

引文格式: 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(13): 92-104.
XIA Kailong, GE Chao, WANG Qiutong, et al. Research progress on detection technology for film cooling holes and coating defects of turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 92-104.

涡轮叶片冷却气膜孔及涂层缺陷检测技术研究进展*

夏凯龙¹, 葛超², 王秋童², 何 箐^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院表面工程技术研究所, 北京 100083;

2. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

[摘要] 为满足现代燃气涡轮发动机长寿命、高可靠性的需求, 高性能涡轮叶片呈现出气膜冷却结构和热障涂层热防护一体化设计与制造的发展趋势。然而气膜孔制备过程产生的显微组织缺陷和涂层涂覆过程导致的尺寸偏差会影响气膜结构及其冷却效率, 先涂层后飞秒激光制孔也会引起涂层局部烧结甚至开裂。叶片服役过程中, 受到温度梯度和边缘效应的影响, 孔边涂层更易产生应力集中进而导致裂纹的萌生扩展, 成为失效的薄弱环节。目前, 包括塞规法、流量法和微小探针法等传统测量手段均无法有效评估气膜孔尺寸参数、形状特征和加工缺陷。在各类用于叶片及其涂层质量评价的无损检测方法中, 主动红外热成像法具有快捷、多功能和有效质量控制等优势。基于上述研究背景, 本文综述了快速、高精度的气膜孔参数测量和孔边合金及涂层缺陷的评估方法, 论述了燃气涡轮发动机涡轮叶片常见气冷结构及其制备工艺的发展, 详细列举了主动式红外热成像技术用于气膜孔质量评价的研究进展, 同时总结了现有技术的不足和发展方向, 对提升涡轮叶片冷却结构和气膜孔加工质量控制水平具有重要意义。

关键词: 涡轮叶片; 热障涂层; 冷却气膜孔; 无损检测; 红外热成像

Research Progress on Detection Technology for Film Cooling Holes and Coating Defects of Turbine Blades

XIA Kailong¹, GE Chao², WANG Qiutong², HE Qing^{1,2}

(1. Surface Engineering Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2. Beijing JinLunKunTian Special Machine Co., Ltd. Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] In order to meet the long-life and high-reliability requirements of modern gas turbine engines, the development trend of high-performance turbine blades is presented as integrated designing and manufacturing of film cooling structure and thermal barrier coating for thermal protection. However, the gas film structure and its cooling efficiency could be affected by the microstructure defects produced in the process of film holes preparation and the dimensional deviations caused by the coating. The progress of coating first will also cause local sintering or even cracking of the coating, with femtosecond laser drilling afterwards. During blade service, due to the temperature gradient and edge effects, the stress concentration of coating on the edge is more easily occurred, leading to the initiation and expansion of cracks, which becomes the weakness of failure. At present, traditional measurement methods, including the plug gauge method, flow method, and microprobe method, cannot effectively evaluate the geometric parameters, shape characteristics and processing defects of the film holes. Among the various non-destructive testing methods applied to evaluate the quality of blades and coatings, active infrared thermography is qualified of the advantages of high-speed, versatility and effective quality control. In this paper, a high-efficiency and high-precision parameters measurement and defect evaluation methods

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0007-0100)。

for alloy and coatings around the holes are reviewed in conjunction with traditional non-destructive testing methods and the development of common air-cooling structures and their preparation processes are discussed. The research progress of the application of active infrared thermal imaging technology in the evaluation of film cooling holes is enumerated in detail. At the same time, the article summarizes the deficiency and the development orientation of the current technology, which is of great significance for improving the processing quality control level of the gas cooling structures and film holes.

Keywords: Turbine blades; Thermal barrier coatings; Film cooling holes; Non-destructive testing; Infrared thermal imaging

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.092

涡轮叶片是燃气涡轮发动机服役工况最为恶劣的部件之一,需要承受高温高压燃气及循环交变载荷和离心载荷作用。先进的气冷结构、高温结构材料和热障涂层作为现代燃气涡轮发动机涡轮叶片制造的“三大关键技术”,是保障其在复杂环境下长寿命高、可靠性服役的有效手段和关键措施。近年来,由于涡轮前温度不断提升和在役高温合金承温能力不足,在开发新型高温结构材料的同时,先进涡轮叶片通常采用气膜冷却结构和热障涂层一体化的热防护技术。为提高冷却效率、降低基体服役温度和提高涡轮叶片使用寿命,气膜孔形状逐步被设计成三维异型。随着孔排布密度逐渐提高、孔径尺寸不断降低,其精密成形难度进一步增加。气膜孔加工技术从电火花加工、电液束加工到激光加工不断演变,各类减材加工方式均会产生不同程度的热影响区,不仅破坏叶片结构的完整性,还会导致高温结构材料缺陷和组织变化,孔边裂纹和再结晶层的存在也会使单晶高温合金涡轮叶片的服役寿命和可靠性受到影响。资料表明,裂纹扩展和合金开裂是涡轮叶片常见的失效形式之一。为提高加工质量、有效控制热损伤,国内外对冷却气膜孔的复合加工工艺进行了一系列研究,如 GE 公司开发的激光-电火花法、水助激光法等。

热障涂层是现代燃气轮机涡轮叶片热防护一体化技术中不可或缺的关键环节。然而,涂层涂覆过程中出现的缩孔和孔壁沉积涂层现象将导致气膜孔的尺寸和形状差异。即使预放大孔径和涂层后扩孔等措施能在一定程度上削弱其对气冷结构的作用,但涂层制备过程的一致性波动仍会对气膜结构及其冷却效率造成影响,甚至可能导致冷却通道堵塞。基于“先涂层后打孔”工艺思路的飞秒激光技术发展使得陶瓷-金属复合体系中异质材料的快速减材成为可能,能充分发挥气冷结构的设计功效,但由于热障涂层和高温合金材料在导电性、热膨胀系数、韧性等方面存在较大差异,面临层间撕裂、孔壁裂纹和涂层烧结、开裂等问题以及涡轮叶片全寿命周期修复的挑战。此外,边缘效应的存在使得孔边涂层的抗热冲击和热循环性能降低,成为失效的薄弱环

节。寻找一种快速准确的方式评定气膜孔形态、尺寸等参量,批量有效地评估孔边的合金损伤和涂层缺陷,是该领域技术和工程人员一直探索的方向,也是保障涡轮叶片服役可靠性和使役性能的必要技术手段。

传统的气膜孔参数获取多依靠破坏式检测和人工判断,无法保证结果的准确性和重复性。如采用不同尺寸塞规逼近的方法确定孔径,会受到孔径圆度差及孔壁粗糙度高的影响,存在较大的测量误差;微小探针法通常需要多点接触测量后经数值转换获取尺寸参数,易造成误差积累;水、气流量法只能整体表征,不能得到单孔信息;气膜覆盖率表征法只能定性分析冷却效果,无法对气冷结构的加工质量做出评估。无损检测技术已成为评价气膜孔是否符合加工精度和质控要求的关键手段,随着机器视觉及图像处理技术的发展,研究人员通过建立叶片坐标系、搭建基于 CCD 的图像采集和数据分析系统,初步实现了气膜孔形位参数的高精度测量。同时,声发射、光致光谱、太赫兹时域光谱和红外热成像技术等被广泛用于叶片热障涂层的缺陷表征,其中主动式红外热成像技术在叶片类薄壁零件的损伤评价方面具有优势,当前研究主要集中于涂层的界面开裂、密度差异、脱粘、风道堵塞和气膜孔边缺陷及涂层裂纹检测等方面。欧美等国已将该技术应用于热生长氧化物(TGO)检测、叶片疲劳程度评估及其服役过程的在线监测等。近年来,又逐步发展了基于涡流、热气流等不同激励方式的红外热成像技术用于叶片加强结构、合金铸造缺陷、涂层厚度及其损伤、气膜孔孔径等方面的检测,相关技术已投入到燃气涡轮发动机涡轮叶片生产线上的质量控制环节。

