深海采矿提升硬管流固耦合动力响应分析①

王伟[1,2], 双志[1,2], 郑皓[1,2], 陈时平[1,2], 吴卓[1,2]
(1.长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 2.深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘 要: 为研究深海采矿提升硬管外部海洋环境和管道内部粗颗粒固液两相流共同作用下硬管的运动和结构响应,建立了硬管内、外部流体-提升硬管双向流固耦合数值分析模型,并计算了提升硬管的位移和应力特性。数值计算结果表明,结核尺寸对提升硬管的最大应力和最大位移影响不大;输送浓度和输送速度对提升硬管的最大应力和最大位移均有明显增大的作用。此外,与无船舶运动工况相比,考虑船舶运动条件下提升硬管的最大应力增幅为 21.7%~52.1%,最大位移增幅为 182.1%~247.0%,表明船舶运动对硬管动力响应影响显著。

关键词: 深海采矿; 水力提升; 提升硬管; 流固耦合; 固液两相流; 动力响应; 船舶运动; 管道输送
中图分类号: TD857;TD807 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.008
文章编号: 0253-6099(2026)03-0068-07

Dynamic Response Analysis of Fluid-Structure Interaction of Hard Riser in Dee-Sea Mining

WANG Wei[1,2], SHUANG Zhi[1,2], ZHENG Hao[1,2], CHEN Shiping[1,2], WU Zhuo[1,2]
(1.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: In order to explore the motion and structural response of the hard riser for lifting in deep-sea mining under the combined effect of external marine environment and internal coarse-particle solid-liquid two-phase flow, a numerical model of two-way fluid-structure interaction between the internal and external fluids in the hard riser was established, and the displacement and stress characteristics of the riser were calculated. The numerical calculation results show that nodule size has minor effect on the maximum stress and maximum displacement of the hard riser. By contrast, conveying concentration and flow rate can significantly increase both parameters. In addition, compared with the working condition without vessel motion, the maximum stress of the riser can rise by 21.7% - 52.1%, and the maximum displacement can increase by 182.1% - 247.0% when vessel motion is taken into account, which indicates that vessel motion exerts a remarkable influence on the dynamic response of the hard riser.

Key words: deep-sea mining; hydraulic lifting; hard riser; fluid-structure interaction; solid-liquid two-phase flow; dynamic response; vessel motion; pipeline transportation

深海矿产资源主要为多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物[1-3]。目前,深海矿产资源开采系统中的提升方式主要有管道连续提升式、缆绳非连续提升式等[4],其中较为成熟的提升方式为水力式管道输送系统[5]。水力式管道输送系统主要由扬矿泵、提升硬管、中继站、软管等组成,其中提升硬管的稳定性和结构安全性一直是深海采矿领域重点关注的问题,其承受的载荷主要来自管道外部海洋环境和内部固液两相流,研究这两者对提升硬管位移和应力特性的影响对深海采矿水力式管道输送系统的设计具有重要意义。自 20 世纪 60 年代以来,早期研究主要采用有限元法,重点分析提升硬管在外部海洋环境载荷及自身重力作用下的动力学特性,如横向位移、管道构型及振动响应等,取得了较为系统的理论成果,建立了基于有限元法的分析模型[5-9]。但随着湖试、海试的推进,研究者逐渐认识到管道内流的影响,开始引入流固耦合理论,相

① **收稿日期**: 2025-12-05
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2801702);中国五矿全国重点实验室专项资金项目(2024GZSJ02)
作者简介: 王伟(1996—),男,湖南邵阳人,硕士,工程师,主要研究方向为深海采矿系统优化设计。E-mall:wangwei_hnsy@ 163.com

关研究从直管流固耦合动力学方程[10]出发,逐步完善了管道与内外流体相互作用的理论框架,进一步考虑了内流对管道顶端张力、位移及应力分布的影响[11-13],使分析模型更加贴近实际工况。

在研究深海采矿提升硬管结构安全性问题时,国内外学者的研究从只考虑外部环境载荷作用,发展为综合考虑内外流共同影响下的流固耦合问题,该领域整体研究已较为系统,但仍存在以下不足:在考虑外部海洋环境载荷如波浪、海流的影响时,大部分学者忽略了船舶运动的影响,实际上提升硬管受到海洋环境载荷以及船舶运动产生载荷的共同作用;另外将长距离输送时管内两相流做了简化处理,采用管内单相流体模拟两相流,而实际上管内为粗颗粒两相流。

