

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.002

超大跨度下卧扇形闸冲淤试验研究

刘元勋^{1,2}, 余澜轩^{1,2}, 王政平^{1,2}

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610;

2. 广东省水工程及清洁能源工程技术研究中心, 广东 广州 510610)

摘要: 针对澳门内港湾仔挡潮闸超大跨度(单孔净宽 62 m)下卧扇形闸门的泥沙淤积问题, 采用 1:20 整体单孔与 1:5 局部放大冲淤物理模型, 系统研究了不同淤沙厚度、外动力扬程与潮位条件下的冲淤规律及治理策略。试验涵盖水平冲淤、斜向冲淤及潮差自流产淤等典型工况, 重点分析了淤沙厚度、扬程与作业时间对清淤效果的影响。结果表明: 淤沙厚度是影响清淤效率的主导因素, 薄层淤积(≤ 10 cm)可通过常规外动力清除, 深厚淤积(≥ 20 cm)则需高扬程冲洗配合机械疏浚; 50 m 扬程在 7.5~10.0 min 内清淤效率最佳; 潮差自流在 $\Delta H \geq 1.0$ m 时可辅助冲刷浅层淤沙, 但无法替代外动力或机械清淤。基于试验结果, 提出了“定期浅层外动力冲洗 + 集中机械疏浚”的维护策略, 并给出了冲淤系统配置与运行参数建议。

关键词: 挡潮闸; 下卧扇形闸门; 冲淤试验; 清淤效率; 物理模型; 泥沙治理

中图分类号: TV66

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0009-08

Experimental Study on Sediment Flushing and Siltation for Ultra-large-span Bottom-hinged Sector Gates

LIU Yuanxun^{1,2}, YU Lanxuan^{1,2}, WANG Zhengping^{1,2}

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610, China;

2. Guangdong Provincial Water Engineering and Clean Energy Engineering Technology Research Center, Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: To address the sediment siltation issue of ultra-large-span (single-gate clear width of 62 m) bottom-hinged sector gates at the Inner Harbor A-Ma Barrage floodgate in Macau, a systematic study on the laws of sediment flushing and siltation, as well as control strategies, was conducted under varying conditions of sediment thickness, external hydraulic head, and tidal levels. The work utilized both a 1:20 overall single-gate physical model and a 1:5 locally enlarged model for siltation and flushing experiments. Tests covered typical operational scenarios including horizontal flushing, oblique flushing, and tidal-range self-flow flushing, focusing on the influence of sediment thickness, hydraulic head, and operation duration on sediment removal effectiveness. The results indicate that sediment thickness is the dominant factor affecting flushing efficiency. Thin-layer siltation (≤ 10 cm) can be removed by conventional external hydraulic flushing, whereas thick siltation (≥ 20 cm) requires high-head flushing combined with mechanical dredging. A hydraulic head of 50m yields optimal flushing efficiency within 7.5~10 minutes. Tidal-range self-flow flushing can assist in scouring shallow sediment when the tidal range $\Delta H \geq 1.0$ m, but cannot replace external hydraulic or mechanical dredging. Based on the experimental results, a maintenance strategy of "regular shallow-layer external hydraulic flushing + centralized mechanical dredging" is proposed, along with recommendations for the configuration and operational parameters of the flushing system.

Keywords: tide barrier; bottom-hinged sector gate; scouring and siltation experiment; desilting efficiency; physical model; sediment management

收稿日期: 2025-11-15

修稿日期: 2026-01-17

基金项目: 水利部重大科技项目 (SKS-20222116)

作者简介: 刘元勋(1972—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构设计工作。E-mail: liuyuanxun@126.com

通讯作者: 王政平(1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构、工程仿真研究工作。E-mail: sunwzhp@hotmail.com

河口及感潮河段水利枢纽在运行过程中,常因水动力条件改变引发悬移质泥沙淤积^[1],成为影响工程功能与安全的关键问题之一^[2]。对于采用下卧式闸门的闸坝,其闸室凹槽及护坦段易形成局部低流速区,为细颗粒泥沙的沉降淤积提供了有利条件。淤积体发展至闸门底缘时,将显著增大启闭阻力,诱发结构应力异常,直接威胁工程的运行可靠性与长期安全^[3-4]。因此,开展下卧式闸门的冲淤机理与治理策略研究具有明确的工程意义。

目前,国内外关于闸门冲淤的研究多集中于常规尺度或中小型结构^[5-8],而对单孔净宽超 60 m 的超大跨度下卧扇形闸门,在强潮汐动力作用下的泥沙运移规律与清淤控制研究尚显不足^[9]。澳门内港湾仔挡潮闸通航孔净宽达 62 m,其闸门作为典型的超大跨度下卧扇形结构,面临严峻的淤积威胁。模型试验观测表明,闸门底部及凹槽区域淤积问题突出。经分析,当闸门上板结淤泥厚度超过 0.15 m 时,已对闸门启闭安全构成明显影响。针对此类大跨度特殊结构的冲淤系统布置参数、清淤效率及其在不同潮位与淤积厚度下的适应性,仍缺乏系统的试验验证与优化依据。

