

· 施 工 ·



黏土耙头喷嘴角度及喷嘴排布优化*

荣建国^{1,2}, 陈天山^{1,2}, 王 涛^{1,2}, 薛艳琛^{1,2}

(1. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 524557; 2. 中交广航疏浚有限公司, 广东 广州 510220)

摘要: 针对挖掘黏土容易形成堵耙、结块等现象, 以耙头挖掘黏土为研究对象, 结合耙吸式挖泥船在实际施工过程中遇到的堵耙、闷耙、滑耙等问题, 通过计算流体力学数值模拟的手段, 分析大型耙吸式挖泥船的原始耙头模型在不同工况下耙头及吸入管道的内部流动, 为耙头高压冲水中的喷嘴角度及喷嘴排布等设计提供参考。结果表明: 当喷嘴角度为 10° 时, 高压冲水的冲击角度可以有效地冲刷黏土的易粘区域, 有利于黏土的输送; 当喷嘴呈叉排分布且喷嘴排距为 115 mm 时, 压力核心明显对靶面冲击效果较好, 且各高压水射流的干扰以及在靶面上回流的干扰作用也较小。

关键词: 耙吸式挖泥船; 喷嘴角度; 喷嘴排布; 高压冲水; 数值模拟; 内流场

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0226-09

Optimization of nozzle angle and nozzle layout for clay rake head

RONG Jianguo^{1,2}, CHEN Tianshan^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, XUE Yanchen^{1,2}

(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 524557, China;

2. CCCC-GH Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: To the phenomenon of clogging and clumping easily caused by excavating clay, this study takes the excavation of clay with a rake head as the research object. Combined with the problems encountered by trailing suction hopper dredgers in the construction process of actual engineering, such as clogging rake, trapped rake, and sliding rake, the original rake head model of a large trailing suction hopper dredger is analyzed through numerical simulation of computational fluid dynamics under different working conditions, and the internal flow of the rake head and suction pipeline is analyzed, providing reference for the design of nozzle angles and nozzle arrangements in high-pressure flushing of the rake head. The results indicate that when the nozzle angle is 10° , the impact angle of high-pressure flushing can effectively wash away the sticky areas of clay, which is beneficial for the transportation of clay. When the nozzles are distributed in a forked pattern and the nozzle spacing is 115 mm, the pressure core has a significant impact on the target surface, and the interference of high-pressure water jets and backflow on the target surface is also relatively small.

Keywords: trailing suction hopper dredger; nozzle angle; nozzle layout; high pressure flushing; numerical simulation; internal flow field

随着疏浚工程的不断扩展, 挖泥船技术也在不断进步^[1]。耙吸式挖泥船因其高效、灵活的特点, 在疏浚工程中得到了广泛应用^[2], 然而, 在挖掘黏土等高黏性土质时, 耙吸式挖泥船的耙头容易受到堵塞问题的困扰, 这严重影响了施工效

率和设备的正常运行^[3], 为了解决这一问题, 研究人员进行了大量的实验和理论研究。

为了提高耙头的挖掘效率, 解决耙头堵塞问题, 国内外各挖泥船制造商和疏浚公司针对不同的疏浚条件, 对耙头进行了改良, 设计并制造出

收稿日期: 2024-10-30

*基金项目: 中国交通建设集团有限公司重大课题资助项目(2022 年)

作者简介: 荣建国 (1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为轮机管理。

众多专用耙头, 提出一系列优化方法, 以提高耙吸式挖泥船的产能^[4-5]。其中, 郝光杰^[6]从耙头挖掘原理入手对耙头进行建模优化; 郑金龙等^[7]通过对耙头内部泥沙的流动状态进行分析, 实现对耙头的优化, 优化后的耙头内流场实现了低流动阻力和减少涡流的目的; 文武^[8]利用 CFD 软件进行数值模拟, 研发出了主动型高效耙头; Su 等^[9]提出使用 CFD 的方法解决挖泥过程中产生的耙头堵塞问题。

为了有效解决耙头堵塞问题, 许多学者对辅助耙头工作的高压冲水方法进行研究^[10]。逯新星等^[11]采用梯形耐磨块内安装斜冲式高压冲水喷嘴的方法, 增加高压冲水对土质的剪切破坏作用, 达到泥块脱离泥层的效果; 杨广志^[12]从防止耙头冲水垂直冲击泥面以及防止喷嘴垂直接触泥面等 2 个角度对高压冲水进行系统改进。也有学者利用 CFD 的方法对耙头喷嘴进行数值模拟分析。陈浩等^[13]利用 CFD 方法对耙吸式挖泥船耙头冲水系统喷嘴布局进行优化, 发现采用叉排的方式可有效改善射流对泥沙的冲击效果。尹纪富等^[14]也利用 CFD 方法分析喷嘴移动速度对高压冲的水流速度、压力及涡量场特性的影响。刘昊阳等^[15]采用 CFD 方法分析不同喷嘴间距及排列方式下水射流对耙物冲击效率的影响。郑金贵^[16]分析了喷嘴直径对耙物的冲击压力。

