

文章编号 1004-924X(2010)01-0037-08

红外锁相法热波检测技术及缺陷深度测量

刘俊岩^{1,2}, 戴景民², 王 扬¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:研究了红外锁相法热波检测技术的原理、缺陷深度测量及在蜂窝夹层结构及焊接构件检测中的应用。建立了二维热传导有限差分模型,采用该模型计算了强度按正弦规律变化的热流引起试件表面温度变化的历程,基于锁相法提取了有缺陷与无缺陷处的准稳态温度变化,并计算了二者的相位差。然后,建立了热波在试件中传导的热-电等效模型,利用该模型对红外锁相法热波检测技术进行了仿真研究,得到了缺陷深度和反射热波与入射热波相位差之间的关系。最后,采用红外锁相法热波检测技术对模拟缺陷的蜂窝夹层结构试件和实际焊接构件进行了无损检测试验。结果显示,有限差分模型和热-电等效模型计算有缺陷与无缺陷处的相位差与试验结果基本一致,偏差 $<5\%$,表明采用红外锁相法热波检测技术能够快速、准确地获得缺陷大小、位置等,该技术也适用于有复杂曲面结构的构件。

关键词:锁相法热成像;热波检测;缺陷深度;有限差分方法;热-电等效模型

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Thermal wave detection and defect depth measurement based on lock-in thermography

LIU Jun-yan¹, DAI Jing-min², WANG Yang¹

(1. *School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

2. *School of Electric Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The principle of a lock-in thermography for non-destructive tests was researched and the evaluation, defect depth measurement and its application to the detection of honeycomb structure materials and welding bearings were introduced. A Finite Difference Model(FDM) of 2D heat conduction was established and it then was used to compute the temperature variety process on the surface of samples under the condition of sine law modulated heat flux. The lock-in processing method was applied to extract the quasi-steady state temperature variety of the defect and non-defect regions and the phase differences between them was computed. Furthermore, a thermal-electronic equivalence modeling was established by analog to the fundamental laws of heat and electricity, and it was used to simulate the lock-in thermography. The relation between defect depth and phase difference of both incident and reflected thermal waves was obtained. Finally, non-destructive tests were carried out on a honeycomb structure sample with simulated defects and a real welding bearing by the lock-in thermography.

收稿日期:2008-11-19;修订日期:2009-02-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60776802/F01);黑龙江省重点科技攻关项目(No. GB06A512)

Experimental results indicate that the phase deference between defect and non-defect regions obtained by the finite difference model and thermal-electrical equivalence modeling is close to the experimental result, and the bias error is less than 5% as well. The lock-in thermography can rapidly and exactly detect defect sizes and positions, and can be also used in the measurement for the curve surface of a structure.

Key words: lock-in thermography; thermal wave detection; Finite Difference Method (FDM); defect depth; thermal-electronic equivalence modeling

1 引言

20 世纪 60 年代, 红外热成像技术就开始应用于材料和构件结构的无损检测, 红外热波无损检测技术作为一种非接触、非破坏及直观的检测技术, 已日益成为保证产品质量和安全运行检测的重要手段, 广泛应用于航空航天、机械、医疗、电力、建工、石化等领域, 具有探测面积大、安全、准确及适于现场检测等特点。红外热波检测方法可分为主动式与被动式^[1]。主动式按照激励方式不同可分为脉冲热像法和调制热像法(锁相热成像法—Lock-in Thermography)以及近年来发展起来的超声脉冲相位法(UBP)和超声锁相热成像法(ULT)等。红外脉冲热像法是目前最成熟、应用最广泛的技术, 该方法采用脉冲热源进行激励, 利用瞬时高能量热流脉冲在存在缺陷或损伤的构件及材料内部传导的不均匀性引起的表面温度差异进行探伤和检测^[2-3]。

红外锁相法热波无损检测技术是最近发展起来的新型无损检测手段。早在 1995 年瑞典“AGMA”公司就开发了“LOCK-IN”热波检测技术; 2001 年法国 Cedic 公司开发了红外锁相热成像系统“Cedic JADE III”, 该系统包括硬件系统和软件系统, 硬件系统由红外热像仪、数字锁相器及图像采集卡组成, 软件系统包括图像采集处理、分析等功能^[4]。红外锁相法热成像技术将红外热像技术与数字锁相信号处理技术相结合, 通过计算试件表面各点温度变化的幅值图和相位图确定缺陷特征, 由于相位信息量要多于幅值信息量, 可有效降低背景噪声的影响, 显著提高温度信号的信噪比。红外锁相法热成像技术具有与材料或构件加热不均匀性、环境条件及结构等无关的

