

文章编号: 1674-8190(2024)03-013-14

航空发动机陶瓷基复合材料无损表征技术研究进展

樊俊铃, 张伟, 宁宁, 詹绍正, 杨鹏飞, 贾文博

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

摘要: 随着陶瓷基复合材料在先进航空发动机热端部件中的推广应用, 对其在工艺研发、制备加工、试验考核以及使用服役等阶段形成的缺陷/损伤进行高效准确的无损表征尤为重要。由于陶瓷基复合材料复杂的制备成型工艺及多相复合引起的高度非均质和各向异性, 导致传统基于整体均质化假设的无损检测技术面临诸多挑战。本文结合陶瓷基复合材料在航空发动机领域的应用情况, 分析了其在制备、加工及服役等阶段的典型缺陷/损伤类型及特征, 重点回顾了近年来陶瓷基复合材料无损表征技术的研究进展及应用情况, 总结了现有无损表征技术面临的主要挑战, 并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 航空发动机; 热端部件; 陶瓷基复合材料; 无损表征; 研究进展

中图分类号: V263

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.02

Research progress of nondestructive characterization technologies of aeroengine ceramic matrix composites

FAN Junling, ZHANG Wei, NING Ning, ZHAN Shaozheng, YANG Pengfei, JIA Wenbo

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research

Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the widespread application of ceramic matrix composites in hot end components of advanced aeroengines, it becomes particularly important to conduct efficient and accurate nondestructive characterization of defects/damages formed during the whole life cycle. Due to the complex preparation and forming process of ceramic matrix composites and the high heterogeneity and anisotropy caused by multiphase composite, the traditional nondestructive testing technology based on the assumption of global homogenization faces many challenges. Based on the application of ceramic matrix composites in aeroengine field, the typical defect/damage types and characteristics in the whole life cycle of ceramic matrix composites are analyzed. The research progress and application of nondestructive characterization techniques of ceramic matrix composites in recent years are reviewed, the main challenges faced by existing nondestructive characterization techniques are summarized, and the future development trend is prospected.

Key words: aeroengine; hot end components; ceramic matrix composites; nondestructive characterization; research progress

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51601175); 航空科学基金(20200009023004); 中国科协青年人才托举工程(2022QNRC001); 企业创新青年人才托举计划(2021-1-2)

通信作者: 张伟(1990-), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: zhangwei_dut@163.com

引用格式: 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)

0 引言

从航空推进技术的发展历程来看,新一代航空发动机发展的首要目标是持续提高推重比^[1-2]。随着推重比的大幅增加,发动机热端构件服役环境变得越来越苛刻,法国 Snecma 公司研制的 M88-2 航空发动机推重比高达 10,其高压涡轮进口温度已经超过 1 500 °C,当推重比提升至 12~15 后,发动机涡轮进口平均温度预计将达到 1 800 °C 以上^[3-4]。在承受高温载荷的同时,高推重比发动机的燃烧室、加力燃烧室及涡轮等关键热端构件还需要保持甚至提高结构强度和耐久性,并进一步降低结构质量。在这种极端服役环境下,即使采用先进的气膜冷却和热障涂层技术,传统高温合金的工作温度也已超过 1 100 °C 的使用极限,无法满足新一代航空发动机的研制需求。

陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composites, 简称 CMC)是一种兼具金属和陶瓷性能优点的新型结构功能一体化材料,通过各结构单元的优化设计产生协同效应,进而达到性能的合理匹配,在减轻结构质量和提高燃烧效率方面具有无可比拟的优势。采用颗粒、晶须或纤维等增强体对陶瓷材料进行补强增韧后,陶瓷基复合材料的性能得到了显著提升。这种复合材料不再像传统陶瓷那样脆性大、对裂纹敏感,而是展现出一种类似于金属的“假塑性”断裂行为,且兼具陶瓷质量轻、耐超高温、抗腐蚀等优异性能^[5-7]。如 SiC/SiC 复合材料的密度仅为高温合金的 1/4~1/3,潜在使用温度可达 1 650 °C,并能够在 1 200~1 350 °C 长时服役^[8]。20 世纪 80 年代以来,国外围绕航空发动机陶瓷基复合材料开展了大量研究工作,美国、法国、英国和日本等国家围绕陶瓷基复合材料相继组织实施了多个专项研究计划,形成了完备的工艺研发、材料和构件制备、试验验证和服役应用全链条技术体系,实现了燃烧室、喷管、涡轮外环和导向叶片等发动机关键热端部件的工程化应用^[3,9]。近年来,为适应新一代航空发动机的研制需求,我国也开展了一系列重大研发工程,重点开展了陶瓷基复合材料工艺探索、制备加工和考核验证等基础性研究,并完成了部分典型热端部件的装机考核试验,有力支撑了我国航空工业的发展^[10-11]。

随着陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用进程的不断加快,保证其制造质量和服役安全已成为本领域关注的热点问题。一方面,复杂的制备工艺和多相复合的结构特点导致陶瓷基复合材料在制备阶段容易产生孔洞、夹杂、裂纹、分层和密度不均等各类初始缺陷;另一方面,陶瓷基复合材料在极端恶劣的工况中长时间服役会形成新的损伤,且初始缺陷在高速气流冲击和高温交变载荷作用下会进一步演变扩展^[12-15]。缺陷/损伤的出现、累积和扩展会显著降低陶瓷基复合材料的综合性能,因此,如何利用无损表征技术实现陶瓷基复合材料全寿命周期内缺陷/损伤的高效检测与评估,对改进优化制备工艺、提高产品合格率、保证发动机服役效能具有重要意义。近年来,国内外研究者在陶瓷基复合材料缺陷/损伤无损表征方面开展了大量研究,并取得了丰硕的成果。从检测技术发展的维度看,射线、超声、红外、电阻抗、太赫兹及声发射等无损检测方法均有所应用,研究方向主要聚焦于检测理论分析、方法验证以及面向工程应用的可检性、适用性试验探索。从检测对象的维度看,涉及纤维束、预制体、坯料、机加件和装机件等不同制备加工阶段和服役周期的材料和结构,重点关注不同阶段缺陷/损伤演变过程的检测、监测和评估表征。与金属等均质材料不同,陶瓷基复合材料复杂的高温成型工艺及多相复合引起的高度非均质和各向异性,导致传统基于整体均质化假设的无损检测方法难以适用,对其性能要求和检测需求仍然处于不断的探索、认识和积累过程中。而且目前在工程应用层面,陶瓷基复合材料缺陷/损伤的容限阈值确定、检测标准规范制订及缺陷/损伤判据等尚不明确,这些都给陶瓷基复合材料无损表征带来了非常大的挑战。

本文针对近年来国内外陶瓷基复合材料在先进航空发动机领域的应用情况进行综述,从制备成型工艺、机械加工和服役环境等角度系统分析陶瓷基复合材料在制备及加工服役等阶段的典型缺陷/损伤类型及特征,从检测技术和检测对象两个维度追踪陶瓷基复合材料无损表征方面的最新研究进展,总结现有无损表征技术面临的技术难点,并对未来的发展趋势进行展望。

1 航空陶瓷基复合材料发展与应用

国外陶瓷基复合材料相关研究最早可追溯到20世纪中期,经过多年来的发展,目前国外陶瓷基复合材料逐步由基础研究转入工程测试及应用阶段,其中美国、英国、法国和日本等国在陶瓷基复合材料的研究及应用方面处于领先地位,其在先进航空发动机的典型应用部位如图1所示。

