

# 基于风幕控尘除尘的综掘面粉尘治理研究

张立祥, 方振\*

安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年3月22日; 录用日期: 2022年5月13日; 发布日期: 2022年5月19日

## 摘要

为改善综掘面高浓度粉尘的工作环境, 以淮北某矿的综掘面为研究对象, 通过理论分析和数值模拟的方法, 在混合式通风系统的基础上, 安装风幕装置在综掘机前端。分析在不同工况下, 综掘工作面内粉尘浓度的变化情况, 研究结果表明: 随着送风筒口与迎头面距离增加, 呼吸带粉尘浓度也随之降低, 当二者距离为25 m时, 巷道后方粉尘浓度最低; 风幕出口宽度增加, 巷道呼吸带后方粉尘浓度相应有所降低, 但出口宽度超过8 cm时, 风幕射流强度减弱, 受回风流影响粉尘浓度也随之增加; 开启风幕后, 粉尘被控制在距迎头面0~5 m内, 随着初始风速的增加, 风幕射流抗干扰能力得到提升, 当风速为12.5 m/s时, 风幕控尘效果最佳。

## 关键词

风幕, 粉尘, 综掘面, 数值模拟

# Study on Dust Control of Comprehensive Excavation Face Based on Air Curtain Dust Control and Dust Removal

Lixiang Zhang, Zhen Fang\*

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: May 13<sup>th</sup>, 2022; published: May 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to improve the working environment of high concentration dust in the comprehensive excavating face, taking the comprehensive excavating face of a mine in Huaibei as the research

\*通讯作者。

object, through theoretical analysis and numerical simulation, an air curtain device is installed in the front end of the comprehensive excavating machine based on mixed ventilation system system. By analyzing the changes of dust concentration in the excavation face under different working conditions, the research results show that the dust concentration in the breathing zone decreases with the increase of the distance between the air supply cylinder and the face. When the distance between the two is 25 m, the dust concentration in the back of the roadway is the lowest. When the width of the air curtain outlet increases, the dust concentration at the rear of the breathing zone of the roadway decreases correspondingly. However, when the width of the outlet exceeds 8 cm, the strength of the air curtain jet weakens and the dust concentration increases due to the influence of the return air flow. When the wind background is opened, the dust is controlled within 0~5 m away from the headface. With the increase of the initial wind speed, the anti-interference ability of the air curtain jet is improved. When the wind speed is 12.5 m/s, the dust control effect of the air curtain is the best.

## Keywords

The Wind Curtain, Dust, Comprehensive Excavation Face, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着井下巷道内机械化程度的提高,掘进面内作业时产生的粉尘浓度也因此大幅增加,使其成为井下主要污染源之一[1]。大量粉尘在迎头面产生而后向巷道后方弥散,当粉尘浓度过高时会污染井下工作环境,威胁综掘面内工作人员的生命健康安全,为粉尘爆炸事故的发生埋下隐患[2] [3] [4]。井下的主要除尘措施有湿式除尘、通风除尘等,但由于客观环境因素使得粉尘治理效果并未达到预期理想[5] [6]。

20 世纪 50 年代,前苏联的谢别列夫在煤矿巷道内应用气幕装置,针对矿用气幕的理论方面进行研究,得出气幕在井下的实用效果与巷道宽度、风幕射流初始角度和安装位置等因素关系紧密。20 世纪 80 年代,徐竹云[7]等人基于有效压力理论深入研究矿用气幕,得出矿用气幕的工作能耗与相关参数的联系,为风幕设计时选取理想结构参数提供帮助。2012 年,李雨成[8]等建立了风幕的数学、物理模型并进行 Fluent 数值模拟,对比分析有无风幕的模拟结果,证实风幕可提高粉尘治理效果。基于上述分析,由于巷道内粉尘的运动轨迹十分复杂,且在现场难以具体分析风流场与粉尘场的情况。因此为实现更好的粉尘治理效果,更直观地分析巷道流场的变化规律,本文采用理论分析与数值模拟的研究方法,以淮北某矿综掘面为原型构建三维模型;针对影响风幕工作性能的几个重要参数,进行较为系统的模拟优化研究,旨在推进风幕控尘除尘技术的深入研究,对综掘面粉尘防治具有指导、推广意义。

