

# 基于 CFD-DPM 的空气幕协同排风罩增效除尘研究

丁厚成, 许婉萍, 邓权龙, 陈圳杨, 朱 强  
(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**以某机械厂打磨车间为研究对象,利用 Solidworks 软件建立带有空气幕协同排风罩除尘的打磨车间模型,基于气固两相流理论,采用计算流体力学离散颗粒模型(CFD-DPM)模拟分析空气幕送风速度、射流角度和射流宽度对除尘效率的影响,选取空气幕的最优参数;在此基础上,对比分析未开启排风罩、开启排风罩、同时开启排风罩与空气幕3种工况的风速分布、粉尘运移轨迹及粉尘质量浓度分布,探讨空气幕协同排风罩除尘的效果。结果表明:粉尘最大浓度、呼吸带粉尘浓度随空气幕送风速度、射流宽度的增大而减小,但不随空气幕射流角度的变化而变化;粉尘浓度随地面高度的增大先增后减,不同高度处粉尘浓度变化趋势基本一致;当空气幕射流宽度30 mm、射流角度30°、送风速度3 m/s时,通风除尘效果最佳,除尘效率高达94.2%。相比于仅开启排风罩,排风罩与空气幕协同作用下的除尘效率提高了38.8%,空气幕协同排风罩对车间除尘具有较好的增效作用。

**关键词:**打磨车间;金属粉尘;排风罩;空气幕;计算流体力学(CFD);离散颗粒模型(DPM);除尘;职业健康

中图分类号: X 965 文献标志码: A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.24037



## Research on Enhanced Dust Removal Using Air Curtain in Conjunction with Exhaust Hood Based on CFD-DPM

DING Houcheng, XU Wanping, DENG Quanlong, CHEN Zhenyang, ZHU Qiang

(School of Architecture Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Taking a mechanical factory's grinding workshop as the research object, a model of the grinding workshop equipped with a air curtain in conjunction with an exhaust hood for dust removal was established using Solidworks software. Based on the gas-solid two-phase flow theory, the computational fluid dynamics-discrete particle model (CFD-DPM) was adopted to simulate and analyze the influence of air curtain supply air velocity, jet angle and jet width on dust removal efficiency, thereby selecting the optimal parameters for the air curtain. On this basis, the wind speed distribution, dust migration trajectory and dust mass concentration distribution were compared and analyzed under three working conditions of not opening the dust extraction hood, opening the dust extraction hood, opening the dust extraction hood and air curtain. The effectiveness of dust removal using the air curtain in conjunction with the exhaust hood was explored. The results show that the maximum dust concentration and respiratory zone dust concentration decrease with the increase of the air velocity and the jet width of the air curtain, but do not change with variations in the jet angle of the air curtain. The dust concentration first increases and then decreases with the increase of height from the ground, showing a consistent trend at different heights. When the air curtain jet width is 30 mm, the jet angle is 30°, and the air velocity is 3 m/s, the ventilation and dust removal effect is

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2019A0052); 国家大学生创新创业项目(202410360045); 省级大学生创新创业项目(S202310360228)

作者简介: 丁厚成(1973—), 男, 安徽滁州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为安全技术与工程。

引文格式: 丁厚成, 许婉萍, 邓权龙, 等. 基于 CFD-DPM 的空气幕协同排风罩增效除尘研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(1):62-71.

the optimal, achieving a dust removal efficiency of up to 94.2%. Compared to operating the exhaust hood alone, the dust removal efficiency increases by 38.8% when the dust extraction hood and the air curtain work together, demonstrating that the air curtain in conjunction with the exhaust hood significantly enhances dust removal in the workshop.

**Keywords:** grinding workshop; metal dust; exhaust hood; air curtain; computational fluid dynamics (CFD); discrete particle model (DPM); dust removal; occupational health

金属打磨是机械制造过程中的 1 个关键环节, 是提高产品质量的重要步骤。但是, 金属打磨过程中, 尤其在磨削处理大型金属工件时会产生大量的金属粉尘 (主要成分为铝), 若处理不当, 会引发安全事故<sup>[1]</sup>, 严重影响员工生命健康及生产设备的安全运行。例如: 2019 年, 昆山某工厂发生较大金属粉尘爆炸事故, 致使多人伤亡<sup>[2]</sup>; 2022 年, 我国职业性尘肺病占全国各类职业病的 68%<sup>[3]</sup>。有效的粉尘治理措施是保障车间安全运营的关键, 控制打磨车间粉尘扩散一般使用排风罩, 但单一使用排风罩难以达到理想的除尘效果<sup>[4-5]</sup>。因此, 研究打磨车间除尘方式及其除尘效果, 对于保障安全生产和工人职业健康等具有重要意义。

空气幕是 1 种由风机、风管和出风口等组成的送风装置, 具有防尘、防污染的功能, 且具有不占空间、不影响视野、便于操作的优点, 广泛用于电子、仪器仪表、制药、食品、精密加工、化工等行业。为有效控制粉尘扩散, 相关学者对由空气幕组成除尘系统的阻隔粉尘效果进行了研究。Xiao 等<sup>[6]</sup> 实验研究表明, 当空气幕射流速度为 6.27 m/s、排气压力比为 0.6、射流角为 15° 时, 软密封空气幕系统的粉尘控制效率达到 92.6%; Li 等<sup>[7]</sup> 实验研究表明, 当排气压力比为 0.8、风幕射流速度为 13.5 m/s 时, 旋转流空气幕系统除尘效率最高可达 94.76%, 可解决某烟草厂烟杆装填点的粉尘逃逸问题; Zhang 等<sup>[8]</sup> 针对抑制抓斗卸船机卸料过程, 设计 1 种粉尘扩散的空气幕软密封系统, 该系统能有效阻断气流, 限制污染物的扩散, 使空气幕平面外污染物的平均质量分数降低 70.02%; Li 等<sup>[9]</sup> 模拟研究表明, 当排气压力比为 1.5、空气幕出口速度为 5~6 m/s 时, 由空气幕组成的大豆转运系统除尘效率可达 95.54%~96.27%, 可显著降低职业性尘肺病的患病几率。

