

DOI: 10.3901/JME.2023.20.325

# 深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述<sup>\*</sup>

康娅娟<sup>1,2</sup> 刘少军<sup>2,3</sup>

- (1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院 佛山 528000;
2. 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室 长沙 410083;
3. 中南大学深圳研究院 深圳 518000)

**摘要:** 深海底蕴藏着丰富的矿产资源, 但因其赋存环境特殊, 必须依赖专门的技术和装备才能开发利用。近年来新能源电池等对关键金属需求的迅猛增长, 推动了深海采矿技术与装备的研究向商业化发展。回顾深海采矿技术和装备的研究进展, 介绍近年来几次大型深海采矿系统海试的情况。从深海矿产资源商业开采的视角, 梳理对深海采矿技术和装备的功能要求和性能指标。以深海多金属结核商业开采为对象, 分析商业生产要求下可能选择的采矿系统基本技术方案, 梳理采矿船需具备的基本功能并估计其排水量及主要尺度参数, 推荐采矿车采集装置和行走装置的结构形式并测算其尺度规模, 分析大产能指标下气力提升方式可能遇到的问题, 提出水力提升系统的初步设计及主要零部件的选用方案。通过对深海采矿技术与装备研究进展和商业开采系统基本方案的综合分析指出, 管道水力提升已成为当前深海采矿系统的主流方案, 海底采矿车的行走及定位导航技术研究取得了很大进展, 水下提升系统等可以借鉴海洋油气工程的相关技术和装备, 深海采矿技术与装备研究已达到开展商业采矿系统装备开发的水平, 而尽量减小采矿作业对海洋环境的扰动成为了又一个重要的方向。

**关键词:** 深海采矿装备; 采矿船; 深海采矿车; 水下提升

**中图分类号:** TD857

## Review on the Technology and Equipment Progress and the System Scheme of Deep-sea Mining

KANG Yajuan<sup>1,2</sup> LIU Shaojun<sup>2,3</sup>

- (1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000;
2. National Key Laboratory of Deep Sea Mineral Researches Development and Utilization Technology, Changsha 410083;
3. Shenzhen Research Institute of Central South University, Shenzhen 518000)

**Abstract:** The deep seabed is rich in minerals, which must be exploited by deep-sea mining technology and equipment. The rapid growth in demand for critical metals, such as new energy batteries, has promoted the commercialization of deep-sea mining technology and equipment research. The research progress of deep-sea mining technology and equipment and several large-scale deep-sea mining system sea trials in recent years are introduced. From the perspective of commercial exploitation of deep-sea minerals, the functional requirements and performance indicators of deep-sea mining technology and equipment are sorted out. As taking the commercial mining of deep-sea polymetallic nodules as the object, the primary technical scheme of the mining system that may be applicable under commercial production requirements is analyzed. The basic functions of the mining vessel are sorted out, and its displacement and main scale parameters are estimated. The structural form of the mining vehicle collection device and the traveling device are recommended, and the dimension scale is measured; besides, the problems encountered in the pneumatic lifting method under the large-capacity index are analyzed. Finally, the preliminary design of the hydraulic lifting system and the applicable scheme

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(52201314)和深圳市科技创新战略研究和技术转移促进中心战略研究合作课题(SZVUPZLYJ—202201)资助项目。20230324 收到初稿, 20230920 收到修改稿

of the main components are proposed. It is indicated that pipeline hydraulic upgrading has become the mainstream scheme of the current deep-sea mining system through the comprehensive analysis of the research progress of deep-sea mining technology and equipment and the basic scheme of commercial mining system. The research on the walking and navigation technology of seabed mining vehicles has made great progress, and the underwater lifting system can learn from the relevant technology and equipment of offshore oil and gas engineering. Consequently, the research on deep-sea mining technology and equipment has reached the level of developing commercial mining system and equipment, and minimizing the disturbance of mining operations to the marine environment has become another important direction.

**Key words:** deep-sea mining; mining vessels; deep-sea mining vehicle; underwater lifting

## 0 前言

2050 年实现全球净零碳排放已成为国际社会的目标。然而,国际能源署估计,要实现这一目标,2040 年对锂、镍、钴、铜、锰等清洁能源关键矿物的需求将比现在多 6 倍<sup>[1]</sup>。目前已发现的镍、钴、铜的陆地储量满足不了未来市场的需求。而深海底蕴藏着丰富的矿产资源,目前认为具有商业开采前景的有多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物这三种矿物。这些深海矿物富含新能源发展所需的镍、钴、铜、锰等,且储量巨大,是新能源关键矿物的新供应源。美国地质调查局预计:“到 2065 年,关键金属供应的 35%~65%将来自于深海底”<sup>[2]</sup>。

深海底的矿物必须从海底采集提取到陆地才能被利用,深海采矿技术及装备是深海矿产资源能否被开发利用的关键。然而,深海矿物赋存在数千米的深海底,超常的极端环境和严苛的环保要求,使深海采矿不能直接采用陆地采矿及海洋油气开发中已发展成熟的技术和装备。几十年来,人们针对深海采矿技术与装备进行了不懈的探索和研究,发展了一些专门技术和装备,形成了基本的系统方案。近年来,在新能源关键矿物需求迅速增长、海洋环境保护要求不断提高的形势下,深海采矿技术与装备在商业化高环保方面更是取得了显著的进展。本文综述深海采矿技术和装备需满足的要求、研发的历程及进展,分析商业采矿系统的基本方案和关键技术及装备的解决方案。

## 1 深海采矿技术与装备需要满足的要求

### 1.1 深海采矿装备需要满足的功能要求

总体上,深海采矿是要将深海底的矿物采集提升到水面、然后运送到陆地再进行加工处理。深海多金属结核一般以 1~12 cm 的颗粒状半埋在 4 000~6 000 m 的深海底沉积物上<sup>[3]</sup>,其海底采集是

要将结核“拾取”到采矿车上,由于每平米的结核只有几公斤或数十公斤,为了保证采集的持续性,采矿车需要在稀软的海底沉积物上不断地行走。深海底富钴结壳呈 4~20 cm 的壳层状粘附在 800~2 500 m 水深的海山表面<sup>[4]</sup>,其开采需要先将结壳从基岩上剥离破碎后再采集到采矿车上。深海多金属硫化物在海底呈大块固体状<sup>[3]</sup>,其采集过程需将其切削破碎。为保持持续开采,富钴结壳和硫化物的采矿车需要具备在崎岖不平的海山上行走的能力。采集到采矿车上的深海底矿物需要被提升到水面采矿船上,目前通常采用的方法是垂直管道输送。提升到采矿船的矿浆经脱水或初选将矿物与海水及沉积物等进行分离,海水和沉积物排放回海中,矿物转移到运输船上被运送到陆地港口。

### 1.2 深海采矿装备需要满足的产能要求

深海采矿是一项商业活动,必须保持持续稳定产能的开采。技术经济分析也表明,系统产能是保证经济开采的极其重要的指标。1987 年,联合国海洋经济技术处在分析了不同海域多金属结核的开发潜力并确定矿区所需面积后提出,深海多金属结核的商业开采应满足每年开采 300 万吨(干)结核、连续开采 20 年的生产能力指标<sup>[5]</sup>。2019 年,麻省理工学院为国际海底管理局所进行的国际海底多金属结核商业开采技术经济评价也指出,一个年产 300 万吨(干)结核且连续开采 30 年的开发项目,投资者所获的经济回报也只能勉强达到陆地铜矿开采的一般水平<sup>[6]</sup>。因此,年产 300 万吨(干)结核是深海多金属结核采矿应达到的基本产能。从深海多金属结核采矿装备的角度,一般建议采用两套采矿系统来完成 300 万吨(干)结核的年产能,即单套系统年产(干)结核 150 万吨。考虑到海况条件及系统维护等,年工作日可按 250 天计,即每套深海多金属结核开采装备需要满足 250 t/h(干)结核的产能。对于深海富钴结壳和多金属硫化物,国际海底管理局提出的商业开采产能要求均是年产 100 万吨(干)结核。

