

掘进巷道爆破粉尘运移规律数值仿真

谢雍哲¹, 王鹏飞^{1,2*}, 祖佳乐¹, 王新喆¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究掘进巷道爆破粉尘的运移规律, 以瓮福磷矿延伸开采技术改造项目为背景, 建立巷道爆破压入式通风模型, 运用数值仿真研究方法, 分析压入式通风风流特性与粉尘运移规律。研究结果表明: 风流从出风口射向工作面的过程中, 风流速度不断减小, 风流到达工作面时会发生回流现象。爆破后, 粉尘随风流向巷道出口方向移动, 回风侧的粉尘质量浓度大于风筒侧, 爆破发生 400 s 后, 巷道内的粉尘基本全部排出。随通风管距工作面距离增加, 掘进工作面的粉尘质量浓度增加; 随通风风量增加, 工作面的粉尘质量浓度逐渐下降; 工作面产尘量越少, 粉尘质量浓度下降至 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 所需时间越短。瓮福磷矿最佳通风参数为通风管距离工作面 8 m, 通风管风量 $848 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 该参数有利于巷道爆破控尘。

关键词: 粉尘; 数值仿真; 通风距离; 通风风量; 产尘量

中图分类号: TD714

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)01-0008-08

Numerical Simulation of Blasting Dust Transportation Laws in Roadway Excavation

XIE Yongzhe¹, WANG Pengfei^{1,2*}, ZU Jiale¹, WANG Xinzhe¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To investigate the migration patterns of blasting dust in excavation roadways, a forced ventilation model for roadway blasting is established based on the extension mining technology renovation project at the Wengfu Phosphate Mine. Numerical simulation methods are employed to analyze the airflow characteristics of forced ventilation and the migration patterns of dust. The research results indicate that as the airflow travels from the outlet to the working face, its velocity continuously decreases, and a reflux phenomenon occurs when the airflow reaches the working face. After blasting, the dust moves with the airflow toward the roadway exit, with the dust mass concentration on the return air side being higher than that on the duct side. Within 400 seconds after blasting, the dust in the roadway is almost entirely expelled. As the distance between the ventilation duct and the working face increases, the dust mass concentration at the excavation face also increases. Conversely, as the ventilation volume increases, the dust mass concentration at the working face gradually decreases. The lower the dust generation at the working face, the shorter the time required for the dust mass concentration to drop to $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The optimal ventilation parameters for the Wengfu Phosphate Mine are a ventilation duct distance of 8 meters from the working face and a ventilation volume of $848 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, which is conducive to dust control during roadway blasting.

Keywords: dust; numerical simulation; ventilation distance; ventilation airflow; dust production

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 湖南科技大学大学生创新创业训练计划项目 (ZX2201)

* 通信作者, E-mail: pfwang@sina.cn

巷道爆破工作中,爆炸产生的粉尘是不可避免的.粉尘主要来自岩石破碎和爆炸后的碎屑物,以及爆炸药物燃烧产生的烟雾.粉尘污染空气,使空气质量下降,危害矿井工作人员的生命健康,长期暴露于粉尘密集的巷道中,容易造成呼吸道疾病和其他健康问题,同时粉尘还会对周围环境和生态系统造成有害的影响.2021年全国共报告各类职业病新病例15 407例,其中职业性尘肺病及其他呼吸系统疾病11 877例(其中职业性尘肺病11 809例)^[1],2010年以来每年报告尘肺新增病例均突破2万例^[2].因此,开展巷道工作面爆破控尘研究具有理论与实践意义.

为了提高巷道爆破控尘效果,蒋仲安等^[3-4]研究了巷道型采场爆破粉尘质量浓度分布规律,根据进路断面方向和轴线方向的粉尘分布规律得出,当联络巷风速为2 m/s时,采场空间内粉尘沉降及排出效果较好;并且运用数值模拟研究通风距离、通风风量和海拔对隧道爆破后的粉尘污染效应的影响,得出隧道内粉尘质量浓度降低至安全值所需时间受通风距离的影响最大,受通风风量的影响次之,受海拔高度的影响最小.咎军等^[5]通过现场试验得出水封爆破降尘使用2支水封袋时总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate, TSP)的平均含量下降趋势明显,降尘效果最佳.欧阳丹等^[6]从爆破粉尘及炮烟的扩散规律出发,阐述了节能高效环保水压爆破降尘技术的原理与应用.赵金银等^[7]采用高压复合膜水袋台阶爆破技术降尘,其降尘效率超过50%.

