

文章编号: 1671-251X(2024)12-0103-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024090083

综掘工作面双叶旋流湿式除尘器设计

龚晓燕¹, 贺子纶¹, 陈龙¹, 王海军¹, 付浩然¹, 裴晓泽¹, 孙海鑫¹, 张红兵¹, 杨富强²

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对目前用于煤矿综掘工作面环境的除尘器除尘效率低的问题, 设计了一种双叶旋流湿式除尘器。根据功能树法确定了该除尘器主要由环状喷雾装置、双旋流叶片、折流除雾板等组成, 设计了双旋流叶片以提供更大的离心力, 从而提高除尘效率。采用数值模拟方法分析了喷嘴口径、喷雾压力、叶片安装角、叶片转速对除尘器除尘效率的影响规律, 基于响应曲面法建立了除尘效率与4种影响因素之间的多元回归方程, 得出了令除尘器除尘效率最高的最佳参数: 叶片安装角 37°, 转速 1 550 r/min, 喷雾压力 1.9 MPa, 喷雾口径 2 mm。基于该参数建立了双叶旋流湿式除尘器虚拟样机, 通过仿真得出除尘器的除尘效率为 97.21%, 安装除尘器后巷道回风侧行人呼吸带粉尘浓度大幅降低。在除尘实验平台及模拟巷道对除尘器模拟机进行测试, 结果表明: 除尘器的除尘效率平均值为 94.80%; 应用除尘器后, 巷道回风侧行人呼吸带高度平均粉尘浓度由应用前的 441.29 mg/m³ 降低至为 269.14 mg/m³, 降幅达 39.0%。

关键词: 综掘工作面; 喷雾除尘; 湿式除尘器; 双旋流叶片; 结构参数优化; 响应曲面法

中图分类号: TD714.4

文献标志码: A

Design of a double-blade swirl wet dust collector for comprehensive mining faces

GONG Xiaoyan¹, HE Zilun¹, CHEN Long¹, WANG Haijun¹, FU Haoran¹, PEI Xiaoze¹, SUN Haixin¹,
ZHANG Hongbing¹, YANG Fuqiang²

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Department of Mechanics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the issue of low dust collection efficiency of dust collectors currently used in the environment of coal mine comprehensive mining faces, a double-blade swirl wet dust collector was designed. The dust collector was mainly composed of an annular spray device, double swirl blades, and baffle mist eliminators, with the double swirl blades designed to provide greater centrifugal force and thus improve dust collection efficiency. A numerical simulation method was used to analyze the effects of nozzle diameter, spray pressure, blade installation angle, and blade rotational speed on dust collection efficiency. Based on the response surface methodology, a multivariable regression equation was established between dust collection efficiency and the four influencing factors. The optimal parameters for maximum dust collection efficiency were determined as follows: blade installation angle of 37°, rotational speed of 1 550 r/min, spray pressure of 1.9 MPa, and nozzle diameter of 2 mm. Using these parameters, a virtual prototype of the double-blade swirl wet dust collector was established, and simulation results showed that the dust collection efficiency of the dust collector reached 97.21%. After the installation of the dust collector, the dust concentration in the breathing zone of workers on the return air side of

收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-12-18; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374226); 陕西省自然科学基金基础研究计划-企业陕煤联合基金项目(2021JLM-01)。

作者简介: 龚晓燕(1966—), 女, 甘肃临洮人, 教授, 博士, 主要研究方向为矿井智能化通风风流动态调控技术及设备、智能决策支持系统, E-mail: gongxymail@163.com。

引用格式: 龚晓燕, 贺子纶, 陈龙, 等. 综掘工作面双叶旋流湿式除尘器设计[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 103-110, 135.

GONG Xiaoyan, HE Zilun, CHEN Long, et al. Design of a double-blade swirl wet dust collector for comprehensive mining faces[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 103-110, 135.



扫码移动阅读

the tunnel significantly decreased. Tests on a dust collection experimental platform and in a simulated tunnel indicated that the average dust collection efficiency of the dust collector was 94.80%. After the application of the dust collector, the average dust concentration at the breathing zone of workers on the return air side of the tunnel decreased from 441.29 mg/m^3 to 269.14 mg/m^3 , a reduction of 39.0%.

Key words: comprehensive mining face; spray dust collection; wet dust collector; double swirl blades; structural parameter optimization; response surface methodology

0 引言

随着我国煤矿采掘机械化水平提高,掘进工作面作业产尘量成倍增加,由此引发的矿工尘肺职业病的新发病例数、累计病例数和死亡病例数居高不下,煤尘爆炸事故也时有发生,严重威胁井下工作人员的身体健康和生命安全^[1-4]。为解决综掘工作面粉尘污染严重的问题,通风降尘、喷雾除尘等措施已被应用于煤矿粉尘治理。湿式除尘器因其具有体积小、除尘效率高的特点,成为综掘工作面常用的除尘手段之一^[5-7]。

