

基于COMSOL Mutiphysics的粒子悬浮效果模拟仿真研究

吴龙文

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年12月5日; 录用日期: 2023年12月25日; 发布日期: 2024年1月23日

摘要

粒子悬浮是指固体粒子在液体或气体中不断运动并保持悬浮状态的现象, 这个现象广泛存在于许多工程和科学领域。而粒子悬浮模拟可以通过数值模拟的方式对粒子悬浮行为进行深入研究和分析, 揭示粒子与流体之间的相互作用机制。本研究利用COMSOL Mutiphysic仿真软件中流体流动模块中的单相流与粒子追踪功能, 对粒子在液体中的悬浮行为进行了数值模拟。通过建立粒子与流体之间的相互作用模型, 探讨了粒子在不同流体条件下的运动特性, 并分析了粒子浓度、粒子尺寸等因素对悬浮行为的影响。通过仿真结果与实际悬浮测试效果进行对比, 研究结果对于理解粒子悬浮系统的稳定性和传输特性具有一定的参考价值。

关键词

COMSOL Mutiphysics, 粒子追踪, 单相流, 粒子悬浮

Simulation and Modeling Study of Particle Suspension Effects Based on COMSOL Multiphysics

Longwen Wu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 5th, 2023; accepted: Dec. 25th, 2023; published: Jan. 23rd, 2024

Abstract

Particle suspension refers to the phenomenon where solid particles continuously move and remain suspended in a liquid or gas medium. This phenomenon is widely observed in various engi-

neering and scientific fields. Simulation of particle suspension allows for in-depth study and analysis of particle behavior, revealing the mechanisms of interaction between particles and the surrounding fluid. In this study, numerical simulation of particle suspension in a liquid was conducted using the single-phase flow and particle tracking capabilities within the fluid flow module of COMSOL Multiphysics simulation software. By establishing an interaction model between particles and the fluid, the movement characteristics of particles under different fluid conditions were investigated, and the effects of particle concentration and size on suspension behavior were analyzed. The simulation results were compared with actual suspension tests, providing valuable insights into the stability and transport properties of particle suspension systems.

Keywords

COMSOL Multiphysics, Particle Tracking, Single-Phase Flow, Particle Suspension

Copyright © 2024 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

粒子悬浮是指固体粒子在液体或气体中不断运动并保持悬浮状态的现象，对环境科学、化学工程和材料科学等领域具有重要意义。在水处理领域，了解粒子在水中的悬浮行为有助于设计更有效的污水处理系统和优化悬浮物的去除过程。在大气污染研究中，模拟粒子的悬浮行为可帮助预测和评估空气质量，并制定减排措施。在化学工程和材料科学中，了解粒子的悬浮行为对药物输送系统、粉末冶金和陶瓷材料制备具有重要影响，有助于优化材料的粒子分散性和制备工艺[1]。

粒子悬浮模拟的重要性在于，通过数值模拟可以对粒子悬浮行为进行深入研究和分析，揭示粒子与流体之间的相互作用机制。相比实验方法，数值模拟可以提供更多的细节信息，并且可以通过改变参数和条件来进行系统的探索。这种模拟方法能够帮助研究人员更好地理解粒子悬浮系统的稳定性、运动规律和传输特性[2] [3]。最近的研究进展包括对粒子悬浮系统稳定性、运动规律和传输特性的深入理解，以及为实际系统提供设计和优化建议。一些研究集中在利用计算流体动力学(CFD)和离散元素法(DEM)等先进数值模拟方法，来模拟和优化粒子悬浮系统的各种参数和条件[4]。这些研究有助于深化对粒子悬浮行为的理解，并为相关领域的工程和科学问题提供可靠的模拟分析方法。

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限元分析方法的多物理场仿真软件，被广泛应用于解决涉及多个物理场的复杂问题[5]。在粒子悬浮模拟中，COMSOL Multiphysics 可用于建立和求解粒子与流体之间的相互作用模型，包括粒子的运动方程、流体的流动方程和粒子与流体之间的力学耦合。通过其多物理场仿真功能，研究人员可以模拟和优化粒子悬浮系统的各种参数和条件，深入研究粒子悬浮问题，并提供对实际系统的设计和优化建议[6]。因此，COMSOL Multiphysics 在多物理场仿真中的应用优势使其成为研究粒子悬浮行为的重要工具，有助于深入理解粒子悬浮系统的特性和行为，并为相关领域的工程和科学问题提供可靠的模拟分析方法。

