

# 局部负压作用下综采工作面各粒度粉尘弥散机制分析

张相辰, 于海明, 解 森

山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年7月23日; 录用日期: 2024年8月21日; 发布日期: 2024年8月28日

## 摘 要

针对综采面粉尘污染问题, 文章在局部负压作用下对于综采工作面各粒度粉尘的弥散机制进行了分析。通过建立风流-粉尘双向耦合模型, 分析了综采面风流场运移规律和不同粒径下粉尘弥散机制, 并对比分析了人行道侧与煤壁侧沿程粉尘浓度。结果显示, 通过设置的隔尘板和吸风口, 煤壁一侧区域风速明显低于人行道一侧, 大量粉尘在局部负压的作用下, 被吸风口抽出, 粉尘弥散受到限制, 人行道部分区域粉尘浓度仅为 $15.0 \text{ mg/m}^3$ , 人行道侧各粒径粉尘浓度均小于煤壁侧。随着弥散距离的增加, 部分携尘风流侵入人行道内, 人行道侧粉尘浓度逐渐增大, 但大粒径粉尘的浓度沿巷道距离的增加呈下降状态。

## 关键词

综采工作面, 数值模拟, 粉尘粒径, 风流控尘

# Analysis of Dust Dispersion Mechanism of Each Particle Size in Fully Mechanized Mining Face under Local Negative Pressure

Xiangchen Zhang, Haiming Yu, Sen Xie

College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Aiming at the problem of dust pollution in a fully mechanized mining face, this paper analyzes the dispersion mechanism of dust of each particle size in a fully mechanized mining face under the ac-

tion of local negative pressure. Through the establishment of a two-way coupling model of airflow and dust, the movement law of the airflow field in a fully mechanized mining face and the mechanism of dust dispersion under different particle sizes are analyzed, and the dust concentration along the sidewalk and coal wall is compared and analyzed. The results show that the wind speed on one side of the coal wall is obviously lower than that on the other side of the sidewalk through the dust barrier and suction outlet, and a large amount of dust is drawn out by the suction port under the action of local negative pressure, and the dust dispersion is limited. The dust concentration in some areas of the sidewalk is only  $15.0 \text{ mg/m}^3$ , and the dust concentration of each particle size on the sidewalk side is lower than that on the sidewalk side. With the increase of the dispersion distance, part of the dust-carrying airflow invades the sidewalk, and the dust concentration on the sidewalk side increases gradually, but the concentration of large particle size dust decreases with the increase of roadway distance.

## Keywords

Fully Mechanized Mining Face, Numerical Simulation, Dust Particle Size, Airflow Dust Control

Copyright © 2024 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

近年来,随着科技的飞速发展,国内外对于能源的需求不断增大,煤炭作为我国能源组成之一,煤炭消费总量占能源消费总量的60%左右,推动着煤矿开采向更深层次迈进[1][2]。然而,这一进程不可避免地导致综采面粉尘污染问题日益加剧,部分区域粉尘浓度高达 $4000\sim 6000 \text{ mg/m}^3$ [3]。高粉尘环境不仅危及生产安全,增加爆炸风险,还严重威胁矿工的呼吸健康,带来尘肺病等一系列职业病[4][5]。因此,治理煤矿粉尘污染,降低综采面粉尘浓度,已成为刻不容缓的任务[6][7]。

综采面的粉尘多产生于截割煤岩、运输煤块以及装载煤体等过程中,所产生的粉尘浓度、粒径各不相同,导致造成的危害和预防措施各不相同[8]。虞启辉[9]等人通过建立三维模型,利用数值模拟软件,研究了不同风速下在作业区、巷道、回风巷附近位置不同粉尘粒径的分布情况。发现采煤机附近作业区 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 粒径粉尘颗粒约占36%。刘毅[10]等人根据综采工作面的具体特点和实测数据,发现采煤机下风向10 m以内的煤壁一侧粉尘浓度较高。赵延军[11]等人建立蒙特卡洛数据软测量模型,对矿井粉尘粒径测量的关键参数进行推算。目前,综采面粉尘浓度超标及控尘措施效果不佳等问题依旧存在[12],为此本文利用建立数学模型以及几何模型,并通过数值模拟的方法对某煤矿4.2 m采高综采工作面进行研究,以期获得综采面不同粒径粉尘的弥散规律,为提高综采面清洁化生产提供新策略。

