

# 高瓦斯综放工作面采空区瓦斯涌出规律

张天军<sup>1</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 李树刚<sup>2</sup>, 宋爽<sup>2</sup>, 汤峰<sup>3</sup>

1. 西安科技大学理学院, 西安 710054
2. 西安科技大学能源学院, 西安 710054
3. 中国人民解放军66427部队, 北京 100042

**摘要** 针对山西某矿煤层瓦斯赋存特点及高瓦斯综放工作面开采条件, 采用数值模拟和现场实测相结合的方法, 研究了U+I型通风采空区瓦斯流场以及瓦斯运移规律, 分析了瓦斯涌出与产煤量和周期来压的关系。数值模拟结果表明; U+I型通风可以有效降低回风巷和上隅角瓦斯体积分数; 随着工作面推进, 采空区后方形成的瓦斯富集带会不断扩大, 回风侧后方瓦斯体积分数升高。现场实测结果表明: 进风侧至工作面中部瓦斯体积分数变化幅度较小, 靠近回风侧50 m范围内瓦斯体积分数增加较快; 绝对瓦斯涌出量与产煤量成近似线性关系, 顶板初次来压后瓦斯涌出呈现周期性变化, 经对比研究, 数值模拟得到的瓦斯体积分数分布规律与现场实测结果相吻合; 在采空区后方回风侧附近采用埋管抽放高浓度瓦斯是可行的, 可以大量减少瓦斯涌出。

**关键词** 综放工作面; 瓦斯涌出; 数值模拟

中图分类号 TD325

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.03.009

## Gas emission law in high gas goaf of fully mechanized caving face

ZHANG Tianjun<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, LI Shugang<sup>2</sup>, SONG Shuang<sup>2</sup>, TANG Feng<sup>3</sup>

1. School of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
3. No. 66427 Troop, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100042, China

**Abstract** In view of the characteristics of the coal seam gas storage and the conditions of the fully mechanized caving face, the numerical simulation and field measurement methods are used to study the distribution of the gas concentration in space under the condition of the U+I ventilation mode, and the relationship between the gas emission, the coal production and the periodic weighting is analyzed. The results of the numerical simulation show that the U+I ventilation mode can effectively reduce the gas concentration in the upper corner and the return airway. With the working face advancing, the gas enrichment zone is constantly expanded in the goaf back. And the gas concentration rises in the back of the return air side. Therefore, it is suitable to bury the pipe in the return air side of the goaf back. The results of field measurements show that the gas concentration distributes gently from the inlet side to the middle of mining faces, increasing faster in the range of 50 meters near the return air side. The absolute outflows of the gas and coal productions are in an approximate linear relationship, and the gas emission sees periodic changes after first weighting. A comparison study shows that the results of the distribution of the gas concentration obtained from the numerical simulation and the field measurements agree very well. At the same time it is feasible to bury the pipe in the return air side of the goaf back to drain the high concentration gas, and it can significantly reduce the gas emission.

**Keywords** fully mechanized coal face; gas emission; fluent numerical simulation

收稿日期: 2014-07-30; 修回日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374168, 51174157, 51174158)

作者简介: 张天军, 教授, 研究方向为力学与安全, 电子信箱: tianjun\_zhang@126.com

引用格式: 张天军, 李伟, 李树刚, 等. 高瓦斯综放工作面采空区瓦斯涌出规律[J]. 科技导报, 2015, 33(3): 58-62.

近年来随着煤层开采深度的增加和开采强度的增大,原来一些低瓦斯矿井也逐渐演变成高瓦斯矿井,煤层瓦斯压力和含量持续上升,矿井瓦斯涌出量愈来愈大,瓦斯频频超限已成为制约矿井安全生产的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。此外,由于综放开采强度大,推进速度快,采空区遗煤多等因素的影响,导致采空区瓦斯大量涌向工作面,引起回风巷、上隅角瓦斯积聚和超限,给综放工作面安全高效回采带来很大的难度<sup>[3,4]</sup>。