优点, 在无损检测与评价方面得到了广泛应用^[5-6]。

2 红外锁相法无损检测原理

锁相热成像“Lock-in Thermography”是采用强度按正弦规律变化的激励源对试件进行外部激励, 而在试件或构件表面引起的温度变化也为正弦规律变化, 表面的温度信号按照加载频率振荡变化, 其幅值与相位和材料的传热特性有关, 当试件或构件内部存在缺陷或损伤时, 则有缺陷处与无缺陷处的试件或构件表面引起的温度变化将产生幅值和相位的差异。图 1 给出了采用红外锁相热成像法通过计算相位值而实现无损检测的原理。当激励加热强度按正弦规律变化时, 试件或构件表面温度也按正弦规律变化, 在缺陷对应位置引起表面温度变化与无缺陷处表面温度变化存在相位的差异, 通过计算相位可确定构件存在缺陷的特征^[7]。

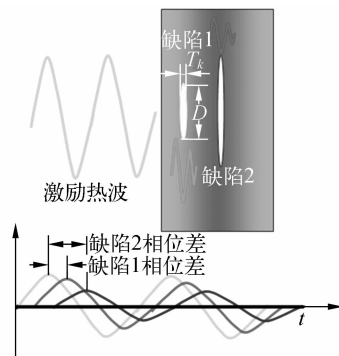


图 1 红外锁相法实现无损检测原理

Fig. 1 Principle of IR lock-in thermography for NDT

2.1 红外锁相法的热波理论分析

外部热激励源的热流是随时间按正弦规律变化的, 即加热辐射源的热流强度是随时间变化的正弦函数。

$$I(t) = \frac{P}{2}(1 - \cos(2\pi f_c t)), \quad (1)$$

式中, $I(t)$ 为周期性变化的热流强度; P 为热源的加热功率; f_c 为热源激励加载频率。

当热波在试件中传递时, 则可由傅里叶热扩散方程描述该过程^[8]。

$$\frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Z^2} - \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T(X, Y, Z, t)}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

式中, k 为材料的热导率; ρ 为材料密度; c 为比热。

为了分析周期性热流在试件中的传递过程, 可将式(2)进行简化, 只考虑热波沿 Z 方向的传导, 则可以得到正弦规律变化的热流在试件中传递时的温度分布和变化历程模型的解析方程。

$$T(Z, t) = T_{am} + \Delta T(1 - e^{-Z/\Lambda}) +$$

$$A \exp\left(\frac{-Z}{\Lambda}\right) \exp(i(2\pi f_c t - \frac{Z}{\Lambda})), \quad (3)$$

式中 T_{am} 为环境温度; A 为温度变化幅值; ΔT 为温度变化; Λ 为热扩散长度, $\Lambda = \sqrt{\frac{2\alpha}{2\pi f_c}}$, α 为热扩散系数。

通过式(3)可直接提取 $Z=0$, 即表面温度变化的幅值和相位。当存在缺陷时, 温度幅值和相位将发生变化, 通过提取幅值和相位可确定缺陷的大小及深度。

红外锁相法的幅值和相位可采用移相法进行提取, 设入射热波和反射热波的幅值分别为 A_1 和 A_2 , 则在表面两个热波的叠加热波幅值应满足^[9]。

$$A_c^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi), \quad (4)$$

式中 A_c 为叠加热波幅值; A_1 为入射热波幅值; A_2 为反射热波幅值; φ 为入射热波与反射热波的相位差。

在一个循环周期内, 在相差 90° 进行采样可得:

$$A_c(0)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi), \quad (5)$$

$$A_c(90)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi + 90), \quad (6)$$

$$A_c(180)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi + 180), \quad (7)$$

$$A_c(270)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi + 270), \quad (8)$$

反射热波的幅值和相位可由式(5)~(8)计算得:

$$A_2 = \sqrt{[A_c(0) - A_c(180)]^2 + [A_c(90) - A_c(270)]^2}, \quad (9)$$

$$\text{Phase}_r = \frac{[A_c(0) - A_c(180)]}{[A_c(90) - A_c(270)]}. \quad (10)$$

