



深海多金属结核开采技术发展历程及展望

康娅娟¹, 刘少军^{2,3}

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

摘 要: 深海多金属结核富含镍、钴、铜等新能源技术发展所需的金属, 将其从数千米深海底开采出来需要依靠独特和高效可靠的开采技术和装备。本文全面总结了国内外深海多金属结核开采技术及装备的研究历程和发展现状。首先梳理了 20 世纪西方财团进行的深海多金属结核采矿海试系统, 并分析了水力管道提升式采矿系统原型的技术和经济可行性; 接着全面回顾了中、韩、印等深海先驱投资者对深海多金属结核采集及水下输送等关键技术的攻关; 然后分析了深海多金属结核开采技术所面临的商业化和高环保要求的形势以及近期在这方面的发展动态及研究进展; 并且系统地总结了我国深海多金属结核开采技术研究的发展历程。最后在此基础上, 展望了深海多金属结核开采技术研究发展面临的机遇, 以及在商业开采要求下, 深海多金属结核开采系统可能的技术方案及其高可靠、高环保、高智能的发展趋势, 为我国深海多金属结核得高效开采技术和装备的研究开发提供了参考价值和指导作用。

关键词: 深海采矿; 多金属结核; 集矿技术; 水力输送; 采矿海试

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2848-13

中图分类号: TD857

文献标志码: A

引文格式: 康娅娟, 刘少军. 深海多金属结核开采技术发展历程及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2848–2860. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42134

KANG Ya-juan, LIU Shao-jun. Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2848–2860. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42134

深海底蕴藏着丰富的矿产资源, 其中多金属结核资源潜力巨大, 富含新能源技术发展所需锰、镍、铜、钴等金属^[1-4]。然而, 这些资源的开发利用, 必须通过开采技术将赋存在数千米深海底的结核采集提升到海面并输运到陆地^[5-6]。因此, 深海多金属结核开采技术是决定能否真正利用这些海底矿产资源的关键。

深海多金属结核的开采面临许多问题, 深海底的巨大水压力、无自然光、电磁波传播严重衰减、深海的风浪流复杂流场, 使深海多金属结核的开采面临极为严峻恶劣的超常极端环境。深海多金属结

核的特殊赋存状态、深海采矿的特殊环境保护要求, 使得深海多金属结核的开采原理、工艺和装备不能直接采用陆地上已发展成熟的采矿技术, 也与海洋油气的开采明显不同^[7-8]。因此, 自深海多金属结核的商业价值被认识到后, 人类便开始积极开展深海多金属结核开发研究, 从开采方法和技术原型的探索、开采关键技术的攻关, 到面向商业开采的采矿系统开发, 付出了不懈的努力, 也取得了丰硕的成果^[9-10]。本文先归纳深海多金属结核开采技术研究的发展历程, 然后重点分析整理中国深海多金属结核的研究进展, 进一步展望商业开采求下深

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0304103); 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室资助项目(SH-2020-KF-A02)

收稿日期: 2021-08-02; **修订日期:** 2021-09-13

通信作者: 刘少军, 教授, 博士; 电话: 18316621835; E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

海多金属结核研究的未来发展。

1 深海多金属结核开采系统研究发展历程

深海多金属结核的发现已有 100 多年历史, 但成规模的资源调查评价和开采方法研究始于 20 世纪 60 年代。1960 年, 美国教授 MERO 提出拖斗式采矿系统方案^[11]; 1972 年, 日本进行了 4500 m 水深的连续链斗法采矿试验^[12]; 1979 年, 法国人提出了穿梭艇式的采矿系统设想^[13]。但是, 这些方案在技术上存在难以解决的问题, 经济上难以被商业开采所接受, 对深海多金属结核开采技术的发展未能留下有发展价值的成果, 已经逐渐淡出研究视线^[14]。为深海多金属结核开采技术奠定发展基础、取得阶段性进展的研究是 1970 年代几个西方财团的多金属结核采矿海试研究, 以及其后先驱投资者们对关键技术的持续攻关。

1.1 早期采矿系统海试及技术可行性的研究

1970 年代, 基于对当时金属市场需求及陆地矿产资源储备的估计, 国际上开始关注深海多金属结核的商业开采, 以美国为首的一些工业国家组成了几个国际财团, 加紧了对深海多金属结核开采的研究, KCON(Kennecott Consortium)、OMA(Ocean Mining Associates), OMI(Ocean Management Inc)和 OMCO(Ocean Minerals Company)等 4 个国际财团在太平洋克拉里昂-克里帕顿地区(Clarion-Clipperton Zone, CCZ)开展了系列 5000 m 级深海多金属结核中试采矿系统采矿海试。这些财团使用的深海多金属结核开采海试系统的组成基本相同, 都是由在海底采集结核的集矿机、水面的采矿船, 以及连接集矿机和采矿船的提升系统 3 个部分组成^[15]。因为都具有 5000 m 长的输送管道, 所以这一代采矿系统也被称为管道提升式采矿系统。

图 1 所示为 OMA 的采矿系统方案, 该系统采用拖曳式集矿机采集矿物, 利用气力提升方式进行矿物的垂直管道输送。OMI 除研发出与 OMA 类似的气力提升方式采矿系统外, 还研发了一个水力管道提升式采矿系统方案, 如图 2 所示。该系统中的集矿机依然为拖曳式, 但矿物的垂直管道输送是通过德国 KSB 公司研制的 3 台潜水电泵来提供动力。

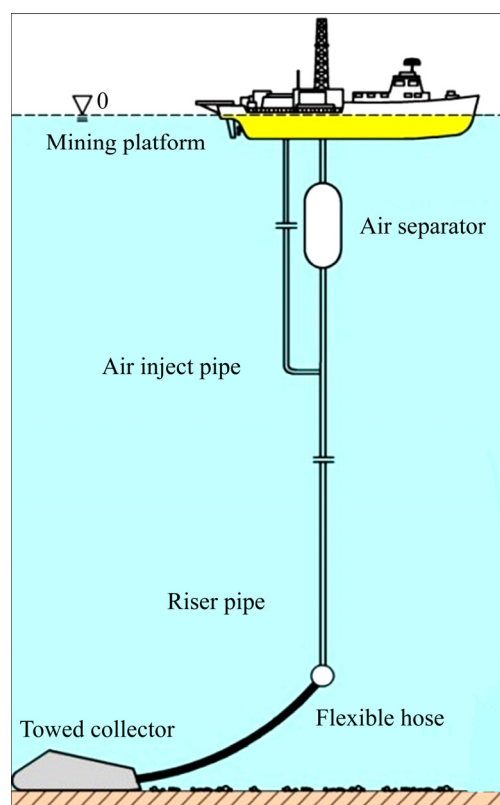


图 1 OMA 的气力提升式采矿系统示意图^[15]

