

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.086



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 建筑饰面砖空鼓缺陷无人机识别关键参数 试验研究

赵仕兴<sup>1,2</sup>, 马麟涛<sup>1</sup>, 许浒<sup>1,3</sup>, 田永丁<sup>1</sup>, 何佳斌<sup>1</sup>, 余志祥<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 四川省建筑设计研究院有限公司, 成都 610095;  
3. 成都西南交通大学设计研究院有限公司, 成都 610031)

**摘要:** 为了应对当前建筑外墙饰面砖频繁脱落造成的公共安全隐患, 通过归纳总结饰面砖缺陷的形成机理发现, 空鼓缺陷为外墙饰面砖脱落的前奏。基于无人机搭载红外热成像相机, 通过开展空鼓缺陷检测室内试验, 研究无人机的最佳观测姿态, 揭示无人机旋翼工作对外墙温度的影响规律, 探讨空鼓缺陷特征参数对识别效果的影响, 提出一种用于外墙饰面砖空鼓识别的温差阈值。结果表明: 当无人机距外墙的距离为 2~3 m、立面观测角度为  $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、平面观测角度为  $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$  时, 观测效果最佳; 无人机旋翼会使外墙降温增速 10%; 空鼓尺寸越大、埋深越浅、厚度越大, 识别效果越好; 黑色和红色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏高, 淡黄色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏低。在此基础上开展室外试验, 通过与可见光图像识别方法进行对比, 验证了所提出检测阈值的有效性, 为建筑饰面砖空鼓缺陷的识别提供了新途径。

**关键词:** 高坠事故; 建筑维护; 外立面缺陷; 空鼓缺陷; 无人机; 红外热成像法

**中图分类号:** TU18 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0097-13

## Experimental study on key parameters for identification of hollowing defects via UAV in facade tiles

ZHAO Shixing<sup>1,2</sup>, MA Lintao<sup>1</sup>, XU Hu<sup>1,3</sup>, TIAN Yongding<sup>1</sup>, HE Jiabin<sup>1</sup>,  
YU Zhixiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610095, P. R. China; 3. Southwest Jiaotong University Chengdu Design Institute Co. Ltd., Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** To mitigate the safety hazards posed by the frequent detachment of facade tiles, this study summarized the causes of these defects, identifying hollowing defects as precursors to exterior wall tile detachment. Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with infrared thermal imaging camera, the

**收稿日期:** 2024-05-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(52308330); 四川省建筑设计研究院有限公司科研项目(KYYN202231-F1)

**作者简介:** 赵仕兴(1970-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高层建筑结构、复杂结构的设计与研究, E-mail: 316458931@qq.com。  
许浒(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: xuhu@swjtu.edu.cn。

**Received:** 2024-05-13

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52308330); Research Project of Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co. Ltd. (No. KYYN202231-F1)

**Author brief:** ZHAO Shixing (1970-), professor level senior engineer, main research interests: high-rise building structure and complex structure, E-mail: 316458931@qq.com.

XU Hu (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: xuhu@swjtu.edu.cn.

study conducted laboratory tests for hollowing detection. The optimal observation attitude of the UAV was investigated. The impact of defect characteristic parameters on identification accuracy and the effect of UAV rotor operation on the temperature of external walls were evaluated. Additionally, a temperature difference threshold was proposed for the identification of hollowing in exterior wall facade tiles. The study indicated that optimal observation occurs when the UAV is 2 to 3 meters from the external wall, with a vertical angle of  $-30^\circ$  to  $30^\circ$  and a horizontal angle of  $-15^\circ$  to  $15^\circ$ . The drone rotors increase the cooling rate of external walls by 10%. Recognition improves with hollowing of larger sizes, shallower depths, and greater thicknesses. Hollowing defects in black and red tiles exhibited higher temperatures, while those in yellowish tiles exhibited lower temperatures. Consequently, an outdoor test was conducted to verify the efficacy of the proposed detection method by comparing it with visible light image recognition, which provides a novel threshold for the expeditious identification of hollowing defects in facade tiles.

**Keywords:** fall accident; building maintenance; facade defects; hollowing defects; UAV; infrared thermography method

饰面砖因色彩丰富、满足人们对建筑美学的需求而备受青睐。然而,由于设计施工不当、材料质量和建筑老化等原因,饰面砖脱落事件频繁发生,而且随着时间的推移,趋势愈加显著,对人们的生命财产安全构成了重大威胁,亟须采取高效且准确的检测方法,以预防脱落的发生。中国传统建筑工程外立面检测方法主要有:目测法、敲击法和拉拔法<sup>[1-2]</sup>。尽管目测法能发现明显的损伤(如脱落和开裂),但其适用性主要限于表面层,在建筑检测中因观察角度和遮挡问题而受限。相比目测法,敲击法可以检测外立面内部的损伤,但易受噪声影响,且效率较低,难以完成多点检测。拉拔法通过施加拉力或拔起力检测材料黏结情况和基层间的缺陷,但因成本高、抽样量限制以及建筑检测的操作空间受限,其应用效率难以满足日常运维需求。

近年来,由于轻量性、高效性、可视化等优点,无人机技术在检测识别领域得到了广泛应用和研究<sup>[3-4]</sup>。无人机搭载红外热成像相机<sup>[5]</sup>能克服传统方法在对建筑外立面进行缺陷检测时面临的诸多困难。王俊伟等<sup>[6]</sup>通过无人机搭载红外热成像仪和数码相机对建筑外墙进行初步检测,比较了正常角度和无人机角度拍摄的结果,确认无人机红外热成像能够解决由检测地点限制引起的仰角问题。周斌等<sup>[7]</sup>结合南京某公寓楼实例,利用无人机搭载红外

热像仪对建筑外墙饰面层缺陷进行检测,发现在相同角度和距离下,采用不同楼层和立面热像图进行缺陷检测的方法具备可行性。由于无人机具有很强的灵活性,而红外热成像图的质量对拍摄角度等因素变化较敏感,因此,针对无人机搭载热成像技术(unmanned aerial vehicle-infrared thermography,简称 UAV-IRT)拍摄距离、角度等影响因素进行研究较为重要,需要对观测姿态的最佳参数进一步定量研究,同时还需明确缺陷特征参数对拍摄的影响规律。笔者对建筑饰面砖外立面的缺陷特征进行分析,明确饰面砖脱落原因及风险最大的缺陷类型;基于 UAV-IRT 开展室内试验,探究拍摄距离、立面角和水平角对检测效果的影响,从而确定最佳检测姿态;研究无人机旋翼气流、缺陷埋置深度、缺陷厚度和饰面砖颜色等因素对红外热成像图的影响规律;确定检测饰面砖内部缺陷的温差阈值,为 UAV-IRT 的实际应用提供依据。

## 1 建筑饰面砖脱落机理分析

学者们对建筑外墙饰面砖脱落原因和机理开展了大量研究<sup>[8-10]</sup>,其常见的发生机制和脱落过程如图 1 所示。黏结力是影响饰面砖脱落的关键原因,足够的黏结力可以有效防止饰面砖脱落,延长饰面砖的使用寿命。饰面砖铺贴后,由于砂浆干燥固结

