

综放工作面采空区注氮量与氧化自燃带分布关系

马 东^{1,2} 秦波涛^{1,2}

(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: 为了防止柳塔煤矿 12201 综放工作面在推进过程中发生采空区遗煤自燃, 采用 COMSOL Multiphysics 模拟软件研究了不同注氮量条件下采空区氧化自燃带的分布规律。研究结果表明: 随着注氮量的增大, 氧化自燃带的起始位置沿着工作面方向移动, 但整体受注氮量的影响不大, 氧化自燃带的终止位置受注氮影响较大, 明显向工作面方向移动, 导致氧化自燃带的宽度逐渐减小; 注氮量与氧化自燃带宽度近似满足幂指数关系, 经计算得出最佳注氮量为 $860 \text{ m}^3/\text{h}$, 此时的氧化自燃带宽度为 55 m。

关键词: 采空区; 氧化自燃带; 氧浓度; 注氮

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)04-0078-05

Relationship between oxidized spontaneous combustion zone and nitrogen injection quantity in goaf of fully-mechanized top coal caving mining face

Ma Dong^{1,2} Qin Botao^{1,2}

(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: In order to prevent the spontaneous combustion occurred of coal left in the goaf during the face pushing forward of No. 12201 fully-mechanized top coal caving mining face in Liuta Mine, COMSOL Multiphysics software was applied to study the distribution law of oxidized spontaneous combustion zone in the goaf under the condition of different nitrogen injection quantity. The study result showed that with the nitrogen injection quantity increased, the initial location of the oxidized spontaneous combustion zone was moved along the direction of the coal mining face, but it was not highly influenced by the nitrogen injection quantity, the terminal location of the oxidized spontaneous combustion was highly influenced by the nitrogen injection and was obviously moved forward to the direction of the coal mining face and thus the width of the oxidized spontaneous combustion zone was steadily reduced. The nitrogen injection quantity and the oxidized spontaneous combustion zone width could approximately meet the relationship of the power exponent. The optimum nitrogen injection quantity calculated was $860 \text{ m}^3/\text{h}$ and the width of the oxidized spontaneous combustion zone was 55 m.

Key words: goaf; oxidized spontaneous combustion zone; oxygen concentration; nitrogen injection

0 引 言

由于我国能源结构类型和经济发展的需要, 煤炭在未来很长的时间内, 仍然是我国的主要能源^[1]。因此, 煤矿安全、稳定、高效的生产显得尤为重要。我国 95% 的煤矿开采是地下作业, 煤层赋存

条件较为复杂, 多种灾害相互作用, 相互影响, 很容易造成严重事故。其中, 煤矿最严重的灾害之一就是采空区的遗煤自燃^[2]。据统计, 我国有 56% 的矿井具有自然发火的危险^[3]。如果对采空区煤自燃防治不到位, 很容易由煤自燃氧化导致自然发火, 甚至有可能导致瓦斯爆炸, 造成重大的人员伤亡和经

收稿日期: 2015-11-23; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.04.016

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1361213); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014YC04)

作者简介: 马 东(1992—) 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生。Tel: 13813471792 E-mail: madongcumt@163.com

引用格式: 马 东, 秦波涛. 综放工作面采空区注氮量与氧化自燃带分布关系[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 78-82.

Ma Dong, Qin Botao. Relationship between oxidized spontaneous combustion zone and nitrogen injection quantity in goaf of fully-mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 78-82.

济损失^[4-5]。

为了解决煤矿频发的煤自燃灾害,注氮防灭火技术得到了广泛使用^[6-8]。其中,注氮量对治理效果有较大影响,注氮量太大,虽然可以达到惰化采空区、防治煤自燃的目的,但是很有可能导致采煤工作面氧气体积分数低于18.5%^[9],这会威胁到煤矿井下的正常作业和工人身体健康;注氮量太小,则达不到治理采空区遗煤自燃的目的。目前国内外对注氮防灭火技术中最佳注氮量的研究主要通过现场实测、计算机数值模拟等方法,文献[10-13]通过数值模拟对采空区的氧气浓度场进行了研究,得到了注氮量对氧化自燃带的影响规律。但上述学者没有系统地研究注氮量与氧化自燃带宽度的定量关系,对注氮量的模拟范围也没有统一的标准。为此笔者基于前人的研究成果,综合现场实测、数值模拟、定量分析的方法系统地研究注氮条件下采空区氧浓度场、漏风风速场的分布规律,确定最佳注氮量,可以为煤矿现场采空区遗煤自燃的治理提供指导,对煤矿现场的防灭火也具有重要的现实意义^[14-16]。

