

SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术进展*

刘松平, 刘菲菲, 章清乐, 李治应

(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300)

[摘要] 随着 SiC_f/SiC 复合材料在航空航天等领域高温热端部件中的推广应用, 无损检测与评估尤为重要。由于这类复合材料具有非常特别的高温成型工艺和内部微结构及缺陷特征, 需要研究采用专门的无损检测技术和缺陷评估方法。结合近年本领域的研究, 分析了 SiC_f/SiC 复合材料缺陷及其特征; 回顾了 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术研究进展; 总结了 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估面临的主要技术挑战; 提出了 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术今后的主要发展趋势。目前的研究结果表明, 高分辨率数字式 X-射线成像和高分辨率超声-声发射检测或者非对称频率超声检测技术已成为 SiC_f/SiC 复合材料非常重要的无损检测与评估方法, 并已得到很好的实际检测应用效果。

关键词: SiC_f/SiC 复合材料; 无损检测与评估; 超声检测; X-射线成像; 红外检测

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.024



刘松平

研究员, 航空工业特级专家, 全国无损检测学会副理事长。主要从事复合材料及焊接等先进无损检测与评估新方法新技术研究和新仪器新设备新换能器研发与应用。先后获省部级科技发明奖、科技进步奖 20 余项, 国家发明专利 30 余项, 出版专著 1 部, 发表学术论文 100 余篇。

碳化硅纤维增强 / 陶瓷基复合材料 (Silicon carbide fiber / Silicon carbide ceramic matrix composites, SiC_f/SiC CMC) 由于具有良好的耐高温性能和抗高温氧化性能, 不断用于高推重比航空发动机和高超音速飞行器中高温耐热零部件的制造, 其中发动机高压压气机叶片、机匣、高压与低压涡轮盘及叶片、燃烧室、加力燃烧室、火焰稳定器及排气喷管等热端部件已被业内认为是 SiC_f/SiC 复合材料的重要应用方向^[1-5]。在 SiC_f/SiC 复合材料研发和推广应用过程中遇到的突出问题之一就是如何通过无损检测方法和技术手段, 揭示其内部质量, 进行内部缺陷的检测与评估, 同时帮助优化工艺, 制造符合设计要求且质量稳定的 SiC_f/SiC 复

材料零部件。近年有许多文献报道了这方面的试验研究和结果, 从已经掌握的资料文献分析, 目前研究主要集中在超声^[6-8]、激光超声^[9-10]、声-超声^[11-12]、声发射^[12-16]、射线^[6,16-21]、红外^[6,12,22-23]、电阻^[12,24-25]等方面, 其中有些研究主要是针对 SiC_f/SiC 复合材料试样, 通过在实验室小尺寸样品条件下, 开展的 SiC_f/SiC 复合材料试样缺陷或损伤的检测、监测可检性的试验探索; 有些则是研究 SiC_f/SiC 复合材料缺陷的可检性和 SiC_f/SiC 复合材料结构件的无损检测与缺陷评估问题。由于 SiC_f/SiC 复合材料成型工艺的特殊性和内部微结构特征, 以及复杂的高温使用环境, 对其性能要求仍然处于不断的积累、认识过程中, 这给 SiC_f/SiC 复合材料无损

* 基金项目: 国家自然科学基金(61571409, 60727001)。

检测与缺陷评估带来了许多技术挑战。特别是 SiC_f/SiC 复合材料采用高温成型工艺,材料本身又具有多空隙行为,因此,在很多时候,如何构建有效的检测方法,获取与 SiC_f/SiC 复合材料内部缺陷量化关联的检测信号,都会非常具有技术挑战性。加之 SiC_f/SiC 复合材料缺陷或损伤的容限阈值、接受/拒收标准、缺陷判据等目前在工程应用层面,尚处于不断积累和认识期,这些都给 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估带来了非常大的技术挑战。因而, SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估再次成为业内关注的焦点和热点,也吸引了不少的科技人员和技术专家的研究兴趣。目前在这方面的研究可以分为检测方法/原理试验探索、缺陷或损伤表征与评估、面向工程应用的检测技术研发等^[6-25],为分析 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术研究进展,了解 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估所面临的技术挑战和今后的发展方向等打下了基础。

本文结合近几年作者团队的研究进展、业内在 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方面的研究进展和部分典型试验结果,分析了 SiC_f/SiC 复合材料主要缺陷及其特征;回顾了 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估研究进展;总结了 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估面临的主要技术挑战;提出了未来 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术的主要发展方向。

