

# 非接触式露天煤垛在线温度监测系统设计

谷红伟<sup>1,2</sup> 李瑛<sup>1</sup>,许文海<sup>1</sup>,张望<sup>1</sup>,董云辉<sup>3</sup>

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026; 2. 神华销售集团有限公司,北京 100011;  
3. 沈阳军区空军气象中心,辽宁 沈阳 110015)

**摘要:**为实现露天煤垛自动温度监测与自燃隐患点的探测,设计一种基于红外成像技术的非接触式露天煤垛在线温度监测系统。介绍了在线温度监测系统的功能模块与硬件设备组成、软件功能以及所采用温度校正算法和内热源计算模型的原理。研究结果表明,该系统可对多个煤垛进行全天候无盲区在线扫描,实现多煤垛在线温度监测;经温度校正,该系统在不同天气下可将煤垛表面温度的平均测温误差由14.33%有效校正为0.92%,显著提高了测温准确度;对内热源温度的平均计算误差为10.36%,满足工程实际需求;可对多个煤垛温度进行综合分析,判断其温度变化趋势与处理优先级。

**关键词:**非接触温度监测;露天煤垛;红外成像技术;在线监测系统;无盲区扫描;温度校正

中图分类号:TD67

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2014)04-0083-05

## Design on Non-contact Temperature On-line Monitoring System in Opencast Coal Stack

GU Hong-wei<sup>1,2</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, XU Wen-hai<sup>1</sup>, ZHANG Wang<sup>1</sup>, DONG Yun-hui<sup>3</sup>

(1. College of Information Sciences and Technology Dalian Maritime University Dalian 116026, China; 2. Shenhua Trading Group Co. Ltd., Beijing 100011, China; 3. Meteorological Center of Air Force Shenyang Military Area Command Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to realize automatic temperature measurement and spontaneous combustion hidden source probing of opencast coal stack, a non-contact temperature on-line monitoring system of opencast coal stack was designed based on the infrared image technology. The paper introduced function modules, hardware equipment and software of designed system. Meanwhile the paper introduced the algorithm principle of temperature correction and inner-heat-source calculation. The research results showed that the monitoring system could all-weather and non-blind-area detected temperature for opencast coal stacks. The measured results of the temperature calculation indicated that the coal stack temperature measurement average error of the monitoring system was reduced from 14.33% to 0.92% in different weather. The internal temperature calculation average error was 10.36%, and satisfied the temperature detecting practical demand. Moreover, the system could comprehensively analyze temperatures and gave the priority of procession for coal stacks of storage base.

**Key words:** non-contact temperature monitoring; opencast coal stack; infrared imaging technology; on-line monitoring system; non-blind-area scanning; temperature correction

## 0 引言

港口等大型储煤基地通常为露天煤场,由于天气的变化以及时间的积累,露天存放的煤垛内温度会逐渐升高,甚至引发自燃。因此,煤炭自燃的早期预测预报和火源探测技术是煤炭储存管理、储煤基地防灾灭火的关键技术<sup>[1-2]</sup>,也是难点和重点问

题<sup>[3]</sup>。红外探测技术在煤炭自燃预报和火源探测中的应用一直是国内外研究的热点,已成功应用于煤巷、煤堆、露头煤柱等自燃隐患与自然发火火源的探测<sup>[4-6]</sup>,是一种简单、迅速、有效的自燃隐患点探测方法,也是煤炭自燃高温火源点探测的发展方向<sup>[7-8]</sup>。然而,目前红外探测技术在港口等储煤基地煤垛自燃隐患点探测的应用还存在一些问题:

收稿日期:2013-10-10;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.04.022

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012QN042)

作者简介:谷红伟(1974—),男,河南商丘人,高级工程师,博士研究生。Tel:010-58134853,E-mail:guhw@shenhua.cc

引用格式:谷红伟,李瑛,许文海,等.非接触式露天煤垛在线温度监测系统设计[J].煤炭科学技术,2014,42(4):83-87.

GU Hong-wei, LI Ying, XU Wen-hai, et al. Design on Non-contact Temperature On-line Monitoring System in Opencast Coal Stack [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4): 83-87.

