

## · 施 工 ·



# 复杂疏浚工况下重型绞吸挖泥船 施工工艺优化

杨 琨<sup>1</sup>, 郭素明<sup>2</sup>

(1. 中港疏浚有限公司, 上海 200136; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

**摘要:**盐城滨海港区疏浚工程工况复杂, 土质分层不均, 上层粉土具有粒径小、密实、坚硬的特点, 船舶施工时出现正刀滚刀、绞刀功率波动明显; 下层亚黏土土体密度大, 14 km 长排距输送易造成堵管; 施工区内块石与障碍物较多, 经常发生堵吸口、堵泵。对于新建出厂的“昊海龙”轮, 通过更换绞刀分析不同绞刀防石方案适用性, 寻找泥浆浓度、流速与施工效率的平衡点, 对其船机性能进行试验。结果表明: 挖掘密实粉土时, 使用通用绞刀可以增加破土能力, 减少绞刀功率波动幅度与频次; 吸口加装钢板格栅可以有效减少堵吸口、堵泵; 挖掘下层时, 适当降低泥浆浓度可以达到生产率与输送效率平衡。

**关键词:** 重型绞吸船; 绞刀; 钢板格栅; 泥浆浓度; 长排距

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0175-05

## Construction process optimization of heavy cutter suction dredger under complex dredging conditions

YANG Kun<sup>1</sup>, GUO Su-ming<sup>2</sup>

(1.CHEC DredgingCo., Ltd., Shanghai 200136, China;

2.CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The dredging project of Yancheng Binhai port area has complex working conditions and uneven soil stratification, the upper silt has the characteristics of small particle size, dense and hard, the power of cutter fluctuates obviously during ship construction. The density of subclay soil in the lower layer is high, and the long row distance of 14 km is easy to cause pipe blocking. There are many blocks and obstacles in the construction area, and the suction and pump blockage often occur. For the newly-built ship “HAO HAI LONG”, the applicability of different cutter stone prevention schemes is analyzed by replacing the cutter to find the balance point between mud concentration, flow rate and construction efficiency, and the ship machine performance is tested. The results show that when excavating dense silt, the use of general cutter can increase the soil breaking capacity and reduce the fluctuation amplitude and frequency of cutter power. The installation of steel grating at the suction port can effectively reduce the blockage of suction and pump. When excavating the lower layer, the balance between productivity and transportation efficiency can be achieved by properly reducing the mud concentration.

**Keywords:** heavy cutter suction dredger; cutter; steel grating; mud concentration; long row spacing

### 1 工程概况

盐城滨海港区疏浚工程位于江苏省盐城市滨海县滨海港区, 该区域为江苏沿海中北部的突出

海岸, 处于废黄河口以北、中山河以南。工程位置见图 1。

收稿日期: 2022-05-06

作者简介: 杨琨(1999—), 男, 助理工程师, 从事疏浚施工及管理工作。



图 1 工程位置

工程内容为开挖新的港池泊位，拓宽、浚深进港航道，港池及航道水域共分为 6 个疏浚区域。疏浚总量约 1 980.49 万 m<sup>3</sup>，包含港池疏浚量 1 736.89 万 m<sup>3</sup>，回淤量 200 万 m<sup>3</sup>，10 万吨级航道疏浚量 43.6 万 m<sup>3</sup>。

疏浚土质上层以密实粉土为主，灰褐色，土

质分布不均，混杂较多砂粒及少量黏粒，下层以亚黏土为主，灰黄色，混少量砂粒。疏浚土平均标贯击数 25.4 击，最大标贯击数达 39 击，按照疏浚技术规范<sup>[1]</sup>为 8 级土质。

2 施工船舶性能和施工限制分析

2.1 船舶性能

本工程投入施工的“昊海龙”轮是一艘新建的智能化程度高、环保理念先进的全电力驱动自航绞吸挖泥船。船长 148 m(含桥架)，型宽 29 m，型深 9.2 m，设计吃水 6.5 m，总装机功率 26.433 MW，最大挖深 38 m，最小挖深 7 m，设计航速 11.5 kn。

