

# 煤矿胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术

马明星<sup>1,2</sup>, 荆德吉<sup>1,2</sup>, 张 天<sup>1,2</sup>, 葛少成<sup>3</sup>, 刘鸿威<sup>1,2</sup>, 蒋 卓<sup>1,2</sup>, 张 强<sup>4</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 3. 太原理工大学 安全与应急管理学院, 山西 太原 030024; 4. 辽宁铁法能源有限责任公司 大兴煤矿, 辽宁 铁岭 112710)

**摘 要:** 胶带转载点粉尘危害与治理是实现煤矿高效、安全、清洁生产的重要问题之一。为解决转载点粉尘污染问题, 降低转载点粉尘危害, 根据旋流卷吸理论, 提出胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术。该技术是在竖直设立的落料管侧壁上安设一定数量和射流角度的进风口, 抽风口设置在落料管正上方。工作原理是落料管侧壁射入的风流遇到侧壁改变方向, 进风口射流相互作用下, 在落料管内形成向上流动的旋流, 抽风口负压牵引旋流携带粉尘流入除尘器, 实现粉尘净化。通过建立高度仿真的3D实体模型和搭建胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术试验平台, 采用数值模拟和试验测试相结合对转载点内风流分布、粉尘运移分布进行研究。数值模拟和试验测试中在落料管4个侧壁上分别设有8个倾斜向上且与水平面夹角为10°的进风口, 导料槽上设有4个进风口, 进风口朝向与下级胶带上粒子释放位置的圆相切。根据旋流卷吸理论得出: 落料管上进风风速越大, 落料管边界与中心压力差越大, 对粉尘的聚集效果越好。模拟结果得出: 多径向旋流卷吸除尘技术最佳进风速度为8 m/s, 此时可收集下落过程中粒径小于50 μm的粉尘和煤料与下级胶带撞击产生的粒径小于30 μm的粉尘。对比试验中下落前后煤料分散度得出: 除尘技术应用后下级胶带上煤料中粒径小于50 μm的颗粒占比减小47.96%, 粒径小于5 μm的颗粒减小44.62%, 降低煤料中有害颗粒的占比; 通过测定导料槽两端及入料口处粉尘质量浓度, 试验确定多径向旋流卷吸除尘技术最佳进风速度为8 m/s, 此时, 导料槽左右两端及入口处粉尘质量浓度最低, 除尘效率分别为97.71%和99.92%, 转载点整体的除尘效率可达95%以上。证明转载点多径向旋流卷吸除尘技术可以解决转载点粉尘污染难题, 改善转载点处工作环境。

**关键词:** 胶带转载点; 粉尘; 多径向旋流卷吸除尘技术; 分散度; 除尘效率

**中图分类号:** TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)11-4261-08

## Multi-radial cyclone suction dust removal technology at coal mine belt transfer points

MA Mingxing<sup>1,2</sup>, JING Deji<sup>1,2</sup>, ZHANG Tian<sup>1,2</sup>, GE Shaocheng<sup>3</sup>, LIU Hongwei<sup>1,2</sup>, JIANG Zhuo<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>4</sup>

(1. College of Safety Science and Technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin 123000, China; 3. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. Daxing Coal Mine, Liaoning Tiefert Energy Co., Ltd., Tieling 112710, China)

**Abstract:** The dust hazard and management at the belt transfer point is one of the most important issues in achieving efficient, safe and clean production in coal mines. To address the problem of dust pollution at the transfer point and to reduce the dust hazard at the transfer point, a multi-radial cyclone suction dust removal technology is proposed for the belt transfer point based on the cyclone suction theory. The technology is based on a certain number of inlets and jet angles on the

收稿日期: 2023-03-30 修回日期: 2023-04-03 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0114

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52204216); 辽宁省自然科学基金资助项目(2020-MS-304); 辽宁省教育厅科学研究经费重点资助项目(LJKZ0323)

作者简介: 马明星(1995—), 男, 辽宁阜新人, 讲师, 博士。E-mail: mamingxing1995@163.com

通讯作者: 荆德吉(1984—), 男, 辽宁抚顺人, 教授, 博士。E-mail: jingdeji@lntu.edu.cn

引用格式: 马明星, 荆德吉, 张天, 等. 煤矿胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4261-4268.

MA Mingxing, JING Deji, ZHANG Tian, et al. Multi-radial cyclone suction dust removal technology at coal mine belt transfer points[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4261-4268.



