

# 红外热像技术应用于安全科学的研究进展

刘 辉, 吴 超

(中南大学, 国家金属矿安全科学技术研究中心, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 为了解红外热像技术的研究情况及其应用于安全科学领域的科研进展情况, 利用美国工程索引 EI Compendex 及 US Patents 和 EP Patents 数据库, 以 Thermal imaging or Infrared imaging, Application 等为主题词检索了自 2000 年至今的研究成果, 共检索出相关的研究论文 7300 多篇, 专利 1400 多项(其中涉及安全科学技术领域的论文 404 篇, 专利 55 项)。根据发表时间、作者国别、研究内容、应用领域及前沿方向等分别对这些文献作了详细统计和分析。最后从电气安全、石油化工安全、消防安全、建筑安全、交通安全以及矿山安全等领域论述了红外成像技术在我国安全科学领域的应用研究状况, 并展望了其在安全科学的应用前景。

**关键词:** 红外热像; 安全科学技术; 应用; 研究进展

**中图分类号:** TN219; X9 **文献标识码:** A

## Research progress of applications for infrared thermography technology in security field

LIU Hui, WU Chao

(Central South University; National Research Center of Science and Technology for Metal Mines, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this paper, the current status and applications of the infrared thermography in security field were reviewed systematically, based on searching of the database EI Compendex, US Patents and EP Patents. With two subject words: thermal imaging or infrared imaging and application, about 7300 papers and 1400 patents (including 404 papers and 55 patents on field of safety science and technology) were obtained. Then a statistics depending on the time publication, research topics, authors' affiliation and application fields were analyzed. Moreover, the current status and development directions on the field concerning safety science were pointed out from electrical safety, petrochemical safety, fire safety, building safety, transportation safety and mine safety.

**Key words:** infrared thermography; safety science and technology; application; research progress

### 1 引言

红外热像技术是当今迅速发展的高新技术之一, 已广泛地应用于军事、准军事和民用等领域, 并发挥着其他产品难以替代的重要作用<sup>[1]</sup>。它是利用红外辐射原理, 通过各种探测器接收目标物体表面发出的红外辐射能, 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)<sup>[2]</sup>。与传统的测温技术相比, 红外热像技术具有以下特点: ①灵敏度高, 响应速度快, 响应时间多为毫秒甚至微秒级, 可以测取快速变化的温度(场); ②测量

范围宽。其理论下限为热力学零度以上, 目前实际的辐射测温上限已达到 6000℃; ③非接触测量。能够测量运动、危险和不易接近的目标; ④测量结果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, 红外热像技术不仅在军事领

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划课题(No. 2006BAK04B03); 中南大学优博扶植项目(No. 2009ybfz08)资助。

**作者简介:** 刘 辉(1978 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为矿山安全与井下内源火灾探测。E-mail: liuhui2003@126.com

**收稿日期:** 2009-05-18; **修订日期:** 2009-07-14

域得到了充分的重视,而且在民用领域也获得越来越广泛的关注<sup>[3-4]</sup>。

在工矿企业生产中,许多潜伏性的事故,往往伴随着温度分布的变化。通过测量温度,可以发现事故隐患,以便采取紧急措施,以免事故扩大和造成重大损失。但当温度较小或者不能接触测量(如高温、高压、旋转运动或带电目标等)时,传统的测量方法不能使用,或者使用起来很不方便,而红外热像技术为这些目标温度的测量提供了有效的检测手段,对保证安全生产的顺利进行起到了很重要的作用,使得系统安全状态由传统的事故预防性向事故预知性发展<sup>[5]</sup>,已成为一门新的安全检测与监控技术,对于进一步完善安全科学技术理论的建设与发展具有重要的意义。

## 2 红外热像技术应用的研究进展

### 2.1 近十年该领域研究成果检索结果与分析

利用 Thermal imaging or Infrared imaging, Application 等主题词检索美国工程索引 EI Compendex 及 US Patents and EP Patents 数据库从 2000 年至今所