本文基于高性能燃气涡轮发动机涡轮叶片气膜冷却结构和热障涂层热防护一体化设计和制造的发展趋势,指出了传统减材加工方式用于气冷结构精密成形所面临的挑战,以及对冷却气膜孔进行高效高精度参数测量和缺陷评估的必要性,介绍了当前用于叶片类薄壁零件及涂层结构的无损检测技术和基于建模仿真及算法优化提高定量检测效果的应用实例,分析了不同形式的

激励能量与材料微观组织结构的作用机理,阐述了主动式红外热成像技术在涡轮叶片质量评价方面的研究进展,对提升涡轮叶片的使役性能、降低其全寿命周期的修复成本具有重要意义。

1 气冷结构及其制备工艺的发展

1.1 常见气冷结构

扰流冷却是将不同形式的湍流发生器浇筑在叶片内壁,通过扩展表面积和增强流体扰动的方式强化对流换热^[1]。冲击冷却是将高动量的冷却工质通过小孔或狭缝喷射到高温部件表面进行局部冷却^[2]。气膜冷却是指在涡轮叶片前缘、叶身型面及缘板等部位设计大量连通叶表与内部空腔的小孔,冷却气体经过内部流道在部件表面形成气膜,达到隔离高温燃气保护部件的目的,其原理如图1(a)所示^[3]。发散冷却以多孔材料为载体,高压冷却工质通过壁面的致密小孔和细微流道渗出与结构材料充分换热,但其毛细孔结构易发生堵塞引起表面破坏,进而降低叶片的机械强度并增大边界层的流动损失,无法满足耐久性要求。层板冷却是在相互叠合的层板间布置不同形式的扰流结构,具有冲击冷却和全气膜冷却的特点,可以起到增强局部传热、节省冷气消耗、消除冷却死角、使端壁表面温度分布更加均匀的作用,如图1(b)和(c)所示^[4]。

近年来,国内外研究人员不断探索新型冷却方式,

如冲击发散冷却、层板冷却和气雾冷却等,旨在降低气冷结构对叶片强度和气流流动的影响,并通过改型优化减小复合冷却结构间的相互作用,气冷过程中的通气工艺得到完善,冷却工质流量及附加损失不断减少。综合考虑应用价值和技术成本等因素,通过结构改型得以不断提升冷却效率的气膜冷却结构具有较为明显的优势,至今仍对燃气涡轮发动机涡轮前温度的提升起着至关重要的作用。

1.2 气膜孔加工面临的挑战

研究表明,气膜冷却效率是材料、孔几何参数及其耦合作用在高温高压三维非定常流场下的响应,关键影响因素是气膜孔的设计与布局^[3]。为实现更优的气动外形,气膜孔形状从直边簸箕斗型发展为曲线过渡的复杂异型,冷却效率大幅跃升^[5]。同时,涡轮叶片通常采用镍基单晶高温合金直接铸造成型,机加工性能较差,加之气膜孔直径小、数量大、加工角度复杂,因此国内外主要通过电火花加工、电液束加工和飞秒激光加工等特殊工艺及其复合形式实现气膜孔的加工^[6]。

尽管上述方法在工程实际中得到了广泛应用,但仍面临一些挑战。如图2所示^[7-9],电火花加工热效应明显,不能加工陶瓷层^[10],且电蚀产物会对已加工侧面“二次放电”形成锥孔,锥度补偿过程易造成叶片背壁损伤(图2(a))。电液束加工效率较低、尺寸精度重复性差,开孔形状难以控制(图2(b)和(c)),且存在杂散腐蚀

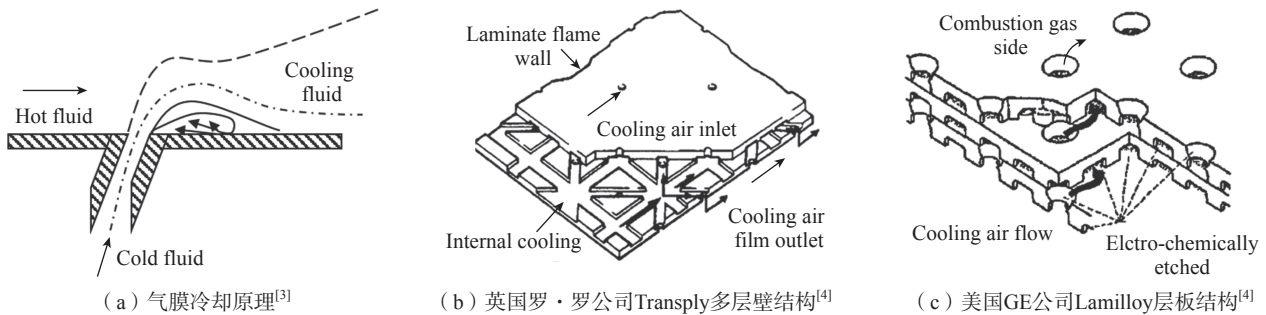
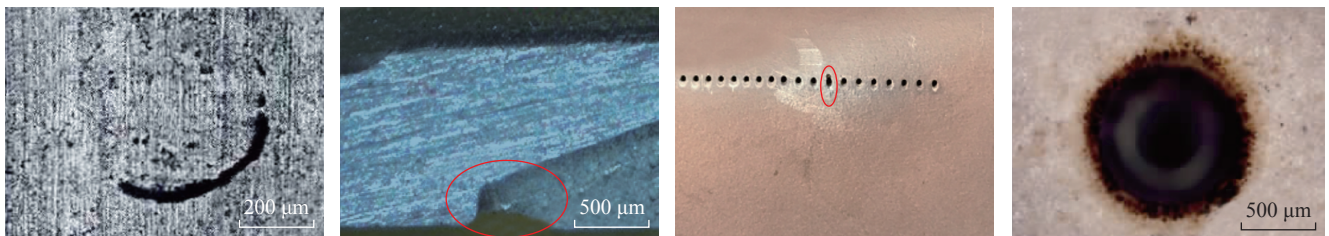


图1 气膜冷却及层板冷却形式
Fig.1 Film cooling and laminated plate cooling



(a) 背壁损伤^[8] (b) 电液束加工造成的孔口形状差异^[9] (c) 边缘重叠 (d) 孔口的氧化附着物^[7]

图2 飞秒激光制孔的缺陷形式
Fig.2 Defect forms of femtosecond laser drilling

现象。飞秒激光极高的峰值功率足以使任何材料发生电离,以等离子体形式向外喷发去除^[11],具有无材料选择性、阈值效应明显的特点,理论上能解决高温合金和热障涂层材料差异性导致的层间撕裂、表面脱落和孔壁裂纹等问题^[12],但在实际工况中并不能实现真正意义上的“冷加工”。Fochl^[13]和赵华龙^[14]等发现单纯将脉宽降低到飞秒级别,仍难以防止重铸层、微裂纹等缺陷的形成。对于加工过程中孔壁上出现的棱状加工痕迹,刘新灵等^[15]认为原因在于定向凝固和单晶高温合金是各向异性的,飞秒激光与材料之间的损伤机理不同于各向同性等轴晶材料。张学谦等^[7]在试验中发现孔口边缘发黑现象(图2(d)),虽然可以通过调整激光的脉宽和重频等参数得到解决,但随着加工次数的增加,会逐渐覆盖整个入口边缘部位,造成安全隐患。

为此,国内外学者将复合形式用于涡轮叶片冷却气膜孔的精密加工,取得了显著的效果。不同脉宽激光的复合可以解决单一脉冲对带涂层叶片造成损伤及打孔质量不佳的问题,一定程度上提高了材料去除率^[16-18]。各类电加工工艺的集成亦可以有效提高加工效率和表面质量^[19-21]。超声辅助激光能进一步增加加工孔的深径比^[22-23]。水助激光不仅克服了传统激光加工的深度受限问题,还能充分控制热影响,实现小应力、高精度加工^[24-26]。

