

综采工作面新型局部负压控尘方法及其规律研究

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12日; 录用日期: 2024年8月16日; 发布日期: 2024年8月28日

摘 要

针对煤矿综采工作面截割作业区存在的粉尘污染问题, 文章提出了一种新型局部负压控尘方法。通过建立风流-粉尘双向耦合模型, 并对比分析传统通风方法和新型局部负压控尘方法的风流运移规律和粉尘扩散污染机制。结果显示, 实施新型局部负压控尘方法后, 通过设置的隔尘板和吸风口, 大量新鲜风流在采煤机滚筒上风侧提前进入人行道, 在煤壁一侧采煤机附近产生负压, 煤壁一侧部分区域风速低于0.5 m/s, 粉尘扩散受到限制, 人行道部分区域粉尘浓度低于25.0 mg/m³。大部分粉尘被限制在煤壁一侧, 人行道的平均浓度明显低于传统通风方式下的平均粉尘浓度。文章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, 粉尘污染, 风流控尘

Study on New Local Negative Pressure Dust Control Method and Its Rule in Fully Mechanized Mining Face

Xiangchen Zhang, Haiming Yu, Sen Xie

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

Received: Jul. 12th, 2024; accepted: Aug. 16th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstract

Aiming at the problem of dust pollution in the cutting area of fully mechanized mining face, a new

local negative pressure dust control method was proposed. The dual coupling model of air flow and dust was established, and the air flow migration rule and dust diffusion pollution mechanism of the traditional ventilation method and the new local negative pressure dust control method were compared. The results show that after the implementation of the new local negative pressure dust control method, a large number of fresh air flow enters the sidewalk in advance on the up-wind side of the shearer drum through the dust insulation plate and suction tuyere, and generates negative pressure near the shearer on the side of the coal wall. The wind speed in some areas on the side of the coal wall is lower than 0.5 m/s, and the dust diffusion is limited. The dust concentration in some areas of the sidewalk was lower than 25.0 mg/m³. Most of the dust is confined to one side of the coal wall, and the average dust concentration of the sidewalk is significantly lower than that of the traditional ventilation mode. The article provides new strategies for clean production of coal in fully mechanized mining faces.

Keywords

Fully Mechanized Mining Face, Numerical Simulation, Dust Pollution, Air 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

目前, 随着我国经济的高速发展, 能源的需求也逐渐加大。近十年, 我国在航天、深海、化工等行业的主要能源依然是煤炭, 以煤为主的能源结构不会轻易改变[1], 作为世界重要的能源来源之一[2], 煤炭的需求量不断攀升。为满足煤炭的需求, 矿井开采深度不断加深, 粉尘污染问题也日趋严重[3]。综采面作为井下机械化生产的区域之一, 在进行割煤作业工序时, 局部作业地点粉尘浓度瞬间高达 4000~6000 mg/m³ [4], 严重影响了煤矿的安全开采, 当粉尘浓度较高时, 遇到明火极易发生爆炸事故; 与此同时, 长期工作在高浓度的粉尘环境中, 矿工易患上尘肺病[5], 因此, 如何降低综采面的粉尘浓度, 减少尘肺病的发病率以及避免发生生产安全事故, 成为现在亟需解决的问题。

粉尘在煤炭生产过程中主要经历产生、扩散和沉降三个阶段; 而综采面粉尘多在截割、运输以及装载煤体的过程产生[6]。针对于粉尘的不同阶段以及综采面的粉尘的来源不同, 诸多学者通过不断研究, 以期找到综采面粉尘的扩散规律以及解决方法。孟君[7]等人通过对综采工作面的测量, 并绘制风流变化曲线, 发现了部分区域风速呈现下降的趋势, 利用低风速区域, 可有效避免粉尘扩散至人行道。赵俊伟[8]等人通过建立全机械化采掘工作面气流 - 粉尘耦合输运模型, 分析了挡风板和多孔粉尘挡板等参数对粉尘污染的影响机理, 发现人行道空间平均粉尘浓度从 645 mg/m³ 降低到 68 mg/m³ 以下。目前, 综采面粉尘浓度过高、控尘效果差的问题依旧存在[9], 为此本文利用数值模拟和现场实测相结合的方法对某煤矿 4.2 m 采高综采工作面进行研究, 以期获得运用新型局部负压控尘方法后综采面粉尘扩散污染规律, 为降低综采面粉尘污染提供了新策略。

