

Research on dredging construction technology in shallow beach and shoal areas

Xiaoliang Fan

China Electric Power Construction Group Fifteenth Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

This paper takes the dredging project in the shallow coastal beach area as the research object, focusing on the suction dredger construction, systematically analyzing its process characteristics, parameter optimization and environmental adaptability. Through measured data and case verification, the construction parameter combination and process improvement scheme of the suction dredger suitable for beach area are proposed. The results show that in muddy beach, when the cutter speed is controlled at 15-20r/min, the mud concentration is at 15%-20%, and the discharge distance is optimized to 3-5km, the comprehensive efficiency is increased by more than 30%. At same time, the impact of construction on the environment can be reduced and the survival rate of benthic organisms and the water quality can be guaranteed by ecological barriers, flocculant and other measures. The research results take into account the construction efficiency and ecological protection, and can provide technical reference for the same type of shallow coastal beach dredging project.

Keywords

shallow beach shoal; cutter suction dredger; dredging process; parameter optimization;

浅海滩涂地区清淤施工技术研究

范小亮

中国水电建设集团十五工程局有限公司，中国·陕西 西安 710000

摘要

文章以浅海滩涂地区清淤工程为研究对象，聚焦绞吸式挖泥船施工技术，系统分析其工艺特点、参数优化及环境适应性。通过实测数据与案例验证，提出适用于滩涂区域的绞吸船施工参数组合与工艺改进方案。研究表明，在淤泥质滩涂中，绞刀转速控制在15-20r/min、泥浆浓度保持15%~20%、排距优化至3-5km时，综合效率提升30%以上。同时，通过生态围隔、絮凝剂添加等措施，可降低施工对环境的影响，保障底栖生物存活率与水体质量。研究成果兼顾施工效率与生态保护，可为同类浅海滩涂清淤工程提供技术参考。

关键词

浅海滩涂；绞吸式挖泥船；清淤工艺；参数优化

1 引言

浅海滩涂作为海陆交互敏感带，淤积问题严重制约其生态调节与经济开发功能。绞吸式挖泥船因连续作业、精准控制等优势，成为该区域清淤主流设备，但浅水区潮汐变化、淤泥质地质及高生态敏感性，对施工提出特殊要求。本文以浅海滩涂清淤工程为对象，结合实测数据与案例，聚焦绞吸式挖泥船工艺特点、参数优化及环境适应性，构建适配技术体系，旨在兼顾施工效率与生态保护，为同类工程提供参考。

2 浅海滩涂环境特征与清淤挑战

2.1 水文地质特征

水文条件复杂多变：浅海滩涂平均水深仅0.5-3m，属典型浅水区，直接限制大型设备吃水深度，传统清淤设备难以适配。区域内潮差达2-4m，潮汐涨落导致水深短时间剧烈波动——涨潮时水流速度骤增至0.3-1.2m/s且方向周期性反转，易造成绞吸船定位偏差、泥浆输送不稳。更棘手的是，水体悬浮泥沙含量高达2-5kg/m³，既遮挡观测设备视线、降低作业精度，又与绞刀切削泥浆混合后难以控制浓度，浓度过高易堵管，过低则降低效率，大幅增加施工参数调控难度。

地质组成以淤泥为主：地质以淤泥为核心，粒径<0.075mm的细颗粒占比达60%-90%，兼具粉砂（0.075-0.005mm）与贝壳碎屑。粉砂形成局部致密夹层，贝壳碎屑加速绞刀磨损，破坏地质均一性。物理特性上，地质松散高含水、孔隙率大、黏结力弱，抗剪强度仅<10kPa（远低于

【作者简介】范小亮（1988-），男，中国陕西咸阳人，本科，工程师，从事水利、港航、铁路、桥梁、公路等研究。

常规水域）。施工中，细颗粒淤泥易黏附绞刀形成“糊刀”，需频繁停机清理；同时，松散地质承载力不足，绞吸船易下陷倾斜，不仅影响作业精度，更可能因过度接触导致设备损坏，威胁施工安全。

