



深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案

康娅娟¹, 王长伟¹, 刘少军^{2,3}, 邹伟生⁴, 许怡赦⁵

- (1. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 佛山 528000;
2. 中南大学 深圳研究院, 深圳 518000;
3. 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 长沙 410012;
4. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082;
5. 湖南开放大学 网络与技术学院, 长沙 410004)

摘 要: 将多金属结核从数千米的海底提升到水面是采矿作业的关键环节。本文阐述了深海多金属结核商业开采对水下垂直提升系统的要求, 总结了气力和水力两种提升方式的工作原理, 研究了主要提升参数对系统的性能影响, 从系统结构可靠性、经济性、能效指标、产能实现等方面全面分析了两种提升方式的优劣, 通过对比认为, 水力提升方式更适合深海多金属结核商业开采。在此基础上, 开展了深海多金属结核商业开采水下垂直提升系统的设计研究, 提出了提升系统基本技术方案。结合提升泵试验样机的清水试验和矿浆输送试验, 验证了深海多金属结核商业开采水下垂直提升系统方案及设计方法的可行性。该研究为深海采矿技术和装备的研发提供了参考和指导。

关键词: 多金属结核; 商业开采; 气力提升; 水力提升; 提升系统设计

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2938-15

中图分类号: TD857

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37999

KANG Ya-juan, WANG Chang-wei, LIU Shao-jun, et al. Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2938–2952. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37999

中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要强调要瞄准深地深海等前沿领域实施具有前瞻性、战略性的科学技术研究, 深海矿产资源开发研究是深海前沿领域的重要发展方向, 且契合我国“海洋强国”战略。目前, 开发海洋矿产资源已被许多国家列为了重要战略目标。深海中多金属结核资源潜力巨大, 富含新能源技术紧迫需要的钴、镍、铜、锰等金属资源, 是深海矿产资源开发的首选目标。多金属结核一般为球形或椭球形, 粒径在 20~100 mm 之间, 密度约 2100 kg/m³, 呈半埋状态铺在海底沉积物表面, 赋

存于水深 4500~6000 m 的海底^[1-4]。

从 20 世纪 60 年代开始, 以美国为首的多个西方国家便开始了对多金属结核采矿技术方案的研究。将多金属结核从数千米海底提升至海面是深海采矿的重要技术环节, 提升方式决定着深海矿产资源采矿系统的整体结构和组成^[5-6]。国内外对深海采矿技术进行了广泛的研究。日本人提出的“连续链斗法”和法国提出的“穿梭艇法”, 都因为技术和经济方面的一些问题未能解决而终止了研究^[7]。1970 年代末, 以美国为首的 4 个西方财团在东太平洋进行了数次 5000 m 以上的深海多金属结核采矿

基金项目: 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室开放课题资助项目(SH-2020-KF-A02); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0304103)

收稿日期: 2021-07-19; **修订日期:** 2021-09-10

通信作者: 刘少军, 教授, 博士; 电话: 18316621835; E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

海试,都获得了一定程度的成功^[8-11]。这几个海试采矿系统所采用的装备有所不同,但也具备一个共同的基本特征,即这些系统都是由海底集矿机、水面采矿船,以及连接两者的数千米的矿物垂直提升系统三个部分组成,其中垂直提升系统均采用得管道提升式^[8-10]。在管道提升式深海采矿系统作业时,海底集矿机先将海底沉积物上的结核采集到集矿机上并进行初步的破碎,然后通过提升管道将破碎后的结核垂直输送到水面采矿船上,进行初步脱水处理后再由运输船运至陆地。根据矿物提升的驱动方式不同,管道提升系统又分为气力提升^[8]和水力提升^[9]两种方式。OMA(Ocean mining associates)采用气力提升系统从5500 m水深的海底采集了550 t结核到采矿船上,最大产能达到50 t/h^[8]; OMI(Ocean mining INC.)也采用气力提升系统从5200 m的海底成功采集了150 t结核。除了气力提升试验外,OMI还进行了水力提升试验,采用德国KSB泵业公司研制的多台离心泵串联的管道输送系统,成功地采集了650 t多金属结核,最大产能达到40 t/h^[9]。气力提升方式和水力提升方式的技术可行性都已经在多次5000 m级水深的多金属结核采矿海试中得到验证,相关研究人员对其各自的利弊也有一些分析和比较,但大多集中于技术原理和系统结构方面,缺乏从商业开采立场和角度的分析。本文开展深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案研究。首先,在商业开采的要求和背景下,通过技术方案比较和主要性能参数计算,从系统可靠性、产能实现、能效指标等方面,定性定量地分析气力提升和水力提升方式的特点和利弊,确定商业开采系统采用的提升方式。然后根据商业开采产能效率等指标,提出深海多金属结核商业采矿系统水下垂直提升基本技术方案,并介绍针对商业采矿系垂直提升方案开发而开展的试验提升泵的设计研制与性能考核情况,为深海多金属结核商业开采垂直输送系统的选择和设计提供参考。

1 深海多金属结核商业开采对输送系统的要求

深海多金属结核的商业开采不仅要求开采技

术的可行性、开采设备的可靠性,而且还对经济性有严苛的要求。大量的技术经济分析表明,对于深海多金属结核的商业开采系统,其产能是影响收益的最重要因素。1987年,联合国海洋经济技术分会对深海多金属结核商业开采的技术和经济性进行如下评价:一个深海多金属结核的商业开采项目应满足年产300万t干结核、开发20年的产能条件^[12]。当前国际海底管理局对勘探矿区面积的确定、绝大多数的结核开发系统设计和经济分析均是以此为测算依据^[13-16]。

对于年产300万t干结核的产能,从采矿船设计的角度通常建议由两套采矿系统来实现,即每套系统年产150万t干结核。考虑到海况及系统维护时间等,一般可按年工作250 d计,每套系统的产能为干结核6000 t/d,即250 t/h。根据实际勘探结果,按深海多金属结核的含水率约30%计算,也就是湿结核360 t/h。由此也可以看到,当年OMI、OMA实现的最大采集能力40~50 t/h(湿结核),实际上只是略高于商业开采系统1/10的规模。本文后续对气力提升与水力提升方式的比较研究以深海多金属结核的商业开采为背景,以产能360 t/h(湿结核)、工作水深为6000 m为基本参数进行分析。

除了产能外,系统输送的能效指标、建造和运行的可行性等,都是商业开采系统必须考虑和评价的重要因素。而且,相对于纯技术的视角,商业开采系统将从全方位全流程进行更加综合的考虑。例如,对深海多金属结核商业开采背景下的气力提升和水力提升的比较分析,在系统结构上,不仅要分析系统的结构组成形式,还要分析高产能要求下关键零部件的结构尺寸是否适宜于系统的建造和运行;系统能耗方面,不仅要了解管道内不同提升方式的能耗效率,而且得考虑将提升到采矿船的海水回送到海底的能耗需求;输送结核粒径选择方面,不仅要分析粒径大小对提升能耗的影响,还得考虑系统矿物输送回收率的要求。因此,深海多金属结核商业开采气力提升与水力提升方案的比较,不仅要提升管道尺寸、系统输送浓度及输送颗粒粒径及能耗等主要性能参数和指标进行定量的理论计算,同时还需要参照实践经验对商业开采系统进行定性的综合评估。

2 商业开采条件下气力与水力提升方式比较

2.1 气力提升方式研究

2.1.1 气力提升的工作机理

气力提升是利用安装在采矿船上的空气压缩机,将高压气体通过空气注入管进入提升管道,在低密度的海水中膨胀而推动海水上升,当高压气体的持续进入导致海水上升速度高于海底多金属结核颗粒在海水中的沉降速度,就会推动结核颗粒也上升,最终将海水和结核沿管道送到海面排出。