2.2 施工参数

针对不同的土质条件，“昊海龙”轮的施工参数可分为 2 种，见表 1。

表 1 “昊海龙”轮不同工况的施工参数

工况	土质类型	前移距/ m	横移速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	绞刀转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	绞刀功 率/MW	吸入真 空/kPa	总排压/ MPa	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	管线情况
1	粉土居多，混有大量块石与垃圾	1.2~1.5	10~16	30~32	2.0~6.0	55~70	2.60	3.9~4.3	水上管线 737.6 m，水下管线 964.4 m，陆上管线 11.64 km，管径 1 m，管线排高 8.1 m，出口处无缩口
2	亚黏土居多，夹杂块石	1.0~1.3	8~14	33~35	1.5~3.0	45~65	2.85	3.3~3.8	

2.3 施工限制分析

1) 上层粉土硬度大，破土困难。疏浚区域上层以密实粉土、粉砂为主，泥层厚度 8~10 m，天然土密度 1.97 g/cm<sup>3</sup>。土质粒径小、密实度高、板结程度高，土质坚硬，破土困难。施工时正刀出现滚刀现象，反刀绞刀功率波动大，难以控制横移速度，绞刀刀齿及齿座磨损严重。

某月施工中，1<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>刀齿更换情况见表 2。其中 10<sup>#</sup>为大圈齿，共更换刀齿 629 个，日更换 20.3 个；2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>齿损耗最多，占总量的 66%；除 10<sup>#</sup>齿外，8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>齿损耗最少，占总量的 5%。

表 2 刀齿更换情况

刀齿编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>	10 <sup>#</sup>
总换齿数/个	57	152	167	100	51	35	28	18	15	6

2) 石块、建筑垃圾频繁堵口、堵泵。施工区域内存在大石块与各种障碍物，极易堵塞吸口与泥泵，严重影响施工连续性，降低时间利用率。通过监测疏浚台参数的变化推测吸口与水下泵是否畅通<sup>[2]</sup>。当发生堵口、堵泵时，立即采取脱泵

措施，使管内泥浆部分回流、冲刷泥泵内与吸口的块石，可减少起桥清理时间，但是堵塞严重时仍需人工掏口清理<sup>[3]</sup>。

除了影响生产率外，障碍物对船机设备的损害也是不可逆的：①堵塞吸口会导致水下泵真空度突然升高，引起振车，同时水下泵叶轮易发生气蚀，缩短使用寿命；②堵塞泥泵会使叶轮叶片被石头卡死，阻碍旋转，导致水下泵法兰、轴承受损，严重影响齿轮箱的使用寿命。

3) 长排距输送及下层亚黏土降低了流速。“昊海龙”轮施工管线长 14 km，设计单船最大排距接近 15 km，施工区域下层亚黏土居多，使得流速下降明显，每台车结束时流速最低降至约 3.3 m/s，极易造成堵管，影响施工连续性。

3 施工工艺优化及方案比选

3.1 绞刀选型

“昊海龙”轮配备通用绞刀、挖黏土绞刀和挖岩绞刀以适应不同的土质，绞刀参数见表 3。

表 3 “昊海龙”轮配置绞刀基本参数

类型	型号	刀臂数	大圈内径/mm	总质量/t	刀臂齿数	大圈齿数	适用工况
通用绞刀	VOSTA T6. 33/2800×900/6NR	6	2 800	22. 935	54	3	密实砂土、粉土、淤泥
挖黏土绞刀	VOSTA T6. 33/2800×900/5NR	5	2 800	20. 635	45	3	黏土、淤泥、砂土
挖岩绞刀	VOSTA T8. 31/2800×900/6NR	6	2 800	27. 530	51	3	砾石、强风化岩以及无侧限抗压强度 50 MPa (岩石质量指标 RQD≤80%) 以内的中弱风化岩

本工程土质情况复杂, 需要根据不同工况更换绞刀, 基本原则为: 1) 挖掘密实粉土混石块时, 由于土质硬度大、挖掘困难, 使用质量较大、破土能力较强的通用绞刀, 绞刀前端搭配使用凿型齿提升破土能力; 同时, 在齿座及刀臂上堆网状耐磨焊, 增强绞刀的耐磨性, 减少刀齿与齿座的更换次数。2) 挖掘亚黏土混粉土时, 因通用绞刀挖掘粉土磨损较大, 改用挖黏土绞刀, 该绞刀为 5 臂绞刀, 刀臂间隔大, 可有效避免绞刀被亚黏土糊住。亚黏土破土后不易坍塌, 故在绞刀前端使用宽型齿增加挖掘效率。