### 1.3 海洋环境保护对深海采矿技术与装备的要求

《联合国海洋法公约》要求各国无条件地“保护和保全海洋环境”，并将海洋采矿定义为污染范围。根据目前的分析和试验，深海采矿活动对海洋环境的影响主要包括海底矿物的采集移走将改变底栖生物环境、采矿车在海底的运动对沉积物和底栖生物产生机械挤压作用、采矿车采集和行走还将扰动海底产生沉积物羽状流导致滤食性动物的窒息、尾矿在海面表层的排放将使水体中悬浮颗粒物增加影响浮游植物的光合作用、浮游动物的摄食和代谢、海底采矿还会产生噪音和泄漏等污染<sup>[7]</sup>。因此，深海采矿装备的设计和实际操作应当尽可能减小对深海底质的扰动、减少沉积物羽状流的产生并抑制其扩散、尽可能少地将沉积物输送到水面和将尾矿送至海底再排放等<sup>[8]</sup>。法律和管理方面，除了国际海底管理局将制定和实施严格的环境影响评价和环境管理与监测制度外，相关机构还会出台一些针对深海采矿技术和装备的具体环境保护标准和指南。

## 2 深海采矿技术与装备发展历程与现状

### 2.1 深海采矿技术与装备的发展历程

1873 年 2 月 18 日，英国“挑战者”号在大西洋水深 4 360 m 的海底地质取样时首次采集到深海多金属结核。1965 年，美国学者 JOHN MERO 发表专著肯定了多金属结核的工业开发前景<sup>[9]</sup>，由此开启了深海采矿技术与装备的研发。

日本曾提出一种“连续链斗法”深海多金属结核采矿系统方案，并于 1972 年进行过海试，但由于长链水下缠绕等技术原因而失败<sup>[10]</sup>。1980 年，法国提出过一种“穿梭艇法”的系统方案，但分析认为“未来几十年也无法经济地开采”，因此中止了研究<sup>[11]</sup>。早期获得了进展的是几个以美国为首的西方财团。1970 年代末，OMI(Ocean Mining Inc)、OMA(Ocean Mining Associates)和 OMCO(Ocean Minerals Company-Lockheed)等几个财团研发了采矿试验系统并在太平洋进行了多次 5 000 m 级多金属结核开采试验。他们提出的采矿系统方案总体架构上比较一致，均由一台采矿车在海底采集结核，再利用流体输送方式通过垂直管道将结核提升到水面采矿船上<sup>[12]</sup>。由于都是通过长达数千米的管道进行矿物提升，所以也统称为“管道提升式系统”。不

同的是，OMA 和 OMCO 系统中的矿物管道输送采用的是气力提升，而 OMI 进行了气力提升和水力提升两种方案的试验。另外，OMA 和 OMI 系统中的采矿车是由采矿船通过 5 000 m 的管道拖曳着在海底被动地行走，而 OMCO 的采矿车则采用阿基米德螺旋机构在海底自行行走。1978 年夏，OMI 成功地完成了世界上首次深海多金属结核采矿试验，从 5 200 m 水深的海底将 800 t 结核采集输送到水面采矿船上，其中气力系统采集约 150 t，水力系统采集约 650 t，最大产能达到 40 t/h<sup>[13]</sup>。同年 10 月，OMA 也从 5 500 m 海底采集了 550 t(湿)结核，最大产能达到 50 t/h<sup>[14]</sup>。这些海试的成功验证了管道提升式采矿系统的技术可行性。

1982 年《联合国海洋法公约》获得通过，构架了国际海底矿产资源开发管理制度。1990 年起，一些缔约国依据《公约》的法律规定，先后成为“先驱投资者”及其后的“勘探合同承包者”，开展深海矿物资源勘探和采矿设备研究测试，形成了新阶段的深海采矿技术与装备研究。从技术的角度看，这个阶段的研究依然是以 1970 年代的管道提升式系统为基本技术原型，并对采矿车及提升泵等关键技术和装备进行了深入研究和改进。例如，为了使采矿车的海底行走具有更高的机动性和可靠性，海底采矿车基本上都是采用履带自行式；基于高采集效率和减小海底扰动的考虑提出和探讨了各种海底结核采集方案和机构；针对提升泵及提升管道开展了大量理论分析和参数优化研究，等。各国也针对采矿车、提升泵等关键装备进行了不同水深的单体海试。如日本 1997 年的 2 000 m 水深集矿机试验<sup>[15]</sup>、印度 2000 年代的 400 m 级部分系统海试<sup>[16]</sup>和 2021 年的采矿车海底行走试验、韩国 2013 年的 1 370 m 水深模拟多金属结核采集试验和 2015 年 1 200 m 水深的矿物提升泵和中间仓测试试验<sup>[17]</sup>、欧盟 2022 年 300 m 水深的采矿车作业与扰动试验等。这些研究和试验在深海采矿技术与装备的发展方面都取得了一些进展。

自认识到其商业利用价值后，1980 年代开始了深海富钴结壳和多金属硫化物的开采技术研究。因为这些矿物在海底呈壳层或大块固体形态，所以其开采过程需要先破碎剥离后再采集。海底矿物的破碎剥离基本上都是借鉴陆地煤矿开采中的截齿螺旋滚筒方案。对被剥离矿物的采集，可以是螺旋滚筒后直接用水力抽吸方式采集，也可以借鉴疏浚机上

的铰刀式采集方法<sup>[18]</sup>。2016 年,鸚鵡螺矿业开发了一套深海多金属硫化物商业采矿系统<sup>[19]</sup>,其中包括一台截齿螺旋滚筒的主采矿机和一台铰刀式的采集车,但因为资金链断裂该采矿项目并未得到实施。2017 年和 2021 年,日本在其专属经济区内分别进行了多金属结核和富钴结壳的采矿试验并成功采集到海底矿物<sup>[20]</sup>。

中国的深海采矿技术和装备研究开始于 1990 年代,确定了以水力管道提升式系统为基本技术原型,针对多金属结核的海底采集和水下输送关键技术开展研究和试验验证。2001 年,中国大洋协会组织了 135 m 水深部分采矿系统海试<sup>[21]</sup>。2016 年和 2018 年,长沙矿冶院分别进行了 300 m 水深泵管输送系统和 500 m 水深采矿车行走与采集海试<sup>[22]</sup>。2021 年,上海交通大学开展了 1 300 m 水深采矿车海底行走试验,大连理工大学等开展了 500 m 水深矿产智能化混输系统海试<sup>[23]</sup>。同年,中国大洋协会在国家重点研发项目支持下开展了 1 300 m 级采矿整体系统联动海试<sup>[24]</sup>。在深海富钴结壳和硫化物采集技术与装备方面也开展了大量研究,研制了采矿样机,长沙矿山院、中科院深海所等先后多次开展过 1 300~2 900 m 水深的富钴结壳采矿样机海底行走和矿物切削采集试验<sup>[25]</sup>。

## 2.2 近年来的几次深海采矿系统海试

### 2.2.1 TMC 的深海多金属结核采矿海试

TMC(The Metals Company)是一家在美国上市的加拿大公司,在瑙鲁、汤加、基里巴斯政府担保下在太平洋 C-C 区拥有 3 块国际海底多金属结核矿区。2022 年第 4 季度,TMC 在其瑙鲁矿区开展了 4 300 m 水深深海多金属结核的采矿试验。采矿试验系统采用管道气力提升式,试验采矿船由一条钻探船改装而成,图 1 是放置在采矿船甲板上的试验采矿车。在 11 月的一次采矿试验中,采矿车在海底行驶超过了 80 km,采集了约 4 500 t 结核,并将超过 3 000 t 结核通过 4 300 m 长的立管系统传送到水面采矿船上,而将另外 1 500 t 结核预留在海底以满足后续试验所需。据报道,该次海试中该系统实现了每小时 86.4 t 的持续生产率<sup>[26]</sup>。TMC 声称,他们将继续升级该试验系统的技术规格,采用更多采集头和更大直径的立管,以实现每小时超过 200 t 的目标生产率。试验中,他们还监测和采集了采矿活动引起的沉积物羽状流和作业噪音以进行环境影响评估,为实现其 2024 年进行年产 130 万吨(干)多金属结核商业开采做准备。



