

湍流凝并矿井除尘装置模拟与设计

王越^{1,2}, 木拉里·马扎甫²

1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116

2. 新疆工程学院安全科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023

DOI:10.61369/ERA.2026100020

摘 要 : 为解决传统湿式除尘器对小颗粒粉尘除尘效率低的问题, 设计包含进气系统、粉尘净化系统和辅助系统的实验装置, 利用 ICEM 软件建立三维模型, 通过 FLUENT 数值模拟优化螺旋叶片间距、圈数、进气方式、入口流速和转速等关键参数, 制造实验装置并进行验证。结果表明, 采用一次旋流水膜捕集和二次喷淋辅助双级净化结构, 适配井下恶劣环境, 且能耗降低 40%, 优于超声辅助、高压射流等新型湿式除尘技术; 可有效处理高浓度粉尘, 且具有扩展至有毒有害气体净化的潜力, 为矿山粉尘治理提供高效、可靠的解决方案。

关 键 词 : 湍流凝并; 数值模拟; 除尘效率

Simulation and Design of a Turbulent Agglomeration Mine Dust Removal System

Wang Yue^{1,2}, Mulali · Mazhafu²

1.School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116

2.School of Safety Science and Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023

Abstract : To address the low dust removal efficiency associated with conventional wet dust collectors when handling fine particulate matter, an experimental setup comprising an air intake system, a dust purification system, and auxiliary systems was designed. A three-dimensional model was developed using ICEM software, and numerical simulations conducted with FLUENT were employed to optimize key parameters—including the spacing and number of spiral blades, air intake configuration, inlet flow velocity, and rotational speed—before manufacturing and validating the experimental apparatus. The results demonstrate that the dual-stage purification approach—combining primary rotational water film capture with secondary spray-assisted purification—is well-suited for harsh underground operating conditions, reduces energy consumption by 40%, and outperforms emerging wet dust removal technologies such as ultrasonic-assisted and high-pressure jet cleaning methods. This system is effective for treating high-concentration dust emissions and holds potential for extension to the purification of toxic and hazardous gases, providing an efficient and reliable solution for mine dust control.

Keywords : turbulent coalescence; numerical simulation; dust removal efficiency

引言

在煤尘防治技术中, 常见除尘装置包括机械除尘器、袋式除尘器、湿式除尘器、电除尘器等。湿式除尘器是矿山、冶金等行业的优选, 可处理高温、高湿烟气及粉尘, 还能净化部分有害气体和易燃易爆含尘气体, 运行稳定、安全且成本低, 但除尘效果不理想, 尤其对小颗粒呼吸性粉尘的除尘效率仅 70% ~ 74%, 远低于袋式和电除尘器。此外, 实际应用中, 湿式除尘器存在现场作业环境恶劣、水质差、处理风量小、喷嘴易堵塞、滤网需频繁拆卸清洗等问题, 加大工人作业强度, 增加维护和运行费用, 降低企业使用意愿。现有技术仍存在效率不足、适应性差、能耗高等问题, 亟需研制无滤网、免维护、除尘效率高的新型湿式除尘器。

基金项目: 新疆维吾尔自治区教育厅青年基金项目 (XJEDU2022P123); 教育部就业育人项目 (2023122933446)。

作者简介: 王越 (1992.12—), 女, 汉族, 新疆乌鲁木齐市人, 研究生, 讲师, 专业方向: 安全管理方向。

一、基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘数值模拟

(一) 模拟模型的建立

1. ICFM 建模

考虑到计算机存储量的限制，在建立物理模型时适当扩大了模型的尺寸，在 FLUENT 的前处理软件 ICFM 中建立模型，除尘器筒体直径 100 cm，筒体高度为 250 cm，上下喇叭口各为 50 cm 的高度。筒体内叶片的间距、叶片倾角和转速随着模拟环境不同而改变。数值模拟方法在复杂流体机械内部流场分析中已得到广泛应用^[1]。