1 柳塔煤矿12201工作面概况

12201工作面位于柳塔煤矿井田12煤西盘区,工作面走向长度为880.8 m,倾斜长度为324 m,煤厚为4~5 m,煤层倾角为1°~3°,采用全部垮落法管理顶板,顶板煤岩随采随落,工作面通风方式为U型全风压通风,风量为1 600 m³/min。

前期该矿对12201综放工作面采空区进行了初步氧化自燃带测量。测试系统中设置2个采样点,分别置于进风隅角和回风隅角处。通过对测量数据进行整理分析,采用氧气体积分数5%~15%作为氧化自燃带的划分标准^[17],得出测点的氧气浓度随工作面推进距离的变化曲线,如图1所示。

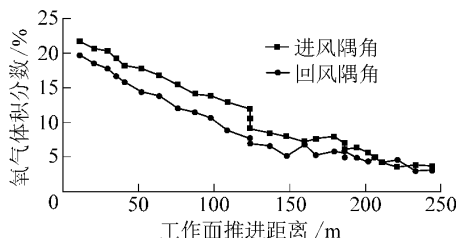


图1 氧气浓度随工作面推进距离的变化曲线

Fig. 1 Change curves of oxygen concentration with working face advancing

由图1可看出,采空区进风侧和回风侧氧化自燃带宽度较大,进风侧氧化自燃带范围为81205 m,

回风侧氧化自燃带宽度为48190 m。由于采空区的氧化自燃带范围较大,遗煤自燃危险性较强,决定采用注氮防灭火技术对采空区进行治理。

2 12201采空区模型的建立

2.1 几何模型的建立

利用COMSOL Multiphysics模拟软件建立采空区几何模型,几何模型主要由进风巷、回风巷、工作面、采空区4个部分组成。如图2所示,采空区长287 m、宽为330 m;采煤工作面长为330 m、宽为13 m;进风巷的进风口宽度5 m,回风巷的回风口宽度为5 m,注氮口设置在埋入采空区30 m处。

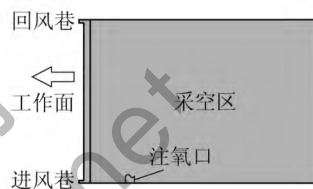


图2 采空区几何模型

Fig. 2 Geometric model of goaf

2.2 采空区气体流动控制方程

流体流动所遵循的物理定律是建立流体运动基本方程组的依据,由于假设采空区内的不可压缩气体进行的是二维的层流流动,能量交换忽略不计。因此采空区风流主要符合连续性方程和动量守恒方程^[18]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的风流速度, m/s; ρ 为矿井中空气的密度, kg/m³; t 为气体流动时间, s; P 为流体微元上的压力, Pa; μ 为采空区空气的动力黏度, Pa·s; S_u 、 S_v 为自定义的源项。

2.3 模拟参数的设定

1) 边界条件设定。①设定进风巷为入口边界,入口速度为风流速度,根据工作面实际风量 $Q = 1\ 600\ \text{m}^3/\text{min}$,实测巷道断面截面积 $S = 11.9\ \text{m}^2$,工

作面风速 $V = 2.24 \text{ m/s}$; 采空区出口边界为自由边界。②氮气入口设置为速度入口, 注氮体积分数为 97%, 氧气体积分数为 3%。③工作面与采空区的相接触的边界设置为内部边界。

2) 参数的设定。矿井平均空气密度 $\rho = 1.154 \text{ kg/m}^3$, 氧气体积分数为 20.08%, 氮气体积分数为 79%, 空气的黏性系数 $\eta = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$, 气体的扩散系数 $D = 2.88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 松散系数设置为 1.5。

根据采空区顶板岩体冒落的碎胀特征, 采空区孔隙率采用经验公式进行设定:

$$\begin{cases} n = 0.00001x^2 - 0.002x + 0.3 & (x \leq 100) \\ n = 0.2 & (x > 100) \end{cases} \quad (4)$$

采空区渗透率 e 通过 Blake—Kozeny 经验公式进行计算^[18]:

$$e = \frac{D_p^2 n^3}{150(1-n)^2} \quad (5)$$

式中: D_p 为平均粒径, μm ; n 为孔隙率; x 为采空区距工作面距离, μm 。

3 注氮量取值范围的确定

为了准确模拟注氮条件下采空区煤自燃“三带”的分布, 需要对注氮量的模拟取值范围进行确定。注氮的设计有 2 种计算方法, 分别是按工作面日产煤量计算和按采空区氧化自燃带的氧气浓度计算。

