

红外热像检测技术的发展和研究现状

吕事桂, 刘学业

(中国人民解放军 92419 部队, 辽宁 兴城 125106)

摘要: 红外热像检测具有非接触性、实时性、测温范围广、无测温热惯性、测量结果直观形象等优势, 得到各工程领域的青睐, 广泛应用于设备故障、材料缺陷等的在线检测诊断。本文回顾和总结了红外热像检测技术国内外的发展和研究现状, 展望了其未来的发展趋势。

关键词: 红外热像检测; 故障诊断

中图分类号: TH16; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2018)03-0214-06

Development and Research Status of Infrared Thermal Image Detection Technology

LYU Shigui, LIU Xueye

(92419 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China)

Abstract: Infrared thermal image detection is widely used in online detection and diagnosis of equipment faults and material defects, owing to advantages such as noncontact, real time, wide temperature range, no thermal inertia, and intuitive image of measurement. In this paper, the development and research status of infrared thermal imaging technology both nationally and internationally are reviewed and summarized, and its future development trend is prospected.

Key words: infrared thermography detection, fault diagnosis

0 引言

利用红外图像对设备表面温度场进行测定进而评估其状态的红外热像检测技术, 是一种从 20 世纪 60 年代开始就受到各工程领域广泛关注的无损检测技术^[1]。与常规检测技术相比, 它具有如下特点: ①适用性广泛: 温度是最普适的物体状态参数之一, 而采集到的红外热像实质就是温度在物体外表面的分布云图, 因而红外热像检测技术适用性很广泛; ②非接触性: 这是红外热像检测的最大优势。红外热像检测是基于物体表面辐射产生的红外热辐射能进行测量的, 是非接触式的测量, 不会影响被检测的温度场, 因而该检测技术不但能检测测量一般物体, 而且能在线检测运动中的、危险的(如高压线缆)或难以靠近的物体; ③测温范围广: 高于 -273.15°C 绝对零度的物体都会向外产生红外辐射能, 所以理论上讲, 红外辐射测温是没有上限的, 具有宽广的测温范围; ④无测温热惯性, 能测量热容量很小或导热系数很小这样材质的物体; ⑤红外热像检测技术通常以灰度或彩色云图的形式进行输出。因而测试的结果较为直观, 各点温度值的读取较为方便, 并且热像图中还包含有丰

富的与被测设备有关的其他信息; ⑥可进行相对快速的实时测量, 可以相对快速地观察大范围的设备表面温度变化以及进行温度变化瞬态研究; ⑦数值化的输出信号, 便于计算机处理和自动化的实现。

由于具备上述独特优势, 特别是随着采用非制冷红外焦平面阵列探测器的热像仪的成功研制及其性能的不断改进, 和热像仪朝着体积更小、价格更低、使用更加方便方向的发展, 红外热像检测现已公认最具前途的无损检测技术之一, 在社会各领域得到了广泛应用, 产生了显著的社会经济效益^[2-3]。在 1998 至 2000 年, 红外热像检测技术因其特有的优势一举拿下了美国联邦航空局举办的飞机机身无损探伤检测技术的竞标, 淘汰了超声检测等多项检测技术。据《NDE NEWS》报道, 在哥伦比亚号航天飞机于 2003 年 2 月意外失事而造成重大损失后, NASA 与美国 TWI 公司签约, 将红外热像检测技术运用到航天飞机的监控和检测之中, 以提高飞行前的安全检查测量。

1 红外热像检测技术国外发展和研究现状

红外技术的应用最先是在军事领域得到的。在二战中德国率先在部队配装了红外通讯和夜视等红外

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2018-01-01.

作者简介: 吕事桂(1986-), 男, 江西赣州人, 工程师, 博士, 主要从事设备故障红外检测与诊断, 红外目标特性等方面的研究。E-mail: shiguily@hotmail.com.

