

高瓦斯易自燃采空区瓦斯与煤自燃耦合模拟研究

裴晓东^{1,2}, 张人伟^{1,2}, 马伟南²

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 以高瓦斯易自燃 1118₁ 综采工作面采空区为对象,研究了无抽采和瓦斯立体抽采条件下采空区瓦斯抽采治理效果及与浮煤自燃的耦合影响。通过建立理论模型,结合现场观测,计算得出了分段渗透率范围并建立了采空区渗透率三维控制方程。模拟结果表明:无抽采条件下,采空区瓦斯积聚严重,在可能自燃带范围内存在瓦斯与煤自燃共生致灾危险区,必须加以处置;而在采用了采空区留管及高抽巷等瓦斯立体抽采措施后,有效治理了采空区瓦斯积聚问题,抽采负压 4.5 kPa 时,上隅角处的瓦斯体积分数降至 0.5%,满足要求;可能自燃带范围内的瓦斯体积分数下降至 0.48%~4.69%,有效消除了瓦斯与煤自燃共生致灾危险,保障了安全生产。但瓦斯抽采作用会造成采空区漏风量增大,可能自燃带范围扩大,采空区自然发火危险性有所增加,应加强观测。

关键词: 高瓦斯; 易自燃; 采空区; 共生灾害

中图分类号: TD712; TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)04-0073-05

Study on coupling simulation of gas and coal spontaneous combustion in high gassy and easy spontaneous combustion goaf

Pei Xiaodong^{1,2}, Zhang Renwei^{1,2}, Ma Weinan²

(1. MOE Key Lab of Mine Gas and Fire Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on the high gassy and easy spontaneous combustion goaf of No. 1118₁ fully-mechanized coal mining face as an object, the paper had a study on the gas drainage control effect of the goaf and the left coal spontaneous combustion coupling influences under the condition of no gas drainage and gas three dimension drainage. With the establishment of the theoretical model, in combination with the site observation, a scope of the sectional permeability rate was calculated and obtained and a three dimension control equation of the goaf permeability rate was established. The simulation results showed that, under the condition of no gas drainage, the gas accumulation was serious in the goaf. In a possible scope of the spontaneous combustion zone, there would be a symbiotic disaster danger zone of the gas and coal spontaneous combustion, which should be treated. After the pipeline left in the goaf and high level gas drainage gateway as well as the gas three dimensional drainage measures conducted, the gas accumulation problems in the goaf was effectively controlled. When a negative pressure of the gas drainage was 4.5 kPa, the gas volume fraction at the top corner was reduced to 0.5% and could meet the requirements. The gas volume fraction in the possible spontaneous combustion scope was reduced from 0.48%~4.69%, the gas and coal spontaneous combustion symbiotic disaster danger was effectively eliminated and the safety production was ensured. But the gas drainage function would cause the air leakage of the goaf increased, the possible spontaneous combustion scope was expanded, the spontaneous combustion danger of the goaf would be increased and should enhanced to observe.

Key words: high gassy; easy spontaneous combustion; goaf; symbiotic disaster

收稿日期: 2015-11-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.04.015

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A055); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 裴晓东(1981—),男,江苏徐州人,博士研究生,讲师,国家注册安全工程师。Tel: 13776773183 E-mail: peixd119@126.com

引用格式: 裴晓东, 张人伟, 马伟南. 高瓦斯易自燃采空区瓦斯与煤自燃耦合模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 73-77.

Pei Xiaodong, Zhang Renwei, Ma Weinan. Study on coupling simulation of gas and coal spontaneous combustion in high gassy and easy spontaneous combustion goaf[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 73-77.

