

· 施 工 ·



## 新型环保清淤机具作业性能的试验研究

刘国瑞<sup>1,2</sup>, 乔儒林<sup>2</sup>, 吴云海<sup>1,2</sup>, 杨正军<sup>1</sup>, 董道武<sup>1</sup>

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 中交天航(海南)实业有限公司, 天津 300480)

**摘要:** 研发了一种新型环保清淤机具, 理论上具有提升清淤泥浆浓度、抑制挖掘过程泥浆扩散的效果。针对新型机具在不同关键作业参数下表现的挖掘产量及泥浆扩散规律, 尚无可靠的研究方法进行量化评价。通过物模试验, 对机具的挖泥特性开展了系统研究。采用多因素法设计工况, 通过重复试验以确保数据可靠, 并进行不装环保罩的对比试验以验证其生态友好性。通过测量流速和泥浆浓度来确定挖掘产量, 并使用浊度计来评估泥浆扩散情况。经过对数据的全面统计分析后发现, 较常规绞刀清淤, 该机具可提升泥浆浓度 136% 以上, 阻止挖泥作业中 90% 以上的泥浆扩散。工程试挖试验表明, 该机具具有优异的高浓度挖掘性能与良好的环保性。

**关键词:** 高浓度; 环保清淤; 环保罩; 挖掘产量; 泥浆扩散

**中图分类号:** U616+.2; TV53+5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2026)03-0205-07

### Experimental research on dredging characteristics of new eco-friendly dredging equipment

LIU Guorui<sup>1,2</sup>, QIAO Rulin<sup>2</sup>, WU Yunhai<sup>1,2</sup>, YANG Zhengjun<sup>1</sup>, DONG Daowu<sup>1</sup>

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

2. CCCC Tianjin Dredging (Hainan) Industry Co., Ltd., Tianjin 300480, China)

**Abstract:** A new type eco-friendly dredging equipment has been developed, which can increase slurry concentration and effectively curb slurry diffusion during excavation. Regarding the performance laws of excavation output and slurry diffusion under different key operation parameters, there is currently no applicable research method that can be used for quantitative evaluation. Systematic research on the equipment's dredging characteristics has been carried out via physical modeling tests. Test conditions are designed using the multi-factor method, repeated tests are carried out to ensure the reliability of the data, and comparative tests without the eco-cover are also conducted to verify the eco-friendliness. The flow rate and slurry concentration are measured to determine the excavation output, and the turbidimeter is used to assess slurry diffusion situation. After comprehensive statistical analysis of the data, it is found that compared with conventional cutter operations, the dredging equipment raises slurry concentration by more than 136% and prevents over 90% of slurry diffusion. Engineering trial excavation tests also show that it has excellent high-concentration excavation performance and eco-friendly performance.

**Keywords:** high-concentration; environmental dredging, eco-cover; excavation output; slurry diffusion

河湖环保清淤工程对作业装备提出了高浓度、低扩散的迫切需求, 以最大限度减少清淤对水体扰动与污染物扩散<sup>[1]</sup>。目前常规疏浚装备普遍存在泥浆浓度低、作业过程浊度高的问题<sup>[2]</sup>, 常规绞吸船挖泥作业泥浆浓度 $\leq 30\%$ , 浊度 $> 300$  NTU,

难以满足日益严格的环保标准。为突破此技术瓶颈, 中交天津航道局有限公司研发了一种新型螺旋式清淤机具, 利用低扰动的螺旋刀结构, 并在螺旋刀外侧布置环保罩, 旨在提升泥浆浓度、抑制扩散, 并促进后端泥水高效分离。前期已完成

