



邓博知,夏晓峰,聂百胜,等. 沿空留巷 Y 型通风瓦斯运移规律及风量调控研究[J]. 矿业安全与环保,2024,51(3): 16-27.

DENG Bozhi, XIA Xiaofeng, NIE Baisheng, et al. Research on gas transportation law and air volume regulation of Y-type ventilation along gob-side entry retaining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3): 16-27.

扫码阅读下载

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20240409

沿空留巷 Y 型通风瓦斯运移规律及风量调控研究

邓博知^{1,2}, 夏晓峰^{1,2}, 聂百胜^{1,2}, 周皓文^{1,2}, 靳崇亮³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044;
3. 山西焦煤汾西矿业东瑞煤业, 山西 临汾 042404)

摘要:沿空留巷 Y 型通风“两进一回”工作面 and 采空区尾巷存在瓦斯涌出问题,当瓦斯超限时,易诱发瓦斯爆炸等灾害。以山西东瑞煤矿沿空留巷工作面为研究对象,利用 Fluent 数值模拟软件,模拟沿空留巷 Y 型通风瓦斯运移基本规律,分析不同通风条件对瓦斯浓度分布的影响。结果表明:增加运输巷道风量使沿空留巷瓦斯浓度降低,增加辅运巷道风量使工作面瓦斯浓度降低;当总风量不变时,2 条进风巷道的风量配比对工作面瓦斯浓度影响较大,对采空区瓦斯浓度影响相对较小。随着采煤工作面推进距离的增加,沿空留巷和工作面的瓦斯治理难度上升,最佳通风配比量由运输巷道向辅运巷道倾斜。在煤矿开采过程中,应不断调节进风巷风量配比来预防工作面和尾巷的瓦斯浓度升高,同时,还应提高采空区密闭程度、加强采空区的漏风管理。

关键词:沿空留巷;瓦斯运移规律;Y 型通风;瓦斯防控;数值模拟;风量配比

中图分类号:TD722;TD712

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)03-0016-12

Research on gas transportation law and air volume regulation of Y-type ventilation along gob-side entry retaining

DENG Bozhi^{1,2}, XIA Xiaofeng^{1,2}, NIE Baisheng^{1,2}, ZHOU Haowen^{1,2}, JIN Chongliang³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. College of Resources and Safety, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Shanxi Coking Coal Fenxi Mining Dongrui Coal Industry, Linfen 042404, China)

Abstract: There is gas outflow from the Y-type ventilation “two-in-one-return” working face and the tailing lane of the mining area, which could result to disasters such as gas explosions induced by gas overloading. This paper takes Shanxi Dongrui coal mine working face of gob-side entry retaining as the research object. Fluent numerical simulation software was applied to simulate the basic law of gas transport of gob-side entry retaining Y-type ventilation. The influence of different ventilation conditions on the distribution of gas concentration was analyzed. The results show that: increasing the air volume of the transportation roadway reduces the gas concentration along the open roadway, and increasing the air volume of the auxiliary transportation roadway reduces the gas concentration in the working face. As the total air volume is constant, changing the air distribution ratio of the two inlet roadways has a greater impact on the gas concentration in the working face. The impact on the air

mining area is relatively small. Increment of the advancement progress of the coal mining face, the difficulty of gas management retaining lanes and the working face rises. The optimal ratio of ventilation moved from the transportation lanes to the auxiliary transportation lanes. In the process of mining, the ratio of air volume in the inlet road to prevent the gas concentration in the working face and the tailing road from increasing should be constantly adjusted. Improvement of the degree of airtightness of the gob area by regulating the air quantity to prevent the gas accumulation.

Keywords: gob-side entry retaining; gas moving law;

收稿日期:2024-05-02;2024-05-24 修订

基金项目:国家重点研发计划子课题(2022YFC3004701)

作者简介:邓博知(1990—),男,重庆人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事矿山通风安全方面的研究工作。
E-mail:253571078@qq.com。

通信作者:聂百胜(1973—),男,山西运城人,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为煤岩瓦斯动力灾害预防理论与技术、气体和粉尘爆炸防控、低浓度瓦斯及低品质燃气利用、智慧安全与智慧应急、城市公共安全等。E-mail:bshnie@cqu.edu.cn。

Y-type ventilation; gas prevention and control; numerical simulation; air volume distribution

瓦斯灾害一直是困扰我国煤炭开采的重大难题,对矿山安全生产造成严重威胁,矿井通风则是综合防治瓦斯灾害的有效方法之一。

近年来,沿空留巷无煤柱开采技术在煤矿中的应用越来越广泛,传统的沿空留巷无煤柱开采一般采用“两进一回”Y型通风方式^[1-2],即在工作面的上、下进风巷引入新鲜空气,同时,利用回风巷来降低回风中瓦斯浓度的通风布局。

国内外学者针对Y型通风条件下采空区和沿空留巷内的瓦斯运移分布规律开展了大量的分析与研究工作。针对不同的巷道风量配比、采煤方法、通风方式和采空区瓦斯抽采方法等,借助Fluent等数值模拟软件近似还原出采空区各物理场的分布并对其规律性进行了研究。张迪等^[3]通过数值模拟,研究了综放工作面通风方式与配风量这2个通风关键因素对采空区遗煤瓦斯涌出的影响规律;李良伟等^[4]利用多孔介质模型对不同配风比下的Y型通风采场和采空区瓦斯分布规律进行了研究;胡千庭等^[5]采用CFD模型模拟了采空区瓦斯流动规律,以及地面钻孔抽放条件下的瓦斯流动规律;朱南南等^[6]构建了自由和多孔介质流动及稀物质传递等物理场的强耦合多物理场数学模型,模拟研究了回采工作面及采空区稳态下的瓦斯运移特征;司俊鸿等^[7]建立了Y型通风采空区渗透率分布模型,采用数值模拟方法研究了漏风封堵位置影响采空区风流运移的变化规律;李宗翔等^[8]建立了综放采空区风流—瓦斯变密度混合气体非线性渗流—扩散控制方程,模拟了三维采空区瓦斯运移及分布状态;KARACAN等^[9]研究了采空区内的渗透率,根据各个区域渗透率分布的不同,通过数值模拟方法得到采空区内瓦斯运移及浓度分布规律;JUGANDA^[10]、张增辉^[11]等利用Fluent数值模拟软件,研究了不同通风方式下的采空区瓦斯分布规律,分析了地面抽采方式的不同对工作面瓦斯分布的影响;王春霞等^[12]通过建立CFD数值物理模型,设置边界条件,模拟工作面运输巷和风巷不同配风比下工作面采空区风流流场,发现随着运输巷风量增大,工作面瓦斯浓度不断降低;赵灿等^[13]研究了不同工作面配风量下上隅角和通风联络巷内的瓦斯浓度变化,并建立了浓度预测公式;田垚等^[14]为研究Y型通风方式下采空区漏风规律,采用气体示踪法将现场与数值模拟结合,得到了Y型通风方式下采空区内漏风风流流线呈扇形分布的规律;GOU^[15]、LI^[16]、ZHANG^[17]等开展了大量的关于Y型通风模式下采空区流场数值模拟研究,模拟结果均验证了Y型通风下的辅助进风巷可以较好地

解决上隅角瓦斯超限的问题;TUTAK^[18]对Y型通风下通风量这一重要参数进行了研究,分析了其对巷道气体组分构成的影响。

综上所述,目前关于Y型通风条件下采空区和沿空留巷内的瓦斯运移分布规律的研究主要针对的是单一开采阶段,而对不同开采时期各种影响因素对瓦斯运移影响的研究较少。基于此,研究在不同推进距离时、不同的通风条件下所对应的沿空留巷及工作面瓦斯分布规律和浓度变化情况显得尤为重要,研究结果可为预测各个阶段巷道瓦斯浓度峰值提供依据,通过提前改变通风参数,实现对瓦斯超限的有效预防及治理。

1 工作面概况

2103工作面位于山西焦煤汾西矿业东瑞煤矿井田东北部2#煤层,该工作面采用“两进一回”式Y型通风系统、沿空留巷布置,辅运巷道作为主进风巷,运输巷道作为副进风巷。矿井绝对瓦斯涌出量为20.76 m³/min,相对瓦斯涌出量为18.31 m³/t,原始瓦斯压力最大为0.36 MPa,属高瓦斯矿井。工作面开切眼长度180 m,走向长度868 m,煤层厚度0.75~1.05 m,平均厚度0.9 m,属稳定可采的薄煤层,煤层倾角为4°~10°,平均为7°,属近水平煤层。根据实测数据分析和分源预测法得出,工作面绝对瓦斯涌出量为4.72 m³/min,采空区绝对瓦斯涌出量为9.98 m³/min。采煤方法为走向长壁后退式开采,采用综合机械化一次采全高。2103辅运巷道实测断面面积为11.14 m²,2103运输巷道实测断面面积为10.44 m²,均采用锚、网、索支护。