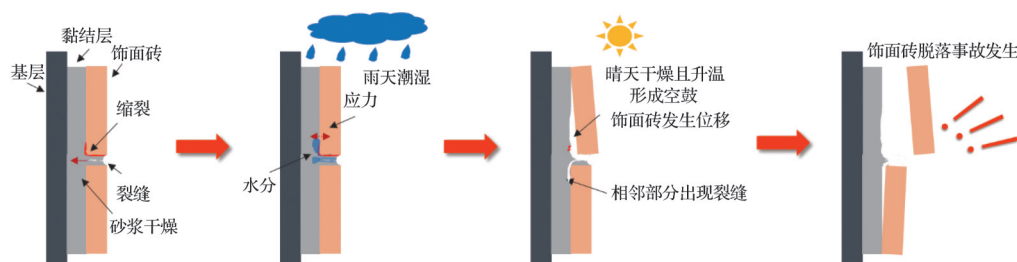


图 1 建筑外墙饰面砖脱落机制

Fig. 1 Mechanism of detachment of external wall facade tiles

等原因导致砂浆发生缩裂,在饰面砖缝间产生裂缝。环境湿度较高时,水分沿着裂缝渗透到砂浆黏结层,并对饰面砖产生压应力。此外,界面材料在阳光直射下会发生热胀,使得裂缝进一步扩大,同时产生次生矿物,使得裂缝无法回缩,对饰面砖的黏结面继续产生压应力。在温度和水分共同影响下,经过长时间作用,裂缝不断扩大,饰面砖发生位移,形成空鼓,饰面砖粘接失效导致脱落。由此可见,由于温度和湿度等因素,砂浆黏结力下降,导致空鼓缺陷,当黏结力降低到一定程度时,饰面砖与基层分离,引发高空坠落事故。换言之,饰面砖脱落的前奏缺陷类型往往表现为空鼓,其主要特点包括高发性、隐蔽性和加剧性。由于基底处理不当、黏结工艺或环境条件变化等原因,瓷砖空鼓在建筑施工和装修过程中频繁发生。空鼓难以通过外观直接发现,瓷砖表面看似正常,但内部空隙难以通过目测察觉,需借助专业方法检测。更为严重的是,空鼓问题会随着时间的推移逐渐加重,最初可能只发生在局部小范围,但由于温度变化、湿度变化和负荷作用等因素,空鼓范围会逐渐扩大,最终可能导致瓷砖松动、脱落。瓷砖空鼓问题不仅影响建筑的美观和使用寿命,还存在严重的安全隐患。空鼓在极端天气、季节交替和地震作用等自然诱因下,容易诱发灾害,可能导致瓷砖大面积脱落,造成人员伤亡和财产损失。因此,对空鼓缺陷进行及时检测和维修,能有效预防饰面砖掉落,降低城市高坠事故风险。

2 饰面砖空鼓检测室内试验

UAV-IRT 技术因其高效、灵活等特点在建筑外立面损伤检测领域备受关注,然而,在实际检测过程中,常常会遇到复杂的使用环境,比如树荫遮挡和人员干扰等。同时,该技术对于检测距离、角度等参数比较敏感。虽然现有的研究<sup>[11-13]</sup>对这些参数提出了一些建议,但缺乏系统试验数据支持。开展基于 UAV-IRT 技术的饰面砖空鼓缺陷检测室内试验,以探究其最佳观测姿态控制参数。

2.1 试验材料

既有试验研究中,学者们尝试采用大孔隙比的多孔介质材料来模拟建筑外墙的空鼓缺陷,如软木、泡沫胶带、聚苯乙烯泡沫板等<sup>[14-17]</sup>,此外,还有学者会使用桐油等试剂辅助模拟空鼓缺陷黏结界面的特性<sup>[14]</sup>。值得注意的是,这些材料的选取仅依赖其热工性能,即保证所选材料的热传导系数和比热容等物理参数与被模拟缺陷的实际参数相近,却忽

略了与实际空鼓内介质的等效情况。由此可见,在当前相关研究中,用于模拟饰面砖空鼓缺陷的材料并无统一标准,且既有方案与真实空鼓缺陷均存在差异。此外,这类大孔隙材料在施工过程中可能会吸收水分,亦会对试验结果产生不利影响。为了尽量还原真实的空鼓状态,笔者直接将空腔体埋入砂浆层,并以硬质纸板作为腔体外壳。腔体内的空气与实际空鼓缺陷保持一致,而在热传导系数和比热容方面,承担骨架作用的硬质纸板较聚苯乙烯泡沫板更接近于空气,如表 1 所示。同时,以聚苯乙烯泡沫为代表的多孔材料热膨胀系数明显小于空气,由于该类材料填满空鼓区域会导致升温时空鼓腔内压强和体积变化与实际情况不符,而硬质纸板仅作为边界层且其热膨胀系数很小,不会对实际空气的升温变化规律产生影响。因此,采用硬质纸板加工成的空腔模拟内部空鼓缺陷的方法更具合理性。

表 1 材料热学参数  
Table 1 Thermal parameters of the materials

材料	热传导系数/ (W/(m·K))	比热容/ (J/(g·K))	热膨胀系 数/℃ <sup>-1</sup>
硬质纸板	0.03~0.05	0.9~1.2	10 <sup>-5</sup>
空气	0.024	1.005	3.5×10 <sup>-3</sup>
泡沫板	0.032~0.04	1.38	2.5×10 <sup>-4</sup>

2.2 建筑外立面模型设计

设计一面比例为 1:2 的缩尺外墙面模型,宽 3 m、高 1.8 m。饰面砖尺寸为 240 mm×60 mm×5 mm,颜色选取淡黄色、红色以及黑色,涵盖了建筑外墙常用的色系。为了确保试验结果的准确性和可靠性,纸盒的尺寸设计是试验设计中的关键环节。参考文献[14,16,18]中空鼓常见尺寸,为了排除其他变量的干扰,统一设计 3 种尺寸,分别为 100 mm×100 mm、100 mm×50 mm 和 50 mm×50 mm,见表 2,空鼓缺陷布置过程见图 2。为了分析不同缺陷特征的影响,每种颜色饰面砖分别划分为 3 个区域,每个区域内埋置 3 组不同参数的空鼓缺陷,每组缺陷间距为 0.2 m,具体分布如图 3 所示。选用黏土砖作为基层材料,其尺寸为 240 mm×115 mm×53 mm,强度等级为 MU15。黏土砖的热导率约为 0.8 W/(m·K),比热容为 840 J/(kg·K)。黏结层采用的水泥砂浆由普通硅酸盐水泥与河沙按 1:2 的比例混合,水泥的强度等级为 42.5 级。水泥砂浆的热导率为 1.1 W/(m·K),比热容约为 1 000 J/(kg·K),找平层厚度为 15 mm,保证试验模型与实际建筑材料一致。

表 2 空鼓尺寸设置

Table 2 Size setting of hollowing

空鼓编号	尺寸	厚度/mm	埋深/mm	空鼓编号	尺寸	厚度/mm	埋深/mm
A1-1	50 mm×50 mm	8	10	A5-3	100 mm×100 mm	8	15
A1-2	50 mm×100 mm	8	10	A6-1	50 mm×50 mm	12	10
A1-3	100 mm×100 mm	8	10	A6-2	50 mm×100 mm	12	10
A2-1	50 mm×50 mm	8	15	A6-3	100 mm×100 mm	12	10
A2-2	50 mm×100 mm	8	15	A7-1	50 mm×50 mm	8	10
A2-3	100 mm×100 mm	8	15	A7-2	50 mm×100 mm	8	10
A3-1	50 mm×50 mm	12	10	A7-3	100 mm×100 mm	8	10
A3-2	50 mm×100 mm	12	10	A8-1	50 mm×50 mm	8	15
A3-3	100 mm×100 mm	12	10	A8-2	50 mm×100 mm	8	15
A4-1	50 mm×50 mm	8	10	A8-3	100 mm×100 mm	8	15
A4-2	50 mm×100 mm	8	10	A9-1	50 mm×50 mm	12	10
A4-3	100 mm×100 mm	8	10	A9-2	50 mm×100 mm	12	10
A5-1	50 mm×50 mm	8	15	A9-3	100 mm×100 mm	12	10
A5-2	50 mm×100 mm	8	15				

