒙皮分层等 85% 以上典型损伤;北京航空工程技术研究中心在三代机全机实验中通过声发射技术捕获主梁螺孔疲劳裂纹等隐蔽缺陷<sup>[33]</sup>。然而,声发射检测技术依赖人工经验判读,自动化程度不足,仅适用于动态承载工况检测场合,通过数字孪生与边缘计算深度融合,可实现航空结构健康监测从静态抽检到全使用周期实时预警的突破,为飞行安全提供动态数据支撑。

### 2.2 超声检测技术

超声检测 CFRP 制孔缺陷原理如图 3 所示,超声波在材料内部产生弹性波,当弹性波遇到制孔缺陷时会产生回波,通过对回波信号进行分析可获得缺陷位置、类型等信息。该技术具有穿透能力强、灵敏度高优点,可用于对 CFRP 孔隙、分层等缺陷进行检测<sup>[34-35]</sup>。随着科学技术的发展,超声检测技术出现如空气耦合超声检测、相控阵超声检测、激光超声检测等先进技术。其中,空气耦合超声检测以空气为介质实现非接触式检测,避免耦合剂污染,但其受限于空气与材料间的高声阻抗差异,信号衰减显著,对微小缺陷灵敏度不足<sup>[36]</sup>;相控阵超声检测通过电子聚焦阵列探头动态调控声束角度

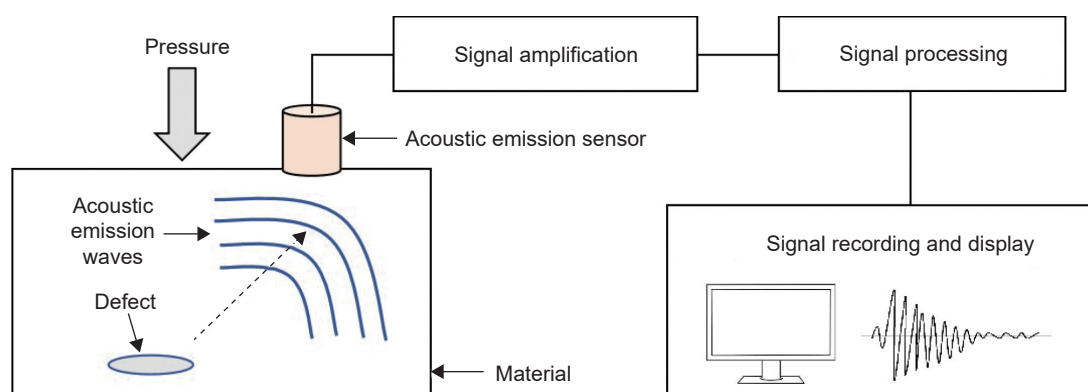


图 2 声发射检测原理

Fig. 2 Principle of acoustic emission detection

与焦点深度,具备高分辨率三维成像能力,但设备成本高且依赖专业操作<sup>[37]</sup>;激光超声检测利用激光脉冲激发声波,可达纳米级检测精度,但对表面粗糙度敏感<sup>[38]</sup>。Long等<sup>[39]</sup>采用空气耦合激光超声法对非均匀金属/CFRP界面内部缺陷进行大视场检测,通过仿真验证其在Al/CFRP复合材料中的传

播特性,并与相控阵超声和射线检测方法进行对比,证明空气耦合激光超声法在非接触式大视场检测中具有显著优势。方周倩等<sup>[40]</sup>基于超声C扫描技术分析CFRP缺陷成像特征,量化孔洞/分层尺寸与图像对比度的相关性,并揭示孔边缘干扰下缺陷成像位置偏差 $< 0.3\text{ mm}$ 。

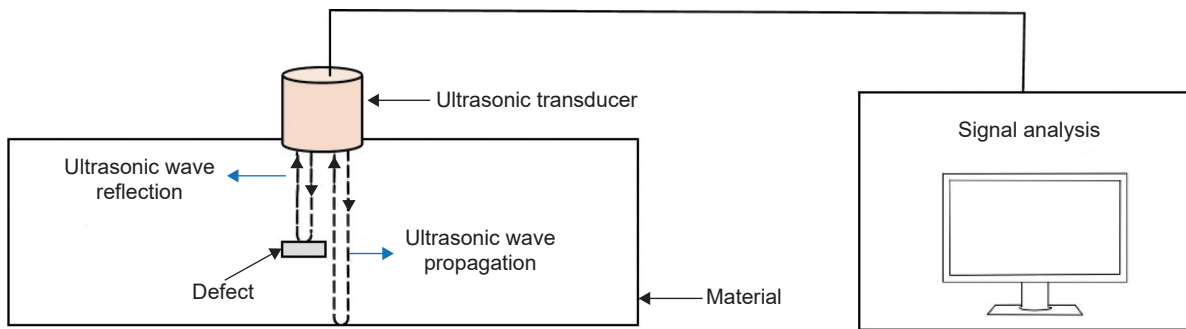


图3 超声检测原理

Fig. 3 Principle of ultrasonic detection

超声检测技术凭借高灵敏度与标准化体系,已成为航空复合材料构件缺陷检测的主要手段,波音777X复合材料翼梁采用相控阵超声自动流水线系统实现孔周分层与纤维断裂的精准量化,德国EADS联合加拿大奥林巴斯利用相控阵超声检测技术评估老龄飞机CFRP结构损伤<sup>[41]</sup>。然而,该检测技术面临对操作者经验依赖度高、材料各向异性导致的信噪比低等问题,可通过深度学习算法实现缺陷自动分类,驱动航空复合材料构件的超声检测技术向智能化升级。

### 2.3 红外热成像检测技术

红外热成像检测分为主动式和被动式:主动式利用外部热源制造缺陷与正常区域的热传导差异,通过捕捉动态温差实现检测<sup>[42]</sup>;被动式直接捕捉物体自身热辐射,无需外部热源。对于CFRP制孔缺陷,通常采用主动红外热成像技术,通过可控热源对物体表面施加热能,利用内部缺陷导致的热传导差异形成表面温度异常,经红外探测器捕捉并转换为热图像后,通过分析温度场分布及动态变化规律即可实现缺陷检测,如图4所示。其核心方法包括:脉冲热成像技术,利用毫秒级高能闪光灯对材料表面进行瞬时加热,并通过红外相机记录材料在冷却过程中温度场分布的差异,该方法检测速率高,但易漏检<sup>[43]</sup>;锁相热成像,以调制激光或卤素灯进行周期性热激励,通过锁相放大提取特定频率的热响应信号,可识别亚表面级缺陷,但检测耗时较长<sup>[44]</sup>。Luo等<sup>[45]</sup>采用瞬态锁相热成像技术检测

