

超声脉冲相位热成像技术及其应用实例

陈大鹏 张存林 李艳红

(首都师范大学物理系, 北京 100048)

摘要 超声脉冲相位热成像技术是利用超声能量激励被检测材料, 如果材料中有表面或是亚表面的缺陷(裂纹或分层), 超声能量就会引起缺陷处摩擦生热或是产生热弹效应, 从而实现对缺陷部位选择性热激励。同时采用现代红外成像技术, 通过热像仪在计算机控制下进行时序热波信号探测和数据采集, 并将采集到的原始热图序列做傅里叶变换处理得到相位热图序列, 从而可定量获取材料内部缺陷的振幅及相位信息。利用这种技术对两个不同焊接能量的不锈钢激光焊缝试件以及某型号电锯锯齿轮试件进行检测, 并以图像形式直观显示了焊缝及缺陷的振幅和相位信息。

关键词 超声; 红外; 脉冲相位; 傅里叶变换

中图分类号 TN219 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0107

Ultrasonic Burst Phase Thermography and Its Applications

Chen Dapeng Zhang Cunlin Li Yanhong

(Capital Normal University, Beijing 100038, China)

Abstract Ultrasonic burst phase thermography technology used the ultrasonic as heat source to heat the material, if there are some defects (crack or delamination) in the sample, the ultrasonic energy will cause the friction or thermal elastic effect of the place where the defects is. At the meantime, an infrared camera controlled by the computer are used to detect the thermal wave sequences and collect the information. Then processing the original thermal sequence by Fourier transformation, the amplitude and phase information of the defects in the material are obtained. In this paper, two laser welded seams which are welded by different laser powers and a wheel of an electronic motor saw were detected by this method, and the amplitude and phase information was shown as images.

Key words ultrasonic; infrared; pulse phase; Fourier transform

1 引 言

超声脉冲相位热成像技术是一项新兴的, 快速可靠的无损检测技术, 该技术对于试件中隐藏裂纹的检测非常敏感, 由于超声波在材料中传播的快速性, 通常试件中的裂纹在几秒钟内就能检测出来, 与常规的检测方法, 如涡流、X 射线、渗透、磁粉等技术相比, 它既不需要液体或磁粉粒子的浸入, 也不需要射线, 检测的快速性和便利性得到很大提高。而与闪光灯脉冲^[1]的方法相比较, 它无需考虑材料表面是否平整, 受热是否均匀, 热波在由缺陷处向试件表

面传播的过程中不会受到干涉或是叠加的影响, 因此表面温度的变化更明显, 用这种方法检测材料中的缺陷(裂纹或分层)效果更好^[1]。

超声脉冲相位热成像技术源于超声锁相热成像技术, 两种方法都是利用超声波引起缺陷部位自身的振动摩擦产生热量, 来实现对缺陷部位选择性地热激励, 通过分析热图的振幅和相位信息来获得缺陷的结构信息, 但脉冲相位技术在检测时间上大大的缩短了, 因此它结合了超声脉冲法与超声锁相法的优点^[2]。

基金项目: 国家 973 计划(2006CB605305)、北京市自然科学基金(10502035)和北京市教育委员会科技发展计划面上项目(KM200710028007)资助课题。

作者简介: 陈大鹏(1983—), 男, 硕士, 主要从事红外热波无损检测方面的研究。E-mail: pp.2002@163.com

导师简介: 张存林(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹及红外热波等方面的研究。

E-mail: cunlin_zhang@mail.cnu.edu.cn

2 基本原理

当一个几百毫秒的超声脉冲被激发到试件中后,携带能量的超声波会在试件中快速的传输,对于大多数固体来说声波在试件中的传输几乎是瞬时的(例如声波在钢铁中的传播速度约是 6 km/s,对于帧频为 60 Hz 的红外热像仪,在一帧的时间内,声波可以传 100m 的距离),因此对于某些材料,超声能够在距离激发源较远的地方产生有效的热激励^[3]。

