

文章编号: 1007-7294(2026)03-0427-12

附壁射流式集矿流场及矿粒运动特性实验研究

靳奉园^{1a}, 赵国成^{1a, 1b, 2}, 肖龙飞^{1a, 1b, 2}, 张栢源^{1a}, 徐立新^{3, 4}

(1. 上海交通大学 a. 海洋工程全国重点实验室; b. 海洋装备研究院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 三亚崖州湾深海科技研究院, 海南 三亚 572024; 3. 江苏科技大学 海洋学院, 江苏 镇江 212000; 4. 江苏省船舶与海洋工程装备技术创新中心, 江苏 南通 226100)

摘要: 海底矿石颗粒采集是深海矿产资源开发的关键环节, 附壁射流式集矿装置因其采集效率高且对海床表层沉积物扰动小而具有重要的工程应用价值。本文采用高速摄像与计算机图像处理技术, 研究了射流雷诺数 Re 对矿粒运动特性的影响规律。基于粒子图像测速实验技术(PIV), 分析了射流雷诺数 Re 、离底高度与颗粒粒径之比 h/d 以及射流厚度与颗粒粒径之比 b/d 对集矿流场分布特征的影响规律。实验发现, 矿石颗粒在集矿流场的不同区域具有不同的运动特征, 可划分为: 平动区、起动区和延续区。相同 Re 下, 在 $1.5 \leq h/d \leq 2.25$ 范围内, h/d 的降低对凸曲壁最低点($y/d=0$)附近流场流速变化趋势影响较小, 但有利于矿粒进入近壁面大速度梯度流场区域, 从而有效促进矿粒提升; 相同 Re 下, 在 $0.1 \leq b/d \leq 0.4$ 范围内, b/d 减小会增大近壁面高流速区域的流速梯度, 增强颗粒的垂向提升力, 提高采集效率。本研究可为新型高效、低扰动集矿装置的设计与工程应用提供重要参考。

关键词: 深海采矿; 多金属结核; 附壁射流; 矿粒运动; 粒子图像测速

中图分类号: P744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.03.008

Experimental study on flow field and particle motion characteristics of wall-jet nodule-collection device

JIN Feng-yuan^{1a}, ZHAO Guo-cheng^{1a, 1b, 2}, XIAO Long-fei^{1a, 1b, 2}, ZHANG Bai-yuan^{1a}, XU Li-xin^{3, 4}

(1a. State Key Laboratory of Ocean Engineering; b. Institute of Marine Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. SJTU Yazhou Bay Institute of Deepsea SCI-TECH, Sanya 572024, China; 3. Ocean College, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 4. Jiangsu Marine Technology Innovation Center, Nantong 226100, China)

Abstract: The collection of seabed ore particles is a critical phase in the development of deep-sea mineral resources. The wall-jet nodule-collection device has significant engineering value due to its high collection efficiency and minimal disturbance to the surface sediment of the seabed. In this study, high-speed imaging and computer-based image processing techniques were employed to investigate the influence of the jet Reynolds number (Re) on the dynamic behavior of ore particles. Based on Particle Image Velocimetry (PIV), the impact of Re , height-to-particle-diameter ratio (h/d), and jet thickness-to-particle-diameter ratio (b/d) on

收稿日期: 2025-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52301332); 上海市“科技创新行动计划”扬帆专项(23YF1419800); 海南省自然科学基金(424QN297); 海南省科技专项资助项目(ZDYF2024KJTPY014); 三亚市科技创新专项(2022KJCX67); 上海市战略性新兴产业重大项目

作者简介: 靳奉园(2001-), 男, 硕士研究生;

赵国成(1992-), 男, 博士, 助理研究员, 通讯作者, E-mail: guocheng.zhao@sjtu.edu.cn。

the distribution characteristics of the mining flow field were analyzed. The experimental results reveal that ore particles demonstrate distinct movement characteristics in different regions of the collection flow field. These regions are categorized into a translation zone, a startup zone, and a continuation zone. Under the same Re , in the range of $1.5 \leq h/d \leq 2.25$, decreasing h/d had a limited impact on the flow characteristics near the lowest point of the convex curved wall ($y/d = 0$), and facilitated ore particle entry into high-velocity gradient flow regions near the wall, thereby effectively promoting particle elevation. Under the same Re , for the range of $0.1 \leq b/d \leq 0.4$, reducing b/d increased the velocity gradient of the high-speed flow region near the wall, and enhanced the vertical lifting force on particles, improving collection efficiency. This study offers valuable insights for the design and engineering application of new, efficient, and low-disturbance collection devices.

Key words: deep-sea mining; polymetallic nodules; wall-jet; particle motion; particle image velocimetry

0 引 言

矿产资源的稳定供应是国家工业发展的重要支撑,随着陆地矿产资源的日益枯竭,世界各国对海洋矿产资源的开发已是大势所趋。在各种深海矿产资源中,多金属结核因其储量最大、分布最广而备受关注,其覆盖面积达到世界洋底的 15%^[1]。多金属结核通常呈球形或椭球形,粒径介于 1 cm 到 10 cm 之间,密度约为 2100 kg/m^3 ,富含锰、钴、镍及稀土等关键金属,主要分布在水深 4000~6000 m 的海底沉积物表层,处于半埋或全埋状态^[2-3]。

目前,深海采矿系统主要由深海重载作业装备、矿石输送装备和水面支持装备三大子系统组成,其中,海底矿粒采集装置是深海重载作业装备的核心^[4-5]。多金属结核的采集方式主要有三种,分别为机械式、机械-水力复合式和水力收集式。1978 年,海洋采矿公司的研究表明,水力收集方法相比机械方法更为高效、环保,并且更适应复杂的海底地形^[6]。集矿装置的流场特性和矿粒运动特性是成功采集矿粒的关键,对其进行研究可为集矿装置的优化设计和新型集矿装置的研发提供重要的理论参考。