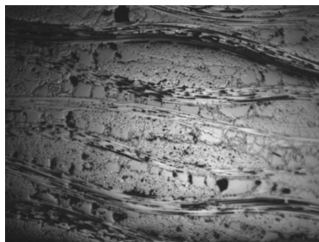


图1 优异的SiC_f/SiC复合材料内部空隙及其分布特征(×40)

Fig.1 Characteristics of porosity distribution in excellent SiC_f/SiC composites

研究和应用验证结果表明,目前高分辨率数字式 X-射线成像和高分辨率超声-声发射检测或者非对称频率超声检测技术已成为 SiC_f/SiC 复合材料非常重要的无损检测与评估方法,并已得到很好的实际检测应用效果。

缺陷及其特征

已有的研究和试验结果表明, SiC_f/SiC 复合材料在成型、装配、使用以及试验过程中可能产生的缺陷主要包括以下几种类型。

1 制造缺陷

主要指 SiC_f/SiC 复合材料在高温裂解过程中形成的缺陷。目前用于 SiC_f/SiC 复合材料高温成型的方法有 PIP、MI、CVI 等,每种高温成型工艺方法的特点不同,可能引入的缺陷行为及其特征也不尽相同。但从作者团队近年的研究和积累来看, SiC_f/SiC 复合材料中的制造缺陷主要包括以下 4 种类型。

(1)空隙。由多个离散分布的微米级气孔组成,是 SiC_f/SiC 复合材料中一种固有的物理特征,通常不同的热端部件对容许存在空隙的量级要求有所不同。但一般认为特别优良的 SiC_f/SiC 复合材料,其空隙含量在 2% 以下,如图 1 所示,在 SiC_f/SiC 复合材料内部,空隙非常少;良好的 SiC_f/SiC 复合材料,其内部空隙含量在 5% 以下,如图 2 所示,显然,其内部空隙比图 1 中明显要多;而对于

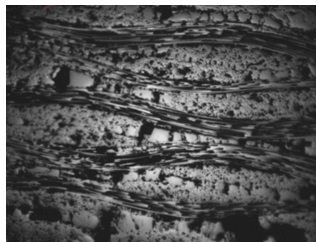


图2 良好的SiC_f/SiC复合材料内部空隙及其分布特征(×40)

Fig.2 Characteristics of porosity distribution in good SiC_f/SiC composites

空隙含量在 10% 以上的 SiC_f/SiC 复合材料,可能不宜用于发动机关键热端部件的制造。目前,有关空隙含量具体阈值与结构件验收值之间的量化数理关系,尚需进一步研究和通过试验确定。

(2)分层。是 2.5D 和 3D 的 SiC_f/SiC 复合材料中不常见的一种制造缺陷,但脱模不当,容易产生分层缺陷,这种分层一般位于 SiC_f/SiC 复合材料浅层位置。

(3)空洞。是 SiC_f/SiC 复合材料中比较容易产生的一类缺陷,与 SiC_f/SiC 复合材料高温裂解的程度有密切的关系。在物理特征上,尽管空洞与空隙都具有离散分布的特征,但空洞是比空隙更大的缺陷,通常单个空洞的尺寸在 mm 量级。空洞的出现总会伴随空隙。图 3 是含有典型的空洞的结果,从中可以非常清晰地看出空洞与空隙的特征和区别。

(4)裂纹。是 SiC_f/SiC 复合材料在高温裂解或脱模过程中由于局部应力过度集中引起的一类缺陷,分为微裂纹和裂纹,通常裂纹的取向比较复杂。

除了上述 4 种典型制造缺陷外, SiC_f/SiC 复合材料基体浸渍不均、纤维屈曲、纤维断裂、纤维缺少等也是这类复合材料在制造过程可能产生的一些制造缺陷。

2 加工缺陷

加工缺陷是指 SiC_f/SiC 复合材料完成高温成型之后,进行后续机械加

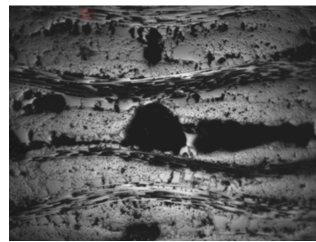


图3 空洞及其分布特征(×40)