收录的文献和专利,共检索出有关红外热像技术应用研究的文献 7300 多篇,专利 1400 多项(其中 US Patents 1338 项)。为了了解近 10 年来该领域的研究动态,对所检索的文献按照发表时间及世界主要研究国家进行统计分析,统计结果如图 1 所示。从图中可以看出以下特点:

1)近十年来,该领域一直是世界各主要发达国家研究的热点问题,其相关研究论文数量几乎呈逐年上升趋势;

2)2004 年和 2005 年发表的论文比较多,这主要是因为这几年的 SPIE, ANTEC 等会议较多。

3)2009 年论文较少,是因为 EI 收录论文滞后的缘故。图中所列是至 2009 年 5 月初 EI 收录发表论文的仅少量部分,按照趋势预测,2009 年发表的论文会更多;

4)与世界研究的总体状况相比,中国相关的研究成果仅占很小部分;但从发展的态势来看,中国每年增幅明显,这与我们国家“十一五”规划对该领域研究的大量投入与大力支持是分不开的。

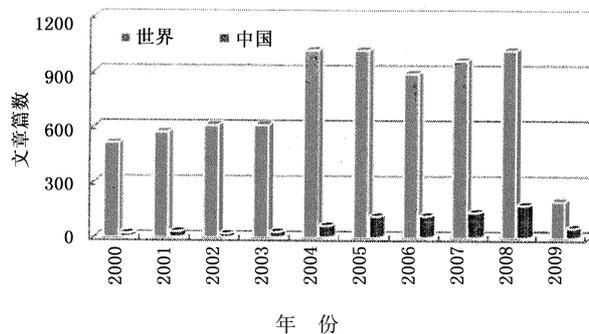


图 1 近十年世界及中国相关研究论文的发表情况

按照作者所属国别,对检索文献进行统计,统计结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,美国发表的论文及申请的专利均占绝对优势,代表了其在红外热像应用研究领域的先进水平;加拿大次之,中国紧

跟加拿大之后,表明我国相关研究工作得到迅猛发展,正逐步融入世界研究行列。日本相关研究的论文数量虽然排在第六位,但其专利却仅排在美国之后,其研究成果转化成生产力的水平与效率最为显著。

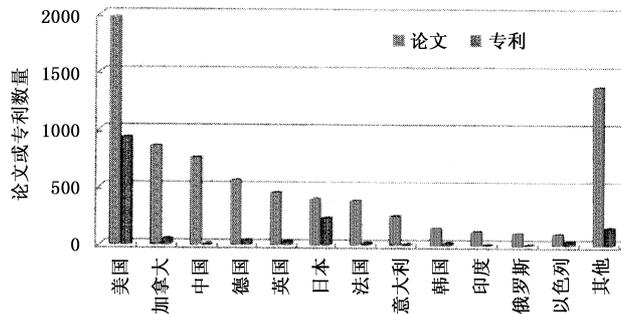


图 2 近十年主要国家发表论文及申请专利的情况

### 2.2 应用领域及前沿方向

红外热像技术首先在军事领域获得应用,世界上第一台商用红外热像仪于 20 世纪 60 年代中期,

由瑞典的 AGA 公司和瑞典国家电力局在红外前视装置的基础上研制。随着半导体技术和计算机技术的日新月异和突飞猛进,红外热像仪的硬件性能日

益提高、软件功能不断完善,其应用技术研究得到了巨大的发展,所涉及的领域越来越广泛,在工业、农业、环境控制、森林管理、电力、消防、石化以及医疗等方面应用也逐步完善和成熟<sup>[5-29]</sup>。其具体应用研究领域如表1<sup>[6]</sup>所示。