①红外测温仪或成像仪大部分采用人工测量方式,通过将测温仪或成像仪架设在被测煤垛附近,连续对其进行单独测定以判断自燃隐患的程度和范围,或者通过在待测煤垛中布设大量测温点<sup>[9-10]</sup>,同步采集各点温度,以实现对被测煤垛温度的监测。无法同时对储煤基地的多个煤垛进行在线自动实时探测,也无法进行隐患程度趋势分析;②目前红外成像技术关注于成像系统本身的特性,关注于对数字红外图像的处理,但就天候条件对红外成像测温准确度的影响研究较少。通常情况下(除了浓雾和沙尘暴天气),当成像距离较短时( $<10$  m),大气传输影响可以近似忽略,成像距离越长,红外辐射传输的路径越长,大气传输对成像测温的影响越大<sup>[11]</sup>,并且,由于受到港口等储煤基地气候条件的影响,使得红外成像仪的测温误差远大于标称误差,将影响对自燃隐患点的探测结果,目前尚没有能去除气候条件对测量影响的红外探测设备;③虽然国内的学者文虎、肖旸等对采用数学计算模型进行煤炭自燃预报与火源探测的方法已有一些研究<sup>[12-13]</sup>,但主要针对井下的煤层进行自然发火的数学方式预测,对于露天煤垛,该类计算方法无法直接得以使用。而现有红外探测设备也仅能对被测煤垛的表面温度进行探测,无法通过煤垛表面温差直接确定煤垛内自燃火源点的位置与温度。针对此现状,笔者设计了一种基于红外成像技术的非接触式露天煤垛在线温度监测系统。

## 1 系统功能模块设计

笔者所设计的非接触式露天煤垛在线温度监测系统功能模块组成如图1所示。由图1可见,系统按照功能划分,可分为数据采集、数据传输、数据处理、数据显示与查询4个模块。

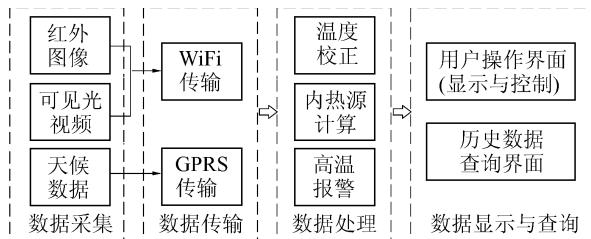


图1 非接触式露天煤垛在线温度监测系统功能模块组成

数据采集模块主要功能如下:①采集被测煤垛的红外图像;②采集监测现场的可见光视频;③采集监测时刻的天候(包括大气能见度、空气温湿度、风速、风力、降雨强度等)参数;④控制监测现场设备

的定点监测和自动巡航。数据传输模块负责进行数据采集和数据处理模块之间的数据交互。数据处理模块包括温度校正、内热源计算与高温报警3项功能。数据显示与查询模块主要为用户提供显示与控制的操作界面,并将所有采集数据进行存储,以备历史查询。

通过4个模块的协同工作,笔者所设计的系统能对大型储煤基地煤垛集群中的多个煤垛进行全天候在线扫描监测;能去除天候条件对煤垛红外图像的影响,以获得更为准确的煤垛表面温度分布情况;能通过温度校正后的煤垛表面温度计算内部高温隐患点(即内热源)位置及温度;能综合多时段监测结果,对煤垛的温度变化趋势与自燃隐患程度做出分析判断,给出处理优先等级;在监测的同时,具有报警机制,对超过温度设置阈值的煤垛进行报警;能根据时间、垛位等信息调取监测历史数据,进行数据追溯和查询。

## 2 系统硬件设计

非接触式露天煤垛在线温度监测系统硬件设备组成如图2所示。由图2可知,监测系统的硬件设备分为图像数据采集点、天候数据采集点及监测中心3大部分。多套图像数据采集设备与1套监测中心设备即组成可覆盖全堆场、可获取露天煤垛各斜面的全方位温度监测网络。

