

红外热像无损检测技术的发展历程、现状和趋势

刘颖韬^{1,2,3}, 郭广平^{1,2,3}, 曾智⁴, 李晓丽⁵, 唐佳^{1,2,3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;

2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095; 3. 材料检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095;

4. 重庆师范大学 计算机与信息科学学院, 重庆 400047; 5. 北京理工大学 光电学院, 北京 100085)

摘要: 对红外热像检测技术在国内外的发展历程、发展现状和发展趋势进行了回顾和总结, 在仪器和销售市场、标准、技术研发机构等方面, 对国内外发展现状进行了详细对比。得出结论: 国内的红外热像检测技术研究与应用水平较国外还存在差距, 但是从研究与应用的格局上看还比较完整, 并具有一定的基础。

关键词: 无损检测; 红外热像无损检测; 红外热波

中图分类号: TN219; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)08-0063-08

The Development History, Status and Trends of Infrared Thermographic Nondestructive Testing

LIU Yingtao^{1, 2, 3}, GUO Guangping^{1, 2, 3}, ZENG Zhi⁴, LI Xiaoli⁵, TANG Jia^{1, 2, 3}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;

4. College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

5. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100085, China)

Abstract: The development history of infrared thermographic nondestructive testing was reviewed, and its status and trends were summed up in this paper. The current situation of instruments, sales markets, standards and research institutions at home and abroad was compared in detail. The conclusion that there was still a gap between the domestic and foreign in the level of research and application of infrared thermographic nondestructive testing was drawn.

Key words: nondestructive testing; infrared thermographic nondestructive testing; thermal wave

红外热像检测, 是基于红外辐射原理, 通过扫描、记录或观察被检测工件表面由于缺陷或内部结构不连续所引起的热量向深层传递的差别而导致表面温度场发生变化, 从而实现检测工件表面及内部缺陷或分析内部结构的无损检测方法。该技术相对于超声、射线、涡流等传统检测技术而言, 是一种发展较晚的无损检测新技术, 具有检测速度快、非接触、无污染、对构件近表面缺陷和特征敏感的特点。

收稿日期: 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1433122, 61571028)

作者简介: 刘颖韬(1976—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事红外热像检测技术研究与应用和超声 C 扫描设备的研制

通信作者: 刘颖韬, yingt.liu@163.com

近些年来红外热像检测技术在国内外都得到了较快的发展, 并出现了大量的检测标准。在国内, 该技术已经应用于航空、航天、风电等领域的产品检测和民用领域, 如石化、电力、建筑等的在役检测与监测。笔者对红外热像检测技术在国内外的发展历程、发展现状和发展趋势进行了回顾和归纳, 并对发展现状进行了详细对比。

1 发展历程

1.1 国外的发展历程

早在 1930 年, 就有人提出最初的主动法红外无损检测的思想^[1]。20 世纪 60 年代, Green 和 Alzofon 首次阐述了主动红外无损检测的基本理论

和应用。从此,世界各国的学者对红外无损检测与评价开展了广泛的研究。早期的红外无损检测由于检测成本、检测精度等原因,主要应用于军事领域,如发动机的检测,管子或容器的泄漏检查等^[1]。

应用红外物理理论、红外技术成果和传热学理论对材料、装置和工程结构等进行无损检测与诊断,民用方面首先是从电力部门开始的。20世纪60年代中期,瑞典国家电力局和AGA公司合作,对红外前视系统加以改进,并使用其对运行中的电力设备的热状态进行诊断,开发出第一代工业用红外热像仪^[2]。美国、加拿大、英国、瑞典和丹麦等国逐渐将红外热像无损检测技术应用于高压输电线路的航检,并在后来引入了自动跟踪系统。

建筑方面,瑞典在1966年开始采用红外热像技术检测建筑物节能保温性能,随后美国、德国等许多国家的研究人员也在这个方面进行了研究^[3]。

缺陷检测方面,20世纪60年代国外开始采用红外技术对缺陷进行检测,主要用于金属、陶瓷、玻璃、塑料、橡胶和发动机喷管胶接质量的检测。美国A3火箭曾采用红外检测。美国洛克希德公司用TIRIS红外横移检验仪检查C5飞机的胶接结构^[4]。俄罗斯也积极开展了胶接结构脱粘缺陷的检测研究。

