

红外热像技术及其应用的研究进展*

李国华, 吴立新, 吴 森, 曲敬信

(中国矿业大学(北京校区)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:论述了红外热像技术及其在温度(场)测试方面的特点, 红外热像设备的研究发展历程及国内外的最新进展。对红外热像技术在材料或构件的无损检测与评价, 电力和石化设备的状态热诊断, 构(建)物的状态检测与节能评测, 电子元器件、PCB 板及整机的自动测试, 地震、岩爆等自然灾害防治等方面的国内外应用研究进展的情况进行了简要评述, 并展望了红外热像技术的应用前景。

关键词: 红外热像; 无损检测; 热诊断; 灾害防治

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0227-04

Current status and applications of infrared thermography*

LI Guo-hua, WU Li-xin, WU Miao, QU Jing-xin

(Department of Mechanical, Electrical and information Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing Campus), Beijing 100083, China)

Abstract: The main characteristics of IR thermography on temperature measurement and the development of infrared thermographic equipments are discussed. Applications of IR thermographic techniques on NDT&E of materials and structures, thermal diagnosis of equipments, testing of structures and buildings, and prevention and cure of disasters are reviewed. The application prospect of IR thermography is expected.

Key words: Infrared thermography; NDT; Thermal diagnosis; Prevention & cure of disaster

0 引 言

红外热像技术利用红外辐射原理, 通过测取目标物体表面的红外辐射能, 将被测物体表面的温度分布

转换为形象直观的热图像(灰度图或彩色图)。

红外热像技术是目前最为活跃的研究热点之一。它具有以下特点:(1)响应速度快。传统的测温技术(如热电偶)的响应时间一般为秒级, 而热像仪测温的响应时间多为毫秒甚至微秒级, 因此热像仪可以测取

收稿日期: 2003-07-04; 修订日期: 2003-11-06

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172090); 中国矿业大学机电与信息工程学院青年科技基金资助项目(2002-2)

作者简介: 李国华(1966-), 男, 江西新余人, 副教授, 博士生, 主要研究方向为设备故障分析、无损检测、摩擦学与表面工程、测试计量技术及仪器, 出版著作一部, 发表论文 20 余篇。

快速变化的温度(场);(2)测量范围宽。玻璃温度计的测温范围为 $-200\sim 600^{\circ}\text{C}$,热电偶的测温范围为 $-273\sim 2750^{\circ}\text{C}$,而辐射测温的理论下限是绝对零度(即 -273.16°C)以上,没有理论上限。目前实际的辐射测温上限可达 $5000\sim 6000^{\circ}\text{C}$;(3)非接触测量。由于测取的是物体表面的红外辐射能,不用接触被测物体,也不会干扰被测的温度场,故红外热像技术非常适合于测量运动的物体、危险的物体(如高压线缆)和不易接近的物体;(4)测量结果直观形象。红外热像仪以彩色或黑白图像的方式输出被测目标表面的温度场,不仅比单点测温提供更为完整、丰富的信息,且非常直观形象。因此,它不仅在军事领域得到了充分的重视,成为现代军事对抗的制胜关键技术之一,而且在民用领域,也获得了越来越广泛的关注,已在材料缺陷的检测与评价、建筑节能评价、设备状态热诊断、生产过程监控、自动测试、减灾防灾等诸多方面获得了应用,并显示出越来越强大的生命力。

1 红外热像设备的研究进展

红外热像技术的关键设备是红外热像仪,红外热像仪经历了几个不同的发展阶段^[1,2]。

从探测元和扫描方式来看,红外热像仪经历了单探测元一维线扫描、单探测元二维线扫描、线阵多探测元一维线扫描、SPRITE 技术,发展到目前最为先进的 $N\times M$ 多探测元焦平面(FPA)直接成像。其总的趋势是探测元数量越来越多,扫描方式越来越简单,直至完全取消扫描机构。从已经上市的产品来看,目前的 FPA 热像仪探测元数量已发展到 512×512 元甚至更多。