CFRP次表面缺陷,通过对含人工平底孔的CFRP试件测试,证明该技术可有效消除加热不均匀影响,是一种快速、稳健的CFRP次表面缺陷无损检测方法。Zhou等<sup>[46]</sup>采用线激光红外热成像技术检测CFRP夹层分层缺陷,通过温度矩阵差分成像方法结合主成分分析算法实现缺陷形状的有效表征。

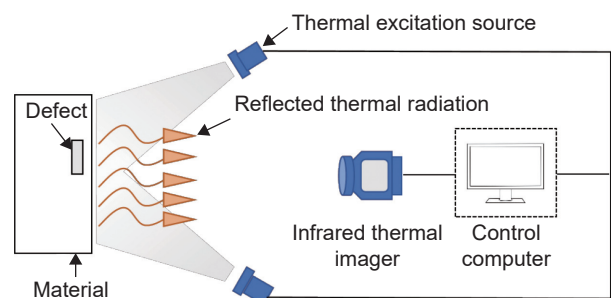


图4 主动红外热成像检测原理

Fig. 4 Principle of active infrared thermal imaging detection

在航空领域,美国TWI公司开发的便携式红外热成像系统获多家航空公司认可,其典型应用包括波音747机身剥落检测及EC飞机螺旋桨裂纹检测等,通过热激发与红外成像技术实现非接触式快速扫描,可精准识别亚表面缺陷<sup>[47]</sup>。然而,红外热成像检测技术在航空复合材料检测中由于缺陷热响应弱易导致图像对比度低、检测精度受限等问题<sup>[48]</sup>,未来技术发展将聚焦多模态传感融合与自适应热激励技术的发展,提高其在航空复合材料分层、脱粘缺陷等检测领域的优势。

## 2.4 X射线CT成像检测技术

X射线CT成像检测CFRP制孔缺陷,基于材料中缺陷、基体、纤维等线性吸收系数差异较大,通过计算机技术获得具有不同灰度级别的X射线3D扫描图像,实现对缺陷信息的观察与检测<sup>[49]</sup>。该技术通过微米级分辨率与三维重构能力,实现航空复合材料构件内部孔隙率及缺陷的高精度量化检测,当前该技术聚焦于深度学习算法优化CT图像重建,以及结合多模态检测技术,在线捕捉CFRP制孔过程中亚表面裂纹的萌生与扩展行为等<sup>[50]</sup>。Pejryd等<sup>[51]</sup>通过X射线CT扫描技术来评估CFRP复合材料制孔的表面和内部裂纹、分层缺陷,利用滤波后的反投影算法从X射线投影中重建三维体积图像并对图像进行分析检测,从而提高CFRP孔缺陷检测精度。Penumadu等<sup>[52]</sup>利用X射线CT成像检测技术来评估弹丸对复合材料造成的冲击损伤,通过对获得的CT数据进行分析,得到分层间距、孔隙尺寸分布、纤维拔出和断裂特征等缺陷信息。

X射线CT成像检测技术在航空领域形成覆盖低能、中能、高能的全谱系检测能力,以美国ARACOR公司为代表,其低能CT系统用于检测固体火箭发动机和核武器的相关零部件,中能系统适配大型洲际导弹发动机全尺寸检测,高能系统则服务于飞行器结构与火箭涡轮叶片缺陷解析等方面<sup>[53]</sup>。然而,该技术在航空检测中仍存在局限:X射线辐射需严格管控,限制移动检测场景应用,大型复合材料构件扫描效率低、视野范围有限等<sup>[54]</sup>。随着高帧率探测器的发展,未来可突破大型复合材料构件原位扫描效率限制,实现机翼、机身等大尺寸部件的快速三维缺陷重构,推动航空检测设备从实验室固定式向车间移动式延伸。

## 3 CFRP制孔缺陷的机器视觉检测技术

近年来,信息技术的迅速发展促进了人工智能在各个领域的广泛应用,机器视觉作为人工智能的重要分支,在缺陷检测领域发挥重要作用<sup>[55]</sup>。机器视觉检测技术主要通过成像、信息处理和执行单元对目标进行检测。航空复合材料缺陷检测技术基于算法架构差异可分为传统机器视觉检测与深度学习检测两大类。二者均通过高精度图像识别与自动化分析,有效克服人工检测效率低、一致性差等问题,显著提升检测精度与智能化水平。

## 3.1 基于传统机器视觉的CFRP制孔缺陷检测

传统机器视觉检测技术依赖图像处理和计算机算法完成缺陷检测,主要包括图像预处理、分割、特征提取等方法<sup>[56]</sup>。在CFRP制孔缺陷检测中,图像预处理可通过中值滤波与高斯滤波实现图像去噪,结合直方图均衡化增强孔壁与背景的灰度对比度,并通过拉普拉斯算子或Canny边缘检测锐化加工损伤轮廓,为后续分析提供高清晰度图像<sup>[57-58]</sup>。图像分割阶段则根据灰度、边缘或纹理特征分离缺陷与背景,主流图像分割法包括阈值分割法(快速提取孔位偏差等高对比缺陷,如分层、孔隙)、边缘分割法(精准定位毛刺、裂纹等轮廓损伤)、区域分割法(基于纹理相似性识别分层或撕裂等弥散性缺陷)等<sup>[59-60]</sup>。特征提取阶段通过量化缺陷的几何、纹理及频域特性支撑分类决策,几何特征分析缺陷面积、周长等参数的特性,可用于区分规则与不规则缺陷;纹理特征通过分析缺陷区域的像素分布规律反映其表面特性,能有效地提取纤维断裂、分层等缺陷的纹理模式;频域特征则通过傅里叶变换、小波变换等将图像从空间域转换至频域,从而揭示缺陷的周期性纹理<sup>[61-62]</sup>。Ahmed等<sup>[63]</sup>提出一种基于小波积分交替稀疏字典矩阵分解的无监督机器学习方法,用于识别CFRP复合材料深层缺陷。该方法可显著去除高频噪声并提高计算速度,进而提升不规则表面复合材料深层缺陷的分辨率。梁思羽等<sup>[64]</sup>提出基于极坐标映射的图像处理方法以提升CFRP制孔毛刺识别评价便利性,同时建立基于伪频谱的成孔轮廓参数化评价方法,通过自然坐标系下轮廓曲线切向量方向角函数伪频谱量化毛刺。Zhang等<sup>[65]</sup>提出一种综合评价钻孔质量的机器学习模型,通过开发统一标准评估撕裂、毛刺和分层等缺陷因子,结合三维表面粗糙度量化与准静态拉伸/循环载荷力学性能测试,经参数优化后实现多缺陷条件下疲劳寿命预测及敏感性分析,为复合材料钻孔工艺优化提供可靠方法。

