

日本深海采矿发展现状分析及启示^①

李满红, 程阳锐, 李小艳, 黎宙, 刘禹维, 李青

(深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012)

摘要: 介绍了日本深海矿产资源开发运行机制, 包括日本海洋政策、与海洋采矿相关的管理机构及实施机构以及日本海洋科技开发推进联络会议等协调机制, 简述了日本海洋采矿领域的跨部门战略创新推行计划, 并总结了日本在海洋采矿领域取得的研究成果。研究日本海洋矿产资源开发管理体系及其开发计划, 可为我国制定深海采矿领域战略、投入机制及协调机制等提供借鉴。

关键词: 深海采矿; 深海矿产资源; 日本; 海洋政策; 海洋科技; 协调机制

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.004

文章编号: 0253-6099(2023)04-0016-05

Analysis of Current Status of Japan's Progress in Deep Sea Mining and Its Revelations

LI Manhong, CHENG Yangrui, LI Xiaoyan, LI Zhou, LIU Yuwei, LI Qing

(State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: Based on an introduction of Japan's operation mechanism for exploiting deep-sea mineral resources, including Japan's marine policies, management and implementation agencies related to ocean mining, as well as Japan's coordination mechanisms for pushing progress in ocean technologies, Japan's cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program is outlined in terms of ocean mining, and the research achievements made by Japan in this field are also summarized. Such research on Japan's management system and program for exploitation of deep-sea mineral resources can be of reference for China in developing strategies, formulating investment mechanism and coordination mechanism for deep-sea mining.

Key words: deep sea mining; deep-sea mineral resources; Japan; marine policy; marine technologies; coordination mechanism

日本四面环海, 是典型的海洋国家, 非常重视海洋资源的利用, 注重官产学研用联动, 通过制定政策法规、拨付科研经费等方式给予海洋科技创新大力支持。

经过多年努力, 日本在海洋矿产资源、海洋再生能源等领域取得了一系列重大科技成果, 在海洋采矿领域, 日本也做了大量工作, 如针对海洋资源立法, 研究海底矿床的形成及其相应的勘探技术、海洋采矿对环境的影响以及面向未来的商业化开采等。特别是在稀土领域, 日本已探明其南鸟岛附近专属经济区蕴藏大量高浓度稀土泥, 并已在推进相关技术开发工作。

我国同属海洋大国, 拥有非常丰富的海洋资源。本文通过分析日本海洋矿产资源开发管理体系及其所取得的成果, 希望对我国海洋科技创新体系特别是海

底矿产资源开发等有所启发, 加快推动我国从海洋大国向海洋强国迈进。

1 日本深海矿产资源开发运行机制

1.1 日本海洋法律及相关政策

日本是一个高度重视海洋的国家, 为更好地利用和保护海洋, 日本制定了相关的法律法规。

2007年, 日本通过了统括海洋政策的《海洋基本法》。日本政府依据该法成立了由首相任部长的“综合海洋政策本部”, 并于2008年制定了首个《海洋基本计划》。该计划作为日本顶层海洋战略文件, 是其未来中长期的海洋政策指针^[1]。

日本《海洋基本计划》每5年修订一次, 目前已出

① 收稿日期: 2023-03-14

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2806700)

作者简介: 李满红(1977—), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 主要研究方向为深海采矿装备与海洋工程。

台了4期。第1、2期《海洋基本计划》主要聚焦基础研究;第3期《海洋基本计划》以保障海洋安全为主,确立了海洋状况把握体制并首次提出了北极政策;第4期《海洋基本计划》在第3期基础上以构筑可持续海洋为主题。

1.2 海洋采矿管理机构与协调机制

1.2.1 政府管理部门

相比于西方国家资源开发模式,在海洋矿产资源开发方面,日本政府发挥了更多的主导作用。日本内阁府、文部科学省、经济产业省等部门主导了海洋采矿领域的发展。

日本内阁府主管的“综合海洋政策推进事务局”成立于2007年,原名为“综合海洋政策本部”,由内阁官房管理。2017年,为进一步加强海洋政策事务的中央集权和权威,该机构转移到内阁府进行管理^[1]。该机构由日本首相直接负责,研究制定海洋战略、法律法规,协调管理海洋工作,联系中央各省厅、地方自治体、独立行政法人、学术研究机构、资源管理和技术开发团队,发挥枢纽型的关键作用,日本《海洋基本计划》即由该部门发布。日本内阁府为强化政府统筹领导力,从2014年到2018年实施了跨省厅、跨学科和跨产业的战略性创造创新项目(Strategic Innovation Promotion Program,简称SIP项目),建立核心创新模式,促进相

