

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518938

刚性陶瓷防热瓦损伤检测技术研究进展*

周伟^{1,2} 胡嘉美^{1,2} 王赛男^{1,2} 刘武刚³ 侯传涛³

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北大学计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室 北京 100076)

摘要: 刚性陶瓷防热瓦具有耐高温、低热导率和化学稳定等优点,是当今航空航天领域中空天飞行器热防护系统的关键材料,被广泛应用于飞行器迎风面及其他高温部位。在其制造、安装和服役过程中,受到疲劳和外部冲击等载荷的影响,可能会出现表面、内部以及粘结层的损伤,严重影响热防护性能,甚至危及飞行器的安全。因此对防热瓦进行可靠有效的无损检测评估,是确保其结构稳定,降低维护成本,提高飞行器安全性及寿命的关键。本文调研了近年来适用于防热瓦材料的无损检测技术,分别对射线、超声、红外热成像、结构光和太赫兹检测技术进行了总结,探讨各种技术的特点和应用情况,以期对飞行器热防护结构的无损检测发展和应用提供技术支持。

关键词: 热防护;陶瓷防热瓦;无损检测;缺陷识别;太赫兹

中图分类号: TN911 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.4030

Research progress on non-destructive testing technology of rigid ceramic insulation tiles

Zhou Wei^{1,2} Hu Jiamei^{1,2} Wang Sainan^{1,2} Liu Wugang³ Hou Chuantao³

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding 071002, China; 3. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Rigid ceramic thermal insulation tiles, as critical components of thermal protection systems in aerospace vehicles, have been extensively utilized in high-temperature parts such as windward surfaces of aircraft due to their superior properties including exceptional high-temperature resistance, low thermal conductivity, and excellent chemical stability. During the manufacturing, installation and service phases, surface, internal and bonding defects may occur due to the influence of fatigue and external impact loads, which can severely compromise their thermal protection performance and even endanger the safety of aerospace vehicles. Therefore, the reliable and effective non-destructive testing of the insulation tiles is critical to ensuring structural stability, reducing maintenance costs, and enhancing the safety and service life of aerospace vehicles. This paper reviews recent research advances in non-destructive testing technologies. The X-ray, ultrasonic, infrared thermal imaging, structured light and Terahertz testing technologies are summarized respectively, and the technical characteristics and application of each method are discussed, aiming to provide technical support for the development of non-destructive testing in spacecraft thermal protection structures.

Keywords: thermal protection; ceramic thermal insulation tile; non-destructive testing; defect identification; Terahertz

0 引言

空天飞行器能够在临近空间或空间中来回穿梭或长时间驻留,其飞行速度可达到5倍音速以上,用于执行各种航空航天任务,因其具有低成本、响应速度快、高灵活性及可持续性等特点,成为各国航空航天领域竞相研发的热点^[1]。

特别是在深空探索中,空天飞行器也将担负重要的使命。飞行器在上升和再入阶段,承受极高的空气动力加热和压力载荷^[2],对飞行器结构及内部控制系统等仪器仪表造成巨大影响。因此,开发针对严苛热力环境的热防护系统(thermal protection system, TPS)以抵御热载荷的影响,并保证内部设备正常运转和人员安全是必要的。TPS根

收稿日期:2025-05-26

* 基金项目:联合创新基金(BQJJ202402)、河北大学无损检测技术及仪器创新团队项目(IT2023C03)资助

据作用原理可以分为 3 类:被动式、半被动式和主动式^[3]。其中被动式是指在飞行器表面增加轻质、耐高温、隔热和透波等特性的防隔热材料有效阻止外部热量向内部传递^[4]。半被动式则是依靠材料或气流将机体表面的大部分热量带走,从而实现热防护功能^[5]。主动式是通过冷却介质将高温处的热量带走,需外部输入能量或者复杂的机械装置对热流进行控制,以达到降温的效果^[6]。其中被动式最为简单,并且可重复使用,是目前技术成熟度及可靠性最高的热防护方案,也是空天飞行器中最常用防护系统^[7]。

被动式热防护系统(passive thermal protection system, PTPS)常用的方案为刚性陶瓷隔热瓦和柔性隔热毡^[8],其中柔性隔热毡常用于飞行器中的被风面以及非承载、低温部位,而刚性陶瓷隔热瓦因其耐高温、低热导率和化学性质稳定等优点,常用于迎风面及其他承受高温的部位,在 TPS 中起主要作用。影响隔热瓦热防护性能的因素主要有以下 4 个方面:一是在生产过程中,隔热瓦受材料或者工艺影响易产生内部缺陷;二是在安装过程中,受粘结工艺及曲面安装难度大等影响,隔热瓦易产生粘结不良等现象;三是在服役的高温环境下,刚性隔热瓦遭受弯曲、拉伸、压缩、剪切等载荷作用^[9],在重复使用过程中受到碎片撞击或其他冲击,对隔热瓦表面或内部造成损伤;四是在近地飞行过程中,隔热瓦容易受到碎石或者鸟群等冲击作用形成损伤。上述情况都有可能对材料出现损伤,影响整体的热防护性能,严重时会对飞行器的安全产生致命影响。例如,2003 年“哥伦比亚”号航天飞机由于外部燃料箱泡沫材料脱落撞击隔热瓦产生裂缝导致机体坠毁。近几年 SpaceX 星舰发射失败与隔热瓦安装不牢固、局部缺失或脱落有关。除了从材料强度以及安装工艺上提升隔热瓦的使用强度,及时发现隔热瓦的缺陷与故障也具有至关重要的意义。

对刚性陶瓷隔热瓦的损伤检测以无损检测(nondestructive testing, NDT)为主,NDT 是指在不损伤被测物的基础上,采用声、光、电、磁等方法,通过信号处理对产品进行检测的技术^[10]。由于刚性陶瓷隔热瓦具有多层结构,在生产和使用阶段都有可能出现损伤,其损伤类型主要包含表面、内部以及粘结层的损伤,如何快速准确定位损伤的位置、识别损伤的类型、鉴定损伤的程度成为研究的重点。随着载人航天、登月与深空探测、高超声速飞行器、重复使用运载器、空间机动飞行器等航天科技发展与航天工程的发展,对刚性陶瓷隔热瓦检测又提出了全新、更加可靠的技术要求,同时也为隔热瓦的无损检测发展提供了前所未有的机遇和挑战。

杨杰等^[11]系统综述了美国 3 种典型刚性隔热瓦材料体系的制备工艺与性能特征,并探讨了热-隔热一体化陶瓷瓦的研究进展。该研究详细分析了高超音速飞行器用刚性隔热瓦的材料类型及其性能参数。李俊宁等^[12]基于隔热材料的组成、结构和性能特征,结合美国超声速飞行器的应

用需求,系统总结了高超声速飞行器高效隔热材料的研究进展。该团队在 2024 年进一步综述了典型可重复使用热防护材料的发展历程与研究现状,重点从材料损伤失效机制角度评估了其可重复使用性能^[13]。宋俊柏等^[14]对比分析了不同检测方法的优劣,为可重复使用飞行器的热防护结构发展和应用提供技术支持。

本文结合国内外最新研究进展,系统分析了刚性陶瓷隔热瓦在制备和服役阶段的典型缺陷类型,从检测需求和缺陷对象两个维度对目前常用的无损检测技术进行追踪,从检测方法和数据处理两个方面总结了不同类型 NDT 技术的特点、研究进展与应用情况。为提高隔热瓦的可靠性和安全性,促进 NDT 技术发展与应用提供一定的参考和借鉴。

1 陶瓷隔热瓦损伤类型与机理

1.1 陶瓷隔热瓦

刚性陶瓷隔热瓦为复合结构,如图 1 所示,其隔热结构由外到内依次由热辐射涂层、隔热瓦、应变隔离垫和冷结构组成,其中隔热瓦与隔离垫、隔离垫与冷结构之间由粘接固化胶连接。隔离垫用于消除冷结构的形变传递,瓦与瓦之间的间距则是为了预防蒙皮与外隔热层变形匹配的问题^[15]。

