

深海采矿垂直管道内异形粗颗粒运动状况研究^①

许明^{1,2}, 徐江敏², 卢道华², 汤雁冰²

(1.江苏科技大学机械工程学院,江苏镇江212000; 2.江苏科技大学海洋装备研究院,江苏镇江212003)

摘要:运用计算流体力学-离散元(CFD-DEM)方法对不同工况下球形、四面体形和六面体形颗粒群在垂直管流中的运动状况进行仿真分析,得到异形颗粒群垂直管道内的运动状况。对比分析了异形颗粒群在垂直管道中的局部浓度和局部流量,结果表明,入口流速较低时,颗粒形状对局部浓度影响较大;给料浓度较大、入口流速较低时,颗粒形状对局部流量的影响明显。

关键词:深海采矿;颗粒群;管道输送;垂直提升;异形粗颗粒;CFD-DEM

中图分类号:TD807

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.010

文章编号:0253-6099(2023)03-0042-05

Motion of Irregular Coarse Particles in Vertical Pipelines During Deep Sea Mining

XU Ming^{1,2}, XU Jiangmin², LU Daohua², TANG Yanbing²

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, Jiangsu, China;
2.Research Institute of Marine Equipment, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: The motion of spherical, tetrahedral and hexahedral particles flowing in a vertical pipe under different working conditions was simulated by using computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM), and the motion of irregular particles flowing in a vertical pipe was obtained. Based on comparison of local concentration and local flow rate, it is found that with lower flow rate at the inlet, the shape of particles can bring a larger influence to local concentration; while with a higher feed concentration and lower inlet flow rate, the shape of particles can bring obvious influence to local flow rate.

Key words: deep sea mining; group of particles; pipeline transportation; vertical lift; irregular coarse particles; CFD-DEM

深海采矿时,在海底进行矿石粉碎比较困难并且成本很高,矿石一般都是提升至海面后再粉碎,所以垂直提升管道输送的矿石颗粒粒径一般较大,并且呈现各种形状;形状各异的粗颗粒在垂直提升管道中的运动特性会有很大差异。因此,研究垂直提升管道内异形粗颗粒的运动状况对完善深海采矿水下输送系统具有重要意义。

国内外诸多学者通过物理试验和数值模拟的方法对深海采矿垂直提升管道内矿石颗粒的输送状况进行了研究,主要包括以下3个方面:垂直提升管道的沿程压力损失^[1-4]、矿石颗粒在垂直提升管道中的运动状况^[5-9]以及垂直提升管道的运输安全^[10-13]。但目前使

用计算流体力学-离散元(CFD-DEM)方法对深海采矿垂直提升管道水力输送的研究较少,尤其是对异形粗颗粒运动状况的研究鲜有报道。本文采用CFD-DEM方法,对不同给料浓度、不同入口流速下异形粗颗粒的运动状况进行数值模拟,得到深海采矿垂直提升管道内异形粗颗粒的运动规律,为后续深海采矿水下输送系统垂直提升管道的设计、提升泵的设计、输送系统防淤堵研究等提供参考。

1 模型与方法

1.1 数值模拟概况

实际的深海采矿垂直提升管道可长达数千米,本

① 收稿日期:2022-12-03

作者简介:许明(1997—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究方向为深海采矿混输系统及隔膜泵结构与控制。

通信作者:徐江敏(1980—),男,江西湖口人,硕士,高级实验师,硕士研究生导师,主要研究方向为先进制造技术。

文主要是对固液两相流在垂直提升管道中的混合时间段和初始稳定时间段进行研究,因此选取垂直管道管径 200 mm、管道长 4 000 mm,如图 1 所示。为了方便监测垂直提升管道的局部流量和局部浓度,在距离速度入口 3 500 mm 处设置一段长 200 mm 的观察区域。

