绞吸船开挖岩石能效分析*

张　鼎[1]，李　庆[2]，程远明[1]
（1. 中交天航南方交通建设有限公司，广东 深圳 518101；2. 北部湾大学建筑工程学院，广西 钦州 535011）

摘要：绞吸船疏浚施工因其水下作业的不可视性，不仅对工程施工质量产生影响，也一定程度上影响生产性能的精确判定，准确把握绞吸船挖岩生产效率是目前工程施工急需解决的问题。以西部陆海新通道（平陆）运河入海口近海段航道工程某绞吸船开挖岩石试验工程为例，基于三维图形软件，构建航道疏浚模型，利用船舶监测系统统计数据，分析绞吸船开挖岩石施工质量和挖掘生产效率。结果表明，三维模型与监测系统统计数据相结合的分析方法在土质类别判别、统计方面更为精析，挖掘生产效率计算更为精准，施工质量分析更为直观。研究成果可为工程后期船舶施工提供参考。

关键词：平陆运河；绞吸船；挖岩；质量；挖掘生产率

中图分类号：U616+.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0190-04

Energy efficiency analysis of rock excavation by cutter suction dredger

ZHANG Ding[1], LI Qing[2], CHENG Yuanming[1]
(1. CCCC TDC Southern Communication Co., Ltd., Shenzhen 518101, China;
2. College of Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: Due to the invisibility of underwater operations, the dredging construction of cutter suction dredgers not only affects the construction quality of the project, but also affects the accurate determination of production performance to a certain extent. Accurately grasping the production efficiency of cutter suction dredger rock excavation is an urgent problem that needs to be solved in current engineering construction. Taking the rock excavation test project of a cutter suction ship in the offshore section of the Western Land Sea New Channel (Pinglu) Canal estuary as an example, based on three-dimensional graphics software, a dredging model of the channel is constructed. The construction quality and excavation efficiency of rock excavation by cutter suction dredger are analyzed based on the statistical data of ship monitoring system. The results show that the analysis method combining three-dimensional models with monitoring system statistical data is more accurate in soil category discrimination and statistics, more precise in mining production efficiency calculation, and more intuitive in construction quality analysis. The research results can provide references for ship construction in the later stage of engineering.

Keywords: Pinglu Canal; cutter suction dredger; rock excavation; quality; digging productivity

岩石类疏浚施工的传统工艺是炸礁船钻爆破碎、抓斗泥驳清渣疏运，但钻爆施工产生的振动和水下冲击波不仅影响钻爆区附近陆上建筑结构的安全，引起人的不舒适，同时对水下生物也造成较大的影响，安全隐患较大[1-2]。绞吸船是最为高效的疏浚施工设备之一，在航道疏浚、围海造地等工程中应用广泛。2005 年，中交天津航道局有限公司所属的“浚航浚 218”在广西防城港 5 万

收稿日期：2024-08-06
*__基金项目：__北部湾大学高层次人才科研启动项目（2019KYQD43）；广西教育厅高校科研项目（2022KY0414）；北部湾大学创新训练项目（S202211607215）；船舶与海洋工程一流学科成果培育基金项目（85/YLXKKY202260）
作者简介：张鼎（1984—），男，高级工程师，从事港口航道与海岸工程施工技术研究及管理工作。

水运工程

吨级航道进行挖岩施工，是国内较早开展绞吸船挖岩施工的案例。绞吸船挖岩可以避免钻爆作业振动带来的不利影响，越来越受到重视。有别于陆地土石方开挖施工，因水下疏浚作业的不可视性，无法通过视觉感观直接判别土质类别及指导开挖操作，无法对疏浚物类别、开挖工程量及相应作业时间进行精细划分和统计，一般只能进行大范围、长时间的记录统计，施工效率多以综合形式体现[3]，无法对单一岩类开挖施工效率进行精确计算，对船舶挖掘性能和生产效率的统计可能存在失真情况。现阶段绞吸船开挖岩石的研究更多关注绞吸船铰刀切削荷载[4-5]、施工工艺等方面[6-8]，对于挖岩能效精细分析方面报道较少。

