

“阻隔 - 封闭”新方法粉尘污染机制

赵俊伟

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3月15日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月18日

摘要

针对煤矿综采工作面截割作业区严重粉尘污染问题,提出了一种“阻隔 - 封闭”控尘新方法。采用CFD-DPM方法建立了风流 - 粉尘耦合运移模型,对比研究了原始与使用新方法后风流 - 粉尘运移机制。结果表明:在原始状态下,受割煤产生携尘风流横向偏移的影响,大量粉尘涌入人行道,人员作业区粉尘浓度可达 300 mg/m^3 以上。采用“阻隔 - 封闭”方法后,约80%的新鲜风流在巷道上风侧距离采煤机后滚筒3 m处提前发生横向偏移,造成煤壁空间与人行道空间风流压能差,延缓了携尘风流的偏移。采煤机后侧安置的多孔挡板,阻挡粉尘进入作业区,保证人行道处的清洁空间长达30 m,平均粉尘浓度由 300 mg/m^3 降为 50 mg/m^3 以下,控尘效率超过83.3%以上。该研究为综采面煤炭清洁化生产提供了新策略。

关键词

综采工作面, 数值模拟, 阻隔 - 封闭, 污染规律, 风流控尘

A New Method of “Barrier Closure” for Dust Pollution Mechanism

Junwei Zhao

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

Received: Mar. 15th, 2024; accepted: Mar. 31st, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

In view of the serious dust pollution problem in the cutting area of coal mining face, a new method of “Barrier closure” dust control is proposed. The CFD-DPM method was used to establish a coupled wind-dust transport model, and the wind-dust transport mechanism was compared between the original and the new method. The results show that in the original state, due to the lateral deviation of the dust carrying airflow generated by coal cutting, a large amount of dust flows into the side-

walk, and the dust concentration in the personnel operation area can reach over 300 mg/m³. After adopting the method of “Barrier closure”, about 80% of the fresh airflow in the upwind side of the roadway from the coal miner to the rear roller 3 m in advance of the lateral offset, resulting in the difference in the pressure energy of the airflow between the space of the coal wall and the space of the walkway, which slows down the dust-carrying airflow offset. The porous baffle placed at the back side of the coal mining machine blocks dust from entering the operation area, ensuring that the clean space at the footpath is up to 30 m long, and the average dust concentration is reduced from 300 mg/m³ to less than 50 mg/m³, with the dust control efficiency exceeding more than 83.3%. This study provides a new strategy for cleaner coal production in the integrated mining face.

Keywords

Fully Mechanized Mining Face, Numerical Simulation, Barrier Closure, Pollution Patterns, Wind Flow Control Dust

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

煤炭是世界最重要的基础能源来源。煤炭生产过程中难以避免产生大量的粉尘污染，综采面是煤矿污染最严重的作业区域之一，局部区域粉尘浓度可达到 8000~10,000 mg/m³ [1]。工人长期暴露在高浓度粉尘的环境中对他们的身心健康造成了严重的威胁，患尘肺病的概率大大增加。因此，采取有效措施降低煤矿综采面粉尘浓度，对控制尘肺病，减少井下事故发生具有极其重要的意义[2]。

鉴于目前的综采面除尘现状，并考虑到经济性、实用性、易用性等因素，高定向通风控除尘技术已成为发展趋势[3]。王鹏飞等人模拟研究了空气幕阻隔过程中的风流场和粉尘分布，研究发现采煤机空气幕可阻止粉尘扩散到人行道[4]。聂文等人开发了一种综采面风机除尘技术，两个机载风机可产生高速气流场，在采煤机和人行道之间形成了一个独立的清洁空间，可阻止粉尘进入司机作业区[5]。目前，综采面定向通风技术存在可控性差、控尘效率低，且难以在综采面开放空间应用的问题。为此本文将结合 CFD 数值模拟和现场实测方法对陕西榆林某煤矿 4.2 m 采高综采工作面进行模拟研究，以期获得采用“阻隔-封闭”技术后综采面粉尘沿程扩散规律，该研究为综采面煤炭清洁化生产提供了新策略。