气力提升从装备系统来看结构很简单,但在管道内是复杂的气-液-固的三相流。相关研究发现,压缩气体进入垂直管道的流动的液体中后,可能形成5种不同的流态,分别为气泡流(Bubbly),大量小气泡均匀地分散在连续液体中;段塞流(Slug),小气泡不断相互碰撞形成子弹头状的大气泡,尺寸接近管道内径;混状流(Churn),比较大的一些气泡夹杂在液相中的一种非稳定流态;环状流(Annular flow),气体在管道中央形成连续相,液体被挤至管壁沿管壁环状流动;雾状流(Mist),与气泡流相反,液体被切成大量小液滴均匀地分布在连续气相中。图1所示为5种不同流态的形状描述示意图^[17]。

深海采矿垂直管道气力提升中,这5种流态都

有可能产生。压缩空气刚进入提升管道时,因为高压气泡直径会比较小,因此,空气入口处的气液两相流将呈气泡流状态。随着管内气液相的向上流动,气泡的直径随着压力的减低而不断增大,且气泡之间相互碰撞合并成更大气泡,直径接近管道内径,形成段塞流;随着两相流流速的进一步提高,两相流的结构变得不稳定,一些流体在整体向上流的过程中也发生一些上下震荡,成为混状流;在垂直管道上部,当气体速度继续提高,在液体表面高速气体产生的界面剪切力大于重力,液体将被从管道中央挤开,气体成为连续相在管道中央流动,液体只能沿管壁流动,形成环状流;如果气体的速度继续提高,气体对液体表面的剪切使管壁处液相环状流变得越来越薄,直至变成液滴分散在连续气相中,形成雾状流。

相关研究人员对各个流态间的转换条件做过很多探讨,也发表过一些试验和理论分析数据比较吻合的研究结果。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^[18],如图2所示。相关试验研究在一定程度上验证了TAITEL流态界面图的合理性^[19-20]。一些知名学者在深海采矿气力输送、深水气泵的研究中也是以TAITEL流态界面图为依据。值得关注的是,TAITEL流态界面图表示,不论液相的流量率 J_L 是什么状态,只要气相的流量率 J_g 超过15 m/s,就会发生环状流。

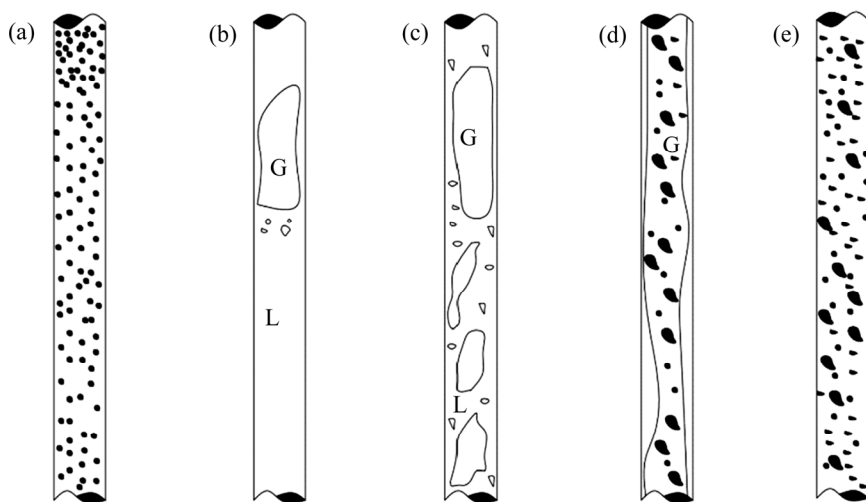


图1 气力提升管道中5种不同流态的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of five different flow patterns in-air lifting pipeline: (a) Bubbly; (b) Slug; (c) Churn; (d) Annular; (e) Mist

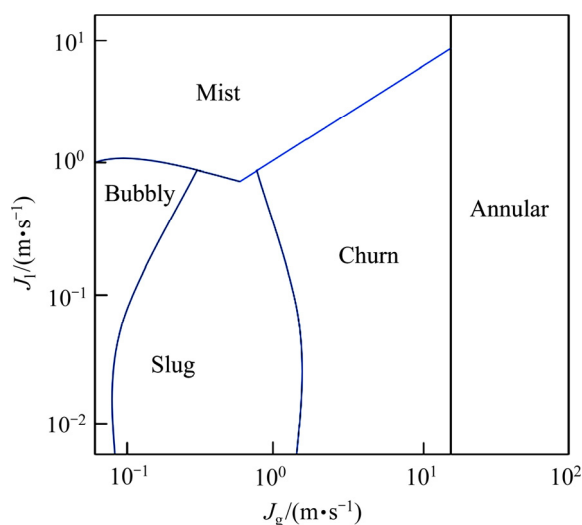


图2 流态界面图

Fig. 2 Flow state interface diagram

从理论上讲, 气力提升的工作机理是提升管道内的动量平衡, 包括提升管道的海底入口处的液体和固体、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。为了更清楚地讨论, 建立如图3所示的提升管道及各种动量因素的示意图。由图3可知, 压缩空气入口点(I)将管道分为两部分, 提升管在海底的吸入口(E)到压缩空气注入口(I)之间为海水与多金属结核颗粒的固液两相流段、从气体入口(I)到提升管在海面上出口(O)之间由海水、结核颗粒和注入空气构成的气固液三相流段。

对于整个管道, 考虑各种不同类型的动量值, 可建立如下动量平衡方程式^[17]:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 = 0 \quad (1)$$

式中: G_1 为从海底进入提升管道的海水和结核颗粒的固液两相流的动量值; G_2 为从提升管道出口流出的海水、结核和气体的气固液三相流的动量值; G_3 和 G_4 为与管壁摩擦相关的动量值, 需分别计算两相流段和三相流段的摩擦剪切应力, 乘以立管内壁周长, 再沿两相流段和三相流段的管长做积分; G_5 和 G_6 为管道内两相流或三相流混合体的质量引起的动量值, 需分别由两相流段和三相流段内混合体质量乘以重力加速度求取; G_7 为海底提升管入口处静水压对管内动量值, 可通过计算立管周围的水柱重量求得。

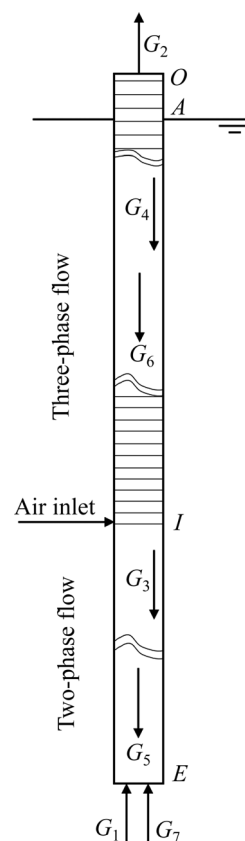


图3 气力提升管道内各动量因素的示意图

Fig.3 Schematic diagram of momentum factors in air lifting pipeline

其中 G_1 和 G_2 分别根据式(2)和式(3)进行计算^[17]:

$$G_1 = A(j_l \rho_l v_{l,E} + j_s \rho_s v_{s,E}) \quad (2)$$

$$G_2 = A(j_{g,O} \rho_{g,O} v_{g,O} + j_l \rho_l v_{l,O} + j_s \rho_s v_{s,O}) \quad (3)$$

