

# 不同光学方法对蜂窝结构中脱粘缺陷检测

李慧娟<sup>1</sup> 霍雁<sup>2</sup> 蔡良续<sup>1</sup> 黄振华<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国航空综合技术研究所, 北京 100028; <sup>2</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100048)

<sup>3</sup>辽河石油勘探局锦州工程技术处, 辽宁 锦州 121209

**摘要** 航空领域为减轻结构重量并增加结构强度,大量采用复合材料及复合结构代替传统材料,尤其是蜂窝夹层结构以其比强度高及比刚度高的优点得到广泛应用。然而,这些结构在胶接过程中更容易出现粘接不良、脱粘等质量问题。传统检测方法难以对新型结构及新型缺陷类型进行准确检测,需要开展新型检测技术研究以适应实际检测生产需求。利用激光剪切散斑方法、锁相红外热成像、脉冲红外热成像检测方法对内部出现的脱粘缺陷进行检测已经得到越来越广泛的应用,然而此三种新型方法各有检测优势及局限性。利用此三种光学检测方法对蜂窝结构中模拟脱粘缺陷进行检测,从检测原理、适用范围、应用前景等方面对此三种方法的检测优越性及局限性进行比较。结果表明,此三种方法均能对脱粘缺陷进行准确检测,激光剪切散斑方法对粘接不良缺陷检测效果优于脉冲红外及锁相红外方法。

**关键词** 测量;红外锁相;红外脉冲;激光散斑;蜂窝结构

中图分类号 V214.6

OCIS 160.0160 090.0090 140.0140 350.0350

文献标识码 A

## Honeycomb Structures Using Different Optical Testing Methods

Li Huijuan<sup>1</sup> Huo Yan<sup>2</sup> Cai Liangxu<sup>1</sup> Huang Zhenhua<sup>3</sup>

<sup>1</sup>China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

<sup>2</sup>School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100048, China

<sup>3</sup>Liaohu Oilfield Jinzhou Engineering Technology Department, Jinzhou, Liaoning 121209, China

**Abstract** To reduce weight and improve strength in the aerospace industry, composite structure has gained popularity as a replacement for conventional materials and structures, such as adhesive bonding and honeycomb structure. However, the adhesive bonding process is more susceptible to quality variations during manufacturing than traditional joining methods. Shearography, lock-in thermography and pulsed thermography are widely used in the aerospace industry. The three techniques are often used to inspect for various aerospace applications, such as delaminations in composite structures or skin-to-core disbands in honeycomb structures. A study of detection honeycomb structures using the three non-destructive testing (NDT) methods is presented and their potential for inspecting disbanding are demonstrated. The advantages and disadvantages of these three techniques over other NDT methods are also outlined. Result shows that all the three NDT method are available to measuring the bonding process, and the shearography is the best.

**Key words** measurement; lock-in thermography; pulsed thermography; shearography; honeycomb structures

## 1 引言

随着航空技术的快速发展,战斗机结构中所用材料逐渐从以铝合金及钢为主向复合结构及复合材料逐步过渡。在第四代战斗机中,为得到大的推重比、满足强度及刚度要求、符合损伤容限设计要求,大量采用比强度、比刚度更高的环氧树脂、蜂窝夹层结构等轻质材料或结构。以 F-35 的验证机 X-32 为例,复合材料蜂窝夹层结构已广泛应用于前机身蒙皮、武器舱门、整体进气道、副翼、尾翼等关键部件中<sup>[1]</sup>。复合材料蜂窝夹

收稿日期: 2010-04-02; 收到修改稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目(T062007A002)资助课题。