收稿日期: 2025-06-19 录用日期: 2025-07-07

作者简介: 刘国瑞(1989—), 男, 高级工程师, 从事河湖治理、疏浚工艺研究、疏浚装备、采砂设备研发工作。

机具在结构、水动力性能方面的研究工作，理论上证实了机具的优良特性，然而，对于该新型机具的关键作业参数(如挖掘厚度、移动速度、螺旋转速)对生产能力与环保性能的影响规律，尚缺乏系统的量化研究。为深入掌握其性能特征、优化作业参数并评估其工程适用性，需开展小比例物理模型试验。张忱<sup>[3]</sup>介绍了其研发机具的室内试验过程，对试验过程采用观察法进行了定性描述，但缺少量化指标。本文研究设计了一套可以量化研究清淤机具作业性能的方法，旨在揭示关键作业参数对机具挖掘产量与环保性能的综合影响规律，量化评估机具作业过程中的泥浆扩散特性。

### 1 新型环保清淤机具简介

新型环保清淤机具由延桥座、调向液压缸、深度液压缸、马达、固定罩、活动罩、骨架体、螺旋刀组等构件组成，见图1。其中，螺旋刀组由左旋和右旋的螺旋形刀组成，并对称布置。作业时，螺旋刀组不断切割泥土，并产生轴向推力，将泥土汇集到吸泥口位置，被泥泵吸入泥管。

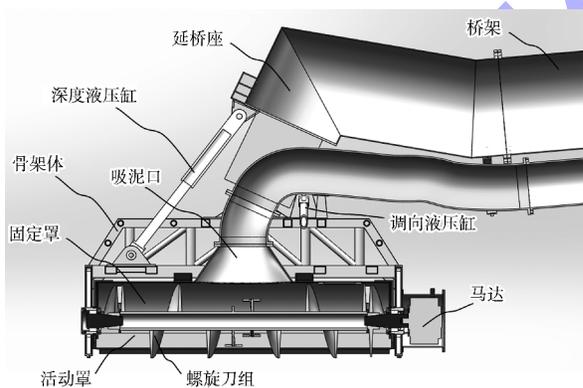


图1 新型环保清淤机具的结构组成

Fig.1 Structural composition of the new eco-friendly dredging equipment

螺旋式机具的主要性能参数：螺旋直径0.8 m，螺距0.6 m，螺旋轴额定转速45 r/min，横移速度13.4 m/min，作业宽度3.0 m。

## 2 室内试验设计

### 2.1 试验布置及挖泥工艺

试验设有控制台、动力平台、螺旋机具及

2个泥浆槽，动力平台可实现机具横向移动、竖向挖厚、垂向移位调节，泥浆槽互为挖泥、排泥槽，试验整体布置见图2。机具挖掘泥浆槽内土体，形成泥浆，在离心泵负压作用下被吸入，并排到另一泥浆槽中。试验用土为配制的淤泥质土(密度1.35 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[4]</sup>，探究上述参数对挖掘产量及泥浆扩散(以浊度表征)的影响机制。