在刚性陶瓷隔热瓦结构中,隔热瓦和热辐射涂层是主要隔热部件。隔热瓦由石英纤维、硼硅酸铝纤维或氧化铝纤维制成,高温烧结后形成多孔结构以实现隔热,其中硼硅酸铝纤维或氧化铝纤维能增强热稳定性。韩清壮等^[16]对隔热瓦陶瓷的制备技术和应用情况进行了总结。热辐射涂层由发射剂、粘结剂和助剂组成,高温烧结后在隔热瓦表面形成光滑的硼硅酸盐玻璃层,具有耐高温和高辐射系数的特性^[17]。郭琳琳等^[18]总结了隔热瓦涂层的结构设计和材料改进的研究进展。热辐射涂层通过辐射散热降低瓦体温度,同时防止隔热瓦表面材料脱落。涂层的热膨胀系数要与隔热瓦相匹配,避免高温下涂层出现碎裂剥落。

刚性陶瓷隔热瓦研制工作开始于 20 世纪 60 年代,以美国 NASA 为主导,按照所含纤维系统单元数的不同,隔热瓦的发展可分为四代,如图 2 所示。第一代单元体系,由石英纤维构成,以洛克希德绝缘材料(lockheed insulation, LI)系列为代表;第二代为二元体系,由石英纤维和硼硅酸铝纤维构成,代表产品是纤维增强复合隔热材料(fibrous refractory insulation composite, FRIC)、含硼刚性隔热材料(boron-containing rigid insulation, BRI)和高性能隔热材料(high thermal performance, HTP);第三代为三元体系,由石英纤维、硼硅酸铝纤维和氧化铝纤维构成,形成了氧化铝增强热障材料(alumina enhanced thermal barrier, AETB)系列;第四代多元双结构体系,增加了增强 C/C 隔热材料,克服了前几代的脆性问题,以整体增韧纤维增强抗氧化复合材料(toughened unibody fibrous

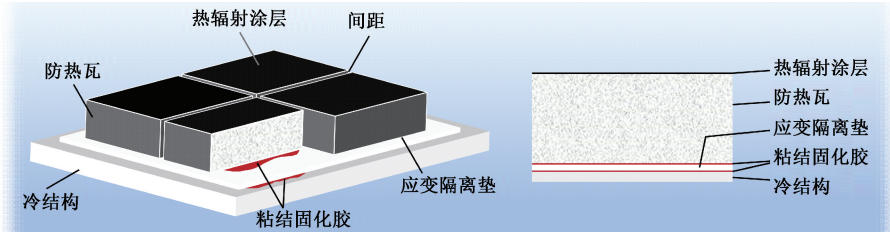


图1 刚性陶瓷防热瓦结构

Fig. 1 Rigid ceramic insulation tile system

reinforced oxidation-resistant composite, TUFROC) 材料为代表, 该材料也是 SpaceX 星舰主要的热防护材料。

目前, 刚性陶瓷防热瓦的研究重点在于纤维类型、粘结剂和制备工艺优化, 这些因素直接影响防热瓦性能。Yu 等^[19]制备了一种低成本、高性能的石英纤维气凝胶复合保温材料, 该材料密度为 0.36 g/cm^3 、常温热导率为 0.049 W/(m K) 。Liu 等^[20]制备了一种刚性陶瓷绝热砖增强酚醛气凝胶复合材料, 经过 1300°C 以上高温 270 s 和 800°C 以上低温 180 s 两段风洞烧蚀后, 背面温度为 242°C 。

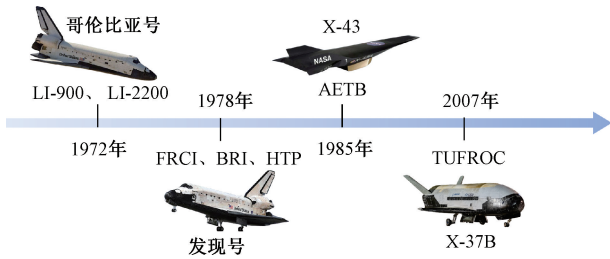


图2 防热瓦发展历程、代表产品及应用实例

Fig. 2 Evolution, representative products, and practical applications of thermal insulation tiles

吉冯春等^[21]提出以短切玻璃纤维为骨架、TEOS 改性酚醛树脂为粘结剂制备了一种低成本、耐中低温的玻璃纤维防热瓦, 其体积密度 $0.20 \sim 0.26 \text{ g/cm}^3$, 热导率为 0.0475 W/(m K) , 可在 400°C 的热氧环境中稳定使用。Zhao 等^[22]制备了一种新的轻质 $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 多孔陶瓷, 密度 0.37 g/cm^3 , 常温热导率为 0.12 W/(m K) , 能够承受 1350°C 高温, 当表面温度达 1268°C 时, 背面冷结构温度仅为 223°C 。研制低密度、高孔隙率、低热导率的耐高温陶瓷材料的同时提高材料的耐用性、力学强度、和耐温性仍是研究重点。

1.2 损伤缺陷类型

刚性陶瓷防热瓦的损伤缺陷可分为 3 类: 表面涂层缺陷、材料缺陷和粘结缺陷^[23]。

1) 表面涂层缺陷

防热瓦表面热辐射涂层的缺陷主要包括掉块、脱落和开裂, 其产生原因主要有 3 种: 涂层生产工艺、使用过程受到外力冲击以及高温暴露^[24]。涂层厚度仅约 0.3 mm , 制备时易出现不均匀或裂纹; 使用中若受冲击, 涂层与基体

间易因形变差异导致剥落^[25]。同时, 防热瓦长时间暴露于高热的气动环境中, 涂层与陶瓷材料之间热膨胀差异会导致涂层开裂, 这是由于在升温过程中, 当基体的热膨胀系数大于涂层的膨胀系数时, 基体受到压应力, 涂层受到拉应力, 涂层容易开裂; 或者在降温过程中, 当基体的热膨胀系数小于涂层的热膨胀系数时, 基体受到压应力, 涂层受到拉应力, 涂层也容易开裂^[26]。

2) 材料缺陷

陶瓷材料的缺陷主要为内部孔洞扩展。因陶瓷材料制备工艺复杂, 工艺参数众多, 在制造加工过程中, 材料结构质量稳定性差, 容易产生微小孔洞缺陷^[27]。同时, 陶瓷材料质脆、抗热震性较差, 在其服役过程中会使材料中的微小缺陷进一步扩展^[28]。这是由于防热瓦遭遇强烈的热流或突然的高温冲击, 使陶瓷材料的表面及内部受到瞬间热应力, 导致大量的裂纹萌生并扩展^[29]。除遭受高温载荷外, 防热瓦还会受到各种碎片、流体侵蚀等冲击外力, 促使裂纹或孔洞恶化, 进而导致材料失效。

3) 粘结缺陷

防热瓦与应变隔离垫、应变隔离垫与冷结构之间通过胶接方式连接, 以确保结构变形连续性。在防热瓦重复使用过程中时, 气动加热产生的循环热载荷使胶层受剪切载荷作用, 同时防热瓦与应变隔离垫间温差较大, 导致胶接界面失效^[30]。同时, 振动和热力载荷会削弱粘接层强度, 使其内部缺陷扩展, 甚至导致防热瓦脱落^[31]。

2 陶瓷防热瓦无损检测技术

刚性陶瓷防热瓦的失效一般发生在重复使用过程中, 持续的热载荷会导致微小缺陷逐步扩展, 影响防热瓦的结构稳定性, 进而影响飞行器的安全, 因此需要在防热瓦服役前或服役间隔对其潜在的缺陷进行检测。但受到飞行器基体的限制, 只能从热防护结构外侧进行检测, 同时要求不能影响防热瓦的使用性能, 因此采用无损检测的方法对防热瓦进行缺陷检测和评价。目前, 无损检测已经广泛应用于陶瓷防热瓦材料从研制到制备, 直至服役期的全生命周期, 主要的无损检测技术包括射线检测、超声检测、红外热成像检测、结构光检测、太赫兹检测等, 其技术对比如表 1 所示。其中, 结构光检测主要用于表面缺陷的检测, 而射线检测和超声检测主要用于内部缺陷的检测。红外