为此,本文以澳门内港湾仔挡潮闸工程为背景,采用物理模型试验与理论分析相结合的方法,旨在系统研究超大跨度下卧扇形闸门的冲淤规律并提出针对性治理策略。研究构建了 1:20 整体单孔模型与 1:5 局部放大模型,兼顾宏观冲淤效率评估与近场泥沙输移细节观测,重点探究淤沙厚度、外动力扬程及潮位条件对清淤效果的影响。通过本研究,以期类似工程的冲淤系统设计、运行维护策略制定提供试验依据与理论参考。

1 工程概况

澳门内港挡潮闸工程位于澳门半岛西侧,属大(1)型水利枢纽,挡潮闸防洪(潮)标准为 200 年一遇(3.71 m),排涝标准为 20 年一遇,承担挡潮、防洪、排涝、通航等综合功能,工程平面示意如图 1 所示。闸址地处河口区感潮河段,受天文潮、风暴潮及降雨等共同作用,淤悬移质易随潮流、径流进入闸室与护坦区,淤积问题突出。

该工程通航孔采用旋转下卧扇形钢闸门,其单孔净宽达 62 m,是目前单孔净宽跨度最大旋转下卧扇形闸门^[10]。闸门底板高程为 -5.5 m,门顶高程为 5.5 m。在非挡潮工况下,闸门平卧于闸底凹槽内,门叶表面与河床平齐,以确保航道畅通;在挡潮

工况下,闸门绕轴逆时针旋转 90°立起,形成挡水立面^[11]。

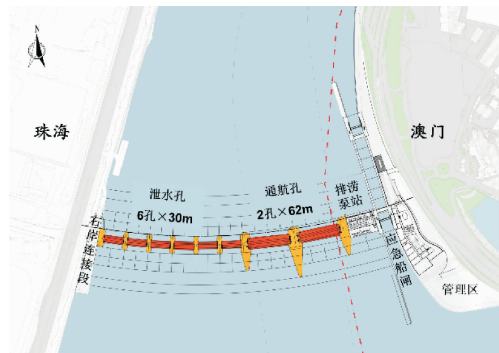


图 1 澳门挡潮闸工程平面示意图

2 试验模型设计

2.1 工程问题与治理方案

闸门下卧式运行方式,使得闸门下部的凹槽区域成为泥沙淤积的敏感区。该区域水流流速缓慢,为悬移质泥沙提供了良好的沉降环境^[12]。通过模型试验与分析得出,当闸门面板上板结淤泥厚度超过 0.15 m 时,将显著增大闸门启闭阻力与结构变形,危及止水密封性与运行安全;若集淤槽内淤积物累积至闸门底缘,则会在启闭过程中产生巨大的剪切与摩擦阻力,制约闸门的正常运作^[13]。因此,有效解决闸门底部及周边的泥沙淤积问题,是保障该超大跨度下卧扇形闸门长期安全、稳定运行的关键^[14]。

为解决闸址处淤泥板结与淤积对闸门启闭的影响,本研究提出一套“水力导移-集中堆积-机械外运”的联动治理方案,其核心构成如下:①水平冲淤系统:于闸门门楣处布置水平向冲淤管,当闸门平卧时,通过高压射流在闸板与底板间产生剪切流,用于清除薄层淤泥并抑制板结,保障闸门启闭顺畅。②斜向冲淤系统:于闸室凹槽切向布置斜向冲淤管,并设置集淤池。当闸门挡潮时,利用该系统的水力冲刷作用,将闸室斜坡面的淤泥引导并集中至集淤池。③机械外运系统:当集淤池内淤积达到设计容量后,启动清淤船或淤泥泵等机械化设备进行集中疏浚与外运,作为最终处置手段。该方案通过水力冲淤实现淤泥的松动与导移,通过机械方式完成最终清除,旨在实现清淤作业的高效性与经济性。

2.2 模型相似理论与设计

为保证试验结果能有效预测原型行为,模型设计遵循重力相似准则^[15]。考虑到研究目标兼顾整

体效应与局部细节,试验采用两种几何比尺的物理模型:①整体模型:采用 1:20 几何比尺($L_r = 20$)建立整体单孔模型,主要用于重现闸门整体的冲淤现象并评估宏观清淤效率。②局部模型:采用 1:5 几何比尺($L_r = 5$)建立局部放大模型,用于精细观测闸门近区的流态结构、泥沙输移路径及堆积形态,并校核尺度效应。基于弗劳德相似准则,推导得到各主要物理量的相似比尺^[16],如表 1 所示。