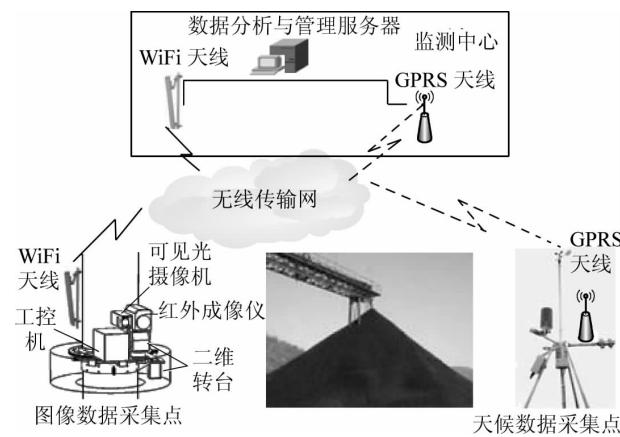


图2 非接触式露天煤垛在线温度监测系统硬件组成

### 2.1 图像数据采集

为实现单监测点可对多个煤垛进行在线温度监测,系统采用立杆方式安放图像数据采集点设备。图像数据采集点设备主要包括红外成像仪、可见光摄像机、无盲区监测二维转台、WiFi天线、工控机。红外成像仪(波长为8~14 μm,像素为320×256,

双视场)负责采集露天煤堆的红外图像,以获取其表面温度分布情况;可见光摄像机(像素为795×596)负责采集监测现场的视频;图像数据采集点与监测中心之间的数据通信采用WiFi无线传输方式实现;工控机则进行数据缓存及设备控制等工作。

为实现单点最大范围扫描,设计了无盲区监测二维转台(水平角调节范围为0°~360°,俯仰角调节范围为-75°~+15°)。转台上搭载可见光摄像机与红外成像仪。转台通过抱轴机构固定在监测杆上,可围绕监测杆进行水平360°无盲区实时扫描,可设置1~256个预置位,可根据预置位点自动调节红外成像仪视场和焦距,解决了目前红外成像系统无法自动调焦的问题,实现了红外成像仪视场内各煤堆的在线自动监测。

## 2.2 天候数据采集

天候数据采集点的设备主要包括小型气象站、大气能见度仪以及GPRS数传模块。其中,小型气象站采集测量时刻的温湿度、风速、大气压、降雨量等信息。大气能见度仪采集测量时刻的大气能见度。气象站与能见度的数据采用GPRS模块通过无线通信公网发送至监测中心。

## 2.3 监测中心

监测中心包括WiFi接收天线、GPRS接收模块以及数据显示与管理服务器。WiFi与GPRS模块负责接收监测点发送的数据。数据显示与管理服务器则负责存储、分析与显示所有数据信息。

## 3 系统软件设计

非接触式露天煤堆在线温度监测系统软件分为数据采集端和服务器端软件2个部分。

### 3.1 数据采集端软件设计

数据采集端软件主要包括:红外成像仪控制、环境参数采集以及无盲区二维转台控制软件。

1) 红外成像仪控制软件负责执行红外成像仪的焦距和视场的调节、图像采集与上传等操作。

2) 环境参数采集软件负责将小型气象站与大气能见度仪采集得到的天候参数进行读取、格式转换与上传。

3) 无盲区二维转台控制软件则完成二维转台的角度调节以及预置位设置等工作。

### 3.2 服务器端软件设计

服务器端软件主要包括:温度校正、内热源计算、高温报警、用户操作平台和数据库管理软件。

1) 温度校正软件。根据红外辐射理论,若令 $I$ 为红外成像仪的输出灰度, $L_e$ 为被测煤堆的红外辐射亮度, $L_r$ 为被测煤堆的红外反射辐射亮度, $\tau$ 为大气透过率, $L_p$ 为大气辐射亮度, $P_s$ 为红外成像仪的系统传递函数, $K$ 和 $B$ 为红外成像仪的定标参数, $N$ 为红外成像仪的随机噪声,则 $I$ 可以表述为

$$I = K \{ (L_e + L_r) \tau + L_p \} \otimes P_s + B + N \quad (1)$$

通过对同一测量位置所采集的多幅红外图像取平均的方法可去除随机噪声 $N$ 。通过对红外成像仪定标,可获得 $K$ 、 $B$ 与 $P_s$ 。通过建立大气辐射传输模型,可获得 $\tau$ 和 $L_p$ <sup>[14-15]</sup>。温度校正的目的在于通过计算各影响参数,并逐项去除式(1)中所有计算项的影响,获得 $L_e$ ,再根据式(2)的普朗克公式即可计算得到煤堆的表面温度 $T_s$ 。

$$L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\infty}^{14} \varepsilon \frac{a}{\lambda^5} \frac{1}{e^{b/(\lambda T_s)} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为普朗克常数; $\varepsilon$ 为煤堆的发射率; $\lambda$ 为煤堆的红外波长。

