

中文引用格式:陈景序,赵嘉诚,曹成福,等.电铲外高压风幕闭环射流除尘装置数值模拟及试验研究[J].中国安全科学学报,2026,36(1):104-111.

英文引用格式:CHEN Jingxu, ZHAO Jiacheng, CAO Chengfu, et al. Numerical simulation and experimental study on closed-loop jet dust removal device of high pressure air curtain outside electric shovel[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 104-111.

# 电铲外高压风幕闭环射流除尘装置数值模拟 及试验研究\*

陈景序<sup>1,2,3</sup>副教授,赵嘉诚<sup>1</sup>,曹成福<sup>1</sup>,刘业娇<sup>1,2,3</sup>副教授,  
荆德吉<sup>4</sup>教授,智咏凯<sup>1</sup>

(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)

中图分类号:X964

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0868

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(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)(2025YFSH0073);自治区直属高校基本科研业务费项目(2024QNJS101,2025QNJS007)。

**【摘要】**为降低电铲采装作业过程中的粉尘扩散,设计一种安装于电铲车身外的高压风幕闭环射流除尘装置,将电铲倾倒车前方产生的粉尘团与周围环境分隔开,形成一个小型非扰动区,只开启风流装置时,通过射流风口与负压集尘口共同作用将粉尘通过指定闭环路径吸入负压集尘口;开启喷雾装置后,液滴粒子在高速射流冲击下加剧破碎,水雾粒子与含尘气流充分混合后沉降;通过数值模拟方法分析开启该装置时电铲车身外流场特性及液滴粒子分布特征,并设置4个不同的偏转角度探究最佳流场分布。模拟结果表明:射流风速30 m/s,偏转角30°的情况下闭环卷吸效果最佳;开启喷雾装置后,液滴粒子在受到高速风流冲击下加剧液滴破碎,增大了车身前方粉尘润湿覆盖面积;烟流观测试验与风流场模拟保持高度相似,验证了开启装置外流场模拟结果的准确性;雾化降尘试验表明开启雾化装置后射流偏转角30°时电铲周围粉尘治理效果最佳。

**【关键词】**电铲; 高压风幕墙; 闭环射流; 除尘装置; 数值模拟

## Numerical simulation and experimental study on closed-loop jet dust removal device of high pressure air curtain outside electric shovel

CHEN Jingxu<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Jiacheng<sup>1</sup>, CAO Chengfu<sup>1</sup>, LIU Yejiao<sup>1,2,3</sup>, JING Deji<sup>4</sup>, ZHI Yongkai<sup>1</sup>

(1 School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 2 Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 3 Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 4 College of Safety Science and Technology, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

**Abstract:** To mitigate dust dispersion during electric shovel excavation and loading operations, an externally mounted high-pressure air curtain closed-loop jet dust removal system was designed. This system

isolated dust generated during dumping operations at the shovel front from the surrounding environment, creating a low-disturbance zone. When only the airflow system was activated, dust was drawn into the negative-pressure dust collection port through a predetermined closed-loop path via the combined action of jet outlets and the collection port. Subsequent activation of the spray system intensified droplet fragmentation under high-velocity jet impact, enabling thorough mixing of mist particles with dust-laden airflow before settlement. Numerical simulations were conducted to analyze the shovel's external flow field characteristics and droplet distribution during system operation. Four jet deflection angles were evaluated to determine optimal flow field distribution. Simulation results show that the optimal closed-loop entrainment is achieved when the jet velocity is 30 m/s and the deflection angle is 30°. Spray activation enhances droplet fragmentation through high-speed airflow impact, significantly improving dust wetting coverage in front of the shovel body. Airflow field simulations were confirmed through smoke visualization tests showing high similarity to observed flow patterns. Dust concentration measurements after spray activation demonstrated the best dust control effect around the shovel when the jet deflection is 30°, verifying the simulation accuracy of the external flow field and establishing optimal operational parameters.

**Keywords:** electric shovel; high-pressure wind curtain; closed-loop jet; dust collect unit; numerical simulation

## 0 引 言

中国作为全球最大的煤炭生产国和消费国,煤炭工业的健康发展对国家能源安全和经济稳定至关重要<sup>[1-2]</sup>。露天矿作业因开采规模大、作业环境开放,粉尘扩散范围广且受气象条件影响显著,治理难度更高。逸散的粉尘直接影响采场作业人员职业健康、污染周围环境以及加速设备磨损<sup>[3]</sup>。因此,露天矿粉尘防治形势严峻,已成为亟需解决的问题<sup>[4-5]</sup>。