近年来,相关学者针对综掘工作面湿式除尘器开展了广泛的研究工作。李刚等^[8]研发了一种移动式矿用湿式振弦旋流除尘器,实验研究了该除尘器的除尘效率和阻力特性,得出了除尘器运行时的最佳风速范围。江丙友等^[9]将空气雾化喷嘴与湿式除尘器相结合,搭建试验平台开展降尘试验,得到了降尘系统的最佳参数组合。S. Kurella 等^[10]提出了一种多级双流筛板湿式除尘器,实验研究了不同液体速率、气体速率和入口参数条件下的除尘性能变化。邓有凡等^[11]以 KCS-180D 湿式除尘器为对象,实验研究了过滤单元位置、滤网参数、脱水器参数对除尘器性能的影响,优化结构后提高了湿式除尘器的除尘效率与脱水效率。王海桥等^[12]设计了一种矿用湿式多通道轴向离心除尘装置,运用数值计算方法对内部结构进行优化与选型,得到了该除尘装置的最优尺寸与性能参数。Hu Shengyong 等^[13]设计了一种矿用湿式洗涤器,在不同进水量条件下实验研究了径向混合叶轮不同叶片数量对洗涤器降尘效果的影响,发现进水量为 $1.35 \text{ m}^3/\text{h}$ 、叶片数为 16 时除尘效率最高。现有研究在湿式除尘器的除尘机理、相关参数对装置性能的影响等方面取得了许多理论成果,为开发新型矿用湿式除尘技术及装置奠定了良好的基础。

本文基于现有研究成果,针对目前矿用除尘器除尘效率低等问题,设计了一种双叶旋流湿式除尘器,通过仿真分析叶片与喷雾参数对除尘器除尘效率的影响,得到最佳参数方案,并搭建除尘实验平

台,验证了该除尘器的除尘效果。

1 除尘器结构设计

目前湿式除尘器基本结构包括喷雾供水系统、配套除尘风机、捕尘装置、进风口、风筒等^[14]。本文根据功能设计法,将除尘器划分为除尘结构、喷雾结构和除雾结构,分别进行优选方案设计。

常用的除尘结构中,过滤式结构中的滤网易被污泥堵塞,导致风阻变大,除尘效率降低;文丘里式除尘结构能耗较高;水雾荷电除尘结构成本较高,且多为精细化结构,不便于维修^[15];旋流式除尘结构除尘效率高,压力损失较小,成本较低。因此,选用外壳为圆柱形的旋流式除尘结构,采用双叶片结构进行旋流除尘,提高除尘器内部空间利用率,同时提供较大的离心力,使粉尘、雾滴混合更加充分,提高除尘效果。

喷雾结构安装在除尘器进口处时,可使喷雾均匀分布在整个除尘器中;安装在除尘器中部或出口处时,雾滴颗粒在除尘器内的分布范围较小且浓度不均,减少了雾滴与粉尘颗粒在风流中的混合接触时间,导致除尘效率下降。因此,将喷雾结构安装于除尘器进口处。

除雾结构根据原理不同可分为过滤式、离心式、撞击式 3 种。过滤式除雾结构风压损失小,使用方便,但在气体流速较大时脱水效率较低,甚至无法分离;离心式除雾结构的脱水效率较低;撞击式除雾结构不受处理风量大小限制,尺寸变化范围较大。因此,选用撞击式除雾结构。

基于上述方案设计的双叶旋流湿式除尘器结构如图 1 所示。其主要包括环状喷雾装置、双旋流叶片、折流除雾板。喷雾装置环形布置于旋流叶片前端,喷雾方向为顺风方向。双旋流叶片由 2 个形状和旋向相同的叶片组成。折流除雾板由多个波纹折流板层层堆叠而成。在旋流区与脱水区下方设有污水槽。进风口位于除尘器前端,电动机安装在双旋流叶片中间,除尘器进出口处均安装粉尘传感器。

双叶旋流湿式除尘器结合了喷雾降尘、旋流除

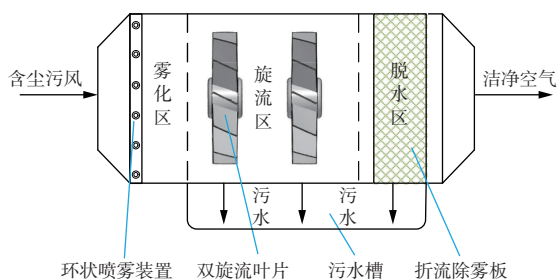


图1 双叶旋流湿式除尘器结构

Fig. 1 Structure of double-blade swirling wet dust collector

尘及惯性分离三重除尘机理。含尘污风受抽风筒负压作用进入除尘器内部,由环状喷雾装置喷雾润湿。粉尘与雾滴在雾化区初步混合碰撞,形成雾状尘水,之后受双旋流叶片的离心作用,在旋流区螺旋前进并进一步混合和吸附,形成质量较大的尘雾颗粒。这些尘雾颗粒在离心力的作用下远离轴心,与除尘器内壁碰撞并附着在其表面,在重力作用下形成污水流入污水槽。在脱水区,风流与尘雾因折流除雾板的拦截作用而迅速分离,实现空气净化,最终清洁干燥的风流从出风口排出。

双叶旋流湿式除尘器初始参数见表1。

表1 双叶旋流湿式除尘器初始参数

Table 1 Initial parameters of double-blade swirl wet dust collector

参数	值	参数	值
处理风量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	400~600	供水压力/MPa	1~3
叶片转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 000~2 000	直径/mm	1 000
叶片安装角/($^\circ$)	20~60	长度/mm	2 000
用水量/($\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$)	≤ 0.2	喷嘴口径/mm	1.6~2.4

2 除尘器结构参数设计

2.1 数值模型建立

湿式除尘器主要依靠旋流离心作用使粉尘与雾滴充分接触,叶片与喷雾参数对其除尘效率的影响最大。因此,本文仅考虑这2种关键参数,适当简化模型。湿式除尘器直径为1 m,长度为2 m。利用SolidWorks软件建立双叶旋流湿式除尘器三维物理模型,如图2(a)所示,其中OXYZ为除尘器物理坐标系,O点位于除尘器出口截面中心点。采用四面体非结构化网格划分方式,结果如图2(b)所示。

