基于闭式循环举升的海底矿产绿色高效开采模式探讨

王永军[1]，李文博[2]，张浩[1,2]，胡文韬[1,2]，高飞农[1]，卞鑫[1,2]，葛玖浩[3]，潘盼[4]，孟宇[5]

（1. 中国船舶科学研究中心 无锡 214082；2. 深海技术科学太湖实验室 无锡 214082；
3. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106；4. 中天科技股份有限公司 南通 226000；
5. 浙江恒安泰石油工程有限责任公司 舟山 316000）

摘要：深海矿产资源开发是海洋开发的重要方向，水力提升及气力提升面临尾水排放引发的羽流污染风险、矿浆体积浓度受限导致的经济性瓶颈等难题。文章梳理了当前海底采矿在环境友好性、经济性及作业可靠性等方面的核心因素特征，提出以双通道立管为核心的闭式循环系统方案；在此基础上，针对双通道立管的材料结构、多相流稳定性与系统集成控制，以及半封闭式中继站的耐压密封等关键技术难点分别进行了分析。研究表明，该模式通过构建封闭循环回路实现了举升介质重复利用，消除了尾水直排带来的羽流问题；采用微泡沫介质能降低管内矿浆平均密度与流动阻力，显著降低了输矿的单位运行能耗。闭式循环举升作业模式能够有效兼顾深海采矿的环境友好性与经济性要求，是未来海底矿产绿色高效开发极具前景的发展方向。

关键词：海底矿产资源开发；闭式循环举升作业模式；双通道立管；半封闭式中继站；举升介质

中图分类号：P751 **文献标识码：**A **文章编号：**1005-9857（2026）07-0052-12

Study on a Green and Efficient Mining Mode for Seabed Minerals Based on Closed-cycle Lifting

WANG Yongjun[1]，LI Wenbo[2]，ZHANG Hao[1,2]，HU Wentao[1,2]，GAO Feinong[1]，BIAN Xin[1,2]，GE Jiuhao[3]，PAN Pan[4]，MENG Yu[5]

（1. China Ship Scientific Research Center，Wuxi 214082，China；2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science，Wuxi 214082，China；3. College of Automation，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 211106，China；4. Zhongtian Technology Co.，Ltd.，Nantong 226000，China；5. Zhejiang Heng'antai Petroleum Co.，Ltd.，Zhoushan 316000，China）

Abstract：Deep-sea mineral resource exploitation constitutes a crucial component of marine development. Traditional hydraulic and pneumatic lifting technologies are confronted with prominent challenges，including

收稿日期：2026-04-03；**修订日期**：2026-06-16

基金项目：江苏省前沿技术研发计划“深海矿物 / 光电一体化混输柔性管缆研制与多模态健康监测技术研发”（BF2025015）；上海市科技计划项目“大深度粗颗粒矿物安全输送关键技术研究及核心样机研制”（24DZ3100100）.

作者简介：王永军，研究员，博士，研究方向为深海装备总体

通信作者：张浩，高级工程师，硕士，研究方向为深海资源开发装备

plume pollution risks induced by tailwater discharge and economic limitations stemming from the restricted volumetric concentration of ore slurry. To address these bottlenecks, this study proposes a "closed-cycle lifting operation mode" oriented toward green and high-efficiency development requirements. The core influencing factors of deep-sea mining, such as environmental friendliness, economic efficiency and operational reliability, are systematically reviewed. Subsequently, a closed-cycle system scheme centered on dual-channel risers is proposed. Additionally, key technical challenges are analyzed in depth, covering the material and structural design of dual-channel risers, multiphase flow stability, system integrated control, as well as the pressure resistance and sealing performance of semi-enclosed relay stations. The research results demonstrate that the proposed mode establishes a closed circulation loop to realize the recycling of the lifting medium, thereby eliminating plume pollution caused by direct tailwater discharge. Meanwhile, the adoption of micro-foam medium effectively reduces the average density and flow resistance of ore slurry in pipelines, leading to a significant reduction in unit energy consumption for ore transportation. The closed-cycle lifting operation mode proposed in this paper can effectively meet both environmental and economic requirements of deep-sea mining, and represents a promising direction for the green and high-efficiency exploitation of deep-sea mineral resources in the future.

Keywords: Seabed mineral resource development; Closed-cycle lifting operation mode; Double-channel riser; Semi-enclosed buffer station; Lifting medium

0　引言

深海开发作为中国深海战略“三部曲”中的最后一步，旨在面向深海资源开采，根本目标在于服务人类发展。海底矿产资源开发作为迄今人类可预见的最大规模的深海活动，其技术先进性与战略价值极为突出。随着新能源产业的不断发展，铜、钴、镍等金属资源需求量日益增加，而陆地矿藏经长期开发已日趋枯竭[1]。当前，典型的海底矿产资源包括深海多金属结核、深海多金属硫化物、富钴结壳和深海富稀土沉积物等。其中，结核、硫化物、结壳类矿物富含铜、钴、镍等重要工业金属，硫化物中还含有金、银等贵金属。而深海稀土富集中稀土元素、重稀土元素[2]，是工业发展不可或缺的“维生素”。我国目前已申请获得 5 个优先开采权区块，总面积达 23.5 万 km^2[1]，但深海采矿装备研发以及总体技术体系研究起步相对较晚，至今尚未形成符合我国基本国情的详细技术体系。随着我国海底矿产资源开发的不断深入，以及国际社会对“绿色开发”要求的日益提高，“绿色、高效”已成为我国海底矿产资源开发的主旋律。

20 世纪 60 年代，西方国家已开始针对多金属结核开发进行研究[3]，相继提出链斗提升作业模式[4-5]、自动潜浮穿梭采矿模式[6]、水力提升作业模式[7]、气力提升作业模式[8-9]及特殊介质举升作业模式[10]。其中，气力提升、水力提升以及特殊介质举升均可归为管道提升模式。水力提升作业模式是指以海水作为矿物提升介质，实现矿物连续提升的作业模式，也是目前国际上公认的最具备推广潜力的作业模式。从深海采矿管道提升作业模式出发，海底矿产资源的开发必然包括采集系统、输送系统、采矿船（含粗选系统），以及转储系统等。其中，采集系统、输送系统和采矿船是强耦合关系，而采矿船和转储系统是另一强耦合关系。本文重点针对采集系统、输送系统和采矿船之间的作业模式展开讨论，转储系统与转储方案不作重点研究。

