

# 深海采矿水下输送系统提升硬管选型及水动力校核研究<sup>①</sup>

张明<sup>1</sup>, 郑皓<sup>1</sup>, 李满红<sup>1</sup>, 李小艳<sup>1</sup>, 宋环峰<sup>2</sup>

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南长沙 410012; 2.中国船舶科学研究中心 上海分部,上海 200011)

**摘要:** 为了研究深海采矿水下输送系统提升硬管选型设计的可靠性,以输送指标为设计输入,通过水动力学进行校核,根据多金属结核沉降速度确定提升硬管选用外径 244.48 mm 的 P110 钢级抗疲劳螺纹连接套管(壁厚 20.24 mm),水池拖曳试验结果表明提升电泵上端硬管阻力系数为 1.4,提升电泵下端硬管阻力系数为 1.3。对水下输送系统按作业工况和布放工况分别进行水动力学计算,在海试作业环境下提升硬管安全系数满足 API RP 2RD 规范要求。在深海多金属结核采矿试验工程海上验收试验中,提升硬管满足各项输送指标要求,各接口间连接可靠,验证了提升硬管选型设计的合理性。

**关键词:** 深海采矿; 水下输送系统; 提升硬管; 水动力学; 管道输送

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.008

文章编号: 0253-6099(2023)05-0037-05

## Research on Type Selection of Lift Pipe and Hydrodynamic Parameters Check for Underwater Transport System in Deep-Sea Mining

ZHANG Ming<sup>1</sup>, ZHENG Hao<sup>1</sup>, LI Manhong<sup>1</sup>, LI Xiaoyan<sup>1</sup>, SONG Huanfeng<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China; 2.Shanghai Branch of China Ship Scientific Research Center, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** In order to explore the reliability of type selection in the design of lift pipe for underwater transport system in deep sea mining, hydrodynamic parameters were checked with transport indices as input for design. Based on the settling velocity of polymetallic nodules, anti-fatigue threaded sleeve of P110 steel, with outer diameter of 244.48 mm and wall thickness of 20.24 mm, was selected for lift pipe. And a towing test performed in a pool shows that the resistance drag coefficient is 1.4 for the lift pipe at the upper end of the pump and 1.3 at the lower end of the pump. Hydrodynamic parameters were calculated and analyzed for the underwater transport system according to working conditions and launching conditions, showing that the safety factor of lift pipe can meet the requirements of API RP 2RD Standard. In the deep-sea polymetallic nodules mining test project, lift pipe in the at-sea acceptance test, with reliable joint connection, could meet the requirement for each transporting parameter, which has verified that the type selection of lift pipe in the design is acceptable.

**Key words:** deep sea mining; underwater transport system; lift pipe; hydrodynamics; pipeline transport

深海赋存着巨量的多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳和富稀土沉积物等多种高品位深海矿产资源,这些矿产资源中富含镍、钴、锰、铜等金属,是我国十分短缺的战略性金属资源,也是新能源汽车、芯片、特种合金等新兴高技术产业的核心元素<sup>[1-2]</sup>。据有关数据估算,海底多金属结核总量达 210 亿吨,其中镍含量是陆地镍总储量的 3.5 倍、钴含量是陆地钴总储量的 5.5

倍<sup>[3]</sup>。深海矿产资源主要存在于水深 300~6 000 m 的海底<sup>[4]</sup>,深海矿产资源开发就是将海底矿产安全高效地输送至水面。目前已成功应用的开采方式主要有管道提升式采矿、穿梭艇式采矿、连续绳斗式采矿以及拖斗式采矿等<sup>[5-6]</sup>。国际上对海底履带式行走、水力/机械采集和管道水力/气力提升为主的深海采矿方案研究较为深入。

① 收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0014); 中国五矿集团有限公司科技专项计划(2018ZXB06)

作者简介: 张明(1987—),男,湖南永州人,工程师,主要从事深海采矿管道输送技术研究。

国家重点研发计划“深海多金属结核采矿试验工程”项目,采用的是管道水力提升方式。水下输送系统提升硬管作为深海采矿多金属结核的提升通道,同时作为整个水下输送系统的承载体,提升硬管的选型设计及校核至关重要。本文开展深海多金属结核采矿试验工程水下输送系统提升硬管选型设计研究,以输送指标为设计输入,开展水动力分析校核,确定提升硬管选型设计的可靠性。