## 2. 数学模型构建

### 2.1. 风流 - 粉尘耦合数学模型构建

通过对综采面风流场特性研究,发现其内部某些局部区域雷诺数高于 $10^6$ ,因此,选择一个恰当的风流湍流模型至关重要。而Realizable  $k-\epsilon$ 模型被多次验证能够准确的描述复杂流场,广泛应用于各种流动中,因此,本文选择了Realizable  $k-\epsilon$ 模型来描述综采工作面中的气体流动。具体过程如式(1)、式(2)[13]:

$k$  方程——湍流动能方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$\varepsilon$  方程——湍流能量耗散率方程

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

式中,  $k$  为湍流动能, 单位为 J;  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率, 单位为  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $G_k$  为由平均运动速度梯度引起的紊流动能生成项,  $G_b$  为由于浮力引起的湍动能  $k$  的产生项, 单位为 J;  $Y_M$  为可压湍流中脉动扩张的影响,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  为经验常数,  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  为用户定义的源项,  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别是湍动能  $k$  和湍动耗散率  $\varepsilon$  对应的普朗特数,  $C_1$  为  $\max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ,  $\eta = E \frac{k}{\varepsilon}$ ;  $C_2$  为常数。上述方程实际计算过程中取  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

## 2.2. 颗粒受力模型

为了模拟粉尘颗粒在风流中的运移状况, 本文选择了 DPM (Discrete Phase Model) 模型[14], DPM 模型利用拉格朗日参考系中的力学原理, 对颗粒所受力的综合效应进行计算, 从而实现了对离散相颗粒运动轨迹的精准模拟, 得到粉尘弥散结果。公式为:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt_p} = G + F_f + F_p + F_d + F_M + F_{V_m} \quad (3)$$

$$F_p = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} \quad (4)$$

式中,  $m_p$  为颗粒质量;  $\vec{u}$  为空气瞬时速度;  $\vec{u}_p$  为颗粒速度;  $t_p$  为颗粒运动时间;  $G$  为重力;  $F_f$  为浮力;  $F_p$  为曳力;  $F_d$  为压力梯度力;  $F_M$  为 Magnus 升力;  $F_{V_m}$  为虚假质量力;  $\tau_r$  为雾滴粒子的松弛时间, 计算方法为[15]:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (5)$$

式中,  $d_p$  为颗粒直径;  $\rho_p$  为颗粒密度;  $C_d$  为曳力系数;  $\mu$  为气体的粘度系数;  $Re$  为相对雷诺数:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (6)$$

## 3. 物理模型

### 3.1. 物理模型及网格划分

某煤矿综采面现场采用 U 型通风, 为了确保模拟结果的可靠性, 对模型进行适当的简化, 着重对采煤机滚筒截齿、液压支架梁与梁之间的连接构造、刮板输送机、张紧装置以及钢丝绳等关键部件进行了适度的简化处理。建立了几何模型, 如图 1 所示。工作面尺寸为  $109.3 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ , 支架移动区  $25.8 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ , 进风、回风巷道为  $23.4 \text{ m} \times 4.4 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 。采煤机机身 为  $6 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ , 摇臂长  $3.1 \text{ m}$ , 滚筒简化为直径  $2.20 \text{ m}$ , 高  $0.8 \text{ m}$  的圆柱, 位于进风隅角下风侧  $25.8 \text{ m}$  处。布设了液压支架  $86$  台, 液压支架宽度  $1.33 \text{ m}$ , 超前支架  $8$  台。

