

深海金属采矿装备与技术发展现状及分析

金永平^{1,2}, 董向阳^{1,2}, 万步炎^{1,2}, 刘德顺^{1,2}

(1. 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南科技大学海洋资源探采技术与装备湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201)

摘要: 金属矿产资源是保障国家经济发展与建设的重要物质基础。在陆地稀有金属供应初显疲态的形势下, 世界各国纷纷将资源战略瞄向稀有金属蕴藏丰富的深海。开展深海采矿装备与技术的研发攻关, 是实现深海矿产资源高效开采的关键。首先, 系统论述深海采矿科学技术与装备发展历程, 重点分析拖斗式、连续绳斗式、自动穿梭艇式、管道提升式技术特点, 总结梳理国内外深海采矿车、深海扬矿装备、深海采矿船3类装备的发展现状; 然后, 以当前研究与发展动态为基础, 围绕采矿、运输、支撑平台3个领域, 梳理采集技术、牵引驱动技术、轨迹与规划技术、羽流演变评估技术4项采矿技术上取得的成效和进展, 总结气力提升技术、水力提升技术、过流部件保障技术、力学行为分析技术4项运输技术的研究动态, 探讨收放技术、升沉补偿技术2项支撑平台技术的研究方向及进展; 最后, 鉴于经济、环境、装备与技术3个维度目前的发展形势, 提出深海采矿技术科学目标由装备可控转变为绿色采矿、安全采矿, 为应对未来深海采矿装备与技术发展面临的环境与安全挑战, 分析提出有待于聚焦研究的关键科学与技术问题, 以此凝练出绿色行进采集技术、超深安全扬矿技术、全局协同保障技术、数字环境评估技术4项亟待突破的关键技术, 以期为我国深海采矿装备体系研究与建设提供参考。

关键词: 深海金属采矿; 矿产资源; 采矿装备; 采矿技术; 运输技术

中图分类号: TD857 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)08-3316-19

Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and technologies

JIN Yongping^{1,2}, DONG Xiangyang^{1,2}, WAN Buyan^{1,2}, LIU Deshun^{1,2}

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Marine Resources Exploration Technology and Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Metal mineral resources are critical materials for the world economic development. In a situation of weak supply of terrestrial rare metals, many countries are expanding the direction of resource extraction from a land-based approach to a land-sea approach, with an increased emphasis on marine resource extraction. Aiming at the problem of efficient exploration of deep-sea resources, it is crucial to investigate the equipment and technology used in the deep-sea mining (DSM). First, the history of scientific technologies and equipment for DSM is systematically discussed, and the technical characteristics of submarine-drag bucket mining system, continuous line bucket mining system, shuttle vessel min-

收稿日期: 2024-03-05 修回日期: 2024-06-11 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0220

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC2805901, 2023YFC2811102); 国家自然科学基金资助项目 (52275106)

作者简介: 金永平 (1984—), 男, 贵州黎平人, 教授, 博士。Tel: 0731-58290059, E-mail: jinyongping@hnust.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

ing system, and pipe lift mining system are analyzed, the development and current status of the three types of deep-sea vehicles, transport equipment, and mining vessel are summarized. Subsequently, on the basis of current research and development trends, the research developments on the technologies for DSM equipment are synthesized in three areas of mining, transportation, and support platforms. The progress and achievements of four major mining technologies have been reviewed, i.e., harvesting, traction-drive, tracking-planning, and plume evolution assessment. Research developments in four transport technologies are summarized, including pneumatic lifting technology, hydraulic lifting technology, transition parts assurance technology, and mechanical behavior technology. Research direction and progress of two support platform technologies are discussed, involving the launch and recovery technology and heave compensation technology. Finally, the key scientific and technical issues are analyzed and the studies are carried out to meet the environment and safety challenges in the future. It is proposed that four key technologies need to have a breakthrough, which consist of green travel and collection technology, ultra-deep safe mine lifting technology, global synergistic safeguard technology, and digital environmental assessment technology, given the current state of development in the three areas of economy, environment, equipment and technology, as well as the scientific goals of deep-sea mining technology, which is to shift from equipment controllability to safe and green mining. These initiatives provide a theoretical support for the research and construction of the DSM equipment manufacturing system.

Key words: deep-sea metal mining; mineral resources; mining equipment; mining technology; transportation technology

随着陆地矿产资源长期开采利用而趋于枯竭,陆地金属矿产资源供给初显疲态,世界各国将矿产资源开发也从陆地扩展至海洋^[1]。更为特别的是,一方面,全球高端装备制造行业兴起,航天航空、新能源、医疗等领域需要大量的铜、镍、钴等金属,尤其是稀有金属等战略性资源需求量激增,国际能源机构(IEA)根据2050年净零排放(NZE)预测铜、镍、钴的需求增长量为40%、168%、372%^[2];另一方面,在海洋海底蕴藏着丰富的战略性矿产资源,全球三大洋富钴结壳潜在资源量为2 162亿t,全球新火山脊上多金属硫化物资源储量6亿t,太平洋沉积物中稀土资源量相当于陆地储量的800~1 000倍,东太平洋CC区多金属结核储量高达210亿t,而这些矿产资源大多都赋存在水深1 000 m以上的深海海域。这样,世界各国纷纷将资源战略瞄向稀有金属蕴藏丰富的深海,以期开发利用深海矿产资源来解决日益紧迫的高端装备制造材料需求问题^[3-5]。

深海采矿装备是开发海洋矿产资源、解决全球资源供给所必备的技术手段。自20世纪50年代末认识到海洋矿产资源经济价值以来,世界各国便瞄准海洋矿产资源加紧采矿装备及其技术研究。目前,虽然世界各国根据矿产资源赋存特征及结构特点,研究与开发出多种多样的深海采矿装备^[6],但是由于海洋矿产资源开采技术、经济性制约,至今仍然未进入商业化开发阶段。而且,随着海洋生态环境受到高度关注,海洋矿产资源开发的环境约束更为凸显,绿色安全采矿成为世界深海采矿装备与技术研究及开发面临的

重要研究课题^[7-8]。本文将在回顾国内外深海采矿技术装备发展历程基础上,梳理国内外深海采矿装备与技术发展及其现状;然后,综合论述采矿、运输、支撑平台3个方面的深海采矿关键技术研究动态;最后,分析提出深海采矿装备研发与未来开采需要聚焦研究的关键科学与技术问题,以期为我国深海采矿装备研发和自主技术体系建设提供依据。

1 深海采矿科学技术与装备发展历程

1.1 深海采矿科学技术发展历程

自1957年MERO^[9]首次评估深海矿产资源经济性以来,为实现深海矿产资源采输,世界各国提出了多种深海采矿技术。1960年,MREO提出拖斗式采矿系统,如图1(a)所示,由母船、拖缆、拖斗组成,海面母船通过拖缆拖动海底拖斗进行采矿作业。因此,操作难度大、可控性差、效率低,且矿产资源提升成本高,并不具备商业应用价值。

1967年,根据疏浚装备工作原理,日本孟田善雄提出了连续绳斗式采矿系统,图1(b)显示了船载的缆绳动力装置驱动间距为20~30 m的串联铲斗环状链,当某个铲斗拖过海底时采集到矿产,下一个铲斗重复操作,然后依次提升至母船,以此循环。单船连续绳斗式由于使用8 km托缆连接船首、船尾,容易发生拖缆缠绕事故。于是,法国提出两船相距1 000~2 000 m的双船连续绳斗式采矿系统,缆索长度至少为水深的3倍,实施难度大。无论是单船还是双船的方式,铲斗采集轨迹均难以控制,容易发生矿产泄漏,

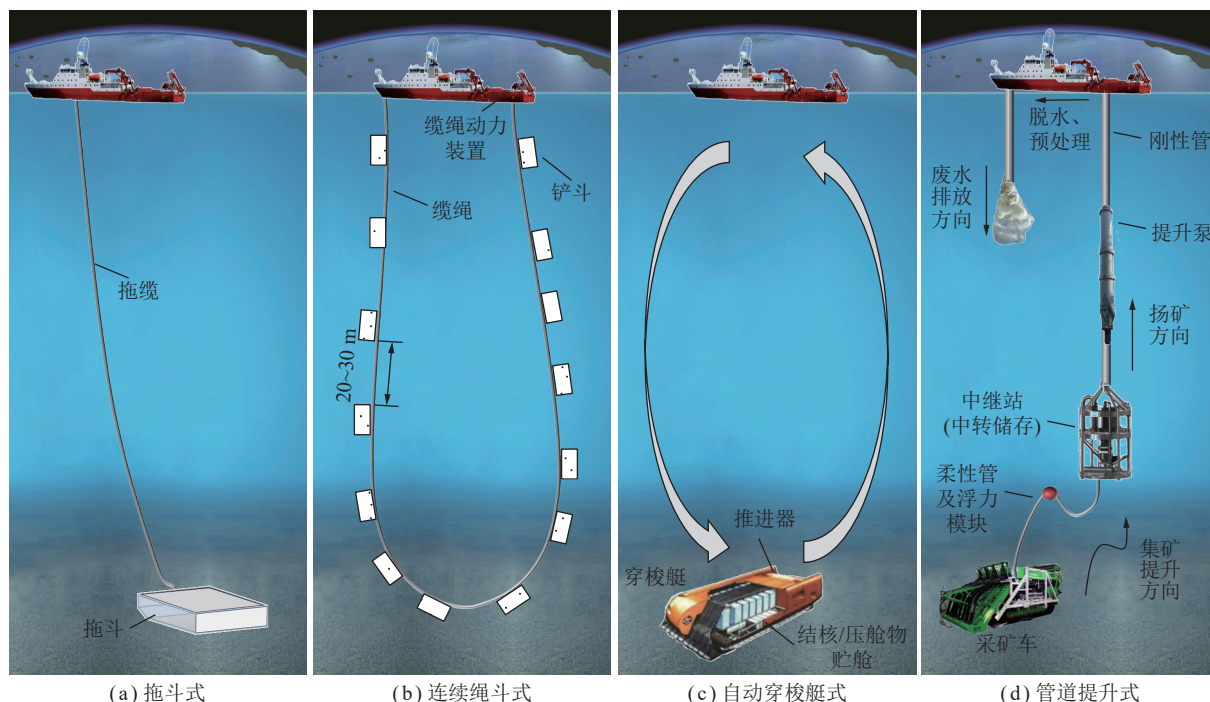


图 1 深海采矿科学技术

Fig.1 Deep-sea mining science and technology

并不能满足深海商业开采要求。

1979 年, 法国提出自动穿梭艇式采矿系统, 如图 1(c) 所示。穿梭艇在海面时, 利用压舱物和自重下潜, 到达海底采矿时, 采集矿产需抛出等质量的压舱物, 在压舱物全部抛完前停止采矿, 然后抛完压舱物并借助推进器浮至海面, 卸下矿产并补充压舱物, 以此循环。该系统共包含矿物采集系统、压载系统、推进和浮力控制系统。虽然具备良好的可控性、机动性, 但由于电力供应难, 当时技术并不足以解决动力问题, 商业前景渺茫。

上述采矿科学技术均有缺陷, 并不能满足长期作业、装备可控等商业开采要求。在 20 世纪 70 年代, 根据陆地矿浆管道运输原理, 国外财团提出了管道提升式开采方案, 主要装备分为深海采矿车、深海扬矿装备、深海采矿船。作业过程如图 1(d) 所示, 采矿车在海底采集到金属矿产, 并通过软管输送到中继仓中转储存, 提升泵将储存的矿浆提升至海面采矿船, 并在船舱内完成预处理与储存, 沉降海水循环入海。该技术方案的深海采矿车具备行走功能, 可以实现连续采矿; 扬矿管道、中继仓和提升泵联动可进行矿产输送调节, 实现连续稳定输矿; 矿产在采矿船舱内完成沉降, 沉降海水循环入海, 实现连续的矿物预处理。

综上所述, 深海采矿技术发展历程为拖斗式、连续绳斗式、自动穿梭艇式、管道提升式。管道提升法从连续采矿、连续输矿、连续预处理 3 个方面, 为长期作业提供了基本保障; 各组成部分相互独立, 基本