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, 雷诺数超过 10⁶, 因此, 选择一个恰当的风流湍流模型至关重要[10]。Realizable $k-\varepsilon$ 模型能够维持雷诺应力的真实性, 因此, 考虑到实际工程问题

的复杂性和计算资源的限制, 本文选择了 Realizable k - ε 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) [11] [12]:

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, 单位为 J; ε 为湍流动能耗散率, 单位为 W/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_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. 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 [13] [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, 得到粉尘扩散结果。公式为:

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

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

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_{Vm} 为虚假质量力; τ_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; ρ_p 为颗粒密度; C_d 为曳力系数; μ 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, 为了降低计算负担, 同时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 $109.3 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 4.5$

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 m , 滚筒简化为直径 2.20 m , 高 0.8 m 的圆柱, 位于进风隅角下风侧 25.8 m 处。布设了液压支架 86 台, 液压支架宽度 1.33 m , 超前支架 8 台。

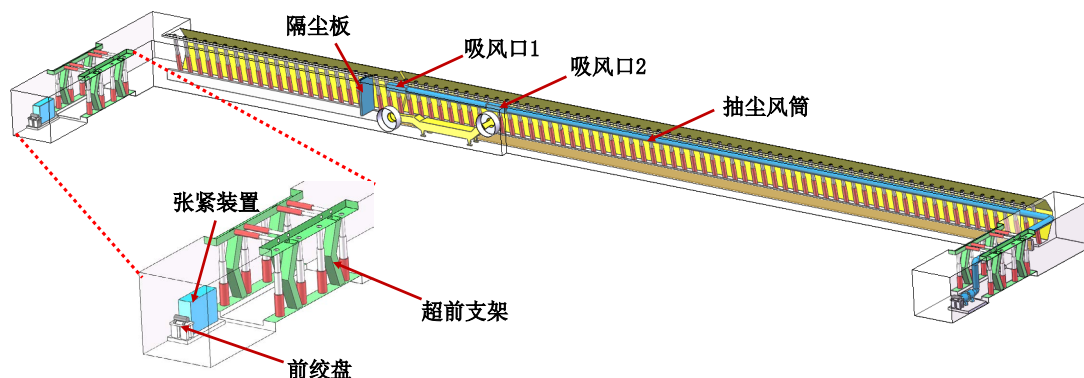


Figure 1. Geometric model
图 1. 几何模型

3.2. 网格验证和边界条件设定

使用 ICEM-CFD 将已构建的三维模型进行非结构化网格划分。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	新技术进风口(m/s)	1.1
	传统技术进风口(m/s)	1.2
	新技术吸风口 1 (m^3/min)	600
	新技术吸风口 2 (m^3/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

新型局部负压控尘方法的原理如下：当新鲜空气通过进风巷道进入综采工作面，在接近隔尘板的位置，风流遭遇阻碍，大量风流改变路径，提前进入人行道。经过采煤机滚筒的风流大幅减少，粉尘污染无法大面积扩散。此时人行道的风流速度较大，阻止滚筒附近的携尘风流侵入人行道，实现人行道的清洁化。同时，在采煤机滚筒上方对应设置吸风口，在吸风口的作用下，产生的负压的作用更加明显，有效的减少切割时产生的高浓度粉尘，显著提升了除尘效率。

