

文章编号: 1000-8055(2025)00-20250363-19

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250363

航空发动机复合材料缺陷 CT 检测技术 进展综述

杨富强^{1,3}, 王 乐^{1,3}, 黄魁东^{1,2,3}, 李志翔^{1,3}, 焦 智^{1,3}, 郭龙龙^{1,3}

(1. 西北工业大学 机电学院

航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072;

2. 西北工业大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000;

3. 西北工业大学 硬质合金全国重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 综述了计算机断层(CT)技术在航空发动机复合材料构件缺陷检测中的研究进展。针对复合材料在航空发动机应用中产生的跨尺度、多形态缺陷难以精准检测与评估的瓶颈问题, 重点从缺陷产生的工艺机理、CT 检测的技术原理及智能识别算法的视角展开论述。分析了树脂基、金属基、陶瓷基及碳碳复合材料的典型缺陷, 通过梳理 CT 技术的应用场景, 从 CT 检测典型缺陷特征、结构形态差异切入, 对比了微焦点 CT、同步辐射 CT 等不同技术在不同类型缺陷识别中的有效性及局限性。结果表明: 基于深度学习的智能识别技术是实现跨尺度缺陷精准表征的有效途径, 而多模态融合检测是解决厚壁构件微缺陷检测难题的重要发展方向。综述分类探讨了不同基体复合材料在 CT 检测中的研究方法, 为航空发动机复合材料构件全生命周期智能检测与可靠性评估提供了理论依据和技术支撑。

关 键 词: 树脂基复合材料(PMC); 金属基复合材料(MMC); 陶瓷基复合材料(CMC); 碳碳复合材料(C/C); 计算机断层(CT)无损检测; 跨尺度缺陷

中图分类号: V263.6

文献标志码: A

Review of advances in CT detection technology for defects in aero-engine composite materials

YANG Fuqiang^{1,3}, WANG Le^{1,3}, HUANG Kuidong^{1,2,3}, LI Zhixiang^{1,3},
JIAO Zhi^{1,3}, GUO Longlong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Performance Manufacturing for Aero Engine,

Ministry of Industry and Information Technology, School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Ningbo Institute, Northwestern Polytechnical University, Ningbo Zhejiang 315000, China;

3. State Key Laboratory of Cemented Carbide,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The research progress of computed tomography (CT) technology in defect detection for

收稿日期: 2025-08-02

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-YBMS-520); 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2022CX024);

浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划(2024C01249(SD2)); 西北工业大学博士论文创新基金(CX2025058);

西北工业大学硕士研究生实践创新能力培育基金项目(PF2025051)

作者简介: 杨富强(1985—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为智能无损检测与装备。E-mail: fgyang@nwpu.edu.cn

通信作者: 黄魁东(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为先进 CT 检测与装备。E-mail: kdhuang@nwpu.edu.cn

引用格式: 杨富强, 王乐, 黄魁东, 等. 航空发动机复合材料缺陷 CT 检测技术进展综述[J]. 航空动力学报, 2025, 41(X): 20250363. YANG Fuqiang, WANG Le, HUANG Kuidong, et al. Review of advances in CT detection technology for defects in aero-engine composite materials[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 41(X): 20250363.

aero-engine composite components was systematically reviewed. It addressed the bottleneck problem of accurately detecting and evaluating the cross-scale and multi-form defects generated in composites during their application in aero-engines, focusing discussions from the perspectives of the process mechanisms of defect formation, the technical principles of CT detection, and intelligent recognition algorithms. It provided a detailed analysis of typical defects in key components made of resin-based, metal matrix, ceramic matrix, and carbon-carbon composites. By reviewing the application scenarios of CT technology and starting from the typical defect characteristics and structural morphology differences revealed by CT detection, the effectiveness and limitations of different technologies, such as micro-focus CT and synchrotron radiation CT, were compared in identifying various types of defects. The results indicated that intelligent recognition technology based on deep learning is an effective approach for achieving accurate characterization of cross-scale defects, while multi-modal fusion detection is an important development direction for solving the challenge of micro-defect detection in thick-walled components. This review systematically investigated the compatibility of different matrix composites in CT detection, providing a theoretical basis and technical support for the full-lifecycle intelligent detection and reliability assessment of composite components in aero-engines.

Keywords: polymer matrix composites (PMC); metal matrix composites (MMC); ceramic matrix composites (CMC); carbon-carbon composite material (C/C); computed tomography (CT) non-destructive testing; multiscale defects

先进航空发动机在高推质比、可靠性、寿命及经济性等方面的追求,带来了严苛且矛盾的指标,这使得其关键重要件需兼具复杂构型与轻质高效的特性。该类高性能发动机的研发,目前是我国航空工业发展的一大制约^[1-2],而大规模采用复合材料是实现减重和高效能的关键途径。

复合材料成型过程中很容易产生缺陷,与金属材料相比,复合材料缺陷具有跨尺度^[3-6](纳米至毫米)、多形态(孔隙、裂纹、分层等)、关联性(如孔隙诱发裂纹扩展)等特点,这使得其检测与评价难度显著增加。如何快速、准确地实现复合材料的无损检测与评估,是当前检测技术领域研究热点^[7-8]。当前的无损检测方法多种多样,检测的精度和分辨率也不同,例如射线、工业 CT、超声、渗透、红外热成像等^[9-12]。接触式超声作为一种近表面无损检测方法^[13],近年在复合材料构件结构、缺陷、损伤检测与评估方面有可喜的技术进展^[14-17],但是分辨率仍然相对较低,而且需要耦合剂^[18]。非接触式的空气耦合超声、激光超声等对于各向异性、多材质、内含正常孔隙等结构、表面粗糙度较大的复合材料构件,以及进一步考虑到耐高温复合材料构件结构的曲面曲率、内腔、小孔等特征,要达到高精度检测是非常困难的。作为非接触式无损检测方法^[19-21],基于 X 射线的工业 CT 在复合材料构件制造缺陷检测方面从理

论上就表现出独特优势,近年来特别关注微小结构及缺陷检测的显微 CT 技术发展迅速,对于某些特殊复合材料构件缺陷检测取得了显著的研究进展和部分实际应用^[22],但对于较大尺寸的构件,目前的缺陷检测方法尚不成熟。现有研究虽证实 CT 无损检测在缺陷识别中的有效性,但存在核心技术挑战:一是缺乏复合材料全生命周期中裂纹、分层、夹杂等缺陷的统一评判标准;二是跨尺度、多形态缺陷的精准表征^[23]与智能识别仍存技术壁垒。

为此,本文面向航空发动机复合材料全生命周期质量控制的 CT 检测技术融合应用与智能演化趋势,针对航空发动机中树脂基、金属基、陶瓷基和碳基复合材料构件,聚焦航空发动机复合材料的“技术-缺陷-性能”CT 检测新方法,区别于以往侧重于单一材料或单一技术的综述,提供了一个更综合、更前沿的视角,将检测技术与材料特性、工艺过程、性能评估乃至智能化发展趋势相结合,旨在为行业提供“基体适配-技术选型-标准制定”的系统性参考,并对现有综述在航空发动机复合材料“跨基体、全生命周期、动态表征”方面的研究内容进行梳理。针对航空发动机四大类复合材料 CT 检测时遇到的典型缺陷及损伤识别与判定方法展开归纳与分析,总结 CT 无损检测对复合材料面临的核心技术挑战,并对未来发展趋

势予以展望。

1 复合材料构件及典型缺陷

图 1 展示了 NASAN+3 发动机中先进材料的应用场景: 例如, 风扇叶片、机匣等低温部件采用树脂基复合材料(polymer matrix composites, PMC)

或金属基复合材料 (metal matrix composites, MMC), 火焰筒、涡轮导叶等高温部件则使用陶瓷基复合材料 (ceramic matrix composites, CMC)^[2]。

复合材料损伤不仅类型多样、情况复杂, 还常出现多种损伤混杂的现象, 这使得其检测与评价均比金属材料损伤更具难度。表 1 呈现了航空

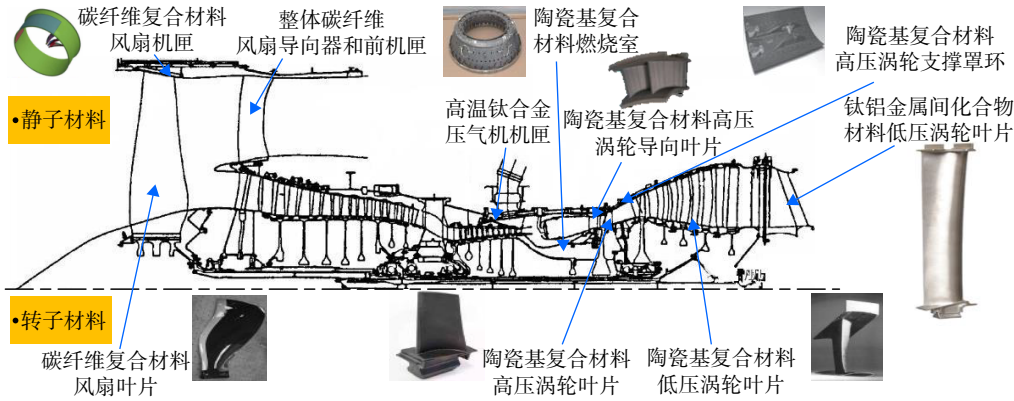


图 1 不同复合材料构件在先进航空发动机中的相关应用

Fig. 1 Related applications of different composite components in advanced aero-engines

表 1 航空发动机复合材料不同种类缺陷比较

Table 1 Comparison of different types of defects in aero-engine composites

缺陷类型	形成因素	图像表现	主要特征
分层	制造工艺把控不到位, 固化参数不合理、使用加工等环节遭受外力冲击产生损伤		层间开裂、脱胶、大面积间隙等
脱黏	使用或加工时承受的应力超出合理范围, 以及受到外力冲击、摩擦等损伤		胶接面间分离
夹杂	混入了原本不应存在的杂质或者外界异物进入或造成材料误操作		金属或非金属夹杂物
孔洞	工艺环节出现诸如模具设计不合理、树脂填充不充分、固化条件失控		空穴
孔隙	浸渍过程未能充分渗透, 或层合铺层间空气未通过真空辅助、加压排气未彻底排出		扁圆形孔隙
基体开裂	遭受外力冲击、长期承受交变载荷, 或是处于极端温度环境下产生应力集中		基体内纵向断裂
纤维断裂	受到外部冲击, 或是承受较高拉伸载荷, 或长期疲劳循环作用		纤维丝/束断裂
纤维褶皱	材料之间热膨胀系数不匹配, 或温度和压力控制不合理, 或铺层顺序不合理		褶皱

发动机复合材料的部分内部缺陷相关比较,包括缺陷的种类、成因和特征。

2 复合材料 CT 检测流程及优势

2.1 复合材料构件工业 CT 检测优势

复合材料缺陷的高效精准检测需满足高分辨率、快速识别的要求。常规的超声检测对构件中的气孔、夹杂、裂纹、分层等内部缺陷及其类型识别不足,复合材料超声检测存在难度^[24]。图 2 直观呈现超声检测在复合材料缺陷识别中的局限性:图 2(a)为复合材料内部微小裂纹的分布;图 2(b)为超声检测的示意图,图 2(c)为信号解析结果,回波信号的电压幅值 A 随超声波传播时间 t 呈现波动变化,但受杂波干扰,裂纹回波特征被掩盖导致未被识别。工业 CT 适用于金属、非金属各