移动阅读

side wall of the vertical drop pipe, with the suction outlet set above the drop pipe. The principle of operation is that the incoming air-flow from the side wall of the drop pipe changes direction when it meets the side wall and the inlet jets interact with each other to form an upward flowing cyclone in the drop pipe. A simulated 3D solid model and a test platform for multi-radial cyclone suction dust removal at the belt transfer point are built. A combination of numerical simulations and experimental tests is used to study the distribution of air-flow and dust transport in the transfer point. In the numerical simulation and experimental tests, eight air inlets are provided on each of the four-side walls of the drop pipe at an angle of  $10^\circ$  to the horizontal, and four-air inlets are provided on the guide chute, with the air inlets oriented tangential to the circle of the particle release position on the lower belt. According to the cyclonic suction theory, the greater the inlet air velocity on the drop pipe, the greater the pressure difference between the boundary of the drop pipe and the center, and the better the effect on dust collection. The simulation results show that the best inlet air speed for the multi-radial cyclone suction technology is 8 m/s, where the dust of less than  $50\ \mu\text{m}$  and the dust of less than  $30\ \mu\text{m}$  from the impact of the coal with the lower belt can be collected during the drop. Comparing the dispersion of the coal before and after falling in the test, it is concluded that the proportion of particles smaller than  $50\ \mu\text{m}$  in the coal on the lower belt is reduced by 47.96%, and the proportion of particles smaller than  $5\ \mu\text{m}$  is reduced by 44.62% after the application of the dust removal technology. It reduces the proportion of harmful particles in the coal. By measuring the dust concentration at the ends of the guide chute and at the inlet, the test determines that the best inlet air speed for the multi-radial cyclone suction dust removal technology is 8 m/s. At this time, the dust concentrations at the left and right ends of the guide chute and at the inlet are the lowest, and the dust removal efficiency is 97.71% and 99.92% respectively, and the overall dust removal efficiency at the transfer point can reach more than 95%. The study proves that the multi-radial cyclone suction dust removal technology at the transfer point can solve the problem of dust pollution, improve the working environment.

**Key words:** belt transfer point; dust; multi-radial cyclone suction dust removal technology; dispersion; dust removal efficiency

2021 年全国共报告职业病新病例 15 407 例,其中职业性尘肺病 11 809 例,占总数的 76.6%。职业性尘肺病病例中,煤炭行业占比最大,因此,煤炭行业粉尘防治尤为重要。胶带转载点一贯是煤矿粉尘治理的重点和难点<sup>[1-4]</sup>,转载点产生的粉尘污染范围最广,所接触的人员最多,严重危害工人的健康及破坏周围生态环境<sup>[5-7]</sup>。

国内外学者开展了诸多关于转载点粉尘防治方法的研究。DE Almeida Leão<sup>[8]</sup>提出了一种仅由自由落体物质驱动的尘粒传播模型,通过使用类似空气-灰尘混合流体的模型,得到一个适合于露天场地中航空尘埃传播的数学模型,确定了 4 个流型区域,并显示了在受到外力时可能成为灰尘扩散源的区域的概念指标。文献<sup>[9]</sup>将风幕除尘技术应用到大豆转运过程中,采用数值模拟对影响风幕粉尘控制系统性能的主要因素进行了研究,确定了排气压力比和风幕出风速度对抑尘效率的影响。梁钦<sup>[10]</sup>根据带式输送机转载点实际情况设计了负压湿式除尘装置,利用高速旋转的叶轮产生相对于大气压力的负压,将含尘空气吸入装置内部,然后通过喷嘴喷出的水雾进行有限空间内的降尘。但无法将粉尘全部吸入装置内部,处理后的粉尘易形成泥浆附着在风筒壁上。薛文涛等<sup>[11]</sup>在通过搭建模拟转载点运煤试验平台对喷雾降尘技

术参数进行确定,并在井下转载点进行了现场试验,降尘效率可达 90%。但在井下难以达到气动喷雾技术最佳参数且气动喷雾喷嘴极易堵塞。周伟<sup>[12]</sup>将直落刮板输送机巷道改为  $45^\circ$  倾角的转折刮板输送机巷道,每个转折点处物料会得到缓冲换向,物料下落速度降低,达到控制粉尘浓度的目的,但降低程度有限。文献<sup>[13]</sup>提出了复合直弧刮板输送机巷道抑尘技术,该技术可降低刮板输送机巷道出口处的气流速度和粉尘质量浓度,与线性刮板输送机巷道相比,粉尘质量浓度最多可降低 70% 以上,但无法杜绝粉尘产生。

因此,笔者提出胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术,通过数值模拟方法探究转载点内气流流动和粉尘运动情况;通过搭建多径向旋流卷吸除尘技术试验平台,测试除尘技术的应用效果,确定多径向旋流卷吸除尘技术可有效地治理胶带转载点粉尘污染。

## 1 多径向旋流卷吸袋式除尘技术

### 1.1 旋流卷吸除尘理论

利用图 1 中的装置在落料管中形成旋流,旋流流动方向由下向上,假设旋流的角速度  $\omega \neq 0$ ,忽略质量力和  $v_z$ ,采用欧拉方程求解涡核内空气速度和压力,落料管中旋流水平截面分布如图 1 所示。任意点速度与压力间关系如下:

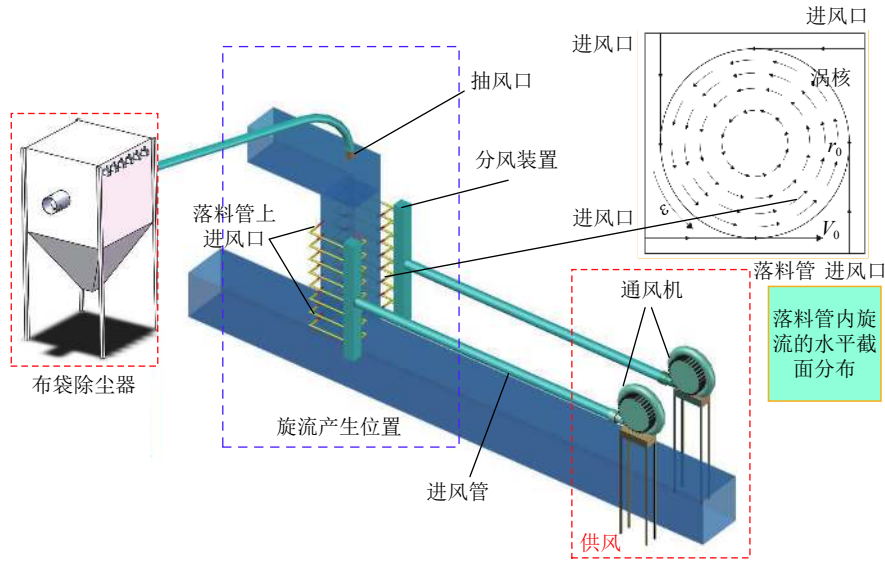


图 1 多径向旋流卷吸除尘装置示意

Fig.1 Schematic diagram of multi-path swirl entrainment dust removal device

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1)$$

其中,  $v$  为涡核内任意点的空气流速, m/s;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为  $v$  在空间直角坐标系中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度分量, m/s;  $p$  为涡核内任意点的压力, Pa,  $\omega$  为旋流的角速度, rad/s。对于涡核内任意点有  $v_x = -\omega y$ ,  $v_y = \omega x$ , 则有

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \omega, \quad \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\omega, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

即

$$\omega^2 x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \omega^2 y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

式 (3) 两个方程分别乘以  $dx$ 、 $dy$ , 然后积分得

$$p = \frac{\rho\omega^2}{2} (x^2 + y^2) + C = \frac{\rho\omega^2}{2} r^2 + C = \frac{\rho v^2}{2} + C \quad (4)$$

式中,  $x$ 、 $y$  为任意点在以涡核为原点的平面直角坐标系中的坐标;  $r$  为任意点与涡核的距离, 其中,  $r^2 = x^2 + y^2$ , m;  $C$  为常数;  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>。

设  $r_0$  为涡核边界半径, m;  $v_0$  为涡核边界处空气流速, m/s;  $p_0$  为涡核边界处压力, Pa。当  $r=r_0$ 、 $p=p_0$ 、 $v=v_0$  时, 则有

$$p_0 = \frac{\rho v_0^2}{2} + C, \quad C = p_0 - \frac{\rho v_0^2}{2} \quad (5)$$

将  $C$  代入式 (4) 得

$$p = \frac{\rho v^2}{2} + p_0 - \frac{\rho v_0^2}{2} = p_0 + \frac{1}{2} \rho (v^2 - v_0^2) \quad (6)$$

落料管水平截面中涡核内压力  $p$  随风流速度  $v$  变化, 风流速度从涡核中心向边界线性增加。涡核内任意点的风流速度  $v < v_0$ ,  $p < p_0$ 。涡流内风流速度与

压力为二次函数关系, 压力沿半径呈抛物线状增大, 涡旋中心压力小于涡旋边界压力, 涡旋中心具有吸引作用。从式 (6) 推断出涡核边界处的速度  $v_0$  越大, 涡流中心处的压力与边界处压力差越大, 即旋流中心吸引效应越强。

### 1.2 多径向旋流卷吸除尘机理

胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术是利用旋流中心与边界的压力差产生的吸引作用与负压抽尘相结合研发而成。在落料管侧壁上分别设置具有射流角度的进风口, 落料管正上方设置抽风口。多个进风口射出的风流遭落料管壁拦截改变方向, 相互作用下在落料管中形成旋流场。旋流在抽风口负压作用下向上流动。旋流会降低物料下落速度, 降低物料与壁面和胶带碰撞后的粉尘产生量, 物料粒径越小受旋流影响越大, 从源头降低粉尘产生。物料下落过程中产生的粉尘被旋流吸引向中心, 粉尘跟随旋流进入布袋除尘器被净化。多径向旋流卷吸除尘装置如图 1 所示。

落料管中下落的煤料与向上运动的旋流相遇, 大粒径煤料保持原有下落行为, 小于某一粒径值的颗粒会被旋流聚集并进入到抽风口, 称该粒径值为界限粒径 ( $D_j$ ), 即下落的颗粒中, 粒径大于  $D_j$  时颗粒下落, 小于  $D_j$  时颗粒上升。界限粒径 ( $D_j$ ) 受风流影响, 不同进风速度有不同的界限粒径 ( $D_j$ )。

## 2 除尘技术数值模拟

### 2.1 数学模型

该技术是对设有防护罩的转载点内进行定点通风和抽风, 转载点内旋流为大雷诺数湍流, 需建立湍

流计算模型,在众多模型中,RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型是使用重整化群理论方法推出,在  $\varepsilon$  方程中引入附加生成项,它更多地考虑旋流和湍流中的涡效应,因此更适用于计算转载点内的旋流。结合 COMSOL Multiphysics 软件中粒子追踪模块对转载点内的粉尘运动呈现。流场连续性方程<sup>[14]</sup>为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (7)$$

对于稳态、不可压缩气体、无源项,RNG  $k-\varepsilon$  模型<sup>[15]</sup>可以写成

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (9)$$

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon} \rho} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (10)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3}{1 + \beta \eta^3} \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