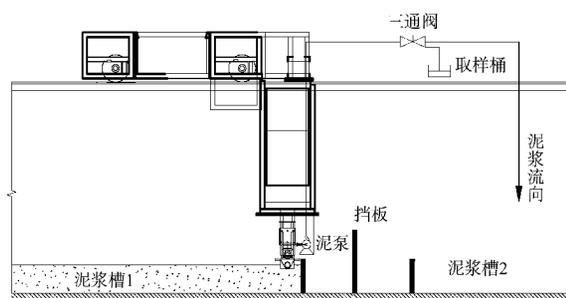


图2 试验整体布置

Fig.2 Overall layout of the test

试验采用分层、分条挖掘工艺，即单次挖厚为0.03或0.06 m，单次挖宽为机具宽度0.6 m，机具在相邻区域依次挖掘。

### 2.2 挖泥参数调控方法

1) 挖泥厚度。通过控制台调整机具竖向位置，由钢尺测出挖泥厚度 $H$ ，按式(1)计算。

$$H = X_2 - X_1 \quad (1)$$

式中： $X_1$ 为挖泥前原泥面距泥浆槽上沿的距离； $X_2$ 为挖泥后底部距泥浆槽上沿的距离。

2) 螺旋转速。通过液压泵站流量阀控制输出流量，实现螺旋机具马达转速的定量控制和调整，调整范围为80~120 r/min。

3) 机具移动速度调节。由控制台操作系统调节动力平台移动速度 $v$ ，实现挖泥速度的调整，调整范围为0.064~0.288 m/s。

4) 泥浆流量。通过变频器调节泥泵电机频率，进而调节泥泵转速和泥浆流量的大小。

### 2.3 关键数据采集方法

#### 2.3.1 环保性能测试

机具挖泥作业产生的泥浆扩散会引起水体浑浊度的变化，泥浆扩散情况以浊度表征，选择利用光学探测的方法观测水体浊度是主流方法<sup>[5]</sup>。

通过浊度仪监测水体浊度情况,实现对机具环保性能的量化评价。机具作业时,在泥泵吸力作用下,吸泥口和两侧螺旋刀形成空间区域的上部,螺旋刀之间空腔的下部均有较高的吸入负压。在机具移动方向的前后两侧分别安装2支浊度计,分别布置在吸泥口和机具的外端处,用以全方位监测机具作业时前、后方向泥浆扩散情况,取4支浊度计读数中最大的数值作为某工况下的环保性能评价数据。其中一侧浊度计的布置情况见图3。



图3 浊度计布置

Fig. 3 Installation of turbidimeters

### 2.3.2 泥浆密度测定

在泥管的排泥侧通过人工方式取样,将采样桶内样品搅拌均匀后,取其中500 ml样品,用称重法测量泥浆的质量 $m$ ,得到泥浆密度 $\rho_m$ 。

### 2.3.3 泥浆流量测定

通过流量计获取不同时刻管路的泥浆流量 $Q^{[6]}$ ,从而可以获得不同泥浆密度所对应的管路流量。

### 2.3.4 挖泥产量计算

单位时间内机具挖掘产量 $Q_v$ (实际产量)受扫掠产量 $M_v$ 和固有挖掘能力 $I_v$ 共同影响。

1) 扫掠产量。 $M_v$ 由式(2)计算。同机具额定固有挖掘能力相等的扫掠产量称为额定扫掠产量。

$$M_v = 3600HBv \quad (2)$$

式中: $B$ 为机具挖掘宽度。

2) 固有挖掘能力。机具的固有挖掘能力是其固有属性,按式(3)计算。额定转速下的固有挖掘能力称为额定固有挖掘能力。

$$I_v = 47D^2nS\varphi C \quad (3)$$

式中: $D$ 为螺旋外径,0.16 m; $C$ 为机具倾角系

数,水平状态取1; $S$ 为螺距,0.12 m; $n$ 为转速,r/min; $\varphi$ 为物料的填充系数。

3) 挖掘产量。测出泥浆密度 $\rho_m$ 及对应流量 $Q$ 后, $Q_v$ 可按式(4)计算<sup>[7]</sup>。

$$Q_v = Q \frac{\rho_m - \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{底泥}} - \rho_{\text{水}}} \quad (4)$$

式中: $\rho_{\text{水}}$ 为试验温度下水的密度,0.964 g/cm<sup>3</sup>; $\rho_{\text{底泥}}$ 为底泥的密度,1.35 g/cm<sup>3</sup>。

## 2.4 试验机具设计

依照弗劳德数相似准则,原型机、试验机的关键构件尺寸对比见表1,试验机关键构件均按1:5比例尺缩小。原型机最大横移速度为13.4 m/min,额定转速为45 r/min,根据弗劳德数算出试验机对应的横移速度应为6 m/min(0.1 m/s),再由式(2)、(3)反算出试验机的额定转速为100 r/min。同机具配套的泥泵参数选取应按照额定扫掠产量进行匹配,并且泥泵电机具备调频功能,以满足当扫掠产量变化时可同倍率调节泥泵的流量。

