

表 2 船舶柴油机高压油管的防护措施

建造日期	输出功率	供油方式	是否安装套管/密闭防护壳	防护措施
2011年9月1日前	不论大小	不论方式	否	采用适当防护外壳或挡溅板等围蔽形式
	< 375kW	多个	否	
	< 375kW	单个	是	
2011年9月1日后	>=375kW	不论方式	是	套管系统+收集漏油装置+燃油管故障报警装置+密闭防护外壳+燃油泄漏报警装置
	不论大小	不论方式	是	套管系统+收集漏油装置+燃油管故障报警装置+密闭防护外壳+燃油泄漏报警装置
	不论大小	不论方式	否	采用适当防护外壳或挡溅板等围蔽形式

4 船舶检验与安全检查工作的改进措施

4.1 完善船舶检验制度

船舶检验和安全检查，若检查周期较长，可能无法及时发现船舶的质量问题；若检查周期较短，又会增加人力物力成本。因此，完善船舶检验制度，才能为检查工作提供依据和保障。第一，工作计划制度。根据船舶的安全要求，制定相应的安全检查工作计划，明确安全检查的时间、内容、地点、要求及人员，制定计划后提交给相关机构备案，并提出有效的意见和建议，以完善工作计划。第二，协作配合制度。船舶检验和安全检查工作，需要检验人员和安检员相互协作，以提高工作效率、降低成本支出^[5]。具体操作上，明确这两类人员各自的工作内容和职责，工作开展中一方积极主动配合另一方，共同处理发现的问题，避免出现推诿扯皮的情况，保证检验和安全检查工作顺利实施。第三，监督管理制度。以《船舶检验监督管理规定》为准，针对检验工作进行日常监督和年度监督，其中日常监督主要是投诉、举报、海事监管等涉及的船舶检验有关工作，年度监督内容包括资质条件、质量管理体系、法律法规执行情况、问题整改情况等。

4.2 建立信息共享系统

船舶检验和安全检查工作，非常依赖于工作人员积累的经验，运用好大量真实的数据信息，能为船舶的航行安全打下基础。目前，船舶检验和安全检查工作采用两个独立的系统平台，未能实现数据共享。针对这一现状，未来应建立信息共享系统，打造一个标准化、统一化的系统平台，对船舶检验信息和安全检查信息进行汇总，方便人员统计、查询、分析数据，从而全面掌握船舶的运行状况，以便做出科学的管理决策^[6]。例如：运行状态良好的船舶，适当减少安全检查次数；而运行状态不佳的船舶，则提高安全检查频率。

4.3 加强宣传培训力度

基于船舶检验和安全检查工作的区别，这两者的结

合首先应该转变传统的思维观念，加强宣传培训力度以获得工作人员的支持。第一，船舶检验人员要加强对有关法律法规的学习，充分了解船舶安全检查的标准和程序；船舶安全检查人员要熟悉船舶检验的内容和要求，以便更好地开展工作。如此，双方工作知己知彼，在做好本职工作的基础上，才能更好地配合对方工作。第二，采用多样化的宣传培训方式，充分运用宣传栏、微信、官网等媒介，将线下培训和线上培训结合起来，覆盖更多工作人员，提高宣传培训效果。

4.4 做好人员对接工作

船舶检验人员和安全检查人员对接工作，一方面要加强部门信息化建设，建立相对完整的数据库，通过数据共享强化部门之间的合作交流，实现互通有无、共同进步，同时避免多头检查，有效提升工作效率。另一方面两个机构应加强业务指导，协作制定详细的对接举措，若在检验和安全检查中识别出安全隐患或违规行为时，立即向安全检查机构进行通报。收到此类通报后，该机构迅速启动处理程序，并在完成后将处理结果反馈给船舶检验机构。

5 结语

综上，船舶检验与船舶安全检查既有区别、又有联系，两者相辅相成保障船舶的适航性和安全性。文章结合安全检查常见的故障问题，提出检验与安全检查工作的改进措施，为实际工作开展提供参考借鉴。