图 1 TMC 海试中放置在采矿船上的采矿车<sup>[26]</sup>

### 2.2.2 中国深海多金属结核采矿系统整体联动试验

2021 年 7 月,由中国大洋协会牵头,中国五矿集团、中船集团等参与,在中国南海开展了深海多金属结核采矿全流程整体系统联动试验<sup>[27]</sup>。试验系统按 1/10 商业开采规模设计,采矿试验车和提升泵按 3 500 m 工作水深设计,试验船由运输船改装而成,根据海试需要研制了动力输送与控制系统、布放回收及升沉补偿装置、船载脱水与矿物储存系统(图 2)。海底试验区面积为 1 km×1 km,平均坡度 5.17°,结核丰度 2~8 kg/m<sup>2</sup>。试验中最大作业水深 1 306 m,采矿船行驶距离 1 695 m。最大行驶速度 1.2 m/s,采矿车定位精度 0.5 m,计算定位精度 0.189 %R。试验过程中从海底采集并通过离心泵和管道输送到试验船结核 1 166 kg,实际采集最大粒径达 134 mm,脱水后的结核水分 16.07%。实现了采矿车海底行走与结核采集、提升泵与管道水下垂直输送、甲板脱水和矿物储存等全采矿流程联动运行,突破了海底采矿车高精度导航和稳健行走、粗颗粒矿物大浓度高效输送等关键技术。同时,试验中也进行了表层和近底羽状流浊度监测和水样采集,底质扰动情况近底视像观察和沉积物取样。



图 2 中国深海多金属结核采矿试验系统<sup>[27]</sup>



### 2.2.3 GSR 的深海多金属结核采矿车作业试验

GSR(Global Sea Mineral Resources NV)是一家比利时公司,2013 年在太平洋 C-C 区国际海底获得多金属结核矿区。2017 年起,GSR 开始在自己的矿区以及德国的矿区开始进行采矿车海底作业试验。2017 年,GSR 将其第一代采矿样机下放到其矿区海底开展地面力学和行走能力研究,最大水深 4 571 m,行走了 14.5 km,最大行走速度达 0.65 m/s。在此基础上,GSR 研发了第二代采矿样机,2019 年再次去矿区开展海底作业试验,但下放至 3 000 m 左右因光纤缆发生故障而中断了试验。2021 年 4 月再次开展试验,采矿样机下放到海底后与试验船上之间 5 000 m 长的电缆又发生了分离,几天后才恢复连接重新开始试验。试验在 5 月 20 日结束。据报道,该次海试中,采矿样机在海底停留时间超过 107 h,海底行走距离 54.3 km,估计海底采集了结核 2 000 t(该试验系统没有矿物提升系统,结核采集到样机上后又排放到海底)<sup>[28]</sup>。具有特色的是 GSR 在其采矿样车上布置了较多的环境影响检测仪器,如远程触发的取水采样瓶阵列、成组的浊度传感器和声学多普勒流体剖面仪(Acoustic doppler profilers, ADCPs)、实时粒径和沉降速度粒度分析仪以及不同清晰度摄像机等(图 3),用以获取因采矿作业对环境水体影响的信息。同时,试验过程中还在离试验现场较远的地方安排了另外一条船,以监测集矿机试验中产生的沉积物羽状流的漂移和沉降状态等。

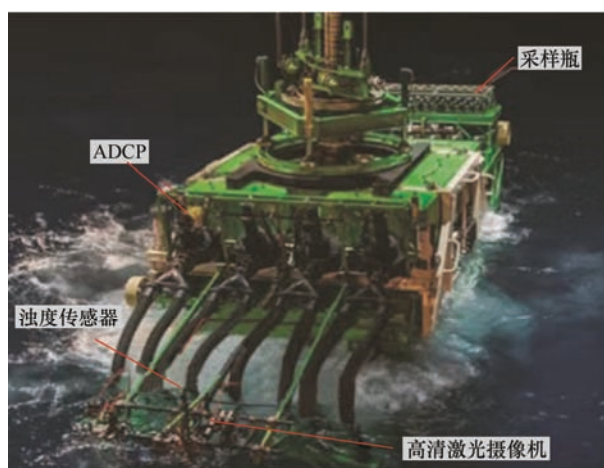


图 3 GSR 的海底采矿样机及环境监测仪器<sup>[28]</sup>

### 2.2.4 JOGMEC 的深海多金属硫化物采矿海试

近 30 年来,日本一直在开展其专属经济区海域的深海多金属硫化物和富钴结壳资源的开发研究。其中,日本官方机构 JOGMEC(The Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)制定和实施了一个

2008—2017 的多金属硫化物研究开发计划。根据该计划,JOGMEC 将海底多金属硫化物的开采分为掘削、破碎、采集、提升 4 个环节,依然采用管道水力提升式系统执行。为此,JOGMEC 开发了 2 台海底采矿试验车,试验车 A 带有双轴式和滚筒式两种刀头,主要用于掘削平整采场和收集矿物;试验车 B 则可进行采掘头更换以适应掘削、破碎、采集等不同作业要求。对于矿物的提升,开发了由 2 台反向旋转多级离心泵组成的提升装置。2014 年,JOGMEC 在靠近冲绳 1 600 m 深的海底硫化物矿场进行了 2 台试验车的性能试验,并应用试验车 B 在矿场上开整了一片平整的试验区域。2015 年,JOGMEC 按计划开启了其为期 3 年的深海多金属硫化物采矿海试,整个海试分为 3 个阶段:第一阶段(2016 年),应用装载掘削头的试验车 B 在 2014 年开出的试验区域进行了矿物掘削;第二阶段(2017 年),将试验车 B 换上带有小型颚式破碎机的铲斗对掘削下来的矿物进行破碎后再放置在试验区域;第三阶段(2017.8.22—2017.9.23),进行海底矿物采集和提升试验。在第 3 阶段的试验中,总共使用了 4 条试验船。其中一条船(白岭号)布放并支持试验车 A 在海底采集前期破碎后的矿物(最大粒径小于 30 mm),另一条船(POSEIDON-1)则悬挂提升系统将采集到的矿物输送至船上(图 4)<sup>[20, 29]</sup>。在这次试验中,JOGMEC 的试验系统从海底采集了 4 140 kg 海底硫化物矿物到水面船上。同时,其提升系统还将试验前期放置在海底的 12 255 kg 模拟硫化物矿提升到水面。

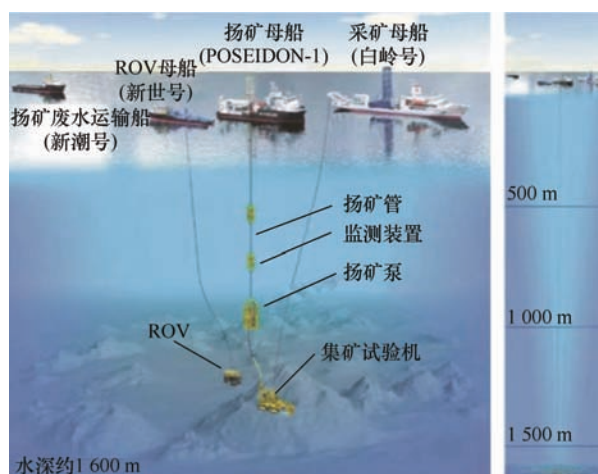


图 4 JOGMEC 的深海多金属硫化物开采试验系统图<sup>[29]</sup>

综合以上海试案例可以认为,经过几十年的发展,深海采矿技术和装备的水平已经得到很大的改善和提升。开展采矿系统海试的深海矿物种类已从多金属结核扩展到了多金属硫化物,同时,中国和

