



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

刘 辉, 吴 超, 阳富强, 李亚威

中南大学资源与安全工程学院; 国家金属矿安全科学技术研究中心, 长沙 410083

摘要 红外热像技术已成为火源探测的一种新方法,但其应用于井下自燃火源探测的实际操作中还存在许多不足。为了准确、快速地获取自燃矿石表面的温度场,初步探讨了发射率、感温距离、背景噪声、井下环境及热像仪稳定性等因素对探测结果的影响。通过试验,确定了硫化矿石表面的热发射率和使用 IRI-1011 热像仪探测系统测温时的合理距离。试验结果表明,硫化矿石表面的热发射率 $\epsilon=0.88$; 常温下 10m 探测范围内,随着探测距离的增大,感温误差明显增大;热源温度一定时,3m、4m 距离的感温误差几乎呈线性增大;热源温度 $T>50^{\circ}\text{C}$ 时,2m 距离的感温误差趋于稳定。在试验基础上,采用数据拟合的方法,建立了热像仪感温与矿石表面实际温度间的定量关系。现场应用证明该研究结果实际可行。

关键词 硫化矿石; 自燃; 火源探测; 红外热成像

中图分类号 TD75

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0091-05

Detection of Spontaneous Combustion of Sulfide Ores by Infrared Thermal Imaging Method

LIU Hui, WU Chao, YANG Fuqiang, LI Yawei

National Research Center of Science and Technology for Metal Mines; School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Infrared thermal imaging technique is a new method for detecting the fire source. But a number of problems have to be solved before it can be applied to the detection of a spontaneous fire source of sulfide ores in mine. In order to determine the surface temperature of spontaneous combustion ores more accurately, preliminary studies were carried out on the effects of emission rate, the range of the detector, background noise, subsurface environment and stability of infrared thermal imagers. It is shown that the emission rate of materials and the range of the detector have greater influence on the precision of the measured temperature than other factors. Some measures are taken to control factors, such as background noise, subsurface environment and stability of infrared thermal imagers in order to avoid external disturbance and keep the imager stable. The emission rate of sulfide ores and the reasonable range of IRI-1101 infrared thermal imagers were determined based on experimental results and a theoretical analysis. The emission rate of sulfide ores is $\epsilon=0.88$. Within 10m, the temperature error will increase greatly with the measuring distance. When the temperature of the heat source is kept in a certain range, the temperature error is almost linearly related with the distance at 3m and 4m. Temperature error is stable at 2m when the temperature of the heat source $T>50^{\circ}\text{C}$. The quantitative relationship between the temperature obtained by IRI-1101 infrared thermal imager and the real surface temperature of spontaneous combustion ores was established when distance is equal to 2m, 3m and 4m, respectively. After the adjustment, the relative error of four measuring points are -3.1% , 3.9% , 5.5% and -5.8% , respectively. The results of study were confirmed by field tests in the sulfide mine.

Keywords sulfide ores; spontaneous combustion; detection of fire source; infrared thermal imaging

收稿日期: 2009-10-26

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAK04B03); 湖南省研究生科研创新项目(CX2009B053); 中南大学优秀博士学位论文扶植项目(2009ybfz08)

作者简介: 刘辉, 博士研究生, 研究方向为矿山安全与环保, 电子信箱: liuhui2003@126.com; 吴超 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520001585M), 教授, 研究方向为安全与环保, 电子信箱: wuchao@mail.csu.edu.cn



0 引言

硫化矿石自燃是长期以来影响矿山安全生产的问题。中国有 20%~30% 的硫铁矿、5%~10% 的有色金属或多金属硫化矿具有自燃的危害^[1-4]。这些自燃火灾一旦发生,将产生大量有毒有害气体和强热量,污染井下作业环境;火区开采时还可能引发炸药自爆、早爆事故,给矿山的生产埋下许多安全隐患^[5-7]。因此,定期探测发火矿石的温度是预防硫化矿石自燃的重要手段。然而,由于井下条件复杂,影响因素多,自燃火源具有较强的隐蔽性^[8-9],加之探测手段和途径不成熟等各方面条件的限制,准确、快速确定井下火源的位置及自燃程度一直是困扰矿山安全的难题。

