

DOI: 10.11973/wsjc202004001

# 红外检测技术的研究与发展现状

沈功田,王尊祥

(中国特种设备检测研究院,北京 100029)

**摘要:** 红外无损检测(IRT)技术作为一种新的检测方法,可以检测材料、构件的内部缺陷,评估材料的应力状态以及实现疲劳寿命的快速预测,对设备进行运行状态监测和故障诊断。简述了IRT技术的基本原理,从缺陷检测、应力检测、疲劳分析、图像处理、检测监测应用等方面阐述了国内外IRT技术的研究以及应用现状。介绍了国内外IRT检测设备和检测标准、技术应用情况,并指出了该检测技术的发展趋势。

**关键词:** 红外检测;红外成像;无损检测;应力;疲劳

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2020)04-0001-09

## Progress of Infrared Testing Technology

SHEN Gongtian, WANG Zunxiang

(China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** As a new inspection method, infrared non-destructive testing (IRT) technology can detect the internal defects of materials and components, evaluate the stress state of materials and achieve rapid prediction of fatigue life, and monitor the operating status and diagnose faults of equipment. This article briefly describes the basic principles of IRT technology, and elaborates the research and application status of IRT technology at home and abroad from the aspects of defect detection, stress detection, fatigue analysis, image processing, and testing and monitoring application. The relevant testing equipment and testing standards, applications of the testing technology at home and abroad were introduced and its development trend was also pointed out.

**Key words:** infrared testing; infrared imaging; nondestructive testing; stress; fatigue

目前,超声、射线、涡流、磁粉、渗透等常规的无损检测方法已在相关行业得到了成熟的应用,但上述方法多用于已形成的宏观缺陷的检测,红外检测(Infrared testing, IRT)技术作为一种新的检测方法,通过提取被检测物体的红外特征参数,可实现设备故障的实时监测以及应力集中和疲劳寿命的快速检测。通过检测此类“危险源”,可以确定构件、设备的服役情况,从而为重要部件的后期寿命和安全评价提供参考和依据。与常规的无损检测方法比较,红外无损检测还有以下优势:① 无需接触测量;

② 测量范围大(可达  $0.1\text{ m}^2$ );③ 测量距离远(20 cm~20 m);④ 成像直观、快速。IRT技术目前在航空航天、电力、建筑等工业领域有着广泛应用。

笔者介绍了红外检测技术的原理,综述了国内外关于红外检测技术的发展情况和研究进展,指出了重点研究领域和目前仍然存在的问题,最后介绍了基于红外成像检测技术的相关仪器设备和检测标准,展望了该技术的未来发展趋势和应用前景。

### 1 IRT 检测原理

红外检测技术主要基于红外辐射(红外线)的理论,即任何高于绝对零度的物质都会连续地向周围辐射红外线,红外线是一种带能量的电磁波,其波长为  $0.75\text{~}1\,000\text{ }\mu\text{m}$ ,频率为  $3\times 10^{11}\text{~}4\times 10^{14}\text{ Hz}^{[1]}$ 。红外辐射与物体本身的温度满足一定的函数关系,被测物体表面温度越高,辐射能量也越多。黑体红外辐

收稿日期:2019-12-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFF0203104)

作者简介:沈功田(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为声发射、红外和电磁等无损检测新技术

通信作者:沈功田,shengongtian@csei.org.cn

射的基本规律反应了红外辐射强度和波长随温度变化的定量关系, 其满足的基本规律主要有: 普朗克辐射定律、维恩位移定律、斯特凡-玻尔兹曼定律等。

红外线在大气中穿透比较好的波段, 被称为“大气窗口”, 短波波长为  $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ , 长波波长为  $7\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 。红外热像仪利用红外探测器和光学成像系统接收被测物体的红外辐射能量, 并反映到红外探测器的光敏元件上, 从而获得红外热像图, 这样红外热像仪就将不可见的红外能量转化为可见的热像图, 热像图与物体表面的热分布场是相对应的。通过对热像图温度、幅值、相位等信息的提取和分析等, 实现对被测物体的检测、监测和评估。

IRT 检测装置根据是否需要外加激励源可分为主动式和被动式两种, 检测装置分别如图 1 和图 2 所示。主动式检测装置由激励部分(信号发生器和激励源)、红外热像仪和 PC(计算机)终端 3 部分组成, 而被动式检测装置无需激励部分, 红外热像仪主要由光学系统、红外探测器、信号处理器和显示器等 4 部分组成。PC 终端可控制激励信号以及对红外热像图进行相应的数据处理。

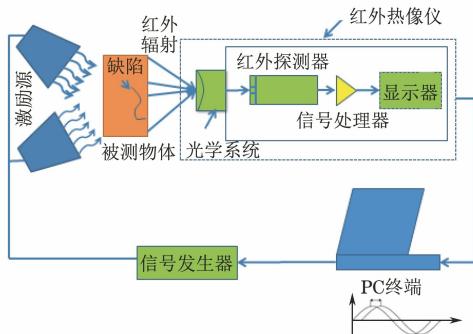


图 1 IRT 主动检测装置示意

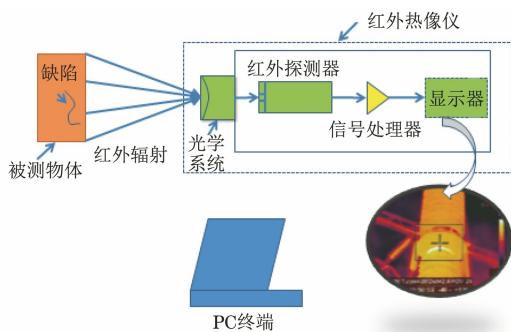


图 2 IRT 被动检测装置示意

## 2 国外研究现状

国外许多学者对红外检测技术的研究和应用做了大量工作, 比如法国国立高等工程技术学校的

BALAGEAS 团队<sup>[2]</sup>、意大利费德里克二世大学的 MEOLA 团队<sup>[3]</sup>以及日本名古屋大学的 TSUJI 团队、美国的 RAMI HAJ-ALI 团队、墨西拿大学的 CRUPI 等。目前, 国际上对于红外成像检测技术的研究及应用主要集中在缺陷检测、应力检测和疲劳分析等方面。