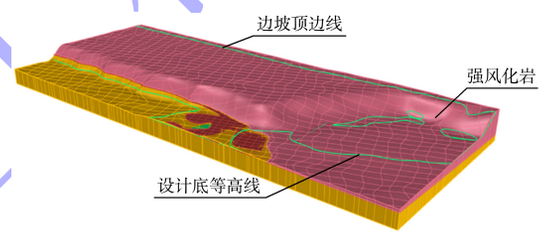
本文以某大型绞吸船西部陆海新通道(平陆)运河入海口近海段航道工程开挖岩石试验工程为背景，采用三维图形软件建模划分、统计船舶施工的岩土类别及工程量，分析疏挖施工质量，结合船舶监测系统记录的施工数据，计算其挖掘生产效率，实现单一岩类精准分析的目的，旨在为绞吸船施工提供更为科学的指导。

1　工程概况

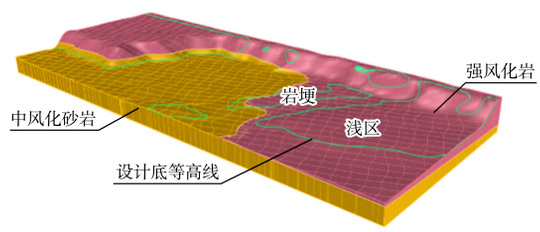
绞吸船开挖岩石试验区位于西部陆海新通道(平陆)运河入海口近海段航道工程 K122+200—K122+500 航道东侧约 50 m 范围，面积约为 1.5 万 m^2。航道设计挖宽 130 m，挖深 7.8 m。前期施工业已完成试验区西侧半幅航道的开挖和全区内覆盖层的揭除施工，设计航道断面内剩余疏浚物为强风化岩和中风化砂岩。绞吸船开挖岩石试验期间，排泥管线长度保持 1 970 m 不变，采用三泵串联施工，水下泵 1 台，舱内泵 2 台，流速可达 6 m/s。绞吸船具备强大的输送能力，对停泵时的排泥管线进行检查，未发现疏浚物着床的现象，因而在能效分析时未考虑泵送能力的影响。勘察资料显示[9]，开挖岩石试验区内中风化砂岩的饱和抗压强度最大值为 13.87 MPa，最小值为 1.94 MPa，平均值为 5.33 MPa。

2　地质建模

将带有水深数据的 CAD 文件导入 Rhion3D 软件中，利用嵌面工具形成浚前岩面，根据勘察资料的钻孔柱状图土层信息，在 Rhion3D 软件中输入中风化砂岩高程，利用嵌面工具连点成面，完成航道岩层的划分。绘制设计断面后，利用挤出工具生成设计开挖面，经过布尔运算后形成工前模型，如图 1a)所示。在进行一段时间的开挖施工后，根据最新的水深数据生成新的岩面，利用分割工具形成工后模型，如图 1b)所示。由图 1 可以看出强风化岩、中风化砂岩及设计开挖面之间的关系，试验区内全风化岩上岩面基本呈水平状，中风化岩层面向航道左边线倾斜。上部区域强风化岩开挖层较厚，设计航道底部揭露中风化砂岩占试验区面积约为 60%。



a) 开挖前



b) 开挖后

图 1　试验区岩层

Fig. 1　Rock strata of test area

3　能效分析

3.1　挖掘能力

由图 1b)可知，大部分区域的绞吸船施工开挖深度均达到设计高程要求，中风化区域未出现浅点。通过对一段时间开挖施工后的绞刀进行观察，刀齿损耗以磨损为主，少部分为掉齿，说明船舶具备较强的挖掘能力，如配合专用挖岩绞刀，该绞吸船即可挖掘平均强度为 5.3 MPa 的中风化砂岩。挖深不足的区域主要为岩层交界处和边坡

水运工程

上，可能与下刀深度的选定有关。

3.2　开挖质量

从水深测图及图 1 上可以得出，设计航道挖槽内最大挖深为 8.9 m，最小挖深为 7.4 m；已开挖施工区域内存在一带状岩埂，面积为 528 m^2，水深 7.5~7.7 m；边坡存在 3 处浅点，占已开挖面积的比重较小，总体上开挖质量较好，基本满足设计深度的要求。绞刀下放深度与实际挖深效果之间存在一定的系统差，取 3 月 28 日 3—4 时约 1 h 时段内绞刀深度的实时记录进行分析，如图 2 所示。绞刀深度实时记录数据反映，挖中风化砂岩时绞刀存在跳跃的现象，且跳幅随中风化砂岩开挖厚度的增加而增大，这与船舶实际施工动态情况是相符的。绞刀深度最大值为 9.6 m，最小值为 7 m，平均值为 8.08 m，平均值较设计底高程深 0.28 m。