近年来,随着红外技术的日趋成熟及各种红外探测器的研制成功,红外技术应用于自燃火源探测已成为一种新的趋势。S. B. Mansor 等^[10]利用红外数据监测地下煤的自燃情况;刘永平^[11]针对煤矿井下粉尘、水汽影响,提出了应用红外测温仪应采取的措施;程卫民等^[12]研究了煤巷煤自燃火源红外探测的影响因素,并给出了诊断方法;O. Carpentier 等^[13]应用红

外热像技术结合 GPS 对发火煤堆进行监测, 取得良好的效果。现有的热像仪已能分辨 0.01°C 甚至更小的温差, 为开发新的自燃火源探测方法提供了条件, 但由于用红外热像仪探测矿石表面的温度场分布不仅与自身参数 (灵敏度、发射率) 设定正确与否和外界环境状态 (如环境中水蒸气、二氧化碳及微粒粉尘含量、目标距离等) 因素有关, 还受到内部结构、性能老化的影响^[14]。本研究针对这些问题, 对红外热像仪应用于硫化矿石自燃火源探测可能产生的影响因素及误差进行分析, 以期为准确探测矿石自燃火源提供技术依据。

1 红外热成像探测原理

1.1 工作原理

一切温度高于绝对零度的物体,都在以电磁波的形式向外辐射能量,其辐射能包含各种波长,如图 1 所示,其中波段位于 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 的为红外辐射,按波长分为 4 个波段,如表 1 所示^[15]。物体的温度越高、辐射特性越好,红外辐射的能量就越强。

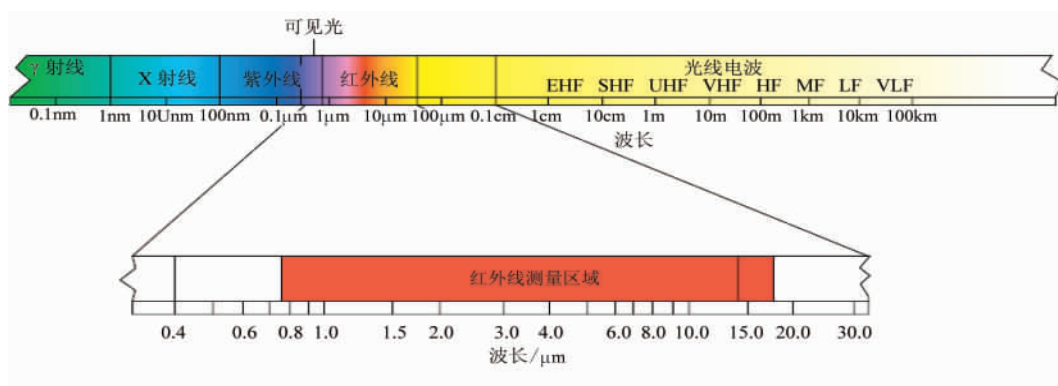


图 1 红外线分布

Fig. 1 Distribution of infrared rays

表 1 红外线分类

Table 1 Classification of infrared rays

波段	波长/ μm	简称
近红外	0.76~3	NIR
中红外	3~6	MIR
远红外	6~15	FIR
极远红外	15~1000	XIR

根据斯特藩-玻耳兹曼定律, 物体表面每一辐射单元的热辐射能量与该单元绝对温度的 4 次方呈正比, 即

$$M = \epsilon \delta T^4 \quad (1)$$

式中, M 为辐射单元的热辐射能量; ε 为辐射单元表面发射率; δ 为斯特藩-玻耳兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T 为辐射单元表面温度, K。

