

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0864-07

# 引流器与尾巷治理上隅角瓦斯的 数值模拟及应用实践

王凯<sup>1,2</sup>, 蒋曙光<sup>1</sup>, 马小平<sup>2</sup>, 吴征艳<sup>1</sup>, 邵昊<sup>1</sup>, 张卫清<sup>1</sup>, 裴晓东<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 为了解决S5-2工作面上隅角瓦斯波动超限的问题, 分析了回采工艺、周期来压等因素对其产生的影响, 提出了优化尾巷配置及采用引流器综合改变上隅角瓦斯涡流场, 高效控制瓦斯波动超限的方法。运用Fluent数值模拟研究了采用引流器不同引流量改变上隅角风流-瓦斯涡流场的效果, 局部风流的风速、风压分布特征; 对不同尾巷的步距及配风量的风排瓦斯效果进行了数值模拟, 分析了配置尾巷的工作面及采空区风流-瓦斯流场中, 不同区域风速、风压及瓦斯含量的分布特征。结合模拟结果, 确定了S5-2工作面尾巷最佳配风量与步距, 引流器的最佳配置方法。跟踪监测结果表明控制上隅角瓦斯波动超限效果显著。

**关键词** 上隅角; 引流器; 风流-瓦斯; 尾巷; 步距

**中图分类号** TD 712 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.026

## Numerical simulation and application of controlling gas accumulation in upper corner of drainage instrument and tail roadway

WANG Kai<sup>1,2</sup>, JIANG Shuguang<sup>1</sup>, MA Xiaoping<sup>2</sup>, WU Zhengyan<sup>1</sup>,  
SHAO Hao<sup>1</sup>, ZHANG Weiqing<sup>1</sup>, PEI Xiaodong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Safety Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** In order to solve the problem of fluctuation overrun of gas in upper corner of S5-2 working face, the paper has analyzed some elements like coal mining technology and periodical weighting to expound the cause of the upper corner gas fluctuation overrun. The method that the drainage device is used to change the corner eddy current field has been provided to optimize the tail-road configuration and to change the upper-corner gas vortex field with drainage instrument and to control the fluctuation overrun of gas accumulation efficiently. The Fluent numerical simulation, establishing the upper corner gas air-eddy current field model, has been used to simulate the effect of using the different drainage

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51404263); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20130203); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放课题项目(WS2013A05); 国家自然科学基金煤炭联合基金项目(51134023); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王凯(1985—), 男, 山东省聊城市人, 讲师, 博士(后), 从事矿井通风与安全、矿井瓦斯综合治理技术方面的研究。

E-mail: wangkai850321@163.com

Tel: 15862185614

volume of drainage device to change the upper corner air-gas vortex, and the distribution characteristics of wind speed, wind pressure of local wind. And the ventilation effects for different tail step distance and air distribution numerically have been simulated to analyze the distribution characteristics of wind speed, wind pressure and gas concentration in different places in the working face of configuration and the goaf air flow-gas flow field mode. Combined with the simulating results, the best air distribution amount and step distance of tail roadway in S5-2 working surface and the best method of drainage instrument configuration have been determined. The monitoring results have shown that it has obvious effect on the gas fluctuation limit in upper corner.

**Key words** upper corner; drainage; air-gas; tail roadway; step

随着国民经济的快速发展,对煤炭资源的需求越来越大。许多大型煤矿建立了“一矿一线两面”的高效开采模式,加大了单个工作面的产量,瓦斯问题逐渐凸现<sup>[1-3]</sup>。但是,现阶段瓦斯问题还是通过通风、抽放、通风-抽放相结合的方式处理。通过改变传统“U”型通风模式,设计了“Y”型、“U+L”型、“E”型、“高抽巷”等来提高风排瓦斯效率<sup>[4-6]</sup>。针对高瓦斯厚煤层综放工作面透气性系数差的实际,国内采用“一进二回”的巷道布置方式,改变了采空区漏风场与瓦斯体积分数场,一定程度上克服了工作面上隅角瓦斯超限问题<sup>[7-8]</sup>。在抽采方面,提出了采前预抽、随采随抽、采空区抽采的理念,同时研发和更新了抽采设备,如千米大直径定向钻技术与高压水射流切割增透技术等在各大型矿区尝试使用,大大提高了抽采效率<sup>[9-11]</sup>。鉴于矿井瓦斯赋存条件的复杂性,本文以S5-2工作面为例研究采前预抽后改变通风条件,分析尾巷配置对采空区漏风、瓦斯分布、上隅角瓦斯分布的影响,引流器配置破坏上隅角涡流场的效果,确定控制瓦斯超限的最佳通风调配方法。