国内外学者已经开展了大量有关深海矿石采集和水力集矿流场特性的研究。Lim 等^[7]通过 CFD 分析了收集锰结核时深海中收集装置的流场特征,发现整体海水流场特性在很大程度上受收集装置流量和锰结核颗粒行为的影响。陈昱衡等^[8]针对一种 ROV 型深海矿物采集装置的路径跟踪问题,提出了一种双层模型预测控制算法,以直线圆弧拼接路径和正弦路径为例进行仿真分析,结果显示该算法可以精准跟踪预设轨迹。Zhao 等^[9]通过实验研究了固定在底面的单球形颗粒受到的流体作用力和离底高度、流速、采集管的移动速度对集矿的影响,还通过流动可视化实验得到了吸流场的特性,并用于解释吸流场中颗粒的受力特性。Wei 等^[10]针对深海采矿车行驶过程中深海沉积物压力-下沉特性,建立了一个新的深海沉积物压力-沉降本构模型,该模型考虑了时变力学特性,可以有效描述深海沉积物力学性质的演变和各阶段下沉速率的趋势。张晓龙等^[11]对不同自由来流角度影响下的壁面湍流脉动压力及其波数-频率谱进行了数值计算与分析,研究发现,自由来流角度对湍流脉动压力波数-频率谱有显著影响,且边界层内湍流脉动压力的能量主要沿流向分布。Chen 等^[12]采用离散元法和计算流体力学的方法研究了矿粒的收集机理,通过模仿不同运动条件下球体的采集过程,发现球体上方的涡流可为颗粒的提升提供足够的升力。吴世海等^[13]针对深海沉积物取样器的楔形密封方式进行结构优化,结果表明,优化后结构可以保持样品的原位压力并有效地阻止样品泄漏。Zhao 等^[14]提出了一种基于螺旋流原理的新型矿粒采集装置,并基于数值方法实现了螺旋导流板的优化设计,验证了螺旋流在增加吸力和临界离底高度、降低工作流量等方面具有优势。Alhaddad 等^[15]通过 CFD 数值仿真开发出一种有效的矿粒收集器,并测试了射流速度、收集器的前进速度和底部间隙等若干因素对采集效率的影响,发现采集时间和集矿装置底部与矿粒的间隙对采集效率有着重要影响。赵国成等^[16-17]针对椭球形状矿

粒和球形矿粒,研究了集矿装置离底高度、集矿装置拖曳速度、矿粒长短径比,以及集矿装置与矿粒底部端点之间的偏移角对矿粒垂向受力、水平受力及受力系数的影响。Jia 等^[18]基于康达效应的矿粒采集装置,研究了垂直于曲壁的速度、压力和单颗粒升力指数的变化趋势,发现该升力指数在初始速度较高、无量纲射流槽高度较高和无量纲壁高度较低时更强。倪其军等^[19-20]针对基于康达效应的低扰动射流泵,分析了喷口间隙、内部结构、出口半径、进口压力等关键参数与流场之间的规律以及各参数对射流性能的敏感性,并给出了射流泵流体流动机理。Yue 等^[21]和李雨瑶等^[22]对包含康达效应集矿装置在内的三种水力集矿装置的集矿性能进行了数值和试验研究,发现康达效应集矿装置在保证较小环境扰动的同时能保持较高的采集效率。Cho 等^[23]和张栢源等^[24]对康达效应集矿装置开展几何参数研究,发现射流厚度与矿粒直径之比对集矿效率的影响最大,曲壁曲率半径与矿粒直径之比次之,射流切向角度的影响最小。

本文针对附壁射流式海底集矿装置进行了物理实验,利用粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术获得集矿流场的速度分布,并通过高速摄像与计算机图像处理和识别技术获取矿粒运动轨迹和速度,并分析了不同射流流量 Q 下矿粒的运动特性,同时研究了 Q 、离底高度 h 、射流厚度 b 对集矿流场的影响规律。本文提出了一系列用于研究集矿装置性能的实验方法,可为探究水力集矿流场与矿粒运动的相互作用机制及集矿装置优化设计提供参考。

1 实验系统和工况设计

1.1 附壁射流集矿原理

附壁效应(也称康达效应)是由法国工程师亨利·康达发现的一种流体力学现象。该现象描述了流体在接触到曲面时,会倾向于紧贴并沿曲面流动的特性。附壁效应原理如图 1(a)所示,基于曲面引起局部低压区域,流体在接近曲面时产生较大的流速和速度梯度,从而形成升力效应。图 1(a)中, Q 、 R 分别为附壁射流流量和曲面壁的曲率半径, c 为射流半宽,即为射流横断面处从壁面到最大流速 v_m 一半处的距离。

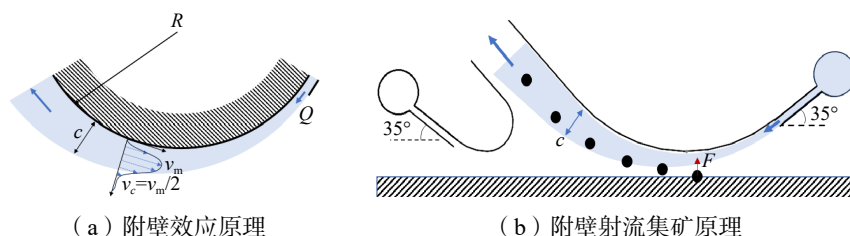


图1 附壁效应原理

Fig.1 Principle of the wall-jet effect

附壁射流集矿原理如图 1(b)所示,集矿装置通过在凸曲壁上施加高速切向射流,形成附壁流场。流场的速度梯度产生压力差,进而在矿粒上表面产生升力,使其从海床表面脱离并提升。随后,矿粒在流场作用下被引导至输矿管,最终完成采集。

1.2 实验系统概述

附壁射流集矿实验系统包括实验水槽、集矿模块、高速摄像模块和 PIV 模块。其中实验水槽为长 3 m、宽 0.8 m、高 0.7 m 的高透明玻璃水槽,实验水深为 0.6 m。集矿模块由集矿装置模型、潜水泵(0~30 t/h)和电磁流量计等构成,用于模拟海底水力集矿流场。集矿装置模型固定在六自由度机械臂前端,可实现集矿装置的姿态定位。高速摄像模块固定在水槽前方,用于记录颗粒运动过程。PIV 模块由激光发生器、PIV 相机和示踪粒子等组成,用于监测集矿流场的速度分布。实验平台及实验设备如图 2 所示。

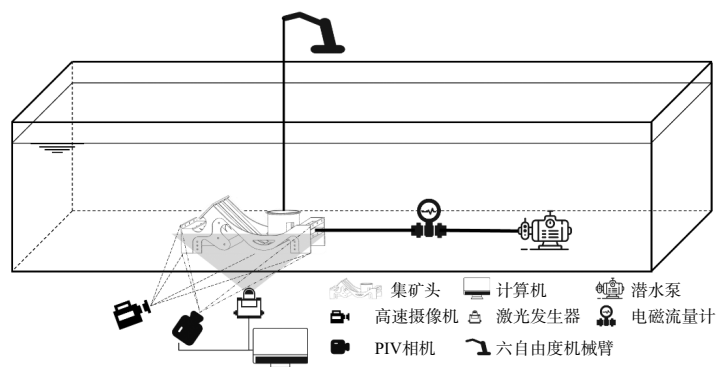


图2 实验系统

Fig.2 Experimental system

粒子图像测速(PIV)是一种非接触式的流体测量技术,通过追踪流体中微小示踪粒子的运动轨迹来获取流场的速度分布信息。实验过程中,将集矿装置的射流流量、离底高度、射流厚度调节至对应工况。待流场稳定后,将示踪粒子(密度约为 1.0 g/cm^3)均匀分散在清水中,使用激光片光源高频照射粒子,同时利用高速摄像机拍摄粒子位移的图像序列。通过图像处理软件 DaVis,计算粒子的位移和流体的速度分布,从而获得集矿流场特征。