上述研究表明由空气幕组成的除尘系统可提高除尘效率。排风罩是局部排风系统中捕集粉尘的装置, 相关学者对空气幕协同排风罩去除不同污染物进行了研究。舒心予<sup>[10]</sup> 模拟研究表明, 在打磨工位最佳工况下, 对于烟雾状粉尘, 空气幕协同排风罩的除尘效率接近 100%; 谭聪等<sup>[11]</sup> 模拟分析打磨车间使用排风罩、排风罩与挡板、排风罩与空气幕 3 种

通风除尘系统的除尘效果, 得出空气幕与排风罩协同除尘的效果较优; 罗薇<sup>[12]</sup> 研究空气幕协同大型落砂机半密闭罩的除尘效果, 结果表明在上进风口增设风速 10 m/s 的单侧空气幕或增设风速 5 m/s、与 X 轴夹角为 -15° 的两侧空气幕, 除尘效果最佳; 于青玉等<sup>[13]</sup> 使用空气幕协同排风罩解决了消失模浇注工位因烟气大、烟气上升速度快而无法有效除尘的问题。现有研究表明, 空气幕与排风罩协同除尘可起到较好的除尘效果, 但针对空气幕送风速度、射流角度和射流宽度等参数对空气幕协同排风罩除尘效果影响的研究不够深入。因此, 采用数值模拟的方法分析空气幕送风速度、射流角度和射流宽度对除尘效率的影响, 优化空气幕的工况参数, 基于此分析排风罩与空气幕协同作用下的除尘效果, 以期降低车间粉尘浓度提供参考。

## 1 打磨车间模型建立与验证

### 1.1 几何模型

以某机械厂打磨车间为研究对象, 利用 Solidworks 软件按 1:1 的结构比建立打磨车间几何模型, 如图 1。打磨车间长 12 m、宽 10 m、高 4 m; 车间大门宽 1.5 m、高 2.1 m; 室内窗户宽 1.2 m、高 1.5 m; 墙壁一侧设置直径为 0.5 m 的排风扇; 车间内有 3 个打磨台, 长 2.0 m、宽 1.5 m、高 0.8 m。

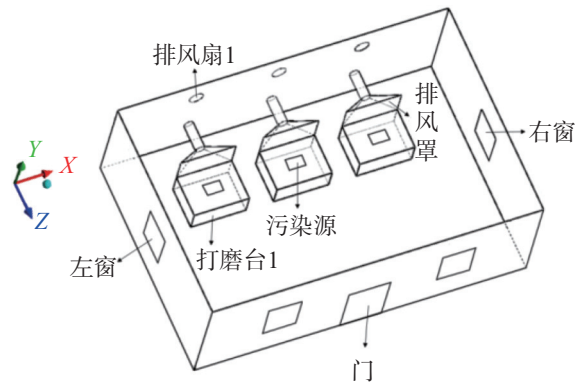


图1 带有排风罩的打磨车间几何模型

Fig. 1 Geometric model of a grinding workshop equipped with a dust extraction hood

空气幕与排风罩结合除尘的局部图如图 2。车间设有 2 个监测点 ( $P_1, P_2$ ),  $P_1$  位于污染源与排风罩

口距中心竖直向上的直线;  $P_2$  位于污染源正上方呼吸带高度处(距地面 1.5 m 高度)。GBZ 2—2002<sup>[14]</sup> 规定, 车间内的铝合金粉尘质量浓度卫生标准为  $4 \text{ mg/m}^3$ , 经测试该车间作业空间粉尘质量浓度为  $16 \text{ mg/m}^3$ , 粉尘浓度远超标准要求。

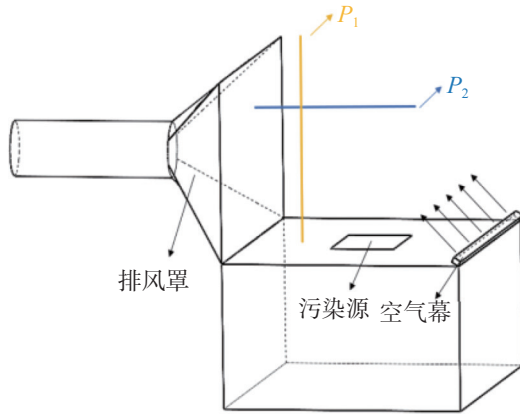


图2 空气幕与排风罩结合除尘的局部图

Fig. 2 Local view of dust extraction combining an air curtain and a dust extraction hood

## 1.2 数学模型

打磨车间离散相的体积分数小于 10%<sup>[15]</sup>, 将车间气流和打磨过程产生的粉尘分别看作连续相和颗粒相, 分别选用欧拉法和拉格朗日法计算连续相和颗粒相的运动。计算流体力学中用到的控制方程<sup>[16-18]</sup>如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$k-\varepsilon$  湍流方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ 。

颗粒作用力平衡方程

$$\frac{du_a}{dt} = F_D(u - u_a) + \frac{g(\rho_a - \rho)}{\rho_a} \quad (4)$$

其中:  $F = 0.75 \frac{C_D \rho |u_a - u|}{\rho_a d_a}$ ;  $t$  为时间;  $\rho$  为气体密度;  $u$  为流体速度;  $u_i, u_j$  为  $i, j$  方向的流体速度;  $p$  为流体压力;  $\tau_{ij}$  为应力张量;  $g$  为重力体积力;  $g_i$  为  $i$  方向的重力体积力;  $k$  为湍流动能;  $u_i$  为  $i$  方向的速度;  $G_k$  为湍流动能变化率;  $\mu$  为层流黏性系数;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率;  $x_i, x_j$  为  $i, j$  方向的坐标;  $C_{\varepsilon 1}$ ,

$C_{\varepsilon 2}, C_\mu, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$  分别取 1.44, 1.92, 0.09, 1.3, 1.0;  $C$  为阻力系数;  $u_a$  为颗粒速度;  $\rho_a$  为颗粒密度;  $d_a$  为颗粒直径。

## 1.3 边界条件设定

将几何模型导入 FLUENT 软件, 进行气固两相流设置, 先计算连续相后加载离散相。对流场的仿真模拟采用速度入口 inlet、压力出口 outlet 的边界条件<sup>[19-21]</sup>。设置门和窗的边界条件为速度入口, 排风罩与排风扇的边界条件为压力出口, 排风扇的离散相边界条件为逃逸, 门窗与墙面的离散相边界条件为反射, 排风罩的离散相边界条件为陷入。采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型迭代, 采用 SIMPLE 算法。打磨工具为砂轮直径为 125 mm 的角磨机, 标准转速为  $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、线速度为 32.7 m/s, 设置粉尘源时, 将砂轮的线速度作为粉尘的初始速度。离散相参数设定见表 1。