## 1 S5-2 工作面通风配置及隅角瓦斯波动超限原因分析

S5-2 工作面煤层属于不易自燃,不具备突出危险性,瓦斯涌出显现强度高、数量大、涌出不均衡等特点。工作面采高 3.2 m,放煤高度 3.0 m,倾向长度 180 m,走向长度 1 600 m,工作面日推进 4.8 m。S5-2 工作面采用“U+L”型的通风方式,尾巷步距在 70 m 左右,尾巷配风与回风巷各占总进风量的一半;为了更好地控制隅角瓦斯在回风巷布置风筒,用局部通风机对上隅角涡流“吹散”。2011 年底,《山西省煤炭管理条例》明确规定工作面上隅角禁止使用局部通风机“吹散”,S5-2 工作面局部通风机撤掉。当时工作面正在回采初期,随工作

面回采至 200 m 后上隅角出现了波动超限现象,且回采区域无构造及其他地质因素。

S5-2 工作面瓦斯来源包括围岩、暴露煤壁与采空区瓦斯涌出 3 部分。随工作面的推进,前方采空区内的遗留瓦斯形成仓库,顶板来压时造成顶煤大面积垮落,瓦斯瞬间大量涌出引起了 S5-2 工作面及尾巷瓦斯的波动超限。分析发现波动超限都出现在尾巷接替的那次周期来压前后,鉴于上隅角瓦斯“吹散”的良好效果,拟通过研究引流器改变上隅角涡流场的方法;结合优化尾巷的步距与配风量的方法,解决综合控制上隅角瓦斯波动超限的问题。

## 2 尾巷配置及上隅角吹散的数值模拟研究

### 2.1 数值模拟的理论基础及物理模型建立

Fluent 在动流体进行求解时采用质量和动量守恒方程,对包括组分混合的流动,通过解组分守恒方程或者使用 UDF 编辑模型来解混合质量分数的守恒方程及方差,求解湍流时,通过求解附加的输运方程<sup>[12-13]</sup>。文中在对引流器效果进行模拟中,只对风速、风压进行分析,确定破坏隅角涡流场的最佳效果。在模拟尾巷配置效果时,要对采空区瓦斯流场进行分析,需要通过对采空区多孔介质渗流模型进行分析,运用 UDF 编辑解算模型,详细分析瓦斯在尾巷作用下的渗流作用及扩散传播规律<sup>[14]</sup>。Fluent 数值模拟求解的基本方程如表 1 所列。

通过建立数学物理模型,运用 Fluent 软件对 S5-2 综放工作面“U+L”型通风方式下的瓦斯场及引流器改变隅角涡流场的效果进行数值模拟研究。国内外学者对采空区渗透率开展了大量的研究,梁运涛等<sup>[15]</sup>经大量的数值模拟和推导认为采空区距煤壁 10 m 以内为 0.4 左右,随岩石力学的作用规律,采空区深部边界处孔隙率已接近 0.1,总体上采空区倾斜方向和走向上的孔隙率表现为二维分布规律。徐精彩<sup>[16]</sup>通过现场观测和岩石力学的相关数学

假设拟合出了采空区松散煤体孔隙率与深入距离的分布函数为：在对“U+L”通风模型的数值模拟中，采用以下分布函数建立 UDF 模型进行模拟。

表 1 Fluent 求解的基本数学模型

Table 1 Basic mathematical model of poisonous and pernicious gas spreading in roadway

质量守恒方程	$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_f u_i)}{\partial x_i} = s_m$
动量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f u_i) + \frac{\partial (\rho_f u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_i \cdot \partial x_j} u_i + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho_f g + s_i$
组分输运方程	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f Y_n) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f u_i Y_n) = \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{J}_n + R_n + S_n$
能量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f E_f + (1-\varepsilon) \rho_s E_s) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho_f E_f + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_n h_n \bar{J}_n + \Phi + S_f^h$

$$f = \begin{cases} 0.00001y^2 - 0.002y + 0.3, & y \leq 100 \\ 0.2, & y \geq 100 \end{cases}$$

