

DOI: 10.14015/j.cnki.1004-8049.2024.08.005

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”，《太平洋学报》，2024年第8期，第62-75页。

FENG Ni, YANG Jianmin, “Development of Equipment Technology for Exploitation of Marine Mineral Resources”, *Pacific Journal*, Vol.32, No.8, 2024, pp.62-75.

全球深海矿产资源开发进展与启示

——以装备技术为核心

冯妮¹ 杨建民¹

(1.上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 随着全球战略性新兴产业的快速发展, 钴、镍、锰、锂等关键矿产的需求急剧增加, 这些矿产在新能源、电子产业及国防安全等领域中扮演着不可或缺的角色, 深海矿产资源具有重大战略价值, 同时这些资源开发过程还带动深海科技和产业向更高层次发展, 对提升国家海洋开发与探测能力具有重要意义。在全球深海矿产资源开发过程中, 装备技术具有核心作用。自20世纪60年代起, 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, 强化了本国大洋事务管理体系, 发展了海底钻探技术、深海采矿平台技术、环境影响评估技术等, 部分国家已经完成了多项海上采矿试验, 展示了主导国际海底采矿标准规则制定的能力。我国自20世纪90年代起显著提升了海底资源开发相关的行政管理能力和法治建设水平, 积极参与了国际海底矿区勘探和申请工作。“十二五”迄今, 我国相继完成从500米到4000米海试的采矿车单体试验, 为下一步工作奠定了坚实基础。但是, 相较于国外发达国家, 我国仍然存在较大差距, 主要体现为基础研究不足、核心技术装备验证与研发能力有限、关键元器件自主研发能力欠缺、全系统联合海试与商业化开采方案缺失, 以及环境友好型装备研发与环境评估滞后等。面向即将到来的深海采矿时代, 我国应加强对深海矿产资源开发的战略研究, 加大技术创新力度, 加快推进深海采矿装备技术体系发展, 培育深海高技术装备产业, 拓展我国深海活动的利益空间。

关键词: 深海采矿; 海洋工程装备; 关键技术

中图分类号: D815

文献标识码: A

文章编号: 1004-8049(2024)08-0062-14

收稿日期: 2024-04-24; 修订日期: 2024-07-02。

基金项目: 本文系中国工程院2024年一般咨询项目“海洋科技创新提升海上丝绸之路建设效能研究”(2024-HZ-16)的阶段性成果。

作者简介: 冯妮(1983—), 女, 四川宜宾人, 上海交通大学中国海洋装备工程科技发展战略研究院助理研究员, 法学博士, 主要研究方向: 海洋战略、海洋政策; 杨建民(1958—), 男, 江苏镇江人, 上海交通大学讲席教授, 中国海洋装备工程科技发展战略研究院副院长, 上海交通大学海南研究院荣誉院长, 主要研究方向: 深海科技、海洋战略。

* 作者感谢《太平洋学报》编辑部匿名审稿专家提出的建设性修改意见, 文中错漏由笔者负责。

一、深海矿产资源开发具有重大战略价值

1.1 海底金属类矿产资源种类丰富,开发潜力巨大

大洋底部蕴藏着丰富的矿产资源,富含钴、锰、锂、铁、镍、铜等多种高价值金属矿产,以及金、银等贵金属,开发潜力巨大。这些金属矿产的存在形式主要包括多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳和深海稀土四种。

多金属结核多产在水深4 000~6 000米深海平原的浅表层沉积物中,成分非常稳定,锰、镍、铜、钴是主要有用组分,钼、钒、铂族金属、铋、稀土是伴生组分,目前经济意义最大的是镍、钴、铜和锰。^①太平洋海底多金属结核分布非常广泛,最富集地是东赤道太平洋的克拉里昂—克里帕顿断裂带,迄今为止估算结核资源量约210亿吨。^②此外,南美的秘鲁海盆、中印度洋盆地、西北太平洋海山区也发现大量多金属结核赋存。

多金属硫化物多产于水深800~3 000米的大洋中脊和弧后盆地,其形成与海底火山活动密切相关。多金属硫化物主要组分为铜、锌、金、银和铅、硒、碲、砷、钨为伴生组分。^③目前全球大洋已发现大约380个硫化物点或高湿热液喷口,但研究界对多金属硫化物矿床的规模、构造、资源潜力等认识尚不够明确。

富钴结壳是一种富含金属元素的层级沉积物,由水合氧化锰或水合氧化铁沉积到大洋底部形成,多出现在800~4 000米的海山、海脊和海台,主要组分为锰、钴、镍和铜,伴生组分为钼、铂族金属、稀土(首先是铈)、铋、钛、碲,其中钴是富钴结壳中最具有经济意义的金属元素。^④目前已发现的富钴结壳储量最多的海区位于中太平洋,平顶海山是形成富钴结壳最有利的环境。

