

# 锁相成像技术检测玻璃钢缺陷研究

蒋玉龙 冯立春 黄新萍 张存林

(首都师范大学物理系, 北京 100048)

**摘要** 红外热波检测技术是一种新兴的无损检测技术。与传统的被动式红外检测方法不同,该方法将外加瞬时或交变温场施加到被测物,通过红外热像设备监测被测物在外加温场下的表面温度变化。根据外加温场的类型及相应的物理模型对采集到的数据信号进行处理,以图像的形式显示。利用红外锁相技术对玻璃钢材料试件进行检测,通过 SC3000 热像仪进行实验,并通过快速傅里叶变换进行计算,实验得出相位图效果好于振幅图,且发现在不同加载频率下,实验效果不同。

**关键词** 测量;无损检测;锁相热像法;快速傅里叶变换算法;玻璃钢

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.s112001

## Lock-Imaging Technology to Detect Defects Fiber Reinforced Plastics Research

Jiang Yulong Feng Lichun Huang Xinping Zhang Cunlin

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Infrared (IR) thermal wave inspection is a merging technology in nondestructive evaluation. Different from conventional passive infrared inspection, infrared thermal wave inspection work with a sample under transient or alternating temperature field. The surface temperature is recorded by an infrared camera, and the data collected are processed according to the type of the temperature field and correspond physical model. Using lock-in thermography to test fiber reinforced plastics (FRP) material by SC3000 IR camera, and calculated by the fast Fourier transform (FFT) algorithm. Results show that the phase diagram effect is better than that of amplitude diagram, and different loading frequencies have different experimental results.

**Key words** measurement; nondestructive testing; lock-in thermography; fast Fourier transform; fiber reinforced plastics

**OCIS codes** 110.6820; 120.5050; 350.7420

### 1 引 言

红外无损检测技术自 20 世纪 70 年代初就用于材料和机械结构的检测评估,随着当今科技的发展,无损检测在工程应用、生产等领域和环节都起到了重要作用,红外无损检测有别于 5 大常规无损检测(射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测)。其优点在于检测面积大、速度快、非接触等特点<sup>[1]</sup>,但红外热波无损检测技术在定量检测缺陷的深度方面有一定局限性。其中锁像红外热成像技术

在周期性热源的加载条件下具有相位延迟,深度测量且相位图所含信息比振幅图多的特点<sup>[2-4]</sup>,越来越得到工程界的重视。本文采用 FLIR 公司的 sc3000 热像仪,结合自身搭建的红外加热系统及热源控制系统来对玻璃钢试件进行定量的周期性加热,对实验结果进行分析处理,着重研究锁相加载频率周期等对实验结果的影响。

本文在综合国内外研究的基础上,采用按正弦规律进行调制的外激励光源和先进的焦平面红外热像

**收稿日期:** 2013-12-01; **收到修改稿日期:** 2014-01-27

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金(U123312040)

**作者简介:** 蒋玉龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事红外无损检测方面的研究。E-mail: jiangyulong55@sina.com

**导师简介:** 冯立春(1974—),男,副教授,硕士生导师,主要从事红外无损检测方面的研究。

E-mail: tomfeng@gmail.com

仪技术,将红外热像检测技术与数字锁相成像技术相结合,建立了包括外激励热源、调制信号发生器、功率放大器、焦平面红外热像仪、计算机图像处理及数据处理软件在内的锁相红外热波无损检测系统。

## 2 锁相成像原理

红外锁相热成像原理如图 1 所示,由于试件内部缺陷位置和无缺陷位置热物理特性不同,根据热传导理论,将产生不均匀热流。从而可以判断幅值和相位信息。锁相装置由大功率可持续性加热热源、热像仪、锁相设备、计算机组成。热源代替点光源,红外热像仪采用热波探测阵列。为了获取温度调至的振幅和相位,需要对每一个像素点的温度时间图像进行傅里叶变换<sup>[5]</sup>。

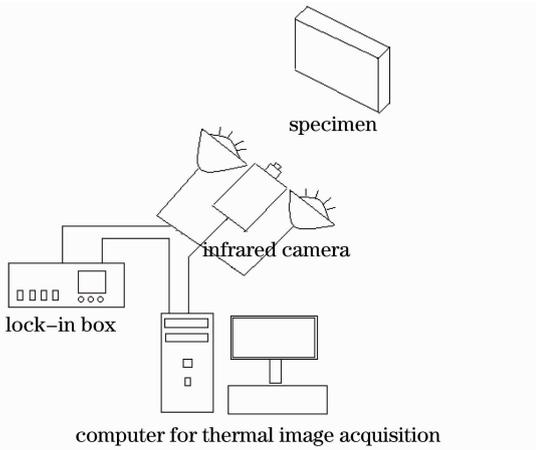


图 1 锁相原理示意图

Fig. 1 Schematic phase-locked

考虑到内含缺陷的半无限平板材料,如果忽略热流的横向扩散,只计算沿厚度方向的传递,当时间  $t > 0$  时,在  $x = 0$  处受到周期热流  $q = I_0 \exp(j\omega t)$  输入,可描述成如下方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x = 0, \quad -k = \frac{\partial T}{\partial x} = I_0 \exp(j\omega t), \quad (1)$$

