基于CFD-DEM的多金属结核小型水力式集矿机构设计*

李俊[1,2],程阳锐[1,2],曾轩[1],彭建平[1]

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
2.中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要:为满足科考船舶搭载设备的功率和质量要求,采用单个水泵集中为捕捉喷嘴和输送喷嘴供水的结构设计方案,研制了多金属结核小型水力式集矿机构,运用CFD-DEM软件开展了小型水力式集矿机构流场特性和采集率的仿真分析,并开展了水池试验和海上试验。水池试验结果表明,当采集宽度为0.3 m、采集功率为4.9 kW时,主管路水压为58 kPa,模拟结核采集率为75%,满足设计要求;海上试验采集了19 kg的多金属结核,验证了该集矿机构具备良好的采集功能,可降低搭载设备的功率和质量。研究结果可为类似集矿机构的设计提供参考。

关键词:小型水力式集矿机构;多金属结核;深海采矿;CFD-DEM

中图分类号:TD424;TD857 **文献标识码**:A

文章编号:1005-2763(2024)11-0001-08

0 引言

多金属结核是一种重要的海底矿产资源,富含铁、锰、镍、铜等金属元素,资源总量达万亿吨[1-2],多赋存于水深4～6 km的海底沉积物中。集矿机构是将多金属结核从沉积物中采集、输送至水下采矿装备的关键设备,目前国内外出现了近百种多金属结核采集原理和结构的专利,根据原理可分为3类:机械式、水力式和复合式集矿机构[3-4]。水力式集矿是一种利用水流分离和移动赋存在海底沉积物表面上结核的技术方法。与其他集矿原理相比,利用水射流冲采或产生负压抽吸结核,具有结构简单、经久耐用的优点,其缺点是采集结核的同时伴随着沉积物,对海底和水体的环境有一定影响[5]。

近年来,国内外机构对多金属结核水力式集矿机构开展了研究与海上试验。韩国海洋工程研究所研制了水力式集矿机构,并搭载采矿车样机MineRo-Ⅱ于2013年在韩国东海开展了1 370 m单体海试,采集了模拟结核[6-7]。比利时德米集团研制了水力式采矿车样机Patania Ⅱ,于2017年开展了4 571 m水深试验,并于2021年开展了4 500 m水深试验[8]。加拿大金属公司采用水力式集矿机构,于2022年10月在太平洋多金属结核富集区开展了4 400 m多金属结核全系统采矿联动试验,采集了数千吨的多金属结核[9]。长沙矿冶研究院有限责任公司研发的水力式集矿机构的采集原理为双排喷嘴冲采-附壁喷嘴负压输送[10-11],该集矿机构于2018年开展了514 m水深海试,采集了模拟矿石[12],并于2021年开展了1 306 m水深海试[13]。

为便于搭载科考航次,本文在多金属结核资源丰富的海域开展了水力式集矿机构的试验,分析了适用于常规科考的小型水力式集矿机构的原理,研制了单水泵集矿机构,开展了实验室水池试验和海上试验,试验结果达到了设计要求,验证了小型水力式集矿机构结构方案和设计方案的合理性。

1 水力式集矿机构结构与原理

1.1 水力式集矿机构的结构组成

水力式集矿机构按工作原理主要可分为3种:泥浆泵吸扬集矿机构、水射流附壁效应集矿机构和水射流举升集矿机构[14]。水射流举升集矿机构主要由水泵、输送系统、捕捉系统、随动机构以及相应管路组成,如图1所示。水泵为特制耐深水压力、耐腐蚀的轴流泵。输送系统由水力输送喷嘴和水力输送通道两部分组成。捕捉系统由带喷嘴的前后两排喷管、上下导流板以及侧面挡板组成。采用3台水泵分别为前、后捕捉喷嘴及输送喷嘴3组喷嘴供水,便于水压与流量控制。

* **收稿日期**:2023-12-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2806802-3)
作者简介:李俊(1986—),男,湖南衡阳人,硕士,高级工程师,主要从事深海采矿技术与水下装备研究。E-mail:cfdxli@126.com