3.1 按工作面日产煤量计算注氮量

按工作面日产煤量计算注氮量的原理是, 工作面向前推进一段距离后会造成采空区体积变大, 从

而计算所需注氮量 Q_N , 计算公式如下:

$$Q_N = k \frac{A}{24\rho'N_1N_2} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \quad (6)$$

其中: Q_N 为注氮量, m^3/h ; k 为附加系数, 取 1.3; A 为煤炭的日产量, t ; ρ' 为煤的密度, 取 1.32 t/m^3 ; N_1 为管道输氮效率, 取 0.9; N_2 为采空区注氮效率, 取 0.6; C_1 为采空区的氧气体积分数, 取 20.9%; C_2 为采空区实现惰化的氧化体积分数, 取 7%。计算得注氮量 $Q_N = 1025 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.2 按采空区氧化自燃带的氧气浓度计算注氮量

按采空区氧化自燃带的氧气浓度计算的原理是, 使氧气浓度降低到惰化标准以下, 所需注氮量的计算公式如下:

$$Q_N = 60Q_0k \frac{C_3 - C_2}{C_N + C_2 - 1} \quad (7)$$

式中: Q_0 为采空区氧化自燃带漏风量, 取 $5 \text{ m}^3/\text{h}$; C_3 为采空区氧化自燃带的平均氧气体积分数, 取 15%; C_N 为注氮体积分数, 取 97%。

计算得注氮量 $Q_N = 780 \text{ m}^3/\text{h}$, 即可确定注氮量的范围为 $780 \sim 1025 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4 数值模拟结果及分析

4.1 数值模拟结果

数值模拟分为 4 组, 每组的注氮量分别为 780、880、980、1080 m^3/h 。对不同注氮量条件下采空区的氧浓度场及漏风风速场进行模拟, 得到采空区氧浓度等值线图 and 上限漏风风速 (0.004 m/s 风速线) 与下限氧浓度 (5% 氧浓度线) 的叠加图 (为了方便, 下面称为二场叠加图), 模拟结果如图 3、图 4 所示。

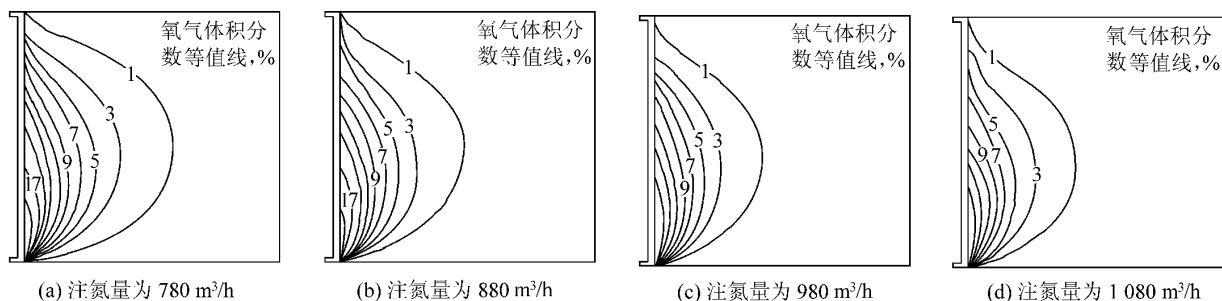


图3 不同注氮量下的氧浓度等值线

Fig. 3 Contours of oxygen concentration with different nitrogen injection quantity

4.2 数值模拟结果分析

由图 3 可以看出, 增大注氮量后, 采空区内的氧

气浓度分布规律发生了改变, 氧气浓度的分布范围明显变窄, 浓度降低且向工作面方向移动。

由图4可知,得到不同注氮量条件下采空区氧化自燃带见表1。由表1可以看出,氧化自燃带的起始位置沿着工作面方向移动,但整体受注氮量的影响不大,这是由于采空区注氮对上限漏风风速没有较大影响;而氧化自燃带的

终止位置受注氮影响较大,明显向工作面方向移动,导致氧化自燃带的宽度逐渐减小,当注氮量为 $1\ 080\ \text{m}^3/\text{h}$ 时,氧化自燃带已经降到了 $32\ \text{m}$,说明注氮量越多,惰化效果越好,氧化自燃带宽度越小。