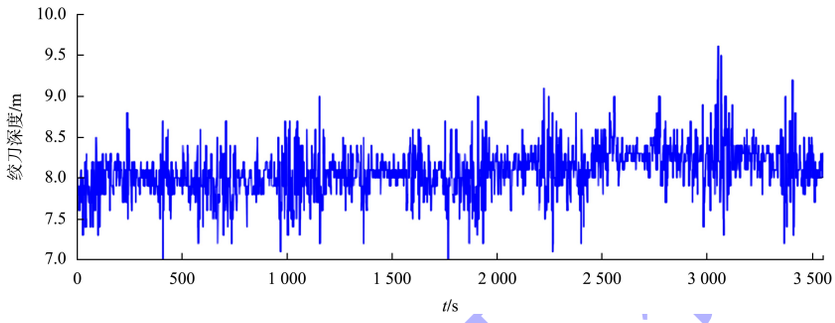


图 2　绞刀深度实时记录

Fig. 2　Real-time recording of cutter depth

不计边坡区域数据，航槽内的绞刀深度记录值分布如图 3 所示，绞刀深度主要分布在 7.8~8.3 m 之间，水深测图显示，该施工时间段内绞吸船最大挖深为 8.9 m，最小挖深为 8.2 m，平均挖深为 8.46 m，平均超深值达到 0.66 m。实际挖深平均值大于绞刀深度记录平均值，主要原因是绞吸船绞刀挖深记录起点位于绞刀轴前端中点上，高于绞刀旋转壁面。该工况条件下，绞刀下放深度与实际挖深完成面系统差约为 0.38 m，为减少超挖工程量，可适当减少绞刀下放深度。

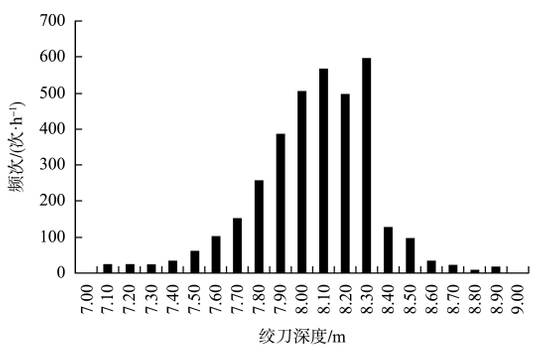


图 3　绞刀深度分布

Fig. 3　Cutter depth distribution

3.3　施工效率

3 月 28 日 3 时—31 日 2 时，绞吸船挖岩总时间为 37.8 h，时利率为 52.5%，以上作业时间未包含绞吸船施工时的到边换向、移船移锚和检机加油等时间。以绞刀下放深度、横移速度及绞刀功率为主要参考因素作为判定、划分和统计两类岩石施工时间的依据，横移速度≤5 m/min、绞刀电流成周期性突增和绞刀下放深度低于中风化砂岩岩面高程 3 个监测指标中的任何 2 个指标满足要求，即可认为所开挖的岩石种类为中风化砂岩。据此标准，对施工记录进行逐秒统计，得到强风化岩的施工时间为 15.45 h，中风化砂岩的施工时间为 22.4 h。

利用浚前、浚后两次水深测图和地层数据信息构建三维模型，得出该时段内完成施工的开挖体，如图 4 所示，完成开挖体具有面积小(约为 4 272 m^2)、边坡多(四周均存在边坡)、层面平整度较差等特点。根据规范规定[10]，航道工程量的统计一般采用断面法计量，即取两端桩号断面工程量求平均再乘以桩号间距，采用传统的断面法对此开挖体

进行计量势必存在较大的误差。利用 Rhion3D 软件建模，植入设计开挖面、中风化砂岩顶面等曲面，形成强风化岩体、设计断面内中风化砂岩体和超挖中风化砂岩体等，然后使用三维软件的物质分析工具，可以较为快速地计算各类开挖体的体积数据。

