中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0740-09 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 740-748.

基于动态捕集概率模型的掘进巷道水帘除尘数值模拟研究

薛 涛[1]，王成岩[2]，周 丹[3*]

（1. 开滦（集团）有限责任公司 东欢坨矿业分公司，河北 唐山 063000；
2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院，北京 海淀 100191；3. 河南理工大学 资源环境学院，河南 焦作 454003）

摘 要：为揭示掘进巷道水帘除尘的多相流作用机理，提出一种耦合动态捕集概率的水帘除尘多相流数值模拟方法。基于Fluent软件进行二次开发，通过类比Stokes流建立了半解析模型，利用用户自定义函数构建了液-气-尘相互作用的掘进巷道水帘除尘多相流数值模型。不同于采用固定捕集效率的处理方法，该模型根据粉尘颗粒粒径、瞬时法向速度和惯性参数实时更新捕集概率。研究结果表明：粉尘受重力作用沿巷道出口方向发生沉降，粉尘质量浓度逐渐降低，但仍存在大范围高浓度粉尘区域。采用双水帘进行除尘，两道水帘分别作用于不同沉降阶段的粉尘，实现累积除尘。第一道水帘开启后(X=35 m)，回风侧3个测点的除尘效率分别为64.8%、63.1%和62.4%；随巷道距离的增加，粉尘质量浓度持续降低。第二道水帘作用后(X=50 m)，平均粉尘质量浓度降低至18.6 mg/m^3，两道水帘累计除尘效率达78.4%。在X>50 m的区域，水帘关闭时部分区域粉尘质量浓度大于100 mg/m^3；水帘开启后粉尘质量浓度基本低于40 mg/m^3，巷道出口平均粉尘质量浓度低于10 mg/m^3。现场对比结果表明，8个现场测点的模拟值与实测值的相对误差为7.10%～36.42%，模型能够反映水帘开启后粉尘质量浓度的总体变化。研究结果可为掘进巷道水帘布置和运行参数比较提供参考。

关键词：计算流体力学；粉尘；水帘除尘；动态捕集概率；多相流；掘进巷道

中图分类号：TD714 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.05.0024

引用格式：薛涛，王成岩，周丹. 基于动态捕集概率模型的掘进巷道水帘除尘数值模拟研究[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：740-748.

Xue Tao, Wang Chengyan, Zhou Dan. Numerical simulation of water curtain dust suppression in an excavation roadway based on a dynamic capture probability model[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 740-748.

Numerical Simulation of Water Curtain Dust Suppression in an Excavation Roadway Based on a Dynamic Capture Probability Model

Xue Tao[1], Wang Chengyan[2], Zhou Dan[3*]

(1. Donghuantuo Mining Company, Kailuan Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China;
2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: To reveal the multiphase flow mechanism of water curtain dust suppression in an underground excavation roadway, a numerical simulation method coupled with dynamic capture probability is proposed.

收稿日期：2026-05-26
基金项目：国家自然科学基金项目(42230814)
作者简介：薛 涛(1985—)，男，高级工程师，主要从事矿山一通三防的研究。E-mail：85101568@qq.com。
*通信作者：周 丹(1984—)，男，讲师，博士，主要从事安全技术及工程的研究。E-mail：18639180517@163.com。

Based on secondary development of Fluent, a semi-analytical model was established by analogy with Stokes flow, and a liquid-gas-dust interaction model was constructed using user defined functions. Unlike methods using a fixed capture efficiency, the model updates capture probability according to particle diameter, instantaneous normal velocity, and inertia. The results show that dust settles under gravity and the mass concentration gradually decreases along the roadway, but high concentrations of dust still exist in large areas. Two water curtains are used at different settling stages to achieve cumulative dust removal. After the first water curtain is opened (X=35 m), the dust removal efficiencies at three monitoring points on the return-air side are 64.8%, 63.1%, and 62.4%, respectively. With the increase of roadway distance, the mass concentration continuously decreases. After the second water curtain acts (X=50 m), the average dust mass concentration decreases to 18.6 mg/m^3, and the cumulative efficiency of the two curtains reaches 78.4%. In the region of X>50 m, some areas exceed 100 mg/m^3 when the curtains are off, whereas the concentration is generally below 40 mg/m^3 when they are on; the average concentration at the roadway outlet is below 10 mg/m^3. Comparison with field measurements at eight points gives relative errors of 7.10%–36.42%. The model reproduces the overall concentration change after the water curtains are opened and can be used to compare curtain layouts and operating parameters.

Key words: computational fluid dynamics; dust; water curtain dust suppression; dynamic capture probability; multiphase flow; tunnel excavation

0　引　言

煤炭掘进、开采、运输和破碎等环节均会产生大量粉尘，其中，巷道掘进时掘进机截割和带式输送机转载是主要产尘过程[1-2]。大量悬浮粉尘不仅会降低作业环境能见度，还会损害作业人员的呼吸系统健康[3-5]。目前，水帘除尘是掘进巷道常用的湿式除尘方式，具有布设灵活、能够覆盖巷道断面等特点[6-7]。准确描述水帘作用下粉尘颗粒的运移与捕集过程，对评价水帘除尘效果具有实际意义。