1.2 系统组成

由于物体表面由许多单元组成,均存在一个热辐射能量场,所以相应有一个温度分布场。红外热像仪就是利用对物

体表面红外辐射的强弱进行探测而呈现出物体表面形状轮廓和分布情况,以便人眼观察的仪器,其结构如图 2 所示^[15]。当一个物体表面的发射率不变时,该物体的辐射功率与其温度的 4 次方呈正比。因此,对物体辐射功率的探测,实际上就形成了对其表面温度的探测。

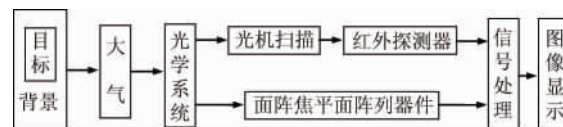


图 2 红外热像仪结构

Fig. 2 Structure of infrared thermal imager

1.3 实验仪器

研究所采用的热像仪为英国 IRISYS 公司生产的 IRI-1011 通用型热像仪。其特点是无须制冷,可实时成像,并具有功耗低、工作寿命长、可靠性高、体积小、质量轻、可操作性强等特点。其主要性能参数如下:

测温范围为 $-10\sim 150^{\circ}\text{C}$ 或 $-10\sim 300^{\circ}\text{C}$ (任选);温度精确度为 $-0.5\sim 30^{\circ}\text{C}$ ($-10\sim 150^{\circ}\text{C}$);镜头观测角度为 $20^{\circ}\times 20^{\circ}$;影像显示画素为 128×128 像素;温度检知器为 16×16 像素阵列;画面显示速率为 8Hz ;红外线感应频谱为 $8.0\sim 14.0\mu\text{m}$;发射率设置为自动输入。

2 实际使用中的问题

具有自燃倾向的硫化矿石在向外辐射能量的同时,必然会将矿石内的自燃信息以能量场的形式反馈到矿石表面。红外热像火源探测就是通过红外热像仪探测矿石表面的温度场分布,获取矿石表面下的温度场信息,然后根据温度场的异常分布情况识别矿堆内是否存在火源和深度,以此达到火源探测的目的。但由于作业环境的复杂及热像仪自身参数等因素,在红外热像仪的实际使用过程中,若不充分考虑各因素的影响,则会在很大程度上降低探测精度,甚至影响探测结果。

2.1 发射率的影响

由式(1)可知,使用红外热像仪进行温度测量时,其最大的不确定因素是被测物体的发射率 ε 。发射率表明了辐射和吸收的能力,是材料的固有性质。测温时选用 ε 值的大小直接影响测温结果。然而,它随表面条件、形状、波长和温度等因素的影响而变化。为了测量真实温度,需要精确设定发射率值。图3(a)、3(b)是用IRI-1011热像仪拍摄的装有热水玻璃杯的红外热图。利用热像仪的 ε 值自动输入系统,分别输入 $\varepsilon=0.9$ 和 $\varepsilon=0.5$,相邻热像图之间的拍摄间隔控制在 3s 内以尽量减少因时间造成的误差。从图3可以看出,仅改变 ε 的取值,测温的精度影响很大,这在图3(c)、3(d)的温度曲线图上更为明显。

