

尾巷风压及风量变化对采空区自然发火影响的理论分析与数值模拟

杨胜强 程涛 徐全 吕文陵 黄金

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 安全工程学院 江苏 徐州 221008)

摘要: 基于多孔介质的渗流连续性方程、动力弥散方程以及相似理论,建立了U+I型综放工作面与尾巷负压和风量变化相关的理论数学模型,对4种尾巷风量条件下有关采空区可能自燃带范围和回风流瓦斯浓度进行了模拟分析。通过理论分析和数值模拟发现,回风巷瓦斯浓度随尾巷风量变化幅度较大,而采空区可能自燃带宽度变化曲线较为平缓,因此,是否需要通过降低尾巷负压来减小采空区可能自燃带范围,必须根据各矿具体的实际情况而定;当工作面供风量较小时,实施意义不大;当工作面风量较大时,降低尾巷负压则可能既使回风巷瓦斯不超限,又使采空区浮煤自然发火危险性显著降低。

关键词: 尾巷; 自然发火; 数值模拟; 负压调节

中图分类号: TD752.2 **文献标志码:** A

Theoretical analysis and numerical simulation of influence of the change of negative pressure and air volume of inner interlocked tail road on coal spontaneous combustion

YANG Sheng-qiang, CHENG Tao, XU Quan, LÜ Wen-ling, HUANG Jin

(School of Safety and Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on continuity equation of air leakage, seepage flow-diffusion-consumption equation and similarity theory, a theory and numerical model about adjusting the negative pressure and air volume of inner interlocked tail road in U+I-Ventilation was established, range of spontaneous combustion and gas density in return airflow roadway were simulated and analyzed with the change of four different air volume of inner interlocked tail road. Through the theoretical analysis and numerical simulation, finds that the range ability of gas density in return airflow roadway is comparatively large by adjusting the air volume of inner interlocked tail road, but the range of spontaneous combustion is not obvious changed. A conclusion is arrived that is or isn't need to adjust the negative pressure or air volume of inner interlocked tail road to reduce the range of spontaneous combustion is defined by the different real conditions of each coal mines: when the air volume of the air-intake crossheading is small, it's not significant; on the contrary, could not only keep the gas density in return airflow roadway not transfinite, but also reduce the fatalness observably of coal spontaneous combustion in goaf.

Key words: inner interlocked tail road; spontaneous combustion; numerical simulation; adjust the negative pressure

1 矿井概况

山西阳泉煤业集团国阳二矿 80509 工作面位于

470 水平 15 号煤层,煤层倾角 $3 \sim 9^\circ$, 平均 5° , 厚 6.91 m, 埋藏深度为 430 ~ 570 m, 走向长 772 m, 倾斜长 200 m, 面积为 $154\,400\text{ m}^2$, 密度 1.41 t/m^3 , 工业储

收稿日期: 2010-05-20 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50834005)

作者简介: 杨胜强(1964—),男,贵州铜仁人,教授,博士生导师。联系人: 程涛(1984—),男,山西孝义人,硕士研究生。E-mail: 37chengtao@163.com

量 1 441 200 t, 采出率 87%, 可采储量 1 253 844 t。东邻东丈八一、二区采空区, 西部为 80507 工作面采空区, 南部为五采上山, 北部为五采区与三采区隔离煤柱, 属孤岛综放工作面。工作面采用一进两回的通风系统, 新鲜风流经五采轨道巷、胶带巷进入 80509 进风巷到工作面; 污风由工作面回风、内错巷经里五采回风巷、470 水平南翼总回、九采扩区北回风、最后回北茹回风井。15 号煤层属 II 级自然发火煤层。

2 问题的提出

对于 80509 工作面来说, 在目前的 U + I 型通风方式下, 工作面的尾巷位置成为采空区漏风流的集中汇, 该漏风量与工作面上隅角的采空区漏风汇相比, 要大得多。按通风排瓦斯要求, 高瓦斯矿井 U + I 型综放工作面需要较大的尾巷风量, 而根据防止采空区自然发火的要求, 则需要较小的尾巷风量以减少采空区漏风, 两者相矛盾。尾巷负压的大小决定漏风量的大小, 进而影响采空区“三带”范围和回风流瓦斯浓度。本文通过理论分析和数值模拟, 得出最佳的尾巷负压和尾巷风量, 均衡排瓦斯和防灭火两者之间的矛盾, 从而在充分保证采空区不发火的前提下, 减小回风上隅角和回风巷风流的瓦斯浓度。

