

# 非金属材料红外无损检测的建模和数值分析

牛 奕, 马 云, 李明明, 张 英

(武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 利用 ANSYS 模拟建立二维、三维非金属材料非稳态导热模型, 采用红外热源作为激励, 非金属材料粘贴缺陷无损检测过程。在缺陷深度一定, 不同缺陷厚度和面积条件下, 二维模拟得到非金属材料表面温度, 并计算温度梯度。分析温度梯度与缺陷厚度和半径的关系, 提出确定缺陷边界和厚度的方法; 建立 3 种不规则形状缺陷, 通过三维模拟结果, 验证二维模拟提出的确定缺陷边界和厚度方法的可行性。结果表明: 在缺陷半径一定时, 缺陷厚度与温度梯度峰值呈线性关系; 缺陷半径大于 10 mm, 缺陷厚度与温度梯度峰值线性度基本相同; 温度梯度峰值的位置与缺陷边界基本一致。

**关键词:** 红外无损检测; 非金属; 建模; 温度梯度

中国分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2019)03-0214-06

## Modeling and Numerical Analysis of Infrared Nondestructive Testing of Non-metallic Materials

NIU Yi, MA Yun, LI Mingming, ZHANG Ying

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Two-dimensional and three-dimensional unsteady heat conduction models were established. The infrared heat source was used as the excitation, and ANSYS was used to simulate the nondestructive testing process of non-metallic materials. Under the condition that the defect depth was certain and the thickness and area of the defect were different, the surface temperature of the non-metal material was obtained by two-dimensional simulation, and the temperature gradient was calculated. The relationship between the temperature gradient and the thickness and radius of the defect was analyzed. The method of determining the boundary and thickness of the defect was put forward. Three kinds of irregular-shaped defects were established. The feasibility of the method for determining the boundary and thickness of the defect was verified by the three-dimensional simulation results. The results showed that the defect thickness had a linear relationship with the peak temperature gradient when the defect radius was fixed, and the defect radius was greater than 10mm. The defect thickness was similar to the temperature gradient, and the position of the peak temperature gradient was similar to the defect boundary.

**Key words:** infrared nondestructive testing, non-metal, modeling, temperature gradient

## 0 引言

研究非金属材料红外无损检测技术, 对工程应用中, 非金属材料的检测具有十分重要的意义。红外无损检测技术与常规无损检测方法相比, 它的优势在于适用范围广, 不会对试件造成污染, 测量结果的可视性, 观测面积很大, 检测速度快。在众多领域中得到广泛运用, 已经被大多数人普遍接受<sup>[1-3]</sup>。对于红外无损检测的实验和仿真模拟, 前人做了大量的工作。参

考文献[4]对红外锁相法涂层进行建模与仿真模拟, 确定了锁相法涂层厚度测量方法; 参考文献[5]对复合材料表面缺陷无损检测优化问题进行了研究。

然而, 在现有的模拟仿真研究中, 通常采用涂层或其他金属材料(如铝板)作为研究对象。涂层厚度较薄, 铝板材料单一, 无法满足对非金属粘贴材料(如聚乙烯)的研究。而对于粘贴材料, 粘贴质量一般采用粘结力表征, 即将粘贴材料通过破坏性剥离所需的力的大小, 由于破坏性剥离会对粘贴材料造成损坏,

收稿日期: 2018-08-16; 修订日期: 2019-01-10.

作者简介: 牛奕(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事热安全科学机理、安全仿真与模拟的研究工作。E-mail: niuyi@whut.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0209704); 国家自然科学基金(51706164); 武汉理工大学自主创新研究基金(2018IYB056)。

故可采用红外无损检测方法对粘贴材料进行检测<sup>[6-7]</sup>。

本文主要对非金属材料脱粘缺陷进行二维、三维建模和仿真分析,对不同面积、不同厚度缺陷问题进行数值仿真计算,研究缺陷面积和厚度对非金属材料表面温度的影响,提出确定缺陷边界和厚度的方法,从而为非金属材料粘贴缺陷的红外热无损检测提供可靠的理论依据。