表 1 离散相参数设定

Tab. 1 Discrete phase parameter setting

条件	参数设定
材料	铝合金
阻力特征	球形颗粒
粒径分布	Rosin-Rammler
粒径分布指数	3.5
最大粒径/ $\mu\text{m}$	50
中位径/ $\mu\text{m}$	5.45
最小粒径/ $\mu\text{m}$	0.3
质量流率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$10^{-5}$

## 1.4 网格划分

在满足计算要求的前提下, 使用 ICEM CFD 软件对图 1 所示的模型进行网格划分。为验证网格无关性, 模拟计算模型网格为 56, 98, 129 万个条件下未开启空气幕和排风罩时呼吸带高度处粉尘的质量浓度, 结果如图 3, 由图 3 可见: 3 种网格下呼吸带高度处粉尘的浓度变化趋势基本一致, 综合考虑计算精度与时间, 选择 98 万个的网格进行模拟。

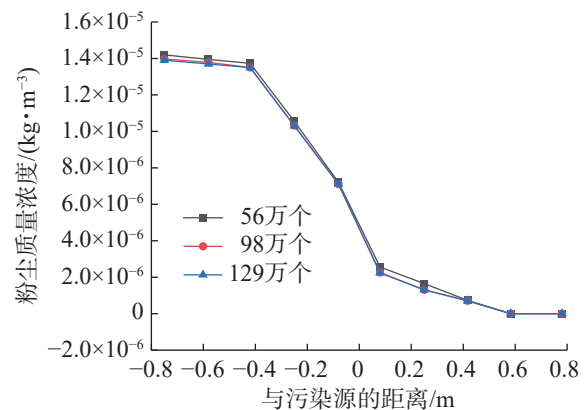


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

### 1.5 模型验证

为验证数值模拟结果的可靠性, 以文献 [11] 中的打磨车间为研究对象, 采用本文模拟方法建立模型, 对车间中部呼吸带高度 11 个监测点粉尘浓度进行模拟计算, 计算结果与文献 [11] 中的实测结果如图 4。从图 4 可看出: 模拟结果与实验结果较为接近, 粉尘质量浓度变化趋势基本一致, 说明采用本文的数值模拟方法分析打磨车间粉尘质量浓度分布是可行的。

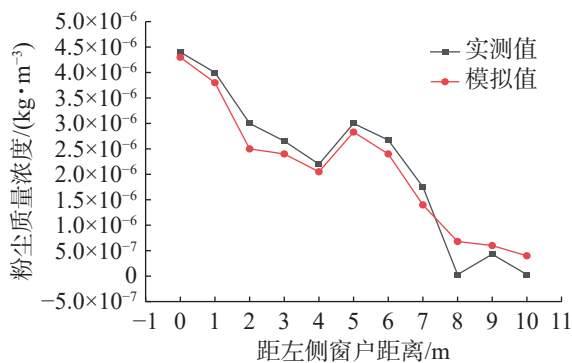


图4 模型有效性验证

Fig. 4 Model validity verification

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 空气幕参数对空气幕协同排风罩控制粉尘效果的影响

影响空气幕除尘效果的主要因素为送风速度、射流角度和射流宽度。传统的通风系统风量设计方法为速度控制法和流量比法, 文中依据速度控制法, 设定除尘排风量为 10 080 m<sup>3</sup>/h, 探究空气幕送风速度、射流角度和射流宽度对空气幕协同排风罩除尘效果的影响。

#### 2.1.1 空气幕送风速度

空气幕射流角度 30°、射流宽度 30 mm 时, 送风速度为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m/s 下打磨台 1 周围的空气流速分布如图 5, 粉尘源与排风罩间距中心竖直向上 (P<sub>1</sub> 点) 不同高度处粉尘浓度分布如图 6, 粉尘源正上方呼吸带高度处 (距地面 1.5 m 高度的 P<sub>2</sub> 点) 粉尘浓度分布如图 7, 空气幕不同送风速度下的除尘效率如图 8。

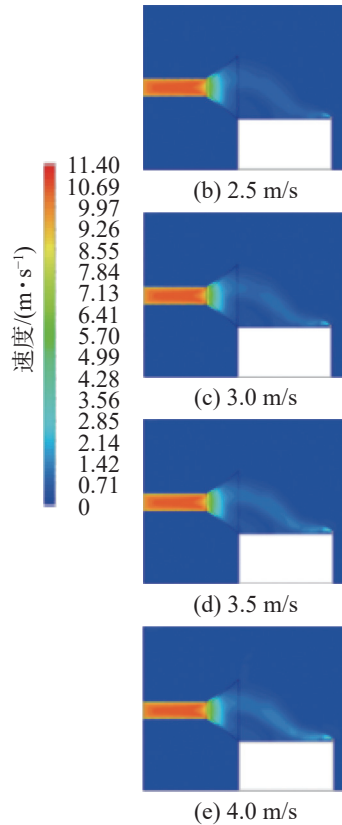
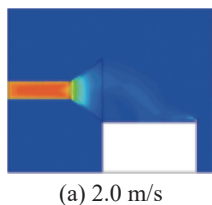


图5 不同送风速度下打磨车间空气流速分布

Fig. 5 Air velocity distribution of grinding workshop with different air supply velocities

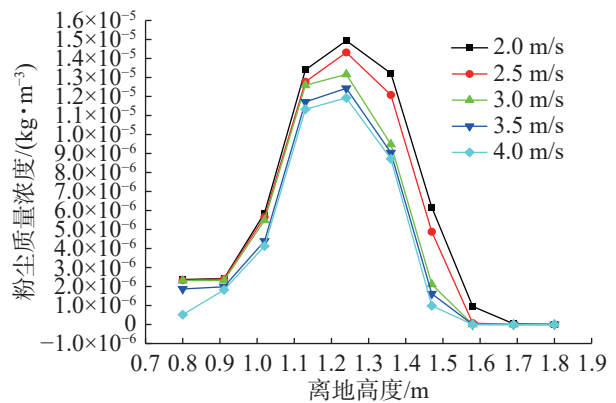


图6 距地面不同高度处粉尘浓度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of dust concentration at different heights from the ground

