

· 施 工 ·



耙吸式挖泥船耙头内部泥沙运动 及防淤堵策略分析*

孟庆盛¹, 刘 静², 李 智², 张书笛¹, 汪 星¹, 方珍龙¹

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510220)

摘要: 针对耙吸式挖泥船进行航道疏浚作业时, 吸入的黏土容易在耙头内部堆积造成堵塞, 导致疏浚效率下降的问题。通过研究耙头的结构发现, 防止杂物进入泥泵的格栅为黏土堵塞的主要位置, 对其进行基于双欧拉模型的流体动力学仿真研究, 得出不同的工作参数和格栅角度对耙头压力、速度、泥沙浓度的影响。结果表明, 耙头内部低速区容易发生泥沙沉积, 高压水射流能提高局部流速, 促进泥水混合, 有利于泥浆的输送, 施工过程如遇黏土将格栅前移能有效防止施工过程中的堵耙现象, 提高耙吸式挖泥船的工作效率。

关键词: 耙吸式挖泥船; 耙头; 数值模拟; 格栅角度; 内流场

中图分类号: U 674.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0166-08

Analysis of sediment movement inside drag head of trailing suction hopper dredger and anti-blocking strategy

MENG Qing-sheng¹, LIU Jing², LI Zhi², ZHANG Shu-di¹, WANG Xing¹, FANG Zhen-long¹

(1. School of Energy and Power, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

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

Abstract: For the dredging operation of the trailing suction hopper dredger, the suctioned clay is easy to accumulate inside the drag head and cause blockage, which can lead to the problem of the dredging efficiency reduction. We study the structure of the drag head to find that the grille to prevent debris from entering the dredging pump is the main location of clay plugging. Based on the Euler-Euler model, we carry out fluid dynamics numerical study to analyze the pressure and speed of the drag head and obtain the influence of different working parameters and grid angle on drag head pressure, velocity, and sediment concentration. The results show that the low-velocity area inside the drag head is prone to clay plugging, and the high-pressure water jet can increase the local velocity and promote the mixing of clay and water. Moving forward of grille can effectively prevent the drag siltation during the construction clay process, and improve the working efficiency of the trailing suction hopper dredger.

Keywords: trailing suction hopper dredger; drag head; numerical simulation; grille angle; internal flow field

在经济建设蓬勃发展的今天, 疏浚在航道拓宽、水力吹填造陆、江河污染治理等工程领域发

挥着重要作用。在各类挖泥船中, 耙吸式挖泥船拥有较高的机动性, 其生产效率高、抗风浪能力

收稿日期: 2020-05-27

*基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51706161); 国家级大学生创新创业训练计划项目(No. 201910497105); 武汉理工大学自主创新研究基金项目(No. 2019NDB111)

作者简介: 孟庆盛(1998—), 男, 本科生, 研究方向为船舶能源与动力工程。

通讯作者: 方珍龙(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为疏浚装备及技术。E-mail: zl_fang@whut.edu.cn。

强、可单船作业、辅助设备少、在行进中挖泥对周围航行船舶影响小、能适应多种工作环境且运营成本低, 已逐渐成为航道疏浚业的主力^[1]。

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, 设计并制造出众多专用耙头。日本、美国等已经拥有一套较为成熟的疏浚仿真系统^[2-3]; 比利时国际疏浚公司研发了带有超高压射流系统的专用耙头, 减少堵塞现象, 提高了产量; 荷兰 Van Oord 公司研制了具有双排高压冲水的主动耙头, 能够提高耙头的挖掘能力^[4]。我国挖泥船起步较晚, 但随着技术形态、建造质量、工艺水平等方面的提升, 我国挖泥船制造技术已取得了重大进步^[5]。中交广州航道局有限公司自行研发的新型主动耙头应用于“浚海 1”和“浚海 2”挖泥船上, 挖泥效率保持在 3 000 m³/h, 性能优越^[6]。尹纪富等^[7]对耙头喷嘴射流的流场特性进行研究, 得出提高喷嘴的冲水压力可以减小其移动速度对流场特性的影响, 从而提高疏浚作业效率的结论。刘昊阳等^[8]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。

