

封开江口至肇庆大桥段 159km 航道的设计通航尺度为 4.5m×135m×670m。主要工程措施为筑坝、清礁、疏浚、护岸、桥梁防撞、航标以及配套工程等, 工程实施后, 实际航道航槽水深全线达到 3000 吨级航道扩能所要求的 4.5m 水深, 全面实现 3000 吨级航道整治目的。西江航运干线货运量连续 8 年创历史新高, 2024 年货运量为 2.24 亿吨, 同比上涨 22.06%, 航道整治作用效果明显。

### 3 整治思路变化分析

上世纪 90 年代之前, 在西江干流航道整治工程中, 采用以筑坝为主、疏浚为辅的方法, 以丁坝群为主对浅滩进行整治, 取得一定效果后, 再对局部浅滩进行疏浚, 整治工程取得较好效果, 航道达到设计要求的尺度, 航槽稳定。因此, 以“筑坝为主”的整治思路成为上世纪 90 年代之前对西江“四滩”浅滩进行整治的主导思路和整治方法。

21 世纪初, 西江(界首至肇庆)航道整治工程(2000 吨级)开始实施, 结合河段特性, 工程确定“四滩”的整治原则为以筑坝和炸礁为主, 与疏浚相结合的方式, 以调整枯水期河床, 尽可能减小洪中枯水流动力轴线的差异。自 2007 年底整治工程实施以来, 筑坝工程调整了水流流态, 并稳定边滩, 保护了岸坡; 疏浚及清礁工程调整了水流流态, 畅通主槽, 提高了河流的泄洪能力, 基本达到了整治效果。

近十几年来, 西江航道的水沙条件及河流特性发生了重要改变, 航道整治的目标要求也发生较大变化。航道建设中水力、泥沙因子的变化, 都会导致河床作出整体性反应, 航道整治思路应系统考虑浅滩及其上下河段, 防止出现新的浅滩, 达到标本兼治。因此, 西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程(3000 吨级)整治思路为: 通过疏浚及清礁等整治措施提高航槽水深, 使河段全线达到设计航道尺度; 以加密布置丁坝等方式进一步调整洪、枯季水流动力轴线, 必要时辅以规整边滩、保护洲滩和岸坡节点等工程措施, 全面实现 3000 吨级航道通航要求。

### 4 总结

(1) 整治思路转变影响整治措施。西江中游作为长河段、浅滩众多的典型, 在经历多次扩能升级大幅度提高航道水深, 水力和泥沙因子发生深刻变化的条件下,

仅靠传统束水攻沙理念, 即通过布置大规模丁坝群调整断面形态和水流分布的方式将难以达到预期整治效果, 还可能对河道带来严重的不良影响。新形势下西江“四滩”的整治应从浅滩本身及上下游进行系统分析研究, 进一步通过数学模型、物理模型进行模拟研究, 适当确定炸礁范围及疏浚规模, 再通过少量筑坝, 调顺水流, 以增加中枯水航槽流速、保持航槽稳定, 最终实现满足通航的航道尺度和维持航道稳定的双重目的。

(2) 碍航礁石为西江中游航道整治的关键。随着西江上游长洲枢纽运行, 水库拦截了进入河道的泥沙, 淤粗排细, 下泄水流含沙量较天然条件下减小, 一般下泄含沙量减小往往伴随着悬移质级配的变细<sup>[7]</sup>。水流具有的能量大于携带沙量所要求的能量, 水流开始从河床上卷起新的物质来补偿含沙量的不足, 造成坝下的河床开始逐渐下降, 且向下游逐渐推进。这种有选择的侵蚀过程一般会导致河床顶层逐渐粗化, 最终形成抗冲保护层。抗冲保护层形成后, 将使河床下切受到抑制, 卵石、礁石暴露而成为碍航的主因, 故西江中游段今后航道整治的关键在于碍航礁石的处理。

