

透射法的红外热波缺陷定量检测研究

华浩然,袁丽华*,鄒冠华,吴伟

(南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室,江西 南昌 330063)

摘要: 脉冲红外热波检测是一种新兴的无损检测技术,通常采用反射型激励方式。针对反射法缺陷深度检测误差大的不足,系统分析了透射法的红外脉冲热波定量检测缺陷深度。通过分析材料在脉冲热激励下的一维热传导模型,探讨了缺陷深度的红外测量原理。利用表面温度一阶微分峰值时间法建立特征时间与缺陷深度的关系,实现对缺陷深度的定量检测。以 PVC 板人工楔形槽缺陷为例,采用透射法与反射法对比实验分析缺陷深度的测量误差。结果表明,反射法在对缺陷进行定量计算时需要选取参考区域,而透射法对数据的处理不依赖参考区域,避免参考区域所带来的误差。透射法直接加热缺陷面,响应时间短,通过求解缺陷处的特征时间计算缺陷深度,检测精度得到大幅度提高。

关键词: 红外热波检测; 反射法; 透射法; 定量检测

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0204007

Defect quantitative detection based on transmission infrared thermal wave method

Hua Haoran, Yuan Lihua*, Wu Guanhua, Wu Wei

(Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Pulsed infrared thermal wave testing, which typically uses reflective-type incentives, is a new non-destructive testing technology. In view of the reflection method with big defect depth quantitative detection error, transmission infrared thermal wave method was systematically analyzed in order to improve the detection precision. The principle of infrared measurement of defect depth was discussed by analyzing the material in pulsed thermal excitations of one-dimensional heat transfer model. The relationship between the characteristics of time and defect depth was established by the peak time method of the first order differential of surface temperature, so the quantitative detection on the depth of defect was realized. The sample of PVC flat with artificial slot wedge defects was used. The depth of defects were detected by comparative experiments between transmission and reflection methods, and the measurement errors were analyzed. The results show that reflection method in quantitative calculation for defects requires selecting reference region, while transmission method does not rely on the reference avoiding the error resulted from it. Moreover, transmission method directly heats surface defects, so short response time can be obtained and the defect depth precision are improved greatly by solving the characteristic time of the defect.

Key words: infrared thermal wave testing; reflection method; transmission method; quantitative detection

收稿日期: 2015-06-21; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61261031, 51065024); 江西省自然科学基金(20151BAB207058)

作者简介: 华浩然(1988-), 男, 硕士生, 主要从事红外无损检测技术方面的研究。Email: ben-hua@163.com

* 导师简介: 袁丽华(1970-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光与红外检测方面的研究。Email: lilyyuan99@qq.com

0 引言

脉冲红外热波无损检测技术是通过高能脉冲热激励被测物,使材料表面及表面下的物理结构特性影响热波传输,进而以温度场变化的方式反映在表面上,利用红外热像仪连续观测和记录材料表面的温度场变化,并对热像图序列进行处理和运算,实现对材料表面及近表面缺陷的检测和定量测量^[1-2]。红外热波无损检测技术具有检测速度快,检测结果直观的诸多优点,其在用于检测被测物近表面缺陷的问题上具有非常广阔的应用前景^[3-4]。

材料缺陷的定量检测研究是红外热波检测的重要研究方向,检测方法的选取和依据缺陷深度定量原理的数据处理是决定检测精度的关键因素^[5-6]。20 世纪 80 年代 C.K.Hsies^[7]等人在内表面温度和热流分别一定的条件下,对材料内表面存在的矩形缺陷利用红外扫描温度,定量计算了矩形平板和直角圆柱体内的缺陷大小。近年来,S.Sahnoun^[8]等人利用一个二维模型对平板结构内的圆形缺陷进行了红外无损研究,确定了缺陷的位置和性质。S.Kubo^[9]等人利用热波的相位延迟对混凝土材料内部缺陷进行了定量的分析研究。霍雁等^[10]选用对数温度二阶微分峰值时刻作为特征时间定量测量缺陷深度,研究表明随着缺陷埋深加大,测量误差增大,只适合测近表面的缺陷,如当埋深为 5.5 mm 时,10 mm 孔径误差达到 26.5%,研究者随后探讨了误差数值修正问题,达到比较满意的结果。以上研究成果的取得,对红外热波无损检测技术具有推动作用,但研究的方法和手段大都采用反射法红外检测技术,在后续的实验数据处理中需要在非缺陷处选取参考区域,并对参考区域温度做差值处理^[11],以上都会产生误差而使得缺陷深度定量的精确度下降。文中将探讨采用透射法激励被测物体,期待提高检测精度。