日本也都成功进行过多次深海富钴结壳原位采集的试验；相对于 1970 年代的拖曳式采矿车，这些试验中的海底采矿车都采用了履带自行式机构，试验中展现出极高的行走路径控制精度；得益于海洋油气工业的发展，管道提升系统在管接头、管道布放及升沉补偿技术等方面也取得了长足的进步等。采矿装备设计和采矿作业实施中对环境扰动影响的关注和研究更是提高到了新高度。但另一方面，尽管 TMC 的试验系统开采规模已达到准商业级，但总体而言，对采矿系统的经济性、可靠性的分析和验证还是不充分。而 GSR 的试验中连续出现电缆方面故障，更说明深海采矿技术和装备的发展还远未达到成熟程度。

### 3 深海采矿系统及关键装备基本方案

经海试验证成功后，管道提升式系统成为深海采矿研究的主要对象。几十年持续研究后，海底采矿车的行走方式等关键技术和装备已得到了重大改变和发展，船舶与海洋工程中一些先进和成熟的技术和装备也不断应用和移植于深海采矿系统。因此，尽管还有一些改进方案以及新的设想不断被提出和尝试，管道提升式已成为深海采矿系统的基本方案，而一些关键技术和装备的认识和改进还在不断深入和发展中。本文以深海多金属结核采矿系统为对象综述如下。

#### 3.1 深海采矿系统基本方案

管道提升式系统可分为气力提升和水力提升两种。1970 年的海试系统中，除了 OMI 采用了一个以多级离心泵驱动的管道水力提升方式外，其它几个试验系统均是气力提升方式。两种提升方式都采集了数百吨结核，最大产能也相差不大。但因认为气力提升方式效率较低，所以，从 1990 年代的日本、韩国、印度，到 2010 年代的 GSR 和欧盟(IHC)，所研发的深海采矿系统基本上都是采用了水力提升系统，中国 2021 年也是采用管道水力提升式系统完成了 1 300 m 多金属采矿的全流程试验。图 5 是水力管道提升式多金属结核采矿系统的基本构型。与 OMI 系统<sup>[13]</sup>不同的是，当前系统都是采用履带自行式行走海底采矿车，而且在输送硬管和软管之间增设了一个中间仓。从海底采矿车通过软管提升上来的矿浆先进入中间仓内的矿仓，然后再通过给料机送至提升硬管，可以在因为结核丰度或采矿车采集率变化时按设定参数调节进入提升硬管的矿石量。

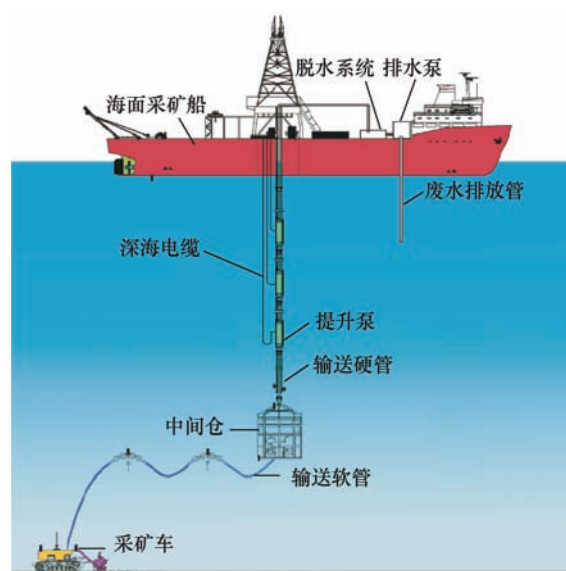


图 5 管道水力提升式深海多金属结核采矿系统方案示意图

同时，海底提升上来的矿浆在中间仓内的中转也有利于减小进入提升硬管的沉积物，提高输送效率和减小环境影响。另外，为了防止采矿废水对近海面“阳光层”中海洋生物和光穿透能力的影响，将采矿废水送至一定深度的海底后再排放已成为基本要求，因此，现代的采矿系统中还需设置废水海底排放装置。

气力提升是将压缩气体注入提升管道，通过气体膨胀释放能量进行矿物提升，可以避免和减小水深潜水泵和电缆的应用，具有系统结构简单的优点。因此，尽管 1980 年后几乎所有实际研制的采矿系统都是采用的水力提升方式，但对气力提升方式的研究一直未停止过。TMC2022 年的深海采矿试验系统即是采用气力提升方式，压缩机安装在试验船上，通过注气管在水下 1 500 m 处将压缩气体注入提升管道中进行矿物提升<sup>[30]</sup>，将 3 000 t 结核从 4 300 m 水深的海底输送到了水面试验船上。无疑，TMC 这次采矿海试的成功将引起对气力提升系统的再次关注，促进对气力提升系统的进一步研究。

不论是气力还是水力提升，在深海多金属结核采矿的水下垂直管道输送中，建议的输送矿浆体积浓度都在 20% 以下。这意味着需要将矿浆中占体积 80% 以上的海水提升到采矿船后再排放回海洋，显然，如果采用箕斗等仅将矿物提上采矿船应当具有更高的效率。因此，尽管几十年前连续链斗法已宣告失败，但对机械式提升的探讨也还一直在继续。2015 年，鸚鵡螺矿业提出了一个在采矿船两侧采用穿梭式箕斗进行矿物提升的机械式提升系统方



案<sup>[31]</sup>。但是,分析表明,尽管可以采用零浮力提升缆和箕斗外形水动力优化设计等,目前提升绞车的提升速度和载荷能力还是难以满足商业开采系统的产能要求,而且,多箕斗提升时缆绳水下缠绕问题并未能消除<sup>[32]</sup>。因此,该方案并没有形成实际系统。

### 3.2 采矿船基本方案

采矿船是整个开采系统的水面支持平台,承担着诸多功能。一方面,采矿作业前,采矿船需要将约 5 000 m 的提升管道、提升泵和海底集矿机等装载运送到采矿区,并将它们布放到海底构成采矿系统;采矿作业中,需要为海底装备提供动力支持和操作控制,维护保养等,采矿作业完成或较长时期中断时还要回收海底作业装备。另一方面,采矿船还需要将提升上来的矿石进行初步脱水处理后储存在船舱里,积累到一定程度上再装载到运输船上,由运输船运回陆地进行冶炼加工。

为了完成这些功能,除一般船舶要求外,采矿船的甲板还必须具有足够的面积和空间来放置海底提升管道、集矿机等作业装备以及他们的布放绞车、起重机,还需要安装发电机、脱水系统,矿物装载系统等。为了安装和操作提升系统,采矿船上一般还会设有尺寸较大的月池以及塔架。而采矿船的船舱中,应当包括有大容积的储矿仓、压载水仓、支持采矿船长时间作业的储油仓和机器放置空间。就具体尺寸设计而言,甲板上海底作业装备及所需安放空间等可根据设计情况和类似设备来确定,对于

