



# 超大型绞吸船长吹距黏土混姜结石 复杂土质施工工艺

李 军<sup>1</sup>, 王晓萌<sup>1</sup>, 陈 浩<sup>2</sup>

(1. 中交 (天津) 疏浚工程有限公司, 天津 300450; 2. 天津市疏浚技术企业重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 以连云港港赣榆港区 10 万吨级航道延伸段工程施工 (HD-SG-2 标段) 为例, 针对绞吸船在长吹距工况下 (标准岸管长度 7 km) 施工 4、5 级黏土混姜结石的问题, 从挖掘工艺、输送工艺两方面进行分析, 在施工参数优化方面, 在黏土混姜结石工况运用自动挖泥技术, 通过多组参数对比分析, 实现自动挖泥技术最优施工参数组合; 并基于自动挖泥数据, 修正施工流速与泥浆密度计算模型以及 Durand 水力梯度计算模型。结果表明, 该技术的成功实施可提高超大型绞吸船长吹距输送黏土混姜结石产能的测算精度, 并确定该类土质最优施工参数组合, 保证该类土质在管道中输送的平稳性, 避免堵管现象发生。

**关键词:** 长吹距; 自动横移; 挖掘工艺; 输送工艺; 临界流速

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0073-04

## Complex earthy construction process of clay mixed ginger stones blown long distance by ultra large cutter suction dredger

LI Jun<sup>1</sup>, WANG Xiao-meng<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>

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

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** We take the construction project of the extension section of the 100,000-ton level channel in Ganyu Port area of Lianyungang Port (HD-SG-2 bid section) as an example, aim at the problem of grade 4 and 5 clay mixed ginger stones when cutter suction dredger is working in long blowing distance (standard length of shore pipe is 7 km), analyze from the two aspects of excavation technology and transportation technology, use automatic dredging technology in the working conditions of clay mixed ginger stones in terms of construction parameters optimization, realize the optimal construction parameters combination of automatic dredging technology by the comparative analysis of multiple groups of parameters, and revise the construction flow rate and mud density calculation model and the Durand hydraulic gradient calculation model based on the automatic dredging data. The results show that the successful implementation of this technology can improve the calculation accuracy of the productivity of clay transported by the long distance of ultra large cutter suction dredger, determine the optimal combination of construction parameters of this kind of soil, ensure the stability of soil transportation in the pipeline, and avoid pipe blockage.

**Keywords:** long blowing distance; automatic transverse movement; excavation process; conveying process; critical velocity

绞吸船在长吹距下 (7 km 以上) 输送硬黏土混钙质土时, 黏土会逐渐由絮状滚动成球状, 成球黏土与管底摩擦造成管线阻力大, 船舶输送困难,

如果流速控制不好易堵管。本文根据真空浓度的换算关系, 以真空为目标参数, 在黏土混姜结石复杂土质工况运用自动挖泥技术实现平稳挖泥,

采用高绞刀转速、小进步、慢横移的施工方法减小挖泥切片厚度, 运用自动化技术, 最大化提高船舶施工产能。另外通过大数据找寻管路平均浓度和流速关系, 改进成球黏土的临界流速计算模型, 可为类似土质流速控制提供依据, 在产能测算方面, 通过积累不同输送状态下黏土的水力损失, 修正 Durand 模型, 可为类似工程产能测算提供参考。

## 1 工程概况

本航道疏浚工程位于连云港港赣榆港区规划

的一港池, 延伸段航道长度 3 727 m, 疏浚量全部吹填造陆, 设计开挖深度 -13.3 m, 超深 0.3 m, 超宽 3 m, 边坡 1:4, 吹填区设计高程为 6.5 m, 各区域应基本平整, 高差不超过 3 mm。

根据地勘资料显示: 上层主要为 4 级粉质黏土, 并混有少量中粗砂及淤泥, 下层主要为 5 级黏土<sup>[1]</sup>。但是现场实际, 上层土质主要为粉质黏土混姜结石及粗砂、下层为 5 级黏土混姜结石, 土质的具体土力学指标见表 1, 现场取样见图 1。

