

DOI: 10.3901/JME.2021.20.232

深海采矿提升系统研究综述*

康娅娟^{1,2} 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. 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室 长沙 410083;
3. 中南大学深圳研究院 深圳 518000)

摘要: 将粗颗粒矿物从数千米的海底提升到水面是深海采矿需要解决的一个关键技术难题。以深海矿产的商业开采为背景,从技术原理的角度对当前几种典型的深海采矿提升系统进行研究,根据深海矿物商业开采的高产能高效率要求,从提升系统的工作机理、结构方案、输送能力、系统效率及实施可行性等方面进行剖析,结果表明,机械式提升系统能量利用率高,但存在作业过程中缆绳可能发生缠绕,实现商业开采产能尚有难度;气力提升系统结构简单,但系统效率低且需采用大直径的提升管道,会增加管道布放回收及整个采矿系统运行的成本和难度;综合对比各方面,对于高扬程大产能的深海矿物提升而言,离心泵水力管道提升是一种综合性较优的提升方案。

关键词: 深海采矿; 机械提升系统; 气力提升系统; 水力提升系统; 离心泵

中图分类号: TD857

Summary of Research on Lifting System of Deep Sea Mining

KANG Yajuan^{1,2} LIU Shaojun^{2,3}

- (1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000;
2. National Key Laboratory of Deep Sea Mineral Researches Development and Utilization Technology, Changsha 410083;
3. Shenzhen Research Institute of Central South University, Shenzhen 518000)

Abstract: Raising coarse mineral particles to sea level from the seabed of several kilometers deep is considered a key technical problem in deep sea mining. Based on the background of commercial exploitation of deep-sea minerals, several typical lifting systems of deep sea mining are studied from the perspective of technical principles. According to the high productivity and high efficiency requirements of commercial deep-sea mineral mining, the lifting system is analyzed from the aspects of working mechanism, structural scheme, conveying capacity, system efficiency and implementation feasibility. The mechanical lifting system has a high energy efficiency, but the cable may be entangled during the operation of the system and it is still difficult to achieve commercial mining capacity. The air lifting system has a simple structure, but the efficiency of the system is low and large-diameter lifting pipes are required, which will increase the cost and difficulty of pipe deployment and recovery and the operation of the entire mining system. Although different lifting schemes have their own advantages, hydraulic pipeline lifting with centrifugal pump is considered to be a comprehensive scheme for commercial exploitation with high head and large production capacity.

Key words: deep sea mining; mechanical lifting system; pneumatic lifting system; hydraulic lifting system; centrifugal pump

0 前言

深海底蕴藏着品质较高,资源量丰富的固体矿

产资源,这些矿产资源中富含镍、钴、铜、锰等金属,是航空航天、特种合金、锂电池、超导体和燃料电池等的核心元素。从20世纪50年代末开始,以美、日、德、法为代表的西方发达国家和一些跨国公司投入了大量的资金来进行深海固体矿产资源勘测技术和开采装备的研究,取得了初步成功,但受限于当时开采技术和装备,一直未能进入大规模

* 国家重点研发计划(2016YFC0304103-4)和深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室开放课题(SH-2020-KF-A02)资助项目。20201225收到初稿,20210723收到修改稿

的商业开采^[1-3]。近年来,随着陆地矿产资源的日益枯竭、新能源技术对矿产资源的巨大需求和海洋油气工业的技术发展,深海矿产资源商业开采再度成为关注热点,深海矿产也成为了世界各国竞相争夺的重要战略目标^[4-6]。

多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳被认为是目前最具有商业开发前景的三种深海固体矿产资源(简称“矿物”)^[7]。这几种矿物所处的水深不同,在海底的赋存状态也不一样,但目前提出的采矿系统基本相近,均由在海底采矿车、水面的采矿船以及将矿物从海底采矿车输送到水面采矿船上的提升系统(也称“输送系统”)三部分组成^[8]。除因矿物赋存状态不同导致三种矿物的采集方法和采矿车设计有较大差异外,采集这三种矿物所用的水面采矿船和矿物提升系统基本相同。将矿物从数千米海底输送到海面是深海采矿的关键环节,目前已经提出了多种矿物提升方案,也有不少文献对各种提升系统进行了介绍^[9-13],但大多只简单描述了这些技术方案的基本构成,没有从技术原理的角度对各种提升系统进行分析。

首先,梳理深海采矿提升系统的研究现状,分析深海采矿提升系统需要满足的要求,在考虑系统输送产能要求的前提下,进一步从其提升性能、系统效率及实施可行性等角度对各种深海采矿提升系统进行综合分析。

1 深海采矿提升系统研究发展历程

从 20 世纪 50 年代末开始,国内外对深海采矿提升技术进行了广泛的研究,出现过多种技术原型和样机。

20 世纪 60 年代日本研究人员提出了一种采用连续链斗式(Continuous line bucket, CLB)的深海多金属结核采集及提升系统方案,并在 20 世纪 70 年代初进行了海试。该系统由一根长 8 km 的链及其每隔二三十米连接在其上的一系列箕斗组成,链从试验船的船头下放,从船尾回收,如图 1 所示。试验过程中收集到一些结核,但由于缆的缠绕问题导致试验最终停止^[14-16]。其后,法国研究人员试图以双船模式来解决缠缆问题(图 2),曾计划 1975 年进行试验但最终应缺乏经费未能进行^[17]。1979 年,法国工程师提出了“穿梭艇式”的采矿系统方案,设想由一系列能自由潜入海底的穿梭艇来回采集和运载矿物到水面,但因技术和经济方面的一些问题未能解决而终止了研究^[18]。