## 1 提升硬管选型设计

深海多金属结核采矿试验工程水下输送系统如图1所示,设计作业水深1400 m,提升硬管总长度约1300 m,中继站距海底高度100 m,提升电泵位于水深500 m处。采矿车采集的多金属结核通过输送软管输送至中继站,再通过提升硬管输送至水面船舶。

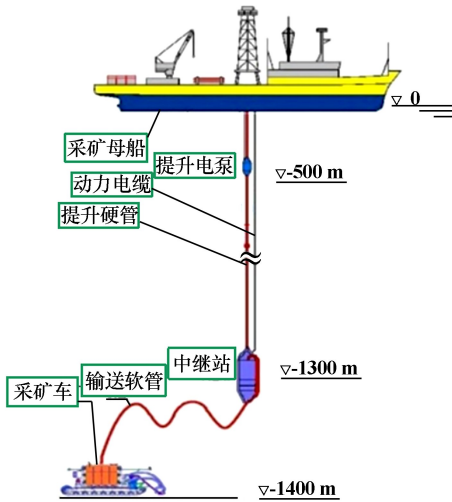


图1 深海采矿水下输送系统示意图

### 1.1 提升硬管选型设计依据

#### 1.1.1 设计输入

水下输送系统提升硬管需满足:输送湿结核43 t/h,输送流量不小于420 m<sup>3</sup>/h,多金属结核粒径不大于20 mm,输送体积浓度不小于5%。

#### 1.1.2 校核方式

提升硬管作为水下输送系统唯一的通道和承载体,在满足输送指标的前提下,保证提升硬管在复杂海洋环境下,能够达到API RP 2RD<sup>[7]</sup>规范要求的安全系数(材料屈服强度/最大等效应力),作业工况安全系数大于1.5,极端工况(布放回收工况)安全系数大于1.25。

### 1.2 提升硬管规格

#### 1.2.1 提升硬管内径

根据输送速度、多金属结核矿浆输送浓度确定提升硬管内径。由固液两相流理论中的Govier理论<sup>[8]</sup>

可知,提升速度应大于矿石颗粒沉降速度的3~5倍,才能保证矿石颗粒在管道中垂直向上输送。不规则形状锰结核颗粒的沉降速度可按式(1)计算:

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

式中 $S_f$ 为形状系数,天然锰结核形状系数取0.8; $\rho_s$ 为湿结核密度,为2000 kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{sw}$ 为海水密度,为1037 kg/m<sup>3</sup>;  $g$ 为重力加速度; $d$ 为结核粒径,为20 mm。代入式(1),多金属锰结核颗粒沉降速度 $W_t = 0.54$  m/s,按5倍沉降速度计算,提升速度 $V_m = 2.70$  m/s。

输送产能 $Q_s$ 与输送流量 $Q_v$ 关系如下:

$$Q_v = \frac{Q_s}{\rho_s C_v} \quad (2)$$

式中 $Q_v$ 为体积流量,m<sup>3</sup>/h; $Q_s$ 为矿浆质量流量,为43 t/h; $C_v$ 为体积浓度,取5%~6%,计算得 $Q_v = 360 \sim 430$  m<sup>3</sup>/h。

提升硬管内径计算公式为:

$$D_{in} = \frac{4Q_v}{V_m} \quad (3)$$

将 $Q_v = 360 \sim 430$  m<sup>3</sup>/h、 $V_m = 2.70$  m/s,代入式(3),计算得输送管内径 $D_{in} = 216 \sim 236$  mm。考虑到结核粒径可能大于20 mm,应适当提高流速,提升硬管内径应小于216 mm。

#### 1.2.2 提升硬管材料钢级及管道壁厚

管道材料钢级越高,管道屈服强度越大,抗力越强,同时管道硬度和脆性也会加大。表1为海洋工程立管常用钢级性能参数表,综合考虑钢级屈服强度和硬度,提升硬管选择P110钢级材料。

表1 钢级性能参数表

钢级	屈服强度/MPa	最大平均硬度(HRC)
X65	448~600	15.7
X80	552~690	22.2
P110	758~965	35
P140	965~1172	41

