

〈综述与评论〉

## 红外热像技术在安全领域的研究进展

石东平, 吴超, 李孜军, 潘伟

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 红外热像技术凭借其非接触式测量、快速成像的优点, 成为国内外研究和应用的热点。借助 EI Compendex、Inspec、US Patents 和 EP Patents 数据库以及维普中文科技期刊数据库等, 对 2000~2013 年发表的有关红外热像技术在安全领域应用的论文进行系统检索, 在此基础上根据有关论文的发表年份、作者国别、应用领域、标准规范、市场分布等分别进行计量统计, 并分析了红外热像技术在不同行业安全的具体应用情况和存在的问题及其展望。

**关键词:** 红外热像; 安全检测; 应用统计

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)06-0528-08

### Research and Progress of Infrared Imaging Technology in the Safety Field

SHI Dong-ping, WU Chao, LI Zi-jun, PAN Wei

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

**Abstract:** For the reasons of non-contact measure and fast imaging, infrared imaging technology has become a research and applying hotspot both in China and abroad. Based on the database 'EI Compendex', 'Inspec', 'US Patents', 'EP Patents' and that of VIP Chinese, scientific and technical journals about infrared imaging in 2000-2013 were searched. The statistics of the publication time, authors' nationalities, application fields, standard specification and marketing distribution were analyzed. The current status and development directions in the field concerning safety science and technology were pointed out in detail, and the problems existed in infrared imaging technology have been analyzed. Finally, the tendency and future work of the infrared imaging technology in safety science and technology were forecasted.

**Key words:** infrared imaging technology, safety science and technology, applied statistics

## 0 引言

自 1800 年英国天文学家赫谢尔 (S. W. Herschel) 在寻找新光学介质时意外发现红外线后, 红外技术及红外物理有了飞速发展。红外热成像技术作为红外物理的核心, 已广泛应用于工业、农业、军事、交通、医疗、空间技术等各方面, 逐渐形成一门独立的应用技术, 在各个领域多点开花。

红外热成像技术是将不可见的红外辐射转化为可见图像的技术, 利用这一技术研制的装置统称为红外热成像装置或红外热像仪。红外热像仪的主要特点

为: ①为非接触式测量, 能够检测运动目标、微小目标及带电目标温度; ②测温效率高, 可直观显示物体表面温度场; ③温度分辨率高, 可同时显示多点温度值, 并能准确区分较小温差; ④显示方式多样, 除一般的伪彩色和灰度显示的热成像, 还可进行模数转换处理; ⑤可进行数据存储和计算机处理<sup>[1]</sup>。

红外热成像技术凭借其特点, 通过与安全科学中不同工程技术学科相结合, 进行安全监测及隐患排查, 逐渐成为安全科学不可分割的一部分。现今红外热像技术已在矿山开采、航空航天、石油化工等多领域开展安全活动。

收稿日期 2014-11-07; 修订日期: 2014-12-16.

作者简介: 石东平 (1988-), 女, 博士生, 主要从事硫化矿的红外热像方面的研究。E-mail: 526223151@qq.com.

通讯作者: 吴超 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事安全与环保领域的教育和科研工作。E-mail: wuchao\_csu@126.com.

基金项目: 国家青年自然科学基金, 编号: 51304238; 湖南省研究生科研创新项目, 编号: CX2013B080.

# 1 红外热像技术应用于安全检测方面的计量分析

## 1.1 按文献数量检索结果的分析

学术论文可准确反映研究领域发展动态，为更系统研究红外热成像技术研究前沿，本文在 EI Compendex、Inspec、US Patents 和 EP Patents 数据库中以 infrared imaging、infrared detects 等为关键词进行搜索。搜索范围为 2000~2013 年收录论文。为了解研究趋势，针对搜索结果按照发表年份及国别进行分析。分析结果见图 1 和图 2。

2000 年至 2013 年，论文发表数为逐年递增模式，表明红外热像技术在安全科学中愈加重要。2013 年论文发表数少于 2012 年的原因可能是 EI 数据库收录滞后。

2000 年至 2013 年间，发表论文数量最多的国家依次为美国、中国和日本。而在 2000~2009 期间发表论文统计中加拿大位于第 2 位，中国排名第 3。表明中国

在 2009~2013 年间红外热像技术发展迅速<sup>[2-3]</sup>。

图 3 表明我国红外技术标准发布保持稳定势头。标准规范的持续发布说明我国政策对红外热像技术强力支持。在《信息产业科技发展十一五规划及 2020 年中长期规划纲要》中，将红外热像技术列为重点技术领域；在《高技术产业发展十一五规划》中，红外热像技术被明确列入。