我国露天矿主要分布在新疆、内蒙古、山西等地区,这些地区海拔相对较高,春季风速较大,平均风速为 6~8 m/s。电铲作为露天矿的核心采装设备,其作业过程中因物料破碎、装卸及机械振动产生的粉尘瞬时质量浓度可达每立方米数百毫克,成为露天矿粉尘污染的主要源头之一<sup>[6]</sup>。而传统降尘方式主要是通过从外部喷雾达到降尘目的<sup>[7]</sup>,在采装作业环境风速较小时能起到一定降尘作用,其效率受限于粉尘表面疏水性及液滴粒径匹配性。研究表明:传统喷雾对 PM<sub>2.5</sub> 的捕获效率不足 40%<sup>[8]</sup>,而雾滴粒径的二次破碎虽可提升微细颗粒捕集能力,却易受露天环境风流干扰导致雾场失稳。因此,通过研究倾倒起尘特性及粉尘扩散特性实现对采装作业精准降尘,成为国内外学者的研究重点。张建华等<sup>[9]</sup>采用离散型模型模拟了受料斗内外区域粉尘的扩散特征,发现 10~100 μm 的颗粒物主要集中在受料斗上缘 11 m 以上区域。宋子玲等<sup>[10]</sup>利用

Fluent 软件分析露天矿卡车装车部位外流域风速及 PM<sub>10</sub> 颗粒物在采装过程中的迁移变化的影响,发现采装车厢内部与下风侧附近形成低速旋涡,此范围粉尘质量浓度较高。BUSAYA<sup>[11]</sup>基于 Gambit 软件设计了北衙露天金矿的 3D 模型,运用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件模拟了气流模式,通过在露天矿区中下部输入一个进气隧道,研究机械通风下矿坑流场特性。马明星等<sup>[12]</sup>采用风洞试验方法搭建起尘试验装置,研究了露天煤场不同粒径起尘现象及扩散特征,阐明了沉积煤尘的起尘量随粒径的增大呈现起尘量先增大后减小的特点。通过 CFD 数值模拟分析复杂流场起尘特性已成为主流研究方式,但涉及驱动风流闭环及液滴动态润凝仍有待探究<sup>[13]</sup>。

为此,在研究露天矿各个生产环节产生机制及降尘方式<sup>[14-15]</sup>基础上,笔者拟围绕露天矿电铲采装,结合生产实际需求,研发一种安装在电铲车身外侧的高压风幕闭环射流除尘系统;通过动态调节射流方向,风-雾协同控尘系统结合风幕定向导流与雾滴吸附,抑制粉尘扩散并增强沉降效果,以期风幕控尘及雾化降尘提供参考,为解决电铲作业粉尘治理难题提供新思路。

## 1 除尘装置介绍及闭环射流形成机制分析

### 1.1 除尘装置介绍

该装置(图 1)安装在以某型号电铲为原型的车

身上,运用三维绘图软件 SolidWorks 建立等比例高压风幕闭环射流除尘系统的物理模型,该装置包含吸尘系统和射流雾化系统。其中,吸尘系统主要由前、侧方吸尘口和风管组成,射流雾化系统主要由射流风口、雾化喷嘴和轴流高压风机组成。

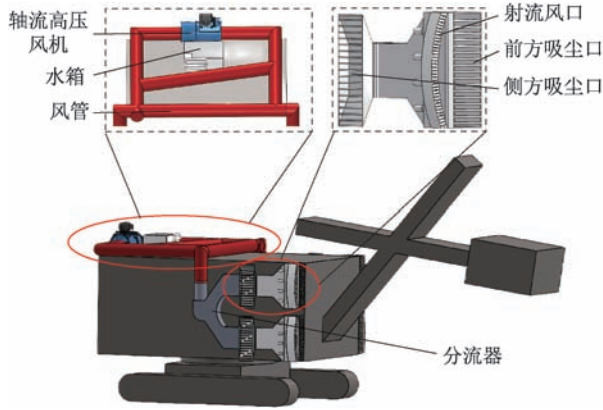


图1 闭环射流装置

Fig.1 Closed-loop jet device

## 1.2 闭环射流形成机制分析

闭环射流是通过调节特定的吹吸比及射流偏转角,实现流体在封闭路径内的循环运动。该技术在除尘领域具有重要应用价值,特别是控制开放环境下的悬浮颗粒物。

射流雾化系统工作时,车身两侧喷出2道高压风幕墙,将前方粉尘团与周围隔离,形成不受侧风干扰的非扰动区。风幕外侧的空气被吸尘系统背向开口吸入过滤;风幕内侧的气流则在负压作用下形成闭环,被前方集尘口吸入。开启雾化后,高速风流使液滴破碎并吸附粉尘沉降。该系统能够有效隔绝外部风流影响,并在隔离区内实现风流闭环。

## 2 除尘装置数值模拟研究

采用数值模拟软件 COMSOL 数值模拟高压风幕闭环射流除尘装置,结合湍流模型(描述射流特性)及液滴破碎模型(表征喷雾工况下的液滴破碎),揭示风流场运动规律与雾化场闭环液滴破碎机制。