表 1 模型比尺

| 物理模型 | 相似比尺 | 比尺关系 | 比尺值 |
|-------------|--------|-------------------|---------|
| 1:20 整体单孔模型 | 长度比尺 | L_r | 20 |
| | 流量比尺 | $Q_r = L_r^{2.5}$ | 1788.85 |
| | 流速比尺 | $V_r = L_r^{0.5}$ | 4.4721 |
| | 时间比尺 | $V_r = L_r^{0.5}$ | 4.4721 |
| | 压力比尺 | $P_r = L_r$ | 20 |
| | 糙率系数比尺 | $n_r = L_r^{1/6}$ | 1.6475 |
| 1:5 局部放大模型 | 长度比尺 | L_r | 5 |
| | 流量比尺 | $Q_r = L_r^{2.5}$ | 55.9017 |
| | 流速比尺 | $V_r = L_r^{0.5}$ | 2.2361 |
| | 时间比尺 | $V_r = L_r^{0.5}$ | 2.2361 |
| | 压力比尺 | $P_r = L_r$ | 5 |
| | 糙率系数比尺 | $n_r = L_r^{1/6}$ | 1.3078 |

试验泥沙根据现场勘测数据选定。原型年淤积厚度约为 1.0~1.2 m,最大月淤积厚度按 20~30 cm 考虑。通过试验测定,原型泥沙的起动流速范围为 0.76~0.88 m/s,模型试验中按此范围控制泥沙的相似性。

2.3 冲淤系统配置

冲淤系统的模型配置参照设计方案进行。冲淤管道布置于闸门两侧门楣及闸室内部,以分别清除闸门全开位与全关位的淤沙。主管道($\Phi_1 = 1500$ mm)沿闸室布置,并于中部对称分为两支管($\Phi_2 = 600$ mm),

支管间夹角为 45°。主管与支管均设置于专用泵房及管道廊道内,整套管道系统共设 10 道支管,每道支管负责约 6 m 宽度的冲淤区域,以实现对冲底的全覆盖。

支管上以中心间距 $\Delta = 300$ mm 设置冲淤喷嘴,喷嘴直径 $d = 100$ mm。冲淤泵站模型按设计方案分为 3 组,每组 8 台泵(上下游各 4 台),单台泵的设计流量为 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$,设计扬程为 50 m。冲淤系统的剖面布置详见图 2。冲淤管布置与闸室模型图见图 3。

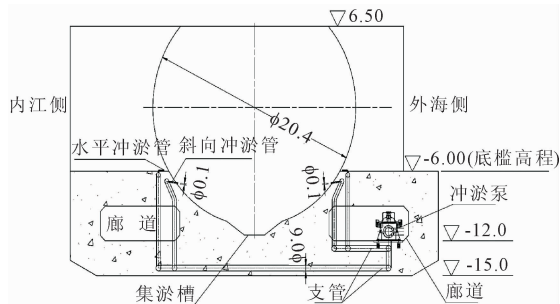


图 2 闸门冲淤系统剖面图(单位:m)

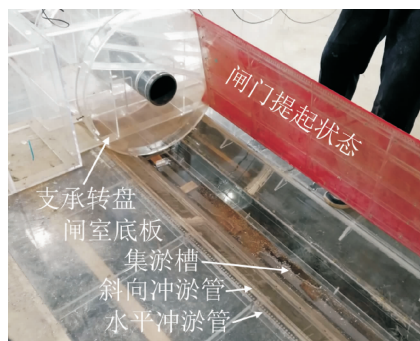


图 3 冲淤管布置与闸室模型图

2.4 试验工况与数据采集

为系统研究冲淤效果,试验设置了四组试验,如表 2 所示。

表 2 试验工况汇总

| 编号 | 试验研究类型 | 模型尺度 | 控制变量 | 试验目的 |
|----|---------|------------|--|---------------------------|
| G1 | 淤沙厚度影响 | 1:20 | 淤沙厚度: 5, 10, 15, 20, 30 cm | 探究淤沙厚度对清淤效率的主导作用 |
| G2 | 扬程-时间耦合 | 1:20 & 1:5 | 扬程: 30, 40, 50 m; 时间: 2.5~12.5 min | 量化扬程与作业时长对清淤效果的影响,校核尺度效应 |
| G3 | 潮差自流冲淤 | 1:20 & 1:5 | 潮差(ΔH): 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.7 m | 评估利用潮差进行节能冲淤的可行性及效果 |
| G4 | 斜向水力冲淤 | 1:20 | 淤沙高度: 0.3, 0.8, 1.3, 1.8, 2.3 m | 验证斜向冲淤管将泥沙导入集淤池的“引导-集中”效果 |

试验过程中,主要通过以下指标量化冲淤效果:
①冲净范围:从冲淤孔下游起算,淤沙被完全清除的

最大水平距离(m);②残留比例:试验后,残留淤沙面积占初始淤沙面积的百分比(%);③堆积高度:

