

显微计算机断层扫描在纤维增强复合材料中的应用

杨 飒^{1,2*} 祖 宁^{1,2} 杨 阳^{1,2}

1. 天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192

2. 国家市场监督管理总局重点实验室(特种设备数字孪生共性技术) 天津 300192

摘 要: 本文论述了显微计算机断层扫描(Micro-CT)技术在纤维增强复合材料检测中的研究进展。综述了国内外近十年间利用Micro-CT技术在纤维增强复合材料微观缺陷检测、孔隙率与密度分析和复合材料建模中的应用,探讨了显微计算机断层扫描的标准化进展,最后根据目前国内显微计算机断层扫描的不足及存在的问题,对该技术未来的发展方向进行了展望。

关键词: 显微计算机断层扫描; 复合材料; 标准化; 应用

纤维增强复合材料是由纤维增强相与树脂、陶瓷或金属基体相组成的先进材料。与传统材料相比,纤维增强复合材料在强度、模量、抗疲劳、耐腐蚀性、各向异性及可设计性方面具有显著优势,在化工和医药领域具有重要应用。在化工领域,纤维增强复合材料广泛应用于航空航天、轨道交通及复合材料电池等领域;在医药领域,常用于手术器械支架和医疗影像设备。然而,在恶劣环境和复杂工况下,复合材料的力学性能可能会受到影响,进而带来安全隐患。因此,复合材料在服役前或服役期间的安全性评估至关重要。

显微计算机断层扫描(Micro-CT)经过十多年的发展,已成为目前最精确、最有效的无损检测方法之一。Micro-CT对复合材料种类和缺陷的适应性较强,优于传统无损检测技术,可在不影响材料或结构内部状态的情况下检测出微裂纹、分层、纤维拔出和断裂等缺陷。Micro-CT的检测结果以三维图像呈现,具有直观、可靠的优势,重构的三维图像可用于定性和定量描述材料的物理性能。基于该技术的特点,其主要应用包括:(1)检测微裂纹或内部分层/脱粘等微观缺陷;(2)测量材料均匀性及孔洞尺寸;(3)内部装配结构检测;(4)反馈工程(RE):将监测结果与先进制造技术结合以实现工程应用。

第一作者: 杨飒(1995-),男,工程师,研究生学历,主要研究特种设备无损检测技术。

通讯作者: 王璇(1986-),男,高级工程师,研究生学历,主要研究特种设备无损检测及数字孪生。

资助项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK016);天津市科技计划项目(24YFXTX200090);天津市市场监督管理委员会科技计划项目(2023-W06、2024-W44)

本文对显微计算机断层扫描在纤维增强复合材料无损检测中的应用与进展进行阐述,同时结合当前的发展状况,指出该技术存在的问题,并对未来的发展趋势进行展望。

1 显微计算机断层扫描在微观缺陷检测中的应用

Micro-CT已广泛应用于纤维增强复合材料的微观缺陷检测。编织复合材料结构复杂,具有明显的非均匀性特征,易在疲劳载荷下产生裂纹、分层等缺陷,显著影响材料的强度和刚度。因此,亟需一种高效的无损检测方法来自表征复合材料内部结构及缺陷演化。李媛媛利用Micro-CT研究了三维编织复合材料的冲击剪切行为,揭示了主要的破坏类型为纤维断裂、分层和界面开裂,并将能量吸收历程分为三个阶段。刘晓东通过Micro-CT研究了三维五向编织复合材料的渐进拉-拉疲劳损伤,揭示了减纱点和孔隙对疲劳失效进程的加速作用。Shi等研究了双向和单向混合编织复合材料管材在轴压作用下的破坏行为,获得了损伤裂纹的萌生与扩展过程图像。Bull等也基于Micro-CT表征了碳纤维复合材料的冲击损伤。随着人工智能技术的发展,Micro-CT与深度学习算法的结合为复合材料缺陷的自动化识别提供了新的思路。钱奇伟等^[1]使用Micro-CT对三维编织碳/碳复合材料进行扫描,获得了18.27 μm 分辨率的内部结构图像,并采用基于深度学习的语义分割算法实现了三维微观组分与缺陷的智能识别。Micro-CT与其他无损检测技术相结合,能够更加全面地理解复合材料的损伤行为。张鹏飞等结合Micro-CT与其他无损检测技术,研究了加载方向对三维五向编织复合材料连续弯曲损伤的影响,识别了损伤的演化与分布特征。结果表明,纵向承载试件的损伤主要由纤维和纱线损伤引起,而横向承载试件的损伤形式则为纤维滑移、界面脱粘、基体开裂和纤维断裂。刘武刚

