

· 施工 ·



重型绞吸挖泥船挖掘砂岩混泥岩施工工艺优化

王曦巍¹, 李军¹, 冯诗甲¹, 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: 针对重型绞吸船挖掘砂岩混泥岩的复杂工况, 以钦州港东航道扩建工程为例, 开展“天鲲号”绞吸船挖掘与输送砂岩混泥岩土质的施工工艺研究。通过7G与8G 6臂绞刀的对比试验, 综合比较不同绞刀型号的生产效率及刀齿损耗, 对挖泥机具进行比选; 通过对绞吸船施工时进尺、切厚等关键施工参数的分析优化, 结合砂岩混泥岩的土质特性, 确定了最佳挖掘施工工艺; 通过对泥泵性能的分析计算, 确定了绞吸船输送的最佳控制浓度; 从挖掘、输送2方面进行施工工艺优化, 总结了重型绞吸船挖掘砂岩混泥岩的施工技术。研究成果可为类似工况的绞吸船施工提供参考。

关键词: 疏浚工程; 重型绞吸船; 砂岩混泥岩; 泥泵功率计算

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0184-05

Optimization of construction technology for excavation of sandstone mixed with mudstone by heavy-duty cutter suction dredger

WANG Xiwei¹, LI Jun¹, FENG Shijia¹, ZHANG Yanan², YANG Zhengjun³

(1. Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China;
2. Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China;
3. Dredging Engineering Laboratory, Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: In response to the complex working conditions of heavy cutter suction dredgers excavating sandstone mixed mudstone, this paper takes Qinzhou Port East Channel Expansion Project as an example to carry out construction technology research on the excavation and transportation of sandstone mixed mudstone soil by “Tiankun Hao” cutter suction dredger. Through comparative experiments between 7G and 8G six-arm cutter, the production efficiency and tooth loss of different cutter types are comprehensively compared, the dredging equipment is compared and selected. By analyzing and optimizing key construction parameters such as footage and cutting thickness during the construction, combined with the soil characteristics, the optimal excavation construction technology is determined. By analyzing and calculating performance of the mud pump, optimal control concentration for the transportation is determined. The construction technology optimization is carried out from two aspects of excavation and transportation, the construction technology of heavy-duty cutter suction dredgers for excavating sandstone mixed mudstone is summarized. The research results can provide reference for the construction of cutter suction dredgers under similar working conditions.

Keywords: dredging project; heavy-duty cutter suction dredger; sandstone mixed with mudstone; pump power calculation

随着近些年疏浚行业的不断发展, 绞吸挖泥船施工工况愈发复杂, 由于挖岩工况的增多及岩

石强度的增大, 采用传统大型绞吸船已无法满足现阶段挖岩工程需求^[1]。“天鲲号”^[2]是目前为数

收稿日期: 2023-07-18

作者简介: 王曦巍 (1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚装备及施工技术工艺研究等工作。

较少的重型绞吸船, 应用时间相对较短, 对于重型绞吸船挖掘岩石类土质的工艺研究尚不完善, 研究多集中于中微风化页岩或砾岩的挖掘^[3-4], 针对重型绞吸船挖掘砂岩混泥岩类似土质的工况没有太多可供参考的成熟工艺与经验。近年随着航道深度的不断增加, 绞吸船挖掘砂岩混泥岩的工况越来越多, 为进一步完善重型绞吸船挖岩工艺的研究, 本文从挖掘与输送两方面对重型绞吸船挖掘砂岩混泥岩进行研究。

砂岩混泥岩工况的土质特点为岩石硬度变化大、分布不均匀、施工情况复杂、挖掘难度较大。本文通过对绞刀型号比选, 对不同风化程度砂岩混泥岩施工工艺变化进行分析, 利用切厚与进尺组合、配合增加横移速度与浸泡岩石的方式提高挖掘砂岩混泥岩的效率。再通过对最佳输送浓度的计算, 提高重型绞吸船在此工况下的吹填效率, 改善泥泵超功率带来的影响, 提高船舶在类似工况下的施工效率。