式中 Phase_r 为反射热波的相位。

2.2 有限差分模型的建立

为了分析正弦规律变化的热流在试件中的传导, 采用有限差分法对正弦规律变化的热流在存在缺陷的试件中传导而导致试件表面温度变化进行计算, 采用极坐标系下建立了热传导过程的有限差分模型, 如图 2 所示。为了简便运算, 只考虑热流沿径向和厚度方向的传导。

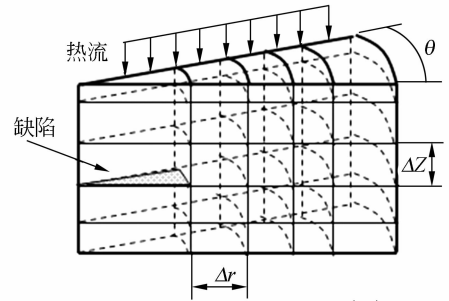


图 2 极坐标下的热传导有限差分模型

Fig. 2 Cylinder reference system used in conductive heat FED modeling

由热力学第一定律, 即能量守恒定律得^[10]

$$\left[\sum \frac{\Delta E_1}{\Delta t} - \sum \frac{E_o}{\Delta t} \right] = \frac{\Delta E_A}{\Delta t}, \quad (11)$$

式中 ΔE_1 为输入系统的能量变化率; ΔE_o 为输出系统的能量变化率; ΔE_A 为系统能量增加变化率;

由图 2 中模型可得

$$-\Delta q_r - \Delta q_z = \frac{\Delta E_A}{\Delta t} = \frac{\rho c \Delta V \Delta T}{\Delta t}, \quad (12)$$

式中, Δq_r 为径向热流; Δq_z 为深度方向热流; ΔV 为单元体积;

边界条件可由下列式得。

$$T(r, Z, 0) = T_{am}, \quad (13)$$

$$\Delta q_{rad} = H_{rad}(T^4 - T_{am}^4), \quad (14)$$

$$\Delta q_{con} = H_{con}(T - T_{am}). \quad (15)$$

式中, Δq_{rad} 为辐射热流; Δq_{con} 为对流热流; H_{rad} 为辐射换热系数; H_{con} 为对流换热系数。

利用式(12)~(15)和 VC++ 编制了热流在试件中传导引起温度变化的有限差分计算程序, 采用该程序可计算脉冲加热和调制加热两种方法

的试件温度分布和温度变化历程。

2.3 热波传递过程的仿真

为了研究缺陷深度对反射热波相位的影响和确定给定材料和缺陷类型条件下缺陷深度与相位之间的关系,本文建立了热-电等效模型对热波在试件中传递过程进行仿真,通过该模型可提取不同缺陷深度的反射热波相位,进而确定反射热波相位和缺陷深度之间的关系。

由傅里叶传热模型得^[8]

$$Q = kA_s \Delta T / L, \quad (16)$$

式中 Q 为热量; A_s 为试件截面积; L 为试件厚度。

当系统受热时,引起系统内能增加,则得:

$$C_t \frac{dT}{dt} = Q, \quad (17)$$

式中, C_t 为试件热容。

则由式(15)~(16)和热-电等效模型可得:

$$R = L / (kA_s), \quad (18)$$

$$C = \rho c LA_s. \quad (19)$$

式中, R 为等效电阻; C 为等效电容。

故热波在试件中的传递可等效为一个 RC 低通滤波电路,利用该 RC 滤波电路模型和式(4)可对热波在试件中的传递过程进行仿真。

3 仿真与试验研究

本文采用建立的有限差分模型和编制的程序对 CFRP 板材中存在的脱粘缺陷进行了红外锁相法温度分布计算和试验研究。利用建立的热-电等效模型对热波在带有平底孔的 A3 钢板传递过程进行了仿真和试验研究。试验设备采用法国的 Cedis Jade III 红外锁相热成像系统,该系统由激励系统、锁相单元和红外热像仪组成,红外热像仪采用法国的焦平面阵列式 Jade MWIR 550,制冷型,探测波段为 $3.1 \sim 5.6 \mu\text{m}$,等效温差

