

脉冲红外无损检测技术研究现状与发展趋势

江海军，陈力

(南京诺威尔光电系统有限公司，江苏 南京 210046)

摘要：综述了脉冲红外无损检测技术国内外的发展历程、发展现状、基本原理、技术特点；对比了脉冲激励4种方法，介绍了国内外脉冲红外无损检测成套设备的发展状况。对近年来国内脉冲红外无损检测领域主要研究内容进行了总结，包括理论建模分析、脉冲激励方法、数据处理、检测材料和涂层厚度测量。最后总结了该技术的发展趋势。

关键词：脉冲红外；无损检测；脉冲激励

中图分类号：TN219

文献标识码：A

文章编号：1001-8891(2018)10-0946-06

Infrared Flash Thermography Nondestructive Testing and Its Development

JIANG Haijun, CHEN Li

(Novelteq-Ltd, Nanjing 210046, China)

Abstract: This paper summarizes the basic principles, development process, and technical characteristics of infrared flash thermography nondestructive testing (NDT). Four impulse excitation methods are compared, and the development of pulsed infrared thermography NDT equipment is introduced. This paper also reviews the main research areas in pulsed infrared thermography NDT technology, including the pulse excitation source method, data processing, testing material, and coating thickness measurement. Finally, the development trend of this technology is summarized.

Key words: pulsed infrared, thermography, NDT, pulse excitation

0 引言

随着现代科学与工业技术的发展，产品更新换代的速度不断加快，对产品质量及安全的要求也越来越高，检测产品的技术也越来越受到重视，新的检测方法不断出现并逐步发展和完善。脉冲红外无损检测技术是一门跨学科、跨领域的通用型技术，更是一种创新型的无损检测技术^[1-3]。

近年来，国际上积极开展脉冲红外无损检测技术研究，脉冲红外无损检测技术在国内外都得到了快速的发展。美国、俄罗斯、法国、加拿大等国已经把脉冲红外无损检测技术广泛应用于飞机复合材料构件内部缺陷及胶接质量检测、蒙皮铆接质量检测^[4-8]。我国也已将该技术用于航空航天、风电、军工等领域的相关产品检测^[9-11]。

1 脉冲红外无损检测技术原理及技术特点

脉冲红外无损检测技术于20世纪80年代由英国哈韦尔国家无损检测中心的研究人员Milne和Reynolds首先提出^[12]。脉冲红外无损检测技术是一种集光、机、电综合为一体的非接触无损检测方法。该技术具有检测速度快、非接触、非破坏、检测面积大、便于在线检测、检测结果直观易懂等特点，可以对金属、非金属、复合材料中存在的脱粘、裂纹、锈蚀、疲劳、损伤等缺陷进行检测，日益成为保障产品和安全运行的重要手段，具有广阔发展前景^[13-14]。

脉冲红外无损检测技术工作原理如图1所示，利用高能量脉冲在物体表面形成一个短周期热脉冲激励，产生的热脉冲向物体内部传播，当热波在物体内部遇到缺陷或者热阻抗发生变化的地方就会有一部分热量发射到物体表面，产生温度梯度分布，利用高分辨率红外热像仪记录存储，通过红外热图序列分析来检测物体缺陷。