耙吸式挖泥船利用耙头疏松泥土, 通过泥泵抽吸泥浆并将其输送至舱内以达到疏浚的目的^[9-10]。吸泥时依靠被安装在活动罩或固定体中的格栅装置, 防止杂物进入泥泵内^[11]。格栅的安装与工况条件紧密结合, 其形式和布设角度对生产率影响很大^[12]。其中, 耙头格栅角度设计安装不合理将会造成耙头内涡流的产生, 使泥沙在耙头内黏结, 造成格栅阻塞(图 1), 大幅降低航道疏浚的工作效率, 缩短耙头的使用寿命, 增加维护成本。



图 1 耙吸式挖泥船耙头格栅阻塞

本文以黏土在耙头中混合流动特性为研究对象, 结合耙吸船施工过程中遇到的堵耙、闷耙、滑耙等问题, 通过 CFD(计算流体动力学)数值模拟的手段, 分析大型耙吸船的耙头在不同工况下的内部流动, 为耙头施工工艺提供理论建议, 提高耙吸船的作业效率, 为疏浚工程的顺利施工提供技术保障。

1 模型及数值模拟方法

1.1 模型结构及网格划分

根据耙头结构参数, 建立耙头内流场的三维模型, 如图 2 所示。由于泥沙流经区域的不规则性, 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含有曲率和高速流动的局部区域进行网格加密, 并在计算时进行网格无关性验证, 保证计算精度的同时节省计算时间, 网格结构如图 3 所示。



图 2 耙头内流场计算区域模型

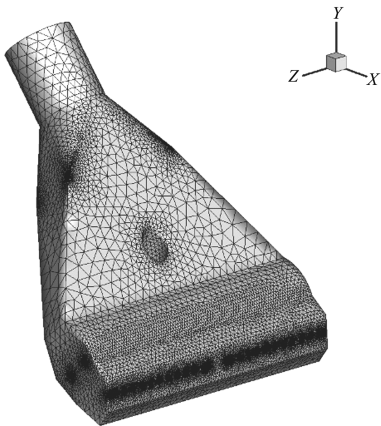


图 3 网格划分

1.2 黏土参数

为确认土质的类型及各项参数，通过对连云港港工地“浚海 2”船进行现场调研，搜集现场土质，进行密度、抗剪强度和液塑限试验，基于 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》的测量标准，得到黏土土质参数：密度 1.63 t/m^3 ，抗剪强度系数 $0.077\ 9$ ，液限 28.1% ，塑限 16.2% ，塑性指数 11.9% 。

1.3 边界条件

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水管进入泥舱。采用速度入口边界条件，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；进口湍流通过湍流强度和湍流耗散率进行描述；出口边界条件为压力出口，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。

根据实船调研的资料可知，泥浆在耙管内流动速度稳定在 $6\sim 8\text{ m/s}$ 。耙头进口的湍流强度与湍流耗散率分别为 5% 和 10% 。耙头吸入最大真空为 80 kPa ，出口的湍流强度和水力直径分别设置为 5% 和 1 m 。两相计算中泥沙的体积分数为 30% 。

1.4 求解方法

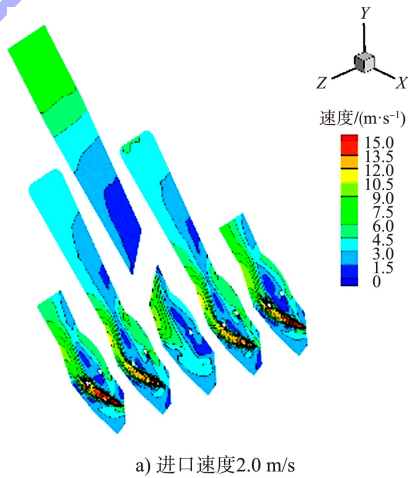
建立耙头内液固两相流动的 CFD 模型，确立模型中的关键参数，为了计算的准确性和有效性，对模型做如下简化：连续相和离散相均为不可压缩流体；连续相为同一流体介质，离散相为具有相同密度的球形颗粒；连续相和离散相之间的耦合方式为双向耦合；忽略颗粒之间的碰撞和破碎，不存在相变现象；不考虑温度变化对流场的影响。欧拉模型可以更为精确地描述液固两相流的流动特征，适用于较高浓度泥浆流的模拟，且在准确性和计算量之间达到较好的平衡，故本文采用基于颗粒流动力学理论的欧拉-欧拉双流体模型，模拟流道内泥浆两相流。