现有研究主要从巷道气流与粉尘运移模拟、湿式除尘试验及参数分析等方面展开，同时，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）已广泛用于巷道通风流场和粉尘迁移规律研究[8-9]。Parra等[10]通过数值模拟与试验对比，验证了CFD预测深井巷道气流的可行性。Diego等[11]分析了CFD在井工矿通风研究中的适用性。赵敏等[12]采用CFD-DPM方法研究了综掘巷道粉尘的时空演化特征。李军胜等[13]分析了压入式风筒位置和风速对工作面粉尘分布的影响。张廷寿[14]研究了粉尘参数对巷道负压除尘效率的影响。在湿式除尘方面，水帘、水幕和喷雾装置的参数确定仍较多依赖现场试验与工程调试[15-16]。Seaman等[17]通过调节喷雾间距、覆盖宽度和液滴尺寸，验证了水幕对悬浮煤尘的去除作用。相关实验表明，回风巷水帘系统具有较好的降尘效果[18]。Nie等[19]研究了湿式降尘技术对矿井粉尘扩散的控制作用。黄强[20]分析了水幕降尘系统对全尘和呼吸性粉尘的影响。宋胜伟等[21]利用Fluent研究了喷嘴角度、压力和间距对喷雾降尘效果的影响。此外，部分研究采用数值模拟方法分析了负压射流、水帘及全断面雾幕的降尘过程[22-23]。

现有CFD研究主要描述巷道气流组织和粉尘浓度分布，水帘与喷雾研究则多以装置参数和除尘效率为考察对象，对颗粒运动状态变化下的捕集过程涉及较少。固定捕集效率或经验判据不能区分粒径、瞬时法向速度和惯性参数不同的颗粒。本文以某煤矿掘进巷道为研究对象，在ANSYS Fluent 2024 R1的CFD-DPM框架中编写用户自定义函数（User Defined Functions，UDF），按颗粒粒径、瞬时法向速度和惯性参数计算其穿越水帘时的捕集概率。计算工况设置两道水帘，分别位于距迎头30 m和50 m处。通过比较水帘开启与关闭时的粉尘质量浓度和粒径分布，并与现场监测值对照，检验该处理方法在本研究巷道条件下的计算结果。

1　耦合动态捕集概率的水帘除尘多相流优化模型

计算采用欧拉-拉格朗日方法求解气-尘两相运动[24]，水帘对颗粒的作用通过动态捕集概率模型处理。巷道内平均风速约为0.5 m/s，最大风速为

21.0 m/s，对应马赫数小于0.3，计算中将空气视为不可压缩流体。连续相采用SST k-ω模型，该模型在近壁区采用k-ω形式，在远离壁面的区域逐渐过渡至k-ε形式。该模型的控制方程及涡黏系数为

$$\nu_T=\frac{a_1 k}{\max(a_1\omega, SF_2)}。\tag{1}$$

湍动能为

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\bar{u}_i\frac{\partial k}{\partial x_i}=P_k-\beta^* k\omega+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\nu+\sigma_k\nu_T)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]。\tag{2}$$

湍动能耗散率为

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\bar{u}_i\frac{\partial \omega}{\partial x_i}=\alpha S^2-\beta\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\nu+\sigma_\omega\nu_T)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right]+2(1-F_1)\frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i},\tag{3}$$

式中：ν_T为湍流粘性系数；k为湍流动能；ω为比耗散率；P_k为湍流产生项；S为平均应变率张量；F_1和F_2为混合函数。闭合系数和辅助关系为

$$P_k=\min\left(\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k\omega\right),\tag{4}$$

$$F_1=\tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{\mathrm{CD}_{k\omega}y^2}\right]\right\}^4\right\},\tag{5}$$

$$F_2=\tanh\left[\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)\right]^2\right],\tag{6}$$

$$\mathrm{CD}_{k\omega}=\max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20}\right)。\tag{7}$$

取 $\alpha_1=\frac{5}{9}$，$\alpha_2=0.44$，$\beta_1=0.075$，$\beta_2=0.082\,80$，$\beta^*=0.09$，$\sigma_{k1}=0.85$，$\sigma_{k2}=1$，$\sigma_{\omega 1}=0.5$，$\sigma_{\omega 2}=0.856$。

粉尘颗粒被视为重颗粒[9]，其控制方程为

$$m_\mathrm{p}\frac{\mathrm{d}\vec{u}_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t}=m_\mathrm{p}\frac{\vec{u}-\vec{u}_\mathrm{p}}{\tau_\mathrm{r}}+\vec{F}_0+m_\mathrm{p}\frac{\vec{g}(\rho_\mathrm{p}-\rho)}{\rho_\mathrm{p}}+\vec{F}_\mathrm{s}+\vec{F}_\mathrm{m},\tag{8}$$

式中：m_p为粒子质量；$\vec{u}$为瞬时流体速度；$\vec{u}_\mathrm{p}$为粒子速度；ρ为流体密度；ρ_p为粒子密度；$\vec{F}_0=\frac{m_\mathrm{p}\vec{u}'}{\tau_\mathrm{r}}$为粒子湍流扩散作用力；$\vec{g}$为重力加速度；$\vec{F}_\mathrm{s}$为Saffman升力；$\vec{F}_\mathrm{m}$为因颗粒旋转而受到的Magnus升力；$m_\mathrm{p}\frac{\vec{u}-\vec{u}_\mathrm{p}}{\tau_\mathrm{r}}$为曳力；$\tau_\mathrm{r}$为粒子弛豫时间。

$$\tau_\mathrm{r}=\frac{\rho_\mathrm{p}d_\mathrm{p}^2}{18\mu}\frac{24}{C_\mathrm{d}Re},\tag{9}$$

式中：μ为空气分子粘度；d_p为粒子直径；$Re=\frac{\rho d_\mathrm{p}|\vec{u}_\mathrm{p}-\vec{u}|}{\mu}$为相对雷诺数；$C_\mathrm{d}$为光滑球形粒子的阻力系数。阻力系数$C_\mathrm{d}$可表示为$C_\mathrm{d}=a_1+\frac{a_2}{Re}+\frac{a_3}{Re^2}$，其中$a_1$，$a_2$，$a_3$为适用于不同$Re$范围的常数。

