

脉冲红外无损检测缺陷深度定量测量的数值模拟

李美华¹, 曾智², 沈京玲¹, 张存林¹

(1. 首都师范大学物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室 太赫兹光电子学教育部
重点实验室, 北京 100048; 2. 重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047)

摘要: 缺陷深度定量测量是脉冲红外热波技术定量测量的重要应用, 在一维热传导理论模型基础上分析了对数温度-对数时间二阶微分峰值法计算原理。以背面有 6 个大小相同深度不同的平底洞不锈钢试件为例, 利用 Ansys 模拟脉冲红外无损检测过程, 采用对数温度-对数时间二阶微分峰值法计算缺陷深度。比较和分析了 Ansys 和脉冲红外热波实验结果, 结果表明所建立 Ansys 模型与脉冲热波实验结果相符, 可为脉冲红外热波技术缺陷深度定量测量应用提供理论依据。

关键词: Ansys 数值模拟; 缺陷深度; 定量测量; 脉冲红外无损检测

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0875-05

Numerical simulation of defects depth quantitative measurement in pulsed infrared nondestructive testing

Li Meihua¹, Zeng Zhi², Shen Jingling¹, Zhang Cunlin¹

(1. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics,
Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: Quantitative measurement of defect depth is an important application of pulsed infrared nondestructive testing. The calculation principle of peak second derivative of the temperature decay curve in the log scale was analyzed based on one-dimensional heat conduction model. The stainless steel sample which has six flat bottom holes with same diameters and various depths at the back surface was used. Ansys was used to simulate the process of pulsed infrared nondestructive testing. The depth of defects were calculated by method PSDT. The results of Ansys and pulsed infrared nondestructive testing were compared and analyzed, which indicate that the Ansys model in accordance with the experiment. This research provides theoretical basis for the quantitative study of infrared nondestructive testing.

Key words: Ansys numerical simulation; defect depth; quantitative measurement;
pulse infrared nondestructive testing

收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(10804078)

作者简介: 李美华(1987-), 女, 硕士, 主要从事红外无损检测方面的研究。Email: limeihua_happy@126.com

导师简介: 沈京玲(1957-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学-太赫兹科学技术和红外无损检测方面的研究。

Email: jinglingshen@gmail.com

0 引言

红外热波无损检测是一种基于热波理论的无损检测方法,通过主动对物体施加周期、脉冲等函数形式的可控热激励,使物体内部的缺陷以表面温度场变化的差异形式表现出来,采用红外热像仪连续观测和记录物体表面温度场的变化。此项技术适用于多数复合、非复合材料,应用领域广泛,如航天航空、汽车制造以及新材料领域。可检测冲击损伤、分层、脱粘、空隙等缺陷^[1-5]。

在无损检测中,不仅要检测到缺陷的存在,还要得到缺陷的定量信息,如缺陷的大小、深度、缺陷类型等,这也是无损检测技术的难点。缺陷深度的测量是脉冲红外热波无损检测定量分析中非常重要的应用,一般是对缺陷处表面温度随时间变化情况进行分析得到某个峰值时间作为特征时间进行计算,常用的测厚方法有热对比度峰值法,热对比度变化率峰值法,对数温度-对数时间曲线分离法,最小二阶拟合法等,文中采用对数温度-对数时间二阶微分峰值法计算缺陷厚度^[5-6]。

针对背面含有 6 个大小相同、深度不同的平底洞不锈钢试件,采用有限元软件 Ansys 对脉冲红外热波无损检测进行模拟,通过表面温度场的变化来定量计算和分析内部缺陷的深度。

1 缺陷深度的测量方法

脉冲红外无损检测方法采用两个高能闪光灯作为热激励源,主动对试件加载瞬时脉冲热,试件表面吸收热量并向内传导,当试件存在缺陷时,由于缺陷部分与材料热属性不同而引起试件表面温度场的变化。通过红外热像仪对温度分布异常区域进行识别,以达到检测缺陷的目的。实验装置如图 1 所示。

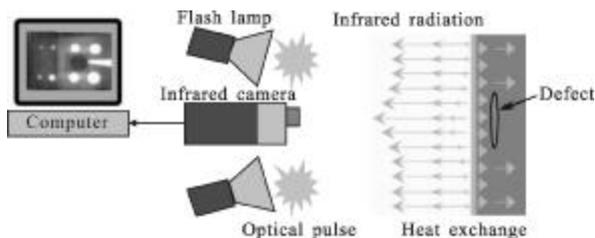


图 1 脉冲红外无损检测实验装置图

Fig.1 Experimental setup of pulsed infrared nondestructive testing

对于半无穷大厚度均匀的介质,在一维热传导情况下,脉冲加热后,当物体表面下有缺陷或被测试件较薄时,热传导方程的解为^[7]:

$$T(t) = \frac{Q}{\rho C L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2}\right) \alpha t \right] \quad (1)$$

