

深海多金属结核矿物输送模式特征与适应性研究^①

张浩^{1,2}, 陈小平^{1,2}, 汤明刚^{1,2}, 许锋炜¹, 卞鑫¹, 李生鹏¹

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 在分析多金属结核矿区环境特征的基础上, 研究了连续链斗、自动潜浮穿梭采矿车以及各类管道提升模式应用于深海多金属结核矿物输送的具体特征及适应性。综合考虑机动性、干矿输送能力、布放回收作业效率、造价及运行成本、作业水深适配性、极端海况适应性、海底扰动适应性以及环境友好性等八个方面, 建立涵盖多维度评价因素的数学模型以及适应性评价体系。分析结果表明, 连续链斗以及管道岸斗提升模式不适用于多金属结核输送; 自动潜浮穿梭采矿车研发成本高, 不具备经济适应性。随着水下装备可靠性提高, 在可以高质量解决重介质密封问题的前提下, 重介质管道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。

关键词: 深海采矿; 多金属结核; 矿物输送模式; 适应性分析

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.007

文章编号: 0253-6099(2023)04-0032-07

Characteristics and Adaptability of Lifting Modes for Deep-Sea Polymetallic Nodules

ZHANG Hao^{1,2}, CHEN Xiaoping^{1,2}, TANG Minggang^{1,2}, XU Fengwei¹, BIAN Xin¹, LI Shengpeng¹

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the environmental characteristics of polymetallic nodules mining zone, different lifting modes for deep-sea polymetallic nodules, including continuous line bucket (CLB) system, autonomous submersible shuttle mining system and pipeline lifting system, were analyzed in terms of characteristics and applicability. With eight factors taken into consideration, including maneuverability, dry ore lifting capacity, launching and recovery efficiency, manufacturing and operation costs, suitability for water depth, adaptability to extreme sea condition and seabed disturbance, as well as environmental friendliness, a mathematical model covering multi-dimensional evaluation indices and an adaptability evaluation system were established. Analysis results show that CLB system and capsule pipeline lift system are not suitable for lifting polymetallic nodules, while autonomous submersible shuttle mining system, due to high cost in R & D, is not economically applicable. Due to the improvement in the reliability of underwater equipment and progress in the solution to sealing of heavy medium, pipeline lift system with heavy medium is expected to become a high-efficient lifting mode for deep-sea polymetallic nodules.

Key words: deep sea mining; polymetallic nodules; mineral lifting mode; adaptability analysis

国际海底面积达 2.517 亿平方公里, 占地球总表面积的 49%, 是一类不受任何国家管辖的广阔区域。这一区域蕴含着丰富的金属资源, 以多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳为代表^[1-2]。尽快开发海底丰富的金属矿产资源, 是解决当前工业发展速度与陆地矿产资源不协调矛盾的重要途径。根据《联合国海洋公约》与国际海底管理局规则框架, 深海矿产资源的勘探开发权由

申请国自行完成申请, 并在规定时间内具备开发能力后, 方可实施矿产资源开发。目前深海多金属结核是全球关注的深海矿藏资源, 也是各国的必争之物。

早在 20 世纪 60 年, 西方国家便开始针对多金属结核开采与输送技术开展研究工作^[3], 矿物输送模式是确定深海矿产资源开发模式的关键一环。矿物输送模式不同, 将直接导致整套开发模式发生重大变化。

① 收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801600); 江苏省自然科学基金(BK20190152); 中国船舶集团专项(202102Z)

作者简介: 张浩(1991—), 男, 河北保定人, 工程师, 主要从事船舶与海洋结构物水动力与结构力学、深海采矿方面的研究。

国外学者在研究初期开展了多类输送模式的分析研究,日本人提出了连续链斗输送模式,法国人提出了自动潜浮穿梭采矿车模式,但这些模式尚未实现工程化应用。目前主流的矿物输送模式为管道提升式作业模式,相关学者分别针对不同动力介质进行了研究,包括气力提升模式、水力提升模式、轻介质提升模式、重介质提升模式以及管道岸斗提升模式^[4]。