水帘通过网孔处形成的液膜构成粉尘阻隔屏障。液膜厚度远小于巷道尺度，若直接解析自由界面，需要在水帘区域设置远小于巷道主体网格的液膜尺度网格，计算量显著增加。因此，本文将捕集过程等效为球形颗粒沿水帘法向穿越静止薄液膜的过程，并在液膜内颗粒相对雷诺数远小于1，液膜黏度恒定及颗粒间相互作用可忽略的条件下采用半解析模型。首先考虑厚度为h的无限大水帘系统。在低雷诺数条件下，粉尘颗粒穿越水帘的过程可类比斯托克斯流动问题，此时阻力与速度呈线性关系且可实现方向解耦。设垂直于水帘方向为x轴，则阻力分量可表示为

$$F_x=-k\mu_l d_\mathrm{dust}u_x。\tag{10}$$

在液膜动力黏度为μ_l和粉尘颗粒垂直液膜速度为u_x的条件下，斯托克斯流动(极低雷诺数工况)中阻力系数k的理论值为常数3π，但实际应用中允许对该参数进行标定优化以提升模型适应性。因此，粉尘颗粒在液膜中的运动方程可表述为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=u_x, m_\mathrm{dust}\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}t}=-k\mu_l d_\mathrm{dust}u_x。\tag{11}$$

进而可求得解析解

$$x(t)=\frac{m_\mathrm{dust}u_{x0}}{k\mu_l d_\mathrm{dust}}\left[1-\exp\left(-\frac{k\mu_l d_\mathrm{dust}}{m_\mathrm{dust}}t\right)\right]。\tag{12}$$

设粉尘初始速度为u_{x0}，则满足不等式$\frac{m_\mathrm{dust}u_{x0}}{k\mu_l d_\mathrm{dust}}<h$的粉尘颗粒将被水帘捕获，进一步考虑实际工况中水帘厚度h具有时空非均匀性，假设其服从均值为$\bar{h}$的指数分布($\bar{h}$可通过流量与液膜覆盖面积计算获得)，其概率密度函数为$\mathrm{e}^{-h/\bar{h}}$，则粉尘被捕集概率可估算为

$$P\left[\frac{m_\mathrm{dust}u_{x0}}{k\mu_l d_\mathrm{dust}}<h\right]=\int_{\frac{m_\mathrm{dust}u_{x0}}{k\mu_l d_\mathrm{dust}}}^{+\infty}\mathrm{e}^{-\frac{s}{\bar{h}}}\mathrm{d}s=\bar{h}\exp\left(-\frac{m_\mathrm{dust}u_{x0}}{k\mu_l d_\mathrm{dust}\bar{h}}\right)。\tag{13}$$

动态捕集概率模型通过UDF写入ANSYS Fluent。颗粒每次穿越水帘时，程序读取其粒径、

法向速度、密度和等效液膜厚度，并按式(13)计算捕集概率。颗粒密度相同时，极限穿透距离随粒径平方和法向速度增大，因此惯性较大的颗粒具有较长的穿透距离。固定捕集效率模型采用同一概率处理所有颗粒，本文方法则随颗粒当时的运动状态更新计算值。

2　案例描述和仿真设置

2.1　模型构建和网格划分

本文研究对象为我国某煤矿掘进巷道，空气密度为 1.209 kg/m^3，巷道断面面积为 13.59 m^2。掘进作业采用 EBZ-160F 型悬臂式掘进机，截割头转速为 47.8 r/min，带式输送机运行速度为 1 m/s。通风系统采用压入式通风，配置Φ600 mm 风筒，实测入口风量为 339.7 m^3/min，风筒出口距迎头 5 m。第一道水帘布置在距迎头 30 m 处，用于拦截强产尘区下游尚未充分沉降的粉尘；第二道水帘布置在 50 m 处，用于捕集第一道水帘后继续向下游输运的残余粉尘。两处位置根据现场安装条件和无水帘工况下的粉尘分布确定，未开展全范围位置寻优。图 1 给出了距迎头 60 m 范围内的巷道尺寸。距迎头 20～60 m 段为缓坡，最大坡度为 12.7°。

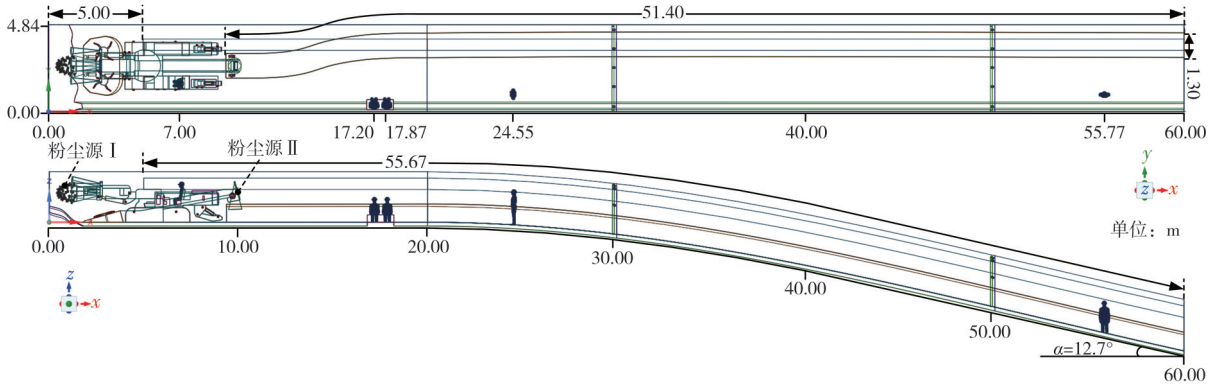


图 1　掘进巷道详细尺寸参数

Fig. 1　Detailed dimensional parameters of excavated tunnel

为获取DPM模型所需粉尘基础参数，采用常熟市顺欣仪器仪表有限公司生产的CCZG2型个体粉尘采样器现场采集悬浮粉尘样本。该采样器为矿用本质安全型防爆仪器，采样流量为 2 L/min，流量误差≤2.5%，时间误差≤0.1%。采样时长持续 6 h，总进气量 720 L，并通过称重法计算平均粉尘质量浓度。采用 Winner 2018 激光粒度分析仪测定粉尘粒径分布。分析表明粉尘粒径服从 Rosin-Rammler 分布，最小粒径 0.61 μm，中位粒径 52.60 μm，最大粒径 165.31 μm，分散系数 1.55。