传统机器视觉检测技术通过图像识别显著提升CFRP制孔缺陷检测效率与精度,被广泛应用于航空复合材料缺陷检测领域。例如,空客公司开发的无人机检测系统搭载激光雷达与多光谱相机,通过自主导航对机身进行全覆盖扫描,实时对比数字孪生模型识别微米级表面损伤。中国飞机强度研究所针对C919全机结构周期性检测需求,研发5G离朱巡检系统。该系统通过轨道与机械臂协同移动,搭载超高分辨率相机采集图像,结合特征提取算法实现0.2 mm以上损伤的检出与定量测量,

并依托 5G 技术实现全舱百余个重点部位的 24 h 不间断云端巡检<sup>[66]</sup>。基于传统机器视觉的 CFRP 制孔缺陷检测技术虽在检测效率、定位精度方面具有优势,但在实际应用中存在检测精度受环境因素影响、对于复杂或微小的缺陷检测效果不佳等缺点。

### 3.2 基于深度学习的 CFRP 制孔缺陷检测

基于深度学习的 CFRP 制孔缺陷检测技术通常利用具有图像特征提取和分类识别功能的网络模型对数据集进行大量训练,并通过不断优化网络模型提高缺陷检测精度与效率<sup>[67]</sup>。该方法凭借自适应特征提取、强抗干扰能力以及高效自动化识别等优势,克服传统机器视觉因材料各向异性、微米级缺陷特征微弱等导致的误检与漏检问题<sup>[68]</sup>。目前 CFRP 制孔缺陷检测主要基于监督学习方法,通过训练大量标注样本构建检测模型,利用分类、检测和分割网络三大模型实现缺陷自动化检测<sup>[69]</sup>。其中,分类网络通过构建多层次非线性映射模型对缺陷特征进行分类,主要模型包括 AlexNet、GoogLeNet 和 ResNet 等<sup>[70]</sup>。检测网络可以对缺陷进行综合识别和定位,分为双阶段检测模型(如 R-CNN、Faster R-CNN)与单阶段检测模型(如 YOLO、SSD)<sup>[71]</sup>:前者通过生成候选区域与精细化分类两步实现高精度检测,具有自学能力强、自适应性能好等优点,但检测速度较慢;后者可直接在特征图上预测缺陷位置与类别,检测速度快<sup>[72]</sup>。分割网络可分为语义分割(如 FCN、U-Net 等)与实例分割(如 Mask-RCNN、SOLO)两类,语义分割把不同种类像素区域分开后判定每一区域的类别,实例分割是在语义分割基础上进一步解耦同类目标的个体实例<sup>[73-74]</sup>。

在研究应用中, Fotouhi 等<sup>[75]</sup> 构建包含微尺度(基体开裂、纤维断裂)与宏观尺度(冲击、侵蚀)损伤的 CFRP 图像数据集,通过预训练 AlexNet 框架,并引入通道注意力机制强化损伤特征选择能力,使微、宏观损伤分类准确率达 91.3% 与 93.5%。Wen 等<sup>[76]</sup> 针对 CFRP 涡流检测中裂纹、分层和低速冲击损伤的多目标识别难题,开发 EDC-YOLO 模型实现飞机复合材料紧固孔缺陷的准确分类与识别。Cheng 等<sup>[77]</sup> 提出基于深度学习的信号自动分类方法以深度估计 CFRP 低速冲击检测结果,通过长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)、卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和 CNN-LSTM 三种神经网络分析并识别不同冲击损伤深度信息,结果表明 CNN-LSTM 模型识别结果更准确。Li 等<sup>[78]</sup> 针对纹理复杂的复合材料表面,提出改进型纹理分割算法:融合局部二值模式

特征提取与半监督标签生成,结合 U-Net 模型实现机器人制孔场景下多纹理孔洞的自动化检测,孔位圆度误差  $\leq 0.03$  mm,满足航空孔位检测标准。Saeed 等<sup>[79]</sup> 提出一种基于卷积神经网络和迁移学习的 CFRP 热像图缺陷检测方法,设计一种用于热成像缺陷检测和深度估计的两步、完全自主的后处理器。该后处理器通过 CNN 编码自动检测热像图缺陷,并结合深度前馈神经网络算法估计缺陷深度,从而实现对热成像图中缺陷的实时检测与量化。在航空复合材料缺陷检测领域,深度学习技术已展现出显著潜力,如通过改进的语义分割网络实现蒙皮微米级孔隙检测、目标检测算法精准定位多目标航空构件缺陷等,但其检测可靠性高度依赖训练数据集的质量与规模。未来需突破多模态融合、小样本学习及构建标准缺陷数据库与多学科协作平台,推动航空复合材料构件检测技术向高可靠、低成本方向发展。

## 4 多源检测技术的对比与智能融合应用

### 4.1 各检测技术的性能对比分析

在 CFRP 制孔缺陷检测领域,无损检测、传统机器视觉检测及深度学习检测技术各具优缺点,如图 5 所示。NDT 基于多物理场耦合机理,可精准定位内部缺陷的几何特征,但因信号解析过程具有主观性,检测精度、效率低,难以满足航空构件的高批量检测需求;传统机器视觉通过轻量化算法架构实现高效检测,但其难以应对 CFRP 各向异性导致的复杂纹理干扰,对分层、纤维断裂等内部缺陷的识别精度不足;深度学习技术通过端到端建模自动提取缺陷特征,在复杂背景下表现出优异的鲁棒性,然而其模型训练对数据集质量与数量要求高。从工业化适配性维度分析,三类技术呈现“效率、精度、成本”的不可调和性,这表明,单一检测技术难以满足航空复合材料检测领域严苛的要求,需要多源检测技术融合。