在主要堆积区测量的淤沙最大垂直高度(m)。数据采集综合运用了高清摄像记录、视频过程追踪与试验后地形定量测量相结合的方法,以确保数据的准确性与可重复性。

3 试验结果与分析

3.1 闸门平卧水平冲淤试验效果

3.1.1 淤沙厚度对清淤效率的控制作用

在恒定外动力扬程(50 m)与单分区作业时长(约 22 min)条件下,淤沙厚度是控制清淤效率的主导因素。图 4 展示了不同初始厚度下的冲淤效果。为提高试验效率,试验沿门轴线将闸门面划分为 A、B、C 等分区,并对各分区分别采用不同的冲淤时长以记录其响应;具体观测结果如下:①5 cm 淤沙:在约 22 min 的冲淤过程中,闸门面板仅在后部出现微小残留区域,残留量约占原门面淤沙的 1/6;②10 cm 淤沙:冲淤 5 min 时淤沙已移至闸门宽度约 1/2;

约 15 min 时冲净范围扩大至约 12 m;约 22 min 后门板基本清净,但闸门后部仍约 1/5 的淤沙未能冲出。由此可见,对于 10 cm 厚度,延长冲淤时间有助于显著提高局部清净范围,但短时冲洗仍留有后部残沙;③15 cm 淤沙:冲淤 22 min 后门面板后部仍有少量残留,残留量约 1/5;④20 cm 淤沙:在相同分区持续约 22 min 的条件下,闸门面板仍有约 1/4 的淤沙未被冲净;⑤30 cm 淤沙:约 22 min 后闸门面板约 1/2 的淤沙仍留存于门面。

总体而言,冲淤效率随淤沙厚度增加而显著降低。薄层(≤ 5 cm)可在常规分区作业条件下快速清净;中等厚度(10~15 cm)需延长冲淤时间以减少后部残留;厚层(≥ 20 cm)则需提高外动力扬程或辅以机械疏浚方可达到工程可接受的清淤水平。该规律为通航孔闸门的日常维护与应急清淤策略提供了重要参考依据。

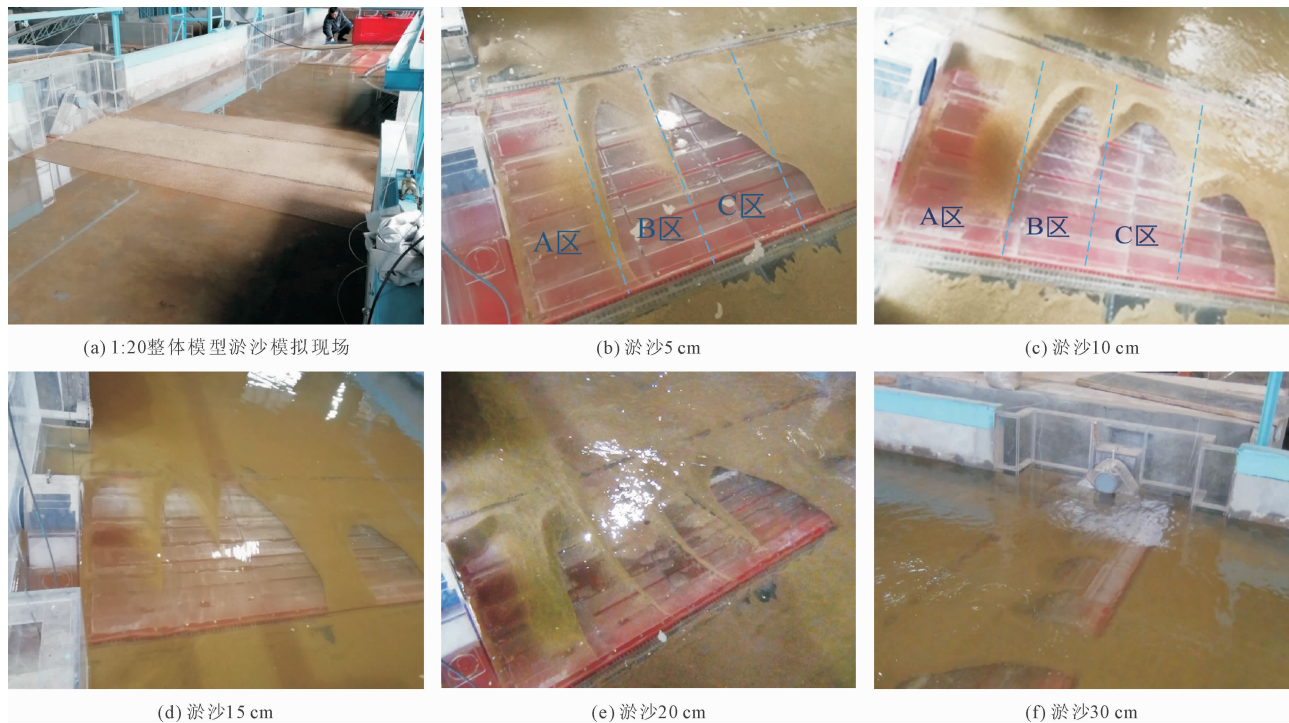


图 4 冲淤试验结果

3.1.2 扬程与时间的耦合影响

为评价冲淤泵扬程与单次作业时长对短时冲移距离与清淤效率的影响,基于 1:20 整体单孔模型开展了系统的扬程-时间耦合试验,且为校核尺度效应并获取近场堆沙高度等细节量值,进一步进行了 1:5 局部放大模型试验。