深海稀土是2011年在太平洋海底发现的一种新矿物类型,主要赋存于5 000~6 000米水深海底沉积物中,主要分布在西太平洋、中—

东北太平洋、东南太平洋和中印度洋。据估算,太平洋深海稀土资源总量为目前陆上稀土资源总量的800倍,具有重要的经济价值。^⑤

1.2 全球战略性新兴产业催生关键矿产巨大需求

目前,全球经济发展的新增长点集中在战略性新兴产业,钴、镍、锰、锂等金属就是这类新能源、电子产业所必需的关键材料。由于这类矿产在现代经济、科技、国防和国家安全中具有至关重要的地位和作用,因而被国际上广泛认定为“关键矿产”。2017年以来,欧盟、美国、澳大利亚、加拿大、英国、南非、印度等重要国家掀起了关键矿产保障的热潮,多国制定“对于本国经济和国家安全至关重要”的关键矿产清单,目的是从源头上保障高科技产业安全,降低供应链风险。比如,欧盟2018年发布《欧盟原材料2050愿景与科技和创新路线图》,强调钴、锂、镍等35种战略性原材料的供应安全问题;美国众议院2020年7月成立关键矿产工作组(CMC, Critical Materials Caucus),目标是应对稀土、锂、钴等关键矿产供应风险。^⑥伴随着陆地上关键矿产资源的储量日趋减少,开采难度持续增大,全球已经形成广泛的共识,未来关键矿产资源增量预计将主要来源于海底矿产资源开发,因此多国政府及跨国公司正积极加速推进本国海底矿产资源的勘探开发,全球矿产资源供应格局或将迎来深刻变革。

我国关键矿产资源禀赋不佳,安全形势十

① 王淑玲、白凤龙、黄文星等:“世界大洋金属矿产资源勘查开发现状及问题”,《海洋地质与第四纪地质》,2020年第3期,第160~170页

② T. Kuhn, et al., “Correction to: Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules”, in R. Sharma, eds., *Deep-Sea Mining*, Springer, 2018, p.23.

③ 宋珏琛、洛怡:“深海多金属硫化物采矿研究进展及其前景探讨”,《海洋开发与管理》,2019年第11期,第29~37页。

④ 杨燕子、陈华勇:“大洋富钴结壳研究进展及展望”,《大地构造与成矿学》,2023年第1期,第82~99页。

⑤ 王汾连、何高文、孙晓明等:“太平洋富稀土深海沉积物中稀土元素赋存载体研究”,《岩石学报》,2016年第7期,第2057~2068页。

⑥ 林君:“矿产资源保障与国家安全”,《太平洋学报》,2023年第10期,第1~9页。

分严峻。据统计,我国铜、镍、钴消费量均占全球40%以上,2022年,我国镍、钴、锂的对外依存度分别达到93%、98%、63%。^① 鉴于美国和欧盟的矿产战略中明确将中国定位为竞争对手,可以预见,未来我国获取境外矿产资源的外部环境将面临更大的不确定性风险,甚至可能出现“源头断供”的极端情况,亟须扭转关键矿产资源受制于人的被动局面,加强关键矿种的储备工作。

1.3 深海矿产资源开发将带动我国深海科技和产业向更高层次进军

从技术视角深入剖析,深海矿产资源开发面临特殊且极端的自然环境挑战,并承载着严苛的环境保护要求,整个开发过程构成了一个庞大而复杂的系统工程,不仅涉及了机械工程、海洋科学、地质勘探等多个学科,还跨越了海洋工程、通信技术、环境保护等多个技术领域,因此,需要以大载荷、多平台、高协同的工程方式,将动力定位系统、地形探测系统、深海潜水器、水面支持母船与海底采矿机器等技术进行高度集成。因此,相较于成熟的海洋油气开发领域,深海采矿技术无疑是当今全球海洋工程的尖端前沿。它对于自主创新能力的要求更为迫切,对产业间深度融合的需求也更为强烈。从另一个角度来看,这些关键技术难题的攻克与突破,亦将极大地推动并提升国家整体的海洋探测与开发综合能力,为海洋经济的可持续发展注入新的动力。

从产业层面深入分析,“十四五”规划强调“要加快壮大新一代海洋装备等产业”,明确指出了我国在海洋领域的发展蓝图。深海矿产装备产业不仅规模庞大、产业链长,而且经济效益显著。以一套300万吨/年产能的高端采矿系统装备为例,其估算价值可达50亿元以上,显示出巨大的市场潜力和经济价值。若我国能够在此领域抢占先机,将有力推动海洋经济向更高层级发展,同时在全球海洋资源竞争中占据有利地位。此外,“十四五”规划还强调“提高海洋资源、矿产资源开发保护水平”,这要求我们在开发海底矿产资源的同时,注重环境保护和

可持续发展。通过技术创新和产业升级,实现资源开发与环境保护的双赢,是深海矿产装备产业未来发展的必由之路。

从科学研究层面审视,以深海矿产勘探开发工作为关键驱动力,积极开展大洋科考将显著提升我国对深海、极地、外大陆架等重点海域的深入研究能力,这将极大地增强我国的海洋科考和观测能力,有助于构建与国际接轨的数据模型与标准,为国家海洋资源权益的维护提供坚实的科学基础与数据支撑。

1.4 深海矿产资源开发是打造深海“新疆域”的重要抓手

在2017年1月18日的联合国日内瓦总部的主旨演讲中,习近平主席发表了题为《共同构建人类命运共同体》的重要论述,其中特别强调“开拓深海、极地、外空、互联网等新领域的合作疆域”。就深海这一特定领域而言,其“新”的特质在多个维度上得以体现。

首先,从发展的视角审视,深海蕴含了丰富且待发掘的资源,这些资源不仅构成全人类共同财富的巨大宝库,更是实现可持续发展战略不可或缺的支撑。其次,从全球治理的角度分析,深海作为人类尚未大规模涉足和全面认知的最后区域,相关规则的制定将深刻影响各国在全球范围内的利益分配,以及全球治理体系和国际秩序的构建。^② 再者,从安全的角度考量,深海面积占据地球表面积约65%,位于传统国家管辖疆域之外,具有特殊的战略意义。深海规则与秩序的稳定与否,将直接关系到未来全球海上战略格局的演变,通过合理且积极的深海开发,能够进一步拓展国家安全防线的边界。

