

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0277-05

# 脉冲红外热成像对于碳纤维复合材料检测能力的研究

霍 雁<sup>1</sup> 李慧娟<sup>2</sup> 赵跃进<sup>1</sup> 张存林<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081; <sup>2</sup> 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

<sup>3</sup> 首都师范大学物理系, 北京 100048

**摘要** 复合材料的主要缺陷有分层和脱粘等。脉冲红外热成像技术作为一种新型的无损检测技术,目前在航空航天领域得到了越来越广泛的应用。研究了脉冲红外热成像技术对碳纤维复合材料的检测能力,通过理论建立评价脉冲红外热成像检测分辨能力的依据,并且在实验上利用碳纤维复合材料设计了不同深度、不同大小和不同相邻间距的脱粘模拟缺陷,进行了脉冲红外热成像技术对碳纤维复合材料检测能力的实验研究。实验结果证明脉冲红外热成像技术对于蒙皮厚为 1 mm 和 0.5 mm 的预制缺陷均可检测,通过检测结果分析了缺陷的大小、缺陷的深度和相邻缺陷的间距对检测能力的影响。为脉冲红外热成像检测碳纤维复合材料提供了一定的理论和实验参考。

**关键词** 信号处理;检测能力;脉冲红外热成像;复合材料

中图分类号 TN219 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0277

## Study on the Detectability of Carbon Fiber Reinforced Plastics Composites Using Pulsed Infrared Thermography

Huo Yan<sup>1</sup> Li Huijuan<sup>2</sup> Zhao Yuejin<sup>1</sup> Zhang Cunlin<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China  
<sup>2</sup> China Aero-Polytechnique Establishment, Beijing 100028, China  
<sup>3</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Composite material is normally affected by anomalies such as delaminations and disbandings. Pulsed thermography is a new non-destructive inspection technology, which has been widely used in aerospace. In this paper, the detectability of pulsed infrared thermography is studied by establishing the theory for the detect ability of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). Meanwhile by utilizing the designed specimens buried with different depths, different sizes and different distances between adjacent flaws to represent disbonding and delamination in the CFRP composite material. The detectability of CFRP composites using pulsed infrared thermography is experimentally studied. The results of the experiment show that the designed defects in the CFRP with thickness of 0.5 mm and 1.0 mm are all detected. Meanwhile, the relationship between depth size and distance of adjacent flaws and detectability are analyzed. According to this study, it will provide some theoretical basis and experimental references for the inspection of the CFRP composites.

**Key words** signal processing; detectability of carbon fiber reinforced plastics; pulsed thermography; composite

## 1 引 言

碳纤维是一种力学性能优异的新材料,由于碳

纤维具有高比强度、低热膨胀系数和高导热性等独特性能,因而由其增强的复合材料用作航空航天结

收稿日期: 2010-01-28; 收到修改稿日期: 2010-04-05

基金项目: 国家 973 计划(2006CB605305)和国防科技工业技术基础科研项目(T062007A002)资助课题。

作者简介: 霍 雁(1982—),女,博士研究生,主要从事红外热成像和锁相红外热成像技术等方面的研究。

E-mail: huoyan3422@163.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,博士,教授,主要从事太赫兹成像技术、基于微机电系统(MEMS)的红外成像技术、空间光学技术和智能光电仪器研制等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

构材料减重效果十分显著。复合材料由于其优异的特性,广泛应用于航天飞机舱门、机械臂、压力容器火箭、导弹和人造卫星展开式太阳能电池板等方面。随着碳纤维和基体树脂性能的不断提高,在飞机上的应用已由次承力结构材料发展到主承力结构材料,拓宽了在飞机工业中的应用。

