

# 建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测

王嘉怡<sup>1</sup>, 段中兴<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

<sup>2</sup>西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055

**摘要** 建筑外墙外保温层作为一种建筑节能材料被广泛应用。为了有效检测外保温层出现的质量问题,提出一种基于外保温层表面裂缝三维传热模型的红外热成像检测方法。首先,借助红外热成像技术,搭建了建筑外墙外保温层表面裂缝检测实验平台,对外保温层的表面裂缝进行检测。之后,通过 ANSYS 软件建立了建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测三维模型,验证了该模型的可行性,并模拟计算了裂缝尺寸和环境温度对检测效果的影响。结果表明:外保温层裂缝和非裂缝区域的温差主要受到实验环境温度、裂缝尺寸的影响。当环境温度一定时,裂缝宽度和厚度增大,温差随之增加。伴随着环境温度升高,温差也逐渐增大,当实验的环境温度在 10 °C 以下时,温差变化较为平缓;当环境温度大于 10 °C,温差增长的速率随着温度的增加逐渐增大。

**关键词** 红外热成像; 保温层; 表面裂缝; 无损检测; 有限元模拟

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2204001

## Infrared Thermal Imaging Detection of Surface Cracks in External Insulation Layer of Building Exterior Wall

Wang Jiayi<sup>1</sup>, Duan Zhongxing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, Shaanxi, China

**Abstract** The external insulation layer of a building's exterior wall is widely used for energy conservation in buildings. An infrared imaging detection method based on a three-dimensional heat transfer model for the surface cracks of the external insulation layer is proposed to effectively detect the quality problems of the external insulation layer. First, with the help of infrared thermal imaging technology, an experimental platform for surface crack detection of the external insulation layer of building exterior wall was built to detect the surface crack of the external insulation layer. Then, using ANSYS software, the three-dimensional infrared thermal imaging detection model for the surface cracks of the external insulation layer of the building exterior wall was established, the model's feasibility was verified, and the effects of crack size and ambient temperature on the detection effect were simulated and calculated. The results show that the experimental ambient temperature and crack size have the greatest influence on the temperature difference between the crack and non-crack areas of the external insulation layer. When the ambient temperature remains constant, the crack width and thickness grow, as does the temperature difference. With an increase in ambient temperature, the temperature difference also increases gradually. When the ambient temperature is below 10 °C, the temperature difference changes gently; when the ambient temperature exceeds 10 °C, the rate of temperature difference growth increases gradually with increasing ambient temperature.

**Key words** infrared thermal imaging; insulation layer; surface crack; nondestructive testing; finite element simulation

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-09-27; 录用日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(51678470)

通信作者: \*zhx\_duan@163.com

## 1 引言

如今,国家节能减排工作顺利开展,相关政策也陆续出台,为降低建筑物能耗、提高室内舒适性,建筑外墙外保温层得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。随着使用年限的增加,建筑外墙外保温层受建筑物所处地区环境、施工条件、材料质量、天气因素等影响,经常会有材料脱落、表面裂缝、空鼓等问题发生,给使用者带来安全隐患和经济损失<sup>[1-2]</sup>。所以亟需研发高效的检测手段,对建筑外墙外保温层的质量进行快速有效的检测和评估<sup>[3]</sup>。

红外热成像法作为一种无损检测技术在国内外被应用于建筑工程领域中。在国外,Balaras等<sup>[4]</sup>验证了红外热像法能对保温层的损伤、热损失及热桥进行检测。Simões等<sup>[5]</sup>对围护结构中的锚钉位置和尺寸进行了有效识别。在国内,蒋济同等<sup>[6]</sup>建立了有限元仿真三维模型,进行热分析模拟计算,论证了在保温层缺陷参数、墙体朝向、季节等工况组合下红外热成像法进行缺陷检测的最佳时间。目前,红外热像法对建筑外墙外保温层的缺陷进行大面积的普查具有一定的可操作性,但无法对缺陷进行精准识别与检测。

## 2 热成像检测理论基础

### 2.1 红外热成像检测原理

任何物体根据自身温度的不同,都会向外辐射波长各异的电磁波,红外热成像检测技术正是利用了这个原理,从而可以对不同温度的物体进行检测<sup>[7-10]</sup>。对于建筑外墙外保温层,一定区域内的结构和材料的质地基本相同,所以保温层的比热容在一定区域内近似相同。当外保温层表面出现裂缝,热量辐射到裂缝表面及非裂缝区域表面时,两部分区域的温度存在一定差异,从而产生不同的红外辐射特性,红外热像仪正是利用这种辐射差异,在物体表面产生相对应的“热区”和“冷区”。因此,可以通过对红外热像图的分析来确定建筑外墙外保温层表面存在裂缝的区域及裂缝的大小<sup>[11]</sup>。

在以往的研究中,红外热成像法可以对外保温层的热工缺陷、表面开裂、饰面层和墙面之间的空鼓等现象进行定性的检测,但如何对这些现象进行定量的检测和分析,尚有较多技术问题需解决<sup>[11-12]</sup>。本文借助红外热成像技术,搭建了建筑外墙外保温层表面裂缝检测实验平台,对外保温层的表面裂缝进行检测;并通过 ANSYS 软件建立红外热成像检测三维模型,定量地研究了外保温层表面裂缝的尺寸和环境温度对检测效果的影响。

