



# “新海牛”轮挖掘硬质黏土高压冲水耙头系统研制

郑金龙<sup>1</sup>, 石启正<sup>1</sup>, 陈旭<sup>1</sup>, 尹纪富<sup>2</sup>, 方华<sup>1</sup>, 王新宇<sup>1</sup>, 范佳欣<sup>1</sup>

(1. 中港疏浚有限公司, 上海 200136; 2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201208)

**摘要:** 针对挖掘硬黏土时耙头堵塞、破土能力弱等问题, 对比硬质黏土与长江口土质性能, 得知硬质黏土具有凝聚力大、颗粒细、抗剪强度大等特点。结合数值模拟技术, 采用超高压射流技术, 研制一套具有自主知识产权的高效挖掘硬质黏土耙头系统(最大压力为38 MPa)。该系统采用“高压头、低排量”的模式, 减少挖掘阻力, 缓解堵耙问题, 增加破土能力, 为航道疏浚工程提供了技术保障。

**关键词:** 耙吸挖泥船; 硬质黏土; 耙头系统; 智能化

中图分类号: U 674.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0218-05

## Development of high-pressure flushing drag head system for hard clay excavation of “Xinhainiu” trailing suction hopper dredger

ZHENG Jin-long<sup>1</sup>, SHI Qi-zheng<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>, YIN Ji-fu<sup>2</sup>, FANG Hua<sup>1</sup>, WANG Xin-yu<sup>1</sup>, FAN Jia-xin<sup>1</sup>

(1. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China;

2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

**Abstract:** In view of the problems such as the blockage of drag head and weak ability of breaking soil when excavating hard clay, we compare the properties of hard clay and soil in the Yangtze River and find that the hard clay has the characteristics of large cohesion, fine particles and high shear strength. Based on the numerical simulation and adopting the technology of ultra-high pressure jet to solve the above problems, we develop a set of efficient excavating hard clay drag head system with independent intellectual property rights (with the maximum pressure of 38 MPa), which adopts the mode of “high-pressure head, low flow” to reduce the excavation resistance, alleviate the problem of rake blocking, and increase the soil breaking capacity, to provide a technical support for channel dredging projects.

**Keywords:** trailing suction hopper dredger; hard clay; drag head system; intellectualization

随着国内外航道水深逐步增加, 耙吸船面对黏土的疏浚工程不断增多。硬质黏土具有黏聚力大、颗粒细、抗剪强度高等特点, 挖掘时黏性强的土容易糊住耙头, 致使闷耙而打开补水窗, 因此泥泵吸入泥浆浓度极低, 需要收起耙头清除堵塞, 导致停工频繁、效率低下。针对硬黏土, 国外 DEME 公司在耙吸船加装 Dracula 系统(最大压力为38 MPa)

后, 解决了挖掘硬黏土时的耙头堵塞、破土能力弱等问题并提高了疏浚产量<sup>[1]</sup>。目前国内耙吸挖泥船多采用常规高压冲水辅助破土, 但是针对硬黏土, 耙头采用0.8、1.6 MPa高压冲水模式时, 实船测试结果表明破土的效果很差。

为解决上述问题, 笔者对连云港港疏浚土及长江口12.5 m深水航道土质情况进行分析, 研发

了一套具有自主知识产权的高效挖掘硬质黏土耙头高压冲水系统(最大压力为 38 MPa, 流量 48 m<sup>3</sup>/h)。该系统采用“高压头、低排量”的模式代替普通挖掘型耙头的“低压头、大排量”(压力 1.2~1.8 MPa, 流量 4 000~4 500 m<sup>3</sup>/h)模式, 从而减小挖掘阻力, 缓解堵耙现象, 增加破土能力。现场实测疏浚数据表明, 本系统在有效解决疏浚硬质黏土问题<sup>[2]</sup>的同时, 创造性地利用国产设备将高压冲水系统应用于疏浚领域。本项目的研究成果有助于提高耙吸船在特定环境下船舶的生产能力, 同时拓展耙吸船的施工范围和施工适应性。

