·施　工·

绞吸式挖泥船绞刀扰动吸入能力的数值分析*

林嘉伟，夏　铖，郭　涛，胡京招，史一帆
（中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 200082）

摘要：为了研究绞吸式挖泥船绞刀以不同转速和横移速度工作时其流场分布及颗粒运动轨迹，本文对某型绞刀的挖掘过程进行单向的流体-固粒耦合数值模拟。使用欧拉描述求解的流场，使用拉格朗日描述对土颗粒进行追踪，得到该绞刀相应工况下的流场分布规律和颗粒运动轨迹。结果表明：当转速 30 r/min 和横移速度 0.50 m/s 时，绞刀流场最稳定，颗粒吸入效率更高。本文的研究在理解绞刀工作原理、优化切削效果等方面具有一定参考价值，可以为绞吸式挖泥船绞刀优化施工及未来推广提供参考，从而在实际应用中更好地满足工程需求。

关键词：绞吸式挖泥船；绞刀；颗粒跟踪；单向流-固粒耦合
中图分类号：U615.35+1.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)02-0203-08

Numerical analysis of suction capacity of suction dredger with reamer disturbance

LIN Jiawei, XIA Cheng, GUO Tao, HU Jingzhao, SHI Yifan
(CCCC National Engineering Research Center of Dredging Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: To study the flow field distribution and particle trajectory of reamer for a cutter suction dredger working at different rotational speeds and traversing velocities. In this paper, a unidirectional fluid-solid particle coupling numerical simulation of the excavation process of a certain type of reamer is carried out. The flow field are solved using the Eulerian description and the soil particles are tracked using the Lagrangian description to obtain the flow field distribution pattern and particle motion trajectories for the corresponding operating conditions of this reamer. The results show that when the rotational speed is 30 r/min and the traverse speed is 0.50 m/s, the reamer flow field is most stable and particle suction efficiency is higher. The research in this paper has certain reference value in understanding the working principle of the reamer, optimizing the cutting effect and other aspects. The research results can provide reference for the optimized construction and future promotion of the reamer for cutter suction dredgers, so as to better meet the engineering needs in practical applications.

Keywords: cutter suction dredger; reamer; particle tracking; unidirectional flow-solid particle coupling

随着世界船舶运输业的不断发展，我国对港口建设和航道疏浚的需求不断加大[1]。绞吸式挖泥船在港湾建设、航道湖泊清淤、填海造地、水域环保等领域有着重要的应用[2]。其施工时桥架下放并左右摆动，安置在桥架前端的螺旋型绞刀头通过旋转疏松土层，形成的泥浆被绞刀头内侧的吸泥口吸入，经过泥泵增压后运送到指定的卸泥区[3]。疏浚土层多以淤泥和黏土为主，具有固体颗粒度小、分布范围宽、含水量高的特点[4]。绞刀的流场特性对于绞刀挖掘性能有着重要的影响[5]。

周栋彬等[6]研究绞刀下倾角和入口流速对绞

收稿日期：2024-05-15
*基金项目：中交疏浚技术装备国家工程研究中心科研项目(2018.10.SD.30)
作者简介：林嘉伟（1998—），男，硕士，工程师，从事疏浚装备研发工作。

刀挖掘性能的影响，获得不同下倾角及入口流速工况下绞刀的压力和出口体积分数变化情况；郑琳珠等[7]研究绞吸挖泥船切削过程土体与绞刀相互作用的功率消耗和切削产量情况，结合实船施工数据，对现有的绞刀刀臂曲线进行优化；刘世伟[8]以 4 200 kW 大型绞吸式挖泥船为研究对象，比较不同工作参数对绞刀磨损的影响，分析绞刀磨损与产量之间的关系；张德义等[9]采用 LS-DYNA 模拟绞刀切削土壤的过程，研究土壤切削形态和切削阻力；谢立全等[10]对于不同刀齿切削角下刀齿体切削过程进行建模和数值分析，探究了绞刀刀齿切削角对于挖泥能效的影响规律；Zhang et al. [11]应用标准 k-ε 湍流模型和多参考系模型对绞刀附近的流场特性进行数值模拟研究，得到在不同平面流体速度矢量和压力分布特征；方园等[12]应用 RNG k-ε 模型和滑移网格技术对绞刀二维清水流场进行模拟计算，分析绞刀周围和绞刀内部的流场特性，得到不同时刻绞刀流场参数的变化特点；余义瑞等[13]通过对比螺旋绞刀、普通绞刀、加装防护装置绞刀在施工过程中的污染物释放量，探究更加环保的绞刀型式和环保疏浚方案。这些研究均相对新颖和深入，但是对于不同参数条件下绞刀工作时流体和固粒之间影响规律的研究分析较少。