图 2 为挖掘密实粉土时由挖黏土绞刀更换为通用绞刀前后绞刀功率的变化, 分析可知: 1) 更换绞刀后, 峰值功率由 6.2 MW 下降至 4.5 MW, 达到额定功率的频次由 5 次减少为 0 次; 2) 更换绞刀前, 绞刀功率最大波动幅度为 5.1 MW, 波动超过 1.0 MW 的波动频次为 30 次; 更换后绞刀功率最大波动幅度为 3.5 MW, 波动超过 1.0 MW 的波动频次为 11 次。波动幅度与频次明显减弱, 更有利于横移速度的控制。

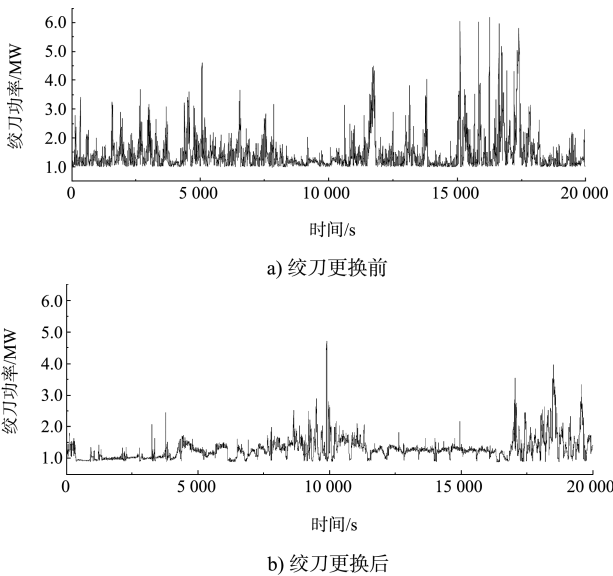


图 2 绞刀防石形式优化前后绞刀功率波动情况

3.2 绞刀防石形式适用性比选

为减少堵口、堵泵的次數, 需对绞刀防石形式进行优化, 针对挖区内大量的块石与障碍物采用不同的防石形式(图 3)并对各方案适用性进行分析, 见表 4。

由表 4 可看出, 虽然防石环与防石钢丝的效果都很好, 但在实际使用中寿命较短, 无法作为长久有效的优化方案; 刀臂挡石板则无法适应本工程土质多变的工况, 挖掘黏土时反而降低绞刀的切削能力; 吸口圆钢、钢板格栅的方案虽然较为简单, 但是对于复杂工况的适用性较强, 并能根据不同施工区域的情况改变格栅间距, 可达到长久有效的防石目的。



a) 绞刀臂挡石板



b) 防石环



c) 绞刀防石钢丝

图 3 各种绞刀防石形式

表 4 本工程绞刀防石形式优化方案对比

类型	刀臂数	形式优化方案	优点	缺点
通用绞刀	6	绞刀臂挡石板	可在吸口外将障碍物移除,减轻吸口堵塞压力	挖掘下层黏土时绞刀阻力大,易堵糊绞刀
		防石环	能够防止较大石块引起的堵吸口、堵泵,对水下泵真空及对黏性土吸入影响不大	1)圆环需作为备件,船上无法直接制作; 2)焊接定位难度大,需要现场有熟练的电焊工; 3)块石较多时容易损坏
		吸口圆钢格栅(φ50 mm)	焊接方便,块石可通过脱泵方法简单处理	1)圆钢迎面大,减少了吸口的有效面积,降低了生产效率; 2)格栅间距较小时,水下泵的真空上升较大,对水下泵易造成损伤
		吸口钢板格栅(d=20 mm)	对黏土、碎石有一定的切削、破碎作用	钢板太薄,块石撞击后易变形
挖黏土绞刀	5	绞刀臂圆钢格栅(φ50 mm)	迎面较小,相比于刀臂挡石板绞刀旋转阻力更小	不能有效阻挡石块
		绞刀臂防石钢丝	绞刀最外侧的防护措施,对水下泵真空的影响最小,防石效果最优	外层长时间受磨损,寿命极短