除尘器中风流高速旋转,宜采用realizable $k-\varepsilon$ 模型进行模拟。该模型中湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的传输方程为^[16-17]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X} \right) + G_a + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

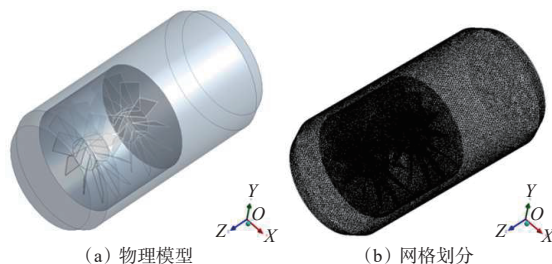


图2 双叶旋流湿式除尘器物理模型和网格划分

Fig. 2 Physical model and mesh generation of double-blade swirl wet dust collector

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho \varepsilon u) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X} \right) + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: t 为时间; ρ 为流体密度; u 为风流速度; μ 为分子黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数; G_a 为由平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为由浮力引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的影响; S_k , S_ε 为自定义的源项; C_1 , C_2 , $C_{1\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 为常数; ν 为运动黏性系数。

粉尘和雾滴颗粒的运动通过牛顿动力学方程求解。在拉格朗日坐标系下对颗粒的运动方程进行积分,得到粒子的运动轨迹。颗粒 i 的运动方程为^[18-19]

$$m_i \frac{du_i}{dt} = m_i g + F_i + \sum_{j=1}^n F_{ij} \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = W_i \quad (4)$$

式中: m_i 为颗粒 i 的质量; u_i 为颗粒 i 的速度; g 为重力加速度; F_i 为流体作用于颗粒 i 的力; n 为颗粒总数; F_{ij} 为颗粒 i 和颗粒 j 间的作用力; I_i 为颗粒 i 的转动惯量; ω_i 为颗粒 i 的角速度; W_i 为颗粒 i 所受的力矩。

采用Fluent软件和EDEM软件进行模型耦合计算,研究除尘器内部风流、粉尘和雾滴颗粒的运动。Fluent软件中控制方程选用realizable $k-\varepsilon$ 模型与standard wall function壁面函数,使用SIMPLE算法耦合速度-压力,压力方程采用Standard离散格式,其他方程均采用二阶迎风格式;空气为连续相,收敛残差为 1.0×10^{-4} 。EDEM软件中雾滴与粉尘颗粒为离散相,相互独立存在,均为圆球形,时间步长为 8.0×10^{-6} 。通过计算捕获粉尘颗粒数与跟踪粉尘颗粒数的比值得到湿式除尘器的除尘效率。具体喷雾及粉尘参数分别见表2、表3。

基于上述参数设置,对除尘器物理模型分别划分104.43万、121.89万、168.59万3种网格方案,以除尘器内部($X=0.3$ m, $Y=0.3$ m, $Z=0 \sim 2$ m)风速为依

表 2 喷雾参数设置

Table 2 Spray parameters setting

参数	值	参数	值
耦合频率	20	雾化半角/(°)	20
雾滴材料	Waterliquid	破碎模型	TAB
喷射方式	Pressure-swirl-atomizer	喷嘴口径/m	0.002
质量流率/(kg·s ⁻¹)	0.02	喷雾压力/MPa	2
喷射时间/s	100		

表 3 粉尘参数设置

Table 3 Dust parameters setting

参数	值	参数	值
耦合频率	20	最小粒径/m	1×10^{-6}
粉尘材料	Coal-mv	中位粒径/m	6.03×10^{-5}
喷射方式	Surface	粒径分布规律	Rosin-Rammler
质量流率/(kg·s ⁻¹)	0.008	粒径个数	10
最大粒径/m	1×10^{-4}	湍流扩散模型	DRW模型

据,对网格模型进行独立性检验。参考位置的风速模拟结果如图 3 所示。可看出 3 种网格数量下风速分布曲线几乎重合。本研究需在保证网格质量的同时兼顾计算效率,因此选择 104.43 万网格方案进行后续数值计算。该方案下网格单元平均质量为 0.840。

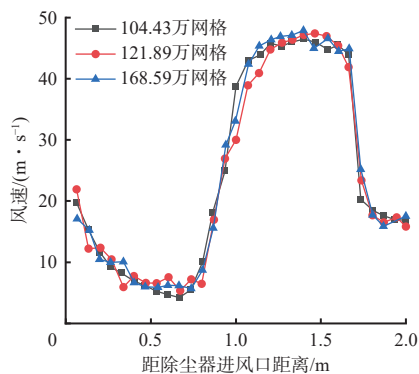


图 3 除尘器物理模型网格独立性检验结果

Fig. 3 Grid independence test results of physical model of dust collector

2.2 数值模拟

2.2.1 喷雾参数对除尘效率的影响

将喷雾压力、喷嘴口径作为变量,通过数值模拟方式分析除尘器的除尘效率变化规律,进而确定变量合理取值范围。数值模拟结果如图 4 所示。

从图 4 可看出,随着喷雾压力、喷嘴口径增大,除尘器的除尘效率均呈先增大后减小趋势。分析可知较小的喷雾压力对雾滴的破碎作用有限,因此喷嘴喷出的喷雾粒径较大,对较小粒径的细微粉尘捕捉能力有限,而随着喷雾压力增大,雾滴粒径减小,对粉尘的捕捉能力增强,除尘器的除尘效率得以提