为了反映深海采矿提升硬管在复杂海洋环境下输送粗颗粒固液两相流时的运动结构响应特性,本文建立了流体-提升硬管双向流固耦合数值分析模型(将提升硬管顶端固定在船舶上),分别计算了环境载荷和输送粗颗粒固液两相流共同作用下硬管的运动和受力情况。

1　计算理论及方法

水力式管道输送系统如图 1 所示。

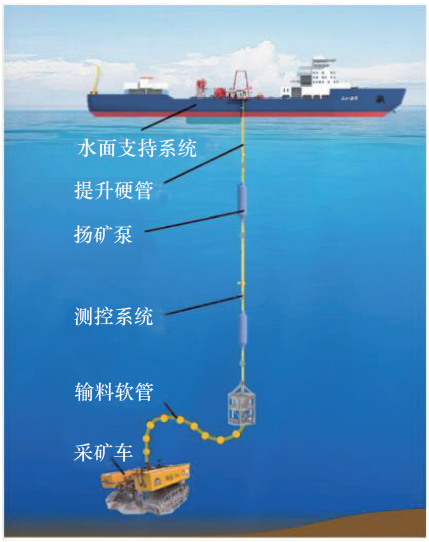


图 1　水力式管道输送系统

Fig. 1　Hydraulic pipeline transportation system

管道动力学行为受多种因素影响[14-15],本文主要研究流体和刚体相互作用以及流固耦合问题[16-17]。其中流体域的求解采用有限体积法,固体域的求解采用有限元法。假设流体为不可压缩黏性流体,控制方程[18-19]为:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=\boldsymbol{f}-\frac{\nabla p}{\rho_f}+\nu\nabla^2\boldsymbol{u} \tag{2}$$

式中:∇为 Nabla 算子,$\nabla=\boldsymbol{i}\frac{\partial}{\partial x}+\boldsymbol{j}\frac{\partial}{\partial y}+\boldsymbol{k}\frac{\partial}{\partial z}$,其中 $\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}$ 分别为坐标轴 x、y、z 方向的单位矢量;$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量;t 为时间;ν 为运动黏性系数;$\boldsymbol{f}$ 为质量力;p 为压强。

流体域的湍流模型采用 k-ε 模型,湍动能 k 方程和湍动能耗散率 ε 方程[20]分别为:

$$\frac{\partial(\rho_f k)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_f k\bar{u})=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right]+f_c G_k+G_b-Y_M-\rho_f(\varepsilon-\varepsilon_0)+S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho_f\varepsilon)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_f\varepsilon\bar{u})=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right]+\frac{C_{1\varepsilon}}{T_e}(f_c S_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}f_2\rho_f\left(\frac{\varepsilon}{T_e}-\frac{\varepsilon_0}{T_0}\right)+S_\varepsilon \tag{4}$$

式中:ρ_f 为流体密度;$\bar{u}$ 为雷诺平均速度;μ 为动力黏性系数;μ_t 为湍流黏性系数;f_c 为湍流模型修正系数;G_k 为由速度梯度引起的湍流动能;G_b 为由浮力引起的湍流动能;Y_M 为过度扩散引起的湍流波动;ε_0 为耗散率的初始值;S_k 和 S_ε 均为自定义源项函数;σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能 k 和耗散率 ε 的普朗特数;$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$为模型常数,分别取 1.44 和 1.92;$C_{3\varepsilon}$为浮力常数,取 0.8~1.0;f_2 为近壁阻尼函数;T_e 为湍流时间尺度;T_0 为参考时间尺度。

采用有限元法对提升硬管进行离散,固体区域的守恒方程为:

$$\rho_s g_s=\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+f_s \tag{5}$$

式中:ρ_s 为固体部分密度;g_s 为加速度;$\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量;f_s 为体积力。

颗粒群在流体中运动时,主要受到自身重力、流体对颗粒的作用力、颗粒和颗粒之间的相互作用力。颗粒的运动方程为:

$$m_p\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_d+F_p+F_{vm}+F_g+F_{LR}+F_{LS}+F_c \tag{6}$$

$$\boldsymbol{I}_p\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_p}{\mathrm{d}t}=\frac{\rho}{2}\left(\frac{D_p}{2}\right)^5 C_R|\boldsymbol{\Omega}|\boldsymbol{\Omega}+\boldsymbol{M}_c \tag{7}$$