### 2.1 缺陷检测

目前, 对于构件缺陷的红外成像检测主要采用主动法, 即通过对构件施加可控的激励来获得热像图, 构件缺陷处与非缺陷处的热阻和温度分布是不同的, 缺陷会阻碍“热流”的均匀传播扩散, 在构件表面形成“高温区”和“低温区”。红外热成像检测不受材料性质的限制, 目前主要集中应用于复合材料领域的检测, 对裂纹、脱黏、冲击损伤等缺陷的检出率较高。CHATTERJEE 等<sup>[4]</sup>在对红外热成像检测技术进行对比研究时发现, 热像图的噪声主要来源于结构的不均匀性, 当缺陷位置较浅时, 脉冲红外热成像检测技术的图像信噪比最高, 但随着缺陷深度的增加, 3 种方法的差异会逐渐减小。MUNOZ 等<sup>[5]</sup>对航空碳纤维复合材料的损伤演变机理进行了研究, 发现  $0^\circ$  拉伸有 3 种损伤: 基体破坏、纤维断裂和脱黏, 而  $90^\circ$  拉伸不存在基体破坏的模式。BALAGEASL 等<sup>[6]</sup>对先进复合材料的内部裂纹、外部夹杂物、脱胶、分层等缺陷成功进行了红外无损检测, 发现相比其他检测方法, 该方法检测效率更高, 安全性更高, 非常适于在线监控。波兰的 PSUJ<sup>[7]</sup>对热像图序列进行归一化和 DFT(离散傅里叶变换)处理, 通过幅值和相位图分析研究了裂纹的生长过程。TSUJI 等<sup>[8]</sup>在碳纤维复合材料的锁相试验中发现低压下厚度方向的热扩散系数要小于标准大气压下的热扩散系数, 平面方向上热扩散系数取决于激励的加热频率。EKANAYAKE 等<sup>[9]</sup>采用 CT(X 射线计算机断层扫描)技术验证了基于红外成像技术的碳纤维缺陷几何尺寸测量的准确性, 整体相对误差小于 10%。

金属材料的热传导率相比复合材料的大很多, 相对研究要少一些。KOCHANOWSKI 等<sup>[10]</sup>发现采用脉冲红外热像法测得的奥氏体不锈钢 316L 的热扩散系数与文献中给出值的误差仅为 0.5%, 利用热传导方程来解相关的简单边界条件也更加方便。SEKHARABU 等<sup>[11]</sup>对 D2 工具钢的摩擦焊过程进行红外监测, 测得其红外轮廓, 并发现其焊接温度场的峰值温度可达  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , 由于马氏体相变

和初生碳化物的细化,提高了显微硬度和耐磨性,有利于研究焊接过程中的组织变化。

## 2.2 应力检测

红外应力检测是基于热弹性效应原理进行的。红外热弹性效应于 1853 年首次由 LORD KELVIN 提出,后经过 BLOT 的进一步研究,建立了表面温度变化与应力变化之间的定量关系表达式,如式(1)所示。

$$\Delta T_e = -KT\Delta\sigma_e \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_e$  为在温度  $T$  时的热弹性温度变化;  $K, T$  分别为与膨胀系数、密度和热容量有关的常数;  $\Delta\sigma_e$  为弹性应力增加值。

由式(1)可以看出,热弹性温度变化与弹性应力增加值呈线性关系,任何固体材料在受到拉伸时,其自身温度会降低,形成“冷发射”;在受到压缩时,自身温度会升高,形成“热发射”。根据目前的研究可知,温升 1 mK, 对应钢材的应力变化约为 1 MPa, 对应铝构件的应力变化约为 0.4 MPa<sup>[12]</sup>。

2008 年, HAJ-ALI 等<sup>[13]</sup>采用虚拟裂纹闭合技术(VCCT)和有限元(FE)两种热弹性应力分析方法对复合材料表面的应力场分布进行了研究,发现 I 型应力强度因子与应力场有较高的吻合度, II 型应力强度因子与裂纹尖端的位置和尖端附近的非弹性以及损伤区域的大小有关。同年, EMERY 等<sup>[14]</sup>提出了一种新的分层材料热弹性定量分析矫正方法,并成功应用于复合材料的检测中。2011 年, KUTIN 等<sup>[15]</sup>采用红外热像技术对环氧玻璃复合材料进行应力检测,试验得到了传统检测技术的验证,表明该方法可作为一种高效的复合材料早期诊断方法。BRÉMOND 等<sup>[16]</sup>在压强 30 MPa, 加载频率 3 Hz 的参数设置下准确测量了裂纹长度。

## 2.3 疲劳分析

机械零部件在交变载荷的长期作用下,会萌生细小裂纹并形成主导裂纹随后稳定扩展,最终引起构件的失稳或完全断裂<sup>[17]</sup>。据报道,目前 80% 的断裂事故属于疲劳断裂,金属材料在疲劳试验过程中的不同阶段会伴随有不同的固有耗散能释放,材料的表面温度在疲劳进程中会出现 3 个阶段:开始时表面温度迅速升高,中间缓慢增加和最后裂纹扩展时快速升高,且只有当循环应力大于疲劳极限时温度才会显著升高<sup>[18]</sup>。传统的疲劳试验周期长、成本高,红外热像仪的出现为疲劳检测提供了一种新的快速高效检测方法,采用红外热像仪来表征温度的