向同性/各向异性/多层复合等各种材质,以及复杂外形/复杂内腔/小孔/嵌套/点阵等构件对象,可以满足复合材料构件缺陷的高效精准非接触无损检测需求^[25],如图 3 所示,工业 CT 是复合材料构件缺陷无损检测的重要技术手段,其三维投影重建原理为: $\mu(x,y)$ 为被测对象内部点 (x,y) 的衰减系数, t 为投影时间, θ 为投影角度,投影数据 $P_\theta(t)$ 由射线沿着直线 $x\cos\theta+y\sin\theta=t$ 穿过物体的衰减积分得到,通过多角度 $P_\theta(t)$ 可重建出物体内部的 $\mu(x,y)$ 分布,进而识别细小裂纹、气孔等缺陷。表 2 和表 3 整合了常用无损检测方法对比^[26-29],清晰显示工业 CT 在微小缺陷定位($3\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-2}\text{ mm}$)、复杂结构适应性(各向异性、多孔材料)等方面的独特优势,但其设备成本高、大尺寸构件扫描效率低的问题仍需突破。

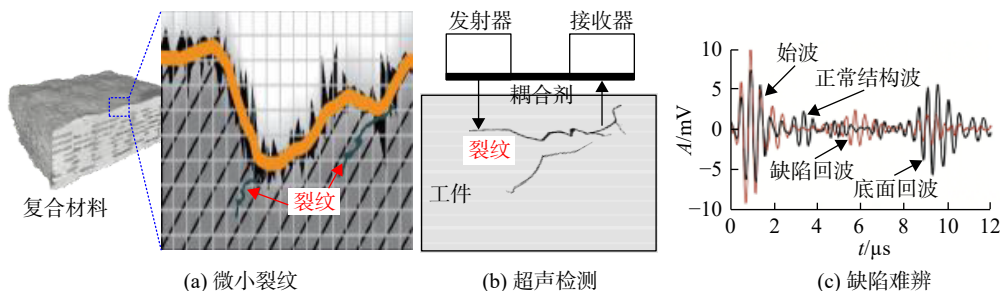


图 2 超声检测对复合材料内部缺陷识别不足

Fig. 2 Insufficient identification of internal defects in composites by ultrasound testing

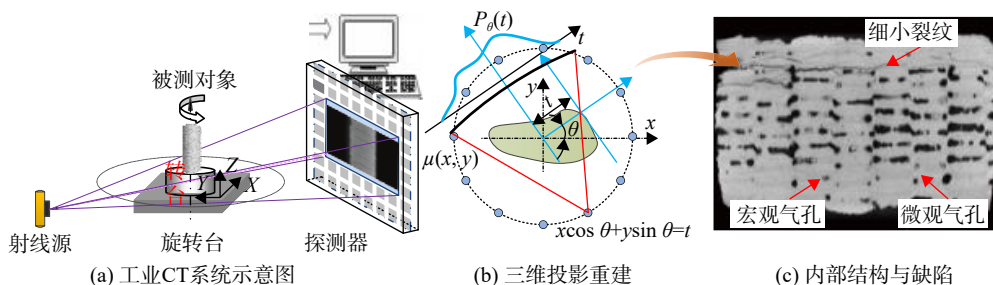


图 3 工业 CT 系统的组成示意图

Fig. 3 Composition diagram of industrial CT system

2.2 复合材料构件缺陷 CT 检测流程

工业 CT 检测流程包括 CT 扫描成像、切片图像重建、缺陷特征分割、参数计算与评定 4 个核心环节(图 4)。与传统二维(2D)检测相比,CT 通过三维重建^[30-32]实现缺陷的空间定位与量化分析(如孔隙率、裂纹扩展路径),为工艺优化提供更全面的数据支持。但缺陷分割环节仍依赖人工或传统算法,对低对比度、微小缺陷的识别精度不足,需引入深度学习技术提升自动化水平。

1) CT 扫描成像。X 射线穿过材料,并根据其密度差异在探测器上形成信号。收集到的数据将被转化为二维投影图像(或称为原始数据),用于后续的图像重建,如图 4(b)所示。

2) 切片图像重建。将获取的原始数据转换为三维图像的过程,通过对所有投影数据进行处理,生成每一层切片图像,便于后续分析和缺陷定位,如图 4(c)所示。

3) 缺陷特征分割。主要对重建后的切片图

表 2 常用的内部缺陷无损检测方法对比
Table 2 Comparison of common nondestructive testing methods for internal defects

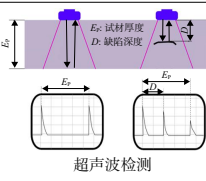
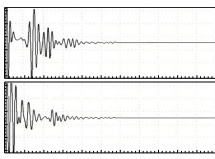
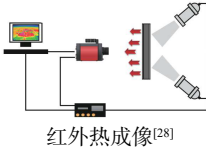
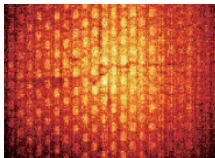
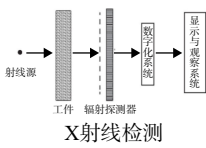
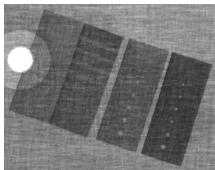
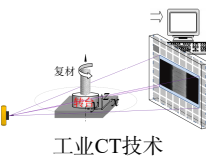
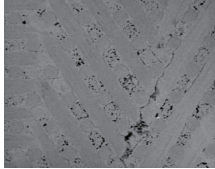
常用手段	方法优点	方法缺点	主要应用	图像表现
 超声波检测	检测速度快	形状或厚度不均匀导致结果不准确	中小复合材料部件	
 红外热成像 ^[28]	检测快速、操作简单	受环境、温度影响较大，难以识别微小缺陷	表面缺陷和热性能评估，复合材料涂层和黏合	
 X射线检测	高分辨率，识别内部缺陷	分层缺陷不敏感，对比度不足	复杂航空航天复合材料孔隙、夹杂	
 工业CT技术	微小缺陷精确定位，检测速度快	扫描时间较长，效率低，设备成本高	复杂形状和结构复合材料及零件	

表 3 不同成像检测技术的性能
Table 3 Performance of different imaging detection technologies

检测手段	激励方式	成像模式	缺陷(损伤)类型	成像最小缺陷尺寸/mm
超声波检测	超声波	液体耦合剂	冲击凹痕、分层、脱黏	$5 \times 10^{-2} \sim 10^0$
红外热成像	热辐射/振动	非接触	分层损伤、基体开裂、纤维断裂	$>10^0$
X 射线检测	X 射线	非接触	孔隙、孔洞、分层、脱黏	$10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$
工业 CT 技术	X 射线	非接触	孔隙、孔洞、分层、脱黏、疏松、基体开裂	$3 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$

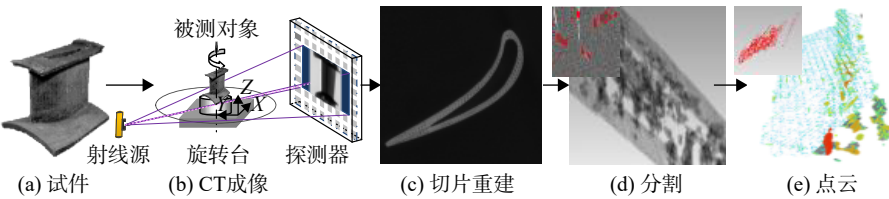


图 4 基于工业 CT 扫描的复合材料缺陷特征获取

Fig. 4 Acquisition of composite defect characteristics based on Industrial CT scanning

像进行预处理,如去噪、平滑处理等,使用图像处理算法(包括图像分割、边缘检测、深度学习^[33]等)提取缺陷特征,如图 4(d)所示。

4) 参数计算与评定。对检测到的缺陷进行分析和评价,对缺陷特征进行几何参数计算,包括孔隙率、缺陷尺寸等,以评估缺陷对性能的影响,如图 4(e)所示。

以上环节相互关联,形成了完整的 CT 无损检测流程,通过合理的扫描成像、图像重建、特征分割

与评定,有效地识别和分析复合材料内部的缺陷,为复合材料性能评估和工艺优化提供重要依据。

2.3 复合材料检测常用 CT 技术类型

复合材料因其各向异性、多层次结构与复杂损伤机制,其内部缺陷(如孔隙、裂纹、纤维断裂、界面脱黏、分层等)的精确检测与定量表征对 CT 技术提出了多样化的需求。选择最适宜的 CT 检测技术,是一个基于检测目标的系统决策过程。其核心逻辑在于明确“材料-缺陷-目标”的三元关

系: 首先, 界定待测构件的基体材料(如树脂基、金属基或陶瓷基复合材料)与增强体特性; 其次, 锁定关键缺陷的类型、尺度与可能分布; 最终, 明确检测的具体目标。例如, 中国航发^[34]聚焦 SiC/SiC 复合材料工业 CT 快速检测技术的工程化应用, 通过具体研究案例, 验证了 Micro-CT 辅助数值仿真的实用性。武汉理工大学^[35]围绕织物增强复合材料 Micro-CT 辅助数值仿真技术展开研究, 利用 Micro-CT 无损成像获取材料内部三维结构信息, 构建更具代表性的数值模型, 进而实现成型工艺与力学性能的高精度仿真, 填补了“理想化模型”与“真实材料结构”间的差距。华中科技大学^[36]针对熔融沉积工艺制备的复合材料存在内部缺陷多、纤维浸渍不良、层间结合弱等问题, 基于上海同步辐射光源实现微米级 CT 成像,

动态追踪拉伸过程中缺陷演化, 分析了拉伸/弯曲过程中碳纤维/树脂界面和层间的失效模式及机制。上海交通大学^[37]针对陶瓷基微型复合材料在高温结构部件中的应用需求, 量化分析其内部损伤演化过程, 并建立数据驱动的力学模型。结合四维(4D)原位 X 射线微 CT 技术、深度学习图像分割、数字体积相关分析和 CT 数据驱动的剪切滞后模型, 实现从微观损伤到宏观力学响应的全链条研究。

为系统展示不同 CT 技术的特性与适用范围, 表 4 从核心技术原理、空间分辨率、优势、局限性、典型应用场景及案例等维度, 对工业 CT、显微 CT(Micro-CT)、同步辐射 CT(SR-CT)与原位 CT 技术进行了对比, 量化技术差异, 为复合材料研究与工程应用中的 CT 技术类型提供决策依据。

表 4 CT 技术类型分类比较

Table 4 Classification and comparison of CT technology types

技术类型	核心原理	空间分辨率/mm	优势	局限	典型应用场景	案例
工业 CT	X 射线穿透成像 + 三维重建	$3 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$	适配大尺寸构件、检测范围广	微小缺陷($<5 \times 10^{-2}$ mm)对比度低	树脂基复合材料风扇叶片宏观缺陷检测、金属基复合材料压气机叶片裂纹定位	图 7
显微 CT (Micro-CT)	微焦点 X 射线+高分辨率探测器	$10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$	捕捉微米级缺陷、三维结构重构精度高	仅适配小尺寸样品($<10^2$ mm)、扫描效率低	树脂基复合材料微观孔隙率计算、碳基复合材料编织结构分析	图 8
同步辐射 (SR-CT)	同步辐射光源+快速成像系统	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	动态观测缺陷演化、对比度高	依赖同步辐射装置(资源稀缺)、成本高	陶瓷基复合材料涡轮叶片高温损伤动态检测、金属基复合材料半固态压缩孔隙演变	图 10
原位 CT	CT 扫描+力/热加载装置	$10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$	关联载荷-缺陷演化关系(如拉伸下裂纹扩展)	加载装置对扫描视野有遮挡	树脂基复合材料拉伸损伤机制、陶瓷基复合材料弯曲缺陷扩展	图 12

3 复合材料缺陷/损伤 CT 无损检测技术

目前, 树脂基、金属基、陶瓷基及碳基复合材料凭借优异的低温性能, 已成为航空发动机风扇、压气机等部件的潜在选用材料^[38-40], 但各基体复合材料表现出不同缺陷。表 5 中列出了不同基体复合材料特点及缺陷表现形式。

