



深海开采矿浆泵水力管道提升理论与设计

邹伟生¹, 李浩天¹, 康娅娟²

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082;

2. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 佛山 528000)

摘要: 水力管道提升系统是联系海底采矿车和水面采矿船的中间环节和海底矿石运输通道。本文对矿浆泵水力提升系统的关键技术和关键装备进行研究, 提出了粗颗粒海底矿浆体在提升管道中的流动模型和理论, 并提出了具有通过粗颗粒、高扬程、轴向流、能回流特性的矿浆泵的高比转数混流泵型和技术以及矿浆泵放大流量、等功率设计理论, 得到了试验室矿浆试验、海底矿石提升海上试验的验证, 应用这些理论和技术对海洋矿产资源商业开采矿浆泵水力提升系统进行了改进。

关键词: 海洋矿产资源; 水力提升系统; 粗颗粒浆体; 矿浆泵

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2953-10

中图分类号: TH857

文献标志码: A

引文格式: 邹伟生, 李浩天, 康娅娟. 深海开采矿浆泵水力管道提升系统的研究[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2953–2962. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37997

ZOU Wei-sheng, LI Hao-tian, KANG Ya-juan. Research on slurry pump hydraulic lift system for marine mineral resources exploitation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2953–2962. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37997

矿产资源在一定程度上影响着人类社会的生存和发展。国际海底区域海洋矿产资源的占有与开发利用技术的发展对我国社会经济发展和国家资源安全保障具有重要作用。已查明具有商业开采前景的矿产资源有大洋多金属结核、富钴结壳、海底热液硫化物和天然气可燃冰等。由于这些海底矿物种类不同, 其分布所在的水深和海底地形不同, 在海底的成矿规律和赋存形式也不同, 采掘这些矿物的装备和工艺也存在很大的差别, 但将采集的这些海底矿物从海底提升至水面采矿船的提升技术和提升系统是相似的, 因此, 提升技术是海洋矿产资源开采系统的共性技术, 目标是如何将采集的深海矿物高效安全地提升到海面采矿船上。深海采矿提升系统技术方案可分为管道流体提升和运载机械提升, 管道流体提升又可分为矿浆泵水力提升和

气举法提升。20 世纪 70 年代西方发达国家开始了海底矿物开采的第一次大规模研发, 在放弃被称作第一代深海采矿系统的连续绳斗法(CLB)之后, 三大国际财团相继进行了由海底采矿车加提升管道组成的水下开采系统的研发, 并各自开展深水开采试验, 普遍认为采用海底采矿车采集海底矿物、应用陆地矿山浆体管道输送的原理通过管道和矿浆泵将海底矿石提升至洋面的开采方式, 最具有商业开采应用前景。德国人 ENGELMANN 开展的 200 mm 管径、13~52 mm 粒径范围的模拟结核矿浆泵水力提升试验^[1], 为国际财团 OMI 公司^[2](Ocean Management Incorporated)1978 年 5000 m 水深试采系统和德国 KSB 泵业公司提升矿浆泵的研制提供了理论与技术支撑。国际财团公司 OMA(Ocean Mining Associates)的采矿系统与 OMI 公司的类似,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071138); 湖南省科技重大专项(2020GK1020)

收稿日期: 2021-07-20; **修订日期:** 2021-10-09

通信作者: 邹伟生, 教授, 博士; 电话: 13973140869; E-mail: zouweisheng1@hnu.edu.cn

这两个公司的拖曳滑动式海底采矿车加管道提升的采矿系统被称作第二代深海采矿系统。国际财团 OMCO 公司(Ocean Minerals Company)采矿系统^[3]的采矿车为阿基米德螺旋线自行式采矿车, 采矿系统的管道提升系统第一次设置了中间仓(即缓冲装置), 对竖直提升管线起到配重和平衡的作用; 用管道提升矿石被认为是开采不同种类海底矿物提升的共性技术^[4], 该自行式采矿系统被称作第三代深海采矿系统。目前, 该技术原型仍被正在进行深海采矿技术研发的中国、韩国、印度、波兰、日本、国际海洋金属联合组织和加拿大鸚鵡螺矿业公司等大多数国家和组织所采用, 并加以改进和完善^[5-10]。如图 1 所示, 从第一代毫无测控的连续绳斗在海底无目标滑移采矿发展到第三代具有可控

性的自行式采矿车加管道提升采矿系统的自主采矿, 充分体现了矿浆泵水力管道提升的采矿系统向智能化发展的过程。

我国有关研究机构在“八五”期间建立了专门的提升试验系统, 分别对矿浆泵水力管道提升、气举法、清水泵、射流泵以及轻介质浮子等多种提升方法开展试验研究, 通过对试验结果分析和提升技术经济比较, 矿浆泵水力管道提升系统被优选为我国海洋矿产资源开采的提升方法。矿浆泵水力管道提升系统经过我国 30 年的研究已形成较为完善与成熟的技术方案, 开展过多次的湖上、海上验证试验。