由于复合材料制作过程复杂,并且在各种环境下又极易受到损伤,所以缺陷的产生不可避免。复合材料常见的缺陷有分层、脱粘和蜂窝积水等,复合材料界面结合状况是影响复合材料性能的重要因素<sup>[1,2]</sup>。复合材料界面发生脱粘,将影响复合材料力学性能的传递,造成应力集中,界面脱粘处成为裂纹源,发生裂纹萌生和失稳扩展,最终导致整个材料断裂破坏<sup>[3]</sup>,因此对复合材料的检测极为重要。复合材料的无损检测技术发展很快,常用的超声和射线检测等方法可以提供一定的缺陷信息。对复合结构,蒙皮一般较薄,超声检测需要耦合剂,由于盲区的存在用超声 C 扫检测不易检测到蒙皮下的粘结及蜂窝缺陷;而 A 扫是单点波形观察,人工判读,检测速度慢。利用射线检测则会对人体造成伤害。红外热波无损检测技术是无损检测中的一门新技术,克服了以上缺点。红外热波无损检测技术具有非接触、快速、热图判断直观的优点,可以直接得到缺陷所在位置和尺寸,不受检测对象的形状或结构的限制,检测结果对曲面的影响较小<sup>[4,5]</sup>。红外热波无损检测技术是一种创新性的无损检测技术,其核心是设计和选择不同特性的热源或机械振动对各类试件进行周期、脉冲和阶梯等函数形式的激励;采用现代红外成像技术,在计算机控制下进行时序热波信号的探测和数据采集;使用根据热波理论模型和现代图像处理理论模型而研制的专用计算机软件进行实时图像信号处理和分析<sup>[6,7]</sup>,目前广泛地应用于航空航天产品的检测。国内外主要利用红外热成像技术对复合材料检测进行了研究<sup>[8]</sup>,对飞机复合材料进行了冲击研究<sup>[9]</sup>以及对复合材料进行了损伤面积的研究<sup>[10]</sup>等。这些都集中于实验研究,但是利用红外热成像对复合材料进行检测能力的研究尚未有过报道。

本文利用脉冲红外热成像对碳纤维蒙皮铝蜂窝夹芯结构复合材料的检测能力进行了初步研究。主要研究了碳纤维复合材料(CFRP)中不同深度、不同大小和不同相邻间距的脱粘模拟缺陷对脉冲红外热成像检测能力的影响。

## 2 脉冲红外热波检测技术的特点及检测能力分析

脉冲红外热成像技术是一种主动式的热成像技术,对被检测物施加均匀的平面热源,被检测物表面及表面下的物理特性和边界条件会以特定方式影响热的传输,并以某种方式在被检测物表面的温场变化上反映出来。通过热像仪采集到的被检测物的表面温场信息可以反映被检测物的内部信息。

脉冲红外热成像无损检测技术检测能力主要取决于试件中有缺陷和无缺陷区域所对应表面温度差值的大小,只计热波在缺陷表面的一次反射,可得缺陷对应表面中心温度与无缺陷表面温度之差<sup>[11]</sup>为

$$\Delta T(0, t) = T_{\text{defective}}(0, t) - T_{\text{non-defective}} = \frac{I_0}{\sqrt{\pi\rho c\kappa t}} \left\{ \exp\left(-\frac{z^2}{\alpha t}\right) - \exp\left[-\frac{(z + \sqrt{z^2 + D^2})^2}{4\alpha t}\right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为单位时间内单位面积上的热流密度,  $\rho, c, \kappa$  分别为材料的密度、热容和热传导系数,  $\alpha$  是热扩散系数, 满足  $\alpha = \kappa/\rho c$ 。  $D$  为缺陷的直径,  $z$  为缺陷的深度。

物体内的缺陷若能被检测到,则有缺陷和无缺陷区域所对应表面温度差必须大于红外热像仪的最小温度分辨率,这里用  $T_0$  代表红外热像仪的最小温度分辨率,因此可得缺陷能被系统检测到的条件为

$$\Delta T(x = 0, t) \geq T_0, \quad (2)$$

即

$$\Delta T(0, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi\rho c\kappa t}} \left\{ \exp\left(-\frac{z^2}{\alpha t}\right) - \exp\left[-\frac{(z + \sqrt{z^2 + D^2})^2}{4\alpha t}\right] \right\} \geq T_0. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,脉冲红外热成像对缺陷的探测能力与缺陷的尺寸和深度等因素有关。对于给定的材料和检测系统,探测能力还与相邻缺陷的间距有关。由于热像仪监测被检测物表面采集到的是其表面的红外辐射,被检测物表面的温度变化是由被检测物表面红外辐射的强弱体现的,所以在这里,一律用有缺陷区域和无缺陷区域的表面红外辐射差来体现表面温差。

