

文章编号: 0253-2239(2010)10-2776-06

# 含缺陷疲劳试件的锁相红外热成像无损检测

赵延广 郭杏林 任明法\*

(大连理工大学运载工程与力学学部工程力学系工业装备分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 锁相红外热像技术由于其实时、快速、无损以及非接触等优点,被逐渐应用于疲劳研究中。基于锁相红外热像理论,用法国 Cedip 公司开发的锁相红外热像系统对含缺陷的疲劳试件进行了无损检测,并快速测得了其疲劳极限。结果表明,相位图比幅值图能提供更多的缺陷内部信息,恰当选择检测频率是无损检测的关键,缺陷面积越大检测精度越高。随缺陷深度的增加,疲劳试件的疲劳极限降低。

**关键词** 成像系统;无损检测;红外热像法;锁相;缺陷

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2776

## Lock-In Infrared Thermography for the Non-Destructive Testing of Fatigue Specimen with Defects

Zhao Yanguang Guo Xinlin Ren Mingfa

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering and Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** Lock-in infrared thermography method is gradually used in fatigue studies because of its advantages such as real-time, quick-reaction, non-destructive, non-contact and so on. Non-destructive testing is applied to fatigue specimen with defects, and the fatigue limit is detected rapidly based on lock-in infrared thermography. In parallel, the results are analyzed using lock-in infrared thermography system developed by Cedip in French. It shows that more information of internal defects can be found from phase image than from amplitude image. The experimental procedure indicates that a proper testing frequency is the key to the non-destructive testing. The data reveals that larger area of defect leads to a precise testing result and the fatigue limit of the specimen decreases with the increase of the defect depth.

**Key words** imaging systems; non-destructive testing (NDT); infrared thermography; lock-in; defect

### 1 引 言

疲劳破坏是飞机、船舶、车辆和建筑结构等最重要的失效形式之一,但至今尚缺乏有效的方法对其进行检测。一些学者采用声发射技术对疲劳试验进行了实时监测<sup>[1,2]</sup>,但面临着高背景噪声、声波传播途径复杂和声波衰减严重等困难。红外热波无损检

测技术相对于常规的无损检测方法具有其自身的优点,如检测面积大、速度快和非接触等<sup>[3~5]</sup>。其中锁相红外无损检测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幅值图多的特点,越来越得到工程界的重视<sup>[6~10]</sup>。疲劳热像法借助红外热像仪,测量材料或构件在循环载荷

收稿日期: 2010-05-11; 收到修改稿日期: 2010-08-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(10702012)、工业装备分析国家重点实验室自主研究课题基金(S08204)和辽宁省博士科研启动基金(20071093)资助课题。

**作者简介**: 赵延广(1981—),男,博士研究生,主要从事无损检测及疲劳等方面的研究。

E-mail: ygzha081@mail.dlut.edu.cn

**导师简介**: 郭杏林(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事基于振动分析的结构损伤识别及无损检测技术等方面的研究。E-mail: xlguo@dlut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: renmf@dlut.edu.cn

下的升温,可对整个疲劳破坏过程进行实时监测。本文基于锁相热成像理论,对含不同类型盲孔的 Q235 平板试样进行了光激励加载下的无损检测,并利用 Luong 法<sup>[11]</sup>快速确定其疲劳极限。

## 2 锁相红外热成像理论

锁相红外热像理论首先由 Carlomagno<sup>[12]</sup> 和 Berardi 教授提出。内含缺陷的半无限平板材料,忽略热流的横向扩散,只考虑沿厚度方向的传递,时间  $t > 0$  时,在  $x = 0$  处受到周期热流  $q = I_0 \exp(j\omega t)$  输入,可描述为<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

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

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

$$T(x, t) = \frac{I_0}{k\sigma} \exp(-\sigma x) \exp(j\omega t), \quad (3)$$

式中  $\sigma = \sqrt{(j\omega)/\alpha} = (1+j) \sqrt{\omega/2\alpha} = (1+j)/\mu$ ,  $\mu$  是热扩散长度,也称阻尼系数  $\mu = \sqrt{2\alpha/\omega}$ 。方程描述了受调制频率控制的热波沿  $x$  轴方向传递的情况。

