

超声红外锁相热像技术检测金属板材表面裂纹

秦 雷, 刘俊岩, 龚金龙, 姜 斌, 王 扬

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 超声红外锁相热像检测法是超声波激励与红外锁相热像检测技术相结合的一种红外无损检测方法。采用超声红外锁相热像检测法实现对金属板材构件接触界面类缺陷的检测, 分析超声波激励构件缺陷的选择性加热过程。通过有限元仿真模型对热流在金属板材内部的热传导过程进行研究并分析超声激励参数对检测结果的影响; 利用所建立的超声红外锁相检测系统对预制金属板材构件接触界面类缺陷中的裂纹缺陷进行检测实验, 验证有限元模型的有效性。研究表明, 加载中心位置远离缺陷时, 裂纹缺陷幅值降低, 相位不变; 超声激励振幅(即初始静压)增加, 缺陷处的幅值升高, 相位基本保持不变; 超声调制频率增加, 缺陷处幅值降低, 相位升高。通过对比仿真结果与实验结果发现, 所建立的仿真模型能够较好地预测检测过程中的热流传递, 并且能够用于超声红外锁相热像技术检测金属板材接触界面类缺陷检测结果的预测, 为超声红外锁相热像技术激励参数的选择提供了指导。

关键词: 红外缺陷检测; 超声锁相法; 有限元分析; 无损检测技术

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1123-08

Testing surface crack defects of sheet metal with ultrasonic lock-in thermography

Qin Lei, Liu Junyan, Gong Jinlong, Jiang Bin, Wang Yang

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

Abstract: Ultrasonic lock-in thermography is a nondestructive testing method, which combines ultrasonic excitation and infrared lock-in thermography. The detection of contact interface defects of sheet metal was studied in this paper using ultrasonic lock-in thermography, and the selective heating advantage of the ultrasonic excitation was analyzed. The finite element simulation model of heat transfer in sheet metal was discussed, and the effect of ultrasonic excitation parameters on the detecting results was illustrated. Experiments were performed on prefabricated defects of sheet metal to validate the built simulation model. The result shows that amplitude decreases and phase is invariant when location of loading departs from crack, amplitude increases and phase is invariant when ultrasonic excitation amplitude increases, amplitude decreases and phase increases when modulated frequency increases. The built finite model

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(51173034、51074208)

作者简介: 秦雷(1984-), 男, 博士生, 主要从事红外热波无损检测与评价技术方面的研究。Email: qinleihit@163.com

导师简介: 王扬(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光加工、红外检测、切削技术和纳米技术等方面的研究。

Email: wyyh@hit.edu.cn

accords with the experimental results. Ultrasonic lock-in thermography is fit for test surface defects of sheet metal, and provides guidance for ultrasonic lock-in thermography testing.

Key words: infrared crack detection; ultrasonic lock-in thermography; finite element analysis; nondestructive test

0 引言

红外无损检测技术是一门跨学科的新兴检测技术,该技术的研究和应用对提高多种军、民用设备的安全可靠性具有重要意义。美国多家大公司(如 GE、GM、波音、福特、洛克西德和西屋等)及政府机构(如 NASA、FAA、空军、海军)等已经在广泛应用和推广该技术^[1-2]。超声红外锁相热像检测技术结合了超声振动选择加热特性和红外锁相热像检测技术的优点^[3]:超声波作为激励源,可直接在试件缺陷处生热,使缺陷或非均匀结构迅速通过试件表面温度异常表现出来,锁相热像技术可以有效地排除杂波信号干扰。金属板材是由板坯轧制而成,板坯则可用浇铸法制成或由坯料轧制及锻造制成。轧制过程中由于连铸钢坯、轧制设备和轧制工艺等原因,轧制后板材表面或内部会形成缺陷,而接触界面类缺陷(如裂纹、分层、夹杂等)是其最常见的缺陷类型之一,超声的选择加热特性使得超声红外锁相热像检测法适合检测金属材质的接触界面类缺陷。该技术可显著提高金属板材接触界面类缺陷检测的信噪比和灵敏度,既可作为传统无损检测技术补充,也可发挥其优势,解决金属板材接触界面类缺陷的检测问题,为产品质量安全提供技术保障,具有重要理论研究意义和实际应用价值。

