

涡旋控尘机器人方案设计与仿真分析

灿 斌¹, 李双祥¹, 周应建¹, 顿向明^{2*}, 江森辉³, 高爱军³

¹云南省交通科学研究院有限公司, 云南 昆明

²上海交通大学航空航天学院, 上海

³宁波介量机器人技术有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

针对道路钻孔作业时的降尘需求, 设计了涡旋气流控尘机器人。采用涡旋气流控尘的方法, 解决了钻孔作业时大面积的扬尘问题, 为钻孔作业降尘提供了设计新思路。

关键词

钻孔, 涡旋聚集式, 控尘

Design and Simulation Analysis of Vortex Dust Control Robot Scheme

Bin Can¹, Shuangxiang Li¹, Yingjian Zhou¹, Xiangming Dun^{2*}, Senhui Jiang³, Aijun Gao³

¹Yunnan Provincial Transportation Science Research Institute Co., Ltd., Kunming Yunnan

²School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

³Ningbo Jieliang Robot Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: March 30, 2026; accepted: April 23, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

A vortex airflow dust control robot has been designed to meet the dust suppression needs during road drilling operations. By utilizing the vortex airflow dust control method, the extensive dust emission problem during drilling operations has been addressed, providing a new design approach for dust suppression in drilling operations.

*通讯作者。

文章引用: 灿斌, 李双祥, 周应建, 顿向明, 江森辉, 高爱军. 涡旋控尘机器人方案设计与仿真分析[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(2): 250-267. DOI: 10.12677/met.2026.152026

Keywords

Drilling, Vortex Aggregation, Dust Control

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

道路施工扬尘中含有大量的颗粒物，如 PM10 和 PM25 等。这些颗粒物在空气中漂浮，不仅会降低空气质量，还可能被人体吸入，引发呼吸道疾病、心血管疾病等健康问题。此外，扬尘还会影响周边植物的光合作用，对生态环境造成破坏。同时，严重的扬尘污染也会降低城市的能见度，影响交通安全。

2. 研究现状与施工现场约束分析

2.1. 现状分析

(1) 喷雾降尘是最常见的降尘方式，也是近些年来发展最迅速的降尘手段，由于以水为介质，可以衍生出多种形式的喷雾形式，其喷雾内在原理为雾滴与粉尘颗粒充分接触，与粉尘结合增加其质量，从而使粉尘沉淀。

李亚行[1]分析了采煤机附近的气流与粉尘分布特征，提出了合理的负压-喷雾装置布置方式，以期在实际生产中更好地控制和减少粉尘扩散。

侯晋[2]从喷雾降尘时雾滴捕获粉尘微观机理角度深入探究了喷雾降尘时雾滴捕获粉尘作用机制，并对煤矿井下降尘用喷嘴进行结构优选及结构参数优化，从喷雾降尘雾滴群与颗粒群碰撞捕获宏观机制角度研究了喷雾场捕获粉尘空间区域分布特性。

史光亮[3]对目前回风巷道所用的除尘装置进行改进，研制出新型的干湿组合装置，采用喷嘴和捕尘网 2 种方式。通过干湿结合除尘器的研发，搭配捕尘网进行联合降尘，显著提高了回风顺槽残余粉尘的降尘效果，为回风巷道工人提供了更安全可靠的工作环境。

李亚行、闫红红、郑贺、张宏、袁利才[4]根据康达效应原理设计了一种适用于采煤机的负压-喷雾降尘装置，结构简单、安装维护简易。该装置不仅能对采煤机滚筒产尘进行有效覆盖，而且装置本身可以产生较强的抽吸效应，能够较好地处理巷道中的逸散粉尘，为基于康达效应的新型负压降尘装置在煤矿除尘中的应用提供了重要理论依据和试验支撑。

喷雾控尘的方式虽然能有效地减少扬尘，但是其工作过程中需要用到大量的水，需配备大体积水箱，难以持续较长的工作时间。另外潜孔机冲击气流气压较大，喷雾难以完全控制住扬尘，故此方案不合适。

(2) 吸尘罩除尘。吸尘罩将粉尘全部罩住后，通过电机带动吸尘器将粉尘带入除尘装置来达到除尘效果。

福建省新华都工程有限责任公司[5]设计的防尘罩能自动贴合地面，防止粉尘漏出。

戴刚[6]研究了潜孔锤钻机的防尘方法，其使用的防尘罩能将灰尘吸入至除尘箱的内部并通过挡板减少由排污管飘出的灰尘，从而降低灰尘对设备和工作人员身体的影响，并且提高设备的实用性。

曹国智、赵鹏[7]针对目前道路清扫车因吸尘盘结构设计不合理导致吸尘效率低下的问题，对某型道路清扫车吸尘盘的结构参数进行分析研究。基于仿真模型利用 FLUENT 对吸尘盘工作时内部流场进

行模拟, 将吸尘盘排气管进风口平均速度、排气管出风口平均速度和沿程压降作为评判吸尘盘吸尘效率的综合指标, 研究了吸尘盘排气管进风口直径、肩部宽度和离地高度等关键结构参数对吸尘盘吸尘效率的影响, 最后对分析改进后的吸尘盘流场特性进行了验证, 为清扫车吸尘系统结构设计提供了理论依据。

李路阳、关红艳、李勇[8]利用 Fluent 对吸尘模型内流场进行模拟分析, 研究扫路车吸尘在不同高度和宽度时吸尘前进风口、侧边进风口、近地面和吸尘口的气流平均速度变化, 得到吸尘在高度 160 mm、纵向宽度 220 mm 时取值面速度最大, 吸尘能力最佳; 采用欧拉-拉格朗日离散相模型(DPM)对不同肩部斜角的吸尘进行气固两相流模拟, 研究吸尘肩部斜角不同时直径为 15 mm 的尘粒捕获数量, 结果表明当吸尘肩部斜角为 8°时吸尘口捕获颗粒数量最多。

吸尘罩方式除尘虽然被广泛使用, 但是潜孔钻机工作过程中, 钻杆会大幅度震动, 固定在末端的除尘罩不稳定, 另外吸尘罩与地面接触, 用不了多久便损坏, 故此方式不适合。

(3) 涡旋控尘。利用涡旋气流进行粉尘控制是一种新型的控尘方法, 涡旋气流具有强大的卷吸能力, 能够对粉尘粒子进行强有力的控制, 此种控尘方式的潜力巨大, 目前使用涡旋风流控尘较少, 但是有部分学者对于涡旋风流以及龙卷风形成有了一定研究。