收稿日期：2017-02-28；修订日期：2017-03-31。

作者简介：江海军（1988-），男，硕士，研发工程师，主要从事红外无损检测技术研究。E-mail：hjiang@novelteq.com。

基金项目：科技部中小企业技术创新项目（14C2621320110）。

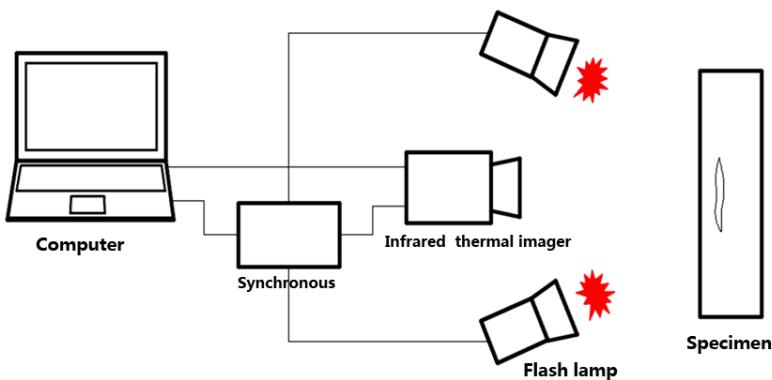


图1 脉冲红外无损检测技术工作原理

Fig.1 Principle of pulsed infrared nondestructive testing technology

脉冲红外无损检测系统一般包括3部分:热激励系统、红外图像采集系统、红外图像处理系统。目前,脉冲激励常用的激励源为:闪光灯、激光、红外灯管、热风等。脉冲激励源通常采用计算机自动控制,但有时也可以采用手动方式进行控制。红外热像仪用来对热激励样品表面的温度图像进行同步采集,采集红外热图序列,图2所示。

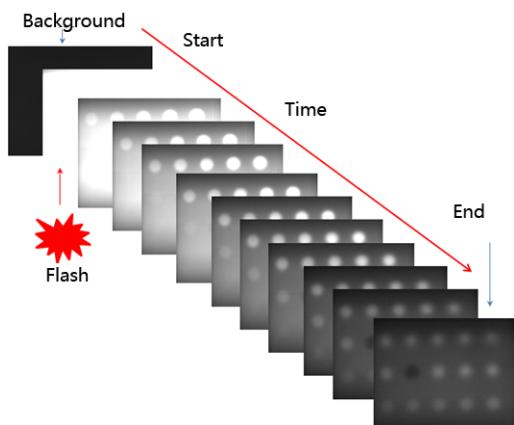


图2 脉冲红外无损检测热图序列示意图

Fig.2 Schematic diagram of pulse infrared NDT thermal chart

2 脉冲红外无损检测主要研究内容

国内脉冲红外无损检测研究方向大致为:理论建模分析、脉冲激励源、数据处理、检测材料、涂层厚度测量等方面。

2.1 理论建模分析

理论建模分析对于脉冲红外无损检测应用起到指导性意见,刘颖韬^[15]等对3D建模与1D建模进行了对比分析,得出当其他条件相同时,不计材料导热各项异性,热扩散率越高的材料中横向导热越明显,由3D模型简化为1D模型带来的误差越大。郭兴旺^[16]等对3层复合结构建立轴对称模型并进行了有限元仿真研究,深入分析了缺陷参数(大小和深度)与信息

参数(最大温差和最大对比度)的基本关系。陈栋^[17]等对半透明复合材料脉冲红外无损检测进行了有限元仿真分析,重点对比分析了不透明模型与半透明模型,对半透明材料缺陷漏检进行了理论仿真研究,为半透明材料缺陷检测提供了理论依据。

2.2 脉冲激励源

目前脉冲激励源主要有闪光灯、激光、红外灯管、热风等。

首都师范大学、北京维泰凯信联合研制的闪光灯阵列脉冲热激励装置^[18],采用阵列式设计、方式独特,以氘灯为光源、阵列式分布闪光灯同步热激励为核心,具有质量轻、结构简单、便携式、针对性强等特点。南京诺威尔光电系统有限公司自主研制的闪光灯装置,具有激励能量大(最大能量为12000 J)、截尾可控(最短2 ms)、便于携带等优点。

江海军^[19]等采用激光作为热激励源,激光为线光斑,最大功率为240 W,激光以扫描方式进行热激励,同时论证了激光扫描2-D理论模型,并对碳钢试件进行了检测,可检测出碳钢直径为9 mm、深度为4 mm缺陷。

