



# 挖岩绞刀的岩石切削试验及数值模拟<sup>\*</sup>

苏召斌<sup>1,2</sup>, 林森<sup>1,2</sup>, 杨晨<sup>1,2</sup>

(1. 中交天津航道有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 绞刀是绞吸挖泥船的核心部件, 通过现场试验研究绞刀挖掘性能的代价巨大。针对在实船试验中难以遇到合适土质的问题, 提出在实验室进行挖掘试验和数值模拟表征绞刀挖掘性能的方法。制作 2 000 kW 功率绞刀的缩比模型和不同单轴抗压强度的岩石模型, 在实验室进行不同切削厚度、步进距离等参数的绞刀切削岩石的模型试验, 建立 1:1 尺寸的绞刀数值模型和岩石模型, 采用单元删除法模拟 2 000 kW 绞刀切削岩石的过程, 分别模拟产量为 240 和 500 m<sup>3</sup>/h 的切削过程, 并分析绞刀切削功率和横移拉力。结果表明, 挖掘产量 240 m<sup>3</sup>/h 时的最大功率为 1 884 kW、平均功率为 1 088 kW, 满足设计要求。

**关键词:** 疏浚; 绞刀; 岩石切割; 数值模拟

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0189-05

## Cutting test and numerical simulation of rock cutter

SU Zhaobin<sup>1,2</sup>, LIN Sen<sup>1,2</sup>, YANG Chen<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Cutter is a core component of cutter suction dredger, and it is very expensive to study the excavation performance of cutter through field test. To solve the problem of meeting the suitable soil quality in the real ship test difficultly, a method to characterize the excavation performance of the cutter by excavation test and numerical simulation in the laboratory is proposed. Scale model of 2 000 kW power cutter and rock model with different uniaxial compressive strength are made. Model tests of cutter cutting rock with different cutting thickness and stepping distance are carried out in the laboratory, and 1:1 scale cutter numerical model and rock model are established. The cutting process of 2 000 kW cutter is simulated by unit deletion method, and the cutting processes with output of 240 m<sup>3</sup>/h and 500 m<sup>3</sup>/h are simulated respectively, and the cutting power and the cutting power of cutter are analyzed. The results show that when the excavation output is 240 m<sup>3</sup>/h, the maximum power is 1 884 kW and the average power is 1 088 kW, which meets the design requirements.

**Keywords:** dredging; cutter; rock cutting; numerical simulation

绞吸挖泥船常被用于港口开发、吹填造陆等基建工程, 其具有挖掘能力强、土质适应性广等优点<sup>[1]</sup>。随着港口航道工程的不断拓展, 疏浚土质越来越硬, 挖岩工程日益增多, 绞吸船对大功率的挖硬质土及挖岩绞刀需求越来越大<sup>[2-3]</sup>。绞刀是绞吸挖泥船上重要的疏浚设备, 而多年来大功

率绞刀技术一直被几家国际大公司所垄断。向这些公司订购绞刀订购周期长、价格昂贵、后续备件长期依赖进口, 这些缺点制约了国内疏浚生产设备生产能力的发挥和疏浚设备研发技术水平的提高。

目前, 以 ESCO 和 VOSTA 为代表的国外绞刀产品代表了当今世界先进水平, 其绞刀产品已成

收稿日期: 2023-06-26

\*基金项目: 中国交通建设股份有限公司科技研发项目(2023-ZJKJ-10); 中交天津航道有限公司科技研发项目(THJKJRW(2021)010)

作者简介: 苏召斌(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚工程施工装备理论研究和设计开发。

系列化和标准化，不同的疏浚土质、绞刀功率对应不同的绞刀系列，而且随着疏浚工程土质的变化和实际工程要求，新的绞刀形式和结构不断推出。相比之下，国内的挖泥机具技术水平还比较落后，在绞刀设计开发方面起步比较晚，尽管近年来在绞刀改造、绞刀技术开发与设计方面进行了不断的探索和尝试<sup>[4-5]</sup>，离散单元法<sup>[6-7]</sup>、有限单元法<sup>[8-9]</sup>等数值模拟手段用于绞刀研究，在绞刀设计方法、设计理念方面有了长足的进步。