1970 年代末,以美国为首的几个财团组织开展了一系列深海采矿海试,这些试验系统均采用管道提升系统。按驱动方式不同可将管道提升系统分为气力提升和水力提升两类。

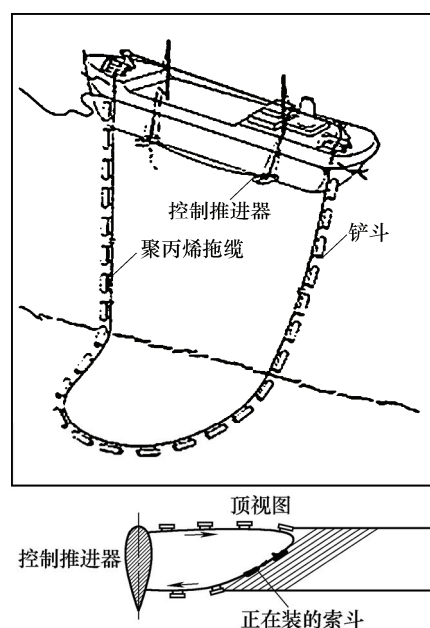


图1 连续链斗式提升系统示意图

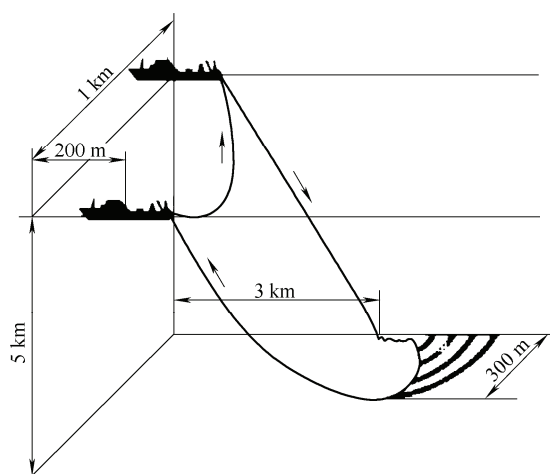


图2 双船模式连续链斗式提升系统示意图

气力提升是通过压缩机向输运管道内输入气体,利用输送管道内外流体的位能差和气压的动能,把矿物从海底提升至海面,如图 3a 所示。水力提升则是通过串接在管道上的矿浆输送泵将矿物提升到水面船,如图 3b 所示。1978 年,OMA (Ocean Mining Associates) 采用气力提升系统在太平洋进行了深海采矿试验,在 18 h 内从海底采集并输送到采矿船上的矿物为 550 t,最大产量达到 50 t/h。同期 OMI(Ocean Mining INC.)在太平洋开展了深海采矿试验,分别采用了水力提升和气力提升两种输送方

式实现了 5 200 m 水深的水下矿物垂直输送, 其中气力提升系统输送了 150 t 矿物、水力提升系统输送了 650 t 矿物, 一共采集到 800 t 矿物。水力提升系统的最大输送能力超过了 40 t/h, 该系统中采用的动力设备是由德国的 KSB 泵业公司研制的一种空间导叶式离心泵^[19-22]。

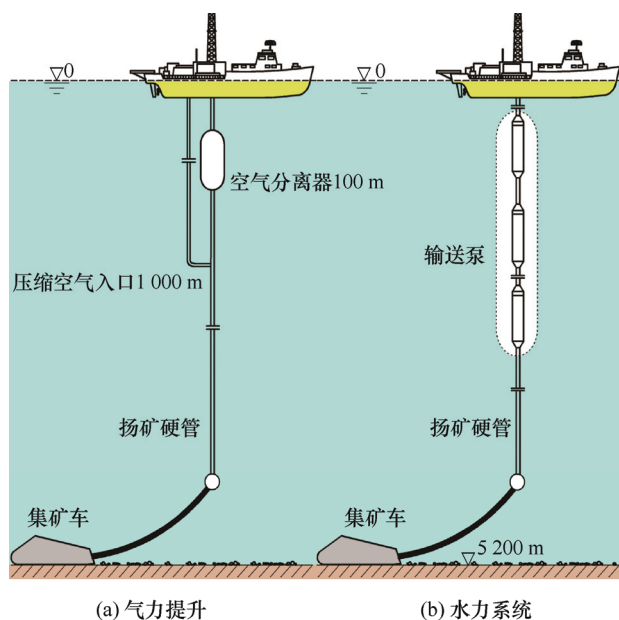


图 3 管道提升系统示意图

此后几十年内, 水力提升系统成为了各国深海采矿提升系统研究的主流方案。日本东北大学等研制加工了两台 8 级离心式输送泵^[23], 但一直未进行海试。德国 PREUSSAG 和法国 GEMONOD 联合研制的深海多金属结核商业开采系统方案设计中也采用水力提升方案, 拟采用 4 台 KSB 研制的离心泵进行矿物提升^[24]。其后, 日本、韩国和中国等都进行了不同水深的深海采矿系统试验^[25-32], 采用的水下矿物提升系统基本方案与 OMI 的水力管道提升系统基本一致。同期, 印度国家海洋技术研究所和德国 SIEGE 大学合作开展了深海多金属结核采矿系统研究, 其矿物提升系统也是采用水力管道提升的方案, 与图 4 中所示方案不同的是, 该系统设计采用全软管方案, 采用的输送泵为正排量泵, 并在 2005 年进行了 500 m 水深海底采砂试验^[33]。鸚鵡螺矿业在其巴新专属经济区的深海多金属硫化物商业开采 (1 600 m 水深) 方案中, 也采用了隔膜正排量泵输送的水力管道提升系统^[34]。

以上对深海采矿矿物提升系统发展历程的简要回顾表明, 尽管发展历史不是很长, 而且至今未能进入商业应用, 但已提出了多种提升方案并进行了相关试验。上述方案可归类整理如图 5 所示, 其中,

CLB 法可归类在缆斗提升、而穿梭艇法可归类为运载器提升。就目前研究状况而言, 对管道加离心泵的水力提升系统的认可度相对较高, 但其他系统方案也有其优点, 并不能排除随着技术的发展经修改完善后获得成功应用的可能。

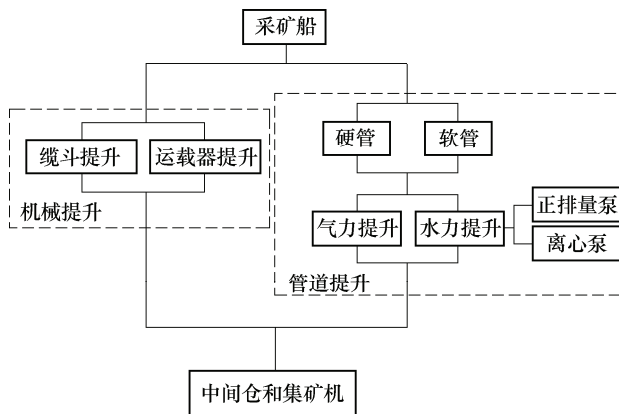


图 4 深海采矿提升系统方案分类

除了前文介绍的提升方案, 也有其他一些提升方案被讨论和探索过, 例如清水泵提升、轻介质提升、重介质提升等, 其原理及优缺点在文献[9-10]上有比较详细介绍, 在实际深海采矿系统研发中基本上未被采用, 因此不再做详细介绍。

2 深海采矿对矿物提升系统的要求

深海采矿矿物提升是要将在数千米深海底采集的矿物输送到水面船舶上, 是一个粗颗粒矿物长距离垂直输送问题, 需要满足以下要求。

2.1 粗颗粒输送

深海多金属结核粒径一般在 20~100 mm, 多金属硫化物和富钴结壳的采集需要切削剥离, 形成的矿物颗粒也可达数十厘米。当采用气力或水力提升时会先对矿物进行初步破碎, 但破碎粒度不宜太小, 一方面是出于减小破碎能耗的考虑, 另一方面过度破碎将加大矿石的粉化程度导致矿物回收时损耗大。

2.2 长距离垂直输送

深海多金属结核赋存水深为 4 000~6 000 m, 多金属硫化物水深为 500~3 700 m, 富钴结壳水深为 800~2 400 m, 因此, 深海采矿中矿物从海底到输送距离常为数千米, 远大于当前海洋油气的开采深度。对于机械提升而言这意味着长行程, 对管道提升而言则需要高扬程。

