

多翼离心风机叶轮内油性粒子沉积特性的数值研究

李慧军¹, 李斌², 张建坤¹, 孙佳琪², 王发银², 刘海湖¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 健康智慧厨房浙江省工程研究中心, 315336, 浙江宁波)

摘要: 为了揭示多翼离心风机内部油性粒子沉积分布规律,减少风机内粒子沉积,采用 Fluent 离散相模型描述粒子运动,同时结合临界速度模型和用户自定义函数(UDF)建模油性粒子在壁面上的沉积,模拟研究了多翼离心风机内油性粒子的运动轨迹和沉积特性,并探究了颗粒直径对沉积分布的影响。结果表明:油性粒子沉积主要分布在叶片压力面,且靠近出口尾缘段尤为严重;由于进气条件不稳定,整机下内部流场更为紊乱,沉积情况也更为严重;大直径粒子受惯性力主导更容易沉积在叶片表面。针对油性粒子沉积分布规律及成因,提出了切割叶片减小叶片出口安装角从而减少叶轮内油性粒子沉积的方法。对于切割后的叶片,叶轮出口处流动分离区域减小,叶片尾缘段涡量减小,通过数值模拟和实验研究发现,叶轮内油性粒子沉积率分别下降了 30.75% 和 30.66%,两者吻合良好,证实了提出的减小叶轮油性粒子沉积方法的有效性。

关键词: 多翼离心风机;粒子沉积;离散相模型;油性粒子

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202405013 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0133-10

Numerical Study on Deposition Characteristics of Soot Particles in Impeller of a Multi-Blade Centrifugal Fan

LI Huijun¹, LI Bin², ZHANG Jiankun¹, SUN Jiaqi², WANG Fayin², LIU Haihu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Healthy & Intelligent Kitchen Engineering Research Center of Province Zhejiang, Ningbo, Zhejiang 315336, China)

Abstract: To reveal the distribution of soot particle deposition in a multi-blade centrifugal fan and mitigate such deposition, numerical simulations are conducted to investigate the trajectories and deposition characteristics of soot particles within a multi-blade centrifugal fan. The study utilizes the Fluent discrete phase model to describe particle motion, while employing the critical velocity model and the user-defined functions (UDF) to model the particle deposition on walls. In addition, the study examines the particle diameter on deposition distribution. Findings indicate that soot particles mainly deposit on the blade pressure surface, with notable accumulation near the trailing edge close to the outlet. When the complete machine is involved, the flow field within the fan becomes more turbulent due to unstable inflow conditions, thereby leading to escalating deposition levels. It is found that particles with larger diameters exhibit a higher tendency to deposit on blade surfaces owing to the dominant inertial forces. In light of deposition distributions

and their causal factors, an optimization strategy is proposed to reduce the deposition on blade surfaces by cutting blades and consequently reducing the outlet installation angle. In terms of the modified blades, flow separation near the impeller outlet decreases, leading to decreased vorticity around the trailing edge of blades. Comparing the original and modified blades, numerical simulation results show a 30.75% decrease in deposition rate, while experimental outcomes demonstrate a 30.66% reduction. The close agreement underscores the effectiveness of the proposed method in mitigating the deposition of soot particles.

Keywords: multi-blade centrifugal fan; deposition; discrete phase model; soot particles

多翼离心风机具有结构紧凑、流量系数高、噪声小等优点,广泛应用于空调通风、家用厨房等领域,国内外针对多翼离心风机已开展了大量研究。Lun和Wei等^[1-2]研究了不同蜗舌结构对风机噪声的影响;Zhang等^[3]研究了导流槽对风机内部流动特性的影响;马列、王加浩和王梦豪等^[4-6]分别研究了多翼风机采用不同仿生叶片下的噪声和气动特性,表明采用仿生翼型可以有效提高多翼离心风机的风量,减小噪声;孟永哲等^[7]对风机模块化设计中的叶轮-蜗壳匹配性进行了研究,发现采用最佳叶轮-蜗壳匹配方案时,叶轮流道内的旋涡尺度与强度均有所减小,叶片通道内流场分布更为均匀。

目前,针对多翼离心风机的研究主要集中在气动和噪声特性方面,然而多翼离心风机因其工作场景的特殊性而面临着油性粒子沉积问题。厨房油烟通常是由气态、固态和液态构成的多相混合物,成分极其复杂,具有黏度高、易粘附的特点。风机吸入大量厨房油性粒子会导致烟气粒子沉积在叶轮、蜗壳等处,其中叶轮结构较为复杂,叶片表面沉积大量油性粒子会造成风机流量减少,噪声和振动增大,给后期的运行和维护带来巨大压力。

国内、外针对粒子沉积问题开展了广泛研究。Sreedharan和Tafti^[8]提出的临界黏度模型表明,当粒子黏度低于熔融温度对应的临界黏度时,粒子全部沉积。Brach和Dunn^[9]基于Johnson-Kendall-Roberts理论^[10]提出了临界速度模型,认为当粒子以小于临界值的速度碰撞壁面时,粒子将发生沉积,否则发生反弹。El-Batsh和Haselbacher^[11]以临界速度模型为基础发展了考虑粒子粘附的沉积模型。