关各方积极参与解决社会课题,强化产业竞争力。

日本文部科学省下属的日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)是政府行业的管理机构,该中心于1971年10月建成,并于2004年4月改革为政府机构,主要负责海洋科技研发、人才培养、基础信息收集和处理、设备供应等^[2]。目前,该机构在役船舶8艘,包括开展过稀土研究的深海调查研究船“海岭”号和载人潜水调查船“深海6500”。2018年,JAMSTEC还获得国际海底管理局(ISA)的观察员资格,参与国际规则的制定。

日本经济产业省根据《海洋基本计划》出台了2期《海洋能源矿物资源开发计划》^[3],制定了10年长期计划,以商业化开采为最终目标,针对石油与天然气、天然气水合物、海底矿产资源的开发分别提出了具体目标,制定了时间节点和路线图。该计划由日本石油、天然气和金属国家公司(JOGMEC)具体执行。

1.2.2 与海洋采矿相关的协调机构

海洋科技开发推进联络会议是日本政府综合协调管理机构,该会建成于1969年,由内阁总理官方审议室长和14个省厅的官方长官组成、科技厅官房长官主持,是日本海洋界具有综合协调能力的权力机构,主要负责制定各项海洋科学技术规划并协调各省厅的海洋开发技术推进计划^[2]。与海洋采矿相关的项目及其与日本政府管理部门的关系^[4]如图1所示。

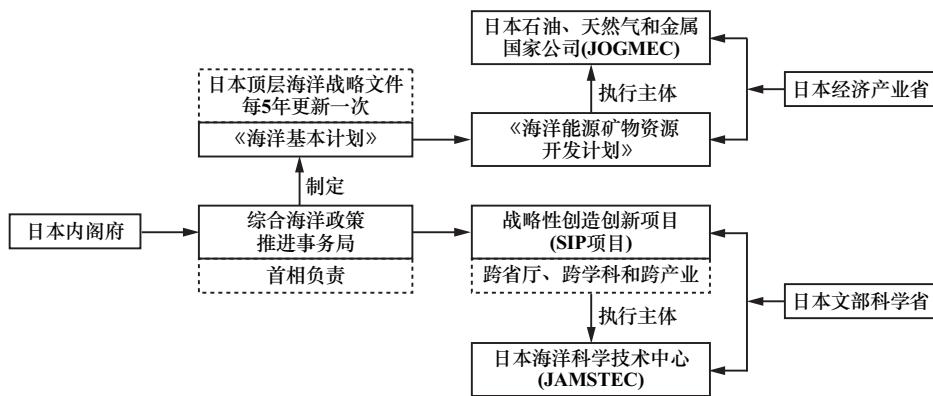


图1 与海洋采矿相关的项目及其与日本政府管理部门的关系

1.2.3 深海采矿领域的主要实施机构及大型项目

JOGMEC作为日本政府机构负责执行国家自然资源和能源政策,是开展深海矿产资源勘探开发工作的唯一官方组织,主要牵头实施日本的海洋矿产资源开发计划。2014年1月,JOGMEC与ISA签署了富钴结壳勘探合同,合同截止期为2029年^[5]。

JOGMEC的运营经费主要来自政府拨款,其运营模式在陆地矿产资源开发中取得了成功。JOGMEC前期开展大范围地质勘查工作,取得一定成果后,该机构

会逐步退出,利用勘查补助金等各种金融财政税收优惠手段吸引日本企业介入项目进行后续详细勘查。待企业获利后,JOGMEC与企业分享经营所得^[3]。

JAMSTEC主要负责执行SIP项目^[6]。目前该项目已实施了2期。项目经费主要来源于JAMSTEC的运营成本补贴。第2期SIP项目主要对象是稀土,评价南鸟岛稀土资源量及其富集区,研究开发将稀土从富集区提升至船上的技术,以便将来向更广阔的区域开发稀土。