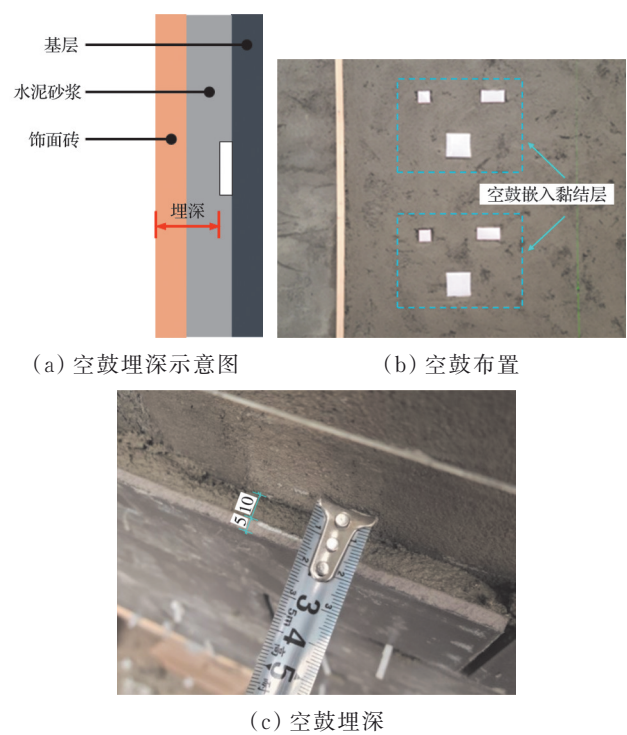


图 2 空鼓制作与埋置

Fig. 2 Production and embedment of hollowing

2.3 试验设备与试验方法

2.3.1 试验设备

根据建筑饰面层的热传递规律,利用大疆 M30 T 无人机平台,搭载热成像相机(分辨率 640×512@30 Hz,测温精度±2℃)和激光测距仪(精度±(0.2 m+D×0.15%)),对外墙模型中的空鼓缺陷进行检测。同时,选定 F3C 型红外加热仪(最大功率为 3 600 W,有效加热面积为 1.2 m×1.4 m),确保了试验中所需的温度条件。

2.3.2 试验方法

饰面砖外墙采用 3 个 1 200 W 的红外线加热灯

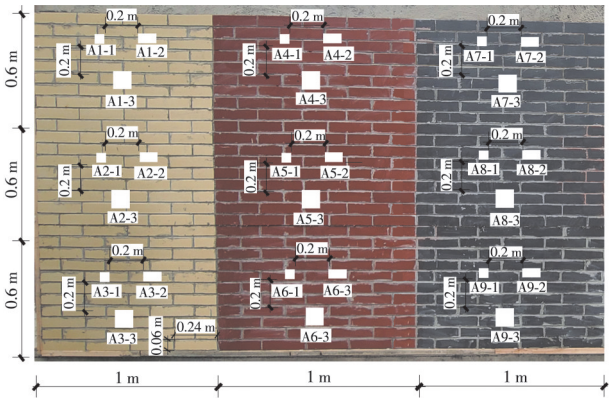


图 3 空鼓布置

Fig. 3 Layout of hollowing

管进行加热,通过 F3C 型红外加热仪并联,可调整加热功率,如图 4(a)所示。将红外加热装置布置在需加热区域正前方 0.5 m 处,并在墙面上粘贴温湿度测量仪,设置红外加热装置,功率为 70%(2 520 W),对墙面进行加热,当墙面气温达到 37℃后,调整加热装置功率为 55%,恒温 10 min,以模拟日照情况,之后迅速撤除加热装置,并用无人机的红外热像仪和可见光摄像头同时进行检测,同时将红外热像仪的发射率设置为 0.95,连续观察 24 min,每分钟记

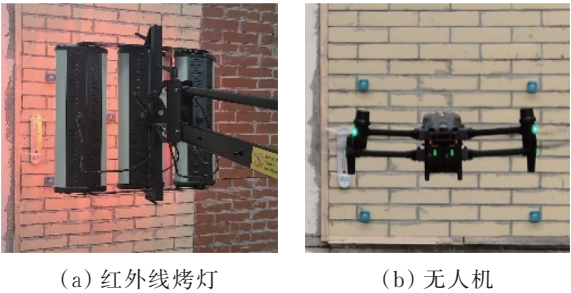


图 4 试验设备

Fig. 4 Test equipment

录一次,如图4(b)所示。

文献[11]采用热源模糊聚类二值分割和支持向量机方法,提取出缺陷区域图像。文献[12]通过阐明红外热像检测原理,介绍了EPS板薄抹灰外保温模型中红外热像检测和温度提取流程。文献[13]根据改进的U-Net模型,实现连续分割和复杂背景中有效识别的效果。参考文献[11-13],笔者采用DJI Thermal Analysis Tool软件进行温度数据提取,在导入红外热成像图后,读取任一点成像温度值、区域温度平均值和最大、最小值等。为了自动确定最佳阈值并精确提取边缘信息,采用Otsu方法和Canny算法进行空鼓缺陷面积计算,计算流程如图5所示。红外热成像图通常是伪RGB图像,其中R、G、B通道对应的是不同颜色的映射。采用MATLAB对红外热像图进行图像灰度化处理,将不同颜色分量转换为一个二维矩阵灰度图像,矩阵中每一个元素值都是灰度值,如式(1)所示。

$$I = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (1)$$

式中: $R$ 、 $G$ 、 $B$ 为RGB的3个分量; $I$ 为二维矩阵中的灰度值。

采用Otsu方法,通过最大化类间方差来自动计算最佳阈值,进行阈值分割,将图像中的缺陷和非缺陷区域分割开,如式(2)所示。

$$B(x,y) = \begin{cases} 0, f(x,y) < T \\ 1, f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 为原图像在 $(x,y)$ 处的灰度值; $T$ 为阈值; $B(x,y)$ 为阈值分割后得到的二值化图像。

采用Canny算法,对图像进行高斯滤波,平滑图像。计算图像的梯度和方向,从图像中寻找灰度变化比较剧烈的像素点,找到图像中的边缘结构,对梯度方向进行非极大值抑制,将梯度沿着梯度方向投影到相邻两个像素,只保留局部最大值,见式(3)。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \cdot I(x,y) \quad (3)$$

$$\begin{cases} G_x = \frac{\partial G}{\partial x} \\ G_y = \frac{\partial G}{\partial y} \\ \theta = \arctan \frac{G_y}{G_x} \end{cases} \quad (4)$$

$$M(x,y) > M(x + \text{sgn}(G_x), y + \text{sgn}(G_y)), \text{ 且 } M(x,y) > M(x - \text{sgn}(G_x), y - \text{sgn}(G_y)) \quad (5)$$

式中: $I(x,y)$ 为原始输入图像在位置 $(x,y)$ 处的灰度值; $G(x,y)$ 为高斯滤波器。 $G_x$ 、 $G_y$ 分别为图像在 $x$ 和 $y$ 方向的梯度; $\theta$ 为梯度的方向角度。 $M(x,y)$ 为当前像素点 $(x,y)$ 在梯度方向 $\theta(x,y)$ 邻域中两个相邻像素点中的梯度幅值;如果当前像素点的梯度幅值 $G_x$ 、 $G_y$ 在 $\theta(x,y)$ 的邻域中最大,符合式(5),则保留该像素点的梯度值,即 $M(x,y)=M(x,y)$ ,否则该像素点的梯度值 $M(x,y)=0$ 。