热成像检测和太赫兹检测则适用于表面及内部缺陷的检测。接下来将对这些方法的研究进展与应用情况进行介

绍,尤其是针对刚性陶瓷防热瓦以及陶瓷基复合材料的无损检测。

表 1 不同无损检测技术对比

Table 1 Comparative analysis of different NDT techniques

	射线检测	超声检测	红外热成像检测	结构光检测	太赫兹检测
适用缺陷	内部、粘结缺陷	内部、粘结缺陷	表面、内部缺陷	表面缺陷	表面、内部、粘结缺陷
优点	成像精度高、支持三维图像、可检测深层缺陷	灵敏度高、适用范围广	快速、实时、简易	精度高、速度快	安全、强穿透非极性材料、对多层结构敏感
缺点	速度慢、辐射风险、尺寸受限	易受噪声干扰、难辨混合缺陷	厚度受限、分辨率低	对环境光敏感	速度慢、数据处理复杂
成本	高	适中	低	适中	极高

2.1 射线检测

射线检测技术是一种利用射线穿透材料并通过检测信号变化来评估材料内部缺陷的无损检测方法,其原理是当射线穿透材料时,缺陷区域会导致透射射线强度发生局部变化,通过接收器捕获射线强度信息,并采用相关成像处理方法能够定量表征缺陷的尺寸、位置等信息^[32]。按照成像原理,射线无损检测技术可分为数字射线成像(digital radiography, DR)^[33]和计算机层析成像(computer tomography, CT)^[34]。其中 DR 技术具有实时成像、效率高、成本低的优点,但对垂直射线方向的分层缺陷检测能力弱,且缺陷定位精度较差;而 CT 技术能实现三维直观成像,分辨率可达亚微米级,可精确识别缺陷位置、形状和尺寸信息,但由于高昂的检测成本,并未大范围应用^[35]。

射线检测技术具有较高的分辨率和穿透能力,主要用于检测防热瓦内部和粘结缺陷。但该技术对检测参数敏感,需实验优化参数以获最佳成像效果,王树鹏^[36]研究了微焦点 DR 参数优化显著提升陶瓷基复合材料成像质量,最佳参数组合使空间分辨率优于 0.05 mm,可清晰识别内部孔洞、裂纹等缺陷。微焦点 CT 技术相比 DR 具有更高的分辨率,能检测到更微小的缺陷。熊瑛等^[37]研究了微焦点 CT 在陶瓷基复合材料检测中的应用,能够清晰检测并显示孔洞、裂纹、夹杂物等缺陷,如图 3 所示,且在检测亚毫米级孔洞时分辨率和准确性优于常规 CT。微焦点 CT 受计算能力限制,难以精细扫描大型零件,而工业 CT 更适合大体积检测。张松^[38]针对新型陶瓷基复合材料,提出了一种改进的缺陷分割方法和材料密度计算模型,利用工业 CT 技术对材料进行无损检测,实现了对孔洞和脱粘缺陷的定量表征,在缺陷分割精度和材料密度计算方面取得显著进展。

除了通过调整实验参数以及新设备技术提升成像质量外,对图像进行有效地处理也可以提升检测效率和精度,但传统的图像分割方法在处理低对比度、复杂结构的 CT 图像时存在局限性,难以准确识别缺陷,因此发展了很多结合计算机和深度学习算法进行图像分割的方法。

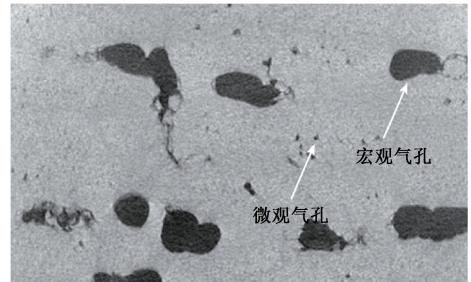


图 3 CT 扫描气孔缺陷^[37]

Fig. 3 CT scanning for porosity defects^[37]

Badran^[39]提出了一种基于深度学习的图像分割方法,用于自动分割纤维增强陶瓷复合材料的 CT 图像,成功地对纤维和基体进行了相分割,并且能够识别在原位拉伸加载过程中产生的基体孔洞,如图 4 所示,证明了深度学习方法在大批量微观图像处理中的优越性。冯宇琦等^[40]基于深度学习的图像分割方法建立了复合材料内部损伤的三维可视化模型,提升了识别和评估复合材料的微裂纹损伤的效率和准确率。杜永龙等^[41]提出了一种利用深度学习的 CT 图像分割方法,实现了复合材料拉伸裂纹的三维可视化和定量表征,进一步证明了深度学习方法在图像处理和缺陷识别方面的有效性。深度学习虽能精准识别材料损伤,但存在数据依赖和算力要求高的局限。未来需通过弱监督学习和硬件加速提升实用性

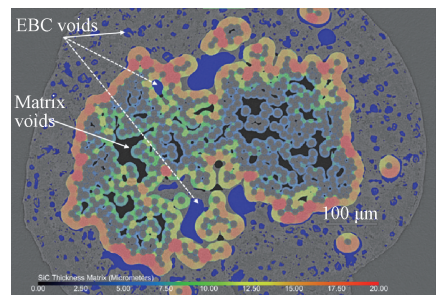


图 4 基于深度学习的缺陷识别^[39]

Fig. 4 Deep learning-based defect recognition^[39]

2.2 超声检测

超声检测是一种基于超声波在被检测物体中传播的主动声学无损检测技术^[42]。当超声波进入物体内部时,会形成弹性波,若物体内部存在缺陷,弹性波在遇到缺陷时便会反射,从而产生缺陷回波。通过将缺陷回波信号与无缺陷物体的正常回波信号进行对比分析,能够精准地确定缺陷的大小、位置以及类型^[43]。超声检测技术专注于探测材料内部深处的缺陷,凭借出色的穿透能力和高分辨率,已被广泛应用于大厚度材料结构的检测,尤其是在分层、孔隙和脱粘等缺陷检测方面,该技术展现出独特的优势,是用于刚性陶瓷防热瓦材料和脱粘检测的有效技术。

目前发展了很多先进超声技术用于检测和识别材料内部的缺陷,如超声C扫、空气耦合超声检测和非线性超声检测等。李万达^[44]基于超声C扫描成像对隔热陶瓷基复合材料进行了检测,可检测到直径1 mm的孔洞,如图5所示,图5(a)为试样图;图5(b)为超声C扫描重建图,并采用脉冲耦合神经网络算法进行图像分割,定量和定位误差率分别为5%和6%。董方旭等^[45]采用空气耦合超声检测技术,对含模拟缺陷的泡沫夹芯复合材料、环氧树脂层压复合材料等多种材料进行了检测,能够有效检测出不同厚度、不同种类复合材料中的模拟缺陷。郑国浩等^[46]针对陶瓷复合材料中的微小缺陷,采用非线性系数变化和二次谐波传播时间两种方法进行定位研究,有效地确定缺陷位置,检测精度可达微米级。其中,超声C扫描技术适用于复杂材料结构的缺陷检测和定量分析;空气耦合超声检测技术则以其非接触、操作简便的特点,适合于快速检测和对表面敏感材料的检测;非线性超声检测技术则在检测微小缺陷和早期损伤方面表现出色,具有较高的灵敏度和分辨率。

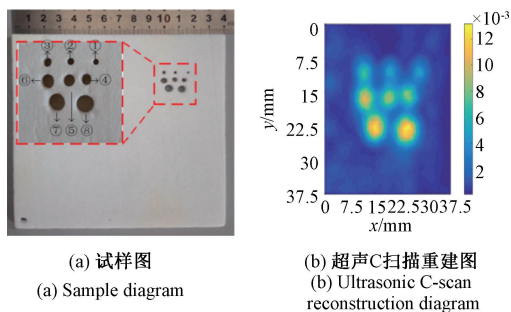


图5 防热瓦陶瓷基复合材料^[44]

Fig. 5 Thermal insulation tile ceramic matrix composites^[44]

超声检测用于分层和脱粘方面的研究更加成熟,温银堂等^[47]采用超声水浸穿透法,可检测脱粘及直径1 mm的孔洞缺陷。孙广开等^[48]通过自主研发的全光学激光超声检测系统实现了对陶瓷基复合材料中分层缺陷的检测,有效检出了内部直径2 mm以上分层缺陷。防热瓦的厚度通常较厚,接收到的回波信号很微弱,容易被噪声信号掩盖,李爱华等^[49]提出了一种改进的阈值函数降噪方法,通过调