式中:m_p 为颗粒质量;u_p 为颗粒速度;F_d 为颗粒在流体中受到的曳力;F_p 为压力梯度力;F_{vm}为虚拟质量力;F_g 为颗粒重力;F_{LR}和 F_{LS}分别为旋转升力和剪切升力;F_c 为接触力;$\boldsymbol{I}_p$ 为颗粒惯性矩;$\boldsymbol{\omega}_p$ 为颗粒角速度矢量;D_p 为颗粒直径;C_R 为旋转阻力系数;$\boldsymbol{\Omega}$ 为颗粒与流体的相对旋转角速度;$\boldsymbol{M}_c$ 为颗粒碰撞引起的力矩。

为了准确模拟流体与硬管相互之间的影响,设定

一个耦合时间步长,流体域和固体域采用不同的迭代数,流体域主要计算压力场、速度场等参数,并通过流固交界面将压力、速度等传递至固体域,得到提升硬管的应变、应力等参数。颗粒碰撞的时间尺度为 10^{-12}~10^{-6} s,远远小于流体域计算的时间步长,因此需要采用更短的时间步长,并在每一个流体域计算时间步长内对颗粒计算时间步长进行积分。

2 数值计算模型构建

为真实反映深海采矿作业中内外流体对提升硬管的影响,数值计算模型设定外部海洋环境为六级海况。依据联合国国际海底管理局(ISA)委托的经济学研究结论[21](年产 300 万 t 干结核的商业化开采产能目标),结合文献[22]提出的水力式管道输送系统计算公式,并参考《套管和油管规范》(API SPEC 5CT)[23]确定管道参数。考虑海流主要影响水深范围[24]及计算成本,将硬管长度设为 500 m,提升硬管和海洋环境的主要参数[25]见表 1。

表 1 提升硬管和外部海洋环境主要参数

Table 1 Main parameters of hard riser and external marine environment

长度/m	外径/mm	内径/mm	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	六级海况		
						浪高/m	周期/s	流速/(m·s^{-1})
500	406.4	381.3	7 850	210	0.3	4	10	3

深海采矿提升的矿浆为粗颗粒固液两相流,多金属结核尺寸[26]为 10~100 mm,密度约 2 000 kg/m^3。内流参数重点考虑结核尺寸、输送浓度、输送速度等,设置 5 组结核尺寸:0(单相流体海水)、10、30、50、70 mm;5 组输送浓度(体积分数):0、5%、10%、15%、20%。为保证结核颗粒随水流连续运动且不阻塞管道,输送速度应为结核沉降速度的 2.5~5.0 倍[27],沉降速度 v_z[24,28]计算公式为:

$$v_z = 1.529 S_f^{0.815} \sqrt{gd\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} \tag{8}$$

式中:S_f 为形状系数,多金属结核的 S_f 可取 0.8[29];g 为重力加速度,取值 9.8 m/s^2;d 为结核尺寸;ρ_s 为结核密度,取值 2 000 kg/m^3;ρ_l 为海水密度,取值 1 037 kg/m^3。

将结核尺寸 0.01、0.03、0.05、0.07 m 代入式(8),可得结核沉降速度分别为 0.38、0.67、0.86、1.02 m/s,输送速度按结核沉降速度的 3.0 倍进行计算,得到输送速度分别为 1.14、2.01、2.58、3.06 m/s。

基于上述参数构建长度为 500 m 的提升硬管耦合分析模型(见图 2),其中提升硬管受到海洋环境载荷的直接作用以及船舶运动而产生的间接载荷作用。提升硬管输送粗颗粒两相流时,颗粒尺寸可能大于网格尺寸,影响求解精度,故引入源项光顺法[30]。提升硬管壁面作为流固耦合交界面,流体网格与固体网格在耦合界面处完全重合,边界层网格采用壁面函数法。提升硬管上端固定在船舶中间月池位置,船舶主尺度参数[31]见表 2。海洋环境载荷中,波浪采用五阶 Stokes 波,海流为定常流,流速 3 m/s;管道内部流体载荷通过设置不同内流参数进行改变。

