

水下铰刀作业流场特性仿真研究^①

黎宙, 卓晓军, 程阳锐, 吉成才, 吴卓, 罗斌

(长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 基于固液两相流计算理论, 在考虑碰撞效应的基础上, 采用 VOF 模型建立流体力学模型, 仿真分析了不同工况下铰刀作业情况。结果表明, 铰刀在 45° 倾角下工作时效果较好, 扰动范围为 68.32%; 随着铰刀转速增大, 铰刀上方水域受扰动程度逐渐增加, 流域受扰动范围呈现逐渐增大后又减小的趋势。铰刀工作参数为倾角 45°、转速 45 r/min 和横移速度 0.2 m/s 时, 有利于降低铰刀作业对水域的扰动, 能够在一定程度上减少对水域的二次污染。

关键词: 清淤铰刀; 数值模拟; 倾角; 扰动

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.001

文章编号: 0253-6099(2023)04-0001-05

Simulation Study of Flow Field Characteristics of Underwater Reamer Operation

LI Zhou, ZHUO Xiaojun, CHENG Yangrui, JI Chengcai, WU Zhuo, LUO Bin

(State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: Based on the calculation theory of solid-liquid two-phase flow and consideration of collision effect, a hydrodynamic model was established by using VOF model, and reamer operation under different working conditions was also analyzed by numerical simulation. It is shown that a reamer working with an inclination angle of 45° can have a good effect, resulting in percentage of disturbed area at 68.32%. As the rotating speed of reamer increases, disturbance of the waters above a reamer gradually becomes violent, and the scope of waters being disturbed also gradually becomes wider first and then narrows down. It is concluded that a reamer should work with an inclination angle of 45°, rotate at a speed of 45 r/min and move laterally at a speed of 0.2 m/s, which can reduce disturbance to the waters brought by its operation, thus minimize the secondary pollution to the waters to a certain extent.

Key words: dredging reamer; numerical simulation; inclination angle; disturbance

水下清淤作业装备中铰刀转速、铰刀倾斜角度和铰刀横移速度对清淤场地周边环境及清淤效率产生影响。铰刀转速过快时切削下来的泥沙颗粒扩散范围广, 部分泥沙颗粒未能吸入到管道中, 导致清淤效率降低且对周边环境造成了二次污染; 不同的铰刀倾角会产生不同的铰刀切削泥沙面积, 对铰刀工作效率有一定影响; 不同横移速度对泥沙颗粒扩散范围有很大影响, 合适的横移速度不仅可以提高作业效率, 而且可以降低对周边水域的扰动。

本文结合水下清淤机器人环保绞吸头的实际作业情况进行仿真研究, 分析铰刀不同运动状态时对周边流

场的影响, 为铰刀设计及水下环保清淤作业提供指导。

1 泥沙底质分析

在清淤铰刀工作过程中, 不同工作环境和泥沙底质对其整体工作性能有很大影响。底质物质的基本特性包括几何特性、重力特性和水力特性。几何特性是指沉积物的形状和大小, 以及群体底质的组合特征^[1]。泥沙粒径可用等容粒径、算术平均粒径和几何平均粒径来表示, 此外, 筛分粒度 (>0.075 mm) 或水沉淀粒度 (<0.075 mm) 在建筑行业经常使用, 沉积物粒度分类方法是 W C Krumbein 提出的常用 Φ -分级

① 收稿日期: 2023-02-09

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金(2021JJ40552); 湖南省科技创新计划项目(2021RC3126); 三亚崖州湾科技城咨询项目(2020)

作者简介: 黎宙(1990—), 男, 湖南宁乡人, 工程师, 主要研究方向为深海采矿机械设计及流体仿真。

通信作者: 卓晓军(1978—), 男, 四川自贡人, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为水下作业技术及新能源材料。

法,公式为:

$$D = 2^{-\phi}$$

即:

$$\phi = -\log_2 D$$

式中 D 为泥沙颗粒直径; ϕ 为无量纲系数,为 $-3 \sim 7$ 的整数。采用 Φ -分级法的优势在于可以用小的 ϕ 值去表示更大范围的粒径。本文所研究的对象为泥沙颗粒,其粒径分布在 $0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$ 之间^[2]。