式中  $T$  为温度函数,  $\alpha = k/(\rho c)$  为热扩散系数,  $k$  为热传导率,  $\omega$  为角频率。温度函数  $T$  可以描述成深度  $x$  和时间  $t$  的函数:

$$T(x, t) = \frac{I_0}{k\sigma} \exp(-\alpha x) \exp(j\omega t), \quad (2)$$

式中  $\sigma = \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = \frac{1 + j}{u}$ , 其中  $u$  是热扩散长度, 也称阻尼系数  $u = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$ 。这个方程描述了受调制频率控制的热波沿  $x$  轴方向的传递情况。

为了获得相位和幅值信息,系统运用了简单的傅里叶分析,用热像仪采集每一个周期至少 4 幅热像图  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , 当加载到试件上的热源为正弦信号时,从四组温度数据得到的温度场信号也是正弦的。振幅  $A$  和相位  $\varphi$  如下式表示:

$$\varphi = \arctan(S_3 - S_1)/(S_4 - S_2), \quad (3)$$

$$A = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2}. \quad (4)$$

## 3 信号幅值与相位提取算法

目前,应用于红外锁相技术的锁相频率信号提取算法主要包括 4 点平均算法, Lock-in 算法、相关算法及快速傅里叶变换(FFT)变换算法等。可以有效消除白噪声,并实现在信号谱上提取锁相频率信号的幅值与相位信息,进行锁相处理<sup>[6-8]</sup>。

通过快速傅里叶变换算法对滤波后的红外图像进行处理,可以得到相应的材料或者构件的缺陷信息。根据离散傅里叶变换(DFT)公式,  $N$  点有现场序列  $y(n)$ :

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (5)$$

$$W_N = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right).$$

为了提取锁相频率即加载频率  $f_e$  信号的幅值和相位信息,由(5)式可得

$$k = [N/(f_s/f_e)] + 1, \quad (6)$$

式中  $f_s$  为采样频率即红外热像仪的振幅频率。

由(5)式和(6)式就可以提取锁相频率信号的幅值与相位<sup>[9-10]</sup>。

## 4 锁相红外技术用于检测玻璃钢试件实验

软件系统的建立:

基于图像序列处理的红外锁相热成像无损检测系统是通过红外热像仪记录正弦规律变化的周期性热流在构件表面引起温度变化的图像序列,编制的软件系统根据相应的图像序列进行处理,绘制出温度变化幅值和相位分布图。

本文所用到的软件可以完成温度曲线的测量,快速傅里叶变换等多项功能。

试件:本实验采用的玻璃钢试件长 30 cm,宽 20 cm,厚 0.5 cm,后边面掏成 0.2 cm、0.3 cm、0.4 cm 的楔形尖角。

本次实验所选用的试件是玻璃钢材质的,其试

件背面的厚度是不一样的,通过锁相技术,来检测整个区域,并比较相位和幅值的实验信息,来判断是否能通过实验看到试件后面的厚度变化。

图2为玻璃钢试件加载频率为0.4 Hz,采集频率5 Hz,加热时间12.5 s的振幅图和相位图。从振幅图图中能够看出最浅层次的缺陷形状,其余无法看出。相位图可以清晰看到试件上边三处缺陷效果(箭头所示),并且下端较深的缺陷形状也能看到。