相比于以上学者对耙头喷嘴移动速度和喷嘴排布进行优化, 本文从耙头喷嘴角度和喷嘴排布两方面解决耙头堵塞问题。利用 CFD 数值模拟的方法, 分析在不同喷嘴角度下耙头内部黏土的分布情况, 以此提高喷嘴水射流对黏土的冲刷作用; 分析喷嘴所采用的排布方式及喷嘴排距对耙面的影响, 综合考虑喷嘴水射流之间的相互干扰以及耙面压力 2 个因素, 实现对喷嘴排距的优化。

1 模型与计算方法

1.1 耙头模型

主要关注耙吸式挖泥船耙头处流场特性, 因此选择框线内部耙头工作时的影响区域进行研究,

见图 1, 建立耙头内部过流区域的几何模型进行分析研究。

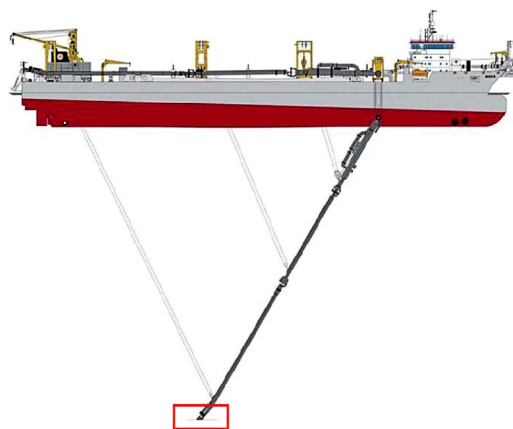


图 1 计算区域选择

Fig. 1 Calculation area selection

1.2 网格划分

由于泥沙流经区域不规则, 为了能按时完成计算工作, 以及保证计算的准确性, 使用高级尺寸函数将模型中带有曲率和细微特征的局部区域进行网格加密, 保证计算精度的同时节省计算时间。同时, 采集现场工作时的数据作为边界条件, 保证边界条件的合理性和求解方案的可靠性。

1.3 边界条件

本文主要通过数值模拟手段, 分析耙头吸入管道及外部影响区域的流场分布, 分析黏土被耙头破碎后与水流混合后在流道中的运移过程。对于所选定的计算区域, 泥沙和水的混合物从耙齿附近进入活动罩, 经过隔栅, 由于泥泵的抽吸作用, 进入吸泥管, 混合均匀的泥沙沿吸入管进入泥舱。进口采用速度进口, 速度值根据质量守恒定律由泥浆在耙管内的流速换算得出。通过湍流强度和湍流耗散率描述进口流; 出口为压力出口, 其真空度数值由实船数据给出; 壁面采用无滑移边界条件, 近壁区域采用标准壁面函数处理。

1.3.1 进口速度

耙头模型的进口包括 2 处, 即耙头的进口和高压冲水的进口。

耙吸式挖泥船在稳定工作时, 航行速度基本

稳定, 可视为匀速直线运动。耙头内的流动速度为耙吸船前进速度与活动罩吸入速度的合成, 将这种合成的速度定义为耙头的进口速度。根据连云港实船调研的资料可知, 泥浆在耙管内流动速度稳定在 6 ~ 8 m/s。考虑到耙头进口速度难以测量得到, 因此通过泥浆在耙管内的流速反推得到耙头活动罩进口的速度。

根据连云港实船调研的资料可知, 高压冲水泵压力为 80 kPa, 单泵供水时高压冲水的进口流量为 0.556 m³/s, 双泵并联供水时高压冲水的进口流量为 1.11 m³/s。

1.3.2 耙头出口压力

根据施工数据推算, 耙头吸入最大真空度为 80 kPa。

1.4 求解策略

本文使用有限体积法对液固两相流的基本控制方程进行离散。采用基于压力的分离算法, 数值方法采用 SIMPLE 算法实现压力场与速度场的耦合。为保证计算的精度以及求解的稳定性和经济性, 动量方程采用 QUICK 离散格式, 体积分数采用二阶迎风格式, 其他控制方程均采用一阶迎风格式。在对控制方程求解时, 结果收敛标准为前后 2 次迭代间的误差小于 10⁻⁵。

2 耙头内流场边界条件计算

2.1 耙头进口速度估算

计算分析“浚海 2”轮耙吸式挖泥船的现有耙头在典型工况下的流场模拟。考虑原耙头在对地角度为 50°、活动罩对地角度为 0°时, 不同进口速度下耙头内部流场的异同, 通过该模型计算不同进口速度下耙头内的流动状况及出口速度, 与调研结果对比后得到合理的进口速度波动范围。耙头进口速度从 2.0 m/s 增加到 2.6 m/s, 喷嘴进口流量设置为 0.574 m³/s, 耙头出口真空度为 80 kPa。计算工况边界条件见表 1。