水力提升管道粗颗粒两相流和水力提升装备矿浆泵是深海开采水力管道提升系统的两项关键核心技术, 本文主要对这两项核心技术进行研究。

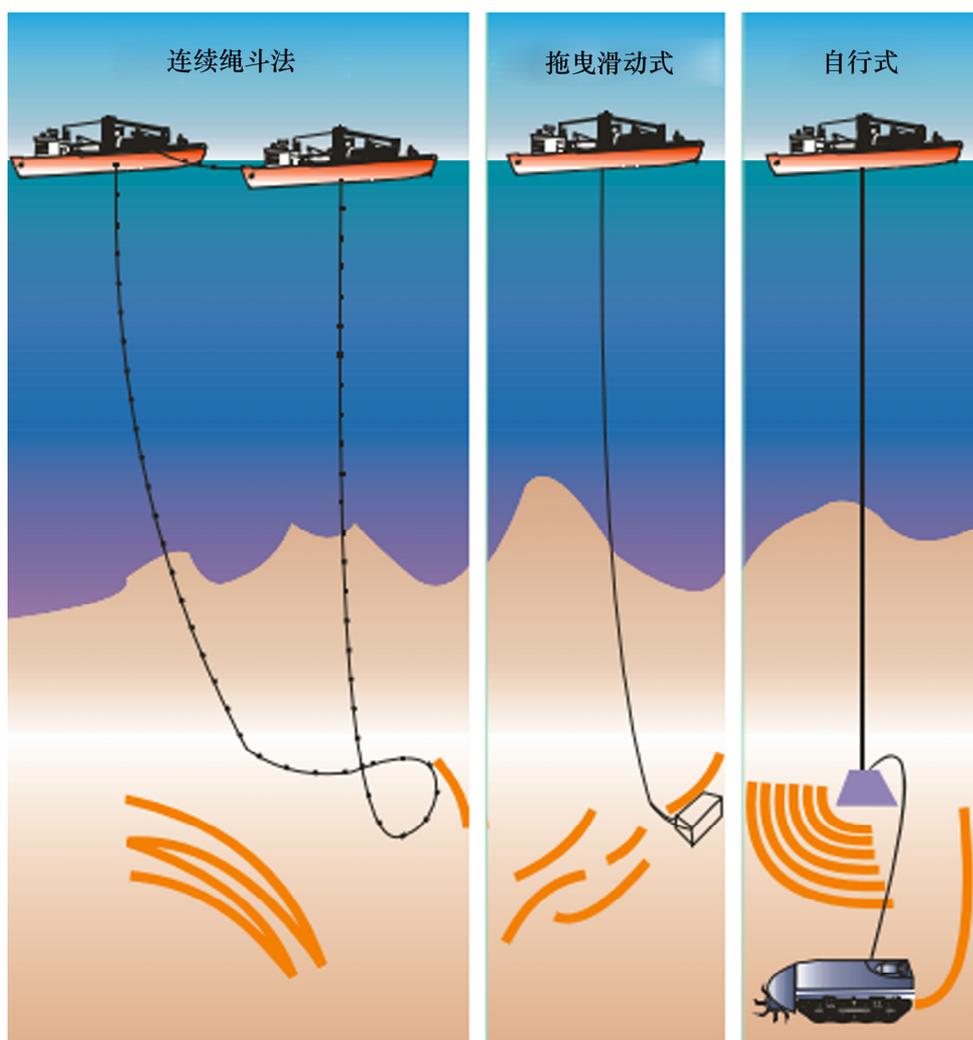


图 1 深海采矿系统向智能化发展

Fig. 1 Intelligent development of deep-sea mining system: (a) CLB c; (b) Towed method; (c) Self-propelled method

1 水力提升管道粗颗粒两相流研究

1.1 水力提升管道粗颗粒两相流动机理和流动模型

在陆地矿山长距离高浓度浆体管道输送中, 输送的固体物料颗粒粒径为毫米级以下。利用陆地上高浓度浆体输送原理, 采用垂直管道将矿石浆体从海底提升到洋面采矿船上, 需要解决海底矿石浆体中矿石粒径为厘米级以上粗颗粒提升的难题。在海洋采矿的海底矿石浆体垂直管道提升中, 海底矿石浆体既含有采矿头从海底携带上来的粒径为微米级的海底沉积物, 又含有经采矿车破碎装置破碎的粒径为厘米以上的海底矿物, 导致所形成的海底浆体上升流十分特殊而复杂。可以认为粒径较小的颗粒以悬移运动方式与海水形成浆体的均质部分, 而粒径较大的颗粒以滑移运动或推移运动的方式被这种均质浆体所运载, 形成浆体的非均质部分, 浆体由这两部分组成。按照这个流动图案, 可以认为存在一个将矿石颗粒划分为粗、细两类的临界粒径, 小于临界粒径的这类颗粒与海水构成海底矿石浆体的均质部分作为载体, 而大于临界粒径的另一类颗粒被认为是由这种载体运载的非均质部分, 即细颗粒与海水组成的均质浆体携带粗颗粒一起运动^[11]。细颗粒均质浆体作为载体运载粗颗粒的流动模型合理地反映了海底矿石浆体管道上升流的实际流动情况, 物理概念非常清晰, 粗颗粒非均质浆体加细颗粒均质浆体流动模型如图 2 所示。

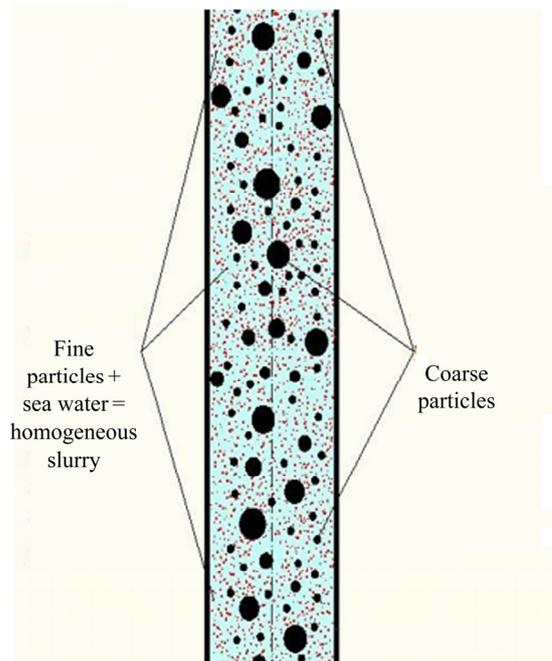


图 2 细颗粒均质浆体运载粗颗粒的流动模型

Fig. 2 Flow model of coarse particle and fine homogeneous slurry

1.2 水力提升管道粗颗粒两相流动阻力的计算

如图 3 所示, 应用牛顿第二定律可推出海底矿石颗粒的运动方程式。

$$n_s \cdot \frac{w_s}{g} \cdot \frac{dv_s}{dt} = n_s C_D \frac{\rho_w}{2} (v_m - v_s)^2 a_s - \mu_s n_s w_s \frac{\rho_s - \rho_{mc}}{\rho_s} \cos \theta - n_s w_s \frac{\rho_s - \rho_{mc}}{\rho_s} \sin \theta \quad (1)$$