式中：*f* 为空隙率；*y* 为深入采空区的距离。

结合 S5-2 工作面的实况建立了相似物理模型如图 1，在 Gambit 中建立了含引流器模型，其中工作面 100 m×4 m，回风巷 80 m×4.5 m；建立了含尾巷二维、三维模型，其中工作面 200 m×4 m、回风平巷 10 m×4.5 m、尾巷宽 75 m×4.5 m、进风平巷 10 m×4 m，工作面深入采空区 300 m，网格 24 万个，尾巷开口距工作面 75 m，其他开口位置根据步距调整为 50，25 m，含尾巷的三维模型中巷道高度为 3 m，采空区高度为 30 m；二维网格划分为 0.5 m×0.5 m，三维网格划分为 1 m×1 m×1 m。

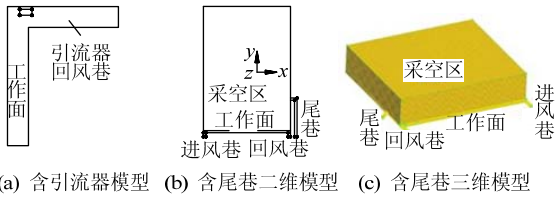


图 1 数值模拟的 3 种物理模型

Fig.1 Three kinds of physical model in numerical simulation

2.2 配置引流器的数值模拟及结果分析

上隅角是“U”型工作面平巷回风中风流方向改变易形成涡流的区域，加之采空区漏风瓦斯的涌出，且瓦斯密度小在该区域上层风流中积聚，导致上隅角顶板瓦斯超限<sup>[17]</sup>。研制气动引流器，其结构示意图如图 2 所示，将其悬挂在上隅角位置附近，通过引导隅角位置气流的内循环来改变涡流场状态。悬挂调节器可以改变引流器的方向和位置，引流器风量为 60~100 m<sup>3</sup>/min，随高压气体(0.4~0.8 MPa)流量的增加而变大，现阶段现场使用中通过人工操作调节阀来改变引流器的导风量，将研制瓦斯

-流量自动监测调控的联动系统。按照 S5-2 工作面的布置方式对引流器的效果进行数值模拟，为形象表达瓦斯积聚状况和比较引流器不同流量的作用效果，分别进行模拟。

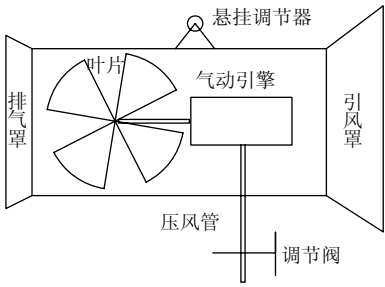


图 2 引流器结构示意图

Fig.2 Diagram of the drainage device structure

运用 FLUENT 软件对上隅角附近的风流情况及引流器引流后上隅角瓦斯的情况进行了数值模拟。引流器引流前后上隅角的风流速度分布如图 3，引流器引流前后上隅角的风流风压分布如图 4。

由图 3 可以看出：通过工作面的风流达到上隅角时，速度骤然转向，图中红色区域表明风速明显变大，而蓝色区域表明风速很小，故在上隅角留下一个涡流区域，同时工作面的瓦斯和采空区溢出的瓦斯进入回风流的过程中在此区域循环，很难随主流风流流到回风巷中，于是就造成上隅角成为瓦斯超限的重点区域。增加了引流器引流后，上隅角涡流区域明显减小，且图 3c 中隅角位置的风速明显比图 3b 中的风速大，说明引流器的引流量加大能够更好地改变涡流场的状态。引流器工作中把一部分风流高速度吸出隅角位置，在引流一段距离后排入回风流，进行内部循环。当涡流区域有积聚的瓦斯时，该风流能对此区域起到明显的扰动作用，把积聚的瓦斯引流，使其随主流风进入到回风巷。

