附壁射流式集矿头多金属结核集矿效率影响因素分析①

郑涛，金国庆，邹丽，于宗冰，林清源
（大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连 116024）

摘　要：针对深海采矿作业中海床结核分布不均匀、集矿头连续行进的特点，基于 CFD-DEM 方法研究了颗粒丰度、行进速度及二者共同作用对附壁射流式集矿头采集率和颗粒输运行为的影响。结果表明，静态工况下，颗粒丰度增加使更多颗粒进入附壁射流作用区域，采集率随之升高，但当颗粒丰度过高时，集矿口前方颗粒堆积增多，持续输运受限，采集率下降，较优颗粒丰度为 12.60 kg/m^2；动态工况下，采集率随行进速度增加同样呈先升高后降低趋势，速度过低时颗粒供给不够连续，速度过高时颗粒与集矿头的有效作用时间缩短，均不利于稳定输运，速度 0.15～0.20 m/s 范围内的采集效果较好；颗粒丰度和行进速度共同影响集矿口附近颗粒输运状态，较高采集率取决于颗粒供给水平、有效作用时间和集矿口输运能力之间的匹配关系。

关键词：深海采矿；多金属结核；深海采矿系统；水力式集矿；CFD-DEM；附壁射流；集矿效率；集矿头
中图分类号：TD857　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.011
文章编号：0253-6099(2026)04-0081-08

Analysis of Influencing Factors for Polymetallic Nodules Collection Efficiency of a Wall-Attached Jet Collector Head

ZHENG Tao, JIN Guoqing, ZOU Li, YU Zongbing , LIN Qingyuan
(*School of Naval Architecture*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116024, *Liaoning*, *China*)

Abstract: In consideration of uneven distribution of seabed nodules and continuous travel of a collector vehicle during deep-sea mining operations, a CFD-DEM coupling approach was used to investigate the effects of particle abundance, traveling speed, and their combined actions on the collection efficiency of a wall-attached jet collector head and particle transport behavior. The results show that under static conditions, when particle abundance increases, more nodule particles enter the effective zone of the wall-attached jet, and collection efficiency rises accordingly. Nevertheless, excessively high particle abundance can lead to massive accumulation of particles in front of the pick-up mechanism, inhibiting continuous particle transport and lowering collection efficiency. It is found that the preferable particle abundance is 12.60 kg/m^2. Under dynamic working conditions, collection efficiency also exhibits a trend of initial increase followed by a decrease with increasing traveling speed. At too low traveling speed, particle supply cannot remain continuous, while at excessively high speed, the effective interaction time between particles and collector head is reduced. Both scenarios are unfavorable for stable particle transport. And collection performance is satisfactory with the traveling speed at 0.15－0.20 m/s. It is concluded that the particle transport near the pick-up mechanism is jointly governed by particle abundance and traveling speed. Higher collection efficiency depends on the appropriate balance among particle supply, effective interaction time and transport capacity of the pick-up mechanism.

Key words: deep-sea mining; polymetallic nodule; deep-sea mining system; hydraulic collection; CFD-DEM; wall-attached jet; collection efficiency; collector head

深海多金属结核富含锰、镍、铜、钴等关键金属元素[1-3]，被认为是陆地金属矿产的重要潜在替代资源。目前，开采多金属结核的深海采矿系统主要包括水面支持系统、水力提升系统、中继舱和海底集矿系统[4]。

① **收稿日期**：2026-05-28
基金项目：国家重点研发计划(2022YFC2806700)；辽宁省面上基金(2025-MS-008)；大连市科技人才创新创业项目(2024RQ060)；中央高校基本科研业务费[DUT25RC(3)116)]；辽宁省青年科技人才托举工程项目
作者简介：郑涛(2004—)，男，湖南邵阳人，硕士研究生，主要研究方向为深海采矿水动力学。E-mail：914693234@ mail.dlut.edu.cn
通信作者：邹丽(1981—)，女，辽宁盘锦人，教授，博士研究生导师，主要从事深海矿产资源开发、船舶与海洋工程高端装备、船舶与海洋工程水动力学等研究。E-mail：lizou@ dlut.edu.cn

其中,海底集矿系统在海床沉积物表面作业,直接影响矿石采集率、海床冲刷深度等性能指标,是深海采矿系统中的核心部分。海底集矿方式可分为机械式、水力式和复合式[5]。与机械式集矿相比,水力式集矿具有结构相对简单、故障率较低、输运连续性较好等特点,受到较多关注。水力式集矿主要包括吸扬式、附壁射流式和双排射流冲采式等典型方案。其中,双排射流冲采式集矿装置通过强射流直接冲刷海床,促使颗粒抬升[6];附壁射流式集矿装置利用康达效应[7-8]使高速射流沿曲面发展,在集矿头近底区域形成有利于颗粒采集的速度分布与压力梯度,能够在保持颗粒采集能力的同时减弱对海床的直接冲刷扰动。因此,附壁射流式集矿头逐渐成为水力式集矿装置研究的重要方向。

围绕附壁射流式集矿装置,现有试验与理论研究主要沿三条路径展开:一是通过曲壁射流试验分析壁面曲率、冲击角和雷诺数对射流发展、分离及湍流特性的影响[9-10],并结合理论模型和颗粒受力试验研究近底压力梯度、几何参数与颗粒举升之间的关系[11-12];二是通过全尺度拖曳试验和小尺度砂床侵蚀试验,分别考察射流速度、行进速度和离底高度对颗粒采集性能及床面扰动的影响[13-14];三是综合运用水槽试验、PIV(particle image velocimetry)、高速摄影,对集矿过程进行可视化观测与模型验证[15-16]。上述试验与理论研究揭示了附壁射流作用下流场特征和颗粒起动的基本规律,然而受限于试验周期、成本和观测范围以及简化模型的不足,对不同作业条件下采集效率的影响因素仍需进一步研究。