图 1　水射流举升集矿机构的结构组成

Fig.1　Structural composition of water jet lifting mining mechanism

1.2　水力式集矿机构工作原理

水力式集矿机构的工作原理为由捕捉系统完成对结核的冲刷、松动、移动并将结核举升到一定高度,再由输送系统将结核送到采矿车。捕捉系统的工作原理:相对安装的前后两排喷嘴产生两排水射流射向结核,其中前排射流完成对结核的冲刷、松动,并将结核向后移动,后排射流挡住移来的结核,在前后两排射流共同作用产生的上升水流带动下,将结核举升到一定高度。这股结核上升流在上下导流板的作用下,按预定的运动轨迹自动进入输送通道口。输送系统的工作原理为安装在适当位置的水力输送喷嘴喷出水射流,利用射流形成的压差,将输送通道口的结核流沿通道送至采矿车。

1.3　工作原理的理论分析

1.3.1　捕捉喷嘴的功率适配理论

捕捉喷嘴形成水流喷射的作用是松动并扬起结核至一定高度,之后由输送喷嘴经输送通道进行输送,实质是一个动量传递和能量转换的过程,其射流功率起决定作用。水流的速度 V 射至结核和海底沉积物形成反射,如图 2 所示。V_H 和 V'_H 分别为经底板反射形成的上升速度和下降速度,V_R 为由动压转化为静压(形成绕流)构成的上升速度。

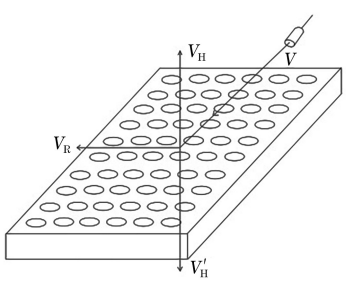

图 2　水流对底板的作用

Fig.2　Effect of water flow on the floor

反射系数 q 的计算公式如下:

$$q=(1-R)/(1+R) \tag{1}$$

式中,R 为密度比,R=底板密度/水密度。

能量转换率 η 的计算公式如下:

$$\eta=q^2=(1-R)^2/(1+R)^2 \tag{2}$$

1.3.2　输送喷嘴的工作原理

为保证多金属结核在集矿机构输送通道内向上运动,输送速度 v_s 应大于结核自由沉降速度 w_t 的分速度 v_t。

结核自由沉降速度的计算公式如下:

$$w_t=\sqrt{4gd\rho_w/3C_d(\rho_s-\rho_w)} \tag{3}$$

式中:w_t 为结核自由沉降速度,m/s;g 为重力加速度,m/s^2;d 为结核粒径,m;C_d 为结核沉降阻力系数;ρ_s 为模拟结核的湿密度,kg/m^3;ρ_w 为水密度,kg/m^3。

2　小型水力式集矿机构设计

2.1　总体要求

为满足科考船舶的搭载要求,小型水力式集矿机构的使用功率应小于 5 kW,质量小于 100 kg,采集宽度为 0.3 m,采集效率大于 70%,结构简单可靠,易维护。

2.2　集矿机构设计

2.2.1　水泵-喷嘴配置

为减少水力式集矿机构水泵-喷嘴系统的体积和质量,采用单个水泵集中为捕捉喷嘴和输送喷嘴供水,具体设计参数如下:(1) 水泵 1 台,排量 250 m^3/h,扬程 5 m;(2) 采宽 0.3 m;(3) 前喷嘴 Φ9 mm,后喷嘴 Φ7 mm,输送喷嘴的输送缝宽为3.5 mm。

2.2.2　结构设计

小型水力式集矿机构的设计难点在于需采用单个水泵为 3 组喷嘴供水,同时需减少管路的压力损失,提高能量利用率。集矿机构由捕捉系统、输送系

统以及相应管路装置组成。捕捉系统和输送系统共用一个由液压马达驱动的水泵。捕捉系统主要设计参数有前后两排喷管间的距离、前后两排喷管的离地高度、前后两排喷嘴参数、上下导流板参数、侧面挡板工作参数。水力输送喷嘴参数包括安装位置、喷嘴形状、出口面积、喷射流量和喷射速度,水力输送通道参数包括水力输送通道的高度、宽度、长度和倾角。