2.3 大产能输送

根据联合国专家组的分析结论, 深海多金属结

核的商业开采应满足年产 300 万 t 干结核、开发 20 年的产能条件^[35]。国际海底管理局深海多金属结核勘探规章中对矿区面积的设定也是基于这一标准，而对多金属硫化物和富钴结壳商业开采产能要求则都是年产干结核 100 万 t。

2.4 高效输送

由于矿物垂直输送距离长且产能大，因此不论是机械式还是气力或者水力式提升，能耗都将相当大。同时，深海采矿在大洋中进行，远离大陆，能源的供应也是大问题。因此，深海采矿矿物提升系统应当尽可能采用能耗低的方案，努力提高能源利用效率。

2.5 低环境污染

《联合国海洋法公约》对海洋环境保护提出了明确的要求，深海采矿需要满足严格的环境影响标准。一方面，矿物提升过程中应尽量减少对海洋环境的干扰和污染。另一方面，为了防止采矿排放对海洋表层的污染，目前推荐的方案将提升到水面的矿浆脱水后的废水回送到海底，因此，降低废水量也是需要考

虑的重要因素。

除了以上要求外，安全性、可靠性、长寿命、低成本等，均是深海采矿矿物提升系统方案设计和选择应考虑的基本要求。

3 深海采矿矿物提升系统技术分析

3.1 缆斗式提升系统分析

20 世纪的 CLB 法提升系统试验终止后，很长时间内没有关于缆斗式提升系统研究的相关报道。2016 年，鸚鵡螺矿业提出了一种缆斗式的深海多金属结核提升系统方案^[36]，如图 5 所示。

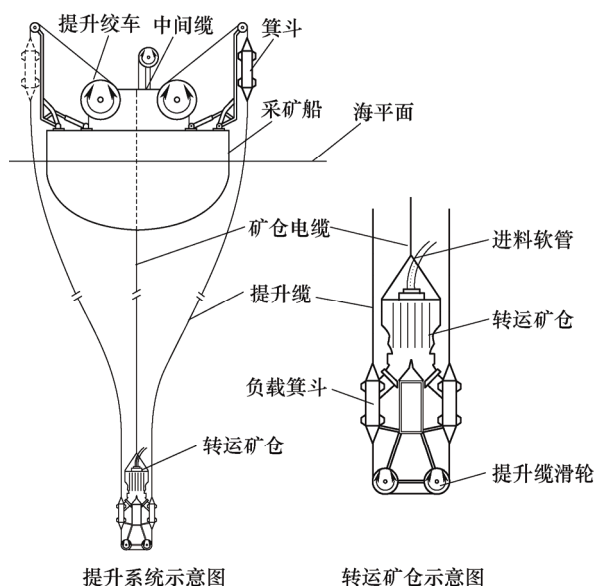


图 5 鸚鵡螺矿业缆斗式提升系统示意图

两个高功率的绞车分别将两个运矿箕斗从采矿船的两侧拉上或放下，一个具有动力和主动导向的转运矿仓悬挂在海床上方几十米处。海底采矿车(图 5 中未表示)将采集到的结核通过进料软管送到转运矿仓内，转运矿仓再将矿物卸至箕斗内，然后由箕斗提升到采矿船上。箕斗外形经过水动力优化设计以减小水阻力，两侧箕斗对称布置并用一条中间缆连接，以通过耦合使上升箕斗可以利用另一侧下降箕斗产生的能量。

箕斗提升在陆地地下矿开采中应用广泛，最大应用深度已达 2 000 m，每次提升量 50 t，提升速度 25 m/s。与陆地矿井箕斗提升相对应，深海采矿箕斗提升能力主要取决于以下 3 个因素：

3.1.1 箕斗的提升速度

考虑到水阻力因素，深海采矿中的箕斗提升速度不宜太高，鸚鵡螺矿业在设计中考虑最大提升速度不宜高于 5 m/s。

3.1.2 有效提升载荷

深海采矿缆斗提升的载荷包括矿石重量，箕斗和缆绳重量以及水阻力。陆地矿井中矿物提升通常采用钢缆，随着开采深度增加钢缆自重引起的提升载荷也大幅增加，有数据表示，在南非深井金矿的箕斗提升中，钢缆自重已占总载荷的 50%以上(相应矿物重量的比例仅为约 35%)。而鸚鵡螺矿业提出缆斗提升方案的一个重要因素是认为可以在深海采矿中采用超高分子量聚乙烯纤维缆(High Modulus Polyethylene Rope，简称 HMPE)作为提升缆。HMPE 具有钢缆的强度，但比钢缆轻得多，对于提高输送的有效载荷极具优势，价格相对较高但在可接受范围。根据鸚鵡螺矿业的分析，采用 HMPE 时，被提升矿物的重量在总载荷中占比可提高到 60%以上。因此，鸚鵡螺矿业的设计方案中，将最大有效提升载荷假设为 100 t。

3.1.3 提升单元数量

如图 5 所示，布置在采矿船两侧的两个成组箕斗构成一个提升单元。一般而言采矿船的长度会在 200 m 以上，因此具有布置多个提升单元的可能空间。

通过对上述 3 个因素的调整与组合可以设定系统的产能。按照多金属结核的商业开采产量规模应不小于年产 300 万 t 干结核(对应于 430 万 t 湿结核)，采用两套采矿系统来实现，即每套系统年产 150 万 t 干结核。按年工作 250 天计，每套系统的产能为 250 t/h 干结核(即湿结核 358 t/h)。

鸚鵡螺矿业也对上述因素和参数进行了假设和

估算,如:设箕斗提升速度为 2 m/s,有效提升载荷 55 t,按水深 4 500 m 计算,提一斗矿石的时间约为 0.63 h,即一小时提矿 87 t。如果采用 4 个提升单元,整个系统产能可达 358 t/h;另一方案则将箕斗的提升速度取 5 m/s,有效提升载荷取 90 t,按水深 4 500 m 计算,提一斗矿石的时间约为 0.25 h,即提矿 360 t/h,采矿船只需要搭载 1 个提升单元。理论上,鸚鵡螺矿业的缆斗式提升系统可以实现深海多金属结核商业开采的产能。但深海绞车供应商建议的缆绳线速度在 0.3~1 m/s^[37],目前陆地矿井提升的最大有效载荷也只达到 50 t,同时,箕斗中矿物的装卸时间及输送减速时间等也需要考虑。综上,在深海环境下,提升速度达到 5 m/s 和有效提升载荷 90 t 很难实现。

缆斗式提升系统的效率与箕斗的提升速度、箕斗的外形结构、被提升矿物的密度等多个因素有关。但总体上,缆斗提升是一种机械提升方式,它直接采用机械方式将矿石垂直提升至水面,不需要将机械能转换成流体的动能,也不需要额外将海水输送至水面,因此在能量利用率方面有明显的优势。SCHULTE 在假设单斗提升等条件下对深海采矿缆斗提升的效率进行了计算,结果表明在深海多金属结核(密度 2 000 kg/m³)采矿提升时效率可达 86%、深海多金属硫化物(密度 3 500 kg/m³)采矿提升时效率可达 89%^[38]。

