

陈景序, 曹成福, 赵嘉诚, 等. 掘进机外吹吸耦合除尘系统数值分析与试验研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2218–2228.

CHEN J X, CAO C F, ZHAO J C, et al. Numerical analysis and experimental study on the external blowing-suction coupled dust removal system for roadheaders[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2218–2228.

掘进机外吹吸耦合除尘系统数值分析与试验研究*

陈景序^{1,2,3}, 曹成福¹, 赵嘉诚¹, 荆德吉⁴, 刘业娇^{1,2,3}, 智咏凯¹

(1 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古包头 014010; 2 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古包头 014010;

3 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古包头 014010;

4 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要:为有效解决掘进工作面粉尘浓度过高问题,提出一种基于空气幕阻隔、喷雾降尘与负压集尘协同作用的吹吸耦合除尘系统。采用数值模拟与试验研究相结合的方法,通过建立掘进巷道与吹吸耦合除尘系统几何模型进行模拟计算,分析系统风流流场、速度切面及雾滴粒子运动轨迹的变化特性;最后通过流场观测试验和控尘试验,验证该系统的风流特性及降尘效率。结果表明,射流速度为30 m/s时,可形成有效的射流风幕,射流出口偏转角度为17°时流场卷吸效果、雾滴包裹截割部和覆盖掘进壁面效果最优。基于数值模拟参数设置相似试验参数进行试验验证:流场观测试验结果表明,当射流出口偏转角度为17°时,风流卷吸效果最优;降尘试验结果表明,司机位置处的降尘效率最高为93.08%,可有效改善掘进工作面作业环境。

关键词:安全卫生工程技术;高压雾幕墙;吹吸耦合;除尘系统;掘进机

中图分类号:X964;TD714.4

文献标志码:A

文章编号:1009-6094(2026)06-2218-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1683

0 引言

随着煤矿机械化、自动化程度和开采强度的提升^[1-2],掘进工作面的粉尘浓度显著增高,巷道内高浓度的粉尘是导致粉尘爆炸事故和职工尘肺病、加快机械设备磨损的主要原因^[3-5]。在实际生产过程中,未采取除尘措施的掘进工作面粉尘质量浓度可达2 000 mg/m³以上^[6]。掘进工作面已成为矿井粉尘产生的重点区域,因此亟须高效的联合降尘技术,以改善掘进工作面作业环境。

目前,在掘进工作面粉尘防治技术领域,国内外学者进行了大量研究。苏联学者谢别列夫等于20世纪50年代将空气幕技术引入矿山中^[7]。1999年,国内学者王海桥^[8]最先将矿用空气幕应用于井下综掘工作面。在后续的研究中,荆德吉等^[9]提出了一种应用于煤矿辅运巷道的射流吹吸风幕控尘技术,并通过数值模拟和现场试验的方法确定射流速度 $v=25$ m/s、压抽比 $\lambda=1.2$ 时的控尘效果最佳。刘荣华等^[10]提出了一种综掘工作面双径向旋流屏蔽通风控尘技术,通过数值模拟和试验结合的方法

确定吹吸流量比为1.5时司机处粉尘浓度降至最低。于永宁等^[11]利用数值模拟与试验相结合的方法对掘锚机司机位置处有无气幕防尘装置时的粉尘浓度进行了分析,司机位置处安装气幕装置后控尘效率可达87%以上。2024年,Shen等^[12]提出了一种双旋流空气幕(Double Spiral Air Curtain, DSAC)除尘系统,利用相似试验平台对空气幕的形成和衰减以及粉尘分布规律进行了研究,并详细阐述了环形旋流射流理论和DSAC的除尘机理,为风幕控尘提供了新的方法。井下实际应用过程中风幕易受通风系统的影响,控尘效率大打折扣。喷雾降尘技术经济实用、简便高效,可有效抑制粉尘扩散并广泛应用于煤矿降尘^[13-14]。张天等^[15]提出超声速汲水虹吸气动雾化降尘技术,该技术雾滴速度快、射程远、耗气量和耗水量低,相较超声波干雾降尘方式降尘效果提升1.5倍。李刚等^[16]通过数值模拟与相似试验发现,工作面拐角及设备布局形成的涡流区主导粉尘迁移路径分化,逆向喷雾布局下喷嘴与粉尘运动轴向呈120°时粉尘质量浓度降至22.7 mg/m³,降尘效率最优。Wang等^[17]基于Fluent数值模拟软

* 收稿日期: 2025-09-22

作者简介: 陈景序,副教授,博士,硕士生导师,从事粉尘防治理论及技术研究,chanjingxu@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52474229);内蒙古自治区2025年重点研发和成果转化计划(社会公益领域)项目(2025YFSH0073)

件对巷道粉尘污染规律和掘进头低表面张力喷雾除尘技术进行了研究,研究表明,降低溶液表面张力可有效提升雾化效果。喷雾降尘技术虽然经济实用,但雾滴覆盖范围有限,对呼吸性粉尘的捕集效率不佳,且易受巷道风流影响。

综上所述,现有研究大多聚焦于风幕控尘、喷雾降尘及通风除尘,对多种降尘技术联合降尘的研究较少。单一的降尘技术在实际应用过程中存在固有的局限,如风幕控尘和喷雾降尘易受井下通风气流干扰,导致控尘效果不佳,而负压集尘若缺乏前期有效粉尘聚集预处理,降尘效率会受到严重影响。采用多种降尘技术联合控尘可有效避免单一降尘技术的局限性,且目前对多种降尘技术联合降尘的研究较少。因此,本文提出一种联合空气幕隔尘、喷雾降尘和负压集尘的掘进机外吹吸耦合除尘系统,利用数值模拟的方法确定其最优参数,并通过试验对降尘效果进行研究。

1 吹吸耦合除尘系统除尘原理

吹吸耦合除尘系统本质是通过在掘进机裁割臂尾部壳体上安装射流出口、雾化喷嘴和负压集尘装置,实现三者协同控尘。射流出口喷射形成三道高压风幕,对雾化喷嘴喷出的液滴进行二次破碎,共同形成高压雾幕墙,将裁割部与周围环境隔离,在内部形成一个小负压控尘区域。系统运行过程中液滴与粉尘充分耦合促使粉尘沉降,高压雾幕墙内侧的负压集尘装置则吸入控尘区域内的粉尘;穿过雾幕墙的粉尘由隔离区域外裁割部尾部端的多个集尘口吸入,有效抑制粉尘向掘进机后方扩散。该系统通过“吹-吸-喷雾”的闭环协同机制实现对粉尘的高效控制。图 1 为吹吸耦合除尘系统工作示意图。