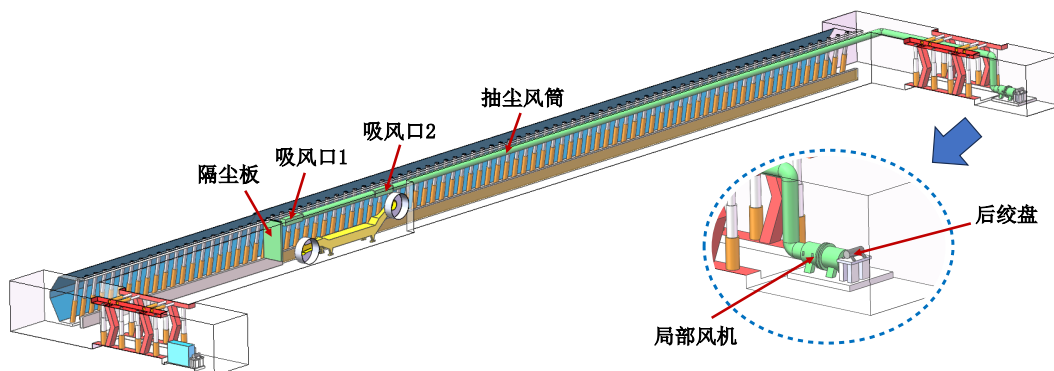


Figure 1. Geometric model  
图 1. 几何模型

### 3.2. 网格验证和边界条件设定

利用 ICEM-CFD 对于已构建的几何模型进行非结构化网格划分[16]。将数据导入 FLUENT 软件，根据某煤矿综采工作面的现场状况设置边界条件：进风口的边界类型设置为 Velocity-inlet，出风口的边界类型设置为 Pressure-outlet，采煤机滚筒设置为发尘面，粉尘发射类型设置为 Surface，粉尘排放总量设定为 0.003 kg/s，具体参数如表 1。

Table 1. Boundary conditions  
表 1. 边界条件

名称	类型	参数
模型	k-epsilon	Realizable
边界	进风口(m/s)	1.1
	吸风口 1 (m <sup>3</sup> /min)	600
	吸风口 2 (m <sup>3</sup> /min)	620
	进风口边界类型	Velocity-inlet
	出风口边界类型	Pressure-outlet
	采煤机滚筒	Dust Source
运算方法	Scheme	SIMPLEC
壁面	DPM	Escape
粉尘颗粒	粒径分布	Rosin-Rammler
	总流量(kg/s)	0.003
	粉尘发射类型	Surface

## 4. 综采面风流 - 粉尘模拟结果分析

### 4.1. 新技术控尘规律分析

新方法的原理如下：当新鲜风流通过进风巷道流向综采工作面时，遇到隔尘板的阻挡，大部分风流会改变原本的路径，提前涌入人行道区域，从而减少了直接流向采煤机滚筒的风量。有效限制了滚筒附

近粉尘的弥散,使得粉尘主要集中在滚筒附近区域。与此同时,人行道内因大量风流的涌入导致风速加快,高速风流形成了一道屏障,有效阻止了滚筒附近携带粉尘的气流侵入人行道,保持了人行道的相对清洁。通过采煤机滚筒上方设置吸风口,利用负压原理,通过吸风口产生的强大吸力,将滚筒截割过程中产生的高浓度粉尘迅速吸入并排出,从而显著降低了作业区域的粉尘浓度,提升了整体的除尘效率。

#### 4.1.1. 风流场运移结果

在局部负压作用下,通过综采面风流流线图以及在采煤机下风侧 10 m、20 m、30 m、40 m、50 m 处共设 5 处截面,得到综采面内风流具体分布情况,如图 2(a)所示,通过在采煤机前方设置隔尘板,可有效促使大部分新鲜风流运移至人行道,在采煤机下风侧 10 m 处,人行道内风速为 1.71 m/s,而煤壁一侧风速仅为 0.53 m/s,在距采煤机 30 m 处人行道内风速为 1.57 m/s,而煤壁空间内风速为 0.60 m/s。人行道内高速风流形成了一道屏障,有效阻止了滚筒附近携带粉尘的气流侵入人行道,保持了人行道的相对清洁。

