深海多金属结核在垂直管道气力提升系统中的运动特性模拟①

林海[1,2], 杜燕连[1,3], 符孟帝[1,2], 魏孟然[1,3], 朱井育[1,2], 沈义俊[1,3]
(1.海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228; 2.海南大学 机电工程学院, 海南 海口 570228; 3.海南大学 海洋科学与工程学院, 海南 海口 570228)

摘 要: 为研究深海多金属结核在垂直管道气力提升系统中不同气流量下的运动特性和气液固三相流的流场特性,采用 CFD-DEM 耦合方法对垂直管道气力提升系统内气-液-固三相流进行数值模拟。结果显示:随着气流量增大,颗粒群的平均局部体积分数减小、段塞流的出现频率先降低再升高、管内流体流速和颗粒群平均轴向速度增大;管内平均压降随着气流量增大而减小,随着颗粒群局部体积分数增大而增大。因此,可通过压降了解管道内颗粒局部体积分数的变化,从而判断段塞流,防止管道堵塞。

关键词: 深海采矿; 多金属结核; 气力提升; 管道输送; 运动特性; 流场特性; 三相流; 流体力学
中图分类号: TD857 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.001
文章编号: 0253-6099(2026)01-0001-06

Research on Motion Characteristics of Deep-Sea Polymetallic Nodules in Vertical Pipeline of Airlift System by Numerical Simulation

LIN Hai[1,2], DU Yanlian[1,3], FU Mengdi[1,2], WEI Mengran[1,3], ZHU Jingyu[1,2], SHEN Yijun[1,3]
(1.*State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *Hainan*, *China*; 2.*School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *Hainan*, *China*; 3.*School of Marine Science and Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *Hainan*, *China*)

Abstract: To investigate the motion characteristics of deep-sea polymetallic nodules in a vertical pipeline of airlift system with air at different flow rates and also study flow field characteristics of gas-liquid-solid three-phase flow in the system, numerical simulation was made with CFD-DEM coupling method for the three-phase flow in the vertical pipeline of airlift system. The results show that as air flow rate increases, the average local volume fraction of particle swarm decreases, and the frequency of occurrence is lower first and then become higher for slug flow. Both the flow rate of fluid and the average axial velocity of particle swarm in pipeline increase. The pressure drop in the pipeline increases with the local volume fraction of particle swarm, and average pressure drop decreases with the increase of air flow rate. Therefore, based on the variation in local volume fraction of particles in pipeline reflected by the pressure drop, the slug flow can be identified so as to prevent pipeline blockage.

Key words: deep-sea mining; polymetallic nodules; airlift; pipeline transportation; motion characteristics; flow field characteristics; three-phase flow; fluid mechanics

深海蕴藏着丰富的金属矿产资源,其中具有商业前景的矿产资源主要有多金属锰结核、富钴结壳以及热液硫化物等[1-3]。深海矿产资源开采的输送方式主要有水力提升系统[4]和气力提升系统[5]两种。近年来,气力提升系统因作业工艺简单、输送装备简化和避免了水力输送泵磨损等优点[6],在深海采矿海试中被广泛应用[7]。

气力提升系统在石油等行业已有较长的应用历

① **收稿日期**: 2025-09-15
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801504);国家自然科学基金重点项目(52231012);国家自然科学基金重点联合基金项目(U22A20581)
作者简介: 林海(1996—),男,海南澄迈人,硕士研究生,主要研究方向为深海矿产资源开采与输送技术。E-mail: 23220855000035@hainanu.edu.cn
通信作者: 沈义俊(1964—),男,湖北武汉人,教授,研究方向为深海资源开发技术与装备。E-mail: sheny2000@hainanu.edu.cn

史[8],主要用于石油提升、深井取水、泥沙输送等[9]。大量学者针对气力提升系统提升矿物进行了大量实验和理论研究,提出了固体颗粒提升的临界条件[10]、单个固体颗粒运输行为理论[11]、气力提升系统内压缩气体的状态方程[12]等,但采用数值模拟方法研究气力提升系统的报道较少。相较于理论研究和实验方法,数值模拟通过流固耦合方法,可获得实验中无法直接测量的数据,如固体颗粒速度[13]、固体局部体积分数[14]和流体压降特性[15]等,有助于了解气液固三相耦合后固体颗粒深层次的运动机理和输送过程的效率等。