解决了操作可控的问题。因此, 管道提升法最具开采潜力。目前, 3 个主要子系统的研发与海试在持续进行。

1.2 深海采矿车

深海采矿车负责采集海底矿产资源, 并输送至中继仓。多金属结核主要分布在被沉积物覆盖的深海盆地, 深海稀土与多金属结核产出环境相近; 富钴结壳主要分布在海山、岛屿斜坡和海底高地; 多金属硫化物分布在洋中脊和弧后盆地的热液喷口区; 各类矿产资源赋存环境有显著差异^[10]。因此, 深海采矿车良好的行走性能成为保证商业开采的先决条件。从 20 世纪 70 年代开始, 陆续研发出拖曳式、自行式等深海采矿车。其中, 拖曳式难以控制, 依照预定路线采矿难, 避障难, 该行走方式被逐渐放弃。自行式分为阿基米德螺旋式、螺旋桨推进式和履带式。国外多项海试证明拖曳式、阿基米德螺旋式、螺旋推进式采矿机难以适应稀软底质环境^[11]。其中, 阿基米德螺旋式存在沉陷量大、牵引力小、转弯困难、易打滑等问题。螺旋推进式牵引力小, 容易导致结核被扬起沉积物埋没。因此, 近 30 a, 针对不同的矿产资源, 各个国家的组织机构主要进行了履带式采矿车研发, 如图 2 所示, 近 5 年, 多家组织机构进行研发和海试, 研究速度明显加快。

1.2.1 多金属结核采矿车

针对多金属结核矿区地势相对平坦、底质稀软、赋存深度深等特点, 国内外众多团队开始了长期探索



图 2 国内外研制的履带式系列采矿车

Fig.2 Caterpillar series mining vehicles developed domestically and internationally

和研究。首先,为解决稀软地质沉陷问题,已开发出渐开线齿形、人字齿橡胶履带、锋利三角形齿轨以及“鲲龙 500”船心底均有利于采矿车在稀软底质行进。其次,为提高集矿效率,韩国 MineRo II 号采用对称式结构,即在两侧布设 2 个相同的机械和液压系统模块,便于调节集矿宽度,以提高集矿效率^[12-13]。

然而,采矿车在深海长期作业,必须具备高可靠性。2021 年 NIOT 采矿车在 5 270 m 水深 1~4 °C 深海环境工作时间超过 2.5 h,行走超过 120 m,验证了履带底盘、液压动力系统、仪器仪表等仪器仪表的可靠性。2021 年,上海交通大学“开拓一号”在 108、246、968 和 1 305 m 的海试中,验证了大功率液压、高压电和信号传输等技术的可靠性,为长期作业提供保障。

最后,针对集矿过程对海底环境造成的严重干扰问题。2021 年,全球海洋矿产资源公司基于商用采矿车的 1/3 规模的 Patania II 号,在 4 500 m 水深进行了环境测试,并提交全球首个国际海域多金属结核开采环境影响报告。为减小行进过程中不必要的环境扰动,上海交通大学研制的“开拓一号”突破了大曲率路径自主行进、小半径原地掉头等技术。2022 年开发出浮游式“曼塔号”平台,是国际上首台浮游行进的集矿技术验证平台,质量 4.2 t,行进速度为 0.2~0.6 m/s,可搭载小型集矿头进行多金属结核采集,作业最大水深超过 5 600 m,从根源上解决采矿车与稀软底质作用导致的沉积物扩散问题。

1.2.2 富钴结壳采矿车

针对富钴结壳地形起伏大、厚度不均匀等特点,富钴结壳采矿车主要研究重点为富钴结壳自适应剥离与采矿头随动技术。2016—2019 年,长沙矿山研究院有限责任公司先后进行螺旋滚筒采矿头、2 000 m 级规模取样、综合采掘等一系列海试,研制的“鲲龙 2000”具备声学测厚、微地形采矿等功能。2019 年,中国科学院深海科学与工程研究所研制的采矿车长宽高尺寸为 4.3 m×2.3 m×1.6 m,空气中质量为 4.1 t,具备微地形、切削厚度自适应等技术,并完成了 2 490 m 水深海试。

1.2.3 多金属硫化物采矿车

多金属硫化物采矿车应具备崎岖地形下硫化物切割和收集能力。鸚鵡螺矿业公司 (Nautilus Minerals) 和海王星矿业公司 (Neptune Minerals) 率先开展研究,鸚鵡螺矿业公司研发了采矿装备包含了辅助采矿车、主采矿车、收矿车,海王星矿业公司开发了采矿车和遥控电视抓斗两套采掘设备。2017 年,鸚鵡螺矿业公司和 JOGMEC 分别完成了多金属硫化物采集,标志着国外已率先验证硫化物切割收集技术。JOGMEC 硫化物采矿车采用破碎收集一体式设计,与其研制的富钴结壳采矿车的结构基本相同,主要为尖端刀头不同。2016 年至今,中国船舶集团突破对旋切削和水射流式多金属硫化物采掘、自适应行走等多项硫化物开采技术。2023 年在连云港进行了首次浅海试验,采矿车外形尺寸为 8.2 m×3.9 m×3.5 m,开发的摆动铰

削式挖掘头解决了硬矿挖掘难题。从上述研究发现,多金属硫化物采矿车分为一体式和分体式。若采用分体式,采矿车类型多、数量多,可能增加对海底环境的扰动。

1.2.4 深海稀土采矿概念车

深海稀土作为深海第4种开采潜力巨大的金属矿产,国内外相关研究处于起步阶段。2012年,英国南安普顿大学提出了铰吸式履带稀土采矿概念车^[2]。2013—2015年,日本设计出生产量为3 500 t/d的深海稀土开发方案,并发现旋转型和桨型钻取刀头适合深海稀土开发。此后,又提出了基于文丘里效应的水力采集新方案^[14]。

1.3 深海扬矿装备

在采矿车完成采集并输送到中继站后,深海扬矿装备负责将中继站中的矿产颗粒与海水混合物输送至采矿船。1978年,海洋管理公司(OMI)、海洋矿业协会(OMA)海试证明了水力、气力提升方案具备技术可行性^[15]。随着海试发现,气力装备运输效率低、且部件质量大。因此,水力式扬矿装备发展迅速。

自上世纪以来,扬矿提升方案已发展成为提升泵—中继仓的形式,提升泵负责将矿产从深海提升到海面,其设计制造水平关系到深海采矿效率。离心泵最具应用前景,其工作原理为通过叶轮叶片离心力、泵内压力、速度场的变化,将机械能转换为液压能。海试常用蜗壳泵和空间导叶式离心泵,如图3(a)所示,每个蜗壳泵都由独立的电机驱动,串联的蜗壳泵由于弯管的存在,将矿浆的流动方向由轴向改变为垂向,从而增加了压力损失,甚至可能引起管道堵塞和回流障碍;空间导叶式离心泵由单电机驱动控制,多级叶轮和空间导叶串联,空间导叶将上一级叶轮出口的矿浆输送到下一级叶轮,如图3(b)所示。提升泵技术最初掌握在德、日、法、加等国。1978年,OMI使用的提

升泵流量达到500 m³/h,工作压力为3 MPa,功率为800 kW,扬程为265 m,但发现泵内磨损较为严重。1986年,日本在进行8级提升泵研究时发现,泵停止后矿浆颗粒流动不顺畅。近年来,鸚鵡螺矿业公司研制了流量为409 m³/h,压力为45.5 MPa的矿用隔膜泵,性能虽已接近商业开采要求,但也发现泵磨损失效及回流能力不足而造成流道堵塞等问题。20世纪90年代,我国开始了空间导叶式离心泵技术重点攻关。“十五”期间,长沙矿冶研究院设计了泵长4.6 m,外径0.93 m的二级提升泵,并进行了清水、矿浆的性能验证试验。2016年,我国研制出高比转速五级提升泵,结核输送量可达50 t/h,发现泵停止后粗粒矿物存在回流平稳性问题。2018年,中南大学与长沙矿冶研究院有限责任公司分别研制改进六级提升泵,流量420 m³/h,额定液压扬程为270 m。上海交通大学针对4 000 m级提升泵的泵级优化设计研究发现,能耗与产能均与泵级数正相关。总体来说,国内外已掌握提泵制造技术。

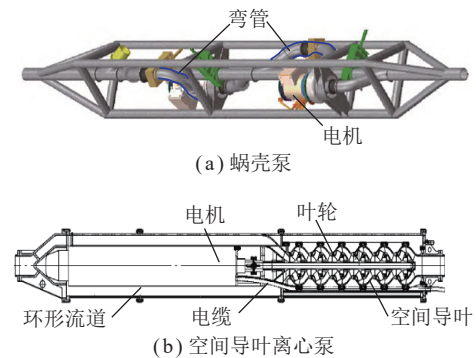


图3 深海提升泵^[16]

Fig.3 Deep-sea lifting pump^[16]

升泵装备发展与提升泵的研究进展息息相关,近10 a国内外主要的扬矿装备海试,见表1。2015年,韩国KIOST、KRISO联合进行了1 200 m水力扬矿

表1 近10 a国内外深海扬矿装备发展现状

Table 1 Development status of deep-sea lifting equipment at home and abroad in the past ten years

时间/年	参与国家组织及牵头单位	研究内容	水深/m	备注
2009	韩国/地质资源研究院(KIGAM)	模拟结核全软管水力提升系统	100	生产能力为30 t/h
2015	韩国/海洋科学技术院(KIOST)、 韩国/海洋工程研究所(KRISO)	水力提升系统海试	1 200	提升泵和中继仓测试
2016	中国大洋协会(COMRA)	我国首套多金属结核采矿系统	1 000 m级	可扩展为3 500 m
2016	长沙矿冶研究院有限责任公司(CRIMM)	输送系统单体海试	304	结核运输能力50 t/h
2017	日本/石油天然气金属矿物资源机构(JOGMEC)	水力提升试验	1 600	—
2021	大连理工大学(DLUT)	“长远号”智能输送装备海试	500	额定体积分数超过11%,最大流量356 m ³ /h
2021	中国大洋协会(COMRA)	多金属结核水力提升全系联动	1 306	流量420 m ³ /h,额定液压扬程为270 m
2022	加拿大/金属公司(TMC)	多金属结核运输	4 300	运输能力86.4 t/h

装备海试,主要测试了提升泵和中继仓的性能。2016年,长沙矿冶研究院有限责任公司进行了扬矿装备单体海试,装备总长 638 m,布放水深 304 m,结核输送量达到 50 t/h。2017年,日本 JOGMEC 在水深 1 600 m 的冲绳海域成功提升多金属硫化物^[17]。2021年,大连理工大学完成了“长远号”智能输送装备海试,有效推动扬矿装备在监测、识别、组拆方面的智能化发展。同年,中国大洋协会完成了国内首次采矿全系的联动海试,水深 1 306 m,共输运多金属结核 1 166 kg,标志着我国初步具备了多金属结核的深海输采能力。2022年,加拿大 TMC 公司在 4 300 m 水深进行了多金属结核的提升海试,输运能力达到 86.4 t/h。2023年,中国船舶集团七〇四所进行了提升泵-管-中继仓集成联动试验,验证了扬矿装备的协同性。

可以看到,扬矿装备研究已取得大进展,但存在矿产颗粒回流、堵塞、磨损等安全问题,也存在随着提升的矿产颗粒多,泵级越高,能耗越大的问题。因此,为了解决这类问题,有必要通过高新技术或基础研究为输运的安全可靠、效率提供保障,扬矿装备将朝着协同化、集成化、智能化的方向发展。

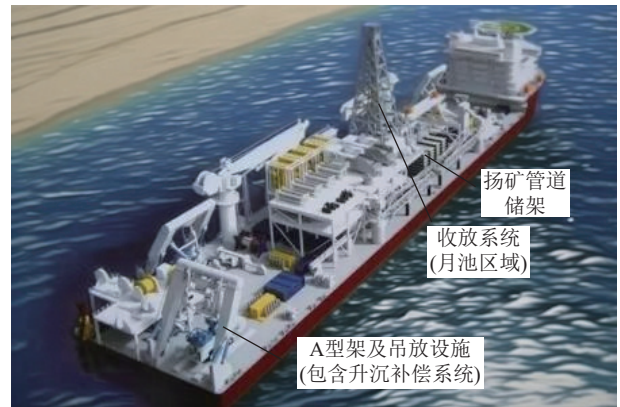
1.4 深海采矿船

深海采矿船是整个采矿系统的综合保障平台和控制中枢,需要处理由海底提升而来的矿物。此外,还要负责水下装备的布放回收,也要保障深海作业的稳定性。因此,船上搭载着 A 型架及吊放设施、收放系统(月池区域)、扬矿管道储架、升沉补偿等采矿子系统辅助深海采矿作业,详细结构如图 4 所示。