多金属结核主要分布在深海平原以及深海盆地内,分布水深4 000~6 000 m,表现为沉积在海底表面或被沉积物浅度掩埋的平面式分布,是一种典型的二维矿藏。

当前国内外学者针对深海矿藏实际开发需求开展了一定程度的定性分析,主要在某一具体维度上进行2~3类矿物输送模式的优劣性分析,尚未考虑多维度因素之间的耦合关系,同时研究对象也尚未覆盖所有矿物输送模式。本文以深海矿产资源发展过程中出现的诸多输送模式为研究对象,结合当前技术发展水平与实际作业需求,针对深海多金属结核矿藏开发需求,开展输送模式的特征分析与适应性评价,通过建立一套考虑多维度评价因素的、具备量化评估能力的适应性评价方法,为设计人员在矿物输送模式的选取上提供一种可实现量化评价的数学模型。

1 多金属结核矿区环境特点

为便于开展矿物输送模式对多金属结核矿物的适应性分析,需充分分析多金属结核矿区环境载荷特征。多金属结核矿区海域多为深远海区域,其风力较强^[5-6]、波浪载荷作用剧烈。同时多金属结核矿区所在海域表面洋流活动明显^[7],海底洋流活动频繁且不规则,流速波动大,流向不稳定,这一特征会对海底采矿装备产生一定程度的扰动。因此,在开展多金属结核输送模式适应性研究时,需充分考虑其所在海域的环境特征。

2 矿物输送模式特征分析

自20世纪60年代起,各国相关学者分别提出了多种矿物输送模式,从输送的形式特征上可分为两大类:非管道提升式矿物输送模式和管道提升式矿物输送模式,其中非管道提升式矿物输送模式包括连续链斗模式、自动潜浮穿梭采矿车模式,管道提升式矿物输送模式包括水力提升模式、气力提升模式、轻介质提升模式、重介质提升模式以及管道岸斗提升模式。

2.1 非管道提升式矿物输送模式

2.1.1 连续链斗模式

连续链斗模式是一种将集矿与输送融为一体的作业模式,也是最早提出的针对多金属结核的开采及输送

作业模式,如图1所示。其基本原理是在一根较长的缆索上吊挂若干链斗,通过采矿船首尾两端或两条采矿船安装的缆索牵引系统实现循环运转,利用链斗的铲掘作用将海底多金属结核铲入链斗中,并提升至海面^[8-9]。

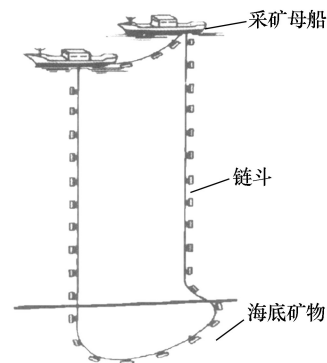


图1 连续链斗模式

该作业模式优点为:① 系统设备简单,维修成本低,维护难度小,投资少;② 开采矿物主要以干矿为主,矿物含水率较低;③ 对采矿船技术能力需求较低,采矿船设计制造成本低。

该作业模式缺点为:① 对矿区多金属结核回采率控制难度非常大,链斗在海底的实际铲掘位置不可控,极可能造成部分区域重复性开采或未实现开采;② 对地形平坦程度要求高,在拖曳过程中,若地形起伏较为严重,可能造成采矿设备损坏;③ 由于缆索需形成闭合回路,且采矿作业水深较深,在海洋环境载荷与采矿船动边界影响的交互作用下,可能产生缠绕打结问题,造成整套输送系统失效。

2.1.2 自动潜浮穿梭采矿车模式

自动潜浮穿梭采矿车模式是一种非典型矿物输送模式,如图2所示。它将集矿与输送功能集中在采矿车上,通过采矿车调节自身浮重比,下潜至海底。完成开采后,进一步释放一部分压载,并利用推进器辅助作用返回海面完成矿石卸货。如此往复循环实现海底多金属结核的开采^[9]。

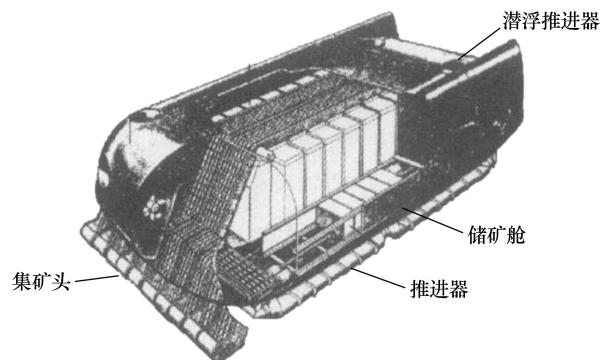


图2 自动潜浮穿梭采矿车

该作业模式优点为:①设备独立、灵活性好;②单台设备故障不会对整体开采系统造成决定性影响;③设备可维性较高,对系统完整性与可靠性要求较低。

该作业模式缺点为:①采矿过程间断不连续,单台车潜浮作业时间长,单机生产力低下;②采矿车能源需求较大,且产量低,整套系统作业模式费效比偏高,很难实现经济化开采;③研发成本较高,对于高技术设备以及传感遥控系统要求极高。