表1 红外热像技术的应用领域

应用目的	应用领域	应用项目
预防保养 设备检查	电力工业	线路检测及发、变、输、配电设备内、外部故障诊断
	机械工业	锅炉、热处理
	化学工业	储槽、蒸汽管线
污染防治 资源探测	环保工业	空气、水污染侦测
		海洋温域、低热平衡
目标搜索	军事单位	预警、跟踪、搜索、观瞄、制导、隐蔽和伪装的目标识别等
	警政单位	司法、海关、禁毒、危险品监测等
	其他安全防御单位	空中搜索、森林火灾探测等
灾害探测	矿山行业	井下煤与瓦斯突出、危岩及自燃火源探测
	建筑行业	混凝土构件损伤
	交通行业	燃轴探测
研究发展	国防、航天、航空工业	引擎燃烧
	材料工业	符合、建筑材料
	电子、电信工业	电路板设计检测
	塑胶、纺织工业	热传导研究
	汽车、机械工业	轮胎设计
医学诊断	肿瘤研究	乳癌、烧烫伤、血管疾病
	内、外、骨科	脊椎病变、皮肤病变
制造 过程控制	钢铁业	温度分布
	水泥业	水泥旋转窑炉检测
	塑胶业	塑胶膜温控
	造纸业	纸浆干燥监控
	玻璃业	玻璃制造过程监控

经过近50年的应用和研究,尽管各国出于保密等方面的原因,但就检索的文献看,红外热像技术在民用与工业生产等领域依然取得了很大的发展与进步。随着生产工艺的不断提高和工艺技术的突破,在热像仪实现可获得性<sup>[1]</sup>和可生产性<sup>[1]</sup>的同时,探测灵敏度及空间分辨率高、视场大、尺寸小、重量轻、自动化程度高的热像仪将会使得红外热像技术在各行业发挥越来越大的作用。

### 2.3 应用于安全领域的检索结果与分析

在先前检索的基础上,以泛安全(safety or security or secure or safe)为主题词进一步检索研究,获

得近十年安全领域发表论文及申请专利的情况。其中相关论文有404篇,专利55项。其每年的具体研究情况及态势如图3所示。

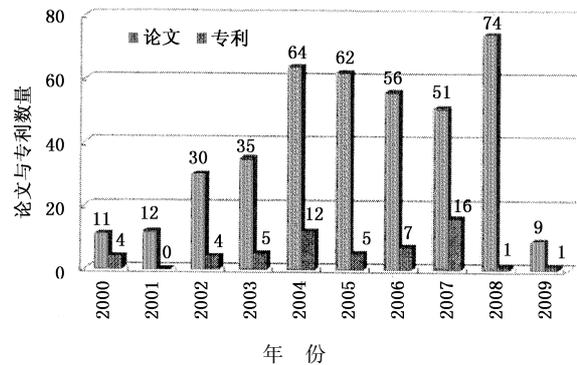


图3 近十年相关研究在安全领域发表论文及申请专利的情况

从世界范围来看,近十年红外热像技术应用于安全领域的研究动态紧跟世界发展态势,在2004年达到新高,之后缓慢下滑,2008年开始重新显热。不可否认,所检索文献虽部分涉及安防、军事安全等相关内容,但随着其在民用及工矿企业安全生产领域获得的越来越多的关注,在世界范围内红外热像技术应用于安全科学的研究发展态势和前景是毋庸置疑的。

### 3 在我国安全科学的研究进展

安全科学<sup>[30-32]</sup>作为一门新兴科学,是以人们在生活、生产、生存领域的安全问题为研究对象,研究消除或控制危害因素的理论和技术。它的发展经历了五六十年的历史。目前,安全科学研究已涉及电气、石油化工、消防、建筑、交通、矿山等行业的各个领域<sup>[31-33]</sup>。

#### 3.1 在电气安全的研究进展

电气安全是安全科学领域中与电气相关联的科学技术及管理工程。在电力系统中,许多重大事故都是由于电气设备过热所引起,如能及早发现电气设备过热隐患,及时采取维护或检修措施,排除故障隐患,可大大减少电力系统的运行事故,提高供电的可靠性。