王冠^[20]等采用红外灯管作为热激励源对玻璃纤维复合材料进行了检测,检测出了直径为2 mm、深度为0.5 mm缺陷,试验结果表明该系统对于复合材料试件缺陷有较好的检测结果。

李科^[21]等采用以热风作为激励源对复合材料冲击损伤进行检测,可清晰看出检测区域的缺陷位置,对蜂窝夹层复合材料进水情况进行了检测,可清楚观察到材料内部进水位置。

2.3 数据处理

受热像仪噪声、脉冲加热均匀性、材料表面吸收不同的影响,因此需要对采集到的红外热图序列进行图像处理,包括滤波降噪处理、帧间差分法、背景差分法、比值热图法、数据重建、主成分分析等。

李艳红^[22]通过数据重建得到红外图像微分热图(1-D图像)对复合材料层压板进行了检测,微分热图使缺陷点与无缺陷点信号差异增大,使原始热图中无法判断的内部较深较小的缺陷显示出来,提高了缺陷的检测能力。

郭兴旺^[23]等通过主成分分析对铝试件检测图像进行了处理,采用第2、第3主成分及前面几个主成分分量重建图像均有增强缺陷对比度和抑制加热不均的效应,可以提高脉冲红外无损检测的缺陷检测能力,对于铝板腐蚀检测时,采用主成分分析可探测的最小腐蚀率减小10%左右。

2.4 检测材料

目前脉冲红外无损检测技术在缺陷检测主要应用于以下试件:风电叶片、蜂窝材料、复合材料、涂层等;纪瑞东^[24]等采用闪光灯激励对碳纤维层压结构复合材料进行了检测,直径为3 mm缺陷最大可检测缺陷深度为2.16 mm。杨小林^[25]采用闪光灯激励对雷达罩蜂窝夹芯结构进行了检测,不仅可以检测出表面擦伤及漆层脱落,更可以检测出内部撞击损伤。郑立胜对飞机复合材料冲击损伤进行了研究,并得出了冲击损伤形式和特点。刘丽娜^[26]采用红外灯管、热风两种热激励方法对碳纤维冲击损伤进行了研究,得出不同深度缺陷,应采用不同的热激励方法,大缺陷采用红外灯管可以获得良好红外热图,而细微的缺陷由于散热较快采用热风激励检测效果更佳。岳大皓等^[27]采用闪光灯激励方法对风电叶片近表面缺陷进行了检测,获得了较为清晰的图像数据。孟梨雨^[28]采用大功率烤灯对风电叶片粘接缺陷进行了检测,检测结果中胶位置、轮廓、大小等信息与实际粘胶部分吻合一致。郭兴旺等^[29]采用理论与实验验证了脉冲红外无损检测蜂窝板进水的基本规律,最大温差和最大对比度

与积水高度均呈非线性关系,随着积水高度的增加而增加,根据检测信息参数与积水高度关系曲线可以反向估计积水高度。刘颖韬等^[30]采用闪光灯激励方法对薄蒙皮的泡沫夹层结构件和蜂窝夹层结构件进行了检测,结果表明脉冲红外无损检测可以清晰得出检测结果和丰富的构件内部信息,可以检测出脱粘缺陷、损伤和蜂窝积水,能够用于雷达罩的在役检测。蒋淑芳等^[31]对固体火箭发动机绝热涂层进行了脱粘检测,实验结果表明该技术可以对固体火箭发动机涂层脱粘进行快速而有效的检测。杨正伟^[32]等对导弹发动机壳体粘接进行了检测,并与超声C扫描检测结果进行了对比,实现了缺陷大小和深度的定量识别。