2.2 管道提升式矿物输送模式

管道提升式矿物输送模式是一种以管道为主体、利用流体携带能力来实现矿物提升的作业模式。

2.2.1 水力提升模式

水力提升模式通过在海底采矿车与采矿母船之间建立一条输送管道,自下而上分别包括采矿车、输送软管、中继站、输送硬管与串联扬矿泵组、采矿船等^[9-10],如图3所示。

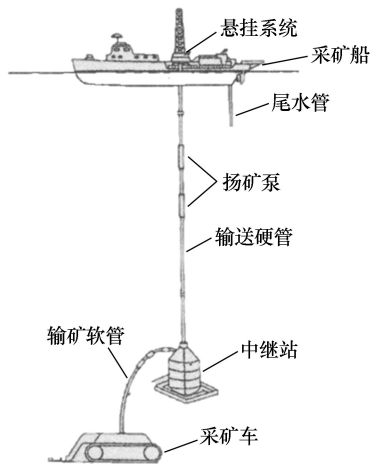


图3 水力提升模式

该作业模式优点为:①以建立管道输送系统为主,系统结构形式简单;②水力提升效率较高,矿石携带量较大,且连续性好。

该作业模式缺点为:①矿石输送过程对泵送系统磨损较为严重;②矿石输送效率与矿石粉碎粒径呈负相关,但矿浆脱水效率与矿石粉碎粒径呈正相关,两者存在一定矛盾关系;③输送的是矿浆,含水量较高,需要进行脱水处理;④针对多金属结核矿区水深与作业特点,需建立4 000~6 000 m的悬挂拖航式管道系统,管道系统可靠性维持难度大;⑤超深水矿物输送系统管路长度大,对采矿船承载力要求高,增大了配套船舶的建造成本,同时需要搭载专用的布放回收作业装备。

2.2.2 气力提升模式

气力提升模式与水力提升模式相似,主要区别表

现为气力提升模式的驱动力来自气体的运移能力,通过向输送管道内注入高压气体,在管内形成气液两相流,利用气泡或气体柱塞的上移携带力实现矿石颗粒的运移。气力提升模式不再需要水力输送泵,而是采用连接辅助管线来完成管道内高压气体的输送功能^[11-12],如图4所示。

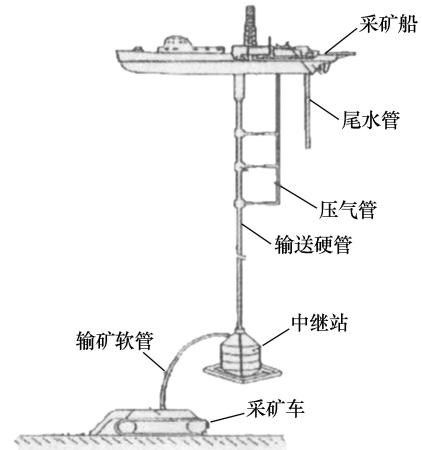


图4 气力提升模式

该作业模式优点为:①避免了水力输送泵的磨损问题;②输送装备进一步简化,作业工艺简单。

该作业模式缺点为:①效率低、能耗大,一般能量利用率低于15%;②气力提升需要建立多管路系统,其安装工艺与安装效率均不如水力提升作业模式;③管路系统过于复杂,在4 000~6 000 m超深水悬挂作业状态下,系统可靠性进一步下降,一旦出现局部管路破坏,会造成整个系统的功能丧失。

2.2.3 轻介质提升模式

轻介质提升与气力提升模式相似,只是将气体换成了轻介质,主要包括液体轻介质和固体浮子式轻介质。

该作业模式优点为:相较于气力提升模式,提升效率有所增加。

该作业模式缺点为:①与气力提升模式相似,仍没有解决安装工艺复杂以及系统可靠性问题;②轻介质泄露会造成海水污染;③船上需要储存大量的轻介质,不利于船体设计^[4]。