图 4 和图 5 为红外市场规模图，图 6 为各大红外企业份额图。由于国内经济高速发展，中国红外市场年均增长率可高达 20%，从 2006 年为 4 亿元，增长至 2013 年的 12.06 亿。目前中国民用红外热像仪的供应商不多，具有较强的独立研发能力的国内民用生产企业主要为大立科技、广州飒特和武汉高德，但需继续发展研发实力，提高市场影响力。近几年红外市场贸易额持续增长，表明中国红外热像技术民用市场逐步扩大。随着国家支持性法律法规、标准规范的陆续出台，红外热像技术日益规范，本土技术替代进口技术趋势愈加明显<sup>[4]</sup>。

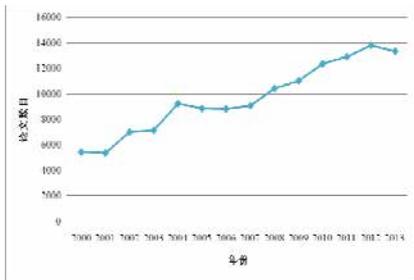


图 1 有关论文数量与发表时间关系  
Fig.1 Distribution by time of publication

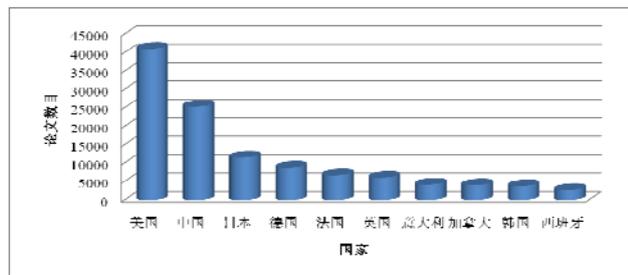


图 2 有关论文作者的国别分布  
Fig.2 Distribution by author's countries

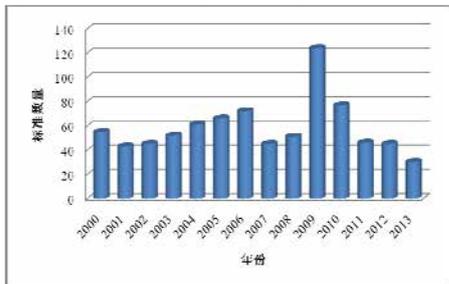


图 3 有关国内标准文献数量与颁布时间  
Fig.3 Distribution of standard specification by time of publication

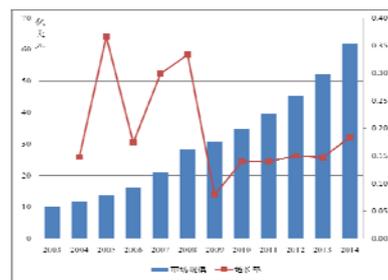


图 4 世界红外热像仪市场规模与时间关系  
Fig.4 Infrared thermal imager market sales of global civil

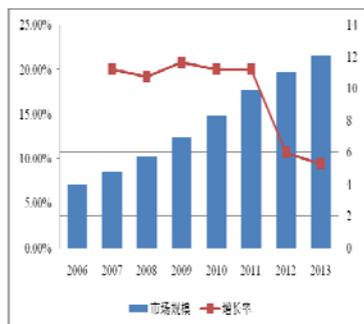


图 5 中国红外热像仪市场规模与时间关系  
Fig.5 Infrared thermal imager market sales of China

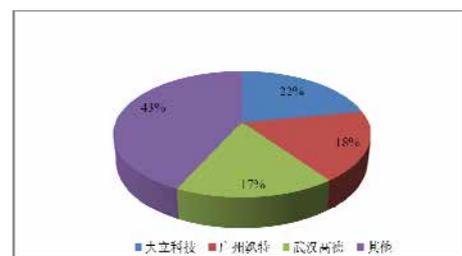


图 6 红外生产企业市场份额图  
Fig.6 Infrared enterprise market share

## 1.2 按文献具体应用领域的计量分析

为更深入研究红外热像技术在我国应用研究进展,对2000~2013年我国重要期刊上发表的有关红外热成像技术的中文学术论文进行系统检索,按照学科分类对红外热像技术的应用论文进行分类统计,统计结果见表1。

从上述统计中可看出,红外热像技术广泛应用于多个学科,主要应用方向为设备无损检测及温度检测,论文数发表较多的学科为医药卫生、电力工业、轻工业和化学等,而在核工业、水利水电业则论文发表相对较少。一方面是由于学科领域发展不均衡,另

一方面则是由于各行业机构数目不对等,如目前我国核电站数量仅有4座,21台在运核电机组;而医疗卫生机构达98.1万个。但29个学科的应用分布印证了红外热像技术同其他学科之间有密切联系,红外热像技术的应用范围也逐渐拓宽。