Fig.3 Characteristics of voids in SiC_f/SiC composites

工和装配过程中可能引入的缺陷,它与 SiC_f/SiC 复合材料零件机械加工、装配等密切相关,主要包括制孔区缺陷和装配区缺陷,缺陷开度分布在几百 μm 到 mm 量级不等。

3 损伤

SiC_f/SiC 复合材料中的损伤可以分为两类:

(1) 服役损伤。是指 SiC_f/SiC 复合材料零件在使用过程,在结构受力和承载以及高温热环境等作用下,产生的各种损伤,如分层、断裂、裂纹等,取向长度一般在 mm 量级以上,典型的 SiC_f/SiC 复合材料分层及其特征参见文献 [26]。

(2) 扩展损伤。是指 SiC_f/SiC 复合材料中原有非超标的制造缺陷在服役环境条件下,出现了新的扩展后,超过了设计容许的损伤容限值的缺陷,其取向长度一般也在 mm 量级以上。

SiC_f/SiC 复合材料无损检测与缺陷评估就是需要针对不同的阶段可能会产生的缺陷、损伤特点、检测要求、检测环境等研究制定相应的检测方法、检测标准和实现手段,其中缺陷判据和缺陷量化评估方法的建立尤为重要。

研究进展

从已掌握的资料分析,国外 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方面的密集研究至少可以追溯到 2000 年前后,起初主要是关注 SiC_f/SiC 复合材料缺陷的表征与评估以及可检性研究;随着其在高温热端部件制造方面的技术推进和研究研发, SiC_f/SiC 复合材料损伤的检测与评估,以及无损检测新技术的研究又成为业内的研究热点,目的是针对不断出现的新的 SiC_f/SiC 复合材料制造工艺、结构设计和应用研发,研究和探索新的无损检测技术与缺陷评估方法,目前这方面的研究仍然在不断推进中。

总体上, SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方面的研究可以分为:面向小样品的实验室级检测新方法探索(包括可检性研究)和面向 SiC_f/SiC 复合材料零件级的检测技术研发(包括检测标准和验收标准的建立)。在缺陷表征与评估方面,主要针对 SiC_f/SiC 复合材料的工艺特点,通过研究和试验验证分析,了解和掌握 SiC_f/SiC 复合材料微结构特征、可能产生的缺陷行为,构建 SiC_f/SiC 复合材料缺陷表征和评估方法。在 SiC_f/SiC 复合材料无损检测方法与应用研究方面,先后推出了超声、射线、红外、电阻等多种检测方法。

1 超声检测

超声检测主要是基于超声波在 SiC_f/SiC 复合材料中产生的各种传播行为,从中提取有益的超声信号,构建超声信号特征与缺陷之间的数理联系,实现缺陷判别和检出。超声检测被认为是 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估的首选检测方法^[6-8]。采用超声检测方法的最大益处是,超声对 SiC_f/SiC 复合材料中的空隙、空洞、裂纹、基体浸渍不均等大部分制造缺陷和损伤有很强的检出能力,而且便于实现自动化检测和可视化检测与缺陷定量评估,环保低成本,但需要液体耦合剂。但是,声波在高空隙含量的 SiC_f/SiC 复合材料中声衰减非常强烈,会明显影响其在 SiC_f/SiC 复合材料中的穿透能力。为此,作者在多项国家发明专利基础上,近年创建了一种高分辨率脉冲超声-声发射,又称非对称频率超声(AU)方法^[27],为解决 SiC_f/SiC 这类的高衰减、大厚度、变曲率复合材料的超声检测提供了一种非常有效的解决方法,很好地实现了超声检测穿透能力、检测分辨率、表面检测盲区的平衡兼顾,其配套的检测方法、仪器设备及检测标准已经取得了很好的实际检测效果(图 4)。

激光超声、声-超声、声发射等

虽然在产生超声波的方式和超声信号特征方面有各自不同的特点和实现方法,但都是从超声学的角度,基于声波在材料中的传播行为实现检测,这里也可归类为超声检测方法的扩展。针对 SiC_f/SiC 复合材料在力学试验过程中可能产生的损伤问题,近年的研究报道主要集中在超声新方法的机理探索,例如,文献 [9-10] 报道了 SiC 复合材料激光超声方面的试验结果,文献 [11-12] 报道了 SiC 复合材料声-超声检测方面研究情况,文献 [12-16] 报道了 SiC 复合材料声发射检测方面试验研究。目前这些研究还处于实验室科学原理性试验研究层面,距离解决工程应用中的 SiC_f/SiC 复合材料结构的检测要求和技术成熟度差距还很大,但为探索新的 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方法打下了基础。