超声能量传导至缺陷部位时,其机械振动会显著的减弱,主要是由于缺陷部位(裂纹或分层)交界面的摩擦^[4],或是因为缺陷和非均匀区域与其他区域的弹性性质不同,其声衰减及其产生的热量比无缺陷或均匀区域的多,产生热弹效应和滞后效应^[5],从而导致超声能量转化为热能,缺陷处产生的热量将会以热波的形式向试件表面传导。

在向试件激发超声能量的同时,计算机控制红外热像仪开始采集数据,材料表面局部的温度变化情况被热像仪捕捉到,同时热像仪将所采集到的热图反馈给计算机,热像仪采样频率(时间间隔为 Δt)下接收的每个像素点 (i, j) 对应 N 个离散温度时域信号 $T(t)$ ^[6]。一般采用快速傅里叶变换(FFT)得到频域上的信号 F :

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T(t) \exp(-i2\pi ft/N) = \text{Re}(f) + \text{Im}(f), \quad (1)$$

式中 n 为离散值的序列号, $\text{Re}(f)$ 、 $\text{Im}(f)$ 分别为频域信号的实部和虚部。再将 $F(f)$ 按下式提取不同频率下的幅值和相位,如图 1 所示。

$$A(f) = \sqrt{\text{Im}(f)^2 + \text{Re}(f)^2}, \quad (2)$$

$$\Phi(f) = \arctan[\text{Im}(f)/\text{Re}(f)],$$

其中频率范围从 0 到 $1/(\Delta t)$, 这里实验采样频率 100 Hz, $\Delta t = 0.01$ s, 频率增量 $\Delta f = 1/(N\Delta t)$, 这

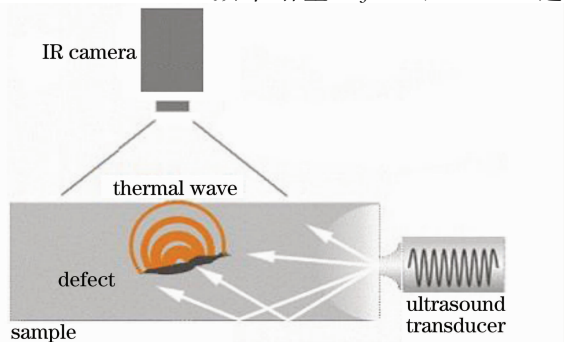


图 1 超声脉冲相位热像技术原理图

Fig. 1 Sketch of the principle of ultrasonic burst phase thermography

样,原始热图经过傅里叶变换处理后,便可以直观显示缺陷的振幅和相位信息,超声脉冲相位法原理图如图 1 所示^[7,8]。

3 实验装置

红外热超声系统的实验装置主要由超声激励系统,红外热像仪,计算机三个部分组成。图 2 是实验装置简图。

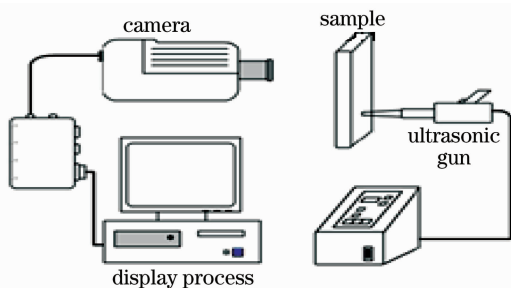


图 2 装置简图

Fig. 2 Sketch map of experimental setup

超声激励系统采用的是 BRANSON 公司制造的型号为 2000aed 的超声仪,所用的超声频率是 20 kHz。红外热像仪用的是法国 cedip 的 JADE III,图像大小为 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$,工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,采集频率与采集时间可以实时调整,在 VC++ 软件中对原始热图像做快速傅里叶变换处理,得到振幅图和相位图。