### 4.2 多源检测技术融合的 CFRP 制孔缺陷智能检测体系

#### 4.2.1 多源检测技术融合的 CFRP 制孔缺陷智能检测框架

针对 CFRP 制孔缺陷检测技术的瓶颈,当前研究提出将多检测技术进行融合得到数据采集、特征提取、智能分析于一体的智能检测技术:首先基于 NDT 实现 CFRP 制孔缺陷的多模态数据采集,充分分析各检测技术的特点,综合运用视觉成像、超声

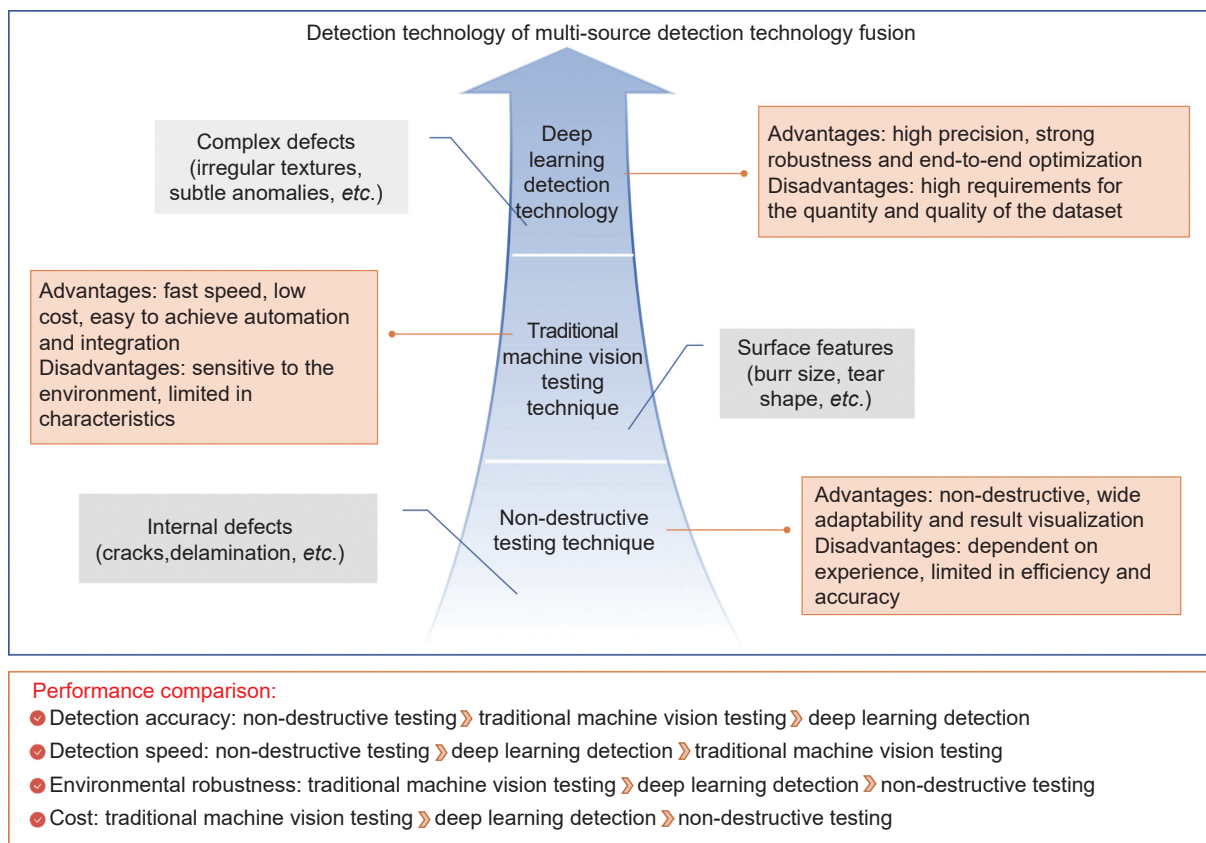


图 5 三大检测技术综合评价图

Fig. 5 Comprehensive evaluation diagram of three detection technologies

信号和红外热成像等多种传感器对缺陷进行全面采集。形成涵盖几何形貌、纹理特征、内部损伤及微观结构的高质量多模态数据集,为后续智能分析提供可靠的数据基础;由于无损检测依赖人工判读,导致检测效率与精度低,因此需引入传统机器视觉进行自动化缺陷初筛与特征量化,通过算法高效提取几何形貌与纹理细节等缺陷信息。然而,传统机器视觉在 CFRP 制孔缺陷检测中存在特征提取能力不足的问题,需立足实际应用环境与检测对象特点,通过多尺度纹理分析增强纹理特征提取能力、结合自适应阈值分割减少光照干扰、采用亚像素级边缘检测提高轮廓精度等方法,提高缺陷初筛与特征量化能力;经过上两步可获得用于深度学习检测训练的高质高量数据集,最终通过深度学习检测技术对数据集进行训练与学习,该技术凭借其强大的非线性特征提取能力,自动挖掘传统技术难以捕捉的深层次特征,弥补传统机器视觉检测技术对 CFRP 复杂缺陷形态特征提取能力不足的问题,从而实现对 CFRP 制孔缺陷的准确、高效识别与检测。图 6 为多源检测技术融合的智能检测技术协调价值图,这种多源信息融合的智能检测技术通过多技术协同与信息互补,突破单一检测技术的瓶

颈,满足航空复合材料制造的高精度、高效率、智能化检测需求,为工艺优化与质量控制提供可靠数据支撑<sup>[80]</sup>。

#### 4.2.2 多源检测技术融合的 CFRP 制孔缺陷智能检测应用

多源检测技术融合在 CFRP 制孔缺陷智能检测中的应用,是提升航空复合材料构件制造质量与可靠性的关键突破。通过多技术协同检测,同步捕获材料内部物理场特征与表面信息,实现分层、毛刺、孔隙等全维度缺陷的精准定位与智能分类,满足航空领域对缺陷检测的严苛需求,推动航空航天制造向高效化、自动化、智能化方向升级。