表 1 不同进口速度下单排喷嘴耙头边界条件计算

Tab. 1 Calculation of boundary conditions for single row nozzle rake heads at different import speeds

编号	耙头对地 角度/(°)	进口速度/ (m·s ⁻¹)	喷嘴流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	进口 浓度/%	耙头出口 压力/kPa
1		2.0			
2	50	2.3	0.574	30	-80
3		2.6			

经过仿真计算可得耙头出口速度见表 2。由表 2 可知, 当进口速度从 2.0 m/s 增加到 2.6 m/s 时, 出口速度从 6.38 m/s 增加到 8.02 m/s, “浚海 2”实船调研反馈的耙管内流速波动范围为 6.0 ~ 8.0 m/s, 两者相符, 由此确定了合适的进口流速范围。

表 2 不同进口速度下耙头的出口速度

Tab. 2 Export speed of rake head at different import speeds

序号	进口速度/(m·s ⁻¹)	出口速度/(m·s ⁻¹)
1	2.0	6.38
2	2.3	7.20
3	2.6	8.20

2.2 不同耙头对地角度下的入口压力

耙吸式挖泥船在作业过程中可能会面对不同深度的疏浚区, 由于耙臂长度恒定, 不同深度的疏浚区会影响耙头工作的对地角度。为分析实际耙头在不同工作深度的流动情况及压降, 改变耙头模型的对地角度并进行数值模拟分析, 计算工况见表 3。

表 3 不同对地角度下耙头边界条件计算

Tab. 3 Calculation of boundary conditions for rake head at different ground angles

序号	耙头对地 角度/(°)	进口 浓度/%	进口速度/ (m·s ⁻¹)	喷嘴进口 压力/kPa	耙头出口 压力/kPa
1	35				
2	40				
3	45	30	2.0	80	-80
4	50				

随着耙头对地角度从 35°逐渐变化到 50°, 对流线轨迹进行分析, 见图 2, 可以发现疏浚混合物从耙头进口流入活动罩部分后, 在耙头活动罩部分形成了大量的漩涡; 在固定体结构中存在耐块的进水管路, 流体绕过该管路时形成绕流, 导致其附近流线存在一定程度的紊乱; 在方圆管中过流断面角度逐渐收缩, 引导流线从耙头固定体收缩到耙臂输泥管中。

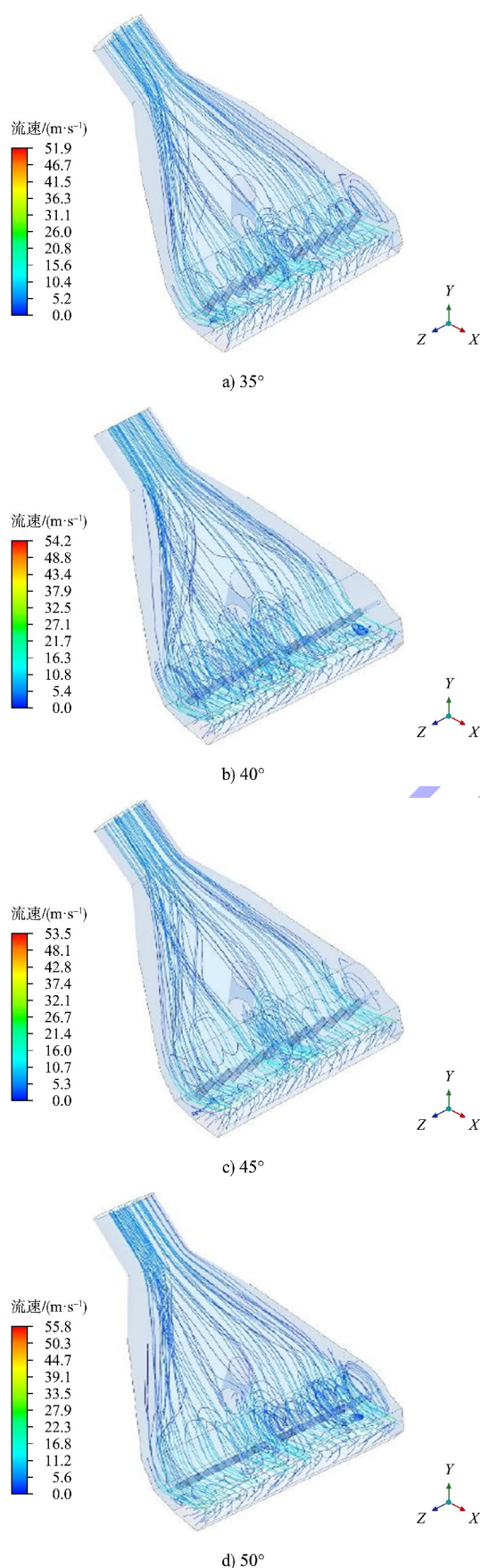


图 2 耙头不同对地角度流线

Fig. 2 Streamline of rake head at different ground angles

分别统计不同对地角度耙头模型的进出口压力, 得到不同的压降见表 4。由表 4 可知, 随着对地角度增加, 耙头进出口压降略有增加, 但增加幅度很小, 几乎可以忽略不计, 因此后续计算均以耙头对地角度 50° 进行计算。