在 SIP 项目中,设立项目负责人、咨询会议、促进委员会等。项目负责人负责整个项目的管理实施,咨询会议负责提供技术性、学术性建议,促进委员会(由相关省厅、研究机构等组成)通过与项目负责人等的沟通与协调,确保 SIP 计划的实施效果。JAMSTEC 协助项目负责人和促进委员会,负责项目研究计划的推进,管理研究经费,协助进行项目评估以及相关调查、

分析等。JAMSTEC 积极鼓励企业参加 SIP 项目,如第 2 期 SIP 项目设立了 3 个课题,课题 1 和课题 2 由企业参与,课题 3“海洋资源调查的实际应用”由企业主导。同时,为了构建深海资源产业化模型及新的海洋调查任务委托,企业后期可通过降低成本来实施调查,并进行改进以提高其工作效率。第 3 期 SIP 项目实施体制如图 2 所示。

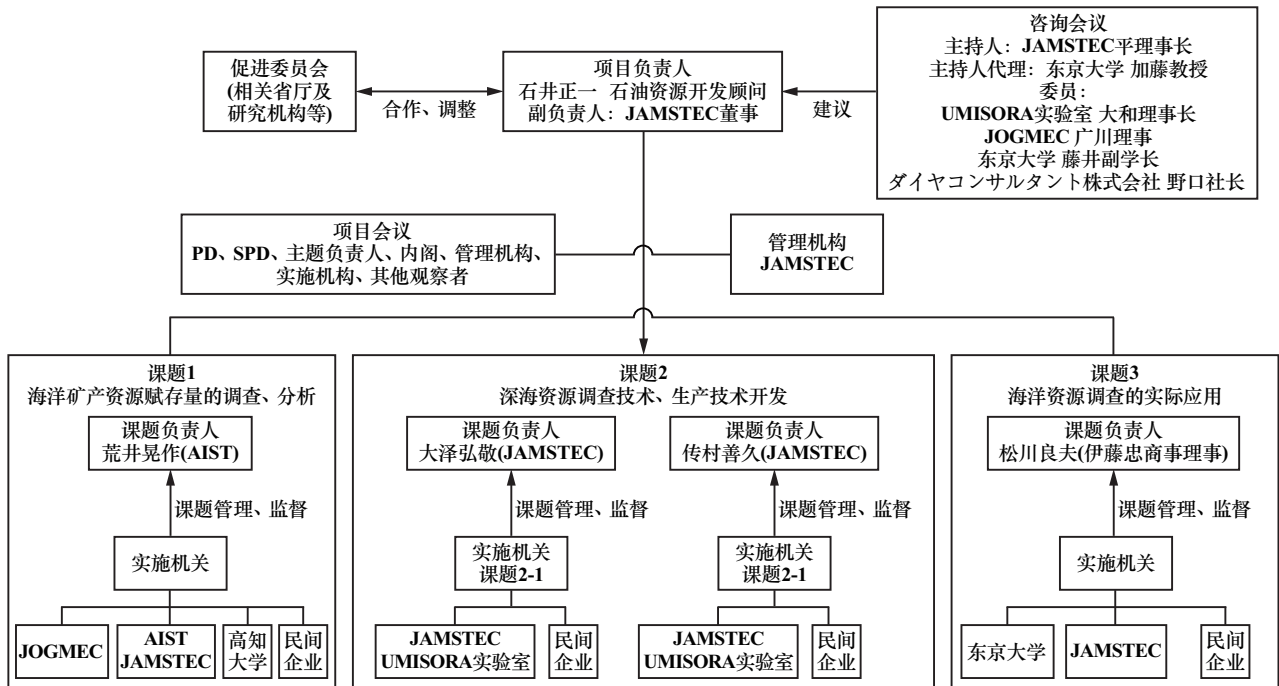


图 2 第 3 期 SIP 项目实施体制

2 日本深海采矿发展成果

日本是拥有多金属结核与富钴结壳 2 种海底矿产资源勘探合同区的国家,同时其专属经济区内赋存储量可观的多金属硫化物矿床和稀土资源。日本积极开展深海调查,取得了一系列成果^[7]。

2.1 海底热液矿床

海底热液矿床俗称海底热液硫化物,主要形成于海洋中脊中正在张开的裂谷处,它富含铜、铅、锌、金和银。受经济产业省的委托,JOGMEC 机构从 2008 年开始,在企业、大学、研究机构等的协助下,开启了海底热液矿床的开发工作。