表 1 主要土力学指标

土层	含水率/%	标贯击数 $N$ /击	天然密度/( $t \cdot m^{-3}$ )	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	疏浚级别
淤泥	70.9	-	-	21.3	2.30	1
淤泥混砂	37.0	<1	1.64	12.6	1.74	2
粉质黏土	21.9	11.8	1.96	14.7	0.43	4
黏土	25.8	14.5	1.94	10.7	0.21	5
中粗砂	-	24.8	-	-	-	7



图 1 土质取样

该工程投入公称生产率 6 000  $m^3/h$ 、总装机功率 25.843 MW 的超大型自航绞吸船。管线总吹距为 5 820.1 m, 由水上管线(507.4 m  $\phi 1 000$  mm 的自浮管) + 水下管线(总长 5 249.8 m) + 陆地管(总长为 62.9 m)组成, 管线的标准岸管长度为 7 151 m。

## 2 挖掘施工工艺

### 2.1 利用绞吸船自动横移控制系统控制船舶施工浓度

大型绞吸船可利用自控系统控制横移<sup>[2]</sup>, 通过对比分析多组真空(压差)、泥浆密度、流速等

施工参数, 确定管路平均泥浆密度 1.15  $t/m^3$ 、流速可维持在 4.2 m/s 以上, 同时结合以往施工经验, 为了防止堵管发生, 本工程采用自动横移系统的施工流速目标值下限 4.2 m/s, 对应真空(压差)下限为 -40 kPa, 将施工排压控制在 3 MPa 左右。

当真空小于 -40 kPa 时, 横移速度下调, 反之上调, 横移速度调整相对速率与实际真空  $p$  和目标真空  $p_0$  之差的平方呈线性相关, 即实际真空与目标真空相差越大<sup>[3]</sup>, 横移速度调整越快, 横移速度调整相对速率与真空变化关系见图 2。

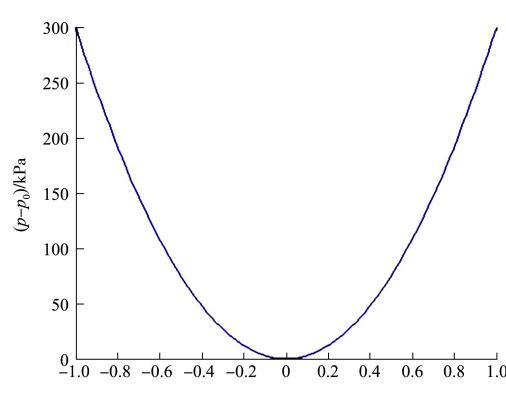


图 2 横移速度调整相对速率与真空差关系曲线

另外当流速低于限值或排压高于限值时, 横移速度不再上调, 系统报警, 并提示驾驶员手动增加泵转或采取其他措施。经试验, 相对于手动挖泥, 自动挖泥更加平稳, 可提高船舶生产率约 5%。

## 2.2 采用快绞刀转速和小切片厚度的挖掘工艺

赣榆工程主要疏浚土质为黏土, 其中混杂大

量姜结石, 黏土易起球, 通过施工过程中的一系列挖掘试验, 对 7G5、6G6 臂绞刀进行试挖对比, 两款绞刀均不存在糊绞刀现象, 施工时浓度等参数较为接近, 6G6 与 7G5 臂绞刀在相同绞刀转速和横移速度的前提下, 6G6 臂绞刀切片厚度更薄, 更有利于输送。7G5 臂绞刀与 6G6 臂绞刀的施工参数见表 2。

表 2 7G5 臂绞刀和 6G6 臂绞刀施工参数对比

绞刀类型	绞刀转速/(r·min <sup>-1</sup> )	横移速度/(m·min <sup>-1</sup> )	切片厚度/mm	平均浓度/%	平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )	平均排压/MPa
7G5 臂	30	15	100	14.1	4.90	2.42
6G6 臂			83	13.5	4.97	2.58