商业开采船设计来说,储矿量及储矿仓大小是极为重要的参数。

根据前述分析,商业采矿船的日产能为 6 000 t(干)结核,考虑到海底结核 30% 的含水率,则每天必须采集 8 570 t(湿)结核。如果将太平洋 C-C 区多金属结核矿区为设想矿区,其到大陆的距离可取为 8 000 km,一般运输船往返一次需要约 24 天(包含从采矿船装货和码头卸货时间)。经济分析结果推荐采用 3 船运输模式,也就是每条运输船运走采矿系统 8 天采集的 68 560 t(湿)结核,如果再考虑 2 天裕量,则采矿船需具备装载 85 700 t(湿)结核的能力,按平均湿容重  $2.0 \text{ t/m}^3$ ,采矿船的储矿仓容量约需  $45\,000 \text{ m}^3$ 。根据国际海事组织对散货船的安全措施要求,为保证采矿船向运输船输送矿物时吃水线和姿态基本不变,需要采矿船具备较大的水压载能力,如果取压载量与储矿量基本相等,考虑到结核和海水的比重,压载舱的容积应当在  $90\,000 \text{ m}^3$  左右。此外再根据拟定作业时间和耗油量等设计燃油舱、淡水舱等,采矿船各类舱的总容积可基本确定。在此基础上,综合采矿船各舱和甲板上各设备的布局,考虑船上开较大月池对船宽的要求,并参考其他研究者对采矿船的设计方案<sup>[33-34]</sup>,可得采矿船的排水量大约在 15 万吨左右,船长和型宽分别约 265 m 和 44 m,吃水深度约 15 m。图 6 是中国深圳金航矿产开发集团的多金属结核商业采矿船设计图<sup>[35]</sup>,该设计 2022 年获得了中国船级社颁发的第一个深海采矿船及立管设计 AIP 认证。

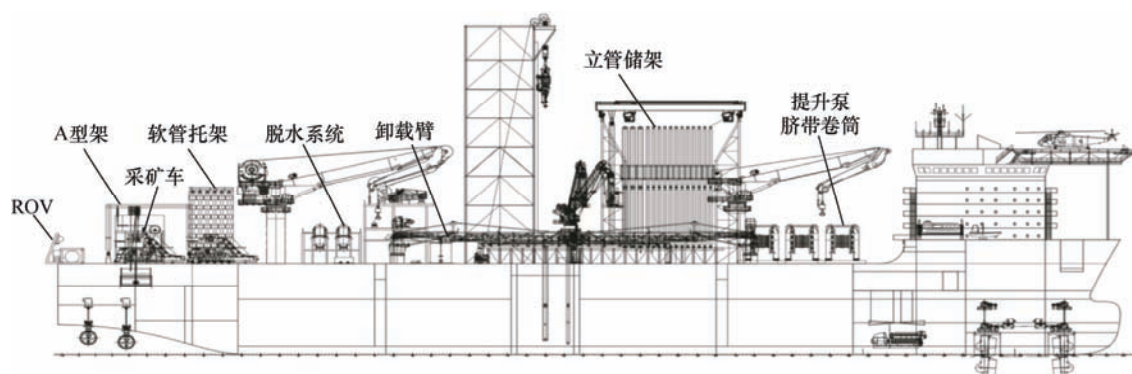


图 6 深海多金属结核商业采矿船设计图<sup>[35]</sup>

为了保证稳定作业,通常采矿船都要求安装有动力定位系统,一般推荐采用 DP2 等级。为了抑制船的升沉对提升系统的影响,还需要考虑升沉补偿装置。

### 3.3 海底采矿车基本方案

深海多金属结核商业集矿机要求的功能如下:

在海床上按预定轨迹行走,采集沉积物中的结核并进行初步的矿-泥分离,将超过尺寸的结核破碎到管道输送要求的粒度,将破碎后的结核颗粒输送到提升系统。商业集矿机除了应满足系统产能要求外,还应当具备高的采集率,对海底环境扰动影响小。根据上述功能要求,目前集矿机的结构设计方案将

大致如图 7 所示,由集矿头(采集模块)、破碎机、行走机构、动力与液压传动系统、浮力块等组成。

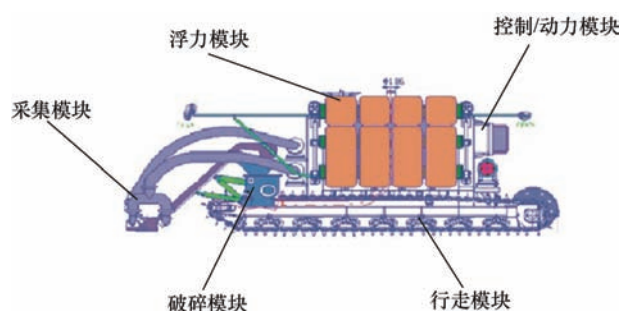


图 7 深海多金属结核采矿车结构设计方案

### 3.3.1 结核采集机构基本方案

采矿车在海底的结核采集实际上包括两个阶段:首先将半埋在沉积物中的结核“拾取”到采集头中,然后将结核传送到车上的破碎机或储料罐中。有三种基本的采集方法:机械式、水力式、机械-水力混合式<sup>[36]</sup>。机械采集机构可以是滚筒链齿、梳状铲、传动链等。而水力采集方式也分为类似于真空吸尘器的吸扬式、基于康达效应(Coanda-effect)的附壁射流式和采用高压喷射的射流冲击式 3 种。这些类型的采集机构在实验室测试中大都取得了结核采集率高于 80%的结果<sup>[17]</sup>,也分别在一些采矿海试中得到过应用及功能验证<sup>[37]</sup>。

除了结核采集率外,对环境的低扰动、能耗和可靠性也都是采集方式的评价因素。目前比较普遍的观点如下:相对于机械集矿方式,水力集矿方式结构简单、不易堵塞、可靠性好,采集率更高且对地形适应能力更强,不破坏海床板结层,对环境扰动影响相对较小,但在相同采集能力下能耗更高。尽管这些观点还缺乏充分的试验和实际应用效果来支撑,但从当前采用的技术路线来看,水力集矿方式更受青睐。1990 年以来研发的采矿系统中,除印度还在同时对组合梳状铲机械式和吸扬水力式进行研究外,其他系统都是采用水力集矿方式<sup>[37]</sup>。对于水力集矿中的 3 种方式,有研究结果认为,吸扬式对近底流场扰动最小,射流冲击式采集效率最高,而附壁射流式在低的能量消耗和流场扰动方面综合性能最佳<sup>[38]</sup>。从实际发展情况来看,近年来欧美企业(如 GSR、IHC、TMC 等)一些新研发的系统都是采用附壁射流式集矿方式<sup>[37]</sup>。

### 3.3.2 海底采矿车行走机构基本方案

深海多金属结核在海底的丰度通常在  $5 \sim 25 \text{ kg/m}^2$ ,因此,按商业开采时  $250 \text{ t/h}$ (约  $360 \text{ wt/h}$ )的产能要求,采矿车必须在较大的范围内进行结核采集,必须具备在海底沉积物上行走的能力。而且,

为了不浪费海底资源,商业开采时也必须满足一定的结核回采率要求,这就要求采矿车的结核采集面积相对设计的矿区面积不低于某一比例(Sweep efficiency),既不能留下区域不去采集,也不能在已采过区域内重复采集。为此,采矿车还需具备良好的行走机动性和预定路径跟踪能力。

OMI、OMA 系统中的采矿车由采矿船通过数千米长的管道拖曳着在海床表面移动,无法实现对行走路径的高精度控制。OMCO 的阿基米德螺旋自行机构承载能力受限,转弯性能差。因此,自 1990 年代开始,几乎所有的深海采矿车都是采用履带行走方式。

海底沉积物主要由硅质粘土与软泥组成,表层含水率高、承载能力低,其表面摩擦角小于  $5^\circ$ ,因此,深海多金属结核集矿机的履带牵引力实际上是来自于海底沉积物产生的剪切阻力。对海底沉积物土工特性调查的结果表明,海底表层以下  $0 \sim 15 \text{ cm}$  处剪切强度持续增加,从  $3 \text{ kPa}$  上升到  $10 \text{ kPa}$ ,超过  $15 \text{ cm}$  以后有一段平稳值<sup>[39]</sup>,其剪切应力-位移特性则是先增大至某一应力峰值,然后在屈服极限后具有残余剪切应力<sup>[40]</sup>。所以,深海采矿车的履带行走机构设计可以通过调节履带的宽度实现希望的接地比压和静压陷深度,通过履带速度及与沉积物各点的动态剪切变形来计算履带产生的牵引力,从而得到希望的采矿车行走能力和机动性。

