

文章编号 1004-924X(2008)01-0055-04

基于脉冲位相的红外热波无损检测法测量缺陷深度

李艳红¹, 赵跃进¹, 冯立春², 张存林²

(1. 北京理工大学 信息科学技术学院 光电工程系, 北京 100081; 2. 首都师范大学 物理系, 北京 100037)

摘要:提出了基于脉冲位相分析的数据处理方法以实现红外热波无损检测法对缺陷深度的测量。对脉冲红外热波无损检测的时间信号进行傅里叶变换(FFT),提取位相频率信息,根据热波频率与传导深度的关系完成缺陷深度的检测。以热传导较快的铝材料为例,对自行设计的深度不同的平底洞缺陷进行实验,并通过应用 Matlab 的 FFT 分析得到不同深度平底洞缺陷在不同频率下的位相曲线,同时,应用 VC++ 得到位相序列热图。实验结果表明了脉冲位相相对缺陷深度检测的可行性,缺陷实际深度与实验深度存在 $d \approx 1.98 \mu$ 的关系,同时位相图有效抑制了噪声的干扰,为材料和结构内部缺陷检测提供了一种有效处理方法。

关键词:红外热波;无损检测;缺陷深度;脉冲位相测量法;傅里叶变换

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase

LI Yan-hong¹, ZHAO Yue-jin¹, FENG Li-chun², ZHANG Cun-lin²

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to realize the defect depth measurement in the infrared thermal wave nondestructive evaluation, the pulse phase thermography was introduced. The temporal signals were analyzed by Fourier transform, and the depth was measured according to the relation of thermal wave frequency with conduction depth. The experimental results of Al samples with flat bottom holes were obtained by phase curves in Matlab and phase images in VC++ in different frequencies. The initial results show that the detected depth and factual depth have a relation of $d \approx 1.98 \mu$ and phase images have good robustness to noise, which shows the pulse phase infrared thermography is an effective way for subsurface defects detection of material and structure.

Key words: infrared thermal wave; nondestructive evaluation; defect depth; pulse phase thermography; Fourier transform

1 引言

脉冲式红外热波无损检测以热传导理论为基

础,在一维传导模型下,脉冲面热源施加于被检测物表面,在试件表面以热波形式向试件内部纵向传播,并随时间和穿透深度指数衰减,遇到不同介质,在介质界面处按边界条件继续传播。红外

热像仪实时接收被检物表面辐射的红外信号,即通过热图直观得到被检材料或结构内部状况;其中热波传导到被检物内部界面的时间 t 、表面到此界面深度 d 、热扩散系数 α (与材料热传导性、密度和比热容相关, $\alpha = k/\rho c$) 之间存在 $t \sim d^2/\alpha$ 的关系,找到异常界面传导时间 t ,即可定量计算被检物的材料结构内部异常深度信息。脉冲式红外热波检测过程方便快捷^[1],检测结果直观可靠,但此方法以辐射信号强度信息为基础,热波传导的指数衰减使可探测的深度有限,若材料表面的红外发射率低,反射率高也会影响检测性能。

锁相方法是采用单一频率的周期热源加热被检物表面,红外热像仪采集红外参考信号和输出信号周期内的数字信号,由计算机处理得到振幅和位相热图。其中位相与信号的时间延迟有关^[2],得到的位相热图与表面光学特性无关,从而部分解决脉冲式检测的被检物表面影响问题。

进一步从频域考虑,由单一频率热图发展到多频热图,即为脉冲位相法(Pulse Phase Thermography, PPT)。

2 脉冲位相法原理

对脉冲式检测加载的时域脉冲信号 $\delta(t)$ 进行傅立叶变换(FFT)得到频域上的无限频谱,可产生丰富的谐波成分,不同频率的热波在被检物内的传播深度不同。定义传播深度为热扩散长度 $\mu = \sqrt{2\alpha/\omega}$,其中 ω 为热波角频率。由不同频率的信号,就可以得到被检物材料或结构内部不同深度缺陷信息。