自2000年起,国际海底管理局(ISA)陆续颁布了一系列具有里程碑意义的文件,包括《区域内多金属结核探矿和勘探规章》《区域内富钴结壳探矿和勘探规章》以及《区域内多金属硫化

^① 徐爱东:“新能源金属镍、钴、锂资源保障形势及政策建议”,《资源再生》,2023年第11期,第25页。

^② 胡波:“中国的深海战略与海洋强国建设”,《人民论坛·学术前沿》,2017年第18期,第12页。

物探矿和勘探规章》等,这些规章为各国在深海矿产资源勘探提供了明确的法律框架和指导原则。截至当前,国际海底管理局签发并仍然有效的国际海底的矿产勘探合同达到31份,共计151万平方公里,其中多金属结核的有19份,多金属硫化物的有7份,富钴铁锰结壳的有5份。我国应正视这一全球竞争态势,将海底矿产资源的开发作为我国参与全球海洋治理的重要战略抓手,借此扩大在海洋权益和海洋安全等方面的国际影响力与战略空间。

二、全球深海矿产资源开发的主要进展

目前,全球范围内着力于深海矿产资源开发的主要集中在发达国家,这得益于发达国家在技术积累、资金投入、政策支持、国际合作等方面的优势。进入21世纪以来,多国已经完成了海底矿产资源开发的若干海上试验,在资源勘探装备、开发平台装备、开采作业装备的研究上取得重要进展,并更加注重环境影响评估和监测等方面的研究。全球深海矿产资源开发正向着高效、安全、环保的趋势迅速发展。

2.1 发达国家深海矿产开发法规制定与管理机制构建情况

美国认为第三次海洋法会议有关海底制度的条款违背了美国的基本利益与市场自由理念,于1980年6月制定《深海底固体矿产资源法》(the Deep Seabed Hard Mineral Resource Act),以国内立法的形式继续鼓励其国内开发实体的海底活动。1982年,美国明确拒绝批准《联合国海洋法公约》,还借口“公海自由”原则,在国际海底开发制度之外与其他发达国家签订“互惠国协议”,公然与国际海底资源开发制度抗衡,意图在《联合国海洋法公约》正式生效之前,在发达国家内部形成一种有效的机制安排,在海底开发中掌握主动权,从而保护发达国家的海底利益。^①英国也制定了以《深海采矿法》《深海采矿(勘探许可证)(申请)规章》《深海采矿(勘探许可证)规章》为核心的法律制度,

详细规定了英国深海资源勘探和开发的许可程序、管理要求、环境保护措施以及收益分配等。德国则出台了《深海海底采矿暂行办法》,后又依据《联合国海洋法公约》的内容对前者进行了修订并颁布了《海底开采法案》,法案中规定了本国海底矿产资源勘探与商业开发的相关事宜,同时非常强调深海资源的可持续利用和生态环境的保护。日本将海洋资源开发作为提振经济、加速经济增长战略的一项重要举措,先后制定了《深海海底采矿暂行措施法》《海洋基本法》,有力推动了日本在深海资源开发领域的科技进步。

国际海底资源开采权的争夺也体现了国家组织能力的较量,各发达国家除了积极颁布法律以外,还进一步强化本国的大洋事务管理体系。韩国在1996年设立了海洋水产部,旨在全面协调与推进海洋资源开发事务。俄罗斯在2001年成立了联邦海洋委员会,由政府高层领导担任主席,并吸纳了政府相关部门、地方政府以及海洋产业界和学术界的代表,共同负责海洋开发战略和政策的制定与实施。2007年,日本基于《海洋基本法》成立了政府综合海洋政策总部,这一机构由首相直接领导,负责整合分散于多个政府部门中的海洋政策,形成统一的海洋政策框架。美国于2004年12月正式成立了新的内阁级海洋政策委员会,在2010年又对其进行结构整合,成立了国家海洋委员会(National Ocean Council),以加强海洋管理中各有关部门之间的协调,强化决策和争端解决机制,实现更高水平的管理。

这些国家在构建海底矿产开发相关事务的体制时展现出了几个显著的特点。首先,这些体系均由国家主导,设立了专门机构来管理和指导国际海底资源的开发工作。这反映了海洋资源开发的国际竞争态势,各国都在努力抢占先机,通过国家层面的组织来加强自身的竞争力。其次,这些管理机构多为综合性协调机构,

^① 王金强:“国际海底资源分配制度演变与美国海底政策的转向”,《美国研究》,2012年第3期,第54-76页。

具备较高的行政级别和较强的综合性。除了韩国的海洋水产部为部级单位外,其他国家设立的大多为国家级机构,直接向最高行政首长负责。这种体制有助于整合各方资源,形成协同推进的合力。最后,这些国家在国家主导的基础上,积极引入市场和社会力量参与海洋资源开发工作。管理机构中不仅有政府部门和专家学者的参与,还有来自企业和社会各界的精英。同时,各国也充分借助市场力量,鼓励科研机构和企业深海资源开发技术研发、资金筹集、资源勘探等方面发挥积极作用。

2.2 发达国家深海矿产资源勘探装备研制进展

深海矿产资源开发是一个复杂且高技术含量的过程,需要一系列高技术装备来支持全流程活动。其中资源勘探装备主要用于对海底地质结构、矿产资源分布及储量进行初步勘探和详细调查;开发平台装备是海底矿产资源开发活动的核心基础设施,用于支撑开采作业和相关设备的运行;开采作业装备是直接用于从海底提取矿产资源的机械设备,需要具备高效、精准、耐用等特点,以应对海底复杂的环境条件和作业要求。

自20世纪60年代起,发达国家便致力于海洋矿产资源的勘查与勘探,取得了总体上的领先优势。进入2000年以后,随着深海采矿技术的迅速进步以及法律框架的日益健全,深海矿产资源勘探活动已逐步聚焦于合同区的详细勘探,并逐渐过渡到高效精细探测与智能评价的新阶段。

当前,全球顶尖的勘探钻探船包括美国的“决心”号和日本的“地球”号大洋钻探船,它们代表了目前海洋勘探技术的最高水平。此外,海洋地质勘探领域的佼佼者荷兰辉固集团公司(Fugro-Jason)也拥有多艘地质钻探船,还有一些规模稍小的地质钻探船,如日本在2012年建成的“白岭”号,以及地平线公司(Horizon)在2014年推出的探索地平线号(Quest Horizon)钻探船,在海洋矿产资源勘探领域也发挥着重要作用。在特定的商业勘探项目中,如加拿大鸚

鹉螺矿业公司和美国海王星公司在巴布亚新几内亚和新西兰专属经济区进行的热液硫化物矿床勘探,采用了经改装的钻探船亨特德普号(DP Hunter)进行岩芯钻探取样。总的来说,尽管全球在海洋矿产资源勘探方面取得了显著进展,但海底钻探技术仍面临诸多挑战和提升空间,尤其是在多金属硫化物的资源评价方面,现有技术尚不能满足全面、准确评估资源潜力的需求。

发达国家在水下机器人技术领域展现出较高水平,除了传统的载人潜水器(Human Occupied Vehicle, HOV)和水下遥控机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)外,还研发出了钻机、切割机等多样化的高精度海底取样工具,显著提升了地质取样的精准度和自主性。未来基于自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)平台的高频、高分辨率、高清的声、光、磁探测技术将占据主导位置,为合同区内微地形地貌的描绘以及精细构造沉积特征的识别提供强有力的技术支撑。日本近年来正涉足混合潜水器的研发,这一创新将传统的载人潜水器和水下遥控机器人的优点完美融合,将极大提升潜水器的操控性和工作效率。此外,美国、日本等国还在研发低扰动爬行式水下机器人,这类机器人具备在复杂水下地形(如岩石、泥沙等)上稳定爬行的能力,能够到达传统潜水器难以到达的区域,并能根据需求搭载不同的传感器和工具,执行监测、探测、采样等多种任务。同时,这类机器人在爬行过程中产生的水流扰动很低,能够有效减少对周围环境的干扰,预计未来将在海洋科学研究、资源勘探和环境保护等领域发挥重要作用。

在资源评价技术层面,随着深海矿产资源调查所获取的地质、地球物理和地球化学数据的持续累积,合同区内调查程度较高的详细勘探区已构建起庞大的多源地学大数据集。面对这一数据量的激增,传统的基于地质取样信息的多边形法、克里格法等评价方法已难以满足高效精准的资源评价需求。因此,未来深海矿产资源评价领域将步入地球科学大数据挖掘和

人工智能技术应用的新阶段,以期实现对深海矿产资源潜力更精确、高效的评估。

2.3 发达国家深海矿产资源开发平台装备研制进展

深海矿产资源开发平台集航行、作业、居住、支持等功能于一体,需要满足航程远、作业水深大、作业周期长、系统集成度高等要求。平台的完整作业程序是:快速抵达作业海域,在预定的海况下完成水下采矿系统的现场组装和布放,然后在动力定位、综合导航定位和中央控制等系统的协助下,操控水下采矿系统进行海底矿物采集和提升输送作业,在对输送到水面的矿浆进行处理后,将其储存到矿物贮藏舱,并周期性地将矿物贮藏舱内的矿物卸载输送到货船上进行转运。当局部区域海底矿物采集完成之后,水下采矿系统将停止采集输送作业,并随水面平台在一定范围内整体联动(水下采矿系统不回收),整个系统抵达新矿区。最后,矿区矿物采集任务完成或应急避台撤离时,平台需要完成整个水下采矿系统的拆卸回收并快速驶离作业海域。

未来,全天候深水作业能力、高度安全性、环境友好性和经济效益将成为深海矿产开发平台的主导趋势,这同时也对平台结构的安全评估技术提出了更严苛的标准。在技术革新的背景下,云服务、大数据以及人工智能等前沿技术将成为推动深海开发平台智能化和无人化管理的核心动力。这些技术的融合与应用,不仅能为深海开采作业提供前所未有的技术支持,还将极大地促进整个海洋工程领域的技术创新和产业升级。云服务通过提供高效、灵活的数据存储和计算能力,使得平台能够实时处理和分析大量数据,为决策制定提供科学依据;大数据技术的运用使得平台能够深入挖掘和利用历史数据,预测潜在风险,优化作业流程;人工智能技术的应用将为平台带来革命性变革,通过机器学习、深度学习等算法,平台能够自主学习和优化作业策略,提高作业效率和安全性,还能实现对平台设备的智能监控和故障预测,减少停机时间和维护成本。

从现状来看,自20世纪70年代末开始,美国、加拿大、英国、日本、德国等国家组建了国际海洋采矿财团,通过改装货船、钻探船或甲板驳船,打造了专门用于海试的采矿船只,并成功支持了各类深海采矿试验。2018年3月,全球首艘深海采矿船“鸚鵡螺新纪元”出坞,该船由新加坡海洋科技公司(SeaTech)负责设计,中国福建马尾造船厂承担建造工作。船上的关键系统,如采矿车、布放回收系统、输送系统、除水系统和中控系统等,均由船东负责采购和集成。该船原计划作为采矿运营基地,服务于加拿大鸚鵡螺公司与巴布亚新几内亚合作的索瓦拉1号项目。然而,由于鸚鵡螺矿业公司资金链紧张以及作业海域环保问题挑战,该船在建造完成约80%后被迫处于弃船状态,迄今尚未完成海试验证。

针对深海采矿相关的船舶与海洋工程技术能力,国际知名企业如康士伯(Kongsberg)、ABB集团、通用集团(GE)等已在高度集成、高可靠性的多系统控制技术方面取得显著成果,这些技术对于未来深海采矿系统在动力定位、推进控制、功率管理、监测报警等关键子系统实现综合调控具有重要意义。针对电力传输技术,国外已研发出适用于深海采矿环境的大功率动力传输系统,并成功进行了水深范围在1 000至6 000米、容量达数百千瓦级、中压输电的海上测试。比如上述加拿大鸚鵡螺公司的采矿项目,其水下大功率用电设备系统包含三台采矿车,采用点对点电力输送方案,单设备功率接近2兆瓦。在海洋工程的综合性能分析研究领域,国外也积累了较丰富的成果,主要包括对非线性水动力问题、计算流体动力学计算可靠性的研究,以及总体性能分析软件的开发与应用。

总的来说,迄今为止全球范围内尚未出现商业化的开采平台工程应用实例,但迄今已有的研究准备对于提升深海矿产资源开发系统的整体性能和安全性起到了重要作用,也为未来进一步优化和商业化应用提供了理论基础和技术支持。

2.4 发达国家深海矿产资源开采作业装备研制进展

深海矿产资源开采作业装备可被细化为一系列专门针对海底矿石采掘和海底输运过程的关键作业工具,主要包括海底矿床开采装备、矿石转运装备以及水面控制与辅助开采装备等。其中,海底矿床开采装备承担着矿石采掘、破碎和收集的核心任务,其选择与应用依据矿床类型的不同而有所调整。具体而言,针对多金属结核的开采,主要依赖于矿石收集和破碎装备;而富钴结壳和多金属硫化物的开采则首要运用采掘装备进行矿石的切削与剥离,随后再进行破碎和收集操作。矿石转运装备的核心是泵管提升系统,它通过特定的速度和浓度参数,将矿石与海水形成的混合物稳定地输送到海面。为了实现这一过程的高效与稳定,水下通常配置有中继装备,用于精细控制矿石的输送速度和浓度,确保输送过程的均匀、稳定和高效。此外,水面控制和辅助装备在海底矿石开采作业中也承担着重要作用。这些装备不仅用于集中调控海底矿石开采装备,确保其高效运作,同时还具备辅助作业的功能,包括开采作业协同控制系统、水下导航定位装备、水声通信装备以及辅助作业远程操作车辆(ROV)等。

全球深海矿产资源开采作业装备的发展趋势是秉持重装、协同、智能和绿色的原则,加速推进核心技术创新,为深海矿产资源的开发提供强有力的技术支撑。通过加速开发具备大功率和高效能的重载作业装备,可以满足深海矿产资源商业化开采的需求。基于信息融合、数字孪体以及人工智能技术的海底多装备联合作业的全系统协同调控技术将成为研发的重点。通过引入智能算法和决策支持系统,将实现开采装备的环境感知与精准控制技术,以及长距离多相流管道输送的流动保障技术和动力响应预报分析技术,大大提升深海矿产资源开发的效率和安全性。^① 深海矿产资源开发必须满足日益苛刻的环境保护要求,全球将致力于发展绿色开采技术,也将加强对深海生态系统的保护和修复技术的研究。此外,未来将构建一个

完整的深海矿产资源开发技术产业链,基于技术创新、装备研发、海上作业以及矿石处理和综合利用的整合,将有助于实现深海矿产资源的商业化开采,促进全球深海经济的可持续发展。

在开采作业装备实际研制方面,20世纪70年代,由美国、欧洲、日本等组成的跨国联盟或合资公司成功完成了5000米级水深的多金属结核采矿试验,这一里程碑式的进展为深海采矿技术的后续发展奠定了基础。随后,在1979年,美国成功进行了5500米水深的多金属结核采矿试验,并采集了约1000吨的结核样品。这一试验不仅验证了深海采矿技术的可行性,也为后续的技术研发和商业化应用提供了重要参考。进入21世纪后,随着深海矿产资源开发成为全球关注的焦点,欧盟设立了深海采矿(Blue Mining)、深海多金属结核(Blue Nodules)等多个专项项目,旨在推动深海采矿技术的进一步发展。^② 同时,荷兰、比利时、加拿大、日本、印度等国家也纷纷开展百米级至千米级水深的海底矿床开采装备海试,这些试验不仅积累了宝贵的深海采矿经验,也初步展示了这些国家在深海采矿技术及采矿技术标准规则制定方面的能力。

日本是全球深海采矿领域最活跃的国家之一,依托日本国家石油天然气和金属公司(JOGMEC)和日本海洋科技中心(JAMSTEC)两家单位进行了四个矿种的采矿试验。2012年3月,日本国家石油天然气和金属公司建造了海底多金属硫化物采矿车,并在冲绳海域1600米深处进行了采矿试验,并分别于2013年8月和2014年1月用该系统进行了陆地和现场测试,试验取得了25公斤金属硫化物。2017年8月至9月,该公司在冲绳县附近海域采用了三菱重工自主研发的挖掘与集矿试验机,成功进行了世界首次海底多金属硫化物开采和提矿的先导试验。该系统由半潜式平台、垂直管道、水力旋流

^① 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”,《中国工程科学》,2020年第6期,第1-9页。

^② 田先德、杨锦坤、韩春花等:“国际海域矿产资源勘探与开采技术现状与展望”,《海洋信息》,2021年第2期,第28-32页。

器、软管和集矿机等关键组件组成,试验方案主要针对水深700米至1600米的区域,能够在海底半径250米范围内有效采集多金属硫化物,展示了日本在深海采矿技术方面的实力。2020年,日本在深海富钴结壳开采领域也取得了重要进展,在940米水深处成功进行了世界首次富钴结壳采、输联合海试,采集量达到649公斤。这次试验主要采用了机械方法,包括螺旋滚筒式截齿切削、刀盘式轧削、冲击钻冲击破碎和水射流切削等,有效提高了富钴结壳的开采效率和采集质量。此外,日本在深海稀土资源开采方面也取得了重要成果,2018年,日本从南鸟岛周边25个5000米水深的海底区采集了稀土样本,为日本在深海稀土资源勘探和开发方面提供了宝贵的数据支持。2022年,日本在深海稀土开采技术方面再次取得突破,日本海洋科技中心在2470米水深处进行了世界首次稀土沉积物开采、输送、环境监测联合海试,为其未来在深海稀土资源商业化开发方面奠定了基础。

欧美国家近年来在深海采矿技术领域也取得了显著进展。2017年,比利时在4571米的深海海底成功完成了海底采矿车的海试,并提交了环境评估报告。这份报告评估了采矿活动对海洋环境的影响,为后续的深海采矿作业提供了重要的环境参考。荷兰皇家IHC公司设计建造的阿波罗号(Apollo)集矿车于2019年完成了海试,这款集矿车采用了环保履带设计,有效避免了沉积物羽状流的大面积扩散,显著降低了对海洋环境的影响,该次试验不仅监测了履带在水下的运动过程,还关注了运行过程中可能产生的扬尘情况。比利时全球海洋矿产资源公司(Global Sustainable Resources)2021年4月在

帕拉尼克拉珀顿区对25吨重的采矿机器人原型Patania II进行了测试,收集了富含锰、钴和镍的矿石,还完成了环境监测海试。2022年加拿大金属公司(TMC)与全海洋公司(Allseas)合作在大西洋水深745米和2470米处分别完成了采矿车与立管系统和柔性软管的水下连接,还测试了采矿车的各种泵和关键机动功能,并在海底行驶了1018米,验证了采矿车在压力和温度条件下的运行能力。在太平洋克拉里昂—克利珀顿区(Clarion-Clipperton Zone),加拿大金属公司进行了世界上首次深海结核开采与环境监测的联合海试,试验应用了自主水下航行器(AUV)、遥控潜水器(ROV)以及多种海洋探测装备,对羽流分布、海底沉积物特性以及海底生态环境等关键参数进行了研究与分析,试验中共采集结核4500吨,产能达到86.4吨/小时。

此外,近年来亚洲国家韩国、印度在深海采矿技术方面也展现了显著进步。韩国于2009年率先开展了第一代采矿车的浅海试验,初步验证了设计可行性和基本性能,之后在2012年又进行了第二代采矿车的浅海试验,相较于第一代,第二代采矿车在设计和功能上有了显著的改进和优化。2013年,韩国在深海领域取得了重大突破,成功在1370米的水深下完成了第二代采矿车的深水试验,验证了采矿车在深海环境下的稳定性和可靠性。此外,韩国在2015年还完成了1200米水深泵—管提升系统的海试,为深海矿产的有效提取和运输提供了技术支持。印度分别于2000年、2006年和2010年完成了多次海底采矿系统的水下测试,展现了在海底采矿系统设计和制造方面的能力。

表1统计了近40年来全球发达国家深海矿产开发的主要进展。

表1 国外深海矿产资源开采进展

时间/年	国家/单位名称	水深/米	试验内容	备注
1978	海洋管理公司(OMI)	5500	多金属结核海试	联动
1978	海洋矿业协会(OMA)	4570	多金属结核海试	联动
1979	海洋矿物公司(OMCO)	5000	多金属结核海试	联动

续表 1

时间/年	国家/单位名称	水深/米	试验内容	备注
1979	德国/普罗伊萨格公司	2 200	多金属软泥试采	单体
1990	俄罗斯/莫斯科地质勘探学院	790	水力提升系统海试	单体
1996	印度/海洋技术研究院、德国/锡根大学	500	采矿车行走和采集试验	单体
1997	日本/多金属结核采矿系统研发项目	2 200	钢丝绳和采矿机联合拖航试验	联动
2002	日本/石油天然气金属矿物资源机构	1 600	采矿车行走试验	单体
2006	印度/海洋技术研究院	450	采矿车海试	单体
2009	韩国/地质资源研究院	100	输送系统海试	单体
2012	日本/石油天然气金属矿物资源机构	1 600	采矿车采样试验	单体
2013	韩国/海洋科学技术院	1 370	采矿车海试	单体
2015	韩国/海洋科学技术院、韩国/海洋工程研究所	1 200	水力提升系统海试	单体
2017	日本/石油天然气金属矿物资源机构	1 600	采矿车采集和水力提升试验	联动
2017	比利时/德米集团	4 571	采矿车行走海试,环境评估	单体
2017	加拿大/鸚鵡螺矿业公司	—	采矿车带水试验	单体
2017	欧盟/可行性替代采矿作业系统项目	—	采矿车定位导航及感知试验	单体
2018	荷兰/皇家 IHC 公司	300	采矿车行走试验	单体
2019	荷兰/皇家 IHC 公司	300	采矿车行走试验	单体
2020	日本/石油天然气金属矿物资源机构	1 450	钴结壳开采试验	单体
2021	比利时/全球海洋矿物资源公司	—	采矿车 CCZ 区的行走与采集试验	单体
2022	日本/国立研究开发法人海洋研究开发机构	2 470	稀土沉积物联合海试	联动
2022	加拿大金属公司	745	采矿车海试	单体
2022	加拿大金属公司	4 500	金属结核全系统联动海试	联动

注:海洋管理公司、海洋矿业协会、海洋矿物公司都是跨国财团,其成员众多,具体成员公司及国籍在不同历史时期变动较大,在 1970 年代能够确认的参与国家有美国、日本、德国、加拿大等,参与公司有美国的洛克希德海洋矿物公司(Kennecott Consortium)、肯尼科特公司(Kennecott Corporation)、加拿大的因科有限公司(INCO)等。

文献来源:作者搜集相关文献自制。

综上所述,当前深海采矿技术正逐步从试验验证阶段迈向试开采阶段。虽然当前全球范围内尚未出现完全适用于商业化开发的成熟装备,但发达国家已经通过实施矿区原位海试验证了技术可行性和有效性,也展示出多样化的基本开采能力。同时,针对海底矿物采集、输送、处理、布放回收、测控导航以及选冶等核心系统集成的专项研发仍然需要持续深入。

2.5 国外深海采矿环境影响评估和监测技术研究进展

为了深化对深海采矿活动环境效应的科学理解,精确评估其对海洋生态系统的潜在影响,通过现场试验来研究深海采矿的环境影响尤为重要。自 20 世纪 80 年代以来,国际上已启动了一系列海底扰动影响实验,旨在探究底栖生物群落及其栖息地环境在受到采矿活动干扰后的自然恢复机制。近年来,荧光示踪技术已成为

深海采矿环境影响评估的有力工具,德国和比利时已成功开发出羽状流监测的荧光示踪技术,并计划在未来太平洋结核区的深海采矿试验中加以应用。

尽管在深海采矿活动潜在环境影响评估方面已取得一定进展,但面临的挑战仍较多。国际海底管理局(ISA)虽已提出一份环境影响评估报告的框架性模板,但针对深海采矿的具体评估方法与评价标准尚未形成共识,这凸显了当前评估体系的局限性和紧迫性。因此,迫切需要突破现场模拟实验、深海原位实验和数值模拟等关键技术,构建一套全面、系统的深海采矿环境影响评估技术体系与标准框架,为深海矿产资源的可持续开发和利用提供坚实的技术支撑和决策依据。这一目标的实现,对海底水动力学研究、水下高精度影像测量技术和定量分析方法的进一步发展提出了更高的要求,也为深海采矿的可持续发展提供了重要保障。

三、我国深海矿产资源开发的进展、差距与启示

3.1 我国深海矿产资源开发的进展

(1) 法规制定与机制构建进展

1991年,我国正式成为继印度、法国、日本和前苏联之后,第五个国际海底区域先驱投资者,这一里程碑事件标志着我国在国际海底资源勘探和开发领域获得了重要地位。同年,我国成立了大洋矿产资源研究开发协会(简称“大洋协会”),协会以申请国际海底矿区为契机,通过常务理事会的运行机制,有效争取了中央编办、外交部、发展改革委、财政部、科技部等部门对大洋工作的政策指导和资金、能力等方面的支持。协会通过设立专项领导小组等协调机制,依托国家海底新资源工作领导小组、国家深海基地建设领导小组、“蛟龙”号海试(试验性应用)领导小组等,高效组织和实施了一批大洋领域重大任务。在业务开展方面,协会依托理事单位,在多个关键领域如大洋资源勘查技术与

资源评价研究、大洋地球科学与环境评价研究、大洋生物基因资源利用研究等,建立了一系列业务平台,同时也加强了中国大洋样品馆和大洋信息系统建设。此外,协会还启动了国家深海基地项目一期工程建设,为大洋事务管理提供了强有力的科学技术支撑。这一系列举措显著提升了我国在国际海底资源开发和管理领域的综合实力。

此外,我国高度重视深海矿产资源开发的国内法制建设,全国人民代表大会常务委员会于2016年2月26日通过了《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》。该法律由七章共计二十九条组成,标志着我国首次在法律层面对中国公民、法人或其他组织在国家管辖范围以外海域从事的资源勘探、开发活动进行了规范。这一立法举措对于完善我国海洋法律体系,规范并促进“深海海底区域”资源勘探、开发活动的有序进行,以及保护“深海海底区域”海洋环境的可持续发展,具有里程碑式的意义。

(2) 海底矿产资源勘探装备研究进展

我国自1983年开始启动海底矿区勘查工作,尤其对东北太平洋的多金属结核矿区开展了多次勘查。1991年,我国成为第一批国际海底矿产资源勘探的“先驱投资者”,此后我国陆续与国际海底管理局先后共签订了5个矿区勘探合同,总面积约为23.5万平方公里,其中多金属结核矿区3块、多金属硫化物矿区1块、富钴铁锰结壳1块,是目前全球拥有国际海底矿区最多的国家。在2000年以前我国海底勘探主要以地质取样为主,2000年以后,我国在深海载人潜水器方面取得快速进展,2012年“蛟龙”号载人深潜器下潜至7062米,创世界同类作业型潜水器最大下潜深度纪录。2017年,4500米型的“深海勇士”号载人深潜器正式投入使用,国产自主率超过95%。2020年,“奋斗者”号万米级载人潜水器成功坐底马里亚纳海沟,创下中国载人深潜10909米新纪录,标志着我国在大深度载人深潜领域达到世界领先水平。迄今我国已初步建立全海深潜水器谱系,包括“海斗”“潜龙”“海燕”“海翼”和“海龙”号等系列无人