变化,可深入分析其断裂原理。MICHAL 等<sup>[19]</sup>已通过试验验证了该方法的可行性。目前,疲劳特性的研究已经在钢材、铸铁、镁合金、铝合金等金属的疲劳试验中取得了良好的效果。

LUONG<sup>[20]</sup>曾在 1998 年采用红外热像法研究了疲劳演变过程和预估汽车零部件连杆的疲劳极限。2010 年, CRUPI 等<sup>[21]</sup>在焊接接头的低周疲劳试验中发现材料表面也会出现类似高周疲劳的三个温升阶段,且温升与磁滞回线紧密关联,都属于在塑性变形中释放能量的一种表现形式。同年, CRUPI 又对原有的热像法(EM)进行了改进,与能量分析相结合,提出了一种新的定量分析方法来预测剩余疲劳寿命和进行非线性应力的测量,并通过试验验证得到测量误差分别为 13% 和 4%<sup>[22]</sup>。MOUMNI 等<sup>[23]</sup>研究了加载频率对形状记忆合金的低周疲劳寿命影响,得到以下结论:① 随着加载频率的增加,温度的振幅会随着时间先增大后趋于稳定;② 不管是应力控制还是应变控制,温度振幅整体都会随着加载频率的增加而减少;③ 加载频率很低时疲劳寿命对温度基本无影响。

## 2.4 其他领域

由于红外热成像检测具有检测面积大、速度快、适于实时监测等优点,已被广泛应用在电力、建材、地质、医疗、大气研究等领域<sup>[24]</sup>。 HUDA 等<sup>[25]</sup>运用基于红外热成像法的智能系统进行电力设备故障的预防性检测,试验采用人工神经网络和统计特征方法进行设备内部缺陷的检测,结果表明统计特征方法具有更好的性能,准确率为 82.40%。KORDATOS 等<sup>[26]</sup>利用红外热成像技术来评价壁画和历史纪念碑的损坏情况。LUONG<sup>[27]</sup>运用红外热成像技术来进行土地动力学研究,为研究土地变形的机理提供了依据。MEOLA 等<sup>[28]</sup>对热塑性基体复合材料进行在线红外监测中发现温升与材料密切相关,从而可作为评判新材料性能的指标,相位图则可以为冲击动力学提供参考信息。SAHU 等<sup>[29]</sup>进行了癌症的红外光谱研究工作。MEOLA 等<sup>[30]</sup>发现相位值与材料的某些特性(密度,孔隙率,硬度等)相关联。锁相热成像技术能够区分成分非常相似的材料,可以用来表征金属、塑料、复合材料等多种材料,评估材料老化或暴露于不利环境下而出现的特性变化情况。

## 3 国内研究现状

我国的 IRT 技术起步于 20 世纪 50 年代,改革

开放以来得到了迅速发展。目前国内对 IRT 研究较多的有华中科技大学、电子科技大学、哈尔滨工业大学、南京理工大学、首都师范大学、中国特种设备检测研究院等科研院所。这些研究主要集中在缺陷检测、应力和疲劳分析、模拟仿真和图像处理等方面, 并涉及到了机械设备故障诊断的应用领域。

### 3.1 缺陷检测

国内对于缺陷检测的研究主要集中在常规、锁相和脉冲相位等不同热成像技术的理论和试验研究中, 如缺陷深度测量、相位信息分析等。张金玉等<sup>[31]</sup>在涂层的锁相无损检测中发现当涂层厚度一定时, 相位差随着缺陷尺寸的增大会先增大后减小, 并通过温度的一阶差分实现了对缺陷的定量识别。沈功田等<sup>[32]</sup>针对金属高温压力管道设计了一系列试验, 发现导热率越低的材料, 检测灵敏度越高, 缺陷显现时间越长, 缺陷面积越大, 材料厚度越薄, 检测缺陷的灵敏度也越高; 检测灵敏度还与加热和冷却方式有关, 试验中内部加热法的检测灵敏度高于外部冷却法的。霍雁等<sup>[33]</sup>对电路板分层缺陷进行检测时发现, 锁相成像技术的缺陷检出率要高于脉冲成像技术的。孙丰瑞等<sup>[34]</sup>系统地研究了正弦规律加热沉孔型缺陷时的表面温度变化的情况, 发现构件材料对检测表面温差变化影响较大, 采用反射法和透射法检测, 构件表面的温度场变化趋势是一致的。李艳红<sup>[35]</sup>通过傅里叶变换提取红外热波信号的位相频率信息来检测缺陷深度, 得出计算深度是实际深度的 1.98 倍的结论。

在复合材料的检测方面, 武翠琴等<sup>[36]</sup>对玻璃纤维复合材料壳体/绝热层构件中深度为 5 mm 以内、直径 10 mm 以上的脱黏缺陷取得了较好的检测效果。周正干等<sup>[37]</sup>进行了钛合金蜂窝结构蒙皮的红外热成像研究工作, 发现厚度为 0.6~2.0 mm 构件的最佳锁相检测激励调制频率为 0.04 Hz~0.1 Hz。蒋淑芳等<sup>[38]</sup>采用红外热成像技术成功检测出铝蜂窝复合材料的夹层胶接情况和蜂窝结构。

