

新型负压外喷雾装置降尘特性及喷雾压力影响规律研究

于海明¹, 朱金佗², 孙 祚³

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州

³煤炭科学研究总院有限公司, 北京

收稿日期: 2026年3月7日; 录用日期: 2026年4月8日; 发布日期: 2026年5月29日

摘 要

针对综掘工作面粉尘浓度高、传统喷雾降尘效果有限的问题, 提出一种新型负压外喷雾装置, 通过在截割臂周围布置负压吸风管道并结合外接风机实现协同降尘。采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 建立风流-粉尘及风流-雾滴耦合模型, 并利用相关软件开展模拟研究。结果表明: 喷雾压力为4 MPa时, 雾滴粒径、速度及浓度分布最优, 降尘性能最佳; 在此基础上, 负压风量为50 m³/min时, 粉尘浓度显著降低, 且喷雾场在截割头处包裹与团聚效果最佳。研究确定了装置的最优运行参数, 为提高综掘工作面降尘效率提供了理论依据与技术参考。

关键词

综掘工作面, 掘进机外喷雾, 负压装置, 喷雾压力

Study on Dust Suppression Characteristics and Influence Law of Spray Pressure of Novel Negative Pressure External Spray Device

Haiming Yu¹, Jintuo Zhu², Zuo Sun³

¹School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

³China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing

Received: March 7, 2026; accepted: April 8, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

A novel negative-pressure external spray device is proposed to address the problems of high dust concentration and limited dust reduction performance of conventional spray systems in fully mechanized excavation faces. The device achieves collaborative dust control by arranging negative-pressure air suction pipes around the cutting arm and connecting an external fan. A theoretical analysis and numerical simulation approach is adopted to establish air-dust and air-droplet coupling models, and simulation studies are carried out using relevant software. The results show that when the spray pressure is 4 MPa, the droplet size, velocity and concentration distribution are optimal, leading to the best dust reduction performance. On this basis, when the negative-pressure air volume is 50 m³/min, the dust concentration is significantly reduced, and the wrapping and agglomeration effects of the spray field at the cutting head are optimal. This study determines the optimal operating parameters of the device, providing a theoretical basis and technical reference for improving the dust removal efficiency of fully mechanized excavation faces.

Keywords

Fully Mechanized Excavation Face, Roadheader External Spray, Negative-Pressure Device, Spray Pressure

Copyright © 2026 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

煤炭作为我国的主体能源，在相当长的一段时间内仍占据较强的主体能源地位[1]。随着煤矿机械化开采技术的快速发展，综掘工作面粉尘产量急剧增加，已成为煤矿井下主要粉尘来源之一。高浓度粉尘不仅严重威胁作业人员的职业健康，还存在粉尘爆炸风险，因此粉尘治理成为煤矿安全生产的关键环节，喷雾降尘技术因设备成本低、可操作性强、适用范围广而在矿山粉尘治理中得到广泛应用[2]。

国外喷雾降尘技术研究起步较早。19世纪70年代末，美国学者 Schowengerdt [3]基于空气动力学原理研究了微细水雾捕捉呼吸性粉尘的机理，指出与粉尘粒径相近的液滴具有更好的捕尘效果。20世纪20年代，英美等国开始引入喷雾降尘技术，随后发展出离心式、旋流式等多种雾化方式，但早期降尘效率仅约30%。70年代，高压射流技术的研究取得突破，美国矿业局研究发现12.7 MPa工作水压能显著降低煤尘浓度，推动了高压喷雾技术的发展[4]。2004年，Gerrit [5]等人研究发现喷雾压力对呼吸性粉尘浓度有显著影响。近年来，随着数值模拟技术的发展，Simakov 等人[6]应用 Lax-Wendroff 算法进行气液两相流模拟，Rui Zhou 等人[7]采用 VOF to DPM 方法研究雾化机理，为优化喷嘴设计提供了重要工具。

国内喷雾降尘技术研究虽起步较晚，但发展迅速。2005年，马素平、寇子明等人[8]系统研究了喷雾粒径对粉尘沉降效率的影响，发现小孔径喷嘴和适当提高水压能有效提升降尘效率，但水压超过10 MPa后效果提升不明显。程卫民、聂文等人[9]通过自主设计的喷雾降尘实验平台，研究了压力型喷嘴的雾化粒度分布特性，并成功研发了掘进机外喷雾负压二次降尘装置，显著提升了降尘效率。Haiming Yu 等人[10]采用欧拉-拉格朗日方法构建外喷降尘模型，研究发现8 MPa喷淋压力下抑尘效率可达86.1%。2022年，Wen Nie 等人[11]通过多因素分析优化了负压喷雾装置参数，Huitian Peng 等人[12]通过正交试验确定了影响负压吸力效果的主要因素，进一步提升了装置性能。

综上所述,国内外学者在煤矿喷雾降尘领域开展了大量研究并取得重要成果,但对于适用于综掘工作面的负压外喷雾装置的系统研究仍有待深入。为此,本文提出一种新型负压外喷雾装置,通过理论分析与数值模拟相结合的方法,探究压力对降尘规律与效果影响,以期对综掘工作面粉尘治理提供理论依据和技术支撑。

2. 综掘工作面风流 - 雾滴耦合数学模型构建

通过对风流喷雾两相流流动特性以及运动状态进行深入分析后得出风流 - 喷雾两相流主要呈现为湍流形式。我们假设流体的粘性在运动过程中保持恒定,即粘性系数被视为常数,基于这一假设我们使用 Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)来分析这种流动,方程如下所示:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho F - \text{grad}p + \frac{\mu}{3} \text{grad}(\text{div}u) + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

通过式(1)得到不可压缩流常粘性系数的 N-S 方程来表示液体密度为常数的不可压缩流体,如式(2)所示:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho F - \text{grad}p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