2 数值模拟方案

2.1 数学模型

2.1.1 湍流模型

吹吸耦合除尘系统运行时,巷道内风流发生变

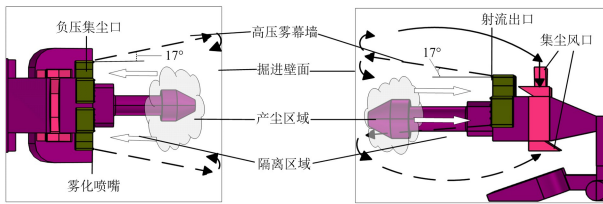


图 1 吹吸耦合除尘系统工作示意图

Fig. 1 Working schematic diagram of the blowing-suction coupled dust removal system

化,湍流出现在速度发生变化的位置。相对于标准 $k-\varepsilon$ 模型,Realizable $k-\varepsilon$ 模型在涡旋、强线流弯曲和旋转方面具有更高的仿真效果。因此,本文应用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型描述风流流动。Realizable $k-\varepsilon$ 模型由湍流动能 k 方程和耗散率 ε 方程组成^[18]。

k 方程为

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

ε 方程为

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

式中 ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; k 为湍流动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; x_i, x_j 为张量坐标; u_i, u_j 分别为速度在 i, j 方向上的分量(i, j 分别为 X, Y, Z 三个方向), m/s ; S 为弹性模量; μ 为分子动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G_k 为平均速度引起的湍流动能产生项; C_1 和 C_2 为代常量,在使用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型时, $C_1 = 1.44, C_2 = 1.9$; ν 为流体运动黏度, m^2/s ; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

2.1.2 曳力模型

水雾粒子在掘进工作面中的运动主要受到射流风幕的作用,自身重力的影响可忽略不计,因此,采用 Schiller-Naumann 定律对雾粒子的运动轨迹进行计算。流体曳力服从 Schiller-Naumann 定律,即

$$F_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (U - v) \quad (3)$$

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p}{3\mu C_D Re} \quad (4)$$

式中 F_D 为曳力, N ; τ_p 为剪切应力, N ; m_p 为液滴颗粒质量, mg ; U 为气流速度 m/s ; v 为液滴颗粒速度, m/s ; ρ_p 为液滴密度, kg/m^3 ; d_p 为液滴粒径, μm ; μ 为气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C_D 为曳力系数; Re 为液滴颗粒雷诺数。

曳力系数 C_D 为

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.678}) \quad (5)$$

颗粒雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{\rho_p |U - v| d_p}{\mu} \quad (6)$$

2.1.3 液滴破碎模型

KH (Kelvin-Helmholtz) 模型多用于两种运动流

体相互作用分析。当高速射流与高压喷雾之间达到一定的相对速度时,就会因过渡到不稳定状态而导致液滴再次破碎,因此可用该原理模拟水雾液滴破碎情况。

液滴破碎时粒径变化率为

$$\frac{\partial r_{KH}}{\partial t} = \frac{r_{ch} - r_{KH}}{\tau_{KH}} \quad (7)$$

式中 r_{ch} 为液滴破碎后的半径, μm ; t 为时间, s ; r_{KH} 为液滴破碎前的半径, μm ; τ_{KH} 为液滴破碎时间, s 。

$$\Lambda_{KH} = \frac{0.92r_p(1+0.45\sqrt{Z})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (8)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34+0.385We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho_p r_p^3}} \quad (9)$$

$$\tau_{KH} = \frac{3.788B_{KH}r_p}{\Omega_{KH}\Lambda_{KH}} \quad (10)$$

式中 Λ_{KH} 为增长波长, m ; Ω_{KH} 为最大频率; Z 为昂赛格数; T 为泰勒数; We_g 为液体韦伯系数; σ_p 为液体表面张力, N/m ; r_p 为初始液滴半径, μm ; B_{KH} 为模型经验参数。液滴破碎后的半径表达式可表示为

$$\gamma_{KH} = \begin{cases} B_0\Lambda_{KH} & B_0\Lambda_{KH} \leq r_p \\ \min\left\{\left(\frac{3\pi r_p^2 U_r}{2\Omega_{KH}}\right), \left(\frac{3r_p^2 \Lambda_{KH}}{4}\right)\right\}^{0.33} & B_0\Lambda_{KH} > r_p \end{cases} \quad (11)$$

式中 B_0 为常数,取 0.61; U_r 为气液两相的速度差, m/s 。

2.2 物理模型及网格划分

2.2.1 物理模型

掘进机吹吸耦合除尘系统结构如图 2 所示,该系统主要由高压风幕发生装置(含射流出口)、喷雾装置(含喷头)和负压集尘装置(含集尘风口)三部分组成。系统整体安装于截割臂尾部壳体:喷嘴位于顶部,射流出口在其下方,负压集尘口在射流出口下方,上方集尘风口和侧方集尘风口连接风机腔室。根据 1:1 的比例建立掘进机外吹吸耦合除尘系统及巷道物理模型,其中巷道尺寸(长×宽×高)为 $20\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3.7\text{ m}$,掘进机总长度为 9.6 m 。图 2 为物理模型示意图。

2.2.2 网格划分与网格独立性检验

利用 COMSOL Multiphysics 网格划分功能对物理模型进行网格划分,生成粗网格、中网格和细网格三种网格结构,如图 3 所示。由于巷道内的液滴主要受风流影响,故选取风流速度作为研究对象进行网格独立性检验。在巷道行人呼吸带(1.5 m)司机侧(距离侧壁 0.7 m)截取 X 轴的数值模拟风速进行

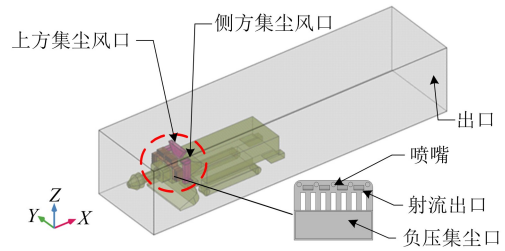


图2 物理模型

Fig. 2 Physical model

对比。结果如图 4 所示,粗网格和细网格的最大误差为 24.65%,中网格与细网格的最大误差为 12.17%。考虑网格密度影响模拟精度,选用细网格进行数值模拟,细网格共划分网格单元数量为 4 457 568,单元质量(偏度)在 0.4~0.8,平均单元质量为 0.662 4,单元质量满足模拟需求。