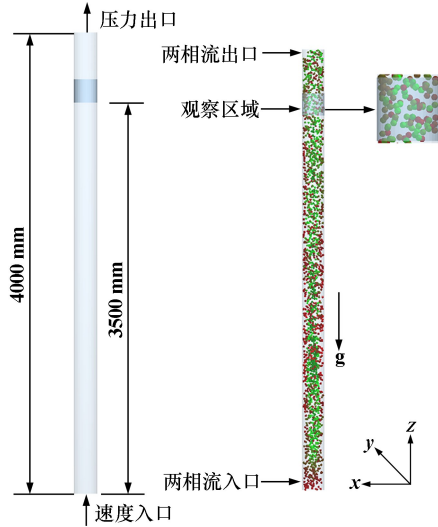


图 1 数值模拟计算区域

如图 2 所示,为验证颗粒形状对颗粒运动状况的影响,选择 3 种形状的颗粒,分别为球形颗粒、四面体形颗粒和六面体形颗粒。矿石颗粒密度 $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、泊松比 0.4。选取球形颗粒直径 20 mm。为充分研究颗粒形状对垂直管道提升过程的影响,要保证 3 种形状颗粒体积以及其他相关参数尽可能保持不变,因此四面体形颗粒设置为直径 14 mm 的 4 个球形颗粒以四面体形状排列,六面体形颗粒设置为直径 12 mm 的 8 个球形颗粒以六面体形状排列。



图 2 异形粗颗粒

1.2 数学模型选择

为了能够准确模拟矿石颗粒在管道中的运动状态,采用动态流固耦合方法进行模拟。管道内流体的控制方程通过 $N-S$ 方程并耦合矿石颗粒对管道内流体产生的扰动项;矿石颗粒的控制方程分为动量以及角动量守恒方程。

管道内流体控制方程为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f_g + f_{st} \quad (2)$$

式中 ∇ 为哈密顿算子; u 为管道内流体流速; ρ_f 为管道内流体密度; ν 为管道内流体运动黏度; f_g 为管道内流体所受重力; f_{st} 为矿石颗粒对管道内流体的作用力。

矿石颗粒控制方程为:

$$m_s \frac{dV_s}{dt} = F_{ct} + F_{fs} + m_s g \quad (3)$$

$$I_s \frac{d\omega_s}{dt} = M_{ct} + M_{fs} \quad (4)$$

式中 m_s 为矿石颗粒质量; V_s 为矿石颗粒速度; F_{ct} 为矿石颗粒所受到碰撞力; F_{fs} 为管道内流体对矿石颗粒的作用力; I_s 为矿石颗粒的转动惯量; ω_s 为矿石颗粒角速度; M_{ct} 为矿石颗粒所受其他矿石颗粒的接触力矩; M_{fs} 为矿石颗粒所受管道内流体阻力矩。

$$F_{ct} = \sum F_c \quad (5)$$

$$F_{fs} = F_d + F_l + F_p + F_{am} + F_B \quad (6)$$

$$M_{ct} = \sum (r_c + F_c + M_c) \quad (7)$$

式中 F_c 为两矿石颗粒间的接触力; F_d 为矿石颗粒受到的管道内流体阻力; F_l 为矿石颗粒受到的升力,包含 Magnus 力和 Saffman 力; F_p 为矿石颗粒受到的压力梯度力; F_{am} 为矿石颗粒受到的附加质量力; F_B 为 Basset 力; r_c 为矿石颗粒重心到矿石颗粒接触点的向量; M_c 为矿石颗粒滚动摩擦产生的力矩。

1.3 网格无关性验证与边界条件设置

根据垂直管道计算区域,使用六面体结构化网格对计算区域进行网格划分,并且在保证较高准确性的基础上尽可能减少网格数量,对网格进行无关性验证。在清水流速 $2\ \text{m}/\text{s}$ 、出口处压强为标准大气压、壁面粗糙度常数 0.5 工况下选取计算区域中观察区域两端的压力差来判断网格无关性。如图 3 所示,为尽可能提高计算效率,最终选取网格数量为 395 293 的网格模型。垂直管道计算域的网格划分情况如图 4 所示。