作者简介: 李慧娟(1980—),女,硕士,工程师,主要从事航空、航天复合材料产品的红外与激光无损检测方面的研究。

E-mail: LHJ1900@126.com

层结构由于其结构制作特点,在使用过程中易产生脱粘缺陷。现有对其进行检测方法基本沿用金属材料的检测方法,由于复合材料蜂窝夹层结构与金属材料之间存在较大的物理及力学性能、结构特点和制造工艺等方面的差异,针对金属的检测方法并不能完全适用于复合材料蜂窝夹层结构件的检测需求<sup>[2]</sup>。目前各类光学检测方法以其非接触、无污染、不受工件几何外形和尺寸限制、全场检测、检测灵敏度高、检测速率高等特点被大量应用于复合材料蜂窝夹层结构中脱粘缺陷的检测<sup>[3]</sup>。

本文介绍了蜂窝夹层结构中典型脱粘缺陷的形成及特点,对适用于脱粘缺陷检测的不同光学方法进行研究,并分别对其适用性及优缺点进行了分析。

## 2 蜂窝夹层结构试件

### 2.1 实际缺陷类型

蜂窝夹层结构试件由蒙皮层、胶层和蜂窝芯子三大部分组成,蜂窝夹层结构中存在的缺陷类型包括:间隙型缺陷、紧贴型缺陷、弱胶接和芯子缺陷,其中间隙型缺陷是指被粘接物与胶层间或胶层中存在间隙的缺陷,包括:空洞、气泡和脱粘等。目前针对蜂窝夹层结构的实际检测中遇到最多的缺陷类型为脱粘缺陷。因此,对蜂窝结构中脱粘缺陷进行检测就变成航空领域中至关重要的工作。

蜂窝夹层结构在制作过程中,容易由于胶层不均匀或压制抽真空过程中的不当操作形成脱粘缺陷。脱粘缺陷可能出现在蒙皮与胶层之间或胶层与蜂窝芯子之间。由于碳纤维蒙皮蜂窝夹层结构产品生产成本高,不适用于利用现实产品进行理论研究,故选用飞机雷达罩及卫星产品中所使用的实际碳纤维材料制作模拟脱粘缺陷试件进行研究,其材料厚度、制作工艺完全与实际生产过程一致。

### 2.2 模拟缺陷试件

针对上述脱粘缺陷出现的不同位置,设计制作了两种不同制作工艺的人工模拟脱粘缺陷。选择蒙皮材料为碳纤维材料,蒙皮厚度为 0.5 mm;蜂窝芯材料为铝,蜂窝芯格边长为 5 mm,高度为 10 mm。内部分别预置四排缺陷,前两排为一组圆形缺陷,缺陷位置分别为蒙皮以下及胶层以下,大小分别 5, 10, 15, 20, 25 及 30 mm,后两排为方形缺陷,缺陷位置及大小与前两排相同。

## 3 脉冲红外热成像检测方法

### 3.1 脉冲红外热成像检测原理

脉冲红外热成像检测方法检测原理如图 1 所示。用一束强脉冲热流照射被测物体表面,同时利用热像仪记录被测物体表面在加热-冷却过程中温度场变化过程。根据热传导理论,物体内部存在缺陷部分与无缺陷部位热物理性质不同而形成热流不均匀,从而物体表面的温度也不均匀。根据热像仪采集物体表面的温度数据即可分析缺陷存在的位置。

### 3.2 脉冲红外热成像试验装置

实验采用美国 TWI 公司生产的红外热波检测系统,包括脉冲热源、红外热像仪和数据分析软件三部分。其中红外热像仪为 FLIR 公司生产的 ThermaCAM<sup>TM</sup>SC3000 型,图像大小为 320 pixel×240 pixel,工作波段为 8~9 μm,利用 Echo Therm 软件进行数据处理。加热源为大功率闪光灯<sup>[4]</sup>。

### 3.3 脉冲红外热成像检测结果

闪光灯加热试件表面时,热像仪记录试件表面温度场,计算机软件对实时图像序列进行处理和分析后得到红外热像序列图。可以利用软件对检测结果中缺陷大小及缺陷位置进行分析计算。

利用不同方法模拟形成的脱粘缺陷热物理性质存在差异,缺陷所处位置不同,随时间延长而逐渐清晰。图 2 为对模拟脱粘缺陷试件进行检测时不同时刻所显示的热图。图 3 给出了对检测得到缺陷进行尺寸测量时结果。