式中: A 是立管内截面积; j 为通量率; 下标 g 、 l 、 s 分别为气体、流体和固体; ρ 为质量密度; E 和 O 分别表示提升管入口和出口位置; v 为立管不同点处的速度。以上这些动量值的关系式都是流体力学中常用的计算公式, 文献[17]也进行了清晰详尽的阐述, 本文不再详述。需要指出的是, 管道三相流段内因为不同位置的混合流的组成、速度的变化, 不同位置的摩擦应力、单位长度管道内混合体的重量等也不相同, 理论上应根据不同位置参数积分计算, 数值计算中则可将三相流段离散成若干个微小管段分别计算然后累加。利用上述计算关系式, 对一个特定的气力提升系统组态, 即如果立管直径、提升管总长度、水深、空气入口深度等参数确定,

而且矿物颗粒直径、密度、形状系数、阻力系数已知,那么对应于一个特定的气体通量率,系统内的流体通量率 J_f 和固体通量率 J_s 即可通过动量平衡公式来计算出来。

2.1.2 商业开采条件下气力提升方式的参数及性能分析

基于以上气力提升系统动量平衡分析,可以根据第1节提出的深海多金属结核情况及商业开采基本要求,对深海多金属结核商业开采气力提升方式的关键参数及基本性能进行计算分析。产能和能耗是商业开采系统的关键指标,相关文献表明,提升管道内径、压气入口深度和输送矿物粒径等是气力提升系统产能和能耗的主要影响因素,以下分别讨论这些因素对气力提升系统的性能影响。

1) 满足商业开采条件所要求的提升管内径

图2所示为垂直管道气力提升中可能的5种流态及其对应的液相与气相通量率的分界面情况。进一步的研究则指出,不同的流态具有不同的液体和固体的输送能力。一些学者趋向于认为只有段塞流才具备输送液体的能力。相关学者针对深海多金属结核气力输送的研究指出,环状流不具备提升结核颗粒的能力^[21]。这也就是说,对于深海多金属结核的气力提升而言,气相的通量率不能超过15 m/s。

实际上,气力提升系统中气体的通量率是变化的,压缩空气进入提升管道后,随着与海水和结核一起上升的过程中,由于压力下降气体体积不断膨胀,气体的体积通量率将逐渐上升。因此,高值的气相通量率 J_g 应该发生在靠近出口的提升管道上部区域。对于深海多金属结核商业开采而言,按前面所提出的参数,以开采水深6000 m,产能360 t/h,分别计算了结核粒径 d_s 为10 mm和20 mm情况下,不同内径管道中的最大气体的体积通量率 J_g 。结果表明,当管道内径取1 m时,对应结核粒径10 mm和20 mm,管道中的最大气体的体积通量率 J_g 分别达12.7 m/s和13.3 m/s。而内径取0.9 m时,对应的通量率 J_g 将大于16 m/s和17 m/s,均已超出15 m/s,因此,为了满足气体的通量率不超过15 m/s以避免产生环状流的要求,即使输送结核颗粒的粒径为10 mm,提升管道的内径也不能小于1 m。相关计算表明,当采用1 m内径的管道来实现360 t/h(湿结核)的结核产能时,在提升管道下部的固-液两相流段

中结核颗粒的体积浓度仅为3%~4%^[22]。

2) 压缩空气入口位置对系统能耗的影响

改变压缩空气的入口位置将改变提升管内两相流段和三相流段的长度,也将改变管内各段动量状态。如果压缩空气入口深度太低,高压空气参与工作的气固液三相流管道长度不够,提升固体颗粒所需的净能量功率也越大。也就是说,增加压缩空气入口的深度可能减小气力提升所需能量功率。但相关计算也指出,当压缩空气入口的深度超出某个临界值后,管道提升所需消耗的能量功率将不再随空气入口的深度而改变。图4所示为本文深海多金属结核商业开采产能和水深条件下系统提升能耗随空气入口深度的变化情况。在输送结核颗粒粒径20 mm时,如果空气入口深度小于1750 m,或者输送粒径10 mm时,如果空气入口深度小于1700 m,系统提升所需能耗将随着入口深度的减小而急剧增加。但超出相应临界值后,系统提升所需能量功率基本上不再随空气入口深度的增加而变化。因此,在深海多金属结核商业开采方案中,压缩空气的入口深度必须大于1750 m,但是,入口深度的继续增大对系统能耗基本上没有影响。这也意味着依靠增加空气入口深度来减小系统的能耗实际上受到限制的。

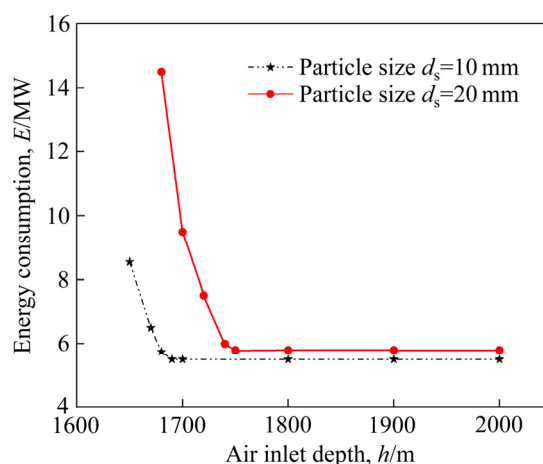


图4 空气入口深度对能耗的影响

Fig. 4 Effect of air inlet depth on energy consumption

3) 输送结核颗粒的粒径对系统的能耗影响

减小输送颗粒的粒径将有利于减少系统的所需能量。根据计算,在本文所提出的深海多金属结核商业开采条件下,当输送结核的颗粒从20 mm减

至 10 mm 时,对应的系统气力提升所需能量将从约 5700 kW 降至 5300 kW,颗粒粒径减小确实可降低能量消耗,但整体上影响不是很显著。而在实际采矿工程中,输送结核的粒径还需考虑其他因素。

根据勘探结果和采矿方案,深海底采集的多金属结核的粒径一般为 20~100 mm,采集到集矿机上的结核将通过破碎机破碎到小于最大输送粒径。很明显,要求的输送粒径越小,破碎机消耗的能量也越大。更重要的是,结核颗粒在管道输送过程中不可避免会因颗粒与管道、颗粒与颗粒之间的碰撞磨损而破碎粉化。颗粒的输送粒径越小,碰撞后破碎粉化的程度就越高,不仅会给结核输送到采矿船后的脱水操作增加难度,而且如果粉化程度严重,被粉化颗粒粒径接近于海泥粒径时,将导致大量细微结核颗粒无法被回收,影响输送过程的矿物回收率,而且被粉化后的结核回注到海水中,增加对海洋环境的污染。因此,输送颗粒的粒径应基于整个系统工程来考虑,输送粒径不宜太小。

2.2 水力提升方式研究

2.2.1 水力提升的工作机理

水力提升方式是将泵安装在水下的输送管道中,由泵提供动力,将机械能转化为矿浆的压力能,泵只需克服浆体流动的摩阻和由于矿浆密度增大形成的位能差做功,泵安装位置以下管线内的压强低于管外压强,矿浆由海水的位能进行提升,泵安装位置以上管线内压强高于管外压强,矿浆由泵提供动力进行提升,利用泵的动力在管外产生压差,形成海水在管线内的上升流,将结核提升至海平面上的采矿船上。

矿浆提升需要满足其提升速度必须大于其临界流速才能保证输送系统的安全作业。矿浆在垂直管道上升流的临界速度定义为:在该流速下固体颗粒仍处于流体全断面的运动,在管壁附近没有颗粒反向的运动。同时,在该速度下压力损失最小。根据我国对深海多金属结核水力输送的试验测试数据,天然多金属结核的沉降速度(W_t)计算公式如下^[23]:

$$W_t = 1.529 S_f^{0.815} \left(g d_s \frac{\rho_s - \rho_{sw}}{\rho_{sw}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: S_f 为形状系数; ρ_s 、 ρ_{sw} 分别为湿结核以及矿浆的密度; g 为重力加速度;

