



基于黏土挖掘的绞刀模型试验研究

林 森^{1,2}, 苏召斌^{1,2}, 孙守胜^{1,2}, 郭喜亮^{1,2}, 杨建华^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461;

2. 天津市疏浚技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 针对我国疏浚技术基础理论研究落后, 数值模拟绞刀挖掘黏土不准确等问题, 通过理论研究、小规模试制的方法, 制备了目标试验用黏土, 并研制了一款适用于实验室使用的模型黏土绞刀。在此基础上开展了模型绞刀挖掘黏土的实验室研究, 分析绞刀转速、横移速度、泥层厚度、前移距等工艺参数对挖掘试验泥浆浓度的影响规律。得出其选取原则: 选择中等绞刀转速, 适当降低横移速度, 以及在确保桥架前端不阻碍横摆的条件下, 优先选用增加前移距的方法提高挖掘断面面积。该研究成果可为黏土挖掘工艺参数的选取提供参考。

关键词: 疏浚工程; 绞刀; 黏土挖掘; 工艺参数

中图分类号: U 616+.5; U 615.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0038-05

Cutter model experiment based on clay excavation

LIN Sen^{1,2}, SU Zhao-bin^{1,2}, SUN Shou-sheng^{1,2}, GUO Xi-liang^{1,2}, YANG Jian-hua^{1,2}

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

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

Abstract: Aiming at the problems of backward basic theoretical research of dredging technology and inaccurate numerical simulation of cutterhead excavating clay in China, through the methods of theoretical research and small-scale trial production, the target experimental clay is prepared, and a model clay cutterhead suitable for laboratory use is developed. On this basis, the laboratory experimental research of model cutterhead excavating clay was carried out, and the influence of the process parameters such as the rotating speed of cutterhead, traverse speed, mud layer thickness and forward displacement distance on the mud concentration of excavation test was analyzed. The principle is selecting the medium cutter speed, appropriately reducing the traverse speed, and giving priority to the method of increasing forward displacement distance to improve the excavation section area under the condition of ensuring that the front end of the bridge does not hinder the yaw. The research results can provide a reference for the selection of clay excavation process parameters.

Keywords: dredging engineering; cutterhead; clay excavation; process parameters

进入 21 世纪后, 我国的疏浚事业得到蓬勃的发展, 已经逐渐成为世界疏浚大国^[1], 疏浚船舶与装备也得到了长足的进步^[2], 但是, 我国疏浚技术基础理论研究还落后于西方国家。荷兰的

Miedema 教授^[3-4]通过多年的研究, 提出了多种土质的二维切削模型, 我国近些年才开始二维切削理论的研究^[5-6], 某些高校采用有限元、离散元的方法对绞刀挖掘过程进行了数值模拟^[7-8]。但是对

于黏土的挖掘, 数值模拟很难真实地反映实际情况, 尤其对于吸人影响, 数值模拟的方法无法评估, 特别是实船试验研究会受到现场不确定因素的影响, 不能保证单一变量。

为了研究绞刀挖掘工艺参数对黏土挖掘效果的影响, 利用中交天津航道局有限公司疏浚实验室挖掘试验平台, 通过实验室绞刀模型试验, 研究绞刀转速、横移速度、泥层厚度、前移距等参数对绞刀挖掘黏土效果的影响规律, 最终确定绞刀挖掘试验用黏土的最佳挖掘参数, 为绞刀挖掘黏土施工提供参考。

1 试验准备

1.1 试验用绞刀研制

按照实验室挖掘平台能力及相关安装尺寸, 结合黏土挖掘的特点设计制造了试验用模型绞刀见图 1, 该模型绞刀基本参数为: 刀臂 5 个, 刀齿 45 个, 刀圈外径 750 mm, 刀圈内径 632.5 mm, 绞刀总高度约 511 mm, 大圈厚度 45 mm, 绞刀总质量 204 kg。