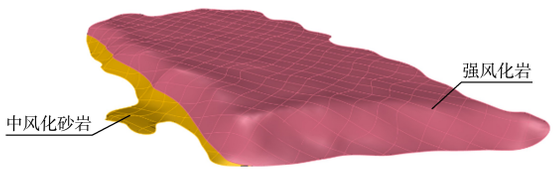


图 4　开挖体形状

Fig. 4　Excavation shape

经建模计算，得到该时段内的总开挖量为 14 933 m^3，其中强风化岩工程量为 9 387 m^3，中风化砂岩工程量为 5 546 m^3，强风化岩欠挖工程量为 332 m^3，中风化砂岩超挖工程量为 1 778 m^3，开挖区内平均超深值为 0.41 m。据此可得，强风化岩的挖掘生产率为 607.6 m^3/h，中风化砂岩的挖掘生产率为 247.6 m^3/h，结论与文献[7]基本一致。按断面法，采用综合生产率统计法对试挖区进行统计计算，强风化岩挖掘生产率为 537.8 m^3/h，中风化岩挖掘生产率为 182.5 m^3/h。对于中风化岩和强风化岩的挖掘生产率，建模计算法较典型断面法分别提高 35.7% 和 13.0%。生产率统计提高的原因主要有：1）挖掘时间统计更准确，剔除了换向、倒装等辅助时间；2）挖掘时间与挖掘土质对应关系更明确；3）建模分析计算较断面法计算更合理，特别在边坡部分优势更为明显。

4　结论

1）利用三维图形软件进行土质建模计量，可以较好分析开挖断面尺寸是否符合设计规范要求，预判开挖土方量、施工方案及机具选择的合理性，克服小区域、多边坡工程量计量误差较大的问题。

2）与测深数据、船舶施工监测系统相结合，不仅易于得出监测系统与实际完成面的系统差，而且一定程度上提高了船舶的单一岩体挖掘性能的分析能力。

3）基于三维模型和监测系统统计数据的生产率分析计算依据更明确，结果更精准，可为后期工程的实施提供更为科学的指导。

参考文献：

[1] 姚强, 杨兴国, 陈兴泽, 等. 大型地下厂房开挖爆破振动动力响应数值模拟[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 66-70, 76.
YAO Q, YANG X G, CHEN X Z, et al. Numerical simulation of dynamic response of large underground powerhouse subjected to blasting vibration[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(6): 66-70, 76.

[2] 孙冰, 罗志业, 曾晟, 等. 爆破振动影响因素及控制技术研究现状[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 129-134.
SUN B, LUO Z Y, ZENG S, et al. Research status of influencing factors and control technology of blasting vibration[J]. Mining safety & environmental protection, 2021, 48(6): 129-134.

[3] 廖宏刚, 林镇定. 大型绞吸船开挖岩石试验方案设计及技术要点[J]. 中国水运(下半月), 2021(10): 72-74.
LIAO H G, LIN Z D. Design and technical points of rock excavation test scheme for large cutter suction ship[J]. China water transport (the second half of the month), 2021(10): 72-74.

[4] 田蓝. 绞吸式挖泥船绞刀挖岩的离散单元法数值仿真[D]. 天津: 天津大学, 2018.
TIAN L. Numerical simulation based on the discrete element method of rock cutting process for the cutterhead of cutter suction dredger[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[5] 熊庭, 王竞翔, 危卫, 等. 绞吸式挖泥船绞刀切岩数值模拟[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 69-75.
XIONG T, WANG J X, WEI W, et al. Numerical simulation of rock cutting process with cutter-suction dredger[J]. Navigation of China, 2022, 45(2): 69-75.

[6] 刘璟, 刁海岛, 张陈浩, 等. 重型绞吸式挖泥船挖掘中风化岩影响因素分析[J]. 水运工程, 2014(4): 182-186.
LIU J, DIAO H D, ZHANG C H, et al. Analysis of influential factors for heavy-duty cutter suction dredger working in moderately weathered rock [J]. Port & waterway engineering, 2014(4): 182-186.

（下转第 206 页）

水运工程