

# 深井高地温工作面煤自燃特点及预控方法研究

马 砾<sup>1,2,3</sup>, 任立峰<sup>1,2</sup>, 王乃国<sup>4</sup>, 韩 力<sup>4</sup>

(1. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 安全科学与工程学院 陕西 西安 710054; 3. 山东兖矿集团博士后工作站 山东 邹城 237500; 4. 山东新巨龙能源有限责任公司 山东 菏泽 274918)

**摘 要:** 为解决深井开采地温高易导致煤层自燃的难题,研究了高地温工作面煤层氧化放热特性及预控方法。采用傅里叶变换红外光谱仪和大型自然发火试验装置,分别测试了高地温对煤活性官能团和自然发火期的影响;现场观测了龙固矿井2302高地温综放工作面采空区自燃危险区域。研究结果表明:地温为42℃时,煤自然发火期相比地温为20℃时缩短25d;高地温使煤表面活性官能团数量及中间活性产物数量增加,氧化放热性显著增强;氧化升温带范增长。针对高地温对供氧、蓄热条件及其氧化放热性的影响,提出了采用堵漏和注氮气减少煤体氧化,阻化泡沫阻化煤体,压注液态二氧化碳和注胶抑制煤温升高结合的防火方法。通过在巨野矿区的现场应用,该方法有效控制了高地温综放工作面采空区煤体自燃。

**关键词:** 高地温;煤自燃;氧化特性;自然发火期

中图分类号:TD75 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)10-0039-05

## Study on coal spontaneous combustion features and pre-control method of high ground temperature coal mining face in deep depth mine

Ma Li<sup>1,2,3</sup>, Ren Lifeng<sup>1,2</sup>, Wang Naiguo<sup>4</sup>, Han Li<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Post-doctoral Workstation, Yankuang Group Zoucheng 237500, China; 4. Shandong Xinjulong Energy Company Limited, Heze 274918, China)

**Abstract:** In order to solve the difficult problems of the high spontaneous combustion danger of seam caused by the high ground temperature of the coal mining in the deep depth mine, the paper had a study on the seam oxidation and thermal releasing features of the high ground temperature coal mining face and the pre-control method. Fourier transform infrared spectrometer and large spontaneous combustion experiment device were applied to test the high ground temperature affected to the active functional group and the spontaneous combustion period of the coal. A site observation was conducted on the spontaneous combustion danger area in the goaf of No. 2302 high ground temperature coal mining face in Longgu Mine. The study results showed that when the ground temperature was 42℃, the coal spontaneous combustion period would be reduced by 25 days than when the ground temperature was 20℃. The high ground temperature could make the coal surface active function group number and the intermediate active product value increased and the oxidation thermal releasing would be obviously increased. The oxidized temperature rising zone scope would be increased. According to the high ground temperature affected to the oxygen supply, thermal accumulation condition and the oxidation thermal releasing. The combined fire prevention method was put forward, including using leakage sealing and nitrogen injection to reduce the oxidation of the coal mass, using resist foam to resist coal, using liquid carbon dioxide pressurized injection and glue injection to inhibition coal temperature rising. With the site application to Juye Mining Area, the method could affectively control the coal spontaneous combustion in the goaf and high ground temperature coal mining face.

**Key words:** high ground temperature; coal spontaneous combustion; oxidation features; period of coal spontaneous combustion

收稿日期:2016-05-19;责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.10.008

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574193, 51204135);陕西省工业科技攻关资助项目(2016GY-191)

作者简介:马砾(1978—),男,四川隆昌人,教授,博士。Tel: 029-85583789, E-mail: malifuture@126.com

引用格式:马砾,任立峰,王乃国,等.深井高地温工作面煤自燃特点及预控方法研究[J].煤炭科学技术,2016,44(10):39-43.

Ma Li, Ren Lifeng, Wang Naiguo *et al.* Study on coal spontaneous combustion features and pre-control method of high ground temperature coal mining face in deep depth mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 39-43.