2 X 射线检测

目前用于 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估的 X 射线检测技术主要包括数字式射线成像法(Digital X-Rays, DR)、胶片照相法、CT (Computed Tomography) 法及 μCT (Computed Micro-Tomography) 法。文献 [6, 16-21] 先后报道了这方面的试验研究结果,其中 X 射线胶片照相法因需要复杂的胶片处理设施、场地,不环保(存在废液和排污处理),检测效率非常低,已经被 DR 方法所替代。对于实际 SiC_f/SiC 复合材料结构件无损检测,通常优先选 DR 方法,作者及团队研究了一种基于 DR 原理的工业级 X 射线自动扫描成像检测技术及其检测系统(FDR-160),在 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与缺陷评估方面发挥了非常好的检测效果,自动化程度高、成像分辨率高,目前已成为 SiC_f/SiC 复合材料结构件无损检测与缺陷评估方面非常重要的检测技术与自动化检测设备。图 5 是典型的 SiC_f/SiC 复合材料结构件中基体浸渍不均匀的检测结果,

缺陷指示非常清晰。CT法及 μ CT检测技术研究目前主要集中在针对 SiC_f/SiC 复合材料小试样的微结构、力学测试过程中小试样内部产生的损伤评估的实验室研究方面^[16-21]。已经取得的研究结果表明, μ CT主要面向mm级 SiC_f/SiC 复合材料小试样的缺陷表征与评估问题研究,CT可以用于 SiC_f/SiC 复合材料结构的缺陷表征与评估,但考虑到检测效率、成本等,能用DR检测技术解决的,尽量优先选择DR检测方法。

3 红外检测

目前红外检测方法主要用于 SiC_f/SiC 复合材料缺陷表征与评估,以脉冲红外检测为主,采用热加载方法(图6)。文献[6,12,22-23]先后报道了这方面的研究,针对典型

的 SiC_f/SiC 复合材料试样,开展了红外检测方法的可检性试验研究,结果表明,红外检测方法对较薄(3mm以下)的 SiC_f/SiC 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,随着缺陷或者损伤的深度增加,红外对 SiC_f/SiC 复合材料中的缺陷检出能力急剧下降。因此,总体上,红外检测方法对2mm以上 SiC_f/SiC 复合材料中的缺陷检出能力非常有限,但对一些近表面较大的缺陷或者损伤,是一种非接触检测方法补充和选择。但是,红外检测方法对热加载和热加载过程的控制有严格的要求,容易引起不正确的检测结果指示。此外,红外方法检出信号指示容易受到 SiC_f/SiC 复合材料表面状态的影响,进而会干扰缺陷的判别^[6]。

4 电阻法检测

电阻法检测是基于 SiC_f/SiC 复合材料在受到外力(如拉伸载荷)作用下,沿受力方向的电流会随着 SiC_f/SiC 复合材料损伤(如裂纹)的出现发生变化,进而使 SiC_f/SiC 复合材料在受力方向的电阻或电阻率发生变化,从而根据所测得的电阻的变化进行 SiC_f/SiC 复合材料损伤行为的评估。文献[12,24-25]报道了这方面的试验探索,结果表明, SiC_f/SiC 复合材料试样在拉伸载荷作用下,其内部损伤,如裂纹的产生,会改变 SiC_f/SiC 复合材料试样在拉伸方向的电阻,如图7^[24]所示。目前这种方法尚处于原理探索阶段。尽管这种检测方法目前还很难用于 SiC_f/SiC 复合材料制造缺陷和加工缺陷的无损检测与评估,但为今后开展 SiC_f/SiC 复合材料无损检测新方法研究提供了启示。

主要技术挑战

1 缺陷的可检性

这里的缺陷是指前文所述 SiC_f/SiC 复合材料在高温成型、加工、服役过程中产生的缺陷。缺陷的可检性包括:制造缺陷的可检性、加工缺陷的可检性、损伤的可检性。其中制造缺陷可能是目前 SiC_f/SiC 复合材料最为关注的缺陷,直接影响 SiC_f/SiC 复合材料制件的原始质量、初始力学性能。由于 SiC_f/SiC 复合材料