1 红外无损检测缺陷的原理

当被测试件温度与环境温度存在差异时,就会在试件内部产生热量的流动。在采用红外无损检测时,如果对试件外加热源,其中一部分热量必然向内部扩散,并引起试件表面的温度分布的变化。对于无缺陷的试件,当热量均匀注入时,热流能够均匀地向内部扩散或从表面扩散,因而表面的温度场分布也是均匀的;当试件内部存在隔热性缺陷时,热流会在缺陷处受阻,造成热量堆积,导致表面出现温度高的局部热区;当试件内部存在导热性缺陷时,试件表面就会出现温度较低的局部冷区<sup>[8]</sup>。无缺陷与缺陷试件传热示意图如图1所示。

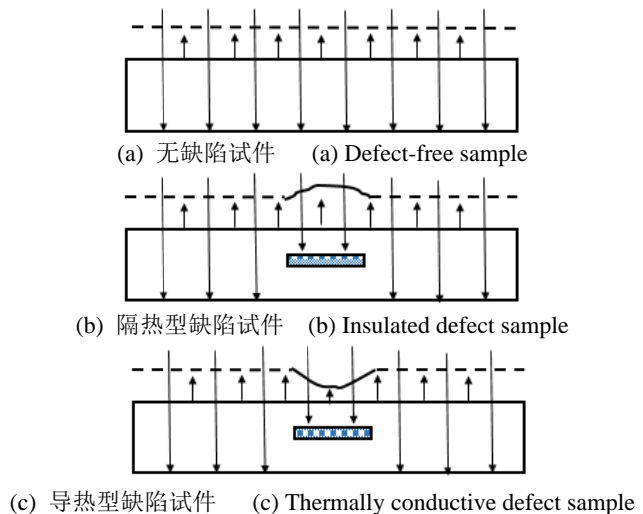


图1 无缺陷与缺陷试件传热示意图

Fig.1 Heat transfer diagram of defect-free and defective specimens

由以上几种情况可以看出:当试件内部存在缺陷时,试件有缺陷区域和无缺陷区域会形成温差,且该温差主要取决于缺陷的面积、深度、厚度及它的热物理性质<sup>[9-10]</sup>。通过红外测温手段检测试件表面温度,从而确定缺陷的边界和厚度。

2 二维模拟

2.1 二维模型的建立

应用 ANSYS 有限元分析软件,研究非金属材料

粘贴缺陷的红外无损检测过程,可以排除实际检测过程中噪音、加热不均匀等因素的影响,为量化分析缺陷厚度和面积提供一个有效的方法。

在 ANSYS 中建立如图2所示的二维轴对称粘贴缺陷模型,其边长为400 mm,基体材料假设为厚度20 mm的铁,胶水层厚度0.5 mm,PE层厚度5 mm。脱粘缺陷区域假设为空气,且空气层位于基体材料上表面与胶水层间,距离基体材料下表面的高度保持不变。空气层厚度分别为胶水层厚度的25%、50%、75%、100%,缺陷半径为5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、30 mm、40 mm。

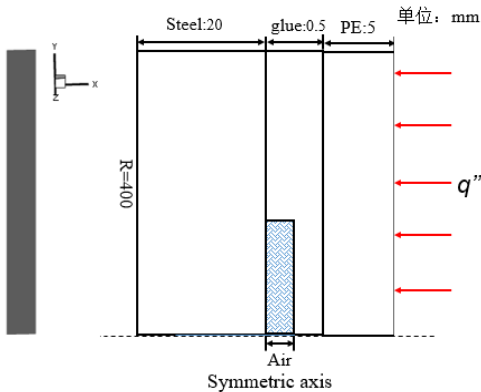


图2 粘贴缺陷建模及尺寸

Fig.2 Paste defect modeling and size

计算区域内涉及4种材料:铁、PE、胶水和空气,空气位于狭缝内,忽略其流动,故当成固体计算。根据参考文献<sup>[11]</sup>,4种材料的密度、导热系数、热容如表1所示。

表1 材料热物性参数

| Table 1 Material thermal property parameters |                                  |   |                                      |
|--|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| Material                                     | Density/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Thermal<br>Conductivity/(W/(m <sup>2</sup> ·K)) | Specific heat<br>capacity/(J/(kg·K)) |
| Steel  | 8030                             | 16.27   | 502.48                               |
| PE   | 100                              | 0.047   | 1380                                 |
| Glue   | 1200                             | 0.35  | 270                                  |
| Air  | 1.225                            | 0.0242  | 1006.43                              |