式中, $k$ 为湍流脉动动能, $J$ ; $\varepsilon$ 为 $k$ 的耗散率; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数,这里取 $C_{1\varepsilon}=1.42$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.68$ 、 $C_{3\varepsilon}=1.72$ 、 $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.393$ ; $\mu_{\text{eff}}=\mu+\mu_t$ , $\mu$ 为风流黏度, $\mu_t$ 为湍流黏度, $\mu_t=\rho_c \mu(k^2/\varepsilon)$ ; $G_k$ 为由于平均速度引起的湍动能 $k$ 的产生项; $G_b$ 为由于浮动引起的湍流动能 $k$ 的产生项; $\hat{v}=\mu_{\text{eff}}/\mu$ ;经验常数 $C_v=100$ ; $R_\varepsilon$ 为平均应变率对 $\varepsilon$ 影响的附加项; $\eta=S_k/\varepsilon$ 为应变或者平均流时间尺度与湍流时间尺度之比;经验常数取 $\eta_0=4.38$ 、 $\beta=0.015$ 、 $C_\mu=0.0845$ 。

粉尘受重力和浮力作用,假设粉尘颗粒为规则形状球体,控制方程采用传统重力和浮力方程,根据质点受力平衡原理<sup>[16-18]</sup>,拉格朗日坐标系中粉尘运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = F_D(u-v) + \frac{g_i(\rho_g - \rho)}{\rho_p} + F \\ F_D = \frac{3C_D d_p \rho |u-v|}{4\rho_p d_p} m_p (u-v) \\ C_D = \frac{24\mu}{\rho |u-v| d_p} + 4.5 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $F$ 为其他应力, $N$ ; $F_D$ 为曳力, $N$ ; $C_D$ 为阻力系数; $m_p$ 为颗粒质量, $\text{kg}$ ; $v$ 、 $u$ 为涡核内任意点的风流和粒子速度, $\text{m/s}$ ; $g$ 为重力加速度, $\text{m/s}^2$ ; $\rho_g$ 为空气密度, $\text{kg/m}^3$ ; $\rho_p$ 为颗粒密度, $\text{kg/m}^3$ ; $d_p$ 为粒子直径, $\text{m}$ ; $\mu$ 为气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

## 2.2 几何模型

根据实际胶带转载点按比例 1:1 建立几何模型,

导料槽尺寸 6 m×1 m×1 m,落料管 1 m×1 m×2.9 m,入料口 3 m×1 m×1 m,模型高 4.8 m。抽风口半径为 0.2 m。落料管侧壁共设置 32 个进风口,进风口间距 0.3 m,位于侧壁边缘。导料槽上设置 4 个进气口。采用软件中的常规网格划分,网格统计信息见表 1。带有网格的物理模型如图 2 所示。

表 1 网格统计信息

Table 1 Mesh statistical information

名称	网格数量	名称	网格数量
网格顶点	433 063	四边形	3 740.000 00
四面体	1 285 042	边单元	4 390.000 00
金字塔	12 214	顶点单元	335.000 00
棱柱	382 252	最小单元质量	0.088 54
三角形	87 870	平均单元质量	0.717 40

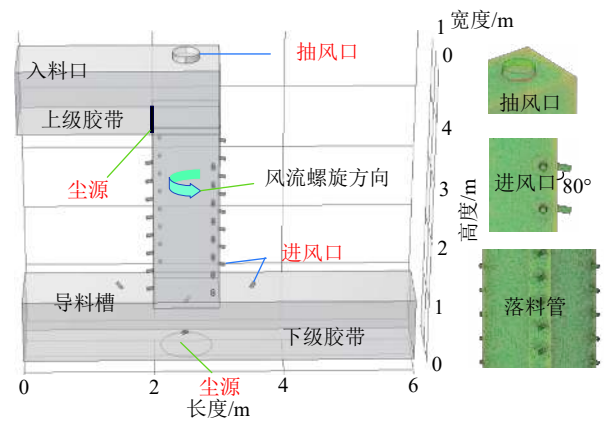


图 2 物理模型及网格划分

Fig.2 Physical model and mesh division

## 2.3 边界条件

矿井中 2 条不同巷道间的煤料转运或选煤厂楼层间的煤料转载均需要对转载点进行密闭,因煤料转运距离短,大多采用垂直形状落料管。入料口与导料槽两端开口一般设有挡尘帘,理论上转载点内部与外界处于隔断状态,转载点内流场不受外界风速影响。转运点粉尘主要由胶带机头煤料喷射和下落过程中诱导气流夹带和碰撞胶带形成。粉尘沿煤料接触挡尘帘时产生的缝隙向外扩散,因此,将入料口和导料槽开口设定为开放边界,允许受转载点内部压力变化引发的气流交换。粉尘间碰撞发生在落料管内不会对粉尘向外扩散造成影响,粉尘间凝结效应视为形成大粒径颗粒。上级胶带前端和下级胶带表面作为粒子释放位置,分别模拟煤料喷射和下落过程及煤料撞击下级胶带形成的粉尘。胶带运行速度为 2 m/s,相关物理参数见表 2。

表 2 边界条件设置  
Table 2 Boundary condition setting

名称	参数	数值
进风口	落料管上进风速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	3~10 (取整)
	湍流强度	0.1
介质	空气密度 $(kg \cdot m^{-3})$	1.29
	连续相的动态黏度/Pa	$1.8 \times 10^{-5}$
	气体分子扩散系数 $(m^2 \cdot s^{-1})$	$2 \times 10^{-5}$
出口	压力/Pa	-10
步长	时间/s	1
粒子	平均粒子质量/kg	$2 \times 10^{-10}$
	颗粒质量的标准偏差/kg	$5 \times 10^{-10}$
求解器	风流场	稳态
	粒子轨迹	瞬态