2 结果分析

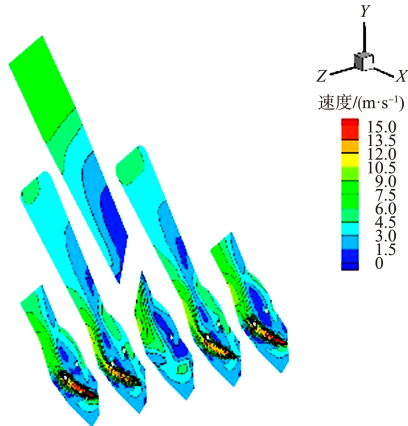
2.1 耙头内部回流区

考虑原始耙头的对地角度为 50° 时，不同进口速度下耙头内部流场的异同。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 ，实船调研反馈的耙管内流速波动范围为 $6.0\sim 8.0\text{ m/s}$ ，二者相符，可据此确定合适的进口流速范围。

首先以清水为例计算耙头内速度分布，确定耙头内部低速回流区域分布。不同进口速度下耙头内部流动的速度云图见图 4。可以看出，在不同进口速度下，耙头内部流场大致相似，高压冲水的方向均指向格栅中间的固定轴，在活动罩顶部存在低速流动区。但在局部区域存在差异，随着进口速度从 2.0 m/s 增加到 2.6 m/s ，由于耙头内整体流速增大，在耐磨块进水管后面的低速区域逐渐减小。