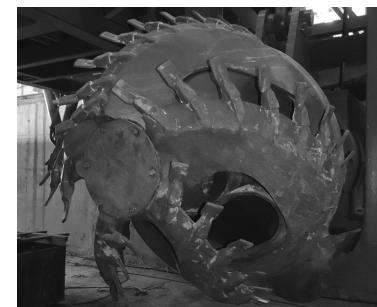


图 1 试验用模型绞刀

1.2 试验用黏土制备

为了制备含水率 25%~40%, 标贯击数 $N=8\sim16$ 击、塑性指数 13~21 的试验用黏土, 开展了实验室黏土制备方法的研究。在分析土源地黏土粒径及物理特性的基础上, 提出了采用添加高岭土、矿粉等改良土源地黏土特性的方案, 并通过小规模制备试验, 确定了外添加剂的添加比例。在真空预压法、加载预压法、真空联合堆载预压法、强夯法、冲击夯实法等众多制备方法中, 优选出冲击夯实法作为制备试验用黏土的制备方法, 通过优化制备流程, 最终制备出 3 箱符合上述要求的实验用黏土, 具体参数见表 1, 黏土的各项指标较为一致, 为开展试验创造了有利条件。

表 1 试验用黏土制备结果

试验用黏土	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	标贯击数 N
第 1 箱	25.1	44.5	23.7	20.8	0.07	75.2	26.5	12-13
第 2 箱	25.1	44.7	23.6	21.1	0.07	75.1	26.0	12-13
第 3 箱	25.3	44.7	23.8	20.9	0.07	75.0	26.4	12-13

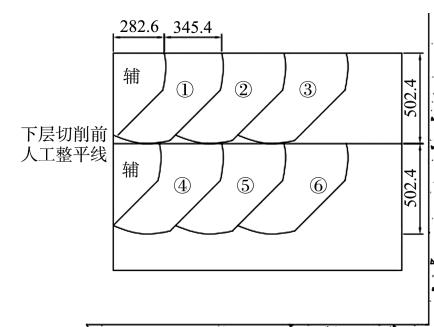
2 模型绞刀挖掘试验

为了分析绞刀转速、横移速度、泥层厚度、前移距等参数对绞刀挖掘效果的影响规律, 对 3 箱试验用黏土进行 18 次挖掘试验, 保证挖掘产量一致的条件下, 改变绞刀转速、横移速度、泥层厚度、前移距等挖掘工艺参数。

2.1 挖掘断面及顺序

配合泥层厚度和前移距的变化, 对 3 箱黏土的挖掘断面进行合理规划, 断面形状及挖掘顺序见图 2: ①~⑥断面面积为 16.75 万 mm^2 ; ⑦⑧⑩断面面积为 12.36 万 mm^2 ; ⑨⑪⑫断面面积为 20.86 万 mm^2 ; ⑬~⑯断面面积为 12.41 万 mm^2 ;

⑯~⑯断面面积为 21.09 万 mm^2 。在上层挖掘试验后, 为保证挖掘断面形状一致, 按照痕迹最低点人工削平泥面, 见图 3。每层第一次挖掘开始前需要进行辅助挖掘, 见图 2 中的“辅”。



a) 第一箱土

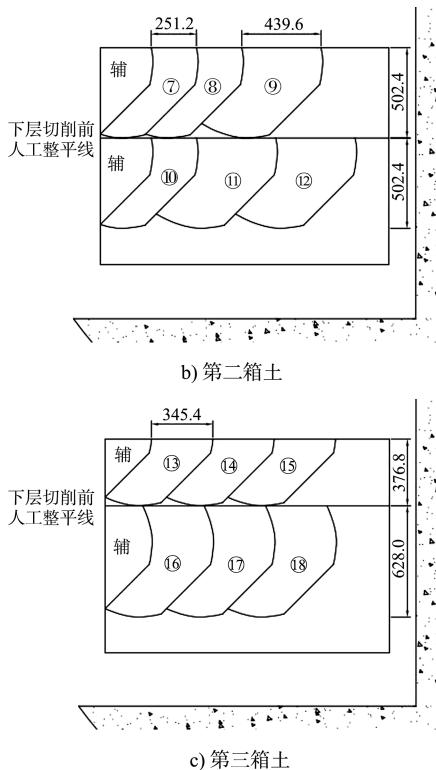


图 2 黏土的挖掘顺序及断面形状 (单位: mm)