2 模型的建立与参数设定

2.1 几何模型及网格划分

随着工作面的推进,采空区上覆岩层应力分布及垮落岩体岩性发生变化,导致采空区在水平方向上演化形成“横三区”,自工作面至开切眼方向,首先是自然堆积区,其次是载荷影响区,进入采空区深部后为压实稳定区,横三区在围岩应力的作用下随着回采工作面的推进不断地交替向前移动^[19]。以东瑞煤矿2103工作面地质条件和现场实际情况为基础,分别建立160、460、760 m 3种推进距离时开采采场的几何模型,运用SpaceClaim软件依据实际尺寸进行1:1等比例建模,将几何模型导入ICEM CFD,采用非结构四面体网格划分,几何模型及网格划分情况如图1所示,网格质量均为最高。为便于在文中表述,定义入口1为上进风口,入口2为下进风口。

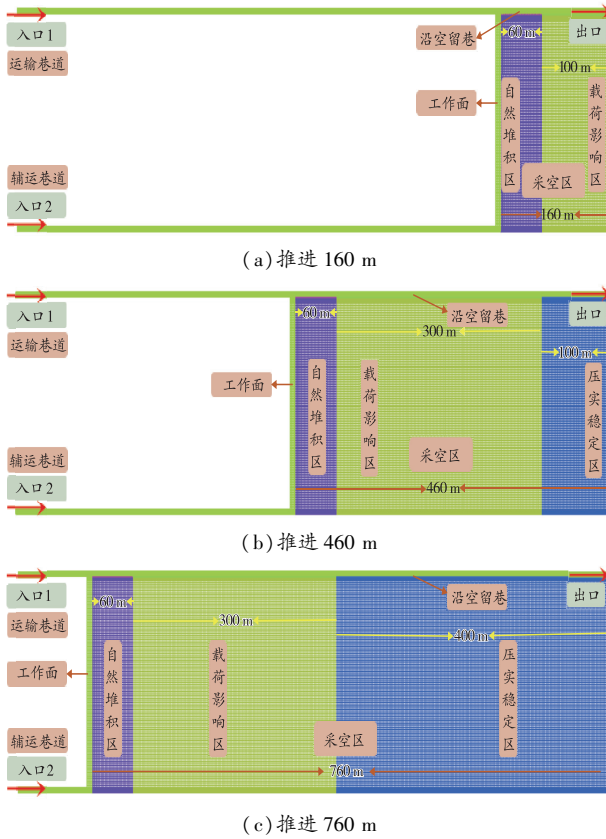


图 1 沿空留巷采空区几何模型及网格划分图

Fig. 1 Geometric modeling and mesh delineation of goaf and the gob-side entry retaining

2.2 数学模型

在煤矿开采过程中,瓦斯的涌出和流动可被视为一个非稳态的流体扩散过程。由于模拟仿真与实际工况存在一定差异,同时考虑到现场的复杂性和不均匀性,为简化模型并聚焦于研究问题的规律,在可接受误差范围内,对模型做出以下假设^[20]:

- 1) 忽略巷道几何尺寸微变及设备等障碍物对风流流动的影响,即假设巷道内阻力不变;
- 2) 忽略瓦斯涌出和空气混合气体在运移过程中巷道内的温度变化,即假设运移过程中温度不变;
- 3) 忽略混合气体流动过程中密度的变化,始终保持为某一固定值,即假设巷道内瓦斯和空气流体为不可压缩流体。

巷道及采空区的流体流动遵循物理守恒定律,气体扩散属于无化学反应的组分运输模型,且流体流动的雷诺数超过 8 000,属于湍流流动^[21-22]。因此除了考虑连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程外,还需要考虑组分运输方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流双方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; x_i 为 i 方向上的坐标, m ; u_i 为流体在 i 方向上的速度, m/s ; S_m 为源项,是从分散的二级相中加入到连续相的质量,也可以是任何自定义源项。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: x_j 为 j 方向上的坐标, m ; u_j 为流体在 j 方向上的速度, m/s ; p 为静压, Pa ; τ_{ij} 为应力张量; g_i 为 i 方向上的重力体积力; F_i 为 i 方向上的外部体积力, F_i 包含其他模型相关源项,如多孔介质和自定义源项; μ 为分子黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; δ_{ij} 为总速度矢量, m/s 。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{K}{c_p} \text{grad } T \right) + S_T \quad (4)$$

式中: T 为温度; K 为流体的传热系数; c_p 为比热容; S_T 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分,有时简称 S_T 为黏性耗散项。

组分运输方程:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (5)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数; J_i 为组分 i 的扩散通量; R_i 为化学反应产物 i 的净产生速率; S_i 为额外产生速率。

标准 $k-\varepsilon$ 湍流双方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

式中: k 为湍动能, J ; ε 为 k 的耗散率, m^2/s^3 ; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G_k 为由平均速度梯度导致的湍动能的产生项; G_b 为由浮力导致的湍动能的产生项; Y_M 为可压缩湍流波动扩张对整体耗散率的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数项; σ_k 、 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数; S_k 、 S_ε 分别为湍动能源项和湍动能耗散率源项。

2.3 边界条件及参数设置

将划分完的网格模型导入 Ansys Fluent,结合现场实际情况及实测数据,模型边界条件设置如下:

- 1) 入口边界: 设定运输巷道为速度入口

1 (velocity-inlet1), 辅运巷道为速度入口 2 (velocity-inlet2), 作为空气入口, 其中氮气质量分数为 75%, 氧气质量分数为 23%; 工作面设置为速度入口 (velocity-inlet), 作为瓦斯涌出源之一^[23-24], 根据现场实际测量和换算结果, 设定回采工作面的瓦斯涌出量为 $1.45 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。湍流指定方法为湍流强度和水力直径 (Intensity and Hydraulic Diameter), 水力直径即巷道断面的直径, 湍流强度 I 计算公式如下^[25]:

$$I = 0.16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (8)$$

式中: I 为湍流强度; Re 为雷诺数。

流体的雷诺数 Re 计算公式如下:

$$Re = \frac{\bar{v}d}{\nu} \quad (9)$$

式中: $\bar{v}$ 为流体平均流速, m/s ; d 为风管直径, m ; ν 为流体运动黏性系数, m^2/s 。

2) 出口边界: 设定沿空留巷尾端为自由流出 (Outflow), 作为风流出口。

3) 其他边界: 采空区与工作面界面, 以及采空区横三区交界面均设为内部边界 (Interior)。沿空留巷与采空区之间的密闭墙设定为质量边界交换面 (Mass flow), 其数值将通过达西定律根据两者的压力差计算得出, 而压力差会随巷道风量的改变而发生变化。其他边界为无滑移壁面, 将 Wall Motion 设定为 Stationary Wall, 选用标准壁面函数 (Standard Wall Functions)。

计算模型的其余参数设置情况见表 1。

表 1 沿空留巷采空区物理模型参数
Table 1 Parameters of the physical modeling of goaf and the gob-side entry retaining

项 目	模型参数设置
求解器	Pressure-Based
时间	Steady
空气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.293
空气动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.85×10^{-5}
甲烷密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.716
甲烷动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.1×10^{-5}
密闭墙渗透率/ m^2	1.1×10^{-10}
密闭墙厚度/ m	1
温度/ K	291
工作面瓦斯涌出量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.45×10^{-4}
采空区瓦斯涌出量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$	2.54×10^{-7}
大气压力/ kPa	100.52

2.4 数值模拟结果验证

Y 型通风方式下新鲜风流由辅运巷道进入工作面, 部分风流稀释回采工作面涌出的瓦斯, 另一部分风流漏入采空区后, 折返携带瓦斯通过密闭墙缝隙和工作面流入沿空留巷排出; 而运输巷道的风流小部分流入工作面上隅角稀释瓦斯, 大部分直接流入尾巷。在东瑞煤矿现场风量配比和漏风量等条件不变的情况下, 工作面正常开采时采空区风速分布如图 2 所示。

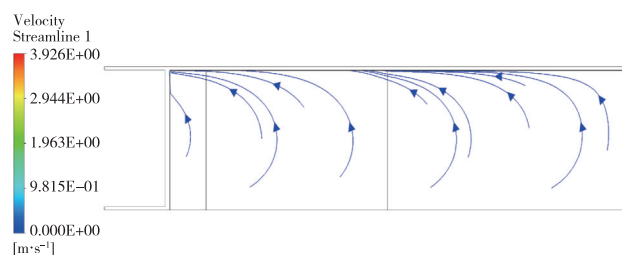


图 2 工作面正常开采时采空区风速分布图

Fig. 2 Distribution map of wind speed in goaf under normal mining of working face