2.2.4 重介质提升模式

重介质提升与水力提升模式相似,通过添加重介质等化学添加剂,增大提升介质浓度、密度以及黏度来提高携矿能力。

该作业模式优点为:提升效率高,作业能耗小,重介质具备润滑能力,对泵送系统的磨损率降低。

该作业模式缺点为:①不可建立类似于水力提升

的开放式循环管路,对管路系统密封性提出了非常高要求;②需解决泄露污染问题,使管道系统可靠性评价体系进一步复杂,实现难度更大;③中继站设计复杂,需要多路水下阀组控制介质循环;④采矿船需要配备重介质泥浆配置系统。

2.2.5 管道岸斗提升模式

管道岸斗式提升是利用U形管建立回流通道,通过在管道内预制岸斗实现连续运转与携矿功能^[4,13]。集矿头抽吸结核,通过软管输送给装载室,进入提升管道后,通过管道内的岸斗运转,提升至采矿船上。如图5所示。

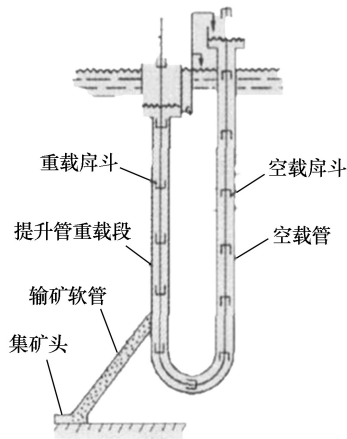


图5 管道岸斗提升模式

该作业模式优点为:作业效率高,能耗低。

该作业模式缺点为:①不适用于拖航作业工况,管道线型发生扭转后,岸斗会卡住,造成运行失效;②布放回收作业工艺复杂,船用配套设备设计难度大;③在4000~6000 m超深水作业环境下,U形管处于不稳定状态,管道自身存在扭矩,会引发管道变形及缠绕事故。

3 多金属结核输送模式适应性分析

3.1 评价因素分析

基于多金属结核矿区环境特点,开展矿物输送系统适应性评价因素分析,认为评价因素可分为以下八个方面:

- 1) 矿物输送高程非常大,需要解决4000~6000 m的垂直高程输送需求。
- 2) 目标区域海况较为恶劣,采矿船的水动力响应变化对输送系统稳定性具有一定影响。
- 3) 海底扰动较明显,对输送系统的水下部分影响较大。
- 4) 矿区面积大,开采过程中,矿物输送系统应具有良好的机动性与拖航性能。

- 5) 矿物输送系统应具备较强的干矿输送能力。
- 6) 矿物输送应具备良好的密封性,避免向海水环境泄露污染物。
- 7) 布放回收以及作业效率高,布放回收作业装备技术成熟度高。
- 8) 输送系统的造价及运行成本较为合理,具有较高经济性。

根据上述具体要求建立输送作业模式的评价体系,梳理顶层八项评价因素,详见表1。

表1 多金属结核矿物输送模式适应性评价因素

因素序号	因素名称
1	作业水深适配性
2	极端海况适应性
3	海底扰动适应性
4	机动性
5	干矿输送能力
6	环境友好性
7	布放回收作业效率
8	造价及运行成本

针对多金属结核矿区特点,分别从经济性和技术可靠性两方面建立评价因素体系,其中以费效比作为经济性评价的唯一准绳,技术可靠性评价因素主要以安全性评价为主。安全性分解为重大安全性问题与一般安全性问题,对技术可靠性建立两级评价系统。如图6所示。