文中通过理论与试验对超声红外锁相热像法检测金属板材接触界面类缺陷中的表面裂纹缺陷进行研究,运用有限元法对热流在金属板材内部的热传导过程进行分析,并计算试件表面温度的幅值图和相位图信息,研究超声激励参数对检测的影响;利用所建立的超声红外锁相检测系统对预制金属板材构件表面裂纹缺陷进行检测实验,验证模型的正确性。

1 理论模型的建立

1.1 原理模型分析

超声红外锁相热像法检测金属板材缺陷的过程

包括超声源激励生热、热流传导和热图采集与处理三个主要部分。

超声波通过耦合剂输入被检测构件(金属板材),使波动在构件内传播。超声波与缺陷相互作用,在局部缺陷处发生激励生热,其主要原因有^[4-6]:缺陷在波动过程中产生接触、粘合、滑移及脱离等相互作用,使缺陷表面在相对滑动时,由于摩擦作用,缺陷区局部产生温升;弹性固体的热弹性效应,当物体受张力时,大谐振子的能量会降低,释放能量,使固体温度降低,受较小的压力时,其能量会增大,吸收能量,固体的温度升高;由于缺陷处的迟滞效应,使机械能显著衰减转化为热量。超声波激励构件中的接触界面类缺陷时,磨擦作用是缺陷区域局部产生热量的主要原因,故通常可忽略热弹性效应和迟滞效应,超声波在金属板材内部作用过程一般有如下三个方程描述^[7]:

(1) 超声波在金属板材内的传播

位移偏微分控制方程(Navier 控制方程)

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad \left(\theta = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

式中: u_i , f_i 分别为位置张量和体积力张量; μ , λ , ρ 分别为切边模量、Lame 常数和构件密度。

(2) 超声波在接触界面缺陷处衰减生热

热流 $Q(t)$ 满足

$$Q(t) = [\mu_s + (\mu_s - \mu_d) e^{-c|v(t)|}] F_N(t) v_r(t) \quad (2)$$

式中: $v(t)$, $v_r(t)$ 分别为接触点的相对速度和切向相对速度; μ_s , μ_d 分别为裂纹处静摩擦系数和动摩擦系数; $F_N(t)$ 为接触力; c 为静摩擦转化为动摩擦的速度系数。

(3) 缺陷处热流的传导

超声波激励金属板材缺陷产生热流率 q 的传播满足导热微分方程

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中: k , ρ , c 分别为构件导热系数、密度和比热容。

公式(1)~(3)建立了超声波激励金属板材接触界

面类型缺陷的声-机-热能量耦合解析模型,在给定初始条件和边界条件下,求解方程,可得到超声波激励金属板材接触界面类型缺陷生热所引起构件表面温度变化情况。

1.2 有限元仿真模型的建立

为了分析超声生热热流在试件表面引起的温度分布情况,采用有限元方法对该过程进行仿真研究。图 1 给出了金属板材缺陷结构及有限元网格模型,环境温度设为 15℃。金属板的下端面固定,上端面施加 Y 轴方向的超声波,将超声激励头施加到金属板上的载荷视为接触处的位移载荷,位置为 X 轴 60~80 mm 处,作用面积为 S=20 mm×5 mm。材料为 Q235,表 1 给出了材料热物性参数。

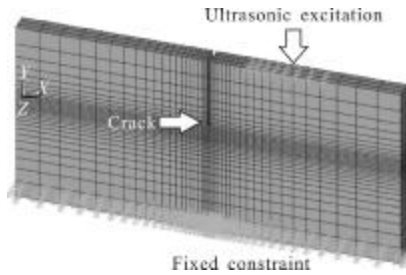


图 1 有限元几何模型
Fig.1 Finite model

表 1 Q235 的热物性参数

Tab.1 Thermal properties of Q235

| Parameter | Value |
|--|---------|
| Density/kg·m ⁻³ | 7 854 |
| Poisson ratio | 0.3 |
| Elasticity modulus/GPa | 210 |
| Specific heat/J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹ | 465 |
| Heat conductivity/W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹ | 49.8 |
| Coefficient of linear expansion/K ⁻¹ | 13 7000 |