设备。它在无损检测技术中的应用以瑞典 AGA 公司 1964 年研制成功的世界上第一套工业用红外热像仪为标志。

其中美国、英国、瑞典等一些发达国家的发展较为快速。主要被用在航空航天、电力电子、石化冶炼等领域^[4-8]。美国是目前红外技术最为领先的国家,拥有世界上大部分的红外设备供应厂商,对红外热像检测技术的发展应用也非常的快速,并且制定了 ASNT、ASTM 等标准以及各种红外操作说明书和人员培训体系。

红外热像检测技术按其检测方式可分为主动式 (Active thermographic testing) 和被动式 (Passive thermographic testing)^[9]。早在 1930 年,最初的主动式检测思想就已被提出,20 世纪 60 年代主动式红外热像检测技术的理论基础和应用就由 Green 以及 Alzofon 首次阐述提出来了^[10]。在此之后,世界各国学者开始了广泛而细致的红外热像无损检测与评估技术的研究。

由于检测成本、检测精度等原因,红外热像无损检测早期主要应用于军事领域,如发动机喷管胶接质量的检验,管道的泄露检查等。这一阶段探讨的主要还是应用红外技术进行检测的可能性,相比较于其他检测方法(如超声、X 射线检测等),红外热像检测技术的优越性还没有真正体现出来,那时的红外检测尚处于发展的初期。

进入 20 世纪 70 年代以后,国外学者逐渐开始将热传导理论引入到红外热像检测的研究中, Carlslaw^[11]所作的工作比较具有代表性。这一时期,主要围绕均质体进行热传导研究,典型的代表是 Maldague^[12]、Vavilov^[13]、D. P. Alomond^[14]、Favro^[15] 等人,他们在不同热或冷激励条件下,相继对一、二维热传导进行了建模并获得了相应的解析或数值的解。这些工作为将红外热像检测上升到理论层次提供了理论基础。

20 世纪 80 年代后期,伴随着红外热像仪的摄像速度、像素和灵敏度等都朝着更高的方向发展和计算机数字信号处理技术的更加成熟先进,提高红外热像检测精度的研究得到了各国学者的广泛关注^[16-17]。同时,这一时期也相继涌现出了各种新的红外热像检测与评估技术,使这一技术在军事和民用中的应用达到了前所未有的广度和深度。这一时期发展的红外热像检测新技术主要包括:

1) 脉冲热像法 (Pulsed thermography)

脉冲热像法作为一种新型的红外热像检测技术,由英国哈韦尔国家无损检测中心的 Milne 和 Reynolds

于 20 世纪 80 年代初首先提出^[18]。它以脉冲热源作为热激励施加于被检测材料之上,并通过红外热像设备摄取被检测材料表面的温度场变化,以此来判断分析被检材料的材质均匀性以及内部的结构信息等。目前,脉冲激励分为闪光灯、热水和激光束等几种方式,其中对高功率闪光灯脉冲热激励的研究最为普遍,也最为成熟。脉冲热像法的检测原理见图 1 所示,图 2 给出了以闪光灯作为热激励源时该方法的检测示意图。

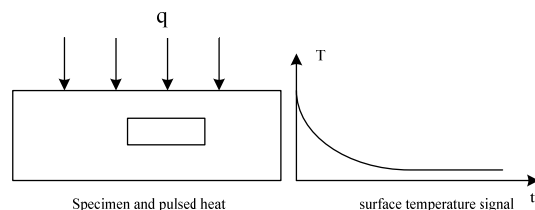


图1 脉冲热像法检测原理

Fig.1 The theory of pulsed thermography

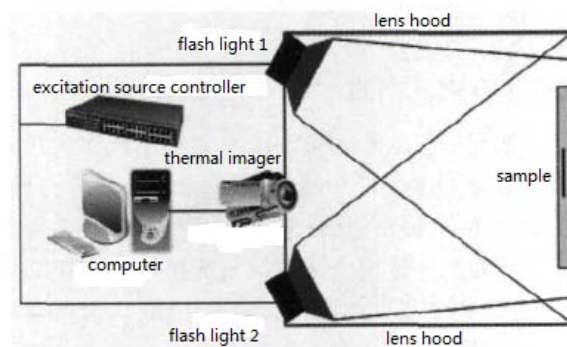


图2 闪光灯激励脉冲热像法(反射式)检测示意图

Fig.2 The detection diagram of flash excitation pulsed thermography(reflective)