由图 2 可知, 采空区内风流自工作面流入, 从采空区上侧流出, 这是由于采空区上侧由密闭墙密封, 密闭墙内存在裂隙, 风流通过缝隙进入沿空留巷, 最终排出, 这与前人的研究结果一致。

工作面正常开采下风压分布如图 3 所示。

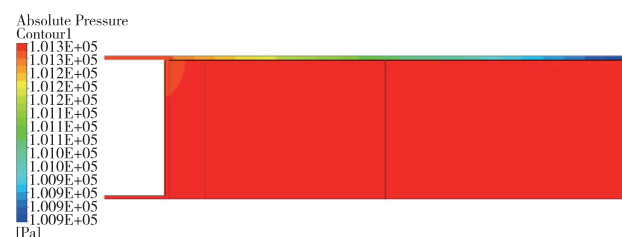


图 3 工作面正常开采下采空区风压分布图

Fig. 3 Distribution map of wind pressure in goaf under normal mining of working face

由图 3 可知, 沿空留巷内压力自工作面至出风口呈层级分布且逐级降低, 采空区内部瓦斯压力较大。

为进一步验证数值模拟结果的准确性, 以工作面为起点, 在沿空留巷内每隔 20 m 布置测点, 采用煤矿便携式瓦斯检测仪进行数据检测。将现场参数代入模型, 在入口风量和瓦斯源涌出量不变的情况下, 模型中影响沿空留巷内瓦斯浓度的唯一因素为采空区密闭墙的裂隙度, 由于墙体裂隙度数值很难实测得到, 可通过不断调节裂隙度模拟数值得到符合现场实际的裂隙度。辅运巷道风量为 $955 \text{ m}^3/\text{min}$ 、运输巷道风量为 $626 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 沿空留巷内瓦斯浓度 (甲烷体积分, 下同) 数值模拟与现场实测数据对比如图 4 所示。

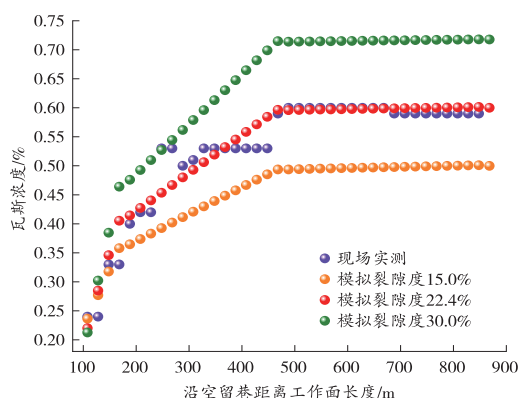


图4 沿空留巷内瓦斯浓度数值模拟与现场实测数据对比图
Fig. 4 Comparison between numerical simulation and on-site measured data of gas concentration along the gob-side entry retaining

由图4可知,当模拟裂隙度为22.4%时,沿空留巷内瓦斯浓度数值模拟结果与实测结果基本一致,说明此裂隙度可用于后续的瓦斯分布规律研究。工作面附近尾巷内瓦斯浓度上升较快,而沿空留巷尾端瓦斯浓度基本不变,这意味着压实稳定区向沿空留巷内泄漏瓦斯量基本为0,这与前人得出的压实稳定区内瓦斯积聚不易进行扩散运动的结论一致。

3 单进风巷风量调节对瓦斯运移的影响规律

通过了解东瑞煤矿2103工作面历史配风记录得知,该矿井曾多次在保持一条进风巷风量不变的情况下,增加另一条进风巷风量。因此,可利用现有的沿空留巷采空区流场数值模型,探究单一进风巷风量调节对瓦斯治理的影响。煤矿现场配风情况:辅运巷道风量 $955\text{ m}^3/\text{min}$,运输巷道风量 $626\text{ m}^3/\text{min}$,固定一侧进风巷风量为 $955\text{ m}^3/\text{min}$,另一侧进风巷风量分别为 $438, 626, 814\text{ m}^3/\text{min}$,分别建立辅运巷道风量恒定和运输巷道风量恒定的采空区模型进行计算,模拟工作面推进至160、460、760 m 3种情况时采空区流场分布。在工作面、沿空留巷分别每隔1.0、6.6 m布置瓦斯浓度测点,其中工作面自下进风口至上进风口倾向方向布置测点180个,沿空留巷自工作面至开切眼走向方向分别布置测点115、70、25个,绘制沿空留巷和工作面瓦斯浓度变化图。为绘图美观,部分测点数值等比跳过,不影响最终结果。

3.1 运输巷道风量调节结果

辅运巷道风量不变,不同推进距离时运输巷道不同进风量的瓦斯浓度分布云图如图5所示。可以看出,3种推进距离下瓦斯浓度随风量变化趋势相同,大量瓦斯积聚于采空区深部,瓦斯浓度随采空区深度的增加而增大,不同风量配比不会影响瓦斯浓度分布的总体趋势。随着运输巷道风量的增加,工

作面附近的采空区瓦斯低浓度区域在沿空留巷入口处逐步扩大,高浓度区域逐步向采空区深部压缩,这说明沿空留巷及附近采空区瓦斯浓度逐步下降,运输巷道风量的增加有效地降低了沿空留巷的瓦斯浓度。

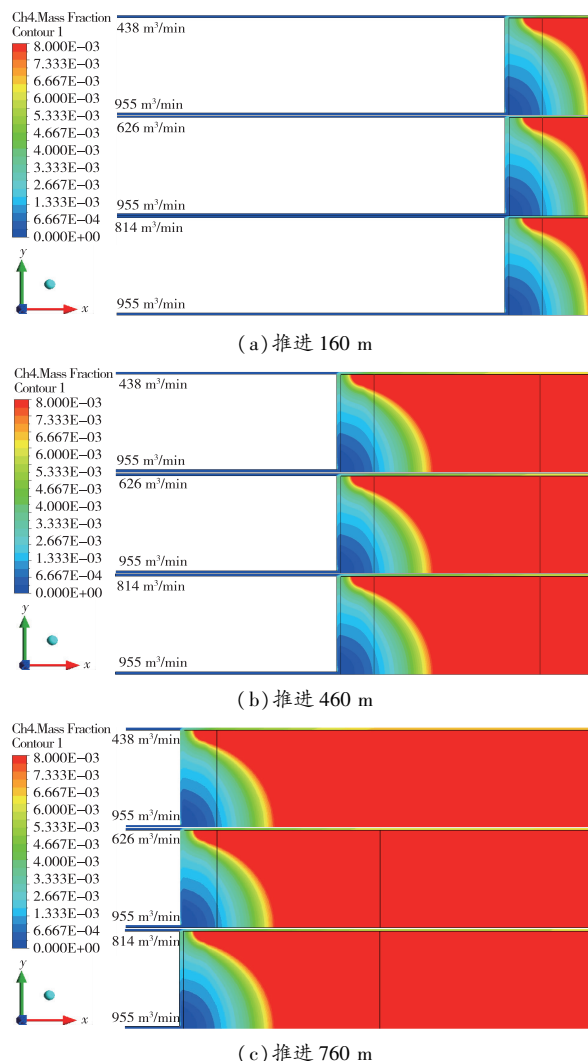
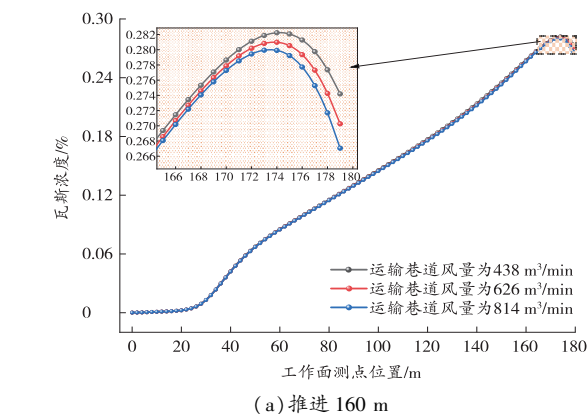
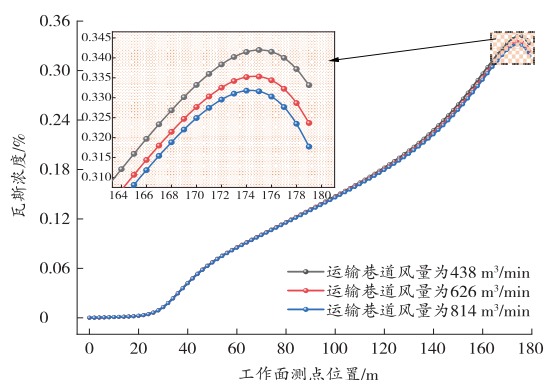


图5 不同推进距离时运输巷道不同进风量的瓦斯浓度分布云图
Fig. 5 Cloud map of gas concentration distribution with different air intake in transport roadway with different advance progress