采矿车海底行走路径控制的另一个重要因素是定位与导航信息的获取。目前常用的方法是采用综合各方面信息来执行。如可以应用超短基线和短基线构建移动声学系统测取采矿车与中间仓的绝对和相对位置、采用三维实时声成像声呐测取采矿车与相邻车辙之间的距离、应用光纤惯性导航单元获得采矿车三方向加速度及三轴角速率、应用声多普勒测速仪检测采矿车的行驶速度等等,然后,融合各方面信息构成高精度的组合定位导航系统。

经过多年的研究,海底采矿车行走及定位导航技术已有可行的基本技术方案。近十年来,韩国、中国等进行过一系列采矿车大水深海底行走与路径控制的试验,表现出稳健的行走能力和机动性能、高精度的定位和导航性能<sup>[17, 27]</sup>。

### 3.3.3 海底采矿车的基本尺度规模

就本文所述管道提升系统中的深海多金属结核采矿车而言,不论是采用何种采集或行走方式,其结核采集产能取决于矿区结核丰度、采矿车海底行走速度、采矿车结核采集宽度、结核回采率(考虑采集头的结核采集率和采矿车的实际采集区域面积



比)。如果采用单台采矿车来完成 360 t/h(湿)的商业开采产能,设矿区结核丰度  $20 \text{ kg/m}^2$ (湿)、采矿车行走速度  $0.6 \text{ m/s}$ 、结核回收率 70%,可计算得采矿车结核采集宽度不能低于 12 m。与尺度规模相近的海底挖沟机、鸚鵡螺矿业研制的深海多金属硫化物采矿机及 TMC 的深海多金属结核商业采矿车初步设计方案相比较,该采矿车在空气中的重量将在 250 t 以上<sup>[30]</sup>。也有一些设计方案考虑一个采矿系统(一条船)中采用 2 台甚至多台采矿车同时作业,但尚未见到具体的技术经济分析和优劣比较结果。

### 3.4 提升系统基本方案

从原理和结构上看气力和水力方式各有优劣,而从商业开采角度来看,还有更多问题需要考虑。

#### 3.4.1 气力提升系统与水力提升系统的比较

多金属结核在管道中的气力提升是一个气-液-固流动过程,期间可能形成不同的流态。研究表明,如果气相的通量率超过  $15 \text{ m/s}$ ,就会发生环状流<sup>[41]</sup>。而进一步的试验研究认为,环状流不具备提升结核的能力<sup>[42]</sup>。以开采水深 6 000 m、产能 360 t/h(湿)、结核粒度 20 mm、提升管道内径 1 m 来计算,结核气力提升中提升管道上部的气通量将超过  $13 \text{ m/s}$ <sup>[43]</sup>。实际上,TMC 为其 4 500 m 作业水深商业采矿气力提升系统的管道设计方案就是船底到水下 600 m 的管道为 36 吋管(外径 168 cm),水深 600 以下的管道为 28 吋管(外径 86 cm)<sup>[30]</sup>。而深圳金航为其 6 000 m 作业水深商业采矿水力提升系统设计的提升管道全为 16 吋管(外径 41 mm)<sup>[44]</sup>。可见,在相近的采矿水深时,气力提升系统管道重量为水力提升的两倍以上,将给管道系统的布放和采矿船的作业运行带来困难;体积更是增加 5~6 倍,采矿船甲板基本无法为这些管道堆放提供足够空间。

另一方面,对于上述商业采矿系统相关参数,根据理论分析,气力提升系统注气孔以下管道的结核和海水混合物中颗粒的体积浓度为 3%~4%,而水力提升中的最佳输送浓度为 15%左右<sup>[43]</sup>。低的输送浓度意味着需要将更多的海水提升到水面再排回海底,显然将降低提升效率。据计算分析,多金属结核开采的气力提升方式提升效率一般不超过

20%<sup>[45]</sup>,而水力提升方式的提升效率在 45.7%~55.8%<sup>[44]</sup>。就整体而言,提升系统的能耗将为采矿车的两倍以上,因此,提升效率与能耗必然是商业开采系统基本方案选择重点考虑的因素之一。

根据上述分析,气力提升方式虽然具备结构简单的优点,但当应用于大产能的商业开采系统时却可能存在结构尺寸过于庞大的问题,而且提升能耗相对水力提升将高比较多。因此,水力提升系统还应当是当前管道提升式深海采矿系统的主流选择。

#### 3.4.2 管道水力提升系统基本方案

水力提升系统主要部件包括输送管道、提升泵和中间仓。

提升泵是提升系统的关键部件。因为需要进行数千米垂直管道的固液两相流输送,需要具备高扬程输送能力;与陆地管道的毫米级矿物输送相比,深海多金属结核是 20~50 mm 的粗颗粒输送;为了防止故障等情况下泵内发生堵塞,要求泵具备可回流能力;而且,因为需要多级泵串接在管道中使用,泵型为轴流式会有利于浆体输送。OMI 系统采用德国 KSB 设计的多级空间导叶式离心泵成功地进行 5 000 m 水深的结核输送<sup>[36]</sup>,其后该泵型被大多数采矿系统所沿用。中国 2021 年深海多金属结核采矿海试系统也是采用了空间导叶式离心泵,图 8 为其结构设计图<sup>[46]</sup>。试验测试结果表明该泵具有良好的粗颗粒矿浆输送及回流能力<sup>[47-48]</sup>。海试结果也验证了该泵型用于深海多金属结核采矿垂直管道水力提升的可行性。德国和印度一起合作提出和采用过柱塞式正排量泵的提升系统方案<sup>[49]</sup>,就单级泵比较,正排量泵能比离心泵提供更高的扬程,但是否能满足 5 000 m 级大水深采矿的扬程要求尚未得到实际验证,且结构上不利于多台泵串接使用。鸚鵡螺矿业在其 1 700 m 水深的多金属硫化物商业开采项目中设计和制造了一套由隔膜式正排量泵组构成的提升泵,但后来由于项目中断也未能实际应用<sup>[50]</sup>。因此,对于多金属结核商业采矿系统,一般还是采用多台多级离心泵串联使用的方案,如深圳金航的商业采矿系统方案中,采用了 3 台 7 级泵串联在 6 000 m 的提升管道中,每台泵具有 420 m 的扬程<sup>[44]</sup>。

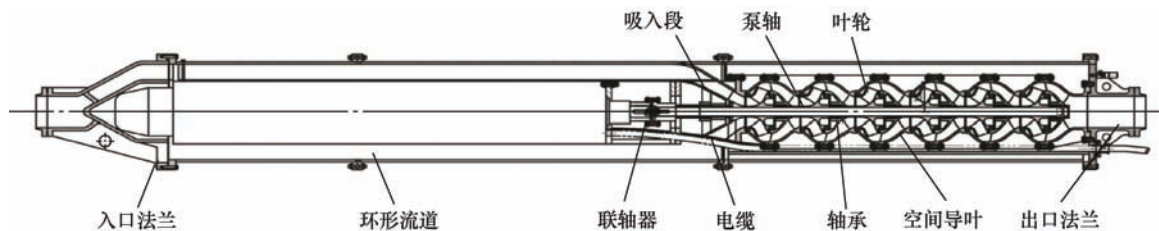


图 8 多级空间导叶式离心泵设计图<sup>[32]</sup>

根据以上分析,深海多金属结核商业采矿系统的水力提升管道内径在 400 mm 左右。这种规格的管道在海洋油气工业中有成型产品,例如 APL Spec 5 无缝钢管,该管外径 16 吋、壁厚 0.687 5 吋、腐蚀和磨损裕量 0.1 吋。标准管长 50 英尺,6 000 m 米管道在空气中总重约 1 156 t。选用标准管道也就可以选用配套的管接头及管道浮力块。例如,为了消除采矿船风浪作用下纵、横摇运动对提升管道的影响,可以选海洋油气工业中的柔性管接头(如 Oil states diverter II-5)作为管道与采矿船的连接头。该接头可允许管道在各方向相对于船体的垂直轴线产生 $\pm 15^\circ$  内的摆动<sup>[44]</sup>,起到传统方案中复杂庞大万向架的作用<sup>[36]</sup>。

