

# Research on Deep-sea Mining Vehicles

Penghui Duan Zhi Yang Ziqiang Han

Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan, Hunan, 411101, China

## Abstract

With the continuous exploitation of land resources, the rare metal resources on land are constantly decreasing. Countries are starting to focus their resource strategies on the deep sea, which is rich in rare metal deposits, and the technology of deep sea mining is also constantly improving. This paper provides a review of the research techniques for four types of mining vehicles: polymetallic nodule mining vehicles, cobalt rich crust mining vehicles, polymetallic sulfide mining vehicles, and deep-sea rare earth mining concept vehicles. Among them, the polymetallic nodule mining vehicle focuses on the key mechanical issues, dynamic traction force, lifting methods and other technical research involved; The technical research on the guidance and detection performance, walking path control, obstacle crossing ability, and the relationship between traction coefficient of cobalt rich crust mining vehicles were summarized in detail; The development history, technical characteristics, and performance in practical applications of polymetallic sulfide mining vehicles are summarized; The concept vehicle for deep-sea rare earth mining focuses on its development history, current research achievements, and future development directions.

## Keywords

polymetallic nodule mining vehicle; cobalt-rich crust mining vehicle; polymetallic sulfide mining vehicle; deep-sea rare earth mining concept vehicle

## 深海采矿车研究综述

段鹏辉 杨智 韩自强

湖南电气职业技术学院, 中国·湖南湘潭 411101

## 摘要

随着陆地资源的不断开采, 陆地稀有金属资源在不断减少, 各国开始不断将资源战略瞄向稀有金属蕴藏丰富的深海, 深海采矿的技术也在不断提升。论文针对多金属结核采矿车、富钴结壳采矿车、多金属硫化物采矿车、深海稀土采矿概念车四种采矿车的研究技术进行综述。其中, 多金属结核采矿车重点概述了其涉及的关键力学问题、动态牵引力、提升方式等技术研究; 富钴结壳采矿车重点概述了导向探测性能、行走路径控制问题、越障能力与牵引系数之间的关系等技术研究; 多金属硫化物采矿车概述了其发展历程、技术特点及其在实际应用中的表现; 深海稀土采矿概念车重点介绍了其发展历程、目前研究的成果、未来发展的方向。

## 关键词

多金属结核采矿车; 富钴结壳采矿车; 多金属硫化物采矿车; 深海稀土采矿概念车

## 1 引言

深海采矿车作为现代海洋工程的重要组成部分, 近年来在全球范围内得到了广泛的研究和应用。深海采矿车 (Deep Sea Mining Vehicle, DSMV) 在深海资源开发中扮演着至关重要的角色, 其技术进步直接关系到深海矿产资源的高效、安全和可持续开发。

深海采矿车的研究始于 20 世纪末, 随着深海技术的

发展, 各国纷纷投入大量资源进行深海采矿车的研发。例如, 加拿大 TMC 公司在 2022 年完成了深海采矿车的研制, 并在 NORI-D 矿区完成了 4300 米级的采集提升试验, 采集效率达到 86.4t/h。此外, 中国在深海采矿车的研发上也取得了显著进展。上海交通大学自主研制的“开拓二号”深海重载作业采矿车在 2024 年成功完成了海试, 最深达到了 4102.8m, 创下了多项纪录。

深海采矿车的技术挑战主要集中在复杂海底地形的高机动行进、多矿类复合钻采以及深水重载作业等方面。为了克服这些技术难题, 研究人员开发了多种创新技术, 如智能电驱动系统、高承载光电复合脐带缆以及重载布放回绞车等。这些技术不仅提高了采矿车的作业效率和安全性, 还显著提升了其在复杂海底环境中的适应能力。

深海采矿车的研究不仅限于技术层面, 还包括对深海

**【基金项目】**湖南省教育厅科学研究优秀青年基金项目“深海结核壳多轮独驱电传动采矿车差速转向研究”(项目编号: 21B0860)。

**【作者简介】**段鹏辉(1988-), 男, 中国湖南娄底人, 硕士, 工程师, 从事绿色制造研究。

环境的监测和保护。例如,深海采矿车与柔性运输软管相连接时,其动态特性与环境监测成为研究的重点之一。此外,深海采矿车的动力学特性研究也包括了对海底沉积物特性的牵引分析、海底地形对采矿车通过性的影响分析以及采矿车的运动控制研究等。

总之,深海采矿车的研究是一个多学科、多技术领域的综合工程,涉及机械工程、海洋工程、材料科学、环境科学等多个领域。随着技术的不断进步和应用的不断拓展,深海采矿车将在未来的深海资源开发中发挥越来越重要的作用。