试验结果见表 3,表 3 数据显示,冲净范围随扬

程提高而显著增大。在 7.5 min 作业时间下,30、40 和 50 m 扬程对应的冲净范围分别为 3.8~4.2、5.8~6.8、7.8~9.6 m。50 m 扬程在 7.5~10.0 min 内表现最优,冲净范围可达 8~11 m,部分试验结果见图 5—图 8。可见,提高冲淤泵扬程可显著扩大单位时间内的冲移距离并提升清淤效率,但需在设备能耗与施工经济性间权衡。在逐分区约 22 min 的常

规作业节奏下,50 m 扬程较 30 m 和 40 m 更能有效清除门面淤沙;若受限于扬程条件,可通过延长冲淤时间或配合机械疏浚以满足清淤要求。

同时,1:5 局部模型观测到冲移后淤沙在闸门后部形成集中堆积,高度在 1.0~1.4 m 之间,证实了水平冲淤的位移效应而非彻底清除。

表 3 模型水平冲淤试验结果(淤沙 20 cm)

| 扬程 /m | 冲淤时间 /min | 整体单孔模型 (1:20) | 局部放大模型(1:5) | |
|-------|-----------|---------------|-------------|--------|
| | | 冲净范围/m | 冲净范围/m | 堆沙高度/m |
| 30 | 2.5 | 2.8~3.3 | 5.5~5.75 | 0.95 |
| | 5.0 | 3.6~4.2 | 6.0~6.75 | 1.20 |
| | 7.5 | 3.8~4.2 | | |
| | 10.0 | 4.0~4.2 | | |
| 40 | 2.5 | 3.0~4.8 | 6.0~6.25 | 1.10 |
| | 5.0 | 5.8~6.4 | 6.25~8.75 | 1.25 |
| | 7.5 | 5.8~6.8 | | |
| | 10.0 | 6.8~8.2 | | |
| 50 | 12.5 | 6.4~9.6 | | |
| | 2.5 | 4.8~6.6 | 6.0~7.5 | 1.35 |
| | 5.0 | 6.4~7.6 | 6.8~8.85 | 1.40 |
| | 7.5 | 7.8~9.6 | | |
| | 10.0 | 9.0~10.8 | | |
| | 12.5 | 7.6~11.2 | | |



图 7 1:5 局部放大模型淤沙模拟实景

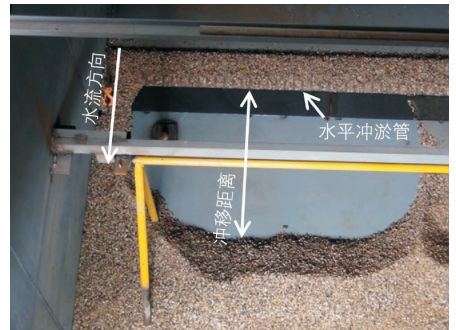


图 8 淤沙 20 cm 扬程 40 m 冲淤 5.0 min 试验结果

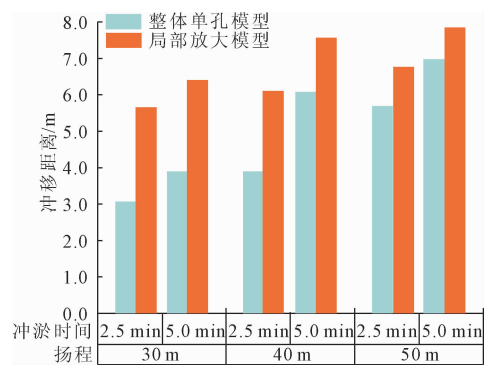


图 9 模型水平冲淤试验结果对比图

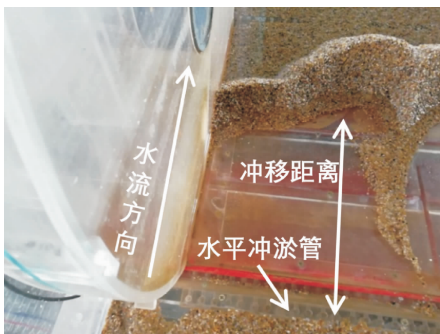


图 5 扬程 50 m 冲淤 2.5 min 试验结果



图 6 扬程 50 m 冲淤 12.5 min 试验结果

3.2 集淤槽冲淤试验效果

为揭示不同水动力条件下闸室及集淤槽内泥沙的运动规律与清淤效果,本节基于 1:20 整体单孔与 1:5 局部放大模型,分别开展了潮差驱动自流水动力冲淤与外动力高压管道冲淤试验。通过对比分析不同潮差、扬程及淤沙厚度条件下的冲刷形态与堆积特征,探讨了各清淤方式的适用范围与可行性,为后续冲淤方案优化与运行策略提供试验依据。