生态系统敏感性高：作为海岸带生物多样性关键区，浅海滩涂是底栖生物核心栖息地。若施工扰动过大，绞刀会破坏底栖生物洞穴与附着基质，导致生物窒息或迁移；泥浆扩散覆盖植被根系，阻碍其呼吸与养分吸收，最终打破生物与植被的共生关系，引发生态失衡。

2.2 清淤工程难点

设备适应性不足：传统绞吸式挖泥船的最小吃水深度普遍 $\geq 1.5m$ ，而浅海滩涂平均水深仅 $0.5\text{-}3m$ ，且受潮汐影响水深波动大，易出现设备搁浅风险，导致施工中断；同时，传统设备的绞刀功率、泥泵扬程等参数难以适配淤泥质地层的切削与输送需求，易出现“切削效率低”“堵管”等问题。

施工效率波动显著：潮汐涨落是影响浅海滩涂施工的

关键因素——涨潮时水深增加但水流速度快，可能导致绞刀定位偏差；落潮时水深骤减，设备易陷入淤泥或搁浅。综合来看，潮汐作用导致每日有效作业时间仅为 6-8 小时，远低于常规水域施工时长，严重制约工程进度。

生态风险管控难度大：清淤过程中，绞刀切削与泥浆输送易导致水体中悬浮颗粒物浓度骤升，使水体浊度(NTU)超过 500，遮挡阳光照射，影响水生植物光合作用；同时，扩散的泥浆可能覆盖底栖生物栖息地，导致生物窒息死亡；若泥浆中携带污染物，还可能造成二次污染，进一步加剧生态破坏。

3 绞吸式挖泥船施工技术体系

3.1 设备选型与改造

基于浅海滩涂“浅水深、软地质、高生态敏感”的特点，绞吸式挖泥船的参数选型与结构改造需围绕“浅水适配、高效切削、精准定位”三大目标展开，具体优化参数及依据如下表所示：

参数	优化值	依据
绞刀功率	200-400kW	适配淤泥质地层的切削需求：功率过低易导致“切不动”或“糊刀”，功率过高则造成能耗浪费，200-400kW 可实现高效切削与能耗平衡
泥泵扬程	25-35m	匹配 3-5km 的优化排距：根据流体力学计算，25-35m 扬程可确保泥浆在 3-5km 排距内保持稳定流速($2.5\text{-}3.0 \text{m/s}$)，避免堵管
船体吃水	$\leq 1.2 \text{m}$ (平底船型)	提升浅水适应性：采用平底结构减少船体对地质的压力，避免下陷；吃水 $\leq 1.2 \text{m}$ 可适配大部分浅海滩涂的低潮位水深，降低搁浅风险
定位系统	GPS+ 声呐双模定位	保障施工精度：GPS 定位可实现平面位置精准控制(精度 $\pm 0.1 \text{m}$)，声呐系统可实时探测地质变化与水深，避免绞刀触碰硬质夹层(如贝壳层)。

3.2 施工工艺流程

为实现“高效清淤、精准控污”的目标，将绞吸式挖泥船施工流程划分为前期准备、核心工序、质量控制三个阶段，各阶段关键操作如下：

3.2.1 前期准备

前期准备是保障施工顺利开展与生态保护的基础，核心任务包括地质勘察与生态防护：

地质勘察：采用多波束测深仪对施工区域进行全覆盖扫描，绘制 1:500 高精度地质分布图，明确淤泥厚度、硬质夹层(如贝壳层、粉砂层)的分布范围与深度，为后续绞刀参数调整(如切削厚度、转速)提供依据，避免设备损坏。

生态防护：在施工区域周边布设生态围隔，围隔材料采用高强度 PE 膜(厚度 $\geq 0.5 \text{mm}$)搭配浮筒固定，形成封闭的施工区域，将泥浆扩散范围严格控制在 50m 以内，减少对周边水体与生物栖息地的影响。

