

基于涡旋控尘原理的气流生成装置的参数优化研究

李彦宏¹, 郭镇江¹, 石定雄¹, 顿向明^{2*}, 江森辉³, 高爱军³

¹云南省交通科学研究院有限公司, 云南 昆明

²上海交通大学航空航天学院, 上海

³宁波介量机器人技术有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年7月28日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年8月28日

摘要

设计了用于潜孔钻机的涡旋生成装置。改变旋转速度和挂帘形态, 可以产生不同的涡旋。通过仿真模拟, 分析不同涡旋对扬尘的控尘效果。结果表明, 在六片挂帘叶片、70°挥舞角和60°桨距角情况下, 涡旋气流生成装置的控尘效果达到最佳。

关键词

钻孔, 涡旋, 控尘, 仿真

Research on Parameter Optimization of Airflow Generation Device Based on Vortex Dust Control Principle

Yanhong Li¹, Zhenjiang Guo¹, Dingxiong Shi¹, Xiangming Dun^{2*}, Senhui Jiang³, Aijun Gao³

¹Yunnan Provincial Transportation Science Research Institute Co., Ltd., Kunming Yunnan

²School of Aeronautics & Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

³Ningbo Jieliang Robot Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: July 28, 2026; accepted: August 21, 2026; published: August 28, 2026

Abstract

A vortex generation device for down-the-hole drills has been designed. By altering the rotational

*通讯作者。

文章引用: 李彦宏, 郭镇江, 石定雄, 顿向明, 江森辉, 高爱军. 基于涡旋控尘原理的气流生成装置的参数优化研究[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(4): 486-497. DOI: 10.12677/met.2026.154046

speed and the shape of the hanging curtain, different vortices can be generated. Through simulation, the dust control effect of various vortices on dust emission is analyzed. The results indicate that the dust control effect of the vortex airflow generation device is optimal when using six hanging curtain blades, a flapping angle of 70° , and a pitch angle of 60° .

Keywords

Drilling, Vortex, Dust Control, Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通过制造旋转的气流, 维持适当的环境和进行必要的控制, 来模拟自然界中的龙卷风现象。通过对人造龙卷风的研究和实验, 我们可以更好地理解自然界中的龙卷风现象, 并且可以将其应用到气象科学、环境工程和风能利用等领域。

2. 涡旋生成装置设计

2.1. 设计原理

人造龙卷风是一种人工制造的气象现象, 通过特定的装置和原理模拟真实龙卷风的形成和运动过程。人造龙卷风原理涉及气象学、流体力学和热力学等领域。

人造龙卷风的原理主要基于流体力学中的螺旋流和离心力的作用。首先, 通过一个圆柱体或锥形的装置在其底部引入空气, 通过高速旋转的装置使其产生强大的离心力。由于旋转装置的存在, 空气会顺着装置的形状以螺旋状向上旋转。这种旋转的空气流体形成了一个类似于龙卷风的螺旋气流。

人造龙卷风的研究和实验对气候模拟、防灾减灾等领域具有重要意义。通过人工制造龙卷风, 可以模拟真实龙卷风的形成和发展过程, 深入了解其内部结构和运动特点, 为龙卷风观测和预测提供重要的科学依据。目前龙卷风发生装置主要通过大型风扇的结构化组装实现, 例如:

张冀喆[1]研究了龙卷风的内部结构以及流场特性, 分析了平移、粗糙表面、入口风速和物理模型尺寸对龙卷风风场的影响, 并根据数值模拟的结果设计并制造了一种新的龙卷风发生器, 实际测量验证了该发生器可以产生近似龙卷风的风场。

郭舒云、胡胜勇[2]等人基于“涡旋气流增压”原理, 研发了由无叶涡轮、喷孔、环形空腔等组成的引风装置, 以压缩空气为动力, 无叶涡轮高速旋转产生涡旋气流, 负压作用下将周边气流吸入空腔, 喷孔喷出的涡旋气流与吸入的气体混合后以旋流方式高速喷出。有效改善了现有矿山特殊地点通风供氧困难、特殊地点有毒有害气体积聚等问题, 可广泛应用于矿山密闭、掘进巷道、水仓、缺氧或无氧区的短距离通风供氧。

贾鑫[3]研究了压入式通风及长压短抽通风的传统通风除尘方法的除尘效果与不足, 并采用数值模拟研究了装置结构、射流角度、射流风速、抽风筒位置等因素对除尘性能的影响, 并结合控尘实验验证了涡旋吹吸集聚式控尘技术优势及可靠性。

武圆[4]提出了新的龙卷等涡旋的动力学模型, 分别对龙卷风涡旋场中旋转与轴向运动气流的运动与受力, 以及物体在龙卷风涡旋场中径向与轴向的受力, 进行理论分析。

郑磊[5]对附壁风筒对综掘面控尘风流流场的影响规律研究,结果表明,附壁风筒的应用可将巷道流场划分为轴向旋流区、径向旋流区、回流区三个区域,改变了初始单一的轴向流场,并且径向流场和轴向流场的均匀性参数都有所增大,对轴向流场均匀性影响更大。