2.3 集矿机构仿真分析

为验证小型水力式集矿机构设计参数的合理性,采用 CFD-DEM 软件的对其流场特性和采集率进行分析。

2.3.1 仿真模型构建

为构建小型水力式集矿机构水射流主要作用区域流场和内部管路流场的流体计算域模型,对设计模型中的水泵本体、密封等对流场本身影响较小的部件进行了简化,如图 3 所示。

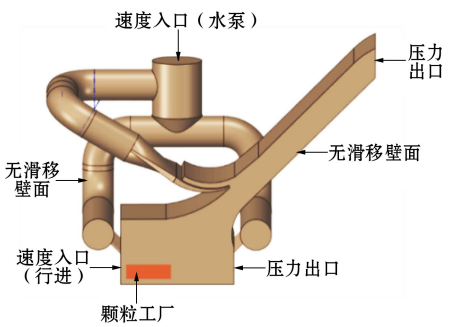

图 3 小型水力式集矿机构的仿真模型

Fig.3 Simulation model of small hydraulic mining mechanism

在 EDEM 中采用单球模型模拟多金属结核,将多金属结核简化为表面光滑的球体。根据中国五矿集团有限公司多金属结核合同区调查数据,将密度设置为 2 000 kg/m^3,泊松比设为 0.13,弹性模量设为 1.15×10^{10} Pa;结核粒径主要分布范围为 10～100 mm,其中粒径为 20～40 mm 的占比最大,平均粒径为 32 mm,故在仿真中将多金属结核生成的颗粒直径设置为 30 mm。

为更好地模拟集矿机构行走与采集同时进行的工况,将颗粒工厂设置在海底壁面底部流场前侧。根据中国五矿集团有限公司多金属结核合同区的结核丰度特点,取丰度为 10 kg/m^2。按 0.3 m/s 的行走速度以及 0.3 m 的采集宽度,颗粒工厂生成速度为 0.9 kg/s,生成总量设置为 3 kg。为使采集开始时内部流场达到相对稳定状态,颗粒起始生成时间设置为仿真开始后的 0.3 s 时刻。

2.3.2 仿真目标变量

水泵输送工况参数是小型水力式集矿机构设计过程中的关键参数,需要通过仿真分析验证其设计的合理性。基于简化的仿真模型,开展不同初始水压下的集矿机构作业过程数值模拟,获得集矿机构内部流场以及水射流主要作用区域的流场特性,探究采集效果形成机理与特征,分析不同参数对采集效果的影响特点。统计仿真中颗粒采集率,以此分析不同工况参数下的采集性能。采集机构仿真中设置了 6 种不同的初始水压,分别为 110 kPa、100 kPa、90 kPa、75 kPa、60 kPa、50 kPa。

2.3.3 流场特性分析

双排喷嘴集矿机构的工作原理为利用两排水射流冲击底部沉积物使其瓦解,并在汇合后形成上升水流将结核颗粒抬起。在捕捉前喷嘴内径 9 mm、捕捉后喷嘴内径 7 mm、输送缝宽 3.5 mm,初始水压 90 kPa 的条件下,当计算域流体稳定后获得了整个区域的流场速度分布云图,如图 4 所示。

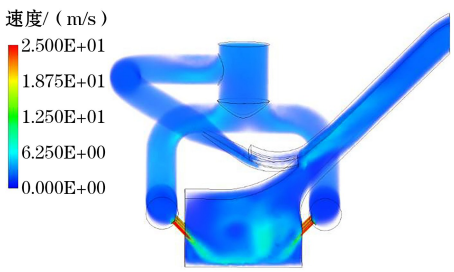

图 4 小型水力式集矿机构作业过程全区域流场速度分布云图

Fig.4 Velocity distribution cloud diagram of flow field in the whole region during the operation of small hydraulic mining mechanism

由图 4 可知,水泵出口的水流沿着 3 条内部管路流向 2 组捕捉喷嘴和 1 组输送喷嘴。水流流速在 2 组捕捉喷嘴流道内迅速升高,水流高速射入下方流场,两侧捕捉喷嘴产生的水流相互汇合并向上发展,流场产生复杂变化,形成了冲击底面的水流,在集矿机构采集区域的流场中部形成了相对稳定的上升水流,同时在输送通道内沿着上壁面也存在着充足流速的输送水流。此处仿真不考虑底部稀软底质对模拟的影响。