在工作环境方面,红外热像仪经历了低温制冷(氦气制冷、液氮制冷)、电制冷,目前发展到非制冷(室温)工作方式。非制冷红外热像仪主要采用热释电和微测辐射热计 Bolometer 两种技术。 $N\times M$ 多探测元非制冷 FPA 红外热像仪代表当今红外热像仪的最高水平。

随着半导体技术和计算机技术日新月异、突飞猛进的发展,红外热像仪的硬件性能日益提高、软件功能不断完善。目前红外热像仪所达到的空间分辨率 $<0.1\text{ mrad}$ 、目标斑点尺寸 $0.0003''$ 、帧频 1400 帧/s 、温度分辨率 $<0.001^{\circ}\text{C}$ 、探测元数量 10^6 个,测温上限

3600°C 、像素 $>512(H)\times 512(V)$,并集成功能强大的图像分析与处理软件,如图像边缘自动检测与增强、任意点的目标辐射率自动校正、图像分割、红外热像序列图的比较运算等。红外热像仪总的发展趋势是:体积更小、质量更轻、环境适应性更强、性价比更高、功能更强大、操作使用更方便,以满足不同用户在不同场合下的使用需求。

红外热像技术首先在军事领域获得应用,德国在第二次世界大战中率先装备了红外夜视仪、红外通讯设备等。世界上第一台商用红外热像仪于 20 世纪 60 年代由瑞典的 AGA 公司研制,美国是目前红外热像技术最为先进的国家,绝大多数的红外热像仪器供应商也集中在美国^[1]。红外热像技术的应用研究美国最为活跃,其次是瑞典、英国和日本等国家。

我国对红外技术的研究起步于建国初期,目前从事红外热像技术研究的单位主要有中国科学院上海技术物理所、昆明物理所、华北光电所等单位。目前我国能自行研制生产多种型号的制冷红外热像仪,全国首台非制冷 FPA 红外热像仪已于 2001 年由华中光电研究所研制成功,并投入批量生产。这些成果的取得,标志着我国将结束红外热像仪长期依赖进口的局面,同时也意味着,红外热像仪产品价格的下降,应用领域的进一步扩大。

2 红外热像技术的应用进展

前已述及,红外热像技术的应用领域十分广泛,限于篇幅,在此仅简要论述红外热像技术在材料和构件的无损检测、能源保护、设备状态热诊断、灾害防治等方面的进展。

2.1 材料和构件的红外热像无损检测与评价^[3-8]

材料和构件中的缺陷检测与评价是目前无损检测的主要研究内容,红外热像技术为现代无损检测技术注入了新的活力。借助其非接触、高效率、安全、直观形象等诸多优势,红外热像无损检测获得了广泛关注。

在材料的缺陷检测与评价方面,国内外的许科技人员进行了卓有成效的研究工作。我国的北方交通大学、东南大学、华南理工大学、西安交通大学、天津大学、清华大学和哈尔滨工业大学等单位的研究人员,对此进行了较为系统和深入的研究工作,取得了

一些很有价值的研究成果。

在国外,以加拿大 LAVAL 大学的 Xavier P. V. Maldague 教授为代表的一大批研究人员对材料或构件的缺陷的红外热像无损检测进行了大量研究。

以上研究成果的取得,对红外热像无损检测具有推动作用。但同时也应该看到存在的问题:(1)定性研究居多,定量研究不够;(2)理论和实验研究不够深入,数值模拟研究居多,且多采用一维传热模型;(3)对各向异性、导热较慢的层板状复合材料研究较多,而对导热快的金属材料研究不够。

2.2 设备状态的红外热像诊断^[9-11]

目前电力和石化是红外热像诊断的两个最主要的应用领域。

就世界范围而言,瑞典的国家电力公司最先将红外热像技术应用于电气设备运行状态热诊断。目前,英国、美国等许多国家正在广泛开展电力设备的红外热像检测研究。

我国红外热像技术已广泛应用于电力设备的热状态检测。在诊断技术基础方面,中国科技大学火灾科学国家重点实验室、华北电力大学、电力部西安热工研究院等单位的研究人员,对此进行了较为系统深入的理论分析和实验研究,并且应用于供电公司(局、站、所)的设备维护及对一些电气设备的实际检测,积累了大量的原始资料。为更好地规范和指导红外热像技术在电力工业中的应用,在对一些设备的典型故障进行现场实测和模拟试验的基础上,国家经贸委1999年颁布实施了“带电设备红外诊断技术应用导则”(DL/T664-1999),其中包含有40幅典型故障的热像图谱。