整参数解决了传统阈值函数存在的恒定误差和不连续问题,显著提升了信噪比(约15%)和噪声抑制比(约20%),有效保留了缺陷信号特征,为厚陶瓷基复合材料的超声检测提供了新的降噪方法。在缺陷识别方面,也有结合机器学习等技术的尝试,郑善朴等^[50]利用BP神经网络对缺陷类型进行分类,采用阈值法确定缺陷界面位置,并提出分段线性插值-相关性定量法将缺陷尺寸检测误差缩小到 ± 2 mm,实现了缺陷的定性、定位和定量检测。

2.3 红外热成像检测

红外热成像检测原理是利用物体温度差异产生的红外辐射能量分布差异,经光学成像与信号处理转化为热图像以实现缺陷检测^[51]。根据是否依赖外部激励热源,可分为主动式和被动式两种红外成像技术^[52],其中主动式是通过增加主动激励源的方法来提高被测样件与周围环境的温度差异。根据热源激励形式的不同被分为红外脉冲热成像、红外锁相热成像与红外热波雷达成像^[53],其中红外脉冲热成像技术应用最为广泛,使用的热源为高能光源(如卤素灯、激光),是用于刚性陶瓷防热瓦的表面和内部缺陷检测的主要方法,其检测装置如图6所示。红外热成像技术因其快速、高效和大范围检测能力,在无损检测中应用广泛,但存在损伤分类能力不足、依赖外部热源和手动操作,以及对厚样品检测效果差等局限性。



图6 主动式红外热成像检测装置

Fig. 6 Active infrared thermographic NDT equipment

由于防热瓦表面微小缺陷会引起热辐射发生变化,热成像检测可以检测热防护涂层表面的缺陷或损坏状态。Jiao等^[54]针对热障涂层表面缺陷,开发了一种激光多模式扫描热成像方法,通过结合线性激光快速扫描和点激光精细扫描,可实现了宽度为 $20 \mu\text{m}$ 裂纹的检测,其结果如图7所示,这种线性扫描和点扫描结合的方式,解决了传统方法在检测效率和灵敏度之间的矛盾。

Ding等^[55]提出了一种基于可重构激光刺激锁相热成像的表面微裂纹检测系统,利用空间光调制器动态调整激光束形状,实现多点和单点照明模式的快速切换,显著提高了大面积检测效率并降低了扫描时间,多点可以显著缩短检测时间,而单点则适用于详细分析裂纹的尺寸,最小分辨尺寸约为 $50 \mu\text{m}$ 。Celorrio等^[56]提出了一种基于锁相热成像技术的裂纹缺陷表征方法,利用间断有限元方法计算样品表面温度分布,结合最小二乘拟合从数据中提取裂

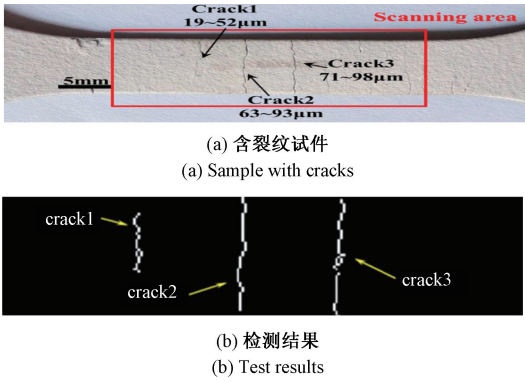


图 7 热成像检测^[54]

Fig. 7 Thermal imaging inspection^[54]

纹的几何参数,可检测的裂纹宽度低至 $1\ \mu\text{m}$,研究结果表

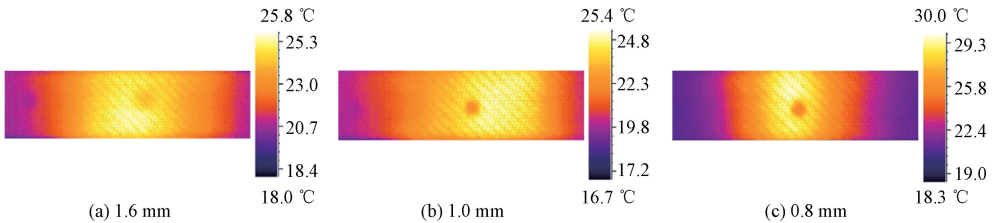


图 8 不同深度的热成像^[58]

Fig. 8 Thermal imaging at different depths^[58]

2.4 结构光检测

结构光检测是一种基于光学投影的三维测量技术,广泛应用于工业检测、三维重建等领域^[60]。其原理是通过投射特定的光图案到物体表面,利用物体表面形变导致的光图案畸变,结合相机捕捉和分析这些畸变,可得到被测物

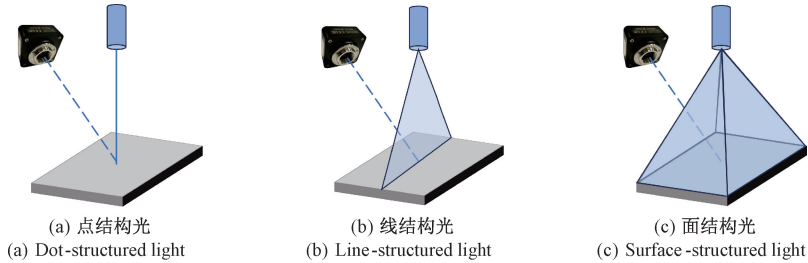


图 9 结构光投影模式

Fig. 9 Structured light projection patterns

刚性陶瓷隔热瓦表面涂层的微小缺陷(如裂纹、凹陷)难以肉眼识别,但基于结构光的三维测量技术能实现微米级精度的检测。尽管传统系统存在标定精度、测量范围和抗遮挡能力的局限,近年通过采用远心镜头、优化算法及系统设计,其性能已显著提升。在标定方法改进方面, Li 等^[64]提出了一种用于显微结构光系统的灵活标定方法,通过使用长距离的针孔镜头对远心镜头进行标定,可实现约 $10\ \mu\text{m}$ 的高精度测量。Zhong 等^[65]提出了一种双远心结构光三维测量方法,利用双远心镜头的正交投影特性,消除了透视误差,并通过电子调焦镜头快速精确地改变投影

明了裂纹的温度振幅和相位对比度与裂纹的深度、厚度和长度高度相关。

热成像可检测内部缺陷,但随深度增加,热信号显著衰减,故仅适用于表层或浅层缺陷,难以检测深层缺陷。梅晨^[57]针对热障涂层结构的脱粘缺陷,采用脉冲红外热波无损检测技术进行检测,能有效识别直径 $2\ \text{mm}$ 的缺陷,缺陷边缘识别准确率达 85% 以上,验证了热成像检测次表面缺陷的能力。Xu 等^[58]提出了一种改进的涡流脉冲热成像方法,为非导电材料的缺陷检测提供了新的思路,通过引入金属部件作为热源,有效检测和表征复合材料的次表面缺陷,如图 8 所示。此外,还可以结合深度学习或者图像处理等技术提升检测的精度,例如 Luo 等^[59]将深度学习技术引入红外热图缺陷检测,结合时空特征,提高了检测的准确性和鲁棒性。

的三维形貌点云信息,从而利用其几何特征参数提取缺陷特征,实现物体表面的无损检测^[61]。根据投影光源的不同可以分为点、线和面结构光^[62],如图 9 所示。其中点光源用于计算单点的深度信息;线光源以激光线为主,用于形貌测量;面光源以光栅条纹为主,用于三维重建^[63]。

结构光的焦平面,实现了高精度的深度测量,空间分辨率达到约 $5.86\ \mu\text{m}$,均方根误差为 $4.08\ \mu\text{m}$,深度范围为 $1\ 200\ \mu\text{m}$ 。祁昊等^[66]提出了一种基于双远心镜头的结构光系统标定框架,通过优化标定参数,显著降低了标定误差,实现了对微小物体的高精度测量,全视场测量精度约为 $32\ \mu\text{m}$,中心视场精度为 $10\ \mu\text{m}$ 。

结构光检测通过点云数据识别缺陷,其中平面拟合技术常用于区分缺陷区域与正常表面。罗嘉兴等^[67]提出了一种基于最小二乘法的平面拟合方法,通过计算点云的质心和协方差矩阵,确定平面的法向量和常数项,实现了材