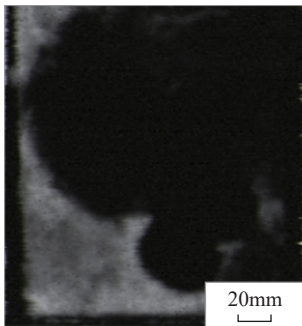


图4 SiC_f/SiC 复合材料分层AU检测结果
Fig.4 AU imaging result of SiC_f/SiC composite delamination

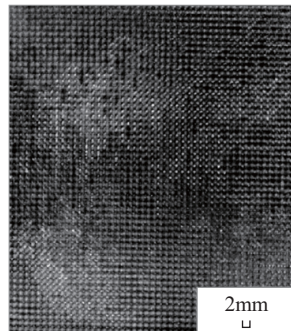


图5 典型基体浸渍不均匀的DR检测结果
Fig.5 Inhomogeneity of polymer impregnation using the FDR-160 DR system (Made in ACC)

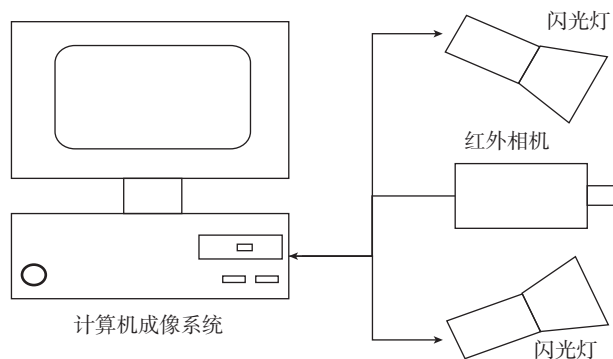


图6 红外检测方法
Fig.6 Illustration of infrared thermography

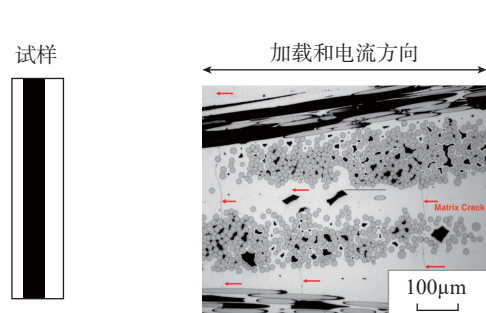


图7 电阻法检测基本原理
Fig.7 Illustration of electrical resistance method

特殊的高温成型工艺和缺陷形成机理,导致其缺陷行为与其他复合材料显著不同,有关缺陷判别的基础数据、缺陷判据等也在不断积累过程中,这需要密切结合 SiC_f/SiC 复合材料成型工艺的研究,持续开展实际工艺缺陷表征。在此基础上,通过不断的检测试验和验证分析,才能研究建立实用的 SiC_f/SiC 复合材料制造缺陷无损检测方法。因此,缺陷的可检性需要建立在系列实际 SiC_f/SiC 复合材料缺陷检测案例基础上才能有效地解决,仅通过类似金属材料检测中的简单平底孔等效的方法,不足以解决 SiC_f/SiC 复合材料制造缺陷的可检性问题。

2 检测方法的可检性

正如前文所述, SiC_f/SiC 复合材料制造缺陷具有多样性,而不同的检测方法,其检测原理不同,用于缺陷判别的检测信号形成机理和信号也会有区别,检测方法的可检性就是验证来自实际 SiC_f/SiC 复合材料制造缺陷的检测信号的敏感程度,是否能确保在给定的检测条件和技术参数情况下,有效地检出所要求检出的缺陷(包括大小和类型)。不同检测方法对不同的缺陷或损伤具有不同的检出能力,因此,在进行检测方法的可检性试验时,需要针对性地选择适合的检测方法,开展充分的检测试验验证。例如, DR 对 SiC_f/SiC 复合材料中的分层不敏感,常规超声方法对于 SiC_f/SiC 复合材料中的单个微裂纹可能难以检出,红外方法对较薄的 SiC_f/SiC 复合材料中表面和近表面缺陷/损伤具有一定的可检性等,需要针对性考虑不同检测方法对 SiC_f/SiC 复合材料中不同缺陷的可检性,验证所选用的无损检测方法对 SiC_f/SiC 复合材料中可能出现的制造缺陷的可检性。