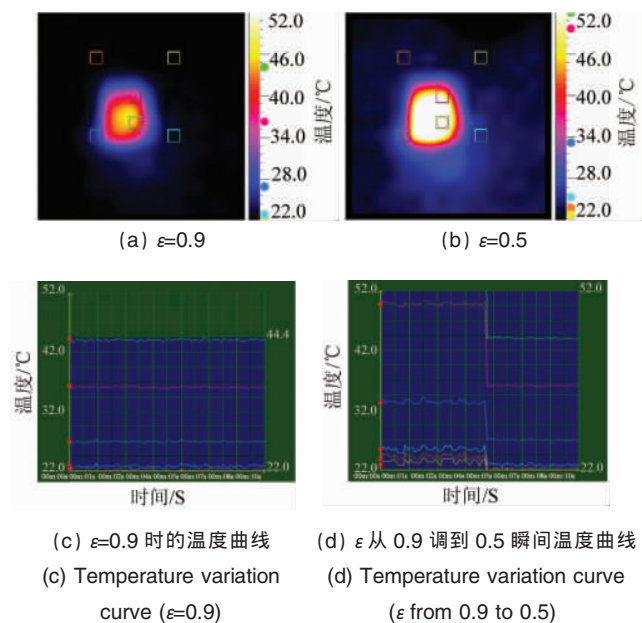


图3 不同 ε 的红外热图

Fig. 3 Infrared image of different emission rates and temperature variation curves

2.2 探测距离的影响

物体所辐射的能量必须经过大气才能够到达探测系统。在其透过大气时,会因被大气中的气体分子和尘埃吸收与散射而衰减。因此,红外探测器检测时,探测距离越远,衰减就越大。

2.3 背景噪声的影响

利用红外辐射测温,被测物体的发射率越高,背景影响越小;背景温度越高,背景影响越大;当被测物体温度与背景温度相近时,背景引起的误差较大^[15-16]。井下探测时,来自待测物体周围的反射光(如巷道内机电设备等)有时极大地影响测量结果,因此测温时须考虑上述影响因素,准确对准焦距,避免非待测物体的辐射能进入测试角,并在待测物体附近设置屏蔽物,以排除外界干扰。

2.4 井下环境的影响

井下被测物温度较低,温度变化范围不大,产生的红外辐射较弱。因此,所选红外热像仪除有较好的稳定性外,还应具有较高的灵敏度。研究表明,井下大气中,吸收红外辐射的气体主要是 CO_2 (有 $2.65\sim 2.8$ 、 $4.15\sim 4.45$ 、 $13.0\sim 17.0\mu\text{m}$ 3个吸收波段)、 H_2O (有 $2.55\sim 2.84$ 、 $5.6\sim 7.6$ 、 $12\sim 30\mu\text{m}$ 3个吸收波段)^[16]。由表2可知,本研究所用热像仪的吸收波段在 $8.0\sim 14.0\mu\text{m}$ 范围内,能够满足实验要求。但粉尘和水汽容易在热像仪窗口堆积和结露,严重影响热像仪的正常使用;同时,还要防止粉尘、水汽侵入热像仪内部而对电子线路产生危害。因此,热像仪井下使用时应注意防尘、防水。

2.5 热像仪稳定性的影响

红外热像仪受环境温度的影响较大。当待测温度低于常温时,环境温度变化的影响甚至大于信号的变化,这是由于红外透镜自身存在一些不可避免的影响因素。尽管仪器设计中考虑了某种补偿措施(如IRI-1011热像仪可以设置不同的环境温度),但最好使仪器的使用温度维持在恒定温度。当环境温度高于规定值时,必须冷却仪器^[15]。

3 探测系统校正

3.1 硫化矿石表面发射率的确定

物体的发射率受表面结构、几何形状、物体温度等因素的影响。为了提高探测精度,采用实验模拟井下常温环境下测试硫化矿石的发射率值。设计测试装置如图4所示。通电后,通过电压控制器使碳素纤维板表面温度达到均匀,其表面所贴热电偶的测试结果显示,不同区域之间的温差在 40°C 时低于 0.2°C ,表明测试装置可靠。测量时,先将有代表性的硫化矿石破碎至 0.5mm 以下,取少量放于碳素纤维板表面,铺平,用胶带($\varepsilon=0.95$)盖住。接通电源之后等待几秒钟,使温度稳定。将热像仪的发射率设置为 0.95 ,并测量温度,记下温度值。然后将胶带揭下并测量矿样的温度值。调整热像仪的发射率,直到仪器上显示出与上一次相同的温度值,此发射率即为矿样的发射率。经3次测试,得出硫化矿石的发射率平均值为 0.88 。