图3为加载频率为0.5 Hz,采集频率5 Hz,加

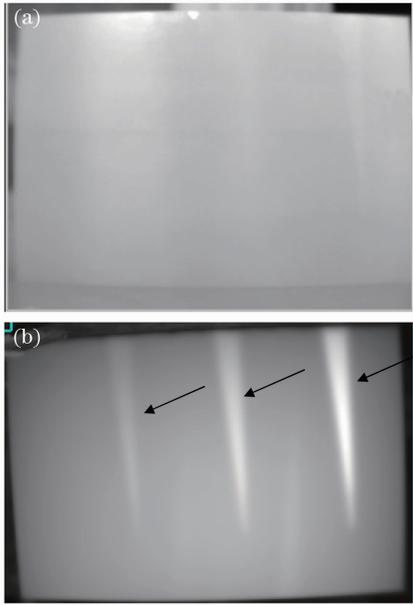


图2 实验效果1。(a)振幅;(b)相位

Fig. 2 Experimental results 1. (a) Amplitude; (b) phase

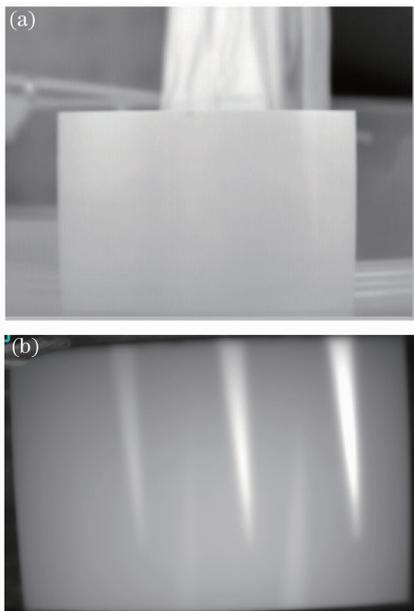


图3 实验效果2。(a)振幅;(b)相位

Fig. 3 Experimental results 2. (a) Amplitude; (b) phase

热时间8 s的振幅图和处理后的相位图,从图中可以更明显地比较出在实验效果上的区别。

作为大功率灯加热源,加热均匀性往往制约着实验效果,因为想得到良好的实验结果。必须要保证激励源有很高的均匀性,而对试件采用正弦变化的激励源,并通过快速傅里叶变换得到实验的相位图时,就可以摆脱加热均匀性对实验结果的影响,从而提高了实验的可靠性。可以看出,当加载频率为0.5 Hz,采集频率5 Hz,加热时间8 s时,通过软件处理后的相位图可以清晰地看到试件缺陷,得到较为良好的实验结果。

## 5 结 论

实验结果表明,在相同加载频率和采集频率下,相位图的效果要好于振幅图,试件背面的厚度变化可以更清晰地看到,并且相位图不受加热均匀性的影响。在不同的加载频率下,相位图本身的效果也会出现不一样的结果。由此可知,在相同试件和实验条件下,加载频率会影响检测深度。但采样频率不能选择过高,一般满足采样定理即可。通过对正弦规律变化的热流在构件表面引起温度变化的有限元仿真,对Lock-in热像技术进行了系统研究,通过相位信息的提取可准确判断缺陷的位置及形状,仿真结果表明:利用相位差与缺陷深度的关系可实现缺陷深度定量分析。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Yanguang, Guo Xinglin, Ren Mingfa. Lock-in thermography method for the NDT of composite grid stiffened structures [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(1): 199-205.  
赵延广, 郭杏林, 任明法. 基于锁相红外热成像理论的复合材料网格加筋结构的无损检测 [J]. *复合材料学报*, 2011, 28(1): 199-205.
- 2 G Busse, D Wu, W Karpen. Thermal wave imaging with phase-sensitive modulated thermography [J]. *Appl Phys*, 1992, 71(8): 3962-3965.
- 3 D Wu, A Salerno, B Schonbach, *et al.*. Phase-sensitive modulation thermography and its applications for NDE [C]. *SPIE*, 1997, 3056: 176-182.
- 4 Sun Lei, Zhang Litong, Mei Hui, *et al.*. Nondestructive testing and evaluation of 2D C/SiC with defects [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(5): 85-90.  
孙磊, 张立同, 梅辉, 等. 2D C/SiC缺陷的无损检测与评价 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(5): 85-90.
- 5 Feng Lichun, Tao Ning, Xu Chuan. Lock-in thermography and its application in nondestructive evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1120-1123.  
冯立春, 陶宁, 徐川. 锁相热像技术及其在无损检测中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1120-1123.
- 6 Chen Dapeng, Li Xiaoli, Li Yanhong, *et al.*. Ultrasonic infrared thermography tests the quality of laser welded seams [J].

- Nondestructive Testing, 2008, 30(10): 747-749.
- 陈大鹏, 李晓丽, 李艳红, 等. 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.
- 7 Xu Chuan. Pulsed Infrared Thermography and Lock-in Thermography [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.
- 徐 川. 脉冲红外热成像与锁相热成像 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- 8 Liao Pengcheng, Hong Yi, Zhang Zhongning, *et al.*. Applications of infrared imaging in ultrasonic infrared thermography [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(2): 132-134.
- 缪鹏程, 洪 毅, 张仲宁, 等. 红外热像仪在超声红外热像技术中的应用 [J]. 激光与红外, 2003, 33(2): 132-134.
- 9 Chen Dapeng, Zhang Cunlin, Li Yanhong, *et al.*. Ultrasonic burst phase thermography and its application [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 107-110.
- 陈大鹏, 张存林, 李艳红, 等. 超声脉冲相位热成像技术及其应用实例 [J]. 光学学报, 2009, 29(s1): 107-110.
- 10 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.
- 刘俊岩, 戴景民, 王 扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 346-351.

栏目编辑: 何卓铭