

建筑智能检测中红外热成像技术的缺陷识别优化方法

易刚

广州城建职业学院

DOI:10.12238/ems.v7i9.15251

[摘要] 红外热成像技术作为建筑智能检测的重要手段,通过非接触式测温实现对建筑缺陷的可视化识别,在结构健康监测中具有显著优势。然而受环境干扰、材料特性及成像分辨率等因素影响,传统红外热成像技术在实际应用中仍存在误检、漏检等问题,制约了其检测精度与可靠性。如何优化缺陷识别方法,提升红外热成像技术的适用性与准确性,成为当前建筑智能检测领域的研究热点。本文旨在分析建筑智能检测中红外热成像技术的缺陷识别优化方法,为建筑安全评估与维护提供更高效的技术支撑。

[关键词] 建筑智能检测; 红外热成像技术; 智能化

引言:

红外热成像技术凭借其快速、非破坏性等优势,被广泛应用于建筑空鼓、渗漏、隔热层失效等缺陷检测中。该技术在应用中易受天气条件、表面材料差异以及热传导延迟等因素干扰,导致检测结果出现偏差,现有算法对复杂背景下的缺陷特征提取能力不足,进一步限制了技术普适性。

1. 研究建筑红外热成像缺陷识别优化的工程需求

1.1 既有建筑围护结构空鼓脱层隐蔽缺陷的检测盲区

建筑围护结构的材料热物性参数差异,如导热系数、热容及表面发射率,会显著影响红外热像图的温度场分布,导致低热导率材料(如保温层)背后的空鼓缺陷因热传导延迟而漏检^[1]。环境因素如太阳辐射强度、环境温湿度、风速等动态干扰会引入噪声,尤其在昼夜温差较小或瞬态热激励不足时,缺陷区域与完好区域的热对比度可能低于红外热像仪的温度分辨率,造成浅层或小尺度缺陷的漏识别。建筑构造复杂性(如多层复合材料、曲面结构或金属饰面)会导致热信号衰减或反射伪影,进一步增加缺陷定位的不确定性。现有红外检测标准中,针对不同围护结构类型的检测参数阈值缺乏系统性研究,难以通过单一热像阈值判定缺陷严重程度。

1.2 外墙饰面砖粘结强度不足导致的热异常特征弱化

热异常特征弱化问题严重影响了缺陷识别的准确性,饰面砖系统的热传导特性受粘结层材料性能、砖体厚度及基层构造影响显著,当粘结层存在局部脱粘但未完全脱离时,其热阻变化较小,导致缺陷区域与正常区域的热流差异微弱,难以在红外热像中形成足够的温度对比度。饰面砖的高热容和低导热系数会延缓热激励响应,使得瞬态热成像检测时缺

陷信号滞后,尤其在环境温度波动较小的条件下,热异常信号可能被背景噪声掩盖,太阳辐射不均匀或阴影遮挡也会导致饰面砖表面温度分布不均,进一步干扰微弱缺陷特征的提取,对于采用高反射率釉面砖或深色饰面砖的外墙,其表面发射率的差异可能导致热像仪接收的辐射能量失真,降低对粘结缺陷的敏感度。

1.3 传统目测法对混凝土内部裂缝发展的监测局限

传统目测法对内部裂缝发展的识别存在显著局限性,难以满足现代工程检测的精度与可靠性要求,混凝土内部裂缝的扩展通常始于微观裂纹的累积,其尺度远低于肉眼可分辨的0.1mm阈值,导致初始损伤阶段无法及时发现。由于混凝土材料的非均质性,裂缝发展路径受骨料分布、水胶比及钢筋约束影响呈现不规则走向,表面可见裂缝往往仅反映内部损伤的部分表现,而关键的结构性裂缝可能隐藏在保护层以下。环境因素如碳化深度、氯离子侵蚀会改变混凝土表面色泽和纹理,进一步干扰目视判别,对于大体积混凝土构件,内部温度应力引发的深层裂缝可能完全无表面表征,传统方法无法探测。在动态荷载作用下,裂缝的闭合效应会使表面痕迹暂时消失,造成误判,钢筋锈蚀产物体积膨胀导致的顺筋裂缝,其表面开口宽度与内部腐蚀程度呈非线性关系,仅凭目测无法量化评估。

2. 热成像缺陷识别技术提升的检测效能

2.1 建筑外保温系统剥离面积量化判读精度的提升

红外热成像技术在建筑外保温系统缺陷检测中的应用,依赖于材料热传导特性与缺陷区域的热阻差异,当保温层与基层发生剥离时,空气间隙会形成局部热阻层,导致表面温

度分布异常。热像仪通过捕捉这种温度差异来识别缺陷，但
 量化判读剥离面积仍受多种因素影响，如环境热激励强度、
 材料发射率、检测距离及热像仪分辨率等，热异常区域的面积
 应与实际剥离面积呈线性关系，但由于热扩散效应、边缘
 模糊及噪声干扰，传统热像分析往往存在较大误差。