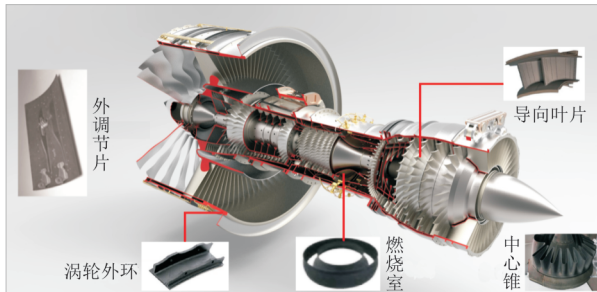


图1 陶瓷基复合材料在先进航空发动机中的典型应用部位

Fig. 1 Application of ceramic matrix composites in advanced aeroengines

20世纪80年代,法国Snecma公司将陶瓷基复合材料喷管调节片/密封片应用在M53-2发动机上进行350 h的整机试验考核,并在幻影2000战斗

机上进行实战测试飞行^[3];20世纪90年代,Snecma公司先后将C/SiC和SiC/SiC陶瓷基复合材料分别在推重比更高的M88-2发动机尾喷口的外调节片和内调节片上进行试车考核^[4];从1996年开始,C/SiC陶瓷基复合材料外调节片已经在M88系列发动机上使用,目前服役的C/SiC外调节片情况良好,能够满足发动机长期使用要求^[11]。GE、罗罗等公司也围绕航空发动机高性能CMC及部件开展了大量研究。GE公司将陶瓷基复合材料应用于F414涡扇发动机和民用GENx发动机的涡轮外环、尾喷管、燃烧室火焰筒、涡轮静叶等热端部件^[16];2009年,该公司研制的SiC_f/SiC复合材料低压导向叶片在F136发动机上完成验证,并于2010年完成首飞;罗罗公司采用CVI+MI连用工艺制备SiC/SiC陶瓷基复合材料密封片,并计划在2025年前后将喷管、涡轮外环整环部件等应用于发动机;此外,罗罗公司的“超扇”(UltraFan)发动机将采用耐高温的陶瓷基复合材料部件以提高燃烧效率^[17]。

陶瓷基复合材料在国外航空发动机上的应用及验证情况如表1所示。

表1 陶瓷基复合材料在先进航空发动机中的应用及验证情况^[18-19]

Table 1 Application and verification of ceramic matrix composites in advanced aeroengines^[18-19]

型号	材料	应用部位	验证情况
美国F119	SiC	矢量喷管内壁板	有效减重,解决飞机重心后移问题
美国F414	SiC	燃烧室	冷却空气量减少,提供工作温度和寿命
欧洲EJ200	SiC	燃烧室、火焰筒稳定器、尾喷管调节片	通过军用发动机试验台、验证发动机的严格审定,在高温高压燃气下未受损伤
美英Trent800	SiC	扇形涡轮外环	大幅节省冷气量,提高工作温度和使用寿命,有效减重
美国F136	SiC _f /SiC	燃烧室火焰筒、火焰稳定器	已进行了全寿命演示验证,进入工程应用阶段,耐高温能力提高,减少冷却空气量
欧洲LEAP	SiC _f /SiC	涡轮外环	减少从压气机引出的冷气需求量,提高发动机推力,并降低燃油消耗量1.5%以上
美国GE9X	SiC _f /SiC	燃烧室火焰筒、导向叶片、涡轮外环	第一阶段,导向叶片和涡轮外环已通过测试;第二阶段,燃烧室火焰筒已经过百小时级试车考核

进入21世纪以来,随着我国军、民用飞机航空发动机型号研制的不断深入,国内高校和航空发动机主机厂所对CMC在航空发动机上的构型设计、考核验证和工程化应用等方面开展了大量研究工作,形成了初具规模的陶瓷基复合材料制备、试验和考核验证技术体系。目前,国内CMC的研制单位主要有国防科技大学、西北工业大学、北京

航空材料研究院、中国航发商用航空发动机有限责任公司、北京航空航天大学、厦门大学等机构。国防科技大学在20世纪80年代初开始了SiC先驱体及陶瓷纤维的研制工作,1988年又开展了陶瓷先驱体转化法制备陶瓷基复合材料的研究,已经从试验阶段转向实际应用阶段。目前,国防科技大学已经先后研制并开发出聚碳硅烷、聚硅氮烷、

聚硅氧烷等陶瓷先驱体,生产出的陶瓷基复合材料构件性能明显改善^[20-21]。西北工业大学研制出某型燃烧室浮动瓦块、密封片、内锥体、涡轮外环、火焰筒内环等零件,开展了燃烧室浮动瓦块台架试验,完成了1 047~1 227 °C、2 MPa状态下持续30 min的考核,利用发动机整机平台,对全尺寸CMC调节片进行了全工况的挂片考核,试验测得材料的壁面温度达1 047 °C^[11]。

经过几十年的发展,国外CMC已经在高温涡轮叶片、高温燃烧室、调节/密封片等部件上进行了相关典型件测试,航空发动机喷管调节片/密封片等中温中等载荷静止件已完成全寿命验证并进入实际应用和批量生产阶段,燃烧室火焰筒和内外衬等高温中等载荷静止件正进行全寿命验证,有望进入实际应用阶段^[1,18-19]。同时,国内近年来针对先进航空发动机热端部件开展了大量陶瓷基复合材料的研究工作,研制了各类模拟件和试验件,如尾喷管的密封片/调节片、加力燃烧内锥体、主燃烧室火焰筒、高压涡轮外环、涡轮导叶等,相继完成了部分构件模拟发动机工况的静力试验和环境等各项试验考核,并已进行了挂片试车考核,但在航空发动机陶瓷基应用方面还处于起步阶段,尚未实现陶瓷基构件的规模化工程应用。

2 典型缺陷/损伤类型与特征

陶瓷基复合材料优异的抗氧化和耐高温性能,使其成为先进航空发动机耐高温关键部件的理想材料。但陶瓷基复合材料复杂的制备工艺及极端恶劣的工况会导致其出现各类缺陷/损伤,缺陷/损伤的出现、累积和扩展会显著降低陶瓷基复合材料的综合性能。因此,明确陶瓷基复合材料典型缺陷/损伤的特征是陶瓷基复合材料高效无损检测与评估的基础和前提。

2.1 制造缺陷

目前,陶瓷基复合材料的主流制备工艺主要包括化学气相渗透(Chemical Vapor Infiltration,简称CVI)、聚合物先驱体浸渍裂解(Precursor Impregnation and Pyrolysis,简称PIP)、反应熔体渗透(Reactive Melt Infiltration,简称RMI)及CVI-PIP联用工艺等,一般而言,不同工艺制备的陶瓷基复合材料在微观组织、密度、孔隙率、缺陷类型及特

征等方面也存在一定的差异。综合而言,法国在CVI技术方面处于领先地位,日本拥有聚碳硅烷和连续SiC纤维制备技术(主要开展PIP法的研究),德国的MI技术世界领先,美国在PIP、CVI和MI工艺上均有较高的研究水平^[22]。

不同制备工艺的区别主要在于陶瓷基体引入的方式不同,制造缺陷的类型和特征也有所差异^[8]。对于CVI工艺,主要由气相先驱体原位反应生成固态陶瓷基体,不需要引入其他物质反应,因此基体的纯度较高,缺陷相对较少,但由于气相沉积过程难以有效填充纤维束间的大孔,因而在纤维束间易出现大尺寸的菱形孔洞,且在CVI致密化后期,气体在预制体内部传质效率进一步降低,导致材料具有较高的孔隙率^[23]。对于PIP工艺,一般利用高温浸渍设备将先驱体溶液浸渍到预制体中,经过反复的交联、裂解、陶瓷化过程,最终得到陶瓷基复合材料,但由于PIP工艺中存在有机到无机的转化过程,陶瓷基体容易出现含氧和富碳现象,且转化过程伴随一定的体积收缩,导致基体存在较多的微裂纹,在微观结构上呈现基体不连续,在宏观上表现出较强的局部非均质性^[24]。对于RMI工艺,首先采用真空注塑机将含有一定比例陶瓷颗粒的悬浮料浆注入负型模具内,固化后真空烧结得到富碳多孔体,随后,在多孔体表面包埋硅颗粒,在高温高压条件下进行熔融渗硅处理,通过硅与碳反应生成陶瓷基体,通常来说,RMI工艺制备的陶瓷基复合材料相对较为致密,但制备过程中不可避免地存在一定量的残余硅相,导致材料的耐温能力有所降低。CVI-PIP联用工艺充分结合了两种单一工艺的优点,即首先由CVI工艺制备界面相和填充纤维束内小孔,然后采用PIP工艺填充纤维束间的大尺寸孔洞,最后再用CVI工艺进行致密化处理,因此,采用联用工艺制备的陶瓷基复合材料微观组织更为均匀,综合性能也更为稳定^[25]。