韩雪峰,刘鸿威,张天[6]等提出并研发一种有限空间涡旋气流卷积原理的动力微雾涡旋控尘技术,用于抑制诱导气流并强化雾滴捕尘。

刘显晨,曹智翔[7]等利用计算机模拟技术对车间的通风进行模拟计算,通过模拟研究论证了涡旋通风技术作为赤泥压滤车间的通风方案的可行性,从而为下一步工程实践打下理论基础。

韦淞浙[8]基于涡旋气流生成条件建立了熔铅锅涡旋通风物理模型,分析不同送风速度和不同排风速度下涡旋通风对粉尘控制效果的影响,验证铅锌熔炼锅涡旋通风对粉尘扩散的控制作用,并分析不同送风速度和不同排风速度下涡旋通风对粉尘控制效果的影响。

张琛[9]通过实验方法与数值方法相结合展开研究,探明了两种典型涡旋通风系统涡流区特性对系统排污效率的影响,为涡旋通风系统实际应用提供了量化的理论依据,并得到了两种典型涡旋通风系统初步的设计方法。

总结起来,人造龙卷风通过模拟真实龙卷风的原理和运动过程,通过特定装置产生高速旋流。本文在前人基础上进一步研究了人造龙卷风控制抽吸的原理将其应用于道路粉尘控尘技术之中。采用理论设计、流场数值计算以及试验研究相结合的方式进行了涡旋生成装置的设计研究,实现了涡旋气流控制抽吸在道路降尘的应用,对未来新型高效防尘装置的设计具有重要的参考价值。

2.2. 涡旋生成装置

涡旋生成装置的三维模型如图1所示,由三部分组成,中空旋转平台、控尘罩、挂帘。

控尘罩两侧设置有两个滚轮镶嵌于导向板中,滑轮尾端穿过控尘罩后,固定安装在中空平台上。导向板末端固定安装于改良式钻头底座两侧,导向板用于保证涡旋生成装置上下移动时不会倾斜。

中空旋转平台提供旋转运动,并传动给与其固定的挂帘,从而产生诱导旋流。

挂帘由数个柔性叶片组成,叶片设置有橡胶骨架,用于平衡柔性、刚度与减振,实现自适应。

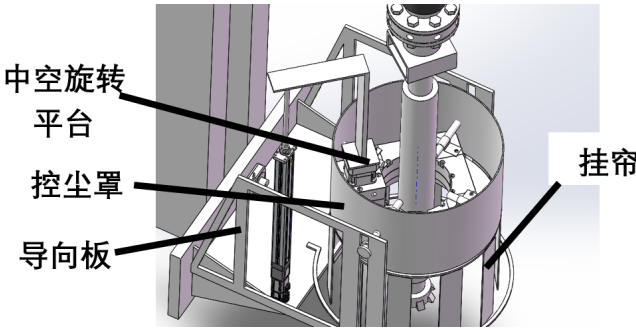


Figure 1. Overall diagram
图1. 总体图

3. 实验原理

3.1. 核心原理

利用旋转叶片产生一个稳定的、低速但强旋向的环状射流(即旋流风幕),以此包裹污染源(如粉尘),在流体力学上实现“软隔离”与定向引导。其主要构成如下:

(1) 旋流的生成

当风机叶片旋转时，推动空气，赋予其两种运动分量：

切向速度：由叶片旋转驱动，使空气绕轴旋转。

轴向速度：由叶片桨距角产生的推力，使空气沿轴向(出风方向)运动。

这两种速度的合成，形成了一条螺旋前进的螺旋流线。众多叶片产生的螺旋流在出口下游混合，形成一个整体的旋转射流(Swirling Jet)。

(2) 涡旋流场的形成与结构

这是控尘的关键。形成的旋流射流具有以下典型涡结构：

叶尖涡/起动涡：叶片旋转时，叶尖处因压力突变会脱落后强度较大的涡旋，它们是构成整体涡量场的重要部分。

尾涡/涡街：每个叶片后缘会周期性脱出尾迹涡，这些涡相互诱导、合并。

涡量场与涡核：所有离散的涡通过粘性作用相互缠绕、合并，最终在射流外围形成一个环状涡包络面，其内部是一个旋转速度较高的低压涡核区域。这个涡核就像一根“虚拟的旋转轴心”，具有很强的流动自持性。

(3) 控尘的物理机理

旋流风幕正是利用上述涡旋流场的特性来实现控尘：

包裹与约束效应：强旋流产生的离心力将粉尘颗粒甩向外围，而涡核中心的低压和轴向速度则吸入含尘空气。整个流场就像一个动态的、无形的“管道”，将粉尘约束在风幕内部。

诱导与隔离效应：旋流风幕与外部的静态或低速空气之间存在很大的速度梯度(剪切层)。这个剪切层就像一个屏障，外部空气很难穿透它进入风幕内部，风幕内部的污染物也因被旋转流场包裹而难以向外扩散。这是“气幕”隔离的核心。

3.2. 三个关键参数的影响与机理

3.2.1. 叶片数量

叶片数量主要影响涡系的空间结构和涡旋间的相互作用。

影响现象：

(1) 叶尖涡间距与强度：叶片越少，单个叶片的载荷越大，产生的叶尖涡强度越高，且涡与涡之间的间距越大，结构越独立、清晰。叶片越多，涡间距越近，涡旋强度相对较低。

(2) 涡-桨干扰：后方叶片切入前方叶片产生的叶尖涡，称为“涡-桨干扰”，是振动和噪音的主要来源。叶片少时，干扰是间歇性、剧烈的，导致明显的振动和脉冲噪音。叶片多时，干扰更频繁但每次强度减弱，流场更平滑，振动噪音显著降低。