#### 参考文献:

- [1] 杜小燕. 西江航运干线整治工程通航安全影响与对策研究 [J]. 珠江水运, 2024, (10): 28-30.
- [2] 张建林, 桂姗子, 朱俊杰, 等. 西江“四滩”高等级航道攻坚战 [J]. 珠江水运, 2017, (02): 24-27.
- [3] 王勇. 潮汐影响下西江“三滩”的航道整治工程研究 [D]. 重庆交通大学, 2008.
- [4] 童朝锋, 卢行长, 孟艳秋. 西江四滩河段近 10 年河床变形与成因分析 [J]. 水运工程, 2016, (02): 114-120+126.
- [5] 马劲. 西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程对桥梁防船舶碰撞问题的研究 [J]. 珠江水运, 2020, (10): 70-71.
- [6] 李露露, 姚海元, 武哲宇, 等. 西江航运堵点分析及对策 [J]. 水运工程, 2024, (07): 18-23+41.
- [7] 刘临雄, 李俊娜, 黄文辉. 西江长洲水利枢纽至界首河段航道碍航分析及整治措施 [J]. 水运工程, 2020, (07): 158-163+174.

# 航道工程疏浚项目耙吸挖泥船施工工艺要点分析

曹永鑫, 杨浩

(长江宜昌航道工程局, 湖北 宜昌 443003)

**摘要:** 为探索大型耙吸挖泥船在航道疏浚项目中的应用要点及改进思路, 以某地质条件复杂的航段为例, 在概述前期疏浚情况的基础上, 对航道进行分段, 并针对性地提出疏浚施工优化思路; 对优化方案的适用性展开论证, 并对优化方案的应用要点进行阐述分析。结果表明, 大型耙吸挖泥船对于岩石类河床及以粉质黏土和淤泥质土为主的地质段均较为适用; 为保证疏浚船舶和疏浚工艺切实可行, 提高疏浚工效, 必须进行疏浚工艺适用性论证, 并结合地质条件对施工工艺做出相应改进和优化。

**关键词:** 航道工程; 疏浚项目; 耙吸挖泥船; 疏浚吹填; 装舱溢流

中图分类号: U616.2 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0073—04

为更好满足大型船舶运输、进港要求, 航道加宽加深成为必然, 也对航道疏浚提出更高要求。航道地质条件复杂, 不同土质岩性特征、硬度等不尽相同, 为确保疏浚工效, 降低施工船舶损耗及故障, 必须选择切实适用的疏浚工艺和施工船舶。近年来, 大型耙吸挖泥船因优异的性能与工效, 在航道疏浚领域日渐上风。基于此, 本文依托航道实际, 对大型耙吸挖泥船疏浚施工方案优化及施工要点展开研究, 以期对相关疏浚工艺的更好应用提供借鉴参考。

## 1 航道前期疏浚情况

某航道疏浚段长 17.088km, 河床土类型复杂, 航道疏浚面临较大难度。考虑到航道水深、宽度均较大, 工期紧张, 故通过耙吸挖泥船进行开挖疏浚。其中, 20K+000~30K+988 段河床土质以珊瑚礁石为主, 结构呈层状, 表现出一定的脆性及破碎特征, 裂隙较发育。航道水深在 14.2~19.5m 之间, 航道宽度 150m。采用耙吸挖泥船疏浚过程中, 耙头破岩能力和切削力达不到设计要求, 入土深度有限, 也无法对珊瑚礁石施加相应的碾压力, 礁石破碎效果较差。由耙头碾碎和泥泵破碎的礁石粒径相差大, 不均匀, 需通过破碎锤等破岩设备进行二次破碎, 或借助抓斗船移除。施工船舶配置量增大, 工效降低。

30K+988~37K+088 段疏浚土以粉质黏土和淤泥质土为主, 质地软弱并呈弱粘性, 沉淀效果差。结合《航道整治工程施工规范》(JTS 224-2016) 及施工经验, 耙吸挖泥船在疏浚期间主要采用短时溢流或不溢流、满舱抛泥的工艺, 挖泥时间维持在 30~40min 左右。主要

通过单船运转时间控制, 提升挖泥工效。按照以上思路施工后, 效果并不理想。因此类疏浚土沉淀及装舱效果差, 装舱系数(即耙吸挖泥船舱总容积和船舶净载重量之比)均值达不到 50%。再加上抛泥运距较远, 日产量达不到  $4.2 \times 10^4 \text{m}^3$  的计划水平。为提高航道疏浚工效, 亟待改进疏浚施工工艺。