3 结构的可检性

这里“结构”是指要求检测的 SiC_f/SiC 复合材料对象。目前 SiC_f/

SiC 复合材料的检测与评估,主要面对 4 类检测对象:(1)微小样品,主要是指用于观察分析的 SiC_f/SiC 复合材料小样品,通常在 mm 量级;(2)小试样,例如,用于力学性能测试的各种 SiC_f/SiC 复合材料小试样,通常在 cm 量级;(3)试件,例如,用于结构和工艺验证的各种试验件、缩比件,通常在小尺寸 m 级范围内;(4)零件,具有各种各样的形状、厚度、尺寸等特征,通常在 m 量级。结构可检性就是要针对不同的检测对象,研究和选择相应的检测方法,开展缺陷可检性和检测方法实用性研究。例如, μ CT 方法只适合 SiC_f/SiC 复合材料微样品的检测与评估,服役中的 SiC_f/SiC 复合材料零件,采用 DR 方法,其可检性将会很差,等等。

4 多环境下的可检性

目前从无损检测角度,所面临的 SiC_f/SiC 复合材料检测环境主要有:(1)实验室环境下的 SiC_f/SiC 复合材料检测与评估,多以试验研究、方法研究为主,主要是研究样品、样件中的缺陷可检性;(2)制造环境下的 SiC_f/SiC 复合材料检测与评估,是以试验验证、检测应用验证为主,主要是研究样件、零件中的缺陷可检性;(3)产品质量控制环境下的 SiC_f/SiC 复合材料检测与评估,以检测工艺有效性验证为主,主要解决 SiC_f/SiC 复合材料零件中的缺陷可检性和零件质量符合性问题。

此外, SiC_f/SiC 复合材料的可检性还与产品质量要求、相关产品验收标准等有关,通常需要结合不同热端部件对 SiC_f/SiC 复合材料的质量要求和缺陷检出要求,开展针对性的可检性规划与考虑。因此目前在 SiC_f/SiC 复合材料的材料制备、工艺研发和结构设计、性能基础数据等不断积累与认识阶段,需要同步开展其可检性方面的研究。

5 可视化与智能评估

由于 SiC_f/SiC 复合材料目前的

材料、制造成本居高难下,制造周期较长,耗能较高,因此,研究和制定合理的 SiC_f/SiC 复合材料质量验收阈值,提高 SiC_f/SiC 复合材料的制造成品率,具有非常重要的工程意义。从目前已经取得的成功研发经验和案例来看,借助先进的无损检测技术,实现 SiC_f/SiC 复合材料的可视化与智能评估,一方面,可以用于 SiC_f/SiC 复合材料零件的质量控制;另一方面,可以利用无损检测提供的量化信息和检测结果,帮助优化工艺、提升工艺稳定性,从而提高 SiC_f/SiC 复合材料零件的成品率。同时通过先进的可视化检测与智能评估技术,还可以帮助建立合理的缺陷/损伤验收阈值,用于 SiC_f/SiC 复合材料的安全性评估。为此,未来将更加需要能够实现 SiC_f/SiC 复合材料零件可视化检测与智能评估的技术。

随着 SiC_f/SiC 复合材料在热端部件更广泛的应用,其在无损检测与评估方面将会面临诸多技术挑战,特别是当 SiC_f/SiC 复合材料用于航空发动机、高超音速飞行器中的热端部件制造时,对 SiC_f/SiC 复合材料零部件的质量要求更高、寿命预期更长,研究先进的 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估将尤为重要和紧迫。

未来发展

尽管 SiC_f/SiC 复合材料已经开始有了一些显著的应用^[1-5],也开展了无损检测与评估方面的研究^[6-27],建立了一些可用于 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估的方法,但仍然面临诸多技术挑战。在 SiC_f/SiC 复合材料缺陷表征与评估方面,目前非常欠缺验证分析方面的基础数据和缺陷判据;在检测方法方面,在缺陷的可检性、适用性、可视化检测与智能评估方面,还非常有待研究和建立新的检测方法,积累相应的检测判据和

检测应用案例;在检测标准方面,非常欠缺经过了足够的检测应用验证的检测标准;在缺陷符合性检测方面,非常欠缺针对性的、且经过了验证的技术标准,做到既不过严,也不过松,恰到好处地发挥 SiC_f/SiC 复合材料的性能和特点。近年来,针对这些无损检测方面的技术挑战,业内也一致在开展相关的研究,未来 SiC_f/SiC 复合材料缺陷表征与评估技术研究将主要是结合前文所述的技术挑战,开展相关的研究。