综上所述,尽管每种制备成型工艺的特点各异,可能产生的缺陷类型及其特征也不尽相同。但从近年来的研究内容来看,陶瓷基复合材料中的典型制造缺陷主要包括孔隙、孔洞、夹杂、裂纹和分层五类^[8]。陶瓷基复合材料典型制造缺陷如图2所示。孔隙(气孔)是陶瓷基复合材料普遍存在的一类缺陷,单个孔隙的尺寸一般在微米量级,

随机弥散分布在陶瓷基体中,一般以孔隙率这一整体性概念出现,虽然孔隙率与陶瓷基复合材料性能间还未建立明确的量化关系,但一般认为孔隙率过高会显著降低材料的力学性能,而孔隙率过低则会影响材料的耐高温能力。孔洞与沉积过程和高温裂解的程度密切相关,虽然与孔隙具有相似的随机分布特征,但单个孔洞尺寸一般在毫米量级,在细观尺度能够很容易观测到孔洞的存在。夹杂一般是前驱体转化不完全或熔融渗硅残留所致,由于此类缺陷一般表现为元素偏聚或化合物的形式,因此,主要在工艺验证阶段采用能量色散X射线光谱仪(EDS)等高精度手段进行分析。裂纹主要是由于转化过程体积收缩、内应力或组成相性能失配引起的界面分离,微裂纹的尺寸一般在几十至几百微米量级,而贯穿裂纹和层间裂纹的尺寸可达几毫米甚至几十毫米。分层是一类典型的面积型缺陷,常见于2D陶瓷基复合材料层间,在2.5D和3D结构中较为少见。分层缺陷的面积一般较大,在剪切力的作用下会迅速扩展,最终导致结构失效破坏。除了上述典型缺陷外,基体浸渍不均、预制体纤维屈曲、断裂和缺失等也是陶瓷基复合材料可能产生的制造缺陷。

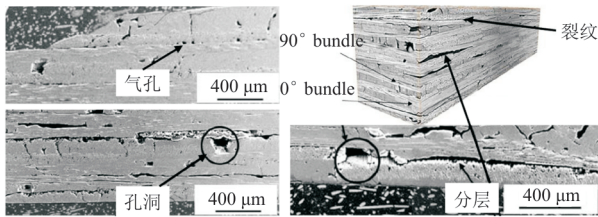
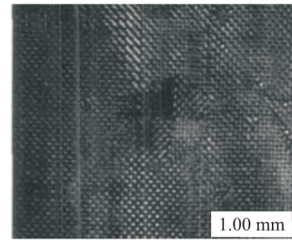


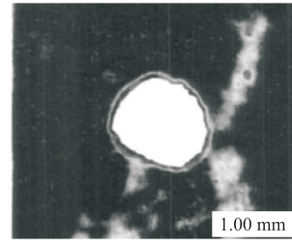
图2 陶瓷基复合材料典型制造缺陷^[8]
Fig. 2 Typical manufacturing defects of ceramic matrix composite^[8]

2.2 加工与服役损伤

缺陷是指材料在连续性、纯洁度和均匀性方面存在的先天不足,而损伤一般表示外部载荷或环境引起的材料几何结构改变或性能退化^[26-27]。对于陶瓷基复合材料,其典型损伤可分为加工损伤和服役损伤两大类,其中,加工损伤一般是材料或构件制备完成后,后续机械加工和装配过程中引入的损伤。加工损伤与机械加工工艺、装配流程等密切相关,主要包括工具坠落冲击、制孔损伤和装配损伤等,损伤尺寸一般在几百微米到几毫米量级,典型的冲击损伤宏观形貌及损伤区超声C扫描图像如图3所示。



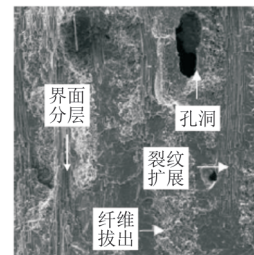
(a) 冲击损伤宏观图像^[26]



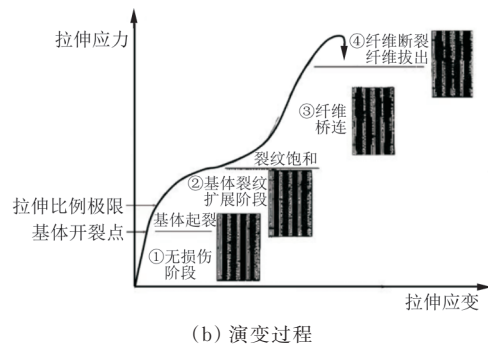
(b) 冲击损伤区超声C扫描图像^[27]

图3 陶瓷基复合材料典型制造损伤
Fig. 3 Typical manufacturing damage of ceramic matrix composites

服役损伤是指陶瓷基复合材料部件使用过程中,在结构受力、承载及高温热环境等作用下,产生的各种损伤,如微裂纹扩展、分层和断裂等,尺寸一般在毫米量级以上。一般来说,服役损伤的形成是一个由点及面、由小到大、逐渐累积的过程。SiC/SiC复合材料在模拟工况下典型损伤及其演变过程如图4所示。



(a) 损伤



(b) 演变过程

图4 SiC/SiC陶瓷基复合材料典型服役损伤^[15]
Fig. 4 Typical service damage of SiC/SiC ceramic matrix^[15]

对于航空发动机而言,涡轮外环与导向叶片等热端部件的服役载荷环境极端严酷,如涡轮外环服役温度约 1 350~1 450 °C、导向叶片温度约 1 200~1 500 °C,对陶瓷基复合材料及构件的质量控制、缺陷/损伤与安全性评估要求严格^[28]。然而,由于制造工艺复杂、服役环境恶劣,在基体、纤维束之间及其内部和界面相中不仅容易出现孔洞、夹杂、裂纹、分层、密度不均等体积型和面积型

缺陷,而且容易产生使用损伤。这些缺陷和损伤呈现微米至毫米级的跨尺度特征,缺陷/损伤和尺寸图谱复杂,一旦材料缺陷和使用损伤未及时检出,可能导致灾难性事故,给陶瓷基复合材料质量控制带来极高难度。因此,无损检测与表征技术对陶瓷基复合材料及构件的高质量制造和长寿命服役具有重要作用,陶瓷基复合材料典型缺陷/损伤特点及其无损表征的意义如图 5 所示。

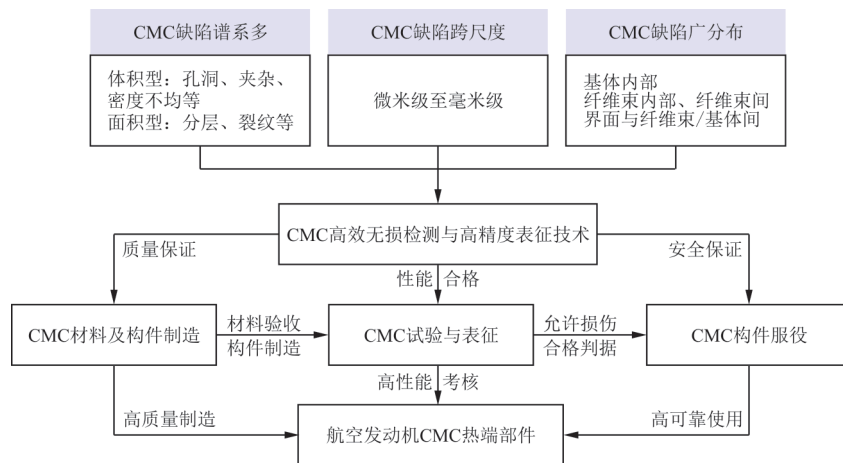


图 5 陶瓷基复合材料缺陷/损伤特点及其表征意义

Fig. 5 Defect/damage characteristics of ceramic matrix composites and the important role of nondestructive characterization