表 4 不同对地角度下的压降

Tab. 4 Pressure drops at different ground angles

序号	对地角度/ ($^\circ$)	入口 压力/kPa	出口 压力/kPa	进出口 压降/kPa
1	30	-76.484 3		3.515 7
2	35	-75.721 3		4.278 7
3	40	-74.572 0	-80	5.428 0
4	45	-73.879 0		6.121 0

3 高压冲水结构优化

自航耙吸式挖泥船的耙头一般包括高压冲水泵、水箱和喷嘴等, 组成了高压冲水系统^[17-19]。高压冲水系统在施工过程中对疏浚物进行冲刷和疏松, 便于疏浚混合物的输送以提高施工效率。因此高压冲水系统喷射水流的流量、流速、压降是决定系统性能的重要指标^[20]。

在挖掘黏土施工过程中, 耙头本体底部耐磨块高压冲水的压力为 80 kPa (单泵冲水时), 在实际应用中发现挖掘黏土时作用不大。因此, 在耙头顶部进水管路上加装蝶阀进行开关调节, 挖掘黏土时关闭耐磨块上的高压冲水, 挖掘其他砂土土质时开启耐磨块上的高压冲水, 以便合理调控船舶能耗, 提高施工效率。

关闭耐磨块上的高压冲水后, 高压冲水泵的流量都施加在活动罩内部的高压冲水上, 其工作流量与原始耙头不同, 因此需要对其喷嘴角度、喷嘴排布进行优化。

3.1 喷嘴角度优化

活动罩上高压冲水对进入耙头的大块黏土输送起着非常重要的作用, 合理定义活动罩喷嘴的角度有利于提升高压冲水对黏土的输送效果。耙头保持对地角度为 50° , 活动罩对地角度保持 0° , 格栅保持原始状态, 以活动罩上喷嘴与活动罩基准线的夹角为 0° 作为基准模型, 分别研究喷嘴与活动罩基准线的夹角为 10° 、 20° 、 30° 时的流场变化, 射流的冲击力增加了黏土通过格栅的能力, 具体计算的边界条件见表 5。

表 5 不同喷嘴角度下耙头内流场边界条件
Tab. 5 Boundary conditions of flow field inside
rake head at different nozzle angles

序号	耙头对 地角度/ (°)	进口 速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	进口 浓度/ %	喷嘴 角度/ (°)	喷嘴出 口压力/ kPa	耙头出 口压力/ kPa
1				0		
2				10		
3	50	2.0	30	20	80	-80
4				30		

对 4 组不同喷嘴角度的模型进行数值模拟计算, 得到黏土浓度云图见图 3, 对比分析不同喷嘴角度的浓度场云图, 可以发现: 喷嘴角度为 0° 时, 活动罩部分浓度较高, 集中在活动罩两侧; 喷嘴角度为 10° 时, 活动罩高浓度区域较其他角度时明显减少; 喷嘴角度为 20° 和 30° 时, 活动罩部分淤积了大量的黏土, 很容易导致堵耙。

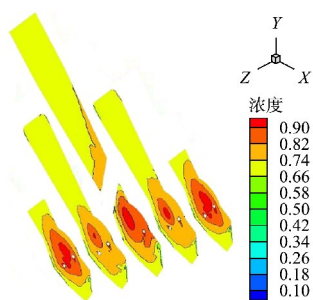
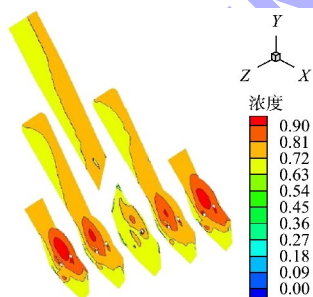
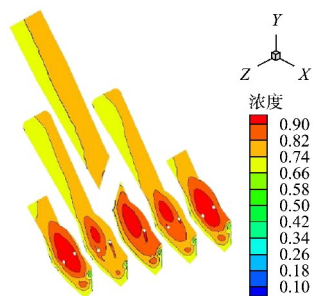
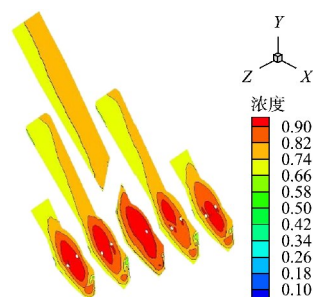
a) 0° b) 10° c) 20° d) 30°

图 3 不同喷嘴角度下耙头黏土浓度云图

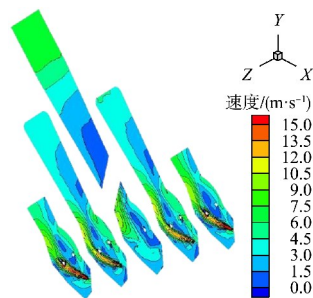
Fig. 3 Cloud map of clay concentration in rake head at different nozzle angles