随着计算流体力学(CFD)的发展,数值研究为进一步分析附壁射流式集矿头的流场和颗粒运动过程提供了有效手段。数值研究多采用 CFD 和 CFD-DEM 方法,考察集矿头结构参数、运行参数与附壁射流发展及颗粒采集过程之间的关系。相关研究从射流条件、曲壁几何、离底高度和装置姿态等方面,分析射流附着、压力梯度和近场流动结构的变化[17-19],并结合颗粒起动、运动轨迹和采集率评价不同参数条件下的采集性能[18-23]。装置方案评价除采集率外,还涉及射流流量、能耗、近底扰动指标和颗粒碰撞损失[22-23],其中可靠性设计还将结核尺寸和质量的不确定性纳入参数选择[24]。上述研究从流场特征和颗粒输运过程两方面分析了结构参数与运行参数对采集性能的影响,为集矿头结构设计和作业参数选择提供了参考。

综上所述,已有研究围绕附壁射流式集矿头的射流流量、喷嘴结构、离底高度和曲壁几何参数等开展了较多分析,揭示了结构参数对附壁射流发展、近底压力分布及颗粒输运过程的影响规律。然而,在实际海底作业中,多金属结核在海床上的分布并不均匀,集矿头处于连续行进状态,采集率不仅受装置结构影响,还与复杂作业工况下的环境变量和工作参数密切相关。现有研究对海床颗粒丰度变化和集矿头行进过程共同影响下的颗粒输运过程讨论较少,复杂作业工况下采集率变化的原因需要进一步探究。基于此,本文采用 CFD-DEM 方法,分析颗粒丰度、行进速度及二者共同作用对附壁射流式集矿头多金属结核采集率和颗粒输运行为的影响,重点讨论颗粒供给、有效作用时间和集矿口附近输运状态对采集率的影响,为附壁射流式集矿头多金属结核集矿效率影响因素分析和作业参数优化提供参考。

1 数值模型与方法

1.1 CFD-DEM 耦合方法

本文使用的数值模拟软件为 STAR-CCM+,采用 CFD-DEM 双向耦合方法模拟附壁射流作用下结核颗粒的运动过程。采用可实现的 k-ε 两层(RKE2L)模型模拟集矿液相湍流,采用离散元(DEM)模型模拟矿粒。

1.1.1 湍流模型

结合可实现的 k-ε 模型与两层方法[25],其中湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\nabla\cdot(\rho k\bar{v})=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\right)\nabla k\right]+P_{\mathrm{k}}-\rho(\varepsilon-\varepsilon_0)+S_{\mathrm{k}} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\nabla(\rho\varepsilon\bar{v})=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla\varepsilon\right]+\frac{1}{T_{\varepsilon}}C_{\varepsilon 1}P_{\varepsilon}-C_{\varepsilon 2}f_2\rho\left(\frac{\varepsilon}{T_{\varepsilon}}-\frac{\varepsilon_0}{T_0}\right)+S_{\varepsilon} \tag{2}$$

式中:ρ 为流体密度;$\bar{v}$ 为平均流速;μ 为动力黏度;μ_{t} 为湍流涡黏度;$C_{\varepsilon 1}$、$C_{\varepsilon 2}$、σ_{ε}、σ_{k} 均为模型系数,$C_{\varepsilon 1}=\max\left\{\frac{\xi}{5+\xi},0.43\right\}$,$C_{\varepsilon 2}$取 1.9,$\sigma_{\varepsilon}$ 取 1.2,σ_{k} 取 1,ξ 为无量纲应变率参数,$\xi=\frac{Sk}{\varepsilon}$,$S$ 为平均应变率,$S=\frac{1}{2}(\nabla\cdot\bar{v}+\nabla\cdot\bar{v}^{\mathrm{T}})$;$f_2$ 为阻尼函数;T_{ε} 为大涡时间尺度,$T_{\varepsilon}=\frac{k}{\varepsilon}$;$T_0$ 为单位时间尺度,$T_0=\max\left(\frac{k_0}{\varepsilon_0},\sqrt{\frac{\bar{v}}{\varepsilon_0}}\right)$,$\varepsilon_0$ 为初始湍流耗散率,k_0 为初始湍动能;P_{k} 和 P_{ε} 为 k-ε模型相关项;S_{k} 和 S_{ε} 均为用户定义项。

1.1.2　DEM 模型

颗粒群在流体中运动时,主要受到自身重力、流体对颗粒的作用力、颗粒和颗粒之间的相互作用力。颗粒的运动方程为:

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{d}}+F_{\mathrm{p}}+F_{\mathrm{vm}}+F_{\mathrm{g}}+F_{\mathrm{LR}}+F_{\mathrm{LS}}+F_{\mathrm{c}} \quad (3)$$

$$I_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=\frac{\rho}{2}\left(\frac{d}{2}\right)^{5}C_{\mathrm{R}}|\Omega|\Omega+M_{\mathrm{c}} \quad (4)$$