### 2.2 表面温差计算

建筑外墙外保温层的面积与厚度之比很大,因此保温层被近似为一个无限单层平壁,符合的条件<sup>[13-16]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \\ t=0, T=T_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:当  $x=0$  时,  $\partial T/\partial x=0$ , 当  $x=d$  时,  $\lambda \cdot \partial T/\partial x = h(T - T_e)$ ;  $\lambda$  为建筑外墙外保温层热导率,单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ;  $T$  为建筑外墙外保温层内部任意一点的温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  为建筑外墙外保温层的密度,单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c$  为建筑外墙外保温层的比热容,单位为  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ;  $x$  为空间坐标方向。

对于无缺陷的保温层,可令  $\theta = T - T_a$ , 则导热微分方程和边值条件可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \\ t=0, \theta = \theta_0 = T_0 - T_a \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $a$  为导温系数,  $a = \lambda/\rho c$ ;  $T_a$  为环境温度参数,单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。对数据进行无量纲化,  $F = \theta/\theta_0$  作为替代后的温度变量,  $X = x/d$  作为替代后的坐标变量,从而得到

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial (at/d^2)} = \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} \\ t=0, F = F_0 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

当  $X=0$  时,  $\partial F/\partial X=0$ , 当  $X=1$  时,  $\partial F/\partial X = hd \cdot F/\lambda$ 。本研究为模拟流体实验,准则数傅里叶数可表示为  $F_0 = at/d^2$ , 表示保温层热传导过程替代后的时间变量;准则数毕渥数可表示为  $B_i = hd/\lambda$ , 表示保温层内部单位面积上的导热热阻与表面处外部热阻之比。从而得到无量纲化后的温度变量  $F$  是傅里叶数  $F_0$ 、毕渥数  $B_i$  和无量纲化后的坐标变量  $X$  的函数,可写为

$$F = g(F_0, B_i, X) \quad (4)$$

假设在保温层裂缝上有一层厚度趋近于无穷小的饰面层,便可以将保温层的裂缝视作其内部的缺陷。设保温层裂缝部位的表面温度为  $T_1$ , 非裂缝部位的表面温度为  $T_h$ , 那么可以得到裂缝和非裂缝部位表面的温度之差,即

$$\Delta T = T_1 - T_h \quad (5)$$

进而考虑到裂缝的尺寸,即长度  $l$ 、宽度  $w$ 、厚度  $\delta$  的作用,  $\Delta T$  可表示为

$$\Delta T = g(\theta_0, t, a, d, \lambda, h, l, w, \delta) \quad (6)$$

式中:  $\theta_0$  的单位是  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  的单位是  $\text{s}$ ;  $a$  的单位是  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $d$  的单位是  $\text{m}$ ;  $\lambda$  的单位是  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $l$  的单位是  $\text{m}$ ,  $w$  的单位是  $\text{m}$ ,  $\delta$  的单位是  $\text{m}$ 。则基本量纲为  $\text{s}, ^{\circ}\text{C}, \text{m}, \text{J}$ 。

依据量纲分析法基本原理( $\pi$ 定理),选择  $\Delta T$ 、 $t$ 、 $\lambda$  和  $d$  四个有量纲的物理量,则剩余的物理量在所参与的物理过程中的函数关系可表示为

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{\theta_0}{\Delta T^{a_1} l^{y_1} \lambda^{z_1} d^{w_1}}, \pi_2 = \frac{a}{\Delta T^{a_2} l^{y_2} \lambda^{z_2} d^{w_2}} \\ \pi_3 = \frac{h}{\Delta T^{a_3} l^{y_3} \lambda^{z_3} d^{w_3}}, \pi_4 = \frac{a}{\Delta T^{a_4} l^{y_4} \lambda^{z_4} d^{w_4}} \\ \pi_5 = \frac{w}{\Delta T^{a_5} l^{y_5} \lambda^{z_5} d^{w_5}}, \pi_6 = \frac{w}{\Delta T^{a_6} l^{y_6} \lambda^{z_6} d^{w_6}} \end{cases} \quad (7)$$

应用量纲和谐原理,各 $\pi$ 项的指数为

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{\theta_0}{\Delta T}, \pi_2 = \frac{at}{d^2}, \pi_3 = \frac{hd}{\lambda} \\ \pi_4 = \frac{l}{d}, \pi_5 = \frac{w}{d}, \pi_6 = \frac{\delta}{d} \end{cases} \quad (8)$$

则得到的无量纲方程为

$$F\left(\frac{\theta_0}{\Delta T}, \frac{at}{d^2}, \frac{hd}{\lambda}, \frac{l}{d}, \frac{w}{d}, \frac{\delta}{d}\right) = 0, \quad (9)$$

即

$$\Delta T = f\left(\frac{at}{d^2}, \frac{hd}{\lambda}, \frac{l}{d}, \frac{w}{d}, \frac{\delta}{d}\right) \cdot \theta_0, \quad (10)$$