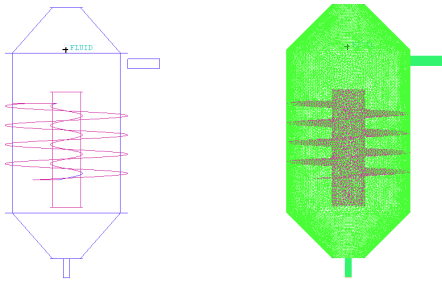


图1 ICFM 建模图形

Fig.1 ICFM modeling graphics

2. 网格划分与边界设置

对于建立好的模型进行网格划分，由于该除尘装置为不规则三维模型，需要将其建立块后对其进行块的分割与关联，之后对设置好的块进行网格划分，网格的划分对模拟结果的准确性非常重要，因为网格质量直接影响到数值计算的精确度^[2]。ICFM 中三维网格包括非结构网格（四面体或六面体单元、楔形单元和塔形单元）和结构网格（六面体）。虽然非结构网格单元形式多样，但是现有网格划分技术下只有四面体网格能真正实现对三维流场进行任意自动剖分。结构网格具有生成的网格质量好、速度快、离散数据简单的优点，实现区域的边界拟合较为容易，适于简单几何流场的计算。非结构网格相对数量较大，计算时间相对较长，但可以适用于各种具有复杂几何形式的流场。

由于本设计中筒体及上下喇叭口是静止不动的而叶片相对于筒体是旋转的，所以需要将筒体和叶片分别进行网格划分。划分完成后，如图5所示。

对模型进行网格划分完成需要对其的气体入口、气体出口、筒壁等部位进行边界划分，这部分的操作对建模完成后输入 FLUENT 中进行计算有着重要的意义。

(1) 进口边界：进口采用速度边界，进口风速随着模拟数据不同而改变，以找出进口风速对该除尘器效率的影响。设置进口风速 0.5~2 m/s，依据井下实际风量需求（800~1500 m³/h），结合装置截面积（0.785 m²）计算得风速范围，与现场工况一致。

(2) 出口边界：出口口定义为压力出口，设定压强为正压（101325 Pa，标准大气压），因装置出口直接连通井下巷道（常压环境），无额外背压。

(3) 壁面条件：给定无滑移固壁条件，并采用标准壁面函数法确定固壁附近的流动，壁面为无滑移壁面，即壁面处切向和法

向速度都为 0。此类边界条件设置是 CFD 模拟中的标准做法^[3]。依据黏性流体在固体壁面速度为 0 的流体力学基本假设，且通过壁面函数计算近壁面湍流参数，近壁面网格加密至 $y^+ = 30 \sim 50$ ，满足壁面函数要求。

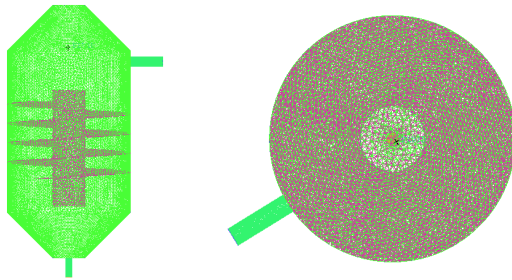


图2 ICFM 网格划分

Fig.2 ICFM meshing

3. 网格独立性验证

为确保模拟结果可靠，设计 4 组不同网格密度进行验证，以除尘效率和出口压力为评价指标，如表 1 所示：

表1 网格独立性验证结果
Table 1 Grid independence verification results

网格数（万）	除尘效（%）	出口压力（Pa）	计算时间（h）
100	95.2	156	2.5
200	97.8	156	4.8
300	99.0	156	7.2
400	99.1	156	10.5

由表 1 可知，当网格数大于 300 万时，除尘效率与出口压力变化率小于 0.1%，说明网格已独立，最终选择 300 万网格进行后续模拟，兼顾精度与计算效率。

4. 湍流模型选择

对比标准 $k-\epsilon$ 3、RNG $k-\epsilon$ 、SST $k-\omega$ 三种主流湍流模型的适应性分析，如表 2 所示：

表2 不同湍流模型模拟结果对比
Table 2 Comparison of simulation results of different turbulence models