3.1 PMC 缺陷 CT 检测

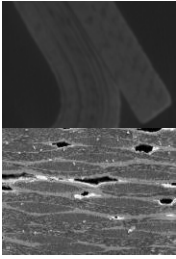
PMC 在发动机冷端部件中应用广泛, 但在使用过程中容易出现孔隙、分层、纤维屈曲等各类缺陷^[41], 图 5 给出了 PMC 中不同缺陷的尺度分布, 明确 PMC 缺陷的跨尺度特性: 微观尺度($10^{-6} \sim 10^{-3}$ mm)以树脂孔洞、纤维-树脂界面缺陷为主, 需 Micro-CT 实现检测; 细观尺度($10^{-3} \sim 10^{-1}$ mm)包含纤维断裂、界面脱黏, 需工业 CT 结合高对比度

重建算法; 宏观尺度($>10^{-1}$ mm)以分层、大面积疏松为主。图 6 给出了 PMC 中部分缺陷的形态。

对于 PMC 构件而言, 利用工业 CT 技术对 PMC 制品进行检测和分析, 能够对 PMC 中的杂质、气孔等缺陷做出精确性较高的灵敏度检测。研究者采用不同的 CT 技术对 PMC 进行内部缺陷和结构分析。中国兵器 53 所^[42]利用工业 CT 有效地检测出复合材料内部缺陷(如图 7 所示, 含夹杂、气孔、分层、裂纹、疏松等典型类型), 并且精确地测定缺陷的几何尺寸、位置。同时, 利用 X 射线锥束 CT 成像检测模拟分层缺陷^[43-44], 不仅具备检测效率高、图像质量优、缺陷尺寸测量误差小的特点, 还能用于探究碳纤维 PMC 构件内部分层缺陷与工艺参数的关系^[45-46]。华东理工大学借助 CT 原位拉伸装置, 对拉伸过程中纤维增强

表 5 不同基体复合材料特点及缺陷表现

Table 5 Characteristics and defect performance of different matrix composites

基体类型	材料特点	常见产品	实物图片	CT 图像	缺陷表现
树脂基	通常以纤维增强(如碳纤维或玻璃纤维)为主要组成,强度和刚度较高	风扇机匣、风扇叶片、进气道消声衬板			孔隙、孔洞、分层、脱黏、疏松、基体开裂
金属基	由钨、铅、镍铝金属间化合物构成,承载能力和导热性优异	压气机叶片、密封元件			裂纹、气孔
陶瓷基	基体为氧化铝、氧化硅、碳、硼、碳化硅等高温结构陶瓷,适合极端环境	火焰筒、涡轮导叶、调节片			裂纹、分层、孔隙
碳碳基	基体以碳纤维为增强相,适合在极端磨损环境	尾喷管、喷油杆、隔热屏			孔洞、分层、裂纹

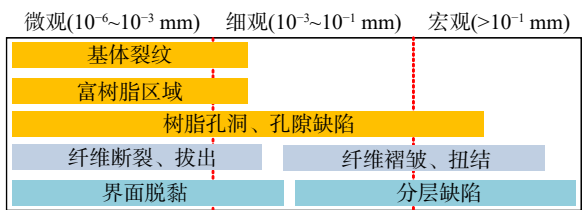


图 5 PMC 中缺陷类型及与尺度
Fig. 5 Types and scales of defects in resin-based composites

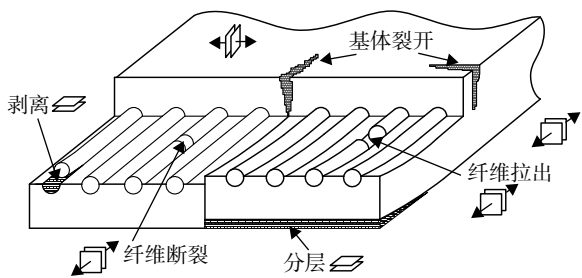


图 6 PMC 中的缺陷表现^[41]
Fig. 6 Defect manifestations in resin-based composites^[41]

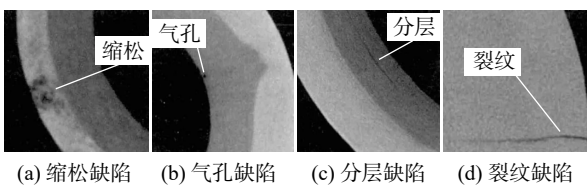


图 7 树脂基复合材料夹杂、气孔等缺陷的 CT 检测^[42]
Fig. 7 CT detection of defects such as inclusions and pores in resin matrix composites^[42]

纳米孔 PMC 的微观结构变化进行了表征^[47]。研究发现,纤维布的加入显著提升了复合材料的力学性能,且微裂纹最先出现在针刺区域边缘的树脂基体中。

Micro-CT 具有较高的空间分辨率,能够捕捉到微米级别的细节,非常适合用于检测小型缺陷和复杂内部结构。在 PMC 的研究与开发过程中, Micro-CT 能够助力研究人员掌握材料的微观结构及缺陷形成机理^[48]。天津工业大学^[49]借助 Mi-

cro-CT 技术重构复合材料预制件的完整纤维结构,探究纬纱密度与厚度对纤维排布的影响(图 8 所示)。从 Micro-CT 图像(图 8(a))可见,预制件内部纱线的交织结构清晰可辨;通过纬向路径(图 8(b))、经向路径(图 8(c))与法向路径(图 8(d))

的对比,结合路径偏差公式(式(1)和式(2))计算发现,实际纱线的空间路径与建模软件设计路径的偏差较大, Micro-CT 可精准捕捉预制件工艺偏差,为优化编织参数、减少纤维褶皱缺陷提供关键依据。

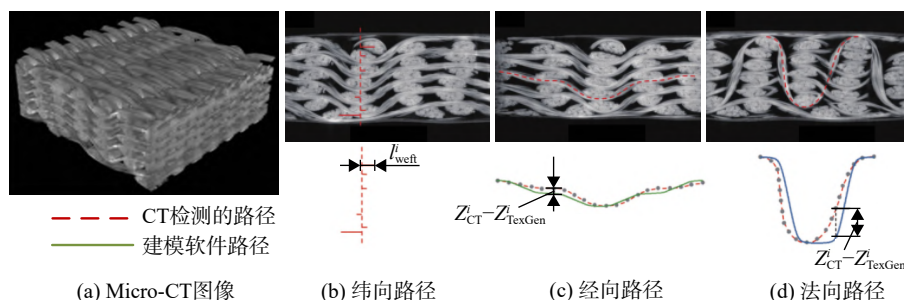


图 8 复合材料试样 Micro-CT 路径检测分析^[49]

Fig. 8 Micro-CT path detection and analysis of composite samples

$$I_{\text{location}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{\text{weft}}^i}{n} \quad (1)$$

式中 l_{weft}^i 为纬纱列中第 i 根纱线到纬纱列中线的距离; n 为一列纬纱中纬纱的数量。

$$I_{\text{path}} = \frac{\sum_{j=1}^m |Z_{\text{CT}}^i - Z_{\text{TexGen}}^i|}{m} \quad (2)$$

式中 Z_{CT}^i 为 Micro-CT 图像纱线路径上第 i 点的 z 坐标; Z_{TexGen}^i 为 TexGen 纱线路径上对应的 z 坐标; m 为一个屈曲周期内纱线路径上选取的坐标个数。

北京理工大学^[50]团队通过 Micro-CT 的跨尺度损伤分析方法,对含孔隙缺陷的三维编织复合材料孔隙特征和拉伸行为进行了表征。通过 Micro-CT 扫描技术对复合材料内部孔隙缺陷进行检测与重构后,对于具有非均质孔结构的跨尺度纤维针刺预制体增强 PMC,研究中从 CT 数据里提取出编织纱的不规则形态,进而构建了不规则纱线截面的几何模型。在 RTM 数据表征的基础上,还对不同载荷下的应力-应变曲线及损伤断裂机制展开研究。不过,尽管跨尺度损伤分析法能有效检测孔隙,但在识别小尺寸或复杂形状缺陷时可能存在误差,因此孔隙的特征提取和分类或许需要更精细的算法。西安交通大学^[51]通过无监督机器学习结合 Micro-CT,实现 PMC 纤维、基体及孔隙的精准识别(如图 9 中呈现了含神经网络训练流程与基体成分分析结果)。该方法通过实验数据进行验证,对复合材料构件内部的纤维、基体及孔隙率进行了测定,并探究了孔隙率与模

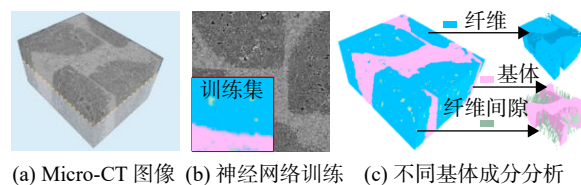


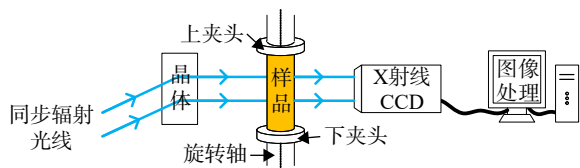
图 9 基于 CT 的复合材料基体成分^[50]

Fig. 9 Matrix composition of composites based on CT analysis^[50]

量及强度相对降低量之间的关系,具体如图 9 所示。然而,跨尺度涉及从纳米到毫米的多个尺度,如何有效整合不同尺度下的性能数据,构建全局模型仍然是一个挑战。

同步辐射 CT(synchrotron radiation computed tomography, SR-CT)技术成功地实现了物体内部结构演化过程的在线检测,从而为从微结构角度揭示物体或材料的属性提供了强有力的手段,同时也为物体或材料各种属性模型的建立或修正提供了直接依据^[52]。图 10 展示了 SR-CT 技术实验装置示意图。由于 SR-CT 成像技术能够对物体内部结构演化过程实现在线检测,因此,不少研究将其用于 PMC 的破坏实验,观察材料内部破坏演化过程^[53-54]。中国科学技术大学^[55]将 SR-CT 技术用于复合材料动态破坏过程的观察试验,首次得到了亚微米分辨率下的短纤维 PMC 动态破坏过程的三维形貌图像,验证了试验与理论分析的一致性。

综上,工业 CT 可有效检测夹杂、气孔等缺陷^[30],但厚壁构件中树脂与纤维的 X 射线吸收差异小,导致微裂纹($<5 \times 10^{-2} \text{ mm}$)成像对比度低,成为检

图 10 SR-CT 实验装置示意图^[55]Fig. 10 Schematic diagram of SR-CT experimental device^[55]

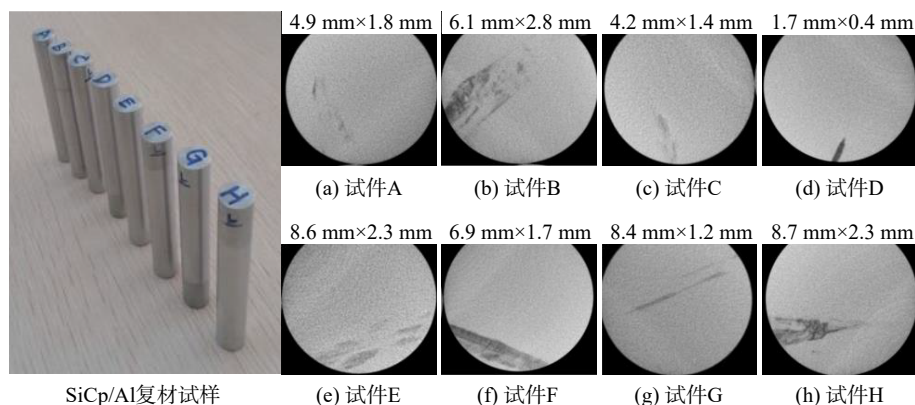
测瓶颈。研究表明,结合 Micro-CT(微米级分辨率)与同步辐射 CT(亚微米级动态成像)的多尺度融合技术,可实现从微观结构到宏观缺陷的全尺度表征,为解决厚壁件检测难题提供新思路。