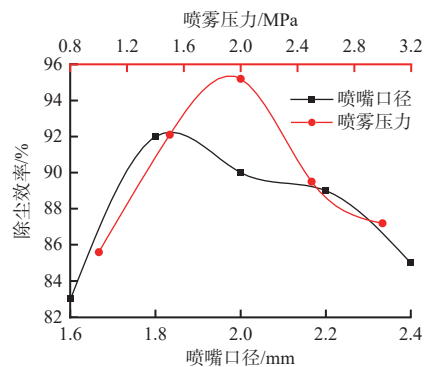


图 4 喷雾参数对除尘器除尘效率的影响

Fig. 4 Influence of spray parameters on dust removal efficiency of dust collector

高,但当喷雾压力上升到一定程度后,雾滴颗粒运动速度加快,与粉尘的结合能力下降,导致除尘效率降低;喷嘴口径较小时,较小粒径的喷雾颗粒在运动过程中蒸发消散,难以有效作用于粉尘颗粒,导致除尘效率较低,喷嘴口径增大时,喷雾颗粒粒径增大,与粉尘颗粒的粘附效应增强,除尘效率得以提高,但当喷嘴口径过大时,由于喷雾压力不变,喷出的雾滴颗粒运动速度相对较小,冲击惯性较大,不利于捕捉小粒径粉尘,导致除尘效率降低。

综合分析后,选取喷雾压力为 1.5~2.5 MPa,喷嘴口径为 1.8~2.2 mm,此时除尘效率均大于 88%,除尘效果显著。

2.2.2 叶片参数对除尘效率的影响

将叶片安装角和叶片转速作为变量,通过数值模拟方式分析除尘器除尘效率变化规律,进而确定变量合理取值范围。数值模拟结果如图 5 所示。

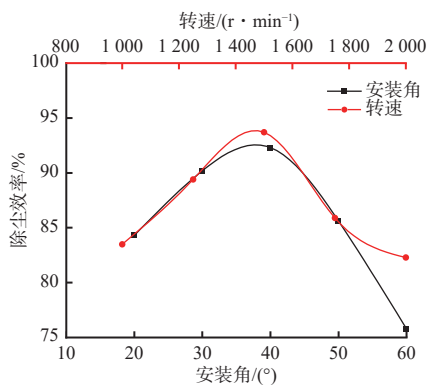


图 5 叶片参数对除尘器除尘效率影响

Fig. 5 Influence of blade parameters on dust removal efficiency of dust collector

从图 5 可看出,随着除尘器叶片安装角、叶片转速增大,除尘效率均呈先增大后减小趋势。分析可知叶片安装角较小时,叶片有效做功面积较小,除尘效率较低,随着安装角增大,叶片做功能力增强,使得除尘效率提高,但安装角进一步增大会使除尘器

内部气流旋转效果减弱,多数粉尘颗粒被直接吹出除尘器,降低除尘效率;叶片转速越大,气流速度和旋转强度越大,有助于更高效地捕捉和分离粉尘,从而提高除尘效率,但叶片转速过大会导致内部气流紊乱,不利于粉尘分离,使得除尘效率降低。

综合分析后,选取叶片安装角为30~50°,叶片转速为1 250~1 750 r/min,此时除尘效率均大于85%,除尘效果较好。

2.3 参数优化

针对选取的除尘器关键参数,采用响应曲面法进行参数优化。基于Box-Behnken方法设计四因素三水平方案,见表4,其中A为叶片安装角,B为叶片转速,C为喷雾压力,D为喷嘴口径。采用Design-Expert软件设计24种方案,基于除尘器数值模型(图3)进行模拟,结果见表5,其中R为除尘效率。

表4 基于响应曲面法的四因素三水平方案
Table 4 Four-factor three-level scheme based on response surface method

水平	因素			
	A/(°)	B/(r·min ⁻¹)	C/MPa	D/mm
1	30	1 250	1.5	1.8
2	40	1 500	2.0	2.0
3	50	1 750	2.5	2.2

根据表5中数据,利用Design-Expert软件建立响应值(除尘效率R)关于叶片安装角A、叶片转速B、喷雾压力C和喷嘴口径D的二次回归方程,即响应曲面模型:

$$R=95.21-5.09A+1.13B-1.76C-0.60D-3.20AB-2.71AC-0.45AD-0.32BC+0.71BD+0.31CD-9.1A^2-4.96B^2-3.65C^2-1.7D^2 \quad (5)$$

采用方差分析法验证该模型的可靠性,结果见表6。可看出除尘器响应曲面模型的显著性检验值 $P<0.05$,说明回归效果显著,除尘器除尘效率模拟值与预测值之间有良好的拟合度;失拟项 >0.05 ,说明预测值与模拟值之间的误差小,预测精度高;因素A、C对除尘效率R影响的显著性检验值 $P<0.05$,说明叶片安装角与喷雾压力对除尘效率的影响显著;因素B、D对R影响的 $P>0.05$,说明叶片转速与喷嘴口径对除尘效率的影响不显著;交互项AB、AC和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对R影响的 $P<0.05$,说明上述因素对除尘效率的影响具有显著的交互作用;交互项AD、BC、BD、CD对R影响的 $P>0.05$,说明上述因素对除尘效率影响不存在显著的交互作用。分析可知4个因素对除尘效率的影响排序为叶片安装角>喷雾