0 引言

矿井瓦斯爆炸和煤炭自燃是煤矿生产中的2种主要灾害形式。当前,煤矿的开采深度和产量不断加大,一些原先的低瓦斯矿井逐渐转变为高瓦斯矿井或煤与瓦斯突出矿井,地热问题及煤炭自然发火也越来越严重,这都导致了存在瓦斯与煤自燃双重灾害的矿井越来越多^[1-2]。如铜川、鹤岗、阳泉、淮北、盘江等主要矿区的许多煤矿就存在2种灾害共生的问题,这给矿井的安全生产带来了巨大的隐患。相关调研发现^[3-4],在国内229对大型煤矿中有32.3%的矿井存在瓦斯与煤自燃共生灾害情况,且2种灾害共生的趋势随着矿井开采深度的延伸有增加趋势。

采空区是瓦斯与煤自燃共生灾害发生最主要的场所之一。目前矿井关于采空区瓦斯灾害及煤炭自燃的防治技术和措施相对比较成熟,但是往往只是针对单一灾害因素展开,而没有考虑到二者之间的耦合影响,这极易造成在2种灾害的防治过程中出现顾此失彼的问题,甚至诱发、加剧某一灾害的危险性^[5-8]。试验工作面为金佳煤矿18₁号煤层首采工作面,通风方式为“U”型上行通风,倾斜长110 m,煤层平均厚3.0 m,已开采下保护层11223工作面。1118₁1工作面最大绝对瓦斯涌出量为24.74 m³/min,采用了顺层钻孔、采空区留管以及高位钻场等瓦斯立体抽采措施;该煤层自燃倾向性属于I类容易自燃,最短自然发火期仅为32天,自然发火问题严重。笔者以金佳煤矿高瓦斯易自燃1118₁1综采工作面采空区为研究对象,以现场实测和数值模拟为研究手段,从无抽采和瓦斯立体抽采条件下采场气体运移变化规律来研究采空区火与瓦斯防治的耦合问题,以指导高瓦斯易自燃矿井合理开展采空区瓦斯和火灾综合防治工作。

1 采空区数值分析模型的建立与参数确定

1.1 几何模型的建立

根据1118₁1工作面实际情况,运用Fluent模拟软件,建立采空区几何模型。在直角坐标系中,以 x 表示采空区深度方向,以 y 表示工作面倾斜长度方向,以 z 表示采空区高度方向,并设定回风巷、工作面和采空区的交点为坐标原点,几何模型如图1所示。模型长×宽×高为:工作面5 m×110 m×3 m,采空区120 m×115.2 m×25 m,冒落带120 m×115.2 m×7

m,高位钻场30 m×3 m×3 m,进、回风巷60 m×3 m×4.6 m。

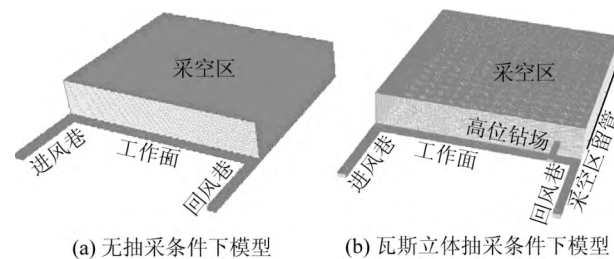


图1 采空区几何模型

Fig. 1 Geometric model of goaf

高位钻场简化为高抽巷处理,相对于回风巷的垂直距离、水平距离均为12 m,距最里端边界120 m;留管抽采系统,埋管管径为0.5 m,长度为120 m,距煤层底板2 m,距最里端边界20 m,连接有3个三通分支,分别距上隅角15、45和75 m。

1.2 模拟参数的确定

1.2.1 采空区模型渗透率

渗透率是影响采空区等多孔介质模型中气体流动及流场分布情况的关键参数,它与煤体破碎程度和煤、岩的碎胀系数有关^[9-14],根据Blake-Kozeny公式,采空区任意一点的渗透率 $e(x, y, z)$ 计算公式为

$$e(x, y, z) = \frac{D_p^2}{150} \times \frac{n(x, y, z)^3}{[1 - n(x, y, z)]^2} \quad (1)$$

其中: $e(x, y, z)$ 为渗透率, m²; D_p 为采空区平均调和粒径, m; $n(x, y, z)$ 为多孔介质孔隙率, $n(x, y, z) = 1 - 1/[K_p(x, y, z)]$, $K_p(x, y, z)$ 为三维采空区某点的煤岩碎胀系数,可参考文献[15]取值。