3.2.1 潮差自流水动力冲淤

为节约工程运行成本并减少高压管道冲淤的使用频次,试验首先考虑利用内外潮差形成的水位差驱动自流冲淤。在工程运行中,下卧式闸门提起挡潮时,闸门底缘和侧缘的止水与闸室底板的预埋件

接触形成水封;当需利用潮差产生自流冲淤时,通过对闸门小幅回转使止水与预埋件之间形成可控的狭缝过水通道。该缝隙在内外水位存在差值(潮差)时允许水流通过,潮差驱动的通流在闸室-集淤槽内产生局部环流与底部剪切力,从而诱发泥沙的起、扬起与局部输移,集淤槽如图 10 所示。

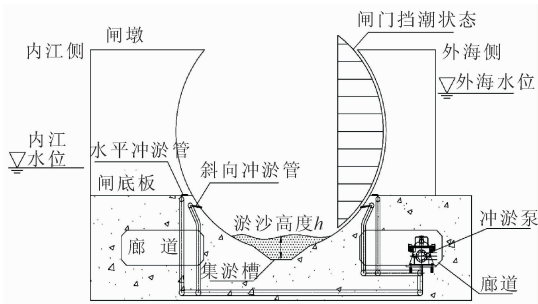


图 10 集淤槽示意图

在低潮差条件($\Delta H = 0.75 \sim 1.5 \text{ m}$)下,闸门微启形成的自流水流速与底部剪应力较低,泥沙主要在闸室斜坡与槽口前缘发生局部掀动,并堆积于集淤槽坡脚,典型冲刷距离约 $1.5 \sim 1.6 \text{ m}$,外运量极低,运动模式以“推移-回落-再堆积”为主。当潮差增至 $\Delta H \approx 2.0 \text{ m}$ 时,槽内形成明显环流与周期性翻滚区,浅层(0.3 m)淤沙可被扬起并产生局部输移,部分细颗粒可能随流逸出,但整体仍以槽内循环

为主。高潮差条件($\Delta H \approx 3.7 \text{ m}$)下,翻滚范围与扬动强度进一步增大,部分泥沙可被带出槽体并下泄至下游, 3.7 m 水位差淤沙 1.8 m 自流冲淤试验结果如图 11 所示。然而对于厚层淤积($\geq 1.8 \sim 2.3 \text{ m}$),冲刷作用仍主要限于淤体前部约 $2/3 \sim 4/5$ 区段,深部泥沙因压密与黏结难以被有效掏刷,整体外运比例依然有限。

试验表明,潮差是控制自流冲淤效果的关键因子。随潮差增大,槽内流速、底床剪切力与环流强度增强,泥沙扬动与外运概率整体提高;但潮差超过临界值(约 2.0 m)后,清淤效率的边际增益显著减弱。同时,淤积厚度也显著影响冲淤有效性:浅层淤积($\leq 0.3 \text{ m}$)易于被扰动并实现再分布;中厚层淤积($0.8 \sim 1.8 \text{ m}$)在潮差大于约 1.0 m 时可被输移,但所需作用时间随厚度增加;厚层淤积($\geq 2.0 \sim 2.3 \text{ m}$)则因深部泥沙压密黏结,难以被彻底外运,冲刷主要集中于淤体前部。

综上,自流冲淤在潮差大于约 1.0 m 时可对不同厚度淤沙产生辅助冲刷效果,但其作用受厚度与时间限制。因此,建议将自流冲淤作为日常维护或轻淤阶段的节能辅助手段,并与外动力冲淤或机械疏浚结合使用,以满足深槽或厚淤条件下的彻底清淤需求。