3 无损表征技术研究进展

陶瓷基复合材料研发和应用几乎同步,国内外关于陶瓷基复合材料无损表征的研究工作可以追溯到 20 世纪末,最初主要聚焦于检测方法的可行性分析、理论计算及实验室试验验证等探索性工作。近年来,随着陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件制造和应用领域的逐步推广,面向工程应用的缺陷/损伤无损表征技术已成为业内的研究热点,针对制备成型、机械加工、考核试验和外场服役的全寿命周期,研究和更为高效、可靠的无损表征方法,进一步提高检测方法的工程可检性、可靠性和适用性,目前这方面的研究工作仍在持续深入中。总体而言,射线、超声、红外、电阻抗、太赫兹及声发射等技术均有所应用,表征对象涉及纤维束、预制体、坯料、机加件和装机件等不同制备加工阶段和服役周期的材料和结构。

3.1 射线检测技术

当射线穿透材料或构件后,如果材料或构件

局部区域存在缺陷/损伤,将改变物体对射线的衰减,引起透射射线强度的变化,采用一定的成像和处理方法可以判断是否存在缺陷/损伤,并确定形貌、分布和尺寸等信息^[29-30]。目前,应用于无损表征领域的射线检测技术主要包括胶片成像、数字射线成像(Digital Radiography,简称 DR)技术及最新的计算机层析成像(Computer Tomography,简称 CT)技术等^[31-34]。

传统的胶片成像技术由于胶片处理复杂、曝光场地限制,存在废液和排污处理等问题,已经逐渐被 DR 技术所取代。DR 技术采用数字探测器代替感光胶片,具有可实时成像、检测效率高、成本低等优势,是目前陶瓷基复合材料检测最为常用的方法之一,但受限于入射角度的限制,DR 技术对垂直于射线入射方向的裂纹和分层等面积型缺陷不敏感,检测效果较差。CT 是一种基于射线穿透效应的三维成像技术,射线穿透样品后在探测器上形成二维投影,将样品按一定的步进角旋转,再通过重建算法对不同角度的投影进行三维成像。其中,工业 CT 已广泛用于航空航天、轨道交

通、生物医学等领域,常规工业CT的检测分辨率一般为毫米量级。而采用微焦点射线源的显微CT技术,可直接获得检测对象在微米量级上的空间位置、形状及尺寸信息,且图像便于存储、传输、分析和处理,典型的二维编织SiC/SiC陶瓷基复合材料显微CT检测图像如图6所示。由于受到硬件性能和三维重建算法计算成本的限制,高精度微纳显微CT技术目前只能对尺寸在毫米量级的样品进行精确定量分析,加之高昂的检测成本和高级别的辐射防护措施,限制了其应用范围。

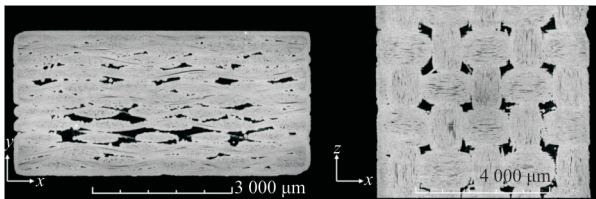
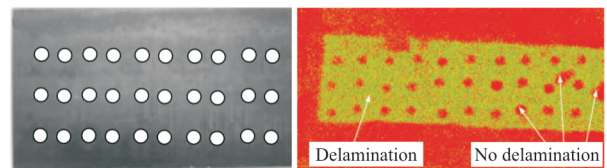


图6 二维编织SiC/SiC陶瓷基复合材料显微CT成像^[35]
Fig. 6 Micro CT imaging of two-dimensional braided SiC/SiC ceramic matrix composites^[35]

3.2 超声检测技术

超声检测技术具有灵敏度高、检测速度快、成本低和对人体无害等优点,已成为航空工业中应用最为广泛的无损检测技术之一。超声波在非均匀介质中传播时,超声波场与异质界面、增强相和孔隙等散射体相互作用会引起声波的反射、折射和散射,回波信号中携带了大量反映材料密度、组分含量、微观结构等特征信息。利用时域、频域及时频域等信号处理技术提取声速、声衰减、频谱质心偏移、背散射系数等超声特征参量,通过分析这些参量的变化即可实现材料特性的无损表征^[35-46]。

国内外报道了超声检测技术在陶瓷基复合材料检测方面的最新进展,研究工作涉及常规超声、相控阵超声、声一超声和激光超声等。孙广开等^[43]制备了预埋人工缺陷的C/SiC陶瓷基复合材料试样,利用自主研发的激光激励、激光探测的全光学激光超声无损检测系统进行试验研究,实现了陶瓷基复合材料的分层检测。C/SiC陶瓷基复合材料人工缺陷及其激光超声C扫描图像如图7所示,激光超声检测技术可以有效表征C/SiC复合材料内部直径5 mm以上的分层。但超声检测也具有非均质材料衰减大、信噪比低、存在表面检测盲区及对小尺寸的缺陷检测灵敏度不高等局限性。



(a) 人工缺陷 (b) 激光超声C扫描图像

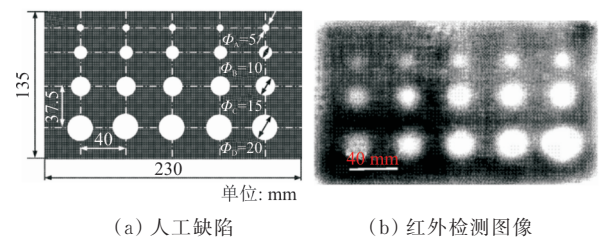
图7 C/SiC陶瓷基复合材料人工缺陷^[43]

Fig. 7 Artificial defect of C/SiC ceramic matrix composite^[43]

3.3 红外检测技术

红外热成像技术主要利用不同材料热辐射特性的差异,通过热成像系统观测温度场异常分布来识别物体的内部缺陷。该技术主要用于大型构件的全场实时检测,检测速度是常规超声C扫描的30倍以上,具有操作简单、检测结果直观和便于原位检测等特点。

国内外开展了大量红外检测技术的可检性试验研究,结果表明,红外检测技术对较薄的复合材料试样中的近表面冲击损伤、平底孔类的模拟缺陷有一定的检出能力^[47-49]。邓晓东等^[48]利用红外热波检测技术对含人工模拟缺陷C/SiC试样盲孔的孔径和深度进行定量检测(如图8所示)。现有研究表明,红外热波适合陶瓷基复合材料近表面缺陷的检测,理论上可通过热传导时间定量给出缺陷的大小和深度。但由于探测器自身性能的限制和外部环境变化的影响,从热像图中对小尺寸缺陷识别和微观组织均匀性的定量分析有一定难度。此外,红外热成像技术对位置较深的缺陷检测灵敏度较低,使用主动热成像技术识别陶瓷基复合材料中的缺陷时,材料的最大厚度仅为2~3 mm。



(a) 人工缺陷 (b) 红外检测图像

图8 C/SiC陶瓷基复合材料人工缺陷^[48]

Fig. 8 Artificial defects of C/SiC ceramic matrix composite^[48]

3.4 太赫兹检测技术

太赫兹波是一种频率范围覆盖0.1~10 THz

的电磁波,该频段介于红外与微波之间。太赫兹辐射可以穿透塑料、陶瓷、纤维和泡沫等非极性分子材料,非常适合陶瓷基复合材料的无损表征,已逐渐发展为CT、超声与红外热成像等传统无损检测技术的重要补充。