3.2.2 核心工序

核心工序是清淤施工的关键环节，涵盖绞刀切削、泥浆输送、吹填调控三个步骤，需通过参数精准控制实现高效作业：

绞刀切削：采用闭式螺旋绞刀(直径 800-1200mm)，以扇形轨迹缓慢推进，单次切削厚度控制在 200-300mm。扇形轨迹可提高切削覆盖度，避免漏挖；200-300mm 的切

削厚度既能适配淤泥质地层的抗剪强度，又可防止因切削过厚导致泥浆浓度过高、堵管风险增加。

泥浆输送：泥泵真空度维持在 -80kPa 至 -60kPa 之间，确保泥浆吸入效率；同时将管道内泥浆流速控制在 2.5-3.0m/s，该流速既能避免泥浆在管道内沉积(流速过低易沉积堵管)，又能减少管道磨损(流速过高磨损加剧)。

吹填调控：在泥浆输送至吹填区前，按 0.1-0.3kg/m³ 的用量添加聚丙烯酰胺(PAM)絮凝剂，加速泥浆中颗粒的沉降，降低吹填区出水的悬浮物浓度，减少二次污染；同时，通过调整吹填管出口流量，避免泥浆在吹填区局部堆积，确保吹填平整度。

3.2.3 质量控制

质量控制需贯穿施工全过程，通过实时监测与精准复核确保清淤效果与生态安全：

泥浆浓度监测：采用 γ 射线密度计对管道内泥浆浓度进行实时监测，监测精度 $\pm 1\%$ ，确保泥浆浓度稳定在 15% ~ 20% 的优化区间—浓度过低会降低清淤效率(单位时间内有效淤泥量减少)，浓度过高则易导致管道堵塞。

清淤高程复核：每完成一个施工单元(面积约 50m × 50m)，采用差分 GPS 对清淤区域的高程进行复核，确保清淤后高程误差 $\leq \pm 0.3 \text{m}$ ，避免出现“超挖”(破坏基底结构)或“欠挖”(清淤不达标)问题。

4 施工参数优化与案例分析

为验证绞吸式挖泥船施工技术体系在浅海滩涂的适用性，以印尼沿海城市浅海滩涂清淤工程为案例，通过正交试验与生态监测，分析关键参数对施工效率的影响及工程的生态效益。

4.1 案例背景

该工程位于印尼爪哇岛沿海浅海滩涂区域，施工面积156万m²，清淤总量630万m³，地质以淤泥为主（粒径<0.075mm颗粒占比82%），抗剪强度6-8kPa，平均水深1.2-2.5m，潮差3.2m，周边分布有少量红树林植被。工程采用优化后的绞吸式挖泥船（平底船型，吃水1.1m，绞刀功率350kW，GPS+声呐定位），施工周期700天。

4.2 关键参数敏感性分析

通过正交试验设计，选取绞刀转速、横移速度、排距三个关键参数，分析其对清淤效率（单位时间清淤量）的影响，试验结果如下：

绞刀转速：当绞刀转速从10r/min提升至15r/min时，清淤效率逐渐提高；转速超过15r/min后，效率增长放缓，且能耗显著上升—15r/min时的切削效率较25r/min提高18%，同时能耗降低23%。这是因为过高的转速会导致绞刀与淤泥的摩擦加剧，部分淤泥被“打碎”后随水流流失，反而降低有效切削量。

横移速度：横移速度直接影响绞刀的覆盖度，当横移速度为5m/min时，控制绞刀切削轨迹的重叠率为30%，可完全避免漏挖；若横移速度提升至8m/min，重叠率降至15%，漏挖率超过12%，需二次返工，反而降低整体效率。

排距影响：排距与清淤效率呈负相关，排距每增加1km，清淤效率下降12%。这是因为排距增加会导致管道阻力增大，需提升泥泵功率以维持流速，而功率提升会增加能耗且易导致设备过载。结合效率与能耗平衡，排距应控制在3-5km，并根据排距匹配相应的管径与泥泵功率，具体匹配关系如下表所示：