Fig. 1 Air lifting mining system of OMA^[15]

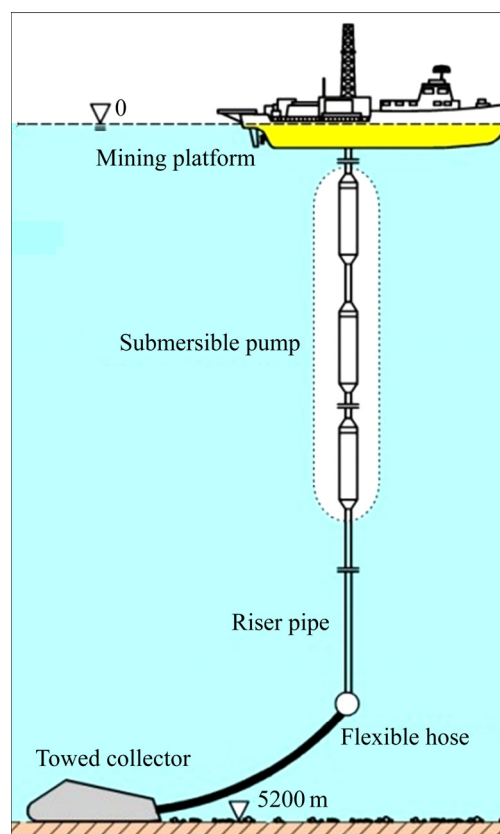


图 2 OMI 的水力提升式采矿系统示意图^[15]

Fig. 2 Hydraulic lifting mining system of OMI^[15]

图3所示为OMCO的采矿系统方案。OMCO系统也是采用气力输送方式,但输送管系下端增设了一个中间仓,集矿机采用阿基米德螺旋推进方式在海底自行。中间仓内设置有矿仓和可调节的给料机,其目的是在集矿机从海底采集的结核量变化时缓冲和稳定给输送管道的矿石量,同时,也认为在输送管系下端悬挂一个数十吨质量的中间仓将有利于海洋风浪流环境中数千米的管道系统的稳定^[16-18]。

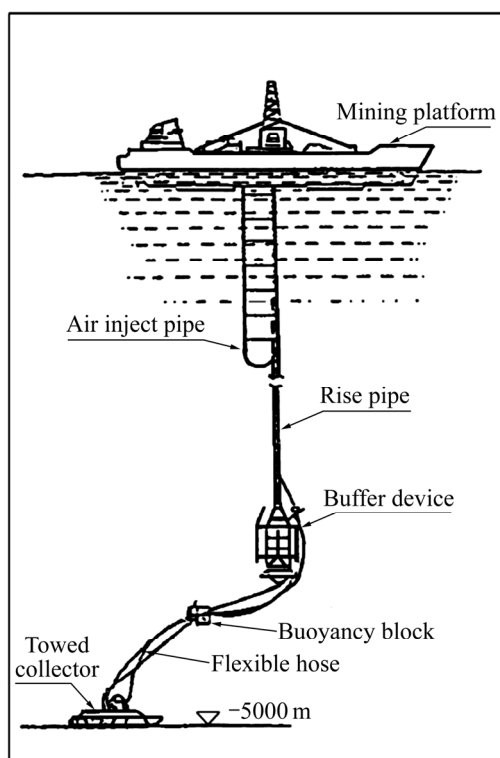


图3 OMCO的气力提升式采矿系统方案^[16]

Fig. 3 Air lifting mining system of OMA^[16]

1970年代末至1980年代初,这些财团应用他们研发的系统在太平洋进行了5000 m以上水深的多金属结核开采试验并取得一定程度的成功。其中,OMA采集了550 t湿结核,最大产能达到50 t/h。OMI采集了800 t湿结核,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。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。

但是,对于商业开采而言,管道提升式采矿系统会遇到一些问题。联合国专家组提出的深海多金属结核商业开采的产能指标为年产300万t干结核、开发20年^[19]。从技术的角度通常建议由两套采矿

系统来实现,即每套系统年产150万t干结核。考虑到海况及系统维护时间等,一般可按年工作250天计,每套系统的产能为250 t/h干结核,根据实际勘探结果按含水率约30%计算,即湿结核360 t/h。对比可知,OMI和OMA系统的最大开采能力实际上只是略高于商业开采系统的1/10规模。相关研究指出,如果采用气动提升方式来实现开采深度5500 m、湿结核360 t/h的指标,系统提升管道的内径应大于1 m,而此时对应的系统输送结核颗粒浓度仅为3%~4%,输送系统的效率在15%以下。因此,不仅过低的输送浓度和输送效率难以被接受,而且,尺寸过大的管道会增加管道系统的质量和体积,增加系统的操作难度,甚至超出采矿船所能提供的甲板堆放空间,使气动提升方式在深海多金属结核商业开采系统中不具备工程应用的可行性。而与此相对应的是,在上述商业开采系统条件下,水力提升方案中的管道内径可控制在0.4 m以下,系统最佳颗粒输送浓度在12%~15%之间,管道系统输送效率可达40%以上。许多针对水力提升式系统的深海多金属结核商业开采项目技术经济分析也表明,该系统方案和开发项目具备经济可行性。

因此,OMI提出的水力管道提升式系统成为深海多金属结核开采系统的主流方案,目前研究开发中的深海多金属结核采矿系统中,基本都是采用的水力提升式方案,如韩国、中国、印度,以及欧盟的“蓝色结核”项目中的采矿系统等。

1.2 中期深海多金属结核采集与提升关键技术的攻关

1982年,联合国第三次海洋法会议通过《联合国海洋法公约》并开放签字。该公约在确立国际海底区域的资源为全人类共同继承财产的同时,也提出了一个先驱投资者登记制度,允许1985年前在国际海底活动中投资额度超出一定值的缔约国可以用“先驱投资者”的身份进行国际海底矿产资源调查评价和采矿设备研究测试^[20]。1990年,印度、韩国、日本、中国等7个国家或实体登记为先驱投资者,开始深海矿产资源勘探开发工作。然后,2000~2001年,这些国家或实体又先后与国际海底管理局签订多金属结核勘探合同,并根据合同要求开展深海多金属结核开采的可行性研究,形成了继1970年代西方财团之后的新一轮深海多金属结核