## 2 红外热像技术应用于不同行业安全的具体内容分析

安全科学创建于20世纪80年代,是从人体免受外界因素(事物)危害的角度出发,并以生产、生活、生存过程中创造保障人体健康条件为着眼点,揭示安

表1 红外热像技术的应用分析及论文统计

Table 1 Analysis of infrared imaging technology application and thesis statistics

应用学科	论文数目/篇	主要应用研究内容
化学	491	材料拉伸、冲击、疲劳过程的热效应特征检测
无机化工	97	电气设备检测、热设备衬里损伤诊断以及气体泄漏监测等方面应用
有机化工	311	高分子材料红外热分析、设备故障诊断、无损检测、气体泄露检测
燃料化工	88	气化炉炉壁温度检测、气体泄漏检测、燃料燃烧过程及能耗特性分析、热解性研究
一般化学工业	86	物质红外热分析
石油天然气工业	100	管道保温效果评价、油井生产及运输过程中的红外监控、有毒有害气体红外检测、耐火衬里设备监控、加热炉炉管表面温度检测、电气设备检查等
材料科学	131	材料缺陷红外测量、材料应力热效应分析
矿业工程	180	自燃火源探测、透水预防、煤体瓦斯突出预防、电气设备故障判断、有毒气体监测
金属学及金属工艺	256	无损检测、焊接温度场红外分析、确定材料疲劳极限、金属切削加工温度场分析
冶金工业	65	钢铸锭缺陷研究、炉钢水温度检测、钢包内衬厚度检测、电气检测、炼钢下渣检测
轻工业手工业	532	品质检测鉴定、织物热传导性评价、机械维修红外诊断技术、缺陷红外检测等
安全科学与灾害防治	166	电器设备安全检测、煤炭自燃探测、有毒有害气体泄漏检测、火焰温度场模拟
环境科学与资源利用	140	侦测石化装置无组织排放源、污染气体扫描、热岛效应研究、公路小气候监测
工业通用技术及设备	168	红外无损检测、红外小目标检测、电器设备安全检测
机械工业	51	疲劳极限的试验、设备及压力容器红外无损检测
仪器仪表工业	467	红外热像仪开发及应用、红外信号处理、红外图像处理、红外热像仪标定等
航空航天科学工程	187	可靠性检测及故障诊断、燃烧室壁温监测、航空发动机喷流红外成像仿真等
武器工业与军事技术	370	PBX压缩疲劳过程中的红外热像
铁路运输	33	高强混凝土受压损伤过程红外辐射特征研究、铁路视频监控、设备故障检测
公路与水路运输	89	沥青路面质量控制、压力管道检测、水泥混凝土无损检测、开挖隧道岩溶探测预报
汽车工业	53	红外汽车防撞系统中、特种车辆裂纹无损检测、发动机温度检测、轮胎温度检测
船舶工业	13	舰艇消防安全、设备故障红外智能诊断、无损检测、建立防撞系统
水利水电工程	10	长距离输水隧洞缺陷检测、水轮发电机磁极温度快速红外检测、设备缺陷检测
建筑科学与工程	237	建筑节能检测、检测建筑物渗漏、混凝土检测、房屋无损检测
动力工程	97	纵向涡强化传热研究、常压燃烧温度场模拟
核科学技术	10	压力容器保温层缺陷的红外检测、热核聚变实验堆中超导母线绝缘层的红外检测
电力工业	778	电力设备故障诊断
医药卫生	1003	肿瘤、血行障碍、代谢异常、慢性疼痛、自律性神经障碍、炎症、体温异常等疾病诊断、观察艾滋病患者热态变化、监测和评价运动训练
公安	44	刑侦领域、空情预警系统、毒品检测、无损检测

全客观规律的学说。红外热像技术作为一种检测手段在安全科学中起着举足轻重的作用<sup>[5]</sup>。

## 2.1 交通安全

火车运输方面,早在20世纪70年代,红外热像技术就已应用于火车热轴箱温度测量报警系统,现在主要用于火车车轮及轴承温度测量<sup>[6]</sup>。汽车运输方面,使用红外热像技术测量发动机及轮胎温度。以热红外成像技术为基础建立汽车防撞系统,根据路面情况及车速变化安全距离,提高安全性能<sup>[7]</sup>。船舶运输方面,应用红外探测建立桥梁防撞预警系统,对船舶进行预警;红外热像技术也同样应用于发动机检测<sup>[8]</sup>。航空运输方面,应用红外热像技术进行机体内部缺陷检测、发动机温度检测;并可利用红外系统识别跑道异物及预警,有效预防跑道异物对航空安全的威胁<sup>[9]</sup>。

## 2.2 电气安全

电力设备隐患表征多为温值过高。红外热像仪可对负荷电气设备进行检测,直观观察异常温度,及时发现火灾隐患,防止电气火灾事故。

1965年,瑞典国家电力局同AGA公司研制出第一套专门用于电气设备检测的商用红外热像;英国在1971年召开了红外技术会议,对于红外热像技术的发展,发挥了巨大推动作用<sup>[10]</sup>。