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四幅热像图  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , 可以确定相位  $\phi$  和幅值  $A$  为

$$\phi = \arctan\left(\frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2}\right), \quad (4)$$

$$A = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2}. \quad (5)$$

红外锁相热成像原理如图 1 所示,由于被测物中有缺陷区域和无缺陷区域部分的热物理性质不同,根据热传导理论,将产生不均匀热流,从而造成被测物有缺陷与无缺陷部分对应表面温度幅值和相位不同,由此可以判定缺陷的存在。

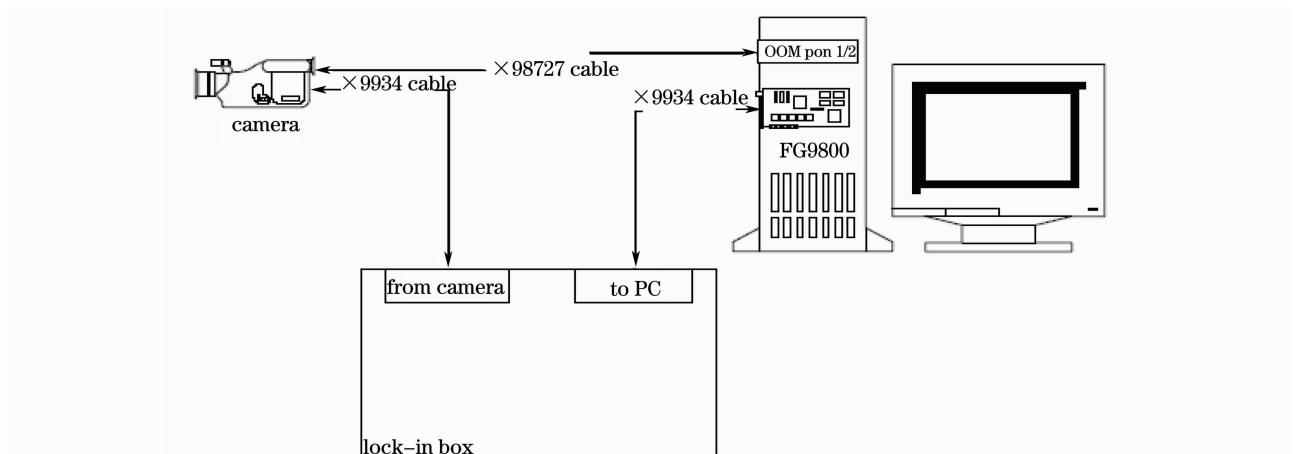


图 1 红外锁相热成像原理示意图

Fig. 1 Principle of infrared lock-in thermography

## 3 试件及检测系统

第 1 组试件:中心含 8 mm 直径圆形盲孔的疲劳试件,试件厚 5 mm,如图 2 所示。孔深(孔的深度)分别为 4, 2.5 和 1 mm。

第 2 组试件:中心含 6 mm 直径圆形盲孔的疲劳试件,试件厚 5 mm,如图 3 所示。孔深分别为 4, 2.5 和 1 mm。

第 3 组试件:中心含不同形状缺陷的疲劳试件,试件厚 5 mm,孔深 4 mm,如图 4 所示。三角形缺陷为等边三角形,边长 8 mm;正方形缺陷边长 6 mm;圆形缺陷直径 8 mm。



图 2 不同盲孔深度的 8 mm 疲劳试件

Fig. 2 Fatigue specimen with 8 mm diameter different depths and internal defect



图 3 不同盲孔深度的 6 mm 疲劳试件

Fig. 3 Fatigue specimen with 6 mm diameter different depths and internal defect



图 4 不同形状缺陷试件

Fig. 4 Fatigue specimen with different shape and internal defect

红外锁相无损检测系统由法国 Cedip 公司开发的红外热相机 (CEDIP Jade)、锁相盒、函数发生器和热源等组成,如图 5 所示。热源的加载频率、时长和强度由函数发生器控制,采用正弦加载。检测时,首先采用较高频率,然后逐渐降低加载频率直到缺陷被检测出。检测结果以平均值图,幅值图和相位图三种格式同时存储,用系统软件 (ALTAIR) 进行深入分析。