本文通过 CFD-DEM 双向耦合的数值模拟方法,描述流体与颗粒间复杂的相互作用力,对不同运行条件下管道内流场流速和颗粒群运动进行数值模拟仿真,得到管道内流体和固体颗粒的运动规律,以防止管道堵塞,提高气力提升系统运输效率。

1 理论和模型

CFD-DEM 是一种欧拉-拉格朗日方法,在模拟过程中,运用连续介质理论对流体行为进行精准描述,同时采用离散单元法(DEM)对流场中的每一个颗粒,单独对其运动轨迹、速度变化等状态进行细致追踪与记录,从而获得流场与颗粒的相互作用及运动特性。

1.1 计算模型

在 CFD-DEM 模拟过程中,CFD 求解器计算初始流场(速度、压力等)并传给 DEM 求解器,DEM 求解器计算颗粒相体积分数和初始相互作用项(作用力、传热速率)并回传给 CFD 求解器,CFD 求解器更新初始固体相,开始执行 1 个 CFD 求解时间步长和 n 个 DEM 求解时间步长,重复以上过程直至模拟结束。

在数值模拟过程中,求解流场时,需要分别求解连续方程[见式(1)]和动量方程[见式(2)]。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f\rho_f) + \nabla\cdot(\alpha_f\rho_f u) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f\rho_f u) + \nabla\cdot(\alpha_f\rho_f uu) = -\alpha_f\nabla p + \nabla\cdot(\alpha_f T_f) + \alpha_f\rho_f g + F_{p\to f} \tag{2}$$

式中:α_f为流体体积分数;p 为压力;ρ_f为流体密度;u 为流体相速度;T_f为流体应力张量;$F_{p\to f}$为流体和颗粒间的相互作用力。

在求解流体域内固体颗粒时,通过求解颗粒平动和转动的欧拉第一定律[见式(3)]和第二定律[见式(4)],对计算域内所有颗粒以拉格朗日方式进行追踪。

$$m_p\frac{dv_p}{dt} = F_c + F_{f\to p} + m_p g \tag{3}$$

$$J_p\frac{d\omega_p}{dt} = M_c + M_{f\to p} \tag{4}$$

式中:m_p 为粒子质量;g 为重力加速度;F_c 为考虑粒子-粒子以及粒子-壁相互作用的接触力;ω_p 为角速度;J_p 为粒子转动惯量张量;M_c 为由切向力产生的导致粒子旋转的总转矩;$M_{f\to p}$为因流体相速度梯度产生的附加转矩。

1.2 三维模型和网格划分

气力提升系统主要由底部储料仓、提升管道、进气口和进水口组成,气力提升系统三维模型如图 1 所示。为了提高数值模拟的计算精度和可靠性,对计算域采用非结构多面体网格划分,网格最小正交质量为 0.5,满足计算流体动力学模拟对网格质量的基本要求,网格视图如图 2 所示。为了选取适合本文模拟计算的网格数量,共划分 5 组不同的网格数量,分别为 91 954、138 215、185 024、235 133 和 292 994。网格无关性验证表明,网格数 235 133 适用于本文数值模拟计算。

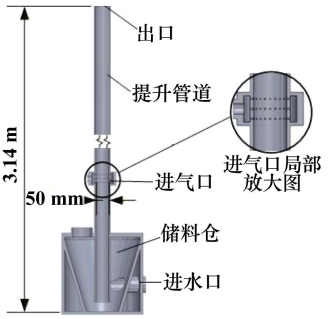


图 1 气力提升系统三维模型

Fig. 1 3D model of airlift system



图 2 网格视图

Fig. 2 Grid view

1.3 边界条件

数值模拟过程中,CFD 求解时,流场需不断更新信息,因此采用瞬态计算。湍流模型选用 k-ε 模型,压力与速度耦合求解采用 SIMPLE 算法,压力空间离散使用二阶方法,动量方程和体积分数使用一阶迎风方

法,重力沿流动反方向。进气口采用速度进口条件,进水口采用压力入口条件,出口采用压力出口。在模拟过程中,气体采用理想气体,体积分数为 1,气流量分别为:Q_1 = 121 L/min、Q_2 = 158 L/min、Q_3 = 181 L/min、Q_4 = 211 L/min 和 Q_5 = 241 L/min。进水口水体积分数为 1,压力为静水压力。出口压力为一个标准大气压。入口和出口的边界条件设置为湍流强度和水力直径,边界条件如表 1 所示。壁面条件为无穿透、无滑移壁面边界条件。

