

我国红外热像检测技术的研究及发展展望

莫朝霞, 陈沅江

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 红外热像技术具有检测速度快、非接触、精度高、范围广、易于实现自动化和实时观测等优点, 目前是非接触式检测领域的研究热点之一。为了更好地了解我国红外热像技术的研究情况, 该文通过检索 CNKI 网中我国近十年来有关红外热像技术的研究文献, 对该领域的研究成果及未来发展方向进行了总结和分析。目前我国红外热像技术的研究可分为基础研究、产品研发、应用研究等三个方面。其中红外热像的技术开发研究、红外图像分析处理、测温精度影响因素、红外热像仪新产品的开发以及其在军事、医疗、电力、农林业等领域的应用等方面的研究极具潜力, 应用前景广泛。

关键词: 红外热像; 检测技术; 研究现状; 展望

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.002

Research and prospects of the domestic infrared thermography technology

MO Zhao-xia, CHEN Yuan-jiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Infrared thermography technology has become one of the most active hotspots for its advantages of fast measurement, non-contact test, large measuring range, high accuracy, easiness to realize automation and real-time observation, etc. To master the research situation of the domestic infrared thermography technology, its research and development are summarized and analyzed. The study of infrared thermography technology is divided into three parts, including fundamental research, product development and application research. The development of infrared thermography, infrared image processing, the factors of affecting accuracy and the infrared camera's development at home are introduced. Its applications in the field of military, medical, electricity, agriculture and forestry have broad prospects.

Key words: infrared thermography; detection technology; research status; prospects

1 引言

红外热像技术实质上是一种把红外辐射图像转换为可视图的波长转换技术。它通过光学机械扫描系统, 将物体发出的红外线辐射汇聚在红外探测器上, 形成红外热图像, 由此来分辨被测物体的表面温度。由于具有检测速度快、非接触、范围广、精度高、易于实现自动化和实时观测等诸多优点, 该技术从

军事领域的应用起源, 到 20 世纪 80 年代初便逐渐引入民用工业领域。此后, 随着红外热像仪器性能的不断提高和相应图像分析处理软件的发展, 该技术在海外已越来越广泛地应用于工农业生产和人民

作者简介: 莫朝霞, 女, 硕士, 主要研究方向为红外热像检测。
E-mail: 872817971@qq.com
收稿日期: 2014-04-13; 修订日期: 2014-05-21

生活等的各个领域。

我国从建国初期就开始了红外热像技术的研究,经过几十年的发展,取得了一定成果,如已能自行研制多种型号的制冷型红外热像仪。但由于国外对关键技术的封锁,我国在该领域的研究与世界先进水平国家的差距仍很大。本文主要就我国红外热像检测技术领域的研究成果进行分析和综述,提出该领域未来可能的发展方向。

2 我国红外热像技术近十年的研究情况

由于红外热像技术在进行与温度变化有关的测量方面所具有的优势,故从其产生之日起,就引起了国内外广大研究者的密切关注,对其进行了深入持久的研究。如图1、2给出了近十年来与红外热像技术有关的研究文献情况及其发展趋势。

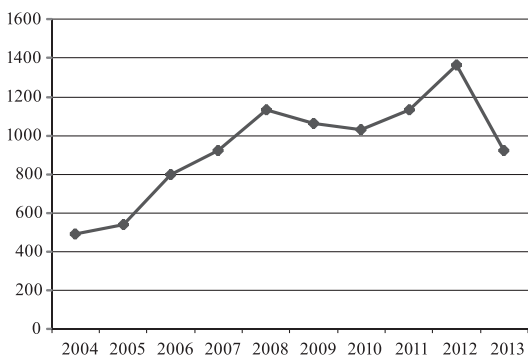


图1 近十年来红外热像技术的论文发表情况

Fig. 1 the papers of infrared thermal imaging technology over the past decade

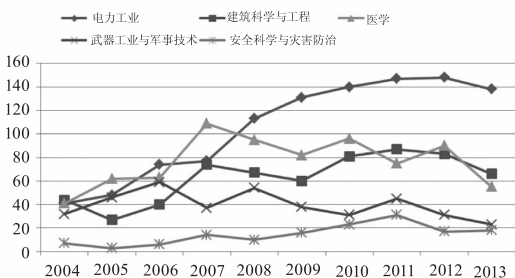


图2 近十年来红外热像技术在各个学科的研究情况

Fig. 2 Study of infrared thermal imaging technology used in various disciplines over the past decade