料修磨后表面深度的精确测量,平均偏差仅为 0.015 mm。Zong 等^[68]提出了一种基于立体视觉的 3D 表面缺陷检测系统,利用立体数字图像相关技术重建 3D 点云,并建立点云与彩色图像的映射关系,进而通过图像分割和点云分割算法获取缺陷区域的 3D 特征参数,同时采用 DenseNets 卷积神经网络智能识别缺陷类型。吴昆鹏等^[69]提出了一种基于 3D 点云的钢管表面缺陷检测系统,通过环形布置的多组 3D 相机获取钢管轮廓点云数据,并利用 PointNet++ 模型进行点云分割,实现缺陷位置与深度的精确检测,如图 10 所示,缺陷检出率超过 99%。然而,这些研究仍存在一些挑战,当前研究仍需提升点云数据的处理效率,未来可通过优化降噪算法、升级采集设备来推动结构光技术的实用化。

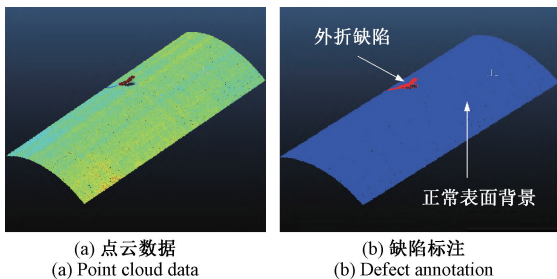


图 10 钢管表面三维重建结果^[69]

Fig. 10 3D reconstruction results of steel pipe surface^[69]

2.5 太赫兹检测

太赫兹位于微波和红外光之间,如图 11 所示,频率在 0.1~10 THz,对应波长范围为 30~3 000 μm ^[70]。太赫兹能够无接触的穿透一些非金属、非极性材料,可应用于缺陷的无损检测。原理是通过发射太赫兹波穿透材料并接收处理其反射信号,基于缺陷引发的介电特性变化导致的信号特征改变,实现对材料内部缺陷的检测分析^[71],也可通过太赫兹成像技术直观地观察检测目标的缺陷情况^[72]。根据发出的太赫兹性质不同,太赫兹检测技术可分为太赫兹时域光谱检测和连续太赫兹检测^[73],前者速度慢分辨率高,后者速度快分辨率低。也可以根据接受信号的位置不同分为反射式和透射式,由于刚性陶瓷隔热瓦底层为金属冷结构,只能采用反射式检测,如图 12(a)所示。由于隔热瓦具有多层结构,太赫兹波穿过隔热瓦后会在不同结构的界面中产生反射,对接收到的不同回波进行分析,来获取不同结构中的缺陷情况,如图 12(b)所示。

目前,对于表面涂层,太赫兹主要用于厚度检测。Im 等^[74]利用太赫兹技术对碳纤维增强复合材料的涂层厚度(100 μm)进行测量,获得了良好的结果。Cao 等^[75]建立了基于 Rouard 方法的解析模型准确的测量出多层涂层的厚度,但计算时间长,效率低。随后进一步提出了自适应 TLBO 算法,在保证测厚精度的同时,提高了测厚的效率,单次实验仅需 50 s,误差不超过 1.7 μm ^[76]。

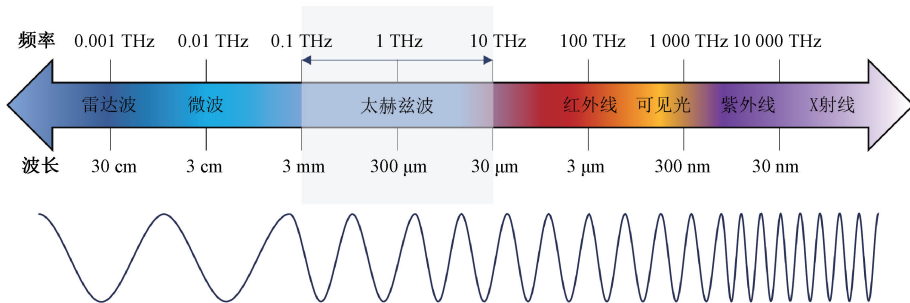
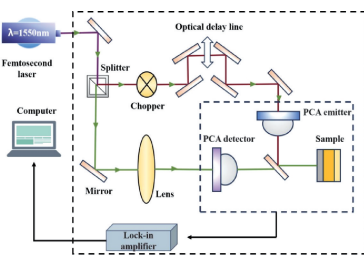
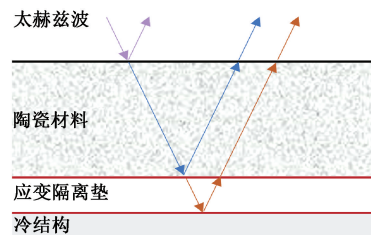


图 11 太赫兹波段在电磁波谱中的位置

Fig. 11 Position of Terahertz band in the electromagnetic spectrum



(a) 反射式太赫兹检测
(a) Reflective terahertz detection



(b) 太赫兹在隔热瓦结构中的传播路径
(b) The propagation path of terahertz waves in thermal tile structures

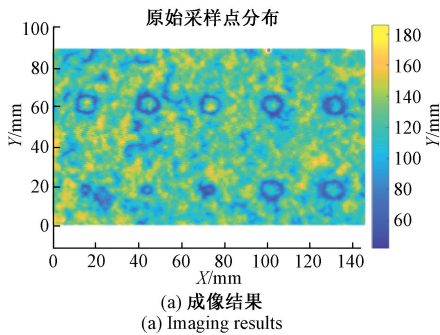
图 12 太赫兹检测示意图

Fig. 12 Schematic diagram of Terahertz detection system

太赫兹的强穿透力优势在于对内部结构的检测,可以确定材料内部缺陷的具体尺寸和位置。张国强等^[77]使用调

频连续太赫兹波对隔热瓦内部的裂纹类和孔洞类缺陷进行了检测,检测精度可达 2 mm,通过反射法检测时,可检角度

为 $\pm 10^\circ$ 。刘增华等^[78]基于太赫兹时域光谱技术,提出了一种陶瓷基复合材料内部缺陷的无损检测方法。通过零相位滤波和多特征加权融合成像,实现了缺陷的精确定位与尺寸定量评估,误差在 $0.36\% \sim 7.04\%$,但在缺陷深度信息的精确提取方面仍有改进空间。连亚容等^[79]针对调频连续太赫兹检测系统在隔热瓦结构缺陷深度检测中精度较低的问题,引入多种离散频谱校正方法进行比较分析,结果表明,



能量重心法和比值法可将缺陷深度定位误差控制在 1 mm 以内,显著提高了检测精度。如图 13 所示为太赫兹检测检测结果,但实际应用中需根据信号特性选择合适的校正方法。宋俊柏等^[73]研究发现, 0.3 THz 太赫兹波对带胶应变隔离垫的穿透性不足,影响隔热瓦结构的检测效果,降低频率至 0.166 THz 后,穿透性显著提升,检测效果改善,但太赫兹波与多层材料相互作用机制仍需深入研究。

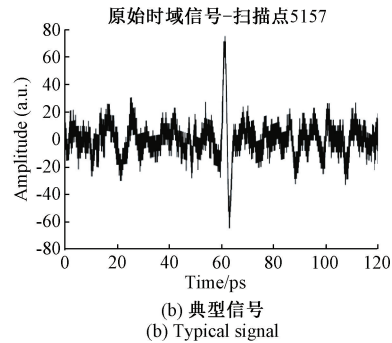


图 13 太赫兹检测结果

Fig. 13 Terahertz detection results

在粘结缺陷检测方面,刘陵玉等^[80]基于太赫兹时域光谱技术,通过时域和频域信号分析,成功检测出泡沫材料与钢板胶接结构的脱粘缺陷,验证了该技术在复合材料与金属胶接结构无损检测中的有效性。Zhang 等^[81]提出了一种基于多次回波和特征融合的太赫兹无损检测方法,用于分析陶瓷基复合材料粘接结构中的脱粘缺陷,该方法在厚度测量和缺陷面积识别方面表现出较高的精度,但对于薄

粘接层和小厚度缺陷的识别精度仍有待提高。潘钊等^[82]基于太赫兹时域光谱技术对陶瓷纤维复合材料粘接层缺陷进行了检测,图 14 为陶瓷隔热瓦试验件设计图与太赫兹成像结果,结合反卷积滤波技术处理信号,定性分析了缺陷特性与波形的关系,并利用太赫兹层析成像技术进一步提高了缺陷定位的精度,实现了对粘接层缺陷深度(18.4 mm)和厚度(0.28 mm)的高精度评估,准确率为 98% 。

