

树脂基复合材料缺陷表征与评价方法研究综述

王潘丁¹, 牛国浩¹, 李元晨¹, 章凌², 雷红帅¹

(1. 北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 复合材料结构中的制造缺陷严重影响航天装备的服役性能, 如何实现复合材料缺陷的高精度检测表征与评价对航天装备的安全性设计意义重大。针对树脂基复合材料缺陷的先进表征技术及评价方法进行概述, 重点介绍了复合材料成型工艺与典型缺陷类型、常用复合材料缺陷检测与原位表征技术和复合材料缺陷分析评价方法。通过对复合材料缺陷研究现状的梳理, 可见计算机断层扫描技术和基于图像的数值计算方法正以其独特的精确度优势在复合材料缺陷的表征与分析领域崭露头角。同时还对先进的复合材料检测与评价技术在航天装备中复合材料结构安全性设计与可靠性分析方面的应用和发展趋势进行了展望。

关键词: 纤维增强树脂基复合材料; 成型工艺; 缺陷; 缺陷表征; 性能评价

中图分类号: V414.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2023) 05-0051-13

A Review of Research on Internal Defects Characterization and Evaluation Methods of Fiber Reinforced Polymer Composites

WANG Panding¹, NIU Guohao¹, LI Yuanchen¹, ZHANG Ling², LEI Hongshuai¹

(1. Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The service performances of composite equipment are heavily determined by the manufacture-induced defects. It is important to develop the advanced internal defect testing technique and evaluation method for the safety design of aerospace equipment. This paper provides an overview of advanced characterization techniques and evaluation methods for internal defects in resin matrix composites, focusing on the composite manufacture processes and typical internal defects, internal ex-situ and in-situ testing methods for composite defect detection, and methods for analyzing and evaluating the internal defects effects. Based on the current research status of composite defects, it is evident that computed tomography and image-based numerical computation methods are emerging in the characterization and analysis of composite defects with their unique advantage of accuracy. Meanwhile, the development trend of advanced characterization techniques and accurate computational analysis methods for composite structure safety design and reliability analysis in aerospace equipment are prospected.

Key words: Fiber reinforced polymer composites; Molding process; Internal defects; Defects characterization; Performance evaluation

收稿日期: 2023-07-28; 修订日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金 (12002031); 国家自然科学基金 (12027901); 国家自然科学基金 (11872012)

作者简介: 王潘丁 (1995-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复合材料多尺度计算及实验力学。

通信作者简介: 雷红帅 (1986-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轻质多功能材料与结构力学。

0 引言

树脂基纤维增强复合材料具有优异的比强度、比刚度、抗腐蚀等特性，在航空航天工程、船舶制造等各类装备中得到广泛的应用，实现了装备结构的轻量化与性能指标的显著提升^[1-2]。然而复合材料作为多相异质材料，具有复杂的宏微观几何特征^[3]，复合材料由纤维、基体与界面相组成，同时复合材料在铺放、固化、成型、加工等制备过程、运输装配过程与服役过程中，易诱发裂纹、孔洞、黏连、分层等缺陷，这些缺陷呈现多尺度随机分布、三维几何形貌复杂、失效作用机理多样、诱发因素不确定等特点，严重制约了复合材料结构的安全性与其使用寿命^[4-5]。开展树脂基复合材料的制造缺陷的评价表征并揭示其对复合材料力学性能的影响机制，对于复合材料构件的强度预测和可靠性评价意义重大。

本文围绕树脂基复合材料缺陷表征与评价方法，着重介绍树脂基复合材料成型工艺与缺陷的类型、缺陷表征技术与评价方法等方面的国内外研究现状，并对未来发展趋势进行了讨论。本文旨在推动树脂基复合材料及缺陷评价表征方法在实际工程中的应用。

1 树脂基复合材料制造工艺与缺陷类型

复合材料技术领域包含设计、材料、工艺、设备与测试5大要素，其中复合材料工艺方法品种繁多，层出不穷，近年来发生了长足的进步。而复合材料的力学性能与缺陷受到成型方法与参数的决定性影响，在复合材料成型过程中，材料受真空压力分布、树脂流动率、固化速度和固化压力等制造因素的影响，诱发不同类型的制造缺陷，常见缺陷种类与特征如图1所示。本章就树脂基复合材料的各类制造工艺与常见的缺陷种类进行简要总结。

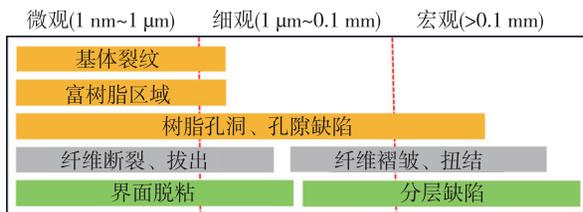
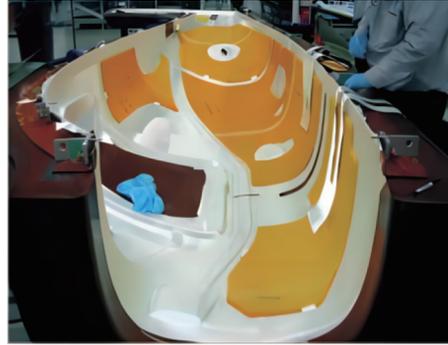


图1 复合材料常见缺陷类型与尺度

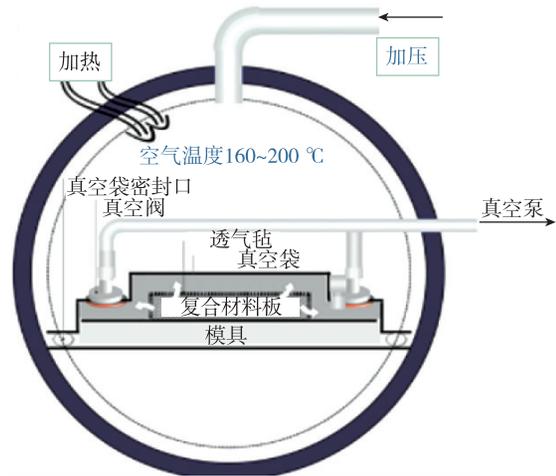
Fig. 1 Types and scales of defects in composite materials

1.1 树脂基复合材料常用制造工艺

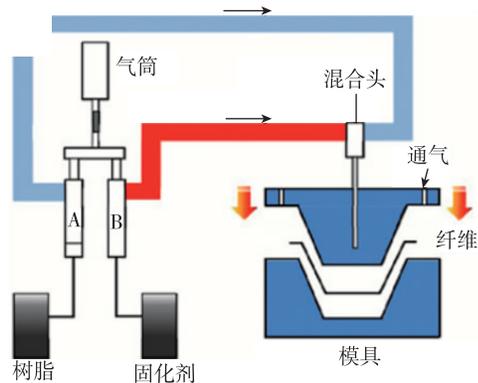
对于纤维增强复合材料而言，常用的成型制造工艺包括手糊成型法、热压成型法、树脂传递模塑成型法、缠绕成型法、挤压成型法等，如图2所示。



(a) 手糊成型^[6]



(b) 热压成型^[9]



(c) 树脂传递模塑成型^[11]

