

引用格式: 凡丽梅, 李荣成, 董方旭, 等. 红外热波成像检测技术研究进展及在航空航天领域的应用[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 45-59.

FAN Limei, LI Rongcheng, DONG Fangxu, et al. Research progress of infrared thermal-wave imaging technique and its application in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 45-59.

## 红外热波成像检测技术研究进展及 在航空航天领域的应用

凡丽梅<sup>1,2</sup>, 李荣成<sup>3</sup>, 董方旭<sup>2</sup>, 王飞<sup>3\*</sup>, 宋鹏<sup>3</sup>, 徐丽霞<sup>4</sup>,  
刘钊<sup>5</sup>, 张景胜<sup>6</sup>, 杨耀东<sup>4</sup>, 刘丽霞<sup>4</sup>, 岳洪浩<sup>3</sup>, 刘俊岩<sup>3\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250000; 3. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001; 4. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100089; 5. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 6. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300000)

**摘要:** 红外热波成像检测具备高效、检测区域大、非接触式等优点, 被广泛应用在航空、航天新材料的损伤检测与评估领域。本文介绍了典型的红外热波成像检测技术的原理、实现途径以及适用条件, 涵盖脉冲式红外热成像、锁相红外热成像、调频热波成像、超声辅助红外热波成像、涡流激励红外热波成像以及红外热波层析成像等多种红外热波检测技术。此外, 探讨了红外热波无损检测技术在航空航天领域的当前发展状况, 并列举了实际应用案例。最后, 本文剖析了红外热波无损检测技术面临的主要挑战, 并展望其未来发展趋势: 其正朝着激励源多元化、检测智能化和信息融合深度化方向演进, 激励源将从单一光热向超声、激光、电磁等多物理场协同激励发展; 检测过程将融合新型成像技术与人工智能算法, 实现微弱缺陷的精准识别; 信息处理将通过多源异构数据融合, 突破单一技术局限, 提升缺陷定量检测与三维重构能力。

**关键词:** 无损检测; 红外热波成像; 检测原理; 航空航天材料

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000197

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000197

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0045-15

## Research progress of infrared thermal-wave imaging technique and its application in aerospace field

FAN Limei<sup>1,2</sup>, LI Rongcheng<sup>3</sup>, DONG Fangxu<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>3\*</sup>, SONG Peng<sup>3</sup>, XU Lixia<sup>4</sup>, LIU Zhao<sup>5</sup>,  
ZHANG Jingsheng<sup>6</sup>, YANG Yaodong<sup>4</sup>, LIU Lixia<sup>4</sup>, YUE Honghao<sup>3</sup>, LIU Junyan<sup>3\*</sup>

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Shandong Non-metallic Materials Research Institute, Jinan 250000, China; 3. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100089, China; 5. Beijing Xinghang Electromechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China; 6. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Infrared thermal wave imaging detection technology has the advantages such as high efficiency, large detection area, and non-contact operation, making it widely used in the field of damage detection and evaluation of new materials in aviation and aerospace. This study introduces the principle, implementation approach and applicable conditions of typical infrared thermal wave imaging detection technology, covering various typical infrared thermal wave detection techniques such as pulse infrared thermal imaging, phase-locked infrared thermal imaging, frequency modulation thermal wave imaging, ultrasound assisted infrared thermal wave imaging, eddy current excitation infrared thermal wave imaging, and infrared thermal wave tomography imaging. In addition,

the article also explores the current development status of infrared thermal wave non-destructive testing technology in the aerospace field, and lists practical application cases. Finally, this paper analyzes the main challenges faced by infrared thermal wave nondestructive testing technology and outlines its future development trends. The technology is evolving toward diversified excitation sources, intelligent detection, and deeper information integration; excitation sources will develop from single photothermal excitation to multi-physics collaborative excitation incorporating ultrasound, laser and electromagnetic methods; the detection process will integrate novel imaging technologies with artificial intelligence algorithms to achieve precise identification of subtle defects; information processing will leverage multi-source heterogeneous data fusion to overcome the limitations of single-technique approaches and enhance capabilities for quantitative defect detection and three-dimensional reconstruction.

**Key words:** non-destructive testing; infrared thermal-wave imaging; detection principle; aerospace material

任何高于绝对零度的物体都会持续向周围环境发射红外热辐射。红外热辐射是一种波长介于微波和可见光之间的电磁波,波长在 700~1000 nm。使用成像技术捕获电磁辐射红外光谱中的热能称为红外热成像。根据是否有外部热激发,红外热成像又可以分为被动成像和主动成像<sup>[1]</sup>。

红外热波成像检测技术,作为一种依托主动红外热成像原理的无损检测手段,正快速发展并广泛应用于各个领域。该技术通过施加外部热源对检测对象进行主动加热,促使物体内部存在的缺陷(例如裂纹、腐蚀、脱粘等)以表面温度分布异常的形式显现<sup>[2]</sup>。利用红外热像仪,该技术能够实时捕捉并记录这些表面温度随时间的变化,进而将其转换为可视化的图像序列。随后,通过数据分析处理技

术,即可实现缺陷信息的检测与识别。

红外热波成像检测技术涉及热源激励加载及参数调制、红外热图序列的采集、处理和分析以及缺陷参数的定量判别<sup>[3]</sup>。热激励源是为了激发材料内部的缺陷信息,针对不同的待检测试件及需求,需要设计特定的热激励源。常用的热激励手段包括闪光灯、超声波、激光、电流、THz 波以及热风等。热激励的加载包括脉冲激励、调制激励以及持续加热等方式。对红外热像仪检测的温度序列图进行处理,还原为视觉可见的图像,就可以在图像上分辨出有缺陷处与正常区域的差异,从而发现缺陷的位置。同时根据建立的缺陷判断标准,对缺陷的类型、大小和深度作出定量描述。图 1 为红外热波成像原理示意图。

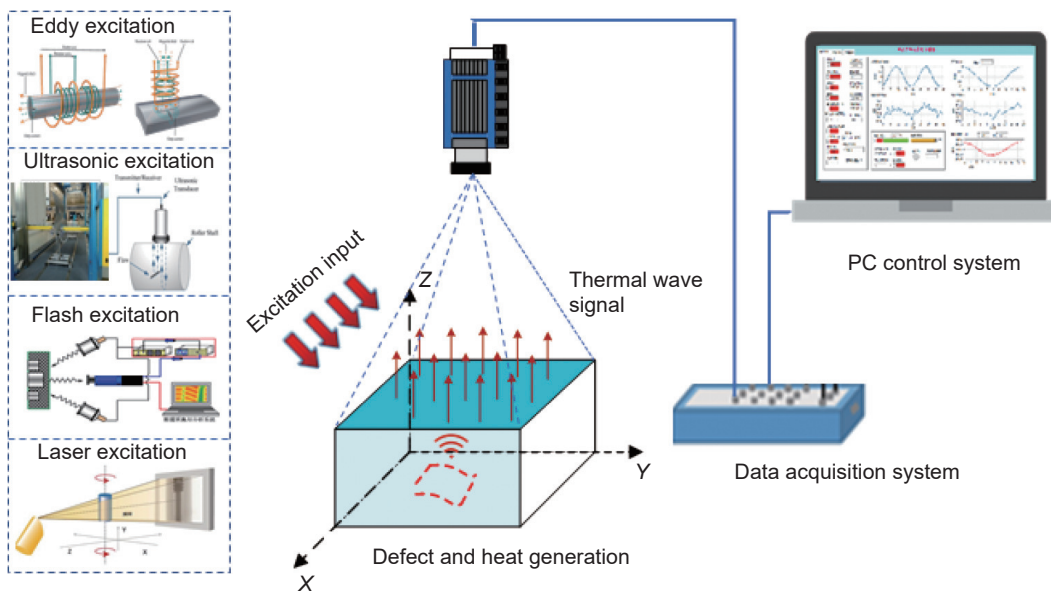


图 1 红外热波成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared thermal wave imaging principle

本文系统综述红外热波成像检测技术的研究进展及其在航空航天领域的应用现状,并剖析当前

红外热波成像技术面临的挑战,为航空航天结构的高效、精准、原位检测提供了新的技术路径。

## 1 红外热波成像检测技术

### 1.1 脉冲红外热波成像检测技术

红外脉冲法热波检测技术是研究最多和最成熟的方法,也是使用最广泛的方法。红外脉冲法热波检测是采用瞬时高能脉冲激励源(如闪光灯、脉冲激光、瞬时高能量超声波等)对试件进行激励,瞬时高能量热流脉冲在有缺陷或损伤的构件及材料内部传导,由于试件内部的热特性不均匀而导致试件表面存在温度差异,利用红外热像仪对试件表面的温度变化进行记录,实现对构件或材料进行探伤和检测<sup>[4]</sup>。脉冲红外热波成像的检测原理示意图如图2所示。