吴昊等<sup>[81]</sup>针对复合材料螺栓连接处易产生裂纹与分层损伤且实际工程中螺栓常处于预紧不可拆卸状态的技术难点,创新性地采用超声红外热波检测法,结合 MATLAB 平台的自适应热图对比度增强算法与  $K$  均值聚类图像分割算法,通过数值模拟揭示复合材料螺栓孔裂纹与分层损伤的热生成特性,在预紧力条件下实现损伤区域的精准提取,检测效率较传统方法提升 5 倍。Maghami 等<sup>[82]</sup>开发了基于多光谱成像与 U-Net 架构的深度全卷积神经网络,通过自动化端效应器采集孔周多光谱图

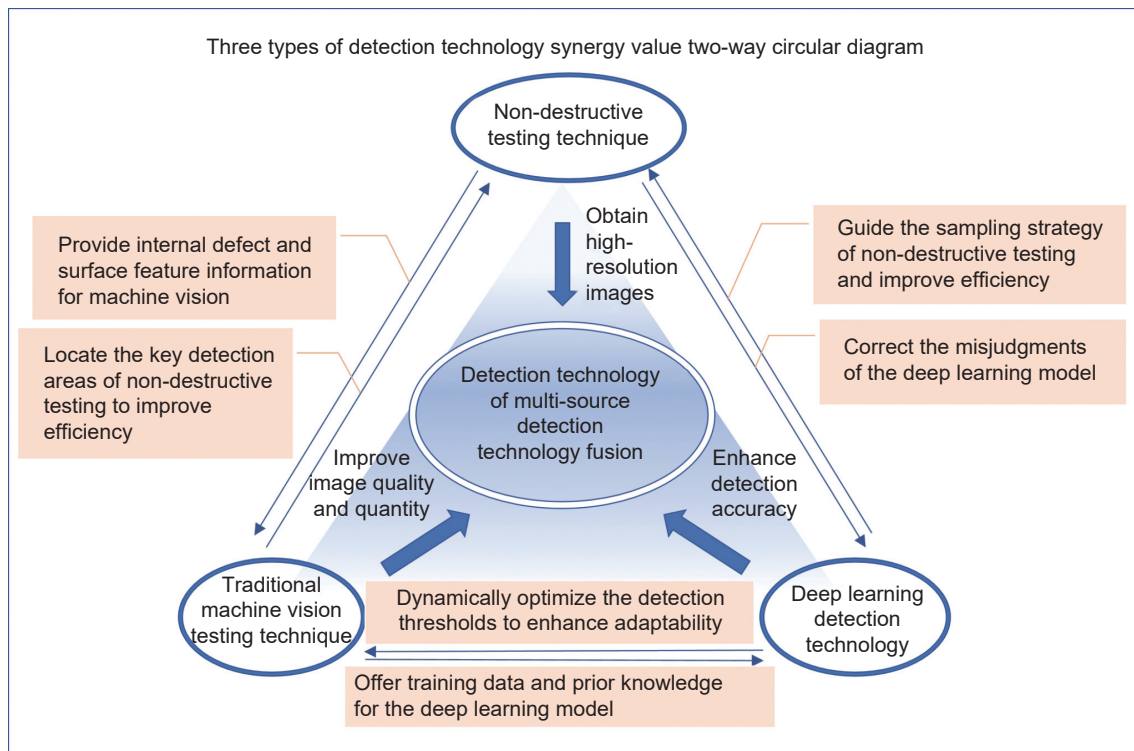


图 6 多源检测技术融合的智能检测技术协调价值图

Fig. 6 Intelligent detection technology coordination value diagram for multi-source detection technology integration

像,采用改进型图像融合算法构建复合特征图,最终实现孔轮廓、损伤区域及裂纹线的像素级语义分割,模型输出与金相检测结果的空间一致性达 94.6%。Hu 等<sup>[83]</sup> 聚焦超声检测智能化,构建包含 12 类缺陷的复合材料超声 A 扫描信号数据库,设计基于一维卷积神经网络的分类模型,通过数据增强使模型检测精度达到 92.7%,满足对复合材料内部缺陷自动判读的要求。Li 等<sup>[84]</sup> 提出了一种基于深度学习与红外检测的复合材料损伤智能识别方法,通过红外热成像技术捕获材料表面及近表面的热响应特征,设计 1D-YOLOv4 网络,实现红外图像和红外信号的智能融合检测,该方法在碳纤维复合材料样本中实现 98.3% 的损伤识别准确率,为航空航天复合材料构件的高效、非接触式在线检测提供可靠解决方案。Gong 等<sup>[85]</sup> 使用 X 射线无损检测收集一批航空复合材料的图像样本作为目标域,然后构建和训练深度迁移学习神经网络,以获得准确高效的缺陷识别模型,实验表明该模型检测精度值为 96.7%,显著降低对标注数据量的依赖,可快速适配不同工艺批次航空复合材料的在线检测需求。

## 5 结束语

CFRP 在航空航天领域的广泛应用使其制孔缺

陷检测成为关键课题。本文聚焦 CFRP 制孔缺陷检测技术的智能化发展:从缺陷类型与特征入手,系统梳理 NDT 原理,探讨传统机器视觉与深度学习方法的研究进展,并通过应用实例说明多模态融合检测技术可提高检测效率、精度与智能化程度。但 CFRP 制孔缺陷的检测仍然面临诸多挑战,如材料的各向异性影响检测精度、缺乏评估缺陷严重程度标准化指标、深度学习检测中存在小样本问题、航天构件检测的自动化和智能化水平仍待提高等。因此,提出推进 CFRP 制孔缺陷检测技术的展望。

### (1) 针对 CFRP 各向异性的多模态检测技术研究

CFRP 的各向异性导致其在不同方向上的密度、弹性模量和导波特性存在显著差异,增加制孔缺陷检测的复杂性。因此,亟须开发适应 CFRP 特性的高鲁棒性检测算法,并结合多模态信息融合技术,提升检测的精度、效率和稳定性,以满足航空复合材料构件检测标准。

### (2) 缺陷严重程度评估标准化建设

当前 CFRP 制孔缺陷严重程度评估缺乏统一标准,尤其在毛刺缺陷量化中,一些研究通过测量缺陷面积进行严重性评估,另一些则采用计算比例因子进行评估,亟须建立统一的评估体系,以提升检测结果的可比性与工程指导价值。