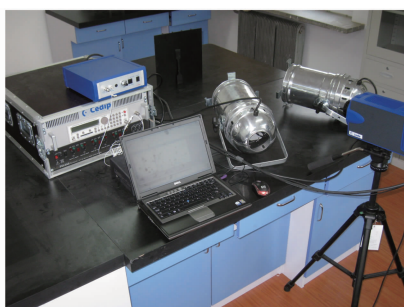


图 5 锁相红外无损检测系统

Fig. 5 Experimental setup of the infrared lock-in NDT system

## 4 锁相红外无损检测结果

### 4.1 幅值图和相位图比较

图 6 是第一组试件在相同检测频率下的幅值图

和相位图,图 6(a)为幅值图,图 6(b)为相位图。幅值图更多地提供了试件表面的信息,一些喷漆不均匀、表面不光滑处可以被检测出来,而背面含有的盲孔却不能被检测出来。试件表面的不均匀对相位图干扰不大,相位图可以检测出试件背面所含的盲孔。应用锁相红外热像法进行无损检测时,相位图比幅值图可以更多的提供试件内部的缺陷信息。图 6(b)中纵坐标为相位值,横坐标为其相对位置坐标,从左到右盲孔深度依次为 4, 2.5 和 1 mm。由图 6(b)可以看到盲孔深度为 4 mm 和 2.5 mm 试件的盲孔位置,有盲孔处和无盲孔处相位值不同,并且 4 mm 孔深的相位差值大于 2.5 mm 孔深的相位差值,盲孔越深越容易被检测出。

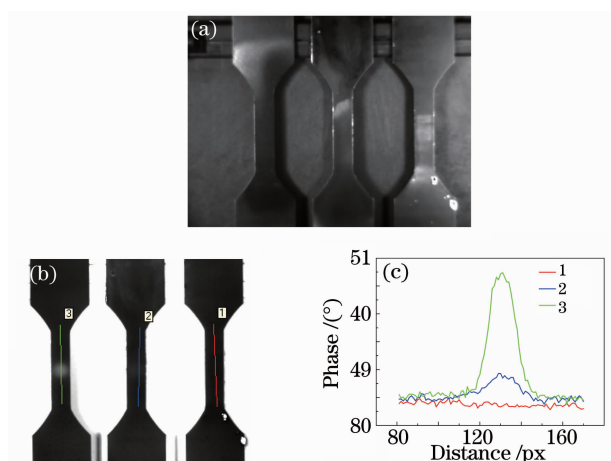


图 6 相同频率下的(a)幅值图,(b)相位图和(c)图(b)的二维简化图

Fig. 6 (a) amplitude image and (b) phase image under the same testing frequency, (c) simplified figure of (b)

### 4.2 不同加载频率下的检测结果

图 7 是第一组试件在检测频率为 0.11~1.31 Hz 时的相位图对比。检测结果表明,频率在 0.2~1.11 Hz 之间可以检测到缺陷的存在,而低于 0.11 Hz 或者高于 1.3 Hz 均不能检测到背面的缺陷,在 0.71 Hz 时缺陷最明显。锁相红外热像法进行无损检测时,不应该去一味地追求高频或低频,它存在一个最佳的检测频率,这个最佳检测频率和被检试件的固有材料属性及缺陷距表面的深度有关。

### 4.3 加载频率、缺陷面积对检测精度的影响

由于是非接触检测,受加载频率、拍摄角度和被测物表面形状等多因素影响,检测到的缺陷相比实际缺陷会有不同程度的拉伸或压缩。不同加载频率下 8 mm 和 6 mm 盲孔的实际检测长度及检测精度如表 1 所示。根据表 1 的检测结果分析,加载频率是影响检测误差最关键的因素,它由函数发生器控