水力式集矿机构作业过程中,颗粒随着流体运动完成采集过程。图 5 展示了集矿机构从水泵出口出发的速度流线以及此时的颗粒分布,流线与颗粒均采用速度进行着色。颗粒在采集过程中的分布规律与运动速度规律基本上与流线一致,颗粒对流体

有着较好的跟随性,因此仅需对小型水力式集矿机构内部流场进行分析以评估整体采集效果。

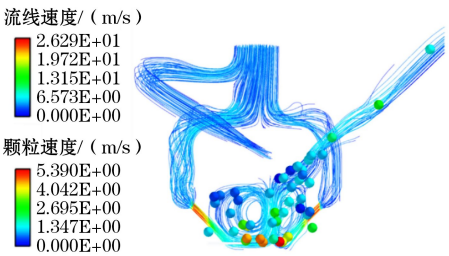

图 5 小型水力式集矿机构速度流线与颗粒分布云图

Fig.5 Velocity streamline and particle distribution cloud diagram of small hydraulic mining mechanism

图 6 为小型水力式集矿机构核心流场区域不同初始水压 P_0 下的流场速度分布云图,选取了计算域的集矿机构结核输送管道中纵剖面数据进行展示。为更直观地体现差异,根据所有工况下的流速极值,将各图设置为一致的调色板范围。

由图 6 可知,从前后捕捉喷嘴出口处流出的高速流体相互汇合影响流场。不同初始水压下的流场具有明显区别,当初始水压较高时,射流汇合后形成的合流具有充足的流速,且流动方向更利于颗粒向输送管道内部运动;当初始水压较低时,射流汇合后更趋向于在流场中耗散,形成的合流强度低。上升流在进入输送通道口的速度能达到 6 m/s 时,能较好地实现采集和输送的结合。输送通道入口的流速随着水压的降低而降低,当初始水压在 80 kPa 及以上时,受到射流作用,流体对多金属结核颗粒均具有较好的采样与输送效果。