进一步写成

$$\Delta T = \theta \cdot C \cdot R, \quad (11)$$

式中: $\theta$ 为环境温度; $C$ 为裂缝自身的尺寸大小; $R$ 为热力学常数。

综上所述,采用红外热成像技术对建筑外墙外保温层表面裂缝进行检测时,影响裂缝与非裂缝区域温差的主要因素是裂缝自身尺寸和所处环境温度,为模拟计算研究奠定了理论基础。

### 3 有限元仿真模型搭建与验证

#### 3.1 ANSYS Fluent 有限元数值模拟

有限元仿真软件 ANSYS 拥有强大的数值模拟能力,而子系统 ANSYS Fluent 可以在自然对流且有光辐射的工况下对传热系统进行模拟,得到相对准确的实验结果,满足本研究的要求。所以本实验选择 ANSYS Fluent 软件来建立针对建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测三维模型。

#### 3.2 建筑外墙外保温层模型建立

采用聚苯乙烯泡沫塑料板(EPS)作为研究对象,其具有热导率小、保温性能好、价格低廉的优势,是一

种目前市面上最受欢迎的新型轻质屋面保温材料,本检测实验所选用检测试件的面积为 750 mm×600 mm,厚度为 40 mm。由于保温层裂缝的出现具有不确定性,且裂缝尺寸(长度、宽度和厚度)因素难以控制,为了量化研究裂缝尺寸对裂缝与非裂缝区域温差的影响,需要对保温层表面裂缝进行简化,将不规则的裂缝设置成尺寸不同的规则裂缝,模拟外墙外保温层不同的保温失效工况。

红外热像仪的检测效果会受到许多因素的影响,比如被测物体折射率、环境温度、设备自身的测温范围和分辨率等。尤其是环境温度对红外热像仪检测设备的使用影响较大,环境温度与设备温差过大或环境温度剧烈变化时都会对红外检测的效果造成一定影响。在实时测量中环境参数在不断变化,难以及时地捕捉环境信息,因此利用有限元仿真来进行主要影响因素对裂缝与非裂缝区域温差影响趋势的研究,进一步控制了其他外界因素对实验影响的不确定性,也规避了红外热像仪的性能差异对实验的影响。

按照实验材料的实际尺寸,通过 ANSYS Fluent 软件搭建建筑外墙外保温层表面裂缝三维传热模型,创建流体区域,之后对三维模型实行网格划分,如图 1 所示。接下来针对研究对象与计算问题类型,进行 Fluent 热分析的设置,具体步骤如下。1) 选取自然对流的热对流方式,由于流体的流动是重力场下的密度变化引起的,因此需打开重力项,设置重力大小及方向,并假设气体密度不可压缩。计算得雷诺数小于 2300,判别为层流状态。2) 进行辐射边界条件的设置,激活能量方程。热辐射模型为离散坐标(DO)模型,输入与实验时环境参数相对应的辐射参数。3) 输入实验材料参数。聚苯乙烯泡沫板的主要热力学参数如表 1 所示,设置边界条件,默认壁面为绝热。4) 对实验设置的不同工况进行初始化,展开仿真计算。由于保温层温度场受时间因素影响较大,且需分析稳定的热荷载对保温层保温缺失工况的影响,因此先进行短时间稳态热分析,将迭代计算至平稳的温度信息作为最终结果。

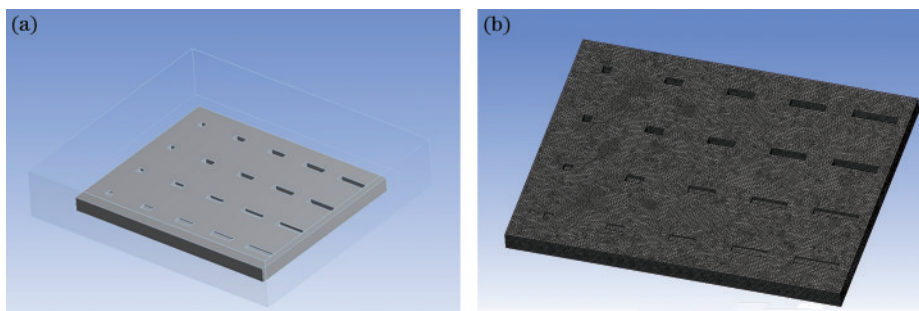


图 1 聚苯乙烯泡沫板的红外热成像检测三维模型。(a)聚苯乙烯泡沫板整体示意图;(b)模型网格划分

Fig. 1 Three-dimensional model of infrared thermal imaging detection for polystyrene foam board. (a) Overall schematic of polystyrene foam board; (b) model meshing

表 1 聚苯乙烯泡沫板的主要热力学参数

Table 1 Main thermodynamic parameters of polystyrene foam board

Length /mm	Width /mm	Thickness /mm	Specific heat capacity / ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Density / ( $kg \cdot m^{-3}$ )	Thermal conductivity / ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Absorption coefficient / $m^{-1}$
750	600	40	1500	32	0.03	1