进行二值化处理后,空鼓面积可通过统计目标区域像素数量并换算为像素面积获得,流程如图5所示。

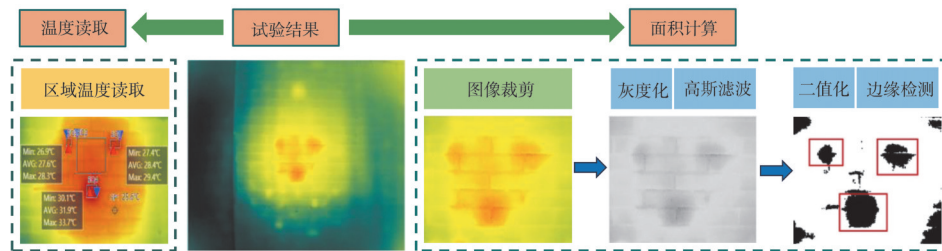


图5 MATLAB红外热成像图处理

Fig. 5 MATLAB infrared thermal imaging map processing

### 3 观测姿态分析

为了便于对比,选用A2组缺陷作为观测对象,以揭示观测距离、立面观测角度和平面观测角度对空鼓缺陷识别精度的影响。

#### 3.1 观测距离

将观测点分别设定在2~7 m的不同距离,具体为2、3、4、5、6、7 m。试验中,红外热像仪的立面角度和平面角度均固定于 $0^\circ$ ,以保证观测条件一致。图6展示了观测距离对空鼓缺陷面积计算精度的影响情况,其中红色曲线代表3个空鼓的总误差,从图6

可以看出,随着观测距离的变大,总误差不断增加。在2 m观测距离时,空鼓总面积的计算总误差仅为2.09%,而在3 m处,总误差增至21.66%。值得注意的是,当观测距离达到7 m时,总误差急剧增加至64.36%。进一步分析发现,在2~3 m的观测距离范围内,对不同尺寸空鼓的识别总误差最低,一般低于10%。总体上,50 mm×50 mm平均误差为47.65%,100 mm×50 mm平均误差为38.24%,100 mm×100 mm平均误差为35.41%。试验结果表明,空鼓缺陷的面积越大,红外热成像检测误差越小。

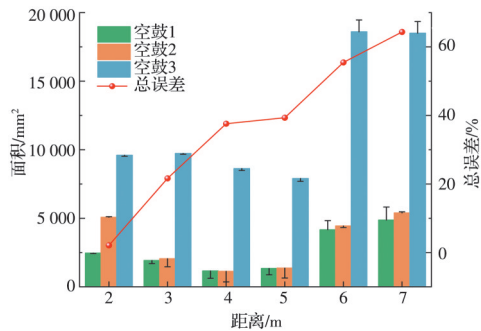


图 6 不同距离的面积测量结果

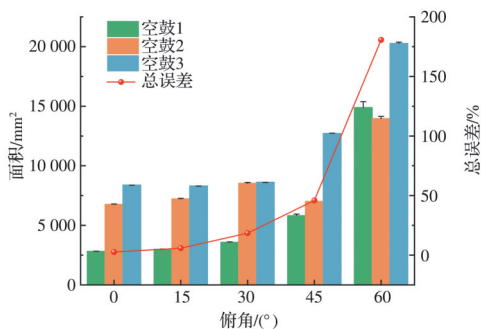
Fig. 6 Area measurement results under different distances

基于试验结果,推荐 UAV-IRT 观测距离为 2~3 m。若观测距离小于 2 m,可能会增加无人机飞行中的碰撞风险;而观测距离超过 3 m,则会导致空鼓轮廓识别和缺陷面积计算的准确率显著下降。

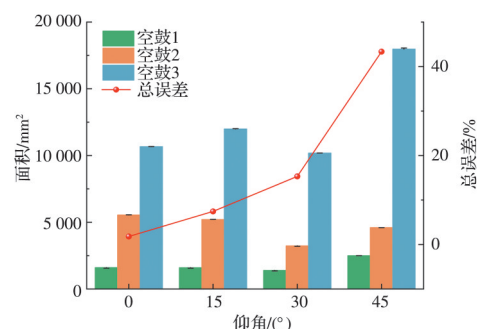
### 3.2 立面观测角度

使用数字水平仪测量无人机相对于墙面的倾斜角度,确保对模型立面进行成像时无人机摄像头与模型立面保持所需的角度。该无人机装备可实现最大 120°俯视角和 45°仰角的高灵活角度拍摄。试验中设置了不同的俯角(0°、15°、30°、45°、60°)以及对应的仰角(45°、30°、15°、0°),同时确保无人机的平面观测角度维持在 0°。

利用 MATLAB 软件对得到的成像数据进行处理,结果如图 7 所示。分析图 7 可以发现,在俯仰角



(a) 俯角面积计算值



(b) 仰角面积计算值

图 7 不同垂直角度的面积测量结果

Fig. 7 Area measurement results under different vertical angles

为 0°时,立面缺陷的面积计算总误差最小,分别为 2.63% 和 1.81%。然而,随着观测角度的增加,面积计算误差显示出明显的线性上升趋势,尤其是在俯角达到 60°时,总误差激增至 180.7%,表明在此角度下的空鼓轮廓识别和缺陷面积计算基本失效。造成这一现象的主要原因是随着观测角度向垂直方向增大,无人机摄像头的成像效果受到透镜畸变的影响而产生偏差,进而导致误差的增加。

在俯角面积计算中,50 mm×50 mm 平均误差为 140.67%, 100 mm×50 mm 平均误差为 73.96%, 100 mm×100 mm 平均误差为 35.33%。具体而言,在 0°面积计算中,50 mm×50 mm 误差为 35.80%, 100 mm×50 mm 平均误差为 10.94%, 100 mm×100 mm 平均误差为 6.65%。结果表明,空鼓缺陷的面积越大,其边界区域对空鼓本身识别的干扰越小,红外热成像检测精度和灵敏度越高。较大的空鼓面积能减少边界区域的干扰,并使得红外设备在不同距离下保持较高的识别精度。而在远距离观测时,较小的空鼓面积误差明显增大,表明红外热成像检测精度和灵敏度与空鼓面积密切相关。

建议在进行立面检测时尽量保持无人机立面观测角度为 0°。在面对复杂环境导致无法实现 0°观测角度的情况下,应优先考虑将立面观测角度控制在 -30°~30°的范围内,以最大程度减小成像误差,确保缺陷识别的准确性。

### 3.3 平面观测角度

无人机在墙体模型前飞行时,通过 GPS 确定其相对于模型的水平位置。试验设置中,平面观测角度分别调整至 0°、15°、30°和 45°,同时保持垂直角度恒定于 0°,并固定观测距离为 2 m。采用旋转云台的方法调整水平观测角度。

不同水平角度下的面积测量结果如图 8 所示。随着水平角度的变化,红外成像的面积计算精度呈现显著波动。在 0°~15°范围内,面积识别总误差相

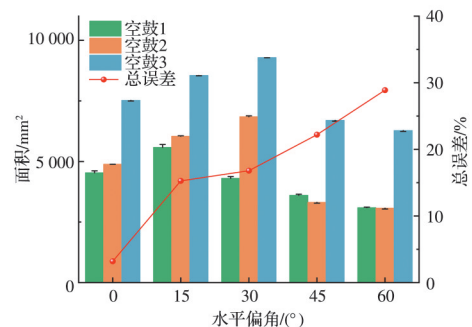


图 8 不同水平角度下的面积测量结果

Fig. 8 Area measurement results under different horizontal angles

对较小,分别为3.20%和15.27%。然而,当平面观测角度增大时,成像精度出现明显下降。为确保无人机红外热成像技术进行缺陷检测的准确性,建议在实际应用中将平面观测角度范围控制在 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间。

