

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.009

# 建筑外墙饰面层内部缺陷红外热像法检测试验研究

冯力强<sup>1,2</sup>, 王欢祥<sup>2</sup>, 晏大伟<sup>3</sup>, 刘吉林<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 甘肃省建设投资(控股)集团总公司, 兰州 730050;  
3. 甘肃省建筑科学研究院, 兰州 730050)

**摘要:**利用红外热像仪对建筑外墙饰面层(包括砂浆饰面层和饰面砖饰面层)内部缺陷进行检测试验,研究饰面层内部缺陷在外部热源辐射下的表面温度变化特征,得出饰面层表面温度随时间、空间的分布及变化规律,并分析内部缺陷的厚度、面积大小、埋置深度等因素对红外热成像效果的影响。试验结果表明,厚度越大、面积越大、深度越浅的内部缺陷越容易被检测出来;缺陷沿其宽度方向的表面温度关于其最大温度点呈近似对称关系。基于试验结果,采用统计分析的方法建立了缺陷面积大小预测模型。

**关键词:**饰面层;红外热成像;表面温度;预测模型;缺陷

**中图分类号:**TU746.2; TU767.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)02-0057-05

## Experimental Analysis of Infrared Thermography for Detecting Internal Defects of Decorative Layer on Exterior Wall

Feng Liqiang<sup>1,2</sup>, Wang Huanxiang<sup>2</sup>, Yan Dawei<sup>3</sup>, Liu Jilin<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;  
2. Gansu Construction Investment (Holding) Group General Company, Lanzhou 730050, P. R. China;  
3. Gansu Academy of Building Research, Lanzhou 730050, P. R. China)

**Abstract:** Internal defects of decorative layer on exterior wall, including mortar and ceramic tile decorative layers, were detected using thermal infrared imager. Variable characteristics of surface temperature for decorative layer heated by external heating source were studied. The distribution and variation law of surface temperature on decorative layer with time and space were obtained, and the influences of thickness, area and embedded depth of internal defect on image quality were analyzed. It is revealed that the thicker, bigger and shallower internal defect are more easily detected. The surface temperature of internal defect is maximum temperature point of approximate symmetry along with width direction. Based on the test results, the prediction model of dimensions for internal defect was established through statistical analysis technique, which can provide a reference for the related follow-up study and practical project application.

**Key words:** decorative layer; infrared thermography; surface temperature; prediction model; defects

砂浆饰面层和饰面砖饰面层在建筑外墙的装饰系统中大量使用,并取得了良好的工程应用效果。但由于环境影响或施工质量等原因,饰面层与主体

钢筋混凝土结构之间经常会产生脱开现象,且随着时间的推移,在雨水、风及地震等的作用下,脱开面积会逐渐增大,最终导致砂浆从主体结构上剥离、脱

收稿日期:2013-11-13

基金项目:甘肃省科技支撑计划(1104GKCA053)

作者简介:冯力强(1967-),男,教授级高级工程师,博士生,主要从事工程灾害监测与防治研究,(E-mail)fenglq168@si-na.com。

落,从而造成安全隐患。因此,需要采用有效的预防措施以避免该类事故的发生。

建筑外墙饰面层内部缺陷检测技术已发展为一个新兴行业,检测技术也随着计算机技术的发展而不断进步。传统的目测法和锤击法已逐渐被脉冲雷达法和红外热像法等可视化检测技术所取代,其中,红外热像法因其快速、无接触、远距离、范围广等优点<sup>[1]</sup>,近年来在建筑外墙质量控制中得到广泛应用。已有诸多学者对红外热像法在建筑外墙质量控制方面进行了研究<sup>[2-5]</sup>,并取得了良好的实际工程应用效果<sup>[1,6-9]</sup>。中国在该方面的研究相对较少<sup>[10-12]</sup>,工程应用案例<sup>[13-14]</sup>亦为数不多。从既有的研究成果来看,红外热像检测技术在建筑外墙饰面层内部缺陷判断上,主要处于定性分析阶段,尚缺乏定量化分析模型。为了更好的推广该项技术在建筑外墙饰面层粘接质量检测中的应用,笔者在国家住房和城乡建设部“2010 工程建设标准规范制订、修订计划”的要求下,对红外热像法检测建筑外墙饰面层内部缺陷进行室内试验研究,建立了内部缺陷大小预测模型。