影响缆斗提升实际应用的最大问题还是作业过程中缆绳可能发生缠绕。如图 5 所示,从采矿船的两侧(船宽为 40~50 m)放下的两根 5 000 m 长缆绳,在洋流以及采矿船移动作用下发生缠绕的可能性并不低。而根据前面分析,由于绞车提升速度及有效载荷的限制,每条采矿船上可能得布置安装多套提升单元,从而更增加了缆绳缠绕或箕斗碰撞的风险。

3.2 气力提升系统分析

气力提升是管道提升法中的一种。气力提升是通过被压缩空气进入提升管道后膨胀释放能量,将矿物从海底提升到采矿船上,其原理如图 6 所示。气力提升法分析所依据的基本理论是提升管道内的动量平衡,包括提升管道的海底入口处、压缩空气入口处及提升管道在采矿船上出口处的液体、固体和气体的总动量平衡。因此,从提升机理上来解释,是进入管道的气体以及气泡与水之间的滑移导致管内液体(海水)上升,当液体的上升速度大于固体颗粒(矿物)在液体中的沉降速度,就会推动固体从海底上升到采矿船表面。

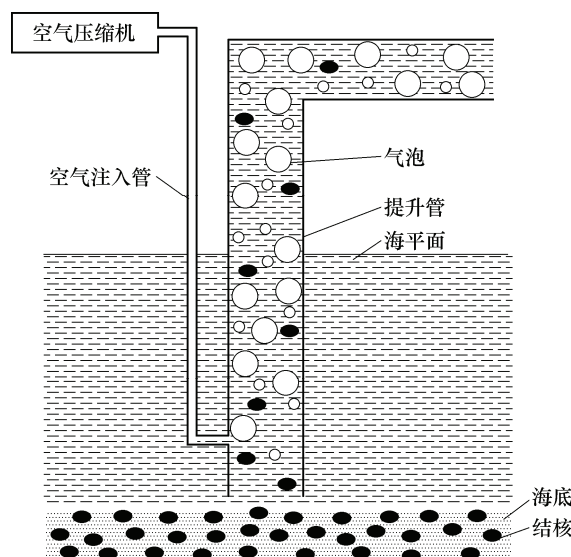


图 6 气力提升法原理示意图

研究认为,垂直管道内的气-液两相流可能有五种流态,分别为:气泡流指大量气泡分散在连续的液体中;段塞流指管道内形成尺寸接近管径、形状像子弹头的大气泡;混状流指管道内气体和液体以震荡方式向上流动;环状流指气体在管道中央形成连续相,液体被挤至管壁做环状流动;雾状流指液体被高速气体切成液滴夹带在连续的气相中流动。深海采矿管道输送中这几种流态都有可能发生。压缩空气入口处可能是气泡流,因为在高压可能产生一些小气泡;当管内三相流往上运动一定距离后,气泡的大小将随着压力的减小而增大,形成段塞流;继续上升后,则可能导致环状流甚至雾状流,如图 7 所示。

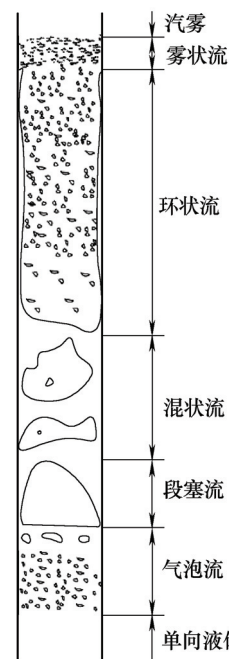


图 7 深海采矿管道输送中五种流态示意图

关于各流态之间的分界面也有过许多研究。1980 年, TAITEL 提出了各流态间的转换公式, 并据此绘制了流态界面图^[39], 如图 8 所示。YOSHINAGA^[40]和 KASSAB^[41]的试验也一定程度上验证了 TAITEL 流态界面图的合理性。相关研究表明环状流不具备提升固体颗粒的能力^[42]。由图 8 可知: 不管液相的流量率(J_l)是多大, 只要气相的流量率(J_g)超过 15 m/s, 环形流态就会发生。也就是说, 对于气力输送法提升而言, 气相的流量率(J_g)不能超过 15 m/s。

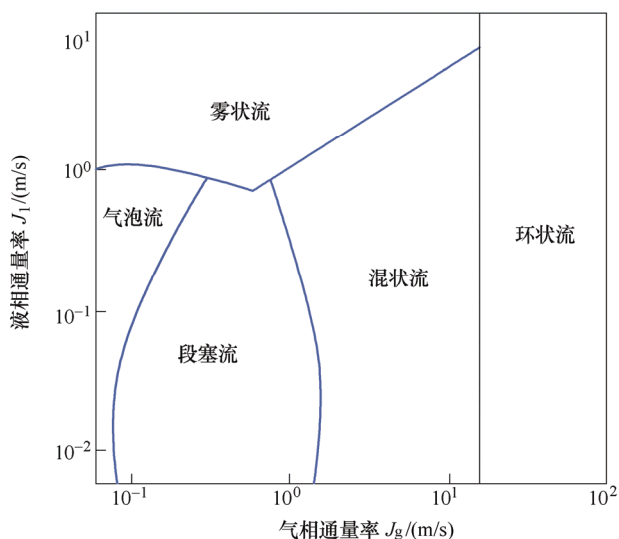


图 8 不同通量的流态界面

气力提升系统中影响产能和能耗主要因素为管道直径、压缩空气入口深度和矿物粒径等。

增大提升管道内径可以提高产能。同时, 提升管道内径也影响气相流量率。根据文献[35, 38], 如果要满足系统产能达到 358 t/h(对应年产 150 万 t 干结核的采矿系统), 在提升高度 6 000 m、矿物粒径 20 mm 的情况下, 如果管道内径小于 1 m, 气相流量率将超出 15 m/s。这意味着, 对于年产 300 万吨干结核的采矿系统, 如果采用气力提升法进行矿物提升, 必须采用直径大于 1 m 的大口径提升管道。大直径的管道将大幅增加管道提升系统的重量, 从而增加管道布放回收以及采矿船及整个采矿系统运行的成本和难度。因此, 对于深海多金属结核商业开采系统而言, 如果采用气力提升法输送矿物, 过度增大管道直径并不合适。

压缩空气入口深度以及矿物粒径与能量消耗有关。图 9 是在年产 300 万 t 结核产能、6 000 m 采矿水深条件下, 不同的空气入口深度、不同的矿粒直径(10 mm 和 20 mm)输送所需的净能量功率图。由图 9 可知, 对于气力提升法而言, 压缩空气的入

口深度 h 存在一个临界值, 当压缩空气的入口深度小于该临界值时, 所需的能量 E 随着入口深度的减小急剧地增大, 但当空气的入口深度大于这一临界值时, 所需的能量几乎不随进气口深度而变化。减小矿物颗粒的直径大小确实会减小提升系统所需的能耗, 但这种影响并不显著。而且实际采矿工程中, 在海底将矿物进行初步破碎的程度与需要消耗能量成正比, 而且过细的矿物粒径将加大输送过程中矿物的粉化而导致矿物回收率的降低。