(1) 缺陷表征与评估技术研究:主要针对 PIP、MI、CVI 等 SiC_f/SiC 复合材料成型工艺,以及基于 2D、2.5D、3D 的 SiC 纤维编织预制体的 SiC_f/SiC 复合材料,研究和建立相应的缺陷表征与评估方法。

(2) 检测新方法研究:主要结合不同应用和使用环境条件等,开展 SiC_f/SiC 复合材料检测新方法研究,进一步提升缺陷的检出能力、快捷性与适用性。

(3) 应用验证研究:针对不同的 SiC_f/SiC 复合材料及其结构,开展面向实际结构或者零部件的检测应用验证研究。

(4) 可视化检测与智能评估技术:研究能够用于实现 SiC_f/SiC 复合材料结构件可视化检测与智能评估技术,支撑 SiC_f/SiC 复合材料在高温热端部件中的研发和推广应用。

(5) 新型检测仪器设备研发:主要基于所研究建立的 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术,研制面向 SiC_f/SiC 复合材料结构件的无损检测仪器设备,形成 SiC_f/SiC 复合材料结构件无损检测技术能力与平台。

(6) 检测标准的研究制定:包括检测标准和产品验收标准的建立,主要通过系列的检测和验证试验,研究和制定 SiC_f/SiC 复合材料结构无损检测与评估方面的技术标准,从而支撑 SiC_f/SiC 复合材料的研发和工程化应用。

结论

(1) SiC_f/SiC 复合材料中的缺陷主要包括制造缺陷、加工缺陷和损伤,不同的缺陷和损伤具有显著不同的物理特征和尺度,不同的检测方法对 SiC_f/SiC 复合材料中的缺陷的敏感程度和检出能力不同,研究和采用针对性的检测方法,才能有效地检出 SiC_f/SiC 复合材料中要求检出的缺陷。

(2) 已有的研究和试验结果表明,超声方法和 X 射线方法是目前 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估的主要方法。当选用超声方法时,需要考虑声波在 SiC_f/SiC 复合材料中的衰减、检测分辨率和表面检测盲区以及缺陷检出能力,其中采用高分辨率脉冲超声-声发射或非对称频率超声方法,可以在穿透能力、检测分辨率和表面检测盲区以及缺陷检出能力方面获得均衡提升,从而更加适合 SiC_f/SiC 复合材料的无损检测与评估。对于 SiC_f/SiC 复合材料零部件的 X 射线检测,DR 方法是一种非常具有技术优势的检测技术,目前已经在 SiC_f/SiC 复合材料零部件检测中得到了非常重要的应用。

(3) 红外、电阻、声-超声、激光超声等检测方法,目前仍然有待在技术上进一步突破,才可能在 SiC_f/SiC 复合材料零部件方面找到用武之地。

(4) 在 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方面,目前还面临诸多的技术挑战:面向 SiC_f/SiC 复合材料缺陷、结构、应用环境等方面的可检性,以及面向 SiC_f/SiC 复合材料结构的可视化与智能评估技术需求。

(5) 缺陷表征与评估、检测新方法、应用验证、可视化检测与智能评估、新型检测仪器设备研发、标准的研究制定等将是未来 SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估方面的重要技术方向。

参考文献

- [1] BREWER D. HSR/EPM combustor materials development program[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 261(1-2): 284-291.
- [2] KAYA H. The application of ceramic-matrix composites to the automotive ceramic gas turbine[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(6): 861-872.
- [3] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: An overview[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(2): 155-170.
- [4] NASLAIN R R. SiC-matrix composites: Nonbrittle ceramics for thermostructural application[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2005, 2(2): 75-84.
- [5] DICARLOJ A. Advances in SiC/SiC composites for aero-propulsion[R/OL]. NASA/TM-2013-217889. [2013-07-01]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp>.
- [6] SUN J G, VERRILLI M J, STEPHAN R, et al. Nondestructive evaluation of ceramic matrix composite combustor components[C]//29th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Bellingham, 2002.
- [7] ZAWRAHMF, EL-GAZERY M. Mechanical properties of SiC ceramics by ultrasonic nondestructive technique and its bioactivity[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 106(2-3): 330-337.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] P O D Y M O V A 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.
- [11] GYEKENYESI A L, MORSCHER G N, COSGRIFF L M. In-situ monitoring of damage in SiC/SiC composites using acousto-ultrasonics[C]// ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Vienna, 2008.