3 理论模型的建立与边界条件分析

3.1 采空区渗流控制方程^[1-2]

采空区可以看作是由冒落的岩块组成的非均匀孔隙介质, 气体在采空区流动的微分方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} k_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_{yy} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_{zz} \frac{\partial p}{\partial z} + I = 0$$

式中 k 为采空区渗透系数; p 为压力; I 为源汇项, $g/(m^3 \cdot s)$ 。

根据质量守恒定律和流体动力弥散定律, 瓦斯在采场中的动力弥散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (cu_i) + I_{CH_4}$$

式中 c 为采空区内瓦斯浓度, g/m^3 ; D_{ij} 为动力弥散系数的 9 个分量, m^2/s ; u_i 为平均流速向量的分量, m/s 。

将综放工作面采空区视为煤岩混合体组成的多孔介质空间, 由于松散煤体空隙的时空分布不均匀, 漏风源和漏风汇难以确定, 松散煤体中的漏风流场十分复杂, 将采空区内风流看作不可压缩气体在三维空间的非线性渗流, 包括紊流、层流、过渡流。所服从的基本方程为非线性渗流方程, 即 Bachmat 方程, 达西定律仅仅是 Bachmat 方程在低速层流状态下的特例。

三维非线性渗流定律公式为

$$E \bar{J} = \frac{\nu}{g} \left(1 + \frac{v \beta D_m}{n \nu} \right) \bar{v}$$

式中 E 为渗透率, m^2 ; $\bar{J}$ 为压力坡度; ν 为运动黏性系数, m^2/s ; D_m 为平均调和粒径; v 为采动裂隙椭圆抛带的风速, m/s ; n 为采动裂隙椭圆抛带的孔隙率; $\bar{v}$ 为渗流速度, m/s ; g 为重力加速度, $9.81 m/s^2$; β 为多孔介质粒子形状系数。

3.2 采空区孔隙率及渗透率

采空区漏风强度和煤体蓄热条件都与孔隙密切相关, 但严格说采空区孔隙率应分为两部分考虑: ① 松散煤体的孔隙率; ② 垮落顶板的孔隙率。松散煤体孔隙率主要影响煤体内部氧的渗透和分布、高温点的深度, 垮落顶板的孔隙率主要影响煤体表面散热的快慢和漏风强度。随着工作面向前推进和时间的推移, 采空区的孔隙率随时发生变化。一般而言, 顶板岩层越坚硬, 孔隙率越大; 矿压越大空隙率越小; 作用时间越长, 孔隙率就越小, 反之就越大。孔隙率为

$$n = 1 - 1/K_p$$

式中 K_p 为岩石及煤的碎胀系数。

由 Blake - Kozeny 公式^[3], 多孔介质的渗透率 e 为

$$e = \frac{D_m^2}{150} \frac{n^3}{(1 - n)^2}$$

式中 D_m 为平均调和粒径。

3.3 采空区模型的建立和边界条件分析

根据现场工作面的几何尺寸建立三维的 CFD 模型, 利用 Fluent 进行数值模拟分析。模型如图 1 所示。

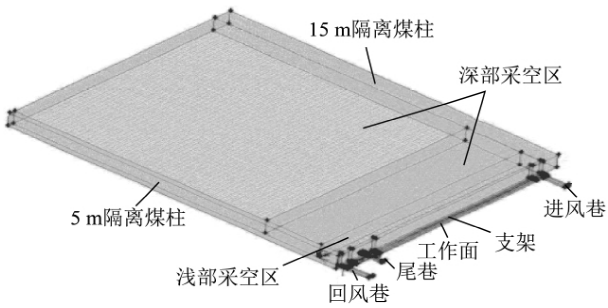


图 1 孤岛综放工作面采空区三维模型

Fig. 1 3D model of goaf in full mining face of isolated island

为了使本次建立的模型最大程度上与实际矿井的物理环境相接近, 经过反复调试, 得到以下较为理想的模型^[4]。根据相似理论, 模型与矿井采场实际尺寸比例相同, 可保证几何相似; 模拟与实测进风、回风、尾巷风量的匹配可以保证运动相似; 模拟与实测