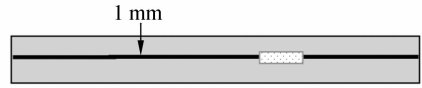


图 3 Cedis Jade III 红外锁相热像系统

Fig. 3 Cedis Jade III lock-in thermography system

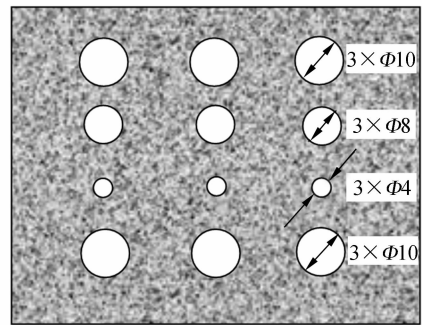
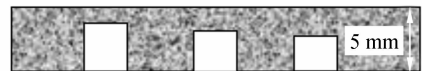
在室温下为 20 mK,图 3 给出了 Cedis Jade III 红外锁相热像系统。

试件采用制作带有脱粘的 CFRP 胶结板和平底空气孔的 A3 钢板,CFRP 板厚为 1 mm,A3 钢板平底孔距表面分别为 1,1.4 mm 和 1.8 mm。试件结构如图所示。



(a) CFRP 板试件

(a) CFRP panel sample



(b) A3 钢板试件

(b) A3 steel panel sample

图 4 试件设计示意图

Fig. 4 Design sketch of samples

3.1 CFRP 板试件计算与试验结果

图 5 给出了有限差分网格划分和温度参考点。

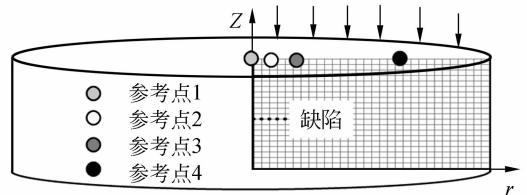
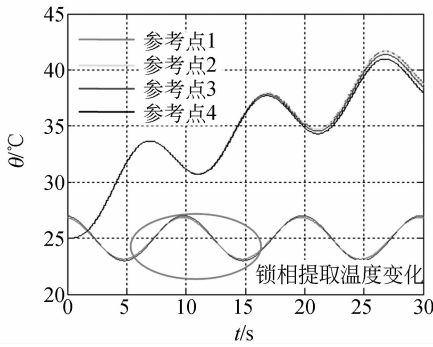


图 5 有限差分网格及温度参考点

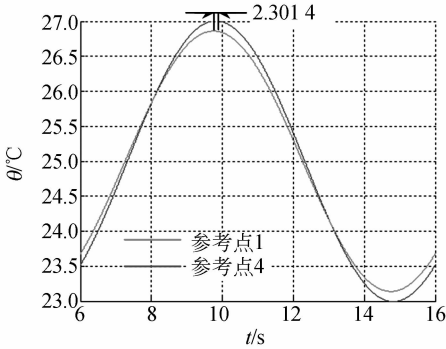
Fig. 5 FDM meshing and temperature reference points

图 6 给出了在激励加载频率 $f_e = 0.1 \text{ Hz}$,功率 2 kW 时,给定参考点温度随时间的变化历程和锁相提取后的有缺陷处与无缺陷处参考点温度变化。由图可知,在给定的计算时间内,热累积作