2. 数学模型构建

2.1. 风流 - 粉尘耦合模型构建

综采工作面气流 - 粉尘运移过程是非常复杂的气固两相耦合过程。根据携尘流场的特点，基于欧拉 - 拉格朗日方法计算气流 - 粉尘耦合运移[6]。在众多湍流模型中，Realizable $k - \varepsilon$ 模型可保持雷诺应力与真实湍流一致，并在分离流计算和二次流的复杂流动计算中表现出色，可以更精确的模拟射流的扩散速度，更适合于描述高应变率和流线弯曲程度较大的流动，因此文中选用 Realizable $k - \varepsilon$ 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) [7] [8]。

k 方程——湍流动能方程

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

ε 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, ε 为湍流动能耗散率, 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, Y_M 为可压湍流中脉动扩张的影响, $G_{1\varepsilon}$, $G_{2\varepsilon}$ 和 $G_{3\varepsilon}$ 为经验常数, S_k 和 S_ε 为用户定义的源项, σ_k 和 σ_ε 分别是湍动能 k 和湍动耗散率 ε 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. 多孔介质模型构建

多孔介质模型是计算填充床、多孔板、分流器等材质中的常用模型, 也称为多孔跳跃模型, 在薄多孔介质界面区应用过程中表现出良好的稳定性和收敛性。本研究采用多孔跳跃模型计算多孔档尘板的导流性能[9] [10]。

在使用多孔跳跃模型之前, 需要确定两个关键参数, 即渗透率 α 和惯性损失系数 C_2 , 可根据半经验的厄尔贡方程计算出来[10]:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} V_\infty + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} V_\infty^2 \quad (3)$$

然后, 渗透率 α 和惯性损失系数 C_2 可以计算为:

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon_q)}{D_p \varepsilon_q^3} \quad (5)$$

式中, Δp 为压力损失, L 为多孔介质的厚度, μ 为空气粘度, V_∞ 为空气通过多孔介质的速度, ρ 为空气密度。

新装置中采用的多孔挡板为网状结构的铁质挡板, 通过孔径 w 和线径 D_p 可计算多孔跳跃模型中的孔数 n 和孔隙度 ε_1 [10] [11]:

$$n = \frac{0.0254}{w + D_p} \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{w^2}{(w + D_p)^2} \times 100\% \quad (7)$$

3. 物理模型

3.1. 物理模型及网格划分

陕西榆林某综采面采用 U 型通风, 包括进风巷道和回风巷道, 平均开采高度为 4.2 m。综采工作面设有全套机械采矿设备, 包括双滚筒 MG400/985-GWD 型采煤机、ZF7000-23/47 顶放煤液压支架、刮板输送机、电缆槽等。根据综采面的现场实际情况, 采用 SolidWorks 软件建立了全尺度三维几何模型。采

煤工作面长度、宽度、高度分别为 106.5 m、5.2 m、4.2 m，新方法采用了多孔挡板一个，其宽度、长度、高度分别为 0.1 m、15.0 m 和 3.7 m，布设在采煤机机身 1.5 m。设置隔尘板 1 个，2.0 m × 0.2 m × 3.5 m，距采煤机后滚筒距离 3 m。液压支架上设置固定钢丝绳和驱动钢丝绳，其上悬挂调风板和多孔挡板，绞车 2 台，为钢丝绳驱动设备，并增设张紧装置 1 台，可实现调风板与多孔挡板随着割煤作业前后同步运移，如图 1 所示。

