

# 碳纤维增强复合材料层压板低速冲击损伤的脉冲红外热像检测

冯立春<sup>1</sup>, 陶宁<sup>1</sup>, 杨小林<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学物理系, 北京 100048, 2. 空军第一航空学院, 信阳 464000)

**摘要:** 碳纤维增强复合材料具有高比强度, 在航空航天领域内得到越来越广泛的应用。对五种不同冲击能量下的碳纤维增强复合材料层压板进行了脉冲式红外热像检测。利用外加的瞬时或交变温场, 用红外热像仪记录了试件在外加温场下的表面温度变化。将采集到的数据信号根据外加热类型进行了处理, 处理结果以图像或图像序列形式显示, 并用超声 C 扫描方法对检测结果进行了验证。

**关键词:** 红外检测; 脉冲热像法; 冲击损伤; 碳纤维复合材料

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2009)12-0977-03

## Inspection of Low Speed Impact Damage of CFRP with Pulsed and Lock-in Thermography

FENG Li-Chun<sup>1</sup>, TAO Ning<sup>1</sup>, YANG Xiao-Lin<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Carbon fiber reinforced plate(CFRP) was widely used in aero industry for its high strength and low weight. CFRP plates with five different impact energies were inspected by pulse thermography. With transient or modulated temperature field applied on object sample, surface temperature variation was recorded by infrared camera. After acquisition, the data was processed according to corresponding heating type and the results were given as graphs. Ultrasonic C-scan was used as validation.

**Keywords:** Infrared testing; Pulsed thermography; Impact damage; Carbon fiber reinforced plate

纤维增强复合材料因其优良的比强度及比模量, 在航空航天领域得到了越来越广泛的应用。如波音公司的 787 飞机, 复合材料的用量已达到总重量的 50%。

对复合材料进行快速有效的检测, 已成为复合材料制造及使用者的迫切需求。复合材料在制造和使用过程中常见的一种损伤是冲击损伤, 特别是低速冲击损伤, 如磕碰及撞击等。冲击会带来如分层、基体开裂等结构破坏, 进而影响复合材料的强度, 且此种损伤常常不是表面目视可检, 而存在于表面下方。

红外热像检测是近年来发展起来的一种主动式

红外检测方法。其非接触、快速的特点很适合复合材料低速冲击损伤的快速检测。

### 1 基本原理

红外热波检测将外加的瞬时或调制热源施加到被测物上, 热像仪采集被测物表面的温度信号, 并根据相应的物理模型进行数据处理<sup>[1-4]</sup>。根据加热方式及相应数据处理方法的不同, 主动式红外检测一般可分为脉冲激励或调制激励, 热源一般为红外热灯, 也可以使用超声或电磁激励方式来对被测物进行加热。

对于脉冲加热方式, 根据瞬时加热模型及一维热传导模型, 可得出表面温度  $T$  随时间  $t$  变化的解析解。热传导公式为:

收稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10502035)

作者简介: 冯立春(1974—), 男, 讲师, 主要从事红外无损检测研究。

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

假设被测物由两层物质组成,上层物质厚度为  $d$ ,其被瞬时加热后,表面温度随时间变化为:

$$T(0, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\pi e_1} \sqrt{t}} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \right)^n e^{-\frac{n^2 d^2}{\alpha_1 t}} \right) \quad (2)$$

式中  $Q_0$  为瞬时加热脉冲的能量;  $e_1$  和  $e_2$  分别为两种物质的热扩散系数;  $\alpha$  为热扩散率。

根据上述数学模型,可由记录的表面温场中缺陷出现的时间,结合材料的性质,进行表面下缺陷深度的反演计算<sup>[5]</sup>。

对采集的数据进行处理,可进一步增强信号并消除噪声影响。其中,对各像素点对应的温度-时间对数曲线进行多项式拟合是一种很有效的办法<sup>[6]</sup>。此方法可以有效地降低噪声而且可以方便地进行微分等增强处理。

