

# 煤矿下井电缆短路故障限流方法研究

王彦文, 赵铁英, 马枫林

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了大容量高速开关 FSR 的工作原理及结构, 论述了将 FSR 并联在电抗器两端串接于煤矿下井电缆线路中的限流方法。通过分析其动作时序与 EMTP/ATP 仿真模型, 对煤矿供电系统正常及短路时线路电流、电压变化过程进行了深入研究。EMTP/ATP 仿真结果表明, 采用该方法既可有效限制短路电流水平, 又能减小限流电抗器在线路正常工作情况下的能耗损失。

**关键词:** 大容量; 高速开关; 限流电抗器; 电缆短路; EMTP/ATP

**中图分类号:** TD611 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2012)06-0081-05

## Study on Current Limited Method of Electric Cable Short Circuit Fault in Underground Mine

WANG Yan-wen, ZHAO Tie-ying, MA Feng-lin

(School of Electromechanical and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The paper introduced the work principle and structure of the high volume and high speed switch FSR and stated a current limited method with FSR parallel to the two ends of the reactor connecting with electric cable line in underground mine. With the analysis on the action time sequence and the EMTP/ATP emulation model, a deep study was conducted on the current and voltage variation process when the mine power supply system was in normal operation or in short circuit. The EMTP/ATP emulation results showed that the application of the method could effectively limit the current level of the short circuit and could reduce the energy consumption and lost of the current limited reactor when the circuit was in normal operation.

**Key words:** high volume; high speed switch; current limited reactor; electric cable short circuit; EMTP/ATP

随着采煤生产机械化程度的不断提高, 煤炭采掘运输设备的容量及矿井供电系统的规模越来越大, 井下中央配电室母线的短路容量可能会超过矿用隔爆型高压配电装置的遮断容量<sup>[1-4]</sup>。因此, 《煤矿安全规程》规定, 井下电力网的短路电流不得超过其控制用的断路器在井下使用的开断能力, 所以在地面变电所下井电缆上一般采用串联限流电抗器来限制短路容量。加入限流电抗器可以限制短路电流水平, 但是同时也给煤矿电网的运行带来负面影响<sup>[5-6]</sup>。供电系统正常时, 电流流过限流电抗器, 电抗器的压降较大, 使得母线上电压降低, 尤其在重负荷启停时, 将使电压波动加剧, 降低了供电质量。电抗器的有功损耗大, 其无功损耗更大, 长期运行经济性差, 文献 [3-4, 6-8] 对电抗

器的耗电量进行了计算分析。空心电抗器强大的漏磁场对钢筋混凝土的影响及对通信的干扰严重, 使通信系统及计算机监控系统受到严重干扰。为消除限流电抗器的不利影响, 采用在限流电抗器两端并联大容量高速开关 FSR 的方法。供电系统正常时电流流过 FSR, 电压损失小, 系统发生短路时, FSR 动作退出电路, 限流电抗器自动接入系统起到限制短路电流的作用。限流电抗器并联 FSR 的方法既可提高煤矿供电网络的可靠性和运行的稳定性, 又可节省大量的电能, 具有明显的经济效益。然而, 当发生短路故障时, 如何快速、正确地做出判断, 启动 FSR 使之断开, 限流电抗器在短路电流的暂态过程中投入后引起的第 2 次过渡过程的情形如何等, 都需要进行深入研究。笔者采用

收稿日期: 2012-02-02; 责任编辑: 赵 瑞

作者简介: 王彦文 (1962—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士生导师。E-mail: 18911552327@189.cn

网络出版时间: 2012-06-15 10:27:00; 网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.81\\_022.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.81_022.html)

引用格式: 王彦文, 赵铁英, 马枫林. 煤矿下井电缆短路故障限流方法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (6): 81-85.