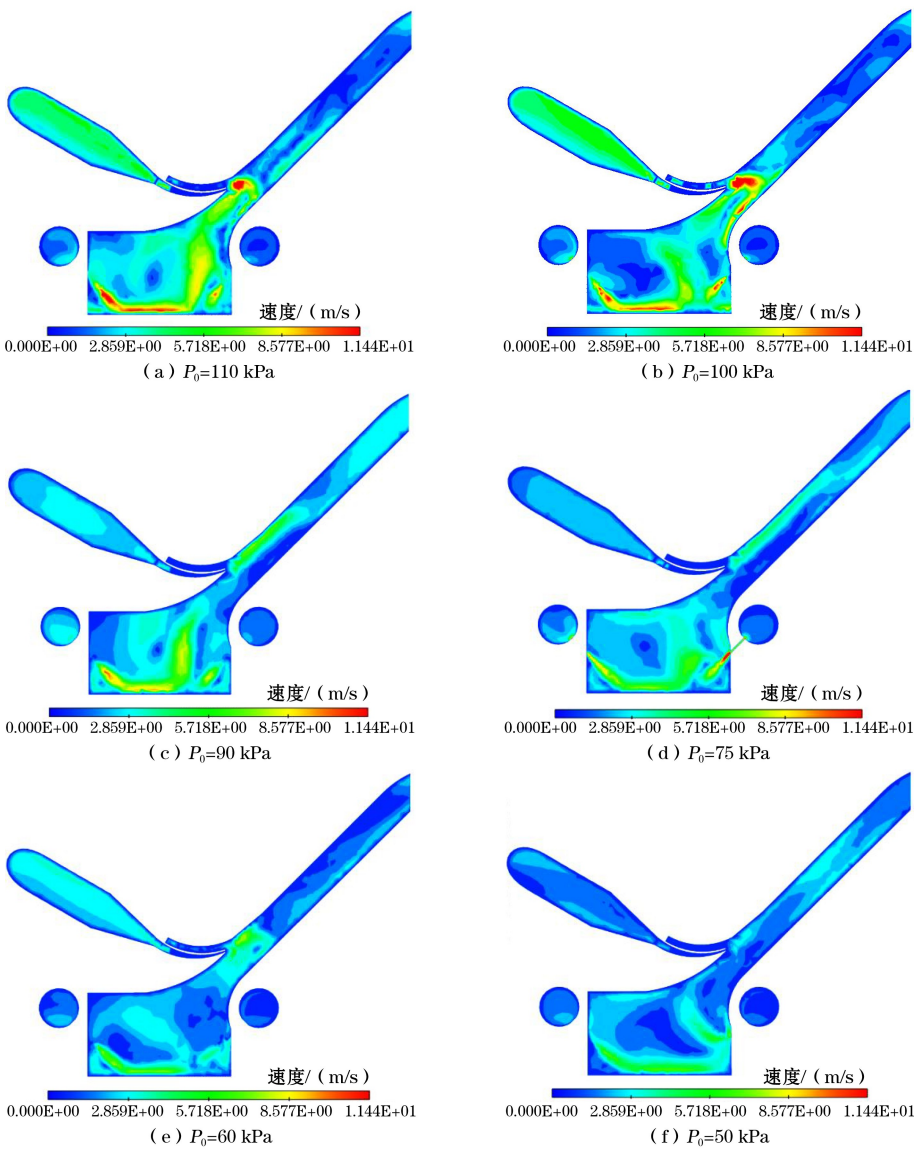

图 6 不同初始水压下流场速度分布云图

Fig.6 Velocity distribution cloud diagrams of flow field under different initial water pressures

能否将冲起的颗粒成功提升至输送水流起作用的高度是影响采集效果的关键因素。汇合水流的提升作用体现为流体的上升流速,即为仿真中 y 轴方向的流速。图 7 展示了在捕捉前喷嘴内径为 9 mm、捕捉后喷嘴内径为 7 mm、输送缝宽为 3.5 mm 的喷嘴参数条件下,不同初始水压下上升流速分布云图。可以看出,随着初始水压的降低,流场内采集中心区域的上升流速逐渐降低,输送通道中的流速也随之降低,且不稳定。要实现结核的稳定输送,需采用较高的初始水压。