对 4 组不同喷嘴角度的模型进行数值模拟计算, 得到速度场云图见图 4, 对比分析不同喷嘴角度的速度场云图, 可以发现:

1) 不同的喷嘴角度下, 活动罩高压冲水冲击到格栅的位置不同, 且沿射流方向存在一定程度的偏移。随着喷嘴角度增加, 高压冲水的位置向下偏移。喷嘴角度为 0° 时, 高压冲水冲击到格栅中间的固定轴; 喷嘴角度为 10° 时, 高压冲水冲击到格栅的下半部分; 喷嘴角度为 20° 和 30° 时, 高压冲水冲击到格栅。

2) 喷嘴角度为 0° 时, 高压冲水覆盖位置偏上, 无法对耙头底部的大块黏土进行冲刷; 随着喷嘴角度增加, 高压冲水覆盖位置逐渐向下偏移, 可以较好地实现对黏土的冲刷效果; 当喷嘴角度为 10° 时, 高压冲水的冲击角度正对黏土容易粘结的格栅下半部分, 有利于黏土的输送。

3) 单排喷嘴的布置形式仅能冲击到格栅上较窄的区域, 不利于防止黏土在格栅上的重新粘结, 因此考虑将喷嘴改为叉排的布置形式。

a) 0°

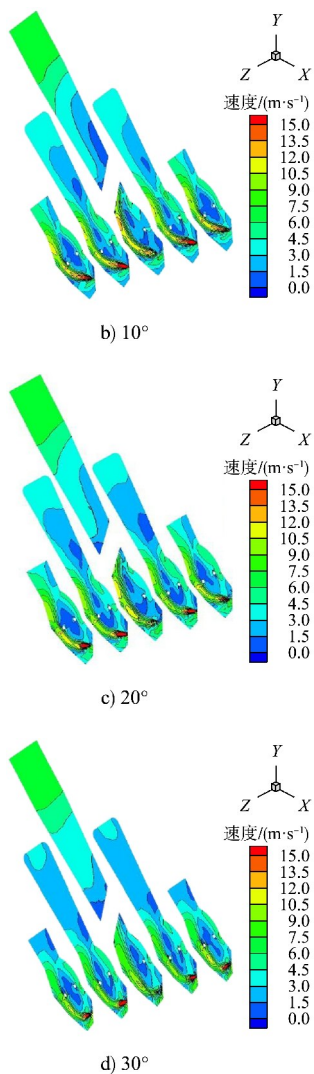


图 4 不同喷嘴角度耙头的速度场云图
Fig. 4 Cloud map of velocity field of rake head with different nozzle angles

3.2 喷嘴排布优化

活动罩高压冲水的排布方式对耙头内流动具有很大的影响, 目前耙头活动罩上一般使用的多是单排喷嘴, 基于工程实际应用的活动罩上的喷嘴排列方式对活动罩高压冲水系统进行建模仿真。

3.2.1 单排喷嘴布置

活动罩喷嘴单排布置时, 共 26 个, 全部计算不仅导致计算缓慢, 而且浪费计算资源, 因此可简化模型为 7 个喷嘴, 设定喷嘴间距为 146 mm, 简化模型格见图 5。

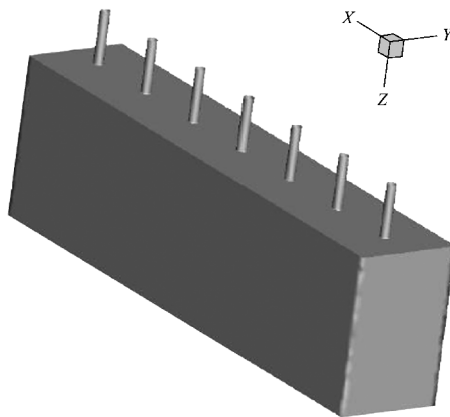


图 5 单排喷嘴简化模型
Fig. 5 Simplified model of single row nozzle

活动罩喷嘴供水压力来自高压冲水泵, 其压力为 80 kPa, 因此活动喷嘴进口压力设置为 80 kPa; 活动罩喷嘴位于活动罩内, 受到泥泵的抽吸作用, 将活动罩喷嘴的出口压力设置为泥泵的真空度, 因此模型的出口压力为 -80 kPa。

分析得到压力云图 (图 6) 和靶面压力曲线 (图 7), 由图 6 可知, 单排喷嘴产生的高压水射流在外流场的扰动较小, 对外流场的冲击呈线型。由图 7 可知, 相邻喷嘴之间有较强的回流作用, 喷嘴间压力较低, 会有部分泥块在中间集聚。由于喷嘴排列单一, 不同喷嘴产生的射流之间不能相互补充, 单排喷嘴在外流场产生的扰动范围狭小, 在射流扰动作用不到的区域或作用效果弱的区域, 对泥块的冲击效果差, 易产生堵耙现象。