根据参考文献<sup>[12]</sup>,环境温度取300 K;对流换热系数取15 W/(m<sup>2</sup>·K);在PE层上表面施加100 W/m<sup>2</sup>的热激励,进行模拟仿真。

2.2 二维模拟结果分析

从图3可以看出,缺陷半径和厚度的增加,都会导致试件表面温度的升高,这是由于缺陷半径和厚度越大,缺陷区域内积累热量越多,试件表面温度越高。径向位置越大(离缺陷越远),温度越低,直至达到稳定状态。

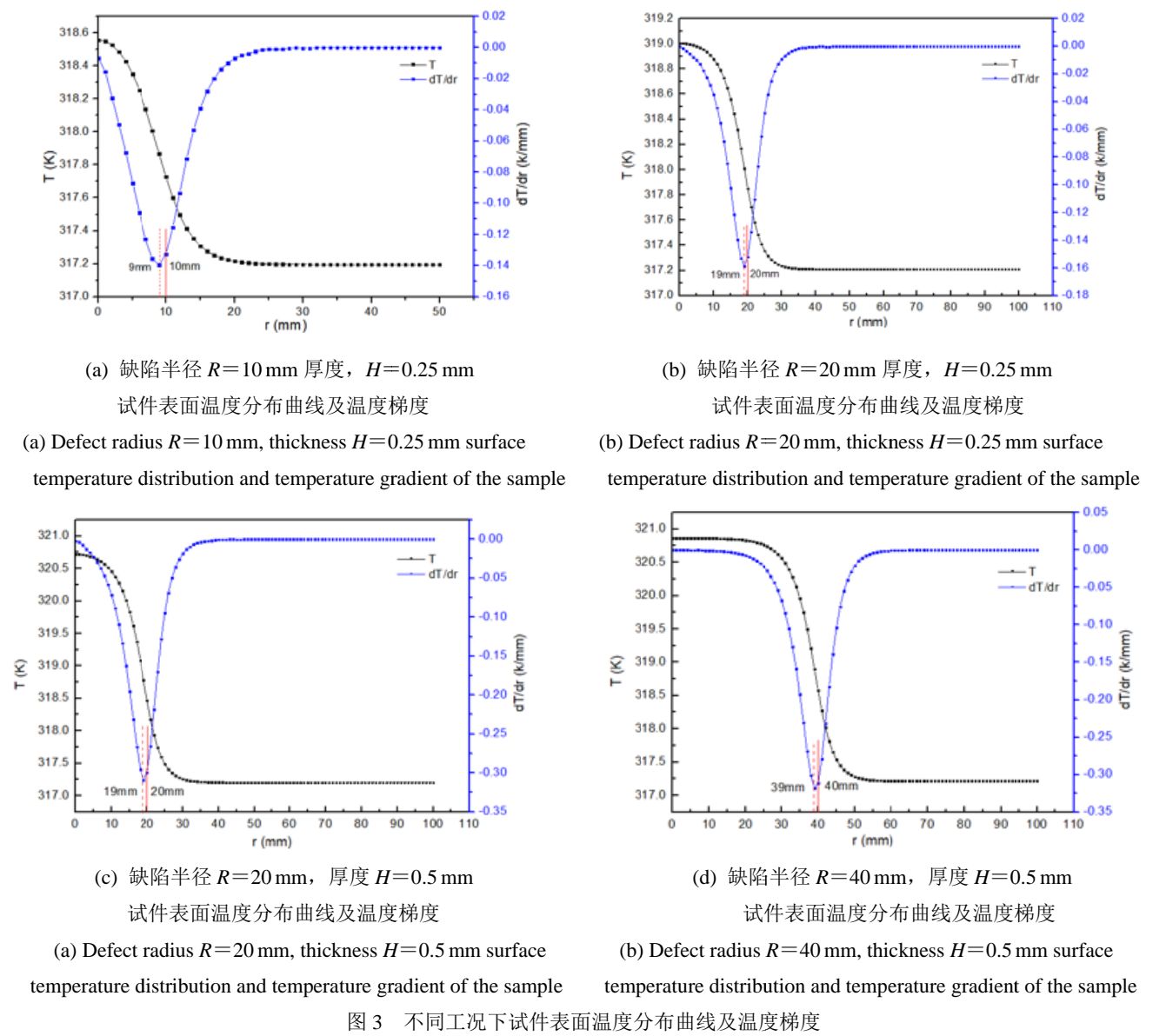


Fig.3 Surface temperature distribution curves and temperature gradient of test specimen under different conditions

