



环保绞刀内部流动状态研究

马 源, 夏 铖, 胡京招, 王海荣

(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: 近年来, 绞吸挖泥船的研制工作逐渐向环境保护型、绿色节能型发展, 防扩散技术是研制环保绞吸挖泥船的核心。通过对原型环保绞刀进一步改造, 在绞刀罩两侧增加活动翻板来灵活调整绞刀切削深度和吸口吸入浓度。采用 CFD (计算流体力学) 软件对原型绞刀和新型绞刀进行模拟计算, 对比绞刀切削过程中左右两侧流场情况。结果表明: 新型绞刀防扩散效果明显优于原型绞刀; 从结构的角度分析, 新型绞刀切削深度灵活可调, 满足不同现场工况的要求, 为后续打造经济型、环保型绞吸挖泥船提供一定的理论基础。

关键词: 环保绞刀; 优化设计; 防扩散; CFD

中图分类号: U615. 31; U615. 35+1. 3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0183-07

Internal flow state of environmental protection cutter

MAYuan, XIA Cheng, HU Jingzhao, WANG Hairong

(CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: In recent years, the development of cutter suction dredger gradually develops to environmental protection and green energy saving, and the anti-diffusion technology is the core of the development of environmental protection cutter suction dredger. In this paper, the prototype environmental protection reamer is further reformed by adding movable flaps on both sides of the reamer cover to flexibly adjust the cutting depth and suction concentration of the reamer. The CFD (Computational Fluid Dynamics) software is used to simulate the prototype reamer and the new reamer, and the flow field on both sides of the reamer is compared in the cutting process. The results show that the diffusion prevention effect of the new reamer is obviously better than that of the original reamer. From the perspective of structure, the cutting depth of the new reamer is flexible and adjustable, which can meet the requirements of different field conditions, and provide a certain theoretical basis for the subsequent construction of economic and environmental protection cutter suction dredger.

Keywords: environmental protection cutter; optimization design; anti-diffusion; CFD

绞刀破土是环保疏浚过程中的关键环节之一, 过程中易产生底泥扰动和水体浑浊的现象, 增加氮、磷、有机质等释放^[1], 并且在底泥被污染严重的区域造成污染源扩散, 不仅未起到治理效果反而影响生态环境^[2]。

防扩散技术通过污染物的二次扩散进行划分, 大致可以分为三大类: 1) 针对细颗粒扩散的防扩

散技术; 2) 针对疏浚后的臭气扩散的防扩散技术; 3) 针对堆场的二次污染的防扩散技术^[3]。其中细颗粒扩散产生的二次污染问题主要由于绞刀的横移以及切削扰动造成。

国外的防扩散技术起源于 19 世纪 70 年代, 以 IHC、BOSKALIS、HAM 为代表的多家国际知名疏浚公司研制了带罩式环保绞刀、立式圆盘环保

收稿日期: 2023-04-10

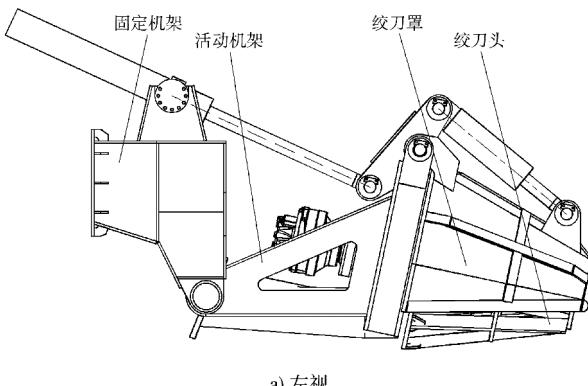
作者简介: 马源 (1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事疏浚装备研发工作。

绞刀、螺旋环保绞刀和刮扫吸头等多种防扩散的环保绞刀^[4-5]。国内关于防扩散技术研究起步较晚，主要以 20 世纪初张春华等^[6]、张晴波^[7]、郭志勇等^[8]的研究作为基础，之后的研究均在此基础上进行深化。余义瑞等^[9]通过现场试验的方式对比普通绞刀、加罩普通绞刀、螺旋绞刀和加罩螺旋绞刀的防扩散性能，结果表明加罩螺旋绞刀的防扩散性能最优。刘国瑞等^[10]设计了一款防扩散环保绞刀，并通过有限元方法论证此绞刀结构的可靠性以及存在的问题。方园等^[11]利用有限元分析软件对绞刀运行过程中周围的流场进行模拟仿真，由速度矢量图分析绞刀运行过程中周围高速区及低速区的分布情况，总结绞刀作业的经济性须考虑的因素。在此基础上，本文进一步深化对于防扩散技术的探索，在带罩式环保绞刀的绞刀罩两侧增加活动翻板，并通过 CFD(计算流体力学)软件计算对比原型绞刀和新型绞刀的优劣，旨在为后续打造经济型、环保型绞吸挖泥船提供一定的理论基础。

1 原型绞刀

1.1 结构介绍

原型环保绞刀主要由固定机架、活动机架、绞刀罩、绞刀头组成，见图 1。其中固定机架通过紧固件连接在绞吸船的桥架上，跟随桥架上下摆动和左右横移；通过调整固定机架和活动机架之间的角度，保持不同水深下绞刀对地角度不变；通过调整绞刀罩和绞刀之间的开度，调节吸入浓度。



a) 左视

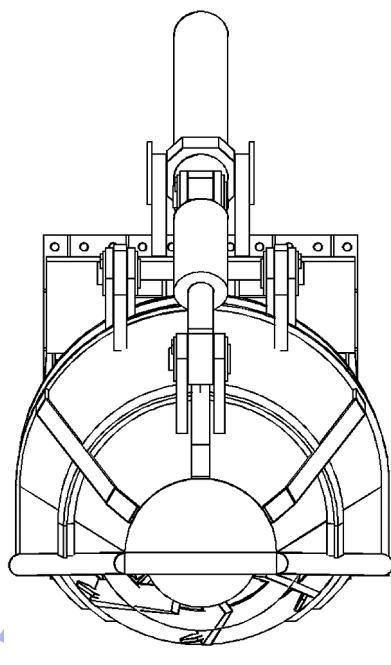


图 1 原型环保绞刀组成

1.2 工作原理

在不同的作业水深条件下，为改善绞刀入土切削角度偏离最佳设计角度以及绞刀的有效切削刃长度缩短的不足，将机架设计成固定式和活动式，通过调整两者之间的角度，实现不同作业水深下绞刀头对地角度不变，最大可调角度约 45°。绞刀罩与淤泥形成相对封闭的空间，并在泵吸作用下形成负压区域，一定程度上防止了被扰动淤泥的扩散；在吸入浓度较高时也可打开绞刀罩，吸入部分清水控制浓度。在检修期间，调节活动机架和绞刀罩角度，使绞刀头和绞刀罩向上摆动，留出更多的检修和操作空间。

1.3 现场试验

为考察原型绞刀的性能，将其安装于某环保绞吸平台上，通过测量排泥管管路出口位置的泥浆含固率来考察施工效率，并观察周围水体浊度考察防扩散的环保性能。

挖泥过程中泥泵绞刀绞车等均按照设计工况开启，施工过程中在排泥管取样口提取样本，测定样本密度、含固率等数据并记录。

所测结果低于预期值，且在施工过程中水面浑浊，水体的浊度较大，环保效果有限。

2 改进方案

2.1 问题分析

结合现场试验结果, 分析造成水体浊度增加, 含固率较低的原因是该环保绞刀罩不能灵活匹配疏浚施工现场情况以及施工要求。

原型环保绞刀罩下边缘比绞刀头切削刃高约 150 mm, 且基本不可调, 因此无法针对不同土质调整切削深度。如疏浚对象为淤泥土、黏性土时需适当增大切削深度, 此时原型绞刀现有结构非常受限, 并会出现横移时绞刀罩比绞刀头先接触淤泥的情况, 造成淤泥扰动扩散。已经切削过的位置又因绞刀罩下边缘位置较高, 导致绞刀罩内的淤泥未被完全吸入便已发生泄漏, 且外部水体从该位置被大量吸入, 导致吸入浓度降低, 因此为改善不同工况下的防扩散效果和有效调整吸入浓度, 需对原型绞刀罩进行改造。

2.2 改进措施

为满足不同切削深度的要求, 提高吸入浓度, 减少施工过程中的疏浚土泄漏量, 并控制疏浚过程中的扩散现象, 将绞刀罩下边缘下移与绞刀头切削刃齐平, 同时将绞刀罩的两侧改为 2 个翻板, 通过铰链连接在绞刀罩主体上, 2 个油缸通过铰链连接起绞刀罩主体和翻板, 2 个翻板分别由油缸驱动实现开合以及任意开度可调。改进后的新型环保绞刀罩见图 2。通过改进措施, 以满足不同切削深度要求、减少淤泥泄漏以及提高吸入浓度。

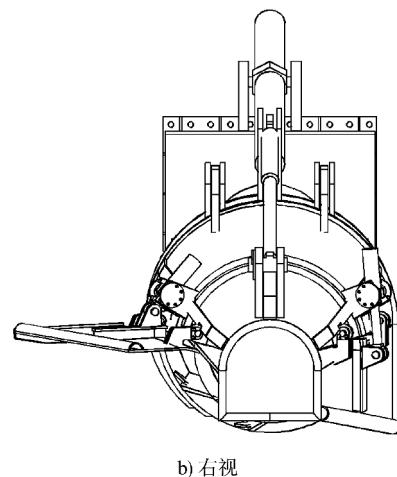
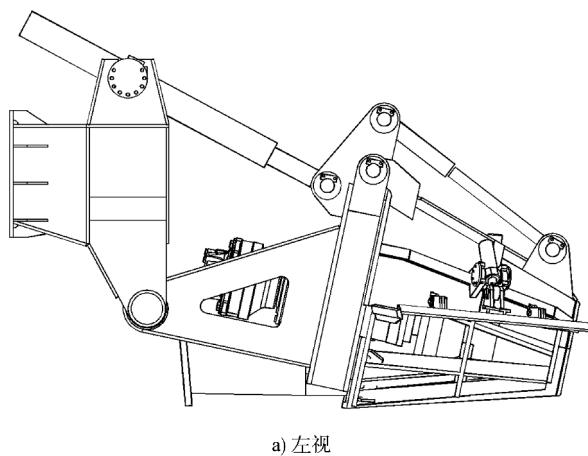


图 2 改进后的新型环保绞刀罩

3 改进前后对比

为对比原型环保绞刀和新型环保绞刀在防扩散方面的优劣性, 验证改进后方案的可行性, 采用 CFD 软件对这两种绞刀的工作过程进行数值模拟, 通过对泥浆流场分析两种绞刀的防泄漏能力。两种绞刀的结构外形见图 3。最主要区别在于新型环保绞刀的绞刀罩增加可以控制启闭角度的翻板。因此, 新型绞刀在横移方向一侧的开度明显大于原型绞刀, 而在横移反方向的开度则明显减小, 增大吸泥面积的同时减少了泄漏面积。