表1 原型机、试验机的关键构件尺寸对比

Tab. 1 Key components for prototype and testing equipment

	m			
类别	螺旋直径	螺距	作业宽度	泥管直径
原型机	0.80	0.60	3.00	0.45
试验机	0.16	0.12	0.60	0.09

试验机主要尺寸:宽度0.60 m、螺旋外径0.16 m、螺距0.12 m,额定转速100 r/min,对应额定固有挖掘能力12.99 m<sup>3</sup>/h。结合试验条件,机具单次挖厚范围为0.03~0.06 m。

## 2.5 试验工况设计

试验分两类:第1类试验,使用环保罩,为主试验;第2类试验,针对额定工况(工况9),设计不使用环保罩对比试验,用于验证机具环保罩的效果。根据机具额定转速100 r/min下,设计额定固有挖掘能力12.99 m<sup>3</sup>/h,对应机具额定扫掠产量为12.96 m<sup>3</sup>/h。结合试验条件,确定工况设计策略:1)控制其他变量不变,分别设置0.8 $M_v$ 、1.2 $M_v$ 作为对照,即10.368、15.552 m<sup>3</sup>/h;2)控制其他变量不变,调节 $n$ ,分别设置0.8 $n$ 、1.2 $n$ 作为对照,即80、120 r/min;3)控制不同 $M_v$ 条

件下的试验挖厚分别为 0.03、0.06 m，机具挖泥移动速度由  $M_V$  反算得出；4) 第 1 类试验包含 2 种挖泥厚度、3 种转速，共 14 种不同工况的试验。第 1 类试验的工况参数见表 2。

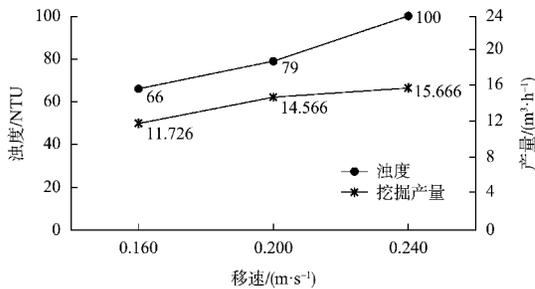
表 2 第 1 类试验工况参数  
Tab. 2 Test conditions for type 1 trials

工况序号	$H/m$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$M_V/(m^3 \cdot h^{-1})$	$n/(r \cdot min^{-1})$	$I_V/(m^3 \cdot h^{-1})$
1	0.03	0.200	12.960	120	15.59
2	0.03	0.240	15.552	120	15.59
3	0.06	0.100	12.960	120	15.59
4	0.06	0.120	15.552	120	15.59
5	0.03	0.160	10.368	100	12.99
6	0.03	0.200	12.960	100	12.99
7	0.03	0.240	15.552	100	12.99
8	0.06	0.080	10.368	100	12.99
9	0.06	0.100	12.960	100	12.99
10	0.06	0.120	15.552	100	12.99
11	0.03	0.160	10.368	80	10.39
12	0.03	0.200	12.960	80	10.39
13	0.06	0.080	10.368	80	10.39
14	0.06	0.100	12.960	80	10.39

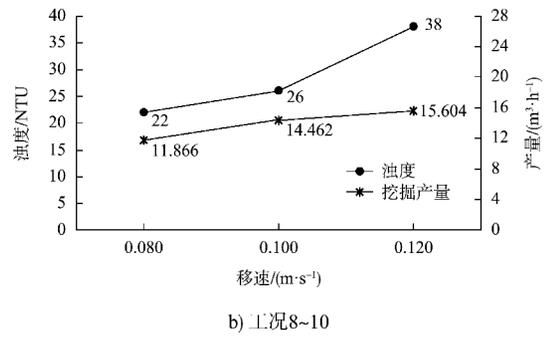
### 3 试验结果及分析

#### 3.1 额定转速、固定挖厚,不同移速的挖掘特性

根据第 1 类试验数据, 100 r/min 转速时, 分别将工况 5~10 下的挖掘特性(挖掘产量、浊度)随移动速度变化情况进行对比, 见图 4。由图可知: 1) 额定转速、同一挖厚, 机具自  $0.8M_V$  向  $1.2M_V$  增加的过程中, 随着机具移动速度的增加,  $Q_V$  随之增大, 增速递减; 2) 额定转速、同一挖厚, 机具自  $0.8M_V$  向  $1.2M_V$  增加的过程中, 随着机具移动速度的增加, 浊度  $T$  随之增加, 增速递增; 3) 各工况下的实际挖掘产量均高于理论扫掠产量。