脉冲式红外热像方法检测速度快,对导热速度比较快的金属材料(如 1 mm 厚的铝飞机蒙皮)只需要 10 s 左右即可完成一个视场的数据采集及信号重建。

## 2 冲击试验板检测结果及分析

试验所用试件纤维及基体材料分别为 T300/QY8911,尺寸为 89 mm × 55 mm,铺层方向  $[0/90]_{2S}$ ,16 层。低速冲击试验所用冲头为 20 mm 直径的钢质半球。试验使用冲击能量为 2~6 J,共两组 10 块试件。试件编号及对应的冲击能量见表 1。

表 1 试件编号及冲击能量

试件编号	冲击能量/J	试件编号	冲击能量/J
1, 2	2	7, 8	5
3, 4	3	9, 10	6
5, 6	4		

试验所用脉冲热像系统使用高能闪光灯作为外加热源,脉冲能量为 9.6 kJ。数据采集使用 Flir 公司 SC3000 制冷型量子阱探测器热像仪,等效噪声温差为 30 mK,采集频率为 60 Hz。

脉冲式红外热像检测结果如图 1 和 2 所示。由两组检测结果可知,损伤区域基本呈现以受冲击点为中心的椭圆形状<sup>[7]</sup>。根据对热图序列的分析,冲