尽管已有研究在爆破粉尘控制方面取得了一定成果,但是针对压入式通风系统下掘进巷道爆破粉尘运移规律的深入研究较少,并且关于通风参数与粉尘浓度分布的定量关系研究仍不够充分,针对上述问题,本文运用Fluent软件进行模拟计算,通过分析矿井巷道爆破后的风流特性及粉尘运移规律,探究掘进工作面爆破后粉尘扩散的影响因素.基于分析模拟结果,提出适用于掘进巷道爆破粉尘控制的最佳通风参数.本研究成果可以为保障矿工安全、降低工作面粉尘浓度、提高煤矿生产效率等方面提供科学指导.

1 物理模型建立及参数设置

1.1 模型的建立

根据瓮福磷矿延伸开采技术改造项目实际情况,该独头巷道全长2 760 m,选取其中一段长30 m的巷道作为研究对象.使用SolidWorks软件创建几何模型,构建掘进巷道工作面的三维模型,如图1所示.为了实现数值模拟的可行性和计算效率,对模型进行合理简化,巷道断面为宽5.0 m、高4.2 m的半圆拱形结构;风管直径为1.0 m,风管布置在离地高度2.5 m,其中心轴线距巷道右侧壁0.6 m处,风管出口距工作面10 m.

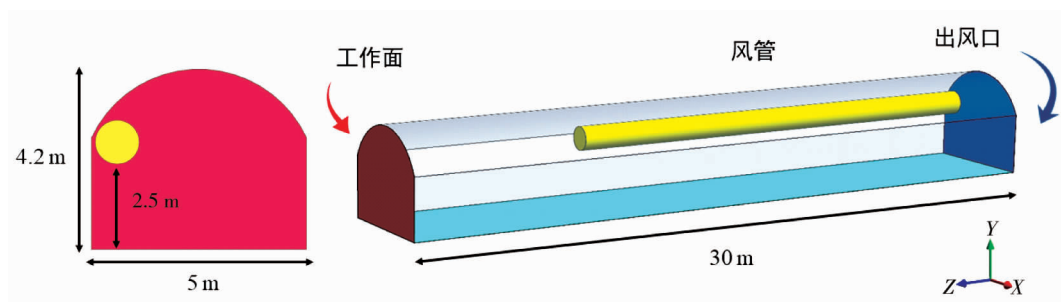


图1 巷道三维模型

1.2 数值仿真参数及边界条件设定

1.2.1 基本假设

巷道内空气为不可压缩气体,符合理想气体状态方程,并且巷道内空气为静止状态,不研究空气流动和对流传热^[8].从压风筒传入巷道的空气为新鲜空气,不夹带其他杂质,且压风筒的风速均匀稳定^[9].粉尘粒子均为规则的球形颗粒,粉尘全部由掘进工作面爆破产生,在爆破瞬间从掘进面均匀喷出.爆破产生的粉尘靠风流沉降至地面或通过出口排出,粉尘颗粒不会受到除压风系统以外的干扰^[10].

1.2.2 连续相模拟参数及边界条件的设定

基于FLUENT数值模拟平台,针对稳态流场特性分析的需求,设置相关参数和边界条件^[11-12],连续相

模拟参数如表 1 所示,边界条件如表 2 所示.