图 3 上层挖掘后的黏土

2.2 挖掘工艺参数

除挖掘断面形状与面积的改变以外, 18 次挖掘试验的工艺参数也相应变化, 其中绞刀转速 3 档分别为: 40、50、60 r/min, 横移速度 3 档分别为: 6.0、7.5、10.0 m/min, 前移距 3 档分别为: 251.2、345.4、439.6 mm, 泥层厚度 3 档分别为: 376.8、502.4、628.0 mm。对参数交叉组合形成了挖掘试验的参数, 见表 2。

表 2 各挖掘试验参数

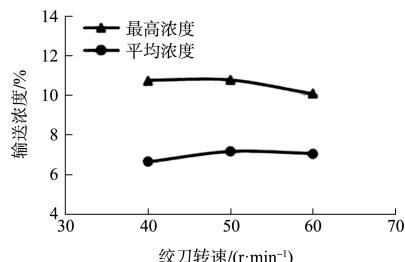
序号	绞刀转速/(r·min ⁻¹)	横移速度/(m·min ⁻¹)	泥层厚度/mm	前移距/mm	断面面积/万 mm ²	正反刀
①	40	7.5	502.4	345.4	16.75	正刀
②	40	7.5	502.4	345.4	16.75	反刀
③	50	7.5	502.4	345.4	16.75	正刀
④	50	7.5	502.4	345.4	16.75	反刀
⑤	60	7.5	502.4	345.4	16.75	正刀
⑥	60	7.5	502.4	345.4	16.75	反刀
⑦	40	10.0	502.4	251.2	12.36	反刀
⑧	50	10.0	502.4	251.2	12.36	反刀
⑨	40	6.0	502.4	439.6	20.86	反刀
⑩	60	10.0	502.4	251.2	12.36	反刀
⑪	60	6.0	502.4	439.6	20.86	反刀
⑫	50	6.0	502.4	439.6	20.86	反刀
⑬	40	10.0	376.8	345.4	12.41	反刀
⑭	50	10.0	376.8	345.4	12.41	反刀
⑮	60	10.0	376.8	345.4	12.41	反刀
⑯	40	6.0	628.0	345.4	21.09	反刀
⑰	50	6.0	628.0	345.4	21.09	反刀
⑱	60	6.0	628.0	345.4	21.09	反刀

3 试验结果分析

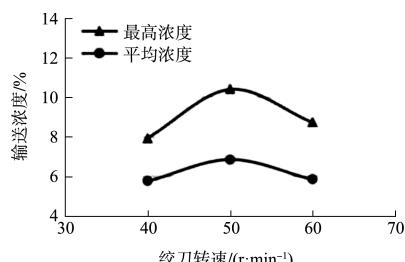
3.1 绞刀转速的影响规律

选择 4 组、12 次的挖掘数据②④⑥、⑦⑧⑩、⑨⑪⑫、⑬⑭⑮, 将这些试验数据的泥浆浓度进

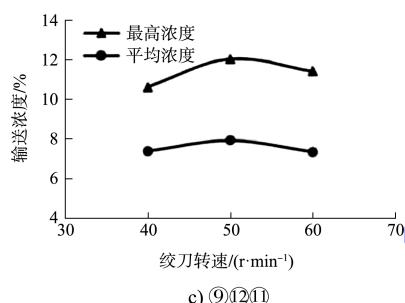
行最大值、平均值对比分析, 见图 4。4 组数据中, 50 r/min 绞刀转速的平均浓度和最高浓度都比 40 和 60 r/min 高, 表明绞刀转速不宜过高也不宜太低, 选用中等绞刀转速挖掘效果最佳。