目前海洋工程立管采用法兰连接和螺纹连接均较为成熟,考虑水下输送系统提升硬管需要快速对接,提升硬管选用抗疲劳螺纹连接管。提升硬管连接方式如图2所示,该螺牙扣型抗疲劳应力集中系数 $SAF \leq 2.0$ 。

根据《API SPEC 5CT 套管和油管规范》<sup>[9]</sup>,内径216 mm相近的标准套管,应选取外径244.48 mm的套管,选择该规格下最大壁厚20.24 mm,其管道内径为204 mm。当体积流量 $Q_v = 420$  m<sup>3</sup>/h,管道内径为 $D_{in} = 204$  mm,通过式(3)得到输送流速为3.75 m/s,大

于最小提升速度,满足输送要求。

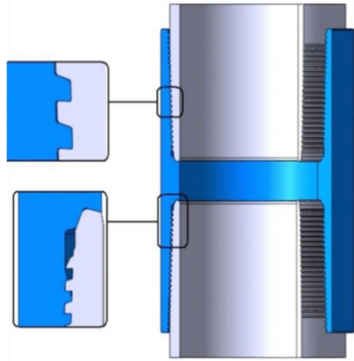


图2 提升硬管连接方式

## 2 水下输送系统水动力计算模型

### 2.1 水动力计算基本原理

在 Orcaflex 软件中建立完整的水下输送系统总体水动力模型,包括采矿车、输送软管、中继站、提升硬管及水面船舶,考虑风浪流环境条件,运用三维势流理论,使用时域法进行耦合分析<sup>[10]</sup>。在复杂海洋环境中,水下输送系统提升硬管主要受到两种载荷作用;一种是船舶传递的管道波浪力,一种是长距离管道海流力。

采用莫里森(Morison)方程<sup>[11]</sup>计算细长立管波浪力。莫里森方程是根据绕流理论建立的半理论半经验公式:

$$f_{wy} = \frac{1}{2} C_D \rho_w D \left( u - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \left| \left( u - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \right| + C_M \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) \quad (4)$$

式中  $f$  为立管单位长度波浪力,  $\text{kN/m}$ ;  $\rho_w$  为海水密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $D$  为立管直径,  $\text{m}$ ;  $u$  为海流速度,  $\text{m/s}$ ;  $C_D$  为立管阻力系数;  $C_M$  为立管惯性力系数。

海流作用在管道上产生的阻力大小与海流速度和管道外径直接相关。立管上的总海流力可用下式表示:

$$F_c = \frac{\rho_w}{2g} D \int_0^S C_D u^2 dz \quad (5)$$

式中  $F_c$  为立管总海流作用力,  $\text{kN}$ ;  $S$  为立管总长度,  $\text{m}$ 。

提升硬管波浪力和海流力主要影响因素为阻力系数  $C_D$  及海流速度  $u$ 。其中海流速度根据试验海域监测的流速按高度方向设置剖面流速,阻力系数根据硬管在水池中拖曳试验获取。

### 2.2 提升硬管阻力系数拖曳试验

按 1:1 搭建长度 1 m 的提升硬管模型,采用普通钢材料制作提升硬管,采用铠装钢丝缆模拟绑扎在提升硬管上的脐带缆,如图 3 所示。将模型与三分力天

平连接的圆管固定在拖曳水池的拖车上,三分力天平安装在扬矿管的中间位置,用于测量硬管的受力情况。由于水下输送系统提升电泵上端硬管绑扎两根脐带缆(提升泵脐带缆和中继站脐带缆),提升电泵下端硬管绑扎一根电缆(中继站脐带缆),圆管附着非对称的电缆,不同的来流方向绕流结果不一样,整体的阻力大小也不一样,因此按不同来流方位角度分别测量。