表 1 连续相模拟参数

项目	名称	设置情况
求解器设置	Type(类型)	Pressure Based(压力基)
	Velocity Formulation(速度格式)	Absolute(绝对)
	Time(时间)	Steady(稳态)
模型	Viscous Model(湍流模型)	Realizable $k-\epsilon$
	Energy(能量模型)	Off
	Discrete Phase Mode(离散相模型)	Off
材料(空气)	Density(密度)	1.225 kg/m ³
	Viscosity(黏度)	1.789 4×10 ⁻⁵ Pa·s

表 2 边界条件

边界条件	设置情况
Inlet Boundary Tape(入口边界类型)	Velocity inlet(速度入口)
Inlet Velocity Magnitude(入口速度)	14.49 m/s
Turbulent Intensity(湍流强度)	5 %
Turbulent Viscosity Ratio(湍流黏度比率)	10
Outlet Boundary Type(出口边界类型)	Outflow(自由出流)
Wall Motion(壁面运动)	Stationary Wall(固定壁面)
Shear Condition(剪切条件)	No Slip(无滑移)

1.2.3 离散相模拟参数的设定

在完成稳态流场特性模拟的基础上,进一步对离散相模拟参数进行设定^[13-14],具体设置如表 3 和表 4 所示.

表 3 离散相模拟参数

项目	名称	设置情况
求解器设置	Time(时间)	Transient(非稳态)
模型	Discrete Phase Model(离散相模型)	On
	DPM Iteration Interval(DPM 迭代间隔)	10
离散相参数	Max Number of Steps(最大步数)	50 000
	Step Length Factor(步长因子)	5

表 4 爆破粉尘参数

喷射源参数	设置情况
Injection Type(喷射源类型)	Surface(面喷射)
Release From Surfaces(喷射源)	Development end(掘进工作面)
Material(材料)	SiO ₂ (二氧化硅)
Diameter Distribution(粒径分布)	Rosin-rammler(双 R 分布)
Velocity(初始速度)	$v_x = 0$ m/s
	$v_y = 0$ m/s
	$v_z = -6$ m/s
Total Flow Rate(总质量流率)	0.116 9 kg/s
Max Diameter(最大颗粒直径)	1.0×10 ⁻⁴ m
Mean Diameter(平均直径)	1.0×10 ⁻⁵ m
Spread Parameter(分布指数)	1.93
Number of Diameters(直径组数)	1 000

2 数值仿真结果分析

2.1 风流流场模拟结果分析

通过设定相关参数和边界条件,采用 FLUENT 软件对模型进行计算,得到 YZ 截面和 ZX 截面的风流流速云图与迹线图,见图 2.图 2 中 X 方向为巷道宽度方向, Y 方向为巷道高度方向, Z 方向为巷道长度方向.

由 $X=0.6$ m 处的风流云图和 $Y=2.5$ m 的风流云图可知,压入式风筒出风口射出的高速射流可以到达工作面,这说明风筒出风口至工作面的距离设置为 10 m 是合理的.高速射流到达工作面壁面时受到阻碍会形成反弹并产生回流现象.再观察 $X=4.4$ m 处的风流云图,风流在工作面方向发生折返后向巷道回风侧流动,并沿着巷道壁面向出口方向流出.由于风流冲击工作面会产生较大的能量损耗,因此回流区风流速度远小于射流区,但回流区面积要大于射流区^[15].对比 $Y=1.5$ m 和 $Y=2.5$ m (不同高度)处的风流云图,当风流到达工作面后,两种高度处的风流速度均降至 7 m/s,但是 1.5 m 高度处的回流风流扩散范围更为明显,表明低高度区域的风流分布更加分散.

由 $X=0.6$ m 和 $Y=2.5$ m 处的风流迹线图可看出,在射流区和回流区之间存在涡流区,其形成原因是高速风流在冲击工作面后发生反弹,与后续射流相互作用,导致局部风流方向紊乱.在涡流区内,风流迹线呈现明显的螺旋状或环状结构,该区域的风流速度在 1.4 m/s 左右,显著低于射流区和回流区,且风流稳定性较差.这种低速和不稳定的风流特性可能导致粉尘在涡流区内滞留时间延长,从而增加粉尘积聚的风险.