为了更直观地得到颗粒在绞刀流场中的运动情况，本文分别采用欧拉、拉格朗日描述求解流体动力学和颗粒运动方程，模拟绞刀作用下水的复杂湍流运动以及泥沙运动，得到该绞刀不同转速和横移速度条件下的流场分布规律和泥沙的运动轨迹。

1 绞刀结构

基于三维建模软件针对某型疏浚绞刀进行建模。绞刀的主要参数包括底圈外径 D_1 为 2 960 mm，底圈内径 D_2 为 2 500 mm，整体高度 H 为 1 780 mm，刀臂数量 6 个。绞刀三维模型如图 1 所示。

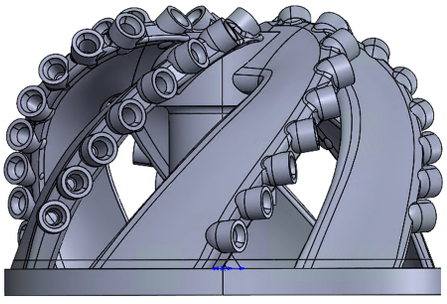


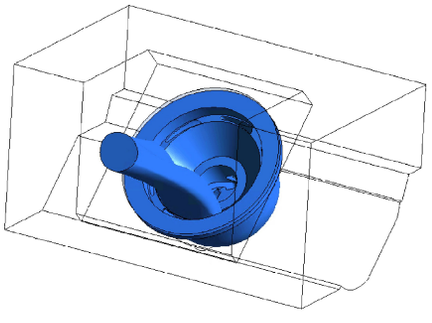
图 1 绞吸式挖泥船绞刀模型

Fig. 1 Reamer model for cutter suction dredger

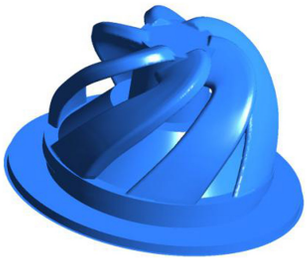
2 绞刀数值模型

2.1 计算模型建立与网格划分

为探究绞吸式挖泥船绞刀入土挖掘的内部及周边流场，针对绞刀计算域进行建模和网格划分，如图 2 和 3 所示。由于绞刀在水中旋转，因此将计算区域分别设置静止域和旋转域，将包围绞刀及绞刀内部的流体区域设为旋转运动域，而外部流体区域作为静止域。绞刀在旋转过程中，越靠近绞刀附近的流场所受影响越大。因此，对于旋转域以及旋转域和静止域交界面上的网格进行了加密。经过网格无关性验证，整体网格划分数量确定为 500 万个，网格的质量和数量均可达到计算的相关要求。