我国于20世纪80年代末引进瑞典红外热像仪,进行电气设备检测。1974东北电力局和沈阳电业局率先研制红外测温仪并成功进行电气接头温度检测。随后红外技术在电气检测逐渐普及,随着《交流高压电器在长期工作时的发热》(GB 763-1990)、《低压电器基本标准》(GB 1497-1985)等标准的陆续颁布,现已广泛用于发电厂、变电所中变压器、电动机、开关接点等电气设备的隐患排查和故障检测及输电线路的负荷检测。在东北电力局、陕西电力局、湖北电力局等多所科研单位 and 生产运行单位都进行了电气设备的红外检测,有效诊断出事故隐患<sup>[11-13]</sup>。

## 2.3 建筑施工安全

建筑施工中存在高层建筑物外墙装饰易发生坠落伤人事故、基础设施建设中混凝土构件存在缺陷等隐患。通过红外热像技术可将红外辐射变为红外图像,可大面积检测建构筑物,直观反映被测物温度状况、结构及受损状况。

红外热像技术在建筑行业的应用稍晚于电力行业。1983年国际标准组织制订了第一部建筑领域的红外标准:《保温-建筑维护热异常的定性诊断红外方法》(ISO6781-1983(E))。美国学者已将红外热像技术应用于建筑物的缺陷检测、路面缺陷检测等方面。ASTM和ASTN一直致力于混凝土的红外检测,并制定了相

关的检测标准<sup>[14]</sup>。

我国红外热像技术在建筑安全方面起步较晚,1983年北京建筑工程研究所初步进行建筑物缺陷红外诊断。20世纪90年代,我国建设部颁发《建筑工程饰面砖粘结强度检验标准》,为首部规范红外热像在建筑物外墙饰面检测的规范。现今已颁布《红外热像法检测建筑物外墙装饰面粘贴质量技术规程》(Q/JY25-2003),《红外热像法检测建筑外墙饰面粘贴缺陷技术规程》(CEC204-2006)等规范。特别是《采暖居住建筑节能检验标准》(JGJ132-2001)中明确规定“建筑围护结构热工缺陷宜采用红外热像法进行定性检测”。

哈尔滨工业大学、清华大学等多家科研院所针对红外热像技术在建筑物隐患检测方面应用开展研究。如清华大学提出混凝土内部置入电阻丝加热的红外热线检测方法、北京航空航天大学提出两种定量缺陷红外检测法、武汉大学建立混凝土内部缺陷深度公式<sup>[15-17]</sup>。

综合分析国内外使用情况,其应用主要集中于建筑物外墙装饰面粘结质量检测、混凝土构件内部缺陷及损伤检测、混凝土路面缺陷探测、加固工程粘钢粘贴质量检测、建筑质量检测等方面。

## 2.4 石油化工安全

石化设备工作环境多为高温高压、腐蚀、氧化等,具有极强易燃易爆危险性。传统热电偶等测温方式效率低、局限性大。而红外热像技术凭借其非接触性和准确性在石化领域得到广泛应用<sup>[18-19]</sup>。

国外19世纪70年代即应用红外热像技术对石化系统反应炉、加热炉、管道等进行隐患排查。中国石油化工集团19世纪80年代引进红外热像仪,在长岭炼油厂、齐鲁石化公司等单位开展石化设备红外诊断检测。19世纪90年代,我国红外热像技术研发工作不断开展,深入开展设备内部诊断等。其后,红外热像技术在石化领域应用愈加广泛,从最初简易厂内检测发展到精密红外诊断、设备趋势分析和寿命预测<sup>[20-23]</sup>。

分析目前石化领域应用情况,红外热像技术仍存在以下问题:①处于定性诊断阶段,诊断结果依靠经验判断,缺乏定量化标准;②周围环境参数影响因素未排除,石化设备高温环境等对目标测量存在影响,应开展补偿计算;③存在几何定位误差,被测物体红外热像图存在一定程度畸变,须消除几何定位误差,减少测温误差。

## 2.5 矿山安全

红外热像技术应用于煤炭行业相对较晚,最初仅限于井下电气设备诊断检测。随着红外热像技术日趋

成熟, 矿山自燃发火、突水、瓦斯突出、顶板垮落等问题都可用其来解决。

### 1) 岩石受力灾变

同岩石受力灾变有关矿井灾害有顶板垮落、边坡失稳、冲击岩爆等。对矿山岩石受力过程进行检测和有效识别, 能够起到预防灾变的目的。

早在 1994 年, 国家地震局邓明德等即对岩石应力同红外辐射的关系开展初步探讨<sup>[24]</sup>, 1997 年吴立新等对矿山岩石受力红外辐射进行研究, 发现矿井岩石屈服过程中存在红外前兆, 可利用红外前兆及时发现矿山岩石灾变过程, 进行预警<sup>[25]</sup>。