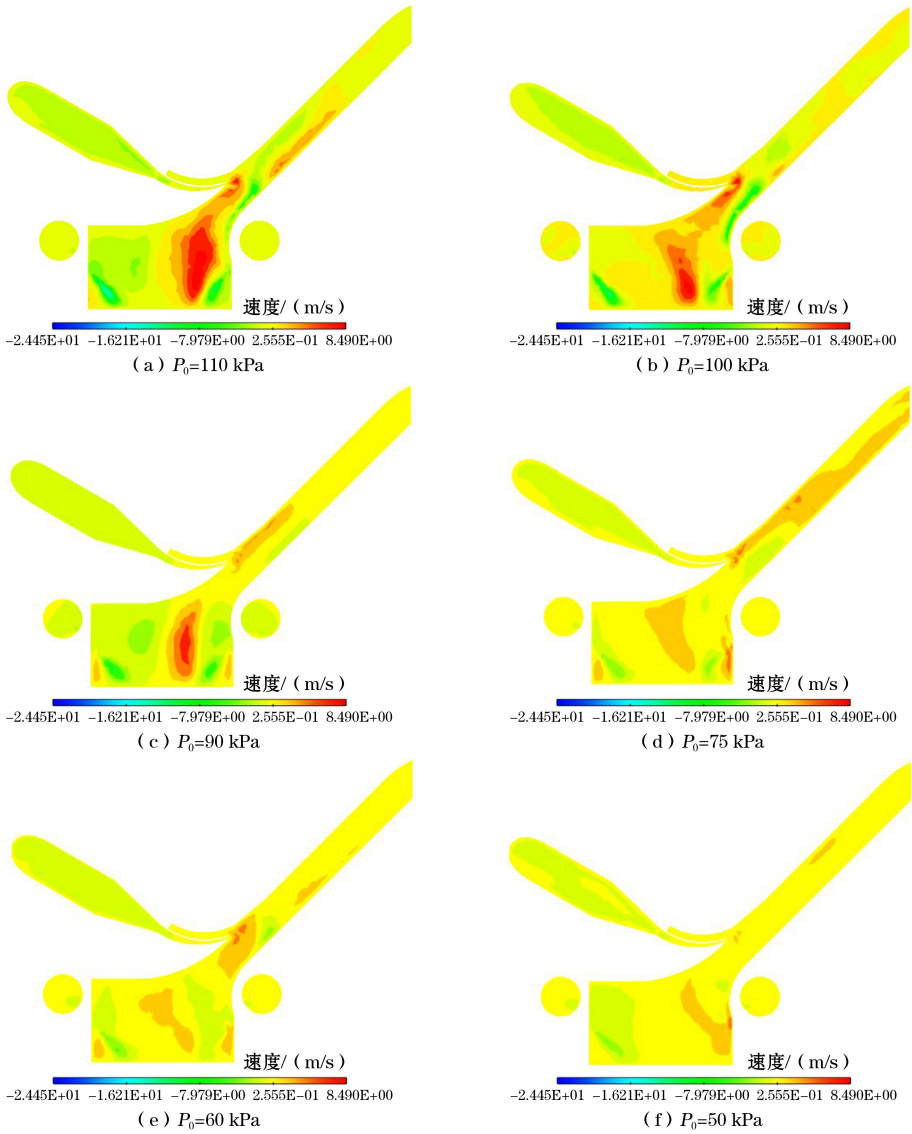

图 7 不同初始水压下上升流速分布云图

Fig.7 Distribution cloud diagrams of rising velocity under different initial water pressures

2.3.4 采集率分析

采集率分析中设置颗粒生成速度 0.9 kg/s,颗粒生成总量 3 kg,起始生成时间 0.3 s,颗粒释放时间为 0.3～3.63 s。仿真过程中被成功采集的颗粒从输送通道的末端出口离开计算域,统计当全部颗粒生成完毕后计算域内仍留存颗粒的总质量即可计算出采集率。图 8 展示了初始水压为 90 kPa 时 t=3 s 与 t=5 s 时刻计算域的颗粒总质量。由于颗粒在采集过程中存在回落与重新抬起的运动阶段,故选取 t=5.5 s 时所采集的多金属结核总质量作为分析小型水力式集矿机构采集率的数据依据。采用此分析方法,仿真得到不同初始水压下的结核采集率,如图 9 所示。

由图 9 可知,随着水压的增大,结核采集率随之升高;当初始水压超过 90 kPa 时,结核的采集率超过 90%。采集率分析结果和集矿机构流场分析结果吻合,说明仿真结果的准确性与可靠性较好。同时当初始水压达到 90 kPa 后,尽管随着水压的提升

采集率存在上升趋势,但是提升幅度并不明显。根据水泵工作原理可知,提高水泵的输出水压将导致水泵消耗功率快速增加,且水泵输出水压越高,消耗功率增加速率越大。故认为当初始水压达到 90 kPa 后,提升水压所带来的采集率收益远远不及功率增加所带来的资源损耗。因此,综合分析流场仿真与采集率数据,认为初始水压 90 kPa 可以在兼顾高效性与节能性的同时,较好地完成取样任务。