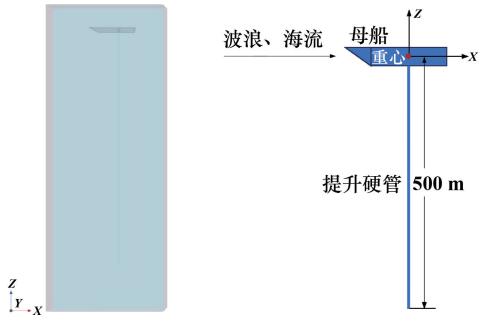


图 2 提升硬管流固耦合分析模型

Fig.2 Fluid-structure interaction model of hard riser

表 2 船舶主尺度参数

Table 2 Main dimensions of vessel

装载工况	吃水/m	排水量/t	重心高/m	横稳性高修正值/m	修正后的横稳性高/m	惯性半径/m			船舶中心坐标(全局坐标系)	船舶重心坐标(船舶坐标系)	船舶 RAO 原点(船舶坐标系)
						横摇	纵摇	首摇			
轻载	5.8	24 601.2	10.053	−0.178	14.578	11.24	48.69	48.69	(2.6,0,−2.1)	(−4.16,0,4.85)	(−4.16,0,4.85)
满载	7.0	30 969.4	8.702	−0.284	14.835	11.71	48.69	48.69	(2.6,0,1.08)	(−6.14,0,2.65)	(−6.14,0,2.65)

3 计算结果与分析

3.1 结核尺寸对提升硬管的动力响应分析

在外部海洋环境的作用下,为探究提升硬管输送不同结核尺寸的固液两相流时硬管的动力响应情况,共设置了 5 组不同结核尺寸计算工况,如表 3 所示,工况 1 为对照工况。为保证所有工况均能顺利输送结核,输送速度设置为输送最大尺寸结核时所需的输送速度,为 3.06 m/s。提升硬管顶端固定在船舶上,底端自由无约束,因此最大应力出现在提升硬管顶端,最大

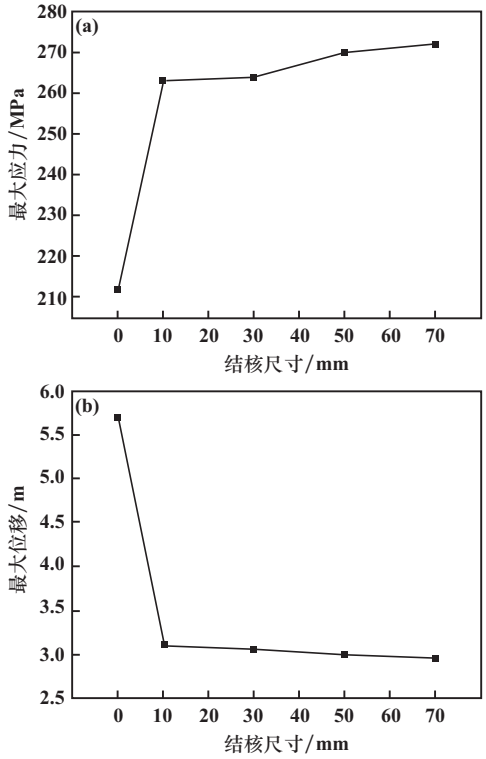
位移出现在提升硬管底端[15],本研究主要监测提升硬管顶端应力和底端横向位移。

表 3　结核尺寸影响因素计算工况

Table 3　Working conditions in consideration of different nodule sizes

工况	结核尺寸/mm	输送浓度/%	输送速度/(m·s^{-1})
1	0	0	3.06
2	10	15	3.06
3	30	15	3.06
4	50	15	3.06
5	70	15	3.06

提升硬管最大应力和最大位移与输送结核尺寸的关系如图 3 所示。



(a) 最大应力;(b) 最大位移

图 3　提升硬管最大应力和最大位移与输送结核尺寸的关系

Fig. 3　Relationship between maximum stress, maximum displacement of hard riser and nodule size

