深海采矿技术发展态势及研究现状综述①

黄章峰[1], 张韵佳[1], 孙佳昭[2,3]
(1.天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2.东北大学海洋工程研究院, 河北 秦皇岛 066004; 3.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于对当前深海采矿技术发展态势的调研,结合国内外文献与专利热点分析,明确了深海采矿三大关键技术领域为矿石采集、矿石提升和水面支持,系统梳理了不同领域的核心技术,综述了国内外在矿石破碎技术、矿石收集技术、采矿车行走技术、长距离垂直管道输运技术、提升管道防堵塞与紧急避险技术、无泵送矿物输运技术、水声通信技术、矿物处理技术、布放回收技术、升沉补偿技术共 10 项核心技术的研究进展,多维度定量评估了我国在深海采矿总体领域及矿石采集、矿石提升和水面支持三大关键技术领域相比于国际的优势与不足。综合分析表明,现阶段我国深海采矿技术主要短板体现在核心装备的效率不高、长期可靠性不足、深海环境扰动机制认识不深以及整体协同作业海试匮乏等方面,全球深海采矿技术挑战主要表现在多场耦合下的动力学协同控制、长距离垂直输运的流动保障与设备可靠性、环境约束与羽流控制等方面。我国未来应聚焦突破核心技术、加强环境影响评估监测以及系统级联合海试等方向,推动我国深海采矿技术向系统化、绿色化、智能化发展,为我国未来参与深海资源开发奠定基础。

关键词: 深海采矿; 采矿技术; 矿石采集; 矿石提升; 水面支持; 专利分析; 文献分析; 文献综述
中图分类号: TD857 **文献标志码**: B doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.001
文章编号: 0253-6099(2026)03-0001-19

A Review on Development Trends and Research Status of Deep-Sea Mining Technology

HUANG Zhangfeng[1], ZHANG Yunjia[1], SUN Jiazhao[2,3]
(1.*School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*; 2.*Ocean Engineering Research Institute, Northeastern University, Qinhuangdao* 066004, *Hebei, China*; 3.*State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*)

Abstract: Based on the investigation of the current development trends of deep-sea mining technologies, and in combination with the analysis of domestic and international literature and patent hotspots, three key technological fields of deep-sea mining were identified: collection, lifting, and surface support. Based on the systematic sorting of the core technologies in different fields, a review on the domestic and international research progress is presented in 10 core technologies, including ore crushing, ore collection, mining vehicle traveling, long-distance vertical pipeline transportation, anti-clogging and emergency escape for lifting pipelines, pump-free mineral transportation, underwater acoustic communication, mineral processing, launch and recovery, as well as heave compensation. A multi-dimensional quantitative assessment was conducted on China's advantages and disadvantages compared to the international level in the overall field of deep-sea mining and the three key technological fields of collection, lifting, and surface support. Comprehensive analysis indicates that at the current stage, the main shortcomings of China's deep-sea mining technologies include the low efficiency of core equipment, insufficient long-term reliability, inadequate understanding of deep-sea environmental disturbance mechanisms, and the lack of integrated coordinated operation in at-sea tests. The global challenges of deep-sea mining technology are mainly manifested in dynamic coordinated control under multi-field coupling, flow assurance and equipment reliability in long-distance vertical transportation, and environmental constraints and plume control. In the future, it is advisable for China to focus on breaking through core technologies, strengthening environmental impact assessment and monitoring, and conducting integrated system at-sea tests, so as to move toward the

① **收稿日期**: 2026-03-30
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2806701)
作者简介: 黄章峰(1977—),男,湖南宜章人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为流体力学、深海采矿等。E-mail:hzf@ tju.edu.cn

more systematical, smarter and eco-friendly technology, laying a foundation for China's future participation in deep-sea resource exploitation.

Key words: deep-sea mining; mining technology; ore collection; ore lifting; surface support; patent analysis; literature analysis; literature review

随着全球能源转型与战略性新兴产业的迅猛发展,新能源电池、电动汽车、航空航天等领域对镍、钴、铜、锰等关键金属的需求呈指数级增长。据国际能源署(International Energy Agency,IEA)预测,到 2040 年,此类金属的全球需求量较当前将增加 6 倍以上[1]。海底矿产资源因富含上述关键金属且储量巨大,成为重要的补充来源。例如,东太平洋多金属结核资源量高达 210 亿 t,被视为陆地稀有金属的潜在替代[2-3]。而中国作为全球最大的关键金属消费国,矿种对外依存度处于 80%~90%的高位[4],资源安全面临严峻挑战。因此,我国积极布局深海矿业,已与国际海底管理局(International Seabed Authority, ISA)签订 5 份专属勘探合同,勘探区数量和矿区面积均居世界首位,矿区总面积达 23.8 万 km^2,在全球深海勘探资源中占据显著份额。

深海采矿技术是获取深海矿产资源的核心手段。自国际社会认识到海洋资源战略价值以来,主要国家持续投入研发力量,虽受政策、经济及环境因素制约尚未实现商业化开采,但近年各国已在不同海域开展系列海试,取得多项技术突破。发达国家在深海矿产资源的开发管理体制、勘探装备、开发平台和开采作业装备等方面持续突破[5],以美国、欧洲、日本等为代表的发达国家和地区已基本掌握了深海矿产资源开发的核心技术[6],而目前我国在该领域虽已取得显著突破,但相较于上述发达国家和地区仍存在一定差距。在此背景下,如何在全球大规模商业化开采前实现技术赶超、研制出领先国际的采矿装备,已成为我国当前的紧迫战略任务。党的十八大以来,习近平总书记指出"建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务",并多次强调要进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋,为新时代海洋强国建设提供了根本遵循。本文基于近 25 年的相关数据和文献,分析深海采矿发展态势,综述关键领域技术研发现状,评估国内外技术差距,进而提出未来技术挑战及我国的发展方向,以期为深海采矿技术发展提供建设性依据。

1 深海采矿技术发展态势

1.1 总体发展态势及国家分布

论文和专利作为衡量学科发展态势的核心指标,能够较为直观地反映该领域的演进轨迹。依托国家图书馆科学评价中心提供的文献与专利数据[中文文献来源于中国知网(CNKI)的 CAJD 数据库,外文文献来源于 Scopus 数据库,专利数据来源于 incoPat 数据库],统计了 2000 年以来国内外深海采矿领域研究成果,并手动剔除与深海采矿主题无关的样本,截至 2025 年 5 月 13 日,全球共发表深海采矿相关研究论文 11 634 篇,授权有效专利 4 641 件(受统计时间节点影响,2025 年发文量尚未完整统计,并不代表该年度研究热度下降)。

2000—2025 年深海采矿领域论文和专利数量总体趋势如图 1 所示。深海采矿研究总体发展趋势分为 3 个阶段。2000—2004 年为萌芽期,相关研究尚处于起步阶段,整体论文数量和专利数量较少。2005—2010 年进入增长期,论文数量逐年上升,标志着深海采矿领域逐渐受到学术界的关注。2011 年至今则呈爆发式增长,年发文量呈指数级攀升,原因主要有:① 全球新能源产业快速扩张,对镍、钴、锰等关键矿产形成了刚性需求;② 国际海底管理局相关规章持续完善,且我国深海立法逐步推进,为资源勘探开发提供了制度保障;③ 以"蛟龙号"载人深潜器成功研发以及多国企业相继开展深海试采为代表的技术突破,显著提振了各国对深海采矿的研发投入与探索热情。

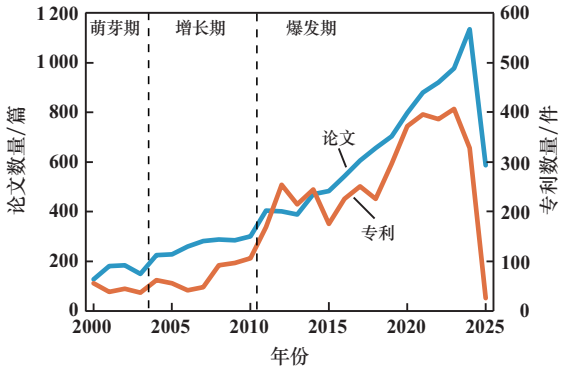
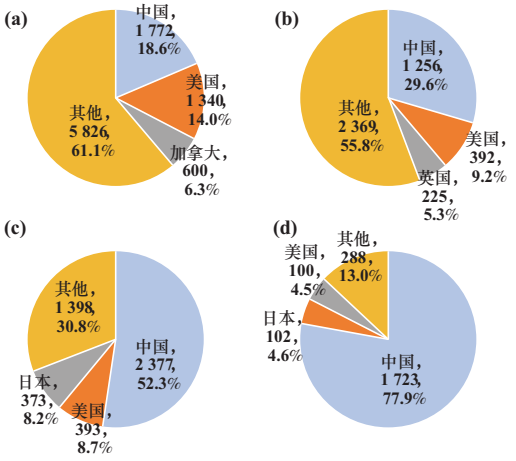


图 1 2000—2025 年深海采矿领域论文和专利数量总体趋势

Fig. 1 Overall trend of publications and patents on deep-sea mining from 2000 to 2025

仅数量而言,我国在深海采矿领域论文发表量和专利申请量都排在全球首位(仅考虑 Scopus 收录的英文文献),如图 2 所示。相比近 25 年的数据,近 5 年我

国在深海采矿领域全球论文发表量占比提升 11 百分点，专利申请量占比提升约 26 百分点，这说明我国近年来在该领域的投入不断加大，在成果数量上处于领先地位。



（a）近 25 年论文数量；（b）近 5 年论文数量；（c）近 25 年专利数量；（d）近 5 年专利数量

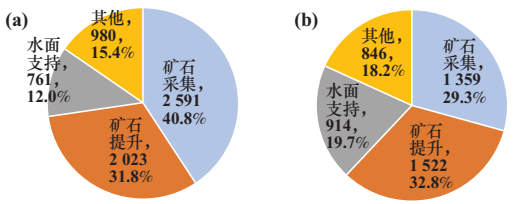
图 2　近 25 年和近 5 年深海采矿领域全球论文数量和专利数量

Fig. 2　Number of global publications and patents on deep-sea mining over past 25 years and past 5 years

1.2　研究热点及专利技术构成

对论文文献检索结果集的关键词进行人工清洗、归并后，选择高频关键词，发现当前该领域的研究主题主要聚焦于以下方面：① 采矿装备研发，包括采矿车、扬矿管、提升泵以及自主水下航行器（AUV）等核心设备的设计与优化；② 采矿提升技术研究，如螺旋滚筒式破碎、水力式集矿、水力提升等关键作业方法的研究；③ 水面支持系统的智能化研究，涵盖路径规划、动力定位、采矿船升沉补偿、水声通信等支撑技术。在研究方法层面，数值模拟、CFD-DEM 耦合方法、固液两相流等关键词反映出以流体力学、颗粒动力学、结构动力学等多物理场耦合建模为核心的数值仿真方法，已成为解析深海复杂开采过程的重要手段。同时，机器学习、深度学习、神经网络等术语的广泛使用，表明智能算法在装备控制场景中正发挥日益重要的作用，深海采矿技术已开始向智能化、精准化发展。

整合以上研究热点可得，深海采矿技术主要涉及三大关键技术，即矿石采集技术、矿石提升技术和水面支持技术，具有科技含量高、涉及学科领域广、研究起点高等特点。按照三大关键技术将文献（仅考虑 Scopus 搜索得到的英文文献）和专利进行分类，可得到深海采矿关键技术领域论文及专利分布，如图 3 所示。



（a）Scopus 论文数量；（b）incoPat 专利数量

图 3　深海采矿关键技术领域论文及专利分布

Fig. 3　Proportions of publications and patents on key technological fields in deep-sea mining

1.3　三大关键技术领域发展态势及国家分布

图 4 为 2000—2025 年深海采矿三大关键技术领域的论文发表趋势。整体来看，各领域的研究活跃度均呈现明显上升趋势。相较于水面支持，研究多集中在矿石采集和矿石提升领域。其中，矿石采集技术发文量始终领先，该领域是研究核心，尤其在 2013 年后迅速增长，到 2024 年达到 322 篇。矿石提升技术发文量趋势与之同步，2024 年发文量为 253 篇。水面支持领域发文量增长相对平缓，数量较少。由图 4 可知，2013 年为关键转折点，此前各领域年发文量均低于 60 篇，之后同步快速上升，这与前述深海采矿技术从早期探索转向工程化研发的整体趋势相符。