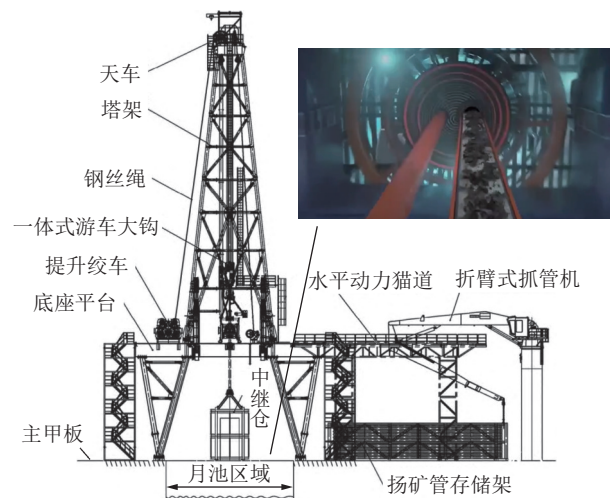
通常,采矿船在货船、钻井船等旧船基础上升级改造。TMC 公司联合 Allseas 公司将深海钻井船改造为 Hidden Gem 号采矿船,长 227.8 m,宽 42 m,通过加装 4 500 m 扬矿管道,使其具备开采多金属结核的能力,已入级美国船级社。经历“八五”到“十三五”持续的科技攻关,我国涌现出一系列科考船,我国船舶制造已摆脱被动局面^[18]。2018年,鸚鵡螺矿业公司委托福建省马尾造船股份有限公司建造,全球首制大型综合采矿船“鸚鵡螺新纪元”号(MW301-1#)出坞,装载能力达 39 000 t,具备 2 500 m 深海采矿作业能力。

1.4.1 收放系统

一般而言,采矿车和扬矿装备在水下的载荷达到 600~800 t。因此,有必要设计采矿专用收放系统,图 4(a)中的 A 型架及吊放设施包含 A 型架、伸缩止荡缆、绞车、复合缆、升沉补偿等设备,主要对采矿车进行布放回收;而图 4(b)收放系统(月池区域)主要收放中继仓和扬矿管道,系统还包含着储架和抓管机等设施进行辅助作业。“鸚鵡螺新纪元”号的收放系统



(a) 采矿船整体



(b) 收放系统(月池区域)

图 4 深海采矿船^[19]

Fig.4 Deep-sea mining vessel^[19]

的安全工作载荷为 3 100 kN,最大工作水深为 2 500 m。近些年,宝鸡石油机械有限责任公司研制出最大静载荷 4 500 kN 的深海采矿收放系统,作业水深 3 000 m,最大静载荷 4 000 kN,最大作业海况 5 级^[20]。

复合缆作为收放系统的重要部分,具有承载、电力传输、数据传输等功能。因此,复合缆必须具备耐高压、抗拉伸、高强度等特点。国外的深海复合缆制造水平高,复合缆供应商主要为 Amokabel 公司、Rochester 公司、Nexans 公司、Technip 公司等。国内复合缆生产制造商主要有江苏中天科技和宁波东方电缆、江苏亨通光电等公司。2013年,宁波东方电缆等单位研制国内首条 1 500 m 水深样缆,并于 2018 年交付使用。2021年,江苏中天科技完成非金属铠装复合缆关键技术验收。

1.4.2 升沉补偿系统

深海采矿装备为串联系统,受海洋复杂环境影响,水下的重数百吨的扬矿装备和采矿车随采矿船产生 6 自由度摇荡,而升沉运动难以消除。因此,采矿船上的升沉补偿系统可安设于采矿船与扬矿管道(或采矿

车)之间,其目标对象不同,安设位置有差异,但主要用于降低或抑制收放装备时升沉运动产生的动载荷,确保水下装备保持在目标位置,同时保持复合缆张力稳定。其中,被动式升沉补偿系统在船上升(或下沉)时,蓄能器内部压缩气体并储存能量(或蓄能器内部气体膨胀并释放能量),以此减小升沉运动的影响。而主动式不需要大型气液蓄能器,而是通过传感器的参数输入来控制补偿缸进而控制升沉运动。

20世纪70年代,海洋矿物公司(OMCO)为抑制深海采矿装备的升沉运动,设计出被动式升沉补偿系统,为升沉补偿系统设计提供参考。1991年,RETSCO公司发明半主动升沉补偿系统,减小了动力和空间需求。现阶段,升沉补偿系统的性能要求为低耗重载。2018年,宝鸡石油机械有限责任公司研制了180 t升沉补偿系统,最大载荷1 800 kN,最大补偿载荷1 200 kN,最大补偿行程4.5 m,为我国自主设计采矿装备的升沉补偿系统提供了案例参考。近些年,中国船舶集团有限公司第七〇四研究所也在积极开展升沉补偿系统技术攻关。

2 深海金属采矿关键技术研究动态

2.1 采矿领域关键技术

2.1.1 采集技术

采集技术主要分为集矿技术和剥离切割技术。多金属结核赋存在海底沉积物表层,采集时无需切割破碎。集矿技术包含机械式、水力式、水力-机械复合式等,如图5所示。机械式有滚筒铲斗式、链带齿耙式,均由于运动部件过多,导致集矿阻力大、集矿口

易堵塞、可靠性低。可通过应用响应面法(RSM),分析底质切割深度、集矿装置角度、牵引速度对集矿效率、耗能的影响,从而获得最优设计参数^[21]。水力式对海底环境扰动相对较小,环境适应力强,得到广泛使用。水力-机械复合式组合方式多样,典型方法为冲采式-齿链复合式,虽然功耗比水力式低,但其集矿参数难以确定。HONG等^[22]分析了底部压力分布特征和集矿效率的关系,为复合式集矿装备提供了设计参数指导。

水力式集矿装备分为吸扬式、附壁射流式、射流冲采式,如图6所示,提升原理不同,上升轨迹亦不同。吸扬式曾应用于OMA海试,其结构简单,但采集效率主要受到垂直受力影响。因此,吸扬式功耗大、效率低。ZHAO等^[23]通过分析垂直吸力与矿产颗粒运动的关系,提出垂直吸力系数为指标的水力集矿性能预测模型,用于表征结构参数与性能的内在联系。

附壁射流式在GSR、IHC、TMC海试中得到广泛应用,其工作原理为通过向曲面施加切向射流,在近壁面形成低压区,结核周围存在压力差,从而实现多金属结核的剥离、抬升、输送。因此,附壁射流式关键参数为射流流速,在集矿作业中,射流流速至少为结核沉降临界值的2.5倍。最大流速分布在射流中心线上,同一剖面的射流流速衰减快。当射流流速保持一定时,提高采集效率还可通过以下方式:①控制行驶速度。集矿过程需要响应时间,行驶速度过高导致采集效率降低^[2];②减小离底间隙。采矿头底部间隙越小,采集效率越高;③流速配合。当斜水射流冲击沉积床时,沉积床最上层坍塌,喷嘴射流速度过大,会

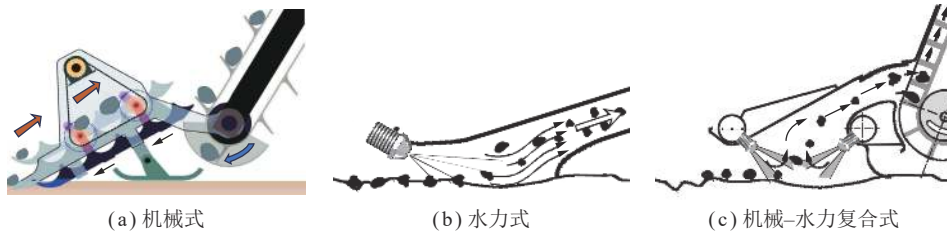


图5 多金属结核集矿方式

Fig.5 Polymetallic nodule collecting methods

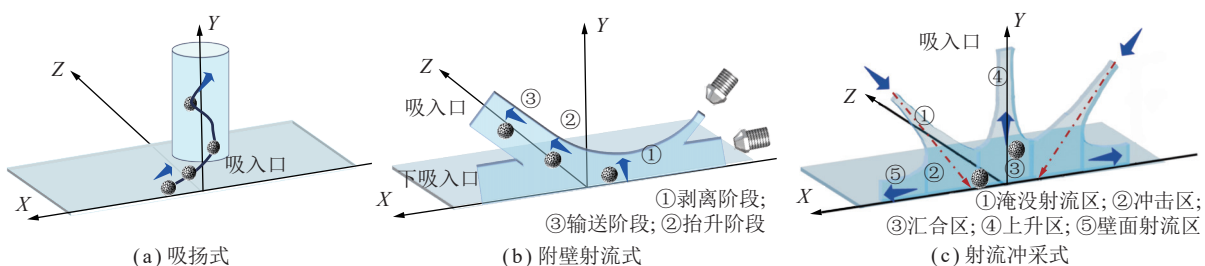


图6 水力式集矿提升过程

Fig.6 Hydrodynamic mineral collection and lifting process

增加侵蚀深度, 导致采集效率减小^[24]; ④ 提高升力。减小射流角度或凸曲面壁半径, 可有效提高装备升力指数^[25]。

射流冲采式曾应用于“鲲龙 500”, 该方法的颗粒剥离主要动力来源为射流区流体对海床的剪切力^[26]。射流高度变化易引起水流能量耗散, 从而改变射流底部压力; 射流底部侵蚀孔表现出自相似性, 射流速度影响侵蚀孔尺寸, 但不改变侵蚀孔形态, 其形态随射流高度、汇合区宽度变化^[27]。总体来说, 冲采流场分为 5 个区域, 淹没射流区、冲击区、壁面射流区、汇合区和上升区。

相比之下, 吸扬式集矿结构简单、采集效率低; 射流冲采式对海底水体及沉积物影响大; 附壁射流式的能耗低、流场扰动小^[28]。为提高射流效果, 可采用自振射流技术, 当频率高于 10 kHz, 可有效提升深海射流冲击效果, 以提高深海采集效率。目前, 深海自振射流的研究集中在射流调制及冲蚀行为, 尚未具备深海采矿应用水平。

在富钴结壳及多金属硫化物集矿前, 应将矿产资源剥离切割。相比于陆地上的水力法、热冲击法等, 滚筒式刀具切割较适合深海采矿。截齿作为滚筒式刀具传递剥离切割设备能量的重要部分, 应具备耐磨性好、能耗低、结构简单可靠等特点。由于镐型截齿所受弯矩小、作业截角小, 镐型截齿得到广泛使用。截齿的主刃面、截距、厚度等参数与矿产表面形态相互组合, 得出以下截割形式, 如掏槽截割形式、角状截割形式、平面截割形式、自由截割形式、重复截隔形式。截割形式结合镐型截齿的截割顺序和矿物裂纹扩展形态, 可将破岩过程分为 4 个模式, 加载模式影响破碎块度, 顺序加载模式存在独特断裂方式^[29]。随着矿物赋存水深增加, 切割效率和裂纹生长能力降低, 切割破碎过程中出现高变形现象。可通过光滑粒子方法, 将岩石切削过程中不连续属性转化为连续属性, 对局部体积变形速率进行估算^[30]。

一般而言, 破碎效率、能耗、块度是陆地剥离切割技术的主要评价指标。为进一步提升破碎效率和减小能耗, 应保证最少的截齿剥离尽可能大的切屑断面面积, 这与截齿的排列方式有关。此外, 还应增加镐型截齿与矿物的接触面积和单个滚筒的破碎区域面积^[31]。实际上, 由于海底矿产资源特殊的赋存状态, 海底富钴结壳厚度薄而不均、多金属硫化物地形崎岖且深度大。深海采矿的另一项重要指标是地形自适应剥离切割技术, 关乎采集效率、贫化率的控制。

为了增加深海采矿装备的长期可靠性, 必须减小采矿过程对采矿车的冲击载荷。因此, 有必要引入水

射流切割技术。影响水射流切割效果的主要参数为工作压力、喷射范围和喷射角度, 为保证良好的切割效果, 喷射范围应小于 4 倍的喷嘴直径, 喷射角度为 13°^[32]。但随着海水围压增加, 矿物抗压强度越大, 水射流切割能耗越大。因此, 可采用螺旋滚筒-水射流复合切割, 当水射流与刀具作用点重合, 可有效减小刀具的最小切削力。总体来说, 装备作业结构与动态参数关乎作业效率及可靠性, 为保证采集技术在深海采矿的应用水平, 还需进一步融合新型技术开展研究。