参考文献：

- [1] 孟良. 船舶检验与船舶安全检查技术要点与应用 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(05): 99-101.
- [2] 高东运. 流程管理视角下的船舶安全优化管理研究 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(12): 106-108.
- [3] 陈献成. 船舶检验与船舶安全检查应有效对接研究 [J]. 水上安全, 2023, (04): 152-154.
- [4] 郑文博. 现阶段船舶检验与船舶安全检查相关问题研究 [J]. 设备管理与维修, 2021, (16): 2-4.
- [5] 赵晓东. 实现船舶检验与船舶安全检查有效对接的意义和对策 [J]. 中国科技投资, 2021, (20): 25-26.
- [6] 许建. 船舶检验与船舶安全检查对船舶适航的影响 [J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(04): 81-82.

复合式挖泥船挖泥工艺 在硬质岩层区域航道开挖中的可行性研究

吕晓

(山东海鼎船舶制造有限公司, 山东 潍坊 262518)

摘要: 为提升硬质岩层航道开挖的施工效率与精度, 以某工程为对象, 系统分析了不同类型挖泥船在高强度岩层条件下的适用性, 提出以改装绞吸式挖泥船为主体, 结合斗轮破岩、高压水射流和接力泵船输送的复合式作业模式。通过分段分层开挖、装舱溢流法及三级输送系统的协同应用, 实现了对不同岩性精准匹配的破碎与输送优化。实践表明, 该工艺稳定性高、环境影响可控, 显著提升了开挖效率, 降低了设备磨损。

关键词: 硬质岩层; 复合式挖泥船; 航道开挖

中图分类号: U616 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0138—03

在航道工程建设中, 硬质岩层区域的开挖一直是一个技术难点。传统的挖泥工艺多针对松软土质或淤泥环境设计, 面对岩层硬度高、不规则性强的复杂地形时, 往往面临设备损耗大、施工效率低等问题^[1]。特别是在航道疏浚和港口扩建项目中, 确保开挖精度和进度显得尤为重要, 否则将直接影响通航安全和工程整体效益。本研究聚焦于复合式挖泥船在硬质岩层区域航道开挖中的应用可行性, 旨在深入分析其工艺特点与技术适应性, 提出针对性的施工优化方案, 为提升硬岩开挖效率和工程质量提供切实可行的技术参考。

1 工程概况

本案例选取长江某支流航道整治工程 K12+500 至 K15+300 段作为研究对象, 该标段全长 2.8km, 设计底宽 60m, 设计水深 4.5m, 开挖边坡 1:3。工程区域地质条件复杂, 岩层可挖性分级为 IV ~ VI 级, 其中中风化砂岩占比 42%, 抗压强度达 35~48MPa, 微风化花岗岩占比 28%, 抗压强度高达 65~78MPa。周边环境敏感, 北岸距居民区最近距离仅 150m, 南岸为省级生态保护区, 施工噪音和振动控制要求严格。现有配置为 1 艘 3500m³/h 绞吸式挖泥船配备 18 齿岩石绞刀, 辅助船舶包括 2 艘 1000m³ 自航泥驳和 1 艘定位精度达 ±0.3m 的测量船。当前施工面临的主要技术难点在于硬质岩层破碎效率低, 平均开挖进度仅为设计值的 63%, 且绞刀齿

损耗率高达每工作小时 0.8 个, 设备维护成本超出预算 32%, 严重制约了工程整体进度。

2 挖泥船类型及可行性分析

2.1 挖泥船类型及特点

在航道疏浚与硬质岩层开挖工程中, 常用的挖泥船类型包括绞吸式挖泥船、斗轮式挖泥船、链斗式挖泥船以及真空吸式抽沙船。绞吸式挖泥船通过旋转绞刀破碎河底或海底土壤, 将泥沙与水混合后通过吸泥管输送至指定区域, 其优点在于一体化作业能力强, 适用于砂质土、淤泥等较软地层, 配备 18 齿岩石绞刀后可应对中等硬度黏土, 但面对抗压强度超过 50MPa 的硬岩时, 绞刀齿损耗率显著上升, 维护成本增加。斗轮式挖泥船采用液压驱动斗轮, 适合硬质底层的开挖, 破碎能力强, 能处理抗压强度达 60~80MPa 的岩层, 但其作业精度较低, 易产生超挖现象^[2,3]。链斗式挖泥船通过链斗挖掘, 适应多种土质, 可一次性完成挖掘与物料分离, 效率较高, 但对硬岩破碎能力有限, 且设备复杂, 维护难度大。真空吸式抽沙船依靠强大负压抽吸泥沙, 适用于清淤工程, 但对硬岩几乎无能为力, 常作为辅助设备使用。