1 透射法测深度的原理

1.1 透射法红外检测一维热传导理论模型

在脉冲红外无损检测应用中,热通常是非均匀变化而且易受环境因素影响。在直角坐标系下,非稳态、无内热源状态下的瞬态温度场 $T(x, y, z)$ 是空间和时间的函数,设在固体中任取一块体积为 V 相应

的界面为 S ,然后在封闭的曲面 S 上取一个微元,该处法线方向 n 的温度梯度可写为:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial T}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial T}{\partial z} \cos \gamma \quad (1)$$

由傅里叶定律单位时间内通过 dS 流出的热量为:

$$-\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial T}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial T}{\partial z} \cos \gamma \right] dS$$

对上式进行二重积分计算并转化为三重积分,即

$$\iiint_V \lambda \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dV \quad (2)$$

另一方面,从热传导的基本概念可知,包含在体积 V 内的总热量为:

$$\iiint_V c\rho T(x, y, z, \tau) dV$$

其对时间的增长率为:

$$\iiint_V c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} dV \quad (3)$$

公式(2)和公式(3)是同一种物理量的不同数学形式,因此可得

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (4)$$

因此三维非稳态导热微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(y, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (5)$$

式中: $T(x, t)$ 是 t 时刻 x 处的温度; $\alpha(\text{m}^2/\text{s})$ 是热扩散系数,用来测量物质传热与存储热量的能力,是随温度和位置变化的量。公式(5)给出了三维热传导函数形式,但由于实际定解条件的复杂性,求其解析解一般比较困难。所以,在工程领域往往要简化成一维热传导形式,一维热传导理论不能解释所有的热现象,但对于大多数实验中(如测厚),其传热微分方程简化的一维热传导模型可以近似解决问题^[12]。在给定的初边值条件下,通过求解热传导方程可以得到热能在介质中传播的函数。

现在假设各向同性的厚度为 x_2 的薄板材料如图1所示,其方向为 x 轴正向。在薄板下方有处距离表面 x_1 厚度的凹坑缺陷。设在每一个垂直于 x 轴的截面上的温度相等,薄板材料与周围没有热交换,且薄板材料内无热源, Q 为初始状态施加于试件下表

面单位面积上的总热量。这时温度只是坐标 x 和时间 t 的函数。热传导方程为：

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (6)$$

为计算简化, α 可视为常数。

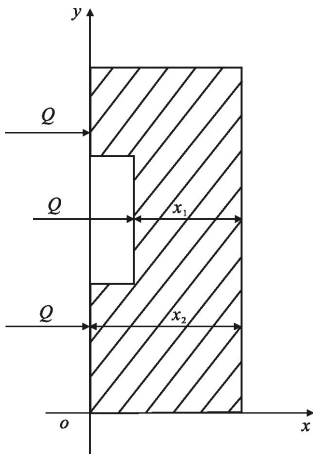


图 1 薄板材料受脉冲热源激励

Fig.1 Sheet material by heat pulse excitation

对试件表面在 $t=0$ 时刻施加热量 Q , 设 $T(x, 0)=Q(x)$, 则热传导方程(1)在任意 $x \gg 0$ 处的解为：

$$T(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\alpha\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (7)$$

1.2 表面温度一阶微分峰值时间测量深度原理

由于试块的厚度与长宽比很小, 所以忽略掉热量横向传播的影响, 可以近似满足上述一维热传导理论模型的要求。取薄板厚 x_2 处(距缺陷处为 x_1 处)如图 1 所示, 以距离薄板底面 x_2 处的上表面为研究对象, 研究此界面上的温度分布情况。