2. 粒子悬浮系统实体模型

2.1. 模型结构

本研究用于测试悬浮效果的三维建模图与装置实物如下图 1 所示。在该模型中，首先在腔室内部充

满液体，液体流向为左上方入口流入，右侧出口流出；然后粒子通过左上方的入口随流动的液体进入装置内，并悬浮于腔室内部。粒子悬浮仿真主要模拟粒子在不同流体条件下的运动特性，分析粒子浓度、粒子尺寸等因素对悬浮效果的影响[7]。

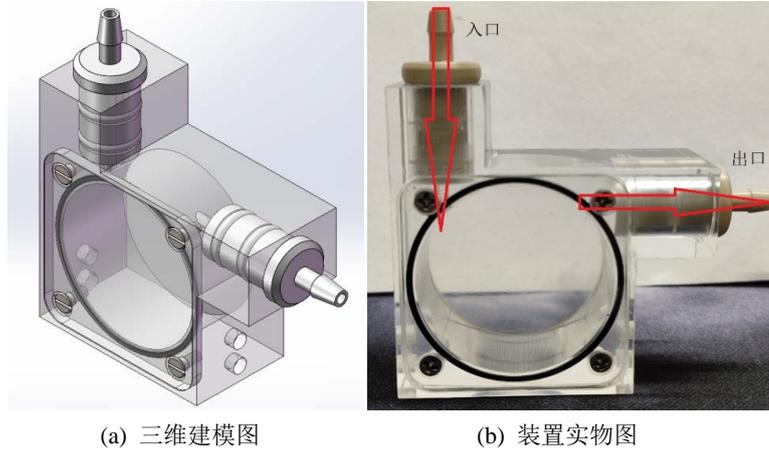


Figure 1. 3D modeling and actual drawings
图 1. 三维建模与实物图

2.2. 粒子受力分析

粒子遵循牛顿第二定律：

$$\frac{d}{dt}(m_p V) = F_t$$

其中：

m_p (SI 单位：kg)是粒子质量，

V (SI 单位：m/s)是粒子速度，

F_t (SI 单位：N)是粒子上的总力。

总力由曳力 F_D 决定，其斯托克斯定律为：

$$F_D = 3\pi\mu d_p (u - v)$$

其中：

u (SI 单位：m/s)是流体速度，

μ (SI 单位：Pa s)是流体动力黏度，

d_p (SI 单位：m)是粒子直径。

除曳力外，还可以分析粒子上的虚拟质量力 F_{vm} 和压力梯度力 F_p ，这些力由以下式定义：

$$F_{vm} = \frac{1}{2} m_f \frac{d(u-v)}{dt}$$

$$F_p = m_f \frac{Du}{Dt}$$

其中 m_f (SI 单位：kg)是被粒子体积代替的流体的质量。

$$m_f = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho$$

$$\frac{d_f}{d_t} = \frac{\partial_f}{\partial_t} + \nabla f \cdot v \frac{Df}{Dt} = \frac{\partial_f}{\partial_t} + \nabla f \cdot u$$

ρ (SI 单位: kg/m^3) 是流体的密度。上式中, 导数 d/dt 是粒子速度方向上的材料(或总)导数, D/Dt 是流体速度方向上的材料导数。

当粒子相的密度比流体相的密度大得多时, 虚拟质量力和压力梯度力通常可以忽略不计, 气体中的固体粒子也是如此。但是, 如果粒子在液体中, 这些力可能与阻力接近同一个数量级。当流动不稳定时, 应特别注意这些力, 这是因为它们都依赖于流体速度场的空间和时间导数。流场是通过“层流”接口计算得出的。本文的数值模拟仿真中包含虚拟质量力和压力梯度力。

2.3. 数值模拟相关条件设定

建立粒子与流体之间相互作用的数值模型涉及一系列假设、基本方程和边界条件。

2.3.1. 基本假设

- 1) 粒子是刚性的, 不会变形;
- 2) 流体是连续、不可压缩的, 符合牛顿流体的黏性特性;
- 3) 粒子与粒子之间相互作用力可以忽略, 仅考虑粒子与流体之间的相互作用;
- 4) 粒子与流体之间的相互作用是局部、稳态的。