比较图 4 风压分布情况，可以看出上隅角在布置引流器前后风压变化较大，安装引流器后风压明显提高，关键的是风流在上隅角流动通畅，涡流区域发生明显风压变化。在图 4a 中，上隅角风压高的区域明显比图 4b, c 大得多，并且上隅角风压在

无引流器时相当不均匀。而图 4b, c 表明，在引流器作用下上隅角区域风压分布相对均匀，且风压高的区域明显减少。说明风流在引流器作用下，对上隅角涡流区域引流分散产生了巨大影响。

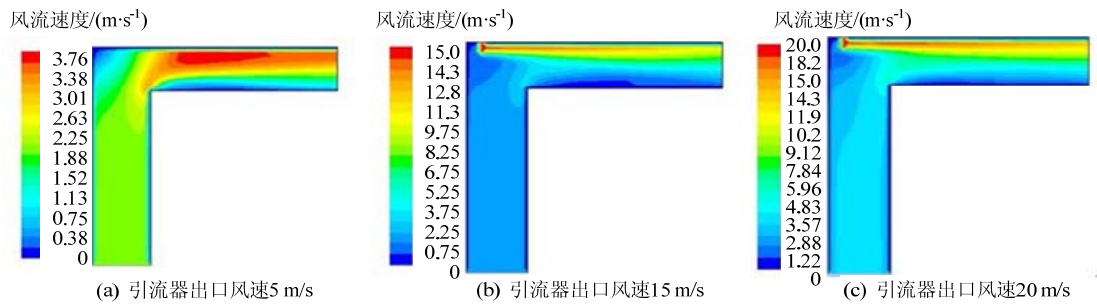


图 3 引流器作用效果的风流速度分布图  
Fig.3 Fluid speed conditions in goaf corner with the drainage effect

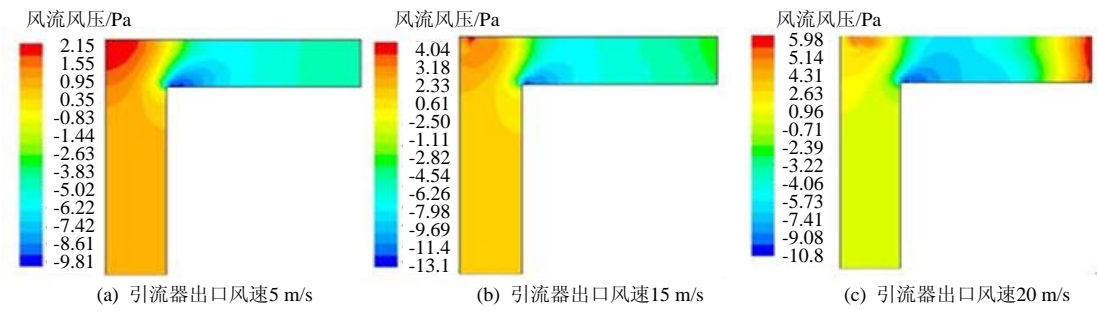


图 4 引流器作用效果的风流风压分布图  
Fig.4 Fluid speed conditions in goaf corner with the drainage effect

2.3 尾巷配置的数值模拟及结果分析

由于“U”型通风方式下，采空区的大量瓦斯极易随工作面漏风在上隅角位置涌出，通过联络巷使瓦斯尾巷与一定深度的采空区导通，在负压作用下上隅角涌出的采空区瓦斯会减少甚至产生倒流，从而最大限度地减少了涡流与涌出量<sup>[18-19]</sup>。采用 S5-2 工作面的布置方式，建立数学物理模型，运用 FLUENT 软件对尾巷的作用效果进行数值模拟，设置采空区多孔介质不同孔隙率的 UDF 模型来建立采空区漏风模型。下面将分别对有无瓦斯尾巷以及联络巷不同步距对上隅角瓦斯运移规律的影响进行模拟，根据 S5-2 工作面周期来压情况，选择尾巷步距为 25, 50, 75 m，尾巷配风占总进风量 1/3, 1/2, 2/3 为基本数学模型进行模拟，模型的基本参数如表 2 所列。