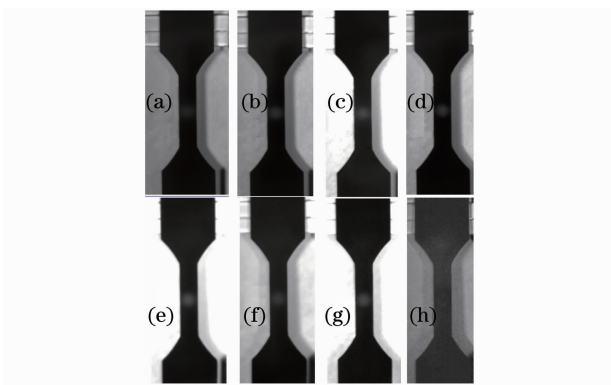


图7 不同加载频率下检测结果。(a)  $f=0.11$  Hz; (b)  $f=0.21$  Hz; (c)  $f=0.31$  Hz; (d)  $f=0.51$  Hz; (e)  $f=0.71$  Hz; (f)  $f=0.91$  Hz; (g)  $f=1.11$  Hz; (h)  $f=1.31$  Hz)

Fig. 7 Testing results for different frequencies. (a)  $f=0.11$  Hz; (b)  $f=0.21$  Hz; (c)  $f=0.31$  Hz; (d)  $f=0.51$  Hz; (e)  $f=0.71$  Hz; (f)  $f=0.91$  Hz; (g)  $f=1.11$  Hz; (h)  $f=1.31$  Hz)

制,在不同的加载频率下会产生不同的检测误差。对比分析 8 mm 和 6 mm 盲孔的检测误差,发现在加载频率为 0.71 Hz 时二者都是最小的检测误差,提高或降低频率检测误差均增大,并且在相同频率下 6 mm 孔径的检测误差要大于 8 mm 的,说明随着缺陷面积的增大,检测精度提高。

表1 加载频率、缺陷面积对检测精度的影响

Table 1 Effect of loading frequency and the area of the defect on the measurement precision

Loading frequency/ Hz	Measured value of	Measured value of	Measurement error of	Measurement error of
	8 mm / mm	6 mm / mm	8 mm / %	6 mm / %
0.21	7.34	5.22	8.3	13.0
0.31	7.52	5.46	6.0	7.7
0.51	7.82	5.74	2.3	4.3
0.71	7.96	5.96	0.5	0.7
0.91	7.82	5.64	2.3	6.0
1.11	7.48	5.30	6.3	10.5

不同形状缺陷疲劳试件的相位图检测结果如图 8 所示。可以检测到缺陷的形状,从左到右依次是三角形,正方形和圆形。缺陷面积大小排列依次是圆形、正方形和三角形,对比有缺陷区域和无缺陷区域相位差值,大小顺序依次是圆形、正方形和三角形。在缺陷深度一样的情况下,缺陷面积越大,检测结果越明显,检测精度越高。

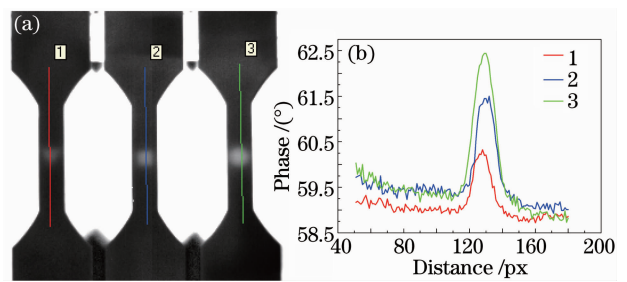


图8 不同形状缺陷疲劳试件检测结果  
Fig. 8 Testing result of fatigue specimen with different shape and defect

## 5 疲劳极限的快速确定

对第 1 组试件进行光激励加载无损检测后,分别将其放在 MTS810 液压伺服低频疲劳试验机上进行拉伸-压缩疲劳试验,同时采用 Altair LI 非接触式温度与应力场测试系统进行热数据的采集与处理,如图 9 所示。试验参数设置如下:循环特性  $R=-1$ ,加载频率 15 Hz,采样频率高于 200 Hz。实验采取载荷水平逐级增高的加载方式,应力幅值从 40 MPa 开始,每循环 6000 个周次就增加 10 MPa,直至试件发生断裂为止。整个加载过程并不是连续的。每级应力加载结束后要有几分钟的散热时间,以确保试件在下一级应力加载开始前能恢复到初始温度。