对公式(5)求导, 令

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = 0$$

易得到在任意与材料表面平行的平面 $x=x_2$ 处, 当

$$t = \frac{x_2^2}{2\alpha} \quad (8)$$

时, 温度达到最大值。

当被检材料一定时, 在表面上不同厚度处存在温差。由公式(8)可知缺陷深度的平方与其表面温度的一阶微分峰值时间成正比, 因此可以通过确定此特征时间来测量缺陷深度。

由上述理论分析可知, 利用温差峰值时间法和表面温度一阶微分峰值法都可以通过确定特征时间来测量缺陷深度。已知的温差峰值法需要选取缺陷区和非缺陷区对应的表面温度数据, 对两组数据做差并求取对应的峰值时间, 这种方法需要选取参考区域, 特征时间的提取易受参考区域选择的影响。表面温度一阶微分峰值时间法求取特征时间则不需要选取参考区域, 易于对特征时间的重复性提取。因此文中分别用这两种不同方法来对试件进行缺陷深度的定量检测研究。

2 试块设计及检测系统

实验中采用的试块是 PVC 平板, 规格为 152.00 mm × 110.00 mm × 3.00 mm, 热扩散系数为 $0.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在 PVC 板中制作了两条楔形槽人工缺陷, 记为 A、B, 两条槽的形状是一样的, 最大宽度 9.00 mm, 最窄处宽度 3.00 mm, 但 A、B 槽的深度分别为 1.50 mm、1.00 mm。试块的设计图和实物图分别如图 2 和图 3 所示。

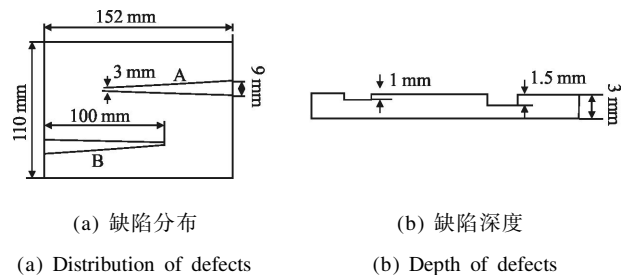
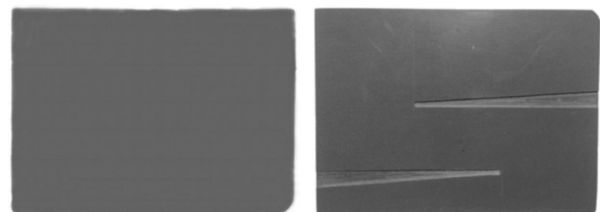