在粘贴缺陷的边界处,由于空气的导热系数远远小于胶水的导热系数,因此空气的温度要高于胶水,热量由空气传向胶水。根据导热的傅里叶定律,在缺陷的边界热流密度将达到峰值。

图 3 给出试件表面的温度分布及其温度梯度。对应的温度梯度先下降而后上升趋近于 0,且温度梯度在缺陷的边界附近呈现极小值,即温度梯度的绝对值最大。由此可见,可通过计算温度梯度峰值位置来确定缺陷边界。计算缺陷半径与实际缺陷半径如表 2 所示。

由表 2 可以看出,根据温度梯度峰值位置确定的缺陷半径与实际缺陷半径相比,存在一定的误差。缺陷半径越小,三维热扩散的影响越严重,相对误差越大,检测难度越大。

表 2 计算缺陷半径与实际缺陷半径的对比

Table 2 Comparison of calculated defect radius and actual defect radius

| Actual defect radius/mm | Calculated defect radius/mm | Relative error |
|-------------------------|-----------------------------|----------------|
| 5.0                     | 4.0                         | −20.0%         |
| 10.0                    | 9.0                         | −10.0%         |
| 15.0                    | 14.0                        | −6.7%          |
| 20.0                    | 19.0                        | −5.0%          |
| 30.0                    | 29.0                        | −3.3%          |
| 40.0                    | 39.0                        | −2.5%          |

由图 4 看出,缺陷深度一定时,不同缺陷厚度之间,缺陷半径与温度梯度峰值曲线走势基本一致,在缺陷半径大于 10 mm 时,温度梯度峰值趋于稳定,且厚度对温度梯度峰值的影响更大;当缺陷半径小于 10

mm 时,半径对温度梯度峰值的影响更大。由曲线走势看出,当缺陷半径小于 5 mm 时,温度梯度峰值会非常小,难以检测到缺陷。由图 5 可以看出,在缺陷深度一定的情况下,缺陷厚度与温度梯度峰值呈线性关系,当缺陷半径大于 10 mm 时,缺陷厚度与温度梯度峰值曲线基本重合,缺陷半径对温度梯度峰值的影响较小;当缺陷半径小于 10 mm 时,缺陷厚度与温度梯度峰值曲线线性度明显不同。