针对采空区大量瓦斯涌出导致的回风巷和上隅角超限问题,姜福兴等<sup>[5]</sup>利用微震监测技术得到了综放面采场围岩破裂规律,认为采空区瓦斯是导致工作面超限的主要来源;胡千庭<sup>[6]</sup>对采空区瓦斯流动规律进行了模拟,得出了回风侧瓦斯体积分数最高可达80%;王凯<sup>[7]</sup>、何磊<sup>[8]</sup>分别对比研究了J型、Y型与U型通风方式采空区流场和瓦斯运移特征,认为J型、Y型通风方式都可以有效解决上隅角瓦斯超限。但是由于采空区瓦斯涌出和运移规律复杂,受多因素综合影响,具有不平衡性和多变性,故本文采用Fluent数值模拟和现场实测的方法对高瓦斯低透气性煤层综采放顶煤工作面U+I型通风方式下瓦斯体积分数动态分布规律、采空区流场以及瓦斯涌出与产量和周期来压关系进行研究。

## 1 工作面概况

工作面开采对象为3#煤层,平均厚度6.13 m,平均倾角3.5°,煤层赋存稳定,煤种为贫瘦煤。工作面走向长1460 m,倾斜长256.5 m,设计采高3 m,采用U+I型通风方式,即在回风巷内侧35 m,距离煤层顶板2 m位置布置一条专用瓦斯排放巷。工作面采用走向长壁后退式,沿底开采低位放顶煤,一次采全高的综合机械化开采方法,全部垮落法管理顶板。矿井实行“三八”制生产、“二采一准”,即2班采煤,1班检修。工作面回风巷和上隅角瓦斯时有超限,引起报警,造成工作面停产。

## 2 瓦斯涌出规律数值模拟

### 2.1 流体模型的建立

为了简化分析,假设采空区是由遗煤和落矸组成的多孔介质,并且由于分布的随机性,近似将采空区多孔介质视为各向同性,认为采空区气体不可压缩,瓦斯在采空区内流动满足达西定律,符合湍流稳态模型<sup>[9]</sup>。根据现场实际情况和数值模拟的需要,对工作面和采空区做如下简化。

1) 本模型只考虑工作面、进风巷、回风巷和瓦斯尾巷对采空区的影响,把采空区、进风巷、回风巷、瓦斯尾巷、工作面均视为长方体<sup>[10]</sup>;

2) 根据物理相似模拟实验得到的“三带”高度和水平“三区”的长度,将采空区垂直方向上分为冒落带和裂隙带,冒落带22 m,裂隙带18 m;冒落带水平方向分为自然堆积区、载荷影响区、压实稳定区,长度分别为25、115、230 m;

3) 进风巷、回风巷和瓦斯尾巷长度分别取15、15、23 m,宽度4 m,高度3.5 m,煤层厚度6 m,设定采空区长度370 m,

工作面长度264 m(进、回风巷宽度各4 m),宽度8 m;建立好的流体模型如图1所示。流体模型进风巷入口设为速度入口(velocity inlet),风速设为1.4 m/s,进风口气体O<sub>2</sub>的体积分数 $\varphi(\text{O}_2)$ 为21%, $\varphi(\text{CH}_4)$ 为12%,其余为N<sub>2</sub>。

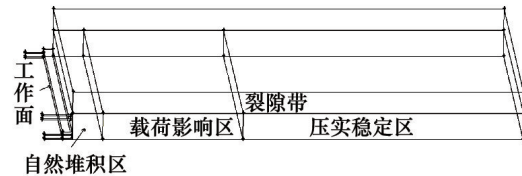
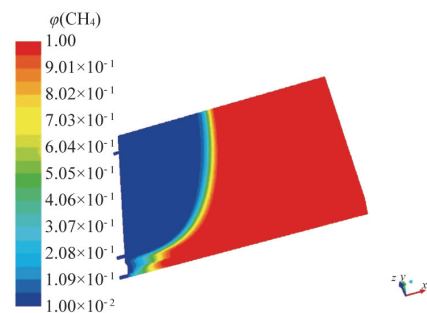