2.5 涂层厚度测量

李艳红^[33]采用闪光灯激励对特种涂层厚度测量进行了研究,实验结果表明厚度范围为0.5~3 mm涂层检测精度为0.1 mm;范围为几十微米量级涂层厚度,由于脉冲宽度的影响,检测涂层厚度结果误差大。陶胜杰等^[34]通过理论分析和仿真得出涂层厚度的平方与热图序列对数二阶微分峰值时间成正比关系,通过此关系可以测量出涂层厚度,对涂层厚度为1~4 mm涂层进行检测,厚度测量误差保持在±6.16%以内。

3 脉冲红外无损检测技术研究现状

3.1 脉冲热激励方法

热激励目的在于打破试件表面温度原有平衡,使用外部激励试件表面,使其缺陷区域与非缺陷区域产生温度差,通过红外热像仪记录这种差别从而检测出缺陷。脉冲红外无损检测技术的三大关键技术之一便是热激励技术。目前,脉冲激励方法主要包括4种:闪光灯、激光、红外灯、热风,如表1所示。

表1 脉冲热激励方法比较

Table1 Comparison of pulse thermal excitation methods

Method	Advantage	Disadvantage	Application	
Flash	High power, high efficiency and high detection accuracy	Cumbersome volume, depth of detection	Metals, nonmetals	and composites
Laser	High energy density, very uniform light intensity and high detection accuracy	Large volume, complex system, water cooling, and image time correction	Metals, nonmetals	and composites, crackle
IR-Lamp	Wide wavelength range, stable power and portable	The depth of detection is low	Metals, nonmetals	and composites
Hot air	Small size, easy to carry, cheap.	The depth of detection is low and the energy is low	Less material for light absorption coefficient	

脉冲红外无损检测技术属于主动红外热成像技术,与被动红外热成像技术的本质区别在于主动施加热激励,被动红外无损检测技术利用检测物体自身热辐射采集热图像。脉冲红外无损检测机理方式采用脉冲热激励源,大功率闪光灯是目前研究最多、应用最广、国际上主流的脉冲加载方法。主动红外无损检测技术根据不同热激励源可以分为脉冲激励、超声激励、涡流激励等,如表2所示。

3.2 国内外总体发展现状

红外无损检测在世界范围,尤其是发达国家得到了推广,比如:美国、德国、加拿大、俄罗斯、瑞典、法国、意大利等国的红外无损检测技术发展很快,这一技术已成为能解决许多棘手检测难题的常规检测方法,在航空、航天、汽车、船舶、核工业、军工、管道、新材料研究领域都有许多成功的应用实例。其中,许多国际大公司,包括西门子-西屋电力、劳斯莱斯、福特汽车、通用汽车等许多欧美大公司都将此技术用于实际产品检测。NASA 使用该技术对航天飞机机翼检测,美国波音公司使用该技术对飞机蜂窝材料进行检测^[35-37]。这些都极大扩展了红外无损检测领域应用范围。

2003年,红外热波无损检测技术在复合材料研究中的应用列入国家863计划;2004年,中国设立红外热波无损检测联合实验室;2005年,首次将红外热波无损检测技术用于外场飞机检测^[38]。近年来,国内高校、科研院所、企业对红外热波无损检测技术展开了研究。首都师范大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、北京航空材料研究院、航天703所等在理论建模分析、热激励方法、缺陷尺寸和深度定量、图像处理、信号分析等方向进了持久、大量的研究,取得了很多实际性进展。

3.3 成套设备发展现状

3.3.1 国外成套设备

国外成套脉冲红外无损检测设备主要有:美国TWI公司、德国edeviS GmbH公司、德国InfraTec公司、以色列Opgal公司。美国TWI采用FLIR公司制冷热像仪开发的脉冲红外无损检测设备,其集成度高、操作简单、并且拥有脉冲红外无损检测数据重建发明专利,是第一个将红外无损检测技术商业化的公司;德国edeviS GmbH公司脉冲红外无损检测设备集成度不高,比较适合于实验室研究使用;德国InfraTec公司采用自主品牌制冷热像仪研制脉冲红外无损检测设备,集成度高、软件使用灵活;以色列Opgal公司采用自主品牌的热像仪研制脉冲红外无损检测设备,主要采用大功率红外灯管激励,易于使用,适合大面积检测。