## 2. 综掘面风幕控尘除尘系统

风幕控尘除尘系统主要由抽出式系统和压入式系统组成,前者含有抽出式风机、抽风筒和湿式除尘器,后者包含压风筒、压入式风机、风幕装置等,如图 1。其中,风幕控尘除尘装置由空气压缩机、高压风管和射流箱等组成,风幕射流腔整体呈 $\cap$ 形状,每个射流腔内配置有挡风板可用于调节出口射流方向。风幕工作原理:空压机将压缩后的气流经高压风管送至风幕射流箱内,再由射流箱将气流分配给各个射流腔体内,腔内气流通过调节后的导流叶由风幕条缝出口射出,如图 2。风幕控尘除尘装置是安装

在掘进机司机位置前部, 风幕射流是按照设定好的风速从射流腔出口喷出, 将综掘面分割为粉尘污染区和风幕控制区, 如图 3, 污染区内的高浓度携尘风流, 可由长压短抽通风系统中抽风筒吸走, 并被其后方的湿式除尘器净化而后排出巷道。



Figure 1. Air curtain dust control and dedusting system

图 1. 风幕控尘除尘系统

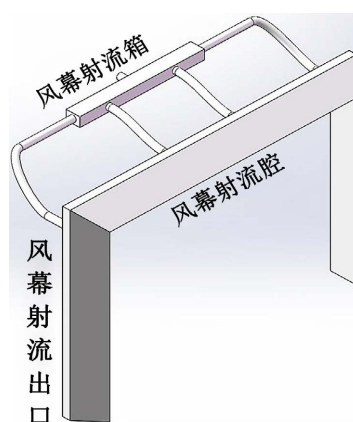


Figure 2. Model diagram of air curtain installation

图 2. 风幕装置模型图

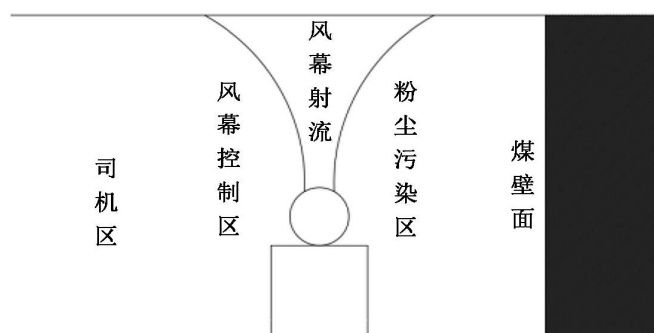


Figure 3. Principle diagram of air curtain dust control

图 3. 风幕控尘原理图

### 3. 综掘面流场理论分析

运用气-固两相流数学模型研究综掘面内的粉尘运移规律。其中的气流连续相都遵循质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程, 且三者可合为纳维-斯托克斯(N-S)方程; 粉尘粒子为离散相, 并使用基于 Euler-Lagrange 法的 DPM 离散相模型来研究粉尘颗粒在连续相中的运动。假设淮北某煤矿的综掘面内空气为不可压缩气体且温度恒定, 则连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

N-S 方程为:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \Delta u + \rho f$$

式中,  $t$  为时间,  $s$ ;  $\rho$  为流体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为在  $t$  时刻流体位于  $(x, y, z)$  点时的速度分量;  $f$  是单位体积流体受的外力, 只考虑重力时:  $f = \rho g$ ;  $p$  为压力,  $N$ 。