朱丽红、黄勇[9]等通过分析人造涡流的生成理论, 衍生出对钻头的设计, 提出了旋风钻头, 并通过数值模拟研究了该装置内部的气固流场, 分析了相关影响参数对风流场的作用, 结果得出钻头在工作状态下, 装置内部产生涡流对周围气体形成卷吸能力, 产生抽吸。

林爱晖等[10]通过数值模拟研究了人造涡流的生成过程, 分析了涡旋集聚作用有效控制污染的相关参数, 得出了形成人造涡流的风量、角度等主要参数作用。

郭瑞雪、王鹏程等[11]通过采用基于粒子图像的速度测量方法, 结合了兰金涡流理论, 研究了涡流产生的相关内容, 对涡旋产生时的内部速度, 以及定义的涡度分别进行了定量及定性分析, 得到了内部流场分布以及涡流的物理量分布, 通过模拟清晰的显示了除了涡流的产生过程。

荆德吉、刘绍航、刘鸿威、任帅帅等[12]等针对煤矿综采工作面采煤机作业时由于滚筒旋转诱导气流加剧粉尘扩散的问题, 研究提出一种基于超音速雾化技术的微雾隔尘系统, 采用架间全断面控尘雾幕与采煤机外超音速雾化装置双模块协同架构, 实现多动态尘源的全流程覆盖高效捕集, 为综采工作面粉尘综合治理提供新的技术方案。

裴凯强[13]通过构建煤矿工作面通风系统的物理模型和采用数值模拟技术, 对通风量、次级压风量及抽风口位置等关键参数进行了综合优化研究。结果表明, 优化后的通风系统能够显著提高工作面的空气质量, 有效降低岩尘质量浓度, 从而改善作业环境, 保障煤矿工人的健康与安全。

毋阳阳[14], 以山西某煤矿 3321 综掘巷道为工程背景, 综合正压通风, 集成风幕控尘技术, 构建巷道风幕协同控尘体系。基于实测巷道参数构建三维流体力学模型, 进行气固两相流耦合分析, 定量揭示了启用控尘装置前后巷道粉尘的时空演化特征, 并根据现场监测数据对模拟结果进行验证。结果表明, 数值仿真数据与工程实测结果具有良好的一致性。相较于传统通风除尘方案, 应用气幕控尘系统后, 作业带颗粒物平均浓度的降幅达 86%。

杨阳[15]针对综掘面粉尘控制难题, 提出了一种新的内外双旋流风幕控尘技术, 其与传统风幕的核心区别在于利用“双旋流协同卷吸”大幅提升自由粉尘捕集效率, 利用“壁面吸附效应”彻底解决边界积尘问题。

(4) 综上所述, 涡旋气流具有良好的集聚性, 有效控制粒子的运移方向。已有部分学者将其运用到粉尘治理当中, 并取得一定成果。本文基于涡旋气流控尘理论基础之上, 设计了涡旋气流控尘机器人并加以研究。

2.2. 现场工况分析

潜孔钻机是一种用于钻取土壤或岩石的土质钻机。它在土壤表层使用强力推动器进行推进，同时利用旋转机构带动下部的钻杆进行旋转钻进。这种钻机能够实现不断钻进、提取土样和回收泥浆的功能。

如图 1 所示，结合实地考察，发现钻孔工作时主要影响因素为钻头抖动和钻头挡板升降。故此采用以下方案解决问题：

(1) 钻头抖动

采用圆形涡旋气流罩，中间部分留有中心孔，即使钻头剧烈抖动也不会撞到机器人。

(2) 钻头挡板的升降运动

通过改装现有挡板，用以适配机器人的安装。



Figure 1. Working conditions
图 1. 现场工况

3. 基于涡旋原理的控尘方案设计

方案一：如图 2 所示为第一版机器人设计，控尘方式为通过水幕初步降尘后，通过涡旋气流控尘聚尘。主要由风机、集尘箱、水泵、涡旋气流罩和喷嘴组成。水泵固定在钻杆上，喷嘴固定安装在钻头部分，工作时形成水幕，进行初步降尘。风机和集尘箱固定安装在钻头滑板上，涡旋气流罩固定安装在钻杆上，通过风机的抽吸，形成负压，可以将粉尘吸收到集尘箱中。

第一版主要采用喷淋降尘与涡旋气流聚尘结合来实现功能。但是通过实地考察发现：

1. 钻头实际抖动过大，初版的涡旋气流罩内部与钻头接触过近，容易碰撞导致损坏。
2. 实际钻孔时产生的灰尘冲击力，难以通过喷淋来实现有效的降尘。

针对以上发现的问题，重新设计了第二版机器人。

方案二：如图 3 所示为第二版机器人设计，通过内外壁面带有螺纹的控尘罩，将大部分粉尘控制在罩中，而带有粉尘的气流进入罩子中后，会沿着壁面的螺纹槽流动，从而形成涡旋气流聚尘，最终将大部分粉尘控制在罩子中。主要由升降装置、折叠臂和控尘罩组成。使用固定于运载车的长方形框架，末端安装有升降装置。升降平台通过电磁铁磁吸的方式与升降装置连接。升降平台上固定安装有两个多段折叠机械臂，通过此结构分别将末端的上层控尘罩和下层控尘罩推送与收拢。控尘罩分为上下两层，每层又分为左右两部分，通过弧形机械臂进行开合动作，用以抱紧钻杆。

此方案虽然解决了钻头抖动的碰撞问题，但是上下层的设计对工作流程限制较大，且整体体积过于

庞大，对此重新设计出了现有的机器人模型。

方案三：如图 4 所示为第三版机器人设计，通过涡旋生成装置中的挂帘旋转，产生涡旋气流，将粉尘聚集在近地面，大大减少扬尘面积。主要由控尘作动器、涡旋生成装置、改良式底座和传感器模块组