(3) 尾涡系致密性：多数叶片使尾涡系结构更致密、连续，近似一个涡环面，从而使下洗流在桨盘上的分布更均匀。

物理机理：

核心是涡的相互诱导、拉伸和耗散。密集的涡旋会相互干扰，导致部分能量抵消，整体涡量场更扩散，峰值涡量降低。这削弱了强烈的涡-桨干扰，提升了飞行品质和声学性能。

3.2.2. 桨距角

桨距角是叶片弦线与旋转平面的夹角，直接决定叶片迎角和升力系数，是涡旋强度的“源”。

影响现象：

(1) 涡旋强度：根据库塔-茹科夫斯基定理，升力与环量(涡旋强度的度量)成正比。增大桨距角→增

大迎角和升力系数→叶片环量增大→叶尖涡和尾涡的强度线性增强。

(2) 下洗流速度：更强的涡系诱导出更强大的下洗流。直升机通过增大总距(集体桨距角)来爬升，其物理本质就是增强涡系强度，从而增大动量改变率(下洗流)，获得更大反作用力(升力)。

(3) 流动分离：过大的桨距角可能导致叶片失速，产生小尺度分离涡，干扰主叶尖涡的稳定发展。

物理机理：

机理核心是环量与升力的直接等价关系。桨距角作为控制量，直接决定了从桨叶后缘拖出的涡层强度，进而决定了整个涡系的“源强”。

3.2.3. 挥舞角

挥舞角是叶片相对于旋转平面的上下摆动角，主要是对不对称来流的响应，它通过改变涡的几何路径来影响流场。

影响现象：

(1) 叶尖涡轨迹：挥舞角使叶尖运动轨迹不再是标准圆形。例如，前行边挥舞角小，叶尖轨迹低；后行边挥舞角大，叶尖轨迹高。这导致叶尖涡被释放后，形成一个纵向有起伏的复杂三维螺旋轨迹。

(2) 涡系拓扑结构：挥舞运动使本应排列在规则圆柱面上的叶尖涡发生空间扭曲，改变了涡与涡之间的相对位置。

(3) 缓解涡-桨干扰：这是一个关键益处。挥舞运动使后方叶片的轨迹可能高于前方叶尖涡，从而避免直接“撞击”强涡核，仅与涡核的诱导速度场相互作用，显著减轻了剧烈的 BVI。

物理机理：

机理核心是通过几何路径变化调节涡间相互作用。挥舞角不直接改变涡的强度，但通过改变涡的释放点和对流路径，重塑了整个涡系的空间拓扑，影响其稳定性和演化，并被动地成为一种避免强干扰的调节机制。

3.3. 总结与参数相互关系

(1) 叶片数量、涡系空间结构、干扰频率度、涡的相互干扰与空间平均化。少叶：振动噪音大，结构简单。多叶：品质高，操纵灵敏，成本高。

(2) 桨距角、涡系强度、下洗流速度、环量/升力与涡强度的等价关系、控制升力(垂直运动)，是功率主要决定因素。

(3) 挥舞角、涡系几何轨迹、涡间相对位置、通过改变涡路径调节相互作用，解决飞行力学问题，并被动缓解 BVI。

(4) 桨距角 ↔ 挥舞角：增大总距以爬升时，锥度角(平均挥舞角)会增大。周期变距也会引起周期挥舞。

(5) 叶片数量 ↔ 桨距角：为产生相同总升力，叶片越多，单个叶片负担越小，所需桨距角也越小。

(6) 挥舞角反馈：挥舞运动本身会通过挥舞-变距耦合机构反馈影响叶片的局部有效桨距角。

结论：叶片数量、桨距角和挥舞角分别从“空间结构”、“源强”和“几何路径”三个维度，共同塑造了直升机旋翼的复杂涡旋流场。深入理解其影响机理，对于优化直升机的气动效率、振动噪声性能和飞行安全性具有根本性的重要意义。

4. 仿真模拟

4.1. 湍流模型

本研究采用 SolidWorks Flow Simulation 内置的 $k-\varepsilon$ 湍流模型(标准壁面函数)对流体流动进行数值模

拟。该模型通过求解湍动能(k)及其耗散率(ϵ)的输运方程来封闭雷诺平均纳维 - 斯托克斯(RANS)方程, 适用于本研究中涉及的高雷诺数、充分发展的内部湍流流动。壁面附近的流动通过标准壁面函数进行处理, 在保证计算精度的同时有效控制了近壁面网格需求。

4.2. 收敛标准

- 计算收敛性通过以下综合判据进行判断:
- (1) 方程残差: 连续性、动量及湍流方程的残差下降至少 3 个数量级。
 - (2) 目标监控: 通过软件“目标”功能监控的关键物理量(包括系统总压降、出口流量及关键点压力/速度)达到稳定状态。其判据为: 在最后 500 次迭代内, 目标值的波动幅度小于其平均值的 0.5%。
 - (3) 全局守恒: 计算域进出口的质量流量相对误差小于 0.5%。当同时满足以上条件时, 认为计算已获得稳定收敛解。

