

文章编号: 1672-8785(2013)03-0021-05

基于对数二阶微分峰值法的 缺陷深度测量研究

王中华^{1,2} 曾 智^{1,2,3} 张存林^{1,2} 黄新萍^{1,2}

(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, 北京 100048;

2. 首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;

3. 重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047)

摘 要: 红外检测中定量分析方法常以特征时间和缺陷深度的关系为基础。本文预设 6 个平底洞的不锈钢为实验试件, 选取一种不需要参考区域的 PSDT 法进行测厚计算。以对数温度曲线的二阶微分峰值时刻作为特征时间, 利用特征时间与试件深度的平方成正比关系, 达到测厚的目的。用 VC 软件编程实现任意点的数据计算, 先用最小二乘多项式的方法拟合数据, 再计算对数温度-对数时间的二阶微分峰值时刻, 将结果用图形直观精确地显示出来, 最终实现缺陷深度的自动测量。

关键词: 二阶微分峰值; 深度测量; 红外脉冲检测

中图分类号: O434.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.03.05

Study of Defect-depth Measurement Based on Second-order Derivative Peak Value Method

WANG Zhong-hua^{1,2}, ZENG Zhi^{1,2,3}, ZHANG Cun-lin^{1,2}, HUANG Xin-pin^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics,
Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics Ministry of Education, Department of Physics,
Capital Normal University, Beijing 100048, China;

3. Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University,
Chongqing 400047, China)

Abstract: In infrared detection, the quantitative analysis is usually based on the relationship between the specified characteristic time and the defect depth. Using a stainless steel plate with six flat-bottom holes as an experimental sample, the defect depth is calculated by using a PSDT method which need not to choose any reference. When the time of the second-order derivative of logarithmic temperature peak is taken as the characteristic time, the defect depth is measured according to the proportion of the characteristic time to the square of defect depth. The data calculation for any point can be implemented with a VC program. Firstly, the data is fitted by using the least square polynomial. Then, the second-order derivative peak time of the logarithmic temperature-logarithmic time is calculated. The result is displayed precisely in figures and the defect depth is automatically measured finally.

Key words: peak value of second-order derivative; depth measurement; infrared pulsed thermography

收稿日期: 2013-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(U1233120,61079020)

作者简介: 王中华(1987-), 女, 研究生, 四川巴中人, 研究方向为红外热波技术。

E-mail: joanna_wang212@163.com

0 引言

目前红外脉冲无损检测技术已被应用于各种材料的各种缺陷的探测,并取得了明显的效果。该技术通过主动地对物体施加周期、脉冲等函数形式的可控热激励,使物体内部的缺陷以表面场温差形式表现出来。通过热像仪连续观测并采集表面温场变化的热像图,可为进一步的理论分析提供重要依据。定性定量地探测分析各类缺陷在工业上有重要作用。定性分析可以判定缺陷类型,如复合材料和金属材料的腐蚀、碰撞损伤、分层、断裂、脱粘和气泡等。定量分析主要用于确定缺陷深度及大小关系。^[1,2]

近 20 年定量测量缺陷深度一直是热门的研究课题。这期间出现了很多新的测厚方法,其中包括通过特征时间 (SCT) 来确定缺陷深度的方法。这种方法是在一维或者二维热传导模式下,以数值分析得到某个位置点的峰值时间作为特征时间,特征时间的准确与否直接关系到测量结果的准确性。常用的测厚方法有热对比度峰值法 (PCT 法)、热对比度变化率峰值法 (PST 法)、对数温度 - 对数时间曲线分离法和对数温度 - 对数时间二阶微分峰值法 (PSDT 法)。前三种方法均需选取参考,参考可以是无缺陷区域温度,也可以是整个表面温度的平均值,或者是前几帧的平均温度。PCT 法把热对比度 (有缺陷区域的温度减去无缺陷区域的温度) 的峰值温度对应的时间作为特征时间。PSDT 法根据位置点自身的温度变化确定峰值时间,不会因为手动选择参考而引入额外的错误。本文选取不锈钢为实验试件,在试件底部预设 6 个深度不一的平底洞。采用直观的 VC 软件进行计算处理,通过比较计算结果中缺陷深度的大小关系来分析验证该种测厚方法^[3]。