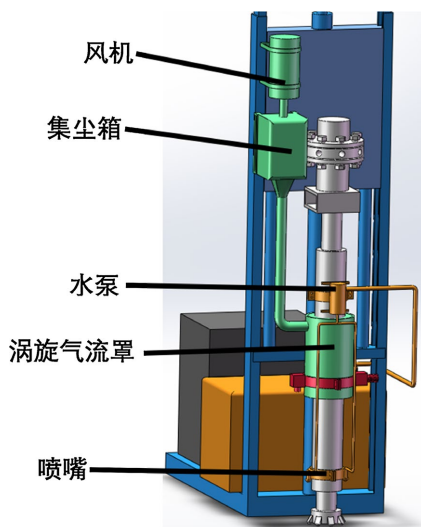


Figure 2. First version of the design scheme
图 2. 第一版设计方案

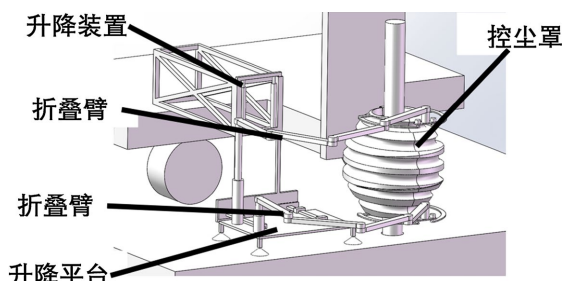


Figure 3. Second version of the design scheme
图 3. 第二版设计方案

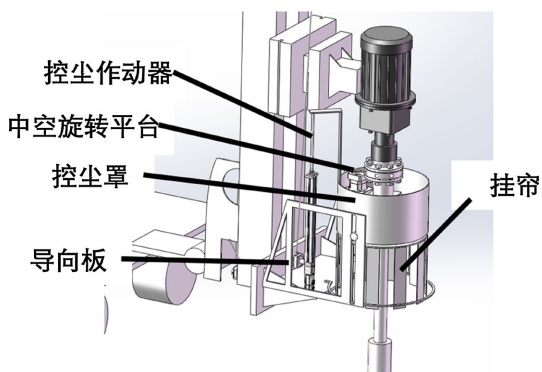


Figure 4. Third version of the design scheme
图 4. 第三版设计方案

成。涡旋生成装置主要由中空旋转平台控制挂帘旋转，产生涡旋气流控尘，另外设置有一控尘罩辅助控

尘。控尘作动器用于控制涡旋生成装置升降。改良式底座用于方便安装控尘作动器和涡旋生成装置。传感器模块用于实时检测钻头的距离，从而给予控制信号。

此方案通过中空旋转平台，即中空部分留有足够的空间，解决了钻头抖动的碰撞问题。另外，通过挂帘旋转产生的涡旋气流，比前两版控尘效果更好，烟尘面积更小。

4. 钻孔扬尘分析

钻孔扬尘生成规律

根据现场对工作流程中其中一钻孔过程的视频录制，研究其扬尘生成规律，如下图所示。

- (1) 如图 5 所示，为准备工作状态。
- (2) 如图 6 所示，为工作第五秒的状态，已经产生明显的扬尘。



Figure 5. Preparation work status
图 5. 准备工作状态



Figure 6. Work 5th second
图 6. 工作第 5 秒

- (3) 如图 7 所示，为工作第十秒开始，此时扬尘达到最大。

- (4) 如图 8 所示，为工作第 17 秒，此时扬尘开始减弱，孔洞有部分土壤喷出。
- (5) 如图 9 所示，为工作第 40 秒，扬尘已结束。



Figure 7. 10th second of work
图 7. 工作第 10 秒



Figure 8. 17th second of work
图 8. 工作第 17 秒

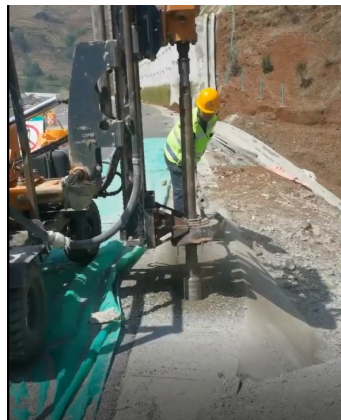


Figure 9. The 40th second of work
图 9. 工作第 40 秒

5. 详细设计

5.1. 挂帘尺寸与转速的理论设计

5.1.1. 物理模型

柔性挂帘长度 L 决定了旋转半径 R ，宽度 W 决定了该气幕的轴向高度。考虑到帘体的柔性摆动，引入形状系数 $k \approx 0.85$ ，则有效流体动力半径为 $R = kL$ 。

采用描述集中涡旋的经典兰金涡模型。该模型将流场分为涡核区和外部区。涡核区(强制涡)：半径为 R 的内部区域，流体像刚体一样以匀角速度 ω 旋转。外部区(自由涡)： $r > R$ 的外部区域，流动无旋，环量守恒。

空气为不可压缩流体(马赫数 $Ma < 0.3$)忽略粘性影响，按理想流体处理。流动为稳态、轴对称。

5.1.2. 理论推导

(1) 设旋转角速度为 $\omega = 2\pi n$ ，其中 n 为转速。

涡核区(强制涡， $0 \leq r \leq R$)：流体像刚体一样旋转，切向速度 v_θ 与半径 r 成正比。

$$v_\theta(r) = \omega r$$

外部区(自由涡， $r > R$)：环量守恒，切向速度与半径成反比。由在 $r = R$ 处的速度连续性 $v_\theta = \omega R$ 确定环量，故有：

$$v_\theta(r) = \frac{\omega R^2}{r}$$

(2) 压力分布推导。 ρ 为空气密度(取 1.2 kg/m^3)， p 为静压对于稳态、轴对称的圆周运动，径向的欧拉方程简化为：

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{v_\theta^2}{r}$$

外部自由涡区($r \geq R$)压力分布，以无穷远处(压力为大气压 p_∞ ，速度为 0)为参考点积分：

$$p(r) - p_\infty = \int_\infty^r \frac{\rho v_\theta^2}{r} dr = \int_\infty^r \frac{\rho \omega^2 R^4}{r^3} dr = -\frac{\rho \omega^2 R^4}{2r^2}$$

在涡核边界 $r = R$ 处，外部压力为：

$$p(R^+) = p_\infty - \frac{1}{2} \rho \omega^2 R^2$$

内部强制涡区($r \leq R$)压力分布，从边界 $r = R$ 向中心积分，并利用压力连续条件 $p(R^-) = p(R^+)$ ：

$$p(r) - p(R^-) = \int_R^r \rho \omega^2 r dr = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - R^2)$$

代入 $p(R^+) = p_\infty - \frac{1}{2} \rho \omega^2 R^2$ ，得到涡核内部压力分布：

$$p(r) = p_\infty + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - 2R^2) \quad (0 \leq r \leq R)$$

