

文章编号 1004-924X(2010)03-0653-09

超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷

刘 慧,刘俊岩,王 扬

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了提高超声锁相热像技术(ULT)的检测效率并获得最佳检测结果,对超声波调制、热图序列处理和检测参数选择进行了研究。阐述了超声锁相热像技术的检测原理并进行了理论分析,建立了ULT的检测系统。采用方波调制的超声波激励试件,用红外热像仪记录试件表面热图,并用瞬态处理方法对热图进行锁相处理得到相位图和幅值图实现对缺陷的检测。用该方法检测了钢板表面及近表面的微裂纹(微米级)和铝合金板内不同深度缺陷等接触界面类型缺陷。结果表明,检测A3钢板材料表面(近表面)裂纹时,调制频率可选择0.5 Hz,接触压力约0.25 kN,激励头与微裂纹的距离对检测结果几乎无影响,激励位置可根据试件结构而确定;由于降低调制频率可提高缺陷的检测深度,检测铝合金材料时,调制频率 ≤ 0.3 Hz能够探测到4 mm深度的缺陷;另外,该方法能够准确检测蜂窝夹层结构的脱粘缺陷。研究表明,研制的检测系统数秒内即可完成对接触界面类型缺陷的准确检测。

关键词:超声红外热像技术;超声锁相热像;缺陷检测;接触界面类型缺陷

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

Detection of contacting interface-type defects using ultrasound lock-in thermography

LIU Hui, LIU Jun-yan, WANG Yang

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the inspection efficiency of Ultrasound Lock-in Thermography (ULT) and to obtain optimal results, the ultrasound modulation, thermal sequence image processing and the optimal parameter selection were investigated. The principle of ULT was analyzed theoretically, then an inspection system was developed, and several experiments were carried out on the steel plane with surface (subsurface) microcracks and Al alloy with defects at different depths. In inspection, the modulated ultrasonic square signals were used to excite the samples and an infrared camera to collect the transient sequences, then the lock-in processing was taken to obtain phase images and amplitude images. Experimental results indicate that, for given A3 steel samples, the modulation frequency of 0.5 Hz and the pressure between sample and ultrasonic transducer about 0.25 kN is a good choice. Furthermore, the distance between the injection position and the crack has a few effects on the inspection and appropriate injection position should be depended on the specific structure of samples. As deeper defect can be detected with decreasing modulation frequency, the defect at 4 mm depth on the Al alloy

收稿日期:2009-06-08;修订日期:2009-07-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60770802F-01);黑龙江省科技攻关基金资助项目(No. GB06A512)

sample is detected at modulation frequency of 0.3. Moreover, the method can also be used for detecting the skin unbond on a honeycomb sandwich structure. Using the inspection system, reliable detection of contacting interface-type defects can be done for a few seconds.

Key words: ultrasonic infrared imaging; ultrasound lock-in thermography; defect detection; contacting interface-type defect

1 引言

上世纪 80 年代出现的超声红外热像技术是一种以超声波为激励源的主动式红外热像技术,该技术可有效地检测接触界面类型缺陷^[1],如金属疲劳裂纹、复合材料分层、脱粘缺陷和脆性材料裂纹及冲击损伤等。超声波在致密固体中传播速度快、衰减小,可瞬间从表面传播到内部深处,但当固体中存在裂纹、应力集中等使声阻抗明显变化的缺陷区域时,超声波能量将在此缺陷区域大量衰减而产生热量^[2-4]。用热像仪采集被激固体表面的温度信号,经后续处理可实现对缺陷的检测,故超声红外热像技术以超声波为激励源相当于在缺陷处进行选择性地加热,有效地抑制了背景噪声、提高了探测灵敏性;克服了以往主动式红外热像技术热流加热和光加热中加热不均匀的问题,且提高了缺陷检测深度,同时还能用于检测垂直裂纹和冲击损伤。因此,超声红外热像技术在航空航天、能源、汽车制造等行业具有广阔的应用前景。

超声锁相热像(ULT)^[5]是一种采用锁相技术处理热图序列的超声红外热像技术。与以往超声红外热像技术不同,该技术需首先对作激励源的超声波进行调制,使其幅值呈周期性变化,其次,要对采集所得的热图序列运用锁相技术进行处理。它具有功率低、信噪比高等优点^[6-8];但由于表面温度要达到准稳态,使得检测周期一般较长。德国斯图加特大学 IKP-ZFP 的 D. Busse 教授在 90 年代提出该检测方法,多年来,不仅对其适用性做了大量的试验研究,还对该技术中超声波的调制方式进行了相应研究,但是至今尚未见到对给定材料上的缺陷进行检测的系统研究报告。