3.2 MMC 缺陷 CT 检测

MMC 因高比强度用于压气机叶片等部件,

当前常用基体金属多以镁、铝、钛等为主^[56-58],其缺陷主要为裂纹、夹杂和气孔。

X 射线 CT 技术有助于检测 MMC 增强相以及内部气孔的分布情况^[59-60]。哈尔滨工业大学^[59]运用显微 CT 技术,对 SiC 颗粒增强基的偏聚情况及气孔分布进行了检测,且成功辨别出密度相差 77% 的镁基体与 SiC 增强相,为复合材料的制备及评价提供了实用的方式方法。北京航材院^[61]对 SiC 颗粒增强铝基复合材料存在的缺陷开展了工业 CT 检测试验,图 11 中对比分析了缺陷实际尺寸与不同无损检测方法定量结果的差异,认为工业 CT 的结果更接近缺陷真实尺寸。

图 11 SiCp/Al 试样典型缺陷的尺寸测量结果^[61]Fig. 11 Industrial CT image of SiCp/Al composite sample and size measurement results of typical defects^[61]

虽然 CT 可分辨密度差较大的增强相(如 SiC 颗粒与镁基体),但多相材料(如铝基与纳米颗粒增强相)的低对比度易导致微孔隙漏检。通过原位 CT 加载试验结合灰度值动态分析,可量化孔隙率与载荷的关联规律,为评估材料力学性能退化提供依据^[61-62],图 12 展示工业 CT 灰度图像在缺陷量化中的应用:图 12(a)为 CT 重建切片;图 12(b)为局部放大区域,灰度值降低区域对应初始孔隙生成;图 12(c)为孔隙率随应变的变化,该结果为建立 CT 检测-力学性能关联模型提供直接数据。

同样地,借助 SR-CT 成像技术在线检测物体内部结构演化过程的能力^[63-64],哈尔滨工业大学^[63]运用原位快速 SR-CT 技术,针对纳米颗粒增强的 Al-10%Cu 复合材料的压缩过程开展研究,同时结合 CT 图像,对变形过程中材料的微观组织结构进行了量化分析。大连理工大学^[65]在制备高性能铝基复合材料过程中,借助 SR-CT 成像技术研究 TiB₂ 颗粒团簇,并在 CT 成像的基础

上改进了混合反应工艺,制备高性能的复合材料。SR-CT 技术虽适合静态或变化缓慢的过程,但在高速冲击、爆炸反应等快速动态场景中,时间分辨率可能难以清晰记录变化细节。为此,研究人员通过分析纳米颗粒增强铝基复合材料在不同阶

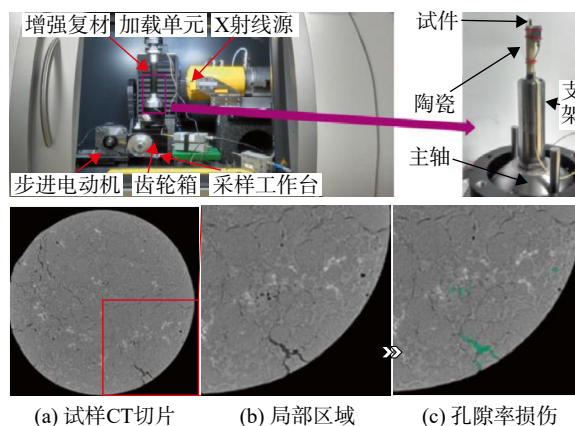


图 12 复合材料原位 CT 灰度图像缺陷表征

Fig. 12 Defect characterization of composite materials in CT grayscale images

段微观组织结构的变形特征,揭示了 MMC 在半固态温度区间压缩变形过程中的微孔演变规律,而这得益于他们运用快速同步辐射原位四维 CT 技术对该过程进行的原位观察^[66]。同时,利用 CT 技术对获取的重构切片,定义了一种切片高度 l_i 与应变 ε 的模型来表征变形,用以获取组织和孔洞量化分析,相关结果见图 13。

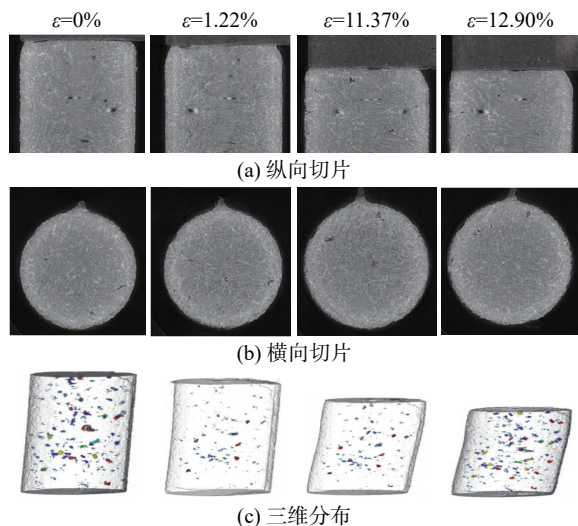


图 13 不同应变压缩过程 CT 切片孔洞分布和演变^[65]

Fig. 13 Distribution and evolution of holes in CT slices during the compression process at different strains^[65]

变形过程中三相结构的演化及孔洞、裂纹的生长情况,可通过同步辐射原位 CT 成像得到有效呈现。尽管 CT 在提升时间与空间分辨率上已有明显进步,能实现四维(时间加三维)组织演化的原位观察,但在检测部分复合材料的微小缺陷或结构时,仍可能存在不足。特别是在检测较小尺寸的孔隙、微裂纹或纤维层析等问题时,分辨率和检测能力仍需进一步提高。同时,复合材料通常由多种不同材料组成,它们的 X 射线吸收率 and 对比度可能相似,使得在 CT 图像中难以清晰区分不同组分,都将导致在检测材料缺陷或异物时出现困难。

3.3 CMC 缺陷 CT 检测

CMC 用于高温部件(燃烧室、涡轮叶片)^[67],缺陷以裂纹、分层、界面脱黏为主^[68],如图 14 展示了其典型缺陷,如何有效通过检测方法判断材料内部缺陷性质是十分迫切的问题。

CT 技术能方便地获取 CMC 的内部信息,为孔隙研究带来便利。CT 技术能方便地获取 CMC 的内部信息,为孔隙研究带来便利^[70-73]。经工

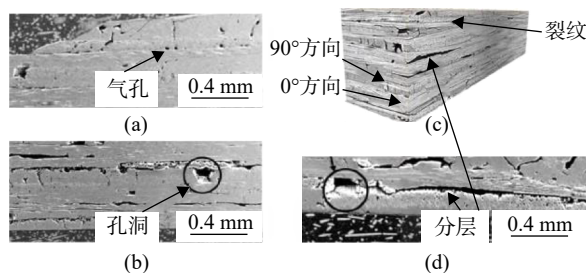


图 14 CMC 典型缺陷^[69]

Fig. 14 Typical defects of ceramic matrix composites^[69]

业 CT 对其内部结构的表征可见:孔隙多为微米级,在陶瓷基体中随机弥散分布,微裂纹尺寸一般在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ mm 之间。中国航发沈阳黎明^[71]基于微焦点 CT 系统,对薄壁 CMC 进行检测,获得了高分辨率的内部缺陷图像。如图 15 所示,微焦点 CT 技术能够清晰地揭示材料内部的多种典型缺陷形貌。具体而言,图 15(a)显示的亮白色点状或团簇状异物可判定为夹杂,这类硬质夹杂物会破坏基体的连续性,在服役过程中成为应力集中点,显著降低材料的疲劳强度并可能诱发微裂纹。图 15(b)清晰可见的线性暗色条纹则为裂纹,裂纹的存在会直接损害材料的承载能力和断裂韧性,是导致构件最终失效的关键风险源。此外,图 15(c)中可能观察到的纤维束局部不连续或中断现象提示了断丝缺陷,这将影响纤维增强相的整体承载能力,削弱复合材料的强韧化效果。

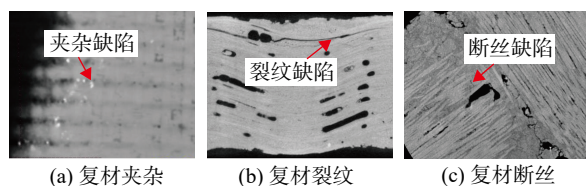
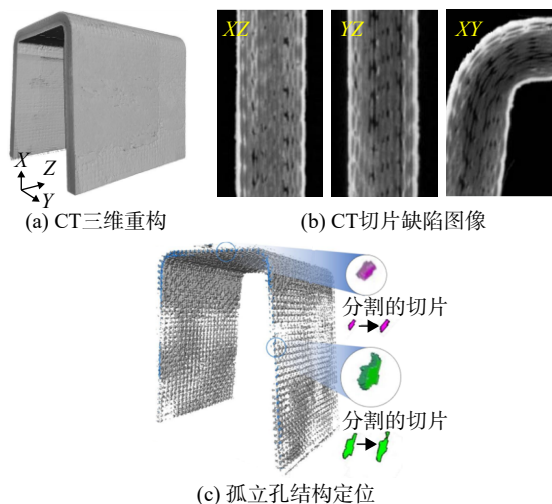


图 15 微焦点 CT 对 CMC 缺陷检测^[71]

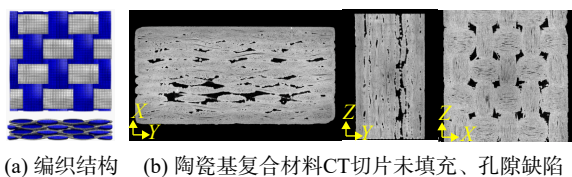
Fig. 15 Micro-focus CT detection of defects in ceramic matrix composites^[71]

进一步地,为了在三维空间可视化孔结构,燕山大学^[72]采用工业 CT 对异型大尺寸 C/SiC 复合材料样件进行检测(图 16 所示),通过三维重构(图 16(a))获取样件整体形状与内部缺陷分布,结合二维切片缺陷图像(图 16(b))的分割处理,实现孤立孔的精准定位(图 16(c))。统计显示,样件孤立孔主要集中在异型结构的曲率突变处,该发现为异型复合材料构件的模具设计优化与成型压力调整提供了直接数据支撑。

常规焦点 CT 的分辨率通常处于毫米级别,

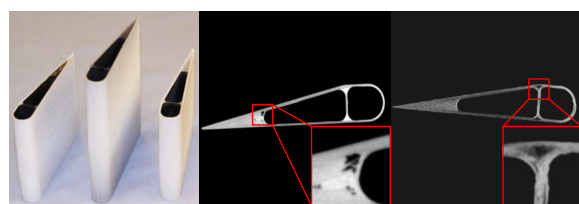
图 16 CT 对异形材料样件进行检测^[72]Fig. 16 CT inspection of irregularly shaped material samples^[72]

相比之下, 显微 CT 可获取微米尺度的形态尺寸数据^[74]。图 17 展示了显微 CT 图像, 可以看出, 相邻编织层和纤维束的相交位置之间存在大量未填充区, 内部存在较高孔隙率分布。

图 17 编织 SiC/SiC CMC 的 CT 成像^[74]Fig. 17 CT imaging of woven SiC/SiC ceramic matrix composites^[74]

受硬件与重建计算成本的制约, 当前显微 CT 技术仅能对毫米级尺寸的样品开展定量分析。同时, 较高的检测成本以及对辐射防护措施的高要求, 也使得其应用范围受到限制。虽然, 美国通用电气(GE)公司已经在实验室研究中采用显微 CT 技术对 CMC 部件进行无损探伤及检测, 以