基于 PIV 技术的流场测量结果如图 3 所示。实验中,在足够远离集矿装置且未到达水槽壁面的位置处的流速已经接近于 0,因此认为水槽的边界效应不会对实验结果产生较大的影响。

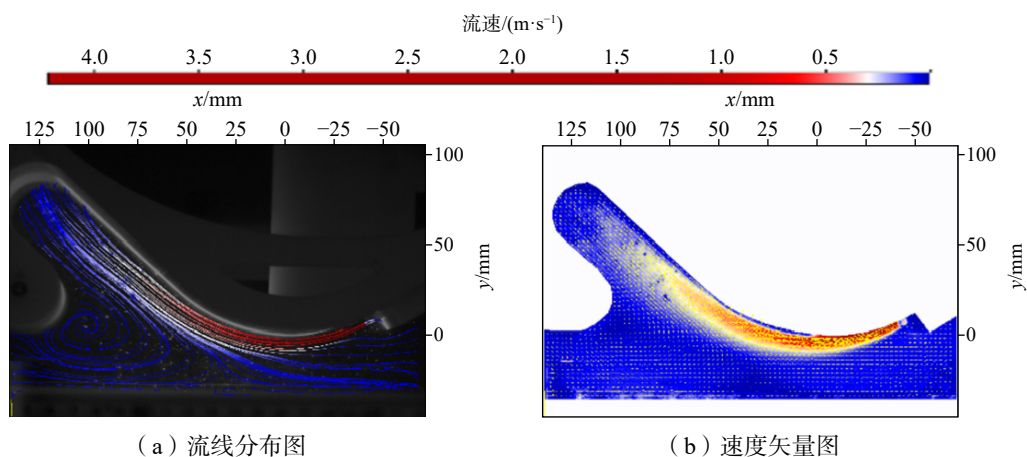
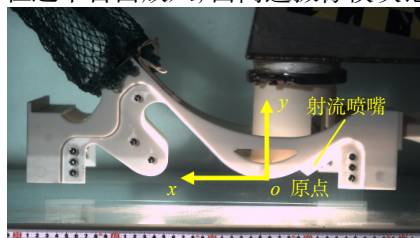


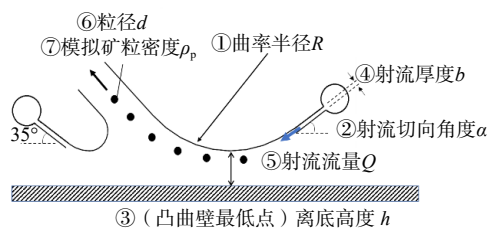
图3 基于 PIV 技术的流场测量结果

Fig.3 Results of the flow field captured by PIV technique

集矿装置模型如图 4 所示,以凸曲壁最低点为原点,水平向左为 x 轴正方向,竖直向上为 y 轴正方向建立坐标系。集矿装置模型采用 3D 打印技术制作,材质为光敏树脂(密度为 1.15 g/cm^3),将玻璃材质的模拟矿粒逐个自由放入,由高速摄像模块记录矿粒的运动情况。



(a) 集矿装置模型实物图



(b) 集矿装置参数示意图

图4 附壁射流式集矿装置

Fig.4 Wall-jet nodule-collection device

本实验涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 集矿装置模型主要参数
Tab.1 Main parameters of the nodule-collection device

编号	主要参数/单位	取值	物理意义
1	曲率半径 R / mm	80	集矿装置凸曲壁的半径
2	射流切向角度 $\alpha / ^\circ$	35	射流方向与水平方向的夹角
3	离底高度 h / mm	30~45	凸曲壁最低点到玻璃底面之间的距离
4	射流厚度 b / mm	2~8	射流喷嘴的厚度
5	射流流量 $Q / (\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	8~25	集矿装置射流喷嘴处的质量流量
6	粒径 d / mm	20	模拟矿粒的直径
7	模拟矿粒密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2300	模拟矿粒（玻璃材质）的密度

1.3 实验工况设计

为探究附壁射流式集矿装置射流流量 Q 对单颗粒运动特性的影响以及 Q 、离底高度 h 、射流厚度 b 对附壁射流集矿流场特性的影响,研究设置实验工况如表 2 所示。

表 2 实验工况表
Tab.2 Experimental working conditions

	编号	b / mm	h / mm	$Q / (\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$
颗粒运动测量实验	1	3.125	30	8, 10, 12, 16, 19, 22
	2	4	30	10, 12.5, 15, 17.5, 20, 25
集矿流场测量实验	3	6	30, 35, 40, 45	15
	4	2, 4, 6, 8	30	15

考虑 h 和 b 与粒径 d 之比得到无因次几何参数: h/d 、 b/d ,同时根据公式(1)定义射流雷诺数 Re ,根据公式(2)定义集矿流场的无量纲流速 $\tilde{v}$,其表达式分别为

$$Re = \frac{\rho u b}{\mu} = \frac{Q}{\mu B} \tag{1}$$

$$\tilde{v} = \frac{\rho v R}{\mu} \times 10^{-5} \tag{2}$$

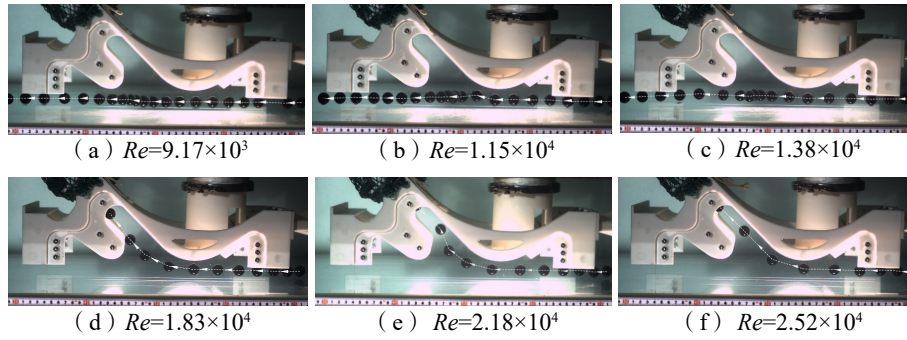
式中: ρ 为流体密度,取 1000 kg/m^3 ; μ 为流体的动力黏度,取 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; B 为射流喷嘴的宽度,取 0.24 m ; u 为射流喷嘴的流速, $u = \frac{Q}{\rho b B}$; v 为集矿流场中流体质点的速度。