海底矿产资源主要集中在公海区域，其开发方案涉及全人类环境保护问题。因此，绿色开发一直是海底矿产资源开发的主旋律。在欧盟资助下，挪威政府曾先后启动了蓝色矿冶与蓝色结核项目[11]，对整个深海采矿作业模式开展了系统性研究，形成了较为详细的设计方案，并于 2024 年 1 月批准了

深海采矿商业项目。然而，由于环境保护组织的反对，挪威政府不得不暂停了深海采矿发展计划。因此，探索绿色环保的海底矿产资源开发方案是未来实现商业化必须研究的课题。此外，深海采矿虽属高成本、高风险项目，但受陆地矿产资源开发成本的制约，以及深海矿产资源不同区域的赋存状态差距较大，并未像深海油气行业那样表现出高回报的特征。因此，研究海底矿产资源高效开发模式是提升其经济性的必经之路。本文在已有研究基础[10]之上，融合深海油气钻探相关技术，提出构建闭式循环矿物举升作业模式具有环境友好性与作业高效性，并针对这一模式开展了总体性研究工作。

本文立足系统总体集成，针对海底矿产资源绿色高效开发模式的研究逻辑结构安排如下。首先，从环境友好性、经济性及作业可靠性 3 个维度，系统剖析了当前海底采矿面临的核心制约因素，阐明模式创新的必要性；其次，基于闭式循环理念，提出以双通道立管和半封闭式中继站为核心的举升作业总体方案，并对举升介质的特殊需求进行分析；再次，围绕双通道立管与半封闭式中继站两项关键装备，逐一深入探讨其设计方案与技术难点；最后，总结研究结论，并对未来深海采矿技术在智能化、极限可靠性及环境友好性方面的发展方向进行展望。

1 海底矿产资源开发面临的挑战

海底矿产资源开发是目前人类面向深海、涉及水深最深且规模体量最大的深海工程，其走向商业化仍亟须解决诸多问题。其中，最为突出的是环境友好性问题。海底矿产资源作为公海资源，由国际海底管理局（ISA）统一管理，各国在制定开发方案时均需开展环境影响评估并形成专项报告。同时，海底矿产资源作为陆地矿产资源的补充供给，其开发成本是决定其开发方案是否具备商业价值的根本因素，若所制定的开发方案具有较高的运营成本，则无法成功实现商业化。深海采矿工程包含采集系统、输送系统以及采矿船，各系统内均存在关键设备与技术瓶颈。同时，系统间的强耦合关系使系统间指标匹配性存在矛盾，可能导致无法最大化各系统的性能优势，从而造成系统单位运行能耗偏高。以上内容是探讨海底矿产绿色高效开采模式需要考虑的重要因素。

1.1 环境友好性

海洋是全人类共同的财富，其环保问题一直是国际社会关注的焦点。因此，国际海底区域的环境保护要求一定会越发严苛[12]。2023 年 9 月，《〈联合国海洋法公约〉下国家管辖范围以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》开放签署[13]，确立了风险预防、生物多样性养护及可持续发展等基本原则[14]。同时，ISA 已经针对部分环境因素开展控制阈值的法律化工作，当前涉及的内容包括毒性、浊度、沉积物再沉降、水下噪声以及光污染[15-16]。有研究认为，海底矿产资源开发进入商业化阶段仍需要 6 ～ 8 年[16]，但随着国际相关法规的不断优化，海底矿产资源开发必将面临法规发展超前于装备技术发展的现状，这就需要立足未来思考更加符合环保要求的海底矿产资源开发新模式。

根据 ISA 已公布的 5 项环境控制阈值因素，当前重点关注的内容包括毒害问题、沉积物扰动与羽流形成—扩散问题、噪声源与强度及水下光学成像等。其中，讨论最为热烈的是沉积物扰动与羽流形成—扩散问题，具体体现在以下两个方面：①采集系统在矿物采集（收集）作业过程中对海底表层沉积物的扰动与再沉积；②矿物输送过程中，尾水排放在近海底区域形成的尾水排放羽流以及大面积扩散。这两个作业节点均会对深海采矿作业周期中的浊度以及沉积物再沉积造成影响[17]。其中，采集系统所造成的影响主要体现在羽流浊度高、沉积物再沉积厚度大，但羽流扩散较尾水排放影响面积小。尾水排放所造成的影响则主要体现为羽流浊度较低、沉积物再沉积厚度较小，但羽流扩散较远、影响面积较大。

毒性评价主要考虑深海采矿作业过程所涉及材料的无毒无害性，其并不影响深海采矿作业模式的建立。声污染与光污染与此类似，主要面向部分设备的噪声控制指标和光学指标进行界定，均属于设备级控制因素。因此，从环境友好性角度出发，羽流的形成原因与规模应成为深海矿物开发模式建立的

重要评价因素。

1.2　经济性

海底矿产资源开发作为海洋经济的重要板块，研究其总体作业模式时需考虑经济性因素。通过对比国内外陆地开采与海底开采的技术经济评价结论发现，以图木尔陶勒盖多金属矿及法索里多金属矿为例，技术经济评价模型评估[18-19]显示其投资回报周期为 8 ～ 10 年。海底矿产资源通常丰度较高，投资回报周期通常较短[20]，一般小于 7 年。根据海底矿产资源经济性评价敏感性分析可知[20]，年矿石产量是影响海底矿产资源开发经济性的最重要因素，经营成本次之，开发装备研制成本对经济性影响最弱。

矿石年产量是影响海底矿产资源开发经济性的最重要因素[20]，主要与采集系统、输送系统的作业效率、全年有效作业时长、矿区矿石丰度有关。根据对国内矿物开发装备的研制情况调研，从装备性能参数角度考虑，当前限制产能的主要因素是输送系统的输送效率问题。现有管道式提升方案以水力提升为主，水力离心泵是矿石举升的主要动力源。由于离心泵内部流道复杂，为克服矿石沉降速率，需要将举升速度控制在 4 m/s 以上，当内部矿浆体积浓度超过 12%时，离心泵导叶区将出现流动形态恶化现象[21]。考虑到采集系统的采集效率可以通过提高采矿车单机能力或增加并联作业采矿车的方式实现提升，而矿物输送仅可建立一条独立通道。因此，输送矿浆体积浓度是限制矿物开发产能的重要因素，如何提升矿物举升效率将是未来提高海底矿产资源产能的核心课题。