2.1.2 牵引驱动技术

牵引驱动技术表现为通过电缆持续供电为驱动控制系统、液压补偿系统提供动力, 从而驱使海底履带式采矿车。本质上, 牵引驱动技术核心是保证在不同矿区下的机动性。富钴结壳、多金属硫化物采矿车应优先具备良好的越障避障功能, 一般采用多条履带、铰接式车体、大角度接近角与离去角履带设计。而在多金属结核矿区, 应优先使采矿车在海底环境保持高牵引力。

海底岩土特征是采矿装备设计的最基本参数。采矿车以表层 15~20 cm 的深海底质作为承载层、牵引层, 深海底质具有大孔隙比、高含水率、高塑性、低抗剪强度、冲压蠕变等特征。其中, 冲压蠕变分为瞬间蠕变、非稳态蠕变、稳态蠕变 3 个阶段^[33]。深海底质与采矿车相互作用发生弹塑性形变, 导致采矿车沉陷, 引起动力和牵引力损失^[34]。通过建立弹塑性本构模型, 可明确沉陷量与牵引力的内在关系。实际上, 牵引力不仅受到沉陷压力影响, 还受到剪切力影响。应用 Hooke-Kelvin 流变模型, XU 等^[35]根据深海底质压缩和剪切流变特性, 推导出采矿车牵引力的计算公式。

牵引力损失还会影响采矿车动力学响应, 通过建立动力学模型可实现动态响应分析, 动力学模型分为单体动力学和多体动力学模型。单体动力学分析具有实时分析可行性、高精度等特点^[36]。利用多体动力学模型, 可建立复杂机械系统运动数学模型。

通过结构或系统设计可有效控制牵引力, 可采取两种方法。一是改变外形结构; 二是通过内部控制系统减小打滑率。仿生结构设计有利于增加牵引力, 可通过改变抓地齿的曲率半径、顶部到曲率变化点距离, 提高抓地齿最大牵引力^[37]。采矿车在深海底质上易打滑, 尤其是启动阶段的打滑率较高^[38], 打滑率增加导致牵引力减小。首先, 应实现打滑率等动力学预估, 即在获取液压系统状态参数后, 根据采矿车状态信息, 利用非线性参数模型预估打滑率。陈昱衡等^[39]提出

自适应无迹粒子滤波的参数测算方法,能有效控制打滑率的预估误差。然后,通过闭环控制系统调节和浮力调节实现打滑控制^[40],使采矿车保持高牵引力。总体来说,防沉陷与保持高牵引力是稀软海底采矿车驱动及行走的基础。

2.1.3 轨迹与规划技术

海底采矿车在探测矿产资源分布、海底地形、采矿车状态的同时,根据导航和声学定位修正轨迹。因此,采矿车轨迹与规划技术可分为路径规划技术、导航定位技术、轨迹控制技术。

路径规划技术是提高单位时间内采矿车覆盖效率的有效手段。在路径规划应以真实连续的海底矿区勘测数据重建矿区环境模型,而依靠传统方法采样样本数量不足以支持矿区模型构建,可采用非接触式三维结构光摄影探测、超声探针、激光多普勒流速测量等方法进行数据获取。在建立模型后,引入高鲁棒性规划算法,在解决障碍物导致的算法死区问题的同时,通过遍历路径规划性能评价函数生成可靠路径,即尽可能减少路径匝数和采矿车转向频率,以保证采矿路径与矿区的无缝覆盖。此外,路径规划所需设定参数众多,包含起始点、方位角、速度、行驶路径等。因此,还需要准确获取采矿车空间位置信息,并结合

路径偏差和陀螺累计误差动态修正。

深海中导航定位方法为声学、惯性、视觉、多普勒、组合导航定位系统等,声学 and 惯性导航定位系统应用较多。其中,声学导航定位系统中的声基线法分为长基线(LBL)、短基线(SBL)、超短基线(USBL)。相比之下,超短基线精度高、所需海底信标和接受发射器少,在海试中得到广泛使用^[41]。惯性导航定位通过测量加速度,积分解算出采矿车速度、位置、方向等参数,然后建立全量定位导航信息。

在导航定位的同时,采矿车姿态信息实时变化,海底采矿车轨迹控制应首先进行速度控制、方向控制。速度控制可以通过PI控制器、PID控制实现^[42-43],而PID速度控制与动力学模型协同控制,可有效提高控制效果。方向控制在速度控制的基础上实现,构建速度和方向控制模型需要考虑内外部阻力。同时,结合神经网络控制、专家智能决策形成采矿车轨迹控制方案。“开拓一号”应用超短基线法,通过嵌入式可编程控制器处理多传感器的实时数据,搭载卡尔曼滤波定位算法“ESKF-slip”,如图7所示,比其他ESKF和EKF算法精度更高,与USBL得出的轨迹最接近。在考虑打滑和沉陷的影响下,改善了编码器速度估计不准的问题,实现了采矿车轨迹的精准控制^[44]。

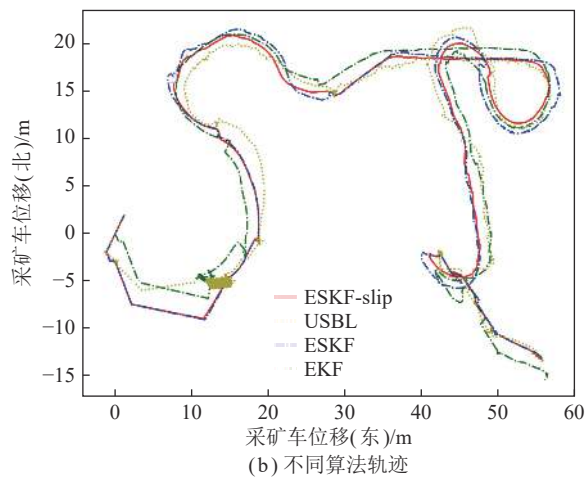
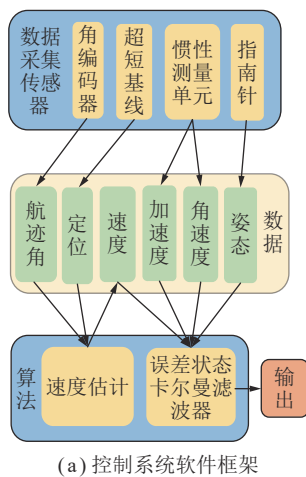


图7 “开拓一号”轨迹控制^[44]

Fig.7 “Pioneer I” trajectory control^[44]

因此,通过算法与系统相关模型、结构参数的优化,将路径规划、导航定位、轨迹控制等技术有机结合,才能实现真实采矿条件下的规划控制。

2.1.4 羽流演变评估技术

行进过程中,深海稀软底质在履带产生粘附现象,随着采矿车移动,沉积物被扬起。由于沉积物的沉降速度低,在尾流处形成羽流,沉积物羽流扩散范围可达几公里甚至数十公里。因此,羽流演变过程研究是评估环境影响的核心因素。

羽流演变随时间尺度变化,可以分为释放阶段、浮力驱动阶段、被动运输阶段,如图8所示。在释放阶段,惯性和湍流的影响起主导作用。在小尺度上(羽流产生时间 $t \leq 2$ s),尾流长度与羽流相对排出速度成指数增长关系,若羽流相对速度低于某一限值,采矿车尾流涡结构可能抑制羽流的横向扩散^[45]。然而,高雷诺数湍流尾流、出流产生的湍流射流会导致羽流发展恶化。

在中尺度上 ($12 \text{ min} \leq t \leq 28 \text{ min}$),羽流演变主要

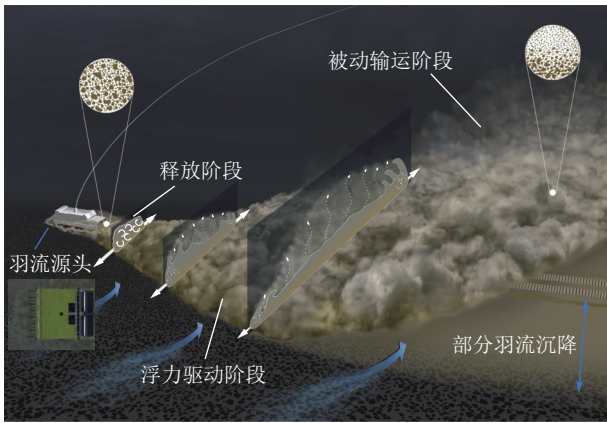


图 8 沉积物羽流演化过程^[8]

Fig.8 Transitions of sediment plume^[8]

处于浮力驱动阶段。浮力驱动阶段中负浮力驱动沉积物扩散, 迁移过程中与湍流、海底坡度相互作用, 多金属硫化物和富钴结壳破碎时, 可能产生浊流影响浮力驱动阶段。MUÑOZ-Royo 等^[46]通过动态、静态羽流原位测量方法, 获得羽流扩散范围与时间的关系, 也说明轨迹与路径规划, 影响着羽流扩散程度, 如图 9 所示 (图 9 中, x_c 为采矿车的水平距离, m; x_1^l 、 x_1^r 为与羽流锋面的距离, m; L 为羽流锋面之间的距离, m; L_{ad} 为采矿车轨迹与羽流质心的估计距离, m; D 为采矿车轨迹与泊系测量设备的距离, m; L_3 为海试中采矿车首次转弯的行驶距离, m)。并且发现存在 2%~8% 的沉积物扩散至海床 2 m 以上, 且数小时不沉降。

洋流运动具有远距离传播沉积物的能力。在大尺度下, 羽流处于被动运输阶段, 受到被动平流、湍流扩散、沉积物沉降等多种影响^[8]。此外, 羽流速度场特征主要受沉降速度和扩散参数的影响, 还受到速度结构、密度流和分层等多因素影响^[47]。

总体而言, 羽流演变及扩散研究主要集中在多金属结核采集过程中, 而海底各类矿区特征各不相同, 羽流演变过程有所差异。此外, 多金属硫化物还存在有毒物质释放与演变。因此, 针对羽流演变的进一步研究亟待开展。

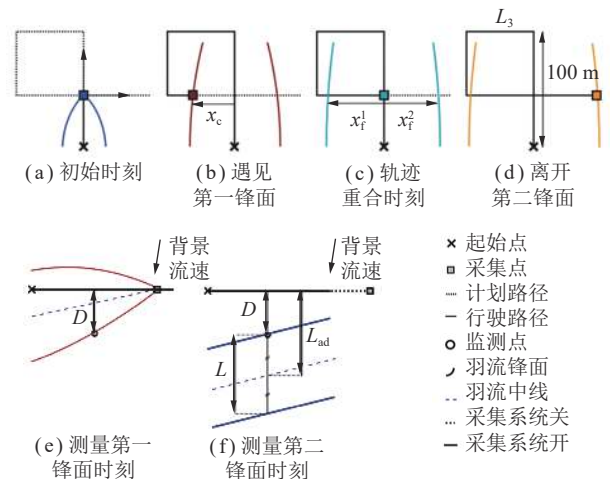


图 9 沉积物羽流测量^[46]

Fig.9 Sediment plume measurement^[46]

2.2 输运领域关键技术

2.2.1 气力提升技术

早在 1978 年, OMI、OMA 公司就率先应用了气力提升技术。气力提升过程遵循内部动量守恒的原理, 当压缩空气进入提升管道, 气体膨胀释放能量造成注气点上下方密度差异, 气液之间发生滑移现象, 致使提升管道内海水提升, 若固体矿产颗粒沉降速率小于海水提升速率, 可将固体颗粒运输至采矿船。气力提升过程中存在三相耦合, 流动介质形态多变, 呈现出 5 种状态, 分别为气泡流、弹状流、搅拌流、环状流、雾状流^[48], 如图 10 所示。一些研究表明, 弹状流、搅拌流利于矿产颗粒提升, 且弹状流和搅拌流之间存在过渡流, 气泡变形破碎产生压力波, 有效推动内部流动。环状流和雾状流的压差常等效为搅拌流, 环状流并不具备提升矿产颗粒能力, 且稳定性不足。高气体流速下, 气力泵性能主导因素是雾状流, 当雾状流厚度达到管径的 0.2 倍时, 保证了输出速率^[49]。

气力提升系统由活塞式空气压缩机或透平式压缩机供气, 进气方式和进气量影响运输效率。相同进气面积下, 同数量气孔的排布方式对液体流量与提升效率影响不大。若增加进气孔数量, 可以使气泡分布