图 2 PVC 试块的试块设计图

Fig.2 Design diagram of PVC test block



(a) Intact surface of test block (b) Defect surface of test block

图 3 PVC 试块实物图

Fig.3 Physical map of test block

红外热波无损检测的激励方式分为反射法和透射法。反射法是对被测目标的加热和红外检测在被测目标的同一侧面进行(参见图 4(a)), 透射法是把对

被测目标的加热和红外检测分别在目标的正反两个侧面进行(参见图 4(b))。

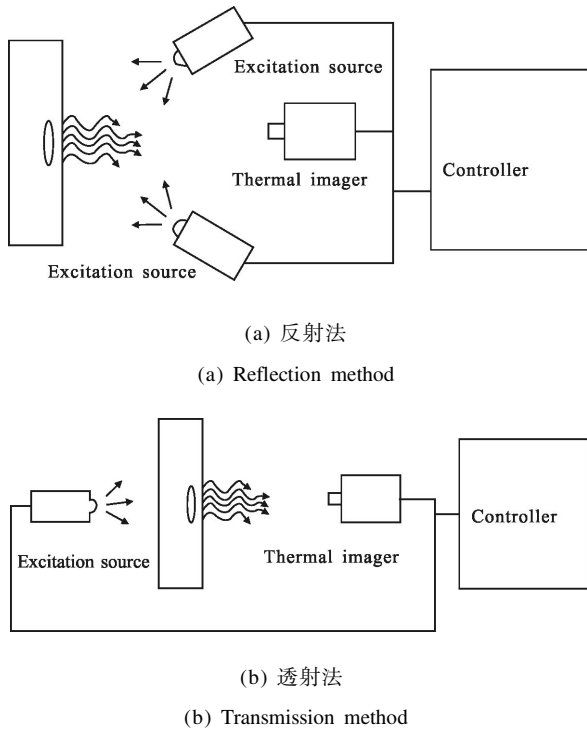


图 4 两种红外热波检测系统示意图

Fig.4 Two kinds of infrared thermal wave detection system diagram

实验采用德国InfratecVarioCAM HD 热像仪,热成像系统为非制冷微测焦平面探测器,其分辨率为 1 024×768,最大采集频率为 30 Hz,温度分辨率为 0.05 K。激励源由两盏 500 W 的卤素灯构成。控制器控制激励与采集的同步。在实验过程中通过软件控制卤素灯脉冲辐射试块,在试块中形成热传导过程,同时红外热像仪以序列图的形式同步记录热脉冲作用后试块表面温度场的变化过程。

3 实验测试及结果分析

3.1 透射法缺陷深度的定量分析

采用如图 4(b)所示的透射法检测系统,探测PVC板中的 A、B 槽的深度。软件控制卤素灯脉冲激励,激励时间为 3s。设置采集频率为 30 Hz,共采集了 800 帧热图像序列,耗时 26.7 s。从序列中选取不同时刻的热像图说明试块从升温到降温的过程,如图5所示,激励 1 s 后,试块缺陷的轮廓就隐约可见,在 $t=7$ s 左右试块的缺陷处轮廓最为清晰,然后边缘开始扩散,模糊。

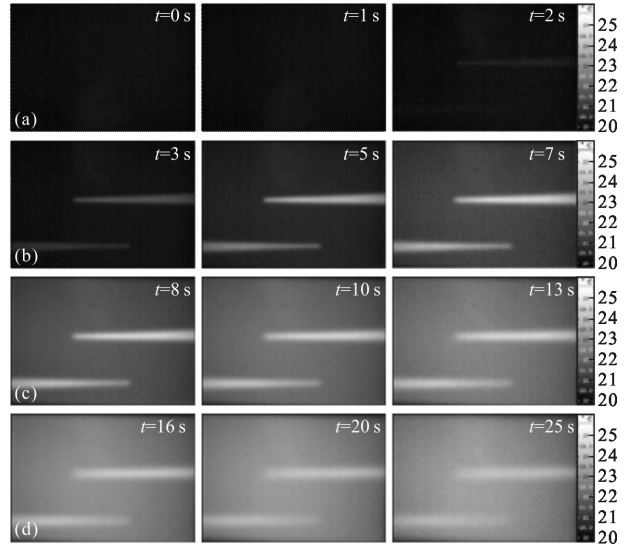


图 5 透射法 PVC 试块表面不同时刻温度场分布

Fig.5 Transmission method of PVC specimen surface temperature field distribution in different time

选择 $t=7$ s 试块的缺陷处轮廓最为清晰时刻的热像图作为示例图,如图 6 所示,在两个缺陷区域分别拾取一个小区域 R1 和 R2,作为参考区域。将所选区域每个时刻的温度值数据导出,绘制温度 T 相对时间 t 的曲线,反映了 R1 和 R2 在热像图序列中温度变化的时间历程,如图 7 所示。

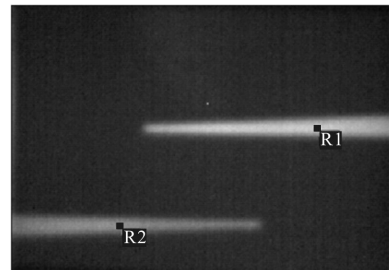


图 6 透射法热图像上拾取的区域

Fig.6 Pick-up area in thermal image with transmission method

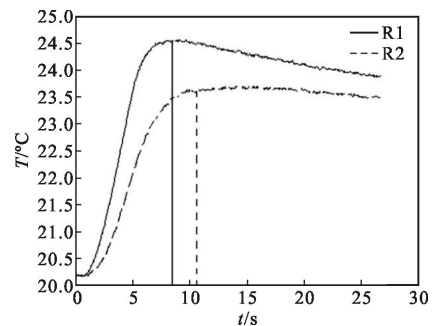


图 7 区域 R1、R2 的温度变化

Fig.7 Temperature changes in regional R1, R2

从图 7 可以看出,区域 R1、R2 在激励初期温度同时升高,由于缺陷深度不同,导致开始阶段就出现明显的温度差,埋深 1.50 mm 深的缺陷比埋深 2.00 mm 深的缺陷升温更高、更快。楔形槽 A 出现最高温度的时间 $t=7.70$ s; 楔形槽 B 出现最高温度的时间 $t=11.00$ s;代入公式(8)反解出缺陷深度,并分别求出相对误差如表 1 所示。