泥沙的水力特性包含泥沙起动、沉降和不淤流速等,可以通过环形水槽试验获得。在清淤过程中,铰刀进行转动及横向移动时将水下堆积的泥沙进行切割,泥沙被切割过程是泥沙水力特性的重要体现^[3-4]。

2 铰刀流场分析理论及模型处理

2.1 铰刀流场分析理论

为了研究铰刀作业时对周边水流的扰动规律,采用基于格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)的仿真软件进行数值模拟计算。该方法是在介观层面描述分子的统计行为,不考虑单个系统的影响,不受连续性假设的限制,为复杂的 CFD 提供了新的解决办法。格子玻尔兹曼方法的特点是利用玻尔兹曼输运方程,解决部分 Navier-stokes 方程所遇到的问题。

玻尔兹曼输运方程定义如下:

$$f_i(r + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(r, t) + \Omega_i^B(f_1, \dots, f_b)$$

式中 f_i 代表在 i 方位上的分布函数; Ω_i^B 表示其对应的碰撞算子。

碰撞算子通常采用概率分布函数向平衡状态松弛的方式建模。常见的方法是基于 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) 近似的单松弛时间(SRT),方程定义如下:

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} (f_i^{\text{eq}} - f_i)$$

式中 τ 为弛豫时间; f 为状态松弛的局部平衡函数。

LBM 对点阵的空间离散化由离散点的笛卡尔分布和一组离散的速度方向组成。离散速度集包含问题的维度和速度向量的数量 $DnQm$, 其中 n 表示问题的维度, m 表示速度方向的数量。常见的二维模型是 $D2Q7$ 和 $D2Q9$ 模型,它涉及 9 个速度向量;常见的三维模型是 $D3Q19$ 和 $D3Q27$ 模型^[5]。模型结构如图 1 所示。

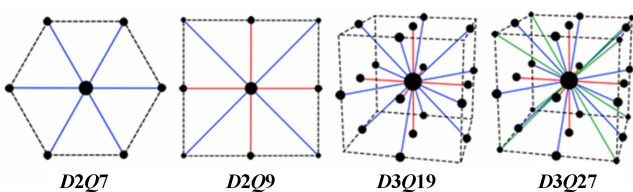


图 1 LBM 二维及三维模型简图

2.2 铰刀模型处理

根据水下清淤机器人铰刀的实际需求,通过三维软件对铰刀模型进行绘制,铰刀刀臂采用弧形设计,刀臂尾部与顶部采用不同大小的楔形结构,刀臂侧边与小环位置加装宽型刀齿,由于铰刀结构相对复杂,采用铸造的方式进行铰刀加工。

建立 1:1 的铰刀模型进行数值模拟分析,研究铰刀在实际工作过程中对周边水流的扰动状况。3 种不同倾角的铰刀模型如图 2 所示。

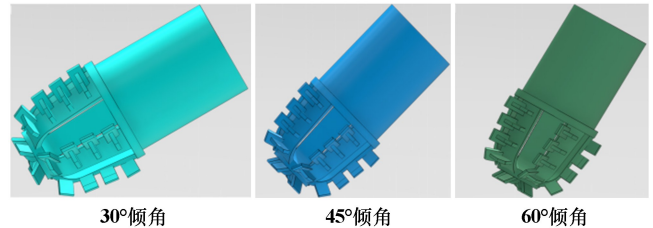


图 2 铰刀模型

2.3 计算参数设置

采用非定常数值模拟,计算模型采用基于粒子的多项内部流。两相流设置中,第一相介质设置为泥沙,密度为 2000 kg/m^3 ,按照牛顿流体计算其黏度为 $0.015 \text{ Pa} \cdot \text{s}$;第二相介质设置为清水,其动力黏度为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,重力方向设置为 Y 轴负方向。湍流模型采用 Wall-Adapting Local Eddy 模型,该模型适用于复杂的湍流模拟,能较好地反映近壁湍流黏滞系数的变化规律。管道处设置为速度入口,假定连续相在入口截面的速度均匀分布;出口设置为压力出口,壁面均设置为增强的壁面函数。进出口边界条件如图 3 所示。计算模拟中运动部件均采用刚体动力学模型。

