# 基于数值模拟的气固两相流颗粒沉积机制 研究及其参数影响规律

## 王境泰,刘 松\*

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月27日

## 摘要

基于RNG k- ε湍流模型,通过数值模拟手段,对H型翅片管省煤器通道内颗粒特性从颗粒粒径、模拟时间、 流速及颗粒浓度等多个角度,系统研究了气固两相流中颗粒的沉积特性,揭示了影响颗粒沉积的关键因 素及其作用机制。研究结果表明:沉积速率随模拟时间的延长显著增加,20 s模拟时间下的沉积速率分 别较10 s和5 s增加1.94倍和3.43倍。颗粒粒径与沉积速率呈正相关关系,尤其在粒径大于5 μm时,沉积 速率快速上升,表现出强烈的惯性主导效应。颗粒粒径还影响其在流场中的分布特征:小颗粒趋于均匀 分布,而大颗粒易在低速区及尾涡区聚集沉积,随着流速提升,沉积速率明显降低,5 m/s至10 m/s时 下降幅度达46%~82%。

## 关键词

H型翅片管,气固两相流,颗粒沉积,流动特性分析,数值模拟

## Study of Particle Deposition Mechanism in Gas-Solid Two-Phase Flow Based on Numerical Simulation and Its Parameter Influence Law

## Jingtai Wang, Song Liu\*

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 27<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

## Abstract

Based on the RNG k- $\epsilon$  turbulence model, the deposition characteristics of particles in the gas-solid two-phase flow were systematically investigated by means of numerical simulation from the perspectives of particle size, simulation time, flow velocity and particle concentration in the channel of H-type finned-tube economizer, and the key factors affecting the deposition of particles and their action mechanisms were revealed. The results show that the deposition rate increases significantly with the simulation time, and the deposition rate increases 1.94 times and 3.43 times in 20 s compared with 10 s and 5 s, respectively. The particle size is positively correlated with the deposition rate, especially when the particle size is larger than 5  $\mu$ m, the deposition rate increases rapidly, showing a strong inertia dominant effect. The particle size also affects the distribution of particles in the flow field: small particles tend to be uniformly distributed, while large particles tend to be aggregated and deposited in the low-velocity region and the tail vortex region. The deposition rate decreased significantly with increasing flow velocity, with a decrease of 46%~82% from 5 m/s to 10 m/s.

## **Keywords**

H-Fin Tube, Gas-Solid Two-Phase Flow, Particle Deposition, Analysis of Flow Characteristics, Numerical Simulation

Copyright © 2025 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/

CC O Open Access

## 1. 引言

为实现"双碳"目标,我国正在加快构建以新能源为主体的新型电力系统[1]。然而,风能、太阳能 等新能源因其间歇性和不可预测性,给电网的消纳能力带来了严峻挑战。与此同时,燃煤发电正在从传 统主力电源逐步转型为基础保障和系统调节电源。目前,我国 60%以上的煤电装机为超超临界机组,预 计在未来的深度调峰运行中仍将发挥关键作用。在这一背景下,提升机组运行的安全性与稳定性、提高 发电效率、降低能耗与污染物排放,依然是燃煤发电技术亟需解决的重要任务。

H 型翅片管因其具备良好的换热效率、耐高温耐腐蚀性能以及热能回收和节能降耗的优势,被广泛应用于燃煤电厂锅炉的省煤器中。但省煤器运行过程中普遍面临三大核心问题:烟气传热效率低、炉管酸腐蚀严重以及灰分颗粒结垢堆积。针对传热问题,已有研究提出了多种有效改善方案[2]-REF\_Ref201927979 \r \h [5],但酸腐蚀与结垢问题仍未得到有效解决。灰分颗粒沉积在管道和翅片表面,不仅会显著降低传热系数,还可能导致管道堵塞[6]。

为应对这一难题,近年来众多学者通过多种方法对 H 型翅片管的灰分颗粒沉积模式进行了深入研究。 例如,有研究利用 Boltzmann 方法对单根管道内颗粒沉积过程进行模拟,发现入口流速和颗粒粒径对沉 积速率具有显著影响[7]。也有学者通过实验手段研究沉积灰分的物理特性[8]-REF\_Ref201927994 \r \h [10],并使用扫描电镜对沉积样品进行微观分析,揭示其表面特征。结合模拟与实验的方法,不仅能系统 探讨灰分的沉积规律,还能考察颗粒粒径与斯托克斯数等关键参数的影响[11]。王飞龙等[12]对两种典型 烟气余热换热器进行对比研究,结果显示,灰分颗粒主要沉积于 H 型翅片管前侧的流动滞止区及管后尾 涡区域,且随入口速度与颗粒粒径的增大,污垢热阻显著降低。文夏楠等[13]通过数值模拟结合用户自定 义函数方法,研究了圆管与椭圆管交错排列下颗粒沉积率与粒径的关系。Fu 等[14]构建数值模型,预测 飞灰颗粒在换热器表面的碰撞、附着与反弹行为,结果表明大颗粒倾向于沉积在管前部,而小颗粒则易 随流体运动,在管前后部沉积,并通过涡量比较分析了不同管道布置方式下的涡流强度与颗粒分布特征。