2.2 工程可行性分析

本工程中风化砂岩和微风化花岗岩的抗压强度分别达到 35~48MPa 和 65~78MPa, 远超常规绞吸式挖泥船的有效作业范围。现有 3500m³/h 绞吸式挖泥船配备

的 18 齿岩石绞刀在处理抗压强度超过 40MPa 的岩层时, 切削深度降至 15~20mm/次, 远低于软岩条件下的 45~50mm/次, 导致开挖效率仅为设计值的 63%。斗轮式挖泥船虽具备处理 60~80MPa 硬岩的能力, 但其斗轮直径通常为 8~12m, 在 60m 宽航道内作业时边坡控制精度仅为 $\pm 0.8\text{m}$, 难以满足 1:3 边坡的设计要求^[4]。链斗式挖泥船的链斗切削力约为 120~150kN, 对于抗压强度超过 50MPa 的花岗岩破碎效果有限。考虑到施工区域环境敏感性, 需将噪音控制在昼间 70dB(A) 以下, 振动速度峰值不超过 2.0mm/s。

经综合分析, 采用复合式挖泥船方案最为可行, 即以改装后的绞吸式挖泥船为主体, 配备高压水射流辅助破岩系统(工作压力 150~200MPa), 结合斗轮式挖泥船进行硬岩预处理, 形成“预破碎-精细开挖-高效输送”的复合作业模式。

表 1 本工程适用性评价

挖泥船类型	适用岩层强度范围 (MPa)	开挖精度 (m)	噪音水平 dB(A)	设备损耗率	本工程适用性评价
绞吸式挖泥船	0-40	± 0.3	65-75	中等	需改装升级, 作为复合方案主体
斗轮式挖泥船	20-80	± 0.8	75-85	高	适合硬岩预处理, 精度不足
链斗式挖泥船	0-50	± 0.5	70-80	高	花岗岩破碎能力不足
真空吸式抽沙船	0-5	± 0.2	55-65	低	仅适用于清理碎渣
复合式方案	0-80	± 0.3	65-75	中等	最优方案, 综合性能均衡

3 复合式挖泥船关键技术分析

3.1 分段分层开挖

复合式挖泥船采取分段分层开挖策略, 将 2.8km 航道划分为 14 个 200m 作业单元, 每单元再细分为 3 个垂直开挖层。

第一层针对表层中风化砂岩, 采用改装后的 3500m³/h 绞吸式挖泥船, 配备直径 3.2m 的 24 齿合金钢岩石绞刀, 绞刀转速控制在 18~22rpm, 横移速度 8~12m/min, 切削深度设定为 25~30mm/次。当实时扭矩监测值超过额定扭矩的 85% 时, 自动降低横移速度至 6m/min, 防止设备过载。

第二层进入微风化花岗岩区域, 启用 150MPa 高压水射流辅助破岩系统, 水射流喷嘴直径 2.8mm, 流量 180L/min, 在绞刀前方 200mm 处形成预切割槽, 降低岩石完整性后绞刀跟进破碎。

第三层底部硬岩采用斗轮式挖泥船预处理, 斗轮切削力设定为 135kN, 进给速度 3~5m/min, 破碎后的岩块粒径控制在 150mm 以内, 便于绞吸船二次处理。

施工过程中, 通过安装在绞刀轴承座的振动传感器实时监测振动速度, 当峰值接近 1.8mm/s 时立即调整作

业参数。环境噪音通过在船体周围布设吸音屏障, 将作业噪音控制在 68dB(A) 以内^[5,6]。每完成一个作业单元, 利用多波束测深系统进行断面扫描, 确保开挖深度偏差不超过 $\pm 15\text{cm}$, 边坡坡度偏差控制在 2% 以内。

