

深海多金属结核商业开发中海底采集关键技术进展及展望

栾鲁宝^{1,2}, 刘茜茜^{1,2}, 牛小东^{1,2}, 谢亦朋^{1,2}, 刘学麟^{1,2}, 陈旭光^{1,2*}, 李华军^{1,2}

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100; 2. 山东省深海采矿技术与水下装备重点实验室(筹), 山东青岛 266100)

摘要: 在“双碳”战略与新质生产力驱动下, 我国关键金属资源供需矛盾日益凸显, 深海多金属结核作为战略接替资源, 正处于从试验开采向商业开发的关键阶段。然而, 海底采集装备在长周期连续作业、采集效率、复杂环境适应及低扰动控制等方面仍存在一系列技术瓶颈, 成为制约深海多金属结核商业化开发的重要因素。本文聚焦深海采矿商业化对海底采集关键技术的新发展需求, 围绕履带式海底采矿车, 系统梳理了矿车行进理论与方法、矿车作业路径规划、深海矿产高效开采技术、海底扰动机制与低扰动控制4个方面的研究进展; 在此基础上, 结合商业开发对产能规模、复杂海床适应性、长周期连续运行能力及生态合规性的技术诉求, 分析了制约商业化落地的关键技术障碍, 并进一步凝练出四大关键技术攻关方向, 包括矿区分级评估与长时连续集矿规划方法、矿车长周期连续行走关键技术、复杂海床地貌下连续高效采集技术、土体“胶结-解离”机理与低扰动开采技术。本研究旨在梳理深海多金属结核海底采集技术中亟需突破的关键环节, 为构建适配商业化需求的自主可控技术体系提供参考, 并为我国深海多金属结核的规模化、经济化、环境友好化开发提供技术支撑, 对保障国家战略资源安全具有重要现实意义。

关键词: 深海采矿; 履带式矿车; 多金属结核; 商业化开发; 高效低扰集矿技术

中图分类号: U676.6 **文献标识码:** A

Key Seabed Collection Technologies for Commercial Exploitation of Deep-Sea Polymetallic Nodules: Advances and Prospects

Luan Lubao^{1,2}, Liu Xixi^{1,2}, Niu Xiaodong^{1,2}, Xie Yipeng^{1,2}, Liu Xuelin^{1,2},
Chen Xuguang^{1,2*}, Li Huajun^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Deep-Sea Mining Technology and Underwater Equipment, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Driven by the carbon peaking and carbon neutrality goals as well as the accelerated development of new quality productive forces, the supply-demand tension of critical metals has become increasingly pronounced. As a strategic successor resource, deep-sea polymetallic nodules are entering a pivotal transition from pilot trials to commercial exploitation. However, seabed collection equipment still faces significant technical bottlenecks in long-duration continuous operation, collection efficiency, adaptability to

收稿日期: 2025-06-22; 修回日期: 2026-03-20

通讯作者: *陈旭光, 中国海洋大学工程学院教授, 研究方向为海洋工程; E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)(52225107), 国家自然科学基金(U25A6020)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

complex environments, and low-disturbance control, which have become key obstacles restricting the commercial development of deep-sea polymetallic nodules in China. This study focuses on the emerging development needs of key seabed collection technologies for the commercialization of deep-sea mining and, centering on tracked seabed mining vehicles, conducts a systematic review across four core dimensions: mobility theory and methods for mining vehicles, operational path planning, high-efficiency nodule collection technologies, and seabed disturbance mechanisms with low-impact control. Moreover, considering the multiple technical demands of commercial development for production scale, adaptability to complex seabed conditions, long-duration continuous operation, and ecological compliance, the study identifies the key technical obstacles that hinder commercial deployment. Four priority research directions are further proposed: long-duration continuous locomotion technologies for mining vehicles, graded assessment of mining areas with long-duration continuous collection planning, efficient and low-energy continuous harvesting under complex seabed topography, and mechanistic understanding of sediment bonding-disaggregation coupled with low-disturbance mining strategies. This study aims to clarify the core technological targets for deep-sea polymetallic nodule seabed collection and to provide guidance for establishing an independent and controllable technical system tailored to commercial needs, thereby laying the foundation for the large-scale, economically viable, and environmentally responsible development of deep-sea polymetallic nodules in China and offering important practical significance for safeguarding national strategic resource security.

Keywords: deep-sea mining; crawler-type mining vehicle; polymetallic nodule; commercialization; efficient and low-disturbance collection

一、前言

在“双碳”战略持续推进与新质生产力加速发展的背景下，我国高端制造业和新能源产业发展迅速。近年来，新能源发电装机规模稳居世界首位，新能源汽车产销量占全球的比重超过60%，相关产业的快速发展对钴、锰、铜、镍等关键金属的需求量急剧增加。与此同时，我国矿产资源禀赋相对不足，而消费需求持续攀升，部分关键金属资源的对外依存度较高^[1]，供需矛盾愈发突出，资源安全已成为制约我国产业高质量发展的核心瓶颈。在此背景下，开发新的战略性矿产接替资源成为现实需求。深海底蕴藏的多金属结核、富钴结壳及多金属硫化物等矿产，富含钴、锰、镍等关键金属，其储量占全球总量的95%以上^[2]，可作为破解我国关键矿产约束、保障国家安全的战略性接替资源，是打通新质生产力发展资源瓶颈的核心抓手。达沃斯世界经济论坛指出，全球正在由“石油时代”转向“关键矿产时代”^[3]。在这一趋势下，关键矿产资源的保障能力已成为大国战略竞争的新焦点，也进一步凸显了海洋矿产资源的战略意义。2025年，《政府工作报告》中强调，推动深海科技等新兴产业安全健康发展，为深海矿产资源开发的技术创新与产业化发展提供了重要政策依据。

多金属结核是当前深海固体矿产资源的典型代表，主要赋存于4000~6000 m的深海海底，具有分布范围广泛、资源储量大的特征，是现阶段最具商业开发前景的深海矿产资源类型。深海多金属结核开发是融合海洋工程、机械工程与系统控制等多学科

的系统性前沿工程，需构建海底矿车开采、立管长距离输送、层级系统调控及水面船舶支持等多元协同技术体系，形成覆盖海底、水体、水面等全维度的装备集群^[4]。其中，海底采集系统位于采矿全流程的最前端，工作性能直接决定多金属结核的采收率与作业产能，同时也对立管输送浓度、水面平台作业负荷及海底环境扰动水平均存在显著影响，是整个深海矿产开发系统中的核心环节。从国际发展态势来看，欧美等发达国家凭借较早的研究布局与长期技术积累，已完成深海多金属结核开采关键技术攻关，并成功开展海底矿车原位联合作业试验。更为关键的是，美国已明确要绕开联合国相关规制框架，加快推进深海多金属结核的商业化开发（商采），这进一步加剧了全球深海矿产资源的竞争格局。相较而言，我国深海矿产资源开发研究起步较晚，在深海多金属结核开采核心技术，尤其是海底履带式矿车作业技术方面，仍面临诸多亟需突破的瓶颈：一是履带式矿车长周期自主路径规划与稳健高速行驶控制难度大；二是深海沉积复杂的物化特性显著制约履带式矿车行进与集矿效率；三是履带式矿车开采活动引发的海底环境扰动易诱发生态污染。对此，我国从顶层战略到工程实践等方面均开展了系统性部署。2025年2月，我国与库克群岛签署《海底采矿事务蓝色伙伴关系谅解备忘录》，同年11月中国科考船“大洋号”停靠库克群岛，开展深海矿产资源开发潜力专项调查。目前，我国已在太平洋、西南印度洋等关键区域累计获批超过 2.2×10^5 km²海底矿区，成为国际海底区域矿区数量最多的国家，为深海矿产资源开发提供了核心资源保障。依据国