## 1 土质工况分析

### 1.1 连云港港硬质黏土的物理力学性能指标

连云港港某项目黏土粒径为:  $D_{10} = 1.24 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 6.94 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} = 38.6 \mu\text{m}$ , 颗粒级配曲线见图 1。通过直剪试验, 测得黏土体内黏聚力  $c = 21.58 \text{ kPa}$ ,

内摩擦角  $\varphi = 27.83^\circ$ 。

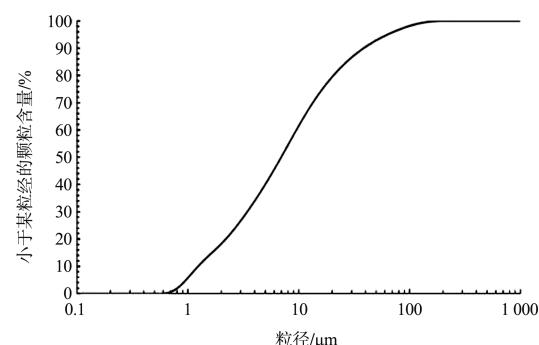


图 1 颗粒级配曲线

### 1.2 长江口 12.5 m 深水航道细粉砂的物理力学性能指标

长江口 12.5 m 深水航道土质粒径为:  $D_{10} = 3.04 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 31.46 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} = 194.45 \mu\text{m}$ 。从表 1 可知, 土质黏聚力较小, 仅在淤泥质黏土时出现一些土体黏聚力较大的区域, 土质内摩擦角也较小, 仅部分土质内摩擦角大于 20°。

表 1 12.5 m 深水航道土的物理力学性质指标

地基土层	天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	天然孔隙比 $e$	液性指数 $I_L$	塑性指数 $I_P$	固结快剪	
						内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力/kPa
灰黄色淤泥质粉质黏土	42.1	1.79	1.137	1.32	13.7	24.0	9.5
灰黄色淤泥	59.8	1.65	1.645	1.78	19.8	9.5	9.0
灰黄-灰色淤泥质黏土	50.4	1.70	1.423	1.31	20.3	10.5	11.0

### 1.3 2 种土质挖掘难度对比

1) 抗剪强度: 连云港港土质的抗剪强度高, 即土壤黏聚力较大, 颗粒之间黏结紧密, 耙齿挖掘阻力较大, 因此挖掘难度较大。

2) 粒径: 硬质黏土的中值粒径很小, 以粉、黏粒为主, 含水率很低, 渗透系数很小, 致使水流无法快速补充到剪胀区, 就会形成负压区, 从而导致切削阻力增大。

3) 黏聚力: 一般耙头在挖掘过程中需借助水流的冲刷作用带走部分泥沙。连云港港土质黏聚力较大, 在挖掘过程中不易坍塌, 且在低速水流作用下不会被冲刷, 使得泵吸水流的冲刷效果非常小。

## 2 “新海牛”轮高效挖掘黏土耙头高压冲水系统

要由供水泵、高压泵站、耙管上的高压管路和耙头组成。由 2 台离心式供水泵将海水供给泥舱甲板的高压泵站, 供水泵的流量为 140 m<sup>3</sup>/h、扬程 45 m, 高压泵站组增压至 5~38 MPa, 高压管路通过伺服架及耙管铺设至耙头上三进三出高压分配阀块(图 2), 直至耙头耐磨块、耙齿及格栅防堵喷嘴喷射出水, 切割硬质黏土由大块破碎成小块, 在提高挖掘效率的同时防止耙头格栅处堵塞。



图 2 高压管路布置

高压冲水系统(压力 38 MPa, 流量 48 m<sup>3</sup>/h)主

## 2.1 高压泵站性能参数

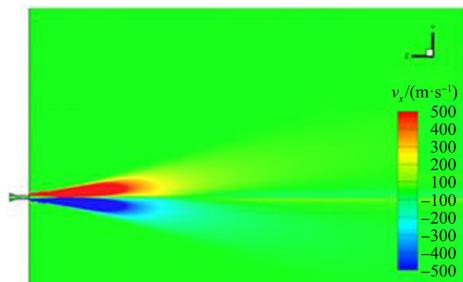
高压泵站由柴油机、联轴器(离合器)、减速箱、传动轴、高压柱塞水泵组成。柱塞泵持续工作时排出压力最高可达 38 MPa, 主要技术参数见表 2。