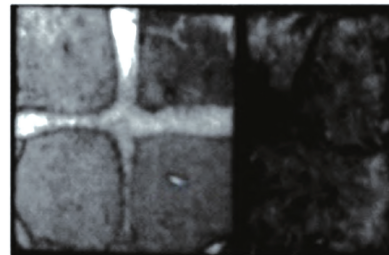
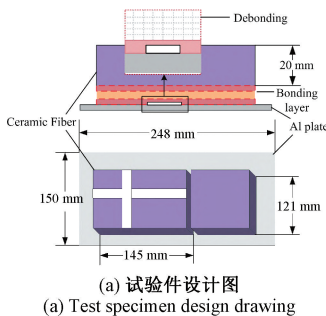


图 14 太赫兹脱粘缺陷检测^[82]

Fig. 14 Terahertz debonding defect detection^[82]

相关研究表明,太赫兹技术在材料检测中展现出高精度和强穿透力的优势,能够有效检测涂层厚度、内部缺陷及粘结缺陷。通过算法优化和信号处理,检测精度和效率得到显著提升,但对薄粘接层和小厚度缺陷的识别仍需进一步改进。

3 总结与展望

刚性陶瓷隔热瓦作为航空航天领域关键的热防护材料,其损伤检测对于保障飞行器安全至关重要。随着无损

检测技术的发展,对刚性陶瓷隔热瓦的损伤缺陷检测研究取得了重大进展。当前可用于隔热瓦无损检测的技术主要包括射线检测、超声检测、红外热成像、结构光检测和太赫兹检测。射线检测成像精度高,适用于内部缺陷检测,但效率较低;超声检测灵敏度高但精度有限;红外热成像适合大面积快速扫描,但对深层缺陷检测能力不足;结构光检测适用于表面损伤快速筛查;太赫兹检测对微小缺陷具有独特优势。每种技术都有其独特的优势和局限性,需根据检测需求和隔热瓦特性选择合适的检测方法。然而,

单一检测技术往往难以满足复杂损伤的全面检测需求,因此多技术融合成为未来的发展趋势。此外,深度学习和图像处理等智能化技术在无损检测中的应用日益广泛,能够显著提高检测效率和精度,可为防热瓦无损检测技术的发展提供了新的动力。

尽管无损检测技术在刚性陶瓷防热瓦检测中取得了显著进展,但仍面临一些挑战。例如,检测技术的适应性有待提高,以满足防热瓦复杂结构和多层材料的检测需求;检测设备的便携性和实时性需要进一步优化,以适应现场检测和快速响应的要求;数据处理和分析的复杂性增加,需要更高效的算法和软件支持。未来,随着新型检测技术的不断涌现和现有技术的持续改进,刚性陶瓷防热瓦的无损检测技术将朝着更高效、更准确、更智能化的方向发展,为航空航天飞行器的安全运行提供更加可靠的保障。

参考文献

- [1] 邓云飞, 顾春辉, 尹进, 等. 可重复使用航天器耐高温复合材料结构设计技术[J]. 宇航材料工艺, 2024, 54: 11-17.
DENG Y F, GU CH H, YIN J, et al. Reusable spacecraft high-temperature resistant composite structure design technology[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54: 11-17.
- [2] 但文清. 静电纺丝法制备高熵陶瓷纤维及其热物理性能研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2023.
DAN W Q. Preparation of high-entropy ceramic fibers via electrospinning and study on their thermophysical properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [3] SHVYDYUK K O, NUNES J, RODRIGUES F F, et al. Review of ceramic composites in aeronautics and aerospace: A multifunctional approach for TPS, TBC and DBD applications [J]. Ceramics-Switzerland, 2023, 6(1): 195-230.
- [4] LE V T, SAN H N, GOO N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: A review[J]. Composites Part B-Engineering, 2021, 226: 109301.
- [5] 李成伟, 庄晟逸, 向文超, 等. 航天热防护用树脂基复合材料研制的前沿进展[J]. 中国科学:化学, 2024, 54: 2167-2182.
LI CH W, ZHUANG SH Y, XIANG W CH, et al. Recent advances in resin matrix composites for aerospace thermal protection [J]. Science China Chemistry, 2024, 54: 2167-2182.
- [6] MERMER E, UNAL R. A novel entropy calculation approach for sensor placement optimization for a satellite thermal control system [J]. Measurement, 2025, 249: 116963.
- [7] 黄红岩, 苏力军, 雷朝帅, 等. 可重复使用热防护材料应用与研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41: 6-40.
HUANG H Y, SU L J, LEI CH SH, et al. Application and research progress of reusable thermal protection materials [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41: 6-40.
- [8] 李俊宁, 冯志海, 张大海, 等. 可重复使用热防护材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2024, 54: 1-10.
LI J N, FENG ZH H, ZHANG D H, et al. Research progress on reusable thermal protection materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54: 1-10.
- [9] 魏霞慧. 基于数字图像相关技术的刚性防热瓦材料高温力学性能测试研究[D]. 西安:长安大学, 2024.
WEI X H. Research on high-temperature mechanical properties testing of rigid thermal insulation tile materials based on digital image correlation technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.
- [10] 项赫, 姜亚明, 齐业雄, 等. 纺织复合材料预制体成型过程无损检测技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38: 1029-1042.
XIANG H, JIANG Y M, QI Y X, et al. Research progress in non-destructive testing technologies for textile composite preform molding processes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38: 1029-1042.
- [11] 杨杰, 隋学叶, 刘瑞祥, 等. 航天飞机及高超飞行器用刚性隔热材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2015, 36: 25-29.
YANG J, SUI X Y, LIU R X, et al. Research progress on rigid thermal insulation materials for space shuttles and hypersonic vehicles [J]. Advanced Ceramics, 2015, 36: 25-29.
- [12] 李俊宁, 胡子君, 孙陈诚, 等. 高超声速飞行器隔热材料技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(6): 10-13, 31.
LI J N, HU Z J, SUN CH CH, et al. Research progress on thermal insulation materials technology for hypersonic vehicles [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(6): 10-13, 31.
- [13] 李俊宁, 冯志海, 张大海, 等. 可重复使用热防护材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2024, 54(2): 1-10.
LI J N, FENG ZH H, ZHANG D H, et al. Research progress on reusable thermal protection materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54(2): 1-10.
- [14] 宋俊柏, 吴振强, 侯传涛, 等. 刚性防热瓦热防护结构无损检测方法概述[J]. 强度与环境, 2022, 49:

- 48-57.
- SONG J B, WU ZH Q, HOU CH T, et al. Overview of non-destructive testing methods for rigid thermal protection tile structures [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2022, 49: 48-57.
- [15] 陈玉峰, 洪长青, 胡成龙, 等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. *现代技术陶瓷*, 2017, 38: 311-390.
- CHEN Y F, HONG CH Q, HU CH L, et al. Thermal protection ceramic materials for aerospace vehicles[J]. *Advanced Ceramics*, 2017, 38: 311-390.
- [16] 韩清壮, 向阳, 彭志航, 等. 防隔热一体化材料研究进展[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2025, 30: 79-100.
- HAN Q ZH, XIANG Y, PENG ZH H, et al. Research progress on integrated thermal insulation and ablation-resistant materials[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2025, 30: 79-100.
- [17] 兰志丹, 任伟敏, 安楠, 等. 陶瓷纤维隔热瓦及其高发射涂层的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42: 4465-4474.
- LAN ZH D, REN W M, AN N, et al. Research progress on ceramic fiber insulation tiles and their high-emissivity coatings[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42: 4465-4474.
- [18] 郭琳琳, 苗成朋, 张金君, 等. 可重复使用刚性陶瓷隔热瓦辐射式热防护涂层研究进展[J]. *材料工程*, 1-12.
- GUO L L, MIAO CH P, ZHANG J J, et al. Research progress on radiative thermal protection coatings for reusable rigid ceramic insulation tiles[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1-12.
- [19] YU H, JIANG Y, LU Y, et al. Quartz fiber reinforced Al₂O₃-SiO₂ aerogel composite with highly thermal stability by ambient pressure drying [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 505: 79-86.
- [20] LIU R, WANG H, HONG C, et al. Mechanical and dual-stage wind tunnel ablative behavior of ceramic fiber-tile reinforced phenolic aerogel[J]. *Composites Communications*, 2022, 36.
- [21] 吉冯春, 彭志航, 杨鑫, 等. 杂化酚醛树脂/玻璃纤维隔热瓦的制备及性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2025(4): 117-124.
- JI F CH, PENG ZH H, YANG X, et al. Preparation and properties of hybrid phenolic resin/glass fiber insulation tiles [J]. *Composites Science and Engineering*, 2025(4): 117-124.
- [22] ZHAO B, WANG Y, HUANG H. Preparation and characterization of novel lightweight Y₂Si₂O₇ fibrous porous ceramics for high temperature thermal insulation[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(11): 18510-18518.
- [23] 刘永胜, 曹立阳, 张运海, 等. 高超声速飞行器热防护用超高温复合材料的研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(10): 107-118.
- LIU Y SH, CAO L Y, ZHANG Y H, et al. Research progress on ultra-high temperature composites for thermal protection of hypersonic vehicles [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022 (10): 107-118.
- [24] 陶鑫. MoSi₂-(TaSi₂-SiC-)玻璃基辐射式防热涂层的制备和性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- TAO X. Preparation and properties of MoSi₂-(TaSi₂-SiC-) glass-based radiative thermal protection coatings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [25] 宋俊柏, 吴振强, 刘振皓, 等. 隔热瓦低速撞击试验及机理分析[C]. 北京力学学会, 2024, 310-313.
- SONG J B, WU ZH Q, LIU ZH H, et al. Thermal protection tile low-velocity impact test and mechanism analysis [C]. *Beijing Society of Mechanics*, 2024: 310-313.
- [26] 孙宇雷, 李明伟, 钟业盛, 等. 热暴露对陶瓷隔热瓦表面硼硅玻璃涂层组织的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48: 83-89.
- SUN Y L, LI M W, ZHONG Y SH, et al. Effect of thermal exposure on microstructure of borosilicate glass coating on ceramic insulation tiles[J]. *Surface Technology*, 2019, 48: 83-89.
- [27] 王钦, 胡子君, 孙陈诚, 等. 陶瓷隔热瓦力学性能影响因素及其稳定性控制[J]. *宇航材料工艺*, 2010, 40: 77-79.
- WANG Q, HU Z J, SUN CH CH, et al. Influencing factors of mechanical properties and stability control of ceramic insulation tiles [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40: 77-79.
- [28] 陈思安, 李海玉, 迟蓬涛, 等. 耐 1 200℃ 陶瓷瓦重复使用性能[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43: 69-75.
- CHEN S AN, LI H Y, CHI P T, et al. Reusability of 1 200℃-resistant ceramic tiles[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43: 69-75.
- [29] 胡娇娇. 孔结构对氧化铝隔热材料高温性能的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- HU J J. Effect of pore structure on high-temperature properties of alumina thermal insulation materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [30] 周松, 吴振强, 付延涛, 等. 刚性陶瓷瓦热防护结构力学性能及疲劳寿命研究进展[J]. *强度与环境*,

- 2022, 49: 11-17.
- ZHOU S, WU ZH Q, FU Y T, et al. Research progress on mechanical properties and fatigue life of rigid ceramic tile thermal protection structures [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2022, 49: 11-17.
- [31] 温银堂. 基于平面电容成像的热防护复合材料粘接缺陷检测与表征[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2017.
- WEN Y T. Detection and characterization of bonding defects in thermal protection composites based on planar capacitive imaging[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [32] NARESH K, KHAN K A, UMER R, et al. The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: A review [J]. *Materials & Design*, 2020, 190: 108553.
- [33] LIU S P, LIU F F, ZHANG Q L, et al. Non-destructive characterisation and evaluation of manufacturing defects in SiCf/SiC composites using the relative energy attenuation behaviour of X-rays[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 26044-26054.
- [34] QUINEY Z, WESTON E, NICHOLSON P I, et al. Volumetric assessment of fatigue damage in a SiCf/SiC ceramic matrix composite via in situ X-ray computed tomography[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(11): 3788-3794.
- [35] 孙淑义, 任晓萱, 吕亮亮, 等. 风电叶片复合材料的无损检测技术研究现状[J]. *无损检测*, 2025, 47: 86-94.
- SUN SH Y, REN X X, LYU L L, et al. Research status of non-destructive testing techniques for wind turbine blade composites[J]. *Nondestructive Testing*, 2025, 47: 86-94.
- [36] 王树鹏. SiCf/SiC 陶瓷基复合材料构件射线成像检测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
- WANG SH P. Research on X-ray imaging inspection of SiCf/SiC ceramic matrix composite components [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [37] 熊瑛, 刘海强, 杜本莉, 等. 微焦点 CT 在陶瓷基复合材料上的检测应用[J]. *航空制造技术*, 2018, 61: 58-63.
- XIONG Y, LIU H Q, DU B L, et al. Application of micro-focus CT in inspection of ceramic matrix composites [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61: 58-63.
- [38] 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 S. Research on industrial CT non-destructive testing of novel lightweight ceramic matrix composites[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [39] BADRAN A, MARSHALL D, LEGAULT Z, et al. Automated segmentation of computed tomography images of fiber-reinforced composites by deep learning [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55 (34): 16273-16289.
- [40] 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: 1765-1775.
- FENG Y Q, ZHANG Y, ZHANG D X, et al. Damage identification and evaluation of 2.5D ceramic matrix composites based on deep learning[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49: 1765-1775.
- [41] 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: 249-257.
- DU Y L, ZHANG Y, WANG L, et al. In-situ tensile damage evolution and fracture analysis of plain-woven C_f/SiC composites based on deep learning [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41: 249-257.
- [42] 闫蓓, 刘孟轲, 马宏林. 超声检测系统设计及回波信号特征分析[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(2): 123-129.
- YAN B, LIU M K, MA H L. Design of ultrasonic testing system and characteristic analysis of echo signals [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(2): 123-129.
- [43] PENG Y, XU H X, SUN J G, et al. Numerical study of defect localization in additive manufactured short fiber reinforced composites with diffuse ultrasonic wave inspection [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1071063.
- [44] 李万达. 基于超声波的新型轻质陶瓷基复合材料粘接缺陷检测研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
- LI W D. Research on bonding defect detection of novel lightweight ceramic matrix composites using ultrasonic-based methods[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [45] 董方旭, 凡丽梅, 赵付宝, 等. 空气耦合超声检测技术在复合材料检测中的应用[J]. *无损探伤*, 2022, 46: 10-13.
- DONG F X, FAN L M, ZHAO F B, et al. Application of air-coupled ultrasonic testing technology in composite materials inspection[J]. *Nondestructive Testing*, 2022, 46: 10-13.
- [46] 郑国浩, 刘雨昊, 张佳辉, 等. 基于氧化锆陶瓷缺陷的定位研究[J]. *机械工程与自动化*, 2024 (5):