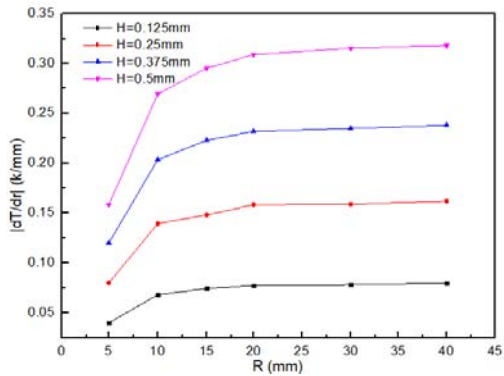


图 4 缺陷半径与温度梯度峰值曲线

Fig.4 Defect radius and temperature gradient peak curves

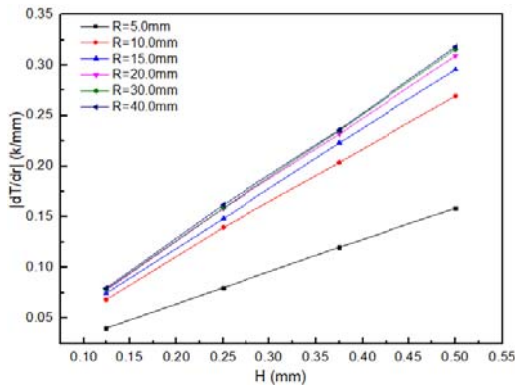


图 5 缺陷厚度与温度梯度峰值曲线

Fig.5 Defect thickness and temperature gradient peak curves

3 三维模拟

3.1 三维模型的建立

建立 3 种不规则形状缺陷的三维模型,缺陷形状及尺寸如图 6 所示,其他设置条件与二维模型一致。

在 ANSYS 中建立长 100 mm,宽 100 mm,高 25.5 mm 的三维粘贴缺陷模型,建模及物理模型如图 7 所示。

3.2 三维模拟结果验证

根据二维数值计算结果,在缺陷边界附近,温度梯度存在极大(小)值,因此可采用温度梯度作为判断缺陷边界的依据。即当温度梯度为极大值时,表明该位置为缺陷边界。将温度梯度引入三维数值模拟,验证二维模拟分析得到的确定缺陷边界的方法。温度

梯度计算公式如下:

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \tag{1}$$

根据公式(1)计算得到试件表面温度梯度云图和等高线图,如图 8 所示。从图中可以看出,使用等高线绘制温度梯度时,在缺陷区域会形成“火山”状地形。

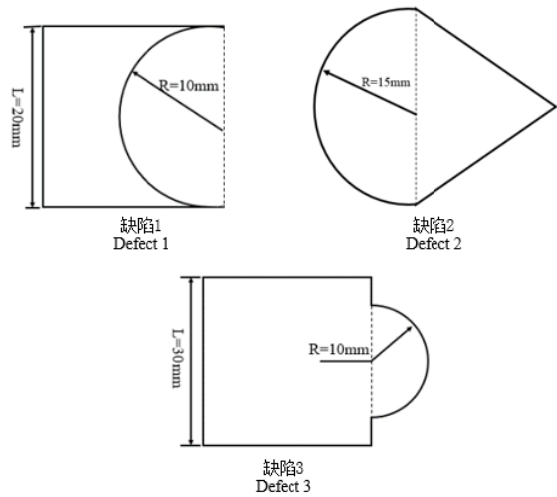


图 6 三种缺陷形状尺寸

Fig.6 Three defect shape and sizes

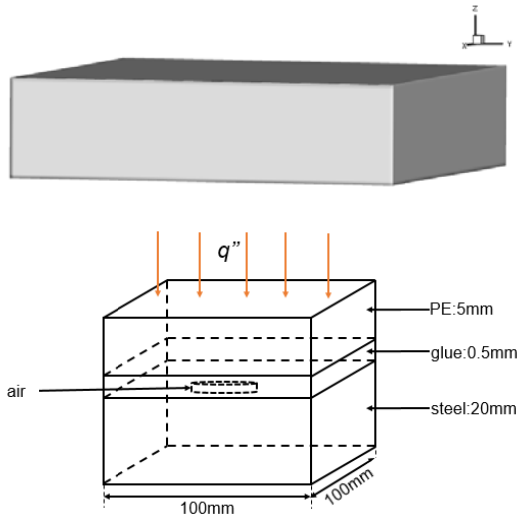
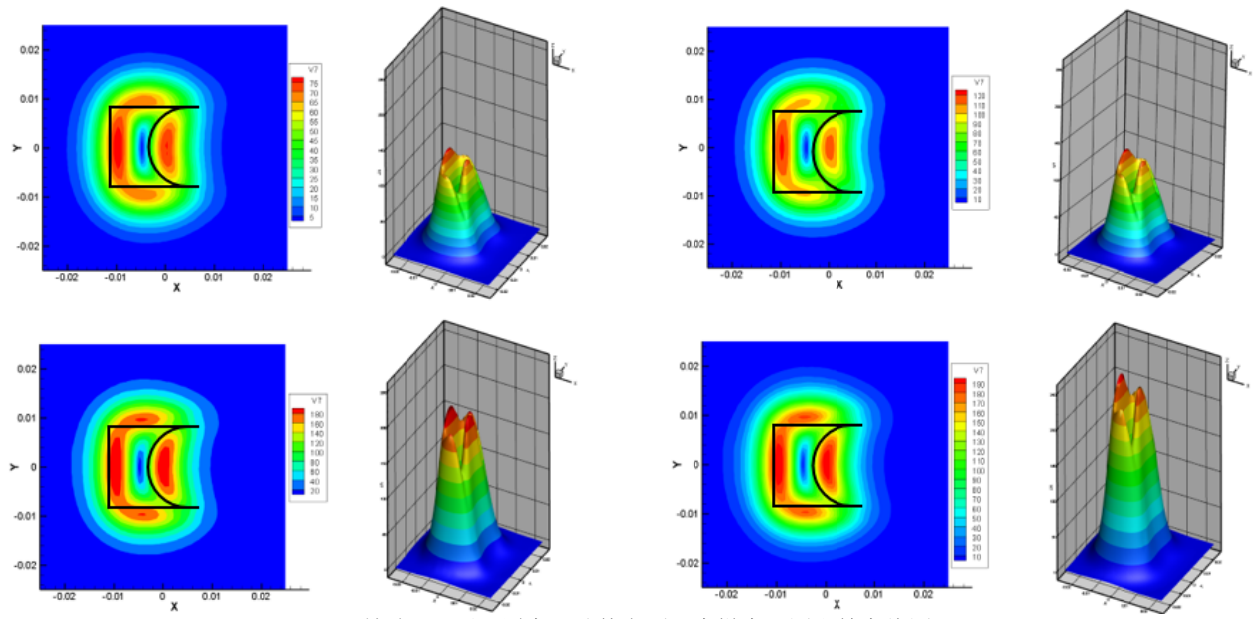