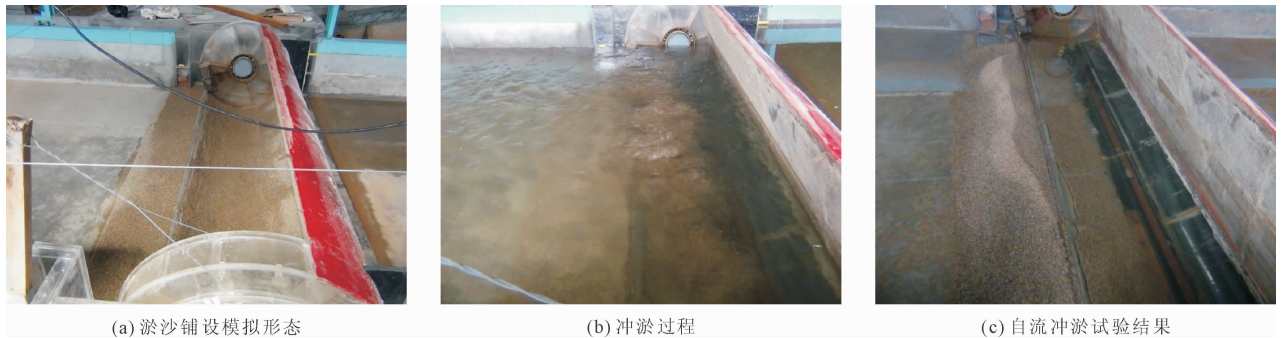


图 11 3.7 m 水位差淤沙 1.8 m 自流冲淤试验结果

3.2.2 管道高压水力冲淤试验

斜向冲淤的主要功能是在闸室斜坡处将弧面泥沙推入集淤池并集中堆积,便于后续机械或船舶清淤。集淤槽淤沙高度 2.3 m 扬程 50 m 冲淤试验如图 12 所示,高压管道冲淤试验观测表明:

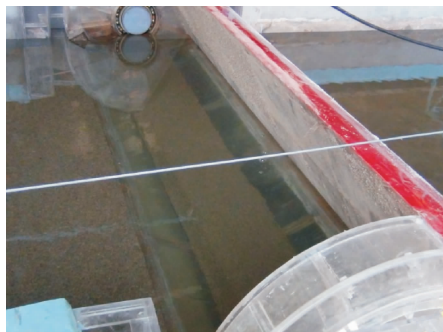
在所有试验条件下,泥沙均表现出以“冲移-堆积”为主导的行为模式:斜向冲淤能够将闸室斜坡上的淤沙推移并集中堆积于集淤槽中后部,有利于后续机械清淤,但未能使泥沙充分扬起并在水体中形成持续悬移和向外输运。随着扬程增大($30 \sim 50$

m),局部扬动略有增强,但泥沙仍主要在槽内翻滚回落,堆积位置略向中后部移动;当淤积厚度较高(接近或达到 2.3 m)时,冲淤的有效推进深度和搬运能力显著降低,难以将泥沙进一步推向集淤槽深处或实现外运。

模型试验表明,斜向冲淤在当前布置下可实现淤沙从闸室斜坡向集淤槽的有效集中,便于船舶清淤,但其作用以“集中堆积”为主,并不能替代机械疏浚作为将泥沙彻底外运的主要手段。 $1:5$ 局部放大模型结果与 $1:20$ 整体模型基本一致,验证了在不

同淤厚与扬程组合下冲淤机理的相似性,支持将结论外推至工程实际时采取保守判断,即在现有条件

下宜将斜向冲淤作为“集中+机械”联合清淤策略的预处理环节。



(a) 淤沙模拟实景



(b) 冲淤试验结果

图12 集淤槽淤沙高度2.3 m 扬程50 m 冲淤试验

4 讨论

4.1 冲淤系统运行策略优化

基于试验结果,水力冲淤应明确定位为“预处理与导移”手段,其核心目标是预处置板结松动淤沙并将其引导至集淤池,为最终的机械化集中外运创造条件。

(1) 水平冲淤运行策略:对于闸门平卧工况,建议采用“分区、逐段、短时高效”的作业模式。喷嘴参数($\varphi = 100 \text{ mm}$, $\Delta = 300 \text{ mm}$)与6 m作业单元划分被证实是有效的。常规维护周期可依据月均淤积量(20~30 cm)设定为每月一次。当在线监测显示闸底淤积厚度接近0.6 m时,应提升作业等级,启动高扬程泵组并准备机械疏浚。

(2) 斜向冲淤与潮差利用协同策略:闸室凹槽区域应优先利用斜向冲淤管进行“引导-集中”。在潮差较大($\Delta H \geq 1.0 \text{ m}$)时,可优先启用潮差自流冲淤作为节能辅助措施。当潮差不足或集淤槽容量受限时,则需启动斜向高压冲淤或直接进行机械疏浚。

4.2 冲淤设备选型与工程配置

设备选型需在清淤效率与运行经济性之间寻求平衡。

(1) 泵站扬程配置:试验表明,50 m扬程在短时清淤中优势显著,但能耗较高。建议泵站采用分组并联与可变速控制设计,以适应不同工况:常规维护采用30~40 m扬程,快速恢复或处理深厚淤积时启用50 m高扬程。

(2) 清淤阈值与闭环管理:应建立“在线监测-预警-分级处置”的运行闭环。本研究建议以闸底淤积0.6 m作为启动机械外运的预警阈值。据此可制定示例性运行计划:水力冲淤(每周或按监测触

发)、机械外运(每月或当堆积厚度 $\geq 0.6 \text{ m}$ 时)、闸门运行与系统检查(每月)。

4.3 研究结论的工程外推与不确定性

本研究通过1:5与1:20双尺度模型对比,验证了主要结论在不同尺度下的一致性,增强了向工程原型外推的可靠性。然而,在工程化应用中,仍需考虑以下不确定性:原型泥沙的时空变异性可能超出模型试验的控制范围;管道系统的实际水力损失、泵组效率等可能影响最终出流效果。建议在工程实施初期,通过原型试运行对设计参数进行现场校核与优化。