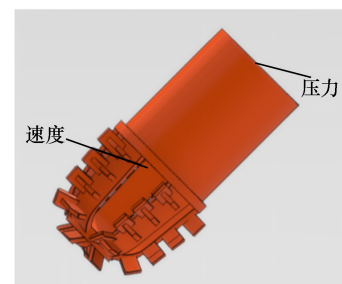


图 3 边界条件设置参数

特征长度直接决定了后续计算时间的长短。因此在仿真时间为 0.5 s 内对固定监测点的速度进行监测,通过测定速度变化来对特征长度进行无关性分析,如表 1 所示。从表 1 可以看出,特征长度达到 0.01 mm 时,速度变化达到了相对稳定的数值,因此在进行数值模拟时采用特征长度 0.01 mm 。

表1 计算域尺寸

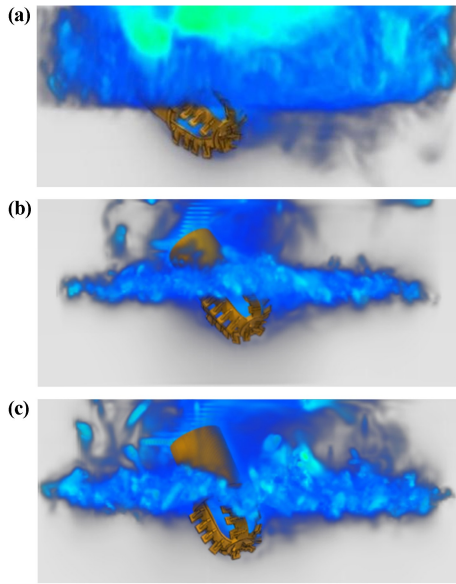
特征长度/mm	速度变化/(m·s ⁻¹)
0.005	0.139
0.01	0.137
0.015	0.113
0.02	0.076

3 铰刀作业流场特性分析

3.1 铰刀倾角对流场特性的影响

泵流量恒为 100 m³/h、铰刀转速 45 r/min、铰刀横移速度 0.2 m/s,分别选取铰刀倾角 30°,45°和 60°,进行数值模拟仿真,分析不同工作倾角对整个流体域的影响。

铰刀以不同倾角作业时,对整个流体域的扰动情况可以通过计算流体域内速度不为 0 的流体体积表示,如图 4 所示,着色区域表示在对应位置处流体速度不为 0。对扰动情况进行了整理,结果见表 2。可见铰刀以 30°倾角作业时对整个流体域的扰动情况要远大于另外两种工况,铰刀倾角对流体域的扰动情况呈现高、低、高的分布趋势,倾角 45°时,影响比例相对较小,为 68.32%。



(a) 30°; (b) 45°; (c) 60°

图4 不同铰刀倾角对流场的扰动图

表2 受影响区域与铰刀倾角的关系

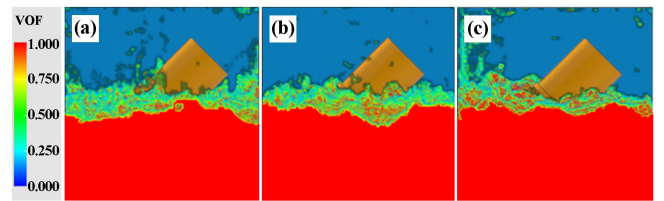
铰刀倾角/(°)	受影响体积/L	流域体积/L	影响比例/%
30	924.4	1 000	92.44
45	683.2	1 000	68.32
60	794.5	1 000	79.45

3.2 铰刀转速对流场特性的影响

分析铰刀转速对周边流场特性的影响时固定泵流

量,根据实际作业情况,铰刀横移速度选定为 0.2 m/s、泵流量选定为 100 m³/h,结合已知管道直径换算为吸泥管道入口速度为 0.67 m/s。选定对流体域扰动小的 45°倾角,铰刀转速根据低、中、高 3 种不同类型的工况设定转速为 24 r/min、45 r/min 和 76 r/min。