本文在 ULT 技术中采用方波调制超声波幅值,用已调制的超声波激励试件的同时记录试件

表面热图,在瞬态对热图序列进行锁相处理得到试件表面热波的相位图和幅值图,以实现缺陷的检测。通过用该方法检测钢板表面(近表面)微裂纹和铝合金材料内不同深度的缺陷等接触界面类型缺陷的试验和系统研究,提出了合理的检测参数。

2 超声锁相热像检测原理

超声波在固体中传播,当遇到裂纹、应力集中及声阻明显变化区域时,由于裂纹接触面间的摩擦、塑性变形或声阻抗骤增而导致超声波能量衰减释放热量^[9]。图 1 给出了 ULT 技术检测原理。

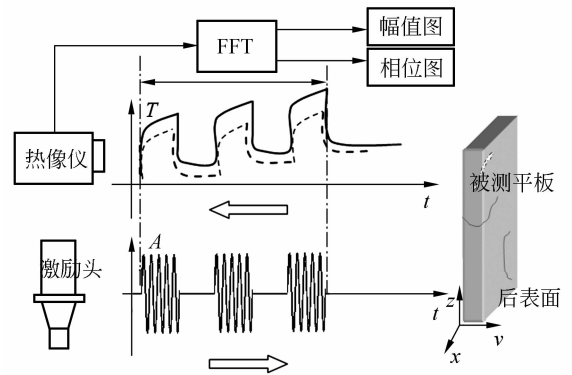


图 1 ULT 的检测原理图

Fig. 1 Principle of ULT

经方波调制幅值的超声波在构件中传播时,在缺陷处产生的热流也呈周期性变化,热流通过热传导使表面温度也呈周期性变化。用热像仪采集表面温度^[10]并对所得热图序列进行锁相处理得到幅值图和相位图,利用幅值图和相位图中的幅值差和相位差来确定缺陷。如果在表面温度达到准稳态时处理热图,检测时间比较长,故本文在激励构件的同时采集热图,对瞬态热图序列进行锁相频率(调制频率)的傅里叶变换得到幅值与相位图,这既利用了 ULT 的特点,又提高了检测效率。

2.1 超声激励生热模型

以图1中被测平板为例,采用有限元方法对平板进行离散,接近裂纹处将网格细分,对平板激励过程中裂纹接触面间的作用进行分析,则构件有限元系统含接触力的运动方程应满足

$$M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + C \frac{\partial \delta}{\partial t} + K \delta = F + P, \quad (1)$$

其中, M, C 和 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, δ 为节点的位移矢量, P 为裂纹处接触力矢量, F 为注入的超声波引起的外载荷矢量。

从平板边缘平行注入超声波:

$$\begin{cases} \delta_u = A(1 + \cos(2\pi ft)) & (2k)/(2f_m) \leq t \leq (2k+1)/(2f_m) \\ \delta_u = 0 & (2k+1)/(2f_m) \leq t \leq (k+1)/f_m \quad k=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (2)$$

其中, A 为超声波振幅, f 为超声波的频率, f_m 为调制频率。

在超声波激励过程中,裂纹处生热主要是由于裂纹交界面在超声波作用下的接触摩擦作用,故忽略塑性变形影响,热流满足:

$$q(t) = \sum_{i=1}^n [\mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-c|v_i(t)|}] P_i(t) v_i(t), \quad (3)$$

其中, $q(t)$ 为裂纹处热流, n 为裂纹表面的单元数, μ_s, μ_d 分别为裂纹处静摩擦系数和动摩擦系数, c 为静摩擦转化为动摩擦的速度系数, $v_i(t)$ 为裂纹处第 i 个单元节点速度; $P_i(t)$ 为第 i 个单元节点接触力。

2.2 热传导模型

由以上分析可知,超声波在裂纹处进行了加热,产生热流 $q(t)$ 由式(3)计算。平板热传导方程为:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

其中, T 为温度, α, β, γ 分别为 x, y, z 方向的热扩散系数。

边界条件为:

(1)前后表面:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_{\Gamma_f} = hA(T_\infty - T), \quad (5)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_{\Gamma_r} = hA(T_\infty - T), \quad (6)$$