a) 工况5~7



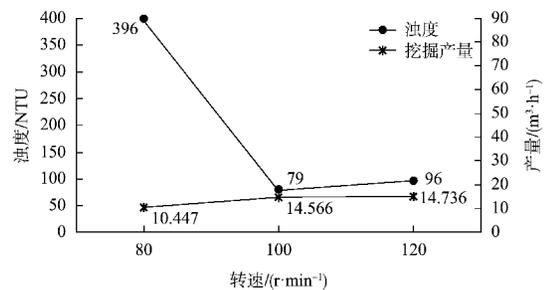
b) 工况8~10

图 4 不同移速下的挖掘特性曲线

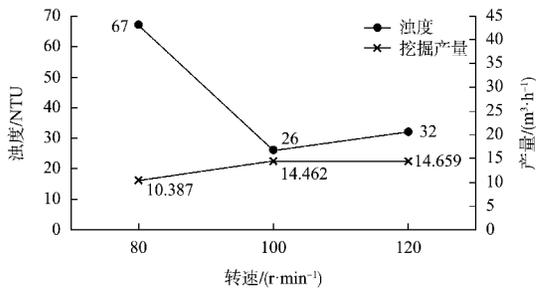
Fig. 4 Excavation characteristic curves at different moving speeds

#### 3.2 固定挖厚、移速,不同转速的挖掘特性

根据第 1 类试验数据, 分别将工况 1、6、12, 工况 3、9、14 在转速 80、100、120 r/min 时对应的挖掘产量、浊度等进行对比, 见图 5。由图可知: 1) 机具以额定扫掠产量挖泥, 提高螺旋转速, 固有挖掘能力增大, 挖掘产量先增大后趋于稳定; 2) 机具以额定扫掠产量挖泥, 提高螺旋转速, 固有挖掘能力增大, 机具挖掘过程产生的浊度先减小后趋于稳定, 额定螺旋转速时浊度较小; 3) 机具以额定扫掠产量挖泥, 固有挖掘能力降为额定扫掠产量的 0.8 倍时, 挖掘产量接近固有挖掘能力, 挖掘过程会产生最大浊度。4) 机具以额定扫掠产量挖泥, 固有挖掘能力同机具额定扫掠产量相同时, 挖掘产量略大于固有挖掘能力(或扫掠产量)。5) 机具以额定扫掠产量挖泥, 固有挖掘能力增加为额定扫掠产量的 1.2 倍时, 挖掘产量介于两者之间, 近似于固有挖掘能力同机具额定扫掠产量相同时的挖掘产量。



a) 工况1、6、12



b) 工况 3、9、14

图 5 不同转速下的挖掘特性曲线

Fig. 5 Excavation characteristic curves at different rotational speeds

### 3.3 固定转速、扫掠产量,不同挖泥厚度的挖掘特性

第 1 类试验分别探究了以下工况下挖掘产量、浊度等的变化规律: 1) 螺旋转速为 120 r/min 时, 扫掠产量分别为 12.960、15.552 m<sup>3</sup>/h; 2) 螺旋转速为 100 r/min 时, 扫掠产量分别为 10.368、12.960、15.552 m<sup>3</sup>/h; 3) 螺旋转速为 80 r/min 时, 扫掠产量分别为 10.368、12.960 m<sup>3</sup>/h。根据试验数据, 120、80 r/min 时, 在同一扫掠产量下, 挖掘产量、浊度的变化规律相似。由于篇幅限制, 考虑到实际作业应在额定工况附近进行, 以下仅展示螺旋转速为 100 r/min 时的挖掘产量、浊度的变化规律及分析。