上下隅角漏风量的匹配又可保证模型中工作面风阻和采空区渗透率的合理性,使二者动力相似。

现有 80509 综放工作面边界条件实测数据与在该模型下边界条件模拟数据比对见表 1,二者差值很小,可认为误差已经达到可接受的程度。

表 1 80509 工作面边界条件实测数据与模拟数据对照
Table 1 Comparison of the actual measurement data and the numerical simulation data about 80509 working face

项 目	实测数据	模拟数据
进风巷进风量	494.44	494.38
回风巷回风量	269.34	269.23
尾巷回风量	233.16	232.74
回风+尾巷风量	502.50	501.97
相邻采空区漏风量	8.06	7.60
漏进采空区风量	186.08	185.94
流出采空区风量	40.20	39.95

按照煤的可能自燃的情况,采空区一般划分为 3 个带^[5-11]:低温不自燃带、可能自燃带、窒息带。划分“三带”通常有 3 种标准^[12-13]:即以采空区内的漏风强度、氧气浓度和温度分布来划分,前两种标准的本质是相同的,即保证供氧聚热条件适宜,使氧化生成的热量不易被漏风风流带走,而采用温度分布标准划分“三带”的数值模拟较难实现,多用于现场埋管实测。故本模拟按照采空区内漏风速划分:散热不自燃带内采空区内漏风风速大于 0.24 m/min;可能自燃氧化带内采空区漏风风速在 0.24~0.10 m/min 之间;窒息带漏风风速小于 0.10 m/min。风速划分标准下的数值模拟所得可能自燃氧化带范围如图 2 所示。

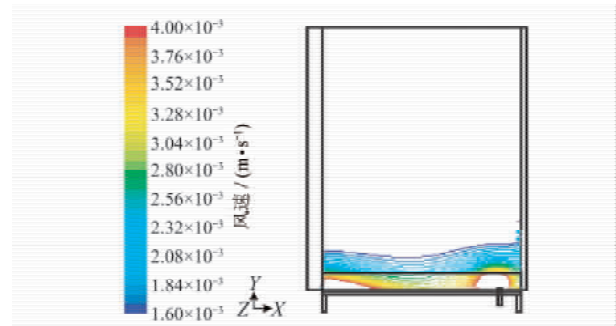


图 2 风速划分标准下的可能自燃带范围
Fig. 2 Range of spontaneous combustion in the standard of the wind speed of return airway

从图 2 可以发现:① 由于工作面供风量只有 494 m³/min 左右,但进回风断面却很大,风速相对较小,风压也不是很大,因此 80509 综放工作面的可能

自燃氧化带范围很窄,而且比较靠近工作面,刚过支架不到几米速度就降到 0.24 m/min 以内,风流在深部采空区遇到的阻力系数较大,又走过 30~40 m 后降到 0.10 m/min。② 采空区周边“两道”可能自燃带走向宽度较大,自然发火率高,特别是回风侧,有细长的可能自燃带。采空区回风侧局部放大如图 3 所示。分析原因^[14],从采空区浮煤分布情况看,端头支架处顶煤放出率低,该顶煤垮落采空区后,产生 5~8 m 宽的丢煤带,与相邻采空区端头丢煤带和周围煤柱组合在一起成为最大遗煤带,再加上巷道顶板的煤已经过长时间氧化蓄热升温,进入采空区后,使采空区二道遗煤温度相对其它地点有可能较高,自然发火期大为缩短,从而在推进速度较慢时就可能发生采空区遗煤自燃。