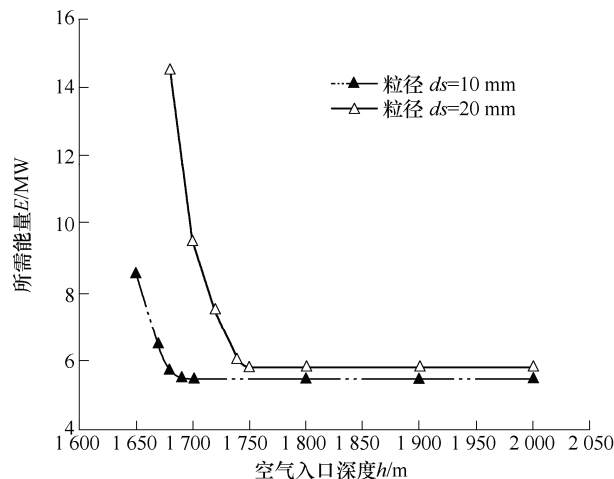


图 9 空气入口深度和矿物粒径对能耗的影响

因此, 根据以上分析, 通过增大管道直径、或加大压气入口深度以及减小矿物粒径等方式来提高系统的产能或能量效率在实际应用中都会受到一些因素的制约。根据计算分析, 在上述产能及系统基本参数水平下, 在提升管道下部的固-液二相流段, 固相的体积浓度只有 3%~4%。这个体积浓度远低于水力提升法中通常的 12%以上, 所以, 一般而言, 气力输送法的效率一般在 15%以下^[43]。不仅如此, 较低的固相浓度还意味着, 如果要达到相同的矿物产能, 就必须有更多的海水被从海底抽送到海面。出于环境保护的目的, 被抽送到海面的海水并不能直接排放到海面, 而是必须回注到一定的深度以下。也就是说, 在同样的产能要求下, 气力提升法将相对水力提升法有更大的回注水量, 这也是气力提升法的一个不利点。

相对水力提升法而言, 气力提升法的优点在于其空气压缩机等布置在水面采矿船上, 无水下活动部件, 因而也无需像水力提升系统那样将高压电缆延铺到深海, 检验和维修也相对方便很多。

3.3 水力提升系统分析

如图 4 所示, 目前研究的水力提升系统主要包括正排量泵和离心泵两种泵送方式, 均是将海底的

矿物通过管道提升到水面船上。因为深海采矿水深达数千米, 矿浆在管道中的流动特性对系统的性能起着决定性的作用。因此, 先分析正排量泵和离心泵两种泵送方式的水力提升方案, 然后从浆体在管道中的流动特性来讨论系统主要参数的选取及水力提升系统的性能。

3.3.1 采用正排量泵的水力提升系统分析

正排量泵也称为容积泵, 它是通过泵工作腔的容积变化吸取和排出液体来完成液体输送。可以用不同的方式使得工作腔容积变化, 从而形成不同形式的正排量泵。例如, 通过叶轮的旋转使泵工作腔容积产生周期性变化, 称为叶片泵; 通过活塞或隔膜在泵内的往复运动导致两侧工作腔容积的交替变化完成吸液和排液, 形成活塞泵或隔膜泵。而隔膜往复运动的驱动可以是机械方式(如电机), 或者由另一个泵周期性地向泵内注入高压液体。

近年来, 鹦鹉螺矿业在其巴新专属经济区深海多金属硫化物商业开采系统中计划采用隔膜式正排量泵来进行矿物提升, 并委托通用公司制造了正排量泵。如前所述, 印度与德国合作开发的深海多金属结核开采系统方案中, 也采用了正排量泵为提升泵。

图 10 所示为一个采用正排量泵(隔膜泵)提升的深海采矿提升系统方案。正排量泵将矿物和海水混合的矿浆(Q_m)从采矿车泵送到采矿船上, 船上的分离器将矿浆分离后, 矿物颗粒(Q_s)被送至矿仓, 海水(Q_w)通过船上的泵加压后又被用于驱动正排量泵, 然后送回海底。如图 11 所示为隔膜泵工作原理图, 隔膜泵由泵体、隔膜和 4 根带阀门的管道组成。左图中, 管路①、②阀门关闭, 管路③、④阀门打开, 在深海底压力下, 矿浆(Q_m)通过管路④流入泵右腔, 并推动隔膜将泵左腔内的海水(Q_w)经管路③送回海底; 右图中, 管路①、②阀门打开, 管路③、④阀门关闭, 采矿船上的泵将海水加压经管

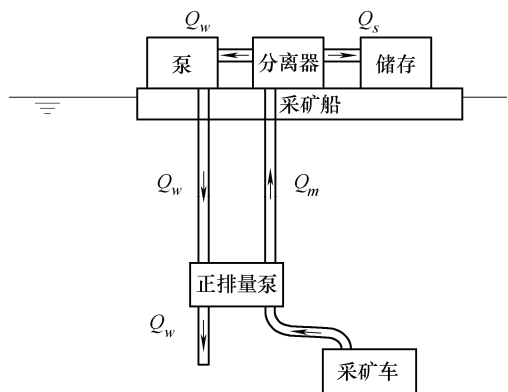


图 10 深海采矿正排量泵水力提升系统

路①注入到隔膜泵的左腔, 驱动隔膜将泵右腔内的矿浆经管路②推送到采矿船上。

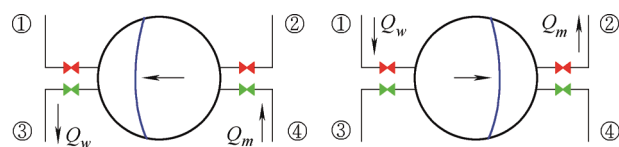


图 11 正排量泵的工作原理

隔膜式正排量泵水力提升系统的一个优点是它可将提升到水面并分离后的海水再泵送到海底去驱动隔膜泵, 这不仅可利用这部分海水的能量, 而且适应海上作业废水排放的环保要求。

从工作原理来看, 正排量泵能达到较高的扬程、工作特性较硬, 能对输送浆体产生较大的推压力。但就泵的结构而言, 单个泵能输送的产能会受到限制。以鹦鹉螺矿业在其巴新专属经济区的深海多金属硫化物商业开采项目中的正排量泵方案为例, 该项目的采矿水深 1 600 m, 年设计产量为干结核 100 万 t。该系统的提升驱动由两个并联的泵模块组成, 每个模块包括 5 个并联隔膜泵^[44]。这 10 个隔膜泵的并联使用, 一方面说明正排量泵具有较高的扬程, 另一方面也反映了每个隔膜泵能提供的产能受到限制。当然, 设计得当的话, 10 个泵的并联使用能较好地减缓单个隔膜泵固有的流量脉动影响。