### 2.1 数学模型

#### 2.1.1 湍流模型

空气相符合湍流特征,考虑到露天流体流动及相关计算方面的要求,采用  $k-\varepsilon$  标准模型求解,标准  $k-\varepsilon$  双方程假设流体流动为完全湍流且忽略分子黏性影响,需要求解湍流动能及其耗散率方程<sup>[16]</sup>,湍流动能运输方程和耗散率方程表达式如下:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_h} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_a + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_a + C_{3\varepsilon} G_b) \quad (2)$$

式中: $k$ 为湍动能, $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $\mu$ 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_t$ 为湍流黏性系数  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\sigma_h$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 为软件默认值常数, $\sigma_h = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ;  $G_a$ 为平均速度梯度引起的湍动能产生项;  $G_b$ 为浮力导致的湍动能产生项;  $\rho$ 为流体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\varepsilon$ 为耗散率, $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散能的影响;  $C_{1\varepsilon}$ 和  $C_{2\varepsilon}$ 为 COMSOL 软件默认值常数,分别为 1.44、1.92。  $C_{3\varepsilon}$ 对于流动方向与重力方向相同时取 1,对于流动方向与重力方向垂直时取 0。

#### 2.1.2 液滴破碎模型

开尔文-亥姆霍兹 (Kelvin-Helmholtz, K-H) 模型广泛应用于 2 种不同速度的流体界面(如高速气流与低速液滴表面),在剪切速度差驱动作用下液滴被剥离成更细碎的液滴,液滴破碎时粒径变化率为:

$$\frac{\partial r_k}{\partial t} = \frac{r_c - r_k}{\tau_k} \quad (3)$$

式中: $r_c$ 为液滴破碎后的半径, $\mu\text{m}$ ;  $r_k$ 为液滴破碎前的半径, $\mu\text{m}$ ;  $\tau_k$ 为液滴破碎时间, $\text{s}$ 。

$$\tau_k = \frac{3.788 B_k r_p}{\Omega_k \Lambda_k} \quad (4)$$

式中: $B_k$ 为模型经验参数,通常取 10;  $r_p$ 为初始液滴半径, $\mu\text{m}$ ;  $\Omega_k$ 为最大频率,  $\text{Hz}$ ;  $\Lambda_k$ 为增长波长, $\text{m}$ 。

$$\Lambda_k = \frac{9.02 r_p (1 + 0.45 \sqrt{Z}) (1 + 0.4 T^{0.7})}{(1 + 0.865 We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (5)$$

$$\Omega_k = \frac{0.34 + 0.385 We_g^{1.5}}{(1 + Z)(1 + 1.4 T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma_p}{\lambda_p r_p^3}} \quad (6)$$

式中: $Z$ 为昂赛格数;  $T$ 为泰勒数;  $We_g$ 为液体韦伯数;  $\lambda_p$ 为液体表面张力  $\text{N}/\text{m}$ 。

破碎后的液滴半径为:

$$r_c = \begin{cases} B_0 \Lambda_k & B_0 \Lambda_k \leq r_p \\ \min \left( \left( \frac{3 \pi r_p^2 U_r}{2 \Omega_k} \right)^{1/3}, \left( \frac{3 r_p^2 \Lambda_k}{4} \right)^{1/3} \right) & B_0 \Lambda_k > r_p \end{cases} \quad (7)$$

式中: $B_0$ 为经验参数;  $U_r$ 为气液速度差, $\text{m}/\text{s}$ 。

2.2 网格划分及边界条件设置

2.2.1 网格划分

以某型号电铲为原型采用 COMSOL 软件按 1 : 1 建立电铲模拟模型。电铲机身简化为长×宽×高=8.7 m×6.1 m×3.9 m 的长方体,机身两侧共 4 个装置形成一个系统,每个装置上有 7 个 0.15 m×0.05 m 的方形射流风口和 8 个直径为 0.04 m 的圆形雾化喷嘴,位于前方,同时,装置前方还有 7 个 0.42 m×0.15 m 的方形集尘口,侧方有 6 个 0.51 m×0.18 m 的方形射流风口,运用 COMSOL 软件建立模型并划分网格,外部采用自由四边形网格,内部采用自由四面体网格,并细化了除尘装置部分(图 2)。图 2 中  $x$  轴为电铲纵向(即前后方向), $y$  轴为电铲横向(即左右方向), $z$  轴为电铲垂向(即高度方向)。