鉴于煤矿综掘面内风流的雷诺数与流线曲率较大, 为了让计算结果更加准确, 本文选用 **Realizable- $k$ - $\varepsilon$**  模型。其中的湍流动能  $k$ 、耗散率  $\varepsilon$  是为该模型的两个基本参数, 其对应的输运方程如下:

$k$  方程:

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

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_s} \right) \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\varepsilon \nu}} + \rho C_1 S_\varepsilon + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

上式中,  $G_k$  为由层流速度梯度产生的紊流动能,  $J$ ;  $G_b$  为由浮力产生的紊流动能,  $J$ ;  $Y_M$  为可压缩紊流产生的扩散动能,  $J$ ;  $C_2$ ,  $C_{1\varepsilon}$  为常量,  $C_2 = 1.9$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $\sigma_\varepsilon$ ,  $\sigma_k$  为紊流系数,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ;  $S_k$ ,  $S_\varepsilon$  为用户自定义的源项,  $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ 。

## 4. 物理模型与边界条件

### 4.1. 几何模型的建立

鉴于综掘面内的掘进机、风筒等机械设备会一定程度影响洁净风流和含尘风流的运动轨迹, 因此本文采用 **SolidWorks** 软件对综掘面的工况进行建模, 同时对模型进行一定的简化, 相比二维建模前者更能真实地反映综掘面巷道内风流场和粉尘场内气体流动状况。

以淮北某矿综掘面为研究对象构建几何模型, 综掘面流体域为宽度 4 m, 高度 3.2 m 的立方体, 截取长度 30 m; 压风筒、抽风筒处于同一水平面, 且距离巷道底板高 2.7 m, 直径均为 0.8 m; 风幕条缝出口的宽度为 6 cm, 综掘工作面几何模型如图 1 所示。

### 4.2. 边界条件的确定

计算的湍流模型选用 **Realizable  $k$ - $\varepsilon$** , 开启离散相并使用欧拉-拉格朗日模型。只考虑风流稳定流动时状态, 使用稳态类型的求解器, 求解器为 **Pressure Based**。考虑到综掘面内的温度和压强对空气流体的影响较小, 因此假定气体为不可压缩气体并关闭能量方程, 具体边界条件参数见表 1~3。

## 5. 数值模拟结果与分析

### 5.1. 不同压风口距离对系统控尘影响

送风口与迎头面距离  $L$  不同时, 巷道呼吸带高度(距底板高 1.6 m)水平面的粉尘浓度分布情况如图 4 所示; 当  $L$  为 10 m 时, 距底板不同高度的水平面风流场云图如图 5 所示。

如图 4、图 5 所示, 当送风口距迎头面距离  $L$  为 10 m 时, 压风筒喷出射流向迎头面运动, 风速在行进过程中不断减弱, 射流穿过风幕抵达迎头面后, 携带大量粉尘被墙面阻拦后反向偏转形成回风流, 抽风筒侧粉尘浓度总体较高于其余位置, 最高可达  $800 \text{ mg/m}^3$ 。当  $L$  为 15 m 时, 压风筒射流对风幕射流的