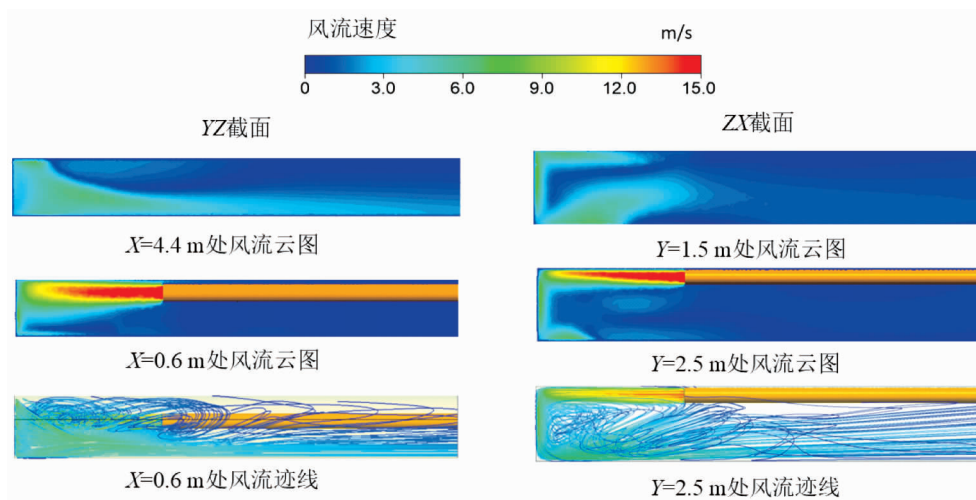


图2 不同截面位置的风流云图与风流迹线

2.2 粉尘运移模拟结果分析

采用非稳态求解器进行计算,并开启离散相模型,设置爆破粉尘参数,使粉尘产生于爆破瞬间,观测爆破发生后 5,10,15,20,50,100,200,400 s 时巷道内的粉尘分布情况.图 3 展示了巷道内粉尘随时间变化的分布情况.

由图 3 可知:爆破发生后 5 s 内,粉尘由工作面喷向巷道内部,受到压入式通风射流的影响,粉尘向巷道回风侧聚集,并且在工作面与压风筒出口之间做旋流运动;爆破发生后 5~15 s,受巷道回风风流的影响,粉尘逐渐向出口方向运移,其中粒径较大的粉尘沉降速度较快,逐渐被巷道底板捕捉^[16];爆破发生后 20~50 s,粉尘由聚集状态开始向巷道四周扩散,一部分粉尘继续随着回风风流向巷道出口排出,另一部分随着进风风流重新吹回风管侧;爆破发生后 50~200 s,粉尘的沉降速度逐渐变慢,较大粒径的粉尘颗粒大部分已通过重力沉降或随风流排出巷道出口,而较小粒径粉尘颗粒受重力作用较小,沉降速度较慢,悬浮在巷道内.爆破发生后 400 s,巷道内的粉尘基本全部排出.