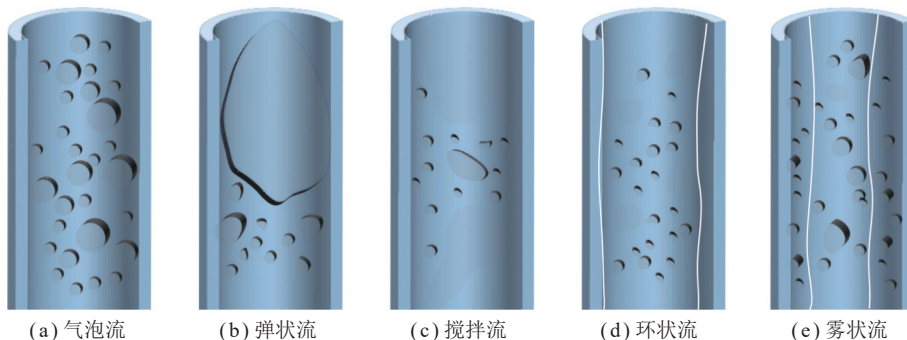


图 10 气力提升过程流态变化

Fig.10 Flow regimes in air lifting progress

均匀性提高,从而提高提升效率。另一方面,随着进气量增加,出口速度增加,输运效率提高。当出口速度稳定不变时,表明管道内气泡形态变化,气液状态从弹状流正转变为搅拌流^[50]。

此外,2022年,TMC公司通过多金属结核提升,验证了气体提升技术成为商业提升方法的可行性。总之,气力提升技术水下无运动部件,容易维修、故障率低,仍是管道提升法中有较高研究价值的关键技术。

2.2.2 水力提升技术

不同于气力提升技术,表1中大多数海试均采用水力提升技术,该技术以水和矿产细颗粒组成的均质浆体为介质,携带矿产粗颗粒组成的非均质浆体提升。提升过程实质为能量的转换过程,矿产颗粒由海底提升至海面需要克服压力损失,导致能量耗散,进而影响输运效率。

减小压力损失是提高输运效率的有效途径。压力损失包含管壁摩擦损失、局部压力损失和重力压力损失。颗粒形状、粒径、输运速度、输运体积分数等参数均影响压力损失,进而影响输运效率。其中,经典输运理论认为,颗粒粒径 d 和管道直径 D 输运比例符合 $d/D=O(10^{-1})$;WIJK^[51]认为当 $d/D \leq 0.26$ 时,经典的受阻沉降理论预测固相滑移速度在 $\pm 25\%$ 。当颗粒直径足够小时,小颗粒碰撞造成的压力损失小,故合适的粒径分布可以提高输运效率^[52]。对于矿浆最小输运速度,一般认为可以根据最大颗粒沉降速度和颗粒群速度来确定,若从工程角度考虑,矿浆最小输送速度是颗粒群浮游速度的2倍时较为合理。而考虑到管道内颗粒和流体的瞬时特性,临界流速下压力损失最小,因此,确定临界流速可以提高输运效率。对于输运体积分数,研究表明,商业开采条件下,水力提升管道内径不超过0.4 m,输运体积分数在12%~15%,输运效率可达40%以上^[53]。但是,当体积分数增加到一定程度时,对于输运效率的提升并不明显,反而大幅提升输运阻力。

提升过程的矿产颗粒构成非连续非均质流,粗颗粒与细颗粒有不同运动特性,进行矿产颗粒动力学和流体力学分析是研究水力提升技术的重要方法。目前,可依靠实验获取流体和颗粒运动特征或通过建立模型求解内部动态特征,实验测量法有CT、LDA、PDA等;数学模型有双流体模型(TFM)、离散颗粒模型(DPM)、流体拟颗粒模型(PPM)等。DPM模型中颗粒不发生碰撞,并且流体方程中没有考虑空隙率,可应用离散元素法(DEM),赋予颗粒-流体、颗粒-颗粒、颗粒-壁面的特性,以获得颗粒运动、碰撞、旋转等状态信息。研究发现,高体积分数低流速中颗粒运

动轨迹不稳定,是造成堵塞的重要原因^[54]。由于颗粒-颗粒、颗粒-壁面的碰撞,输运过程中不同阶段还会出现多金属结核降解现象^[55],严重的结核降解将降低矿产输运效率。实质上,水力提升技术的研究目标始终为通过各类方法技术提升输运效率。

2.2.3 过流部件保障技术

过流部件保障技术,从防磨损、防堵塞、防过大轴向力的角度出发,通过研究提升泵等过流部件结构参数与颗粒流动参数之间的内在关系,预测并解决提升泵等过流部件的磨损、堵塞、轴向推力问题,从而避免引发矿产输运过程安全问题。

一般而言,矿产颗粒冲击过流部件会产生磨损,不同部件磨损机制不同,磨损机制分为滑移切削、表面脆性裂纹、表面塑性变形以及表面脆性破碎^[56]。而不同位置的磨损程度也不同,是因为颗粒对泵的磨损首先发生在泵体外和叶轮区域^[57],然而当流量提高时,颗粒在压力面的冲击位置发生偏移,随着出流角变大,颗粒可能冲击导叶吸力面^[58]。因此,通过离散元实现提升泵磨损预测,并通过颗粒流动参数与过流结构优化可以实现防磨损。

根据海试结果,回流堵塞问题一直是扬矿技术中的痛点,以第1.3节我国研发的六级提升泵为研究原型,研究发现颗粒在叶轮和导叶处产生局部堆积效应,如图11所示。小颗粒可能聚集成大颗粒,表现出分层现象,易发生流道阻塞^[59],尤其是导叶和叶轮的接触面为堵塞的主要区域。当泵内浓度高于管道浓度,且体积浓度恒定时,颗粒粒径增加,分层现象逐渐消失,导叶涡的强度、尺度均增大^[60]。流动区域扩散和固液内部损失是导致泵能量损失的主要原因,而能量损失过大又是造成泵堵塞的原因之一。小颗粒的能量获取能力大于大颗粒,输运颗粒不易过大。根据提升泵防回流堵塞要求,最大颗粒不超过35 mm。相关研究表明,颗粒组成应该为大颗粒比细小颗粒多一个

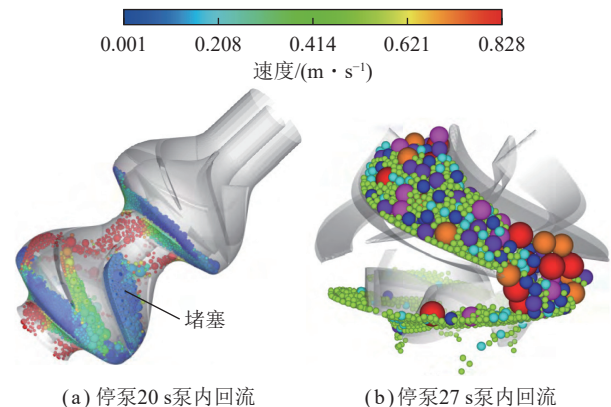


图11 10~40 mm矿物颗粒回流^[59]

Fig.11 10~40 mm mineral particles reflux^[59]

数量级^[61]。因此,预测与控制颗粒流动参数可实现防堵塞。

为了保证提升泵的安全运行,必须防止多级提升泵结构引起的过大轴向力。轴向力集中在提升泵中间段,由叶轮前后腔泄漏造成反向流动引起。过大轴向力引起提升泵失效,甚至引起轴承、轴封损坏。通过布设平衡装置或在叶片流动中心布设平衡孔,可有效减小轴向力。然后,基于压力分布与能力损失实现轴向力预测,并指导多级提升泵设计。除此外,轴向力与泵内介质有关,固液介质的轴向力比水介质的轴向力小^[62]。然而,即使是同一种深海矿产,由于组成成分差别大,引起轴向力也不同。因此,围绕平衡装置/孔的结构参数优化与不同介质下的轴向力预测,可有效防止过大轴向力。

综上,从实现预测与控制过流部件的磨损、堵塞、轴向力出发,不断完善流动保障技术,将提高数千米长距离输运过程安全性,是输运领域技术的关键一环。

2.2.4 力学行为分析技术

力学行为分析技术是扬矿装备安全稳定服役的关键,有必要通过采用求解时域控制方程和集中质量法等方法,对图 1(d) 中从柔性管到刚性管的各个装备的关键力学行为进行分析,主要研究船舶升沉运动下装备疲劳损坏问题。

在外部载荷的作用下,扬矿装备产生弯曲应力和弯矩将导致装备疲劳损伤,甚至断裂失效。随着升沉运动频率和幅度的增加,扬矿装备的动态响应分为稳定状态、过渡状态、局部动态屈曲状态。在稳定状态时,最大弯曲应力出现在管道底部;在过渡状态时,中继仓产生位移,如图 12 所示,其位移轨迹为圆形;局部动态屈曲状态产生极大的弯曲应力和横向位移。系统稳定之前,刚性管的顶部弯曲应力先增大再减小^[63]。同时,船舶运动的 6 个自由度运动中,均不影响刚性管所受弯矩^[64],刚性管道弯矩响应是非高斯过程,弯矩主要发生在顶部和底部^[65]。海流角增大,刚

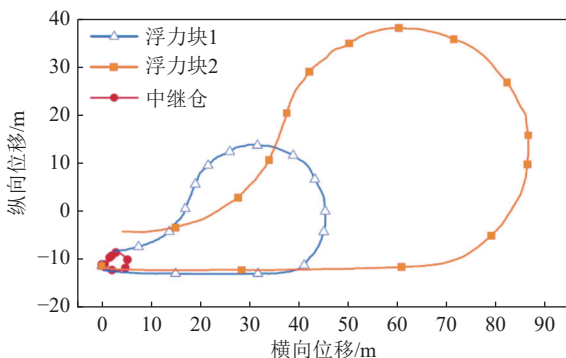


图 12 中继仓和浮力块位移轨迹^[43]

Fig.12 Trajectories of buffer and buoyancy^[43]

性管的最大弯矩减小,柔性管的最大弯矩增大,布设浮力块能有效抑制弯矩突变^[66]。

由于刚性管上端与船舶相连,船舶的升沉运动还引起刚性管发生纵向振动,呈现上小下大的现象^[67],即最大振幅在中继仓,当中继仓的质量较大时,纵向振动趋向于环形准周期运动^[68];当中继仓质量增加,刚性管固有频率减小,考虑到固有频率影响因素众多,可通过建立固有频率与无量纲参数的关系式,得到各阶固有频率^[69],为刚性管疲劳破坏研究提供参考。相关研究表明,刚性管上部振动频率高,易发生疲劳损坏。

洋流在刚性管两侧尾流区产生交替的漩涡脱落,刚性管产生涡激振动,属于非线性响应形式。涡激频率接近刚性管的固有频率时,涡激振动导致刚性管产生轴向共振^[70],加剧刚性管疲劳损伤。同时,内部流动会产生黏性摩擦力、惯性力等力改变涡激振动模态、频率,进一步加剧疲劳损伤。

综上,针对复杂载荷下扬矿管道的疲劳、变形、损坏等问题,通过力学行为分析技术对弯曲应力、弯矩、纵向振动、涡激振动等力学行为进行分析,为扬矿装备设计与制造提供参考,从而确保装备长期稳定服役。

2.3 支撑平台领域关键技术

2.3.1 收放技术

无论采用母船上的何种系统或方式进行收放作业,均存在共性问题:收放过程与装备可靠性问题。因此,收放技术围绕共性问题开展研究。极端海况波浪载荷可能对装备造成局部损伤,若实现安全收放,要确保收放技术具备安全可靠,应验证关键零部件在波浪激励下的可靠性^[71]。脐带缆作为连接支撑平台和水下装备的纽带,是可靠性验证的重点,也关乎数千米的深海采矿长期运行。

脐带缆受力与作业过程密切相关,下放作业可分为 3 个过程:入水过程、下沉过程、着底过程。入水过程实际上受气-固-液耦合作用,海水阻力抑制装备摆动角度和脐带缆张力^[72],中继仓入水后 0~300 m 属于高风险水深^[73]。在下沉过程中,扬矿管道具有大尺度特点,持续受到水动力影响,海洋内波上层流方向与海洋流同向不适宜进行收放作业。着底过程中,当采矿车陷入沉积物时,脱离沉积物需要较大的纵向拉力,可能损坏装备。