转速 100 r/min 时, 将工况 5~10 的挖掘产量、浊度试验数据分别对比, 挖掘产量随挖厚变化的曲线见图 6, 浊度随挖泥厚度变化的曲线见图 7。由图可知: 1) 机具扫掠产量相同, 两种挖泥厚度作业工况下, 机具的挖掘产量无明显变化, 浊度明显降低; 2) 机具扫掠产量相同,  $H=0.06$  m 作业浊度约是  $H=0.03$  m 产生浊度的 33% (平均值)。

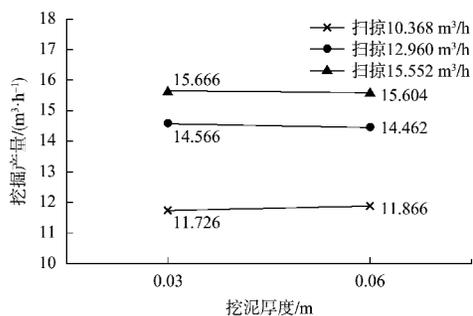


图 6 工况 5~10 挖掘产量变化曲线

Fig. 6 Excavation output variation curves for conditions 5-10

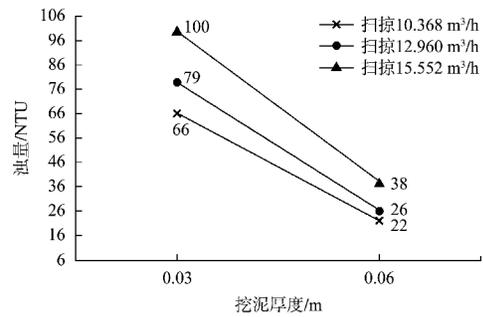


图 7 工况 5~10 浊度变化曲线

Fig. 7 Turbidity variation curves for conditions 5-10

### 3.4 环保罩效果验证

研究在额定工作状态下(工况 9), 使用环保罩(第 1 类试验)和不使用环保罩(第 2 类试验)时, 挖掘产量、浊度参数的变化规律。根据第 1 类试验数据, 工况 9 的挖掘产量为 14.462 m<sup>3</sup>/h、浊度 26 NTU; 根据 2 类试验数据, 工况 9 的挖掘产量为 9.544 m<sup>3</sup>/h、浊度 370 NTU。使用和不使用环保罩时对应的挖掘产量、浊度数据对比见图 8。由图可知, 在额定转速、额定固有挖掘能力、额定扫掠产量下, 使用环保罩可使挖掘产量提升 80%, 并降低浊度至原来的 14%。

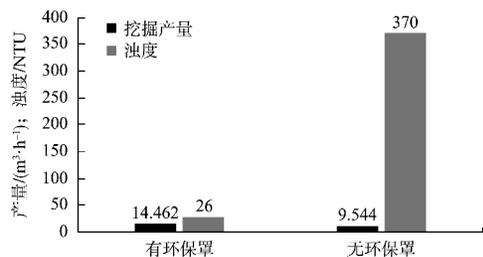


图 8 工况 9 有环保罩效果对比

Fig. 8 Effect comparison between having and not having an eco-cover under condition 9

### 3.5 综合分析

1) 机具扫掠产量应和额定固有挖掘能力相匹配, 从而获得较高的挖掘产量和较低的泥浆扩散。  
2) 机具保持额定固有挖掘能力挖泥, 若扫掠产量小于额定固有挖掘能力, 挖掘产量和浊度接近线性等比例降低; 若扫掠产量大于额定固有挖掘能力, 挖掘产量增加不明显, 泥浆泄漏增加, 导致浊度增加。