开采技术研究。与前不同的是,这些先驱投资者(或合同承包者)的研究基本上是在国家专项支持下开展,研究内容也更加注重深海多金属结核开采中的关键技术攻关。具体来说,中、韩、印等都是采用了水力管道提升式的基本技术原型,但印度采用的是全软管输送方案。这阶段关键技术的攻关主要集中在以下三个方面。

1.2.1 履带自行式行走机构的研究

多金属结核半埋在深海沉积物中,根据勘探调查情况,其丰度一般在 $5\sim 25\text{ kg/m}^2$ 之间,也有高达 40 kg/m^2 甚至 50 kg/m^2 的。显然,为了实现 360 t/h 的产能,作业过程中海底集矿机必须以较高的速度在较大的范围内行走。而且,对于大规模的商业开采而言,除了要达到产能要求外,为了不浪费矿区的资源,还会提出采集率的指标,例如,要求实现对符合采集条件面积内70%的结核的有效采集。为此,集矿机作业过程中必须按某种规划路径在海底行走,既不能留下很多区域不去采集,又不能在已采集过的区域内重复采集。如上所述,OMA、OMI是通过采矿船的提升管道拖曳着带有滑橇的集矿机在海底被动式移动,而OMCO的集矿机采用了阿基米德螺旋推进机构实现自行式行走。可以想象,依靠一根长5000 m以上的管道拉着集矿机行走很难实现高精度的路径跟踪。自行式的阿基米德螺旋行走机构理论上应当具备这个能力,但实际中反映在海底沉积物上行走时螺旋线凹槽易被沉积物敷住,行走打滑严重,转弯比较困难,承载能力也比较低,而且对海底扰动较大^[21-24]。

因此,1990年代起,先驱投资者们都开始对集矿机在海底的履带自行式机构进行探讨。各机构在海底沉积物土工特性海底原位调查和实验室模拟、履带式重载车辆在极稀软底质上行走动力学性能、履带式集矿机的防打滑防沉降及结构参数设计、以及海底重装备作业环境下的导航定位技术、与管道提升式采矿系统相适应的集矿机海底作业路径规划与路径跟踪等方面开展了大量研究,遇到和发现了不少问题,通过反复的研究和试验也取得了不错的进展。研究表明,履带式行走机构可以通过履带宽度和履齿形状等设计来调节履带的承载面积及剪切力,而且可以具备很好的操控性能,配合先进的水下定位导航技术,可以在稀软的底质上实现高性能的稳健行走和路径控制。这些研究成果有

力地肯定和推动了履带自行式行走机构在深海多金属结核采矿海底集矿机上的应用。目前研究开发的深海多金属结核开采海底集矿机,全都是采用履带自行方式。

1.2.2 集矿机采矿头的研究

采矿头的作用是将半埋于海底沉积物中的结核采集到集矿机上。OMI、OMA等系统中的采矿头是利用水力来实现采集功能,比较典型的有日本提供的水力式“*Asakawa Head*”。从设计的角度,集矿头采集海底结核时应当满足三个方面的基本要求:1) 高采集率,尽可能多地将海底的结核采集起来;2) 低扰动,对海底沉积物的扰动尽可能小,采集活动导致的沉积物羽状流也尽可能小;3) 高效率,能耗低,尽可能不让沉积物进入垂直输送环节。为了实现这些目的,不同机构提出过不同的采矿头方案,从技术原理上可以分为水力式、机械式和混合式。如,韩国的方案是水力-机械组合式,结核被喷嘴喷出的高压水吹起,经挡板导流后,被一个带刮板转动链板带上集矿机^[25]。而印度的方案是机械式,由一个组合的梳状铲将结核从海底铲起并送至转动链板上^[26]。

不同的研究者有不同的观点,比较一致的共识包括:全水力式的采集装置中运动部件少,结构简单,采集过程中也不需要将沉积物一同带上集矿机,但消耗能量较多,而且采集效率也比较低。而机械式采集方式存在机械部件易于损坏、沉积物容易在集矿头中堵塞等问题。但这些观点尚缺乏充分的对比分析和试验来确认。因此,在目前的采矿系统研究方案中,各种采集方案依然存在。

1.2.3 提升技术的研究

几个先驱投资者研究的提升系统均采用水力提升方式,所以这方面的研究主要集中在提升泵及管道水力输送工艺与性能分析方面^[27]。

为了满足深海多金属结核开采垂直管道输送中高扬程轴向流动的要求,在OMI海试中成功应用的KSB泵为空间导叶式离心泵^[28]。1986年,日本荏原制作所也在KSB泵原型上进行了2台8级扬矿泵的研制,采用潜水电机置于中间、上下各4级泵的结构,但一直未进行海试^[29]。韩国、以几个东欧国家为主组成的“海金联”也对多金属结核的水力管道输送特性进行了大量研究和试验台架试验,韩国还研制了多台空间导叶式离心泵进行不

同水深的海试。印度通过与德国 SIEGE 大学合作的方式开展其深海多金属结核采矿系统研究,也是水力管道提升方式,但采用全软管方案,采用的输送泵为正排量泵^[28-29]。理论上,正排量泵可以有比较高的输送浓度,但怎样实现 5000 m 以上大水深的高扬程输送目前未见到明确的技术方案。

总体上看,以多级离心泵驱动的水力管道提升系统依然是深海多金属结核开采垂直输送的主流技术方案,尽管在技术原理方面没有重大突破,但几十年来围绕提升泵流道设计、优秀水力模型开发、泵和管道内颗粒的运动等进行了大量的研究,取得了系列研究成果。

1.2.4 关键子系统的海试

在深海采矿关键技术攻关中,先驱投资者们针对海底集矿机、提升泵等关键子系统开展了一些海试研究。

1997 年,日本在西北太平洋进行了 2200 m 水深采矿海试,海试系统中采用了拖曳式海底集矿机,但没有破碎装置和提升泵,成功进行了海底结核的采集^[30]。印度在 2000 年和 2006 年分别进行了 410 m 和 450 m 水深的部分采矿系统海试。测试了集矿机海底行走时的工作性能,进行了泵在海底的采砂和输送试验^[31]。韩国在 2009 年和 2010 年分别进行了 100 m 浅海的集矿机和提升泵单体试验^[32]。2013 年,韩国研制的“MineRo II”采矿车完成了 1370 m 水深模拟多金属结核采集试验,验证了集矿机在海底采集结核的功能;同时,还进行了集矿车海底行走性能试验,验证了集矿机在海底行走的良好路径控制能力^[33]。2015 年,韩国进行了 1200 m 水深的矿物提升泵和中间仓测试试验。这些研究和试验在 20 世纪 70 年代采矿系统方案的基础上都有一些方案和技术方面的改进,都取得一定进展^[24,34]。