### 3.2 应力和疲劳分析

我国的应力、疲劳分析研究多与实际应用相结合, 沈功田<sup>[39-40]</sup>通过检测蓄能器疲劳区热斑迹的变化来研究裂纹的走向和大小变化, 此外对液化石油气储罐的应力集中部位的检测也取得了良好的效果。曾伟等<sup>[41]</sup>提出了一种基于温升对循环周次的积分  $M$ , 来确定材料的 S-N(应力-疲劳)曲线的新方法。吕宝西<sup>[42]</sup>在对 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展的

红外检测试验中, 发现低速扩展裂纹尖端的温度高于周围的现象并不明显, 金属表面的裂纹红外检测效果并不理想。王文先等<sup>[43]</sup>采用红外热成像技术研究了 AZ31B 镁合金的裂纹尖端温升值与裂纹扩展速度之间的关系, 发现快速扩展阶段的温升明显大于稳定扩展阶段的。李萌等<sup>[44]</sup>对 2A12 铝合金的铆接结构进行了红外锁相疲劳极限的快速测定, 对试验结果采用阶梯法验证, 得到误差为 4.82%, 此方法尤其适用于处于多轴应力状态的结构构件。张传豹<sup>[45]</sup>对 Q235 材料的十字接头焊趾处应力集中系数进行测量, 发现结果高于理论计算和仿真模拟计算的结果, 但仍是可信的。李旭东等<sup>[46]</sup>采用锁相红外热成像技术选取合适的加载频率, 成功地对机翼表面的应力分布状态进行了测量。

### 3.3 模拟仿真

国内还有很多学者利用 ANSYS, MATLAB 等仿真软件对红外检测技术进行了研究。顾桂梅等<sup>[47]</sup>对钢轨裂纹缺陷进行模拟研究, 并采用温度-时间二阶对数微分峰值法进行裂纹深度计算, 发现对钢轨亚表面 6 mm 以内的疲劳裂纹有较高的准确性。郭杏林等<sup>[48]</sup>对焊接接头采用差分热像法获得了不同应力范围的稳定温升值, 通过建立的能量损伤模型得到的剩余疲劳寿命与实际值误差为 6.5%, 实现了快速预测。刘俊岩等<sup>[49-50]</sup>发现: 随着缺陷与加载中心距离的增加, 幅值差会降低但相位差基本保持不变, 初始静压升高, 幅值差升高, 相位差基本不变; 调制频率提高, 幅值差降低, 相位差升高。此外, 他们还通过建立的热-电等效模型确定了相位与缺陷深度之间的关系。郭兴旺等<sup>[51]</sup>通过建立振动热像检测的数学模型研究裂纹区表面温升与激励时间、频率、幅值等参数的关系。张金玉等<sup>[52]</sup>建立了涂层的三维瞬态导热模型, 得到了锁相法理论可检的最大涂层厚度是热扩散长度的 1.5~2 倍, 且检测厚涂层时检测频率应适当减小的结论, 并给出了涂层厚度与相位的计算关系式。

### 3.4 图像处理

在图像处理方面, 秦翰林等<sup>[53]</sup>针对弱小目标的复杂背景提出了剪切波与高斯尺度混合模型的新算法, 检测结果优于二维最小均方误差滤波算法的结果。周正干等<sup>[54]</sup>对红外锁相法得到的相位图采用模糊 C 均值(CFM)算法进行处理, 对缺陷进行定量检测, 误差小于 4%, 具有很高的吻合度。李宇光等<sup>[55]</sup>提出了一种新的小波变换的红外图像增强技

术,该技术更有利于故障点的信息提取,提高检测的准确性。康长青等<sup>[56]</sup>针对目前算法的鬼影和参数时间漂移的问题,提出了一种新的基于中间均衡直方图的图像矫正算法。

### 3.5 故障诊断

我国红外检测技术的应用最早开始于电力行业的故障诊断与监测,但存在图像噪声大、精度不高的问题,上述图像处理的研究工作大大提高了弱小目标的检测精度,为红外检测技术的应用提供了更多的可能。李大鹏等<sup>[57]</sup>针对机电设备给出了一种红外故障诊断可诊性的评价体系,为故障诊断应用提供了参考。于泽奇<sup>[58]</sup>设计了基于红外热成像的轮机故障检测系统,可以用来监控船舶设备运行情况和查找故障。李明等<sup>[59]</sup>成功自行设计了高温炉管剩余寿命的红外在线监测系统。叶超等<sup>[60]</sup>将红外热像技术应用于游乐设施的机械和电气部件的检测中,取得了初步结果。杨振中等<sup>[61]</sup>对汽车尾气排放物的成分和浓度进行了红外光谱研究,并提出了实时性较好的诊断技术。

## 4 国内外 IRT 仪器现状

红外热像仪主要有制冷型红外热像仪和非制冷型红外热像仪两种。制冷型红外热像仪由于价格昂贵、携带不方便等原因还未得到大规模应用;非制冷型红外热像仪经过近 20 年的快速发展,价格已大幅下降,性能也得到了快速提升,受到了多个行业的青睐。作为仪器核心的红外探测器,光谱响应从短波红外扩展到长波红外,实现了对室温目标的探测,成像目标也从单元发展到多元,从多元发展到焦平面,实现了单波段向多波段、点源探测到目标热成像的飞跃,为系统应用提供了充分的选择余地。红外热像仪包括便携式、在线式和扫描式三大系列,并部分配有各种选件(如镜头、存储卡等)。

### 4.1 国外设备

瑞典的 AGEMA 公司于 1995 年首先开发了锁相热成像检测技术,后被 FLIR 公司并购,目前美国的 TWI、德国的 Edevis 以及以色列的 Opgal 公司的主动式红外热成像检测系统产品技术较成熟,应用较广。被动式的红外热像仪厂家较多,知名的有美国的 FLIR、RAYTEK、KELLER 和日本的 NEC、德国的 Infratec 等公司。其中美国 FLIR 公司主要的红外检测设备有 P 系列、E 系列、S 系列、A 系列、2000/3000 系列、FLIR B 系列、FLIR T 系列、SC