超声波作激励源经过幅值调制后,调幅超声波的幅值按调制信号的频率呈周期变化。施加在上端面 Y 轴方向的位移载荷为:

$$y_{AM}(t) = A_u [1 + m_a \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_u t) - (1 + m_a) A_u \quad (4)$$

为了减小计算时间和节约计算资源,将调制超声波参数简化为 $f_u=1\ 000\ \text{Hz}$, $f_m=0.5\ \text{Hz}$, $A_u=10\ \mu\text{m}$, $t=4\ \text{s}$, $m_a=0.5$,即计算两个周期,加载的调制超声波的函数曲线如图 2 所示。

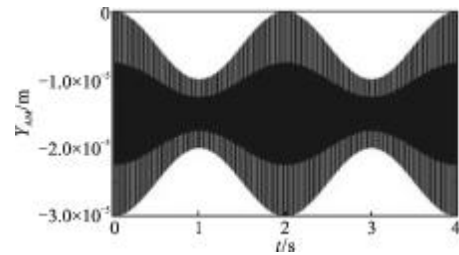


图 2 加载的调制超声波函数曲线

Fig.2 Modulated ultrasonic wave function curve

为了研究超声激励参数对于检测结果的影响,对超声激励加载位置、初始静压和调制频率对表面热波的影响进行分析,其设定如下:

(1) 加载位置仿真分析

如图 3 所示,A 为仿真模型中调制超声波激励加载的中心位置,A 到裂纹处延 x 轴方向的距离定义为 L,加载的调制超声波振幅取 10 μm、调制频率取 0.5 Hz,只改变调制超声波加载的中心位置,分别取 L=12.5 mm、16 mm、17.5 mm、20 mm、22.5 mm 进行分析。

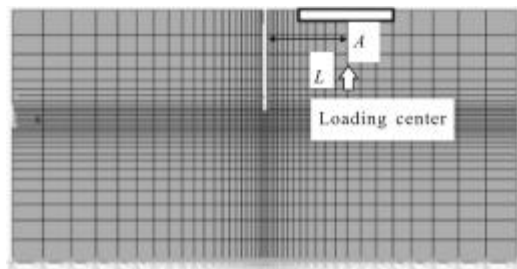


图 3 加载位置示意图

Fig.3 Loading position sketch

(2) 初始静压仿真分析

调制超声波加载的中心位置 L=20 mm、调制频率为 0.5 Hz,振幅分别取 10 μm、12 μm、14 μm、16 μm、18 μm、20 μm 进行仿真分析。

(3) 调制频率仿真分析

调制超声波激励的中心位置 L=20 mm,振幅为 10 μm,调制频率分别取 0.2 Hz、0.4 Hz、0.5 Hz、0.8 Hz、1.0 Hz 进行分析。

2 实验

2.1 实验试件

实验试件采用一块 150 mm×50 mm×5 mm 的 Q235 材质平板,为了产生人工裂纹,在上端面中间

处用线切割加工出一个 20 mm 长的凹槽，然后对其进行扭力疲劳作用,使其尖端区域产生约 3 mm 长的疲劳裂纹,其结构及裂纹形貌如图 4 所示。图 4(a)给出了试验试件的整体结构图片,图 4(b)给出了试验试件切缝尖端区域放大 200 倍的 CCD 镜下图片。从图片中可以看出，制作出的裂纹长 2.285 mm，裂纹贯穿平板,裂纹界面几乎垂直于平板表面。

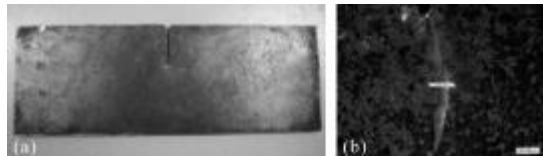


图 4 实验试件
Fig.4 Specimen

2.2 实验装置

超声红外锁相热像无损检测试验装置如图 5 所示,由计算机、红外热像仪、超声电源、超声激励装置、五自由度工作台及气瓶组成。其中的红外热像仪采用 FLIR 法国 Cedic 公司的 SC7 000 型焦平面红外探测器,工作波段为 3.0~5.0 μm ,噪声等效温差在室温下为 20 mK,空间分辨率为 320 \times 240 像素。超声电源最大功率为 1.5 kW,为超声激励装置提供电能;工作台具有五个自由度,可实现两个方向的移动和三个方向的转动;机械加载装置通过气瓶可提供 0~0.5 MPa 的初始静压,使激励头发出的超声波有效地注入被检构件中;气瓶中的气体可选用氮气、空气、氧气和氩气等常用气体。