式中:u_{p} 为颗粒速度;F_{g} 为颗粒重力;F_{p} 为压力梯度力;F_{vm} 为虚拟质量力;F_{LR} 为旋转升力;F_{LS} 为剪切升力;F_{c} 为基于 Hertz-Mindlin 接触理论计算的颗粒接触力,包括颗粒和壁面、颗粒和颗粒间的法向和切向接触力,其相互作用参数见表 1,其中,静摩擦因数及法向、切向恢复系数用于计算接触力,滚动摩擦因数用于计算滚动阻力矩,摩擦因数参考文献[26]的摩擦角测试试验数据,恢复系数根据动态冲击理论[27]估算得到;I_{p} 为颗粒惯性矩;ω_{p} 为颗粒角速度;M_{c} 为颗粒碰撞引起的力矩;C_{R} 为旋转阻力系数;d 为颗粒直径;Ω 是颗粒相对于流体的角速度;F_{d} 为颗粒在流体中受到的曳力。

表 1　相互作用参数

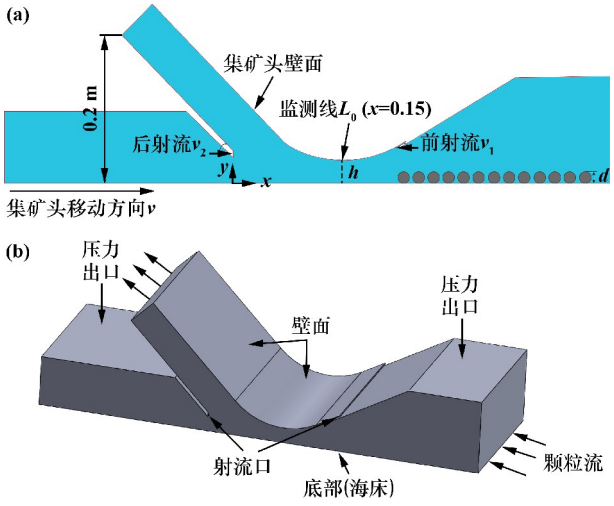
Table 1　Interaction parameters

相互作用	静摩擦因数	法向恢复系数	切向恢复系数	滚动摩擦因数
颗粒和颗粒间	0.20	0.45	0.45	0.01
颗粒和壁面间	0.10	0.50	0.50	0.01

1.2　几何模型与边界条件

本文基于已有的附壁射流式集矿头模型[6,28]开展研究。附壁射流式集矿头几何模型如图 1 所示,该模型主要由前后射流喷口、曲壁导流结构、集矿口和近底集矿区域组成。与双排射流冲采式集矿头相比,附壁射流式集矿头利用康达效应使射流沿弯曲壁面贴附发展,在集矿口附近形成有利于颗粒抬升的压力梯度,同时可减弱强射流直接冲刷海床带来的环境扰动。采用右手坐标系,后射流喷口处为 $x=0$,模型对称面为 $z=0$,颗粒接触底面为 $y=0$,L_0 为模型监测线。集矿头喷口横截面为矩形,h 为集矿头离底高度,v 为行进速度,v_1、v_2 分别为前、后射流速度。

结核的采集过程及其所处环境极其复杂,涉及海底沉积物以及海底扰动等因素。为了聚焦结核采集过程中的核心问题,本文作以下近似假设:在数值模型中采用集矿头静止、颗粒相对运动的方式表征集矿头与海床结核的相对运动,并将结核简化为直径 0.02 m、密度 2 100 kg/m^3 的球形颗粒[29],同时将底部边界设为平坦表面并忽略沉积物影响。



(a) 剖面图;(b) 三维示意图

图 1　附壁射流式集矿头几何模型

Fig. 1　Geometric model of wall-attached jet collector head

计算域及边界条件如图 2 所示。前后射流喷口均设为速度入口边界,底部设置为沿 x 轴负方向匀速运动的无滑移壁面,集矿头表面和侧面均设为无滑移壁面,其余开放边界采用压力出口条件。颗粒初始布置于集矿头前方近底区域,在附壁射流的作用下被集矿管采集。前、后射流速度分别取 11、1.38 m/s,颗粒丰度与行进速度参照文献[6]中关于集矿头运动工况的参数设置,其余主要模拟参数见表 2。

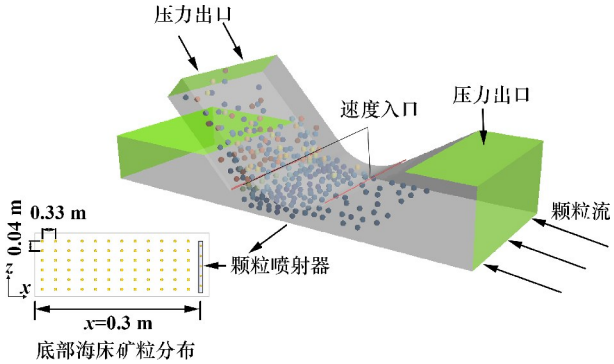


图 2　计算域及边界条件

Fig. 2　Computational domain and boundary conditions

1.3　网格无关性与模型验证

本文以集矿头稳定作业后出口截面的平均矿粒质量流量 q_{mn} 作为判据,开展网格与时间步长无关性分析。计算域采用多面体网格,并对射流口、曲壁近壁区和集矿口附近区域进行局部加密,网格划分与加密剖视图如图 3 所示。网格与时间步长无关性曲线如图 4 所示。由图4可知,当网格数由 2 131 970 增至 2 913 425