7000 系列、BCAMTM 系列等众多产品。

FLIR 公司的 T640 红外热像仪,分辨率高达 640 像素×480 像素,视场角可达  $25^\circ \times 19^\circ$ ,1~8 倍的变焦,内置 800 像素×480 像素的取景器,在工业检测领域尤其是电力行业的绝缘子脱落、连接松动、接触不良、过热、过载等故障的监测中,有着广泛的应用。RAYTEK 公司的 MT4 红外测温仪,测温范围为  $-18^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ ;距离系数比达 8:1,采用单点激光瞄准,主要应用于汽车检测与维护、燃油压力过低、排风系统以及冷却系统的检测中。

### 4.2 国内设备

我国红外热成像检测技术起步较晚,1975 年西安热工所和昆明物理所等单位合作研制了我国第一台 HRD21 红外热像仪。华中光电研究所于 2001 年成功研制了首台非制冷型红外热像仪。武汉高德红外于 2014 年成功研制出红外探测器芯片,打破了国外技术垄断。

我国研究人员在增透膜和中长波红外变焦系统的改进、杂散辐射的抑制等方面做了大量的工作。中科院的杨为锦设计了高变倍比中波红外连续变焦系统,实现了 11~200 mm 的连续变焦,变倍比达 18+,满足 100% 冷光阑效率<sup>[62]</sup>。昆明物理所设计了折射/衍射的长焦距红外系统,系统焦距可达 300 mm<sup>[63]</sup>。哈尔滨工业大学的汪子君等<sup>[64]</sup>在国外热像仪的基础上建立了红外热像无损检测系统,并自行设计了硬件和软件系统,经测试性能达到了国外同类技术水平。

目前国内从事红外检测技术产品研制、生产和经营的单位约有 400 余家。国内红外检测设备生产厂家有广州飒特、济宁科电、浙江大立、武汉高德以及推出主动式红外热成像系统的北京维泰凯信和南京诺威尔等公司。广州飒特生产的 VS 640 型高端旗舰机,主要应用于电力、建筑、石油化工、制造业等工业领域,红外测温范围为  $-20^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ ,最高可达 2 000 °C,分辨率可达 640 像素×480 像素,精度可达  $\pm 2^\circ\text{C}$ 。维泰凯信的 InspectIR2.0 系统,易于操作,速度快,每次测量一般只需几秒到几十秒钟;高效、单次检测面积大,大型试件的分区检测结果可自动拼图处理,能定量测量缺陷的位置、大小和深度,可集成多种激励方式。

## 5 国内外检测标准现状

由于红外技术兴起较晚,研究也正处于发展阶

段,目前国内外关于红外检测的标准已陆续颁布,并在加速制定中。

国际上主要有 ISO 10878:2013《无损检测-红外热成像技术-术语》、ISO 10880:2017《无损检测-红外热成像检测-导则》和 ISO 18251-1:2017《无损检测-红外热成像检测 第 1 部分: 系统和设备的特性》; 美国的材料与试验协会 ASTM 也颁布了几项红外热成像标准,如: ASTM E1862-14《用红外成像辐射仪测量和均衡反射温度的标准试验方法》、ASTM E1897-14《用红外成像辐射仪测量和均衡衰减介质的传输的标准试验方法》、ASTM E1933-14《用红外成像辐射仪测量和均衡衰减介质发射率的标准试验方法》; ASTM E1934-99a(2014)《机械和电气红外热成像技术应用导则》,此外还有一些美国军用电气红外检测标准。

国内相关人员也做了大量的研究和制定工作<sup>[65-66]</sup>。主要有 GB/T 12604.9—2008《无损检测术语 红外检测》、GB/T 31768.2—2015《无损检测术语 第 2 部分: 检测规范》、GB/T 26643—2011《无损检测 闪光灯激励红外热像法 导则》、GB/T 31768.2—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 2 部分: 检测规范》、GB/T 26643.3—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 3 部分: 试块》、GB/T 31768.4—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 4 部分: 检测系统》、GB/T 19870—2018《工业检测型红外热像仪》和 DL/T664—2008《带电设备红外诊断技术应用导则》、GB/T 28706—2012《无损检测 机械及电气设备红外热成像检测方法》、GB/T 36668.3—2018《游乐设施状态监测与故障诊断 第 3 部分: 红外热成像监测方法》、HB 8428—2014《航空复合材料闪光灯激励红外热成像检测方法》、MH/T 3022—2011《航空器复合材料构件红外热像检测》,此外还有一些物质红外光谱法的标准如 DB 23/T 1196—2007《植物油反式脂肪酸的测定红外光谱法》、DB 37/T 2651—2015《车用汽油中甲缩醛含量的测定 红外光谱法》等。

## 6 红外检测技术应用

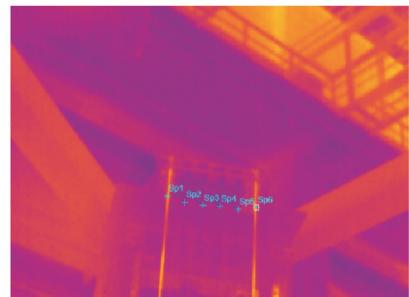
### 6.1 卷扬机红外检测应用

卷扬机作为常见机械系统部件,因操作简单、绕绳量大、移置方便而广泛应用于建筑、水利工程、矿山等行业,作为主要受力部件的钢丝绳,常见的报废原因有直径减小、表面腐蚀、结构破坏、超载等,红外检测技术可以方便快捷地判断钢丝绳的使用情况。