50 mm $\times$ 50 mm平均误差为68.89%,100 mm $\times$ 50 mm平均误差为26.45%,100 mm $\times$ 100 mm平均误差为23.32%。由此可见,空鼓面积越小,误差越大,50 mm $\times$ 50 mm空鼓的平均误差显著高于100 mm $\times$ 50 mm和100 mm $\times$ 100 mm。因此,在空鼓检测中,面积较大的空鼓检测精度更高,计算误差更小。

## 4 关键影响因素分析

基于最佳观测姿态参数,进一步探究无人机旋翼产生的风流、空鼓的埋深及其厚度大小以及饰面砖颜色等因素对缺陷识别能力的影响。

### 4.1 无人机旋翼气流

与传统架立式红外仪测量不同,无人机旋翼在工作时对周围环境气流产生较大扰动,从而不可避免地观测对象表面温度造成影响。目前还未见对该影响进行研究的报道,因此,笔者开展了相关测试,探讨其影响的作用及规律。测试方案为,在实施标准化加热后,将无人机安置于专用支撑架上,以确保其处于与实际悬停观测相同的高度。在关闭旋翼转子后,对A2组进行标准化静态观测。

图9为在悬停与静态两种状态下存在空鼓与无空鼓表面温度差异的对比。结果显示,在有空鼓的情况下,3.5、16.5 min时刻的最大温差分别达 $3^{\circ}\text{C}$ ,而在无空鼓条件下,16.5 min时刻的最大温差为 $2.2^{\circ}\text{C}$ 。说明无人机旋翼运转对缺陷表面温度有显著影响,尤其是在有缺陷的表面,无人机旋翼旋转产生的气流导致饰面砖表面降温速度增加10%。旋翼运转产生的气流加快了外墙表面的热量散失,

从而使温度显著下降,说明无人机旋翼旋转气流对红外热成像测试结果的影响不可忽略。然而,尽管在完全开放式场景下旋翼气流对温度的影响可能较为有限,但在某些条件下,无人机旋翼气流会对测量结果带来不可忽略的影响<sup>[19-20]</sup>。尤其是在隧道、地下车库等密闭或半密闭局限空间环境中,使用无人机进行检测和监控时,被检测物体的表面温度易在旋翼气流作用下加速衰减,故此时应着重考虑该影响效应。

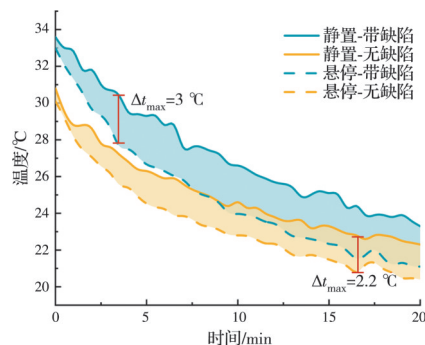


图9 悬停和静止状态下温度测量结果的比较

Fig. 9 Comparison of temperature measurement results under hovering and stationary states

### 4.2 空鼓埋置深度

在对A1、A4、A7(埋深10 mm)以及A2、A5、A8(埋深15 mm)的标本完成标准化加热处理后,部署无人机执行悬停观测任务,并据此绘制这两组试样的温度与位置变化曲线,其路径如图10(a)所示。

图10(b)、(c)展示了沿L1和L2路径选取点的温度曲线峰值。结果表明,当埋深为15 mm时,A2、A5、A8样品的温度明显低于埋深为10 mm的A1、A4、A7组。尤其在100 mm $\times$ 100 mm尺寸的A1-3缺陷中,埋深10 mm的缺陷表面温度最高可达 $34.6^{\circ}\text{C}$ ,而埋深15 mm的A2-3缺陷表面温度最高仅为 $30.4^{\circ}\text{C}$ ,两者温差竟达到 $4.2^{\circ}\text{C}$ 。

图11展示了不同空鼓埋深的温度最大值,从图11可以看出,缺陷的埋深对其表面温度有显著影

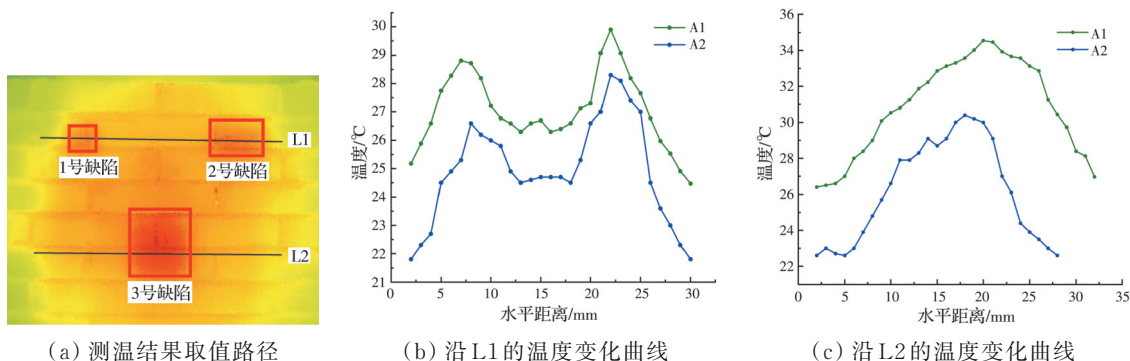


图10 温度变化路径

Fig.10 Temperature variation paths

响,埋得越浅的缺陷,其表面温度越高,因此,在红外热成像检测中的表现也越明显。红外热成像技术反映的是表面与缺陷之间的热传递效果,其温度差异主要是因为埋得更深的缺陷需要更长的热传递距离,导致更多热量在传递过程中散失,所以检测到的温度更低。

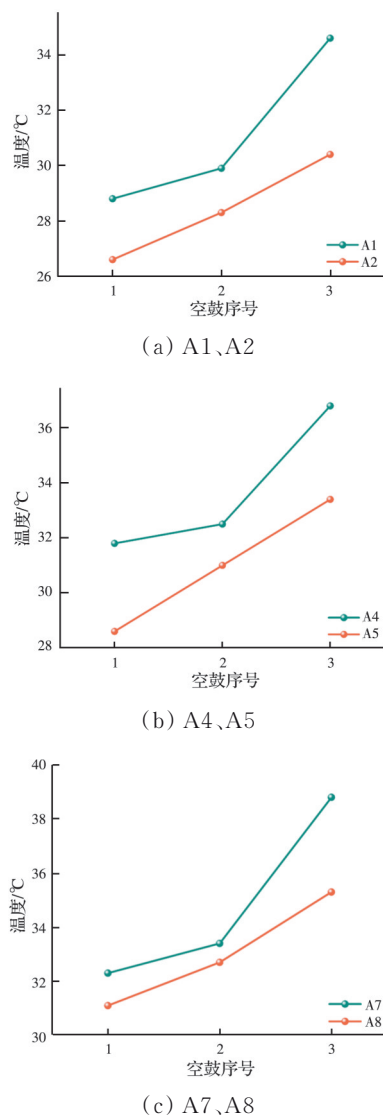


图 11 不同空鼓埋深的温度最大值

Fig. 11 Maximal temperature for different burial depths of hollowing

### 4.3 空鼓厚度

选择厚度为 8 mm 的 A1、A4、A7 组以及厚度为 12 mm 的 A3、A6、A9 组进行分析,提取各组的最高温度值,结果如图 12 所示。

图 12 揭示了缺陷外表面温度与其厚度之间存在直接关联性。具体来说,厚度为 12 mm 的 A3、A6、A9 试样温度均高于厚度为 8 mm 的 A1、A4、A7 试样。在对具有相同尺寸(100 mm×100 mm)的 A6-3 与 A4-3 缺陷进行测量时,相应缺陷位置的表