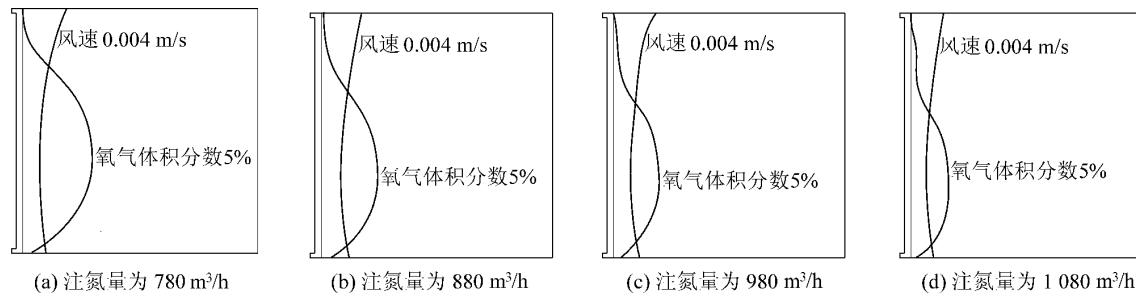


图4 不同注氮量下的二场叠加图

Fig. 4 Contours of double fields synthesis with different nitrogen injection quantity

表1 不同注氮量条件下采空区氧化自燃带范围

Table 1 Distribution of oxidized spontaneous combustion zone in goaf with different nitrogen injection quantity

注氮量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	氧化自燃带范围/m	氧化自燃带宽度/m
780	31101	70
880	2978	49
980	2873	45
1 080	2860	32

4.3 最佳注氮量的确定

为了确定最佳注氮量,拟合注氮量与氧化自燃带宽度的关系曲线,如图5所示。

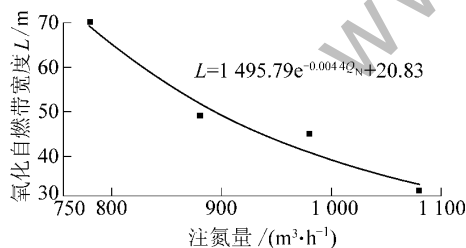


图5 注氮量与氧化自燃带宽度拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve between nitrogen injection quantity and width of oxidized spontaneous combustion zone

由图5可确定注氮量与氧化自燃带宽度为指数关系。工作面推进速度为 v ,煤层的最短自然发火期为 τ 则:

$$v\tau \geq L = 1\ 495.79\exp(-0.0044Q_N) + 20.83 \quad (8)$$

由柳塔煤矿12201工作面开采实际情况,工作面推进速度 $2.5\ \text{m/d}$,为安全起见,取工作面推进速

度 $v = 2.2\ \text{m/d}$,煤层的最短自然发火期 $\tau = 25\ \text{d}$ 。由式(8)计算得最佳注氮量为 $860\ \text{m}^3/\text{h}$,此时的氧化自燃带宽度为 $55\ \text{m}$ 。

5 结 论

1) 通过 COMSOL Multiphysics 研究了注氮条件下柳塔煤矿12201综放采空区氧化自燃带的变化规律,得出增大注氮量后,采空区内的氧气浓度分布规律发生了改变,氧气浓度的分布范围明显变窄,浓度降低且向工作面方向移动。

2) 采空区注氮后氧化自燃带的起始位置沿着工作面方向移动,但整体受注氮量的影响不大,氧化自燃带的终止位置受注氮影响较大,明显向工作面方向移动,导致氧化自燃带的宽度逐渐减小。

3) 注氮量越大,惰化效果越好,氧化自燃带宽度越小;注氮量与氧化自燃带宽度呈指数关系,通过计算得出:可保证安全生产的最佳注氮量应为 $860\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,刘洪,吴刚.煤炭对国民经济发展贡献的定量分析[J].中国能源,2012,34(4):5-9.
Xie Heping, Liu Hong, Wu Gang. Quantitative analysis of coal contribution to national economic development [J]. Energy of China, 2012, 34(4): 5-9.
- [2] 许满贵,徐精彩,文虎等.煤矿内因火灾防治技术研究现状[J].西安科技学院学报,2001,21(1):4-8.
Xu Mangui, Xu Jingcai, Wen Hu, et al. The internal cause of coal mine fire prevention and control technology research status [J].

- Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2001, 21 (1): 4-8.
- [3] 矿井防灭火综合技术手册编委会. 矿井防灭火综合技术手册 [M]. 长春: 吉林电子出版社, 2010.
- [4] 秦波涛, 张雷林, 王德明, 等. 采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1655-1659.
Qin Botao, Zhang Leilin, Wang Deming, et al. Mechanism and restraining technology on spontaneous combustion of coal detonation gas in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1655-1659.
- [5] 周心权. 煤矿采空区自燃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.
- [6] 郝宇, 刘杰, 王长元, 等. 综放工作面超厚煤层注氮防灭火技术应用[J]. 煤矿安全, 2008, 39(7): 41-44.
Hao Yu, Liu Jie, Wang Changyuan, et al. Application of feeding nitrogen in extra-thick coal seam of comprehensive mechanized and breaking props coal mining [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(7): 41-44.
- [7] 李宗翔. 综放采空区防灭火注氮数值模拟与参数确定[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(5): 53-57.
Li Zongxiang. Numerical simulation of nitrogen injection process for fire prevention and extinguishment in fully mechanized longwall top coal goaf [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(5): 53-57.
- [8] 吴玉国, 鄯剑明, 张东坡, 等. 综放工作面连续注氮下采空区气体分布及“三带”变化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 964-967.
Wu Yuguo, Wu Jianming, Zhang Dongpo, et al. Distribution law of gas and change rule of “three zones” in the goaf of fully mechanized top-coal caving working face under the continuous nitrogen injection [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 964-967.
- [9] 徐会军, 刘江, 徐金梅. 浅埋薄基岩厚煤层综放工作面采空区漏风数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 435-441.
Xu Huijun, Liu Jiang, Xu Jinmei. Numerical simulation research on gob air leakage of shallow-buried thin bedrock thick coal seam with fully-mechanized top coal caving technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 435-441.
- [10] 朱红青, 刘星魁. 采空区非间隔性注氮防火效果及施工参数[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(5): 706-712.
Zhu Hongqing, Liu Xingkuai. Fire prevention effects and construction parameters of continuous nitrogen injection in gob area [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(5): 706-712.
- [11] 高科, 刘剑, 刘玉蛟. 急倾斜综放面采空区注氮方案研究及数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 49-53.
Gao Ke, Liu Jian, Liu Yujiao. Innovated nitrogen-injection project and numerical simulation in gob at steep inclined fully-mechanized mining face [J]. Journal of Safety and Engineering, 2014, 14(5): 49-53.
- [12] 姚元领, 胡泊, 李洁莹, 等. 综放面采空区注氮前后“三带”分布数值模拟[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 13-16.
Yao Yuanling, Hu Po, Li Jieying, et al. Numerical simulation on distribution of “three zones” in gob of full-mechanized caving face before and after being injected nitrogen [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(1): 13-16.
- [13] 洪林, 冯寸寸, 周西华, 等. 红庙矿综放面防灭火合理注氮参数[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 729-732.
Hong Lin, Feng Cuncun, Zhou Xihua, et al. Rational parameters of nitrogen injection for fire prevention and extinguishment in goaf area of fully mechanized caving face in Hongmiao Mine [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2012, 31(5): 729-732.
- [14] 张人伟, 贺小刚, 孙勇, 等. 朱仙庄矿综放面采空区“三带”范围的确定及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 332-336.
Zhang Renwei, He Xiaogang, Sun Yong, et al. Determination of three-zone in goaf fully-mechanized face in Zhuxianzhuang Coal Mine and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(3): 332-336.
- [15] 杨胜强, 徐全, 黄金, 等. 采空区自燃“三带”微循环及漏风流场数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 769-788.
Yang Shengqiang, Xu Quan, Huang Jin, et al. The “Three Zone” microcirculation theory of goaf spontaneous combustion and a numerical simulation [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 38(6): 769-788.
- [16] 李宗翔, 海国治, 秦书玉. 采空区风流移动规律的数值模拟与可视化显示[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 76-80.
Li Zongxiang, Hai Guozhi, Qin Shuyu. Numerical simulation and visual display of air flow pattern in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 76-80.
- [17] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [18] Szlczak J. The determination of a coefficient of longwall gob permeability [J]. Archives of Mining Sciences, 2001, 46(4): 451-468.
- [19] 杨胜强, 张人伟, 邱志乾, 等. 综采面采空区自燃三带的分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 93-96.
Yang Shengqiang, Zhang Renwei, Di Zhiqian, et al. Research on the distribution of “three zone” in mining goaf spontaneous combustion [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(1): 93-96.