### (3) 基于深度学习的 CFRP 制孔缺陷检测优化

在航空复合材料检测领域中, 基于深度学习的 CFRP 制孔缺陷检测面临小样本和算法性能不足等问题, 可引入迁移学习和生成对抗网络扩充训练样本数量, 提升模型的泛化能力。同时, 优化算法设计, 采用多尺度特征融合、注意力机制和更适配的损失函数以改善检测效果。

### (4) 航空复合材料制孔缺陷智能监测技术开发

当前 CFRP 制孔缺陷检测主要对加工后的缺陷进行静态评估, 难以满足航空制造实时工艺反馈与动态优化的需求。未来需聚焦制孔缺陷动态形成机制, 构建工艺参数、缺陷特征与检测结果的关联模型, 结合多源信息融合技术实现制孔缺陷的在线智能监测。推动检测系统与自动化产线融合, 开发“制孔、检测、反馈、优化”闭环控制方案, 为航空复合材料构件的高效制造与安全运行提供核心支撑。

### 参考文献:

- [1] 宋晨曦, 林海涛, 赖恩平, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. *纺织科学与工程学报*, 2023, 40(4): 86-93.  
SONG C X, LIN H T, LAI E P, et al. Research progress of the forming process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2023, 40(4): 86-93.
- [2] RAJAK D K, PAGAR D D, MENEZES P L, et al. Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications[J]. *Polymers*, 2019, 11(10): 1667.
- [3] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. *Composites Part B*, 2023, 250: 110463.
- [4] AAMIR M, TOLOUEI-RAD M, GIASIN K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5/6): 2289-2308.
- [5] CHEN Z G, DING F, ZHANG Z C, et al. A review on machining SiC<sub>p</sub>/Al composite materials[J]. *Micromachines*, 2024, 15(1): 107.
- [6] LIU W T, QIN X D, LI S P, et al. Experimental research on the matrix cracks and delamination distribution and their monitoring methods during drilling UD-CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(3/4): 1595-1615.
- [7] 魏莹莹. 碳纤维增强复合材料孔加工缺陷产生机理、评价与工艺优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.  
WEI Y Y. The drilling defects mechanism, evaluation method and process optimization on carbon fiber reinforced polymer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [8] PERUŇ G. Advances in non-destructive testing methods [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2024, 17(3): 554.
- [9] 张薇, 苑改红, 周天一, 等. 基于机器学习的航天装备金属表面缺陷检测方法综述[J]. *航天电子对抗*, 2025, 41(3): 43-50.  
ZHANG W, YUAN G H, ZHOU T Y, et al. Review of machine learning-based methods for detecting surface defects in aerospace equipment metals[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2025, 41(3): 43-50.
- [10] TOWSYFYAN H, BIGURI A, BOARDMAN R, et al. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(3): 771-791.
- [11] REN Z H, FANG F Z, YAN N, et al. State of the art in defect detection based on machine vision[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(2): 661-691.
- [12] MA Y X, YIN J X, HUANG F, et al. Surface defect inspection of industrial products with object detection deep networks: a systematic review[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, 57(12): 333.
- [13] DONG G P, SUN S W, WANG Z X, et al. Application of machine vision-based NDT technology in ceramic surface defect detection—a review[J]. *Materials Testing*, 2022, 64(2): 202-219.
- [14] ZHENG H, ZHANG W J, LI B W, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: a review[J]. *Composites Part B*, 2022, 233: 109639.
- [15] HOU G Y, LUO B, ZHANG K F, et al. Effects of heat accumulation on the characteristics of hole wall temperature and damages in drilling of UD CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(5/6): 1529-1546.
- [16] 徐锦泐. 碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展[J]. *航空制造技术*, 2022, 62(22): 24-33.  
XU J Y. Research advances in drilling-induced defects of carbon fiber reinforced polymers[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 62(22): 24-33.
- [17] ZHANG D Z, WANG H, BURKS A R, et al. Delamination in rotary ultrasonic machining of CFRP composites: finite element analysis and experimental implementation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(9/10): 3847-3858.

- [18] RAHME P, LANDON Y, LACHAUD F, et al. Delamination-free drilling of thick composite materials[J]. *Composites Part A*, 2015, 72: 148-159.
- [19] 朱萍玉, 李永敬, 孙孝鹏, 等. 纤维增强复合材料制孔分层缺陷检测与评价技术研究进展[J]. *中国测试*, 2018, 44(1): 1-8.  
ZHU P Y, LI Y J, SUN X P, et al. Research progress on detection and evaluation technology of drilling delamination defect for fiber reinforced plastic[J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(1): 1-8.
- [20] SHAHABAZ S M, SHETTY N, SHARMA S, et al. Optimization of drilling parameters on delamination and burr formation in drilling of neat CFRP and hybrid CFRP nano-composites[J]. *Materials Research Express*, 2024, 11(3): 035006.
- [21] HAN S L, LI X D, CUI Z, et al. Detection and characterization of hole processing defects in carbon fiber-reinforced polymer[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2879(1): 012003.
- [22] ZHU W Y, FU H G, LI F, et al. Optimization of CFRP drilling process: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(5/6): 1403-1432.
- [23] DONG Z G, WANG Z J, TIAN J C, et al. Investigation on tearing damage of CFRP circular cell honeycomb in end-face grinding[J]. *Composite Structures*, 2023, 325: 117616.
- [24] 康仁科, 陆冰伟, 陈凯良, 等. 超声振动辅助磨削 CFRP 复合材料薄管撕裂损伤研究[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(3): 524-533.  
KANG R K, LU B W, CHEN K L, et al. Study on tearing of CFRP thin circular tubes machined by ultrasonic vibration assisted grinding[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(3): 524-533.
- [25] LI P N, QIU X Y, LI C P, et al. Hole exit damage and tool wear during the drilling of CFRP with a double-point angle drill[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(5): 2363-2370.
- [26] XIAO J Z, WANG G F, SU H, et al. Study on cutting force and induced thermal damage of carbon fiber reinforced polymer composites using microscopic simulation modeling[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(3): 1626-1636.
- [27] GU G W, PARK M S, SUH J H, et al. A technique for integrated compensation of geometric errors and thermal errors to improve positional accuracy of hole machining in large-size parts[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2024, 25(8): 1541-1555.
- [28] 张辉, 张邹铨, 陈煜嵘, 等. 工业铸件缺陷无损检测技术的应用进展与展望[J]. *自动化学报*, 2022, 48(4): 935-956.  
ZHANG H, ZHANG Z Q, CHEN Y R, et al. Application advance and prospect of nondestructive testing technology for industrial casting defects[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(4): 935-956.
- [29] 刘文婷, 杨建青, 陆燕燕, 等. 应用于复合材料诊断的声发射检测技术综述[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(6): 9-16.  
LIU W T, YANG J Q, LU Y Y, et al. Review of acoustic emission detection techniques applied to composite material diagnosis[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(6): 9-16.
- [30] LIU Y. Research progress of acoustic emission detection technology based on modal theory[J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2021, 21(4): 853-864.
- [31] LIU P F, CHU J K, LIU Y L, et al. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission[J]. *Materials & Design*, 2012, 37: 228-235.
- [32] BARILE C, CASAVOLA C, PAPPALETTERA G, et al. Laplacian score and K-means data clustering for damage characterization of adhesively bonded CFRP composites by means of acoustic emission technique[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 185: 108425.
- [33] 白生宝, 肖迎春, 杨宇, 等. 飞机结构强度试验中的声发射应用进展[J]. *环境技术*, 2021, 39(5): 121-124.  
BAI S B, XIAO Y C, YANG Y, et al. Applicate progress of acoustic emission technology in the aircraft structure test[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(5): 121-124.
- [34] VANDENDRIESSCHE J, ORTA A H, VERBOVEN E, et al. Probabilistic ultrasound C-scan imaging of barely visible impact damage in CFRP laminates[J]. *Composite Structures*, 2022, 284: 115209.
- [35] LI Y M, YAO K, LI X L. An ultrasonic signal reconstruction algorithm of multilayer composites in non-destructive testing[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 186: 108461.
- [36] ZHANG C C, ZHANG Y H, LIU D Z, et al. A novel two-level approach to defect detection in braided CFRP using air-coupled ultrasonic testing[J]. *Ultrasonics*, 2023, 128: 106884.
- [37] MILLS B, JAVADI Y, ABAD F, et al. Inspection of wind turbine bolted connections using the ultrasonic phased array system[J]. *Heliyon*, 2024, 10(14): 34579.
- [38] LIAN Y D, XIE L Y, HAN S W, et al. Advances in post-processing technology for laser ultrasound detection sig-