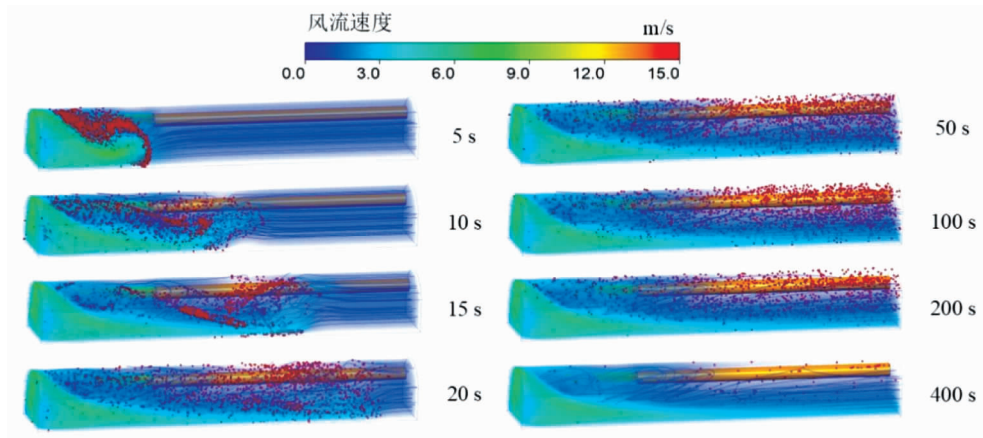
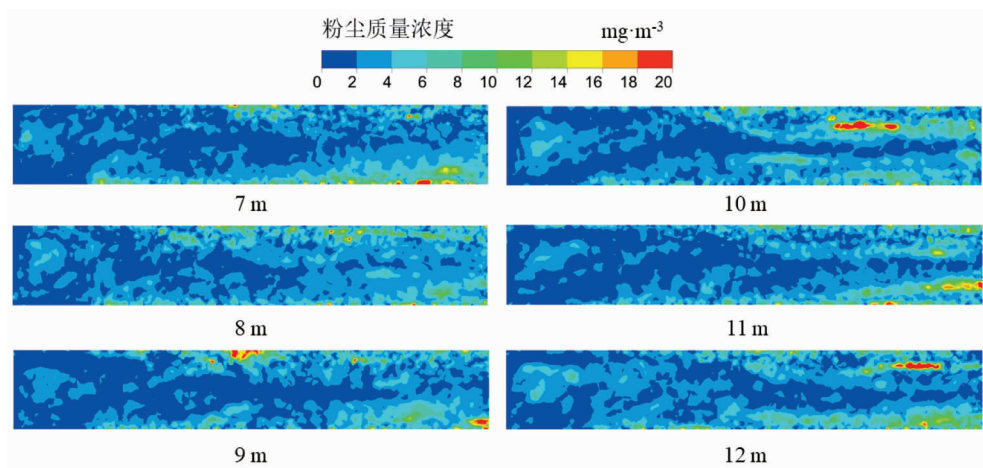
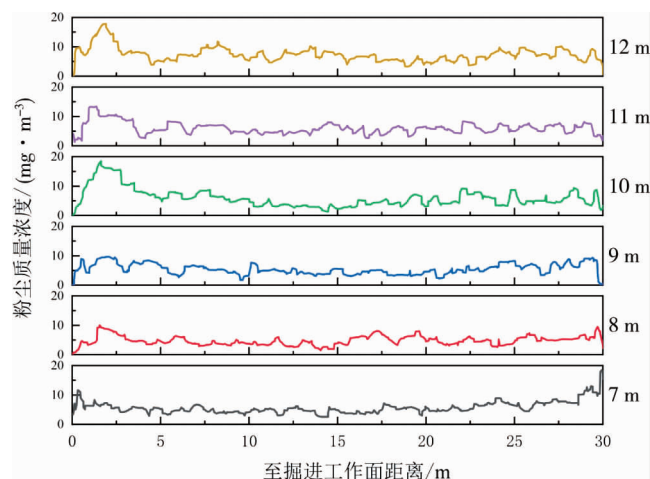


图3 粉尘随时间变化的分布情况

2.3 爆破粉尘扩散因素分析

2.3.1 通风距离对粉尘扩散的影响

选取压风筒出风口距离掘进工作面 7, 8, 9, 10, 11, 12 m 进行研究, 模拟爆破后 50 s 时巷道内粉尘质量浓度分布情况. 不同通风距离下, $Y=1.5$ m 处 ZX 截面的粉尘质量浓度分布云图见图 4. $Y=1.5$ m 处粉尘质量浓度沿程分布曲线见图 5.

图4 不同通风距离下 $Y=1.5$ m 处 ZX 截面的粉尘质量浓度分布云图图5 不同通风距离下 $Y=1.5$ m 处粉尘质量浓度沿程分布曲线

由图 4 可知, 随着压风筒出风口至掘进工作面的距离增加, 风流射流到达工作面时的风速逐渐减小,

导致回流的风速也减小,但是回流的面积增大,因此粉尘扩散更加明显.爆破后大量粉尘随着回流风流向巷道回风侧壁面运移,巷道回风侧粉尘质量浓度更高,分布也更密集,而风管侧的粉尘质量浓度相对较低但分布范围更大,并且随着压风筒出风口至掘进工作面的距离增加,粉尘在回风侧与风管侧的分界现象更加明显.