(3) 负压区域特性分析。在整个涡核内部($r \leq R$)，由于 $r^2 - 2R^2 < 0$ ，恒有 $p(r) < p_\infty$ 。因此，整个涡核构成了一个低压区域。由有效旋转半径 $R = kL$ 决定，形成一个半径为 R 的圆形截面。在轴向上，该低压特性沿挂帘宽度 W 方向分布。因此，负压区是一个半径为 R 、高度为 W 的圆柱形空间。其体积为：

$$V_{low} = \pi R^2 W$$

在涡心 ($r = 0$) 处, 压力达到全局最小值:

$$p_{min} = p(0) = p_{\infty} - \rho \omega^2 R^2$$

涡心处相对于大气压的最大压降为:

$$\Delta p_{max} = p_{\infty} - p_{min} = \rho \omega^2 R^2$$

平均压降: 表征整个负压圆柱内的平均抽吸能力:

$$\Delta p_{avg} = \frac{1}{V_{low}} \iiint_{V_{low}} (p_{\infty} - p(r)) dV = \frac{3}{4} \Delta p_{max} = \frac{3}{4} \rho \omega^2 R^2$$

5.1.3. 设计参数验证

(1) 设计参数。挂帘物理长度 $L = 500 \text{ mm} = 0.5 \text{ m}$, 挂帘宽度 $W = 120 \text{ mm} = 0.12 \text{ m}$, 挂帘转速 $n = 20 \text{ r/s} = 1200 \text{ rpm}$ 角速度 $\omega = 40\pi \text{ rad/s} \approx 125.66 \text{ rad/s}$ 。

挂帘旋转时, 其末端轨迹构成圆柱面。考虑柔性体的摆动与变形, 有效旋转半径 R 略小于物理长度。

取形状系数 $k = 0.85$, 则: $R = kL = 0.85 \times 0.5 = 0.425 \text{ m}$ 。空气密度: $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 负压区域范围。根据模型, 显著的负压区(涡核区)半径为 $R = 0.425 \text{ m}$, 对应直径 $D = 0.85 \text{ m}$ 。高度 $H = W = 0.12 \text{ m}$, 体积 $V_{low} \approx 0.068 \text{ m}^3$ 。

(3) 涡心最大压降:

$$\Delta p_{max} = 1.2 \times 125.66^2 \times 0.425^2 \approx 3422.6 \text{ Pa}$$

(4) 涡核边界压降, 在 $r = R$ 处:

$$\Delta p(R) = \frac{1}{2} \rho \omega^2 R^2 = \frac{1}{2} \times 3422.6 \approx 1711.3 \text{ Pa}$$

表明从大气压到涡心, 压力梯度显著

(5) 区域平均压降

$$\text{区域平均压降: } \Delta p_{avg} = \frac{3}{4} \Delta p_{max} \approx 2567 \text{ Pa}$$

5.1.4. 讨论与结论

(1) 挂帘长度 L : 决定负压区域的横向作用尺度。通过 $R = kL$ 直接控制低压屏障的直径 ($D \approx 1.7kL$)。设计时, 应根据需隔离的开口宽度 B 确定 L 的下限, 需满足 $2kL \geq B$ 。本例中 $L = 0.5 \text{ m}$ 可实现约 0.85 m 的覆盖宽度。

旋转速度 n : 决定负压强度的核心动力参数。压降与 n^2 成正比。提高转速可二次方地增强低压区的“抽吸”力, 从而提升气幕抵抗外部气流干扰(如横向风)的能力。 $n = 20 \text{ r/s}$ 的设计产生了显著的压差(理论值 $> 3000 \text{ Pa}$), 确保了足够的流体动力强度。

挂帘宽度 W : 决定负压区域的轴向(高度)作用范围。它定义了低压圆柱体的高度 $H = W$, 直接影响气幕在垂直方向的密封完整性和负压区总体积 $V \propto W$ 。宽度不足可能导致上下端气流短路。 $W = 0.12 \text{ m}$ 的设计提供了适中的轴向覆盖。

参数匹配性: 依据目标隔离开口的宽度和高度, 分别确定挂帘长度 L 和宽度 W 的最小需求。继而, 根据需克服的外部干扰压差 Δp_{req} (如风压), 由公式反推所需的最低转速 $n_{min} = \frac{1}{2\pi kL} \sqrt{\frac{\Delta p_{req}}{\rho}}$ 。最后, 在结

构强度与功耗约束下,选择最终的 $n \geq n_{\min}$ 。本研究的参数组合($L = 0.5 \text{ m}$, $W = 0.12 \text{ m}$, $n = 20 \text{ r/s}$)即遵循此逻辑,在空间覆盖与动力强度间取得了良好平衡。

(2) 总结:本研究基于兰金涡模型,对旋转挂帘产生的流场进行了完整的理论推导,获得了负压区域空间范围与压力分布的解析表达式。分析表明:挂帘长度 L 和宽度 W 共同定义了圆柱形负压区的空间域(半径与高度),而转速 n 决定了该区域的压力强度域。对于所设计的 $L = 500 \text{ mm}$ 、 $W = 120 \text{ mm}$ 、 $n = 20 \text{ r/s}$ 的挂帘,理论计算得出其可产生一个直径约 0.85 m 、高 0.12 m 、中心最大压降约 3423 Pa 的稳定低压区,该低压区是旋转挂帘实现有效气流隔离的流体动力学基础。本理论模型为旋转空气幕的工程设计与性能优化提供了关键的理论依据和量化设计工具。

5.2. 中空旋转平台内径的尺寸选择与影响分析

5.2.1. 引言

所研究的涡旋生成装置采用外缘驱动模式,其核心物理模型如图10所示。中空旋转平台通过一个外径为 710 mm 的法兰盘,带动均布于其外缘的挂帘高速旋转。该驱动方式旨在向流体中注入强大的角动量(切向速度分量)与轴向动量(轴向速度分量)。装置中心轴线处贯穿一根直径 180 mm 的钻杆。法兰盘中中心开设孔洞,用于钻杆的穿过。装置的最终目标是生成一个具有强抽吸能力的集中涡旋气流。

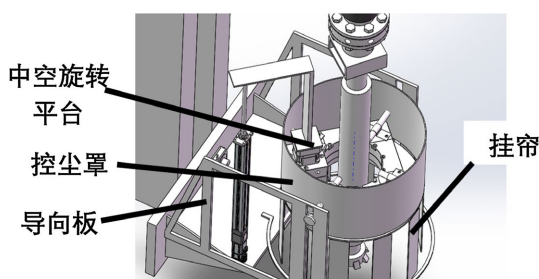


Figure 10. Vortex generation device design diagram
图 10. 涡旋生成装置设计图

鉴于钻头的阻挡,使用内径 300 mm 的中空旋转平台和法兰盘,直径 180 mm 的钻头可以从中空部分穿过,保证钻头与旋转平台留有足够的空间,防止碰撞。此部分旨在从理论层面研究内径 300 mm 这一尺寸参数对涡旋生成过程的独立影响,从而为装置的优化设计提供明确依据。