家海洋资源开发战略部署及国际海底区域“先到先得”的矿区申请原则^[9]，若不能加速突破深海履带式矿车关键技术、稳步推进深海矿产资源开发商业化进程，我国将错失深海资源开发的战略窗口期，进而影响国家矿产资源安全与全球话语权的构建。

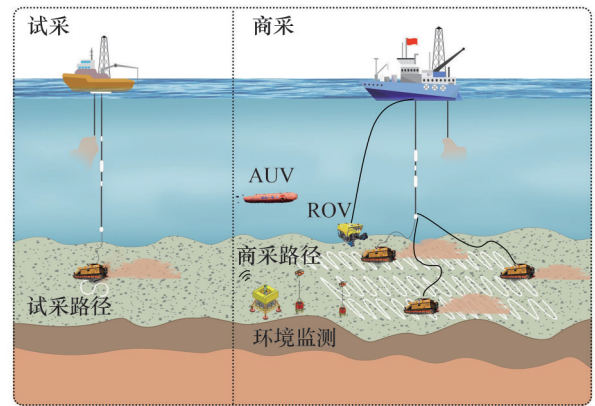
本文立足我国深海多金属结核开发从试采向商采跨越的关键战略转折期，深度剖析深海采矿新发展背景下，海底开采关键技术发生的本质转变，并聚焦履带式海底采矿车这一核心装备，系统梳理其国内外发展现状，在此基础上凝练出制约多金属结核商业化开发的关键技术瓶颈与核心挑战，针对性提出技术发展路径与对策建议，旨在为构建具有自主知识产权的深海多金属结核采集技术体系提供技术突破方向，为输送系统、水面平台及环境管理系统的协同发展提供支撑。

二、多金属结核海底采集技术新需求

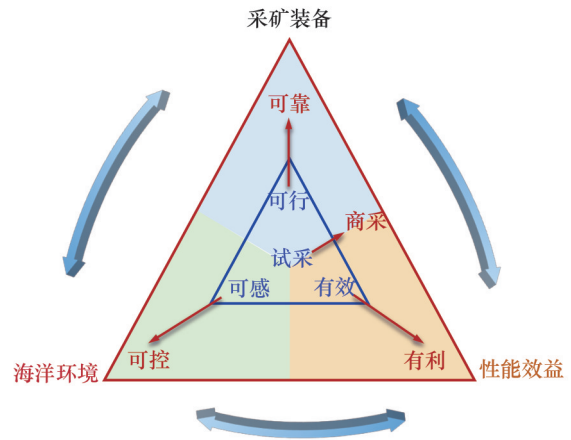
随着深海装备制造技术的不断进步、采矿系统效率的持续提升、作业规模的持续扩大以及低环境扰动开采技术的关键突破，深海多金属结核开发正加速实现从技术验证性试采向规模化商采的关键跨越。作为深海采矿技术发展的更高阶段，商采的核心目标已不再局限于试采的技术可行性验证，而是聚焦工程应用的多目标协同提升。然而，这一转变并非对试采规模和作业时间的简单放大，而是遵循清晰的商业化推进的内在逻辑：突破开采系统在极端深海环境下的长期稳定运行能力，在此基础上，满足日益严格的环境保护要求和政策监管规定，最终，进一步支撑大范围、长周期连续作业条件下的产能提升与经济性实现。这一转变推动海底开采技术体系与核心要求随之发生系统性提升，具体表现为开采方式从局部“点式”验证性采集转变为全域“面式”开采（见图1）。因此，与试采阶段侧重装备环境适应性和基础作业有效性验证不同，商采阶段对开采技术诉求在产能效益、作业条件及环境政策3个核心维度呈现出全方位提升，迫切需要构建适配其发展需求的技术体系。

（一）从试采验证向商业经济的产能量级突破

商采阶段的核心前提是实现矿产资源开发的经济可行性，而产能规模是经济性的重要支撑。要实



(a) 局部“点式”试采与全域“面式”商采



(b) 商采与试采的内涵差异

图1 多金属结核商采与试采的差异

注：AUV表示自主水下航行器；ROV表示遥控式水下机器人。

现年产能300万吨级的商业化开采目标，干结核开采能力需达到150 t/h以上，同时需保障开采、提升、分选等全流程系统的连续与稳定运行效率。但从目前发展状况看，国内外深海多金属结核开采技术仍处于产能提升的关键攻坚阶段。受采矿车行进速度、装备尺寸、结核丰度等因素影响，我国海底湿结核开采产能为20~30 t/h。即使是国际领先企业，现有技术水平仍无法满足商采对产能的要求。产能不足不仅直接限制开发规模，还会显著抬升单位产能对应的装备投入、能耗与维护成本，使整体投入产出比难以达到商业化水平。由此可见，海底矿车开采产能提升已成为制约深海多金属结核商采落地的关键瓶颈。

（二）从理想区域“点式”试采向复杂区域“面式”连续作业的转变

在试采阶段，开采技术的核心目标是验证海底

矿车的基础运行能力，其作业区域通常选择在海底地形平坦、结核丰度高、沉积物厚度适中、海况相对稳定的理想海域，作业模式以短周期（单次作业时长 ≤ 30 d）、局部化“点式”开采为主，作业范围通常控制在数平方公里内，技术重心聚焦装备功能与系统架构可行性验证。相比之下，在商采阶段，开采技术的目标不再局限于技术验证，而是转向“全域覆盖、连续作业、高效采收”的核心目标，开采场景、作业模式及系统配置随之发生本质性变化。商业矿区往往面临海底地形起伏、结核丰度分布不均、沉积物类型多样（如黏土质粉砂、粉质黏土等）等现实问题，这对海底矿车的地形适应性与路径规划能力提出了极高要求。此外，商采阶段的作业模式从“点式”开采升级为“面式”开采，需实现对数十至数百平方公里商业矿区的全域覆盖开采，要求海底矿车具备高精度自主导航、矿区边界识别与动态路径优化能力。同时，商采阶段的作业周期将从短周期间歇运行转向全天候连续运行，需保障年有效作业天数 ≥ 300 d，这意味着矿车作业技术需适配极端海况（如台风、巨浪等）、深海极端环境（如低温、高压、黑暗）及长周期运行等复杂条件。为满足对海底作业产能、效率的综合要求，商采已不再是试采作业模式的简单放大，而是升级为由专用采矿船或半潜式作业平台、多级矿浆输送管系、矿浆与尾水处理系统、多台采矿车协同作业、羽流抑制装置以及ROV移动监测站点共同构成的多系统协同架构。在这一背景下，履带式海底采矿车不再是孤立运行的单机作业装备，而是需要在采集效率、连续作业能力、低扰动控制和系统协同匹配等方面实现整体升级。