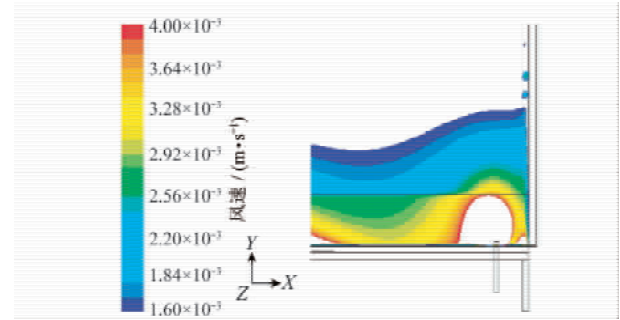


图 3 采空区回风侧可能自燃带范围放大
Fig. 3 Enlargement of spontaneous combustion of return airway
可能自燃带范围具体数值见表 2。

表 2 可能自燃氧化带范围
Table 2 Range of spontaneous combustion

氧化升温带位置	进风巷一侧 氧化升温带	回风巷一侧 氧化升温带	采空区中部 氧化升温带
0.24 m/min 风速线 距工作面距离	13	6	4
0.10 m/min 风速线 距工作面距离	48	58	50
可能自燃带宽度	35	52	46

4 尾巷负压和风量的变化对“三带”的影响

4.1 可行性分析

根据本采区瓦斯统计预计和本工作面掘进过程中瓦斯涌出统计综合分析,预计该工作面总涌出量约为 37 m³/min,其中本煤层约为 2 m³/min,邻近层约为 35 m³/min;高抽巷抽放率按 90% 计算预计抽放 31.5 m³/min,风排约 5.5 m³/min。本煤层瓦斯涌出量 2 m³/min,邻近层瓦斯涌出量 1.5~3.5 m³/min,风排瓦斯量为 3.5~5.5 m³/min^[15]。

$$Q_c = Q_A + Q_B = Q_{wA}/1\%K_{wA}K_{bA} + Q_{wB}/2.5\%K_{wB} \times K_{bB} = 2/1\% \times 1.3 \times 1.2 + 3.5/2.5\% \times 1.1 \times 1.1 = 481.40 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

式中 Q_c 为采煤工作面需要风量, m^3/min ; Q_A 为回风量, m^3/min ; Q_B 为内错巷风量, m^3/min ; Q_{wA} 为本煤层瓦斯涌出量, m^3/min ; Q_{wB} 为邻近层瓦斯涌出量风排部分, m^3/min ; K_{wA} 、 K_{wB} 为工作面瓦斯涌出不均衡系数, 前者取 1.3, 后者取 1.2; K_{bA} 、 K_{bB} 为工作面风量备用系数, 前者取 1.4, 后者取 1.2。

因此, 将工作面配风计划调整为 $490.00 \text{ m}^3/\text{min}$, 其中内错尾巷风量不低于 $170.00 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

适当的减小尾巷负压, 则减少漏风量, 使风流更多的经工作面流到回风巷, 则漏风流到达采空区的深度将有所减少, 采空区的可能自燃带的范围有所减小, 80509 采空区自然发火的危险性将会有所降低。

流经工作面的最低风量为 $Q_w = v_{\min}S_w = 0.25 \times (2.8 \times 3) \times 60 = 126 \text{ m}^3/\text{min}$, 则尾巷最大风量为 $494.44 - 126 = 368.44 \text{ m}^3/\text{min}$, 内错尾巷的供风范围为 $170.00 \sim 368.44 \text{ m}^3/\text{min}$ 。由于现在尾巷风量为 $233.16 \text{ m}^3/\text{min}$, 要想达到减小采空区自燃氧化带范围的目的, 则尾巷模拟调整的风量范围为 $170.00 \sim 233.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 。除两个极限风量值之外, 在以上范围之间再取两个尾巷风量中间值 205.00 和 $190.00 \text{ m}^3/\text{min}$, 对以上 4 种尾巷风量分配下的可能自燃带范围进行模拟。

4.2 不同尾巷负压和风量条件下的可能自燃带范围模拟结果

模拟结果见表 3。

表 3 不同尾巷风量条件下的可能自燃带范围模拟结果
Table 3 Range of spontaneous combustion with the changes of air volume of inner interlocked tail road