表5 不同因素下的除尘器除尘效率模拟实验结果
Table 5 Simulated experiment results of dust removal efficiency of dust collector under different factors

方案	A/(°)	B/(r·min ⁻¹)	C/MPa	D/mm	R/(mg·m ⁻³)
1	40	1 500	2.0	2.0	93.15
2	40	1 500	2.5	1.8	88.57
3	50	1 500	1.5	2.0	81.57
4	40	1 750	2.0	2.2	91.38
5	40	1 500	2.0	2.0	96.02
6	40	1 500	2.0	2.0	95.39
7	50	1 750	2.0	2.0	75.55
8	30	1 500	2.5	2.0	89.17
9	40	1 250	1.5	2.0	86.26
10	40	1 500	1.5	2.2	91.65
11	30	1 250	2.0	2.0	81.65
12	50	1 500	2.0	2.2	77.54
13	40	1 250	2.5	2.0	85.51
14	40	1 500	2.0	2.0	94.93
15	40	1 250	2.0	1.8	87.35
16	30	1 500	2.0	2.2	86.34
17	50	1 500	2.0	2.2	89.22
18	40	1 500	2.0	1.8	78.76
19	40	1 500	2.0	1.8	94.82
20	40	1 500	1.5	1.8	95.62
21	50	1 250	2.0	2.0	78.65
22	30	1 750	2.0	2.0	91.35
23	40	1 500	2.5	2.2	85.84
24	40	1 500	2.0	2.0	96.19

压力>叶片转速>喷嘴口径,即叶片安装角和喷雾压力对除尘器除尘效率影响较大,叶片转速与喷嘴口径对除尘效率影响较小。

以除尘器除尘效率最高为目标,在Design-Expert软件中利用RSM数值优化功能对响应曲面模型进行优化,可得除尘器最佳参数方案为叶片安装角37.266°、叶片转速1 547.799 r/min、喷雾压力1.927 MPa、喷嘴口径1.986 mm,该方案下除尘效率预测值为96.199%。为便于制作样机和实验,本文取叶片安装角37°,叶片转速1 550 r/min,喷雾压力1.9 MPa,喷嘴口径2 mm。

3 仿真分析

根据湿式除尘器结构参数优化结果,采用SolidWorks软件对除尘器各结构进行建模及组合装配,所得除尘器虚拟样机如图6所示。

表 6 除尘器除尘效率响应曲面模型方差分析

Table 6 Variance analysis of response surface model for dust removal efficiency of dust collector

项目	平方和	自由度	均方	显著性检验值	
				<i>F</i>	<i>P</i>
<i>A</i>	310.800 0	1	310.800 0	93.270 0	<0.000 1
<i>B</i>	12.810 0	1	12.810 0	3.840 0	0.070 1
<i>C</i>	37.070 0	1	37.070 0	11.120 0	0.004 9
<i>D</i>	4.060 0	1	4.060 0	1.220 0	0.288 2
<i>AB</i>	40.960 0	1	40.960 0	12.290 0	0.003 5
<i>AC</i>	29.380 0	1	29.380 0	8.820 0	0.010 2
<i>AD</i>	0.819 0	1	0.819 0	0.245 8	0.627 8
<i>BC</i>	0.403 2	1	0.403 2	0.121 0	0.733 1
<i>BD</i>	1.270 0	1	1.270 0	0.381 5	0.546 7
<i>CD</i>	0.384 4	1	0.384 4	0.115 4	0.739 2
<i>A</i> ²	543.390 0	1	543.390 0	163.070 0	<0.000 1
<i>B</i> ²	145.080 0	1	145.080 0	43.540 0	<0.000 1
<i>C</i> ²	87.480 0	1	87.480 0	26.250 0	0.000 2
<i>D</i> ²	17.590 0	1	17.590 0	5.280 0	0.037 5
模型	1 108.650 0	14	79.190 0	23.760 0	<0.000 1
残差	46.650 0	14	3.330 0	—	—
失拟项	40.710 0	10	4.070 0	2.740 0	0.171 8

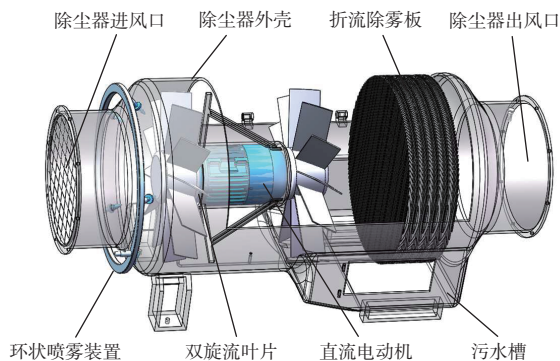


图 6 双叶旋流湿式除尘器虚拟样机

Fig. 6 Virtual prototype of double-blade swirl wet dust collector

基于除尘器优化的结构参数进行仿真。除尘器内部风速及粉尘场仿真结果如图 7 所示,其中流线形状表示风速大小及分布,球状颗粒表示粉尘浓度及分布。经计算,除尘器除尘效率为 97.21%,与响应曲面模型预测值之间的误差为 1.011%(主要由叶片与喷雾参数近似取值导致),在可接受范围内。

根据某矿综掘工作面实际条件建立仿真模型。巷道断面为宽 6 m、高 4 m 的矩形,巷道总长 40 m。掘进机长 10 m,宽 2.9 m,高 1.8 m。仿真模型如图 8 所示,参数设置见表 2、表 3。