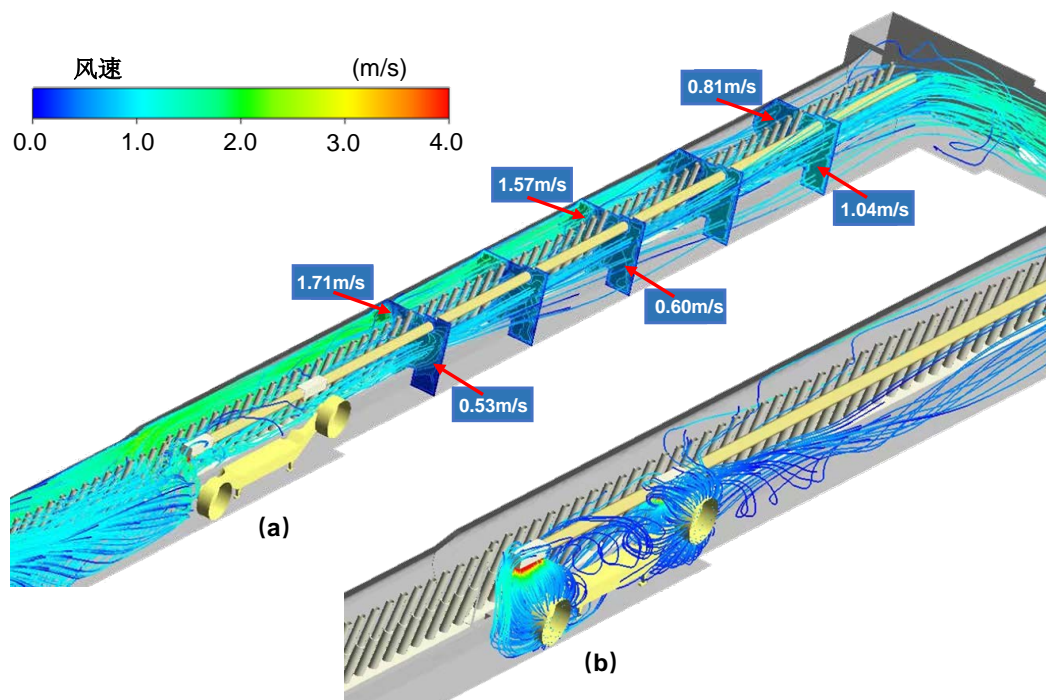
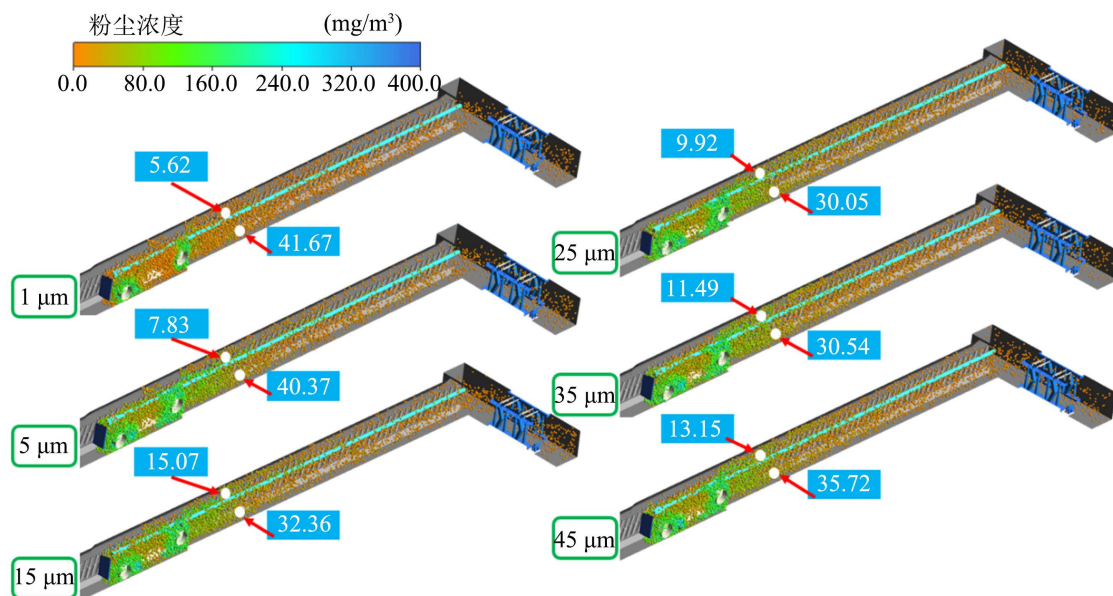


Figure 2. Airflow distribution map of fully mechanized mining face  
图 2. 综采面风流分布图

如图 2(b)所示,通过在采煤机滚筒上方对应设置两个吸风口以及抽尘管道,滚筒处的大量携尘风流被吸入吸风口,使采煤机附近负压效果显著,与人行道内产生压力差,携尘风流无法弥散运移至人行道内,粉尘污染降低。