海底矿产资源运营成本主要包括能源消耗、设备折旧成本、环境养护成本[13]等。环保问题一直是海底矿产资源开发最关注的内容，因此，在开发活动过程中的环境保护以及开发后的环境修复与养护成本将是未来运营成本的关键组成部分。随着 ISA 对海底矿产资源开发活动管理进一步合规化以及环境保护要求的不断提高，未来的开发作业模式必须在环保方面具有超前意识，以满足可能即将面临的更加严苛的环保要求。因此，在评估项目开发技术因素时，绿色环保与经济性评价是不可分割的，在确定总体作业模式时，应重点考虑此方面因素。

1.3　作业可靠性

海底矿产资源开发涉及的作业工艺复杂、作业环境恶劣、事故影响巨大。因此，在开展总体作业模式研究时，应重点考虑宏观工艺的可行性与可靠性因素（表 1）。例如，减少海上原位安装作业工艺的复杂性与时间占比等。

表 1　总体模式评价思路

Table 1　Overall evaluation approach for the operation mode

因素	内涵
安装便捷性	减少或规避海底对接安装作业工艺，尽可能实现陆地安装或水下简单对接工艺
风险影响性	应做到重大风险不存在，一般风险不常现，小风险可控
作业连续性	应具备良好的工艺连续性，降低检修节点，延长检修周期等

传统的矿物开发方案，利用吊放钢缆完成采矿车向海底的布放，再通过遥控潜水器（ROV）辅助完成柔性管道与采矿车之间的水下对接安装。此类作业工艺的水下安装作业相对复杂，并且安装质量较难控制。若将柔性管道与采矿车在采矿船上完成预安装，可降低水下作业风险，并提高安装的可靠性。

传统的单通道管道提升方案，通常采用海底容积泵或多级离心泵实现矿浆的举升动力传输。加拿大鹦鹉螺矿业公司制造了面向海底矿产资源开发的隔膜泵[1]，而欧盟国家[22-23]及我国都开展了离心泵方案研究[23-24]。此类泵送设计方案，泵体需要置于海底或者千米级水深，当泵体出现堵塞或动力下降，需要对泵体检修时，则要将中继站与采矿车脱开，将硬管系统回收才能拆除泵体，开展维修，这对矿产资源开发的连续性是不利的[11]。

此外，在开展总体作业模式分析时，应考虑水下作业风险的影响范围。例如，脐带缆的水下湿插拔作业技术，目前尚无 6 000 m 水深的工程应用案例，其一旦出现供电系统故障，将造成水下装备的整体瘫痪，属于重大风险因素。此类对整个系统工程可能造成重大影响的风险点，在设计过程中应尽量予以规避。

上述分析表明，环境友好性、经济性与作业可靠性三大挑战相互交织，已成为制约海底矿产资源商业化开发的核心因素。通过系统梳理既有开发模式可知，尽管水力提升因其输送连续性优势被公认为最具推广潜力，但现有方案均未能突破开放式输送技术框架的固有局限：尾水排放引发的羽流污染、矿浆浓度难以突破 12%的浓度上限，以及水下泵维护困难等可靠性问题仍未根本解决。因此，亟须探索一种能够兼顾零排放、高浓度、低能耗与高可靠性的新型作业模式。

2 绿色高效开发模式的总体思路

根据前述分析，当前海底矿产资源开发模式面临的问题主要集中在环境友好性与经济性方面。同时，在总体作业模式设计过程中需兼顾技术可行性与风险控制能力。本文在海洋油气作业模式的基础上，提出了一种闭式循环举升的作业模式，对尾水排放造成的环境污染、矿石举升效率与能源消耗，以及装备运行可靠性均有较明显的改善。

2.1 闭式循环举升作业模式的总体方案

传统管道提升作业模式通常依靠水力提升或气力提升，将矿石由 5 000 m 以深的海底矿区提升至采矿船并完成转储。由于其举升作业采用开放式模式，会产生大量的尾水，需要通过辅助管线将尾水排放至 1 500 m 以深区域，以防止深层海水混入浅层区，造成浅层区污染并损害生物多样性。水力提升效率虽然明显优于气力提升，但其举升矿浆体积浓度受限，一般不超过 12%，并且举升泵通常布置在水下，其发生故障后需要将输送系统部分或整体上提，方可排除故障，这对矿产资源开发效率影响很大。闭式循环举升作业模式，是针对海底矿产资源开发日益凸显的绿色环保与节能高效需求而提出的新型作业模式。针对上述问题，我国必须在海底矿产资源开发方面具备前瞻性，才能保证所建立的作业体系符合环境评价要求。开放式举升与闭式举升对比如表 2 所示。

闭式举升总体作业模式，如图 1 和图 2 所示。闭式举升模式是在采矿船与中继站之间构建一套封闭式钢制硬管循环回路，利用船载循环泵提供动力，使举升介质在闭式回路中循环流动，从而实现矿石举升的目的。其核心装备包括采矿船、双通道立管、半封闭式中继站、柔性输送管道及采矿车。其中，双通道立管与半封闭式中继站是闭式循环举升作业模式的关键。

表 2 开放式举升与闭式举升对比

Table 2 Comparison between open-cycle lifting and closed-cycle lifting

因素	开放式举升	闭式举升
环境友好性	大量尾水排放	没有尾水排放
	水下泵噪声污染严重	泵布置在船上噪声污染小
经济性	矿浆体积浓度上限低	搭配举升液可提高矿浆体积浓度
	泵运行功率高	举升液降低管阻，泵运行功率低
作业可靠性	水下泵维修代价高	船体泵维修代价低，作业不间断