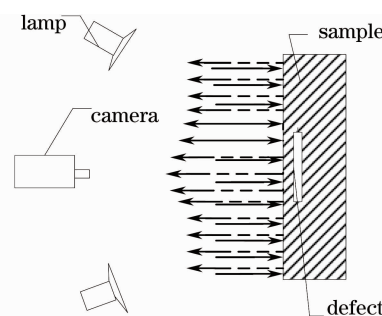


图 1 脉冲红外热成像检测原理图

Fig.1 principle of pulse thermography

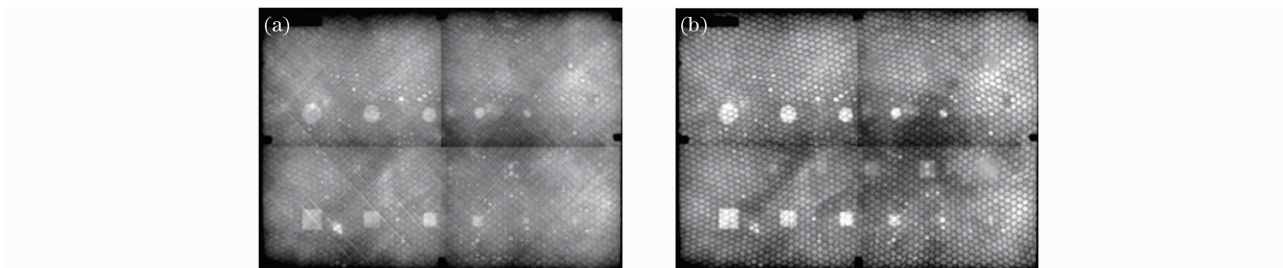


图2 0.184 s(a),0.501 s(c)时刻热图

Fig. 2 Thermal image at 0.184 s (a) and 0.501 s (b)

从图2中可以看出在0.184 s时能够在热图中读取第二与第四排缺陷,随着时间的延长,第一与第三排缺陷在0.501 s时才逐渐显现。由于第二排与第四排中模拟缺陷采用去胶层方法,缺陷位置完全是空气,而第一排和第三排中加两层聚四氟乙烯方法,无形中增加了缺陷深度,导致缺陷显现时间滞后于其他两排。随着时间延长第一排与第三排缺陷逐渐清晰,全部缺陷均在一幅热图中显示出来。对检测结果进行尺寸标定,以第一排为例从左到右缺陷分别为1号至6号,测量检测结果大小,将其与设计图中缺陷大小进行比较结果如表1所示。

表1 检测结果与设计结果误差

Table 1 Error between design and measurement

| Mark        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Measure /mm | 7.683 | 10.47 | 15.36 | 19.55 | 24.44 | 32.13 |
| Design /mm  | 5.0   | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    |
| Error /%    | 53    | 4.47  | 2.45  | 2.21  | 2.24  | 7.1   |

对检测结果进行尺寸测量时会与设计尺寸存在一定误差,主要是由于红外热成像检测方法探测到的是热辐射量,并且通过人直观观察对缺陷进行测量,无论是热在传递过程中产生的热扩散,还是检测人员的主观判定能力,均会导致测量值与实际值之间产生差异。从表1中可以看出,测量误差随着缺陷尺寸的不断减小而逐渐增大。如果希望对小缺陷进行精确测量,一方面需要提高热像仪检测灵敏度,另一方面根据需提高检测空间分辨率。

## 4 锁相红外热成像检测方法

### 4.1 锁相红外热成像检测原理

由于按正弦规律变化的加热条件,在构件表面引起的温度变化也为正弦规律变化,构件表面温度以加载频率振荡变化,其幅值与相位与材料的传热特性有关,当构件内部存在缺陷时,则在构件有缺陷处与物缺陷处在构件表面引起的温度变化将产生幅值和相位的差异,通过计算构件表面温度变化的相位图和幅值图可确定缺陷的特征,此即为锁相红外热成像检测。图4给出了采用红外锁相热像技术进行无损检测的原理。由图中可知,当加热条件按正弦规律变化时,构件的表面温度也按正弦规律变化,且存在缺陷的位置引起表面温度变化与无缺陷处的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<sup>[5,6]</sup>。