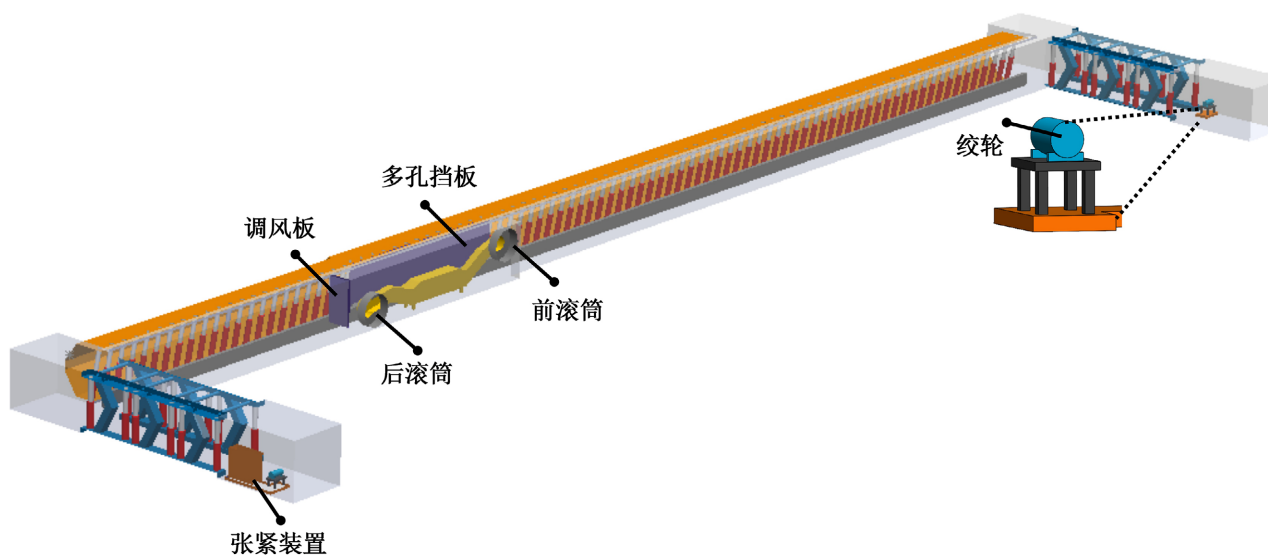


Figure 1. Geometric model

图 1. 几何模型

3.2. 网格验证和边界条件设定

将构建好的三维模型导入 ANSYS-ICEM 中进行非结构化网格划分。得到了三个不同数量的网格：356 万(低质量)、556 万(中等质量)和 786 万(高质量)。通过风速独立性验证可知网格数目为 556 万时，满足符合模拟要求。将网格文件导入 FLUENT 软件中，根据陕西榆林某综采面的现场实际情况，设定边界条件如下：进风口的边界类型设置为 Velocity-inlet，出风口边界类型设置为 Pressure-outlet，压力自由出口。滚筒设置为发尘面，尘源喷射方式为 Surface，粉尘总流量为 0.025 kg/s。多孔介质入口类型设置为 Porous-jump，多孔介质出口类型设置为 Interior [12] [13]。巷道壁面及设备边界类型为 Wall，具体参数如表 1。

Table 1. Setting table

表 1. 设置表

名称	类型	参数
模型	k-epsilon	Realizable
边界条件	进风口(m/s)	0.95 m/s
	多孔介质入口	Porous-jump
	多孔介质出口	Interior
	入口边界类型	Velocity-inlet
	出风口	Pressure-outlet
	采煤机滚筒	Dust Source

续表

壁面	DPM	Escape
运算方法	Scheme	SIMPLEC
	总流量(kg/s)	0.025
	结束时间(s)	80.0
	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

本研究综合分析综采面的风流流场及粉尘场结果，以揭示“阻隔 - 封闭”新方法的控尘规律。新鲜风流从进风巷道中进入综采工作面，当新鲜风流运移至调风板处受到阻挡，使其提前 3 m 进入人行道区域，增加人行道一侧风流压能。随巷道距离的增加，新鲜风流将逐渐由人行道区域流向采煤机区域，成为阻止采煤机含尘风流进入人行道的风墙，减少含尘风流的横向偏移。同时采煤机与人行道采用多孔挡板进行阻隔，阻碍了采煤机割煤形成的携尘风流的横向偏移，在人行道形成较大的清洁化独立空间。在井下作业环境中，粉尘的运移规律主要受风流的影响。在对粉尘场进行分析之前，对综采面的风流粉尘进行具体分析。