4 实验及实验结果分析

4.1 锯齿片试件

试件为某型号电锯上的锯齿盘,半径为 135 mm。由于长时间工作产生裂纹型损伤,图 3 中 1 和 2 位置有肉眼可见的微小损伤。如继续使用可能会导致崩裂,从而造成事故,因此准确的检测出有损伤的锯齿盘并提前进行更新替换,对于预防事故的发生意义重大,图 3 是试件的可见光照片。



图 3 锯齿盘照片

Fig. 3 Photo of the saw

实验用的超声频率为 20 kHz, 超声脉冲宽度为 300 ms, 超声枪作用力的大小是 200 N, 红外热像仪的采集频率是 100 Hz, 采集时间为 10 s。由于热像仪视场关系, 我们只对试件的一部分进行检测。图 4 为快速傅里叶变换处理后, 频率为 1.17 Hz 所对应的振幅图和相位图。

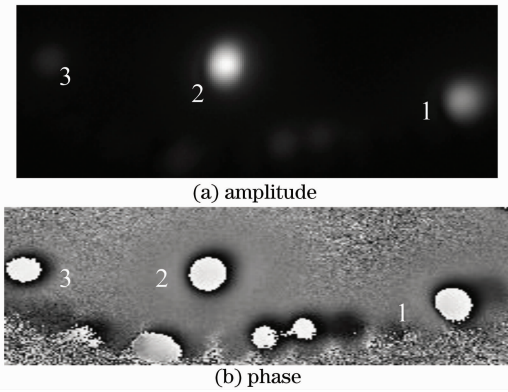


图 4 在 1.17 Hz 的振幅和相位图

Fig. 4 Images of amplitude and phase at 1.17 Hz

从实验结果可以看出, 相位图比振幅图更清晰地显示了缺陷的位置, 并发现一处肉眼不可见的缺陷, 如图中标号 3 所示, 而在振幅图中很难看到此处缺陷。

4.2 激光焊缝试件

激光焊接板试件的可见光图片如图 5 所示, 由两块 21 mm × 16 mm × 2 mm 的钢板激光焊接而成, 激光焊接的能量分别为 2.8 kW 和 2.0 kW, 焊接速度 4 m/min, 焊缝宽度约为 0.8 mm, 焊缝长约 100 mm。

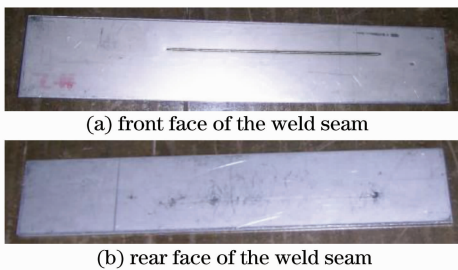


图 5 激光焊缝照片

Fig. 5 Photo of the welded seam

实验所用超声频率 20 kHz, 超声脉冲宽度 300 ms, 作用力 250 N。热像仪帧频为 100 Hz, 采集时间 10 s。图 6 是超声激励 0.8 s 后所得到的原始热图以及 0.59 Hz 的相位图。