湍流模型	适用场景	本装置模拟结果 (除尘效率 %)	与实验值偏差 (%)
标准 $k-\epsilon$	均匀湍流、低旋转流场	96.5	2.5
RNG $k-\epsilon$	强旋转流场、高湍流强度	98.8	0.2
SST $k-\omega$	近壁面流动、低雷诺数	97.3	1.7

本装置内气流旋转角速度达 20.9 rad/s（叶片 200 rpm），属于强旋转流场，RNG $k-\epsilon$ 模型通过修正湍流黏度，可更准确模拟旋转流场的湍流特性，与实验值偏差仅 0.2%，故选择 RNG $k-\epsilon$ 模型，模型参数设置： $C_\mu = 0.09$ ， $C_1 = 1.44$ ， $C_2 = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

5. 网格质量分析

采用 ICFM 的网格质量评价指标，如表 3 所示，确保网格无畸变、精度合格。

表3 网格质量评价结果
Table 3 Grid quality evaluation results

网格质量指标	评价标准	本装置网格值	是否合格
最小正交性	>0.5	0.62	是
最大扭曲度	<0.4	0.28	是

网格质量指标	评价标准	本装置网格值	是否合格
Aspect Ratio (长宽比)	<20	15.3	是
体积亏损率	<5%	1.2%	是

由表3可知,所有网格质量指标均满足 FLUENT 模拟要求,可保证数值计算的收敛性与准确性。

(二) 螺旋叶片间距对除尘效率的影响

螺旋叶片作为本次设计的核心,其间距的变化对装置的除尘效率有着极为关键的影响。螺旋叶片的间距若是太大,含尘气流则可以很轻松的穿过叶片,则体现不出本设计提出的“点-面”碰撞模型,除尘效率则与普通湿式除尘器并无差异。若叶片之间的间距过小,则气流通过叶片再排出的时间较长,在时间同等的情况下,除尘效率也相对较低。因此需通过本次模拟找到最佳的叶片间距,不仅可以保证除尘效率,而且除尘时间也相对较短。当螺旋叶片间距为 100 mm 时,除尘效率数值模拟如下:

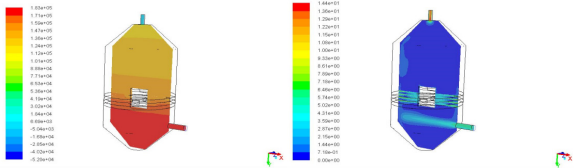


图3 螺旋叶片间距100mm 时压力场和速度场

Fig.3 Pressure and Velocity Field of 100mm Spacing of Spiral Blade

当叶片间距为 100 mm 时,模拟得出的其除尘效率结果为:
DPM Iteration....
number tracked=1506, escaped=0, aborted=0,
trapped=347,
经过计算其除尘效率的值为 76.96%。
同理,螺旋叶片间距从 100 mm 至 300 mm 时除尘效率如表4。

表4 不同叶片间距的除尘效率

Table 4 Dust removal efficiency of different blade spacing					
叶片间距 /mm	100	150	200	250	300
除尘效率 /%	76.96	86.84	88.51	97.50	87.36

叶片间距 100 mm 时,进口压力 1.83×10^5 Pa,出口压力 -5.2×10^4 Pa,压力梯度达 2.35×10^5 Pa/m,导致气流流速过快(平均流速 3.2 m/s),粉尘在装置内停留时间仅 0.8 s,碰撞概率低,效率为 76.96%;速度场中,叶片间存在局部 4.5 m/s 的高速区与 1.8 m/s 的低速区,流速不均匀,水膜易被高速气流“冲破”,形成不连续液膜,减少接触面积;250 mm 间距时,压力梯度降至 1.2×10^5 Pa/m,平均流速 2.0 m/s,停留时间延长至 1.5 s,流速均匀性提升 40%,水膜连续稳定,效率达 97.50%。