### 2.4 气流数值模拟结果分析

风流流线如图 3 所示, 落料管内流线螺旋向上, 即落料管内产生向上流动的旋流。导向槽右端有一个涡流, 涡流范围随着  $V$  增大而减小, 入料口处形成流向抽风口的风流, 转载点内风流均流向抽风口。转载点内流速分布如图 4 所示, 落料管中形成多径向旋流流速大于入料口与导料槽内的风流流速, 多径向旋流竖直向上流动进入到抽风口。

### 2.5 粒子运动规律

粉尘运动模拟结果如图 5 所示, 粒子粒径为  $1 \sim 78.1 \mu m$ , 与粉尘粒径极为接近, 将其认为粉尘粒子。从图中可知, 随着  $V$  增大, 落料管中下落粉尘量减少,

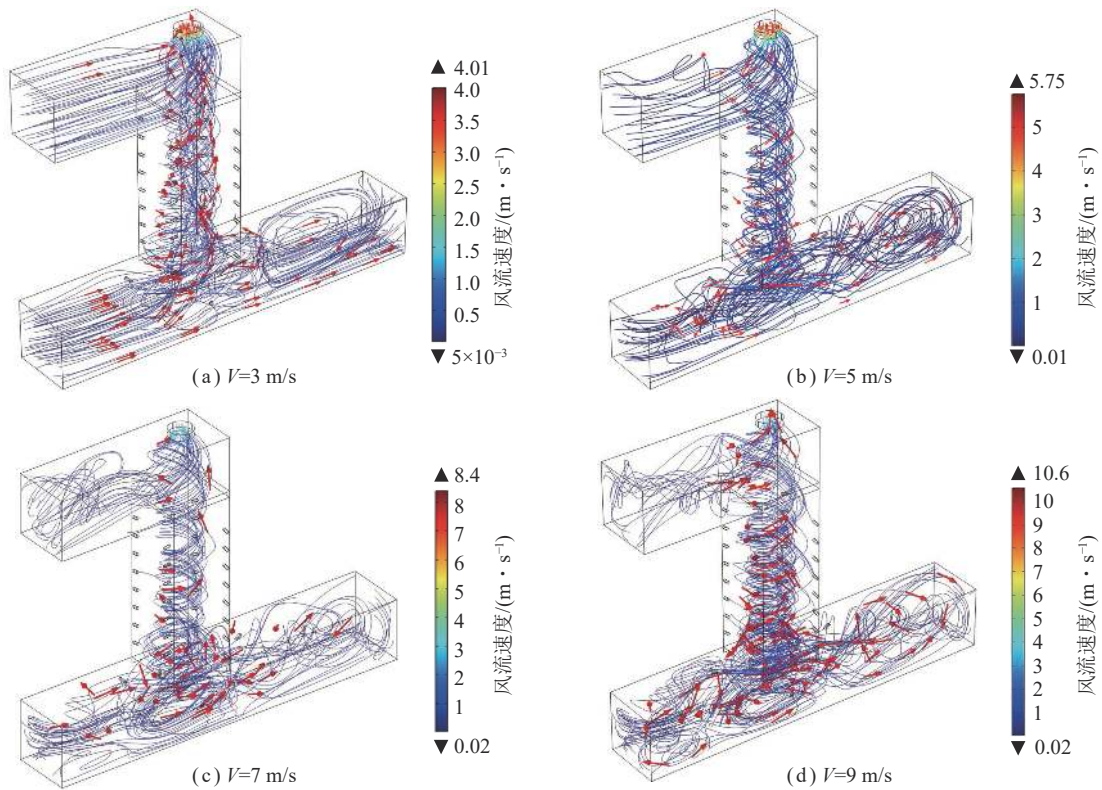


图 3 流场流线

Fig.3 Streamline diagram of flow field

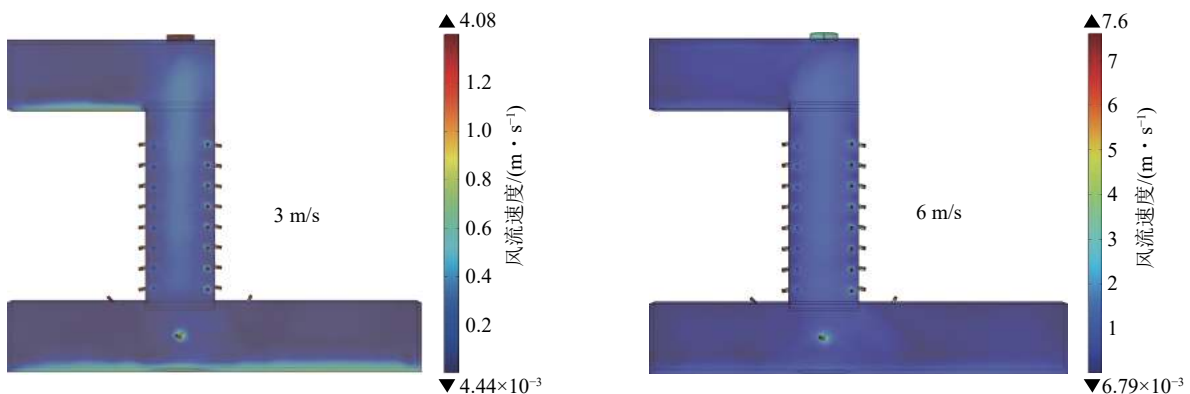


图 4 风流速度整体分布

Fig.4 Overall wind speed distribution

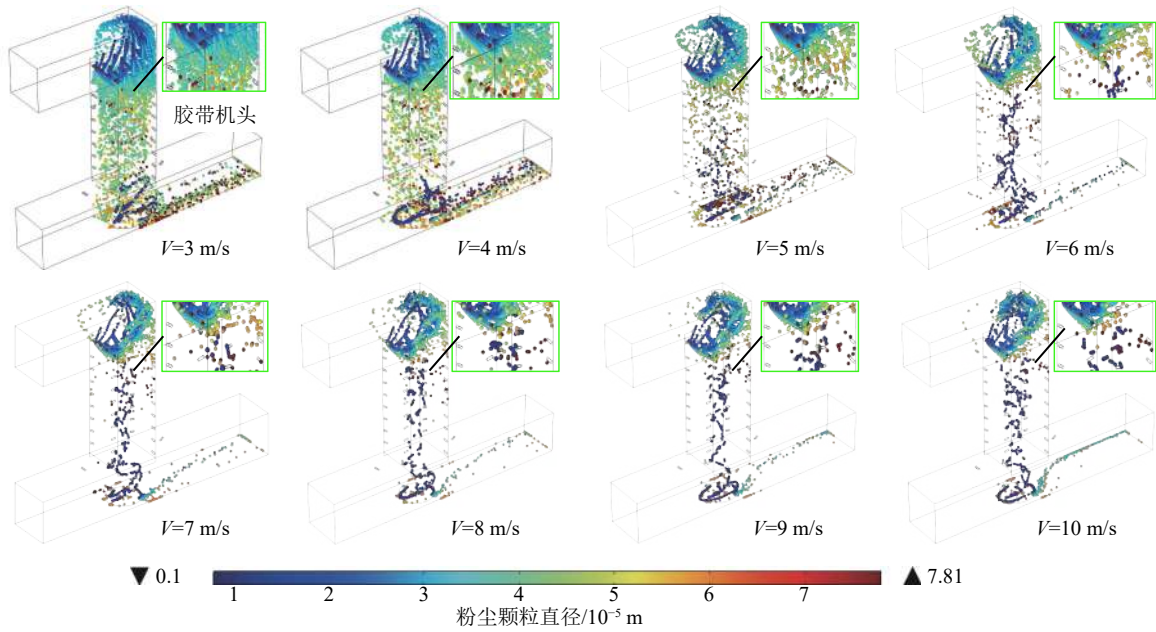


图 5 粉尘粒径及分布

Fig.5 Dust particle size and distribution

下落粉尘粒径范围减少,即  $D_j$  增大。

$D_j$  结果见表 3,  $D_j$  的最小值为 32  $\mu\text{m}$ ,  $D_j$  随  $V$  增大而增大,当  $V$  在 7~10 m/s 时,  $D_j$  在 52~55  $\mu\text{m}$ , 相差不大。当  $V$  达到 8 m/s 时, 胶带撞击产生的粉尘中

粒径小于 30  $\mu\text{m}$  的会受落料管中多径向旋流控制, 向上运动的粉尘全部进入到抽风口。当  $V$  大于 9 m/s 时, 有粉尘脱离旋流控制运动到入料口, 因此, 确定  $V=8$  m/s 为多径向旋流卷吸除尘技术的最佳进风风速。

表 3 界限粒径  $D_j$  统计结果

Table 3 Statistical results of limit particle size  $D_j$