- [12] GYEKENYESI A L, BAKER C, MORSCHER G. Characterizing damage in ceramic matrix composites[C]//Conference on nondestructive characterization for composite materials, aerospace engineering, civil infrastructure, and homeland security. San Diego, 2014.
- [13] MORSCHER G N. Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(5): 687–697.
- [14] 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.
- [15] OJARD G, MORDASKY M, KUMAR R. Acoustic emission monitoring of damage in ceramic matrix composites: Effects of weaves and feature[C]//AIP Conference Proceedings. 2018, 1949(1): doi.org/10.1063/1.5031675.
- [16] MAILLET E, SINGHAL A, HILMASA, et al. Combining in situ synchrotron X-ray microtomography and acoustic emission to characterize damage evolution in ceramic matrix composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(13): 3546–3556.
- [17] KIM W J, KIM D, JUNG C H, et al. Nondestructive evaluation of microstructure of SiC_f/SiC composites by X-ray computed microtomography[J]. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2013, 50(6): 378–383.
- [18] CHATEAU C, GÉLÉBART L, BORNERT M, et al. In situ X-ray microtomography characterization of damage in SiC_f/SiC minicomposites[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(6): 916–924.
- [19] BACHE M R, NICHOLSON P I, WILLIAMS E. In-situ assessment of fracture in SiC_f/SiC under computed X-ray tomography[C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Oslo, 2018: doi.org/10.1115/GT2018-75795.
- [20] THORNTON J, ARHATARI B D, SESSO M, et al. Failure evaluation of a SiC/SiC ceramic matrix composite during in situ loading using micro X-ray computed tomography[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2019, 25(3): 583–591.
- [21] MEI H, XU Y D, CHENG L F, et al. Nondestructive evaluation and mechanical characterization of a defect-embedded ceramic matrix composite laminate[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2007, 4(4): 378–386.
- [22] COSGRIFF L M, BHATT R, CHOI S R, et al. Thermographic characterization of impact damage in SiC/SiC composite materials[C]//Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV. 2005: 363–372.
- [23] SUN J G. Evaluation of ceramic matrix composites by thermal diffusivity imaging[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2007, 4(1): 75–87.
- [24] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z H. Monitoring damage accumulation in ceramic matrix composites using electrical resistivity[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(4): 463–466.
- [25] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z H. 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.
- [26] SUN J G, VERRILLI M J, STEPHAN R, et al. Nondestructive evaluation of ceramic matrix composite combustor components[C]//Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. 2003: 1011–1018.
- [27] LIU F F, ZHOU Z G, LIU S P, et al. Evaluation of carbon fiber composite repairs using asymmetric-frequency ultrasound waves[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107534.

通讯作者: 刘松平, E-mail: liusp2014@163.com。

Progress in Non-Destructive Testing and Evaluation of SiC_f/SiC Composites

LIU Songping, LIU Feifei, ZHANG Qingle, LI Zhiying

(Composites Technology Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] As silicon carbide fibre/silicon carbide ceramic matrix composites (SiC_f/SiC CMCs) have become widely used in high temperature hot-section components in aerospace and aero-engines, nondestructive testing and evaluation (NDT & E) is particularly important. Due to the special high temperature manufacturing process, internal microstructure and defect characteristics of SiC_f/SiC CMCs, it is difficult to realize reliable NDT & E of SiC_f/SiC CMCs by using existing detection techniques and defect evaluation methods. Based on the studies in this field in the recent years, the defects and characteristics of SiC_f/SiC CMCs are analyzed. The research progress in NDT&E of SiC_f/SiC CMCs is reviewed. The main technical challenges in NDT&E of SiC_f/SiC CMCs are presented. The future development tendency in NDT & E of SiC_f/SiC CMCs is given. At present, high-resolution digital X-ray imaging and high-resolution asymmetric-frequency ultrasonic detection techniques have become very important methods for the NDT & E of SiC_f/SiC CMCs, and good practical testing and applications have been obtained.

Keywords: SiC_f/SiC composites; Non-destructive testing and evaluation; Ultrasonic evaluation; X-ray inspection; Infrared testing

(责编 雷松)