表 2 高压泵站主要技术参数

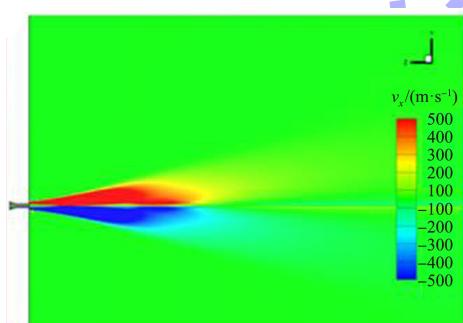
最高理论压力/MPa	最大理论流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )
97.5(流量 0.35 $\text{m}^3/\text{min}$ )	1.56(压力 25.75 MPa)

## 2.2 高压冲水喷射数值模拟

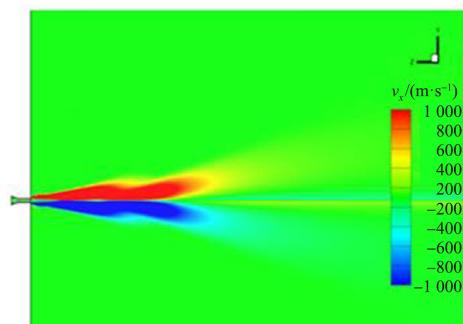
不同高压冲水喷射流速分布数值模拟结果见图 3。



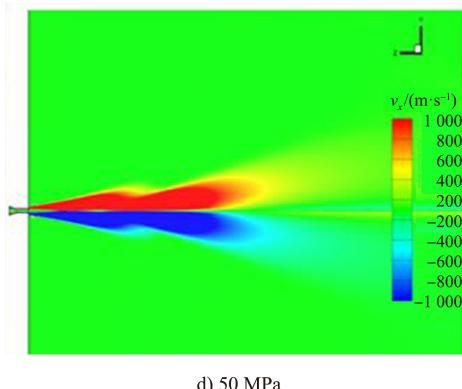
a) 10 MPa



b) 20 MPa



c) 30 MPa



d) 50 MPa

图 3 不同高压冲水喷射数值模拟

从图 3 可知, 随着高压冲水压力的增加, 涡量场影响的范围明显增加, 且涡量的幅值也在增加。当射流压力超过 30 MPa 后, 涡量场中会形成二次涡的现象, 涡量场的变化范围先增加后减小, 到一定程度后又迅速增加并向下游扩展<sup>[3]</sup>。

## 2.3 高效挖掘黏土耙头内部结构

在耙头固定体上安装三进三出控制阀块, 通过控制阀调节出口流量。3 根软管总成分别与耙头的耐磨块喷头、耙齿喷头、防堵喷头入口连接, 高压冲水耙头喷口理论出口流速为 235 m/s, 而常规挖掘型耙头理论射流流速 42 m/s<sup>[4-5]</sup>。高流速高压冲水切削泥土后, 增加了耙齿破土能力和提高切削效率, 从而减轻了对耙头质量的需求, 达到辅助切削的目的(图 4)。

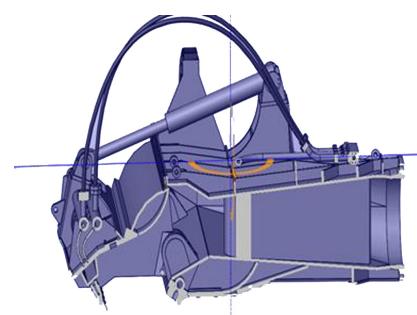


图 4 高效挖掘黏土耙头三道高压冲水辅助切削

## 2.4 智能化、可视化控制系统

耙吸船高效挖掘黏土耙头自动化控制系统为高压泵站、供水泵以及其他辅助设备提供一套完整的集信号采集、远程控制、设备报警监测和网络通讯为一体的智能化、可视化控制系统, 如图 5 所示。