国外应用红外技术检测电气设备故障始于20世纪60年代中期,瑞典国家电力局最先将红外热像技术应用于电气设备安全运行状态热诊断<sup>[9]</sup>。20世纪70年代开始把热像仪装在机动设备上(如汽车和直升机等)对变电站设备或高压输电线路连接件故障做生产性巡回检测,并分别制订出相应的技术规范或红外诊断故障判定标准。1990年国际大电网会议(CIGRE)上充分肯定了电力设备故障红外诊断技术,实践证明该技术在电力设备从传统的预防性故障检修体制向先进的预知性状态维修体制

发展中发挥了重要的作用。

我国研究红外成像技术应用于电气安全可以追溯到 20 世纪的 70 年代初研究开发的电力设备红外诊断技术。80 年代中期,几家电力专业研究所先后引进较先进的光机扫描热象仪,积极开展发变电设备故障检测试验和 220 kV 及 110 kV 输电线路的直升机巡线红外检测试验,并取得了良好的效果。进入 90 年代后,除进一步扩大现场检测外,一些电力研究院(所)和省(市)电力局相结合,通过对多种高压电气设备内部导流回路故障及绝缘故障的模拟试验研究,并结合现场检测积累的经验,现已掌握了各类高压电气设备内外部故障的外表红外热像特征,积累了各类设备不同内外部故障类型的温度变化规律和大量典型红外图谱<sup>[4,10-12]</sup>。

可以发现,随着红外成像技术大力应用于电力设备的故障诊断,其在保证电气安全,维护电力系统人员与设备的安全中发挥着越来越重要的作用。

### 3.2 在石油化工安全的研究进展

石油化工行业的生产工艺流程大都存在着热交换,工艺参数的变化、设备热故障等均与温度变化密切相关<sup>[7]</sup>。如各种反应器、加热炉、催化装置等多是在热状态下工作,这就使得红外成像技术在石化工业得到高度运用,从而为石油化工安全研究领域开辟一个新的研究方向。

国外从 20 世纪 70 年代起应用红外技术对石油化工系统的加热器、管道、锅炉、转动窑和冷却器等设备运行的安全状况进行成像检测与监控,并通过探测和分析油罐保护层表面温度分布的热图像,查出保护层的缺陷,从而消除事故隐患<sup>[13-15]</sup>。我国在 80 年代末开始应用红外热像技术诊断石化系统设备运行的安全状况<sup>[4]</sup>。目前,红外成像技术应用于石化安全领域的故障诊断技术发展具有两方面的特色<sup>[7]</sup>:一是初步实现了红外微机诊断;二是对于热图像的识别还停留在依赖经验阶段,没有上升到理论阶段,对各种故障形式所表现的红外成像特征、红外热图像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。通过提高设备状态的热诊断技术,大力加强相关技术的研究,红外成像技术可望在石化行业发挥更大的作用。

### 3.3 在消防安全的研究进展

#### 3.3.1 火灾预防

火灾往往是由不明显的隐火引发的,这是毁灭性火灾的根源<sup>[16]</sup>。采用红外成像技术,利用飞机巡逻,可以快速、有效地发现这些隐火,把火灾消灭在萌芽阶段。在住宅小区、机场、码头、学校等人流密集的场所,通过红外热成像仪探测的红外热图像,均

能迅速及时监测到火灾源头,进行预/报警。厂房仓库往往会发生自燃现象,这种自燃现象时间长、来势猛、损失大。利用红外成像仪可以准确判定这些火灾的地点和范围,做到早发现、早预防、早扑灭。