由图 3 可知,输送不同尺寸(10~70 mm)结核时,提升硬管的最大应力和最大位移变化不大。这是因为在输送浓度和速度相同的情况下,内流密度和质量基本一致,对硬管产生的作用力也相近。然而,与输送单相流体(工况 1)相比,输送固液两相流时最大应力平均增幅约 26%,最大位移平均降幅约 47%。这表明结核颗粒的存在增大了内流密度和质量,既增加了管道应力,也对管道起到了稳定作用。

3.2　输送浓度对提升硬管的动力响应分析

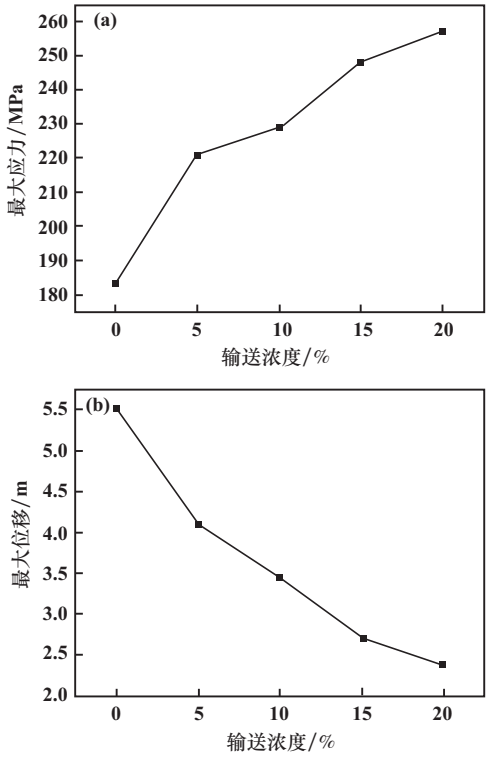
在外部海洋环境的作用下,为探究输送浓度对提升硬管的动力响应,共设置了 5 组不同输送浓度计算工况,如表 4 所示。工况 6 为对照组,其他工况输送结核尺寸设置为 30 mm,输送速度设置为输送 30 mm 结核时需达到的提升速度,为 2.01 m/s。

表 4　输送浓度影响因素计算工况

Table 4　Working conditions for different conveying concentrations

工况	结核尺寸/mm	输送浓度/%	输送速度/(m·s^{-1})
6	0	0	2.01
7	30	5	2.01
8	30	10	2.01
9	30	15	2.01
10	30	20	2.01

提升硬管最大应力和最大位移与输送浓度的关系如图 4 所示。



(a) 最大应力;(b) 最大位移

图 4　提升硬管最大应力和最大位移与输送浓度的关系

Fig. 4　Relationship between maximum stress, maximum displacement of hard riser and conveying concentration

由图 4 可知,随着输送浓度从 5%增至 20%,提升硬管最大应力逐渐增大,最大位移逐渐减小。输送浓度每提升 5%,最大应力增幅分别为 21%、3.6%、8.3%、3.6%,平均增幅约为 9%;最大位移降幅分别为 25.7%、

16.5%、21.6%、11.9%,平均降幅约19%。这是因为输送浓度越高,内流中固体结核含量越多,内流密度和质量相应增加,从而对管道产生更大的作力,同时质量增加也增强了管道稳定性。

3.3 输送速度对提升硬管的动力响应分析

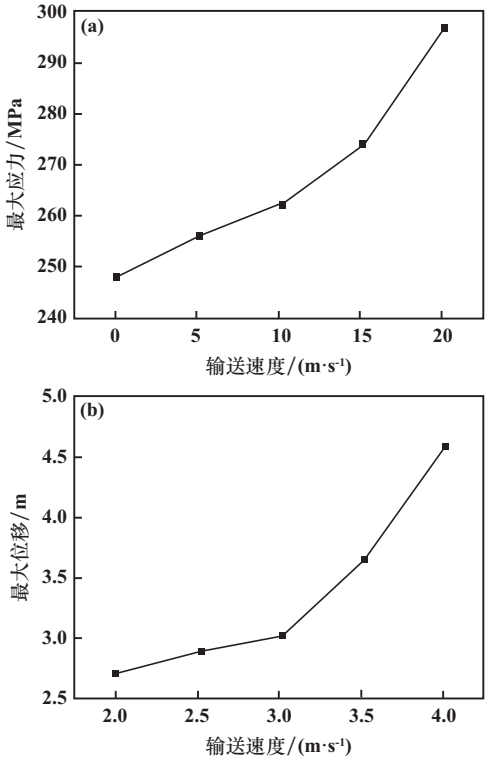
在外部海洋环境的作用下,为探究输送速度对提升硬管的动力响应情况,共设置了5组不同输送速度计算工况,如表5所示。结核尺寸设置为30 mm,输送浓度设置为15%,最小输送速度为输送30 mm结核需达到的提升速度,为2.01 m/s,后续工况速度依次增加0.5 m/s,最大输送速度为4.01 m/s。