EMTP/ATP 软件建立仿真模型, 进行仿真研究。

## 1 开关 FSR 并联限流电抗器结构及原理

大容量高速开关装置由桥体 FS、高压限流熔断器 FU、非线性电阻 FR 及测控单元组成, 简称 FSR, 并联于限流电抗器 L 两端, 接在煤矿下井电缆上, 其结构如图 1 所示<sup>[4-5 9-12]</sup>。

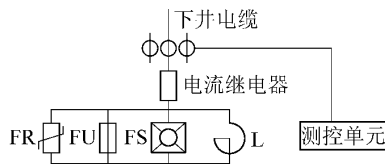


图 1 大容量高速开关 FSR 并联限流电抗器结构示意图

FS 与 FU 阻抗之比为 1: 2 000, 远小于限流电抗器 L 阻抗, 因此正常运行时工作电流经 FS 流过。系统发生故障短路时, 接到测控单元的分断命令, FS 在 0.15 ms 内爆破断开, 电流转移至 FU。FU 在 0.5 ms 内熔断。FU 断开时产生的弧压使 FR 瞬时导通, 吸收 FU 开断后产生的电弧能量及电源注入的能量, 使 FU 顺利熄弧, 并限制断开时的电压在允许范围内。FR 的阻抗呈现出非线性的特点, 瞬时导通后在电压低于一定值时表现出极大的阻抗, 电流转移到限流电抗器 L 支路。测控单元检测电流和电流变化率, 当电流幅值和变化率同时超过定值时, 判断为短路发生, 并采用 3 个相同的独立工作的测控部件, 以“三取二”动作方式做出判断, 向 FS 发出分断信号。FSR 电流变化原理如图 2 所示。图 2 中, 时间  $t=0$ , 短路故障发生;  $t=t_1$ , 电子控制器检测到故障并建立点火信号;  $t=t_2$ , 快速隔离器打开, 电流转移到熔断器中;  $t=t_3$ , 熔断器开始起弧;  $t=t_4$ , 熔断器内电弧熄灭, 故障电流被彻底断开,  $(t_3-t_4)$  为熔断器的燃弧时间;  $i_1$  为预期短路电流;  $i_2$  为实际短路电流。

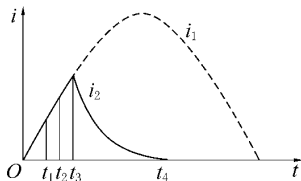


图 2 FSR 电流变化曲线

## 2 限流电抗器动作过程分析及应用仿真

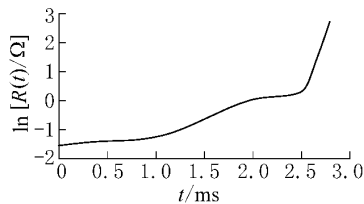
### 2.1 动作过程分析

FSR 由 3 个具有不同特性的电路元件组成, 当

系统发生短路故障时, 各元件相继动作, 有效控制短路电流的切换。按照各元件动作顺序, 将动作过程分成 3 个不同阶段。

1) 0~0.15 ms, FS 支路。设系统在  $t=0$  发生短路故障, 此时电流主要的通道仍是 FS 支路, 0.15 ms 后测控单元检测到故障发生使 FS 爆炸断开。由于 FS 的阻抗很小, 因此这一阶段的短路电流和未接 FSR 线路的短路电流上升速度一样, 迅速增大。

2) 0.15~0.65 ms, FU 支路。FS 断开后, 系统中构成回路的只有 FU 和 FR 支路。FR 通常选用金属 ZnO 避雷器, 只有当其两端电压超过一定值时 FR 才会导通。对于工频 50 Hz 的交流电, 20 ms 为 1 个周期, 在 0.65 ms 内, 电压不足以将 FR 击穿, 因此这段时间内 FR 将保持截止, 电流全部流过 FU 支路, 外电路电流将由 FU 的电流电压特性决定。FU 的电阻值随着电路电流的变化不断变化, 对外表现出非线性的特性。高压熔断器特性如图 3 所示<sup>[13-14]</sup>。



$R(t)$  — 高压熔断器电阻值

图 3 高压熔断器动作特性曲线

3) 0.65 ms 为断路器动作时间, FR、L 支路。当 FU 和 FS 支路断开后, 系统中可以构成短路回路的有 FR 和限流电抗器 L 支路。FR 是高能氧化锌非线性电阻, 具有非线性伏安特性, 同时能够抑制瞬时过电压。当其端电压低于某一值时, 其中的电流几乎为零; 超过这一值时, 其电流  $I$  将随着端电压  $U$  的增大而急剧增加, 其非线性特性如图 4 所示<sup>[9]</sup>。在高压限流熔断器熔断时产生的弧压, 使氧化锌非线性电阻瞬时导通, 吸收线路电感中储存的磁能及电源注入的能量, 使高压限流熔断器顺