1.3 近期商业化和高环保要求形势下的采矿技术研究

进入 21 世纪后,新能源技术的发展加大了对深海矿产资源开发的需求,进而引起了各国对深海矿产资源商业开发的高度关注并加大了布局。2000 年国际海底管理局多金属结核勘探规章通过后,在早几年内只有早期的 7 个先驱投资者与国际海底管理局签订了勘探合同,2006 年,德国联邦地球科学和自然资源研究所(BGR)与国际海底管理局签订勘

探合同。2010 年后,英国海底资源有限公司(UKSR)在国际海底申请了两块矿区,并与新加坡大洋矿产有限公司合作申请一块矿区;比利时全球海洋矿物资源公司(GSR)在国际海底申请矿区,并支持库克群岛投资公司申请一块矿区;另外一些西方企业也借壳汤加、瑙鲁、基里巴斯等太平洋小岛国申请国际海底多金属结核矿区。与早期 7 个先驱投资者主要为国家或所管辖的国有企业不同,2010 年代后成为勘探合同承包者的大都是私营企业,开发深海多金属结核的商业目的十分明确,对深海多金属结核采矿系统研发也更加注重商业化。同期,欧盟也开展了“BLUE MINING”和“BLUE NODULES”计划,组织和支持欧洲企业开展深海矿产资源开发技术与装备的研发。

随着国际社会环境保护意识的不断加强,对深海采矿环境影响问题的关注也不断加强。与此同时,国际海底管理局在 2012 年开启国际海底矿产资源开发规章制定讨论,深海采矿的环境保护被列为两个主题之一,尽管对环境保护的认识和措施有不同的观点,但针对深海采矿活动提出一些相对严格的要求和标准是一个必然的趋势。因此,更加关注深海采矿的环境保护问题,减小采矿作业对环境的扰动影响,已成为深海采矿技术研究的关注重点。近年来,将深海采矿水下矿物提升输送到水面并经脱水处理后的废水通过回水管送到海底再排放已成为保护环境的基本处理方法;尽可能减小集矿机对海底沉积物扰动也成为集矿机的采矿头和行走机构设计的重要目标和内容;如何合理排放废水和如何抑制结核采集所产生的羽状流影响已成为深海采矿技术-研究的重要内容^[35-37]。2018 年,BGR 和 GSR 向国际海底管理局提交报告,申请在他们的国际海底多金属结核勘探合同区内开展集矿机行走和结核采集试验,同时结合试验开展环境影响评估研究。2019 年 4 月,GSR 用其研制的集矿机试验样机在其合同区开始海试,但因光纤故障不得已中断试验。2021 年 4 月,GSR 再次启动合同区的集矿机海试,并于 2021 年 5 月完成了集矿机在合同区海底的行走与采集试验。试验期间,GSR 同时安排了一艘调查船,供来自其他 8 个机构的 23 名科学家对试验影响进行独立的环境影响调查,监测了试验现场引起的沉积物羽状流及漂移和沉降,测量了水柱中的沉积物浓度等,评价了深海

多金属结核采矿作业对环境的影响。GSR 的这种试验安排,一方面显示了他们对深海采矿技术发展中国环境因素的高度重视,另一方面也包含了其想尽早获得采矿活动环境影响评价数据,争取在商业开采时机到来时尽快通过环境影响评价的考虑,充分反映了当代深海多金属结核开采技术研究和发展中高度关注环保要求和直接面向商业开发的动态。2017 年的国际海底管理局大会上,荷兰代表团提交了一份“开发对环境负责任的采矿技术:建立采矿设备的核准进程”的提案,在呼应国际社会对海洋环保关注的同时,也拟设立未来商业开采的技术门槛。2020 年,国际海底管理局提出了深海矿产资源开环境管理系统申请标准与指南草案。2021 年中国北京先驱高技术开发公司也提出了开采技术的相关指南,强调环保的要求。深海采矿技术研究在向商业开采发展的同时,对降低环境扰动影响方面也正在给予越来越多的关注和努力。

2 中国深海多金属结核开采技术研究进展

深海矿产资源的开发是造福全人类的伟大事业,也符合我国矿产资源保障的利益,因此,我国对深海矿产资源开发及采矿技术发展高度重视,几十年来,在深海多金属结核开采技术研究方面投入了大量人力物力,并取得良好进展。

2.1 深海多金属结核开采方法及系统方案的基础性研究

20 世纪 80 年代,我国当时的冶金部和中国有色金属工业总公司便组织冶金部长沙矿冶研究院、中国有色金属工业总公司北京矿冶研究总院和长沙矿山研究院等科研院所开展大洋多金属结核采、选、冶方面的信息收集与资料整理工作,翻译了若干集“海洋多金属结核加工译文专集”,整理编写了十几份有关海洋多金属结核采、选、冶、经济分析和前景预测等方面的文章和报告,并结合浅海采矿和陆地采矿研究,如浅海采矿船的研究、矿石的管道提升和输送等,提出我国深海多金属结核开采技术研究建议,为我国深海多金属结核开采技术研究提供了丰富技术参考资料。

1990 年,我国将大洋多金属结核资源勘探开发

列为国家长远发展项目。1991 年,联合国海底筹委会同意中国大洋矿产资源研究开发协会(简称中国大洋协会)登记为先驱投资者,2001 年,中国大洋协会与国际海底管理局签订多金属结核勘探合同。自此,我国深海多金属结核开采技术研究在国家专项支持下结合国际海底多金属结核勘探开发进行。

为了确定深海多金属结核开采系统的技术原型,在国家专项支持和中国大洋协会组织下,长沙矿冶研究院、长沙矿山研究院等对当时已有的系统方案进行了系统的比较研究,包括水力式、机械式、水力机械复合式 3 种集矿方式,履带和阿基米德螺旋 2 种行走方式,气力和水力 2 种矿物提升方式,建设了集矿机试验水池和管道提升试验系统,研制了相应的模型试验机,对不同工作方式和系统方案开展了理论分析和实验室模型试验。在此基础上,经过分析比较,提出了我国深海多金属结核开采系统的技术原型^[38-40]。该系统采用离心泵水力管道提升方式,硬管与软管之间设置中间仓,集矿机采用履带自行式行走,水力式集矿,开采系统组成如图 4 所示。