太赫兹检测技术在陶瓷基复合材料及其他非极性复合材料的无损检测中得到了广泛应用^[50-53]。长春理工大学周小丹等^[51]通过建立单点厚度检测模型和光学参数的提取,将太赫兹检测技术用于陶瓷基复合材料密度分布检测和孔洞缺陷尺寸检测,进行定量测量,实验获取了较为理想的时频光谱分析结果及成像结果,显示出太赫兹检测技术在缺陷/损伤检测和探究材料特征方面具有一定的揭示作用;李铁军等^[52]提出了一种时频域多模式新光谱成像方法,对内含缺陷的4种陶瓷基复合材料样本实现了无损检测,形成了检测样本的太赫兹图像库,并引入5个图像质量的客观综合评价指标,通过指标融合处理选出了质量较佳的太赫兹图像,基于尺度不变特征变换与K值聚类实现了该图像的检索,如图9所示,该方法可有效对氧化锆陶瓷基复合材料不同位置处的不同宽度缺陷进行成像检测。但由于太赫兹检测设备功率和功能等的差异,对于很多低功率的检测设备,仅采用单一的成像模式,通常无法有效成像。因此,有必要采用调整太赫兹的成像模式并结合后期太赫兹图像处理的方法,提高太赫兹成像质量,以满足陶瓷基复合材料无损表征的需求。

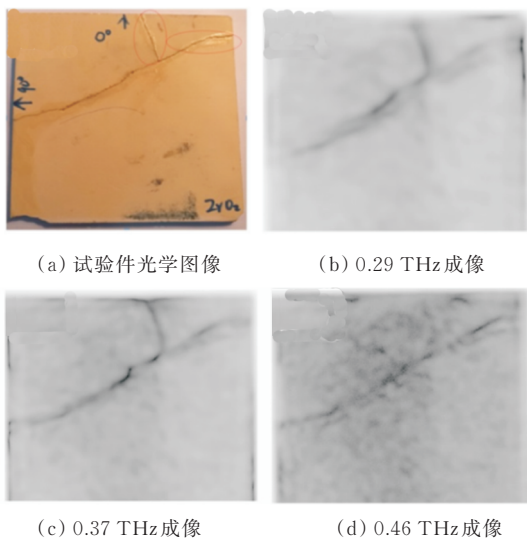


图9 氧化锆陶瓷基复合材料太赫兹检测^[52]

Fig. 9 Terahertz detection of zirconia ceramic matrix composite^[52]

3.5 计算机辅助智能检测技术

陶瓷基复合材料多相和非均质的固有特性导致人工无损检测过程中存在检测判据不明、缺陷评判误差大、效率低等问题,随着计算机技术的快速发展,基于计算机和深度学习算法的计算机辅助智能检测技术为陶瓷基复合材料检测技术研究提供了新的思路。

在计算机辅助智能无损检测技术方面,Evsevleev等^[54]、冯宇琦等^[55]利用深度学习算法对多相金属基复合材料各组分进行了图像智能分割与三维表征,为材料微观力学模型的建立提供了输入参数;Badran等^[56]针对单向纤维增韧陶瓷基复合材料,采用深度学习方法成功分割出SiC纤维、SiC基体、孔隙和涂层等材料组分,充分显示了深度学习方法在大批量微观图像处理中的优越性;杜永龙等^[57]提出了一种微型高精度原位X射线CT测试方法,用于进行SiC平纹纤维增强SiC基复合材料(SiC/SiC)的X射线CT原位拉伸测试,通过CT数据的图像重建,精确揭示了材料在连续加载水平下的实际微观结构和损伤演化,并基于UNet框架训练深度学习模型用于识别材料损伤,如图10所示。基于深度学习的图像分割方法能够准确高效地识别材料裂纹,实现裂纹空间分布的三维可视化,突破了传统二维切片观测的局限性,提供了新的观测维度,实现了材料损伤演化及断裂的量化分析。

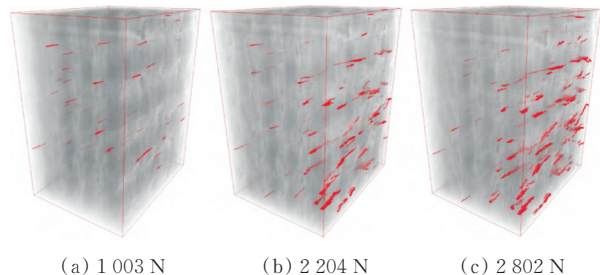


图10 不同级载荷下深度学习识别出的裂纹三维视图^[57]

Fig. 10 3D view of identified crack by deep learning under different loading levels^[57]

3.6 其他检测技术

除以上检测技术外,近年来各种无损表征新技术也逐渐应用于陶瓷基复合材料缺陷/损伤表征,如利用电阻或电阻率变化表征陶瓷基复合材料损伤演变情况的电阻检测技术^[58-61],通过分析材

料受力或损伤扩展产生声发射信号进行缺陷/损伤监测的声发射技术以及结合表面光学成像和人工智能算法的机器视觉技术等^[62-63]。

在电阻抗检测方面,Smith等^[64-66]开展了大量基于电阻法对陶瓷基复合材料进行损伤评估的研究,研究发现材料的电阻对于组分含量、纤维结构和应力/应变历史十分敏感。利用包含基体开裂密度和应变参数的函数关系能够拟合加卸载循环过程中电阻的变化。由于基体裂纹的萌生是导致复合材料在氧化环境下热力性能退化的主要原因,Morscher等^[67]在SiC基体中浸入导电性更高的Si使电阻法对基体开裂更为敏感,并利用串并联电阻组合的电路模拟横向基体裂纹和纤维/基体单元;栾新刚^[68]利用电阻测量研究3D C/SiC复合材料在复杂耦合环境中的损伤机理,由于试验机和夹头处在常温环境中,其电阻值基本不变,因此电桥电阻的变化直接反映了试样电阻的改变。在声发射检测方面,Morscher等^[69]研究了声发射法确定基体裂纹对施加载荷的依赖性,采用两种基于声发射的方法获得了裂纹密度的演化、发射事件的累积能量建立方法和基于声速测量速度;Rodriguez等^[70]采用CLAP-Wave方法监测岩石试样在压缩载荷下的损伤累计,证明了声速与试样的损伤程度相关,并实现损伤三维定位;黄喜鹏等^[71]通过循环加卸载试验测量了2D-C/SiC复合材料整个拉伸过程中不同应力水平处的声速变化,研究了声速对2D-C/SiC复合材料的损伤表征,研究发现,随着应力水平的不断增加,声速逐渐下降,2D-C/SiC复合材料损伤程度对声波在材料中的传播速度有较大影响。

目前,上述研究还处于原理探索和实验室试验研究层面,距离解决工程应用中的陶瓷基复合材料检测表征要求和技术成熟度差距还很大,但这些研究为探索新的陶瓷基复合材料表征与评估方法打下了坚实的基础。

4 存在的问题与挑战

综上所述,近年来关于陶瓷基复合材料缺陷/损伤的无损表征研究已取得了丰硕的研究成果,射线、超声、红外、太赫兹及声发射等无损检测技术均有所应用,但在方法适用性、缺陷/损伤可检性和工程可用性等方面依然存在诸多技术问题和

挑战亟需解决。

1) 方法适用性:制备工艺复杂和多相复合的特点,导致陶瓷基复合材料缺陷/损伤表现出较强的随机和多样性,而对于不同的无损表征方法,用于缺陷/损伤判别和定量的信号处理方法和表征效果也有很大差异。例如,超声检测技术对面积型缺陷/损伤较为敏感,适用于裂纹、分层和脱粘等缺陷/损伤的表征;射线检测技术对孔洞、夹杂等体积型缺陷具有较好的检测效果;红外热成像检测技术对厚度较薄的陶瓷基复合材料中表面和近表面缺陷/损伤具有一定的适用性;太赫兹检测技术则主要适用于SiC/SiC等非极性陶瓷基复合材料。此外,同一表征方法检测参数和工艺的适用性也亟待细化,需要进一步提高方法的精度和鲁棒性。因此,后续工作需要综合考虑制备工艺、缺陷类型等因素,针对性地选择合适的表征方法和检测工艺,开展充分的方法适用性研究和试验验证。