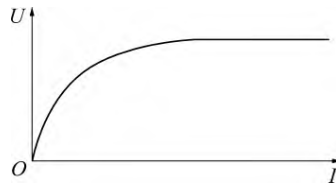


图 4 金属 ZnO 特性

利熄弧。氧化锌非线性电阻导通后两端电压降低, 低于其导通值时恢复高阻抗状态, 电流转移到限流电抗器  $L$  支路。

## 2.2 仿真分析

选用电磁暂态分析程序 EMTP/ATP 为平台, 以简化的煤矿供电网络为例, 建立大容量高速开关并联限流电抗器仿真电路, 如图 5 所示。采用 3 种电路形式: ①线路中无限流装置; ②线路中只串联限流电抗器, 记为  $L$  方式; ③线路中串接 FSR 并联限流电抗器结构, 记为 FSR-L 方式。仿真分为 2 个部分。

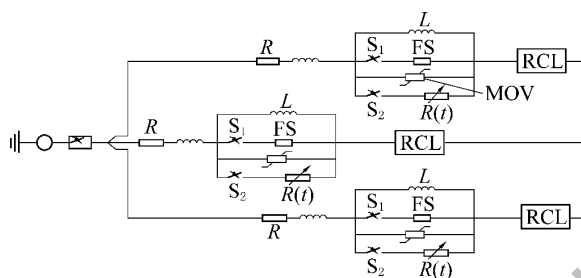
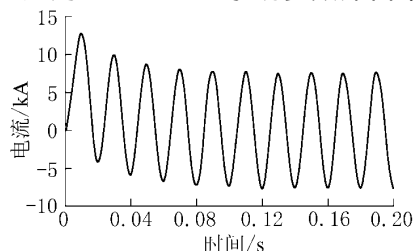


图5 EMTP/ATP 短路故障仿真示意

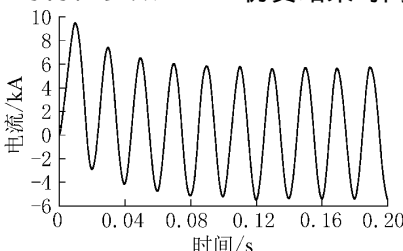
1) 正常状态电压降落对比。系统正常时,  $L$  方式和 FSR-L 方式下线路两端电压降落仿真。

2) 短路故障时, 无限流装置、 $L$  方式和 FSR-L 方式时电流对比。在  $t=0$  时刻, 系统在  $K$  点发生短路故障, 以短路后果最严重的三相短路为例, 分析短路时电流变化。

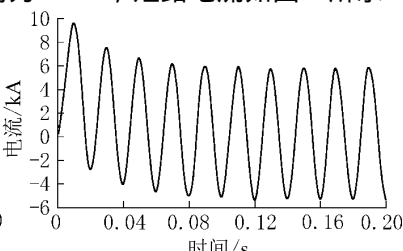
在图 5 中, 各线路元件均从 EMTP/ATP 元件库选取, 并根据线路对其参数进行相应设置。线路中  $R$  设置为  $0.15 \Omega$ ,  $L$  设置为  $5 \text{ mH}$ , 限流电抗器阻抗设置为  $2 \text{ mH}$ , 负荷电阻为  $50 \Omega$ , 电抗值为  $150 \text{ mH}$ 。选用非线性可变电阻表示高压熔断器<sup>[13]</sup>, MOV 表示金属 ZnO 避雷器, FS 支路阻抗值很小, 开关  $S_1$  和  $S_2$  控制 FSR 中 FS、FU 支路的切换。仿真中  $R(t)$  的特性曲线如图 6 所示。MOV 选用 EMTP/ATP 系统参数库自带的特性参数