4.3. 网格独立性验证

为确保数值结果的网格独立性, 本研究基于 SolidWorks Flow Simulation 的网格等级控制功能, 设置了多套网格方案进行验证。基准工况设定为入口给定总压, 出口静压为 0.2 MPa, 目标出风速度为 10 m/s。通过对比三组全局初始网格, 其等级分别为 4 级、5 级和 6 级的系统网格。在出口边界条件为 0.2 MPa 静压的设定下, 计算收敛后出口截面监测的关键参数对比结果如表 1 所示:

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

网格方案	单元总数 ($\times 10^6$)	出口平均速度 (m/s)	相对误差	出口压力 (MPa)	相对误差	入口总压 (MPa)	相对误差
粗(G1)	0.85	9.65	3.5%	0.2002	0.10%	0.2210	0.7%
中等(G2)	2.20	9.96	0.4%	0.2001	0.05%	0.2198	0.2%
细(G3)	5.80	10.00	基准	0.2000	基准	0.2194	基准

验证结果表明, 以细网格(G3)的计算结果为基准, 当中等网格(G2)的单元数加密至约 2.2 百万时, 核心目标参数出口平均速度已达到 10 m/s 的设计目标, 且与基准值的相对误差小于 0.5%。同时, 入口总压等关联参数的变化也趋于稳定。根据工程收敛准则(关键参数变化率小于 1%), 可认为中等网格(G2)的计算结果已基本不受网格进一步加密的影响。所有后续正式计算均采用 G2 网格配置。

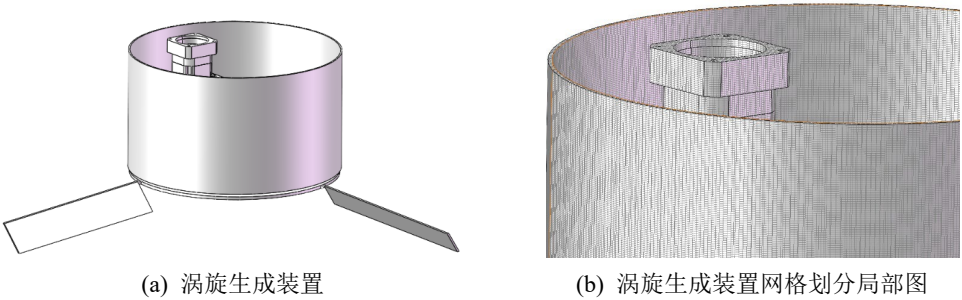


Figure 2. Overall diagram and grid division diagram of vortex generation device
图 2. 涡旋生成装置整体图与网格划分图

如图 2 所示，控尘罩的直径为 710 mm，高度 400 mm，挂帘叶片长度为 500 mm 宽度 120 mm，利用软件划分网格。

4.4. 仿真研究

本节研究了不同样式的涡旋生成装置对涡旋气流的形成及其对灰尘控制能力的影响。通过给定不同的参数设置，保持边界条件即孔洞出风参数为 10 m/s、0.2 MP，完成了不同条件下流场的数值计算模拟。根据叶片的弦线为探测线，制作涡量折线图。

(1) 叶片数量模拟。固定设置涡旋生成装置旋转速度 10 m/s、挂帘叶片挥舞角 70°、桨距角 45°，分别研究 9 叶片、6 叶片、3 叶片的涡量，图 3 为对应的涡量效果图和涡量折线图的对比。