## 1 红外热像仪检测原理

红外线是一种波长介于  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$  之间的电磁波。自然界中任何处于绝对零度 ( $-273.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 以上的物体,都会因为自身分子的运动而产生红外辐射。红外热像检测技术正是利用红外辐射对物体或材料表层进行检测、测量,并将不可见的红外辐射转化为可见图像的一种技术<sup>[15]</sup>。

红外热像仪主要由配备了一系列可变光学系统的照相机和微型计算机组成。照相机的核心部件是红外探测器,用来吸收被检测物体辐射出的红外线能量,并转化为电子电压或电流,从而得到物体表面的热分布(任何物体释放的能量与其表面温度呈比例关系),再经图像处理系统,最终以热像图的形式在显示器上显现。其工作原理如图 1 所示<sup>[15]</sup>。

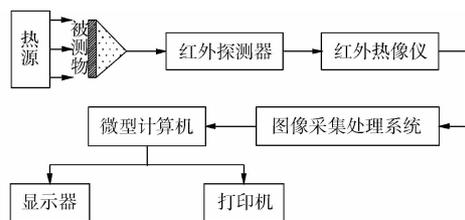


图 1 红外热像仪检测系统示意图

红外热像仪显示的热像图能很好地反映被检测物表面的热分布及温度的差异<sup>[16]</sup>。当结构或材料内部存在缺陷时,在外部热源作用下,由于缺陷部位

的热传导性能与其他位置有所不同,导致被检测物表面的温度场产生变化,从而可准确判断出缺陷的位置。

## 2 试验概况

### 2.1 试件设计

试验利用室内既有墙面(C30 混凝土板墙),在其表面进行砂浆饰面层和饰面砖饰面层的施工。砂浆饰面层和墙体以及粘接砂浆与饰面砖之间预先埋设空鼓,以模拟内部缺陷。由于实际工程中,空鼓内部介质主要为空气,所以空鼓材料选用与空气热传导性能相近的发泡苯乙烯板。

为研究缺陷的厚度、面积大小及埋置深度对热成像效果的影响,试验共设计 2 块饰面砖饰面层试件和 8 块砂浆饰面层试件,每块试件布置 4 个面积不等的空鼓。各试件主要参数如表 1 所示,试件尺寸及空鼓分布见图 2。

表 1 试件编号及主要参数

试件编号	空鼓埋置深度/mm	空鼓厚度/mm	空鼓尺寸/(mm×mm)
S1		1.0	
S2		2.0	
M1-1	20	0.2	
M1-2	20	0.4	100×100
M1-3	20	1.0	100×80
M1-4	20	2.0	100×60
M2-1	30	0.2	80×50
M2-2	30	0.4	
M2-3	30	1.0	
M2-4	30	2.0	

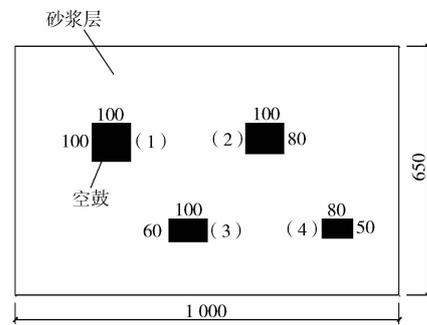


图 2 试件尺寸及空鼓分布(单位:mm)

### 2.2 试验装置及测试方法

将 5 个 1 200 W 的红外灯均匀分布在距试件正前方 1 m 远的  $1 \text{ m} \times 0.65 \text{ m}$  范围内,对饰面层进行加热,并利用热流-温度巡回仪测量饰面层表面处空气温度。当空气温度达到  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  后,移除红外灯,以红

外热像仪(型号:FlukeTi50FT,测温度范围: $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度: $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,发射率:0.95)代之,对饰面层进行连续监测,并适时拍摄红外热像图。试验装置如图3所示,饰面层表面处空气温度变化曲线如图4所示。