图9 疲劳试验中的锁相实时监测系统  
Fig. 9 Lock-in real-time monitoring system for the fatigue test

4 cm 孔深疲劳试件在不同强度加载下的应力图,如图 10 所示。通过应力图可以看出,试件中心圆孔区域显示出明显的应力集中现象,最大应力值比其他区域高出很多。该区域内的应力分布也并不均匀,最大应力沿横向分布,这是裂纹扩展发生区域并且是试件最终断裂的方向。随着荷载的增加,应力集中更明显。因此在疲劳试验的过程中,可以对其进行实时健康检测。



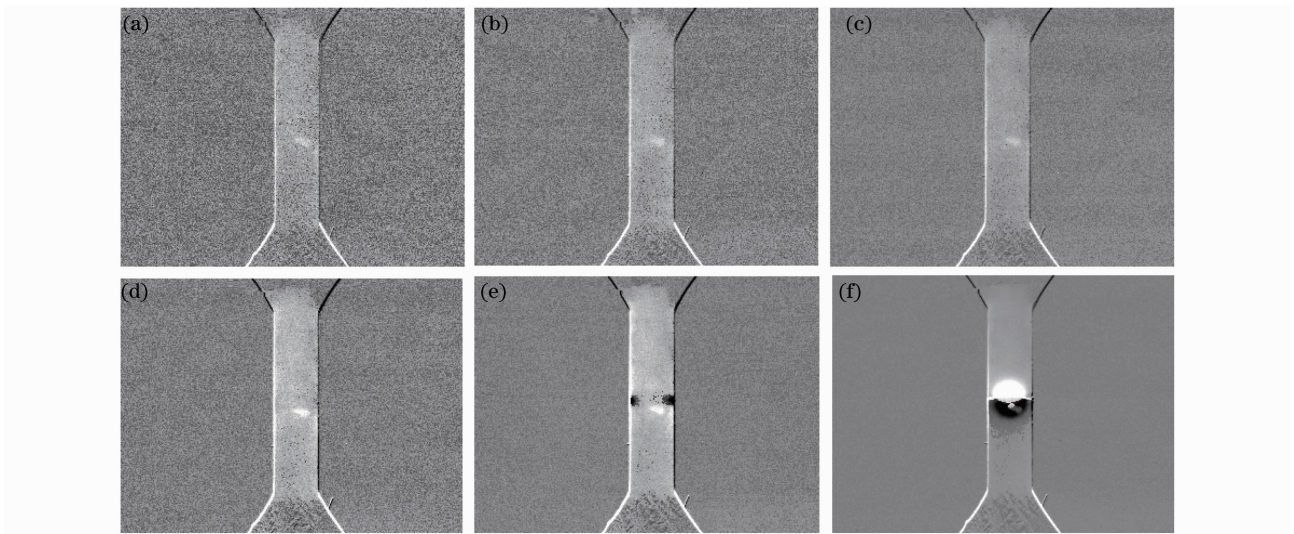


图 10 逐级强度加载下试件的应力图。(a) 80 MPa; (b) 100 MPa; (c) 120 MPa;  
(d) 140 MPa; (e) 150 MPa; (f) 160 MPa

Fig. 10 Stress images at increasing loads by a stepwise succession. (a) 80 MPa; (b) 100 MPa; (c) 120 MPa;  
(d) 140 MPa; (e) 150 MPa; (f) 160 MPa