对安装除尘器前后巷道内粉尘场进行仿真,结

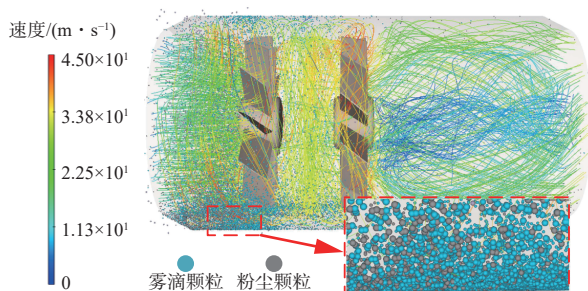
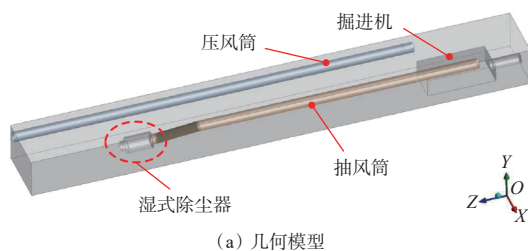
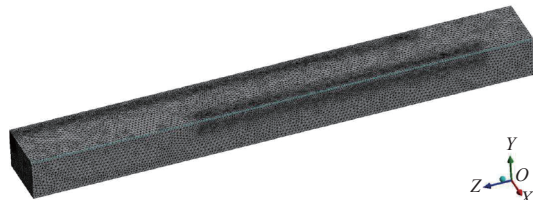


图 7 除尘器内部风速及粉尘场仿真结果

Fig. 7 Simulation results of air flow and dust field in the dust collector



(a) 几何模型

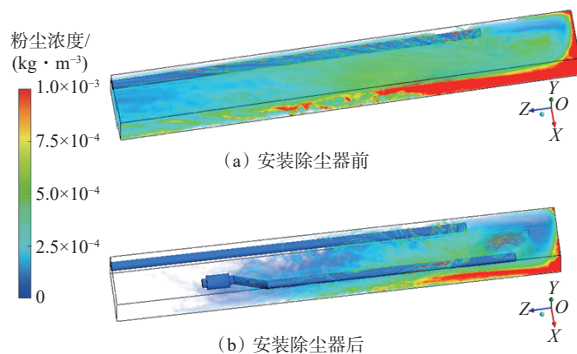


(b) 网格模型

图 8 巷道模型及其网格划分

Fig. 8 Roadway model and its grid division

果如图 9 所示。可看出未安装除尘器时,巷道内粉尘覆盖范围广且粉尘浓度较大,特别是在巷道回风侧人员活动区域;安装除尘器后,巷道回风侧行人呼吸带粉尘浓度大幅降低,工作环境得到有效改善。



(a) 安装除尘器前

(b) 安装除尘器后

图 9 安装除尘器前后巷道粉尘场对比

Fig. 9 Comparison of roadway dust field before and after applying dust collector

4 实验测试

为了验证除尘器除尘效果,搭建除尘实验平台,如图 10 所示。该平台主体包括除尘器与通风管道,配置了粉尘发生装置和粉尘传感器。

在除尘实验平台上测试除尘器的除尘效果。为

消除偶然因素影响,进行4组重复实验。记录1—4号测点处的粉尘浓度,并计算除尘效率,结果见表7。

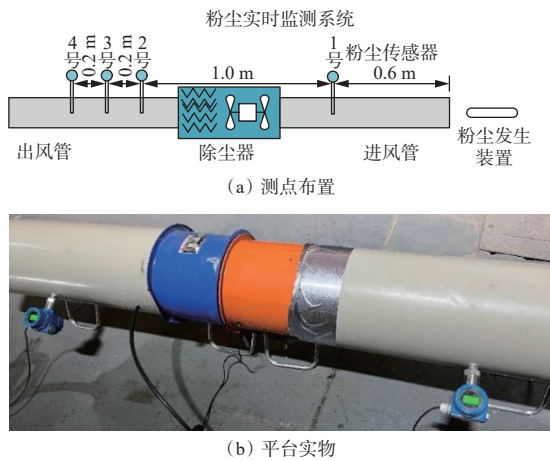


图10 除尘实验平台

Fig. 10 Experimental platform for dust removal

表7 除尘实验结果

Table 7 Experimental data of dust removal

序号	测点处粉尘浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)				2—4号测点粉尘 浓度平均值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	除尘 效率/%
	1号	2号	3号	4号		
1	905.72	52.64	56.85	34.38	47.96	94.70
2	832.81	36.24	23.36	28.18	29.26	96.49
3	854.47	30.54	57.13	48.55	45.41	94.69
4	866.95	69.28	47.50	57.63	58.13	93.30

从表7可看出,4组数据误差较小,主要由粉尘发生装置的随机性导致。测试得到的除尘效率平均值为94.80%,与仿真值的最大误差为3.91%,验证了除尘器具有较好的除尘效果。

采用响应曲面法模拟实验方案1—10的参数设置,在除尘实验平台上进行测试,并与响应曲面模型预测值进行对比,结果如图11所示。可看出各方案中响应曲面模型预测值与实测值误差较小,置信度均在95%左右,验证了该模型具有较好的拟合度和较高的预测精度。