#### 3.3.2 火灾调查与分析

我国消防与科研机构在火灾调查和分析火灾事件、确定事发原因时,常利用红外热像技术来实现重现时间的方法去理解爆炸机理<sup>[17]</sup>。应用红外成像技术能够获得热分布图显示出爆炸时和爆炸后的热传导范围。重放热像录像很容易辨认燃爆碎片的抛射轨迹,而可见光对这些无能为力。

在美国,分析失火原因和火源的程序与爆炸事故分析类似,红外热图像提供了定量的温度值,能帮助识别失火原因,为起火点的详细检验提供事故发生原因的有效信息。

#### 3.3.3 灭火抢险

红外热成像仪能够把目标的红外辐射转变成肉眼可见的视频信号,帮助消防员克服在烟雾中的视力障碍,迅速找到着火点或被困人员,从而实施有效的灭火救助行动<sup>[18-20]</sup>。在消防部队实施抢险救援中,利用红外热成像仪,消防员可以穿过气雾找到气体(液化气)泄漏点、搜寻遇险者所处的准确位置,还可以在气雾或烟雾笼罩无法接近目标时估测出与目标的距离,划定警戒区。

红外热成像仪的使用,解决了消防部队在浓烟条件下照明、火情侦察和抢险救援等方面的难题。1999 年 1 月 1 日起施行的《城市消防站建设标准》中,已将红外热成像仪列为消防队抢险救援的必备器材之一。可以预计,在不久的将来红外热成像设备将在消防部队灭火救援行动中发挥极其重要的作用。

### 3.4 在建筑安全的研究进展

近年来高层建筑表面装饰材料因黏贴质量不佳,从高空脱落伤及行人的事故时有发生,表面装饰材料脱落不仅影响美观而且影响其对建筑物的防护作用;混凝土建筑物使用过程中可能受到自然灾害(冻融、化学侵蚀等)和人为灾害(火灾、劣质施工等)的损伤,这些损伤的特征是混凝土构件由表及里受到不同程度的破坏,尤其是表层疏松或破损状况,均给建筑和过往行人造成很大的安全隐患<sup>[21]</sup>。

目前对结构混凝土火灾的损伤程度和混凝土的强度下降范围以及冻融反复作用的损伤情况还缺乏快速有效的检测手段。在国内,同济大学<sup>[22]</sup>采用红外成像技术对上述混凝土损伤破坏进行探测的研究表明,根据混凝土火灾的物理化学反应,使混凝土表层变得疏松,表面因被直接火烧,其疏松程度尤为严重,其强度也随之下降;混凝土受冻融作用同是导致

其导热性下降。使用红外成像技术显示的“热斑”和“冷斑”比较容易分辨出火烧和冻融破坏的部位。

随着广泛深入地实验,使得红外技术能够在建筑领域适应不同的技术条件,提高判别的精度,为建筑安全树立一道检视的防护网。

### 3.5 在交通安全的研究进展

火车在快速行驶中,由于机械结构、加工工艺、润滑状态不良等原因,是车轴和轴瓦发生不正常的摩擦,产生高温过热,形成热轴,导致行车安全隐患。因为热轴很容易使轴箱外的油污燃烧而产生燃轴,会使行驶中的车轴变软,进而发生切轴事故,使列车越轨、翻车,从而造成严重的交通事故<sup>[23]</sup>。

红外热像技术为探测运行中列车的热轴提供了可靠的手段。红外热像仪可以探测行驶中列车的轴温,只要轴箱的温度比正常运行时稍高一点,成像仪就可以检测出来,所以在列车发生燃轴甩车事故前进行停车检修,消除行车隐患,保证列车安全运行。

### 3.6 在矿山安全的研究进展

矿山安全是矿山企业健康、可持续发展的关键问题,其井下生产系统是一个由人-机-环境构成的、人工和自然因素共存、空间极其复杂的灾害系统。煤与瓦斯突出、矿柱稳定性、顶板跨落、矿爆、水、火等均是困扰矿山安全生产的难题。红外成像技术作为一门高新技术,在矿山行业的研究应用已见端倪<sup>[24-26]</sup>。