1 工程概况

钦州港东航道扩建工程施工面积约 82 万 m², 设计底高程 -16.3 m, 挖槽宽度 230~280 m。超深 0.5 m, 超宽 5 m。疏浚物吹填至指定纳泥区。疏浚工程量 176 万 m³、岩石层疏浚工程量 83 万 m³, 平均吹距约 3 700 m。钦州港东航道扩建工程施工区位置见图 1。



图 1 钦州港东航道扩建工程施工区位置

实际钻孔数据显示岩石抗压强度最小为 8.00 MPa, 最大达到 68.40 MPa, 平均抗压强度为 26.85 MPa, 工程施工土质为强、中、弱风化的砂岩混泥岩。

岩石类土物理力学指标见表 1, 施工区土质送检结果见表 2。

表 1 岩石类土物理力学指标

地层	天然密度/ (t·m ⁻³)	饱和密度/ (t·m ⁻³)	天然抗 压强度/ MPa	饱和单轴 极限抗压 强度/MPa
中风化砂岩	2.55	2.55	-	18.3
中风化泥质粉砂岩	2.45	2.54	8.1	8.9

表 2 施工区土质取样送检结果

样品 编号	试样含水 状态	单轴抗压 强度/MPa	里程	对应生产率/ (m ³ ·h ⁻¹)
1	饱和	30.60	B0+562	315
2	饱和	35.86	B1+500	393
3	天然	47.14	B1+000	206
4	饱和	19.83	B1+800	610
5	天然	21.07	B1+384	920
6	天然	16.34	B1+450	1 074
7	天然	17.10	B1+450	1 074

疏浚土质现场取样照片见图 2。由于工程土质较硬, 挖掘难度大, 普通绞吸船无法满足需求^[5], 因此该工程投入了公称生产率 6 000 m³/h、额定绞刀功率 6 000 kW 的重型自航绞吸船“天鲲号”, 并进行了挖掘与输送两方面的工艺优化。



图 2 疏浚土质现场取样照片

2 挖掘施工工艺优化

2.1 挖泥机具比选

砂岩混泥岩施工的中风化砂岩、泥岩抗压强度大于 30 MPa, 对挖泥机具的抗冲击、抗磨损能力有很高的要求, 并且挖掘过程中岩石对机具的冲击造成频繁换齿的现象, 严重影响了时利率。因此, 根据工程特点开展 7G 与 8G 两种 6 臂绞刀

的绞刀型号对比试验，同时收集刀齿损耗数据，针对不同土质进行挖泥机具比选，以提高船舶的生产率与时利率。

2.1.1 绞刀特点

“天鲲号”主要配备 8G 与 7G 两种 6 臂绞刀，两者均适用于岩石土质。8G 6 臂绞刀功率更低，刀臂更厚、齿座直径更大、刀齿数量更少、开档

更小，抗冲击能力更强，适用于开挖中风化岩，特别是磨损速度快的岩石。

2.1.2 不同型号绞刀数据对比

通过对本工程不同型号刀齿施工不同岩石磨损情况统计分析得出，在进行砂岩混泥岩土质施工时，7G 刀齿的万方齿耗约为 8G 刀齿万方齿耗的 2 倍，绞刀维修和刀齿更换时间更短，见表 3、4。

表 3 不同型号刀齿施工不同岩石刀齿磨损情况

时间	齿型	工程量/m ³	万方齿耗/(齿·万 m ⁻³)	主要疏浚土质	7G 与 8G 消耗比
2020 年 11 月	7GC2-B	213 070	33.60	泥岩、砂岩，少量黏土	1.90
2020 年 11 月	8GP2-B	300 240	17.65	泥岩、砂岩，少量黏土	
2020 年 12 月	7GC2-B	444 266	64.11	泥岩、砂岩	2.01
2020 年 12 月	8GP2-B	74 434	31.84	泥岩、砂岩	
2021 年 1 月	7GC2-B	99 640	104.18	砂岩，中粗砂	2.24
2021 年 1 月	8GP2-B	215 960	46.54	砂岩，中粗砂	

表 4 7G、8G 绞刀修理周期和绞刀换齿周期对比

绞刀型号	平均修理周期/d	换齿周期/h	单齿座开裂时修理时间/h	单齿座折断时修理时间/h	单齿换齿时间/min
7G	10	7.50	2.10	5.08	1.75
8G	13	10.0	1.75	5.33	2.50