为了输送系统安全运行,工程设计中常采用 3~5 倍的颗粒沉降速度作为提升速度。深海采矿水力提升管道运输是一个典型的固液两相流问题。引起固液两相流体输送压力梯度的内在原因是两相流在运动过程中的能量耗散,这种能量耗散在管道输送过程中表现为沿程压力的降低。两相流动的能量耗散是一个极为复杂的过程。通过分析可知,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主要包括三部分:管壁摩擦损压损、局部压损和重力压损,如式(5)所示^[17]:

$$p_{loss} = \left(\xi_f + \xi_v h + \lambda \frac{h}{D_i} \right) \cdot \frac{1}{2} (\rho_1 C_1 v_1^2 + \rho_s C_s v_s^2) + gh(\rho_{sw} - \rho_1) \quad (5)$$

式中: p_{loss} 为总压力损失, Pa; ξ_f 为提升管道进、出口局部压力损失系数,无量纲; ξ_v 为矿浆在提升管道经过的阀门、弯管、接头等部件的压力损失系数, m^{-1} ; λ 为管道内部流动达西摩擦阻力系数,无量纲; h 为矿浆提升高度, m; D_i 为提升管道内径, m; C_1 为矿浆中的海水体积浓度,无量纲; v_1 为矿浆提升海水平均流速, m/s; C_s 为矿浆中的固体体积浓度,无量纲; v_s 为矿浆提升固体颗粒平均速度, m/s。

管道提升系统的能量效率 η_e 为单位质量的矿物势能增加与提升单位质量矿物所需输入能耗的比值,即:

$$\eta_e = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right) gh \frac{M_s}{A p_{loss} v_m} \quad (6)$$

式中: M_s 为单位时间内矿物产量, kg/s; A 为提升立管横截面积, m^2 ; v_m 为矿浆平均速度, m/s。

由式(5)和式(6)可知,包括颗粒体积浓度、颗粒粒径、矿物产量等在外的输送系统提升参数对多金属结核采矿提升系统压力损失有直接影响,进而关系到动力设备的选择和浆体管道的能量效率。因此水力提升管道输送系统设计的基础和核心在于提升参数的确定。提升参数选定不当不仅导致工程投资和营运费的提高而且导致管道提升系统技术可靠性的下降。

2.2.2 商业开采条件下水力提升方案的参数及性能分析

基于以上对水力提升系统分析,根据第1节提出的深海多金属结核情况及商业开采基本要求,可对深海多金属结核商业开采水力提升方案的关键提升参数及基本性能进行如下计算分析。

1) 颗粒体积浓度和粒径对提升系统的综合影响

图5所示为考虑结核粒径和体积浓度对提升系统设计的综合影响。在其他参数固定的情况下,颗粒粒径越大,提升系统能量效率就越低,相应的总功耗就越大。这表明颗粒粒径小,群体沉降速度低,传输效率高,提升能量效率就高。另外,输送颗粒粒径也会影响泵扬程修正系数,颗粒粒径大时,在泵内部加速的过程中互相碰撞产生的能量损失就越大,同时产生额外的压头损失。当颗粒粒径体积浓度从5%上升到15%时,对于不同的颗粒粒径,系统能量效率都达到了极大值。但是,随着颗粒浓度的增加,矿浆的平均密度也同时增加,提升系统需要克服的重力压降升高。综合颗粒粒径和体积浓度对提升系统的影响,总体而言,粒径变化对整个系统能量效率的影响小于矿物浓度的影响。另外,输送颗粒粒径的选取还需考虑其他因素,比如矿物破碎设备和矿物传送、脱水过程的流失率等。深海多金属结核商业开采情况下,可取结核经集矿机破碎后最大粒径为20~40 mm,颗粒体积浓度选取15%左右。

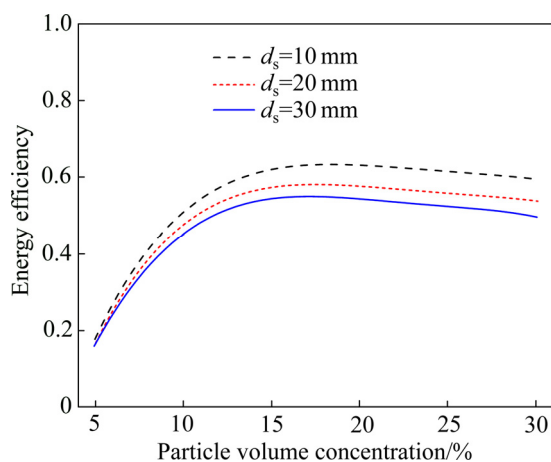


图5 颗粒体积浓度和粒径对能量效率的影响

Fig. 5 Influence of particle volume concentration and particle size on energy efficiency

2) 提升管道内径和颗粒体积浓度对系统的综合影响

图6所示为提升管道内径和颗粒体积浓度和对提升系统能量效率的综合影响(颗粒直径为20 mm,产量为360 t/h)。由图6可知,当管道内径小于400 mm时,能量效率随管径增加而增加,能量效率也随浓度增加而增加,和前文论证的一样。当颗粒体积浓度(φ_s)为15%和20%,管道内径大于400 mm时,能量效率有缓慢下降的趋势。分析表明提升管直径和颗粒体积浓度的选取要尽量避免选取研究参数范围的最小值。前一节对颗粒体积浓度选取进行了讨论,推荐范围颗粒体积浓度为15%左右。由图6可知,管径在400 mm左右提升系统能量效率可以得到最优值。但是管道尺寸的选取还需要与整个采矿系统的整体设计综合考虑。增加管道的尺寸,对海面采矿船的悬挂、承载设备的要求也会提高。因此,一般建议提升管内径选取400 mm左右。

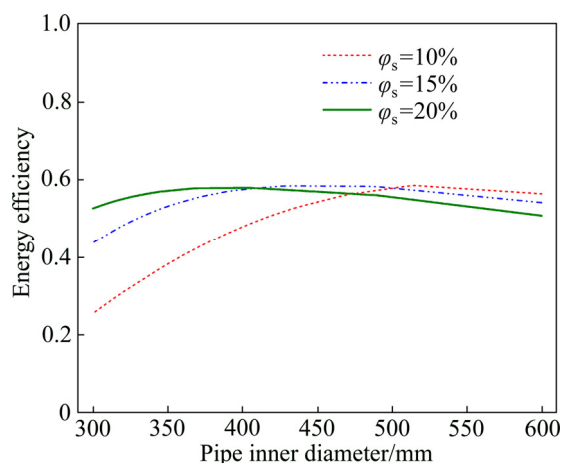


图6 管道内径和颗粒体积浓度对能量效率的影响

Fig. 6 Influence of pipe inner diameter and particle volume concentration on energy efficiency

3) 产量和颗粒体积浓度对系统的综合影响

考虑到实际生产过程中可能遇到的恶劣海况、故障维护等不确定因素,为了达到300万t/a干结核的矿物产量,采矿系统单位时间产能有可能需要提高。图7显示了90%~150%设计产量变化范围的提升系统性能与要求(矿物颗粒平均直径为20 mm,提升管道内径为400 mm)。当颗粒体积浓度为20%时,提升系统能量效率随产能增加而显著降低。当颗粒体积浓度取15%时,产量取1.0~1.1倍设计产量时,能量效率基本不变。

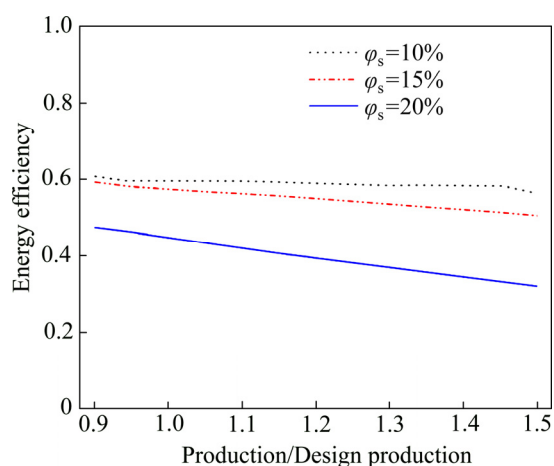


图7 产量和颗粒体积浓度对能量效率的影响

Fig. 7 Influence of production and particle volume concentration on energy efficiency