- nals: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23: 28564-28578.
- [39] LONG B N, CHENG Z W, LIAO W S, et al. Large-field detection of metal/CFRP hybrid composites based on air-coupled laser ultrasound[J]. *Composites Communications*, 2025, 53: 102174.
- [40] 方周倩, 苗沛源, 金肖克, 等. 碳纤维复合材料孔洞损伤超声波 C 扫描无损检测[J]. *纺织学报*, 2022, 43(10): 71-76.
- FANG Z Q, MIAO P Y, JIN X K, et al. Nondestructive testing on damage of carbon fiber composites using ultrasonic C-scanning[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(10): 71-76.
- [41] 詹湘琳, 韩红斌, 周德新. 民用飞机复合材料结构件超声相控阵无损检测技术进展[J]. *航空制造技术*, 2014, 54(15): 124-127.
- ZHAN X L, HAN H B, ZHOU D X. Progress of ultrasonic phased array nondestructive testing technique for civil aviation composite structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 54(15): 124-127.
- [42] CHRYSAFI A P, ATHANASOPOULOS N, SIAKAVELLAS N J. Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 116: 242-253.
- [43] QU Z, JIANG P, ZHANG W X. Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques[J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 3851.
- [44] CIAMPA F, MAHMOODI P, PINTO F, et al. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 609-609.
- [45] LUO Z T, WANG H, HUANG Y D, et al. Nondestructive detection of CFRP subsurface defects using transient lock-in thermography[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, 150(11): 8229-8239.
- [46] ZHOU G Y, ZHANG Z J, YIN W L, et al. Characterization and depth detection of internal delamination defects in CFRP based on line laser scanning infrared thermography[J]. *Structural Health Monitoring*, 2024, 23(5): 3195-3210.
- [47] 林伟谦. 浅谈红外热成像技术在航空无损检测中的应用[J]. *科技信息*, 2012, 24: 258-259.
- LIN W Q. Application of infrared thermal imaging technology in aviation nondestructive testing[J]. *Science & Technology Information*, 2012, 24: 258-259.
- [48] LIU S N, SONG K C, YANG X M, et al. EHSGNet: a novel edge and high-level semantic guided network for CFRP subsurface defects detection[J]. *Measurement*, 2024, 237: 115210.
- [49] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X 射线检测技术在复合材料检测中的应用与发展[J]. *无损检测*, 2016, 38(2): 67-72.
- DONG F X, WANG C K, FAN L M, et al. The application and development of detection of composite materials by X-ray nondestructive testing techniques[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(2): 67-72.
- [50] KATUNIN A, DAŃCZAK M, KOSTKA P. Automated identification and classification of internal defects in composite structures using computed tomography and 3D wavelet analysis[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, 15(2): 436-448.
- [51] PEJRYD L, BENO T, CARMIGNATO S. Computed tomography as a tool for examining surface integrity in drilled holes in CFRP composites[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 43-48.
- [52] PENUMADU D, KIM F, BUNN J. Damage of composite materials subjected to projectile penetration using high resolution X-ray micro computed tomography[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(4): 607-616.
- [53] 罗美依. Eshihou 美国 X 射线工业 CT 的发展及应用[C]//2004 年全国射线检测新技术研讨会论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2005: 112-117.
- LUO M N. Eshihou development and application of X-ray industrial CT in the United States[C]// Proceedings of the National Conference on New Technologies for Radiographic Testing. Beijing: China Mechanical Engineering Society, 2005: 112-117.
- [54] 林心园. 基于 X 射线图像的树脂基复材工件缺陷检测技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2022.
- LIN X Y. Research on defect detection technology based on X-ray images for resin-based composite workpiece[D]. Jinan: University of Jinan, 2022.
- [55] HE Z Q, LIU Q F. Deep regression neural network for industrial surface defect detection[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 35583-35591.
- [56] 张涛, 刘玉婷, 杨亚宁, 等. 基于机器视觉的表面缺陷检测研究综述[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(35): 14366-14376.
- ZHANG T, LIU Y T, YANG Y N, et al. Review of surface defect detection based on machine vision[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(35): 14366-14376.
- [57] THAKUR R S, CHATTERJEE S, YADAV R N, et al. Image de-noising with machine learning: a review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 93338-93363.
- [58] 王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 438-448.