（三）从有限环境影响向合规与生态修复的发展

在试采阶段，由于作业规模小、持续周期短（ ≤ 30 d），海底矿车开采对海洋环境的影响范围与程度相对有限，对开采技术的环境适配要求相对宽松，环境管理重点以基础环境监测与短期影响评估为主，尚未建立系统性的环境治理与生态修复技术方案。在商采阶段，大规模、长周期开采活动将产生显著的累积性环境压力，主要体现为：矿车开采活动产生的开采羽流（含沉积物颗粒、重金属离子）对水体生态系统带来影响、结核移除对海底底栖生物栖息地产生破坏、海底矿车运行产生的声光

污染对海洋哺乳动物带来干扰等。在此背景下，国际海底管理局（ISA）作为深海区域资源开发的核心监管机构，推动深海采矿环保监管规章体系逐步完善，其发布的《深海采矿规章（草案）》（2024年）对商采阶段的环境管理提出了严苛的刚性约束要求。为此，需围绕羽流源头抑制、在线监测及扰动阈值判据构建等开展关键技术攻关，通过采集结构优化与作业参数动态调控实现扰动控制，并依托原位多参数实时监测手段建立可量化的环境响应评价判据。在此基础上，分层推进污染物减排与生态修复等后续管控措施，逐步完善“开采、监测、治理、修复”的一体化环境管理链条。

三、多金属结核海底采集装备及技术发展现状

（一）多金属结核海底采集装备发展现状

在深海矿产资源开发领域，开采技术装备研发与产业化布局呈现发达国家“领跑”、新兴经济体追赶、资源国积极参与的发展格局，整体已从实验室研发阶段逐步进入海试验证关键期，但尚未实现规模化、商业化开发。图2展示了全球深海采矿技术的发展历程与中外技术地位的动态变迁：1990—2015年，法国、德国、韩国、加拿大、比利时等国家先后完成不同水深和输送能力的海试，技术长期占据主导地位；中国在此阶段完成抚仙湖系统测试、1000米级混输系统海试等基础积累。2018—2020年，我国迎来技术爆发期，“鲲龙500”“开拓一号”“曼塔号”等装备相继完成不同水深海试，中国科学院与招商局海洋装备研究院有限公司也取得关键突破，技术水平追平国际水平，并计划在2030—2035年实现深海矿产资源大规模商采。2007年，加拿大鸚鵡螺矿业公司首次设计了履带式矿车配合船舶矿物提升装置的深海采矿系统，初步证明了履带式矿车开展深海采矿作业的可行性^[9]。比利时GSR公司在深海采矿试验样机PATANIA I的基础上研制出二代样机PATANIA II，并于2021年在东太平洋Clarion-Clipperton矿区完成4500 m水深海试工作，采集效率达110~120 t/h。加拿大TMC公司在2022年3月完成深海履带式矿车研制，同年8~11月在NORI-D矿区完成采集提升试验，采集效率可达86.4 t/h。美国Impossible Metals公司研发了

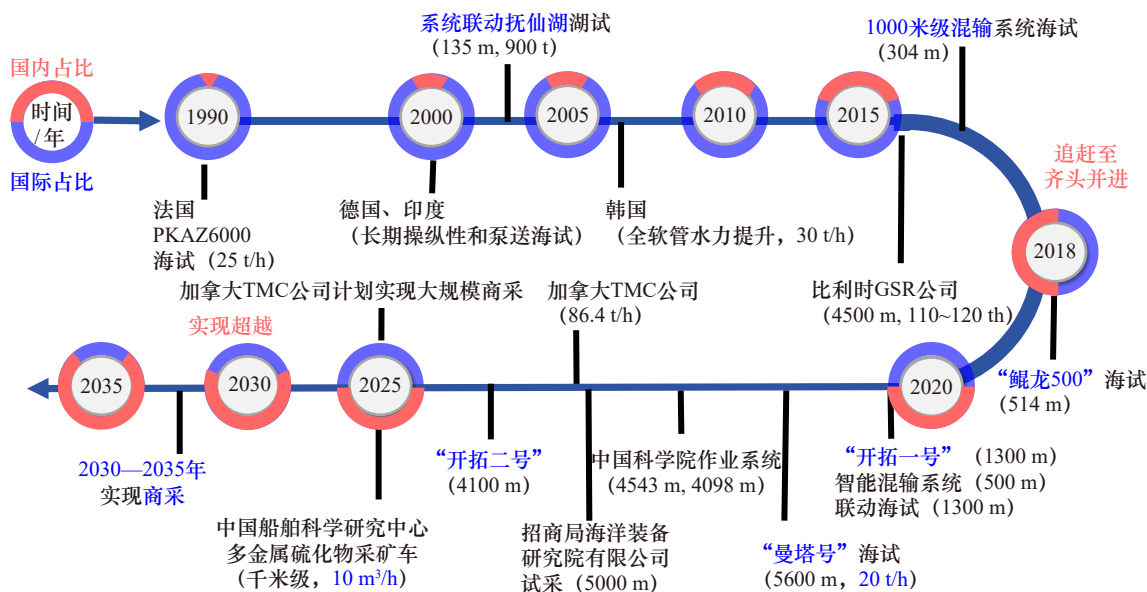


图2 国内外深海矿车发展进展

Eureka III水下浮游机器人，利用人工智能视觉技术在深海海床进行“挑拣式”作业，能够精准识别并抓取多金属结核。欧美、加拿大等发达国家和地区凭借长期的技术积累与持续的研发投入，拥有显著的先发优势，在装备耐压密封、深海导航定位、矿石高效采集等关键核心技术方面处于全球“领跑”地位，其商采已进入技术优化的冲刺攻坚阶段^[7]。

我国在20世纪80年代开始探索和研发深海矿产资源开发关键技术及装备，与欧美国家相比起步较晚。在“九五”和“十五”时期，我国顺利完成了海底矿车、立管提升装备和船舶支持装备的详细设计工作^[8]。在“十二五”时期，科学技术部对深海多金属结核开采关键技术装备进行立项支持，重点关注海底矿车的研制。在“十三五”时期，由长沙矿冶研究院有限责任公司主导研制的“鲲龙500”履带式矿车，成功完成500米级水深海试，标志着我国深海采矿装备由陆路试验全面转向海上试验。近年来，上海交通大学研制出履带式深海矿车“开拓一号”，于2021年7—8月在我国南海西沙海域成功完成1300米级水深海试，开采效率为30 t/h。2022年11月，由上海交通大学主导研制的浮游式深海原位集矿机“曼塔号”，在西太平洋多金属结核矿区完成6000米级海试任务，结核的最大采集效率为20 t/h。经过40余年的系统性攻关，以中国大洋矿产资源研究开发协会、长沙矿冶研究院有限责