深入检查 CMC 部件的内部结构^[75], 但考虑到实际生产需求, 在进行规模批量生产时将采用更为普通的工业 CT 对显微 CT 进行代替。图 18 呈现了通过熔融浸渗及化学气相浸渗工艺所制备的 CMC 叶片内部缺陷^[76]。对比熔融浸渗(MI)与化学气相浸渗(CVI)两种工艺制备的 CMC 叶片缺陷特征: 图 18(b)为 MI 工艺叶片 CT 图像, 仅叶尾存在孤立孔隙, 适合工业 CT 快速扫描; 图 18(c)为 CVI 工艺叶片, 前缘孔隙密集, 且存在微小裂纹, 需采用 Micro-CT 局部扫描与工业 CT 全局定位结合的方案, 避免缺陷遗漏, 为 CMC 叶片检测的工艺适配性提供参考。

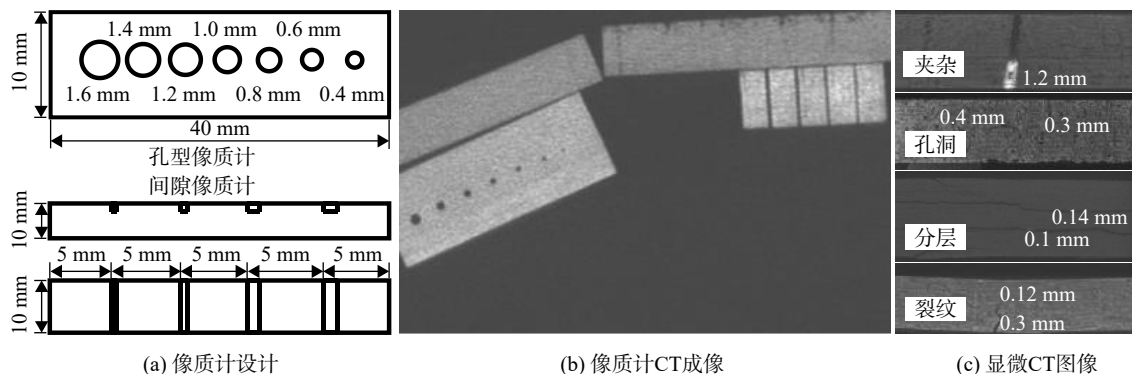


(a) SiC/SiC CMC 叶片 (b) 熔融浸渗工艺 (c) 化学气相浸渗工艺

图 18 不同工艺下叶片 CT 图像^[76]Fig. 18 CT images of blades under different processes^[76]

在 CMC 材料构件检测方面, 中国航天科工集团有限公司^[77]在 CMC 材料构件检测方面, 已借助工业 CT 通过间隙像质计和孔型像质计对裂纹、分层、孔洞、夹杂等缺陷进行检测, 形成了 CMC 无损检测能力, 进一步证实了工业 CT 检测方法的可靠性, 相关情况如图 19 所示。

在 CMC 材料的研究与检测工作中, 工业 CT 的作用十分广泛: 不仅能够检测缺陷、增强体及密度分布情况, 还能为材料构件的失效分析提供支持, 帮助观察复合材料内部的细微损伤。多所高校借助相关技术开展了具体研究^[78-80]。厦门大学^[81]通过微焦点 CT 分析高温氧化后材料的涂层,

图 19 C/SiC 复合材料工业 CT 检测像质计^[77]Fig. 19 Industrial CT image quality measurement of C/SiC composite materials^[77]

探究其对涂层氧化形貌的分辨能力及涂层在不同环境下的抗氧化能力,为该材料氧化失效机制提供参考。西北工业大学^[82-83]利用工业 CT 研究内置缺陷试样的弯曲性能,检测材料局部缺陷与位置,对比两种预制体结构喷管的截面密度,为喷管结构和工艺改进提供依据。此外,CT 技术在原位试验及三维图像处理中也有应用:美国加州大学等^[84-85]机构观测了单向 SiCf/SiC 纤维复合材料在不同温度拉伸时的开裂或断裂过程。上海交通大学^[86]、北京理工大学^[87]、北京结构与环境工程研究所^[88]分别借助 X 射线 CT 原位试验、有限元法结合原位剪切试验等,研究了不同复合材料的损伤演化机理、孔隙缺陷对力学性能的影响及损伤分布与拉伸裂纹的关系(如图 20 所示),验证了 X 射线 CT 成像检测的有效性。不过,受限于 X 射线 CT 设备资源及试验样品要求,目前该方

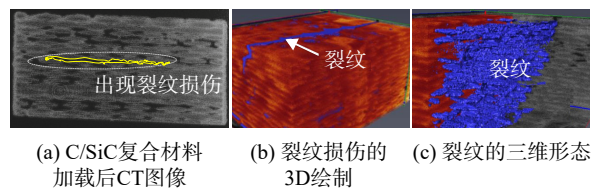


图 20 C/SiC 复合材料疲劳裂纹损伤分布^[88]

Fig. 20 Damage distribution of fatigue cracks in C/SiC composites^[88]

法在 CMC 研究中的应用仍有限。

综上,微焦点 CT 可有效检测夹杂、断丝等缺陷,但界面黏接层(如 SiC 涂层与基体)的缺陷因尺度小($<10^{-2}$ mm)且对比度低,成为检测盲区。尽管深度学习的语义分割算法(如 U-Net)可实现基体裂纹与纤维拔出孔的精准识别^[89],如图 21 所示,但需扩大样本库(涵盖不同工艺缺陷)以提升泛化能力。

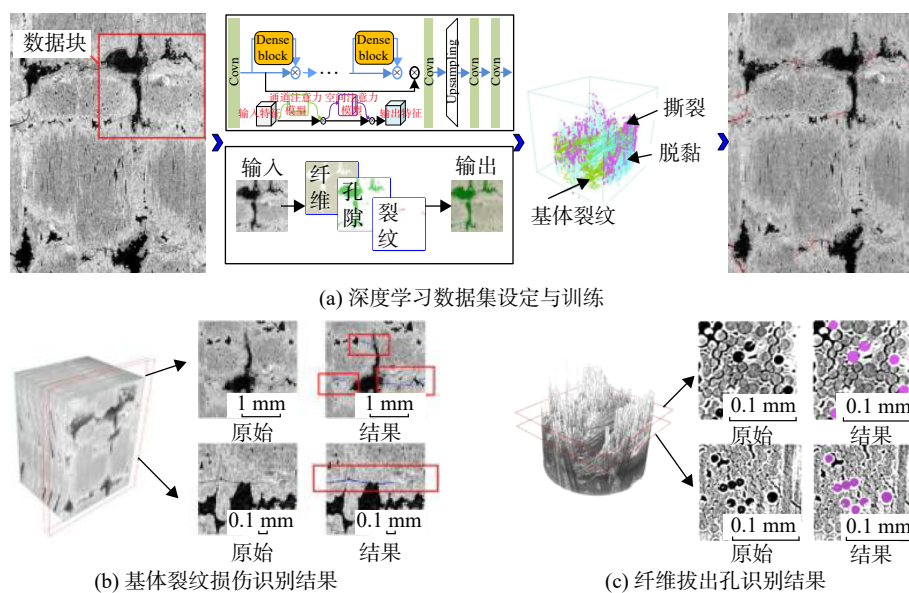


图 21 局部原始切片图像与损伤识别结果^[89]

Fig. 21 Local original slice image and damage identification results^[89]

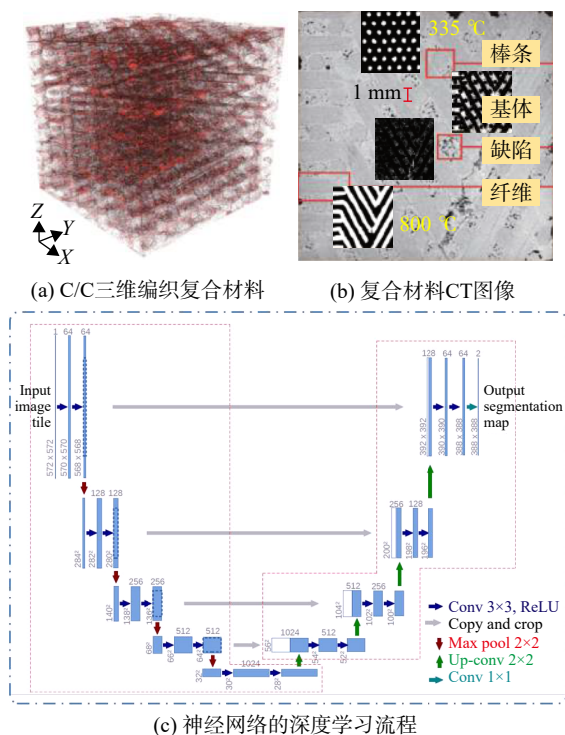
3.4 C/C 缺陷 CT 检测

碳碳复合材料(C/C)耐高温,用于火箭喉衬等部件^[90],缺陷主要为孔洞、裂纹^[91]。借助显微 CT 技术,通过不同方向编织特征研究,明确了该材料微观结构的特点及其分布模式^[92],并构建起相应的物理模型与几何模型。武汉大学^[93]运用 Micro-CT 对尺寸约 20 mm^3 的三维编织碳/碳复合材料试样进行扫描,得到了精度约 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 的微观图像(见图 22)。随后,研究团队采用基于深度学习的语义分割算法,对海量 CT 图像进行训

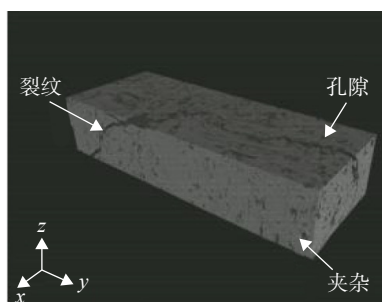
练,成功实现了三维微观组分及缺陷分割与识别。

CT 技术也常被用于获取复合材料的缺陷种类及其分布,孔隙率大小等。Micro-CT 可量化孔隙率^[94],图 23 展示了利用显微 CT 对 C/C 复合材料的检测结果,但热循环下孔隙动态演化(如闭合与扩展)的实时检测仍依赖同步辐射 CT 的高时间分辨率。建立“孔隙演化-力学性能退化”映射模型,需结合 CT 原位试验与有限元仿真,这是未来提升 C/C 材料可靠性的关键。

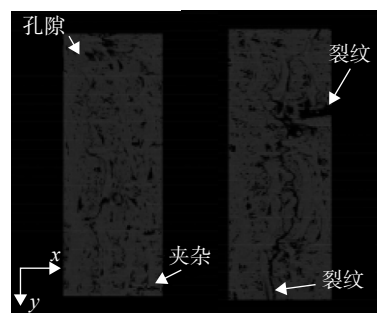
近年来, Micro-CT 系统的观测精度持续提升,

图 22 C/C 复合材料深度学习的微观组分与缺陷识别过程^[93]Fig. 22 Micro-component and defect identification process of C/C composites using deep learning^[93]

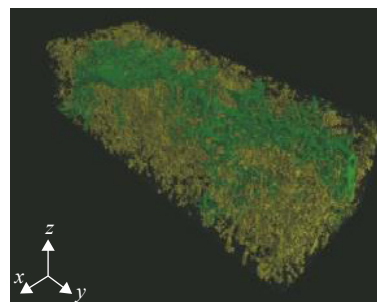
已从最初的厘米级逐步发展到微米级乃至纳米级,这使其能够胜任编织复合材料内部微观结构的观测工作。航天材料及工艺研究所^[95]围绕 C/C 复合材料,从测量、孔隙形状与分布等多个维度,深入剖析了 X 射线 CT 技术在该材料表征中的应用。为实现对不同类型材料孔隙率的精准测量,业界提出并应用了更多显微 CT 技术的 C/C 复合材料孔隙率测量方法,这进一步印证了显微 CT 技术在复合材料孔隙率测量领域的有效性^[96]。南京航空航天大学^[97]的研究发现,基体孔隙率符合正态分布(如图 24 所示),该结论源于其采用显微 CT 技术开展的研究,包括将低对比度的 CT 图像转换为仅包含纤维束和孔隙的二值图,接着借助算法去除噪声干扰、平滑图像边界,再对处理后的图像进行统计。另外,CT 技术也在 C/C 复合材料