热脉冲激励成像方法应用于损伤检测最早是

由 Almond 等<sup>[5]</sup> 和 Maldague 等提出的<sup>[6]</sup>。之后脉冲红外热波技术又经过不断发展,包括引入了热流传导的三维扩散分析<sup>[7]</sup>、采用双脉冲激励加深检测深度<sup>[8]</sup>以及缺陷外观的定量分析<sup>[9-10]</sup>与三维重构<sup>[11-12]</sup>。红外脉冲热波成像检测技术凭借检测速度快、效率高、适合在线检测等突出优势,已经被广泛应用到各种材料的缺陷检测。王飞等<sup>[13]</sup>利用红外脉冲热成像技术对 CFRP 的冲击损伤裂纹进行检测,得到了不同冲击能量与脉冲雷达热波特征的映射关系。Panahandeh 等<sup>[14]</sup>使用闪光灯对电子芯片焊接界面进行短脉冲加热,实现了电子器件表面裂缝和分层缺陷的检测。除此之外,脉冲红外热波成像检测技术还被用来检测复合材料的缺陷表征<sup>[15]</sup>,以及医学上对早期龋齿的检测识别<sup>[16]</sup>等。

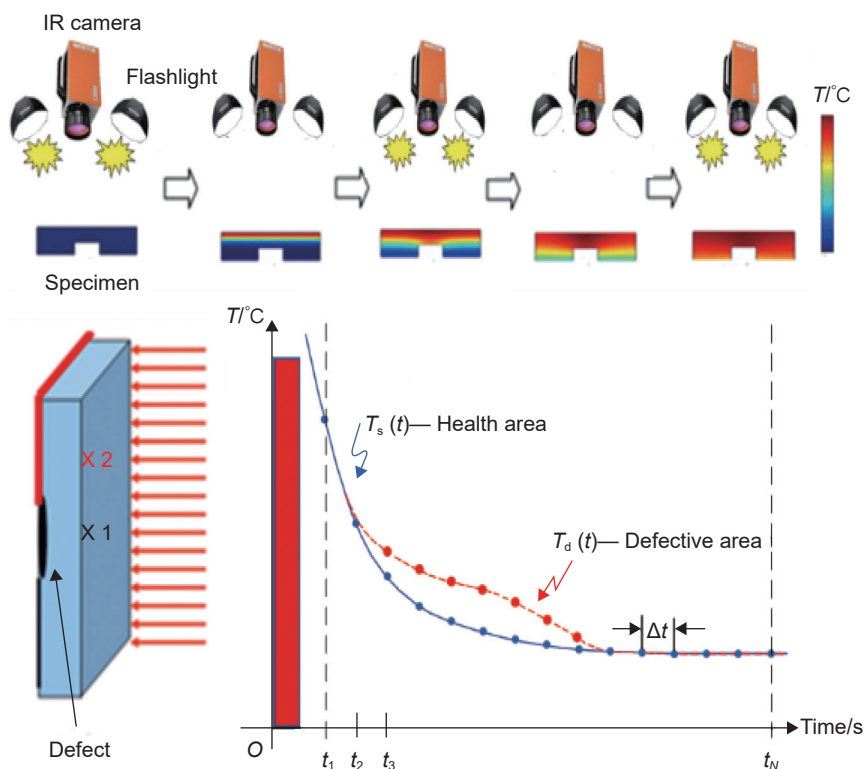


图2 脉冲红外热成像检测原理

Fig. 2 Principle of pulse infrared thermal imaging detection

红外脉冲热成像检测作为典型的无损检测方法之一,已经被广泛应用于各种材料和类型的缺陷无损检测当中,检测效率高、成像效果好,但值得注意的是,该方法对深层次缺陷的识别能力有限,当需要检测深层缺陷时,该方法并不适用;且检测成果受试件表面光学性能的影响较大,另外瞬时脉冲能量的注入有可能会扩大缺陷范围,造成试件的损伤。

### 1.2 锁相红外热波成像检测技术

锁相红外热波检测技术是将数字锁相方法引入红外热波成像技术中,激励信号采用正弦或余弦形式变化,构件表面温度以加载频率振荡变化,其幅值和相位与材料的性质有关。当构件内部存在缺陷时,有缺陷处与无缺陷处在构件表面引起的温度变化将产生幅值和相位的差异,通过计算构件表面温度变化的相位图和幅值图可确定缺

陷的特征<sup>[17]</sup>。红外锁相法热波检测技术原理如图3。

Busse等<sup>[18]</sup>使用热成像技术和锁相数据分析对所有像素进行顺序监测,在热成像分析中引入锁相算法,抑制了热流的扩散。之后锁相热成像方法被不断改进。Matarrese等<sup>[19]</sup>将锁相热成像方法与三层结构的神经网络结合,实现了CFRP中缺陷深度的自动分类。Boué等<sup>[20]</sup>将不同扫描速度的连续激光源与红外锁相检测相结合,建立了一种多速激光锁相热成像方法,用于评估金属中裂纹深度和角度信息,该方法适用于深度为0.5~3.5 mm的倾斜于试件表面的裂纹检测。Laureti等<sup>[21]</sup>开发了一种多频锁相热成像技术,即利用多频调制信号激励生热,结合锁相热成像技术显现缺陷信息。该方法的优点是,单次检测可以探测不同深度的缺陷信息,同时提取所有激励频率的幅度和相位特征。除此

之外,锁相热成像技术还被应用于各种缺陷类型的检测之中,展现其强大的检测能力。例如金属中夹杂物的面积以及所处深度的定量检测<sup>[22-23]</sup>、牙齿填充界面处微间隙的成像检测<sup>[24]</sup>、电子芯片中界面气泡的检测<sup>[25]</sup>、聚合物薄膜内纳米颗粒浓度的检测<sup>[26]</sup>以及聚合物电解质燃料电池中水分分布<sup>[27]</sup>等各种缺陷类型。

在红外锁相热成像技术中,由于相位信息比幅值信息更丰富,能够进一步改善信噪比,与材料的表面辐射发射率、环境条件及构件结构等无关,可获得更多的缺陷信息<sup>[4]</sup>。但由于该技术在单一调制频率热激励下仅能探测与其热扩散长度相对应深度的内部缺陷,对复合材料或热障涂层类结构内不同深度或不同铺层界面的缺陷,需选择不同调制频率对待测试件进行激励,因此,该方法检测时间仍相对较长且易出现漏检。

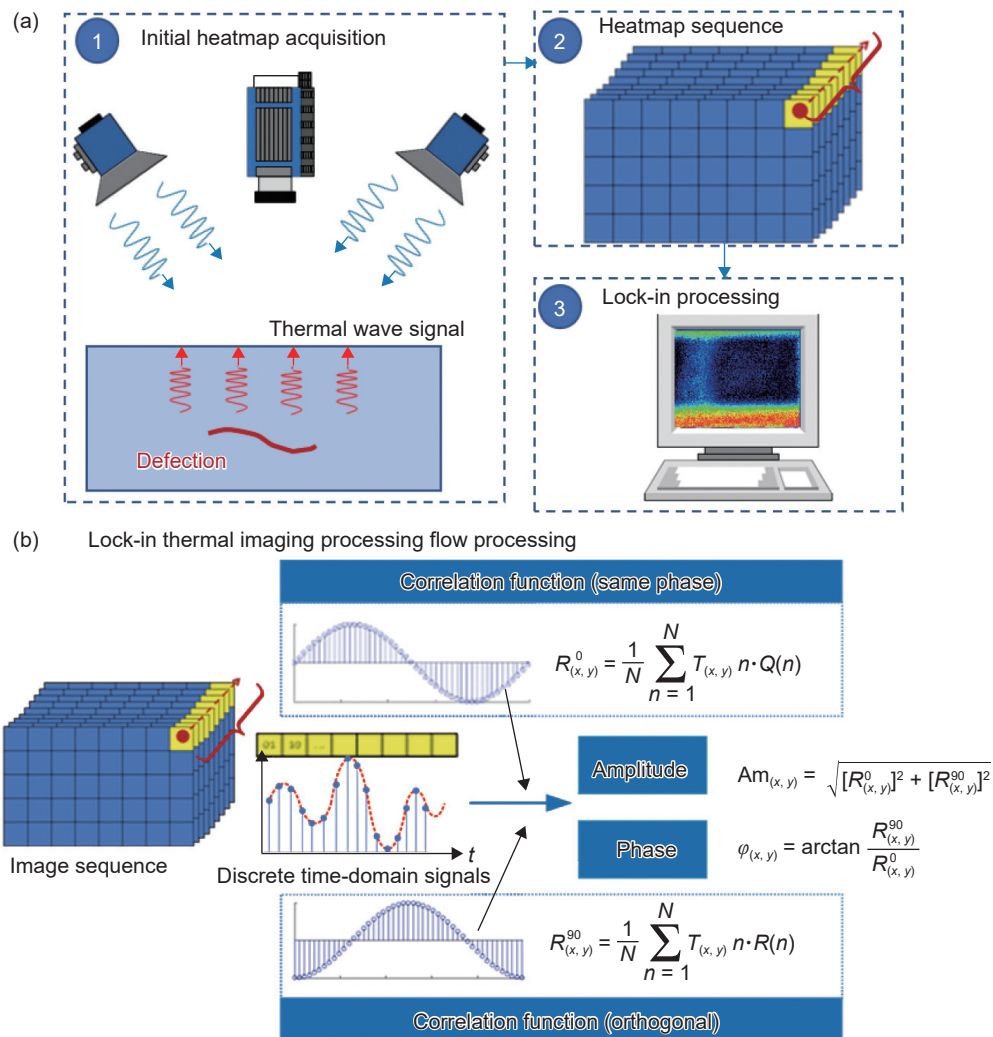


图3 红外锁相热波检测原理图 (a)数据处理流程;(b)算法原理  
Fig. 3 Schematic diagram of infrared phase-locked thermal wave detection technology (a) data processing flow; (b) algorithm principles