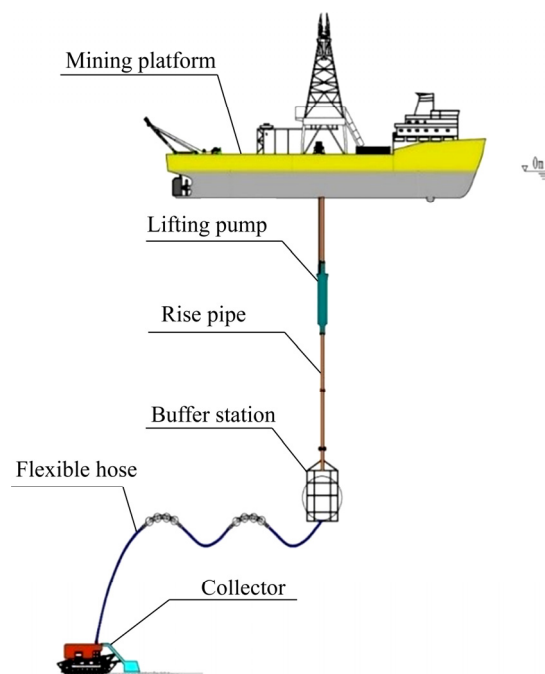


图 4 中国深海多金属结核开采系统方案示意图^[40]

Fig. 4 Schematic diagram of China's deep-sea polymetallic nodules mining system^[40]

2.2 样机研制与部分系统湖试

基于所提出采矿系统技术原型,按 1/10 商业开采规模制定了我国深海多金属结核采矿中试系统

方案,研制了集矿机试验样机和提升试验泵,并分别开展了集矿机水池行走与模拟结核采集试验、提升泵的台架矿浆输送试验等研究。

2001年,中国大洋协会组织长沙矿冶研究院、长沙矿山研究院等在135 m水深的云南抚仙湖进行了部分系统湖试。湖试系统由集矿机、软管输送和水面试验船三部分组成,由于水深的原因,湖试中的提升系统没有垂直钢管和中间仓^[40]。试验内容包括集矿机的行驶性能试验、软管输送系统扬矿试验、集矿和扬矿串式流程联合试验、整体系统的运行和可控性试验。集矿试验是通过对采集事先人工铺撒在湖底的结核进行。湖试结果表明,试验系统运转正常,从湖底采集模拟结核并输送到水面船的整个流程工作可靠。结合湖试还进行了采矿作业对环境影响的调查研究,研究表明,试验对湖底及试验区域水层影响不大。图5所示为湖试过程中布放集矿机的现场。

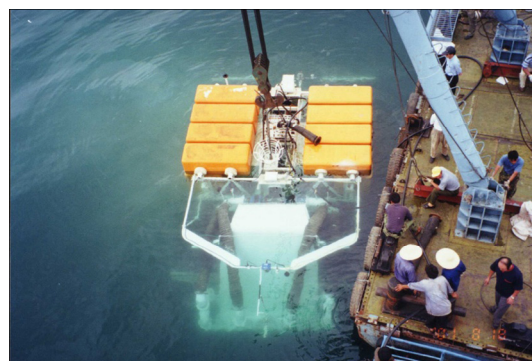


图5 湖试试验中集矿机布放现场^[40]

Fig. 5 Launch of pilot nodule collector in lake test^[40]

等单位开展了深海多金属结核集矿机性能改进研究,对履带驱动性能、车体轻量化、导航防干扰等进行系列关键技术攻关,在此基础上研制了新一代的深海多金属结核集矿机“鲲龙500”^[41]。鲲龙500集矿机依然采用水力式集矿机构,但增加了采集头的地形适应功能以实现最佳的采集效率;采用大接地面积、高履齿、大前角、轻量化的履带结构设计保证集矿机在海底稀软沉积物上的稳健行走;通过惯导DVL组合导航和声学定位系统实现集矿机高精度定位及路径控制^[42]。2018年,在我国南海进行了鲲龙500集矿机的采集与行走海试。实验中,集矿机最大作业水深达514 m,多金属结核采集能力为10 t/h,单次行驶最长距离为2881 m,水下定位精度达0.72 m,实现了自主行驶模式下按预定路径进行海底采集作业的能力,在中国南海海底按设定路径走出了单边长度为120 m的“中国星”^[43],如图6所示。

2.3 多金属结核开采关键技术攻关研究

湖试结束后,中国大洋协会组织相关单位对湖试及我国深海多金属结核采矿中试系统情况进行总结,分析和提出了系统存在的问题及改进措施,部署和组织了集矿机及提升泵等关键子系统的技术攻关研究。

2.3.1 高性能深海多金属结核集矿机技术研究

针对湖试中暴露出的集矿机样机体积质量较大、行走履带打滑及水下定位导航受作业影响等问题,长沙矿冶研究院、长沙矿山研究院及中南大学

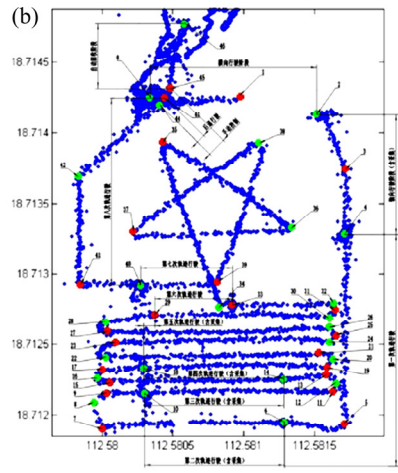


图6 鲲龙500集矿机海试现场图及其在海底的行走路径记录图^[43]

Fig. 6 Scene map of Kunlong 500 mining machine during sea trial(a) and record of its walking path on seabed^[43] (b)

2.3.2 高性能深海多金属结核水力输送技术研究

针对深海多金属结核的垂直管道水力输送特点, 深入的开展了粗颗粒固液两相流理论研究和提升泵研制、垂直管道矿浆输送试验研究。“十五”期间, 长沙矿冶研究院以 1000 m 深海多金属结核开采中试系统为背景设计了两级提升泵, 进行了清水和矿浆输送试验^[44]; “十一五”期间, 利用一个 219 m 深的废弃矿井开展了垂直管道模拟结核矿浆输送试验^[45], 为我国深海多金属结核开采系统提升泵设计和管道输送工艺方案确定等积累了数据和经验。2016 年, 在国家高技术项目和大洋专项支持下, 长沙矿冶院、中南大学等在我国南海进行了 300 m 水深提升泵管系统海上试验, 输送矿浆体积流量为 500 m³/h、多金属结核输送量达 50 t/h。