图2 复合材料常用制造工艺

Fig. 2 Manufacturing processes for composite materials

手糊成型法是复合材料生产过程中应用较为普遍的一种成型方法，主要原理是通过手工操作以不饱和聚酯树脂或环氧树脂等为基体材料将增强材料粘结在一起^[6]。其成型过程包括涂刷涂膜剂、纤维铺设、挤压、包裹真空袋、固化、脱模等。手糊成型法具有模具简单、操作便捷、不受限于尺寸和形状的要求等优点，然而其成型效果稳定性差，制出的构件力学性能较低，成品受生产人员、生产环境、操作方式等多重因素影响较大，且具有较高体积百分数的缺陷，因此该工艺不适合大批量高性能复合材料的成型与生产^[7]。

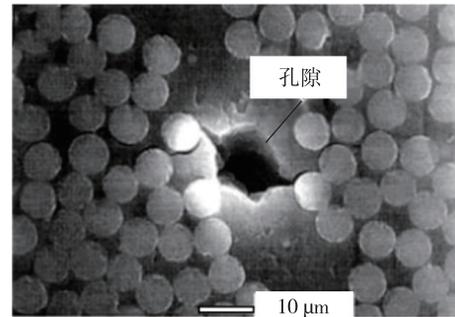
热压成型工艺是复合材料构件成型的主要方法之一，应用广泛，现已成为航空航天领域承力结构件成型的首选工艺^[8-9]。热压成型中材料铺设打袋后放置于热压罐中，在真空状态下，通过升温、加压、保温、冷却、泄压等过程使树脂固化成型。热压成型工艺具有构件受压均匀，成型质量好，纤维体积分数稳定、安全性高、生产效率高等优势，适合复合材料大批量生产加工^[10]。然而热压成型的构件尺寸受限于热压罐，且单次制备成本较高。热压成型的复合材料具有较高的力学性能与较低的缺陷体积百分数，并且随着成型压力的提升，复合材料的缺陷含量进一步降低。

树脂传递模塑（RTM）成型法是一种采用真空辅助将树脂注入到闭合模具浸润增强材料并固化的工艺方法，在航空航天等领域有广泛的应用，可以满足纵横加筋、翻边等复杂复合材料结构高精度成型加工的要求，这是热压成型和手糊成型所达不到的^[11-12]。树脂传递模塑成型具有工艺质量高、成型构件孔隙含量低、可制造复杂结构，生产效率高等优点^[13]。然而RTM成型工艺对模具密封性要求高，模具设计不当、预成形体制造质量偏低以及工艺参数的选择不合理等会导致复合材料制件出现气泡和干斑以及富树脂区等缺陷。

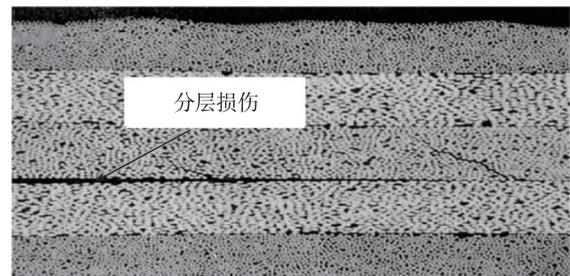
1.2 树脂基复合材料常见制造缺陷

复合材料结构在制备、加工以及使用过程中，不可避免地会产生微裂纹、孔隙、界面脱粘等缺陷，这对复合材料的性能有着十分显著的影响，制造缺陷根据其在纤维、基体与界面的区域与特征进行分类：纤维增强相在制备中会产生局部断裂、起皱和扭结等缺陷，树脂基体的制造缺陷主要包括孔隙、夹杂和树脂富集等，而复合材料层

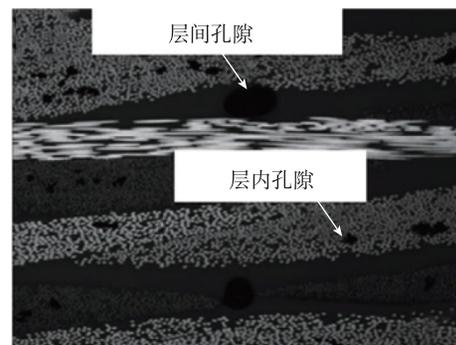
间易诱发分层缺陷，这些缺陷在复合材料中广泛存在，如图3所示。



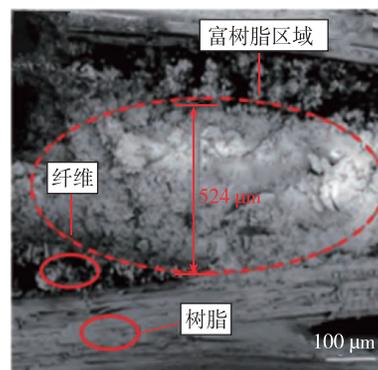
(a) 单向板孔隙^[14]



(b) 分层缺陷^[15]



(c) 平纹织物孔隙^[16]



(d) 富树脂区域^[17]

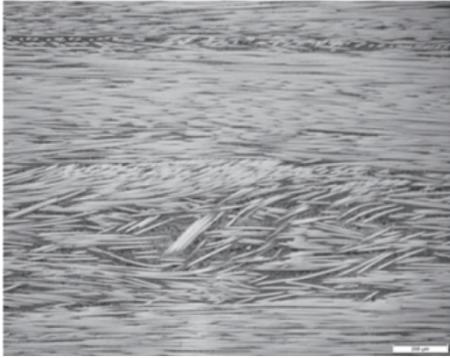
(e) 局部纤维扭结^[18]

图3 常见缺陷类型

Fig. 3 Common defect types

分层缺陷是影响复合材料使用寿命的重要缺陷类型,指的是层合板层间开裂产生的大面积间隙,主要由固化工艺不合理、面粘接强度过低、加工与服役环境中受到冲击损伤等因素导致,固化工艺中抽真空效果差、压力不均匀、未完全冷却即脱膜等均为易产生分层缺陷的原因^[19-20]。分层缺陷会导致复材结构件压缩强度和弯曲强度的降低,在外载作用下出现分层损伤扩展导致层板提早断裂,严重影响结构的承载能力与使用稳定性。孔隙缺陷是复合材料中最为常见的一种缺陷,受到工艺过程与工艺参数影响,复合材料孔隙率有较大差别^[21]。孔隙的形成通常由树脂固化不充分、基体未完全浸润或者材料空气未排除等因素产生,其尺寸在数微米至几百微米之间^[22]。具有较高孔隙率的复合材料性能受环境影响加剧,水分、氧气等物质更容易侵入复合材料,材料的渗透率更高,同时受到外部载荷时孔隙位置易形成裂纹并扩展,最终导致复合材料的失效。航空航天领域对于复合材料材料整体的孔隙率要求一般不得高于2%^[23]。复合材料纤维扭结与皱曲是复合材料纤维增强体的一种常见缺陷,在复合材料成型过程中局部压力偏大时,基体无法维持对纤维的横向支撑作用,纤维屈曲扭结形成缺陷^[24]。而固化过程中基体的固化变形以及层板的弯曲应力等因素则导致纤维皱曲缺陷^[25],这些缺陷对于材料的压缩强度与疲劳性能有着显著影响^[26]。