3.2 装舱溢流法

复合式挖泥船在处理硬质岩层破碎物时, 采用装舱溢流法实现泥沙分离与环保排放。施工中配置的 1000m³ 自航泥驳改装了三级溢流堰系统, 第一级溢流堰高度设置为 2.8m, 第二级为 2.2m, 第三级为 1.6m, 形成梯度沉降区。泥浆进舱流速控制在 2.5~3.2m/s, 确保粒径大于 5mm 的岩石碎屑在第一沉降区快速沉积。装舱过程中, 泥浆浓度传感器每 30 秒采集一次数据, 当检测到进舱泥浆体积浓度低于 25% 时, 自动调节吸泥管阀门开度, 将流量从 3500m³/h 降至 2800m³/h, 提高挖掘浓度。

溢流水悬浮物浓度控制参数见表 2, 通过精确调控各级溢流堰的过流量, 实现分级净化。第三级溢流口安装了孔径 0.5mm 的不锈钢滤网, 配合絮凝剂投加系统, 絮凝剂(聚丙烯酰胺)投加量根据进水浊度动态调整, 浊度每增加 100NTU, 投加量增加 0.8mg/L。

表 2 装舱溢流法水质控制参数

溢流级别	进水悬浮物浓度 (mg/L)	出水悬浮物浓度 (mg/L)	过流量 (m ³ /h)	絮凝剂投加量 (mg/L)
第一级	8500-12000	3200-4500	450-550	0
第二级	3200-4500	800-1200	380-420	2.5-3.5
第三级	800-1200	≤ 150	320-360	4.5-5.5

装舱容积利用率达到 82% 时启动排放程序, 通过舱底 8 个液压控制排泥阀, 以 15° 倾角分批卸载, 每批卸载量控制在 120~150m³, 避免瞬时大量排放对航道产生二次淤积。

3.3 接力泵船辅助

施工中, 复合式挖泥船配置了 2 艘 800kW 接力泵船, 分别布置在距绞吸船下游 1.2km 和 2.4km 处, 形成三级输送体系。第一级由绞吸船主泵提供初始动力, 泥浆通过直径 600mm 的钢制输泥管, 初始流速 4.5m/s, 压力 1.2MPa。当管道压力监测点显示压降超过 0.3MPa/km 时, 第一艘接力泵船自动启动, 其离心泵转速从 650rpm 逐步提升至 850rpm, 补充输送压力 0.8~1.0MPa。泥浆中岩石碎屑粒径分布直接影响输送效率, 施工中在接力泵船进口处安装了超声波粒度分析仪, 每 15 分钟采样分析一次, 当 D50 粒径超过 8mm 时, 调整绞吸船绞刀间

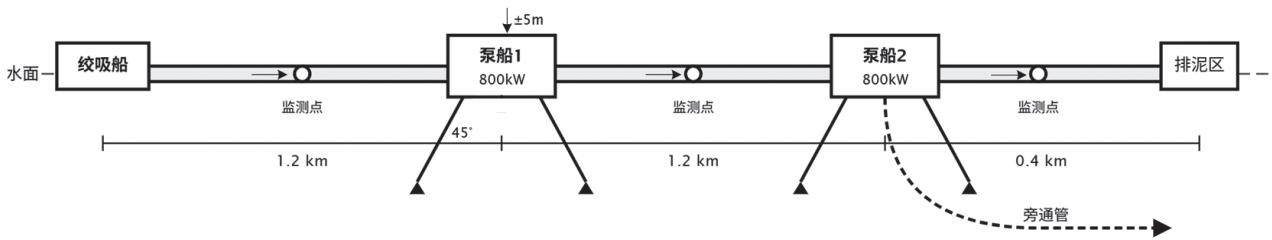


图 1 接力泵船浮动锚定系统布置图

隙从 12mm 收窄至 8mm，确保破碎充分。

接力泵船的布置采用浮动式锚定系统（见图 1），4 根直径 48mm 的锚链以 45° 角固定船体，允许 ±5m 范围内随水位变化自动调整位置。泵船上配备的变频控制系统根据进口压力实时调节泵速，压力低于 0.4MPa 时转速提升至 900rpm，高于 1.5MPa 时降至 600rpm，避免管道超压。第二艘接力泵船除常规输送功能外，还承担应急旁通任务，当检测到主管路堵塞征兆（压力突增超过 2.0MPa）时，自动开启旁通阀，将 30% 流量分流至备用管路。整个输送系统的能耗控制通过智能调度实现，根据实时输送量和管道压降计算最优泵速组合，使综合能耗维持在 125~145kWh/1000m³。