5.2.2. 理论分析

(1) 在外缘驱动模式下,涡旋的生成遵循经典的角动量注入与守恒原理。挂帘在半径 $R_0 = 355 \text{ mm}$ 处给予流体切向速度 v_θ ,形成初始环量 $\Gamma = 2\pi R_0 V_\theta$ 。在理想无粘、无中心障碍的情况下,根据开尔文环量定理与伯努利方程,流体在向中心轴汇聚的过程中,切向速度将增加,压力降低,从而在中心轴线处形成一个集中、稳定的低压涡核,其典型半径 R_c 通常与系统尺度成比例,经验关系为 $R_c \approx (0.2 \sim 0.3) R_0$,即约 $71 \sim 106 \text{ mm}$ 。

然而,中心钻杆的存在从根本上改变了此边界条件。直径 $d_s = 180 \text{ mm}$ 的钻杆(半径 $r_s = 90 \text{ mm}$)作为主导性固体边界,其尺寸已大于或等于上述预估的自然涡核半径 R_c 。因此,预期中可自由发展的点状或小直径涡核被物理上“固化”和“撑开”,被迫附着于钻杆表面,形成一个环形的强剪切层。此时的流场核心区域是钻杆外壁与外部约束边界(如罩壁或自由空间边界)之间的环形空间,其流动由带中心体的旋转库埃特流或旋涡破碎流等模型主导。

(2) 法兰盘位于中空旋转平台平面,两者内径 $D_i = 300 \text{ mm}$ (半径 $r_i = 150 \text{ mm}$)与钻杆之间形成了一

个径向宽度为 $\Delta r = r_i - r_s = 60 \text{ mm}$ 的环形缝隙。需从涡量动力学角度评估此缝隙的影响。

涡量的生成与输运由 Navier-Stokes 方程决定。在所述装置中, 涡量的主要来源是旋转的挂帘(边缘剪切层)以及中心钻杆表面的边界层。主要流场(即螺旋向心并向上抽吸的涡旋气流)的发展区域位于法兰盘平面的轴向上下游(即图 1 中法兰盘的上方或下方空间), 而非径向穿过该平面。

因此, 从主流场的控制方程和边界条件来看, 主导性的无滑移边界条件是钻杆外壁面和外部罩壁(或无穷远条件)。法兰盘的内孔壁面($r = r_i$)并非主流场的直接边界。

由于压力梯度主要沿轴向和径向(向心方向), 而非沿法兰盘平面的周向, 因此通过 $\Delta r = 60 \text{ mm}$ 缝隙的径向流速 v_r 极弱, 主要为被主流诱导的二次流或局部滞止流。其雷诺数 $Re_{\Delta r} = \rho v_r \Delta r / \mu$ 远小于主流旋转雷诺数, 流动状态对主流涡旋结构无显著影响。

涡核的结构、稳定性及强度由钻杆表面的边界层特性(决定摩擦耗散)和钻杆尾部的流动分离情况(决定湍流生成)主导。法兰盘内孔尺寸不改变钻杆的直径和表面状况, 故不直接影响涡核。

5.2.3. 总结

在所述外缘驱动、中心含 $\Phi 180 \text{ mm}$ 钻杆的涡旋生成装置构型中, 法兰盘内径 $D_i = 300 \text{ mm}$ 作为一个孤立的几何参数, 对生成的涡旋气流的宏观特性(如涡核形态、抽吸强度、整体稳定性)不构成独立的、显著的影响。其流体力学效应已完全被中心钻杆($d_s = 180 \text{ mm}$)这一更大尺度的主导边界条件所涵盖。

5.3. 控尘作动器设计思路

鉴于设计的控尘作动器开始上升的时间点, 为灰尘大幅度减弱的状态, 故此不考虑控尘作动器行程对涡旋生成效果的影响, 只考虑与钻孔设备的碰撞。钻头挡板与地面距离大约为 500 mm 的距离, 故此作动器行程不低于 500 mm , 同时考虑防尘的需求, 选用行程 600 mm 的电缸为控尘作动器主体。

控尘作动器的三维模型如图 11 所示, 通过直角形连接件与涡旋生成装置固定连接。如图 12 和图 13 所示, 分别为控尘作动器最低与最高点图。

5.4. 涡旋生成装置设计思路

涡旋生成装置的三维模型如图 14 所示, 由四部分组成, 中空旋转平台、控尘罩、挂帘和导向板。

使用内径 300 mm 的中空旋转平台和法兰盘, 直径 180 mm 的钻头可以从中空部分穿过, 保证钻头与旋转平台留有足够空间, 防止碰撞。控尘罩的直径为 710 mm , 高度 400 mm , 中空旋转平台固定安装于控尘罩内部, 与挂帘通过法兰盘连接, 法兰盘直径与控尘罩一致, 可以通过旋转使挂帘展开, 形成涡旋气流, 将产生的灰尘聚集后向下从四周散开, 使大部分灰尘不会向上扩散。