$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_j/\mu\text{m}$	32	34	38	47	52	53	54	55

### 3 多径向旋流卷吸除尘技术试验

#### 3.1 多径向旋流卷吸除尘技术试验平台

试验中选用粒径小于 2 cm 煤料, 以 5 kg/min 均匀地向入料口输送。待抽风风机和胶带运行稳定后开始试验。通过对比除尘技术应用前后相同时间相同位置处的粉尘质量浓度来测定除尘效率, 粉尘质量浓度 ( $c$ ) 测量点 1 号和 2 号位于导料槽两端, 距开口 30 cm, 胶带上方 20 cm 处, 测量点 3 号位于入料口开口处。落料进行 2 min 后开始试验, 每组实验重复 3 次, 以避免数据的偶然性误差, 测量数据平均值作为最终测试结果, 结果见表 4, 试验平台如图 6 所示。

#### 3.2 旋流观测试验

采用控制变量法测试多径向旋流卷吸袋式除尘技术的流场特征, 通过点燃烟饼产生的烟流来观测风流旋转效果。在试验中, 烟饼放置在转载点中心线与胶带交点, 抽风口的抽风速度为 4 m/s。落料管壁上进风风速  $V=0$ , 即试验中不采用除尘技术。点燃烟饼,

表 4 粉尘质量浓度测量结果

Table 4 Measurement results of dust mass concentration

$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			除尘效率/%		
	1号	2号	3号	1号	2号	3号
0	148.86	109.65	0	—	—	—
3	20.47	4.61	0	86.25	95.79	100
4	18.89	3.47	0	87.31	96.83	100
5	16.58	3.42	0	88.86	96.88	100
6	13.24	1.69	0	91.10	98.45	100
7	8.79	0.09	0	94.09	99.91	100
8	3.41	0.08	0	97.77	99.92	100
9	4.39	0.08	0.01	97.71	99.92	—
10	5.16	0.08	0.02	96.53	99.92	—