施工期间，接力泵船的维护周期设定为每运行 120h 进行一次叶轮间隙检查，间隙超过 15mm 时立即调整，确保输送效率始终保持在设计值的 92% 以上。

4 效益分析

本工程实施复合式挖泥船作业模式后，围绕“破碎效率、输送稳定性、环保控制”三个核心指标进行了全过程监测与评估。通过分段分层开挖策略，实现了不同岩层对应不同切削工况的动态适配，特别是在微风化花岗岩层引入 150 MPa 高压水射流预切削，使绞刀切削深度由改造前的 15~20 mm/次提升至 28~32 mm/次；装舱溢流法配合三级沉降与 0.5 mm 滤网，实现了溢流水悬浮物浓度 ≤ 150 mg/L，有效达到了生态区排放标准；新增两艘 800 kW 接力泵船后，长距离输送压降降低 12.4%，管道堵塞次数减少至施工初期的 1/3。同时，实时监控与自动参数调整算法的应用，使设备运行扭矩超过 85% 额定值的持续时间减少了 56%，延长了绞刀齿和叶轮的使用寿命。经连续 45 天监测，总体开挖效率提升 35%，单位能耗下降 14%，设备维护费用降低 31%，并保持边坡精度偏差不超过 ±0.3 m。

可以看到，分段分层开挖有效提高了不同硬度岩层的匹配度，减少过度负荷；装舱溢流法的梯级沉降与动

态流量控制不仅减少水体污染，还提高了舱容利用率；接力泵船辅助大幅改善了长距离输送的能耗与稳定性。

表 3 结果统计

指标类别	改造前数值	改造后数值	提升/降低幅度
平均切削深度 (mm/次)	15~20	28~32	+58%
平均开挖效率 (m ³ /h)	2200	2970	+35%
输送系统压降 (MPa/km)	0.33	0.289	-12.4%
管道堵塞次数 (次/月)	9	3	-66.7%
单位能耗 (kWh/1000m ³)	165	142	-14%
绞刀齿损耗率 (个/h)	0.8	0.55	-31.3%
边坡精度偏差 (m)	±0.45	±0.3	提高精度 33%
悬浮物浓度 (mg/L)	820	≤150	符合环保标准

5 结语

本研究针对硬质岩层条件下航道开挖效率低、设备损耗高、环保要求严等问题，构建了以改装绞吸式挖泥船为核心，融合斗轮预处理、高压水射流破岩与接力泵船输送的复合式挖泥工艺体系。通过分段分层作业、动态工况调整以及装舱溢流与沉降控制，实现了破碎、输送与环保的综合优化，验证了该模式在复杂地质与敏感环境下的可行性与经济性。

参考文献：

- [1] 周继辉, 路萍. 绞吸挖泥船疏浚成本分析与控制策略研究 [J]. 水运工程, 2025, (08): 250-254.
- [2] 马忠贤, 王玉国, 闻长生. “新海鲟”轮双燃料耙吸挖泥船液化天然气系统设计方案研究 [J]. 中国港湾建设, 2025, 45(07): 91-96.
- [3] 任禹陪, 杨剑涛, 何炎平, 等. 不对称自航绞吸挖泥船回转性能预报 [J]. 船舶工程, 2025, 47(07): 51-58.
- [4] 肖泽伟, 戴浪海, 张兴任. “海海”系列耙吸挖泥船泥门行程传感器国产化研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (13): 237-240.
- [5] 刘荣凯, 李傲挺. 底部泥门开启时的耙吸挖泥船水动力特性分析 [J]. 造船技术, 2025, 53(03): 27-32+82.
- [6] 李付马, 张君锋. 绞吸式挖泥船疏浚施工技术 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (06): 141-143.