图1 流体模型

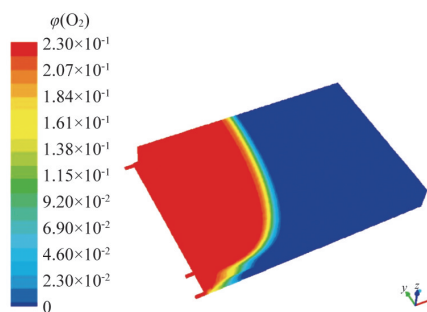
Fig. 1 Fluid model

### 2.2 结果分析

针对U+I型通风采空区瓦斯运移做数值模拟。图2为采空区瓦斯流场和氧气流场分布图,由图可见进风侧瓦斯体积分数较低,氧气体积分数较高,从进风侧至工作面中部瓦斯体积分数缓慢变化,工作面中部到回风侧瓦斯体积分数增加,靠近尾巷10 m左右瓦斯体积分数陡然增高。载荷影响区和压实稳定区内瓦斯体积分数被稀释,使得采空区回风侧瓦斯体积分数明显降低。由图2可以看出采空区进风侧距工作面80~100 m范围内氧气体积分数基本维持在18%,沿回风巷方向逐渐降低;压实稳定区内氧气体积分数已经很低,说明采空区深部上覆垮落岩层已经重新被压实。



(a) 瓦斯流场分布



(b) 氧气流场分布

图2 采空区瓦斯流场及氧气流场分布

Fig. 2 Distribution of gas flow field and distribution of oxygen flow field in goaf

采空区氧体积分数在载荷影响区主要受漏风情况影响,当新鲜风流遇到采空区遗煤时,沿漏风线路,由于煤对氧的消耗、瓦斯涌出对氧的稀释,使得风流中的氧含量逐渐降低。

图3和图4分别是 $z=10\text{ m}$ 瓦斯流场分布图和工作面瓦斯体积分数分布图。由图3可以看出,高浓度瓦斯在采空区深部沿回风巷侧逐渐汇集成瓦斯富集带,体积分数可达60%以上。随着工作面的推进和采空区的增大,瓦斯富集带会越来越大,有利于在采空区回风侧后方埋管抽放高浓度瓦斯。由4图可以看出,回风巷瓦斯体积分数0.7%,说明专用瓦斯排放巷起到了较好的抽放效果,有效地缓解了回风巷上隅角瓦斯超限问题。但是当风流不稳定时尾巷体积分数最高可达6%,仍高于2.5%,短时间内可造成尾巷瓦斯体积分数超限,

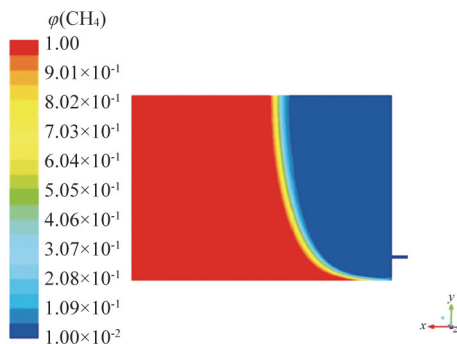


图3  $z=10\text{ m}$  瓦斯流场分布

Fig. 3 Gas flow field at  $z=10$  meters

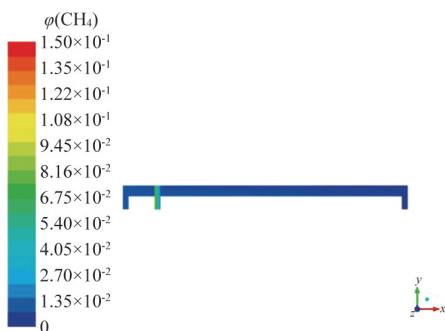


图4 工作面瓦斯体积分数分布

Fig. 4 Distribution of gas concentration in workplace

同时也说明采空区瓦斯涌出量特别大。因此,一方面应该在采空区后方回风侧附近埋管抽放高浓度瓦斯以减少瓦斯涌出,另一方面应该加强对瓦斯尾巷浓度的监测,保证尾巷体积分数低于2.5%。

### 3 工作面瓦斯涌出规律实测分析

#### 3.1 工作面瓦斯体积分数分布测定

为了使测量能够更加准确地反映工作面风流中瓦斯实际分布情况,在研究过程中,沿工作面倾斜方向每隔45 m建立1个测站,共布置6个测站(A、B、C、D、E、F),每个测站从煤壁至采空区(工作面走向方向)均匀布置5个测点,每个测点在竖直方向上均匀布置3个测点,在进、回风巷内距采面15 m左右各布置1个测站,各测点布置见图5。测量时间分别选在采煤机刚割完一刀煤时和检修班进行,此时工作面瓦斯涌出不受割煤影响,瓦斯体积分数分布相对稳定。