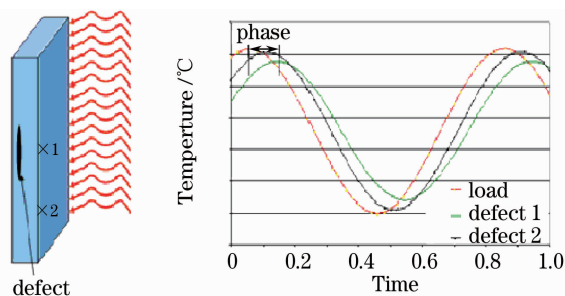


图4 锁相红外热成像检测原理

Fig. 4 Principle of lock-in thermography

### 4.2 锁相红外热成像检测试验装置

实验采用法国 CEDIP 公司生产的 JADE III 型红外



热像系统<sup>[7]</sup>,包括锁相调制热源、红外热像仪、信号发生器和数据分析软件。热像仪图像大小为 256 pixel×256 pixel,空间分辨率小于 25 μm,最高帧频 1500 Hz;信号发生器在保证频率范围的前提下自己组装;热源能够根据信号发生器产生的信号进行周期性变化;软件为基于图像序列处理的红外锁相热成像软件。

### 4.3 锁相红外热成像检测结果

某一周期性频率热波注入到被检物体表面后,由于物体内部温度差异将会产生对流和辐射,导致待检表面温度产生相应的周期性变化<sup>[8]</sup>。利用红外热像仪实时记录待检物体表面温度变化过程及反射热波,利用图像处理软件将反射热波与注入物体原始热波进行比较,从而对检测结果中缺陷大小及缺陷位置进行分析计算。图 5 给出利用不同频率对试件进行检测时检测结果。