2.3 商业开采条件下气力提升和水力提升方式的比较分析

2.3.1 系统结构可靠性和经济性方面的比较

气力提升系统结构非常简单,动力系统(空气压缩机)安置在采矿船甲板上,水下只有一根送气管,无任何活动部件。因此,出故障可能性低,维护修理也很方便。水力提升系统的主要动力系统(泵)是串接在提升管道中,对于深海多金属结核商业采矿系统而言,可能需要串接 3~5 台泵(取决于泵的级数),为此,也需要有多条深水大功率电缆布置在水下。相对而言可靠性会差些,而且泵的叶片、导叶等都属于高磨损零部件,维修保养时需要将泵及几千米管道从海底回收至采矿船上才能进行。

根据前面的计算结果,对于产能 360 t/h、6000 m 水深的深海多金属结核商业开采系统而言,为了保证矿浆安全可靠的输送,气力提升管道的内径必须在 1 m 以上,而水力提升管道的内径只需在 0.4 m 左右就能满足。如果两种管道采用同样的壁厚,气力提升管道的重量将是水力提升管道的 2.5 倍,提升管尺寸和质量的增加不仅导致制造成本提高,而且对管道系统的布放和采矿作业中采矿船的运行控制带来很大困难。同时,对于同样长度的管道系统而言,1 m 内径的气力提升管道的体积为 0.4 m 内径水力提升管道的 6.25 倍;从目前采矿船的设计来看,基本无法在甲板上为气力提升管道堆放提供足够的空间。事实上,尽管当前市场上已有内径 1 m

的标准钢管,但出于经济性和安全性考虑,1 m 内径的立管对于 6000 m 海洋工程的运行操作而言并不适合。

2.3.2 系统能量效率方面的比较

由前面的分析可知,针对本文深海多金属结核商业开采系统方案,采用气力提升方式时,管道下段固液两相流中固相的体积浓度只有 3%~4%,而水力提升时建议采用的最佳输送浓度是 15%左右。这意味着,从海底提升同等体积的结核到海面时,气力方式提升到采矿船的海水将数倍于水力方式。对于以采集结核为目的的垂直输送而言,这也意味着气力提升方式做了更多的无用功。大部分研究认为,从整体效果上,气力提升系统的效率一般在 15%以下,而水力提升的效率可达 40%以上^[24-27]。深海多金属结核开采作业的主要工作可分为两步,第一步是将铺在海底的结核颗粒采集到集矿机上,然后第二步将集矿机上的结核颗粒垂直输送到 6000 m 以上的采矿船上,垂直输送系统消耗的能量一般为采集系统 10 倍左右,提高输送系统的能量效率对深海多金属结核的商业开采具有极为重大的意义。气力提升系统输送浓度低、提升效率低可能是其最致命的缺点。

另外,将海水提升到采矿船需消耗大量的能量,并出于防止大洋表层海水被污染的环保要求,还需将从海底输送到采矿船的海水再回注到海平面下数百至数千米的深度去,气力提升方式相对水力提升输送了更多的海水到采矿船,因此,需要消耗更多的能量以排放废水,这也是气力提升方式的一个不利点。

2.3.3 系统产能提升能力的方面的比较

本文商业系统的 360 t/h(湿质量)产能是根据年产量 300 万 t 干结核的指标按理想情况计算出来的,但如果考虑脱水系统的结核损耗以及年工作天数达不到要求等情况,提升系统实际上应当具备超出 360 t/h 的产能提升能力。对于气动提升系统而言,更高的产能必然要求更大的固体、液体特别是气体的通量率。然而,表 1 中的数据表明,气体通量率的稍许提高就可能超出 15 m/s 的临界值而导致管道内环状流的发生。这也表明于某个特定构型(包括提升管道长度、直径,空气入口深度等)的气力提升系统,其产能受到比较大的限制,难以提升。而在

水力提升系统中,可以通过输送浓度、系统流量等在比较宽的范围内调节,实现系统产能的较大提升。

2.3.4 系统输送颗粒粒径方面的比较

气力提升系统中,整个提升管道无任何障碍物且内径很大,因此在结构方面不存在最大颗粒粒径限制问题。但前面的分析也指出,颗粒粒径越大所需能量越大,因此,系统颗粒输送粒径也不能过大^[28]。水力提升系统中,由于泵内流动结构复杂,颗粒粒径过大容易引起泵的堵塞,因而会限制最大输送颗粒粒径。但对于商业开采系统而言,因为产能大所以泵的流道尺寸也大,允许的最大粒径也会相应增加。因此,对于多金属结核商业开采系统,不论是气力提升还是水力提升,其输送颗粒粒径可能都会选择在20~40 mm之间。

2.3.5 系统防堵和颗粒降解方面的比较

如上所述,气力提升管道因为直径大而且无障碍物、输送浓度又低,所以对输送结核而言应当不存在堵塞问题。而水力提升系统因泵流动结构复杂、输送浓度也大,而且需考虑系统突然停电等情况下管道内的结核应当可以通过自由沉降时通过泵流道回流,因此,泵的设计时存在防堵和可回流的问题,而且运行中堵塞的风险客观存在。

前面也分析到管道输送过程中颗粒与颗粒、颗粒与管道的碰撞摩擦将导致被输送结核的破损粉化,导致资源回收损失和环境污染^[29]。相对而言,因为水力提升系统中泵的叶轮运动及流道复杂等原因,结核在泵内的破损粉化将远比管道内严重。总之,存在堵塞风险和颗粒降解严重是水力提升方式的一个缺点。

3 深海多金属结核商业开采提升系统基本方案设计及样机验证研究

3.1 深海多金属结核商业开采水下垂直提升系统基本方案设计

以上比较分析表明:对于商业开采系统,气力提升和水力提升各有其利弊。但综合来看,气力提升方式的效率远低于水力提升,对于商业开采而言是一个重要的考虑因素。另外,气力提升的管道尺寸太大,带来的问题难以克服。因此,水力提升是

当前深海多金属结核开采系统的主流技术方案。本文也基于水力提升方式来进行深海多金属结核商业开采提升系统方案设计。

本文第1节已分析了深海多金属结核商业开采对提升系统的要求,主要参数包括结核提升能力360 t/h(湿结核)、水深为6000 m等。2.2节中分析了商业开采条件下水力提升方案中主要参数与系统性能的关系。在此基础上,可以对深海多金属结核商业开采水下垂直提升系统基本方案进行如下设计。

1) 最大输送粒径与水力提升速度

根据勘探结果,深海多金属结核粒径一般在2~8 cm之间,最大粒径可达20 cm。考虑到管道特别是泵的通过能力,一般对采集的多金属结核经过破碎后再进行输送。如前所述,颗粒粒径越大所需提升能量越大,但粒径太小又不利于矿物的回收,综合上述因素,选取深海多金属结核商业开采垂直提升系统的最大输送粒径为35 mm。

水力垂直提升的最基本要求是输送流体的速度必须大于被提升颗粒的沉降速度。工程上,一般要求提升管内矿浆流速应为被提升颗粒的沉降速度3~5倍^[30]。式(4)已给出天然多金属结核的沉降速度计算公式,将最大输送粒径 $d_s=35$ mm代入式(4),可计算得到 $W_t=0.72$ m/s,进而得到最小提升速度 v_m 应为2.16~3.6 m/s,本设计取系统水力提升速度为3.6 m/s。