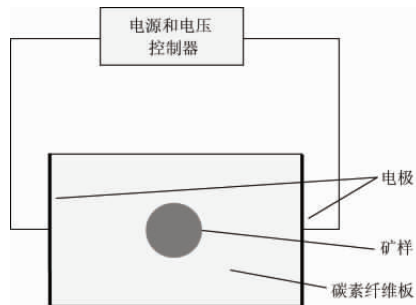


图4 硫化矿石发射率测试装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of the apparatus for measuring emissivity of sulfide ores

3.2 探测距离的确定

热像仪测温不同于其他测温装置的一个显著特点是非接触性,使得其在某些危险场合具有很大优势。尽管 IRI-1011 通用型热像仪用户手册上并没有限制测温的距离范围,但在实际操作中发现,不同距离的测温效果差别很大,如图 5~图 8 所示。从图 5 可以看出,随着测温距离的增大,热像仪感温误差随之变大,10m 距离感温时误差甚至接近 15℃;图 7、图 8 分别是热像仪在 2、3、4m 的感温效果及误差曲线。从图 8 可知,当热像仪 3、4m 感温时,感温误差几乎呈线性增大;而在 2m 距离处,当热源温度大于 50℃时,感温误差开始减小。由此知热源温度大于 50℃时该热像仪的最佳感温距离是 2m,温度越高,误差越小。因此,寻求合适的探测距离并纠正误差至关重要。

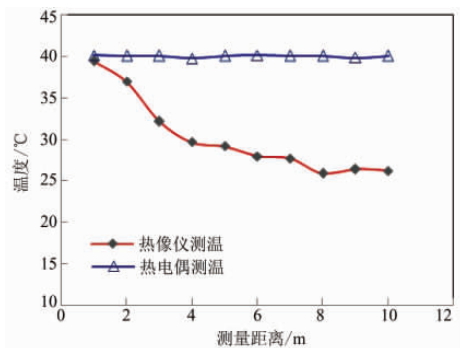


图5 热像仪和热电偶测温对比

Fig. 5 Comparison of measurement results between the imager and the thermocouple

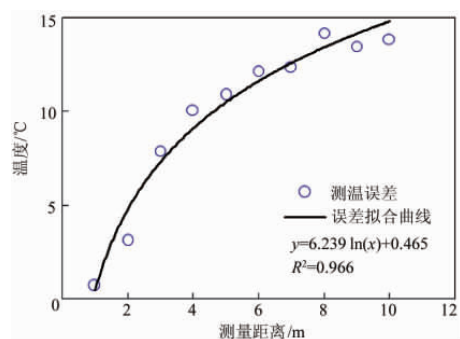


图6 热像仪测温误差散点分布及拟合曲线

Fig. 6 Error and its fitting curve with different distances

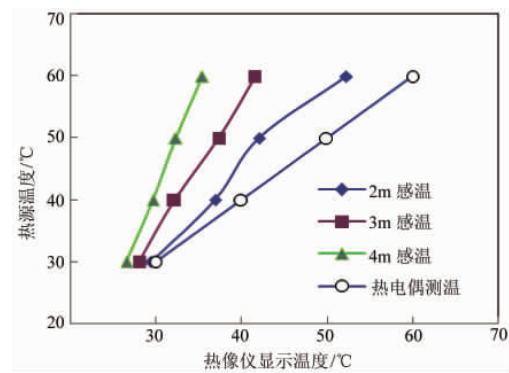


图7 不同距离和热源时的测温曲线

Fig. 7 Relationship between temperature of heat source and imager when the distance is 2, 3 and 4m, respectively