### 1.3 调频热波成像检测技术

调频激励的红外热波成像检测技术是一种基于调制热波信号处理的主动式红外热成像技术,能够弥补传统红外锁相热像检测的单一调制热波只能探测相应扩散深度缺陷的不足,可准确检测不同深度范围内的缺陷形貌信息<sup>[28]</sup>。与红外锁相热波

检测技术仅采用单一频率热流信号作为激励信号不同,调频热波成像检测技术的激励热流信号含有多个频率成分,具有更好的缺陷检测深度分辨率。根据所检测缺陷类型与尺寸不同,该技术可采用连续线性调频雷达与脉冲雷达等形式的热流加载方式。图4为调频热波成像的检测原理图。

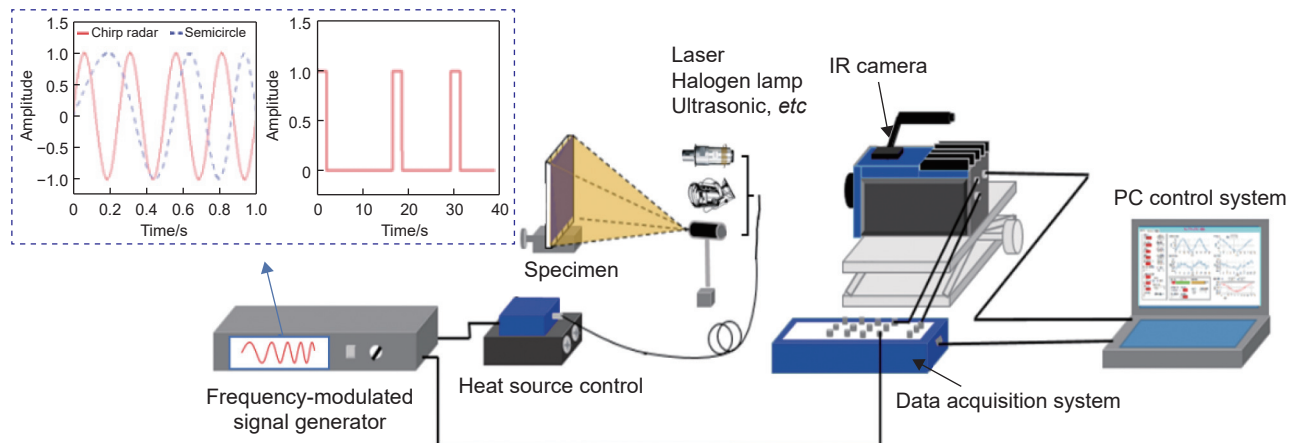


图4 调频热波成像检测技术原理图

Fig. 4 Schematic diagrams of FM thermal wave imaging detection technology

当采用光强按线性频率调制信号规律变换的热流对试件进行主动式热加载时,通过将红外热像仪采集到的热波信号与连续线性调频雷达信号进行互相关匹配滤波运算,获取热波信号的峰值与延迟信息。由于线性频率调频雷达信号具有较大的时宽带宽积,通过匹配滤波运算可以实现脉冲压缩的作用。因此,当采用连续线性调频雷达信号作为热加载信号时,可实现不同深度缺陷的一次性可靠检测<sup>[29-30]</sup>。脉冲雷达信号是连续线性调频雷达信号与脉冲信号进行卷积运算得到的一种信号形式。脉冲雷达信号将两者相结合,即保证了信号具有较大的可压缩性,同时又保证有较多的能量注入,从激励信号源上保证了此方法具有高信噪比特性<sup>[17]</sup>。

调频热波雷达成像技术因检测效率高、灵敏度高以及缺陷深度分辨率好而受到越来越多的关注。Gong等<sup>[31]</sup>研究了光学双向热波雷达成像对具有亚表面缺陷的GFRP层合板的检测可靠性,并比较了单一特征处理算法与融合特征处理算法的可靠性结果。Liu等<sup>[32]</sup>以激光作为热源,结合调频热波雷达成像建立激光激发啁啾脉冲光热雷达成像检测方法,并对GFRP层合板的裂纹缺陷进行检测,该方法可以检测识别宽度大于150 μm、深度小于2000 μm的GFRP表面裂纹。也有学者对传统的线性调频成像技术进行改进,形成了非线性调频

模式下的热波成像检测技术。Banda等<sup>[33]</sup>将非线性Log调频热波成像模式与线性调频下成像检测结果进行了对比。结果显示,非线性调频模式下,对CFRP试件平底口缺陷的检测信噪比更具优势,这主要是因为非线性频率调制在低频下提供具有更高能量的频率带。Hedayatrasa等<sup>[34]</sup>将频率和相位调制的概念相互耦合,提出了一种频率相位调制波形,以获得优化的激励信号代替传统线性调频。所建立的方法在缺陷可检测性以及对比度噪声方面优于传统线性调频热成像结果。Ahmad等<sup>[35]</sup>将独立成分分析与调频热波成像方法相结合,利用独立成分分析处理调频热波图像序列,对低碳钢亚表面平底孔缺陷进行识别。结果表明,该方法具有高深度分辨率和增强内部缺陷检测的能力,可以显著增强缺陷和非缺陷区域之间的对比度。上述研究现状表明,将调频热波成像检测技术与其他方法进行融合,是当前研究的一个热点方向。

值得注意的是,调频热波成像检测技术仍然具有局限性。首先,低调制频率激励源会带来热流横向扩散的影响,致使微小缺陷的漏检;另外,热流激励功率的提升可改善检测信噪比,但也会增加构件热损伤的风险。因此,针对不同的试件以及检测条件,寻找出最佳的调频区间以及激励强度是调频热波成像检测技术需要解决的关键问题之一。

#### 1.4 超声红外热波成像检测技术

超声红外热像技术是将超声波注入待检测对象,超声波传播到缺陷区域时,由于摩擦生热、塑性变形等因素,超声波具有的能量转化为热能,并以温度场的形式分布在试件表面,通过红外相机采集表面温度信息,对数据处理后即可判断被测对象内部或表面的缺陷信息<sup>[36]</sup>。超声红外热成像的系统组成主要包括红外相机、PC 机、超声激励系统和其他辅助设备,如图 5 所示。红外相机采集不同时刻的温度信息,PC 终端负责控制及数据处理,超声激

励系统包括超声电源和超声枪。

与其他主动红外热像检测技术相比,超声红外热像技术具有如下特点<sup>[37]</sup>:(1)可以忽略加热的不均匀性,即使被测对象几何结构复杂,也可获得很好的检测效果;(2)对于绝大部分固体,声波传到缺陷位置几乎是瞬时的,可以忽略声波的衰减,声波能够在距离激发源较远或较深的地方产生有效的激励,故超声激励可以对更深的内部分层或裂纹等进行热激励;(3)超声激励注入试件后只对缺陷加热,针对性强。

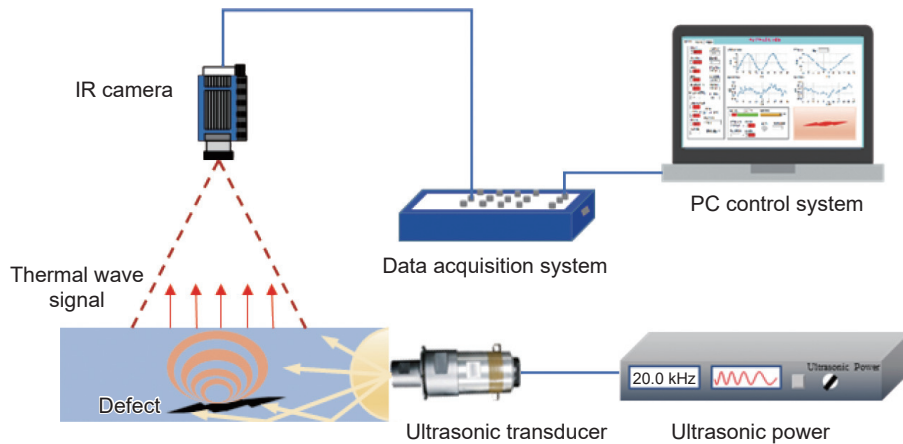


图 5 超声红外热波成像检测技术原理图

Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic infrared thermal wave imaging detection technology