由图 5 可知: 空气幕送风速度为 2.0~4.0 m/s 时, 随送风速度的增大, 形成的射流面越大, 更易阻止粉尘扩散; 同时, 排风罩吸入的粉尘越多, 越有利于提高除尘效率。

由图 6 可知: 同一送风速度下, 随地面高度的增加, 粉尘浓度先增后减, 粉尘最大浓度出现在距地面高度 1.25 m 附近; 粉尘最大浓度随空气幕送风速度的增大而减小, 且空气幕送风速度 4.0 m/s 时, 粉尘最大浓度最小为 11.9 mg/m<sup>3</sup>。

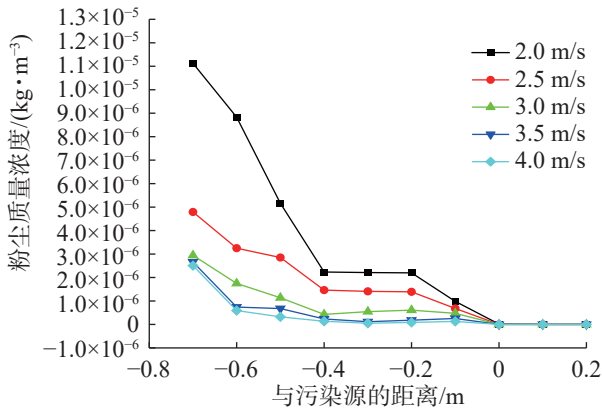


图7 不同送风速度下呼吸带粉尘浓度分布

Fig. 7 Dust concentration distribution in the breathing zone at different air supply velocities

由图7可知:同一送风速度下,呼吸带粉尘浓度随与污染源距离的增大而减小;距污染源-0.7 m处,空气幕送风速度最高为4.0 m/s时,呼吸带粉尘浓度降低为 $2.5 \text{ mg/m}^3$ 。

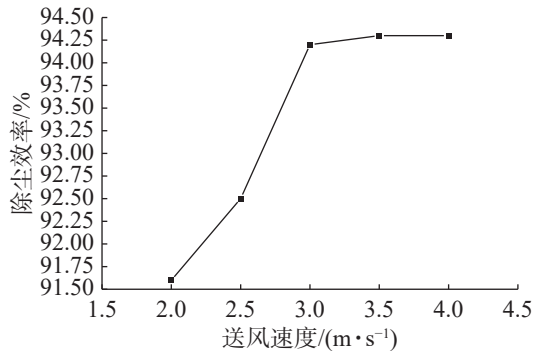


图8 不同送风速度的除尘效率

Fig. 8 Dust removal efficiency at different air supply velocities

由图8可知:空气幕送风速度为2.0~4.0 m/s时,除尘效率随空气幕送风速度的增大逐渐增大,至送风速度为3.0 m/s时,速度达到稳定状态,除尘效率基本不变。考虑到节约能源、人员舒适度及除尘效果,选择空气幕送风速度为3.0 m/s。

### 2.1.2 空气幕射流角度

空气幕送风速度3.0 m/s、射流宽度30 mm时,射流角度为 $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 下打磨台1周围的空气幕流线如图9,粉尘源与排风罩间距中心竖直向上( $P_1$ 点)不同高度处粉尘浓度分布如图10,粉尘源正上方呼吸带高度处(距地面1.5 m高度的 $P_2$ 点)粉尘浓度分布如图11,空气幕不同射流角度下的除尘效率如图12。

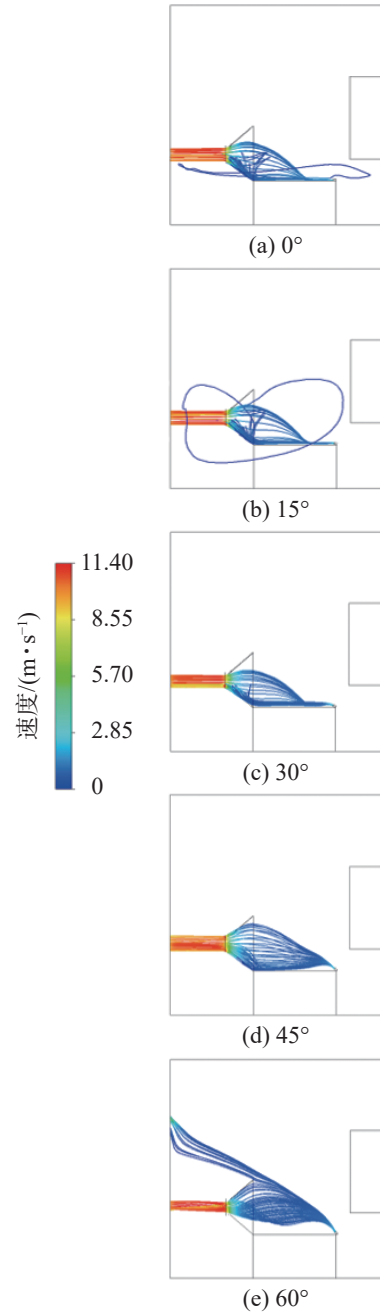


图9 不同射流角度的打磨车间气流线

Fig. 9 Air flow line of grinding workshop with different jet angles

由图9可知:射流角度为 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 时,空气幕喷出的气流大部分涌入排风罩,极少量气流在打磨台周围盘旋;与射流角度 $45^\circ$ 相比,射流角度 $30^\circ$ 时空气幕喷出的气流更易涌入排风罩,更易阻隔粉尘与操作人员的接触;射流角度为 $60^\circ$ 时,空气幕喷出的气流部分涌向排风扇,空气幕无法形成有效射流面阻隔粉尘的扩散,除尘效果不佳。

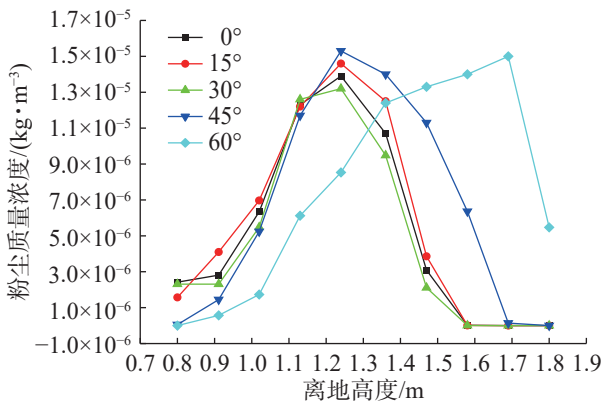


图10 距地面不同高度处粉尘浓度的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of dust concentration at different heights from the ground