绞刀臂形状、刀齿布置、切削角度等参数影响绞刀的挖掘性能<sup>[10-11]</sup>。绞吸挖泥船施工现场挖掘的土质复杂，还包括海况、操作水平等因素，限制了新型绞刀的试验和推广。相比而言，室内试验容易实现单一变量<sup>[12-13]</sup>，排除其他因素的干扰，通过绞刀缩比模型挖掘岩石的试验情况，观察和测量绞刀特别是刀齿的磨损情况，以分析绞刀及刀齿结构设计中各几何参数选取的合理性。

## 1 岩石切削试验

### 1.1 试验准备

为验证 2 000 kW 功率绞刀(简称绞刀)设计的合理性，利用天津市疏浚工程技术企业重点实验室(简称实验室)的设备，进行室内岩石切削试验。

绞刀为 6 臂形式，共有刀齿和齿座各 57 个，其中刀臂上刀齿和齿座各 51 个，大圈上齿座和刀齿各 6 个。将绞刀按 1:4 缩比制成绞刀模型，质量为 235.2 kg，见图 1。配制了 5、10 和 15 MPa 等不同单轴抗压强度的水泥砂浆代替岩石，见图 2。



图 1 绞刀模型



图 2 岩石模型

### 1.2 试验过程

按照既定的试验方案进行绞刀切削岩石的试验，按照单轴抗压强度由低到高的顺序进行切削，每个岩石模型的切削过程均依次调整不同的绞刀切削速度、横移速度、步进和横移等参数。

### 1.3 试验结果

挖掘过程十分顺利，所有设备运转正常，模型绞刀的强度和刚度均符合要求。试验后，观察切削后的岩石残留面和岩石碎块，岩石的残留面基本上呈规则的沟槽形状，岩石碎块呈不规则排列，碎块大小合理，见图 3。



图 3 挖掘后的仿岩底部

试验过程中绞刀切削扭矩变化见图 4。挖掘过程中绞刀切削扭矩最大值为 7.36 kN·m，切削扭矩值无明显波动。挖掘试验后观察绞刀本体未出现局部异常磨损状况，齿座部分也没有明显磨损痕迹，参与挖掘的刀齿未出现偏磨现象，挖掘的碎块大小合理，表明绞刀本体线型和刀齿布置合理。