1 理论基础

红外脉冲无损检测的原理如图 1 所示。用可见光 (本实验为高能闪光灯发出的光) 将被测试件加热。热流在试件内传导,遇到不均匀 (有缺陷或有杂质) 处热传导受阻,缺陷上方的试

件表面出现热异常。采用热像仪记录所有热变化的过程,记录结果通过数据线传送到计算机。

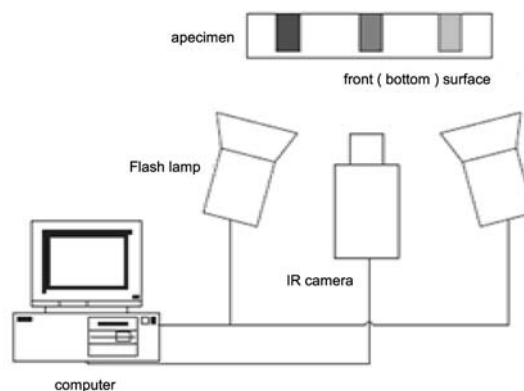


图 1 脉冲红外热成像框架图

在给定热源函数和边界条件的前提下,通过求解热传导方程可以得到热波在媒介中传播的函数热扩散方程。

热传导方程为

$$\nabla[k\nabla T(r,t)] - \rho c_v \frac{\partial T(R,T)}{\partial t} = -f(r,t) \quad (1)$$

理想情况下,半无限大均匀介质的热传导方程为

$$T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

式中, Q 表示单位面积施加在表面的热量 e 为被测试件的蓄热系数,如果材料中有缺陷或者是结构异常,则一维热传导方程为

$$T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 l^2}{\alpha t}\right) \right] \quad (3)$$

根据一维热传导模型,红外热波实验中被测试件的热对比度 (缺陷中心处和无缺陷处的表面温差) 可以表示为

$$\Delta T(0,t) = \frac{2Q}{e\sqrt{\pi t}} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 l^2}{\alpha t}\right) \quad (4)$$

式中, α 为热扩散系数,代表材料传导热的能力。 l 为被测试件厚度 (或缺陷深度), n 为脉冲传播到两种材料界面发生的 n 次放射。

PCT 法直接利用 $\Delta T(0,t)$ 的峰值对应的时刻作为特征时间 t_{pst} , 特征时间的大小与缺陷深度的平方成正比。PST 法以 $\Delta T(0,t)$ 的一阶导数

峰值对应时间作为特征时间 t_{pst} 。该特征时间也与缺陷深度的平方成正比, 但与缺陷大小没有关系^[4]。对数温度 - 对数时间曲线分离法常选无缺陷区域点的温度曲线作为参考曲线, 以参考曲线和选取点的对数温度曲线分离点处对应的时间作为特征时间。这种方法在实际的计算过程中不易唯一确定曲线的分离点, 因此常常有很大的误差, 在此不做计算分析。

PSDT 法以对数温度 - 对数时间的二阶微分峰值时间作为特征时间 t_{psdt} , 不需要选取参考区域。

对数温度 - 对数时间的一阶微分表示为

$$\frac{d(\ln T)}{D(\ln t)} = \frac{t}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

上式的二阶微分结果为

$$\frac{d^2(\ln T)}{d(\ln t)^2} = \frac{t}{T} \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{t^2}{T^2} \left(\frac{dT}{dt} \right)^2 + \frac{t^2}{T} \cdot \frac{d^2T}{dT^2} \quad (6)$$