## 0 引 言

由于我国近几十年对煤炭资源高强度的开采,浅部资源日益枯竭,矿井开采逐渐向深部发展。深部开采给矿井开采活动带来一系列的困难,其中最突出的是地压大和地温高<sup>[1-2]</sup>。高地温高地压会使煤自燃危险性增加,改善煤氧化蓄热条件,缩短自然发火期,煤体破碎程度增加。粒度会影响煤的自燃特性以及自燃极限参数<sup>[3]</sup>。受冲击地压影响,采空区煤的氧化时间长,导致自燃危险性增大。国内外学者采用自然发火、程序升温、热分析等试验手段对煤自燃特性研究,已经取得丰硕的成果<sup>[4-7]</sup>。文献[8-9]通过理论分析,验证得出了高地温增强煤的氧化放热性能,改善自燃蓄热条件和供氧条件。文献[10-13]通过分析地温与煤氧化放热性、蓄热条件和供氧的关系,研发了深井高地温煤自燃的阻化惰泡防火技术。文献[14-15]发现高温高湿环境中煤的含水量对煤自燃有重要影响。刘少南<sup>[16]</sup>得到初始温度越高,煤自燃危险性越大。Sargeant等<sup>[17]</sup>研究表明起始氧化温度分别为25℃和40℃时对自然发火期有非常显著的影响。鲍庆国<sup>[18]</sup>研究了滕南矿高地温环境对煤自燃的影响,制定了相应的自燃防治措施。文献[19-20]研发了三相泡沫配套的装备和工艺。以上这些研究推动了高地温矿井煤火防治技术水平的提高,而针对高地温矿井煤

自燃特点,如何有效改善采空区浮煤供氧条件、蓄热条件及其氧化放热性,延长自然发火期需要进一步深入研究。因此,笔者在试验研究高地温环境对煤自燃特性影响基础上,提出了可靠的预控方法,能有效防治高地温工作面采空区煤自燃。

## 1 高地温对煤自燃特性的影响

### 1.1 煤的氧化活性

通过式(1)可得采空区温度每升高10℃氧分子的平均动能就会变为原来的10倍,平均动能越高,气体分子中活化分子数也就越高,反应速率加快。因此,高地温会造成煤氧反应速率提高,化学反应活性增强。

$$\bar{\varepsilon}_k = ikT/2 \quad (1)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_k$ 为气体平均分子动能,J; $i$ 为气体分子自由度; $k$ 为常数; $T$ 为体系温度,℃。

煤样取自巨野矿区龙固矿2302工作面,煤质为气煤。采样点煤层埋深约810m,地温为42℃。将煤样密封防止氧化,并运输到实验室。煤样的 $M_{ad}$ 、 $A_d$ 、 $V_d$ 和真密度分别为1.31%、11.86%、34.30%和1.348g/cm<sup>3</sup>。采用VERTEX70型傅里叶变换红外光谱仪对原煤样和经过40℃恒温氧化处理的煤样进行测试。测试范围为4000~400cm<sup>-1</sup>,分辨率为4cm<sup>-1</sup>,累加扫描32次,煤样红外谱峰强度见表1。

表1 煤样的红外光谱谱峰强度

Table 1 The peak intensity of the infrared spectrum of coal samples

温度/ ℃	不同波数下的谱峰强度									
	3 697~3 684	3 624~3 613	3 050~3 030	2 975~2 915	2 875~2 858	1 710~1 700	1 604~1 599	1 449~1 439	1 379~1 373	1 220
20	0.047	0.048	0.036	0.066	0.054	0.013	0.114	0.093	—	0.068
40	—	0.020	0.009	0.032	0.027	—	0.062	0.061	0.043	0.039

注:波数的单位为cm<sup>-1</sup>;波数为3500~3200cm<sup>-1</sup>时,20、40℃下的谱峰强度均为0.023。

由表1可得,经过高地温环境处理煤样红外谱峰强度减小。高地温环境处理煤样谱图中羟基红外振动峰3697~3684cm<sup>-1</sup>和地酮类羰基红外振动峰1710~1700cm<sup>-1</sup>消失,甲基剪切振动峰1379~1373cm<sup>-1</sup>出现。这是高地温环境中活泼官能团—OH、—CH<sub>2</sub>—、C—O—C等与氧气发生反应生成大量的中间活性产物(自由基);自由基氧化活性强,煤的氧化性增强,自燃危险性增大。