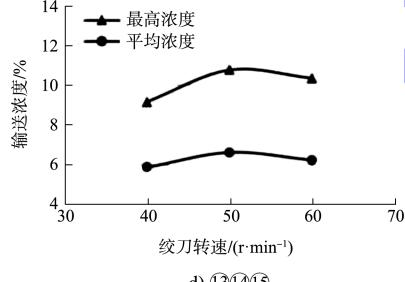
a) ②④⑥



b) ⑦⑧⑩



c) ⑨⑫⑪

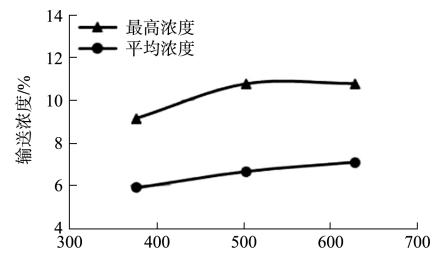


d) ⑬⑭⑯

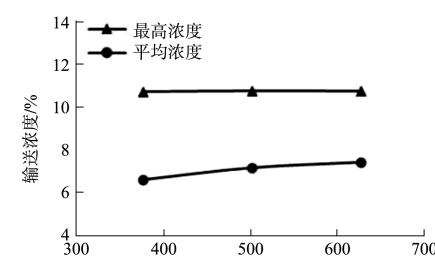
图 4 不同绞刀转速对泥浆浓度的影响

3.2 泥层厚度、横移速度的影响规律

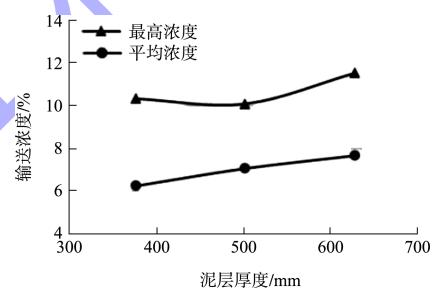
改变横移速度后, 为了保证挖掘产量不变, 需要相应地增加挖掘断面面积, ⑯②⑬、⑰④⑯、⑱⑥⑯, 3 组数据采用改变泥层厚度的方法调整挖掘断面面积, 见图 5, 分析不同横移速度、泥层厚度对泥浆浓度的影响。3 组数据的横移速度越慢泥浆浓度越高, 表明增大泥层厚度、降低横移速度更利于提升泥浆浓度。



a) ⑯②⑬



b) ⑰④⑯

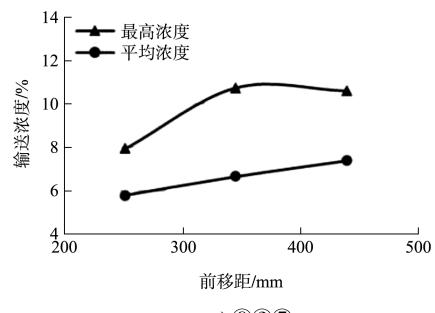


c) ⑱⑥⑯

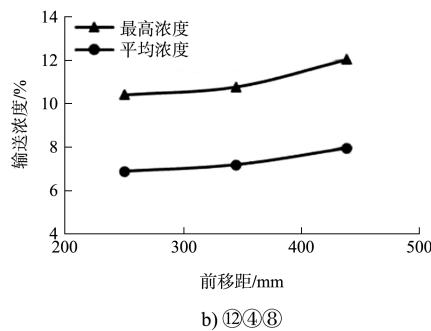
图 5 不同泥层厚度、横移速度对泥浆浓度的影响

3.3 前移距、横移速度的影响规律

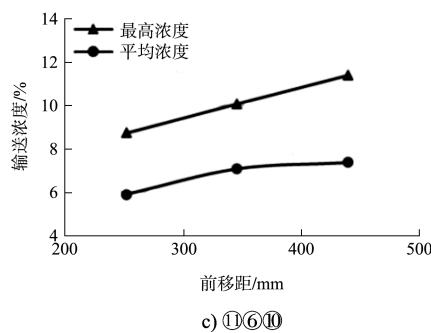
改变横移速度后, 为确保挖掘产量一致需提高前移距、增加挖掘断面面积, ⑨②⑦、⑫④⑧、⑪⑯⑯ 3 组数据见图 6, 分析不同横移速度、前移距对泥浆浓度的影响。与增加泥层厚度一样, 横移速度越慢泥浆浓度越高, 表明采用增加前移距, 降低横移速度的挖掘工艺, 也有助于提升泥浆浓度。