表 2 数值模拟中的主要参数

Table 2 Main parameters for numerical simulation

参数	单位	取值
流体密度 ρ	kg·m^{-3}	1 025
动力黏度 μ	Pa·s	1.08×10^{-3}
颗粒直径 d	mm	20
矿粒密度 ρ_n	kg·m^{-3}	2 100
颗粒丰度 $\overline{A}$	kg·m^{-2}	6.16
集矿头离底高度 h	m	0.03
集矿范围宽度 w	m	0.3
前射流速度 v_1	m·s^{-1}	11
后射流速度 v_2	m·s^{-1}	1.38

时，q_{mm}仅相差 0.346 9%；网格数为 2 131 970 时，不同时间步长下 q_{mm}整体变化较小，0.010 s 可满足本文计算精度要求。综合计算精度和计算成本，模拟采用网格数 2 131 970、时间步长 0.010 s。

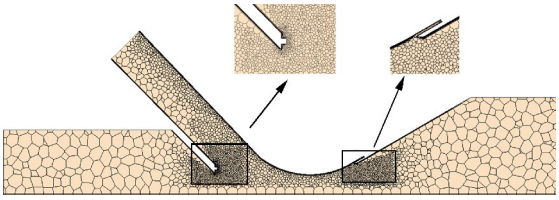


图 3 网格划分与加密剖视图

Fig. 3 Mesh generation and cross-sectional view of mesh refinement

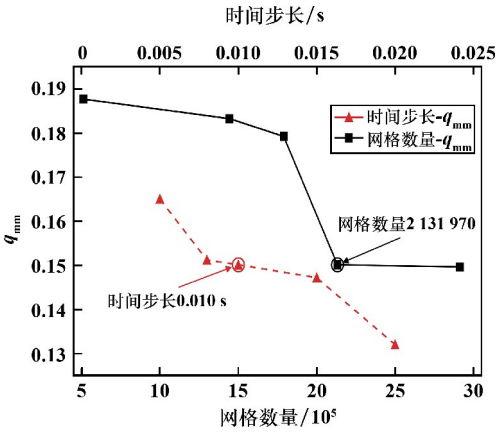


图 4 网格与时间步长无关性曲线

Fig. 4 Mesh and time-step independence analysis

为验证流场计算结果的准确性，参考文献[28]的 PIV 试验布置，在监测线 L_0 上选取 16 个测点，对比各测点的流场速度。模拟和试验测得的流场速度对比如图 5 所示。由图 5 可见，模拟结果与试验结果在监测线上的变化规律基本一致，均能反映近壁区域速度较高、远离壁面后速度逐渐衰减的特征，表明 RKE2L 湍流模型可用于本文附壁射流近场流动的计算。此外，模拟和试验的颗粒轨迹对比如图 6 所示，模拟的颗粒轨迹与试验观测结果基本一致，说明 CFD-DEM 模型能够反映附壁射流作用下的颗粒输运过程。

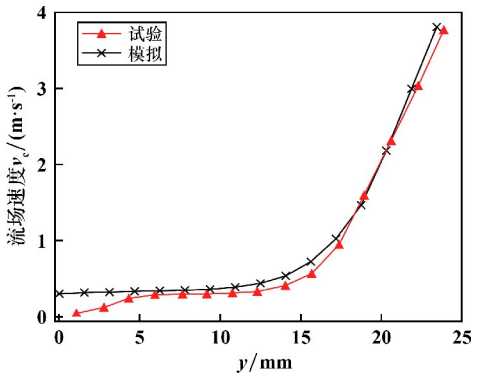


图 5 模拟和试验测得的流场速度对比

Fig. 5 Comparison of flow-field velocity from simulation and experiment

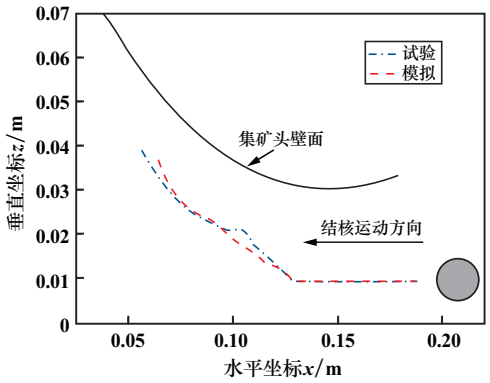


图 6 模拟和试验的颗粒轨迹对比

Fig. 6 Comparison of particle trajectories from simulation and experiment

1.4 集矿效率评价指标与工况设计

本文以采集率表征附壁射流式集矿头的集矿效率，定义为被集矿头成功采集的颗粒质量和参与统计的颗粒总质量之比：

$$\eta = \frac{m_c}{m_t} \times 100\% \tag{5}$$

式中：η 为采集率；m_c 为被成功采集颗粒的质量；m_t 为参与统计的颗粒总质量。

为分析颗粒供给水平和行进速度对集矿效率的影响，本文设置了 3 组工况。第 1 组为静止初始分布工况，用于分析颗粒丰度对采集效率的影响；第 2 组为动态连续供粒工况，用于分析行进速度对采集效率的影响；第 3 组为颗粒丰度与行进速度组合工况，用于分析同时考虑颗粒丰度与行进速度对采集率的影响。

在静止初始分布工况中，先使流场稳定后再释放颗粒，以减弱射流初始发展过程对颗粒运动的影响。

颗粒于 $t=2$ s 时释放,颗粒丰度分别为 3.14、5.50、6.16、10.00、12.60 和 17.80 kg/m^2。初始分布区域为 $y=0.1$ m、$x\in[0.05\ \text{m},0.25\ \text{m}]$、$z\in[-0.14\ \text{m},0.14\ \text{m}]$,并按设定丰度在该区域内均匀排列。