### 1.2 高地温对煤自然发火期的影响

采用XK型煤自然发火试验台进行自然发火试验。将龙固矿煤样使用颚式破碎机进行破碎,边破碎

边装煤,装煤完成立即开始自然发火试验,试验共历时50d。煤自然发火试验中,煤体最高温度从试验开始的29.7℃升至167.9℃,整个升温过程历时50d,煤体高温点温度与时间之间的关系如图1所示。

从图1得出,在煤自燃初期,煤样升温速率较慢,在1℃/d附近变动;通风时间超过40d后,煤样升温速率快速升高;煤温超过167.9℃,升温速率将会急剧升高,可达51℃/d。在外界条件不变的情况下,煤温一天内达到300℃,之后在1h内煤体温度将会超过燃点。

地温为20、22、24、26、28、30、32、34、36、38、40、42℃

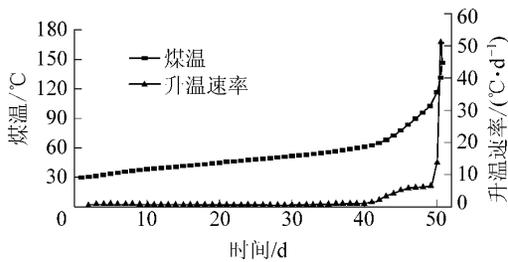


图1 高温点温度与时间的关系

Fig. 1 Relationship between temperature of hot spots and time  
时,自然发火期分别为 59、57、55、53、52、49、46、44、42、40、37、34 d。煤自然发火期随地温升高而减小,自燃危险性不断升高。在采空区地温为 20 °C 时,煤自然发火期为 59 d,当地温为 42 °C 时,缩短为 34 d。地温升高 22 °C,煤自然发火期减小了 25 d。因此,高地温显著缩短了煤自然发火期,自燃危险性强。

## 2 深井高地温对煤自燃环境的影响

### 2.1 地温对煤体自燃蓄热环境影响

在煤自燃低温阶段,煤体向外散热的主要途径为对流散热,热传导只占小部分。采空区煤体产热量与散热量之间的关系为<sup>[21]</sup>:

$$Q = n\rho_a S_a \text{div}(vT_a) + \text{div}(\lambda_e \text{grad} T) \quad (2)$$

式中:  $Q$  为松散煤岩体向外界散热量, J;  $n$  为松散煤体的空隙率;  $\rho_a$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_a$  为风流比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $v$  为风流的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $T_a$  为风流的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_e$  为松散煤体导热系数,  $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

式(2)等号右侧第 1 项为热对流散热量,第 2 项为热传导散热量。对流散热量和传热量均与煤体和风流的温度差呈正相关。高地温环境会显著抑制煤的对流散热和热传导,改善煤体蓄热环境。

### 2.2 地温对采空区漏风供氧条件的影响

工作环境与采空区之间的温差会产生热风压,引起漏风流场变化,影响采空区煤体自燃。热风压的计算公式<sup>[9]</sup>:

$$H_r = \int_0^{L \sin \alpha} \rho_\infty g \frac{\theta_x - \theta_\infty}{\theta_x} dx \quad (3)$$

式中:  $H_r$  为热风压, Pa;  $L$  为工作面倾向距离, m;  $\alpha$  为工作面倾角,  $(^\circ)$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\rho_\infty$  为工作面(采空区)进风隅角的环境空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\theta_\infty$  为工作面(采空区)进风隅角的环境温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_x$  为工作面中距进风隅角  $x$  处的温度。

以龙固矿 2303S 工作面为例,工作面倾斜宽度 264.0~268.5 m,原始岩温 42 °C,煤层倾角 4°~

13°。在初采期间两巷之间的落差  $L \sin \alpha$  为 28 m;采用下行式通风,采空区上端空气温度为 26 °C,密度为 1.181  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,采空区下部空气经过与采空区充分热量交换,近似认为采空区深部温度为 42 °C,密度为 1.121  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。为了简化计算,近似认为采空区风流温度随风流深入采空区距离符合线性增加的关系,即:  $\theta_x = k_1 d + \theta_\infty$ ,其中  $k_1$  为系数,  $^\circ\text{C}/\text{m}$ ;  $d$  为距回风隅角的距离, m。将其代入式(3)可得: 2303S 采空区热风压可达 71.64 Pa,这对采空区漏风影响显著,甚至会造成采空区漏风方向逆转,采空区自燃危险区域难以准确判定。