由图 10 可知: 同一空气幕射流角度时, 粉尘浓度随地面高度的增加先增后减, 不同空气幕射流角度时粉尘浓度随高度变化的趋势基本一致。距地面高度为 1.20~1.25 m 时, 射流角度为 0~45° 时粉尘浓度达最大; 距地面高度为 1.70~1.75 m 时, 射流角度为 60° 时粉尘浓度达最大, 30° 时粉尘最大浓度最小。

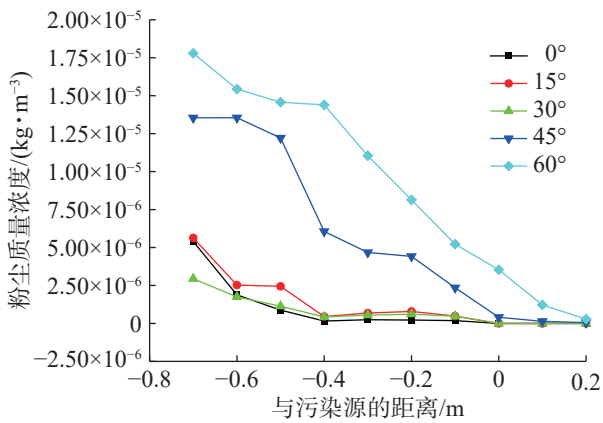


图11 不同射流角度下呼吸带粉尘浓度分布

Fig. 11 Dust concentration distribution in breathing zone at different jet angles

由图 11 可知: 同一射流角度下, 呼吸带粉尘质量浓度随着与污染源距离的增大而减小; 射流角度为 30° 时, 呼吸带粉尘浓度达最小, 且始终小于 4 mg/m<sup>3</sup>。

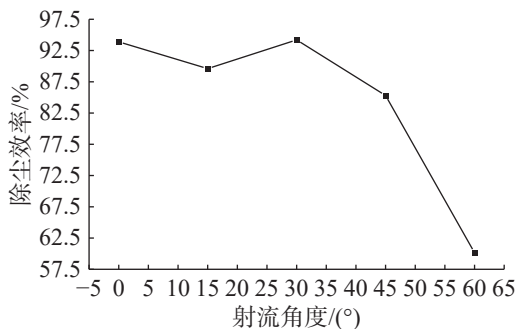


图12 不同射流角度的除尘效率

Fig. 12 Dust removal efficiency at different jet angles

由图 12 可知: 射流角度为 0~60° 时, 除尘效率随射流角度的增大先降后升再降; 射流角度为 30° 时的除尘效率最高, 60° 时的除尘效率最低。基于最大粉尘浓度和除尘效率, 实际应用中选择空气幕射流角度 30°。

### 2.1.3 空气幕射流宽度

空气幕送风速度 3 m/s、射流角度 30° 时, 空气幕射流宽度为 20, 25, 30, 35, 40 mm 下打磨台 1 周围的空气流速分布如图 13, 粉尘源与排风罩间距中心竖直向上 ( $P_1$  点) 不同高度处粉尘浓度分布如图 14, 粉尘源正上方呼吸带高度 (距地面 1.5 m 高度的  $P_2$  点) 粉尘浓度分布如图 15, 空气幕不同射流宽度下的除尘效率如图 16。

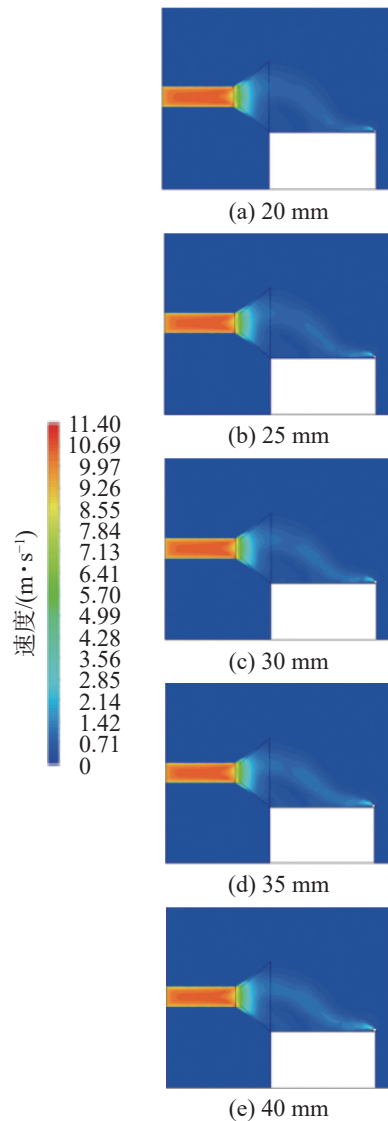


图13 不同射流宽度的打磨车间空气流速分布

Fig. 13 Air velocity distribution of grinding workshop with different jet widths

由图 13 可知:空气幕射流宽度为 20~40 mm 时,随射流宽度的增大,形成的射流范围略有增大;射流宽度为 40 mm 时,空气幕喷出的射流面更易阻止粉尘的扩散。

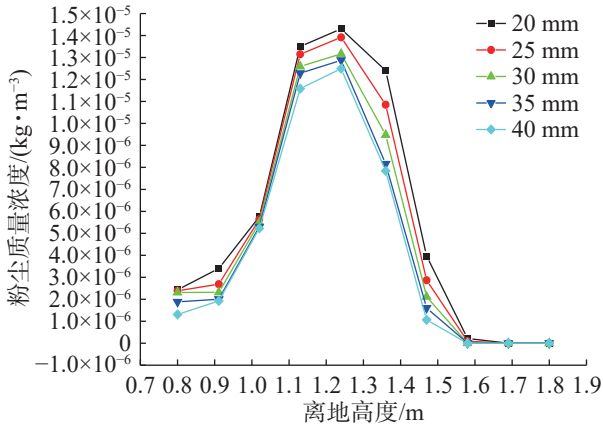


图 14 距地面不同高度处粉尘浓度的变化曲线

Fig. 14 Variation curve of dust concentration at different heights from the ground