1.3 对气膜孔精密测量的必要性

冷却气膜孔的设计加工和质量控制对于保证涡轮叶片的性能和结构可靠性具有重要意义。当前,孔口扩展的复杂异形孔可以实现气膜的大范围贴附,能较好地兼顾结构强度和冷却温控之间的矛盾,带来相较于高密度直圆孔更优的冷却效果。然而叶片铸造过程的复杂性会使叶身型面存在一定的尺寸偏差,无法精确定气膜孔的位置和角度,打孔过程中极易损伤基体内壁或造成相邻孔的内腔交叉,直接影响气膜覆盖面积和气冷效率。同时,微裂纹等缺陷不仅会降低叶片结构强度、减少其疲劳寿命,还会在服役过程中进一步扩展为宏观可见的裂纹,导致叶片及气膜孔边缘等应力集中区域涂层结构的失效。作为燃气涡轮发动机的关键部件,涡轮叶片结构复杂、铸造技术精密、制造周期长、零件合格率低,采用更换新件的方法进行维修成本过高。若对气膜孔不符合质控要求或孔边涂层缺陷过大的叶片进行返厂维修后二次使用,可以缩短生产周期和降低制造成本,技术附加值极大。

综上,迫切需要对服役和送修前的涡轮叶片冷却气膜孔进行参数测量,确定其尺寸、形状、公差、位置度和孔表面粗糙度是否满足设计要求。同时借助红外热成像等无损手段对孔边合金及其涂层结构进行质量评价,

评估其重铸层厚度是否符合标准规定、是否产生了显微组织裂纹并在服役过程中进一步扩展,为气冷结构的设计改进、涡轮系统的寿命预测和维修工艺的制定落实提供重要依据。

2 冷却气膜孔的测量手段

气膜孔的加工质量与涡轮叶片的安全可靠性直接相关,工程上一般以气膜孔尺寸、位置和缩孔率,以及冷却效果和孔边涂层缺陷等信息为质量评价标准。然而国内通常只进行通透性评估,且无普适且成熟的测量手段,因此迫切需要确定精确有效的基于气膜孔的参数测量和质量评价方法,建立相应的系统和平台。

2.1 参数测量

工程实践中对于涡轮叶片气膜孔的测量以无损手段为主,分为接触式和非接触式两种。接触式测量手段通常基于微小探针系统获得孔轮廓,并采用数值转换法实现气膜孔几何参数的读取和内部形貌的评估。Cui等^[27]利用光纤耦合器将探针尖端的位移转换为返回光束中心点的位置变化。崔继文等^[28]基于利用图像定位算法得到的光斑中心位置,通过光纤传感器将探头在孔内的位移量转换为工业相机捕捉的横向矢量变化,可实现对直径0.2 mm、深度2.0 mm左右微深孔的精密测量。Sajima等^[29]基于一种配备由压电元件驱动的振动机构的光纤探针,通过双光电二极管接收的光量变化来监测探针的轴位移,可实现直径范围10~150 μm微孔的轮廓测量。Sun等^[30]介绍了一种基于同轴圆柱电容式探头测量微小孔内径的方法,采用等电位保护环和驱动电缆技术,在消除边缘效应的同时降低寄生电容的影响,并通过设置运算放大器变换电路克服极距变化引起的非线性缺陷,具有精度高、反应快的优点。Stone等^[31]指出,当探头尖端和孔壁的间隙与其他特征长度(如探头偏转或形状误差)尺寸相当时,会导致测量过程中的几何误差被无限放大。此外,探头的非同轴性/非正交性、探头尖端的半径补偿和机械滤波等也是引起误差放大的可能因素。上述方法不受工件特性影响,具有较高的可靠性,但其多点测量的工序使得效率较低,易造成误差的累积。

非接触式测量手段一般基于机器视觉和图像采集与分析。Jin等^[32]分析了传统光学手段测量微深孔时的边缘衍射和存在杂散光的现象,提出了一种基于光的干涉光谱分析技术的深孔形貌的测量方法。Ramamurthy^[33]和Lin^[34]等开发出一种基于多轴图像采集设备的自动测量系统并将其集成到激光加工平台上,在实现多个冷却气膜孔参数测量的同时对孔深度实时监测,防止激光加工过程中的背壁损伤问题。气膜孔参数化建模及可

修改性与否极大地影响涡轮叶片设计效率。曹率等^[35]通过气膜孔在给定截面轮廓线的投影获得其终止曲面,并将拉伸柱体与空心叶片实体求布尔差,生成了带有气膜孔结构的叶片模型,可实现参数输入、干涉检查、快速建模和编辑修改等功能,显著缩短了涡轮气冷叶片的设计和检测周期。由于气膜孔与叶身相贯而成的不规则空间封闭曲线,对气膜孔进行测量存在一定的技术难度,因此建立涡轮叶片坐标系是实现冷却气膜孔直径和坐标位置精确测量的基础。关军等^[36]以榫头作为测量基准设计定位装置,然后将叶片按气膜孔的空间角度进行旋转,使叶身轴线、定位装置基准圆中心线和转台中心同轴,如图3(a)所示。通过上述坐标变换将气膜孔轮廓在指定平面投影成规则圆形,将沿叶身轴线的孔距转化到气膜孔轴线方向,初步解决了异型曲面上气膜孔不规则轮廓的测量难题。但该方法中寻找气膜孔轴线角度的过程依靠操作人员的主观判断,测量重复性误差较大。鲍晨兴等^[37]基于CCD图像采集处理方法和Halcon算法研制了一台四轴专用检测设备,可以实现气膜孔轴线和孔径的自动化快速检测,轴线角度测量精度为 $\pm 0.5^\circ$,重复性误差为 0.2° ,孔径测量误差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,如图3(b)所示。毕超等^[38]设计了一种基于三轴滑动和两轴回转的联动测量装置,通过改变待测件与图像采集装置的位置关系和对准姿态,可获取涡轮叶片冷却气膜孔的孔径大小、轴线角度和中心坐标等特征参数,提供了一种高精度、高效率、高可靠性的气膜孔质量评价技术手段。然而,杨慕升等^[39]认为传统的气膜孔圆度评定指标忽略了圆形表面起伏波动的性态,用于闭合区域面积不同的图像间圆度比较时结果不够准确,因而提出了一种新的描述圆度的算法,在小孔边缘几何特征提取时获得了更高的准确度和检测效率。

受设备本身测量范围或工装的限制,多种工况下无法通过一次或一种测量手段完成对气膜孔的完整测量,近年来基于多测量方式复合的研究案例显著增多。如美国SURVICE公司基于光学扫描和工业CT多源融合的测量方法;通用公司在专利中提到坐标测量机与光学扫描相结合的方法;Elfurjani等^[40-41]成功搭建出声发射和金属探针耦合的测量系统;隋鑫等^[42]基于多传感器技术,将接触式与非接触式传感器同时集成到坐标测量机上,提高了气膜孔参数测量的自动化程度。

2.2 缺陷评估

对气膜冷却和热障涂层一体化热防护体系,制孔过程会造成孔边单晶材料的显微组织损伤和结构功能弱化,而孔缺陷的存在对疲劳裂纹的萌生有促进作用。受边缘效应的影响,涂层边缘部位过大的残余拉应力使涂层的结合强度、抗冲击性能和热循环疲劳寿命降低。服役过程中,冷却气体和高温燃气的掺混使气膜孔周边形成复杂的温度场和较大的涂层内温度梯度,造成热障涂层界面间、粘结层与合金基体间的热失配应力,容易在孔边产生应力集中从而引起裂纹的萌生扩展以致涂层剥落失效。因此,冷却气膜孔孔边涂层的失效行为将直接威胁气膜冷却效率和热障涂层的服役寿命,因此有必要对处在复杂环境中尤其是冷却孔附近的热障涂层进行应力和失效分析。常规的无损检测方法不再适用其质量评价和性能表征^[43],当前用于涡轮叶片涂层缺陷检测的无损手段主要有声发射技术、光致光谱技术、太赫兹时域光谱技术和红外热成像技术等,上述方法的特点见表1。