(a) 温度变化历程

(a) Temperature variety process



(b) 锁相提取后温度变化

(b) Temperature variety by lock-in processing

图 6 有限差分计算结果

Fig. 6 Results of FDM computation

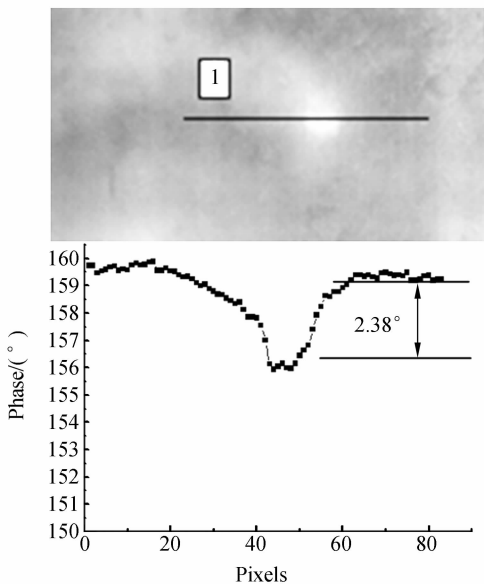


图 7 CFRP 板红外锁相法检测结果

Fig. 7 Results of CFRP used in-lock thermography

用会使表面温度总体上升很高温度,但由于热流的周期性交变作用,使表面温度信号中包含了交流成分,即温度存在周期性变化,但此时,温度变化处于瞬态阶段,当随时间逐渐增加,试件表面与外界热交换达到平衡时,则温度变化达到稳态阶段,温度只按照正弦规律变化。利用锁相法将正弦规律变化的温度信号进行提取,并计算有缺陷处与无缺陷处的相位差,经计算可知,有缺陷处与无缺陷处的相位差为 2.3014° 。图 7 给出了在相同激励频率和功率条件下的红外锁相法的试验结果,可以看出,有缺陷处与无缺陷处的相位差为 2.38° ,计算结果与试验结果十分接近,偏差 $< 5\%$ 。

3.2 A3 钢板试件仿真与试验结果

本文采用 Matlab/Simulink 和热-电等效热波传递模型对正弦规律变化的热流在 A3 钢板试件中的传递进行仿真分析。图 8 给出了激励频率 $f_e = 0.12 \text{ Hz}$ 时,不同缺陷深度的温度变化,由仿真结果可知,反射热波与原始入射热波之间产生了幅值和相位差异,随着缺陷深度的增大,二者之间幅值差和相位差减小,即缺陷探测能力减小。图 9 给出了相同激励加载频率下的红外锁相法检测的相位分布图,由图可测量不同缺陷深度相位与无缺陷处相位的差异,结果表明,随着缺陷深度增大,相位差减小。表 1 给出了仿真与试验测得相位差,仿真结果与试验结果很接近,故采用热-电等效模型能够准确仿真热波在试件中的传递过程,同时,利用相位差与缺陷深度的关系,可准确测量缺陷深度。

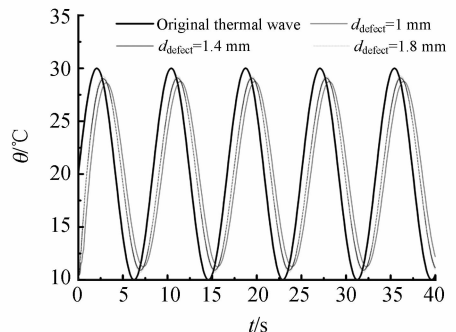
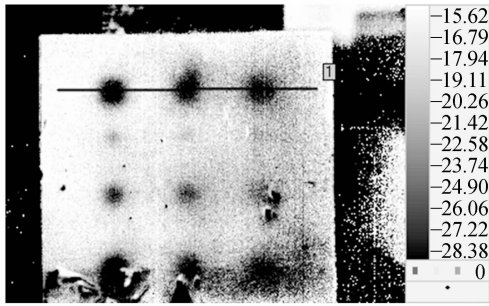


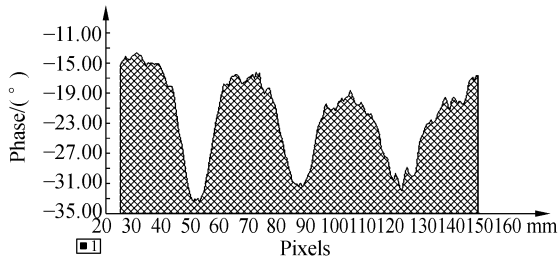
图 8 仿真结果

Fig. 8 Results of simulation by Matlab/Simulink



(a) A3 钢板的相位图

(a) Phase image of A3 steel panel



(b) 不同深度的相位分布

(b) Phase distribution of different depth defects

图 9 A3 钢板试件红外锁相法检测结果

Fig. 9 Results of A3 steel used in lock-in thermography

表 1 不同缺陷深度相位差

Tab. 1 Phase difference with different defect depths

缺陷深度 /mm	相位差计算值 /(°)	相位差测量值 /(°)	偏差 (%)
1	-16.031 8	-16.07	0.24
1.4	-15.269 1	-15.08	1.2
1.8	-15.248 5	-14.98	1.76