表 1　边界条件

Table 1　Boundary Conditions

边界条件	湍流强度/%	水力直径/mm
速度入口	5	16
压力入口	5	54
压力出口	5	50

在求解 DEM 过程中,设置颗粒密度 2 544 kg/m^3、泊松比 0.25、杨氏模量 7×10^{10} Pa;颗粒形状为球形,直径 5 mm;为保持数值模拟与实验条件一致,耦合前在储料仓内预设填充 6 kg 颗粒使颗粒填充高度和数量与实验工况相符。管壁密度 1 190 kg/m^3、泊松比0.38、杨氏模量 3×10^9 Pa;颗粒与颗粒之间、颗粒与管壁之间的碰撞采用 Hertz-Mindlin 接触模型。颗粒与颗粒、颗粒与管壁间的相互影响系数见表 2。

表 2　颗粒与颗粒、颗粒与管壁间的相互影响系数

Table 2　Interaction coefficient for particles and particles, particles and pipe wall

材料相互作用	恢复系数	动摩擦因数	静摩擦因数
颗粒-颗粒	0.3	0.3	0.35
颗粒-管壁	0.3	0.3	0.35

1.4　模型验证

为了验证模拟结果的准确性,进行气力提升实验,获得有关流动状态信息作为参照对象,将其与数值模拟结果进行比较。气力提升系统实验装置如图 3 所示。实验对象为直径 5 mm 的球形颗粒,使用高速摄像机拍摄固体颗粒在管道中的流动状态。

气流量 Q_4 = 211 L/min 条件下,实验和数值模拟得到的颗粒输送流动状态如图 4 所示。数值模拟和实验获得的流动状态是相似的,例如在液固两相流阶段,固体颗粒填充整个管道;在气液固混合初始阶段,气体主要分布在管壁上,颗粒主要集中在管道中心;随着颗粒提升高度增加,由于液相回流和重力作用等,颗粒出现稀疏相;同时由于固体相密度高,停滞效应显著,会出现颗粒积聚。由此可见,CFD-DEM 耦合数值模拟方法能够准确再现气力泵垂直管道中气液固三相流的流动特性。