4.1.1. 风流场运移结果

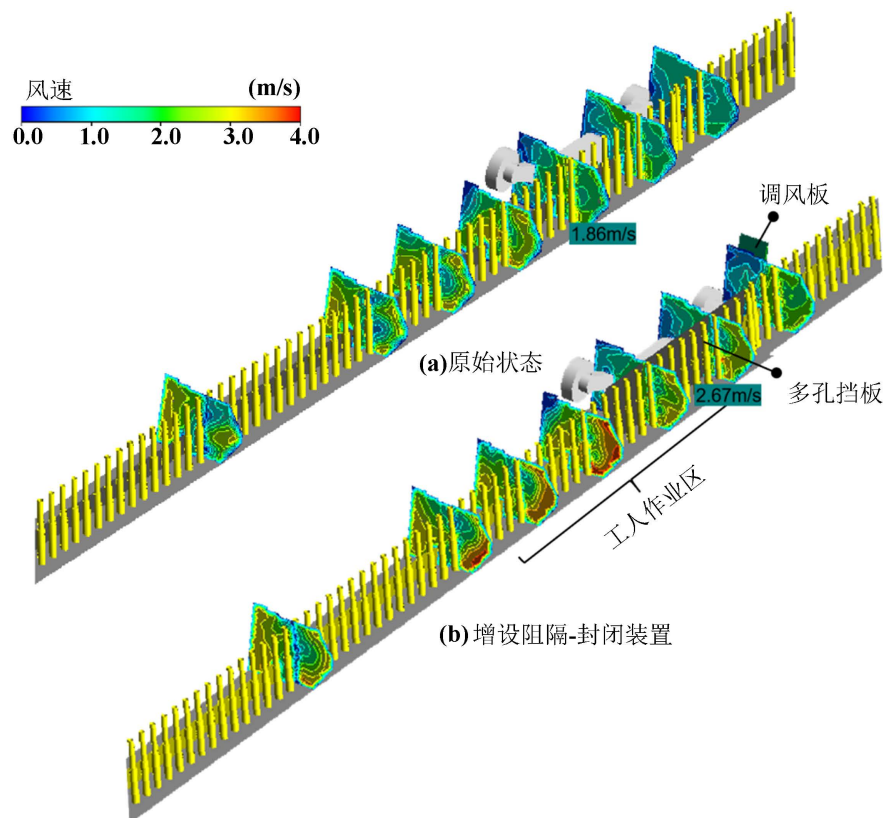


Figure 2. Cross-sectional wind flow distribution diagram near the coal shearer
图 2. 采煤机附近截面风流分布图

本研究对沿综采面风流流动方向间隔 7 m 选取六个横截面进行重点分析,颜色代表风速大小。如图 2(a)可知,在原始风流情况下,从进风口进入的新鲜风流,以 1 m/s 的速度沿巷道运移。沿煤壁侧风流受到采煤机阻碍,逐渐向人行道侧偏移,导致人行道区风速略高于煤壁侧,平均风速达到 1.86 m/s。在采煤机下风侧,受采煤机前滚筒割煤的影响,部分携尘风流向人行道扩散,工人作业区平均风速达到 2.15 m/s,对作业员造成不好影响。

在增设“阻隔-封闭”装置后,图 2(b)所示,新鲜风流改变原始运移方向,在距离采煤机后滚筒 3 m 处,近 95% 的风流提前发生横向偏移。在人行道司机处风速达到 2.15 m/s,较原始状态提高 1.3 倍,增加了人行道一侧的压能,造成煤壁侧与人行道侧的风流压能差。在采煤机下风侧,人行道侧风速明显高于煤壁侧,最高风速达到 3.6 m/s,配合多孔挡板作用,抑制了割煤产生的携尘风流偏移,保证作业人员的环境安全。