任公司等为代表的骨干单位已积累了一系列具有标志性的海底开采技术成果。

从技术路线看，当前海底采集装备主要包括履带式 and 浮游式两类。履带式海底采矿车依靠履带接地实现行进与采集，具有牵引能力强、承载能力大、作业稳定性较高和连续采集能力突出等优点，更适合大范围、高产能开采场景，但也存在沉陷、打滑和底质扰动较强等问题。浮游式采集系统通过浮力调节实现近底悬浮作业，能够在一定程度上减轻接地扰动和沉陷风险，在环境友好性方面具有潜在优势，但在复杂流场条件下面临姿态控制、推进稳定性、近底定位和连续采集能力不足等挑战。总体来看，履带式海底采矿车在当前深海多金属结核试验验证和工程化应用中仍更具代表性，因此本文重点围绕履带式海底矿车展开讨论。

（二）多金属结核海底采集关键技术研究进展

1. 多金属结核开采中的矿车行进理论与方法

履带式海底采矿车的行进性能直接决定采矿系统的作业效能与稳定性，其行进机构的动态稳定性已成为制约深海矿产资源规模化开发的核心瓶颈之一。深海底质条件大致可分为硬底质（如富钴结核、多金属硫化物赋存区）与软底质（如多金属结核、深海稀土赋存区）两大类，前者的抗剪强度可达3.8 MPa^[9]，而后的抗剪强度仅为0~11.8 kPa^[10]。

深海硬底质的力学特性与陆地表面底质较为相似，作业场景主要面临微地形起伏显著、地面倾角大等问题，相关力学分析基本可纳入地面车辆力学的理论框架。然而，深海稀软底质与陆地底质存在差异，高含水率（超过液限）使其在履带扰动下呈现“固态-液态”转换特性，进而导致土体抗剪强度发生量级衰减^[9]。现有研究表明，深海沉积物由片状黏土矿物与微生物胶结物构成独特的絮凝结构^[11]，其超高孔隙比、高灵敏度等特性与陆地黏土存在显著区别^[12]，在动态剪切过程中易发生胶结结构破坏、颗粒离散流动的形态演变。

地面车辆力学的发展为履带式海底采矿车行进机构的研发提供了重要理论借鉴，但现有理论体系仍难以满足深海稀软底质的极端特殊性，存在显著适配性局限。20世纪中期，为优化坦克等重型军事车辆的越野通过性能，研究人员提出了经典的“压力-沉陷”模型，奠定了现代地面力学的理论基石^[13]；在该模型基础上进一步引入“剪切应力-位移关系”模型，完善了地面车辆力学的理论框架，并推动其广泛应用于农业机械、陆地采矿装备等领域^[13]。值得注意的是，传统地面车辆力学理论多将土体简化为弹性或弹塑性连续介质，如有研究指出底质力学参数的动态演化对海底行车过程中的“车-土”相互作用机制具有决定性影响^[14]。因此，为突破现有理论局限，需从深海底质的特殊性入手，当前研究的核心瓶颈为：一是尚未阐明深海沉积物胶结结构动态破坏与孔隙流体迁移的跨尺度耦合机制^[15,16]，导致无法合理解释高应变率工况下土体状态突变的流体化效应；二是在“履带-沉积物”动态相互作用研究中，现有接触算法^[8]尚未实现应变场分区演化与底质相变过程的实时耦合，导致高速行驶工况下的行驶阻力预测误差显著^[17]。针对速率效应这一关键影响因素，研究人员提出了深海沉积物新型剪切流变损伤模型^[18]；近期部分学者尝试引入非牛顿流体模型^[19]，虽在一定程度上弥补了传统模型对速率效应刻画不足的缺陷，但应用于履带式矿车与稀软底质的动态相互作用研究时仍存在明显短板，即在微观层面仍缺乏胶结结构破坏与离散颗粒重组演化的定量表征方法，在宏观层面尚未建立与动态应变率直接相关的“固-流”耦合力学模型。

2. 多金属结核富集区开发作业规划

深海多金属结核作为保障国家战略性矿产资源供给安全的重要储备资源，其规模化开发已成为全球海洋资源开发领域的重要研究方向。路径规划作为深海采矿作业系统的“中枢神经”，决定着海底采矿车的作业路线、运行组织与实时调控，是突破深海极端环境约束、实现多金属结核高效开发的核心技术支撑^[20]。目前已探明的多金属结核富集区主要集中于水深4000~6000 m的深海平原^[21]，面临40~60 MPa的极端高压、2~4 °C的低温环境，对原位感知、控制执行及规划实施中的系统稳定性与环境适应性提出了严苛要求。同时，多金属结核在海底稀软沉积物中以面状分散形态分布，其开采路径规划不仅需要统筹考虑海床地形地貌特征和矿石赋存分布规律，还需要综合匹配采矿车的行进通过能力、转向能力及连续作业能力，从而使路径规划由单一的航线生成问题转向集环境感知、状态识别、路径决策与动态调控为一体的综合优化问题。然而，面向商业化连续开采需求，现有路径规划的基础数据与技术支撑仍存在明显不足。一方面，精细化生产勘探技术尚未成熟，对海底微地形、结核丰度分布及局部赋存状态仍难以实现高分辨率、连续化识别，所构建的矿石赋存模型精度有限，无法为路径规划提供可靠的空间约束信息；另一方面，采矿车在复杂海床环境下的障碍物识别、风险区域避让以及受困自主脱困能力仍较为薄弱，进一步降低了规划方案的工程可实施性与作业安全性。由此可见，深海采矿车路径规划已不再是单纯的路线生成问题，而是涉及地形识别、矿体赋存表征、车辆作业能力评估及复杂工况响应的综合决策问题。

深海多金属结核开发路径规划场景与陆域采矿存在本质性差异，导致陆上成熟技术难以直接迁移至深海海底^[22]。究其原因在于，深海环境的不可达性与极端性，使人工干预无法实时实现，还需要具备高度自主决策能力的路径规划，能够基于原位感知信息以动态适配环境与资源赋存变化；深海装备运维成本呈指数级增长，矿车若因路径规划偏差导致沉陷、卡滞，或因负载调控失当引发故障，将直接造成矿区产能中断，对商业开发的盈亏平衡构成根本性威胁^[23]。这种环境不可控、决策自主化的约束，凸显了深海采矿路径规划的核心战略价值。深海多金属结核开发研究仍存在显著的“重装备、轻

系统”研发倾向，路径规划研究多依附于装备硬件研发，尚未形成独立的系统化技术体系，导致矿车作业性能面临多重瓶颈^[24]。在实际作业中，该局限主要表现为两方面：一是在稀软底质环境下，现有路径规划方法对底质承载特性的考虑不足，易导致矿车沉陷、牵引力损失及能耗激增；二是在长周期连续作业场景中，路径规划未能综合考虑机械部件磨损、行进与采集协同作业等因素，难以实现作业效率最大化。尽管通过优化矿车驱动结构可在一定程度上提升装备性能并缓解局部问题，但路径规划受制于地形识别、矿体赋存表征及作业能力匹配等多重约束，单纯依赖硬件升级难以突破其系统性技术瓶颈。