掘进巷道计算域及主要边界条件如图 2 所示。供风管入口设置为速度入口，巷道末端设置为压力出口；截割头和带式输送机转载点分别设置为粉尘颗粒释放源，截割头采用旋转区域，带式输送机设置为移动壁面。两道水帘分别布置在距迎头 30 m 和 50 m 处，并在水帘前后及人员作业区域设置测尘点，用于分析粉尘沿程迁移及两道水帘的分级除尘效果。颗粒穿越水帘时，由 UDF 调用动态捕集概率模型判断颗粒被捕集或继续运动；巷道出口、地面和排水沟采用逃逸边界，其余固体壁面采用反射边界。

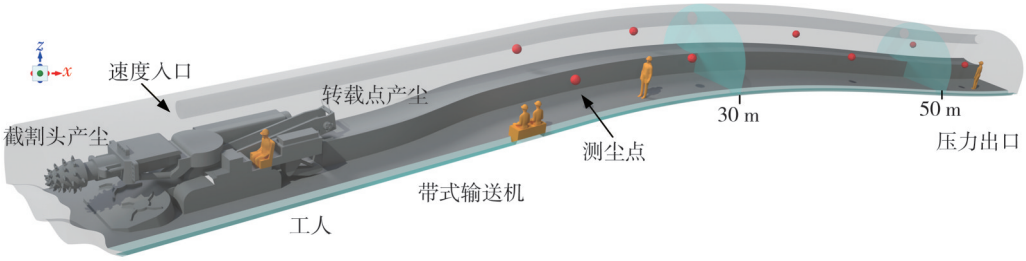


图 2　掘进巷道计算域、边界条件及水帘布置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the computational domain, boundary conditions and water curtain arrangement in the excavation roadway

本研究采用多面体-六面体混合网格，即边界区域采用多面体网格覆盖，流动核心区域填充六面体网格。部分边界区域网格如图 3 所示，通过局部网格加密实现计算精度与效率的优化平衡，最小正交质量 0.61，局部加密区域集中于截割头、矿工、掘进机本体及流场剧烈变化区域。

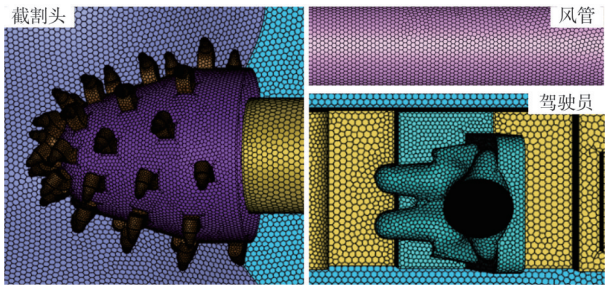


图3 部分区域网格细节展示

Fig. 3 Key area grid detail display

2.2 参数设置

几何尺寸、设备运行参数及通风参数主要依据现场调查和实测结果确定。巷道断面尺寸、风筒直径、风筒距迎头距离、截割头转速和带式输送机速度均按现场实际工况设置。风筒入口速度根据实测供风量339.7 m^3/min和风筒直径600 mm换算得到。粉尘粒径范围及Rosin-Rammler分布参数由现场采样和激光粒度测试获得，颗粒密度取1 400 kg/m^3，为煤尘数值模拟中的常用工程取值。两道水帘的位置结合现场安装条件和无水帘工况下的粉尘沿程分布确定，水帘等效液膜参数根据供水量和有效覆盖面积估算。具体计算参数见表1。

表1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter setting

一级项	二级项	参数设置	一级项	二级项	参数设置
计算参数	时间步长/s	0.001	粉尘参数	材料	煤
	最大迭代步数/时步	50		密度/(kg•m^{-3})	1 400
	收敛级别	10^{-4}		颗粒类型	惰性颗粒
湍流模型	SST k-ω	瞬态		产尘源	截齿|转载点
		双精度		质量流率/(mg•s^{-1})	5 128|1 642
		曲率修正		粒径分布	Rosin-Rammler
		角流修正		湍流扩散	随机游走模型
		Kato-Launder生产项修正		最小粒径/μm	0.61
		生产限制器(ON)		最大粒径/μm	165.31
滑移网格	近壁面处理	Tabulated		中位粒径/μm	52.60
	旋转区域	截割头		分散指数	1.55
	旋转速度/(r•min^{-1})	47.8		粒径数目	10
壁面运动	运动区域	皮带	求解方法	求解器	耦合式
	运动速度/(m•s^{-1})	1		时间	有界二阶隐式
离散项	交互	与连续项交互		梯度	单元最小二乘法
		每次流场迭代更新DPM源项(10)		压力	PRESTO!
	追踪选项	最大追踪次数(700)		动量	三阶MUSCL差分格式
		高精度追踪(ON)		湍动能	三阶MUSCL差分格式
	水帘过滤	UDFs		耗散率	三阶MUSCL差分格式

