

基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘机理研究

王越^{1,2} 木拉里·马扎甫²

1. 中国矿业大学 安全工程学院, 中国·江苏 徐州 221116

2. 新疆工程学院 安全科学与工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830023

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, 提出螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘机理, 以提升粉尘捕集效率。结果表明, 通过形成连续螺旋水膜实现“面-点”碰撞, 碰撞概率从 20-30% 提升至 95-98%, 使微细颗粒粉尘除尘效率达 99%, 显著优于现有湿式除尘技术 (70-74%), 适用于井下环境; 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: 螺旋水膜复合; 湍流凝并; 除尘效率

Analyzing the Mechanism of Turbulent Coagulation Dust Capture Based on Spiral Water Film Composite

Wang Yue^{1,2}, Mulali Mazhafu²

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

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

Abstract: To address the low dust removal efficiency associated with conventional wet dust collectors when handling fine particulate matter, this study proposes a turbulent coagulation-based dust collection mechanism incorporating a spiral water film, thereby enhancing dust capture efficiency. The results demonstrate that by forming a continuous spiral water film to facilitate "surface-point" collisions, the collision probability is increased from 20-30% to 95-98%, enabling a dust removal efficiency of 99% for fine particulate matter – significantly outperforming existing wet dust removal technologies (70-74%) and making this approach suitable for underground environments. This system is effective for treating high-concentration dust streams and holds potential for extension to the purification of toxic and hazardous gases, providing an efficient and reliable solution for mine dust control.

Keywords: Spiral water film composite; Turbulent coalescence; Dust removal efficiency

0 引言

根据国家统计局近 20 年公布的统计数据显示, 煤炭消费占我国能源总消费构成的 70% 以上, 预计到 2050 年仍会占到 60%。因此煤炭开采在国民经济中起着至关重要的作用^[1]。然而, 煤矿开采过程中产生大量粉尘, 其浓度最低为 300 mg/m³, 最高可达 8000 mg/m³ 以上, 造成煤尘爆炸及尘肺病等职业危害^[2]。从 1949 年建国到 2024 年的 60 年间, 我国煤矿共发生百人以上的死亡事故 35 起, 死亡人数高达 4564 人。其中与煤尘爆炸有关的事 22 起, 占事故总数的 58%, 共死亡 2415 人, 占死亡总人数的 52.9%。2024 年全国共报告各类职业病新病例 23062 例, 其中职业性尘肺病 19418 例, 占各类职业病新病例比例为 84.2%^[3]。全国每年因尘肺病造成的直接经济损失达 80 多亿元, 间接损失更是难以估量^[4]。

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。因此, 本研究提出螺旋水膜复合湍流凝并捕尘机理, 相较于传统湿式除尘“点-点”碰撞技术, 针对“面-点”碰撞设计开展相关研究, 为矿山粉尘治理提供更优方案。

1 基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘机理

1.1 传统湿式除尘机理分析

传统湿式除尘装置除尘效率低下的主要原因是采用喷雾形式捕捉悬浮粉尘颗粒, 属于“点-点”形式的碰撞结合, 即液滴与粉尘颗粒碰撞结合以加快尘粒沉降, 其除尘效率取决于“点-点”碰撞的概率和结合程度, 且液滴颗粒大小不易掌控, 如图 1 所示。

1.2 螺旋水膜捕捉粉尘颗粒除尘机理

针对传统湿式除尘模式除尘效率受粉尘颗粒与除尘液滴碰撞机率影响的问题, 本文提出螺旋水膜捕捉粉尘颗粒除尘机理, 即基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘机理, 如

图 2 所示。该机理通过形成连续液面，增大气液接触面积，其理论基础涉及多相流与湍流混合作用，进而提高除尘效率，并在此基础上设计实验装置结构，通过计算机模拟优化结构，最终试制实验模型，验证该假设的可行性。