式中: n_s 为 L 长管段中所含的粗颗粒数; w_s 为颗粒的重力; g 为重力加速度; ρ_w 为海水的密度; ρ_s 为固体颗粒的密度; ρ_{mc} 为均质浆体的密度; v_s 为粗颗粒的速度; v_m 为浆体平均速度; C_D 为沉降阻力系数; a_s 为矿石颗粒运动方向的有效面积; μ_s 为

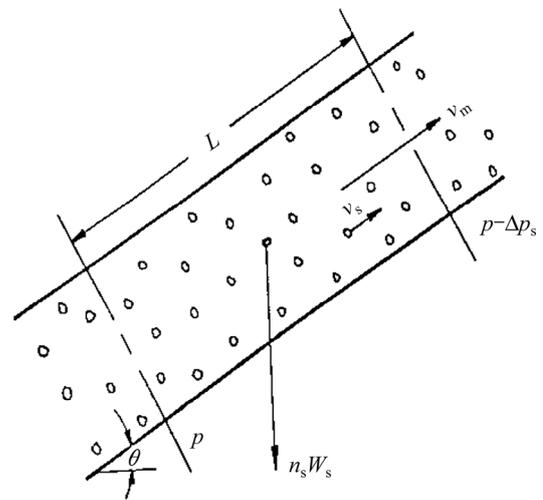


图 3 管道上升流示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pipeline upward flow

结核的摩擦因数; θ 为浆体流动方向与水平方向的夹角。

设 $\xi = \frac{v_s}{v_m}$, $s = \rho_s / \rho_{mc}$ 代入上式, 得:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{3C_D v_m (1 - \xi)^2}{4d_s s} - \frac{\mu_s g (s - 1) \cos \theta}{s v_m} - \frac{g (s - 1) \sin \theta}{s v_m} \quad (2)$$

在方程中引入沉降速度: $W_t = \sqrt{\frac{4gd_s(s-1)}{3C_D}}$

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{g(s-1)(1-\xi)^2}{sv_m} \left(\frac{v_m}{W_t}\right)^2 - \frac{\mu_s g(s-1) \cos \theta}{sv_m} - \frac{g(s-1) \sin \theta}{sv_m} \quad (3)$$

式中: d_s 为粗颗粒的粒径。式(3)就是固体颗粒速度 v_s 的运动方程式。

在上述固体颗粒运动方程中, 根据 $\xi = 0$ 的初始条件 $t_0 = 0$, $v_s = 0$, 即, 可求解得下式:

$$t = \frac{sW_t}{2g(s-1)} \ln \left[\frac{1 - \frac{W_t}{v_m} \sqrt{\mu_s \cos \theta + \sin \theta}}{1 + \frac{W_t}{v_m} \sqrt{\mu_s \cos \theta + \sin \theta}} \times \frac{1 - \xi + \frac{W_t}{v_m} \sqrt{\mu_s \cos \theta + \sin \theta}}{1 - \xi - \frac{W_t}{v_m} \sqrt{\mu_s \cos \theta + \sin \theta}} \right] \quad (4)$$

在正常的提升条件下, 时间 t 在一秒时间以内, ξ 基本近似接近 1, 所以在固体颗粒的运动中, 加速区间极短。因此, 在固体颗粒的水力提升中, 只需考虑稳定流状态, 即在式(4)中, 若 $d\xi/dt = 0$, 那么可得:

$$\xi = 1 - \left(\frac{W_t}{v_m}\right) \sqrt{\mu_s \cos \theta + \sin \theta} \quad (5)$$

用弗劳德数 F_r 代替式(5)中混合物的平均流速 v_m , 可得:

$$\xi = \frac{v_s}{v_m} = 1 - \frac{1}{F_r} \sqrt{\frac{4(s-1)}{3C_D} \left(\frac{d_s}{D}\right) (\mu_s \cos \theta + \sin \theta)} \quad (6)$$

式中: D 为管道内径。从力的平衡方程式可求得两截面的压差 Δp_s :

$$\Delta p_s = \frac{3}{2} C_D \cdot C'_v (1-\xi^2) \left(\frac{d_s}{D}\right)^{-1} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_m^2}{2g} \rho_w g \quad (7)$$

$$\lambda'_s = \frac{3}{2} C_D C'_v (1-\xi^2) \left(\frac{d_s}{D}\right)^{-1} \quad (8)$$

因此, 粗颗粒两相流动阻力损失的理论计算式

为:

$$i_m = (\lambda_{me} + \lambda'_s) \frac{v_m^2}{2gD} = \left[\lambda_{me} + \frac{3}{2} C_D (1-\xi^2) \left(\frac{d_s}{D}\right)^{-1} C'_v \right] \frac{v_m^2}{2gD} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 确定颗粒的沉降阻力系数 C_D 后, 用上述公式就能计算出粗颗粒两相流动阻力损失 i_m 。应该指出的是, 在实际中提升的海底矿物一般不是均匀粒径而是混合颗粒, 应用式(9)计算时, 大于临界粒径的粗颗粒应按颗粒粒级大小分组, 每组按均匀粒径进行计算, 再叠加。