黄毅等<sup>[14]</sup>根据各向同性均匀体内热弹性效应的理论提出了基于热弹性应力集中系数的疲劳评估方法。热弹性应力集中系数 $\lambda_e$ 被定义为

$$\lambda_e = \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_{nom}}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\sigma_e$ 是由热像数据计算得到的弹性应力, $\Delta\sigma_{nom}$ 是疲劳加载的名义应力值。在进行安全评估时,当热弹性应力集中系数等于1时,即应力-应变完全为线弹性关系,可认为是最安全的状态。而随着局部应力集中现象的出现,该系数将不断的增大,结构也将变得越来越不安全。8 mm孔深疲劳试件不同应力下的热弹性系数如表2所示,可以看出, $\lambda_e$ 明显大于1,基本都在1.4左右。在80~140 MPa的应力区间内,应力集中系数基本控制在1.4左右,这说明此时的构件还处于比较安全的受载状态。而当应力幅达到150 MPa时, $\lambda_e$ 由1.4左右增加至1.71,统计区域内的应力集中开始变得显著起来。随着载荷的进一步升高,当应力幅达到160 MPa时, $\lambda_e$ 骤增至2.61。这说明此时的试件已处于非常不安全的状态,疲劳破坏将在不久后发生。而事实也证实了这一点,试件在160 MPa下循环了几百个周次后即发生了断裂。

由于传统求疲劳极限的方法试验周期长、需要试件多,所以高试验成本成为疲劳试验中一个难以解决的问题。为了寻求一种准确、快速、低成本的试

表 2 不同应力幅下的热弹性系数

Table 2 Thermo-elastic coefficient at increasing loads by a stepwise succession

Stress amplitude ( $\sigma_a$ /MPa)	Thermo-elastic coefficient ( $\lambda_e$ )
80	1.41
100	1.43
120	1.41
140	1.46
150	1.71
160	2.61

验方法,国内外许多学者提出运用红外热像技术对材料进行疲劳检测。A. Risitano<sup>[15]</sup>最早提出“温升三段论”,并由此得出材料的疲劳极限可以通过绘制不同载荷水平下温度稳定阶段的温升值与载荷之间的关系曲线来确定,疲劳极限就是曲线与载荷横轴的交点。目前流行的Luong法则分别对固有耗散发生突变前后的热像数据进行线性拟合,定义两条拟合直线交点的横坐标即为材料的疲劳极限。该方法是对Risitano法的一种改进,可称作“二线拟合法”。采用luong法,分别对在疲劳极限以上和以下的两组温度值进行线性拟合,求得试件的疲劳极限按缺陷由浅至深分别为180.28,146.28和117.02 MPa,如图11所示。由此可以看出,试件的疲劳极限随缺陷深度的增加而降低。

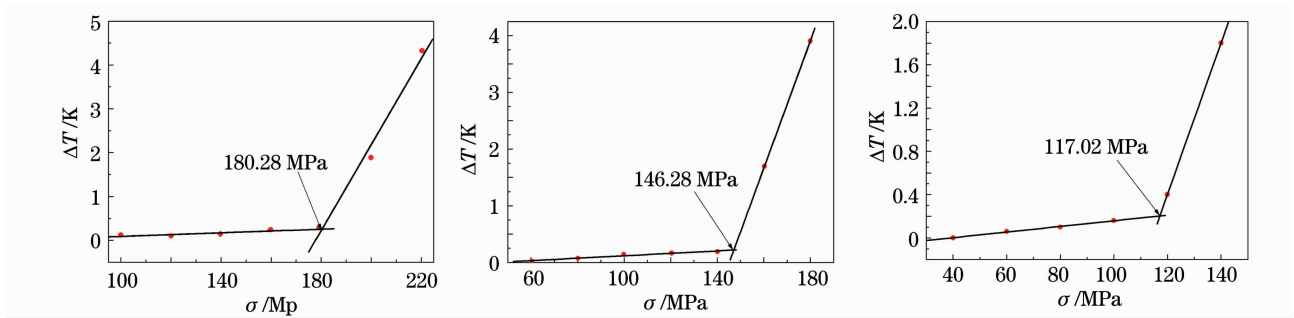


图 11 Luong 法确定的不同深度缺陷的疲劳极限

Fig. 11 Fatigue limit prediction of the specimen with different depth and defect using Luong method