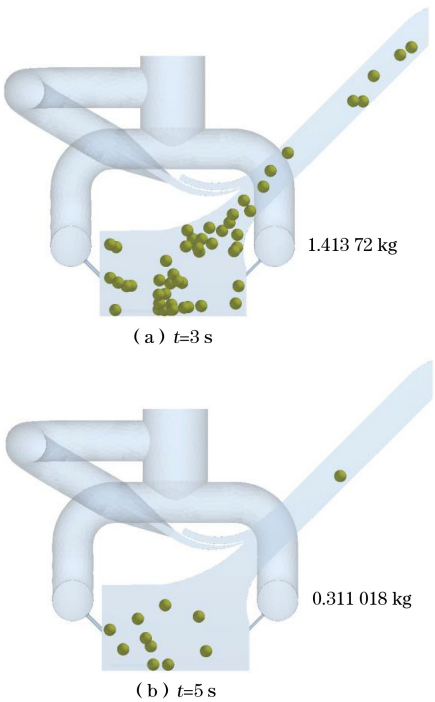

图 8 不同时刻下计算域内颗粒总质量

Fig.8 Total mass of particles in the calculation domain at different time

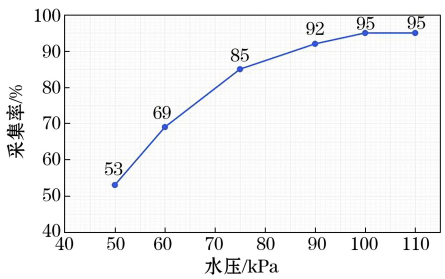

图 9 不同初始水压下结核采集率曲线

Fig.9 Collection rate curve of nodules under different initial water pressures

3 小型水力式集矿机构试验验证

3.1 水池试验

小型水力式集矿机构水池试验如图 10 所示。在实验室采集水池中搭建了试验平台,水池底面铺设了与矿区力学性能相近的稀软底质。试验所用原料为模拟结核,密度与真实结核相当,直径为 20～70 mm。试验过程中采集了水泵出口主管路的水压及水泵液压马达的压力与流量,进而换算为水泵转速及液压马达消耗的功率。经过多次水池试验,得到的试验数据见表 1。采集率为采集的模拟结核与采集面积上所铺设的模拟结核质量之比。

图 10 小型水力式集矿机构水池试验

Fig.10 Pool test of small hydraulic mining mechanism

表 1 小型水力式集矿机构水池试验数据

Table 1 Pool test datas of small hydraulic mining mechanism

序号	水压/kPa	水泵转速/(r/min)	液压功率/kW	模拟结核采集率/%
1	85	2 870	10.6	90
2	78	2 460	6.9	85
3	69	2 310	5.7	80
4	58	2 170	4.9	75
5	55	2 110	4.5	73

试验结果表明,模拟结核的采集率与水压及液压功率成正比,水压与模拟结核采集率的结果与仿真结果基本吻合。当采集宽度 0.3 m、消耗功率为 4.9 kW 时,主管路水压为 58 kPa,模拟结核采集率为 75%,满足设计要求。

3.2 海上试验

为验证采集功能,将研制的小型水力式集矿机构安装于履带底盘上,开展多金属结核采集功能的海上试验验证。小型水力式集矿机构海上试验如图 11 所示,搭载某航次在水深超过 5 000 m 的某海域完成海上采集功能验证。试验过程中成功完成海底多金属结核采样,采集结核 19 kg,结核样品如图 12 所示,验证了该集矿机构具备良好的采集功能,满足考核指标。

图 11 小型水力式集矿机构海上试验

Fig.11 Offshore test of small hydraulic mining mechanism

图 12 采集的多金属结核样品

Fig.12 Collected samples of polymetallic nodules

4 结论

(1) 为满足科考船舶的搭载要求,采用单个水泵集中为捕捉喷嘴和输送喷嘴供水的结构设计方案,设计了小型水力式集矿机构,并确定了喷嘴参数。

(2) 采用 CFD-DEM 软件的对小型水力式集矿机构的流场特性和采集率进行分析,在捕捉前喷嘴内径为 9 mm、捕捉后喷嘴内径为 7 mm、输送缝宽为 3.5 mm 的喷嘴参数条件下,90 kPa 初始水压能获得较好的采集效率。

(3) 水池试验结果表明,当采宽为 0.3 m、消耗功率为 4.9 kW 时,主管路水压为 58 kPa,模拟结核采集率为 75%,满足设计要求;海上试验采集了 19 kg 的多金属结核,验证了该集矿机构具备良好的采集功能。综合来看,小型水力式集矿机构设计采用单水泵供水,可降低搭载设备的功率及质量,该设计方案合理可行,可为类似集矿机构的设计提供参考。

参考文献(References):

[1] 李家彪,王叶剑,刘磊,等.深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2022,1(2):92-102.
LI Jiabiao, WANG Yejian, LIU Lei, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology[J]. Science and Technology Foresight,2022,1(2):92-102.