#### 4.1.2. 不同粒径粉尘运移结果

本文通过对于粒径为 1  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ 、25  $\mu\text{m}$ 、35  $\mu\text{m}$  和 45  $\mu\text{m}$  的综采工作面粉尘颗粒进行研究,在采煤机下风侧 20 m、距地面高度 1.5 m 处设置测点,不同粒径的粉尘浓度分布情况如图 3 所示,在局部负压作用下,通过设置隔尘板以及吸风口,大量风流提前运移至人行道,且在负压的作用下,粉尘难以弥散至人行道内,采煤机下风侧 15 m 处人行道内粉尘各粒径的浓度均处于 15.0  $\text{mg}/\text{m}^3$  以下。

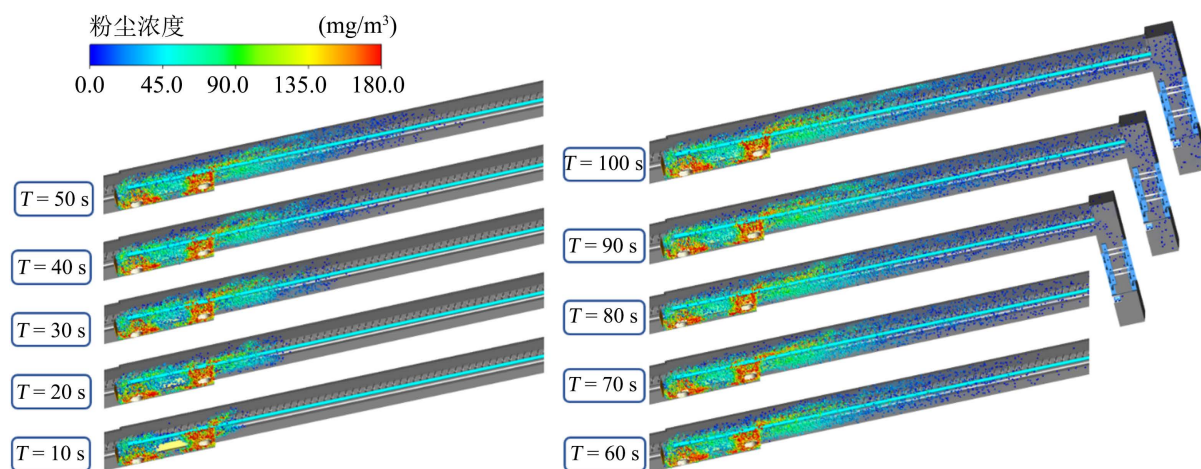


**Figure 3.** Dust concentration distribution of different particle sizes  
**图 3.** 不同粒径粉尘浓度分布图

在煤壁侧粉尘浓度较高,但随着距离的增加,大粒径粉尘逐渐沉降,而小粒径粉尘仍悬浮在空中,浓度较高,当粉尘粒径为  $1\ \mu\text{m}$  时,煤壁侧的粉尘浓度为  $41.67\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,而随着粉尘粒径的增大,采煤机下风侧  $20\ \text{m}$  处的粉尘浓度逐渐降低,在粉尘粒径为  $45\ \mu\text{m}$  时,粉尘浓度为  $35.72\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。因此进行综采面控尘时,针对中小粒径的粉尘问题,建议采用湿式捕尘等除尘方式对粉尘颗粒进行捕捉,进一步控制粉尘污染问题。

#### 4.2. 新技术运移规律分析

为进一步研究局部负压对综采面内粉尘弥散的影响,本文对  $45\ \mu\text{m}$  粒径粉尘场的动态变化进行研究。现截取  $10\ \text{s}$ 、 $20\ \text{s}$ 、 $30\ \text{s}$ 、 $40\ \text{s}$ 、 $50\ \text{s}$ 、 $60\ \text{s}$ 、 $70\ \text{s}$ 、 $80\ \text{s}$ 、 $90\ \text{s}$  和  $100\ \text{s}$  十个时间点的粉尘浓度,如图 4 所示。



**Figure 4.** Dispersion diagram of dust particles  
**图 4.** 粉尘颗粒弥散图

在局部负压作用下,在  $T = 10$  s 时,由于人行道内的风速高以及吸风口产生的负压,大部分粉尘被限制在采煤机滚筒处,导致采煤机滚筒周围区域内粉尘浓度高,而人行道粉尘浓度较低。随着携尘风流的运移,在  $T = 30$  s 时,由于粉尘数量的增多,部分携尘风流脱离负压的影响,向采煤机下风侧运移,随着距离的增加,控尘效率开始下降,部分携尘风流开始渗透至人行道。当  $T = 100$  s 时,工作面内的粉尘弥散完全,随着距离的增加,粉尘逐渐沉降,  $45 \mu\text{m}$  粒径的粉尘浓度呈下降趋势,在回风巷道内粉尘浓度极低。