式中:Q 为施加在表面的热量,J; ρ 为材料密度,kg/m³;C 为比热容,J/(kg·K);L 为试件厚度,m; $\alpha = \frac{k}{\rho C}$ 为热扩散系数,m²/s;k 为热传导率,W/(m·K)。

α 一般被视为常数,它表示了物体传导热的能力, α 越大,物体随着环境温度的变化越快, α 越小,物体随着环境温度的变化越慢。

在方程(1)中, $\alpha t/L^2$ 是无量纲的量,因此,在脉冲加热方法中不能单独求出热扩散系数 α 和试件的厚度 L,但是如果试件的热扩散系数 α 已知,那么就能求出试件的厚度 L,反之亦然。

缺陷深度的定量测量一直是一个非常重要的研究课题,很多研究都是基于热对比度 $\Delta T = T - T_r$ (T 为缺陷区域的温度, T_r 为非缺陷区域的温度)基础上做的。研究所使用的厚度测量的方法是对数温度-对数时间二阶微分峰值法(PSDT),PSDT 法不需要选取参考点,取其峰值所对应的时间作为特征时间求缺陷深度。缺陷深度与特征时间的关系可以由方程(1)计算得出^[6]。

对数温度-对数时间的一阶微分表示为:

$$\frac{d(\ln T)}{d(\ln t)} = \frac{t}{T} \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

二阶微分表示为:

$$\frac{d^2(\ln T)}{d(\ln t)^2} = \frac{t}{T} \frac{dT}{dt} - \frac{t^2}{T^2} \left(\frac{dT}{dt} \right)^2 + \frac{t^2}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} \quad (3)$$

并且,

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{Q}{\rho C L} \frac{2\omega^2}{t^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2 \omega} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} = \frac{Q}{\rho C L} \frac{2\omega^2}{t^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^4 e^{-n^2 \omega} \quad (5)$$

其中,

$$\omega = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \quad (6)$$

应该注意的是,对数温度-对数时间的一阶和二阶微分都是无量纲的方程。求解方程(3)可得,当 $\omega = \pi$ 时, $\frac{d^2(\ln T)}{d(\ln t)^2}$ 达到最大值,此时所对应的时间 t_{PSDT} 为:

$$t_{\text{PSDT}} = \frac{\pi L^2}{\pi^2 \alpha} \quad (7)$$

由此可见,PSDT 法所对应的特征时间与缺陷深

度或试件厚度平方成线性关系。在实际测量中,可根据这种线性关系得到缺陷的相对深度。

2 Ansys 模拟

采用 Ansys 有限元模拟的方法研究脉冲红外无损检测,可以排除真实红外无损检测过程中噪声、加热不均匀等影响,为红外无损检测提供理论依据,并且为进一步量化分析缺陷的深度、大小等特征提供了一个理论手段^[8]。

选取不锈钢平底洞作为研究对象,不锈钢试件尺寸为:长300 mm,宽为 200 mm,高为 20 mm。底部设有两排共 6 个平底洞,每个平底洞的直径均为 20 mm,厚度分别为 1、2、3、4、5、6 mm,分别记为 A 洞,B 洞,C 洞,D 洞,E 洞,F 洞。实物图和模拟图分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

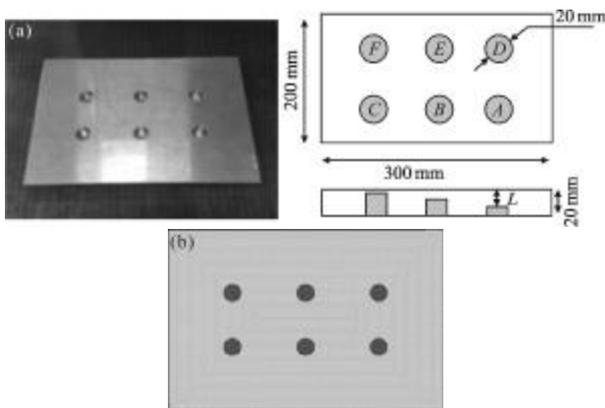


图 2 不锈钢平底洞试件实物图与模拟图

Fig.2 Material object and simulation drawing of stainless steel with flat bottom holes

该实例用加载热流密度法模拟脉冲红外无损检测,在 Ansys 模拟过程中设试件的初始温度为 20 °C,加载的热流密度为 $4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ^[8],采集时间为 5 s,实验中采集的时间为 30 s,虽然模拟的采集时间与实际实验的采集时间不同,但在 Ansys 求解中并不影响模拟结果与实际检测结果的对比,因为所有的缺陷在 5 s 内就可检测出来,这样可以提高计算机的计算效率。材料的热属性参数如表 1 所示。