等^[2]结合声发射技术和Micro-CT,研究了陶瓷基高温复合材料的损伤行为及内部微观损伤形貌,识别了损伤机制和相应的声发射特征频率。Wang等^[3]则是提出了一种融合算法,该算法结合了来自超声和Micro-CT成像的数据,以检测GFRP复合材料中的分层和夹杂缺陷。

Micro-CT在复合材料微观缺陷检测中扮演重要角色。通过其高分辨率的三维成像能力, Micro-CT能够准确地捕捉到材料内部的微观损伤信息,且与其他检测技术如深度学习和声发射技术的结合,极大提高缺陷识别和损伤分析的效率和精度。

2 显微计算机断层扫描在密度分布测量中的应用

孔隙率是指固化过程中未排除的残余挥发物形成的空隙体积与总体积之比。复合材料内部各组分对X射线的吸收率不同,导致三维重构图像中的各组分呈现不同的灰度值,基于此原理可以测量内部孔洞或空隙的大小、形状和位置。孔隙率直接影响复合材料的力学性能,孔隙在承载过程中会扩展成微裂纹,进而可能导致大面积开裂。通常,复合材料的孔隙率需控制在1%-2%之间。肖鹏等基于Micro-CT技术,成功测量了碳纤维增强复合材料的孔隙率,并发现试样体积越大,检测结果越接近真实孔隙率。陶洋等采用Micro-CT技术对三种针刺C/C复合材料的孔隙率和分布进行了统计,结合力学测试和显微镜观察,分析了材料的损伤机制。Wang等结合Micro-CT与声发射技术,研究了孔隙率对碳纤维复合材料损伤的影响,发现孔隙率的增加加速了微观损伤向宏观损伤的转变。增材制造聚合物复合材料表现出复杂的热驱动现象,会在内部结构中引入空隙或孔隙导致严重的不连续性。Satapathy等^[4]通过Micro-CT扫描的大型数据集,捕获了增材制造中关键打印参数对3D打印复合材料孔隙率的大小、形状和位置的影响。研究发现孔隙率与打印样品的堆积密度呈负线性相关,较快的打印速度和较高的挤出速率会产生细长的层间空隙,而较低的喷嘴温度会导致大而对称的珠间空隙。

Micro-CT可以借助高分辨率图像重构材料内部孔隙的大小、形状和分布,可用于评估材料的力学性能和损伤机制,也能够有效地揭示孔隙对复合材料损伤和力学性能的影响,帮助优化材料设计。

3 显微计算机断层扫描在复合材料建模中的应用

复合材料力学性能的研究核心为构建复合材料宏观性能与细观结构及材料组分间的量化关系。复合材料建模与力学性能分析中,为了提高数值模拟的精度,实现材料宏观性能的预报,以显微计算机断层扫描的三维图像为基础,构建符合材料真实结构的细观模型。Micro-

CT的多尺度成像能力可覆盖从整体部件到单根纤维的多个层级,因此该技术逐渐被应用到纤维增强复合材料的数值模拟当中。

以Micro-CT图像为基础的直接建模技术应用价值较高,即对图像中各区域进行分割,根据空间分部信息,再对重要区域进行离散,生成数字孪生模型用于精准描述织物的形貌,作为复合材料数值模拟的输入,在优化复合材料的结构设计、评价力学性能等方面具有良好的应用前景。蔡恒等^[5]在细观尺度下提出了三维高精度有限体积均化细观力学模型,并通过CT技术表征短纤维增强复合材料的细观结构,量化了细观短纤维的空间取向和细观长度等几何特征。根据短纤维分布的几何特征,建立简化的椭球夹杂力学模型,评估短纤维增强复合材料的各向异性力学性能。方国东选择纤维的截面形状为八边形等效截面,根据随机模拟理论模拟纤维的随机弯曲路径,对三维编织碳纤维复合材料的力学性能进行了预报。Ya等在三维五向碳纤维复合材料中引入少量玻璃,利用两种纤维对X射线的吸收率不同,区分纤维在材料中的变形和破坏情况。复合材料的建模趋势逐渐从精细化方向发展,利用该技术得到真是微观结构,并基于此建立符合真实情况的模型,使得数值模拟结果具有更高的精度和鲁棒性。