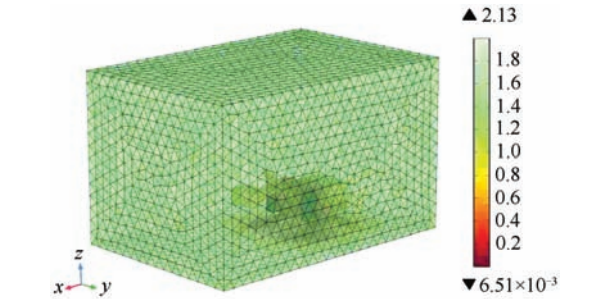


图 2 几何模型网格划分  
Fig. 2 Geometric model meshing

为验证模拟结果准确性,采用常规(83.7 万单元,最小质量 0.002)、细化(186.3 万,0.021)和较细化网格(302.1 万,0.040)这 3 种网格规格。以闭环射流关键区域(电铲前方)风速为验证标准,在落料高度 3 m 处设置 25 个测点(图 3)。网格独立性验证结果表明:网格细化后风速分布趋于稳定,满足独立性要求。

从图 3 可以看出,3 种不同规格的网格在电铲车身前方风速分布趋势大致相同,但在某些位置处常规网格与较细化网格存在较大误差,在距离闭环射流装置 2.1、24.5 m 处的风速值,常规网格与较细化网格相比,误差分别达到 31.9%、34.9%,均超过 30%,易造成后续模拟结果的不够准确。而细化网格与较细化网格的风速曲线几乎趋于一致,最高误差为 16.2%,模拟精度符合模拟要求。考虑到网格数量的增加会使后续计算量大幅增加,从而导致模拟时间、成本的增加,故选用细化网格进行数值模拟。

2.2.2 边界条件设置

露天矿为开放采场空间,根据其特点设置模型

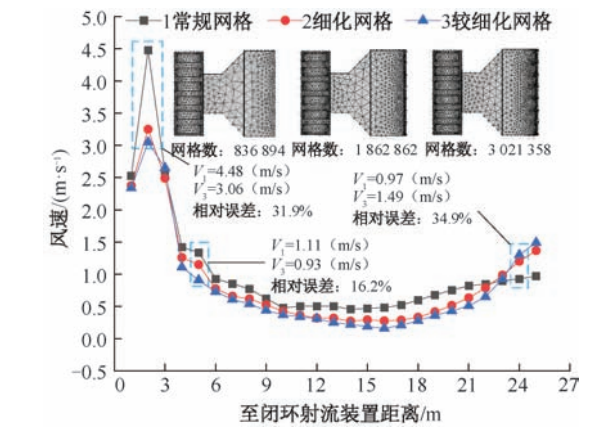


图 3 网格独立性验证结果  
Fig. 3 Grid independence verification results

具体边界条件参数,见表 1。

表 1 边界条件

| Table 1 Boundary condition |                                           |                       |
|----------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| 名称                         | 类型                                        | 属性值                   |
| 湍流模型                       | $k-\varepsilon$                           | 标准                    |
| 空气                         | 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )    | 1.225                 |
|                            | 黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )         | $1.79 \times 10^{-5}$ |
| 风流                         | 射流风口/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )   | 30                    |
|                            | 前方吸尘口/Pa                                  | -245                  |
|                            | 侧方吸尘口/Pa                                  | -245                  |
| 雾滴                         | 粒子密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )  | 1 000                 |
|                            | 粒子表面张力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | $7.28 \times 10^{-2}$ |

3 除尘装置数值模拟结果分析

3.1 闭环射流系统风流场特性

露天作业环境下,粉尘与液滴粒径小,其分布受装置风流和外部风流共同影响。高压风幕可隔绝外部风流干扰,故风流场分析聚焦装置吹吸射流的偏转角。鉴于装车落料时粉尘主要扩散于铲斗与车厢之间,选取铲斗下方 1.5 m 截面,设置射流风口风速为 30 m/s 下对比分析 20、25、30、35°等 4 种射流偏转角的风流运移特征(图 4)。

在落料中心 2 m 处,仅 20°射流偏转角风速显著增加由 0.75 m/s 增大到 1.83 m/s,其余角度变化平缓。风幕墙位置随偏转角增大外移:20(3 m)、25(4.5 m)、30(5.5 m)、35°(7 m)。4 组最大风速均稳定在 2.4 m/s 左右(2.36~2.43 m/s),表明角度变化仅影响风幕位置,对最大风速无显著改变。

横断面射流喷嘴流场分布( $x-y$  截面)如图 5 所示,上半部分虚线框为风幕墙作用区域,下部分为闭环特征区域。随着射流偏转角的增大,高压风幕墙

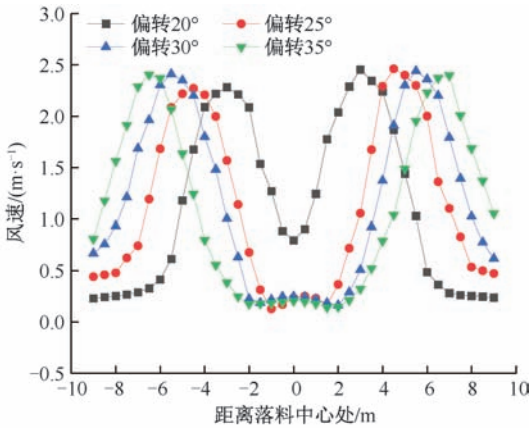


图4 不同射流偏转角度在铲斗落料高度处y轴风速分布  
Fig.4 Y-axis wind speed distribution of different jet deflection angles at bucket blanking height