(a) C/C 复材三维结构



(b) C/C 复材不同位置 CT 图像

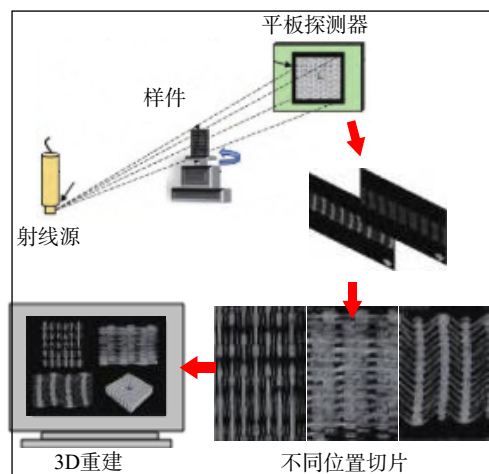


(c) C/C 复材内部孔隙和裂纹分布

图 23 C/C 复合材料内部结构^[94]Fig. 23 Internal structure of C/C composites^[94]

的力学试验观测中得到了应用^[98]。研究中,先对复合材料的内部几何结构进行扫描,以此获取三维图像和相关数据;接着运用统计算法,分析纱线与孔隙形态的变化特征;最终,成功重构出该复合材料的精细化模型。

尽管现有检测方法在损伤和缺陷的识别效果上已有大幅提升,但在复合材料构件的生产、试验、使用及维护等全流程中,仍缺少明确的判断依据,是复合材料无损检测技术当前面临的主要难题。以深度学习神经网络为基础的技术方法^[99],为微小损伤及缺陷的智能识别开辟了新路径。但在神经网络的学习过程中,训练样本的准确性会对



(a) Micro-CT 原理示意图

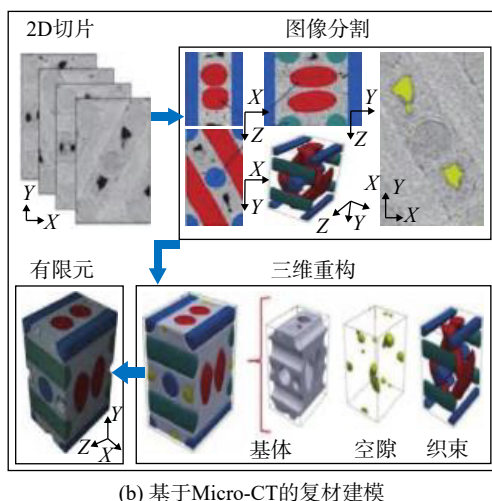


图 24 C/C 复合材料 CT 图像建模

Fig. 24 CT image modeling of C/C composites

学习结果产生一定限制,而样本数量与对象组合方式,同样是影响结果的重要因素。利用神经网络对伪影先验知识进行侦测与识别,进而构建基于先验信息知识库的性能迁移算法,已成为人工智能在工业 CT 智能检测领域的发展方向^[100-102]。尤其是兼具定性定量分析能力,且具备高灵敏度、高分辨率的快速可靠无损检测技术,将成为复合材料 CT 检测的主要内容。

4 总结与展望

CT 技术作为非接触、高分辨率的无损检测手段,在航空发动机复合材料缺陷检测中展现出显著优势。本文系统梳理了 PMC、MMC、CMC 和 C/C 复合材料中典型缺陷的 CT 检测方法,系统地将航空发动机四大类复合材料的 CT 检测技术进行归纳比较,并深入剖析了各类 CT 技术(工业 CT、Micro-CT、SR-CT、原位 CT)在解决这些痛点中的最新进展、有效性与局限性,为缺陷量化和工艺优化提供了关键依据。当前仍存在两大挑战:一是缺乏全生命周期缺陷评判标准,导致生产与服役阶段的缺陷关联性分析缺失;二是跨尺度、多形态缺陷的智能识别精度不足,尤其是低对比度界面缺陷的检测,仍依赖人工经验。未来 CT 检测技术将围绕智能化算法、多尺度融合和标准化建设 3 个方向进行突破和发展,为复合材料可靠性提升提供关键支撑。

1) 自适应智能检测技术:开发基于 Transformer 的多模态缺陷分类模型,输入 CT 图像灰度特征、缺陷几何参数(如孔隙率、裂纹长度)及

材料力学性能数据(如拉伸强度),建立航空发动机树脂、金属、陶瓷、碳基复合材料缺陷 CT 图像数据库,通过迁移学习解决小样本缺陷识别问题,实现微孔隙、微裂纹的自动化识别,适配航空发动机复合材料构件的批量检测需求。

2) 多尺度融合检测系统:整合 Micro-CT 的高空间分辨率,开发“微观-宏观-动态”四维(3D+时间)检测系统,基于特征点匹配的跨尺度图像配准算法,解决现有融合技术中空间与时间分辨率难以兼顾的问题;针对 CMC 高温部件,实现界面缺陷的动态演化追踪,如热循环下裂纹扩展速率,为极端环境下复合材料的损伤机理研究提供依据。

3) 工艺-性能映射模型:基于 CT 检测获得的缺陷信息(孔隙率、裂纹长度、分层面积),提出构建缺陷特征(类型、尺寸、分布)与复合材料宏观力学性能(强度、疲劳寿命)之间的定量关系模型,建立“缺陷参数-力学性能”的回归模型,引入贝叶斯优化算法优化模型精度,将模型预测结果反馈至复合材料成型工艺,形成“工艺调整-CT 检测-性能验证”的闭环优化,为工艺优化和寿命预测提供支撑。

总之,随着智能算法与多模态 CT 技术的深度融合,CT 将在航空发动机复合材料的可靠性提升中发挥更核心的作用。

参考文献:

- [1] 胡殿印,潘锦超,米栋,等.航空发动机增材制造结构强度、寿命评估与设计:研究现状及展望[J].航空动力学报,2022,37(10):2112-2126.
HU Dianylin, PAN Jinchao, MI Dong, et al. Strength and lifetime assessment and design for additive manufacturing structures in aero-engine: review and prospects[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2112-2126. (in Chinese)
- [2] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰.碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J].材料工程,2019,47(2):1-10.
LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, HE Aijie. Application requirements and challenges of CMC-SiC composites on aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 1-10. (in Chinese)
- [3] 马利,文安戈,申川川,等.纤维增强树脂复合材料中的褶皱缺陷:微应力无损检测[J].复合材料学报,2022,39(7):3590-3602.
MA Li, WEN Ange, SHEN Chuanchuan, et al. Wrinkles in fiber-reinforced resin composites: micro-stress non-destructive testing [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3590-3602. (in Chinese)
- [4] 廖向娜,贺雍律,张鉴炜,等.CNTs-纤维增强树脂基复合材料纳米-介观尺度数值模拟研究进展[J].材料工程,2020,48(12):1-11.
LIAO Xiangna, HE Yonglv, ZHANG Jianwei, et al. Research

- progress in nano-meso scale modelling of carbon nanotube reinforced FRP composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(12): 1-11. (in Chinese)
- [5] 马鹏辉, 胡殿印, 刘茜, 等. 基于数据驱动的纤维增强复合材料高效多尺度损伤分析方法[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(7): 20230051.
- MA Penghui, HU Dianyin, LIU Xi, et al. Data-driven approach for efficient multiscale damage analysis of fiber reinforced composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(7): 20230051. (in Chinese)
- [6] 温班宁, 李少林, 石多奇, 等. 复合材料高低周复合疲劳试验技术[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(1): 20230096.
- WEN Banning, LI Shaolin, SHI Duoqi, et al. Combined cycle fatigue test technology for composite materials[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(1): 20230096. (in Chinese)
- [7] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 11-25.
- ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(2): 11-25. (in Chinese)
- [8] ZHANG Xuesong, CHEN Yongjun, HU Junling. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 97: 22-34.
- [9] 林珊珊, 康达, 李新华, 等. 典型缺陷构件的计算机射线照相检测与常规射线检测对比[J]. *无损检测*, 2021, 43(11): 23-26, 57.
- LIN Shanshan, KANG Da, LI Xinhua, et al. Comparison between computed radiography testing and conventional radiography testing for typical defective components[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2021, 43(11): 23-26, 57. (in Chinese)
- [10] 常皓亮, 杨明, 朱新宇, 等. 通用飞机复合材料红外成像无损检测技术[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024, 22(7): 768-775.
- CHANG Haoliang, YANG Ming, ZHU Xinyu, et al. Infrared imaging nondestructive testing technology for general aircraft composites[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024, 22(7): 768-775. (in Chinese)
- [11] 罗忠兵, 曹欢庆, 林莉. 航空复材构件 R 区相控阵超声检测研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(14): 67-75.
- LUO Zhongbing, CAO Huanqing, LIN Li. Progress in study of phased array ultrasonic testing on CFRP radii in aerospace component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(14): 67-75. (in Chinese)
- [12] KALYANAVALLI V, ABILASHA RAMADHAS T K, SASTIKUMAR D. Long pulse thermography investigations of basalt fiber reinforced composite[J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 84-91.
- [13] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 82-99.
- MENG Lingxiao, SHI Wenzhe, LU Chao, et al. Research on the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber-wrapped gas cylinder based on coded compression[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 82-99. (in Chinese)
- [14] 刘菲菲, 刘松平, 周正干, 等. 蜂窝共固化结构高分辨率超声 C 扫描方法及应用[J]. *无损检测*, 2018, 40(8): 1-5, 27.
- LIU Feifei, LIU Songping, ZHOU Zhenggan, et al. High resolution ultrasonic C-scan method for co-cured honeycomb structures and its applications[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2018, 40(8): 1-5, 27. (in Chinese)
- [15] 李然然, 张一帆, 耿殿程, 等. V-4Cr-4Ti/Ti 复合材料界面的辐照损伤特性研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(21): 239-246.
- LI Ranran, ZHANG Yifan, GENG Diancheng, et al. Characterization of interface irradiation damage in Ti-clad V-4Cr-4Ti composite material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(21): 239-246. (in Chinese)
- [16] ZHANG Zhen, LIU Menglong, LI Qian, et al. Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan[J]. *Composites Communications*, 2020, 22: 100435.
- [17] NSENGIYUMVA W, ZHONG Shuncong, LIN Jiewen, et al. Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: a state-of-the-art review[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 112951.
- [18] 刘松平, 刘菲菲, 章清乐, 等. SiC_p/SiC 复合材料无损检测与评估技术进展[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(19): 24-30.
- LIU Songping, LIU Feifei, ZHANG Qingle, et al. Progress in non-destructive testing and evaluation of SiC_p/SiC composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(19): 24-30. (in Chinese)
- [19] 陆慧中, 孙颖, 焦亚男, 等. 典型多向 2.5D 机织预制体近净形编织结构设计[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 3101-3109.
- LU Huizhong, SUN Ying, JIAO Yanan, et al. Near net-shaped design on the architecture of typical multi-directional 2.5D woven preform[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 3101-3109. (in Chinese)
- [20] 项赫, 姜亚明, 齐业雄, 等. 纺织复合材料预制体成型过程无损检测技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(4): 1029-1042.
- XIANG He, JIANG Yaming, QI Yexiong, et al. Research progress in nondestructive testing technologies for textile composite preform forming process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4): 1029-1042. (in Chinese)
- [21] 章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像自动化快速扫描检测技术[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(13): 78-83.
- ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated X-ray digital radiography scanning imaging technique[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(13): 78-83. (in Chinese)
- [22] 贾路, 曾昊, 彭靖波, 等. 基于数据增强与多尺度融合的航空发动机叶片损伤检测[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(10): 20250155.
- JIA Lu, ZENG Hao, PENG Jingbo, et al. Aero-engine blade damage detection based on data augmentation and multi-scale fusion[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(10): 20250155. (in Chinese)
- [23] 刘菲菲, 周正干, 刘松平, 等. 复合材料结构修理高分辨率超声断面成像检测与缺陷评估[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(21): 24-31.
- LIU Feifei, ZHOU Zhenggan, LIU Songping, et al. Cross-sectional imaging and defect evaluation of composite repairs using high-resolution ultrasonic technique[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(21): 24-31. (in Chinese)
- [24] 丁凯旋, 陈冀景, 皮一涵, 等. 基于非接触声成像的碳纤维增强复合材料冲击损伤检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 2155-2162.