式中

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{Q}{\rho CL} \cdot \frac{2\omega^2}{t^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2\omega} \quad (7)$$

$$\frac{d^2T}{dt^2} = \frac{Q}{\rho CL} \cdot \frac{2\omega^2}{t^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^4 e^{-n^2\omega} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\pi^2 \alpha t}{l^2} \quad (9)$$

当 $\omega = \pi$ 时, $\frac{d^2(\ln T)}{dt(\ln t)^2}$ 得到最大值, 此时对应的时间即为特征时间 t_{psdt} , 其大小为

$$t_{psdt} = \frac{d^2}{\pi \alpha} \quad (10)$$

从 (10) 式可以看出当被检测试件材料一定时, 根据热扩散系数能确定缺陷深度的平方与其表面对数温度的二阶微分峰值时间成正比。通过以上理论分析可知, 参考区域的选择会使结果具有不确定性, 引入额外的误差。二阶微分对数时间曲线的峰值时间不需要选取参考区域, 特征时间的重复性较好, 更适合工程化检测的需求。本文选取工业中常见的不锈钢材料作为探测对象, 选取对数温度二阶微分峰值时间作为缺陷深度测量的特征时间^[5,6]。

2 实验试件选取

本实验选取长为 300 mm、宽为 200 mm、高为 20 mm 的不锈钢作为实验试件。试件底部设计 6 个深度不同的平底洞, 每个平底洞的直径均为 20 mm。厚度分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 和 6 mm, 分别记为 1、2、3、4、5 和 6, 其背视图和实物图如图 2 所示。

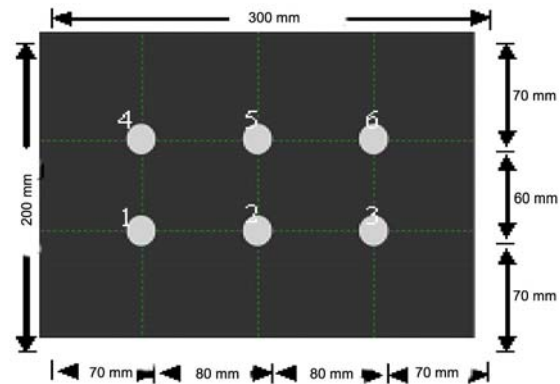


图 2(a) 不锈钢平底洞尺寸图



图 2(b) 试件实物图

实验所需的红外热波实验装置如图 1 所示, 通过两个 4.8 kJ 的闪光灯给试件的底部施加平行的脉冲热激励。热像仪选用焦平面制冷型热像仪, 图像大小为 320×240 像素, 敏感波段是 8~9 μm。热像仪广角镜头与试件的距离约为 40 cm。在实验进行过程中, 将试件的检测平面正

对热像仪, 因此缺陷越浅的洞越早在热像仪上显现出来^[7]。

3 软件计算及结果分析

3.1 软件计算

热像仪对试件表面的降温过程以 60 Hz 的频率采集 30 s, 总共获得 1800 帧图像, 文件保存为 dcb 格式。在 $t=6$ s 时不锈钢试件的二维红外热图如图 3 所示。图中能清晰地看见 6 个平底洞缺陷的位置。根据热波传导理论很容易知道出现越早亮度越大的平底洞缺陷越浅, 但是不能定量地指出它们的深浅关系^[8-9]。本文通过对数时间 - 对数温度的峰值时间确定出特征时间, 求出缺陷深度, 并将结果以二维视图的方式直观表现出来。