(1) 声发射技术。作为一种动态无损检测技术,利用材料变形或产生裂纹时释放的应变能产生的应力波来检测裂纹信息^[44]。国内外学者基于该技术在

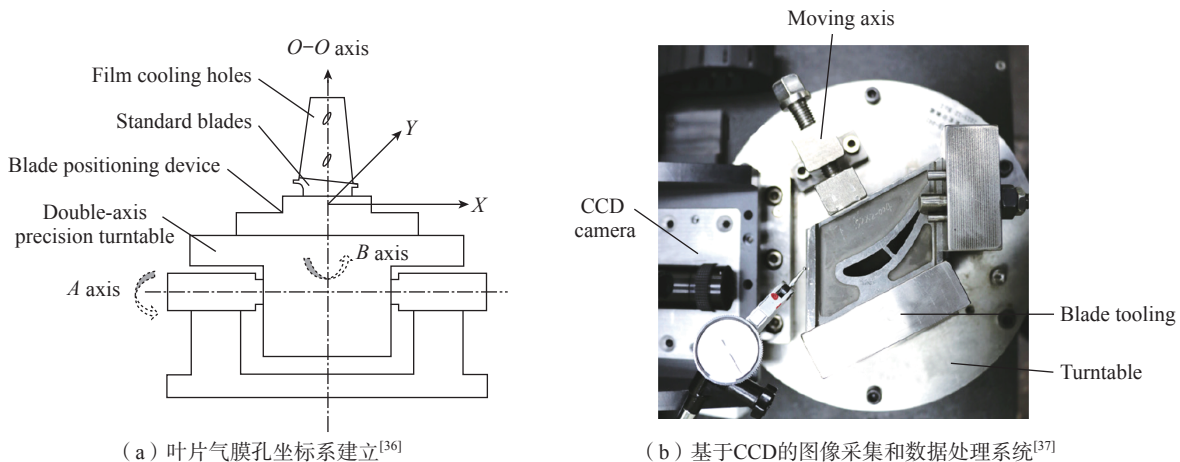


图3 基于光学手段的参数测量系统

Fig.3 Parameter measurement system based on optical means

表 1 常见无损手段的适用范围及检测特点对比

Table 1 Comparison of the application scope and testing characteristics of common nondestructive methods

检测方法	检测对象	适用范围	优点	局限性
声发射	材料变形、裂纹扩展； 缺陷监控	金属、非金属、 复合材料和磁性材料	可实现实时监控、整体评价和缺陷的快速定位；可检测形状复杂的构件；检测不影响设备运行	对材料敏感，易受噪声干扰； 需加载程序；信号发生不可逆
光致光谱	涂层开裂；残余应力	金属和非金属材料	测量快速、灵敏度高、无损； 操作便捷、高效	受荧光现象和光学系统参数的影响；易出现非线性问题
太赫兹时域光谱	涂层精准测厚、失效预警、 缺陷形位信息、工件组分等	金属、非金属和 复合材料	信噪比高；光学常数提取方便；非 电离、非破坏性；能够深度成像	理论模型不完善；成像速度低、 分辨率低
红外热成像	缺陷位置、大小和深度； 涂层厚度、裂纹和脱粘	金属和非金属材料	检测效率高、直观、单次检测 面积大、非接触测量	外形复杂构件需计算模型； 检测深度不足

热障涂层无损检测的应用范围和相关理论做了大量研究。Yang 等^[45-46]结合声发射技术对处于热循环和高温 CMAS 腐蚀下热障涂层的失效过程进行实时监测,通过聚类分析、频谱分析和小波分析等信号处理方式识别失效模式,获得了涂层损伤行为与声发射信号的关系。Park 等^[47]对高温热疲劳下的涂层损伤进行了诊断,结果表明,声发射的信号源是由热生长氧化物中及微裂纹的应力引起的。Renusch 等^[48]基于声发射技术,对大气等离子喷涂 (APS) 热障涂层循环氧化过程进行监测并建立了损伤动力学模型,为预测涂层寿命提供了理论基础。目前,该技术在信号信息读取、原始数据处理和理论分析论证等方面尚需完善,距工程化应用存在一定距离。

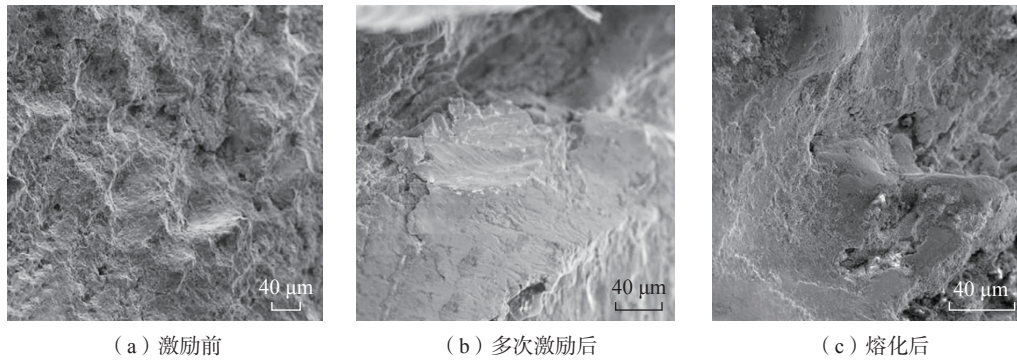
(2) 光致光谱技术。通过测定材料内部离子受激发后产生的拉曼光谱或荧光光谱,根据特征频率的变化量得到应力值。Wen 等^[49]总结了热循环过程中光谱强度变化与涂层损伤信息的对应关系,如观测到的双峰发源于局部损伤引起的应力松弛,初始阶段的生长与热生长氧化物 (TGO) 相变引起的体积变化导致开裂等,证明了该技术用于涂层质量监控的有效性。Wang 等^[50]通过定期测量涡轮叶片 TBCs 中的残余应力,揭示了表面曲率对应力演变和涂层失效行为的影响。由于电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 的热障涂层具有柱状晶的结构特点,信号穿透能力强,反馈信号明显,起初的研究主要集中在 EB-PVD TBCs^[51-53] 的无损检测方面,Lima^[52]和 Yang^[54]等通过优化参数收集方法等措施,实现了对大气等离子喷涂 (APS) 涂层缺陷和残余应力的无损检测。但该技术受激光脉冲强度起伏的影响较大,测量准确性尚需提高。

(3) 太赫兹时域光谱技术。该技术利用样品与太赫兹 (THz) 脉冲作用后反射或透射光谱,同时获得脉冲的振幅和相位信息,经频域变换后直接获取折射率、吸收系数等,具有光学常数提取方便、非电离、非破坏

性、成像分辨率高和深度成像的优点,在无损检测领域具有广阔的应用前景。Fukuchi^[55]和 Krimi^[56]等基于多组不同厚度 (300~600 μm) 的样品,证明了该技术用于涂层精准测厚的有效性,并开发出对应的自校准方法,减小了测量过程中的相对偏差。Chen^[57]和 Watanabe^[58]等对 TGO 层、陶瓷层和金属界面缺陷的演化过程进行监测,通过评估等离子喷涂 TBCs 陶瓷层的透射率和介电性能,证明了太赫兹时域光谱技术用于涂层及其烧蚀导致的微观结构的无损评价和涡轮叶片热障涂层失效预警的有效性。目前该技术仍处于起步阶段,存在理论模型待完善、成像速度慢和分辨率低等问题。不过鉴于太赫兹在其他无损检测领域取得的成功,未来该技术在叶片及其涂层结构的缺陷检测中将大有可用。

(4) 红外热成像技术。该技术是一种基于瞬态热传导的无损检测方法,相比于其他传统无损检测方法具有以下特点:适用面广,不受零件材料和形状的限制;效率高,单次检测面积大;无污染、无射线辐射危害;易于操作,结合图像处理技术可实现定量检测和评估。根据红外辐射来源,分为被动式红外热成像和主动式红外热成像。被动式红外热成像是将试件自身的红外辐射转化为电信号以获得热图;主动式红外热成像则是通过施加外部激励的方式使被检零件表面温场发生变化,由热像仪采集热辐射信息的变化过程,并根据热激励方式的不同分为以下 6 种典型技术:脉冲热成像、超声激励红外热成像、锁相红外热成像、脉冲相位热成像、太赫兹激励红外热成像和电磁激励红外热成像技术^[59]。