表5 输送速度影响因素计算工况

Table 5 Working conditions for different flow rates

工况	结核尺寸/mm	输送浓度/%	输送速度/(m·s^{-1})
11	30	15	2.01
12	30	15	2.51
13	30	15	3.01
14	30	15	3.51
15	30	15	4.01

提升硬管最大应力和最大位移与输送速度的关系如图5所示。



(a) 最大应力;(b) 最大位移

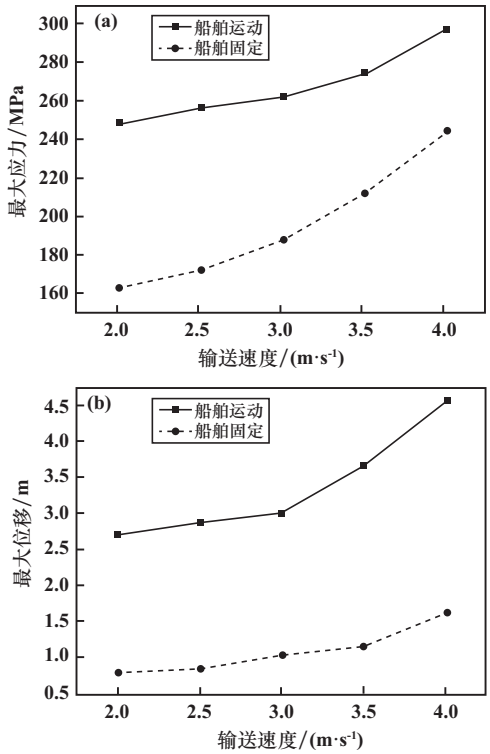
图5 提升硬管最大应力和最大位移与输送速度的关系

Fig.5 Relationship between maximum stress, maximum displacement of hard riser and flow rates

由图5可知,随着输送速度增大,提升硬管顶端最大应力和底端最大位移均呈增大趋势,且增幅明显。速度每增加0.5 m/s,最大应力增幅分别为3.2%、2.3%、4.6%、8.4%,平均增幅约4.6%;最大位移增幅分别为7.1%、4.5%、20.9%、25.5%,平均增幅约15%,且输送速度越大,增幅越高。这说明输送速度的增加不仅增大了输送系统的载荷,还降低了系统的稳定性。因此,在实际提升过程中,输送速度应控制在合理范围内,以满足相应尺寸结核的输送需求,避免速度过大影响系统安全。

3.4 船舶运动对提升硬管的动力响应分析

为分析船舶运动对提升硬管的影响,按照表5中的工况计算了无船舶运动情况下提升硬管的动力响应。所有工况下,将数值计算模型中的船舶固定,即船舶在海洋环境载荷的作用下不再发生运动,海洋环境载荷只对提升硬管产生影响。这与3.1~3.3节的计算工况相比,提升硬管不再受到海洋环境载荷以及船舶运动产生的载荷共同作用。不同船舶状态下提升硬管最大应力和最大位移与输送速度的关系如图6所示。



(a) 最大应力;(b) 最大位移

图6 不同船舶状态下提升硬管最大应力和最大位移与输送速度的关系

Fig.6 Relationship between maximum stress, maximum displacement of hard riser and flow rate with/without vessel motion

从图6可以看出,提升硬管在船舶运动产生的载荷以及环境载荷的共同作用下,其最大应力和位移相

较于无船舶运动影响的工况均要大得多。经计算,随着输送速度增大,考虑船舶运动的工况最大应力相较于无船舶运动的工况增幅分别达 52.1%、48.8%、39.4%、29.2%、21.7%,最大位移增幅分别达182.1%、213.80%、189.4%、240.5%、247.0%。这说明船舶运动大幅增加了提升硬管的应力和位移。