4 显微计算机断层扫描的标准化进展

显微计算机断层扫描(Micro-CT)技术快速发展的同时,国内外标准化建设也取得了显著进展。我国已逐步建立起较为完善的工业CT检测标准体系,其中GB/T 29067-2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)图像测量方法》系列标准为复合材料检测提供了基础性规范,明确了空间分辨率、密度分辨率和伪影抑制等核心性能指标的技术要求。配套标准如GB/T 29069-2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法》进一步提出了系统性能测试方法,确保检测结果的可靠性和重复性。在应用层面,GB/T 38535-2020《纤维增强树脂基复合材料工业计算机层析成像(CT)检测方法》规定了复合材料CT检测的设备要求(分辨率 $\leq 50\mu\text{m}$)、扫描参数和缺陷分析方法,重点解决孔隙、分层和纤维排列异常等典型缺陷的检测问题。标准创新性地提出了三维缺陷量化方法和纤维取向分析技术,建立了完整的检测流程和评价体系,为航空航天、风电等领域的复合材料质量检测提供了规范依据。国际标准方面,ASTM E1695-20和ISO 15708:2017无损检测系列标准分别从航空航天领域验收标准和材料密度定量分析角度提供了补充依据,而我国标准在动态扫描速率等指标

上已具备国际竞争力。实际研究中,多维度各方向上标准化的实施显著拓展了该技术的应用范围,除纤维增强复合材料外,铸件、增材制造孔隙率、焊接接头、孔隙结构等相关国家标准的研制进一步推动了CT技术在材料科学、先进制造等领域的规范化应用。这些标准体系的建立不仅完善了不同材料类型的检测规范,更通过统一的技术要求和方法学框架,实现了跨行业、跨材料体系的检测结果可比性,为材料研发、质量控制和工艺优化提供了标准化支撑。

然而,现有标准体系在应对复合材料高温原位检测、纳米纤维增强材料微观表征等新兴需求时仍显不足,特别是在高温环境下的检测参数标定、纳米级分辨率的评价方法等方面缺乏统一规范。同时,AI辅助缺陷识别等前沿技术也已开始应用,但相关标准研制明显滞后,尚未建立算法验证、数据标注等关键技术要求的标准化框架。这种标准滞后于技术发展的现状,制约了CT检测技术在新兴领域的规范化应用,亟需加快建立与技术创新相匹配的标准体系,实现技术研发与标准制定的协同推进。

5 显微计算机断层扫描存在的问题

显微计算机断层扫描在复合材料无损检测中的应用具有不可替代的优势,但该技术仍存在一定的局限性。在使用计算机对工件进行扫描时,通常面临检测效率低和检测成本高的问题。为了获得高分辨率的图像,扫描时间通常需要超过1.5小时,而将二维图像重构为三维图像也需耗费额外时间。因此,提升试件扫描、数据处理和二维图像重构速度已成为新设备开发中的一个关键问题。这一问题的解决需要开发新的重建算法,并对图像中的伪影进行校正,从而提高重构图像的质量。此外,Micro-CT技术在平面薄板构件的检测中存在一定的局限性,而大型结构的现场检测也面临诸多挑战。标准化方面,复杂环境下的检测参数标定、纳米级分辨率的评价

方法等方面缺乏统一规范,AI辅助缺陷识别等前沿技术的相关标准研制明显滞后,缺乏标准化框架。因此,如何应用Micro-CT技术深入探讨复合材料在复杂环境下的破坏机理,快速获得高质量、高分辨率检测图像,同时完善相关标准体系以指导实际应用,将成为未来具有巨大潜力的发展方向。

结束语:展望未来, Micro-CT技术在纤维增强复合材料检测领域将朝着更高精度、更智能化、更标准化的方向发展。随着技术的持续创新,设备成本有望逐步降低,检测效率将进一步提升,使其在更多领域得到广泛应用。加强标准化研究与制定,推动行业规范统一,有助于提升检测结果的可靠性与通用性。同时,深化与人工智能、大数据等前沿技术的融合,开发更先进的自动化分析算法,将实现对复合材料性能与缺陷的更高效、更精准评估,为航空航天、医药等关键领域的复合材料安全应用提供坚实保障,助力推动相关产业高质量发展。

参考文献

- [1]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,2024,41:1-9.
- [2]刘武刚,王龙,宋俊柏,等.拉伸载荷下陶瓷基高温复合材料损伤状态特征分析[J].无损检测,2023,45(11):30-34.
- [3]Wang J, Han D, Peng L, et al. Non-destructive damage evaluation of composites based on X-ray and ultrasonic image fusion[J]. Insight, 2024, 66(9): 541-547.
- [4]Satapathy Y, Nikitin V, Hana J, et al. Multiscale porosity characterization in additively manufactured polymer nanocomposites using micro-computed tomography[J]. Additive Manufacturing, 2024:86, 104199.
- [5]蔡恒.短纤维增强复合材料多尺度建模与失效机理研究[D].西安电子科技大学,2023.