## 3 实 验

### 3.1 材料

这里所采用的复合材料是碳纤维蒙皮蜂窝结构

材料,它由三层材料组成,中间是铝蜂窝核,两侧覆盖薄板。盖板采用碳纤维层压板,蜂窝和盖板之间都是用胶粘结的,这种结构中通常存在的缺陷类型有分层、脱粘和蜂窝芯积水等。分层出现在碳纤维蒙皮板中;脱粘通常由于胶层不均匀或压制抽真空过程中的不当操作形成。脱粘缺陷可能出现在蒙皮

与胶层之间、胶层与蜂窝芯子之间。利用脉冲红外热成像技术对这种材料的脱粘缺陷的探测能力进行研究,通过去除蒙皮与蜂窝芯子之间的胶层、在蒙皮与胶层之间添加聚四氟乙烯膜模拟脱粘缺陷、在蒙皮与蜂窝芯之间形成空气隙模拟脱粘缺陷,具体见图 1 所示。

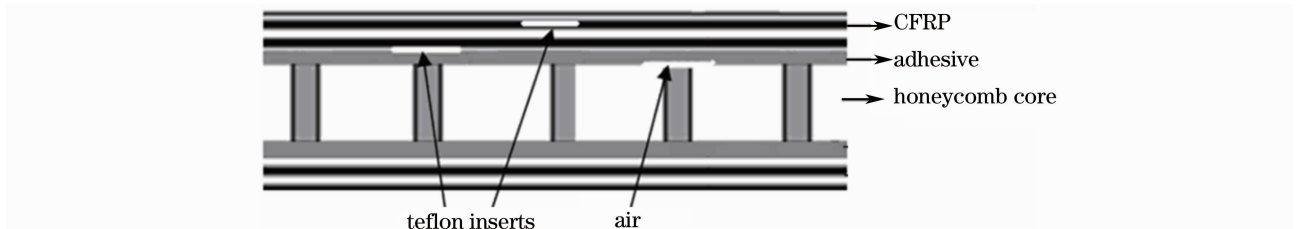


图 1 碳纤维复合材料模拟缺陷分布图

Fig. 1 Distribution of the designed debonding defects in CFRP

实验所用的复合材料共三块试件,分别模拟不同深度、不同大小和不同相邻间距的脱粘缺陷。

### 3.2 检测设备

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 ThermoCAMTMS3000 型,采集到的图像大小为 320 pixel×240 pixel,采集频率可高达 900 Hz,工作波段为 8~9 μm,利用 EchoTherm 软件进行数据处理。

加热源为大功率闪光灯,可提供最大的脉冲能量为 9.6 kJ。

### 3.3 检测结果

#### 3.3.1 不同大小的缺陷对探测力的影响

碳纤维蒙皮厚 1 mm,在蒙皮与蜂窝之间填充大小不同的圆形聚四氟乙烯膜模拟脱粘缺陷,脱粘缺陷深度相同。所用实验条件为:闪光灯热激励能量 9.6 kJ,热像仪采集频率 60 Hz,采集时间 10 s,所得的红外热图如图 2 所示。

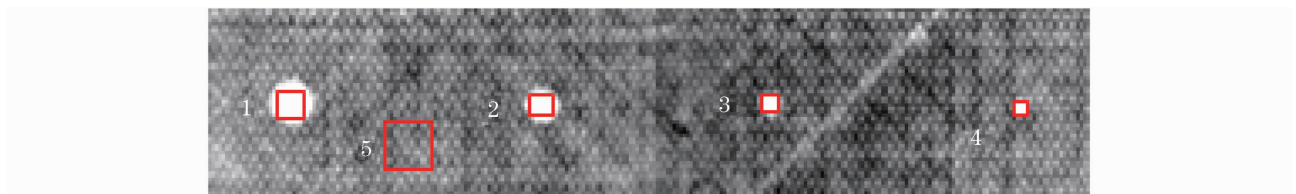


图 2 不同大小模拟脱粘缺陷的红外热图

Fig. 2 Thermal image of different defect sizes

在相同的实验条件下,不同大小的缺陷对其表面温差的影响不同。对实验所得的红外热图 2 中选取不同有缺陷与无缺陷区域,其中数字 1~4 代表相同深度不同大小的模拟脱粘缺陷,5 代表无缺陷区域,根据热像仪采集到不同区域随时间变化的表面温场分布,通过计算不同时间的 1~4 区域与 5 区域温差,可以求出 1~4 所代表的不同大小缺陷的表面温差随时间的变化曲线,如图 3 所示。通过图 3 可以研究缺陷的大小对检测分辨力的影响。