表 1 材料的热属性参数

Tab.1 Thermal parameters of materials

	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$K/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
Stainless steel	7 962	456	17
Air	1	1 004	0.025 1

3 脉冲红外无损检测缺陷深度的计算及分析

3.1 缺陷深度的模拟计算及分析

根据热传导理论,当热量传到缺陷处时,材料的导热系数发生改变,热量在此处发生热积累,表面温度相对较高。因此深度小的缺陷处首先发生热积累,导致降温曲线在深度大的缺陷降温曲线的上方。

图 3(a)和图 3(b)分别为 5 s 时 Ansys 模拟热图和实验热图,从图中可以看出,模拟热图与实验热图相符。

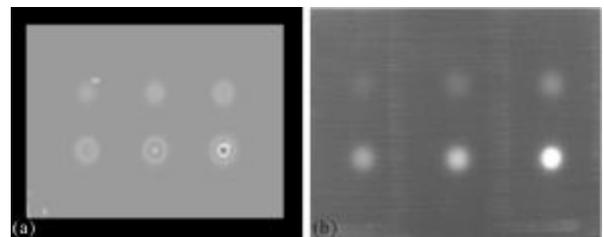


图 3 模拟热图和实验热图

Fig.3 Simulation thermography and experimental thermography

图 4(a)和图 4(b)分别为不锈钢平底洞试件的模拟和实验 T-t 曲线,其中,图 4(b)选取实际实验过程中的前 5 s 时间,与模拟时间相对应。

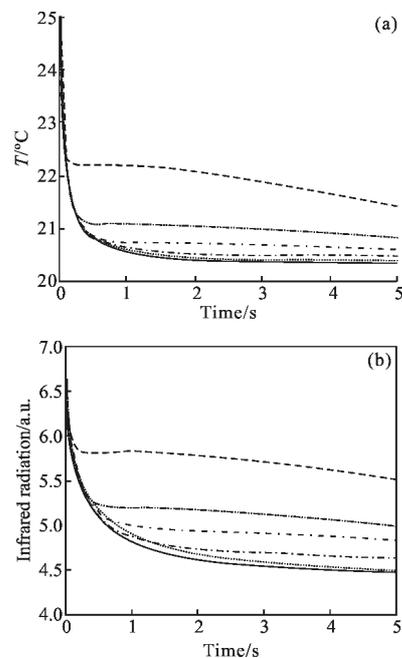


图 4 模拟和实验 T-t 曲线

Fig.4 Simulation and experimental T-t curves

由图 3 和图 4 可以看出,模拟检测结果与实际

红外系统处理后的检测结果相符,因此用 Ansys 模拟红外无损检测是可行的。

图 5 是平底洞试件模拟数据的对数温度-对数时间二阶微分处理后的曲线,取峰值对应的时间为 t_{PSDT} ,由图 5 可见,缺陷深度越小所对应的峰值越靠前,即 t_{PSDT} 越小。

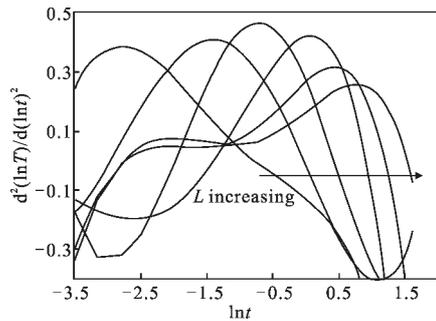


图 5 模拟数据的对数温度-对数时间二阶微分曲线
Fig.5 Second-order derivatives of simulation lnT-ln t curves

将 t_{PSDT} 带到公式(7)中,可以得到 6 个平底洞的深度及相对误差,如表 2 所示。

表 2 模拟结果及相对误差

Tab.2 Simulation results and relative errors

Holes	Peak time/s	Depth/mm	Simulation depth/mm	Relative errors
A	0.062	1	0.911	8.9%
B	0.242	2	1.886	5.7%
C	0.502	3	2.716	9.47%
D	1.062	4	3.950	1.25%
E	1.541	5	4.759	4.82%
F	2.122	6	5.584	6.93%

由表 2 可以看出,平底洞模拟深度与实际深度相差不大,相对误差都保持在 10% 以内,因此 Ansys 可以作为缺陷深度测量的理论基础。

3.2 缺陷深度的实际实验计算及分析

图 6 是平底洞试件实际实验数据的对数温度-对数时间二阶微分处理后的曲线,图 4 与图 5 对比可见,模拟的 PSDT 曲线和实际实验的 PSDT 曲线走势相同,进一步验证了 Ansys 有限元软件模拟红外无损检测过程的可行性。