早期,学界对于粒子沉积的研究主要以实验为主^[12-17],随着现代计算流体力学的不断发展,通过数值方法模拟粒子沉积的研究逐渐兴起。针对粒子沉积的建模,以采用离散相模型实现为主,该方法不考虑粒子对连续流体运动的影响,适用于粒子体积分数不大于10%的情况^[18]。贾会霞等^[19]针对轴流式压缩机入口级动叶,探讨了粒子的运动轨迹和叶

片上粒子的沉积分布情况。周君辉等^[20]研究了不同气流进气角和不同粒径对叶栅内粒子运动和沉积特性的影响,表明较大粒径下粒子随流性较差,较小粒径粒子则相反。杨晓军等^[21]采用网格重构技术,模拟了高压涡轮叶片表面粒子的增长过程,表明粒子的沉积以及小粒子的陷入现象多发生于涡轮叶片压力面前缘处。Yang等^[22]研究了粒子在涡轮静叶表面沉积对叶片表面冷却性能的影响。郝子晗等^[23]采用动网格更新技术,研究了粒子污染物在高压涡轮动叶机匣表面的沉积特性以及沉积物对叶顶区域气动和传热性能的影响。

研究人员对影响粒子沉积的因素也开展了大量研究。Casaday和Bonilla等^[24-25]借助粒子加速沉积试验台,探究了粒子粒径对涡轮叶片表面沉积的影响,发现沉积率随粒径的增加逐渐增大。Rozati等^[26]采用大涡模拟对飞灰粒子在某涡轮叶片前缘气膜孔附近的沉积进行模拟,发现随着粒径增大沉积效率提高,当尺寸达到10 μm 时,沉积率接近90%。Lundgreen等^[27]发现粒子易沉积在涡轮肋壁和弯壁上,粒径越大,粒子更多的在静叶前缘滞止线周围沉积,且随着主流温度升高沉积率增大。Laycock等^[14]实验测试了镍基合金试件表面的沉积特性,探讨了主燃气温度和临界速度对颗粒沉积分布的影响^[28]。为研究涡轮端壁处颗粒物的沉积特性,徐致远^[29]计算了粒径为0.5~25 μm 粒子在不同壁面温度下的粒子碰撞和沉积率,结果表明,较低温度时撞击率较高,但沉积率随温度的升高而增大。此外,研究发现吹风比、气流入口角等也会显著影响涡轮叶片表面粒子沉积速率的分布^[20,30-34]。

综上所述,有关粒子沉积的实验研究以及模拟仿真主要围绕压气机等高压高速叶轮机械展开,在风机等低压流体机械领域内此类研究涉及较少,而探讨风机系统内油烟沉积机理,分析沉积规律并提出有效的改进措施,对提高油烟机的效率和使用寿命具有重要的意义。与涡轮内粒子沉积特性受气体温度影响较大不同,风机内粒子沉积一般不考虑能

量交换,即忽略温度影响。同时,粒子主要组分亦不同于涡轮,导致杨氏模量、泊松比等物性参数与涡轮内粒子存在显著差异。因此,本文针对油烟机用多翼离心风机叶轮积油问题,基于临界速度模型,建立了油性粒子沉积的数值模型和计算方法,并分析了叶轮及蜗壳的积油特性。在此基础上,提出了一种减少多翼离心风机叶轮内积油的方法,并通过实验和模拟证实了方法的有效性。

1 模型描述和网格划分

根据方太厨具有限公司某型号油烟机,本文开展包含厨房区域的整机和单风机两类几何模拟研究。建立了如图1(a)所示的整机计算域,并将其分为厨房区域、油烟机区域、箱体和单机等部分,其中厨房区域尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。同时将内置多翼离心风机划分为进口域、蜗壳、叶轮、转换段和出口域五部分,如图1(b)所示。为保证出口段湍流充分发展,计算域出口向下游延伸 0.3 m 。

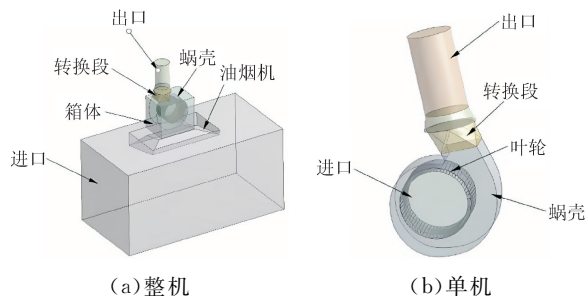


图1 油烟机几何模型

Fig.1 Geometrical model of range hood

采用ANSYS ICEM对整机和单机计算域进行网格剖分,其中内流特性较为复杂的风机区域采用结构化网格,其余部分均采用非结构化网格。风机单机模型网格如图2所示。

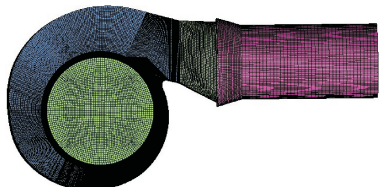


图2 风机单机网格模型

Fig.2 The grid of single fan

2 数值方法与边界条件

2.1 连续相控制方程

模拟中工作介质设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气,为三维不可压

缩流动且不考虑传热和能量损失。连续相介质的控制方程如下。

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}$ 是连续相流体速度; t 为时间; ρ 为连续相流体密度; p 为流体压力; μ 为连续相流体的动力黏度。