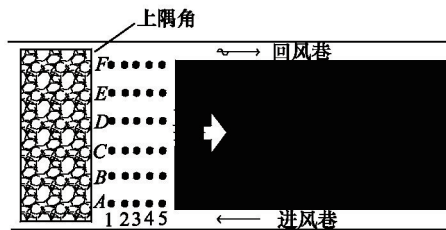


图5 工作面测点布置示意

Fig. 5 Layout of workplace measuring points

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 瓦斯体积分数沿工作面方向分布

图6为工作面生产班和检修班瓦斯体积分数沿工作面方向的分布,由图可以看出,工作面瓦斯体积分数从进风侧至回风侧逐渐增大。进风侧到工作面中部瓦斯体积分数变化幅度较小,而工作面中部到回风侧瓦斯体积分数增加幅度较快,尤其是靠近回风侧50 m范围内瓦斯体积分数度较高。

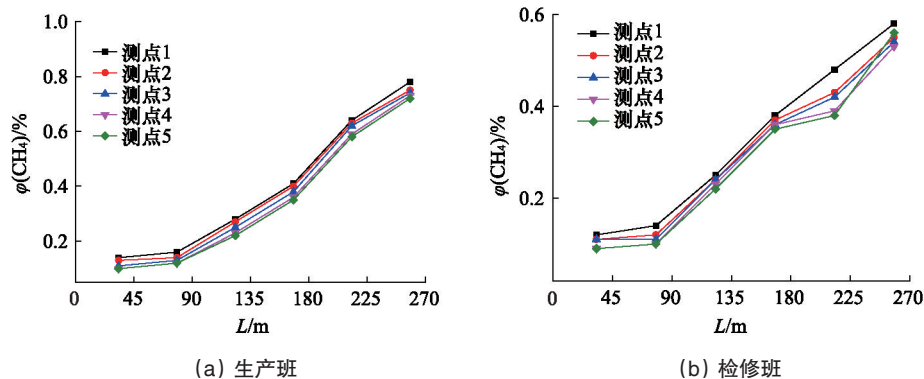


图6 工作面方向瓦斯体积分数分布

Fig. 6 Distribution of gas concentration along workplace direction

造成这种分布规律的原因主要是受采空区漏风影响,进风流流经采场时,有一部分风流在采面前半段漏入采空区,漏入采空区的风流从工作面的后半段又逐渐返回到工作面,同时将采空区的高浓度瓦斯带入工作面,使工作面瓦斯体积分数逐渐增高。

### 3.2.2 工作面瓦斯体积分数垂直煤壁方向的分布

图7为生产班和检修班瓦斯体积分数沿垂直煤壁方向的分布,由图7可以看出工作面前方煤壁至采空区瓦斯体积分数呈现高、低、较高、高的分布趋势,在煤壁和采空区之间有一个瓦斯最低点,最低点的位置随采面位置不同而变化。可

以认为,高、低、高趋势中的瓦斯体积分数最低点即是采空区瓦斯与煤壁涌出的分界点。瓦斯尾巷和上隅角附近是工作面瓦斯体积分数较高的区域,也是采空区瓦斯流入工作面的主要通道,因此防止瓦斯尾巷和上隅角瓦斯超限是工作面瓦斯治理的重点。

由以上分析可知,数值模拟和现场实测结果得出的瓦斯体积分数分布规律相吻合,都呈现出工作面进风侧至回风侧瓦斯体积分数升高,尤其在靠近回风侧50 m范围内瓦斯体积分数增加较快。通过在煤层顶板布置专用瓦斯排放巷可以有效降低上隅角瓦斯体积分数。