资源调查方面,2016 年 5 月,日本在冲绳海域的 Hakurei 区域,推算出该区域总资源量为 740 万吨^[8]。2014—2017 年,日本在冲绳海域发现了 6 处高品位矿床。

采矿扬矿技术研发方面,从 2015 年开始,日本进行了为期 3 年的采矿扬矿试验,制定了采矿计划,研究了潜水泵系统及扬矿管系统,对其可操作性和安全性

进行评估。2017 年日本在水深 1 600 m 处连续采集泥浆状矿石 16.4 t,是世界上首次成功完成采矿扬矿试验的国家。试验由日本经济贸易产业部与 JOGMEC 合作完成,该试验的成功标志着日本海洋矿产资源开发技术成功地迈进了一大步^[8]。

选矿技术方面,确定了冲绳海域 Hakurei 区域矿石的特征,改进了在陆上黑矿矿床的选矿方法,并构建了适用于该区域矿石的浮选工艺,达到了锌品位 40%、实际产量 70% 的目标值,该目标值与陆上矿山指标相当。

冶炼技术方面,日本于 2018 年 8 月通过冶炼从选矿试验获得的锌铅中成功获得了锌,并证实了通过现有技术可回收硫化铁精矿中包含的金和银。

环境影响评价方面,自 2012 年以来,日本在海上试验区域进行了环境监测调查,通过扰动试验定量评估了破碎对环境的影响,并构建了环境预测模型,得出该扰动试验对环境的影响极小的结论。

经济性评价方面,2018 年 10 月,日本在假定技术和生产系统已经确定的基础上进行了经济性评价,结

果表明,以“Hakurei”区域矿石为开发对象,并根据2017年经济状况等进行估算,在以铜、金和银含量较高且具有较高经济价值并能满足成本改善和金属价格上涨的情况下,可以确保足够的内部收益率。

2.2 富钴结壳

富钴结壳是一种生长在海底岩石或岩屑表面的皮壳状铁锰氧化物和氢氧化物。因富含钴,名富钴结壳,用于电池正极材料时,其钴含量大约是锰结核的3倍。因新能源汽车的普及,预计其需求将不断增加。JOGMEC拥有国际海底区域富钴结壳的专属勘探权,该领域的成果主要由其主导。

资源量调查方面,2015—2018年间,日本利用调查船“白岭号”,在其ISA矿区进行了海底观察及地形调查等,取得了大量数据,并在小笠原海域确定了其赋存情况。

采矿扬矿技术方面,日本通过海底热水矿床的海上试验及实验室试验,确定了富钴结壳的钻探方式,并于2020年7月在日本南鸟岛专属经济区成功开展了世界首次富钴结壳破碎试验,水深930 m,回收649 kg富钴结壳。该试验采用了日本科考船“白岭号”,由经济产业省委托JOGMEC完成,三菱造船、住友金属矿山、三菱重工均参与了此次海试^[9]。水下无人机拍摄的采掘现场及采掘的富钴结壳如图3所示。



图3 水下无人机拍摄的采掘现场及采掘的富钴结壳

选矿技术方面,2014—2017年间,日本研究了重选和色彩选别的效果,并对其冶炼方式进行了研究,简化了熔炼硫化矿氯化浸出法的处理工艺。

环境影响评价方面,2016—2018年间,日本在其ISA矿区进行了环境调查,收集了水温、盐分、流速、水质、底质等基础数据,并利用摄像机对海底生物群进行了拍摄,2017年对该部分数据进行了分析,一部分成果已发表。

2.3 多金属结核

多金属结核是一种沉淀在大洋底的矿石,它表面呈黑色或棕褐色,形状如球状或块状,它含有30多种金属元素,其中较有商业开发价值的是锰、铜、钴、镍等。20世纪80年代,日本将多金属结核采矿系统的

研究与开发作为国家计划付诸实施。该计划从1981年到1997年历时17载,花费了大量的人力、物力、财力,总耗资高达170亿日元^[10]。1997年,日本在北太平洋进行了2200 m多金属结核采矿系统海试,采集矿石7.3 t,集矿效率为87%。2001年6月,日本与ISA签订了多金属结核勘探合同,由于有关开发规则尚不完善,经2次延期后,该勘探合同延至2026年6月。2021—2022年,日本连续向ISA提交了4个环境影响评价标准,为商业化开采中关注的环境影响评价提供了依据。