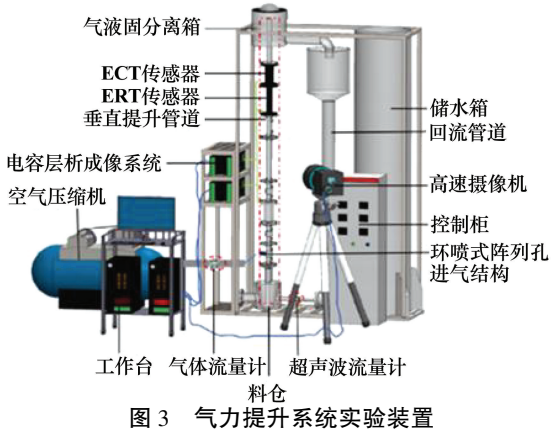


图 3　气力提升系统实验装置

Fig. 3　Experimental equipment of airlift system

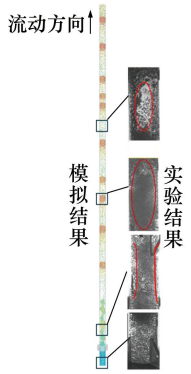


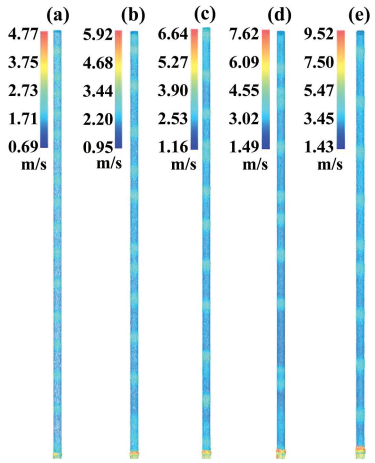
图 4　数值模拟结果与实验验证

Fig. 4　Numerical simulation results and experimental verification

2　计算结果和分析

2.1　流体域速度特性

在气力提升系统中,气体和液体构成的流场通过夹带作用把固体颗粒沿轴向向上提升,因此了解提升管道中流体在上升过程中的运动特性是研究气力提升系统输运的关键。图 5 为不同气流量下,从进气口至出口的流体速度矢量图。从图 5 可知,进气口处越靠近管壁流体速度越大,越靠近管道中心流体速度越小,主要原因是进气口处气相和液相没有充分混合,气相主要分布在管壁,液相主要分布在管道中心,并且气相速度远大于液相速度;同时流体速度并不是随着轴向高度增加而线性衰减,而是当气-液-固三相充分混合后,流体速度沿轴向呈周期性变化。在不同气流量下,流体速度整体增大,但在进气口处,管道中心流速比管壁流速变化幅度小,此处流体速度梯度随着气流量增大而增大。



(a) Q_1=121 L/min; (b) Q_2=158 L/min; (c) Q_3=181 L/min; (d) Q_4=211 L/min; (e) Q_5=241 L/min

图 5 不同气流量下流体速度矢量图

Fig. 5 Vector graphs of fluid at different air flow rates

2.2 颗粒群分布特性

在颗粒提升过程中,由于流体和颗粒之间的相互作用、颗粒和颗粒之间的碰撞以及颗粒和管壁之间的相互作用,颗粒群局部体积分数变化显著。当局部体积分数较高时,颗粒群会形成段塞流,并沿着流动方向呈现不同的运动状态。以气流量 Q_1=121 L/min、颗粒直径 d=5 mm 为例,图 6 为颗粒群在提升管道内的分布情况。把段塞流划分为上中下三部分进行变化分析,段塞流下部分随着高度增加开始从段塞流脱落,高度越高,其轴向分布越大,并与后面相邻的段塞流连接成为相邻段塞流的上部分;当高度进一步上升时,段塞流中上部分也会开始从段塞流中脱离,与前面的相邻段塞流连接。值得注意的是,段塞流在不同时刻出现的位置并不相同,段塞流之间的距离也不同。

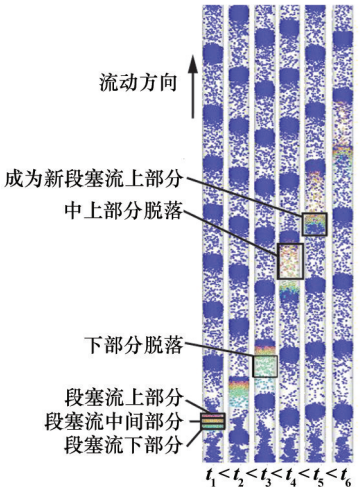


图 6 颗粒群在提升管道内的分布情况

Fig. 6 Spatial distribution of particle swarm in lift pipe

2.3 颗粒群的流动特性

为了分析颗粒群在不同气流量的提升管道内的局部体积分数、速度和压降情况,在 z=1.35、2、2.5 m 处分别设置长度为 0.1 m 的监控区域,分别对应监控区域 A、B、C,监控各个区域内颗粒群流动状态。

2.3.1 颗粒群的局部体积分数

不同进气量条件下,流体对颗粒产生的夹带作用各不相同,颗粒群在提升管内运动不稳定。因此在监控区域内,颗粒群的局部体积分数也不相同,颗粒群平均局部体积分数如表 3 所示。不同进气流量下提升管道内的湍流强度不同,颗粒群在提升管道内的局部体积分数大致围绕着平均值呈周期性波动;随着气流量增加,监控区域内颗粒群平均局部体积分数呈现先快速后缓慢的递减趋势;气流量较低时,平均局部体积分数显著减小,最大降幅为 2.68%;气流量较高时,平均局部体积分数减小缓慢,最小降幅为 0.2%。主要原因是,气流量增加时,提升管道内流体表观流速增加,流体传递给颗粒群动量增大,颗粒群的停滞效应减小,平均局部体积分数变化显著;气流量进一步增大时,流体和颗粒群混合更加充分,平均局部体积分数变化较小。

表 3 颗粒群平均局部体积分数

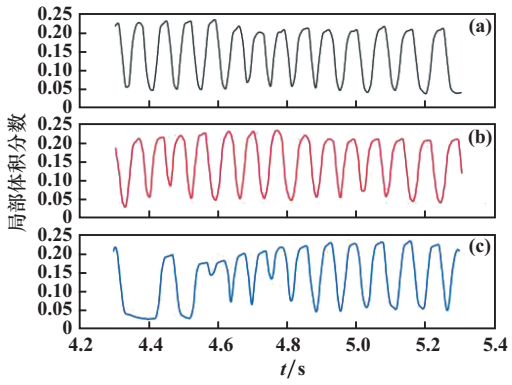
Table 3 Average local volume fraction of particle swarm