由图1、2可知,红外热像技术的研究呈现出逐年稳步上升的趋势,特别是近三年我国红外热像技术的研究达到了一个高潮。根据论文发表情况分析其原因,主要是由于很多关于高新技术会议召开,如第九届全国光电技术学术交流会、第二届中国科学院博士后学术年会暨高新技术前沿与发展学术会议、2010 远东无损检测新技术论坛论文集等。同时,也有很多高校致力于这方面的研

究,比较突出的有南京理工大学、西安电子科技大学、华南理工大学和哈尔滨工业大学等。从图2中还可以看出,红外热像技术在安全科学与灾害防治学科领域的应用研究虽然很早就开始了,但是这方面的研究还很少,主要是对安全科学的重视不够以及这方面的研究人员和机构也比较缺乏。而该项研究最突出的是电力工业,电力是人类发展的生命线工程,将红外热像检测技术用于电力行业安全运行状况的检测十分重要,故这方面我国的研究有很大的投入。

分析图1、2中有关文献的研究情况,可从整体上对红外热像检测的研究分为基础研究、产品研发和应用研究等三个板块,以下对其进行分别论述。

3 红外热像检测技术的基础研究

我国目前红外热像技术的基础研究主要集中在红外成像技术的开发、红外图像处理以及红外热像检测精度的影响因素分析等几个方面。其中,红外热成像技术主要致力于各种不同波段范围内非制冷型焦平面阵列红外热像仪技术的开发,已有了长波范围检测的产品^[1]。红外图像的处理主要致力于成像质量,如清晰度、细致度等方面的提高^[2];红外热像仪在现场实际环境中进行检测时,其精度的影响因素众多,如检测目标的距离、物体表面发射率等,但目前这方面的研究成果较少,可进一步进行探索。表1、表2、表3分别列举了我国近十年红外热像检测技术基础研究领域的一些代表性研究成果。

表1 我国红外成像技术开发一些代表性研究成果

Tab. 1 Some representative achievements of Infrared imaging technology development

研究者	主要成果	意义
易波, 张建等 ^[3]	设计了红外四波段测温辐射计	填补了国内基于海洋平台用于测量海洋表面温度的高精度多通道红外辐射计研究的空白
雷述宇等 ^[4]	非制冷氧化钒红外探测器的开发研制	国内首次实现了VO _x 热敏材料、640×512读出电路阵列、20μm像元的非制冷式红外焦平面传感器的研发、生产
孔令彬, 易新建等 ^[5]	设计了320×240长波非制冷微测辐射热计焦平面阵列红外热像仪	为自行研制、开发国内首台320×240非制冷长波焦平面阵列红外热像仪奠定了基础

表2 我国红外图像处理技术的一些代表性成果

Tab. 2 Some representative achievements of Infrared image processing technology

研究者	主要成果	意义
陈钱, 柏连发等 ^[6]	提出了新颖的红外图像直方图双向均衡技术, 在进行直方图均衡化处理的同时, 消除灰度冗余, 并在整个显示范围内对图像灰度级进行等间距排列	解决了热像仪信号处理中输入信号大动态范围和显示输出的小动态范围的矛盾, 能够针对千变万化的红外图像实现自适应实时处理
徐军等 ^[7]	提出了一种红外图像增强的新方法, 采用先分割后增强的新思路	有效提高了红外图像对比度、增强了目标的细节
王利平, 陈钱等 ^[8]	提出了一种改进的拉普拉斯锐化算法 - 受限拉普拉斯锐化算法, 并采用 DSP + FPGA 的架构进行实时处理	有效地控制了红外图像噪声, 使处理后的图像边缘更加清晰, 又保护了图像细节

表3 我国红外检测影响因素的代表性研究

Tab. 3 Some representative researches of factors affecting the infrared detection