综上所述,当前研究已在管道结构、颗粒运动行为及沉积模式等方面取得了一定进展,尤其在不同 管形与管束结构条件下的颗粒沉积过程与积灰特性方面成果丰富。然而,关于颗粒特性对沉积行为的具 体影响仍有待进一步深入探索。因此,本文将针对省煤器内部流道中的颗粒沉积过程开展定量分析,旨 在为抗积灰型换热器的优化设计提供理论依据与工程参考。

### 2. 物理模型和数学模型

## 2.1. 物理模型

H 型翅片管换热器因具备高效换热、耐高温、抗腐蚀等多项优势,被广泛应用于各类工业余热回收 系统中。本文以顺排布置的四排 H 型翅片管为研究对象,对其内部颗粒沉积特性展开分析,相关几何参 数如图 1 与表 1 所示。鉴于 H 型翅片管在工程实践中常以横向与纵向多排结构形式存在,且其结构具有 周期性、流动具有重复性,故选取典型的四排翅片管区域作为代表,研究其内部流场中的涡结构演化特 征与颗粒沉积行为之间的耦合关系。



**Figure 1.** Schematic structure of H-type finned tube: (a) Top view, (b) Side view 图 1. H 型翅片管的计算域示意图: (a) 俯视图, (b) 侧视图

## Table 1. Geometrical parameters of H-finned tubes 表 1. H 型翅片管几何参数

几何参数	H型翅片管
管外径 D (mm)	38.0
翅片厚度 $F_t$ (mm)	2.0
翅片长度 H (mm)	70.0
翅片宽度 W (mm)	76.0
狭缝宽度 m (mm)	10.0
翅片间距 $F_p$ (mm)	18.0
纵向节距 S1 (mm)	80.0
横向节距 S2 (mm)	80.0
管壁温度 T <sub>wall</sub> (K)	360.0

图 1(a),图 1(b)分别展示了工业余热回收系统中典型 H 型翅片管的计算域俯视图与侧视图。在计算 域设置方面,为有效避免边界效应及回流干扰,本文将进口方向延伸至五倍管径长度,下游出口方向则 延长十倍管径,确保流场稳定发展。图中阴影部分所示为计算域的高度方向结构示意,考虑到翅片管在 垂直方向上具备几何对称性,因此在模拟中仅取一个翅片间距范围进行建模,以提高计算效率的同时保 证模拟精度。

## 2.2. 控制方程

为简化数学模型的构建与数值计算过程,本文在建模时作出如下假设:假设烟气为不可压缩的理想 气体,且其物理性质在整个流动过程中保持恒定不变;气体流动处于典型的湍流状态,并满足稳态条件。 在求解过程中,忽略黏性耗散、体积力等对整体影响较小的次要因素,以便更聚焦于主导作用力对颗粒 迁移与沉积行为的影响规律分析。

#### 2.2.1. 离散相模型

本文采用拉格朗日方法预测离散相颗粒的运动,通过积分颗粒上的力平衡进行分析,并假设颗粒为 均匀、非旋转的球形颗粒。颗粒在流场中的运动方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t} = F_D\left(u - u_p\right) + \frac{g\left(\rho_p - \rho\right)}{\rho_p} + F_{th} + F_{Br} + F_{\mathrm{Saffman}} \tag{1}$$

上式左侧表征颗粒惯性力项,右侧各项依次排列为:首项对应于单位质量拖曳力项,第二项为重力 项,第三项表征热泳力项,第四项描述布朗力项,第五项则对应 Saffman 升力项。其中, $F_D(u-u_p)$ 是单 位质量颗粒上的拖曳力, $F_D$ 为阻力; $u \approx u_p$ 是流体相和颗粒相的速度, $\rho \approx \rho_p$ 分别是流体和颗粒的密 度, $\mu$ 是流体的动态粘度, $D_p$ 是颗粒的直径, $C_D$ 是颗粒的非线性拖曳系数, $Re_m$ 是相对颗粒雷诺数[15],热泳力、布朗力、Saffman 升力分别为式(5)~(7)。

$$F_{D} = \frac{18\mu}{\rho_{p}D_{p}^{2}} \frac{C_{D}Re_{m}}{24}$$
(2)