4.1.2. 粉尘场运移结果

两种不同情况影响下综采工作面粉尘颗粒场扩散结果如图 3 所示,采用云图表示粉尘浓度大小。在原始状态下,如图 3(a)所示,煤壁侧粉尘浓度最高达 825.5 mg/m³。随携尘风流向人行道侧迁移,司机处粉尘达到 300 mg/m³ 以上。随着扩散距离的增加,较大的粉尘颗粒发生沉降,小颗粒粉尘继续污染人员呼吸带区域,在采煤机附近 30 m 范围内人行道区域形成了平均粉尘浓度在 200 mg/m³ 以上的高浓度污染区,威胁工人的身心健康。

在增设“阻隔-封闭”装置后,如图 3(b)所示,在调风板的作用下新鲜风流提前 3 m 发生横向偏移,增加了人行道侧的风流压能,延缓采煤机割煤产生的携尘风流的迁移。采煤机后侧设置的多孔挡板,在保证司机视线不受影响的同时,抑制煤尘向人行道侧扩散。司机处的粉尘浓度降低至 50 mg/m³ 以下,较原始状态下降了 83.3%,采煤机附近 30 m 范围内人行道区域平均粉尘浓度为 85 mg/m³ 以下,工人作业区几乎无粉尘污染,新方法控尘效果显著。

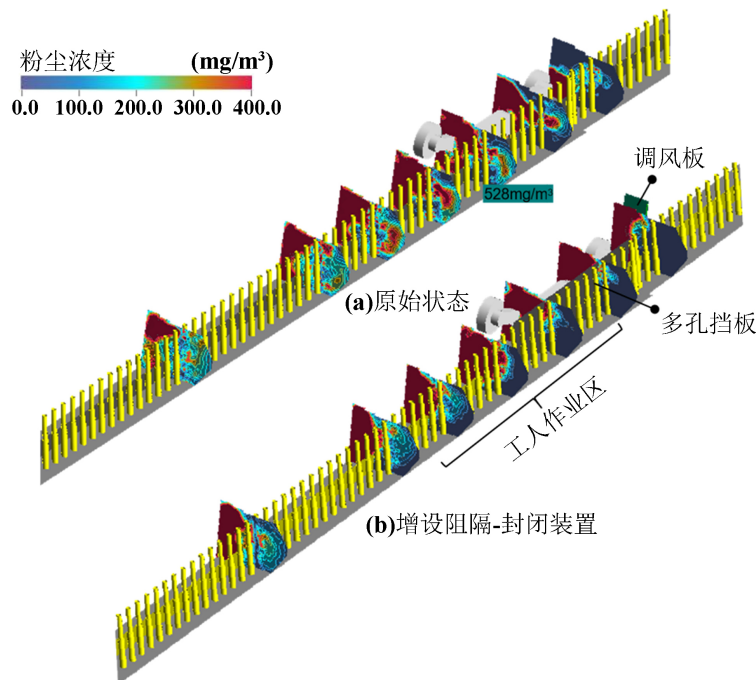


Figure 3. Cross-sectional concentration distribution diagram near the coal shearer
图 3. 采煤机附近截面浓度分布图