2 附壁射流集矿装置作业特性分析

2.1 射流流量对单颗粒运动的影响特性分析

选用射流厚度 $b = 3.125 \text{ mm}$ 和离底高度 $h = 30 \text{ mm}$ 的集矿装置开展附壁射流集矿单颗粒运动测量实验。通过高速摄像机捕捉了 6 种射流雷诺数条件($9.17 \times 10^3 \leq Re \leq 2.52 \times 10^4$)下的颗粒轨迹,并利用计算机图像识别和处理技术提取了颗粒的运动速度。

实验结果表明,颗粒的运动轨迹呈现出两种典型运动形态,如图 5 所示。当射流雷诺数较低($Re = 9.17 \times 10^3$ 、 1.15×10^4 、 1.38×10^4)时,颗粒所受垂向提升力不足,因此沿底部轨迹穿过集矿装置;而当射流雷诺数增大($Re = 1.83 \times 10^4$ 、 2.18×10^4 、 2.52×10^4)时,垂向提升力逐渐增强,颗粒显著上升并进入集矿装置,实现有效采集。总体而言,射流雷诺数的增大能够显著提升颗粒的垂向动量,使颗粒顺利被采集。

图5 不同 Re 下颗粒运动轨迹Fig.5 Particle trajectories at different Re

定义无量纲参数 x/d (水平位移与颗粒粒径比)。根据公式(3)定义颗粒的特征速度 v_0 , 考虑颗粒的速度与特征速度之比得到无量纲水平速度 $\bar{v}_x = v_x/v_0$ 和无量纲颗粒竖直速度 $\bar{v}_y = v_y/v_0$ 。

$$v_0 = \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1\right)gd} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

颗粒在采集过程中的无量纲水平和竖直速度 $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$ 随 x/d 变化如图6所示, 颗粒在集矿装置中的运动区域划分以及 $Re = 1.83 \times 10^4$ 下集矿流场的流线分布如图7所示。实验表明, 颗粒在集矿装置不同区域具有不同的运动特征, 可划分为平动区 ($x/d < 0$)、起动区 ($0 \leq x/d \leq 5$) 和延续区 ($x/d > 5$)。

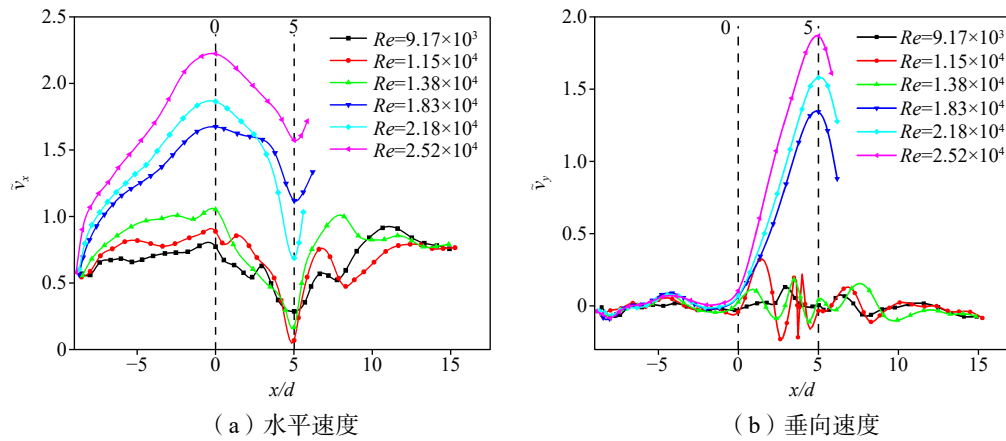
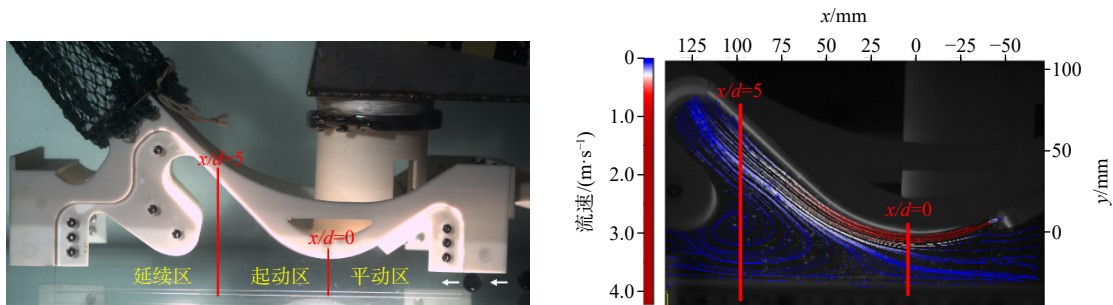
图6 不同 Re 下颗粒无量纲运动速度随 x/d 的变化Fig.6 Variation of dimensionless particle motion velocity with x/d for different Re 

图7 颗粒在集矿装置中的运动分区

Fig.7 Partitioning of particle movement in the nodule-collection device

在平动区 ($x/d < 0$), 随着 x/d 的增加, $\bar{v}_x$ 逐渐增加, 但 $\bar{v}_y$ 仍保持在接近 0 的低值。流场分布显示, 该

区域流速相对较低且分布均匀, 流场垂向速度梯度较小, 颗粒的垂向提升力不足以克服其水中重力, 因此颗粒沿底面水平运动。

在起动区($0 \leq x/d \leq 5$), 随着 x/d 的增加, $\bar{v}_x$ 逐渐减小至最小值, 而 $\bar{v}_y$ 对射流流量的响应出现显著差异。对于高雷诺数工况 ($Re = 1.83 \times 10^4$ 、 2.18×10^4 、 2.52×10^4), $\bar{v}_y$ 显著增加并达到峰值; 而对于低雷诺数工况 ($Re = 9.17 \times 10^3$ 、 1.15×10^4 、 1.38×10^4), $\bar{v}_y$ 在 0 附近波动, 且 Re 越大, 波动的剧烈程度越大。流场分布表明, 该区域靠近凸曲壁面流速达到峰值, 垂向速度梯度显著增大, 颗粒在此区域获得较大的垂向动量。较大的雷诺数能够提供足够的垂向提升力, 克服颗粒的水中重力并推动其向上运动, 有利于颗粒成功采集。