(a) 无限流装置



(b) 只接限流电抗器



(c) FSR并联限流电抗器

图8 三相短路电流波形

曲线。限流电抗器在系统中相当于电感<sup>[11]</sup>, 可以通过在线路中串联电感来模拟串联的限流电抗器。

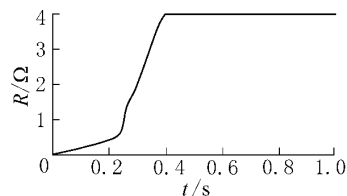


图6  $R(t)$  特性曲线

## 2.3 仿真结果

系统正常时三相是对称的, 所以仅对  $A$  相进行分析。设  $A$  相电源电压  $U = 10\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$ , 其中,  $\omega$  为角速度;  $\varphi$  为相位角, 取  $\varphi = 0^\circ$ 。

1) 系统正常时电压降落对比。供电系统正常时,  $L$  方式下限流电抗器两端压降及 FSR-L 方式下两端压降如图 7 所示。从图 7 可看出, 并联 FSR 后电压降落 (峰值) 由原来的  $108 \text{ V}$  降到  $0.18 \text{ V}$ , 这是由于系统正常时电流流过 FSR 中的 FS 支路, FS 的阻值很小, 相当于直接短接, 因此大幅降低了两端电压降落, 减少限流电抗器的能耗损失。

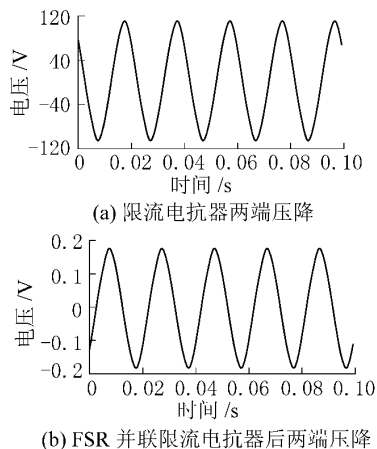


图7 电压降落对比

2) 三相短路。系统发生三相短路后电路仍然是对称的, 因此仅对其中一相进行仿真分析。设置仿真结束时间为  $0.2 \text{ s}$ , 短路电流如图 8 所示。

图8a为电路无限流装置发生短路时短路电流的变化规律。线路发生短路,短路电流将迅速增大,短路电流的冲击值较高,周期分量仍有较高的峰值,如此大的短路电流将对电源和回路中各设备的安全运行造成很大影响。图8b是L方式下的电流波形,从图8b可以看出,短路电流非周期分量被有效地消减,短路电流幅值显著降低,可以保证断路器可靠的动作。图8c是采用FSR-L方式后的短路电流波形。图8c与图8b在短路开始到FSR动作时间内,电流波形有所不同,其余部分完全一致,表明FSR只在短路发生瞬间对短路电流有影响,未影响限流电抗器的限流效果。

图8b和图8c中电流非周期分量经过160 ms后衰减为零,图8a中短路电流衰减到零为100 ms。经理论分析计算可知,当电路发生三相短路时,短路电流 $i$ 可以分解为周期分量和按指数衰减的非周期分量,其中非周期分量衰减的时间常数 $T = L_x / R_x$ ,其中: $L_x$ 为回路总的电感值, $R_x$ 为回路上总的电阻值。当电路中接入限流电抗器时,增大了 $L$ ,相应的 $T$ 也随之变大,非周期分量衰减时间变长,延长了电路短路的暂态过程,而且 $L$ 值越大,相应时间常数越大,衰减时间越长。从限流效果来看,限流电抗器阻抗值越大则短路电流越小,限流效果越好。这与时间常数 $T$ 构成了矛盾,所以选择限流电抗器阻抗时需要综合考虑衰减时间与限流效果,找到最优的阻抗值。

设置仿真结束时间为2 ms,短路开始时3种方式下电流起始部分如图9所示。从图9可知,当短路刚发生时,即 $t = 0 \sim 0.65$  ms,电流1曲线和电流3曲线重合,无限流装置和FSR-L方式下短路电流上升速率一致,这是因为此时FSR-L方式下FSR没有完全动作断开,电流在FSR各支路间切换,限流电抗器未接入电路,短路电流未受到限制,短路电流将按照没有限流时电流1曲线的上升速率变化。在FSR-L方式下,当 $t = 0.65 \sim 0.68$  ms,FSR逐渐断开,电流转移到限流电抗器支路,