$$C_{D} = \begin{cases} \frac{24}{Re_{m}}, & Re_{m} < 1\\ \frac{24}{Re_{m}} \left(1 + 0.15Re_{m}^{0.687}\right), & 1 < Re_{m} < 1000 \end{cases}$$
(3)

$$Re_{m} = \frac{\rho D_{p} \left| u_{p} - u \right|}{\mu} \tag{4}$$

$$F_{th} = 3.084 \frac{\rho \upsilon^{0.5}}{\rho_p D_p} \sqrt{\left|\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\right|} \left(u - u_p\right) \tag{5}$$

$$F_{Br} = \xi \sqrt{\frac{12\pi\mu k_B T D_p}{\Delta t}} \tag{6}$$

$$F_{\text{saffman}} = -6\pi\mu D_p \cdot \frac{k_f}{k_p + 2k_f + 4Kn} \cdot \frac{\nabla T}{T}$$
(7)

#### 2.2.2. 控制方程

为了有效预测颗粒的沉积速率,除了需深入了解颗粒在流场中的传输行为外,还必须掌握其在壁面

上的保留效率。关键在于明确颗粒在何种物理条件下会发生粘附现象,同时需考虑颗粒发生回弹时的回 弹速度与回弹角度等参数。基于能量守恒原理,在开发颗粒沉积速率预测模型时,应充分考虑颗粒与壁 面之间的相互作用过程。该相互作用通常被视为弹塑性碰撞,其能量平衡关系可由以下公式进行描述:

$$Q_k + Q_{A,a} = Q_{el} + Q_{pe} + Q_p \tag{8}$$

其中 $Q_k = \frac{1}{2}m^* v_{i,n}^2$ 是对应于折合质量的粒子动能的法向分量, $Q_{A,a}$ 是表面能, $Q_{el}$ 和 $Q_{pe}$ 分别表示在接触区域内储存的弹性能和塑性能, $Q_p$ 是在塑性流动中耗散的能量。当接触区储存的能量大于附着能量 $Q_{A,r}$ 时,颗粒会回弹;否则,颗粒将沉积。因此,上述 $Q_{el} \times Q_{pe}$ 和 $Q_{A,r}$ 的值可以通过 $Q_{el} + Q_{pe} \ge Q_{A,r}$ 式判定颗粒回弹。在回弹的情况下,恢复系数和法向回弹速度可由下式计算:

$$e_n^2 = 1 - \frac{Q_p + (Q_{A,r} - Q_{A,a})}{1/2 \, m^* v_{i,n}^2} \tag{9}$$

$$v_{r,n} = v_{i,n} - (1 + e_n) \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_{i,n}$$
(10)

式中:  $m^* = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$ 为等效质量,  $m_1 和 m_2 分别为入射粒子和目标粒子的质量。$ 

在切向方向上,切向回弹速度受滑移速度和摩擦力大小的影响。如果碰撞过程中滑移速度降至零,颗粒的运动将由滑动转变为滚动,当摩擦系数达到最小值  $\mu_{min}$ 时,若材料组合的摩擦系数低于该最小值,冲击将以滑动结束,此时切向回弹速度为 $v_{r,t(1)}$ ,否则,滑动运动将变为滚动运动,且切向回弹速度为 $v_{r,t(2)}$ 。

$$\mu_{\min} = \frac{2}{7} \frac{\tan \theta_i}{1 + e_n} \tag{11}$$

$$\mathbf{v}_{r,t(1)} = \mathbf{v}_{i,t} - \mu \left( 1 + e_n \right) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{\mathbf{v}_{i,t}}{|\mathbf{v}_{i,t}|} |\mathbf{v}_{i,n}|$$
(12)

$$\mathbf{v}_{r,t(2)} = \mathbf{v}_{i,t} - \frac{2}{7} \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{v}_{i,t}$$
(13)

## 2.3. 计算区域及边界条件

在三维直角坐标系下,边界条件设置如下:入口设定为速度入口,假定空气以恒定的速度、温度及 湍流强度均匀进入计算域;出口则采用压力出口边界条件,确保流场稳定排出。在固体表面处理方面, 管壁被设定为恒温边界,且流动采用无滑移条件,即流体在壁面上的速度为零。翅片表面施加流固耦合 边界条件,同时同样满足无滑移要求。y 方向的上下边界指定为对称面,以减少计算量并反映流场对称 性;z 方向上下边界则设为周期性边界,用于模拟重复结构单元的连续流动特性。