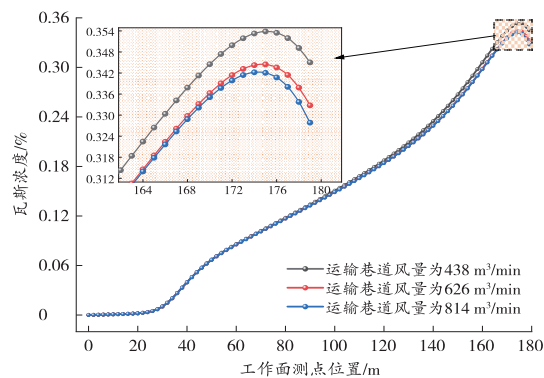
不同推进距离时运输巷道不同进风量的工作面



(a) 推进 160 m



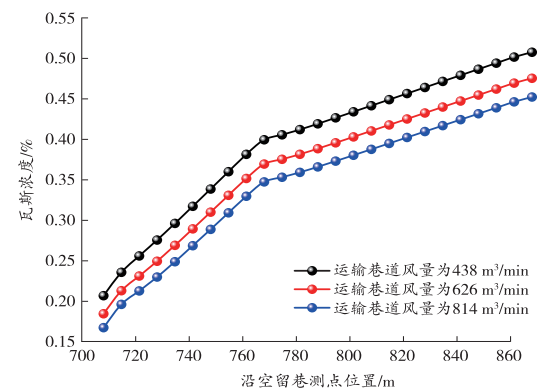
(b) 推进 460 m



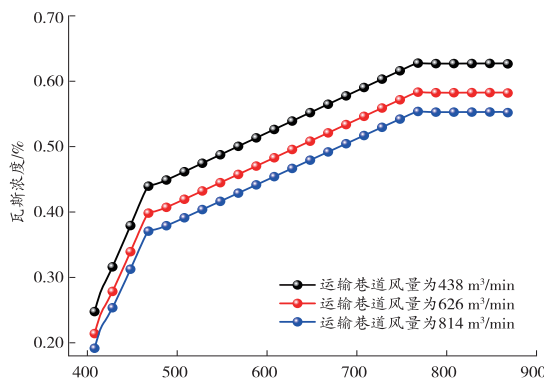
(c) 推进 760 m

图 6 不同推进距离时运输巷道不同进风量的工作面瓦斯浓度变化图

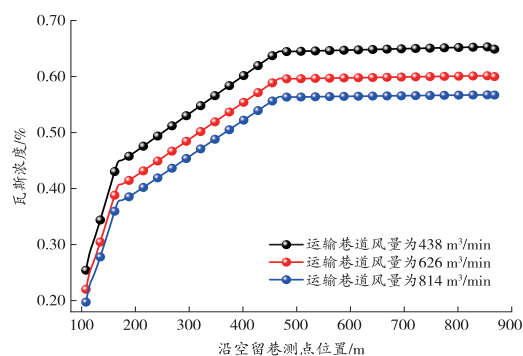
Fig. 6 Gas concentration change diagram of working face with different air intake in transport roadway with different advance progress



(a) 推进 160 m



(b) 推进 460 m



(c) 推进 760 m

图 7 不同推进距离时运输巷道不同进风量的沿空留巷瓦斯浓度变化图

Fig. 7 Gas concentration change diagram of gob-side roadway retained along goaf with different air intake in auxiliary roadway with different advance progress

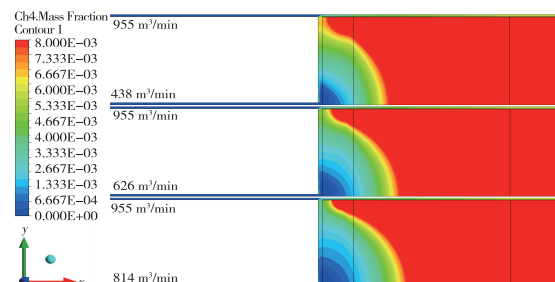
由图 6、图 7 可以看出,工作面瓦斯浓度整体变化趋势基本不受推进距离和风量的影响,均呈现出自工作面始端至末端瓦斯浓度逐渐增大、到达某一峰值后有所减小的趋势,但瓦斯浓度峰值随着采煤工作面推进距离的增加而增大,运输巷道风量增加会降低工作面瓦斯浓度但效果微弱。而运输巷道风量的增加对沿空留巷瓦斯治理效果明显,这是因为总风量增加,对尾巷内瓦斯稀释程度加强,但随着运输巷道风量的增加,沿空留巷内瓦斯浓度虽然出现逐步下降的现象,但是下降幅度逐步减小,这表明并不是盲目地增加或者减少风量就会提高瓦斯治理的效率,应综合考虑通风成本等多方面因素,进行合理的风量分配和调节,研究得出最适合现场的风量配置。

3.2 辅运巷道风量调节结果

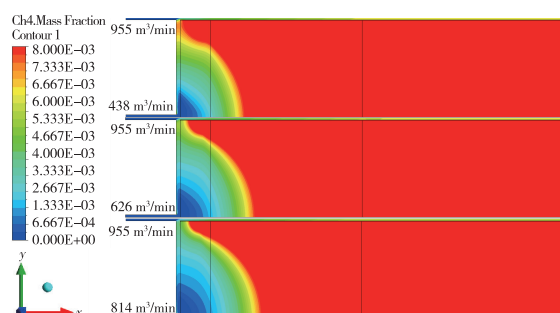
运输巷道风量不变,在工作面不同推进距离时辅运巷道不同进风量的瓦斯分布云图如图 8 所示。



(a) 推进 160 m



(b) 推进 460 m



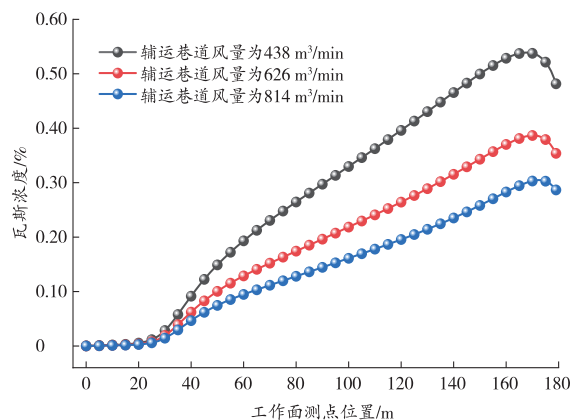
(c) 推进 760 m

图8 不同推进距离时辅运巷道不同进风量的瓦斯分布云图

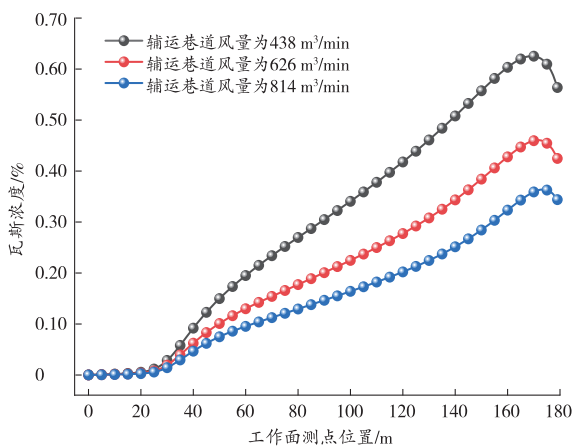
Fig. 8 Cloud map of gas distribution with different air intake in auxiliary roadway with different advance progress

由图8可以看出,3种工作面推进距离下瓦斯浓度随风量变化趋势大致相同,不同风量的配比不会影响瓦斯浓度分布的总体趋势。随着辅运巷道风量的增加,在瓦斯扩散达到稳定时,瓦斯高浓度区域向采空区深部推移,工作面附近的低瓦斯浓度区域明显扩张,采空区瓦斯治理效果得到改善,尾巷入口附近的采空区瓦斯浓度得到稀释。

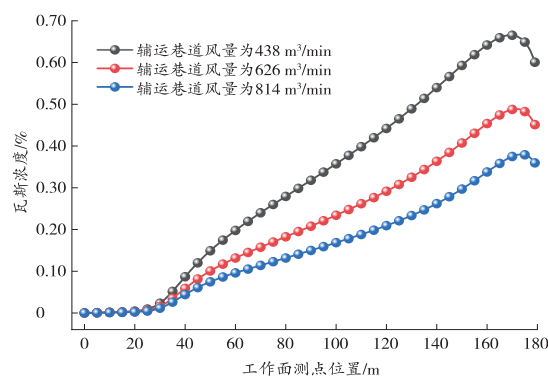
运输巷道风量不变,在不同推进距离时辅运巷道不同进风量的工作面和沿空留巷瓦斯浓度变化如图9、图10所示。