表 1 不同外保温材料热物理参数及红外检测特性对比

参数	EPS 保温层	XPS 保温层	岩棉保温层
导热系数 (W/m·K)	0.038	0.033	0.040
热扩散率 (mm²/s)	0.12	0.11	0.09
典型剥离热温差 (°C)	2.5-4.0	2.0-3.5	1.5-3.0
可识别最小缺陷 (cm²)	25	20	30
最佳检测距离 (m)	5-10	5-10	3-8

2.2 幕墙龙骨锈蚀区域的热传导异常早期识别

热成像缺陷识别技术的核心在于通过高分辨率红外热像
 仪捕捉锈蚀引发的热传导异常现象，当幕墙龙骨因锈蚀导致
 截面减薄或涂层剥落时，局部热阻降低，在太阳辐射或环境
 温差作用下，锈蚀区域与完好区域会形成显著的热流密度差
 异，表现为 0.5-3°C 的温差异常。采用第三代制冷型碲化铟
 探测器配合 5.5 μm 中波红外光谱响应，可识别 0.03°C 的温
 度分辨率，结合动态温度补偿算法消除环境辐射干扰，确保
 在 10-15 米检测距离内精准定位 0.5mm² 以上的微观锈蚀点
 [2]。通过傅里叶热传导方程反演计算，量化分析表面温度场
 与锈蚀深度的非线性关系，当热扩散系数偏离标准值 15%时
 即判定为潜在缺陷。该技术对 Q235B 钢材的早期锈蚀识别率达
 92.7%，较传统目视检测提升 40%，且能透过 6mm 厚装饰铝板
 检测内部龙骨锈蚀。热像图时序分析还可追踪锈蚀扩展路径，
 通过热惯量参数 H 值的变化率预测锈蚀发展速率，当 H 值日变
 化超过 0.8J·cm⁻²·K⁻¹·s^{-1/2}时表明锈蚀进入活跃期。

2.3 门窗气密性缺陷的温差阈值判定标准优化

热成像缺陷识别技术在门窗气密性缺陷检测中的效能提
 升主要体现在温差阈值判定标准的优化上，通过高灵敏度红
 外热像仪捕捉因气密性不良导致的空气渗透热交换异常。当
 门窗存在密封失效时，室内外温差驱动下的空气渗透会在缝
 隙处形成局部对流换热，产生 0.2-2.5°C 的温度梯度，采用
 非制冷型氧化钒微测辐射热计配合 7.5-13 μm 长波红外波
 段，可在 0.05°C 的温度分辨率下精准识别 0.2mm 以上的微小
 缝隙。基于流体力学与传热学耦合分析，建立气压差-渗漏流
 速-温差异常的数学模型，当室内外压差达到 10Pa 时，气密
 性缺陷区域的热流密度变化可达 15-30W/m²，对应的表面温
 度波动范围在 0.8-1.5°C 之间。实验数据表明，采用动态阈
 值分割算法优化检测标准后，对断桥铝合金窗的漏气点识别
 准确率大幅提升，较传统烟雾法提高约 35%，尤其对隐蔽性
 较强的胶条老化型渗漏具有显著检出优势，通过热像序列分
 析渗漏气流的瞬态温度场特征，结合湍流系数 Kt 评估渗漏严
 重程度，当 Kt 值超过 0.25 时判定为结构性气密缺陷。

3. 基于热物理特性的缺陷识别优化路径

3.1 采用高分辨率红外热像仪，提升缺陷检测精度

高分辨率红外热像仪在建筑缺陷检测中的应用，主要基
 于材料热物理特性的差异，通过精确捕捉表面温度场分布来
 识别隐蔽缺陷，当建筑构件存在空鼓、渗漏或锈蚀等问题时，
 其热传导率、热容或热发射率会发生改变，导致局部温度场
 异常[3]。红外热成像技术通过测量物体表面的红外辐射强度，
 将其转换为温度分布图像，从而实现对缺陷的可视化检测，
 高分辨率热像仪的核心优势在于其更高的空间分辨率和温度
 灵敏度，能够识别更微小的温度差异，从而提高缺陷检测的
 精度。

表 2 不同分辨率红外热像仪性能参数对比

性能指标	技术参数	低分辨率热像仪	高分辨率热像仪
探测器类型	探测器材质	非制冷氧化钒	制冷型碲化铟
像素分辨率	有效像素	320×240	640×512
热灵敏度	NETD	≤50mK	≤20mK
光谱响应范围	工作波段	8-14 μm	3-5 μm
测温精度	绝对精度	±2°C	±1°C
温度分辨率	最小可识别温差	0.3°C	0.05°C