2.4 稀土

稀土泥是海底沉积物,被认为是一种新的矿物资源,分布在水深5000~6000 m的海域。日本该方面的成果主要由JAMSTEC主导。

2013年日本东京大学和海洋研究开发机构发现在日本最东端——小笠原诸岛南鸟岛周边的专属经济区海域海底蕴藏着大量高浓度稀土泥,且储量巨大。2013年5月19日,日本再次宣布在印度洋东部的海底发现了含有高浓度稀土的海底层^[11]。2019年1月14日《日本经济新闻》报道,日本海底资源开发项目在2018年下旬科考航次中从南鸟岛周边25个水深5000 m的海底区采集了样本,下一步将对样本展开分析,调查南鸟岛周边海底底质中的稀土含量。

2022年8月12日至9月2日,JAMSTEC在茨城县近海2470 m深处(见图4)进行了实际水域测试,在3个海底采矿地点进行了采矿试验,每天能成功回收约70 t沉积物,这是世界上首次成功地对海底沉积物进行开采。此外,为了确认SIP开发方法的实用性和评估环境影响,配备作业用ROV(远程操作型无人探测器)中搭载4K摄像机,记录采矿现场的状况,同时将“江户1号”COEDO型海底监测装置分别安装在矿场以北50 m和200 m处,对海底沉积物进行与扬泥作业相关的海底环境监测。海试中用到的采矿设备可用于水深6000 m处,如图5所示。

此实验成功后,日本政府表示,力争在5年内对小笠原群岛南鸟岛海域水深6000 m的海底试采稀土泥,并立刻在2022年度第2次补充预算案中列入相关经费。

3 启 示

深海矿产资源开发是一个国家综合实力的表现,需要投入大量的人力物力,其技术门槛高、涉及领域宽、辐射能力强,能对整个海洋科技领域产生重大的引领作用。日本从20世纪70年代一直活跃在深海采矿的技术前沿,其在深海采矿方面的探索为我们带来一些启示。