a) 绞刀旋转域及吸泥管



b) 绞刀

图 2 绞吸式挖泥船绞刀计算模型

Fig. 2 Calculation model of reamer for cutter suction dredger

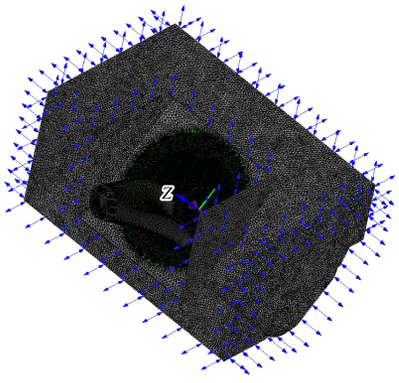


图 3　绞刀附近水体域计算网格

Fig. 3　Computational grid for water domain near reamer

2.2　数值计算方法

单向耦合(unidirectional coupling)拉格朗日颗粒跟踪模型是基于拉格朗日描述的一种常见的模拟方法[14]。它将颗粒视为离散的实体，通过数值计算模拟颗粒在流体中的运动轨迹。该模型的基本原理是通过求解流体力学方程和颗粒动力学方程来模拟系统中流体和颗粒耦合的作用[15]。其目的是为了绞刀仿真过程中能够直观地得到颗粒在绞刀流场中的运动情况。

以单个离散相颗粒为例，单颗粒在流体中的运动主要包括平动和转动。颗粒运动的驱动力来自于流体的曳力、压力梯度力以及颗粒之间的碰撞作用力。基于牛顿第二定律，单个颗粒的运动方程可表示为[16]：

$$\frac{\mathrm{d}u_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t}=F_\mathrm{d}(u-u_\mathrm{p})+\frac{g_\mathrm{p}(\rho_\mathrm{p}-\rho)}{\rho_\mathrm{p}}+F \tag{1}$$

其中：$$F_\mathrm{d}=\frac{18\mu}{\rho_\mathrm{p}d_\mathrm{p}^2}\frac{C_\mathrm{D}Re_\mathrm{p}}{24} \tag{2}$$

$$Re_\mathrm{p}=\frac{\rho d_\mathrm{p}|u_\mathrm{p}-u|}{\mu} \tag{3}$$

式中：F_d 为流体对于颗粒的曳力[17]；Re_p 为颗粒雷诺数[18-19]；u、u_p 分别为流体相速度和固体颗粒速度；ρ、ρ_p 分别为流体密度与固体颗粒密度；g_p 为 u_p 方向上的重力加速度分量；F 为该方向上的其他作用力；C_D 为曳力系数，与 Re_p 相关，取 0.44；μ 为流体的运动黏度；d_p 为球形固体颗粒的直径。

在计算过程中忽略了布朗力、热泳力以及 Saffman 力的作用。

2.3　流场计算设置

绞刀流场计算设置为稳态计算，计算步数为 2 000 步。湍流模型选择 shear stress transport(剪切应力运输,SST)。绞刀吸入泥浆流量为 2 万 m^3/h，固液两相分别为水和泥沙颗粒，绞刀与土体倾斜夹角为 27°，高度方向上入土约 2 m，破土面积 2 m^2。数值模拟过程中绞刀为正刀作业，进口及所有外围水域选择开放式壁面作为边界条件，绞刀轴与静止域的接触面选择无滑移壁面作为边界条件。绞刀转速计算工况分别为 20、30 和 40 r/min。绞刀横移速度计算工况分别为 0.20、0.35 和 0.50 m/s。

如图 4 所示，本研究在进口投放颗粒，以等效绞刀挖掘时刀臂破土后形成的沙土颗粒群，探究在不同工况条件下土颗粒群的运动轨迹。低质量负荷运动中，单向耦合可以得到一个较为准确的结果，因此流体与颗粒的耦合方式选择单向耦合。设置颗粒直径为 0.01 m，清水密度为 997 kg/m^3，黏土密度为 2 650 kg/m^3。为了使颗粒有足够长的时间和距离通过流场区域，设置颗粒被追踪的最大实时时间为 10 s，颗粒被追踪的最大距离为 10 m。

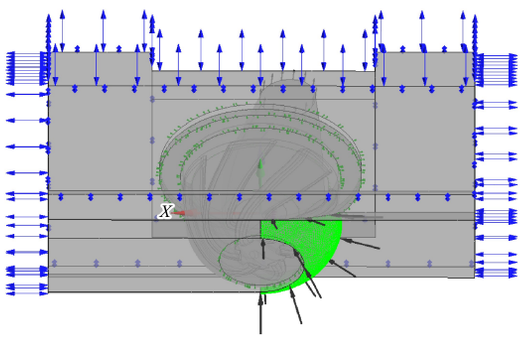


图 4　绞刀颗粒投放位置

Fig. 4　Particle drop-off location in reamer

3　绞刀数值模拟结果分析

3.1　不同转速条件下流场分析

为了探究绞刀在不同转速条件下的流场分布规律，保持绞刀横移速度为 0.5 m/s，分别针对转速 20、30 和 40 r/min 条件下的绞刀进行数值仿真。图 5 和 6 分别为不同转速条件下的绞刀纵截面压力和速度分布云图。