对比不同通风距离下粉尘质量浓度沿程分布曲线(图5)可知,通风距离为7,8,9 m时的粉尘质量浓度明显小于通风距离为10,11,12 m时的粉尘质量浓度.较远的通风距离下其射流范围虽然可以到达工作面并形成回流,但是通风排尘效果并不理想,且工作面附近的粉尘质量浓度较大^[17].通风距离为8 m时,沿程粉尘质量浓度相对稳定,粉尘分布状态较好.

2.3.2 通风风量对粉尘扩散的影响

为研究风量对粉尘扩散的影响,选取通风风量分别为471.2,565.5,659.7,754.0,848.0 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (对应压风筒出口风速为10,12,14,16,18 m/s)的工况,结合最佳通风距离8 m,模拟爆破后50 s时巷道内粉尘浓度沿程分布情况,如图6所示.

由图6可知,爆破后50 s时,巷道内粉尘质量浓度沿巷道长度方向呈现波动变化,但随着至掘进工作面距离的增加,粉尘质量浓度整体呈上升趋势.随着通风风量的增加,巷道内的粉尘质量浓度整体降低.当通风风量为471.2 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时,巷道内粉尘质量浓度的峰值达到12.5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,通风除尘效果不太理想;当通风风量为565.5,659.7和754.0 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时,粉尘质量浓度曲线的波动较大;当通风风量为848.0 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时,巷道内的粉尘质量浓度明显小于其他风量的粉尘质量浓度,峰值仅为6.87 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,并且粉尘质量浓度曲线变化平缓,有利于粉尘随风流的排出或沉降.因此根据实际项目需要,可以适当加大通风风量^[18],在短时间使巷道内粉尘质量浓度降低到安全范围,从而提升掘进工作效率.

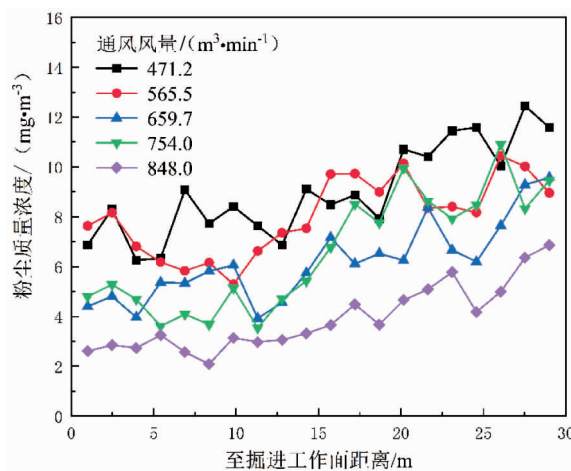


图6 不同通风风量下巷道内粉尘质量浓度沿程分布曲线

2.3.3 产尘量对粉尘扩散的影响

为了保证爆破后工作面的粉尘质量浓度在一定时间内能够下降到2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的安全标准,可以设置爆破药量来改变工作面初始产尘量的大小.一般来说,巷道爆破药量增加,产生的粉尘浓度也会相应增加.在FLUENT中,通过设置不同的粉尘颗粒密度来模拟不同的总质量流率(Total Flow Rate),而总质量流率则用于表示产尘量的大小.设定工作面处的粉尘颗粒密度为500,1 000,2 000和3 000 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,根据总质量流率公式计算,得到对应的总质量流率分别约为0.058 5,0.116 9,0.233 9和0.350 8 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

总质量流率 q_m 计算公式为

$$q_m = cvS. \quad (1)$$

式中: c 为工作面处的粉尘颗粒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为粉尘的喷出速度,按6 m/s计; S 为巷道工作面断面积,19.49 m^2 .