3) 各工况的实际挖掘产量均高于理论计算产

量,原因是机具吸泥口位置的真空负压较大,造成该区域的泥面被过吸,超出设定的挖泥厚度。

#### 4 工程试挖试验

通过模型试验确认研发机具的优良效果后,制作了可用于工程施工的机具。清淤机具整体支撑结构为钢质焊接结构,螺旋刀组采用铸造20CrNiMo优质合金钢,刀轴选用42CrMo材料。

##### 4.1 试挖结果

现场挖泥测试时,机具横移速度分别为11.0、13.4 m/min,单次挖厚为0.3 m。获取两种横移速度作业时的流量和泥浆浓度。其中,泥浆流量通过超声波流量计进行测量,泥浆密度通过称重法获得。底泥主要为淤泥土,密度为1.35 g/cm<sup>3</sup>,挖泥参数及工程试挖结果见表3。清淤机具正常作业时,在泥泵功率全开、机具横移速度为额定速度13.4 m/min时,泥浆体积分数达71%。若机具在障碍物较多区域,将横移速度减少至11.0 m/min时,泥浆体积分数达66%。

表3 挖泥参数及工程试挖结果  
Tab.3 Dredging parameters and data of engineering test

横移速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	泥泵流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	泥浆浓度/ (t·m <sup>-3</sup> )	体积 分数/%	产量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
11.0	1 080	1.23	66	709.7
13.4	1 080	1.25	71	771.4

##### 4.2 结果分析

从工程试挖效果看,清淤机具正常作业时,获得的泥浆体积分数达71%。而常规机具疏挖的泥浆体积分数在30%以下<sup>[8-9]</sup>,证实了新研制的清淤机具具备高浓度疏挖的能力。

工程试挖使用的机具为物模试验原型机,因工程船上所配泥泵为常规疏浚场景使用的泥泵,疏浚船舶的泥泵规格同物模试验所用泥泵规格无法映射对应。从两者挖泥效果上分析,仍具有一定的规律性。物模试验及工程试挖的挖泥参数对比见表4。在额定工况下,工程试挖的机具横移速度为13.4 m/min,根据弗劳德数相似准则,对应物模试验横移速度6.0 m/min。

表4 物模试验及工程试挖挖泥参数对比

Tab.4 Dredge parameters of physical model test and engineering test

类别	横移速度/(m·min <sup>-1</sup> )	体积分数/%	产量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
工程	11.0	66	709.700
试挖	13.4	71	771.400
物模	4.8	62	11.866
试验	6.0	71	14.462

由表4可知:1)物模试验结果折算成原型机产量为808.5 m<sup>3</sup>/h,同工程试挖产量(771.4 m<sup>3</sup>/h)相差4.8%;2)机具以11.0 m/min的移动速度作业时,工程试挖和物模试验所获得的体积浓度偏差为7.6%,物模试验折算成原型机产量为663.3 m<sup>3</sup>/h,同工程试挖产量(709.7 m<sup>3</sup>/h)相差6.5%;3)工程试挖、物模试验的体积浓度和挖泥产量偏差均小于预期测量误差10%<sup>[10]</sup>,故可认为两者的结果数据相吻合。

#### 5 结论

1)通过设计的物模试验,研究新机具的挖掘产量、泥浆扩散等指标,系统化研究了研发机具的作业规律特点。

2)研发的清淤机具额定作业工况下,可获得最大泥浆的体积分数为71%,最小浊度为26 NTU,清淤泥浆的体积分数较常规疏浚装备可增加136%以上,泥浆扩散浊度降低90%以上,较常规疏浚装备具有显著的泥浆浓度高、环保性好的优点,能为河湖清淤的有效开展提供高效、环保的装备条件<sup>[11]</sup>。

3)新型环保清淤机具呈现如下作业规律:扫掠产量、固有挖掘能力均按照额定参数施工,可以获得较高的挖掘产量、较低的泥浆扩散浊度,性能最优;额定扫掠产量、额定固有挖掘能力下作业,将挖厚增加1倍、机具移动速度降低50%,可降低浊度约67%;机具的环保罩能有效抑制泥浆扩散。

#### 参考文献:

- [1] 刘国瑞,黄冰,刘荣振,等.基于有限元法的螺旋式环保机具仿真研究[J].水运工程,2023(11):187-192.