在动态连续供粒工况中,颗粒不预先布置于流场中,由上游位置 $x=0.3$ m 处的颗粒喷射器连续释放。为表征动态作业条件下的颗粒供给强度,定义动态等效颗粒丰度 A_n 为:

$$A_n=\frac{\rho_n\pi d^3 r_{nf}}{6w} \tag{6}$$

式中 r_{nf}为单位时间内释放的颗粒数。

动态连续供粒工况中,动态等效颗粒丰度保持为 6.16 kg/m^2,行进速度分别为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25和 0.30 m/s。

在上述单因素工况的基础上,组合工况选取 3.14、6.16 和 12.60 kg/m^{2}三种初始颗粒丰度,分别代表低、中、高丰度,并分别与 0.10、0.20 和 0.30 m/s 三种行进速度进行组合,用于分析给定初始颗粒分布条件下颗粒丰度与行进速度对集矿效率及颗粒输运行为的影响规律。

2　参数影响规律分析

2.1　颗粒丰度的影响

首先分析静止初始分布工况下颗粒丰度变化对采集率和颗粒运动过程的影响。该工况下颗粒丰度对颗粒采集质量和采集率的影响如图 7 所示。采集率随颗粒丰度增加呈先升高后降低的变化规律。颗粒丰度从 3.14 kg/m^2 增至 12.60 kg/m^2 时,采集率由 12.50%提高至 66.66%,说明在低~中等颗粒丰度范围内,提高颗粒丰度会增加进入附壁射流作用区域的颗粒数量,颗粒更容易输运至集矿口。当颗粒丰度进一步增至 17.80 kg/m^2 时,采集率降至 22.47%,颗粒采集质量也明显降低,说明过高的颗粒丰度并不能继续提高有效采集量,反而使集矿口附近颗粒输运受到限制。

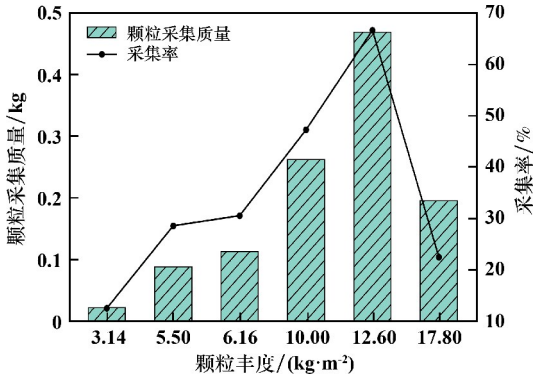


图 7　颗粒丰度对颗粒采集质量和采集率的影响

Fig. 7　Effect of particle abundance on collected particle mass and collection efficiency

为比较颗粒丰度由低到高变化时的颗粒输运特征,选取 3.14、10.00 和 17.80 kg/m^{2}三种代表性颗粒丰度进行对比,其颗粒轨迹与入口局部颗粒分布见图 8。从图 8 可以看出,低颗粒丰度工况下采集率较低,主要与颗粒供给水平不足有关。低颗粒丰度工况下颗粒分布较为稀疏,进入附壁射流作用区域的颗粒数量有限,输运路径较为离散;随着颗粒丰度增至中等水平,进入附壁射流作用区域的颗粒数量增加,颗粒轨迹不再离散分布,逐渐形成连续的输运路径。结合颗粒轨迹及入口附近颗粒分布可以看出,中等颗粒丰度条件下,颗粒数量增加并未造成明显堵塞,更多颗粒能够沿附壁射流方向运动,并被连续输送至集矿口,因此采集率明显提高。当颗粒丰度进一步提高至 17.8 kg/m^{2}时,集矿口前方颗粒碰撞和堆积增多,部分颗粒虽发生短时抬升,但难以稳定进入集矿口,容易再次下落并干扰后续颗粒运动。

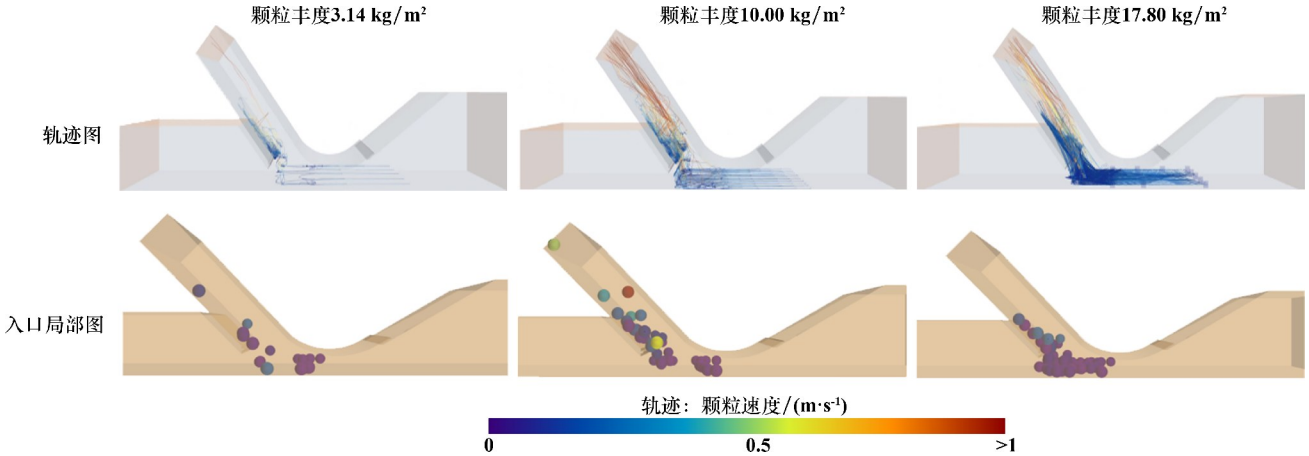
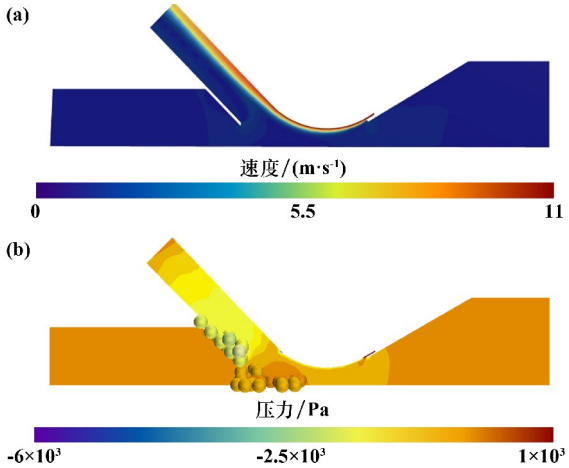