[2] 彭建平.多金属结核水力集矿机构离地高度控制研究[J].矿冶工程,2020,40(3):20-23.
PENG Jianping. Research on controlling ground clearance of hydraulic collectors in polymetallic nodules mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2020,40(3):20-23.

[3] 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.

[4] 李俊.水力式集矿机构注水软管变形阻力矩分析[J].矿冶工程,2019,39(6):5-9.
LI Jun. Analysis of deformation resistance moment of water hose in hydraulic collector mechanism [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2019,39(6):5-9.

[5] 陈时平,卓晓军,李俊,等.海底多金属结核水力式集矿系统产生的污泥浓度分析[J].矿冶工程,2023,43(3):16-19.
CHEN Shiping, ZHUO Xiaojun, LI Jun, et al. Concentration analysis for plume caused by hydraulic collecting system in deep-sea polymetallic nodules mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(3):16-19.

[6] KIM S, CHO S, 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.

[7] KIM S, CHO S, LEE T H, et al. Identification of marginal and joint CDFs using bivariate type I interval multiply censored data for RBDO of a pick-up device of a pilot mining robot[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021,63(4):1989-2007.

[8] 金永平,董向阳,万步炎,等.深海金属采矿装备与技术发展现状及分析[J].煤炭学报,2024,49(8):3316-3334.
JIN Yongping, DONG Xiangyang, WAN Buyan, et al. Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and technologies [J]. Journal of China Coal Society,2024,49(8):3316-3334.

[9] 王翠,丁一,罗阳,等.深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望[J].应用海洋学学报,2024,43(3):473-484.
WANG Cui, DING Yi, LUO Yang, et al. Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes [J]. Journal of Applied Oceanography,2024,43(3):473-484.

[10] 彭建平.中国深海多金属结核采矿车研究的发展[J].矿山机械,2020,48(3):8-11.
PENG Jianping. Development of research on deep-sea polymetallic nodule mining vehicles in China[J]. Mining & Processing Equipment,2020,48(3):8-11.

[11] 康娅娟,刘少军.深海多金属结核开采技术发展历程及展望[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2848-2860.
KANG Yajuan, LIU Shaojun. Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10):2848-2860.

[12] 夏剑锋,王贵满.深海采矿水力式集矿模型机[J].矿冶工程,1996,16(4):18-21.
XIA Jianfeng, WANG Guiman. Hydraulic model machine for deep sea mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1996, 16(4):18-21.

[13] 唐红平.集矿机构和破碎机的改进与完善[R].长沙:长沙矿冶研究院,2006.
TANG Hongping. Improvement and perfection of ore-collecting mechanism and crusher[R]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, 2006.

[14] 官雷,张东宽,夏玉超,等.深海多金属结核采集方式及其结构参数比较分析[J].海洋技术学报,2021,40(5):62-69.
GUAN Lei, ZHANG Dongkuan, XIA Yuchao, et al. Comparative and analysis of deep-sea polymetallic nodules collection methods and structural parameters[J].Journal of Ocean Technology, 2021, 40(5):62-69.

Design of Small Hydraulic Mining Mechanism for Polymetallic Nodules Based on CFD-DEM

LI Jun[1,2], *CHENG Yangrui*[1,2], *ZENG Xuan*[1], *PENG Jianping*[1]
(1.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In order to meet the power and quality requirements of the equipment carried by the scientific research ship, a small hydraulic mining mechanism for polymetallic nodules was developed using a single pump to supply water for the capture nozzle and the conveying nozzle. CFD-DEM software was used to carry out the simulation analysis of the flow field characteristics and the collection rate of small hydraulic mining mechanism, and the pool test and the sea test were carried out. The pool test results show that when the collection width is 0.3 m, the collection power is 4.9 kW, and the water pressure of the main pipeline is 58 kPa, the collection rate of simulated nodules is 75%, which meets the design requirements. A total of 19 kg of polymetallic nodules are collected in the sea test, which verifies that the mining mechanism has good collection function and can reduce the power and quality of the equipment. The research results can provide reference for the design of similar mining mechanism.

Key words: Small hydraulic mining mechanism, Polymetallic nodules, Deep sea mining, CFD-DEM