水运工程

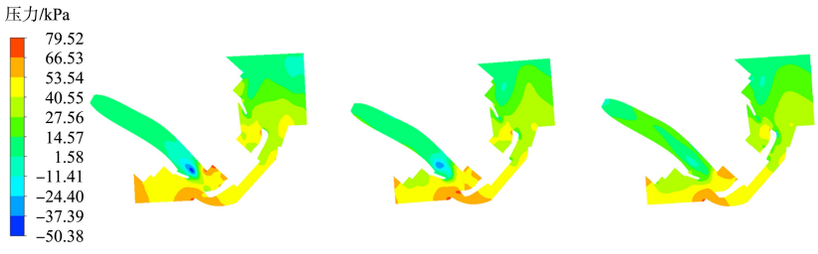


图 5　不同转速的压力分布云图

Fig. 5　Pressure distribution cloud at different rotational speeds

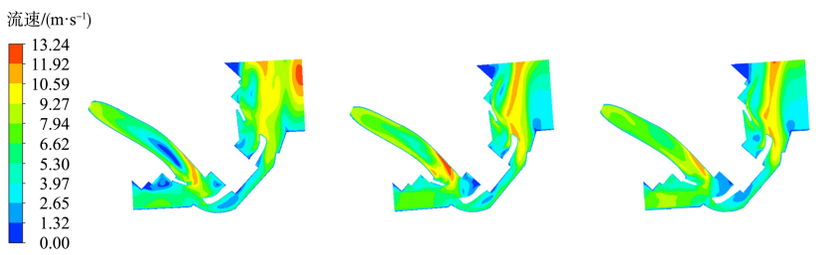


图 6　不同转速的流速分布云图

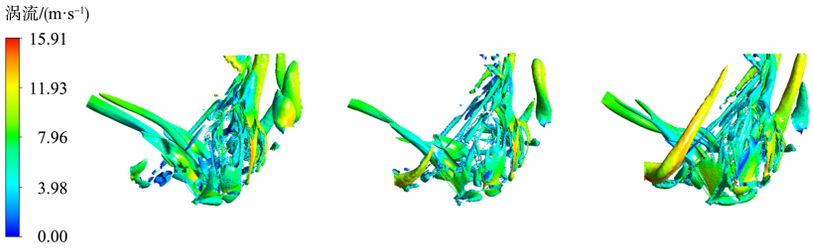
Fig. 6　Velocity distribution cloud at different rotational speeds

如图所示，绞刀高压区始终位于纵截面的底部位置。在低转速 20 r/min 条件下，由于流体动力学不够强烈，涡流和湍流的形成相对较弱，导致绞刀纵截面高压区较为分散。随着转速的增加，高压区域集中于绞刀头底端，绞刀纵截面压力分布逐渐趋于均匀。绞刀的高压区域集中在纵截面底部，对于提高绞刀的切割效率和改善其他性能参数具有潜在影响。

由图 6 可以看出，在低转速 20 r/min 的条件下，绞刀的流速分布呈现出一定的不均匀性。绞刀中间区域的流速较高，而四周壁面区域的流速相对较低。这种不均匀的流速分布是由于低转速时，流体在绞刀周围形成的湍流不足以将流速均匀分布在整个绞刀表面。中间区域受到较大的涡流影响，导致流速相对较高，而四周壁面区域由于涡流弱化，流速相对较低。随着转速的提高，湍流强度增加，更好地将流体动能分布到绞刀表面各个区域，从而使流速更加均匀。