(a) 推进 160 m



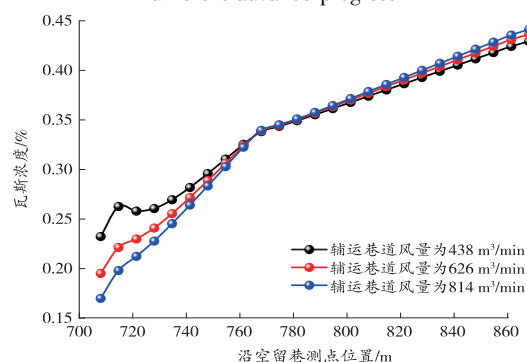
(b) 推进 460 m



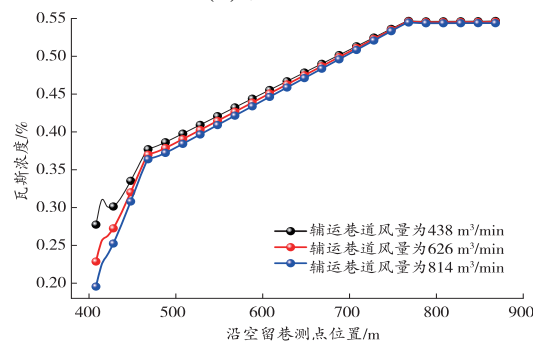
(c) 推进 760 m

图9 不同推进距离时辅运巷道不同进风量的工作面瓦斯浓度变化图

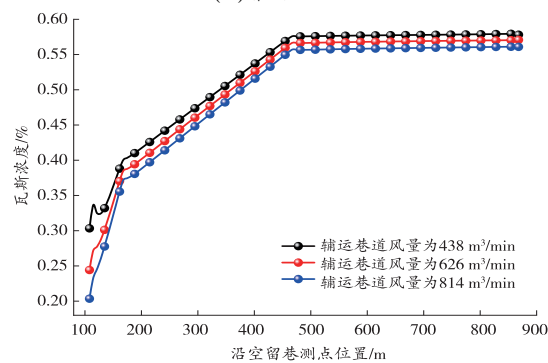
Fig. 9 Gas concentration change diagram of working face with different air intake in auxiliary roadway with different advance progress



(a) 推进 160 m



(b) 推进 460 m



(c) 推进 760 m

图10 不同推进距离时辅运巷道不同进风量的沿空留巷瓦斯浓度变化图

Fig. 10 Gas concentration change diagram of gob-side roadway retained along goaf with different air intake in auxiliary roadway with different advance progress

由图 9、图 10 可知,工作面不同推进距离和辅运巷道风量增加对瓦斯浓度变化总体趋势基本没有影响。推进距离的增加仍然会增高瓦斯治理难度。随着辅运巷道风量的增加,采煤工作面的瓦斯浓度明显减小但幅度逐级变低,这同样说明在改变辅运巷道风量时也应综合考虑通风成本等因素,在瓦斯浓度符合要求的同时,需要进行合理的风量设置。而沿空留巷的瓦斯浓度受辅运巷道风量变化的影响较小,不同风量下整条巷道瓦斯浓度差值较小。辅运巷道风量增加带动总风量增加的同时,也会增加采空区与沿空留巷内的压力差,导致采空区向沿空留巷内扩散的瓦斯量增多,在总风量增加和瓦斯量增多的共同作用下,沿空留巷内瓦斯浓度仅在小幅度范围内变化,因此单一增加辅运巷道风量对治理沿空留巷瓦斯效果不明显。

4 双进风巷风量调配对瓦斯运移的影响规律

通过对改变单一进风巷风量这一瓦斯治理方法的模拟研究,发现单独增加某条巷道的风量难以实现同时降低沿空留巷和工作面的瓦斯浓度。进风巷风量配比调节瓦斯治理方法主要应用于 Y 型通风模式下“两进一回”巷道布置方式的无煤柱开采采煤工作面。技术形式是在不改变总风量的条件下,按不同的比例关系配置不同的运输巷道和辅运巷道供风量,在恒定的比例关系下 2 条进风巷入口进入不同的新鲜风流量对流经工作面 and 沿空留巷等各处的瓦斯稀释效果有好有坏。因此,风量调配方法的核心在于调节 2 条进风巷的风量大小以达到最优风量配比,使沿空留巷与工作面瓦斯超限问题得到协同解决。

东瑞煤矿 2103 工作面现场配风情况:运输巷道风量为 $626 \text{ m}^3/\text{min}$,辅运巷道风量为 $955 \text{ m}^3/\text{min}$,风量配比约为 2 : 3。根据现场风量配比及参考文献,分别取 1 : 3、2 : 3、1 : 1、3 : 2、3 : 1 等 5 种不同进风巷风量比例作为模拟研究风量配比,分别模拟计算工作面推进 160、460、760 m 时 3 种距离的不同风量配比下采空区流场分布。数值模型上进风口(入口 1)为运输巷道,在模拟结果中简称为 YS,下进风口(入口 2)为输运巷道,在模拟结果中简称为 FY;定义工作面入口 1 端为始端,入口 2 端为末端。

4.1 采煤工作面推进初期

工作面推进距离为 160 m 时运输巷道与辅运巷

道不同进风量配比下瓦斯分布云图如图 11 所示。

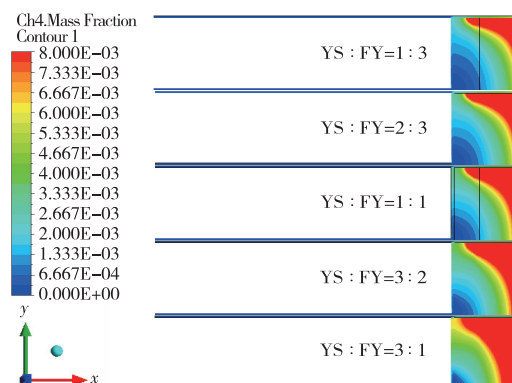


图 11 工作面推进距离为 160 m 时运输巷道与辅运巷道不同进风量配比下瓦斯分布云图

Fig. 11 Cloud map of gas distribution under different air intake ratio between transport roadway and auxiliary transport roadway when the advance progress is 160 m

由图 11 可知,运输巷道与辅运巷道不同风量配比的采空区瓦斯运移趋势基本一致,瓦斯浓度自采空区浅部至深部逐渐增高,而浅部瓦斯浓度自工作面始端至末端逐渐升高。Y 型通风“两进一回”的辅运巷道进风风流流经工作面,稀释工作面及附近采空区内的瓦斯,将大部分瓦斯排入沿空留巷。当运输巷道风量增加,辅运巷道风量减少时,流经工作面的新鲜风流减少,漏入采空区的风量相应较少,风流稀释浅部采空区内瓦斯能力减弱,引发采空区内高瓦斯浓度区域向工作面方向扩展,更多的瓦斯被封存在采空区内。当运输巷道风量减少,辅运巷道风量增加时,更多新鲜风流进入采空区,浅部采空区瓦斯稀释速度加快,高瓦斯浓度区域向采空区深部移动。

不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化如图 12 所示。

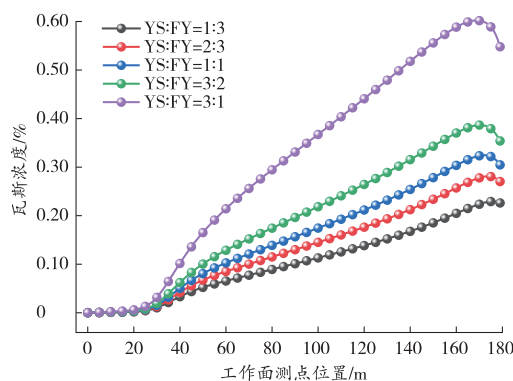


图 12 推进距离为 160 m 时不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化图

Fig. 12 Gas concentration change diagram of working face with different air volume ratio when advancing progress is 160 m

由图 12 可知,5 种配风比例的工作面瓦斯浓度变化趋势均呈现为自工作面始端至末端瓦斯浓度逐渐升高、到达某一峰值后有所减小的趋势。在下进风口处工作面瓦斯浓度较低且上升缓慢,这是因为有足够的新鲜风流稀释工作面涌出的瓦斯。风流向前方工作面流动过程中,向采空区漏风导致其对工作面瓦斯稀释能力减弱,因此工作面瓦斯浓度上升速度加快。风流达到工作面末端处,由于运输巷道新鲜风流的涌入,瓦斯被稀释,瓦斯浓度下降。提高辅运巷道风量配比,能明显改善工作面瓦斯超限状况。