## 2.4. 相关参数定义

特征长度: 定义 D。为翅片管束的特征长度, 具体如式(14)所示:

$$D_e = 4 \frac{A_T}{A_H} \cdot l \tag{14}$$

式中:  $A_T$  为流体流经流场的最小截面处面积,  $A_H$ 为 H 型翅片管的总传热面积, l 为管束的流动长度。 雷诺数 Re:

$$Re = \frac{\rho D_e U_{\text{max}}}{\mu} \tag{15}$$

式中, $\rho$ 为流体密度; $U_{\text{max}}$ 为流体流经流场的最小截面处的最大速度; $\mu$ 为动力粘度。

## 3. 网格生成及数值方法

## 3.1. 网格生成

H 型翅片管的几何模型采用 ANSYS Meshing 软件进行网格划分,如图 2 所示。整体采用尺寸为 1 mm 的全六面体结构化网格。在靠近壁面的区域,为满足 RNG *k-e* 湍流模型中壁面函数法对近壁处理的 精度要求,应用膨胀层技术生成棱柱型过渡网格。具体设置为:第一层网格厚度为 0.04 mm,膨胀层生长 率设定为 1.12,共生成 10 层棱柱网格。该设置确保了近壁区域的 y<sup>+</sup>值控制在 1 以下,从而保证了湍流模 型对壁面剪切应力和边界层发展的精确捕捉。



Figure 2. Schematic diagram of grid division 图 2. 网格划分示意图

## 3.2. 网格独立性考核

为验证网格独立性,本文分别建立了网格数为11万、37万、76万、132万、188万和245万的网格 系统。结果如图 3 所示,当网格数超过132万时,努塞尔数(Nu)和欧拉数的变化量均已不显著。综合考 虑计算精度和计算资源,最终选定132万网格作为最终网格数。

## 3.3. 数值方法

本文采用 ANSYS FLUENT 22 R1 软件进行数值模拟计算,求解过程中选用 SIMPLE 算法以实现速度 与压力的耦合。离散格式方面,压力项采用二阶差分格式进行离散处理;动量方程和能量方程中的对流 项采用二阶迎风格式,以提高数值解的稳定性和精度;扩散项则采用中心差分格式进行处理。在收敛准 则设置方面,能量方程的残差收敛标准设为 10<sup>-9</sup>,其他控制方程(如动量、连续性和湍流方程)的残差收敛 标准均设定为10-9,以确保数值解的准确性和可靠性。



**Figure 3.** Variation of Nusselt number, E number with the number of grids 图 3. *Nu* 数、*Eu* 数随网格数的变化

## 3.4. 数值方法可靠性验证

选取三种常用的湍流模型(RNG k-ε 湍流模型、Standard k-ε 湍流模型和 SST k-ω 湍流模型)进行数值 模拟验证,并采用 SIMPLE 算法、近壁强化壁面处理方法,对 H 型翅片管束在有颗粒相影响的条件下, 进行数值模拟计算,将所得结果与文献中的实验数据结果进行对比,可以发现,在对三种湍流模型的数 值模拟中,传热性能的预测偏差均较小,其中 RNG k-ε 湍流模型预测偏差在 5%的范围内,而对流动阻力 性能的预测偏差也在 5%左右,其余两种模型的传热性能和流动阻力性能的预测偏差均在 10%以内,比较 三种模型的综合性能,RNG k-ε 湍流模型和 Standard k-ε 湍流模型综合性较好,由于 RNG k-ε 湍流模型自 身的优点,本文选取 RNG k-ε 湍流模型[16]进行数值模拟。

对H型翅片管的湍流模型进行选取与数值结果验证[17],其验证结果如图4所示。



**Figure 4.** Numerical validation of the turbulence model 图 4. 湍流模型的数值验证

## 4. 结果分析与讨论

## 4.1. 不同粒径对沉积的影响

## 4.1.1. 粒径对沉积速度的影响

在省煤器运行过程中,飞灰颗粒的粒径通常分布在 0.1~100 μm 之间[18]。本文主要研究残余粉煤灰 的沉积特性,其典型粒径范围较常规飞灰更小,为1~20 μm [19] [20]。为深入探讨颗粒的沉积机制,选取 粒径为1~10 μm 的颗粒作为研究对象。在该粒径范围内,颗粒不仅受到拖曳力的主导作用,还受到热泳 力和惯性效应的影响。在数值模拟中,结合实际工况条件,建立了10组粒径梯度为1~10 μm 的计算案 例。具体的颗粒参数范围见下表 2。颗粒注入采用均匀注入模式,时间步长设为 0.001 s,每个时间步在 入口面释放1500 个离散颗粒,以确保统计显著性,并准确反映粒径对沉积差异的影响。