**Table 1.** Solver and boundary condition setting**表 1.** 求解器与边界条件设置

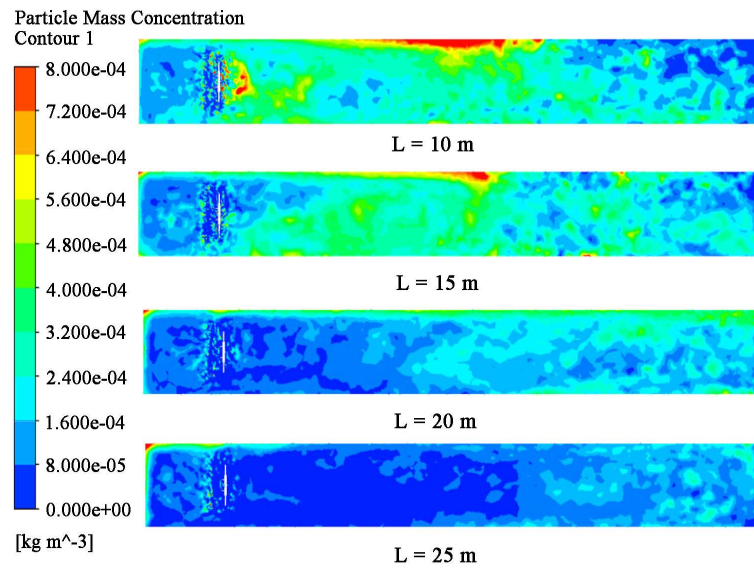
项目	设置
求解器类型	Steady
湍流模型	Realizable $k - \varepsilon$
空气密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225
重力常数(m/s <sup>2</sup> )	9.81
送风筒风速(m/s)	11
送风筒水力直径(m)	0.8
送风筒湍流强度(%)	3.1
吸风筒风速(m/s)	-8.5
吸风筒水力直径(m)	0.8
吸风筒湍流强度(%)	2.91
入口边界类型	Velocity-inlet
出口边界类型	Outflow

**Table 2.** Discrete phase parameter settings**表 2.** 离散相参数设置

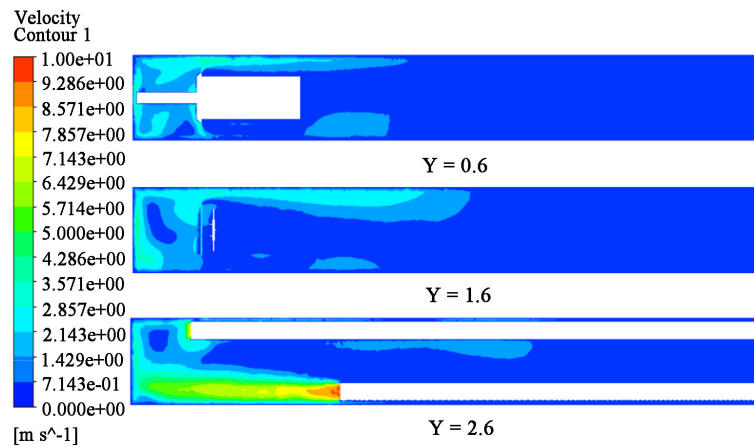
计算模型	设置
喷射源类型	surface
离散相材料	coal-hv
粒径分布类型	rosin-rammler
最小粒径(m)	1e-6
最大粒径(m)	1e-4
中粒径(m)	2e-5
粉尘速度(m/s)	0.6
质量流率(kg/s)	0.002
湍流扩散模型	随机轨道模型

**Table 3.** Solving parameter table**表 3.** 求解参数表

求解器参数	设置
压力速度耦合求解器	Coupled
离散压力	Standard
离散格式	二阶迎风



**Figure 4.** Cloud map of dust concentration of breathing zone at different distances from the comprehensive excavation face  
**图 4.** 距综掘面不同距离的呼吸带粉尘浓度云图



**Figure 5.** Cloud map of air flow field at different heights from bottom plate (L = 10)  
**图 5.** 距底板不同高度的风流场云图(L = 10)