a) ⑨②⑦



b) ⑫⑭⑯

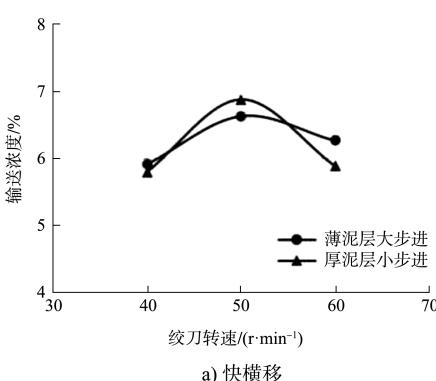


c) ⑪⑯⑰

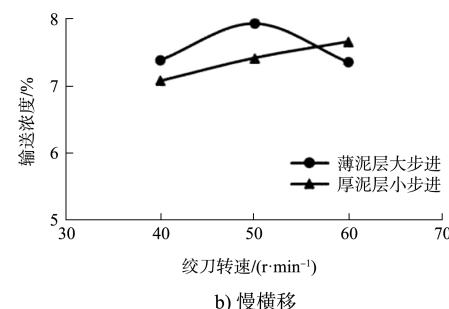
图 6 不同前移距、横移速度对泥浆浓度的影响

3.4 泥层厚度、前移距的影响规律

增加泥层厚度或者提高前移距，同时降低横移速度都能提高泥浆浓度，选取 4 组数据进行对比，见图 7，通过较快横移速度的⑦⑧⑩与⑬⑭⑮对比，发现薄泥层大步进与厚泥层小步进差异较小，曲线相互交叉；通过较慢横移速度的⑨⑫⑪与⑯⑰⑱对比，发现薄泥层大步进更有优势。无论是增加泥层厚度，还是提高前移距，都是以降低横移速度为前提，因此慢横移速度的⑨⑫⑪与⑯⑰⑱对比更有参考价值，当增大挖掘断面时，在确保桥架不阻碍横摆的条件下，优先增加前移距，再选择增加泥层厚度。



a) 快横移



b) 慢横移

图 7 不同泥层厚度、前移距对泥浆浓度的影响

4 结论

- 1) 针对该试验所选用的黏土，选择中等绞刀转速挖掘更有利于提高泥浆浓度。
- 2) 在保证挖掘产量相同的前提下，降低横移速度更容易获得高浓度泥浆。
- 3) 同样降低横移速度时，在确保桥架前端不阻碍横摆的条件下，优先选用增加前移距的方法。

参考文献：

- [1] 陈云.疏浚业将大有可为[J].施工企业管理,2010(12):32-33.
- [2] 童孟侯.大国重器:疏浚船(期刊)航海[J].2022(01):14-17.
- [3] MIEDEMA S A.The cutting forces in saturated sand of a seagoing cutter suction dredger [C]//The Western Dredging Association . Proceeding of WODCON XII. Orlando: WEDA, 1989: 1-35.
- [4] MIEDEMA S A.The cutting mechanisms of water saturated sand at small and large cutting angles [C]//The Central Dredging Association. International Conference on Coastal Infrastructure Development-Challenges in the 21st Century. Delft: CEDA, 2004: 1-13.
- [5] 李章超,张更生,肖博.单耙齿切削黏土机理试验研究[J].水运工程,2020(S1): 85-90.
- [6] 杨桢毅,朱汉华,范世东,等.基于二维切削理论的绞刀刀臂载荷分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013, 36(5): 1040-1043.
- [7] 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.
- [8] 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.