2 复合材料缺陷检测方法

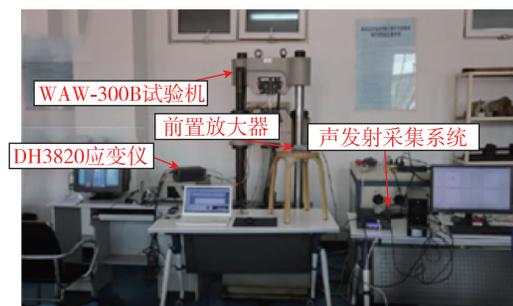
准确检测评估复合材料与结构缺陷对于提高装备服役安全性、降低维护成本至关重要,复合材料缺陷的表征评价需要覆盖其整个生命周期,

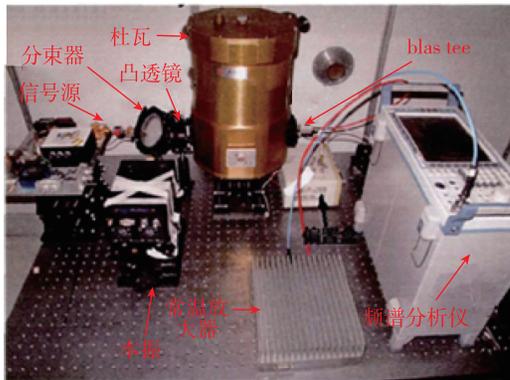
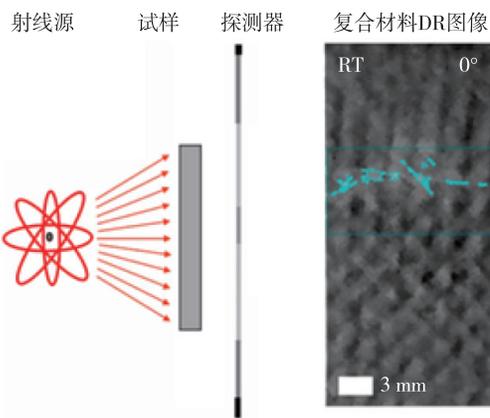
在制造阶段,复合材料缺陷检测评价可以有效评估其工艺参数与产品质量寿命;在服役阶段,检测复合材料结构件出现的损伤缺陷,能够评估结构损伤状态和剩余寿命,为复合材料结构的维护与替换提供依据。目前已经有多种检测方法用于树脂基复合材料的缺陷检测表征,本章对这些表征方法进行概述。

2.1 复合材料缺陷常用检测方法

复合材料缺陷检测方法可以分为破坏性检测和无损检测两种。复合材料缺陷破坏性检测方法包括密度法、显微照相法和连续断层成像等。密度法通过测量纤维、基体与复合材料的密度以及树脂的质量分数,进而计算出材料孔隙率,该方法相对简单,不需要复杂仪器,得到了广泛的应用,但无法得到复合材料孔隙尺寸、形状及其分布等信息,而且测量精度较差。显微照相法通过选定被测试样的几个截面,通过抛光或者切割观察样品截面,计算断面内的孔隙总面积与断面面积的百分比从而得出孔隙率,该方法可以测定孔隙的形状和分布情况,测量精度相对密度法稍有提升,但是要获得较高精确度,必须对大量截面进行检测^[27]。

复合材料缺陷无损表征方法主要包括声发射检测、超声检测、涡流检测、脉冲红外热成像检测、太赫兹检测和X射线检测等,如图4所示。声发射(Acoustic Emission, AE)方法利用检测物体受到外力发生形变或破坏时释放局部能量而产生的声信号,通过分析来检测纤维断裂、基体开裂、脱粘、分层等缺陷^[28-29]。声发射检测方法主要应用于分析纤维和复合材料拉伸断裂、轴压压缩等损伤过程,对于静态物体的检测较为困难。超声检测(UT)利用超声波在检测物体的人射波、透射波与反射波进行分析,可以精确地测出缺陷尺寸与位置,具有较高灵活性与高准确检测效率,已被广泛用于评估复合材料与结构中的孔

(a) 声发射检测^[41]

(b) 超声检测^[42](c) 太赫兹检测^[43]

(d) X 射线检测

图 4 树脂基复合材料缺陷表征方法

Fig. 4 Characterization methods of internal defects in resin matrix composites

洞、裂纹与分层等缺陷^[30-32]。然而超声检测要求被测样品表面平整，目前复杂构型的超声检测与三维特征反演较为困难。涡流检测、脉冲红外热成像检测与太赫兹检测方法同样被用于复合材料缺陷的检测评价，然而这些方法对被测样品的材质、形状与检测环境具有较高的要求，适用范围较为局限^[33-38]。X 射线检测 (Radiographic Testing, RT) 方法是一种在复合材料缺陷检测中广泛应用的方法，根据 X 射线在穿过物体时材料不同组分对射线吸收能力不同，从而实现复合材料复杂缺陷的无损检测。X

射线检测方法具有灵敏度高、检测结果直观与适用性强等优点，可以满足树脂基复合材料中的孔洞、裂纹、分层等多种缺陷的检测评价需求^[39-40]。然而 X 射线检测方法检测成本高，而且检测过程具有辐照，需要专职人员在屏蔽设施中进行操作。

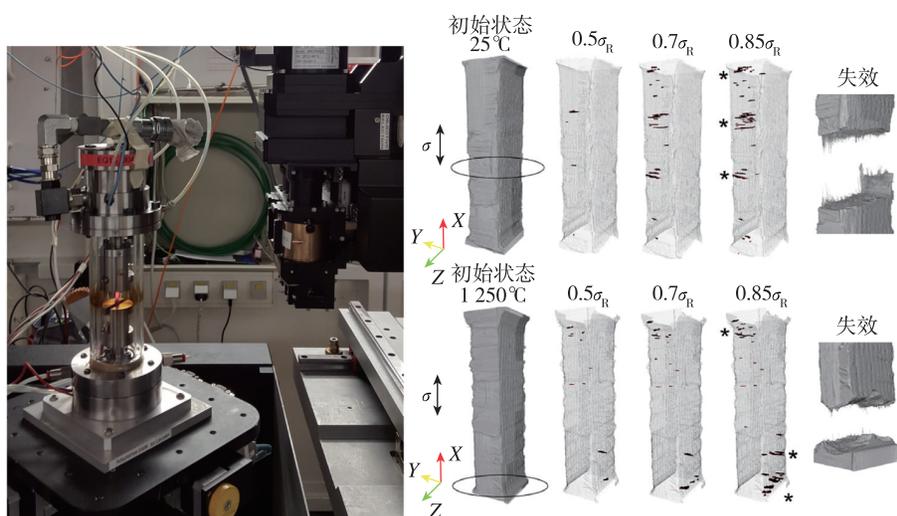
2.2 CT 表征方法

复合材料缺陷具有复杂的三维几何特征，传统的检测评价方法很难实现复合材料宏微观缺陷复杂三维特征的定量化表征评价需求。X 射线计算机断层扫描 (Computed Tomography, CT) 技术作为在射线检测基础上发展起来的三维检测方法，实验测试中试样放置于转台上进行 360° 旋转，探测器接收 X 射线穿过物体不同角度的剩余能量，之后通过 Radon 逆运算的算法重建出复合材料真实的三维信息，实现复合材料与结构三维特征的检测与评价，其中微焦点 X 射线 CT 扫描 (Micro-CT) 最高精度达到 500 nm，满足复合材料纤维扭结断裂、基体微裂纹等微观特征的表征需求。印度安那大学的 Vasudevan 等^[44]通过 X 射线 CT 扫描了不同铺层的编织复合材料低速冲击前后损伤情况，揭示了损伤区域大小与不同铺层能量吸收能力之间的关系。土耳其萨班哲大学的 Mehmet 等^[45]采用微米 CT 和红外热成像表征了剪切载荷下平纹编织复合材料厚度效应对损伤演化和裂纹扩展过程的影响机制，材料裂纹密度随试样厚度的增加而增大。