2.4 1000 m 级全采矿系统联动试验

2016 年, 国家首批重点研发计划立项“深海多金属结核采矿试验工程”, 支持深海多金属结核开采系统的整体联动海试, 争取构建具有国际先进水平的深海多金属结核采矿技术体系。在中国大洋协会的组织下, 中国五矿集团、中船集团、中车集团及中科院、教育部的数十家企业、科研院所及高校参与了项目研究。项目按 1/10 商业开采规模, 设计研制了 3500 m 水深试验采矿车(见图 7)和大于 1000 m 水深的试验提升泵(见图 8)及管道系统(可扩展至 3500 m 水深)^[46-49], 突破了履带式采矿车海底稳健行走与精确定位导航、粗颗粒矿物水下高效输送等关键技术。同时, 根据 3500 m 水深海试要求将一艘运输船改装为采矿试验船(见图 9), 研发了采矿试验需要的动力输送与控制系统、布放回收及升沉补偿装置, 形成了我国深海多金属结核采矿试验系



图 7 多金属结核全采矿系统联动试验的采矿试验车
Fig.7 Collector prototype in full-system integrated polymetallic nodule pilot mining tests



图 8 多金属结核全采矿系统联动试验中的试验泵
Fig. 8 Test pump in full-system integrated polymetallic nodule pilot mining tests



图 9 多金属结核全采矿系统联动试验中试验船
Fig. 9 Test ship in full-system integrated polymetallic nodule pilot mining tests

统。经过各子系统的单体实验室测试考核、码头联调后, 2021 年 6 月 3 日至 7 月 20 日, 整个系统在我国东海和南海进行了全系统采矿联动试验, 最大作业水深 1306 m, 打通了集矿机海底行走、结核采集与破碎、提升泵与管道提升、甲板脱水和矿物储

藏等全采矿流程,从海底采集并输送到采矿船上天然多金属结核 1166 kg。同时,实施了深海采矿试验全程立体环境影响监测,获得了深海多金属结核采矿环境影响评价的大量数据。这是自 1970 年代以来几个西方财团多金属结核开采海试结束后全球的第一次深海多金属结核全系统采矿试验,也是世界上首次深海多金属结核履带式集矿机加水力管道提升的采矿联动海试。

3 深海多金属结核开采技术发展展望

经过几十年的努力,形成了具有技术经济可行性的深海多金属结核开采技术方案,在采集和管道输送关键技术研究方面也取得突破,已经基本具备研制商业开采系统开展商业开采的能力,在新能源技术发展对镍、钴、铜等金属需求不断增长的形势下,深海多金属结核开采技术可能迎来一个新的发展阶段。

1) 市场的强劲需求将推动深海多金属结核采矿技术的快速发展。多金属结核是资源量最大的深海矿产资源,所含的金属种类契合新能源发展对钴、镍、铜、锰资源的需求。西方一些企业已布局深海多金属结核的商业开发。如,英国海底资源公司和加拿大 DeepGreen 公司实际上已分别在国际海底占有 3 块多金属结核矿区。近期,DeepGreen 公司与 SOAC 公司共同组建了 The Metals Company,同时与嘉能可、马士基、ALLSEAS、HATCH 等行业知名企业建立合作伙伴关系,宣布要于 2024 年实现深海多金属结核的商业开采。我国最近颁布的中长期科技发展规划也强调要加强深海矿产资源的开发。深海多金属结核采矿技术必将成为国内外相关行业与企业的重点研发对象,在商业利益和国家战略驱动下获得较大的发展。

2) “履带式自行+水力管道提升”将成为当前主流方案。水力管道提升式多金属结核开采系统的技术可行性已经在 1970 年代的 5000 m 级海试中得到验证,技术以及经济方面的分析也表明其具备商业开采应用可行性。尽管气力提升系统结构简单,机械提升方式理论上可具有更高的系统效率,但在商业开采高产能要求下,气动提升管道尺寸过大、机械提升绞车速度受限等暂时未见到有效解决方

法。集矿机方面,近年来在履带式行走以及集矿机作业环境下深海导航定位技术研究方面取得了很好的进展,集矿机在海底行走试验中展现了高精度的路径控制性能,为集矿机海底作业的高回采率提供了有力的技术支持。因此,“履带式自行+水力管道提升”将是未来一段时期内深海多金属结核开采系统的主流技术方案。

3) 低环境扰动将成为深海多金属结核采矿系统的重要指标。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,作为一项新兴产业,深海采矿的环境影响更是得到国际社会的高度关注。尽量降低采矿作业对深海环境的不利影响,既是对深海采矿系统的约束指标,也将成为深海多金属结核系统与装备研发的重要目标。近年来,将泵送到采矿船的海水回注到海底再排放已经成为行业默认的共识。尽可能减小对海底沉积物的扰动和抑制采集过程的沉积物羽状流已成为采集头设计的重要研究目标。GSR 和我国深海多金属结核采矿海试中都将采矿作业的环境影响评价作为试验的重要组成部分。国际海底管理局也正在制定深海矿产资源开采的环境影响评价指南。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) 高可靠高智能是深海多金属结核采矿技术发展的必然趋势。随着深海多金属结核开发从技术研究向商业应用的转变,深海多金属结核开采系统也需要向高可靠、高性能、高智能方面发展。极端海洋环境下的全天候多功能水面支持平台,大深度强干扰环境下深海作业装备的高精度定位导航与协调控制,海底结核采集过程中的海底结核赋存情况的智能感知,输送过程中固液两相流的智能调控和安全保障,水下装备健康状态的智能检测和评估维护,复杂海况下水下重载作业装备的安全快速布放回收等,都是商业开采对采矿装备与系统的必要要求,也是下阶段深海多金属结核开采系统研究必须掌握的关键技术。

5) 深海多金属结核开采系统与深水装备器件材料发展将相互促进。深海多金属结核赋存水深 4500~6000 m,其开采作业水深大于多金属硫化物和富钴结壳,更大于当前的海洋油气开采。尽管目前 6000 m 级的深水电机、深水电缆、大水深浮力

材料等深水装备、器件与材料等已有问世,但因市场需求小,产品制造成本高、质量保证程度低。深海多金属结核开采系统的研发及其商业化将促进深水装备器件材料发展,大水深装备器件材料的发展也将推动深海多金属结核开采技术和系统工程化、商业化程度的提升。