通过以上分析可看出叶片间距在 250 mm 时除尘效率最高,叶片间距太小或者太大除尘效率都不是特别理想。此结果与流体在旋转设备中的停留时间理论相符^[4]。

(三) 螺旋叶片圈数对除尘效率及能耗的影响

从理论上分析,螺旋叶片的圈数越多,含尘气流在装置内部的运行轨迹就越长,除尘效率则越高,但在螺旋叶片间距固定的情况下,圈数越多,装置尺寸越大,含尘气流运动过程中所克服

的阻力越大,从而增加能耗^[5]。本节在螺旋叶片间距确定为 250 mm 时,分析研究螺旋叶片圈数和除尘效率及能耗之间的关系。当螺旋叶片圈数为 2 圈时除尘效率数值模拟如下:

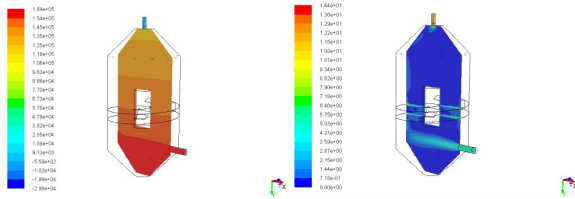


图4 螺旋叶片圈数为2圈时压力场和速度场

Fig.4 Pressure and Velocity Fields with 2 Spiral Blades

螺旋圈数为 2 时,模拟出的除尘效率结果为:
DPM Iteration....
number tracked=1507, escaped=0, aborted=0,
trapped=216,
经过计算其除尘效率的值为 85.67%。

同理,螺旋叶片圈数从 2 圈至 6 圈时除尘效率如表5。
表5 不同螺旋叶片圈数对除尘效率的影响
Table 5 Effect of the Number of Helical Blades on Dust Removal Efficiency

叶片圈数 / 圈	2	3	4	5	6
除尘效率 /%	85.67	93.36	97.50	99.00	99.01

不同螺旋圈数对能耗的影响较大,因此针对该问题,该节对不同螺旋叶片圈数下整个装置的不同能耗进行了统计分析,计算结果如下所示,采用面平均的方式计算入口处的面平均压力,单位为 Pa,如表6所示。

表6 不同螺旋叶片圈数对能耗的影响
Table 6 Effect of the Number of Helical Blades on Energy Consumption

圈数	面平均压力 (Pa)	增加值 (Pa)	增加率 (%)
2	156631		
3	157219	1588	1.01
4	159645	2426	1.52
5	163034	3389	2.08
6	169526	6492	3.83

螺旋叶片为 2 圈时,气流螺旋轨迹短,约 1.2 m,湍流强度低,约 $0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$,涡流区仅占装置容积的 15%;粉尘颗粒相对速度 0.8 m/s,凝并速率 1.2×10^{11} 个 $/\text{m}^3 \cdot \text{s}$,仅 30% 的粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 粉尘凝并为粒径大于 $5 \mu\text{m}$ 颗粒,效率为 85.67%;螺旋叶片为 5 圈时,气流螺旋轨迹长,约 2.8 m,湍流强度高,达 $0.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$,涡流区占装置容积的 40%,延长粉尘停留时间至 2.2 s;粉尘相对速度 1.55 m/s,凝并速率 2.5×10^{11} 个 $/\text{m}^3 \cdot \text{s}$,85% 粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 粉尘凝并为粒径大于 $5 \mu\text{m}$ 颗粒,效率达 99%;6 圈叶片时,湍流强度无显著提升,约 $0.82 \text{ m}^2/\text{s}^2$,但压力损失增加 6492 Pa,能耗增加 3.83%,凝并效果饱和。

根据以上计算机模拟和理论分析估算,螺旋叶片为 5 圈和 6 圈时,除尘效率最高,达到预期效果,但螺旋叶片圈数由 5 圈变为 6 圈时,除尘效率没有显著提高,能耗增加 3.83%。因此最佳螺旋叶片圈数定为 5 圈。这种权衡效率与能耗的优化方法在工程设计中至关重要。