超声红外热成像技术对包括复合材料、金属等在内的绝大部分材料都体现出了良好的适用性。Huang 等<sup>[38]</sup>通过改变正弦波的激励位置,研究了 CFRP 层合板中脱粘深度对检测结果的影响,证明了超声红外热成像技术可以有效检测 CFRP 复合板中直径 5 mm、深度为 1.5 mm 的分层缺陷。Tuo 等<sup>[39]</sup>通过红外相机在线监测表面温度变化,并且使用超声 C 扫描方法观察损伤演变,通过分析热图像、分层轮廓和刚度退化,建立了疲劳载荷下受冲击层合板的损伤演变和失效机制。Daryabor 等<sup>[40]</sup>对黏合到铝板上的碳/环氧树脂贴片进行超声波和热成像检测的图像融合,检测结果表明,图像融合后结果可以显著提高缺陷表征的精度和检测结果的可靠性。

目前,常见的超声红外热像检测系统存在以下不足:首先,超声枪的振动频率有限,无法产生特定的高频超声振动;其次,控制系统对超声枪的精准控制还有待提高;除此之外,对于脆性材料,如陶瓷,超声激励可能会加剧内部缺陷(如裂纹)的产生,而对于高弹性材料(如橡胶),超声激励热成像

检测方法并不适用。

#### 1.5 涡流红外热波成像检测技术

涡流红外热波成像检测利用电磁感应原理对金属材料试件加热,缺陷区域的电磁参数会发生变化,导致缺陷处和非缺陷处存在温度差异。借助红外相机记录不同时刻待测件表面的温度信息,并对红外热图像进行数据增强处理,获得缺陷形貌特征。涡流红外热波成像检测技术适用于导电材料的缺陷检测,易于实现管、棒、线材的高速、高效、自动化检测,尤其对于复杂遮挡结构的无损检测,涡流热成像法具有优势。涡流检测技术起初被应用于军用飞机蒙皮锈蚀等缺陷的无损检测<sup>[41]</sup>。Tu 等<sup>[42]</sup>基于涡流脉冲热成像并结合特征提取算法对高压线路中复合绝缘子内部的导电缺陷进行识别,并比较了不同特征提取算法的检测结果。研究发现,该方法可以提供一种可视化有效的方法来检测复合绝缘子内部的导电缺陷。针对钢材、CFRP 和环氧树脂的混合结构中的内部缺陷难以准确检测和清晰可视化问题,Xie 等<sup>[43]</sup>利用涡流脉冲热成像对混合结构进行感应加热,并构建了堆叠式

自动编码模型来提取像素级热特征,生成裂纹和脱粘缺陷的可视化图像。Yang等<sup>[44]</sup>通过在涡流脉冲热成像中引入互相关匹配滤波算法,提出了一种脉冲感应热波雷达无损检测方法,并将其应用于钢板中的裂纹缺陷和CFRP材料的分层缺陷检测。结果表明,所提出的方法在降低发射率变化和对近表面缺陷和内部分层的缺陷检测能力方面具有显著改善。也有学者在非导电材料表面加装一层临时感应加热层作为辅助发热组件,将涡流热成像无损检测技术应用于非导电材料的无损检测中,有效检测到GFRP层压板中的微小缺陷,但该方法的可推广性还未得到证实<sup>[45]</sup>。

涡流红外热波成像检测技术一般只适用于导电材料表面或亚表面缺陷的无损检测,这也是该方法的局限性之一。另外,针对尺寸较大的检测结构,该检测方法难以保证时效性,区分缺陷的类别及形貌特征的能力也有待提高。

### 1.6 红外热波层析成像检测技术

红外热波层析成像检测技术,主要采用脉冲雷达形式热流激励方式实现层析成像,该技术可以得到较好的检测深度分辨率与检测效果<sup>[46]</sup>。红外热波层析方法原理是对脉冲雷达热波信号进行特征提取时,通过改变参考信号的脉冲宽度与延迟特性实现不同深度的能量定位而实现层析成像。红外热波层析成像检测技术可以实现对被测试件的有效检测、量化评价及三维可视化成像,具有高探测深度、高效率、适用性广及高信噪比等优点。

目前红外热波层析成像检测技术主要用于缺陷形貌的三维重建。Peng等<sup>[47]</sup>将连续小波变换的动态热层析成像方法,应用在具有模拟平底孔缺陷的固体推进剂熔覆层,进行层析成像实验,实现了发动机固体推进剂熔覆层脱粘缺陷的三维重建。Dong等<sup>[48]</sup>建立了热波传递解析模型,深入分析了涂层厚度退化和基底材料对线性脉冲雷达热波信号演化的影响。通过使用双正交解调(DOD)算法获得热波信号的振幅与延迟时间用于深度采样层析成像。结果表明,C/C复合基底上涂覆的大于380 μm的SiC剥落损伤可以通过热波层析扫描方法进行识别。Risheh等<sup>[49]</sup>将计算机视觉技术与红外热波层析成像技术结合,通过K-means类聚算法以及Canny边缘检测算法,实现了钢材中内部孔洞和裂纹缺陷的三维形貌重建。由上述研究可知,基于红外热波的三维层析成像技术能够定量呈出缺陷的三维信息,对缺陷形貌的反映更加直观。

基于红外热波的层析技术根据其原理可分为,

数学模型解析法与扩散深度-时间对应关系法。数学模型解析法(如锁相层析成像)层析成像质量较大依赖于所建立模型的准确性,同时存在效率低的问题。深度-时间对应关系法(如动态热层析成像)是根据热扩散过程与时间存在特定关系,通过获取不同时刻的热图像进行层析重构,该方式容易收到热流横向扩散的影响。

### 1.7 红外热波成像检测技术的比较

不同模式的红外热波成像检测技术原理存在差异,具有各自的优势和不足,适用范围也不相同。表1展示了多种红外热波成像检测技术的对比情况。由表1的对比可以得到:

(1)脉冲红外热波成像检测技术作为最成熟的无损检测技术之一,适用于金属、非金属、纤维增强复合材料等的非接触大面积快速检测。该检测方法的不足之处主要体现在成像受深度限制,无法深入探测内部缺陷。此外,脉冲红外热波成像检测技术需要待测试件表面平坦且材料导热系数均匀。

(2)锁相红外热波成像的原理是通过周期性加热待测物体,利用锁相增强算法定位和识别缺陷。该方法的优点包括,周期性加热可以有效避免加热不均匀对检测结果的影响,相位检测不受试件表面发射率的影响,灵敏度高,抗干扰能力强,适用于深层缺陷的识别与定位。同时,周期性加热会导致检测时间加长,检测过程中需要处理幅值图和相位图,后续的数据处理较复杂,不同检测对象的激励频率选择也存在差异。

(3)调频热波成像检测利用频率可调的激励热源激发待测件,待测件表面温度信号与激励信号同频率变化。该方法具有高精度成像检测能力,能够检测出不同深度的缺陷信息,适用于多种材料、多种尺度的缺陷检测。数据处理量大,检测耗时以及检测设备复杂是应用该方法需要考虑的问题。

(4)超声红外热波成像检测技术将超声振动注入待测件,通过超声波在缺陷处的能量变化间接反映缺陷信息。该检测方法不受待测件几何结构的影响,具有高的灵敏度和检测分辨率,适用于微小尺寸和复杂结构的缺陷检测,并且易于实现自动化和实时观察。该方法依赖于材料的声学特性,对于一些脆性的试件,外部超声注入时增加了试件损伤的风险。

(5)涡流红外热波成像检测方法利用电磁感应对待测件进行加热,可实现对导电材料表面及近表面缺陷的快速检测,对外界的热干扰不明显。该技

表 1 不同模式红外热波成像检测技术的对比  
Table 1 Comparison of infrared thermal wave imaging detection technologies with different modes

Imaging technique	Excitation method	Advantage	Disadvantage	Applicable scenario
Pulsed thermography	Short-duration, high-energy pulse	High resolution, rapid inspection, sensitive to near-surface defects	Limited capability for deep defect detection, influenced by material thermal conductivity	Surface defect detection in aerospace, automotive industries
Lock-in thermography	Periodically modulated heat source	High signal-to-noise ratio, suitable for deep defects, strong anti-interference capability	Slow inspection speed, complex equipment, demanding on modulation frequency selection	Deep defect detection, delamination inspection in composites
Frequency-modulated thermography	Frequency-varying modulated heat source	Broadband excitation, high signal-to-noise ratio, multi-scale defect detection	Complex data processing, high equipment cost	Multi-scale defect detection in layered materials, complex structures
Ultrasonic infrared thermography	Ultrasonic excitation	Non-contact, suitable for micro-defects and complex structures	Dependent on material acoustic properties, limited deep defect detection capability	Micro-crack detection, weld inspection, composite material testing
Eddy current pulsed thermography	Eddy current excitation	Suitable for conductive materials, sensitive to surface/subsurface defects	Only applicable to conductive materials, limited deep defect detection capability	Surface crack detection, corrosion inspection in metallic materials
Thermal wave tomography	Multi-angle heat source excitation	Providing 3D defect information, suitable for complex internal structures	Complex equipment, large data processing load, slow inspection speed	Internal structure inspection, 3D defect characterization in complex components