### 2) 煤矿自燃

美、德、俄等国都利用红外热像技术对煤壁、煤柱温度进行监测, 开展自燃预测。1988 年我国煤炭部门引进红外技术进行火区调查。我国徐州、兖州等多矿区采用红外仪测定井下煤壁温度, 达到预测自燃目的。王振平等应用红外热像技术对巷道壁面进行探测, 建立近距离自燃高温反演, 确定自燃火源深度、范围和温度。刘辉等应用红外热像技术进行大面积扫描感温, 提出确定自燃矿石火源定位新方法。阳富强等将红外热像技术应用于金属矿山, 揭示红外热像技术实际应用时误差机理。利用红外热像仪进行矿井自燃预测已成为自燃预测的发展趋势<sup>[26-29]</sup>。

### 3) 瓦斯突出

煤矿瓦斯突出为应力、瓦斯和煤的力学性质三者综合作用的结果, 而煤层采掘面附近煤体温度与这 3 个因素都有关系, 因此可把红外征兆作为瓦斯突出预测指标。

20 世纪 60 年代, 波兰根据井下钻孔温度和煤壁温度进行突出预报。1993 年, 中国科学院上海技术物理研究所张才根等应用红外测温仪对煤样瓦斯吸附温度进行研究; 2006 年钟晓辉等应用红外热像仪对煤体破裂过程温度场进行测定, 得出了煤样红外图像。2013 年西安科技大学刘纪坤等应用红外热像仪对煤体瓦斯吸附过程温度变化进行测量, 拟合温度变化曲线。一系列研究推动红外热像技术在煤与瓦斯突出预测预报方面的应用的进步<sup>[30-32]</sup>。

### 4) 矿井突水

矿井突水在矿山事故中最为严重, 传统矿井突水检测主要对突水点部位、高压富水区、岩溶陷落柱和导水断层进行探测, 缺乏矿井突水形成过程动态监测预报。而矿井岩石在破裂及渗水过程中存在红外异常。

我国最早在 1997 年, 邓明德等对含水岩石红外辐射进行研究, 研究发现岩石破裂前有高温带出现;

2008 年陈群龙等进行含水岩石应力加载研究红外辐射变化; 2010 年刘善军等针对矿井突水进行实验模拟, 研究试样破坏过程中红外辐射变化, 发现变化规律<sup>[33-35]</sup>。

由于矿山井下条件较复杂, 红外热像技术在井下应用仍存在未解决问题: ①井下被测物体温度范围相差不大, 红外辐射较弱, 对红外热像仪正确判断存在干扰; ②井下环境含有大量粉尘、甲烷、一氧化碳等, 对红外辐射吸收和散射存在影响; ③红外热像技术只获取矿山表面温度, 对内部温度需结合井下具体情况反演。

## 2.6 消防安全

通过层层烟雾和建筑障碍寻找被困人员和隐蔽火源在消防救援中难度最大。红外热像技术凭借非接触性、准确的优点, 能够正确探测出隐蔽火源, 可在消防灭火救援中迅速获取火场内部火源位置。红外热像技术主要集中应用在火情侦察、搜索救援、辅助灭火和火场清理这几个方面<sup>[36-37]</sup>。

另外红外热像技术也可进行林火探测。早在 19 世纪 60 年代, 美国已展开森林火警红外探测的研究。现已发展到将探测红外图像同卫星和站台直接共享, 迅速确定森林火险。我国在 19 世纪 70 年代开始将红外热像技术应用于森林火险探测。现我国森林火险探测将红外技术同北斗卫星导航相结合, 通过对要素的量算, 能够建立信息快速传输森林火灾侦查系统。伴随社会进步及技术发展, 红外热成像技术在安全防火消灾等方面发挥更大作用<sup>[38-39]</sup>。

## 2.7 应急救援

发生矿难、爆炸等灾害后, 通过红外热像技术对目标辐射进行分析, 可获取被埋压幸存者红外图像, 大幅提高救援效率。

美国、日本等国家在 20 世纪 90 年代就已应用红外热像技术进行火灾爆炸、矿井坍塌、滑坡等灾害救援工作。在 1999 年土耳其地震和台湾大地震中, 美国和日本采用红外热像技术进行救援, 发挥了很大作用。在我国汶川大地震中, 救援人员利用红外热像技术及时确定被埋在废墟底下幸存者位置。为营救工作争取宝贵时间<sup>[40-42]</sup>。

## 2.8 职业卫生

我国职业卫生工作开展较为缓慢, 因此, 红外热像技术在职业卫生领域应用相对较少, 主要集中在对高温环境及人体温度检测。

武建民等在实验室环境下对处于不同气温作业人员体表温度检测, 研究人体同热环境之间关系<sup>[43]</sup>。李璐铭等应用红外热像技术建立安全帽传热模型, 设