在延续区($x/d > 5$), 颗粒的运动状态趋于稳定。对于高雷诺数工况 ($Re = 1.83 \times 10^4$ 、 2.18×10^4 、 2.52×10^4), 颗粒已被成功采集; 对于低雷诺数工况 ($Re = 9.17 \times 10^3$ 、 1.15×10^4 、 1.38×10^4), $\bar{v}_x$ 随着 x/d 的增加逐渐稳定在 0.8 左右, $\bar{v}_y$ 则保持接近 0 的状态, 表明颗粒未能被有效提升。

2.2 射流流量对附壁射流集矿流场的影响特性分析

为探究射流流量 Q 对附壁射流集矿流场特性的影响, 选取 $x = 0$ mm 处竖直监测线 l_1 和 $y = -3$ mm 处水平监测线 l_2 , 并定义无量纲参数 y/d (竖直位移与颗粒粒径比) 和 x/d (水平位移与颗粒粒径比)。根据不同射流雷诺数条件下的测量结果, 得到监测线上无量纲流速 $\bar{v}$ 的分布情况, 如图 8 所示。

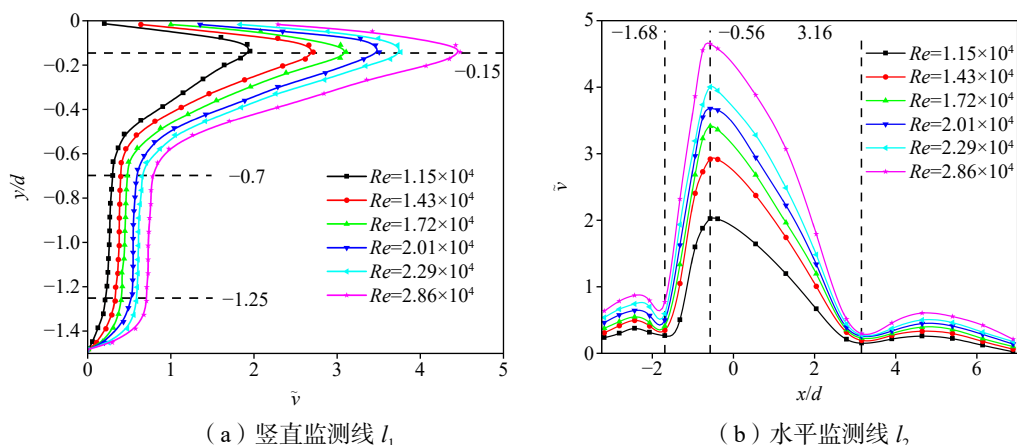


图 8 不同 Re 下监测线上无量纲流速分布

Fig. 8 Distribution of dimensionless flow velocity on the monitoring line for different Re

由图 8(a)可知, 流体质点在竖直监测线 l_1 上的无量纲速度变化呈现出以下三个阶段。在 $-0.7 \leq y/d \leq 0$ 范围内, 无量纲流速 $\bar{v}$ 随 $|y/d|$ 的增加先升高后降低, 并在 $y/d = -0.15$ 处达到最大值, 表明该区域流场受到凸曲壁形状和射流效应的影响显著。在 $-1.25 < y/d \leq -0.7$ 范围内, $\bar{v}$ 几乎保持恒定, 表明流体在这一区域流动相对稳定。在 $-1.5 < y/d \leq -1.25$ 范围内, 随着垂向距离 $|y|$ 的进一步增加, $\bar{v}$ 逐渐衰减到 0。

由图 8(b)可知, 在水平监测线 l_2 处, 随着 x/d 的增加, 在 $-3.25 \leq x/d \leq -1.68$ 范围内, 无量纲流速 $\bar{v}$ 先升高、后降低, 且变化幅度较小。在 $-1.68 < x/d \leq 3.16$ 范围内, $\bar{v}$ 迅速增加, 并在 $x/d = -0.56$ 处达到峰值, 随后逐渐减小。在 $3.16 < x/d \leq 7.5$ 范围内, $\bar{v}$ 再次呈现出先增加、后减小的趋势, 但整体变化幅度较小。

综合 l_1 和 l_2 的流速分布可见, 射流雷诺数 Re 对流场特性有显著影响。 Re 越大, 监测线上的流速越大, 且监测线上的流速变化趋势相同。集矿流场的无量纲流速 $\bar{v}$ 在 $-0.7 \leq y/d \leq 0$ 和 $-1.68 \leq x/d \leq 3.16$ 范围内变化剧烈, 表明矿粒在此区域能够获得较大的水平动量和垂向动量。随着 Re 的增加, 该区域的垂向压力梯度显著增大, 矿粒因此获得更大的垂向提升力, 采集效率也随之增加。

选取 l_1 和 l_2 上的最大无量纲流速 $\bar{v}_{\max}$ 并分析其与 Re 的关系, 如图 9 所示。随着 Re 的增大, $\bar{v}_{\max}$ 显著增加。线性拟合结果表明, l_1 和 l_2 上的 $\bar{v}_{\max}$ 与 Re 的关系分别为

$$\bar{v}_{\max} = 1.681 \times 10^{-4} Re, R^2 = 0.995 \text{ (} l_1 \text{ 上)} \quad (4)$$

$$\bar{v}_{\max} = 1.772 \times 10^{-4} Re, R^2 = 0.994 \text{ (} l_2 \text{ 上)} \quad (5)$$

因此, 可以认为 $\bar{v}_{\max}$ 与 Re 呈线性关系。

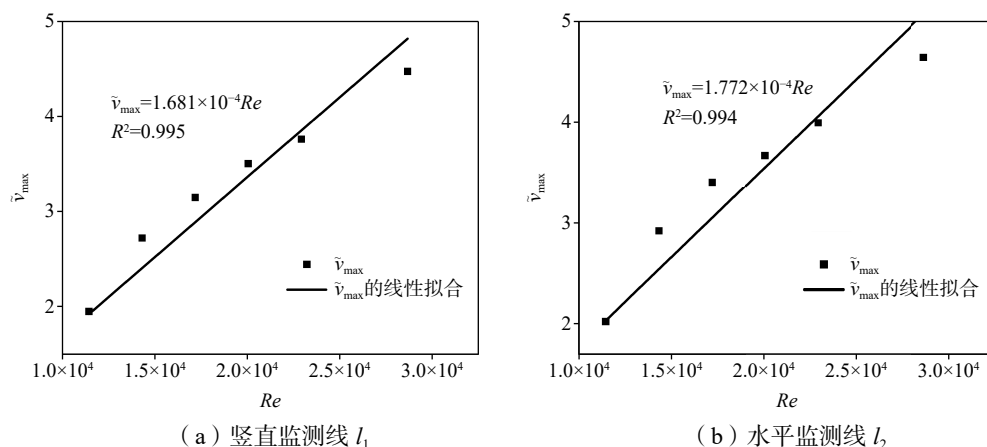


图 9 不同 Re 下监测线上无量纲流速最大值

Fig.9 Maximum dimensionless flow velocity on the monitoring line for different Re