加拿大鸚鵡螺矿业公司在早期深海硫化物开采试验过程中，因忽视海底地形复杂性评估，缺乏科学的路径规划体系支撑，导致矿车频繁发生停滞故障，最终未能实现商业化落地。此案例揭示了路径规划缺失对深海采矿项目的致命影响。在深海富钴结壳试采领域，日本研究团队基于矿物丰度分布特征划分开采优先级区域，通过精细化路径规划实现了采矿效率 20% 的提升^[25]。当前路径规划中常用的算法主要包括 A*、JPS、RRT* 和蚁群等群智能算法^[26]。科学的路径规划是突破深海开采效率瓶颈、保障产能稳定性的关键途径，对深海多金属结核商采具有重要的技术支撑价值。当前，构建“规划驱动产能”的新型技术体系成为国内外科研与工程领域的普遍共识^[23]，其核心方向在于融合深海环境原位感知技术与多目标智能优化算法^[27]，构建覆盖“环境感知、路径生成、动态调控”的全生命周期精细化路径规划与差异化调控方法。通过实时感知深海环境参数与资源分布动态，利用智能算法实现作业路径的动态优化、负载的精准匹配以及潜在故障的提前预警，从而系统性提升矿区作业效率与系统鲁棒性。

3. 多金属结核开采技术及理论

深海多金属结核主要赋存于深海浅表层 25 cm 以内，针对这一浅埋深矿产资源，行业内普遍采用机械式、水力-机械混合式、水力式 3 种开采技术路径。其中，水力式开采具有结构简单、作业故障率低等优势，已逐渐发展为当前主流开采技术路径^[6]。中国大洋矿产资源研究开发协会、长沙矿冶研究院有限责任公司、上海交通大学等国内代表性

科研与工程单位^[24]，通过模型试验、数值模拟等多尺度研究方法，系统分析了不同流场构型对结核提升效率的影响规律，经多轮迭代优化设计，成功研发出“鲲鹏 500”“开拓一号”“曼塔号”等具有自主知识产权的深海水力式多金属结核集矿装置，并完成了海试验证。然而，海试结果表明，现有技术体系与商业化开采目标之间仍存在明显差距^[24]，且其核心制约机理尚未明确。因此，精准识别制约结核开采产能提升的核心因素，是实现深海采矿从试采阶段向商采阶段跨越的关键前提。

现有研究虽已取得阶段性进展，但仍存在显著局限。近期研究发现^[28]，在射流作用过程中，深海稀软底质边界具有极强的侵蚀特性，导致射流流场呈现显著非稳态特征^[29]，且流场内部存在漩涡发育、负压不足等问题^[30]，直接制约结核的有效剥离与提升效率，即稀软底质的动态侵蚀效应与流场构型优化不足，成为导致结核开采失效、产能显著降低的核心诱因。然而，以往研究在一定程度上忽视了稀软底质对结核开采性能的耦合影响，未能充分揭示结核在“水-矿-土”多场耦合作用下的剥离与提升机制，多停留在装置参数组合优化的“经验式”设计模式，难以实现开采产能的突破性提升。

目前，深海多金属结核高效采集系统的优化设计，通常参考行业标杆企业（比利时 GSR 公司）提出的产能计算方法^[31]：

$$A = V \times b \times \eta \times v \quad (1)$$

式 (1) 中， A 表示结核采集效率（产能）， V 表示矿车行驶速度， b 表示采集头宽度， η 表示结核丰度， v 表示采集率。该方法主要通过提升履带式矿车行驶速度、结核采集率及矿车作业宽度三大关键参数来实现产能提升。在传统理论框架中，采集率与矿车速度被视为相互独立的产能贡献因子，且常规计算公式普遍认为矿车速度对采集率的影响可忽略不计^[32]。然而，最新海试结果表明，矿车在运动过程中，结核采集率与行驶速度之间存在显著的临界阈值效应：当矿车速度超过该阈值后，采集率随速度增加呈显著下降趋势，这与常规产能计算公式的预测结果存在本质差异，揭示了两者的相互制约关系。比利时 GSR 公司提出的产能计算方法未充分考虑这一关键科学内涵^[33]，导致其在矿车快速行进工况下会严重高估实际开采产能。深入阐明矿车速度与“水-矿-土”多场耦合作用的内在关联

机制，构建结核“剥离-提升”全过程的力学分析模型，成为解决深海多金属结核高效开采难题的核心突破口。

4. 多金属结核开发过程中的环境低扰动

行进机构与水射流开采对深海底质的耦合扰动，与羽状流萌生及其扩散规律存在显著耦合关联^[34]。在开展履带式海底采矿车行进作业时，履齿通过与深海沉积物的相互作用提供行驶牵引力，履齿扰动深度、履带转速等关键参数均会对海底沉积物产生显著扰动效应^[35]，且在扰动过程中，土体可呈现类固态、“固-液”转化过渡态、类液态3种典型的物理状态^[36]。最新研究成果表明^[37]，不同物理状态的土体对应差异化的羽流转化率，然而现有研究多忽视了沉积物物理状态对“土体扰动-羽流解离转化”过程的调控作用，难以建立扰动强度与环境影响之间的定量关联模型，进而阻碍了低扰动技术体系的构建与完善。

在多金属结核采集过程中，水射流通过冲击、侵蚀深海稀软底质完成结核剥离与提升作业，在此过程中沉积物发生破坏并形成高浓度羽状流^[38]。在传统土体侵蚀理论体系中，流体对土体的侵蚀破坏通常表现为片状侵蚀、大规模侵蚀及表面侵蚀3种典型模式^[39]。而现有研究发现^[38]，由于深海沉积物具有独特的胶结结构特性，在水射流作用下会呈现出团块状解离与细小羽流协同转化的特殊规律，这与传统土体侵蚀破坏过程存在本质差异，导致传统土体破坏理论难以揭示水射流对深海稀软底质的扰动演化机制。与此同时，现有研究多聚焦于土体扰动形态、羽流浓度等宏观环境表征参数^[40]，而对底质扰动过程中稀软土体胶结作用演化、颗粒重组等细-微观动态变化的关注不足，未能从本质上阐明土体扰动破坏的内在机理。这一局限导致无法基于沉积物的射流扰动特性进行作业参数优化与装置结构改进，严重制约了射流作业低扰动控制方法的深入研究与应用。

在传统研究中，水射流对底质的破坏模式与行进机构作用下的土体力学本构模型多被划分为独立研究范畴，但在实际开采作业中，水射流引发的底质扰动会显著改变后部履带作用区域的地形条件与力学特性，因此，深海采矿过程需同步考虑履带行进与水射流开采对底质的耦合扰动效应^[41]。当前，针对履带行进或水射流单因素作用下的底质扰动破

坏机制已开展部分基础研究，但关于双因素耦合作用下的扰动演化机制研究仍较为匮乏，尤其缺乏对深海稀软底质在耦合扰动作用下诱发羽状流的触发机制与演化规律的深入认知。

需要指出的是，深海采矿环境扰动的完整评价并不能仅停留于底质破坏强度、羽流萌生与扩散范围等物理过程层面，还需进一步结合矿区底质参数、生物栖息特征及关键生物类群的响应数据开展综合分析。本文主要从工程角度关注履带行进、水射流开采及其耦合作用下的底质扰动演化机制与低扰动控制方法，以揭示扰动形成、传递与放大的物理过程及其工程调控路径。