图 6 中每条曲线的峰值所对应的时间 t_{PSDT} 及应用 PSDT 法计算的缺陷深度如表 3 所示。

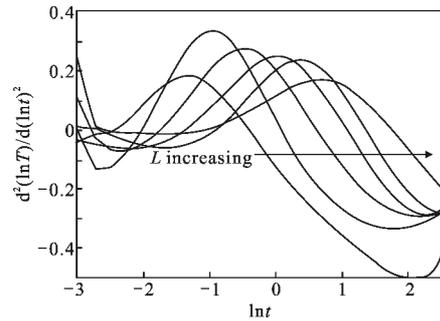


图 6 实验数据的对数温度-对数时间二阶微分曲线
Fig.6 Second-order derivatives of experimental lnT-ln t curves

表 3 实验结果及相对误差

Tab.3 Experimental results and relative errors

Holes	Peak time/s	Depth/mm	Experimental depth/mm	Relative errors
A	0.083	1	1.106	10.64%
B	0.367	2	2.322	16.12%
C	0.617	3	3.011	0.37%
D	1.018	4	3.868	3.30%
E	1.452	5	4.619	7.62%
F	1.935	6	5.332	11.13%

从表 3 中可以看出,深度为 1、2、6 mm 的缺陷深度在 10%~20%,与实际深度相差较大,这是由于 PSDT 法是基于一维热传导理论模型,而在实际测量过程中,会受三维热扩散和缺陷有限尺寸的影响^[9],缺陷深度太深或太浅,计算结果相对误差会变大。因此,在实际实验过程中,很少应用公式直接进行厚度测量,而是利用特征时间与缺陷深度平方的线性关系计算。

4 结论

基于一维热传导理论模型利用 Ansys 对不锈钢平底洞试件进行模拟,通过对获得的试件表面温度变化的热图序列数据进行处理和分析,得到缺陷表面处对数温度-对数时间二阶微分曲线,采用 PSDT 法进行缺陷深度的计算。因为 PSDT 法不需要选取参考点,不会引入额外的影响,并且 Ansys 模拟时避免了实验过程中加热不均匀、噪声、反射等影响,因此用 PSDT 法计算缺陷深度与实际深度相差不大,计算结果在合理的误差范围之内。研究结果表明,利用 Ansys 模拟软件可以为实际实验提供理论基础。

参考文献:

- [1] Xun Wang. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. US: Wayne State Univ, 2001.
- [2] Wang Xun, Jin Wanping, Zhang Cunlin, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26 (10): 497-501. (in Chinese)
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): 497-501.
- [3] Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230. (in Chinese)
李国华, 吴立新, 吴淼, 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.
- [4] Tao Ning, Zeng Zhi, Feng Lichun, et al. Thermal effusivity measurement of subsurface heterogeneous materials using pulsed thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2098-2103. (in Chinese)
陶宁, 曾智, 冯立春, 等. 采用脉冲红外成像法的表面下暗藏物蓄热系数的测量 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2098-2103.
- [5] Li Yanhong, Jin Wanping, Yang Danggang, et al. Thermal wave nondestructive testing of honeycomb structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (1): 45-48. (in Chinese)
李艳红, 金万平, 杨党纲, 等. 蜂窝结构的红外热波无损检测[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 45-48.
- [6] Sun J G. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction [J]. *J Heat Transfer*, 2006, 128(4): 329.
- [7] Park W J, Jenkins R J, Butler C P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. *J Appl Phys*, 32(9): 1679-1684.
- [8] Liu Wenxia. The simulation and analysis of infrared non-destructive testing by using ANSYS finite element software [D]. Beijing: Capital Normal University, 2010. (in Chinese)
刘文霞. 基于 ANSYS 有限元软件的红外无损检测模拟及分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2010.
- [9] Carosena Meola, Giovanni Carlomagno, Luca Giorleo. Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2004, 23(4): 125-132.

下期预览

典型粗糙表面激光后向散射特性的实验

崔骥, 付欢, 刘焯, 王清华, 李振华, 贺安之

(南京理工大学理学院信息物理与工程系, 江苏南京 210094)

摘要: 对现有的粗糙度比较样块和其他典型粗糙目标进行了后向光散射特性的实验。实验结果表明, 当入射光为 632.8 nm 波长时, 随着入射角的增大, 不同的被测目标的散射强度变化的比较明显。如果被测目标的表面斜率均方根比较接近, 可以发现它们整体的散射光强度变化趋势几乎一样, 而且它们的偏振度也相差不大。表面斜率很小的被测目标, 相对其他被测目标, 其散射光光强明显大很多, 其偏振度也是最大的, 说明相对光滑的表面探测到的后向散射光强度比相对粗糙表面探测到的散射光强度大的多。文中关于典型粗糙表面后向散射偏振特性的研究结果对于探讨进行目标识别的理论及应用方面有一定的价值。