Table	2. Range of particle parameters	5
表 2.	颗粒参数范围	

参数	数值	单位
入口速度	8	m/s
入口温度	420	K
管壁温度	360	K
颗粒粒径	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	μm
颗粒浓度	0.001	kg/s

对模拟时间为5s、10s和20s三个时间尺度下的颗粒沉积过程进行数据采集,如图5所示。结果表明,沉积速率与颗粒粒径之间存在显著的多阶段耦合关系。





当颗粒粒径处于 1~3 µm 区间时,沉积速率变化较小,相关性不明显。随着粒径增大,沉积质量逐步上升,且在超过临界阈值( $D_p \ge 5$  µm)后,沉积速率进入准稳态阶段,并随粒径呈指数增长。尤其在  $D_p = 8$  µm 时,惯性沉积机制占主导地位,导致沉积速率显著上升,表明粒径越大,越易沉积。

同时,不同模拟时间对沉积速率亦有影响。以 *D<sub>p</sub>* = 10 μm 工况为例,20 s 模拟周期下的沉积速率分 别是 10 s 和 5 s 工况的 1.94 倍和 3.43 倍。这一趋势归因于模拟时间延长导致斯托克斯数(*Stk*)增大,使颗 粒惯性增强,运动轨迹偏离流线,增加了壁面碰撞概率,从而显著提升沉积速率。

图 6 展示了 20 s 模拟周期下沉积速率与粒径的关系。结果表明,沉积速率与颗粒粒径呈显著正相关, 且在粒径超过 5 μm 后增长速率显著加快,变化梯度较粒径小于 5 μm 时提升约 2.3 倍。该现象主要由拖 曳力主导:在颗粒物性质不变条件下,粒径越大,所受拖曳力越强,惯性与粘性力相对影响减弱,使其 更易偏离流线并聚集于翅片表面。粒径增大还提高了颗粒反弹后的二次碰撞概率,进一步增加沉积可能 性。因此,在相同流场条件下,粒径越大的颗粒沉积概率越高,呈明显正相关趋势。



**Figure 6.** Relationship between particle size and deposition rate at different time nodes 图 6. 不同时间节点下颗粒粒径与沉积速率的关系

进一步分析结果表明,时间变量在沉积过程中的调控作用至关重要。以粒径为10μm的颗粒组为例, 在粒径保持不变的条件下,沉积速率随作用时间的延长表现出明显的时间依赖性增长。具体来看,在0~20 s的时间范围内,沉积速率持续上升,并在20s时达到最大值,此时对应模拟周期内的峰值沉积速率。相 比之下,0s时为系统初始静置状态,沉积尚未开始。粒径和时间通过协同作用共同影响沉积过程,这种 交互效应在粒径大于5μm 且时间超过10s的条件下尤为显著。在此范围内,沉积速率呈现出非线性耦 合增长趋势,与图5所示的规律高度一致。

## 4.1.2. 不同粒径的颗粒在翅片周围的分布情况

为研究颗粒粒径对其在流场中分布特性的影响,本文选取十组算例进行对比分析,颗粒参数设定如

表 2 所示。图 7 展示了不同粒径颗粒在四排 H 型翅片圆管周围的分布情况。结果显示,不同粒径颗粒的运动轨迹差异显著:图 7(a)~(c)中,颗粒分布相对均匀;而从图 7(d)开始,第一排管前端流场两侧出现明显气流分离,且随粒径增大,该现象更为显著。粒径达 10  $\mu$ m 时,第一、二排管后颗粒几乎完全消失,仅在第三排后部残留少量颗粒,第四排管后则形成明显尾涡区,颗粒随涡旋运动迁移。整体上,当粒径 $D_p \geq 5 \mu$ m 时,第四排管后开始出现颗粒聚集,且随粒径增大分布愈发集中。



**Figure 7.** Particle distribution around the fins for different particle diameters 图 7. 不同颗粒直径下翅片周围的颗粒分布图

进一步分析可见: 1 μm 颗粒为超细粒子,其粒径远小于典型湍流尺度,惯性影响可忽略,主要受粘性力与湍流扩散主导,分布高度均匀,基本无局部聚集; 2 μm 颗粒虽惯性略有增强,但仍受拖曳力控制, 在低速区表现出轻微聚集趋势,整体分布仍均匀,短时间内不易沉积。