### 3.3 模型论证

本研究的三维检测模型为传热模型,通过对保温层裂缝不同厚度工况下的现场检测数据与模拟计算数据进行对比,达到传热模型验证的目的。

现场实时检测时,搭建建筑外墙外保温层裂缝红外热成像检测系统,系统主要构成如图 2 所示。当太阳光对实验对象表面进行热辐射时,红外热像仪采集

外保温层表面的温度数据,并对采集到的温度数据进行分析。选择某一晴好天气展开现场实验,选用 XCore LT640 网络测温型非制冷红外机芯红外热成像仪,该设备的分辨率为  $640 \times 512$ ,测温范围为  $-20 \sim 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,测温精度为  $\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,性能优异。现场实验检测结果如图 3 所示。

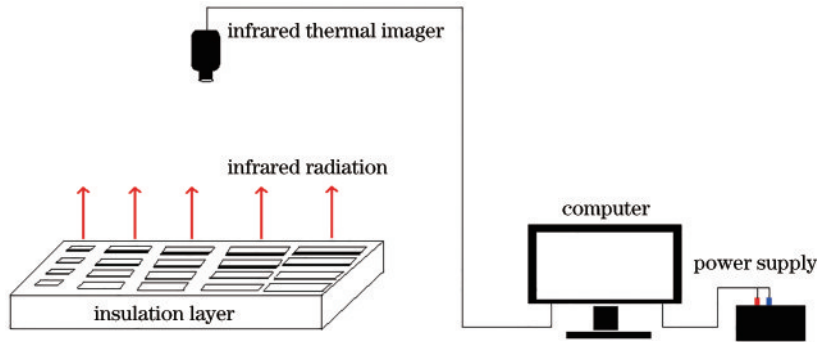


图 2 红外热成像缺陷检测系统

Fig. 2 Defect detection system of infrared thermal imaging

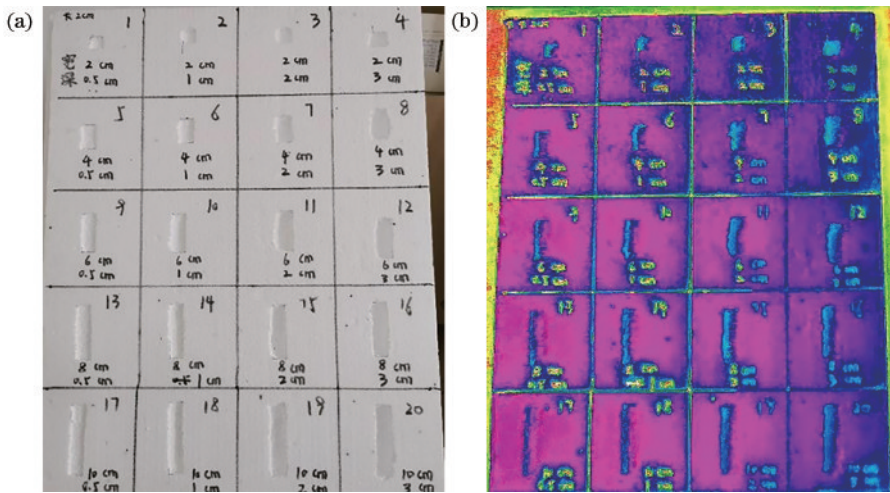


图 3 现场实验检测结果。(a)现场实验材料;(b)红外热像图

Fig. 3 Field test results. (a) Material for field experiments; (b) infrared thermography

根据图 3 现场检测结果中的红外热像图发现,保温层裂缝区域与非裂缝区域的表面温度有显著差异,并且裂缝表面的温度比保温层表面的温度高。同时,裂缝不仅使自身的温度场发生了变化,对附近的温度场也产生了一定的影响,形成了裂缝的热影响区,所以裂缝区域附近的表面温度与非裂缝区域的表面温度也存在着一定的差异。从热传导的角度,这种现象可以解释为:保温层材料为隔热性材料,空气的热导率相对

较小,对其进行热辐射,产生的热量通过空气介质进入裂缝内部,难以继续往旁边保温层传递,从而在裂缝里形成热量的聚集,但辐射在保温层表面的热量容易因空气的流动而扩散,因此在一定时间内,裂缝表面的温度往往高于非裂缝表面的温度,导致保温层表面温度分布在裂缝部位,存在明显的“热区”。由此得出,采用热红外成像检测保温层表面裂缝是可取的。