- WANG H, ZHANG Y, SHEN H H, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448.
- [59] QI J, YANG H T. Research on image segmentation and edge detection technology based on computer vision[J]. *Journal of Physics*, 2021, 1994(1): 012035.
- [60] GIACOMINI M, PEROTTO S. Anisotropic mesh adaptation for region-based segmentation accounting for image spatial information[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2022, 11: 1-17.
- [61] MUTLAG W K, ALI S K, AYDAM Z M, et al. Feature extraction methods: a review[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1591(1): 012028.
- [62] DHONGADE M. Survey on texture classification methods[J]. *International Journal of Computer Science Trends and Technology*, 2015, 3(5): 185-188.
- [63] AHMED J, GAO B, WOO W L. Wavelet-integrated alternating sparse dictionary matrix decomposition in thermal imaging CFRP defect detection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(7): 4033-4043.
- [64] 梁思羽, 刘广军, 陈涛, 等. 基于极坐标映射的 CFRP 制孔毛刺形态学特征与评价指标[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(7): 167-180.
- LIANG S Y, LIU G J, CHEN T, et al. Morphological characteristics and evaluation indicators of CFRP drilling burrs based on polar coordinate mapping[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(7): 167-180.
- [65] ZHANG S G, WANG W H, ZHANG T R, et al. Evaluation of hole quality in drilling CF/BMI composite *via* machine learning: multi-defects analysis and fatigue life prediction[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 212: 113189.
- [66] 张伟, 王梦迪, 樊俊铃, 等. 机器视觉在飞机结构损伤检测中的应用进展与展望[J]. *无损检测*, 2021, 43(10): 75-80.
- ZHANG W, WANG M D, FAN J L, et al. Progress and prospect of the application of machine vision in aircraft structural damage detection[J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(10): 75-80.
- [67] SABERIRONAGHI A, REN J, EL-GINDY M, et al. Defect detection methods for industrial products using deep learning techniques: a review[J]. *Algorithms*, 2023, 16(2): 95.
- [68] CHUM L, SUBRAMANIAN A, BALASUBRAMANIAN V N, et al. Beyond supervised learning: a computer vision perspective[J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2019, 99(2): 177-199.
- [69] LU Y, ZHANG C S, DONG X J. A survey of real-time surface defect inspection methods based on deep learning[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(10): 12131-12170.
- [70] SINGH V, BARAL A, KUMAR R, et al. A hybrid deep learning model for enhanced structural damage detection: integrating ResNet50, GoogLeNet, and attention mechanisms[J]. *Sensors*, 2024, 24(22): 7249-7249.
- [71] 张阳婷, 黄德启, 王东伟, 等. 基于深度学习的目标检测算法研究与应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(18): 1-13.
- ZHANG Y T, HUANG D Q, WANG D W, et al. Review on research and application of deep learning-based target detection algorithms[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(18): 1-13.
- [72] 李炳臻, 姜文志, 顾佼佼, 等. 基于卷积神经网络的目标检测算法综述[J]. *计算机与数字工程*, 2022, 50(5): 1010-1017.
- LI B Z, JIANG W Z, GU J J, et al. Review of target detection algorithms based on deep learning[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2022, 50(5): 1010-1017.
- [73] 赵朗月, 吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1): 198-219.
- ZHAO L Y, WU Y Q. Research progress of surface defect detection methods based on machine vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 198-219.
- [74] WANG X L, ZHANG R F, SHEN C H, et al. SOLO: a simple framework for instance segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(11): 8587-8601.
- [75] FOTOUHI S, PASHMFOROUSH F, BODAGHI M, et al. Autonomous damage recognition in visual inspection of laminated composite structures using deep learning[J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113960.
- [76] WEN R Y, TAO C C, JI H L, et al. Classification, localization and quantization of eddy current detection defects in CFRP based on EDC-YOLO[J]. *Sensors*, 2024, 24(20): 6753.
- [77] CHENG X Y, MA G S, WU Z Y, et al. Automatic defect depth estimation for ultrasonic testing in carbon fiber reinforced composites using deep learning[J]. *NDT & E International*, 2023, 135: 102804.
- [78] LI G H, YANG S, CAO S M, et al. A semi-supervised deep learning approach for circular hole detection on composite parts[J]. *The Visual Computer*, 2021, 37(3): 433-445.
- [79] SAEED N, KING N, SAID Z, et al. Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning[J]. *Infrared Physics*

- &Technology, 2019, 102: 103048.
- [ 80 ] 何友, 刘瑜, 李耀文, 等. 多源信息融合发展及展望[J]. 航空学报, 2025, 46(6): 29-54.  
HE Y, LIU Y, LI Y W, et al. Development and prospects of multisource information fusion[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(6): 29-54.
- [ 81 ] 吴昊, 刘志平, 杜勇, 等. 超声红外热波成像在 CFRP 板螺栓孔损伤检测的研究[J]. 红外技术, 2019, 41(8): 786-794.  
WU H, LIU Z P, DU Y, et al. Study on damage detection of bolt holes in CFRP plate by ultrasonic infrared thermal wave imaging[J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 786-794.
- [ 82 ] MAGHAMI A, SALEHI M, KHOSHDARREGI M. Automated vision-based inspection of drilled CFRP composites using multi-light imaging and deep learning[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 441-453.
- [ 83 ] HU Q C, WEI X L, GUO H Y, et al. Study on intelligent and visualization method of ultrasonic testing of composite materials based on deep learning[J]. Applied Acoustics, 2023, 207: 109363.
- [ 84 ] LI C Z, WEI X L, HE W F, et al. Intelligent recognition of composite material damage based on deep learning and infrared testing[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31739-31753.
- [ 85 ] GONG Y F, SHAO H L, LUO J, et al. A deep transfer learning model for inclusion defect detection of aeronautics composite materials[J]. Composite Structures, 2020, 252: 112681.

---

收稿日期: 2024-04-10; 录用日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52175400)

通讯作者: 伍济钢(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为机器视觉智能感知、智能制造装备、机械系统动力学等, 联系地址: 湖南省湘潭市雨湖区和平街道湖南科技大学(411201), E-mail: [jgwu@hnust.edu.cn](mailto:jgwu@hnust.edu.cn)

( 本文责编: 高 磊 )