图 7 和 8 分别为不同转速条件下的涡量和颗粒路径图。如图所示，在 20 r/min 转速条件下，涡流的分布呈现出相对较多的大尺度涡。此外，与其他转速相比，20 r/min 转速条件下的绞刀出口处涡流数量也最为显著。在低转速的情况下，由于涡流生成的机制受到限制，导致涡流相对较大。这些大尺度涡流可能在绞刀内部形成，并且在出口区域尤为明显。与 20 r/min 转速条件下相比，当转速增加到 30 r/min 时，绞刀流场中的涡量减少，流场相对稳定。随着转速继续增大到 40 r/min，绞刀涡量增加。尤其绞刀头大圈高速区域附近出现大尺度涡，刀臂位置的涡流也变得更加密集。

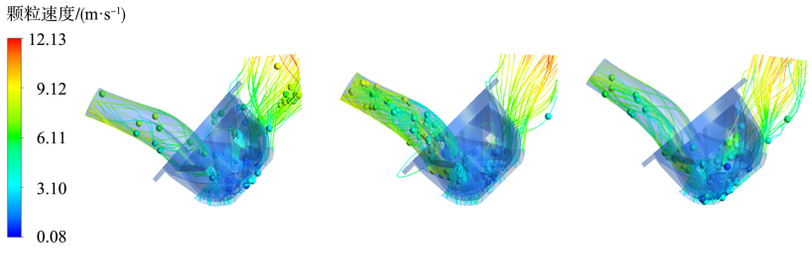
由图 8 可以观察到，当绞刀转速为 30 r/min 时，绞刀的工作效率显著提高。这与颗粒运动流场的变化有关。在 30 r/min 转速条件下，由于涡流和湍流的增强，使得颗粒在绞刀周围形成更加有序的运动流场，从而提高了颗粒的运动稳定性。颗粒受到的力更加均匀，运动流场更加平稳，有效提高颗粒在流场中的均匀混合或切割效果，从而增强了绞刀的工作效率。反观在 20 和 40 r/min 转速条件下，绞刀吸入的颗粒分布较为稀疏。尤其在低转速 20 r/min 条件下，颗粒吸入量最少，颗粒在水中扬起的现象最为严重。



a) 20 r/min　　b) 30 r/min　　c) 40 r/min

图 7　不同转速的涡量

Fig. 7　Vortex at different rotational speeds



a) 20 r/min　　b) 30 r/min　　c) 40 r/min

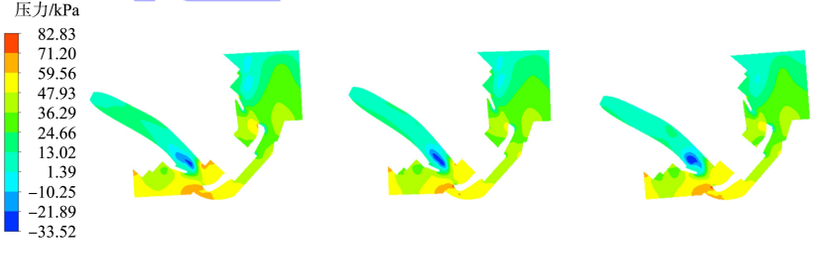
图 8　不同转速的颗粒路径

Fig. 8　Particle path at different rotational speeds

根据上述不同绞刀转速条件下的流场分析，当转速在 30 r/min 条件下，绞刀流场更加稳定，颗粒吸入效率更高，更加适合绞吸式挖泥船的工作环境。稳定的绞刀流场有助于减少能源消耗，提高挖泥船的操作效率。