20世纪70年代以后许多研究者开始将红外无损检测和热传导理论联系起来,随后开展了非均质体的热传导研究,研究了不同激励条件下的一维、二维热传导模型及其解析解和数值解,具有代表性的有MALDAGUE, VAVILOV, ALOMOND等的工作^[5]。这些工作为红外热像检测提供了理论基础。

20世纪80年代后期,随着具有高采集速率、高像元、高灵敏度的红外热像仪的出现和计算机技术、数字信号处理技术的发展,各国专家不断提出新的检测方法和信号处理技术以提高红外检测的能力。瑞典AGA公司于1995年前后开发了一种全新的加热方式——调制加热法(Modulated Thermograph, MT)。在此基础上产生了锁相红外技术(Lock-in Thermograph, LT)^[5]。1996年MALDAGUE X等提出了一种新的信号处理技术——脉冲相位法(Pulse Phase Infrared Thermography, PPT)^[6]。随后,各种新方法和新的信号处理技术不断涌现。

1.2 国内的发展历程

在国内,电力系统是研究开发与应用红外无损检测技术较早的行业^[7]。早在20世纪70年代初,

我国就在电力设备的故障诊断中应用了该项技术。中国石油化工集团公司于1986年同时引进了6台红外热像仪,分别在下属子公司进行使用。利用这些热像仪分别对大化肥装置热交换器、离心压缩机、铂重整装置冷壁反应器、合成氨装置二段转化炉管、催化裂化反应器、再生器和提升器等设备进行了检测,获得了宝贵的经验,并取得了很大的经济效益^[8]。但是,此时的红外无损检测技术是被动式的无损检测方法。后来,红外无损检测技术又逐渐被应用到电子、建筑和临床医学等领域^[9],如电网绝缘子的无损检测^[10]、太阳能电池和太阳能电池板的检测^[11-12]、印刷电路板和集成电路的检测^[13-14]、焊接缺陷检测^[15]、建材质量检测^[16-17]、建筑工程质量检测^[18]、火灾混凝土结构损伤检测^[19]、胶片缺陷在线检测^[20]、高温压力管道检测^[21]、太阳能热水器保温桶检测^[22]、压力容器安全检测^[23]等,这一阶段主动式检测方法逐渐出现。

20世纪90年代中期,北方交通大学在国内首次使用闪光灯作为脉冲热源进行主动式的红外无损检测的尝试,取得了初步成果,后由于主要研究人员离去,研究未能继续。近年来,北京航空材料研究院、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、航天703所、北京卫星制造厂、南京大学、中国矿业大学、复旦大学、西安交通大学、海军工程大学等多所大学及研究机构都进行了一些主动式红外检测方面的理论和实验研究。2003年5月由归国留学生发起,首都师范大学、北京维泰凯信公司和北京航空材料研究院共同组建了专门从事红外无损检测与评估技术研究的联合实验室,该实验室已经在热波理论、基础实验和应用实验研究领域取得了许多成果。

2 总体发展现状

2.1 国外总体发展现状

目前开展红外检测研究的国家有几十个,其中美国、加拿大、俄罗斯、德国、瑞典、法国和意大利等国的技术发展较快,主要应用于航空航天、电力、电子、冶金、石油化工、材料、建筑工业和医疗卫生等领域。很多知名大公司,如西屋-西门子、洛克西得、波音、空客、诺顿、罗依斯罗尔斯、通用汽车、福特汽车、通用电气、英特尔等也纷纷建立了红外无损检测实验室,用于解决各自的无损检测问题。此外NASA、TWI Inc.、加拿大Laval Univ.、德国Stuttgart Univ.等

都在该领域的理论和实验方面进行了富有成效的研究,极大地拓展了红外检测技术的应用领域,发明了诸如脉冲加热、脉冲相位、超声红外等无损检测方法和技术。

红外检测技术在对各类飞机机身的检测,如在复合材料的层析探伤,机身表面下蜂窝材料结构中的积水、液压油渗漏及其他类型损伤的识别,铝蒙皮疲劳裂纹的检测,机身锈蚀的定量测量等方面,都得到了成功的应用,并制定了相关的检测标准和操作手册。波音、空客公司均制定了红外检测标准。ASTM(美国材料与试验协会)也制定了闪光加热红外热像检测标准。