监控区域	不同气流量下颗粒群平均局部体积分数/%				
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
区域 A	14.19	12.63	11.12	9.86	8.51
区域 B	14.64	11.96	10.16	9.96	8.93
区域 C	13.31	10.80	9.34	9.72	8.84

通过颗粒群局部体积分数的变化可以清晰地识别出段塞流情况;高局部体积分数表明该区域正在经过段塞流。规定当局部体积分数大于 13%时,监控区域内出现段塞流。在气流量 Q_1 条件下,段塞流出现的频率较高,且段塞流持续时间长,从而证明了在气流量较低时,颗粒群停滞效应显著;当气流量增大时,段塞流出现的频率先降低再升高,主要原因是在高气流量下,颗粒群速度增大,并且段塞流持续时间较短,因此段塞流在高气流量下出现的频率增高。由于篇幅有限,这里仅展示气流量 Q_1 条件下监控区域颗粒群局部体积分数随时间的变化情况,如图 7 所示。

2.3.2 颗粒群的速度

表 4 为 3 个监控区域在不同气流量下颗粒群平均轴向速度。在相同气流量下,各个监控区域内颗粒群平均轴向速度相差不大,并不会随着提升高度增加而持续增加;气流量 Q_1~Q_3 时,区域 C 内颗粒群平均轴向速度较区域B降低,降幅范围为0.07~0.14m/s,且



（a）区域 A；（b）区域 B；（c）区域 C

图 7　气流量 Q_1 下颗粒群局部体积分数随时间的变化

Fig. 7　Variation of local volume fraction of particle swarm with time at air flow rate of Q_1

随着气流量增加，速度差异逐渐减小；气流量 Q_4、Q_5时，区域 C 内颗粒群平均轴向速度反超区域 B，分别高出 0.06、0.08 m/s；主要原因是随着提升高度增加，流体传递给颗粒的动能逐渐减小，并且颗粒在运输时会发生碰撞和克服重力，因此在相同区域内，低气流量下流体传递的动能减少，从而使得颗粒群平均轴向速度下降。随着气流量增加，不同监控区域内颗粒群的平均轴向速度增大；气流量 Q_5时，区域 C 颗粒群的平均轴向速度比区域 B 的平均轴向速度的增幅大，主要原因是区域 C 距离出口较近，当颗粒流经管道出口时，边界条件从受限流动突变为自由流动，会导致颗粒速度重新分布，这种出口效应在高气流量条件下尤为显著，在高气流量运行时区域 C 内颗粒群平均轴向速度增大。

表 4　颗粒群平均轴向速度

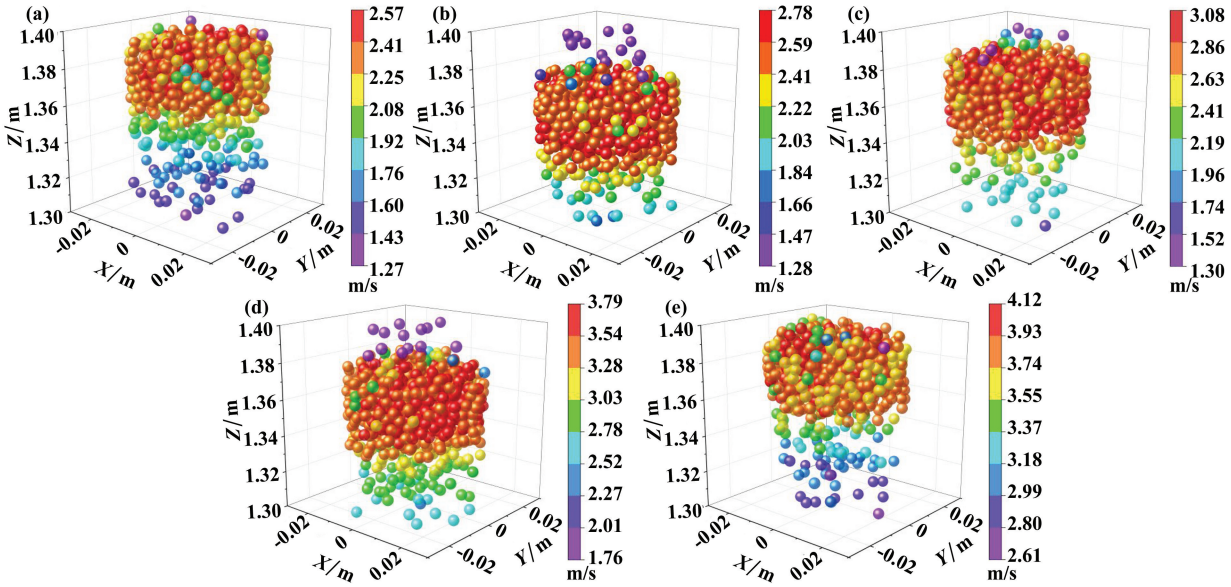
Table 4　Mean axial velocity of particle swarm