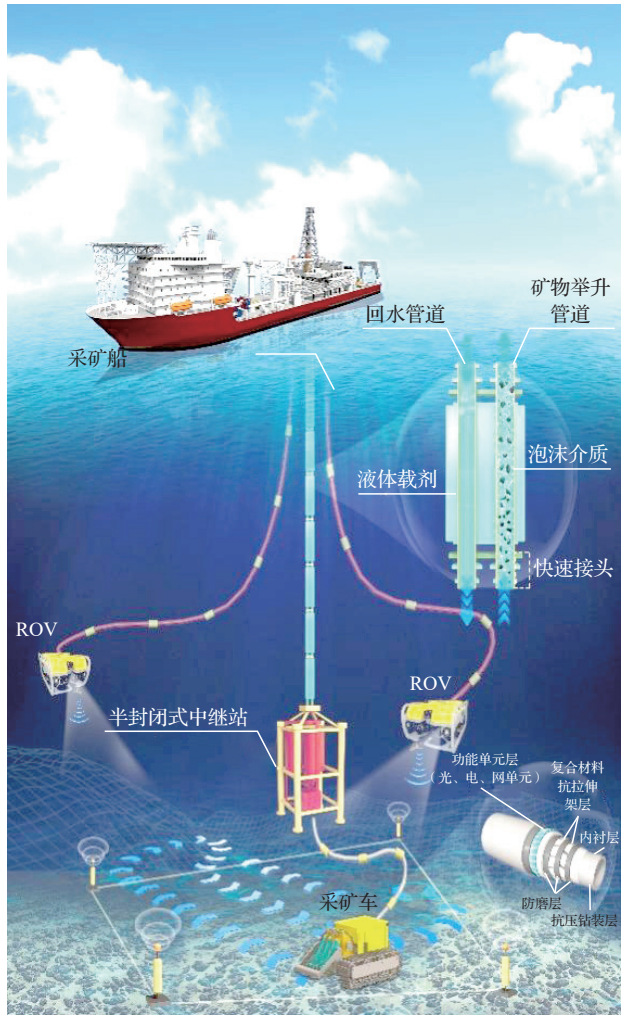
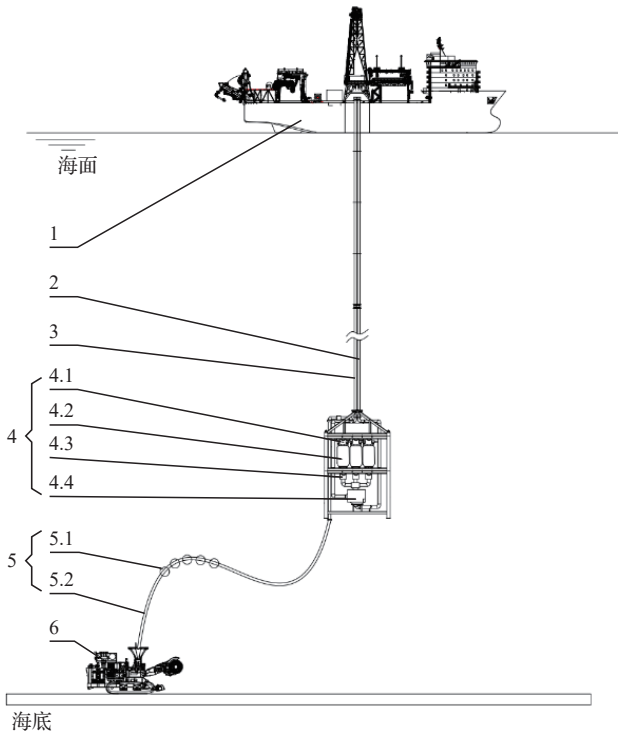


图 1 闭式举升作业场景

Fig.1 Closed-cycle lifting operation



1- 采矿船；2- 举升管道；3- 回水管道；4- 半封闭式中继站（4.1- 耐浊度启闭阀门，4.2- 耐压储罐，4.3- 矿石回流通道，4.4- 给料仓）；5- 柔性输送通道（5.1- 柔性管缆，5.2- 浮力材料）；6- 采矿车

图 2　闭式举升作业模式系统组成

Fig.2　System composition of closed-cycle lifting operation mode

双通道立管如图 3 所示，由两组立管单根组合形成双通道结构，端部采用可独立连接设计，可在不旋转立管本体的同时完成双通道立管间的快速对接。在双通道立管中，一个管路为举升通道，可利用举升液将矿石输送到采矿船上；另一个管路为回水循环通道，可将举升液重复利用循环至半封闭式中继站中，继续举升后续矿石。

半封闭式中继站作为闭式举升作业模式的又一关键装备，与传统的中继站有显著不同。传统中继站由料舱、给料机和出料管组成[25]，主要实现矿石的富集、二次破碎以及向上输送。而在双通道闭式循环作业模式中，中继站既与采矿车建立开放式输送体系，又与采矿船建立闭式输送体系的中枢，受闭式循环举升作业模式的影响，其内部需要包含 5 ～ 15 MPa 内压的动态压力储罐，以抵消闭式循环所产生的管路内压。因此，需要构建一套技术难度较大的大口径截止阀，用于中间内压的封堵与释放，从而实现既开放又封闭的模式切换，其关键技术是决定双通道闭式输送效能的核心要素。

2.2　双通道举升介质的分析

双通道闭式举升作业模式是对传统管道提升模式的系统性革新，其设计初衷源于对深海采矿“高

图 3　双通道立管

Fig.3　Dual-conduit riser

效、绿色、可靠”目标的追求。在深海多金属结核开采环境下，作业水深达 4 000 ～ 6 000 m，面临复杂的海况（如波浪、底层流）和显著的作业扰动（如沉积物再悬浮），实现连续、大容量输送矿物对举升介质与输送系统的稳定性与效率提出了更高的要求。通过分析各类主流提升模式发现：气力提升虽结构简化、无泵磨损，但存在多管路复杂、能量利用率低（不足 15%）、系统可靠性差等问题[10]；水力提升输送携矿能力强，却面临管路通径一致性差、泵组磨损与堵塞风险高、矿浆脱水难度大以及尾水回排量大等挑战[15]；重介质提升在效率、能耗与磨损控制方面表现突出，具备“提升效率高、作业能耗小、对泵送系统磨损低”等优势。然而，重介质模式受限于重介质密度过高造成的循环能耗较大，并且重介质污染性强、泄漏风险大，在解决海底矿产资源绿色高效输送方面仍存在较明显的技术瓶颈。