四、多金属结核商业化开采中海底采集技术面临的挑战

我国深海多金属结核开采技术装备在向商采阶段跨越的进程中，仍面临多重工程挑战，技术发展的核心导向是兼顾经济效益提升、成本精准管控与海洋生态保护。以履带式矿车为核心载体的深海多金属结核开采装备系统，作为深海采矿工程体系的核心支撑单元，既是实现技术跨越式突破的关键载体，也是制约商业化落地的核心环节。深海多金属结核开采技术装备需具备足够的产能规模与低环境扰动能力，方能回应商采对经济性、成本可控性及环境友好性的核心诉求。在深海多金属结核商采进程中，复杂海底地质环境带来的技术适配性挑战，与矿车性能研究中存在的学科交叉融合不足问题，成为制约其工程化应用的核心所在。

（一）深海地质条件适应性不足

深海多金属结核虽总体分布于深海平原等相对平缓的地区，但在实际作业尺度上仍普遍存在微地形起伏、非均质底质、局部障碍物等问题，对履带式矿车的地形适配能力提出了极高要求。而当前研究多聚焦单一技术模块的局部优化，尚未构建全系统协同的技术攻关体系，主要表现为以下两方面的突出矛盾。一是路径规划技术多聚焦于导航避障的静态识别功能，过度依赖全局路径规划算法，却未充分耦合矿车自身通过性能参数（如地形适应阈值、沉陷阻力特性、牵引性能极限等），导致规划方案与矿车动态作业场景存在显著适配性偏差，难

以有效规避沉陷失稳、地形适配失效等关键风险。二是矿车稳定行进与采集效率提升的研究长期处于学科割裂状态，缺乏参数间的协同联动，动态耦合机理尚未被系统纳入理论建模体系，直接导致现有技术框架下的产能输出水平与商业化目标（如连续作业300 d、干结核产能达150 t/h）存在量级差距。

（二）矿车接地行进与矿石采集动态耦合机制不明

履带式矿车在深海沉积物表面行进与采矿过程中，其接地机构和采集作业机构并非彼此独立，而是形成复杂的动态响应过程。履带接地机构会改变底质表层的应力分布、沉陷特征及界面形态；射流集矿装置的冲击、剥离与吸入过程又会进一步扰动沉积物和结核的赋存形态。正是这种由接地机构和采集作业机构共同诱发的沉积物界面状态演化，构成了矿车行进参数、采集参数与作业性能之间的动态关联，导致行进稳定性与采集效率呈现显著的非线性关联。接地机构和采集作业机构的动态匹配机制是实现系统整体协同优化的核心症结。这就要求射流集矿装置的工作频率、矿石吸入强度等关键参数需动态适配矿车的实时行进速度，以保障单位时间矿石采集量的最大化。同时，行进稳定性作为采集连续性的核心保障，其性能优劣直接影响矿石收集的完整性与设备运行的可靠性。当履带式矿车在稀软沉积物表面行进时，若履带张力调节不当或重心分配失衡，会大幅降低对地形的适应性，造成射流集矿装置与沉积物界面接触不充分，进而导致矿石漏采率升高。当前，对这一动态耦合机制的认知仍不充分，使矿车接地行进系统与矿石采集系统难以实现协同优化，最终成为制约产能规模化提升的重要瓶颈。

（三）沉积物扰动引发海底生态环境风险

在深海多金属结核商采进程中，沉积物扰动诱发的羽流扩散已成为制约其可持续发展的核心环境制约因素。基于现有技术体系，在海底集矿作业过程中，履带式矿车对稀软底质的剪切扰动会引发沉积物颗粒的大规模悬浮，形成的高浓度沉积物羽流具有强扩散性，且因颗粒沉降速率低、洋流输运作用显著，可在水体中长期滞留并向周边海域扩散。羽流经洋流输运不仅会覆盖广域海域，更会造成底层水体悬浮颗粒物浓度与浊度显著升高，进而影响

底栖生物的摄食、呼吸与栖息行为。同时，浊度升高还会削弱原位光学观测与监测系统的有效探测距离，降低环境评估与作业闭环控制的精度。值得强调的是，深海生态系统具有高度脆弱性与极低恢复力特征，其自然恢复周期可达数百年至千年量级，因此，精准控制深海采矿过程中的沉积物扰动强度、构建海底生态环境保护体系，成为深海多金属结核商业化推进过程中亟待突破的国际性环保议题。

在此背景下，深海采矿环境低扰动评价不应仅停留于羽流浓度、扩散范围或侵蚀深度等物理量的表征层面。由于深海生态系统对微小底质扰动高度敏感，低扰动控制必须建立在矿区底质与生物基线数据之上，并以可量化的生态响应指标作为支撑。在底质层面，应结合粒径组成、孔隙率与含水率、有机碳含量（TOC）、氧化还原环境及沉积物剪切强度等参数，系统分析扰动前后沉积物性质变化与重沉积特征；在生物层面，需要基于底栖群落（如微生物、中小型底栖动物、大型底栖动物）的组成结构、丰度与多样性、关键类群栖息地占用比例及恢复速率等指标，评估扰动对生态功能的长期影响。

五、多金属结核商业化海底采集技术突破方向

面向深海多金属结核商业化集矿需求，海底采集技术的发展已不再局限于单一装备性能提升，而是需要加快向智能感知、精准作业、协同控制和绿色低扰动方向演进。未来，履带式海底采矿车作业过程应能够综合识别海床地形地貌、结核丰度分布、底质力学特性、矿车行走状态及环境扰动特征，实现地形、矿物、行走数、采集、环保等参数之间的精准匹配。同时，还需推动采集过程数据共享与全链条通信技术发展，构建矿车、采集系统、输送系统及监测单元之间的实时信息交互与协同调控机制，从而支撑商业开采条件下长周期、连续化、高效化与环境友好型作业。

（一）矿区分级评估及长时连续集矿规划方法

实现履带式海底采矿车在极端环境下的长航程（数月乃至数年）、高可靠性与高产能作业，是推动深海多金属结核资源商业开发的核心挑战。这就需

要构建基于临界阈值的矿区分级评估理论，明确海床条件下行车速度、集矿速率与转弯效率等关键参数的响应规律，建立“履带式矿车性能、路径规划、资源分布”耦合模型，为区块优选与产能预测提供理论支撑。在此基础上，通过完善海床要素驱动的性能评价体系，系统研究海床形貌、底质强度、结核丰度、行进阻力、集矿效率之间的敏感性关系，构建海床底质与矿车性能的多维映射模型，实现复杂环境下作业能力的动态诊断与精准评价。基于上述两方面研究，进一步研发行进与采集系统的实时协同调控模型，融合长航程全局路径规划与差异化参数调节策略，以有效应对底质变化与资源分布不均等复杂工况。上述关键技术的协同推进发展，有助于构建评估、诊断、调控一体化技术链，为深海多金属结核开采的规模化与智能化发展提供系统性的解决方案。

面向商业开采的大范围连续作业需求，还应加强地形地貌参数、矿物赋存参数、行走参数与环境约束参数的综合识别与精准匹配研究，推动矿区评估由静态分区向动态分级转变。进一步依托多源感知数据融合与作业过程信息共享，建立感知、规划、执行、反馈全链条通信与协同决策机制，为长期连续集矿提供支撑。