由图 11 可知, 采用隔膜泵时, 矿渣会经过泵的一侧, 因此并未能回避泵的磨损问题。不仅如此, 矿渣还需要通过从管路②和管路④上的阀门(排料阀和进料阀)流过, 因此, 不仅存在阀门的磨损问题, 而且也限制了大尺寸颗粒的过流。目前, 虽然鹦鹉螺矿业提出了隔膜泵输送方案并完成了泵的加工制造, 但尚未在实际开采或者采矿海试中进行过隔膜泵的实际应用。隔膜式的正排量泵在海洋油气和陆地矿山管道输送中均有应用, 但通常要求过流的颗粒粒径在 3 mm 以下。因此, 正排量泵在大水深大产能商业开采系统中应用存在其弊端。

3.3.2 采用离心泵的水力提升系统分析

离心泵是一种应用范围非常广的泵型。离心泵利用离心力原理工作, 通过叶轮将来自泵驱动器的旋转动能转换为液体的流体动力能。与深海矿物提升应用场景比较接近的是海上疏浚工程, 其工作也是将包含粗颗粒物料的渣浆从海底抽送到水面。但与海底疏浚不同的是, 深海采矿中的水力管道输送面临大得多的水深, 即要求泵具有更高的扬程。因此, 与其他离心泵相比, 深海采矿中的矿物提升离心泵不仅要求有较少的叶片和较大的流道以保证粗颗粒矿物的通过, 而且需要多级泵的串接应用来提

供足够的扬程。

根据压水室的不同, 叶片离心泵又可以分为蜗壳泵和导叶泵, 流体经过蜗壳泵会改变流动方向, “轴向进, 垂向出”, 而流体经过导叶泵依旧沿着原来的方向, 有“轴向流”的特点。这两种泵型在深海采矿水力提升式输送方案中均被考虑过。

欧盟以多金属结核开采为背景的蓝色采矿项目中, 提出了一个蜗壳泵提升式的输送方案。因为单个的蜗壳泵无法提供足够的扬程, 所以采用了多个蜗壳泵串联使用^[45]。图 12 是蓝色采矿项目海试中采用的 1/6 规模试验泵, 如图所示, 它由两个蜗壳泵和几个阀组成。由于蜗壳泵的入口和出口相互垂直, 因而在串联使用时, 前一级泵的出口和后一级泵的入口需要通过几段弯管相连, 这些弯管会增加管道的压力损失。另一方面, 为了防止突然断电等情况下垂直管道内矿渣的沉降而导致管道的堵塞和损坏, 通常要求输送泵及管道具有“可回流”能力。蜗壳泵的入、出口垂直布置的结构显然不利于矿渣的回流, 解决的方案是另外设置一根专门的回流管及相应的数个阀门。另外, 如图 12 所示, 每个(级)蜗壳泵是由单独的电机来驱动。所以, 在这个提升系统中, 需要在深海中多个电机和阀门进行控制和供电。

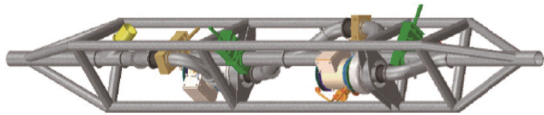


图 12 欧盟蓝色采矿项目中的两级蜗壳式离心泵方案

如前文所述, 20 世纪 70 年代 OMI 的 5 000 m 级深海采矿海试中采用的是德国 KSB 公司研制的空间导叶式离心泵, 其后日本、韩国以及我国深海多金属结核采矿系统中的提升泵也都是采用这一泵型。图 13 为我国深海多金属结核采矿试验工程中研制开发的空导叶式离心泵的设计方案^[46]。该泵由多级叶轮和导叶串联而成, 具有“高扬程”和“轴向流”的特点。通过清水和矿浆性能试验, 已验证了该泵基本满足我国深海采矿试验工程的要求^[33]。

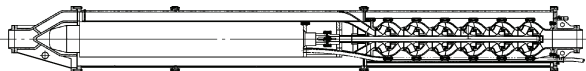


图 13 中国深海采矿试验工程中 6 级空间导叶式离心泵

3.3.3 水力提升系统的主要参数及性能分析

就管道提升而言, 矿浆经过提升系统从海底输运到海面采矿船需要克服的压力损失包括三部分: 管壁摩擦损失、局部压力损失和重力压损。涉及到的主要参数包括被输送矿物的颗粒大小、矿浆浓度

以及管道内的浆体流速与流量等^[47]。

在海水中, 一般来说, 矿物颗粒越小沉降速度越小, 同时, 小粒径颗粒在流动过程中互相碰撞产生的能量损失越小^[48]。因此, 相关理论分析和试验都表明, 矿物的粒径越小, 流体提升的传输效率就越高, 系统的能量效率也越高。但是, 水力提升中矿物颗粒的粒径不仅要考虑管道中的传输效率, 还需考虑海底矿物破碎所需能耗及矿物传输过程中粉化对回收率等影响。所以, 实际深海采矿作业中的矿物颗粒不能一味地取小, 需要有一个综合的权衡。对于深海多金属结核的开采而言, 勘探结果表示结核的粒度一般在 20~100 mm, 考虑到管道特别是离心泵的过流能力, 以及垂直输送中泵的防回流堵塞要求, 通常输送最大粒径不超过 35 mm。

矿浆浓度影响提升系统的产能也影响系统的效率, 式(1)表示了水力提升中提升系统效率与输送体积浓度之间的函数关系^[49]

$$\eta = C_v \left[\frac{\rho_s / \rho_{sw} - 1}{J_m} \right] \quad (1)$$

式中 η ——提升系统效率;

C_v ——输送颗粒体积浓度;

ρ_s, ρ_{sw} ——湿结核密度、浆体密度;

J_m ——提升系统的总水力坡降。

由式(1)可以看出, 提升系统效率将随矿浆体积浓度的增大而提高。因为浓度越低, 意味着输送同样体积的矿物时将会同时输送更多的海水, 导致消耗更多的能量, 所以, 选用高浓度提升可以提高系统效率。但是增大输送浓度 C_v , 总水力坡降 J_m 也随之上升, 当浓度增加到一定程度后, 提升效率 η 的上升并不是很大, 而对提升阻力影响却较大。

以水深 5 200 m 的商业采矿系统、每小时提升湿结核的能力为 358 t/h 为例, 计算得提升系统参数如表 1 所示^[49]。表中可见, 当输送体积浓度 $C_v \geq 12\%$ 时, 随浓度的提高, 效率增大的并不是很明显, 而此时的提升流量却较小, 所需扬程也较大, 因此, 可建议商业开采时的矿浆提升浓度选为 12%, 此时, 计算所得的系统效率可达近 70%。

表 1 5 200 m 提升系统工艺参数与输送体积浓度的关系

体积 浓度 C_v	流量 Q_m /(m ³ /h)	管径 D /mm	水力坡降 J_m /(mH ₂ O/m)	总扬程 H /(mH ₂ O)	效率 η (%)
0.10	1 790	420	0.136 1	694	68.23
0.11	1 627	399	0.148 3	756	68.88
0.12	1 490	383	0.159 7	814	69.78
0.13	1 376	368	0.172 3	883	70.07
0.14	1 278	354	0.184 2	939	70.58
0.15	1 193	342	0.196 1	1 000	71.03