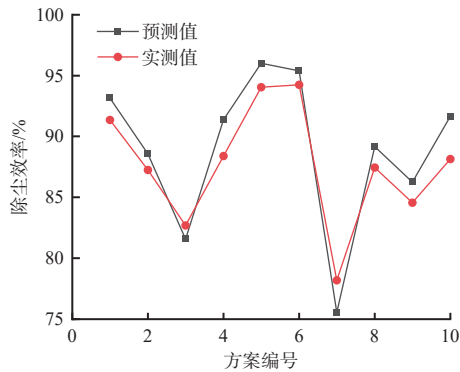


图11 除尘效率的响应曲面模型预测值与实测值对比

Fig. 11 Comparison of dust removal efficiency between predicted values by response surface model and the experimental values

基于课题组前期搭建的综掘工作面巷道相似模拟平台^[20-21],对除尘器模型机进行测试,如图12所示。

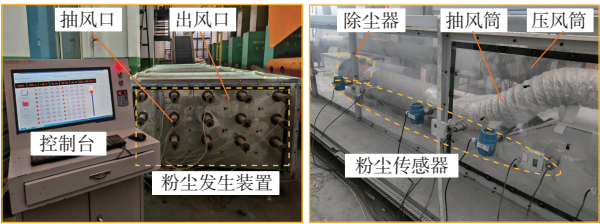


图12 模拟巷道中除尘器测试

Fig. 12 Experiment of dust reduction in simulated roadway

在模拟巷道回风侧行人呼吸带高度安装7个粉尘传感器,其中距断面1~3 m处每隔0.5 m布置1个传感器,3~5 m每隔1 m布置1个传感器,采集应用除尘器前后巷道中的粉尘浓度。各个测点进行5次重复测试,取平均值以减小误差,结果如图13所示。可看出未应用除尘器时,巷道回风侧行人呼吸带高度的粉尘浓度为441.29 mg/m^3 ,应用后降低至269.14 mg/m^3 ,降幅达39.0%,表明该除尘器可显著降低巷道粉尘浓度,改善巷道工作环境。

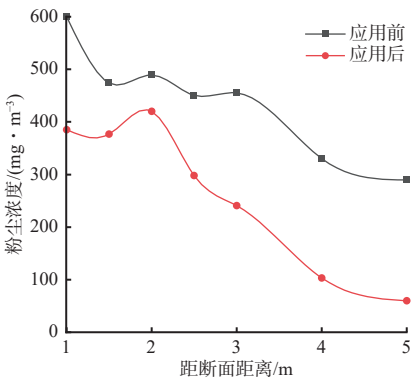


图13 除尘器应用前后测点位置粉尘浓度对比

Fig. 13 Comparison of dust concentration at measuring points before and after application of dust collector

5 结论

1) 结合喷雾降尘与旋流除尘原理,提出了一种综掘工作面双叶旋流湿式除尘器,根据功能树法设计了其总体结构,通过数值模拟与响应曲面法确定了该除尘器的结构参数为叶片安装角37°,转速1550 r/min,喷雾压力1.9 MPa,喷雾口径2 mm。

2) 除尘器除尘效率仿真值为97.21%,实测均值为94.80%,实测值与仿真值的最大误差为3.91%,验证了该除尘器的除尘效果。

3) 在模拟巷道中应用该除尘器后,巷道回风侧行人呼吸带高度的平均粉尘浓度由应用前的441.29 mg/m^3 降低至269.14 mg/m^3 ,降幅达39.0%。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [2] 袁亮. 煤矿粉尘防控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]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 1-7.
- [3] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the "dual carbon" goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [4] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146-156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 146-156.
- [5] 肖鹏. 矿井粉尘防治机理与除尘增效技术研究及展望[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(6): 1052.
XIAO Peng. Research and prospect for dust control mechanism and efficiency enhanced technology of dust removal in coal mines[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(6): 1052.
- [6] 赵健, 张耿城. 深井矿山通风治尘前沿技术及发展态势[J]. 矿业工程, 2018, 16(5): 62-64.
ZHAO Jian, ZHANG Gengcheng. Cutting-edge technology and development trend of ventilation and dust control in deep-level mines[J]. Mining Engineering, 2018, 16(5): 62-64.
- [7] 李小川, 胡亚非, 张巍, 等. 湿式除尘器综合运行参数的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 862-866.
LI Xiaochuan, HU Yafei, ZHANG Wei, et al. Effect of operation parameters of wet dust collector[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 862-866.
- [8] 李刚, 王运敏, 金龙哲. 移动式矿用湿式振弦旋流除尘器的机理分析及实验研究[J]. 金属矿山, 2019(9): 167-171.
LI Gang, WANG Yunmin, JIN Longzhe. Mechanical analysis and experimental research of mobile wet vibrating string cyclone dust collector for mine[J]. Metal Mine, 2019(9): 167-171.
- [9] 江丙友, 张琦, 朱志辉, 等. 湿式除尘器中气水喷雾除尘效果试验研究[J]. 金属矿山, 2023(7): 82-90.
JIANG Bingyou, ZHANG Qi, ZHU Zhihui, et al. Experimental study on dust reduction effect of air-water spray in wet dust collector[J]. Metal Mine, 2023(7): 82-90.
- [10] KURELLA S, MEIKAP B C. Removal of fly-ash and dust particulate matters from syngas produced by gasification of coal by using a multi-stage dual-flow sieve plate wet scrubber[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2016, 51(10): 870-876.
- [11] 邓有凡, 王伟黎, 巫亮, 等. 湿式除尘器优化设计研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(6): 25-28.
DENG Youfan, WANG Weili, WU Liang, et al. Research on optimization design of wet dust collector[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(6): 25-28.
- [12] 王海桥, 陈世强, 李轶群, 等. 矿用湿式多通道轴向离心除尘装置及其优化[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(5): 134-141.
WANG Haiqiao, CHEN Shiqiang, LI Yiqun, et al. Design and optimization on a wetted axial multi-channel centrifugal dedusting device[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(5): 134-141.
- [13] HU Shengyong, GAO Yang, FENG Guorui, et al. Experimental study of the dust-removal performance of a wet scrubber[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(2): 228-239.
- [14] 赵海鸣, 谢信, 夏毅敏, 等. 湿式除尘风机三相除尘运行参数研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1505-1512.
ZHAO Haiming, XIE Xin, XIA Yimin, et al. Research on operation parameters of three-phase flow in wet dust collecting fan[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(6): 1505-1512.
- [15] 杨洁, 胡胜勇, 刘湃, 等. 矿用湿式除尘器研发现状与发展趋势[J]. 煤矿安全, 2023, 54(8): 186-194.
YANG Jie, HU Shengyong, LIU Pai, et al. Research status and development trend of wet dust collector for mine[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(8): 186-194.
- [16] 李琛, 马玉山, 高强, 等. 基于 Realizable k- ϵ 模型的控制阀流场特性研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 328-331.
LI Chen, MA Yushan, GAO Qiang, et al. Study on control valve flow field characteristics based on Realizable k- ϵ turbulent model[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2014, 35(4): 328-331.