图 8　3 组不同颗粒丰度下的颗粒轨迹与入口局部颗粒分布

Fig. 8　Trajectories and local distribution of particles at three different abundances

颗粒丰度 17.80 kg/m^2 下的局部速度场与压力场如图 9 所示。结合图 9 可以看出,颗粒丰度 17.80 kg/m^2 工况下,曲壁附近仍存在明显附壁高速射流,集矿口附近也存在低压区域,说明采集率回落并非附壁射流作用减弱,而主要与高颗粒丰度条件下颗粒聚集和连续输运受阻有关。值得注意的是,后排射流喷嘴方向近似水平,而曲壁附近附壁射流整体向斜上方发展,两股水流在后排喷嘴上方交汇后容易发生流动分离,并形成局部回流区,该区域流场较为复杂,不利于矿粒进一步提升,可以对后排射流口的形状进行优化来改善流场。



(a) 速度流场图; (b) 压力场图

图 9 局部速度场与压力场

Fig. 9 Local velocity and pressure fields

2.2 行进速度的影响

动态连续供粒工况下行进速度变化对颗粒采集质量和采集率的影响如图 10 所示。由图 10 可以看出,采集率随行进速度增加呈先升高后降低的变化趋势。当行进速度由 0.05 m/s 增至 0.20 m/s 时,采集率由 65.45%提高至 90.95%;当行进速度继续增至 0.25 m/s 和 0.30 m/s 时,采集率分别降至 64.23%和 44.92%。结合图 10 中的颗粒采集质量可以看出,高行进速度下虽然颗粒采集质量较高,但有效采集率偏低。在本文工况下,较优的行进速度为 0.15~0.20 m/s。

从颗粒输运过程看,低行进速度工况下颗粒与集矿头之间虽然具有较长作用时间,但因为颗粒丰度保持不变,低行进速度时单位时间内释放的颗粒数量相对较少,颗粒供给不够连续,难以形成稳定输运路径,因此采集率并未达到最高。当行进速度增至 0.15~0.20 m/s 时,颗粒供给较为连续,并且颗粒受到附壁射流作用时间足够长,更多颗粒能够沿附壁射流方向抬升并进入集矿口,底部堆积现象减弱,采集率明显提高。继续增大行进速度后,颗粒与集矿头的有效作用时间缩短,部分颗粒尚未充分抬升和转向便向下游迁移。结合图 11 的颗粒轨迹可以看出,0.25~0.30 m/s 工况下,进入集矿口的颗粒减少,下游迁移的颗粒比例增加,导致采集率明显下降。

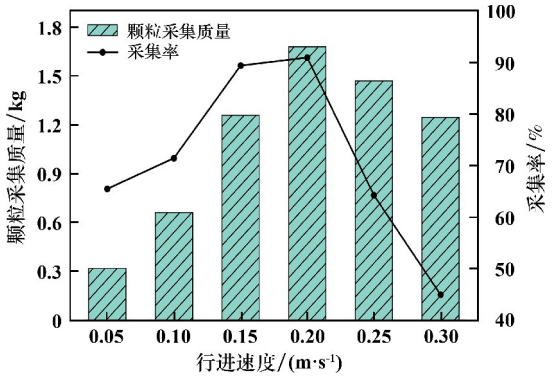
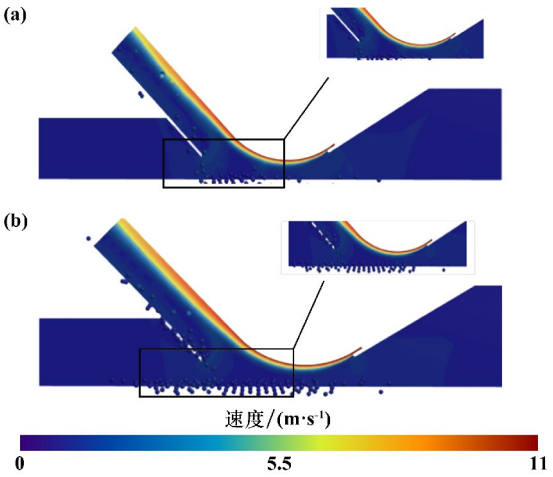


图 10 行进速度对颗粒采集质量和采集率的影响

Fig. 10 Effect of traveling speed on collected particle mass and collection efficiency