从图 3 可以看出,相同深度不同大小的脱粘缺陷所对应的表面辐射差随着缺陷的尺寸变化而变化,缺陷越大,其对应的表面辐射差值越大,缺陷越容易被检测出来。同时从图中可以看出,相同深度不同大小的脱粘缺陷其表面辐射量差达到峰值的时间均在

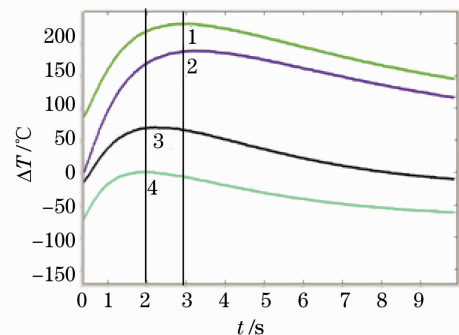


图 3 不同大小模拟脱粘缺陷的时间辐射差曲线

Fig. 3 Temperature difference-time plot of different defect sizes

1.5~2.5 s 之间,达到峰值的时间相差很小,这是由于红外检测时间主要和缺陷的深度有关,缺陷的深度

和温差最大处所对应时间的平方成正比。

### 3.3.2 不同深度缺陷对探测力的影响

碳纤维蒙皮厚 1 mm,通过三种方法模拟不同深度脱粘缺陷:在蒙皮与胶层之间加聚四氟乙烯薄膜模拟深度较浅的脱粘缺陷;去除蒙皮与蜂窝芯子之间的胶层后加两层聚四氟乙烯薄膜,在两层聚四氟乙烯膜之间形成空气隙模拟较深的脱粘缺陷;在胶层和蜂窝芯之间加聚四氟乙烯薄膜模拟深度更深的脱粘缺陷。设计的脱粘缺陷大小相同。实验时闪光灯热激励能量为 9.6 kJ,热像仪采集频率为 60 Hz,采集时间为 10 s,实验结果如图 4 所示。

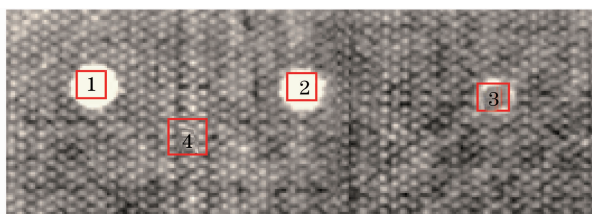


图 4 相同大小不同深度模拟脱粘缺陷的红外热图

Fig. 4 Thermal image of different defect depths

在相同的实验条件下,不同深度的缺陷对其表面温差的影响不同。对实验所得的红外热图 4 中选取不同区域,数字 1~3 代表相同大小不同深度的模拟脱粘缺陷,4 代表无缺陷区域。通过计算不同时间的 1~3 区域与 4 区域温差,得出 1~3 所代表的不同深度缺陷的表面温差随时间的变化曲线,如图 5 所示。通过图 5 可以研究缺陷的深度对检测分辨

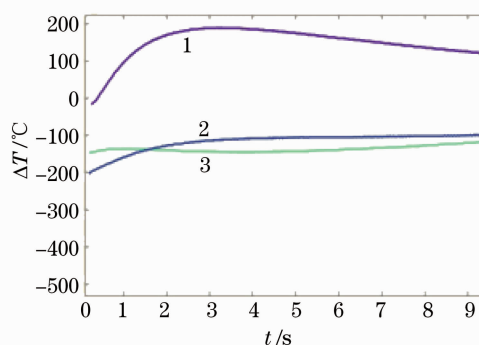


图 5 不同深度模拟脱粘缺陷的时间辐射差曲线

Fig. 5 Temperature difference-time plot of different defect depths

力的影响。

从图 5 可以看出缺陷表面的辐射量差值随着缺陷深度的增加而减小,缺陷深度越小,相应的表面辐射量差值越大,缺陷越容易被检测出来。由图中可见曲线 3 所对应的脱粘缺陷表面温差随时间变化甚微,这主要是由于热在试件中传导,缺陷深度越大,热扩散作用影响就越大,微弱的有用信号淹没在噪音信号中,不利于检测。