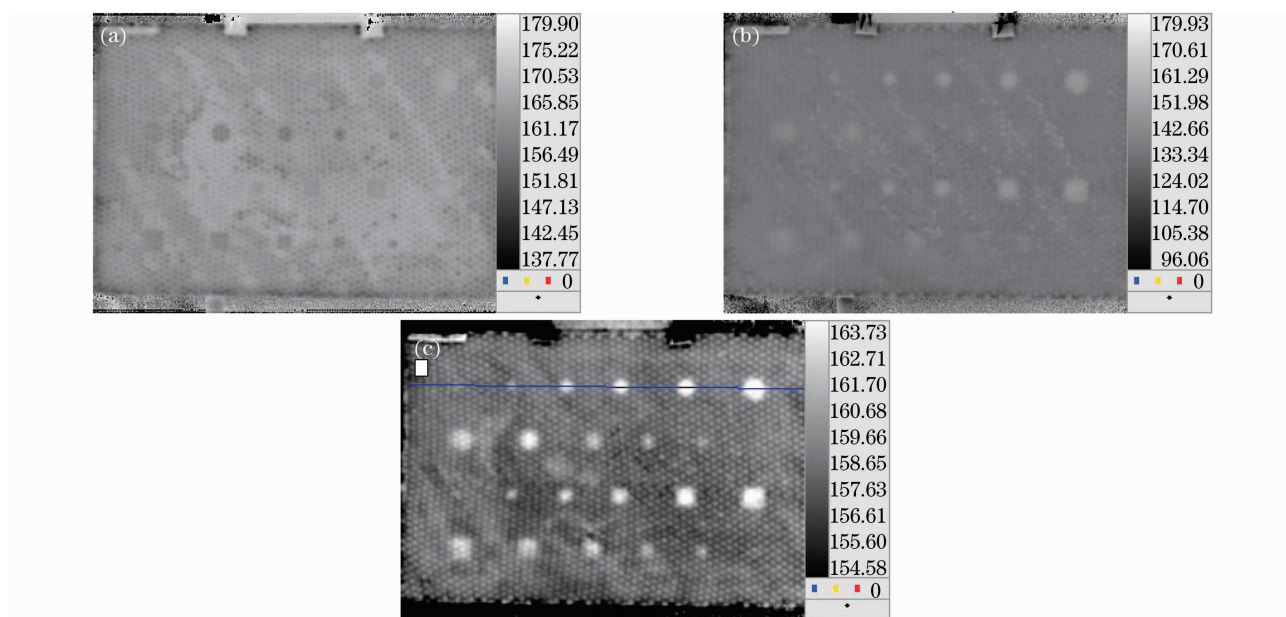


图 5 加载频率为 0.2 Hz(a),0.1 Hz(b)和 0.14 Hz(c)时相位结果

Fig. 5 Phase images of 0.2 Hz (a), 0.1 Hz (b) and 0.14 Hz (c) stimulation frequency

从图 5 可以看出,加载频率选择 0.2 Hz 时第二与第四排缺陷被清晰呈现出来,减小加载频率至 0.1 Hz 时第一与第三排缺陷被清晰呈现出来。根据热扩散长度计算公式可知,加载频率与缺陷深度平方成反比关系,因此,第二和第四排缺陷相对与第一和第三排缺陷而言,其埋藏深度较浅。这一结论与脉冲红外热成像检测方法所得到的结论一致。

选择加载频率为 0.14 Hz 时检测结果对缺陷尺寸进行测量,此时四排缺陷能够在同一图像内清晰呈现。图 6 给出图 5 中第一排标线位置各点相位值,根据半峰全宽原理对缺陷进行尺寸标定。

从图 6 可见,随着缺陷尺寸不断减小,缺陷与完整部位相位差逐渐减小。当采用半波宽原理对缺陷尺寸进行标定时,尺寸测量精度同样随缺陷减小而逐渐降低。

利用锁相红外热成像方法进行时,加载频率是至关重要的影响因素,锁相红外探测深度随加载频率减小而逐渐增加。缺陷部位与完整部位之间相位差随缺陷深度增加而逐渐减小,随缺陷尺寸减小而逐渐降低。

## 5 激光剪切散斑检测方法

### 5.1 激光剪切散斑检测原理

电子剪切散斑干涉也称为电子错位散斑干涉,属于激光光学计量术,它基于激光散斑效应,在用激光照

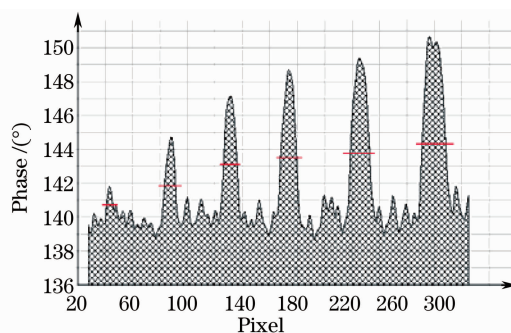


图 6 标线 1 上各缺陷点相位值

Fig. 6 Phase of defined defect

射粗糙表面时发生的现象。激光电子剪切散斑干涉法是在激光全息干涉法基础上,利用单色光束实现干涉。

其检测原理如图 7 所示:一束激光扩束后投射到被测量表面上,反射光(也称物光)直接投射到摄像机(CCD),摄像机前的剪切镜将此反射光分为稍微错开的两个图像。这两束光互为物光、参考光,发生干涉,摄像机记录干涉的斑点图像。分别记录对被测量表面施加力加载前后的散斑干涉图。且对这两幅散斑干涉图,进行数字图像处理,得到的干涉条纹可以显示出斑点结构中的变化,反映了被测物体的表面位移或变形的变化<sup>[9,10]</sup>。根据这些数据,可以获得被测物体的变形,位移,应变,应力集中,振动模式以及更多的信息。