4.2. 新技术运移规律分析

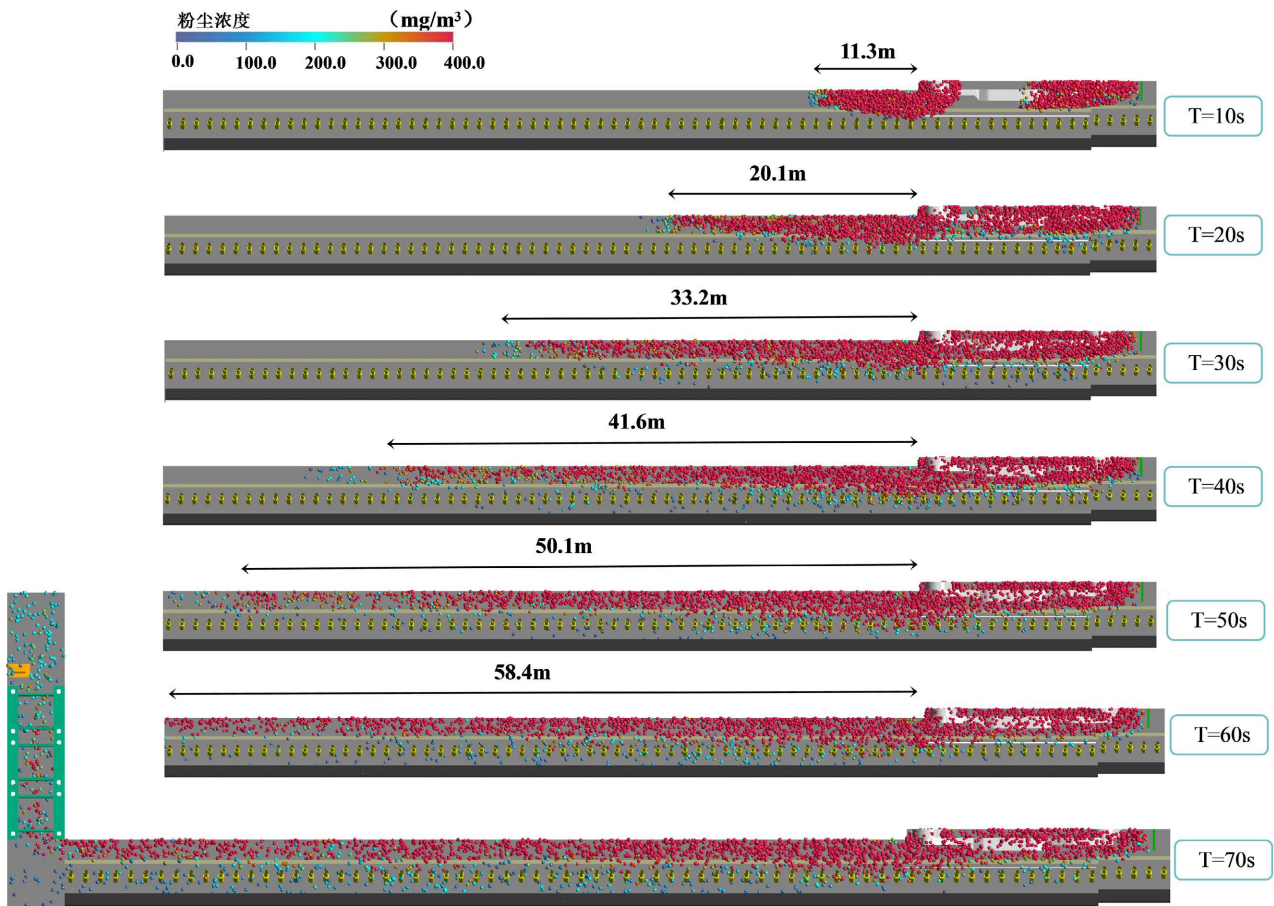


Figure 4. Dust diffusion diagram
图 4. 粉尘扩散图

采用 CFD-DEM 耦合模型计算采用新技术后下粉尘场的扩散情况。为更好的研究巷道内粉尘浓度的扩散规律，选取 10 s、20 s、30 s、40 s、50 s、60 s、70 s 四个不同的时间节点，对粉尘的扩散特点进行分析，如图 4 所示。