红外热波无损检测技术在美军装备维修中有许多成功的应用。应用的机型有:F-22、F-18、F-16、F-15、B-2、AV-8、V-22“鱼鹰”、P-3、E-2C、JSF、F-14、EA-8B、C-130、C-40A等飞机以及CH-46、HH/UH-1N、CH-53、MH-53、SH-60、TH-57等直升机^[24]。

红外热像检测技术在建筑节能监测、建筑物饰面层粘贴质量的检测和建筑物渗漏检测等方面均有研究和应用。在电力、电子、机械设备、文物保护和医疗等领域的应用也很广泛。

2.2 国内总体发展现状

现阶段,我国红外无损检测技术已经得到了广泛的应用,主要应用于电力工业、石油化工、钢铁工业、建筑、电子工业、文物保护、航空航天和医疗等领域。在电力方面,主要用来检测发电机组装置、输电线接头、绝缘部件等。在石油化工方面,对高温高压状况下的设备进行在线检测、监测异常热区的出现,为设备的维修和养护提供支持。在钢铁工业方面,红外检测技术可用于冶炼到轧钢的各个生产环节,例如:热风炉的破损诊断、钢锭温度的测定、高炉残缺口位置的确定等^[25]。在建筑方面,主要用于建筑节能监测和建筑物饰面层粘贴质量的检测^[26-27],在建筑物渗漏和建筑结构混凝土火灾受损、受冻融等检测方面也有研究。在电子工业方面,实现了印刷板电路的自动检测^[25]。在文物保护方面,国内多家相关单位将红外热像检测技术运用在病害探测和修复保护效果评价方面,如空鼓探测、内部裂隙探测和水份分布分析等^[28]。在航空航天方面,北京航空材料研究院、航空623所、北京卫星制造厂和航天703所等单位在材料与构件的红外检测方面开展了大量的研究与工程应用工作,如夹层结构件的脱粘缺陷

检测、在役飞机的蜂窝积水检测、吸波涂层的缺陷检测与厚度测量、热障涂层的缺陷检测等,其中北京航空材料研究院和北京卫星制造厂已将红外检测技术用于某些具体产品的质量检测上。

除了上述领域的企业和研究所进行的红外检测研究与应用外,很多高校对红外检测的基础理论进行了研究,如北京航空航天大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、首都师范大学、中国矿业大学等在建模分析、信号处理、图像处理和定量分析等方面进行了多年、大量的研究,取得了很多宝贵成果。此外,首都师范大学联合北京维泰凯信公司进行了多种检测设备的研制,申请并获得了多项专利,部分设备已进入试用阶段。

除了企业、科研院所和高校的自主研究外,国内还出现了与国外公司合作、提供红外热像检测服务的公司,为用户电器设备的在役检测和维修提供服务。或者是国外的检测公司直接在中国设立分公司,提供先进的、成熟的检测服务,譬如KM Instrument(中国)。

近两年,我国在红外热像检测的人员资格鉴定与认证方面,取得了突破性的进步。在中国机械工业学会无损检测学会的大力支持下,由首都师范大学和北京维泰凯信新技术有限公司牵头,于2012年建立了国内第一个红外培训中心,首都师范大学联合热波实验室的老师编写了培训教材,并于同年8月份在首都师范大学成功举办了第一期红外无损检测资质认证与培训,使得红外无损检测技术成为第一种纳入到中国机械工业学会无损检测资质认证的新技术。

2.3 工程应用面临的挑战

虽然红外热像检测技术具有检测速度快、非接触、无污染和检测结果直观的特点,但是在检测灵敏度、可靠性方面与一些传统无损检测方法(如超声检测)相比并没有优势,所以在对检测要求高的产品上难以替代原有检测技术,除非某些产品无有效检测方法,而恰好红外热像检测方法适用,才可能被应用上。譬如,某些航空航天产品不允许使用耦合剂,或形状复杂,或内部存在多个界面,或蒙皮厚度非常薄,此时才有可能应用上该技术。而在外场在役检测方面,红外热像检测技术应用的舞台更大一些,但是传统方法也在不断进步,各种新技术,如空气耦合超声、超声相控阵、阵列探头扫描装置(以提高扫查速度和实现成像)等不断涌现出来。因此,在掌握红外热像检测技术及其特点的前提下,找到合适的