在脉冲位相法中,红外热像仪采样频率(时间间隔为 Δt)下接收的每个像素点 (x, y) 对应的 N 个离散温度时间信号 $T_{(x,y)}(t)$,做傅里叶变换:

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T(t) \exp[-j2\pi ft/N] = R(f) + iI(f),$$

得到频域上的信号。

一般采用快速 FFT 实现。再将频域信号按

$$|F(f)| = \sqrt{I^2(f) + R^2(f)},$$

$$\Phi(f) = \arctan\left(\frac{I(f)}{R(f)}\right),$$

提取不同频率下的幅值图和相位图^[3]。其中频率 f 范围从 0 到 $1/\Delta t$,这里实验提供采样频率 60

Hz, $\Delta t = 0.0167$ s, 频率增量 Δf 为 $\Delta f = 1/N\Delta t$ (N 为数据长度)。

当采样频率 f 大于信号中最高频率 f_{\max} 的 2 倍时,即 $f \geq 2f_{\max}$,则采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息。金属铝的热扩散系数 α 为 $9.10 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ (热导率为 $2.26 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, 密度为 $2.698 \text{ g}/\text{cm}^3$, 质量热容为 $921 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), 在探测深度为 1 cm 时,由热扩散深度 $\mu = \sqrt{2\alpha/\omega} = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 知,实验采集频率(60 Hz)满足采样定理^[4]。

3 实验与结果

3.1 实验设备及试件

本文中的脉冲位相法使用红外热波无损检测系统,该系统由热激励系统、红外热像仪和计算机组成。热激励系统两个高能氙灯,最大能量可达 10 kJ,脉冲宽度为 2 ms。红外热像仪是瑞典的 ThermoCAM™ SC3000,制冷型量子阱焦平面红外光子探测器,探测波段为 $8 \sim 9 \mu\text{m}$, $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$,室温下最小温度分辨率为 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 。整个检测过程的热激励和信号采集时间较短,依材料热属性及结构性质不同,从几十秒到几分钟内即可完成。采集到的信号通过电缆线传送到计算机,由图像处理软件进行实时处理或后期对比分析处理。

实验采用制作缺陷为空气平底洞:铝试件厚 20 mm,人工钻有 6 个孔径均为 20 mm,距上表面深度 d 分别为 1、2、3、4、5、6 mm 的平底洞,示意图如图 1 所示。图中标号 1~6 对应表面下平底洞区域,7 为无平底洞的参考区域。

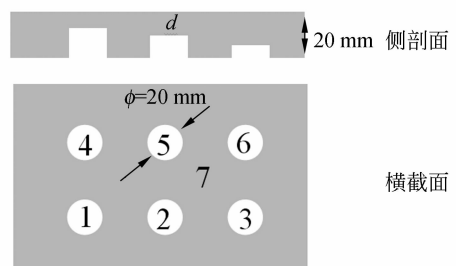


图 1 试件设计示意图

Fig. 1 Design sketch of sample

3.2 实验过程与结果

实验中脉冲能量设为 10 kJ,热像仪采集信号

频率为 60 Hz, 每 1/60 s 采集 320 pixel × 240 pixel 的红外信号, 提取对应 6 个平底洞和参考区域表面对应 3 pixel × 3 pixel 的平均值信号, 得到各点信号幅值随时间的变化曲线如图 2 所示。由于各点脉冲激励不均, 各点的初始幅值存在差别, 随时间各点幅值迅速衰减, 一定时间后达到热平衡时各点变化趋于一致。将提取出的信号做傅里叶变换, 在 Matlab 中快速傅里叶变换得到负值部分位

相曲线如图 3 所示, 由傅里叶变换的特点, 只有 0 ~ $f/2$ 有效。分析位相频谱, 60 Hz 采样频率下的 128 个数据, 可得到的最小频率为 $60/128=0.47$ Hz, 最大频率是采样频率的 1/2, 即 30 Hz。