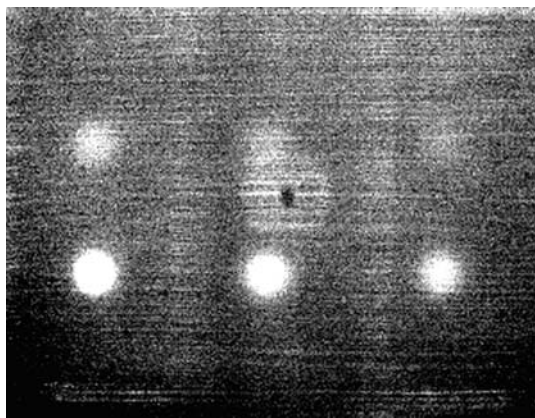


图 3 $t=6$ s 时的红外热图

由于文件格式的不统一, 在数据处理前, 需要对 dcb 文件数据格式进行转换。经分析可知, dcb 文件存储的数据格式为高位数据、高位个数、低位数据、低位个数。经过简单的转换可以直接读取每一帧的各点温度值, 进而可进行数据处理和计算。对转换后的温度进行数据处理的顺序依次是: 减背景操作 - 数据归一化 - 数据拟合 - 找温度最大值 - PSDT 法计算。

本实验采取反射式采集法。在 VC 编程处理数据时减去背景以增强对比度, 选择前 10 帧温度的平均值作为背景。减背景后最低温度基本从零开始, 经过短暂而迅速的升温后再降温。提取 6 个缺陷区域的表面温度时间信号。为减

小误差, 在缺陷中心选取 3×3 像素数据的平均值作为中心处的温度值。由于铝的热扩散系数高, 采集频率比较高, 升温 and 降温都非常迅速, 直接拟合会出现较大误差。因此只关注红外热图的降温过程, 并取对数时间 - 对数温度的降温曲线拟合以减小误差。考虑到单点标定测量深度可能产生较大的随机误差, 拟合利用最小二乘法多项式拟合, 结果如图 4 所示。在一维的热传导模型下, 热流在缺陷处先放射回来, 呈现出比无缺陷区高的温度。缺陷越浅, 升温越快, 降温也越迅速。

由归一化的拟合曲线也能看出 6 个洞的缺陷出现的时间关系。(以下 6 个平底洞的计算坐标均采用缺陷中心点 3×3 像素范围内的平均温度)

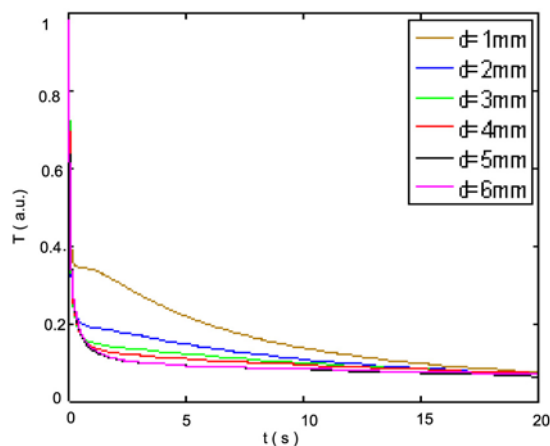


图 4 六个平底洞归一化并拟合后拟合的曲线

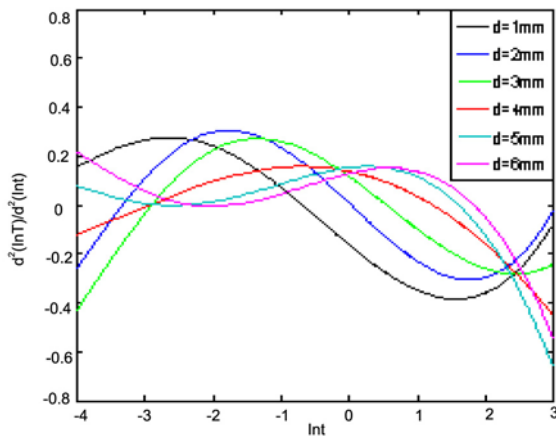


图 5 各缺陷的对数温度 - 对数时间二阶微分曲线

由图5看出,在对数温度-对数时间的二阶微分曲线中,缺陷深度越浅,对应的降温过程越迅速,热图上就越早出现热异常。缺陷深度不同对应的峰值时间也不同。缺陷越浅,对数温度-对数时间曲线的峰值时间就越小。