其中, Γ_f 和 Γ_r 分别为平板前后表面, T_∞ 表示环境温度。

(2)裂纹接触面处:

$$q(t) = \alpha \frac{\partial T}{\partial x} + \beta \frac{\partial T}{\partial y} + \gamma \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_r, \quad (7)$$

其中, Γ 表示裂纹接触面积。

(3)初始条件:

$$T = T_\infty \quad t = 0. \quad (8)$$

采用以上模型求解可知平板温度呈周期性变化,随热扩散过程的进行,无裂纹处温度变化相对于裂纹处存在时间滞后。

2.3 锁相原理

为了提取表面温度信号中的谐波分量,在1个完整周期内选取4个等时间间隔的信号 S_1, S_2, S_3, S_4 , 相隔 $\tau_0/4, \tau_0$ 为调制信号周期,如图2所示。

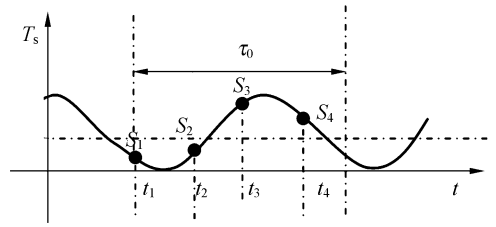


图2 整周期的信号采集

Fig. 2 Signal acquisition during thermal wave cycle

表面温度的谐波分量 T_s 的相位和幅值由式(9), (10)计算。

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{S_1(x, y) - S_3(x, y)}{S_2(x, y) - S_4(x, y)}\right), \quad (9)$$

$$A(x, y) = \sqrt{[S_1(x, y) - S_3(x, y)]^2 + [S_2(x, y) - S_4(x, y)]^2}, \quad (10)$$

其中, $S_n(x, y)$ 表示 t_n 时刻热图上像素点 (x, y) 的温度信号, $\varphi(x, y), A(x, y)$ 分别表示像素点 (x, y) 的相位和幅值。

采用傅里叶变换方法也可以计算表面温度信号谐波分量的相位和幅值。

在相位图中,用裂纹处相位与无裂纹处的相位差来确定裂纹,相位差为:

$$\Delta\varphi = \varphi_d - \varphi_n. \quad (11)$$

其中, φ_d 表示裂纹处相位, φ_n 表示无裂纹处相位。

3 ULT 检测系统的建立

为了实现超声锁相热像检测技术,建立了超声锁相热像无损检测系统,如图 3 所示。检测系统包括调制超声波激励系统和红外锁相热像系统。

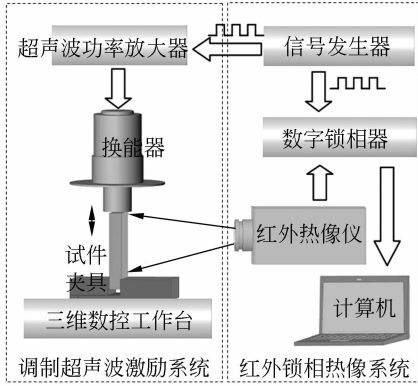


图 3 ULT 检测系统示意图

Fig. 3 Sketch of inspection system for ULT

在 ULT 技术中, 超声波的幅值应按调制规律周期性变化, 故激励系统发出超声波的幅值是可调制的, 调制信号由信号发生器产生并控制超声波功率放大器驱动换能器, 使激励超声波的振幅按调制规律变化。激励装置安装于三维数控工作台上, 由气动系统来保证激励头与试件紧密连接。信号发生器可产生一定频率的方波信号, 同时具有同步输出功能, 为数字锁相器提供参考信号。

在激励过程中红外热像仪实时采集表面温度信号, 并输入数字锁相器与参考信号进行锁相运算, 得到幅值图和相位图。

4 试验与结果分析

4.1 检测装置与试件

图 4 所示为检测试验装置图。

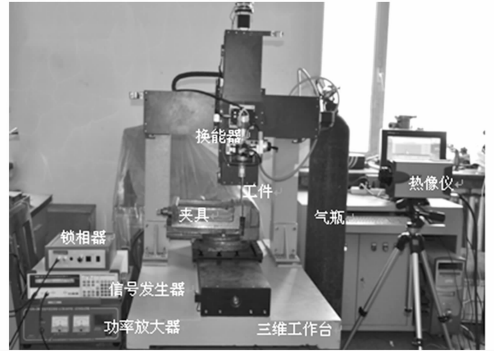
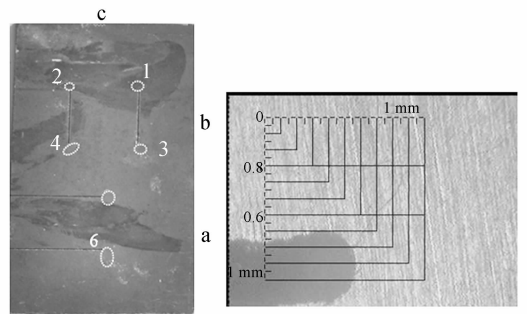