5 结论

本研究基于1:20(整体单孔)与1:5(局部放大)模型,系统分析了超大跨度下卧扇形闸门在不同淤沙厚度、外动力扬程与潮位条件下的冲淤试验,主要得到以下结论:

(1) 阐明了淤沙厚度是控制清淤效率的主导因素。冲淤效率随淤沙厚度显著下降。对于薄层淤积($\leq 10 \text{ cm}$),采用50 m扬程在22 min分区作业内可基本清除;对于中等厚度淤积(10~15 cm),需延长作业时间或提高扬程;对于深厚淤积($\geq 20 \text{ cm}$),则必须采用高扬程(50 m)外动力冲洗并配合机械疏浚方能达到工程要求。

(2) 量化了外动力扬程与作业时间的耦合效应。在20 cm淤沙条件下,50 m扬程在7.5~10.0 min作业时间内清淤效率最佳,冲净范围可达8~11 m;40 m扬程次之;30 m扬程在短时($\leq 10 \text{ min}$)条件下清淤能力有限。双尺度模型试验结论一致,但绝对数值存在尺度放大效应,工程外推需校核。

(3) 明确了斜向冲淤与潮差自流的功能定位。

斜向冲淤管能有效将闸室斜坡淤沙引导并集中堆积于集淤槽,但其远距离外运能力有限,是高效的“预处理-集中”措施。潮差自流冲淤在潮差大于 1.0 m 时对浅层淤沙有明显辅助冲刷作用,但无法独立解决深厚淤积问题,应作为节能辅助措施与主动冲淤方案配合使用。

(4) 基于上述研究,提出了以“定期浅层外动力冲洗+集中机械疏浚”为核心的工程维护策略,并给出了具体的设备选型(如泵站宜采用 30~50 m 变扬程设计)与运行控制参数(如建议以闸底淤积 0.6 m 作为机械清淤启动阈值),为工程设计与运行管理提供了直接依据。

本研究结论可为澳门内港挡潮闸及类似超大跨度下卧闸门的冲淤系统设计与安全高效运行提供理论支撑与试验参考。

参考文献:

- [1] 孙洪滨,黄敏,曹恒军,等. 沿海挡潮闸冲淤减淤调度运用关键技术研究[J]. 水利水电技术,2015,46(03): 97-100.
- [2] 方张斌,吴华安,颜金龙,等. 淤泥质海岸航道工程泥沙淤积研究[J]. 中国农村水利水电,2025(9): 92-98.
- [3] 韩晓维,周文文,史斌. 双层挡潮闸水力冲淤试验研究[J]. 中国农村水利水电,2022(6): 60-65,75.
- [4] 林一楠,潘虹,胡成飞,等. 曹娥江大闸闸下地形影响因素分析及预测[J]. 水利水运工程学报,2024(6): 97-102.
- [5] 周世良,王智,王云莉,等. 新三江船闸曹娥江侧局部动床物理模型试验研究[J]. 水运工程,2025(9): 114-122.
- [6] 吕升奇,许郑宇,唐洪武,等. 外秦淮河武定门闸上游

减淤物理模型试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2): 63-68.

- [7] 李乐诗,吴腾,秦杰,等. 清水条件下河床冲淤平衡时间研究[J]. 泥沙研究,2025,50(4): 15-22.
- [8] 林一楠,潘虹,胡成飞,等. 曹娥江大闸闸下地形影响因素分析及预测[J]. 水利水运工程学报,2024(6): 97-102.
- [9] 田少杰,陈隽祎,王雪梅,等. 复杂条件下某大型挡潮闸的设计方案研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(S2): 187-192.
- [10] 靳高阳,易灵,陈飞. 澳门内港挡潮闸工程泥沙淤积特征分析[J]. 水利技术监督,2024(3): 229-232, 271.
- [11] 王正中,徐超. 国内外大跨度挡潮闸应用评述[J]. 长江科学院院报,2018,35(12): 1-11.
- [12] Tohidloo P, Abbasi S. Improving the efficiency of gate operation plans via the installation of a motivator structure[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2025, 102:102821.
- [13] 郭公林,栾华龙,吕超凡,等. 鄱阳湖入江水道冲淤变化对湖区水动力影响分析[J/OL]. 人民长江,1-11 [2025-11-04]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20251014.1902.008>.
- [14] 郑主平,谈广鸣,罗景,等. 我国河口挡潮闸闸下泥沙冲淤研究综述[J]. 水利水电科技进展,2007,27(S2): 11-15.
- [15] 李伟,沈晓鹏,李书兆,等. 钢圆筒防护装置周围海床冲淤试验研究[J]. 水利水运工程学报,2024(5): 124-131.
- [16] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1): 136-142.