本文采用realizable k - ϵ 湍流模型模拟风机流场。该模型在求解旋转运动、强逆压梯度的边界层分离、二次流及回流等均有其独特优势,方程如下

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (4)$$

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \varphi^3 (1 - \varphi \varphi_0) \epsilon^2}{1 + \beta \varphi^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: k 和 ϵ 分别为湍动能和湍动能耗散率; $\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon}$; $C_\mu = 0.0845$; $\varphi = Sk\epsilon$; $\varphi_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$; $C_{1\epsilon} = 1.42$; $C_{2\epsilon} = 1.68$; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.393$,分别为 k 和 ϵ 的有效普朗特数。

2.2 离散相控制方程

本文采用离散相模型追踪油性粒子。假设油性粒子为均一的圆球形且忽略粒子自转,则基于拉格朗日方法粒子的运动描述如下

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = m_p \frac{\mathbf{U} - \mathbf{U}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{U}_p$ 为粒子速度; m_p 为粒子质量; ρ_p 为粒子密度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $m_p \frac{\mathbf{U} - \mathbf{U}_p}{\tau_r}$ 为曳力; $m_p \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 为重力; $\mathbf{F}$ 为附加力,包括虚拟质量力、布朗力、萨夫曼升力、热泳力和压力梯度力等。由于文中模拟粒子的体积分数和尺寸较小,因此只考虑曳力的影响。 τ_r 是粒子的弛豫时间,其表达式为

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D Re} \quad (7)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{U}_p - \mathbf{U}|}{\mu} \quad (9)$$

式中: C_D 为圆球阻力系数; Re 为相对雷诺数; d_p 为粒子直径; a_1 、 a_2 和 a_3 为常数,分别取值为 0.5191 、

—1 662.5 和 5.1467×10^6 。流体与离散相间为双向耦合。

2.3 边界条件及验证

考虑到流动雷诺数较高,且壁面附近流动对主流区域影响较小,采用标准壁面函数模型。进口条件设为总压入口,出口条件设定为静压出口,压力和速度耦合采用 SIMPLEC 方法。为了获得合适的网格精度,本文通过 5 组不同的网格,测试了网格数对计算结果的影响。图 3 给出了不同网格数下叶轮出口处全压的计算结果。由图可知,随着网格数增加,全压初始逐渐增大,当网格总数超过 664.1 万时,全压随着网格数的增加基本不再变化。这表明选用 664.1 万网格即可获得网格独立的结果,故后文将采用此网格数开展研究,具体各部分的网格数目详见表 1。为了验证数值模型选取的合理性,选取上述油烟机在厨房使用工况(转速为 1 231 r/min)进行模拟,将模拟风量与实验数据对比,结果如表 2 所示。由表 2 可知,整机风量的模拟结果与实验结果偏差为 3.47%,误差控制在较小范围内,表明了模拟结果的准确性。

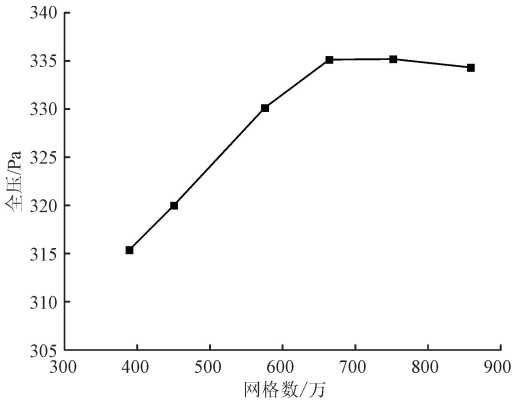


图 3 网格无关性验证
Fig. 3 Grid independence verification

表 1 风机各部分网格数

Table 1 The number of grids of each part within the fan

名称	网格数/万
总体	664.1
叶轮	463.6
蜗壳	58.2
进口	44.3
出口	19.4
箱体	78.6

表 2 风机模拟风量与实验结果对比

Table 2 Comparison of flow rates between the simulated and experimental results

参数	数值		
	模拟	实验	偏差
转速/(r·min ⁻¹)	1 231	1 231	0
风量/(m ³ ·min ⁻¹)	10.45	10.1	3.47%

2.4 粒子沉积模型

本文选取经过实验验证后的临界速度模型^[35]来模拟粒子撞击表面后的粘附沉积过程。当粒子撞击壁面后的法向速度小于临界速度 u_{cr} 时,粒子沉积在固体表面,否则发生反弹。临界速度 u_{cr} 定义为

$$u_{cr} = \left(\frac{2K}{d_p R^2} \right)^{\frac{10}{7}} \quad (10)$$

$$K = 0.51 \left[\frac{5\pi^2 (k_s + k_p)}{4\rho_p^{3/2}} \right]^{2/3} \quad (11)$$