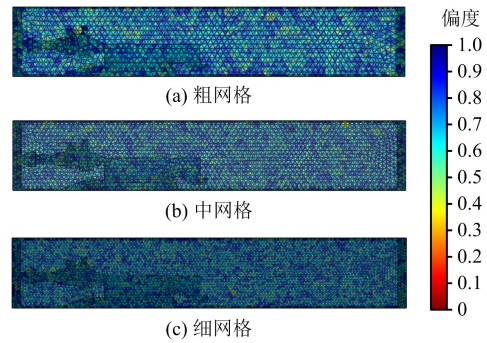


图3 网格划分结果对比

Fig. 3 Comparison of grid division results

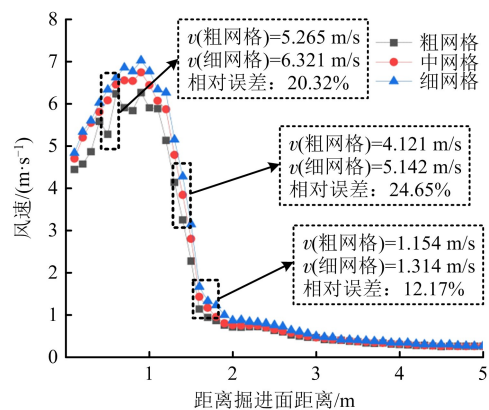


图4 网格独立性检验

Fig. 4 Grid independence test

2.3 边界条件参数设定

结合掘进工作面风流场特性及数值模拟所需条件设置模拟参数。为探究吹吸耦合除尘系统最佳的参数,设置射流出口偏转角度分别为 13° 、 15° 、 17° 和

19°,具体边界条件设置见表1。

表1 边界条件参数设置

Table 1 Parameter setting of boundary conditions

项目	参数	数值
湍流参数	连续相动力黏度	$1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
	气体分子扩散系数	$2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
	壁条件	无滑移
	温度	293.15 K
	空气密度	1.225 kg/m^3
边界条件	射流出口风速	20 m/s、25 m/s、30 m/s、35 m/s
	负压集尘口风速	-5 m/s
	集尘风口风速	-7 m/s
	巷道出口压力	0
液滴	粒子密度	$1\ 100 \text{ kg/m}^3$
	粒子表面张力	$7.29 \times 10^{-2} \text{ N/m}$
	破碎模型	Kelvin-Helmholtz

3 数值模拟结果分析

3.1 吹吸耦合除尘系统风场特性

3.1.1 射流速度对卷吸效果的影响

通过控制变量法,在保证射流出口偏转角度(17°)一致的情况下,研究射流速度对吹吸耦合流场形成效果的影响。不同射流速度下巷道风流速度切面和风流分布如图5和6所示。

从图5可以看出:射流速度为20 m/s和25 m/s时,由于射流风速的衰减速度较快,当风流到达掘进壁面时速度已经衰减到2 m/s以下,速度已经无法

达到形成有效射流风幕的条件;当射流速度为30 m/s、35 m/s时,风流到达掘进壁面时的速度均在3 m/s以上,可形成有效的射流风幕。由文献[19]可知,风流从射流出口处到掘进工作面衰减到速度不小于2 m/s时方可形成有效的射流风幕,因此,射流速度在30 m/s以上时才能够形成有效的射流风幕。

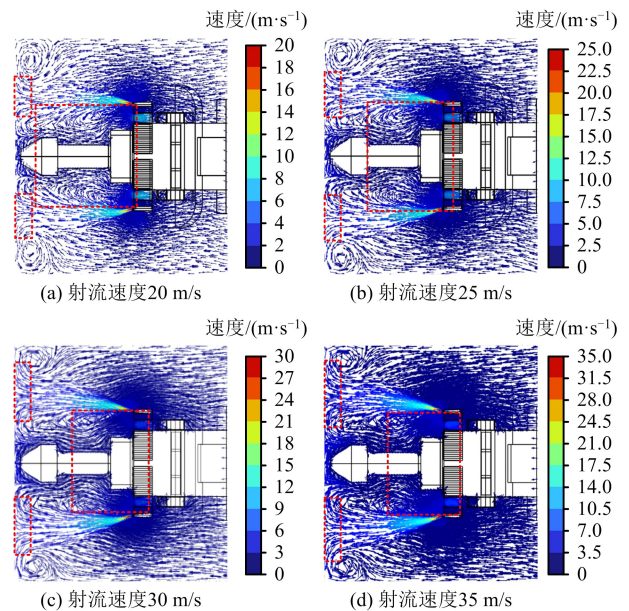


图6 不同射流速度下风流分布

Fig. 6 Airflow distribution under different jet velocity

图6虚线框中分别为未触碰到掘进壁面被负压集尘口吸入的风流和达到掘进面时的风幕厚度。从图6可明显看出射流速度在20 m/s和25 m/s时大量的风流在未接触到掘进壁面时被负压集尘口吸

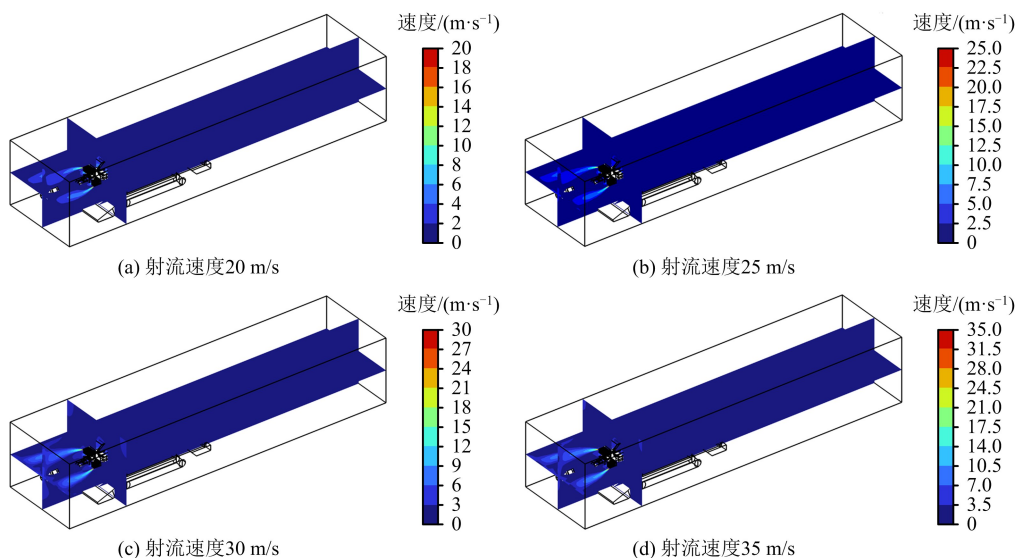


图5 不同射流速度下巷道风流速度切面

Fig. 5 Cross-section of roadway airflow velocity at different jet velocities

回;当射流速度超过 30 m/s 时未接触到掘进壁面时就被负压集尘口吸回的风流明显减少。相较于 20 m/s 和 25 m/s 的射流速度,射流速度 30 m/s 和 35 m/s 的风幕厚度明显厚于前者,因此选取 30 m/s 为后续模拟参数。