图 7 缺陷建模及物理模型

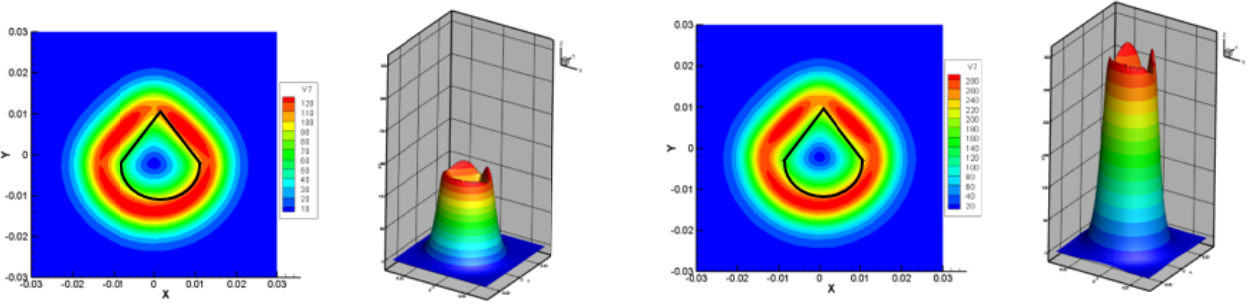
Fig.7 Defect modeling and physical model

由图 8 可以看出,对于以上 3 种不同的缺陷,当缺陷存在方形或三角形角度时,“火山口”会出现缺口,缺陷形状角度越小,“火山口”缺口越大。根据扩散规律,表面温度会逐渐向圆形发展,尽管从温度梯度等高线图中可以看出方形和三角形,但其角已转化为弧形。“火山”高度与缺陷面积和缺陷厚度均成正相关关系,“火山口”(温度梯度峰值)即为缺陷边界,与实际缺陷边界基本吻合;因此可通过统计温度梯度的“火山”高度来表征缺陷。

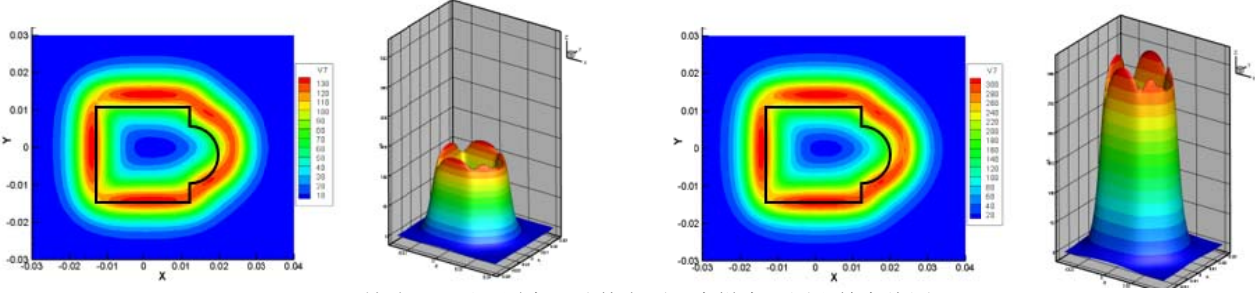




(a) 缺陷 1 不同厚度下试件表面温度梯度云图和等高线图  
(a) Defect 1 Surface temperature gradient cloud and contour plot of test piece at different thicknesses