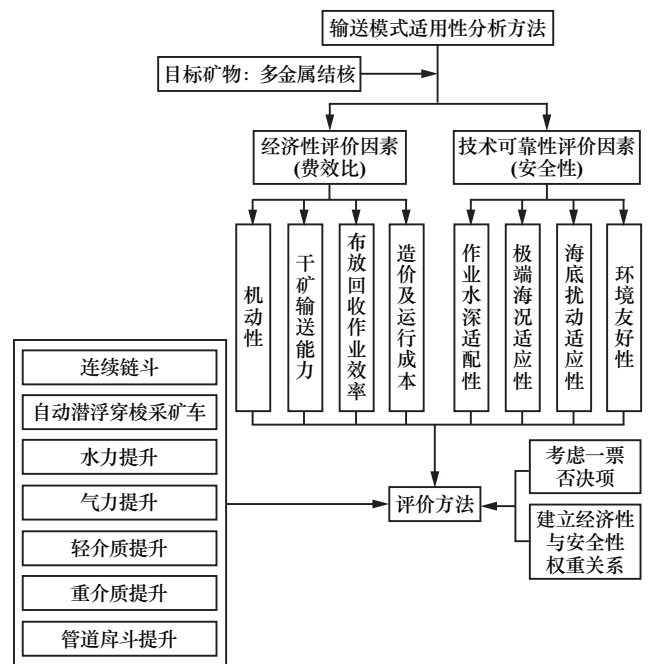


图6 适应性分析方法

本文认为涉及重大安全问题的技术可靠性考核因

素权重最大,其次为经济性评价因素,最后为涉及一般安全性问题的技术可靠性考核因素。在设计适应性分析方法时,若某些输送模式根本无法满足多金属结核输送的基本需求,应做一票否决处理。针对8个评价因素进行具体分析,结果见表2。

表2 考核因素分析

因素名称	分析结果	是否一票否决
作业水深适配性	无法实现多金属结核输送	是
极端海况适应性	输送作业窗口下降	否
海底扰动适应性	输送作业窗口下降	否
机动性	无法实现多金属结核输送	是
干矿输送能力	输送效率下降	否
环境友好性	环境治理成本上升	否
布放回作业效率	附加作业成本上升	否
造价及运行成本	成本上升	否

3.2 数学模型

3.2.1 顶层设计

根据前述分析,确定重大安全因素与一般安全因素的界定准则,如表3所示。

表3 安全性因素分类准则

因素分类	基本特征
重大安全性	存在重大安全隐患,发生事故后,会造成无法挽回的安全问题,造成采矿系统完全丧失作业能力甚至更加严重的后果
一般安全性	设备易发生故障,会造成采矿系统部分功能丧失,降低系统运行效率,或其他一般性的安全事故

在评价体系中,为体现不同级别因素的占比,对各因素大类进行权重划分。考虑到涉及重大安全性因素的事项直接影响到整套采矿系统的可用性甚至是生命财产安全问题,设置权重占比45%;若相应采矿模式费效比偏高,造成整体经济性不好,同样不具备商业化开采推行潜力,设置权重占比35%;涉及一般安全性因素的事项,认为只会造成并不严重的局部安全事故或技术性故障问题,并不会对采矿全系统造成毁灭性影响,设置权重占比20%。

根据分析,认为该数学模型应由两层组成,顶层是根据各因素的权重占比建立最终的评价计算方法,底层是针对不同输送模式的具体得分情况,以扣分法作为评分基本方法,确定满分为10分。

$$Z = 1 - \frac{\text{费效比}}{|1 - \text{费效比}|} \times \delta \times \{10 - [(\text{涉及重大安全因素扣分}) \times 45\% + (\text{涉及经济性因素扣分}) \times 35\% + (\text{涉及一般安全性因素扣分}) \times 20\%]\} \quad (1)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{if 未触及一票否决控制因素} \\ 0 & \text{if 已触及一票否决控制因素} \end{cases} \quad (2)$$

式中 δ 为阶跃函数; Z 为评价体系中的最终得分。

由式(1)可知,费效比大于1时,认为此类输送模式已不具备任何经济性,因此 Z 得分为负值;由式(2)可知,当满足一票否决要求时, δ 为0,其余情况为1。综合上述两式,当 $Z > 0$ 时,所得评分为有效评分;当 $Z \leq 0$ 时,认为该输送模式不具备任何适应性。

3.2.2 不同输送模式的底层扣分准则

为便于完成不同输送模式针对不同评价因素条件下的适应性量化评价,分别设计非常适应、适应、较不适应和不适应4个评分标准,以满分10分作为基础,确定扣分准则。如表4所示。

表4 扣分准则

评价等级	具体扣分
非常适应	0
适应	3
较不适应	6
不适应	10

结合式(1),对经济性评价因素与技术可靠性评价因素的相应评价条目进一步整合,获得大类得分。其中经济性评价因素的加权平均参照三个因素的具体贡献情况进行划分,如表5所示。技术可靠性评价因素分为重要安全性因素与一般安全性因素,经过分析认为,在同一类别里,作业水深适配性、极端海况适应性、海底扰动适应性、环境友好性这4个因素的影响程度区别不大,采用均值法进行评分整合。