监控区域	不同气流量下平均轴向速度/(m·s^{-1})				
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
区域 A	1.86	2.06	2.31	2.78	2.96
区域 B	1.91	2.05	2.28	2.78	2.98
区域 C	1.77	1.93	2.21	2.84	3.06

图 8 为某时刻颗粒群在提升管道内较为稳定流态段的轴向速度分布。结果表明，颗粒群的轴向速度与气流量呈显著正相关关系。气流量从 Q_1 增加至 Q_5 时，颗粒群轴向速度增大，其最大瞬时轴向速度从 2.57 m/s 提升至 4.12 m/s，增幅达 60.3%。颗粒群中轴向速度较低的颗粒主要分布在管壁周围和段塞流尾部，轴向速度较大的颗粒主要分布在管道中心和段塞流中上部；随着气流量增加，管壁周围低轴向速度的颗粒和段塞流尾部颗粒数均减少；结合表 3 分析可知，气流量增大时，监控区域内颗粒数减少，局部体积分数随之降低，颗粒整体速度增大，会加剧管道冲蚀等问题。

2.3.3　颗粒群压降

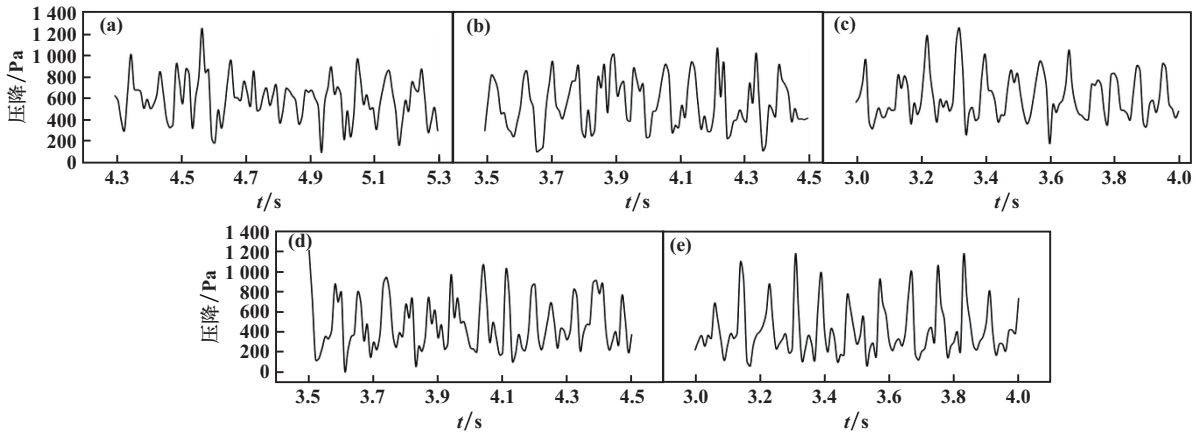
图 9 为颗粒群在监控区域 A 内的压降情况。综合图 7 和图 9，管道内压降会随着段塞流的出现而出现波动。在稳定流态下，提升管内压降围绕着某一均值波动，不同气流量下平均压降如表 5 所示，随着气流量增大，平均压降逐渐降低。监控区域内局部体积分数与压降呈正相关；局部体积分数增大时，压降增大；值得注意的是，在高气流量下，压降整体波动幅度较大。因此关注管道内压降情况能间接了解颗粒群局部体积分数，可以有效防止因浓度过高而产生堵塞。