当粒径增至 3 μm,颗粒运动开始受到剪切力影响,在翅片附近出现局部聚集,但整体分布未显著改 变。4 μm 颗粒分布非均性增强,易在低速区沉积或堆积。5 μm 颗粒在翅片阴影区与缓流区聚集明显,局 部堆积可能影响流动与传热特性。6 μm 颗粒受剪切力影响更加显著,运动轨迹明显偏离流线,易于在翅 片表面形成沉积,进而降低换热性能。7 μm 和 8 μm 颗粒表现出更强非均匀性,倾向于聚集于流动死区 和翅片附近,沉积趋势显著增强。粒径达 9~10 μm 时,重力作用与拖曳力处于相近量级,使颗粒沉积行 为更加复杂,主要集中在第四排管后湍流较弱区域,9 μm 颗粒沉积最密集,沉积层加厚导致局部热阻升 高,降低整体换热效率。

综上,颗粒粒径由 1 μm 增至 10 μm,其在四排管流场中的分布由均匀趋向于非均匀,伴随沉积增强。 1~5 μm 颗粒迁移以扩散为主,分布相对均匀,有助于激发湍流,减少堆积;而 6~10 μm 颗粒受惯性、拖 曳力与重力联合作用,易在低速区与尾涡区沉积,形成局部热阻,甚至引发堵塞问题。小颗粒惯性弱、 质量轻,易随流体带出系统,沉积速率较低;大颗粒则因惯性增强、偏离流线运动,易在翅片表面迅速 沉积,对换热器传热效率产生显著不利影响。

### 4.2. 颗粒速度对沉积的影响

#### 4.2.1. 颗粒速度对沉积速度的影响

为研究入口流速对颗粒沉积特性的影响,设定入口温度为 420 K、壁面温度为 360 K,颗粒粒径为 10 µm。在此基础上,选取 5、6、7、8、9、10 m/s 六组不同烟气流速进行数值模拟,结果如图 8 所示。从 图可见,在相同流速下,颗粒的沉积速率随模拟时间增加而逐渐上升,表明沉积过程具有明显的时间积



**Figure 8.** Variation of particle deposition rate with flue gas flow rate 图 8. 颗粒沉积速率随烟气流速的变化

累效应。然而,在较高流速条件下,沉积速率的增量明显低于低流速下的增量,说明流速对沉积过程的 影响呈现非线性特征。此外,在相同模拟时间内,颗粒沉积速率随入口流速的增加而持续减小。这一现 象可归因于流速上升使颗粒与流体的相对速度增大,从而增强颗粒所受的拖曳力,降低其向壁面沉积的 趋势。同时,流速增加也加剧了近壁面区域的速度梯度,进而显著提升 Saffman 升力效应,促使颗粒更 多沿主流方向运动,减少其在壁面上的沉积概率。

具体来说,当流速由 5 m/s 增加到 10 m/s 时,不同模拟时间下的颗粒的沉积速率分别下降约 82%、 52%和 46%。这种变化反映了流速对颗粒沉积速率的显著影响,随着流体速度的增加,颗粒的沉积行为 逐渐由纯粹的沉降转变为更大程度的随流运动,流速增大使得 Saffman 升力的作用愈加显著,该升力作 用是由流体的速度梯度引起的,尤其是在靠近壁面的区域,其强度较为突出,因此颗粒更倾向于随着流 体的主流方向运动而非沉积。

#### 4.2.2. 不同速度的颗粒在翅片周围的分布情况

图 9 展示了烟气流速分别为 5、7、9 m/s 下,流经四排 H 型翅片圆管周围的颗粒分布情况。通过观察可以明显看到,颗粒的运动轨迹在不同流速下存在显著差异,且随着流速的变化,颗粒的行为和沉积速率呈现出复杂的变化趋势。当流速为 5 m/s 时,颗粒在进入第一排管前的迎风滞止区时,受惯性作用影响,产生了绕流现象,由于此时流速较低,颗粒未能迅速克服流体的粘性阻力,其运动轨迹保持较为均匀地分布在翅片侧。随着颗粒继续流动至第二、三排管后,颗粒在管间几乎没有分布,直至第四排管一直没有改变其运动轨迹,说明在较低流速下,颗粒较难突破流体的粘性束缚,其沉积行为趋向稳定;流速为 7 m/s 时,颗粒的绕流现象更加明显,随着流动推进,颗粒逐渐向管壁靠拢,颗粒在经过第一排管后虽然发生了绕流,但随着流速增大,其获得了更多动能,开始向管壁两侧聚集,流至第四排管时与两侧管壁发生碰撞。颗粒与壁面的碰撞是由于流场中颗粒的动能与流体速度差异所引起的,碰撞后颗粒的轨迹发生了改变,最终在第四排管后形成了明显的涡系结构,这一分布特性表明,当流速较低时,流体的剪切作用和颗粒间的相互作用使得颗粒的轨迹发生改变,并最终形成了清晰的流动模式。