4.1.1. 风流场运移结果

在综采工作面设置 6 个截面，如图 2 所示，在原始通风条件下，现场的风流运移状况如图 2(a)所示，进风风流运移至采煤机作业位置，由于受到采煤机的阻碍，部分风流运移至人行道，但是效果并不明显，人行道部分区域风速超过 2.0 m/s，而煤壁一侧采煤机部分区域风速超过 1.5 m/s，导致在采煤机的下风处人行道的风速与煤壁一侧的风速没有较大差异，受到上风方向采煤机切割煤体的影响，携尘风流会运移至人行道，粉尘污染严重。

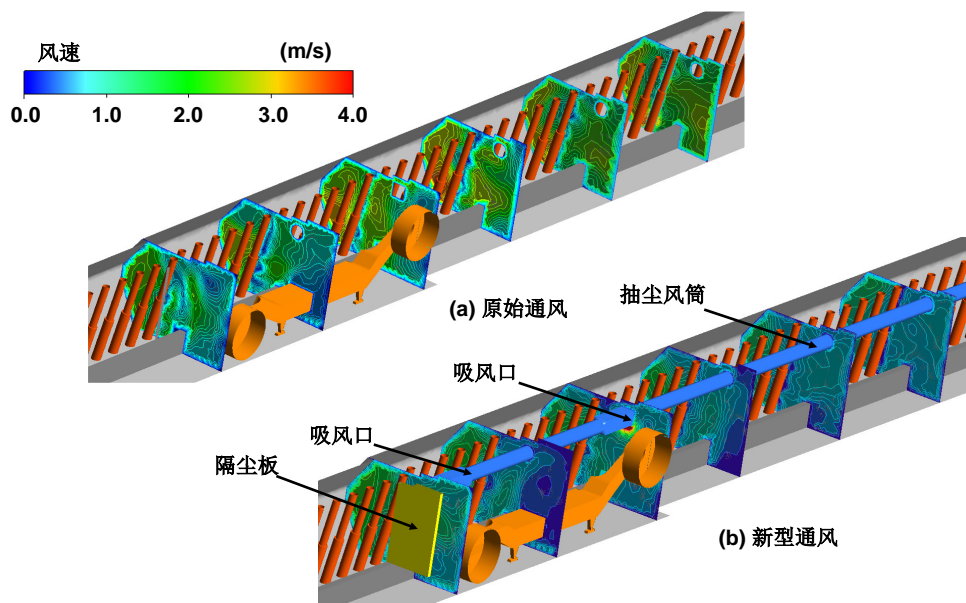


Figure 2. Wind flow distribution diagram of part of the cross section near the coal mining machine
图 2. 采煤机附近部分截面风流分布图

在新型局部负压控尘方法条件下，如图 2(b)所示，增设了隔尘板以及两个吸风口。通过在采煤机前方设置隔尘板，可有效的阻挡进风风流，促使绝大部分进风风流运移至人行道，人行道的部分区域风速超过 2.0 m/s，而煤壁一侧采煤机附近区域风速低于 1.0 m/s，配合吸风口，该区域的负压效果显著，煤壁一侧的风速降低，在采煤机下风侧，煤壁一侧部分区域风速低于 0.5 m/s，与人行道内出现压力差，运移至人行道的携尘风流减少，粉尘污染降低。

4.1.2. 粉尘场运移结果

综采工作面粉尘颗粒的分布情况如图 3 所示，在传统通风条件下，如图 3(a)所示，煤壁一侧部分区域粉尘浓度超过 300.0 mg/m³，向人行道扩散，随着扩散距离的增加，部分粉尘逐渐沉降，但在距采煤机

20 m 的下风方向处, 部分区域粉尘浓度仍超过 200.0 mg/m^3 , 人行道的部分区域粉尘浓度甚至超过 240.0 mg/m^3 , 严重影响工作人员的作业安全。