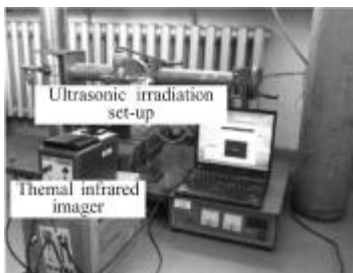


图 5 超声红外锁相检测系统装置

Fig.5 Ultrasonic infrared lock-in thermography experimental setup

3 结果与讨论

3.1 仿真结果

图 6 为对上述模型仿真计算求得时间为 4 s 时温度云图、热梯度云图和热流密度云图,其裂纹处最高温度为 15.568 $^{\circ}\text{C}$ 。

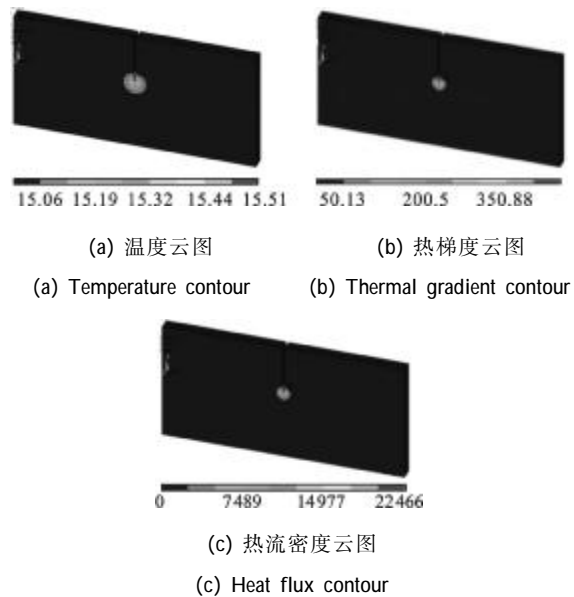


图 6 仿真时间 4 s 时的仿真结果云图

Fig.6 Simulation result contour at 4 s

从所建立的几何模型中选取 3 个节点,如图 7 所示,所选节点的温度随时间的变换关系如图 8 所示,可以看出金属板在调制超声波的激励下,裂纹处生热量呈现周期性变化,构件表面温度按调制频率呈准周期地上升变化。

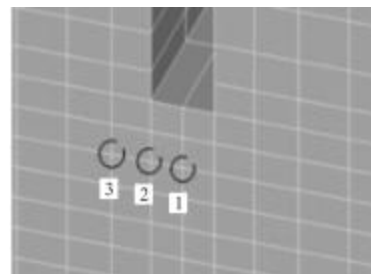


图 7 选取节点位置

Fig.7 Location of the selected nodes

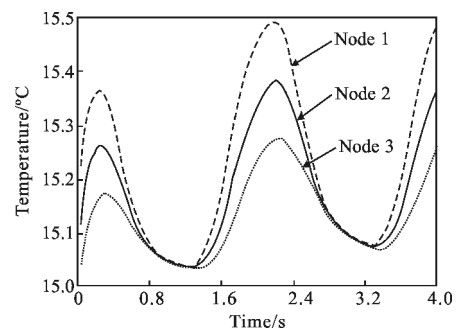


图 8 节点温度随时间变化曲线

Fig.8 Relation between temperature and time for selected nodes

对表面节点温度不同时刻的值进行锁相处理,

获取金属板在超声波激励下表面裂纹处热波信号的幅值和相位信息,绘出幅值图与相位图,分别如图 9(a)与 9(b)所示。

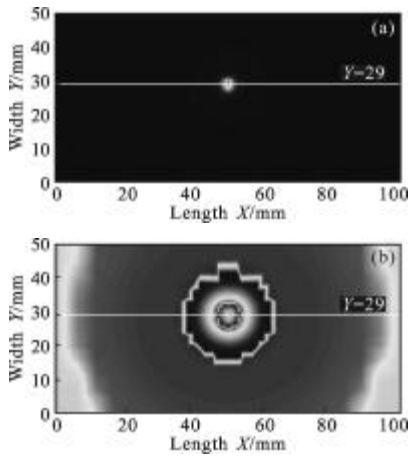


图 9 表面的幅值图和相位图
Fig.9 Front surface amplitude and phase contour

由图 9 结果可以看出,裂纹处的幅值和相位与无缺陷处的幅值与相位存在差异且呈现规律性变化,并且相位图成像的差异性比幅值图更加强。相位图中的震荡现象是由于有限元仿真中对模型进行离散化处理造成的。