如表 3 所示, 不同 Re 条件下, 凸曲壁最低点的射流半宽 c 在其均值 $\bar{c} = 5.3 \text{ mm}$ 附近波动。各射流雷诺数下 c 相对于 $\bar{c}$ 的变化幅度 $|\frac{c-\bar{c}}{\bar{c}}| < 10\%$, 表明射流雷诺数的变化对曲壁最低点的射流半宽影响不显著。因此, 可以认为 c 对 Re 的变化具有较强的鲁棒性。

表 3 不同 Re 下的凸曲壁最低点的射流半宽

Tab.3 Jet half-width at the lowest point of the convex curved wall for different Re

编号	$Re / (\times 10^4)$	c / mm	$\frac{c-\bar{c}}{\bar{c}} (\%)$
1	1.15	4.97	-5.85
2	1.43	5.22	-1.18
3	1.72	5.21	-1.28
4	2.01	5.35	1.41
5	2.29	5.16	-2.35
6	2.86	5.77	9.37

2.3 离底高度对附壁射流集矿流场的影响特性分析

为探究离底高度 h 对附壁射流集矿流场特性的影响, 选取 $x = 0 \text{ mm}$ 处的竖直监测线 l_1 和 $y = -3 \text{ mm}$ 处的水平监测线 l_2 。定义无量纲参数 y/d (竖直位移与颗粒粒径比) 和 x/d (水平位移与颗粒粒径比)。分析不同 h/d 条件下监测线上无量纲流速 $\bar{v}$ 的分布情况, 如图 10 所示。

如图 10(a) 所示, 在竖直监测线 l_1 上, 随着到凸曲壁最低点的垂向距离 $|y|$ 的增加, 流体质点的无量纲速度变化呈现以下特性: 在近凸曲壁面区域 ($-0.7 \leq y/d \leq 0$), 流体质点的速度较高, $\bar{v}$ 先增加后迅速减小, 并在 $y/d = -0.15$ 处达到峰值, 随着 h/d 的增大, 速度峰值的高度略有下降。在 $y/d < -0.7$ 的范围内, $\bar{v}$ 趋于平稳, 几乎保持恒定。在近底面附近 ($|h+y|/d \leq 0.25$), $\bar{v}$ 逐渐减小到 0, 表明 h/d 对近底处流场衰减的影响较小。

如图 10(b) 所示, 在水平监测线 l_2 上, 随着 x/d 的增加, 在 $-3.25 \leq x/d \leq -1.7$ 范围内, 无量纲流速 $\bar{v}$ 先增加后减小, 且变化幅度较小; 在 $-1.7 < x/d \leq 5$ 范围内, $\bar{v}$ 迅速增加, 并在 $x/d = -0.2$ 附近达到峰值, 随后逐渐减小; 在 $5 < x/d \leq 7.5$ 范围内, $\bar{v}$ 趋于平稳, 变化幅度较小。总体来看, 较大的离底高度会使水平监测线上的流速略微降低, 但不会显著影响流速分布的整体趋势。

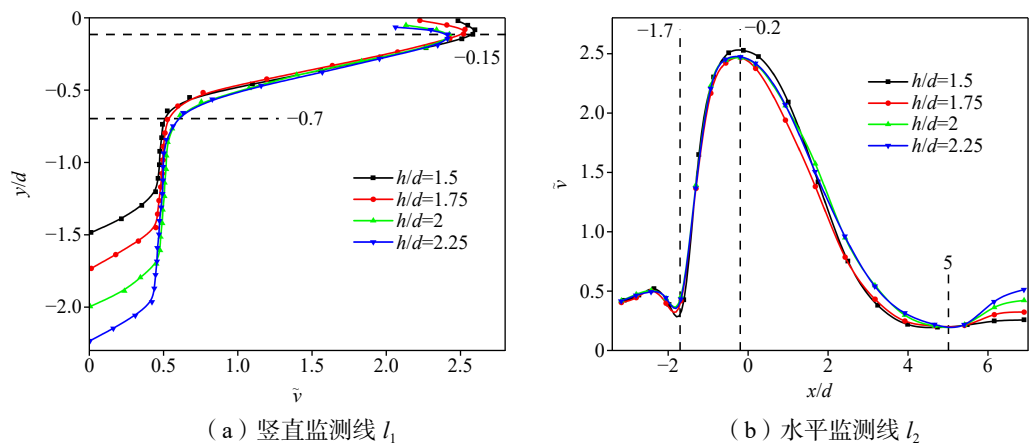


图 10 不同 h/d 下监测线上无量纲流速分布

Fig.10 Distribution of dimensionless flow velocity in the monitoring line for different h/d

对比不同 h/d 的无量纲流速分布曲线, 在 $1.5 \leq h/d \leq 2.25$ 范围内, h/d 的降低对凸曲壁最低点($y/d=0$)附近流速分布的影响较小, 但会显著缩小流场平稳区域的范围。这种特性使得矿粒更容易进入近壁面高速度梯度流场区域, 从而增强垂直方向的动量传递, 显著提高矿粒的提升效率和采集效率。

不同离底高度条件下, 凸曲壁最低点的射流半宽 c 及竖直监测线 l_1 上的最大无量纲流速 $\bar{v}_{\max}$ 的变化如表 4 所示, 随着 h 的增大, $\bar{v}_{\max}$ 逐渐降低, 且相对于其均值 $\bar{v}_{\max}$ 的变化幅度 $|\frac{\bar{v}_{\max}-\bar{v}_{\max}}{\bar{v}_{\max}}| < 5\%$; c 在其均值 $\bar{c} = 6.0 \text{ mm}$ 附近波动, 且相对于 $\bar{c}$ 的变化幅度 $|\frac{c-\bar{c}}{\bar{c}}| < 10\%$ 。这表明离底高度对凸曲壁最低点的射流半宽及 l_1 上的最大流速影响较小。

表 4 不同 h 下的凸曲壁最低点的 c 及 l_1 上的 $\bar{v}_{\max}$

Tab.4 Values of c at the lowest point of the convex curved wall and $\bar{v}_{\max}$ on l_1 for different h