除了采矿船、采矿车、提升系统等关键子系统外,深海多金属结核商业采矿系统中的水下装备布放回收机构、管道升沉补偿机构及深水电缆等,也可以应用或借鉴海洋工程中已有的装备或技术来解决。

### 3.5 环境保护要求对采矿系统方案的影响

不断提高环境保护意识和标准是人类社会发展的必然趋势。保护海洋环境是《联合国海洋法公约》的基本原则,国际海底管理局正在制定的国际海底矿产资源开发规章中,环境规章是其 3 个部分之一。尽管对深海采矿活动对海洋环境的影响了解还有限,但基于“预防性原则”、“最佳可得科学证据”等,围绕开发规章的制定已推出了“环境影响评价标准与指南”、“环境管理与监测计划指南”、“采矿船与设施安全管理与操作指南”等 10 部环境保护相关标准与指南,对采矿活动的底质扰动、沉积物羽状流、废水排放等提出监管标准与指南。这些标准和指南无疑都直接或间接地对采矿系统和设备提出要求。2017 年,荷兰更是直接向国际海底管理局提交了《开发对环境负责的采矿技术:实现采矿设备的审批流程》的提案。近年来美国船级社、中国船级社制定的深海采矿指南中,均明确提出了深海采矿系统和设备的环保认证和规范。2021 年,中国海洋工程咨询协会也发布了《深海采矿活动环境保护与保全指南》的团体标准。尽量降低采矿作业对深海环境的不利影响,不仅是对深海采矿活动的基本要求,也将成为深海多金属结核系统与装备研发的约束性指标。

事实上,这些环保要求和指南,正逐渐在深海采矿系统和设备的研发和设计中得到体现和落实。例如采矿废水的排放,最开始是从采矿船直接向海面排放。后来,考虑到避免对海面下 200 m 水深内

“阳光层”动植物的影响,有建议将废水回送到海面以下 1 000 m 水深(进入“深海层”)后再排放。2022 年 TMC 进行的 4 300 m 水深采矿海试就是将废水回送至海底 1 200 m 排放。最近,一些科学家的研究认为,废水在海洋中层排放可能因为海洋环流等造成更大范围扩散,因此,未来的采矿系统很可能会要求将废水送回海底。实际上,欧盟“蓝色结核”提出的深海多金属结核采矿概念设计方案就是将废水送至海底(3 000~6 000 m)排放,为此,系统设计中也必然需要有大水深回水管系和大功率船载废水排放泵的设置。矿物采集技术和装备方面,除了比较现有研究选择低扰动的采集方案外,一些研究者和企业在设计 and 试验带齿的滚筒式多金属结核采集头等新方案,期望作业过程中只采集结核而尽量不将沉积物移走,从而减小对底栖生物及环境的扰动;GSR 和 TMC 的采矿试验车都设计有特殊的结核与沉积物分离和排放装置,以抑制由车内沉积物与结与分离和排放而造成的羽状流漂移扩散,等等。另外,为了执行和落实国际海底管理局等关于对采矿活动环境影响管理和监测的标准和指南,深海采矿系统中必须得设置大量与环境因素相关的传感器和监控装置。总之,低环境扰动的装备设计和工艺方案,必然是深海多金属结核开采系统发展的努力方向和刚性指标。

## 4 结 论

(1) 深海采矿技术与装备的研究已有数十年历史,采矿对象已由最初单一的多金属结核资源拓展到多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳 3 种资源,研究目标也从技术可行性研究发展到商业试开采系统研究。1970 年代形成的管道提升式系统技术构型依然是当今主流的深海采矿系统基本方案,但采矿车行走技术与装置等已经取得了突破性进步。得益于海洋油气工业技术和装备的移植应用,矿物提升、布放回收和升沉补偿等技术和装备也取得了长足的发展。近年来几次大水深的深海采矿海试,也从能力和规模等各方面验证了深海采矿技术和装备整体水平的提升。

(2) 商业开采将向深海采矿技术和装备提出更多更高的要求。例如,因为深海多金属结核商业开采要求产能较高,水下矿物输送时提升绞车提升能力和速度的受限可能导致机械提升方式难以被应用,气力提升方式的管道总体积可能会超出采矿船甲板可能提供的堆放空间等。然而,分析也表明,

按照通用的深海多金属结核商业开采产能要求, 采用水力管道提升式采矿系统, 采矿船、采矿车及提升管系等关键子系统及装备都可找到可行的技术解决方案甚至部分成熟的产品, 装备的尺度规模也未超出海洋工程中相似产品的范围。因此, 可以认为, 深海矿产资源的商业开采在采矿技术和装备方面已无不可逾越的障碍。

(3) 陆地矿物资源的逐渐枯竭、特别是新能源对关键金属迅猛增长的需求, 已经激发了深海采矿技术和装备研究的新一轮热潮, 将推动深海矿产商业开采系统的发展。国际社会海洋环境保护意识的不断加强、相关环境管理标准和规范的陆续出台, 将不断推进深海采矿系统方案和技术向环境友好方向改进, 从而降低对深海环境的扰动影响。总之, 相信在市场需求的强力驱动下, 随着对技术研发投入的不断加大, 对环境保护措施研究的不断加强, 深海采矿技术与装备将迅速向商业应用水平发展。

### 参 考 文 献

- [1] International Energy Agency. Net zero by 2050-a roadmap for the global energy sector[R]. France: International Energy Agency Press, 2021.
- [2] U. S. Geological Survey. Deep-ocean polymetallic nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts in the global ocean: New sources for critical metals[EB/OL].2022[2023-03-01]. <https://www.usgs.gov/publications/deep-ocean-polymetallic-nodules-and-cobalt-rich-ferromanganese-crusts-global-ocean-new>.
- [3] PETERSEN S, KRAESCHELL A, AUGUSTIN N, et al. News from the seabed-Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 2016, 70(8): 175-187.
- [4] 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.
- [5] UN Ocean Economics Technology Branch. Delineation of mine sites and potential in different sea areas[R]. Berlin: Springer, 1987.
- [6] RANDOLPH K, RICHARD R, FRANK R, et al. Report to the international seabed authority on the development of an economic model and system of payments for the exploitation of polymetallic nodules in the area[R]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2019.
- [7] 高岩, 孙栋, 黄浩, 等. 国际海底区域矿产资源相关环境问题与管理进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2722-2737.  
GAO Yan, SUN Dong, HUANG Hao, et al. The progress of environmental research and management related to mineral resources in the international seabed[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2722-2737.
- [8] RAHUL S, SAMANTHA S. Deep-sea mining and the environment: An introduction[M]. New York: Springer International Publishing, 2019.
- [9] MERO J L. The mineral resources of the sea[M]. Amsterdam: Elsevier, 1965.
- [10] MASUDA Y, CRUICKSHANK M J, MERO J L. Continuous bucket-line dredging at 12 000 feet[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference, April 18-20, 1971, Dallas, TX, USA: ISOPE, 1971: 837-841.
- [11] GUY H. Scientific and technological research and development related to deep seabed mining[C]//Proposed Technologies for Mining Deep-seabed Polymetallic Nodules. August 3-6, 1999. International seabed authority, Kingston. Jamaica: Lithographic Printers Ltd, 1999: 213-244.
- [12] 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): 2847-2860.  
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): 2847-2860.
- [13] BROCKTT F H, HUIZING J P, MCFARLANE J A R. Updated analysis of the capital and operating costs of a polymetallic nodule deep ocean mining system developed in the 1970s[C]// Proceedings of the ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Status and Challenges Ahead, February 18-22, 2008, Chennai, India, France: International Seabed Authority, 2008: 54-80.
- [14] KAUFMAN R, LATIMER J P, TOLEFSON D C, et al. The design and operation of a pacific ocean deep-ocean mining test ship: R/V Deepsea Miner II[C]// Proceedings of the Offshore Technology Conference, May 6-9, 1985, Houston, USA: ISOPE, 1985: 33-43.