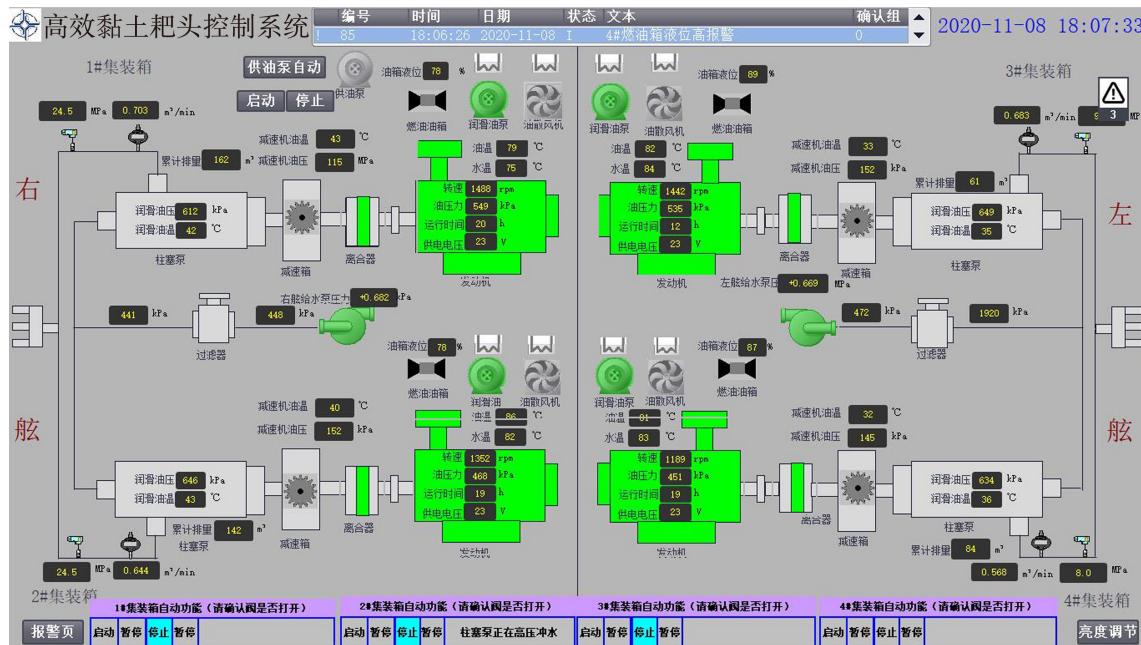


图 5 智能化、可视化的控制系统

该控制系统采集高压泵站的柴油机、离合器等设备相关的运行、故障等状态信号, 操作人员通过驾驶室可视化人机界面(HMI)远程操作4套动力站中柴油机启/停、调速、紧停, 离合器的脱/合排及供水泵启/停、动力站润滑电机、油散电机启/停等动作, 体现系统的高集成化、模块化和远程化, 实现“一键启动”功能。

## 2.5 风险辨识及安全管理要求

常规高压冲水系统的最高压力为1.8 MPa, 而高效挖掘黏土耙头系统最大工作压为38 MPa, 这是本系统的风险点。为保证安全作业, 除了设计时充分考虑满足相关规范要求外, 还着重采取以下安全防护措施: 1) 耙管须下放至吸口到位时, 方可“一键启动”; 2) 甲板上防护措施: ①泵组出口至伺服架处的钢管法兰外部采用5 mm不锈钢板进行防护; ②软管总成选用国外进口防崩链进行安全防护; ③耙管弯管艏艉处设置《高压危险》警示标记, 并设置防护板, 防止人员接近。

## 3 工程应用

### 3.1 清水工况及挖泥工况测试

从清水及挖泥工况测试可以看出, 在关闭格栅防堵喷嘴的状态下, 排出压力为22.6 MPa; 挖

泥工况测试中, 在耙头两路喷嘴全开状态下(关闭防堵喷嘴), 排出压力为27.7 MPa。由于柴油机转速最高为1 800 r/min, 从调试结果可以看出柱塞泵排出压力可达38 MPa的设计压力要求。从图6可见, 喷嘴出口流速快, 水能量较大, 调试时可见船舶尾部较远处的水质被搅动的现象。