3.3.2 国内成套设备

国内成套脉冲红外无损检测设备厂商主要有:南京诺威尔光电系统有限公司、北京维泰凯信新技术有限公司。南京诺威尔光电系统有限公司推出的红外无损检测工作站,热像仪可以选用非制冷热像仪,也可以选用制冷热像仪,可以搭载闪光灯、激光、红外灯管、热风4种激励方法,设备既可以做成台式,也可以做成便携式用于外场使用,闪光灯为自主研制开发,激光采用线扫描方式。北京维泰凯信新技术有限公司研制便携式红外检测系统,选用了非制冷热像仪减小了体积,从而使设备便于携带,可用于外场检测,搭载红外灯管、热风两种激励方法。

4 脉冲红外无损检测技术发展趋势

脉冲红外无损检测技术是随着热成像技术发展而出现的一种新型无损检测技术,既可作为产品缺陷检测提供坚实可靠的依据,也用于产品生产制造过程的品质控制。该技术近年来在国内发展迅速,目前已形成相应的国家标准,正从实验室研究阶段逐步走向工程应用阶段,为各行各业产品故障诊断、缺陷检测

表2 热激励源对比 Table 2 Comparison of thermal excitation sources

Sources	Advantage	Disadvantage	Application
Impulse	High efficiency and high detection accuracy	High energy density and shallow depth	Shallow surface defects and large defects
Ultrasonic	Deep and selective heating	Damage specimen, affected by excitation mode & coupling effect	Internal crack of complex specimen and deep crack detection
Eddy current	No damage to specimen and restriction of specimen shape	Shallow small detection area	High conductivity specimens
Microwave	Deep defects can be detected	Except for metals	Composite materials, ceramics

起到了关键的作用。随着图像处理技术、高帧频热像仪、国内外研究者对脉冲红外无损检测技术的不断深入，脉冲红外无损检测技术的发展趋势主要有3个方面：

1) 缺陷人工识别向自动识别发展

当前脉冲红外无损检测技术用于缺陷的检测主要是基于检测人员人眼观察，其检测效率和准确度受限于检测人员的经验，而且不同深度的缺陷信息在不同帧序列图像上显示，容易造成漏检情况，这制约了脉冲红外无损检测推广应用，自动识别越来越受到研究者的重视。

2) 由定性检测向定量检测发展

脉冲红外无损检测技术伴随理论、算法精细化研究，逐步向高精度定量方向发展，窄脉冲激励、高帧频红外热像仪的发展使微米级涂层厚度测量提供了可能。

3) 多种检测技术融合

单一的检测手段总有其本身的优点和不足，目前脉冲红外无损检测技术在理论方面较为成熟，但是在工程应用方面还有待深入的研究，脉冲红外无损检测技术与其他无损检测技术结合共同解决检测难题：大面积、快速、定量分析；从而提供一整套的安全、高效、全方位的无损解决方案。

5 结论

脉冲红外无损检测技术是一种集光、机、电综合为一体的非接触无损检测方法。该技术具有检测速度快、非接触、非破坏、检测面积大、便于在线在役、检测结果直观易懂等特点，可以对金属、非金属、复合材料中存在的脱粘、裂纹、锈蚀、疲劳、损伤等缺陷进行检测。近年来，国内对脉冲红外无损检测进行研究的有高校、研究院所、企业，对该技术进行了深入研究，取得了较大进展，减小了与国外的差距。随着现代计算机技术及数字信号处理技术的迅猛发展，为研究脉冲红外无损检测技术提供了良好的手段。未来该技术将在无损检测领域发展非常广阔。