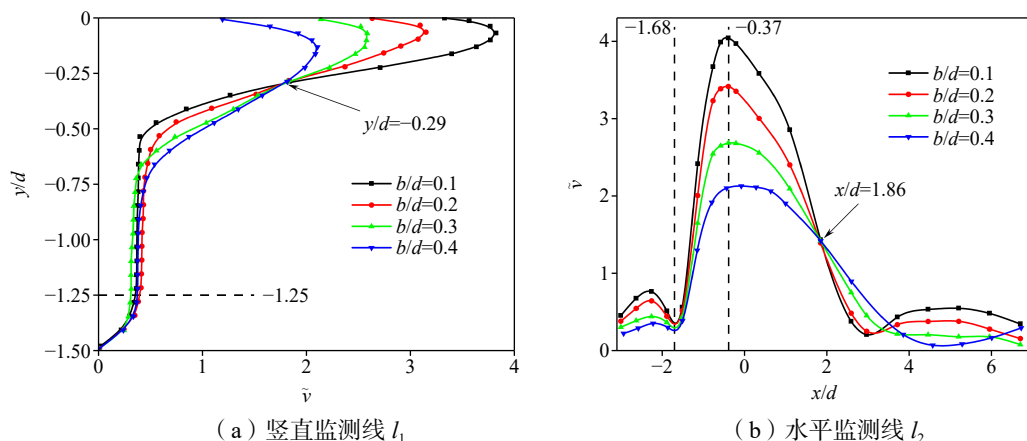
编号	h / mm	$\bar{v}_{\max}$	$\frac{\bar{v}_{\max}-\bar{v}_{\max}}{\bar{v}_{\max}}(\%)$	射流半宽 c / mm	$\frac{c-\bar{c}}{\bar{c}}(\%)$
1	30	2.59	4.92	5.94	-0.02
2	35	2.46	-0.28	5.88	-0.98
3	40	2.43	-1.60	6.52	9.76
4	45	2.41	-2.46	5.59	-5.89

2.4 射流厚度对附壁射流集矿流场的影响特性分析

为探究射流厚度 b 对集矿流场特性的影响, 选取 $x = 0 \text{ mm}$ 处竖直监测线 l_1 和 $y = -3 \text{ mm}$ 处水平监测线 l_2 。定义无量纲参数 y/d (竖直位移与颗粒粒径之比)和 x/d (水平位移与颗粒粒径之比), 分析不同 b/d 条件下监测线上无量纲流速 $\bar{v}$ 的分布情况, 如图 11 所示。

如图 11(a)所示, 在竖直监测线 l_1 上, 不同 b/d 条件下的无量纲流速分布曲线在 $y/d = -0.29$ 处相交, 表现出以下特性: 在靠近壁面的区域($-0.29 \leq y/d \leq 0$), 随着 b/d 的增大, $\bar{v}$ 逐渐减小; 在远离壁面的区域($-0.8 \leq y/d < -0.29$), 随着 b/d 的增大, $\bar{v}$ 逐渐增大。这表明, 较大的射流厚度降低了流体在壁面附近的速度, 并增强了远离壁面区域的流速。总体来看, 在 $0.1 \leq b/d \leq 0.4$ 范围内, 减小 b/d 会增大近壁面高流速区域的流速梯度, 从而增强矿粒的垂向提升力, 有利于矿粒的采集。

如图 11(b)所示, 在水平监测线 l_2 上, 不同 b/d 条件下的无量纲流速分布曲线在 $x/d = 1.86$ 处相交。在 $-1.68 \leq x/d \leq 3$ 范围内, $\bar{v}$ 迅速上升并在 $x/d = -0.37$ 处达到峰值, 之后逐渐下降。随着 b/d 的增加, $\bar{v}$ 的峰值减小, 且变化幅度也更为平缓。总体来看, 在 $0.1 \leq b/d \leq 0.4$ 范围内, 较大的射流厚度降低了流体局部区域的加速效果, 导致流速峰值减小, 流场整体趋于平稳。

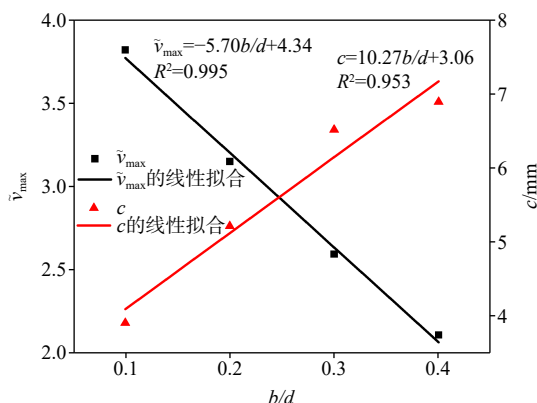
图 11 不同 b/d 下监测线上无量纲流速分布Fig.11 Distribution of dimensionless flow velocity in the monitoring line for different b/d

为进一步研究射流厚度对流场特性的影响,提取 l_1 上最大无量纲流速 $\tilde{v}_{\max}$ 和凸曲壁最低点的射流半宽 c ,分析其与 b/d 的关系。如图 12 所示,随着 b/d 的增加, $\tilde{v}_{\max}$ 逐渐降低,表现出负线性关系; c 逐渐升高,表现出正线性关系。通过线性拟合,得到回归方程如下

$$\tilde{v}_{\max} = -5.70b/d + 4.34, R^2 = 0.995 \quad (6)$$

$$c = 10.27b/d + 3.06, R^2 = 0.953 \quad (7)$$

拟合结果表明,在相同射流流量下,减小射流厚度会使得射流速度增大,且射流更加贴近壁面,从而加剧流场的不均匀性,导致竖直监测线上的流速衰减更快并减小射流半宽。

图 12 b/d 对 l_1 上 $\tilde{v}_{\max}$ 和凸曲壁最低点 c 的影响Fig.12 Influence of b/d on $\tilde{v}_{\max}$ along l_1 and on c at the lowest point of the convex curved wall

3 结 论

本研究基于粒子图像测速(PIV)技术和高速摄像与计算机图像处理和识别技术,通过物理实验,分析了附壁射流式集矿装置在不同射流参数下的单颗粒运动特性和流场特性,得出的主要结论如下:

(1) 依据颗粒在相对于集矿装置不同位置的运动特征,颗粒的运动状态可划分为平动区($x/d < 0$)、起动区($0 \leq x/d \leq 5$)和延续区($x/d > 5$)。在平动区,流场流速分布均匀且数值较小,此时颗粒水平运动速度不断增加;在起动区,流场流速显著增大,垂向速度梯度较大,颗粒的垂向动量明显增大,同时其水平运动速度逐渐减小;在延续区,当射流雷诺数 $Re \geq 1.83 \times 10^4$ 时,颗粒被成功采集,而当 $Re < 1.83 \times 10^4$ 时,颗粒沿集矿装置底部通过而未被采集。