3.2　不同横移速度条件下流场分析

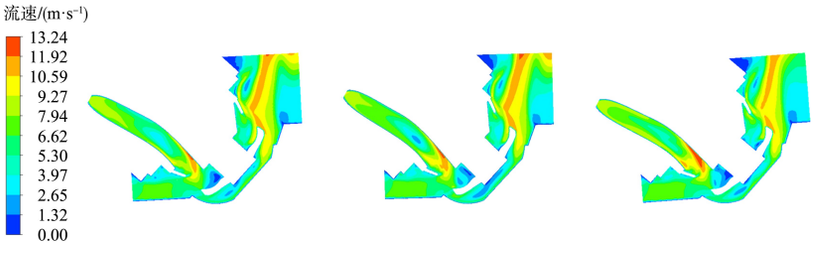
为了探究绞刀在不同横移速度条件下的流场分布规律，保持绞刀转速为 30 r/min，分别针对横移速度 0.20、0.35 和 0.50 m/s 条件下的绞刀进行数值仿真。图 9、10 分别为不同横移速度条件下的绞刀纵截面压力和速度分布云图。



a) 0.20 m/s　　b) 0.35 m/s　　c) 0.50 m/s

图 9　不同横移速度的压力分布云图

Fig. 9　Pressure distribution cloud at different traverse speeds



a) 0.20 m/s　　b) 0.35 m/s　　c) 0.50 m/s

图 10　不同横移速度的流速分布云图

Fig. 10　Velocity distribution cloud at different traverse speeds

如图所示，横移速度对于绞刀纵截面流场压力分布规律影响较小。所有横移速度条件下，刀臂切削正方向上的压强始终保持较高值，出口呈现局部低压区。随着横移速度的增大，低压区域面积逐渐减小。当横移速度增大到 0.50 m/s 时，低压区域面积最小。绞刀的流速分布呈现出一定的不均匀性，保持绞刀中间区域的流速较高，而四周壁面区域的流速相对较低的规律。随着绞刀横移速度的增大，纵截面中间高流速区域面积逐渐减少。该现象反映了横移速度对于绞刀内部流动格局的影响，导致纵截面高速流动区域收缩。

图 11 为绞刀在不同横移速度条件下的涡量图，而图 12 为相应的绞刀颗粒路径图。如图 11 所示，当绞刀横移速度为 0.20 m/s 时，绞刀流场中呈现出较为显著的大尺度涡。然而，随着横移速度的逐渐增大，涡数量呈逐渐减少的趋势。进一步对比 3 个不同绞刀横移速度工况下的涡分布情况，特别是在横移速度达到 0.50 m/s 时，可清晰地发现绞刀内部的涡量减少更为显著。

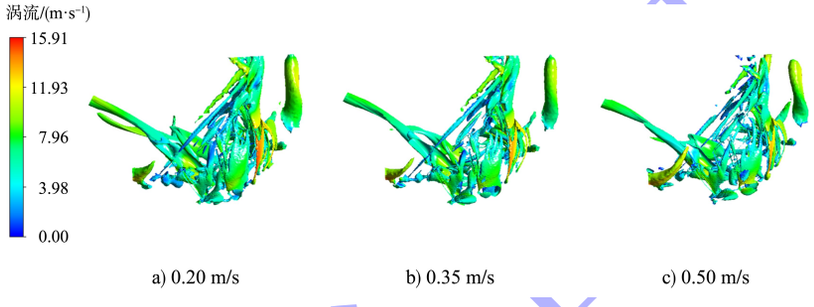


图 11　不同横移速度的涡量

Fig. 11　Vortex at different traverse speeds

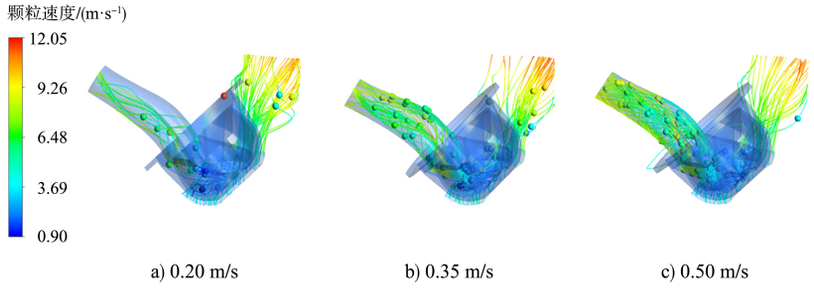


图 12　不同横移速度的颗粒路径

Fig. 12　Particle path at different traverse speeds

由图 12 可以看出，绞刀横移速度对于流场中的颗粒影响较大。在横移速度为 0.20 m/s 时，颗粒吸入情况较差，大部分颗粒随着绞刀的旋转扬起。当增加横移速度时，该情况得到改善，绞刀颗粒吸入效率逐渐提高。相比前两个工况，在横移速度为 0.50 m/s 时，颗粒在绞刀内部的运动轨迹情况更优。