参考文献：

- [1] 戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用发展[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(1): 1-7.
DAI Jingmin; WANG Zijun. Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications[J]. *Techniques of Automation and Application*, 2007, 26(1): 1-7.
- [2] 王迅, 金万平, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 497-501.
WANG Xun, JIN Wanping, ZHANG Cunlin, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(10):497-501.
- [3] 梅林, 张广明, 王裕文. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 无损检测, 1999, 19(11): 466-468.
MEI Lin, ZHANG Guangming, WANG Yuwen. Infrared imaging nondestructive testing technology and its current applications[J]. *Nondestructive Testing*, 1999, 19(11): 466-468.
- [4] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composite and other materials by thermal pulse video thermography[C]//SPIE, 1984, 520(6):119-122.
- [5] Chambers A R, Mowlem M C, Dokos L. Evaluating impact damage in CFRP using fiber optic sensors[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(6): 1235-1242.
- [6] Ball R J, Almond D P. The Detection and measurement of impact damage in thick carbon fiber reinforced laminates by transient thermography[J]. *NDT & E International*, 1988, 31(3): 165-175.
- [7] Almond D P, Peng W. Thermal imaging of composites [J]. *Journal of Microscopy*, 2001, 201(2): 163-170.
- [8] Vallerand S, Maldague X. Defect characterization in pulsed thermography: a statistical method compared with Kohonen and perceptron neural networks[J]. *NDT & E International*, 2000, 33(5): 307-315.
- [9] 刘颖韬, 郭广平, 杨党纲, 等. 脉冲热像法在航空复合材料构件无损检测中应用[J]. 航空材料学报, 2012, 32(1):72-77.
LIU Yingtao, GUO Guangping, YANG Danggang. Pulsed thermography of composite components used in aerospace applications[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1): 72-77.
- [10] 宋远佳, 张炜, 杨正伟. 固体火箭发动机壳体脱黏缺陷的热波检测[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2012, 29(3): 252-257.
SONG Yuanjia, ZHANG Wei, YANG Zhengwei. Debond defect detection in shell of solid rocket motor by thermal wave nondestructive testing[J]. *Journal of Shenzhen University: Science & Engineering*, 2012, 29(3): 252-257.
- [11] 喻新发, 闫荣鑫, 钟亮, 等. 航天器红外成像检漏方法研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 220-225.
YU Xinfu, YAN Rongxin, ZHONG Liang. Infrared imaging leak testing for spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(2): 220-225.
- [12] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composite and other materials by thermal pulse video thermography[C]//SPIE, 1984, 520(6): 119-122.
- [13] 李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.