根据现场实验时间下的检测情况,绘制不同时刻

下现场检测所得的红外热像图,如图 4 所示。同时将材料参数及各工况下的环境参数(地区经纬度、检测时间、环境温度、风向、风速大小、太阳辐射等)导入进

行仿真计算,根据实验结果,外保温层 0,5,10 mm 不同厚度裂缝处温度仿真值与实测值对比如图 5 所示。

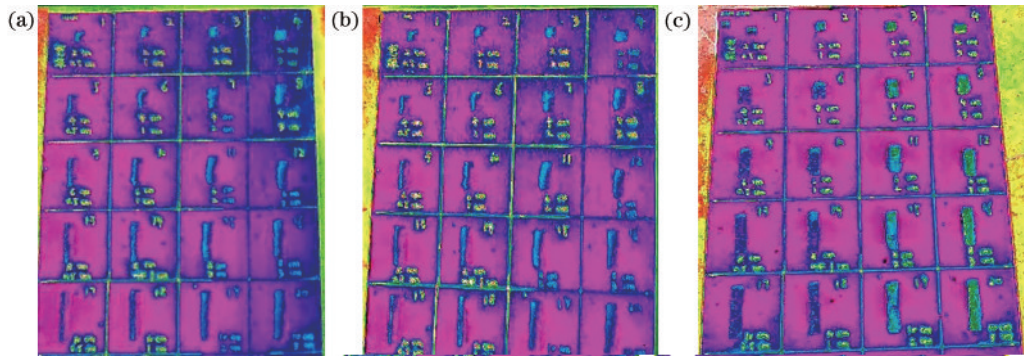


图 4 不同时刻现场检测的红外热像图。(a) 8:00; (b) 12:00; (c) 16:00

Fig. 4 Infrared thermograms of on-site detection at different time. (a) 8:00; (b) 12:00; (c) 16:00

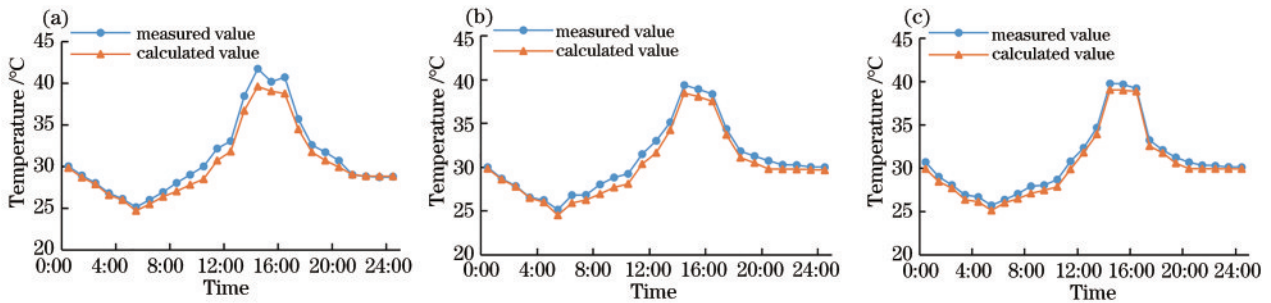


图 5 不同厚度处实测值与计算值对比。(a) 裂缝厚度为 0 mm; (b) 裂缝厚度为 5 mm; (c) 裂缝厚度为 10 mm

Fig. 5 Comparison of measured and calculated values at different thicknesses. (a) 0-mm thick crack; (b) 5-mm thick crack; (c) 10-mm thick crack

由于受到红外热像仪的精确度误差、环境参数改变、材料的导热参数误差等影响,从图 5 可以看出,实测值与仿真值之间存在着一定的差值,并且在裂缝厚度为 0 mm 和 5 mm 的实验中,这种差值最明显,在裂缝厚度为 5 mm 时差值达到最大值 2.125 °C。因为裂缝离保温层表面距离越近,实测值越容易受到现场环境的影响,实测值与仿真值的差值也会越大。实验结果表明,所有实测值与仿真值之间的差值范围为 0.073~2.125 °C,在这个区间内,不同厚度工况下实测结果和仿真结果在曲线走势上趋于拟合,且各工况温度峰值出现的时间也基本一致。由此可见,利用所提模型进行相关仿真计算是可行的。

## 4 模拟计算与分析

### 4.1 计算工况选取

为探究裂缝尺寸对红外热像法检测效果的影响趋势,采用控制变量法,对不同裂缝宽度和裂缝厚度进行组合。考虑到当裂缝尺寸过小时,对外保温层整体结构而言,其影响微乎其微,所以裂缝长度统一设置为 20 mm,分别设置裂缝宽度工况为 20, 40, 60, 80, 100 mm,裂缝厚度为 5, 10, 20, 30 mm,共计进行 20 次仿真计算。结合本地区环境温度数据(环境温度最大

值不超过 39 °C,最小值为 -11 °C),分别选取环境温度为一 10, 0, 10, 20, 30, 40 °C 的工况进行仿真。

### 4.2 分析与讨论

#### 4.2.1 裂缝宽度因素分析

在实验环境温度为 30 °C 的条件下,对 20 种不同工况的参数值进行模拟仿真计算,结果如表 2 所示。

研究中,绘制不同裂缝厚度工况下,裂缝宽度与裂缝表面和保温层表面温差最大值的的关系曲线,如图 6 所示。可以看出,在相同边界条件下,裂缝宽度不断增加,二者的最大温差也不断增大,对比更加明显。经研究,原因为对裂缝区域表面持续进行热辐射时,随着裂缝表面积的增加和时间的累积,裂缝内部的空气增多,由于空气对热量的阻挡作用,热量积累越来越多,所以二者产生的温差越来越大,裂缝就更容易被检测出来。

当裂缝厚度为 5 mm,裂缝宽度为 20 mm 时,最大表面温差仅为 0.025 °C,数值较小。因为裂缝宽度太小,裂缝内部存在的空气介质相对总量较少,对热量的阻挡不足,聚集的热量不多,因此产生的温度梯度也不明显,另一方面也说明了尺寸过小的裂缝不会影响保温层的保温隔热性能;当宽度增加到 40 mm 时,裂缝与非裂缝区域的温度差值更明显,最大同比增幅达