## 2 深海采矿车

### 2.1 多金属结核采矿车

1990年,大洋多金属结核资源勘探开发项目被列为国家长远发展项目。经过30多年的发展。针对多金属结核矿区地势相对平坦、底质稀软、赋存深度深等特点,国内外众多团队开始了长期探索和研究。深海多金属结核采矿车技术研究可分为3个阶段:实验室研究、湖试和海上试验阶段,对采矿车单体功能与整车研究与开发。针对深海履带式采矿车系统所涉及的关键力学问题和研究进展,综合考虑深海稀软底质力学特性,提出了进一步完善的动态牵引力模型,并建立采矿车牵引性能与形式稳定性分析方法<sup>[1]</sup>;为提升有可能发展成为高效的深海多金属结核矿物输送模式,综合考虑机动性、干矿输送能力、部分回收作业效率等八个方面,建立了多维度评价因素的数学模型及适应性评价体系<sup>[2]</sup>。水力提升方式针对水下垂直提升系统更适合深海多金属结核商业开采。提出了动态牵引力计算模型,并能展现动态牵引力的周期性和波动性<sup>[3]</sup>。针对矿物粗颗粒浆体在提升泵内的流动问题,提出了一种新型粗颗粒—均质浆体两相流动模型<sup>[4]</sup>。为提高集矿效率,韩国MineRo II号采用对称式结构,即在两侧布设两个相同的机械和液压系统模块,便于调节集矿宽度,以提高集矿效率<sup>[5]</sup>。

### 2.2 富钴结壳采矿车

富钴结壳是含量非常高的矿产,它以一种“壳状”沉积广布于水下海山上,呈层叠状覆盖,厚度为20~200mm。在低纬度海域深1~3m的水下平顶海山的斜坡上发育最好,而在平坦表面不发育。

针对采矿车微地形导向探测性能差,并且不能检测同时到达不同方向的回波问题;构造声纳圆形平面阵以增强水平垂直分辨率,同时提出圆阵波束形成的快速算法来提高探测系统的实时性。在采矿车的行走路径控制问题方面,提出了包括动力学模型、避障路径的优化方案设计及路径跟踪控制模型的建立的一套完整的解决方案<sup>[6]</sup>。针对富钴结壳微地形特点和物理特性,对该情形下的采矿车提出了急需解决的关键技术问题和发展方向。从动力学角度建立四履带采矿车的越障模型,并分析了越障过程中牵引系数的变化情况,

得出了越障能力与牵引系数之间的对应关系<sup>[7]</sup>。针对目前采矿车在采矿时无法达到规划时间和路程代价综合最优,提出一种改进的跳点搜索算法作为全局路径规划算法。

近年来,中国在富钴结壳采矿装备的研发方面取得了显著进展。依托国家863、国家大洋专项等多个项目的支持,研究人员在声学测厚、四履带行走、自适应剥离与采集等方面实现了重大突破,并成功研制出国际首台4000米级深海富钴结壳采矿装备(车)。

此外,长沙矿山研究院海洋采矿所基于深海富钴结壳规模取样测试装置的技术成果,计划于2018年首次在西太平洋的我国富钴结壳合同区进行现场声学测厚、行走、破碎等试验。该装置设计深度为4500m,长4.3m,宽2.3m,高1.6m,在南海海域2500m水深开展了海上试验,并获取了富钴结壳矿石样品,验证了其有效性。

深海富钴结壳采矿车具备多种关键技术和功能。首先,它采用履带行走方式,确保采样机能适应海底崎岖不平的地形。其次,采矿车通过破碎头破碎并剥离富钴结壳矿石,并利用泵吸方式将矿石收集至料仓。此外,采矿车还配备了基于导航定位系统的精准控制下的定轨迹行驶和基于声探设备的精确引导下的自适应掘采作业能力。

中国科学家完成了深海采矿车与载人潜水器的首次联合作业,使用了中国自主研发的富钴结壳采矿车、“深海勇士”号载人潜水器、光电缆和绞车等多台国产设备,在水深1300多米的海山区开展了采样机海底行走、矿石切削和环境影响调查。

长沙矿山研究院有限责任公司申报的“一种深海富钴结壳矿区采矿实验车”荣获2022年湖南专利奖一等奖,涉及采掘、集矿、行走等多项深海关键技术。这一成就标志着我国在深海富钴结壳采矿领域的技术实力得到了国际认可。

未来,随着技术的不断进步和经验的积累,深海富钴结壳采矿车将在更深层次、更大规模的海域进行试验和应用。同时,科研团队将继续优化采矿车的设计和性能,解决薄矿层“采掘与集矿一体化”的问题。这将为我国深海资源的开发提供强有力的技术支持。

### 2.3 多金属硫化物采矿车

多金属硫化物采矿车是现代深海采矿技术的重要组成部分,其设计和研发对于海底矿产资源的高效、安全开采具有重要意义。论文将综述多金属硫化物采矿车的发展历程、技术特点及其在实际应用中的表现。