4 结论

深海多金属结核开采技术已经经历了几十年的研究发展,已初步形成由水面采矿船、海底履带自行式集矿机和水力管道提升系统三部分组成的基本技术原型,集矿机结核采集和海底行走、长距离垂直管道粗颗粒矿浆输送等开采关键技术研究也取得很大进展。当前迅速发展的新能源技术对钴、镍、铜等金属的需求可能促进深海多金属结核的商业开采,而商业开采的高产能、高可靠性、高环保要求给深海多金属结核开采技术和系统的研发带来新的挑战和机遇,将推动深海多金属结核技术的研发走向新的阶段和高度。

相对于西方国家,中国的深海多金属结核开采技术研究起步较晚,基础薄弱。但在国家大洋多金属结核资源勘探开发长远发展项目的引领和支持下,我国深海多金属结核开采技术研究取得了长足的发展和进步,一些关键技术研究方面已经实现了从“跟跑”到“并跑”,总体上与美、日、欧等处于同一起跑线,但也还存在一些卡脖子技术需解决。中国深海多金属结核开采技术研究尚任重道远。

REFERENCES

- [1] PETEREN S, KRAESCHELL A, AUGUSTIN N. News from the seabed — Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. *Marine Policy*, 2016, 70(8): 175–187.
- [2] 金建才. 走向大洋与建设海洋强国[J]. *中国机构改革与管理*, 2014, 4: 17–19.
JIN Jian-cai. Going to the ocean and building a maritime power[J]. *China Institutional Reform and Management*, 2014, 4: 17–19.
- [3] HEIN J R, MIZELL K, KOSCHINSKY A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*. 2013, 51:1–14.
- [4] 刘 峰. 中国大洋事业发展的里程碑[N]. *中国海洋报*, 2016-03-04(001).
LIU Feng. A milestone in the development of China's ocean industry[N]. *China Ocean News*, 2016-03-04(001).
- [5] SHARMA R. Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 23-28.
- [6] 周 平, 杨宗喜, 郑人瑞, 等. 深海矿产资源勘查开发进展、挑战与前景[J]. *国土资源情报*, 2016(11): 27–32.
ZHOU Ping, YANG Zong-xi, ZHENG Ren-rui, et al. Progress, challenges and prospects of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. *Land Resources Information*, 2016(11): 27–32.
- [7] 阳 宁, 王英杰. 海底矿产资源开采技术研究动态与前景分析[J]. *矿业装备*, 2012(1): 54–57.
YANG Ning, WANG Ying-jie. Research trends and prospect analysis of mining technology for seabed mineral resources[J]. *Mining Equipment*, 2012(1): 54–57.
- [8] SHARMA R. Deep-sea mining: Economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011, 45(5): 28–41.
- [9] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海装备技术发展趋势分析[J]. *船舶物资与市场*, 2016(5): 42–45.
ZHAO Yi-yu, ZENG Xiao-guang, LANG Shu-yan. Analysis on the development trend of deep-sea equipment technology[J]. *Ship Materials and Market*, 2016(5): 42–45.
- [10] 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 Shao-jun, 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.
- [11] THIEL H. From MESEDA to DISCOL: A new approach to deep-sea mining risk assessment[J]. *Marine Mining*, 1991, 10(4): 369–386.
- [12] MASUDA C M J, MERO J L. Continuous bucket line dredging at 1200ft[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Dallas, USA: [s. n.], 1971: 873–841.
- [13] Herrouin, G. Mining of polymetallic nodules: fantasy or reality?[EB/OL].[23,Sept.2021].<http://www.mediachimie.org/ressource/lexploitation-des-nodules-polym%C3%A9tallique>

- s-utopie-ou-r%C3%A9alit%C3%A9.
- [14] 杨建民, 刘磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 9–17.
YANG Jian-min, LIU Lei, LU Hai-ning, et al. Current status and prospects of research and development of deep-sea mineral resources development equipment in my country[J]. Engineering Science, 2020, 22(6): 9–17.
- [15] KAUFMAN R, LATIMER J, TOLEFSON D, 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. Houston, USA: [s. n.], 1985: 33–43.
- [16] CHUNG J S. Deep-ocean mining technology: Development II [C]//Proceedings of the sixth (2005) ISOPE Ocean Mining Symposium. Changsha, China: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005: 1–6.
- [17] CHUNG J S. Deep-ocean mining technology III: Developments [C]//Proceedings of the Eighth (2009) ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai, India: International Seabed Authority, 2009: 1–7.
- [18] BROCKETT F H, HUIZINGH J P, MCFARLANE J. Updated analysis of the capital and operating costs of a manganese 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. Chennai, India: International Seabed Authority, 2008: 54–80.
- [19] UN Ocean Economics Technology Branch. Delineation of mine sites and potential in different sea areas [R]. Berlin/Heidelberg, Germany: [s. n.], 1987: 27–28.
- [20] 金建才. 经略大洋拓展我国在国际海域的活动空间[J]. 海洋开发与管理, 2011(4): 35–37.
JIN Jian-cai. Exploring the oceans to expand my country's space for activities in international waters [J]. Ocean Development and Management, 2011(4): 35–37.
- [21] JANARTHANAN C, CHANDRAN V, SUNDARAMOORTHY V, et al. Development and testing of locomotion trials on soft sea bed soil and system performance checks of experimental undercarriage system [C]//In Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018: 152–159.
- [22] JI D H, CHON H S, MAI T V, et al. Navigation and control of underwater tracked vehicle using ultrashort baseline and ring laser gyro sensors [J]. Sensors and Materials, 2019, 31(5(1)): 1575–1587.
- [23] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿机器人研究: 现状与发展[J]. 机器人, 2013, 35(3): 363–375.
DAI Yu, LIU Shao-jun. Researches on deep ocean mining robots: Status and development [J]. Robot, 2013, 35, 363–375.
- [24] TEAGUE J, ALLEN M J, SCOTT T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring [J]. Ocean Eng, 2018, 147: 333–339.
- [25] KIM S, CHO S G, LEE M, KIM J, et al. Reliability-based design optimization of a pick-up device of a manganese nodule pilot mining robot using the Coanda effect [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(8): 3665–3672.
- [26] 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. Lisbon, Portugal: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007: 166–170.
- [27] International Seabed Authority. Report on the International Seabed Authority's workshop on polymetallic nodule mining technology: Current status and challenges ahead [R]. (ISBA/14/LTC/3). Kingston, Jamaica: International Seabed Authority, 2008.
- [28] 杨放琼, 陈奇, 曾义聪, 等. 深海采矿矿浆泵的设计方法研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014(12): 1413–1418.
YANG Fang-qiong, CHEN Qi, ZENG Yicong, et al. Research on the design method of deep-sea mining slurry pump [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2014(12): 1413–1418.
- [29] 肖业祥, 杨凌波, 曹蕾, 等. 海洋矿产资源分布及深海扬矿研究进展 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 319–326.
XIAO Ye-xiang, YANG Ling-bo, CAO Lei, et al. Research progress on the distribution of marine mineral resources and deep-sea lifting [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 319–326.
- [30] YAMADA H, YAMAZAKI T. Japan's Ocean test of the nodule mining system [C]//Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference. Montreal, Canada: [s. n.], 1998: 13–19.
- [31] RAJESH S, GNANARAJ A A, VELMURUGAN A, et al. Qualification tests on underwater mining system with manganese nodule collection and crushing devices [C]//