系统产能和矿浆的体积浓度确定后,提升系统的流量也就确定了(该例中,提升系统流量约为 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$)。但在同样的流量下,不同的提升管道内径对应着不同的平均流速。参照陆地矿山管道输送的经验,通常要求提升系统中的浆体平均流速 3-5 倍于矿浆在静态液体中的沉降速度^[50],而根据试验结果及经验公式,30 mm 大小的结核在海水中的沉降速度在 0.7 m/s 左右,也就是说多金属结核采矿水力提升系统中,浆体的流速应控制在 2.1~3.5 m/s 的程度。根据流量及流速可以计算出所需的管道内径。但实际工程中管道内径的选取还需要与整个采矿系统的整体设计综合考虑。增大提升管直径,对海面采矿船的悬挂、承载设备的要求也会提高。对于 358 t/h 的产能,如果取流速 3.5 m/s,根据计算,管道的内径应当是在 370 mm 左右,这个管道尺寸对于采矿系统而言是可接受的。

从以上分析可知,在实际的深海采矿的水力提升系统设计时,由于被输送矿物的粒径、矿物在浆体中体积浓度、浆体的平均流速、输送管道的直径等的选取都受到多方面因素的制约,所以在特定的矿物及产能要求下,系统基本参数的选取其实已被限制于一定范围内。也就是说,为满足一定的产能,水力提升系统的基本参数和构型也已基本确定。而且,根据上述分析,对于离心泵式的提升系统而言,其效率可达到近 70%。

综合考虑各种提升系统的输送性能、系统效率及实施可行性,目前来看,离心泵水力提升式是最具有前景的深海采矿提升系统。

4 结论与展望

随着新能源技术对钴、镍、锰等金属的需求剧增以及陆地矿产资源日益枯竭,深海矿产资源的开发与利用再次引起了世界主要工业国家与新兴工业国家以及一些国际大型企业的高度关注。对深海采矿提升系统的发展历程进行了总结,在考虑系统产能要求的前提下,从技术原理的角度对几种典型的深海采矿提升系统进行研究,形成如下观点。

(1) 针对深海采矿商业开采而言,提升系统需要满足长距离,粗颗粒,大产能,高能效和低污染等要求。其中提升系统的输送产能、系统效率及系统在实际工程中实施和维修等方面的性能是提升方案选择的重要因素。

(2) 缆斗式提升系统的输送产能和效率与箕斗的提升速度、箕斗的外形结构、被提升矿物的密度

等多个因素有关。缆斗式提升属于机械提升,其提升效率可达到 85%以上,但对于大产能的商业可开采系统而言,在深海环境下,靠单个提升单元来实现将非常困难,而且,缆斗提升实际应用的最大问题,即作业过程中缆绳可能发生缠绕,尚未解决。

(3) 气力提升法的优点在于其空气压缩机等布置在水面采矿船上,检验和维修相对方便很多。对于大产能的商业开采系而言,气力提升可以通过提升管道内径来提高产能,但大直径的管道会增加提升系统的重量,也会增加管道布放回收及整个采矿系统运行的成本和难度。气力提升的效率远低于水力提升,而且在同样产能下有更大回注水量,这也是气力提升法的一个不利点。

(4) 水力提升系统主要包括正排量泵和离心泵两种泵送方式,对大产能的商业开采系统而言,正排量泵水力提升系统符合海上作业废水排放的环保要求,但存在粗颗粒过流问题。目前欧盟和我国均采用的离心泵水力提升系统,欧盟采用的蜗壳式离心泵水力提升系统需要考虑在深海中多个电机和阀门的供电问题,我国采用的空间导叶式离心泵具有高扬程和可通过粗颗粒等特点,其基本水力性能已通过试验验证。

从多个方面对几种典型的深海采矿提升系统方案进行分析比较,分析结果可知,这些提升系统各有利弊,这也是这些系统方案都还一直被关注和研究的原因所在。对于大产能和高扬程的商业开采系统而言,离心泵水力提升系统更具有其优势。当然最终哪些方案更适宜更有生命力,需要通过实际商业开采的实践来检验和选择。

目前全球海洋矿产资源尚无成熟的开发模式,未实现大规模的商业化开采。但世界各国正在加快开展深海矿物开采关键技术的研究,我国多金属结核采矿试验工程所提出的离心泵水力提升式输送技术方案已形成,海上试验也正在紧张筹备过程中。尽管深海矿产资源商业开采系统的发展还面临着许多重大的挑战,但总体上已不存在不可逾越的技术障碍。全球 31 块专属勘探权和优先开采权的海底矿区中中国享有 5 块,是目前拥有专属勘探权和优先开采权的海底矿区最多的国家,我国应抓住深海矿产资源开发时机,实现深海采矿作业过程安全、经济、环保,这对我国实现“海洋强国”的目标具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] SHIRAYAMA Y, ITOH H, FUKUSHIMA T. Recent

- developments In environmental impact assessment with regard to mining of deep-sea mineral resources[M]. Deep-Sea Mining. New York: Springer International Publishing, 2017.
- [2] 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 Zongxi, ZHENG Renrui, et al. Progress, challenges and prospects of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. Land Resources Information, 2016(11): 27-32.
- [3] NISHI Y. Static analysis of axially moving cables applied for mining nodules on the deep sea floor[J]. Applied Ocean Research, 2012, 34: 45-51.
- [4] SHARMA R. Deep-Sea Mining: Economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. Marine Technology Society Journal, 2011, 45(5): 28-41.
- [5] SHARMA R. Deep-sea mining[M]. New York: Springer, 2017.
- [6] 曹亮, 杨振, 廖时理, 等. 现代海底多金属硫化物矿床控矿因素分析研究进展[J]. 现代矿业, 2019, 35(7): 6-11.
CAO Liang, YANG Zhen, LIAO Shili, et al. Research progress in analysis of ore-controlling factors of modern submarine polymetallic sulfide deposits[J]. Modern Mining, 2019, 35(7): 6-11.
- [7] 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 Jianmin, LIU Lei, LÜ Haining, et al. Current status and prospects of my country's deep-sea mineral resources development equipment research and development[J]. Engineering Science, 2020, 22(6): 9-17.
- [8] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿整体系统动力学建模及联动开采作业过程快速仿真分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 79-88.
DAI Yu, LIU Shaojun. Establishment of the dynamic model of the total deep ocean mining system and fast simulation of its integrated operation process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 79-88.
- [9] 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 Shaojun, 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.
- [10] 郑洲, 姚新伟, 王福平. 论深海海洋装备技术发展的现状及趋势[J]. 化工管理, 2017(34): 154.
ZHENG Zhou, YAO Xinwei, Wang Fuping. On the status quo and trend of the development of deep-sea marine equipment technology[J]. Chemical Management, 2017(34): 154.
- [11] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍, 等. 深海采矿系统现状及展望[J]. 船舶物资与市场, 2016(6): 25-31.
ZHAO Yiyu, ZENG Xiaoguang, LANG Shuyan, et al. Current status and prospects of deep-sea mining system[J]. Ship Materials and Market, 2016(6): 25-31.
- [12] 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 Yingjie. Research trends and prospect analysis of mining technology for seabed mineral resources[J]. Mining Equipment, 2012(1): 54-57.
- [13] 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 Yiyu, ZENG Xiaoguang, LANG Shuyan. Analysis on the development trend of deep-sea equipment technology[J]. Ship Materials and Market, 2016(5): 42-45.
- [14] 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, 2013, 40(6): 59-63.
ZOU Weisheng, LU Yong, LI Zhehuan. Numerical simulation analysis of lift pumps in deep sea mining[J]. Journal of Hunan University, 2013, 40(6): 59-63.
- [15] THIEL H. From MESEDA to DISCOL: a new approach to deep-sea mining risk assessment[J]. Marine Mining, 1991, 10(4): 369-386.
- [16] YOON C H, PARK Y C, KIM Y J. A study on flow analysis of lifting pump and flexible hose for sea-test[J]. Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering, 2007, 44(3): 308-313.
- [17] 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, 2011, 42(增刊 2): 221.
ZOU Weisheng, LI Zhehuan, CHEN Aili. Research on electric pumps for raising mines in ocean mining[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(Suppl.2): 221.
- [18] ODUNTON N A. Deep-seabed polymetallic nodule exploration: Development of environmental guidelines[R]. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority, 1998.
- [19] TROTMAN G. Analysis of exploration and mining technology for manganese nodules[R]. Berlin: Springer, 1984.
- [20] STOW D. Sequence of structures in fine-grained

- turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 25: 23-42.
- [21] MCFARLANE J, BROCKETT T, HUIZINGH J P. Analysis of mining technologies developed in the 1970's and 1980s[R]. Kingston: International Seabed Authority, 2008.
- [22] 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*, 2019, 50(4): 829-836.
ZHAO He, LIU Shaojun, HU Xiaozhou. Research on the unsteady fluid radial force in the deep sea lifting pump[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 50(4): 829-836.
- [23] YAMADA H, YAMAZAKI T. Japan's ocean test of the nodule mining system[C]//Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, May 24-29, 1998, Montreal, Canada. Cupertino, USA: ISOPE, 1998: 13-19.
- [24] 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 ISOPE Ocean Mining Symposium, June 19-24, Hawaii, USA. Cupertino, USA: ISOPE, 2011: 110-115.
- [25] HONG S, KIW H W, CHOI J S. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 6-11, Shanghai, China. New York, USA: ASME, 2010: 75-86.
- [26] 刘少军, 李渊文, 胡小舟. 基于 DEM-CFD 颗粒体积分数对深海扬矿电泵工作性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(10): 273-280.
LIU Shaojun, LI Yuanwen, HU Xiaozhou. The influence of DEM-CFD particle volume fraction on the performance of deep-sea electric pumps[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(10): 273-280.
- [27] 北原良哉, 齐藤隆之. 垂直管における粗大粒子の力輸送に関する研究[J]. *采矿と保安*, 1985, 31(3): 146-157.
KITAHAARA Y, TAKAYUKI S. Research on the hydraulic transport of coarse particles in the vertical pipe[J]. *Mining and Security*, 1985, 31(3): 146-157.
- [28] 野田. 固体粒子の水力輸送に関する研究[J]. *日本矿业会志*, 1986, 86(987): 20-26.
NODA. Research on the hydraulic transport of solid particles[J]. *Japan Mining Journal*, 1986, 86(987): 20-26.
- [29] 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*, 2011, 42(增刊 2): 212-220.
TANG Dasheng, YANG Ning, JIN Xing. Experimental study of lifting simulation system for deep sea mining [J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42(Suppl.2): 212-220.
- [30] 胡琼. 深海采矿扬矿管道系统力学行为模拟试验系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
HU Qiong. The simulation test research on mechanical behavior of the lifting pipe system of deep-ocean mining[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [31] JOHNSTON M. PNG mining and petroleum conference[R]. Sydney: Nautilus Minerals Inc., 2012.
- [32] YOON C H, PARK Y C, KIM Y K. A study on flow analysis of lifting pump and flexible hose for sea-Test[J]. *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, 2007: 171-176.
- [33] 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 Yajuan. Study on internal flow characteristics and hydraulic force of electric lifting pump for deep-sea mining[D]. Changsha: Central South University, 2019.
- [34] OH J W, MIN C H, LEE C H, et al. Arrangement plan of buoyancy modules for the stable operation of the flexible riser in a deep-seabed mining system[J]. *Ocean & Polar Research*, 2015, 37(2): 119-125.
- [35] UN Ocean Economics Technology Branc. Delineation of mine sites and potential in different sea areas[R]. Berlin: Springer, 1987.
- [36] JOHN P, SEAN P. Nautilus nodule mining and processing scoping study[M]. New York: Springer, 2016.
- [37] ROLLS R. Fact-sheet cable traction control unit ctcu[M]. New York: Springer, 2013.
- [38] SCHULTE S A. Vertical transport methods for deep sea mining[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2013.
- [39] TAITAL Y, BORNEA D, DUKLER A E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas - liquid flow in vertical tubes[J]. *Aiche Journal*, 2010, 26(3): 39-45.
- [40] YOSHINAGA T, SATO Y. Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles[J]. *International Journal of Mutliphase Flow*, 1996, 22(2): 223-238.
- [41] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A, et al. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow[J]. *Chemical Engineering*

- Journal, 2007, 131(1-3): 273-281.
- [42] HOOG E D, WIJK J M V, WIJNANDS J T M, et al. Degradation of polymetallic nodules during hydraulic transport under influence of particle-wall and particle-particle interaction[J]. Minerals Engineering, 2020, 155: 106415.
- [43] 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): 4-5. XIAO Yexiang, YANG Lingbo, 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): 4-5.
- [44] STEVE R. Seafloor resource production[R]. Sydney: Nautilus Minerals Inc. 2012.
- [45] WOFKOWICZ S, PAULO A. Blue mining in the atlantic ocean- A real need or a need for realism[J]. Przegląd Geologiczny, 2019, 67(2): 91-103.
- [46] 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.
- [47] 叶坚. 粗颗粒在复杂管道输送过程中运动状态及阻力变化规律研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2011. YE Jian. Research on the movement state and resistance variation law of coarse particles in the process of complex pipeline transportation[D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2011.
- [48] ZHOU Jiawei, DU Changlong, LIU Songyong, et al. Comparison of three types of swirling generators in coarse particle pneumatic conveying using CFD-DEM simulation[J]. Powder Technology, 2016, 301: 1309-1320.
- [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.
- [50] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. FEI Xiangjun. Hydraulics of slurry and granular material transportation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.

作者简介: 康娅娟, 女, 1990 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为深海采矿扬矿装备的研制与多相流数理建模及仿真。
E-mail: kangyajuan@fosu.edu.cn
刘少军(通信作者), 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为深海作业装备设计与控制、工程机械混合动力技术。
E-mail: liushaojun@csu.edu.cn