工程应用切入点很重要。

由于红外热像检测技术本身工程应用不多,与传统方法相比,其发展和实践的时间较短,技术成熟度不够,国内、外尚缺乏普遍接受的缺陷判定方法、定量分析方法,虽然国家标准(详见5.2节)已经在这个方面迈出了重要一步,但是还需要通过大量工程实践来进行检验和完善。

所以,在线检测、自动化检测和便携式检测设备的研发,以及缺陷判定与定量分析,是需要着重发展的两个方面。

3 检测方法发展现状

3.1 基本概况

红外热像检测技术按照有无人为激励可以分为被动式红外热像检测技术和主动式红外热像检测技术。被动式红外热像检测技术利用被检测物自身的温度场分布进行检测分析,如电力、电子器件或机械零部件工作时的非正常发热(高温升),或利用自然条件产生激励进行检测,如阳光照射的周期性、飞机从高空降落到地面的环境温度差等。主动式红外热像检测技术则采用人工主动的激励方式激励被检测物,使其产生变化的温度场,根据温度场的分布变化分析被检测物的内部信息。现在有关红外热像检测的研究主要集中在主动式红外热像检测方面。

主动式红外热像检测的激励方式按照激励源的物理特性可以分为光学激励、热激励、振动激励^[29]、电磁激励等几大类。光学激励方式常见的有闪光灯激励、卤素灯长脉冲激励、卤素灯调制激励、激光脉冲激励等;热激励方式常见的有热吹风加热、电热毯加热等;振动激励方式常见的是超声激励方式,包括接触式和非接触式;电磁激励主要采用感应线圈对被检测物进行电磁感应激励。

主动式红外热像检测的激励方式按照激励源的信号特征,还可以分为 δ 函数式脉冲激励(如闪光灯激励)、长脉冲激励和调制激励。

3.2 具体检测方法

根据激励源的不同,检测工艺和数据与图像处理方法也随之不同,进而演化出各种具体的检测技术,常见的有闪光灯激励红外热像法、光学调制热像法、超声激励红外热像法(又可以分为脉冲式和调制式)、电磁激励红外热像法。按照数据处理方法的不同,有TSR技术、脉冲相位法、主分量分析法、动态热层析等。

根据国内外研究与应用现状来看,闪光灯激励红外热像法是最为成熟的方法之一,国内外均有很多相关标准发布。该方法可用于金属、非金属、复合材料的缺陷检测和涂层测厚。但是当被检测物具有可见光半透明性或是被检测表面反光时,则检测结果会受到明显影响,此时需要对被检测表面进行喷漆或覆膜处理。

光学调制热像法,主要采用卤素灯进行加热,加热功率被人为调制,对应的数据处理方法随之改变。该方法的主要检测工艺参数比闪光灯激励红外热像法多了一个调制频率。该方法适用范围也很广泛,其检测深度理论上比闪光灯激励红外热像法深一些,但是针对具体检测物的检测工艺参数研究要复杂一些,需要确定调制频率。该方法同样受到被检测物表面的影响。

超声激励红外热像法,利用超声激励使得被检测物的微裂纹在振动过程中发生摩擦,将一部分机械能转化为热能,使其对应区域的表面温度出现明显差异。该方法对接触表面有一定的损伤,不能用于涂层脱粘缺陷的检测,并且在裂纹定量评价方面尚不成熟,工程应用受到制约。

电磁激励红外热像法又称感应激励红外热像法,是一种比较新的检测技术,也是当前的研究热点之一。该方法的主要研究与应用对象是铁磁性材料的裂纹检测。其原理是:利用高频磁场在被检测物表面产生感应电流,被测表面如有裂纹存在,则产生更多的热量,从而使得对应区域的表面温度出现异常^[30]。

4 仪器和销售市场发展现状

4.1 国外的发展现状

制冷型红外热像仪是红外热像仪中的高端系列,生产的核心技术掌握在发达国家,较大的生产商包括Indigo、Flir、RNO、Raytek、NEC、Fluke、InfraTEC、TESTO、Telops等。

成套的红外无损检测设备以美国的Thermal Wave Imaging(TWI)公司闪光灯激励红外产品为代表,目前国际和国内已有相关标准,技术较为成熟。由于它集成度高,操作简单,重复性好,国际上的一些大公司,比如波音、美国的劳拉空间系统公司、英国皇家空军、美国航天公司、美国联合航空等,以及国内一些单位,如首都师范大学、西北工业大学、中国民航科学技术研究院、航空材料研究院等,