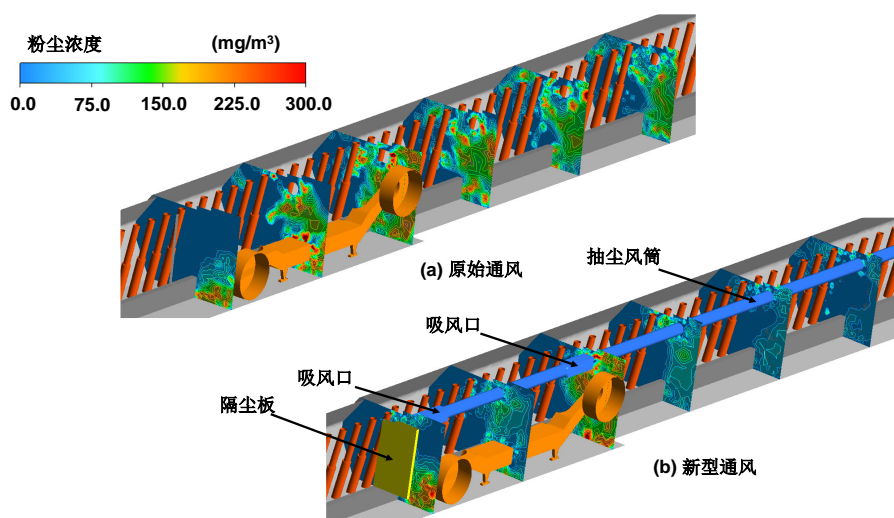


Figure 3. Dust concentration distribution diagram of a section near the coal mining machine
图 3. 采煤机附近部分截面粉尘浓度分布图

在新型局部负压控尘方法的条件下, 如图 3(b)所示, 通过增设隔尘板以及吸风口, 大量风流运移至人行道, 且在吸风口负压的影响下, 人行道内风速远大于煤壁一侧, 粉尘难以扩散至人行道, 而且在吸风口的作用下, 大量粉尘被吸入抽尘管道, 极大的降低作业面的粉尘浓度, 采煤机下风方向煤壁一侧的部分区域粉尘浓度低于 100.0 mg/m^3 , 而人行道部分区域粉尘浓度低于 25.0 mg/m^3 , 与传统通风方式相比, 粉尘污染得到控制。

4.2. 新技术运移规律分析

为进一步研究新型局部负压控尘方法对综采工作面内粉尘扩散行为的影响, 本文对粉尘场的动态变化进行研究。现截取 10 s、20 s、30 s、40 s、50 s、60 s、70 s、80 s 和 90 s 九个时间点的粉尘浓度, 如图 4 所示。

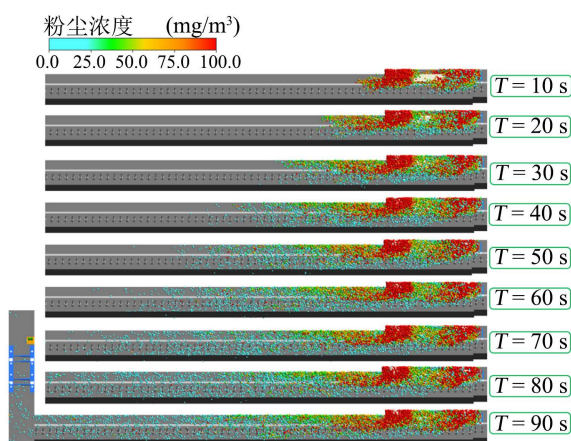


Figure 4. Dust particle diffusion diagram
图 4. 粉尘颗粒扩散图

在新型局部负压控尘方法的作用下,在 $T = 20$ s 时,由于人行道方向的风流与吸风口的共同影响,大部分粉尘被限制在煤壁一侧,导致采煤机滚筒周围区域内粉尘浓度显著增高,而人行道粉尘浓度较低。随着时间的推移,在 $T = 60$ s 时,粉尘的扩散范围由采煤机滚筒向下风侧扩大,此时,随着扩散距离的增加,新型局部负压控尘方法的隔尘效率开始下降,部分高浓度粉尘开始渗透至人行道。当 $T = 90$ s 时,工作面内的粉尘扩散完全,煤壁一侧的粉尘浓度明显高于人行道。由于重力的作用,大量粉尘沉积在巷道底部,人行道的粉尘浓度随着巷道距离的增加而呈现出逐步上升的趋势。