图 4 试验系统图

Fig. 4 Experimental equipment of ULT

激励装置包括 Protek 9301 函数发生器、谐振频率 20 kHz, 最大输出功率 1.5 kW 的超声波功率放大器、压电陶瓷换能器及最小位移量 $1 \mu\text{m}$ 的三维工作台。红外热像系统采用法国 CEDIP 公司的红外锁相检测系统。红外热像仪为焦平面 JADE MWIR 550, (NETD: 20 mK)、波段 $3.1 \sim 5.6 \mu\text{m}$ 、像素 320×240 。

试件如图 5 所示。钢板上切 4 条宽约 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ 缝并在尖点处预制出微裂纹, 白色虚线标出区域为尖点裂纹, 裂纹均分布在表面或近表面; 图 5(a)、(b)、(c) 给出了激励位置。表 1 为该材料的物理性能参数。



(a) 试件

(b) 1 区域放大图

(a) Sample

(b) Enlarged view at scope No. 1

图 5 试样图片

Fig. 5 Photographs of the sample

表 1 试件材料的物理参数

Tab. 1 Thermal properties of inspected material

| 材料 (GB) | 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 比热容 $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 热导率 $\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 热扩散系数 $\alpha / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|------------|--|--|--|---|
| Q235 | 7 854 | 434 | 60.5 | 17.7 |

4.2 试验过程

室温约 20 °C,采用 ULT 方法对试件上的缺陷进行检测。根据试件大小,调整热像仪与试件距离,热像仪垂直于试件表面。将 20 kHz 调制超声波从平板边缘平行注入试件,振幅 2~3 μm,热像仪以采集频率 $f_s=50$ Hz 激励 2 个周期。采用锁相处理得到相位图和幅值图。试验参数见表 2。

表 2 试验参数表

Tab.2 Experimentd parameters

| 加载位置 | 调制频率 f_m /Hz | 接触压力 p_s /kN |
|---------|----------------|----------------------|
| a, b, c | 0.1~1.0/0.1 | 0.25 |
| b | 0.5 | 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 |

4.3 钢板表面裂纹检测的试验结果与分析

4.3.1 调制频率的影响

图 6 给出了 a 位置激励,接触压力 $p_s=0.25$ kN,不同调制频率下的幅值图。从图中可看出,调制频率较低时,不同裂纹处、激励位置和夹持部位产生的热量均增加,热波之间产生较强的相互干扰。调制频率 $f_m=0.8$ Hz,热波间干扰较小, $f_m=0.2$ Hz,热波间干扰较大。降低调制频率可以增加裂纹处温升,但热波间干扰加强。