单排喷嘴的排布方式只能冲击到活动罩内流场一条线的范围。由于流场扰动较小, 范围外的其他部位容易出现堵塞。基于以上分析, 提出叉排喷嘴的排布方式, 即把原来的单排喷嘴改为两排, 且两排喷嘴错开排布的方式。叉排喷嘴的方式有利于扩大高压冲水的覆盖面积, 减少堵耙的风险。

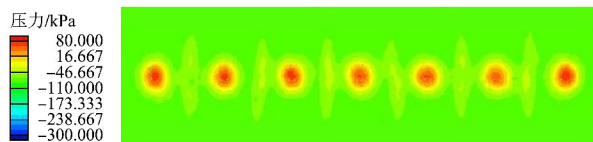


图 6 单排喷嘴靶面压力云图
Fig. 6 Pressure cloud map of single row nozzle target surface

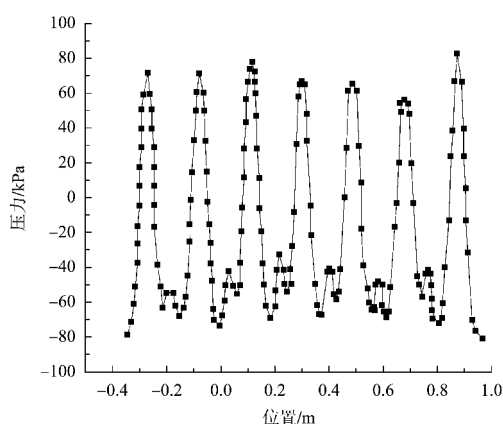


图 7 单排喷嘴靶面压力曲线

Fig. 7 Pressure curve of single row nozzle target surface

3.2.2 叉排喷嘴布置

针对喷嘴叉排排布的具体尺寸(包括喷嘴间距与排距)进行分析:喷嘴的间距与耙齿间距相匹配,布置于两耙齿的中间,有利于通过水流隔离黏土,使挖掘起来的黏土不再重新粘结。为了减少黏土在耙齿部位的粘结,降低挖掘阻力,优化耙齿数量为 20 个,耙齿间距为 180 mm,因此活动罩喷嘴的间距也是 180 mm。

喷嘴的排距需根据不同模型仿真结果确定,因此建立喷嘴叉排模型进行数值分析,叉排喷嘴模拟的边界条件与单排喷嘴相同,即喷嘴排距为 95、115、125、135 mm 时,进口压力为 80 kPa,出口压力为 -80 kPa。

活动罩喷嘴叉排布置时,第 1 排有 20 个,第 2 排有 18 个,其排布呈周期性,全部计算不仅导致计算缓慢,而且浪费计算资源,故简化模型为第 1 排 3 个,第 2 排 4 个,不但可以合理分析喷嘴叉排布置时冲击压力和速度,而且大幅提升了计算效率,其模型见图 8。

针对上述构建的模型分别进行仿真分析,截取底面压力云图,见图 9,分析可知,在排距为 125 和 135 mm 时,由于排距较大,导致对靶面冲击压力较小,压力核心较为分散,冲击效果较差。排距为 95 和 115 mm 时,压力核心分布合理,核心明显对靶面冲击效果较好。