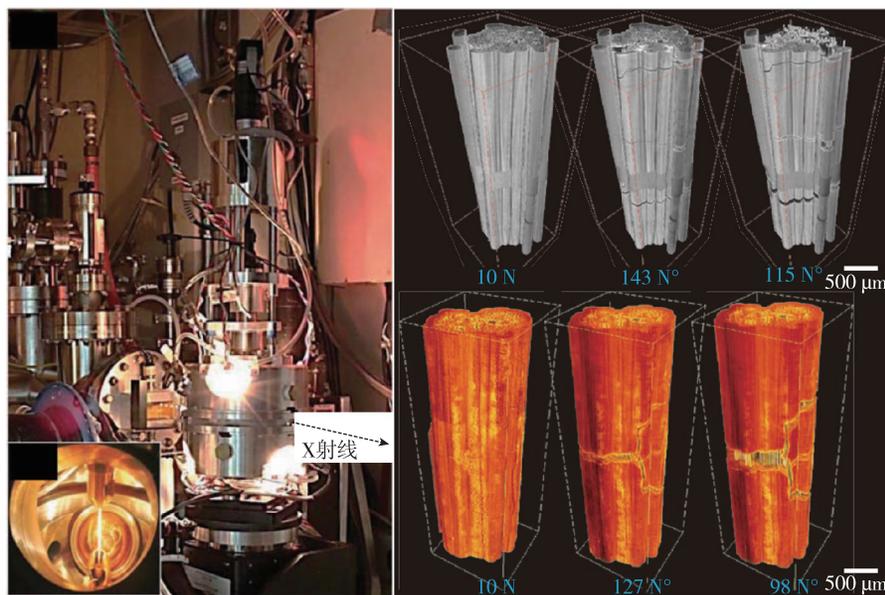
为了观测外载下复合材料缺陷损伤演化过程，揭示复合材料的损伤演化与失效机理，近年来研究人员将力热原位加载装置与 Micro-CT 相结合，开发了多场原位 CT 成像装置，追踪复合材料的损伤演化过程。英国曼彻斯特大学的 Wright 教授团队^[46]2011 年首次通过高分辨率同步辐射 CT 同步观测了正交层合板在拉伸载荷下的纤维断裂累积情况，观测结果表明纤维断裂前复合材料有大量基体开裂和分层损伤发生，而基体损伤的部位与纤维断裂间并没有很强的相关性。中国科学技术大学的胡小方教授等人在上海同步辐射光源上搭建了拉伸 CT 原位加载装置，观测了拉伸载荷下短切碳纤维复合材料的损伤演化过程，分析了纤维断裂、纤维拔出、纤维脱胶等失效形式占比，并通过纤维复合材料应力传递理论滞滞模型分析了纤维应力分布及无效长度对力学性能的影响^[47-48]。法国波尔多大学的 Mazars 等^[49]搭建了高温原位 CT 设备，观测了室温和 1 250 °C 下 SiC/SiC 陶瓷

基复合材料的失效行为,如图5(a)所示,并通过数字体相关方法提取了残差场分析材料损伤机理,原位CT表征结果表明常温与高温下复合材料破坏分别由裂纹扩展与纤维剥离导致。美国劳伦斯国家重点实验室的Bale等^[50]搭建了1750℃的超高温原位加载CT装置,如图5(b)所示,实现了1750℃拉伸载荷下SiC/SiC复合材料缺陷损伤演化过程的原位观测,发现室温和高温下材料裂纹扩展行为存在差异。国内外现有力学原位CT表征装置主要采用将力热加载装置放于转台同步旋转的方式进行CT成像,精密转台承重较小且X穿

透路径上要求材料X射线透明,以实现更好的成像效果,因此现有装置采用较薄的铝合金、有机玻璃或者碳玻璃等材料搭建,加载能力小于5000N,无法满足大尺寸复合材料试样的原位表征需求^[51-52]。北京理工大学方岱宁院士课题组采用实验室微焦点X射线成像与试验机上下夹头同步旋转控制的方法,将大载荷试验机与CT成像系统集成,搭建了国内首台100kN大载荷原位加载双源双探CT成像系统,并在此系统上,集成搭建了一200℃超低温与1200℃高温原位CT表征装置^[53-54],如图5(c)所示。基于该表征平台,实现



(a) 法国波尔多大学高温原位CT装置^[49]



(b) 美国加州大学伯克利分校高温原位CT装置^[50]

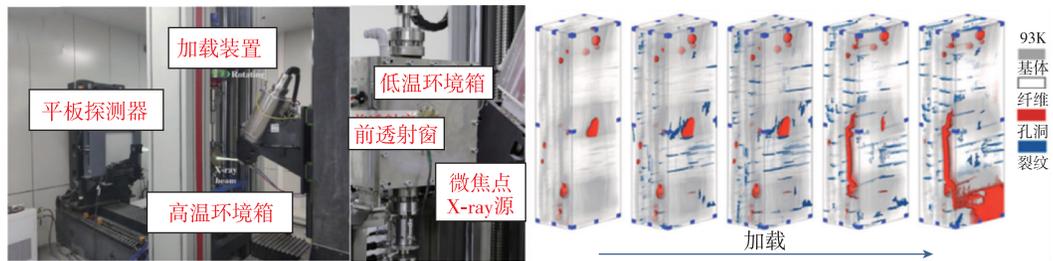
(c) 北京理工大学高/低温原位 CT 装置^[53-54]

图 5 多场原位 CT 装置

Fig. 5 Multi-field in-situ CT devices

了 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 玻璃纤维/环氧树脂编制复合材料 (WFCs)^[54]、室温短碳纤维增强聚合物 (SCFRP) 复合材料^[55] 和 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 陶瓷基复合材料 (CMCs)^[56] 拉伸载荷下损伤演化的定量分析, 并发展了神经网络驱动的复合材料 CT 图像识别、提取与动态追踪方法^[57], 分析了孔洞、裂纹、经纬纱等特征参数在不同载荷下的演化过程, 并通过数字体相关方法测量了试样三维变形场, 揭示了复合材料的失效机理。

综上所述, CT 表征与原位 CT 表征方法已经广泛应用于复合材料缺陷的检测与表征, 近年来受到国内外的广泛关注, 为复合材料复杂的宏微观缺陷检测表征评价提供了有力的工具, 同时实验方法的发展为极端环境下复合材料结构的设计提供了数据支撑。