都引进了这套系统。TWI公司除了脉冲激励红外检测产品外,还有超声激励红外检测系统,以及低成本化的便携设备。

德国 edevis GmbH 也开发了多种激励方式(锁相、脉冲、激光、超声等)的红外检测设备,但集成度不高,比较适合实验室研究使用。德国 AT 公司的 C-CheckIR(简称 CCIR)便携红外探伤仪,集成度较好,可应用于航空航天领域。

此外,有一些红外热像仪公司也加入了红外设备开发的行列,比如 Flir、InfraTEC 都生产红外锁相系统。

4.2 国内的发展现状

国内也有多家企业和研究所提供热像仪产品,但由于起步较晚,目前产品以非制冷热像仪为主,比如武汉高德、广州飒特、深圳欧普士等单位,有些研究所比如航天三院 8358 所、昆明物理研究所等单位都有将红外技术民用化的导向,有些产品正在研制中。

国内也有少数单位研制红外无损检测成套或配套系统,其中北京维泰凯信新技术有限公司发布了 WTKX-IRNDT 便携式红外检测系统,其选用了非制冷热像仪降低了成本,并可以搭载辐射加热和热风加热两种激励办法,方便外场使用和大规模推广。南京诺威尔光电系统有限公司研制了激光激励加热装置,可以用于红外检测。北京航空航天大学和北京华泰科恩有限公司合作开发了商业化红外无损检测设备,有脉冲热像检测、调制及阶跃热像检测两个系列。

5 标准发展现状

5.1 国外的发展现状

ASTM 于 2007 年制定了闪光激励红外热像检测标准:ASTM E 2582-07 *Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications*。在 2009 年的“ASTM E 2533-09 Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications”中也将闪光激励红外热像检测技术作为复合材料检测的一种重要方法进行了详细的说明。

国际标准化组织(ISO)随后发布了多个红外热像的检测标准,具体有:

ISO 10878: 2013 *Non-destructive Testing – Infrared Thermography – Vocabulary*

ISO 10880: 2017 *Non-destructive Testing – Infrared Thermographic Testing – General Principles*

ISO 18251-1: 2017 *Non-destructive Testing – Infrared Thermography – Part 1: Characteristics of System and Equipment*

波音、空客均制定了红外检测标准。此外,还有有关红外检测的 ASNT 标准。

5.2 国内的发展现状

参考 ASTM E 2582-07,并依据多年的实验检测研究结果,由北京维泰凯信新技术有限公司、首都师范大学、北京航空材料研究院等单位牵头编写了关于闪光灯激励红外热像法的国家标准,包括导则、试块、检测系统、检测规范四个部分,均已正式发布。随后,参考 ASTM E 2582-07,中国航空综合技术研究所牵头编写了航空标准《航空复合材料闪光灯激励红外热成像检测方法》,中国国际航空公司工程技术分公司成都维修基地、南京航空航天大学、中国民航科学技术研究院等单位牵头编写了民航标准《航空器复合材料构件红外热像检测》。此外,电力行业和建筑行业均建立了关于红外热像检测的行业标准。目前已发布的国家标准、行业标准有:

GB/T 12604.9—2008《无损检测 术语 红外检测》

GB/T 26643—2011《无损检测 闪光灯激励红外热像法 导则》

GB/T 31768.2—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 2 部分:检测规范》

GB/T 26643.3—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 3 部分:试块》

GB/T 31768.4—2015《无损检测 闪光灯激励红外热像法 第 4 部分:检测系统》

GB/T 19870—2005《工业检测型红外热像仪》

MH/T 3022—2011《航空器复合材料构件红外热像检测》

HB 8428—2014《航空复合材料闪光灯激励红外热成像检测方法》

DL/T 664—2011《带电设备红外诊断应用规范》

DL/T 907—2004《热力设备红外检测导则》

JGJ/T 277—2012《红外热像法检测建筑外墙饰面粘结质量技术规程》

JG/T 269—2010《建筑红外热像检测要求》

最近,由中国特种设备检测研究院牵头编写的 ISO 18251-1:2017 已发布。该标准是第一部由中国无损检测界专家编写的 ISO 无损检测标准。

6 技术研发机构发展现状

6.1 国外的发展现状

美国的 Wayne State University, 20 世纪主要进行脉冲红外热波技术研究, 自 20 世纪末主要开展超声激励红外无损检测技术研究。其获得了多项美国国家自然基金支持, 以及包括来自美国空军等军方项目支持。主要研究了金属材料的裂纹检测, 包括涡轮叶片及轮盘, 以及复合材料的脱粘和粘接检测等。提出了超声激励振动信号的混沌理论, 进行了相关的有限元分析等, 推动了超声激励红外无损检测技术的发展。