式中: K 为有效刚度; k_s 和 k_p 为与碰撞粒子、沉积表面的泊松比和杨氏模量有关的参数^[9]; R 为运动恢复系数。当稳态流场达到收敛条件后再加入离散相模型,根据厨房油性粒子参数设置颗粒相。厨房油烟中存在多种成分,且主要以液态碳氢化合物为主。依据实验所测得的平均分子量,本文选取 FLUENT 材料库中 fuel-oil-gas 作为颗粒相,其平均分子式为 $C_{19}H_{30}$,密度为 960 kg/m^3 。粒子初始速度选取为 0.05 m/s 以表征其在空间中的自由扩散速度。

3 数值结果与分析

3.1 粒子轨迹及沉积分布规律

在风机转速为 1 231 r/min 工况下,分别模拟了粒子直径为 $5 \mu\text{m}$ 下单机与整机的粒子沉积分布情况,结果如图 4 所示。

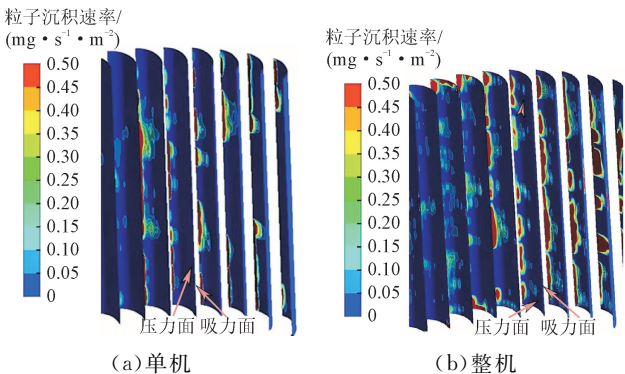


图 4 叶片粒子沉积分布情况
Fig. 4 Particle deposition distribution on the blades

由图可知,油性粒子沉积主要集中在叶片压力

面。这是由于,粒子进入风机叶轮时,在惯性力的作用下直接撞击风机叶片压力面,与其壁面发生多次碰撞而损失动能,因而法向恢复速度小,易小于临界速度,故在压力面形成沉积^[19]。此外,粒子的沉积集中于叶片尾缘,整机沉积分布情况与单机类似,但靠近壁端处沉积情况更为严重。

为了研究粒子在叶片通道内运动和沉积规律的成因,图 5 给出了叶片表面涡量分布情况。图 5 表明,高涡量区域主要集中在叶片尾缘段,这是由于,气流从进入叶片到转向蜗壳过程中气流角度转过 90°,从而在叶轮流道内产生旋涡。同时,在蜗壳与叶轮之间,由于存在二次流,导致蜗壳与叶轮间隙内存在涡旋^[36],二者相叠加,导致了叶片尾缘段涡量较大。低速旋涡处速度梯度大,致使粒子受到的黏滞阻力较大,粒子运动轨迹因此变得紊乱,与壁面发生多次碰撞而沉积在壁面上。同时,由于涡旋强度大,粒子在涡旋的卷吸作用下撞击叶片尾缘段,形成带状沉积段,导致叶片尾缘段沉积严重^[23]。此外,由于整机条件下进气不均匀,其内部流场更为混乱,涡旋表现出由叶片出口向进口处延伸的趋势,故在其卷吸作用下,整机的粒子沉积情况更为严重,且向叶片前缘有一定的发展,如图 4(b)所示。

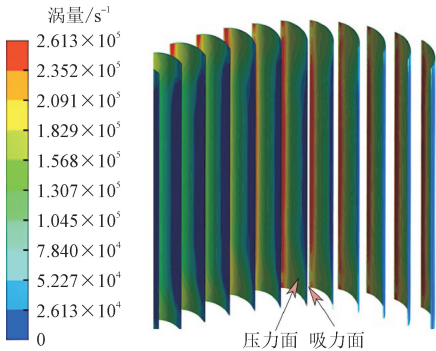


图 5 单机叶片涡量分布云图

Fig. 5 Contour of vorticity distribution of the blade

图 6 给出了单机和整机条件下动叶区内油性粒子的轨迹图。由图可知,粒子经风机入口进入动叶区后撞击叶片压力面后流出动叶区,同时粒子在动叶区内二次流的影响下多次与叶片发生碰撞造成严重沉积。对于整机而言,受进口条件的影响,在动叶区内存在更为明显的二次流,流道内流动分离更为严重,低速流体区域较单机分布范围更广(见图 7)。由此造成粒子轨迹较为紊乱,粒子在部分叶片之间发生多次碰撞折射而造成更严重的沉积,这与图 4 结果一致。

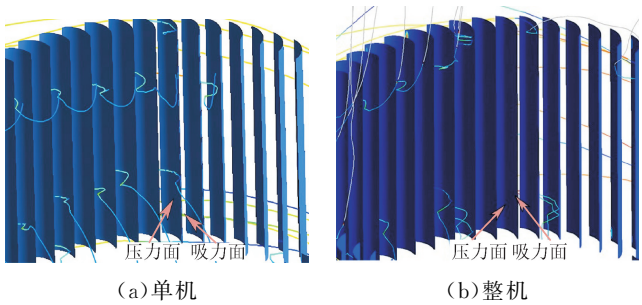
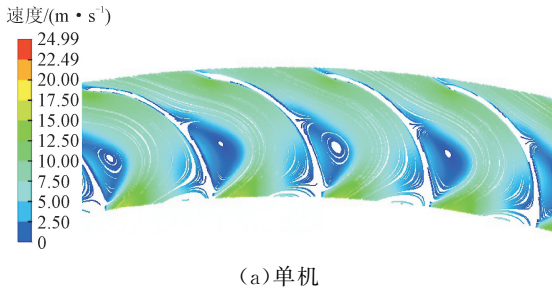
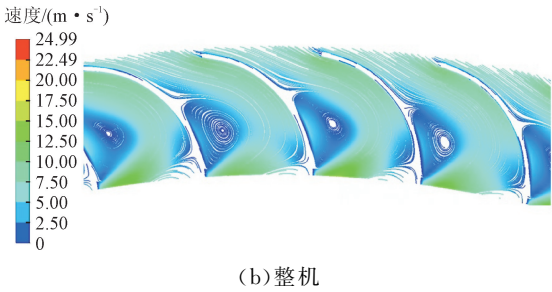