在收放过程中,脐带缆断裂成为阻碍了采矿车海试的一大因素,例如,Patania II 号在 2019 年海试中曾发生断裂。收放过程的可靠性研究发现,轴向张力极大影响脐带缆安全,脐带缆最大张力与下放速度成正

比^[74]。水深增加,脐带缆最大张力持续减小,并趋于平稳^[75]。实际上,绞车与脐带缆共同发展确保了收放技术的可靠性。研究表明,双驱绞车能有效控制脐带缆张力,从而改善脐带缆磨损问题^[76]。另外,脐带缆受到顶端轴向载荷、波浪载荷、底端扭转运动、弯曲等多因素影响,而多金属结核矿区深度达6 000 m,商业采矿车总质量将达到数百吨,提高了对脐带缆的机械性能要求。因此,作为收放技术的重要组成部分,脐带缆将朝着轻量化、抗拉伸、高强度的方向发展,以满足未来商业化深海金属采矿收放技术要求。

2.3.2 升沉补偿技术

升沉补偿技术可有效抑制采矿船升沉摇摆产生的大尺度管道纵向变形等问题,升沉补偿技术分为被动式、主动式、半主动式。被动式通过蓄能器气体补偿油缸压力,无需能耗,补偿滞后大、补偿效率低,其补偿效率与蓄能器容积、管道长度、直径有关^[77];主动式通过传感器测量组成补偿回路,以控制油缸或马达实现升沉运动补偿,结构复杂、能耗大、补偿效率高^[78];半主动式的能耗与补偿效率介于两者之间。

现阶段,研究多集中在主动式补偿系统。由于主动式补偿系统复杂,存在时滞性高、抗干扰性差、能耗大等问题。为提高系统抗干扰性、稳定性,可增设前馈控制、反馈控制、预测控制、PID闭环控制系统等^[79-80];为解决系统复杂引起的非线性时变特性,可增加非线性鲁棒位移控制器^[81],有效减小衰减负载位移,控制效果如图13所示,开启前后幅值有显著区别,在开启10 s后幅值仍能继续减小;为解决传统滤波器采集信号时存在相位超前问题,通过引入频率估计算法或者数据处理方法,设计自适应数字滤波器,可有效提高位移估算精度^[82-83]。为减小补偿系统装机功率高的问题,可采用二次调节静液传动技术,但可能出现低速控制不稳定现象。总体来说,系统多因素强干扰下的不确定性,造成了非线性系统的控制难题,同时也产生了能耗问题,而短时运动预报方法和能量回收为解决补偿精度、效率、能耗等问题提供新思路。总

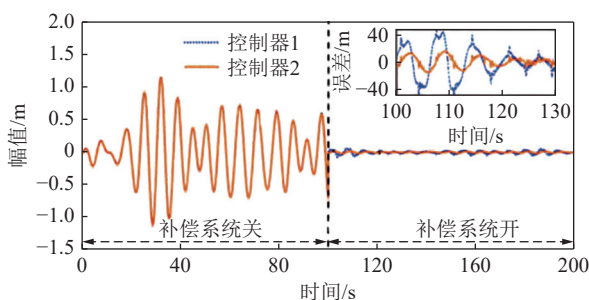


图13 升沉补偿负载位移对比效果^[81]

Fig.13 Heave compensation effect comparison^[81]

之,多技术方案融合下的升沉补偿技术将使6级海况短时安全作业和6 000 m级长期稳定作业成为可能。

3 科学目标与技术挑战

3.1 科学目标

与海洋科考装备相比,深海采矿装备属于工程装备,其发展必然受到更多方面的制约和阻碍。就深海采矿装备的经济性发展来说,随着鸚鵡螺矿业公司的退市,饱受争议的多金属硫化物商业化开采计划宣告失败,意味着环境问题的重视及解决程度直接影响商业开采进程;就深海采矿装备的环境科学研究而言,深海采矿装备环境引起多类污染,如沉积物、光污染、噪声等,2021年Patania II号海试后,全球首个国际海域的深海多金属结核开采环境影响报告问世,报告暴露出深海采矿装备污染问题较为严重,意味着深海装备与相关环境科学问题稍显薄弱。就深海采矿装备与技术研究来说,3个领域的关键技术共同组成了技术架构,关键技术与深海环境均有不同程度联系,装备与技术的发展和突破必然围绕极端环境展开,在具备短时6级海况开采能力的同时,高度集成装备与技术在高围压低温海水环境的安全性验证势在必行。所以,从上述经济、环境、装备与技术3个维度来看,深海采矿科学技术的研究目标,已由最初的装备可控,转向为绿色采矿、安全采矿。2个目标能否实现是评价装备与技术是否具备工程应用价值的标准。

3.2 面临的挑战

3.2.1 环境挑战

多金属结核开采要求:采集率不小于85%;含泥率小于15%。采集率与含泥率的要求,都说明了开发低扰动采集的必要性。

富钴结壳装备应适应地形坡度 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的地形。结壳平均厚度4 cm,厚度范围2~12 cm,富钴结壳物理力学特性与煤类似。因此,自适应截割技术成为采集效率与贫化率控制研究的切入点。

多金属硫化物矿区海底地形崎岖,采矿装备需要具备海底表层、浅表层、深层(20~30 m)的开采能力,虽然可借鉴露天矿分台阶法回采,但矿区物种丰富,采矿过程可能伴随有毒物质的释放。因此,环境友好型开采技术发展成为多金属硫化物能否开采的关键。

不仅如此,多因素的潜在环境影响贯穿资源开采全过程,除在海底开采时引发的环境问题,还应注意海面装备及相关作业流程对环境的影响。若尾矿废水处理不当,溶解的重金属破坏海洋生态环境,污染可持续60~70 a。废水排放深度为1 000 m时,可覆盖范围达1 500 km²,厚度超过4 cm。若将尾矿废水

排放至海底 25~50 m, 产生羽流状最少, 尾矿废水不会上升至 1 300 m 水深以上。不同矿区的尾矿废水排放应结合实际来判断, 综合式尾矿废水处理方法需要进一步优化^[84-85]。另外, 尾矿废水排放还会造成局部海水温度降低, 尾矿废水可以视为潜在的高品位冷源。相关资料显示, 尾矿废水能量回收利用具备可行性, 且热力学性能 Kalina 循环优于 organic Rankine 循环^[86]。加强废水能量回收研究及成果转化, 将产生可观的能量回收效益。

阳光无法照射到 1 000 m 深海, 从细菌到鱼类的物种发光是深海唯一的自然光源, 但采矿车作业配备强光源, 将会进一步干扰生物发光的生态功能。深海采矿装备噪声垂直覆盖范围广、频带宽、分贝高, 装备噪声可能屏蔽、掩盖深海背景噪声。由于海洋生物依靠声音探测环境及交流, 装备噪声严重破坏了濒临灭绝的鲸类生存空间^[87]。

3.2.2 安全挑战

商业开采要求为作业 1 200 h 不减产、连续作业时间不小于 2 000 h, 这对深海低温高压环境下的装备可靠性提出了更高要求。

数千米大长径比扬矿管道在运输过程中, 不仅容易出现堵塞等问题, 在多场耦合下还易引起复杂动力学问题, 如非线性振动、疲劳损伤、屈曲变形、偏移等问题都可能造成重大事故。深海矿产资源深度不同, 千米级扬矿管道在环境载荷影响下可能会产生 5.71° 的偏移, 而 6 000 m 级的扬矿管道偏移可能更大。针对运输过程中的安全技术研究将极大促进深海装备

的商业化进程。

在深海高压作用下, 水下作业关键零部件的材料性能、尺寸变化引起的部件机械性能下降, 可能面临失效、损坏的风险。因此, 关键零部件的材料选用、防腐、密封十分重要。多种材料组成的运动副组合在高压低温环境下配合间隙变化可能超过允许公差范围; 在海水渗透、海水压力交变等腐蚀因素下, 零部件防腐涂层体系失效早、破坏快, 极大缩减涂层和装备寿命; 零部件密封性能受密封材料、密封结构、密封工况等因素影响, 在介质高压且长期作业时, 易产生的端面过热、磨损等问题造成密封永久失效。因此, 提高零部件的可靠性, 有利于采矿装备在深海高压、低温、高盐环境下长期正常作业。

同时, 参考油气开发的事故统计数据, 第三方活动引发的冲击载荷也容易引起管道失效^[88]。为预防和减小上述因素引起的安全影响, 扬矿技术的发展还需要数字化、智能化。深海装备智能化过程中存在新的挑战, 采矿装备结合人工智能、机器学习、环境实时建模等高新技术, 实现自我反馈、自我预警、自我决策等一系列操作, 促进采矿装备及系统的安全运行。

3.3 待突破的关键技术

以 2 个目标和 2 类挑战为指导, 提出采矿装备在不同应用场景下存在的问题, 凝练出 4 个方面的关键技术, 如图 14 所示, 涉及到深海采矿车、扬矿装备、深海采矿船引起或多因素共同引起的问题。

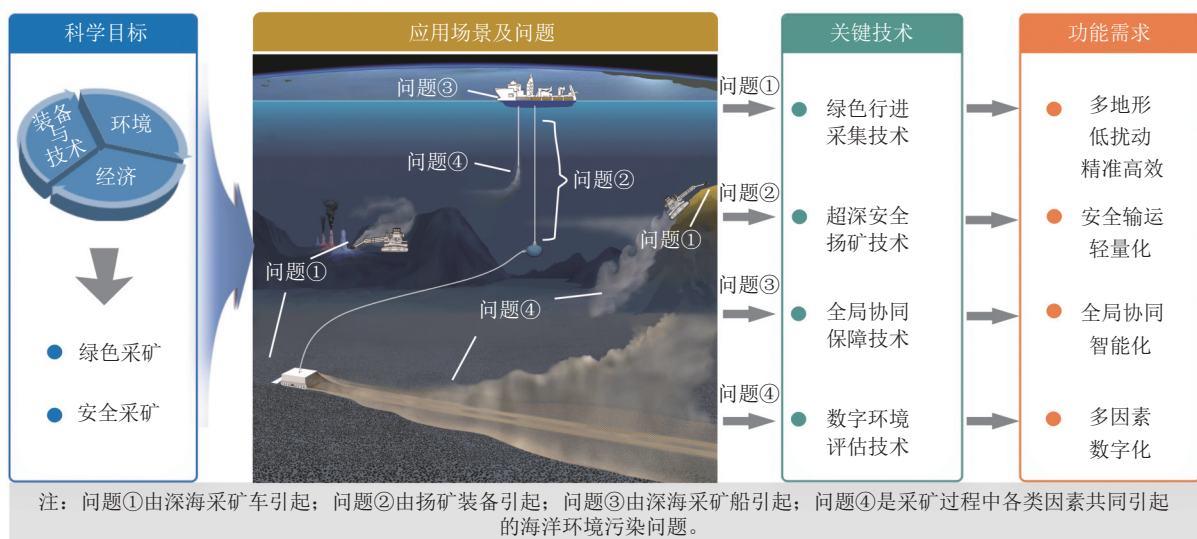


图 14 关键技术示意

Fig.14 Key technology diagram

3.3.1 绿色行进采集技术

深海矿产资源赋存环境不同, 不同矿产的采集技

术难点有所差异。重载履带稀软底质行进与多金属结核采集交互作用造成环境强扰动; 海底薄层富钴结

壳剥离破碎的贫化率控制难;崎岖海底多金属硫化物低扰动切割采集难;深海稀土采集装备及技术研究较为薄弱。

根据相关海试及研究,海底采矿短期污染已十分严重,而深海商业采矿属于长期性、持续性的过程。若要实现商业开采,不同矿产资源的低扰动精准行进采集研究至关重要。既能有效防止开采过程产生资源浪费,又利于复杂地形下的沉积物、污染物控制。依托自主路径规划、高精度导航定位、自适应控制等技术,通过探究新技术应用的可能性,发展低扰动精准行进采集技术。例如,针对行进技术,相关海试证明了多金属结核浮游式采矿技术具备可行性,但富钴结壳、多金属硫化物、深海稀土的浮游式采集技术尚未得到验证;也可借助固液体浮力材料提供的浮力,减少机器人的接地比压,以减小对沉积物的破坏;针对采集技术,加强自振射流等技术在深海领域的应用研究,探究出矿产丰度自适应精准高效采集方法,开发融合地质信息与历史采集数据的智能感知与姿态速度协同控制系统,发展环境扰动抑制技术,探索羽流的高速再沉积方法,如在射流中添加聚合氯化铝将使毫米级颗粒絮凝,为深海采矿提供理论支撑。行进与采集技术互补融合控制污染源头,助力绿色采矿。