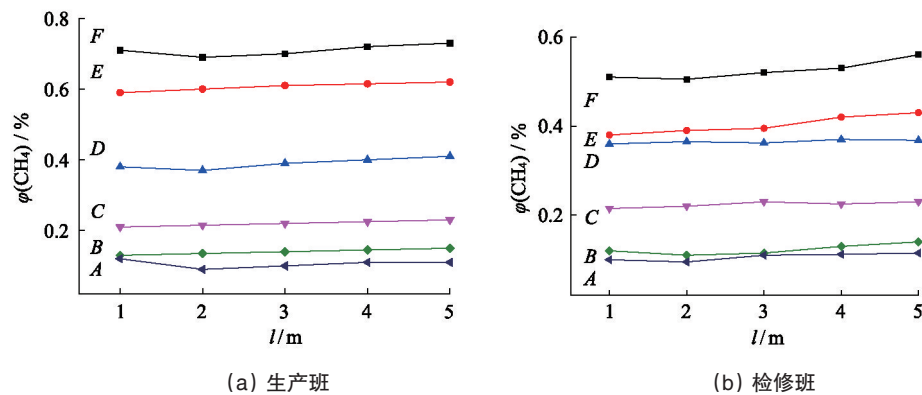


图7 瓦斯浓度沿垂直煤壁方向分布

Fig. 7 Distribution of gas concentration along the direction perpendicular to the coal wall

### 3.2.3 瓦斯涌出与产量的关系

图8~图10是根据对工作面瓦斯涌出量 $Q$ 与产煤量 $q$ 对应关系数据统计拟合出绝对瓦斯涌出量 $Q_1$ 、相对瓦斯涌出量 $Q_2$ 、回风巷排瓦斯量 $Q_3$ 与产煤量 $q$ 的关系曲线。

由图8可以发现绝对瓦斯涌出量随日产量增加而增加,近似成线性关系,由此说明本煤层工作面瓦斯涌出量占总涌出量的绝大部分,而邻近层瓦斯涌出量相对较为稳定。由图9可见工作面相对瓦斯涌出量随着产量的增加而减小,产量较小时,工作面相对瓦斯涌出量随产量变化波动剧烈。随着产量的增大,相对瓦斯涌出量较为收敛。图10反映了回风巷瓦斯涌出量随日产量增加而逐渐增加,瓦斯抽采量 $Q_4$ 基本保持不变。