2) 锁相热像法 (Lock-in thermography)

锁相热像检测技术,即通常所说的调制红外热波成像检测法,是德国斯图加特大学 G. Busse 教授在 1992 年提出的^[19]。它的初衷是为了克服红外热波检测灵敏度差和噪声干扰的问题,一定程度上对脉冲热像法的不足进行了弥补,检测原理如图 3 所示。此方法的技术原理是:利用谐波调制激励源在被测物体内部产生正弦热波,然后在激励周期中的某些特定时刻点上采用数字锁相技术摄取记录多幅物体表面热图像并重构热图像信号,提取到物体表面各点温度变化的相位图和幅值图。因为物体表面的入射热波会受到内部缺陷引起的反射波的影响,这样就可以利用前面提取到的相位图和幅值图来识别缺陷的存在以及大小尺寸等特征。

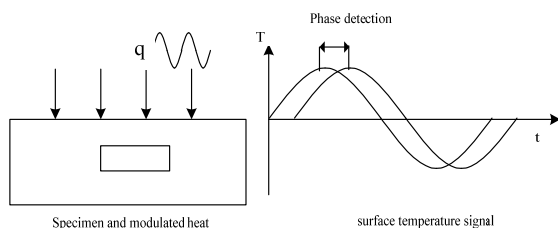


图3 锁相热像法检测原理

Fig.3 The theory of lock-in thermography

3) 脉冲相位热像法 (Pulsed phase thermography)

加拿大 Laval 大学 Maldague 教授于 1996 年提出了脉冲相位热成像技术^[20]。此方法既克服了脉冲热像检测法加热均匀性的苛刻要求,又避免了锁相热像法处理时间较长的缺点,是一种将它们二者相结合而建立起来的热像检测新方法。它对脉冲热成像的整个过程进行温度摄取采集,然后通过傅里叶变换提取出温度变化的相位信息,并以相位差来定义缺陷区域。相比于锁相热像检测法,该方法可以在一次脉冲检测实验过程中获取到多个频率下的检测结果,这样配合合理的采样时间和采样间隔就能获得完整的相位变化曲线。其检测原理如图 4 所示。

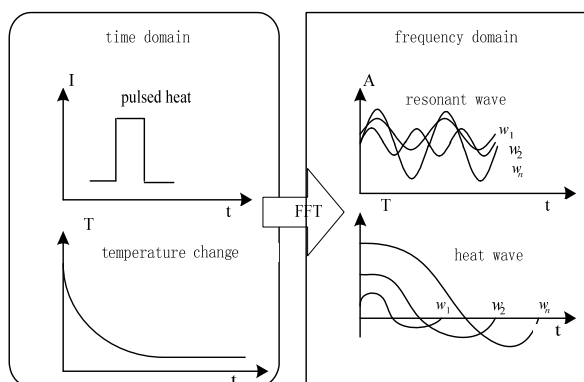


图4 脉冲相位热像法检测原理

Fig.4 The theory of pulsed phase thermography

4) 超声热像法 (Ultrasonic thermography)

Favro 等^[21]根据物体中声波的传播特性,将超声检测与红外热像技术结合在一起提出了超声热像检测法。与前面几种方法相比,此方法最大的特点是:被测试件激励源采用的是超声波,而热波则是源自于试件内部。当超声波施加于试件时,相比于无缺陷处的均匀区域而言,缺陷处的非均匀性区域的弹性性质会有所不同,这样在热弹性效应和滞后效应的影响下,此处的声衰减和热量就会相对多一些,也就是说,缺陷处的非均匀性区域得到了选择性加热。另外,热流量与材料的热学性质相关,通常而言,缺陷处的热流量会更小,即与相邻区域相比,它的热扩散更少。这样,当试件被施以超声振动激励以后,缺陷处的非

均匀性结构就能够通过红外热像设备摄取的试件表面异常温度分布显现出来。图 5 给出了超声红外热像法检测示意图。

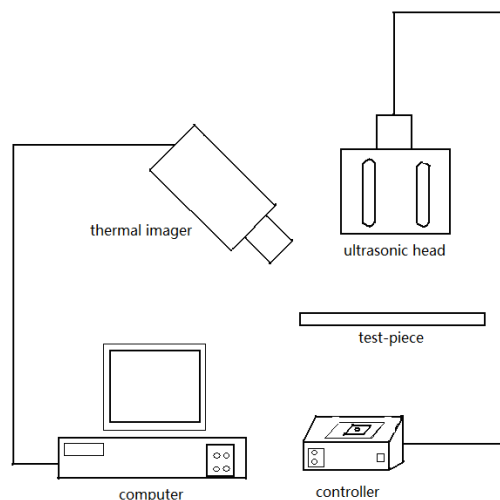


图5 超声红外热像法检测示意图

Fig.5 The detection diagram of ultrasonic thermography

2 红外热像检测技术国内发展和研究现状

与国外相比,红外诊断技术在我国的应用起步较晚。在整体水平上与技术先进的国家相比还存在一定的差距。尽管如此,经过多年的发展,我国在某些方面已经和国际先进水平看齐。目前,我国已经具备多种型号的制冷型红外热像仪的研制生产能力。全国首台非制冷焦平面 (FPA) 红外热像仪也于 2001 年由华中光电技术研究所研制成功,并投入了批量生产,摆脱了长期以来我国红外热像仪国外进口的依赖。从 20 世纪 70 年代华北光电技术研究所和昆明物理研究所首先开展红外热像检测技术研究以来,已有许多学者和单位致力于这一方面的研究。迄今为止,红外热像检测技术已经得到了国内各行各业广泛应用,有电力电子、石化冶炼等^[22]。

在电力方面:电力系统是我国研究开发与应用红外热像检测技术较为早的行业领域。主要应用于电力设备接头和裸露载导体热状态的在线检测。比如输电线路压接管、线夹、高压变电站的母线接头、高压变压器套管接头、配电线路接头和配电变压器接头等。目前,还可采用装有红外热像仪的无人机对高空、高压的电缆进行在线巡检。

在石油化工方面:在高温高压的工况下,石油化工设备存在着易燃易爆的潜在危险。为此在生产过程之中,有必要进行严格地在线巡查检测,比如:设备衬里损伤、管道保温层缺陷检测,高温炉管检测与剩余寿命评估,以及各类储液设备液位的检测等。

在钢铁冶炼方面:在钢铁冶炼过程中,从冶炼到轧钢的各个生产环节,红外热像检测技术都可以得到应用,比如应用于:诊断热风炉是否破损、在线实时测定钢锭的温度、确定高炉的残缺口位置等。

在医学方面:人体是一个热辐射波段在 $3\sim 50\mu\text{m}$ 的天然红外热辐射源。当人体患病时,体内的热平衡会遭到破坏,从而引发人体体表温度的异常分布。因此,医学上可以借助于摄取到的人体红外热像图来对皮肤病、乳腺癌等一些人体病变进行医疗诊断。

在材料探伤方面:基于不同材料热容量以及热辐射能力的差异性,可以让红外无损探伤把超声检测等一些常规探伤方法无法担当的工作胜任起来。比如:对于火箭发动机胶合夹层结构体的检测,利用超声等常规检测方法只能发现发动机外壳和衬里或发动机内壳和衬里之间的单一界面上的缺陷。这种情况下,红外热像检测法就是较为理想的选择了,一定程度上弥补了该方面的不足。

此外,红外热像检测技术在其他方面也有广泛应用^[23-24]。如电子线路板的检测与诊断、房屋诊断与建筑保温评估等。而且,在新型红外热像检测方法的应用研究上,国内学者也进行了相关的探索。

汤慧君^[25]对脉冲红外热像法的机理进行了研究,在热流传播的各种影响因素中,主要研究了缺陷位置(含深度及大小)、试件大小和厚度以及不同材质等因素的影响,引入了最佳理论检测灵敏度的概念并探讨了其影响因素;武翠琴等^[26]利用闪光灯对玻璃纤维夹杂试件进行脉冲加热,对其内部缺陷进行了实验研究;郭杏林等^[27]通过有限元分析方法模拟了锁相红外热像检测过程,分析了频率对检测的影响并进行了实验验证;赵延广等^[28]针对复合材料网格加筋结构的几种典型缺陷,基于锁相红外热像检测理论进行了缺陷检测,讨论了加载频率、输出电压偏移量对检测的影响;田裕鹏等^[29]对铝合金和聚合物两种典型的金属和非金属试件的亚表面缺陷进行了脉冲相位热成像检测的实验研究,并对比了传统红外热成像检测的对比度图像;马说郎等^[30]通过快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transform)的方法对包含特征频率的窄频带进行了选择,并对其进行线性调频Z变换(CZT, Chirp Z Transform)以此细化频率结构,解决了脉冲相位热像法在处理红外检测数据时频率分辨率不够的问题;针对超声热像检测法,徐维超^[31]研究了超声发射器与试件间的压力、超声波能量(对应超声波振幅)和超声波激励时间对裂纹缺陷检测的影响。

目前,还有其他许多单位和学者都对这些新出现的红外热像检测技术进行了一定的研究,文献[32]均

对此进行了相关报道。

3 展望

检测是手段,诊断是目的,检测是诊断的基础和前提,诊断是检测的最终结果。目前红外热像检测技术得到了大量的应用和研究,但是大部分还只停留在定性水平上,即通过红外热像获取的物体表面温度信息,结合检测者的自身经验,定性地判断出故障缺陷的存在与否。这种定性诊断难以满足设备生产、运行和维修对检测的可靠性要求,容易造成故障缺陷的错误判断而引发事故发生。另外,尽管为满足应用需求出现了脉冲热像法等一些新型的红外热波成像检测技术,但是这些技术对故障缺陷的诊断很多都是建立在简化的一维分析模型的基础上,与复杂的实际工程运用相差较远。因此,在多数热传导问题缺乏解析解的实际情况下,定量分析依然是这些新技术所遇到的最根本难题,依据其作出的初步定性判定,仍属于简易诊断的范畴,而不属于真正意义的红外热诊断学^[33]。

总体而言,红外热像检测技术至今基本上还是处于经验性判断层次,为了使其能够逐步发展为具备完善理论支撑和扎实实验基础的红外热辐射诊断学(Thermo diagnostics),除了一些新型红外热波成像检测技术机理性的应用研究外,从定性应用研究逐步走向定量应用研究将是今后红外热像检测技术的重要研究分支之一。在目前实际问题普遍缺乏解析解的情况下,得益于计算机技术和传热数值计算方法的发展和成熟,基于红外热像信息采用导热反问题的技术进行红外热诊断定量识别,为红外热像检测技术的定量应用研究提供了一种新思路,并得到了某些红外技术研究学者的关注^[34-37],该技术途径的思想为:以红外热像仪摄取的物体表面温度为目标输出结果,利用反演算法(如共轭梯度法、Levenberg-Marquardt法、遗传算法等)反演识别出物体内部结构缺陷或其它引发目标输出结果的输入信息。

参考文献:

- [1] 李晓刚,付冬梅. 红外热像检测与诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [2] LI Xiaogang, FU Dongmei. *Infrared thermal imaging detection and diagnosis technology*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] 张波,吕事桂. 基于双响应波段工作的红外热像仪测温原理与误差分析[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(6): 11-15.
- [4] ZHANG Bo, LV Shigui. Temperature Measurement of the thermal Infrared Imager Based on Two Response Working Wavebands and Its Error

- Analysis[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, **30**(6): 11-15
- [3] 莫朝霞, 陈沅江. 我国红外热像检测技术的研究和发展展望[J]. *激光与红外*, 2014, **44**(12): 1300-1305.
- MO Zhaoxia, CHEN Yuanjiang. Research and prospects of the domestic infrared thermography technology[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(12): 1300-1305.
- [4] Kaplan H. *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*[M]. US: SPIE, 1993.
- [5] Chatterjee K, Tuli S, Pickering S G, et al. A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques[J]. *NDT&E International*, 2011, **44**(7): 655-667.
- [6] 楼淼, 吕香慧, 张宇. 有机防腐涂层质量的红外热波无损检测[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(5): 522-525.
- LOU Miao, LV Xianghui, ZHANG Yu, et al. IR nondestructive testing of anti-corrosion organic coatings[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(5): 522-525.
- [7] 吕事桂, 杨立, 范春利, 等. 电缆老化红外热特征数值模拟与分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, **34**(2): 332-335.
- LV Shigui, YANG Li, FAN Chunli, et al. Numerical Simulation and Analysis of Infrared Thermal Characteristics of Aging Power Cable[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(2): 332-335.
- [8] 樊丹丹, 潘晋孝, 刘宾, 等. 多界面脱粘红外无损检测中热激励方法的研究[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(3): 284-287.
- FAN Dandan, PAN Jinxiao, LIU Bin, et al. Research of thermal excitation method in infrared NDT for multiple interface debonding[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(3): 284-287.
- [9] Maldague X P. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [10] 戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[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 & Applications*, 2007, **26**(1): 1-7.
- [11] Carslaw H S, Jaeger J C. *Conduction of heat in solids*[M]. London: Oxford University Press, 1959.
- [12] Maldague P F. Many-body corrections to the polarizability of the two-dimensional electron gas[J]. *Surface Science*, 1978, **73**(1): 296-302.
- [13] Vavilov V P, Shiryaev V V, Grinato E. Detection of hidden corrosion in metals by using transient infrared thermography[J]. *Insight*, 1998, **40**(6): 408-410.
- [14] Almond D P, Lau S K. Edge effect and a method of defect sizing for transient thermography[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **62**(25): 1063-1069.
- [15] Favro L D, Han X Y, Kuo P K, et al. Defect depth determination by thermal-wave imaging[J]. *Natural Science*, 1996(6): S139-S141.
- [16] Robert P. Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations[C]//*Orlando: Proceedings of SPIE*, 1999: 393-401.
- [17] Pokorni S. Error analysis of surface temperature measurement by infrared sensor[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(10): 1523-1533.
- [18] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composite and other materials by thermal pulse video thermography[J]. *SPIE*, 1984, **520**(6): 119-122.
- [19] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992(71): 3962-3965.
- [20] Maldague X P, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography[J]. *Appl. Phys*, 1996, **79**(5): 2694-2698.
- [21] Favro L D, Han X, Ouyang Z, et al. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(6): 2418-2421.
- [22] 陈大鹏, 毛宏霞, 肖志河. 红外热成像无损检测技术现状及发展[J]. *计算机测量与控制*, 2016, **24**(4): 1-6.
- CHEN Dapeng, MAO Hongxia, XIAO Zhihe. Infrared Thermography NDT and Its Development[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, **24**(4): 1-6.
- [23] 陈海鹏, 吴冬华, 徐磊, 等. 基于红外热成像技术的车厢内部火灾预警研究[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(6): 635-639.
- CHEN Haipeng, WU Donghua, XU Lei, et al. Research of fire early warning in internal compartment based on infrared thermal imaging technology[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(6): 635-639.
- [24] 郑小荣, 李红江, 高海林. 舰艇机电设备的红外热成像监测技术[J]. *舰船电子工程*, 2016, **36**(10): 151-154.
- ZHENG Xiaorong, LI Hongjiang, GAO Hailin. Infrared Thermal Imaging Monitoring Technology of Naval Ship Electromechanical Equipment[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, **36**(10): 151-154.
- [25] 梅林, 吴立德, 王裕文. 脉冲加热红外无损检测中的图像处理[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **12**(5): 372-376.
- MEI Lin, WU Lide, WANG Yuwen. Image processing in pulse heating infrared nondestructive test[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **12**(5): 372-376.
- [26] 武翠琴, 王卫平, 李言俊, 等. 主动式红外无损检测技术在复合材料缺陷探伤中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(8): 259-261.
- WU Cuiqin, WANG Weiping, LI Yanjun, et al. Applications of Active Infrared Thermographic NDT in the Composite Materials[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(8): 259-261.
- [27] 周正干, 贺鹏飞, 赵翰学, 等. 钛合金蜂窝结构蒙皮脱焊缺陷锁相红外热成像检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, **42**(9): 1795-180.
- ZHOU Zhenggan, HE Pengfei, ZHAO Hanxue, et al. Detection of skin

- desoldering defect in Ti-alloy honeycomb structure using lock-in infrared thermography test[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, **42**(9): 1795-180.
- [28] 赵延广, 郭杏林, 任明法. 基于锁相红外热成像理论的复合材料网格加筋结构的无损检测[J]. *复合材料学报*, 2011, **28**(1): 119-205.
- ZHAO Yanguang, GUO Xinlin, REN Mingfa. Lock in thermography method for the NDT of composite grid stiffened structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, **28**(1): 119-205.
- [29] 田裕鹏, 周克印, 赵莹莹, 等. 亚表面缺陷脉冲相位热成像检测技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2007, **39**(1): 94-98.
- TIAN Yupeng, ZHOU Keyin, ZHAO Yingying, et al. Evaluation of Subsurface Defect by Pulsed Phase Thermography[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, **39**(1): 94-98.
- [30] 马说郎, 马齐爽. 脉冲红外相位线性调频 Z 变换[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, **37**(11): 1435-1439.
- MA Shuohan, MA Qishuang. Pulse phase thermography chirp Z transform[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, **37**(11): 1435-1439.
- [31] 田干, 张伟, 金国锋, 等. 超声红外热波检测多模式激励的数值仿真研究[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2014, **35**(2): 171-175.
- TIAN Gan, ZHANG Wei, JIN Guofeng, et al. Numerical simulation of multi-mode excitation of ultrasonic infrared thermal wave detection [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2014, **35**(2): 171-175.
- [32] LIU J Y, WANG Y. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **53**(5): 348-357.
- [33] 关荣华. 红外诊断与导热反问题计算[J]. *红外技术*, 2002, **24**(5): 49-51.
- GUAN Ronghua. Study of Infrared Thermal Diagnosis for the Internal Conditions[J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(5): 49-51.
- [34] Danbata L B, Orlande H R B, Cotta R M. An inverse problem of parameter estimation for heat and mass transfer in capillary porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**(9): 1587-1598.
- [35] 吕事桂, 杨立, 范春利. 基于有限元离散的不规则管道几何边界红外瞬态检测识别[J]. *化工学报*, 2012, **63**(12): 3805-3811.
- LV Shigui, YANG Li, FAN Chunli. Identification of irregular pipeline geometry boundary using infrared transient inspection based on finite element discretization[J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(12): 3805-3811.
- [36] 吕事桂, 杨立, 范春利, 等. 采用混沌-LM 混合解法的材料缺陷单面红外检测定量辨识[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(2): 317-323.
- LV Shigui, YANG Li, FAN Chunli, et al. Material defect quantitative identification with single-side infrared inspection based on Chaos-LM hybrid algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2): 317-323.
- [37] 吕事桂, 阳再清, 丛书全. 基于导热反问题的复合材料内壁不规则缺陷 Ansys 二次开发红外诊断识别[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(12): 1204002-1-1204002-6.
- LV Shigui, YANG Zaiqing, CONG Shuquan. Secondary development of Ansys to the infrared diagnosis of irregular inner-wall surface defect of complex material based on inverse heat conduction problem[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1204002-1-1204002-6.