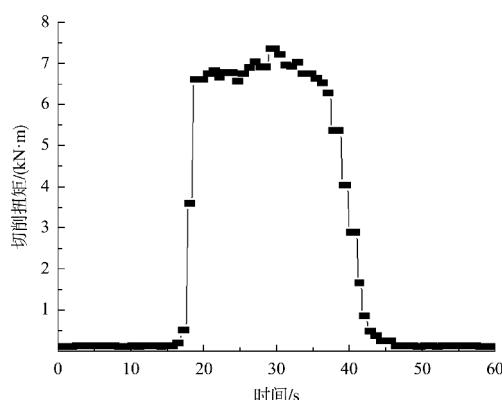


图 4 试验过程中绞刀切削扭矩变化

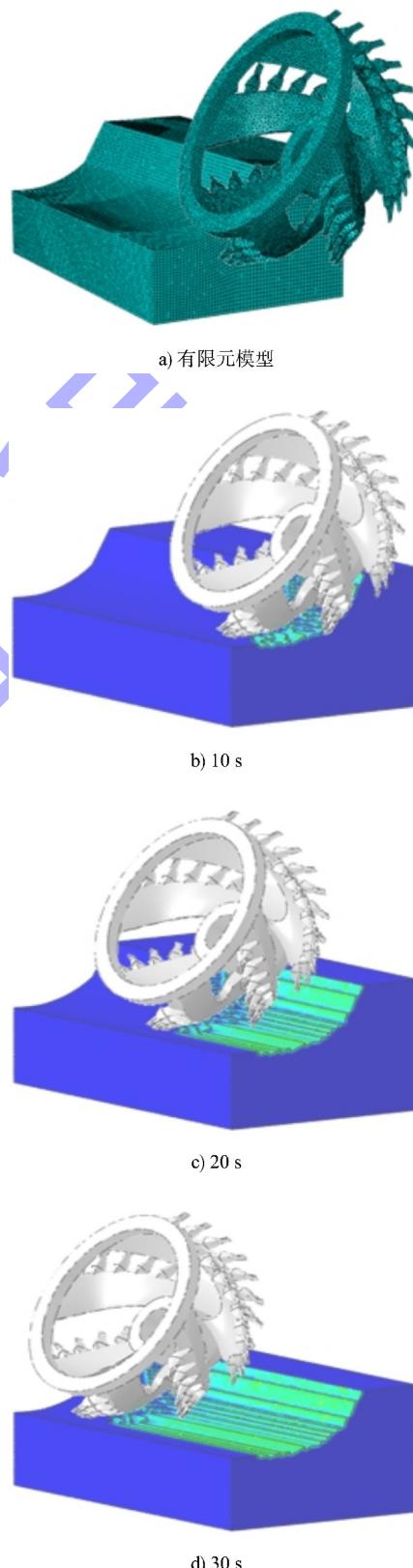
## 2 岩石切削数值模拟

以某绞刀功率为 2 000 kW 的大型自航绞吸挖泥船切削岩石绞刀为模型, 采用绞刀 1:1 比例建立数值模型, 其大圈外径 2 980 mm、绞刀总高 2 045 mm, 对该绞刀切削岩石的功率和横移拉力进行计算。

模拟岩石切削性能采用扩展的 Drucker-Prager (DP) 模型<sup>[14]</sup>, 岩石材料按照计算过程中定义了绞刀与土体“刚体-柔体”的接触类型。在实际的切削过程中, 绞刀的强度和刚度远大于岩石, 可以有效减少模型自由度数量, 在保证计算精度的情况下降低计算规模、提高计算效率。

保证绞刀齿的空间位置和几何形状, 并划分较密的单元, 并保证绞刀齿处的单元形状良好。整个绞刀有限元模型共划分 20.997 2 万个单元。岩石部分采用六面体网格划分, 整个岩石部分的有限元模型共 18.4 万个单元, 有限元模型见图 5a)。切削参数为: 切削速度为 0.166 m/s (10 m/min), 绞刀的旋转速度为 30 r/min, 切削步进距离为 500 mm, 切削厚度为 810 mm, 切削岩石的单轴抗压强度为 30 MPa, 切削产量为 240 m<sup>3</sup>/h。绞刀以反刀姿态切削, 刀齿切入岩石并形成岩石碎屑, 齿绕着绞刀轴线旋转运动并在岩石上形成圆弧状沟槽。随着参与切削的刀齿数的增加, 岩石的破坏区域也逐渐增大, 见图 5b)~d)。由岩石的破坏断面可以看出, 30 MPa 的岩石在破坏后而形成沟槽, 沟槽之间几乎平行, 和试验观察到的现象一致。在正常的施工中, 岩石被绞刀切削后形成的碎屑进入

绞刀吸口, 然后被泥泵等设备抽入排泥管道, 因此在数值模拟的过程中, 岩石的碎屑一旦形成后被设置为不再参与切削计算。

图 5 2 000 kW 绞刀产量为 240 m<sup>3</sup>/h 时数值模拟

2 000 kW 绞刀产量为  $240 \text{ m}^3/\text{h}$  时的扭矩和横移拉力见图 6。由图 6a) 可以看出,  $0 \sim < 6 \text{ s}$  的扭矩为  $0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 因为绞刀还未切入岩石;  $6 \sim < 11 \text{ s}$  为绞刀逐步切入岩石的状态, 绞刀扭矩也逐渐增大;  $11 \sim \leq 30 \text{ s}$  为完全切入的稳定状态, 基本峰值在  $600 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 折合功率  $1 884 \text{ kW}$ ; 综合  $6 \sim 30 \text{ s}$  数据, 扭矩平均值为  $347 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 折合功率  $1 088 \text{ kW}$ 。由图 6b) 可以看出, 绞刀切削的横移拉力基本随着绞刀扭矩增加而增大;  $11 \text{ s}$  时达到最大值  $678 \text{ kN}$ , 随后峰值在  $470 \text{ kN}$  左右, 平均值在  $242 \text{ kN}$ ; 随着绞刀切削岩石的不断进行, 绞刀扭矩呈现出周期性变化。