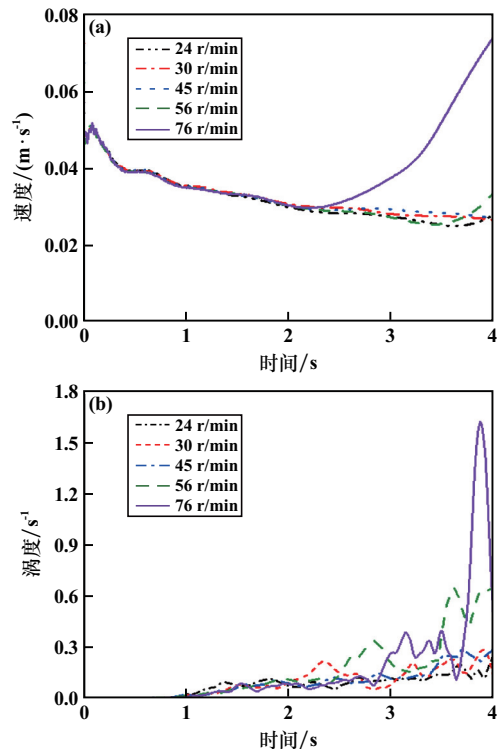
图 5 为不同铰刀转速下的 VOF 矢量图。随着铰刀转速增加,可以明显看到铰刀对周边水域的影响逐渐增大。铰刀转动速度越快,对整个流域的扰动越剧烈,主要表现在铰刀周边泥沙速度出现最大值,随着转速增大,铰刀周边泥浆速度越高。



(a) 24 r/min; (b) 45 r/min; (c) 76 r/min

图5 不同铰刀转速下的 VOF 云图

铰刀作业过程中,在内部流场中设置了 1 个监测点,其坐标为(0.8,0.3,-0.3),通过监测该点流体的速度值和涡度大小,可以直接分析铰刀转速变化对该点的扰动情况。图 6 为不同铰刀转速在该监测点的速度和涡度扰动情况。从图 6 可以明显看出,铰刀转速达到 76 r/min 时,该点速度最大值可达到 0.075 m/s、最



(a) 速度扰动图; (b) 涡度扰动图

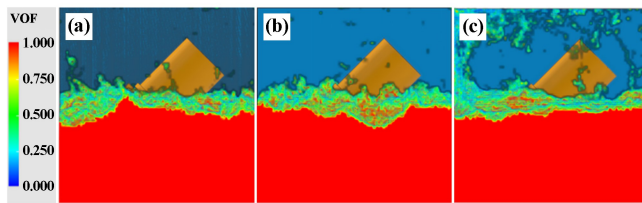
图6 不同铰刀转速下监测点的扰动图

大涡度可达 1.6 s^{-1} 。可以看出高速工况下铰刀对上部水域的扰动情况远大于中、低速工况。

3.3 铰刀横移速度对流场特性的影响

铰刀转动速度 45 r/min 、泵流量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ，铰刀的横向移动速度分别取 0.15 m/s 、 0.2 m/s 和 0.25 m/s ，通过数值模拟方法分析铰刀横向移动对整个流场区域速度场和扰动情况的影响。

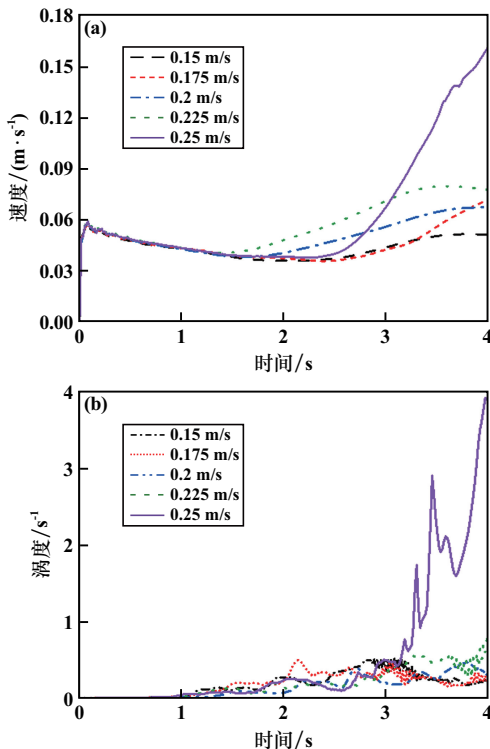
图7为不同铰刀横移速度下的VOF云图。铰刀以中、低横移速度进行切削作业时，对整个水体区域的扰动不大；铰刀横移速度高于 0.2 m/s 时，随着铰刀横移速度增大，对水体区域的扰动逐渐增大。



(a) 0.15 m/s ; (b) 0.2 m/s ; (c) 0.25 m/s

图7 不同铰刀横移速度下的VOF云图

图8为不同铰刀横移速度下监测点速度和涡度曲线。铰刀横移速度不同，铰刀在相同时间内移动距离不同，因此监测点应选择不同横移速度下均能经过的地方，选取监测点坐标为 $(0, 0.3, -0.3)$ 。从图8可见，铰刀横移速度对流体域水域有一定影响。铰刀横移速