为了对表面裂纹缺陷进行质量评价,在幅值图和相位图中取横行 Y=29 处的一条线,做出此线上节点所对应的幅值和相位变化曲线,如图 10 所示,并计算出中心点(即裂纹处)的幅值差为 0.089 9 °C 和相位差为 25.735 4°。

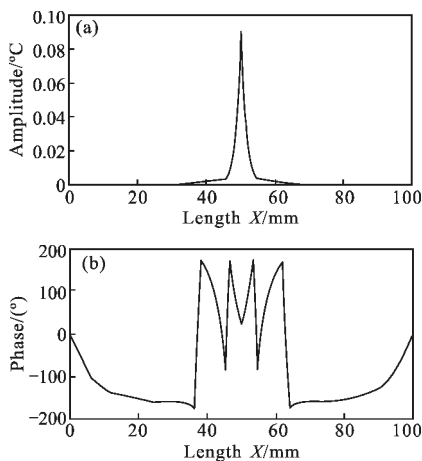


图 10 Y=29 处幅值与相位的变化曲线
Fig.10 Amplitude and phase curves at Y=29

对相位图中失真处的曲线进行多项式拟合处理,如图 11 所示,利用点 1 值、点 2 值、均值(1 值与 2

值之间节点的相位平均值)和中心点值,采用二次多项式拟合出曲线,将均值分别置于点 1 与中心点和点 2 与中心点的中间,分段拟合出点 1 与点 2 之间的相位曲线。

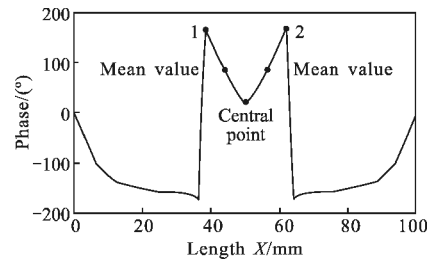


图 11 拟合出的 Y=29 处相位图
Fig.11 Fitting phase curve at Y=29

3.1.1 加载位置仿真分析结果

得到的幅值差与相位差随加载中心位置的变化曲线如图 12 所示,随着加载中心位置偏离缺陷,表面上缺陷处的幅值差降低,相位差上升幅度很小,基本保持不变。

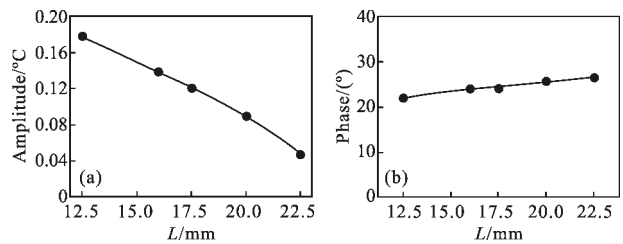


图 12 Y=45 处中心点幅值差和相位差随加载中心位置变化曲线
Fig.12 Amplitude and phase difference curve at Y=45

3.1.2 初始静压仿真分析结果

得到的幅值差与相位差随加载振幅的变化曲线如图 13 所示,可以看出,随着加载超声激励振幅(即初始静压)的增加,表面上缺陷处的幅值差升高,相位差基本保持不变。

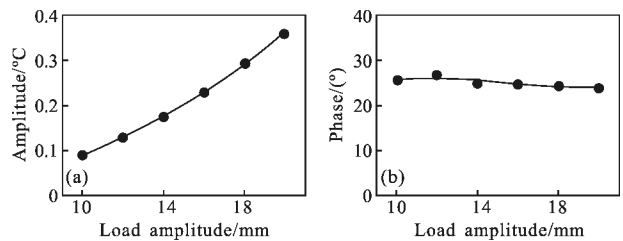


图 13 Y=29 处中心点幅值差和相位差随加载振幅的变化曲线
Fig.13 Amplitude and phase difference curve at Y=29