近年来,大量学者通过建模仿真和算法优化的方法,提高了燃气涡轮发动机涡轮叶片及涂层缺陷的定量检测效果。梅林等^[60]通过三维有限元分析方法模拟脉冲加热红外无损检测过程,分析了影响检测灵敏度的参数并通过对比度变化规律对其进行优化。寇光杰等^[61]建立裂纹区域的摩擦生热模型,利用导热微分方程推导

图5 振动前后裂纹面的变化^[68]Fig.5 Changes of crack surface before and after vibration^[68]

识别径深比 1.2~4.0 脱粘缺陷的有效性,预测误差为 4%~10%。冯驰等^[72]通过伪彩色增强技术和边缘检测技术提高对热图中缺陷的分辨能力,可快速准确检测出涂层脱落部分的位置及大小。Shrestha^[73]和 Ibarra^[74]等分别使用方波脉冲和不同调制频率的正弦信号激励试样,通过傅里叶变换获得相位角和涂层厚度的关系,评估了红外热成像用于评估不均匀涂层厚度及其密度差异的可能性。

(2) 裂纹、气孔和夹杂等缺陷及其深度检测。苏清风^[75]和 Heyes^[76]等搭建了超声红外热像检测试验平台,实现了对航空发动机导向叶片(0.5~1 mm)和工作叶片细微裂纹的检测。肖劲松等^[77]建立了叶片内部气孔的轴对称非稳态导热模型,并通过 ANSYS 进行数值模拟计算,得到脉冲加热-冷却阶段任意时刻的温场分布情况和热辐射变化趋势。将 GCTWI 后处理方法用于 4.2 mm 厚 CFRP 试样上深度为 1.6 mm 和 2.16 mm 的人工缺陷检测,证明了锁相热成像法用于复合材料中盲孔和夹杂物等亚表面缺陷检测的有效性^[78-82]。王卓等^[63]提出了一种基于电磁激励红外热成像技术的管道缺陷深度检测方法,并通过试验数据拟合出槽型缺陷和圆形缺陷的深度检测模型,预测值与实际深度的相对误差分别为 4.12% 和 3.69%。

在热图信号处理及去噪方面, Tang 等^[83]基于 Markov-PCA-BP 算法提出预测模型,以热波信号的特征为输入,可准确识别径深比 1.2~4.0、深度为 1.0~2.5 mm 的缺陷信息,预测误差为 4%~10%。Rajic 等^[84]对光脉冲激励的响应进行奇异值分解,在复合结构缺陷深度表征中具有明显的去噪效果,预测误差均值为 22%。Yousefi 等^[85]利用协方差矩阵和奇异值分解获得主成分热图像,并基于 K-medoids 聚类法对样品缺陷进行分割,简化了计算过程,提高了检测效率。Sun^[86]基于多层传热模型提出了脉冲热成像多层分析(PTI-MLA)方法,通过分析单侧脉冲热成像获得的表面温度响应,可实现对

整个涂层导热系数和发动机部件表面热容分布的预测和评估,测量误差为 5%~10%。秦乾坤等^[87]提出了一种基于传统小波阈值函数的改进方法,将原始阈值提高了 20% 左右,在实现有效减少噪声的同时保留更多图像细节信息。

(3) 冷却风道及气膜孔缺陷检测。涡轮叶片在服役过程中发生风道堵塞会对发动机散热造成影响进而引发事故,孙琦^[64]建立堵塞区的传热模型,定量给出了风道堵塞参数和试验控制参数与表面温差之间的关系,基于冷热水交替激励的方式,采用梯度优化算法对上述模型进行仿真,根据仿真结果提供的控制参数进行试验,得到缺陷区域和非缺陷区叶片表面温差和时间、换热系数、冷热水激励温差以及堵塞大小之间的关系。颜芳^[88]分析了气烘法、冷热水交替法、涡流激励法和蒸汽激励法 4 种激励方案用于叶片内部冷却通道缺陷红外热成像无损检测的优劣性。汪力^[89]基于外部激励内部冷却的方式提出了一种叶片内部通道异物堵塞的红外热成像无损检测方案,可实现插入不同长度缺陷部位图像重构。一些研究基于热像仪测量的冷却数据分析了射流角度、复合角和孔入口形状对气膜冷却效果的影响,证明了红外热成像技术在描述发动机热端部件冷却特性的有效性^[90-92]。何箐等^[93]介绍一种高压涡轮工作叶片冷却气膜孔检测平台及测试方法,将红外手段应用到气膜孔孔边损伤和涂层裂纹、致密化等差异缺陷检测中。

目前,红外热成像技术对于叶片及其涂层结构的检测结果集中在对损伤的定性评价方面。随着先进复合材料、热激励技术和图像处理技术的飞速发展,如超声-红外热像检测、激光电子剪切散斑-红外热像检测等联合方法的检测技术将被用于涡轮系统及其涂层结构缺陷的定量检测。

3.4 热图像的后处理方法

受检测环境、设备性能、工件表面特性和人工操作

误差等因素的影响,由热像仪采集到的原始热图中存在大量噪声,对微小缺陷的精确判别造成干扰。为提高信噪比,过滤图像中的背景和噪声信号,增强缺陷特征的辨识度,通常采用后处理方法来实现,其代表算法及实现途径见表 2^[71,94-100]。

3.5 不足及展望

近年来,主动红外热像技术的检测精度不断提高,在材料缺陷检测和损伤评估方面的重要性更为突出。但受到国外技术封锁和工艺水平的限制,当前技术的不足也较为明显:

- (1) 尚未建立高效的热激励手段,输入能量与材料微观组织结构相互作用机理的研究仍然有待深入;
- (2) 红外热像仪像素较低,常见的非制冷式红外热像仪的最高分辨率仅为 640 × 480 像素;
- (3) 基于序列热图像的信号提取和数据分析程序尚未建立,目前大多依托滤波减背景、去噪增强和图像序列处理等手段,尚未形成一套行之有效的适用于燃气涡轮发动机涡轮叶片损伤评估的处理流程。

随着上述理论和技术问题的解决,主动红外热成像技术呈现出由人工识别缺陷向自动识别发展、定性检测向定量检测发展的趋势。具体表现为以下 3 点:

- (1) 改进激励手段、优化激励参数,基于机器学习开发热图像的数据处理模块,与其他无损检测技术结合,实现优势互补;
- (2) 使用更高分辨率的热像仪;
- (3) 建立“缺陷形式-激励方式-热像采集(灰度/伪彩色图)-特征提取-数据处理”模型,形成一套针对被测件不同部位、不同缺陷的行之有效的评价体系^[98-100]。

4 结论

燃气涡轮发动机涡轮叶片服役环境恶劣,合金基体及其上热障涂层失效机理复杂,基于无损检测技术开展叶表涂层失效研究以及服役状态下冷却气膜孔质量监

测和评估具有极其重要的意义。大量研究结果表明,单一的某种无损手段并不能综合评定影响气膜孔加工精度及服役性能的所有内在因素,如涂层密度不均匀性、孔边裂纹、界面应力等,通常需要采用多种检测技术开展针对性的研究开发和数据积累。当前研究尚存在理论模型不完善、检测流程复杂、图像分辨率不足、数据处理算法不成熟等一系列问题,未来仍需在以下 4 个方面进行深入研究:

- (1) 开发高精度、高效率、低成本的无损检测技术,而红外热成像技术是目前涡轮叶片及涂层缺陷特别是孔及孔边检测较有前景的方法之一,国内亟待推进其系统研究及工程化应用;
- (2) 建立涡轮发动机涡轮叶片气膜孔质量评估平台,实时监测如涂层厚度、裂纹尺寸等信息,实现缺陷参数的闭环反馈与提前预警;
- (3) 基于 Python 等开源编程软件开发数据处理模块,构建针对叶片及其涂层常见损伤的数据库;
- (4) 集成热图像采集与数据分析系统,结合机器学习和神经网络等技术推动无损检测的智能化,实现气膜孔异常信号的自动筛选与存档入库。

参 考 文 献

[1] 张效伟,朱惠人.大型燃气涡轮叶片冷却技术[J].热能动力工程,2008,23(1):1-6,103.
ZHANG Xiaowei, ZHU Hui ren. Blade cooling technology of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 1-6, 103.