a) 进口速度2.0 m/s



b) 进口速度2.3 m/s

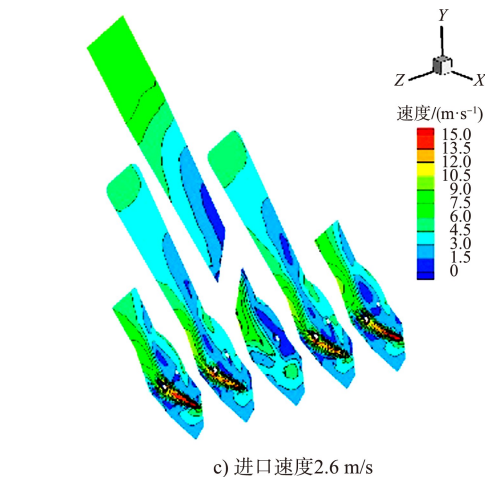


图 4 不同进口速度的速度云图

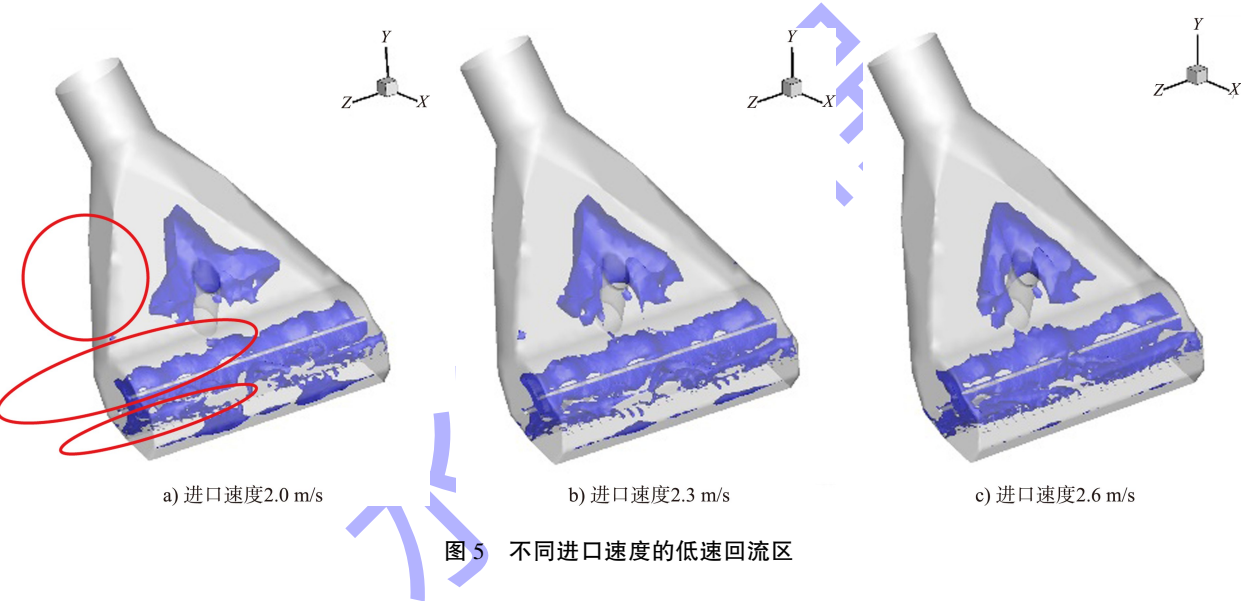


图 5 不同进口速度的低速回流区

2.2 耙头内流场流动特性

以垂直于吸泥管轴线的平面为 0°基准面，以 20°角为公差，逐渐递增格栅的角度，变化范围为 0°~80°。另在耙头内选取特殊位置截面，见图 6。选取平行于吸泥管轴线及耙头吸泥口的平面，并由下向上编号 a~c，选取平行于格栅平面的截面，按距离格栅的长度大小分别编号 d~g，以泥沙相体积分数为 30%进行两相流动计算。

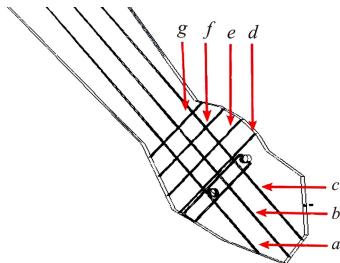


图 6 截面位置

不同进口速度下耙头内部的低速回流区分布见图 5。可以看出，在不同进口速度下，低速回流主要存在于耙头内的 3 个区域：进口处、格栅处、耐磨块进水管后方。进口处由于过流断面增大，流体流动的剪切作用导致进口处存在低速回流区；后两个位置由于存在障碍物的阻挡，流体流过该处容易形成绕流、回流，故导致低速回流区的存在。随着进口速度增大，进口处的低速回流区逐渐减小，格栅处和耐磨块进水管后方的低速回流区基本保持不变。耙头内流场中低速回流区的存在会增加能量耗散，不利于输送效率的提升。

2.2.1 压力分布

0°格栅横截面压力云图见图 7，呈左右对称分布且压力分层明显。在耙头内格栅的前部，由于耙头上部的高压喷嘴的作用，出现高压区且压力最大，当泥水混合物通过格栅时，压力出现明显下降，由于耙头两侧的挤压作用而产生小区域高压，但随后消失，随着喇叭状吸管空间逐渐减小，压力下降速度加快，在吸泥管末端出现低压区。此外，由于格栅处加固杆的作用，压力在此处发生不规则变化，随着截面的上移，对应区域压力随之升高。