(a) 低速工况; (b) 高速工况

图 11 不同行进速度下的颗粒轨迹

Fig. 11 Comparison of particle trajectories at different travelling speeds

2.3 颗粒丰度与行进速度的共同影响

颗粒丰度反映进入集矿区域的颗粒供给水平,行进速度则决定颗粒与集矿头之间的有效作用时间。为分析二者共同变化时的采集效果,本文选取低、中、高三种颗粒丰度,分别为 3.14、6.16 和 12.60 kg/m^2,并在低、中、高三种行进速度下进行组合对比,对应速度分别为 0.10、0.20 和 0.30 m/s。不同颗粒丰度与行进速度组合下的颗粒采集质量和采集率如图 12 所示。由图 12 可以看出,中速工况下采集率整体较高,其中中等丰度-中速组合的采集率最高;高速工况下采集率整体偏低,高丰度-高速组合的采集率降至 15.00%。这

说明提高颗粒丰度并不一定会提升采集率,其作用效果受行进速度限制。低丰度条件下,颗粒供给不足是限制采集率的主要原因;当颗粒丰度增至中等水平时,颗粒供给较为充分,中速条件下颗粒能够较连续地进入集矿口,采集效果较好;而在高丰度条件下,颗粒数量进一步增加,若行进速度过高,颗粒还未充分抬升便随相对运动向下游迁移,集矿口前方也更容易出现颗粒堆积,导致输运受阻。

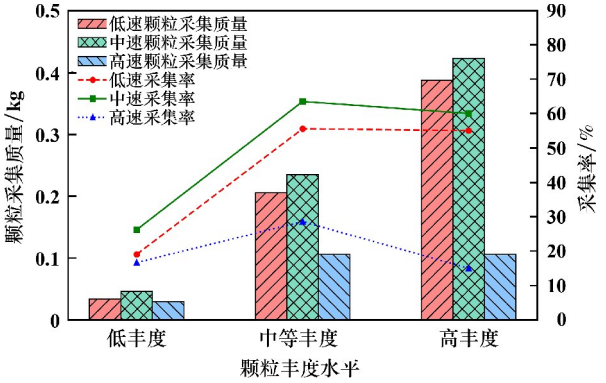


图 12　不同颗粒丰度与行进速度组合下的颗粒采集质量和采集率

Fig. 12　Collected particle mass and collection efficiency under different combinations of particle abundance and travelling speed

从颗粒采集质量看,高丰度能够增加实际采集颗粒量,说明较高颗粒丰度有利于提高颗粒采集质量;但在高速条件下,这种增益明显受限。也就是说,颗粒供给增加不能弥补有效作用时间的不足。因此,颗粒丰度和行进速度应结合考虑。较高采集率需要颗粒供给、有效作用时间和集矿口附近输运能力处于合适范围。对于附壁射流式集矿头,应优先控制行进速度,避免高速下有效作用时间不足,再根据海床颗粒丰度调整作业参数,以减少低丰度下输运不连续和高丰度下颗粒堆积的问题。

3　结论

1) 静止初始分布工况下,颗粒丰度增加使采集率先升高后降低。低至中等颗粒丰度时,进入附壁射流作用区域的颗粒数量增加,颗粒更容易向集矿口输运,采集率最高达到 66.66%;当颗粒丰度继续增大时,集矿口前方颗粒碰撞和堆积增多,输运过程受阻,采集率和有效采集量反而下降。

2) 动态连续供粒工况下,行进速度对采集率的影响同样表现为先升高后降低。低行进速度时颗粒供给不够连续,难以形成稳定输运路径;中等行进速度时颗粒供给和有效作用时间较为适宜,采集率达到最高;高行进速度时颗粒来不及充分抬升便向下游迁移,进入集矿口的颗粒减少。该工况下,0.15 ~ 0.20 m/s 为较优行进速度范围。

3) 同时考虑颗粒丰度与行进速度时,中速工况下采集率整体较高,中等颗粒丰度-中速组合采集率最高,高颗粒丰度-高速组合下采集率最低。在高速条件下,颗粒供给增加不能弥补有效作用时间不足,因此,组合工况下应优先控制行进速度,再根据海床颗粒丰度调整作业参数。

4) 需要指出的是,本文结论是在球形颗粒、平坦底床和忽略沉积物影响条件下得到的。实际海底结核形态、底床起伏和沉积物扰动可能进一步影响颗粒输运过程和集矿效率,后续研究需结合非球形结核、复杂底床和沉积物环境开展进一步分析。

参考文献(References):

[1] 刘成军,李满红,郑皓,等. 国际海底矿区竞争格局与应对策略[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):8-13.
Liu Chengjun, Li Manhong, Zheng Hao, et al. Competitive landscape and coping strategies for international seabed exploration areas[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):8-13.

[2] Toro N, Robles P, Jeldres R I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: a critical review[J]. Ore Geology Reviews, 2020,126:103699.

[3] Liu B Y, Wang X X, Zhang X Z, et al. Research status of deep-sea polymetallic nodule collection technology[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(5):744.

[4] 金国庆,邹丽,宗智,等. 深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析[J]. 力学学报, 2022,54(6):1741-1754.
Jin Guoqing, Zou Li, Zong Zhi, et al. Analysis of vortex-induced vibration for a cantilever riser in a deep-sea mining system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022,54(6):1741-1754.

[5] 任显豪,刘莉红,魏定邦,等. 基于 GERIS 准则的深海多金属结核采集方式比较评估研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):26-32.
Ren Xianhao, Liu Lihong, Wei Dingbang, et al. Comparative evaluation of deep-sea polymetallic nodule collection technologies based on GERIS criteria[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):26-32.