排距(km)	推荐管径(mm)	泥泵功率(kW)
≤3	500	300
3-5	600	400
>5	700	500

4.3 生态效益评估

为评估工程的生态影响，在施工前、施工中、施工后分别对水体浊度、底栖生物存活率、吹填区土壤含水率进行监测，结果如下：

水体浊度恢复：施工期间，生态围隔内水体浊度(NTU)最高达480，但围隔外水体浊度始终低于80；施工结束后，围隔内水体浊度在24h内恢复至施工前水平(NTU<50)，远快于传统施工工艺的72h恢复时间，说明生态围隔与絮凝剂的应用有效控制了泥浆扩散。

底栖生物存活率：在施工区域周边设置对照组（未施工区域）与监测组（施工影响区），结果显示监测组底栖

生物存活率≥85%，而传统施工工艺下的对照组存活率仅为40%，表明优化后的施工参数与生态防护措施显著降低了对底栖生物的扰动。

吹填区土壤改良：吹填区经PAM絮凝剂处理后，土壤含水率从初始的65%降至45%，土壤孔隙度与结构稳定性显著提升，满足后续红树林植被重建的土壤条件（植被生长适宜含水率为40%~50%），实现了“清淤-改良-生态修复”的衔接。

5 技术优化方向

尽管优化后的绞吸式挖泥船施工技术体系在浅海滩涂清淤中取得了较好的效果，但结合行业发展趋势与工程需求，未来仍需从智能化、绿色化、轻量化三个方向进一步升级：

智能化升级：开发基于机器学习的绞吸船自适应控制系统，通过实时采集地质硬度、水流速度、泥浆浓度等数据，构建参数预测模型，实现绞刀转速、横移速度、泥泵功率的动态调整，避免人工参数设定的滞后性，进一步提升施工效率与精度。

绿色清淤技术推广：目前采用的PAM絮凝剂虽能加速泥浆沉淀，但仍存在少量化学残留风险。未来可推广生物酶泥浆固化技术，利用生物酶的催化作用促进泥浆颗粒团聚，减少化学药剂使用，同时提升固化后土壤的生态兼容性，更适配浅海滩涂的生态修复需求。

装备轻量化研发：针对潮间带（涨潮时水深<1m，落潮时裸露）等极端浅水环境，研发模块化绞吸船——将船体、绞刀、泥泵等核心部件设计为可拆分模块，通过小型船舶运输至现场组装，同时优化船体结构，使吃水深度≤0.8m，实现潮间带区域的高效清淤，拓展技术应用范围。

6 结语

文章围绕浅海滩涂清淤工程，深入研究绞吸式挖泥船施工技术，明确该设备在浅滩环境中的适配性关键。通过分析水文地质特征与清淤难点，优化设备参数与施工流程，结合案例验证：当绞刀转速15-20r/min、泥浆浓度15%~20%、排距3-5km时，综合效率提升超30%，且生态围隔等措施可降低环境影响。研究构建了兼顾效率与生态的技术体系，为同类工程提供参考。未来需进一步推进智能化控制与绿色清淤技术融合，助力浅海滩涂清淤向精细化、可持续方向发展。

参考文献

- [1] 王博,叶宁波,黄伟,王涛,孙立斌.浅海滩涂地区高桩承台吊箱法施工关键技术研究——以杭甬高速复线宁波一期工程滨海高架桥施工为例[J].工程技术研究,2022,7(06):1-7.
- [2] 李莉,吴莹莹,宋娴丽,邱兆星.浅析山东省滩涂贝类养殖现状与技术发展对策[J].水产养殖,2020,41(10):78-80.
- [3] 浅海滩涂和浅海资源[J].能源与节能,2020,(03):5.
- [4] 刘风学,代永辉,冯浩,王志强,高源.GPS中继站在浅海地形测量中的实际应用[J].水利科学与寒区工程,2019,2(06):96-99.