的影响,2021年我国在南海开展了1 000米级多金属结核采矿试验的环境影响评估工作,初步构建了环境影响评价指标体系,并建立了羽状流评估模型,期间还完成了国际上首个深海原位重金属毒理试验,为深海采矿环境影响评价提供了生物标志物。

3.2 我国深海矿产资源开发的主要差距

在深海采矿的装备技术格局中,我国相较于全球领先国家及地区如美国、日本及欧洲,仍面临一系列显著的挑战与差距。这些挑战和差距具体体现在以下几个方面:

第一,基础研究与自主研发能力的欠缺。我国在深海采矿装备系统的动力特性分析,特别是在复杂条件下的耦合动力响应分析预报方法上,存在显著的研究短板。深水管道输送相关工程实践经验和测试数据的不足,使得对超深水作业环境中管道结构力学特性的深入研究受限。在组合导航定位装备与算法、大功率深水电缆及光纤技术、深海传感器、水密接插件以及中央控制系统等核心元器件的研发上,我国仍依赖外部技术,高性能材料在深水矿石输运管道的应用研发也亟待加强。

第二,核心技术装备验证与研发能力的局限。我国在完善海底矿石采集技术方案、深水海试验证以及关键技术和装备的自主研发方面仍有待提升。尤其是多金属结核和多金属硫化物的深水试验尚未展开,水下海洋环境实时感知技术基础薄弱,配套设备能力不足,关键技术和装备多依赖进口。矿石长距离提升泵技术、重载装备的布放回收技术、升沉补偿技术以及全系统、多设备的联动控制等方面,均需要进一步的技术研发与实证。

第三,全系统联合海试与规模化、商业化开采能力和战略规划能力不足。我国尚未进行全系统的联合海试,同时也缺乏明确的深海采矿技术规模化、商业化开采规划。尽管已进行多次单体海试,但关于系统生产效率、稳定性、可靠性、长期运维性能及经济性的综合研究尚需深入。

第四,环境友好型装备研发与环境评估的滞后。在环境影响评估及环境友好型装备研发上,我国与先进国家之间存在显著的差距。发达国家已在深海采矿的环境影响评估上取得初步成果,建立了相应的分析模型,而中国在此领域尚未形成系统的环境影响评估方法,环境友好型的开采和输送装备研发也缺乏成熟的技术方案。此外,针对环境评估所需的海底传感、通信技术和安全监测等核心技术方面,我国仍面临外部制约。

3.3 我国深海矿产资源开发的发展启示

针对以上这些差距,近期有必要依托深海矿产开发专项,以国家为主导,企业为主体,协同科技部、发改委等多部门,全面打造我国的深海矿产自主开发能力,力求在深海矿产开发系统设计、核心装备制造、矿产资源利用等方面取得国际领先地位,提升我国深海环境评价与国际规则标准制订的能力。中远期有必要通过目标导向和政策支持,推进供给侧结构性改革,促进国内企业通过合作、联营、借壳等多种方式进入深海海底资源勘探开发领域,引领我国深海产业向高端、智能、绿色方向发展,并带动促进材料、通讯、导航定位等相关领域的创新发展,以及深海与深空、深地、深蓝战略支撑技术的融合发展。

责任编辑 邓文科

Development of Equipment Technology for Exploitation of Marine Mineral Resources

FENG Ni¹ YANG Jianmin¹

(1. *Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: With the rapid development of global strategic emerging industries, the demand for critical minerals such as cobalt, nickel, manganese and lithium has soared, rendering deep-sea mineral resources of significant exploitation value. Simultaneously, the exploitation of seabed mineral resources will drive the advancement of deep-sea technology and industry to a higher level, enhancing a country's marine development and exploration capabilities. This paper delves into the progress of global deep-sea mineral resource exploitation, with a particular focus on the pivotal role of equipment technology in this process. Since the 1960s, developed countries have made continuous breakthroughs in the management systems, exploration equipment, development platforms, and mining operation equipment for deep-sea mineral resources, thereby strengthening their management systems of ocean affairs and developing seabed drilling technology, deep-sea mining platform technology, and technology of environmental impact assessment. Some countries have already completed multiple offshore mining tests, demonstrating their ability to lead the formulation of international seabed mining standards and rules. China has rapidly improved its administrative management capabilities and the level of legal construction related to seabed resource development since the 1990s, actively participating in the exploration and application for international seabed mining areas. Since the 12th Five-Year Plan period, China has successively completed the individual tests of mining vehicles ranging from 500 meters to 4000 meters in sea trials, laying a solid foundation for the next stage of work. However, compared with foreign developed countries, China remains behind them because it has inadequate fundamental research, limited capabilities for verification and research and development (R&D) of core technological equipment, a lack of independent R&D capabilities for key components, the absence of full-system joint sea trials and commercial mining solutions, and the lag in the R&D of environmentally friendly equipment and environmental assessments. Having seen the upcoming era of deep-sea mining, China should strengthen strategic research on the exploitation of deep-sea mineral resources, intensify technological innovation, accelerate the development of a technological system for deep-sea mining equipment, foster a high-tech equipment industry for deep-sea exploration, and expand China's interests in deep-sea activities.

Key words: deep-sea mining; marine engineering equipment; key technology