3.1.3 调制频率仿真分析

得到的幅值差与相位差随加载调制频率的变化

曲线分别如图 14(a)与 14(b)所示,可以看出,随着激励超声波调制频率的增加,表面上缺陷处的幅值差降低,相位差升高。

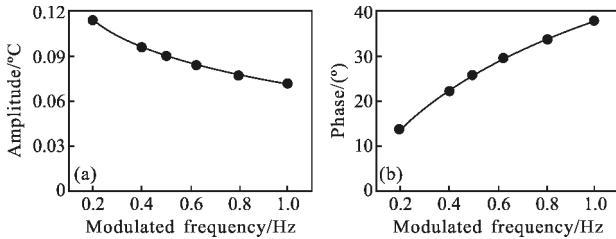


图 14 Y=29 处中心点幅值差和相位差随调制频率的变化曲线
Fig.14 Amplitude and phase difference curve at Y=29

3.2 实验结果

3.2.1 加载位置的影响

图 15 给出了试件的加载位置与夹持位置,AS 为超声红外热像无损检测系统激励头加载的中心位置,AS 到裂纹处延水平方向的距离定义为 LS,实验中激励头与试件间的初始静压为 0.3 MPa,调制超声波激励振幅为 2 μm、调制频率为 0.5 Hz,激励 1 个周期(即激励时间为 2 s),红外热像仪采集频率为 50 Hz。只改变调制超声波加载的中心位置,分别取 LS=12.5 mm、16 mm、17.5 mm、20 mm、22.5 mm,分析加载位置对检测结果的影响及规律。通过试验得到如图 16 所示的 LS=15 mm 的实验结果。

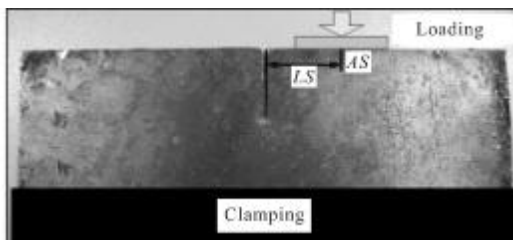
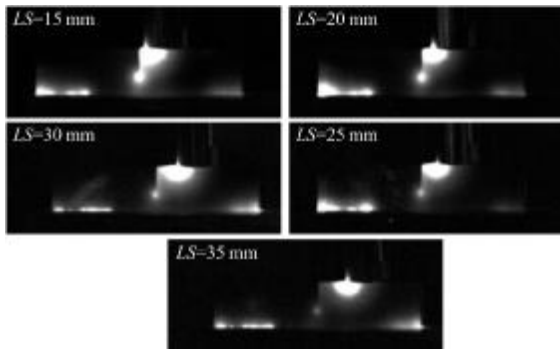


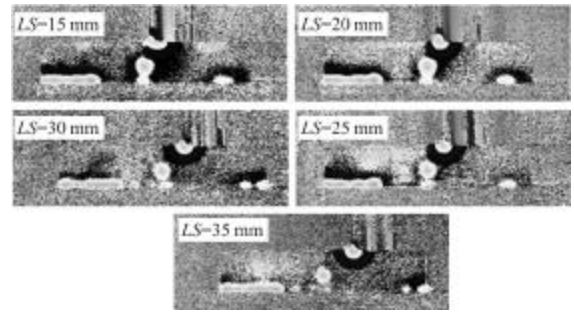
图 15 加载位置示意图

Fig.15 Loading position sketch



(a) 幅值图

(a) Amplitude results



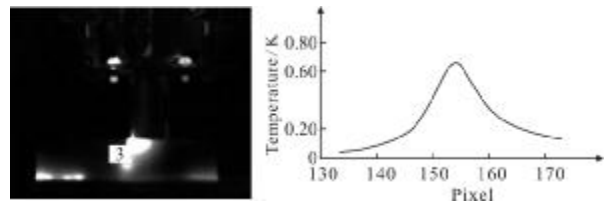
(b) 相位图

(b) Phase results

图 16 不同加载位置下检测得到的幅值图与相位图

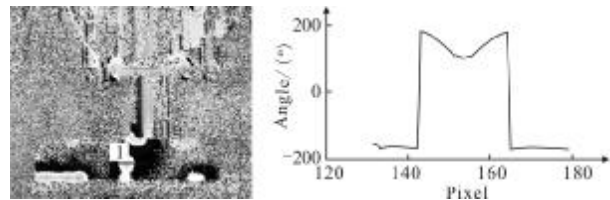
Fig.16 Amplitude and phase results with different loading positions