供风管入口设置为速度入口，巷道末端设置为压力出口，以反映现场压入式通风和回风条件。截割头和带式输送机分别按实际转速和运行速度设置为旋转区域和移动壁面。巷道出口、排水沟渠及地面设置为颗粒逃逸边界，表示颗粒离开计算域或沉降后不再参与悬浮运移；其余固体壁面采用反射边界，参考相关研究[23-26]，法向与切向恢复系数均取0.2。

连续相采用SST k-ω湍流模型，以兼顾近壁流动以及掘进机附近的旋转、分离和复杂剪切流动。针对多面体网格可能产生的非正交误差，采用扭曲面梯度修正方法；压力插值采用适用于旋转流场和复杂压力梯度的PRESTO!格式，动量及湍流方程采用三阶MUSCL格式。时间步长取0.001 s，综合考虑截割头旋转、颗粒轨迹追踪和计算稳定性确定。

仿真过程中首先开启供风筒，并设定时间步长Δt=0.001 s。计算至100 s后，巷道内气流速度趋于稳定；随后开启截割头旋转、湿式除尘风机及带式输送机，并持续计算至连续相达到稳定状态。在此稳态流场基础上注入粉尘颗粒，分别模拟水帘开启与关闭工况下掘进巷道内粉尘的运移及扩散过程。当风流场、颗粒场和浓度场均达到准稳定状态后终止计算，并将所得结果用于后续分析。

3 结果与讨论

3.1 水帘除尘作用下巷道粉尘的分布特征

本文提出的水帘除尘多相流数值模拟方法根据粉尘颗粒的粒径、瞬时法向速度和惯性参数动态计算捕集概率，并据此分析水帘作用下的粉尘质量浓度变化。为比较两道水帘的分阶段作用，提取第一、二道水帘前后位置的粉尘质量浓度分布云图，并统计粉尘质量浓度大于100 mg/m^3区域的面积变化。如图4所示，第一道水帘开启后，粉尘质量浓度大于100 mg/m^3的区域面积由6.16 m^2减小至3.57 m^2，

降幅为42.0%。水帘后方仍存在残余高浓度区。随着粉尘向巷道出口方向扩散与沉降，在第二道水帘前，粉尘质量浓度大于100 mg/m³的区域面积进一步减小至0.86 m²。第二道水帘开启后，该区域面积降低至0.16 m²，主要分布于带式输送机上方。结果显示，两道水帘开启后，高浓度粉尘区域依次缩小，反映出分阶段的累积降尘作用。

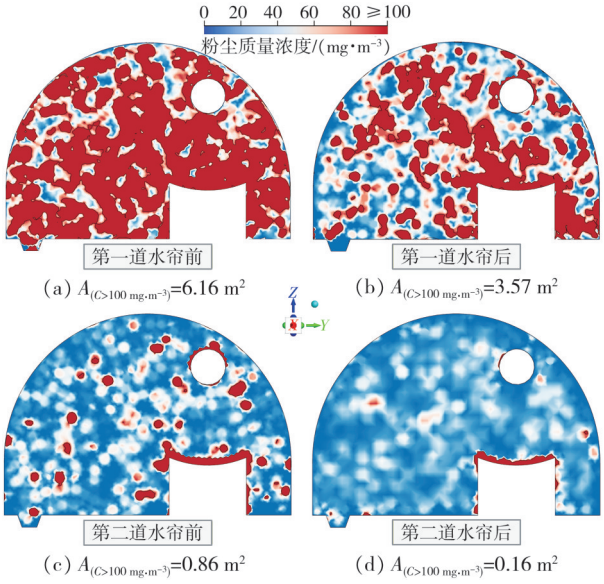


图 4　第一/二道水帘前后的粉尘质量浓度云图分布

Fig. 4　Cloud diagram distribution of dust mass concentration before and after the first/second water curtain

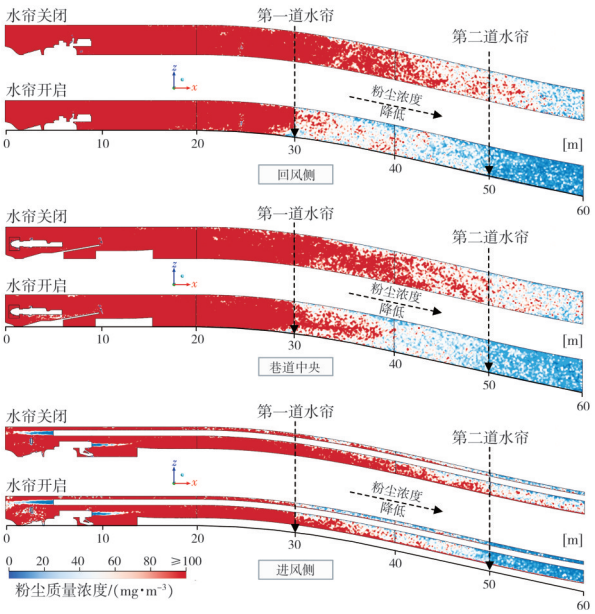


图 5　水帘开启和关闭状态下巷道粉尘质量浓度分布（Y为1.3，2.3，3.3 m）

Fig. 5　Distribution of dust mass concentration in tunnels with water curtains open and closed（Y=1.3，2.3，3.3 m）

图 5 给出了回风侧、巷道中部和进风侧的粉尘质量浓度分布。在X<30 m范围内，两种工况均存在高浓度区。送风管出口和掘进机出风口附近的高速气流改变了局部粉尘分布，但影响范围限于出口周围。第一道水帘开启后，回风侧粉尘质量浓度高于100 mg/m³的区域减少。第二道水帘开启后，巷道出口附近的粉尘质量浓度继续下降。水帘关闭时，X=50～60 m范围内仍有部分区域的粉尘质量浓度高于100 mg/m³；两道水帘开启后，除带式输送机附近外，该范围内的粉尘质量浓度多低于40 mg/m³。