根据上述不同绞刀横移速度条件下的流场分析，保持绞刀转速不变时，横移速度的增大会使得绞刀流场更加稳定，从而使得颗粒运动轨迹情况更佳。

4　结论

1）当绞吸式挖泥船绞刀转速在 30 r/min 条件下，绞刀流场更加稳定，颗粒吸入效率更高，更加适合绞吸式挖泥船的工作环境。因此，挖泥船实际施工时建议绞刀转速为 30 r/min，从而减少能源消耗，提高挖泥船的操作效率。

2）当绞吸式挖泥船绞刀横移速度约为 0.50 m/s 时，绞刀流场较为稳定，绞刀内部涡量减少显著，颗粒吸入效率更高。挖泥船在施工时，绞刀横移速度约为 0.50 m/s 较适宜。

3）研究呈现了流体与颗粒之间的相互作用，有助于进一步分析沉降、扩散等过程，也为绞吸挖泥船绞刀机理研究和挖泥工况的选择提供了参考依据。

4）因物理问题的复杂性，为节省计算资源，研究中对绞刀几何模型进行简化，并对数值模型中泥浆特性及液-固粒耦合作用进行一定的假设处理，对于数值结果的精度具有一定影响。若后期条件允许，将采用更为精准的数值模型开展深入研究。

参考文献：

[1] 王林森, 苏召斌, 李章超, 等. 绞吸挖泥船大功率挖岩绞刀设计与研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(11): 46-48, 56.
WANG L S, SU Z B, LI Z C, et al. Design and research of large power rock cutterhead of cutter suction dredger[J]. China harbour engineering, 2017, 37(11): 46-48, 56.

[2] 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.
ZHANG L B, CAI Z X, LI R X, et al. Numerical simulation of rock cutting process for the cutterhead of cutter suction dredger[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 371-376.

[3] DEKKER M A, KRUYT N P, BURGER M D, et al. Experimental and numerical investigation of cutter head dredging flows[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2003, 129 (5): 203-209.

[4] KWAPINSKA M, SAACE G, TSOTSAS E. Mixing of particles in rotary drums: a comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes [J]. Powder technology, 2006, 161(1): 69-78.

[5] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 701-704.
ZHOU J, CHI Y W, CHI Y, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2000, 22(6): 701-704.

[6] 周栋彬, 熊庭, 张新卓, 等. 绞吸式挖泥船绞刀的流场数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1017-1021.
ZHOU D B, XIONG T, ZHANG X Z, et al. Numerical simulation of flow field for cutter head of cutter suction dredgers[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation science & engineering), 2019, 43 (6): 1017-1021.

[7] 郑琳珠, 胡京招, 梁鑫, 等. 绞吸挖泥船绞刀切削过程数值模拟及刀臂曲线优化[J]. 船海工程, 2017, 46(4): 72-76.
ZHENG L Z, HU J Z, LIANG X, et al. Numerical simulation of cutting process and optimization of cutter arm curve for the cutter suction dredger[J]. Ship & ocean engineering, 2017, 46(4): 72-76.

[8] 刘世伟. 大型绞吸式挖泥船绞刀齿受力分析及磨损仿真[J]. 船舶职业教育, 2023, 11(6): 50-56.
LIU S W. Force analysis and wear simulation of reamer teeth of large cutter suction dredger [J]. Shipbuilding vocational education, 2023, 11(6): 50-56.

[9] 张德义, 倪福生. 疏浚绞刀切削土壤的数值模拟[J]. 水运工程, 2017(7): 68-72.
ZHANG D Y, NI F S. Numerical simulation of dredge cutter cutting soil [J]. Port & waterway engineering, 2017(7): 68-72.