从原始热图中可以看到激光焊接能量为 2.8 kW 的焊缝的中间部位有一条暗线, 周围显亮 (相位图周围显暗)。说明中间部位结合比较紧密,

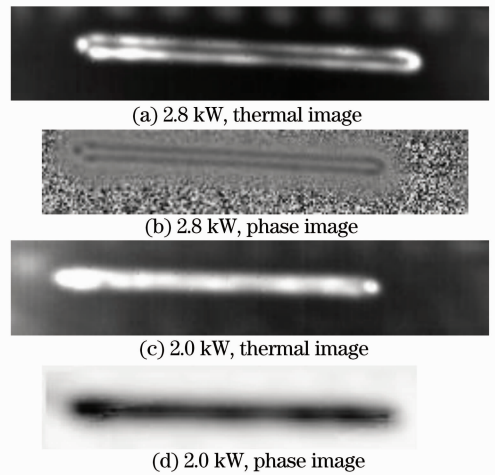


图 6 原始热图及在 0.59 Hz 的相位图

Fig. 6 Original thermal image and phase image at 0.59 Hz

声阻抗小, 没有振动摩擦, 焊接质量较好。而暗线的周围是焊缝与非焊接区域的过度区域, 两块钢板相互接触但没有完全焊接在一起, 超声能量会引起该处的振动摩擦, 转化为热量, 并且以热波的形式向材料表面传导, 引起材料表面的热不均匀, 因此, 此处热信号相位信息也会不同与其他区域^[9]。

而焊接能量为 2.0 kW 的焊缝的原始热图中间部位看不到暗线, 相位图也没有看到明显的变化。说明该处结合不紧密, 激光能量并没有将钢板完全焊透, 焊接质量不理想。因此 2 mm 厚的钢板焊接, 在 4 m/min 的焊接速度下用 2.8 kW 的激光能量焊接质量优于用 2.0 kW 的激光能量焊接^[10]。

5 结 论

本文从原理和实验方面阐述了超声脉冲相位热成像技术, 它可以实现对缺陷处选择性的热激励, 信噪比高, 试件表面温场的变化被热像仪捕捉到, 并将采集信号传给计算机做傅里叶变换处理得到振幅图和相位图, 相位图更清晰地显示了亚表面缺陷的结构信息。这种方法既能快速检测成像, 又能够提供缺陷的相位信息, 同时相位图不受初始加热不均影响, 图像信噪比较高, 结合了脉冲和锁相的优点。文中尝试用这种方法对两类试件做检测, 初步实验结果说明, 超声脉冲相位技术具有其独特的优势, 可以成功检测微小裂纹缺陷以及对不同焊接功率激光焊缝质量给出评价。

参 考 文 献

1 Li Yanhong, Zhang Cunlin, Jin Wanping *et al.*. IR thermal wave

- nondestructive inspection of carbon fiber composite material[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(4): 262~264
- 李艳红,张存林,金万平等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(4): 262~264
- 2 A. Dillenz. Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie, Materialprüfung, München, Carl Hanser Verlag, MP Materialprüfung, Jahrgang 43 1~2, pp. 30~34, 2001
- 3 Steven M. Shepard, Tasdiq Ahmed, James R. Lhota. Experimental considerations in vibrothermography [C]. *SPIE Thermosense*, 2004, **4**: 12~16
- 4 X. Han, W. Li, Z. Zeng *et al.*. Acoustic chaos and sonic infrared imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17): 3188~3190
- 5 Hong Yi. The ultrasonic infrared thermography and its application in NDE [J]. *J. Nanjing University (Natural Science)*, 2003, **39**(4): 105~110
- 洪毅. 超声红外热像技术及其在无损检测中的应用[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(4): 105~110
- 6 Li Yanhong, Zhao Yuejin, Feng Lichun *et al.*. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 55~58
- 李艳红,赵跃进,冯立春等. 基于脉冲相位的红外热波无损检测方法测量缺陷深度[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 55~58
- 7 Guo Xingwang, Liu Yingtao, Guo Guangping *et al.*. Pulsed phase thermography and its application in the NDT of composite materials [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **31**(10): 1049~1053
- 8 Zhang Xiaochuan, Jin Wanping, Li Yanhong *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
- 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
- 9 Chen Dapeng, Zhang Cunlin, Li Xiaoli *et al.*. Ultrasonic infrared thermal wave technology and its applications in nondestructive evaluation [C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, China, 2008
- 10 Chen Dapeng, Zhang Cunlin, Li Yanhong. The ultrasonic infrared thermography testing of the quality of laser weld seams [J]. *Nondestructive Testing*, 2008, **30**(10): 747~749
- 陈大鹏,张存林,李艳红. 超声红外热像技术检测激光焊缝质量[J]. *无损检测*, 2008, **30**(10): 747~749