2) 缺陷/损伤可检性:陶瓷基复合材料中多种缺陷/损伤并存,且在外界环境和载荷作用下会进一步转化、演变和扩展,因此,实现缺陷/损伤在全寿命周期时间历程内的跟踪记录对陶瓷基复合材料基础研究具有重要意义。通过上述分析可知,单一的无损表征技术难以实现多类型缺陷/损伤的全覆盖检测,应着力发展多种检测技术相结合的一体化表征系统,实现多类型缺陷的同步跟踪表征。此外,陶瓷基复合材料的缺陷/损伤具有明显的多尺度特征,孔隙和微裂纹的尺寸一般在几十微米量级,而孔洞和分层的尺寸通常可达几毫米至几十毫米。因此,在检测过程中不应偏执于追求检测精度和灵敏度,而是根据实际需求和检测要求有所侧重。

3) 工程可用性:目前,现有陶瓷基复合材料无损表征研究主要以实验室环境下的方法探索和试验验证为主,在工程化应用方面的研究还面临较大的挑战。在产品制造阶段,应着力解决产品缺陷/损伤的质量符合性问题,通常需要结合不同热端部件对陶瓷基复合材料的质量要求和缺陷检出要求,开展针对性的试验规划与工程验证,制定相关的缺陷/损伤检测标准和工艺流程。在外场服役和运营阶段,应充分考虑环境、检测窗口、经济性等多重因素,根据损伤容限设计准则和前期积

累的试验数据确定合理的检测间隔和检测手段,在保证结构安全的前提下进一步缩短检测时间,降低制造和运营成本。

5 未来发展趋势

尽管国内科研院所开展了陶瓷基复合材料及构件制造工艺和典型缺陷研究,但是更注重成型材料及构件的无损检测和质量检验,对陶瓷基复合材料及构件在制造工艺过程中的缺陷类型特征、跨尺度、多样性和遗传性、形成演变机理并不清楚。因此,如何深入研究缺陷对材料力学性能的影响规律,建立陶瓷基复合材料工艺—缺陷—性能的映射关系,形成陶瓷基复合材料及构件缺陷/损伤图谱,是未来陶瓷基复合材料无损表征技术的优先发展方向。

在 CVI、PIP、RMI 等不同制造工艺下,具有不同的沉积和致密化时间,陶瓷基复合材料及构件的预制体、界面相、纤维束和基体内部会呈现孔洞、夹杂、裂纹、分层、密度不均等不同缺陷类型和特征,影响材料及构件制造质量和服役性能。由于缺少缺陷识别判据、无损检测工艺标准和合格判据,当前无损检测主要针对陶瓷基复合材料与成品件开展微焦点或工业 CT 无损检测,存在数据量大、成本高,而且细微缺陷的影响尚无法评估等问题。此外,由于缺陷/损伤图谱与统计数据不足,缺陷智能识别与评价技术尚未建立,未能有效解决人工识别缺陷效率低、可靠性差的问题。因此,如何明确缺陷/损伤检测阈值,建立适用于陶瓷基复合材料制备质量控制和服役损伤的特征谱系,建立基于人工智能的缺陷/损伤无损检测判据和规范的无损检测工艺流程与评判标准,是陶瓷基复合材料无损表征技术未来重要的发展方向。

航空发动机热端部件承受着严酷的载荷环境,同时要求长寿命、高可靠、安全服役,开展陶瓷基复合材料及构件模拟服役环境试验,并借助于在线检测和表征技术明确缺陷/损伤演化规律,揭示不同条件下的失效机理,能够确保热端构件的综合性能和安全性。但是,由于国内航空发动机陶瓷基复合材料研究起步晚,考核评价方法与应用程度落后,对陶瓷基复合材料及构件的模拟服役环境试验考核与缺陷/损伤状态在线表征技术

的研究相对较少,难以充分捕获模拟服役环境下陶瓷基复合缺陷/损伤演化规律、揭示失效机理,成为陶瓷基复合材料及构件多尺度性能评估精度和适用性的瓶颈。因此,积极发展陶瓷基复合材料及构件的模拟服役环境试验与缺陷/损伤状态在线无损表征技术能力,揭示陶瓷基复合材料及构件缺陷/损伤演化规律与失效机理,是陶瓷基复合材料无损表征技术的重要补充。

从缺陷/损伤成因、种类的角度来看,陶瓷基复合材料的典型缺陷主要包括制造缺陷、加工损伤和服役损伤,具体而言,主要包括孔隙、孔洞、夹杂、裂纹和分层五类,且不同的缺陷/损伤具有不同的物理特征和尺度。不同的无损表征技术对不同类型和尺度缺陷的敏感程度和检出能力不同,需要根据制备工艺、服役环境和关注的缺陷/损伤类型,研究和采用针对性的检测方法。总体而言,射线、超声、红外和太赫兹检测技术仍然是目前研究的热点,同时,电阻抗、声发射、人工智能及机器视觉等新技术也受到广泛关注。

从无损检测方法适用性、缺陷/损伤可检性和工程可用性的角度看,缺陷/损伤判定准则不明确、相关检测标准和专用检测设备缺失是陶瓷基复合材料无损表征技术发展面临的主要问题和挑战。采用单一的无损检测技术难以实现陶瓷基复合材料全寿命周期内缺陷/损伤的可靠、高效表征和追踪,探索和发展多种检测技术相结合的一体化表征技术体系,实现多类型缺陷的同步跟踪表征,是未来陶瓷基复合材料无损表征技术的重要发展方向。

6 结束语

随着陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用进程的不断加快,保证其制造质量和服役安全已成为国内外关注的热点问题。本文基于陶瓷基复合材料典型缺陷/损伤的成因和特征,综述了目前国内外陶瓷基复合材料无损检测技术的研究现状和发展趋势,并对存在的问题和挑战进行了分析。指出射线、超声、红外、太赫兹及声发射等无损检测技术在方法适用性、缺陷/损伤可检性和工程可用性等方面依然存在诸多技术问题亟需解决。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 焦健, 史一宁, 邱海鹏, 等. 高性能连续碳纤维增强碳化硅复合材料的制备及其高温力学性能的研究[J]. 功能材料. 2011, 42(6): 401-404.
JIAO Jian, SHI Yining, QIU Haipeng, et al. The preparation and the high-temperature properties of 3D C_f/SiC composite material by PIP process[J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(6): 401-404. (in Chinese)
- [3] POULOSE N, SELVAKUMAR P, PHILIP J T, et al. Study of the mechanical properties of the copper matrix composites (CMCs): a review[C]// 2022 Materials Science Forum. US: IEEE, 2022: 1-10.
- [4] 王玥. 连续SiC纤维增强SiC陶瓷基复合材料的现状研究[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(1): 77-81.
WANG Yue. Research on continuous SiC fiber reinforced sic matrix composites[J]. Fiber Composites, 2022, 39(1): 77-81. (in Chinese)
- [5] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2003(1): 24-32.
ZHANG Litong, CHENG Laifei, XU Yongdong. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1): 24-32. (in Chinese)
- [6] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview[J]. Composites Science & Technology, 2004, 64(2): 155-170.
- [7] 焦健. 加快复合材料技术发展 助力国产航空动力研制[J]. 航空动力, 2021(5): 55.
JIAO Jian. Accelerating the development of composite materials for promoting the research & development of China aero engine industry[J]. Aerospace Power, 2021(5): 55. (in Chinese)
- [8] 张幸红, 胡平, 韩杰才, 等. 超高温陶瓷复合材料的研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(3): 257-266.
ZHANG Xinghong, HU Ping, HAN Jiecai, et al. Research progress on ultra-high temperature ceramic composites[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(3): 257-266. (in Chinese)
- [9] 张立同, 成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报, 2007(2): 1-6.
ZHANG Litong, CHENG Laifei. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007(2): 1-6. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, GUI Z, ZHOU S, et al. Damage mechanisms of 2.5D SiO₂/SiO₂ woven ceramic matrix composites under compressive impact[J]. Ceramics International, 2022, 11: 1-12.
- [11] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 113-131.
DU Kun, CHEN Qihao, MENG Xianlong, et al. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aeroengine hot components[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 113-131. (in Chinese)
- [12] 刘松平, 刘菲菲, 章清乐, 等. SiC_f/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_f/SiC composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(19): 24-30. (in Chinese)
- [13] 马保全, 周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1787-1803.
MA Baoquan, ZHOU Zhenggan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1787-1803. (in Chinese)
- [14] CHOUDHARY A, DAS CHAKLADAR N, PAUL S. Identification and estimation of defects in high-speed ground C/SiC ceramic matrix composites [J]. Composite Structures, 2021, 261: 113274.
- [15] 王佳伟, 张哲绎, 赵丽滨, 等. 孔隙对纤维增强陶瓷基复合材料的影响研究进展[J]. 河北工业大学学报, 2022, 51(5): 34-42.
WANG Jiawei, ZHANG Zheyi, ZHAO Libin, et al. Research progress on effects of pores on fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2022, 51(5): 34-42. (in Chinese)
- [16] 焦健, 齐哲, 吕晓旭, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料及制造技术[J]. 航空动力, 2019(5): 17-21.
JIAO Jian, QI Zhe, LYU Xiaoxu, et al. The manufacture processing of SiC_f/SiC composite materials and products for aero engine [J]. Aerospace Power, 2019(5): 17-21. (in Chinese)
- [17] 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 Jinhua, DONG Yufei, YANG Rui, et al. Progress of ceramic matrix composites for aero engine [J]. Aerospace Power, 2021(5): 56-59. (in Chinese)
- [18] 郭洪宝. 平纹编织陶瓷基复合材料损伤耦合机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
DONG Hongbao. Research on the damage coupling mechanism of plain-woven ceramic matrix composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [19] 刘巧沐, 黄顺洲, 刘佳, 等. 高温材料研究进展及其在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2014, 27(4): 51-56.
LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, LIU Jia, et al. Progress and application of high temperature structural materials on