美国的 Iowa State University, 主要开展超声激励红外无损检测技术研究, 研究了缺陷处产生热量的理论机制, 并开展了叶片检测的应用研究。

Simens(美国)主要利用红外技术对叶片进行在线监控及寿命预测研究, 并将红外在线监控、脉冲红外热波和超声激励红外热波技术集成为一个大型装备。

加拿大的 Laval 大学, 重点对红外技术的数据和图像处理进行研究, 最重要的成果是 ppt 算法, 也就是脉冲相位算法。

英国 Bath 大学, 较早开始红外无损检测研究, 主要是进行脉冲红外热波技术的研究, 也开展了激光激励和超声激励方法的部分研究。研究工作较多的集中在理论方面, 发表了大量论文。

英国的 New Castle 大学, 主要对涡流激励红外技术做了大量的相关理论和应用研究, 其应用也包括叶片裂纹检测。

美国的 TWI(Thermal Wave Imaging)公司, 最初是由 Wayne State University 的几位教授成立的。该公司已经开发了多个系列的红外检测设备, 包括超声激励系统。软件方面的主要特色是开发了热波信号重建算法。此外该公司也做了大量的脉冲红外技术应用检测服务工作。

俄罗斯的托姆斯克理工大学, 在建模分析、数字图像处理和工程应用方面进行了多年的研究, 在理论分析、仿真分析和应用软件开发方面成绩显著。

此外, 也有其他国家的一些高校和研究机构进行红外检测方面的研究, 此处不一一列举。

6.2 国内的发展现状

首都师范大学联合北京维泰凯信新技术有限公司、北京航空材料研究院和航天 703 所等单位在首

都师范大学建立了联合实验室, 专门开展红外热波(热像)检测技术的研究与工程应用, 针对多领域的產品检测和在役检测进行了应用研究, 并研制出多种检测设备。

北京航空航天大学, 南京航空航天大学, 哈尔滨工业大学, 中国矿业大学等多所高校在建模分析、信号处理、图像处理和定量分析等方面进行了大量的研究, 他们跟踪国外技术发展的趋势, 开发了多种激励装置和信号处理、图像处理技术。

北京航空材料研究院、北京卫星制造厂、航天 703 所和航空 623 所等单位在复合材料构件缺陷检测、涂层缺陷检测、涂层厚度测量和飞机在役检测等方面进行了多年的研究与应用^[31-33], 部分型号产品已采用红外热像检测技术作为主要检测手段。此外, 近几年, 北京航空工程技术研究中心、中国特种设备检测研究院和中国民航科学技术研究院等单位也积极开展了工程应用研究。

7 技术发展趋势

红外无损检测技术的发展趋势主要有三个方面:

(1) 新方法、新技术、新算法的探索研究, 如新的激励手段、新的检测方式、新的检测方法和新的图像处理方法等^[34-37]。通过这些新技术的研究, 不断拓展红外检测技术的应用领域和检测能力, 如 TSR(热波信号重建)方法在定量分析方面的应用^[38], 锁相热像法在缺陷类型、试件厚度测量、横向导热计算等方面的应用^[39], 振动热像法确定分层缺陷深度的研究^[40], 电磁激励红外热像检测焊缝裂纹的试验研究^[41]等。在红外检测技术的应用中进行缺陷定量分析是比较困难的, 这也是制约该技术迅速得到工程应用的一个因素, 因而其也越来越受到研究者的重视。

(2) 工程应用研究, 包括在线检测、自动化检测和便携式检测设备的研发^[42-44], 如在飞机构件中的应用^[45], 在管道的维护与检测中的应用^[46], 检测时外界环境对检测结果的影响^[47]等研究。工程应用往往需要在外场进行检测, 而外场检测环境更为复杂, 检测条件更加恶劣, 环境温度、阳光反射、大气湿度和风速等都会对检测结果产生影响, 进行这方面的研究并研制便携式检测设备都是必要的。