图 6 单机及整机模拟油性粒子轨迹图

Fig. 6 Trajectories of soot particles for the single fan and the whole domain including the kitchen



(a) 单机



(b) 整机

图 7 单机及整机叶轮轴向截面流线图

Fig. 7 Contour of velocity of the selected axial cross-section

图 8 给出了单机条件下蜗壳内粒子的沉积分布。由此可知,沉积区域主要集中在蜗壳出口、蜗壳端壁和侧壁衔接处及蜗舌处。这主要是因为蜗壳流场周向分布不均,蜗壳出口区域存在较大的压力梯

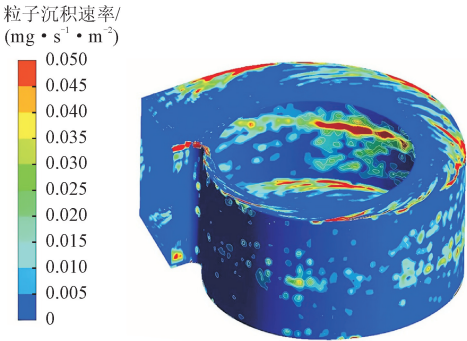


图 8 蜗壳壁面油性粒子分布情况

Fig. 8 Particle deposition distribution on the surface of the volute

度。在压力梯度和离心力的共同作用下,会在出口处形成一个低速涡流^[37-38]。另外,在端壁与侧壁衔接处为流动死区,流体速度较小。因此,在上述区域沉积情况较为严重。

3.2 粒子直径的影响

研究表明,厨房油性粒子粒径主要分布在 0.1~10 μm 之间^[39],其中直径小于 0.5 μm 的小粒径粒子随流性好,通常会随着连续相流体一起排出风机。因此本文选择 4 种典型粒径(0.5、2.5、5.0 和 10.0 μm)粒子模拟粒径对沉积分布的影响。尽管单机和整机的粒子沉积分布规律存在一定差异,但整体上呈现出相似的趋势。因此,为了减少计算时间,采用单机模型在转速 1 231 r/min 工况下进行模拟。表 3 与图 9 分别给出了不同粒径粒子在叶片表面的沉积速率和粒子分布情况。

表 3 不同粒径下的粒子沉积速率

Table 3 Deposition rates of particles with different diameters

粒子直径/μm	粒子沉积速率/(g·s ⁻¹ ·cm ⁻²)
0.5	0.514 00
2.5	0.091 50
5.0	1.055 61
10.0	2.074 56

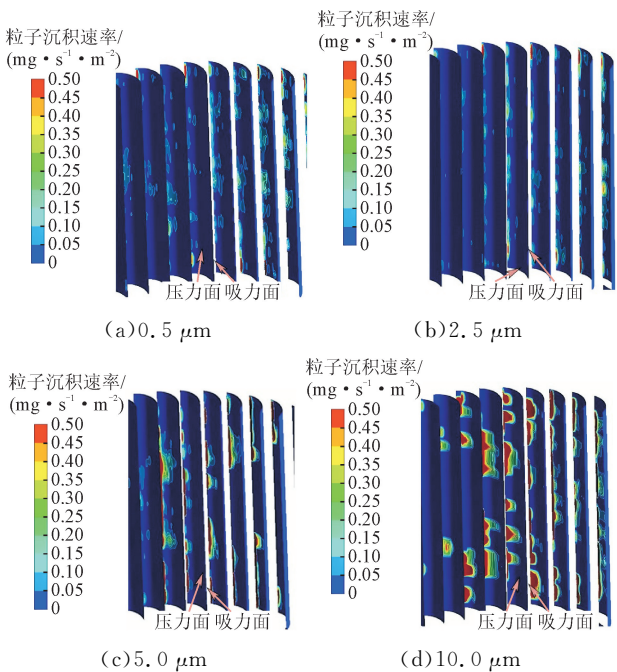


图 9 不同粒径下叶片表面油性粒子分布情况
Fig. 9 Particle deposition distribution on blade surfaces with different particle diameters