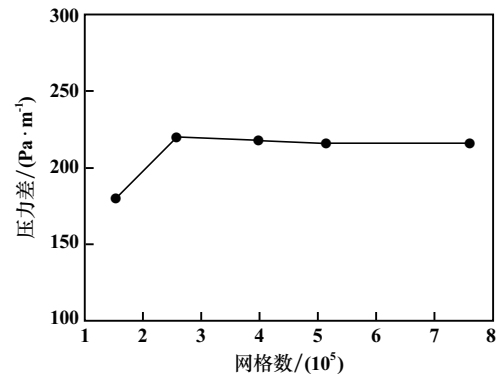


图 3 网格无关性验证

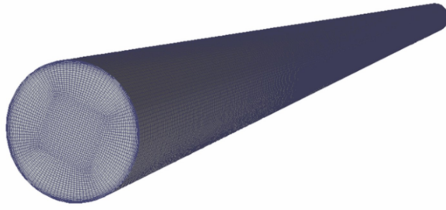


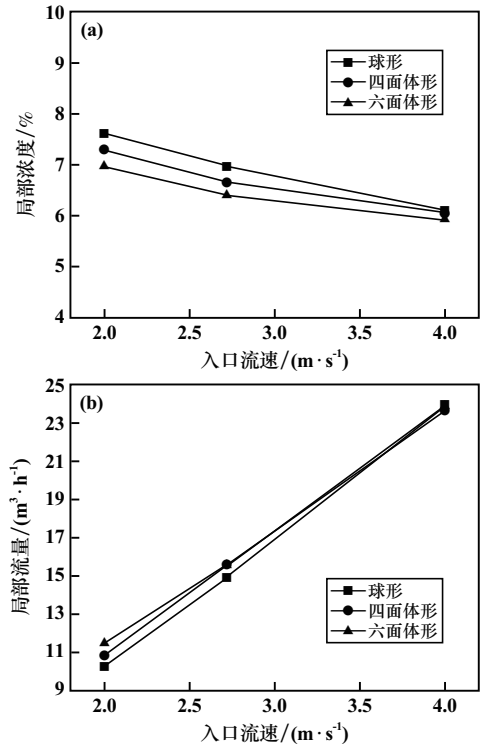
图4 网格划分情况

数值模拟计算区域底部的入口设置为速度入口,入口的压强边界条件设置为0,入口速度根据球形粗颗粒的沉降速度分别设置为2 m/s、2.72 m/s、4 m/s;数值模拟计算区域的壁面设置为无滑移边界条件;数值模拟计算区域顶部的出口设置为压力出口。使用Di Felice作为仿真计算的曳力模型,使用Saffman Lift、Magnus Lift以及Fluid-induced torque作为仿真计算的升力模型。

2 计算结果及分析

2.1 给料浓度5%时异形粗颗粒运动状况

选取球形、四面体形和六面体形3种形状颗粒,选取3种不同的入口流速2、2.72、4 m/s,选取给料浓度5%,通过CFD-DEM耦合对3种异形粗颗粒在垂直提升管道中的运动状况进行仿真模拟,结果如图5和图6所示。从图5(a)可以看出,垂直提升管道中局部浓度随着入口流速增大而减小,同时可以从图中推测出,入口流速降到2 m/s以下时,垂直提升管道内局部浓度将会进一步增大,但考虑到颗粒在垂直提升管道中的悬浮速度,入口流速过小会导致提升管道发生堵塞现象。从图中还可以看出,入口流速2 m/s时,球形颗粒在垂直提升管道中的局部浓度要比四面体形和六面体形颗粒在管道中的局部浓度大,但随着入口流速增大,球形颗粒与四面体形、六面体形颗粒在管道中的局部浓度差从0.31%和0.64%逐渐降低到0.04%和0.20%。这表明随着入口流速提高,颗粒形状对局部浓度的影响降低。从图5(b)可以看出,垂直提升管道中局部流量随着入口流速增大而增大,入口流速2 m/s时,球形、四面体形和六面体形颗粒的局部流量有明显差距,但由于异形颗粒体积和相关性质基本保持不变,随着入口流速提高,3种异形颗粒局部流量的差距会逐渐降低,颗粒形状对局部流量的影响也会逐渐减弱。此现象与颗粒形状对局部浓度的影响相同,在低入口流速下颗粒形状对颗粒运动状况影响较明显,而随着入口流速提高,颗粒形状对颗粒运动状况的影响逐渐减弱。从图6可以看出,入口流速较低的情况下,管道内浓度较高,此情况与图5(a)统计结果一致。