3.3.2 超深安全扬矿技术

在数千米超深水下实现矿物运输,面临诸多安全问题。提升泵动力单一,系统抗干扰性差,当紧急停泵时,泵管内存有数十吨矿浆,可能引发不可控风险;矿产资源在运输过程中保持粗颗粒状态,虽然防止了矿产颗粒过度粉化,但在海洋、装备及关键部件相互作用下可能造成泵管堵塞和结构疲劳;深海环境复杂多变,极端突发天气下装备解脱难、安全系数低;阶段性采矿任务结束时,海面到海底的众多装备需要转移,装备联动调度难。

若要确保扬矿装备安全输运,应从各方面预防事故。加强分布式提升泵研究,有利于降低紧急停泵时的滞留、沉降、堵塞发生概率^[89];发展输运流动保障技术,对扬矿管道进行偏移补偿,同时在500 m水深以上海流强烈区段的扬矿管道外设置螺旋片,防止出现涡旋振动,有利于提高扬矿系统的运行稳定性;开展耐压、耐磨损、耐腐蚀的轻质复合材料及涂层研究,有利于解决扬矿装备的质量和疲劳问题。加强扬矿装备的轻量化设计(如泵管接口结构优化设计),有利于完善泵管快速对接、安全解脱等解决方案,实现装备安全调度。多项扬矿技术及方案确保风险最低化,助力安全采矿。

3.3.3 全局协同保障技术

采矿装备种类繁多、功能各异,统一控制难。高精度关键部件数量多,大尺度关键设备质量大,收放所需时间久、可靠性要求高;采矿装备覆盖垂向范围大,波浪作用下的船舶运动影响水下装备;恶劣海洋环境可能导致采集信息缺失或不准确,获取信息难;超长采矿装备检修维护难;各类装备端口多,造成数据互联难,信息化决策难。

若要实现商业开采,全系统多装备全局协同作业至关重要^[7]。加强深海传感器技术、深海光纤传输技术等技术研究,即关键信息获取与处理,是实现全局协同作业的首要条件;加强高可靠性智能化重载收放技术研究,涉及到轻量化脐带缆、升沉补偿二次元件开发,发展智能化超长泵管升沉技术,即加强智能化保障技术的发展,是实现全局协同作业的关键;构建出实时监测预报、动态诊断响应、远程智能调控的作业协同系统,是实现全作业过程下信息化决策的有利措施,也是实现装备检修维护的重要方式。协同保障技术促进采矿作业智能化发展,助力安全采矿。

3.3.4 数字环境评估技术

采矿过程中造成各类污染影响范围广、持续时间久、污染治理难,可能给海洋生态带来不可预知风险。沉积物、重金属颗粒共同作用产生严重的水体污染,羽流可能造成底栖生物窒息或被埋葬;宽频带、高分贝噪声,严重破坏了海洋声场;采矿装备排放、泄漏、渗漏及矿物预处理阶段可能引发化学污染。因此,亟需长时间、多类型、原位的环境基线数据,而传统的现场采样-实验室分析方法已不能满足深海采矿过程的生态环境监测、预警、评估的要求。

若要确保环境评估的准确性,在于掌握污染产生及扩散规律,用于支撑采矿环境影响评估模型和预警系统。目前欧美等发达国家纷纷在各国专属经济区构建并运行了海底观测网,而未来的国际海底区域海底观测网平台系统的建立将有利于采矿技术海试及监测,通过数据对比在矿区附近建立不开采的参照区和在矿区内构建临时避难所的环境差异性。围绕主要区域建立垂向多剖面监测点,构建多剖面实时数据库,使环境影响数字化。以数字化环境作为支撑,完善羽流成型及扩散机理,初步构建沉积物-环境评估体系。然后,构建多因素环境评估模型,量化环境变化对物种生存空间的冲击,综合建立采矿环境多因素评价体系。评估结果为超深水能量提取技术、海洋低噪装备制造技术等新技术的发展提供指导,实现绿色海洋深度开发的目标。环境评估技术加强采矿过程中环境污染预防能力,助力绿色采矿。

4 结 语

开展深海采矿装备与技术的研发攻关,是实现深海矿产资源开发的关键,是解决全球资源供给难题的必备手段。经过数十年发展,深海采矿科学技术的研究目标,已由装备可控转变为绿色采矿、安全采矿。我国深海矿产装备与技术研究起步较晚,虽然已完成多金属结核、富钴结壳系列装备海试,但尚存在深海采矿全工艺流程装备不全、不配套问题,以至于还无法开展全流程综合海试。同时,2024年工业和信息化部等七部门关于推动未来产业创新发展的实施意见指出,未来产业应聚焦深海,加快深海作业装备、深海智能无人平台研制及创新应用。所以我国深海采矿装备与技术正处于赶、并、超的关键时期,深化深海采矿装备及其技术研究、加快高效安全环保采矿装备开发、建立自主的深海采矿装备与技术体系已刻不容缓。在未来的深海采矿装备与技术发展中,应瞄准多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、深海稀土等矿区特征,聚焦超深水、多地形、低扰动、安全可靠、全局协同等研究方向,完善和突破绿色采集、安全扬矿、全局保障、环境评估等关键科学技术。这些关键科学技术将有利于实现绿色采矿、安全采矿两大目标,有利于推进安全应急技术与配套装备研发,有利于推进深海采矿装备协同应用,有利于构建全作业阶段深海绿色开采体系,对于提高我国深海资源开发话语权、建设海洋强国具有战略意义。

参考文献(References):

- [1] 邓久帅,姚伟,林艳,等。“三深”金属矿产资源开采利用的绿色化思考[J].绿色矿山,2023,1(1):186-192.
DENG Jiushuai, YAO Wei, LIN Yan, et al. Thoughts on the greening of the mining and utilization of metal mineral resources in deep underground/sea/space[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 186-192.
- [2] ALHADDAD S, MEHTA D, HELMONS R. Mining of deep-seabed nodules using a Coandă-effect-based collector[J]. Results in Engineering, 2023, 17: 100852.
- [3] 黄牧,石学法,毕东杰,等.深海稀土资源勘查开发研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2665-2681.
HUANG Mu, SHI Xuefa, BI Dongjie, et al. Advances on study of exploration and development of deep-sea rare earth resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2665-2681.
- [4] 沈芳,韩喜球,李洪林,等.海底多金属硫化物资源预测:方法与思考[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2682-2695.
SHEN Fang, HAN Xiqiu, LI Honglin, et al. Prediction of seafloor polymetallic sulfide resources: Methods and consideration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2682-2695.
- [5] 韦振权,何高文,邓希光,等.大洋富钴结壳资源调查与研究进展[J].中国地质,2017,44(3):460-472.
WEI Zhenquan, HE Gaowen, DENG Xiguang, et al. The progress in the study and survey of oceanic cobalt-rich crust resources[J]. Geology in China, 2017, 44(3): 460-472.
- [6] 邹丽,孙佳昭,孙哲,等.我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(5):708-716.
ZOU Li, SUN Jiazhao, SUN Zhe, et al. Deep-sea mining core technology in China: Aurrent situation and prospects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 708-716.
- [7] 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.
- [8] PEACOCK T, OUIILLON R. The fluid mechanics of deep-sea mining[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2023, 55: 403-430.
- [9] 饶秋华,刘泽霖,许锋,等.深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2795-2816.
RAO Qiuhua, LIU Zelin, XU Feng, et al. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2795-2816.
- [10] 丁忠军,张奕,史先鹏,等.深海矿产资源载人深潜抵近探测新技术[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2757-2770.
DING Zhongjun, ZHANG Yi, SHI Xianpeng, et al. New technology of manned submersible approach exploration for deep sea mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2757-2770.
- [11] 赵松年,刘峰.德国深海采矿技术的研究[J].金属矿山,1995(6):14-17.
ZHAO Songnian, LIU Feng. Study of deep-sea mining technique in germany[J]. Metal Mine, 1995(6): 14-17.
- [12] HONG S, KIMG H W, CHOI J S, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering[A]. Shanghai, 2010: 75-86.
- [13] YE U T K, YOON S M, HONG S, et al. Steering performance test of underwater mining robot[C]//2014 Oceans - St. John's. St. John's, NL[A]. Canada, 2014: 1-4.
- [14] KITAGO R, NAGANAWA S, BJARKASON E K. Subsea lifting system for deep-seabed rare-earth rich mud[C]//Day 2 Tue, May 02, 2023[A]. Houston. OTC, 2023.
- [15] 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.
- [16] 康娅娟,刘少军.深海采矿提升系统研究综述[J].机械工程学报,2021,57(20):232-243.
KANG Yajuan, LIU Shaojun. Summary of research on lifting system of deep sea mining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 232-243.
- [17] 田辰玲,杨建民,林忠钦,等.我国南海资源开发装备发展研究[J].

- 中国工程科学, 2023, 25(3): 84–94.
- TIAN Chenling, YANG Jianmin, LIN Zhongqin, et al. Development of resource exploitation equipment for South China Sea[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 84–94.
- [18] 刘峰, 刘予, 宋成兵, 等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2613–2623.
- LIU Feng, LIU Yu, SONG Chengbing, et al. Three decades' development of China in deep-sea field[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2613–2623.
- [19] 王安义, 刘静, 王兰, 等. 深海采矿船水下设备布放回收工艺[J]. 造船技术, 2023, 51(6): 50–53.
- WANG Anyi, LIU Jing, WANG Lan, et al. Underwater equipment laying and recovery technology of deep-sea mining vessel[J]. *Marine Technology*, 2023, 51(6): 50–53.
- [20] 王安义, 李娜, 孙晓晖, 等. 深海采矿船水面支持布放回收系统研制[J]. 石油机械, 2022, 50(11): 66–72.
- WANG Anyi, LI Na, SUN Xiaohui, et al. Development of surface support placement and recovery system for deep-sea mining dredgers[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(11): 66–72.
- [21] SUDARVELAZHAGAN K, SRINIVAS K, PRADEEP KUMAR M, et al. Experimental investigation and optimization of polymetallic nodule mining by mechanical pick-up device on deep-sea using RSM[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2023, 41(3): 254–268.
- [22] HONG S, CHOI J S, KIM J H, et al. A note on design and operation of waterjet nodule lifter of manganese nodule collector [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2001, 11(3).
- [23] ZHAO G C, XIAO L F, PENG T, et al. Experimental research on hydraulic collecting spherical particles in deep sea mining[J]. *Energies*, 2018, 11(8): 1938.
- [24] 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.
- [25] 杨强, 刘坤, 降星辰, 等. 基于康达效应深海多金属结核采集装置参数匹配[J]. 海洋工程, 2023: 1–13.
- YANG Qiang, LIU Shen, JIANG Xingchen, et al. Parameter matching of deep-sea polymetallic nodule collection device based on the Coandă effect[J]. *The Ocean Engineering*, 2023: 1–13.
- [26] 刘杰, 许栋, 及春宁, 等. 深海多金属结核水力集矿头流场结构数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(3): 123–136.
- LIU Jie, XU Dong, JI Chunning, et al. Numerical investigations on the flow structures around the hydraulic mining header of deep-sea polymetallic nodule collectors[J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(3): 123–136.
- [27] LIU X X, CHEN X G, WEI J K, et al. Study on sediment erosion generated by a deep-sea polymetallic-nodule collector based on double-row jet[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115220.
- [28] YUE Z Y, ZHAO G C, XIAO L F, 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.
- [29] QIAO S, WU Y, ZHU Z M, et al. Effects of confining pressure and cutting sequence on the cobalt-rich crust cutting mechanism by using conical picks in ocean environments[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 112348.
- [30] HELMONS R L J, MIEDEMA S A, VAN RHEE C. A new approach to model hyperbaric rock cutting processes[C]//ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering[A]. San Francisco, 2014.
- [31] 李艳, 梁科森, 李皓. 深海多金属硫化物开采技术[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2889–2901.
- LI Yan, LIANG Kesen, LI Hao. Mining technology of deep-sea polymetallic sulfide[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2889–2901.
- [32] HUANG Z H, XIE Y. Deep-sea cobalt crusts water jet cutting ability[J]. *Geomaterials*, 2011, 1(2): 41–45.
- [33] MA W B, RAO Q H, XU F, et al. Impact compressive creep characteristics of simulative soil for deep-sea sediment[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(4): 356–364.
- [34] LENG D X, SHAO S, XIE Y C, et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 228: 108565.
- [35] XU F, RAO Q H, MA W B. Track shoe structure optimization of deep-sea mining vehicle based on new rheological calculation formulae of sediment[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2019, 47(4): 479–496.
- [36] KIM H-W, HONG S, CHOI J. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil : Single-Body Dynamics vs. Multi - Body Dynamics[C]. Tsukuba, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers[A]. 2003: 15–19.
- [37] CAI Q, MA W B, RAO Q H, et al. Optimization design of bionic grousers for the crawled mineral collector based on the deep-sea sediment[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38: 48–56.
- [38] 韩庆珏, 刘少军. 基于动力学分析的深海履带式采矿车行走打滑控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3166–3172.
- HAN Qingjue, LIU Shaojun. Slip control of deep sea tracked miner based on dynamic analysis[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3166–3172.
- [39] 陈昱衡, 吴鸿云, 边有钢. 基于AUPF算法的水下履带式车动力学参数估计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(8): 29–35.
- CHEN Yuheng, WU Hongyun, BIAN Yougang. Estimation of motion parameters of a underwater track mining vehicle based on adaptive unscented particle filter algorithm[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(8): 29–35.
- [40] HERZOG K, SCHULTE E, ATMANAND M A, et al. Slip control system for a deep-sea mining machine[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(2): 282–286.
- [41] RAMJI S, RAJESH S, RAMESH N R, et al. Design and testing of Control and Positioning System for Underwater Mining Machine [C]//OCEANS. Vancouver, BC[A]. Canada, 2007: 1–5.
- [42] YOON S M, HONG S, PARK S J, et al. Track velocity control of crawler type underwater mining robot through shallow-water test[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(10): 3291–3298.
- [43] DAI Y, YIN W W, MA F Y. Nonlinear multi-body dynamic model-