烟雾流动如图 7 所示。

通过观察不同  $V$  下烟雾的流动状态, 判断流场的旋转效果。  $V=0$  时, 烟气垂直上升。实验结果表明,



图 6 试验平台

Fig.6 Experimental platform

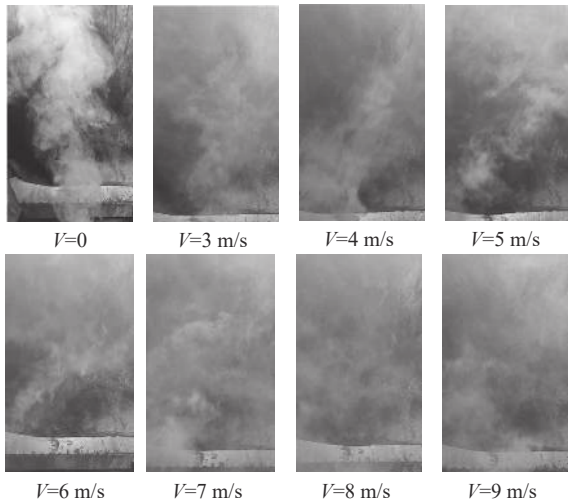


图 7 风流试验效果

Fig.7 Effect of wind flow experiment

当  $V > 0$  时, 烟雾在落料管中形成向上流动旋流。随着  $V$  增大, 烟雾偏转程度越明显, 烟雾在落料管中的螺旋上升效果越好, 试验风流特征与数值模拟风流特征结果一致。当  $V > 7$  m/s 时, 烟雾刚刚产生就被吹散, 试验现象越模糊, 无法通过其观测流场状态。

### 3.3 除尘效率试验

不同进风风速下的试验现象如图 8 所示, 随  $V$  增大, 落料管中出现粉尘分布边界, 边界上方存在大量粉尘, 边界下方则极少, 且该分布边界位置随  $V$  增大而增高, 这与粉尘颗粒运动模拟结果一致。

对下落后煤料分散度的测量结果如图 9 所示。除尘技术应用后, 煤料中粒径小于  $50 \mu\text{m}$  占比由 98.96% 降低到 51.00%, 小于  $5 \mu\text{m}$  的占比由 88.12% 降到 43.50%, 粒径大于  $50 \mu\text{m}$  的占比由 1.31% 增大到 49.00%, 说明多径向旋流卷吸除尘技术对下落煤料中粒径小于  $50 \mu\text{m}$  的粉尘, 尤其是小于  $5 \mu\text{m}$  的粉尘收集效果最好; 煤料转载后, 其中小于  $5 \mu\text{m}$  粉尘的含量大幅减小, 从而降低粉尘对人类的危害。

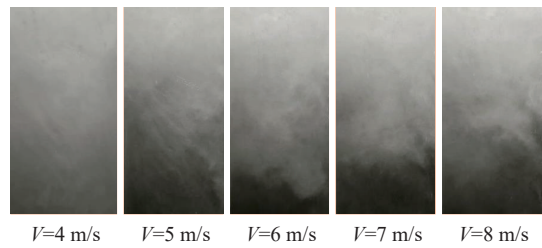


图 8 落煤试验现象

Fig.8 Coal fall test phenomenon

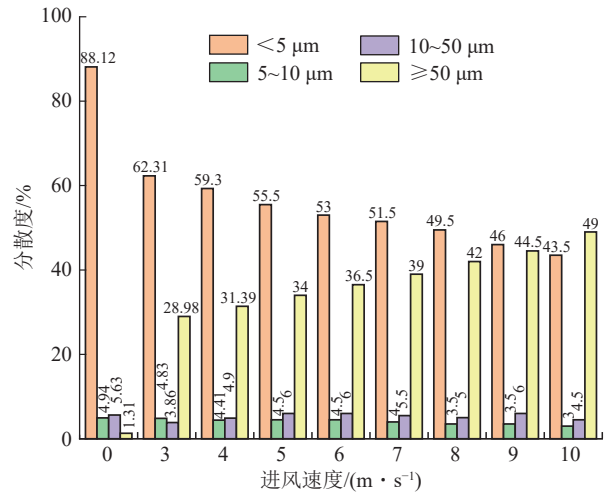


图 9 粉尘分散度测量结果

Fig.9 Dust dispersion measurement results

从表 4 粉尘质量浓度测量结果可知,  $V=0$  m/s 时, 导料槽左端 1 号的  $C_1$  高于右端 2 号的  $C_2$ , 均达  $100 \text{ mg/m}^3$  以上, 原因是胶带运行在表面形成一层跟随胶带运动的牵引流场, 粉尘受该流场作用向左扩散增大, 因此,  $C_1 > C_2$ 。进风速度  $V$  在  $0 \sim 8$  m/s 内, 3 号的  $C_3=0$ , 说明在旋流卷吸和抽风口负压作用下, 无粉尘从入料口处向外扩散;  $V > 8$  m/s 时,  $C_3 > 0$ , 说明此时有粉尘脱离旋流控制, 运动到入料口并向外形成扩散。该结果与数值模拟结果一致。

当  $V$  从 3 m/s 增大 10 m/s 过程中, 测点 2 处  $C_2$  随  $V$  增大而降低。测点 1 处  $C_1$  随  $V$  的增大呈先减小后增大规律, 当  $V=8$  m/s 时,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  均为最低。由此确定  $V=8$  m/s 为多径向旋流卷吸除尘技术最佳进风风速, 该结果与数值模拟结果一致, 此时测点 1 和测点 2 的集尘效率分别为 97.77% 和 99.92%。