工作面推进距离为 160 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化如图 13 所示。

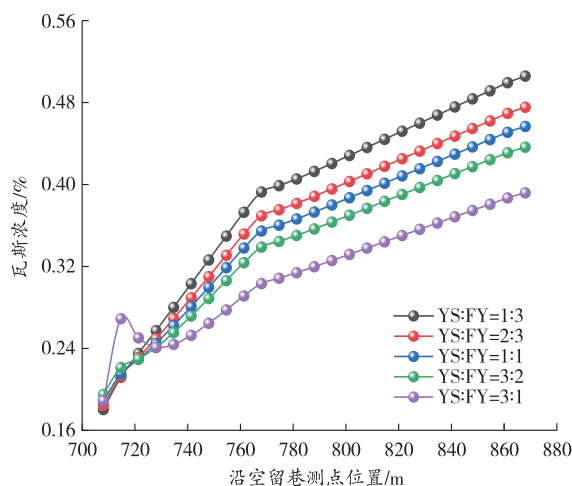


图 13 工作面推进距离为 160 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化图

Fig. 13 Gas concentration change diagram of roadway retained along goaf with different air volume ratio when the advance progress is 160 m

由图 13 可知,各配风比例的变化趋势基本相同,初期瓦斯浓度逐渐升高,随后增长速度变缓、继续升高。运输巷道风量与辅运巷道风量之比为 3 : 1 时,工作面附近的沿空留巷内瓦斯浓度较高,此风量配比的工作面瓦斯浓度最大,但是沿空留巷内瓦斯浓度峰值最小,辅运巷道风流较弱导致工作面末端积聚大量瓦斯,对尾巷拐角附近的瓦斯浓度产生影响,导致瓦斯浓度出现波动。总风量一定的情况下,随着运输巷道风量的不断增加,沿空留巷内瓦斯浓度不断降低。

选取 5 种运输巷道与辅运巷道的风量配比各自的工作面与沿空留巷瓦斯浓度峰值,如图 14 所示。

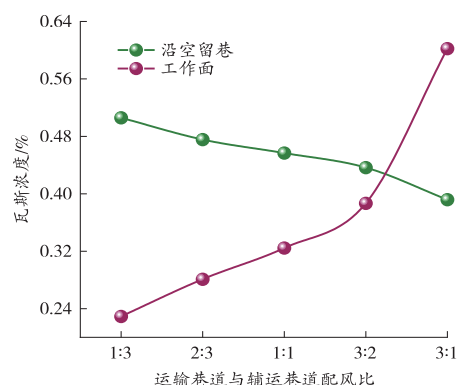


图 14 工作面推进距离为 160 m 时不同风量配比的瓦斯浓度峰值

Fig. 14 The peak gas concentration of different air volume ratio when the advance progress is 160 m

由图 14 可知,在总风量一定的情况下,采煤工作面推进初期风量调配对工作面峰值瓦斯浓度影响较大,对沿空留巷峰值瓦斯浓度影响相对较小。综合考虑工作面 and 沿空留巷的瓦斯浓度峰值,确定推进初期最佳配风比为 3 : 2,此时沿空留巷和工作面的瓦斯浓度均保持在 0.4% 左右。

4.2 采煤工作面推进中期

当工作面推进距离为 460 m 时运输巷道与辅运巷道不同进风量配比下瓦斯分布云图如图 15 所示。

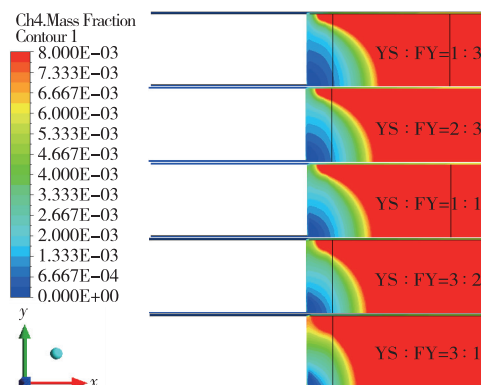


图 15 工作面推进距离为 460 m 时运输巷道与辅运巷道不同进风量配比下瓦斯分布云图

Fig. 15 Cloud map of gas distribution under different air intake ratio between transport roadway and auxiliary transport roadway when the advance progress is 460 m

对比图 11 和图 15 可知,采煤工作面推进中期相比推进初期,采空区瓦斯浓度整体明显增高。随着工作面向前推进,采空区面积增大,矸石压实程度增高,工作面的新鲜风流不易漏进采空区,难以向内扩散,无法降低其深部瓦斯浓度。随着运输巷道与辅运巷道风量配比的提高,采空区瓦斯转移变化趋势与推进初期基本一致,工作面附近的浅部采空区内风流稀释能力减弱,瓦斯浓度增大,使高瓦斯浓度区域向工作面方向扩展,更多的瓦斯被封存在采空区内。

当工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化如图 16 所示。

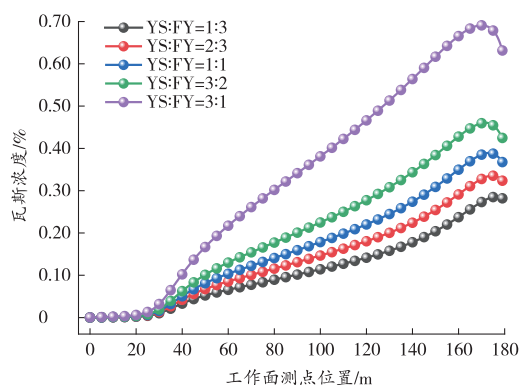


图 16 工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化图

Fig. 16 Gas concentration change diagram of working face with different air volume ratio when advancing progress is 460 m

图 16 反映的推进中期不同风量配比下工作面瓦斯浓度变化趋势与推进初期相一致,但中期的瓦斯浓度整体有所上升。总风量一定的情况下,随着辅运巷道风量的不断增加,工作面内瓦斯浓度出现不断减小的情况,这与工作面附近的浅部采空区瓦斯稀释程度增加相对应。

当工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化如图 17 所示。

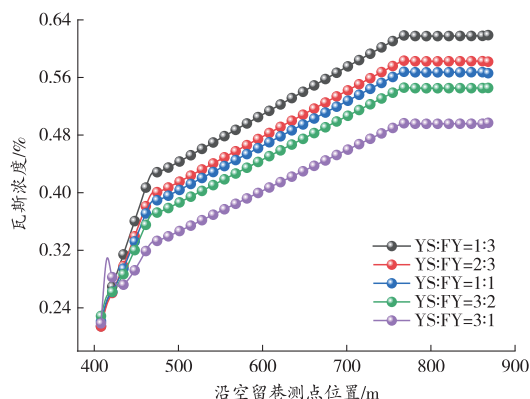


图 17 工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化图

Fig. 17 Gas concentration change diagram of roadway retained along goaf with different air volume ratio when the advance progress is 460 m

从图 17 可以看出,不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度的总体变化趋势基本相同,初期瓦斯浓度逐渐升高,中期增长速度变缓直至达到某一峰值,后期瓦斯浓度增长缓慢几乎不变。总风量不变的情况下,运输巷道风量增加会使沿空留巷的瓦斯减少,而辅运巷道风量增加会使尾巷内瓦斯浓度增大,这是因为辅运巷道风量配比的增大会扩大采空区和尾巷

的风流压力差,使更多的瓦斯通过密闭墙裂隙涌入尾巷。

当工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的瓦斯浓度峰值如图 18 所示。

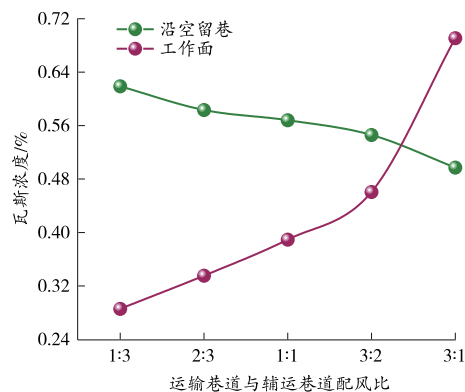


图 18 工作面推进距离为 460 m 时不同风量配比的瓦斯浓度峰值

Fig. 18 The peak gas concentration of different air volume ratio when the advance progress is 460 m

图 18 反映了工作面推进中期瓦斯浓度峰值随不同风量配比的变化情况,与推进初期相同,沿空留巷瓦斯浓度峰值仍出现下降的趋势,而工作面瓦斯浓度峰值仍出现上升的趋势,但是所有数值相较推进初期都有所上升。对工作面和沿空留巷两区域综合考虑,配风比仍可继续保持为 3:2。

4.3 采煤工作面推进后期

采煤工作面推进后期,在推进至 760 m 时运输巷道与辅运巷道不同进风量配比下瓦斯分布云图如图 19 所示。

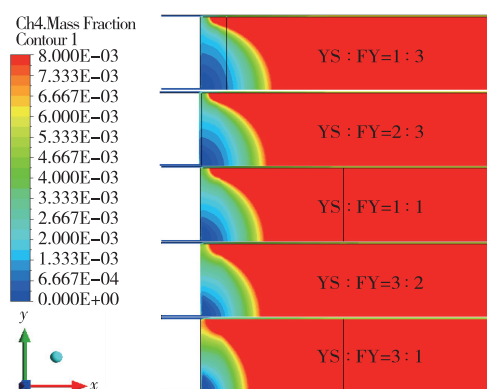


图 19 工作面推进距离为 760 m 时运输巷道与辅运巷道不同进风量配比下瓦斯分布云图

Fig. 19 Cloud map of gas distribution under different air intake ratio between transport roadway and auxiliary transport roadway when the advance progress is 760 m