[10] 谢立全, 梁鑫, 李晓波, 等. 刀齿切削角对绞刀生产效能影响的数值分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 153-155, 152.
XIE L Q, LIANG X, LI X B, et al. Numerical simulation on effect of cutting angle on efficiency of cutter teeth[J]. Water resources and power, 2018, 36(7): 153-155, 152.

[11] ZHANG M, FAN S D, ZHUA H H, et al. Numerical simulation of solid-fluid 2-phase-flow of cutting system for cutter suction dredgers[J]. Polish maritime research, 2018, 25(S2): 117-124.

水运工程

[12] 方园, 倪福生. 挖泥船绞刀二维清水流场数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2011(2): 4-7.
FANG Y, NI F S. Numerical simulation of 2-D water flow in and around cutter of a dredger [J]. Chinaharbour engineering, 2011(2): 4-7.

[13] 余义瑞, 陈垚, 雷晓玲, 等. 绞刀型式对航道疏浚中底泥污染物释放特性的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(8): 210-213.
YU Y R, CHEN Y, LEI X L, et al. Effect of cutter type on sediment pollutants release performance in waterway dredging[J]. Environmental science & technology, 2015, 38(8): 210-213.

[14] 李精精, 常愿, 王辉. 基于拉格朗日方法的气溶胶颗粒运动沉积模型研究[J]. 科技视界, 2022(32): 42-46.
LI J J, CHANG Y, WANG H. Aerosol particle motion deposition modeling based on the Lagrangian approach[J]. Science & technology vision, 2022(32): 42-46.

[15] 汪靓, 崔小朝, 蔡明, 等. 拉格朗日-雷诺应力模型在后台阶颗粒流中的运用[J]. 太原科技大学学报, 2011, 32(5): 406-409.
WANG J, CUI X C, CAI M, et al. Simulation on particles flow over a backward-facing step using Lagranian and Reynolds stress model[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2011, 32(5): 406-409.

[16] 陈林烽. 热剪切湍流中微细颗粒输运特性的大涡模拟研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.
CHEN L F. An investigation on particle motion in the stratified turbulence by LES [D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.

[17] LING Y, ZALESKI S, SCARDOVELLI R. Multiscale simulation of atomization with small droplets represented by a Lagrangian point-particle Model [J]. International journal of multiphase flow, 2015, 76: 122-143.

[18] 丁周, 周锟, 孙科, 等. 基于直接力浸入边界法的线形排列多球颗粒沉降特性研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 297-304.
DING Z, ZHOU K, SUN K, et al. Investigation into sedimentation of linear multi-spheres based on direct forcing immersed boundary method[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Nature science edition), 2020, 43(4): 297-304.

[19] 李琼. 液压油箱中固体颗粒运动轨迹及分布的仿真研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
LI Q. The research on the trajectory and distribution of solid particles in hydraulic tank [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 190 页)

[13] 杨少磊, 马宏旺. 考虑冲刷情况下海上风电单桩基础优化设计研究[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(1): 74-80.
YANG S L, MA H W. Optimum design of single pile foundation for offshore wind turbine monopiles unprotected against scour [J]. Journal of ocean technology, 2018, 37(1): 74-80.

[14] TAFAROJNORUZ A, GAUDIO R, CALOMINO F. Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 138(3): 297-305.

[15] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011(S1): 280-284.
DING J W, HONG Z S, LIU S Y. Flow-solidification method and fluidity test of dredged clays [J]. Rock and soil mechanics, 2011(S1): 280-284.

[16] 吴燕开, 史可健, 胡晓士, 等. 海水侵蚀下钢渣粉+水泥固化土强度劣化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1014-1022.
WU Y K, SHI K J, HU X S, et al. Experimental study on strength degradation of steel slag + cement-solidified soil under seawater erosion [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(6): 1014-1022.

[17] 和庆东, 戚建功. 一种新技术在海上风机基础冲刷防护的应用研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 112-121.
HE Q D, QI J G. Application of a new technology in scour protection of offshore wind turbine foundations[J]. Southern energy construction, 2020, 7(2): 112-121.

(本文编辑 赵娟)

水运工程