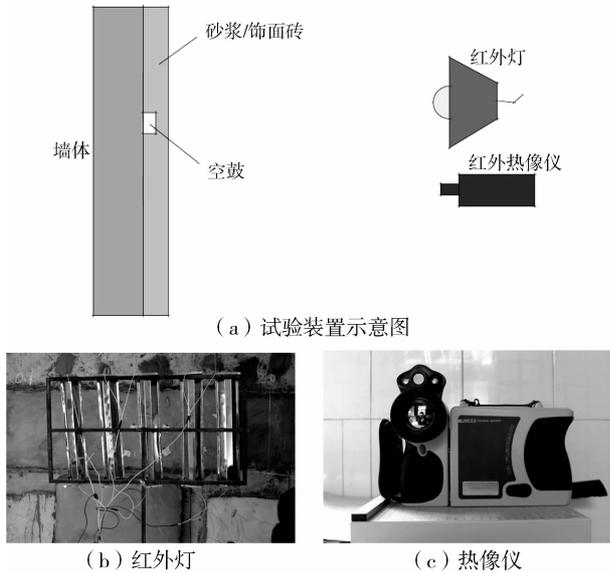


图3 试验布置示意图及装置

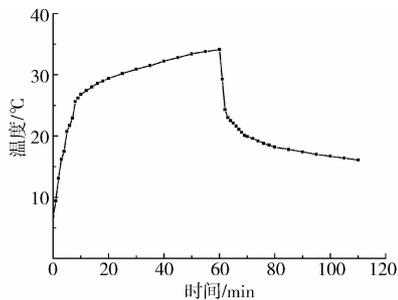


图4 饰面层表面处空气温度-时间曲线

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 成像效果比较

图5所示为移除红外灯后,部分试块在不同时刻下的高度对比热成像图。由图可以看出,有内部缺陷部位的表面温度较无缺陷部位的明显偏高,且表面最高温度随着外部环境温度的降低而降低。这是由于红外灯的加热,使饰面层的内部温度升高,移除红外灯之后,饰面层的温度高于周围环境温度,其内部热量向周围环境流动;当热流在饰面层内部遇到缺陷时,其内部的热传导会受到影响,由于砂浆和饰面砖的导热系数大于发泡苯乙烯材料,所以使缺陷表面的温度高于完好部位的表面温度,形成“热点”。随着热量的持续流动,饰面层内部热量逐渐减

小,表面温度随之降低,热成像效果变差。同时,由于饰面砖的热传导系数大于砂浆且离散性较小,所以饰面砖饰面层的热成像效果明显优于砂浆饰面层。

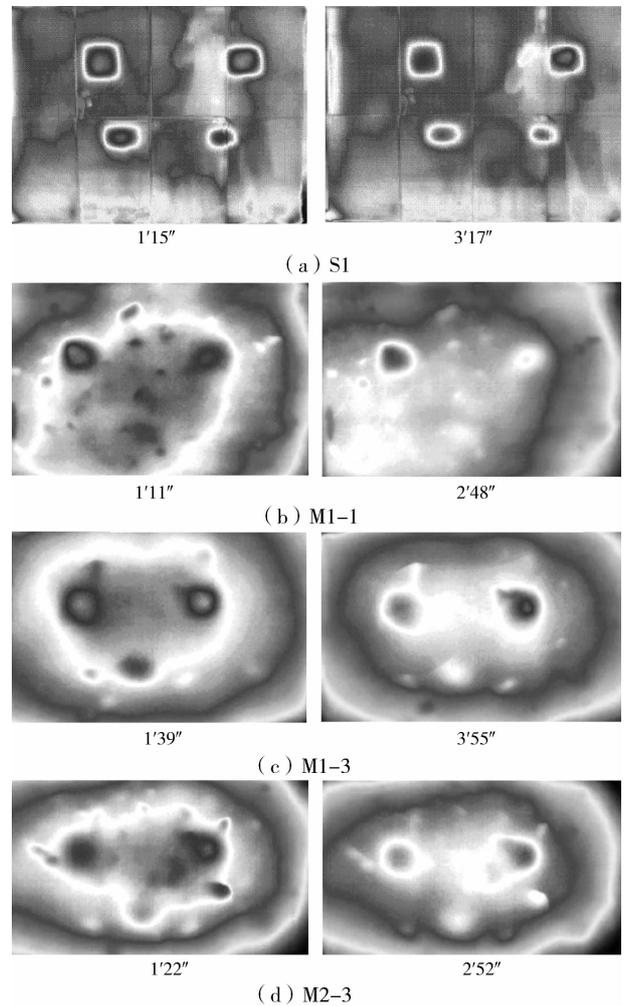


图5 红外热成像图

此外,内部缺陷的热成像效果还与缺陷的厚度、面积大小以及埋置深度有关,厚度越大、面积越大、深度越浅的内部缺陷越容易被检测出,且试验中发现,在红外灯移除初期,饰面砖饰面层的热成像效果图受内部缺陷厚度的影响较小,随着温度的降低,试件S2的成像效果明显优于试件S1。