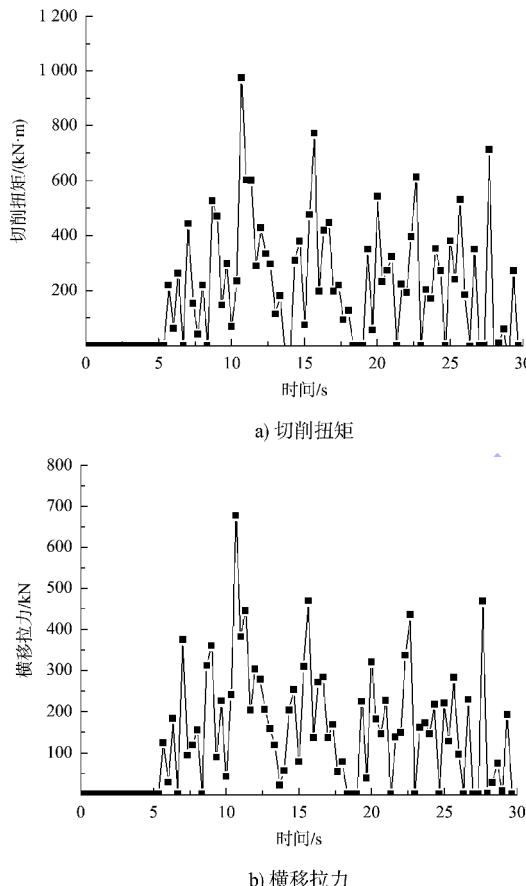


图 6 2 000 kW 绞刀产量为  $240 \text{ m}^3/\text{h}$  时扭矩和横移拉力

绞刀产量为  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 切削步进距离为  $800 \text{ mm}$ , 切削厚度为  $990 \text{ mm}$ , 切削岩石的单轴抗压强度为  $30 \text{ MPa}$ , 切削产量为  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ , 数值模拟结果见图 7。稳定切削的峰值  $847 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 折合功率为  $2 660 \text{ kW}$ , 扭矩平均值为  $435 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 折合功率  $1 365 \text{ kW}$ 。绞刀切削的横移拉力基本随着绞刀扭矩增加而增大。稳定切削后的峰值在  $490 \text{ kN}$

左右, 平均值  $267 \text{ kN}$ , 见表 1。

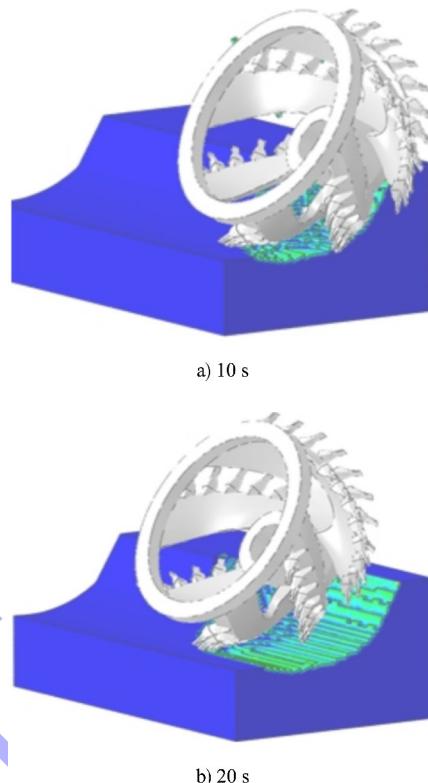


图 7 2 000 kW 绞刀产量为  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  时数值模拟结果

表 1 不同产量与绞刀即时功率对照

产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	功率峰值/ kW	功率平均值/ kW	横移拉力 最大值/kN	横移拉力 平均值/kN
240	1 884	1 088	490	242
500	2 660	1 365	679	267

### 3 实船试验

为进一步验证绞刀设计的预期效果, 对“天麒号”绞吸船上的 2 000 kW 绞刀在江苏启东吕四港挖泥施工的应用情况进行现场跟踪、数据分析和适用性评估, 绞刀实物见图 8。该区域土层为黏性土与砂性土互层, 标准贯入击数为 11 击。



图 8 2 000 kW 绞刀实物

选取典型的连续施工数据进行分析, 绞刀产量能够达到  $4\ 000\ m^3/h$  以上, 而绞刀功率在  $1\ 000\ kW$  左右, 同时横移速度基本小于  $20\ m/min$ ,  $2\ 000\ kW$  绞刀针对这种土质的挖掘能力较好。