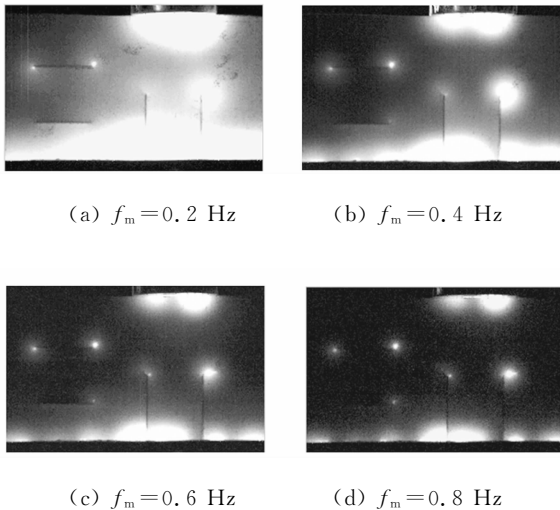


图 6 不同调制频率下的幅值图

Fig.6 Amplitude images at various modulation frequencies

利用式(11)可得到有裂纹与无裂纹处的相位差。图 7 给出了 a 激励位置,接触压力 $p_s=0.25$ kN 时相位差与频率之间关系曲线。

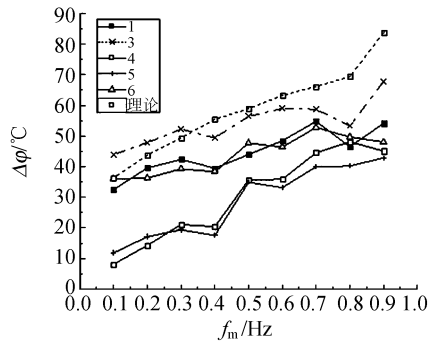


图 7 相位差随调制频率的变化曲线

Fig.7 Plots of phase difference versus modulation frequency

从图中可知,相位差随着调制频率的增加呈上升趋势,与理论计算结果相一致。在给定调制频率下,由于热波间的相互干扰而导致相位差的差异。

调制频率增加,相位差增大,且热波间干扰减小,但图像背景噪声增加。为了分析不同调制频率下噪声对相位图影响,本文用裂纹处图像信噪比(相位差与无裂纹处的相位值的均方差比值)表征噪声对相位图影响。图 8 给出了裂纹处图像信噪比与调制频率之间的关系曲线。

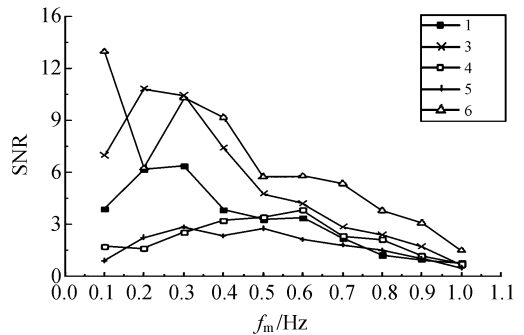


图 8 信噪比与调制频率的关系曲线

Fig.8 Plots of SNR versus modulation frequency

从图中可知,相位差相对较小的 4,5 裂纹的图像信噪比也较低,当调制频率 $f_m>0.6$ Hz 和 $f_m>0.5$ Hz 时,4,5 裂纹的图像信噪比随频率增大而呈下降趋势;1,3,6 裂纹处的图像信噪比相对较高,当调制频率 $f_m>0.3$ Hz 时,图像信噪比随频率增大而呈下降趋势。

由此可得,调制频率增加,相位差增大,热波间干扰减小;但调制频率增大到一定值,图像信噪比减小。为了满足相位图上 4,5 裂纹的相位差和

图像信噪比均较高,由实验结果可得最佳调制频率 $f_m=0.5\text{ Hz}$ 。图 9 给出调制频率 $f_m=0.5\text{ Hz}$ 时的相位图。

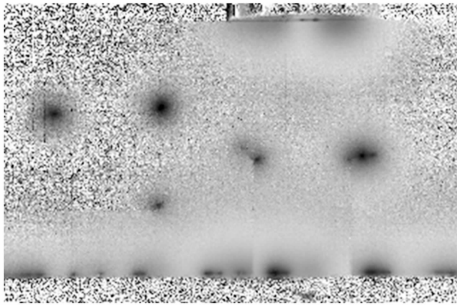
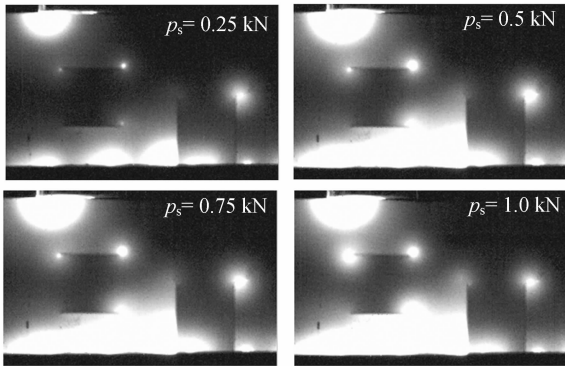