表5 经济性评价因素权重分配

因素条目	对经济性的主要影响	权重分配
机动性	影响采矿系统的运行速率,造成系统运行效率低下	20%
干矿输送能力	影响单位时间的输矿效率以及采矿船的脱水效率,对于经济性影响较大,且最为直接	30%
布放回作业效率	影响非开采时间,针对一个矿区开采总时长占比较小,对于系统运行总体时效性影响有限	10%
造价及运行成本	造价及运行成本是影响经济性评价的最重要因素,是直接影响该输送模式下需要多久才能实现盈利的关键因素	40%

4 案例分析

4.1 底层评价分析

以连续链斗模式、自动潜浮穿梭采矿车模式、水力提升模式、气力提升模式、轻介质提升模式、重介质提

升模式以及管道岸斗提升模式为研究对象,分别开展各类评价因素的适应性水平分析,结果见表6~7。

表6 不同输送模式下的经济性评价结果

输送模式	机动性	干矿输送能力	布放回收作业效率	造价与运行成本
连续链斗	适应	较不适应	不适应	非常适应
自动潜浮穿梭采矿车	非常适应	较不适应	不适应	不适应
水力提升	非常适应	适应	适应	适应
气力提升	非常适应	较不适应	适应	适应
轻介质管道提升	非常适应	较不适应	适应	较不适应
重介质管道提升	非常适应	非常适应	适应	较不适应
管道岸斗提升	较不适应	适应	较不适应	适应

表7 不同作业模式下的技术可靠性评价结果

输送模式	作业水深适配性		极端海况适应性		海底扰动适应性		环境友好性	
	适应性	备注分类	适应性	备注分类	适应性	备注分类	适应性	备注分类
连续链斗	不适应	一般安全因素、关键控制因素	不适应	重大安全因素	不适应	重大安全因素	非常适应	一般安全因素
自动潜浮穿梭采矿车	非常适应	一般安全因素	不适应	一般安全因素	适应	一般安全因素	适应	一般安全因素
水力提升	适应	一般安全因素	适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素
气力提升	适应	一般安全因素	适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素
轻介质管道提升	适应	一般安全因素	适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素	较不适应	一般安全因素
重介质管道提升	适应	一般安全因素	适应	一般安全因素	非常适应	一般安全因素	较不适应	一般安全因素
管道岸斗提升	不适应	一般安全因素、关键控制因素	不适应	重大安全因素	不适应	重大安全因素	非常适应	一般安全因素

采用循环式链斗进行开采,一般依托一条船或两条船建立具有一定尺度的循环回路,其布放回收相对复杂,且作业效率不高,评价为不适应。

4) 造价与运行成本。连续链斗结构形式简单,维护难度低,配套采矿船技术要求少,造价与运行成本较低,评价为非常适应。

4.1.2 技术可靠性评价

1) 作业水深适配性。连续链斗模式对超深水作业环境不具备适应性,随着水深增加,链斗的控制难度显著增加,运行故障率非常大,结合表2,确定为关键控制因素,执行一票否决制的规定。

2) 极端海况适应性。连续链斗模式的线型控制难度巨大,对于极端海况适应性非常差,并可能造成整个采矿系统失效,评价为不适应,确定为重大安全因素。

3) 海底扰动适应性。在海底扰动作用下,链斗可能发生缠绕,造成整个采矿系统失效,评价为不适应,确定为重大安全因素。

4) 环境友好性。连续链斗是一种开放式矿物输送模式,未携带任何污染物,评价为非常适应。

4.2 适应性评价

根据数学模型计算规则与底层评价结果,可以获

得不同作业模式在经济性评价、重大安全性因素以及一般安全性因素三方面的具体扣分情况,计算结果见表8。

4.1.1 经济性评价

1) 机动性。连续链斗模式采用链斗循环作业,具有一定的拖航能力,但由于链斗需要触及海底,在拖航平顺性方面较差,最终评价为适应。

2) 干矿输送能力。连续链斗模式通过链斗的挖掘动作完成矿石开采,挖掘过程中会将淤泥和水一同运送到采矿船上,虽然携带矿石体积浓度较高,但整体输送效率偏低,且回采率很低,因此认为干矿输送能力评价为较不适应。

3) 布放回收作业效率。连续链斗的主要特点是

表8 不同输送模式下的扣分结果

输送模式	经济性评价	重大安全性因素	一般安全性因素
连续链斗	3.4	10	5
自动潜浮穿梭采矿车	6.8	—	4
水力提升	2.4	—	1.5
气力提升	3.3	—	1.5
轻介质管道提升	4.5	—	3
重介质管道提升	2.7	—	3
管道岸斗提升	3.9	10	5