4 模拟缺陷试件的红外锁相法检测

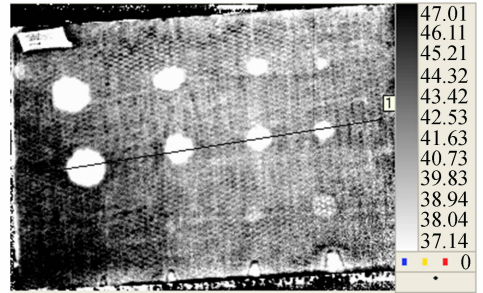
本文采用红外锁相法对不同模拟缺陷蜂窝夹层结构试件进行了无损检测试验研究,表 2 给出了试件缺陷类型及激励频率。

表 2 缺陷类型及激励频率

Tab. 2 Defect types and stimulated frequencies

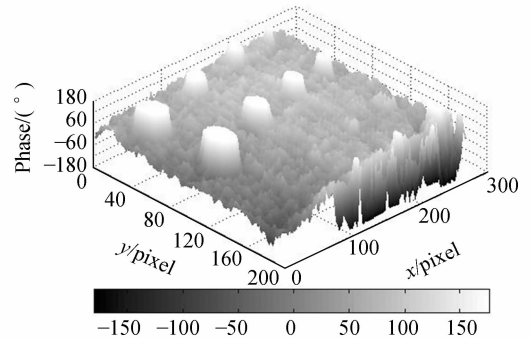
试样	缺陷及深度	激励频率 f_e /Hz
CFRP 蒙皮蜂 窝夹层结构	挖孔、夹杂 ($d_{\text{defect}} = 1 \text{ mm}$)	0.165
铝蒙皮蜂 窝夹层结构	挖孔、夹杂 ($d_{\text{defect}} = 1 \text{ mm}$)	0.223

图 10~11 给出了检测结果。



(a) 相位图

(a) Phase image



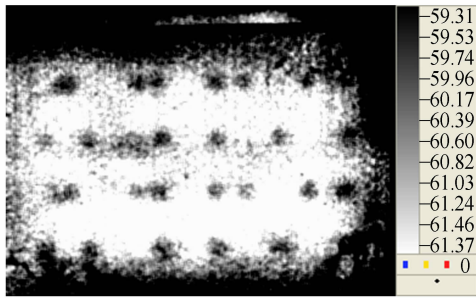
(b) 相位分布三维结构图

(b) Phase distribution of 3D structure

图 10 CFRP 蒙皮蜂窝夹层结构检测结果

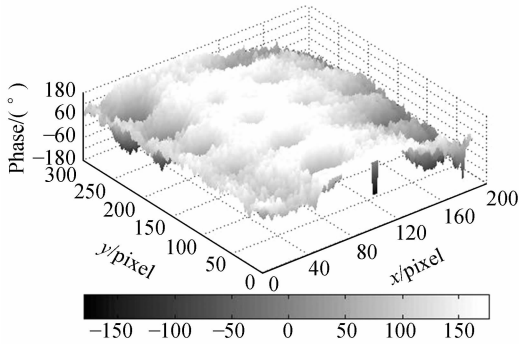
Fig. 10 Results of CFRP-honeycomb by lock-in thermography detection

由图可看出,采用红外锁相法能够准确检测缺陷的形状、大小,同时利用相位与缺陷深度之间的关系,也可确定缺陷深度。红外锁相法作为一种可靠的热波无损检测技术,可很好地解决蜂窝夹层结构材料的缺陷检测问题。



(a) 相位图

(a) Phase image



(b) 相位分布三维结构图

(b) Phase distribution of 3D structure

图 11 铝蒙皮蜂窝夹层结构检测结果

Fig. 11 Results of Al-honeycomb by lock-in thermography

5 实际构件缺陷的红外锁相法检测

采用红外锁相法对实际构件进行了无损检测研究。实际构件为某型号直升飞机的轴瓦,轴瓦采用钎焊工艺将外环高温合金和内环铜合金焊接在一起,要求焊接后不能存在焊接不均和脱焊等现象,外环厚度为 5 mm,轴瓦结构如图所示。