图 9 调制频率 0.5 Hz 时相位图

Fig. 9 Phase image at modulation frequency of 0.5 Hz

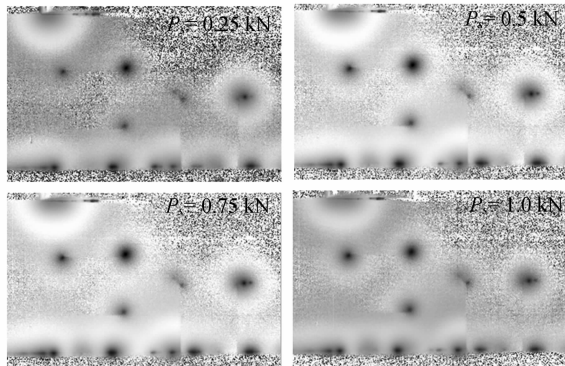
4.3.2 激励头与试件间接触压力的影响

图 10 给出了调制频率 $f_m=0.5\text{ Hz}$, b 位置激励,不同接触压力下的幅值图与相位图。



(a) 幅值图

(a) Amplitude images



(b) 相位图

(b) Phase images

图 10 不同接触压力的幅值图与相位图

Fig. 10 Phase images and amplitude images under various contact pressure forces

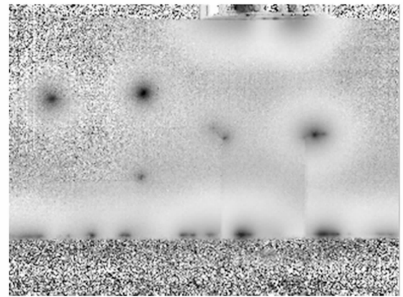
由图 10(a)可知,接触压力增大,夹持位置和激励位置的生热均增多,对裂纹处热波的干扰加剧。在相同接触压力条件下,3,6 处裂纹因距激励位置和夹持位置较远,受热波干扰较小。由图 10(b)可知,接触压力增大对相位图检测结果影响较小,特别是裂纹 6 处,由于受热波干扰小,接触压力对其几乎无影响。

由式(9)可知,相位值不受产生热量的影响。接触压力不同,裂纹处的生热量不同,幅值不同,但相位值不变。故接触压力不应选择过大,以减少夹持部位和激励位置过多生热,但应保证激励头与试样之间在激励过程中紧密接触,由试验结果确定接触压力 $p_s=0.25\text{ kN}$ 。

4.3.3 激励位置的影响

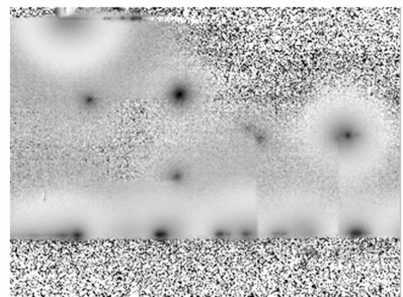
图 11 给出了接触压力 $p_s=0.25\text{ kN}$,调制频率 $f_m=0.5\text{ Hz}$ 时,不同激励位置的相位图。

由图可知,在图 11(a)和(b)处激励试件时,两处的裂纹未检测出来,而在图 11(c)处激励时,裂纹全都清晰地检测出来,且裂纹距激励位置的距离对检测结果影响不大。超声波在试件内传播,超声波未达到的位置是检测的盲点,试验中 c 处激励时,超声波可以达到试件所有微裂纹处且产生热源,有效地防止了裂纹漏检,因此 c 处是有效的激励位置。



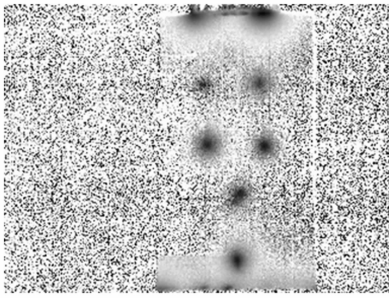
(a) a 处激励

(a) Position a



(b) b 处激励

(b) Position b



(c) c 处激励
(c) Position c

图 11 不同加载位置的相位图

Fig. 11 Phase images on various injection positions

4.4 铝合金板不同深度缺陷的检测

4.4.1 试验试件与参数

在 150 mm×60 mm×12 mm 的铝合金内距前表面不同深度处预制 3 个直径相同(Φ8 mm)的接触界面类型缺陷,1,2,3 处缺陷深度分别 2,3,4 mm,如图 12 所示。试验过程如 4.2 所述,表 3 给出了试验参数。