术对深层缺陷的检测能力有限,同时不适用于非金属以及复合材料的缺陷检测。

(6)红外热波层析成像是通过延时检测,依次叠加不同时刻的缺陷检测结果,最终获得缺陷的三维形貌,该技术的主要优势是高分辨率准确成像,对缺陷的检测更加快速、直观,适合复杂内部结构的检测。数据处理量大,检测速度慢是该技术的一个缺点。

## 2 红外热波成像在航空航天领域的应用

不同材料的检测试件,其加工方式存在差异,存在的缺陷类型也不相同。例如,碳纤维层合板是多层结构压实贴合形成的,往往存在层结构之间的脱粘,金属材料由于成形过程中施加外部载荷,易于形成内部裂纹,而涂层材料在喷涂过程中,涂层厚度的均匀性也会出现偏差。

### 2.1 涂层材料红外热波成像检测应用

涂层材料广泛应用于航空、航天等领域,包括热障涂层、耐磨涂层、防冰涂层等。对涂层材料进行无损检测,既要避免对结构造成损伤,又要保证检测效果,目前的检测方法仍以光激励下的红外热波成像检测为主。该方法可以实现大面积涂层结构的快速检测。

涂层材料的红外热波成像无损检测,主要集中在

在涂层不均匀厚度的定量检测。主要研究思路是,建立涂层厚度与热播信号之间的关联,再利用特征提取算法对涂层材料的红外热波信号进行特征提取,利用提取特征反映涂层厚度的不均匀性。Ma 等<sup>[50]</sup>提出了一种基于光热成像无损方法来测量热障涂层的厚度,首先在外部激励情况下,获得不同厚度涂层的热波信号,并将其与理论值进行最小二乘拟合,以确定涂层材料的厚度及热参数。Unnikrishnakurup 等<sup>[51]</sup>使用脉冲红外热成像和太赫兹时域光谱技术对热障涂层厚度退化进行无损评估,并比较了两种方法的检测结果,证明了脉冲红外热成像方法在对不均匀厚度识别上的准确性。Zhang 等<sup>[52]</sup>在锁相热成像的基础上,基于数值分析建立了涂层厚度与相位之间的关系,结果表明,锁相热成像方法可以测量和校准涂层的厚度,且检测的准确率可达 95%。Huang 等<sup>[53]</sup>采用激光诱导超声技术对热障涂层进行检测,利用频谱分析和小波变换研究了表面超声波传播规律以及涂层厚度对激光诱导表面声波的影响。Song 等<sup>[54]</sup>研究指出,以激光为外部激励源的热波成像方法可以成功地用于评估 C/C 复合衬底上薄 SiC 涂层厚度分布均匀性。100 Hz 的高频激励对于评估 20~30  $\mu\text{m}$  不均匀的薄 SiC 涂层厚度更有效,20 Hz 的调制频率可用于估计 150  $\mu\text{m}$  厚的 SiC 涂层的均匀性。此外,该方法还可以检测 SiC 涂层底面附近约

160~180  $\mu\text{m}$  的孔缺陷。Shrestha 等<sup>[55]</sup> 分别利用脉冲红外热成像和锁相红外热成像进行涂层检测厚度的比较,得到脉冲红外热成像检测速度更快、结果更准确的结论。在此基础上,分析了激励频率对涂层厚度检测的影响,Tang 等<sup>[56]</sup> 构建了涂层结构中脉冲热波传导的三维模型,并利用脉冲红外热成像方法对不均匀厚度的热障涂层进行检测。结果表明,脉冲能量的提高可以改善检测涂层厚度的分辨率;增加采样频率可以提高热图对比度,但当采样频率增加到一定值时,最大对比度几乎没有变化;随着采样时间的增加,对比度先增大后逐渐减小。对涂层材料存在的其他类型缺陷,例如内部脱粘、涂层裂纹等,目前也是研究的热点问题之一。Wang 等<sup>[57-58]</sup> 的研究中,开发了一种结合最小二乘回归和小波变换的特征提取算法,实现了多模态光学激发脉冲热成像,该技术可以提高固体推进剂火箭发动机推进剂/熔覆层界面脱粘缺陷的缺陷可探测性和深度分辨率动态范围。Guo 等<sup>[59]</sup> 将涂层裂纹和基体裂纹在超声振动激发下被视为位于不同深度的热源,从理论上引入涂层裂纹和基体裂纹发出的热波相干干涉,并以混合热波在表面的相位偏差作为对更深热源的判别特征,从而识别基体裂纹。

涂层材料的红外热波成像检测主要包括涂层厚度不均匀性检测和涂层结构不完整性检测两个方面。对涂层材料进行缺陷检测可以及时发现并处理缺陷,保障零部件质量,提升航天产品的安全性能。

## 2.2 复合材料红外热波成像检测应用

复合材料由于质量轻、强度高、耐腐蚀等优势,已被越来越多地应用在航空、航天等领域,并逐渐取代了传统的金属材料。复合材料的生产或加工中往往产生不可控制的缺陷,例如内部脱粘、扭曲、裂纹等。因此,存在多种针对复合材料的无损检测方法,其中利用红外热波成像方法对碳纤维复合材料内部缺陷进行检测是研究最广泛的热点之一。Yang 等<sup>[60]</sup> 以碳纤维增强聚合物制成的无人机机翼框架部件为检测对象,利用超声换能器激发热源,对冲击损伤形式长度、宽度、面积和周长进行定量检测。提出利用少量热像进行时域和时域方法的缺陷合并算法,解决了热像中缺陷的不连续性和畸变性问题,提高定量评估的准确性。Liu 等<sup>[61]</sup> 在脉冲热成像技术用于检测 CFRP 内部缺陷的过程中,首先将特征图像划分为缺陷信号区域和非均匀背景区域,通过用高斯卷积估计不均匀

的背景噪声,之后基于图像直方图分布的自适应阈值机制放大缺陷与其背景之间的对比度,实验结果表明,该方法可以提高检测图像的对比度和信噪比。Meng 等<sup>[62]</sup> 研究引入瞬时氙灯诱导啁啾脉冲雷达热成像技术,对硅/酚醛复合材料进行表面裂纹检测,分析氙灯功率、激发频率、参考脉冲宽度或脉冲时间、参考信号延迟时间等参数对检测结果影响的内在机理。

在复合材料的检测进程中,热波成像检测方法与人工智能方法相结合,提高了缺陷检测的智能化程度。在 Wei 等<sup>[63]</sup> 的研究中,以包含不同深度和大小缺陷的碳纤维增强聚合物层压板为检测对象,利用锁相热成像技术获得不同激发频率下的相位图,开发一种无监督的编码器-解码器的深度学习网络,它结合密集的连接和残差模块,将这些相位图像融合成一个包含不同深度缺陷的单一图像。该方法在厚度为 5 mm 的样品中可以清楚地观察到深度为 4.25 mm 的缺陷。Vesala 等<sup>[64]</sup> 利用二次线性啁啾调制信号激发卤素灯光源,对碳纤维和玻璃纤维增强聚合物 CFRP 和 GFRP 进行正方形、三角形以及矩形等不同形状预埋缺陷的无损检测,将获得的信号热图进行深度学习训练,建立一种基于卷积神经网络和局部异常因子相结合的复合材料缺陷异常检测模型。Yagdjian 等<sup>[65]</sup> 选取碳纤维和环氧树脂作为基体,添加塑料、铝以及铜片模拟典型航空航天面板。基于建立的多层材料的热波扩散模型,为机器学习程序提供数据训练集。该研究的主要结果是确定脉冲红外热波成像的实验数据与多层材料的热波扩散模型预测之间的可靠相关性,从而能够使用模拟数据进行机器学习训练。

随着复合材料的不断发展,近年来,航空航天材料正逐渐从金属材料向以纤维增强塑料为主的复合材料和其他先进材料转变,以 CFRP、GFRP 等为代表的复合材料在航空航天飞行器中的应用比例不断提高。红外热波成像无损检测技术用于检测复合材料内部或表面缺陷,已经成为保障航空航天活动顺利进行的重要环节。

## 2.3 金属材料红外热波成像检测应用

金属材料在航空航天领域的应用非常广泛,主要包括铝合金,不锈钢等。这些金属材料因其优异的力学性能、耐腐蚀性能和耐高温性能,在航空航天器的设计和制造中发挥重要作用。在金属材料的质量检测方面,红外热波检测技术被广泛应用于识别裂纹缺陷、检测复杂结构中的脱粘问题,并可辅助评估材料的力学性能。