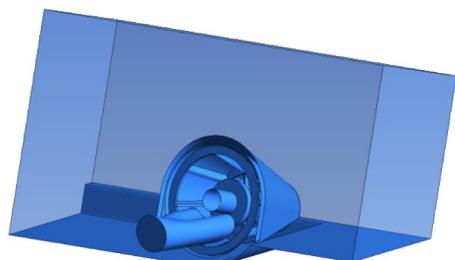


图 3 绞刀模型

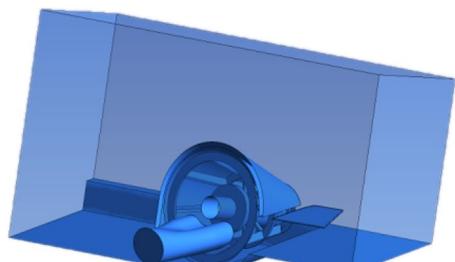
3.1 数值计算

3.1.1 计算域

绞刀罩的结构复杂，对后续的数值计算造成一定的影响。综合平衡计算精度和计算消耗，对绞刀结构与实际工作环境进行适度简化。最终绘制水体计算域见图 4。



a) 原型环保绞刀



b) 新型环保绞刀

图 4 水体计算域外形

3.1.2 计算网格

环保绞刀结构复杂，采用非结构化网格，此网格容易控制网格大小和节点密度，可以有效提高交界面处的网格信息传递，而且这种结构有利于网格间的自适应。为了提高计算精度与收敛性，对刀臂、绞刀罩、交界面处进行网格加密并添加适当的边界层。两个模型的网格数量见表 1。

表 1 绞刀水体网格数量

水体域	排出管系/ 万个	绞刀/ 万个	工作环境/ 万个	总网格数/ 万个
原型绞刀	5.394 5	451.635 7	365.266 8	822.297 0
改进绞刀	5.388 7	451.635 7	388.768 4	845.792 8

3.1.3 计算方法

结合现场实际的施工工况，将淤泥质土以及淤泥作为研究对象，经过绞刀切削或扰动后与水体混合较好，容易形成混合流体。基于 $N-S$ 方程，充分

考虑水深、浮力等因素的影响，开展计算工作。绞刀转速、水深、横移速度均影响防扩散效果，本文选定的绞刀计算工况统一为：作业水深 6 m、切削深度 150 mm、转速 35 r/min、横移速度 16 m/min、吸入流量 950 m³/h。

3.2 计算结果分析

通过对比较刀径向截面的速度分布情况分析绞刀的防泄漏能力，沿轴选取 4 个径向截面(截面 $a \sim d$)进行研究，具体截面的分布情况见图 5。

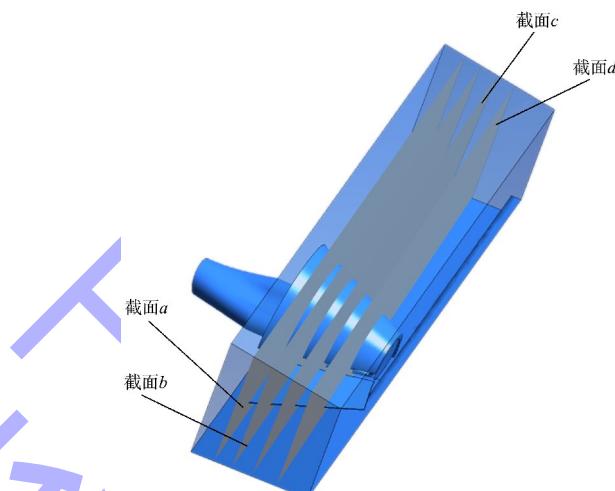


图 5 绞刀径向截面分布

图 6 中绞刀左侧为横移反方向。截面 a 、 b 、 c 、 d 上，新型绞刀罩内壁面存在 1 个回流涡，是由于绞刀内壁面的压力差造成的。这个回流涡既消耗了从左侧进、出绞刀的流体速度，又在流出的流体和进入的流体之间形成了 1 个分界，对流体从左侧持续流入或流出绞刀内部起到阻挡作用。相较于原型绞刀的绞刀罩，减少左侧扰动和泥浆泄漏量，保证防泄漏能力，提高了疏浚效率。

图 7 中绞刀右侧即横移前进方向。截面 a 、 b 、 c 、 d 上，新型绞刀右侧的吸入面积与吸入流量明显大于原型绞刀。特别是原型绞刀在吸入右侧底泥时，一部分泥浆受绞刀罩阻拦而未被吸入，造成扩散；而新型绞刀右侧的大开度吸入面可有效地吸收周边的泥浆。提高产量的同时，保证了防扩散效果。因此新型绞刀明显优于原型绞刀。