### 4.3. 不同粒径沿程粉尘浓度分析

为得到局部负压作用下煤壁侧与人行道侧沿程粉尘浓度的分布状况,在距回风巷道 5 m、煤壁 1.5 m、地面 1.5 m 处的煤壁侧空间内以及在距回风巷道 5 m、煤壁 1.5 m、地面 1.5 m 处的人行道侧空间内,沿逆风方向每隔 1 m 各设置一个测点,每侧空间内设置 60 个测点,且第 60 个测点位于采煤机下风侧一米处。两侧空间内各测点粉尘浓度对比如图 5 所示。

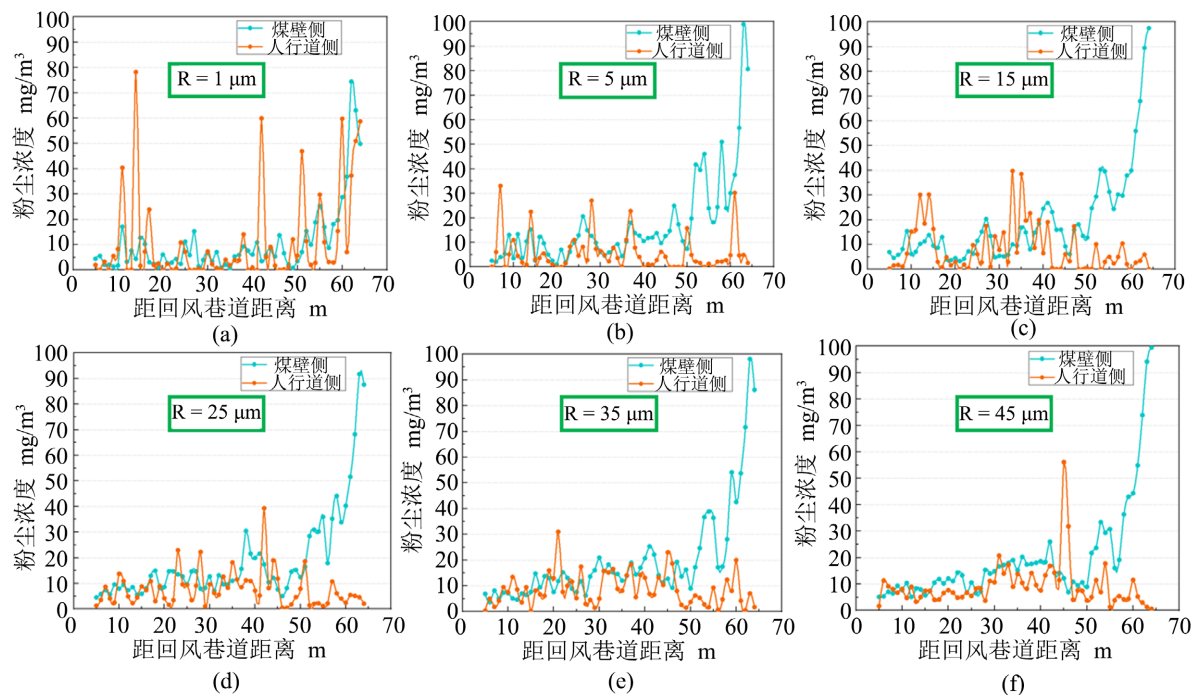


Figure 5. Comparison of dust concentration with different particle sizes

图 5. 不同粒径沿程粉尘浓度对比图

通过分析不同粒径粉尘在煤壁侧和人行道侧的沿程粉尘浓度,在局部负压的作用下,煤壁侧各粒径粉尘浓度均高于人行道侧。如图 5(a)和图 5(b)所示,在采煤机下风侧 30 m 范围内,小粒径粉尘悬浮在空中,粉尘浓度较高。如图 5(c)~(f)所示,在采煤机下风侧 10 m 范围内,由于进风风流的影响,粉尘漂浮在空中,浓度较高,但随着弥散距离的增加,大粒径粉尘逐渐沉降,粉尘浓度降低,粒径为  $45 \mu\text{m}$  的粉尘在靠近回风巷道处平均浓度低于  $10.0 \text{ mg/m}^3$ 。