1.3 水力提升管道粗颗粒两相流动阻力计算试验验证

从 1991 年中国大洋协会成立起, 就开始按照商业开采生产能力的十分之一(43 t/h 湿结核)的中期试采采矿系统提升能力开展深海采矿提升技术的研究, “八五”期间的“水力提升技术研究”进行了粒径 25 mm 的模拟结核和天然结核、管道内径为 100 mm 的提升试验研究^[12]。“九五”期间的“扬矿硬管系统工艺与参数研究”, 邹伟生^[13]用粒径 ≤ 15 mm、 ≤ 32 mm、 ≤ 50 mm 三种粒级组成的天然结核进行了内径 150 mm 的扩大试验和横摇与纵摇动态管的提升试验并建立了深海采矿矿浆泵水力管道提升试验数据库, 部分天然结核浆体管道阻力试验结果和应用上述公式计算结果对比如图 4 所示, 该提升管道阻力计算方法已广泛应用于提升管道阻力和软管输送阻力的计算。

2 水力提升装备——矿浆泵的研究

根据水力提升工艺对矿浆泵提升特性的要求, 以宽流道具有粗颗粒过流能力为设计目标, 开展具有高扬程、通过与回流粗颗粒、轴向流特性的提升矿浆泵设计理论和方法的研究。

2.1 矿浆泵矿浆特性与清水特性的关系

非均质两相流通过矿浆泵获得的能量可看作固相和液相获得的能量之和。单位时间两相混合浆

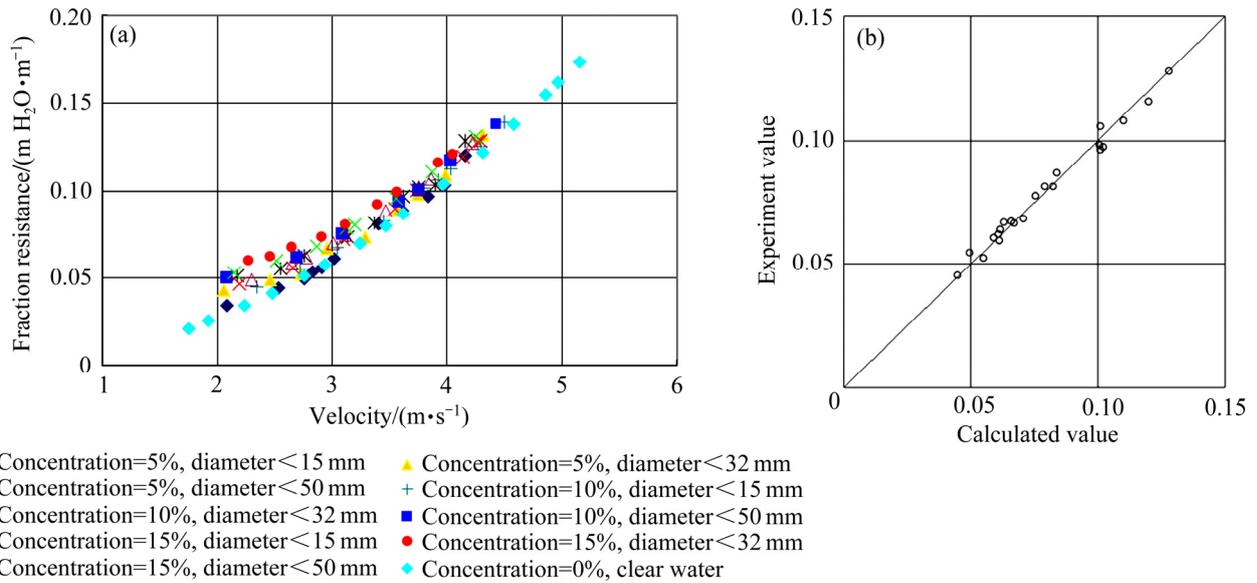


图 4 天然结核浆体管道阻力试验和计算结果^[13]

Fig. 4 Friction resistance-velocity curves of natural nodule slurry^[13]: (a) Friction resistance-velocity curve; (b) Experiment value-calculated value curve

体获得的动量矩为:

$$M_m = \rho_m Q_m (v_{u2m} r_2 - v_{u1m} r_1) + \rho_s Q_s (v_{u2s} r_2 - v_{u1s} r_1) + \rho_w Q_w (v_{u2w} r_2 - v_{u1w} r_1) \quad (10)$$

左边代以 $M_m = \frac{1}{\omega} \rho_m g Q_m H_{tm}$, 整理得:

$$H_{tm} = \frac{\omega}{g} \left[\frac{\rho_s Q_s}{\rho_m Q_m} (v_{u2s} r_2 - v_{u1s} r_1) + \frac{\rho_w Q_w}{\rho_m Q_m} (v_{u2w} r_2 - v_{u1w} r_1) \right] = \frac{1}{g} [(v_{u2s} U_2 - v_{u1s} U_1) C_w + (v_{u2w} U_2 - v_{u1w} U_1) (1 - C_w)] \quad (11)$$

式中: ρ_m 、 ρ_w 、 ρ_s 分别为海底矿石浆体、海水和固体颗粒的密度; Q_m 、 Q_w 、 Q_s 分别为海底矿石浆体、海水和固体颗粒的体积流量; v_{u2m} 、 v_{u2w} 、 v_{u2s} 分别为浆体、海水和固体颗粒在叶轮出口处绝对速度的切线方向速度; v_{u1m} 、 v_{u1w} 、 v_{u1s} 分别为浆体、清水和固体颗粒在叶轮进口处绝对速度的切线方向速度; H_{tm} 为矿浆泵的浆体扬程; C_w 为浆体中固体颗粒重量浓度。

式(11)为离心泵抽吸非均质两相流介质时的理论扬程计算式。一般情况下, 叶片进口绝对液流角设计为 $\alpha'_1 = 90^\circ$, 此时 $v_{u1} = 0$, 同时, 将泵的扬程用

清水柱表示, 式(11)可写成:

$$H_{tm} = \frac{1}{g} [v_{u2s} U_2 C_w + v_{u2w} U_2 (1 - C_w)] \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \quad (12)$$