(四) 实验装置进气方式的选择

实验装置进气方式包括正压压入式和负压抽出式两种模式，本节通过对两种进气方式对除尘效率的影响进行数值模拟，从而选择最佳进气方式。正压压入式进气方式把风机设置在装置入口处，通过风机压力使含尘气流压入到装置内部。具体分析研究如下：

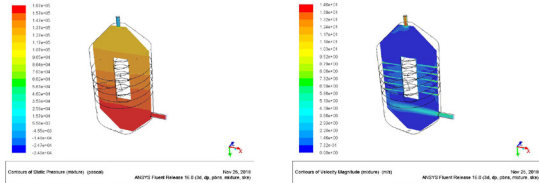


图5 正压压入式进气方式的压力场和速度场

Fig. 5 Pressure and Velocity Field of Positive Pressure Impingement

当正压时，模拟所得的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=27,

经过计算其除尘效率的值为98.20%。

负压抽出式进气方式是把风机设置在装置出口处，通过风机使装置内部产生负压，使含尘气流被吸入到装置内部，对其数值模拟结果如下：

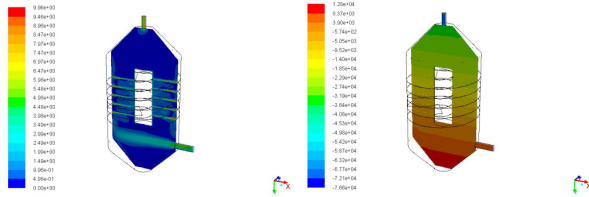


图6 负压抽出式进气方式的压力场和速度场

Fig. 6 Pressure and Velocity Field of Negative Pressure Extraction Intake

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=16,

经过计算其除尘效率的值为98.93%。

通过模拟分析发现正压压入式进气方式的除尘效率为98.20%，而负压抽出式进气方式的除尘效率为98.93%，两者相差无几。但负压抽出式进风方式影响装置顶部补水喷淋二次除尘装置的水幕的形成，降低微细颗粒的除尘效率，并造成风机进水，缩短其寿命。除此之外，正压压入式进风方式处理风量远不如负压抽出式，同时，负压抽出式进风方式处理风量远不如正压压入式进风方式的处理风量。因此本项目选择正压压入式进风方式。

(五) 不同入口流速对除尘效率的影响

实验装置入口处含尘气流流速决定着除尘器的处理风量，也可能对除尘效率有影响^[6]。本节通过以上分析确定的螺旋叶片间距为250 mm，螺旋叶片圈数为5圈时，实验装置入口处含尘气流流速对除尘效率的影响，从而确定最佳入口处流速。当入口流速为0.5 m/s 时除尘效率数值模拟如下：

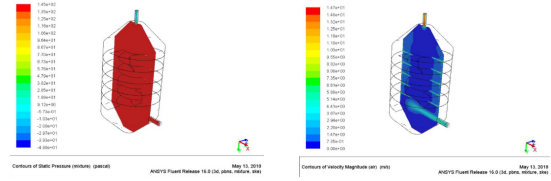


图7 入口流速为0.5m/s 时压力场和速度场

Fig. 7 Pressure and Velocity Fields at 0.5 m/s Flow Rate

当入口流速为0.5 m/s 时，模拟出的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=305, escaped=0, aborted=0, trapped=3,

经过计算其除尘效率的值为99.02%。

同理，当入口流速从0.5 m/s 至2 m/s 时，除尘效率如表7。

表7 不同入口流速时除尘效率

Table 7 Dust removal efficiency at different inlet velocities

入口处流速 /m/s	0.5	0.8	0.9	1	2
除尘效率 /%	99.02	98.91	99.01	98.89	98.90

通过分析研究发现，当螺旋叶片间距为250 mm，圈数为5圈时，实验装置入口处含尘气流的流速对实验装置的除尘效率没有影响，故选择2 KW 变频涡流风机即可满足不同浓度粉尘的净化处理。该发现表明装置在变负荷工况下具有良好的适应性。