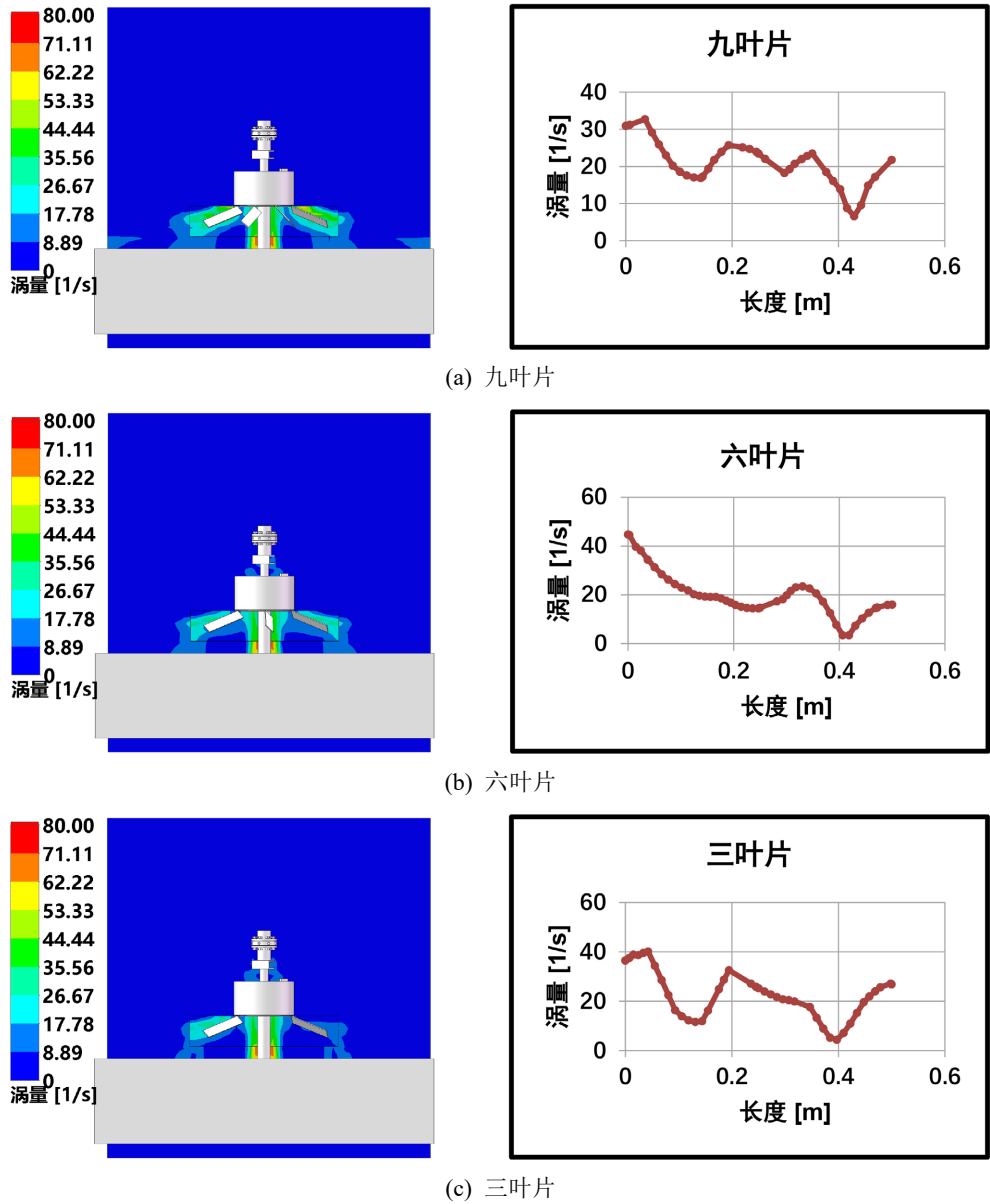


Figure 3. Vorticity distribution with different numbers of blades
图 3. 不同叶片数量下的涡量分布

根据比较发现,三叶片涡量衰减极其迅速,流场结构单一且持续性差。这表明其生成的涡旋强度高但转瞬即逝,无法形成稳定、持久的涡旋气流场,综合效能较低。九叶片涡量分布呈现高频不规则振荡,这是流场严重不稳定的标志。过密的叶片导致了强烈的流动干涉和尾迹干扰,使得能量在无序的扰动中大量耗散,效率最低。六叶片在涡旋的“强度”、“稳定性”和“持久性”三个关键维度上取得了最佳平衡。它既能产生足够强的初始涡量,又能使涡旋以最稳定、最有序的方式发展和维持,从而实现了最高的涡旋气流生成与维持效率。因此,六叶片是本组对比中的最优选择。

(2) 叶片挥舞角模拟。固定设置涡旋生成装置旋转速度 10 m/s, 桨距角 45° , 挂帘叶片数量为 6 片, 分别仿真模拟叶片 60° 挥舞角、 70° 挥舞角、 80° 挥舞角的涡量, 图 4 为对应的涡量效果图和涡量折线图的对比。