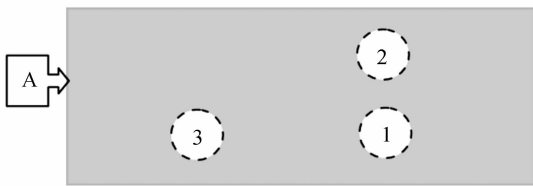


图 12 铝合金试件结构图

Fig. 12 Sample of Al alloy

表 3 试验参数表

Tab. 3 Experimental parameters

| 加载位置 | 调制频率 f_m /Hz | 接触压力 p_s /kN |
|------|----------------|----------------|
| A | 0.1~0.5/0.1 | 0.25 |

4.4.2 检测结果与分析

图 13 给出了 A 位置激励,初始接触压力 $p_s=0.25$ kN 的检测结果。

从图可看出,调制频率 f_m 在 0.1~0.3 Hz 时,3 个不同深度的缺陷都可以检测出来;调制频率 $f_m=0.4$ Hz,距表面深度 4 mm 的缺陷未被检测出;调制频率 $f_m=0.5$ Hz,仅深度 2 mm 的缺陷被检测出。由热扩散长度模型可知,降低调制

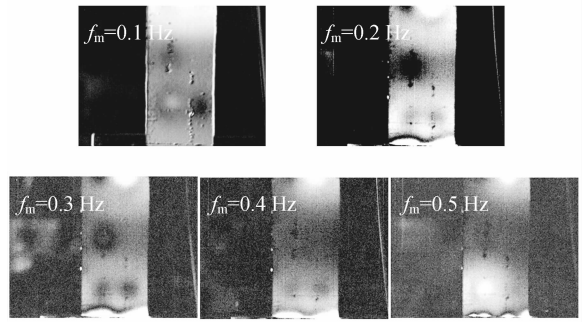


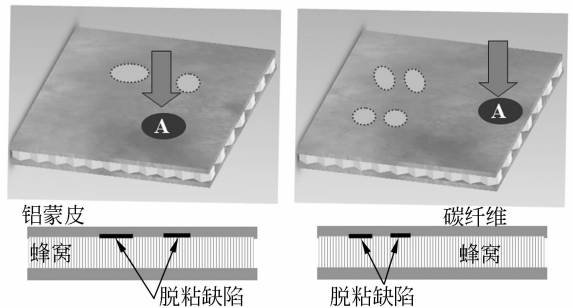
图 13 不同调制频率检测结果

Fig. 13 Images at various modulation frequency

频率可以提高检测深度。对于铝合金板,检测缺陷深度达到 4 mm 的缺陷,调制频率应取 $f_m \leq 0.3$ Hz。

4.5 ULT 对其他材料接触界面类型缺陷的检测能力

取铝蒙皮和碳纤维蒙皮的蜂窝夹层结构,在蒙皮下预制出脱粘缺陷,见图 14 所示。在 A 位置,激励头垂直于结构表面注入超声波,初始接触压力均为 $p_s=0.25$ kN。铝蒙皮蜂窝夹层结构,调制频率选取 $f_m=0.075$ Hz。碳纤维蒙皮蜂窝夹层结构,调制频率选取 $f_m=0.1$ Hz。



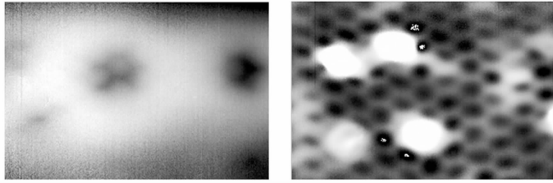
(a) 铝蒙皮蜂窝夹层结构 (b) 碳纤维蒙皮蜂窝夹层结构

(a) Al honeycomb (b) CFRP honeycomb

图 14 蜂窝夹层结构

Fig. 14 Honeycomb sandwich structures

在给定的检测参数下,对不同蒙皮材料的蜂窝结构进行检测的结果如图 15 所示。由图可知,两个不同蒙皮材料的蜂窝夹层结构的脱粘缺陷均被检测出。由此可知,采用 ULT 方法能够对蜂窝夹层结构的脱粘缺陷进行准确检测。



(a) 铝蒙皮

(b) 碳纤维蒙皮

(a) Al honeycomb

(b) CFRP honeycomb

图 15 脱粘缺陷的检测结果

Fig. 15 Phase images for skin unbond detection

5 结 论

本文介绍了超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷的原理,并进行了理论分析,研制了调制超声波激励系统,热图序列处理中采用瞬态处理方法。通过对 A3 钢板表面(近表面)微裂纹检测试验,研究了调制频率、激励位置、激励头与试