(3) 红外检测技术与其他无损检测技术相结合。为更好地解决实际的检测问题, 常需要采用优

势互补的两种或多种检测方法,从而提供完整的无损检测方案,如红外检测与涡流检测相结合对碳纤维蒙皮、铝蜂窝制件进行缺陷检测^[48],红外检测与X射线检测结合对碳纤维复合材料中的缺陷进行定量分析^[49]等。

8 结语

相对于国外,国内的红外热像检测技术研究与应用起步较晚,尤其是对主动式红外热像检测技术的研究较落后。虽然从21世纪初开始,在首都师范大学联合热波实验室,该技术得到了显著的推动,在复合材料检测和涂层测厚方面进步明显,但是较国外的技术发展水平仍存在差距。

目前国内进行红外热像检测的单位有高校、科研院所和企业公司,从格局上看比较完整,并具有了一定的研究基础。虽然整体水平较国外落后,但是相信通过发挥各级无损检测学会的组织、引导功能,依托专业技术交流平台,利用企业、公司需求的牵引,产学研可以紧密地联系起来,我国的红外热像检测技术今后会有更快的发展。

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现状[J].自动化技术与应用,2007, 26(1):1-7.
- [2] 李喜孟,王立君,刚铁,等.无损检测[M].北京:机械工业出版社,2009:134-145.
- [3] 袁仁续,赵鸣.红外热像技术在无损检测中的应用研究进展[J].福州大学学报(自然科学版),2005, 33(Z):203-207.
- [4] 朱建堂.激光、红外和微波无损检测技术的应用与发展[J].无损检测,1997,19(11):314-319.
- [5] 何嘉武,张超省,冯辅周,等.红外热波无损检测技术的研究现状及应用[J].振动与冲击,2010,29(Z):293-296.
- [6] MALDAGRE X, MARINETTI S. Pulse phase infrared thermography [J]. Journal of Applied Physics,1996,79(5):2694-2698.
- [7] 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,1999,21(10):466-468.
- [8] 李晓刚,付冬梅.红外热像检测技术在石化工业中的应用[J].激光与红外,2000,30(5):265-268.
- [9] 陈衡.我国红外诊断技术的现状与展望[J].激光与红外,1998, 28(5):292-296.
- [10] 李晓红,丁杰,陈汉明,等.电网绝缘子的无损检测技术[J].无损检测,2004, 26(3): 129-131.
- [11] 王祥林,姜涛,王裕文,等.非晶硅太阳能电池的电加载热象无损检测[J].西安交通大学学报,1996,30(12):82-86.
- [12] 杨维翰,王培珍,周雷.太阳能光伏阵列故障诊断的研究[J].安徽工业大学学报,2003, 20(4):345-348.
- [13] 陈国顺,吴国庆,王格方,等.红外成像技术在自动测试设备中的应用[J].红外与激光工程,1999,28(2):25-27.
- [14] 王格芳,陈国顺,孟亚峰,等.基于红外热成像的集成电路检测与诊断[J].激光与红外,1999,29(5):315-317.
- [15] 任彬,汪炳权.红外无损检测中焊接缺陷的特征参数提取方法[J].红外技术,1996,18(5):43-45.
- [16] 曾令可,张功元,吴卫生,等.墙面砖红外热成像无损检测及计算机模拟[J].硅酸盐学报,1995, 23(4):392-398.
- [17] 黄莉,李卓球,宋显辉,等.碳纤维增强混凝土中裂纹的红外热像检测方法与机理研究[J].实验力学,2003,18(3):403-408.
- [18] 邱平,张荣成,袁海军.红外热像法和雷达法在工程质量检测中的应用[J].施工技术,2004,33(8):53-54.
- [19] 苗春,张雄,杜红秀.火灾混凝土结构损伤检测技术进展[J].无损检测,2004, 26(2):77-81.
- [20] 梁燕,刘文耀,刘鸣,等.胶片缺陷在线检测方法的研究[J].光电子DK·激光,2002,13(12):1276-1280.
- [21] 孙全胜,李涛.红外检测技术在探伤中的运用[J].红外技术,2003,25(2):65-69.
- [22] 隋婧,王霞,金伟其,等.太阳能热水器保温桶缺陷的红外检测技术[J].红外技术,2004,26(3):75-77.
- [23] 黄毅.热弹性红外图像安全检测系统[J].中国科学院院刊,2003(3):202-205.
- [24] 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(5):41-43.
- [25] 刘莹,张记龙.材料的红外无损检测技术及其进展[J].华北工学院测试技术学报,2001, 15(4):275-279.
- [26] 蒋济同,徐华峰,吴景福.红外热像法检测建筑物外墙外保温缺失的数值模拟[J].无损检测,2015,37(10):39-46.
- [27] 朱雷,房志明,王卓琳,等.外墙饰面层粘结缺陷的检测评估[J].无损检测,2016,66(1):10-16.
- [28] 周霄,付永海,李黎.承德永佑寺避暑山庄后序碑红外热像[J].无损检测,2015,37(4):33-36.
- [29] 管和清,郭兴旺,马丰年.铝合金梁裂纹振动红外热像检测的数值模拟[J].无损检测,2016,38(9):1-5.
- [30] 李托雅,田裕鹏,王平,等.感应激励红外热像无损检测及其在裂纹检测中的应用[J].无损检测,2014,36(1):15-18.
- [31] 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的应用[J].航空材料学报,