本文提出的闭式举升作业模式通过构建封闭循环回路，消除了介质外泄风险。相应地，这一模式也对举升介质提出了更高的要求：①介质必须具备优化的物理性质（如可调密度与流变特性），以实现矿浆体积浓度输送，从而继承并发挥重介质模式的高效携矿能力与经济性优势[23]；②介质必须在闭式循环中保持优异的化学与物理稳定性，确保长期循环使用下无降解、无腐蚀，并且与系统管路、阀门及泵送设备高度兼容，以支撑复杂回路的可靠运行；③介质及其循环系统必须满足环境密封标准，以实现作业全程零泄漏，这是该模式获得环境许可、具备工程可行性的前提。

闭式举升作业模式以其特殊的双通道结构，为矿石垂直举升提供了新的设计思路，可通过配置更优质的举升介质进一步提高矿石的携带能力。该模式对举升介质的需求不再局限于传统的海水输送，而是要求介质在闭式循环体系下，能同时满足高效携矿、低阻流动、环境兼容及循环稳定等多重目标。可选择低密度、高稳定性的微泡沫，有效降低管内浆体的平均密度与黏度。同时，微泡沫的表面张力又能降低矿石在内部的沉降速率。其优势在于可显著降低矿物举升液的循环能耗。微泡沫与传统的气力提升不同，其运载依托泡沫介质，具有很好的表面张力稳定性，借鉴海洋油气钻井工程，泡沫介质已具备携岩能力，实现钻屑返排。因此，基于微泡沫举升，可有效降低循环过程中矿石的沉降速率，有望突破传统水力提升约 12% 的矿浆体积浓度上限，从而直接提升单位时间的矿石产量，提升系统经济性。此外，优化的介质能有效降低管道沿程阻力，减少船载循环泵的功率需求，获得更低的输矿能耗（单位干矿输送量消耗的能量，单位为 kW · h/kg），实现节能增效。更重要的是，闭式循环从根本上杜绝了作业尾水向海洋的直接排放，避免了由此产生的羽流扩散与生态层间扰动问题，而专用介质的易控特性则进一步确保了系统的长期环境友好性。

双通道举升介质的需求可总结为：在深海多金属结核输送中，需要根据介质特性、系统可靠性与经济性综合选择提升模式，重介质提升只有在解决密封与污染控制问题后才具有较大的潜力，而气力提升则因效率与复杂性限制适用性较弱，实际应用中需要结合具体工况进行多维度权衡与系统优化。将泡沫举升介质与双通道闭式举升相结合的模式本质上是在封闭系统中实现“高效输送、低耗运行、长期稳定、环境兼容”多重目标的协调统一。因此，针对双通道闭式系统的举升介质进行专项研发，是构建未来绿色、高效海底矿产资源开采技术体系中不可或缺的一环。

2.3 双通道立管方案设计与难点分析

双通道立管的设计概念围绕“闭式循环、介质复用、动力协同”构建。该系统由两根在结构上集成、功能上耦合的管道组成（图 4）。回水管负责将水面经分离处理的介质主动泵送回中继站的给料仓内，输矿管则负责将矿石与介质在中继站给料仓混合形成的矿浆举升回水面。两管在海底的中继站处实现流体与矿石的混合，在水面通过矿水分离机构完成矿石分离与介质回收，从而形成一个从水面到海底再返回水面的完整流体回路。整个系统的介质闭式循环从根本上避免了作业废水向海洋表层的排放。相较于传统钢制单通道立管，采用以海水为介质且尾水直排的开放式输送模式，双通道立管系

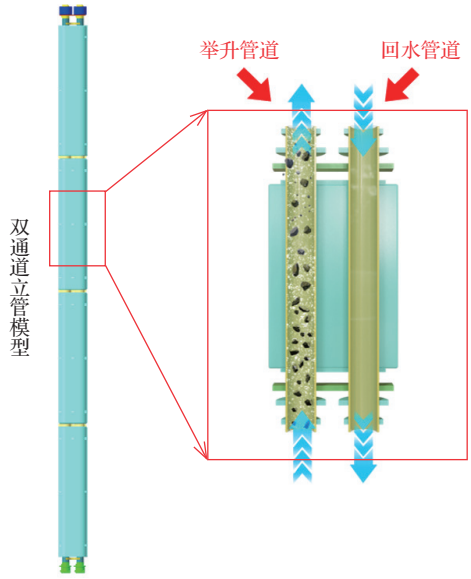


图 4　微泡沫介质的双通道立管模型剖面

Fig.4　Cross-section schematic of the dual-conduit riser model with a foam carrier liquid medium

统通过结构集成与流程闭环，升级为一套融合环保、节能与高效的综合工程解决方案。传统单通道立管与双通道立管技术体系的对比如表 3 所示。

双通道立管作为深海采矿系统中实现闭式循环与绿色举升的核心构件，其工程化应用面临多维度技术挑战。这些挑战主要集中在材料与结构可靠性、流体输送稳定性以及系统集成与智能运行维护 3 个方面。

在材料与结构可靠性方面，双通道立管需要同时应对深海高压、低温与高磨损工况条件。矿浆中硬质颗粒在高速输送下对管壁造成持续性冲蚀，双通道并列布置带来结构耦合振动风险[26]，两管内反向流动的流体可能诱发管束共振，增加结构疲劳损伤概率[27-28]。因此，突破该难点的关键在于开发高性能耐磨复合材料或涂层，优化管道结构与材料方案，建立材料与结构耦合的协同设计体系。

表 3　传统单通道立管与双通道立管技术体系对比

Table 3　Technical system comparison of single-conduit and dual-conduit risers

评价因素	传统立管	双通道立管
系统性质	开放式、单向输送	闭式、循环举升
流动方式	单管向上泵送	双管双向流动
	依赖大功率水下、水面泵	“水面泵 + 泡沫浮力”协同举升
环保性	尾水排海，可能污染表层	介质循环，实现零排放
核心挑战	高能耗、磨损、堵塞、维护难	系统压力平衡、泡沫稳定、双管振动、协同控制
技术定位	矿石输送管道	绿色循环举升系统