18₁号煤层上覆岩层为粉砂质泥岩、粉砂岩,采空区平均调和粒径为0.014 m,采动断裂带碎胀系数为1.10~1.57,压实区碎胀系数为1.10,代入式(1)计算出采空区模型的渗透率范围为采动裂隙带 $1.2 \times 10^{-9} \sim 1.53 \times 10^{-7} \text{ m}^2$,压实区 $1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。又根据采空区“O”形圈理论^[16]结合1118₁1工作面采空区实际尺寸,建立采空区渗透率的三维控制方程为:

$$e(x, y, z) = 1.2 \times 10^{-9} \exp \left\{ 4.8481 \exp(0.0151z) \times \left[\frac{(x - 57.6)^2}{10816} + \frac{(y - 60)^2}{90000} \right] \right\} \quad (2)$$

1.2.2 采空区瓦斯源相

根据1118₁1工作面瓦斯涌出量预测及抽采统

计资料可知,该工作面瓦斯主要来源于本煤层和邻近层的瓦斯涌出,绝对瓦斯涌出量为 $24.74\text{ m}^3/\text{min}$,其中本煤层瓦斯涌出量为 $8.62\text{ m}^3/\text{min}$,上、下邻近层瓦斯涌出量分别为 9.78 和 $6.34\text{ m}^3/\text{min}$ 。回采过程中本煤层预抽瓦斯 $5.0\text{ m}^3/\text{min}$,因此开采期间本煤层实际瓦斯涌出量是 $3.62\text{ m}^3/\text{min}$ 。结合采场实际,将上述参数转算成 Fluent 软件中要求的质量源相见表 1。

表 1 采场瓦斯质量源相

Table 1 Quality source facies of gas in stope

地点	瓦斯涌出量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	瓦斯质量源相/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$
采空区	16.12	5.00×10^{-7}
工作面	3.62	3.97×10^{-5}

1.2.3 边界条件设置

定义进风巷入口为数值模拟模型的入口,入口边界设置为速度入口,入口速度按照具体的模拟方案设定。入口气体为标准空气,无瓦斯。回风巷、高抽巷和留管出口边界均设置为自由出流,壁面边界设置为无滑移壁面,与围岩温度相同。采空区孔隙率、渗透率和采场瓦斯源相利用 Fluent 自定义函数编写程序给定。

2 瓦斯抽采与煤自燃耦合模拟

2.1 无抽采条件下的模拟结果及分析

为了掌握瓦斯立体抽采对采空区瓦斯抽采治理效果及与浮煤自燃的耦合影响,首先对无抽采条件下的采空区瓦斯浓度分布和风流流场进行模拟,如图 2 所示。

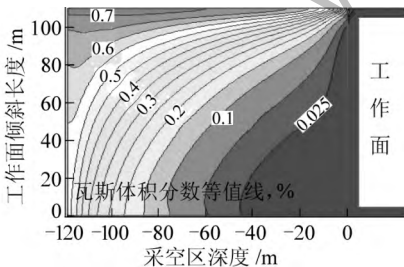


图 2 无抽采条件下采空区瓦斯浓度分布

Fig. 2 The distribution of gas concentration in goaf under the condition of non-drainage

采用极限风速法^[17-19],根据漏风风速范围 $0.004 \sim 0.00167\text{ m/s}$ 划分得到的采空区可能自燃带如图 3 所示。同时,结合瓦斯等值线图(瓦斯爆炸危险区: $5\% < \varphi(\text{CH}_4) < 16\%$)可见,采空区内存在瓦斯与煤自燃共生致灾危险区。从模拟结果可以看

出,在无抽采条件下采场瓦斯分布与浮煤自燃的耦合关系见表 2。

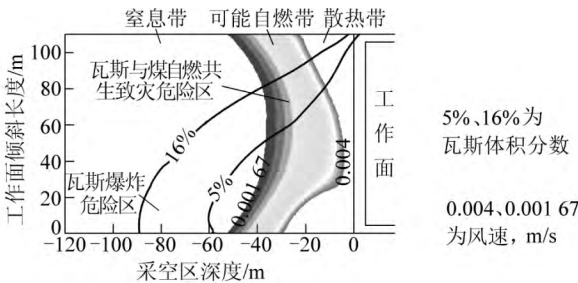


图 3 无抽采条件下采空区可能自燃带范围及瓦斯与煤自燃共生致灾危险区

Fig. 3 Probable spontaneous combustion region and concomitant disaster area of gas and coal spontaneous combustion under the condition of non-drainage in goaf