3.3 加装格栅前后挖泥生产率对比

根据疏浚工程施工规范,绞吸船生产率测定公式为:

$$q=\frac{V}{T} \tag{1}$$

式中:  $q$  为挖泥生产率( $\text{m}^3/\text{h}$ );  $V$  为实测地形变化量( $\text{m}^3$ );  $T$  为实测挖泥时间( $\text{h}$ )。

由测图的地形变化量及挖泥时间,根据式(1)计算挖泥生产率  $q$  值,绘制绞刀加装吸口钢板格栅前后挖泥生产率变化曲线,见图 4。分析可知: 1)加装吸口钢板格栅前后生产率均值分别为 2 014、2 215  $\text{m}^3/\text{h}$ ,加装后挖泥生产率提高约 10%; 2)加装吸口钢板格栅前后,生产率方差分别为 63.3%和 17.6%,加装后方差降低 72%,挖泥生产率波动明显减弱,也间接说明每日的时间利用率稳定。

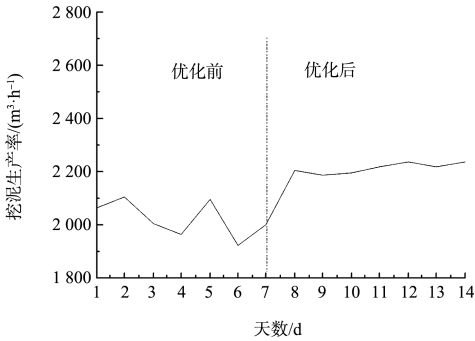


图 4 加装吸口钢板格栅前后挖泥生产率变化

3.4 吸口格栅间距对清理周期的影响

“吴海龙”轮吸口处泥浆流道的宽度为 500 mm,当吸口格栅间距发生变化时,会影响清理吸口和

水下泵的周期。格栅间距越小,清理吸口次数则越多,清理水下泵次数则越少,反之亦然。表 5 为不同格栅间距所产生的清理周期差异。2 种格栅形式清理周期的基本规律相同,但圆钢格栅由于迎面更宽,泥浆阻力更大,挖掘亚黏土时易堵糊吸口,从而增加清理时间,适用性不强。

表 5 不同吸口格栅间距的清理周期

格栅形式	格栅最大间距/mm	清理吸口周期/(min·次 <sup>-1</sup> )	清理水下泵周期/(min·次 <sup>-1</sup> )	水下泵真空度变化量/kPa
无	—	25	315	0
圆钢	300	175	70	10.7~12.6
圆钢	350	125	110	8.2~10.5
钢板	300	215	75	9.4~13.0
钢板	350	170	95	7.6~9.1
钢板、圆钢	400	80	220	-0.3~2.5
钢板、圆钢	450	50	280	-0.5~1.9

在实际施工中,格栅最大间距并不能无限度增大,由表 5 中水下泵的清理周期与真空度变化量可以看出,随着间距增大,格栅对泥泵的防护效果逐渐减弱,当格栅最大间距超过 350 mm 时,格栅将失去其主要作用。为保持清吸口与清泵周期基本平衡且最短,以达到最佳的施工效果,确定钢板格栅间距最佳平衡点为 350 mm。

3.5 泥浆流速与浓度平衡点

本工程中主要考虑下层亚黏土的长排距输送效率问题,下层土质密度大,在管路中极易沉淀,随着时间推移容易造成堵管,影响生产效率。

根据疏浚黏土球成型机理,黏土球成型并非



是从黏性小块团结而成, 而是由大块原状土碰撞、磨圆而成<sup>[4-5]</sup>。为避免黏土输送过程中因黏土球形成造成堵管, 施工时多采用小横移速度、大绞刀转速施工工艺(表 1)以减少挖掘形成的黏土尺寸, 并降低泥浆浓度以提高流速, 从而保证施工的连续性<sup>[6]</sup>。实际施工中也证明此种方法可以减少黏土成球现象的出现。