2) 综合考虑效率与扬程的矿浆输送浓度选取

由图5可知,水力提升方式中矿浆颗粒体积浓度为15%左右时系统达到最高的输送效率,而浓度继续增加时系统效率开始有所下降。这是因为矿浆颗粒体积浓度增加时系统的压降损失也增大,式(5)可以解释这一点。当达到一定程度后,颗粒体积浓度的继续增加,系统提升所需扬程大幅增加,而系统效率增加不大甚至略有下降。因此,水力提升系统设计时,颗粒体积浓度需要综合考虑对系统效率和扬程的影响来选取^[31-32]。

另外,对于一个产能确定的开采系统,颗粒体积浓度确定后,系统的输送流量也就确定了,其关系式为

$$Q_m = \frac{Q_s}{\rho_s C_v} \quad (7)$$

式中: Q_s 为系统结核提升产能, 360 t/h 湿结核; Q_m 为矿浆流量, m^3/h 。而根据矿浆流量和系统水力提升速度, 也可以方便地计算所要求的管道内径:

$$D_{\text{in}} = \left(\frac{4Q_m}{\pi v_m} \right)^{1/2} \quad (8)$$

在上述设计条件和已确定参数条件下, 选取不同的颗粒体积浓度, 分别计算得系统效率和所需扬程, 以及对应的系统流量和管道内径(见表 1)^[33]。

3) 深海多金属结核商业开采水力提升系统基本方案

由表 1 中可知, 随着体积浓度的增加, 系统效率提高, 但系统输送所需总扬程也增加。而且, 当体积浓度大于 12% 后, 系统效率提高不大, 但系统所需扬程增加却较大。综合考虑提升泵的设计等因素, 确定选取 12% 为系统设计的矿浆颗粒体积浓度。此时, 对应的系统矿浆流量为 1490 m^3/h , 提升管道内径为 383 mm。参照《APISPEC5CT-套管和油管规范选取标准》, 可选取 16 寸套管, 管壁厚度 $\sigma=11.13$ mm, 内径 $D_i=384.14$ mm。

系统中的提升泵安装在水下提升管道中, 采用空间导叶式离心泵结构以实现垂直管道输送要求

的轴向流。由于提升距离大, 系统要求的总扬程高, 需要通过多级离心泵才能完成。考虑到泵体及潜水电机、水下电缆的制造等, 一般采用单台泵设计为 5~8 级, 多台泵串接使用来实现系统总扬程。对本文的提升泵设计, 采用的方案是将提升泵设计为 6 级, 每级的扬程为 40 m, 泵的总扬程为 240 m。全系统采用 4 台泵, 系统总扬程 960 m, 相对表 1 中所要求的 814 m 有较大的裕量。图 8 所示为本文基本设计方案中的提升泵结构。

综合上述设计研究, 可得深海多金属结核商业开采水力提升系统基本技术参数如表 2 所示。

3.2 提升泵样机及模拟管道系统试验验证研究

由于市场和技术等方面的原因, 目前尚未真正进行深海多金属结核的商业开采。同时, 由于深海多金属结核开采系统规模庞大且技术复杂, 在商业开发之前开展中试系统设计及其试验研究十分必要。2016 年, 国家首批重点研发项目立项“深海多金属结核采矿试验工程”, 其目标是开展 1000 m 以上水深中试采矿系统采矿海试, 试验规模为 30 t/h 干结核(略大于 1/10 商业开采规模)。提升试验泵是

表 1 不同设计参数条件下系统的效率及扬程^[33]

Table 1 Efficiency and head of system under different design parameters^[33]

Volume concentration	Flow/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Pipe diameter/ mm	Flow rate/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Total head/ m	Efficiency/ %
0.10	1790	420	3.6	694	68.23
0.11	1627	399	3.6	756	68.88
0.12	1490	383	3.6	814	69.78
0.13	1376	368	3.6	883	70.07
0.14	1278	354	3.6	939	70.58
0.15	1193	342	3.6	1000	71.03

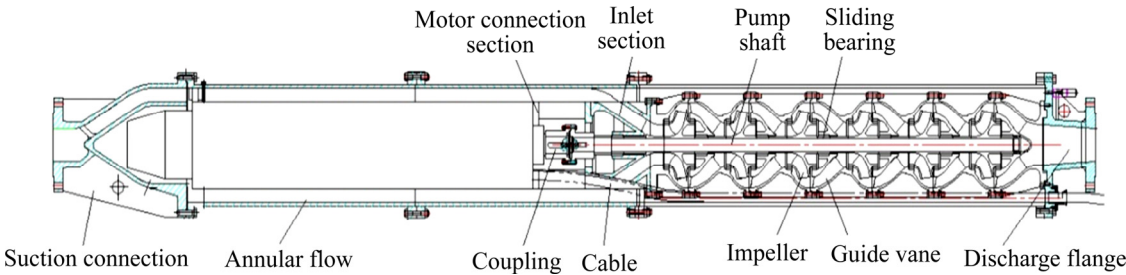


图 8 提升泵整体结构图

Fig. 8 Overall structure diagram of lifting pump

表 2 深海多金属结核商业开采提升系统基本技术参数
Table 2 Basic technical parameters of commercial mining and lifting system for deep-sea polymetallic nodules

System	Parameter	Value
Lifting system	Production	250 t/h
	Maximum particle size	35 mm
	Volume concentration	12%
	Total head	>814 mH ₂ O
	Flow	1 490 m ³ /h
Lifting pump	System efficiency	60%
	Head	240 mH ₂ O
	Flow	1 490 m ³ /h
	Rated voltage	6 300 V
	Power	1 800 kW
Lifting pipe	Total length	5 200 m
	Inner diameter	384.14 mm

项目的一个重点研究内容，它既是试验工程中试系统中的一个关键设备，也是深海多金属结核商业开采系统设计方法验证的试验样机。作为项目的承担和参与者，本文作者应用上述水力提升系统设计理论和方法进行了提升试验泵(既提升泵样机)的设计，完成了提升泵样机研制并开展样机水力性能试验测试，为试验工程提供了一台试验泵，也对多金属结核开采水力提升系统及提升泵的设计理论和方法进行了样机试验研究，基本情况介绍如下。

1) 提升泵样机的设计与研制

根据试验工程的规模，可确定泵的输送产能为湿结核 43 t/h，系统总扬程取 270 mH₂O。考虑试验泵的流道较小，选取系统颗粒最大通过粒径 20 mm、矿浆颗粒体积浓度 5%~6%，并要求试验泵效率不低于 52%。按照上述水力提升系统设计理论与方法，可计算出结核沉降速度($W_t=0.54\text{ m/s}$)，计算并选取系统的矿浆流速($v_m=2.72\text{ m/s}$)和矿浆流量($Q_m=420\text{ m}^3/\text{h}$)。进一步，可按式(8)计算并选取提升管道内径为 220.5 mm(9~5/8 吋套管)。采用 6 级空间导叶式离心泵，每级泵的扬程为 45 m。

依据上述参数进行了提升试验泵的设计，开展了泵的水力性能分析，设计了叶轮、导叶的水力结构参数，提出了潜水电机的功率电压转速等参数，完成了试验泵的设计与研制。同时，开展了提升泵

矿浆输送性能数值模拟研究，构建了提升泵内固液两相流 CFD 分析模型，基于试验泵的设计和工艺参数进行了提升试验泵输送性能仿真分析^[34-35]。

2) 提升泵样机的清水输送性能试验

为验证提升泵的设计方法和方案，第一阶段，研制了一台两级的提升泵样机，并在大型水泵试验系统上进行了提升泵样机的清水输送试验。图 9(a)所示为研制的两级提升泵样机及清水试验测试系统，图 9(b)所示为提升泵样机的扬程、效率、功率随流量变化的试验和仿真结果与曲线。在额定流量工况点 $Q_m=420\text{ m}^3/\text{h}$ 处，测试所得两级提升泵样机的扬程为 94.86 m，系统效率为 54.49%，达到了泵的基本设计要求。另外，在全流量范围内，扬程、效率、功率的仿真曲线和实测曲线均比较接近，表明所构建的 CFD 数值模型和分析程序能较真实地描述和预测提升泵矿浆输送特性。