2.1.3 挖泥机具比选分析

相对于 7G 绞刀，8G 绞刀抗冲击能力更强，刀齿更耐磨，换齿频率低、绞刀修理周期长。据统计，通过节省绞刀修理和刀齿更换时间，时利率提升约 3.5%。因此在挖掘强、中风化岩石时优先选用 8G 绞刀，提高船舶的生产效率，降低使用成本。通过上述分析可知，在研究工况条件下 8G 绞刀挖掘效果更好，使用成本更低，因此在后续挖掘参数研究中均基于 8G 绞刀参数进行分析。

2.2 挖掘参数

2.2.1 绞刀转速比选

通过试验选取绞刀最佳转速。在进尺 1 m、切厚 3 m、摆宽 150 m、挖深 17.2 m 的条件下，设置绞刀转速分别为 26、30、36 r/min，通过控制变量分析绞刀转速最优选项，8G 绞刀转速试验情况见表 5。通过对试验结果分析可知，绞刀转速越高，其对岩石的破碎程度越强，破碎后均为直径 4~14 cm 的块石，吸入效果随之增加，在正反刀挖掘时均有此现象。但当绞刀转速大于 32 r/min 时，绞刀功率增加约 300 kW，并且刀齿磨损急剧加快，故选用 28~32 r/min 的中档转速绞刀施工，可保证绞刀旋转形成瞬时冲击力入岩的同时，采用相对降低的绞刀功率，减少岩石对刀齿的磨损。

表 5 绞刀转速试验结果

绞刀转速/(r·min ⁻¹)	正/反刀	绞刀功率/kW	横移速度/(m·min ⁻¹)	平均横移拉力/kN	流速/(m·s ⁻¹)	水下泵真空/kPa	2#泵转速/(r·min ⁻¹)	2#泵泵轴功率/kW	总排压/MPa
26	正刀	1 540	12.1	254	5.44	-51	305	3 589	1.42
	反刀	1 660	13.2	372	5.42	-54	304	3 596	1.43
30	正刀	2 111	12.6	251	5.35	-52	305	3 614	1.54
	反刀	2 044	13	387	5.37	-56	303	3 585	1.45
36	正刀	2 497	11.3	328	5.45	-62	308	3 696	1.43
	反刀	2 613	10.4	481	4.77	-67	305	3 217	1.58

2.2.2 进尺切厚控制

施工区岩石抗压强度变化较大且分布不均, 存在弱、中、强3种风化岩石。单一的施工工艺无法适用复杂的土质变化工况, 因此对不同工况采用不同的施工工艺开展研究。

1) 小切厚大进尺工艺。在挖掘强风化岩(抗压强度0~15 MPa)时, 将进尺控制在1.2 m; 切厚控制在1.0 m时, 综合生产率为 $1\ 192\text{ m}^3/\text{h}$ 。经管口取样, 块石破碎后的粒径基本在5~16 cm, 采用小切厚、大进尺的施工工艺不仅有利于充分发挥绞吸船的挖掘产能, 而且对岩石破碎效果较好。

对比优化前后的绞刀功率可知, 工艺优化后绞刀达到峰值功率的次数减少, 功率波动也有所减少, 功率变化更加平稳。见表6。由于工艺优化后加强了对块石的破碎能力, 平均功率由2 335 kW上升为2 753 kW, 见图3。