尾巷配风占工作面总风量的 2/3 条件下不同步距的风流速度云图如图 5 所示；步距为 50 m 时不同风量的风流速度云图如图 6 所示；尾巷为 50 m 步距时不同配风量条件下的瓦斯分布云图如图 7。

表 2 设置瓦斯尾巷时物理模型的基本参数表

Table 2 Basic parameter setting of gas tail		
序号	名称	参数
1	采空区	走向 300 m，倾向 180 m，垮落带 20 m，裂隙带 30 m
2	巷道	宽 4.5 m，高 3.2 m
3	通风方式及风量	“U+L”型通风，3 000 m <sup>3</sup> /min
4	瓦斯涌出量	10~16 m <sup>3</sup> /min
5	瓦斯释放口	采空区末端 CH <sub>4</sub> 按照 100% 释放
6	渗透率	0.00001y <sup>2</sup> -0.002y+0.3(y≤100); 0.2(y≥100)

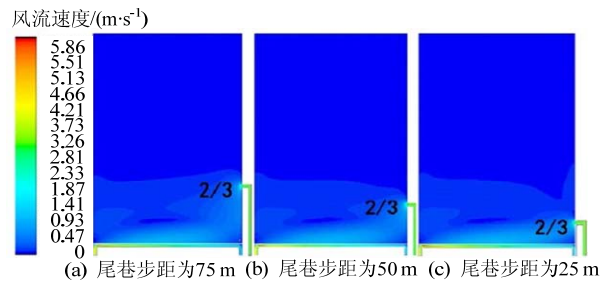


图 5 不同步距的风流速度云图  
Fig.5 Velocity contour of airflow on different step distance

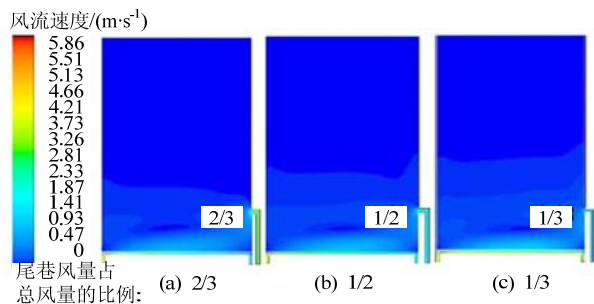


图 6 不同风量的风流速度云图

Fig.6 Velocity contour of airflow on different step distance

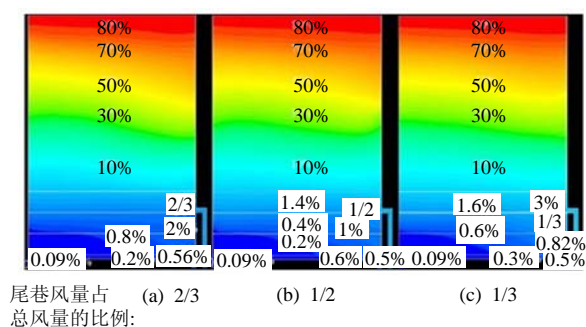


图 7 尾巷不同配风量的瓦斯体积分数分布云图

Fig.7 Gas concentration volume fraction contour of different wind quantity in the tail roadway

为了更加详细准确地通过数值模拟来表征配置尾巷条件下的瓦斯分布规律,对尾巷在 50 m 步距、配风量占总风量 2/3 条件下的瓦斯体积分数分布场进行 3-D 空间模拟,结果如图 8 所示。