3 复合材料缺陷评价方法

复合材料与结构的复杂工艺过程中不可避免产生几何特征复杂的缺陷, 这些缺陷对复合材料的宏观力学性能尤其是材料强度有显著影响, 因此亟须开展复合材料缺陷评价方法的研究, 实现复合材料构件的安全性设计^[58]。自 20 世纪 60 年代以来, 研究人员针对复合材料缺陷对材料力学性能影响机理研究和评价方法开展了大量探索与研究, 复合材料的强度与失效模式相关, 而损伤对材料失效的影响机理复杂且通常涉及多个尺度, 对含缺陷复合材料强度的评价问题难以通过宏观力学理论方法解决^[59-61]。早期对于复合材料缺陷特征的量化与残余性能的评价多采用实验方法, 近年来数值模拟方法也得到了广泛应用, 可以大幅度降低复合材料研发周期, 揭示复合材料损伤机理。随着 CT 三维表征与数值计算能力的提升, CT 图像驱动的图像有限元方法也提供了一种考虑

缺陷真实几何特征的复合材料损伤演化与强度分析评价方法, 本章主要针对这些缺陷评价方法的研究现状展开介绍。

3.1 预制缺陷方法

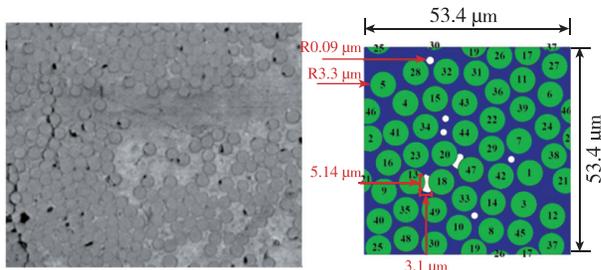
预制缺陷方法是指通过人为设计模拟复合材料缺陷, 在复合材料中预制代表真实缺陷的相关结构特征, 批量化地获取含缺陷的复合材料, 之后量化分析缺陷类型、缺陷尺寸等因素对复合材料力学性能影响机制。针对缺陷类别, 研究人员发展了相应的预制缺陷技术与评价方法: 美国西门子能源公司的 Huang 等^[62] 采用不适当的固化压力和真空条件人为增加复合材料的孔隙并建立了横向裂纹密度与孔隙统计信息的关联模型; IM-DEA 材料研究所的 Hernández 等^[63] 通过调整固化温度的方法制作了含多种孔隙率的复合材料层板, 并评估了孔隙缺陷对材料力学性能的影响; 美国国家航空航天局兰利研究中心的 Juarez 等^[64] 通过在断裂韧性试验件中预埋薄膜的方法来模拟复合材料中的层间分层缺陷。预制缺陷相关的研究工作对复合材料缺陷评价意义重大, 然而此类方法的缺陷是人为在特定的条件下刻意预制, 难以对缺陷的形状、大小及产生位置上进行精准的控制, 并不能真实反映在实际生产工艺中复合材料的真实缺陷数量与几何特征。

3.2 基于缺陷统计信息的数值模拟方法

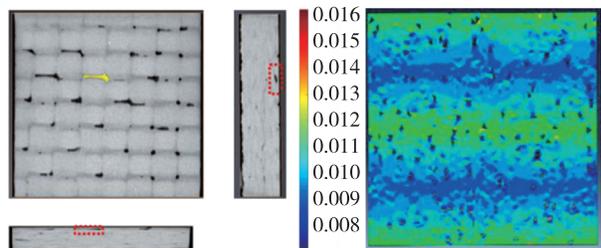
复合材料缺陷数值模拟方法的研究自 20 世纪 90 年代出现, 随着有限元方法的成熟及计算机计算能力的提升, 这一方法被广泛采用, 结合先进表征方法 (如 Micro-CT 技术) 的发展, 研究人员可以准确系统地对缺陷的种类、几何特征及位置信息进行分析统计, 并针对性地发展了复合材料缺陷评价的数值计算方法。

3.2.1 孔隙缺陷

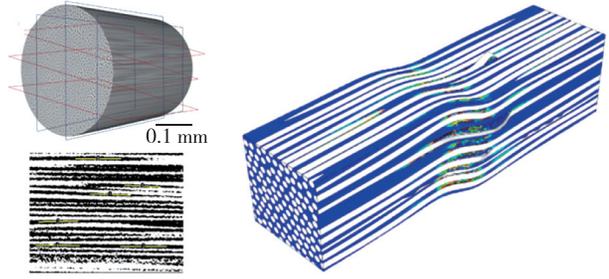
复合材料孔隙缺陷的尺寸主要集中于微米级，研究人员采用代表体积元（Representation Volume Element, RVE）模型研究孔隙对复合材料力学性能的影响，代表体积元模型基于复合材料中周期性分布的基本假设，选取一个具有代表性的典型单元进行性能分析，随后基于均匀化的方法获得材料的力学响应^[65]。针对纤维增强复合材料的代表体积元模型通常由纤维（纤维束）、基体和界面3部分组成，孔隙的模拟主要通过基体几何模型中引入孔洞，建立包含孔洞的数值计算模型，研究孔隙含量、形状、大小和空间分布对复合材料力学性能的影响^[66]。印度理工学院的 Sharma 等^[67]基于 Micro-CT 对复合材料层合板的表征结果，将孔隙缺陷细分为纤维之间形状不规则的孔隙和基体中圆形孔隙两类，如图 6 (a) 所示，研究了这两种缺陷对单向层板力学性能的影响。北京理工大学的王潘丁副教授等^[68]采用 Micro-CT 技术获取了平纹织物复合材料中孔隙缺陷的真实三维尺寸信息（如图 6 (b)），基于此信息建立的含缺陷模型准确预测了含孔隙碳纤维平纹织物复合材料的力学性能。西北工业大学的赵美英教授等^[69]基于不规则孔隙随机分布算法研究了不规则孔隙对单向板横向拉伸性能的影响。



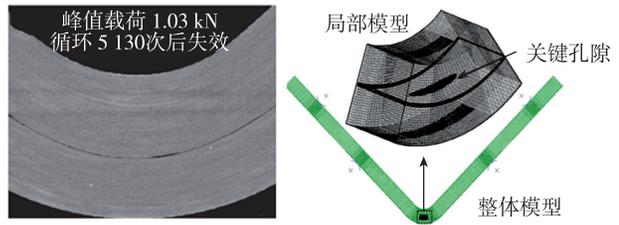
(a) 含孔隙缺陷单向板模型^[67]



(b) 含孔隙缺陷平纹织物模型^[81]



(c) 纤维扭结缺陷分析模型^[72]



(d) 含分层缺陷复合材料梁模型^[73]

图 6 复合材料缺陷数值分析模型案例

Fig. 6 Cases of numerical analysis model for composite materials with internal defects