(a) 对局部浓度的影响; (b) 对局部流量的影响

图5 浓度5%时入口流速对异形粗颗粒运动状况的影响

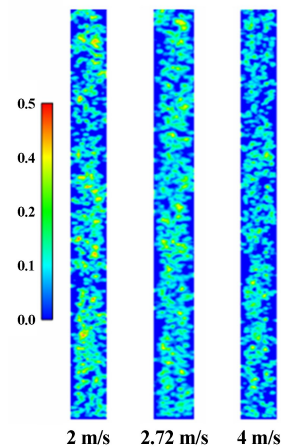
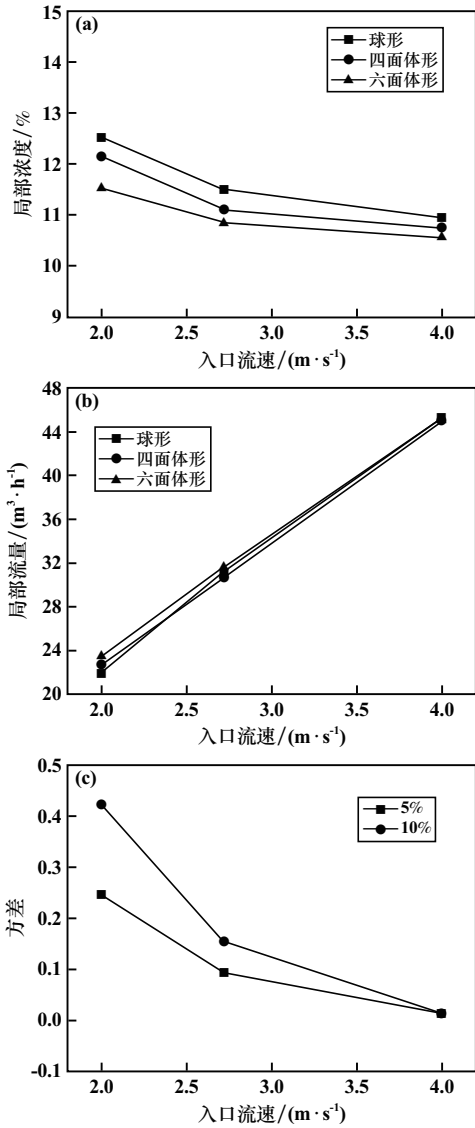


图6 浓度5%时不同入口流速下球形颗粒在管道中体积分数云图

2.2 给料浓度10%时异形粗颗粒运动状况

给料浓度10%时,不同入口流速下不同异形粗颗粒运动状况仿真模拟结果如图7和图8所示。从图7(a)可以看出,随着入口流速增大,球形颗粒与四面体形、六面体形颗粒在管道中的局部浓度差从0.38%和1%逐渐降低到0.2%和0.39%。可以看出随着给料浓度提高,颗粒形状对提升管道内局部浓度的影响效果越来越明显。从图7(b)可以看出,随着入口流速提高,颗粒形状对局部流量的影响逐渐减低。为更清晰地表示颗粒形状对垂直提升管道内局部流量的影响,