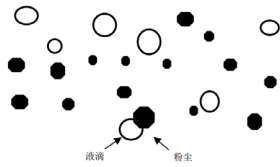


图1 “点—点”碰撞模型（液滴捕捉粉尘示意图）

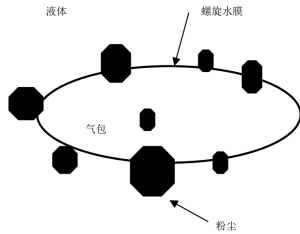


图2 “面—点”碰撞模型（螺旋液面捕捉粉尘示意图）

1.3 机理的数学模型与理论推导

1.3.1 “面—点”碰撞概率数学模型

传统湿式除尘中，“点—点”碰撞概率，即液滴与粉尘的碰撞概率通过公式（1）计算：

$$P_{point} = \frac{\pi d_d^2 n_d v_{rel} t}{4Q} \quad (1)$$

式中： P_{point} —碰撞概率；

d_d —液滴粒径， μm ；

式中： n_d —液滴数浓度，个/ m^3 ；

v_{rel} —液滴与粉尘相对速度， m/s ；

t —接触时间， s ；

Q —处理风量， m^3/h 。

计算时根据生产实际及模型设计情况，液滴粒径在 $50 \sim 100 \mu m$ 范围之内，液滴数浓度在 $10^6 \sim 10^7$ 个/ m^3 之间，液滴与粉尘相对速度在 $0.5 \sim 1 m$ 之间，接触时间在 $0.1 \sim 0.2 s$ 之间，处理风量设为 $1000 m^3/h$ 。代入以上典型值计算得 $P_{point} = 0.2 \sim 0.3$ ，即碰撞概率仅 $20 \sim 30\%$ 。

本研究“面—点”碰撞概率计算过程中，通过粉尘径向受力平衡结合 Stokes 阻力公式推导得出粉尘径向速度如公式（2）计算：

$$v_p = \frac{k d_p^2 \rho_p v_\theta^2}{18 \mu R} \quad (2)$$

式中： k —湍流修正系数； d_p —粉尘粒径， m ；

ρ_p —粉尘密度， kg/m^3 ；

v_θ —气流切向速度， m/s ；

μ —空气动力黏度， $Pa \cdot s$

R —装置半径， m ；

计算时根据生产实际及模型设计情况，湍流修正系数取 35，粉尘粒径未 $2.5 \times 10^{-6} m$ ，粉尘密度为 $1450 kg/m^3$ ，气流切向速度为 $5 m/s$ ，空气动力黏度 $1.81 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ，装置半径为 $0.5 m$ ，代入以上典型值计算得粉尘径向速约为 $0.05 m/s$ 。

“面—点”碰撞概率，即水膜与粉尘的碰撞概率如公式

（3）计算：

$$P_{plane} = \frac{A v_p t}{V} \quad (3)$$

式中： P_{plane} —面—点碰撞概率；

A —接触面积， m^2 ；

v_p —粉尘径向速度， m/s ；

t —接触时间， s ；

V —装置容积， m^3 。

计算过程中，接触面积： $A = 2 \pi R H$ （ R 为筒体半径， $0.5 m$ ； H 为水膜高度， $2 m$ ），得 $A = 6.28 m^2$ ；粉尘径向速度按公式 2 计算为 $0.05 m/s$ ，接触时间为 $0.1 \sim 0.2 s$ 之间，装置容积为 $0.785 m^3$ ，经计算“面—点”碰撞概率 $0.95 \sim 0.98$ ，即碰撞概率达 $95 \sim 98\%$ ，是传统“点—点”碰撞的 $3 \sim 4$ 倍。

1.3.2 湍流凝并机理理论推导

$$v_{rel, turb} = C \sqrt{\varepsilon d_p} \quad (4)$$

基于 Kolmogorov 湍流理论与 Smoluchowski 凝并模型，湍流对粉尘凝并的促进作用推导如下：湍流脉动对相对速度的影响：湍流场中，粉尘颗粒的相对速度由湍流脉动速度决定，如公式（4）所示：