表 2 无抽采条件下采场瓦斯分布与浮煤自燃的耦合关系

Table 2 Coupling relationships between the gas distribution and coal spontaneous combustion under the condition of non-drainage

位置	可能自燃带范围/m	采场瓦斯体积分数/%	耦合关系
进风侧	28.8~52.8	1.45~2.92	共生,无燃烧、爆炸危险
采场中部	4.9~40.2	1.32~10.78	共生灾害,有爆炸危险
回风侧	20.6~52.2	63.18~67.45	共生灾害,有燃烧危险

由图 2、图 3 及表 2 可见:

1) 在无抽采条件下,采空区瓦斯积聚严重,采场进风侧瓦斯浓度相对较低,而中部及回风侧瓦斯浓度较高,其回风侧深部瓦斯体积分数可达 70% 以上。

2) 受风流流动影响,采面上隅角处的瓦斯体积分数为 2.5%,远超过《煤矿安全规程》中的规定,必须加以处置。

3) 在采空区可能自燃带范围内,存在瓦斯与煤自燃共生致灾危险区。即在浮煤存在自燃发热可能的区域内,瓦斯体积分数也处于爆炸界限 5%~16% 以内,二者耦合叠加使得该区域存在遗煤自燃引发瓦斯爆炸的危险。因此,应采取有效措施防止煤炭自燃或降低瓦斯浓度以预防事故发生。

2.2 瓦斯立体抽采条件下的模拟结果及分析

采用留管抽采采空区瓦斯和高位钻场抽采邻近层瓦斯等瓦斯立体抽采措施后(平均抽采负压 4.5 kPa)采空区瓦斯分布、风流流场及可能自燃带范围模拟结果如图 4、图 5 所示。从模拟结果可以看

出,在瓦斯立体抽采条件下采空区瓦斯分布与浮煤自燃的耦合关系见表3。

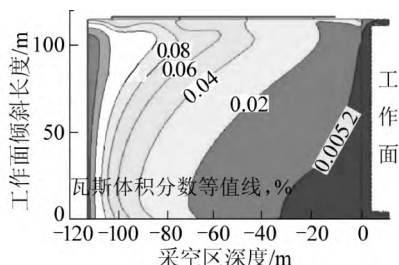


图4 瓦斯立体抽采条件下采空区瓦斯浓度分布

Fig. 4 Distribution of gas concentration in goaf under the condition of three dimensional drainage

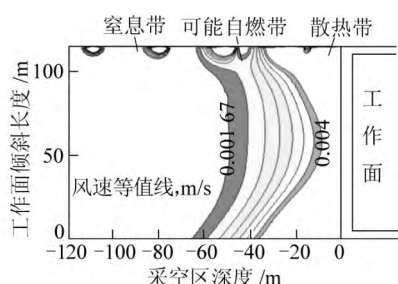


图5 瓦斯立体抽采条件下采空区可能自燃带范围

Fig. 5 Probable spontaneous combustion region in goaf under the condition of three-dimensional drainage

表3 瓦斯立体抽采条件下采空区瓦斯分布与浮煤自燃的耦合关系

Table 3 Coupling relationships between the gas distribution and coal spontaneous combustion in goaf under the condition of three-dimensional drainage

位置	可能自燃带范围/m	采空区瓦斯体积分数/%	耦合关系
进风侧	34.8~66.2	0.48~1.07	共生,无燃烧、爆炸危险
采场中部	9.3~51.8	0.59~1.88	共生,无燃烧、爆炸危险
回风侧	33.1~65.6	2.87~4.69	共生,无燃烧、爆炸危险