式(2)是研究流体力学的基本方程,根据此式可以推导出其他形式的运动方程。

尽管湍流运动具有高度复杂性,我们仍然可以通过非稳定的连续方程和 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)来对其进行描述和建模。这些方程基于流体动力学的基本原理,包括质量守恒、动量守恒和能量守恒,能够描述湍流流动中速度、压力、密度以及其他相关物理量的变化。湍流运动的瞬时控制方程如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \text{div}u &= 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + \text{div}u_x &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \text{vdiv}(\text{grad}u_x) \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + \text{div}u_y &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \text{vdiv}(\text{grad}u_y) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + \text{div}u_z &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \text{vdiv}(\text{grad}u_z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型中 κ 方程是一个经过理论验证的精确方程,它准确地描述了湍流动能的变化,而 ε 方程,则是一个基于经验得到的方程,它不是通过严格数学推导得出的。标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型的一个假设是流体处于完全湍流状态,这意味着模型中不考虑流体间的粘性力。因此,该模型主要适用于湍流占主导地位的流动情况。 $\kappa-\varepsilon$ 模型中扩散率 ε 如下所示:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

标准 $\kappa-\varepsilon$ 方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_K + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

其中:

$$G_k = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_i}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{8}$$

式中 Pr_i 为湍流常数, 值为 0.85; g_i 指流体在 i 方向上的重力加速度, 因为流体是不可压缩流体, 所以 $G_b = 0$, β 为热膨胀系数, 如式(9)所示:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \tag{9}$$

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_i^2 \tag{10}$$

式(10)中, M_i 是湍流 Mach 数, $M_i = (k/a^2)^{1/2}$; 其中 a 为超声速, $a = (\gamma RT)^{1/2}$ 。

在标准 $\kappa - \varepsilon$ 方程中:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_\kappa = 10, \sigma_\varepsilon = 13 \tag{11}$$

若不考虑自定义, 则 $G_b = 0, Y_M = 0, S_\kappa = 0, S_\varepsilon = 0$, 这时标准 $\kappa - \varepsilon$ 方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{13}$$

本文在进行数值模拟时, 所选的湍流模型就是标准 $\kappa - \varepsilon$ 模型。

3. 综掘工作面模型及边界条件

3.1. 物理模型构建

3.1.1. 几何模型的构建

在掘进巷道通风系统的设计中, 采用抽出压入式通风系统, 其中压风口利用风筒引入新鲜空气, 而

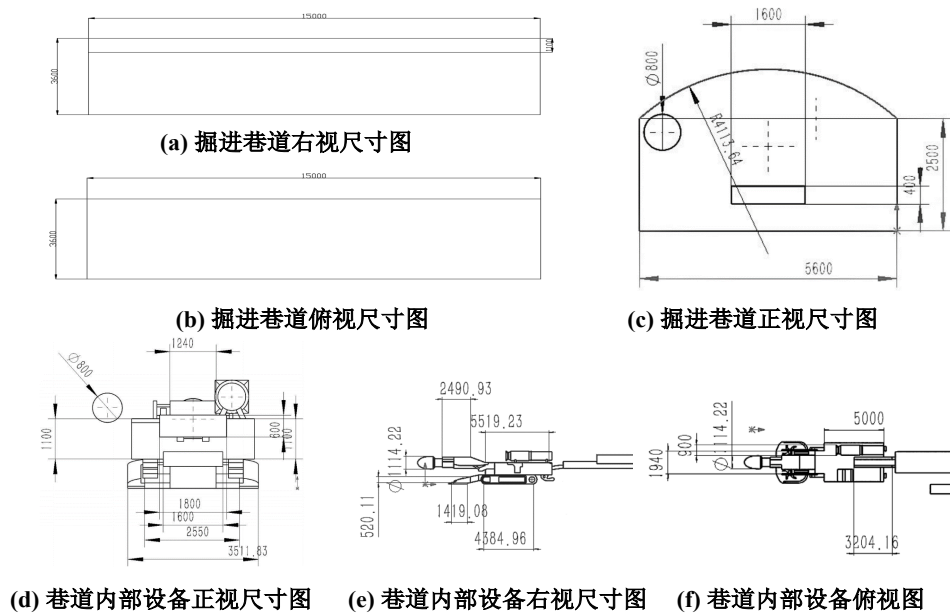


Figure 1. Simulated tunnel CAD model

图 1. 模拟巷道 CAD 模型

出风口则通过抽风机将含尘空气排出。考虑到所研究的负压外喷雾装置应安装在掘进机上。在掘进工作面，悬臂式掘进机是常用的设备之一。因此本次模型构建以悬臂式掘进机为原型。同时本次对于掘进机几何模型的构建采取了适当的简化，在保证掘进机正常工作以及模拟结果的有效性前提下只对掘进机关键部位进行构建。适当的简化既避免了因模型过于复杂而导致计算量大、计算结果容易出错等问题又保证了模拟结果的有效性。模拟巷道 CAD 模型如图 1 所示。

应用 Solidworks 软件绘制出相应的 3D 模型，主要包括巷道、掘进机、风机、风筒等设备。3D 模型如图 2 所示，其中黄色部分为负压管道(外接风机)；该掘进机共设有 10 个喷嘴环绕在截割头周围。

本文所提出的新型负压外喷雾装置主要由喷嘴系统、负压抽吸管道、外接风机及控制单元组成。其中，喷嘴环绕截割头布置形成喷雾场，负压管道布置于截割区域一侧，通过外接风机形成局部负压环境，实现气固两相流的定向调控。