## 2 施工方案优化及适用性

### 2.1 施工方案优化

综合考虑航道疏浚段地质条件后, 对航道展开分段疏浚施工。其中, 20K+000~30K+988 段岩石类河床地质段继续采用耙吸挖泥船岩石破碎疏浚工艺, 并对耙吸挖泥船耙头、耙齿、泥泵等装置进行优化, 对挖泥船对地压力、耙齿入岩角度、挖泥船航速等施工参数展开改进<sup>[1]</sup>, 以较好解决前期疏浚施工中珊瑚礁石破碎效果差, 粒径不均匀等问题。

30K+988~37K+088 疏浚土以粉质黏土和淤泥质土地质段则采用改进后的装舱溢流施工工艺。装舱溢流施工时, 在耙吸挖泥船泥舱装满后仍继续泵吸泥浆进舱, 使泥舱内表层低浓度泥浆持续从耙吸挖泥船溢流筒外溢, 在适宜的运转时间抛泥。当航道内水流条件较好时, 装舱溢流出的泥沙在水流的裹挟下运移至航槽之外, 有利于优化成槽效果, 提升航道疏浚工效。为较好发挥装舱溢流技术优势, 应严格控制溢流时间, 并根据河床地质适时调整, 以确保耙吸挖泥船泥舱装载量<sup>[2]</sup>。

按照以上思路改进后, 该航道岩石类河床段及疏浚土以粉质黏土和淤泥质土地质段疏浚抛填施工流程均按图 1 展开。

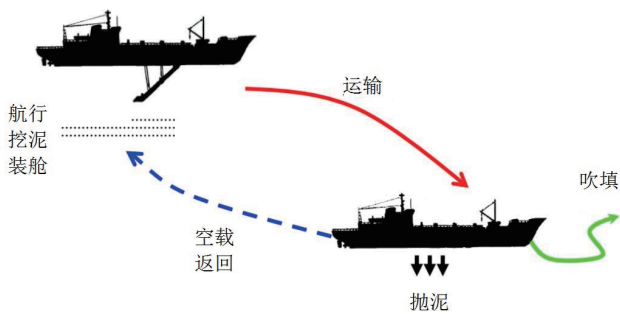


图1 航道疏浚抛填流程

## 2.2 施工方案的适用性

### 2.2.1 耙吸挖泥船疏浚工艺的适用性

根据形成机理,岩石可分为岩浆岩、沉积岩及变质岩等。岩石可破碎程度直接关系到岩石类河床地质段耙吸挖泥船疏浚工效。强度低、风化程度高、完整性差、胶结结合孤立且抗压强度与抗拉强度之比 < 9.0 的脆性岩石切削难度小,疏浚期间极易产生岩片和岩屑。而力学性能相反且抗压强度与抗拉强度之比 > 15.0 的延性岩石存在较大切削难度,对挖泥船耙头磨损严重,切削时基本无岩片产生。从疏浚性能方面看,脆性岩石更适宜耙吸挖泥船切削疏浚。

### 2.2.2 装舱溢流工艺的适用性

装舱溢流损失量受耙吸挖泥船泥舱结构、河床泥沙组分及级配影响较大,故该施工方案的选用面临较大难度,本研究主要通过固体颗粒沉降公式和悬浮颗粒扩散公式进行固体颗粒沉降速率及疏浚物运移距离计算,根据计算结果判定装舱溢流施工工艺的适用性。

#### 2.2.2.1 固体颗粒沉降速率

根据《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42-2010),当粒径 ≤ 0.062mm,粒径在 0.062~2.0mm 之间,粒径超出 2.0mm 时,分别按照斯托克斯沉速公式、过渡区沉速公式、牛顿紊流区沉速公式进行固体颗粒沉降速率计算<sup>[3]</sup>,公式如下:

$$\omega = \frac{g}{1800} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{D^2}{\nu} \quad (1)$$