计良好通风散温性能安全帽,为露天高温作业人员提供职业卫生保护<sup>[44]</sup>。游波等通过红外热像技术研究矿井高温热害对人体生理健康和工作效率影响,分析矿井高温对人体危害<sup>[45]</sup>。

红外热像技术在职业卫生领域还处于起步阶段,大多集中于人体温度检测。红外热像技术拓展性功能还未在职业卫生领域开展,在一定程度上影响了该技术发展。

### 3 结论

1) 论文统计分析了2000~2013年红外热像技术研究领域的文献,检索结果表明该领域研究在世界各国的重视度逐年提高。中国红外热像技术发展迅猛,已处于世界前列,但较于美国还存在一定的差距。

2) 从现有文献分析可知红外热像技术应用主要侧重于医药卫生、轻工业、仪器仪表业、化工行业等安全领域。红外热像技术应用范围还可在核工业、水利水电业等安全领域进一步推广。

3) 现有红外热像技术、诊断结果较多依靠经验判断,缺乏量化标准;周围环境参数影响因素未排除且存在几何定位误差。因此,红外热像技术应同安全科学领域基础技术进一步渗透。通过建立定量分析模型,将红外检测结果进行校正和补偿计算,减少测温误差,精确测温结果<sup>[46-49]</sup>。

4) 红外热像技术在被广泛应用的同时,本身也不断得到完善、发展和丰富。其为员工生命安全和设备设施安全运行提供了有力的保障。红外成像技术作为一门综合性技术,它的发展同安全科学学的发展相辅相成。随着学科理论不断发展,红外成像技术在安全科学领域有着更为广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20-24.  
YANG Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 20-24.
- [2] 刘辉, 吴超. 红外热像技术应用与安全科学的研究进展[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1022-1027.  
LIU Hui, WU Chao. Research progress of applications for infrared thermography technology in security field[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10): 1022-1027.
- [3] 李国华, 吴立新, 吴淼, 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, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230.
- [4] 邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 441-444.  
XING Suxia, ZHANG Junju, CHANG Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444.
- [5] 吴超. 安全科学学的初步研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(11): 5-15.  
WU Chao. Initial study of the science of safety science[J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(11): 5-15.
- [6] 王致春. 我国应用红外测温仪概况[J]. 激光与红外, 1990, 20(6): 32-37.  
WANG Zhichun. A survey application of infrared thermometers in China(brief)[J]. *Laser & Infrared*, 1990, 20(6): 32-37.
- [7] 李致刚. 红外技术在汽车中的应用[J]. 红外, 2011, 32(10): 40-45.  
LI Degang. Application of infrared techniques in automobile[J]. *Infrared*, 2011, 32(10): 40-45.
- [8] 任慧, 王莹, 肖刚, 等. 桥梁防船装主动预警系统设计及实验研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 66-70.  
REN Hui, WANG Ying, XIAO Gang, et al. Dynamic high temperature field measurement device[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 66-70.
- [9] 李煜, 肖刚. 机场跑道异物检测系统设计与研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 909-915.  
LI Yu, XIAO Gang. Study and design on FOD detection and surveillance system for airport runway[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(8): 909-915.
- [10] Norda, Torkel Use infrared scanning to find equipment hotspots[J]. *Hydrocarbon Processing*, 1977, 56(1): 109-110.
- [11] Merry man, Stephen A, Nelms R M. Diagnostic technique for power system sutilizing infrared thermal imaging[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, 42(6): 615- 628.
- [12] 陈晓军, 袁宏永, 谢辉. 红外热像技术在电气火灾隐患检测中的应用[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 40-47.  
CHEN Xiaojun, YUAN Hongyong, XIE Hui. Application of thermal imaging in detecting hidden dangers of electric Fire[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 40-47.
- [13] 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.  
LIU Xin-ye, CHANG Da-ding, OUYANG Lun-duo. Application of infrared imaging in the maintenance of electric devices[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 220-224.
- [14] Xavier P V Maldague. *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*[M]. Berlin, London: Springer2Verlag Limited, 1993.
- [15] 沈天行, 邢双军. 红外热像技术在建筑物上的应用[J]. 激光与红外, 1996, 26(2): 119-120.  
SHEN Tianxing, XING Shuangjun. Application of thermal imaging system on building[J]. *Laser & Infrared*, 1996, 26(2): 119-120.