### 2.3 深井开采地压对采空区煤自燃条件的影响

矿井开采深、矿压大,煤柱会发生破裂形成大量裂隙,漏风通道增加,供氧充分,自然发火控制难度增大。采空区遗煤的粒度显著减小,煤自燃性增强。同时,由于防治冲击地压的要求,工作面推进速度慢,采空区自然氧化时间长,浮煤极易自燃。

### 2.4 深井高地温对采空区煤自燃危险区域的影响

通过以龙固矿 2303S 工作面后部采空区埋设束管测试,结合实验室测试数据,将浮煤厚度、氧浓度和漏风强度分布等值线图叠加,对采空区氧化“三带”进行静态划分,基本分布情况见表 2。

采空区氧化升温带范围变化较大,在进风巷采空区狭窄条带内,由于煤壁的支撑作用,漏风通畅。同时,工作面进风巷连续不断供给新鲜风流,氧化升温带比回风侧宽,为 40~120 m。而在回风巷侧,氧化升温带范围处在距离工作面 20~105 m。

表 2 综放工作面采空区氧化“三带”划分

Table 2 The oxidation “three zones” division of goaf in fully-mechanized working face

划分地段	氧化散热带范围	可能自燃带范围	窒息带范围
进风巷侧采空区	0~40 m	40~120 m	>120 m
回风巷侧采空区	0~20 m	20~105 m	>105 m

## 3 深井高地温综放工作面煤自燃预控方法

针对高地温采空区的环境和条件,提出了集“煤体阻化、惰化降氧、吸热降温”于一体的采空区煤自燃火灾预控方法,即采用堵漏风和注氮等控制氧气,阻化泡沫阻化煤体,液态二氧化碳和局部注胶降温等相结合的防火方法,有效地控制高地温对供氧、蓄热条件及其氧化放热性的影响。

### 3.1 高地温综放工作面惰化方法

采用工作面隅角和架间“堵漏风隔离”和“注氮

气”相结合的情化方法,降低采空区的氧浓度,有效抑制采空区煤自燃。

### 3.1.1 堵漏风隔离方法

采用胶体与采空区封闭隔离相结合的采空区堵漏风隔离方法,可在支架后部形成一道隔离带彻底封堵采空区浅部煤岩裂隙。

工作面初采及正常回采期间,顶板冒落之前,在巷道端头支架上方铺设挡风布,并在上下隅角挂设挡风帘,每隔10 m在工作面上下端头建立袋子墙,减少向采空区内部漏风。在工作面推进速度慢时,采用在工作面上下隅角及中部漏风严重的部位注胶堵漏,防止煤自燃。

工作面末采时,采用胶体与采空区封闭隔离相结合的方式抑制煤自燃。工作面停采时,在支架后部全面铺设堵漏风隔离材料(图2)。同时,在上下隅角施工扇形钻孔、架间孔注胶,封堵破碎煤体裂隙,隔离工作面与采空区之间的漏风。

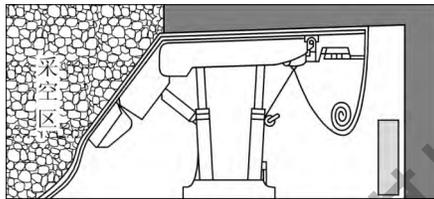


图2 采空区封闭隔离

Fig. 2 Isolation technology for goaf sealing

### 3.1.2 采空区注氮情化方法

针对煤自燃危险性强的特点,结合堵漏风隔离方法,在进风侧埋管连续性向采空区氧化升温带注入氮气,情化采空区。2301N工作面实施情化之后,通过在采空区埋设的束管监测气体变化,如图3所示。

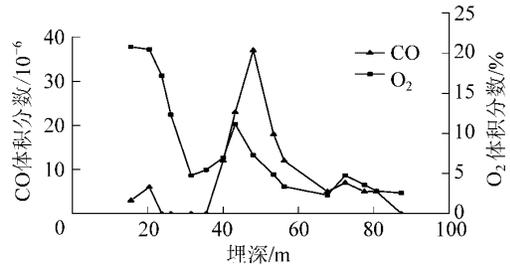
由图3可得,采用情化方法后氧化升温带宽度大幅减小,初采期间为30 m左右,正常回采期间为24 m左右,停采期间为16 m左右。采空区CO呈现先升高后下降的趋势,煤自然氧化得到了抑制。