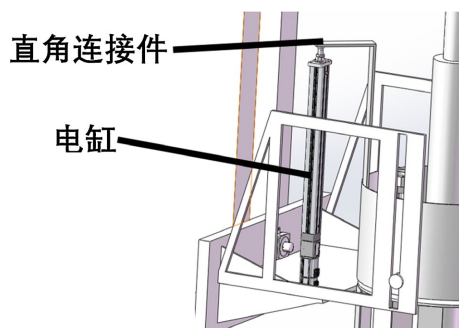


Figure 11. Design drawing of dust control actuator
图 11. 控尘作动器

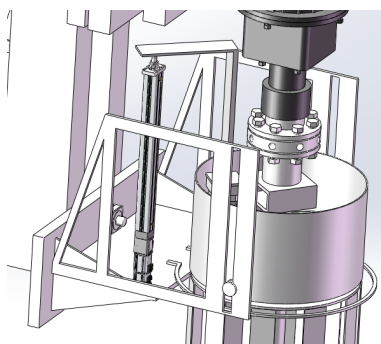


Figure 12. Lowest point
图 12. 最低点

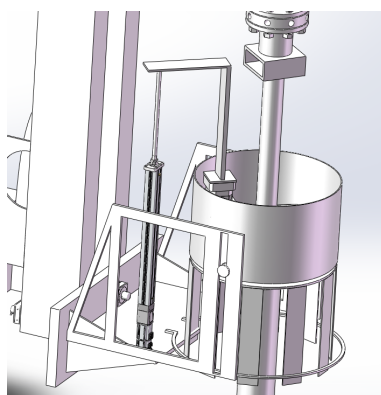


Figure 13. Highest point
图 13. 最高点

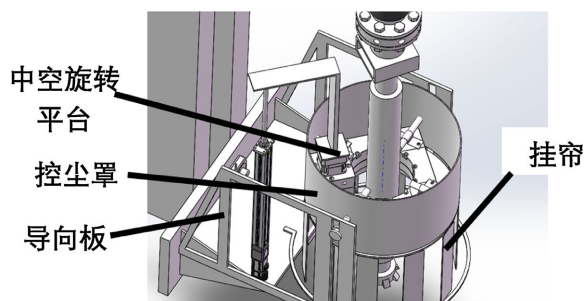


Figure 14. Vortex generation device
图 14. 涡旋生成装置

控尘罩两侧设置有两个滚轮镶嵌于导向板中，滑轮尾端穿过控尘罩后，固定安装在中空平台上。导向板末端固定安装于改良式钻头底座两侧，导向板用于保证涡旋生成装置上下移动时不会倾斜。

5.5. 感应器安装思路

根据实地考察，钻头初始位置为离地状态，通过钻头的框架升降运动，使钻头贴地才开始工作。故此，如图 15 所示，一号感应器行程为 1 m，安装于升降框架背部的底端，绳索与背部升降装置连接。通过此部位升降来判断整个工作流程的开始与结束，即钻头框架下降使钻头贴近地面开始工作和钻头框架上升离开地面结束工作。

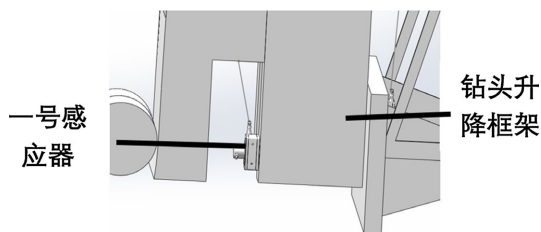


Figure 15. Sensor No. 1
图 15. 一号感应器

如图 16 所示, 二号传感器行程为 5 m, 固定安装于改良式钻头底座上, 绳索与顶部的钻头滑座连接。用于检测钻头的移动距离, 从而控制控尘作动器上升运动, 使罩子上升, 防止随钻头潜入孔洞而导致挂帘接触地面。

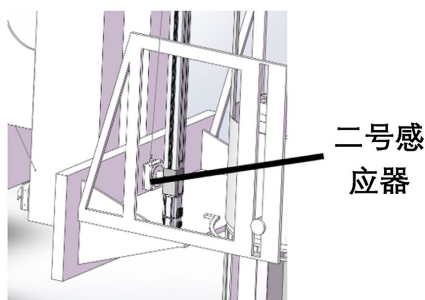


Figure 16. Sensor No. 2
图 16. 二号感应器

5.6. 钻头原有挡板改良设计思路

由于钻头自带的环形挡板会对机器人的作业产生干扰, 在不影响钻头钻孔作业情况下, 对挡板进行改良, 具体样式如图 17 所示, 总体上删除了前半部分的圆环形挡板, 剩余部分进行了横向加宽。同时固定安装有一个圆形抱箍, 用于束缚挂帘防止散乱。

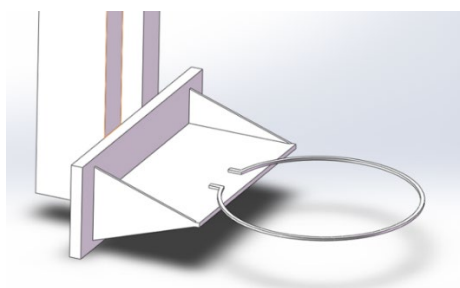


Figure 17. Circular hoop clamp
图 17. 圆形抱箍

5.7. 工作原理

(1) 挂帘初始状态如图 18 所示, 即最低位置。当钻头升降框架向下运动使钻头贴地, 一号传感器感应到运动, 发送信号使涡旋生成装置开始旋转, 涡旋气流生成, 如图 19 所示。

(2) 在作业过程中, 钻头会慢慢潜入孔洞, 当钻头下降到指定距离(即改良式底座离地面较近, 导致

挂帘即将接触地面时的距离), 二号传感器给予信号, 控尘作动器上升直至设定的最高位置, 如图 20 所示, 同时涡旋生成装置停止转动。

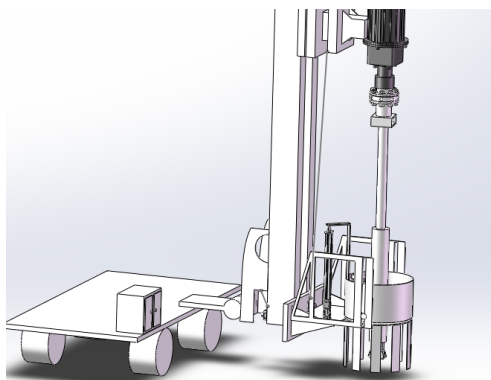


Figure 18. Initial state
图 18. 初始状态

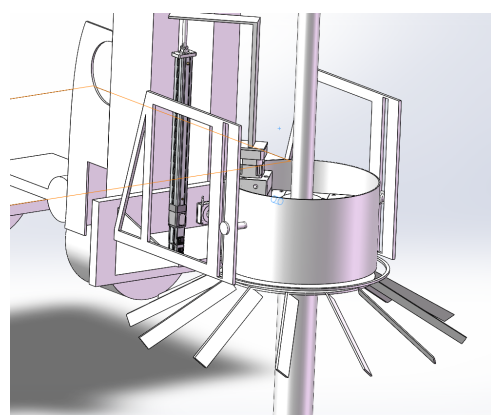


Figure 19. Vortex generation device in operation
图 19. 涡旋生成装置工作

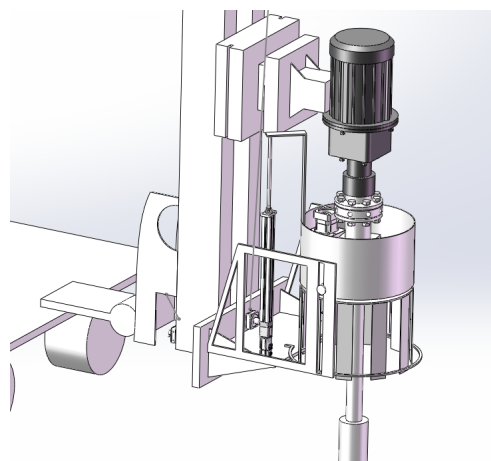


Figure 20. Highest position of vortex generation device
图 20. 涡旋生成装置最高位置图

(3) 钻孔作业完成后, 钻头的升降框架会上升使钻头离开地面, 此时一号传感器检测到运动后给予信号, 使控尘作动器下降至最低位置, 即初始状态。

6. 涡旋气流仿真模拟

本研究采用 SolidWorks Flow Simulation 内置的 $k-\varepsilon$ 湍流模型(标准壁面函数)对流体流动进行数值模拟。该模型通过求解湍动能(k)及其耗散率(ε)的输运方程来封闭雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方程, 适用于本研究中涉及的高雷诺数、充分发展的内部湍流流动。壁面附近的流动通过标准壁面函数进行处理, 在保证计算精度的同时有效控制了近壁面网格需求。