表 1 透射法深度检测结果误差对比

Tab.1 Deviation contrast of depth test results with transmission method

Incentive methods	Defects	Buried depth/mm	Measured value/mm	Error
Transmission method	A	1.50	1.57	4.67%
	B	2.00	1.88	6.00%

使用透射法能比较准确的确定 A、B 的埋深,探测埋深浅的深度精度略高于埋深深的。

3.2 反射法检测对比分析

采用如图 4(a)所示的反射法检测系统,与透射法检测进行对比分析。同样采用脉冲激励,但激励时间更长为 15 s,采集频率仍为 30 Hz,共 1 800 帧热图像序列,耗时 60 s。从序列图中选取典型时刻的热像图说明试块从升温到降温的过程。如图 8 所示。试块受激励后表面温度迅速升高,并在 $t=20$ s 左右达到轮廓较清晰的时刻,由于热的横向扩散作用,随着时间推移,可以看出缺陷热像在逐渐变得模糊,最终整个试块温度会达到平衡。

选取图 8 中第 20 s 的热图像作为示例图片进行处理,在热图像上两个缺陷区域与无缺陷区域分别拾取一个区域 R1、R2、R3,如图 9 所示。导出各个时刻 R1、R2、R3 区域的平均温度值,然后分别用绘制 R1、R2、R3 平均温度与时间的曲线图如图 10 所示。可以看出 R1、R2、R3 在激励初期,升温步调一致,三条曲线重合 ($0 < t < 7$ s);由于缺陷深度不同而使曲线开始分叉 ($t=7$ s);当停止激励不久后,试件的三个区域温度曲线同时到达各自的最大值 ($t=15$ s);在冷却阶段,出现了明显的温度差 ($t > 15$ s)。

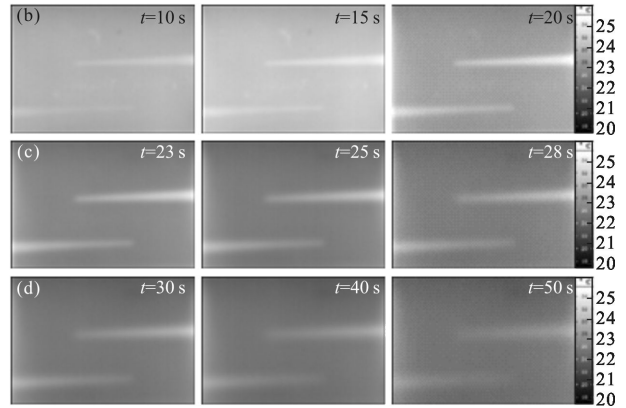


图 8 反射法 PVC 试块表面不同时刻温度场分布

Fig.8 PVC specimen surface temperature field distribution in different time with reflection method

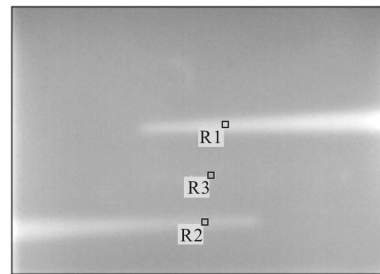


图 9 反射法热图像上拾取的区域

Fig.9 Pick-up area on the thermal image with reflection method

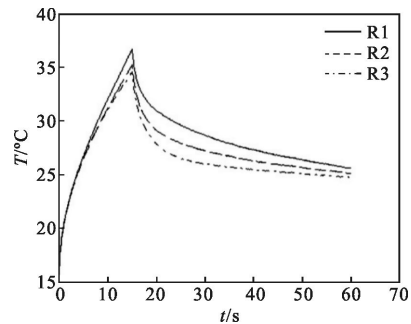


图 10 区域 R1、R2、R3 温度随时间变化曲线图

Fig.10 Graph of the temperature variation with time in regions R1,R2,R3

反射法测深度的依据是表面温差峰值法^[13]

$$t = \frac{2x^2}{\alpha} \quad (9)$$

式中: t 为达到最大温差的时间; x 为缺陷埋深; α 热扩散系数。表明最大温差对应的特征时间与缺陷深度的平方成正比。

图 11 是试验中测的 ΔT 随时间的变化曲线,由此可以确定出缺陷对应的峰值时间 t ,从图中可知,

楔形槽 A 出现最大温差 ΔT 的时间 $t=23.45$ s; 楔形槽 B 出现最大温差 ΔT 的时间 $t=26.00$ s。由公式(9)反解出缺陷深度,并分别求出相对误差如表 2 所示。