Ul Islam 等<sup>[66]</sup>考虑了飞机机身结构中铆钉的两种常见缺陷,即松动和次表面裂纹,提出一种采用锁相热成像的方案,实现铆钉缺陷的检测与识别。在Chen 等<sup>[67]</sup>的研究中,利用激光红外热成像技术获得原始热图,实现不锈钢裂纹位置的确定,之后通过粒子群优化算法选择温度特征,通过贝叶斯搜索方法优化支持向量机和 $k$ 最近邻的超参数,实现裂纹尺寸与深度的准确识别。结果表明,裂纹深度识别的误差不超过10%。刘涛等<sup>[68]</sup>以含有脱粘缺陷的铝蜂窝板为检测对象,采用脉冲红外热成像检测方法实现铝蜂窝板的缺陷无损检测。研究发现理论分析与实验结果一致,缺陷直径越大,缺陷深度越深,检测效果就越明显。在Zhu 等<sup>[69]</sup>的研究中,采用一种基于多项式拟合的温度重建算法,对脉冲热成像方法进行改进,检测不锈钢样品中的平底孔缺陷,与原始热图相比,改进的脉冲热成像方法将信噪比提高80.92%。Ahmad 等<sup>[35]</sup>利用了一种非平稳热波成像技术,即调频热波成像技术,检测带有不同深度平底圆孔的低碳钢样品亚表面缺陷。通过独立成分分析技术处理原始红外图像序列,并与主成分分析方法、相位分析方法的结果进行比较。结果表明,独立成分分析方法具有出色抗噪能力,可以提取内部缺陷信息,并显著增强

缺陷和非缺陷区域之间的对比度。

在金属材料加载过程中,还可以利用红外热波成像原理测量金属材料的力学性能。宦惠庭<sup>[70]</sup>将激光诱导红外热成像技术应用在材料的强度检测,通过建立应变与工件热参数的函数关系完成对航空铝合金材料力学强度的量化。Zu 等<sup>[71]</sup>的研究中,基于涡流热成像原理构建铝合金材料的应力检测理论模型,推导温度变化与应力之间的表达式,建立一种基于时间-温度-应力分布的应力检测方法。哈尔滨工业大学刘俊岩等对锁相算法的原理进行研究,并将其与红外热波成像技术相结合,建立红外锁相热成像方法,并开展实验研究工作<sup>[72-80]</sup>。典型应用包括,红外锁相法热波检测技术对军用飞机的起落架进行检测,检测结果如图6(a)所示,损伤处的幅值和相位明显发生变化。研究发现,红外锁相热波检测的相位图能够准确地确定缺陷特征,采用该方法能够快速准确地识别出军用飞机前缘起落架的损伤位置<sup>[72]</sup>。红外锁相热波检测技术可应用于在役飞机蒙皮进行原位检测。图6(b)为飞机蒙皮原位检测实验系统以及蒙皮裂纹和腐蚀缺陷的检测结果。结果表明,采用红外热波检测技术能够快速准确地检测飞机蒙皮的损伤,为在役飞机原位维修检测提供了新途径<sup>[72]</sup>。

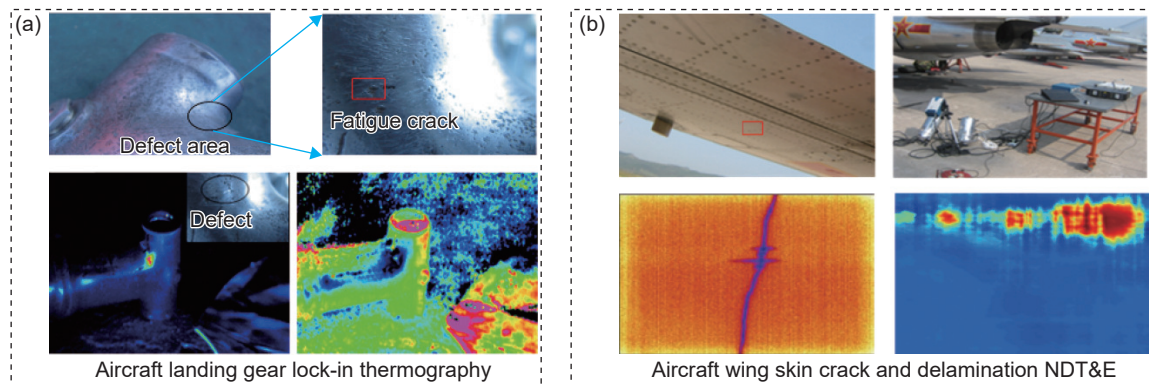


图6 红外热波成像缺陷检测的应用<sup>[72]</sup> (a)飞机起落架红外锁相热波检测结果;(b)飞机蒙皮原位检测

Fig. 6 Application of infrared thermal wave imaging defect detection<sup>[72]</sup> (a)infrared phase-locked thermal wave detection results of aircraft landing gear; (b)*in-situ* detection of aircraft skin

在金属结构中,裂纹等损伤机制通常始于缺陷或应力集中,然后在疲劳载荷下扩展,直至最终失效。大多数金属都具有延性失效机制,结构超载和灾难性故障之间通常会有一个警告期。因此,可以通过红外热成像技术对金属材料的力学性能参数进行测定,从而反映出金属材料的塑性变形。另外,如果缺陷已经产生,红外热波成像检测技术也可以直接检测缺陷信息。

### 3 结束语

红外热成像无损检测技术是一种集合光学、热学、机械与电子技术等学科的一种综合性无损检测技术,具备高效、检测区域大、非接触式等优点,既可用于产品生产过程中的质量监测,也可作为判定产品使用过程中是否失效的有效手段。该技术已在航空、航天材料的无损检测中取得了广泛的

应用,但其仍然面临着—系列的挑战:

首先,随着材料种类的多元化、结构的复杂化以及缺陷类型的多样化,对红外热波成像检测方法提出更加精准、高效的需求。新材料的不断发展以及复杂结构件越来越多地被应用在航空航天领域,传统红外热波无损检测技术难以满足检测需求,开发多模式红外热波检测方法,以适应新型材料特性以及复杂结构件的高效、精准的无损检测是当前面临的一项重要挑战。

其次,随着卫星网络、人工智能、微电子等技术的发展,红外热波成像检测技术也将逐渐实现网络化、智能化和微型化,为远距离实时便携检测创造可能。现有红外热波无损检测系统一般包括激励、红外图像收集、系统控制与数据处理模块,系统整体的便携性差,难以满足航空航天领域中原位探测的实际需求。除此之外,缺陷的识别与判定依靠检测者主观判定,当需要短时间内快速检测出多组缺陷数据时,单依靠人为主观判断难以实现。

最后,不同检测方法的相互结合也成为红外热波成像检测在航空航天领域应用发展的一个方向。例如,将红外热成像、激光超声、微波检测等技术进行集成,实现优势互补,提升检测的精度和效率。

针对红外热波成像检测技术在航空航天领域的应用现状,结合各类无损检测技术、数据融合方法以及人工智能技术的最新研究成果,对其未来可能的发展方向进行展望:

### (1)模式多样化

不同模式的红外热波成像检测技术有着各自的优势和适用范围。面对待测对象及检测需求的复杂多变,检测技术也应具有多元化的发展趋势。在激励热源方面,由传统的超声、热风、磁涡流等,向调频超声、阵列激光器等更复杂的激励源转变;在成像技术方面,新的检测成像方式,如雷达热波成像、相控阵激光束激励热成像等有望成为新的发展方向。

### (2)智能便携化

随着人工智能技术被应用在红外热成像检测领域,特别是基于深度学习模型的红外目标检测与识别,使得红外热成像无损检测技术与人工智能相结合成为未来发展的一个方向。通过对缺陷信息的智能检测与精准识别,红外热成像检测技术有望实现从人工判断到智能化检测的转变。另外,为了达到原位测量和便携性的实际需求,检测系统的智能化、微型化将会是未来的发展趋势。

### (3)信息融合化

与单一模式成像数据相比,多模式检测数据融合对缺陷信息的反映更加全面,有利于提升检测结果的鲁棒性。在检测精度要求较高的情况下,需要通过多模态数据的融合,结合多种检测方法,提供最佳的无损检测解决方案。因此,基于多源信息融合的红外热波成像检测技术也是未来发展的方向之一。