(2)受附壁效应及底面壁面对流场衰减作用的影响, 竖直监测线 l_1 在凸曲壁附近的流速较高且变化剧烈, 而在近底面区域逐渐衰减至零。研究表明, 凸曲壁最低点处的射流半宽与 b/d 呈线性关系, 但与 Q 和 h/d 无显著关联。 b/d 越大, 射流半宽越大, 流场影响范围越广。

(3)相同 Re 下, 在 $1.5 \leq h/d \leq 2.25$ 范围内, h/d 的减小对凸曲壁最低点($y/d=0$)附近流速变化趋势影响较小, 但有利于矿粒进入近壁面的大梯度速度场和压力场, 使矿粒受到更大的流体作用力, 从而有效促进矿粒提升; 相同 Re 下, 在 $0.1 \leq b/d \leq 0.4$ 范围内, 随着 b/d 的减小, 近壁面高流速区域的速度梯度增大, 矿粒的垂向受力因此增强, 提高采集效率。

本研究可为附壁射流式集矿装置的流场优化以及新型高效、低扰动采矿技术的工程设计及工程应用提供重要参考。

参 考 文 献:

- [1] 肖业祥, 杨凌波, 曹 蕾, 等. 海洋矿产资源分布及深海扬矿研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 319–326.
Xiao Y X, Yang L B, Cao L, et al. Distribution of marine mineral resource and advances of deep-sea lifting pump technology[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 319–326. (in Chinese)
- [2] Vanoudheusden E, Sultan N, Cochonat P. Mechanical behaviour of unsaturated marine sediments: Experimental and theoretical approaches[J]. Marine Geology, 2004, 213(1): 323–342.
- [3] GSR. Environmental impact statement: Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact[R]. Technical Report, 2018.
- [4] 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 J M, Liu L, Lv H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 1–9. (in Chinese)
- [5] 陈旭光, 寇海磊, 牛小东, 等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 1–14.
Chen X G, Kou H L, Niu X D, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 1–14. (in Chinese)
- [6] Mcfarlane J, Brockett T, Huizingh J P. Analysis of mining technologies developed in the 1970's and 1980's[R]. Kingston, International Seabed Authority, 2008.
- [7] Lim S J, Kim J W, Jung S T, et al. Deep seawater flow characteristics around the manganese nodule collecting device[J]. Procedia Engineering, 2015, 116: 544–551.
- [8] 陈昱衡, 张海成, 邹伟生, 等. 一种 ROV 型深海矿物采集装置的路径跟踪控制方法[J]. 船舶力学, 2024, 28(11): 1687–1699.
Chen Y H, Zhang H C, Zou W S, et al. Path tracking method for ROV deep-sea mining equipment[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(11): 1687–1699. (in Chinese)
- [9] Zhao G, Xiao L, Peng T, et al. Experimental research on hydraulic collecting spherical particles in deep sea mining[J]. Energies, 2018, 11(8): 1938.
- [10] Wei D, Cao H, Xia J. Study on the pressure-sinkage process and constitutive model of deep-sea sediment[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 883.
- [11] 张晓龙, 张 楠, 吴宝山. 自由来流角度影响下壁面湍流脉动压力波数——频率谱的大涡模拟计算分析研究[J]. 船舶力学, 2017, 21(11): 1323–1335.
Zhang X L, Zhan N, Wu B S. Investigating the effects of free-stream velocities on turbulent wall pressure fluctuations and their wavenumber-frequency spectra at high Reynolds numbers using Large Eddy Simulation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(11): 1323–1335. (in Chinese)
- [12] Chen Y, Xiong H, Cheng H, et al. Effect of particle motion on the hydraulic collection of coarse spherical particles[J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(1): 72–81.

- [13] 吴世海, 刘童祺, 卞如冈, 等. 深海沉积物取样器的楔形密封方式研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(5): 652–658.
Wu S H, Liu T Q, Biao R G, et al. Research on the form of wedge seals of deep-sea sediment samplers[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(5): 652–658. (in Chinese)
- [14] Zhao G, Xiao L, Yue Z, et al. Performance characteristics of nodule pick-up device based on spiral flow principle for deep-sea hydraulic collection[J]. Ocean Engineering, 2021, 226: 108818.
- [15] Alhaddad S, Mehta D, Helmons R. Mining of deep-seabed nodules using a Coandă-effect-based collector[J]. Results in Engineering, 2023, 17.
- [16] 赵国成, 肖龙飞, 杨建民, 等. 深海水力集矿球形颗粒受力特性试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(8): 907–912.
Zhao G C, Xiao L F, Yang J M, et al. Experimental research on force characteristics of a spherical particle in deep sea hydraulic collecting[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(8): 907–912. (in Chinese)
- [17] 赵国成, 肖龙飞, 胡经朝, 等. 椭圆粗颗粒在深海水力集矿流场中受力特性试验研究[J]. 中国造船, 2020, 61(1): 81–89.
Zhao G C, Xiao L F, Hu J Z, et al. Experimental research on characteristics of forces acting on ellipse-shaped coarse particles in deep sea hydraulic collection[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 81–89. (in Chinese)
- [18] Jia H, Yang J, Su X, et al. Theoretical prediction on hydraulic lift of a Coandă effect-based mining collector for manganese nodule[J]. Energies (Basel), 2022, 15(17): 6345.
- [19] 倪其军, 阮文权. 清淤射流泵流场数值模拟及其参数对性能影响分析[J]. 船舶力学, 2019, 23(7): 781–790.
Ni Q J, Ruan W Q. Numerical simulation of flow field of desilting jet pump and analysis of its influence on performance[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(7): 781–790. (in Chinese)
- [20] 倪其军, 阮文权. 基于响应面模型的清淤射流泵吸头参数优化设计[J]. 船舶力学, 2022, 26(3): 365–374.
Ni Q J, Ruan W Q. Optimization design of desilting jet pump parameters based on response surface model[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(3): 365–374. (in Chinese)
- [21] Yue Z, Zhao G, Xiao L, et al. Comparative study on collection performance of three nodule collection methods in seawater and sediment-seawater mixture[J]. Applied Ocean Research, 2021, 110: 102606.
- [22] 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, 2023: 1–17.
Li Y Y, Zhao G C, Xiao L F. Numerical study on collection and environmental disturbance characteristics of different nodule collecting models[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023: 1–17. (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] 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研究[J]. 上海交通大学学报, 2023: 1–15.
Zhang B Y, Zhao G C, Xiao L F. Optimization of geometrical parameters of Coandă-effect-based polymetallic nodule collection device[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023: 1–15. (in Chinese)