表 2 不同工况下保温层裂缝与非裂缝区域最大温差计算结果

Table 2 Calculation results of maximum temperature difference between crack and non-crack areas of insulation layer under different working conditions

Thickness of crack /mm	Maximum temperature difference /°C				
	Width of crack is	Width of crack is	Width of crack is	Width of crack is	Width of crack is
	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm
5	0.025	0.106	0.146	0.178	0.234
10	0.078	0.257	0.297	0.317	0.376
20	0.178	0.287	0.323	0.398	0.498
30	0.249	0.328	0.378	0.436	0.548

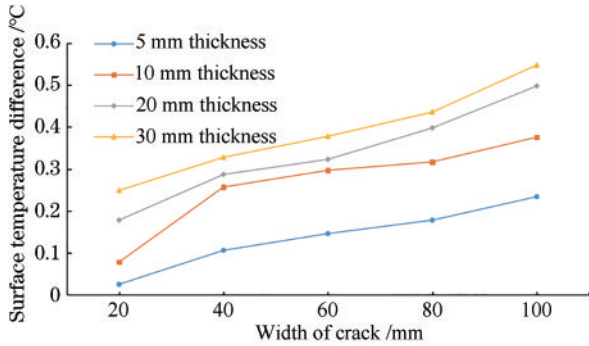


图 6 不同厚度下裂缝宽度与最大温差的关系

Fig. 6 Relationship between crack width and maximum temperature difference under different thickness

229%，经研究，原因为裂缝宽度增大，裂缝内部的空气介质增多，当入射热量进入裂缝区域时裂缝内部自身的空气介质对入射热量有阻挡作用，导致裂缝内部与裂缝侧边保温层之间的热量不能尽快传递，从而堆积在裂缝区域；随着宽度的持续增加，裂缝与非裂缝区域的温差增长趋势变得平缓，平均增幅为 20.73%，这是因为裂缝宽度越大，随着时间的累积，裂缝内部的热量与保温层材料的热量传递就越充分，温差增长的速度也逐渐变得缓慢。

4.2.2 裂缝厚度因素分析

绘制 5, 10, 20, 30 mm 裂缝厚度的工况下，保温层表面裂缝区域与非裂缝区域的最大温差结果，如图 7 所示。

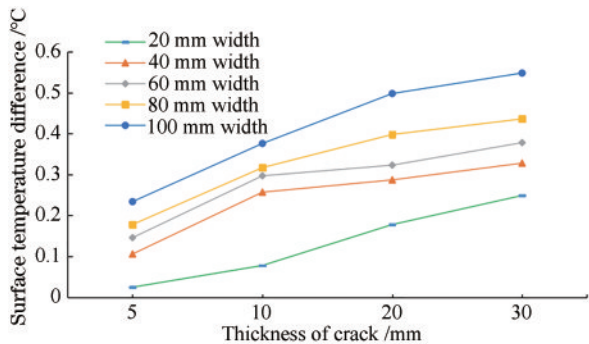


图 7 不同宽度下裂缝厚度与最大温差变化关系

Fig. 7 Relationship between crack thickness and maximum temperature difference under different width

从图 7 可以看出：随着裂缝厚度的增加，裂缝与非裂缝区域的温差均不断增大；当裂缝厚度增加时，不同宽度条件下裂缝区域与非裂缝区域的温差变化趋于平缓。当裂缝厚度为 30 mm 时，温差增长的幅度较小。从数据可以看出，当裂缝宽度为 100 mm，厚度从 10 mm 增长为 20 mm 时，二者温差变化幅度为 32.5%；而当厚度从 20 mm 增长到 30 mm 时，温差变化幅度为 14%，同比下降了 18.5%。一方面是因为热辐射进入裂缝后要与裂缝内部的保温层进行热交换，同时厚度越大，离保温层底部的距离越近，保温层底部的空气对流会带走一部分保温层内部的热量，热交换就更快速。另一方面因为当厚度较大时，太阳辐射不是垂直照射，会有一些区域的阴影区，从而影响热辐射的进入，因此裂缝区域的温度信息就不能及时显示出来。当裂缝厚度为 5 mm，裂缝宽度为 20 mm 时，裂缝表面与非裂缝表面的温差值为 0.025 °C，数据值较小。这是因为裂缝厚度小，当热量传播进裂缝中时受到气体介质的阻挡作用较小，所以积聚在裂缝区域的热量较少，温度较低，和非裂缝区域的温差很微小，不容易检测出来；当裂缝厚度增加到 10 mm，裂缝宽度为 20 mm 时，二者的温差已达 0.89 °C。

综上所述，裂缝厚度会对建筑外保温层裂缝与非裂缝区域的温差产生影响，裂缝厚度越大，裂缝与非裂缝区域温差越大，但温差变化会随着裂缝厚度的增加趋于稳态。

4.2.3 环境温度因素分析

在不同温度条件下，分别对 20 种工况进行模拟检测计算。提取了不同工况下，环境温度与建筑外保温层裂缝区域和非裂缝区域最大温差的关系曲线，分别如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出，环境温度参数值不断增加，裂缝表面与保温层表面的温差最大值显著增大，且裂缝的厚度和宽度越大，温升表现得越明显。原因为裂缝尺寸增加，充斥的气体介质总量也增加，热量累积量变大，裂缝与非裂缝区域的温差最大值也更容易检测出来。