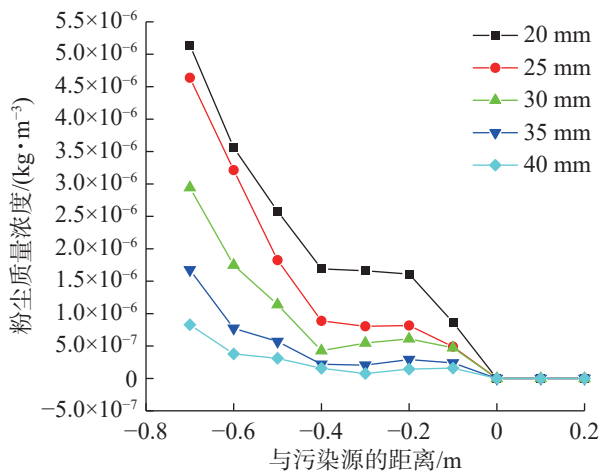


图 15 不同射流宽度下呼吸带粉尘浓度分布

Fig. 15 Dust concentration distribution in breathing zone at different jet widths

由图 14, 15 可知:同一离地高度下,粉尘浓度随射流宽度的增大而减小;不同射流宽度下,呼吸带粉尘质量浓度随与污染源距离的增大而减小;空气幕射流宽度为 20~40 mm 时,随射流宽度的减小,呼吸带粉尘浓度整体降低,射流宽度不小于 30 mm 时,呼吸带粉尘浓度始终在 4 mg/m<sup>3</sup> 以下;在距离污染源-0.7 m 处、射流宽度最大为 40 mm 时,呼吸带粉尘浓度最低为 0.828 mg/m<sup>3</sup>。

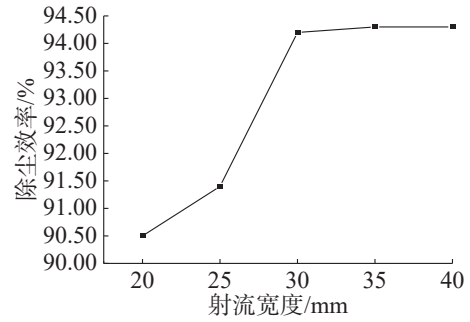


图 16 不同射流宽度的除尘效率

Fig. 16 Dust removal efficiency of different jet widths

由图 16 可知:空气幕射流宽度为 20~40 mm 时,除尘效率随空气幕射流宽度的增大逐渐增大,至射流宽度为 30 mm,除尘效率基本不变。考虑到节约能源、人员舒适性和除尘效果,选择空气幕射流宽度为 30 mm。

### 2.2 空气幕协同排风罩的粉尘控制效果

基于 2.1 的结果,选定排风罩的排风量为 10 080 m<sup>3</sup>/h,空气幕的送风速度为 3 m/s、射流角度为 30°、射流宽度为 30 mm,对比未开启排风罩、开启排风罩、同时开启排风罩与空气幕 3 种工况下,打磨车间空气流速、运移轨迹、粉尘质量浓度、除尘效率。截取高度为 1.1 m 时 3 种工况下打磨车间空气流速分布,结果如图 17。以自动打磨机磨削型材,打磨机反复运动产生的粉尘源为面尘源,打磨 300 s 时 3 种工况下粉尘从产生到扩散至车间各位置的运移轨迹如图 18。3 种工况下打磨车间粉尘浓度分布如图 19,除尘效率如表 2。

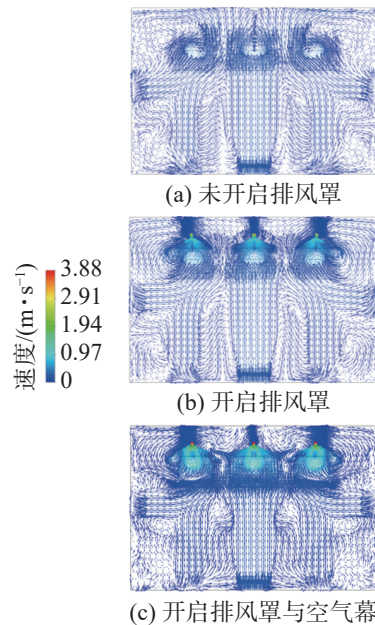


图 17 3 种工况下打磨车间空气流速分布

Fig. 17 Air velocity distribution in grinding workshop under three working conditions

由图 17 可知: 未开启排风罩时, 受打磨台和墙壁的阻挡, 从门窗进入车间的气流流场存在射流区、旋涡区和回流区; 3 台打磨台均阻挡空气流动, 通过的空气流速迅速减小; 同时, 车间各个角落的空气流速较小, 形成无风区域, 不利于通风除尘。开启排风罩时, 排风罩口附近的空气流速为 1.28~3.41 m/s, 空气从门窗进入流向打磨台附近区域, 彼此相互流通, 打磨台之间的气流较小; 同时开启空气幕和排风罩时, 受空气幕射出气流的影响, 排风罩口风速增至 1.45~3.88 m/s, 风流的运移方向使打磨台之间的气流不再彼此流通。由此看出, 空气幕的开启影响排风罩周围局部空气流速分布, 使排风罩口的空气流速增大, 有助于粉尘从排风罩口排出。

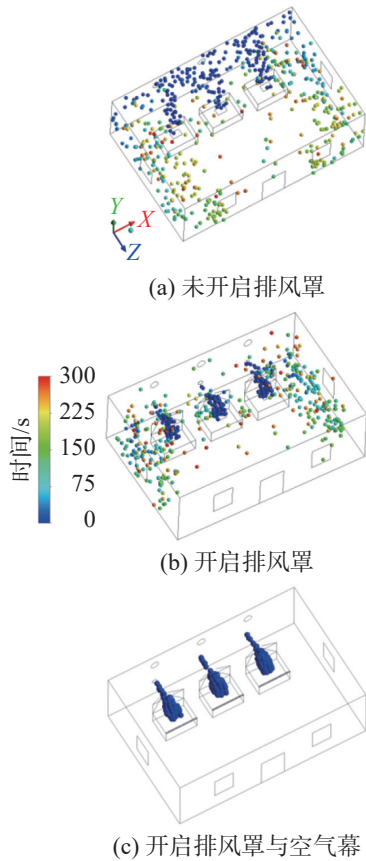


图 18 3 种工况下打磨车间粉尘运移轨迹

Fig. 18 Dust migration trajectory in grinding workshop under three working conditions