(a) 速度扰动图; (b) 涡度扰动图

图8 不同铰刀横移速度下监测点的扰动图

度小于 0.25 m/s 时，铰刀工作对该监测点影响不大；但铰刀横移速度达 0.25 m/s 时，铰刀工作对该监测点影响很大，该点速度最大可达 0.16 m/s ，随着时间延长，该点速度将逐渐增大。该点涡度值也出现了大幅波动，最高峰值达到了 4 s^{-1} ，可见此刻对水域的扰动很大。

4 铰刀扰动试验研究

4.1 试验系统介绍

试验系统包含试验水池、清淤机器人、泥沙收集池和控制平台等，如图9所示。铰刀安装于清淤机器人上，为了方便观察铰刀绞吸特性，在试验水池侧面设置了观察窗。

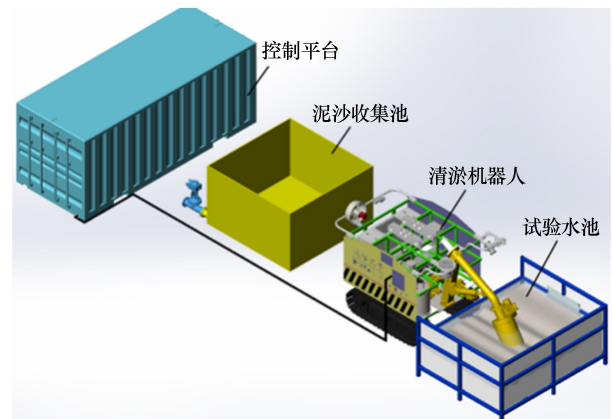


图9 清淤机器人试验系统

试验时，采用浊度传感器实时监测浓度信息，进而分析铰刀转动对周边水域扰动的大小。测量时采用多点位测量法，尽可能真实地反映铰刀作业对整个流域的扰动情况。

4.2 铰刀倾角对水域扰动的影响

通过铰刀扰动试验，在指定监测点上通过浊度传感器进行浓度测试，分析铰刀倾角对周边水域扰动的影响。测试过程中对相同工况下的浓度取平均数值，得到不同倾角下监测点的浓度，如图10所示。从图10可以看出，铰刀在不同工作倾角下进行作业时，随着作业时间增长，铰刀对周边水域扰动逐渐增大，初始时刻，浓度增大较为剧烈，随着时间增长，在该位置处浓度逐渐趋于稳定。不同工作倾角对该监测点产生的影响有所不同，影响最大的是 30° 倾角， 60° 倾角次之， 45° 倾角的影响最小。分析原因可能是铰刀以 45° 倾角进行作业时，泵的抽吸效果可以兼顾前后两个方向，铰刀在该角度进行切削作业时可减少泥沙的扩散从而降低对水域产生二次污染的可能。