相比图 11 和图 15,采煤后期的通风问题更为棘手,这也反映出该时期沿空留巷和工作面的瓦斯治理更加困难。运输巷道与辅运巷道的不同配风比例下采空区浓度分布和变化趋势基本一致,深部瓦斯

浓度高,浅部瓦斯浓度低,随风量配比改变采空区的瓦斯变化趋势也与推进前、中期相似。采煤工作面推进至 760 m 时,相比推进距离为 460 m 时的采空区压实稳定区面积增大,积聚的瓦斯更多。

工作面推进距离为 760 m 时不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化如图 20 所示。

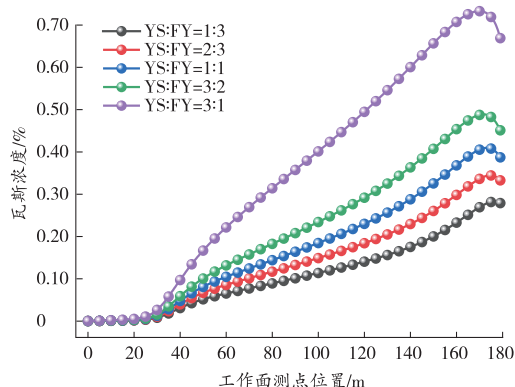


图 20 推进距离为 760 m 时不同风量配比的工作面瓦斯浓度变化图

Fig. 20 Gas concentration change diagram of working face with different air volume ratio when advancing progress is 760 m

由图 20 可以看出,各个比例下瓦斯浓度变化趋势仍表现为不断上升至某一峰值后小幅度下降。随着推进距离的增加,瓦斯浓度明显有所上升。在总风量一定的情况下,辅运巷道风量的增加会使工作面瓦斯浓度不断降低。

当工作面推进距离为 760 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化如图 21 所示。

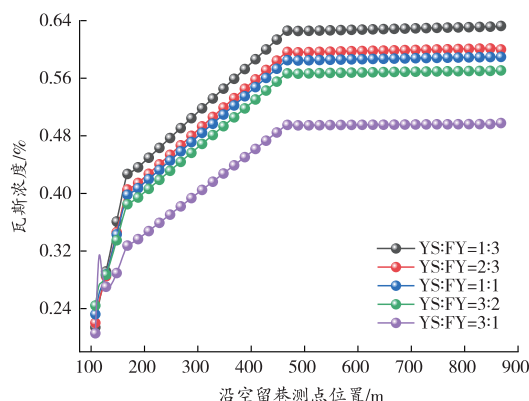


图 21 工作面推进距离为 760 m 时不同风量配比的沿空留巷瓦斯浓度变化图

Fig. 21 Gas concentration change diagram of roadway retained along goaf with different air volume ratio when the advance progress is 760 m

由图 21 可知,推进后期的沿空留巷瓦斯浓度变化与推进中期的总体变化趋势基本相同,瓦斯浓度逐渐升高至某一峰值后增长缓慢,保持微弱幅度上升,但是沿空留巷尾端瓦斯浓度稳定区增大。随着

推进距离的增加,沿空留巷内的瓦斯浓度逐渐上升。总风量不变的情况下,增加运输巷道风量虽然会使沿空留巷的瓦斯减少,但是随着工作面向前推进,尾巷内瓦斯浓度仍会增高甚至出现瓦斯超限的可能性。

开采后期工作面推进至 760 m 时不同风量配比的瓦斯浓度峰值如图 22 所示。

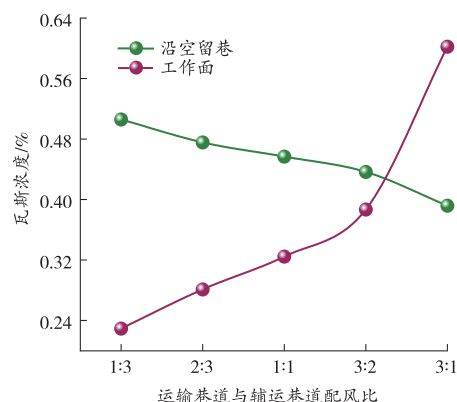


图 22 工作面推进距离为 760 m 时不同风量配比的瓦斯浓度峰值

Fig. 22 The peak gas concentration of different air volume ratio when the advance progress is 760 m

若仅考虑图 22 中曲线交点可判定推进后期运输巷道与辅运巷道最佳配风比仍为 3:2,但是此配风比下工作面瓦斯浓度已逼近矿井报警值 0.5%,而沿空留巷瓦斯浓度值在 2:3、1:1、3:2 这 3 种配风比下相差不大,因此可考虑将 2:3 作为开采后期最佳配风比。

综合图 14、图 18 和图 22 可知,5 种不同配风比的工作面瓦斯浓度变化幅度保持在 0.40% 左右,沿空留巷瓦斯浓度变化幅度保持在 0.15% 左右。在总风量不变的情况下,调节运输巷道和辅运巷道的风量对比对工作面瓦斯浓度影响较大,对采空区影响相对较小。随着采煤工作面向前推进,工作面和沿空留巷瓦斯浓度均升高但幅度不同,最佳配风比选取逐渐“偏向”工作面,通风最佳配比量由运输巷道向辅运巷道倾斜。煤炭开采过程中,可以通过不断调节进风巷风量配比以改善工作面和尾巷瓦斯治理情况。

然而,在密闭墙裂隙度为 22.4% 条件下的风量调控模拟中,工作面推进中后期最佳配风比对应的沿空留巷瓦斯浓度已经超过矿井报警值 0.5%,通过前文推断,在推进末期甚至可能出现达到超限值 0.8% 的情况。因此,仅通过调控风量的方法治理瓦斯仍然存在隐患,而针对密闭墙裂隙度较高、漏风较为严重这一问题,应提高采空区密闭程度,采用修补或封堵墙体裂隙等措施同步治理。密闭墙的修补和封堵需要一定的施工时间,而风量调控用时短、见效快,

在实施新的密闭手段之前,可先通过风量调控的方法对瓦斯超限进行临时治理和预防,而现场主要治理措施为提高采空区密闭程度、加强采空区的漏风管理。

5 结论

1)“两进一回”Y 型通风模式下,采空区瓦斯运移趋势基本相同,采空区深部瓦斯浓度较高,工作面及附近采空区瓦斯浓度较低。工作面瓦斯浓度先上升至峰值后在尾巷附近有所下降。相同工作面推进距离下,大多数条件下沿空留巷瓦斯浓度变化趋势基本相同,初期瓦斯浓度逐渐升高,中期增长速度变缓直至达到某一峰值,压实稳定区形成后会呈现后期瓦斯浓度增长缓慢几乎不变的趋势。

2)当辅运巷道风量恒定时,随着运输巷道风量的增加,工作面瓦斯浓度基本不变,沿空留巷的瓦斯浓度明显降低但下降幅度逐步减小;单一增加辅运巷道风量,采煤工作面的瓦斯浓度明显降低但幅度逐级变小。改变单一进风巷风量对沿空留巷和工作面瓦斯的同步治理效果不明显。

3)在总风量不变的情况下,当运输巷道风量增加、辅运巷道风量减少时,更多的瓦斯被封存在采空区内。当运输巷道风量减少、辅运巷道风量增加时,高瓦斯浓度区域向采空区深部收缩。总风量恒定,辅运巷道风量增加使工作面瓦斯浓度降低,运输巷道风量增加使尾巷瓦斯浓度降低,调节运输巷道和辅运巷道的风量配比对工作面瓦斯浓度影响较大,对采空区影响相对较小。

4)随着采煤工作面推进距离的增加,沿空留巷和工作面的瓦斯治理难度上升,最佳通风配比由运输巷道向辅运巷道倾斜。在煤炭开采过程中,应不断调节进风巷风量配比来预防工作面 and 尾巷瓦斯浓度升高,同时,还应提高采空区密闭程度、加强采空区的漏风管理。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,陈上元,郭志飏,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):959-969.
HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959-969.
- [2] 暴晓庆.矿用自膨胀柔性密闭充填材料及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [3] 张迪,聂海洋.基于 FLAC^{3D} 的综放工作面巷道布置及风量分配研究[J].煤炭科学技术,2022,50(增刊1):132-141.
ZHANG Di, NIE Haiyang. Study on roadway layout and air distribution in fully mechanized top-coal caving face based on FLAC^{3D} [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 132-141.