- aero-engine [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2014, 27(4): 51-56. (in Chinese)
- [20] 陈曼华. PIP 工艺制备陶瓷基复合材料中先驱体的交联固化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
CHEN Manhua. Cross-linking mechanism of precursor during preparation of ceramic matrix composites precursor infiltration pyrolysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [21] 陈钢军. 先驱体转化法制备 SiC 涂层及其对炭材料性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
CHEN Gangjun. The preparation of SiC by precursor infiltration pyrolysis and the influence of SiC on the property of C-materials[D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)
- [22] 邹豪, 王宇, 刘刚, 等. 碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料的发展现状及其在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2017(15): 76-84.
ZOU Hao, WANG Yu, LIU Gang, et al. Development situation and application of SiC/SiC ceramic matrix composites in aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(15): 76-84. (in Chinese)
- [23] 焦健, 刘善华. 化学气相渗透工艺(CVI)制备陶瓷基复合材料的进展研究[J]. *航空制造技术*, 2015(14): 101-104.
JIAO Jian, LIU Shanhua. Progress in ceramic matrix composites fabricated by chemical vapor infiltration (CVI) process [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(14): 101-104. (in Chinese)
- [24] 杨金华, 姜卓钰, 吕晓旭, 等. 熔融渗硅处理对 PIP 工艺制备的 SiC_f/SiC 复合材料性能影响[J]. *陶瓷学报*, 2019, 40(6): 833-839.
YANG Jinhua, JIANG Zhuoyu, LYU Xiaoxu, et al. Influence of melting-infiltration treatment on the property of SiC_f/SiC composites fabricated by using PIP method [J]. *Journal of Ceramics*, 2019, 40(6): 833-839. (in Chinese)
- [25] 陈婧, 吕熙睿, 张佳平, 等. CVI+PIP 复合工艺制备 SiC_f/SiC 复合材料的微观结构和水解腐蚀行为研究[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(6): 1030-1036.
CHEN Jing, LYU Xirui, ZHANG Jiaping, et al. Microstructure and wet oxidation behavior of SiC_f/SiC composites prepared with CVI+PIP hybrid process [J]. *Journal of Ceramics*, 2022, 43(6): 1030-1036. (in Chinese)
- [26] 袁芳, 徐亮, 赵国龙, 等. 纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料加工技术研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(2): 92-108.
YUAN Fang, XU Liang, ZHAO Guolong, et al. Research progress on the machining technology of fiber reinforced silicon carbide matrix composite [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2022, 52(2): 92-108. (in Chinese)
- [27] 邵国栋. 钻削碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料孔出口分层抑制策略[D]. 济南: 山东大学, 2022.
SHAO Guodong. The suppression strategy of hole exit delamination based on drilling carbon fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composite[D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [28] SHINAVSKI R J. 5.2 non-oxiden-oxide ceramic matrix composites: composite design for tough behavior [J]. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2018(5): 19-40.
- [29] WANG H, KOYANAGI T, ARREGUI-MENA D J, et al. Anisotropic thermal diffusivity and conductivity in SiC/SiC tubes studied by infrared imaging and X-ray computed tomography [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(15): 21717-21727.
- [30] PIRZADA T J, LIU D, ELL J, et al. In situ observation of the deformation and fracture of an alumina-alumina ceramic-matrix composite at elevated temperature using X-ray computed tomography [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(7): 4217-4230.
- [31] QUINEY Z, WESTON E, IAN N P, et al. Volumetric assessment of fatigue damage in a SiC_f/SiC ceramic matrix composite via in situ X-ray computed tomography [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(11): 3788-3794.
- [32] LIU F, LIU S, ZHANG Q, et al. Quantitative non-destructive evaluation of drilling defects in SiC_f/SiC composites using low-energy X-ray imaging technique [J]. *NDT&E International*, 2020, 116: 102364.
- [33] LIU S, LIU F, ZHANG Q, et al. Non-destructive characterisation and evaluation of manufacturing defects in SiC_f/SiC composites using the relative energy attenuation behaviour of X-rays [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 26044-26054.
- [34] 张松. 新型轻质陶瓷基复合材料工业 CT 无损检测研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
ZHANG Song. Research on the industrial CT Non-destructive testing of new lightweight ceramic matrix composites [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)
- [35] WANG F, TENG X, HU X, et al. Damage and failure analysis of a SiC_f/SiC ceramic matrix composite using digital image correlation and acoustic emission [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 4699-4709.
- [36] ZHANG M, ZHAO G L, WANG X H, et al. Microstructure evolution and properties of in-situ ceramic particles reinforced Fe-based composite coating produced by ultrasonic vibration assisted laser cladding processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 403: 126445.
- [37] PODYMOVA N B, KALASHNIKOV I E, BOLOTOVA L K, et al. Laser-ultrasonic nondestructive evaluation of porosity in particulate reinforced metal-matrix composites [J]. *Ultrasonics*, 2019, 99: 105959.
- [38] QUINTERO R, SIMONETTI F, HOWARD P, et al. Noncontact laser ultrasonic inspection of ceramic matrix composites (CMCs) [J]. *NDT&E International*, 2017, 88: 8-16.
- [39] PODYMOVA N B, KARABUTOV A A. Combined effects of reinforcement fraction and porosity on ultrasonic velocity in SiC particulate aluminum alloy matrix composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113: 138-143.

- [40] NAUMENKO A A, SHCHERBININ S A, MAKARIEV D I, et al. Experimental study of relationships between ultrasonic attenuation and dispersion for ceramic matrix composite [J]. *Physics Procedia*, 2015, 70: 171-174.
- [41] KRAMB V A, JOHN R, STUBBS D A. A study of the damage progression from notches in an oxide/oxide ceramic matrix composite using ultrasonic C-scans [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(11): 1561-1570.
- [42] KARPUR P, MATIKAS T E, KRISHNAMURTHY S. Ultrasonic characterization of the fiber-matrix interphase/interface for mechanics of continuous fiber reinforced metal matrix and ceramic matrix composites [J]. *Composites Engineering*, 1995, 5(6): 697-711.
- [43] 孙广开, 周正干, 陈曦. 激光超声技术在先进复合材料无损检测中的应用研究[J]. *失效分析与预防*, 2016, 11(5): 276-282.
SUN Guangkai, ZHOU Zhenggan, CHEN Xi. Application of laser ultrasonic technology for nondestructive testing of aerospace composites [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2016, 11(5): 276-282. (in Chinese)
- [44] 姚卫星, 张超, 黄宇翔, 等. 基于导波原位检测的复合材料疲劳表征与寿命预测研究[J]. *航空工程进展*, 2022, 13(3): 12-22.
YAO Weixing, ZHANG Chao, HUANG Yuxiang, et al. Research on fatigue characterization and life prediction of composites based on guided wave in-situ detection [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2022, 13(3): 12-22. (in Chinese)
- [45] 张昭, 肖迎春, 李闵行, 等. 激光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用[J]. *航空工程进展*, 2014, 5(3): 269-274.
ZHANG Zhao, XIAO Yingchun, LI Minhang, et al. Applications of laser ultrasonic nondestructive testing technology in aeronautical carbon fiber composite [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(3): 269-274. (in Chinese)
- [46] 郭佳, 李四海, 宁宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. *航空工程进展*, 2014, 5(4): 487-490.
GUO Jia, LI Sihai, NING Ning, et al. Applications of laser ultrasonic technology in nondestructive testing [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(3): 487-490. (in Chinese)
- [47] SUN J. Evaluation of ceramic matrix composites by thermal diffusivity imaging [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2010, 4(1): 75-87.
- [48] 邓晓东, 成来飞, 梅辉, 等. C/SiC复合材料的定量红外热波无损检测[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(5): 112-119.
DENG Xiaodong, CHENG Laifei, MEI Hui, et al. Infrared thermal wave imaging for nondestructive detection and measurement of C/SiC composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(5): 112-119. (in Chinese)
- [49] 陈曦, 张立同, 梅辉, 等. 2D C/SiC复合材料氧化损伤的红外热波成像检测[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 112-118.
CHEN Xi, ZHANG Litong, MEI Hui, et al. Testing and evaluation of oxidation damages in 2D C/SiC by thermography [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 112-118. (in Chinese)
- [50] ZHANG D, REN J, GU J, et al. Nondestructive testing of bonding defects in multilayered ceramic matrix composites using THz time domain spectroscopy and imaging [J]. *Composite Structures*, 2020, 251: 112624.
- [51] 周小丹, 李丽娟, 赵铎, 等. 太赫兹技术在陶瓷基复合材料缺陷无损检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 234-241.
ZHOU Xiaodan, LI Lijuan, ZHAO Duo, et al. Application of terahertz technology in nondestructive testing of ceramic matrix composite defects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 234-241. (in Chinese)
- [52] 李铁军, 孙跃, 邵桂芳, 等. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 198-207.
LI Tiejun, SUN Yue, SHAO Guifang, et al. Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix composites [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 198-207. (in Chinese)
- [53] 李宗亮. 基于太赫兹技术的先进陶瓷纤维复合材料无损检测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
LI Zongliang. Research on nondestructive testing of advanced ceramic Fiber composite based on Terahertz technology [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [54] EVSEVLEEVA S, PACIORNIK S, BRUNO G. Advanced deep learning-based 3D microstructural characterization of multiphase metal matrix composites [J]. *Advances in Engineering Material*, 2020, 22(4): 1901197.
- [55] 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)
- [56] BADRAN A, MARSHALL D, LEGAULT Z, et al. Automated segmentation of computed tomography images of fiber-reinforced composites by deep learning [J]. *Journal of Material Science*, 2020, 55(34): 1-17.
- [57] 杜永龙, 张毅, 王龙, 等. 基于深度学习的平纹C_f/SiC复合材料原位拉伸损伤演化与断裂分析[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(1): 249-257.
DU Yonglong, ZHANG Yi, WANG Long, et al. In-situ tensile damage evolution and fracture analysis of plain weave C_f/SiC composites based on deep learning [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(1): 249-257. (in Chinese)
- [58] HUO Y, YANG Q, CHEN S, et al. Modeling and experimental study on electrical impedance response to damage accumulation in 2D C/SiC composites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(10): 4144-4153.
- [59] ORTONA A, ANGELO CD, BIANCHI G. Monitoring

- sandwich structured SiC ceramics integrity with electrical resistance[J]. *NDT&E International*, 2012, 46: 77-82.
- [60] WEN J, XIA Z, CHOY F. Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(1): 77-86.
- [61] 魏婷婷. 基于电阻抗成像的陶瓷基复合材料高温燃气损伤检测方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- WEI Tingting. Damage detection method of high temperature gas damage in ceramic matrix composites based on electrical resistance tomography[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [62] QUINEY Z, JEFFS S P, GALE L, et al. Matrix cracking onset stress and strain as a function of temperature, and characterisation of damage modes in SiCf/SiC ceramic matrix composites via acoustic emission[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 43(7): 2958-2967.
- [63] MORSCHER G N, GORDON N A. Acoustic emission and electrical resistance in SiC-based laminate ceramic composites tested under tensile loading[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(13): 3861-3872.
- [64] SMITH C E, XIA Z, GYEKENYESI A. Electrical resistance of SiC/SiC ceramic matrix composites for damage detection and life-prediction[R]. US: NASA, 2009.
- [65] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z. Electrical resistance as a nondestructive evaluation technique for SiC/SiC ceramic matrix composites under creep-rupture loading[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(2): 298-307.
- [66] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z. Electrical resistance as a NDE technique to monitor processing and damage accumulation in SiC/SiC composites [R]. US: NASA, 2008.
- [67] MORSCHER G N, BAKER C, SMITH C E. Electrical resistance of SiC fiber reinforced SiC/Si matrix composites at room temperature during tensile testing [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2014, 11(2): 263-272.
- [68] 栾新刚. 3D C/SiC 在复杂耦合环境中的损伤机理与寿命预测[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- LUAN Xingang. Degradation mechanisms and life prediction of 3D C/SiC composite in high temperature environment including oxidizing gas and syress[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [69] MORSCHER G N, GYEKENYESI A L. The velocity and attenuation of acoustic emission waves in SiC/SiC composites loaded in tension[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(9): 1171-1180.
- [70] RODRIGUEZ M A, EMETERIO J L S, LÁZARO J C, et al. Ultrasonic flaw detection in NDE of highly scattering materials using wavelet and Wigner-Ville transform processing[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42: 847-851.
- [71] 黄喜鹏, 王波, 常杰. 基于声发射技术的陶瓷基复合材料声速特性[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5): 1517-1525.
- HUANG Xipeng, WANG Bo, CHANG Jie. Acoustic emission-based sound velocity characteristics of ceramic matrix composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1517-1525. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)

(上接第 12 页)

- [41] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: a review[J]. *Composites Part B Engineering*, 2021, 227: 109393.
- [42] OLYMPIO K, GANDHI F. Zero-V cellular honeycomb flexible skins for one-dimensional wing morphing[C]// 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2007: 374-401.
- [43] BUBERT E A, WOODS B K S, LEE K, et al. Design and fabrication of a passive 1D morphing aircraft skin [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(17): 1699-1717.
- [44] AVILA A, AVILA J, CHAVES F. A morphological study on cellular composites with negative poisson ratio[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, Virginia: AIAA, 2003: 1951-1960.
- [45] 吴玲玲, 田小永, 李涤尘, 等. 2021年机械超材料热点回眸[J]. *科技导报*, 2022, 40(1): 161-167.
- WU Lingling, TIAN Xiaoyong, LI Dichen, et al. Memorable sounds in mechanical metamaterial field in 2021[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(1): 161-167. (in Chinese)
- [46] NAGHAVI Z M, DAYYANI I, YASAE M. Fish cells, a new zero poisson's ratio metamaterial—Part I: design and experiment [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(13): 1617-1637.
- [47] ZADEH M N, DAYYANI I, YASAE M. Fish cells, a new zero poisson's ratio metamaterial—Part II: elastic properties [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(19): 2196-2210.
- [48] CHEN X, FU M H, LI W H, et al. An unusual 3D metamaterial with zero poisson's ratio in partial directions [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(4): 2001491.

(编辑:马文静)