(b) 缺陷 2 不同厚度下试件表面温度梯度云图和等高线图  
(b) Defect 2 Surface temperature gradient cloud and contour plot of test piece at different thicknesses



(c) 缺陷 3 不同厚度下试件表面温度梯度云图和等高线图  
(c) Defect 3 Surface temperature gradient cloud and contour plot of test piece at different thicknesses

图 8 三种缺陷试件表面温度梯度云图和等高线图

Fig.8 Surface temperature gradient cloud map and contour map of three kinds of defect specimens

由表 3 可知，根据二维数值计算得到的图 5，结合三维温度梯度峰值，计算缺陷厚度，与实际缺陷厚度误差较小，缺陷厚度越小误差越大，检测精度越低。

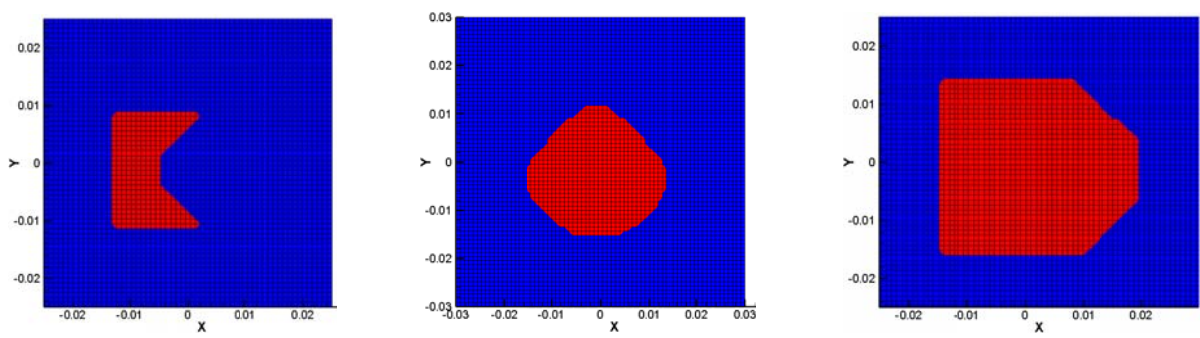
缺陷面积对粘贴质量评估也至关重要。根据逻辑算法确定缺陷边界，计算缺陷面积。缺陷区域示意图如图 9 所示。

由缺陷区域示意图可以看出，计算得到的缺陷区域与图 6 所示的缺陷形状大致相同，缺陷弧度基本不可见，与实际缺陷形状存在一定的误差，可能是由于缺陷形状由方形网格组成。计算缺陷面积与实际面积

如表 4 所示。

表 3 计算缺陷厚度与真实值对比  
Table 3 Comparison of calculated defect thickness and true values

| Calculated defect thickness $H/\text{mm}$ | Actual defect thickness $H/\text{mm}$ | Relative error |
|---|---------------------------------------|----------------|
| 0.142                                     | 0.125                                 | 13.6%          |
| 0.224                                     | 0.25                                  | -10.4%         |
| 0.371                                     | 0.375                                 | -1.1%          |
| 0.462                                     | 0.5                                   | -7.6%          |



(a) 缺陷 1 示意图 (a) Defect 1 schematic (b) 缺陷 2 示意图 (b) Defect 2 schematic (c) 缺陷 3 示意图 (c) Defect 3 schematic

图 9 三种缺陷区域示意图 Fig.9 Schematic diagram of three defect areas

表 4 计算缺陷面积与实际面积的对比  
Table 4 Comparison of calculated area of defects and actual area

| Calculated<br>area/cm <sup>2</sup> | Actual area<br>/cm <sup>2</sup> | Relative error |
|------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 3.02                               | 2.43                            | 24.3%          |
| 6.46                               | 5.78                            | 11.8%          |
| 11.43                              | 10.57                           | 8.2%           |