改变爆破粉尘参数中的总质量流率,并对爆破后 50 s 时巷道粉尘分布进行数值仿真,得到不同产生量下,爆破后 50 s 时巷道粉尘质量浓度沿程变化曲线如图 7 所示;距离工作面 10 m 处粉尘质量浓度随时间变化曲线如图 8 所示;距离工作面 10 m 处的 XY 截面粉尘质量浓度分布云图如图 9 所示。

由于巷道内压入式通风的空气流动对粉尘运移产生影响,粉尘扩散至整个巷道,涡流区的存在导致大量粉尘颗粒聚集在距工作面约 15 m 处(见图 7),形成局部高浓度区域,并且产生量越高,涡流区附近的粉尘质量浓度越高。粉尘质量浓度随时间的变化呈现先快速上升后逐渐下降的趋势(见图 8),不同产生量下粉尘质量浓度随时间变化的曲线形状相似,但浓度值存在显著差异,产生量为 $0.3508 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,距离工作面 10 m 区域的粉尘质量浓度在 50 s 时达到了 $15.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比产生量为 $0.0585 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的粉尘质量浓度高出了 $12.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。产生量为 0.0585 和 $0.1169 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粉尘质量浓度在爆破后 200 s 时即可下降至安全范围;而产生量为 0.2339 和 $0.3508 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粉尘质量浓度在爆破后 300 s 时仍高于安全标准。由图 9 可以看出,当产生量为 $0.0585 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.1169 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粉尘质量浓度较低,主要集中在巷道回风侧壁以及巷道顶部靠近风筒侧,且浓度分布较为均匀。随着产生量增加至 $0.2339 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.3508 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,粉尘质量浓度显著升高,高浓度区域向巷道顶部和回风侧壁扩展,最高值达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。粉尘质量浓度分布规律表现为“回风侧与顶部浓度高,风管侧与底部浓度低”,这与压入式通风作用下风流场的分布特性密切相关。

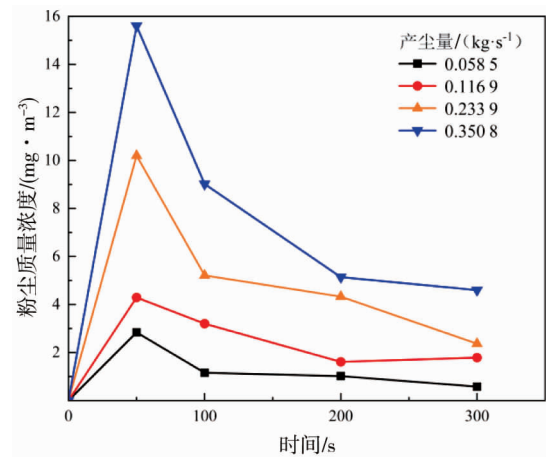
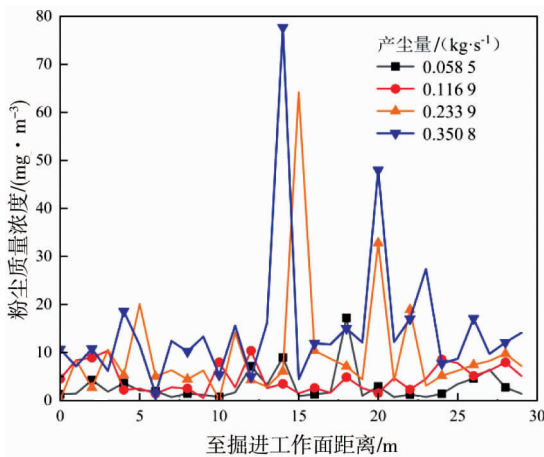


图 7 不同产生量下爆破后 50 s 时粉尘质量浓度沿程变化曲线 图 8 不同产生量下距工作面 10 m 处粉尘质量浓度随时间变化曲线

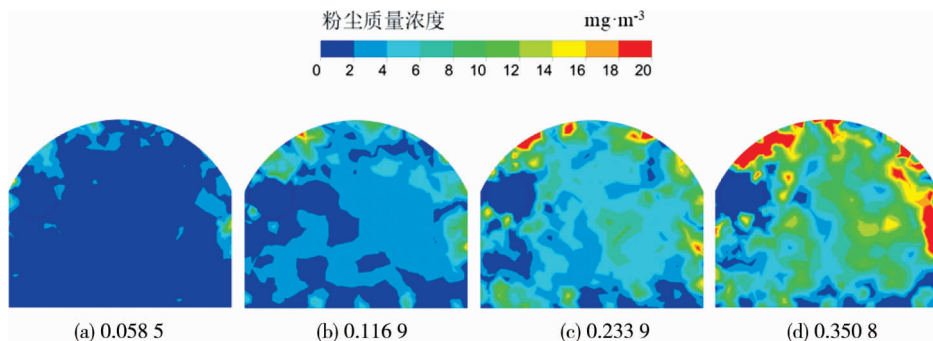


图 9 不同产生量(单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)下距工作面 10 m 处 XY 截面的粉尘质量浓度分布云图