(下转第 135 页)

- [19] 翟小伟, 成倬. 柴家沟矿 4(-2)煤层自燃标志气体优选实验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(11): 18-23.
ZHAI Xiaowei, CHENG Zhuo. Experimental study on optimization selection of coal spontaneous combustion index gases in 4(-2) coal seam of Chaijiagou Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(11): 18-23.
- [20] 王崇景, 杨峰, 李可可, 等. 复采工作面煤自燃危险区域划分及综合治理技术研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(1): 86-92.
WANG Chongjing, YANG Feng, LI Keke, et al. Classification and comprehensive management technology of coal spontaneous combustion hazardous areas in the remining face[J]. Coal Engineering, 2024, 56(1): 86-92.
- [21] 武向强. 基于分布式光纤测温系统的采空区自燃“三带”动态变化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WU Xiangqiang. Study on dynamic change of spontaneous combustion "three zones" in goaf based on distributed optical fiber temperature measurement system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [22] 张建业, 陈举师, 孙新. 漏风测定和煤温监测防治采空区煤炭自燃技术[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 60-63.
ZHANG Jianye, CHEN Jushi, SUN Xin. Control technology for coal spontaneous combustion in gobs based on air leakage determination and coal temperature monitoring[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(3): 60-63.
- [23] 翟小伟, 李心田, 侯钦元, 等. 漏风条件下采空区煤自燃分级预警方法研究及应用[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-8[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240716.1114.002.html>.
- ZHAI Xiaowei, LI Xintian, HOU Qinyuan, et al. Research and application of classification warning method for coal spontaneous combustion in goaf under air leakage[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-8[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240716.1114.002.html>.
- [24] 宋涛, 王建文, 王凯, 等. 柠条塔煤矿 S12002 采空区自燃危险区域划分[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(2): 18-22.
SONG Tao, WANG Jianwen, WANG Kai, et al. Division of spontaneous combustion dangerous area in S12002 goaf of Ningtiaota Coal Mine[J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(2): 18-22.
- [25] 王斌, 贾澎涛, 郭风景, 等. 基于多特征融合的煤自燃温度深度预测模型[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 84-90.
WANG Bin, JIA Pengtao, GUO Fengjing, et al. Deep prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on multi-feature fusion[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 84-90.
- [26] 班鸿榆. 袁店二井煤自燃特性及采空区煤自燃预警技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
BAN Hongyu. Study on the characteristics of coal spontaneous combustion in Yuandian No. 2 Well and the warning technology of coal spontaneous combustion in goaf[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [27] 郑学召, 李梦涵, 张嫵妮, 等. 基于随机森林算法的煤自燃温度预测模型研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 58-64.
ZHENG Xuezhaohao, LI Menghan, ZHANG Yanni, et al. Research on the prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on random forest algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 58-64.

(上接第 110 页)

- [17] XIONG Guilong, GAO Zisheng, HONG Congjie, et al. Effect of the rolling friction coefficient on particles' deposition morphology on single fibre[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103450.
- [18] LI Zhengquan, ZHANG Pei, SUN Yongchang, et al. Discrete particle simulation of gas-solid flow in air-blowing seed metering device[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021, 127(3): 1119-1132.
- [19] ZHANG Shuangming, ZHOU Tuo, WU Haowen, et al. Experimental study on gas-solid flow and heat transfer characteristics in downer moving bed[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2023, 18(5). DOI: 10.1002/APJ.2944.
- [20] 龚晓燕, 樊江江, 刘壮壮, 等. 综掘面出风口及抽风口风流综合调控下粉尘场优化分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊 2): 800-809.
GONG Xiaoyan, FAN Jiangjiang, LIU Zhuangzhuang, et al. Optimization analysis of dust field under comprehensive control of air outlet and exhaust air flow in fully mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 800-809.
- [21] 龚晓燕, 赵少龙, 刘壮壮, 等. 掘进面风流监测及适应性智能调控系统研制[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(2): 424-434.
GONG Xiaoyan, ZHAO Shaolong, LIU Zhuangzhuang, et al. Development of airflow monitoring and adaptive intelligent control system for heading face[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(2): 424-434.