[6] 李雨瑶,赵国成,肖龙飞. 不同水力集矿模型的矿粒采集及环境扰动特性数值研究[J]. 上海交通大学学报, 2024,58(7):1036-1046.
Li Yuyao, Zhao Guocheng, Xiao Longfei. Numerical study on collection and environmental disturbance characteristics of different nodule collecting models[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024,58(7):1036-1046.

[7] Cho S G, Park S, Oh J, et al. Design optimization of deep-seabed pilot miner system with coupled relations between constraints[J]. Journal of Terramechanics, 2019,83:25-34.

[8] 赵国成. 深海采矿水力集矿方法与流体-颗粒动力特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2022:119-144.
Zhao Guocheng. Research on hydraulic collecting methods and fluid-particle dynamic characteristics for deep-sea mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022:119-144.

[9] Rodman L C, Wood N J, Roberts L. Experimental investigation of straight and curved annular wall jets[J]. AIAA Journal, 1989, 27(8):1059-1067.

[10] Kim M, Kim H D, Yeom E, et al. Flow characteristics of three-dimensional curved wall jets on a cylinder[J]. Journal of Fluids Engineering, 2018,140(4):041201.

[11] Jia H, Yang J, Su X H, et al. Theoretical prediction on hydraulic lift of a Coandă effect-based mining collector for manganese nodule[J]. Energies, 2022,15(17):1-12.

[12] Liu Z H, Zhao G C, Xiao L F. Analysis of forces on nodules during Coandă-effect-based hydraulic collection[J]. Physics of Fluids, 2024,36(11):115114.

[13] Alhaddad S, Mehta D, Helmons R. Mining of deep-seabed nodules using a Coandă-effect-based collector[J]. Results in Engineering, 2023,17:100852.

[14] Alhaddad S, Helmons R. Sediment erosion generated by a Coandă-effect-based polymetallic-nodule collector[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(2):349.

[15] Li Y, Han Z B, Li Z Y. Numerical simulation and experimental study of a deep-sea polymetallic nodule collector based on the coanda effect[J]. Minerals, 2024,14(9):915.

[16] 胡经朝,赵国成,肖龙飞. 基于康达效应的海底集矿装置流场与集矿特性试验研究[J]. 海洋工程, 2022,40(5):132-138.
Hu Jingchao, Zhao Guocheng, Xiao Longfei. Experimental investigation on flow field and collecting characteristics of mining device based on Coandă effect[J]. The Ocean Engineering, 2022,40(5):132-138.

[17] Kumar L, Mulders S, Alhaddad S. Flow field around Coandă effect-based polymetallic-nodule collector: insights from three-dimensional numerical simulations[J]. Applied Ocean Research, 2026, 170: 105032.

[18] Zhang B Y, Zhao G C, Xiao L F, et al. Geometry optimization of wall-jet collection device: a study of flow-field dynamics and particle motion[J]. Physics of Fluids, 2024,36(8):083307.

[19] Wang H, Chen X G, Liu X X, et al. Characterization and performance optimization of deep-sea polymetallic nodule mining considering changes in the traveling posture of mining vehicles[J]. Physics of Fluids, 2026,38:013317.

[20] Jia H, Yang J, Su X H. Numerical study on coarse granular flow and performance characteristics of the Coandă effect-based collector for deep sea mining[J]. Applied Ocean Research, 2024,148:104033.

[21] Su X H, Wang H Y, Chen B B, et al. Migration characteristics of nodules at the critical position of a Coandă effect harvesting model[J]. Ocean Engineering, 2024,295:116861.

[22] 张栢源,赵国成,肖龙飞. 附壁射流式多金属结核采集装置几何参数优化[J]. 上海交通大学学报, 2025,59(8):1059-1066.
Zhang Baiyuan, Zhao Guocheng, Xiao Longfei. Optimization of geometrical parameters of Coandă-effect-based polymetallic nodule collection device[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(8):1059-1066.

[23] 王伟,陈时平,双志,等. 深海多金属结核水力式采集方案对比分析[J]. 海洋技术学报, 2025,44(3):77-87.
Wang Wei, Chen Shiping, Shuang Zhi, et al. Comparative analysis of hydraulic collection schemes for deep-sea polymetallic nodules[J]. Journal of Ocean Technology, 2025,44(3):77-87.

[24] Kim S, Cho S G, Lee M, et al. Reliability-based design optimization of a pick-up device of a manganese nodule pilot mining robot using the Coandă effect[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019,33(8):3665-3672.

[25] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995,24(3):227-238.

[26] 谢超. 深海富钴结壳破碎方法与采矿车关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2024:17-44.
Xie Chao. Research on cobalt-rich crust crushing methods and key technologies of underwater mining vehicles in deep sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024:17-44.

[27] Xie J, Dong M, Li S F. Dynamic impact model of plastic deformation between micro-particles and flat surfaces without adhesion[J]. Aerosol Science and Technology, 2016,50(4):321-330.

[28] Hu J, Zhao G, Xiao L, et al. Experimental investigation on characteristics of flow field in "suck-up-based" and "Coandă-effect-based" nodule pick-up devices[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2020:34-44.

[29] Sharma R. Deep-sea mining: current status and future considera tions[M]//Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Cham: Springer International Publishing, 2017:3-21.

引用本文:郑涛,金国庆,邹丽,等. 附壁射流式集矿头多金属结核集矿效率影响因素分析[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):81-88.
Zeng Tao, Jin Guoqing, Zou Li, et al. Analysis of influencing factors for polymetallic nodules collection efficiency of a wall-attached jet collector head[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):81-88.