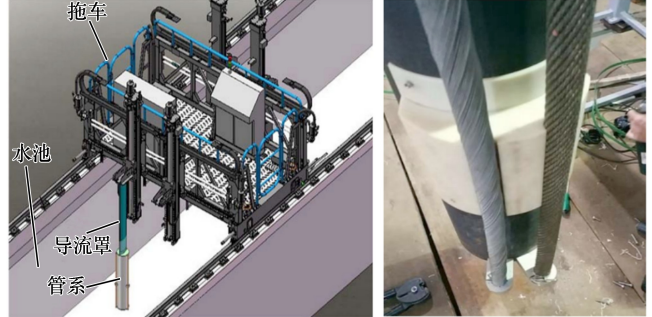
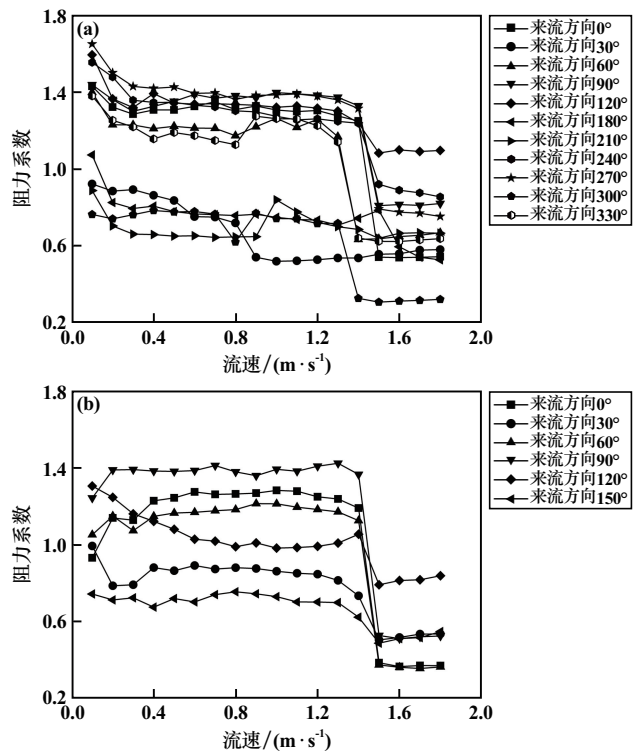


图3 提升硬管阻力系数试验平台

用拖车速度来模拟来流速度,速度  $0.1 \sim 1.8 \text{ m/s}$ , 间隔  $0.1 \text{ m/s}$ 。根据式(5)按单位长度计算阻力系数,图 4 为提升电泵上端硬管、提升电泵下端硬管在不同来流方向、不同流速下的阻力系数。



(a) 上端硬管; (b) 下端硬管

图4 提升硬管阻力系数计算结果

试验海域环境监测数据显示,高度方向剖面流速  $0.2 \sim 1.6 \text{ m/s}$ ,由图 4 可知,流速  $0.2 \sim 1.6 \text{ m/s}$  时,硬管

整体阻力系数为0.4~1.5,低流速时阻力系数大,流速大于1.4 m/s后发生转捩。保守计算,在水动力计算模型中,提升电泵上端硬管阻力系数取1.4、提升电泵下端硬管阻力系数取1.3。

### 2.3 水动力模型管道参数设置

对水下输送系统在 Orcaflex 软件中搭建水动力计算模型,采矿试验母船和海底采矿车采用 Vessel 船舶单元;提升硬管、输送软管、提升电泵采用 Lines 管线单元;中继站采用 6D buoys 六自由度浮筒单元;升沉补偿器采用 Links 线弹性单元。鉴于篇幅有限,文中只列出输送管道参数。

#### 2.3.1 提升硬管参数设置

计算模型中立管尺寸、长度、质量按照 1 400 m 作业水深设置,具体参数见表 2,水下输送系统硬管连接方案如图 5 所示。

表 2 提升硬管参数

参数名称	单位	参数值
外径	mm	244.48
内径	mm	204
提升电泵上端硬管长度	m	501
提升电泵下端硬管长度	m	793
提升电泵上端硬管质量	kg/m	121.45
提升电泵下端硬管质量	kg/m	116.2
提升电泵上端阻力系数		1.4
提升电泵下端阻力系数		1.3