(a) 对局部浓度的影响; (b) 对局部流量的影响; (c) 对局部流量稳定性的影响

图7 浓度10%时入口流速对异形粗颗粒运动状况的影响

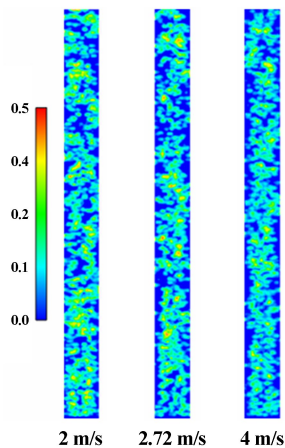
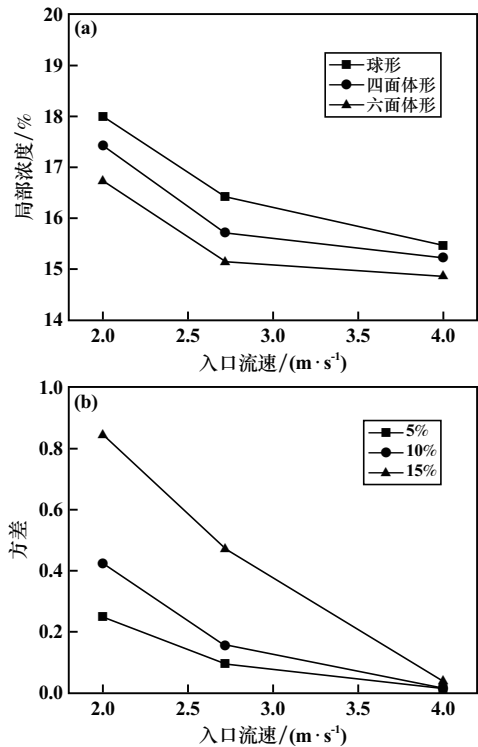


图8 浓度10%时不同入口流速下球形颗粒在管道中体积分数的云图

在图7(c)中,采用3种异形颗粒群在垂直提升管道中局部流量的方差来表示颗粒形状对局部流量的影响,方差越大说明颗粒形状对局部流量的影响越大,方差越小说明颗粒形状对局部流量的影响效果越小。浓度较高、流速较低情况下,颗粒形状对垂直提升管道内局部流量的影响效果明显,但随着入口流速提高,给料浓度降低,颗粒形状对局部流量的影响也在降低。从图8可以看出,入口流速较低时,管道内浓度较高。

2.3 给料浓度15%时异形粗颗粒运动状况

给料浓度15%时,不同入口流速下不同异形粗颗粒运动状况仿真模拟结果如图9~10所示。从图9(a)可以看出,随着给料浓度提高,颗粒形状对垂直提升管道内局部浓度影响更明显,随着入口流速增大,球形颗粒与四面体形、六面体形颗粒在管道中的局部浓度的差从0.57%和1.27%逐渐降低到0.24%和0.6%,3种异形颗粒间的局部浓度差值随着给料浓度增加而提高。从图9(b)可以看出,入口流速2 m/s时,3种给料浓度对应的方差值分别为0.25、0.42和0.84,颗粒形状对局部流量的影响随着给料浓度提高更加明显,但随着入口流速增加,即使在不同给料浓度条件下,颗粒形状对局部流量的影响也会逐渐减低,最终在入口流速4 m/s时,3种给料浓度条件下颗粒形状对局部流量的影响接近于0。从图10可以看出,入口流速较低时,垂直提升管道中局部浓度较大。



(a) 对局部浓度的影响; (b) 对局部流量稳定性的影响

图9 浓度15%时入口流速对异形粗颗粒运动状况的影响

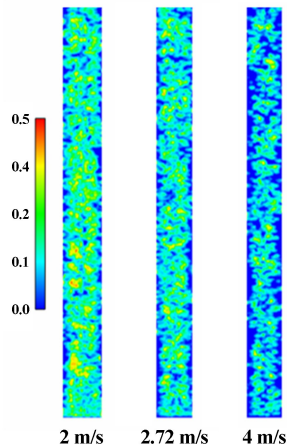
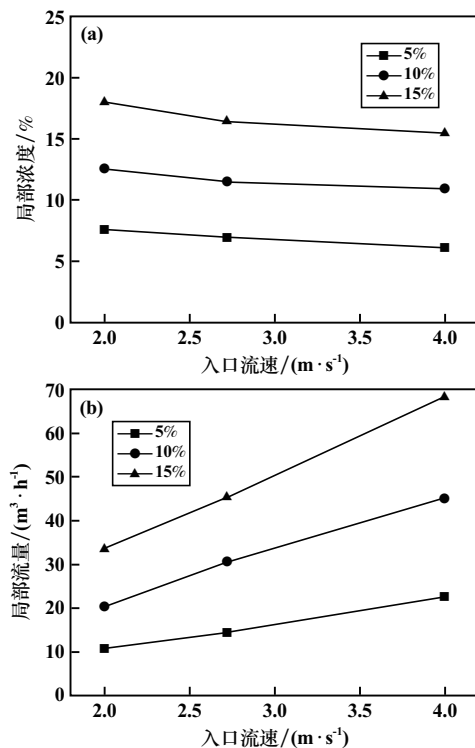