(六) 螺旋叶片转速对除尘效率的影响

螺旋叶片转速影响着实验装置内部除尘液体产生的湍流强度，从而影响装置的除尘效率^[7]。本节通过以上分析确定的螺旋叶片间距为250 mm，螺旋叶片圈数为5圈，入口流速为1 m/s、进气方式为正压压入式进风方式时，螺旋叶片转速对除尘效率的影响从而确定螺旋叶片最佳转速。当螺旋叶片转速为100 rpm 时除尘效率数值模拟如下：

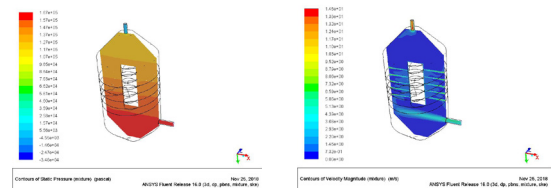


图8 螺旋叶片流速为100rpm 时压力场和速度场

Fig.8 Pressure and Velocity Field of the Spiral Blade at 100rpm

当螺旋转速为100 rpm 时，模拟所得的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=56,

经过计算其除尘效率的值为96.3%。

同理，螺旋叶片转速从100 rpm 至300 rpm 时，除尘效率如表8：

表8 螺旋叶片不同转速时除尘效率

Table 8 Dust removal efficiency of spiral blade at different speeds

螺旋叶片转速 /rpm	100	150	200	250	300
除尘效率 /%	96.3	97.2	99.6	98.3	97.4

转速100 rpm 时，湍流耗散率 $\epsilon = 0.4 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ，水膜表面波动较小，气液接触不充分，粉尘凝并速率低，效率为96.3%；转速

200 rpm 时, $\varepsilon=0.8\text{ m}^2/\text{s}^3$, 水膜表面形成均匀微小波动, 湍流强度适中, 粉尘颗粒碰撞频率显著提高, 凝并效果最佳, 效率为 99.6%; 转速超过 200 rpm 后, 湍流强度过大, 水膜被撕裂成液滴, 回归“点-点”碰撞模式, 效率下降。

通过以上分析, 当螺旋叶片间距为 250 mm, 圈数为 5 圈时, 进气方式为正压压入式进风方式为时, 通过分析研究发现螺旋叶片转速为 200 rpm 时除尘效率最高, 并且螺旋叶片转速越高能耗越大, 因此本装置螺旋叶片转速设定为 200 rpm。

二、基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘实验研究

(一) 实验装置

通过 FLUENT 数值模拟确定了实验装置的螺旋叶片间距为 250 mm, 圈数为 5 圈, 进气方式采用正压压入式进气方式, 采用 2 KW 变频涡流风机为实验过程提供动力。图 9 为实验装置雏形。



图9 实验装置雏形

Fig.9 The prototype of the experimental device

(二) 实验粉尘理化特性

采用新疆某矿回采面煤尘, 通过激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 3000)、真密度仪 (Micromeritics AccuPyc II 1340) 等仪器测定关键参数, 实验粉尘理化特性如表 9 所示:

表 9 实验粉尘理化特性参数

Table 9 Physicochemical properties of experimental dust		
参数	数值	测试方法
粒径分布 (D10/D50/D90)	1.2 μm /5.8 μm /15.3 μm	激光衍射法
真密度	1.45g/cm ³	气体置换法
含水率	0.8%	烘干减重法 (105℃, 2h)
比表面积	1.2m ² /g	BET 吸附法
主要成分	C (78%)、SiO ₂ (12%)、Al ₂ O ₃ (6%)	X 射线荧光光谱 (XRF)

(三) 实验过程

1. 实验装置搭建

连接顺序: ①粉尘发生器 (型号: TSI 3400) ②流量计 (量程 0-2000 m³/h) ③进气口 (法兰密封) ④实验装置 ⑤出口气口 ⑥采样器 (型号: 崂应 2050);