为进一步分析巷道粉尘质量浓度的空间分布特征，选取巷道横坐标X=35 m和X=55 m两处横截面的粉尘质量浓度云图进行对比，如图 6 所示。在X=35 m横截面，水帘关闭时存在大面积粉尘质量浓度高于100 mg/m³的区域，高浓度粉尘几乎覆盖整个断面。水帘开启后，粉尘质量浓度显著降低，其中回风侧降尘效果较进风侧更为明显。回风侧三个测点的粉尘质量浓度分别由124.7，140.0和172.8 mg/m³降低至43.9，51.6和65.0 mg/m³，对应的除尘效率分别为64.8%、63.1%和62.4%。该结果与文献[20]中水帘除尘技术约64%全尘除尘效率的现场实测结果基本一致，表明本文二次开发模型具有较好的计算可靠性。进风侧受带式输送机上方粉尘团影响，局部粉尘质量浓度仍高于130 mg/m³，因此水帘开启后该区域浓度仍相对较高。在X=55 m横截面，由于距工作面较远，大部分粉尘已发生沉降，但局部区域仍存在较高浓度，回风侧测点的粉尘质量浓度达到121.0 mg/m³。第二道水帘开启后，除带式输送机附近外，巷道内粉尘质量浓度基本维持在40 mg/m³以下，除尘效果显著。

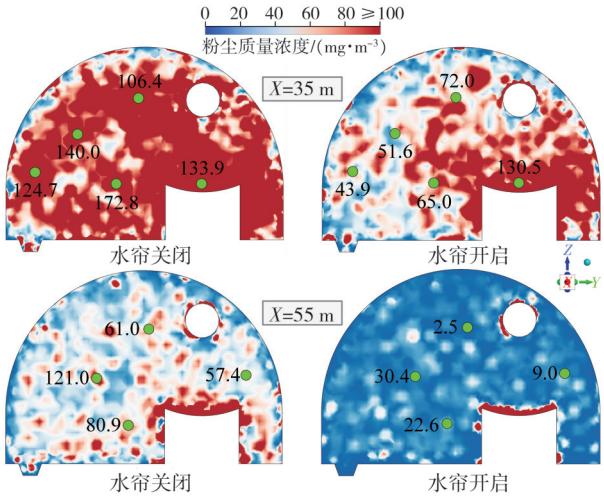


图 6　巷道横截面粉尘质量浓度分布云图（X为35，55 m）

Fig. 6　Cloud diagram of dust mass concentration distribution in the cross-section of the roadway（X=35，55 m）

图 7 展示了水帘开启和关闭工况下不同粒径粉尘颗粒的分布。两道水帘分别布置在X=30 m和X=

50 m处。为对比水帘作用前后的颗粒分布，选取X=30～31 m和X=50～51 m两个区间，比较粉尘颗粒粒径和数量的变化。色带颜色由浅灰至深黑，对应颗粒粒径由0.61 μm增大至165.31 μm。动态捕集概率模型根据颗粒粒径、瞬时法向速度和惯性参数，计算粉尘颗粒穿过水帘时被液膜捕集的概率。在X=30～31 m范围内，水帘关闭工况下粉尘颗粒分布较为密集。水帘开启后，粉尘颗粒数量减少，回风侧的变化较为明显，但进风侧和送风管附近仍存在粉尘聚集。沿巷道出口方向，大粒径颗粒受重力作用沉降较快，小粒径颗粒的悬浮距离相对较长[4]。

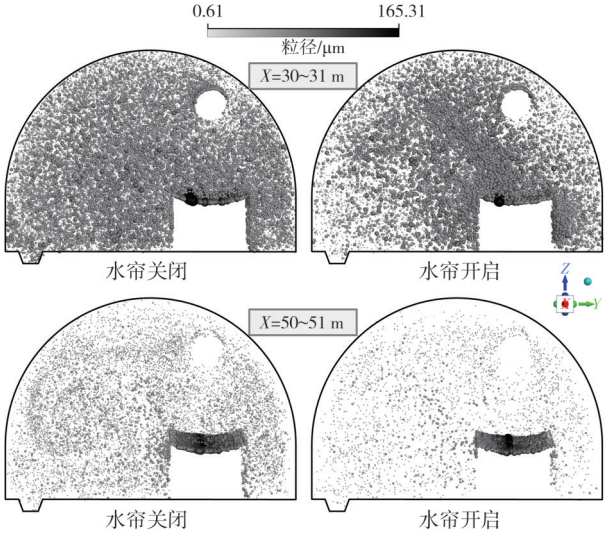


图7 水帘开启和关闭状态下的巷道粉尘颗粒分布

Fig. 7 Distribution of dust particles in the roadway with water curtain open and closed

X=50～51 m范围内的颗粒数量少于X=30～31 m范围内的颗粒数量，悬浮颗粒以小粒径颗粒为主。带式输送机附近仍有少量较大粒径颗粒。结合产尘源设置，这部分颗粒可能来自煤料运输过程中的输送带振动、撒落或转载，而非全部由掘进迎头迁移至此。此类颗粒离开输送带后受重力作用沉降，主要分布在输送机周围和巷道下部；小粒径颗粒的沿程迁移距离相对较长。第二道水帘开启后，该范围内的悬浮颗粒数量减少。