3.1.2 射流出口偏转角度对卷吸效果的影响

前期模拟表明,射流出口偏转角度小于 13° 时难以形成有效的卷吸,当角度超过 19° 部分风流吹向顶板和侧壁,同样削弱卷吸效果。因此,选取 13° 、 15° 、 17° 和 19° 四个偏转角度进行模拟。

从图 7 和 8 可以看出:向掘进面方向的最大风速在 28 ~ 30 m/s,风流由射流喷嘴射出,风速由 30 m/s 开始衰减,到达掘进壁面时风速衰减到 3.5 m/s,衰减速度较为稳定。

图 8 分别为射流出口偏转角度 13° 、 15° 、 17° 和 19° 下横截面和纵截面的风流分布图,横截面对应风流场 Z 轴方向 0.8 m 处截面,纵截面为左侧 Y 轴方向 -0.56 m 处截面、右侧 Y 轴方向 0.56 m 处截面。图 9 为射流喷嘴偏转角度 13° 、 15° 、 17° 和 19° 时,两侧集尘风口和负压集尘装置 X-Z 平面中心截面风

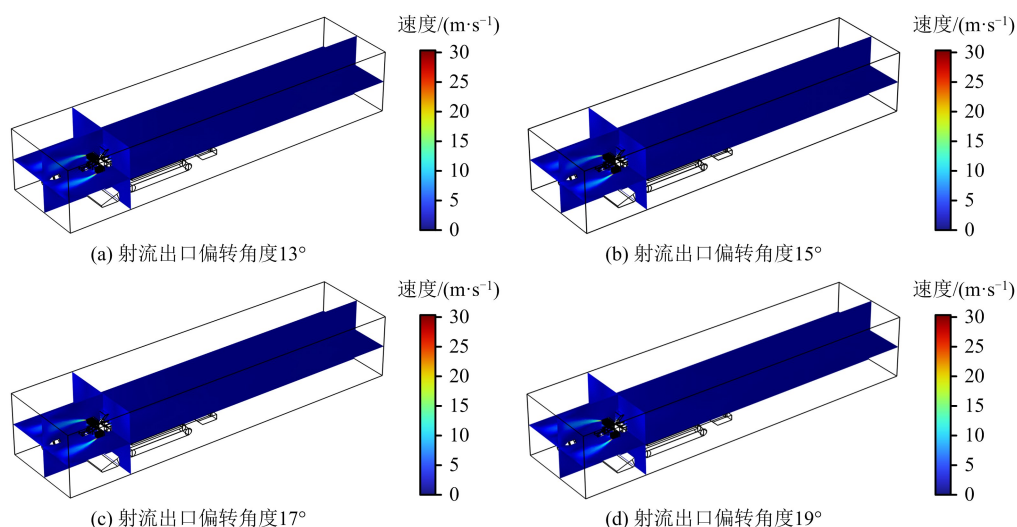


图 7 不同射流出口偏转角度下风流速度切面

Fig. 7 Cross-section of airflow velocity at different jet outlet deflection angles

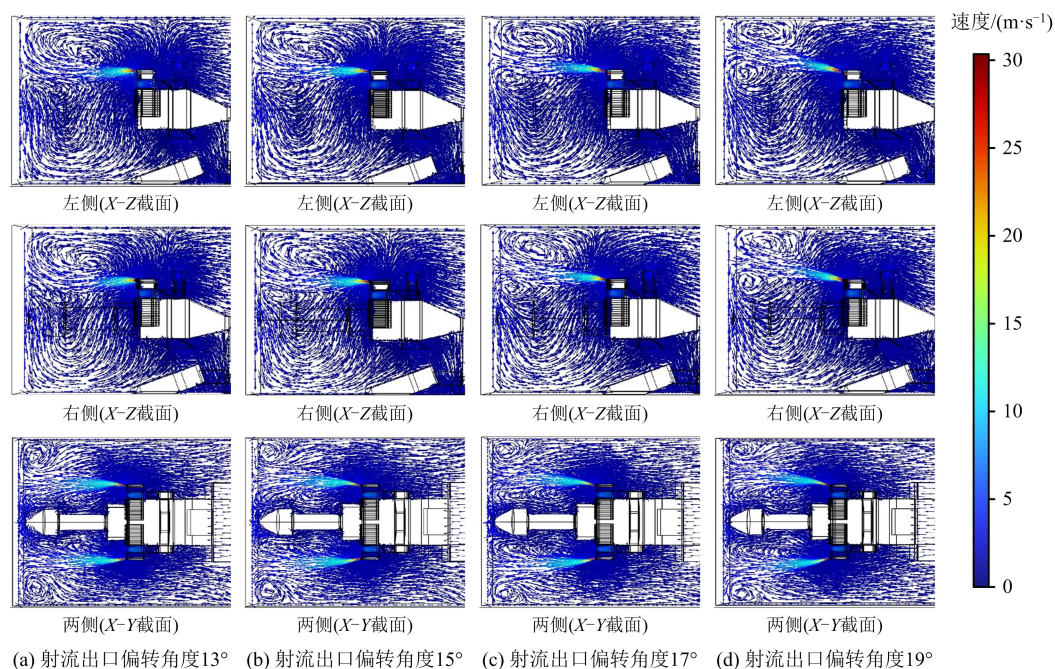


图 8 不同射流出口偏转角度下横纵截面风流分布

Fig. 8 Airflow distribution in horizontal and vertical cross-sections for different jet outlet deflection angles