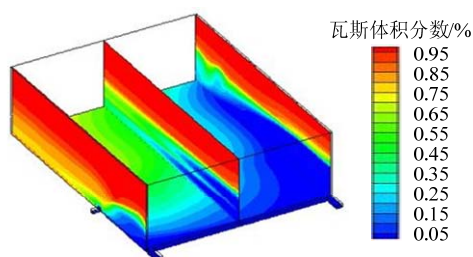


图 8 S5-2 工作面采场瓦斯三维空间分布

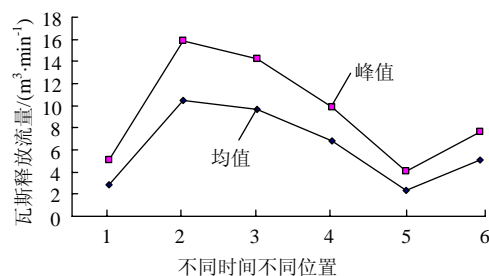
Fig.8 3-D gas distribution in S5-2 face

通过开展大量数值模拟来详细掌握尾巷配置对风排瓦斯效果的影响,限于篇幅论文只列出了能够反映风排瓦斯效果的几幅模拟结果图。由图 5, 6 的风流速度场云图中可看出,随尾巷步距的缩短,采空区漏风区域逐渐地缩小,而且在采空区漏风在隅角位置进入回风的风量也逐步减少,在尾巷步距为 25 m 以内时,采空区漏风几乎都由尾巷排出;同样,随尾巷配风量的增大,采空区漏风区域逐渐地缩小,且在采空区漏风在隅角位置进入回风的风量也逐步减少。由图 7 中不同配风量条件下瓦斯分

布云图可知,随尾巷配风量的增大,采空区瓦斯向工作面上隅角涌出量减小,采空区内临近工作面区域的瓦斯体积分数越低;模拟中还发现随尾巷步距减小,工作面回风和尾巷回风的瓦斯体积分数越低。大量模拟结果显示尾巷步距保持 50 m 左右时能够达到风排瓦斯的效果,再增加步距,风排瓦斯效果就会明显降低。在工作面总配风量为 3 000 m<sup>3</sup>/min 的情况下,瓦斯尾巷风量控制在 2 000 m<sup>3</sup>/min 左右,风排瓦斯效果较为理想,并且整个通风区域内的瓦斯体积分数能控制在 0.8% 以下。同时发现,再增大风量,尾巷排放的绝大多数是采空区瓦斯,对上隅角瓦斯涡流影响不大,但是当尾巷配风量小于 400 m<sup>3</sup>/min 后就没效果。

### 3 引流器与尾巷在上隅角瓦斯控制中的工程应用

为了更加清楚地掌握瓦斯的涌出规律,对采掘活动过程进行监测,在采煤机开始割煤后,整个工作面气流内瓦斯激增,在采煤机完成 1 个工作循环后,30, 60 min 分别测定 1 次各测点的瓦斯体积分数,此时工作面气流稳定、煤壁还持续释放瓦斯气体,所监测的瓦斯流量比较接近真实值。S5-2 综放面回采期间采场瓦斯流量测量结果如图 9。从监测的结果来看,停机后 30 min 时监测瓦斯流量最大,平均达到 10.86 m<sup>3</sup>/min,最多达到 15.73 m<sup>3</sup>/min,比开机前平均增加 11.95 m<sup>3</sup>/min;停机后 60 min 时所测得的数据衰减程度又有所下降,平均衰减量为 1.55 m<sup>3</sup>/min,平均衰减速度为 0.11 m<sup>3</sup>/min,衰减速率已经有所减弱,但距离达到正常态度还需要很长一段时间,只是煤体内瓦斯的释放强度会逐渐减弱,直至煤体瓦斯体积分数和外界达到平衡为止。



1-初始情况下煤壁瓦斯释放量(即采煤机不运行);  
2-采煤机停机30 min后; 3-停机60 min后;  
4-停机30 min后前部输送机位置; 5-停机30 min行人通道处;  
6-停机30 min后后部输送机位置

图 9 S5-2 综放面回采期间采场瓦斯流量测值

Fig.9 The measured data of gas quantity in S5-2 face during the mining period



根据采掘过程中的瓦斯涌出情况, 为了提高工作面风排瓦斯能力, 增加工作面瓦斯排放通道<sup>[20]</sup>。按照综放工作面通过瓦斯尾巷调节上隅角瓦斯分布的数值模拟结果, 将瓦斯尾巷的联络巷步距由原来的 70 m 减小到 50 m 以内, 瓦斯尾巷设置在高位有利于瓦斯排放, 设有联络巷将轨道巷和瓦斯尾巷连接, 中间通过调节风窗对两巷道间的风量进行调节, 尾巷配风量保持在  $1\,500\text{ m}^3/\text{min}$  左右, 回风巷配风  $800\text{ m}^3/\text{min}$  左右, 总配风量减少了  $700\text{ m}^3/\text{min}$ 。同时, 通过加强瓦斯尾巷的维护力度、减小瓦斯尾巷配置步距、增加瓦斯尾巷的通风量等技术措施来改变采空区漏风流场。同时在工作面上隅角加装引流器, 适时改变上隅角的涡流场, 控制上隅角瓦斯超限起到了良好的作用。通过 1 个月的跟踪监测, 尤其在尾巷接替前后(即接近 50 m 步距时)恰逢周期来压的瓦斯体积分数变化, 具体效果如图 10 所示。现场应用结果表明: 通过流场改变, 减小上隅角位置的漏风, 破坏上隅角位置的涡流; 将采空区的大量瓦斯由瓦斯尾巷排出, 从而提高风排瓦斯的能力。