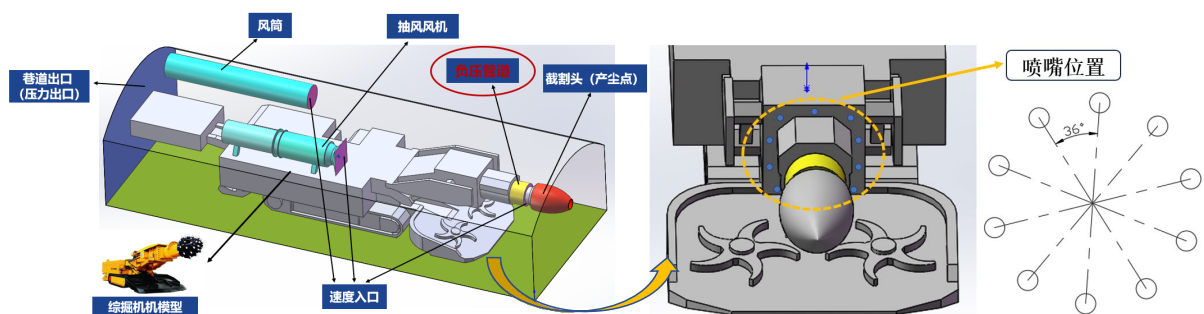


Figure 2. Schematic diagram of the geometric model of the tunneling face and the location of the nozzles

图 2. 综掘工作面几何模型及喷嘴位置示意图

本文提出的新型负压外喷雾装置主要由喷雾系统、负压吸风管道及外接风机组成。其中，喷雾系统由环绕截割头布置的多喷嘴结构构成，用于在产尘源区域形成高密度雾滴场；负压吸风管道布置于截割臂周围关键位置，并通过外接风机产生稳定的负压环境，实现对含尘气流的主动抽吸。

在装置运行过程中，高压水流经喷嘴雾化形成细小雾滴，与截割过程中产生的粉尘发生惯性碰撞、拦截及扩散捕集等作用，实现一次降尘；同时，负压系统在截割区域形成局部低压区，在压差驱动下，含尘气流及雾滴整体向负压管道方向迁移，从而强化粉尘的定向输运与集中捕集，实现二次负压诱导降尘。该过程改变了传统喷雾降尘中粉尘随机扩散的运移模式，使粉尘在尚未大范围扩散前即被有效控制。

3.1.2. 网格划分

在流体力学计算与模拟中，网格的划分主要分为结构化网格和非结构化网格两种类型。结构化网格的划分过程相对简单且规范，因为它基于规则的拓扑结构，如矩形或立方体网格，使得整体计算量较小，同时所需的存储信息量也相对较小。然而，结构化网格的一个主要限制是它们需要适应规则的平面或体积，这在一定程度上限制了它们在处理复杂几何形状时的应用。相比之下，非结构化网格能够应对更为复杂的几何形状和边界条件。它们的布局复杂，可以灵活地适应不规则区域，这使得非结构化网格在处理复杂流体力学问题时具有显著优势。然而，这种灵活性也带来了划分复杂性和计算量的增加，同时由于非结构化网格的结构不规则，存储它们所需的信息量也相对较大。

将 Solidworks 画好的几何模型导入到 ICEM 软件中进行网格划分，对于掘进巷道这类外形规则的结构，可以使用系统自动生成的网格。然而，对于掘进机、抽风机等不规则形状的需要进行网格加密处理，最终网格模型如图 3 所示。所画网格最大为 0.35 m，最小为 0.01 m。共划分了 3,298,401 个网格，最终网格质量大于 0.3，如图 3 所示。本次网格划分数量合理，质量较高，能够满足后续数值模拟的需求。

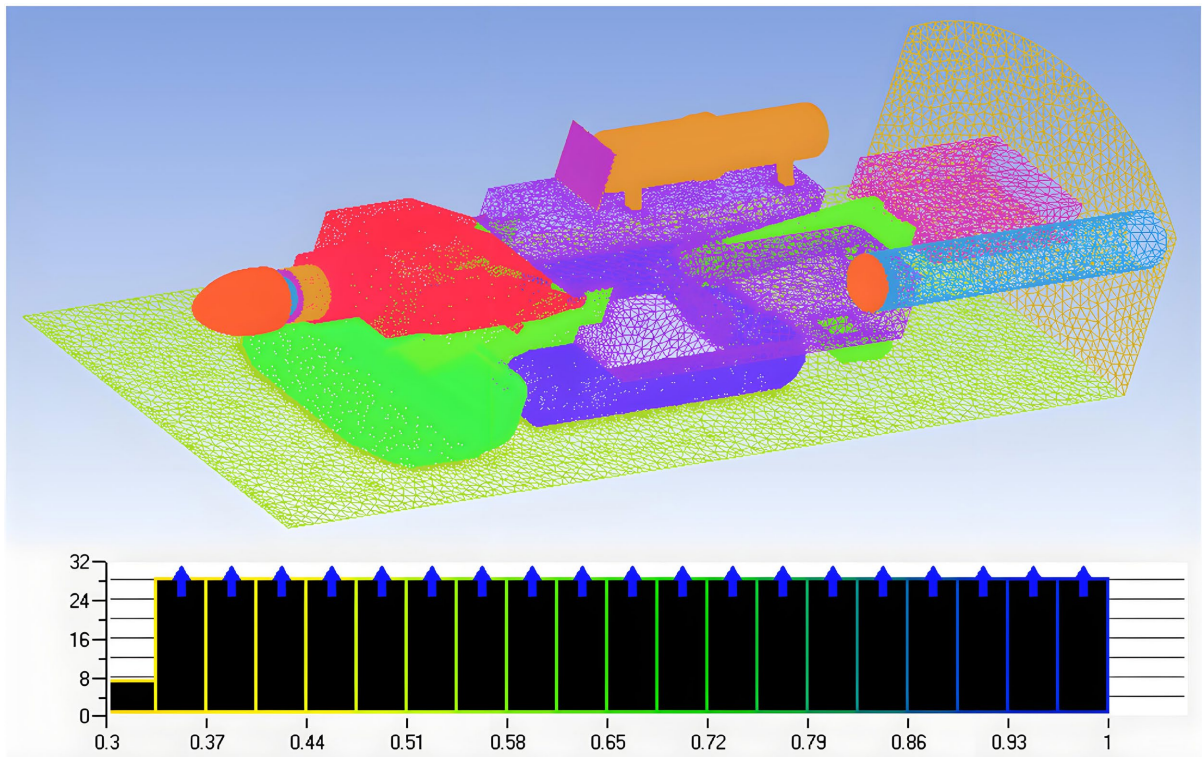


Figure 3. Mesh model of the tunneling face
图 3. 综掘工作面网格模型图

3.2. 数值模拟边界条件及主要参数

本文对相关边界条件进行以下设定：设定风机、进风筒为速度入口(velocity inlet)边界，掘进巷道出口为压力出口(pressure outlet)边界，其余部分设置为壁面(wall)边界。假定温度的变化不会影响掘进工作面喷雾场的变化，风筒流出的风流为洁净风流，具体边界条件设置如表 1 所示。