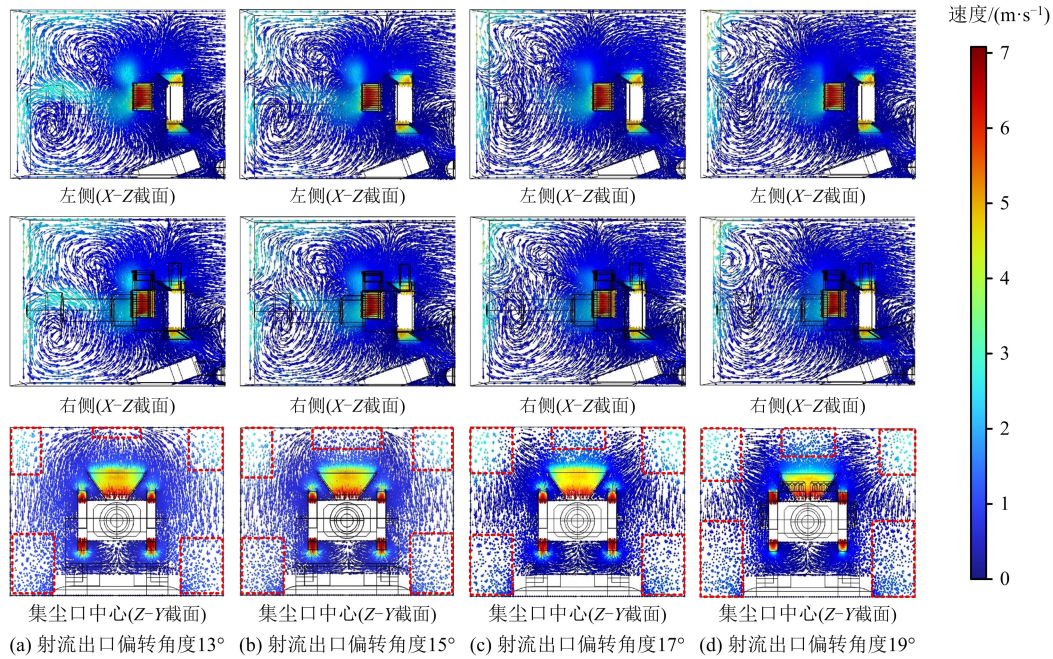


图9 集尘装置两侧与上方中心截面风流分布

Fig. 9 Airflow distribution on both sides and upper central cross-sections of the dust collection device

流分布及所有集尘口中心切面风速分布,左侧为 Y 轴方向 -0.8 m 处截面风流分布、右侧为 Y 轴方向 0.8 m 处截面风流分布。

由图 8 和 9 可知,高速风流与壁面碰撞后形成绕流,裁割头区域风流呈紊乱状态。壳体上方射流出口喷射形成的射流风幕,与壁面碰撞后产生向内收敛和向后方逸散的双向绕流,向后逸散的风流由壳体后方及两侧的集尘风口以 7 m/s 吸入,向内收敛的风流则被负压集尘装置以 5 m/s 的速度吸入,二者协同形成椭圆形的吹吸特征;壳体左右两侧的射流出口形成的侧方射流风幕,与壁面碰撞后同样形成双向绕流,向内收敛的风流经负压集尘装置以 5 m/s 的速度吸入而形成内收型椭圆形吹吸特征,向后逸散的风流由壳体两侧的集尘风口的作用下以 7 m/s 的速度吸入而形成大范围的椭圆形吹吸特征;由于三个风幕均为正压工况,其内部形成局部负压区域。裁割头部产生的粉尘被高压雾幕墙控制在前端区域,在负压吸入与风流运动的作用下被负压集尘装置捕获。

从图 8 可以看出,当偏转角度为 13° 时,存在少量风流与掘进端头发生碰撞,会将产生的粉尘吹向巷道空间;偏转角度增加到 15° 时射流风幕的风流可完全将掘进端头包裹,碰撞现象基本消除;当偏转角度增加至 17° 时,风流完全不与掘进端头碰撞,卷吸效果显著提升;结合图 9 分析可知, 17° 偏转角时,射

流风幕的入射方向与掘进壁面形成最佳冲击角度,使得绕流运动呈现“内收为主、逸散为辅”的理想状态。当角度小于 17° 时,射流风幕直接吹向裁割头导致前端风流紊乱,收敛能力降低,部分风流直接穿透至巷道后方导致粉尘扩散;当角度大于 17° 时,射流风幕与壁面碰撞后产生向上的分力,大量风流吹向顶板形成涡流,不仅削弱了吹吸效果,还导致粉尘在顶板附近积聚。

通过对不同射流出口偏转角度下流场结构的分析发现,偏转角度为 17° 时流场效果最优,在该角度下射流能够以最佳的动量效率抵达掘进壁面,形成的绕流结构较为对称稳定,有效地在控尘区域内部形成强烈的卷吸效应,同时可在最大限度上减少风流与顶板及侧壁碰撞所产生的能量损失。相比之下过小的偏转角度下风流无法有效作用于整个断面,角度过大则导致能量过早耗散于非目标区域,从而削弱系统的整体性能。

3.2 液滴分布规律分析

从图 10 可以看出,液滴自喷嘴喷出后,在射流风幕的作用下于距出口 0.8 m 处达到最大速度 12 m/s ,且在此过程中水雾逐渐破碎,形成三道高压雾幕墙,将掘进端头包围;随后,水雾粒子速度逐渐降低,最终以 1.5 m/s 左右的速度冲击掘进壁面,进一步破碎为细小雾滴并向四周扩散。通过对雾滴运动轨迹的观察,射流出口偏转角度 13° 和 15° 时雾幕虽

然能够完全包裹裁割头部,但覆盖掘进壁面的范围较小,大量雾滴作用在裁割头和裁割臂处,雾滴覆盖掘进壁面范围小,控尘效率较低。相较之下,偏转角度为 17° 时,雾滴在完全包裹裁割部的同时,仅有少量液滴与裁割部碰撞,且能最大限度地覆盖掘进壁面。偏转角度达到 19° 时,大量雾滴被风流吹向顶板和侧壁,雾滴包裹裁割部效果和覆盖掘进壁面效果均欠佳。结合模拟结果分析,偏转角度为 17° 时风流对雾滴的运输与分布达到了最优,既保证了雾滴对裁割部的充分包裹,又实现了对掘进壁面的最大面积覆盖,为粉尘的润湿与沉降创造了最佳条件。