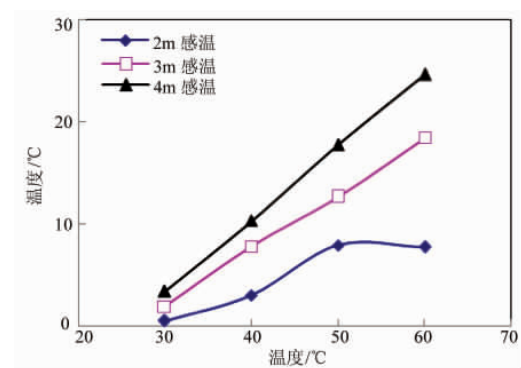


图8 热源不同时的测温误差曲线

Fig. 8 Error variation curve of different distances and heat sources

考虑到井下的实际情况及热像仪的最佳探测效果,分别以 2、3 和 4m 的探测距离进行拟合修正,获得拟合方程为

测距为 2m 时,

$$T = -0.005T_0^3 + 0.592T_0^2 - 21.41T_0 + 274.5 \quad (2)$$

测距为 3m 时,

$$T = 2.183T_0 - 31.04 \quad (3)$$

测距为 4m 时,

$$T = 3.444T_0 - 61.77 \quad (4)$$

其中, T 为校正温度; T_0 为热像仪显示温度。

4 现场应用

应用红外热像探测系统分别对某硫化矿高温矿体 860m 2# 矿体 3 进路防火墙 (测点 1)、870m 2# 矿体 3 进路防火墙 (测点 2)、880m 2# 矿体脉外运输巷防火墙 (测点 3)、890m 2# 矿体 3 进路防火墙 (测点 4) 进行探测, 2m 测温距离时的部分红外热图如图 9 所示, 并通过高温捕捉获得测面最高温, 同时使用已标定的热电偶测定该高温点, 以作为热源温度。热像仪所测温经式 (2) 拟合后具体结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 经过校正后, 热像仪获取的温度更为接近热源温度, 为自然火源的定位等后续工作提供更准确的依据。

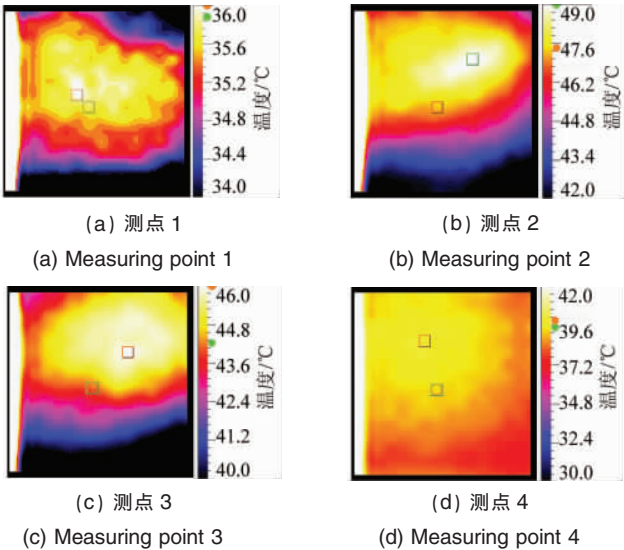


图 9 现场硫化矿石表面热像图

Fig. 9 Thermograph of sulfide ores in field

表 2 热像仪测温校正值与热源温度的对比分析
Table 2 Comparison between calculated and experimental temperature values

测点	热像仪探测最高温度/℃	校正后温度/℃	热电偶所测最高温度/℃	相对误差/%
1	36.1	37.9	39.1	-3.1
2	49.2	58.7	56.5	3.9
3	46.1	55.8	52.9	5.5
4	39.9	45.1	47.9	-5.8

5 结论

1) 硫化矿石表面热发射率、感温距离、背景噪声、井下环境以及热像仪的稳定性等是影响应用红外热像系统探测自燃矿石火源的主要因素。

2) 设计了一种测试矿石热辐射率的装置,并确定了硫化矿石的热辐射率。

3) 随着测温距离的增加,热像仪的测温误差增大。通过试验和理论分析,分别确定了热源在 2、3、4m 处的热像仪测温与矿石表面实际温度的定量关系,并通过现场试验证明研究结果的可行性,为进一步研究井下自燃火源的准确定位奠定了基础。

参考文献 (References)

[1] Wu C, Li Z, Li M. Chemical thermodynamic mechanism of sulfide ores during oxidization and self-heating process[C]//Jing G, Gao J, Zhou A, et al. Proceedings of the 2007 International Symposium on Mining Safety Science and Technology. Beijing: Science Press, 2007: 2435-2439.