由表 3 可知,随着粒子直径增大,沉积速率先下

降然后逐渐增大。这是由于,小粒径粒子惯性小,运动轨迹贴合气体流线,因此不易与叶片发生碰撞。此时粒子运动主要依靠湍流扩散,当其叶片壁面发生碰撞时,由于粒子速度较小且小于临界速度,故与叶片碰撞的粒子几乎全部发生沉积。当粒径增大至一定值时,流体对粒子的运动影响程度减弱,此时粒子与叶片表面发生碰撞时的速度大于临界速度,因此该粒径下粒子不易沉积。随着粒径进一步增大,惯性力逐渐起主导作用,粒子具有足够的动能以偏离流线,脱离主流流体,并被流场中的涡旋结构捕获与壁面发生碰撞^[40]。当粒径到达一定程度后被旋涡捕获的粒子更多,故在大粒径下叶片沉积情况更严重。同时在大粒径下,粒子会先撞击部分叶片的压力面前缘,然后再撞击叶片的尾缘,从而导致部分叶片前缘区域也发生沉积,如图 9(d)所示。

3.3 叶片优化

以上研究表明,风机内部流场对油性粒子沉积分布具有很大影响。因此,优化叶片叶型,改善内部流场对减少叶片积油量和提高油烟机工作效率至关重要。原始叶片出口角较大,叶轮流道内的涡量多,发生流动分离的区域较多,低速区域范围较广,且风机出口速度不均匀,叶片上粒子沉积也更为严重。同时,在大出口角下,蜗壳出口存在回流,一部分气体自出口沿蜗舌流回到蜗壳下部,这部分回流会使流场更加紊乱,导致粒子与叶片表面碰撞更多,造成更为严重的沉积。因此,在原始叶型基础上提出切割叶片的改进方法。切割后的叶片,出口安装角减小,同时出口流道面积减小,当气体流入尾缘段后,流道内扩压度虽然稍有下降,但发生流动分离的区域减小,叶轮流道内的涡旋减弱,导致粒子在流场中受旋涡结构黏滞阻力影响较少,不易与壁面发生碰撞,沉积情况因此得到改善^[40-42]。切割前、后的叶片如图 10 所示。切割后,叶片包角由 102.12°改为 92.12°,出口角由 174.27°变为 164.27°,其他参数与原叶片保持一致。实验测得叶片切割后风机流量下降了 3.5%,全压下降了 20.5 Pa,对于油烟机性能影响较小,可满足用户实际需求。为了检验优化后的叶片对粒子沉积的改善效果,采用数值模拟和实验相结合的方式进行了综合验证。

为了凸显优化效果,在风机转速为 1 231 r/min 工况下,选择 10 μm 粒径对整机系统进行模拟,以观察优化后叶片表面粒子的沉积情况,结果如图 11 所示,优化后的叶片较原叶片沉积情况明显改善。此外,在宁波方太厨具有限公司油烟测试实验室进行

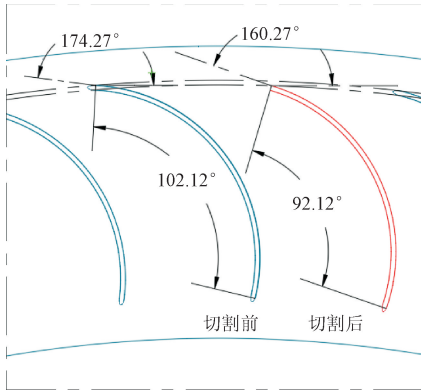


图 10 切割前后叶型参数

Fig.10 Schematic diagram of blade before and after optimization

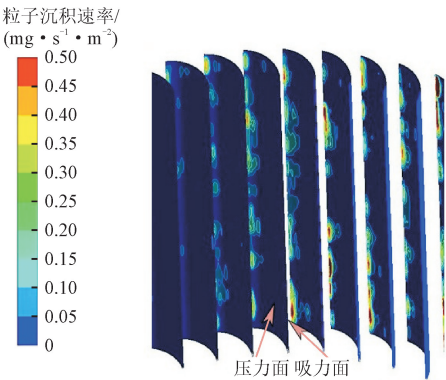


图 11 优化后叶片上粒子沉积情况

Fig.11 Particle deposition distribution on the blades after optimization

了实验研究。实验设备由油烟发生装置和油烟机两部分组成,如图 12 所示。该装置能模拟实际生活中厨房烹饪场景,可以长时间不间断地产生大量的油烟气体,在短时间内模拟产生普通家庭较长时间的油烟产生量,以缩短积油实验周期,每次实验时长为 20 min。实验结束后,取出叶轮进行称量,记录实验前后的叶轮质量的增量,此增量即为不同粒径油性粒子的堆积量。待叶轮完全冷却后,进行下一组测试,总共进行了 4 组实验,模拟结果与实验平均值如表 4 所示。值得指出,由于模拟给定颗粒相的质量流量且按照叶片平均表面积计算沉积速率,而实验是测定一定时间内叶轮总表面积的增量,导致模拟与实验结果的单位并不相同,但二者一定程度上均可表征油性粒子的积油量^[43]。从表 4 可以看出,实验测得优化后叶片较原始叶片积油量下降了 30.66%,与模拟值 30.75% 吻合良好,由此表明本文提出的优化方案能有效地降低风机叶片内油性粒子的沉积。应当指出,

上述实验与模拟结果之间偏差可能由如下原因导致:①在静置冷却的过程中,叶轮表面会吸附空气中的水分、粉尘等微小粒子,而模拟中并未考虑这一现象;②模拟中考虑的是沉积严重的单一粒径的理想情况,而实验条件下通常包含多种粒径。