4.3. 沿程粉尘浓度分析

为得到新型局部负压控尘方法作用下人行道沿程粉尘浓度的分布状况,在距回风巷道 5 m、煤壁 3.5 m、地面 1.5 m 处,沿逆风方向每隔 1 m 设置一个测点,共设置 76 个测点。各测点粉尘浓度如图 5 所示。

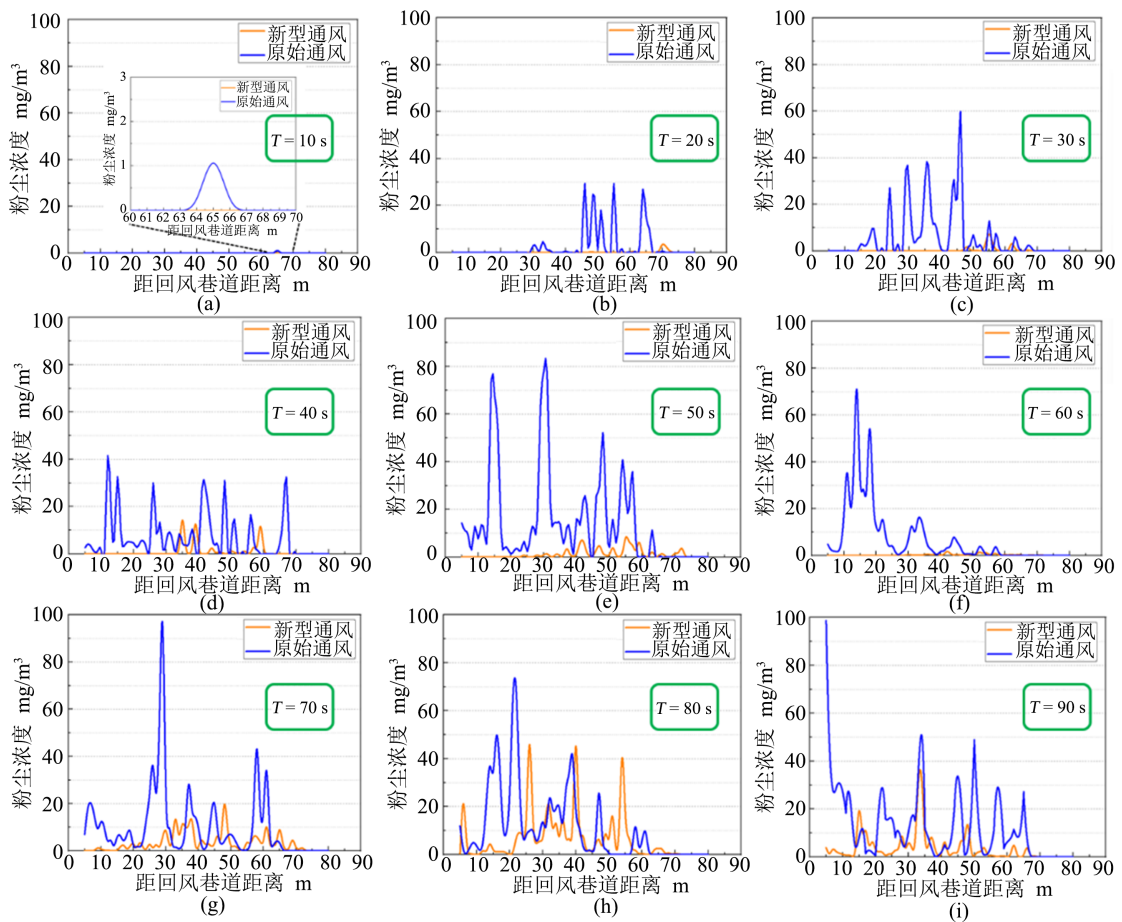


Figure 5. Dust concentration comparison along the route

图 5. 沿程粉尘浓度对比图

通过分析不同时间段下新型局部负压控尘方法和传统通风技术的粉尘浓度,如图 5(a)~(i)所示,新型局部负压控尘方法作用下,在前 60 s 沿程粉尘浓度均控制在 25.0 mg/m^3 以下,在 60 s~90 s 时间段内,随着时间的推移,新型局部负压控尘方法的控尘效率下降,但仍明显低于传统通风技术下的粉尘浓度。其中在 $T = 60$ s 时,新型局部负压控尘方法作用下,沿程范围内几乎无粉尘分布,而在 $T = 80$ s,尽管部分区域新型局部负压控尘方法下的粉尘浓度较高,但平均粉尘浓度仍低于传统通风技术下的粉尘浓度。

5. 结论

1) 在新型局部负压控尘方法下, 通过隔尘板以及吸风口的设置, 新鲜风流提前进入人行道, 且煤壁一侧采煤机附近产生负压, 加大煤壁空间与人行道空间的压力差, 在采煤机下风侧, 煤壁一侧部分区域风速低于 0.5 m/s, 与人行道内存在明显压力差, 避免粉尘扩散至采煤机下风方向的作业区, 人行道部分区域粉尘浓度低于 25.0 mg/m³, 粉尘污染降低。

2) 在新型局部负压控尘方法下, 大部分粉尘被限制在煤壁一侧, 在 $T = 90$ s 粉尘扩散完全时, 煤壁一侧的粉尘浓度明显高于人行道。随着扩散距离的增加, 人行道的粉尘浓度呈现出逐步上升的趋势。但通过模拟人行道沿程粉尘的浓度, 新型局部负压控尘方法下不同时间段内的平均粉尘浓度均低于传统通风技术下的平均粉尘浓度, 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] 汤研, 王德明, 王和堂. 综采工作面粉尘浓度分布模拟研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 203-205.
- [3] Zhou, G., Liu, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Zhu, Y., Sun, B., *et al.* (2024) Study on the Characteristics of Compound Dust Source Pollution and Foam Dust Suppression Technology in Coal Mine Anchor Excavation Production. *Process Safety and Environmental Protection*, **186**, 593-611. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.119>
- [4] 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.