石化系统也是红外热像诊断应用较广泛的领域。对石化生产中的催化再生器、乙烯裂解炉、沉降器、加氢反应器、除沫器、物料输送管线等设备运行状态的热诊断与热监测进行了实际红外热像检测,获取了耐腐砖裂纹、冲刷减薄以及局部脱落等石化设备中常见的典型故障形式的红外热像图,对这些故障可以进行初步的定性和定量分析。

红外热像技术的应用,对保证电力工业和石化工业中的设备的安全、完好运行起到了积极的作用。但目前的成果仍然是初步的,对各种故障形式所表现的红外热像特征、红外热像图与故障严重程度的内在联系等问题还有待深入、系统地研究。为推动设备状态

热诊断上一个新台阶,必须大力加强相关的技术研究,红外热像技术可望发挥更大的作用。

2.3 构(建)物的红外热像检测与评价^[12-15]

目前构(建)物的红外热像检测与评价主要有两方面的目的,即健康状态测评和能源保护测评。

在构(建)物的健康状态检测与评价方面,相对于回弹、钻芯取样、声阻抗等常规检测方法,红外热像技术有其独特优势,因为红外热像检测不会对被检对象造成损坏,这对具有文物价值的古建筑有特别重要的意义。希腊雅典国立技术大学化学工程系的 A Moropoulou 教授等人用红外热像仪实际检测了机场跑道的裂纹和剥离缺陷,美国的 Gary 等人用红外热像技术进行了水泥房顶的无损检测。我国清华大学的孙格靛等人,应用红外热像技术,进行了水泥构件中缺陷的红外无损检测与评定研究。同济大学的研究人员,应用红外热像技术,对水泥砂浆的受伤温度和强度损失与其红外热像图特征之间的关系进行试验研究,初步得出了它们之间的定量关系,为混凝土火灾损伤的检测与评定探索了一条新途径。

在构(建)物的能源保护方面,早在1966年,瑞典就率先采用了红外热像技术从事房屋建筑的保温性能的检测与评价。他们用红外热像仪测取房屋的热像图,以此来发现房屋的漏热部位,为改正房屋的结构和材料提供实测数据。美国、加拿大、德国等许多国家都进行过这方面的研究,我国也有一些单位,从事房屋建筑节能的红外热像技术检测与评价工作。

除房屋建筑外,热力管道的保温效果检测与评价是红外热像技术在能源保护方面的又一个重要应用领域。通过测取管道的红外热像图,比较容易发现管道的漏损点。

2.4 红外热像技术在自动测试方面的应用^[16-19]

现代电子电路的集成度越来越高,单个芯片的功能日益复杂,而尺寸及管脚间距日趋缩小,这就给集成电路、PCB板以及电子仪器整机的故障检测与定位提出了新课题。为应对这种挑战,国内外有许多研究人员探索采用红外热像技术,对集成电路、PCB板以及电子仪器整机进行故障检测与定位。我国西安交通大学、海军工程学院、石家庄军械技术研究所等单位进行了较多的研究,其中,石家庄军械技术研究所成功研制了基于红外热像技术的电路板自动测试系统。

2.5 红外热像技术在灾害防治方面的应用

矿柱稳定性、顶板跨落、矿爆、岩爆等是困扰矿山安全生产的一个难题。为探索红外热像技术在这方面的应用,中国矿业大学吴立新教授^[20]领导的课题组在多项国家与省部级课题的支持下,正在进行“矿山岩石受力的红外辐射规律及其遥感”、“岩石剪切红外成像实验及首都圈地震遥感预报”、“岩石、混凝土应力与灾变遥感遥测的基础理论与实用技术”和“岩石撞击的热辐射特征及其反演问题”等基础研究和攻关,实验研究了岩石在单轴压缩、压剪、纯剪、双剪摩擦滑移、钻进、撞击以及刻划下的红外辐射规律,取得了许多很有价值的定性定量成果。