3.2 结果分析

由于缺陷深度大小的平方与特征时间成正比,因此可通过对数温度峰值的最大帧数确定

特征时间,继而求得缺陷深度。试件的每个缺陷与其对数二阶峰值时刻的关系见表1。通过分析可知,缺陷浅的计算误差比缺陷深的误差大,其原因是本文采用的测厚方法是基于一维热传导模型分析得出的,这就假定了半无限均匀的介质的热传播,而实际热传导过程会受三维热扩散和有限尺寸的影响。

表1 缺陷的对数温度二阶微分对应的特征时间及计算结果

缺陷设计 (mm)	1	2	3	4	5	6
峰值对应帧	5	13	26	41	80	122
特征时间 (s)	0.0837	0.2167	0.4284	0.8617	1.334	2.033
计算值 (mm)	1.121	1.807	2.541	3.604	4.483	5.536

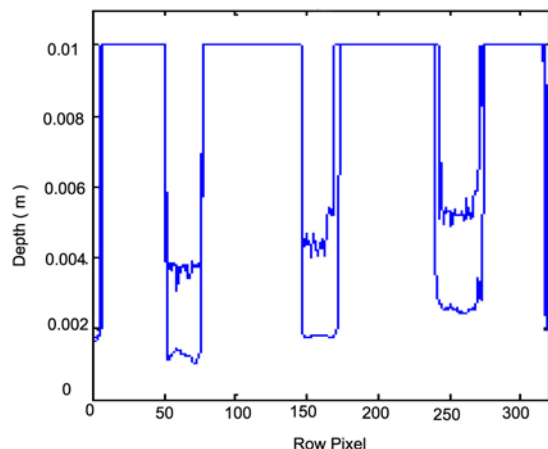


图6 不锈钢缺陷深度曲线

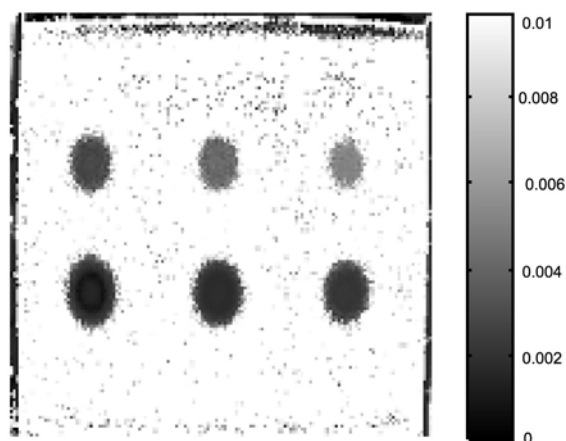


图7 平底洞深度二维图

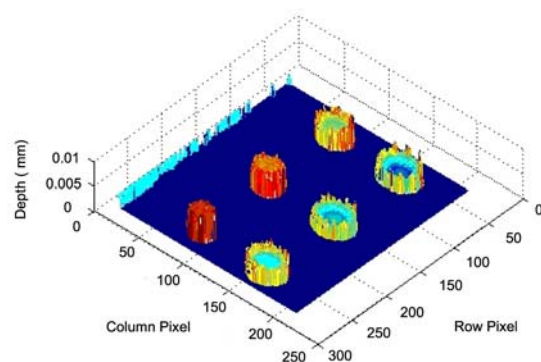


图8 平底洞缺陷深度三维图

已知不锈钢的热传导系数,利用式(10)计算出以上6个点的缺陷深度。图6为缺陷深度曲线,可以看出6个缺陷深度的大小与无缺陷区域的对比。

图7和图8分别是试件所有区域的深度二维图和三维图,可以看出6个平底洞缺陷深浅关系。在缺陷中心区域,深度测量的效果理想,缺陷边界测量有较大的误差。二维深度视图比直接用红外热像仪采集的热像图清晰,而且也实现了定量测量的目的。三维视图的结果则同时具有直观性和量化性。

4 结论

本文选取不锈钢作为试件,在试件底部设计6个深度不同的平底洞缺陷。基于脉冲红外

(下转第31页)