（a）Q_1 = 121 L/min；（b）Q_2 = 158 L/min；（c）Q_3 = 181 L/min；（d）Q_4 = 211 L/min；（e）Q_5 = 241 L/min

图 8　某时刻颗粒群在提升管道内较为稳定流态段的轴向速度分布

Fig. 8　Axial velocity distribution of particle swarm at different air flow rates



(a) Q_1 = 121 L/min; (b) Q_2 = 158 L/min; (c) Q_3 = 181 L/min; (d) Q_4 = 211 L/min; (e) Q_5 = 241 L/min

图 9 颗粒群在监控区域 A 内的压降情况

Fig. 9 Pressure drop in monitoring zone (A) of particle swarm

表 5 稳定流态下不同气流量下的平均压降

Table 5 Average pressure drop in pipe with stable flow state and different air flow rates

气流量	平均压降/Pa
Q_1	601.46
Q_2	549.09
Q_3	487.65
Q_4	474.41
Q_5	389.33

3 结论

1) 由于流体域湍流强度不同,随着气流量增大,流体速度整体增大,其速度分布在轴向呈现周期性变化,并非线性增加。气液固三相流开始混合时,管壁处流体速度最大。

2) 管道内颗粒的局部体积分数随着气流量增大而减小,通过局部体积分数可以判断颗粒段塞流的出现;且随着气流量增加,段塞流出现的频率先降低再升高。

3) 颗粒群平均轴向速度随着气流量增大而增大,气流量从 Q_1 增至 Q_5 时,颗粒群最大瞬时轴向速度从 2.57 m/s 提升至 4.12 m/s,增幅达 60.3%,速度分布沿轴向分层明显。

4) 管道内平均压降随气流量增大而减小,管道压降与局部体积分数呈正相关,压降随着颗粒群局部体积分数增大而增大。因此,可通过压降了解管道内颗粒局部体积分数的变化,防止管道堵塞。

参考文献(References):

[1] 沈义俊,陈敏芳,杜燕连,等. 深海矿物资源开发系统关键力学问题及技术挑战[J]. 力学与实践, 2022,44(5):1005-1020.
SHEN Yijun, CHEN Minfang, DU Yanlian, et al. Key mechanical issues and technical challenges of deep-sea mining development system[J]. Mechanics in Engineering, 2022,44(5):1005-1020.

[2] 张明,郑皓,双志,等. 新型深海多金属结核非连续采矿作业系统研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):6-12.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, SHUANG Zhi, et al. A new type of discontinuous mining system for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):6-12.

[3] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020,22(6):1-9.
YANG Jianmin, LIU Lei, LYU Haining, et al. Deep-sea mining equipment in China: current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020,22(6):1-9.

[4] 刘少军,刘畅,戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014,50(2):8-18.
LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(2):8-18.

[5] 陈立,杜燕连,彭甫森,等. 基于改进小波阈值法的气液两相流特征提取及流型识别[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):35-43.
CHEN Li, DU Yanlian, PENG Fusen, et al. Feature extraction and flow pattern recognition of gas-liquid two-phase flow based on improved wavelet thresholding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):35-43.

[6] 张浩,陈小平,汤明刚,等. 深海多金属结核矿物输送模式特征与适应性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):32-38.
ZHANG Hao, CHEN Xiaoping, TANG Minggang, et al. Characteristics and adaptability of lifting modes for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):32-38.

[7] 康娅娟,王长伟,刘少军,等. 深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2938-2952.
KANG Yajuan, WANG Changwei, LIU Shaojun, et al. Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10):2938-2952.

(下转第 16 页)

sediment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):26-29.

[5] 王伟,陈时平,张明,等. 深海采矿装备布放回收过程中脐带缆动力学响应特性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):12-15.
WANG Wei, CHEN Shiping, ZHANG Ming, et al. Dynamic response characteristics of umbilical cable during launch and recovery of deep-sea mining equipment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):12-15.

[6] LIU L X, WANG X, YANG X, et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect[J]. Expert Systems with Applications, 2023,227:120254.

[7] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects[M]. Boca Raton: A K Peters/CRC Press, 2001.

[8] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect:An efficient approach to single-query path planning[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings. San Francisco, 2002:995-1001.