- [16] 孙格靓, 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.  
SUN Ge-liang, LI Jian-bao, WANG Hou-liang, et al. Dynamic infrared monitoring to fracturing process of CFRC[J]. *Infrared Technology*, 2001, **23**(1): 39-43.
- [17] 王永茂, 郭兴旺, 李日华. 缺陷大小和深度的红外检测[J]. *无损检测*, 2003, **25**(9): 458-461.  
WANG Yongmao, GUO Xingwang, LI Rihua, et al. Defect dimension and depth measurement by infrared thermography[J]. *Nondestructive Testing*, 2003, **25**(9): 458-461.
- [18] Smith Tony. Thermal imaging's key role in corrosion investigation at chemical processing plant[J]. *Anti Corrosion Methods and Materials*, 1993, **40**(6): 12-22.
- [19] 仲跻生. 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.  
ZHONG Jisheng, LI Chuncheng, REN Xun. Application of infrared imaging technology on petrochemical industry equipment inspection and damage diagnosis[J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29**(5): 310-314.
- [20] 李晓刚. 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.  
LI Xiaogang, FU Dongmei. The using of infrared imaging detection technique in petrochemical industry[J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(5): 265-268.
- [21] 石宏臣, 张晓怀, 孙丰瑞, 等. 基于红外测温的油罐多相界面传热反问题识别方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(S1): 24-29.  
Shi Hongchen, Zhang Xiaohuai, Sun Fengrui, et al. Inverse heat transfer algorithm for multi-phase interface detection of oil tank based on infrared imaging temperature measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(S1): 24-29.
- [22] 邹兵, 丁德武, 朱胜杰, 等. 石化企业设备密封点泄漏检测技术研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, **7**(12): 192-196.  
ZOU Bing, DING Dewu, ZHU Shengjie, et al. Research on leakage detection for sealed points of petrochemical equipment[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, **7**(12): 192-196.
- [23] 李国华, 吴立新, 吴淼. 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, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(3): 227-230.
- [24] 邓明德, 崔承禹, 耿乃光. 岩石的红外波段辐射特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(6): 425-430.  
DENG Mingde, LI Xiaogang, FU Dongmei. The using of infrared imaging detection technique in petrochemical industry[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1994, **13**(6): 425-430.
- [25] 吴立新, 王金庄. 煤岩受压屈服的热红外辐射温度前兆研究[J]. *中国矿业*, 1997, **6**(6): 42-48.  
WU Lixin, WANG Jinzhuang. Study on thermal infrared radiation temperature omen in coal-measure rock yielding under ground pressure[J]. *China Mining Magazine*, 1997, **6**(6): 42-48.
- [26] Prakash A, Gens R, Vekerdy Z. Monitoring coal fires using multi-temporal night-time thermal images in a coal field in north-west China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(14): 2883-2888.
- [27] 王振平, 程卫民, 辛嵩, 等. 煤巷近距离自燃火源位置的红外探测与反演[J]. *煤炭学报*, 2003, **28**(6): 603-607.  
WANG Zhenping, CHENG Weimin, XIN Song, et al. The calculation of close-range coal inflammation position at coal-roads based on infrared detecting and inverse heat conduction technology[J]. *Laser & Infrared Journal of China Coal Society*, 2003, **28**(6): 603-607.
- [28] 刘辉, 吴超, 阳富强, 等. 红外热像技术探测硫化矿石自燃火源的影响因素及其解决方法[J]. *科技导报*, 2010, **28**(2): 91-95.  
LIU Hui, WU Chao, YANG Fuqiang, et al. Detection of spontaneous combustion of sulfide ores by infrared thermal imaging method[J]. *Science & Technology Review*, 2010, **28**(2): 91-95.
- [29] 阳富强, 吴超, 李改军, 等. 红外探测技术在硫化矿石堆自燃检测中的应用[J]. *金属矿山*, 2009, **393**: 149-153.  
YANG Fuqiang, WU Chao, LI Zijun, et al. Application of infrared detecting technology in predicting spontaneous combustion of sulfide ore dump[J]. *METAL MINE*, 2009, **393**: 149-153.
- [30] 张才根. 红外测温仪用于煤样瓦斯解吸与温度关系的测量研究[J]. *煤矿安全*, 1993(9): 17-18.  
ZHANG Caigen. Research on relationship between coal sample gas desorption with temperature by infrared radiation thermometers[J]. *Coal Mine Safety*, 1993(9): 17-18.
- [31] 钟晓晖, 朱令起, 郭立稳, 等. 煤体破裂过程辐射温度场的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2006, **34**(2): 57-59.  
ZHONG Xiaohui, ZHU Lingqi, GUO Liwen, et al. Research on radiant temperature field during fracturing process of coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, **34**(2): 57-59.
- [32] 刘纪坤, 何学秋, 王翠霞. 红外技术应用煤体瓦斯解吸过程温度测量[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2013, **32**(9): 1161-1165.  
LIU Jikun, HE Xueqiu, WANG Cuixia. Measurement of temperature variation in coal gas desorption based on infrared imaging technology[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2013, **32**(9): 1161-1165.
- [33] 邓明德, 房宗绯, 刘晓红, 等. 水在岩石红外辐射中的作用研究[J]. *中国地震*, 1997, **13**(3): 288-296.  
DENG Mingde, FANG Zongfei, LIU Xiaohong, et al. Research on the action of water in the infrared radiation of rocks[J]. *EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA*, 1997, **13**(3): 288-296.
- [34] 陈群龙. 水对岩石受力红外辐射影响的研究[D]. 唐山: 河北理工大