- 2024, 45(4): 37-45.
- DING Kaixuan, CHEN Jijing, PI Yihan, et al. Non-contact photoacoustic imaging-based detection of impact damage in carbon fiber reinforced plastic composites[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 37-45. (in Chinese)
- [25] 黄魁东, 张定华, 王凯, 等. 基于锥束 CT 切片图像的复杂零件三维表面重构[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(21): 2287-2292.
- HUANG Kuidong, ZHANG Dinghua, WANG Kai, et al. 3D surface reconstruction of complex parts based on slice images of cone-beam computed tomography[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(21): 2287-2292. (in Chinese)
- [26] 王栋欢, 于艾洋, 肖洪. 基于无监督学习的航空发动机铸造涡轮叶片缺陷检测方法[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(6): 20230800.
- WANG Donghuan, YU Aiyang, XIAO Hong. Defect detection method for casting turbine blades in aeroengines based on unsupervised learning[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(6): 20230800. (in Chinese)
- [27] 杨木金, 陆松兵, 杨大兵, 等. 某型航空发动机涡轮转子叶片断裂分析[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(12): 20240062.
- YANG Mujin, LU Songbing, YANG Dabing, et al. Fracture analysis of turbine rotor blades in an aircraft engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(12): 20240062 (in Chinese).
- [28] 朱笑, 袁丽华. 基于红外热成像的 CFRP 复合材料低速冲击损伤表征[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 4164-4171.
- ZHU Xiao, YUAN Lihua. Low-velocity impact damage characterization of CFRP composite based on infrared thermography[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 4164-4171. (in Chinese)
- [29] 杨红娟, 杨正岩, 杨雷, 等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8): 4295-4317.
- YANG Hongjuan, YANG Zhengyan, YANG Lei, et al. Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8): 4295-4317. (in Chinese)
- [30] 杨富强, 杨瑶, 李志翔, 等. X 射线工业 CT 成像过程复杂伪影抑制方法综述[J]. *自动化学报*, 2023, 49(4): 687-704.
- YANG Fuqiang, YANG Yao, LI Zhixiang, et al. Review of complex artifact reduction methods for industrial computerized tomography imaging[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(4): 687-704. (in Chinese)
- [31] 赵志鹏, 戴宁, 周鑫, 等. 复合材料曲面构件缺陷超声三维成像方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7): 257-266.
- ZHAO Zhipeng, DAI Ning, ZHOU Xin, et al. A 3D ultrasonic imaging method for defects of composite curved components[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 257-266. (in Chinese)
- [32] 都思哲, 张森, 张玉, 等. 基于 CT 图像三维重建的高温下再生混凝土孔隙特征研究[J]. *材料导报*, 2024, 38(5): 218-228.
- DU Sizhe, ZHANG Miao, ZHANG Yu, et al. Study on pore characteristics of recycled aggregate concrete at high temperature based on 3D reconstruction of CT images[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(5): 218-228. (in Chinese)
- [33] 赵恩玄, 何云勇, 沈宽, 等. 基于深度学习的铸件 CT 图像分割算法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 176-184.
- ZHAO Enxuan, HE Yunyong, SHEN Kuan, et al. Casting CT image segmentation algorithm based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(11): 176-184. (in Chinese)
- [34] 蒋明繁, 邓晓东, 史泉颖, 等. 快速扫描对 SiC/SiC 复合材料工业 CT 检测图像质量影响[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(16): 32-42.
- JIANG Mingfan, DENG Xiaodong, SHI Xiaoying, et al. Impact of fast scan on image quality of industrial CT inspection for SiC/SiC composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(16): 32-42. (in Chinese)
- [35] 杨斌, 王继辉, 冯雨薇, 等. 织物增强复合材料 Micro-CT 辅助数值仿真技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10): 5466-5485.
- YANG Bin, WANG Jihui, FENG Yuwei, et al. Advances in Micro-CT aided numerical simulation of fabric-reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10): 5466-5485. (in Chinese)
- [36] 吴若涵, 康友伟, 田小永, 等. 基于同步辐射的 3D 打印 CCF/PEEK 复合材料失效机制及缺陷分析[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(2): 747-756.
- WU Ruohan, KANG Youwei, TIAN Xiaoyong, et al. Failure mechanisms and defect analysis of 3D printed CCF/PEEK composites based on synchrotron radiation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(2): 747-756. (in Chinese)
- [37] GUO Weiyu, ZHANG Daxu, ZHANG Yi, et al. Tensile damage evolution and mechanical behaviour of SiC_f/SiC mini-composites through 4D in situ micro-CT and data-driven modelling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 279: 111439.
- [38] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J]. *材料工程*, 2022, 50(6): 49-60.
- LI Jun, LIU Yanfeng, NI Hongjiang, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(6): 49-60. (in Chinese)
- [39] 袁世峰, 郭婧, 郭孟秋, 等. 陶瓷基复合材料可磨耗环境障涂层制备及性能[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(3): 82-94.
- YUAN Shifeng, GUO Jing, GUO Mengqiu, et al. Preparation and performance of abradable environmental barrier coating on ceramic matrix composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(3): 82-94. (in Chinese)
- [40] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 64-79.
- SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research of 3D advanced aerospace composite preforms forming technology and equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(20): 64-79. (in Chinese)
- [41] 何方成, 王铮, 宋永锋, 等. 航空发动机用树脂基复合材料无损检测技术研究与应用[J]. *失效分析与预防*, 2022, 17(5): 340-346.
- HE Fangcheng, WANG Zheng, SONG Yongfeng, et al. Research and application of nondestructive testing technology of resin matrix composites for aeroengine[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2022, 17(5): 340-346. (in Chinese)
- [42] 赵付宝, 王从科, 张霞, 等. 工业 CT 在树脂基复合材料缺陷检测中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(11): 96-98.
- ZHAO Fubao, WANG Congke, ZHANG Xia, et al. Application of industrial computed tomography on testing defects in resin matrix composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(11): 96-98.

- 96-98. (in Chinese)
- [43] 谢红兰, 邓彪, 杜国浩, 等. 上海光源 X 射线成像及其在材料科学上的应用研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2021, 16(1): 46-59, 69.
XIE Honglan, DENG Biao, DU Guohao, et al. Development of X-ray imaging methodology and its applications on material science at Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2021, 16(1): 46-59, 69. (in Chinese)
- [44] 赵云, 杨波, 陶子伟, 等. 纤维增强树脂基防弹复合材料吸能机制及损伤模式研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 4606-4627.
ZHAO Yun, YANG Bo, TAO Ziwei, et al. Research progress on energy absorption mechanism and damage mode of fiber reinforced resin based bulletproof composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 4606-4627. (in Chinese)
- [45] 王从科, 董方旭, 赵付宝, 等. 碳纤维树脂基复合材料内部缺陷 X 射线成像检测的仿真[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(2): 82-87.
WANG Congke, DONG Fangxu, ZHAO Fubao, et al. The simulation of x-ray imaging detection of defects in carbon fiber resin matrix composite material[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(2): 82-87(in Chinese).
- [46] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X 射线 CT 成像检测方法对复合材料内部分层缺陷检测结果的影响研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2019(3): 86-91.
DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. Influence of X-ray CT imaging detection method on testing results of delamination defects in composite material[J]. *Composites Science and Engineering*, 2019(3): 86-91. (in Chinese)
- [47] 张鸿宇, 钱震, 蔡宏祥, 等. 低密度纤维增强纳米孔树脂基复合材料的断裂机制[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1764-1772.
ZHANG Hongyu, QIAN Zhen, CAI Hongxiang, et al. Fracture mechanism of low-density fiber reinforced nanoporous resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1764-1772. (in Chinese)
- [48] 董万鹏, 果春焕, 曹洪硕, 等. 纤维增强复合材料增材制造缺陷: 形成原因和在线监测研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1141-1157.
DONG Wanpeng, GUO Chunhuan, CAO Hongshuo, et al. Defects in additive manufacturing of fiber-reinforced composites: Research progress on formation causes and online monitoring[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(3): 1141-1157. (in Chinese)
- [49] 邵梦洁, 谢军波, 杨志, 等. 基于 Micro-CT 技术的 3D 机织预制件微观结构分析[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 4129-4138.
SHAO Mengjie, XIE Junbo, YANG Zhi, et al. Analysis of meso-structure of 3D woven preforms based on the micro-CT technology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 4129-4138. (in Chinese)
- [50] GE Lei, LI Huimin, ZHONG Jiehua, et al. Micro-CT based trans-scale damage analysis of 3D braided composites with pore defects[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 211: 108830.
- [51] SONG Xinyi, ZHOU Jin, ZHANG Di, et al. Trans-scale analysis of 3D braided composites with voids based on micro-CT imaging and unsupervised machine learning[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 249: 110494.
- [52] 汪敏. 同步辐射 CT 技术研究及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
WANG Min. Research and application of synchrotron radiation CT technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [53] 王雅娜, 任素娥, 张琴, 等. 2.5D 机织复合材料经向和纬向振动疲劳行为对比[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 109-118.
WANG Yana, REN Sue, ZHANG Qin, et al. Comparison of vibration fatigue behaviors of 2.5D woven composites in warp and weft directions[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 109-118. (in Chinese)
- [54] 邱嘉. 碳纤维增强树脂基复合材料变形破坏机理实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
QIU Jia. Experimental study on deformation and failure mechanism of carbon fiber reinforced resin composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [55] 王罗斌. 短碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的宏微观实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
WANG Luobin. Macroscopic and microscopic experimental study on mechanical properties of short carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [56] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 77-94.
LIU Shifeng, SONG Xi, XUE Tong, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 77-94. (in Chinese)
- [57] 代威珏, 敖波, 刘海强, 等. 金属增材制件射线检测缺陷检出概率分析[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(4): 20210482.
DAI Weijue, AO Bo, LIU Haiqiang, et al. POD analysis of defect in radiographic testing of metal additive parts[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(4): 20210482. (in Chinese)
- [58] 李鹏涛, 左洪福, 肖文, 等. 航空发动机叶片损伤及其修复技术研究及展望[J]. *航空学报*, 2024, 45(15): 029635.
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*, 2024, 45(15): 029635. (in Chinese)
- [59] 李仲勋. 复合材料结构三维影像处理与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Zhongxun. 3D image processing and analysis of composite structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [60] SCHUKRAFT J, LOHR C, WEIDENMANN K A. Approaches to X-ray CT evaluation of *in situ* experiments on damage evolution in an interpenetrating metal-ceramic composite with residual porosity[J]. *Applied Composite Materials*, 2023, 30(3): 815-831.
- [61] 杨平华, 何方成, 王倩妮, 等. SiC 颗粒增强铝基复合材料缺陷的无损检测[J]. *无损检测*, 2017, 39(3): 13-17.
YANG Pinghua, HE Fangcheng, WANG Qianni, et al. Nondestructive testing of defects in SiC_p/Al composites[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2017, 39(3): 13-17. (in Chinese)
- [62] SCHUKRAFT J, LOHR C, WEIDENMANN K A. 2D and 3D *in situ* mechanical testing of an interpenetrating metal ceramic composite consisting of a slurry-based ceramic foam and AlSi₁₀Mg[J]. *Composite Structures*, 2021, 263: 113742.
- [63] 王道畅. 仿贝壳珍珠层结构叠层 Al/Al₂O₃ 复合材料制备及性能测试[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Daochang. Preparation and performance test of laminated