以及闭环特征也随之改变,当偏转角度为 20°时,由于受到集尘风口负压影响,2 股风流先是向电铲车身外侧偏转,很快便转为向内部合拢最终在铲斗处

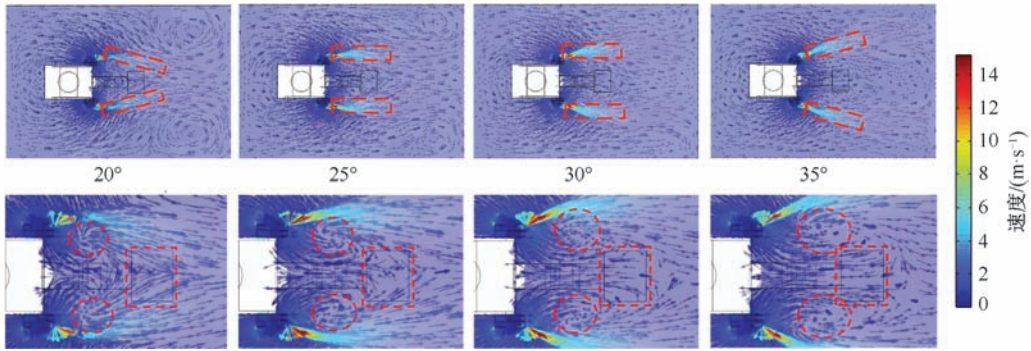


图5 横断面射流喷嘴流场分布(x-y 截面)  
Fig.5 Cross-section jet nozzle airflow distribution (x-y section)

选取 30° 偏转角时距离射流风口 1、3、5、7 m, 4 个切面风速分布如图 6 所示。可以明显看出,风流方向由条状风口中心向四周扩散,形成厚度逐渐增加的风幕墙,出风口射出的高速气流卷吸周边空气进入流场中,共同向前运动,在行进过程中受到集尘口负压、沿程阻力及空气自身粘滞性影响,高速气流动量快速削减,速度不断降低,风速由  $x=1\text{ m}$  处的  $6.9\text{ m/s}$  到落料处  $x=7\text{ m}$  的  $2.4\text{ m/s}$ ,形成的高压风幕墙中心风速递减、厚度递增。

3.2 雾滴分布特征分析

液滴分布如图 7 所示,由图 7 可知:液滴由喷嘴喷出后,一部分被高压风幕墙冲击破碎,形成高压雾幕墙,另一部分在内部闭环流场作用下在从喷出 3 s 后包围电铲倾倒口,大粒径液滴与含尘气流充分混合并在重力作用下沉降,较小粒径液滴受到集尘口

汇集并吹向铲斗正前方,同时,在电铲车身前侧形成 2 个较小型圆形涡流,此时形成的风幕墙并不明显;随着偏转角增加到 25°射出的 2 股风流,每股风流中背离铲斗一侧形成 2 道高压风幕墙,而靠近铲斗一侧在铲斗处碰撞,碰撞后的风流一部分向铲斗正前方逸散,一部分被集尘风口吸入后净化,并在电铲车身前侧形成一个小型椭圆形涡流;30°偏转角时,同样背离铲斗一侧的风流形成 2 道高压风幕墙,靠近铲斗一侧的风流在射流风口与负压集尘口吹吸共同影响下在铲斗处汇集,汇集后的风流被负压集尘口吸入并在车身前侧形成一个较大的椭圆形涡流,能够将落料过程中逸散到车身前方的粉尘循环吸入集尘口;而 35°偏转角时形成的高压风幕墙距离落料口较远无法有效起到隔绝外部风流影响,且在电铲车身前侧风流紊乱,未能有效形成闭环涡流特征,因此,在偏转角度为 30°时,铲斗处风流全部向集尘口移动,且电铲前方的流场形成的闭环效果最佳。

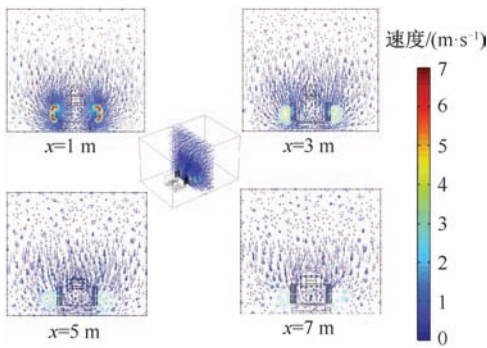


图6 风流场迁移模拟结果(y-z 截面)  
Fig.6 Simulation results of wind flow field migration (y-z section)