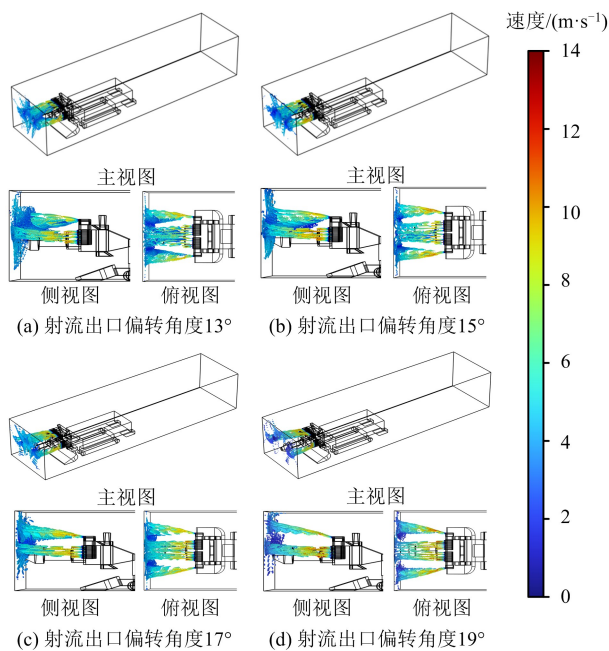


图10 粒子运动轨迹

Fig. 10 Trajectory of particle motion

4 吹吸耦合除尘技术试验

4.1 吹吸流场观测试验

依据某掘进工作面的实际工作情况,设计搭建

1:5的模拟试验平台,如图11所示。试验的首要目的是确定吹吸耦合除尘系统流场规律,以及不同工况下的降尘效率,其中烟雾观测试验可验证其流场特性。

采用控制变量法测试吹吸耦合除尘的风流特性,应用华盛昌DT-8880热敏风速测定仪测定风速。通过点燃烟饼观察风流情况,如图12所示。试验中,烟饼置于掘进端头前端中心前方,设定射流喷嘴出口风速为 30 m/s ,负压集尘口风速为 5 m/s ,集尘风口气速为 7 m/s ,试验中不采用除尘技术。通过观察不同射流偏转角度下烟雾的流动状态,分析风流场的卷吸效果。图10为系统稳定运行后间隔 1 s 的拍摄效果,每种工况连续 5 s 拍摄五张照片。从图10可以观察到,偏转角度 13° 时烟雾被风流直接吹向壁面,卷吸效果不明显,偏转角度越大烟雾的卷吸效果越明显,当射流出口偏转角为 17° 时,烟雾被高效导入负压集尘口,当偏转角度为 19° 时,风流明显吹向顶板,导致大量的烟雾贴近顶板向巷道后方逸散,试验结果与模拟结果有着高度的相似性,验证了吹吸耦合除尘系统的流场特性。

4.2 降尘效率试验

为研究掘进机吹吸耦合除尘系统的降尘效率,应用图11所示的封闭试验装置对吹吸耦合除尘系统不同工况下的降尘效果进行试验分析。应用自制发尘器作为半封闭试验装置中的发尘源,按照 15 g/min 进行发尘作业,使用AKFC-92A矿用粉尘采样器(常熟市矿山机电器材有限公司)采样3次取平均值,设置采样时间为 3 min ,采样体积流量为 20 L/min 。在掘进机左侧设置2个测尘点(1#为司机位置处,2#为掘进机后方),测点间距为 1 m ,如图13所示。

试验保持射流出口尺寸(长 $\times$ 宽)为 $0.016\text{ m} \times 0.004\text{ m}$ 和风速不变,固定喷雾压力为 $4\text{ MPa}^{[13]}$,测量不同工况下的粉尘质量浓度,设置5种对照工况,