2.3.2. 基本方程

1) Navier-Stokes 方程: 用于描述流体的速度场和压力场。对于不可压缩的流体, Navier-Stokes 方程可以写为[8]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (\text{连续性方程})$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F_p \quad (\text{动量方程})$$

其中, u 是流体的速度场, p 是压力场, ρ 是流体密度, μ 是流体的动力黏度, F_p 是粒子对流体施加的力。

2) 粒子运动方程: 用于描述粒子在流体中的运动行为。常用的粒子运动方程包括牛顿第二定律和斯托克斯定律。

2.3.3. 边界条件

边界条件包括流体边界条件和粒子边界条件[9]。

1) 流体边界条件: 通常使用 No-Slip 边界条件来模拟粒子表面与流体之间的摩擦力。即, 在粒子表面上, 流体的速度与粒子表面的速度相等。

2) 粒子边界条件: 根据粒子的特性和运动状态, 可以设置不同的粒子边界条件。

2.3.4. 数值求解方法

1) 采用有限体积法或有限元法对 Navier-Stokes 方程进行离散化, 将连续方程和动量方程转化为离散形式的代数方程组[10]。

2) 使用迭代方法(如迭代法、牛顿迭代法等)求解离散方程组, 得到流体的速度场和压力场。

3) 将粒子运动方程与流体的速度场耦合, 通过迭代求解得到粒子表面的速度、位移或受力。

3. 粒子悬浮流体仿真

3.1. 模型建立与网格划分

通过 COMSOL 中流体流动模块的单相流和粒子追踪模拟仿真液体循环流动过程以及粒子在流体中

的状态，单相流中主要使用“层流”接口，该接口用于计算单相流体流动在层流状态下的速度场和压力场。只要雷诺数低于一定的临界值，流动就将保持层流状态，主要用于求解动量守恒的纳维-斯托克斯方程和质量守恒的连续性方程[11]。粒子追踪主要使用的是“流体流动粒子跟踪”接口，该接口用于计算背景流体中的粒子运动，粒子的运动由曳力和重力驱动。考虑到计算机的运算速度和模拟仿真的时间成本，将三维立体模型合理简化为二维平面模型进行模拟仿真，二维建模如图 2 所示，几何长度单位为毫米；网格划分情况如图 3 所示，采用自由三角形划分，网格数量为 2008 个。