在流体输送稳定性方面，双通道立管系统涉及复杂的固—液—气三相流动[29]。矿石颗粒在低流速区易沉积导致管道堵塞，而为实现高效举升注入输送介质中的泡沫，其尺寸分布与稳定性难以在流动中保持均匀，存在聚并破裂的风险，进而影响举升效率。解决此问题需通过实验与模拟相结合的手段[29]，揭示颗粒—气泡—流体间的相互作用机制，从而建立基于流速、浓度与泡沫特性协同调控的防沉积与稳流方法。

在系统集成与智能运行维护方面，双通道立管与中继站间接头的密封需要具备压力自适应与动态补偿能力，以应对安装误差、洋流冲击及长期压力波动。与此同时，闭式循环系统的稳定运行依赖多参数（如压力、浓度、流速）的实时监测与联动控制，对监测系统的精度与控制算法的要求严苛。为此，需构建融合状态感知、故障预警与自适应调控的智能运维系统[30-31]，并配套模块化、易更换的管段设计，以形成具备高可靠性、可维护性的系统解决方案。

2.4　半封闭式中继站方案设计与难点分析

半封闭式中继站布置于海床或近海床位置，用于实现海底矿石的接收、暂存及与举升流体的混合成浆，其整体包括耐压储罐、汇料仓及与之配套的管路和控制机构（图 5）。

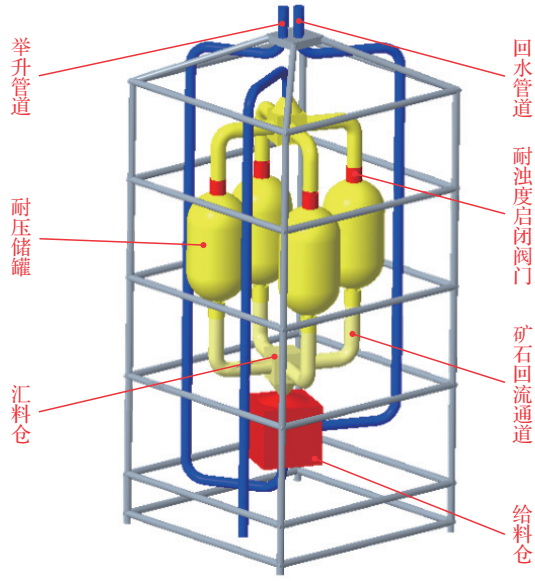


图 5 半封闭式中继站

Fig.5 Semi-enclosed relay station

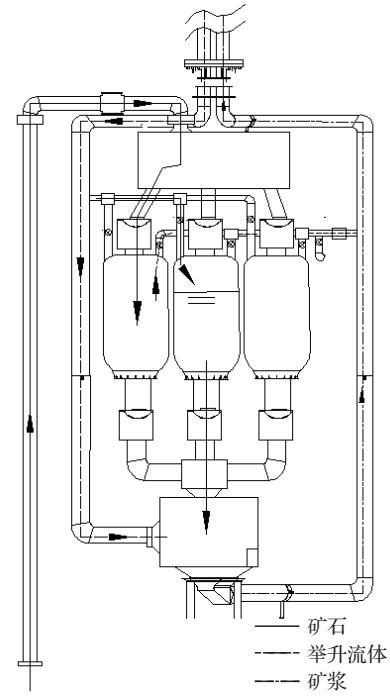


图 6 举升介质在中继站中的流动方向

Fig.6 Flow direction of lifting medium in the relay station

耐压储罐设置于中继站上部，用于接收来自矿物采集系统输送的矿石。其底部通过启闭装置与下方的汇料仓第一入口相连，启闭装置用于控制矿石在采集工况与举升工况之间的释放与隔离。汇料仓设有第二入口并与回水管相连，用于引入由水面支持单元增压泵输送的举升流体，使矿石在重力作用下进入汇料仓后与举升流体充分混合形成矿浆，矿浆经汇料仓出口进入举升管道并被举升至水面。耐压储罐顶部分别与举升管道和回水管道连通，在矿石举升阶段通过举升管道补充举升流体以平衡耐压储罐内压力，在矿石采集阶段通过回水管道排出随矿带入的液体，从而维持举升管道中流体体积的稳定。在矿石举升阶段通过供水管路补充举升流体以平衡耐压储罐内压力；在矿石采集阶段通过排水管路排出随矿带入的液体，从而维持举升回路中流体体积的稳定。在配置泡沫发生器时，含泡沫举升流体经回水管进入汇料仓并参与矿浆形成，泡沫在输矿管内提供附加举升动力，降低矿浆密度和系统能耗，图 6 展示了举升介质在中继站内的流动方向。通过上述结构与管路协同设计，半封闭式中继站实现了矿石采集与举升过程的交替进行，构成稳定、高效且环境友好的深海采矿中转与举升核心单元。

半封闭式中继站的关键技术难点主要集中于深海极端环境下结构与材料的可靠性挑战。中继站需要在千米级水深的高压、低温、腐蚀及矿浆冲蚀等多重严苛条件下长期稳定运行。其中，核心挑战在于高频动作的启闭装置与深海接头的长效密封与耐磨设计。这些部件不仅需要承受巨大的静水压力，还需要在含固体颗粒的介质中实现数百万次可靠启闭与无泄漏连接，对材料的韧性、表面硬度及密封结构的压力自适应能力提出了近乎矛盾的综合要求。此外，单元整体结构还需要应对洋流冲击等偶然载荷，其疲劳寿命预测与可靠性设计是工程实现的基础。

另一难点在于单元内部及关联系统中的复杂多相流态的精确调控与系统智能协同。在耐压储罐的装载与排空过程中，需要动态平衡罐内压力以避免冲击磨损；在汇料仓内，则要实现矿石、介质与泡沫的瞬时、均匀混合，形成稳定可泵送的三相矿浆[29,32]。这一过程对泡沫发生器性能、粒径分布控制及混合流道设计提出了精确的要求。

3　海底矿产资源开发技术路线的展望

闭式循环举升作业模式为海底矿产资源的开发提供了兼顾环境友好性与经济性的新思路，但要从概念走向工程应用，仍需在系统可靠性、智能化水平、材料创新及环境兼容性等方面开展深入研究。