研究者	主要成果	意义
孙丽 ^[9]	分析了距离对红外热像仪测温精度的影响并应用 Matlab 对温度和距离的关系进行拟合	为校正距离影响提供了参考依据
胡剑虹, 宁飞等 ^[10]	就目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响做了研究	得出目标表面发射率越高, 红外热像仪测温精度越高

4 红外热像检测产品研发

红外热像仪的研制与开发涉及到光学、电子、计算机、图像处理等各个方面, 其核心与关键部件是红外探测器。因此, 红外热像仪的发展与红外探测器的发展紧密相连^[11]。红外热像仪的发展经历了一个比较漫长的过程, 大致可分为如下几个阶段:

我国 20 世纪 70 年代有关单位也开始了红外热成像技术的研究, 到 80 年代初, 中国在长波红外元件的研制和生产技术上有了一定进展。在 80 年代末和 90 年代初, 中国已经研制成功了实时红外成像样机, 其灵敏度、温度分辨率都达到很高的水平。进入 90 年代, 中国在红外成像设备上使用低噪音宽频带前置放大器, 微型制冷器等关键技术方面有了发

展, 并且从实验走向应用, 主要用于部队。至今, 中国在红外热成像技术方面已经投入了大量人力物力, 形成了相当规模的研发力量, 但是与世界先进水平差距很大, 目前国外已经开始在部队装备第二代红外热成像仪, 并开始了第三代的研发工作, 但中国现在才推广第一代红外成像仪。我国首台非制冷红外热像仪于 2001 年由华中光电研究所研制成功, 并正式投入批量生产。该热像仪填补了国内空白, 标志着我国红外探测技术取得了划时代的突破, 但在产品研发上落后世界发达国家至少 20 年。红外热像仪发展阶段划分如表 4 所示。

表4 红外热像仪发展阶段划分

Tab. 4 Infrared development stages

阶段划分	标志	优点	缺点
初步研发阶段	1964 年美国首次研制成功的第一代热红外成像装置(红外前视系统)	较高的探测率, 较宽的工作温度范围	灵敏度较低, 探测距离达不到要求, 价格高, 需要制冷
关键技术发展阶段	制冷型和非制冷型红外焦平面红外热成像产品的出现和大规模应用	作用距离和温度灵敏度提高; 可应用于短波、长波和中波各个波段的探测; 根据需要可以自行选择制冷型和非制冷型红外热像产品; 实现了红外产品商业化	非制冷型红外热像产品的性能还需提高; 无法实现双色或多色工作
智能化研究阶段	将前沿科技如 WiFi、App 应用、触摸屏等各种新技术完美的融入红外热像仪 ^[12]	便利, 效率更高, 更智能化	技术要求较高

5 红外热像检测技术的应用研究

目前, 红外热像检测技术在我国各个领域得到了广泛的应用, 具体表现在如下几个方面。

(1) 在军事领域的应用。红外技术最先用于军事领域, 现在主要的研究内容有以下几个方面: ①红外复合制导。吴涛、白云塔在文献[13]中提出了由激光和红外两种寻的制导头共同参与制导的激光/红外复合制导技术, 完成导弹对目标的搜索、捕获和跟踪等任务, 实现了两种制导技术的优势互补。

②红外隐身,如车宏等^[14]基于一种新型的中红外光学玻璃-氟镓酸盐(FGa)玻璃,成功研制出一种新型的具有雷达隐身功能的中红外光功能材料。③红外搜索跟踪,武俊等^[15]提出采用雷达和红外同步航迹融合的方法来进行目标跟踪,并进行了雷达和红外传感器航迹融合仿真,使该方法达到了较高的跟踪精度。除此之外,还有红外对抗、红外侦察以及红外夜视、红外通信、报警、毒气监测、红外遥感预警、红外军用机器人等。未来在红外制导技术方面必须向高速、双色制导方面发展;充分利用红外遥感技术;加强研发质量轻、厚度薄、频段宽、吸波性强、功能多、低发射率并且寻求兼容隐身的红外隐身材料。