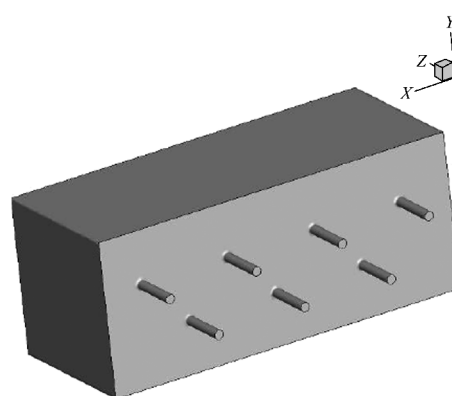


图 8 叉排喷嘴简化模型

Fig. 8 Simplified model of fork shaped nozzle

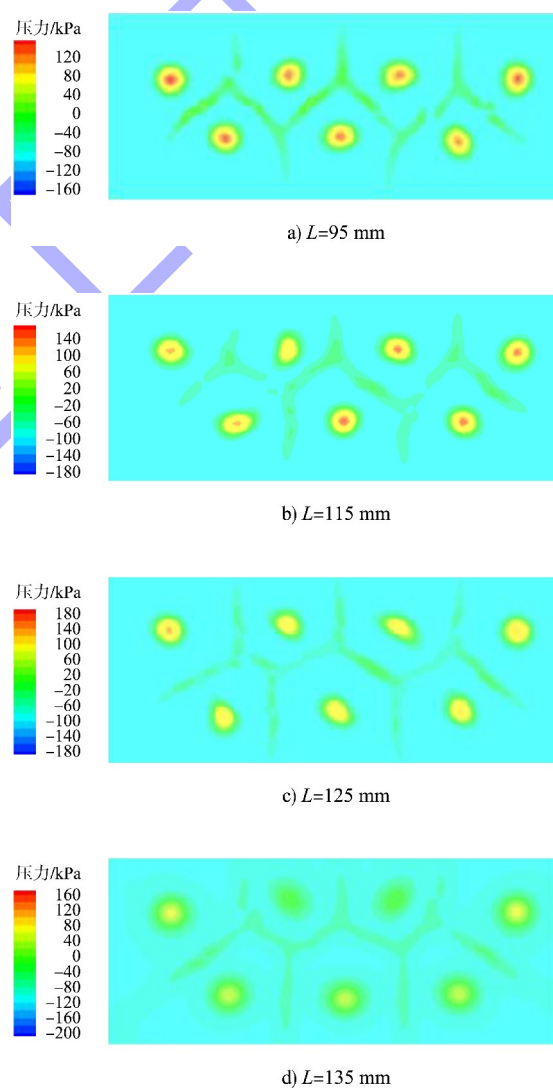


图 9 不同排距下双排喷嘴的压力云图

Fig. 9 Pressure cloud map of dual row nozzles at different row spacing

选取两排喷嘴在靶面中线上的压力值,在同一坐标系中绘出靶面上的两条压力曲线,见图10。当喷嘴排距越小时两条压力曲线的交点对应的压力值越高,表明喷嘴组合对靶面的最小冲击压力越大,同时各高压水射流的干扰以及在靶面上回流的干扰也会加强。考虑到排距为95 mm时,安装两排喷嘴的间距过小,会影响水箱的强度,因此选择115 mm为最佳排距。

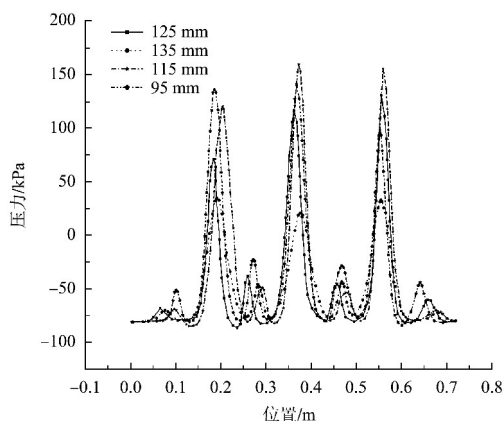


图10 不同排距下双排喷嘴的压力曲线
Fig10 Pressure curves of dual row nozzles at different row spacings

对比双排喷嘴的压力云图(图9)和单排喷嘴的压力云图(图6)可以看出,双排喷嘴的对外流场的作用范围更广,冲击压力更大,同一排相邻喷嘴间的低压区能够被另一排喷嘴的射流补充,在外流场的回流作用减弱,射流作用范围扩大,对泥块的冲击作用增强。综上所述,双排喷嘴对外流场的冲击效果比单排喷嘴好,对解决耙头堵塞问题有一定的帮助。

4 结论

1) 当喷嘴角度为 10° 时,活动罩高黏土浓度区域较其他角度时明显减少,同时,高压冲水的冲击角度正对黏土容易粘结的格栅下半部分,有利于黏土的输送。由于本文只针对“浚海2”所使用的耙头进行研究,所以该喷嘴角度只适用于“浚海2”,虽然该角度无法普遍适用于所有耙吸挖泥船,却可以为船舶提供一种新的思考角度,即改变喷嘴角度来减少耙头内部的黏土分布,以解决

耙头易堵塞的问题。

2) 提出叉排喷嘴的排布方式,该方式有利于扩大高压冲水的覆盖面积,减少堵耙的风险。

3) 当排距为95和115 mm时,压力核心分布合理,核心明显对靶面冲击效果较好。但是当喷嘴排距越小时,各高压水射流之间的干扰以及在靶面上回流的干扰也会加强。考虑到排距为95 mm时,安装两排喷嘴的间距过小,会影响水箱的强度,因此选择115 mm为最佳排距。

参考文献:

- [1] 张莹,徐桂中,邱月.疏浚淤泥颗粒分选特性定量评价方法研究[J].人民长江,2020,51(9):158-162.
ZHANG Y, XU G Z, QIU Y. Study on quantitative evaluation for particle sorting characteristic of dredged silt[J]. Yangtze River, 2020, 51(9): 158-162.
- [2] 王显力,杨顺,袁金永,等.耙吸挖泥船发展历程及趋势[J].船舶工程,2021,43(11):13-19.
WANG X L, YANG S, YUAN J Y, et al. Development history and trend of trailing suction dredger[J]. Ship engineering, 2021, 43(11): 13-19.
- [3] 孙守胜,肖博,林森,等.大型耙吸挖泥船系列化耙头研发与应用[J].中国港湾建设,2015,35(1):64-67.
SUN S S, XIAO B, LIN S, et al. Research & development and application of serial drag heads of large trailing suction hopper dredger[J]. China harbour engineering, 2015, 35(1): 64-67.
- [4] ZHOU B L, YU M H, GUO J. Hybrid optimization algorithm for estimating soil parameters of spoil hopper deposition model for trailing suction hopper dredgers[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2024, 46(1): 1813-1831.
- [5] CHENG T, LU Q R, KANG H R, et al. Productivity prediction and analysis method of large trailing suction hopper dredger based on construction big data[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1505.
- [6] 郝光杰.耙吸挖泥船耙头挖掘过程机理分析与研究[D].镇江:江苏科技大学,2020.
HAO G J. Mechanism analysis and research of digging process of drag head for trailing suction hopper dredger[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.