- 2012,32(1):72-77.
- [32] 刘颖韬,牟仁德,郭广平,等.热障涂层闪光灯激励红外热像检测研究[J].航空材料学报,2015,35(6):83-90.
- [33] 王智勇,刘颖韬,王小虎,等.红外热像检测技术在吸波涂层缺陷研究中的应用[J].航空材料学报,2012,32(3): 91-94.
- [34] THOMAS R, LIBIN M N, BALASUBRAMANIAN K. Scanning Induction Thermography (SIT) on damaged Carbon-Fiber Reinforced Plastics (CFRP) components[C]// 12th International Conference on Quantitative Infra Red Thermography (QIRT). Bordeaux:[s.n], 2014.
- [35] ABUHAMAD M, NETZELMANN U. Dual-band active thermography on infrared transparent materials [C]// 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s. n], 2010.
- [36] JEAN-LUC BODNAR, JEAN-CHARLES CANDORÉ, JEAN-LOUIS NICOLAS. Random photothermal thermography: Principle and examples of applications[C]// 10th International Conference on Quantitative Infra Red Thermography. Québec:[s. n], 2010.
- [37] ANDRÉS D, RESTREPO G, HUMBERTO LOAIZA C. Background Thermal Compensation by Filtering (BTCF) for Contrast Enhancement of Thermographic Sequences [C] // 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Bordeaux:[s.n],2014.
- [38] BALAGEAS D L. Thickness or diffusivity measurements from front-face flash experiments using the TSR (thermographic signal reconstruction) approach [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n], 2010.
- [39] HOLTmann N, SPIESSBERGER C, TLEITER A, et al. Feature-extraction from lock-in-thermography phase-images[C]// 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n], 2010.
- [40] SALAZAR A, MENDIOROZ A, APIÑANIZ E, et al. Application of vibrothermography to the depth characterization of delaminations [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec :[s.n], 2010.
- [41] 刘慧龙,刘志平,刘兴乐.电磁激励红外热像检测焊缝裂纹试验研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(6):87-94.
- [42] SCHULZ R, VERSTOCKT S, VERMIREN J, et al. Thermal Imaging for Monitoring Rolling Element Bearings [C] // 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Bordeaux:[s.n],2014.
- [43] IBARRA-CASTANEDO C, SERVAIS P, ZIADI A, et al. RITA - Robotized Inspection by Thermography and Advanced processing for the inspection of aeronautical components [C] // 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Bordeaux:[s.n],2014.
- [44] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Towards automatic defect detection in carbon fiber composites using active thermography[C] // 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Bordeaux:[s. n], 2014.
- [45] ULLMANN T, AOKI R, SCHMIDT T. Lock-in Thermography for Process Integrated Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Aircraft Structures [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n],2010.
- [46] PARK H S, CHOI M Y, PARK J H, et al. Using ultrasound infrared thermography to detect defects in pipes [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n],2010.
- [47] BORTONI E C, SANTOS L. Development of models to extract ambient variables influence from outdoor thermographic inspections [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n], 2010.
- [48] GRENIER M, IBARRA-CASTANEDO C, MALDAGUE X. Development of a hybrid non-destructive inspection system combining induction thermography and eddy current techniques[C]// 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n],2010.
- [49] HUEBNER S, STACKELBERG B V, FUCHS T. Multimodal Defect Quantification [C] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Québec:[s.n],2010.