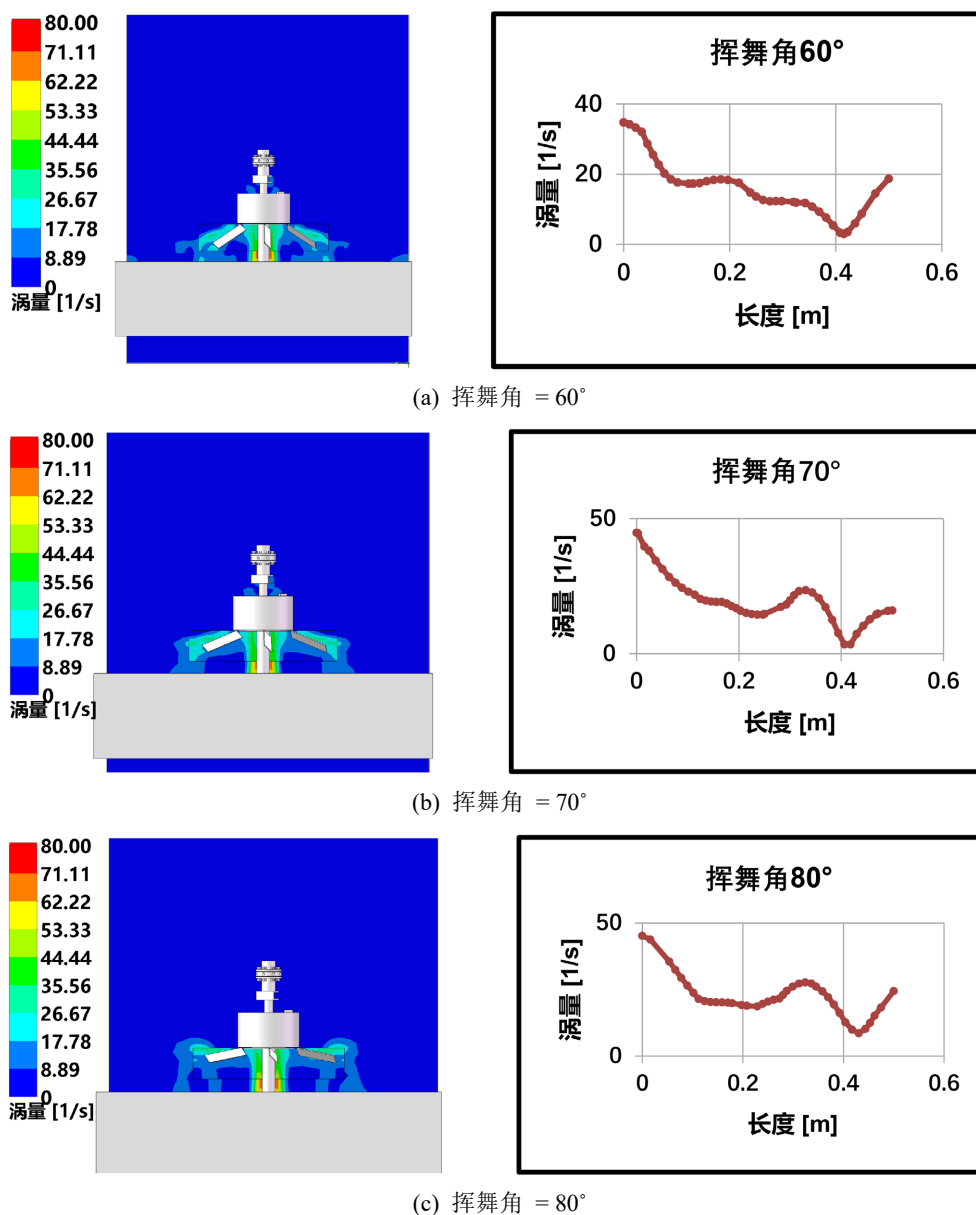


Figure 4. Vorticity distribution at different waving angles

图 4. 不同挥舞角的涡量分布

根据比较发现,挥舞角 60° , 流场存在明显缺陷。中段涡量的崩塌是流动失稳的强烈信号, 会产生较大的附加阻力和能量损失, 综合气动效能较低。挥舞角 80° 呈现“高开低走”的特性。过大的攻角虽然产生了强烈的初始扰动, 但也可能导致流动更易分离, 能量无法被有效组织利用而快速耗散, 效率并非最优。挥舞角 70° 展现出卓越的综合性能, 高初始涡量确保快速生成涡旋, 双峰结构代表了“生成 - 有序脱落 - 再生”的良性循环, 平缓的衰减和广阔的涡量维持区域, 保证了涡旋的长效作用, 其涡量分布曲线揭示了最优的流固耦合状态。故此优先采用 70° 挥舞角设计。

(3) 叶片桨距角模拟。固定设置涡旋生成装置旋转速度 10 m/s 、 70° 挥舞角、挂帘叶片数量为 6 片, 分别仿真模拟叶片桨距角 30° 、 45° 、 60° 的涡量, 图 5 为对应的涡量效果图和涡量折线图的对比。