### 3.2 采空区注阻化泡沫方法

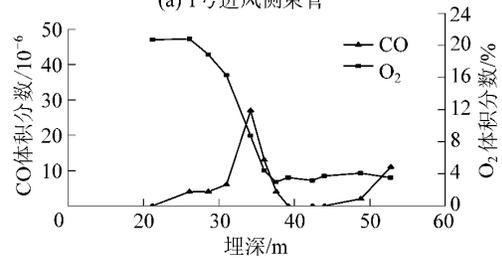
将堆积强、粘壁性强和发泡倍数高的情化泡沫,以氮气作为起泡和运输载体压入采空区内部隐蔽的煤自燃危险区域,实现煤体阻化。先对上隅角采空区进行压注,之后利用高位钻孔对下隅角采空区压注,补注时需要根据采空区压注实际情况进行。

### 3.3 液态二氧化碳情化降温方法

采取液态二氧化碳情化降温方法对采空区易自燃危险区域快速注入低温液态二氧化碳,液态二氧化碳气化后快速冷却窒息采空区。在2301N工作



(a) 1号进风侧束管



(b) 27号进风侧束管

图3 1、27号进风侧束管的O<sub>2</sub>及CO浓度曲线

Fig. 3 Concentration curves for O<sub>2</sub> and CO of No. 1 and No. 27 tube in inlet side

面停采撤架期间,向采空区间歇式压注液态二氧化碳,预防煤自燃火灾,进回风侧埋入采空区25 m处的束管气体监测如图4所示。

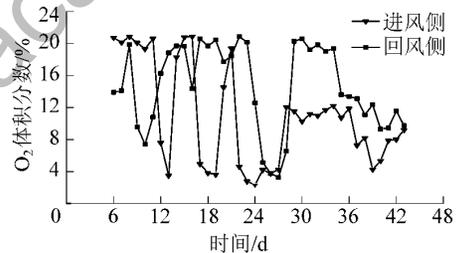


图4 O<sub>2</sub>浓度曲线

Fig. 4 O<sub>2</sub> concentration curves

由图4可得,在停采撤架过程中,采空区内气体监测点处的O<sub>2</sub>浓度呈现出波动下降的趋势,且在后期O<sub>2</sub>浓度监测值快速下降,采取的措施达到了采空区情化降温的目的。

通过在龙固矿2302S、2301N等5个工作面的应用表明,深井高地温工作面煤自燃预控方法能有效控制采空区浮煤自燃,采空区散热带和氧化升温带宽度减小,有效解决了深井高地温综放工作面推进过程中的防灭火难题。

## 4 结 论

1) 深井开采围岩压力大、地温高导致煤自燃起始温度高,发火期短;煤体破碎,氧化蓄热条件好;受冲击地压防治影响,工作面推进速度慢,煤氧化时间长等自燃致灾因素的影响,采空区自燃危险性极强。

2) 采用煤自然发火试验和傅里叶红外光谱试验研究得到高地温环境煤自燃特性,地温为 42 ℃ 时,煤的活性官能团激活氧化活性增强,自然发火期相比地温为 20 ℃ 时减少 25 d。

3) 通过对龙固矿 2303S 工作面采空区埋设束管进行观测,工作面通风、热风压等因素对采空区漏风流场影响显著,实际条件下氧化升温带范围在进风侧处在距工作面 40~120 m 内,而在回风巷侧处于 20~105 m 区域。