图 5 为输送不同浓度的泥浆时流速的变化情况: 1) 施工流速遵循“上层上升、下层下降”的规律呈周期性变化; 2) 施工下层后换桩时(图中圆

圈位置), 需要至少 10 min 的时间打清水保证管路通畅, 是降低施工效率的原因之一; 3) 挖掘下层时, 不同浓度的泥浆流速下降速率不同, 浓度越小, 流速下降得越慢。在初始流速均为 4 m/s 的情况下, 浓度为 25%、30%、35% 的泥浆流速分别下降 15.0%、17.5%、20.0%。

实际施工时为了保证施工的连续性, 需要找到泥浆浓度、流速与瞬时施工效率的最佳平衡点, 由图 6 可以看出, 泥浆浓度稳定在 29%~32% 时, 既能保证施工连续进行, 又能保证挖泥生产率不会太低。

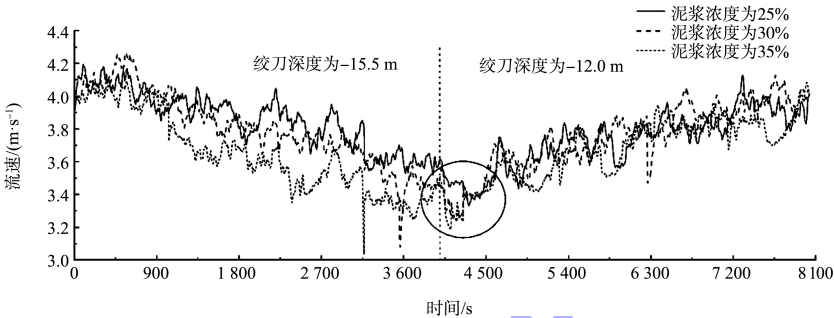


图 5 输送不同浓度泥浆时的流速变化曲线

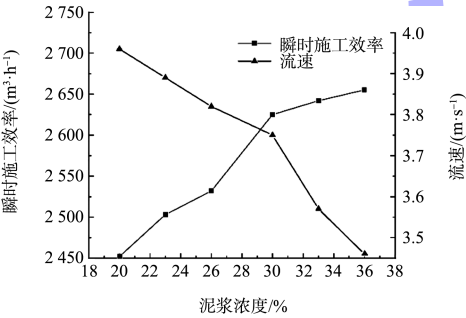


图 6 不同泥浆浓度与流速和瞬时施工效率的关系

4 结语

1) 对于细颗粒密实粉土, 破土难度大, 更换通用绞刀进行挖掘, 绞刀峰值功率由 6.2 MW 减少至 4.5 MW, 达到额定功率的频次由 5 次减少至 0 次, 大幅度波动的频次由 30 次减少至 11 次。

2) 本工程的最优防石方案为吸口钢板格栅, 挖泥生产率均值提高约 10%, 方差降低 72%。当施工区域块石、障碍物较多, 且土质复杂时, 要及时优化绞刀防石方案, 避免因土质变化而导致挖泥生产率下降。

3) 吸口与泥泵的堵塞程度取决于吸口格栅的

间距, 吸口钢板格栅最大间距为 350 mm 时, 可保证清理吸口、泥泵的周期平衡且最短。

4) 长排距施工时需要降低泥浆浓度以保证施工的连续性, 当泥浆浓度稳定在 29%~32% 时, 可达到挖泥生产效率与输送效率的最佳平衡点。

参考文献:

[1] 中交天津航道局有限公司.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.

[2] 高伟, 韦东.绞吸船施工要点及措施[J].中国港湾建设, 2011(1): 66-69.

[3] 孙芳淳.绞吸式挖泥船施工黏土混块石防石设备的应用[J].水运工程, 2020(6): 209-213, 219.

[4] 徐继涛, 尹崧宇, 张更生, 等.疏浚黏土球成形机理[J].水运工程, 2018, 12(S1): 70-74.

[5] 李军, 王晓萌, 陈浩.超大型绞吸船长吹距黏土混姜结石复杂土质施工工艺[J].水运工程, 2022, 8(S2): 73-76, 79.

[6] 刘文, 陈永利, 刘西平.绞吸船长排距施工控制工艺优化[J].水运工程, 2019(2): 177-180.