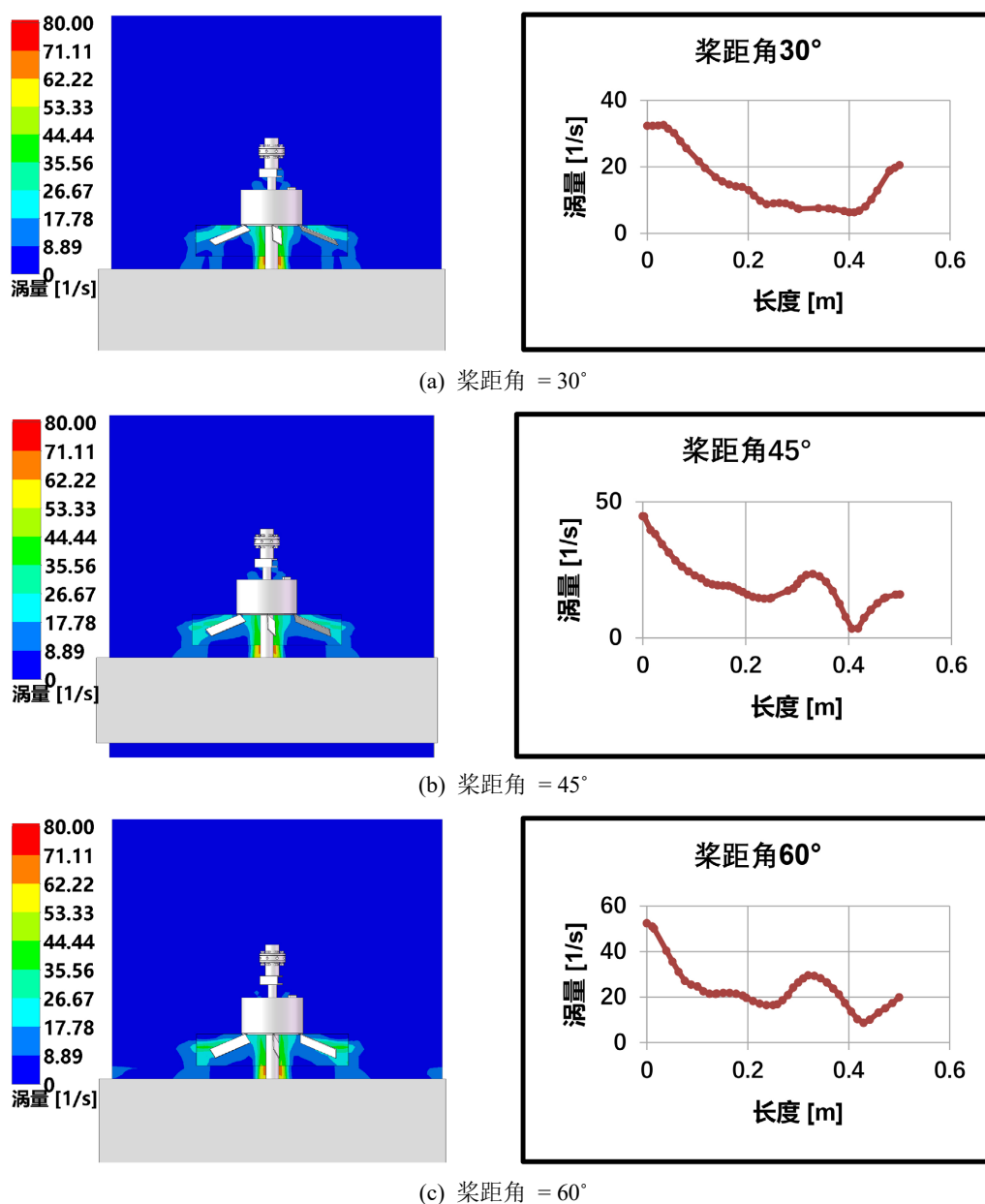


Figure 5. Vorticity distribution at different pitch angles

图 5. 不同桨距角的涡量分布

根据比较发现, 桨距角 30° 流场过于温和。虽然稳定, 但涡量生成强度不足, 能量输入效率低, 难以形成强而有效的涡旋气流, 综合性能不突出。桨距角 45° 呈现“过冲与崩溃”的高风险模式。极高的初始峰值伴随中段的流动性崩溃, 这种不稳定性在实际工程中是不可接受的, 会带来效率损失和可靠性问题, 尽管启动猛但综合效能差。桨距角 60° 全程维持最高的涡量平均水平, 其双峰波动结构是健康涡旋周期性发展的证明, 而非失稳, 在强度、稳定性和持续性上达到了完美平衡。桨距角 60° 是最佳选择。

4.5. 流场数据计算结果及分析

通过上一节所给的计算模型, 给定射流流量 10 m/s , 气压 0.2 MPa , 涡旋生成装置转速 10 rad/s , 挂帘叶片数量为 6、挥舞角为 70° 和桨距角 60° 完成了流场数值计算。