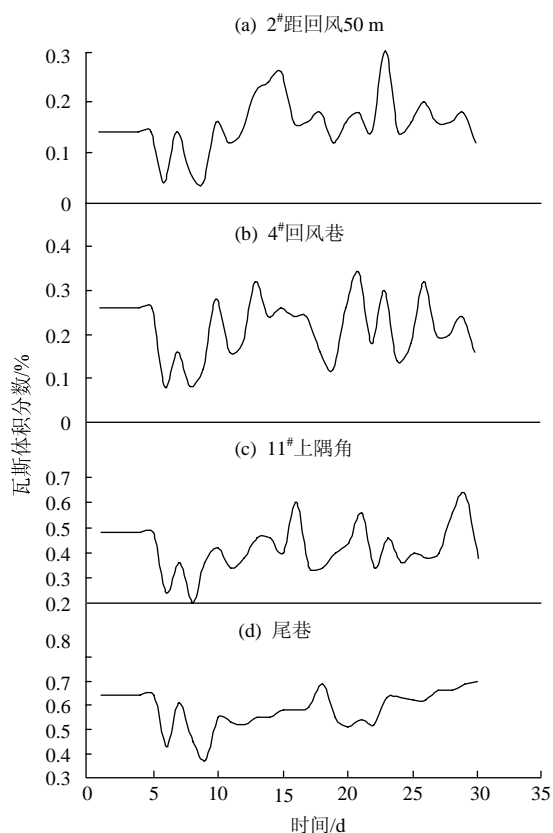


图 10 生产过程中跟踪监测瓦斯体积分数分布曲线

Fig.10 Distribution curve of the gas concentration monitor during production

## 4 结 论

1) 分析了上隅角瓦斯波动超限的原因, 提出了在上隅角加装引流器来破坏涡流场的方法, 模拟结果发现增加了引流器后, 上隅角涡流区域明显减小, 且风速越大, 涡流区域越小, 说明引流器改变上隅角涡流场效果良好。

2) 通过对尾巷的不同步距及配风量进行大量的数值模拟, 结果表明尾巷步距越小, 回风巷和尾巷中的瓦斯体积分数越低, 瓦斯梯度变化越小。由于步距缩小会增加很多工程量, 数值模拟发现 50 m 步距时, 尾巷配风量占总配风量的 2/3 时, 尾巷的风排瓦斯能力能够满足 S5-2 工作面瓦斯涌出的要求, 配合引流器效果最佳。

3) 工程应用中将尾巷步距由原来的 70 m 减小到 50 m, 通过调节风窗对回风巷和尾巷之间的风量进行调节, 尾巷配风量保持在  $1\,500\text{ m}^3/\text{min}$  左右, 回风巷配风  $800\text{ m}^3/\text{min}$  左右, 总配风量减少了  $700\text{ m}^3/\text{min}$ 。建立瓦斯监控与引流器的联动, 通过 3 个月的跟踪监测, 在周期来压期间加强引流器机的风量, 高效控制了瓦斯的波动超限。

## 参考文献:

- [1] 林柏泉, 张建国, 翟成, 等. 近距离保护层开采采场下行通风瓦斯涌出及分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 24-29.  
LIN Baiquan, ZHANG Jianguo, ZHAI Cheng, et al. Gas emission and distribution law in the stope mining short range protection layer using downward ventilation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 24-29.
- [2] 魏春荣, 李艳霞, 孙建华, 等. 灰色-分源预测法对煤矿瓦斯涌出量的应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 628-632.  
WEI Chunrong, LI Yanxia, SUN Jianhua, et al. Gas emission rate prediction in coal mine by grey and separated resources prediction method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 628-632.
- [3] 王海锋, 方亮, 程远平, 等. 基于岩层移动的下邻近层卸压瓦斯抽采及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 128-131.  
WANG Haifeng, FANG Liang, CHENG Yuanping, et al. Pressure-relief gas extraction of lower adjacent coal seam based on strata movement and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 128-131.
- [4] 董钢锋, 胡千庭, 王振, 等. 工作面采动瓦斯流场分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4):