从仿真结果可以看出，当实验的环境温度较小，设置在 10 °C 以下时，环境温度的变化对裂缝与非裂缝区

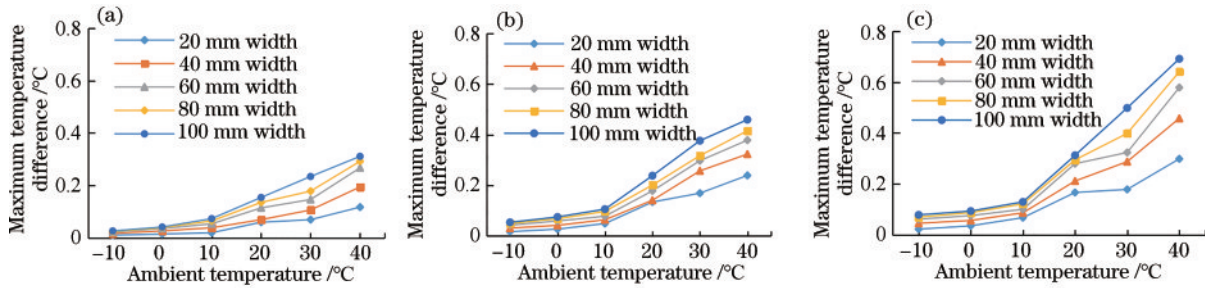


图 8 不同环境温度工况下裂缝宽度与最大温差的关系。(a)裂缝厚度为 5 mm;(b)裂缝厚度为 10 mm;(c)裂缝厚度为 20 mm  
Fig. 8 Relationship between crack width and maximum temperature difference under different ambient temperature conditions.

(a) 5-mm thick crack; (b) 10-mm thick crack; (c) 20-mm thick crack

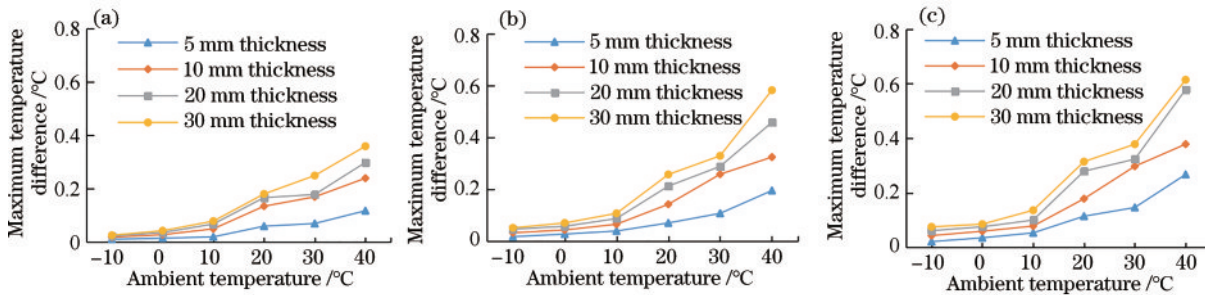


图 9 不同环境温度工况下裂缝厚度与最大温差的关系。(a)裂缝宽度为 20 mm;(b)裂缝宽度为 40 mm;(c)裂缝宽度为 60 mm  
Fig. 9 Relationship between crack thickness and maximum temperature difference under different ambient temperature conditions.

(a) 20-mm wide crack; (b) 40-mm wide crack; (c) 60-mm wide crack

域温差的影响较小,最大值仅为  $0.158\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大温差上升趋势较为缓和。分析原因为当环境温度达不到检测条件时,照射在保温层的热辐射总量较少,空气中原子运动速率不高,保温层表面与裂缝处积累的热量均不足,导致裂缝与保温层表面之间的温度差距相对微小,总体的热交换量不足,因此温度梯度并不明显。

随着环境温度由  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  增大到  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,各裂缝尺寸工况下表面温差都有大幅度增加的趋势,最小同比增长幅度为  $81.5\%$ ,最大同比增长幅度则达  $210.5\%$ ,说明环境温度对二者温差的影响较大。这是由于保温层材料导热参数较小,随着环境温度达到检测要求并不断增加,空气中照射在保温层表面的热量越来越多,聚集在裂缝处的热量相较于保温层表面也就越多,同时与保温层不能进行及时的热量传输,所以两者之间的温差越来越大。

当实验的环境温度设置为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,所有工况条件下的最大温差均超过了  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时,随着环境温度的持续增加,保温层裂缝与非裂缝区域的最大温差开始呈现一次函数拟合增长的趋势,并且裂缝尺寸增大,二者的温差就愈发明显。在实验温度为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,二者的温差最大值已经增加至  $0.734\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 结 论