- 学, 2008.
- CHEN Qunlong. Research on the action of water in the infrared radiation of rock[D]. Tang Shan: Hebei Polytechnic University, 2008.
- [35] 刘善军, 吴立新, 张艳博. 潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, **31**(2): 265-268.
- LIU Shanjun, WU Lixin, ZHANG Yanbo. Change feature of infrared radiation from loaded damp rock[J]. *Journal of Northeastern University*, 2010, **31**(2): 265-268.
- [36] Roberts C C Jr. The application of infrared thermography in fire and explosion investigation[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1988, **934**: 2-9.
- [37] 曹壬艳. 图像识别技术在大空间建筑火灾探测中的应用[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2008.
- CAO Renyan. The application of the image recognition technology on large space architecture fire detection[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2008.
- [38] Melendez J, Castro A J, Lopez F. Forest fire studies by medium infrared and thermal infrared thermography[C]//*Proceedings of the SPIE*, 2001, **4360**: 161-168.
- [39] 陈宏刚, 王文元, 徐艾华. 森林航空消防火场侦察及信息传输系统的建设与应用[J]. 森林防火, 2013, (3): 52-54.
- CHEN Honggang, WANG Wenyuan, XU Aihua. Construction and application of Aerial forest fire detection and information transmission system[J]. *FOREST FIRE PREVENTION*, 2013(3): 52-54.
- [40] 杨建民, 李春孝, 张玉升. 浅谈大型建构物倒塌事故的救援程序措施与组织指挥[J]. 灭火指挥与救援, 2004, **23**(5): 485-487.
- YANG Jianmin, LI Chunxiao, ZHANG Yusheng. Preliminary discussion on succor procedure measure, organizing and command of large building collapse[J]. *Fire Science and Technology*, 2004, **23**(5): 485-487.
- [41] 石国安, 商文忠, 张晗. 生命探测中的红外技术[J]. 红外, 2008, **29**(11): 12-16.
- SHI Guoan, SHANG Wenzhong, ZHANG Han. Infrared techniques in survival detection[J]. *Infrared*, 2008, **29**(11): 12-16.
- [42] 李娟, 黄晖, 褚云汉. 从汶川地震谈灾害应急中的国防科技资源动员[J]. 北京理工大学学报, 2009, **11**(4): 265-268.
- LI Juan, HUANG Hui, CHU Yun-han. The defense resources mobilization in the disaster response[J]. *JOURNAL OF BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY*, 2009, **11**(4): 265-268.
- [43] 武建民, 常绍勇, 崔代秀. 利用红外热像技术观察不同环境气温对人体头颈部皮温的影响[J]. 激光与红外, 1999(4): 38-40.
- WU Jianmin, CHANG Shaoyong, CUI Daixiu. Effect of environment temperature on the head-neck-skin temperature by IR thermography[J]. *Laser & Infrared*, 1999(4): 38-40.
- [44] 李珞铭. 安全帽积热实验研究与影响分析[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- LI Luoming. Experimental research and influence analysis of safety helmet's heat accumulation in the hot work environment[D]. Chang Sha: central south university, 2009.
- [45] 游波, 吴超, 王敏. 深井受限空间高温环境影响模拟试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, **9**(11): 30-36.
- YOU Bo, WU Chao, WAGN Min. Experimental study on the impact of high temperature to human in confined space of deep mines[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, **9**(11): 30-36.
- [46] 高兰香, 沈国土, 蔡继光, 等. 红外热像理论建模中的体效应研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(S): 597-599.
- GAO Lanxiang, SHEN Guotu, CAI Jiguang, et al. Research of thick hull in thermal image theoretical simulation of ships[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S): 597-599.
- [47] 姜会林, 付强, 段锦, 等. 红外偏振成像探测技术及应用研究[J]. 红外技术, 2014, **36**(5): 345-349.
- JIANG Huilin, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Research on infrared polarization imaging detection technology and applications[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(5): 345-349.
- [48] 李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. 红外技术, 2014, **36**(7): 513-520.
- LI Jiakun, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Review of Gas Leak Infrared Imaging Detection Technology[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(7): 513-520.
- [49] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学, 2014, **7**(1): 150-154.
- ZHANG Xiaolong, LIU Ying, WANG Jian, et al. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperature[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(1): 150-154.