[9] XING B W, WANG X, LIU Z C. The wide-area coverage path planning strategy for deep-sea mining vehicle cluster based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(2):316.

[10] 王硕,段蓉凯,廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究[J]. 西安交通大学学报, 2022,56(7):1-8.
WANG Shuo, DUAN Rongkai, LIAO Yuhe. Research on improvement of rapidly exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022,56(7):1-8.

[11] 池志猛,李智刚,赵洋,等. 针对深海采矿车的遍历路径规划方法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022,42(7):160-166.
CHI Zhimeng, LI Zhigang, ZHAO Yang, et al. Research on traversal path planning method for deep-sea mining vehicle[J]. Mining Research and Development, 2022,42(7):160-166.

[12] 郭玲玲,樊蓓蓓. 基于改进 RRT* 算法的深海采矿车局部路径规划算法[J]. 工业控制计算机, 2023,36(1):97-99.
GUO Lingling, FAN Beibei. Local path planning algorithm for deep-sea mining vehicle based on improved RRT* algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2023,36(1):97-99.

[13] LIANG W X, LOU M, CHEN Z X, et al. An enhanced ant colony optimization algorithm for global path planning of deep-sea mining vehicles[J]. Ocean Engineering, 2024,301:117415.

[14] LU C Y, YANG J M, LEIRA B J, et al. Three-dimensional path planning of deep-sea mining vehicle based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(9):1797.

[15] CUI C, WU S Y, CHEN X G. QuatAPF: Ssafety-aware and energy-efficient dynamic path planning and tracking control for deep-sea mining vehicles via a quatre-artificial potential field method[J]. Ocean Engineering, 2025,321:120236.

[16] 李金良,舒翰儒,刘德建,等. 基于改进 RRT 路径规划算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2):22-24.
LI Jinliang, SHU Hanru, LIU Dejian, et al. Path planning algorithm based on improved RRT[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(2):22-24.

引用本文:崔乔宇,彭赛锋,郑皓,等. 基于融合 RRT 算法和人工势场法的深海采矿车路径规划研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):7-16.
CUI Qiaoyu, PENG Saifeng, ZHENG Hao, et al. Path Planning for deep-sea collector vehicles based on integration of RRT algorithm and artificial potential field algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):7-16.

(上接第6页)

[8] KUMAR D, AMUDHA K, GOPAKUMAR K, et al. Air-lift pump systems for vertical solid particle transport: A comprehensive review and deep sea mining potential[J]. Ocean Engineering, 2024,297:116928.

[9] 王霞光. 不同固体颗粒介质下气力提升机理及性能研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2018.
WANG Xiaguang. Study on mechanism and performance based on different solids media for air-lifting[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.

[10] FUJIMOTO H, OGAWA S, TAKUDA H, et al. Operation performance of a small air-lift pump for conveying solid particles[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2003,125(1):17-25.

[11] ENANY P, SHEVCHENKO O, DREBENSTEDT C. Particle transport velocity in vertical transmission with an airlift pump[J]. Fluids, 2022,7(3):95.

[12] DU Y L, ZHU J Y, HAN X H, et al. Gas state equation and flow mechanism of gas-liquid two-phase flow in airlift pump system[J]. Physics of Fluids, 2024,36(5):055142.

[13] 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, 2019.
LIU Lei. Research on dynamic performance of solid-liquid two-phase flow in hydraulic transport in deep sea mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[14] 陈云,杜燕连,李萌,等. 旋转水力提升多金属结核运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):13-17
CHEN Yun, DU Yanlian, LI Meng, et al. Numerical simulation of characteristics of motion for polymetallic nodules in swirling flow during hydraulic lifting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):13-17.

[15] 侯艳君,王庆辉,周甲伟,等. 基于 CFD-DEM 的气力输送变径管中颗粒流动特性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):6-10.
HOU Yanjun, WANG Qinghui, ZHOU Jiawei, et al. Flow characteristics analysis of particles in pneumatic conveying with tapered pipeline based on CFD-DEM[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):6-10.

引用本文:林海,杜燕连,符孟帝,等. 深海多金属结核在垂直管道气力提升系统中的运动特性模拟[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):1-6.
LIN Hai, DU YanLian, FU Mengdi, et al. Research on motion characteristics of deep-sea polymetallic nodules in vertical pipeline of airlift system by numerical simulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):1-6.