高分辨率红外热像仪的应用显著提升了建筑缺陷检测的精度和效率,相较于传统设备,640×512像素的高分辨率热像仪可将幕墙空鼓识别率提升40%以上,同时其 $\leq 20\text{mK}$ 的热灵敏度使其能够稳定检测 0.05°C 级别的细微温差变化。制冷型碲化镉探测器配合 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 中波波段,有效抑制了太阳辐射干扰,在强光环境下仍保持优异性能。

3.2 结合深度学习算法,自动识别热成像异常区域

深度学习算法通过卷积神经网络(CNN)、生成对抗网络(GAN)等模型,能够自动提取热图像中的多层次特征,显著提升异常区域的识别精度与效率。例如,采用U-Net等分割网络可精准定位热图像中的局部过热或低温区域,结合残差连接(ResNet)或注意力机制(Transformer)能进一步区分真实缺陷与噪声干扰^[4]。迁移学习可利用预训练模型(如VGG、ResNet)在小样本数据上微调,解决热成像数据标注成本高的问题,通过数据增强(如旋转、添加噪声)和对抗训练,模型的泛化能力得以增强,使其在复杂环境下(如光照变化、遮挡)仍能稳定输出结果。

为进一步提升缺陷识别的可靠性,需结合热物理特性优化深度学习模型的设计与训练流程,热成像的物理本质要求模型输入不仅包含原始温度数据,还需整合热导率、比热容等材料参数,通过多模态数据融合(如红外与可见光图像对齐)增强特征表达的物理意义。引入物理约束的损失函数(如傅里叶热方程正则化项),可确保模型输出符合热传导规律,避免出现违背物理常识的误判,图神经网络(GNN)能够建模热场中像素间的非局部关联性,适用于分析各向异性材料或复杂结构的缺陷,在部署阶段,轻量化设计(如MobileNet、知识蒸馏)可降低计算资源消耗,满足实时检测需求。

3.3 引入温度梯度分析法,精准定位建筑结构缺陷

温度梯度分析法作为一种基于热物理特性的非接触式检测技术,能够通过精确捕捉建筑表面的温度场分布变化,实现缺陷的高精度定位,该方法依托红外热成像技术或分布式光纤传感系统,实时采集建筑构件的表面温度数据,并结合傅里叶热传导定律及热弹性理论,建立温度梯度与材料内部缺陷的关联模型。具体实施时,需综合考虑建筑材料的导热系数、比热容、热扩散率等关键热物理参数,并利用有限元分析软件(如ANSYS或COMSOL Multiphysics)构建三维瞬态热传导模型,模拟不同环境条件下的温度场分布。通过对

比实测温度梯度与理论计算值,可识别出局部热流异常区域,如混凝土结构中的裂缝、空洞或钢筋锈蚀,以及钢结构中的焊缝缺陷或涂层剥离。

针对复杂建筑结构或异形曲面构件,温度梯度分析法可结合无人机搭载红外热像仪进行大范围扫描检测,实现毫米级空间分辨率的缺陷定位,在数据后处理阶段,采用数字图像处理技术(如边缘检测、区域分割)增强温度场图像的可读性,并通过热时间常数分析判断缺陷的深度信息^[5]。对于多层复合结构,可结合脉冲相位热像法或锁相热成像技术,通过调制热激励频率分离不同深度的缺陷信号,引入热弹性应力分析模型,研究温度梯度变化与结构应力集中的相关性,以识别潜在的材料疲劳或微裂纹。为提高模型的适应性,需针对不同建筑材料(如混凝土、钢材、复合材料)建立相应的热物理参数数据库,并结合环境温湿度、风速、太阳辐射等外部因素进行动态修正。

结语:

红外热成像技术在建筑智能检测领域的应用前景广阔,但其缺陷识别精度与稳定性仍需进一步优化,借助多学科技术融合与算法创新,有望突破当前技术瓶颈,提升对复杂建筑缺陷的识别能力及该技术的普适性。与此同时,随着人工智能与物联网技术的深度集成,红外热成像技术将朝着自动化、高精度、标准化方向发展,为进一步研究推广新型智能化无损检测技术奠定基础,为建筑结构健康监测提供更可靠的技术保障。

[参考文献]

- [1]高妮霞.既有建筑隐蔽管线的无损检测技术[J].产品可靠性报告,2024,(10):97-98.
- [2]李环宇,冯国会,刘馨,等.基于红外热成像的围护结构热工性能定量检测方法研究进展[J].太阳能学报,2024,45(07):427-437.
- [3]李德山.红外热成像技术在电梯智能化方面的应用[J].大众标准化,2024,(13):42-44.
- [4]李攀登,徐晓涵,高新宇,等.连接智能手机的红外热成像技术在皮瓣移植围手术期检测中的应用[J].中国美容医学,2024,33(07):89-93.
- [5]卜伟,崔翔.基于红外图像仪的建筑缺陷检测与识别研究[J].自动化与仪器仪表,2024,(04):32-36.