负压影响后随风流向集尘口运移,增大了其在电铲车身前侧的覆盖捕集面,形成了一个闭环射流雾滴场捕集粉尘。

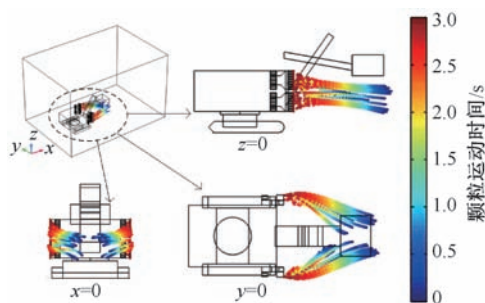


图 7 液滴分布

Fig. 7 Droplet distribution

4 闭环射流除尘装置试验

4.1 试验平台

选择试验方法验证所研制控尘装置的性能,试验装置参照 1.1 节中的装置介绍,3D 打印与实物比例为 1:20 的相似模型,试验首要目的是在定性层面验证闭环流场的形成规律及除尘效率的变化趋势,其中烟流观测试验可验证其流态相似。装置设计中空结构,在末端接轴流抽风风机,前端凹槽嵌入风管并在风管一端接空压机作为压缩气体的来源,通过调节压力从而调节射流风口风速,旋转风管模拟不同射流偏转角。倾倒物料选用鄂尔多斯某露天煤矿经过筛分后的煤尘(粒径为 1~50  $\mu\text{m}$ ,密度为 1.3~1.8  $\text{g}/\text{cm}^3$ ),测试仪器由电子天平、高速摄像机、粉尘质量浓度测试仪、风速仪组成,图 8 为试验装置。

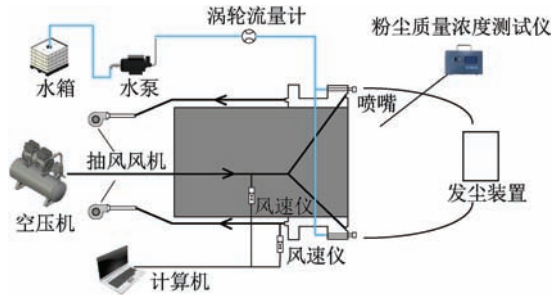


图 8 试验装置

Fig. 8 Experimental device

4.2 闭环射流流场观测试验

只开启风流装置时,通过点燃烟饼来观测风流卷吸效果,烟饼布置于模拟铲斗落料处下方,通过观察不同偏转角  $\theta$  下烟雾的流动状态,判断闭环效果,试验平台如图 9 所示。

点燃烟饼,烟雾流动如图 10 所示,当未开启闭环射流装置时,烟气垂直上升,当  $\theta=20^\circ$  时,铲斗下方少部分烟流向集尘口方向运动;随着  $\theta=25^\circ$  时,部

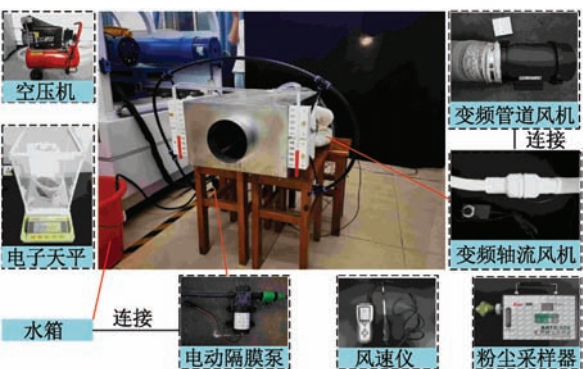


图 9 试验平台

Fig. 9 Test platform

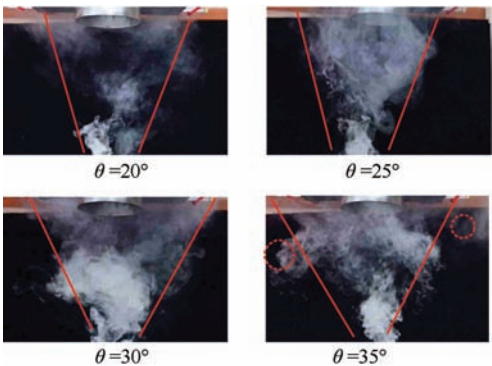


图 10 烟流观测试验效果

Fig. 10 Smoke flow observation test results

分烟流向集尘口方向运动,其余烟流向背离车身方向运动。当  $\theta \geq 30^\circ$  时,大部分烟流进入集尘口。在  $\theta=30^\circ$  时进入集尘口烟流量最大,与模拟结果有高度相似性,验证了开启装置后电铲车身外流场的准确性。