2) 内热源计算软件。根据已有对露天煤堆内部温度场的试验研究发现,露天煤堆从表面至一定深度,煤体由于受天气环境(尤其是太阳辐射、风、大气温湿度等因素)的影响,其温度会随天气与昼夜波动。超过一定深度后,温度则不随外界环境变化,而与距离之间呈指数函数关系<sup>[16]</sup>。因此,笔者提出将露天煤堆从外至内按照是否受外界环境的影响分为表层和内层。表层与内层的交界定义为边界面。由此建立了分层式计算模型,如图3所示。先根据 $T_s$ 计算距离表面 $d$ 处的边界面温度 $T_e$ ,再由 $T_e$ 计算距边界 $q$ 处的内层即内热源温度 $T_{in}$ 。

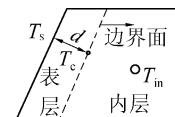


图3 煤堆内热源计算模型示意

由于对煤堆等土壤的表面温度,最常见的方法是通过红外物理中经典的热平衡方程(式(3))解算<sup>[17-18]</sup>。因此,对表层至边界的温度,笔者也采用式(3)求解。

$$\alpha E_1 + \alpha E_2 - M_g + H + E_L + G = 0 \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为煤堆对外界辐射的吸收率; $E_1$ 、 $E_2$ 分别为太阳辐射和大气辐射; $M_g$ 为煤堆表面向外部空间辐射损失的能量; $H$ 为显热交换通量; $E_L$ 为潜热交换通量; $G$ 为热传导通量。

$M_g$ 可由 Stefan Boltzmann 定律得到:

$$M_g = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  为波尔兹曼常数,  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

热传导通量  $G$  为

$$G = \lambda_c (T - T_s) / d_t \quad (5)$$

式中:  $\lambda_c$  为热导率;  $T$  为距离煤垛表面  $d_t$  处温度。

由于当煤垛存在内部热源时, 其表面温度会出现明显的温差, 即有内热源的位置温度较周围温度高。设煤垛内部有内热源位置的表面温度为  $T_{h0}$ , 对应距离煤垛表面  $d_i$  深处的煤垛内部温度为  $T_{h1}$ , 而内部无内热源位置的表面温度为  $T_{a0}$ , 对应距离煤垛表面  $d_i$  深处的煤垛内部温度为  $T_{a1}$ 。按式(3)可分别列出  $T_h$  与  $T_{a1}$  所对应的热平衡方程, 两方程相减, 忽略显热的差异, 可得: 设有内热源时, 深度为  $d$  的煤垛的边界层温度为  $T_c$ , 其对应的表面温度为  $T_h$ , 无内热源时温度为  $T_i$ , 对应的表面温度为  $T_a$ 。按式(3)可分别列出  $T_h$  与  $T_a$  所对应的热平衡方程, 两方程相减, 忽略显热的差异, 可得:

$$\varepsilon\sigma(T_{h0}^4 - T_{a0}^4) = \eta(T_{h1} - T_{a1} - T_{h0}^4 + T_{a0}^4) \quad (6)$$

由于当煤垛内部无热源时, 一定深度  $d_i$  处的温度将基本保持稳定, 且接近于气温的平均值, 即  $T_{a1}$  为天候数据采集点的小型气象站采集的气温数据平均值。根据上述分析可知, 当已知煤垛的表面温度、发射率与热导率, 即可通过式(6)计算得到有内热源时距离表面  $d$  处的边界温度  $T_c$ 。对于厚度超过 2 m 的煤垛, 表层深度  $d$  一般可取 0.2~0.3 m。内热源温度  $T_{in}$  为

$$T_{in} = T_c e^{Aq} \quad (7)$$

其中:  $A$  为温度增长系数, 与煤体的比热容、导热系数及密度有关;  $q$  为边界面至内热源的距离。

已有研究表明, 对于点热源, 以热源为中心, 其形成的等温面为一族同心球面, 热传导作用随角度的衰减规律一致<sup>[12]</sup>。即在煤垛表面, 会由于内热源的热辐射存在温差面, 如图 4 所示。

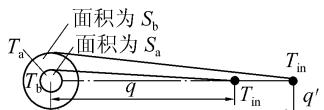


图 4 内热源深度与表面温度的映射关系

若忽略煤垛表层的温度扩散角度影响, 即认为煤垛表面温差面与边界面上的温差面基本一致。图 4 中,  $T_a$  为内部存在内热源的煤垛表面最高温度, 辐射面积为  $S_a$ , 对于温度为  $T_{in}$  的内热源对应深度为  $q$ ;  $T_b$  为煤垛表面的次高温值, 辐射面积为  $S_b$ , 对于