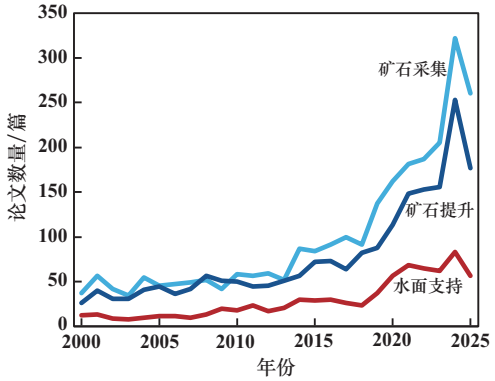
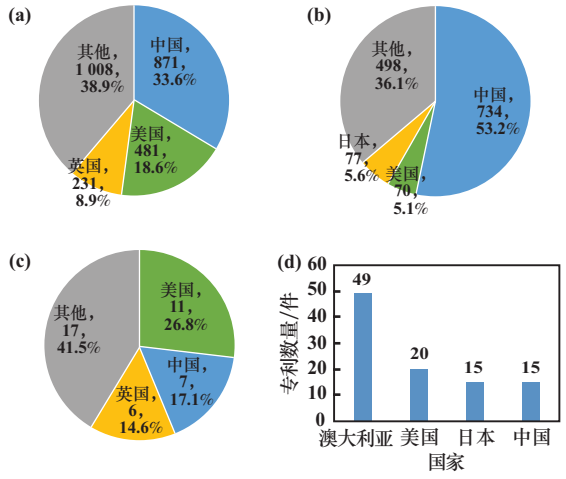


图 4　三大关键技术领域论文发表趋势

Fig. 4　Publication trends in three key technological fields

图 5 为矿石采集领域论文、专利国家分布（其中高影响力论文为在 Scopus 上被引频次超过 80 次的论文；高价值专利为合享价值度为 10 的专利；数据均来源于国家图书馆科学评价中心，下同）。由图 5 可知，我国在矿石采集领域的论文共有 871 篇，占比 33.6%，专利共有 734 件，占比 53.2%，均显著领先于国际，展现了我国强大的科研规模以及研发潜力。然而，我国高价值专利比例相对有限，专利质量仍有提升空间。美国不仅在论文数量与专利数量上居于前列，且在高影响力论文及高价值专利数量方面积累突出，体现了其在该领域的核心技术引领地位。日本专利布局均

匀、价值稳健,英国、澳大利亚等国则在细分领域保持特色优势。

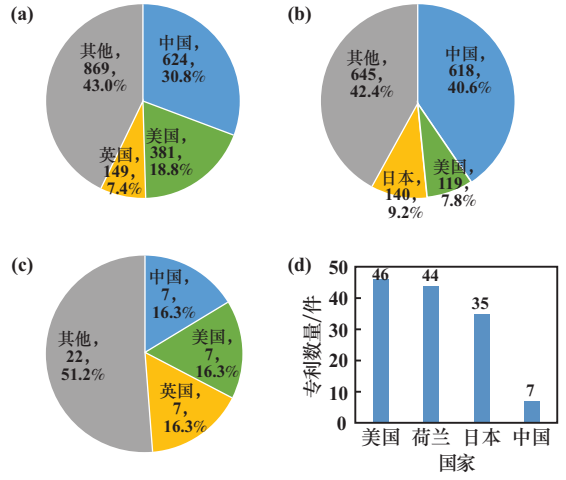


(a) 矿石采集论文数量;(b) 矿石采集专利数量;
(c) 高影响力论文数量;(d) 高价值专利数量

图 5 矿石采集领域论文、专利国家分布

Fig. 5 Proportions and numbers of publications and patents on ore collection by countries

图 6 为矿石提升领域论文、专利国家分布。由图 6 可知,我国在矿石提升领域的论文总数以及专利总量均居首位,但高影响力论文以及高价值专利的积累相对薄弱。美国凭借深厚的理论研究,在高影响力论文与高价值专利数量方面优势显著,保持着核心技术领导力。日本虽然在论文发表数量方面较为薄弱,但其无论是专利总量还是高价值专利数量均居于全球前列,显示了扎实的技术积累。英国等其他国家在细分领域亦具备研发实力,共同推动矿石提升技术的发展。

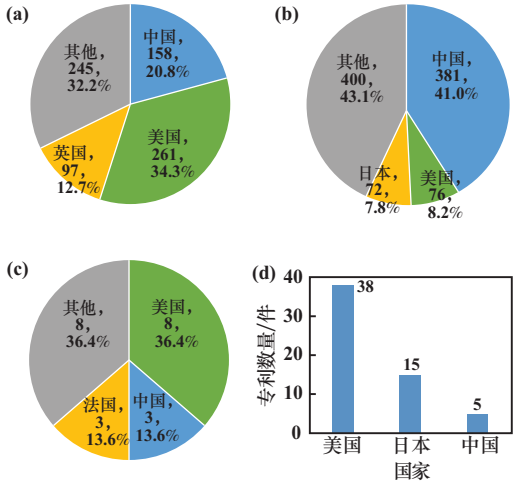


(a) 矿石提升论文数量;(b) 矿石提升专利数量;
(c) 高影响力论文数量;(d) 高价值专利数量

图 6 矿石提升领域论文、专利国家分布

Fig. 6 Proportions and numbers of publications and patents on ore lifting by countries

图 7 为水面支持领域论文、专利国家分布。由图 7 可知,我国在水面支持领域虽在专利总数上依旧居于全球首位,但论文总量却仅为美国的三分之二,并且在高影响论文数量和高价值专利数量上均远落后于美国,这表明我国在该领域的国际学术影响力和尖端技术布局仍有很大提升空间。美国专利布局聚焦于智能化控制、网络系统及材料处理等核心技术,质量高且国际化程度强。日本的专利价值分布均衡,技术优势集中于可靠的水下通信等领域。英国、法国等则在系统集成与装备方面形成特色。



(a) 水面支持论文数量;(b) 水面支持专利数量;
(c) 高影响力论文数量;(d) 高价值专利数量

图 7 水面支持领域论文、专利国家分布

Fig. 7 Proportions and numbers of publications and patents on surface support by countries

总体来看,深海采矿技术目前处于快速上升阶段,市场前景乐观、发展空间巨大,受到各国尤其是发达国家的高度关注。我国得益于国家深海科技专项与海洋战略推动,在论文发文量和专利申请量上均稳居全球前列,近 5 年研究活跃度突出,但国际学术影响力以及尖端技术与国际顶尖水平仍有差距。其中,水面支持领域的差距最为明显,未来需着重专注。

2 深海采矿技术研究现状

管道提升开采系统已确立为当前的主流开采方法。管道提升开采系统主要涉及海底矿石开采装备、矿石提升输送装备以及水面支持装备。三大领域装备对应三大关键技术,其中,矿石采集技术包含矿石破碎、矿石收集及采矿车行走 3 项核心技术;矿石提升技术包含长距离竖直管道输运、提升管道防堵塞与紧急避险以及无泵送水下矿物输运 3 项核心技术;水面支持技术包含水声通信、矿物处理、布放回收及升沉补偿

4 项核心技术。管道提升开采系统作业过程如图 8 所示,具备行走能力的深海采矿车在海底完成金属矿产采集后,通过带浮力模块的柔性输矿软管将矿浆输送至中继站暂存,中继站的矿浆再经提升泵驱动,沿刚性扬矿管道向上输送直达海面采矿船,矿浆在船舱内完成脱水、预处理与储存,沉降分离后的海水则循环排放入海[7]。

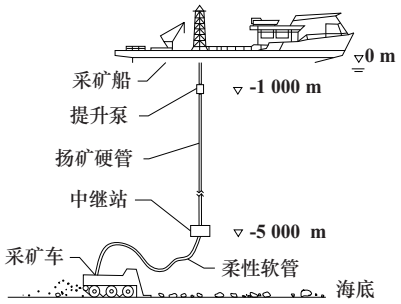


图 8　管道提升开采系统作业过程

Fig. 8　Operation process of pipe-lifting of mining system

2.1　矿石采集领域装备发展及核心技术

海底矿产资源分布示意图如图 9 所示。多金属结核通常赋存于深海平原的沉积物表层,多呈 1~12 cm 颗粒状[8];富钴结壳通常黏附在海山、岛屿斜坡和海底高地表面,多呈 4~20 cm 的壳层状[9];多金属硫化物则集中在洋中脊、弧后盆地等热液活动区,多呈较大的块状或烟囱状[8]。由于 3 类矿石的物理性质、赋存状态与海底地形差异显著,采矿车不仅需要针对不同矿石类型发展相应的采集技术,还必须具备在复杂海底地形中稳定、高效行走的适应能力,这是实现海底矿产资源商业化开采的关键技术挑战之一。

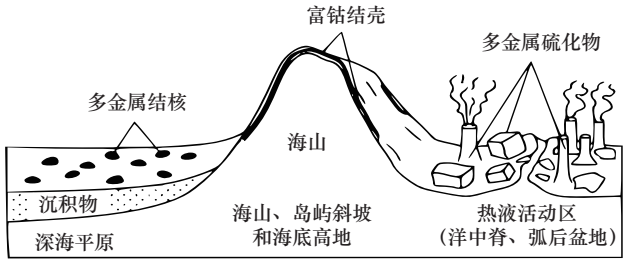


图 9　海底矿产资源分布示意图

Fig. 9　Schematic diagram of distribution of submarine mineral resources

近年来,国内外相继研发了多款针对不同矿石类型的采矿车,并陆续开展了海上试验。国外,比利时 GSR 公司研发的“Patania Ⅱ”采矿车于 2021 年在克拉里昂-克利珀顿区(Clarion-Clipperton Zone, CCZ)完成了 4 500 m 深海试验,验证了水力抽吸式采集头的作业稳定性,并在沉积物扰动控制方面积累了大量数据[10];加拿大 TMC 公司联合 Allseas 进行了首次全系统集成海试,实现了超 3 000 t 湿结核的采集,展现了极高的工业化潜力[11]。

国内,中国五矿长沙矿冶院有限责任公司研制的“鲲龙 500”采矿车在 500 m 海试中实现了 10 t/h 的采集能力,其特定的履带行走与水力采集系统在软底质行走性能上表现优异[12];上海交通大学研制的“开拓二号”重载采矿车于 2024 年在西太平洋成功完成 4 102.8 m 深海试采,不仅刷新了国内采矿车作业深度纪录,还通过创新的多矿种复合钻采技术,实现了对多金属结核与富钴结壳的高效采集,单次下潜采集量超 200 kg[13]。

对比而言,国外在商业化全系统集成及环境影响控制标准制定方面领先,尤其对采集羽流的控制技术更成熟;我国则在复杂地形行走、多矿种兼容采集及关键装备国产化方面具有优势,但在长期连续作业稳定性与工业化量产效率上仍需提升[14]。

2.1.1　*矿石破碎技术*

矿石破碎技术旨在将海底矿石剥离、破碎成便于收集与输送的颗粒。多金属结核主要分散在海底沉积物上,采集时大多无需切割破碎。而对于富钴结壳和多金属硫化物,目前有多种切削破碎方法,其中应用较广的是机械式截齿破碎的螺旋滚筒切削法以及水射流切削法。

螺旋滚筒切削法因适应地形能力强、破碎效率高,已成为实际海试与商业化系统中应用最广的方法。其通过滚筒旋转驱动螺旋排列的截齿,对矿岩进行连续剪切与冲击,使之从基岩分离并破碎至小于 50 mm 的目标尺寸。该方法的效率受截齿排列、切削深度、滚筒转速等因素显著影响。国外早在 2000 年前即开展相关研究,如文献[15]通过线性截割试验揭示了富钴结壳的切割参数关系。国内研究虽起步较晚,但近年来在机理仿真与样机研制方面发展迅速,如文献[16]发现,对于富钴结壳,截割深度对截割阻力的影响比截割速度更明显。目前,结构简单、受力合理的镐型截齿被广泛使用,而截齿几何设计、矿石力学性质等更精细的因素仍在持续研究中。