式中: γ_m 为浆体的重度; γ_w 为清水的重度。

式(12)经过变换可写成:

$$H_{tm} = \frac{1}{g} [v_{u2s} U_2 C_w + v_{u2w} U_2 (1 - C_w)] \frac{\gamma_m}{\gamma_w} = \frac{1}{g} v_{u2w} U_2 (1 - C_w + C_w \phi) \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \quad (13)$$

以清水扬程 H_{tw} 代替 $\frac{1}{g} v_{u2w} U_2$, 最终得:

$$H_{tm} = H_{tw} (1 - C_w + C_w \phi) \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \quad (14)$$

式中: $\phi = v_{u2s} / v_{u2w}$, 为固相和液相在叶轮出口绝对速度的切线方向速度之比。

式(14)为矿浆泵的二相混合浆体扬程与清水扬程的关系式。

2.2 矿浆泵的放大流量设计和等功率设计理论

根据水力提升工艺要求, 意外停泵后要求矿浆泵安装位置以上提升管道中矿石颗粒能回流顺利通过泵的工作叶轮, 泵流道需要具有足够大的断面保证矿石颗粒能回流通通过泵, 因此提出矿浆泵的放

大流量设计法,其设计理论思想如下。

根据《清水泵及渣浆泵规范化设计》可知,叶轮流道出口宽度 b_2 与泵流量 Q 、扬程 H 及叶轮转速 n 、比转速 n_s 之间满足如下关系式:

$$b_2 = k_{b_2} \sqrt[3]{Q/n}, \quad k_{b_2} = 0.84 \times \left(\frac{n_s}{100} \right)^{3/5} \quad (15)$$

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (16)$$

将我国中试采矿系统确定泵的流量 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $40 \text{ m H}_2\text{O}$ 额定工作点参数代入计算,计算得到的叶轮出口宽度无法满足3倍最大提升矿石粒径的要求。通过分析可知,叶轮出口宽度 b_2 与流量 Q 和转速 n 成正比,与扬程 H 成反比。改变转速 n 或者扬程 H 会改变提升系统的提升工艺,因此通过放大泵设计点流量来增大叶轮出口宽度,泵放大流量设计点可通过应用叶轮出口宽度 b_2 计算公式使出口宽度 b_2 为最大提升矿石粒径的3倍来确定,这样将泵设计点的流量放大,使泵具有宽流道和具有较高的比转数,泵型一般处于高比转数离心泵或混流泵型,使得矿浆泵具有轴向流的性质,泵的额定工作点和泵的设计点适当分离,这样获得了比常规设计更宽的泵叶轮流道,提高了泵通过粗颗粒矿石和停泵回流粗颗粒矿石的能力。

鉴于矿浆泵提升过程中浆体浓度有可能从设计浓度降低至零(即海水),因此浆体重力位能的变化引起管道提升阻力的变化,需要泵扬程的改变来适应管道提升阻力的变化,为避免扬程改变造成过大的流量变化引起电机功率过载,要求矿浆泵具有陡降的扬程-流量特性曲线以及平缓的功率-流量特性曲线,通过控制叶轮叶片数和叶片出口安放角来实现泵的陡降的扬程-流量特性曲线,到达通过流量的较小增加获得扬程较大降低的目的,这样使流量增加引起的功率增加值和扬程减小引起的功率降低值大小基本一致,正负基本抵消,使得泵功率随流量增加呈现增加趋势不很明显,即所谓泵等功率设计思想。矿浆泵有效功率公式如下:

$$N_e = \rho_m g Q_m H_m / (1000 \times 3600) \quad (17)$$

通过合理确定提升系统不同工况点矿石浆体

密度 ρ_m 、矿浆流量 Q_m 和扬程 H_m 三者的匹配关系,进行泵的扬程 H_m -流量 Q_m 特性曲线的设计,可以保证矿浆泵的有效功率 N_e 随流量增加而平缓变化,使泵具有较强的自我调节能力以适应采矿系统生产参数的变化。

2.3 水力提升矿浆泵研制

按照上述提升矿浆泵设计理论,开展了系列矿浆泵的研制。“十一五”期间我国研究人员在“中试采矿系统1000米海上试验”中首次研制了两级提升矿浆泵^[14],水力管道提升系统要求按照流量 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $40 \text{ m H}_2\text{O}$ 的额定工作点参数研制;在研制过程中,放大流量设计点参数为流量 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $30 \text{ m H}_2\text{O}$ 。图5所示为“十一五”期间研制的两级提升矿浆泵及其特性曲线试验结果,从扬程-流量曲线的试验结果可知,流量为 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,两级泵的扬程为 $77.99 \text{ m H}_2\text{O}$,单级扬程为 $39 \text{ m H}_2\text{O}$,比额定工作点确定的单级扬程低 $1 \text{ m H}_2\text{O}$,功率-流量特性曲线变化平缓,满足提升矿浆泵研制的要求,通过了矿浆提升试验的验证。

“十四五”期间为国家重点研发计划“深海多金属结核采矿试验工程”研制了六级提升矿浆泵^[15],按照流量 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $45 \text{ m H}_2\text{O}$ 的额定工作点参数研制,放大流量设计点参数确定为流量 $720 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $39.5 \text{ m H}_2\text{O}$ 。图6所示为“十四五”期间研制的六级提升矿浆泵及其特性曲线的试验结果,从扬程-流量曲线的试验结果可知,流量为 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,六级泵的扬程为 $298.84 \text{ m H}_2\text{O}$,单级扬程为 $49.8 \text{ m H}_2\text{O}$,比额定工作点确定的单级扬程高 $4.8 \text{ m H}_2\text{O}$,满足提升矿浆泵研制的要求,功率-流量特性曲线同样变化平缓,通过了矿浆提升试验的验证。

3 商业开采水力管道提升系统的研究

近年来关于开采海洋矿产资源可能比陆地采矿更环保、投资效益更高等观点逐渐成为主流,释放出开发与利用海洋矿产资源的十足信心和期望,深海采矿呼之欲出,作出了“深海采矿能力可在数年内形成”的基本预判,国际社会加快了商业开采