3) 提升泵样机的矿浆输送性能试验

第二阶段，基于两级泵的水力设计及优化，完成了六级提升泵样机研制，在深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室的深海采矿矿物提升模拟试验系统进行了提升泵样机及模拟管道的矿浆输送性能试验。图 10 所示为 6 级提升泵样机和深海采矿水力提升模拟试验系统。矿浆试验采用结核模拟料，密度 2000 kg/m³，粒度 10~20 mm，最大颗粒粒径大于 20 mm；试验系统采用封闭回路循环方式模拟水力管道输送，矿浆流速通过变频调速控制，矿浆颗粒浓度根据系统管路总容积控制给料量来调剂，试验中实际流速、浓度、产量、扬程等参数通过标定的方法来确定。

表 3 给出了 6 级提升泵样机的矿浆输送性能试验实测结果。试验数据表明，该提升泵样机可全面满足输送产能、输送浓度和最大通过粒径等设计指标。特别是从第 2 次试验情况来看，矿浆体积浓度、流量与输送产能与设计指标都比较接近，也即提升泵样机的实际性能比较好地符合了设计方案中提出的参数匹配关系，也从一个方面反映了说用设计理论和方法的正确性。

综上所述，提升泵样机的清水试验和矿浆输送试验结果均表明，所设计研制的提升泵样机可达到设计指标，本研究采用的水力提升系统及提升泵的设计理论和方法正确。

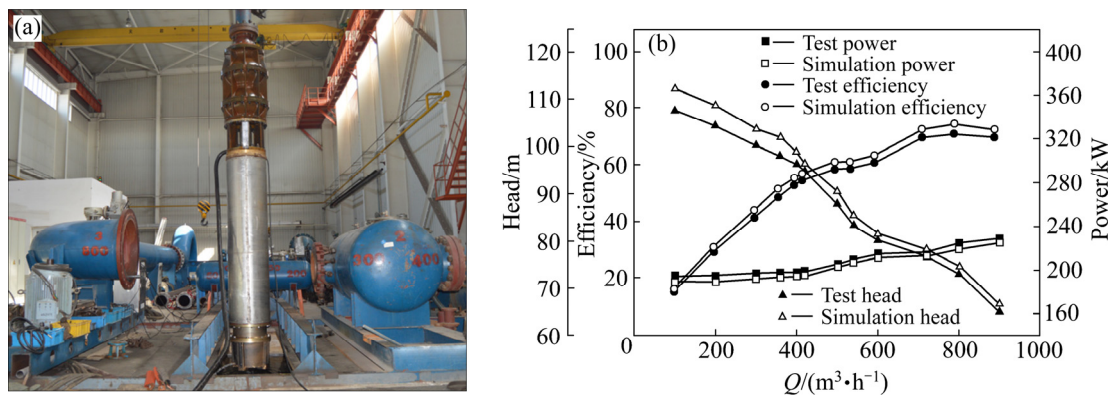


图 9 两级提升泵样机的清水性能试验与仿真结果

Fig. 9 Test and simulation results of pure water performance of two-stage lift pump prototype: (a) Two-stage lift pump prototype and pure water test system; (b) Pure water performance test and simulation results

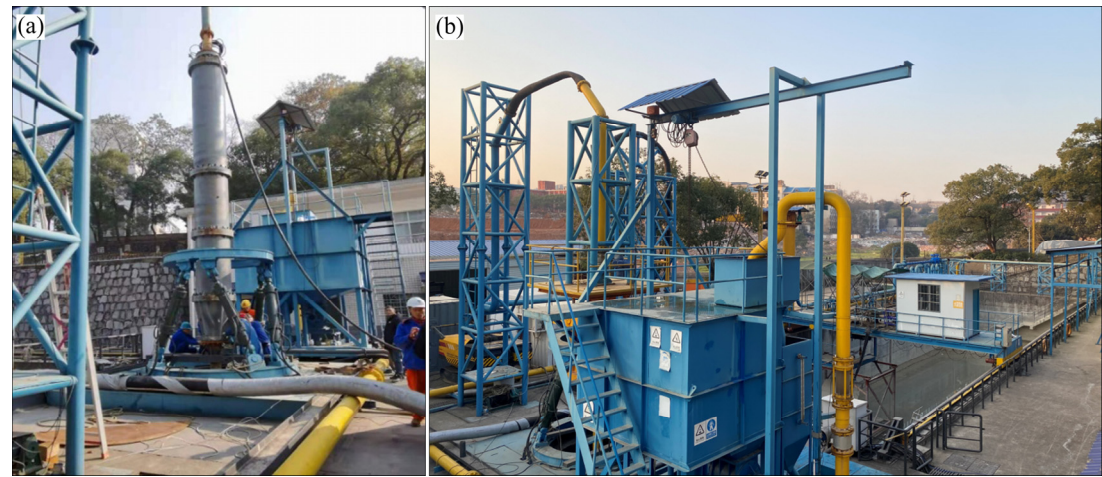


图 10 六级提升泵样机和深海采矿水力提升模拟试验系统

Fig. 10 Six-stage lifting pump prototype and deep-sea mining hydraulic lifting simulation test system

表 3 提升泵样机的矿浆输送性能试验结果

Table 3 Slurry transport performance test results of prototype lift pump

Test	Transmission capacity/(t·h ⁻¹)	Flow/(m ³ ·h ⁻¹)	Flow rate/(m·s ⁻¹)	Volume concentration/%	Maximum particle size/mm	Test head/m
Test 1	73.19	425.4	3.76	8.6	23.2	99.42
Test 2	49.35	468.3	4.14	5.27	23	97.17
System requirements	≥43	≥420	≥2.7	≥5	≥20	≥90

4 结论

1) 在多金属结核商业开采的要求和背景下, 研究了主要提升参数对两种提升方式下采矿系统的

性能影响, 从系统产能实现、能效水平、结构实施等方面, 定性定量地分析气力提升和水力提升方式的特点和利弊: 从系统结构可靠性和经济性方面来看, 气力提升系统相比于水力提升系统结构简单, 易安装, 易维修, 但为了满足系统产能, 气力提升

系统相对于水力提升系统需采用较大内径的提升管道,提升管道直径和重量的增加会增加管道的堆放空间和增大布放回收难度以及整个采矿系统的运行成本。从能量效率方面考虑,相对于水力提升系统,气力提升系统输送浓度低、以及大废水回送量使其能量效率低可能是其最致命的缺点。系统产能提升能力的方面考虑,水力提升系统中,可以通过输送浓度、系统流量等在比较宽的范围内调节,实现系统产能的较大提升。因此,综合来看,水力提升方式更适合于在深海多金属结核商业开采系统中应用。

2) 开展了深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案设计研究。兼顾提升效率和矿物回收率选择输送颗粒最大粒径,基于颗粒沉降速度确定系统输送流速,综合考虑系统效率和提升扬程选择矿浆颗粒体积浓度,根据系统产能要求确定输送系统矿浆流量和提升管道内径,形成了水下垂直提升系统及提升泵的基本技术参数设计理论和方法,完成了深海多金属结核商业开采水下垂直提升系统基本技术参数和方案设计。结合深海多金属结核采矿试验工程提升试验泵的研发,应用所提出的设计方法和研制了提升泵样机。开展提升泵样机的清水输送试验,结果表明提升泵样机流量与扬程、效率等参数关系符合设计要求,验证了本文设计方法的可行性;开展了提升泵样机及模拟管道系统的矿浆输送性能试验,验证了提升泵样机满足设计所要求的矿浆输送性能。这些试验结果也表明水力提升方式可适应深海多金属结核商业开采要求。