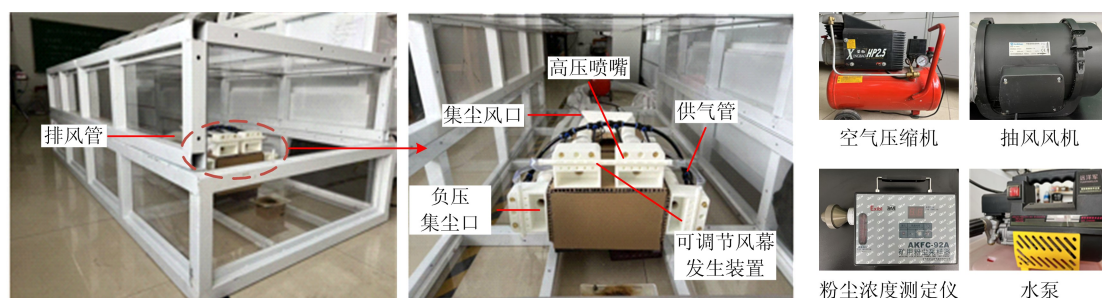


图11 相似试验平台

Fig. 11 Similar test platform

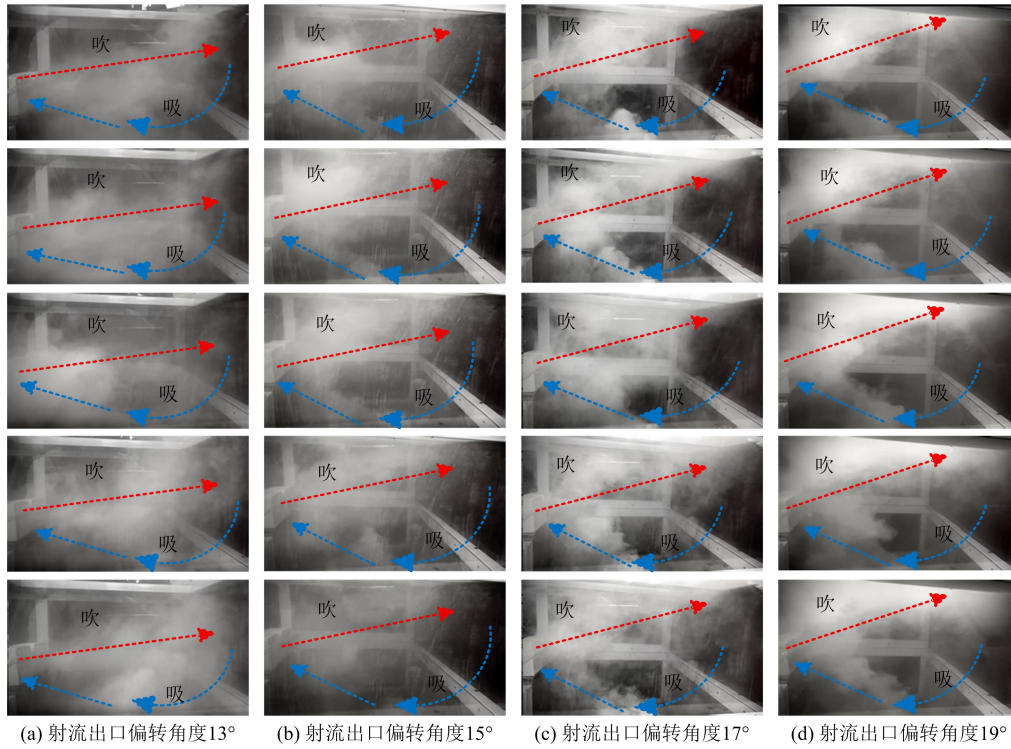


图 12 风流试验效果图

Fig. 12 Effect diagram for airflow tests

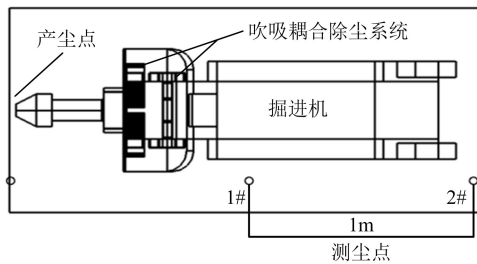


图 13 试验测点位置

Fig. 13 Location of test points

即无除尘措施(空白组)、仅风幕、仅喷雾、风幕+喷雾和吹吸+喷雾(耦合系统),保证其他参数一致,分别测定粉尘质量浓度。测得不同工况下各测点的粉尘质量浓度见表2。

由表2 试验粉尘质量浓度结果可知如下内容。

(1)在单一控尘技术的降尘试验中,仅风幕和仅喷雾的试验在1#测点位置处的降尘效率分别为68.89%和74.30%;风幕+喷雾试验组,在1#测点位置的降尘效率为87.37%。

(2)吹吸耦合除尘:**a.**开启掘进机外吹吸耦合除尘系统,射流出口偏转角度由13°升至19°时,1#测点位于司机位置处,降尘效率分别为91.48%、92.18%、93.08%、91.73%;**b.**2#测点位于掘进机尾部,射流出口偏转角度由13°升至19°时,降尘效率分别为92.57%、93.23%、94.10%、92.82%。降尘效率随偏转角度的增大呈先升后降的趋势,这表明在掘进机外吹吸耦合除尘系统前端的混合场中,含尘气流被迫与雾滴碰撞、凝结并快速沉降,未被沉降

表 2 不同工况粉尘质量浓度对比

Table 2 Comparison of dust mass concentration under different working conditions

工况	1#测点粉尘质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2#测点粉尘质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	工况	1#测点粉尘质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2#测点粉尘质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
空白组	637.8	366.5	耦合系统(13°)	54.3	27.2
仅风幕	198.4	102.7	耦合系统(15°)	49.8	24.8
仅喷雾	163.9	83.2	耦合系统(17°)	44.2	21.6
风幕+喷雾	80.5	38.4	耦合系统(19°)	52.7	26.3

的粉尘则被负压集尘卷吸气流吸入;对比单一控尘技术和两种技术组合,掘进机外吹吸耦合除尘系统更易于隔绝掘进面运动的煤尘,对粉尘的治理效果更优。

5 结 论

(1)针对掘进工作面粉尘浓度过高问题,提出掘进机外吹吸耦合除尘系统;该系统联合喷雾降尘、空气幕隔尘和负压集尘技术,利用数值模拟的方法,揭示了不同射流出口偏转角度下流场结构和喷雾效果,并确定了最佳工况参数。

(2)数值模拟结果表明,射流速度较小时难以形成有效射流风幕,速度过大时则风流向后方扩散,易夹带粉尘反流;当射流速度为 30 m/s 时,可形成有效射流风幕,且能高效地卷吸含尘气流进入负压集尘口。射流出口偏转角度过大过小,均影响卷吸效果和液滴覆盖面积;当偏转角度为 17° 时卷吸和液滴覆盖效果最佳,且流场结构对称稳定,能够限制涡流的产生。

(3)吹吸耦合除尘系统流场特性和降尘效果试验结果表明,流场观测试验与模拟结果高度相似,验证了系统流场的准确性;粉尘质量浓度测定结果表明,开启吹吸耦合除尘系统后,相较于仅风幕、仅喷雾、风幕+喷雾控尘技术,在 1#测点降尘效率分别提升了 24.19 百分点、18.78 百分点和 5.71 百分点,可见,该系统更易阻隔掘进面粉尘扩散,对粉尘的控制效果更优。

(4)本文明确了系统的最优参数和协同机制,但仍有局限性:未涉及实际应用中不同巷道断面形状对风流的影响,也未分析喷雾参数、压抽比变化对降尘效果的影响。未来可开展以下研究:**a.** 针对不同巷道断面形状优化系统结构参数;**b.** 寻求控尘效率最优的喷雾参数及压抽比;**c.** 进行工业性试验,验证系统在矿井中的实际应用效果。

参考文献 (References):

- [1] 李德文,隋金君,赵政,等. “十四五”以来煤矿粉尘防治新技术及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(6): 1-8.
- LI D W, SUI J J, ZHAO Z, et al. Control technology and development direction of coal mine dust from the 14th Five-Year Plan Period [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 1-8.
- [2] 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.

CHENG W M, ZHOU G, CHEN L J, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 1-20.