式中： C 为常数，取 1.2 ， ε 为湍流耗散率，根据装置结构，取 $0.8 m^2/s^3$ ， d_p 为粉尘粒径，取 $2.5 \mu m$ ，经计算湍流脉动速度为 $1.55 m/s$ ，是层流条件下相对速度 $0.5 m/s$ 的 3 倍。

根据 Smoluchowski 模型，湍流凝并速率根据公式（5）计算：

$$N_t = \frac{4}{3} \pi d_p^2 n_p v_{rel, turb} \quad (5)$$

式中： d_p —粉尘粒径， m ；

n_p —粉尘浓度，个/ m^3 ；

$v_{rel, turb}$ —湍流脉动速度， m/s 。

计算过程中，粉尘粒径为 $2.5 \mu m$ ，粉尘数浓度为 10^{12} 个/ m^3 ，湍流脉动速度为 $1.55 m/s$ ，计算得出湍流凝并速率是 2.5×10^{11} 个/ $(m^3 \cdot s)$ ，是层流凝并速率的 3 倍，证

明湍流显著促进粉尘凝并，使粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 的小颗粒快速成长为粒径大于 $5\ \mu\text{m}$ 大颗粒，更易被水膜捕获。

2 基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘装置结构设计

本文设计了由进气系统、粉尘净化系统以及辅助系统组成的实验装置，结构示意图如图 3 所示，该结构参考了旋风除尘器和湿式洗涤塔的优点。

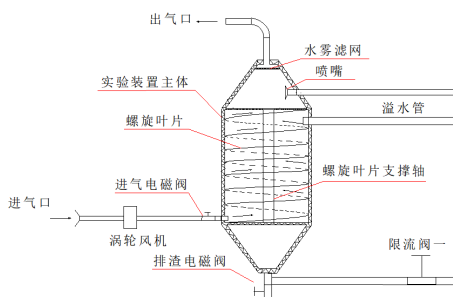


图3 实验装置的示意图

装置设计以高效捕尘、低耗运行、井下适配为核心，融合旋风除尘器的旋流效应、湿式洗涤塔的液膜捕集、PLC 自动化控制，从而延长气流轨迹，增大接触面积，降低运维成本。具体设计逻辑如下：

问题导向：针对井下粉尘浓度波动大、空间狭窄、水质差的特点，避免使用滤网、高压部件，采用一次旋流水膜捕集结合二次喷淋辅助的双级净化结构，兼顾效率与可靠性；

参数匹配：基于数值模拟优化结果，确定装置尺寸，适配井下巷道断面，重量控制在 $500\ \text{kg}$ 以内，便于吊装。

3 结语

本研究提出的螺旋水膜复合湍流凝并捕尘机理，通过形成连续螺旋水膜实现“面-点”碰撞，相较于传统湿式除尘“点-点”碰撞，碰撞概率从 $20\sim 30\%$ 提升至 $95\sim 98\%$ ，结合湍流凝并作用，使微细颗粒粉尘除尘效率达 99% ，显著优于现有湿式除尘技术（ $70\sim 74\%$ ）。

参考文献：

- [1] 罗振敏, 王凯, 王九柱等. 我国井工煤矿降尘防爆及一体化防治技术展望[J]. 煤炭科学技术, 2026,54(01): 163-191.
 - [2] 袁酉亮. 尘源跟踪用无线智能阀门的设计[J]. 自动化技术与应用, 2022,41(5):29-32.
 - [3] 高海, 程传兴. 压入式掘进巷道风流粉尘运移规律及最佳压风量研究[J]. 山西煤炭, 2023,43(3):54-61.
 - [4] 王伟峰, 李高爽, 齐景峰等. 基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10):187-200.
 - [5] 张增辉, 刘彦青, 李瑞卿等. 综掘机截割不同工作面区域除尘风筒的布置位置优选[J]. 煤炭科学技术, 2025,53(10):4-186.
- 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，新疆乌鲁木齐人，研究生，讲师，专业方向：安全管理方向。