- LI Guohua, WU Lixin, WU Miao. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(3): 227-230.
- [14] 张晓燕, 金万平. 红外热波检测技术在美军装备维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2006, **15**(5): 41-43.
- ZHANG Xiaoyan, JIN Wanping. The application of thermal wave detection in American equipment maintenance[J]. *Aviation Maintenance and Engineering*, 2006, **15**(5): 41-43.
- [15] 刘颖韬, 郭兴旺, 郭广平, 等. 红外热像检测的3D建模与1D建模对比[J]. 无损检测, 2011, **33**(2): 5-8.
- LIU Yingtao, GUO Xingwang, GUO Guangping. Comparison of 3D and 1D models in infrared thermographic nondestructive testing by numerically simulating[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, **33**(2): 5-8.
- [16] 郭兴旺, 鄒方. 三层复合结构热无损检测的建模与有限元仿真[J]. 机械工程学报, 2008, **44**(9): 21-29.
- GUO Xingwang, QIE Fang. Modeling and simulation of thermal NDT of three-layered structures by Finite element method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(9): 21-29.
- [17] 陈栋, 郭兴旺, 刘颖韬. 半透明复合材料脉冲热像检测的有限元仿真研究[J]. 无损检测, 2016, **38**(10): 42-47.
- CHEN Dong, GUO Xingwang, LIU Yintao. Modeling of infrared pulsed thermography on translucent composites [J]. *Nondestructive Testing*, 2016, **38**(10): 42-47.
- [18] 刘波, 李艳红, 张存林, 等. 基于红外热波无损检测系统中闪光灯阵列脉冲热激励装置的研制[J]. 中国仪器仪表, 2006, **5**(12): 38-42.
- LIU Bo, LI Yanhong, ZHANGCunlin. A study of pulsed excitation-device with flashing lamps array based on infrared thermal wave nondestructive testing system[J]. *China Instrumentation*, 2006, **5**(12): 38-42.
- [19] 江海军, 陈力, 张淑仪. 激光扫描红外热波成像技术在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2014, **36**(12): 20-22.
- JIANG Haijun, CHEN Li, ZHANG Shuyi. Applications of the laser scanning infrared thermography for nondestructive testing[J]. *Non-destructive Testing*, 2014, **36**(12): 20-22.
- [20] 王冠, 李果, 曾智, 等. 便携式红外热波无损检测系统的研制与应用[J]. 无损检测, 2015, **37**(5): 10-12.
- WANG Guan, LI Guo, ZENG Zhi. Development and Application of a portable infrared thermal wave nondestructive testing system[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, **37**(5): 10-12.
- [21] 李科, 钟安彪, 李玉杰, 等. 基于热风激励的红外成像检测技术研究[J]. 激光与红外, 2016, **46**(7): 823-826.
- LI Ke, ZHONG Anbiao, LI Yujie. Research on infrared imaging detection based on hot wind heating[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(7): 823-826.
- [22] 李艳红. 被检物表面条件对红外热波无损检测结果影响的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
- [23] 郭兴旺, 其达拉图. 铝试件脉冲红外热无损检测的主分量分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, **35**(11): 1393-1397.
- GUO Xingwang, Qidalatu. Principal component analysis used in pulsed thermographic NDT of aluminum specimens[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(11): 1393-1397.
- [24] 纪瑞东, 张旭刚, 王珏. 飞机复合材料构件的原位红外热成像检测[J]. 无损检测, 2016, **38**(1): 13-16.
- JI Ruidong, ZHANG Xugang, WANG Jue. Infrared thermography for in-situ nondestructive testing of airplane composite[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, **38**(1): 13-16.
- [25] 杨小林, 代永朝, 谢小荣. 红外热像检测在直升机维护中的应用研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(11): 1149-1152.
- YANG Xiaolin, DAI Yongchao, XIE Xiaorong. Application research of thermography testing in helicopter maintenance[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(11): 1149-1152.
- [26] 刘丽娜, 郑步生. 红外热成像技术在碳纤维加固构件冲击探伤中的应用[J]. 新技术新工艺, 2015, **36**(11): 122-124.
- LIU Lina, ZHENG Busheng. Infrared thermal imaging technology in the application of the impact of carbon fiber reinforced plastics components inspection[J]. *New Technology & New Process*, 2015, **36**(11): 122-124.
- [27] 岳大皓, 李晓丽, 张浩军, 等. 风电叶片红外热波无损检测的实验探究[J]. 红外技术, 2011, **33**(10): 614-616.
- YUE Dahao, LI Xiaoli, ZHANG Haojun. IR thermography inspection of wind turbine blades[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(10): 614-616.
- [28] 孟梨雨, 曾智, 王冠, 等. 风电叶片蒙皮与腹板粘接红外热成像检测研究[J]. 光电子技术, 2015, **35**(3): 174-178.
- MENG Liyu, ZENG Zhi, WANG Guan. Study on detection of infrared thermal imaging of bonding between covering and web of wind turbine blade[J]. *Optoelectronic Technology*, 2015, **35**(3): 174-178.
- [29] 郭兴旺, 许文浩. 蜂窝结构积水的脉冲红外热像无损检测的热传分析[J]. 红外技术, 2011, **33**(5): 275-280.
- GUO Xingwang, XU Wenhao. Heat transfer analysis of pulsed thermography for water detection in honey comb structures[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(5): 275-280.
- [30] 刘颖韬, 郭兴旺, 温磊, 等. 红外热像检测技术应用于蜂窝结构复合材料的检测能力评价[J]. 无损检测, 2011, **33**(12): 81-85.
- LIU Yingtao, GUO Guangping, WEN Lei. Testing ability of infrared thermographic nondestructive testing in honeycomb sandwich structure composite[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, **33**(12): 81-85.