Table 1. Boundary condition settings
表 1. 边界条件设置

Name	Type	Parameters	Name	Type	Parameters	
General	Solver Type	Pressure-Based	Models	Model	$k-\epsilon$	
	Time	Transient		$k-\epsilon$ Model	Realizable	
	Gravity	$Y = -9.8 \text{ m/s}^2$		Near-Wall Treatment	Standard Wall Functions	
Dust Particle	Material	Coal-hv	Spray	Material	Water-liquid	
	Total Flow Rate	0.0003 kg/s		Injector Inner Diameter	0.0022 m	
	Min Diameter	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$		Upstream Pressure	4 Mpa	
	Max Diameter	$8.43 \times 10^{-5} \text{ m}$		Flow Rate	0.0857 kg/s	
	Mean Diameter	$1.21 \times 10^{-5} \text{ m}$	Half Angle	43.8°		
Boundary Conditions	inlet-fengtong	16.58 m/s	Solution Methods	scheme	SIMPLEC	
	inlet-fengji1	-8.2 m/s		Calculation	Time step	0.002
	inlet-fengji2	14.71 m/s				0.1

4. 综掘面喷雾压力对喷雾降尘效率的影响研究

4.1. 模拟方案设置

通过对喷雾降尘机理等相关理论的研究,发现喷雾压力、喷嘴孔径、喷雾流量等喷雾参数对降尘效果有影响,其中喷雾压力对喷雾降尘效果影响最大。随着喷雾压力的增大,雾滴速度将会增大,雾滴与粉尘颗粒碰撞结合的几率增大,降尘效率便会提升;同时随着喷雾压力的增大,雾滴粒径将会减小,雾滴捕获粉尘的效率提高。因此本文将喷雾压力设置为模拟变量,选取 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa 四组喷雾压力进行模拟分析。基于本文提出的新型负压外喷雾降尘装置特性,我们选取 10 个喷嘴环绕在截割头周围的喷嘴排布方式,喷嘴具体排布位置如 1 所示。同时采取含 X 倒流芯混合式实心圆锥形喷嘴(孔径为 2.2 mm),选取 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa 四组喷雾压力,分别进行数值模拟。利用 Winner312 喷雾激光粒度分析仪、高压水表等仪器进行相关实验,测定了不同压力下喷雾流量、喷雾角大小等相关参数,具体参数如表 2 所示。

Table 2. Nozzle parameter settings under different pressures

表 2. 不同压力下喷嘴相关参数设置

喷雾压力/(MPa)	雾化半角/(°)	有效射程/(m)	流速/(kg/s)	喷射器内径/(m)
1	46.3	1.1	0.0467	0.0022
2	45.7	2.5	0.0628	0.0022
3	44.9	2.9	0.075	0.0022
4	43.8	3.4	0.0857	0.0022

4.2. 雾滴粒径变化规律

对数值模拟结果进行处理,采用相同粒径范围的颜色标尺对雾滴粒径进行表示,通过雾滴颜色变化表征喷雾粒径大小,进而分析 1~4 MPa 四种喷雾压力下雾滴粒径的分布规律。

根据图 4 不同喷雾压力下雾滴粒径分布图分析,雾滴整体分布呈现随机离散特征。在风流作用下,动能较小的雾滴无法克服风流作用力,随风流运移方向四散运动。近风筒区域雾滴数量较少,主要由于高速风流冲击使该区域雾滴运动速度增加,加速其接触产煤壁面,同时抽风机对风流的吸收促使雾滴向风机侧运动。而在风流涡流区雾滴数量相对较多,顶端雾滴因重力下沉和风筒出口风流回流影响,分布数量较少。不同喷雾压力下,雾滴整体分布规律基本一致。