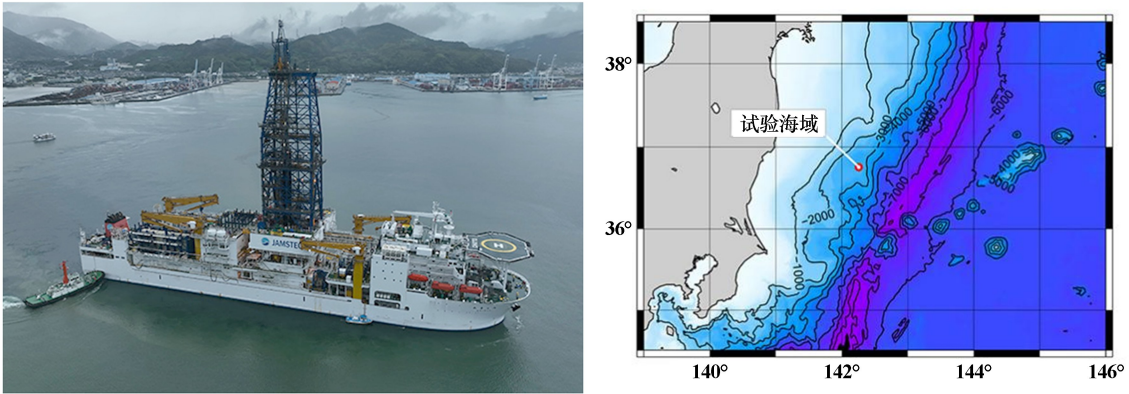


图4 地球深部勘探船“千秋”及测试水域

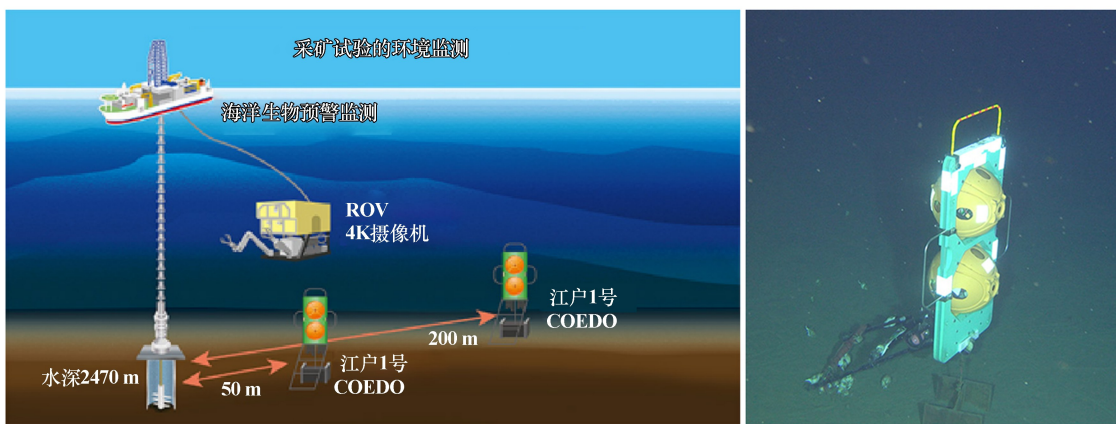


图5 环境监测系统及“江户1号”COEDO型海底监测装置

1) 规划先行,滚动调整,建立动态的产业政策。日本中央政府通过《海洋基本计划》确定深海资源开发战略规划,并在此基础上制定海洋能源矿物资源开发计划,明确提出开发深海矿产资源的战略目标,制定推进的开发政策,建立战略规划动态调整机制,滚动推进未来15年实施的重大项目,并根据形势发展每5年对规划内容进行必要调整。2018年,日本对前两期《海洋基本计划》实施效果进行评估,认为海底多金属硫化物资源开采技术体系已经建立,政府支持的研发目标转向了深海稀土开采技术开发体系研究和建立。

2) 政府引导,企业参与,形成多渠道的支持体系。深海采矿目前处于前瞻性研究阶段,还未进入商业化阶段,是一个投入巨大的产业。日本深海采矿借鉴了其在陆地资源开发的支持体系,如由JOGMEC等机构采用购买股份的方式对项目进行出资,政府给予资金支持或由政府担保向银行等金融机构贷款。项目主要由企业、科研机构、高校等参与,未来一旦商业化,计划由企业主导获取利润,并与JOGMEC进行分成。

我国在实现深海采矿商业化的过程中,可借鉴日

本的支持体系,根据我国实际情况建立多渠道投入机制,加大投资力度。如动员央企以国有资本金的方式深度介入或主导工程技术开发。研究阶段,以国家财政资金投入为主,商业开发阶段以企业资本为主,国家财政逐步退出。并且鼓励地方政府在土地、资金、人才等方面出台相关政策,形成共同支持深海采矿平台设施发展的良好局面。

3) 设置协调机制,构建强有力的海洋事务管理主体。日本建有完善的海洋管理决策咨询与协调机构,制定海洋开发规划和政策措施,赋予其对海洋开发战略布局权、科技立项权、科技力量的组织权与协调权,协同性地推进深海采矿的政策制定和实际行动。

4 结 语

1) 广阔的国际海底拥有极为丰富的矿产资源,铜、钴、镍等资源储量均达到陆地资源储量的几倍甚至几十倍,走向深海已成为各个国家的重要发展战略。

2) 目前日本的海洋资源开发研究重点在稀土领

(下转第25页)

盖形成紧密黏结的整体,表明增加碱激发剂掺量能更有效地促进金矿粉水化反应的进行,提高充填体密实程度,增加充填体抗压强度。

3 结 论

1) 降低金矿粉颗粒细度能增强充填体抗压强度,但当金矿粉颗粒细度小于 CPF 金矿粉后,充填体抗压强度会逐渐降低,CPF 金矿粉(磨矿时间 60 min)为颗粒细度适宜的金矿粉。

2) 增加碱激发剂掺量,充填体抗压强度增大;增大碱激发剂模数,充填体抗压强度先增大后减小。碱激发剂适宜的模数和掺量分别为 1.2 和 60%。

3) 增加碱激发剂掺量,促进了水化进程,增加了硅铝酸盐凝胶的生成量,随着养护龄期增长,水化产物逐渐将金尾矿包裹,形成致密稳定的结构。

参考文献:

- [1] 徐卫东,张永亮,陈晓利,等. 庙岭金矿采空区混合强度充填方法研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):14-18.
- [2] 卢西洲,王文杰,贾稳宏,等. 大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):20-25.