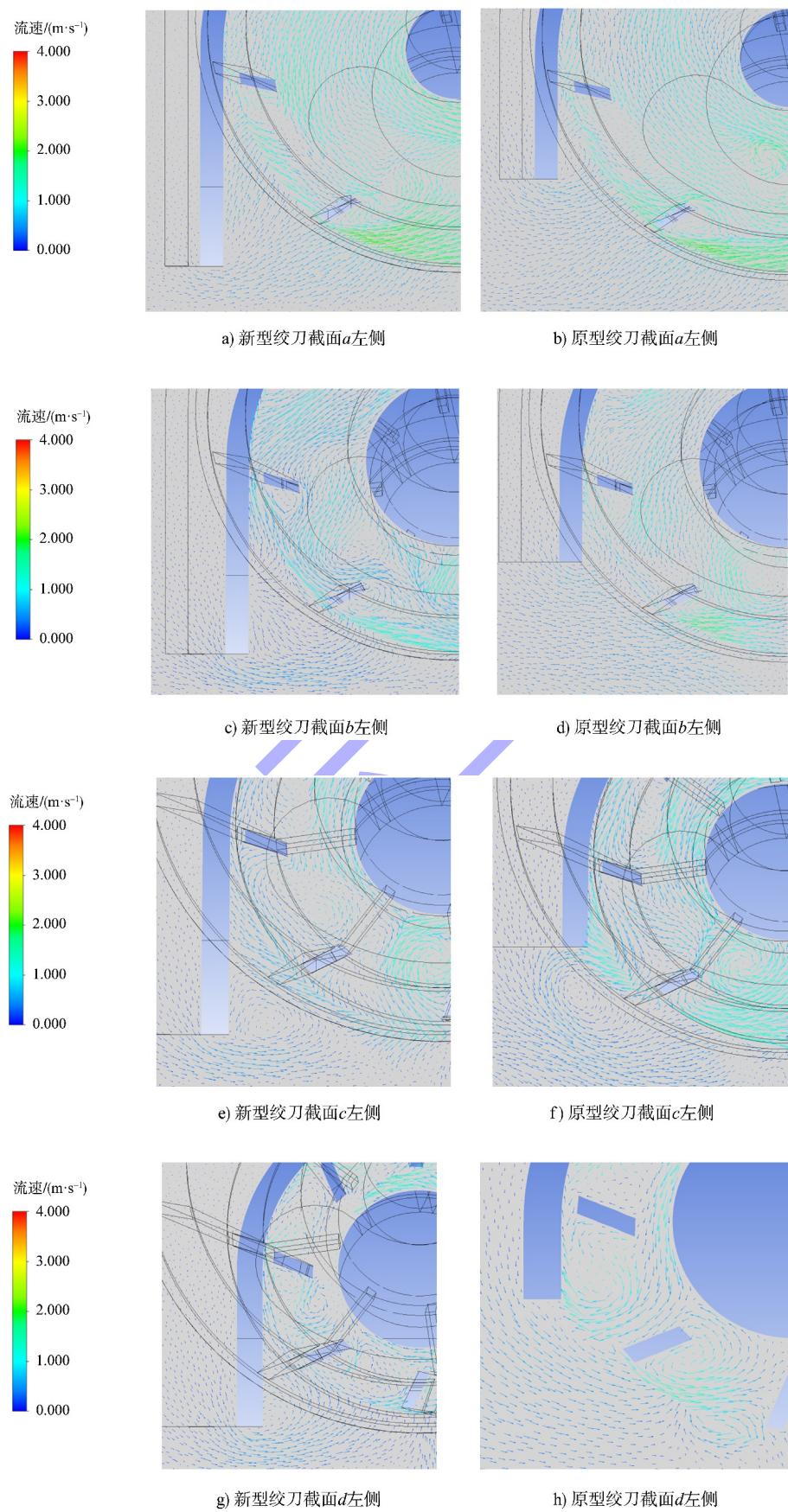


图 6 新型绞刀和原型绞刀左侧速度场对比

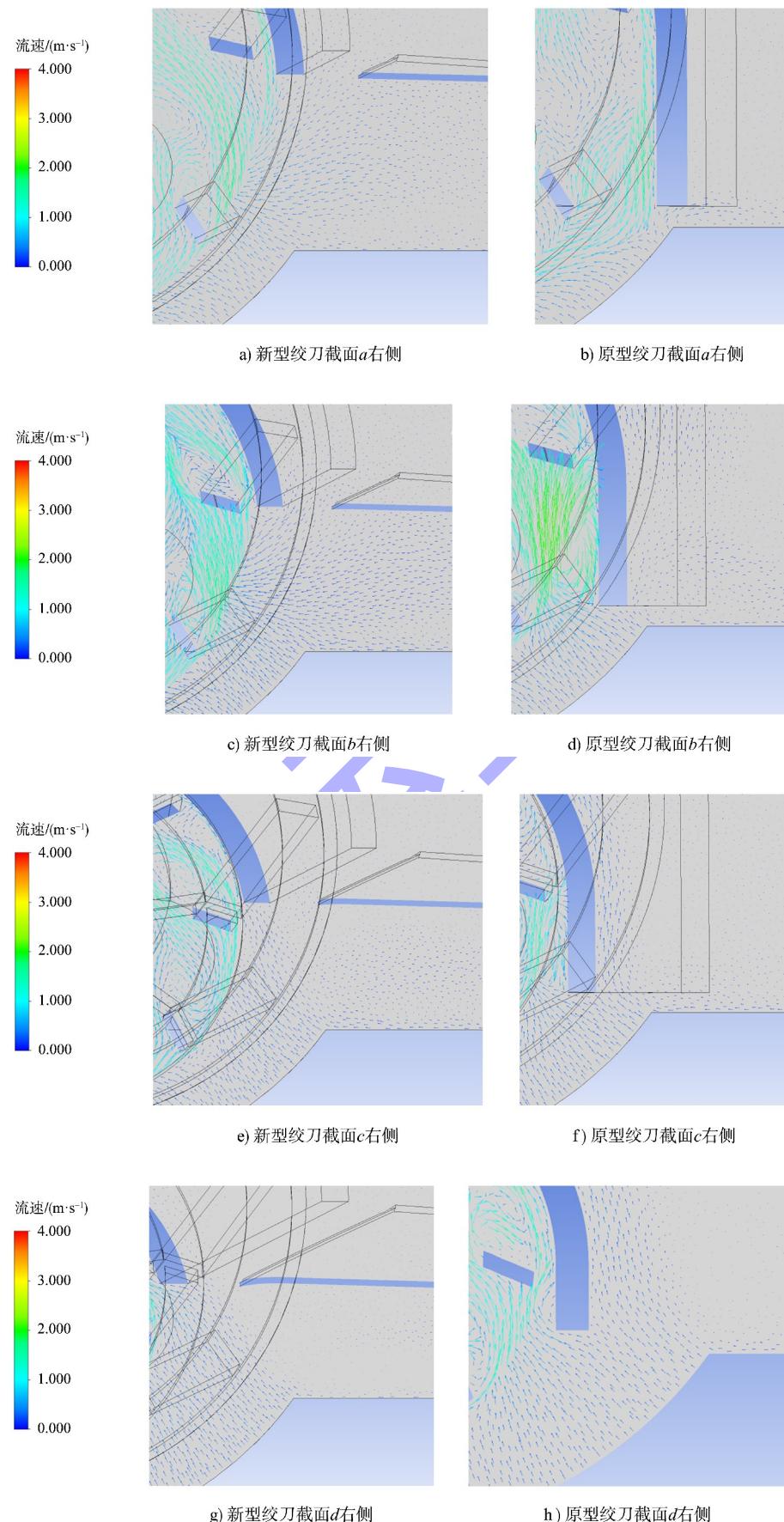


图 7 新型绞刀和原型绞刀右侧速度场对比

4 结论

1) 经计算对比改进前后环保绞刀内部流体状态, 结果表明改进后的新型环保绞刀的防扩散效果较原型环保绞刀明显提高, 施工时新型绞刀翻板式结构使泄漏量更少, 对环境的扰动更低, 此外绞刀切削厚度可调, 适合多变的施工工况, 为后续打造经济型、环保型绞吸挖泥船提供一定的理论基础。