- ing and coordinated motion control simulation of deep-sea mining system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86242–86251.
- [44] XU W H, YANG J M, WEI H D, et al. Error-state Kalman filter-based localization algorithm with velocity estimation for deep-sea mining vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112331.
- [45] LIU S H, YANG J M, LU H N, et al. A numerical investigation of the dynamic interaction between the deep-sea mining vehicle and sediment plumes based on a small-scale analysis[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(7): 1458.
- [46] MUÑOZ-ROYO C, OUILLOON R, EL MOUSADIK S, et al. An *in situ* study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle[J]. *Science Advances*, 2022, 8(38): eabn1219.
- [47] JANKOWSKI J A, MALCHEREK A, ZIELKE W. Numerical modeling of sediment transport processes caused by deep sea mining discharges[C]//Proceedings of OCEANS'94. Brest[A]. France, 1994: III/269-III/277.
- [48] SCHULTE S A. Vertical transport methods for deep sea mining[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013.
- [49] WANG Z N, JIN Y P, HUANG F. Investigation of the inner structure of gas-liquid flow in airlift pumps by laser-high speed visualization technology[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2020, 15(5): e2509.
- [50] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A, et al. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 131(1–3): 273–281.
- [51] VAN WIJK J M, HAALBOOM S, DE HOOG E, et al. Impact fragmentation of polymetallic nodules under deep ocean pressure conditions[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 134: 250–260.
- [52] LIU L, ZHANG X T, TIAN X L, et al. Numerical investigation on dynamic performance of vertical hydraulic transport in deepsea mining[J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 130: 103443.
- [53] 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.
- [54] ZHANG Y Y, DAI Y, ZHU X. Numerical investigation of recommended operating parameters considering movement of polymetallic nodule particles during hydraulic lifting of deep-sea mining pipeline[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4248.
- [55] DE HOOG E, VAN WIJK J M, WIJNANDS J T M, et al. Degradation of polymetallic nodules during hydraulic transport under influence of particle-wall and particle-particle interaction[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 155: 106415.
- [56] 李伟, 潘云欣, 李昊明, 等. 固液两相流离心泵流动特性及磨损问题研究进展[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(2): 109–117.
LI Wei, PAN Yunxin, LI Haoming, et al. Research progress on solid-liquid two-phase flow characteristics and erosion of centrifugal pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(2): 109–117.
- [57] 邹伟生, 刘瑞仙, 刘少军. 粗颗粒海底矿石浆体提升电泵研究[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(24): 2939–2944.
ZOU Weisheng, LIU Ruixian, LIU Shaojun. Study on lifting motor pumps for coarse particle slurry in sea bed mining[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(24): 2939–2944.
- [58] 徐海良, 曾义聪, 陈奇, 等. 深海采矿矿浆泵内颗粒流动规律的数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 84–90.
XU Hailiang, ZENG Yicong, CHEN Qi, et al. Numerical simulation of particle flow trajectory in slurry pump for deep-sea mining[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1): 84–90.
- [59] 胡琼, 陈骏, 邓立文, 等. 极端工况下深海扬矿泵 CFD-DEM 耦合仿真与试验研究[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2926–2937.
HU Qiong, CHEN Jun, DENG Liwen, et al. CFD-DEM coupled simulation and experimental study of deep sea lifting mine pump under extreme working conditions[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2926–2937.
- [60] WANG R K, GUAN Y J, JIN X, et al. Impact of particle sizes on flow characteristics of slurry pump for deep-sea mining[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 6684944.
- [61] LI Y W, LIU S J, HU X Z. Research on reflux in deep-sea mining pump based on DEM-CFD[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(6): 744–752.
- [62] KANG Y J, SU Q, LIU S J. On the axial thrust and hydraulic performance of a multistage lifting pump for deep-sea mining[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265: 112534.
- [63] CAO Y H, GU H L, GUO H Y, et al. Modeling and dynamic analysis of integral vertical transport system for deep-sea mining in three-dimensional space[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271: 113749.
- [64] WU Q, YANG J M, GUO X X, et al. Influence of irregular waves on the dynamic response of a vertical transport system for deep sea mining[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 229: 108443.
- [65] CHEN W, XU H L, PENG N, et al. Linkage characteristics of deep-sea mining lifting system[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109074.
- [66] DAI Y, LI X Y, YIN W W, et al. Dynamics analysis of deep-sea mining pipeline system considering both internal and external flow[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(4): 408–418.
- [67] 肖林京, 范芳超, 陆继铭. 深海采矿扬矿管纵向振动及其升沉补偿研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(12): 143–147.
XIAO Linjing, FAN Fangchao, LU Jiming. Research on longitudinal vibration and heave compensation of lifting pipe in deep sea mining[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(12): 143–147.
- [68] LIU J, ZENG L L, GUO X Q, et al. Multi-field coupling nonlinear vibration characteristics of hydraulic lifting pipe in deep-ocean mining[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 120: 103074.
- [69] WANG Z, ZOU L. Natural frequency analysis of deep-sea mining riser considering varying tension and buffer station[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112372.
- [70] WU Q, YANG J M, GUO X X, et al. Experimental study on dynamic responses of a deep-sea mining system[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110675.
- [71] 金永平, 万步炎, 刘德顺. 深海海底钻机收放装置关键零部件可靠性分析与试验[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(8): 183–191.

- JIN Yongping, WAN Buyan, LIU Deshun. Reliability analysis and experimental for key component of launch and recovery equipment of seafloor drill[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(8): 183–191.
- [72] 金永平, 万步炎, 刘德顺, 等. 不同收放速度对海上钻机收放系统影响分析[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(19): 2557–2563.
- JIN Yongping, WAN Buyan, LIU Deshun, et al. Analyses of launch & recovery system of seafloor drill under different launching and recovering velocities[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(19): 2557–2563.
- [73] 王荣耀, 陈国明, 刘伟, 等. 内波环境下中间仓单体收放过程中的管柱力学分析[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2836–2847.
- WANG Rongyao, CHEN Guoming, LIU Wei, et al. Mechanical analysis of buffer retrieve/deployment operations considering internal solitary waves[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2836–2847.
- [74] 杨祥云, 吕海宁, 杨建民, 等. 深海采矿车布放回收中脐带缆轴向张力响应特性研究[J]. *海洋工程*, 2023: 1–13.
- YANG Xiangyun, LYU Haining, YANG Jianmin, et al. Research on axial tension response characteristics of umbilical cable in deep-sea mining truck deployment and recycling[J]. *The Ocean Engineering*, 2023: 1–13.
- [75] 李文华, 柯思诚, 宋晓华, 等. 深海绞车系统收放缆过程及动力行为[J]. *船舶工程*, 2022, 44(11): 1–7, 30.
- LI Wenhua, KE Sicheng, SONG Xiaohua, et al. Cable retraction and release process and dynamic behavior of deep sea winch system[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(11): 1–7, 30.
- [76] 赵忠, 伏圣钊, 李会芳, 等. 深海电动牵引绞车设计与缆绳张力控制[J]. *船舶工程*, 2022, 44(1): 148–153.
- ZHAO Zhong, FU Shengzhao, LI Hui Fang, et al. Design of deep sea twin traction system of electric optic/electric composite cable winch to release the tension of photoelectric composite cable[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(1): 148–153.
- [77] NI J, LIU S J, WANG M F, et al. The simulation research on passive heave compensation system for deep sea mining[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation[A]. Changchun, 2009: 5111–5116.
- [78] 武云霞, 陆建辉, 张春蕾. 深水吊装升沉补偿液压系统建模与优化[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3): 128–133.
- WU Yunxia, LU Jianhui, ZHANG Chunlei. Modeling and optimization of heave compensation hydraulic system for deep-water lifting[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(3): 128–133.
- [79] 周利, 段玉响, 任政儒, 等. 主动式升沉补偿控制系统及运动预报[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 98–104.
- ZHOU Li, DUAN Yuxiang, REN Zhengru, et al. Active heave compensation control system and motion prediction research[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 98–104.
- [80] 张氢, 夏华, 杨宁, 等. 新型电动升沉补偿系统建模及联合仿真[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(8): 2973–2981.
- ZHANG Qing, XIA Hua, YANG Ning, et al. Modeling and co-simulation of novel electric heave compensation system[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(8): 2973–2981.
- [81] 李世振, 魏建华, 胡波, 等. 主动式水下拖曳升沉补偿系统的非线性控制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 612–617.
- LI Shizhen, WEI Jianhua, HU Bo, et al. Nonlinear control of active heave compensator for an underwater towed system[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 612–617.
- [82] 陈琦, 李榕伦, 李智刚. 用于船舶升沉运动估算的自适应数字滤波器[J]. *中国惯性技术学报*, 2018, 26(4): 421–427.
- CHEN Qi, LI Gelun, LI Zhigang. Adaptive digital filter for vessel's heave motion estimation[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(4): 421–427.
- [83] 黄卫权, 王刚, 程建华, 等. 基于相位补偿的舰船升沉位移测量方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(2): 148–153.
- HUANG Wei-quan, WANG Gang, CHENG Jianhua, et al. Application of adaptive filtering technique in ship heave measurement[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(2): 148–153.
- [84] SCHRIEVER G, THIEL H. Tailings and their disposal in deep-sea mining [C]//ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium[A]. ISOPE, 2013: ISOPE-M-13-089.
- [85] MA W B, SCHOTT D, LODEWIJKS G. A new procedure for deep sea mining tailings disposal[J]. *Minerals*, 2017, 7(4): 47.
- [86] CHEN R H, DENG S, ZHAO L, et al. Energy recovery from wastewater in deep-sea mining: Feasibility study on an energy supply solution with cold wastewater[J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117719.
- [87] WILLIAMS R, ERBE C, DUNCAN A, et al. Noise from deep-sea mining may span vast ocean areas[J]. *Science*, 2022, 377(6602): 157–158.
- [88] 姜逢源, 董胜. 第三方活动冲击荷载作用下近海管道损伤机理及风险评估研究现状[J]. *海洋工程*, 2023, 41(6): 187–199.
- JIANG Fengyuan, DONG Sheng. A review on the damage mechanism analysis and risk assessment for offshore pipelines subjected to impact loads from third-party activities[J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(6): 187–199.
- [89] 邹伟生, 李浩天, 康娅娟. 深海开采矿浆泵水力管道提升理论与设计[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2953–2962.
- ZOU Weisheng, LI Haotian, KANG Yajuan. Theoretical design on slurry pump hydraulic lift system for marine mineral resources exploitation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2953–2962.