(上接第 20 页)

域,以日本专属经济区为重点,以产业发展为最终目标,采取分层次、自成体系、各有侧重、政府和企业共同推动的资源开发政策和创新体系。

3) 经政府主导和引导,日本在深海采矿领域取得了许多重大进展。20 世纪 90 年代就已经完成了多种深海采矿方法的验证,2013 年和 2017 年在冲绳海域 1 600 m 水深分别完成了自行式采矿车的多金属硫化物集矿功能试验和采矿系统联动试验,2020 年成功完成了 930 m 结壳采矿、环境监测联合试验,2022 年完成了深海稀土海上试验。

4) 我国在深海采矿领域开展了大量工作,也获得了一定的技术积累。但我国深海采矿技术与世界先进水平还存在一定差距,尽管已经开展了一系列单体试验和联动试验,掌握了关键技术,但全系统协同作业技术的先进性和成熟度验证尚不充分,采矿环境影响研究尚在起步阶段。尽管日本与我国的侧重点不同,但日本的制度建设、组织管理、投入方式等仍值得参考借鉴。

参考文献:

- [1] 张晓磊. 日本《第三期海洋基本计划》评析[J]. 日本问题研究, 2018(6):32.
- [2] 魏 婷,石 莉. 日本海洋科技创新体系建设研究[J]. 国土资源

- [3] 徐晓臻,黄蓓佳,苑 静,等. 中国水泥出口贸易的隐含环境影响核算[J]. 复旦学报(自然科学版), 2022,61(4):485-494.
- [4] 董 猛,李江山,陈 新,等. 煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022,50(12):75-84.
- [5] 马旭明,倪 文,徐 东. 工业固体废弃物制备充填胶结剂的研究进展[J]. 金属矿山, 2018(4):11-17.
- [6] 杨文寿. 某含铜金银多金属硫化矿尾矿资源综合利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):84-87.
- [7] 王 磊,李金丞,张晓伟,等. 地质聚合物激发剂及其激发原理[J]. 无机盐工业, 2022,54(2):16-20.
- [8] 黄玉琴. 碱矿渣泡沫混凝土的制备与性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学材料科学与工程学院, 2021.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] XU Xianqing, BAO Shenxu, ZHANG Yimin, et al. Role of particle fineness and reactive silicon-aluminum ratio in mechanical properties and microstructure of geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2021,313:125483.
- [11] 童国庆,张吾渝,高义婷,等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. 材料导报, 2022,36(4):129-134.
- [12] 温震江,杨志强,高 谦,等. 金川矿山早强充填胶凝材料配比试验与优化[J]. 矿冶工程, 2018,38(6):29-32.

引用本文: 罗正东,蒋 波,章本本,等. 碱激发金矿粉充填材料力学性能及微观分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):21-25.

情报, 2017(10):38-44.

- [3] 姜 雅. 日本海外矿产资源开发 14 个部门联成的无缝体制[J]. 资源与人居环境, 2010(20):28-29.
- [4] 日本内閣府. 令和元年版海洋の状況及び海洋に関して講じた施策 参考資料(平成 31 年 4 月 1 日現在)[EB/OL]. https://www8.cao.go.jp/ocean/info/annual/r1_annual/r1_annual.html.
- [5] ISA. Minerals; Polymetallic Nodules[EB/OL]. <https://www.isa.org.jm/exploration-contracts/polymetallic-nodules/>.
- [6] 日本内閣府政策統官. 戦略的イノベーション創造プログラム革新的深海資源調査技術[EB/OL]. <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>.
- [7] 日本经济产业省「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の改定について[EB/OL]. www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/026_s01_00.pdf - 2019-03-07.
- [8] 世界で初めて海底熱水鉱床の連続揚鉱に成功しました-沖繩近海で海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験を実施-[EB/OL]. https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000315.html.
- [9] 世界初、コバルトリッチクラストの掘削試験に成功~海底に存在するコバルト・ニッケルの資源化を促進-[EB/OL]. https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_01_000162.html.
- [10] 钟 祥,牛京考. 日本大洋多金属结核开采试验的进展[J]. 国外金属矿山, 2000(3):33-38.
- [11] 于 莹,刘大海. 日本深海稀土研究开发最新动态及启示[J]. 中国国土资源经济, 2019,32(9):46-51.

引用本文: 李满红,程阳锐,李小艳,等. 日本深海采矿发展现状分析及启示[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):16-20.