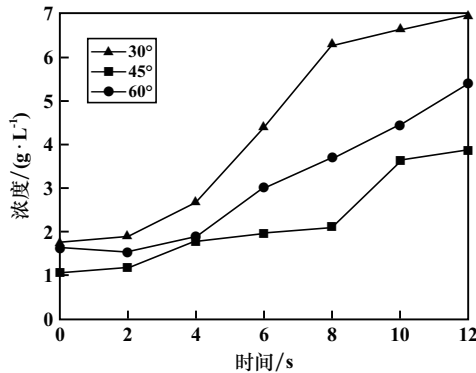


图 10 不同倾角下监测点浓度曲线

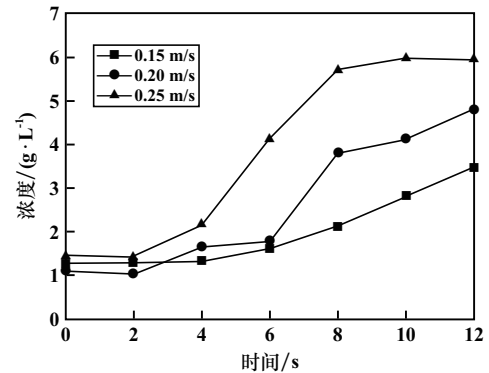


图 12 不同横移速度下监测点浓度曲线

4.3 铰刀转速对水域扰动的影响

不同铰刀转速下的监测点浓度如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着铰刀工作时间增长,铰刀对周边水域扰动逐渐增大。铰刀在起始位置距离监测点相对较远,随着时间增加,铰刀逐渐靠近监测点;另一方面,由于泥沙扩散需要一定时间,达到一定时间后泥沙才能扩散到监测点位置导致监测点浓度增大。从监测点泥沙浓度增长趋势上看,铰刀转速 76 r/min 时泥沙浓度增长速度最快,转速 45 r/min 时次之,转速 24 r/min 时泥沙浓度增长速度最慢。

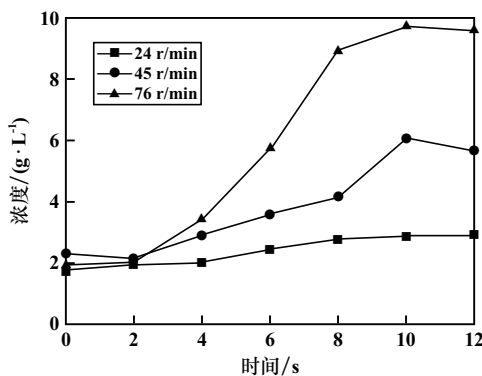


图 11 不同转速下监测点浓度曲线

4.4 铰刀横移速度对水域扰动的影响

铰刀横移速度对固定监测点浓度的影响如图 12 所示。从图 12 可知,高移动速度下铰刀在单位时间内切削泥沙厚度大,导致铰刀对泥沙的破碎效果减弱,部分大块泥沙不足以在泵抽吸力作用下被吸入到吸泥管道,导致这一部分泥沙随着周边水域转动逐渐扩散到上部水域中,增大了对整个水域的扰动;另一方面,铰刀以高移动速度作业时会导致后方泥沙产生堆积,随着作业时间增长,堆积泥沙将逐渐扩散到周边区域,也会加大对周边水域的扰动。从试验结果看,采用 0.2 m/s 的横移速度可在满足一定工作效率的同时降低对水域的扰动,该结果也证实了仿真结果的准确性。

5 结 论

结合固液两相流计算理论,采用基于玻尔兹曼方法的流体分析软件,在考虑碰撞效应的基础上,采用 VOF 模型建立计算流体力学模型。对不同工况下铰刀作业情况进行数值模拟仿真,主要结论如下:

1) 采用三维软件对铰刀模型进行三维绘制并采用铸造的方式进行加工,铰刀具有刀臂窄、内部空间大的特点,同一倾角下铰刀仿真稳定性参数具有相同的变化规律。

2) 铰刀在 45° 倾角下工作时效果较好,扰动范围为 68.32%。随着铰刀转速增大,铰刀上方水域受扰动程度逐渐增加。随着铰刀横移速度增大,对流域的扰动范围呈现逐渐增大后又减小的趋势,低横移速度仅对所移动方向产生影响,中、高横移速度对整个流域都会产生影响。

3) 采用测定固定监测点浓度的方法来判断铰刀作业对水域扰动影响,结果表明,铰刀转动速度和倾斜角度对周边水域的扰动影响较大,铰刀横移速度影响相对较小。铰刀工作参数 45° 倾角、转速 45 r/min 和横移速度 0.2 m/s 时有利于降低铰刀作业对水域的扰动,在一定程度上能够降低对水域的二次污染。

参考文献:

- [1] 周仁馆. 绞吸式清淤流场仿真分析与参数优化[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2019.
- [2] 李文杰,赵 畅,杨胜发,等. 三峡水库细颗粒泥沙起动流速研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016,35(6):68-72.
- [3] 张红武. 泥沙起动流速的统一公式[J]. 水利学报, 2012,43(12):1387-1396.
- [4] 赵冲久. 近海动力环境中粉砂质泥沙运动规律的研究[D]. 天津:天津大学建筑工程学院, 2003.
- [5] 杨 生,钱 进,王明惠,等. 基于 Xflow 风机叶片覆冰数值模拟研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021,38(2):30-36.

引用本文:黎 宙,卓晓军,程阳锐,等. 水下铰刀作业流场特性仿真研究[J]. 矿业工程, 2023,43(4):1-5.