(2) 电力生产领域。过去对电力故障实行的是定期维修制度,这种停电预防性检测给生产带来很大的损失。有了红外热像仪以后,由传统的定期维修制度转变为预知维修制度^[16]。对于电力故障判断标准,赵墨林等^[17]从物理学和电气设备红外检测应用研究出发,提出了“温差比”及“边界温度区域”等概念,提出了红外检测“温差比诊断法”。田志海^[18]通过将红外热像检测和高电压实验技术相结合的方法,不仅快速方便地检测出绝缘缺陷,而且可以监测绝缘电老化现象,为绝缘诊断分析和寿命预测提供了可靠的信息。未来的努力方向是指定判断各种设备缺陷的可靠的统一标准,具体规定设备、部件、零件等温度升到什么范围以内是允许安全运行的。

(3) 在医学领域,红外热像仪的适用范围非常广泛,它可用于人体头部、颈部、胸部、肺部、心血管、脊椎、四肢血管、乳腺、前列腺、胃肠道等各个部位的疾病诊断,具体的临床应用有乳腺肿瘤、骨肿瘤、周围血管疾病、烧伤(红外热像仪对皮肤烧伤程度的诊断准确率达98%)、断肢再植^[19]。张栋^[20]系统分析了红外热像技术在针灸原理和经络研究中的应用,开拓了热像检测技术应用的新领域。2002年,我国学者刘忠齐教授研制出了世界第一台热断层成像系统(Thermal Texture Maps System),简称热断层,又称TTM系统,获得美国发明专利。TTM系统开创了功能医学影像技术的新局面^[21]。红外热像技术在医学领域的发展方向将是针对各种疾病制定统一的红外热图的诊断标准,以及研究如何利用最新的TTM技术来开辟一个崭新的肿瘤诊断新领域,对于中医诊断,红外热像技术也有很大的发展空间,有望将中医的“望闻问切”扩展到热红外技术这一中医诊断数据化过程以及努力研制中医特性红外

仪器。

(4) 在农林业方面,红外遥感技术可用于土地勘测和土壤成分分析,预报灾情识别不同农作物及其种植面积,进而进行水利规划,对农作物的涨势、产量进行调查估计^[21]等。张哲平,宋小勇等^[22]用红外热成像技术研究了番茄、双孢菇、青菜表面温度的变化情况。比较了它们降温效果的好坏。周建民,刘娟娟等^[23]用红外成像装置对苹果的表面缺陷进行了检测,得出缺陷部分低于正常组织温度;缺陷越大,温度升高速度越慢。

此外,红外热像技术也越来越多的应用于安防消防^[24]、遥感-岩石力学^[25]、石化^[26-27]等领域。

6 结论及展望

(1) 近十年来我国对于红外热像技术的研究热度呈现出整体上升的趋势,最近几年的研究达到了高潮。国内越来越多的研究单位以及高级院校投入到该领域的研究并且取得了一定的成果。红外热像技术在有些领域如电力、军事等的研究呈现出高涨的趋势,但是在安全科学与灾害防治学科等领域还处于比较低迷的状态。

(2) 国内的学者就红外热像技术的基础研究、产品研发以及在各个领域的应用做了大量的工作,其中,在热敏材料的研制、长波非制冷红外焦平面的研究方面取得了一定的成果;在红外图像处理方面也具备了一定的能力,能够得到较清晰的符合应用要求的红外图像;很多学者致力于红外检测精度影响因素的研究,但是在这方面的理论研究和实验研究都还不足,目前的研究只能提供一定的参考。

(3) 在红外产品研制方面,虽然21世纪我国已经研制成功了首台非制冷红外热像仪,但是我国与国外发达国家的差距仍然很大。

(4) 在军事、医疗、电力、农林业等方面,红外热像技术的应用在我国已经取得了很多应用型成果,随着基础研究以及产品研发的不断进步,红外热像技术在人类生活中将起到越来越重要的作用。

(5) 对于我国红外热像技术未来的发展,主要是攻克技术难关,研制出具有我国特色的红外热像产品;发展研制大阵列、多波段非制冷红外焦平面探测器;除医用红外热像仪外,还需努力研制出适合于其他领域的专用红外产品,增加红外产品的实用性。

参考文献:

- [1] HU Xiaoyan, ZHOU Liqing, YU Yan, et al. Development

- of long-wavelength 640×512 quantum well infrared photodetector focal plane array[J]. *Laswe & Infrared*, 2010, 40(11):1220-1223. (in Chinese)
- 胡小燕,周立庆,于艳,等.长波 640×512 元 GaAs/Al-GaAs 量子阱红外焦平面探测器的研制[J]. *激光与红外*, 2010, 40(11):1220-1223.
- [2] YANG Jiahong, XIANG Jin, LI Cuihong, et al. Novel algorithm of detail enhancement for IR image[J]. *LASER & INFRARED*, 2012, 42(5):579-583. (in Chinese)
- 杨家红,向锦,李翠红,等.一种新的红外图像细节增强算法[J]. *激光与红外*, 2012, 42(5):579-583.
- [3] YI Bo, ZHANG Jian, QU Enshi, et al. Infrared four spectral temperature radiometer electronics design and implementation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10):2630-2635. (in Chinese)
- 易波,张建,屈恩世,等.红外四谱段测温辐射计的电子学设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10):2630-2635.
- [4] LEI Shuyu, FANG Hui, LIU Jun, et al. Research on domestic 640×512 uncooled VOx infrared focal plane array[J]. *Infrared Technology*, 2013, 1(12):759-763. (in Chinese)
- 雷述宇,方辉,刘俊,等.国产 640×512 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制[J]. *红外技术*, 2013, 1(12):759-763.
- [5] KONG Lingbin, YI Xinjian, WANG Dianhong, et al. Design of 320×240 long wave uncooled microbolometer infrared thermal camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(05):596-600. (in Chinese)
- 孔令彬,易新建,王典洪,等. 320×240 长波非致冷微测辐射热计红外热象仪的研制[J]. *光子学报*, 2002, 31(05):596-600.
- [6] CHEN Qian, BAI Lianfa, ZHANG Baomin. Histogram double equalization in infrared image[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(06):428-430. (in Chinese)
- 陈钱,柏连发,张保民.红外图像直方图双向均衡技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(06):428-430.
- [7] XU Jun, LIANG Changhong, ZHANG Jianqi. A new approach to IR image enhancement[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2000, 27(05):546-549. (in Chinese)
- 徐军,梁昌洪,张建奇.一种红外图像增强的新方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2000, 27(05):546-549.
- [8] WANG Liping, CHEN Qian, GU Guohua, et al. Infrared image sharpening algorithm based on DSP + FPGA[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2006, 30(06):764-766. (in Chinese)
- 王利平,陈钱,顾国华,等.基于 Dsp + Fpga 的红外图像锐化算法的实现[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(06):764-766.
- [9] SUN Li, HUAN Kewei, DI Xu, et al. Research on the influence upon accuracy of IR thermal temperature measuring in distance and correction method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2008, 31(01):33-35. (in Chinese)
- 孙丽,宦克为,邸旭,等.距离对红外热像仪测温精度的影响及校正方法研究[J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2008, 31(01):33-35.
- [10] HU Jianhong, NING Fei, SHEN Xiangheng, et al. Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 03(02):152-156. (in Chinese)
- 胡剑虹,宁飞,沈湘衡,等.目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 03(02):152-156.
- [11] YUAN Jijun. Review of infrared detector development[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(12):1099-1102. (in Chinese)
- 袁继俊.红外探测器发展述评[J]. *激光与红外*, 2006, 36(12):1099-1102.
- [12] Fluke release 3 types of innovative products[J]. *Automobile Parts*, 2013(09):37. (in Chinese)
- 福禄克发布三款创新产品[J]. *汽车零部件*, 2013(09):37.
- [13] WU Tao, BAI Yanta. Research into the jamming method to laser/IR composite guided missiles[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2009, 32(02):23-25. (in Chinese)
- 吴涛,白云塔.对激光/红外复合制导导弹的干扰方法研究[J]. *舰船电子对抗*, 2009, 32(02):23-25.
- [14] CHE Hong, FAN Youyu, YANG Yi. New mid-infrared oxyfluoride glass and technique utilizing radar latent functionality[J]. *Journal of optics*, 2010(10):2988-2993. (in Chinese)
- 车宏,范有余,羊毅,等.新型红外氧氟玻璃及其雷达隐身技术[J]. *光学学报*, 2010(10):2988-2993.
- [15] WU Jun, QI Dening. Radar and infrared flight path fusion[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2007, 27(04):113-114. (in Chinese)
- 武俊,漆德宁.雷达和红外同步航迹融合[J]. *舰船电子工程*, 2007, 27(04):113-114.
- [16] PU Enping, TANG Shanglin. Application of infrared ther-