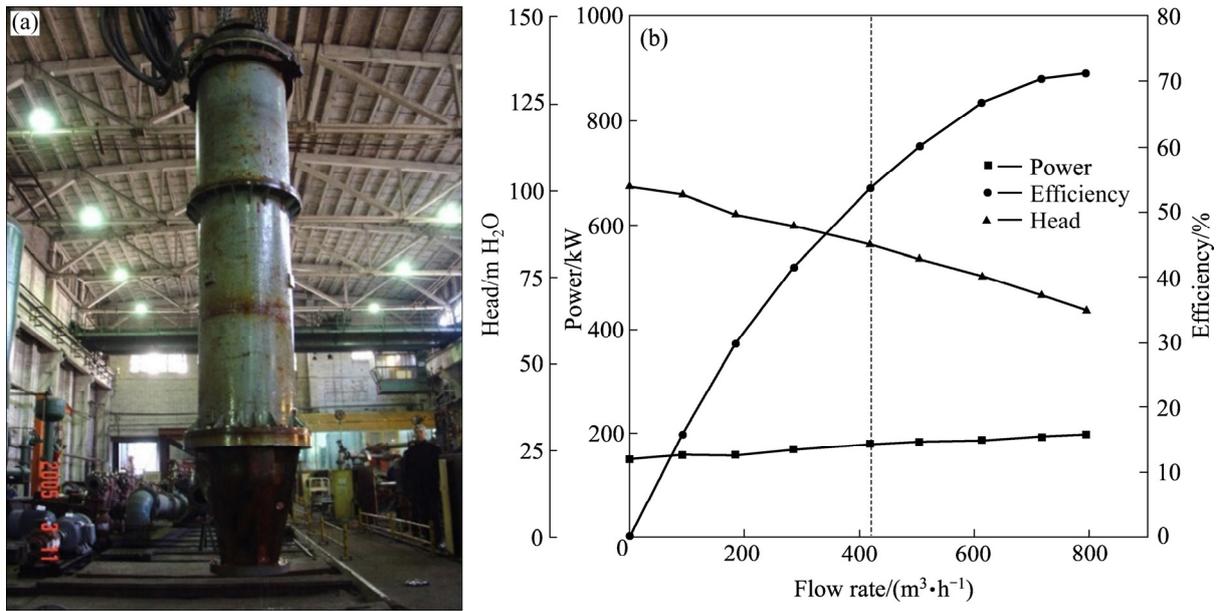


图 5 两级提升矿浆泵及其试验结果

Fig. 5 Two-stage lift slurry pump and test results: (a) Photo of slurry pump; (b) Test results

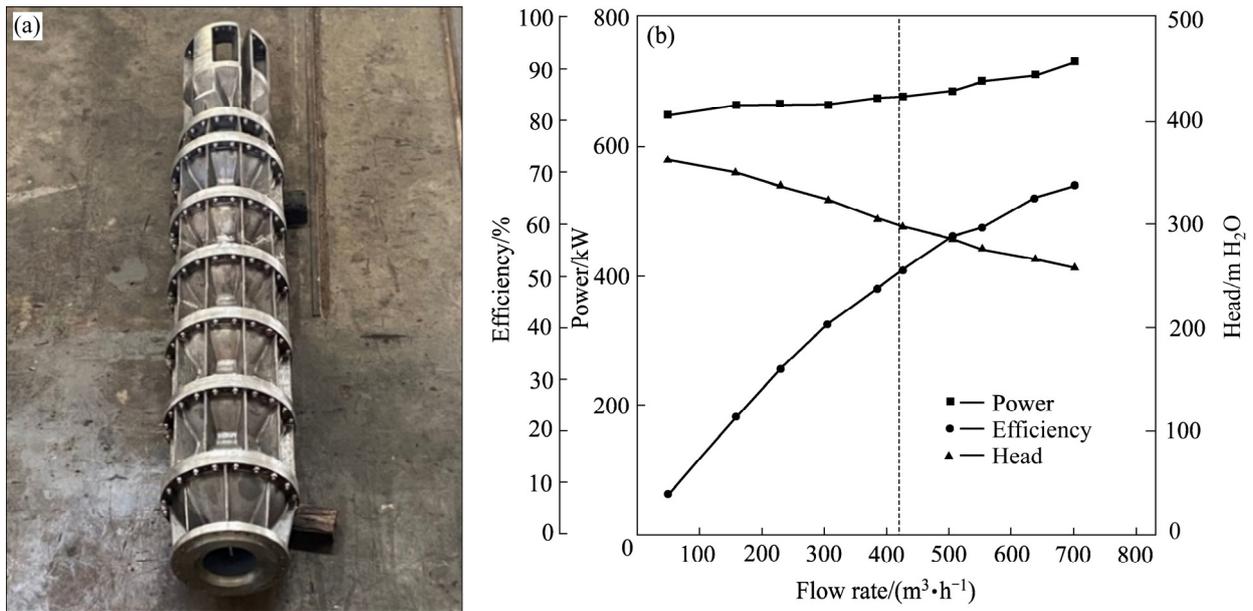


图 6 六级提升矿浆泵及其试验结果

Fig. 6 Six-stage lift slurry pump and test results: (a) Photo of slurry pump; (b) Test results

系统的研发。根据上述矿浆泵水力管道提升系统的研究结果, 对中国大洋协会确定的具有 430 t/h 湿结核生产能力的商业开采水力管道提升系统进行研究分析。

3.1 提升管道系统总阻力

结核浆体管道提升系统总阻力为将结核从提

升管道入口提升到洋面采矿船上所需克服的阻力, 包括结核浆体管道提升系统沿程阻力和位能阻力。

图 7 所示为在四种体积浓度的条件下, 应用式 (9) 对内径 375mm 管道结核浆体提升管道阻力计算结果加上位能阻力随提升流速变化关系曲线, 即提升管道的阻力特性曲线。图中曲线清晰地表明了管道系统总阻力和流速、浓度的关系, 由于结核矿浆