地震预测预报一直广受大众关注。基于大地震前的地温异常变化,为探究将红外热像技术应用于地震预测预报方面的可能性,国家地震局地球物理所的耿乃光等人进行了热红外震兆成因的模拟实验研究,模拟研究了由地壳岩石破裂和断层粘滑失稳两种机制引起的构造地震,并用红外热像仪观测了岩样在加载变形或滑动过程中的红外热像变化。实验发现,在加载过程中,岩样总体为升温过程,但在临破裂前,不同的破裂方式表现出不同的热像特征。实验研究表明,红外热像技术在地震预测预报方面将会有所作为。

3 结束语

以上总结了红外热像技术的仪器设备研究发展历程和现状,论述了红外热像技术在材料缺陷无损检测与评价、建筑及其节能评价、自动测试以及灾害预测预报红外热像诊断等方面的应用研究情况。有理由相信,随着红外热像仪器设备性能水平的提高、价格的降低以及相关应用的逐步深入,红外热像技术必将获得越来越广泛的应用,红外热像技术将会有更大的作为。

参考文献:

- [1] Herbert Kaplan. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment[M]. US: SPIE, 1993.
- [2] Masahiro Shoda. Present status and trends of infrared sensors [J]. 非破坏检查, 1999, 48(10): 68-72.
- [3] Xavier P V Maldague. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography[M]. Berlin, London: Springer-Verlag Limited, 1993.
- [4] Dattoma V, Marcuccio R, Pappalettere C, et al. Thermography investigation of sandwich structure made of composite material [J]. NDT & E International, 2001, 34(8): 515-520.
- [5] Davor G Mandic, Richard E Martin, John H Hemann. Thermal imaging technique to detect delaminations in CFRP plated concrete[A]. SPIE[C]. 1998, 3396: 22-27.
- [6] Girinzato E, Bison P G, Marinetti S, et al. Thermal NDE enhanced by 3D numerical modeling applied to works of art[J]. Insight, 2001, 43(4): 254-259.
- [7] Phong M Luong. Nondestructive damage evaluation of reinforced concrete structure using infrared thermography [A]. SPIE[C]. 2000, 3993: 98-107.
- [8] 梅林, 陈自强, 王裕文, 等. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 66-70.
- [9] 袁宏水, 赵建华, 范维澄. 基于热像技术的电缆火险隐患诊断研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(1): 108-112.
- [10] 刘新业, 常大定, 欧阳伦多. 红外热成像在电气设备维护中的应用[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 220-224.
- [11] 仲犭生, 李春诚, 任迅. 红外热像技术应用于石化设备的检测诊断[J]. 激光与红外, 1999, 29(5): 310-314.
- [12] Stephen J Marshall. Detecting moisture in buildings using infrared thermography[A]. Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conservation in Building Envelopes(Thermosense III), SPIE[C]. 1980, 254: 111-117.
- [13] 孙格靛, 李建保, 王厚亮, 等. 碳纤维增强混凝土构件破坏过程的动态红外监测[J]. 红外技术, 2001, 23(1): 39-43.
- [14] 杜红秀, 张雄, 乔俊莲. 红外热像用于水泥砂浆火灾损伤的检测与评定[J]. 同济大学学报, 1999, 27(4): 499-502.
- [15] Moropoulou A, Kouli M, Avdelidis N P. Infrared thermography as an NDT tool in the evaluation of materials and techniques for the protection of historic monuments methods in the assessment of concrete and masonry structures[J]. Insight, 2000, 42(6): 379-383.
- [16] 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.
- [17] Hideyuki Uemura. Measurement of thermal distribution for electronic devices using infrared camera[J]. 非破坏检查, 2001, 50(5): 302-305.
- [18] Barnes R Bowling. Diagnostic thermography[J]. Applied Optics, 1968, 7(9): 1673-1685.
- [19] 张冠华, 黄炜. 红外热成像测温技术在金属机械加工方面的应用[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 74-78.
- [20] 吴立新, 李国华, 吴焕萍. 热红外成像用于固体撞击瞬态过程监测的实验探索[J]. 科学通报, 2001, 46(2): 172-176.