REFERENCES

- [1] PETEREN S, KRAESCHELL A, AUGUSTIN N. News from the seabed—Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. *Marine Policy*, 2016, 70(8): 175–187.
- [2] STANISTAW D, RYSZARD K, EDWARD R, et al. *Marine mineral resources*[M]. Beijing: Ocean Press, 2001: 99–105.
- [3] SHIRAYAMA Y, ITOH H, FUKUSHIMA T. Recent developments in environmental impact assessment with regard to mining of deep-sea mineral resources[M]. West Berlin: Springer International Publishing, 2017:33–40.
- [4] 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 Zong-xi, ZHENG Ren-rui, et al. Progress, challenges and prospects of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. *Land Resources Information*, 2016(11): 27–32.
- [5] 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 Shao-jun, 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.
- [6] 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 Ying-jie. Research trends and prospect analysis of mining technology for seabed mineral resources[J]. *Mining Equipment*, 2012(1): 54–57.
- [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): 1–9.
- YANG Jian-min, LIU Lei, LÜ Hai-ning, et al. Current status and prospects of research and development of deep-sea mineral resources development equipment in my country[J]. *Engineering Sciences*, 2020, 22(6): 1–9.
- [8] KAUFMAN R, LATIMER J, TOLEFSON D C, et al. The design and operation of a pacific ocean deep-ocean mining test ship: R/V Deep-sea Miner II [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, USA: Offshore Technology Conference, 1985: 33–43.
- [9] BROCKTT F H, HUIZINGH J P, MCFARLANE J A R. Updated analysis of the capital and operating costs of a polymetallic nodule deep ocean mining system developed in the 1970s[C]//Proceedings of the ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology-Current Status and Challenges Ahead. Chennai, India: International Seabed Authority, 2008: 54–80.
- [10] CHUNG J S. Coupled ship and pipe motions measured in North Pacific Ocean: The Hughes Glomar explorer with a 5000-m-long heavy-lift pipe deployed[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2010, 20(1): 1–6.
- [11] CHUNG J S. Deep-ocean mining technology developments. III[C]//Proceedings of the Eighth (2009) ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai, India: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009: 1–7.
- [12] RAHUL S. Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 23–28.

- [13] ISBA/19/C/17. Regulations on prospecting and exploration for polymetallic nodules in the Area[S]. Kingston: International Seabed Authority, 2013.
- [14] NIJEN K V, PASSELS V, SQUIRES D. A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipper ton fracture zone[J]. *Marine Policy*, 2018, 95(9): 133–141.
- [15] VOLKMAN S E, KUHN T, LEHNEN F. A comprehensive approach for a techno-economic assessment of nodule mining in the deep sea[J]. *Mineral Economics*, 2018, 31: 319–336.
- [16] 徐传华. 大洋多金属结核资源开发技术经济模型的研究[J]. *矿冶*, 2000, 9(1): 59–64.
XU Chuan-hua. Research on tech-econo model of developing ocean polymetallic nodule resource[J]. *Mining & Metallurgy*, 2000, 9(1): 59–64.
- [17] SCHULTE S A. Vertical transport methods for deep sea mining[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013: 80–81.
- [18] 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.
- [19] YOSHINAGA T, SATO Y. Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(2): 223–238.
- [20] 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.
- [21] DOYLE R L, HALKYARD J E. Large scale airlift experiments for application to deep ocean mining[C]// *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. San Diego, CA, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2010: 27–36.
- [22] 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: 319–326.
XIAO Ye-xiang, YANG Ling-bo, 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: 319–326.
- [23] 邹伟生, 李哲矣, 陈爱黎. 海洋采矿扬矿电泵的研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 221–225.
ZOU Wei-sheng, LI Zhe-huan, CHEN Ai-li. Research on electric pumps for raising mines in ocean mining [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2011, 42(2): 221–225.
- [24] 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(4): 308–313.
- [25] 邹伟生, 卢 勇, 李哲矣. 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.
ZOU Wei-sheng, LU Yong, LI Zhe-huan. Numerical simulation and analyses of lift pump in deep sea mining[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 40(6): 59–63.
- [26] 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.
- [27] 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(自然科学版)*, 2011, 42(增刊 2): 212–220.
TANG Da-sheng, YANG Ning, JIN Xing. Experimental study of lifting simulation system for deep sea mining[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2011, 42(Supple 2): 212–220.
- [28] 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 Shao-jun, LI Yuan-wen, HU Xiao-zhou. The influence of DEM-CFD particle volume fraction on the performance of deep-sea electric pumps [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(10): 273–280.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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 Xiang-jun. *Hydraulics of slurry and granular material transportation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [32] 赵 贺, 刘少军, 胡小舟. 深海扬矿泵内部非定常流径

- 向力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 829–836.
- ZHAO He, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou. Research on the unsteady fluid radial force in the deep sea lifting pump[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(4): 829–836.
- [33] KANG Ya-juan, LIU Shao-jun, ZHAO He, et al. Design and analysis of an innovative deep-sea lifting motor pump[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 22–31.
- [34] 杨放琼, 陈 奇, 曾义聪, 等. 深海采矿矿浆泵的设计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 12: 1413–1418.
- YANG Fang-qiong, CHEN Qi, ZENG Yi-cong, et al. Research on the design method of deep-sea mining slurry pump[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 12: 1413–1418.
- [35] 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 Ya-juan. Study on internal flow characteristics and hydraulic force of electric lifting pump for deep-sea mining[D]. Changsha: Central South University, 2019.

Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules

KANG Ya-juan¹, WANG Chang-wei¹, LIU Shao-jun^{2,3}, ZOU Wei-sheng⁴, XU Yi-xie⁵

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Shenzhen Research Institute of Central South University, Shenzhen 518000, China;

3. National Key Laboratory of Deep Sea Mineral Researches Development and Utilization Technology, Changsha 410012, China;

4. School of Mechanical and Transportation Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

5. College of Network Technology, Hunan Open University, Changsha 410004, China)

Abstract: Elevating polymetallic nodules from thousands of meters of seabed to the supportive vessel is a crucial part of mining operations. Firstly, this paper elaborates on the requirements of the deep-sea polymetallic nodules commercial exploitation for the conveying system. Then, the working principles and performance indicators of the current air and hydraulic lifting methods were summarized. Furthermore, the influence of the leading lifting parameters on the system's performance was presented, and the two lifting methods were compared within the aspects of system structure reliability, economy, energy efficiency index and capacity realization. Through comparative analysis, it is concluded that hydraulic lifting method is more suitable for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules. On this basis, the design and research of underwater vertical lifting system for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules are carried out, and the basic technical scheme of underwater vertical lifting system for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules is proposed. Finally, the technical feasibility and the applicability of the design theory and method of underwater vertical lifting system for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules are analyzed and verified by the water test and slurry transport test of the lifting pump prototype. This study provides reference and guidance for the research and development of deep-sea mining technology and equipment.

Key words: polymetallic nodules; commercial exploitation; air lifting; hydraulic lifting; lifting system design

Foundation item: Project(SH-2020-KF-A02) supported by the Open Fund of the State Key Laboratory of Deep-sea Mineral Resources Development and Utilization Technology, China; Project (2016YFC0304103) supported by the National Key Research and Development Program of China

Received date: 2021-07-12; **Accepted date:** 2021-09-10

Corresponding author: LIU Shao-jun; Tel: +86-18316621835; E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)