表6 24 h 绞刀功率波动超过2 000 kW次数

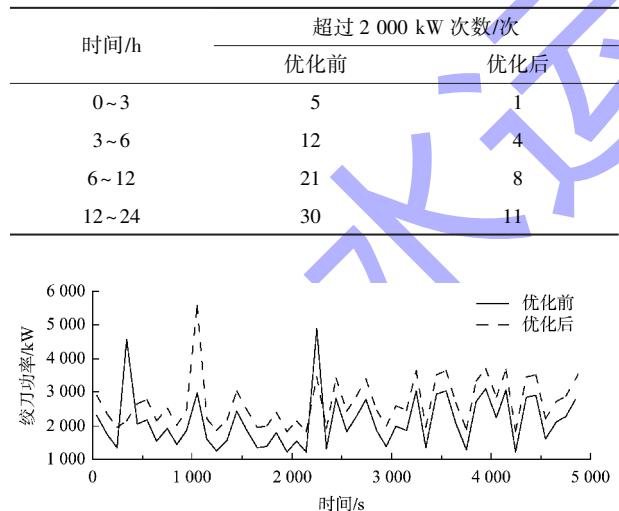


图3 工艺优化前后绞刀功率对比

2) 小切厚小进尺快横移工艺。在挖掘中风化岩(抗压强度20~30 MPa)时, 将进尺控制在1.0 m; 切厚控制在0.8 m时, 综合生产率 $750\text{ m}^3/\text{h}$ 。在工程实践初期, 中风化岩石同样采用小切厚、大进尺、快横移的施工工艺。但实践中, 测图呈现多道浅梗, 是由于该工艺切片厚度大, 对于强度较高的中风化岩石, 石块破碎后形成块体较大(管口取样块石最大粒径达到30 cm), 导

致其吸入效果不佳, 部分石块堆积在绞刀下方, 残留较多。通过进一步减小切厚进尺、降低横移速度的方式, 达到了对岩石进一步破碎的目的, 新工艺破碎后的岩石粒径为4~25 cm。

3) 小切厚、进一步减小进尺的施工工艺。在挖掘弱风化岩(抗压强度>30 MPa)时, 将进尺控制在0.8 m; 切厚控制在0.6 m时, 综合生产率为 $500\text{ m}^3/\text{h}$ 。硬岩区域岩层强度较高(平均强度超过30 MPa), 完整性极好, 同时含有高硬度夹层(局部单轴饱和抗压强度最高达60 MPa)。“天鲲号”施工时, 桥架上下震动剧烈, 严重时绞刀可被抬起30 cm以上。采用小切厚、进一步减小进尺施工工艺, 可减小绞刀上下震动幅度, 绞刀功率平稳, 质量控制效果较好。

通过以上分析可知, 不同风化程度岩石适合采用的施工工艺为: 强风化岩采用小切厚大进尺工艺, 中风化岩采用小切厚小进尺快横移工艺, 弱风化岩采用分多层、小切厚、进一步减小进尺工艺。

2.3 岩石浸泡时间对施工效率的影响

在使用不同工艺的基础上, 针对中、弱风化岩含量占比较高区域, 采取先清除表层覆盖层及一部分岩石、让下层岩石充分暴露在海水中一段时间后再进行开挖的方式。根据施工进度分块施工, 确保下层岩石在海水中浸泡的时间。每隔5 d进行不同区域的分块施工, 以15 d为1个周期, 分析挖掘浸泡5、10、15 d岩石的绞刀功率变化, 研究浸泡时间长短对施工效率的影响, 选取最佳浸泡时间。

挖掘浸泡5、10、15 d土质时的平均绞刀功率分别为2 438、2 267、2 256 kW。分析可知, 浸泡5 d的土质硬度发生了变化, 绞刀功率降低约100 kW; 挖掘浸泡10 d的土质绞刀功率相比未浸泡土质降低300 kW; 但挖掘浸泡15 d土质时绞刀功率相比浸泡10 d时没有明显变化。因此得出, 浸泡10 d对挖掘受限问题的改善效果最好。因此需根据施工进度分块施工, 合理安排浸泡时间。

对比未浸泡岩石, 浸泡区域的土质发生了明

显变化，施工该段时正反刀横移拉力明显低于未浸泡区域，且横移速度明显提升，维持该速度的横移拉力降低幅度明显，见图 4，生产效率最大可提升约 13%。

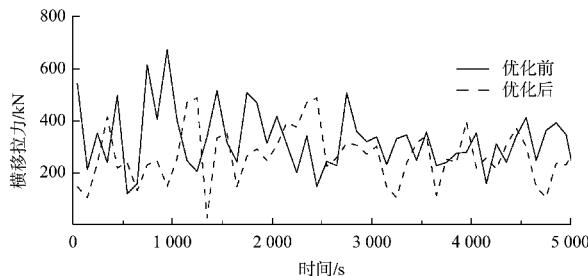


图 4 浸泡前后横移拉力对比

3 施工工艺优化

“天鲲号”总装机功率在面对砂岩混泥岩时略显不足，当绞刀功率增加时，泥泵功率随之降低。工程初期管线长度约为 3 700 m，此长度下使用 1 台水下泵与 2 台舱内泵时排压超出管线承压能力，在水下泵与一台舱内泵串联施工时出现泥泵超功率的现象。为指导船舶施工，针对挖泥浓度控制与泥泵功率的关系开展研究。