经试验, 6G6 比 7G5 臂绞刀更有利于输送产能的发挥, 提高输送生产率约 3%, 故“天鲲号”选用 6G6 臂绞刀。

## 3 输送施工工艺

### 3.1 防堵管流速控制

在吹距较长的工程中, 黏土混砂土质易在输送过程中逐渐由碎片状滚成黏土球, 从管口可以看出黏土球直径为 5~20 cm, 巨大的黏土球如果在管路中比例较多, 当水流动力无法让黏土球滚动时会出现堵管等现象, 需要施工船舶拥有超强的输送能力。大颗粒土临界流速计算公式<sup>[4]</sup>:

$$v_c = (90C)^{0.33} g^{0.25} D^{0.5} v_{ss}^{0.5} d_s^{-0.25} \quad (1)$$

式中:  $v_c$  为泥浆临界流速 (m/s);  $C$  为土颗粒体积浓度 (%);  $D$  为排泥管内径 (m);  $d_s$  为土颗粒平均粒径 (mm);  $v_{ss}$  为颗粒在静水中的沉降速度 (mm/s)。

考虑到沉降速度理论计算的精度较差, 以赣榆施工数据为依据, 反算式(1)中的沉降速度  $v_{ss}$ , 从而形成具有参考意义的施工流速控制计算公式。基于赣榆工程施工经验, 以管路泥浆平均密度 1.15 t/m<sup>3</sup> 对应的实用流速 4.2 m/s 为依据, 反推得出成球黏土沉降速度, 最终得到不同泥浆密度与实用流速的关系, 可为施工船舶在不同吹距施工该种土质的实用流速控制提供依据。临界流速

与土颗粒浓度关系曲线见图 3。

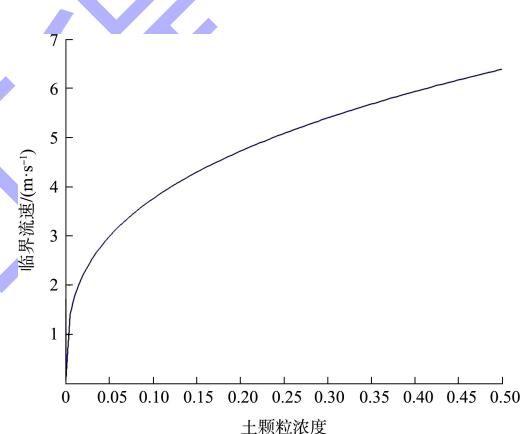
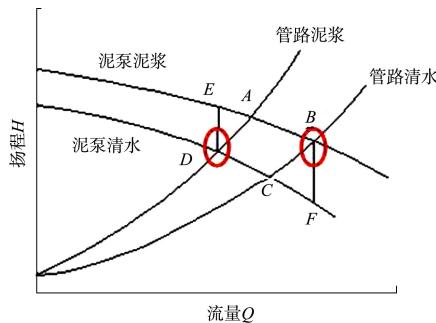


图 3 临界流速与土颗粒浓度关系曲线

绞吸船在倒桩、倒锚作业时, 由于泥泵吸入泥浆密度低, 此时泥泵曲线交叉点位于  $D$  点, 相对于交叉点  $A$ , 流速会下降, 所以此时应适当增加泥泵转速, 要求日常操作过程中泥泵转速要留有一定的富余空间, 一般取 10~20 r/min, 保证绞吸船在整个挖泥周期的流速都处于一个相对稳定状态; 另外船舶刚开始合泵后, 管路还是较空状态, 此时泥泵曲线交叉点位于  $B$  点, 相对于交叉点  $A$ , 流速较高, 应控制吸入浓度不宜过高, 如果过高, 虽然在一段时间内流速不会降低, 但当管路充满高浓度泥浆时, 流速将很难缓解。管路和泥泵在绞吸船整个挖泥周期的流量和扬程关系曲线见图 4。