流速为9m/s时,尽管颗粒的行为与7m/s时相似,但流速增大导致颗粒的动能进一步增强,颗粒的 惯性更强,从而使其更早地偏离原始轨迹与管壁发生碰撞,并且其碰撞位置相较于流速为7m/s时相比更 早,同时由于高流速下颗粒的动能较大,颗粒发生碰撞后的反应更加迅速,使得第四排管后的涡系结构 在流速为9m/s时变得更加紧凑,但不及流速为7m/s时清晰。这是因为在高流速下,颗粒偏移主流的速 度较快,导致其迅速离开了尾涡区域,使得涡的稳定性较差。综上,流速的增加不仅提升了颗粒的动能, 还显著影响了颗粒分布和沉积行为,颗粒的沉积率随着流速的增加而降低,可以解释为流速增大导致了 颗粒与管壁的频繁碰撞,使得颗粒的动能消耗过快,黏附力不足以使其有效沉积。

#### 4.3. 颗粒浓度对沉积的影响

为了探究颗粒物浓度对沉积速率的影响,通过改变入口烟气的颗粒物浓度,分别设定 0.1 g/s、1 g/s 和 10 g/s,其余物性条件保持不变,所得计算结果如图 10 所示。分析结果表明,颗粒物浓度的增加显著提高了颗粒物的沉积率,这一趋势表明颗粒物浓度是影响沉积行为的重要因素之一。在颗粒物浓度较低 (0.1 g/s)时,单位时间内流场中颗粒物的数量有限,与翅片表面的碰撞概率较低,因此沉积速率较小。随着颗粒物浓度增加至 1 g/s 和 10 g/s,流场中的颗粒数量显著上升,使得单位时间内颗粒物与翅片表面的碰撞频率大幅提升,从而增强了颗粒物在换热表面的沉积,表明在较高颗粒物浓度条件下,翅片表面的颗粒负荷增加,进一步加剧了沉积层的增长。



Figure 10. Variation of deposition rate with particle concentration 图 10. 沉积速率随颗粒浓度的变化

图 11 展示了时间尺度为 20 s 时,不同颗粒物浓度条件下颗粒在翅片周围的分布情况,在相同的流速 和粒径条件下,随着颗粒物浓度的增加,流场后端尾涡区域的涡旋结构逐渐增强,当颗粒物浓度较高时, 其碰撞率显著增加,尤其在尾涡区域,颗粒相的动量交换效应更加显著,从而促进了涡旋结构的增强, 同时,涡旋结构的强化进一步影响了颗粒物的沉积速率,使颗粒在尾涡区域的聚集效应更加明显。这一 现象表明,较高浓度的颗粒物不仅影响其自身的分布特性,还对流场的涡旋结构产生了调制作用,同时 与图 10 所示的沉积规律相一致,说明颗粒物浓度不仅决定了颗粒在流场中的运动轨迹,也显著影响了流 场的局部动力学特征。此外,在流场的前端区域,尽管颗粒物浓度增加,由于局部流速较高且剪切力较 强,颗粒沉积受到抑制,导致其在该区域的分布变化较小,而在绕流后,尽管颗粒与第四排管壁的碰撞 概率有所增加,但颗粒与第四排管壁撞击位置未发生明显变化。这是由于在较高流速下,颗粒的惯性主 导作用增强使其更容易随流体运动。因此,在不同颗粒物浓度条件下,流场前后区域的颗粒分布特征存 在明显差异,尾涡区域的颗粒聚集效应更为显著,而前端区域的颗粒沉积则受流场动力学特性主导。



**Figure 11.** Distribution of particles with different concentrations around the fins 图 11. 不同浓度的颗粒在翅片周围的分布情况

## 5. 结论

(1) 颗粒沉积速率随模拟时间延长而显著增加。在  $10 \, \mu m$  工况下,  $20 \, s$  模拟周期的沉积速率较  $10 \, s$  和 5 s 分别提高 1.94 倍和 3.43 倍, 归因于斯托克斯数增大导致颗粒惯性增强、偏离流线并增大壁面碰撞概率。同时,颗粒粒径越大,沉积越显著。粒径小于 3  $\mu m$  时沉积缓慢,以拖曳力主导; 粒径  $\geq 5 \, \mu m$  时沉积进入准稳态并呈指数增长, 8  $\mu m$  以上惯性沉积效应显著。

(2) 颗粒分布特性亦随粒径变化而异。 $1\sim 5 \mu m$  颗粒受粘性力与湍流扩散影响,分布较均匀;  $6\sim 10 \mu m$  颗粒惯性增强,易在低速区及尾涡区聚集,特别是  $D_p \ge 5 \mu m$  时尾涡沉积明显,表明涡结构对颗粒迁移与沉积行为影响显著。