在“阻隔-封闭”装置的影响下，由采煤机滚筒割煤产生的大量粉尘被阻挡在煤壁侧，司机处几乎无粉尘污染。当 $T = 20$ s 时，受人行道反向煤壁侧风流和多孔挡板阻挡作用，粉尘沿煤壁侧运移，高浓度粉尘集聚采煤机后滚筒 20.1 m 范围内，少量粉尘扩散至液压支架附近。 $T = 50$ s，粉尘扩散到 58.4 m，随巷道距离增加，“阻隔-封闭”装置隔尘效果减弱，少量粉尘进入人行道侧。当 $T = 70$ s 时，巷道内粉尘扩散完全，煤壁侧粉尘浓度远高于人行道侧，大量粉尘在重力作用下沉降到底板，在风速降低的情况下，人行道侧粉尘浓度随巷道距离增加而逐渐升高。

4.3. 粒径分析

为研究新方法应用后不同粒径的扩散规律，通过 Post 后处理分析导出近 100 万粉尘颗粒场数据，并通过 MATLAB 软件进行处理，绘制巷道内颗粒分布图及不同粒径占比图。

采用“阻隔-封闭”新方法后，研究采煤机下风侧 $X = 25.0 \sim 100.0$ m 范围内， $7.07 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、

40 μm 、50 μm 、60 μm 六种类粉尘粒径占比,如图 5(a)~(f)所示[6]。在巷道 $X = 25.0\sim 100.0$ m 范围内,7.07 μm 和 20 μm 的小颗粒粉尘始终悬浮在空中,占比在 95.5% 以上。采煤机附近 $X = 26.5\sim 55.5$ m 范围内,受采煤机割煤携尘风流的影响,大部分中、大颗粒仍悬浮的空中。随巷道距离的增加,中、大颗粒逐渐沉降,40 μm 以上的中大颗粒粉尘在巷道不同距离范围内占比呈稳定下降的趋势,沿程下降幅度达到 54.4% 以上,其中 60 μm 大颗粒粉尘沿程降幅达到 75% 以上。针对人行道处仍存在中小颗粒污染的问题,可采用湿式捕尘帘对粉尘颗粒进行捕捉,进一步净化工人作业区环境。