机械系统钢丝绳受力时,两端钢丝绳的受力明显大于中间部分的,这与机械结构和安装都有密切联系。钢丝绳长期受力不平衡会出现损耗,钢丝绳的温度变化可以反映出卷扬机的运动状态和安全状态,可为钢丝绳的单位和更换提供指导。卷扬机的可见光图与红外热像图如图 3 所示。



(a) 可见光图



(b) 红外热像图

图 3 卷扬机的可见光图与红外热像图

### 6.2 液压系统红外检测应用

液压站是为机械运行提供润滑、动力的一种机电装置。液压系统对温度变化敏感,温度每升高 10 °C,密封件寿命就会减半,所以应密切关注液压系统的油温变化,采用红外检测技术可以快速检测油温的变化情况,排除安全隐患。

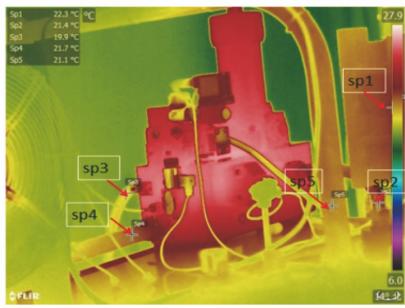
图 4,5 可以客观反映出液压系统的工作原理,不同输油管和回油管的温度呈现相同的周期性变化趋势,出油管的温度变化幅度相对较小,经散热后的温度要低于散热前的油管温度。这些发热规律都为实际工作中液压系统的维护保养提供了重要的参考,比如油液污染时,各输油管的温度会普遍高于正常温度,某处油管滤芯堵塞或者出现连接问题会造成某一段油管的温度异常,散热扇散热效率下降会导致回油管的温度异常等。

### 6.3 电气系统红外检测应用

电气系统的检测大部分需要停电进行,发热点温度难以量化,测量时也有一定的危险性,红外检测技术具有非接触、检测面积大、不受白天黑夜影响等特点,可以解决上述问题。若发生电气设备故障,故



(a) 可见光图



(b) 红外热像图

图 4 液压系统的可见光图和红外热像图

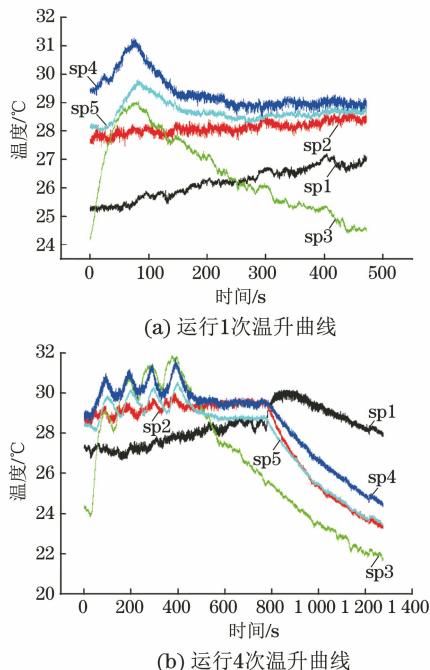


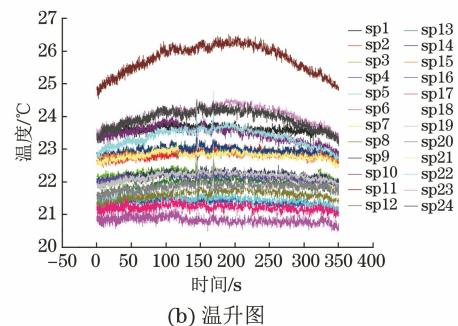
图 5 液压系统的温度变化曲线

障点的温度会大幅上升,并以故障点为中心向外围辐射大量的热能,在周围形成一个“能量热场”,通过检测“能量热场”就可以找到故障发生处。

图 6 是采用红外检测技术进行电气系统状态监测应用的案例,案例中采集了电气柜中 24 组接线端子的温度变化数据,采用参数对比法进行故障分析和诊断。由图 6 可以看出,11 号测试点的温度发热明显异常,温度相比其余测试点要高出  $2^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ ,



(a) 红外热像图



(b) 温升图

图 6 电气系统温度红外及温升图

经检查,11 号测试点的接线端子发生松动,后经维修,温度恢复正常。

## 7 发展趋势

红外热成像检测技术作为新兴的和逐步成熟的无损检测技术,具有非接触、一次可测量面积大、快速高效等优点,得到了很多学者的关注,目前在电力、航空航天、交通运输、石油化工、冶金、医药等设备的检测监测方面得到了成熟应用并有着巨大的应用前景。面向众多的工程需求和目前红外检测技术存在的不足,笔者认为未来红外检测技术的发展应集中在以下几个方面。

- (1) 材料内部缺陷的二维或三维模型建立、缺陷尺寸量化检测的研究。
- (2) 设备的运行状态监测和故障诊断方法的研究。
- (3) 幅值相位等数据信息提取以及小波变换、模糊算法等数据处理的研究。
- (4) 便携化、简单化、智能化检测设备的开发和研究。
- (5) 激励方式的多样化研究。
- (6) 新检测标准的制定和标准体系的建立。

## 8 结语

近几年国内外关于 IRT 技术的研究越来越多,应用也越来越广泛。目前国内外学者已经揭示了许

多热像图特征与对应缺陷之间的关系,为材料尤其是复合材料和新材料的缺陷检测提供了一种新的高效检测方法。IRT技术还可以实现金属材料的应力分析、疲劳寿命的快速预测,同时也带动了模拟仿真、图像处理、红外系统设计技术的进步。