[2] 王旭伟.浅谈涡轮转子叶片冷却技术[J].山东工业技术,2019(1):11-14.
WANG Xuwei. Brief discussion on cooling technology of turbine rotor blades[J]. Shandong Industrial Technology, 2019(1): 11-14.

[3] 董一巍,吴宗璞,李效基,等.叶片气膜孔加工与测量技术的现状及发展趋势[J].航空制造技术,2018,61(13):16-25.
DONG Yiwei, WU Zongpu, LI Xiaojie, et al. Current situation and

表 2 常见热图像后处理方法对比^[71,94-100]
Table 2 Comparison of common thermal image post-processing methods^[71,94-100]

条件	代表方法 / 算法	实现途径
温度对比 ^[94]	绝对对比、递进对比、归一化对比、标准对比和(改进)差分绝对对比 ^[98]	利用试件中缺陷区域和非缺陷区域的温差判别缺陷
时间导数 ^[95]	多项式拟合时间微分-相关系数法 ^[71]	对红外热图序列处理:对 $T-\lg(t)$ 曲线进行多项式拟合,根据各像素点重构信号与参与信号的相关系数矩阵评估缺陷
信号变换 ^[96]	脉冲相位法、小波变换 ^[99] 、Hough 变换 ^[100]	通过离散傅里叶变换获得给定频率下的幅值图和相位图,确定缺陷信息
矩阵分解 ^[97]	主成分分析法	构造协方差矩阵进行奇异值分解,提取重要特征值,得到高信噪比的热图像

development trend of processing and measurement technology for turbine blade film cooling hole[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(13): 16–25.

[4] 李江海. 层板冷却特性的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

LI Jianghai. Investigation of the cooling characteristics of lamilloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

[5] 张文武, 郭春海, 张天润, 等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(22): 26–31.

ZHANG Wenwu, GUO Chunhai, ZHANG Tianrun, et al. Advanced film cooling technology of turbine blades and progress in relevant laser drilling technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(22): 26–31.

[6] 严骅. 航空发动机叶片气膜孔电火花加工的电极补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

YAN Hua. Research on electrode compensation technology of air film cooling holes on an aeroengine blade in edm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[7] 张学谦, 邢松龄, 刘磊, 等. 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 123–128.

ZHANG Xueqian, XING Songling, LIU Lei, et al. Trepanning of super-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 123–128.

[8] 陶俊. 激光打孔工艺及背伤保护实验研究[D]. 宁波: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2017.

TAO Jun. The experimental studies on laser drilling and back strike protection[D]. Ningbo: Ningbo Institute of Material Technology, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[9] 潘志福, 傅军英, 张明岐. 电液束加工特性及小孔形貌控制技术[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(4): 14–20.

PAN Zhifu, FU Junying, ZHANG Mingqi. Study on characteristics of electro stream machining and controlling technology of hole morphology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(4): 14–20.

[10] 王富强, 张志强. 涡轮冷却叶片气膜孔加工方法研究[C]//第16届全国特种加工学术会议论文集. 厦门, 2015: 433–436.

WANG Fuqiang, ZHANG Zhiqiang. Research on the machining method of air film holes in turbine cooling blades[C]//Proceedings of the 16th National Conference on Special Machining. Xiamen, 2015: 433–436.

[11] 张健. 飞秒激光超微细加工及应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2009.

ZHANG Jian. Femtosecond laser ultra-fine processing and application research[D]. Tianjin: Nankai University, 2009.

[12] 张强, 贺斌, 田东坡, 等. 飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术研究进展[J]. *航空科学技术*, 2018, 29(2): 9–14.

ZHANG Qiang, HE Bin, TIAN Dongpo, et al. Development of gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2018, 29(2): 9–14.

[13] FOEHL C, DAUSINGER F. High precision deep drilling with ultrashort pulses[C]//Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication. Munich, 2003: 346–351.

[14] 赵华龙, 周仁魁, 赵鸿雁, 等. 一种提高表面完整性的气

膜孔成形方法[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(3): 649–655.

ZHAO Hualong, ZHOU Renkui, ZHAO Hongyan, et al. A forming method for improving surface integrity of film cooling holes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(3): 649–655.

[15] 刘新灵, 陶春虎, 刘春江, 等. 航空发动机叶片气膜孔加工方法及其演变分析[J]. *材料导报*, 2013, 27(21): 117–120.

LIU Xinling, TAO Chunhu, LIU Chunjiang, et al. Investigation of processing methods and development of gas holes of engine blade[J]. *Materials Review*, 2013, 27(21): 117–120.

[16] LIN C H, PFLEGING W, LU Y, et al. Enhancement of ablation efficiency by a femto/nano-second dual-beam micromachining system[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7585: 75850.

[17] 张晓兵, 孙瑞峰. 二次法激光加工小孔技术[J]. *航空学报*, 2014, 35(3): 894–901.

ZHANG Xiaobing, SUN Ruifeng. Sequential laser drilling technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 894–901.

[18] OGUMA H, TSUKIMOTO K, GOYA S, et al. Development of advanced materials and manufacturing technologies for high-efficiency gas turbines, mitsubishi heavy industries technical review, 2015, 52(4): 5–14.

[19] JONES M G, HAYASHI S R, WEI B. Method for drilling hollow components: US6362446[P]. 2002–03–26.

[20] 刘发展, 曲宁松, 朱增伟. 无再铸层异型孔的电火花-电解除组合加工研究[J]. *电加工与模具*, 2010(2): 33–37.

LIU Fazhan, QU Ningsong, ZHU Zengwei. Research on EDM-ECM combined process for machining holes without recast layer[J]. *Electromachining & Mould*, 2010(2): 33–37.

[21] HE X L, WANG Y K, WANG Z L, et al. Micro-hole drilled by EDM-ECM combined processing[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 562–565: 52–56.

[22] 于滨, 赵万生, 狄士春, 等. 异形孔的微细超声电火花加工技术研究[J]. *微细加工技术*, 2003(1): 44–50.

YU Bin, ZHAO Wansheng, DI Shichun, et al. Study on micro ultrasonic EDM of shaped holes[J]. *Microfabrication Technology*, 2003(1): 44–50.

[23] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Ultrasonic vibration-assisted continuous wave laser surface drilling of materials[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 4: 1–5.

[24] 张文武, 张天润, 郭春海, 等. 激光打孔在飞机发动机领域的一些新进展[J]. *光电产品与资讯*, 2014, 5(11): 23–27.

ZHANG Wenwu, ZHANG Tianrun, GUO Chunhai, et al. Some new developments in laser drilling in the field of aircraft engines[J]. *OE Product & News*, 2014, 5(11): 23–27.

[25] 李灵. 水导激光微细加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

LI Ling. Study on water-jet guided laser micromachining technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[26] 叶瑞芳, 沈阳, 王磊, 等. 新型水导引激光耦合系统研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(3): 369–372.

YE Ruifang, SHEN Yang, WANG Lei, et al. Novel coupling system of water-jet guided laser[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2009, 48(3): 369–372.

[27] CUI J W, LI L, LI J Y, et al. Fiber probe for micro-hole

measurement based on detection of returning light energy[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 13–18.

[28] 崔继文, 谭久彬, 刘洋. 基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 106–109.

CUI Jiwen, TAN Jiubin, LIU Yang. Measurement of micro-hole with high aspect ratio based on double optical fiber coupling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 106–109.

[29] SAJIMA T, MURAKAMI H, KATSUKI A. Precision profile measurement system for microholes using vibrating optical fiber[J]. *Sensors and Materials*, 2012, 24(7): 387–396.

[30] SUN X, MA Y Z, YU Y X, et al. Inner hole diameter measuring based on capacitive sensor[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 739: 596–601.