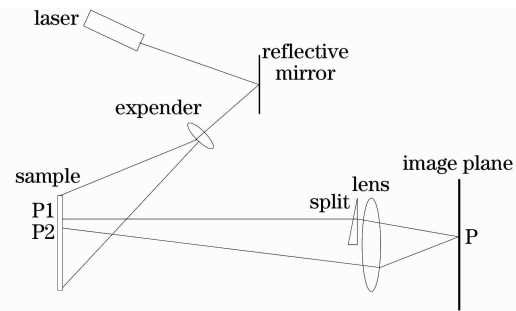


图 7 激光剪切散斑检测原理图

Fig. 7 Principle of shearography

## 5.2 激光剪切散斑检测试验装置

激光剪切散斑检测是对工件进行加载调节下的无损检测,实际检测系统主要由激光电子散斑探头、探头操纵遥控装置、散斑图像处理显示单元和加载单元构成,加载单元一般有热加载、真空加载、振动加载、压力加载、微波加载形式,采用最常用的热加载装置(红外热辐射石英灯)和真空加载装置(便携式真空罩)。

采用美国 LTI 公司生产的 LTI-5100 激光剪切散斑检测系统,包括相机、加载装置和激光器三部分。相机为 LTI-5100 数字激光剪切散斑相机;激光器为钷榴石抽运激光器,波长为 532 nm,能量为 150 mJ;加载选择热加载方式,选用一只 1 kW 的石英灯作为热源进行加载。

## 5.3 激光剪切散斑检测结果

试验在室温下进行,调节激光焦距使试件能够全部位于激光照射范围内,调节相机焦距和剪切角使利用石英灯进行热加载。由于受加载面积条件限制,需要对待检测试件进行多次分区处理,现只对图 1 中方框以内区域进行分析,检测结果如图 8 所示。

图 8 中在检测范围内只有第二排缺陷显现出来,这主要与激光剪切散斑方法检测特点有关。激光剪切散斑方法是利用材料内部微缺陷(如微空洞、微裂纹等)使其内部粘聚力逐渐减弱,在载荷作用后产生微小形变,通过对位移量差异的测量而进行检测<sup>[11]</sup>。

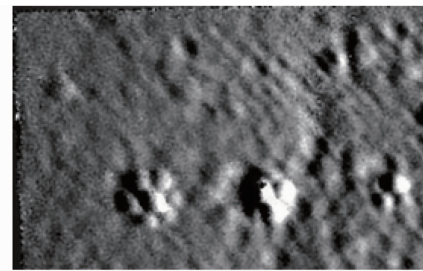


图 8 激光剪切散斑检测结果图

Fig. 8 Result of shearography

当材料内部没有缺陷时,材料加载后发生的形变的梯度可以看作是连续的。此时剪切散斑图上表现出来的散斑条纹是圆滑的。当材料的内部有缺陷时,则材料在缺陷处是不连续的。因此,当材料加载发生形变时,缺陷处的形变梯度会发生较大变化,反映在剪切散斑图上所对应的干涉条纹的形状、间距和取向不同于周围无缺陷区域的干涉条纹,所以可作为无损检测缺陷的判别标准。

试件内部所设计的四排缺陷制作工艺不同,第二排缺陷为去除胶层缺陷,此时在蒙皮与蜂窝芯之间是完全脱粘情况,而第一排是在去除胶层后加入两层聚四氟乙烯膜,这会在蒙皮与蜂窝芯之间产生弱连接,出现粘接不良现象。粘接不良型缺陷在检测加载过程中产生的位移量远小于完全脱粘型缺陷,如果其移动距离的数量级与激光波长的数量级一致,利用激光剪切散斑方法将不能对其进行探测。在此试件中利用加入聚四氟乙烯膜方法模拟的脱粘缺陷为粘接不良型缺陷,难以利用激光剪切散斑方法进行检测。

## 6 结 论

本文介绍的脉冲红外热成像、锁相红外热成像和激光剪切散斑检测均为光学检测方法,它们对于碳纤维蒙皮蜂窝夹层结构中的脱粘缺陷均有良好的检测效果,有其各自不同的特点及适用性:

1)与传统军工产品检测中常用的超声 C 扫描方法相比,三种检测方法均可以应用于现场检测或在役结构检测。

2)三种光学检测方法均为非接触性、快速检测,适用于对缺陷进行快速定位测量。

3) 脉冲红外热波成像检测方法是根据不同材料的热导率不同这一原理进行检测, 只要材料不同就会产生热传导的不一致性, 从而对检测脱粘缺陷、粘接不良缺陷、夹杂、积水等均有良好效果。

4) 锁相调制红外热波成像检测方法同样适用于对热传导特性存在差异的材料进行缺陷检测, 其相位值信息能够更完善反映缺陷边界轮廓, 能够在一定程度上缓解热扩散对检测结果的影响。

5) 激光剪切散斑方法通过微小变形体现脱粘缺陷, 当缺陷为完全脱粘缺陷时检测效果较好, 当缺陷为弱连接或粘接不良时不易发现缺陷, 其适用范围受到一定限制。

### 参考文献

- 1 G. Sun, X. Wang, Z. J. Feng *et al.*. Imaging and quantitative measurement of corrosion in painted automotive and aircraft structures[J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2000, **19**: 603~607
- 2 Yang Xiaolin, Dai Yongchao, Li Yanhong *et al.*. Application of the thermal wave testing technology in composites of airplane[J]. *Non-destructive testing*, 2007, **4**(29): 200~202  
杨小林, 代永朝, 李艳红 等. 红外热波技术在飞机复合材料损伤检测中的应用[J]. *无损检测*, 2007, **4**(29): 200~202
- 3 Li Huijuan, Wu Dongliu, Wang Juntao *et al.*. Testing honeycomb structure by different methods[J]. *Non-Destructive Testing*, 2009, **2**(33): 9~12  
李慧娟, 吴东流, 王俊涛 等. 铝蒙皮蜂窝夹层结构的无损检测方法[J]. *无损探伤*, 2009, **2**(33): 9~12
- 4 Jiang Shufang, Shen Jingling, Yang Danggang *et al.*. Infrared thermal wave nondestructive testing of aluminum honeycomb composite for bonding defects[J]. *Non-Destructive Testing*, 2006, **1**(28): 23~25  
蒋淑芳, 沈京玲, 杨党纲 等. 铝蜂窝胶接缺陷的红外热波无损检测[J]. *无损检测*, 2006, **1**(28): 23~25
- 5 G. Busse, D. Wu, W. Karpen. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, **01**: 3962~3965
- 6 Liu Junyan, Wang Yang, Dai Jingmin. The study on infrared lock in thermography technology based on image sequences processing[J]. *Laser and Infrared*, 2008, **7**(38): 654~658  
刘俊岩, 王洋, 戴景民. 基于图像序列的红外锁相热像检测技术研究[J]. *激光与红外*, 2008, **7**(38): 654~658
- 7 Wang Yongmao, Guo Xingwang, Li Rihua. Measuring defect diameter and depth in infrared testing[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **6**(32): 404~406  
王永茂, 郭兴旺, 李日华. 红外检测中缺陷大小和深度的测量[J]. *激光与红外*, 2002, **6**(32): 404~406
- 8 D. Wu, T. Zweschper, A. Salerno *et al.*. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of aero space structures[J]. *NDT*, 1998, **3**(9)
- 9 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601  
李晓峰, 徐军, 张胜修 等. 激光主动成像图像边缘检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1599~1601
- 10 Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang *et al.*. Laser speckle reduction in retina imaging illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2245~2249  
李抄, 姜宝光, 夏明亮 等. 用于人眼视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 11 Li Huijuan, Shuai Jiasheng. Laser shearography test method used for honeycomb structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(S): 324~329  
李慧娟, 帅家盛. 基于激光剪切散斑技术的蜂窝夹层结构检测[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(增刊): 324~329