3.1　向“极限可靠”与“智能监测”演进

当前，系统将深海采矿作业模式从开放式发展为封闭式集成系统，虽已解决介质循环与表层排放问题，但应对极端深海环境的长期服役能力仍是核心挑战。未来研究需要面向材料与工艺改进，致力于开发具备实时感知能力的智能采矿系统，进一步在输送管道系统内部集成分布式光纤传感网络，实现对应力、腐蚀、磨损状态的实时原位监测[31]。同时，通过人工智能算法分析多相流噪声、压力波动等运行数据，实现对管道堵塞、泡沫溃散等故障的早期预警与自适应调控。

3.2　面向极端环境的材料与结构创新

深海采矿装备长期服役于高压、低温、腐蚀及矿浆冲蚀的多重严苛工况，这对材料的耐磨性、抗疲劳性和结构可靠性提出了极高的要求。未来研究应重点围绕深海采矿具体场景特征，厘清材料与结构典型失效模式与内涵机理，构建更加准确的评估、测试技术方法，不断提升关键结构的设计能力。同时，双通道立管并列布置带来的结构耦合振动风险、反向流动可能诱发的管束共振等问题，仍需通过材料创新与结构优化加以解决。此外，借鉴深海油气领域的成功经验，研发轻量化、高强度的复合材料立管，将有助于提升系统的整体可靠性与布放回收的便捷性。

3.3　深化采集环节的环境影响控制

闭式循环模式主要解决了输送环节的羽流排放问题，但采集作业对海底沉积物的扰动及可能产生的局部羽流仍需有效控制[17]。未来研究应进一步借助计算流体力学等手段，量化不同作业参数（如采集行进速度、吸入流量、排放角度等）下的羽流生成与扩散规律，建立沉积物扰动预测模型。同时，可探索电絮凝等技术促使沉积物快速絮凝沉降，减少羽流扩散范围[33]。通过将环境影响作为系统设计的核心约束，实现从“输送环节零排放”向“全流程环境友好”的跨越，为深海矿产资源绿色开发提供完整的技术支撑。

4　结论

本文针对海底矿产资源开发面临的环保要求严苛、经济性不足及作业可靠性低等核心挑战，系统地探讨了一种绿色高效的开采模式。研究表明，传统开放式管道水力提升方案存在尾水排放引发的羽流污染风险、矿浆体积浓度受限（通常低于 12%）导致的经济性瓶颈，以及水下泵维护困难等作业可靠性问题，难以满足日益严格的环境法规与商业化开发要求。为此，本文提出了一种“闭式循环举升作业模式”。该模式以双通道立管和半封闭式中继站为核心，构建封闭循环系统实现举升介质的重复利用，从根本上避免了尾水排放带来的羽流污染。通过引入微泡沫等优化介质，可有效降低管内矿浆平均密度与流动阻力，有望将矿浆体积浓度提升，显著降低单位能耗。同时，将举升动力源由水下泵转移至船载泵，大幅度降低了维修成本与作业中断风险。上述研究为兼顾深海采矿环境友好性与经济性要求提供了新的技术思路与系统解决方案。考虑到微泡沫介质转运固体颗粒的技术特点，这一技术在输砂以及矿物湿式转储技术领域也可适当借鉴。

面向未来，闭式举升作业系统需要向“极限可靠”与“智能自适应”方向持续演进。在系统可靠性方面，应重点突破深海高压环境下关键部件的长效密封与耐磨设计，构建材料与结构的耦合设计理念，以工程需求为牵引，以结构研发为核心，以材料创新为基石，形成结构拉动材料，材料反哺结构的循环创新机制，打破材料学与结构力学间的信息孤岛，从原始创新维度提升装备运行可靠性。在智能化方面，应基于光纤传感网络与人工智能算法，构建融合状态感知、故障预警与自适应调控的智能运维系统，实现对管道堵塞、泡沫溃散等故障的早期预警与协同控制。在环境兼容性方面，需进一步深化采集环节的羽流控制研究，借助计算流体力学等手段量化不同作业参数下的羽流生成与扩散规律，

建立沉积物扰动预测模型。通过上述研究的持续推进，闭式循环举升作业模式有望为我国深海矿产资源开发技术体系的构建提供重要支撑，助力实现绿色、高效、可持续的深海采矿发展目标。

参考文献（References）：

[1] 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 Guorong，Huang Zeqi，Zhou Shouwei，et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE，2023，25(3)：1-12.

[2] 何高文，王海峰，任江波，等. 深海沉积矿产成矿机制研究：进展与展望[J]. 地质学报，2024，98(11)：3202-3212.
He Gaowen，Wang Haifeng，Ren Jiangbo，et al. Research on the metallogenic mechanism of deep sea sedimentary mineral resources：review and outlook[J]. Acta Geologica Sinica，2024，98(11)：3202-3212.

[3] 初凤友，姜静，刘禹维，等. 我国深海多金属结核资源的勘探进展及思考[J]. 中国有色金属学报，2021，31(10)：2638-2648.
Chu Fengyou，Jiang Jing，Liu Yuwei，et al. Advance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2021，31(10)：2638-2648.

[4] Nishi Y，Yamai T，Ikeda K. Two-belt continuous line bucket system：its concept design and fundamental bucket motion experiments[J]. Applied Ocean Research，2015，53：125-131.

[5] Leng Dingxin，Shao Shuai，Xie Yingchun，et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle[J]. Ocean Engineering，2021，228：108565.

[6] Kang Yajuan，Su Qiao，Liu Shaojun. On the axial thrust and hydraulic performance of a multistage lifting pump for deep-sea mining[J]. Ocean Engineering，2022，265：112534.

[7] Sun Qi，Ye Ping，Peng Wei，et al. Wear of graphite pebbles modeled using a macroscopic particle model in a pneumatic transport lifting pipe[J]. Powder Technology，2020，361：581-590.

[8] Guerra L A O，Temer B O，Loureiro J B R，et al. Experimental study of gas-lift systems with inclined gas jets[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2022，216：110749.

[9] Asim T，Mishra R，Abushaala S，et al. Development of a design methodology for hydraulic pipelines carrying rectangular capsules[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2016，146：111-128.

[10] 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.
Zhang Hao，Chen Xiaoping，Tang Minggang，et al. Characteristics and adaptability of lifting modes for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2023，43(4)：32-38.

[11] Vrij A，Boel S，Vercruijsse P，et al. Blue nodules deliverable report：D4.5 mining platform[R]. European Commission，2020.