（二）履带式海底采矿车长周期连续行走关键技术

深海多金属结核商采对长周期连续、高效作业提出了严苛要求，推动重载装备在稀软沉积物复杂力学环境下实现稳定、快速行进成为关键技术突破方向。首先，针对深海稀软底质“固态-液态”转换特性，应深化“履带-稀软底质”耦合力学模型研究，重点揭示胶结破坏、颗粒离散流动演化机制及“固态-液态”转化的临界应变率阈值，为车辆在复杂底质中的力学行为预测提供理论基础。其次，面向重载与长时作业场景，需突破多工况适应性行进稳定性控制方法，深入解析车辆沉陷与翘起幅值的多因素耦合响应机制，建立适用于复杂地形与底质条件下的多自由度动力学模型，实现作业稳定性的动态调控。第三，基于底质强度的动态演化规律，需发展速率优化方法，构建融合速率效应的动态牵引力、阻力分析方程，并结合“固态-液态”转化驱动下的车辆动力学模型，实现速率与阻力的协同优化。最后，

探索低成本、高效能的行驶性能提升路径，提出抑制底质流动性、提升临界剪切速度阈值的工程化方法，满足商业化需求。上述核心技术的协同推进，将为矿车在稀软沉积物中实现长周期连续、高稳定性与高效率作业提供坚实的技术支撑，助力深海多金属结核资源的商业化开采。

针对商采条件下长周期连续作业需求，需系统开展矿车姿态、牵引状态、底质响应及结构健康状态的在线感知与智能诊断研究，建立行走参数自适应调节与故障预警机制，以提升矿车在复杂海床环境中的自主运行能力与长期服役可靠性。

（三）复杂海床形貌下的连续高效采集技术

面向深海多金属结核商采对高产能、连续性 & 广域地形适应性的需求，结合高效、绿色、低能耗原则，复杂海床形貌下连续高效采集技术的发展方向可围绕以下四大核心方向系统推进。一是开展履带式海底采矿车“行进-开采”联动机制研究，重点解析矿车行进姿态（含不良工况）对水力开采流场的扰动规律，揭示水力式结核开采率与矿车行走速度间的约束耦合关系，突破水力开采对矿车行进速度的上限限制，为产能提升提供底层支撑。二是系统解析结核运动特性，综合考虑流场、土体及运动惯性的耦合作用，建立非稳态流场、结核、土体耦合力学模型与数值方法，阐明土体扰动与结核运动的流场能量分配机制，明确“矿车-开采”联动作用下结核高效采集的主控因素，提出结核跨介质临界出土判据，融合土体、装备及作业参数形成产能量化分析方法。三是聚焦长周期作业下的高效低耗目标，开展水力式开采系统减阻降耗技术攻关，包括优化射流喷嘴形式、壁面材质及介质黏滞性等关键参数；同步探索基于新型射流介质（如CO₂）的高效低耗开采前沿技术，提出降阻增效的低耗作业模式。四是通过构建多源数据集、研发智能调控技术，实现作业参数的动态优化调控。

在上述攻关方向的基础上，应进一步构建采集过程中的数据共享与全链条通信机制，强化矿车、采集装置、输送系统及环境监测单元之间的信息互通与实时协同控制能力，形成兼具复杂海床形貌适应性、高效采收、低能耗运行与环境友好特征的绿色采集技术体系。

(四) 履带式海底采矿车扰动下土体“胶结-解离”机理及低扰动开采技术

针对深海多金属结核开采中的“矿车-土”耦合作用机制不明、土体“固态-液态”转换规律模糊及羽流萌生机理缺失等关键科学问题,深海集矿装备扰动下土体胶结、解离机理及低扰动开采技术的发展方向需围绕土体扰动解析、解离运移机制揭示及低扰动开采方法优化三大核心展开。在土体扰动特性研究中,需系统分析履带切入、剪切、拨出全过程中土体的破坏规律;结合不同射流强度下的土体胶结丧失特征与羽流萌生现象,明确土体解离及羽流萌生的临界判据,阐明行走扰动与射流扰动协同作用下的土体解离、羽流萌生耦合机制。在土体解离运移机制研究中,需基于宏观-微观土力学分析方法,揭示“矿车-土”作用过程中土体解离的主导因素与颗粒运移(“固态-液态”转换)的临界扰动条件,建立“土体解离-颗粒运移”的定量表征模型,阐明多场耦合作用下的土体迁移规律。在低扰动开采技术优化层面,需通过射流角度、介质属性等参数调控,揭示高效开采与低扰动的能量分配机制;同步开展履带式矿车重量、履带构型(如仿生履带)及履齿入土方式的优化设计,结合高牵引力行走力学模型,筛选、优化履带扰动关键参数;并考虑“行进-采集”联动效应,最终形成兼顾开采效率与土体保护的深海采矿高效低扰动开采技术体系。

面向商采的环境合规要求,还应将羽流扩散强度、底质扰动范围及环境敏感性指标纳入采集作业实时调控过程,结合原位监测反馈、作业参数共享和全链条通信机制,推动低扰动控制由事后评估向过程主动调控转变。上述方向的协同推进,将为履带式海底采矿车在复杂海床环境下的低扰动、高适应性作业提供理论支撑与技术保障。

六、结语

本文围绕深海多金属结核商采的国家战略需求与行业核心痛点,以履带式海底采矿车这一关键装备为研究核心,深度剖析了多金属结核由试采向商采阶段转变对技术装备的升级需求,全面梳理了该装备在矿车行进理论与方法、开发作业规划、结核开采技术及理论、环境扰动与控制四大维度的国内

外发展现状,明确了我国当前面临的深海复杂地质条件适应性不足、矿车行进与矿石采集动态耦合机制不明、沉积物扰动引发生态环境风险等关键技术瓶颈,进而提出了矿区分级评估与矿车长时连续集矿规划方法、矿车长航程行走关键技术、复杂海床形貌下矿车连续高效开采技术、低扰动开采技术四大重点攻关方向。期望通过履带式海底采矿车的技术创新,提高多金属结核的开采产能、降低环境扰动,为我国构建自主可控的深海矿产资源开发技术体系提供支撑,进而保障国家关键战略金属供应安全、提升全球深海资源开发话语权,推动我国深海矿产开发产业的高质量发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 22, 2025; **Revised date:** March 20, 2026

Corresponding author: Chen Xuguang is a professor from the College of Engineering, Ocean University of China. His major research field is marine engineering. E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

Funding project: The National Natural Science Foundation of China (NSFC) Young Scientists Fund Project (Category A) (52225107); the National Natural Science Foundation of China Project (U25A6020)

参考文献

- [1] 左更. 我国稀缺性战略金属资源保供稳供问题的思考——以钽、铌、铬、钴为例 [J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(9): 4-13, 23.
Zuo G. Thinking on the problem of stable supply of scarce strategic metal resources in China—Take tantalum, niobium, chromium and cobalt for example [J]. Natural Resource Economics of China, 2023, 36(9): 4-13, 23.
- [2] 段俊, 徐刚, 汤中立, 等. 我国钴资源产业发展现状、问题与对策 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 98-107.
Duan J, Xu G, Tang Z L, et al. Analysis of development of China's cobalt industry: Current status, problems and countermeasures [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 98-107.
- [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] 王国荣, 黄泽奇, 周守为, 等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 1-12.
Wang G R, Huang Z Q, Zhou S W, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 1-12.
- [5] 周守为, 李清平. 开发海洋能源, 建设海洋强国 [J]. 科技导报, 2020, 38(14): 17-26.
Zhou S W, Li Q P. Developing marine energy and building a marine power [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14): 17-26.