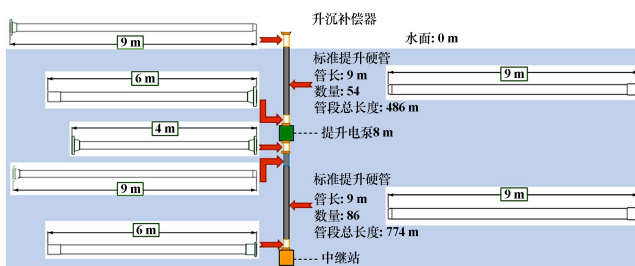


图 5 硬管连接方案

标准管提升硬管质量 112.5 kg/m,计算模型中将提升电泵脐带缆质量 5.25 kg/m、中继站脐带缆质量 3.7 kg/m均布到硬管中。标准管提升硬管长度 9 m/根,海试前 2 根预接成 18 m。1 400 m 水下输送系统,提升硬管连接总长度约 1 300 m,中继站上端、提升电泵下端、提升电泵上端、硬管顶端都采用螺纹式法兰短管连接,长度分别为 6 m、4 m、6 m、9 m。

#### 2.3.2 输送软管参数设置

输送软管一端连接中继站下端,一端连接采矿车,输送软管中间位置每隔 5 m 绑扎一个浮力块,共绑扎

14 个浮力块,单个浮力块净浮力 330 kg(浮力块采用 float 单元,设置净浮力/质量与实际一致),使输送软管在采矿作业时保持 N 构型,计算模型中输送软管参数见表 3。

表 3 输送软管参数

参数名称	单位	参数值
软管总长	m	300
外径	mm	257
内径	mm	203
空气中质量	kg/m	37.5
阻力系数		1.2

### 2.4 计算工况

对水下输送系统按作业工况和布放工况分别开展计算校核。图 6 为水下输送系统布放工况和作业工况水动力计算模型。

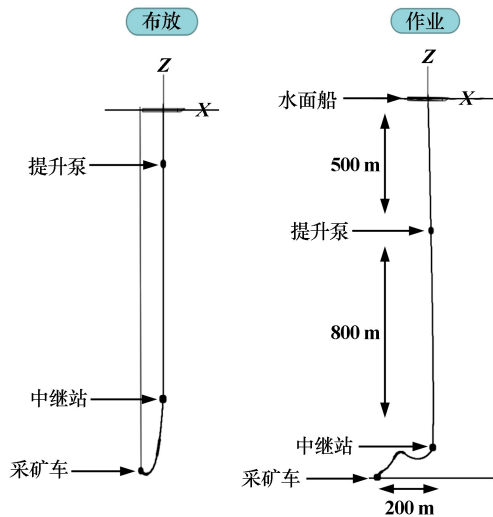


图 6 输送系统水动力计算模型

作业工况:水下输送系统全部管道和设备布放到位,硬管顶端连接升沉补偿器(硬管顶端可摆动角度 $8^\circ$ ),水下输送系统开始输送多金属结核。布放工况:水下输送系统布放时,采矿车从船尾 A 架布放,提升硬管系统从月池中间布放。提升硬管每次布放 1 根,采矿车同步下放,单根下放到位时,硬管顶端采用动力卡瓦锁死,开始对接下一根硬管。硬管顶端固支,在海流作用下,硬管顶端弯矩载荷非常大,因此每布放 1 根(18 m)硬管,都搭建水动力计算模型,校核提升硬管顶端安全系数。

### 2.5 海洋环境条件

#### 2.5.1 海浪参数

采用 Morison 方程计算波浪力的关键在于选定一

种适宜的波浪理论。选用 Jonswap 谱计算模型中不规则波浪谱,谱形参数  $\gamma=3.3$ 。作业工况采用 4 级海况,有义波高 2.5 m; 布放工况采用 3 级海况,有义波高 1.5 m。

### 2.5.2 海流参数

项目单位 2018 年 6 月至 2019 年 5 月在试验海域不同水深分别放置海流监测仪,每 0.5 h 记录一次,筛选试验海域全年监测最大流速作为海流参数,流速剖面见图 7。