3.2.2 纤维扭结

纤维扭结的缺陷评价方法主要通过建立具有不同曲率与空间位置的纤维 RVE 模型分析缺陷对材料的影响，这种方法需要模型在沿纤维方向具备相当尺寸以体现纤维曲率及空间位置的影响。美国陆军研究实验室的 Bogetti 等^[70]分析了纤维增强复合材料中铺层波纹度对刚度和强度的影响，研究了纤维波长和振幅等参数对层合板力学性能的影响。佛罗里达州立大学的 Tsai 等^[71]研究了变长径比下纤维的均匀波纹度及其分布对复合材料有效刚度的影响，结果表明波纹度对单向复合材料的拉伸和剪切模量的影响较大。贝尔法斯特女王大学的 Varandas 等^[72]基于单向板 Micro-CT 扫描结果建立了考虑纤维随机曲率分布的代表体积元分析框架，如图 6 (c) 所示，该模型较为精确地反映纤维几何特征的影响，进而分析了单向板的纵向拉伸和压缩下的失效机理。

3.2.3 分层缺陷

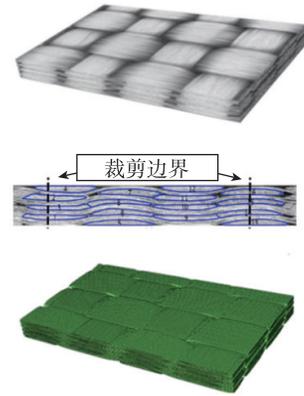
复合材料分层缺陷评价主要通过复合材料宏观建模中引入缺陷进行研究，从数值方法来看，对分层缺陷及扩展的模拟方法主要包括扩展有限元方法 (Extended Finite Element Method, XFEM)、内聚力

模型 (Cohesive Zone Model, CZM) 和虚拟裂纹闭合方法 (Virtual Crack Closure Technique, VCCT)。日本会津大学 Nikishkov 等^[73] 基于 Micro-CT 数据建立了复合材料短梁剪切和弯曲梁试件的三维有限元模型, 在模型中通过显著降低分层部位的单元性能来模拟层间拉伸刚度和层间剪切刚度的退化, 如图 6 (d) 所示。帕多瓦大学的 Ricotta 等^[74] 建立了二维有限元模型并采用 VCCT 技术进行裂纹尖端分层的模拟, 以研究 DCB 试验中复合材料的 I 型层间断裂韧性。大连理工大学的常鑫^[75] 选择内聚力模型和 VCCT 方法作为分层模拟方法, 对含典型分层缺陷的复合材料结构开展了失效分析, 并提出了分形内聚力模型研究了分层产生的复杂形貌。

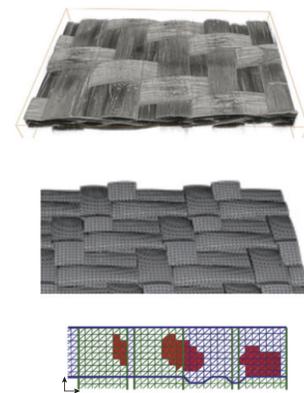
3.3 图像有限元方法

CT 扫描技术为纤维增强复合材料的缺陷高保真、高精度评价提供了新的解决途径。基于 CT 扫描重构可以获取复合材料的真实数字化几何模型, 将几何模型直接网格划分获得考虑缺陷真实几何形貌的复合材料有限元数值分析模型, 最终预测外载下复合材料的响应, 这种方法被称为图像有限元方法 (Image-based Finite Element)^[76]。

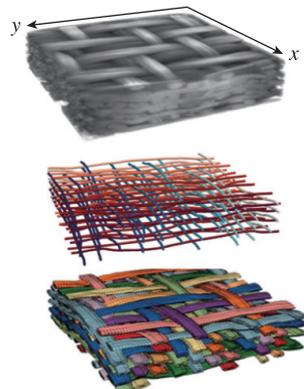
图像有限元方法的工作流程大致可分为 4 个步骤: 通过体积或表面对结构进行数字化成像、将图像转化为虚拟几何模型、将几何模型处理为有限元数值分析格式及基于图像有限元模型的仿真、可视化及后处理。图像有限元方法已广泛应用于纤维增强复合材料的分析中 (如图 7 所示), 其中的核心问题是复合材料组元与缺陷的分割建模和有限元网格划分。CT 吸收成像通过 X 射线穿过不同物质的穿透率不同进行成像, 然而碳纤维



(b) 平纹织物四面体网格模型^[78]



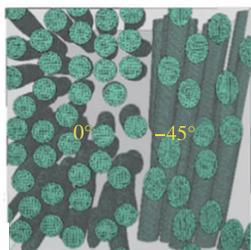
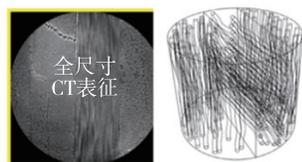
(c) Voronoi 分割体素网格模型^[79]



(d) U-net 神经网络分割重构的平纹织物分析模型^[82]

图 7 复合材料图像有限元计算模型

Fig. 7 Composite image finite element calculation models



(a) 单向板四面体网格模型^[77]

树脂基复合材料增强相和基体的射线吸收率较为贴近, CT 成像对比度较差, 复合材料组元分割是难点。英国曼彻斯特大学的 Sencu 等^[77] 在全局堆栈滤波方法的基础上提出了基于贝叶斯理论的纤维分割算法, 实现了纤维在重构结果中的精确跟踪与重构, 建立了层合板的四面体网格分析模

型。奥克兰大学的 Wijaya 等^[78]采用无监督聚类算法和 3D 映射平滑算法快速建立了二维编织复合材料图像有限元模型。布里斯托大学的 Said 等^[79]建立了理想化的三维编织复合材料结构全尺寸模型,通过基于 Voronoi 分割和体素网格划分开展了有限元计算,并与实验表征结果和有限元模型计算结果进行了对比。南京航空航天大学的宋迎东教授团队^[80]研究了含真实孔洞缺陷的陶瓷基复合材料四面体网格模型热传导特性。北京理工大学的方岱宁院士团队^[81]针对复合材料孔隙提出了基于非均匀 B 样条重建和布尔逻辑运算图像的有限元建模算法,利用所建立的模型方法,分析了孔隙缺陷几何特征对试件力学性能与损伤特性的影响。总体而言,图像有限元技术在复合材料缺陷影响评价研究中具有广阔的应用前景,针对含制作工艺缺陷的大型复合材料构件,基于 Micro-CT 扫描结果采用图像有限元方法构建结构多尺度“数字孪生”模型的研究方法,对于预测大型复材构件的在轨运行性能、评价含缺陷装备性能与可靠性意义重大。

4 展望

复合材料的大规模应用是航天装备轻量化的关键一环,而缺陷检测与评价是复合材料结构生产、装配与服役的安全保障,本文重点概述了复合材料缺陷种类、先进复合材料缺陷检测与原位表征技术以及复合材料缺陷分析评价方法国内外研究现状以及关键技术挑战。复合材料缺陷检测表征评价未来需要重点关注的工程与科学问题,主要包括以下几个方面:

1) 复合材料结构缺陷多尺度评价:单一检测方法对复合材料多尺度缺陷具有局限性,建立多种检测方法相结合的复合材料结构缺陷评价方法,评估宏微观缺陷对复合材料力学行为的影响机制。

