

浆体管道典型计算模型对比分析^①

潘毅¹, 邹雪净², 徐水营¹, 董平省¹, 赵向苗²

(1. 国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450; 2. 中国石油工程建设有限公司华北分公司, 河北 任丘 062550)

摘要: 针对4条典型管道, 采用典型浆体管道临界流速和摩阻降计算模型进行计算, 通过对比模型计算值与4条管道工程实测值, 分析模型的计算精度。结果表明, 瓦斯普模型、韩文亮模型、费祥俊模型、刘德忠模型计算的流速和管径值与实测值吻合度高, 最大偏差均处于 $\pm 15\%$ 范围内; 费祥俊模型在计算摩阻降上具有很高的精度, 最大偏差处于 $\pm 10\%$ 范围内, 不仅具有较高的计算精度, 也具有一定的计算裕量, 可为浆体长距离输送提供有力的设计依据和指导。

关键词: 浆体管道; 临界流速; 摩阻降; 计算模型

中图分类号: TD522

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.009

文章编号: 0253-6099(2023)05-0042-05

Comparative Analysis of Typical Calculation Models of Slurry Pipelines

PAN Yi¹, ZOU Xuejing², XU Shuiying¹, DONG Pingsheng¹, ZHAO Xiangmiao²

(1. Pipe China Engineering Technology Innovation Co Ltd, Tianjin 300450, China; 2. North China Branch of China Petroleum Engineering Construction Co Ltd, Renqiu 062550, Hebei, China)

Abstract: Calculation was made for four typical pipelines by adopting typical critical flow rate and frictional pressure drop calculation model. The precision of the model was analyzed by comparing the calculated value with the measured value of four pipelines. The results show that as for flow rate and pipe diameter, the calculated values from Wasp model, HAN Wenliang model, FEI Xiangjun model and LIU Dezhong model are in good agreement with the measured value, presenting the maximum deviation within the range of $\pm 15\%$. FEI Junxiang model presents higher precision in the calculation of frictional pressure drop, with the maximum deviation within the range of $\pm 10\%$, but also has certain margin in calculation. It is concluded that FEI Xiangjun model can provide an important basis and reference for the design of long-distance transportation.

Key words: slurry pipeline; critical velocity; frictional pressure drop; calculation model

浆体管道是将煤炭、尾矿、泥沙等固液浆料利用管道进行输送的水力系统。与铁路、公路相比, 浆体长距离管道输送具有输送高效、成本低廉、绿色环保等优势, 广泛应用于煤化工、生物质、电力、冶金矿山、水利等多个领域。

浆体管道在我国已有70多年的发展历程, 1995年首条磷精矿长输管道——翁福磷精矿浆体管道建成投用, 1997年首条铁精矿浆体长输管道——太钢尖山铁精矿浆体管道建成投用, 2020年首条煤浆长输管道——陕西神渭输煤管道建成投运^[1-3]。陕西神渭输煤管道是迄今世界上最长、周转量最大的长距离输煤管道, 该管道的成功投运对我国浆体长输管线技术的

发展具有重要意义和示范效应, 标志着我国浆体管道设计、施工、运行管理能力跻身国际先进水平。由于固液两相流动特性的复杂性, 非均匀固体颗粒在管道中的临界速度、摩阻降计算公式等问题没有真正得到解决。从诸多工程项目可以看出, 临界速度、摩阻降不仅直接关系到管道输送的安全性、经济性, 也是管道规格选取以及设备选型的重要参数依据。

目前, 国内外浆体管道输送临界速度、摩阻降计算模型众多, 本文选取几种国内外典型临界速度、摩阻降计算模型, 通过将模型计算值与工程实测值进行对比, 推荐计算精度高、结果合理、普适性强的模型, 为浆体管道工程参数设计提供参考。

① 收稿日期: 2023-04-26

作者简介: 潘毅(1990—), 男, 甘肃武威人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为长输管道设计。

1 典型管道介绍

太钢尖山铁精矿浆体管道^[1,4](A):管道全长 102.3 km,设计输量 200×10^4 t/a,铁精矿密度 4.76 t/m^3 ,输送浓度 65%,流速 1.5 m/s,管径 229 mm,摩阻降 19.71 $\text{m}_{\text{水柱}}/\text{km}$,浆料平均粒径 0.052 mm。泵出口压力 10.17 MPa。

瓮福磷精矿浆体管道^[5-6](B):管道全长 46 km,设计输量 200×10^4 t/a,磷矿密度 3.00 t/m^3 ,输送浓度 55%~60%,流速 1.7 m/s,管径 229 mm,摩阻降 26.78 $\text{m}_{\text{水柱}}/\text{km}$,浆料平均粒径 0.086 mm。泵出口压力 13.36 MPa。

陕西神渭输煤管道^[7-8](C):管道全长 727 km,途径陕西省 4 个市 18 个县(区),设计运量 $1\,000 \times 10^4$ t/a,煤密度 1.40 t/m^3 ,输送浓度 51%~53%,流速 1.8 m/s,管径 610 mm,摩阻降 6.97 $\text{m}_{\text{水柱}}/\text{km}$,浆料平均粒径 0.370 mm。该管道 2020 年 10 月成功带浆试运行。

美国 Black Measa 输煤管道^[9](D):管道全长 430 km,设计运量 450×10^4 t/a,煤密度 1.44 t/m^3 ,输送浓度 55%~60%,流速 1.82 m/s,管径 457 mm,摩阻降 8.77 $\text{m}_{\text{水柱}}/\text{km}$,浆料平均粒径 0.32 mm。

4 条典型管道的设计参数见表 1。

表 1 典型浆体管道设计参数

管道	浓度 $C_w/\%$	长度 L/km	\bar{d}/mm	d_{85}/mm	d_{90}/mm
A	65	102.3	0.052	0.064	0.105
B	55~60	46	0.086	0.180	0.230
C	51~53	727	0.370	0.630	1.020
D	55~60	430	0.320	0.490	0.800

2 临界流速计算结果对比

2.1 临界流速计算模型

浆体中含有固体颗粒,浆体黏性随固体浓度增加普遍增大,因此浆体管道水力参数的计算不能简单地按清水考虑,但与水、成品油等均质流体一样,浆体流态也分层流和紊流。相同流速下,浓度越高,浆体越容易处于层流,在层流状态下浆体中的大颗粒有下沉的趋势,并且可能出现摩阻损失随时间改变的不稳定流,因此由层流到紊流的临界流速是浆体稳定输送的关键参数之一,是控制管道中固体颗粒保持悬移状态、不在管底形成沉降的关键控制指标^[10]。

不同浓度、颗粒级配浆体所呈现的流变状态不同,很难通过一个统一的理论公式来表达浆体的临界流速,学者们利用大量环管试验、工程数据及理论模型等,归纳总结后提出了多种临界流速的计算模型,例如瓦斯普模型、克诺罗兹模型、韩文亮模型、长沙矿冶研究院模

型、费祥俊模型、刘德忠模型等,各计算模型如表 2 所示。

表 2 典型临界流速计算模型

序号	贡献者	模型
1	瓦斯普	$V_c = 3.113 C_v^{0.185} \left[2gD \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right) \right]^{1/2} \left(\frac{d_{85}}{D} \right)^{1/6}$
2	克诺罗兹	$V_c = \begin{cases} 0.2(1+3.4 \sqrt[3]{C_w D^{0.75}}) \beta & (\bar{d} \leq 0.07 \text{ mm}) \\ 0.255(1+2.48 \sqrt[3]{C_w \sqrt[4]{D}}) \beta & (0.07 < \bar{d} < 0.15 \text{ mm}) \\ 0.85(0.35+1.36 \sqrt[3]{C_w D^2}) \beta & (\bar{d} \geq 0.15 \text{ mm}) \end{cases}$
3	韩文亮	$V_c = 9.6 \left[gD \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right) \right]^{1/2} C_v^{1/4} \left(\frac{d_{90}}{D} \right)^{1/4}$
4	长沙矿冶研究院	$V_c = 2.809 \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right)^{-0.308} D^{0.31}$
5	费祥俊	$V_c = \frac{2.26}{\sqrt{\lambda}} \left[gD \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right) \right]^{1/2} C_v^{1/4} \left(\frac{d_{90}}{D} \right)^{1/4}$
6	刘德忠	$V_c = 9.5 \left[gD \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right) \omega \right]^{1/3} C_v^{1/6} \left(\frac{\omega_s}{\omega} \right)^{1/6}$

注: V_c 为计算临界流速, m/s; V 为管道流速, m/s; C_v 为浆体体积浓度, %; C_w 为浆体质量浓度, %; ρ_g 为浆体固体颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_k 为水密度, kg/m^3 ; D 为管径, mm; λ 为摩阻系数; ω 为浆体中颗粒平均沉降速度, m/s; ω_s 为清水中颗粒平均沉降速度, m/s; \bar{d} 为加权平均粒径, mm; d_{85} 为权重 85% 的粒径, mm; d_{90} 为权重 90% 的粒径, mm; g 为重力加速度, m/s^2 。

瓦斯普认为浆体是均质-非均质复合流,均质部分主要分布在管顶附近,非均质部分主要分布在管道底床,管顶处的浆体受紊流影响小,可视为伪一相流即非紊动性的均质流。基于此,通过研究管道淤积福氏系数 F_L 与浆体浓度的关系,对杜兰德模型进行优化完善得出瓦斯普模型^[11]。

克诺罗兹模型^[12]是在明渠非均质流输送固体密度 2.70 t/m^3 条件下推导出来的,对于浆体粒径的影响考虑较为粗放,引入比重影响修正系数 β ,以平均粒径划分为 3 组不同的计算模型,是一个完全的经验公式。

韩文亮模型^[13]是从颗粒悬浮输移机理角度推导获得,认为浆体颗粒分为粗、细两种,细颗粒主要增加水流的黏性,抑制了水流紊动趋势,粗颗粒为保持悬浮或推移需要消耗能量。

长沙矿冶研究院模型^[14]主要通过小管径水泥浆环管实验结果拟合获得,同时没有考虑粒径对临界流速的影响。它仅适用于特定实验条件,不适用于具有复合流特性的工业矿浆管道。

费祥俊模型^[14-15]认为颗粒由悬浮转变为床底滚动或滑动时的流速为临界流速,管道能量除部分用于推移运动和摩阻损失外,大部分能量用于转化为紊流动能维持颗粒悬浮做功。基于固体颗粒紊动悬浮理论推出临界流速模型,能较全面反映管径、浓度和颗粒级

配对临界流速的影响。

刘德忠模型是基于迁移速度概念推导出的非均质流临界流速,后期不断修正后得到适用于管道的临界流速模型^[14-15]。

2.2 流速结果对比分析

表3和图1为4条管道临界流速计算值与实测值的对比结果。由表3和图1可知,克诺罗兹公式计算的流速值偏差落在 $\pm 10\%$ 范围外,最大偏差197%;长沙矿冶研究院模型计算的流速值偏差均落在 $\pm 10\%$ 范围外,最大偏差132%,计算结果偏保守。这是由于两个模型均是在特定条件下的经验公式,没有考虑粒径对临界流速的影响。

表3 不同浆体管道流速和管径计算结果

计算模型	管道	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		管径/mm	
		计算值	实测值	计算值	实测值
瓦斯普模型	A	1.74	1.50	219	229
	B	1.73	1.70	273	229
	C	1.53	1.80	711	610
	D	1.27	1.82	508	457
克诺罗兹模型	A	4.46	1.50	141	229
	B	2.50	1.70	219	229
	C	1.09	1.80	914	610
	D	0.98	1.82	559	457
韩文亮模型	A	1.69	1.50	219	273
	B	1.9	1.70	273	229
	C	1.72	1.80	711	610
	D	1.47	1.82	508	457
长沙矿冶研究院模型	A	1.90	1.50	219	229
	B	2.22	1.70	219	229
	C	4.18	1.80	457	610
	D	3.52	1.82	323	457
费祥俊模型	A	1.30	1.50	219	229
	B	1.74	1.70	273	273
	C	1.87	1.80	610	610
	D	1.57	1.82	457	457
刘德忠模型	A	1.38	1.50	219	229
	B	1.33	1.70	273	229
	C	1.78	1.80	610	610
	D	1.58	1.82	457	457

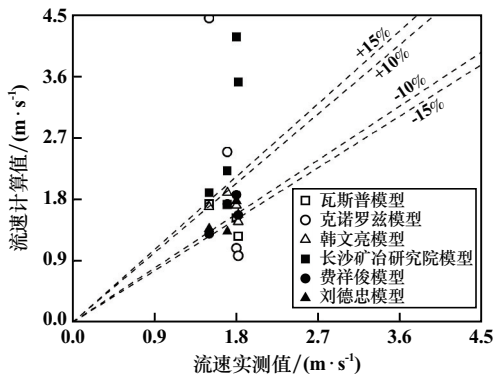


图1 流速计算值与实测值偏差对比

采用瓦斯普模型、韩文亮模型、费祥俊模型、刘德忠模型的流速计算值与实测值偏差较小,分别有60%、80%、80%、100%数据点落在 $\pm 10\%$ 范围内。

表3和图2为4条管道管径计算值与实测值的对比结果。相比而言,采用瓦斯普模型、韩文亮模型、费祥俊模型、刘德忠模型的管径计算值与实测值偏差较小,4种模型均有80%的数据点落在 $\pm 10\%$ 范围内,最大偏差均可控制在 $\pm 15\%$ 范围内。克诺罗兹模型计算的管径值只有20%的数据点落在偏差 $\pm 10\%$ 范围内,最大偏差+50%,计算值普遍偏大;长沙矿冶研究院模型计算的管径值只有40%的数据点落在偏差 $\pm 10\%$ 范围内,最大偏差-29%,计算值普遍比实测值小。

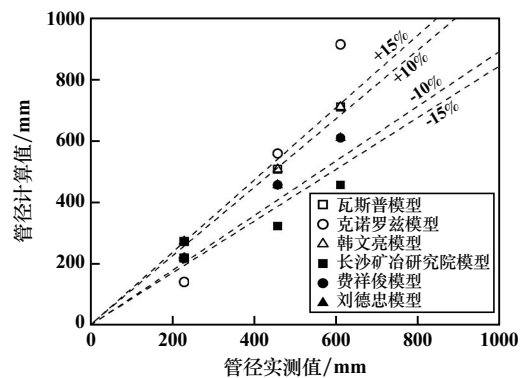


图2 管径计算值与实测值偏差对比

综上所述,无论流速还是管径,瓦斯普模型、韩文亮模型、费祥俊模型、刘德忠模型的计算值与实测值吻合度高,可以较高程度地还原实际管道的情况。

3 摩阻降计算模型对比

3.1 摩阻降计算模型

摩阻降表示单位长度管道下的压力损失,通常与介质黏度、管径、密度等息息相关,还与固体颗粒浓度、粒径等参数有关。较长时间以来,由于人们对浆体流动特性的认识不深入,浆体管道的摩阻降常采用环管实验来获得,然后放大到工业应用中,或通过大量实验和经验数据进行拟合得到计算模型。随着浆体流动特性的认识和理论技术的发展,多种摩阻降计算模型被国内外学者提出,越来越受到人们的关注。本文选取几种典型的摩阻降计算模型进行对比分析,具体如表4所示。

克诺罗兹模型^[14,16]属于扩散论,认为混合液中的细固体流动性质与纯水相同,其管道摩阻损失计算与输送相同流量清水时的压力相似。

长沙矿冶研究院模型^[14]主要根据管径54~81 mm的水泥浆管道实验归纳获得,没有考虑粒径对摩阻的影响。

表4 典型摩阻降计算模型

序号	贡献者	模型
1	克诺罗兹	$i_m = K \cdot \frac{\lambda_m V^2}{2gD}$ $\lambda_m = \frac{0.0159}{D^{0.226}} \left[1 + \frac{0.6849}{D^{0.226} V} \right]^{0.226}$
2	长沙矿冶研究院	$i_m = i_0 \left[1 + 3.68 \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{C_v \rho_k} \right)^{3.3} \frac{\sqrt{gD}}{V} \right] \rho_m$
3	鞍山矿山设计院	$i_m = K \cdot i_0 \frac{\rho_m}{\rho_k}$ 当 $C_w = 0.1 \sim 0.3$ 时, $K = 1$; 当 $C_w = 0.3 \sim 0.6$ 时, $K = 1.464 \sim 0.454$
4	西北水利科学研究所	$i_m = 0.0196 \frac{V^2 \rho_m (\rho_g - \rho_k)^{1/6}}{2gD \rho_k}$
5	费祥俊	$i_m = \frac{V^2 f_m}{2gD} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_k} + 11u_s C_v \left(\frac{\rho_g - \rho_m}{\rho_k} \right) \frac{\omega}{V}$

注: i_0 为管道输送清水时的沿线摩阻降, $m_{水}/km_{管道}$; i_m 为管道输送浆体时的沿线摩阻降, $m_{水}/km_{管道}$; u_s 为固体与管壁的摩擦系数; f_m 为浆体范宁摩阻系数; K 为摩阻系数; ρ_m 为浆体密度, kg/m^3 。

鞍山矿山设计院模型^[16]理论上可以适用于任何管径、固体密度及浓度,认为在浆体浓度 10%~30% 时为均质流,浆料流动性质与水相同。但由于模型反映不出颗粒大小对摩阻降的影响,当粒径、密度不同时,浓度 10%~30% 也可能是非均质流。

西北水利科学研究所模型^[14,16]是在密度 4.51~2.92 t/m^3 、管径 149/123/93/67 mm、粒径 0.07~0.21 mm、浓度 0.483%~39.4% 的特定实验条件下归纳获得,同样没有考虑粒径对摩阻降的影响。

费祥俊模型^[7,14]认为浆体中细颗粒做悬移运动,粗颗粒依靠离散力做推移运动,离散力传递到底床后以摩擦力形式消耗。基于此原理提出了预测管道摩阻损失的模型,该模型无需判断浆体沉降性或非沉降性,普适性较强。

3.2 摩阻降结果对比分析

采用克诺罗兹模型、长沙矿冶研究院模型、鞍山矿山设计院模型、西北水利科学研究所模型、费祥俊模型对 4 条不同类型管道摩阻降进行计算和对比分析,结果见表 5 和图 3。

表5 不同浆体管道摩阻降计算值与实测值对比

类型	摩阻降/($m_{水柱} \cdot km^{-1}$)			
	A	B	C	D
克诺罗兹模型	15.92	20.02	5.97	8.86
长沙矿冶研究院模型	22.69	20.31	2.00	3.73
鞍山矿山设计院模型	25.81	18.70	1.35	2.55
西北水利科学研究所模型	27.30	25.04	5.57	7.93
费祥俊模型	20.49	28.47	7.38	9.76
实测值	19.71	26.78	6.97	8.77

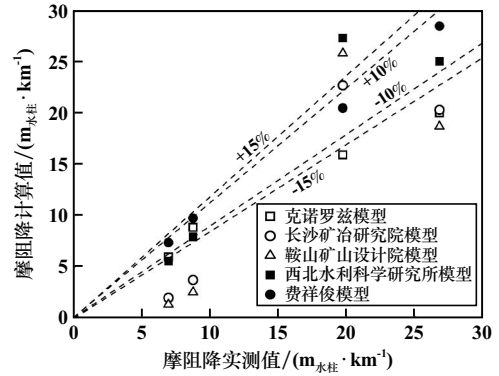


图3 摩阻降计算值与实测值偏差对比

由表 5 和图 3 可知,采用克诺罗兹模型计算的摩阻降有 75% 数据点落在 $\pm 15\%$ 偏差范围内,最大偏差 -25% ;采用长沙矿冶研究院模型计算的摩阻降均落在 $\pm 15\%$ 偏差范围外,最大偏差 -71% ;采用鞍山矿山设计院模型计算的摩阻降均落在 $\pm 15\%$ 偏差范围外,最大偏差 -81% ;采用西北水利科学研究所模型计算的摩阻降有 50% 数据点落在 $\pm 15\%$ 偏差范围内,最大偏差 $+39\%$;采用费祥俊模型计算的摩阻降所有数据点均落在 $\pm 10\%$ 偏差范围内,与实测值高度吻合。

通过上述 5 种摩阻降计算模型对比,克诺罗兹模型、费祥俊模型计算精度相对较高,分别有 75%、100% 数据点偏差处于 $\pm 15\%$ 以内,尤其费祥俊模型,能够较高程度还原管道的实际情况,同时计算值均略高于实测值,模型既具有较高的计算精度,也具有一定的裕量,工程实践应用性强。

4 结 语

我国在浆体管道工程建设、临界流速、摩阻降等数学模型及理论研究方面取得显著成效,完全具备了不同类型长距离输送管线的设计能力。通过对国内外几种典型临界流速、摩阻降计算模型的计算值与几条不同类型浆体管道实测值进行对比,可以得到以下结论:

1) 瓦斯普模型、韩文亮模型、费祥俊模型、刘德忠模型计算的流速和管径值最大偏差均可处于 $\pm 15\%$ 范围内,与实测值吻合度高,具有较高的精度,可以较高程度地还原实际管道情况。

2) 克诺罗兹模型、费祥俊模型计算的摩阻降具有较高的精度,最大偏差均处于 $\pm 15\%$ 范围内。尤其费祥俊模型,摩阻降计算值与实测值偏差可控制在 $\pm 10\%$ 范围内,且均略高于实测值,不仅具有较高的计算精度,也具有一定的计算裕量,工程实践应用性强。

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: develop-

ment 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.