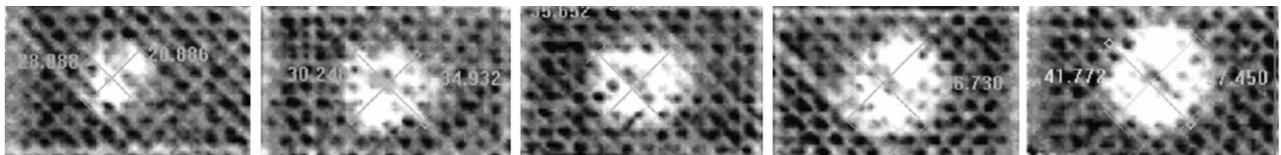


图 1 第 1 组试件红外检测结果

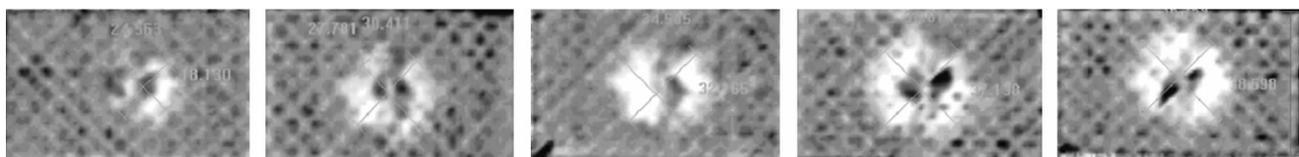


图 2 第 2 组试件红外检测结果

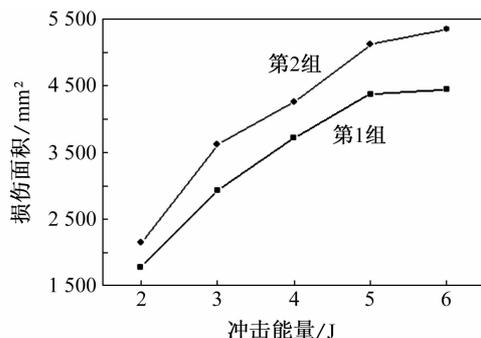


图 3 损伤面积随冲击能量的变化

击能量沿纤维方向传播快,随冲击能量向下传播时,能量亦沿纤维方向传播,从而在热图序列呈现损伤区随时间“旋转”的效果<sup>[8]</sup>。

冲击损伤区面积与冲击能量的关系如图 3 所示。可见,两组试件损伤区域的面积都随冲击能量增加而增加。

## 3 验证试验

作为验证,试件进行了超声 C 扫描检测,结果见图 4 和 5。

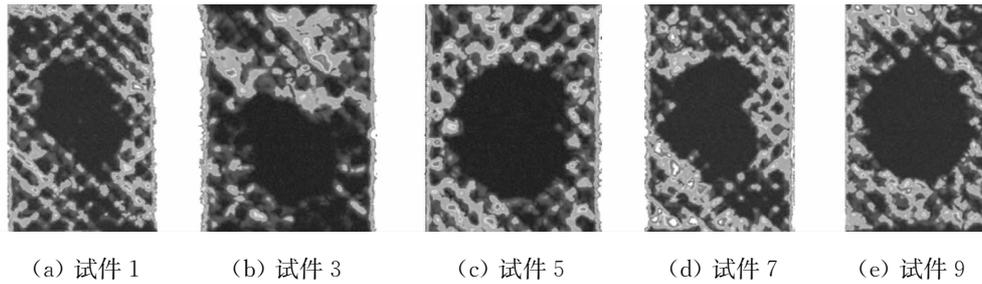


图4 第1组的超声C扫描结果

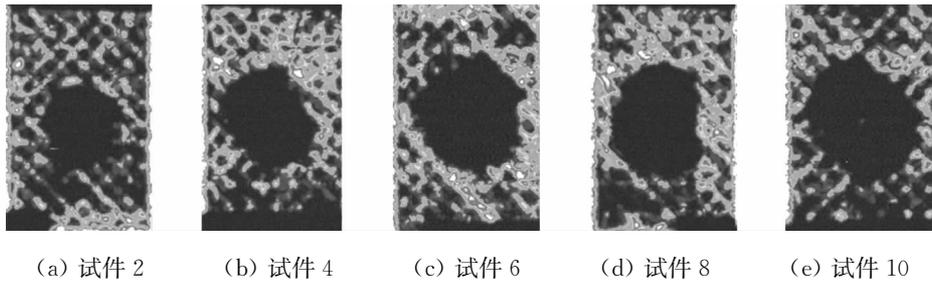


图5 第2组的超声C扫描结果

#### 4 结语

采用2~6 J的冲击能量对两组共10块碳纤维增强层压板进行了冲击损伤试验,并使用超声C扫描方法进行了验证。试验结果表明,脉冲加热红外热像检测方法是一种适用于复合材料冲击损伤的快速检测方法。

#### 参考文献:

- [1] Busse G, Wu D, Karpea W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography[J]. J Appl Phys, 1992(71):3962-3965.
- [2] Parker W J, Jenkins R J, Butler, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. J Appl Phys, 1961(32):1679-1684.
- [3] Sun J G. Analysis of pulsed thermography methods for

defect depth prediction[J]. Journal of Heat Transfer, 2006(128):329-338.

- [4] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, et al. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences[J]. Opt Eng, 2003(42):1337-1342.
- [5] Sun J G. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction[J]. Journal of Heat Transfer, 2006(128):329-338.
- [6] Schroeder J A, Ahmed T, Chaudhry B, et al. Nondestructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography[J]. Composites: Part A, 2002(33):1511-1517.
- [7] Gomez-del Rio T, Zaera R, Barbero E, et al. Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature[J]. Composites: Part B, 2005(36):41-50.
- [8] Bates D, Smith G, Lu D, et al. Rapid thermal nondestructive testing of aircraft components[J]. Composites, 2000(31):175-185.

(上接第976页)

型及解决的技术途径[J]. 推进技术, 1996, 17(1):89.

- [2] 隋兴堂, 杨兴根. 火箭发动机界面脱粘分析及检测新方法[J]. 飞航导弹, 2001(1):43-46.
- [3] 李芳. 固体火箭发动机包覆层状态识别的研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
- [4] 李明轩. 粘接质量超声检测研究[J]. 应用声学, 2002, 21(1):7-12.
- [5] 党长久, 李明轩. 超声在固体火箭发动机无损检测中的应用[J]. 应用声学, 1994, 14(5):32-38.
- [6] 陈友兴, 王召巴. 自适应滤波在多界面超声检测中的应

用[J]. 中国测试技术, 2006, 32(4):57-58.

- [7] 龚雄襄. 自适应滤波(时域自适应滤波和智能天线)第二版[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [8] 王勇. 声-超声材料检测技术研究[D]. 北京:清华大学, 2000.
- [9] 童谷生. 用于结构损伤评估中的应力波因子技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2000.
- [10] Reifsnider K. Feasibility of useful real-time in-process evaluation of laminates[M]. Lancaster: Ashbee(ed), polymer NDE technomic pub, 1986:104-115.