### 参考文献:

- [1] WANG F, SHENG J, SFARRA S, et al. Multimode infrared thermal-wave imaging in non-destructive testing and evaluation (NDT&E): physical principles, modulated waveform, and excitation heat source[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 135: 104993.
- [2] 唐庆菊,刘元林,梅晨,等.一种基于 Retinex-分水岭-Canny 算子的红外图像边缘检测方法:CN201610624413.6[P]. 2019-01-04.  
TANG Q J, LIU Y L, MEI C, et al. A infrared image edge detection method based on Retinex watershed Canny operator: CN201610624413.6[P]. 2019-01-04.
- [3] 郑凯,江海军,陈力.红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J].*红外技术*, 2018, 40(5): 401-411.  
ZHENG K, JIANG H J, CHEN L. Infrared thermography NDT and its development[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(5): 401-411.
- [4] 王扬,李科,刘俊岩. CFRP 复合材料层板缺陷的红外热波成像检测方法[J].*航空制造技术*, 2016, 56(4): 36-42.  
WANG Y, LI K, LIU J Y. Nondestructive testing and evaluation(NDT & E) for CFRP laminate with subsurface defects using infrared thermal wave imaging[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 56(4): 36-42.
- [5] ALMOND D P, LAU S K. Edge effects and a method of defect sizing for transient thermography[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(25): 3369-3371.
- [6] MALDAGUE X, MARINETTI S. Pulse phase infrared thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(5): 2694-2698.
- [7] LUDWIG N, TERUZZI P. Heat losses and 3D diffusion phenomena for defect sizing procedures in video pulse thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3/5): 297-301.
- [8] MALDAGUE X, ZIADI A, KLEIN M. Double pulse infrared thermography[J]. *NDT & E International*, 2004, 37(7): 559-564.
- [9] ALMOND D P, PICKERING S G. An analytical study of

- the pulsed thermography defect detection limit[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(9): 093510.
- [10] 钟佳岑, 徐浩军, 魏小龙, 等. GFRP 层压板脱黏缺陷的红外脉冲热波成像检测[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(4): 47-54.  
ZHONG J C, XU H J, WEI X L, et al. Detection of unbounded defects in GFRP laminates by infrared pulse thermal wave imaging[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(4): 47-54.
- [11] 王飞. CFRP 复合材料缺陷的红外雷达热波成像与层析检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
WANG F. Research on infrared radar thermal wave imaging and tomography for detection of defects in CFRP composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [12] 彭伟. 药柱包覆层缺陷红外脉冲成像及动态层析检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
PENG W. Research on the inspection of explosive coated adhesive layer defect using infrared pulsed thermography and dynamic tomogram[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [13] 王飞, 史倩竹, 高明宇, 等. C/GFRP 层板冲击损伤红外脉冲雷达热波成像检测技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 78-85.  
WANG F, SHI Q Z, GAO M Y, et al. The impact damage detection of C/GFRP laminate using infrared chirp-pulsed radar thermography[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(2): 78-85.
- [14] PANAHANDI S, MAY D, GROSSE-KOCKERT C, et al. Pulsed infrared thermal imaging as inline quality assessment tool[J]. *Microelectronics Reliability*, 2023, 142: 114910.
- [15] PAWAR S S, VAVILOV V P. Applying the heat conduction-based 3D normalization and thermal tomography to pulsed infrared thermography for defect characterization in composite materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 94: 56-65.
- [16] WANG F, WU L J, WANG X C, et al. Accurate identification and detection of occlusal/smooth early caries using thermal-wave radar imaging (TWRI) technique under low temperature rising condition[J]. *Measurement*, 2022, 188: 110517.
- [17] 李建存. 基于超声波焊接技术的 C<sub>f</sub>/PA6 复合材料、6061 铝合金粘接接头的质量检测与修复[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
LI J C. The inspection and repair of discrepancy bonded joints of C<sub>f</sub>/PA6 composite and AA6061 based on ultrasonic welding technology[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [18] BUSSE G, WU D, KARPEN W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(8): 3962-3965.
- [19] MATARRESE T, MARANI R, PALUMBO D, et al. Influence of lock-in thermography set-up parameters on the capability of a temporal convolutional neural network to characterize defects in a CFRP[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 182: 108455.
- [20] BOUÉ C, HOLÉ S. Depth and angle evaluations of oblique linear cracks in metal using multi-speed laser lock-in thermography method[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 142: 105515.
- [21] LAURETI S, BISON P, FERRARINI G, et al. Simultaneous multi-frequency lock-in thermography: a new flexible and effective active thermography scheme[J]. *NDT & E International*, 2024, 146: 103144.
- [22] MENDIOROZ A, PÉREZ-ARBULU J, SALAZAR A. Sizing horizontal metallic inclusions in insulators using lock-in inductive infrared thermography[J]. *NDT & E International*, 2024, 145: 103139.
- [23] ZHAO H X, ZHOU Z G, FAN J, et al. Application of lock-in thermography for the inspection of disbonds in titanium alloy honeycomb sandwich structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 69-78.
- [24] STREZA M, BELEAN B, HODISAN I, et al. Improving lock-in thermography detection of microgaps located at the tooth-filling interface using a phase *versus* amplitude image signal extraction approach[J]. *Measurement*, 2017, 104: 21-28.
- [25] XIONG M M, HUANG Y F, QIN Q, et al. Transmissive laser lock-in thermography for highly sensitive and online imaging of real interfacial bubbles in wafer bonding[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 134: 104903.
- [26] MIRABELLO G, STEINMETZ L, GEERS C, et al. Quantification of nanoparticles' concentration inside polymer films using lock-in thermography[J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(11): 2963-2972.
- [27] RASHA L, CHO J I S, NEVILLE T P, et al. Water distribution mapping in polymer electrolyte fuel cells using lock-in thermography[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 440: 227160.
- [28] 刘俊岩, 刘勋, 王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1416-1422.  
LIU J Y, LIU X, WANG Y. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1416-1422.
- [29] LAURETI S, SILIPIGNI G, SENNI L, et al. Comparative study between linear and non-linear frequency-modulated pulse-compression thermography[J]. *Applied*

- Optics*, 2018, 57(18): 32-39.
- [30] WANG F, LIU J Y, MOHUMMAD O, et al. Experimental study on GFRP surface cracks detection using truncated-correlation photothermal coherence tomography[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39(4): 49.
- [31] GONG J L, LIU J Y, YU Y T, et al. Multi-characteristic combination based reliability enhancement of optical bidirectional thermal wave radar imaging for GFRP laminates with subsurface defects[J]. *NDT&E International*, 2021, 119: 102415.
- [32] LIU J Y, DONG B Y, WANG F, et al. Study on cracks defect inspection for GFRP laminates using laser excitation chirp pulsed photothermal radar imaging (CP-PRI) [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 114: 103689.
- [33] BANDA S S, GHALI V S, VESALA G T, et al. Non-linear frequency modulated thermal wave imaging for subsurface analysis[J]. *Infrared Physics&Technology*, 2024, 138: 105248.
- [34] HEDAYATRASA S, POELMAN G, SEGERS J, et al. On the application of an optimized frequency-phase modulated waveform for enhanced infrared thermal wave radar imaging of composites[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138: 106411.
- [35] AHMAD J, AKULA A, MULAVEESALA R, et al. An independent component analysis based approach for frequency modulated thermal wave imaging for subsurface defect detection in steel sample[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 45-54.
- [36] 林丽, 刘新, 朱俊臻, 等. 基于卷积神经网络的超声红外热图像分类[J]. *红外技术*, 2021, 43(5): 496-501.  
LIN L, LIU X, ZHU J Z, et al. Classification of ultrasonic infrared thermal images using a convolutional neural network[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(5): 496-501.
- [37] 冯辅周, 张超省, 江鹏程, 等. 基于超声红外热像技术的装甲装备缺陷检测系统的设计与实现[J]. *光电子技术*, 2012, 32(3): 170-174.  
FENG F Z, ZHANG C S, JIANG P C, et al. Design and implement of defect detection system for armored equipments based on ultrasonic infrared thermography[J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(3): 170-174.
- [38] HUANG J K, WEI Q, ZHUO L J, et al. Detection and quantification of artificial delaminations in CFRP composites using ultrasonic thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 130: 104579.
- [39] TUO H L, WU T, LU Z X, et al. Evaluation of damage evolution of impacted composite laminates under fatigue loadings by infrared thermography and ultrasonic methods[J]. *Polymer Testing*, 2021, 93: 106869.
- [40] DARYABOR P, SAFIZADEH M S. Image fusion of ultrasonic and thermographic inspection of carbon/epoxy patches bonded to an aluminum plate[J]. *NDT & E International*, 2017, 90: 1-10.
- [41] MOULDER J C, BIEBER J A. Pulsed eddy-current measurements of corrosion and cracking in aging aircraft[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 1997, 503(1): 263-268.
- [42] TU Y X, MEI H W, LIU L S, et al. Transient thermal pattern separation and detection of conductive defects in composite insulators using eddy current pulsed thermography[J]. *NDT & E International*, 2022, 129: 102653.
- [43] XIE J, XU C H, WU C W, et al. Visualization of defects in CFRP-reinforced steel structures using improved eddy current pulsed thermography[J]. *Automation in Construction*, 2023, 145: 104643.
- [44] YANG R Z, HE Y Z. Pulsed inductive thermal wave radar (PI-TWR) using cross correlation matched filtering in eddy current thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 469-474.
- [45] LIU R, XU C H, LIU P Q, et al. Eddy current pulsed thermography with an inductive heating layer (ECPT-IHL) for subsurface defect detection in GFRP materials [J]. *Composites Part B*, 2025, 290: 111982.
- [46] KAIPLAVIL S, MANDELIS A, WANG X D, et al. Photothermal tomography for the functional and structural evaluation, and early mineral loss monitoring in bones [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(8): 2488-2502.
- [47] PENG W, WANG F, MENG X L, et al. Dynamic thermal tomography based on continuous wavelet transform for debonding detection of the high silicon oxygen phenolic resin cladding layer[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 115-121.
- [48] DONG B Y, WANG F, SONG P, et al. Detection on the coating peeling of SiC coated C/C composites using infrared thermal-wave tomography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 114: 103642.
- [49] RISHEH A, TAVAKOLIAN P, MELINKOV A, et al. Infrared computer vision in non-destructive imaging: sharp delineation of subsurface defect boundaries in enhanced truncated correlation photothermal coherence tomography images using K-means clustering[J]. *NDT & E International*, 2022, 125: 102568.
- [50] MA Y J, XU W Y, QI J R, et al. Photothermal measurement of material properties for translucent thermal barrier coatings[J]. *NDT & E International*, 2024, 148: 103245.
- [51] UNNIKISHNAKURUP S, DASH J, RAY S, et al. Non-destructive evaluation of thermal barrier coating thickness degradation using pulsed IR thermography and THz-TDS measurements: a comparative study[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102367.