4.3 雾化降尘效率试验

试验共设置 8 个高压喷嘴,控制各喷嘴压力及水流量保持一致,通过电子天平测量控制每次粉尘倾倒入量 50 g。按照 50 g/min 进行发尘作业,选取距离铲斗中心处 0.2 m 处所在  $x-z$  平面为待测面,布置距离地面高度为 0.4 m 的 4 个粉尘浓度测点,分别位于司机位、铲臂外侧、铲斗外侧、铲斗前侧,编号为 1、2、3、4,各粉尘质量浓度测点的具体布置如图 11 所示。试验中电铲车身为对称结构,故只选取车身一侧测点。采用某矿用粉尘采样器测定空间内各测点粉尘质量浓度,首先选取未开启除尘设备时进行发尘作业后空间内各测点粉尘质量浓度为试验初始质量浓度  $C_0$ ,随后在完全相同工况下,开启降尘装置并设定 20、25、30、35° 等 4 个角度测量并记录相应测点的粉尘质量浓度值  $C$ ,降尘效率  $\eta$  计算公式如下:

$$\eta = [(C_0 - C)/C_0] \times 100\% \quad (8)$$

每组试验重复3次,避免数据偶然误差,测量数据平均值作为最终测试结果,选取电铲模型倾倒产生及扩散时间60 s为测量时间。

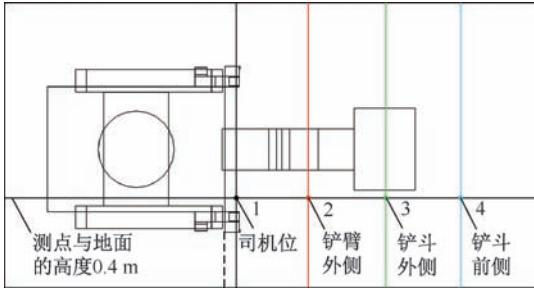


图 11 粉尘质量浓度测点布置

Fig. 11 Dust concentration measuring point arrangement

初始粉尘质量浓度及在射流偏转角 20、25、30、35°下司机位、铲臂外侧、铲斗外侧、铲斗前侧  $x$ - $z$  平面测点粉尘质量浓度如图 12 所示。

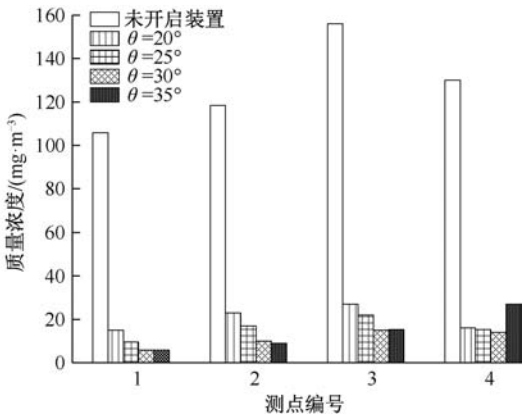


图 12 各测点粉尘质量浓度

Fig. 12 Dust mass concentration at each measuring point

在未开启降尘装置时,各测点粉尘质量浓度随着与产生尘中心距离增大有着不同程度的递减,说明粉尘颗粒在受重力影响下逐渐沉降。开启雾化降尘装置后各测点粉尘质量浓度显著降低,通过调节射流风口偏转角  $\theta$ ,所形成的雾幕形态随之变化,由图 12 可知: $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=35^\circ$  时,对司机位、铲臂外侧、铲斗外侧降尘效果较好,而  $\theta=35^\circ$  时对铲斗前侧降尘效果不佳,因此,综合考虑  $\theta=30^\circ$  时对电铲周围粉尘治理效果最佳,对司机位、铲臂外侧、铲斗外侧、铲斗前侧降尘率分别达到 94.4%、91.5%、90.4%、89.2%。

## 5 结 论

1) 针对露天矿采装过程粉尘扩散,提出电铲车身高压风幕闭环射流除尘技术:射流风口形成隔离风幕;协同负压集尘口引导含尘气流闭环移动;叠加喷雾使液滴破碎为水雾粒子,扩大粉尘捕集面。

2) 通过数值模拟方法分析高压风幕闭环射流除尘装置关键工艺参数对工作面风流运移分布的影响,在射流风速  $v=30\text{ m/s}$ ,偏转角  $\theta=30^\circ$  时,风流场形成了最佳的闭环效果,有效地将含尘气流循环吸入集尘系统;通过内置湍流模型和 K-H 液滴破碎模型相结合,能够准确地模拟液滴破碎增大雾滴覆盖面积。

3) 建立与原模型几何相似比为 1:20 的试验平台对闭环射流除尘装置进行风流场特性观测试验以及雾化场降尘试验来检验其降尘效率,烟流观测结果与风流场模拟结果有着高度相似性,验证了流场分布的准确性;开启雾化装置后对各测点粉尘浓度均有显著降低,在射流偏转角  $\theta=30^\circ$  时降尘效果最佳,对司机位、铲臂外侧、铲斗外侧、铲斗前侧降尘率分别达到 94.4%、91.5%、90.4%、89.2%。

## 参 考 文 献

[1] 王桂林, 赵长海, 宋德林. 基于提高环境安全的露天矿空气污染影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增2): 77-84.  
WANG Guilin, ZHAO Changhai, SONG Delin. Research on the influencing factors of air pollution in open-pit mines based on environmental safety improvement[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2): 77-84.