3.5　计算结果分析

综合上述结果可知,提升硬管在海洋环境载荷和船舶运动产生载荷的共同作用下,输送浓度和输送速度是影响提升硬管动力响应的关键参数,而结核尺寸的影响相对较小。输送浓度的增加虽然可增强管道稳定性,但会显著增加管道应力,在工程应用中,应根据管道材料的许用应力范围,合理控制输送浓度上限,防止应力超限引发结构失效;另外,过高的输送速度不仅加剧管道应力集中,还显著增大底端位移,影响采矿船与集矿机的协同作业,因此,输送速度应在满足结核颗粒悬浮输送的前提下,尽量控制在较低水平,一般取沉降速度的 2.5~3.0 倍为宜,避免因速度过高导致系统失稳。此外,在计算深海采矿输送系统动力响应时,应考虑船舶运动的影响,从计算结果可知,船舶运动大幅增加了提升硬管的应力和位移,这会极大地增加整个系统的安全风险。

4　结论

1) 在输送浓度和速度不变的情况下,结核尺寸(10~70 mm)对提升硬管最大应力和最大位移影响较小。与输送单相流体相比,输送固液两相流时提升硬管最大应力平均增幅约 26%,最大位移平均降幅约 47%。表明固液两相流不可简化为单相流体,结核颗粒的存在既增加管道应力,也起到一定的稳定作用。

2) 在结核尺寸和输送速度不变的情况下,输送浓度对提升硬管最大应力和最大位移影响显著。最大应力随输送浓度增加而增大,最大位移随输送浓度增加而减小。输送浓度每提升 5%,最大应力平均增加约 9%,最大位移平均减小约 19%。

3) 在结核尺寸和输送浓度不变的情况下,输送速度对提升硬管顶端最大应力和底端最大位移影响极为显著,两者均随输送速度增大而增加。输送速度每增加0.5 m/s,最大应力平均增加约 4.6%,最大位移平均增加约 15%。实际工程中应将输送速度控制在合理范围内,以满足结核输送需求为宜,避免速度过大影响系统安全。

4) 考虑船舶运动时,提升硬管的最大应力和最大位移均显著大于无船舶运动工况。在计算的输送速度范围内,考虑船舶运动相较于无船舶运动时,最大应力增幅为 21.7%~52.1%,最大位移增幅为 182.1%~247.0%,这表明船舶运动对提升硬管的动力响应影响极大。

参考文献(References):

[1] 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.
CHU Fengyou, JIANG Jing, LIU Yuwei, et al. Adavance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(10):2638-2648.

[2] 李满红,程阳锐,李小艳,等. 日本深海采矿发展现状分析及启示[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):16-20.
LI Manhong, CHENG Yangrui, LI Xiaoyan, et al. Analysis of current status of Japan's progress in deep sea mining and its revelations[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):16-20.

[3] 张明,郑皓,双志,等. 新型深海多金属结核非连续采矿作业系统研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):6-12.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, SHUANG Zhi, et al. A new type of discontinuous mining system for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):6-12.

[4] 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.
ZHANG Hao, CHEN Xiaoping, TANG Minggang, et al. Characteristics and adaptability of lifting modes for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):32-38.

[5] FELIPPA C A, CHUNG J S. Nonlinear static analysis of deep ocean mining pipe: Part I:Modeling and formulation[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1981,103(1):11-15.

[6] CHUNG J S, FELIPPA C A. Nonlinear static analysis of deep ocean mining pipe: Part II:Numerical studies[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1981,103(1):16-25.

[7] CHUNG J S. Hydrodynamic forces on a marine riser: A velocity-potential method[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1982, 104(1):53-57.

[8] ASO K, KAN K, YUAN S F. Dynamicbehavior of a stepped pipe-string with a buffer at its lower end: Behavior of a pipe string in mining manganese nodules (4th Report)[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1988,104(1205):443-448.

[9] 徐妍,张文明,冯雅丽. 多段铰接式扬矿硬管系统建模与动力学分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008,39(3):560-565.
XU Yan, ZHANG Wenming, FENG Yali. Modeling and dynamics analysis of multiple articulated lifting system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008,39(3):560-565.

[10] HOUSNER G W. Bending vibrations of a pipe line containing flowing fluid[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952,19(2):205-208.