#### 3.6.1 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出(简称突出)是威胁煤矿安全生产的严重自然灾害之一。突出的综合假说认为,突出是地应力、瓦斯和煤的物理力学性质三种因素综合作用的结果。而煤层采掘工作面附近煤体的温度与这三个因素均有关。可见把突出的红外前兆信息作为突出预测指标之一,并与其他突出连续预测方法如声发射监测技术、电磁辐射监测技术等一起进行非接触式突出预测,以提高预测预报的准确性有一定的可行性。孙继平等<sup>[27]</sup>初步分析了煤与瓦斯突出的工作面预测预报的红外诊断方法,并展望了红外诊断技术在煤与瓦斯突出工作面预测中的应用前景。

#### 3.6.2 矿山危岩探测

矿山开采中,工作面常常因为松散的岩石掉落,酿成重大事故。在进行大规模采矿作业时,工作面松散的岩石背留有裂缝,使其与整体岩石隔开,从而减弱了松散岩石与岩石整体间的热传递。因松散危岩的温度受井下气温的影响而使得松散危岩与岩石整体之间存在一个微小的温差。采用红外成像技术不但可以测出这些微小的温差,还可以把所发生的温

度变化情况进行实时显像,为探测和发现工作面的危岩提供了有效的手段和方法。中国矿业大学吴立新教授等<sup>[28]</sup>为探索红外成像技术在这方面的应用,进行了“矿山岩石受力的红外辐射规律及其遥感”等基础研究,取得了许多有价值的定性定量成果。

#### 3.6.3 矿井自燃火源探测

矿井自然发火是煤炭及含硫矿山安全生产的重大威胁。煤炭及硫化矿石氧化发热是矿井自燃起火的主要原因。先前普遍采用气体分析仪测定煤炭氧化过程中伴生的一氧化碳等气体的含量以达到预测自燃起火的目的,如文献<sup>[29]</sup>所述。但气体分析法不容易确定火源地点,而且,在煤炭氧化初期,产生的一氧化碳气体稀少,一般难以检测到。而红外热像技术可以测出煤堆、矿岩表面温度变化情况,不仅能准确测出矿物堆积体自燃起火的火源点,而且还可探测出氧化初期温度不高时矿堆的变化。矿堆温度发生异常或有升高趋势时,可以方便且迅速地掌握,从而把煤炭、硫化矿石氧化自燃发火事故消灭在萌芽状态中,保证矿井安全生产。

#### 3.6.4 探水及其他

与探火相似,使用红外成像技术辅助水文地质监测水区,对透水区域进行定期测量,分析比较,可预测采掘前方有无透水的可能<sup>[34]</sup>。同时,对于井下电气设备和瞎炮等均能使用红外成像技术进行探测诊断。

总之,随着矿山相关研究的不断进展,以及红外成像技术本身的飞速发展,红外成像技术将在矿山行业得到愈来愈广泛的重视与应用。

## 4 结论

1)统计近10年红外热像技术应用研究的文献,结果表明红外热像技术受到世界发达国家的重视,其关注度呈逐年上升之势,该领域一直是世界各主要发达国家研究的热点问题;与世界研究的总体状况相比,中国相关的研究成果仅占很小部分,但从发展的态势来看,每年增幅明显。

2)红外热像技术应用研究所涉及的领域越来越广泛,在工业、农业、环境控制、森林管理、电力、消防、石化以及医疗等方面应用也逐步完善和成熟;应用于安全领域的研究动态紧跟世界发展态势。

3)从电气安全、石油化工安全、消防安全、建筑安全、交通安全以及矿山安全等领域对红外热像技术在安全科学领域的应用研究现状进行了分析和展望。

由此见,随着红外热像仪器设备性能水平的提高、价格的降低和红外热像技术应用的不断探索和研究领域的不断拓宽,其将在工农业许多生产环节领域内得到推广应用,为保证职工的生命安全和设