6.1. 收敛标准

计算收敛性通过以下综合判据进行判断:

- (1) 方程残差: 连续性、动量及湍流方程的残差下降至少 3 个数量级。
- (2) 目标监控: 通过软件“目标”功能监控的关键物理量(包括系统总压降、出口流量及关键点压力/速度)达到稳定状态。其判据为: 在最后 500 次迭代内, 目标值的波动幅度小于其平均值的 0.5%。
- (3) 全局守恒: 计算域进出口的质量流量相对误差小于 0.5%。

当同时满足以上条件时, 认为计算已获得稳定收敛解。

6.2. 网格独立性验证

为确保数值结果的网格独立性, 本研究基于 Solid Works Flow Simulation 的网格等级控制功能, 设置了多套网格方案进行验证。基准工况设定为入口给定总压, 出口静压为 0.2 MPa, 目标出风速度为 10 m/s。如表 1 所示, 通过对比三组全局初始网格, 其等级分别为 4 级、5 级和 6 级的系统网格。在出口边界条件为 0.2 MPa 静压的设定下, 计算收敛后出口截面监测的关键参数对比结果如下表所示:

Table 1. Grid independence verification
表 1. 网格独立性验证

网格方案	单元总数 ($\times 10^6$)	出口平均速度 (m/s)	相对误差	出口压力 (MPa)	相对误差	入口总压 (MPa)	相对误差
粗(G1)	0.85	9.65	3.5%	0.2002	0.10%	0.2210	0.7%
中等(G2)	2.20	9.96	0.4%	0.2001	0.05%	0.2198	0.2%
细(G3)	5.80	10.00	基准	0.2000	基准	0.2194	基准

验证结果表明, 以细网格(G3)的计算结果为基准, 当中等网格(G2)的单元数加密至约 2.2 百万时, 核心目标参数出口平均速度已达到 10 m/s 的设计目标, 且与基准值的相对误差小于 0.5%。同时, 入口总压等关联参数的变化也趋于稳定。根据工程收敛准则(关键参数变化率小于 1%), 可认为中等网格(G2)的计算结果已基本不受网格进一步加密的影响。所有后续正式计算均采用 G2 网格配置。

6.3. 仿真结果

根据上述设计参数, 孔洞冲出的气压设置为 0.2 MP 进行模拟实验, 蓝色箭头为涡旋生成装置产生的涡旋气流, 褐色箭头为孔洞冲出的灰尘。

如图 21 所示, 在涡旋生成装置不工作时, 大量的灰尘向上扬起。根据仿真图 22 可以发现, 经过涡旋气流的作用, 大部分灰尘被控制而后向侧边散开, 由此可见本机器人能有效地控制灰尘扩散。

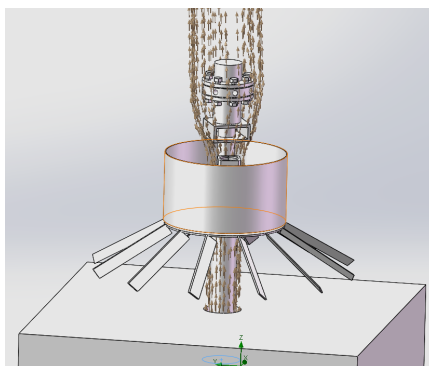


Figure 21. Vortex-free airflow state
图 21. 无涡旋气流状态

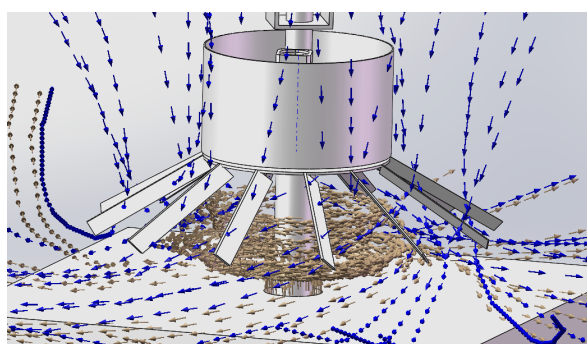


Figure 22. Generate a vortex airflow state
图 22. 产生涡旋气流状态

由图 23 水平截面速度矢量图和图 24 竖直截面速度矢量图所示，流场具有明显的切向旋转速度，这说明外部射流的旋转运动通过粘性切应力将旋转运动传递给了中部吸气流，使之旋转起来。