2) 新型环保绞刀改善了绞刀罩周边流体流态, 以及绞刀头切削带来的二次扰动。未来将通过进一步研究颗粒扩散及运动规律, 实践应用验证施工效果, 为环保绞吸船的优化升级提供建议。

参考文献:

- [1] VLASBLOM W J. Lecture WB3413/OE4626 Dredging Processes [M]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [2] 何平, 唐雪晨, 杨磊, 等. 环保型防扩散剂在绞吸过程中的防扩散性能研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 98-104.
- [3] 曹想. 白洋淀环保疏浚底泥疏挖污染物防扩散技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [4] 李进军. 污染底泥环保疏浚技术 [J]. 中国港湾建设, 2005(6): 46-47, 65.
- [5] 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.
- [6] 张春华, 王健. 改进的环保绞刀头对扩散的影响 [C]// 中国水力发电工程学会. 机械疏浚专业委员会第十八次疏浚与吹填技术经验交流会论文与技术经验总结文集. 济南: [出版者不详], 2005: 141-147.
- [7] 张晴波. 环保疏浚及其控制研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [8] 郭志勇, 杨建华, 陈九肖. 绞吸挖泥船新型环保绞刀设计 [J]. 中国港湾建设, 2014(12): 66-68.
- [9] 余义瑞, 杨白露, 董苗苗, 等. 基于不同疏浚绞刀结构的底泥污染物释放情况分析 [J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 74-78.
- [10] 刘国瑞, 杨建华, 张润喜, 等. 应用有限元法的环保柱式清淤绞刀设计 [J]. 水运工程, 2022(4): 186-190.
- [11] 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.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 131 页)

参考文献:

- [1] 周厚贵. 葛洲坝工程纵向围堰钢板桩防腐处理 [J]. 人民长江, 1991, 22(1): 38-40.
- [2] 郑守仁. 葛洲坝水利枢纽钢板桩格型围堰设计 [J]. 人民长江, 1980(1): 6-21, 47.
- [3] 吴惠国, 孙逸豪, 史英标, 等. 曹娥江清风船闸引航道通航水流条件 [J]. 水运工程, 2022(4): 138-145.
- [4] 王建平, 刘超, 张世宝, 等. 风光枢纽扩建船闸上游口门区通航水流条件试验研究 [J]. 水运工程, 2021(1): 156-161.
- [5] 祁永升, 许光祥, 李昌耀. 改善二线船闸下游引航道口门区流态的补流措施研究 [J]. 水运工程, 2023(7): 157-163, 224.
- [6] 胡亮亮, 谭家万, 袁浩. 基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2022(5): 72-77.
- [7] ALIPARAST M. Two-dimensional finite volume method for dam-break flow simulation [J]. International journal of sediment research, 2009, 24(1): 99-107.

- [8] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例 [J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.
- [9] 胡艳海, 周林飞. 石佛寺水库二维水动力及水质数值模拟与分析 [J]. 人民长江, 2021, 52(1): 31-38.
- [10] 王素云. 基于 MIKE21 FM 的河道洪水数值模拟研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [11] WALKER H J. When and where rivers meet the sea [J]. Science in China (Series B), 2001, 44(S1): 10-22.
- [12] 密蓓蓓, 徐涛, 陆凯, 等. 基于 MapGIS 和 Surfer 软件的三维地质图制作 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 181-185.
- [13] 班美娜, 武永新. 基于 MIKE21 FM 的南渡江河口段行洪能力分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 151-157.
- [14] 计玉健, 冯小检. 葛洲坝大江通航流量的提高对航运带来的影响 [J]. 中国水运 (上半月), 2010(7): 34-36.

(本文编辑 赵娟)