4) 结合高地温对煤氧化放热、蓄热及供氧条件的影响分析,通过采取采空区“煤体阻化、惰化降氧、吸热降温”的煤自燃预控方法,减弱了高地温对煤自燃危险性的影响,延长了自然发火期,达到了防治工作面采空区浮煤自燃的目的。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J].煤炭学报,2012,37(4):535-542.  
Xie Heping, Zhou Hongwei, Xue Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.  
Lan Hang, Chen Dongke, Mao Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [3] 马砺,任立峰,韩力,等.粒度对采空区煤自燃极限参数的影响试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(6):59-64.  
Ma Li, Ren Lifeng, Han Li, et al. Experiment study on particle size affected to coal spontaneous combustion limit parameters in goaf [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 59-64.
- [4] Jones J C, Newman S C. Non-arrhenius behavior in the oxidation of two carbonaceous substrates [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003, 16(3): 223-225.
- [5] Basil B Beamish, Ahmet Arisoy. Effect of mineral matter on coal self-heating rate [J]. Fuel, 2008, 87(1): 125-130.
- [6] Li Bo, Chen Gang, Zhang Hui, et al. Development of non-isothermal TGA-DSC for kinetics analysis of low temperature coal oxidation prior to ignition [J]. Fuel, 2014, 118(15): 385-391.
- [7] Mac Phee J A, Giroux L, Charland J P, et al. Detection of natural oxidation of coking coal by TG-FTIR mechanistic implications [J]. Fuel, 2004, 83(13): 1855-1860.
- [8] 郭兴明,徐精彩,邓军,等.地温在煤自燃过程中的作用分析[J].煤炭学报,2001,26(2):160-162.  
Guo Xingming, Xu Jingcai, Deng Jun, et al. Analyzing the effect of ground temperature on spontaneous combustion of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 160-162.
- [9] 郭兴明,徐精彩,邓军,等.地温对煤层自燃危险性的影响研究[J].西安交通大学学报,2000,34(11):23-26.  
Guo Xingming, Xu Jingcai, Deng Jun, et al. Research on effect of ground temperature on spontaneous combustion danger of coal seam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(11): 23-26.
- [10] 文虎,许满贵.地温对煤炭自燃的影响[J].西安科技学院学报,2001,21(1):1-3.  
Wen Hu, Xu Mangui. Research of influence of ground temperature on coal spontaneous combustion [J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2001, 21(1): 1-3.
- [11] 文虎,赵阳,肖旻,等.深井综放采空区漏风流场数值模拟及自燃危险区域划分[J].煤矿安全,2011,42(9):12-15.  
Wen Hu, Zhao Yang, Xiao Yan, et al. Modeling of flow field and partition of spontaneous combustion danger zone in gob of fully mechanized caving face in deep coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(9): 12-15.
- [12] 赵阳.高地温矿井综放采空区自燃危险区域判定技术研究[D].西安:西安科技大学,2011.
- [13] 文虎,吴慷,曹旭光,等.预防高地温深井煤自燃的阻化惰化防火技术[J].煤炭科学技术,2014,42(9):108-111.  
Wen Hu, Wu Kang, Cao Xuguang, et al. Fire prevention and control technology with inhibition inertia foam to prevent coal spontaneous combustion in high ground temperature deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 108-111.
- [14] 刘文永,孟巴矿高湿环境对煤自燃特性参数影响的试验研究[D].西安:西安科技大学,2011.
- [15] 秦荣宏,翟小伟,孟巴矿高地温高湿环境采空区特厚遗煤自燃规律研究[J].煤矿开采,2014,19(5):100-102.  
Qin Ronghong, Zhai Xiaowei. Spontaneous combustion rule of extremely-thick residual coal in gob of Mengba Colliery under high temperature and high humidity environment [J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(5): 100-102.
- [16] 刘少南.初始温度对煤自燃特征影响的试验研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [17] Sargeant J, Beamish B, Chalmers D. Times to ignition analysis of new south wales [C]//Coal Operators' Conference, Aziz Australia: University of Wollongong, 2009: 254-358.
- [18] 鲍庆国.滕南矿区高地温环境中煤自燃特性及防灭火技术[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [19] 王德明.矿井防灭火新技术:三相泡沫[J].煤矿安全,2004,35(7):16-18.  
Wang Deming. New technology prevention mine fire—three phase foam [J]. Safety in Coal Mines, 2004, 35(7): 16-18.
- [20] 秦波清,王德明,陈建华,等.粉煤灰三相泡沫组成成分及形成机理研究[J].煤炭学报,2005,30(2):155-159.  
Qin Botao, Wang Deming, Chen Jianhua, et al. Study on components and forming mechanism of three-phase foam with fly ash [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 155-159.
- [21] 郭兴明,徐精彩,惠世恩,等.煤自燃过程中极限参数的研究[J].西安交通大学学报,2001,35(7):682-686.  
Guo Xingming, Xu Jingcai, Hui Shien, et al. Research on key parameters in the process of coal self-ignition [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(7): 682-686.