将 6 个不同深度的平底洞缺陷的位相与参考区域 7 的位相作差得到位相差曲线, 如图 4 所示。发现缺陷点在某频率的位相与参考点位相差为零后, 缺陷将不再可见, 该频率即为盲频, 热波分量在试件中传导的深度对应缺陷所在深度^[5-6]。在位相热图中, 不同深度的缺陷对应应在频域 $f=0$ 至 f_b 区间可见(位相差 $\Delta\phi > 0$), 即此频率 f 段内存在位相差, 缺陷显现。图 5 所示即为各像素点随频率变化的位相信号。

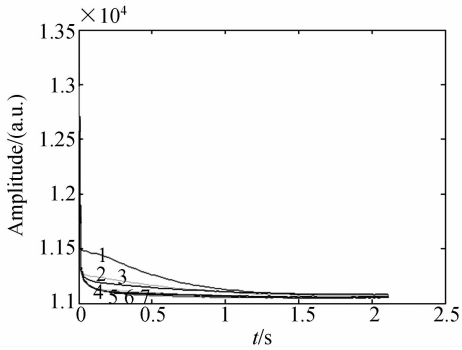


图 2 幅值曲线图

Fig. 2 Amplitude vs. time curves

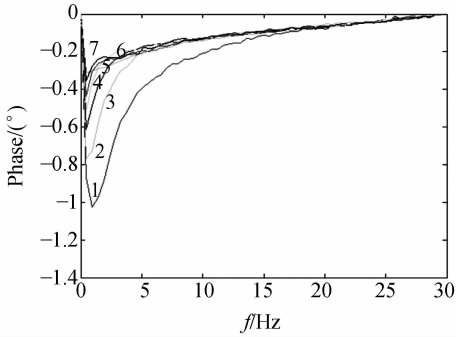


图 3 位相曲线图

Fig. 3 Phase vs. frequency curves

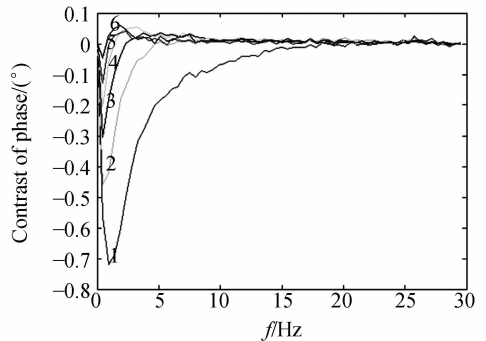


图 4 位相差曲线图

Fig. 4 Phase contrast curves

由图 5 得知, 深的平底洞可见频率段较浅的小, 即需足够高采样频率的热像仪进行较深缺陷的检测。随探测缺陷深度减小, 高频段成分依然可见, 直至盲频后缺陷不可见。

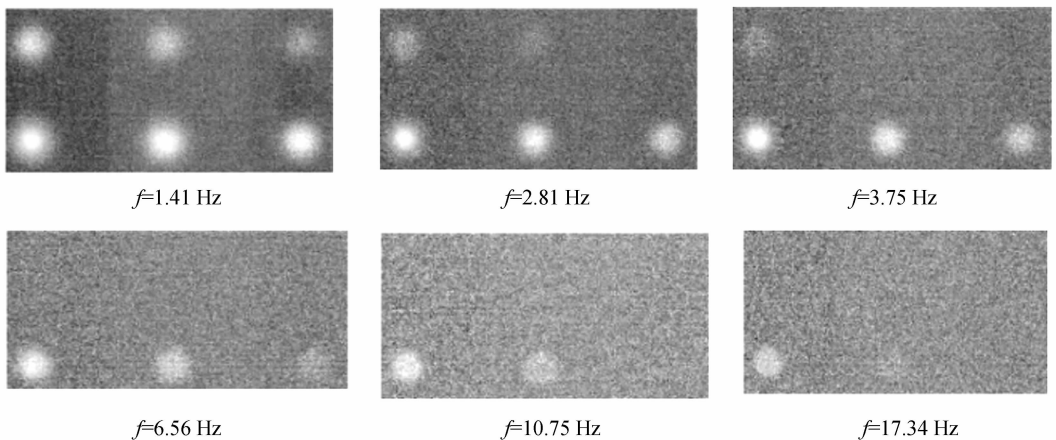


图 5 Al 平底洞试件位相图

Fig. 5 Phase images of Al samples with flat bottom holes

表 1 平底洞缺陷实际深度与对应盲频和实验深度

Tab. 1 Defects' factual depths corresponding blind frequencies and detected depths