- [4] 李良伟,武文宾,林府进.薄煤层 Y 型通风采场瓦斯分布规律研究[J].矿业安全与环保,2021,48(3):17-21.
LI Liangwei, WU Wenbin, LIN Fujin. Study on gas distribution law in working face with Y-type ventilation of thin coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 17-21.
- [5] 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.
- [6] 朱南南,舒龙勇,范喜生,等.回采工作面及采空区瓦斯运移的数学模型及数值模拟研究[J].安全与环境学报,2021,21(1):210-216.
ZHU Nannan, SHU Longyong, FAN Xisheng, et al. Mathematical model and the numerical simulation in regard to the gas migration in the coal-mining goaf[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 210-216.
- [7] 司俊鸿,王乙桥,程根银,等.沿空留巷采空区煤自燃堵漏控风机制数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2022,49(2):40-45.
SI Junhong, WANG Yiqiao, CHENG Genyin, et al. Numerical simulation study on the mechanism of coal spontaneous combustion plugging and air control in goaf of gob-side entry retaining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 40-45.
- [8] 李宗翔,顾润红,张晓明,等.基于 RNG k-ε 湍流模型的 3D 采空区瓦斯上浮迁移[J].煤炭学报,2014,39(5):880-885.
LI Zongxiang, GU Runhong, ZHANG Xiaoming, et al. Simulation of gas migration in 3D goaf based on RNG k-ε turbulence model[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 880-885.
- [9] KARACAN C Ö, ESTERHUIZEN G S, SCHATZEL S J, et al. Reservoir simulation - based modeling for characterizing longwall methane emissions and gob gas venthole production[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2/3): 225-245.
- [10] JUGANDA A, STREBINGER C, BRUNE J F, et al. Discrete modeling of a longwall coal mine gob for CFD simulation[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(4): 463-469.
- [11] 张增辉,薛彦平.基于“U”型下行通风的综放工作面瓦斯治理数值模拟研究[J].煤矿安全,2021,52(12):183-187.
ZHANG Zenghui, XUE Yanping. Numerical simulation study on gas control in fully mechanized top coal caving face based on “U” downward ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(12): 183-187.
- [12] 王春霞,杨付领,石开仪.Y 型通风综采面运巷与风巷合理配风比研究[J].煤,2019,28(4):18-21.
WANG Chunxia, YANG Fuling, SHI Kaiyi. The suitable air distribution ratio of haul road and ventilating road in the working face of Y-ventilation[J]. Coal, 2019, 28(4): 18-21.
- [13] 赵灿,张浪,刘彦青.偏 Y 型通风下采空区瓦斯涌出规律及超限治理研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):127-133.
ZHAO Can, ZHANG Lang, LIU Yanqing. Study on gob gas emission laws and control of gas exceeding limit under inclined Type Y-ventilation[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 127-133.
- [14] 田焱,汤思敏,王佳俐,等.基于示踪检测法与数值模拟的 Y 型通风工作面采空区漏风规律研究[J].矿业安全与环保,2020,47(5):40-45.
TIAN Yao, TANG Simin, WANG Jiali, et al. Study on the law of air leakage in working face of Y-type ventilation in goaf based on tracer detection method and numerical simulation[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(5): 40-45.

(下转第 35 页)

- LI Dongyin, XU Canrong, XIONG Zuqiang. Gas flowing model of mining face and solve it using COMSOL[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 967-971.
- [6] LANGTANGEN H P, LINGE S. Finite difference computing with PDEs: A modern software approach [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [7] 周世宁. 电子计算机在研究煤层瓦斯流动理论中的应用[J]. 煤炭学报, 1983, 8(2): 29-35.
ZHOU Shining. Application of computer in research of gas flow equation[J]. Journal of China Coal Society, 1983, 8(2): 29-35.
- [8] 孙培德. 煤层瓦斯流场流动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1987, 12(4): 74-82.
SUN Peide. Study of flow in gas flow fields of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(4): 74-82.
- [9] 魏晓林. 有钻孔煤层瓦斯流动方程及其应用[J]. 煤炭学报, 1988, 13(1): 85-96.
WEI Xiaolin. Equation of gas flow in seams with boreholes and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1988, 13(1): 85-96.
- [10] 张力, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤层气渗流方程数值分析[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(10): 40-42.
ZHANG Li, GUO Yongyi, WU Shiyue, et al. Numerical value analysis of coal bed methane influent equation[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(10): 40-42.
- [11] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1127-1131.
GAO Jianliang, HOU Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1127-1131.
- [12] 司鹤, 郭涛, 李晓红. 钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(11): 105-110.
SI Hu, GUO Tao, LI Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(11): 105-110.
- [13] 秦跃平, 王翠霞, 王健, 等. 煤粒瓦斯放散数学模型及数值解算[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1466-1471.
QIN Yueping, WANG Cuixia, WANG Jian, et al. Mathematical model of gas emission in coal particles and the numerical solution[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1466-1471.
- [14] 秦跃平, 刘佳, 高宇, 等. 钻孔瓦斯流动模型及其应用的误差分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(6): 1259-1268.
QIN Yueping, LIU Jia, GAO Yu, et al. Error analysis of borehole gas flow model and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(6): 1259-1268.
- [15] 秦跃平, 刘佳, 苏向云. 煤层透气性系数新的测试计算方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 833-844.
QIN Yueping, LIU Jia, SU Xiangyun. A new method for calculating the permeability coefficient of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 833-844.
- [16] 刘彦青. 动态回采工作面煤壁瓦斯涌出数值计算及现场应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 195-204.
LIU Yanqing. Numerical calculation and field application of gas emission from coal wall in dynamic mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 195-204.
- [17] GEORGE F P, WILLIAM G G. Essentials of multiphase flow and transport in porous media [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [18] BEAR J. Modeling phenomena of flow and transport in porous media [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [19] 国家标准化管理委员会. 天然气管道因子的计算: GB/T 17747—2011 [S].
- [20] FOO K, HAMEED B. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 156(1): 2-10.
- [21] SAUER T. Numerical analysis [M]. Boston: Pearson, 2017.
- [22] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. Numerical recipes: The art of scientific computing [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [23] 季振义, 刘诚, 刘健康. 多项式系统求解的算法研究 [M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2018.
- [24] 吕家凤, 李会师. 多项式理想的 Gröbner 基初等导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.

(责任编辑:熊云威)

(上接第 27 页)

- [15] GOU Y N, HAN X Z. Numerical simulation research on gas migration with Y type ventilation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 108: 032054.
- [16] LI T T, WU B, LEI B W, et al. Study on air leakage and gas distribution in goaf of Y - type ventilation system [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020; 1-14.
- [17] ZHANG H B, HUANG Y F. COMSOL-based study on flow field characteristics and gas concentration distribution laws on the coal face under Y-Shape ventilation conditions [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1168: 052042.
- [18] TUTAK M. Influence of the volumetric expenditure of air supplied to the longwall through the "Y" ventilation system on the location of an area at the risk of an endogenic fire [J]. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering, 2020, 3(1): 206-215.
- [19] 沙慧慧. 无煤柱工作面搬迁过渡期合并采空区瓦斯积聚区分布规律 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [20] 曲日红. 突出瓦斯气体逆流运移过程及影响因素研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [21] 吴波, 陈辉浩, 黄惟. 铁路隧道压入式通风流场分析及施工参数优化 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2922-2928.
WU Bo, CHEN Huihao, HUANG Wei. Analysis of forced ventilation flow field in railway tunnel and optimization of construction parameters [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2922-2928.
- [22] 张念, 谭忠盛. 高海拔特长铁路隧道火灾烟气分布特性数值模拟研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 52-57.
ZHANG Nian, TAN Zhongsheng. Numerical simulation study on smoke distribution of fire in high - altitude super - long railway tunnels [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 52-57.
- [23] 梁旭, 张建忠, 陈真, 等. 综采工作面顺槽联巷快速密闭技术研究与应用 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 66-70.
LIANG Xu, ZHANG Jianzhong, CHEN Zhen, et al. Research and application of rapid sealing technology of roadway crosscut in fully mechanized mining face [J]. Coal Technology, 2023, 42(2): 66-70.
- [24] 田晓龙. 新景矿工作面巷旁充填沿空留巷支护技术应用 [J]. 江西煤炭科技, 2022(4): 28-30.
TIAN Xiaolong. Application of support technology of roadside packing on gob-side entry retaining in xinjing colliery [J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2022(4): 28-30.
- [25] 刘杰, 周皓文, 王婉青, 等. 某高原螺旋施工隧道 CO 分布及扩散特征 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 79-87.
LIU Jie, ZHOU Haowen, WANG Wanqing, et al. Study on CO distribution and diffusion in spiral construction tunnel on plateau [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 79-87.

(责任编辑:樊淑兰)