无论水帘是否开启，巷道横截面平均粉尘质量浓度均随距工作面距离的增加而降低。如图8所示，两道水帘开启后，平均粉尘质量浓度降幅增大。当X<30 m时，水帘开启与关闭工况下的平均粉尘质量浓度无明显差异。在X=30 m处，第一道水帘开启后，平均粉尘质量浓度由189.6 mg/m^{3}降至99.7 mg/m^3。在X=50 m处，第二道水帘开启后，平均粉尘质量浓度由38.4 mg/m^{3}降至18.6 mg/m^3。水帘关闭工况下该截面的平均粉尘质量浓度为86.3 mg/m^3，由此计算得到双水帘累积除尘效率为78.4%。至巷道出口处，截面平均粉尘质量浓度低于10 mg/m^3。在第二道水帘后作业人员呼吸高度处选取1个局部监测点，水帘关闭和开启时的粉尘质量浓度分别为13.97 mg/m^{3}和0.13 mg/m^3。开启工况下的监测值低于《煤矿安全规程》规定的总尘质量浓度限值4 mg/m^3[27]。

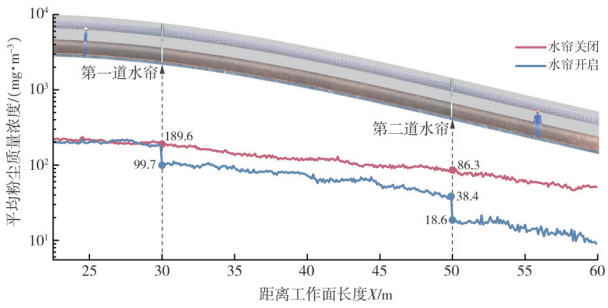


图8 水帘开启和关闭状态下平均粉尘质量浓度沿巷道横向的变化

Fig. 8 The change of average dust mass concentration laterally along the transverse direction of roadway with water curtain open and closed

3.2 水帘系统现场验证及应用

图9展示了现场水帘安装和监测点布局，两套水帘分别安装在距迎头30 m和50 m处，粉尘质量浓度监测点沿进风侧与回风侧分别布置在第一道水帘前、两道水帘之间、第二道水帘后共8个测点。现场实测数据在水帘开启状态下进行测量。

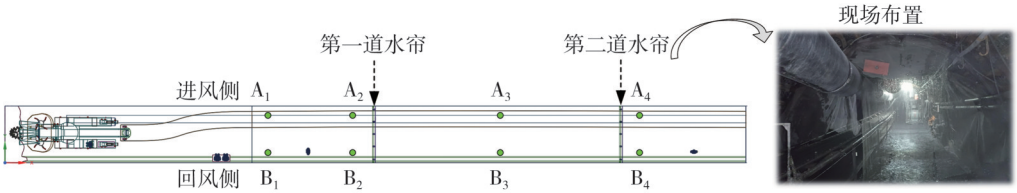


图9 粉尘质量浓度测点布置

Fig. 9 Measurement points layout of dust mass concentration

表2中，水帘开启工况下各测点模拟值与实测值的相对误差为7.10%～36.42%。A_3、A_4、B_3和B_4位于水帘后方，其相对误差为7.10%～12.45%；水帘前方测点的误差较大。水帘前方靠近掘进和转载

区域，粉尘质量浓度及风速随作业过程波动，单次测量值与数值计算的时间平均结果可能存在差异。水帘后方流场和质量浓度波动相对较小，对应测点的模拟值与实测值更为接近。

表 2　粉尘质量浓度模拟值误差分析

Tab. 2　Error analysis of simulated dust mass concentration values

对比项	测点							
	A_1	A_2	A_3	A_4	B_1	B_2	B_3	B_4
实测质量浓度/(mg•m^{-3})	289.47	275.84	66.49	18.57	272.20	205.36	50.96	18.24
模拟质量浓度/(mg•m^{-3})	228.67	175.38	59.21	16.89	185.61	165.79	47.34	20.51
误差/%	21.00	36.42	10.95	9.05	31.81	19.27	7.10	12.45

现场 8 个测点的相对误差为 7.10%～36.42%，其中水帘后方测点的误差不超过 12.45%。在本研究巷道和参数设置下，模拟结果与实测结果的质量浓度变化趋势一致。该模型可用于比较本研究所设水帘位置、数量和颗粒参数组合的计算结果，其适用范围仍需通过其他巷道工况验证。

4　结　论

本文在 Fluent 的 CFD-DPM 框架中加入动态捕集概率模型，计算了某掘进巷道两道水帘开启前后的粉尘分布，并将计算值与实测值进行比较。所得结论如下：

1）开发了基于动态捕集概率的水帘除尘数值模拟方法。通过 UDF 将水帘捕集过程嵌入颗粒追踪计算，根据粉尘颗粒的粒径、瞬时法向速度和惯性参数动态更新其捕集概率，实现粉尘运移过程与水帘作用过程的动态耦合。

2）两道水帘能够分阶段降低巷道内粉尘质量浓度。第一道水帘开启后，X=30 m 处截面平均粉尘质量浓度由 189.6 mg/m^{3}降至 99.7 mg/m^3；第二道水帘开启后，X=50 m 处截面的平均粉尘质量浓度由 38.4 mg/m^{3}降至 18.6 mg/m^3，两道水帘的累积除尘效率达到 78.4%。大粒径颗粒沿程沉降较快，向巷道后部运移的粉尘以小粒径颗粒为主。

3）现场 8 个测点的模拟值与实测值相对误差为 7.10%～36.42%，其中水帘后方测点的最大相对误差为 12.45%。在本研究工况及参数范围内，模拟结果与实测结果的变化趋势总体一致，可为掘进巷道水帘布置和运行参数的对比分析提供参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Cao Y, Xiao Y, Wang Z P, et al. Recent progress and perspectives on coal dust sources, transport, hazards, and controls in underground mines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187: 159-194.