### 3.3.3 不同相邻间距对探测力的影响

碳纤维蒙皮厚度为 0.5 mm;蜂窝芯材料为铝,蜂窝芯格边长为 5 mm,高度为 10 mm;缺陷直径均为 10 mm,具体设计如图 6 所示。

实验时闪光灯热激励能量 9.6 kJ,热像仪采集频率 60 Hz,采集时间 5 s,所得的热图如图 7 所示。

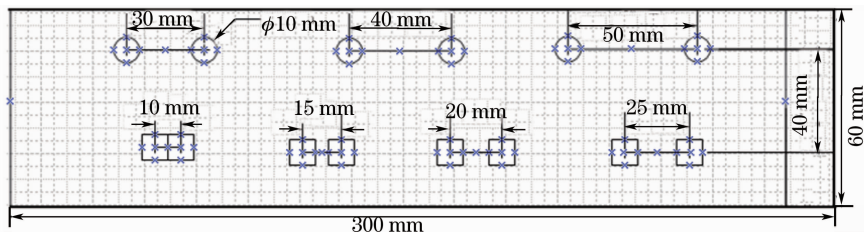


图 6 不同相邻间距模拟缺陷设计图

Fig. 6 Design sketch of different adjacent defects distances

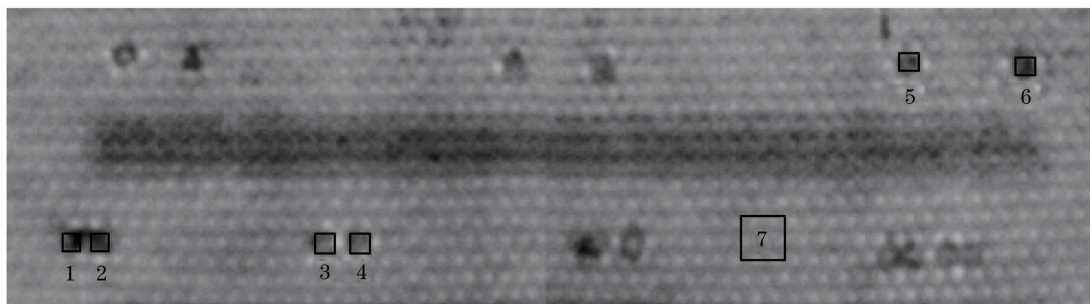


图 7 不同相邻间距模拟脱粘缺陷的红外热图

Fig. 7 Thermal image of different adjacent defects distances



在相同的实验条件下,不同相邻间距的缺陷对其表面温差的影响不同。在红外热图 7 中,在图像中选取 3 组不同相邻间距的模拟脱粘区域,1~6 为不同相邻间距的脱粘缺陷,7 为无缺陷区域,通过计算不同时间的 1~6 区域与 7 区域温差,可以得出 1~6 代表的不同相邻间距模拟脱粘缺陷的表面温差随时间的变化曲线,如图 8 所示。通过图 8 可以研究不同缺陷的相邻间距对缺陷检测的影响。

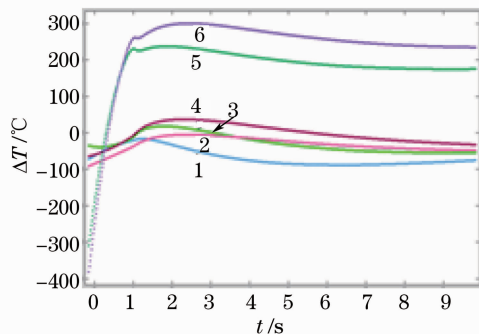


图 8 不同相邻间距模拟脱粘缺陷的时间温差曲线  
Fig. 8 Temperature difference-time plot of different distances between adjacent defects