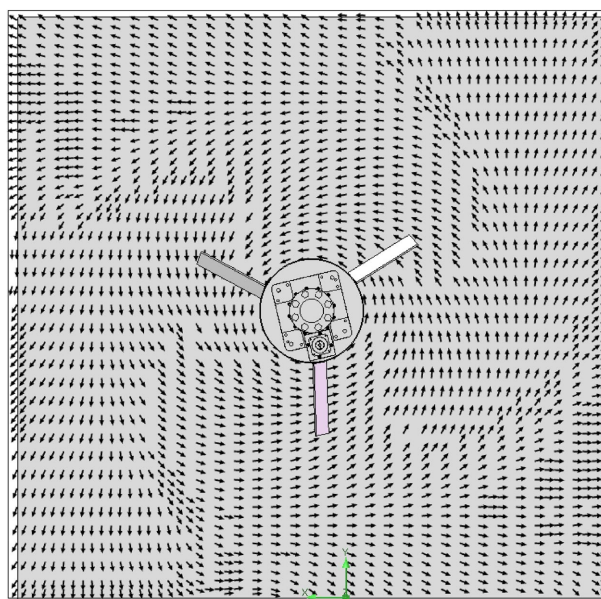


Figure 23. Horizontal section vector
图 23. 水平切面矢量

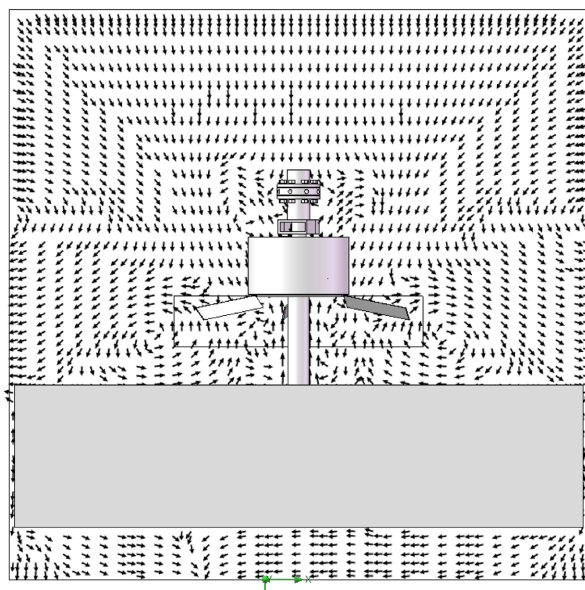


Figure 24. Vertical section vector
图 24. 竖直切面矢量

由图 25 竖直截面压力云图和图 26 竖直截面轴向速度云图可见，挂帘下方形成了稳定的正压涡旋气流区域，聚集粉尘。

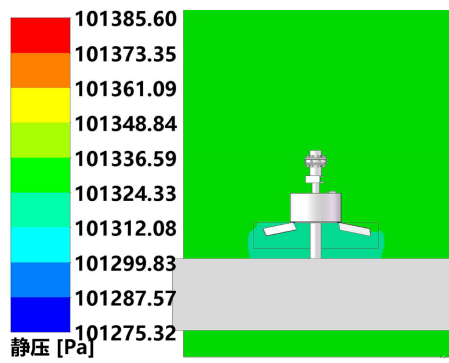


Figure 25. Pressure contour plot of vertical section
图 25. 竖直截面压力云图

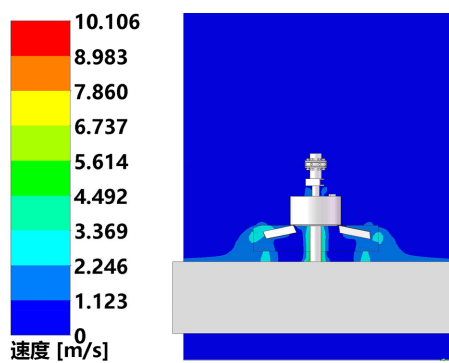


Figure 26. Axial velocity contour plot of vertical section
图 26. 竖直截面轴向速度云图

7. 总结

本文针对开放性尘源的污染控制难题,提出了一种基于主动式旋转挂帘的涡旋气流控尘新方法。该方法的核心在于,通过驱动柔性挂帘高速旋转,基于流体力学中的兰金涡原理,人为地在挂帘中心轴线区域诱导产生一个稳定的负压区。

本装置通过旋转在空间内主动生成一个负压体,能够从三维方向上将粉尘“包裹”并吸入,尤其对低风速、无组织扩散的细微粉尘具有更强的主动捕集能力,有效克服了传统吸捕技术“有风速、无风量”或有效作用距离短的弊端。

在安全性与适应性方面,无高速喷射气流,避免了传统吹吸式气流组织可能引起的二次扬尘。柔性挂帘结构简单,对工艺设备操作干扰小,易于围绕复杂形状的尘源进行布置或集成。

综上所述,基于旋转挂帘产生涡旋气流的控尘技术,原理清晰、设计可控,在捕集效率、能效和适应性方面展现出传统方法所不具备的潜力,为工业粉尘的高效、精准控制提供了一种创新且富有前景的技术路径。(不同挂帘数量、不同挂帘桨距角、不同挂帘挥舞角、不同挂帘转速等变量以及部分内部机理在后续研究中继续,这里将不再展开)

参考文献

- [1] 李亚行. 采煤机负压-喷雾降尘装置设计优化及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2025.
- [2] 侯晋. 综采面高效旋流雾化喷嘴及喷雾降尘特性研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [3] 史光亮. 煤矿回风巷道粉尘运移规律分析及喷雾控尘技术研究[J]. 陕西煤炭, 2026, 45(2): 63-69.
- [4] 李亚行, 闫红红, 郑贺, 等. 新型负压-喷雾装置雾化特性与降尘性能研究[J]. 煤矿安全, 2026, 57(1): 209-217.
- [5] 福建省新华都工程有限责任公司. 一种无缝贴合潜孔钻机防尘罩[P]. 中国专利, 201810041646.2. 2020-04-24.
- [6] 戴刚. 一种潜孔锤钻进的潜孔锤钻机[P]. 中国专利, 202120364282.9. 2021-10-15.
- [7] 曹国智, 赵鹏. 基于 CFD 的道路清扫车吸尘盘结构参数分析研究[J]. 数字制造科学, 2025, 23(1): 16-20.
- [8] 李路阳, 关红艳, 李勇. 基于 CFD 的扫路车吸尘盘吸尘性能分析及结构优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(3): 99-104, 116.
- [9] 朱丽红, 黄勇, 殷琨, 等. 旋风式反循环钻头结构设计及反循环效果分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2752-2758.
- [10] 林爱晖, 李永存. 利用人造龙卷风控制有害物扩散的研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 126-130.
- [11] 郭瑞雪, 王鹏程, 周司维, 等. 可持续性涡旋的产生与测量[J]. 物理实验, 2020, 40(5): 44-49.
- [12] 荆德吉, 刘绍航, 刘鸿威, 等. 诱导气流影响下微雾隔尘技术研究及应用[J/OL]. 安全与环境学报: 1-10. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=JITITmCwHjKZzNlsgJB_lFsaF-0Q586i9O-Tlm-LSihg4S899zMI5U_SLw2zipKIYXalYcNL0r5X5Seuwwblk3tG10nAnSuH9UXpgEPKOAqQCA-K4ntgFn1M2XuK1TL3UI3XKmNwucndQz-11pvt5rFgfEDX0wQhbenMhHIT3Gag=&uniplatform=NZKPT, 2026-03-06.
- [13] 裴凯强. 煤矿工作面通风系统参数及控尘优化研究[J]. 能源与节能, 2025(10): 135-137.
- [14] 毋阳阳. 综掘巷道风幕协同控尘体系构建及应用[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(11): 198-200.
- [15] 杨阳. 双旋流风幕系统控尘机制及临界参数优化[J]. 采矿技术, 2025, 25(6): 304-310.