多金属硫化物采矿车的发展可以追溯到20世纪末,经过数十年的技术积累和创新,中国在这一领域取得了显著进展。从最初的实验室研究到湖试和海上试验,中国的多金属硫化物采矿车技术经历了多个阶段的发展。

多金属硫化物采矿车技术特点:

结构设计:多金属硫化物采矿车通常采用履带式设计,以适应复杂的海底地形。例如,中国首台多金属硫化物采矿

试验车长 8.2m、宽 3.9m、高 3.6m，重达 21t，配备 4 条履带和多种功能模块。

**功能集成：**现代采矿车不仅承担矿物的破碎与收集任务，还集成了自主行走、路径规划、物料输送等多种功能。例如，“开拓二号”采矿车在海南三亚崖州湾近海完成了系列功能性试验，达到了既定研究目标。

**智能化与自动化：**随着科技的进步，现代采矿车逐渐向智能化和自动化方向发展。例如，无人采矿机车采用“5G+人工智能”技术，实现了远程无线遥控和实时数据采集。

**环保与节能：**电动化是采矿车发展的另一大趋势。孚能科技提供的锂电解决方案，使得采矿车在安全可靠的同时，更加节能高效。

多金属硫化物采矿车作为深海采矿技术的核心装备，其发展不仅推动了海底矿产资源的高效开发，还促进了相关技术的创新和应用。未来，随着智能化、电动化和环保化技术的进一步发展，多金属硫化物采矿车将在全球深海采矿领域发挥更加重要的作用。通过不断的技术创新和实践应用，我国在多金属硫化物采矿车领域取得了显著成就，为全球深海矿产资源的开发提供了有力的技术支持。

## 2.4 深海稀土采矿概念车

深海稀土资源的开发是全球科技革命的重要组成部分，尤其是在新能源和高科技产业中，稀土元素的应用日益广泛。然而，深海稀土资源的开采面临着技术、环境和法律等多方面的挑战。

深海稀土资源的开发始于 2012 年，英国南安普顿大学提出了深海稀土采矿的概念设计，采用绞吸式履带挖掘采矿车进行深海富稀土沉积物的采集，并在海底进行稀土元素的冶炼。随后，日本在南鸟礁周边海盆中进行了深海稀土开发利用研究，提出了与多金属结核采矿模式相类似的深海稀土资源开发理念。

近年来，中国在深海采矿技术方面取得了显著进展。2024 年，中国五矿集团所属长沙矿冶研究院牵头研发的全球首台套 6000 米级智能电驱深海重载采矿车辆平台通过了综合验收。该车辆平台具备高机动先进技术和多矿类复合开采技术，能够实现复杂海底地形的安全、稳定行进。此外，上海交通大学研制的“开拓二号”深海重载采矿车成功完成了海试，布放作业水深首次突破 4000m，并实现了多项重大技术突破。这些技术突破为深海矿产商业化开采提供了重要

的科技和装备支撑。

深海采矿对环境的影响一直是国际社会关注的焦点。深海采矿比陆地采矿对环境的影响更小，但仍然需要严格的技术和管理措施来保护海洋生态环境。国际海底管理局 (ISA) 正在制定深海采矿法规，计划在 2025 年完成这项工作。这些法规将规范深海资源的勘探和开发活动，确保其在合理利用资源的同时保护海洋环境。

未来，深海稀土采矿技术将继续向生态化、绿色化方向发展。随着技术的不断进步和法规的完善，深海稀土资源的开发将更加高效和环保。同时，深海采矿技术的发展也将推动相关产业的创新和升级，为全球新能源和高科技产业提供重要的资源保障。

## 3 结论

在深海采矿领域，多金属结核采矿车、富钴结壳采矿车、多金属硫化物采矿车以及深海稀土采矿概念车的发展，标志着中国在深海资源开发技术上的重大突破和进步。这些采矿车的研制和应用，不仅展示了中国在深海采矿技术上的自主创新能力，还为全球深海资源的合理开发和利用提供了重要的技术支持。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 张浩,陈小平,汤明刚,等.深海多金属结核矿物输送模式特征与适应性研究[J].矿冶工程,2023,43(4):32-38.
- [3] 宋宇恒.深海多金属结核履带式集矿车牵引力研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [4] 邹伟生,卢勇,李哲旻.深海采矿提升泵的数值模拟分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(6):59-63.
- [5] HONG S, KIM H-W, CHOI J, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3. Shanghai, China: ASME, 2010:75-86.
- [6] 王强,鄂加强.海底钴结壳采矿车微地形导向声纳探测的圆形阵列设计[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):953-959.
- [7] 刘伟.深海富钴结壳四履带采矿车底盘研究与设计[D].长沙:长沙矿山研究院,2018.