- Proceedings of the 9th Ocean Mining Symposium. Maui USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 110–115.
- [32] HONG S, KIM H W, CHOI J S, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]// Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China: [s. n.], 2010: 1–12.
- [33] HONG S, KIM H W, YEU T, et al. Technologies for safe and sustainable mining of deep-seabed minerals[C]// Environmental Issues of Deep-Sea Mining: Impacts, Consequences and Policy Perspectives. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019: 95–143.
- [34] YOON S, HONG S, PARK S J, et al. Track velocity control of crawler type underwater mining robot through shallow-water test[J]. *J Mech Sci Technol*, 2012, 26: 3291–3298.
- [35] YAMAZALI T. Past, present, and future of deep-sea mining[J]. *Shigen-to-Sozai*, 2016, 131(12): 592–596.
- [36] ALICIA C. Deep seabed mining: An urgent wake-up call to protect our oceans[R]. Amsterdam: Greenpeace International, 2013.
- [37] ISBA/25/C/WP.1. Draft regulations on exploitation of mineral resources in the Area [S]. Kingston: International Seabed Authority, 2019.
- [38] 简 曲, 成湘洲. 大洋多金属结核资源开发的回顾与展望[J]. *中国矿业*, 1996, 5(6): 14–18.
- JIAN Qu, CHENG Xiang-zhou. Retrospect and prospect of the development of oceanic polymetallic nodules resources[J]. *China Mining Industry*, 1996, 5(6): 14–18.
- [39] SONG Cheng-bing, ZHOU Yang, LUO Yi. China is making significant progress in the nomenclature of international undersea features[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(10): 120–121.
- [40] YANG Ning. 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. Chennai, India: [s. n.], 2008: 214–226.
- [41] 戴 瑜, 张 健, 张 滔, 等. 基于多体动力学模型集成的深海采矿系统联动仿真[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 155–160.
- DAI Yu, ZHANG Jian, ZHANG Tao, et al. Motion simulation of the deep ocean mining system based on its integrated multi-body dynamic model. *J Mech Eng*, 2017, 53(4): 155–160.
- [42] 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 Jian-ping. The development of China's deep-sea polymetallic nodule mining vehicle research[J]. *Mining Machinery*, 2020(3): 8–11.
- [43] 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 Bing-zheng. Development and experimental study of crawler mechanism of “Kunlong 500” mining vehicle[J]. *Mining Technology*, 2019, 19(5): 132–135.
- [44] 邹伟生, 李哲旻, 陈爱黎. 海洋采矿扬矿电泵的研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 221–225.
- ZOU Wei-sheng, LI Zhe-huan, CHEN Ai-li. Research on electric pumps for raising mines in ocean mining[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(2): 221–225.
- [45] 唐达生, 阳 宁, 金 星. 深海采矿扬矿模拟系统的试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(增刊 2): 212–220.
- TANG Da-sheng, YANG Ning, JIN Xing. Experimental study of lifting simulation system for deep sea mining[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(Suppl.2): 212–220.
- [46] KANG Ya-juan, LIU Shao-jun, ZHAO He, et al. Design and analysis of an innovative deep-sea lifting motor pump[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82: 22–31.
- [47] 康娅娟. 深海扬矿电泵内部流动特性及水力载荷研究[D]. 长沙: 中南大学, 2019.
- KANG Ya-juan. Study on internal flow characteristics and hydraulic force of electric lifting pump for deep-sea mining[D]. Changsha: Central South University, 2019.
- [48] 赵 贺, 刘少军, 胡小舟. 深海扬矿泵内部非定常流体径向力研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 829–836.
- ZHAO He, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou. Research on the unsteady fluid radial force in the deep sea lifting pump[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(4): 829–836.
- [49] 赵 贺. 深海扬矿泵放大流量设计方法及力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2019.
- ZHAO He. Research on the design method and mechanical characteristics of the amplifying flow rate of the deep-sea lifting pump[D]. Changsha: Central South University, 2019.

Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology

KANG Ya-juan¹, LIU Shao-jun^{2,3}

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Shenzhen Research Institute of Central South University, Shenzhen 518000, China;

3. National Key Laboratory of Deep Sea Mineral Researches Development and Utilization Technology, Changsha 410083, China)

Abstract: Deep-sea polymetallic nodules are rich in the metals needed for the development of new energy technologies such as nickel, cobalt and copper. Extracting them from the seabed of several thousand meters requires unique and reliable mining technology and equipment. The research history and development status of deep-sea polymetallic nodules mining technology and equipment at home and abroad were comprehensively summarized in this article. First of all, the deep-sea polymetallic nodules mining sea trial system conducted by the Western consortium in the last century was sorted out, and the technical and economic feasibility of the prototype hydraulic pipeline-lift mining system was analyzed. Next, the research of key deep-sea polymetallic nodules collection and underwater transportation by deep-sea pioneer investors such as China, Republic of Korea and India were reviewed. Then, the situation of commercialization and high environmental protection requirements faced by deep-sea polymetallic nodules mining technology, and the recent development and research progress in this area were analyzed. Finally, on this basis, the opportunities faced by the research and development of deep-sea polymetallic nodules mining technology, and under the requirements of commercial mining, the possible technical solutions of the deep-sea polymetallic nodules mining system were prospected. The research provides reference value and guidance for the research and development of high-efficiency mining technology and equipment for deep-sea polymetallic nodules.

Key words: deep-sea mining; polymetallic nodules; mining technology; hydraulic transportation; mining test

Foundation item: Project(2016YFC0304103) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(SH-2020-KF-A02) supported by the Open Fund of the State Key Laboratory of Deep-sea Mineral Resources Development and Utilization Technology, China

Received date: 2021-08-02; **Accepted date:** 2021-09-13

Corresponding author: LIU Shao-jun; Tel: +86-18316621835; E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)