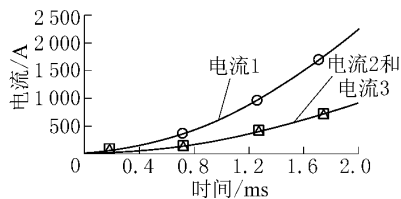


图9 起始电流对比

限流电抗器开始限流,短路电流将按照有限流时变化曲线上升,所以在0.68 ms之后电流2曲线和电流3曲线重合。当供电系统发生短路故障时,FSR可以在很短的时间内将短路电流变化状态由幅值较高的电流1曲线改变为幅值较小的电流2曲线,起到限制短路电流的作用。

提高软件的仿真精度,观察在 $t = 0 \sim 0.68$  ms时,电路在FSR-L方式下FSR中各支路电流的转换过程,如图10所示。图10a为FS、FU中流过的电流,其中, $0 \sim 0.15$  ms为流过FS的电流。FS在短路时导通电流开始增加。经0.15 ms后,电流切换到FU支路, $0.15 \sim 0.65$  ms为流过FU的电流。随着电压的升高,电流值也相应增大,FU上电弧开始产生,经过0.5 ms后FU熔断,电弧产生的弧压使MOV导通,MOV电流如图10b所示,当电压低于一定值时,MOV重新截止,电路被阻断,并将电压限制在一定范围内。由图10可以看出,FSR中电流变化情况与理论分析一致。

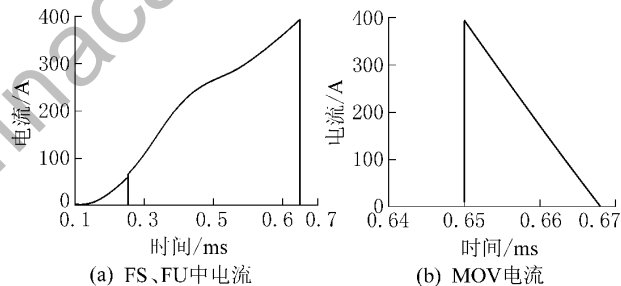


图10 FSR各支路电流

### 3 结 语

分析了大容量高速开关FSR的原理及动作过程,采用FSR并联限流电抗器用于煤矿下井电缆故障限流,应用EMTP/ATP仿真平台,搭建煤矿供电网络仿真模型,进行线路短路故障仿真,分析系统正常时电压降落情况及系统故障时各支路的电流变化曲线。仿真结果表明采用FSR并联限流电抗器,可以大幅降低系统正常时电压降落,解决只接限流电抗器时电压降过大、电能损耗大的问题;供电系统故障时FSR可以快速地将限流电抗器接入电路,改变电流变化曲线,有效地限制短路电流水平。从仿真曲线和理论分析可知,当系统接入限流电抗器时,增大了回路的电抗值,相应回路的时间常数变大,短路电流非周期分量衰减时间变长,延长了短路电流非周期分量的作用时间,对电路的

暂态过程有一定的影响。从限流效果来看,限流电抗器阻抗值越大则短路电流越小,限流效果越好。这与时间常数构成了矛盾,所以选择限流电抗器阻抗时需要综合考虑衰减时间与限流效果及其他相关因素,找到最优的阻抗值。

#### 参考文献:

- [1] 江道灼,敖志香,卢旭日,等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(6): 18-19, 87.
- [2] 施生才. 煤矿井下供电电压升级改造[J]. 煤炭技术,2008,27(5): 32-34.
- [3] 周宏云,张乐中. 大容量高速开关与限流电抗器并联运行应用分析[J]. 湖南电力,2008,28(5): 51-53.
- [4] 陶学仪,尚药世. 现代化矿井安全高效综采工作面供电[J]. 煤炭学报,2010,35(11): 1930-1934.
- [5] 彭小兵. 一种高速开关装置与电抗器并联限流方法设计与应用[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报,2003,3(12): 43-46.