温度为  $T_{in}$  的内热源对应深度为  $q'$ 。则可根据煤垛表面的温差面与内热源的几何映射关系, 并结合温度与距离的指数函数计算得到  $q$ , 计算式见式(8), 再由式(7)可解算出  $T_{in}$ 。

$$q = \ln(T_a/T_b) / [A(1 - \sqrt{S_b/S_a})] \quad (8)$$

综上, 此系统采用分层式内热源计算模型, 利用表面热平衡方程, 由  $T_s$  计算  $T_c$ , 再由  $T_c$  与  $q$  的指数关系式即可计算得到  $T_{in}$ 。

3) 高温报警软件的功能包括: 将同一时段不同煤垛的表面温度进行横向比较, 以对堆场内不同煤垛处理优先等级进行分类和判断; 将同一煤垛不同采集时间表面温度进行纵向综合比较, 以对每一煤垛隐患点温度变化趋势进行分析判断与记录; 对超过温度设置阈值的煤垛进行隐患点高温报警。

4) 用户操作平台软件主要功能为: 显示实时采集的煤垛红外图像、可见光视频、带有温度信息的校正后煤垛红外图像、天候参数; 设置监测预置位点。

5) 数据库管理软件主要负责存储所有原始数据, 进行数据显示, 调用温度校正、内热源计算和高温报警软件, 对煤垛表面温度进行校正, 对存在内部高温隐患的煤垛进行内热源计算; 进行历史数据查询。

#### 4 测试结果与分析

笔者设计的煤垛在线温度监测系统在大连海事大学和黄骅港储煤基地进行测试。测试结果表明:

1) 系统对长度为 1 km 的储煤基地内多个煤垛可进行连续自动监测, 各预置位点红外成像仪自动调焦准确。

2) 系统能对储煤基地内同时段不同煤垛进行监测温度比较, 根据温度探测结果给出处理优先级, 也能对同一煤垛连续监测的温度结果进行分析, 给出该煤垛的温度变化趋势曲线。

3) 测试过程经历了晴、雨、雾、霾等天气, 温度校正部分试验结果见表 1。由表 1 可见, 经温度校正, 不同天气下煤垛表面温度的平均测温误差由 14.33% 有效校正为 0.92%, 显著提高了红外测温的准确度, 减小了测温误差。

4) 在大连海事大学搭建的模拟煤垛内部安放人工热源(热源温度恒定为 200 °C, 埋放深度为 1 m), 内热源计算经大量试验结果表明, 此系统内热源温度计算的平均相对误差约为 10.36%, 能满足工程需要。部分试验结果见表 2。

表1 温度校正试验结果

天气	表面温度/℃	校正前温/℃	校正前温差/℃	校正后温/℃	校正后温差/℃
晴	34.81	32.06	2.75	34.58	0.23
雨	18.87	14.75	4.12	18.56	0.31
雾	22.67	18.89	3.78	22.52	0.15
霾	28.77	25.63	3.14	28.56	0.21

表2 内热源计算试验结果

测量次数	温度真实值/℃	温度计算值/℃	计算误差/℃
1	198.9	219.5	-20.6
2	198.5	179.0	19.5
3	198.2	180.4	17.8
4	198.5	214.5	-16.0
5	198.4	172.9	25.5

## 5 结语

笔者基于红外成像技术设计的非接触式露天煤堆在线温度监测系统可应用于大型储煤基地对多煤堆进行同步监测;一旦需测量煤堆相关参数设置完毕,无需人工操作即可进行全天候煤堆在线温度监测;能显著减小不同天气条件下红外成像仪的测温误差;能计算内热源的温度及深度;能综合掌握各煤堆的温度变化情况,进行处理优先级分析,并对超过温度阈值的隐患煤堆进行报警。当然,笔者的研究尚有待完善,如需进行粒度、孔隙大小、含水量、导热率等煤体内部参数的不均匀性,以及外界天气环境等与内热源计算模型的相关性及对误差的影响等研究,以完善内热源计算模型,减小计算误差。最终笔者所设计的系统,可便于现场人员及时全面掌握煤堆的温度变化情况,及早发现隐患煤堆,以采取有效措施防止煤堆自燃事故的发生,为实现堆储管理的现代化和智能化服务。