1) 对比无抽采条件下的 $z=2$ m平面瓦斯浓度等值线(图2)可见,采取瓦斯立体抽采措施后,采场内瓦斯浓度大幅降低,深部瓦斯体积分数从70%降低到18%左右,尤以回风侧瓦斯治理效果最为显著。

2) 在抽采负压作用下,采场内高浓度瓦斯被抽走,采场低浓度瓦斯区域扩大并向深部移动,从而大幅抑制了采空区瓦斯向工作面的扩散,采面上隅角处的瓦斯体积分数降至0.5%左右,满足要求。

3) 瓦斯抽采致使采空区漏风有所增加,可能自燃带比无抽采时深入采空区4.4~12.5 m,进风侧和

采空区中部可能自燃带宽度增大7 m左右,而回风侧可能自燃带宽度仅增加0.9 m左右,受影响较小。

4) 对比采场瓦斯与浮煤自燃耦合关系可见,模拟算例中,在其可能自燃带范围内,采场瓦斯体积分数由1.32%~67.45%下降至0.48%~4.69%,瓦斯浓度均未达到燃烧、爆炸界限,有效消除了瓦斯与煤自燃共生致灾危险区,这在很大程度上保证了开采的安全。

3 结 论

1) 建立了高瓦斯易自燃1118₁综采工作面采空区无抽采和瓦斯立体抽采模型,结合现场观测结果,计算出分段渗透率范围为:采动裂隙带 1.2×10^{-9} ~ 1.53×10^{-7} m²,压实区 1.2×10^{-9} m²;并建立了采空区渗透率三维控制方程,通过数值模拟得到了采空区瓦斯分布和风流流场的可视化结果。

2) 数值模拟结果显示:无抽采条件下,1118₁综采工作面采空区瓦斯积聚严重,上隅角处的瓦斯体积分数为2.5%左右,远超过相关规定;并且在采场中部及回风侧的可能自燃带范围内,瓦斯体积分数分别达到1.32%~10.78%和63.18%~67.45%,二者耦合叠加使得该区域存在遗煤自燃引发瓦斯燃烧、爆炸的危险,即存在瓦斯与煤自燃共生致灾危险区,必须加以处置。

3) 采用采空区留管及高抽巷等瓦斯立体抽采措施可有效治理采空区瓦斯积聚问题,模拟算例中采场瓦斯浓度大幅降低,以回风侧瓦斯治理效果最为显著,抽采负压4.5 kPa时,上隅角处的瓦斯体积分数降至0.5%左右,满足要求;而在可能自燃带范围内,瓦斯体积分数下降至0.48%~4.69%,有效消除了瓦斯与煤自燃共生致灾危险,为安全生产提供了保障。

4) 在瓦斯抽采作用下,会造成采空区漏风增大,可能自燃带向采空区深部移动,且宽度在进风侧及采场中部有一定扩大,回风侧变化则较小,这在一定程度上增加了遗煤发生自燃的危险性。因此,应加强采空区温度监控及指标气体变化分析,做到在有效治理采空区瓦斯问题的同时,也要有效预防遗煤氧化自燃的发生。

参考文献(References):

- [1] 徐亚民.易燃厚煤层煤炭自燃与瓦斯综合防治技术[J].煤炭科学技术,2013,41(8):77-80.