通过计算泥泵超功率临界值时的泥浆天然体积浓度，分析船舶生产效率。“天鲲号”施工时各项参数为：泥浆密度 1.07 t/m^3 ，流速 5.4 m/s ，管径 1 m ，天然土密度 2 t/m^3 ，舱内泵排压 1 MPa 。

泥泵超功率临界值为泥泵输入功率等于泥泵输出功率。“天鲲号”的舱内泵额定功率为 6000 kW ，泥泵输入功率(泥泵轴功率)根据柴油机有效功率计算。

$$N_p = \eta_t N_e \quad (1)$$

式中： N_p 为泥泵输入功率(泥泵轴功率)， kW ； η_t 为传递效率，交流电力取 $0.88\sim0.94$ ； N_e 为柴油机有效功率，考虑到柴油机无法达到最大额定功率，实际功率取额定功率的 90% 。经计算，泥泵实际输入功率为 4860 kW 。

泥泵输出功率按式(2)计算。

$$N_\mu = \rho_w g H Q \quad (2)$$

式中： N_μ 为泥泵输出功率， kW ； H 为泥泵扬程， mH_2O ； Q 为泥泵流量， m^3/s ； ρ_w 为水的密度， t/m^3 ，海水取 1.025 ，清水取 1.00 。

泥泵泥浆扬程宜按式(3)、(4)计算。

$$H_m = H_w [K_H (\rho_m - 1) + 1] \quad (3)$$

$$\rho_m = (\rho_s - \rho_w) \rho + \rho_w \quad (4)$$

$$\text{其中: } H_w = \frac{M_d - M_s}{\rho_w g} + Z + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (5)$$

式中： H_m 为泥泵泥浆扬程， mH_2O ； H_w 为泥泵清水扬程， mH_2O ； K_H 为泥泵泥浆扬程土质换算系数，取 $0.25^{[6]}$ ； ρ_m 为泥浆密度， t/m^3 ； ρ_s 为天然土密度， t/m^3 ； ρ 为泥浆天然体积浓度，%。 M_d 为泥泵出口压力， kPa ； M_s 为泥泵进口压力， kPa ； g 为重力加速度， m/s^2 ； Z 为泥泵出口压力传感器测点高程与泥泵进口压力传感器测点间高程之差， m ； v_2 为泥泵出口管内流速， m/s ； v_1 为泥泵进口管内流速， m/s 。

排泥管径取 1 m ，圆周率取 3.14 ，舱内泵排压取 1 MPa ，海水密度取 1.025 t/m^3 ，重力加速度取 9.8 m/s^2 ，高差取 2 m ，流速取 5.4 m/s ，泥浆密度为 1.07 t/m^3 。经计算，在挖掘砂岩混泥岩时，理论最佳浓度为 17% 。

4 结语

1) 在施工砂岩混泥岩工况时，“天鲲号”重型自航绞吸挖泥船采用 8G 6 臂绞刀挖掘效果更好，维修更换成本更低。采用 $28\sim32 \text{ r/min}$ 中档绞刀转速，在保证瞬时冲击力入岩的同时，可减少岩石对刀齿的磨损。

2) 在挖掘硬度较小的岩石时采用小切厚大进尺工艺，提高岩石的破碎率，绞刀功率波动超过 2000 kW 的次数降低 63% ；挖掘中硬度岩石时采用小进尺小切厚快速横移工艺；挖掘高硬度岩石时采用小切厚进一步减少进尺工艺。同时利用浸泡岩石的方法降低岩石硬度，平均浸泡时间为 10 d 。

3) 将泥泵输出功率与输入功率建立等式关系，结合泥泵扬程计算公式，反推出泥泵超功率临界点时泥浆天然体积浓度为 17% ，以此限值辅助船舶操作过程中减少泥泵超功率现象，提高船舶的施工效率。

(下转第 193 页)