2) 极端环境下复合材料缺陷检测与评价:复合材料低温贮箱、复合材料热防护结构等复合材料典型结构件在服役过程中面临着超高温、超低温、冷热交变、失重、高真空等极端环境影响,建立复合材料结构极端环境缺陷原位检测评价方法,是亟须解决的关键工程及科学问题。

3) 在轨检测表征评价与数字孪生技术:深空探测、载人登月等新一代航天任务为复合材料结构带来了新的挑战,长期服役极端载荷下,如何

实现复合材料结构缺陷在轨检测与表征,发展人工智能算法驱动的复合材料构件数字孪生评价技术,是亟待解决的焦点问题。

参考文献

- [1] 杨纪龙,景磊,刘甲秋,等. 复合材料先进技术发展概述[J]. 纤维复合材料, 2019, 36(1): 38-42.
- [2] 王国辉,曾杜娟,刘观日,等. 中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(5): 1-11.
- [3] Beckwith S W. Manufacturing defects in composite structures[J]. SAMPE Journal, 2012, 48(5): 52-53.
- [4] 杨成鹏,矫桂琼,王波. 2D-C/SiC 复合材料的拉伸损伤研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(6): 87-92.
- [5] Wang B C, He P J, Kang Y N, et al. Ultrasonic testing of carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. Journal of Sensors, 2022, 2022: 1-20.
- [6] 李军,陈祥宝. 通用航空复合材料的发展现状与挑战[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 206-211.
- [7] 蔡闻峰,周惠群,于凤丽. 树脂基碳纤维复合材料成型工艺现状及发展方向[J]. 航空制造技术, 2008, 51(10): 54-57.
- [8] 李树健,湛利华,彭文飞,等. 先进复合材料构件热压罐成型工艺研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(11): 2927-2931.
- [9] Baghdad A, El Mabrouk K. Autoclave process parameters affecting physical properties of carbon fiber reinforced polymer composite laminates using response surface methodology [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2023, 42(15/16): 762-775.
- [10] 徐强. 复合材料热压罐成型工艺仿真技术研究综述[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 34-38, 47.
- [11] Park S, Seo M K. Interface science and composites [M]. Amsterdam: Academic Press/Elsevier, 2011.
- [12] 柯俊,吴震宇,史文库,等. 复合材料板簧制造工艺的研究进展[J]. 汽车工程, 2020, 42(8): 1131-1138.
- [13] 罗维,郭强,赵文琛,等. 复合材料纵横加筋隔框 RTM 成型工艺[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(6): 44-48.
- [14] Talreja R. Studies on the failure analysis of composite materials with manufacturing defects[J]. Mechanics of Composite Materials, 2013, 49(1): 35-44.
- [15] Kreculj D, Rasuo B. Impact damage modeling in laminated composite aircraft structures [M]. Sustainable Composites for Aerospace Applications. Amsterdam: Elsevier, 2018: 125-153.
- [16] 史俊伟,荀国立,刘松平. 单向带与织物碳纤维增强

- 树脂基复合材料中孔隙的细观特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 628-640.
- [17] 葛立立, 俞鸣明, 方琳, 等. 含富树脂缺陷碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸性能及失效机制[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4961-4971.
- [18] Nunna S, Ravindran A R, Mroszczok J, et al. A review of the structural factors which control compression in carbon fibres and their composites[J]. *Composite Structures*, 2023, 303: 116293.
- [19] 赵丽滨, 龚愉, 张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 171-199.
- [20] Faraz A, Biermann D, Weinert K. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(15): 1185-1196.
- [21] 朱洪艳, 李地红, 张东兴, 等. 孔隙率对碳纤维/环氧树脂复合材料层合板湿热性能的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 24-30.
- [22] 朱洪艳, 李地红, 张东兴, 等. 孔隙对纤维增强聚合物基复合材料层压板力学性能影响的研究进展[J]. 中国机械工程, 2009, 20(13): 1619-1624, 1629.
- [23] 鲁明远, 韩保红, 赫万恒, 等. 孔隙对陶瓷基复合材料强度影响的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 180-185.
- [24] Schultheisz C R, Waas A M. Compressive failure of composites, part I: testing and micromechanical theories[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1996, 32(1): 1-42.
- [25] Jensen H M, Christoffersen J. Kink band formation in fiber reinforced materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1997, 45(7): 1121-1136.
- [26] Hörrmann S, Adumitroaie A, Viechtbauer C, et al. The effect of fiber waviness on the fatigue life of CFRP materials[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 139-147.
- [27] Micheva K D, Smith S J. Array tomography: a new tool for imaging the molecular architecture and ultrastructure of neural circuits[J]. *Neuron*, 2007, 55(1): 25-36.
- [28] Romhány G, Czigány T, Karger-Kocsis J. Failure assessment and evaluation of damage development and crack growth in polymer composites via localization of acoustic emission events: a review[J]. *Polymer Reviews*, 2017, 57(3): 397-439.
- [29] Brunner A J. Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with Acoustic Emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 173: 629-637.
- [30] Hasiotis T, Badogiannis E, Tsouvalis NG. Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials[J]. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 2011(3): 192-203.
- [31] Shiino M Y, Faria M C M, Botelho E C, et al. Assessment of cumulative damage by using ultrasonic C-scan on carbon fiber/epoxy composites under thermal cycling[J]. *Materials Research*, 2012, 15(4): 495-499.
- [32] Patronen J, Stenroos C, Virkkunen M, et al. Inspection of carbon fibre-titanium-carbon fibre stepped-lap joint[C]. *European Conference on Non-Destructive Testing. NDT. Net*, 2018.
- [33] Koyama K, Hoshikawa H, Kojima G. Eddy current non-destructive testing for carbon fiber-reinforced composites[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2013, 135(4): 041501.
- [34] Pastuszak P D, Muc A, Barski M. Methods of infrared non-destructive techniques: review and experimental studies[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 542: 131-141.
- [35] Papa I, Boccarusso L, Langella A, et al. Carbon/glass hybrid composite laminates in vinylester resin: bending and low velocity impact tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111571.
- [36] Destic F, Petitjean Y, Massenot S, et al. THz QCL-based active imaging applied to composite materials diagnostic[C]. *Proceedings of 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Rome, Italy. IEEE Press, 2010: 1-2.
- [37] Karpowicz N, Zhong H A, Zhang C L, et al. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 054105.
- [38] Destic F, Bouvet C. Impact damages detection on composite materials by THz imaging[J]. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, 6: 53-62.
- [39] Senck S, Scheerer M, Revol V, et al. Microcrack characterization in loaded CFRP laminates using quantitative two- and three-dimensional X-ray dark-field imaging[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 115: 206-214.
- [40] Revol V, Jerjen I, Kottler C, et al. Sub-pixel porosity