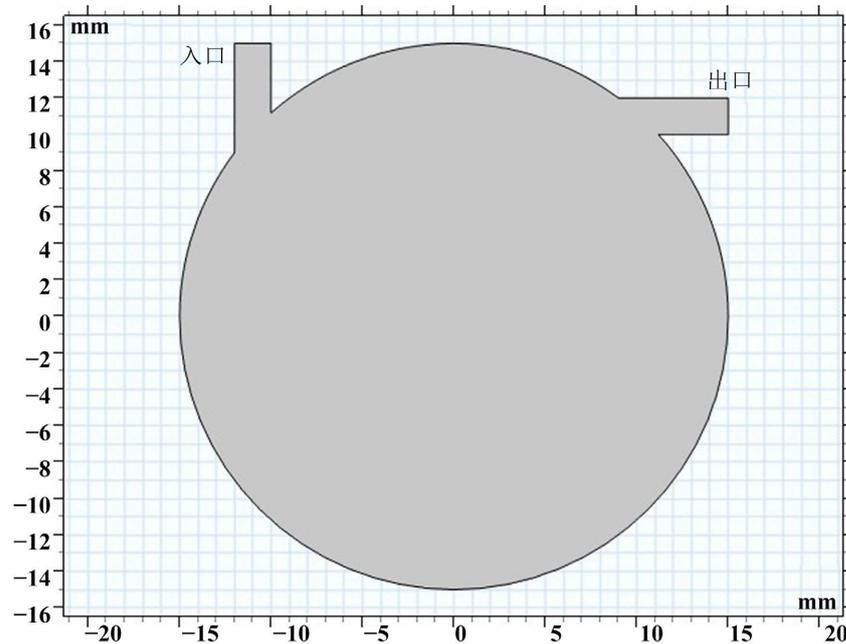


Figure 2. Two-dimensional modeling
图 2. 二维建模

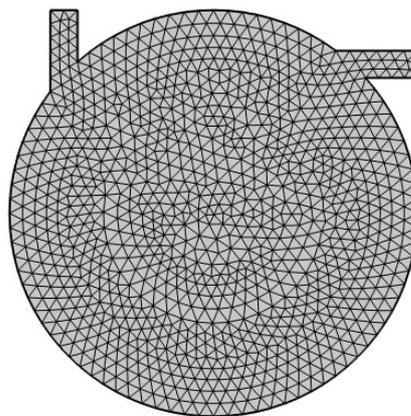


Figure 3. Meshing diagram
图 3. 网格划分

3.2. 流体仿真结果分析

为了了解粒子的运动特性，分析了流体速度、粒子数量和粒子尺寸因素对于粒子最后悬浮行为的影响，分别进行 6 组仿真实验和 2 组实物悬浮对比实验，设置不同的仿真条件如表 1 所示，每种因素设置

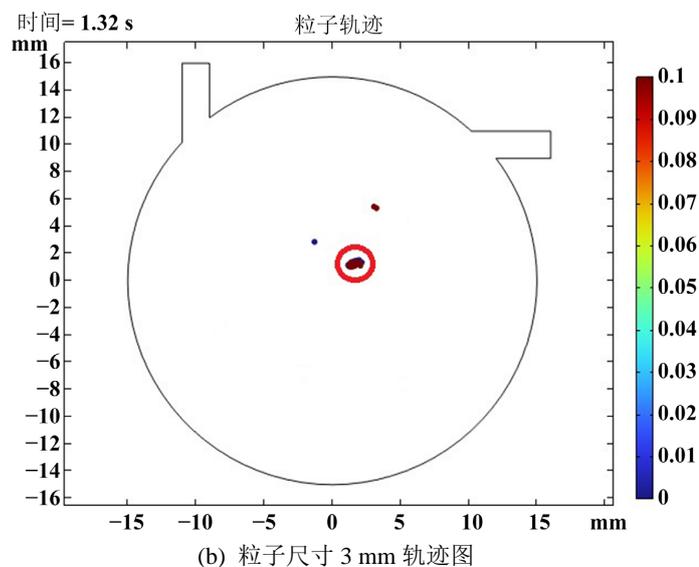
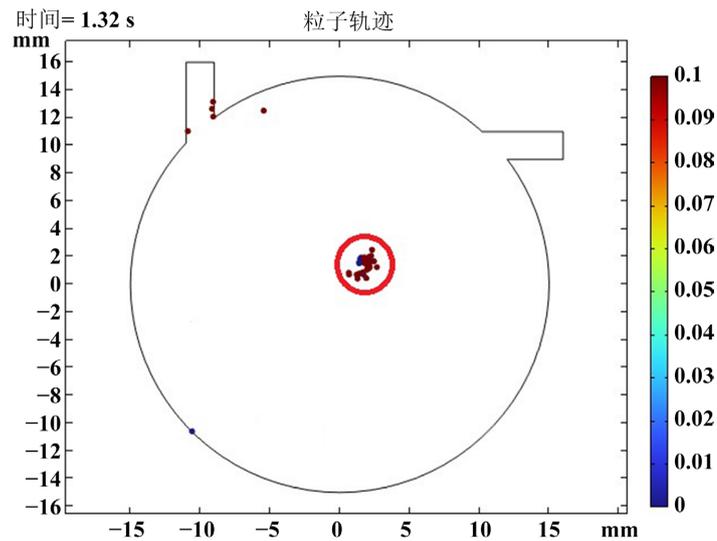
2组模拟仿真进行对比。实物实验采用外形不规则的粒子进行，仅改变物体外形，其余条件不变。