- [7] 郑金龙,倪崇本,何炎平.耙吸挖泥船耙头内流场分析与优化[J].水运工程,2017(5):168-172.
ZHENG J L, NI C B, HE Y P. Internal flow field analysis and optimization for dredging head of trailing suction hopper dredger [J]. Port & waterway engineering, 2017(5): 168-172.
- [8] 文武.耙吸挖泥船高效节能耙头的研发与应用[D].大连:大连海事大学,2017.
WEN W. R & D and application of trailing suction hopper dredger efficient energy-saving drag head [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [9] SU Z, ZHANG X Y, LUAN R Y. CFD simulation and model predictive control of the pipeline transportation system in a trailing suction hopper dredger[J]. Journal of hydroinformatics, 2022, 24(4): 730-748.
- [10] 沈伟平,孙雪梦,赵学,等.耙头高压冲水改进技术[J].水运工程,2012(3):159-162.
SHEN W P, SUN X M, ZHAO X, et al. Improvement technology of high-pressure jet atdraghead [J]. Port & waterway engineering, 2012(3): 159-162.
- [11] 逯新星,朱文斌.耙吸挖泥船耙头高压冲水喷嘴改进[J].水运工程,2019(7):212-216.
LU X X, ZHU W B. Improvement of jet nozzle of drag head high-pressure water for TSHD[J]. Port & waterway engineering, 2019(7): 212-216.
- [12] 杨广志.航道疏浚中耙吸船耙头高压冲水系统的改进研究[J].珠江水运,2024(4):141-143.
YANG G Z. Improvement study on the high pressure flushing system of the scraper head of the dredging ship in channel dredging [J]. Pearl River water transport, 2024(4): 141-143.
- [13] 陈浩,孙守胜,郭志勇.耙头高压冲水喷嘴流场数值模拟及分析[J].水运工程,2022(2):202-208.
CHEN H, SUN S S, GUO Z Y. Numerical simulation and analysis of flow field in high-pressure flushing nozzle of drag head [J]. Port & waterway engineering, 2022 (2): 202-208.
- [14] 尹纪富,洪国军,江帅,等.耙吸挖泥船耙头固体喷嘴流场特性数值分析[J].中国港湾建设,2016,36(5):9-12,20.
YIN J F, HONG G J, JIANG S, et al. Numerical simulation on flow characteristics of water jet nozzle for draghead[J]. China harbour engineering, 2016, 36(5): 9-12, 20.
- [15] 刘昊阳,伍骏,孟治金,等.耙吸式挖泥船耙头冲水系统喷嘴布局的优化研究[J].船舶工程,2019,41(3):76-81,86.
LIU H Y, WU J, MENG Z J, et al. Research on nozzle layout optimization of the rake head flushing system on trailing suction hoper dredger [J]. Ship engineering, 2019, 41(3): 76-81, 86.
- [16] 郑金贵.气液两相旋喷射流流场特征及其影响因素研究[J].人民长江,2023,54(8):178-184.
ZHENG J G. Flow field characteristics and influencing factors of gas-liquid two-phase rotary jet grouting [J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 178-184.
- [17] 兰剑,伍立说,郭涛,等.耙头高压冲水与高压冲水泵匹配性研究[J].中国港湾建设,2021,41(9):59-63.
LAN J, WU L S, GUO T, et al. Matching performance study of draghead high-pressure jet water and jet pump[J]. China harbour engineering, 2021, 41(9): 59-63.
- [18] 陈旭,陶冲林,方华.大型耙吸船超高压黏土耙头高压冲水管路布置[J].中国港湾建设,2021,41(12):71-74,79.
CHEN X, TAO C L, FANG H. Layout of high pressure flushing pipeline for ultra-high pressure clay draghead of large trailing suction dredger [J]. China harbour engineering, 2021, 41(12): 71-74, 79.
- [19] 舒敏骅,朱时茂,尹纪富,等.高压冲水喷嘴破土性能试验研究[J].水运工程,2019(12):14-18.
SHU M H, ZHU S M, YIN J F, et al. Experimental study on ground-breaking performance of high-pressure flushing nozzle [J]. Port & waterway engineering, 2019 (12): 14-18.
- [20] 刘思源.泥沙粒径及射流速度对沙床冲刷的影响[J].人民长江,2017,48(23):79-83,99.
LIU S Y. Influence of particle size and jet velocity on sand bed scouring[J]. Yangtze River, 2017, 48(23): 79-83, 99.

(本文编辑 赵娟)