- [5] 王平, 路国强, 徐洋. 煤矿粉尘及防治技术研究现状与展望[J]. 现代矿业, 2023, 39(11): 8-13.
- [6] 刘语卓. 羊场湾煤矿综采工作面风速场模拟分析[J]. 中国安全生产, 2016, 11(6): 50-51.
- [7] 孟君. 综采工作面气水喷雾粉尘防治技术及管理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [8] Zhao, J., Yu, H., Dong, H., Xie, S., Cheng, Y. and Xia, Z. (2024) Analysis on Dust Prevention Law of New Barrier Strategy in Fully Mechanized Coal Mining Face. *Process Safety and Environmental Protection*, **187**, 1527-1539. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.071>
- [9] Nyabire Akanyange, S., Nie, W., Ilele Mwabaima, F., Liu, F., Niu, W., Jiang, S., *et al.* (2024) A Systematic Review of the Physiological and Environmental Impacts of Coal Dust and Its Control Technologies. *Fuel*, **371**, Article ID: 131876. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131876>
- [10] 赵存有. 综采工作面粉尘运移机理分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 157-159.
- [11] 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>
- [12] 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.
- [13] Wang, H., Cheng, W., Sun, B., Yu, H. and Jin, H. (2017) The Impacts of the Axial-to-Radial Airflow Quantity Ratio and Suction Distance on Air Curtain Dust Control in a Fully Mechanized Coal Face. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 7808-7822. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1106-8>
- [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>