- LIU G R, HUANG B, LIU R Z, et al. Simulation of environmentally friendly spiral dredging tool based on finite element method[J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 187-192.
- [2] 刘国瑞,杨正军,陈九肖,等.螺旋式机具疏浚性能及水动力特点研究[J].水运工程,2022(S2): 39-42, 53.
- LIU G R, YANG Z J, CHEN J X, et al. Dredging performance and hydrodynamic characteristics of screw-type cutter[J]. Port & waterway engineering, 2022(S2): 39-42, 53.
- [3] 张忱.一种新型环保疏浚与吹填机具研究[J].中国港湾建设,2013,33(5): 78-81.
- ZHANG C. Study on an environment-friendly new dredging and reclamation plant [J]. China harbour engineering, 2013, 33(5): 78-81.
- [4] VLASBLOM W J. Lecture WB3413/OE4626 Dredging Processes [M]. Netherlands: Delft University of Technology, 2007: 44-45.
- [5] 刘根生,潘子煜,温德超,等.气泡幕防疏浚泥沙扩散试验研究[J].中国农村水利水电,2024(7): 110-116.
- LIU G S, PAN Z Y, WEN D C, et al. Experimental studies on bubble curtains to control diffusion of dredged sediment [J]. China rural water and hydropower, 2024(7): 110-116.
- [6] 余新鹏.水下清淤装置吸泥管道流场分析及防堵方法研究[D].长沙:中南大学,2022.
- YU X P. Underwater dredging device suction pipe flow field analysis and anti-blocking method research [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [7] 饶洪华.泥浆泵实船特性测定[J].船舶标准化工程师,2022,55(2): 34-36, 51.
- RAO H H. Determination of real ship characteristics of mud pump [J]. Ship standardization engineer, 2022, 55(2): 34-36, 51.
- [8] 汤德意,翁浩轩,沈杰.绞刀作业参数对水库清淤污染物扩散的影响[J].水电能源科学,2018,36(4): 41-43, 5.
- TANG D Y, WENG H X, SHEN J. Impact of reamer operation parameters on pollutant dispersion in reservoir dredging[J]. Water resources and power, 2018, 36(4): 41-43, 5.
- [9] 闫云华.绞吸式挖泥船泥浆流速与浓度双参数的MFAC研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- YAN Y H. Research on mud concentration and velocity of dual parameter cutter suction dredger base on MFAC [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [10] 莫桂初.港池疏浚质量检测水深测量精度影响因子研究[D].上海:同济大学,2018.
- MO G C. Study on influencing factors of water depth measurement accuracy in harbor basin dredging quality inspection[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [11] 汪清.湖泊清淤底泥混凝脱水固化技术优化及应用[D].扬州:扬州大学,2024.
- WANG Q. Optimization and application of coagulation dehydration and solidification technology of lake sediment[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第198页)

- [13] 湖北省水利水电规划勘测设计院.湖北汉江碾盘山水电站预可行性研究报告[R].武汉:湖北省水利水电规划勘测设计院,2013.
- Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute. Pre-feasibility study report for the Nianpanshan hydropower station on the Hanjiang River in Hubei Province[R]. Wuhan: Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, 2013.
- [14] 湖北省水利水电规划勘测设计院.丹江口大坝加高调水95亿m<sup>3</sup>后汉江中下游皇庄、沙洋断面演算报告(1956年4月—1998年3月旬平均流量系列)[R].武汉:湖北省水利水电规划勘测设计院,2001.
- Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute. Section calculation report (10-day average flow series on April 1956 - March 1998) at the Huangzhuang and Shayang Sections of the middle and lower Hanjiang River following the Danjiangkou Dam heightening and a water diversion of 9.5 billion m<sup>3</sup> [R]. Wuhan: Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, 2001.

(本文编辑 王璁)