图 12 油烟机积油测试装置

Fig.12 Experimental facility of particle deposition tests

表 4 模拟与实验积油减少量的对比

Table 4 Comparison of simulated and experimental particle deposition results before and after blade optimization

状态	模拟积油量/($\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)	实验积油量/g
原始叶片	2.075	6.31
优化叶片	1.436	4.375
积油减少量	30.75%	30.66%

4 结 论

本文基于离散相模型和临界速度沉积模型,模拟预测了单机和整机系统内不同粒径对油性粒子沉积的影响,并分析了相关成因。在此基础上,提出了一种减少多翼离心风机积油的方法。主要研究结论如下。

(1)粒子沉积分布主要位于叶片的压力面,且集中在尾缘处。相对于单机,整机进气条件较差,粒子沉积分布更广泛且向前缘方向发展。

(2)随着粒子直径增加,在惯性力和旋涡结构的共同影响下,叶片表面的粒子沉积速率先减小后增大。

(3)模拟研究发现,采用切割叶片减小叶片出口安装角的方法能大范围减小叶轮表面积油分布区域,积油量下降 30.75%,与实验测量积油量下降 30.66% 吻合良好。

参考文献:

[1] LUN Yuxin, LIN Limin, HE Haijiang, et al. Effects of vortex structure on performance characteristics of a

- multiblade fan with inclined tongue [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2019, 233 (8): 1007-1021.
- [2] WEI Yikun, ZHU Lingling, ZHANG Wei, et al. Numerical and experimental investigations on the flow and noise characteristics in a centrifugal fan with step tongue volutes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(15): 2979-2993.
- [3] ZHANG Yingkun, LI Kunhang, LI Yunlong, et al. Effects of the guiding tank on flow characteristics inside the double-suction squirrel-cage fan for range hood [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2020, 13(1): 203-213.
- [4] 马列, 刘阳, 刘小民. 采用吸力面仿鱼形叶片的多翼离心风机气动性能研究 [J]. 风机技术, 2022, 64(2): 9-16.
- MA Lie, LIU Yang, LIU Xiaomin. Study on the aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan with the suction surface bionic fish blades [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(2): 9-16.
- [5] 王加浩, 龚东巧, 刘小民, 等. 采用仿鲤科鱼C型启动构型叶片的多翼离心风机气动性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 57-68.
- WANG Jiahao, GONG Dongqiao, LIU Xiaomin, et al. Aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan with bionic blades inspired by C-Type start of cypripidae [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 57-68.
- [6] 王梦豪, 吴立明, 刘小民, 等. 采用仿鸮翼叶片降低空调用离心风机气动噪声的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 55-61.
- WANG Menghao, WU Liming, LIU Xiaomin, et al. A study on noise reduction of centrifugal fan in air conditioner by using the bionic blade inspired by the owl wing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 55-61.
- [7] 孟永哲, 许子倩, 刘小民. 多翼离心风机模块化设计中叶轮-蜗壳的匹配性研究 [J]. 风机技术, 2022, 64(3): 10-16.
- MENG Yongzhe, XU Ziqian, LIU Xiaomin. Study on the matching of impeller and volute in the modeling design of multi-blade centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(3): 10-16.
- [8] SREEDHARAN S S, TAFTI D K. Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition in turbine gas hotpath [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 201-211.
- [9] BRACH R M, DUNN P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres [J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51-64.
- [10] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A Mathematical and Physical Sciences, 1971, 324 (1558): 301-313.
- [11] EL-BATSH H, HASELBACHER H. Effect of turbulence modeling on particle dispersion and deposition on compressor and turbine blade surfaces [C]//ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2000: V001T03A084.
- [12] JENSEN J W, SQUIRE S W, BONS J P, et al. Simulated land-based turbine deposits generated in an accelerated deposition facility [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 462-470.
- [13] AI Weiguo, MURRAY N, FLETCHER T H, et al. Effect of hole spacing on deposition of fine coal flyash near film cooling holes [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 041021.
- [14] LAYCOCK R, FLETCHER T H. Independent effects of surface and gas temperature on coal fly ash deposition in gas turbines at temperatures up to 1 400 °C [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(2): 021402.
- [15] SMITH C, BARKER B, CLUM C, et al. Deposition in a turbine cascade with combustor flow [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2010: 743-751.
- [16] BONILLA C, CLUM C, LAWRENCE M, et al. The effect of film cooling on nozzle guide vane deposition [C]//ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2013: V03BT13A043.
- [17] CASADAY B, PRENTER R, BONILLA C, et al. Deposition with hot streaks in an uncooled turbine vane passage [J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(4): 041017.
- [18] 王飞龙, 何雅玲, 汤松臻, 等. 典型烟气余热换热器气侧积灰特性 [J]. 科学通报, 2017, 62 (12): 1292-1301.
- WANG Feilong, HE Yaling, TANG Songzhen, et al. Numerical study of fouling characteristics on two kinds of typical heat exchangers used in the waste heat recovery systems [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62 (12): 1292-1301.