在 LS=15mm 的检测幅值图上取穿过微裂纹的一条直线,此线上幅值与相位变化情况,如图 17 所示,可以看到缺陷处的幅值和相位均与无缺陷处有较大差异,这与前面的仿真结果是一致的。



(a) 幅值变化曲线

(a) Amplitude change curve



(b) 相位变化曲线

(b) Phase change curve

图 17 裂纹处的幅值与相位变化曲线

Fig.17 Amplitude and phase change curve at crack area

图 18 给出了检测的幅值差与相位差随加载中心位置的变化曲线

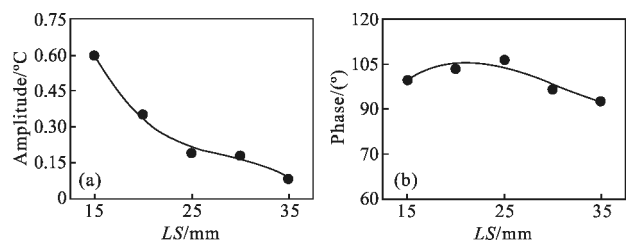


图 18 缺陷处幅值差与相位差随加载中心位置的变化曲线

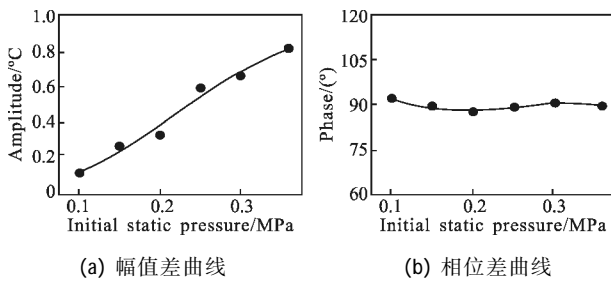
Fig.18 Amplitude and phase difference curve for different loading position

心位置的变化曲线,可以看出,随着缺陷与激励头之间的距离增加,缺陷处幅值差降低,相位差基本保持不变。试验结果与仿真结果显示的规律一致,验证了仿真模型的正确性。

3.2.2 初始静压的影响

检测参数中激励位置取 $LS=20\text{ mm}$,调制频率为 0.5 Hz ,激励 1 个周期(即激励时间为 2 s),红外热像仪采集频率为 50 Hz 。调节气缸内的压强差分别取 0.1 MPa 、 0.15 MPa 、 0.2 MPa 、 0.25 MPa 、 0.3 MPa 、 0.36 MPa 对试件进行激励检测,分析加载的初始静压对检测结果的影响规律。

通过试验可得到如图 19 所示的缺陷处幅值差与相位差随气缸内压强差的变化曲线,可以看出,随着气缸内压强差(即初始静压)的增加,缺陷处幅值差升高,相位差基本保持不变。试验结果与仿真结果显示的规律一致,验证了仿真模型的正确性。



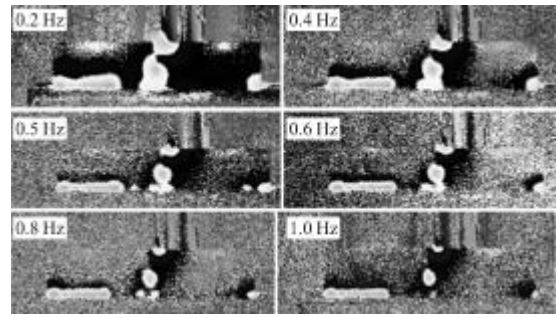
(a) Amplitude difference curve (b) Phase difference curve

图 19 缺陷处幅值差与相位差随气缸内压强差的变化曲线

Fig.19 Amplitude and phase difference for different initial pressure

3.2.3 调制频率的影响

检测参数中激励位置取 $LS=20\text{ mm}$,选定缸内压强差为 0.3 MPa ,激励 1 个周期,红外热像仪采集频率为 50 Hz 。调制频率分别取 0.2 Hz 、 0.4 Hz 、 0.5 Hz 、 0.6 Hz 、 0.8 Hz 、 1 Hz ,对试件进行激励检测,幅值图和相位图如图 20 所示缺陷处幅值差与相位差随调制