位能的影响,提升浓度对管道系统总阻力的影响显著。

根据管道提升系统总阻力计算结果,将提升流速 4 m/s、提升体积浓度 13.48%作为提升系统运行额定工作点工艺参数,管道提升系统总阻力为 1152 m H₂O,此时提升管道系统矿石输送生产能力 Q_s 为 430 t/h 湿结核。考虑到取 1.04 的安全系数,提升系统运行设计工作点所需总扬程为 1198 m H₂O。

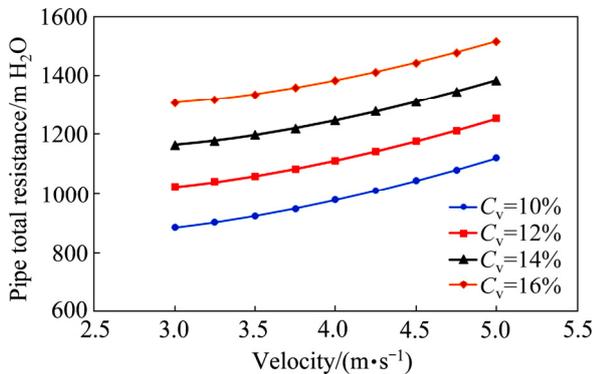


图7 管道提升系统总阻力随提升流速变化的关系

Fig. 7 Relationship between total pipe resistance and velocity

3.2 矿浆泵扬程与台数设计和运行方式

矿浆泵的单级扬程和单台矿浆泵的级数不仅受潜水电机技术水平和泵的轴向力大小以及止推轴承承载能力等因素的影响,而且也受提升工艺条件的影响。商业开采矿浆泵的工作特点是大流量、高扬程、提升浓度高、矿石粒径大。为了保证矿石颗粒能顺利通过泵的流道和停泵能回流通道的流道,其流道仍必需具有流过和回流矿石颗粒的过流能力并具有轴向流的特征,亦仍需要采用放大流量设计法,即要求提升矿浆泵采用高比转数离心泵或混流泵的工作叶轮结构,具有轴向流的特征。

6000 m 级的垂直管道高浓度提升管道故障和堵管的风险很高,管道内流动参数一有稍有降低,管道内颗粒可能迅速出现滞留甚至沉降现象,可能马上出现堵管,建议采用分布式矿浆泵布局,即应该采用“动车”方案分布式动力布局,避免采用“蒸汽机车”动力集中单一式布局,以分散降低故障停运风险和堵管风险,因此矿浆泵数量不宜过少,亦即单台矿浆泵的扬程不宜过高,此外受泵比

转数、潜水电机的功率和止推轴承止推能力的限制,矿浆泵的单级扬程也不宜过高。

“动车”方案的高可靠性就在于动力“分散”,采用矿浆泵扬程高、台数少的“蒸汽机车”动力集中单一式布局,一台矿浆泵故障停运就可能导导致系统产能降低甚至堵管瘫痪。如果矿浆泵台数适当,出现一台两台故障停运,剩下的泵通过变频调速依然能保证系统正常运行。

根据管道提升阻力计算结果确定的管道提升系统运行额定工作点的工艺参数为提升流速 4 m/s(对应的流量 1580 m³/h)、提升体积浓度 13.48%,所需扬程为 1198 m H₂O。经综合分析采用以下单台矿浆泵的设计额定参数为 $Q_0=1580$ m³/h, $H_0=240$ m H₂O,级数 $j=5$,单级扬程 $H=48$ m H₂O,转速 $n=1450$ r/min。放大流量设计点参数确定为流量 2260 m³/h、单级扬程 42 m H₂O。

根据提升管道系统运行额定工作点所需扬程为 1198 m H₂O,提升管道系统配置 6 台矿浆泵,采用变频调速,以满足异常工况要求,可以 6 台同时变频启动运行,正常情况下亦可启用 5 台,做到 5 用 1 备,大大增加了管道提升系统运行可靠性。这种设计方法广泛用于陆地高浓度浆体输送管道的设计中。考虑到便于矿浆泵的布放与安装,建议 2 台矿浆泵组成一个矿浆泵组,6 台矿浆泵组成三个矿浆泵组,分别安装在三个不同的水深位置。

图 8 所示为 5 台矿浆泵串联的总扬程和提升管道阻力与流量关系曲线。从图 8 中可以看出,为使

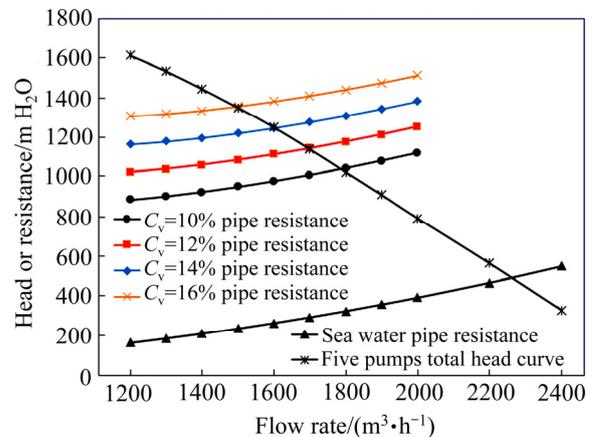


图8 总扬程、总提升管道阻力与流量的关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between total head and total lift pipe resistance

管道提升系统矿石提升生产能力达到 430 t/h 湿结核, 提升体积浓度可控制在 12%至 16%之间, 矿浆泵采用 5 用 1 备的运行模式下, 提升系统将在 $1480 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_m \leq 1680 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量区间内, 亦即在 $3.72 \text{ m/s} \leq v_m \leq 4.24 \text{ m/s}$ 速度区间内安全稳定运行。管道提升系统在该区间内运行时, 矿石输送生产能力 Q_s 在 404.6~473.8 t/h 湿结核之间, 不仅满足商业开采的提升能力, 而且可以适用采矿车生产能力的波动。