- 163-165.
ZHENG G H, LIU Y H, ZHANG J H, et al. Research on defect localization in zirconia ceramics[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2024 (5): 163-165.
- [47] 温银堂, 杨若然, 李万达, 等. 基于超声波的轻质多孔复合材料缺陷检测方法[C]. 2019 中国超声检测大会论文集, 2019: 85-91.
WEN Y T, YANG R R, LI W D, et al. Defect detection method for lightweight porous composites based on ultrasound[C]. 2019 Chinese Conference on Ultrasonic Testing, 2019: 85-91.
- [48] 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 G K, ZHOU ZH G, CHEN X. Application of laser ultrasonic technology in nondestructive testing of advanced composites [J]. Failure Analysis and Prevention, 2016, 11(5): 276-282.
- [49] 李爱华, 陈友兴, 王召巴, 等. 陶瓷基黏接件超声检测缺陷信号的处理方法[J]. 无损检测, 2025, 47: 20-25.
LI AI H, CHEN Y X, WANG ZH B, et al. Signal processing methods for defect detection in ceramic matrix bonded components using ultrasonic testing [J]. Nondestructive Testing, 2025, 47: 20-25.
- [50] 郑善朴, 陆铭慧, 王俊东, 等. 多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法[J]. 应用声学, 2019, 38: 134-141.
ZHENG SH P, LU M H, WANG J D, et al. Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures [J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38: 134-141.
- [51] 魏嘉呈, 刘俊岩, 何林, 等. 红外热成像无损检测技术研究发展现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(2): 64-72.
WEI J CH, LIU J Y, HE L, et al. Research status and development of infrared thermography for nondestructive testing [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(2): 64-72.
- [52] 夏凯龙, 葛超, 王秋童, 等. 涡轮叶片冷却气膜孔及涂层缺陷检测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65: 92-104.
XIA K L, GE CH, WANG Q T, et al. Research progress in detection technologies for cooling film holes and coating defects of turbine blades [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65: 92-104.
- [53] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography-Part II: Experimental investigation[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 92: 24-29.
- [54] JIAO D C, SHI W X, LIU Z W, et al. Laser multi-mode scanning thermography method for fast inspection of micro-cracks in TBCs surface[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(2), DOI:10.1007/s10921-018-0485-1.
- [55] DING L, GORELIK S, WANG P, et al. Reconfigurable laser-stimulated lock-In thermography for surface micro-crack detection[J]. Sensors, 2023, 23(8): 4090.
- [56] CELORRIO R, OMELLA A J, PECH-MAY N W, et al. Vertical cracks characterization using lock-in thermography: II finite cracks [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(11): 115601.
- [57] 梅晨. 热障涂层结构缺陷脉冲红外热波无损检测技术研究[D]. 哈尔滨:黑龙江科技大学, 2016.
MEI CH. Research on pulsed infrared thermal wave nondestructive testing technology for structural defects of thermal barrier coatings[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2016.
- [58] XU C H, ZHANG W Y, WU C W, et al. An improved method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites[J]. Composite Structures, 2020, 242: 112145.
- [59] LUO Q, GAO B, WOO W L, et al. Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection[J]. Ndt & E International, 2019, 108: 102164.
- [60] RUBINSZTEIN-DUNLOP H, FORBES A, BERRY M V, et al. Roadmap on structured light[J]. Journal of Optics, 2017, 19(1): 013001.
- [61] WANG J, LIANG Y Z. Generation and detection of structured light: A review[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 688284.
- [62] 吕柏莹. 面向三维成像的多波长结构光投影超表面器件研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2024.
LYU B Y, Research on multi-wavelength structured light projection metasurface devices for three-dimensional imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.
- [63] 赵永顺. 用于生成点阵结构光的衍射光学元件设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
ZHAO Y SH. Design of diffractive optical elements

- for generating lattice structured light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [64] LI B W, ZHANG S. Flexible calibration method for microscopic structured light system using telecentric lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (20): 25795-25803.
- [65] ZHONG M, CUI J, YUN J S, et al. Uniaxial three-dimensional phase-shifting profilometry using a dual-telecentric structured light system in micro-scale devices [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8), DOI:10.1088/1361-6501/ab6362.
- [66] 祁昊, 董健, 赵楠, 等. 一种利用结构光照明的高精度三维测量系统 [J]. *液晶与显示*, 2024, 39: 248-256.
- QI H, DONG J, ZHAO N, et al. A high-precision 3D measurement system using structured light illumination [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39: 248-256.
- [67] 罗嘉兴, 崔瑞钦, 马立东. 基于点云层次分析的不锈钢板表面深度探测 [J]. *轧钢*, 2025, 1-13.
- LUO J X, CUI R Q, MA L D. Depth detection of stainless steel plate surface based on point cloud hierarchical analysis [J]. *Steel Rolling*, 2025: 1-13.
- [68] ZONG Y, LIANG J, WANG H, et al. An intelligent and automated 3D surface defect detection system for quantitative 3D estimation and feature classification of material surface defects [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 144: 106633.
- [69] 吴昆鹏, 王少聪, 苏成. 基于3D点云的钢管表面缺陷检测系统 [J]. *轧钢*, 2024, 41: 113-118, 26.
- WU K P, WANG S C, SU CH. Surface defect detection system for steel pipes based on 3D point cloud [J]. *Steel Rolling*, 2024, 41: 113-118, 26.
- [70] 毕建敏, 陈友兴, 薛凯亮, 等. 基于连续太赫兹波频谱信息提取方法研究 [J]. *电子测量技术*, 2024, 47(14): 64-71.
- BI J M, CHEN Y X, XUE K L, et al. Research on spectral information extraction method based on continuous terahertz waves [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(14): 64-71.
- [71] COSTA F B, MACHADO M A, BONFAIT G J, et al. Continuous wave terahertz imaging for NDT: Fundamentals and experimental validation [J]. *Measurement*, 2021, 172: 108904.
- [72] 金玉环, 朱凤霞, 封建欣. 基于太赫兹技术的复合材料无损检测研究综述 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, 21: 1295-1305.
- JIN Y H, ZHU F X, FENG J X. A review of terahertz-based nondestructive testing for composite materials [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023, 21: 1295-1305.
- [73] 宋俊柏, 吴振强, 刘武刚, 等. 带胶应变隔离垫对防热瓦太赫兹无损检测的影响分析 [J]. *工程与试验*, 2024, 64: 21-23, 49.
- SONG J B, WU ZH Q, LIU W G, et al. Influence analysis of adhesive strain isolation pads on terahertz nondestructive testing of thermal protection tiles [J]. *Engineering and Test*, 2024, 64: 21-23, 49.
- [74] IM K H, YANG I Y, KIM S K, et al. Terahertz scanning techniques for paint thickness on CFRP composite solid laminates [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(10): 4413-4416.
- [75] CAO B H, WANG M Y, LI X H, et al. Noncontact thickness measurement of multilayer coatings on metallic substrate using pulsed terahertz technology [J]. *Ieee Sensors Journal*, 2020, 20(6): 3162-3171.
- [76] 曹丙花, 郑德栋, 范孟豹, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的多层涂层高效可靠测厚方法 [J]. *光学学报*, 2022, 42: 127-137.
- CAO B H, ZHENG D D, FAN M B, et al. Efficient and reliable thickness measurement method for multilayer coatings based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42: 127-137.
- [77] 张国强, 赵长兴, 辛燕, 等. 基于调频连续波太赫兹技术的复合陶瓷防热瓦无损检测 [J]. *无损检测*, 2020, 42: 29-34.
- ZHANG G Q, ZHAO CH X, XIN Y, et al. Nondestructive testing of composite ceramic insulation tiles using frequency-modulated continuous-wave terahertz technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42: 29-34.
- [78] 刘增华, 吴育衡, 王可心, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的陶瓷基复合材料缺陷检测成像研究 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59: 33-42.
- LIU Z H, WU Y H, WANG K X, et al. Defect detection and imaging in ceramic matrix composites using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59: 33-42.
- [79] 连亚容, 陈友兴, 薛凯亮, 等. 基于CW-THz的防热瓦结构缺陷深度检测校正方法 [J]. *强度与环境*, 2024, 51: 59-64.
- LIAN Y R, CHEN Y X, XUE K L, et al. Depth detection and correction method for structural defects in thermal protection tiles based on CW-THz

- technology[J]. Structure & Environment Engineering, 2024, 51: 59-64.
- [80] 刘陵玉, 常天英, 杨传法. 太赫兹时域光谱技术检测复合材料与金属的脱粘缺陷[J]. 红外技术, 2018, 40: 79-84.
- LIU L Y, CHANG T Y, YANG CH F. Detection of debonding defects between composites and metals using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Infrared Technology, 2018, 40: 79-84.
- [81] ZHANG J Y, REN J J, LI L J, et al. THz imaging technique for nondestructive analysis of debonding defects in ceramic matrix composites based on multiple echoes and feature fusion[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 19901-19915.
- [82] 潘钊, 李宗亮, 张振伟, 等. 基于 THz-TDS 的陶瓷纤维复合材料缺陷检测分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42: 1547-1552.
- PAN ZH, LI Z L, ZHANG ZH W, et al. Defect detection and analysis in ceramic fiber composites based on THz-TDS [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42: 1547-1552.

作者简介

周伟, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为特种设备与无损检测。

E-mail: zhouweihi@126.com

侯传涛(通信作者), 博士, 研究员, 主要研究方向为结构完整性检测。

E-mail: houcht@qq.com