- revealed by X-ray scatter dark field imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(4): 044912.
- [41] 沈臣. 风力机叶片主梁损伤的声发射检测识别研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [42] 周海鹏, 邢松龄, 韩赞东, 等. 基于非线性超声检测的搅拌摩擦焊接头疲劳寿命评价[J]. *无损检测*, 2022, 44(12): 1-5, 17.
- [43] 张鹤. 高速、低噪声太赫兹检测系统[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [44] Vasudevan A, Senthil Kumaran S, Naresh K, et al. Advanced 3D and 2D damage assessment of low velocity impact response of glass and Kevlar fiber reinforced epoxy hybrid composites[J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2018, 4(3): 493-510.
- [45] Ali H Q, Aydin M S, Awais R M, et al. The role of "thickness effect" on the damage progression and crack growth inside the plain-woven carbon fiber composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 110108.
- [46] Scott A E, Mavrogordato M, Wright P, et al. In situ fibre fracture measurement in carbon-epoxy laminates using high resolution computed tomography[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(12): 1471-1477.
- [47] Hu X F, Wang L B, Xu F, et al. In situ observations of fractures in short carbon fiber/epoxy composites [J]. *Carbon*, 2014, 67: 368-376.
- [48] Liu B, Hu X F, Li Y C, et al. Internal three-dimensional strain evolution of the failure process for short carbon fiber composite through in situ synchrotron radiation X-ray computed tomography [J]. *Carbon*, 2020, 157: 506-514.
- [49] Mazars V, Caty O, Couégnat G, et al. Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography in-situ tensile tests[J]. *Acta Materialia*, 2017, 140: 130-139.
- [50] Bale H A, Haboub A, MacDowell A A, et al. Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1 600 °C [J]. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 40-46.
- [51] 王龙, 邢睿思, 张跃平, 等. 基于同步辐射 X 射线成像的力热试验系统[J]. *强度与环境*, 2022, 49(6): 45-50.
- [52] 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.
- [53] Zhu R Q, Qu Z L, Yang S, et al. An in situ microtomography apparatus with a laboratory X-ray source for elevated temperatures of up to 1 000 °C [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(3): 033704.
- [54] Li Y C, Wei Y, Meng J X, et al. Damage evolution characterization of glass fabric composites at cryogenic temperatures via in-situ tensile X-ray computed tomography tests [J]. *Composites Communications*, 2022, 35: 101326.
- [55] Wang P D, Wen J W, Lei H S, et al. Morphology characterization and in-situ three-dimensional strain field monitor of short carbon fiber-reinforced polymer composites under tension [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113634.
- [56] Niu G H, Zhu R Q, Lei H S, et al. Internal damage evolution investigation of C/SiC composites using in-situ tensile X-ray computed tomography testing and digital volume correlation at 1000 °C [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107247.
- [57] Zhu R Q, Niu G H, Qu Z L, et al. In-situ quantitative tracking of micro-crack evolution behavior inside CMCs under load at high temperature: a deep learning method [J]. *Acta Materialia*, 2023, 255: 119073.
- [58] 贾振元, 肖军, 湛利华, 等. 大型航空复合材料承力构件制造关键技术[J]. *中国基础科学*, 2019, 21(2): 20-27.
- [59] Chen J, Yu Z Y, Jin H R. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: a review [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 655.
- [60] Alves M P, Cimini C A Jr, Ha S K. Fiber waviness and its effect on the mechanical performance of fiber reinforced polymer composites: an enhanced review [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106526.
- [61] Fu Y T, Yao X F. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites [J]. *Composites Part C: Open Access*, 2022, 8: 100276.
- [62] Huang Y X, Varna J, Talreja R. Statistical methodology for assessing manufacturing quality related to transverse cracking in cross ply laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 95: 100-106.
- [63] Hernández S, Sket F, González C, et al. Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: void distribution and mechanical properties [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 85: 73-82.
- [64] Juarez P, Leckey C A C. Aerogel to simulate delami-

- nation and porosity defects in carbon-fiber reinforced polymer composites[C]. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1949(1):120008.
- [65] Guo Z S, Liu L, Zhang B M, et al. Critical void content for thermoset composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(17): 1775-1790.
- [66] Carraro P A, Maragoni L, Quaresimin M. Influence of manufacturing induced defects on damage initiation and propagation in carbon/epoxy NCF laminates[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2015, 1(1): 44-53.
- [67] Daggumati S, Sharma A, Van Paeppegem W. Synergistic effects of microscale variabilities on the thermo-mechanical behavior of a UD CFRP ply [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 242:108004.
- [68] Wang P D, Lei H S, Zhu X L, et al. Effect of manufacturing defect on mechanical performance of plain weave carbon/epoxy composite based on 3D geometrical reconstruction[J]. Composite Structures, 2018, 199: 38-52.
- [69] 李波, 赵美英, 万小鹏. 不规则孔隙对复合材料横向拉伸力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 356-361.
- [70] Bogetti T A, Gillespie J W JR, Lamontia M A. The influence of ply waviness with nonlinear shear on the stiffness and strength reduction of composite laminates[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1994, 7(2): 76-90.
- [71] Tsai C H, Zhang C, Jack D A, et al. The effect of inclusion waviness and waviness distribution on elastic properties of fiber-reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(1): 62-70.
- [72] Varandas L F, Catalanotti G, Melro A R, et al. Micromechanical modelling of the longitudinal compressive and tensile failure of unidirectional composites: the effect of fibre misalignment introduced via a stochastic process[J]. International Journal of Solids and Structures, 2020, 203: 157-176.
- [73] Nikishkov G, Nikishkov Y, Makeev A. Finite element mesh generation for composites with ply waviness based on X-ray computed tomography[J]. Advances in Engineering Software, 2013, 58: 35-44.
- [74] Ricotta M, Quaresimin M, Talreja R. Mode I Strain Energy Release Rate in composite laminates in the presence of voids[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(13): 2616-2623.
- [75] 常鑫. 含孔隙和分层缺陷大型复合材料构件强度多尺度分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [76] Ulrich D, van Rietbergen B, Weinans H, et al. Finite element analysis of trabecular bone structure: a comparison of image-based meshing techniques [J]. Journal of Biomechanics, 1998, 31(12): 1187-1192.
- [77] Sencu R M, Yang Z, Wang Y C, et al. Generation of micro-scale finite element models from synchrotron X-ray CT images for multidirectional carbon fibre reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 85-95.
- [78] Wijaya W, Ali M A, Umer R, et al. An automatic methodology to CT-scans of 2D woven textile fabrics to structured finite element and voxel meshes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125: 105561.
- [79] El Said B, Ivanov D, Long A C, et al. Multi-scale modelling of strongly heterogeneous 3D composite structures using spatial Voronoi tessellation [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 88: 50-71.
- [80] Gao X G, Han X, Song Y D. X-ray computed tomography based microstructure reconstruction and numerical estimation of thermal conductivity of 2.5D ceramic matrix composite[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 9790-9797.
- [81] Wang P D, Lei H S, Zhu X L, et al. Investigation on the mechanical properties of epoxy resin with void defects using digital image correlation and image-based finite element method[J]. Polymer Testing, 2018, 72: 223-231.
- [82] Mendoza A, Trullo R, Wielhorski Y. Descriptive modeling of textiles using FE simulations and deep learning [J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 108897.

引用格式:王潘丁, 牛国浩, 李元晨, 等. 树脂基复合材料缺陷表征与评价方法研究综述[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(5): 51-63.

Citation: Wang P D, Niu G H, Li Y C, et al. A review of research on internal defects characterization and evaluation methods of fiber reinforced polymer composites [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(5): 51-63.