- [3] REN S S, JING D J, GE S C, et al. Research and development of vortex suction dedusting device based on multi-factor horizontal response surface method [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 442: 140916.
- [4] 张盈盈,杨云,张景,等. 2021—2023 年我国煤矿事故统计分析及其成因研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(11): 224-231.
- ZHANG Y Y, YANG Y, ZHANG J, et al. Statistical analysis and cause research on coal mine accidents in China from 2021 to 2023 [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(11): 224-231.
- [5] 荆德吉,马纪闯,张天. 水雾粒子特性对呼吸性粉尘降尘效率影响研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 169-175.
- JING D J, MA J C, ZHANG T. Study of the effect of water mist particle characteristics on the dust reduction efficiency of respirable dust [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(1): 169-175.
- [6] 张恒. 综掘工作面尘源点对粉尘分布规律的影响及降尘措施的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- ZHANG H. Study on the influence of dust source point on dust distribution law and dust reduction measures in fully mechanized excavation face [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [7] 孟晗,杨玉中,鲁忠良,等. 基于风幕隔尘集尘的综掘面粉尘防治研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2173-2180.
- MENG H, YANG Y Z, LU Z L, et al. On the dust prevention and control of the fully mechanized workplace based on the dust separation and collection of the air curtain [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(6): 2173-2180.
- [8] 王海桥. 掘进工作面射流通风流场研究[J]. 煤炭学报, 1999(5): 498-501.
- WANG H Q. Study on jet ventilation flow field in heading face [J]. Journal of China Coal Society, 1999(5): 498-501.
- [9] 荆德吉,阚琦笙,胡俭,等. 煤矿辅运巷道径向射流吹吸风幕控尘技术研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(11): 4280-4289.
- JING D J, KAN Q S, HU J, et al. Investigation of dust control technology using radial jet blowing and blowing and suction air curtains in coal mine auxiliary transportation roadways [J]. Journal of Safety and

- Environment, 2025, 25(11): 4280–4289.
- [10] 刘荣华, 朱必勇, 王鹏飞, 等. 综掘工作面双径向旋流屏蔽通风控尘机理[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3902–3911.
- LIU R H, ZHU B Y, WANG P F, et al. Dust control mechanism of double radial swirl shielding ventilation in fully mechanized heading face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3902–3911.
- [11] 于永宁, 孔文源, 廉志华, 等. 掘锚机司机位置气幕防尘性能及影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(6): 80–86.
- YU Y N, KONG W Y, LIAN Z H, et al. Research on dust prevention performance and influencing factors of air curtain at the operator's position of dig-anchor machine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(6): 80–86.
- [12] SHEN C, WANG D, ZHANG J, et al. A novel dual swirling air curtain dust-control system; design and similar experiment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(5): 113728.
- [13] 陈景序, 荆德吉, 葛少成, 等. 掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置的研制与实验[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3233–3240.
- CHEN J X, JING D J, GE S C, et al. Research and experiment on dust control device with external pneumatic vortex mist curtain for road-header[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3233–3240.
- [14] 张传玖, 于海明, 乔欣, 等. 综掘工作面的风幕控尘与喷雾降尘技术应用与研究方法[J]. 金属矿山, 2025(2): 219–226.
- ZHANG C J, YU H M, QIAO X, et al. Application and research method of air curtain dust control and spray dust reduction technology in fully excavated working face[J]. Metal Mine, 2025(2): 219–226.
- [15] 张天, 荆德吉, 葛少成, 等. 超音速汲水虹吸气动雾化降尘技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3912–3921.
- ZHANG T, JING D J, GE S C, et al. Supersonic siphon suction water aerodynamic atomization in dust removal [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3912–3921.
- [16] 李刚, 姜伯洋, 胡方强, 等. 基于矿井风流运动特征的逸散粉尘喷雾除尘研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(3): 39–46.
- LI G, JIANG B Y, HU F Q, et al. Study on spray dust removal of separated powder based on the movement characteristics of mine air flow [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(3): 39–46.
- [17] WANG Y, JIANG Z, ZHANG F, et al. Study on dust diffusion characteristics of continuous dust sources and spray dust control technology in fully mechanized working face[J]. Powder Technology, 2022, 396: 718–730.
- [18] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. Research on tunnel ventilation systems: dust diffusion and pollution behaviour by air curtains based on CFD technology and field measurement [J]. Building and Environment, 2019, 147: 444–460.
- [19] 李雨成, 刘宗桃, 刘蓉蒸, 等. 综掘工作面风幕控尘装置设计及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 66–71.
- LI Y C, LIU Z T, LIU R Z, et al. Design and experiment study on air curtain dust control device of mine fully-mechanized heading face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 66–71.

Numerical analysis and experimental study on the external blowing-suction coupled dust removal system for roadheaders

CHEN Jingxu^{1,2,3}, CAO Chengfu¹, ZHAO Jiacheng¹, JING Deji⁴, LIU Yejiao^{1,2,3}, ZHI Yongkai¹

(1 School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;

2 Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;

3 Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;

4 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: This paper proposes an external-suction coupled dust removal system for roadheaders, integrating air curtain dust isolation, spray dust suppression, and negative pressure dust collection technologies. Employing a combined approach of numerical simulation and

experimental study, this research analyzes the airflow field, spray effectiveness, and dust removal efficiency under the system's operating conditions. COMSOL Multiphysics was utilized to establish the geometric model of the mining roadway and the roadheader's external blowing-suction coupled dust removal system for simulation calculations. A gas-liquid coupling model was developed based on the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and the fluid flow-droplet atomization model to investigate the effects of different jet outlet wind speeds and deflection angles on the airflow field, as well as the movement trajectories of spray droplets under varying jet outlet deflection angles. Simulation results indicate that at a jet outlet wind speed of 30 m/s, a stable and effective jet air curtain can be formed. The optimal flow field entrainment effect occurs at a jet outlet deflection angle of 17° , wherein the spray droplets achieve maximum coverage area on the roadheading face. Experiments were conducted with test parameters aligned with those in the numerical simulation: (1) Flow field observation tests revealed that as the jet outlet deflection angle increases, the flow field entrainment effect first enhances and then diminishes, achieving its peak at 17° . When the angle increases to 19° , airflow directed towards the roof and sidewalls significantly reduces entrainment performance; (2) In the dust removal test design, the system was configured with a jet outlet wind speed of 30 m/s, deflection angles of $13^\circ/15^\circ/17^\circ/19^\circ$, and a spray pressure of 4 MPa, followed by dust removal testing after stable operation. Test results indicated that when the external blowing-suction coupled dust removal system is activated at a deflection angle of 17° , the dust mass concentration decreases from 637.8 mg/m^3 to 44.2 mg/m^3 , achieving a dust removal efficiency of 93.08%. This represents increases of 24.19 percentage points, 18.78 percentage points, and 5.71 percentage points compared with the air curtain-only, spray-only, and "air curtain + spray" groups, respectively, outperforming dust removal effects observed at other deflection angles. The findings demonstrate that the dust removal efficiency of the external blowing-suction coupled dust removal system for roadheaders significantly surpasses that of traditional single or combined dust removal technologies, providing a solid theoretical foundation and robust technical support for efficient dust removal in roadheading operations.

Key words: safety and hygiene engineering technology; high-pressure fog curtain wall; blowing-suction coupled; dust removal system; roadheaders