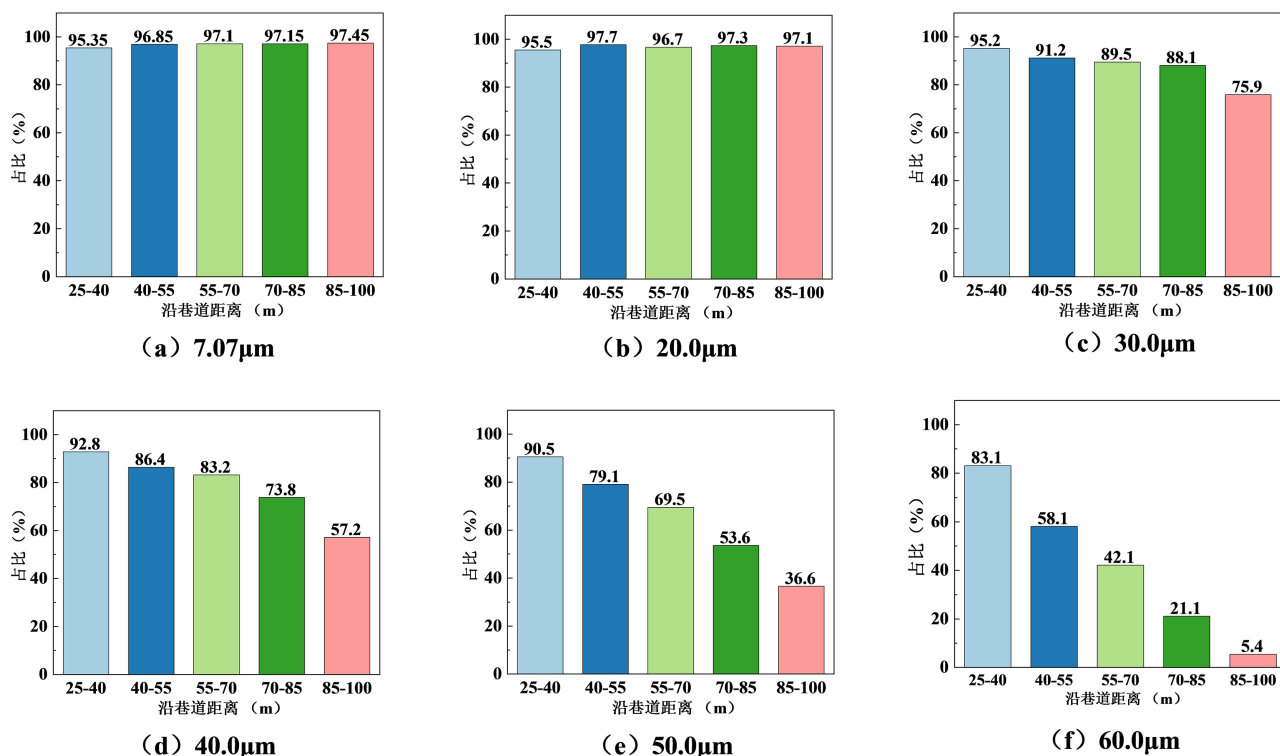


Figure 5. Particle size distribution chart
图 5. 粒径分布图

5. 结论

1) 采用“阻隔 - 封闭”新方法后,新鲜风流向人行道一侧的横向偏移空间位置较原始状态提前 3 m,人行道侧风速较原始状态增加 1.3 m/s 左右,造成煤壁空间与人行道空间的横向压能差,工人作业区粉尘浓度随风量的增加呈下降趋势。工作区平均粉尘浓度控制在 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以内,控尘效率达到 83.3%。

2) 受“阻隔 - 封闭”阻挡作用,约 80% 的粉尘颗粒聚集在采煤机一侧,司机处粉尘污染趋于 0。7.07 μm 和 20 μm 的粉尘粒径较小,受重力在作用不明显,巷道内始终占比 95% 左右,40 μm 以上的中大颗粒粉尘受重力作用明显,沿巷道距离增加呈稳定下降状态。鉴于“阻隔 - 封闭”方法的降尘效率高、可操作性强,在不久的将来,该方法在综采面控除尘中将具有广泛的应用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 詹平, 刘飞翔, 赵嘉良. 基于 LDA 和 ARIMA 模型的煤矿安全隐患数量预测研究[J]. 煤, 2024, 33(3): 39-44.
- [3] 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]. 能源与环境, 2023, 45(10): 1-7.

-
- [4] 王鹏飞, 刘荣华, 贺俊星, 等. 综采工作面旋转风幕隔尘数值模拟及试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 14-19. <https://doi.org/10.13582/j.cnki.1672-9102.2018.04.003>
- [5] 聂文, 程卫民, 陈连军, 等. 旋流风幕扰动硬岩综掘面风-尘流场数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(3): 120-125. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.03.008>
- [6] 郑宝明. 大采高综采面不同截割位置粉尘运移规律仿真研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(10): 67-69. <https://doi.org/10.13487/j.cnki.imce.023650>
- [7] 梁怡芳, 张昌建, 梁界武, 等. 综采面综合降尘技术研究及其应用[J]. 煤炭工程, 2021, 2(12): 50-52.
- [8] 周刚, 尹文婧, 冯博. 综采工作面移架尘源粉尘-雾滴场分布特征模拟分析与工程应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3425-3435.
- [9] 马威. 高风速综采面采煤机产尘运移规律及防治技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 67-70.
- [10] 徐丽阳, 王锴, 丁智, 等. 弹塑性多孔介质流固耦合新理论: 混合耦合理论[J]. 计算力学学报, 2024, 41(1): 129-138.
- [11] 徐厚学, 施国华, 郑彦奎. 综采面采煤机割煤粉尘分布特性及防治技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(3): 75-77.
- [12] 晓玲. 凉水井矿综采面粉尘运移规律数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [13] 王飞. 矿井综掘面粉尘空间分布规律及降尘技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2020.