由表 4 可以看出,根据温度梯度峰值结合逻辑算法确定缺陷区域,计算得到的缺陷面积与实际面积误差较小,且缺陷面积越小误差越大,检测难度越大。

4 结论

采用红外无损检测技术对非金属材料缺陷模型进行数值计算,分析了二维稳态模型温度梯度与缺陷面积和厚度的关系,并建立三维模型进行模拟仿真验证。主要结论如下:

- 1) 二维与三维模拟得到试件表面温度梯度,在缺陷边界附近,温度梯度存在峰值,可根据温度梯度峰值的位置判断缺陷边界。
- 2) 根据二维模拟得到的缺陷厚度与温度梯度峰值曲线,结合三维模拟得到的温度梯度峰值,可确定缺陷厚度。
- 3) 缺陷面积或厚度过小时,温度梯度峰值极小,检测难度大,精度低。

参考文献:

[1] 孙全胜,李涛. 红外检测技术在探伤中的运用[J]. 红外技术, 2003, 25(2): 65-65.  
SUN Quansheng, LI Tao. Application of Infrared Detection Technology in Flaw Detection[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(2): 65-65.

[2] 李国华,吴立新,吴森,等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.  
LI Guohua, WU Lixin, WU Miao, et al. Research progress of infrared thermal imaging technology and its application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230.

[3] 王迅,金万平,张存林,等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 497-502.

WANG Xun, JIN Wanping, ZHANG Cunlin, et al. Infrared thermal wave non-destructive testing technology and its progress[J]. *Non-destructive Testing*, 2004, 26(10): 497-502.

[4] 张金玉,孟祥兵,杨正伟,等. 红外锁相法涂层厚度数值模拟与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 6-11.  
ZHANG Jinyu, MENG Xiangbing, YANG Zhengwei, et al. Numerical simulation and analysis of coating thickness measurement by infrared phase-locking method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 6-11.

[5] 王海亮,范春利,孙丰瑞,等. 二维内部缺陷的红外瞬态定量识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1714-1720.  
WANG Hailiang, FAN Chunli, SUN Fengrui, et al. Infrared transient quantitative identification algorithm for two-dimensional internal defects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1714-1720.

[6] 戴景民,汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(1): 1-8.  
DAI Jingmin, WANG Zijun. Infrared Thermal Imaging Nondestructive Testing Technology and Its Application Status[J]. *Automation Technology and Application*, 2007, 26(1): 1-8.

[7] 陈大鹏,毛宏霞,肖志河. 红外热成像无损检测技术现状及发展[J]. 计算机测量与控制, 2006, 24(4): 1-6.  
CHEN Dapeng, MAO Hongxia, XIAO Zhihe. Current Status and Development of Infrared Thermography Nondestructive Testing Technology[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 24(4): 1-6.

[8] 郑恩辉,曹文浩,富雅琼,等. 缺陷表面温度场的红外无损检测分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 416-420.  
ZHENG Enhui, CAO Wenhao, FU Yaqiong, et al. Infrared Nondestructive Detection Analysis of Defect Surface Temperature Field[J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(4): 416-420.

[9] 郑宏飞. 热力学与传热学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
ZHENG Hongfei. *The basis of thermodynamics and heat transfer*[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[10] 弗兰克 P. 英克鲁佩勒. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石,叶宏,译. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
Frank P. Inker Ruppler. *The basic principles of heat transfer and mass transfer*[M]. Ge Xinshi, Ye Hong, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[11] 周辉,钱美丽,冯金秋,等. 建筑材料热物理性能与数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
ZHOU Hui, QIAN Meili, FENG Jinqu, et al. *Thermophysical Properties and Data Handbook of Building Materials*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

[12] 王永茂,郭兴旺,李日华. 红外检测中缺陷大小和深度测量[J]. 红外技术, 2002, 32(6): 404-406.  
WANG Yongmao, GUO Xingwang, LI Rihua. Measurement of defect size and depth in infrared detection[J]. *Infrared Technology*, 2002, 32(6): 404-406.