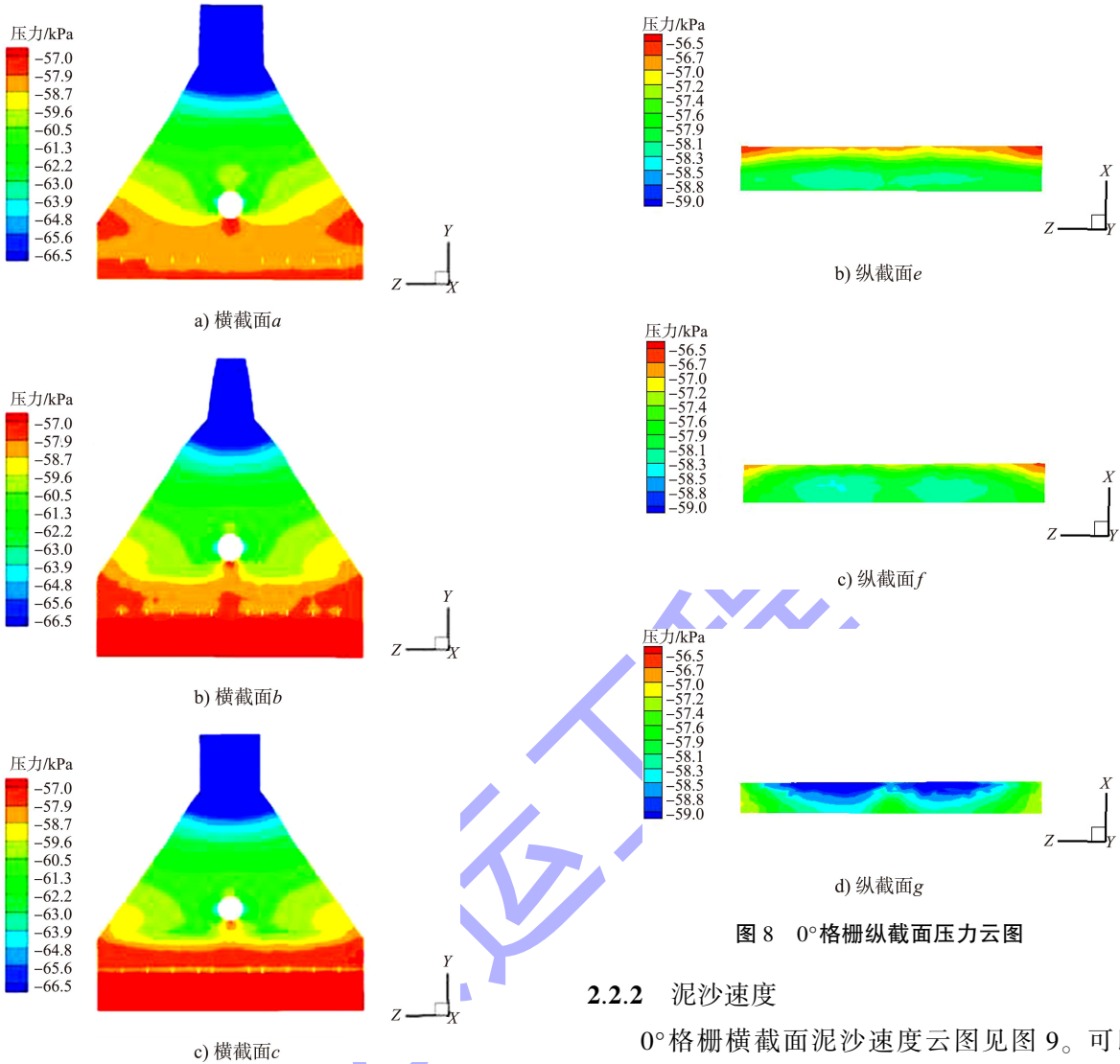
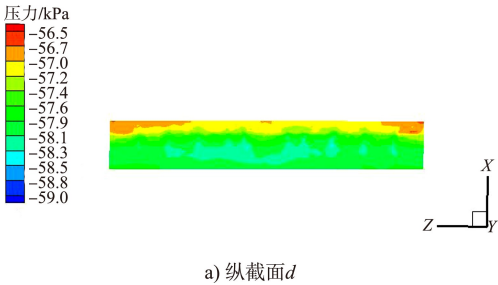


图 7 0° 格栅横截面压力云图

0° 格栅纵截面压力云图见图 8，也呈左右对称分布。在图 8a) 中，纵截面 *d* 由于紧靠格栅，可较好地反映出流体通过格栅后的压力情况。在格栅顶部附近，由于高压喷嘴的存在，此处压力最高，底部压力最低。随着截面远离格栅，压力则迅速下降，在图 8d) 中，顶部速度最大，出现大面积低压区。在格栅中部的两侧区域，有小面积的低压区域，此处为泥沙可能堆积的区域。