尾巷风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	尾巷与回 风巷负压 差/Pa	可能自燃带范围		
		进风巷一侧 氧化升温 带范围/m	回风巷一侧 氧化升温带 范围/m	采空区中部 氧化升温 带范围/m
233.16	75.68	13~48	6~58	4~50
205.00	64.40	15~47	8~57	4~49
190.00	55.78	16~46	10~54	4~48
170.00	46.00	17~45	12~52	4~47

从表 3 可以看出, 采空区可能自燃带范围整体在收缩, 但幅度不大。以尾巷两临界值下的数据相比较, 由于尾巷的风量调节范围很小, 只有 $233.16 - 170.00 = 63.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 的风量可供调节, 负压也只改变了 $75.68 - 46.00 = 29.68 \text{ Pa}$, 因此可能自燃带的

变化范围还是很有限的。采空区中部的氧化升温带范围只收缩了 3 m; 如图 4 所示; 进风侧的氧化升温带范围收缩了 7 m; 由于尾巷在回风侧 20 m 附近, 因此回风风流受尾巷负压变化影响较大, 可能自燃带范围变化也较大, 但氧化升温带也仅收缩了 12 m。

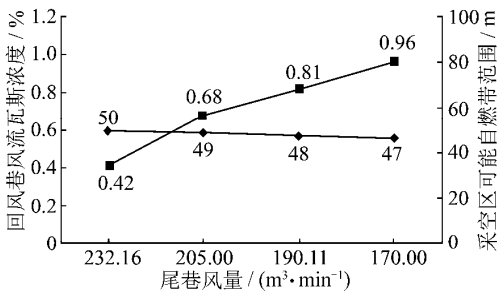


图 4 模拟数据对照曲线

Fig. 4 The contrast of curves the simulation data

4.3 不同尾巷负压和风量条件下的回风巷风流瓦斯浓度模拟结果

模拟结果见表 4。

表 4 不同尾巷风量下的回风巷风流瓦斯浓度模拟结果
Table 4 Gas density in return airflow roadway with the changes of air volume of inner interlocked tail road

尾巷风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	进风隅角漏进风 量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	回风隅角流出风 量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	回风巷瓦斯 浓度/%
233.16	185.86	39.95	0.42
205.00	179.05	47.68	0.68
190.00	175.11	52.77	0.81
170.00	170.26	60.63	0.96

从表 4 可以看出, 回风巷风流瓦斯浓度随尾巷风量的减小增长很快。主要由于当尾巷负压和风量减小时, 尾巷的风排瓦斯量有所减少, 造成回风巷风排瓦斯负担加大所致。在回风隅角漏风汇附近, 由于尾巷的负压减小, 受尾巷节流的风量减少, 流出采空区的风有所增加。回风巷的风排瓦斯主要来自工作面和漏风带出的采空区瓦斯, 工作面的瓦斯涌出量基本不变, 而漏风带出的采空区瓦斯有所增加, 风排瓦斯总量增加, 虽回风量也有所增加, 但绝对瓦斯涌出量增长更快, 因此回风巷风排瓦斯回风巷的瓦斯浓度有所升高。当尾巷风量为 $170.00 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 回风巷浓度达到 0.96%, 几乎达到了回风巷风流瓦斯浓度不超过 1% 的极限值, 如图 4 所示。

5 结 论

(1) 虽然减小尾巷负压和风量可以使采空区可能自燃带范围有所减小(表 3), 但由于尾巷的风量调

节范围有限,可能自燃带范围最多也只收缩了 3 ~ 12 m,对于减小采空区浮煤自然发火危险性意义不是很大。

(2) 随着尾巷负压的提高,工作面上隅角漏出的风量有所增加(表 4),不仅使工作面上隅角瓦斯积聚的问题加剧,而且如果尾巷风量取极限值 $170.00 \text{ m}^3/\text{min}$,则回风巷风流瓦斯浓度达到 0.96%,几乎达到超限的临界值。

(3) 根据模拟数据对照曲线,尾巷风量减少时回风巷瓦斯浓度变化幅度较大,而采空区可能自燃带宽度变化曲线较为平缓。为了保证 80509 工作面的正常回采,降低工作面上隅角瓦斯积聚程度和回风巷瓦斯浓度是很必要的,因此取尾巷风量 $233 \text{ m}^3/\text{min}$ 是较为理想的。