图 4 泥泵、管路通用  $H$ - $Q$  曲线

### 3.2 修正 Durand 模型系数

考虑到黏土在管路中滚动成球, 黏土球与管线的摩擦阻力极大, 利用 Durand 模型预测黏土输送效率, 需要对其经验系数进行修正。通过积累黏土每种浓度下挂浆水力梯度、管线清水水力梯度、黏土球平均粒径以及其相关土力学参数, 根据“天鲲号”远程传输系统, 统计平均浓度、排压、流速之间的关系, 代入式(2)反推 Durand 系数, 从而得到 Durand 系数与浓度、流速的关系, 为产能预测提供依据。

$$\frac{I_m - I_f}{I_f C_{vd}} = K \left[ \frac{v_m^2}{gD (\rho_s - 1)} \frac{\sqrt{gd(\rho_s - 1)}}{v_t} \right]^{-1.5} \quad (2)$$

式中:  $C_{vd}$  为土颗粒浓度;  $v_m$  为泥浆流速 (m/s);  $\rho_s$  为土颗粒密度 ( $t/m^3$ );  $I_m$  为挂浆水力梯度;  $I_f$  为清水水力梯度;  $K$  为 Durand 系数;  $d$  为泥沙颗粒粒径 (mm);  $v_t$  为泥沙沉降速度 (mm/s)。

在统计过程中应注意土颗粒平均浓度的取值方法, 当泥浆累计行程等于吹距时, 管路充满的泥浆为开始统计至吸入所有泥浆为止, 将这部分数据浓度取平均值即为土颗粒平均浓度。泥浆累计行程的计算方法为:

$$W = \sum_{i=1}^n v_i \quad (3)$$

式中:  $W$  为泥浆累计行程 (m);  $v_i$  为管路中第  $i$  秒对应的流速 (m/s)。土颗粒平均浓度与 Durand 系数关系曲线见图 5。

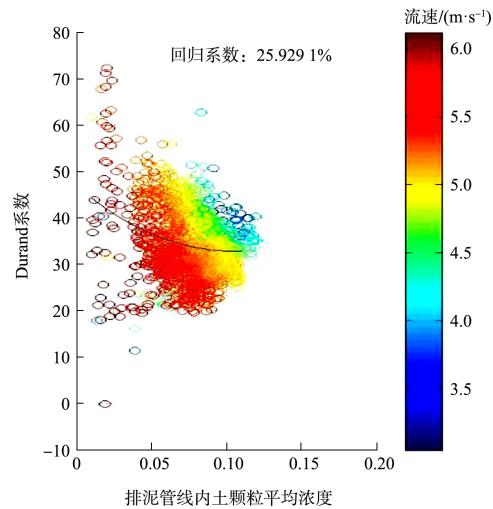


图 5 土颗粒平均浓度与 Durand 系数关系

### 4 结论

1) 在黏土混姜结石工况下运用自动挖泥技术, 通过对比多组挖泥试验, 确定  $6000 m^3/h$  超大型绞吸船在标准岸管  $7151 m$  吹距的工况下, 控制参数真空在  $-40 kPa$  以上、施工流速在  $4.2 m/s$  以上、排压  $3 MPa$ , 可避免堵管现象发生。

2) 本文根据  $6000 m^3/h$  超大型绞吸船在连云港港赣榆工程施工经验, 以施工中平均泥浆密度  $1.15 t/m^3$  时对应的临界流速为  $4.2 m/s$  为依据, 得出施工流速与高塑性黏土泥浆密度关系, 可为施工船舶在不同吹距施工该土质的临界流速控制提供理论支撑。

3) 采用高绞刀转速、小切片厚度的挖掘工艺有利于缓解黏土成球现象, 减小黏土在管道中的平均阻力。经实践, 对于挖掘黏土混姜结石类土, 6G6 比 7G5 臂绞刀挖黏土的施工效果更好, 可提高输送生产率约 3%。

4) 以“天鲲号”在赣榆施工黏土球为依托, 引入土颗粒平均浓度的概念, 通过对施工大数据的筛选、分析, 总结出输送黏土混姜结石的摩阻规律, 对 Durand 模型进行修正, 可为类似土质输送产能测算提供依据。

(下转第 79 页)