水射流切割技术则凭借非接触、低磨损、无热损伤等优势,成为处理硬岩及结核微细化的潜在选择。其利用高压水射流冲击岩面,通过水楔、冲蚀及空化效应实现破碎。早期研究集中于日本与欧美,近年来波兰 Borkowski 团队证实高压水射流可将多金属结核破碎至微米级,利于管道输送[17]。然而,深海高压环境会导致水垫效应与压持效应,严重削弱射流破岩效

率[18-19]。为应对这一挑战,国内外学者提出了提高泵压、优化喷嘴结构、发展跨介质射流等策略[20-21]。

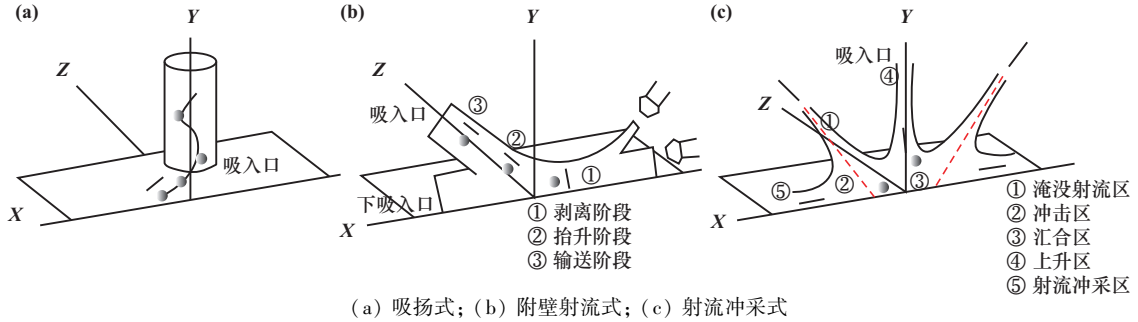
综合来看,纯水射流在处理高强度基岩时能耗较高,当前共识是走向“水射流辅助机械切割”的复合路径,以兼顾低磨损与高能效。其他如冲击钻、盘刀轧削等方法,因结构复杂、适应性不足,目前尚未广泛应用于商业开采系统。

2.1.2 *矿石收集技术*

矿石收集技术旨在将分布在沉积物中的多金属结核颗粒或破碎后的富钴结壳颗粒和多金属硫化物颗粒提升聚拢、输送至采矿车指定的空间。深海集矿技术源于对深海多金属结核的收集[22],在此基础上衍生出针对富钴结壳以及多金属硫化物的破碎-集矿一体化复合采集技术。目前国内外较为成熟的集矿技术依据矿石受力原理可分为机械式、水力式和复合式 3 类。

机械式集矿是深海采矿早期探索的一种方式,其核心原理是利用旋转斗轮、链式输送机等机械运动件直接挖取并输送多金属结核等矿物[23]。具体形式主要包括链耙式、滚耙式、链斗式和轮斗式等。尽管该方式在理论上具有收集效率较高的优点,但实践表明,由于缺乏水力辅助,纯机械结构会不可避免地挖取大量海底沉积物,对环境造成显著扰动。同时,由于挖掘阻力大、易损、易堵及维修性差等固有缺点,机械式集矿方式已被普遍认为不符合未来深海采矿的发展趋势,正逐渐被更高效、可靠的技术所替代[24]。

相比而言,水力式集矿具有结构简单、故障率低、对海底扰动小等优点,因此被广泛应用[25]。其原理主要是利用水射流冲采或产生负压抽吸结核。水力式集矿[26]依据结构形式主要分为吸扬式、附壁射流式和射流冲采式,如图 10 所示。



(a) 吸扬式;(b) 附壁射流式;(c) 射流冲采式

图 10 水力式集矿方式

Fig. 10 Hydraulic ore collection mode

吸扬式集矿利用水泵或负压装置在吸口处产生压差,从而形成抽吸流场将结核与周围介质一并吸入。其结构简单、可靠性高、对地形适应性强且对海底直接污染小,曾是早期海试的主流方案。然而,该方法选择性差,在吸取结核的同时会吸入大量沉积物,增加能耗。随着环保法规趋严,该技术再次成为研究焦点。而国内研究目前侧重于通过数值模拟与水槽试验优化吸口结构与流场参数,以提升集矿精度与效率[27-28]。

附壁射流式集矿也称为单排喷嘴式集矿,其利用康达效应使高速水射流贴附于曲面流动,在集矿头底部形成低压区,从而将结核吸起。该方法能在一定程度上实现结核与细粒沉积物分选,具有“拒土吸矿”潜力,在保证较高收集率的同时对海底流场的扰动远小于射流冲采式,被视为平衡效率与环保的最佳路径之一,也是目前国际公认最具商业化前景的集矿方式[29]。射流速度、行进速度、离底高度等作业参数都可能对沉积物侵蚀产生影响[30-31]。如何在大尺度地形起伏下保持稳定离底高度、抑制尾部羽流是目前关注的重点及难点[32]。

射流冲采式集矿也称为双排喷嘴式集矿,其原理是通过高速水射流直接冲击海床,利用动量交换破坏沉积物结构剥离结核,最后由流场涡旋将矿粒提升至吸口。该方法的挖掘能力以及地形适应能力强,对于黏性或半埋结核特别适用。目前,国内学者在该方法的流场特性精细化解析方面研究活跃[33-37]。然而,射流的直接冲击会产生高浓度底栖羽流,对生态系统威胁大,且存在高能耗、高含泥率问题[38-39]。虽然“鲲龙 500”采矿车海试验证了通过调节行进速度与抽吸流量可有效控制沉积物吸入量[40],但目前射流冲采式主要作为辅助手段与机械式或抽吸技术结合,在保证收集率的同时控制环境影响[41-44]。

复合式集矿融合了机械剥离与水力输送,利用机械部件将矿石从沉积物中分离,再通过水力装置捕获并输送,有效克服了纯机械式集矿扰动大和纯水力式集矿对黏性沉积物适应性差的局限[29],已成为当前商业采矿系统的主流应用方案,在韩国 KIOST 的

“MineRo”、欧洲的“Apollo II”、比利时的“Patania II”以及我国的“鲲龙 500”等采矿车中均有应用。

2.1.3　采矿车行走技术

在深海采矿作业中,实现矿石破碎与收集功能的装备均集成于采矿车上。因此,如何使采矿车在复杂海底环境中稳定、精确地行驶至目标位置,是深海采矿技术研究的核心课题之一。相较于拖曳式、阿基米德螺旋式、螺旋桨推进式,履带式行走技术因其操作便捷、对海底环境影响相对较小、承载能力强等优势,已成为当前深海采矿车主流的行走方式。

深海采矿履带车地面力学研究是履带式采矿车在海底正确安全行走的理论基础,核心在于揭示履带与海底稀软沉积物之间的相互作用机理,适用于通过优化经典压力-沉陷模型(如 Bekker 模型)及剪切应力-位移关系得到的塑性海底地面理论模型。在极端条件下,还需考虑土壤的压缩-剪切耦合效应以及对时间依赖的流变特性[45]。牵引性能与稳定性是衡量采矿车行走能力的关键指标,当前研究重点包括建立精确的牵引力预测模型[46],分析履带张力、履齿参数等影响,以及评估采矿车的机械稳定性[47]。

为了能够高效安全地采集资源,海底采矿车需基于实时感知的矿藏分布、地形信息及自身状态,并借助导航与定位系统进行动态的轨迹规划与跟踪控制。路径规划旨在设计高效行走路线,以提高覆盖率、降低能耗并规避障碍。对于多金属结核开采,全覆盖规划是主流,常采用直线循环推进覆盖法结合如 U 形、鱼尾形等不同的调头策略以减小转弯扰动和打滑风险[48]。方案的稳定性和覆盖率已在 TMC 与 GSR 等机构的海试中得以测试验证[49-50]。算法上,融合改进 Theta* 算法、动态窗口法(DWA)以及多体动力学模型,能够进一步提升复杂海底的导航避障和运动控制精度[51]。轨迹跟踪则要求采矿车跟踪一条具有时间约束的预定路径,这对保证回采率至关重要。尽管目前多数研究仍集中于无严格时间约束的路径跟踪,但针对采矿作业的轨迹跟踪技术正在逐渐引起人们重视。韩国 KIOST 团队在早期采用视线法(LOS)实现了软土上采矿车的精确跟踪[52]。近年来,国内致力于将多体动力学模型与优化控制算法相结合,以提升跟踪精度[53],但大多仍处于仿真阶段,缺乏海试验证。

履带式采矿车行走会扰动海底沉积物,产生底层羽流,其对生态环境的影响远大于输送系统排放的中层羽流。底层羽流的演化包括初始排放、浮力驱动及被动输运 3 个阶段,细颗粒物可长期悬浮并随洋流扩散至作业区外数公里,对底栖生态系统造成持久影响[54]。DEME-GSR 的 2021 年海试及对 DISCOL 区域的长期观测均证实了底层羽流的危害性[55]。调整车辆速度、离底高度及排放速率等参数能有效改变尾迹与羽流演变,控制扰动[56]。此外,适量添加絮凝剂可促进颗粒絮凝沉降,以限制羽流扩散范围,但需精准控制剂量以防适得其反[57]。因此优化行走控制参数与研发物理或化学抑制技术是当前国际上的重要研究课题。

2.2　矿石提升领域装备发展及核心技术

矿石提升是深海采矿的核心环节,旨在将数千米海底采集的矿石安全、高效地输送至海面支持船。国际上的企业在早期已设计并测试了多种扬矿管道系统。例如,前文所提及的加拿大 TMC 公司于 2022 年在 CCZ 完成的全系统海试,成功将约 4 500 t 矿石从 4 300 m 水深输送至水面。

国内的矿石提升研究起步于 1990 年代,通过“八五”“十一五”等国家计划,逐步建立了 30~224 m 的垂直管道试验系统,验证了扬矿工艺。2016 年实现了 300 m 级海上试验,2021 年完成了 1 300 m 级整体联动海试。在 2025 年,由中国石油大学牵头研制的全球首套 6 000 m 级深海采矿非金属智能柔性混输管在南海成功完成海试,实现了矿浆体积浓度 15%、输送量 457 m^3/h的稳定输送,标志着我国在超深水非金属柔性管领域取得了从设计、材料到制造的全链条原创性突破[58]。

对比而言,国际领先企业已在全系统集成与规模化试采方面取得实质性进展,其系统可靠性与作业数据更为充分。我国则在关键装备的创新研发,特别是超深水非金属柔性管这一前沿技术路径上实现了国际领先,但在全系统长期连续作业的工程验证、商业化规模以及系统智能监控与运维经验方面,仍需进一步积累和追赶。

2.2.1　长距离竖直管道输运技术

管道提升系统按驱动方式不同可分为气力提升和水力提升 2 类[59],其中水力提升是目前的主流方案[60]。

水力提升系统通过管道中串联的潜水泵提供动力,形成固-液两相流将矿石输送至水面,主要采用数值仿真手段,揭示数千米垂直管道内矿浆的复杂流动规律。研究发现输送效率通常与颗粒粒径以及固相浓度成反比[61-62],因此想要保证输送效率以及系统稳定则需维持较高的垂直流速。在高速流态下,颗粒通常呈现轴向聚焦趋势[63],但湍流导致的壁面集聚效应是微观堵管的潜在风险[64]。此外,长距离输送的压力损

失与颗粒浓度、级配等参数呈高度非线性关系[65-67]，而管道在海洋环境下的振动、摇摆等动态外载荷会显著扰动管内流场，加剧压力波动与能量损耗[68]。

气力提升则通过向管道底部注入压缩气体，利用气-液-固多相流的密度差与动能提升矿石。该技术在深海环境下会面临高静水压力增强气体溶解度、削弱气塞效应[69]等挑战。故研究重点为高压下的多相流动机理，涉及气泡流、段塞流等多种流态[70]。数值模拟结果表明，进气深度是影响空隙率分布与能量耗散的关键变量，而采用环喷式设计等优化注气结构可有效提升气相做功效率[71]。