- [15] YAMADA H, YAMAZAKI T. Japan's Ocean test of the nodule mining system[C]//Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, May 24-29, 1998, Montreal, Canada, USA: ISOPE, 1998: 13-19.
- [16] DEEPAK C R, RAMJI S, RAMESH N R, et al. Development and testing of underwater mining systems for long term operations using flexible riser concept[C]//Proceedings of the 7th ISOPE Ocean Mining Symposium, September 23-27, 2001, Lisbon, Portugal: ASME, 2007: 166-170.
- [17] HONG S, KIM H W, YEU T, et al. Technologies for safe and sustainable mining of deep-seabed minerals[M]. Environmental Issues of Deep-Sea Mining: Impacts, Consequences and Policy Perspectives. Sharma, R., Ed.; New York: Springer International Publishing, 2019.
- [18] 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.
- [19] LIU Shaojun, HU Jianhua, ZHANG Ruiqiang, et al. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(5): 863-870.
- [20] YAMAJI N, OKAMOTO N, SHIOKAWA S, et al. Achievement for pilot test of excavating and ore lifting conducted for seafloor polymetallic sulphides[J]. J. MMIJ, 2019, 135: 42-51.
- [21] YANG N. Research and development of polymetallic nodule mining technology in China[C]//Proceedings of the ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Status and Challenges Ahead, February 18-22, 2008, Chennai, India, France: International Seabed Authority, 2008: 214-226.
- [22] 陈秉正. “鲲龙 500”采矿车履带行驶机构的研制与试验研究[J]. 采矿技术, 2019, 19(5): 132-135.
- CHEN Bingzheng. Development and experimental study of crawler mechanism of "Kunlong 500" mining vehicle[J]. Mining Technology, 2019, 19(5): 132-135.
- [23] 李家彪, 王叶剑, 刘磊, 等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 92-102.
- LI Jiabiao, WANG Yejian, LIU Lei, et al. Development status and prospect of deep sea mineral resources development technology[J]. Foresight Technology, 2022, 1(2): 92-102.
- [24] 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 the deep-sea field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2613-2623.
- [25] CHAO Xie, MING Chen, LAN Wang, et al. A study on the performance modeling method for a deep-sea cobalt-rich crust mining vehicle[J]. Minerals, 2022, 12(12): 1521.
- [26] Marine Technology, TMC's NORI-All seas lift 3,000 t of seabed nodules from pacific ocean[EB/OL]. 2022[2023-03-01]. <https://www.marinetechologynews.com/news/allseas-seabed-nodules-pacific-623979>.
- [27] KANG Yangjuan, LIU Shaojun. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology[J]. Minerals, 2021, 11: 1132.
- [28] KRIS D B, HAMEN S, STEPHANE F, et al. A precautionary approach to developing nodule collector technology[M]. New York: Springer International Publishing, 2022.
- [29] SEIYA K, HISATOSHI F. Mining and processing of seafloor massive sulfides: Experiences and challenges[M]. New York: Springer International Publishing, 2022.
- [30] DEEP GREEN METALS INC. Technical report summary: Initial assessment of the NORI property, clarion-clipperton zone[R]. Brisbane: AMC Consultants Pty Ltd. 2021.
- [31] MICHAEL J P, GUNTER R B, MICHAEL S P. Seafloor haulage system: WO 2015/178853 EN[P]. 2015-11-26.
- [32] 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.
- [33] KANG Daehoon, KANG Hyodong, LEE Kwangmin. The preliminary front-end engineering and design of manganese nodules mining vessel[C]//IEEE OCEANS, May 21-24, 2012, Yeosu, Korea(South), USA: IEEE, 2012.
- [34] TOMASZ A, TOMASZ C. Preliminary design considerations for a ship to mine polymetallic nodules in the clarion-clipperton zone[C]//Proceedings of the Tenth (2013) ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, September 22-26, Poland, USA:

- ISOPE, 2013: 198-203.
- [35] 李建勋. 商业化深海采矿装备系统总体设计的一些关键问题和解决方案[R]. 深圳: 深海矿产资源商业开发论坛, 2022 中国海洋经济博览会, 2022.
- LI Jianxun. Some key issues and solutions for the overall design of commercial deep-sea mining equipment systems[R]. Shenzhen: Deep Sea Mineral Resources Commercial Development Forum, 2022 China Ocean Economic Expo, 2022.
- [36] 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. Current status and progress of deep-sea mining equipment research and development[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 8-18.
- [37] 赵国成. 深海采矿水力集矿方法与流体-颗粒动力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- ZHAO Guocheng. Research on hydraulic collecting methods and fluid-particle dynamic for deep-sea mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.
- [38] YUE Zeyi, ZHAO Guocheng, XIAO Longfei, et al. Comparative study on collection performance of there nodule collecting methods in seawater and sediment-seawater mixture[J]. Apple Ocean Research, 2021, 110: 102606.
- [39] 彭建平. 中国深海多金属结核采矿车研究的发展[J]. 矿山机械, 2020(3): 8-11.
- PENG Jianping. The development of China's deep-sea polymetallic nodule mining vehicle research[J]. Mining Machinery, 2020(3): 8-11.
- [40] YAMAZAKI T, TSURUSAKI K, HANDA K, et al. Geotechnical properties of deep ocean sediment layer[J]. Journal Mining Material Process Institute Japan, 1995, 111: 309-315.
- [41] TAITAL Y, BORNEAD, DUKLER A E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes[J]. Aiche Journal, 2010, 26(3): 39-45.
- [42] JOHN E H, ROBERT E D. Large scale airlift experiments for application to deep ocean mining[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. June 10-15, 2007, San Diego, USA: OMAE, 2007.
- [43] 康娅娟, 王长伟, 刘少军, 等. 深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2938-2952.
- KANG Yajuan, WANG Changwei, LIU Shaojun, et al. Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2938-2952.
- [44] ALEX R, LI J, LIU Tuanjie, et al. A riser and lifting system (RALS) concept for deep sea polymetallic nodule mining[C/CD]//Proceedings of 50th Underwater Minerals Conference, Florida, USA, October 2-7, 2022.
- [45] SCHULTE S A. Vertical transport methods for deep sea mining[D]. The Netherland: Delft university of technology, 2013.
- [46] KANG Yajuan, LIU Shaojun, ZHAO He, et al. Design and analysis of an innovative deep-sea lifting motor pump[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 22-31.
- [47] DENG Liwen, HU Qiong, CHEN Jun, et al. Particle distribution and motion in six-stage centrifugal pump by means of slurry experiment and CFD-DEM simulation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(7): 716.
- [48] HU Qiong, CHEN Jun, DENG Liwen, et al. CFD-DEM simulation of backflow blockage of deep-sea multistage pump[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(9): 987-992.
- [49] ING Wilhelm Schwarz Herrouin. Deep seabed mining-lift subsystems[C]//Proposed technologies for mining deep-seabed polymetallic nodules, International seabed authority, Kingston. Jamaica: Lithographic printers Ltd, 1999: 153-160.
- [50] BLACHBURN J, HANRAHAN S. Offshore production system definition and cost study[R]. Sydney: Nautilus Minerals Inc., 2010.

作者简介: 康娅娟, 女, 1990 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为深海采矿装备的研制与多相流数理建模及仿真。  
E-mail: kangyajuan@fosu.edu.cn  
刘少军(通信作者), 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为深海作业装备设计与控制、工程机械混合动力技术。  
E-mail: liushaojun@csu.edu.cn