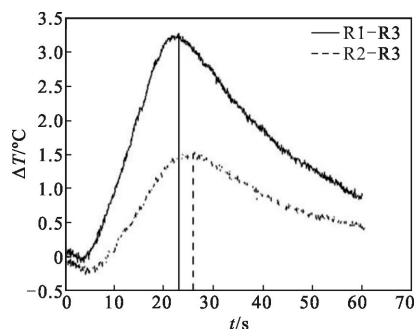


图 11 温差变化曲线

Fig.11 Curves of temperature difference

表 2 反射法深度检测结果误差对比

Tab.2 Deviation contrast of depth test results with reflection method

Incentive methods	Defects	Buried depth/mm	Measured value/mm	Error
Reflection method	A	1.50	1.37	8.67%
	B	2.00	1.44	27.90%

反射法能较准确的探测出埋深浅的缺陷(近表面缺陷),埋深深的缺陷检测误差大,远不及透射法的检测精度。反射法适合检测近表面缺陷。

4 结论

文中采用理论分析与对比试验相结合的方法,研究了透射法激励的红外热波定量探测缺陷深度的问题,成功检测出了 PVC 板人工缺陷的深度。研究表明透射法与反射法相比具有如下优势:激励时间更短,检出速度更快;只需考虑缺陷区域的温度历程,数据处理更加简单;检测精度更高,可准确探测的深度范围更广。但透射法检测在日常检测工作中受条件制约不如反射法具有实用性。

参考文献:

[1] Sun Chunqing, Shi Yu. Numerical simulation of infrared fast defects detection [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011(3): 314-315. (in Chinese)

[2] Ghosh K K, Karbhari V M. Use of infrared thermography

for quantitative non-destructive evaluation in FRP strengthened bridge systems [J]. *Material and Structures*, 2011, 44(1): 169-185.

[3] Lahiri B B, Bagavathiappan S, Reshmi P R, et al. Quantification of defects in composites and rubber materials using activethermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012: 191-199.

[4] Li Guohua, Lin Xiaofeng, Gao Juchun. Numerical simulation of infrared thermographical NDT of pipeline with internal corrosion [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2012 (9): 118-122. (in Chinese)

[5] Zeng Zhi, Tao Ning, Feng Lichun, et al. Effect of defect size on the measurement of defect depth using thermal wave imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1910-1915. (in Chinese)

[6] Sun Qingchun. Quantification research for steel and aluminum plate with Infrared detection[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[7] Hsieh C K, Su K U. A methodology of predicting cavity geometry based on scanned surface temperature data-prescribed surface temperature at cavity side [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1980, 102: 324-329.

[8] Sahnoun S, Belattar S. Thermal non-destructive testing study of a circular defect in plane structure [J]. *British Journal of NDT*, 2003(8): 115-121.

[9] Sakagami Tkubo S. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative non-destructive evaluations[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2002, 43: 271-278.

[10] Huo Yan, Zhang Cunlin. Quantitative infrared prediction method for defect depth in carbon fiber reinforced plastics composite[J]. *Acta Phys Sinica*, 2012, 61(14): 144204. (in Chinese)

[11] Li Meihua, Zeng Zhi, Shen Jingling, et al. Numerical simulation of defects depth quantitative measurement in pulsed infrared nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 875-879. (in Chinese)

[12] Hou Zhenbing, He Shaojie, Li Shuxian. Heat Conduction in Solid [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. (in Chinese)

[13] Zhang Xiaochuan. Determination of infrared thermal wave nondestructive testing technology in defect size [D]. Beijing: Capital Normal University, 2006. (in Chinese)