(4) 工作面供风量较小时,通过降低尾巷负压来减小采空区自然发火带范围是有限的;但对于风量较大的工作面(例如阳泉煤业集团石港煤矿 15108 综放工作面),当尾巷风量变化量达到 $200 \sim 300 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,通过模拟发现,可能自燃带宽度收缩了 30 ~ 40 m,这对减小采空区浮煤自然发火危险性还是非常有效的。

参考文献:

- [1] 丁广骥. 矿井大气与瓦斯三维流动[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996: 77 - 80.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [3] 李宗翔, 贾进章, 李庆刚. 动态推进工作面采空区自燃规律的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 84 - 88.
Li Zongxiang, Jia Jinzhang, Li Qinggang. Numerical simulation of the spontaneous combustion laws in goaf of boost working face[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(5): 84 - 88.
- [4] 丁广骥, 杨胜强, 张吉禄. 采场复杂流场的流体动力相似与模块化问题[J]. 中国矿业大学学报, 1995(3): 47 - 51.
Ding Guangxiang, Yang Shengqiang, Zhang Jilu. Hydrodynamic similarity and modularization of complex flow-field of working face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995(3): 47 - 51.
- [5] 崔凯, 张东海, 杨胜强. 采空区遗煤自燃带确定及风流场数值模拟[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2002, 21(4): 88 - 92.
Cui Kai, Zhang Donghai, Yang Shengqiang. Determination of spontaneous combustion region in gob and numerical simulation of air-flowing field[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2002, 21(4): 88 - 92.
- [6] 李宗翔, 吴志君, 王振祥. 采空区遗煤自燃过程及其规律的数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(6): 15 - 19.
Li Zongxiang, Wu Zhijun, Wang Zhenxiang. Numerical simulation of spontaneous combustion process of residual coal in goaf[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(6): 15 - 19.
- [7] 王雷, 杨胜强. 采空区自燃“三带”分布规律及其数值模拟研究[J]. 能源技术与管理, 2006(3): 12 - 15.
Wang Lei, Yang Shengqiang. Rule of the distribution of three-zone for spontaneous combustion and its numerical simulation research in goaf[J]. Energy Technology and Management, 2006(3): 12 - 15.
- [8] 杨胜强, 徐全, 黄金, 等. 采空区自燃“三带”微循环理论及漏风流场数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 769 - 773.
Yang Shengqiang, Xu Quan, Huang Jin, et al. The “three zone” microcirculation theory of goaf spontaneous combustion and a numerical simulation of the air leakage flow field[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 769 - 773.
- [9] 李宗翔, 许端平, 刘立群. 采空区自然发火“三带”划分的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 545 - 548.
Li Zongxiang, Xu Duanping, Liu Liqun. Study on numerical simulation about the division of spontaneous ignition “three bands” in operation goaf[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 545 - 548.
- [10] Wactawit. A numerical simulation of spontaneous combustion of coal in goaf[A]. Proc. Int. Mine Vent. Congr. 6th [C]. 1997: 313 - 316.
- [11] Deng Jun, Xu Tongmo, Xu Jingcai. Analysis of the danger zone liable to spontaneous ignition around coal roadway at fully mechanized long wall top-coal caving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2002, 8(2): 55 - 59.
- [12] 张辛亥, 刘灿, 周金生, 等. 综放工作面采空区流场模拟及自燃危险区域划分[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(1): 6 - 9.
Zhang Xinhai, Liu Can, Zhou Jinsheng, et al. Modeling of flow field and partition of spontaneous combustion danger zone in gob of fully mechanized caving face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(1): 6 - 9.
- [13] 李宗翔. 综放工作面采空区瓦斯涌出规律的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 173 - 178.
Li Zongxiang. Study on numerical simulation of gas emission regularity and boundary condition of the goaf in coal the fully-mechanized[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 173 - 178.
- [14] 陈炎光, 钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [15] 杨胜强, 刘殿武. 通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 218 - 221.