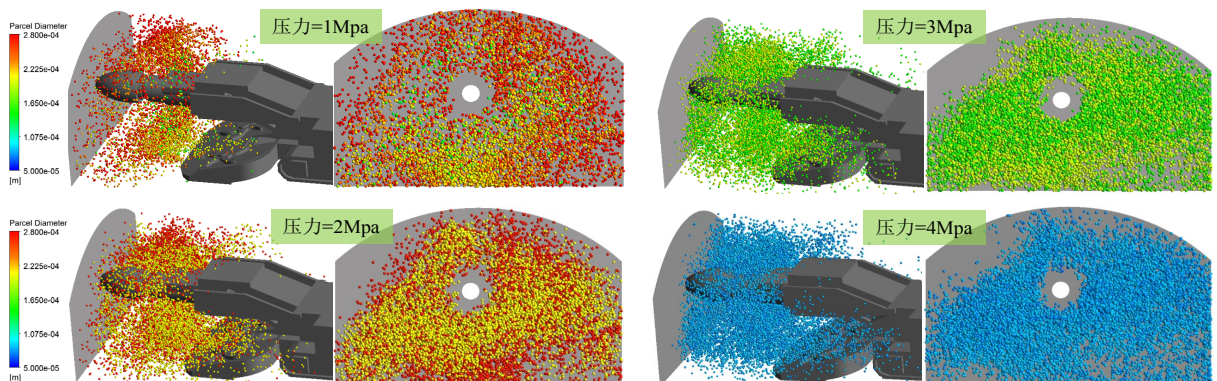


Figure 4. Droplet size distribution at spray pressures of 1~4 MPa

图 4. 喷雾压力 1~4 MPa 雾滴粒径分布图

喷雾压力对雾滴粒径具有显著影响。随着喷雾压力增大,雾滴粒径总体呈现减小趋势。喷雾压力为 1 MPa 和 2 MPa 时,雾滴粒径大致分布在 200~300 μm 之间,2 MPa 时接近 200 μm 的雾滴粒径更多。但从 1 MPa 增至 2 MPa 时,雾滴粒径减小幅度不明显,这是由于两者均属较低压力范围。当喷雾压力从 2 MPa 增至 4 MPa 时,粒径变化显著:3 MPa 时雾滴粒径集中在 100~200 μm 之间,4 MPa 时则集中在 50~100 μm 之间。表明压力从 2 MPa 增至 4 MPa 过程中,雾滴粒径持续减小。雾滴粒径减小有利于提高捕尘效率,但粒径过小会因环境温度和气流影响而迅速蒸发,或被风流带走,反而降低降尘效果。前人研究表明,最佳降尘效果的雾滴粒径为 50~80 μm 。

综合对比可知,喷雾压力为 4 MPa 时,雾滴粒径集中在 50~100 μm 之间,与最佳粒径范围最为接近;同时该压力下喷雾流量为 5 L/min,耗水量适中。因此,从雾滴粒径角度分析,4 MPa 喷雾压力具有更优的降尘效率。

4.3. 雾滴速度变化规律

数值模拟结果如图 5 所示,采用相同速度范围的颜色标尺对雾滴速度进行表示,通过雾滴颜色变化表征喷雾速度大小及其分布,进而分析 1~4 MPa 四种喷雾压力下雾滴速度的分布规律。

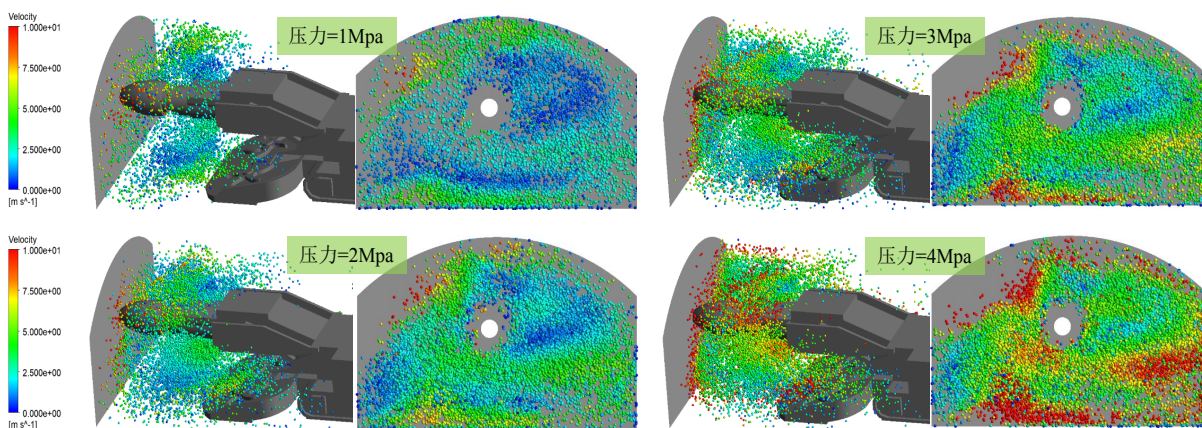


Figure 5. Droplet velocity distribution at spray pressures of 1~4 MPa

图 5. 喷雾压力 1~4 MPa 雾滴速度分布图

从空间分布特征来看,雾场速度在掘进头周围存在明显衰减区域,雾场外端速度普遍慢于内端。切割头处、远离进风筒的墙端以及掘进机底部区域雾滴速度较大。这是由于喷嘴喷出的雾场与风流场交汇后,部分动能较小的雾滴无法克服风流作用力,随风流向外扩散,导致外端速度较小;同时这些低速雾滴在风流扰动下伴随运动获得额外动能,使得掘进机底部等区域雾滴速度增大。

喷雾压力对雾滴速度具有显著影响。随着喷雾压力增大,雾滴速度总体呈现增加趋势。喷雾压力为 1 MPa 时,雾滴速度多集中在 0~2.5 m/s; 2 MPa 时,速度为 2.5~5 m/s 的雾滴增多; 3 MPa 时,雾滴速度多集中在 5 m/s 左右; 4 MPa 时,雾滴速度大多在 5 m/s 以上,其中 7.5~10 m/s 的雾滴显著增多。对比雾滴着色情况发现,喷雾压力越大,处于颜色标尺上方的高速雾滴所占比例越大。

雾滴速度随压力增大而增加的原因在于:更高的喷雾压力将更多能量传递给雾滴分子,使其获得更高的初始动能;同时高压喷雾下雾滴间碰撞合并概率增大,合并后的雾滴继承了原有动量,进一步提高了运动速度。当雾滴速度增加时,雾粒与尘粒的相对速度相应增大,粉尘相对动能增加,有助于粉尘克服雾粒表面张力、减少反弹,从而提高捕集几率,显著提升降尘效率。综合分析,4 MPa 喷雾压力下雾滴速度优势明显,降尘效果更优。

4.4. 雾滴浓度变化规律

对数值模拟结果进行处理, 导出截割头附近雾滴浓度数据, 绘制成三维曲面图, 进而观察雾滴浓度的变化。同时选择 $X = 1.45 \text{ m}$ (负压管道附近)、 $X = 0.5 \text{ m}$ (截割头处) 的 Y-Z 截面喷雾浓度分布云图来分析不同截面雾滴浓度变化规律。