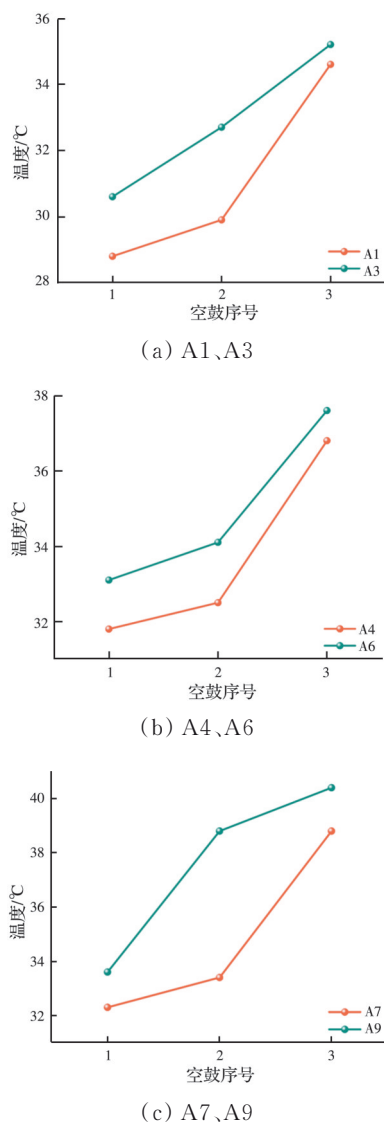


图 12 不同空鼓厚度温度最大值

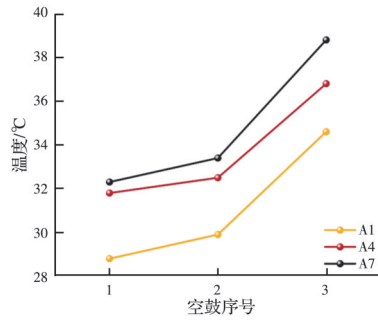
Fig. 12 Maximal temperature for different thicknesses of hollowing

面温度分别为 37.6、36.8 °C,两者温差为 0.8 °C。而在另一组尺寸为 50 mm×100 mm 的 A9-2 与 A7-2 缺陷的测量中,记录的缺陷位置表面温度分别为 38.8、33.4 °C,温差高达 5.4 °C。这种温度差异表明,较厚空鼓组由于具有更强的热蓄能能力,冷却速度更慢,进而导致更高的表面温度。

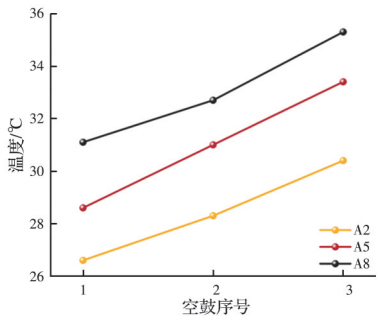
### 4.4 饰面砖颜色

对黄色、红色和黑色的饰面砖进行标准化加热处理后,维持无人机于固定位置,并沿既定路径记录最高温度值,结果见图 13。

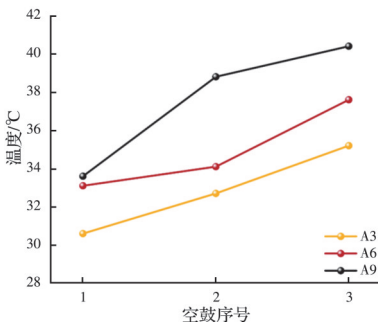
从图 13 可以看出,采用黄色饰面砖的空鼓缺陷呈现出最低的成像温度,而采用黑色饰面砖的空鼓缺陷呈现出最高的成像温度。比如,黑色饰面砖覆盖的 A2-2、A5-2、A8-2 组的成像温度大约为 32.7 °C,而红色和黄色饰面砖缺陷的成像温度分别约 31、28.3 °C。



(a) A1、A4、A7



(b) A2、A5、A8



(c) A3、A6、A9

图13 不同颜色饰面砖的空气温度最大值

Fig. 13 Maximal air temperature for hollowing of different color tiles

这种温度差异的根源在于不同颜色对红外辐射吸收能力的差异。黑色和红色的饰面砖能吸收更多红外辐射,呈现出更高的成像温度,而淡黄色的饰面砖反射红外辐射,其成像温度较低。因此,在红外热成像中,黑色和红色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏高,淡黄色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏低。

## 5 识别空鼓缺陷的温差阈值

在相同条件下,存在空鼓缺陷的区域通常比无缺陷区域的温度高,展现出显著的温度差异,如图14所示。近年来,有学者对采用温度阈值进行空鼓判别的方法开展研究,并应用于实际工程案例<sup>[21-22]</sup>。因此,该方法与实际场景可以建立关联,即当采用无人机检测时,可以快速直观地得到温度色阶为参数的热成像图。但这种热成像图往往存在边界模糊和区域分散等问题,需要定量参数进行界定,将

实际场景中热成像图的定性判断初步转化为定量判断。基于此,提出一个用于识别空鼓缺陷的温度阈值,用于区分空鼓与非空鼓区域的关键边界临界值。选择边界模糊分界区域进行温度测量,即在边界相邻的点位进行检测。外墙饰面砖缺陷的温差阈值 $\Delta T$ 为

$$\Delta T = T_q - T_w \quad (6)$$

式中: $T_q$ 为缺陷处表面温度; $T_w$ 为无缺陷处表面温度。

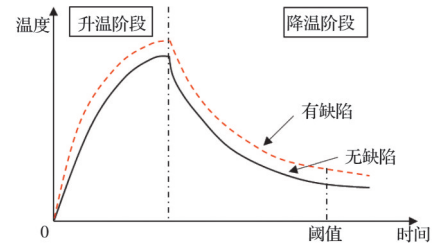
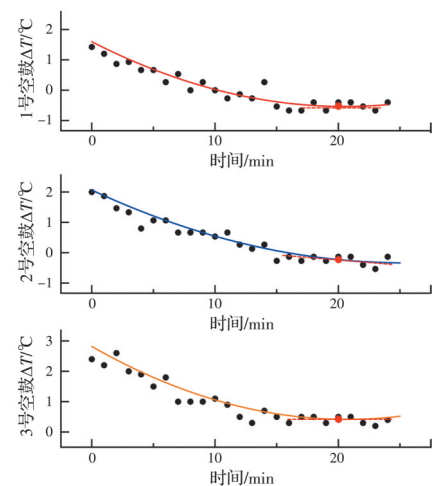


图14 升温与降温曲线示意图

Fig. 14 Schematic diagram of heat-up and cool-down curves

从A2样本的3种不同空鼓尺寸中选择最佳观测姿态记录的温度数据,揭示冷却过程中温度差异与时间的相关性,如图15所示。结果表明,在20 min时,小型空鼓、中型空鼓和大型空鼓的温度变化速率(以导数绝对值表示)分别为0.004、0.028、0.008 °C/s,均小于3%。表明在20 min标记时温度下降速度趋于稳定,温度变化的波动幅度相对一致,因此确定20 min作为观察周期的结束点。

图15 不同空鼓尺寸 $\Delta T$ 与时间的关系Fig. 15 Relationship between  $\Delta T$  and time for different hollowing sizes