## 4 结 论

(1) 在落料管侧壁与上方分别设置进风口和抽风口的方式可以在落料管中形成向上流动的多径向旋流, 根据旋流卷吸理论落料管上进风风速越大, 落料管边界与中心压力差越大, 对粉尘的聚集效果越好。

(2) 模拟结果显示, 多径向旋流卷吸除尘技术最佳

进风速度为 8 m/s, 此时可收集下落过程中小于 50  $\mu\text{m}$  的粉尘和下级胶带产生的小于 30  $\mu\text{m}$  的粉尘。

(3) 对比下落前后煤料分散度得出: 除尘技术应用后下级胶带上煤料中小于 50  $\mu\text{m}$  的颗粒占比减小 47.96%, 小于 5  $\mu\text{m}$  的颗粒减小 44.62%, 降低煤料中有害颗粒的占比。

(4) 通过粉尘质量浓度测定结果得知: 导料槽两端及入料口处粉尘质量浓度最低时, 进风速度为 8 m/s, 即最佳进风速度, 与数值模拟结果一致。此时, 导料槽左右两端除尘效率分别为 97.71% 和 99.92%, 转载点整体的除尘效率可达 95% 以上。

### 参考文献(References):

- [1] WAN D, HAN Z, YANG J, et al. Heavy metal pollution in settled dust associated with different urban functional areas in a heavily air-polluted city in North China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(11): 1119–1133.
- [2] 蒋仲安, 杨斌, 张国梁, 等. 高原矿井掘进工作面截割粉尘污染效应及通风控尘参数分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2146–2157.  
JIANG Zhong'an, YANG Bin, ZHANG Guoliang, et al. Analysis of dust pollution effect of cutting dust and ventilation control parameters at the heading face in plateau mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2146–2157.
- [3] 荆德吉, 魏德宁, 马明星, 等. 胶带运输巷粉尘运移及气动喷雾降尘技术[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(11): 93–99.  
JING Deji, WEI Dening, MA Mingxing, et al. Study on dust movement in belt transportation roadway and pneumatic spray dust control technology[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(11): 93–99.
- [4] 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 Ronghua, ZHU Biyong, WANG Pengfei, 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.
- [5] 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 Tian, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Supersonic siphon suction water aerodynamic atomization in dust removal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3912–3921.
- [6] 国家卫生健康委. 2020 年全国职业病报告[J]. *职业卫生与应急救援*, 2021, 39(4): 381.  
National Health Commission. The 2020 national occupational disease report[J]. *Occupational Health and Emergency Rescue*, 2021, 39(4): 381.
- [7] 乔燕鹏. 带式输送机转载点缓冲除尘装置设计应用[J]. *机械工程与自动化*, 2021(6): 195–196.  
QIAO Yanpeng. Design and application of belt conveyor transfer point buffer dust removal device[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2021(6): 195–196.
- [8] DE Almeida Leão R X, AMORIM L S, MARTINS, et al. A model for velocity streamlines of airborne dust particles spreading caused by free-falling bulk materials[J]. *Powder technology*, 2020, 371: 190–194.
- [9] LI Xiaochuan, ZHANG Mingrui, JIANG Yefeng, et al. Air curtain dust-collecting technology: Investigation of factors affecting dust control performance of air curtains in the developed transshipment system for soybean clearance based on numerical simulation[J]. *Powder Technology*, 2022, 396: 59–67.
- [10] 梁钦. 带式输送机转载点负压湿式除尘装置研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
LIANG Qin. Research on negative pressure wetting dustfall device in transfer point of belt conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [11] 薛文涛, 侯茂森, 霍中刚, 等. 带式输送机转载点气水喷雾降尘效果试验研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(7): 14–19.  
XUE Wentao, HOU Maosen, HUO Zhonggang, et al. Study on dust removing effect of air-water spraying nozzle at transfer point of belt conveyor[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(7): 14–19.
- [12] 周伟. 选煤厂转载点粉尘运动分析与转载溜槽结构研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2016.  
ZHOU Wei. Analysis of dust movement in coal preparation plant and Research on the structure of transfer chute[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [13] ZHANG Xinghua, WANG Haifeng, CHEN Xi, et al. Experimental study on dust suppression at transshipment point based on the theory of induced airflow dust production[J]. *Building and Environment*, 2019, 160: 106200–106210.
- [14] REN T, WANG Z, COOPER G. CFD modelling of ventilation and dust flow behavior above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system[J]. *Tunn Undergr Space Technol*, 2014, 41: 241–254.
- [15] 李宗翔, 顾润红, 张晓明, 等. 基于 RNG k- $\epsilon$  湍流模型的 3D 采空区瓦斯上浮贮移[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 880–885.  
LI Zongxiang, GU Runhong, ZHANG Xiaoming, et al. Simulation of gas migration in 3D goaf based on RNG k- $\epsilon$  turbulence model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 880–885.
- [16] CONNOLLY, BRIAN J, ERIC LOTH, et al. Shape and drag of irregular angular particles and test dust[J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 275–285.
- [17] XIE Y, CHENG W, YU H, et al. Microscale dispersion behaviors of dust particles during coal cutting at large-height mining face[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(27): 27141–27154.
- [18] SHARAF, OMAR Z, DIMITRIOS C, et al. Numerical investigation of nanofluid particle migration and convective heat transfer in microchannels using an Eulerian–Lagrangian approach[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 878: 62–97.