得不同作业模式在经济性评价、重大安全性因素以及一般安全性因素三方面的具体扣分情况,计算结果见表8。

结合式(1)和式(2),对不同输送模式进行最终评分测算,结果见表9。由于费效比测算是一项非常复杂的经济学问题,包含了具体的装备研发成本以及对输送模式潜在的最大产量评估,需要大量的数据测算才能获得准确结论,为保证分析结论的合理性,在本次分析过程中,暂时忽略费效比这一计算因子。

由表9可知,连续链斗模式与管道岸斗提升模式无法满足多金属结核对应水深的输送需求,评分结果为0分。其他几类输送作业模式均满足多金属结核目

标水深的基本作业需求。在忽略费效比因素的前提下,各类输送作业模式自高分至低分的排序为:水力提升、气力提升、重介质管道提升、轻介质管道提升、自动潜浮穿梭采矿车。

表9 不同输送模式下的最终评分结果

输送模式	δ 值	忽略费效比因素的评分
连续链斗	0	0
自动潜浮穿梭采矿车	1	6.820
水力提升	1	8.860
气力提升	1	8.545
轻介质管道提升	1	7.825
重介质管道提升	1	8.455
管道岸斗提升	0	0

由排序结果可知,适用于多金属结核开发需求的输送模式仍以管道输送方式为主,自动潜浮穿梭采矿车作业模式可以确定其费效比大于1,不具备经济性,在考虑费效比因素后,认为以目前的工业研发能力,自动潜浮穿梭采矿车模式不适用于多金属结核开发。气力提升作业模式与重介质管道提升模式得分相差不大,经过进一步定性分析发现:如果能够较好地解决重介质管道密封问题,防止重密度介质泄露,重介质管道提升模式对多金属结核开采的适应性将得到较大提升。

5 结 语

1) 对多金属结核矿区环境特点以及不同矿物输送模式开展特征分析,确定多金属结核矿区环境参数具体特点,并结合相关环境与作业需求,进一步针对连续链斗、自动潜浮穿梭采矿车以及管道提升式矿物输送模式进行特征分析,确定不同输送模式的优缺点。分析结果表明,不同作业模式适用于不同的工程问题,不存在完美的矿物输送模式。需要考虑多维度评价指标进行矿物输送模式综合性分析。

2) 综合考虑矿物输送模式的机动性、干矿输送能力、布放回收作业效率、造价及运行成本、作业水深适配性、极端海况适应性、海底扰动适应性以及环境友好性等八个方面,构建适应性评价体系。评价结果表明,连续链斗以及管道岸斗提升作业模式不适用于多金属

结核开发需求;自动潜浮穿梭采矿车研发成本高,不具备经济适应性。水力提升仍是目前极具潜力的输送模式,随着科技进步,在可以高质量解决重介质密封问题前提下,重介质管道提升有可能发展成为高效的矿物输送模式。

参考文献:

- [1] 郭振威,李方达,柳建新,等. 海洋有色金属矿产地球物理勘探进展[J]. 中国有色金属学报, 2023,33(1):285-306.
- [2] 曾娟,赵庆雷,余侃萍,等. 深海锰结核采矿输送过程对海水水质的影响研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):78-80.
- [3] 康娅娟,王长伟,刘少军,等. 深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2938-2952.
- [4] 邹伟生,黄家桢. 大洋锰结核深海开采扬矿技术[J]. 矿冶工程, 2006,26(3):1-5.
- [5] 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.
- [6] 李健,郭敬天,黎舸,等. 东太平洋克拉里昂-克里帕顿断裂区多金属结核保留区的气象状况和预报规律[J]. 海洋开发与管理, 2018(12):61-65.
- [7] 林丽茹,胡建宁. 太平洋东南海域表层地转流场的季节及年际变化特征[J]. 海洋科学, 2006(6):51-58.
- [8] Yoshiki Nishi, Tomohiro Yamai, Kohsuke Ikeda. Two-belt continuous line bucket system: Its concept design and fundamental bucket motion experiments[J]. Applied Ocean Research, 2015,53:125-131.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] SU 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.
- [12] 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.
- [13] Taimoor Asim, Rakesh Mishra, Sufyan Abushaala, 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.

引用本文: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.