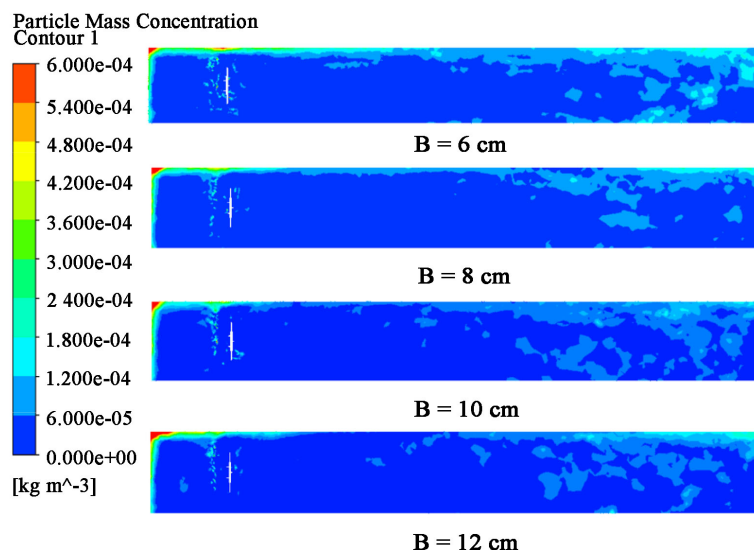
影响减弱, 回风侧粉尘浓度有所改善。当 L 为 20 m 时, 随着压风筒距迎头面距离的增加, 风幕射流受压风射流影响进一步减弱, 巷道后方粉尘浓度明显下降, 总体维持在  $230\sim 310\text{ mg/m}^3$  之间。当 L 为 25 m 时, 风幕能很好将粉尘隔离在迎头面附近, 司机位置处不受粉尘干扰, 风幕控尘效果最好。

## 5.2. 不同出口宽度对系统控尘影响

当风幕初始射流速度为 5 m/s、送风筒口距迎头面 25 m 时, 分析当风幕出口宽度 B 不同时, 综掘工作面内呼吸带高度的粉尘浓度分布情况, 具体如图 6 所示。

由图 6 可知, 当风幕出口宽度为 6 cm 时, 综掘面后方呼吸带高度的粉尘浓度较高, 浓度较高处主要分布在靠近回风侧; 风幕出口宽度为 8 cm 时, 综掘面后方粉尘浓度有所改善, 大部分粉尘被气幕射流隔离在巷道前端, 掘进机司机处不受粉尘干扰, 大量粉尘由抽风筒吸走, 巷道后方粉尘扩散情况得到改善;





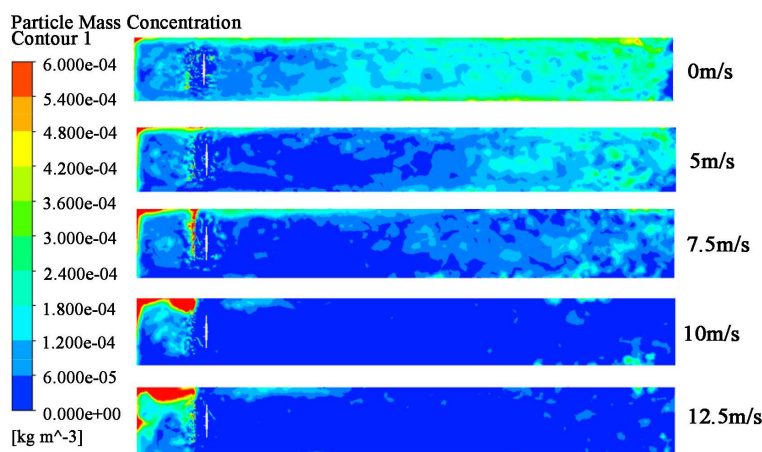
**Figure 6.** Cloud map of dust concentration in breathing zone of comprehensive excavation face at different B

**图 6.** 不同 B 时综掘面呼吸带粉尘浓度云图

当风幕出口宽度在 10~12 cm 时, 风幕射流随着条缝宽度的增加而扩散效果明显, 巷道迎头面后方的粉尘扩散现象明显加重, 粉尘浓度可高达  $230 \text{ mg/m}^3$ , 巷道后方呼吸带高度的工作环境整体较差, 风幕控尘效果不理想。

### 5.3. 不同风幕初始风速对系统控尘影响

改变风幕射流的初始风速, 在初始射流风速分别为 0 m/s、5 m/s、7.5 m/s、10 m/s、12.5 m/s 时进行数值模拟并得到计算结果, 分析不同风速下粉尘浓度的分布情况, 具体如图 7 所示。