由图 6 可见, 涡旋生成装置利用旋转产生稳定的龙卷风流场, 蓝色为涡旋气流场线, 褐色为模拟粉尘的给定射流场线。

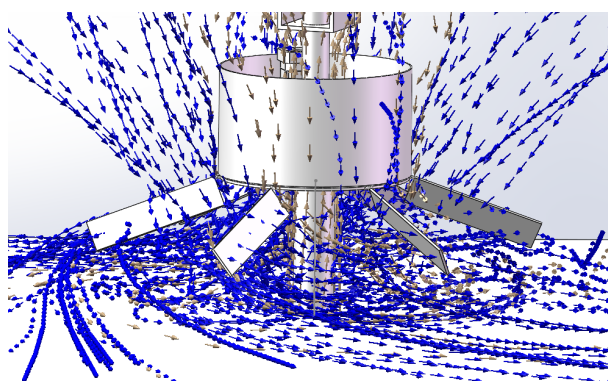


Figure 6. Flow field streamline diagram
图 6. 流场流线图

由图 7 水平截面速度矢量图可见流场具有明显的切向旋转速度, 这说明外部射流的旋转运动通过粘性切应力将旋转运动传递给了中部吸气流, 使之旋转起来。

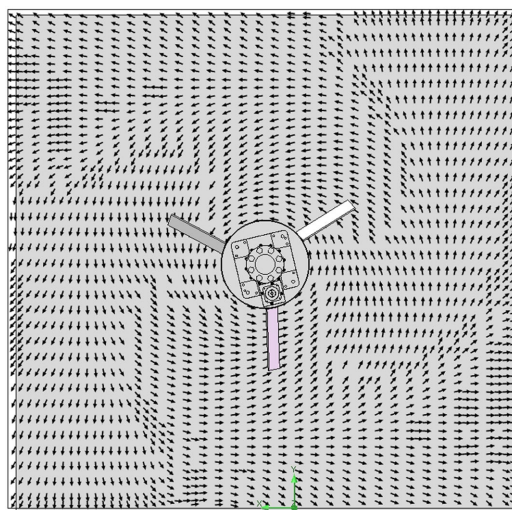


Figure 7. Vector diagram of horizontal section
图 7. 水平切面矢量图

由图 8 竖直截面压力图和图 9 竖直截面图可见，挂帘下方形成了稳定的正压涡旋气流区域，聚集粉尘。

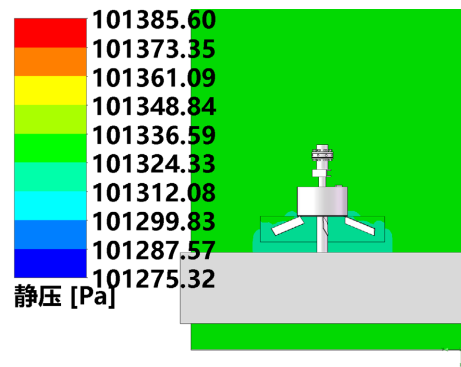


Figure 8. Pressure diagram of vertical section
图 8. 竖直截面压力图

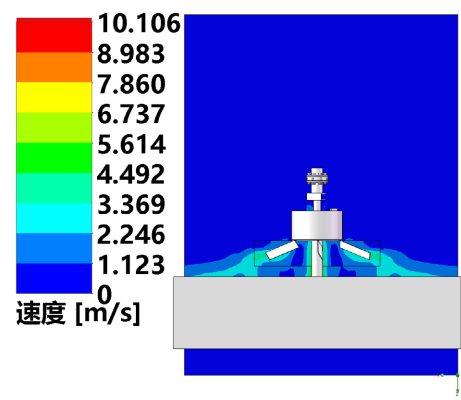


Figure 9. Velocity diagram of vertical section
图 9. 竖直截面速度图

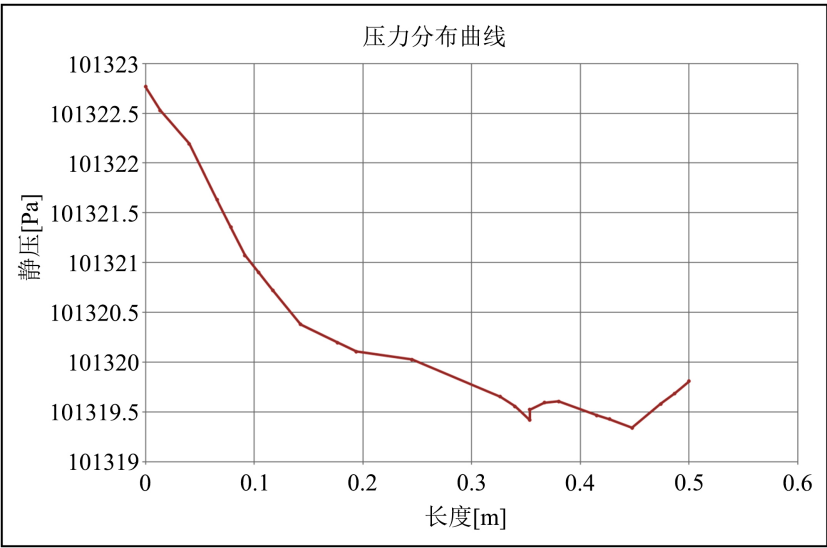


Figure 10. Pressure distribution curve
图 10. 压力分布曲线

图 10 为涡旋生成装置与地面之间垂直方向上的压力分布曲线, 曲线清晰地展示了沿地面某一径向路径上, 静压从装置中心附近向外围的空间分布。整体呈现“先陡降, 后缓变, 末端微升并伴有波动”的非线性特征。

5. 总结

本文研究了涡旋气流控尘的可行性, 完成了数值计算模拟及实验验证, 并研究了挂帘叶片数量和挥舞角对流场的影响, 主要得出以下结论。

(1) 涡旋生成装置在最佳参数, 六叶片、桨距角 60° 、挥舞角 70° 的状态下, 可以得到最优的涡旋气流流场。

(2) 数值计算结果与实验结果的对比表明: 建立的涡旋气流生成装置的数值计算模型, 可有效地模拟涡旋气流流场与粉尘复杂旋流流场。

(3) 通过仿真模拟, 表明本文所采用的方法可以实现控尘效果。但是仿真可能无法完全还原真实涡系的非定常、非线性特征, 并且实际实验中的初始扰动、壁面粗糙度、环境噪声等难以在仿真中精确复现, 可能导致涡核稳定性、涡合并等关键现象的模拟偏差。

基金项目

云南省交科院自主立项(JKYZLX-2023-08)。

参考文献

- [1] 张冀喆. 龙卷风风场数值模拟及发生装置研制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] 郭舒云, 胡胜勇, 孙贾潞, 等. 基于涡旋增压原理的矿用引风装置研发与应用[J/OL]. 金属矿山: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.td.20230925.1320.002>, 2025-11-18.
- [3] 贾鑫. 综掘工作面涡旋吹吸集聚式控尘技术研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [4] 武圆. 龙卷风涡旋场气流的动力学分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 64-70.
- [5] 郑磊. 附壁风筒对综掘面控尘风流流场的影响规律研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(2): 73-76.
- [6] 韩雪峰, 刘鸿威, 张天, 等. 煤矿输煤转载点动力微雾涡旋控尘机理与技术应用研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20260322.1636.001>, 2026-03-23.
- [7] 刘显晨, 曹智翔, 曹莹雪, 刘波. 涡旋通风技术在赤泥压滤车间的应用[J]. 轻金属, 2023(9): 51-54.
- [8] 韦淙淞. 基于数值模拟的铅锌熔炼锅涡旋通风防尘技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [9] 张琛. 涡流区特性对涡旋通风排除污染物性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.