[2] Wu C, Li Z. A simple method for predicting the spontaneous combustion potential of sulfide ores at ambient [J]. *Transaction of Mining and Metallurgy Institute*, 2005, 112(2): 125-128.

[3] Rosenblum F, Spira P. Evaluation of hazard from self-heating of sulfide

rock[J]. *CIM Bull*, 1995, 88(989): 44-49.

[4] 刘辉, 吴超, 潘伟, 等. 硫化矿石堆自燃早期指标优选及预测方法[J]. *科技导报*, 2009, 27(3): 46-50.

Liu Hui, Wu Chao, Pan Wei, et al. *Science and Technology Review*, 2009, 27(3): 46-50.

[5] 刘辉, 吴超, 崔燕, 等. 硫化矿石氧化性的分形表征 [J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(3): 113-116.

Liu Hui, Wu Chao, Cui Yan, et al. *Journal of Safety and Environment*, 2009, 9(3): 113-116.

[6] 李汝军. 硫化矿石自燃机理及其预防关键技术研究 [D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2007.

Li Zijun. Investigation on the mechanism of spontaneous combustion of sulfide ores and the key technologies for preventing fire [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2007.

[7] 吴超, 孟廷让. 高硫矿井内因火灾防治理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.

Wu Chao, Meng Tingrang. Theory and technology of the spontaneous combustion control of sulfide ores in mines[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.

[8] 程卫民, 王振平, 辛嵩, 等. 煤巷煤自燃火源红外探测的影响因素及判别方法[J]. *煤矿安全*, 2003, 31(8): 31-40.

Cheng Weiming, Wang Zhenping, Xin Song, et al. *Safety in Coal Mines*, 2003, 31(8): 31-40.

[9] Cheng W. Study of infrared detecting technology of the spontaneous fire position at the coal road on mines [C]//Progress in Safety Science and Technology. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 586-590.

[10] 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.

[11] 刘永平. 红外技术在煤矿井下测温和测气中的应用 [J]. *红外技术*, 2000, 22(4): 59-63.

Liu Yongping. *Infrared Technology*, 2000, 22(4): 59-63.

[12] 程卫民, 王振平, 辛嵩, 等. 矿井煤炭自燃红外探测仪的选择及应用方法[J]. *煤矿安全*, 2003, 34(10): 23-25.

Cheng Weimin, Wang Zhenping, Xin Song, et al. *Safety in Coal Mines*, 2003, 34(10): 23-25.

[13] Carpentier O, Defer D, Antczak E, et al. The use of infrared thermographic and GPS topographic surveys to monitor spontaneous combustion of coal tips [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 2677-2686.

[14] 田裕鹏. 红外检测与诊断技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

Tian Yupeng. Infrared detection diagnostic techniques [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[15] 李云红, 孙晓刚, 杨幸芳, 等. 红外热像仪测温精度的理论分析[J]. *西安工程科技学院学报*, 2007, 21(5): 635-639.

Li Yunhong, Sun Xiaogang, Yang Xingfang, et al. *Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology*, 2007, 21(5): 635-639.

[16] 郑兆平, 曾汉生, 丁翠娇, 等. 红外热成像测温技术及其应用[J]. *红外技术*, 2003, 25(1): 96-98.

Zheng Zhaoping, Zeng Hansheng, Ding Cuijiao, et al. *Infrared Technology*, 2003, 25(1): 96-98.

(责任编辑 陈广仁)