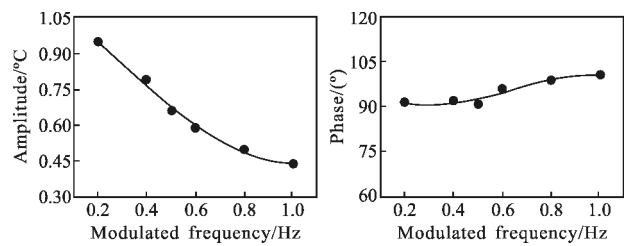
(b) 相位图

(b) Phase results

图 20 不同调制频率下检测得到的幅值图与相位图

Fig.20 Amplitude and phase results for different modulation frequencies

频率的变化曲线如图 21 所示,可以看出,随着调制频率的增加,缺陷处幅值差下降,而相位差升高。试验结果与仿真结果显示的规律一致,验证了仿真模型的正确性。



(a) 幅值差曲线

(b) 相位差曲线

(a) Amplitude difference curve

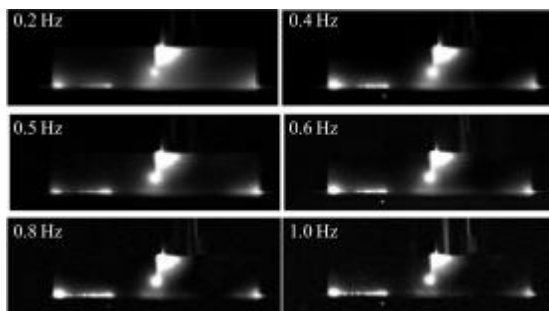
(b) Phase difference curve

图 21 幅值差与相位差随调制频率的变化曲线

Fig.21 Amplitude and phase difference curve for different modulation frequency

4 结 论

超声红外锁相热像检测法用于检测金属板材的表面裂纹缺陷具有很好的敏感性和准确度。文中采用超声红外锁相热像检测法实现了对金属板材构件接触界面类缺陷中的表面裂纹缺陷的检测研究,通过有限元仿真模型对热流在金属板材内部的热传导过程进行了研究并得到了超声激励参数对检测结果的影响;利用所建立的超声红外锁相检测系统对预制金属板材构件表面裂纹缺陷进行了对应的检测试验,结果表明:加载中心位置与缺陷中心的距离越远,表面上裂纹缺陷处的幅值差越小,而相位的变化很小;加载的超声振幅(即初始静压)增加,表面上裂



(a) 幅值图

(a) Amplitude results

纹缺陷处的幅值差升高,而相位差基本保持不变;随着加载的超声波调制频率的增加,裂纹缺陷处的幅值差降低,相位差升高。

参考文献:

- [1] Liu Ying, Zhang Jilong. Infrared nondestructive testing technology in materials and progress [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2001, 15 (4): 275 -279. (in Chinese)
- [2] Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 346-351. (in Chinese)
- [3] Gleiter A, Riegert G, Zweachper T, et al. Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 5(49): 272-274.
- [4] Zweschper T, Gleiter 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] Barden T J, Almond D P, Morbidini M, et al. Advances in thermosonics for detecting impact damage in CFRP composites [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, 48(2): 90-93.
- [6] Ibarra-Castaneda C, Piau J M, Guilbert S, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2009, 20(1): 1-31.

下期预览

锯齿槽闪耀光栅制作误差对衍射效率的影响

葛建平¹, 沈为民¹, 刘全², 陈明辉²

- (1. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要:与矩形槽和正弦槽光栅相比,锯齿槽光栅具有高的衍射效率,可采用全息离子束刻蚀和单点金刚石车削两种方法制造。首先介绍这两种方法的制造误差。然后,分析这些制造误差对用于可见近红外和长波红外成像光谱仪的光栅衍射效率的影响,指出闪耀角误差、槽顶角误差和刻刀圆弧半径是影响锯齿槽光栅衍射效率的关键因素。为制作高质量成像光谱仪用光栅奠定理论基础和指导。