[11] WU M C, LOU J Y K. Effects of rigidity and internal flow on marine riser dynamics[J]. Applied Ocean Research, 1991,13(5):235-244.

[12] 周知进,阳宁,王钊,等. 外部流体作用下管道输送流固耦合效应偏移分析[J]. 振动与冲击, 2013,32(13):142-146.

ZHOU Zhijin, YANG Ning, WANG Zhao, et al. Pipe's offset analysis for a pipeline transporting under action of external fluid considering fluid-solid coupled effects[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(13):142-146.

[13] 李艳,廖科伏,卢飞,等. 考虑流固耦合的1 000 m深海扬矿硬管动力学分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(1):163-168.
LI Yan, LIAO Kefu, LU Fei, et al. Dynamic analysis of 1000 m deep-ocean lifting pipes considering fluid-structure interaction[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017,28(1):163-168.

[14] ZHOU X W, DAI H L, WANG L. Dynamics of axially functionally graded cantilevered pipes conveying fluid[J]. Composite Structures, 2018,190:112-118.

[15] TANG Y, YANG T Z. Post-buckling behavior and nonlinear vibration analysis of a fluid-conveying pipe composed of functionally graded material[J]. Composite Structures, 2018,185:393-400.

[16] HE F, DAI H L, HUANG Z H, et al. Nonlinear dynamics of a fluid-conveying pipe under the combined action of cross-flow and top-end excitations[J]. Applied Ocean Research, 2017,62:199-209.

[17] 蔡逢春,臧峰刚,叶献辉,等. 基于绝对节点坐标法的输流管道非线性动力学分析[J]. 振动与冲击, 2011,30(6):143-146.
CAI Fengchun, ZANG Fenggang, YE Xianhui, et al. Analysis of nonlinear dynamic behavior of pipe conveying fluid based on absolute nodal coordinate formulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(6):143-146.

[18] BATCHELOR G K. An introduction to fluid dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[19] KUNDU P, COHEN I M, DOWLING D R. Fluid Mechanics[M]. 5th ed. Waltham, MA: Academic Press, 2012.

[20] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: Principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[21] UN Ocean Economics Technology Branch. Delineation of mine sites and potential in different sea areas[R]. Berlin:Springer, 1987.

[22] 王明和. 深海固体矿产资源开发[M]. 长沙:中南大学出版社, 2015.
WANG Minghe. The development of deep seafloor solid mineral resources[M]. Changsha: Central South University Press, 2015.

[23] API SPEC 5CT. Casing and tubing[S].

[24] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.
QIAN Ning. Dynamics of sediment movement[M]. Beijing: Science Press, 1983.

[25] COLLING, ANGELA. Ocean circulation[M]. Boston, USA:Butterworth Heinemann, 2001.

[26] 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.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, LI Manhong, et al. Research on type selection of lift pipe and hydrodynamic parameters check for underwater transport system in deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):37-41.

[27] SHARMA R. Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 259-304.

[28] 申焱华,毛纪陵,凌胜. 垂直管道固液两相流的最小提升水流速度[J]. 北京科技大学学报, 1999,21(6):519-522.
SHEN Yanhua, MAO Jiling, LING Sheng. Minimum lifting water velocity of solid-liquid two-phase flow in vertical pipe[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999,21(6):519-522.

[29] 唐达生,肖红,宋跃文,等. 深海粗颗粒矿石浮游速度的试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(3):1-5.
TANG Dasheng, XIAO Hong, SONG Yuewen, et al. Experimental study on floating velocity of coarse ore particles in deep sea[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(3):1-5.

[30] 刘磊. 深海采矿水力提升固液两相流动力学特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
LIU Lei. Research on dynamic performance of solid-liquid two-phase flow in hydraulic transport in deep sea mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[31] 王伟,陈时平,张明,等. 深海采矿装备布放回收过程中脐带缆动力学响应特性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):12-15.
WANG Wei, CHEN Shiping, ZHANG Ming, et al. Dynamic response characteristics of umbilical cable during launch and recovery of deep-sea mining equipment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):12-15.

引用本文:王伟,双志,郑皓,等. 深海采矿提升硬管流固耦合动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):68-74.
WANG Wei, SHUANG Zhi, ZHENG Hao, et al. Dynamic response analysis of fluid-structure interaction of hard riser in dee-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):68-74.