由图 18 可知: 未开启排风罩时, 粉尘从污染面释放, 结合空气流动方向 (图 17), 部分粉尘由于侧边窗户与墙角产生涡旋随风流扩散到车间两端, 部分粉尘因磨削有较大的速度而从排风罩逃逸, 少量粉尘由于自身重力沉降到 3 台打磨台周围; 开启排风罩时, 排风罩口风速大, 大量粉尘被排风罩吸收, 部分粉尘从排风罩逃逸, 部分粉尘仍扩散到车间两端和打磨台周围, 说明排风罩能够排出一定量的粉尘,

对车间粉尘浓度控制有重要作用, 但仍有部分粉尘存留于车间; 开启空气幕时, 由于空气幕射流的作用, 从污染面释放的粉尘短时间内被排风罩吸收, 除尘效率大幅提高。

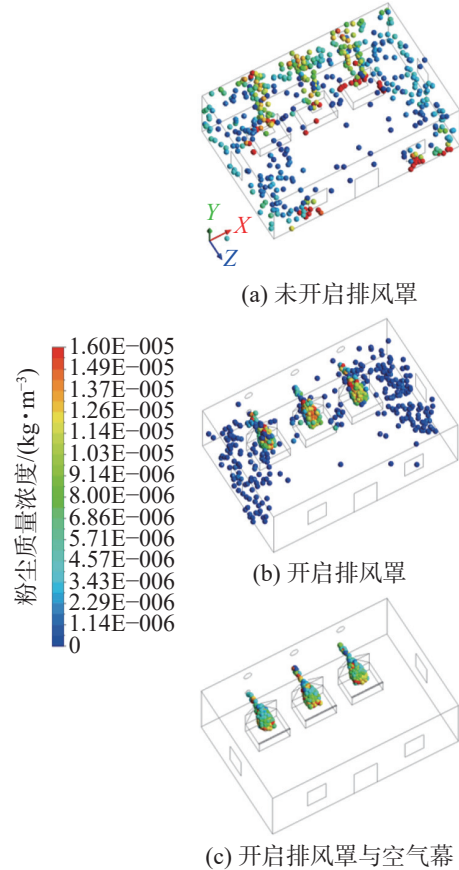


图 19 3 种工况下打磨车间粉尘浓度分布

Fig. 19 Dust concentration distribution in grinding workshop under three working conditions

由图 19 可知: 未开启排风罩时, 打磨台周围存在高浓度粉尘, 粉尘主要围绕在打磨台上方和靠墙两侧, 污染源上方最高粉尘质量浓度可达  $16 \text{ mg/m}^3$ , 呼吸带高度粉尘质量浓度最高可达  $7 \text{ mg/m}^3$ ; 开启排风罩, 打磨车间整体粉尘浓度分布发生较大变化, 靠墙两侧的粉尘质量浓度较低, 说明排风罩可吸收打磨过程中无序扩散的大部分粉尘, 能够保证呼吸带高度粉尘的质量浓度低于  $4 \text{ mg/m}^3$ , 但距污染源中心  $1 \text{ m}$  处粉尘的质量浓度达  $15 \text{ mg/m}^3$ , 粉尘并未完全被排风罩吸收, 未能达到理想的除尘效果; 同时开启空气幕和排风罩后, 除打磨台以外区域的粉尘质量浓度基本降为 0。

表 2 2 种工况下的除尘效率

Tab. 2 Dust removal efficiency under two working conditions

工况	除尘效率/%
开启排风罩	55.4
开启排风罩与空气幕	94.2

由表2可知:仅开启排风罩时,除尘效率为55.4%;同时开启排风罩与空气幕时,除尘效率为94.2%,相比于仅开启排风罩,空气幕与排风罩协同作用下的除尘效率提高了38.8%,空气幕协排风罩可显著提升打磨车间的除尘效率。

### 3 结论

基于气固两相流理论,利用CFD-DPM建立空气幕协同排风罩除尘的打磨车间模型,模拟分析空气幕参数对除尘效果的影响,优化空气幕参数;在此基础上,对比分析空气幕与排风罩协同除尘的效果,所得主要结论如下:

1) 呼吸带粉尘浓度、粉尘最大浓度随空气幕送风速度、射流宽度的增大而减小,且不随空气幕射流角度的变化而变化。在距离污染源-0.7 m处,射流速度最高为4.0 m/s时,呼吸带粉尘质量浓度降低为2.5 mg/m<sup>3</sup>;射流宽度最大为40 mm时,呼吸带粉尘质量浓度最低为0.8 mg/m<sup>3</sup>。随地面高度的增大,粉尘浓度先增后减,变化趋势基本一致。

2) 未开启排风罩时,打磨台周围存在大量高浓度粉尘,污染源上方粉尘质量浓度最高可达16 mg/m<sup>3</sup>,呼吸带高度最高可达7 mg/m<sup>3</sup>;开启排风罩后,除污染源中心1 m处粉尘质量浓度达15 mg/m<sup>3</sup>,其他操作人员活动区域各高度粉尘浓度均较低。

3) 为控制车间粉尘最大浓度,以呼吸带高度粉尘浓度为标准,当空气幕射流宽度为30 mm、射流角度30°、送风速度为3.0 m/s时,空气幕协同排风罩通风除尘效果最佳,相比于仅开启排风罩,排风罩与空气幕协同作用下的除尘效率提高了38.8%。

#### 参考文献:

- [1] 王晋. 高压细水雾喷嘴对巷道煤尘的喷雾降尘试验研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5):38-41,48.  
WANG J. Experimental study on spraying dust reduction of roadway coal dust by high-pressure water mist nozzle[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(5):38-41,48.
- [2] 陈刚, 张晓蕾, 徐帅, 等. 我国2005—2020年粉尘爆炸事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8):76-83.  
CHEN G, ZHANG X L, XU S, et al. Statistical analysis on dust explosion accidents in China from 2005 to 2020[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8):76-83.
- [3] 国家卫生健康委规划发展与信息化司. 国家卫生健康委发布2022年全国职业病防治情况[J]. 职业卫生与应急救援, 2023, 41(5):551.  
The National Health and Wellness Commission released the