4 结论

1) 在大规模的商业化开采之前, 世界各国正在加快开展深海矿物开采关键技术的研究, 我国通过对多种提升方法的试验研究和技术经济比较, 将矿浆泵水力管道提升优选为我国海洋采矿的提升方法, 经过中国大洋矿产资源研究开发协会 30 年的研究已形成较为成熟的矿浆泵水力提升技术方案, 开展过多次矿浆泵水力提升验证试验。

2) 提出细颗粒均质浆体作为载体运载粗颗粒的流动模型, 这一新型流动模型合理地反映了海底矿石浆体管道上升流的实际流动情况, 并基于该流动模型, 提出了水力提升管道粗颗粒两相流动阻力的计算方法。

3) 提出的提升矿浆泵的高比转数混流泵型以及提升矿浆泵放大流量设计和等功率设计的理论可解决提升矿浆泵的通过粗颗粒、高扬程、轴向流、能回流特性要求的关键技术问题。

4) 提出采用分布式提升矿浆泵布局和运行方式, 以分散降低矿浆泵故障停运风险和堵管风险, 从而降低 6000 m 米级商业开采系统的水力提升管道故障和堵管的风险。

REFERENCES

- [1] ENGELMANN H E. Vertical hydraulic lifting of large-size particle—A contribution to marine mining[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1978: 731-740.
- [2] SHAW J. Nodule mining—three miles deep[J]. Marine Geo-resources and Geo-technology, 1993, 11(2): 181-197.
- [3] WELLING C G. Manganese nodule design contents[C]// International Seminar of Deep Sea-bed Mining Technology. Beijing: [s.n.], 1996: 1-15.
- [4] VAN WIJK J M. Vertical hydraulic transport: A study into flow assurance[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2016.
- [5] HONG S. Recent achievements mining technology of polymetallic nodules—performance evaluations of pilot mining system in sea conditions[C]//9th Meeting of Korea-China Cooperation on Deep-Sea Mineral Resources Development. Xiamen: [s.n.], 2016.
- [6] SOBOTA J. Slip velocities in mixture vertical pipe flow[C]// Proceeding of the tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium. Szczecin, Poland: [s.n.], 2013: 221-224.
- [7] DREISEITL I. About geotechnical properties of the deep seabed polymetallic nodules[C]//Proceeding of the 18th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles. Prague, Czech: [s. n.], 2017: 67-74.
- [8] ROGERS S. Nautilus minerals[C]//PNG Mining and Petroleum Conference. Sydney: [s.n.], 2012.
- [9] VAN WIJK J M. The influence of nodules degradation on the vertical hydraulic transport of manganese nodules[C]// Proceeding of the 18th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles. Prague, Czech: [s.n.], 2017: 385-392.
- [10] 郑 洲, 姚新伟, 王福平, 等. 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 Xin-wei, WANG Fu-ping, et al. On the status quo and trend of the development of deep-sea marine equipment technology[J]. Chemical Management, 2017(34): 154.
- [11] 邹伟生, 曹鸿灿. 深海矿产资源管道输送阻力的研究[J]. 现代应用物理, 2016, 3(7): 59-63.
ZOU Wei-sheng, CAO Hong-can. Research on pipeline transportation resistance of deep-sea mineral resources[J]. Modern Applied Physics, 2016, 3(7): 59-63.
- [12] 邹伟生. 海洋采矿扬矿参数与泵的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2005: 52-56.
ZOU Wei-sheng. The study of lift parameters and pump in ocean mining[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2005: 52-56.
- [13] 邹伟生. 扬矿硬管系统工艺与参数研究[R]. 长沙: 长沙矿冶研究院有限责任公司, 1999.
ZOU Wei-sheng. The study of lift system technology and

- parameters in vertical pipe[R]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., 1999.
- [14] ZOU Wei-sheng. COMRA's research on lifting motor pump[C]//Proceedings of the Seventh (2007) ISOPE Ocean Mining Symposium. Lisbon, Portugal: [s.n.], 2007: 177-180.
- [15] 邹伟生, 刘瑞仙, 刘少军. 粗颗粒海底矿石浆体提升电泵研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(24): 2899-2904.
- ZOU Wei-sheng, LIU Rui-xian, LIU Shao-jun. Study on lifting motor pumps for coarse particle slurry in sea bed mining[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24): 2899-2904.

Theoretical design on slurry pump hydraulic lift system for marine mineral resources exploitation

ZOU Wei-sheng¹, LI Hao-tian¹, KANG Ya-juan²

- (1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: The lift system, acting as the passage for the transportation of the seabed ore, is the intermediate part between the seabed mining vehicles and surface mining vessels. This paper focused on the key technologies and equipment for the slurry pump hydraulic lifting system, a flow model and theory for lift coarse particle slurry were put forward. It is proposed that slurry pump is a kind of mixed flow pump with high specific speed, which can pass the coarse particles with high lift head and with axial flow and backflow. The theories for increasing the flow rate design, as well as the equal power design for it were also elaborated, which were all tested with slurry in the laboratory and also verified in the sea-test for pumping seabed mineral slurry. These theories and technologies have been applied to improve slurry pump lifting system for commercial mining of seabed mineral resources.

Key words: marine mineral resources; hydraulic lift system; coarse particle slurry; slurry pump

Foundation item: Project(52071138) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020GK1020) supported by the Major Science and Technology Projects of Hunan Province, China

Received date: 2021-07-20; **Accepted date:** 2021-10-09

Corresponding author: ZOU Wei-sheng; Tel: +86-13973140869; E-mail: zouweisheng1@hnu.edu.cn

(编辑 何学锋)