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} (\rho_s / \rho_w - 1)^{1/3} \nu^{1/3}} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\omega g^{1/3} (\rho_s / \rho_w - 1)^{1/3} D}{10 \nu^{2/3}} \quad (3)$$

$$\omega = 0.577 \left[ \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g D \right]^2 \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为待疏浚航道水体中固体颗粒沉降速率,

cm/s;  $\rho_s$  为待疏浚航道水体中泥沙密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为待疏浚航道水体中清水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $D$  为待疏浚航道水体中固体颗粒粒径, mm;  $\nu$  为待疏浚航道水体粘滞系数, cm<sup>2</sup>/s;  $S_a$  为待疏浚航道水体中固体颗粒沉降速率判数;  $\varphi$  为待疏浚航道水体中固体颗粒粒径判数。

#### 2.2.2.2 悬浮颗粒运移距离

待疏浚航道水体中固体颗粒疏浚泥沙受到风、波浪、潮涌的耦合作用,运移方向缺乏固定性。悬浮颗粒运移距离可根据沉降速率,结合水动力边界条件及扩散输移方程展开联合求解。悬浮颗粒运移方程和悬浮颗粒淤积所引起的泥沙覆盖层厚度方程如下<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} = \frac{F_s}{H} + D_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\rho'_s \partial \zeta}{H \partial t} = 0 \quad (6)$$

式中:  $S$  为待疏浚航道水体含沙量均值, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为水沙运输时间, s;  $u$ 、 $v$  为待疏浚航道  $x$  向和  $y$  向的垂线流速分量均值, m/s;  $F_s$  为源汇项,为沉降项和挖泥源项之和;  $H$  为待疏浚航道实际水深, m;  $D_x$ 、 $D_y$  为待疏浚航道  $x$  向和  $y$  向泥沙紊动扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $\rho'_s$  为待疏浚航道泥沙淤积后的干密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\zeta$  为待疏浚航道泥沙覆盖层厚, m。

坐标原点设置在耙吸挖泥船泥舱中心,以挖泥船边界 2.0m 处泥沙浓度为挖泥源项,将扩散边界处含沙量及泥沙覆层厚度均拟定为 0。在具体施工工况下,进行方程极值计算,即可得到悬浮颗粒运移距离。若计算出的悬浮颗粒运移距离超出挖槽长度,表明颗粒会随水流运移至航槽外部,采取装舱溢流施工工艺有利于提高疏浚工效。对于环保要求较高的航道段,可根据悬浮颗粒运移距离进行疏浚影响范围判定<sup>[5]</sup>。

该航道 30K+988~32K+088 段土质以粉质黏土为主,设计挖深 20.8m;挖泥运输距离为 28.5km,往返 1 次耗时 3.8h。航行和吹填时间在日疏浚总时间中占比较高,挖泥时间显然不足。为此,交通局航道管理处决定对该段航道采用装舱溢流施工工艺,以提升疏浚工效。施工区挖槽长和宽为 2000m 和 400m,航道中线与水流形成 58°~60° 夹角;水体中悬浮颗粒粒径在 0.02~0.04mm 之间;水流流速均值为 1.849km/h,平均水深 18.9m,含沙量均值为 0.28kg/m<sup>3</sup>。挖泥源项处泥沙沉降几率按 0.3 确定,泥沙质量浓度按 2.0% 取值;悬浮物紊动扩散方面暂不考虑。将相关参数取值代入式(5),求出的泥

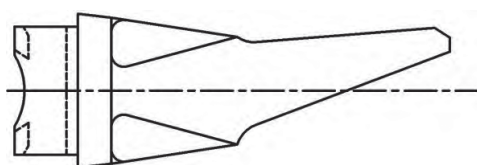
沙运移距离约为 5385m，远超出挖槽长度，故装舱溢流施工工艺对该航道段疏浚完全适用。