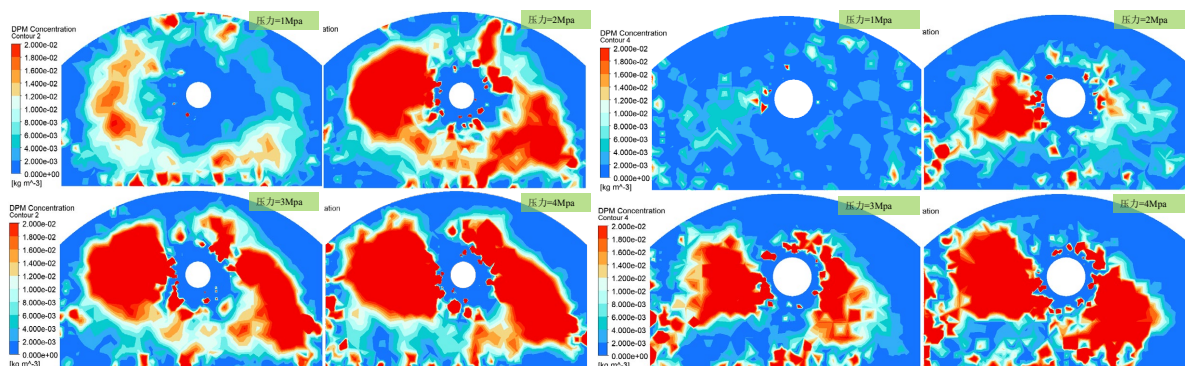


Figure 6. Spray concentration distribution cloud maps at the Y-Z cross sections with $X = 1.45 \text{ m}$ and $X = 0.5 \text{ m}$
图 6. $X = 1.45 \text{ m}$ 与 $X = 0.5 \text{ m}$ 的 Y-Z 截面喷雾浓度分布云图

根据图 6 中喷雾浓度分布云图可得: 不同截面下雾滴浓度呈现出的规律大致相同, 均呈现出随喷雾压力增大雾滴浓度增大的趋势, 且 3 MPa 和 4 MPa 雾滴浓度增大效果更为明显。同时根据云图还可以发现四种压力下不同位置的截面均呈现出左侧雾滴浓度高于右侧雾滴浓度, 且左侧高浓度雾滴范围更大。这是由于受到掘进工作面风流的影响, 风流从风筒流出后撞击壁面导致动能下降, 同时在风压的影响下, 风流远离风筒向风机方向, 因此右侧雾滴浓度降低。同时流向风机的风流在风机附近形成涡流, 随风流动的雾滴在涡流处聚集, 因此左侧雾滴浓度高。观察不同压力下的浓度图可以发现, 喷雾压力越低, 雾滴浓度左右两侧差异越大, 尤其是喷雾压力为 1 MPa 和 2 MPa 时, 两侧雾滴浓度差非常明显。雾滴浓度为 3 MPa 和 4 MPa 时, 两侧雾滴浓度差减小, 4 MPa 时雾滴浓度差最小。

更高的喷雾浓度能够更加有效的捕集粉尘进而达到更好的降尘效果。根据上述分析可知, 喷雾压力为 3 MPa 和 4 MPa 时雾滴浓度差异较小, 但是喷雾压力为 4 MPa 时, 左右两侧雾滴浓度差异更小, 雾滴浓度分布更加均匀, 降尘效果更好。因此从雾滴浓度角度来看, 4 MPa 压力的喷雾降尘效率更好。

5. 负压风量对喷雾降尘效率的影响研究

5.1. 负压装置对喷雾降尘效率有效性验证

本文提出了一种新型负压外喷雾装置, 其中负压管道是该装置的关键结构。根据上述对喷雾压力降尘规律的研究, 确定 4 MPa 喷雾压力降尘效果较好, 因此以 4 MPa 喷雾压力为研究对象, 选取 $10 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $40 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $50 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{min}$ 六组风量进行模拟分析。通过分析不同负压风量下喷雾场浓度以及粉尘场浓度变化规律, 进而得出负压外喷雾装置最佳负压风量。

在分析不同负压风量的粉尘场浓度变化规律之前先对负压情况下负压管道吸风效果进行简单分析, 验证负压装置降尘的有效性, 如图 7 所示。

根据图 7 我们可以看出, 无论负压吸风量为多少, 在负压管道附近均形成以负压管道为中心的涡流, 且随着负压风量的增加, 涡流的强度以及速度均有所增加。根据经验可以初步得出, 负压管道附近的粉尘会随着负压产生的涡流被卷吸进负压管道, 再次验证了负压装置的有效性。