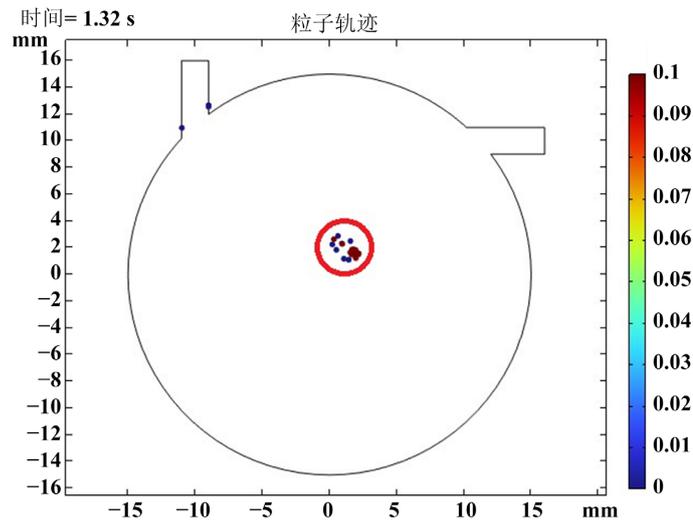
Table 1. Simulation condition settings

表 1. 仿真条件设置

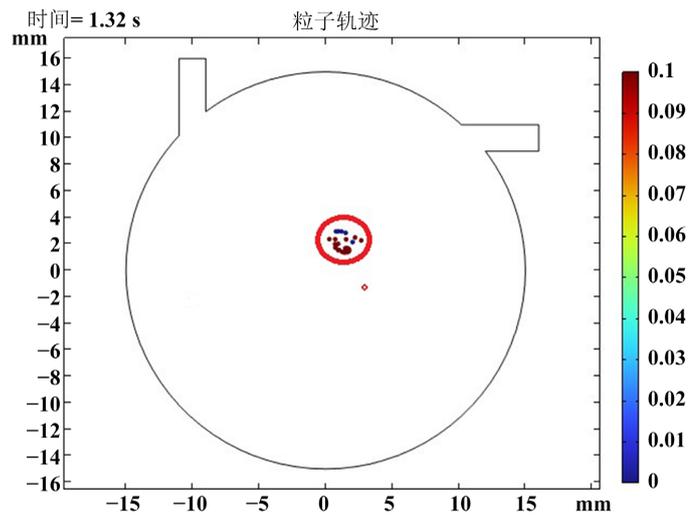
仿真	流体速度 m/s	粒子数量颗	粒子尺寸 mm
1	0.2	100	1.0
2	0.2	100	3.0
3	0.2	50	2.0
4	0.2	150	2.0
5	0.2	100	2.0
6	0.6	100	2.0