- mal image in power system faults [J]. *Electric Power Technology*, 2009, (07): 50 - 56. (in Chinese)
- 普恩平, 唐上林. 红外热成像技术在电力系统故障诊断中的应用[J]. *电力技术*, 2009, (07): 50 - 56.
- [17] ZHAO Molin, NIU Jirong, YANG Chenggang. Conception debating between temperature, relative temperature differential and ratio of temperature differential in infrared testing technology[J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2002, 20(06): 8 - 10. (in Chinese)
- 赵墨林, 牛继荣, 杨成刚. 红外检测技术中温度、相对温差和温差比概念辨析[J]. *内蒙古电力技术*, 2002, 20(06): 8 - 10.
- [18] 田志海, 曾庆立. 红外热像检测复合绝缘材料潜伏性绝缘缺陷[J]. *东北电力技术*, 1995(07): 40 - 43.
- [19] YAO Dingshan. The clinical application of infrared imaging technology[J]. *China Medical Devices Information*, 2001, 7(02): 38 - 40. (in Chinese)
- 姚鼎山. 红外热像技术的临床应用[J]. *中国医疗器械信息*, 2001, 7(02): 38 - 40.
- [20] ZHANG Dong. Application of infrared thermography in studies of acupuncture mechanisms and meridians [J]. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 2004, 24(01): 38 - 43. (in Chinese)
- 张栋. 针灸原理和经络研究中红外热像技术的应用[J]. *中国针灸*, 2004, 24(01): 38 - 43.
- [21] SUN Xiaogang, LI Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(2): 101 - 104. (in Chinese)
- 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. *激光与红外*, 2008, 38(2): 101 - 104.
- [22] ZHANG Zheping, SONG Xiaoyong, LI Yunfei. Application of infrared thermography system in studying the cooling characteristics of different vegetables during vacuum cooling process [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2009, 25(03): 295 - 299. (in Chinese)
- 张哲平, 宋小勇, 李云飞. 红外热成像技术在研究不同果蔬真空预冷特性中的应用[J]. *科技通报*, 2009, 25(03): 295 - 299.
- [23] ZHOU Jianmin, LIU Juanjuan, SHU Lili. Device and method of infrared thermography in surface quality detection of apples [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(02): 113 - 115. (in Chinese)
- 周建民, 刘娟娟, 舒丽丽. 苹果表面缺陷红外热成像检测装置及处理方法[J]. *中国农机化*, 2012(02): 113 - 115.
- [24] WU Hua. Application of infrared thermal image in fire and rescue [J]. *Fire Science and Technology*, 2006 (S1): 100 - 102. (in Chinese)
- 吴华. 红外热像仪在灭火救援中的应用[J]. *消防科学与技术*, 2006(S1): 100 - 102.
- [25] TAN Zhihong, TANG Chunan, ZHU Wancheng, et al. Experimental study on infrared thermal image for failure process of granite with fracture [J]. *Chinese Journal of Rock Mmechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2977 - 2981. (in Chinese)
- 谭志宏, 唐春安, 朱万成, 等. 含缺陷花岗岩破坏过程中的红外热像试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2977 - 2981.
- [26] LI Xiaogang, FU Dongmei. The using of infrared image detection technique in petrochemical industry [J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(05): 265 - 268. (in Chinese)
- 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(05): 265 - 268.
- [27] LIU Naiwei, LIN Qican. Monitoring for unconventional leakage based on open path Fourier transform infrared [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007(S1): 183 - 186. (in Chinese)
- 刘乃维, 林启灿. 应用长光程傅里叶变换红外光谱仪监测石化厂区异常泄漏[J]. *仪器仪表学报*, 2007(S1): 183 - 186.