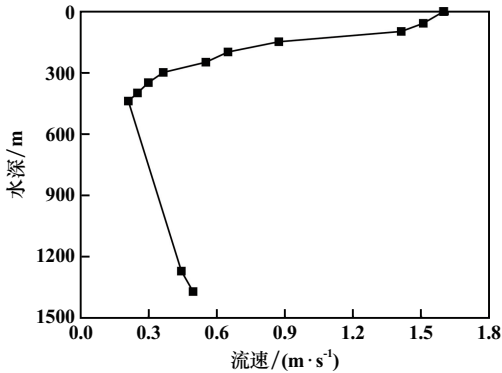


图 7 流速剖面

## 3 提升硬管强度校核

### 3.1 布放工况提升硬管强度校核

布放工况设置 3 级海况,船舶迎浪角度  $30^\circ$ ,每布放 1 根 18 m 硬管,计算 1 次,共计算 73 组,分别提取提升硬管顶端张力、弯矩、综合应力及对应的安全系数,图 8 为布放工况下提升硬管顶端载荷大小。

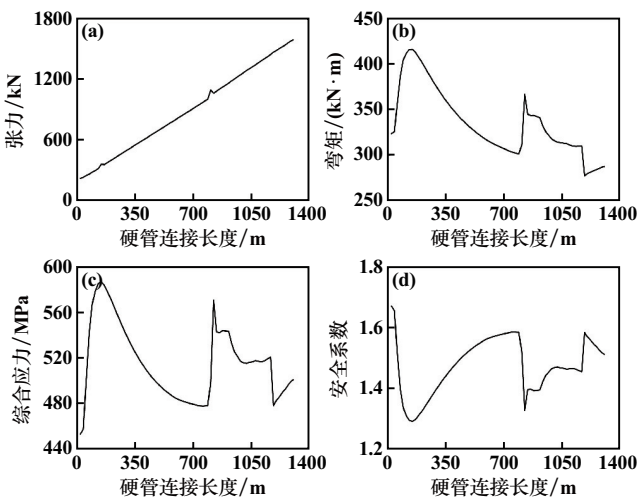


图 8 布放工况硬管顶端载荷大小

由图 8 可知,随着接管长度增长,质量增加,硬管顶端所承受的张力越来越大,顶端张力与长度呈线性关系。综合应力与接管长度非线性变化。综合应力同时受到张力和弯矩共同作用,综合应力变化趋势与弯

矩变化趋势一致,说明综合应力受弯矩影响更大,而弯矩主要受流速影响。整个布放过程中,硬管顶端最小安全系数为 1.29,满足 API RP 2RD 规范要求的“极端工况安全系数大于 1.25”,布放工况下,提升硬管的选型满足设计需求。为了保证海试安全,水下输送系统布放回收时,应时刻监测海况和流速,当海况大于 3 级、表面流速大于 1.6 m/s 时,应停止布放,硬管顶端连接升沉补偿器,待海况好转时再继续布放。同时在水下输送系统布放回收时,船舶开启动力定位,控制船舶迎浪角在  $30^\circ$  以内。

### 3.2 作业工况提升硬管强度校核

作业工况设置 4 级海况,船舶迎浪角度分别按  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  计算,表 4 为作业工况下硬管顶端载荷大小及底端偏移距离。

表 4 作业工况硬管载荷参数

迎浪角度/ ( $^\circ$ )	顶端张力/ kN	顶端弯矩/ (kN·m)	顶端综合 应力/MPa	底端偏移 距离/m	安全 系数
60	1 780.23	116.41	212.47	91.13	3.57
45	1 770.79	19.18	137.12	89.45	5.53
30	1 741.96	15.91	134.49	89.39	5.64
0	1 721.86	14.37	132.68	89.26	5.71

作业工况下,安全系数达到了 3.5 以上,满足 API RP 2RD 规范要求。硬管顶端连接升沉补偿器,硬管顶端综合应力主要由张力产生,此时弯矩非常小;船舶迎浪角越大,船舶幅值响应越大,稳定性变差,作业工况下控制船舶迎浪角度在  $60^\circ$  以内。

## 4 结 语

以“深海多金属结核采矿试验工程”项目水下输送系统为研究对象,开展水下输送系统提升硬管选型设计及水动力校核分析,得出结论如下:

1) 根据多金属结核最小提升速度,确定输送管径范围,选择 P110 钢级抗疲劳螺纹连接套管,外径 244.48 mm、内径 204 mm,满足输送指标要求。

2) 水下输送系统布放回收时,选择 3 级及以下海况布放、监测表面流速小于 1.6 m/s、控制船舶迎浪角在  $30^\circ$  以内,提升硬管安全系数满足规范要求。