#### 3.2 表面温度分析

选取每块试件的热成像最佳效果图,利用红外热像仪所得温度和像素信息提取功能,提取沿其表面最大宽度方向(图6中的L1和L2方向)的温度数值及相应的像素个数,并计算有缺陷部位的饰面层表面温度与其附近无缺陷部位的饰面层表面温度之间的差值(以下简称“温差”),图7所示为得到的典型温差与像素个数之间的关系曲线。

由图7(a)可以看出,同一缺陷在不同时刻的温

差-像素个数曲线基本相同,因此,在选择计算曲线时,可根据最易识别的热成像效果图来确定。由图 7(b)和(c)可知,缺陷表面温差沿缺陷宽度方向关于最大温差点呈近似对称关系,但由于在内部缺陷表面进行砂浆饰面层施工时,造成缺陷厚度(特别是边缘厚度)变化不均而导致热像图中的缺陷边界线较砂浆饰面层模糊。同时,红外灯在加热过程中,红外灯间释放的热量叠加,使饰面层中心部分的温度偏高,所以沿缺陷两边边缘位置至最大温度之间的表面温差变化速度不等。

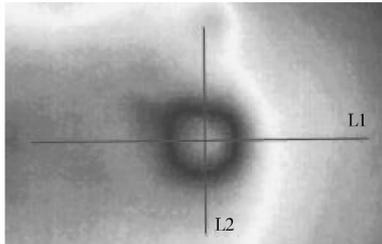


图 6 表面温度提取路径

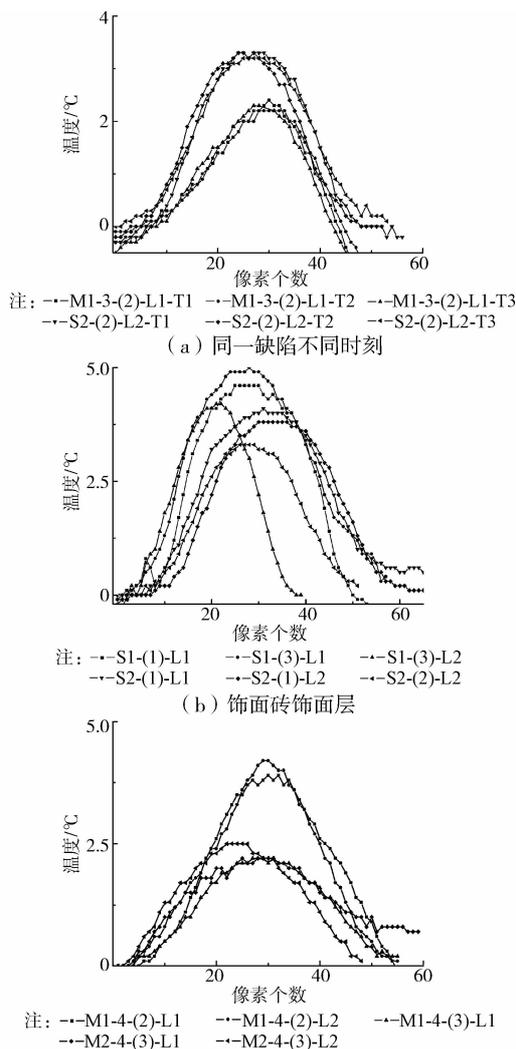


图 7 饰面层温差-像素个数曲线

## 4 缺陷大小预测模型

由图 7 可知,同一试件、同一缺陷的宽度较小方向的温差-像素个数曲线较宽度较大方向的“窄瘦”,且面积大小和厚度相等、埋置深度不等的两个缺陷的温差-像素个数曲线比较接近。为建立内部缺陷大小的计算模型,假定温差与像素个数之间的关系曲线如图 8 所示,缺陷边界处的温差为最大温差  $\Delta T_{\max}$  的  $\alpha$  倍,则缺陷宽度  $B$  的计算公式为:

$$B = (n_2 - n_1) \cdot b \quad (1)$$

式中:  $n_1$ 、 $n_2$  分别为  $\alpha \Delta T_{\max}$  所对应的像素个数;  $b$  为每个像素代表的实际尺寸大小,  $b = L/N$ ;  $L$  为试件的实际长度;  $N$  为  $L$  方向上的像素总数。