为了拓展温差的应用范围,识别和比较了无缺陷状态与空鼓缺陷状态下的曲线末端温度特征。表3展示了各样本的缺陷点(分别标记为1、2、3)与无缺陷点的温度差。

由于试验数据采集过程中出现时间延迟问题,

表 3 各缺陷与无缺陷温度记录表

Table 3 Temperature record for each defect and no defect

空鼓 编号	温度/℃						
	无缺陷	1	$\Delta T_1$	2	$\Delta T_2$	3	$\Delta T_3$
A1	22.3	22.3	0	23.1	0.8	22.8	0.5
A2	21.1	21.1	0	22.1	1.0	21.9	0.8
A3	18.4	18.5	0.1	19.7	1.3	19.4	1.0
A4	21.1	21.5	0.4	21.8	0.7	21.8	0.7
A5	22.6	23.1	0.5	23.4	0.8	24.1	1.5
A6	22.1	22.1	0	22.9	0.8	23.2	1.1
A7	22.9	23.1	0.2	23.9	1.0	23.9	1.0
A8	22.1	22.5	0.4	23.0	0.9	23.2	1.1
A9	20.3	20.4	0.1	21.2	0.9	21.1	0.8
B1	23.2	23.9	0.7	23.9	0.7	23.7	0.5
B2	24.1	24.8	0.7	24.9	0.8	24.9	0.8
B3	25.6	26.4	0.8	26.6	1.0	26.6	1.0
平均值			0.325		0.892		0.9
标准差			0.082		0.026		0.072

50 mm×50 mm 的空鼓(A2-1)在热像图上已难以区分,其周围完整区域的温度值接近,因此,该数据点被视为无效,不予分析。针对 50 mm×100 mm 和 100 mm×100 mm 的空鼓情况,计算  $\Delta T$  的平均值及其标准差,分别为 0.892℃(标准差为 0.026)和 0.9℃(标准差为 0.072),建议统一按 0.9℃考虑。

6 UAV-IRT 饰面砖空鼓缺陷识别应用

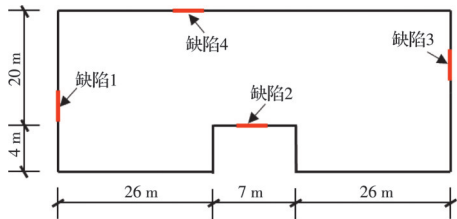
为验证提出方法的准确性和实用性,进行了 4 组实际工程应用。以成都某小区住宅楼为依托,通过走访调研,明确了存在脱落风险的缺陷位置。相关文献<sup>[23-24]</sup>指出,在既有缺陷范围的周边区域容易

出现各类衍生缺陷,如裂缝的延伸、空鼓的拓展等,而在对既有缺陷修复时,往往只针对明显观察到的缺陷区域,忽略了对其周围区域的进一步检测。所以,修补区域及其周边亦存在缺陷风险。基于此,选取图 16 中的 4 处区域作为检测对象,采用灰色饰面砖作为外墙饰面,见图 16。测试时间为 2023 年 4 月 11 日 15:00,当天气温为 29℃,具体结果见图 17。

无人机采集红外热成像图的过程均参照室内试验得到的无人机最佳拍摄姿态,为了确保无人机在实际操作中能精确地遵循这些参数设置,采取了以下措施:



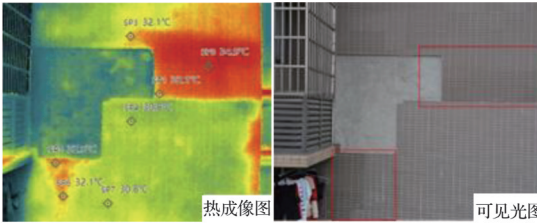
(a) 建筑立面图



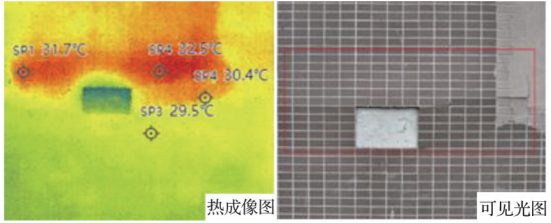
(b) 建筑平面示意图

图 16 成都某小区住宅楼

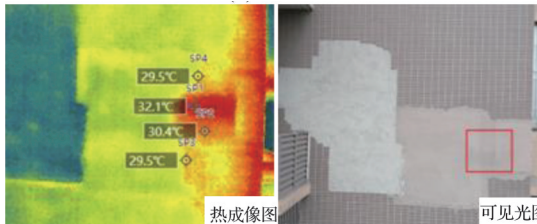
Fig. 16 A high-rise residential building in Chengdu



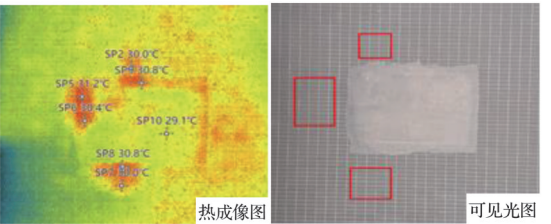
(a) 缺陷 1



(b) 缺陷 2



(c) 缺陷 3



(d) 缺陷 4

图 17 基于  $\Delta T$  的饰面砖空鼓识别

Fig. 17 Rapid identification of hollowing in facade tiles based on  $\Delta T$

1)预先设定无人机的飞行路径和拍摄角度:根据室内试验的结果,在无人机的控制系统中预设了具体的飞行路径和角度,确保每次飞行时无人机都能自动调整到预定的最佳拍摄姿态。

2)使用高精度的定位和导航系统:无人机配备了高精度的 GPS 和陀螺仪系统,可以使无人机在飞行过程中保持稳定,并精确地调整到所需的拍摄角度。

3)现场监控和调整:在室外试验期间,操作团队实时监控无人机的拍摄数据和飞行状态,确保其符合预设参数。如有必要,及时调整无人机的姿态,以适应外部环境变化。

在室内试验中,由于空鼓的实际尺寸是已知的,通过大量的迭代来比较热成像图中空鼓与实际空鼓尺寸上的差异,以精确调整并优化处理红外热图像中空鼓的阈值分割参数,确保了其在区分正常部分与缺陷部分时的高度准确性。处理室外试验中的红外热成像图时,采用 MATLAB 算法和相同的阈值分割参数对正常部分和缺陷部分进行定量判断。

采用 MATLAB 算法对拍摄所得红外热成像图进行二值化处理后,根据颜色差异来识别空鼓的区域,并选择边界相邻的点位进行温度测量。表 4 记录了 4 组缺陷的无人机热成像检测结果,显示了正常区域与空鼓区域的温度差异。在缺陷 1 中,正常区域温度为 30.8℃,而空鼓区域温度为 32.1℃,温差达到 1.3℃。缺陷 2 和缺陷 3 中的温差分别为 0.9℃和 0.9℃。缺陷 4 中的温差分别为 0.9℃和 1.3℃。

表 4 实地检测结果  
Table 4 Field testing results

缺陷	无缺陷温度/℃	有缺陷温度/℃	温差/℃
缺陷 1	30.8	34.9	4.1
缺陷 1	30.8	32.1	1.3
缺陷 2	29.5	30.4	0.9
缺陷 3	29.5	30.4	0.9
缺陷 4	29.1	30.0	0.9
缺陷 4	29.1	30.4	1.3
缺陷 4	29.1	30.0	0.9

由此可见,空鼓区域的温度普遍高于正常区域。所有缺陷中空鼓区域的温差均 $\geq 0.9\text{℃}$ 的阈值,特别是在缺陷 1 中,最大温差高达 4.1℃。结果验证了提出的无人机热成像检测方法的可行性和相关参数的适用性,也展示了该技术的潜力,可广泛应用于建筑饰面层外立面空鼓缺陷的初步识别与诊断。

7 结论

通过开展基于 UAV-IRT 技术的室内试验研究,提出了无人机识别外墙饰面砖空鼓的观测姿态控制参数、关键影响因素及规律和判别温差阈值,并应用于实际工程。主要结论如下:

1)UAV-IRT 技术识别空鼓的最佳观测姿态为距离 2 m,立面观测角度 0°,平面观测角度 0°;合理观测姿态为距离 2~3 m,立面观测角度-30°~30°、平面观测角度-15°~15°,超出合理观测姿态会导致结果不准确。同时,空鼓尺寸越大,其边界区域对空鼓本身的干扰越小,红外热成像检测精度和灵敏度越高。

2)无人机旋翼工作时产生的气流扰动会使外墙温度降温速度增加 10%,尤其在密闭或半密闭环境中,该影响效应不应忽略。空鼓尺寸越大、深度越浅、厚度越大,识别效果越好;黑色和红色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏高,淡黄色饰面砖内的空鼓缺陷温度偏低。

3)提出一种用于外墙饰面砖空鼓识别的温差阈值,空鼓温差阈值 $\Delta T$ 取 0.9℃可初步识别空鼓所在区域。

无人机技术虽能较好地检测建筑外立面缺陷,但总体而言,空鼓缺陷面积越大,检测精度和灵敏度越高。当然,红外热成像检测灵敏度除了受到空鼓尺寸的影响,还会受到空鼓所在的位置、环境因素等方面影响。例如,强风可能导致无人机稳定性降低,从而影响红外图像的质量;强烈的阳光直射可能改变墙面的温度分布,影响空鼓缺陷的热特性识别。因此,未来研究中尚需进一步充分考虑上述因素带来的影响,不断完善无人机红外热成像技术在建筑检测领域的应用,为建筑长期运营的安全评估和维护提供一个更为可靠和有效的工具。

参考文献

[1] 王璞瑾,肖建庄,段珍华,等. 建筑物外立面损伤检测智能化发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 24-37.  
WANG P J, XIAO J Z, DUAN Z H, et al. Intelligent development trend of building enclosure damage detection [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 24-37. (in Chinese)  
[2] 建筑工程饰面砖黏结强度检验标准: JGJ/T 110—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Testing standard for adhesive strength of tapestry brick of construction engineering: JGJ/T 110—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in

- Chinese)
- [3] 朱庆, 尚琪森, 胡翰, 等. 三角网模型多目标加权最短路径的特征线提取[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 116-122.
- ZHU Q, SHANG Q S, HU H, et al. Feature line extraction from 3D model of oblique photogrammetry based on multi-objective weighted shortest path [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 116-122. (in Chinese)
- [4] 王家亮, 董楷, 顾兆军, 等. 基于极大化思想的无人机安全避障域识别算法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(6): 1267-1276.
- WANG J L, DONG K, GU Z J, et al. Recognition algorithm of safe obstacle avoidance domain for UAVs based on maximization idea [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(6): 1267-1276. (in Chinese)
- [5] OMAR T, NEHDI M L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography [J]. Automation in Construction, 2017, 83: 360-371.
- [6] 王俊伟, 周云, 赵鸿, 等. 既有建筑外墙无人机检测技术应用[J]. 住宅科技, 2020, 40(1): 39-42.
- WANG J W, ZHOU Y, ZHAO H, et al. Technology application in exterior wall detection of existing building by unmanned aerial vehicle [J]. Housing Science, 2020, 40(1): 39-42. (in Chinese)
- [7] 周斌, 陆斌, 夏超凡. 无人机红外热成像法在高层建筑外墙保温缺陷检测中应用研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2022(7): 205-208.
- ZHOU B, LU B, XIA C F. Study on the application of UAV infrared thermal imaging method in the detection of external wall insulation defects of high-rise buildings [J]. China Science and Technology Journal Database Industry A, 2022(7): 205-208. (in Chinese)
- [8] WETZEL A, ZURBRIGGEN R, HERWEGH M, et al. Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 335-348.
- [9] MAHABOONPACHAI T, MATSUMOTO T, INABA Y. Investigation of interfacial fracture toughness between concrete and adhesive mortar in an external wall tile structure [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30(1): 1-9.
- [10] MELO A C, COSTA E SILVA A J, TORRES S M, et al. Influence of the contact area in the adherence of mortar-Ceramic tiles interface [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118274.
- [11] 彭雄, 钟新谷, 赵超, 等. 基于无人机热成像的建筑饰面层脱粘缺陷识别[J]. 红外技术, 2022, 44(2): 189-197.
- PENG X, ZHONG X G, ZHAO C, et al. Debonding defect recognition of building decoration layers by UAV thermography [J]. Infrared Technology, 2022, 44(2): 189-197. (in Chinese)
- [12] 陈溪, 王卓琳, 许清风, 等. 红外热像技术在外墙外保温系统安全性检测中的应用研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(10): 105-112.
- CHEN X, WANG Z L, XU Q F, et al. Research on the application of infrared thermal imaging technology in the safety inspection of external wall thermal insulation system [J]. Building Structure, 2023, 53(10): 105-112. (in Chinese)
- [13] 刘少华, 任宜春, 郑智雄, 等. 基于航拍图像与改进 U-Net 的建筑外墙裂缝检测方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 223-231.
- LIU S H, REN Y C, ZHENG Z X, et al. Building exterior wall crack detection based on aerial images and improved U-Net [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 223-231. (in Chinese)
- [14] GARRIDO I, BARREIRA E, ALMEIDA R M S F, et al. Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building façades [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 121: 104012.
- [15] 刘强, 胡玉琨, 朱红光, 等. 基于红外检测的外墙饰面砖黏结质量缺陷识别方法研究[J]. 建筑技术, 2015, 46(10): 924-926.
- LIU Q, HU Y K, ZHU H G, et al. Research on infrared detection method for adhering quality defect of external wall finishing tile [J]. Architecture Technology, 2015, 46(10): 924-926. (in Chinese)
- [16] 许鑫浩, 徐福泉, 刘英利, 等. 红外热成像法检测预制混凝土构件外饰面内部缺陷试验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(7): 52-59.
- XU X H, XU F Q, LIU Y L, et al. Experimental study on the detection of internal defects of precast concrete components by infrared thermal imaging [J]. Building Science, 2021, 37(7): 52-59. (in Chinese)
- [17] ZHU D R, LI J G, WANG F B, et al. A method for extracting contours of building facade hollowing defects using polarization thermal images based on improved canny algorithm [J]. Buildings, 2023, 13(10): 2563.
- [18] 冯力强, 王欢祥, 晏大玮, 等. 红外热像法检测建筑外墙饰面层内部缺陷试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 51-56.
- FENG L Q, WANG H X, YAN D W, et al. Experimental study on internal defects detection of exterior wall finish coat by infrared thermography [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 51-56. (in Chinese)
- [19] 侯天浩, 行鸿彦, 刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的现状与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 7-15.
- HOU T H, XING H Y, LIU Y. Current status and

- prospects of multi-rotor UAVs use in meteorological detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 7-15. (in Chinese)
- [20] 孟宪罗. GMX500 微型气象站在多旋翼无人机气象探测系统中的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(5): 240-244, 248.
- MENG X L. Application of MaxiMet GMX500 in meteorological observation system of multi-rotor UAV [J]. Automation & Instrumentation, 2023(5): 240-244, 248. (in Chinese)
- [21] 邵正建. 一种外墙饰面砖空鼓的红外检测方法[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
- SHAO Z J. Infrared detection method for hollowing of exterior wall decorative tiles [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] 王嘉怡, 段中兴. 建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 74-81.
- WANG J Y, DUAN Z X. Infrared thermal imaging detection of surface cracks in external insulation layer of building exterior wall [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 74-81. (in Chinese)
- [23] BORDALO R, DE BRITO J, GASPAR P L, et al. Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems [J]. Building Research & Information, 2011, 39(1): 66-78.
- [24] SILVESTRE J D, DE BRITO J. Inspection and repair of ceramic tiling within a building management system [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22 (1): 39-48.
- (编辑 胡英奎)