- [6] 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): 1-9.
Yang J M, Liu L, Lyu H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 1-9.
- [7] 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.
- [8] Xu Z Y, Liu Y S, Yang G S, et al. Research on contact model of track-soft sediment and traction performance of four-tracked seabed mining vehicle [J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 111902.
- [9] 吴鸿云, 高宇清, 陈争. 富钴结壳抗剪强度试验研究 [J]. 采矿技术, 2013, 13(6): 35-36, 84.
Wu H Y, Gao Y Q, Chen Z. Experimental study on shear strength of cobalt-rich crust [J]. Mining Technology, 2013, 13(6): 35-36, 84.
- [10] 吴鸿云, 陈新明, 高宇清, 等. 西矿区深海稀软底质剪切强度和贯入阻力原位测试 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1801-1806.
Wu H Y, Chen X M, Gao Y Q, et al. *In-situ* shearing strength and penetration resistance testing of soft seabed sediments in western mining area [J]. Journal of Central South University, 2010, 41(5): 1801-1806.
- [11] 任玉宾, 杨庆, 王胤, 等. 典型深海软黏土触变特性与微观结构探究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1295-1302.
Ren Y B, Yang Q, Wang Y, et al. Experimental study on thixotropic characteristic and microstructural evolution of representative deep-sea soft clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1295-1302.
- [12] Mathai T, Rajarama K N, Kumar S, et al. Geotechnical aspects of clayey sediments off badagara on the Kerala coast, India [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, 30(2): 180-193.
- [13] Bekker M G. Land locomotion on the surface of planets [J]. ARS Journal, 1962, 32(11): 1651-1659.
- [14] Liu X L, Chen X G, Wang L, et al. A block failure model for deep-sea sediment between grousers of deep-sea mining vehicles based on elasto-plastic theory [J]. Applied Ocean Research, 2024, 145: 103921.
- [15] Einav I, Randolph M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(14): 1991-2016.
- [16] Gao Y F, Yin D S. A full-stage creep model for rocks based on the variable-order fractional calculus [J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 95: 435-446.
- [17] Agarwal S, Karsai A, Goldman D I, et al. Surprising simplicity in the modeling of dynamic granular intrusion [J]. Science Advances, 2021, 7(17): eabe0631.
- [18] Wei D B, Cao H D, Li W Q, et al. Research on the shear stress and microscopic deformation mechanism of deep sea sediments under the action of tracked miner [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2025, 43(7): 1263-1280.
- [19] Guo X S, Liu X L, Zhang H, et al. Improved predictive model for the strength of fluidized seabed sediments with rate effect characteristics by full-scale spherical penetrometer tests [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105535.
- [20] Sha F, Li Z Q, Chen X G, et al. A review on path planning and intelligent navigation of deep-sea mining vehicle [J]. Green and Smart Mining Engineering, 2026, 3(1): 1-15.
- [21] 朱祖超, 宿向辉, 夏建新, 等. 深海矿产资源运输与装备发展现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 59-68.
Zhu Z C, Su X H, Xia J X, et al. Current status and prospects on deep-sea mineral resources transportation and equipment development [J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 59-68.
- [22] 杜培军, 陈云浩, 方涛, 等. 工矿区陆面演变动态监测中的遥感信息处理 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 249-253.
Du P J, Chen Y H, Fang T, et al. Remote sensing information processing methods for dynamic monitoring of terrestrial surface evolution in mining areas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 249-253.
- [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 J B, Wang Y J, Liu L, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 92-102.
- [24] 陈旭光, 寇海磊, 牛小东, 等. 深海水下技术装备发展研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 1-14.
Chen X G, Kou H L, Niu X D, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 1-14.
- [25] 褚春鑫. 露天矿采矿车辆调度算法研究及系统设计 [D]. 秦皇岛: 燕山大学(硕士学位论文), 2015.
Chu C X. Research of mining vehicle scheduling algorithm and system design on the open pit mine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University (Master's thesis), 2015.
- [26] 陈鹏, 樊蓓蓓. 基于改进JPS算法的深海采矿车路径规划 [J]. 计量与测试技术, 2024, 50(12): 71-74.
Chen P, Fan B B. Path planning of deep-sea mining vehicles based on improved JPS algorithm [J]. Metrology & Measurement Technique, 2024, 50(12): 71-74.
- [27] 李维科. 简析全球深海采矿发展现状及挑战 [EB/OL]. (2023-12-20)[2025-12-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/x5qNJOCOKpIrfUiHqCTIwQ>.
- [28] 刘茜茜. 流体-颗粒体耦合作用机理及其海底工程应用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学(博士学位论文), 2023.
Liu X X. Study on the interaction mechanism of fluid-particle coupling and its application in marine engineering [D]. Qingdao: Ocean University of China (Doctoral dissertation), 2023.
- [29] 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.
- [30] Ren Y W, Su X H, Wang H Y, et al. Characterization of particle motion of a double-row hydraulic sluicing collector for deep-sea mining [J]. Ocean Engineering, 2024, 309: 118584.
- [31] Global Sea Mineral Resources. Small-scale testing of nodule col-

- lector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact [R]. Zwijndrecht: Global Sea Mineral Resources, 2018.
- [32] 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 M H. Deep-sea solid mineral resource development [M]. Changsha: Central South University Press, 2015.
- [33] Zhang X, Wu Z Q, Ma N, et al. Experimental analysis of abyssal sediment erosion by a traveling double-row jet [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 313: 119474.
- [34] 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.
- [35] Ma W B, Liu J, Cheng Y R, et al. Study on mesoscopic adhesion characteristics of deep-sea sediment for self-cleaning mechanism of bionic grouser [J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 131: 103451.
- [36] 刘俊. 流固耦合作用下颗粒体细观分析 [D]. 南京: 东南大学 (硕士学位论文), 2017.
Liu J. Meso-analysis of granule material under fluid-solid coupling [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2017.
- [37] Wu Z Q, Zhang X Z, Jin S, et al. Analysis of sediment disturbance and plume dispersion characteristics induced by deep-sea polymetallic nodule hydraulic collectors [J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 156: 104462.
- [38] Sharma R, Nath B N, Sankar S J. Monitoring the impact of simulated deep-sea mining in central Indian Basin [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2005, 23(4): 339–356.
- [39] Mazurek K A, Rajaratnam N, Segoo D C. Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127(7): 598–606.
- [40] Zhang F P, Chen X G, Wei J K, et al. Experimental investigation of the inhibition of deep-sea mining sediment plumes by polyaluminum chloride [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(1): 91–104.
- [41] 陈旭光, 栾鲁宝, 张宁, 等. 深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展 [J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1173–1190.
Chen X G, Luan L B, Zhang N, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its environmental effects [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1173–1190.