图10 浓度15%时不同入口流速下球形颗粒在管道中体积分数云图

2.4 对比分析

图11为给料浓度对垂直提升管道内球形颗粒的局部浓度和局部流量的影响。从图11(a)可以看出,随着入口流速增大,局部浓度减小。从图11(b)可以看出,随着入口流速提高,局部流量基本按照线性增长,同时随着给料浓度提高,局部流量随入口流速增长的速率也越高。因此可以推测,较大的入口流速和较高的给料浓度可以提高垂直提升管道的输送效率,但入口速度过大,会增大沿程压力损失,并且对提升泵的



(a) 对局部浓度的影响; (b) 对局部流量的影响

图11 给料浓度对球形颗粒运动状况的影响

功率有较高要求。

3 结 论

1) 入口流速2~4 m/s范围内,球形颗粒群在垂直管流中的局部浓度要比四面体形和六面体形颗粒群在垂直管流中的局部浓度大;入口流速较低时,颗粒形状对局部浓度和局部流量的影响较大,随着入口流速提高,颗粒形状的影响逐渐降低。

2) 给料浓度5%~15%范围内,随着给料浓度增大,球形颗粒与四面体形和六面体形颗粒局部浓度的差异更明显;给料浓度较大、入口流速较低时,颗粒形状对局部流量的影响尤为明显。

3) 不同给料浓度下,对于球形颗粒而言,随着入口流速提高,垂直提升管道中的局部流量基本按线性增大;随着给料浓度增大,垂直提升管道中的局部流量随入口流速增长的速率更大。

参考文献:

- [1] 姚妮均,曹 斌,夏建新. 深海采矿系统软管段输送阻力损失研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(2):10-14.
- [2] 曹 斌,刘金炜,夏建新. 深海采矿系统水平软管水力输送阻力损失规律研究[J]. 海洋技术学报, 2016,35(4):114-119.
- [3] 刘 磊. 深海采矿水力提升固液两相流动力学特性研究[D]. 上海:上海交通大学船舶与海洋工程, 2019.
- [4] 彭 芸. 粗颗粒矿石在深海采矿系统软管中输送特性试验研究[D]. 北京:中央民族大学生命与环境科学学院, 2016.
- [5] 唐达生,肖 红,宋跃文,等. 深海粗颗粒矿石浮游速度的试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(3):1-5.
- [6] 宋跃文,朱小军,唐达生. 垂直提升管道中粗颗粒滑移速度试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(4):5-7.
- [7] 唐达生,宋跃文,朱小军,等. 粗颗粒矿石在提升管道内的旋转特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017,48(7):1831-1838.
- [8] 唐达生,阳 宁,金 星. 深海粗颗粒矿石垂直管道水力提升技术[J]. 矿冶工程, 2013,33(5):1-8.
- [9] 余淑琦,罗荣昌,曹 斌,等. 深海采矿扬矿泵内固体颗粒运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2018,38(1):35-40.
- [10] 符 瑜,肖 红,夏建新. 长条状粗颗粒在垂直管路中最小输送速度试验研究[J]. 海洋工程, 2019,37(4):63-69.
- [11] 关英杰,郑 皓,宿向辉,等. 垂直管道内粗颗粒运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):10-14.
- [12] 赵国彦,林春平,洪昌寿. 垂直管道颗粒沉降速度的影响因素[J]. 科技导报, 2016,34(2):162-166.
- [13] 王 浩. 矽石粉煤灰充填料浆管道输送不稳定流及其影响研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 2019.

引用本文: 许 明,徐江敏,卢道华,等. 深海采矿垂直管道内异形粗颗粒运动状况研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):42-46.