3 结论

- 1) 在压入式通风系统中,风流从出风口射向工作面的过程中,风流速度不断减小,到达工作面后形成回流现象,回流区的风流速度显著低于射流区,但回流区面积更大,导致粉尘在回风侧聚集。
- 2) 随着通风距离的增加,风流射流到达工作面时的风速减小,回流区范围扩大,粉尘扩散更加明显。

3) 通风风量是影响粉尘扩散的关键因素.风量越大,粉尘质量浓度越低,适当提高通风风量可有效控制粉尘扩散,适用于高粉尘浓度的巷道环境.

4) 高产尘量工况下,粉尘扩散范围更广,在巷道内的滞留时间更长,尤其在涡流区附近形成局部高浓度区域,增加了粉尘控制的难度.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.2021 年我国卫生健康事业发展统计公报[EB/OL]. (2020-01-13) [2023-09-22]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s3586s/202207/51b55216c2154332a660157abf28b09d.shtml>
- [2] 金龙哲.我国作业场所粉尘职业危害现状与对策分析[J].安全,2020,41(1):1-6.
- [3] 蒋仲安,陈梅岭,陈举师.巷道型采场爆破粉尘质量浓度分布及变化规律的数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1190-1196.
- [4] 蒋仲安,曾发镔,冯雪,等.高海拔隧道爆破后粉尘污染动力学模型及影响因素[J].煤炭学报,2023,48(1):263-278.
- [5] 咎军,张昊,沈如意,等.巷道掘进粉尘综治措施及水封爆破降尘研究[J].工业安全与环保,2017,43(8):84-86.
- [6] 欧阳丹,王鹏飞,李石林,等.矿山采场水压爆破降尘技术研究进展[J].化工矿物与加工,2023,52(3):60-68.
- [7] 赵金银,阳俊.高压复合膜水袋台阶爆破降尘技术应用研究[J].湖南有色金属,2022,38(3):1-3.
- [8] 关龙.矿井巷道内的通风数值模拟[J].武汉工业学院学报,2012,31(4):82-85.
- [9] 秦跃平,张苗苗,崔丽洁,等.综掘工作面粉尘运移的数值模拟及压风分流降尘方式研究[J].北京科技大学学报,2011,33(7):790-794.
- [10] 李雨成,刘剑.基于气固两相流的风幕控尘数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(5):765-769.
- [11] 郭对明,李国清,侯杰,等.基于 FLUENT 的深井掘进巷道局部通风参数优化[J].黄金科学技术,2022,30(5):753-763.
- [12] 蒋逸丹,刘荣华,刘辉,等.综掘工作面附壁旋流通风控尘效果数值模拟[J].矿业工程研究,2019,34(3):31-37.
- [13] 蒋仲安,陈梅岭,陈举师.巷道型采场爆破粉尘质量浓度分布及变化规律的数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1190-1196.
- [14] 秦跃平,姜振军,张苗苗,等.综掘面粉尘运移规律模拟及实测对比[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(3):289-293.
- [15] 王海桥,施式亮,刘荣华,等.独头巷道附壁射流通风流场数值模拟研究[J].煤炭学报,2004,29(4):425-428.
- [16] 李泳俊,王鹏飞,舒威,等.综掘面长压短抽通风合理压抽比仿真及研究[J].采矿技术,2019,19(2):93-100.
- [17] 尚英智.浅谈综掘工作面长压短抽通风除尘技术[J].内蒙古煤炭经济,2020(17):13-14.
- [18] 高文蛟,梁俊奇,徐家俊,等.关于独头巷道爆破掘进通风的探讨[J].矿冶工程,2021,41(3):16-20.