- [19] 贾会霞, 席光, 闻苏平. 轴流压缩机转子叶栅内粒子沉积及其性能影响的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(5): 779-782.
- JIA Huixia, XI Guang, WEN Suping. Numerical simulation of particle deposition and performance deterioration in axial compressor rotors [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(5): 779-782.
- [20] 周君辉, 张靖周. 涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2492-2499.
- ZHOU Junhui, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation on particle deposition characteristic inside turbine cascade [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2492-2499.
- [21] 杨晓军, 胡英琦, 徐致远, 等. 存在剥离条件下颗粒物沉积过程的数值研究和实验验证 [J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1523-1535.
- YANG Xiaojun, HU Yingqi, XU Zhiyuan, et al. Experimental validation and numerical simulation of particles depositional processes with detachment [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7): 1523-1535.
- [22] YANG Xing, HAO Zihan, FENG Zhenping. Variations of cooling performance on turbine vanes due to incipient particle deposition [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2021, 235(8): 1832-1846.
- [23] 郝子晗, 杨星, 丰镇平. 高压涡轮动叶机匣颗粒物沉积效应的非定常数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(5): 1244-1252.
- HAO Zihan, YANG Xing, FENG Zhenping. Unsteady simulations of deposition effects on the casing of a rotor passage in a high-pressure turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(5): 1244-1252.
- [24] CASADAY B P, AMERI A A, BONIS J P. Numerical investigation of ash deposition on nozzle guide vane endwalls [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(3): 032001.
- [25] BONILLA C, WEBB J, CLUM C, et al. The effect of particle size and film cooling on nozzle guide vane deposition [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 101901.
- [26] ROZATI A, TAFTI D K, SREEDHARAN S S. Effects of syngas ash particle size on deposition and erosion of a film cooled leading edge [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011010.
- [27] LUNDGREEN R, SACCO C, PRENTER R, et al. Temperature effects on nozzle guide vane deposition in a new turbine cascade rig [C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA; ASME, 2016: V05AT13A021.
- [28] 杨晓军, 祝佳雄. 涡轮叶栅通道内颗粒物沉积过程的数值模拟 [J]. 航空学报, 2017, 38(5): 31-42.
- YANG Xiaojun, ZHU Jiaxiong. Numerical simulation of particle deposition process inside turbine cascade [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 31-42.
- [29] 徐致远. 涡轮端壁处颗粒物沉积的数值研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [30] WHITAKER S M, LUNDGREEN R K, BONIS J P. Effects of metal surface temperature on deposition-induced flow blockage in a vane leading edge cooling geometry [C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA; ASME, 2017: V02DT48A020.
- [31] MENSCH A, THOLE K. Simulations of multiphase particle deposition on a gas turbine endwall with impingement and film cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(11): 111002.
- [32] 吕浪. 燃气透平静叶微颗粒碰撞和沉积特性的数值分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [33] 周君辉, 张靖周. 气膜孔附近粒子沉积特性的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2166-2173.
- ZHOU Junhui, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation on particle deposition characteristics in vicinity of film cooling holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2166-2173.
- [34] 赵传鹏, 刘松, 谭晓茗, 等. 气膜冷却射流对叶片微细颗粒沉积影响 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 545-554.
- ZHAO Chuanpeng, LIU Song, TAN Xiaoming, et al. Effect of film cooling jet on deposition of micro particles on blades [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 545-554.
- [35] AI Weiguo, FLETCHER T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 041020.
- [36] 雷健, 秦国良, 吴彦东, 等. 多翼离心风机出口涡旋成因分析与抑制方法 [J]. 流体机械, 2022, 50(12): 65-71.
- LEI Jian, QIN Guoliang, WU Yandong, et al. Cause analysis and suppression method of outlet vortex of multi-blade centrifugal fan [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(12): 65-71.

- [37] 熊仲营, 邓稼琦, 王梦豪, 等. 蜗舌改型设计对多翼离心风机气动性能的影响 [J]. 风机技术, 2018, 60(6): 31-37.
XIONG Zhongying, DENG Jiaqi, WANG Menghao, et al. Study on effects of modified volute tongue on the performance of a multi-blade centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2018, 60(6): 31-37.
- [38] 叶舟, 王企鲲, 郑胜. 离心通风机蜗舌及出口流场的数值模拟分析 [J]. 风机技术, 2008(5): 15-19.
YE Zhou, WANG Qikun, ZHENG Sheng. Analysis on volute tongue and outlet flow field of centrifugal fan by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2008(5): 15-19.
- [39] 张辉辉. 厨房颗粒物分布运动规律及数值分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [40] 裴钰. 燃气轮机涡轮叶片表面污染物沉积模型研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [41] 于思琦, 吴大转, 杨帅. 叶片出口角对多翼离心风机性能影响的数值研究 [J]. 流体机械, 2019, 47(11): 1-7.
YU Siqi, WU Dazhuan, YANG Shuai. Numerical study on the influence of blade outlet angle on the performance of multi-blade centrifugal fan [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(11): 1-7.
- [42] 刘路. 多翼离心风机叶轮的结构优化研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [43] ZHANG Jiankun, LIU Haihu. Multi-objective optimization of aerodynamic and erosion resistance performances of a high-pressure turbine [J]. Energy, 2023, 277: 127731.

(编辑 杜秀杰)