与欧美等发达工业国家相比,目前我国IRT技术领域的仪器开发和工程推广应用等方面略显薄弱,在缺陷识别和自动化检测方面的差距较大,国内还未形成完善的缺陷识别方法。今后应该加大IRT技术的基础研究和工程应用、设备系统的自主开发,尤其是自动化检测缺陷的研究以及相关行业应用标准的系统化制定工作,发掘红外热成像技术更大的工程应用潜能。

#### 参考文献:

- [1] 王汝琳. 红外检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] BALAGEAS D. Defense and illustration of time-resolved pulsed thermography for NDE [J]. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2012, 9 (1): 3-32.
- [3] MEOLA C, CARLOGAGNO G M, SQUILLACE A, et al. Vitiello non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(3): 380-388.
- [4] CHATTERJEEA K, TULIA S, SIMON G, et al. A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques [J]. NDT & E International, 2011, 44 (7):655-667.
- [5] MUÑOZ V, VALES B, PERRIN M, et al. Coupling infrared thermography and acoustic emission for damage study in CFRP composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 2(85):68-75.
- [6] BALAGEAS D, MALDAGUE X, BURLEIGH D, et al. Thermal (IR) and other NDT techniques for improved material inspection [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016, 35(18):1-17.
- [7] PSUJ G, SZYMANIK B. Fatigue monitoring of steel structures using electromagnetic and infrared thermography inspection methods [J]. Przegla Elektrotechniczny, 2016, 92:5-8.
- [8] TSUJI A, NAGANO H. Measurement of in-plane thermal diffusivity of carbon composites by periodic heating method using lock-in thermography [C] // Transactions of the JSME (in Japanese). Japan: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [9] EKANAYAKE S, BALDO C, FERNANDES T, et al. CT applied as a reference technique for evaluating lock-in thermography in characterizing CFRP impact damage test samples [C] // 7th Conference on Industrial Computed Tomography. Belgium: [s.n.], 2017.
- [10] KOCHANOWSKI K, OLIFERUK W, PLOCHOCKI Z, et al. Determination of thermal diffusivity of austenitic steel using pulsed infrared thermography [J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2014, 59 (3):893-897.
- [11] SEKHARBABU R, RAFI H K, RAO K P. Characterization of D2 tool steel friction surfaced coatings over low carbon steel [J]. Materials & Design, 2013, 50 (17):543-550.
- [12] 严园, 邹兰林, 周兴林. 钢桥疲劳裂缝的红外热成像无损检测[J]. 应用科学学报, 2016, 34(1):106-114.
- [13] HAJ-ALI A R, WEI B S, JOHNSON S, et al. Thermoelastic and infrared-thermography methods for surface strains in cracked orthotropic composite materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75:58-75.
- [14] EMERY T R, DULIEU-BARTON J M, EARL J S. A generalised approach to calibration of orthotropic materials for thermoelastic stress analysis [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68:743-752.
- [15] KUTIN M, RISTI S, PUHARI M. Thermographic testing of epoxy-glass composite tensile properties [J]. Contemporary Materials, 2011, 1:88-93.
- [16] BRÉMOND P. New developments in thermo elastic stress analysis by infrared thermography[J]. Buenos Aires, 2007, 10:1-11.
- [17] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [18] LAROSA G, RISITANO A. Thermographic methodology for rapid determination of fatigue limit of materials and mechanical components [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22:65-73.
- [19] MICHAL Š, PETRA H, JOSEF V. Active thermography in materials fatigue testing [C] // Metal-international Conference on Metallurgy & Materials. Czech Republic: [s.n.], 2015.
- [20] LUONG M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique [J]. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155-163.
- [21] CRUPI V, CHIOFALO G, GUGLIELMINO E.