- Al/Al₂O₃ composites with shell-like nacre structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [64] 李仁庚, 吴昊, 范国华. 同步辐射 X 射线断层扫描在失效分析中的应用[J]. *失效分析与预防*, 2021, 16(1): 28-35.
- LI Rengeng, WU Hao, FAN Guohua. Applications of synchrotron radiation X-ray computed tomography in material failure analysis[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2021, 16(1): 28-35. (in Chinese)
- [65] 陈飞. 锌基复合材料的制备及表征[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2016.
- CHEN Fei. Preparation and characterization of zinc matrix composites[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [66] 王玮, 郭恩宇, 王同敏. 铝基复合材料半固态压缩变形组织演化同步辐射原位 CT 研究[J]. *材料工程*, 2021, 49(4): 95-101.
- WANG Wei, GUO Enyu, WANG Tongmin. Microstructure evolution of Al-matrix composites during semi-solid compressive deformation revealed by synchrotron in situ CT study[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(4): 95-101. (in Chinese)
- [67] 杨金华, 董禹飞, 杨瑞, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展[J]. *航空动力*, 2021(5): 56-59.
- YANG Jinghua, DONG Yufei, YANG Rui, et al. Progress of ceramic matrix composites for aero engine[J]. *Aerospace Power*, 2021(5): 56-59(in Chinese).
- [68] 张幸红, 王义铭, 程源, 等. 超高温陶瓷复合材料研究进展[J]. *无机材料学报*, 2024, 39(6): 571-590.
- ZHANG Xinghong, WANG Yiming, CHENG Yuan, et al. Research progress on ultra-high temperature ceramic composites[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, 39(6): 571-590. (in Chinese)
- [69] 樊俊铃, 张伟, 宁宁, 等. 航空发动机陶瓷基复合材料无损表征技术研究进展[J]. *航空工程进展*, 2024, 15(3): 13-26.
- FAN Junling, ZHANG Wei, NING Ning, et al. Research progress of nondestructive characterization technologies of aeroengine ceramic matrix composites[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2024, 15(3): 13-26. (in Chinese)
- [70] KARADIMAS G, SALONITIS K. Ceramic matrix composites for aero engine applications: a review[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3017.
- [71] 熊瑛, 刘海强, 杜本莉, 等. 微焦点 CT 在陶瓷基复合材料上的检测应用[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(19): 58-63.
- XIONG Ying, LIU Haiqiang, DU Benli, et al. Application of micro-focus CT on inspection of ceramic matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(19): 58-63. (in Chinese)
- [72] 于紫梦. 异型 C/SiC 复合材料构件孤立孔隙可视化定位与分布识别技术[D]. 河北 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- YU Zimeng. Visual location and distribution identification technology of isolated pores in special-shaped c/sic composite components[D]. Qinhuangdao Hebei: Yanshan University, 2022. (in Chinese)
- [73] 梅辉, 张鼎, 夏俊超, 等. 浅谈陶瓷基复合材料无损检测方法及其进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(5): 24-30.
- MEI Hui, ZHANG Ding, XIA Junchao, et al. Brief introduction on the method and progress of nondestructive testing for ceramic matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(5): 24-30. (in Chinese)
- [74] WANG Fei, TENG Xuefeng, HU Xiaolan, et al. Damage and failure analysis of a SiC_p/SiC ceramic matrix composite using digital image correlation and acoustic emission[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 4699-4709.
- [75] 李璇. GE 在 CMC 部件生产中使用的缺陷检测方法[J]. *航空维修与工程*, 2016(6): 27.
- LI Xuan. GE advances ceramic matrix composites use[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016(6): 27. (in Chinese)
- [76] HALBIG M, JASKOWIAK M, KISER J, et al. Evaluation of ceramic matrix composite technology for aircraft turbine engine applications: AIAA-2013-0539 [R]. Grapevine, US: AIAA, 2013.
- [77] 江柏红, 于士章, 高晓进, 等. 工业 CT 检测 C/SiC 复合材料构件可靠性评定研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2017, 37(10): 997-1001.
- JIANG Baihong, YU Shizhang, GAO Xiaojin, et al. Study on the reliability of the evaluation method about the industrial CT results of the C/SiC composite structure[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2017, 37(10): 997-1001. (in Chinese)
- [78] 曾涵, 景鑫, 孙亚松. 编织 SiC(C)/SiC 复合材料细观建模与热弹性常数预报[J]. *推进技术*, 2023, 44(9): 238-252.
- ZENG Han, JING Xin, SUN Yasong. Mesoscopic modeling and thermal and mechanical constant prediction of braided SiC(C)/SiC composites[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(9): 238-252. (in Chinese)
- [79] 王龙, 刘武刚, 孔凡金, 等. X 射线 CT 在 C/SiC 复合材料微观结构和损伤表征中的应用[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(6): 72-76, 112.
- WANG Long, LIU Wugang, KONG Fanjin, et al. Application of X-ray CT to characterize the microstructures and damages in C/SiC composite material[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(6): 72-76, 112. (in Chinese)
- [80] 刘斌, 高一迪, 谭志勇, 等. 二维叠层 C/SiC 复合材料低能量冲击损伤实验[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 224202.
- LIU Bin, GAO Yidi, TAN Zhiyong, et al. Low energy level impact damage on 2D C/SiC composites: experimental study[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 224202. (in Chinese)
- [81] 冯炎建, 冯祖德, 李思维, 等. C/SiC 表面 SiC 涂层氧化的显微 CT 无损检测与分析[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 126-132.
- FENG Yanjian, FENG Zude, LI Siwei, et al. Nondestructive testing and analysis of SiC coating on surface of C/SiC composites after oxidation with micro CT[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 126-132. (in Chinese)
- [82] 梅辉, 陈曦, 邓晓东, 等. 三维针刺 C/SiC 密度梯度板的无损检测与评价[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(6): 106-112.
- MEI Hui, CHEN Xi, DENG Xiaodong, et al. Non-destructive testing and evaluation of 3D needled C/SiC plate with density gradient[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2010, 27(6): 106-112. (in Chinese)
- [83] 孙磊, 张立同, 梅辉, 等. 2D C/SiC 缺陷的无损检测与评价[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(5): 85-90.
- SUN Lei, ZHANG Litong, MEI Hui, et al. Nondestructive testing and evaluation of 2D C/SiC with defects[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2008, 25(5): 85-90. (in Chinese)
- [84] BALE H A, HABOUB A, MACDOWELL A A, et al. Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1600 °C[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 40-46.
- [85] HABOUB A, BALE H A, NASIATKA J R, et al. Tensile testing

- of materials at high temperatures above 1700 °C with *in situ* synchrotron X-ray micro-tomography[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083702.
- [86] 刘海龙, 张大旭, 祁荷音, 等. 基于 X 射线 CT 原位试验的平纹 SiC/SiC 复合材料拉伸损伤演化[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(10): 1074-1083.
LIU Hailong, ZHANG Daxu, QI Heyin, et al. Tensile damage evolution of plain weave SiC/SiC composites based on *in situ* X-ray CT tests[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(10): 1074-1083. (in Chinese)
- [87] ZENG Qingliang, SUN Lijuan, GE Jingran, et al. Damage characterization and numerical simulation of shear experiment of plain woven glass-fiber reinforced composites based on 3D geometric reconstruction[J]. *Composite Structures*, 2020, 233: 111746.
- [88] WANG Long, YUAN Kai, LUAN Xingang, et al. 3D characterizations of pores and damages in C/SiC composites by using X-ray computed tomography[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(2): 493-505.
- [89] 冯宇琦, 张毅, 张大旭, 等. 基于深度学习的 2.5D 陶瓷基复合材料损伤识别与评估[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(8): 1765-1775.
FENG Yuqi, ZHANG Yi, ZHANG Daxu, et al. Deep learning-based damage identification and evaluation of 2.5D ceramic matrix composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(8): 1765-1775. (in Chinese)
- [90] 陶洋, 张祝辉, 杨莹雪, 等. C/C 三维纺织复合材料细观结构及力学性能研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(4): 73-86.
TAO Yang, ZHANG Zhuhui, YANG Yingxue, et al. Research progress in mesostructure and mechanical properties of C/C three dimensional textile composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(4): 73-86. (in Chinese)
- [91] MUHAMMED F, MORETTI L, LAVAGGI T, et al. Influence of pyrolytic decomposition on the microstructure evolution of benzoxazine-derived carbon-carbon composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(48): 21915-21934.
- [92] WANG Chunguang, TANG Min, LIU Weikai, et al. Study on microstructure characteristics of axially braided carbon/carbon composites based on SEM and micro-CT[J]. *Materials*, 2020, 13(6): 1414.
- [93] 钱奇伟, 张昕, 杨贞军, 等. 基于 CT 图像深度学习的三维编织 C/C 复合材料微观组分与缺陷智能识别[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(7): 3536-3543.
QIAN Qiwei, ZHANG Xin, YANG Zhenjun, et al. Intelligent identification of micro components and defects of 3D braided C/C composites based on deep learning of X-ray CT images[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(7): 3536-3543. (in Chinese)
- [94] 何深远, 刘怿欢, 敖波. C/C 复合材料显微电子计算机断层扫描成像特征[J]. *无损检测*, 2020, 42(7): 56-60.
HE Shenyuan, LIU Yihuan, AO Bo. Feature of carbon/carbon composites based on micro-CT[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2020, 42(7): 56-60. (in Chinese)
- [95] 李新涛, 张东生, 冯志海, 等. X 射线 CT 技术在 C/C 复合材料研究中的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2016, 46(1): 42-51, 64.
LI Xintao, ZHANG Dongsheng, FENG Zhihai, et al. Application of X-ray CT technique on study of C/C composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(1): 42-51, 64. (in Chinese)
- [96] 江柏红, 周金帅, 高晓进, 等. 基于显微 CT 技术的 C/C-SiC 复合材料孔隙率测量方法[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(4): 122-126.
JIANG Baihong, ZHOU Jinshuai, GAO Xiaojin, et al. Porosity measurement method of C/C-SiC composites based on micro-CT technology[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(4): 122-126. (in Chinese)
- [97] 张海军, 周储伟. 基于显微 CT 图像的细编穿刺碳/碳复合材料细观力学模型[J]. *材料工程*, 2016, 44(5): 65-71.
ZHANG Haijun, ZHOU Chuwei. Meso-mechanical model on fine weave pierced C/C composites based on micro computed tomography[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(5): 65-71. (in Chinese)
- [98] 冯振宇, 迟琪琳, 崔怀天, 等. 平纹机织与 2.5D 机织复合材料平板弹道冲击特性对比[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 425116.
FENG Zhenyu, CHI Qilin, CUI Huaitian, et al. Comparison of ballistic impact behaviors between plain woven and 2.5D woven fabric composite plates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 425116. (in Chinese)
- [99] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J]. *自动化学报*, 2020, 46(11): 2319-2336.
LI Shaobo, YANG Jing, WANG Zheng, et al. Review of development and application of defect detection technology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(11): 2319-2336. (in Chinese)
- [100] ANVARI P, ASHRAFKHORASANI M, HABIBI A, et al. Artifacts in optical coherence tomography angiography[J]. *Journal of Ophthalmic & Vision Research*, 2021, 16(2): 271-286.
- [101] 柴天佑. 工业人工智能发展方向[J]. *自动化学报*, 2020, 46(10): 2005-2012.
CHAI Tianyou. Development directions of industrial artificial intelligence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(10): 2005-2012. (in Chinese)
- [102] 王兰豪, 卫涛杰, 余刚, 等. 基于协同计算的矿浆密度自适应智能检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(10): 237-246.
WANG Lanhao, WEI Taojie, YU Gang, et al. Adaptive intelligent detection method of pulp density based on collaborative computing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(10): 237-246. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)