(下转第 965 页)

technology of China, 2012

- [7] 马学智. 红外焦平面器件性能检测与特征分析研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

MA Xuezhi. IRFPA performance detection and characteristic analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

- [8] 王忆锋, 黄江平. 红外焦平面探测器阵列规格的发展[J]. 红外, 2013, 34(9): 1-8.

WANG Yifeng, HUANG Jiangping. Development of infrared focal plane array detector in format[J]. *Infrared*, 2013, 34(9): 1-8.

- [9] 梁志国, 周艳丽. 数据采集系统校准规范 JJF 1048-95[S]. 北京: 中国航空工业总公司第三〇四研究所, 1995.

LIANG Zhiguo, ZHOU Yanli. Calibration specification of data acquisition system JJF1048-95[S]. Beijing: The 304 Institute of Aviation

Industry Corporation of China, 1995.

- [10] 梁志国, 李少壮, 李滨. 数据采集系统直流增益和线性度的精确评价[J]. 计测技术, 1999, 19(5): 17-21.

LIANG Zhiguo, LI Shaozhuang, LI Bin. Precise evaluation of DC gain and linearity of data acquisition system[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 1999, 19(5):17-21.

- [11] 张宇, 常艳. 数据采集系统校准研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(8): 98-102.

ZHANG Yu, CHANG Yan. Research of data acquisition system calibrating[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(8): 98-102.

- [12] HGH. PI-3105 Multi-Channel Data Acquisition System for Image Sensor Testing Product Description[M]. France: HGH, 2004.

(上接第 951 页)

- [31] 蒋淑芳, 郭兴旺, 沈京玲, 等. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热波无损检测[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 584-586.

JIANG Shufang, GUO Xingwang, SHEN Jingling. Infrared thermal wave NDT on the disbonds of the heat insulated layer in solid propellant rocket motors[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(8): 584-586.

- [32] 杨正伟, 张炜, 武翠琴, 等. 导弹发动机壳体粘接质量红外热波检测[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2781-2787.

YANG Zhengwei, ZHANG Wei, WU Cuiqin. Infrared thermography applied to evaluate adhesive equality of missile motor shell[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(12): 2781-2787.

- [33] 李艳红. 特种涂层涂覆质量的红外热波无损检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.

LI Yanhong. Infrared thermal wave nondestructive testing technology for coating quality of special coatings[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.

- [34] 陶胜杰, 杨正伟, 张炜, 等. 基于热图序列时间特征的涂层厚度测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1810-1816.

TAO Shengjie, YANG Zhengwei, ZHANG Wei. Research on measurement of coating thickness based on thermal image time characteristic[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1810-1816.

- [35] HAN X Y, Favro L D, Thomas R L. Quantitative defect depth measurements for NDE of Composites[A]. Proceedings of the American Society for composites, 1988: 1077-1081.

- [36] Mal dague X. Introduction to NDT by active infrared thermography[J]. *Materials Evaluation*, 2002, 60(9): 1063-1073.

- [37] Carlomagno G M, Meola C. Comparison between thermographic techniques for frecoes NDT[J]. *NDT & E International*, 2002, 35(8): 559-565.

- [38] 罗英, 张德银, 彭卫东等. 民航飞机主动热波成像检测技术应用进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 718-723.

LUO Ying, ZHANG Deyin, PENG Weidong. Development of active infrared thermography and its application in civil aviation aircraft testing[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(7): 718-723.