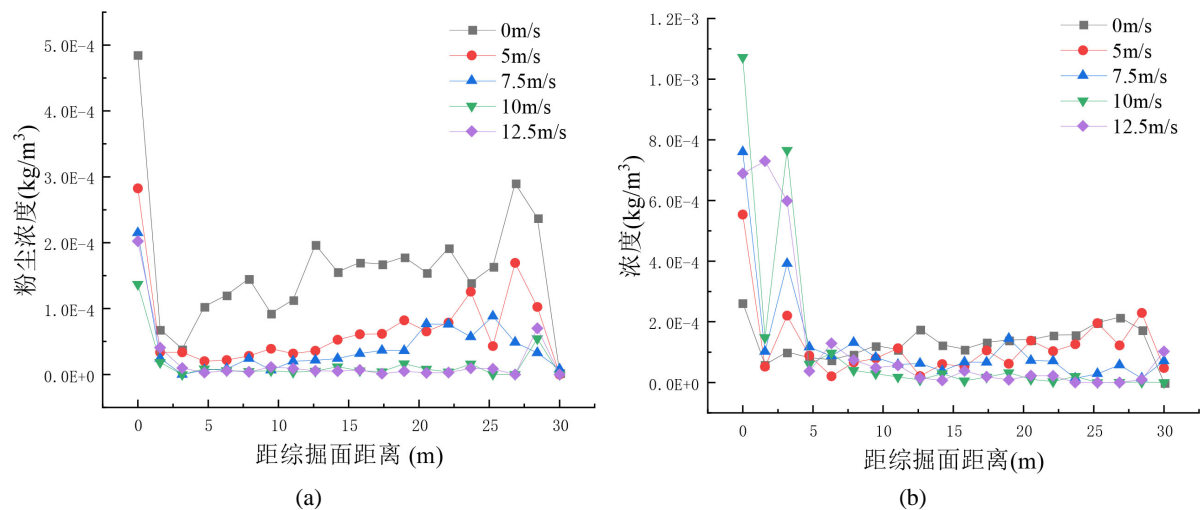


**Figure 7.** Cloud image of dust concentration in respiratory zone at different initial efflux

**图 7.** 不同初始射流时呼吸带粉尘浓度云图

由图 7 可以看出, 相较于不开启风幕时的巷道浓度, 风幕出口风速为 5 m/s 时, 巷道内呼吸带高度的粉尘浓度下降十分明显, 但巷道后方粉尘浓度依旧很高, 总体在  $230\sim 450 \text{ mg/m}^3$  内变化; 由于送风筒喷

出射流抵达迎头面后反向偏转, 大量回流向抽风筒侧扩散, 使得抽风筒侧的风幕射流发生严重偏离, 含尘气流由此沿着风幕偏移的空隙向巷道后方扩散。当风幕出口风速提升到 7.5 m/s 时, 风幕射流强度得到一定提升, 受回流影响而偏移情况得到改善, 但仍有部分含尘风流由射流与风筒的间隙向综掘面后方弥散, 使得巷道后方的呼吸带粉尘浓度维持在 110~170 mg/m<sup>3</sup> 之间。当风幕射流初始风速为 10 m/s、12.5 m/s 时, 风幕射流强度得到加强, 矿下巷道内综掘机截割头工作时产生的大量粉尘, 基本被风幕射流隔离在距迎头面 0~5 m 以内, 巷道后方的粉尘浓度大幅降低, 且维持在 30~75 mg/m<sup>3</sup> 之间; 随着风幕射流风速的提升, 风幕射流的强度得到提升, 巷道回风流对风幕射流的干扰作用被进一步削弱; 随着风幕射流风速的增加, 风幕控尘隔尘效果越来越好且在风速为 12.5 m/s 时控尘效果最好。