## 5. 结论

1) 在局部负压作用下,通过设置隔尘板和吸风口,新鲜风流提前运移至人行道,在采煤机下风侧 30 m 处,煤壁一侧风速为  $0.60 \text{ m/s}$ ,人行道内风速为  $1.57 \text{ m/s}$ ,携尘风流难以弥散至人行道内,采煤机附近

由于吸风口作用产生负压,大量粉尘被吸风口抽出,有效的降低了粉尘污染。

2) 在局部负压作用下,人行道侧不同粒径粉尘浓度均小于煤壁侧,人行道侧采煤机下风侧 15 m 处粉尘浓度小于  $15.0 \text{ mg/m}^3$ ,煤壁侧粉尘浓度较高,由于粉尘受重力作用影响,粉尘浓度沿巷道距离增加呈下降状态。通过对于  $45 \mu\text{m}$  粒径的粉尘不同时间段内的研究,进一步证实煤壁侧大粒径粉尘浓度在回风巷附近平均浓度低于  $15.0 \text{ mg/m}^3$ ,本方法对于大粒径粉尘的控除尘效果显著。

## 参考文献

- [1] 程卫民,周刚,陈连军,等.我国煤矿粉尘防治理论与技术 20 年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2): 1-20.
- [2] 张学伟.综采工作面智能化建设分析[J].能源与节能,2024(6): 250-253.
- [3] 谢瑶.大采高综采面截割粉尘污染规律及雾场控尘研究[D]:[硕士学位论文].青岛:山东科技大学,2019.
- [4] 中国应急救援人员关爱和矿山尘肺病防治基金会.凝心聚力谋发展与时俱进创新篇——中国应急救援人员关爱和矿山尘肺病防治基金会第三届理事会第六次会议在京召开[J].当代矿工,2024(1): 18-19.
- [5] 黄心如.职业性尘肺病问题成因及治理的相关建议思考[J].区域治理,2022(42): 81-84.
- [6] 于海明,叶宇希,程卫民,等.高瓦斯煤矿模块化分风控尘方法及其排瓦斯规律分析[J/OL].煤炭学报,1-9. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0834>,2024-08-22.
- [7] 苗彦平,桂长庚,郑旭鹤,等.大采高综采面粉尘分布规律及防治技术研究[J].煤炭技术,2023,42(1): 124-128.
- [8] 齐力.马兰煤矿采掘工作面产尘特性实测分析[J].江西煤炭科技,2023(3): 183-185,188.
- [9] 虞启辉,杜旭东,高胜昱,等.综采面排尘风速及颗粒轨迹的数值模拟[J].能源与环保,2023,45(10): 1-7.
- [10] 刘毅,蒋仲安,蔡卫,等.综采工作面粉尘运动规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2007(4): 351-353,362.
- [11] 赵延军,冯国旗,高承彬.基于蒙特卡洛算法的矿尘粒径测量研究[J].煤矿安全,2016,47(11): 184-186.
- [12] Zhang, L., Zhou, G., Ma, Y., et al. (2021) Numerical Analysis on Spatial Distribution for Concentration and Particle Size of Particulate Pollutants in Dust Environment at Fully Mechanized Coal Mining Face. *Powder Technology*, **383**, 143-158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.039>
- [13] Toja-Silva, F., Pregel-Hoderlein, C. and Chen, J. (2018) On the Urban Geometry Generalization for CFD Simulation of Gas Dispersion from Chimneys: Comparison with Gaussian Plume Model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **177**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.003>
- [14] Mo, J., Yang, J., Ma, W., Chen, F. and Zhang, S. (2019) Numerical Simulation and Field Experiment Study on Onboard Dust Removal Technology Based on Airflow-Dust Pollution Dispersion Characteristics. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 1721-1733. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06847-8>
- [15] Gosman, A.D. and Loannides, E. (1983) Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors. *Journal of Energy*, **7**, 482-490. <https://doi.org/10.2514/3.62687>
- [16] 马千里,李思昆,白晓征,等.CFD非结构化网格格心格式数据高质量体绘制方法[J].计算机学报,2011,34(3): 3508-3516.