件间接触压力对检测结果的影响;在调制频率 $f_m = 0.5$ Hz,接触压力 $p_s = 0.25$ kN, c 处激励可检测到试件的微裂纹并得到满意结果。通过对带有不同深度的接触界面类缺陷的铝合金试件的检测试验得出,降低调制频率可提高检测深度,对于铝合金材料,调制频率 $f_m \leq 0.3$ Hz 可检测到 4 mm 深的缺陷。另外,ULT 方法能够检测蜂窝夹层结构的脱粘缺陷。

在实际检测中,超声波激励头与试件间需紧密接触,从而保证激励过程中超声波有效地耦合入试件。调制频率范围的选择与试件材料的热物理特性有关,对于给定试件材料,存在一个最佳调制频率范围。激励位置应根据试件结构选择,保证注入的超声波尽可能地传播到整个试件,同时尽量减少激励位置热源对检测效果的影响。试验结果表明,ULT 是一种准确、高效检测接触界面类缺陷的方法。

参考文献:

- [1] MORBIDINI M, CAWLEY P, BARDEN T, *et al.*. Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007,49(5):254-263.
- [2] CHOI M Y, PARK J H. Detection of delamination defect inside timber by sonic IR[J]. *SPIE*, 2008, 6939:1-4.
- [3] MIGNOGNA R B, GREEN R E, DUKE J C, *et al.*. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials [J]. *Ultrasonics*, 1981,19(4):159-163.
- [4] ZWESCHPER T H, DILLENZ A, RIEGERT G, *et al.*. Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2003,45(3):178-182.
- [5] DILLENZ A, ZWESCHPER TH, BUSSE G. Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2000, 12(42): 815-817.
- [6] ZWESCHPER T H, DILLENZ A, BUSSE G. Ultrasound lock-in thermography-A defect-selective NDT method for the inspection of aerospace components [J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2001,43(3):173-179.
- [7] GLEITER A, RIEGERT G, ZWESCHPER TH, *et al.*. Ultrasound-Lockin-Thermography for Advanced depth resolved defect selective imaging[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007,5(49):272-274.
- [8] 李艳红,赵跃进,冯立春,等. 基于脉冲位相的红外热波无损检测法测量缺陷深度[J]. *光学精密工程*, 2008,16(1):55-58.
- LI Y H, ZHAO Y J, FENG L C, *et al.*. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):55-58. (in Chinese)
- [9] BERGLIND H, DILLENZ A. Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison[J]. *NDT&E International*, 2003, 36(6):395-399.
- [10] 李云红,孙晓刚,原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. *光学精密工程*, 2007,15(9):1336-1340.
- LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1336-1340.

作者简介:



刘 慧(1982—),女,山东定陶人,博士研究生,2004年于大连交通大学获学士学位,2006年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事超声红外无损检测技术的研究。E-mail: irtliuhui@gmail.com



刘俊岩(1978—),男,黑龙江海伦人,博士、副教授,2000年、2002年于佳木斯大学分别获学士、硕士学位,2005年于哈尔滨工业大学获博士学位,现为哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院博士后,主要研究方向为红外无损检测与评价技术,绿色切削技术等。E-mail: ljywlj@hit.edu.cn

导师简介:



王 扬(1960—),男,四川成都人,博士,教授、博士生导师,1982年、1988年、1999年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为激光技术应用、红外热像技术及应用等。Email: wyyh@hit.edu.cn

●下期预告

土壤中石油矿物油的荧光特性实验

王忠东,马庆万

(大庆石油学院,黑龙江 大庆 163318)

为了实现对土壤中石油污染物含量的监测,保护土壤环境,采用荧光光谱测量分析方法,对原油、柴油、机油3种矿物油进行了荧光光谱特性实验研究。首先,理论分析了石油有机物受激发射荧光的机理特性;然后,利用荧光光谱仪对水中和土壤中原油、柴油、机油分别进行了荧光测量实验,考察了它们在不同浓度条件下的荧光光谱特性。结果表明,原油、柴油、机油在水中和土壤中受紫外光激发时都能够发出很强的荧光,荧光光谱范围位于可见光区350 nm~700 nm;当它们在水和土壤介质中的浓度为0.0 mg/kg~1.0 mg/kg时,其荧光强度与浓度均成线性关系,在水中最低检测浓度为0.005 mg/kg,在土壤中的最低检测浓度为0.010 mg/kg。实验证明了利用荧光光谱法对土壤中的石油污染物进行检测分析是可行的。