**Figure 8.** Distribution of dust along the wind at different initial wind speeds of air curtain on both sides of the pressure and suction air duct. (a) Dust distribution along the pressure air duct side at different initial air curtain velocities; (b) Dust distribution along the suction air duct side at different initial air curtain velocities

**图 8.** 压、抽风筒两侧不同风幕初始风速时粉尘沿程分布。(a) 压风筒侧不同风幕初始速度的粉尘沿程分布; (b) 抽风筒侧不同风幕初始速度的粉尘沿程分布

如图 8(a) 所示, 当风幕初始射流风速为 5 m/s, 综掘面后方粉尘浓度明显大幅度降低, 大量粉尘被控制在迎头面附近, 部分含尘回风流沿着抽风筒与风幕间隙向巷道后方扩散。当风幕初始风速为 7.5 m/s 时, 由于回风侧的风幕射流强度不足, 导致风幕射流受回风流影响而有所偏移, 含尘的回风流便因此向巷道后方扩散; 当其运动到送风筒口附近时, 被压风筒射流的卷吸作用所吸引, 压风筒侧粉尘浓度有所提高, 如图 7(a) 所示, 距综掘面 25 m 附近粉尘浓度有小幅提升。当初始射流风速为 10 m/s、12.5 m/s 时, 随着风幕初始射流速度的增加, 风幕抗干扰能力得到提升, 由迎头面向巷道后方扩散的粉尘浓度明显降低, 压风筒口处粉尘浓度明显降低。

如图 8(b) 所示, 当风幕初始射流风速为 5 m/s 时, 尘源处粉尘在风幕隔离和抽风筒抽吸的双重作用下, 大量聚集在距离综掘面 0~5 m 内的空间, 粉尘浓度最高可达 590 mg/m<sup>3</sup>; 由于吸风筒抽吸能力有限, 部分粉尘由风幕射流与风筒间隙处逃逸, 顺着回风侧向巷道后方运动, 控尘效果差。当初始射流风速为 7.5 m/s、10 m/s、12.5 m/s 时, 风幕射流受扰动偏移的情况得到改善, 截割头工作产生粉尘很好被控制在迎头面前端, 回风测浓度总体下降明显。

## 6. 结论

1) 当送风筒出口距综掘面为 25 m 时, 风幕射流受回流流的干扰最小, 巷道后方粉尘浓度随送风



筒口与迎头面距离的增加而减小。

2) 调整风幕射流出口宽度为 8 cm 时, 综掘面呼吸带后方粉尘的逸散范围变小, 巷道呼吸带后方粉尘浓度降低明显, 控尘效果最好。

3) 比对 5 种风幕初始射流风速, 风幕开启后, 巷道粉尘浓度整体大幅降低, 随着风幕初始风速的增加, 风幕射流抗干扰能力增强, 粉尘很好地被控制在迎头面前端; 其中, 当风幕初始射流风速为 12.5 m/s 时, 巷道后方粉尘浓度最低, 风幕控尘效果最好。

## 参考文献

- [1] 陈建武, 杨斌. 工程防护粉尘危害的多重路径[J]. 劳动保护, 2022(4): 20-22.
- [2] 孟晗, 鲁忠良. 综掘工作面长压短抽通风下粉尘分布的数值模拟[J]. 中国煤炭, 2018, 44(1): 128-131.
- [3] 王康. 快速掘进工作面粉尘分布规律及综合防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [4] 王晓飞. 长压短抽式综掘工作面粉尘运移规律研究[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(7): 100-103, 107.
- [5] Haas, E.J., Cecala, A.B. and Colinet, J.F. (2019) Comparing the Implementation of Two Dust Control Technologies from a Sociotechnical Systems Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*, **36**, 709-727. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0063-9>
- [6] 张兆威. 综掘工作面粉尘防治若干问题及对策研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(19): 22-23.
- [7] 徐竹云, 陈荣策. 矿山空气幕的有效压力平衡原理及其应用[J]. 黄金, 1988(1): 4-9.
- [8] 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(5): 765-769.