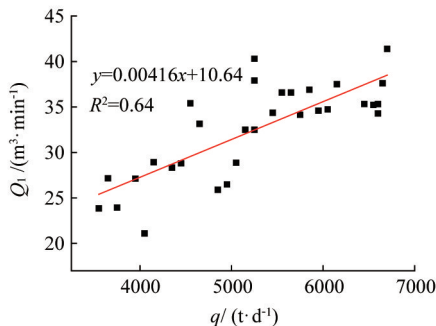


图8 绝对瓦斯涌出量与产量关系

Fig. 8 Relationship between absolute gas emission and coal production

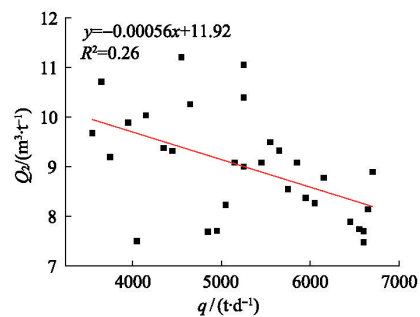


图9 相对瓦斯涌出量与产量关系

Fig. 9 Relationship between relative gas emission and coal production

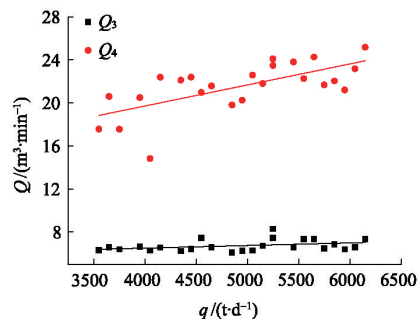


图10 回风巷瓦斯涌出量与产量关系

Fig. 10 Relationship between gas emission of workface and coal production

### 3.2.4 瓦斯涌出与来压的关系

根据长时间对矿压和瓦斯涌出对应关系数据统计可以发现,初次来压时瓦斯体积分数骤增,比来压之前体积分数平均增加了0.91倍。经过初次来压后,瓦斯涌出呈现周期性变化规律。周期来压前,综放面瓦斯体积分数平均0.28%~0.43%,来压时瓦斯体积分数提高到0.46%~0.74%,来压时瓦斯体积分数比原来增加了0.64~0.72倍。瓦斯涌出量发生变化的原因是采掘活动引起煤岩体内应力发生变化,在工作面前方形成超前应力区,超前应力区内煤岩体空隙、裂隙受挤压而闭合,导致煤层透气系数减小,瓦斯涌出量减小。周期来压后老顶岩梁破断导致支承压向煤体深部转移,煤体中裂隙张开、扩大,并产生新的裂隙,煤层透气性系数增大,瓦斯涌出量增加。

## 4 结论

针对该矿综放工作面瓦斯体积分数分布规律和涌出规律的研究,可以得出以下结论:

1) U+I型通风方式可以有效缓解回风巷和上隅角瓦斯体积分数超限问题,但偶尔会造成尾巷瓦斯体积分数超限,应该加强对尾巷瓦斯体积分数监测以及日常管理,确保尾巷体积分数保持在正常体积分数范围。

2) 采空区后方形成的瓦斯聚集带会随着工作面推进不断扩大,可以在采空区回风侧后方进行埋管抽放高浓度瓦斯以减小瓦斯涌出。

3) 相对瓦斯涌出量随产煤量增加而趋于线性递减,绝对瓦斯涌出量和产煤量线性增加,说明本煤层瓦斯涌出占总涌出的大部分,因此可以加大本煤层瓦斯抽采。

### 参考文献(References)

[1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.  
Yu Qixiang. Mine gas prevention and control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1992.

[2] 李树刚. 综放开采围岩活动及瓦斯运移[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.  
Li Shugang. Movement of the surrounding rock and gas delivery in fully-mechanized top coal caving[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.

[3] 李树刚, 肖鹏, 林海飞. 乌兰煤矿 5343 综放工作面瓦斯涌出规律分析[J]. 煤矿安全, 2012, 42(1): 22-24.  
Li Shugang, Xiao Peng, Lin Haifei. Analysis on gas emission law in fully mechanized caving face 5343 of wulan coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 42(1): 22-24.

[4] 李树刚, 林海飞, 成连华. 综放开采支承压向与卸压瓦斯运移关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3288-3291.  
Li Shugang, Lin Haifei, Cheng Lianhua. Relation between abutment pressure and relieved gas delivery for fully-mechanized top coal caving [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3288-3291.

[5] 秦跃平, 朱建芳, 陈永权, 等. 综放开采采空区瓦斯运移规律的模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(11): 11-14.  
Qin Yueping, Zhu Jianfang, Chen Yongquan, et al. Simulation test and research on gas migration law in goaf of fully mechanized coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(11): 11-14.

[6] 姜福兴, 孔令海, 刘春刚. 特厚煤层综放采场瓦斯运移规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 407-411.  
Jiang Fuxing, Kong Linghai, Liu Chungang. Gas emission laws of fully-mechanized sublevel caving mining in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 407-411.

[7] 胡千庭, 梁运培, 刘见中. 采空区瓦斯流动规律的 CFD 模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 719-723.  
Hu Qianting, Liang Yunpei, Liu Jianzhong. CFD simulation of goaf gas flow patterns[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 719-723.

[8] 王凯, 吴伟阳. J 型通风综放采空区流场与瓦斯运移数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(7): 277-282.  
Wang Kai, Wu Weiyang. Numerical simulation of flow field and gas transportation in goaf of fully mechanized sub-level caving face with J-shape ventilation system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(7): 277-282.

[9] 何磊, 杨胜强, 暴庆丰, 等. Y 型通风方式下采场瓦斯运移规律的数值模拟研究及瓦斯治理分析[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(2): 33-36.  
He Lei, Yang Shengqiang, Bao Qingfeng, et al. Research on numerical simulation of stope gas migration law under the Y-type ventilation mode and analysis of gas control[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(2): 33-36.

[10] 范红伟. 综放工作面采空区瓦斯运移规律数值模拟研究及瓦斯治理分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.  
Fan Hongwei. The research on numerical simulation of the gas migration rules in the caving goaf[J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.

(责任编辑 赵业玲)

### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。