[31] STONE J, MURALIKRISHNAN B, SAHAY C. Geometric effects when measuring small holes with micro contact probes[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2011, 116(2): 573–587.

[32] JIN J, KIM J W, KANG C S, et al. Precision depth measurement of through silicon vias (TSVs) on 3D semiconductor packaging process[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5011–5016.

[33] RAMAMURTHY R, HARDING K G, LIAO Y, et al. Method and system for automated shaped cooling hole measurement: US9760986[P]. 2017–09–12.

[34] LIN C H, POWELL R A, JIANG L, et al. Real-time depth measurement for micro-holes drilled by lasers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2): 025307.

[35] 曹率, 莫蓉, 宫中伟. 航空涡轮叶片气膜孔参数化建模研究[J]. *航空计算技术*, 2011, 41(3): 77–81.

CAO Shuai, MO Rong, GONG Zhongwei. Research on parametric modeling of aeronautic turbine blade filmhole[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2011, 41(3): 77–81.

[36] 关军, 王呈. 建立叶片气膜孔工件坐标系的方法研究[J]. *计测技术*, 2013, 33(3): 41–43.

GUAN Jun, WANG Cheng. Study on establishing coordinate system for workpiece of blade gas film holes[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(3): 41–43.

[37] 鲍晨兴, 王磊, 李凯, 等. 基于 CCD 的叶片气膜孔快速检测技术研究[J]. *航空精密制造技术*, 2017, 53(2): 52–55, 59.

BAO Chenxing, WANG Lei, LI Kai, et al. Research on rapid detection technology of gas film hole based on CCD[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2017, 53(2): 52–55, 59.

[38] 毕超, 房建国, 孙永春, 等. 一种用于测量气膜孔形位参数的五轴影像测量装置: CN108180851A[P]. 2018–06–19.

BI Chao, FANG Jianguo, SUN Yongchun, et al. A five-axis image measuring device for measuring the shape and position parameters of air-film holes: CN108180851A[P]. 2018–06–19.

[39] 杨慕升, 熊秋菊. 基于数字图像处理的微内孔质量检测技术[J]. *制造技术与机床*, 2009(1): 112–115.

YANG Musheng, XIONG Qiuju. Quality inspection technique of micro internal hole with digital image processing technology[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2009(1): 112–115.

[40] ELFURJANI S. Study on dimensional measurements based on rotating wire probe and acoustic emission touch sensing[D]. Victoria: University of Victoria, 2016.

University of Victoria, 2016.

[41] ELFURJANI S, KO J, JUN M B G. Micro-scale hole profile measurement using rotating wire probe and acoustic emission contact detection[J]. *Measurement*, 2016, 89: 215–222.

[42] 隋鑫, 徐熙平, 孙健, 等. 应用多传感器技术测量微孔几何参量[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(4): 79–82.

SUI Xin, XU Xiping, SUN Jian, et al. Microhole geometry measurement applying multi-sensor technology[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(4): 79–82.

[43] 李建超, 何箫, 吕玉芬, 等. 热障涂层无损检测技术研究进展[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(2): 16–26.

LI Jianchao, HE Qing, LÜ Yufen, et al. Research progress on non-destructive testing method of thermal barrier coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(2): 16–26.

[44] 刘战伟, 朱文颖, 石文雄, 等. 热障涂层无损检测技术进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(4): 43–47.

LIU Zhanwei, ZHU Wenying, SHI Wenxiong, et al. Progress in the nondestructive testing of thermal barrier coatings[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(4): 43–47.

[45] YANG L, ZHOU Y C, LU C. Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: An acoustic emission method[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(17): 6519–6529.

[46] YANG L, YANG T T, ZHOU Y C, et al. Acoustic emission monitoring and damage mode discrimination of APS thermal barrier coatings under high temperature CMAS corrosion[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 304: 272–282.

[47] PARK J H, KIM J S, LEE K H. Acoustic emission characteristics for diagnosis of TBC damaged by high-temperature thermal fatigue[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187–188: 537–541.

[48] RENUSCH D, SCHÜTZ M. Measuring and modeling the TBC damage kinetics by using acoustic emission analysis[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(4–7): 740–744.

[49] WEN M, JORDAN E H, GELL M. Analysis of localized damage in EB-PVD/(Ni, Pt)Al thermal barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(18–19): 5193–5202.

[50] WANG X, LEE G, ATKINSON A. Investigation of TBCs on turbine blades by photoluminescence piezospectroscopy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(1): 182–195.

[51] MANERO A II, SELIMOV A, FOULIARD Q, et al. Piezospectroscopic evaluation and damage identification for thermal barrier coatings subjected to simulated engine environments[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 323: 30–38.

[52] LIMA C R C, DOSTA S, GUILLEMANY J M, et al. The application of photoluminescence piezospectroscopy for residual stresses measurement in thermally sprayed TBCs[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 318: 147–156.

[53] 朱建国, 谢惠民, 刘战伟. 热障涂层力学性能的实验测试方法研究进展[J]. *力学学报*, 2013, 45(1): 45–60.

ZHU Jianguo, XIE Huimin, LIU Zhanwei. Research progress on the experimental measurement methods of mechanical properties of thermal barrier coatings[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(1): 45–60.

- [54] YANG J S, ZHAO H Y, ZHONG X H, et al. Evolution of residual stresses in PS-PVD thermal barrier coatings on thermal cycling[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, 27(6): 914–923.
- [55] FUKUCHI T, FUSE N, FUJII T, et al. Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2013, 183(4): 1–9.
- [56] KRIMI S, KLIER J, JONUSCHEIT J, et al. Self-calibrating approach for terahertz thickness measurements of ceramic coatings[C]//2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2016: 1–2.
- [57] CHEN C C, LEE D J, POLLOCK T, et al. Terahertz characterization of interfacial oxide layers and voids for health monitoring of ceramic coatings[C]//2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Piscataway: IEEE, 2009: 1–2.
- [58] WATANABE M, KURODA S, YAMAWAKI H, et al. Terahertz dielectric properties of plasma-sprayed thermal-barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(19): 4620–4626.
- [59] 陈大鹏, 毛宏霞, 肖志河. 红外热成像无损检测技术现状及发展[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(4): 1–6, 9.
- CHEN Dapeng, MAO Hongxia, XIAO Zhihe. Infrared thermography NDT and its development[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(4): 1–6, 9.
- [60] 梅林, 陈自强, 王裕文, 等. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析[J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(1): 66–70.
- MEI Lin, CHEN Ziqiang, WANG Yuwen, et al. Pulse thermography analyzed by the finite element method for nondestructive testing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(1): 66–70.
- [61] 寇光杰, 杨正伟, 贾庸, 等. 复杂型面叶片裂纹的超声红外热成像检测[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 101–109.
- KOU Guangjie, YANG Zhengwei, JIA Yong, et al. Detection on cracks in blades with complex profile based on ultrasonic infrared thermal imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 101–109.
- [62] 宋凯, 刘堂先, 李来平, 等. 航空发动机涡轮叶片裂纹的阵列涡流检测仿真[J]. *航空学报*, 2014, 35(8): 2355–2363.
- SONG Kai, LIU Tangxian, LI Laiping, et al. Simulation on aero-engine turbine blade cracks detection based on eddy current array[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(8): 2355–2363.
- [63] 王卓, 张云伟, 喻勇, 等. 主动热激励式红外热成像管道缺陷深度检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 201–208.
- WANG Zhuo, ZHANG Yunwei, YU Yong, et al. Depth test of pipeline defects by active thermal excitation and infrared thermography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 201–208.
- [64] 孙琦. 涡轮叶片冷却风道异物堵塞的红外无损检测[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- SUN Qi. Infrared nondestructive testing in turbine blade cooling duct blockage[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [65] IBARRA-CASTANEDO C, GONZÁLEZ D, KLEIN M, et al. Infrared image processing and data analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, 46(1–2): 75–83.
- [66] 赵莹莹. 脉冲相位光热辐射测量技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- ZHAO Yingying. Research on the technology of pulsed phase thermography[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [67] 李赞. 金属结构件裂纹超声红外热像检测及其激励参数影响规律研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
- LI Zan. Study on metal structure crack detection by sonic IR and the effect of excitation parameters[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016.
- [68] RENSHAW J, HOLLAND S D, THOMPSON R B, et al. Vibration-induced tribological damage to fracture surfaces via vibrothermography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(7): 849–857.
- [69] 高治峰, 董丽虹, 王海斗, 等. 振动红外热成像技术用于不同类型缺陷检测的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9158–9163.
- GAO Zhifeng, DONG Lihong, WANG Haidou, et al. Research progress and prospect of vibrothermography in different defect types[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(9): 9158–9163.
- [70] 郭伟, 董丽虹, 王慧鹏, 等. 基于红外热像技术的涡轮叶片损伤评价研究进展[J]. *航空学报*, 2016, 37(2): 429–436.
- GUO Wei, DONG Lihong, WANG Huipeng, et al. Research progress of damage estimation for turbine blades based on infrared thermographic technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(2): 429–436.
- [71] 唐庆菊. SiC 涂层缺陷的脉冲红外热波无损检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- TANG Qingju. Research on the key technology of SiC coating defects detection using pulsed infrared thermal wave non-destructive testing method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [72] 冯驰, 滑翔. 红外热波技术在涡轮叶片涂层检测上的应用[J]. *应用科技*, 2015, 42(1): 15–18.
- FENG Chi, HUA Xiang. Applications of the infrared thermal wave technology in thermal barrier coating testing[J]. *Applied Science and Technology*, 2015, 42(1): 15–18.
- [73] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography—Part I: Simulation[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 83: 124–131.
- [74] IBARRA-CASTANEDO C, GENEST M, GUIBERT S, et al. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography, and vibrothermography: A comparative study[C]//Defense and Security Symposium. Proc SPIE 6541, Thermosense XXIX, Orlando, 2007: 321–329.
- [75] 苏清风, 习小文, 袁雅妮, 等. 超声红外热像技术在航空发动机叶片裂纹检测中的应用[J]. *无损检测*, 2019, 41(4): 54–57.
- SU Qingfeng, XI Xiaowen, YUAN Yani, et al. Application of ultrasonic infrared thermography technology in crack detection of aeroengine blades[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(4): 54–57.
- [76] HEYES A L, FEIST J P, CHEN X, et al. Optical nondestructive condition monitoring of thermal barrier coatings[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(6): 061301.
- [77] 肖劲松, 严天鹏. 风力机叶片的红外热成像无损检测的数值研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(1): 48–52, 66.
- XIAO Jinsong, YAN Tianpeng. Numerical analysis of NDT of wind turbine blades using infrared imaging[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(1): 48–52, 66.