2.2.2 提升管道防堵塞与紧急避险技术

深海矿石水力管道输送过程中，由于矿石颗粒粒径大、跟随性差，在恶劣海况下极易引发管道堵塞，这是威胁系统安全与效率的核心技术挑战[72]。堵塞形成机理方面，主要关注局部浓度激增与颗粒团聚过程。当高速细颗粒渗透至低速粗颗粒群时，易诱发段塞流并导致堵管[73]。流速、流体密度及管道截面收缩是关键诱发因素[74]。从能量角度出发，颗粒间碰撞频率与耗散能的临界平衡控制着团聚体的生长[75]。值得注意的是，颗粒形态对流场行为有显著影响，研究表明椭球体颗粒因旋转动能更高，能有效抑制贴壁沉积，表现出优于球形和长条形颗粒的抗堵塞性能[76]。

在线监测技术针对深海管道不可视的特点，通过非侵入式信号反演流态。脉冲回波分析可通过反射波的飞行时间与幅值衰减来判定堵塞位置、质量及刚度[77]。此外，对流体瞬态流型进行频谱分析，其峰值振荡特征也可作为核心堵塞的定位判据[78]。而基于压差信号的局部堵塞尺寸估算算法，则为评估防堵措施效果与清管风险提供了工程化手段[79-80]。

应急避险是保障系统安全的关键。针对紧急断电导致的泵口颗粒堆积风险，普遍采用安装紧急排放阀的被动策略，但其开启时序至关重要[81]。为克服阀门动作的时间滞后，浙江理工大学提出了一种主动干预技术，在断电瞬间通过注入气液混合流维持颗粒悬浮，为阀门开启争取时间[82]。日本的新日本制铁公司则从系统设计入手，提出一种具备自愈能力的闭环提升系统，通过改变流路实现快速反冲洗疏通[83]。此外，面对极端海况，传统的整体回收方式耗时过长。海南大学创新性地提出了一种基于自升式下潜平台的紧急避险方法，可使提升立管系统快速脱离母船并下潜至安全深度，大幅缩短了避险响应时间[84]。

2.2.3 无泵送水下矿物输运技术

现有的水力泵管输送系统虽然相对成熟，但在超深水环境中面临能耗高、易磨损堵塞、立管庞大且应急撤离困难等瓶颈。为此，国际工程界提出了多种无泵送输运技术方案，旨在从原理上规避管道磨损、堵塞及产生羽流等问题。目前，该领域主要分为机械离散提升技术、连续链斗技术以及浮力驱动穿梭技术。

机械离散提升技术借鉴深井矿山提升原理，使用重载容进行往复式运输。美国 National Oilwell Varco (NOV)公司开发的系统单容器容积可达 600 t，在 5 000 m 水深下循环周期可控制在 2 h 以内，其核心优势在于通过双容器互平衡设计，利用下放空容器的重力势能辅助提升满载容器，从而显著降低系统峰值能耗[85]。天津大学也提出了类似的双船微能耗吊装系统概念[86]。文献[87]提出一种全海深无泵送大产能深海采矿提升系统，如图 11 所示。该系统通过卷扬机与纤维绳索将采矿车采集到的大型矿物包提升至水面，结构简单，提升效率高且对海底环境扰动小，具有较大研究与应用前景。但目前国内无泵送的采矿系统处于理论或验证阶段，亟须实际海试验证其可行性。

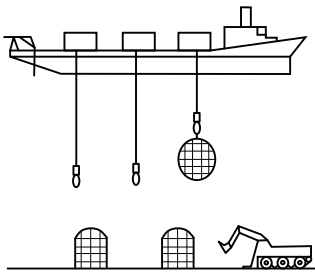


图 11 全海深无泵送大产能深海采矿提升系统

Fig. 11 Full-ocean-depth pump-free high-capacity lifting system for deep-sea mining

近年来，连续链斗技术得益于新材料与动力学控制技术的进步，正在逐渐复兴。其现代化改造的核心是采用如芳纶、超高分子量聚乙烯等接近中性浮力的高强度合成纤维缆索，显著减少了深水作业中缆索自重带来的额外负荷。为解决缠绕难题，日本学者提出了双船或双带连续链斗系统，通过物理分离上升与下降缆，并结合水动力分离器，实现了复杂流场下铲斗轨迹的稳定控制[88]。国内文献[89]利用绝对节点坐标法建立高精度动力学模型，解决超长缆索可能产生的鞭梢效应抑制以及主动补偿策略，以提升系统稳定性和采集效率。研究发现通过优化铲斗间距与牵引速度，可有效平抑张力突变并提升采集效率。连续链斗直接提升矿石，无效载荷少，在理论上具有能效优势，尤其适用于中浅层矿区[90]，也是未来商业化开采中具备竞争力的替代方案。

浮力驱动穿梭技术是当前最具颠覆性的技术路径,其通过调节自身浮力实现矿石的垂直转运,从根本上摆脱了对长距离提升管道和大功率水面泵送设备的依赖。国际上形成两大主流:一是以美国 Impossible Metals 公司为代表的“智能集群”路线,如图 12 所示,其 Eureka 系列 AUV 采用可变浮力引擎,可实现零重力悬停与选择性采集,目标是构建大规模无人蜂群开采系统[91-92];二是以 Krypton Ocean Group 等为代表的“重载运载”路线,设计载重数百吨的深海穿梭机,利用多级压载系统与深海静水压差完成作业循环[93]。国内在该领域的研究尚处于概念与关键技术攻关阶段,相关机构提出了基于 AUV 集群的系统方案[94]、基于“重力-浮力循环”的垂直运输概念[95],并在 AUV 集群协同控制算法等方面取得了理论进展[96-97],为未来发展奠定了基础。

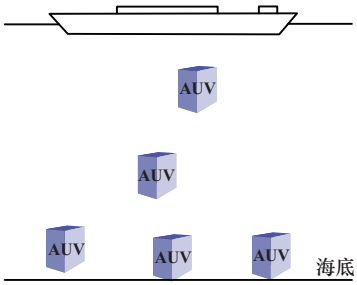


图 12　Impossible Metals AUV 采矿方案示意图

Fig. 12　Schematic diagram of mining scheme with Impossible Metals' AUV

2.3　水面支持领域装备发展及核心技术

深海采矿的水面支持平台作为整个系统的指挥、控制与处理中心,其发展与国际深海采矿试验的进程紧密相连。国际上自 20 世纪 70 年代起便开始了水面平台的探索。早期以美国海洋矿业联合公司(Ocean Mining Associates, OMA)、海洋管理公司(Ocean Management Inc., OMI)、海洋矿产公司(Ocean Minerals Company, OMCO)等公司为代表,通过改装矿砂船、钻探船等现有船舶,成功进行了千米级海试,验证了技术可行性。其中,OMCO 租用“格洛玛探测者”号配备的大型月池和先进动力定位系统为后续研发奠定了基础[98]。进入 21 世纪,水面系统趋向复杂化与专业化,日本试验采用了由采矿母船、扬矿母船等组成的多功能船队[99]。在商业化尝试上,既有像鹦鹉螺公司专门建造“鹦鹉螺新纪元”号采矿船的案例,也有重工改装深水钻井船的“Hidden Gem”号实践[100-101]。

我国深海采矿水面支持平台研发同样采取改装现有科考船路径。2018 年及 2021 年等多次海试均依托“长和海洋”号、“梦娜公主”号等改装科考船成功实施[102-103]。近年来,随着国家科研项目的持续投入,我国在关键装备研发和海试深度上进展迅速。上海交通大学“开拓二号”采矿车于 2024 年搭乘“向阳红 03”号船完成 4 102.8 m 海底试采[104]。

目前,全球深海采矿水面支持平台的发展仍处于工程验证阶段,尚未形成定型的专用船型。国外凭借先发优势,在技术成熟度和商业方案探索上暂时领先。国内则通过国家项目驱动,在装备自主研发和海试深度与能力上奋起直追,发展势头迅猛,正不断缩小与国际先进水平的差距。

2.3.1　水声通信技术

在深海采矿系统中,可靠的数据传输对于实现远程监控与多装备协同作业至关重要。虽然光纤脐带缆是目前的主流方式,但水声通信作为唯一能在水下实现中远距离无线传输的技术,在应对多车协同、复杂地形机动及应急断缆等场景时具有不可替代的战略地位。

深海垂直水声信道具有大带宽时延积和深海声道轴聚焦等特性,建模复杂。更关键的是,采矿作业本身会严重恶化通信环境:一方面,采矿车搅动产生的沉积物羽流会改变局部声学特性,导致信号散射与衰减;另一方面,如破碎、采集等机械作业和水面船舶设备会产生高强度、非高斯的脉冲噪声,能瞬间淹没通信信号,使传统基于高斯假设的接收机性能急剧恶化[105]。为应对上述挑战,研究正从传统模型驱动向数据驱动范式转型。在抗脉冲噪声方面,除利用压缩感知等传统优化方法外,基于一维卷积神经网络(1D-CNN)等深度学习方案展现出显著优势,能通过迁移学习适应特定海域,有效提升误码率性能[106-107]。在物理层传输技术上,正交频分复用(OFDM)与扩频通信是高速传输与可靠控制的主流选择,而自适应调制编码(AMC)方案可根据信道质量动态优化传输效率[108]。最具突破性的概念是引入声学可重构智能表面(aRIS),通过在深海声道轴深度部署智能反射面,可聚焦并引导声波能量,从而大幅扩展通信距离与可靠性,并结合强化学习实现动态波束调整以适应环境的变化[109-110]。国内外围绕深海采矿实际通信难题的研究总体趋势是融合物理层创新与人工智能,推动水声通信从单一的遥测遥控,向宽带、可靠、自适应的智能组网方向跨越。

2.3.2　*矿物处理技术*

深海矿物处理系统是深海采矿实现资源回收、控制环境影响与保障作业经济性的关键环节,主要对提升至海面支持船的大流量、低浓度矿浆进行高效固液

分离,以获得适于储存运输的矿物产品,并对尾水进行净化处理以满足环保要求[111]。典型的船上矿物脱水流程[112]如图13所示。

船体在风浪中的六自由度运动引入了复杂的非惯性系效应,会使振动筛、旋流器、压滤机以及离心分离器等分离装置受到严重干扰。例如,横摇会使旋流器内稳定的低压空气柱发生畸变甚至断裂,导致粗颗粒错误地进入溢流口,即跑粗现象,分离效率显著下降[113-114]。简单地提高入口流速在动态环境下可能适得其反,会加剧湍流并破坏分离精度[115]。对于振动筛,船体运动会导致筛面物料分布不均,即偏载现象。为此,研究提出了平移-摆动复合运动等机制来抵消摇摆影响,维持有效的颗粒分层[116]。此外,深海多金属结核的湿法筛分特性意味着颗粒间存在液桥力,增加了黏附性,需要更强的激振或弹性筛面设计来促进分离,这对设备结构强度提出了更高要求[117-118]。

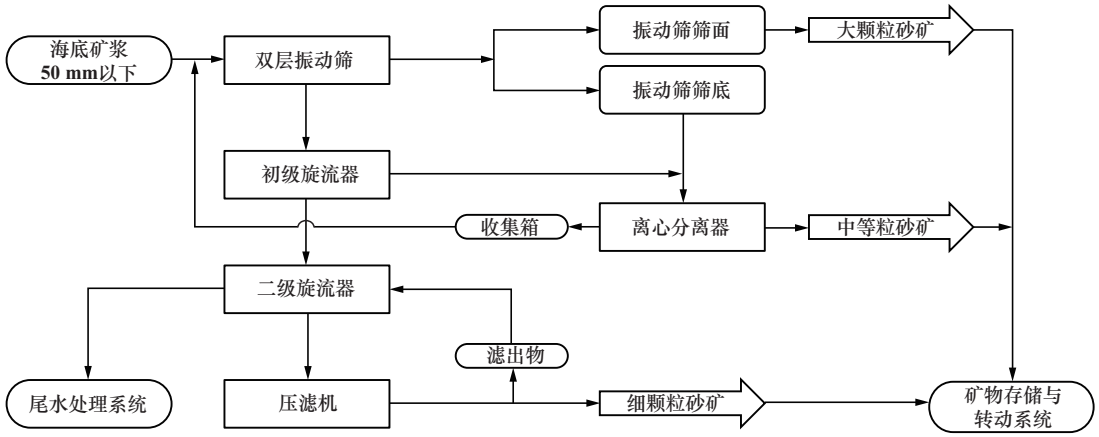


图13 矿物脱水流程

Fig. 13 Mineral dewatering process

矿物脱水产生的尾水中含有细颗粒和溶解物质,控制尾水排放后形成的沉积物羽流对环境保护十分重要。尾水中粒径小于15 μm的细颗粒可悬浮数年并远距离扩散,对海洋生态构成长期风险。因此,当前研究聚焦于预测羽流演化、优化排放深度,部分研究建议在中深层约1 250 m水深排放尾水,以避开生态敏感水层;开发絮凝沉降技术,最大限度降低对环境的影响[119-120]。

2.3.3 布放与回收技术

深海采矿装备的布放与回收是指将采矿车、中继站等大型水下设备安全部署至海底作业区,并在任务完成后将其收回至水面母船的过程;核心技术在于面对复杂海况时确保大质量、异形装备在收、放过程中的结构安全与姿态稳定[121]。根据设备的结构与形态差异,矿车和中继站等大尺寸重型设备通常由甲板起重机在船尾和月池区域进行布放,而提升泵和扬矿立管等细长设备则通常在井口中心进行垂直布放[121]。

布放的过程中面临两大技术难点。首先是飞溅区流固耦合与砰击载荷。当采矿车穿越水-气界面时,会遭受剧烈的波浪砰击,并伴随空泡的生成与溃灭,产生巨大的瞬时冲击力和可能导致设备翻滚的侧向力,严重威胁结构安全[122]。其次是脐带缆的非线性动力学与断裂风险。作为连接母船与水下装备的“生命线”,脐带缆在数千米布放中承受复杂的轴向张力、波浪随机激励及剪切流作用。当母船运动导致缆绳瞬间松弛后再度张紧时,会产生数倍于静态载荷的冲击张力,最终引发断裂[123],例如“Patania II”采矿车在2019年海试中曾发生缆绳断裂。为应对此挑战,工程上研究采用S形或陡波形等特殊缆绳构型,通过加装浮力模块来缓冲母船运动传递的动载荷,从而有效降低张力波动并抑制侧向漂移。同时,针对芳纶等新型非金属缆绳在超深水环境下的黏弹性与非线性力学行为研究,对实现精确的深度控制也至关重要。

2.3.4 升沉补偿技术

在深海采矿作业中,水面支持船在波浪作用下产生的六自由度运动(纵摇、横摇、艏摇、纵荡、横荡及升沉)会通过长达数千米的提升管系传递至水下系统,引发巨大的附加动载荷,威胁整个系统的稳定性与可靠性[124]。因此,必须在船体与提升管系之间设置升沉补偿系统,以隔离或减缓难以被动力定位系统完全消除的船舶纵摇、横摇及升沉运动的影响[125-126]。根据工作原理,升沉补偿技术主要分为被动式、主动式和半主动式。

被动式升沉补偿系统依靠蓄能器、弹簧或重力等被动元件来吸收和储存能量,无需外部动力,结构相对简单、可靠性高,但补偿精度和带宽有限。“格洛玛探测者”号上建立的系统即为经典案例,它通过万向架

补偿摇摆,并利用液压缸与高压气体蓄能器应对升沉运动,但体积庞大。该系统补偿效率与蓄能器容积、管道参数密切相关[127],且补偿器的安装位置,例如靠近负载,也会影响其性能[128]。近期研究致力于优化被动式升沉补偿系统设计,如文献[127]针对 6 000 m 系统进行仿真,文献[129]提出了结合柔性关节和高压蓄能器的紧凑型方案,均验证了被动蓄能器在降低动态载荷方面的有效性。

主动式升沉补偿系统则通过传感器实时检测运动,并驱动液压或电动执行机构主动施加反向作用力,以实现高精度的运动抵消。其补偿性能优越,但系统复杂、能耗高。主动补偿能有效改善提升管顶端的轴向力及其纵向振动的传递延迟问题[130]。国内在该领域研究活跃,例如文献[131-132]设计了基于并联机构的广义升沉补偿驱动平台;文献[133-135]通过虚拟样机技术验证了主动式升沉补偿系统的可行性。此外,主动式升沉补偿系统在宽频振动控制及复杂环境适应方面具有优势[136-137]。

半主动式升沉补偿系统融合了前两者的优点,通过可调阻尼器或可控蓄能器等元件,以较低能耗实现适应性的补偿控制,在鲁棒性和性能之间取得较好平衡,被认为是当前的主流发展方向[138]。其概念可追溯至 1991 年 RETSCO 公司的相关发明[7]。国内外相关研究均证明了半主动式升沉补偿系统在缓解船舶运动传递方面的有效性和稳定性,且其优势能够拓展至更复杂的海况下[129-139]。

3　深海采矿国内外技术对比评估

为了更好地体现我国在三大关键技术领域相较于国外的优势和不足,从总体及矿石采集、矿石提升、水面支持三大关键技术领域进行多维度定量对比评估。

3.1　评价标准

总体评价国内外深海采矿技术可从创新性、技术性能、工程化与成熟度、产业化准备度以及环境友好性 5 个维度展开。其中,创新性以英文文献数量、专利数量、高质量文献数量以及高价值专利数量为指标(取最高数量为满分,下同);技术性能主要考虑海试最大作业深度(取 6 000 m 为满分)与矿石采集效率(取 120 t/h为满分);工程化与成熟度主要考察是否完成千米级全系统海试、累计海试时长及采集矿石种类的全面性;产业化准备度主要关注采矿车、扬矿泵、布放系统等核心装备的国产化程度;环境友好性则评估羽流扩散原位监测、生态避让等技术与装备的研发测试情况。

矿石采集技术可从创新性、矿石破碎技术、矿石收集技术、采矿车行走技术以及工程化与成熟度 5 个方面进行评价。其中,矿石破碎技术评价以破碎后粒度分布及超大颗粒占比为指标;矿石收集技术评价主要专注不同原理技术(如机械式、水力式和复合式)的成熟度与适用场景,以及单次作业对目标矿物的收集率;采矿车行走技术评价主要关注路径跟踪精度与羽流评估控制等自主作业水平;工程化与成熟度则依据近 5 年不同采矿车海试数量以及海试深度及系统集成度评分。

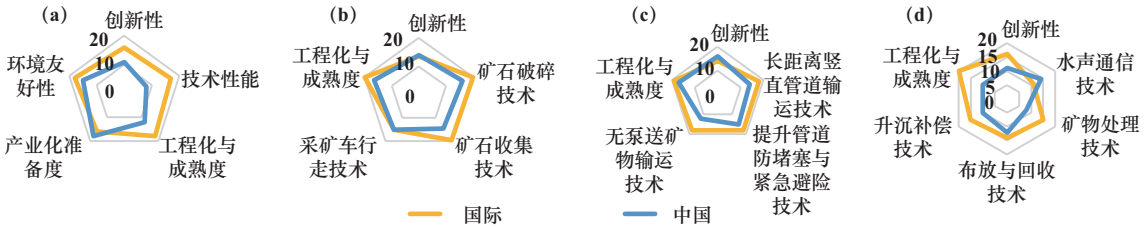
矿石提升技术可从创新性、长距离竖直管道输运技术、提升管道防堵塞与紧急避险技术、无泵送矿物输运技术以及工程化与成熟度 5 个方面进行评价。其中,长距离竖直管道输运技术评价主要考察提升效率(取 120 t/h 为满分)和深度适应能力(取作业深度大于 6 000 m 且效率衰减小于 10%为满分);防堵塞与避险技术评估防堵设计、流量监测与预警系统、应急清堵措施有效性及紧急关断预案的自动、快速与安全程度;无泵送矿物输运技术对比主流泵送技术在能耗、成本与环保方面的潜在优劣势;工程化与成熟度依据近 5 年不同提升系统的海试数量与深度评分。

水面支持技术可从创新性、水声通信技术、矿物处理技术、布放与回收技术、升沉补偿技术以及工程化与成熟度 6 个方面进行评价。其中,水声通信技术评价以数据传输速率、误码率、有效作用距离及深海稳定性为指标;矿物处理技术评价中,脱水效率以当前最大吨每小时值为满分,布矿能力考虑甲板空间占用率小为优,尾水处理能力则考虑废水与污泥处理能力;布放与回收技术依据最大收放深度、设备质量及高海况下的安全作业窗口评估;升沉补偿技术主要评价补偿精度及主动预测式补偿能力;工程化与成熟度则主要基于近 5 年不同采矿船的海试数量、载矿质量及海上作业天数进行评分。

3.2　评价结果

依照 3.1 节的评价标准对中国与国际的深海采矿技术进行总体评价,结果如图 14 所示。

总体上来看,我国深海采矿的创新性落后于国际,其中我国的论文和专利总量虽占据优势,但表征核心创新能力的高被引文献和高价值专利仅分别为 35 篇和 31 件,而美国则分别有 117 篇和 167 件,数量明显落后。在技术性能方面,尽管我国“开拓二号”海试深度为 4 102.8 m,已逼近国际先进水平 4 500 m[13],但在核心采集效能上,国际已实现 86.4 t/h 持续生产能力[11],我国仍处于单机能力验证阶段,规模化生产较



(a) 总体评价; (b) 矿石采集领域; (c) 矿石提升领域; (d) 水面支持领域

图 14 深海采矿技术总体评价对比

Fig. 14 Overall evaluation and comparison of deep-sea mining technologies

为滞后。在工程化与成熟度上,国际领军项目已迈入全系统闭环联动海试,而我国虽掌握水力提升等核心技术并完成千米级试验[58],但在 4 000~6 000 m 全系统联调上仍待突破。但在产业化准备度上,我国装备具备更强的多矿种适应性,且核心部件国产化率超 90%,较之深陷全球供应链依赖的西方国家群体更具自主优势。在环境友好性方面,国际侧重于对大规模监测网络以及从源头减缓技术的研究,我国相关合规监测虽获国际海底管理局批准,但原创性减缓技术的研发布局仍显不足。

矿石采集领域,在创新性方面,我国研究总量显著领先,但高被引文献与高价值专利数量较美国、澳大利亚仍存在提升空间。在矿石破碎上,日本预计能将超大颗粒控制在 5% 内,破碎精度高。而我国“开拓二号”虽兼顾多矿种适应性,但在精细破碎维度仍待精进。在矿石收集方面,国际前沿利用康达效应及机械臂技术[30],已实现高效采集与高度环保化作业,但国内主流的机械-水力复合式方案[12],虽具备环境普适性,但在收集效率与环保精细度上尚处于单机采样验证阶段。采矿车行走技术方面,我国在复杂地形适应性及控制算法上展现出一定优势,而国际在长距离自主导航与监测体系上更成熟[49-50]。在工程化与成熟度上,近 5 年国内外采矿车采集海试频繁,海试频次上旗鼓相当,但我国在采集深度上仍落后于国际。

矿石提升领域,在创新性方面,我国研究总量保持领先,但高价值专利数量落后于美国。在长距离垂直管道输运领域,国际先进系统已实现 86.4 t/h 的持续稳定提升及超 3 000 t 的累计输送量,且日本已于 2026 年初完成对 6 000 m 超深海提升海试的尝试;而国内研究多侧重于提升机理的理论优化,工程验证仍局限于实验性采样,在大规模连续作业实测及极端深度适应性方面尚存短板。在提升管道防堵塞与紧急避险上,国际上已构建起完备的紧急解脱与故障恢复机制[81-83],国内研究在理论建模与智能感知领域位居前沿,但缺少复杂工况下的规模化实战验证。而对于新型“无泵送”技术,面对国际前沿涌现的 AUV 集群式无泵输运等颠覆性路径及原型测试[91-93],我国目前仍聚焦于传统泵管系统的工程攻关,无立管式采矿系统的商业化演进进程相对迟滞。在工程化与成熟度上,近年国内外对于管道提升的海试数量相当,但国际已完成超 4 000 m 的商业化规模持续提升,而我国目前仍处在 4 000 m 的提升试验。

水面支持领域,在创新性方面,我国专利数量总量依旧占优,但高被引文献和高价值专利数量与美国仍差距显著。在水声通信技术上我国已领先于国际,我国已在“无缆”纯水声通信领域实现了 30 km、4 kbps 传输能力,而国际主流依旧依赖高带宽光电复合脐带缆[106-110]。对于矿物处理,我国受制于大规模连续提升验证的匮乏,国内船载矿物处理系统仍滞留于实验室或小试阶段,尚未实现国际前沿工业化脱水及闭环回注。在布放回收与升沉补偿领域,国际装备依托成熟的月池设计与千吨级重载经验,在高海况作业窗口期具有优势;相比之下,我国非金属复合缆技术在有效载荷比上更具潜力[58],且混合补偿系统在能效与算法上展现出后发优势,但同样缺乏大规模工程实证。在工程化与成熟度上,国际上已研制出专门针对深海采矿水面支持的专用船只,而国内还处在改造测试阶段。

基于对深海采矿技术国内外发展情况的系统评估与量化对比,得到国内外关键技术评分总汇,如图 15 所示。总的来看,我国论文与专利总量均领先,但高价值成果数量明显不足;虽已构建起较为完整的技术研发体系,并且核心装备国产化程度超过 90%,在产业化准备度上形成优势,但整体技术成熟度、全系统联动作业验证、专用装备研制以及对环境影响的控制较国际领先水平仍有较大差距。而就本文评价结果横向比较三大技术领域,水面支持已成为我国深海采矿技术链条中最需加速突破的薄弱环节。

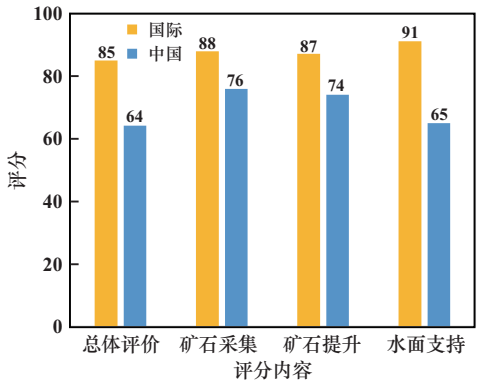


图 15　国内外关键技术评分总汇

Fig. 15　Summary of key technology scores domestically and internationally

4　深海采矿技术挑战与未来发展

4.1　深海采矿面临的关键技术挑战

4.1.1　多场耦合下的动力学协同控制

深海管道提升采矿系统本质上是一个跨尺度、大长细比且具有强非线性特征的柔性多体动力学系统。在数千米水深的极端环境下，各子系统间的时变耦合关系会使得系统难以稳定运行。例如长距离扬矿硬管在外部非均匀海流载荷、母船升沉激振以及内部固液两相流波动的非定常流固耦合作用下，极易诱发涡激振动或参数共振，进而加速硬管的疲劳损伤[68]。同样，海底采矿车的非线性行进轨与柔性连接管的空间构型之间也存在动力学映射。采矿车在稀软沉积物上的非匀速运动会实时改变柔性管的几何形态，若协同控制策略未能实现动态解耦，极易引发柔性管缠绕、局部张力瞬时超限或海底装备碰撞等安全风险[45-47]。目前，现有的动力学模型在集成内流动力学、多体接触力学及海洋环境载荷的全局演化规律方面仍不完备，缺乏能够实时响应复杂海况的系统级联动控制策略。

4.1.2　长距离垂直输运的流动保障与设备可靠性

在数千米的垂直输送过程中，矿浆主要以粗颗粒固液两相流或气-液-固三相流形式存在，其流动规律极其复杂，这将导致作为输运系统核心的提升泵可能面临严重的磨损堵塞风险[61-62]。深海矿物颗粒硬度高、形状不规则，当高速流动的矿浆经过泵体过流部件时会产生剧烈的冲蚀磨损，从而导致泵效降低甚至失效。粗颗粒在流速较低的区域极易团聚，特别是在泵停止后再启动或进料波动情况下，泵口或管道局部极易形成堵塞[72-76]。此外，深海高压、低温及高盐腐蚀的特殊环境对装备材料提出了极高要求。管道与泵体不仅要承受内部矿浆的磨损，还需抵御外部海水的长期腐蚀与高压。现有的结构设计在长期商业化运行中的可靠性仍需验证。

4.1.3　环境约束与羽流控制

随着国际社会对深海环境保护的日益重视，环境友好性已成为制约深海采矿商业化开展的重要因素。采矿车在海底行走采集过程中以及采矿船尾水排放的过程中，羽流的产生不可避免。这些羽流可随洋流扩散至数公里范围，可能导致海底生物群落被掩埋或导致海洋生物窒息而死，对海洋生态产生严重影响[54-56,119]。此外，采矿作业的噪声也可能破坏水体生态平衡[105]。如何在保证商业化开采产能的同时，将对环境的扰动控制在国际海底管理局允许范围内，是当前采集头设计以及行走机制优化的核心难题。

4.2　我国深海采矿未来发展方向展望

4.2.1　深化核心技术攻关

针对前文所提的技术短板，需重点攻克深海采矿作业中的高风险、高技术壁垒环节。在加强商业化开采能力方面，创新研究截齿梯度排布以提升采集头破碎效率；依托康达效应优化设计附壁射流式收集装置以提升集矿效率和环境保护性；采用固液两相流数值仿真系统揭示不同颗粒级配、浓度与流速条件下垂直管道输送特性，从而提升垂直提升管道的输送效率。在降低商业化运行成本方面，研制耐冲蚀高铬铸铁-陶瓷复合过流部件，确保关键零部件在数千米深海具备数千小时以上的无故障运行能力，提高集矿与扬矿系统在极端环境下的可靠性和稳定性；在安全保障方面，建立基于分布式光纤声学传感的管道堵塞实时监测与预警系统，将堵塞定位精度提升至米级；在水面支持方面，研制深海采矿专用采矿船，使其具备适应深海恶劣海况的大型月池收放系统及重载波浪补偿装备。除此之外，还需加强对无泵送等新型采矿方式的研究和试验，将创新性想法落地，重点突破深水试验以及实地海试。

4.2.2　推进系统级联合海试

我国深海采矿目前多处于单体设备验证阶段，未来必须向全流程系统联调发展。需依托国家级深海科研平台，组织实施全系统、大深度、长周期的联合海上试验。重点验证采矿车-提升系统-采矿船全流程在动态环境下的协同作业稳定性，获取真实的工程数据，如能耗特性、故障模式、作业效率，以此修正理论模型并优化装备设计，推动技术向商业化迈进。

4.2.3　强化采保一体化技术

需摒弃“先开发、后治理”的思路，将环境保护技术融入采矿装备设计的全生命周期。首先，需减少羽

流的形成,需在采集方面开展如附壁射流式低扰动采集头的设计研制,优化集矿装置的射流速度、喷口直径及离地高度等参数,以抑制羽流初始浓度,并研制集成于采矿车尾部的沉积物原位分离-回填装置,提高粗颗粒就地回填率。其次,针对无法避免形成的羽流,需加强对其控制研究,如优化尾水排放深度并研究絮凝剂的精准用量投加,将羽流扩散半径控制在作业区周边2 km以内。在羽流监测评估方面,需构建“天-空-海-底”全方位环境监测网络,实现对采矿作业区浑浊度及底栖生物群落等的实时连续监测,为环境影响评估提供数据支撑,从而形成可向国际海底管理局提交的“中国绿色采矿技术规范”草案。

4.2.4 推动智能化与标准化建设

我国在5G通信、人工智能及北斗导航领域具有优势,可将这些技术融合应用至深海采矿领域中,推动深海采矿向数字化采矿转型。在智能作业层面,研发基于深度强化学习的采矿车自适应路径规划与轨迹跟踪控制系统,融合多波束前视声呐与海底底质分类数据,实现在地形起伏下的自主避障与全覆盖采集,并构建基于5G水声通信网络的多车协同作业调度平台,实现3~5台采矿车编队的协同与动态任务分配[108-110]。在数字孪生层面,建立深海采矿装备全生命周期数字化管理平台,集成设计BIM模型、制造工艺参数、运行工况数据与维护记录,实现基于状态监测的预测性维护。在国际层面,应积极参与《“区域”内矿产资源开发规章》及相关技术标准的制定工作。通过输出我国的试验数据、技术标准与环保规范,提升我国在国际深海治理体系中的话语权,从规则的执行者转变为规则的制定者。

4.2.5 培育商业化主体

深海采矿是一项高投入、高风险的系统工程。未来需进一步打破科研机构与企业间的壁垒,建立以企业为主体、市场为导向、产学研深度融合的技术创新体系。鼓励国有大型矿业集团与海洋工程装备企业强强联合,组建深海采矿商业化运营实体,提前布局深海矿区资源的勘探与商业性试采,为最终实现深海矿产资源的商业化开发做好技术、装备与资本的全面准备。

5 结语

深海矿产资源作为21世纪解决关键金属短缺、保障国家资源安全的战略接替资源,其开发利用技术正处于从“勘探与试验”向“商业化开采”跨越的关键历史窗口期。经过数十年的探索,全球对深海采矿的研究目标已发生根本性转移,已从早期的“装备可控”向“绿色采矿、安全采矿”跃升。纵观我国深海采矿发展历程,虽然起步较晚,但在多金属结核与富钴结壳等领域的关键装备海试中已取得突破性进展。然而,我国目前仍面临全工艺流程装备不配套、系统集成度不足的瓶颈,整体处于“赶、并、超”的关键攻坚期。面向未来,在国家战略指引下,我国建立高效、安全、环保的自主深海采矿技术体系已刻不容缓。这不仅是实现商业化开采的技术前提,更是我国在未来全球深海资源博弈中占据主动、维护国家发展利益的必由之路。

参考文献(References):

[1] International Energy Agency. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector[R]. Paris:International Energy Agency, 2021.

[2] International Seabed Authority. Exploration contracts and exploration areas[EB/OL]. [2026-01-11]. https://isa.org.jm/exploration-contracts/exploration-areas/.

[3] 康娅娟,刘少军. 深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述[J]. 机械工程学报, 2023,59(20):325-337.
KANG Yajuan, LIU Shaojun. Review on the technology and equipment progress and the system scheme of deep-sea mining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023,59(20):325-337.

[4] 深企投产业研究院. 我国战略性金属和关键矿产发展白皮书[R]. 深圳:深企投产业研究院, 2024.
Shenqitou Industry Research Institute. White paper on the development of strategic metals and critical minerals in China[R]. Shenzhen: Shenqitou Industry Research Institute, 2024.

[5] 冯妮,杨建民. 全球深海矿产资源开发进展与启示:以装备技术为核心[J]. 太平洋学报, 2024(8):62-75.
FENG Ni, YANG Jianmin. Development of equipment technology for exploitation of marine mineral resources[J]. Pacific Journal, 2024(8): 62-75.

[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: Current situation and prospects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023,44(5):708-716.

[7] 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.

[8] PETERSEN S, KRÄTSCHELL A, AUGUSTIN N, et al. News from the seabed: Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 2016,70:175-187.

[9] 何高文,杨永,韦振权,等. 西太平洋中国富钴结壳勘探合同区矿床地质[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2649-2664.
HE Gaowen, YANG Yong, WEI Zhenquan, et al. Mineral deposit characteristics of cobalt-rich Fe-Mn crusts in COMRA contract area, Western Pacific Ocean[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(10):2649-2664.

[10] ALFORD M H, PEACOCK T. Is deep-sea mining worth it? [J]. Scientific American, 2018,318(5):72.

[11] The Metals Company. Impact Report 2022[R/OL]. [2026-01-09]. https://metals.co/wp-content/uploads/2024/05/TMC-Impact-Report-2022_Copy-of-web-format.pdf.

[12] 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.

[13] 新华社. 我国深海重载作业采矿车海试水深首次突破 4000 米[EB/OL]. (2024-07-09)[2026-01-08]. https://www.gov.cn/yaowen/tupian/202407/content_6962088.htm.
Xinhua News Agency. China's deep-sea heavy-duty mining vehicle reaches record depth in sea trial[EB/OL]. (2024-07-09)[2026-01-08]. https://www.gov.cn/yaowen/tupian/202407/content_6962088.htm.

[14] SONG Y H, YIN S Y, ZHANG N, et al. Dynamic traction of deep-sea polymetallic nodule collector[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(1):146.

[15] HALKYARD J. Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts[C]//OCEANS' 85-Ocean Engineering and the Environment. San Diego: IEEE, 1985:352-374.

[16] 江敏,陆新江,陈秉正,等. 深海富钴结壳螺旋截齿截割破碎受力特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2025,45(11):1-9.
JIANG Min, LU Xinjiang, CHEN Bingzheng, et al. Study on force characteristics of cutting and crushing of spiral cutting picks for deep-sea cobalt-rich crusts[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(11):1-9.

[17] BORKOWSKI P J, ABRAMOWSKI T, SZADA-BORZYSZKOWSKA M, et al. Comminution of polymetallic nodules with a high-pressure water jet[J]. Materials, 2022,15(22):8228.

[18] LIU Z H, LIU K, CHEN X G, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(9):1083-1115.

[19] QIAO S, QING L N, ZHU Z M, et al. Modelling and experimental investigation of cobalt: Rich crust cutting in ocean environment[J]. Ocean Engineering, 2022,245:110511.

[20] LIU S Y, ZHOU F Y, LI H S, et al. Experimental investigation of hard rock breaking using a conical pick assisted by abrasive water jet[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(9):4221-4230.

[21] HUANG Z H, XIE Y. Deep-sea cobalt crusts water jet cutting ability[J]. Geomaterials, 2011,1(2):41-45.

[22] 戴欢. 深海多金属硫化物破碎机理及水力集矿特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2024.
DAI Huan. Research on the fragmentation mechanism and hydraulic collection characteristics of seafloor massive sulfides[D]. Changsha: Central South University, 2024.

[23] 何清华,李爱强,邹湘伏. 大洋富钴结壳调查进展及开采技术[J]. 金属矿山, 2005(5):4-7.
HE Qinghua, LI Aiqiang, ZOU Xiangfu. Investigation progress and exploitation technology of ocean cobalt-rich crusts[J]. Metal Mine, 2005(5):4-7.

[24] 高亚峰. 海洋矿产资源及其分布[J]. 海洋信息, 2009,24(1):13-14.
GAO Yafeng. Marine mineral resources and their distribution[J]. Marine Information, 2009,24(1):13-14.

[25] 阳宁,夏建新. 国际海底资源开发技术及其发展趋势[J]. 矿冶工程, 2000,20(1):1-4.
YANG Ning, XIA Jianxin. Development techniques for international sea-floor resources and their future trend[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000,20(1):1-4.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] ZHANG X Z, ZUO Y H, WEI J K, et al. A review on underwater collection and transportation equipment of polymetallic nodules in deep-sea mining[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(5):788.

[30] 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.

[31] HELMONS R, DE WIT L, DE STIGTER H, et al. Dispersion of benthic plumes in deep-sea mining: What lessons can be learned from dredging? [J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:868701.

[32] YANG Q, LIU S, JIANG X, et al. Parameter matching of deep-sea polymetallic nodule collection device based on the Coandă effect[J]. The Ocean Engineering, 2023,41(5):181-192.

[33] ZHANG X, WU Z Q, MA N, et al. Characterizing nodule motion in abyssal environments induced by double-row jets: A machine learning approach[J]. Physics of Fluids, 2024,36(10):103357.

[34] REN W L, ZHANG X H, ZHANG Y, et al. Investigation of motion characteristics of coarse particles in hydraulic collection[J]. Physics of Fluids, 2023,35(4):043322.

[35] MAO J Y, SI J H, CHEN J Q, et al. Experimental investigation on sand bed scour by an oblique planar water jet at varying impinging angles[J]. Ocean Engineering, 2023,279:114526.

[36] SU X H, CHEN B B, YANG H, et al. Effects of nozzle angles of a double-row jet collector on harvesting performance[J]. Ocean Engineering, 2024,301:117573.

[37] 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.

[38] SHA F, XI M S, WEN Z J, et al. A review on plumes generation and evolution mechanism during deep-sea polymetallic nodules mining[J]. Ocean Engineering, 2024,298:117188.

[39] WEAVER P P E, AGUZZI J, BOSCHEN-ROSE R E, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles[J]. Marine Policy, 2022,139:105011.

[40] 王明和. 深海固体矿产资源开发[M]. 长沙:中南大学出版社, 2015.
WANG Minghe. The development of deep seafloor solid mineral resources[M]. Changsha: Central South University Press, 2015.

[41] DAI Y, ZHANG Y Y, CHENG Y R, et al. CFD-DEM simulation and experimental investigations on continuous hydraulic sampling of deep-sea polymetallic nodules[J]. Ocean Engineering, 2024,313:119509.

[42] RAHUL S. Environmental issues of deep-sea mining: Impacts, consequences and policy perspectives[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.

[43] CHENG Y R, DAI Y, ZHANG Y Y, et al. Status and prospects of the development of deep-sea polymetallic nodule-collecting technology[J]. Sustainability, 2023,15(5):4572.

[44] KANG Y J, LIU S J. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology[J]. Minerals, 2021,11(10):1132.

[45] WANG L, CHEN X G, LI Z G, et al. Analysis of traction performance of deep-sea tracked mining vehicles under different grouser pitch-to-height ratios and traveling speeds[J]. Ocean Engineering, 2024,297:117112.

[46] XU F, RAO Q H, ZHANG J, et al. Compression-shear coupling rheological constitutive model of the deep-sea sediment[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018,36(3):288-296.

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

[48] 梁舒雅. 深海多金属结核采矿车行走路径规划与轨迹跟踪研究[D]. 佛山:佛山大学, 2025.
LIANG Shuya. Research on path planning and trajectory tracking of deep sea polymetallic nodule mining vehicles[D]. Foshan: Foshan University, 2025.

[49] GUO X S, FAN N, LIU Y H, et al. Deep seabed mining: Frontiers in engineering geology and environment[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023,10(1):23.

[50] Global Sea Mineral Resources. Environmental impact statement for collector test[R]. Belgium: GSR, 2018.

[51] DAI Y, YU C, HUANG X, et al. Research on path planning of deep-sea mining vehicles integrating improved theta algorithm with dynamic window method[J]. Ocean Engineering, 2025,330:121281.

[52] HONG S, CHOI J S, KIM H W, et al. A path tracking control algorithm for underwater mining vehicles[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009,23(8):2030-2037.

[53] WU S Y, LIU Y T, CUI C. A trajectory tracking method for deep-sea mining vehicle[C]//Proceedings of the 2024 3rd International Symposium on Intelligent Unmanned Systems and Artificial Intelligence. Qingdao, China: ACM, 2024:330-333.

[54] CHRISTIANSEN B, DENDA A, CHRISTIANSEN S. Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota[J]. Marine Policy, 2020,114:103442.

[55] GAZIS I Z, DE STIGTER H, MOHRMANN J, et al. Monitoring benthic plumes, sediment redeposition and seafloor imprints caused by deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Nature Communications, 2025,16:1229.

[56] ZHAO D X, LI G J. Self-similarity of the near-field turbidity current propagation in deep-sea mining[J]. Physical Review Fluids, 2025,10(7):074303.

[57] GILLARD B, PURKIANI K, CHATZIEVANGELOU D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific)[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2019,7:5.

[58] 中国海洋发展研究中心. 全球首台套6000 m级深海采矿混输管顺利通过南海海试[EB/OL]. (2025-11-11)[2026-03-07]. https://aoc.ouc.edu.cn/_t719/2025/1116/c28894a511007/page.htm.
Ocean Development Research Center of China. The world's first 6000-meter-class deep-sea mining mixed transportation pipeline has successfully passed the sea trial in the South China Sea[EB/OL]. (2025-11-11)[2026-03-07]. https://aoc.ouc.edu.cn/_t719/2025/1116/c28894a511007/page.htm.

[59] BARNES S J, CRUDEN A R, ARNDT N, et al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2016,76:296-316.

[60] MCFARLANE J, BROCKETT F H, HUIZINGH J P. Updated analysis of the capital and operating costs of a polymetallic nodule deep ocean mining system developed in the 1970s[C]//Proceedings of the Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Status and Challenges Ahead. Chennai, India: International Seabed Authority, 2008:46-65.

[61] 王英杰,阳宁,金星. 大颗粒在水力提升系统中运动特性的数值模拟和试验研究[J]. 水利水电技术, 2012(12):26-28.
WANG Yingjie, YANG Ning, JIN Xing. Numerical simulation and experimental study of large particles movement characteristics in hydraulic lifting system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012(12):26-28.

[62] 唐达生,肖红,宋跃文,等. 深海粗颗粒矿石浮游速度的试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(3):1-5.
TANG Dasheng, XIAO Hong, SONG Yuewen, et al. Experimental study on floating velocity of coarse ore particles in deep sea[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(3):1-5.

[63] YOON C H, KANG J S, PARK J M, et al. Flow analysis by CFD model of lifting system for shallow sea test[C]//Proceedings of the Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai, India: ISOPE, 2009: ISOPE-M-09-008.

[64] LI J N, CHEN N Z. Numerical simulation of coarse particle-liquid two-phase flow in deep-sea mining vertical pipes[J]. Powder Tech-

nology, 2025,455:120769.

[65] SONG Y W, ZHU X J, SUN Z Q, et al. Experimental investigation of particle-induced pressure loss in solid-liquid lifting pipe[J]. Journal of Central South University, 2017,24(9):2114-2120.

[66] MATOUŠEK V. Predictive model for frictional pressure drop in settling-slurry pipe with stationary deposit[J]. Powder Technology, 2009,192(3):367-374.

[67] XU H L, CHEN W, HU W G. Hydraulic transport flow law of natural gas hydrate pipeline under marine dynamic environment[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1):507-521.

[68] DUAN J L, ZHOU J F, YOU Y X, et al. Time-domain analysis of vortex-induced vibration of a flexible mining riser transporting flow with various velocities and densities[J]. Ocean Engineering, 2021, 220:108427.

[69] SCHULTE S A. Vertical transport methods in deep sea mining[J]. Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2013:96-110.

[70] RIM U R, KIM H R, RYOM J G, et al. Numerical analysis of air-water-solid three-phase flow in airlift pump for seabed mining[J]. Ocean Engineering, 2023,288:115904.

[71] ZUO J L, LI F C, ZHANG N, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of pneumatic lifting pump[J]. Water, 2020, 12(2):388.

[72] MALEKZADEH R, MUDDE R F, HENKES R A W M. Dual-frequency severe slugging in horizontal pipeline-riser systems[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012,134(12):121301.

[73] VAN DEN BERG G, COOKE R. Hydraulic hoisting technology for platinum mines[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2005,105(5):323-332.

[74] 蘧世豪,丁旺,薛雷平. 利用 CFD-DEM 研究颗粒形状对浆体管道输运过程中阻塞问题的影响[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2021,36(4):499-506.
QU Shihao, DING Wang, XUE Leiping. Investigating on influence of particle shape on blockage in slurry pipeline transportation by CFD-DEM[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021,36(4): 499-506.

[75] ANH HO C, SOMMERFELD M. Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(15):3073-3084.

[76] QIU Z M, XIAO Q H, YUAN H, et al. Particle shape and clogging in fluid-driven flow: A coupled CFD-DEM study[J]. Powder Technology, 2024,437:119566.

[77] DUAN W B, KIRBY R, PRISUTOVA J, et al. On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe[J]. Applied Acoustics, 2015,87:190-197.

[78] LEE P J, VÍTKOVSKÝ J P, LAMBERT M F, et al. Discrete blockage detection in pipelines using the frequency response diagram:Numerical study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(5): 658-663.

[79] ADEWUMI M A, ELTOHAMI E S, SOLAJA A. Possible detection of multiple blockages using transients[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2003,125(2):154-159.

[80] LIU L J, SCOTT S L. A new method to locate partial blockages in subsea flowlines[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans. 2001:SPE71548-MS.

[81] 韩凝,夏建新. 深海采矿水力提升管路系统紧急泄料过程参数分析[J]. 金属矿山, 2008(10):35-38.
HAN Ning, XIA Jianxin. Analysis of the process parameters of the hydraulic lifting piping system in deep-sea mining[J]. Metal Mine, 2008(10):35-38.

[82] 李呋,张海洋,庄龙,等. 一种在深海采矿设备断电时防结核堆积的设备及设计方法: CN112667954B[P]. 2024-03-19.
LI Yi, ZHANG Haiyang, ZHUANG Long, et al. A device and design method for preventing nodule accumulation during power outage of deep-sea mining equipment: CN112667954B[P]. 2024-03-19.

[83] SUMI T, IKEZAKI T, SAKAI K. Ore lifting system: JP, JP2011207537A[P]. 2011-10-20.

[84] 沈义俊,陈云,李萌,等. 一种深海采矿紧急避险的自升式下潜平台及避险方法: CN202211118728.5[P]. 2022-11-01.
SHEN Yijun, CHEN Yun, LI Meng, et al. A self-elevating submersible platform for emergency refuge in deep-sea mining and refuge method: CN202211118728.5[P]. 2022-11-01.

[85] NATIONAL OILWELL VARCO. Deep-sea mineral extraction[EB/OL]. [2026-01-25]. https://www.nov.com/products-and-services/capabilities/deep-sea-mineral-extraction.

[86] 徐万海,宋志友,周丽丹.一种双船形式的微能耗吊装深海采矿系统: CN115182730B[P]. 2024-11-26.
XU Wanhai, SONG Zhiyou, ZHOU Lidan. A dual-ship low-energy-consumption hoisting deep-sea mining system: CN115182730B[P]. 2024-11-26.

[87] 王浩,邹丽,卓晓军,等. 全海深无泵送大产能深海采矿提升系统: CN114575849B[P]. 2023-07-04.
WANG Hao, ZOU Li, ZHUO Xiaojun, et al. Full-ocean-depth large-capacity deep-sea mining lifting system without pumping: CN114575849B[P]. 2023-07-04.

[88] NISHI Y, YAMAI T, IKEDA K. Two-belt continuous line bucket system: Its concept design and fundamental bucket motion experiments[J]. Applied Ocean Research, 2015,53:125-131.

[89] 邹丽,国奇,金国庆,等. 基于 ANCF 的复杂地形下深海采矿柔性软管力学特性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(3):640-649.
ZOU Li, GUO Qi, JIN Guoqing, et al. Analysis of mechanical characteristics of flexible hoses for deep-sea mining on complex terrain based on ANCF[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025,55(3):640-649.

[90] MA W B, SCHOTT D, LODEWIJKS G. Continuous line bucket lifting versus pipe lifting[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017,139(5):051704.

[91] Impossible Metals. Eureka collection system[EB/OL]. (2026-01-06)[2026-01-15]. https://impossiblemetals.com/technology/robotic-collection-system/.

[92] Impossible Metals. Impossible Metals' Eureka III 2026 test in BGR contract area of CCZ[N/OL]. (2025-03-17)[2026-01-15]. ht-

tps://impossiblemetals. com/impossible-metals-eureka-iii-2026-test-in-bgr-contract-area-of-ccz/.

[93] Krypton Ocean Group. Deep-sea mining vessel and autonomous vehicle technical description[EB/OL]. (2026-01-06)[2026-01-15]. https://info.kryptonocean.com/en/.

[94] 王志光,田艳丽,朱晓清,等. 一种深海采矿系统: CN119122531A[P]. 2024-12-13.
WANG Zhiguang, TIAN Yanli, ZHU Xiaoqing, et al. A deep-sea mining system: CN119122531A[P]. 2024-12-13.

[95] LIAO S J. A buoyancy vertical transport system of deep-sea mining[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2020,5(3):294-295.

[96] XING T Y, WANG X H, DING K Y, et al. Improved artificial potential field algorithm assisted by multisource data for AUV path planning[J]. Sensors, 2023,23(15):6680.

[97] GAO C X, HU W W, CHEN K Y. Research on multi-AUVs data acquisition system of underwater acoustic communication network[J]. Sensors, 2022,22(14):5090.

[98] SHARMA R. Deep-sea mining: Current status and future considerations[M]//Deep-Sea Mining. Cham: Springer International Publishing, 2017:3-21.

[99] ISHIGURO S, MASUDA M, KOMATSU M, et al. Development of the pilot system for test of excavating and ore lifting of seafloor polymetallic sulfides[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2018,55(3):1-7.

[100] FILER C, GABRIEL J. How could Nautilus Minerals get a social licence to operate the world's first deep sea mine? [J]. Marine Policy, 2018,95:394-400.

[101] BARRON G. NORI and Allseas lift over 3000 tonnes of polymetallic nodules to surface from planet's largest battery metals deposit in trial run[N]. The Metals Company, 2022-11-14.

[102] 中国青年报社. 中国十大海洋科技进展,大工成果入选![N/OL]. (2022-02-21)[2026-01-11]. https://news.cyol.com/gb/articles/2022-02/21/content_j7vEvtwRA.html.
China Youth Daily. Top 10 advances in China's marine science and technology, achievements of Dalian university of technology selected[N/OL]. (2022-02-21)[2026-01-11]. https://news.cyol.com/gb/articles/2022-02/21/content_j7vEvtwRA.html.

[103] ZHANG Q, CHEN X G, LUAN L B, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives[J]. Earth Energy Science, 2025,1(1):65-84.

[104] 上海交通大学新闻网. 五次探采取"宝",上海交大"开拓二号"创我国深海采矿多项纪录[N/OL]. (2024-07-09)[2026-01-11]. https://news.sjtu.edu.cn/jdyw/20240709/199981.html.
Shanghai Jiao Tong University News Network. Five exploration and mining operations yield valuable resources: SJTU's pioneer II sets multiple new records for China's deep-sea mining[N/OL]. (2024-07-09)[2026-01-11]. https://news.sjtu.edu.cn/jdyw/20240709/199981.html.

[105] MARTIN C, WEILGART L, AMON D J, et al. Deep-sea mining: A noisy affair overview and recommendations[R]. Switzerland: OceanCare, 2021.

[106] TIAN T, YANG K D, WU F Y, et al. Channel estimation for underwater acoustic communications in impulsive noise environments: A sparse, robust, and efficient alternating direction method of multipliers-based approach[J]. Remote Sensing, 2024,16(8):1380.

[107] WAN L, XU S S, DIAO Y W, et al. Impulsive noise mitigation for underwater acoustic OFDM systems based on 1DCNN with multiattention mechanism and transfer learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025,12(8):9917-9926.

[108] JING L Y, DONG C F, HE C B, et al. Adaptive modulation and coding for underwater acoustic OTFS communications based on meta-learning[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(8): 1845-1849.

[109] TAN J B, REN Z Z, SHI X, et al. Deployment of acoustic reconfigurable intelligent surface in underwater acoustic communications under deep-sea long-range scenarios[J]. IEEE Access, 2025,13: 166419-166435.

[110] GHAZY A S, KADDOUM G, TALHI C, et al. Reinforcement learning-assisted secure reliable underwater wireless acoustic communications[J]. IEEE Access, 2025,13:180049-180068.

[111] 谢梦琪,陈丹东,余倩,等. 深海采矿矿物处理技术及发展趋势研究[J]. 现代矿业, 2021,37(9):139-141.
XIE Mengqi, CHEN Dandong, YU Qian, et al. Research on mineral treatment technology and development trend of deep-sea mining[J]. Modern Mining, 2021,37(9):139-141.

[112] 饶顺华. 深海采矿船脱水装置设计[J]. 造船技术, 2018, 46(6):10-13.
RAO Shunhua. Design of sub-sea mining vessel dewatering plants[J]. Marine Technology, 2018,46(6):10-13.

[113] KHAROUA N, KHEZZAR L, NEMOUCHI Z. Hydrocyclones for de-oiling applications: A review[J]. Petroleum Science and Technology, 2010,28(7):738-755.

[114] MURTHY Y R, BHASKAR K U. Parametric CFD studies on hydrocyclone[J]. Powder Technology, 2012,230:36-47.

[115] NARASIMHA M, MAINZA A N, HOLTHAM P N, et al. Air-core modelling for hydrocyclones operating with solids[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012,102:19-24.

[116] SHEN G L, TONG X. Particle stratification of a vibrating screen with translation-swing composite motion[J]. Journal of Vibroengineering, 2020,22(3):498-508.

[117] WASHINO K, TAN H S, HOUNSLOW M J, et al. A new capillary force model implemented in micro-scale CFD-DEM coupling for wet granulation[J]. Chemical Engineering Science, 2013,93:197-205.

[118] GENG R H, GONG S P, WANG X W, et al. Dynamic detachment mechanism and experimental study of wet particles on the flip-flow screen[J]. Powder Technology, 2025,465:121327.

[119] 王春生,周怀阳,倪建宇. 深海采矿环境影响研究:进展、问题与展望[J]. 东海海洋, 2003,21(1):55-64.
WANG Chunsheng, ZHOU Huaiyang, NI Jianyu. Studies on the environmental effects of deep-sea mining: Progress, problems and prospects[J]. Donghai Marine Science, 2003,21(1):55-64.

[120] DOWD M H, ASSAD V E, CAZARES-NUESSER A E, et al. Deep-sea mining discharge can disrupt midwater food webs[J]. Nature Communications, 2025,16:9575.

[121] 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.

[122] 刘珑翔,陈瑛. 波浪环境下圆柱体入水的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2024,39(4):509-521.
LIU Longxiang, CHEN Ying. Numerical simulation study on water entry of cylinder in wave field environment[J]. Journal of Hydrodynamics, 2024,39(4):509-521.

[123] SHEN W, YUAN Z Q, WANG S Q, et al. Comparative study on alternative umbilical cable configurations for deep-sea mining system[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(12):2219.

[124] 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.

[125] 范珂. 海工装备升沉补偿系统建模分析与控制研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
FAN Ke. Research on the design and control of heave compensation systems for offshore operations[D]. Jinan: Shandong University, 2020.

[126] 王长伟. 深海采矿升沉补偿系统方案设计与控制方法研究[D]. 佛山:佛山科学技术学院, 2024.
WANG Changwei. Research on scheme design and control method of heave compensation system for deep-sea mining[D]. Foshan: Foshan University of Science and Technology, 2024.

[127] 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. Changchun., 2009:5111-5116.

[128] DRISCOLL F R, BUCKHAM B, NAHON M. Numerical optimization of a cage-mounted passive heave compensation system[C]// OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings. Providence, 2002:1121-1127.

[129] KANG Y J, FANG H T, WANG C W, et al. Research on heave compensation systems and control methods for deep-sea mining[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025,13(4):652.

[130] 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.

[131] 郑相周,宾鸿赞,罗友高. 基于并联机构的大洋采矿补偿平台构型设计分析[J]. 中国机械工程, 2003,14(18):1565-1567.
ZHENG Xiangzhou, BIN Hongzan, LUO Yougao. Configuration analysis of parallel mechanism based deep-sea mining compensating platform[J]. China Mechanical Engineering, 2003,14(18):1565-1567.

[132] LUO Y G, ZHENG X Z, BIN H Z. Workspace of translation 3-UPU parallel manipulators[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2005,9(1):62-67.

[133] TANG X, LIU S, HUANG K. Design and simulation study on a virtual prototype of an active heave compensation system for deep-ocean mining[C]//ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium. ISOPE, 2005: ISOPE-M-05-014.

[134] 黄锴,刘少军,肖永山. 基于 ADAMS 的深海采矿装置升沉补偿系统仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003,20(10):57-59.
HUANG Kai, LIU Shaojun, XIAO Yongshan. Based on ADAMS' simulation study of the deep sea bed mining heave compensated system[J]. Computer Simulation, 2003,20(10):57-59.

[135] 张榕,刘少军,廖春蓝. 基于 OpenGL 的海洋采矿升沉补偿可视化系统[J]. 计算机仿真, 2005,22(8):170-172.
ZHANG Rong, LIU Shaojun, LIAO Chunlan. Visualization of heave compensation system for heavy lifting mine pipeline based on OpenGL[J]. Computer Simulation, 2005,22(8):170-172.

[136] 李流军. 动力吸振式深海采矿主动升沉补偿系统设计及控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
LI Liujun. Design and control study on active heave compensation system for deep-sea mining with dynamic vibration absorption[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[137] JIN G L, WANG S H, ZHANG F S. A review of motion compensation technology and application status of marine crane payload system[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2025,147(5):051403.

[138] 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, 2023,41(5):128-138.
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, 2023,41(5):128-138.

[139] DU J F, ZHAO S J, ZHANG D Q, et al. Performance analysis of the passive heave compensation system for dual barge float-over operation[J]. Ocean Engineering, 2025,322:120576.

引用本文:黄章峰,张韵佳,孙佳昭. 深海采矿技术发展态势及研究现状综述[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):1-19.
HUANG Zhangfeng, ZHANG Yunjia, SUN Jiazhao. A review on development trends and research status of deep-sea mining technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):1-19.