备设施的安全运行提供有力的保障。红外成像技术是一门综合性技术,它的发展同光学技术、电子技术、半导体技术、激光技术、信息处理技术等的发展又互相渗透,形成彼此促进、相辅相成的密切关系。有理由相信,随着这些学科的发展,红外成像技术必将在安全科学技术领域内有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 麦绿波. 焦平面热像仪的发展与应用综述[J]. 红外技术, 2006, 28(9): 497 - 502.
- [2] 李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热成像技术及其应用的研究进展[J]. 激光与红外, 2004, 33(3): 227 - 230.
- [3] 彭焕良. 热成像技术发展综述[J]. 激光与红外, 1997, 27(6): 131 - 136.
- [4] 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.
- [5] Xavier P V Maldague. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography [M]. Berlin, London: Springer-Verlag Limited, 1993: 224.
- [6] 红外诊断技术在电力设备中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 58.
- [7] 田裕鹏. 红外检测与诊断技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 318 - 319.
- [8] 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.
- [9] Merry man, Stephen A, Nelms R M. Diagnostic technique for power systems utilizing infrared thermal imaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(6): 615 - 628.
- [10] 袁宏永, 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.
- [11] 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.
- [12] 仲蛟生, 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.
- [13] 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.
- [14] Imgram A G, McCandless J B. Infrared thermal imaging of refinery equipment [J]. Proceedings of SPIE, 1983, 371: 47 - 54.
- [15] Norda, Torkel. Use infrared scanning to find equipment hot spots [J]. Hydrocarbon Processing, 1977, 56(1): 109 - 110.
- [16] 雷玉堂. 红外热成像技术及在智能视频监控中的应用[J]. 中国公共安全, 2007, 8: 114 - 120.
- [17] Roberts C C Jr. The application of infrared thermography in fire and explosion investigation [J]. Proceedings of the SPIE, 1988, 934: 2 - 9.
- [18] 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.
- [19] Bryner Nelson, Hamins Anthony. Evaluation of thermal imaging cameras used in fire fighting applications [C]. Proceedings of SPIE, 2004, 5407: 44 - 53.
- [20] Olmo F J, Alados-Arboledas L. Fire detection and growth monitoring using a multitemporal technique on AVHRR mid-infrared and thermal channels [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(2): 111 - 120.
- [21] Moropolou 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.
- [22] 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.
- [23] 黄荣华. 红外技术及其在工业生产中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 122 - 123.
- [24] Zhao-ming Zeng, Fu-zhen Zhou, Yong-fang Huang. Detection and investigation of underground coal fire in coal field by using airborne infrared scanning technology [C]. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1990, 1: 623 - 627.
- [25] Prakash A, Gens R, Vekerdz Z. Monitoring coal fires using multi-temporal night-time thermal images in a coalfield in north-west China [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(14): 2883 - 2888.
- [26] Mansor S B, Cracknell A P, Shilin B V, et al. Monitoring of underground coal fires using thermal infrared data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(8): 1675 - 1685.
- [27] 孙继平, 李迎春. 红外诊断技术在突出工作面预测中的应用[J]. 煤矿安全, 2006, 37(11): 17 - 20.
- [28] 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.
- [29] 何萍, 王飞宇, 唐修义, 等. 煤氧化过程中气体的形成特征与煤自燃指标气体选择[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 635 - 643.
- [30] 金磊, 徐德蜀, 罗云. 跨世纪的中国安全科学学科建设及新拓展[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(4): 1 - 8.
- [31] 吴宗之. 中国安全科学技术发展回顾与展望[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(1): 1 - 5.
- [32] 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.
- [33] 张景林, 王晶禹, 黄浩. 安全科学的研究对象与知识体系[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(2): 16 - 21.
- [34] 程文楷, 刘永平. 矿用红外辐射测温技术的研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(6): 578 - 582.