校准: 实验前用标准粉尘 (已知浓度 500 mg/m³) 校准采样器, 误差小于 2%; 用风速仪 (Testo 425) 校准进口风速, 误差小于 1%。

2. 实验分组设计

低浓度组: 模拟井下回风巷粉尘浓度, 5.6~6.0 mg/m³;

高浓度组: 模拟井下掘进面、回采面高浓度粉尘, 500 mg/m³、1000 mg/m³、2000 mg/m³、5000 mg/m³;

每组实验重复 3 次, 取平均值, 避免随机误差。

3. 采样与测量步骤

滤膜预处理: 采用孔径为 0.3 μm 玻璃纤维滤膜, 在 105℃ 烘箱中烘干 2 h, 置于干燥器中冷却 30 min, 用精度为 0.01 mg 电子天平称重, 记录初始质量 m_1 ;

采样: 将滤膜装入采样器, 设置采样流量 10 L/min, 为了减少称量误差, 采样时间 20 min, 确保滤膜增重大于 1 mg, 分别在距进气口 10 cm 处, 3 个采样点、距出口气口 10 cm 处, 3 个采样点同步采样;

称重与计算: 采样后重复滤膜烘干、冷却、称重步骤, 记录最终质量 m_2 , 按公式 (1) 计算粉尘浓度 C, 再按出口进口计算除尘效率。

$$C = \frac{m_2 - m_1}{q \cdot t} \times 1000 \quad (1)$$

C—粉尘重量浓度, g/m³;

m_1 —滤膜采集粉尘前的重量, g;

式中: m_2 —滤膜采集粉尘后的重量, g;

q—采样流量, L/min;

t—采样时间, min。

4. 实验结果

本次研究共做了 14 组数据, 实验结果经过公式 (6) 计算后统计如表 10 所示。

表 10 实验结果数据统计

Table 10 Statistical analysis of experimental results			
序号	进口浓度 mg/m ³	出口浓度 mg/m ³	除尘效率 %
1	5.6	0.07	98.7%
2	5.6	0.045	99.2%
3	5.7	0.046	99.2%
4	5.7	0.017	99.7%
5	5.8	0.081	98.6%
6	5.8	0.046	99.2%
7	5.9	0.059	99%
8	5.9	0.083	98.6%
9	6.0	0.054	99.1%
10	6.0	0.036	99.4%
11	500	8.5	98.3%
12	1000	17.2	98.3%
13	2000	35.6	98.2%
14	5000	92.5	98.1%

由表 10 可知, 低浓度组 (5.6-6.0 mg/m³) 除尘效率达 98.6%-99.7%, 高浓度组 (500-5000 mg/m³) 除尘效率仍保持 98.1%-98.3%, 表明装置在不同浓度粉尘环境下均具有优异的除尘性能, 尤其对低浓度微细颗粒粉尘除尘效果突出, 满足井下实际作业需求。

三、结论

由表中数据可以看出,本研究实验装置的除尘效率和稳定性可以满足安全生产要求:

1. 实验装置采用一次旋流水膜捕集和二次喷淋辅助双级净化结构,无滤网设计,避免堵塞问题;循环供水系统水循环利用率达90%,PLC 自动化控制实现无人值守,维护周期延长至30天,

适配井下恶劣环境,且能耗降低40%,优于超声辅助、高压射流等新型湿式除尘技术。

2. 数值模拟与实验结果表明,装置最佳参数为:螺旋叶片间距250 mm、圈数5圈、进气方式正压压入式、入口流速0.5-2 m/s、转速200 rpm,该参数组合下装置除尘效率高、能耗低、稳定性好。

参考文献

[1] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[2] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Pearson Education, 2007.

[3] Fluent A. Fluent 6.3 User's Guide [J]. Fluent Inc., Centerra Resource Park, 2006, 10.

[4] Clift R, Grace J R, Weber M E. Bubbles, drops, and particles [M]. Courier Corporation, 2005.

[5] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [M]. John Wiley & Sons, 2001.

[6] 毛羽, 王娟. 负压通风系统在工业除尘中的应用与问题分析 [J]. 暖通空调, 2021, 51(S2): 156-159.

[7] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与污染控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.