### 3 耙吸挖泥船施工工艺

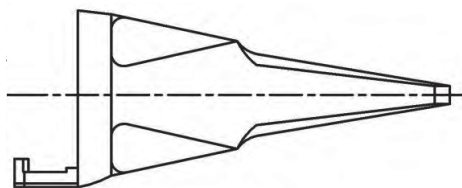
#### 3.1 岩石类河床地质段疏浚

##### 3.1.1 耙吸挖泥船装置优化

(1) 耙头及耙齿。通过安放压铁等方式增大耙头自重，增强其对珊瑚礁石的压力和破碎力。同时，在耙头格栅、挡板等接触面增设抗磨损材料，防止结构过度磨损，增强耙头破岩期间船舶抗震性能。入岩集中、破岩能力较强的耙齿有尖齿、凿齿和板齿等，剖面结构见图 2~4。该航道 20K+000~30K+988 岩石类河床地质段珊瑚礁石强度不高，脆性特征明显，故采取尖齿、凿齿和板齿“2-2-1”间隔布置方式（即 2 个尖齿、2 个凿齿、1 个板齿循环布置），以增大耙齿入岩面积，提升耙齿挖掘强度。

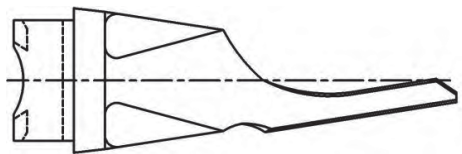


(a) 纵剖面

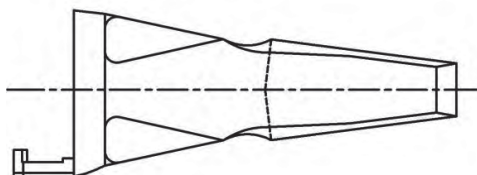


(b) 横剖面

图 2 尖齿

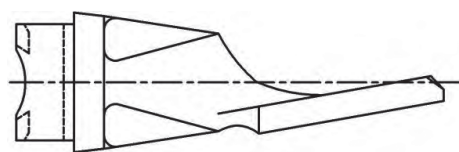


(a) 纵剖面

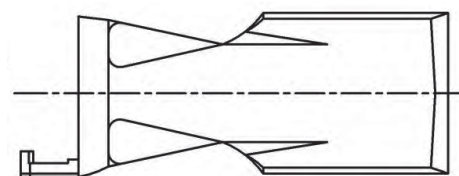


(b) 横剖面

图 3 凿齿



(a) 纵剖面



(b) 横剖面

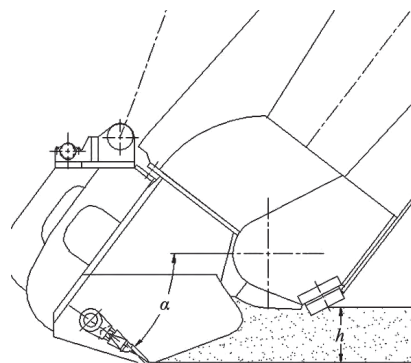
图 4 板齿

(2) 泥泵。对于珊瑚礁石等岩石类河床土质，应选用过流通道较大的泥泵叶轮，以减小大粒径礁石堵塞叶轮的可能。此外，选配汽蚀余量较小的泥泵，以提高开挖期间的可用真空值，并使耙头有效压差增大，较好发挥耙吸挖泥船“吸收”礁石的能力。

##### 3.1.2 施工参数改进

(1) 对地压力。耙头对地压力的提高能使耙头破岩能力提升，还能在土质变化时灵活调节耙头破土能力，扩大耙吸挖泥船的适用范围。应用过程中，只需在施工船舶上安装波浪补偿器，通过调节波浪补偿器补偿压力，选择效率较高的对地压力参数。

(2) 入岩角度。耙吸挖泥船耙齿入岩角度关系到耙齿对珊瑚礁石的切削方向和切削效果，并影响到航道疏浚工效。疏浚前，由技术人员根据航道实际挖深、耙管角度、耙齿安装条件，通过调节耙臂绞车、耙唇角度，使耙头达到最佳入岩角度。耙齿入岩角度示意图 5。



$\alpha$ —耙齿入岩角度， $^{\circ}$ ；h—耙齿切削深度，mm

图 5 耙齿入岩角度示意

#### 3.2 装舱溢流

30K+988~37K+088 段疏浚作业时，耙吸挖泥船主要位于挖槽内，泵吸疏浚土并装入泥舱。待泥舱实际装