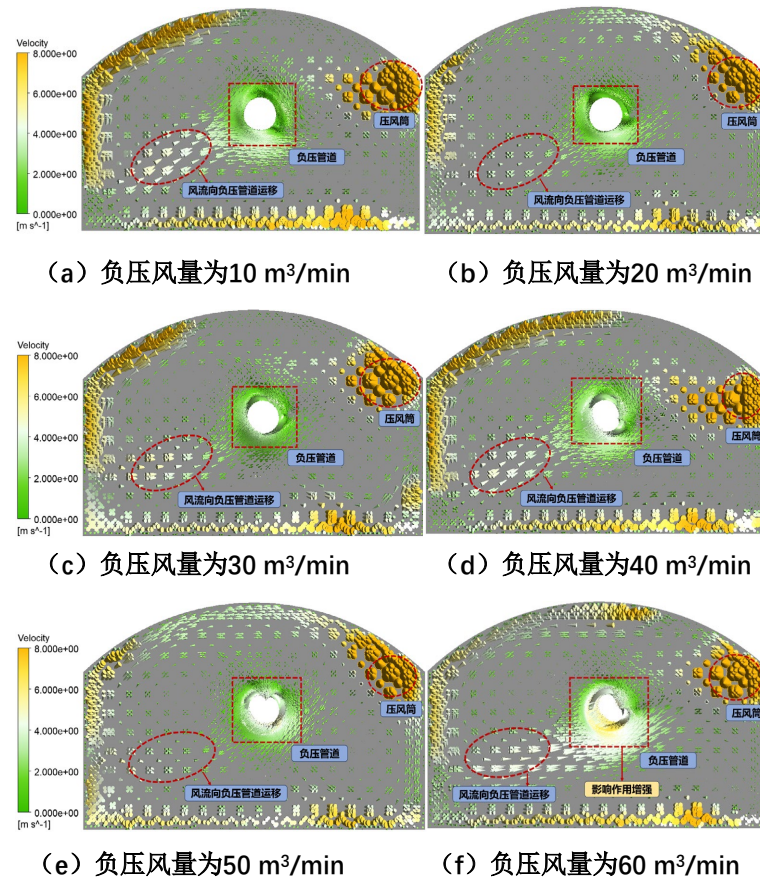


Figure 7. Shows the suction effect of the negative pressure duct at the Y-Z section with X = 1.45 m

图 7. X = 1.45 m 的 Y-Z 截面负压管道吸风效果

5.2. 粉尘场整体浓度变化规律

图 8 表示了不同负压风量下粉尘综掘工作面粉尘浓度整体分布。根据图 8 可知,随着负压风量的增大,工作面上部粉尘浓度不断减小,这表明小颗粒粉尘无规则扩散运动减少,工人作业高度粉尘浓度减少,作业环境得到有效改善。产生这一效果的原因是随着负压风量的增加,负压管道对粉尘的卷吸作用增强。在没有负压管道作用的情况下,截割头产生的粉尘经过一系列运动,大颗粒粉尘多重力沉降至工作面底部,部分粉尘随风流场流动吸入风筒内排出工作面,还有部分小颗粒粉尘未能完全随风流运动,而是做无规则运动,扩散至工作面上方以及后方,这些粉尘可达到作业人员呼吸高度,对工作面作业人员产生的危害极大。而负压管道的加入使得没有被工作面主体风流带走的无规则运动的粉尘可以被负压管道二次吸走,从而使得工作面上方和后方的粉尘浓度减小,有效地改善了工人的作业环境。结果表明随着负压风量增大,作业环境改善效果越好,当负压风量为 50 m³/min 和 60 m³/min 时,工作面上方粉尘浓度均得到有效减少,因此根据综掘工作面粉尘浓度整体分布来看,初步选择 50 m³/min 和 60 m³/min 的负压风量。

5.3. 喷雾场变化规律

数值模拟结果如图 9 所示,选择 X = 1.45 m (负压管道附近)、X = 0.5 m (截割头处)的 Y-Z 截面喷雾浓度分布云图来分析不同负压风量下喷雾浓度变化。

随着负压风量增大,喷雾整体向截割头聚拢,且截割头附近雾滴浓度逐渐升高;在相同风量下,距

离负压管道越远，雾场越分散。低风量(10~40 m³/min)时，雾场主要受工作面风流影响，分布较为分散；较高风量(50~60 m³/min)时，负压作用增强，雾场呈环绕截割头聚集，有利于粉尘包裹与沉降。但当风量过大(60 m³/min)时，部分雾滴被快速抽吸，导致雾场破散、浓度下降。综合来看，50 m³/min 为较优风量，有利于提升降尘效果。