从图 8 可以看出,随着缺陷的相邻间距不断增大,缺陷区域与无缺陷区域对应的温差逐渐增大,相邻间距越大,相邻缺陷的热影响越小,越有利于检测。如果缺陷间距太小,可能造成多个缺陷在热图中不易区分。国外关于红外检测的标准曾描述过,相邻缺陷的间距应大于其最大缺陷的尺寸<sup>[12]</sup>。

## 4 结 论

从理论上给出了评价脉冲红外热成像检测分辨能力的依据,同时研究了脉冲红外热成像检测技术对于不同深度、不同大小和不同相邻间距碳纤维复合材料的脱粘模拟缺陷的探测能力。红外热成像探测能力随着缺陷尺寸的增加而增大,随着缺陷深度的增加而减小,随着缺陷相邻间距的增加而增大。但是在实际检测中红外热成像的探测能力并不是受某一因素影响的,而是各个因素的综合表现。对于给定深度给定大小的缺陷,若缺陷能被检测出来,缺陷的宽深比应至少大于 1,相邻缺陷的间距应大于其最大缺陷的尺寸。在通常的检测中,影响缺陷的探测能力的因素还有:被检测物表面的发射率和光学反射率、数据的采集时间、闪光灯能量、热像仪的工作波段、光学和空间分辨率等。因此在实际实验中,应尽量减少被检测影响因素,选取合适的实验条件,采用高精度的实验设备来提高红外探测能力。

## 参 考 文 献

- Chen Guicai. The Study on Three Dimensional Knitting Carbon/Epoxy Compound Materials Preparation and Behavior of Vitro Moisture Absorption [D]. Tianjing: Tianjing University, 2002
- 陈贵才. 三维编织碳/环氧复合材料的制备及体外吸湿行为的研究[D]. 天津:天津大学, 2002
- Wang Shanyuan, Zhang Ruguang. Fiber Reinforced Composites [M]. Shanghai: Publishing House of Chinese Spinning and Weaving University, 1998. 92
- 王善元, 张汝光. 纤维增强复合材料 [M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 1998. 92
- Wang Zhenming, Du Shanyi, Zhang Heng *et al.*. Compound Materials and Structure Mechanics, the Design, Application and Appraise [M]. Heilongjiang: The Harbin Industry University Publishes, 1998. 120
- 王震鸣, 杜善义, 张恒等. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价(第二册)[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 120
- Wang Jinfeng. The application of infrared thermal wave nondestructive testing technology in America[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, **28**(5): 1~5
- 王金锋. 红外热波无损检测技术在美国应用实例[J]. *无损探伤*, 2004, **28**(5): 1~5
- Zhang Xiaochuan, Jin Wanping, Li Yanhong *et al.*. The infrared thermal wave testing method used in glass fiber reinforced plastic back-drilled flat holes [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 16~18
- 张小川, 金万平, 李艳红等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1): 16~18
- 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
- Zhao Shibin, Zhang Cunlin, Wu Naiming *et al.*. Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 456~460
- 赵石彬, 张存林, 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
- Clemente Ibarra-Castanedo, Marc Genest, Stéphane Guibert *et al.*. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: a comparative study [C]. *SPIE*, 2007, **6541**: 654116
- Dai Yongchao, Zheng Lisheng, Yang Xiaolin *et al.*. The research on low-energy impact of aircraft composite material based on infrared thermal imaging testing [C]. *Collected Works of the Third Youth Scientific Forum of Chinese Aviation Club*, 2006
- 代永朝, 郑立胜, 杨小林等. 基于红外热成像检测的飞机复合材料冲击试验研究[C]. 第三届中国航空学会青年科技论坛文集, 2006
- Feng Haixing, Xian Mingle. Automatic measurement of damage area at composite component in airplane based on infrared thermal wave testing [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2009, **22**(4): 136~138
- 冯海星, 先明乐. 基于红外热波检测的飞机复合材料损伤面积自动测量 [J]. *机电产品开发与创新*, 2009, **22**(4): 136~138
- S. K. Lau, D. P. Almond. A quantitative analysis of pulsed video thermography [J]. *NDT & E International*, 1991, **24**(4): 195~202
- Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications. E2582-07 [S]. USA: ASTM international, 2007