图 6 测试期间耙头喷嘴射流

### 3.2 同类型船舶施工产量对比

从实际挖泥工况可以看出, 在高压泵站排出压力为10 MPa以上时, 泥浆密度最高可超过1.2 t/m<sup>3</sup>, 在记录时间段内平均疏浚密度可达到1.13 t/m<sup>3</sup>左右。从表3可知, 在同一项目工程的同类型船舶平均挖掘时间为3.37 h, 平均挖掘效率为1 145 m<sup>3</sup>/h, “新海牛”轮平均挖掘时间为2.62 h, 平均挖掘效率为1 282 m<sup>3</sup>/h, “新海牛”轮平均挖掘效率提高了12%。总体而言, “新海牛”轮高效挖掘黏土耙头高压冲水系统对连云港土质的挖掘效果优于同

类型船舶。

表 3 同类型船舶施工效率对比

船型	船次	挖泥时间/h	船载土方/m <sup>3</sup>	挖掘效率/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
同类型船舶	1	3.47	3 984	1 149
	2	3.07	3 844	1 253
	3	3.58	3 734	1 042
	4	3.17	3 748	1 184
	5	3.40	3 927	1 155
	6	3.42	3 982	1 165
	7	3.47	3 715	1 072
“新海牛”轮	1	2.78	3 347	1 202
	2	2.00	2 797	1 399
	3	2.87	3 628	1 266
	4	2.43	3 220	1 323
	5	2.92	3 520	1 207
	6	2.53	3 087	1 219
	7	2.83	3 840	1 355

## 4 结论

1) 为解决耙齿难以进入硬质黏土等难题, 研制一套具有自主知识产权的高效挖掘硬质黏土耙头系统(最大压力为 38 MPa, 流量 48 m<sup>3</sup>/h), 采用“高压头、低排量”的模式代替普通挖掘型耙头的“低压头、大排量”模式, 减少挖掘阻力, 有效降低堵耙问题, 增加破土能力。

2) “新海牛”轮的高效挖掘黏土耙头高压冲

水系统是一套综合信号采集、远程控制、设备报警监测和网络通讯为一体的智能化、可视化控制系统, 通过高压泵站平台离合器合排、脱排条件界面, 可实现“一键启动”。

3) 在高压泵站排出压力为 10 MPa 以上时, 依靠高速水流冲刷破碎泥块, 降低土壤颗粒间有效应力, 有效减少堵耙问题, 增加破土能力, 提高了船舶疏浚效率, 为连云港航道疏浚工程提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] STEFAAN V. Dredging stiff to very stiff clay in the Wielingen using the Dracula system on a hopper dredger[J]. *Terra et aqua*, 2002(12): 3-8.
- [2] 郑金龙, 石启正, 梁一凡. 大型耙吸船高效挖掘黏土专用耙头的研发[J]. *水运工程*, 2018(9): 205-209.
- [3] 洪国军, 王健, 林风. 自航耙吸挖泥船耙头模型试验研究[J]. *中国港湾建设*, 2008, 28(4): 19-22.
- [4] 石启正, 郑金龙. 耙吸船超高压冲水耙头集管数值模拟[J]. *水运工程*, 2019(4): 15-20.
- [5] YIN J F. Study on mechanism of cutting hard soil by high pressure water jet[C]//Proceedings of the Twenty-ninth(2019) International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii: [s.n.], 2019: 2831-2835.

(本文编辑 郭雪珍)

## · 消息 ·

### 江苏南通港小庙洪上延航道工程通过交工验收

近日, 由中交上航局设计施工的江苏南通港小庙洪上延航道工程(一阶段)通过交工验收。该项目航道全长约 25.5 km, 其中一阶段长度约 19.2 km, 通航宽度为 246 m, 主要建设内容包括基建性疏浚、航道维护疏浚、临时围埝、导助航工程等。项目吹填排距 27 km, 为目前世界疏浚工程中最长排距。建设团队创新采用高功率绞吸船和接力泵船(站)串联施工方式, 并利用可视化视频监控系统和无人机自动系统动态巡查施工状态, 保障了施工安全与工程质量。

项目的建成, 标志着通州湾主港区迈入 5 万吨级时代, 对统筹优化通州湾主港区生产力布局, 完善集疏运体系, 落实长三角一体化国家战略, 推动江苏沿海开发具有重要意义。

[https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202110/t20211021\\_144515.html](https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202110/t20211021_144515.html) (2021-10-21)