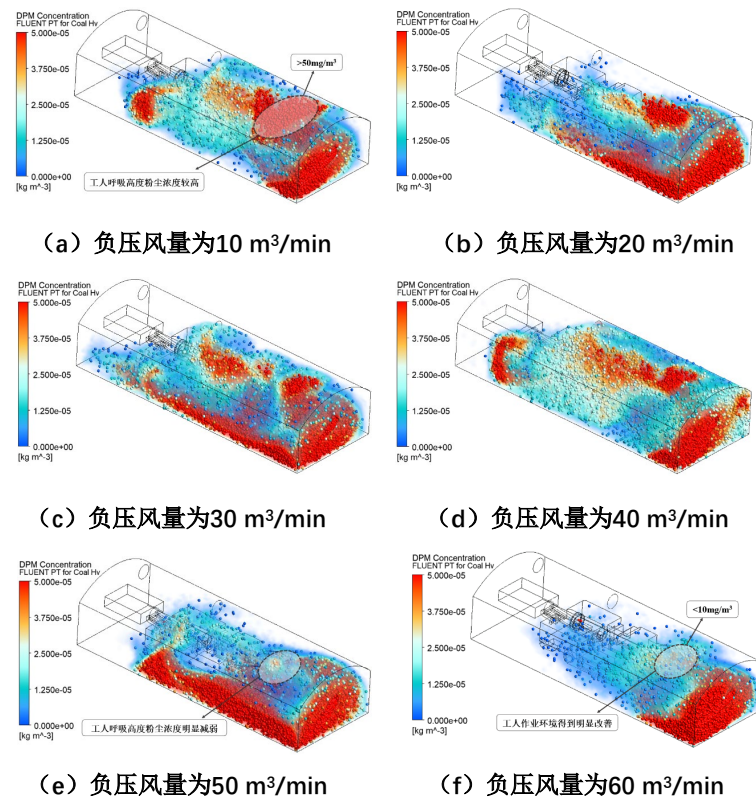


Figure 8. Overall dust concentration distribution at the tunneling face

图 8. 综掘工作面粉尘浓度整体分布

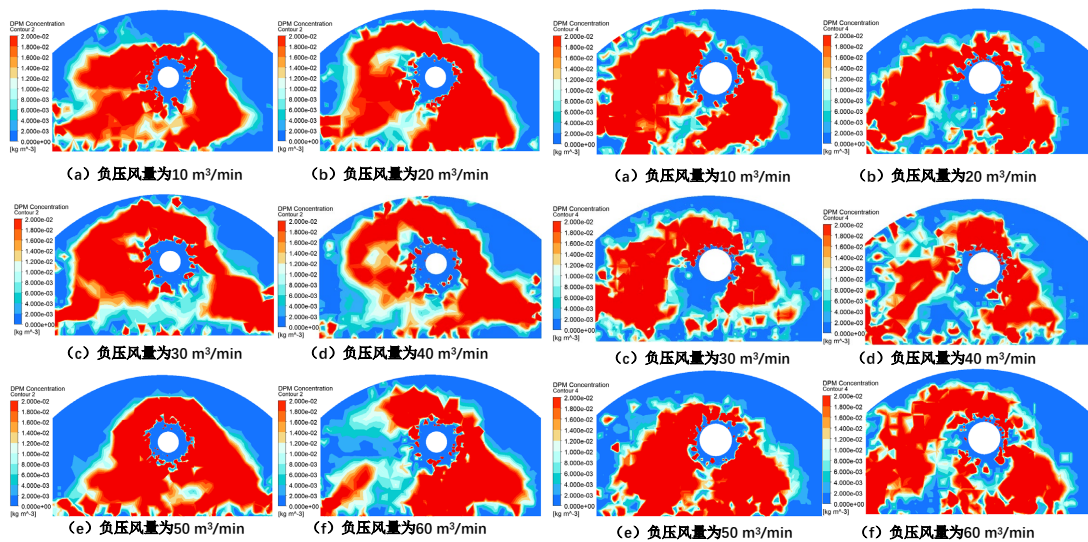


Figure 9. Concentration distribution cloud maps of spray at Y-Z sections with X = 1.45 m and X = 0.5 m

图 9. X = 1.45 m 与 X = 0.5 m 的 Y-Z 截面喷雾浓度分布云图

6. 结论

1) 喷雾压力对降尘效果具有显著影响。随着喷雾压力增大, 雾滴粒径减小、速度提高、浓度增加, 有利于提升雾滴对粉尘的捕集能力。但压力过高会导致雾滴过细、易蒸发且易被风流带走, 从而削弱降尘效果。综合雾滴粒径(50~100 μm)、速度及浓度分布等因素, 确定喷雾压力为 4 MPa 时综合性能最佳, 降尘效率最高。

2) 负压吸风装置能够有效抑制粉尘扩散并强化捕集作用。研究表明, 部分粉尘在产生后可直接被负压管道吸走, 显著降低工作面粉尘浓度。随着负压风量增加, 工作面上方和后方的粉尘浓度减小。当风量为 50 m^3/min 和 60 m^3/min 时降尘效果最为明显, 其中在兼顾能耗与成本条件下, 50 m^3/min 为更优选择。

3) 负压风量对喷雾场分布具有调控作用。低风量下(10~40 m^3/min)雾场受风流影响较大, 分布较为分散; 较高风量(50~60 m^3/min)时, 喷雾明显向截割头聚拢并呈环绕分布, 有利于包裹和团聚粉尘。但风量过大(60 m^3/min)会导致雾场破散、局部浓度降低。综合分析, 喷雾压力 4 MPa、负压风量 50 m^3/min 时降尘效果最佳。

参考文献

- [1] 柏荣. 能源工业投资结构变迁、能源消费结构低碳化和全要素能源效率的互动关系[J]. 长春金融高等专科学校学报, 2024(2): 85-96.
- [2] Liu, R., Ji, D., Zhou, G., Liu, Z., Xu, Q. and Ramakrishna, S. (2021) Electrospun Nanofibers for Personal Protection in Mines. *Chemical Engineering Journal*, **404**, Article 126558. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126558>
- [3] Schowengerdt, F.D., Brown, J.T. (1976) Colordao School of Mines Tackles Control of Spirable Coal Dust. *Coal Age Magazine*, **81**, 4.
- [4] 鲍含诚, 胡秀云, 李庆海, 等. 矿山粉尘与相关疾病[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [5] Goodman, G.V.R. and Pollock, D.E. (2004) Use of a Directional Spray System Design to Control Respirable Dust and Face Gas Concentrations around a Continuous Mining Machine. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **1**, 806-815. <https://doi.org/10.1080/15459620490888245>
- [6] Simakov, N.N. (2020) Calculation of Interphase Mass Transfer in a Spray Flow Produced by a Nozzle with Account of Crisis. *Technical Physics*, **65**, 534-541. <https://doi.org/10.1134/s1063784220040209>
- [7] Zhou, R., Shen, C. and Jin, X. (2020) Numerical Study on the Morphology of a Liquid-Liquid Pintle Injector Element Primary Breakup Spray. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, **21**, 684-694. <https://doi.org/10.1631/jzus.a1900624>
- [8] 马素平, 寇子明. 喷雾降尘效率及喷雾参数匹配研究[J]. 中国安全科学学报, 2006(5): 84-88+146.
- [9] 程卫民, 聂文, 周刚, 等. 煤矿高压喷雾雾化粒度的降尘性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 185-189+206.
- [10] Yu, H., Cheng, W., Peng, H. and Xie, Y. (2018) An Investigation of the Nozzle's Atomization Dust Suppression Rules in a Fully-Mechanized Excavation Face Based on the Airflow-Droplet-Dust Three-Phase Coupling Model. *Advanced Powder Technology*, **29**, 941-956. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.012>
- [11] Nie, W., Ma, Q., Cai, X., Peng, H., Xu, C., Guo, C., et al. (2022) A Multi-Indicator Orthogonal Investigation into the Dust Suppression Effect of a Shearer-Mounted Negative-Pressure Spraying Device. *Powder Technology*, **399**, Article 117135. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117135>
- [12] Peng, H., Nie, W., Zhang, S., Cheng, W., Liu, Q., Guo, C., et al. (2022) Research on Negative Pressure Jet Dust-Removal Water Curtain Technology for Coal Mine Cleaner Production. *Fuel*, **310**, Article 122378. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122378>