- Using infrared thermography in low-cycle fatigue studies of welded joints[J]. Welding Journal, 2010, 89: 195-200.
- [22] WANG X G, CRUPI V, GUO X L. Quantitative thermographic methodology fatigue assessment and stress measurement [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32: 1970-1976.
- [23] MOUMNI Z, ZAKI W, NGUYEN Q S. Theoretical and numerical modeling of solid-solid phase change: Application to the description of the thermomechanical behavior of shape memory alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24 (4):614-645.
- [24] 李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热像技术及其应用的研究现状与发展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33 (3):227-230.
- [25] HUDA A S N, TAIB S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2):220-227.
- [26] KORDATOS E Z, EXARCHOS D A, STAVRAKOS C, et al. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments[J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(19):1261-1265.
- [27] LUONG M P. Introducing infrared thermography in soil dynamics[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 49(3):306-311.
- [28] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, et al. Learning more on thermoplastic composites with infrared thermography[C]//19th World Conference on Non-destructive Testing. Germany: Curran Associates Inc., 2016.
- [29] SAHU P K, MORDECHAI S. Fourier transform infrared spectroscopy in cancer detection[J]. Future Oncology, 2005, 9(22):635-647.
- [30] MEOLA C, CARLOMAGNO G M, GIORLEO L. The use of infrared thermography for materials characterization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155(1):1132-1137.
- [31] 张金玉, 马永超. 基于红外锁相法的涂层脱粘缺陷检测与识别[J]. 红外技术, 2016, 38 (10):894-898.
- [32] 沈功田, 李涛, 姚泽华, 等. 高温压力管道红外热成像检测技术[J]. 无损检测, 2002, 24 (11):473-477.
- [33] 霍雁, 赵跃进, 李艳红, 等. 脉冲和锁相红外热成像检测技术的对比性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39 (6):602-604.
- [34] 寇蔚, 孙丰瑞, 杨立. 正弦规律加热条件下的缺陷红外故障响应[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4):472-474.
- [35] 李艳红, 赵跃进, 冯立春, 等. 基于脉冲位相的红外热波无损检测法测量缺陷深度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):55-58.
- [36] 武翠琴, 洪新华, 王卫平, 等. 复合材料脱粘缺陷的红外热像无损检测[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (12): 3271-3274.
- [37] 周正干, 贺鹏飞, 赵翰学, 等. 钛合金蜂窝结构蒙皮脱焊缺陷锁相红外热成像检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9):1795-1802.
- [38] 梁旗. 基于红外热图像电力设备热故障的自动诊断[J]. 电脑知识与技术, 2008(6):132-140.
- [39] 沈功田, 张万岭. 压力容器无损检测——红外热成像检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(10):523-528.
- [40] 沈功田, 吴彦, 李涛, 等. 热弹性红外成像检测技术在石油液化气储罐检测中的应用[C]//苏州无损检测国际会议无损检测学术会议. 苏州:[出版者不详] 2003.
- [41] 曾伟, 韩旭, 丁桦, 等. 基于红外热象技术的金属材料疲劳性能研究方法[J]. 机械强度, 2008, 30(4): 658-663.
- [42] 吕宝西. 基于红外热成像 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [43] 魏凌霄, 闫志峰, 王文先, 等. 基于红外热成像的镁合金疲劳裂纹扩展的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6):64-69.
- [44] 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.
- [45] 张传豹. 基于热像法的金属疲劳性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [46] 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):218-222.
- [47] 顾桂梅, 黄涛. 基于 ANSYS 的钢轨疲劳裂纹深度红外热波定量测量研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(6):63-66.
- [48] 樊俊铃, 郭杏林, 赵延广, 等. 定量热像法预测焊接接头的 S-N 曲线和残余寿命[J]. 材料工程, 2011 (12):29-33.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 郭兴旺, 李彬. 重型铝合金结构裂纹振动红外热像检测的建模和分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 31-37.

(下转第 14 页)

积。B9 区域泄漏点的测量值如表 5 所示。

表 5 B9 区域泄漏点的 4 次测量值

次数	机器因子	仪器显示值/(Pa·m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
第一次	1 000	$6 \times 10^{-6}$
第二次	1 000	$4.7 \times 10^{-6}$
第三次	1 000	$3.9 \times 10^{-6}$
第四次	1 000	$7.2 \times 10^{-6}$
均值		$5.45 \times 10^{-6}$

经过核算,得出真实的泄漏值为

$$Q_L = \frac{K \cdot Q_s}{\beta} = \frac{1000 \times 5.45 \times 10^{-6}}{0.15} = 3.6 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

后续采用真空罩气泡法进一步确认,检测参数如表 1 所示。真空罩气泡法验证后  $\sigma = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,气泡直径为 5 mm,  $n$  为 4,真空度为  $-0.05 \text{ MPa}$ 。得出  $L_s$  为  $1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Q_L$  为  $3.6 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,两者换算的值在同一数量级内,表明泄漏值的数量级是准确的。

## 6 结论

(1) 氦质谱仪吸枪氦罩法和真空罩气泡法是有效的检漏方法,两者结合起来,可明显地检测出  $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  以下泄漏率的泄漏点,并大幅提高检测效率。

(2) 沿海地带湿度大,易形成冷凝水附着于钢覆面上从而堵塞缺陷口,应在排空水池干燥 2 月后,来年后的 2 个月份前进行检测为佳。

(3) 服役期间的燃料水池,低放射性环境对泄漏检测无影响。

## 参考文献:

- [52] 张金玉,孟祥兵,杨正伟.红外锁相法涂层测厚数值模拟与分析[J].红外与激光工程,2015,44(1):6-11.
- [53] 秦翰林,李佳,周慧鑫,等.采用剪切波变换的红外弱小目标背景抑制[J].红外与毫米波学报,2011,30(2):162-166.
- [54] ZHOU Z, ZHAO H, SUN G, et al. Inspection of disbonds in multilayer dissimilar metal structure using lock-in thermography [J]. Applied Optics, 2016, 55 (16):4490-4496.
- [55] 李宇光,刘明光.电机故障检测的小波分析红外图像增强[J].计算机工程与应用,2013,49(11):241-243.
- [56] 康长青,张其林,郑毅,等.基于中间均衡直方图的红外图像非均匀性校正[J].激光与红外,2013,43(11):1240-1242.
- [57] 李大鹏,孙丰瑞.机电设备红外故障诊断的可诊性研究[J].机电工程,2004,21(7):44-48.
- [58] 于泽奇.红外热成像技术在轮机故障诊断中的应用[D].大连:大连海事大学,2013.
- [59] 李明,林翠,李晓刚,等.红外热像技术在线评估高
- [60] 叶超,沈功田,张万岭,等.游乐设施红外热像特征[J].无损检测,2012,34(3):12-14.
- [61] 杨振中,楚书华,李径定.基于红外光谱的汽车废气排放诊断技术[J].机械工程学报,2000,36(4):5-8.
- [62] 杨为锦,孙强.中波红外连续变焦系统设计[J].中国光学,2010,3(2):164-169.
- [63] 张莹昭,白玉琢,丁黎梅,等.折射/衍射长焦距红外系统的设计[J].红外技术,2010,32 (6):315-319.
- [64] 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.
- [65] 沈功田,胡斌,徐永昌,等.中国无损检测 2025 科技发展战略[M].北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2017.
- [66] 沈功田,贾国栋,钱剑雄.特种设备安全与节能 2025 科技发展战略[M].北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2017.