[2] 王南，张科峰. 负压通风条件采煤机附近高度及风速对粉尘浓度影响研究[J]. 中国矿业，2024，33(5)：196-204.
Wang Nan, Zhang Kefeng. Study on the influence of height and wind speed near shearer on dust concentration under negative pressure ventilation[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 196-204. (in Chinese)

[3] Hang W L, Bu C L, Cui Y M, et al. Research progress on the pathogenesis and prediction of pneumoconiosis among coal miners[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2024, 46(9): 319.

[4] 王俊虎. 大尺度煤体原位脉动注水润湿降尘特性研究[J]. 中国矿业，2025，34(3)：284-295.
Wang Junhu. Study on wetting and dust reduction characteristics of *in-situ* pulsating water injection of large-scale coal[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(3): 284-295. (in Chinese)

[5] 任林海，常艳珍，谭晓乐，等. 碎磨智能控制系统开发与应用[J]. 中国矿业，2024，33(S2)：230-234.
Ren Linhai, Chang Yanzhen, Tan Xiaole, et al. Development and application of intelligent crushing-grinding control system[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 230-234. (in Chinese)

[6] Jing D J, Li Z, Ge S C, et al. Research on the mechanism of multilayer spiral fog screen dust removal at the comprehensive excavation face[J]. PLoS One, 2022, 17(4): e0266671.

[7] Li G, Hu J H, Hao X L, et al. Application and research of swirling curtain dust collection technology in mines[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 2005.

[8] Qiao M, Roberts J, Ren T, et al. Dispersion and migration characteristics of multisource respirable dust in development panels during tunnelling processes[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 148: 105778.

[9] Torno S, Toraño J, Álvarez-Fernández I. Simultaneous

evaluation of wind flow and dust emissions from conveyor belts using computational fluid dynamics (CFD) modelling and experimental measurements [J]. Powder Technology, 2020, 373: 310-322.

[10] Parra M T, Villafruela J M, Castro F, et al. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines[J]. Building and Environment, 2006, 41(2): 87-93.

[11] Diego I, Torno S, Toraño J, et al. A practical use of CFD for ventilation of underground works[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 189-200.

[12] 赵敏, 张峰华, 罗兵, 等. 基于CFD-DPM方法的综掘工作面粉尘时空演化规律研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(12): 107-112.
Zhao Min, Zhang Fenghua, Luo Bing, et al. Study on temporal and spatial evolution law of dust in fully-mechanized driving face based on CFD-DPM method[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(12): 107-112. (in Chinese)

[13] 李军胜, 李书博, 王飞, 等. 综掘工作面压入式风筒位置对粉尘浓度分布的影响[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(5): 61-62.

[14] 张廷寿. 煤矿综掘巷道负压除尘性能研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 241-250.
Zhang Tingshou. Research on negative-pressure dust removal performance in full mechanized coal mining tunnel [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 241-250. (in Chinese)

[15] 张金, 王明, 李红波, 等. 矿井水幕帘降尘参数的实验研究与应用[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2): 363-368.
Zhang Jin, Wang Ming, Li Hongbo, et al. Experimental study and application of dust reduction parameters for mine water curtain[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 363-368. (in Chinese)

[16] 郭栋. 回风巷水幕除尘装置设计与应用分析[J]. 机械管理开发, 2023, 38(4): 94-95.
Guo Dong. Design and application of water curtain dust removal device in return air tunnel [J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(4): 94-95. (in Chinese)

[17] Seaman C E, Shahan M R, Beck T W, et al. Design of a water curtain to reduce accumulations of float coal dust in longwall returns[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(4): 443-447.

[18] Chen D W, Nie W, Cai P, et al. The diffusion of dust in a fully-mechanized mining face with a mining height of 7 m and the application of wet dust-collecting nets[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 463-476.

[19] Nie W, Yang B, Du T, et al. Dynamic dispersion and high-rise release of coal dust in the working surface of a large-scale mine and application of a new wet dust reduction technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 351: 131356.

[20] 黄强. 水幕降尘技术在金属矿井作业中的应用与改进[J]. 山西冶金, 2023, 46(11): 204-206.
Huang Qiang. Application and improvement of water curtain dust reduction technology in metal mines mining [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(11): 204-206. (in Chinese)

[21] 宋胜伟, 王子琦, 李士魁, 等. 综采工作面降尘模拟及试验研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(5): 221-228.
Song Shengwei, Wang Ziqi, Li Shikui, et al. Simulation and experimental study on dust reduction in fully mechanized mining face[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(5): 221-228. (in Chinese)

[22] Peng H T, Nie W, Zhang S B, et al. Research on negative pressure jet dust-removal water curtain technology for coal mine cleaner production[J]. Fuel, 2022, 310: 122378.

[23] Jing D J, Liu H W, Zhang T, et al. Study on dust control technology of mobile spray combined with full-section fog curtain in return airway of header working face[J]. PLoS One, 2022, 17(11): e0277710.

[24] 于海里, 侯庆亮, 李敬国, 等. 风流扰动下煤炭装载冲击粉尘运移规律与抑尘技术研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 208-216.
Yu Haili, Hou Qingliang, Li Jingguo, et al. Study on the transport law of coal loading impact dust and dust suppression technology under airflow disturbance[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 208-216. (in Chinese)

[25] Wang C Y, Zhang H, Xue T, et al. A multi-factor CFD simulation to dust suppression in dynamic tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 159: 106458.

[26] Wang C Y, Fang L. An analytical scaling law model framework for short-time dust emission from belt conveyor [J]. Advanced Powder Technology, 2024, 35(10): 104613.

[27] 中华人民共和国应急管理部. 煤矿安全规程[EB/OL]. (2022-01-06)[2026-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/15/content_5712798.htm.