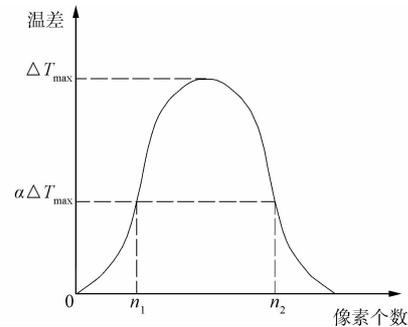


图 8 温差-像素个数模型

选取试验结果中饰面砖饰面层的 16 条曲线和砂浆饰面层的 32 条理想曲线,根据曲线中两个温差相等且像素差值等于缺陷实际宽度与每个像素代表的实际尺寸比值的原则,计算每条曲线对应的  $\alpha$  值并进行统计分析,得到两种类型的建筑外墙饰面层的  $\alpha$  平均值、标准差分别为 0.51、0.067 和 0.41、0.13。可见,饰面砖饰面层所得的  $\alpha$  值较砂浆饰面层的离散性小。

参考试验结果,在计算砂浆饰面砖和饰面砖饰面层的内部缺陷大小时,缺陷边界温差可分别取 0.5 倍和 0.4 倍最大温差。

## 5 结论

利用红外热像法检测砂浆饰面层内部缺陷,通过红外灯加热的方式研究内部缺陷表面的热成像规律,主要结论如下:

1) 红外热像法能有效检测出砂浆饰面层的内部缺陷,且面积、厚度越大、埋置深度越浅的内部缺陷越易被检测出。

2) 沿内部缺陷宽度方向,有内部缺陷饰面层表面温度与无缺陷饰面层表面温度之差关于其最大温

度点近似呈对称关系,且宽度越小,温差-像素个数曲线越“窄瘦”。

3)基于试验所得内部缺陷饰面层的表面温差-像素个数曲线,采用统计分析的方法得出饰面砖饰面层和砂浆饰面层的内部缺陷边缘温差为其最大温差的0.5倍和0.4倍,为估算红外热像法检测砂浆饰面层内部缺陷大小提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Lehmann B, Ghazi Wakili K, Frank T, et al. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings [J]. *Applied Energy*, 2013, 110: 29-43.
- [2] Hoyano A, Asano K, Kanamaru T. Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(24): 3941-3951.
- [3] Datcu S, Ibos L, Candau Y, et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(6): 451-467.
- [4] Youcef M H A L, Mazioud A, Bremond P, et al. A nondestructive method for diagnostic of insulated building walls using infrared thermography [C]// *Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics*, 2007:65410L-8.
- [5] Mahaboonpachai T, Kuromiya Y, Matsumoto T. Experimental investigation of adhesion failure of the interface between concrete and polymer-cement mortar in an external wall tile structure under a thermal load [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(9): 2001-2006.
- [6] Li Z, Yao W, Lee S, et al. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2000, 19(1): 11-19.
- [7] Titman D J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures [J]. *NDT & E International*, 2001, 34(2): 149-154.
- [8] Edis E, Flores-Colen I, de Brito J. Passive thermographic inspection of adhered ceramic claddings: limitations and conditioning factors [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(6): 737-747.
- [9] Carlomagno G M, Cardone G. Infrared thermography for convective heat transfer measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(6): 1187-1218.
- [10] 张荣成. 红外热像法检测建筑物外墙饰面施工质量的试验研究[J]. *建筑科学*, 2002, 18(1): 40-44.  
Zhang R C. Experimental research on detecting the constructional quality for outer wall decorations of building using infrared thermal-imaging method [J]. *Building Science*, 2002, 18(1): 40-44.
- [11] 袁昕, 谢慧才, 陈高峰. 建筑物外墙饰面砖粘贴质量的红外热像检测试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2003, 29(2): 43-45.  
Yuan X, Xie H C, Chen G F. Study of infrared thermography in non-destructive testing of building finish [J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2003, 29(2): 43-45.
- [12] Shen X M, Xu J W. Research on method of building energy conservation based on infrared imaging measurement [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 512: 2899-2903.
- [13] 赵鸿, 冯平, 周云, 等. 红外热像技术检测检测建筑物外墙[J]. *结构工程师*, 2003(Sup1): 15-23.  
Zhao H, Feng P, Zhou Y, et al. Research on infra-red thermal image technology applied to exterior building wall [J]. *Structural Engineers*, 2003(Sup1): 15-23.
- [14] 黄新, 王晓燕. 用红外热成像技术检测外墙空鼓时的影响因素分析[J]. *红外*, 2012, 33(6): 38-41.  
Huang X, Wang X Y. Analysis of influence factors in wall hollow defect detection by infrared thermal imaging [J]. *Infrared*, 2012, 33(6): 38-41.
- [15] 王汝琳, 王永涛. 红外检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [16] Fokaides P A, Kalogirou S A. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4358-4365.

(编辑 胡英奎)