- [78] MULAVEESALA R, ARORA V, RANI A. Coded thermal wave imaging technique for infrared non-destructive testing and evaluation[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2019, 34(3): 243–253.
- [79] MULAVEESALA R, ARORA V. Complementary coded thermal wave imaging scheme for thermal non-destructive testing and evaluation[J]. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2017, 14(1): 44–53.
- [80] MURALI K, RAMA KOTI REDDY D V, MULAVEESALA R. Application of image fusion for the IR images in frequency modulated thermal wave imaging for non destructive testing (NDT)[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 544–549.
- [81] ARORA V, MULAVEESALA R, RANI A, et al. Digitised frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive testing and evaluation of glass fibre reinforced polymers[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2019, 34(1): 23–32.
- [82] DUA G, MULAVEESALA R, KHER V, et al. Gaussian windowed frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive testing and evaluation of carbon fibre reinforced polymers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 125–131.
- [83] TANG Q J, DAI J M, LIU J Y, et al. Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 144–148.
- [84] RAJIC N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures[J]. *Composite Structures*, 2002, 58(4): 521–528.
- [85] YOUSEFI B, SFARRA S, IBARRA CASTANEDO C, et al. Comparative analysis on thermal non-destructive testing imagery applying candid covariance-free incremental principal component thermography (CCIPCT)[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 163–169.
- [86] SUN J G. Pulsed thermal imaging measurement of thermal properties for thermal barrier coatings based on a multilayer heat transfer model[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136(8): 08160.
- [87] 秦乾坤, 杨慧, 岳威, 等. 基于改进小波阈值的红外热波无损检测图像噪声抑制方法的研究 [J]. *计算机时代*, 2019(1): 75–78, 82.
- QIN Qiankun, YANG Hui, YUE Wei, et al. Research on improved wavelet threshold based image noise suppression method for infrared thermal wave nondestructive testing[J]. *Computer Era*, 2019(1): 75–78, 82.
- [88] 颜芳. 涡轮叶片冷却风道的原始红外图像增强及处理 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- YAN Fang. Raw infrared image enhancement and processing of turbine blade cooling ducts[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [89] 汪力. 航空发动机涡轮叶片内部通道异物红外检测 [J]. *硅谷*, 2012, 5(4): 185–186.
- WANG Li. Infrared detection of foreign objects in the internal channel of aero-engine turbine blades[J]. *Silicon Valley*, 2012, 5(4): 185–186.
- [90] ZHANG C, LIN Y Z, XU Q H, et al. Cooling effectiveness of effusion walls with deflection hole angles measured by infrared imaging[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5–6): 966–972.
- [91] 刘岚菲, 董若凌, 施红辉, 等. 基于红外热像技术的不同复
合角气膜冷却实验研究 [J]. *浙江理工大学学报*, 2015, 33(7): 520–525.
- LIU Lanfei, DONG Ruoling, SHI Honghui, et al. Experimental research on film cooling of different compound angles based on infrared thermography technology[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2015, 33(7): 520–525.
- [92] KIM J H, KIM K Y. Film-cooling performance of converged-inlet hole shapes[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 124: 196–211.
- [93] 何箐, 葛超, 王秋童. 高压涡轮工作叶片冷却气膜孔检测平台及测试方法: CN109751972A[P]. 2019–05–14.
- He Qing, GE Chao, WANG Qiutong. High pressure turbine working blade cooling air film hole detection platform and test method: CN 109751972A[P]. 2019–05–14.
- [94] 郭兴旺, 高功臣, 吕珍霞. 基于奇异值分解的红外热图像序列处理 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(8): 937–940.
- GUO Xingwang, GAO Gongchen, LÜ Zhenxia. Infrared image sequence processing based on singular value decomposition[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(8): 937–940.
- [95] 张春雪. 图像的边缘检测方法研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- ZHANG Chunxue. Research on the method of image edge detection[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [96] 郭兴旺, 刘颖韬, 郭广平, 等. 脉冲相位法及其在复合材料无损检测中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(10): 1049–1053.
- GUO Xingwang, LIU Yingtao, GUO Guangping, et al. Pulsed phase thermography and its application in the NDT of composite materials[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(10): 1049–1053.
- [97] 张瑾, 杨常清. 基于矩阵分析的数字图像处理方法 [J]. *微机发展*, 2003, 13(5): 36–37, 76.
- ZHANG Jin, YANG Changqing. Analysis of image processing using matrix method[J]. *Microcomputer Development*, 2003, 13(5): 36–37, 76.
- [98] IBARRA-CASTANEDO C, BENDADA A, MALDAGUE X. Thermographic image processing for NDT[C]//IV Conferencia Panameri Canade NDE, 2007
- [99] 郭彤颖, 吴成东, 曲道奎. 小波变换理论应用进展 [J]. *信息与控制*, 2004, 33(1): 67–71.
- GUO Tongying, WU Chengdong, QU Daokui. Wavelet transform theory and its application progress: A review[J]. *Information and Control*, 2004, 33(1): 67–71.
- [100] 王彬生, 黄乡生. Hough 变换及其在几何特征检测中的应用 [J]. *计算机与现代化*, 2008(4): 20–22.
- WANG Binsheng, HUANG Xiangsheng. Hough transform and application in geometrical property detection[J]. *Computer and Modernization*, 2008(4): 20–22.

通讯作者: 何箐, 研究员, 工学博士, 研究方向为热障涂层等高温防护涂层技术。

(责编 七七)