[12] 薛桂芳. 国际海底区域环境保护制度的发展趋势与中国的应对[J]. 法学杂志，2020，41(5)：41-51.
Xue Guifang. Strengthening trend of marine environmental protection regulations governing deep seabed mining activities in the area and China's responses[J]. Law Science Magazine，2020，41(5)：41-51.

[13] 曹怡昕. BBNJ 海洋保护区制度性话语权之建构：论“适当顾及”原则的重释及其软法路径[J]. 北京理工大学学报（社会科学版），2025，27(4)：54-71.
Cao Yixin. Constructing institutional discourse power in BBNJ marine protected areas system：reinterpretation of “due regard” principle and its soft law approach[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)，2025，27(4)：54-71.

[14] Kojima C. Integration of general principles of international environmental law into the law of the sea：assessment and challenges[J]. Marine Policy，2023，149：105497.

[15] Lodge M，Johnson D，Le Gurun G，et al. Seabed mining：international seabed authority environmental management plan for the Clarion–Clipperton zone：a partnership approach[J]. Marine Policy，2014，49：66-72.

[16] 刘成军，刘禹维，曾轩，等. 基于多因素分析的深海矿产资源商业化开采时间节点研判[J]. 中国锰业，2025，43(1)：114-122.
Liu Chengjun，Liu Yuwei，Zeng Xuan，et al. Comprehensive judgment on the timing for commercial exploitation of deep-sea mineral resources based on multi-factor analysis[J]. China Manganese Industry，2025，43(1)：114-122.

[17] 王翠，丁一，罗阳，等. 深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望[J]. 应用海洋学学报，2024，43(3)：473-484.

Wang Cui，Ding Yi，Luo Yang，et al．Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes[J]．Journal of Applied Oceanography，2024，43(3)：473-484.

[18] 吴迪，蔡嗣经，董宪伟．海外矿产资源开发的技术经济评价模型研究[J]．金属矿山，2010(1)：20-23.
Wu Di，Cai Sijing，Dong Xianwei．Research on the technological and economic evaluation model of developing the overseas mineral resources[J]．Metal Mine，2010(1)：20-23.

[19] 李昱岩．蒙俄和黑龙江矿产资源优势比较与矿业投资环境评价[D]．北京：中国地质大学，2006.
Li Yuyan．Comparative advantages of mineral resources in Mongolia and Russia and Heilongjiang province in China and evaluation on mining investment environment[D]．Beijing：China University of Geosciences，2006.

[20] 刘畅，李艳，张亮，等．海底矿产资源开发技术经济评价模型研究[J]．中国矿业，2016，25(8)：69-73.
Liu Chang，Li Yan，Zhang Liang，et al．Study on technical and economic evaluation model of seabed mineral resources exploitation[J]．China Mining Magazine，2016，25(8)：69-73.

[21] 洪顺军．深海采矿泵流动特性与磨损性能分析及叶轮结构减磨研究[D]．长沙：中南大学，2022.
Hong Shunjun．Analysis of flow characteristics and wear performance and research of impeller structure to reduce wear of deep-sea mining pump[D]．Changsha：Central South University，2022.

[22] Wofkowicz S，Paulo A．Blue mining in the Atlantic ocean：a real need or a need for realism?[J]．Przeglad Geologiczny，2019，67(2)：91-103.

[23] 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.

[24] Kang Yajuan，Liu Shaojun，Zou Weisheng，et al．Design and analysis of an innovative deep-sea lifting motor pump[J]．Applied Ocean Research，2019，82：22-31.

[25] 曹阳，关英杰，杜新光，等．深海采矿水下中继站料仓防溢料结构数值计算与试验研究[J]．中国造船，2022，63(1)：28-38.
Cao Yang，Guan Yingjie，Du Xinguang，et al．Computational and experimental study on anti-overflow structure of bunker at underwater buffer station for deep-sea mining[J]．Shipbuilding of China，2022，63(1)：28-38.

[26] 冯丽苹，李朋，姜振兴，等．并肩排列深海立管群涡激振动试验研究[J]．山东科技大学学报（自然科学版），2021，40(4)：38-48.
Feng Liping，Li Peng，Jiang Zhenxing，et al．Experimental study on vortex-induced vibration of side-by-side deep-sea riser group with coupling interference effect[J]．Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)，2021，40(4)：38-48.

[27] 刘磊．深海采矿水力提升固液两相流动力学特性研究[D]．上海：上海交通大学，2019.
Liu Lei．Research on dynamic performance of solid-liquid two-phase flow in hydraulic transport in deep sea mining[D]．Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2019.

[28] Hong Shunjun，Hu Junhong，Wei Pengyun，et al．Research on the unsteady flow characteristics of solid-liquid two-phase flow in a deep-sea mining lift pump and model experimental verification[J]．Journal of Marine Science and Engineering，2024，12(9)：1611.

[29] 郭晓强，杨巨星，吕俊霖，等．深海天然气水合物固态流化开采立管三相流振动模型[J]．天然气工业，2025，45(7)：135-149.
Guo Xiaoqiang，Yang Juxing，Lyu Junlin，et al．A three-phase FIV model of risers for deep-sea natural gas hydrate extraction by solid fluidization[J]．Natural Gas Industry，2025，45(7)：135-149.

[30] Chen Baiqiao，Videiro P M，Soares C G．Opportunities and challenges to develop digital twins for subsea pipelines[J]．Journal of Marine Science and Engineering，2022，10(6)：739.

[31] 沈义俊，陈敏芳，杜燕连，等．深海矿物资源开发系统关键力学问题及技术挑战[J]．力学与实践，2022，44(5)：1005-1020.
Shen Yijun，Chen Minfang，Du Yanlian，et al．Key mechanical issues and technical challenges of deep-sea mining development system[J]．Mechanics in Engineering，2022，44(5)：1005-1020.

[32] Liu Lei，Gai Kangyu，Yang Jianmin，et al．Numerical investigation on the dynamics of mixture transport in flexible risers during deep-sea mining[J]．Journal of Marine Science and Engineering，2022，10(12)：1842.

[33] Rizea S A，Halkyard J E，Wodehouse J，et al．Making deep sea mining cleaner and greener[C]//Offshore Technology Conference．Houston，Texas，USA．OTC，2023：D021S021R003.