- 581-585.
- DONG Gangfeng, HU Qianting, WANG Zhen, et al. Study on distribution of gas flow fields in working face under the condition of mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 581-585.
- [5] 李英明, 徐继成, 张瀚, 等. 综放开采偏 W 型通风系统及工作面参数优化研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(3): 483-488.
- LI Yingming, XU Jicheng, ZHANG Han, et al. Partial W type ventilation system and its parameters optimization of longwall mining with sublevel caving[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(3): 483-488.
- [6] 卢平, 方良才, 童云飞, 等. 深井煤层群首采层 Y 型通风工作面采空区卸压瓦斯抽采与综合治理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 456-462.
- LU Ping, FANG Liangcai, TONG Yunfei, et al. Relieved gas drainage and comprehensive control in gob of Y-type coal face in the first coal seam mining of deep multi-seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 456-462.
- [7] 王海锋, 程远平, 吴冬梅, 等. 近距离上保护层开采工作面瓦斯涌出及瓦斯抽采参数优化[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 590-594.
- WANG Haifeng, CHENG Yuanping, WU Dongmei, et al. Gas emission and parameter optimization of gas extraction in mining face of short distance protective seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 590-594.
- [8] 袁亮, 郭华, 沈宝堂, 等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 357-365.
- YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of mutiple coal seams with low permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 357-365.
- [9] 卢平, 袁亮, 程桦, 等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 580-585.
- LU Ping, YUAN Liang, CHENG Hua, et al. Theory and experimental studies of enhanced gas drainage in the high gas face of low permeability coal multi-seams [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 580-585.
- [10] 吴建亭. 大直径长距离高位钻孔参数优化与实施[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(8): 63-68.
- WU Jianting. Optimization and implementation on large diameter and long distance high level borehole parameters[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(8): 63-68.
- [11] JING H, PIET S. Local porosity analysis of pore structure in cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35: 233-242.
- [12] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 14-18.
- [13] 金龙哲, 姚伟, 张君. 采空区瓦斯渗流规律的 CFD 模拟[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1476-1480.
- JIN Longzhe, YAO Wei, ZHANG Jun. CFD simulation of gas seepage in goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(9): 1476-1480.
- [14] KARACAN C O. Modeling and prediction of ventilation methane emissions of U S long wall mines using supervised artificial neural networks[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73: 371-387.
- [15] 梁云涛, 张腾飞. 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. Heterogeneous model of porosity in gobs and its airflow field distribution[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(9): 1203-1207.
- [16] 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: 181-184.
- [17] KARACAN C O, ESTERHUIZEN G S, SCHATZEL S J. Reservoir simulation-based modeling for characterizing longwall methane emissions and gob gas venthole production[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 71: 225-245.
- [18] 左前明, 程卫民, 王刚, 等. 低瓦斯矿井高瓦斯区域瓦斯综合治理技术[J]. *工业安全与环保*, 2009, 35(12): 41-43.
- ZUO Qianming, CHENG Weimin, WANG Gang, et al. Gas comprehensive control technology of low gas mine gas area[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2009, 35(12): 41-43.
- [19] 王正帅, 邓喀中. 老采空区残余沉降的离散灰色预测模型[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(7): 1084-1088.
- WANG Zhengshuai, DENG Kazhong. Discrete grey prediction model of old goaf residual subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1084-1088.
- [20] 许满贵, 林海飞, 潘宏宇. 综采采空区瓦斯运移规律及抽采研究[J]. *湖南科技大学学报*, 2010, 25(2): 6-9.
- XU Mangui, LIN Haifei, PAN Hongyu. Fully mechanized goaf gas migration rule and extraction research[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology*, 2010, 25(2): 6-9.