通过仿真得到的结果如下图 4 所示，

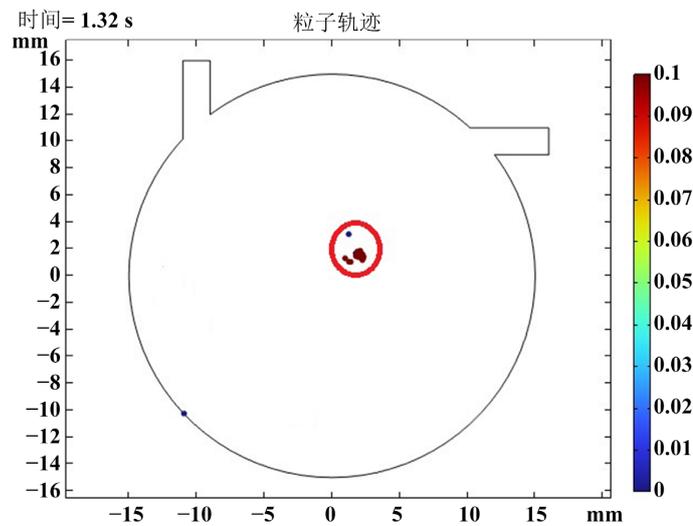




(c) 粒子数量 50 轨迹图



(d) 粒子数量 150 轨迹图



(e) 流体速度 0.2 m/s 轨迹图

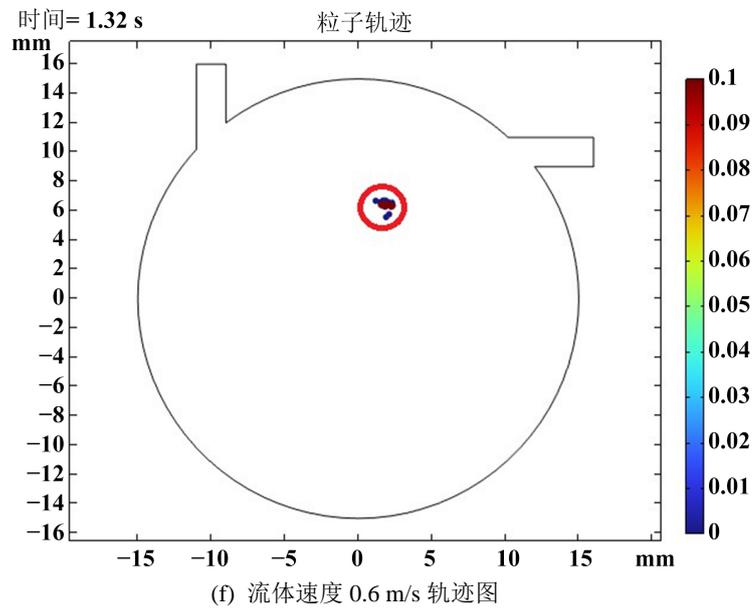


Figure 4. Fluid simulation results
图 4. 流体仿真结果图

实物测试结果如图 5 所示，测试悬浮效果的物体为生物基质胶材料，生物材料 1 是类果冻基质胶材料，2 是棉状基质胶材料。

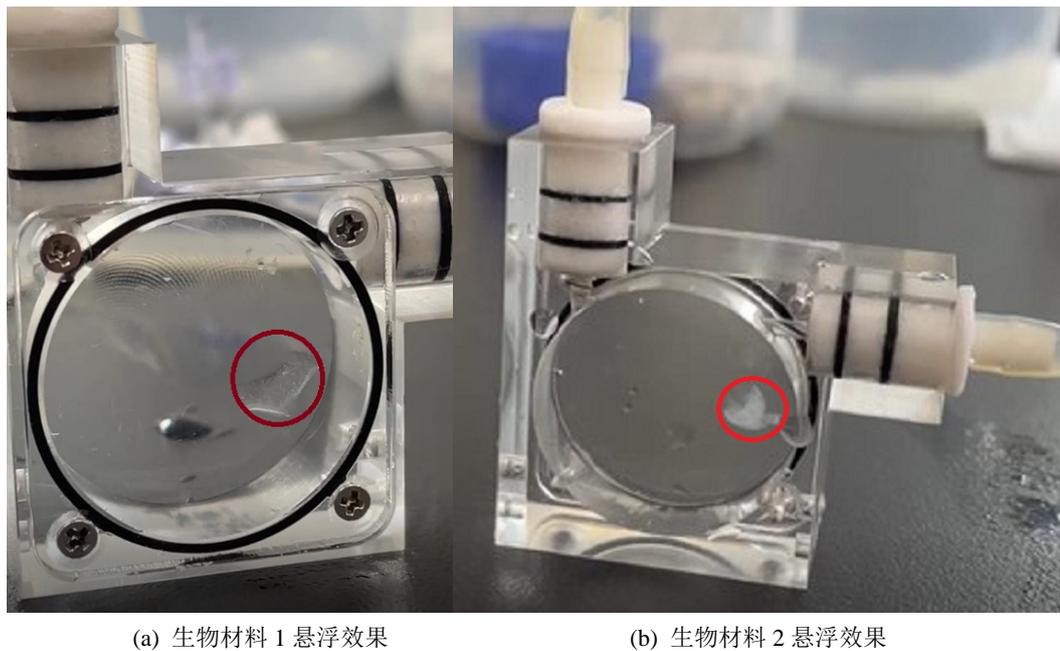


Figure 5. Physical test diagram
图 5. 实物测试图

通过对仿真结果的深入分析，可以得出以下结论：不同形状和大小的粒子在悬浮行为中会表现出差异。大粒子相对较重，更容易沉积，而小粒子则更容易悬浮。通过比较图 4(a)和图 4(b)可以观察到，尺寸较大的粒子往往下沉得更快，而较小的粒子则保持在悬浮状态，尽管它们的悬浮位置可能会有些差异。