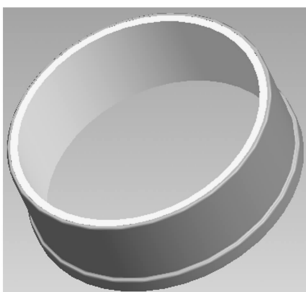


图 12 轴瓦结构示意图

Fig. 12 Sketch of bearing structure

采用红外锁相法对轴瓦进行无损检测,采用光源激励,激励频率 $f_e = 0.25 \text{ Hz}$,激励周期数为 4 个,光源功率为 1 kW,表面进行了喷漆处理,以提高其表面发射率。结果如图所示。



(a) 轴瓦缺陷

(a) Defect of bearing



(b) 缺陷轮廓

(b) Defect profile

图 13 红外锁相法检测轴瓦的结果

Fig. 13 Results of bearing by lock-in thermography

从图中可看出,轴瓦外环与内环之间出现了脱粘缺陷,在缺陷处没有焊料填充。利用 Sobel 算子对缺陷轮廓进行了提取,得到了清晰的缺陷轮廓,并对缺陷大小进行了评价。由此可知,红外锁相法能够快速准确地检测复杂曲面形状构件存在的缺陷。

6 结 论

红外锁相法热波检测技术是一种基于热波处理的主动式红外热成像检测技术,该技术也是新型的无损检测方法。通过分析按正弦规律变化的热流在试件中的传递,采用有限差分法和热-电等效模型对锁相法热波检测技术进行了仿真研究,计算的有缺陷与无缺陷处温度信号的相位差与试验结果基本一致,偏差 $< 5\%$ 。利用本文方法可确定不同材料和缺陷检测所需的激励加载频率。利用不同材料计算有缺陷与无缺陷处的相位差和缺陷深度的关系,可对材料内部缺陷深度测量进行标定。红外锁相法热波检测技术适于复合材料及复杂结构构件的无损检测,该技术能够有效消除背景噪声,提高信噪比,对复杂曲面结构构件缺陷的无损检测也十分有效。

参考文献:

- [1] IBARA-CASTANEDO C, GENSET M. Inspection of aerospace materials by pulse thermography, lock-in thermography and virbothermography: a comparative study[J]. *SPIE*, 2007, 6541: 654116-1-9.
- [2] WU D T, BUSSE G. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials [J]. *Cen. Therm.*, 1998, 37: 693-703.
- [3] 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 CH, *et al.*. Measurement defect depth by infrared thermal wave non-destructive evaluation by pulse phase [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 55-58. (in Chinese)
- [4] BREMOND P. Non destructive testing by heat wave detection [EB/OL]. <http://www.Cedip-infrared.com/articles/>.
- [5] 寇蔚, 孙丰瑞, 杨立. 正弦规律加热条件下缺陷红外故障响应[J]. *红外与激光工程*, 2007, 34(4): 472-474.
- KOU W, SUN F R, YANG L. Thermal responses of defect under sinusoidal heating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 34(4): 472-474. (in Chinese)
- [6] 刘俊岩, 王扬, 戴景民. 基于图像序列处理的红外锁相热像无损检测技术研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(7): 654-658.
- LIU J Y, WANG Y, DAI J M. The study on infrared lock-in thermography technology based on image sequence processing [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 654-658. (in Chinese)
- [7] BUSSE G, WU D, KARPEN W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 1: 3962-3965.
- [8] HOLMAN J P. *Heat Transfer* [M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2008: 131-135.
- [9] WONG B S, TUI C G, BAI W, *et al.*. Thermographic evaluation of defects in composite materials [J] *Insight*, 1999, 41(8): 504-510.
- [10] XAVIER P V. Maldague. *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography* [M]. London: Springer-Verlag, 2001: 23-30.

作者简介:



刘俊岩 (1978—), 男, 黑龙江海伦人, 博士, 副教授, 2000 年、2002 年在佳木斯大学获学士和硕士学位, 2005 年在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: ljyw@hit.edu.cn



戴景民 (1963—), 男, 辽宁新民人, 博士, 教授, 博士生导师, 1985 年、1988 年、1995 年在哈尔滨工业大学获学士、硕士和博士学位, 主要研究方向为热辐射特性测量、红外技术及应用等。E-mail: djm@hit.edu.cn



王 扬 (1960—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 博士生导师, 1982 年、1988 年、1999 年在哈尔滨工业大学获学士、硕士和博士学位, 主要研究方向为激光技术应用、红外热像技术及应用等。E-mail: wyh@hit.edu.cn