深度 d/mm	盲频 f_b/Hz	实验深度 μ/mm
6	2.34	3.52
5	3.28	2.97
4	4.69	2.49
3	7.97	1.91
2	16.88	1.31
1	22.03	1.15

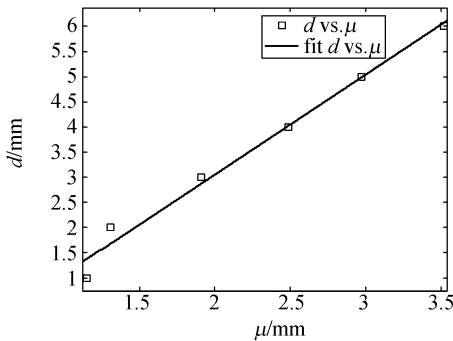


图 6 缺陷实际深度与实验深度的关系

Fig. 6 Factual depth vs. detected depth

由位相图序列灰度图得到各深度平底洞的盲频 f_b , 由 $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f_b}$ 即可计算实验深度 μ 。平底洞实际深度 d 与盲频 f_b 及实验深度如表 1 所示。实际深度 d 与实验深度 μ 存在 $d = 1.98\mu - 0.91$ mm 的关系, 见图 6。

4 结 论

在脉冲红外热波无损检测技术的基础上进行数据处理得到的脉冲位相方法, 具有脉冲检测快捷灵敏的优点, 同时还具有其它独到之处, 如位相图不受初始加热不均影响, 图像信噪比较高, 适用于各种材料的无损检测。不同材料由探测盲频计算得到的深度与缺陷实际深度的关系, 即可标定进行此材料内部缺陷的深度检测, 具体算法可进一步优化, 如小波去噪等等^[7], 提高检测的准确度及精度。

参考文献:

- [1] 张小川, 金万平, 李艳红, 等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 16-18. ZHANG X CH, JIN W P, LI Y H, *et al.*. Measurement of thickness of glass fiber reinforced plastic flat bottom hole sample by infrared thermal NDT[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(1): 16-18. (in Chinese)
- [2] WUA D, SALERNO A, SCHÖNBACH B, *et al.*. Phase sensitive modulation thermography and its applications for NDE[J]. *SPIE*, 1997, 3056: 176-183.
- [3] 容观澳. 计算机图象处理[D]. 北京: 清华大学出版社, 2000. RONG G A. *Computer Image Process* [D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [4] 郭兴旺, 刘颖韬, 郭广平, 等. 脉冲相位法及其在复合材料无损检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1049-1053. GUO X W, LIU Y T, GUO G P, *et al.*. Pulsed phase thermography and its application in the NDT of composite materials[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(10): 1049-1053. (in Chinese)
- [5] GALMICHE F, LECLERC M, MALDAGUE X. Time aliasing problem in pulsed phased thermography[J]. *Thermosense XXIII*, *SPIE*, 2001, 4360: 550-553.
- [6] IBARRA-CASTANEDO C, MALDAGUE X. Pulsed phase thermography inversion procedure using normalized parameters to account for defect size variations[J]. *Thermosense XXVII*, *SPIE*, 2005, 5782: 334-341.
- [7] 同武勤, 凌永顺, 黄超起, 等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 1: 138-144. TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH, *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 1: 138-144. (in Chinese)

作者简介: 李艳红(1981—), 女, 湖北十堰人, 在读博士生, 研究方向为光电信息处理。E-mail: lianhongg@126.com

赵跃进(1958—), 男, 河北涉县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为光电仪器、图像处理、MEMS技术和THz成像技术。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn