



重型绞吸挖泥船 1 m 直径排泥管线 输送微风化岩特性

王曦巍¹, 刘昊¹, 李金峰², 张亚楠², 杨正军³

(1. 中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300457;
3. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 以国外某疏浚工程为例, 对自航式重型绞吸挖泥船“天鲲号”采用 1 m 管径的排泥管线输送坚硬微风化岩的施工数据进行分析, 计算所给工况下的泥泵扬程和泥泵效率, 得出密度、流速与摩阻系数的关系, 给出土质换算系数、实验系数的推荐值。结果表明, 该技术充分发挥重型绞吸船可直接开挖并吹填微风化岩的特点, 在节约成本、保护环境的基础上提高施工效率, 确保工程按期完工。

关键词: 重型绞吸船; 微风化岩; 1 m 管径; 输送

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0219-05

Characteristics of transporting slightly weathered rocks by 1 m diameter dredging pipelines of heavy-duty cutter suction dredger

WANG Xi-wei¹, LIU Hao¹, LI Jin-feng², ZHANG Ya-nan², YANG Zheng-jun³

(1.Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

3.Tianjin Key Laboratory of Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Taking a dredging project in a foreign country as an example, we analyze the construction data on transporting slightly weathered rocks by the 1 m diameter dredging pipelines of the self-propelled heavy-duty cutter suction dredger “Tiankun Hao”. Then, we calculate the head and efficiency of the dredge pump under the given working condition, obtain the relationships of density and flow velocity with friction coefficient, and give the recommended values of the soil conversion coefficient and the experimental coefficient. The results show that the technology, by giving full play to the characteristics of the heavy-duty cutter suction dredger that it can directly excavate and transport the slightly weathered rocks by pipelines, improves the construction efficiency on the basis of saving costs and protecting the environment and thereby ensures that the project is completed on time.

Keywords: heavy-duty cutter suction dredger; slightly weathered rock; 1 m diameter; transport

随着我国“一带一路”倡议的不断推进, 海外疏浚工程中遇到的土质越发复杂, 尤其对于岩石类坚硬土质的疏浚需求越来越大, 传统的炸礁方式由于效率低、环境影响大、危险性高等缺点正逐渐被重型绞吸挖泥船直接开挖岩石的方式替代^[1]。目前国内采用重型绞吸挖泥船 1 m 管径管线输送微风化

岩石尚未进行过实际施工, 针对此种工况下的管线输送特性的分析研究较少。本文结合现场实船试验, 对“天鲲号”自航重型绞吸船^[2]输送微风化岩能力进行深入研究, 并根据统计数据对常用估算方法的系数给出推荐取值, 有助于我国在尖端疏浚技术领域的进步, 缩小与国际先进疏浚技术的差距。

1 工程概况

本工程绞吸船排泥管线由水上管、水下管及陆地管共3部分组成。水上管线采用直径1m、长11.8m的自浮管组成，管线与管线之间采用螺丝连接。水下及陆地管线采用直径1m、长6m钢管与胶套组成，管线与管线之间采用螺丝连接，如图1所示。



图1 水上管线组装

结合绞吸船施工情况，选取岩石输送工况为：土质为碎石、岩石，中值粒径为30mm，管径为1m，管线长度为546m，其中自浮管260m、陆地管286m，缩口780mm。对该工况下的输送过程的施工关键参数^[3]进行统计，并对泥泵扬程、泥泵效率、磨阻系数等进行计算。

2 泥泵扬程及泥泵效率分析

根据水下泵真空表和排压表布设位置，计算在不同挖深情况下真空表与排压表的高程差如图2所示，据此计算绞吸船在不同挖深情况下水下泵的泥泵扬程和泥泵效率。

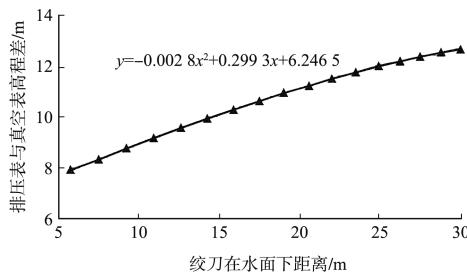


图2 排压表与真空表高程差

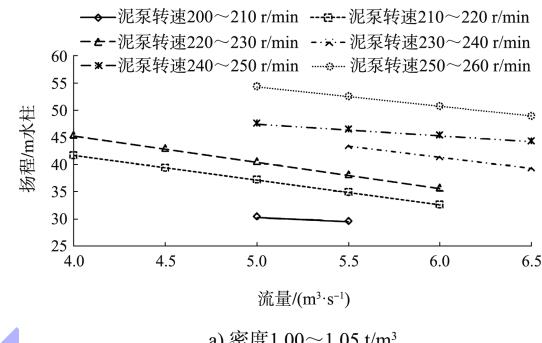
泥泵扬程计算公式为：

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho_w g} + Z \quad (1)$$

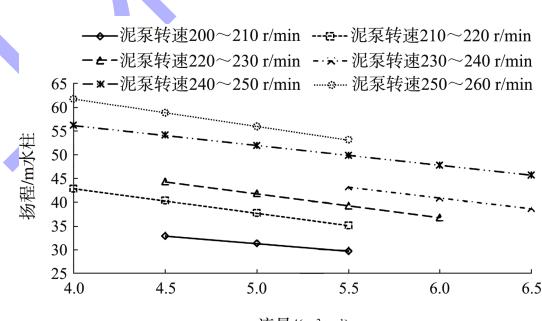
式中：H为泥泵扬程(m水柱)； ρ_w 为海水密度

(t/m³)； p_1 为真空表位置处的绝对压强(kPa)； p_2 为排压表位置处的绝对压强(kPa)；Z为排压表与真空表的高程差(m)。

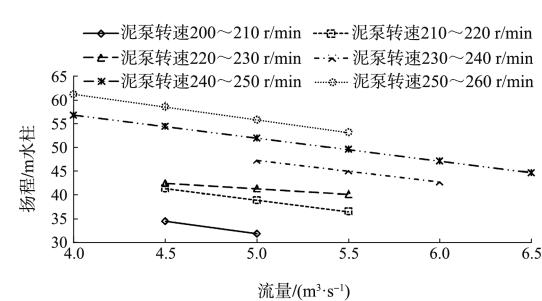
以不同的疏浚施工工况为例，统计施工现场数据计算泥泵扬程和泥泵效率。不同输送密度情况下的输送流量、泥泵转速与扬程的关系如图3所示。



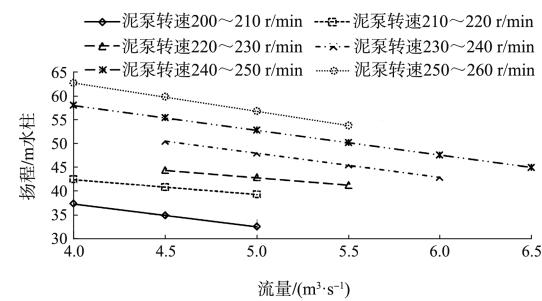
a) 密度1.00~1.05 t/m³



b) 密度1.05~1.10 t/m³



c) 密度1.10~1.15 t/m³



d) 密度1.15~1.20 t/m³

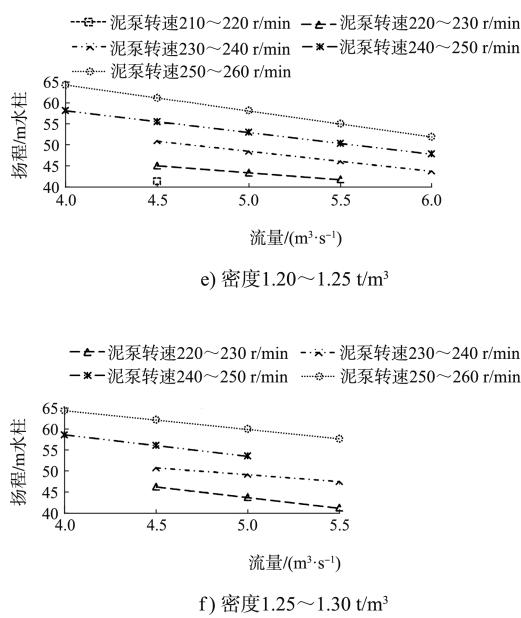


图3 不同密度泥泵扬程曲线

以上计算结果为绞吸船水下泵在不同泥泵转速、不同输送密度、不同流量情况下的扬程。计算结果显示, 泥泵扬程随流量减小而升高, 与泥泵转速的平方基本呈正比。

根据《疏浚与吹填工程设计规范》^[4], 泥泵泥浆扬程宜按以下公式计算:

$$H_m = H_w [K_H (\rho_m - 1) + 1] \quad (2)$$

$$\rho_m = (\rho - \rho_w) \rho' + \rho_w \quad (3)$$

式中: H_m 为泥泵泥浆扬程 (m); H_w 为泥泵清水扬程 (m); K_H 为泥泵泥浆扬程土质换算系数; ρ_m 为泥浆密度 (t/m^3); ρ 为天然土密度 (t/m^3); ρ' 为

泥浆天然体积浓度 (%); ρ_w 为海水密度 (t/m^3)。根据式(2)(3)推算泥泵泥浆扬程土质换算系数 K_H 见表 1。

表1 泥泵泥浆扬程土质换算系数 K_H 推算结果

密度/($t \cdot m^{-3}$)	K_H 推算结果			
	4.5 m^3/s	5.0 m^3/s	5.5 m^3/s	6.0 m^3/s
1.075	0.352 6	0.368 3	0.343 5	0.340 2
1.125	0.383 0	0.266 7	0.410 6	0.317 4
1.175	0.294 5	0.329 1	0.430 8	0.283 8
1.225	0.229 0	0.327 0	0.437 4	0.344 6
1.275	0.291 9	0.299 8	0.348 8	0.319 8

K_H 的计算结果显示, 其整体平均值为 0.33, K_H 与密度相关性不大, 不同密度的取值平均值分别为 0.34、0.34、0.33、0.33、0.32, 而与流量对应关系见表 2。可以看出, K_H 值存在峰值, 在流量较高和较低时, K_H 值均会下降。

表2 K_H 推荐值

流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	4.5	5.0	5.5	6.0
K_H 推荐值	0.31	0.32	0.39	0.32

泥泵效率计算公式为:

$$\eta = \frac{N_{\text{水}}}{N_{\text{轴}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η 为泥泵效率 (%); $N_{\text{水}}$ 为泥泵清水功率 (kW); $N_{\text{轴}}$ 为泥泵轴功率 (kW)。结合施工统计数据, 采用式(4)计算施工工况下绞吸船水下泵的泥泵效率, 计算结果见表 3。

表3 泥泵效率计算结果

泥泵转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	密度/($t \cdot m^{-3}$)	泥泵效率/%					
		4.0 m^3/s	4.5 m^3/s	5.0 m^3/s	5.5 m^3/s	6.0 m^3/s	6.5 m^3/s
210~220	1.00~1.05	89.50	82.53	80.21	82.52	89.48	-
	1.05~1.10	82.56	80.35	79.03	78.62	-	-
	1.10~1.15	-	79.90	79.98	77.11	-	-
	1.15~1.20	68.72	76.05	76.90	-	-	-
	1.20~1.25	-	72.00	-	-	-	-
	1.25~1.30	-	-	-	-	-	-
220~230	1.00~1.05	79.71	79.67	79.69	79.76	79.88	-
	1.05~1.10	-	78.68	78.80	76.80	72.70	-
	1.10~1.15	-	78.17	78.58	77.43	-	-
	1.15~1.20	-	75.17	79.60	77.98	-	-
	1.20~1.25	-	74.15	75.88	76.58	-	-
	1.25~1.30	-	72.63	75.78	73.52	-	-

续表3

泥泵转速/ (r·min ⁻¹)	密度/(t·m ⁻³)	泥泵效率/%					
		4.0 m ³ /s	4.5 m ³ /s	5.0 m ³ /s	5.5 m ³ /s	6.0 m ³ /s	6.5 m ³ /s
230~240	1.00~1.05	—	—	—	81.80	79.97	84.17
	1.05~1.10	—	—	—	76.76	73.86	71.44
	1.10~1.15	—	—	72.51	77.87	73.64	—
	1.15~1.20	—	75.11	75.89	77.47	—	—
	1.20~1.25	—	75.42	76.08	74.46	70.55	—
	1.25~1.30	—	72.89	73.27	70.70	—	—
240~250	1.00~1.05	—	—	80.81	83.13	83.11	—
	1.05~1.10	68.67	78.02	83.80	85.98	84.59	79.60
	1.10~1.15	72.57	75.38	77.23	78.12	78.06	77.03
	1.15~1.20	73.78	75.00	76.18	77.31	78.41	79.47
	1.20~1.25	72.86	73.43	74.02	74.63	75.25	—
	1.25~1.30	70.85	71.80	73.06	—	—	—
250~260	1.00~1.05	—	—	80.98	82.65	81.14	76.45
	1.05~1.10	73.29	78.62	82.11	83.76	—	—
	1.10~1.15	72.52	75.50	76.97	76.93	—	—
	1.15~1.20	73.71	74.26	74.73	75.12	—	—
	1.20~1.25	72.41	73.64	74.06	73.65	72.43	—
	1.25~1.30	72.55	73.84	73.87	72.64	—	—

对泥泵效率的计算结果进行分析, 泥泵挂浆后效率比清水效率的下降幅度与泥浆密度关系见

表 4。

表 4 泥泵效率下降百分比

输送密度/(t·m ⁻³)	1.05~1.10	1.10~1.15	1.15~1.20	1.20~1.25	1.25~1.30
泥泵效率下降程度/%	1.7	4.3	5.5	8.8	9.4

3 管线摩阻系数分析

泥泵总排压可按下式计算:

$$p_m = \lambda_m \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + Z - X \quad (5)$$

式中: p_m 为输送泥浆时泥泵总排压 (m 水柱); λ_m 为管路浆体摩阻系数; D 为管线直径 (m); v 为管内泥浆流速 (m/s); X 为排压测量仪器所在位置高程 (m); Z 为管口中心点位置高程 (m); L 为折算成标准钢管的长度 (m)。

依据式(5), 在已知施工排压、流速、管径、管线长度、管口高程与排出传感器高程差的情况下可反算求出摩阻系数 λ_m 。结合施工统计数据, 计算该工况下绞吸船 1 m 管径钢管摩阻系数 λ_m , 结果如图 4 所示。

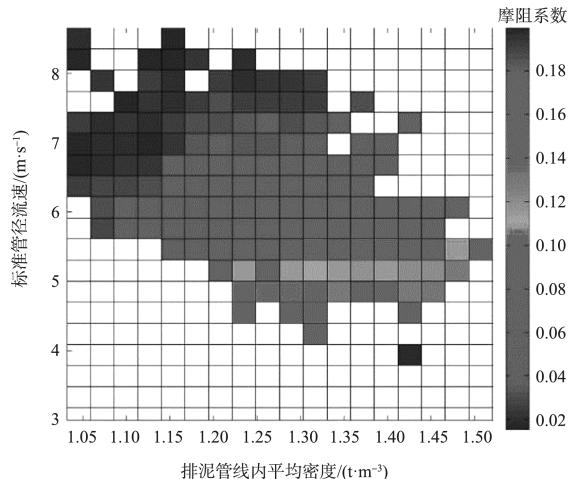


图 4 12 m 钢管串联时不同密度、流速对应的摩阻系数

不同流速下计算的摩阻系数平均值见表 5。

表 5 1 m 管径钢管摩阻系数 λ_m 平均值与流速关系

流速/(m·s ⁻¹)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
摩阻系数 λ_m 平均值	0.183	0.141	0.111	0.083	0.064	0.040	0.030	0.024	0.020

基于摩阻系数计算模型的基本原理, 编制阻力系数计算软件, 通过设定计算时间步长和其他边界条件、导入施工数据, 计算标准管线管阻系数与流速、颗粒浓度等关系后, 反算《疏浚与吹填工程设计规范》中推荐的管路输送杜兰德模型中的实验系数 K_D :

$$K_D = \frac{I_m - I_f}{I_f C_{vd}} / \left[\frac{v_m^2}{gD(\rho_s - 1)} \frac{\sqrt{gd(\rho_s - 1)}}{v_t} \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (6)$$

表 6 实验系数 K_D 与土颗粒浓度关系

土颗粒体积浓度/%	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
K_D	152	137	125	112	105	93	91	89	87	85	82	78	74	70

《疏浚与吹填工程设计规范》对式(6)中的试验系数 K_D 推荐取值为 121, 通过对 1 m 管径输送 30 mm 中值粒径的微风化岩石工况的实际计算, 实验系数 K_D 的值会随着土颗粒粒径和土颗粒浓度的变大而减小。为便于使用, 现将管径 1 m 时输送 30 mm 中值粒径的微风化岩石的杜兰德模型中实验系数 K_D 推荐值见表 7。

表 7 管径 1 m 实验系数推荐值

土颗粒体积浓度/%	5	10	15	20	25	30
K_D 推荐值	130	105	90	85	76	65

4 结语

1) 依托国外某疏浚工程, 对重型绞吸船“天鲲号”首次采用 1 m 管径的管道输送 30 mm 中值粒径微风化岩工况的施工数据进行统计分析, 总结归纳“天鲲号”水下泵不同转速、密度、流量等情况下的泥泵扬程及泵效、输送管路不同密度及流速下对应的摩阻系数, 掌握了自航式重型绞吸挖泥船“天鲲号”输送微风化岩的施工关键技术。

2) 通过对“天鲲号”水下泵的泥泵扬程及泵效的分析, 对《疏浚与吹填工程设计规范》中推荐的泥泵泥浆扬程计算公式中的土质换算系数 K_H 进

式中: K_D 为杜兰德系数; I_m 为泥浆水力梯度; I_f 为清水水力梯度; C_{vd} 为土颗粒体积浓度(%); v_m 为泥浆流速(m/s); D 为管路直径(m); ρ_s 为土颗粒密度(t/m³); d 为土颗粒平均粒径(m); v_t 为土颗粒沉降速度(m/s)。

计算过程的边界条件中考虑了泥沙颗粒滑移比、输送管路中不同管径^[5]等因素。计算结果见表 6。

行了重新计算, 针对 1 m 管径管线输送 30 mm 中值粒径微风化岩的工况总结出不同情况下的 K_H 的推荐值。

3) 通过对“天鲲号”输送管路摩阻系数进行分析, 对《疏浚与吹填工程设计规范》中推荐的管路输送杜兰德模型中的实验系数 K_D 进行了重新计算, 针对 1 m 管径管线输送 30 mm 中值粒径微风化岩的工况总结出不同情况下 K_D 的推荐值。

参考文献:

- [1] 程继, 刘斌. 大型绞吸船开挖深水航道岩石方案优化[J]. 水运工程, 2014(5): 152-155.
- [2] 王健, 孔凡震.“天鲲号”自航绞吸船核心技术应用研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 58-62, 67.
- [3] 交通部上海航道局. 疏浚岩土分类标准: JTJ/T 320—1996[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [4] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 中交天津航道局有限公司, 中国水运建设行业协会, 中交上海航道局有限公司, 等. 疏浚与吹填工程施工规范: JTS 207—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(本文编辑 王璁)