#### 4 结论

1) 挖岩绞刀在实验室进行挖掘岩石试验, 绞刀齿的磨损情况可以直观显示。试验结果表明, 绞刀本体未出现局部异常磨损状况, 齿座部分也没有明显磨损痕迹, 参与挖掘的刀齿未出现偏磨现象。

2) 在标准工况下, 疏挖无侧限压力  $30\ MPa$  岩石的绞刀挖掘产量为  $240\ m^3/h$ , 高于设计技术指标, 单位产量消耗功率为  $4.5\ kW \cdot h/m^3$ , 对应的绞刀峰值功率为  $1\ 884\ kW$ , 平均功率为  $1\ 088\ kW$ , 在  $2\ 000\ kW$  额定功率之内, 满足合同规定的设计指标。

3) 实船试验时虽然土质不是岩土, 但是通过数天试验表明, 绞刀的挖掘阻力较小、产量相对较高, 挖掘效果较好、绞刀臂和齿座的磨损合理、刀齿未偏磨, 说明绞刀臂的空间形状设计合理, 刀齿切削角、齿位角、包角等重要绞刀参数也选取恰当。

#### 参考文献:

- [1] 何炎平, 冯长华, 顾敏童, 等. “天鲸”号大型自航绞吸式挖泥船[J]. 船舶工程, 2009, 31(5): 1-5.
- [2] 姚建伟, 杨启. 基于岩石切削理论的超大型绞吸挖泥船绞刀动载荷分析[J]. 中国港湾建设, 2011(1): 5-10.
- [3] 陈晓华, 杨启. 大型绞吸挖泥船挖岩绞刀切削力计算分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(1): 106-110.
- [4] 李柏, 焦修勤, 黄睿, 等. 绞吸式挖泥船挖岩绞刀动载荷模拟分析[J]. 船海工程, 2013, 42(5): 119-122.
- [5] 马健, 欧阳义平, 杨启, 等. 绞吸挖泥船绞刀头岩石切削动载荷数值仿真[J]. 中国港湾建设, 2014, 12(12): 10-14.
- [6] 田蓝, 蔡宗熙, 张凌博, 等. 挖泥船绞刀挖岩的离散单元法数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(12): 1805-1811.
- [7] 林挺, 冯沛洪, 马源, 等. 离散元法用于绞刀齿切削珊瑚礁岩过程的三维模拟[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(2): 10-15.
- [8] 苏召斌, 林森, 刘俸麟. 大型绞吸挖泥船挖岩绞刀切削数值模拟[J]. 水运工程, 2017(8): 40-44.
- [9] 苏召斌, 于航健, 林森, 等. 绞吸挖泥船大功率挖岩绞刀的荷载分析[J]. 水运工程, 2020(12): 198-205.
- [10] NISHIMATSU Y. The mechanics of rock cutting [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1972, 9(2): 261-270.
- [11] YILMAZ N G, YURDAKUL M, GOKTAN R M. Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2007, 44(6): 962-970.
- [12] 林森, 苏召斌, 孙守胜, 等. 基于黏土挖掘的绞刀模型试验研究[J]. 水运工程, 2023(S2): 38-42.
- [13] 苏召斌, 林森, 陈刘明, 等. 绞吸挖泥船挖掘黏土混粗砂的绞刀齿磨损试验[J]. 水运工程, 2021(7): 226-230.
- [14] 张凌博, 蔡宗熙, 李瑞祥, 等. 挖泥船绞刀挖岩过程的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 371-376.

(本文编辑 王璁)

(上接第 188 页)

#### 参考文献:

- [1] 刘昊, 杨俊钊, 张亚楠, 等. 重型绞吸挖泥船挖岩施工工艺优化[J]. 水运工程, 2020(S1): 100-104.
- [2] 王健, 孔凡震. “天鲲号”自航绞吸船核心技术应用研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 58-62, 67.
- [3] 王曦巍, 刘昊, 李金峰, 等. 重型绞吸挖泥船  $1\ m$  直径排泥管线输送微风化岩特性[J]. 水运工程, 2022(2): 219-223.

- [4] 周志强, 朱海涛. 双耳轴重型绞吸船深槽基岩开挖施工工艺[J]. 水运工程, 2020(11): 205-208.
- [5] 弓宝江, 赵丽娜, 冯晨. 大型绞吸船开挖岩石质量控制措施[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(2): 65~67, 72.
- [6] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(本文编辑 王传瑜)