- Xu Yamin. Comprehensive prevent technology of gas and coal spontaneous combustion in inflammable thick seam [J]. Coal Science and Technology 2013 41(8): 77-80.
- [2] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系 [J]. 煤炭学报 2009 34(1): 1-8.
- Yuan Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(1): 1-8.
- [3] 周福宝. 瓦斯与煤自燃共存研究 (I): 致灾机理 [J]. 煤炭学报 2012 37(5): 843-849.
- Zhou Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion (I): disaster mechanism [J]. Journal of China Coal Society 2012 37(5): 843-849.
- [4] 周福宝, 夏同强, 史波波. 瓦斯与煤自燃共存研究 (II): 防治新技术 [J]. 煤炭学报 2013 38(3): 353-360.
- Zhou Fubao, Xia Tongqiang, Shi Bobo. Coexistence of gas and coal spontaneous combustion (II): new prevention and control technologies [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(3): 353-360.
- [5] 李宗翔, 吴强, 肖亚宁. 采空区瓦斯涌出与自燃耦合基础研究 [J]. 中国矿业大学学报 2008 37(1): 38-42.
- Li Zongxiang, Wu Qiang, Xiao Yaning. Numerical simulation of coupling mechanism of coal spontaneous combustion and gas effusion in goaf [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2008 37(1): 38-42.
- [6] 周心权. 煤矿采空区自然防治和应急处置能力提高的建议 [J]. 煤炭科学技术 2013 41(9): 151-153.
- Zhou Xinquan. Proposals on improvement of spontaneous combustion prevention and control in mining goaf and emergency handling capacity [J]. Coal Science and Technology 2013 41(9): 151-153.
- [7] 周爱桃, 王凯, 臧杰等. 易自燃采空区瓦斯与火灾共治数值模拟 [J]. 中国安全科学学报 2010 20(8): 49-53.
- Zhou Aitao, Wang Kai, Zang Jie et al. Numerical simulation on gas and fire control in spontaneous combustion gob [J]. China Safety Science Journal 2010 20(8): 49-53.
- [8] 裴晓东. 采空区瓦斯与煤自燃共生灾害的实测分析与研究 [J]. 煤炭技术 2014 33(9): 57-59.
- Pei Xiaodong. Measuring analysis and study on concomitant disaster of gas and coal spontaneous combustion in goaf [J]. Coal Technology 2014 33(9): 57-59.
- [9] Jacob B. Dynamics of fluids in porous medium [M]. New York: Courier Dover Publications, 1998.
- [10] 雷树业, 王利群, 贾兰庆等. 颗粒床渗透率和孔隙率的关系 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998 38(5): 76-79.
- Lei Shuye, Wang Liqun, Jia Lanqing et al. Relationship between porosity and permeability of the particles packed bed [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998 38(5): 76-79.
- [11] 胡国忠, 许家林, 王宏图等. 低渗透煤与瓦斯的固气动态耦合模型及数值模拟 [J]. 中国矿业大学学报 2011 40(1): 1-6.
- Hu Guozhong, Xu Jialin, Wang Hongtu et al. Research on a dynamically coupled deformation and gas flow model applied to low-permeability coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2011 40(1): 1-6.
- [12] 王凯, 蒋曙光, 张卫清等. 尾巷改变采空区瓦斯流场的数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2012 29(1): 124-130.
- Wang Kai, Jiang Shuguang, Zhang Weiqing et al. Numerical simulation of tail roadway change to gas flow field in goaf [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2012 29(1): 124-130.
- [13] 梁云涛, 张腾飞, 王树刚等. 采空区孔隙率非均质模型及流场分布模拟 [J]. 煤炭学报 2009 34(9): 1203-1207.
- Liang Yuntao, Zhang Tengfei, Wang Shugang et al. Heterogeneous model of porosity in gobs and its airflow field distribution [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(9): 1203-1207.
- [14] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社 2001.
- [15] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2010.
- [16] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究 [J]. 煤炭学报 1998 23(5): 466-469.
- Qian Minggao, Xu Jialin. Study on the “O-Shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata [J]. Journal of China Coal Society 1998 23(5): 466-469.
- [17] 王德明. 矿井火灾学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2008.
- [18] 杨胜强, 张人伟, 邸志前等. 综采面采空区自燃“三带”的分布规律 [J]. 中国矿业大学学报 2000 29(1): 93-96.
- Yang Shengqiang, Zhang Renwei, Di Zhiqian et al. Distribution regularity of spontaneous combustion “three-zone” in goaf of fully-mechanized coal face [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2000 29(1): 93-96.
- [19] 裴晓东, 张人伟. 煤矿综放面采空区自燃“三带”划分的数值模拟 [J]. 东北大学学报: 自然科学版 2009(S1): 203-206.
- Pei Xiaodong, Zhang Renwei. Numerical simulation for determining the spontaneous combustion three-zone in goaf on fully-mechanized coal face [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science 2009 30(S1): 203-206.