(3) 流速和浓度对沉积影响显著。流速从 5 m/s 增至 10 m/s 时,沉积速率分别下降 82%、52%、46%; 高流速增强拖曳力与 Saffman 升力,抑制颗粒沉积。颗粒浓度升高则提高沉积概率,特别在尾涡区更为 明显,而前端因高流速和强剪切作用沉积较少,表现出显著的空间差异性。

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局."十四五"现代能源体系规划[EB/OL]. 2022-01-29. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content\_5680759.htm, 2022-04-02.
- [2] Chen, H., Xu, J., Li, Z., Xing, F. and Xie, J. (2013) Stratified Two-Phase Flow Pattern Modulation in a Horizontal Tube by the Mesh Pore Cylinder Surface. *Applied Energy*, **112**, 1283-1290. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.062</u>
- [3] Wang, J., Liu, W. and Liu, Z. (2015) The Application of Exergy Destruction Minimization in Convective Heat Transfer Optimization. *Applied Thermal Engineering*, 88, 384-390. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.076</u>
- [4] Zheng, N., Liu, P., Shan, F., Liu, Z. and Liu, W. (2017) Turbulent Flow and Heat Transfer Enhancement in a Heat Exchanger Tube Fitted with Novel Discrete Inclined Grooves. *International Journal of Thermal Sciences*, 111, 289-300. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.09.010</u>
- [5] Yu, X., Xu, J., Yuan, J. and Zhang, W. (2018) Microscale Phase Separation Condensers with Varied Cross Sections of Each Fluid Phase: Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Reduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 439-454. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.002</u>
- [6] van Beek, M.C., Rindt, C.C.M., Wijers, J.G. and van Steenhoven, A.A. (2006) Rebound Characteristics for 50-μm Particles Impacting a Powdery Deposit. *Powder Technology*, **165**, 53-64. <u>https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.03.008</u>
- [7] Tong, Z., Li, M., He, Y. and Tan, H. (2017) Simulation of Real Time Particle Deposition and Removal Processes on Tubes by Coupled Numerical Method. *Applied Energy*, 185, 2181-2193. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.043</u>
- [8] Sui, Z., Zhang, Y., Peng, Y., Norris, P., Cao, Y. and Pan, W. (2016) Fine Particulate Matter Emission and Size Distribution Characteristics in an Ultra-Low Emission Power Plant. *Fuel*, **185**, 863-871.

- [9] Li, Z., Sun, F., Ma, L., Wei, W. and Li, F. (2016) Low-Pressure Economizer Increases Fly Ash Collection Efficiency in Esp. *Applied Thermal Engineering*, 93, 509-517. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.006</u>
- [10] Laycock, R. and Fletcher, T.H. (2015) Independent Effects of Surface and Gas Temperature on Coal Fly Ash Deposition in Gas Turbines at Temperatures up to 1400 °C. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **138**, Article ID: 021402. <u>https://doi.org/10.1115/1.4031318</u>
- [11] Guan, L., Yuan, Z., Gu, Z., Yang, L., Zhong, W., Wu, Y., et al. (2017) Numerical Simulation of Ash Particle Deposition Characteristics on the Granular Surface of a Randomly Packed Granular Filter. *Powder Technology*, 314, 78-88. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.041
- [12] 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.
- [13] 文夏楠, 翟慧星, 王随林. 含尘烟气横掠交错排列椭圆与圆管束数值模拟[J]. 中国科技论文, 2021, 16(2): 223-228.
- [14] Fu, L., Liu, P. and Li, G. (2017) Numerical Investigation on Ash Fouling Characteristics of Flue Gas Heat Exchanger. Applied Thermal Engineering, 123, 891-900. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.184</u>
- [15] Hinds, W.C. (1999) Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Wiley.
- [16] Wilcox, D.C. (1998) Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries.
- [17] 李强, 邹建, 周守杰. H 型翅片椭圆管低低温省煤器换热与阻力特性研究[J]. 锅炉技术, 2020, 51(4): 25-28.
- [18] 鲁晟,姚德飞. 燃煤电厂烟气中颗粒物粒径分布特征研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(8): 62-65.
- [19] Wang, F., Tang, S., He, Y., Kulacki, F.A. and Yu, Y. (2019) Heat Transfer and Fouling Performance of Finned Tube Heat Exchangers: Experimentation via on Line Monitoring. *Fuel*, 236, 949-959. <u>https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.081</u>
- [20] Gupta, R.P., Wall, T.F., Kajigaya, I., Miyamae, S. and Tsumita, Y. (1998) Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy of Minerals in Coal—Implications for Ash Deposition. *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, 523-543. <u>https://doi.org/10.1016/s0360-1285(98)00009-4</u>