[2] LIU Xinjie, LI Lifeng, YANG Y. Development status of coal mining in China[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2023, 123(1): 19-28.

[3] 田卫, 马睿浩, 关小杰, 等. 旧工业建筑再生施工粉尘运移特性数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(1): 231-238.  
TIAN Wei, MA Ruihao, GUAN Xiaojie, et al. Numerical simulation of dust suppression characteristics in regeneration of old industrial buildings[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 231-238.

[4] 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 Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, 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.

- [5] 袁亮. 煤矿粉尘防治与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.

YUAN Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Coal Journal, 2020, 45(1): 1-7.

- [6] 汪帅,曹博,白润才,等. 露天煤矿经济合理剥采比动态预测方法研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(9): 4 305-4 323.

WANG Shuai, CAO Bo, BAI Runcai, et al. Dynamic prediction method of economic and reasonable stripping ratio in open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(9): 4 305-4 323.

- [7] TANG Wanjun, LI Fengming, XIANG Gaoxiang, et al. Investigation on flow field characteristics in an open-pit coal mine[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(18): 27 585-27 594.

- [8] 林汉毅,袁亮,江丙友,等. 水汽在 PM2.5 煤尘表面异质核化凝结效果预测及喷雾降尘试验[J/OL]. 煤炭学报, 1-12. [2025-03-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1119>.

LIN Hanyi, YUAN Liang, JIANG Bingyou, et al. Prediction of condensation effect of water vapor on heterogeneous nucleation of PM2.5 coal dust surface and test of spray dust fall[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-12. [2025-03-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1119>.

- [9] 张建华. 露天煤矿破碎站受料斗粉尘扩散规律[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增 1): 370-375.

ZHANG Jianhua. Dust diffusion law of receiving hopper in crushing station of open-pit coal mine[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 370-375.

- [10] 宋子岭,许璇,赵晓亮,等. 风速对露天矿采装工作面粉尘聚并效应的影响分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(2): 538-546.

SONG Ziling, XU Xuan, ZHAO Xiaoliang, et al. Analysis of the influence of wind speed on dust coalescing effect of mining and loading face in an open-pit mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(2): 538-546.

- [11] BUSAYA J N. 基于气流模拟的深凹露天矿通风与降尘技术研究:以北衙露天金矿为例[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.

BUSAYA J N. Research on ventilation and dust reduction technology of deep open pit mine by airflow simulation: a case study of Beiya gold open pit[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

- [12] 马明星,荆德吉,陈曦,等. 露天煤场不同粒径煤尘扬尘实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2020, 39(1): 12-17.

MA Mingxing, JING Deji, CHEN Xi, et al. Experimental study on dust raised from different sizes in open coal yard[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2020, 39(1): 12-17.

- [13] 张天,穆新升,陶爽,等. 新型超音速气动雾化喷嘴雾化特性及降尘性能[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 239-246.

ZHANG Tian, MU Xinsheng, TAO Shuang, et al. Research on atomization characteristics and dust reduction performance of new supersonic pneumatic atomization nozzles[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 239-246.

- [14] 曹勇,周永利,刘智超,等. 哈尔乌素露天煤矿水封爆破降尘试验及效果分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(增 2): 33-37.

CAO Yong, ZHOU Yongli, LIU Zhichao, et al. Dust reduction effect of water infusion blasting in Haerwusu open-pit coal mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(S2): 33-37.

- [15] 敖忠晨. 煤破碎站卸料口粉尘运移规律及降尘方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.

AO Zhongchen. Study on dust movement law and dust reduction method at the discharge port of coal crushing station[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

- [16] 高凌霄,杨贺琦,李小平,等. 基于 CFD-DPM 耦合方法的多级串联弯管内液固两相流冲蚀特性研究[J]. 节能技术, 2022, 40(4): 297-304.

GAO Lingxiao, YANG Heqi, LI Xiaoping, et al. Research on erosion characteristics of liquid-solid two-phase flow in multi-stage series elbows based on CFD-DPM coupling method[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 40(4): 297-304.

作者简介: 陈景序 (1989—),男,辽宁鞍山人,博士,副教授,主要从事粉尘防治理论及技术等方面的研究。E-mail:chanjingxu@sina.com。