- [52] ZHANG J Y, MENG X B, MA Y C. A new measurement method of coatings thickness based on lock-in thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 655-660.
- [53] HUANG Y, LI B, CHEN L, et al. Influence of top-coat thickness of thermal barrier coating on time-frequency domain and dispersion characteristics of laser-induced surface acoustic wave[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 203: 109230.
- [54] SONG P, XIAO P, LIU J Y, et al. The inspection of coating thickness uniformity of SiC-coated carbon-carbon (C/C) composites by laser-induced thermal-wave imaging[J]. *Carbon*, 2019, 147: 348-356.
- [55] 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.
- [56] TANG Q J, LIU J Y, DAI J M, et al. Theoretical and experimental study on thermal barrier coating (TBC) uneven thickness detection using pulsed infrared thermography technology[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 770-775.
- [57] WANG F, LIU J Y, SONG P, et al. Multimodal optical excitation pulsed thermography: enhanced recognize debonding defects of the solid propellant rocket motor cladding layer[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163: 108164.
- [58] WANG F, LIU J Y, DONG B Y, et al. Blind image separation for the debonding defects recognition of the solid propellant rocket motor cladding layer using pulse thermography[J]. *Measurement*, 2021, 174: 108997.
- [59] GUO W, DONG L H, WANG H D, et al. Discriminate the substrate crack under sprayed coatings using ultrasonic infrared thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103073.
- [60] YANG B, HUANG Y D, CHENG L. Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 166-173.
- [61] LIU W, ZHAO P W, ZHAO Y B, et al. A reflectance-correction retinex framework for thermal image enhancement in nondestructive defect detection of CFRP[J]. *Measurement*, 2024, 237: 115070.
- [62] MENG X L, WANG F, LIANG Z P, et al. Research on the detection of silica/phenolic composite surface cracks using instantaneous high-power xenon lamp-induced chirp-pulsed radar thermography[J]. *Measurement*, 2023, 209: 112494.
- [63] WEI Y J, XIAO Y, GU X H, et al. The fusion of lock-in phase images for the damage investigation in composites materials[J]. *NDT & E International*, 2024, 146: 103159.
- [64] VESALA G T, GHALI V S, SASTRY D V A R, et al. Deep anomaly detection model for composite inspection in quadratic frequency modulated thermal wave imaging [J]. *NDT & E International*, 2022, 132: 102710.
- [65] YAGDJIAN H, GURKA M. One-dimensional N-layer thermal modelling for effective machine learning training data generation for nondestructive testing of composite parts with infrared thermography[J]. *Composites Part B*, 2025, 288: 111902.
- [66] UL ISLAM Z, KHAN H A, QURESHI Z A, et al. Towards diagnostics of aerospace structural defects using a novel physics-based post-processing scheme employing lock-in thermography[J]. *Measurement*, 2025, 241: 115645.
- [67] CHEN H Z, ZHANG Z J, YIN W L, et al. Shape characterization and depth recognition of metal cracks based on laser infrared thermography and machine learning[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 122083.
- [68] 刘涛, 赵博, 曹文萍, 等. 铝蜂窝板缺陷的脉冲红外热成像检测[J]. *机械工程师*, 2020(6): 14-16.
- LIU T, ZHAO B, CAO W P, et al. Detection of defects in aluminum honeycomb by pulse infrared thermography[J]. *Mechanical Engineer*, 2020(6): 14-16.
- [69] ZHU P F, WU D, QIAN L. Detection of defects in metallic materials using an improved post-processing method of pulsed thermography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106927.
- [70] 宦惠庭. 激光诱导超声和辐射量热技术的航空金属材料强度研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- HUAN H T. Non-destructive testing of mechanical strength of aerospace alloy by laser induced ultrasound and thermal infrared radiometry[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [71] ZU R L, YANG Y, HUANG X F, et al. A stress detection method for metal components based on eddy current thermography[J]. *NDT & E International*, 2023, 133: 102762.
- [72] 刘俊岩, 刘慧, 王扬. 红外锁相法热波无损检测技术及应用[C]/第十一届全国无损检测新技术交流会论文集. 上海: 中国机械工程学会, 2009:1-14.
- LIU J Y, LIU H, WANG Y. Infrared lock-in thermal wave non-destructive testing technology and application [C]//Proceedings of the 11th National New Non destructive Testing Technology Exchange Conference. Shanghai: Chinese Society of Mechanical Engineering, 2009:1-14
- [73] 王飞, 岳卓言, 刘俊岩, 等. 碳环氧蒙皮铝蜂窝夹心结构缺陷红外热波成像检测研究[J]. *航天制造技术*,

- 2022(3): 6-11.  
WANG F, YUE Z Y, LIU J Y, et al. Research on defects detection of carbon/epoxy skinned aluminum honeycomb sandwich structure using infrared thermal-wave imaging[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022(3): 6-11.
- [74] 龚金龙, 盖志刚, 解维浩, 等. CFRP层板缺陷红外热波雷达成像检测概率研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1004005.  
GONG J L, GAI Z G, XIE W H, et al. Study on probability of detection for CFRP laminate defect using infrared thermal wave radar imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1004005.
- [75] 秦雷, 刘俊岩, 龚金龙, 等. 超声红外锁相热像技术检测金属板材表面裂纹[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1123-1130.  
QIN L, LIU J Y, GONG J L, et al. Testing surface crack defects of sheet metal with ultrasonic lock-in thermography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1123-1130.
- [76] 李萌, 李旭东, 张辉, 等. 基于锁相红外热成像技术对铝合金铆接结构件疲劳极限的快速测定[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 28-33.  
LI M, LI X D, ZHANG H, et al. Rapid determination of the fatigue limit of aluminum alloy riveted component based on lock-in infrared thermography technique[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 28-33.
- [77] 李旭东, 刘勋, 马渊, 等. 锁相红外热成像技术测量结构的应力分布[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 218-224.  
LI X D, LIU X, MA Y, et al. Measuring structure stress distribution using lock-in infrared thermography technique[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 218-224.
- [78] 汪子君, 刘俊岩, 戴景民, 等. 红外热成像无损检测系统建立与试验分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(2): 20-23.  
WANG Z J, LIU J Y, DAI J M, et al. Establishment and experiment of IR thermography NDT system[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(2): 20-23.
- [79] 刘慧, 刘俊岩, 王扬. 超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 653-661.  
LIU H, LIU J Y, WANG Y. Detection of contacting interface-type defects using ultrasound lock-in thermography[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 653-661.
- [80] 刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外锁相法热波检测技术及缺陷深度测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 37-44.  
LIU J Y, DAI J M, WANG Y. Thermal wave detection and defect depth measurement based on lock-in thermography[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 37-44.

收稿日期: 2024-12-24; 录用日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(62201173, 51173034); 博新计划(BX2021092)

通讯作者: 王飞(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为无损检测与可靠性评价技术等, 联系地址: 黑龙江省哈尔滨市哈尔滨工业大学科学园 2F 栋 309 室(150001), E-mail: wangfeipublic@hit.edu.cn; 刘俊岩(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为无损检测与可靠性评价技术、光热科学与探测技术及增材/增减复合制造与智能制造等, 联系地址: 黑龙江省哈尔滨市哈尔滨工业大学科学园 2F 栋 309(150001), E-mail: ljywlj@hit.edu.cn

(本文责编: 高磊)