本研究聚焦基于红外热像法的建筑外墙外保温层裂缝检测,借助于理论、实验、仿真手段,进行红外热成像技术应用于外保温层裂缝检测的可行性以及检测效

果的研究。结果表明:实验环境温度、裂缝尺寸对建筑外墙外保温层裂缝和非裂缝区域温差有一定影响。二者温差随着环境温度的增加而逐渐增大,当实验的环境温度在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,二者温差变化较为平缓;当环境温度大于  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随着温度的升高,温差增长幅度变化更加剧烈。当环境温度一定时,裂缝宽度和厚度增加,温差愈加明显,同时温差增长的速率增大。研究验证了红外热像法应用于建筑外墙外保温层裂缝检测的可行性,并为日后的工程应用提供了必要的理论依据和参考意义。

在实验中,受到现场复杂因素的影响,实验检测结果与软件仿真结果存在一定程度的误差。另外,在之后的研究中,可以进一步探究裂缝埋深对检测效果的影响,以及施加不同的热源,探究不同辐射强度对检测效果的影响,选择最有效的方式进行检测。

## 参 考 文 献

- [1] 王震, 马国儒, 龚治国, 等. 基于分层加权法进行既有建筑外保温系统安全性评估的研究[J]. 建设科技, 2020(14): 71-73, 77.  
Wang Z, Ma G R, Gong Z G, et al. Study on the safety assessment of external thermal insulation system of existing building based on layered weighting[J]. Construction Science and Technology, 2020(14): 71-73, 77.
- [2] 董建锴, 伍经纬, 徐先港, 等. 我国外墙外保温脱落原因及检测技术介绍[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(7): 31-35.  
Dong J K, Wu J W, Xu X G, et al. Introduction to the

- cause and detection technology of exterior wall shedding in China[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2020, 42(7): 31-35.
- [3] 张东波, 王卓琳, 蒋利学. 既有建筑外墙外保温系统无损和微损检测技术[J]. *施工技术*, 2020, 49(9): 24-30.  
Zhang D B, Wang Z L, Jiang L X. Nondestructive and micro-destructive detection technology for external wall thermal insulation system of existing buildings[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(9): 24-30.
- [4] Balaras C A, Argiriou A A. Infrared thermography for building diagnostics[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(2): 171-183.
- [5] Simões N, Simões I, Serra C, et al. Thermographic inspection of external thermal insulation systems with mechanical fixing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9485: 94851A.
- [6] 蒋济同, 徐华峰, 吴景福. 红外热像法检测建筑物外墙外保温缺失的数值模拟[J]. *无损检测*, 2015, 37(10): 39-46.  
Jiang J T, Xu H F, Wu J F. Numerical simulation of infrared thermographic inspection of the lack of thermal insulation in exterior wall of building[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(10): 39-46.
- [7] 梅建华, 云利军, 朱小鹏. 基于 LSTM 的红外人体步态识别方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(8): 0811005.  
Mei J H, Yun L J, Zhu X P. Research on infrared human gait recognition method based on LSTM [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0811005.
- [8] 王健, 崔天翔, 王一, 等. 高分五号可见短波红外高光谱影像云检测研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 239-246.  
Wang J, Cui T X, Wang Y, et al. Cloud detection for GF-5 visible-shortwave infrared advanced hyperspectral image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928003.
- [9] Mian A, Han X Y, Islam S, et al. Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(5): 0928003.
- [10] 何国康, 袁凯, 张志勇, 等. 基于二维相关近红外光谱的小米含水率检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(8): 0830002.
- He G K, Yuan K, Zhang Z Y, et al. Moisture content detection of millet based on two-dimensional correlation near infrared spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0830002.
- [11] 邹樾旋. 红外热像法在水工混凝土裂缝检测中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.  
Zou Y X. Application of infrared thermal imaging method to crack detection of hydraulic concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [12] 刘一, 刘欣, 赵永强, 等. 红外热成像在建筑物外墙裂缝检测上的应用研究[J]. *科技经济导刊*, 2016, (2): 89, 96.  
Liu Y, Liu X, Zhao Y Q, et al. Application of infrared thermal imaging in crack detection of building exterior wall[J]. *Science, Technology and Economy Guide*, 2016, (2): 89, 96.
- [13] 刘付山, 曾志平, 吴斌, 等. 高速铁路连续式无砟轨道温度场分析[J]. *铁道学报*, 2016, 38(12): 86-93.  
Liu F S, Zeng Z P, Wu B, et al. Study on temperature field of continuous ballastless track for high-speed railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(12): 86-93.
- [14] 欧祖敏, 孙璐, 程群群. 高速铁路无砟轨道温度场简化计算方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(3): 482-487.  
Ou Z M, Sun L, Cheng Q Q. Simplified calculation of temperature field in high-speed railway ballastless track structure[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(3): 482-487.
- [15] 王登涛, 路宏遥, 孟翔震, 等. 轨道板表面裂缝的热成像检测效果仿真分析[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(2): 132-137.  
Wang D T, Lu H Y, Meng X Z, et al. Simulation analysis of thermal imaging detection effect of cracks on track plate surface[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2020, 10(2): 132-137.
- [16] 王登涛. 基于热成像的轨道板伤损无损检测[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.  
Wang D T. Nondestructive testing of track plate damage based on thermal imaging[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.