3) 水下输送系统采矿作业时,硬管顶端连接升沉补偿器,可以在 4 级海况、船舶迎浪角度  $60^\circ$  以内条件下安全作业。

4) 国家重点研发计划“深海多金属结核采矿试验工程”项目于 2021 年 6 月在中国南海完成我国首次

(下转第 46 页)

## 参考文献:

- [1] 陈光国,夏建新. 我国矿浆管道输送技术水平与挑战[J]. 矿冶工程, 2015,35(2):29-32.
- [2] 毛敏. 铁精矿浆输送管道泄漏检测与分析方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [3] 梁霏飞. 长距离输煤管道煤浆制备技术及应用[J]. 煤炭工程, 2020,52(5):5-8.
- [4] 杨盘铭,张晋生,祝庆昌. 尖山铁矿长距离铁精矿浆管道输送技术的实践[J]. 矿业工程, 2003(1):69-71.
- [5] 陈洁,李马锁. 瓮福中低品位磷精矿浆管道输送系统工艺设计[J]. 科技创新与应用, 2016(6):19-20.
- [6] 寿国华,甄云军,梁敏. 瓮福磷矿精矿浆管道输送能力最大化的研究和实施[J]. 化工矿物与加工, 2006,35(8):30-33.
- [7] 马妍,陈家琪,门著铭,等. 管道输煤参数优化研究[J]. 煤炭工程, 2017,49(5):107-111.
- [8] 欧阳增裕. 管道输煤工程煤浆制备工艺的研究与设计[J]. 煤炭加工与综合利用, 2015(5):78-80.
- [9] 于新胜,陈益滨. 管道输煤技术应用现状及展望[J]. 煤炭工程, 2020,52(5):1-4.
- [10] 陈琴瑞,李甲. 浆体管道输送临界流速经验公式适宜性分析[J]. 中国矿山工程, 2015,44(6):73-75.
- [11] 李安,曹书荣,刘宏波,等. 浆体管道输送临界流速的研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(1):26-29.
- [12] 张树森,崔俊强,杨瑞峰. 选煤厂浆体管道水力计算方法探讨[J]. 选煤技术, 2013(2):60-63.
- [13] 李鹏程,韩文亮,田龙. 高浓度管道输送参数计算模型的研究[J]. 金属矿山, 2005(4):60-62.
- [14] 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.
- [15] 长沙有色冶金设计研究院有限公司,中冶长天国际工程有限责任公司. 浆体长距离管道输送工程设计标准:T/CECS 98—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [16] 邵靖超. 浅谈铁精矿长距离管道输送工程中的4种常用计算模型[J]. 矿业工程, 2020,18(5):36-40.

引用本文: 潘毅,邹雪净,徐水营,等. 浆体管道典型计算模型对比分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):42-46.

(上接第41页)

1 000级深海采矿整体联动试验,最大作业水深1 306 m。在海试过程中提升硬管各接口间连接可靠,保障了水下输送系统能够安全高效的输送。海试结果验证了本文提升硬管选型设计及校核方式的可行性。

## 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]//Sharma R. 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.
- [3] 王淑玲,白凤龙,黄文星,等. 世界大洋金属矿产资源勘查开发现状及问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020,40(3):160-170.
- [4] 阳宁,陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述[J]. 矿山机械, 2010,38(10):4-9.
- [5] Odunton N A. Deep-seabed polymetallic nodule exploration: development of environmental guidelines[J]. International Seabed Authority, 2020(1):158-169.
- [6] Sterk R, Stein J K. Seabed mineral resource: a review of current mineral resources and future development[C]//Deep Sea Mining Summit. Aberdeen, 2015:27.
- [7] American Petroleum Institute. Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs) [M]. API RP 2RD, 1st Edition with Errata, 2009.
- [8] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.
- [9] American Petroleum Institute. Specification for casing and tubing: API specification 5CT[S]. 9th Edition, 2011.
- [10] 戴遗山,段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [11] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2013.

引用本文: 张明,郑皓,李满红,等. 深海采矿水下输送系统提升硬管选型及水动力校核研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):37-41.