(上接第43页)

下:测点 $B_1$ — $B_5$ 的温度分别为7、4、5、4、3℃,测点 $L_1$ — $L_5$ 的温度分别为76、56、65、55、57。

表2 有害气体检测结果

测点	气体体积分数/ $10^{-6}$			测点	气体体积分数/ $10^{-6}$		
	CO	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>		CO	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>
Q <sub>1</sub>	11	2	0	Q <sub>4</sub>	0	0	0
Q <sub>2</sub>	12	3	0	Q <sub>5</sub>	0	0	0
Q <sub>3</sub>	2	0	0	Q <sub>6</sub>	2	0	0

由表2可知,通过使用新型防灭火材料进行综合治理后,西曲煤矿矸石山的CO体积分数从 $840 \times 10^{-6}$ 降至 $12 \times 10^{-6}$ ,H<sub>2</sub>S体积分数从 $89 \times 10^{-6}$ 降至趋于0,SO<sub>2</sub>气体检测为0,矸石山表面温度与当地气温一致,内部温度从最高420℃降至80℃以下,达到了《煤矿矸石山灾害防范与治理规范》要求。

## 4 结 论

初始探测时,矸石山表面温度普遍高于30℃,最高温度达到了89℃,CO体积分数最高达 $840 \times 10^{-6}$ ,并有H<sub>2</sub>S气体析出。矸石山平整后经过火区探测与分析,发现矸石山顶部自燃火区面积为

- [6] 周静华. 变电站低压侧限流电抗器电抗值的选择[J]. 供用电,2009,26(3): 48-49.
- [7] 胡东波. 大容量高速开关的应用[J]. 中国设备工程,2010(1): 64-65.
- [8] 邓文君. 限流电抗器在变电站的应用及存在问题[C]//贵州省电机工程学会2010年优秀论文集. 贵阳:贵州省科学技术协会,2010.
- [9] 郎伟明,郭权利,徐春明. 大容量高速开关装置的应用[J]. 东北电力技术,2004(10): 37-38,43.
- [10] 李禄松,邹增春,徐刚. 一种新型大容量高速开关装置FSR的应用[J]. 电工技术杂志,2003(4): 84-85.
- [11] 陈水明,王威,杨鹏程. 限流电抗器对输电线路工频过电压的影响[J]. 电网技术,2010,34(3): 193-196.
- [12] 靳波,邵富平. 大容量高速开关装置的应用[J]. 河北电力技术,2004,23(5): 24-25,41.
- [13] 周挺,文远芳,毛柳明,等. 用EMTP/ATP研究高压限流熔断器暂态过程[J]. 高电压技术,2007,33(10): 37-40.
- [14] 毛柳明. 高压限流熔断器开断过电压研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

650 m<sup>2</sup>,深度1 m处温度普遍高于50℃,较高温度点分布于矸石山的东侧,最高温度达420℃以上。通过注浆量计算,得出西曲煤矿矸石山治理粉煤灰用量1420 t,需水量4680 t,新型防灭火材料用量425 t。通过使用新型防灭火材料进行综合治理后,西曲煤矿矸石山的CO体积分数从 $840 \times 10^{-6}$ 降至 $12 \times 10^{-6}$ ,H<sub>2</sub>S体积分数从 $89 \times 10^{-6}$ 降至趋近于0,SO<sub>2</sub>气体检测为0,矸石山表面温度与当地气温相一致,内部温度从最高420℃降至80℃以下,达到了相关要求。

#### 参考文献:

- [1] 允新,朱字顺,宋长斌,等. 煤矸石的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001(2): 35-38.
- [2] 郑云峰. 浅谈煤矸石的自燃及治理[J]. 煤矿环境保护,1989(2): 9-17.
- [3] 杜忠. 煤矸石的综合利用现状[J]. 资源环境与工程,2007,21(5): 621.
- [4] 段志鹏,王向成,闫海晶. 矸石山自燃的防治[J]. 山西焦煤科技,2009(6): 122-124.
- [5] 董现锋,谷明川. 平煤集团自燃矸石山灭火工程实践[J]. 煤炭科学技术,2009,37(1): 82-84.
- [6] 贺春玲. 矸石山自燃的灭火技术及预防措施[J]. 煤炭技术,2008,27(3): 93-94.
- [7] 张爱青. 大同矿区煤矸石山自燃防治及高效灭火技术[J]. 洁净煤技术,2010,16(1): 110-112.
- [8] 江洪清. 煤矸石对环境的危害及其综合治理与利用[J]. 煤炭加工与综合利用,2003(3): 44-45.