此外，粒子浓度的增加可能会增加粒子之间的相互作用，从而影响悬浮行为。图 4(c)和图 4(d)的比较表明，粒子浓度对于悬浮位置的影响比较明显，但最终的悬浮位置差异不大，粒子几乎都会聚集在相似的位置。值得注意的是，增加流体速度或流量可以增强粒子的悬浮能力，并减少粒子沉降的可能性。当流体速度较低或流量较小时，粒子更容易在流体中沉积和聚集。从图 4(e)和图 4(f)可以观察到，流体速度越快，粒子的悬浮位置越高。

然而，在实际应用中，粒子的分布和聚集可能不均匀，导致特定区域的粒子更易沉积，而其他区域则更可能保持悬浮状态。在实物实验中，观察到的结果与仿真实验的结论具有一定的一致性和可复现性，在最终悬浮位置上并无显著差异。

综上所述，不同形状和大小的粒子、粒子浓度以及流体速度和流量都是影响粒子悬浮行为的重要因素。进一步的研究可以探索这些参数对于悬浮行为的具体影响机制，并且对粒子悬浮系统的优化和设计具有实际意义。

4. 结论

通过本文的研究，得出了以下主要结论：不同流速、粒子大小和粒子浓度对悬浮行为产生差异，较大的粒子更易沉积而较小的粒子更易悬浮。粒子浓度的增加会增加粒子间相互作用，但对最终悬浮位置影响不大。增加流体速度或流量可以增强粒子悬浮能力并减少粒子沉降的可能性。这些发现对于粒子悬浮系统的理解和工程应用具有重要意义，可帮助优化粒子的分离、过滤和输送等过程。

未来的研究方向可以包括以下几个方面：首先，进一步研究不同形状和大小粒子的悬浮行为，探索其影响机制和动力学特性。其次，考虑粒子与流体之间的相互作用，如粒子与流体的相对速度、粘性等因素对悬浮行为的影响。此外，研究粒子悬浮行为在不同流体介质和温度条件下的变化规律，并探索在复杂环境中的应用潜力。

本文研究对于粒子悬浮系统的理解和工程应用具有重要意义，为优化粒子悬浮过程提供了理论基础。未来的研究可以进一步深入探索粒子悬浮行为的机制，并拓展其在不同领域的应用。

参考文献

- [1] 宋丽娟, 刘毅, 杜绍华. 基于 COMSOL 多物理场仿真的粒子悬浮行为数值模拟[J]. 粉体技术, 2020, 38(5): 74-80.
- [2] Wang, Q. and Zhang, L. (2019) Investigation of Particle-Fluid Interaction Using COMSOL Multiphysics for Suspension Behavior Analysis. *Chemical Engineering Science*, **176**, 182-195.
- [3] Liu, Y., et al. (2020) Numerical Modeling of Particle Suspension in Different Fluid Conditions with COMSOL Multiphysics. *Powder Technology*, **308**, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.061>
- [4] Zhang, Y., Li, X. and Liu, H. (2020) Numerical Simulation of Particle Suspension Flow Based on CFD-DEM. *Powder Technology*, **364**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.057>
- [5] 韩力仁, 程志勇, 卢东方. 基于 COMSOL Mutiphysics 的外磁筒式磁选机磁系磁场与流场仿真研究[J]. 矿产保护与利用, 2023(5): 89-98.
- [6] 叶世康, 孙伦业, 杨硕, 肖顺. 基于 COMSOL 的电解加工多物理场耦合数值模拟[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2023, 41(4): 83-86.
- [7] 曾子华, 姚军, 周芳, 董士刚, 赵彦琳, 李宁. 液固两相射流中 304 不锈钢冲蚀行为研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(12): 2853-2858.
- [8] 史卫东, 徐建军, 岳孝强. 求解不规则区域上椭圆方程的一种 Cartesian 网格方法及其在 Navier-Stokes 方程中的应用[J]. 工程数学学报, 2023, 40(5): 779-792.
- [9] 刘雪超. 悬浮液流变特性与颗粒迁移特性数值研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [10] 任能, 杨绿伟, 李军, 曾龙, 夏明许, 李建国. 高温合金定向凝固数值模拟研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1336-1350.
- [11] 李博, 黄嘉伦, 钟振, 邹良超. 三维交叉裂隙渗流传质特性数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3670-3678.