- national occupational disease prevention and control situation in 2022[J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2023, 41(5):551.
- [4] 林大建, 张志丹, 黄小路. 下吸罩结构参数对木粉尘控制模拟及正交优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12):5358-5366.  
LIN D J, ZHANG Z D, HUANG X L. Simulation and orthogonal optimization of wood dust control by structural parameters of downdraft hood[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12):5358-5366.
- [5] 谢春波, 权梦凡, 曹智翔, 等. 平行流送风对侧吸排风罩烟气捕集效率的提升[J]. 环境工程, 2021, 39(10):101-109.  
XIE C B, QUAN M F, CAO Z X, et al. Improvement of fume capture efficiency of side suction hood with parallel-flow supply air[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10):101-109.
- [6] XIAO D, LI X C, FANG Z C, et al. Investigation of the dust control performance of a new transverse-flow air curtain soft-sealing system[J]. Powder Technology, 2020, 362:238-245.
- [7] LI X C, ZHANG M R, JIANG Y F, et al. Air curtain dust-collecting technology: an experimental study on the performance of a large-scale dust-collecting system[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220:104875.
- [8] ZHANG H Z, MENG W J. Study on dust suppression of air curtain soft-sealing system of grab ship unloader[J]. Processes, 2022, 10(8):1505.
- [9] LI X C, ZHANG M R, JIANG Y F, 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] 舒心予. 铸造打磨工位的岗位通风与空气幕隔尘的气流组织研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.  
SHU X Y. Study on airflow organization for position ventilation and air curtain dust suppression in casting polishing workstations[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [11] 谭聪, 谢艳芝, 任金瑶, 等. 打磨车间粉尘控制技术数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7):2352-2359.  
TAN C, XIE Y Z, REN J Y, et al. Numerical simulation of dust control technology in grinding workshops[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(7):2352-2359.
- [12] 罗薇. 基于CFD数值模拟技术的半密闭罩内除尘控制研究: 以某铸造车间大型落砂机半密闭罩为例[D]. 西安: 西安工程大学, 2017.  
LUO W. Research on dust control within a semi-enclosed hood based on CFD numerical simulation technology: a case study of a large shot blast machine in a casting

- workshop[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2017.
- [13] 于青玉, 袁子洲, 高飞. 空气幕在消失模铸造浇注工位除尘上的应用[J]. 铸造技术, 2014, 35(7):1562-1564.  
YU Q Y, YUAN Z Z, GAO F. Application of air curtain in dust elimination in EPC casting[J]. Foundry Technology, 2014, 35(7):1562-1564.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 工作场所有害因素职业接触限值: GBZ 2—2002[S]. 北京: 法律出版社, 2004.  
Ministry of Health, People's Republic of China. Occupational Exposure Limits for Hazardous Agents in Workplace Air: GBZ 2—2002 [S]. Beijing: Law Press, 2004.
- [15] 蒋仲安, 邓权龙, 时训先, 等. 石棉筛分车间粉尘质量浓度分布规律的数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(12):135-141.  
JIANG Z A, DENG Q L, SHI X X, et al. Numerical simulation of dust mass concentration distribution in screening workshop of asbestos concentrator[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(12): 135-141.
- [16] 刘茜尧, 连清旺. 选煤厂筛分车间粉尘浓度分布规律数值研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(1):37-41.  
LIU X Y, LIAN Q W. Numerical study on dust concentration distribution in screening workshop of coal preparation plant[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(1):37-41.
- [17] 林浩宇, 蒋仲安, 杨斌, 等. 组合式通风打磨台风量对粉尘控制效果的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11):160-165.  
LIN H Y, JIANG Z A, YANG B, et al. Influence of air volume on dust control effect for combined ventilation grinding table[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(11):160-165.
- [18] 丁厚成, 李胜男, 郭成, 等. 综采工作面双重空气幕隔尘技术数值模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 119-124.  
DING H C, LI S N, GUO C, et al. Numerical simulation study on the dust isolation technology of double air curtains at fully-mechanized work face[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(3):119-124.
- [19] LI X C, ZHAO X L, JIANG Y F, et al. Air curtain dust-collecting technology: influence factors for air curtain performance[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 218:104780.
- [20] NIE W, ZHANG Y L, GUO L D, et al. Research on airborne air curtain dust control technology and air volume optimization[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172:113-123.
- [21] XIU Z H, NIE W, CAI P, et al. Partially enclosed air curtain dust control technology to prevent pollution in a fully mechanized mining face[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(5):108326.

责任编辑: 闫芳芳

#### (上接第 45 页)

- [15] 陈威. 基于模型预测控制的智能汽车自适应巡航控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.  
CHEN W. Research on Adaptive Cruise Control of Intelligent Vehicles Based on Model Predictive Control [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [16] 邓国红, 张熏, 宋红松, 等. 协同自适应巡航控制系统跟车算法设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(12):32-37.  
DENG G H, ZHANG X, SONG H S, et al. Design of car-following algorithms for cooperative adaptive cruise control system[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(12):32-37.
- [17] ALTHOFF M, MAIERHOFER S, PEK C. Provably-correct and comfortable adaptive cruise control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(1):159-174.
- [18] 党睿娜, 李升波, 王建强, 等. 兼顾节能与安全的电动车 ACC 系统[J]. 汽车工程, 2012, 34(5):379-384.  
DANG R N, LI S B, WANG J Q, et al. Adaptive cruise control system of electric vehicles considering both economy and safety[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(5):379-384.
- [19] 何文韬, 何德峰, 崔靖龙, 等. 网联车辆自适应巡航控制算法验证平台设计[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 235-241.  
HE W T, HE D F, CUI J L, et al. Design of verification platform for adaptive cruise control algorithm of connected vehicles[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14):235-241.
- [20] LI Z T, ZHAO X X, YANG J, et al. Model predictive control of multi-objective adaptive cruise system based on extension theory[Z]. *Complex Engineering Systems*, 2009.
- [21] LIU X L, ZHU S P, WU Z J. Dynamic modeling and acceleration control of electric vehicles[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 476/477/478:944-948.
- [22] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.  
YU Z S. Automotive Theory[M]. 6th edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [23] 岳川元. 智能车辆全速 ACC 纵向 MPC 控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
YUE C Y. Research on Longitudinal MPC Control Method for Full Speed ACC of Intelligent Vehicles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

责任编辑: 何莉