## 参考文献:

- [1] 崔洪义.煤炭自燃早期预测预报与火源探测技术 [M].北京:煤炭工业出版社 2002: 1-18.
- [2] 目洪清.运用红外热像技术探测采掘面周围小煤窑火源的技术研究 [D].淮南:安徽理工大学 2011: 3-6.
- [3] 王长安,王 勃,李夏青 等.松散煤体表面温度与热源温度对应关系的热红外实验研究 [J].中国安全生产科学技术 2011, 7(8): 38-41.
- [4] 文 虎,马 民,费金彪.基于红外成像技术的煤矿火灾治理 [J].煤炭科学技术 2010, 38(1): 28-30.
- [5] 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].煤炭科学技术 2003, 31(8): 37-40.

- [6] 马 民.煤层隐蔽火源红外成像探测技术的应用研究 [D].西安:西安科技大学 2009: 2-7.
- [7] 孙继平.基于图像识别的煤岩界面识别方法研究 [J].煤炭科学技术 2011, 39(2): 77-79.
- [8] 尹中会,李 春.CCD 传感器技术在煤炭工业中的应用 [J].煤炭科学技术 2011, 39(5): 99-101.
- [9] 曾凡宇,田云福,芦根玲 等.西曲煤矿矸石山自燃火区探测及治理技术 [J].煤炭科学技术 2012, 40(6): 41-44.
- [10] 吴海军,曾凡宇,姚海飞 等.矸石山自燃危险性评价及治理 [J].煤炭科学技术 2013, 41(4): 119-124.
- [11] 李云红.基于红外成像仪的温度测量技术及其应用研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学 2010: 35-38.
- [12] 文 虎.煤自燃全过程实验模拟及高温区域动态变化规律的研究 [J].煤炭学报 2004, 29(6): 689-693.
- [13] 肖 晴,徐精彩,李树刚 等.近距离煤层采空区自然发火预测模型研究 [J].湖南科技大学学报:自然科学版, 2006, 21(2): 5-8.
- [14] 周国辉,刘湘伟,徐记伟.一种计算红外辐射大气透过率的数学模型 [J].红外技术 2008, 30(6): 331-334.
- [15] 顾吉林.典型天气大气辐射传输特性研究 [D].大连:大连海事大学 2012: 45-73.
- [16] 陈清华.松散煤体热物性测试及其温度场分布规律研究 [D].淮南:安徽理工大学 2009: 82-91.
- [17] 路 远,吴 丹,金 伟 等.地表红外辐射建模研究 [J].红外技术 2008, 30(2): 75-78.
- [18] 柳 茜,朱 枫,郝颖明 等.土壤-植被混合地表红外辐射温度场的耦合建模方法 [J].计算机应用研究 2011, 28(12): 4589-4592.

(上接第 56 页)

- [6] 张江成.极近距离煤层开采下分层防灭火方案的建立和应用 [J].科技信息 2011(32): 373.
- [7] 白振龙,常兴武,宋立民 等.局部调风调压技术在下分层综采面防灭火中的应用 [J].煤矿开采 2006, 11(4): 83-85.
- [8] 肖 晴,王振平,马 研 等.煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究 [J].煤炭科学技术 2008, 36(6): 47-51.
- [9] 许波波,张人伟,杜高举 等.煤层氧化自燃指标气体分析 [J].煤矿安全 2009, 40(2): 33-34.
- [10] 徐精彩.煤自燃危险区域判定理论 [M].北京:煤炭工业出版社 2002.
- [11] 徐精彩,张辛亥,文 虎 等.煤层自燃胶体防灭火理论与技术 [M].北京:煤炭工业出版社 2003.
- [12] 张迎弟,徐精彩.胶体泥浆快速灭火技术 [J].西安矿业学院学报, 1997, 23(3): 25-28.
- [13] 徐精彩,张辛亥,文 虎.粉煤灰胶体在高瓦斯易燃煤层防灭火中的应用 [J].煤炭安全, 1999, 30(6): 12-14.
- [14] 窦林名,何学秋.采矿地球物理学 [M].北京:中国科学文化出版社 2002.
- [15] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术 [M].徐州:中国矿业大学出版社 2001.