## 6 结 论

运用红外锁相热成像技术对含缺陷的疲劳试样进行了无损检测,并在 MTS810 液压伺服疲劳试验机上进行了疲劳性能测试,结果表明:

- 1) 相位检测比幅值检测更清晰,并且相位检测受表面光洁度影响小,可以提供更多的缺陷内部信息;
- 2) 合理选择检测频率是锁相红外无损检测的关键。它和被检测试件的固有材料属性,缺陷的形状、面积、距表面深度有关;
- 3) 缺陷面积越大检测精度越高;
- 4) 含缺陷试件的疲劳极限,随缺陷深度的增加而降低。

## 参 考 文 献

- 1 Geng Rongsheng, Wu Keqin, Jing Peng *et al.*. AE monitoring of damages of central wing and outer panel jointing area during full-scale aircraft body fatigue test[J]. *NDT*, 2008, **30**(1): 37~41  
耿荣生, 吴克勤, 景鹏等. 全尺寸飞机机体疲劳试验时中央翼与外翼链接区域疲劳损伤的声发射监测[J]. *无损检测*, 2008, **30**(1): 37~41
- 2 Wang Wenyong, Wu Keqin, Zhang Ruilin *et al.*. The research about acoustic emission monitoring fatigue damages of aircraft key components[J]. *NDT*, 2009, **31**(6): 481~484  
王文友, 吴克勤, 张瑞林等. 飞机关键零部件疲劳损伤的声发射实时监测[J]. *无损检测*, 2009, **31**(6): 481~484
- 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 Mei Lin, Wu Lide, Wang Yuwen. A novel defect evaluation method in infrared NDT based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1452~1456  
梅林, 吴立德, 王裕文. 一种基于遗传算法的红外无损检测缺陷的新方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1452~1456
- 5 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
- 6 Li Yanhong, Zhao Yuejin, Feng Lichun *et al.*. Quality evaluation of carbon fiber floor coating with infrared thermal wave nondestructive test. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1489~1492  
李艳红, 赵跃进, 冯立春等. 碳纤维基体涂层质量的红外热波检测研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1489~1492
- 7 Liu Muhua, Chen Quansheng, Lin Huaiwei. The study of non-destructive measurement of fruit internal qualities using spectral imaging. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2042~2046  
刘木华, 陈全胜, 林怀蔚. 苹果糖度的光谱图像无损检测技术研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2042~2046
- 8 Huo Yan, Zhao Yuejin, Li Yanhong *et al.*. Comparison between pulse and lock-in infrared thermography technology. [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(6): 602~603  
霍雁, 赵跃进, 李艳红等. 脉冲和锁相红外热成像检测技术的对比性研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(6): 602~603
- 9 Wang Zijun, Liu Junyan, Dai Jingmin *et al.*. Heat transfer analysis and finite element simulation of phase infrared nondestructive testing. [J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2008, **27**(5): 361~364  
汪子君, 刘俊岩, 戴景民等. 相位法红外无损检测的传热学分析与有限元仿真[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(5): 361~364
- 10 Zhao Shibin, Zhang Cunlin, Wu Naiming *et al.*. Infrared thermal wave non-destructive in section for defects of polypropylene pipeline [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 456~460  
赵石彬, 赵存林, 伍耐明等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 456~460
- 11 M. P. Luong. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique [J]. *Mech. Mater.*, 1998, **28**(1-4): 155~163
- 12 G. M. Carlomagno, P. G. Berardi. Unsteady thermotopography in non-destructive testing [J]. *Proceedings of the III Infrared Information Exchange*, 1976: 33~40
- 13 G. Busse, D. Wu, W. Karpen. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Appl. Phys.*, 1992, **71**(8): 3962~3965
- 14 Huang Yi. Thermoelastic infrared image safe testing system [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2003, **3**: 202~205  
黄毅. 热弹性红外图像安全检测系统[J]. *中国科学院院刊*, 2003, **3**: 202~205
- 15 G. La Rosa, A. Risitano. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components [J]. *Int. J. Fatigue*, 2000, **22**(1): 65~73