a) 纵截面 *d*

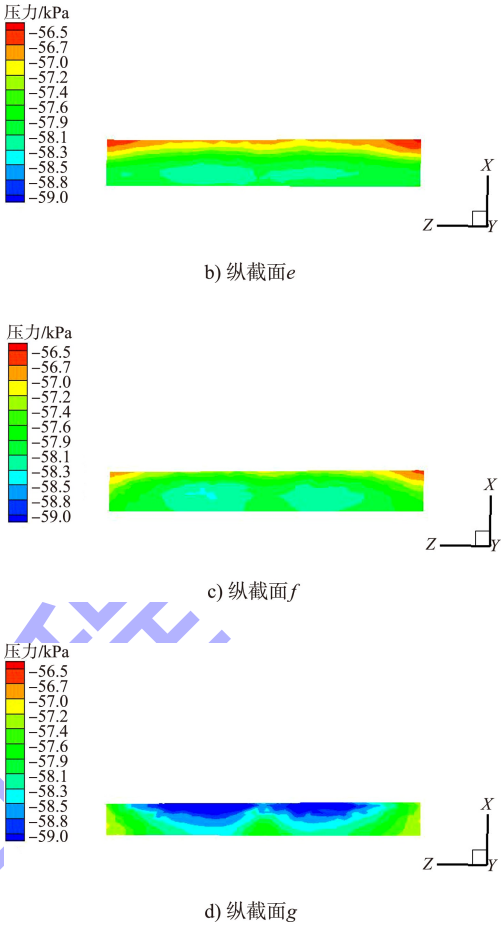


图 8 0° 格栅纵截面压力云图

2.2.2 泥沙速度

0° 格栅横截面泥沙速度云图见图 9。可以看出，从格栅流出后的泥沙混合物的速度向上逐渐增大，并伴有明显的分层现象，且由于吸管内空间的减小，速度变化越来越快，并在吸泥管末端速度达到最大，此外，由于壁面的存在，泥沙混合物在壁面处流速最低，即只要格栅存在，由于表面摩擦力的影响，都会使流体减速。随着截面的上移，格栅处的泥沙速度越来越小，低压区面积逐渐增大。分析图 10，通过格栅上半部分的速度明显高于下半部分，造成该现象的原因是泥沙大部分是由格栅的上半部分进入固定件，高压喷嘴喷出的带有巨大动能的水在增加耙头上半部分压力势能的同时，也增加了泥沙的动能。此外，由于截面所在位置距格栅较近，上半部分出现的小面积较低速区域，图 10a) 最为明显。随着截面

的后移, 流体速度逐渐降低, 四周的低速区域面积也逐渐变小, 图 10c)、d) 上半部分再次出现明显的高速区域, 则是由于吸泥管的收缩作用使流速再次增加。

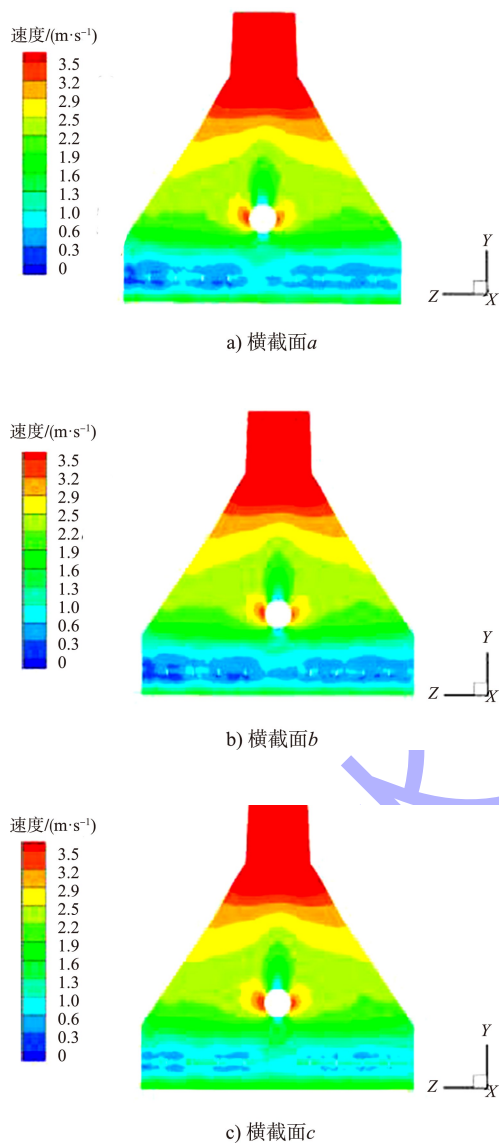


图 9 0°格栅横截面泥沙速度云图

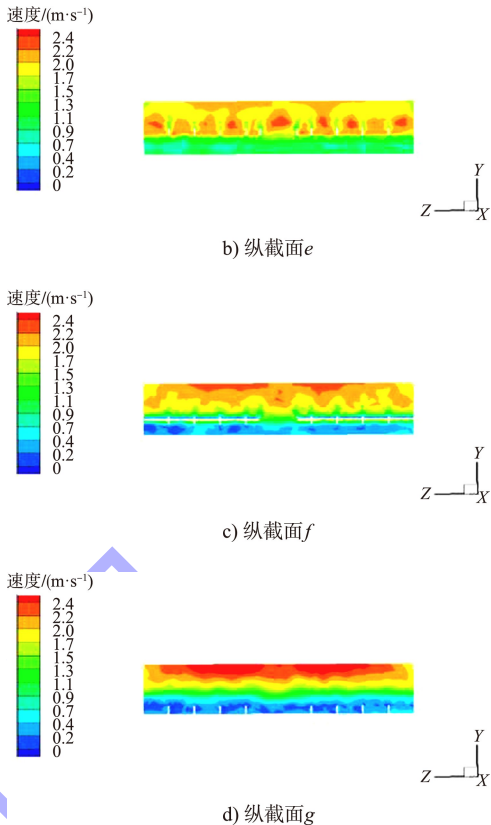
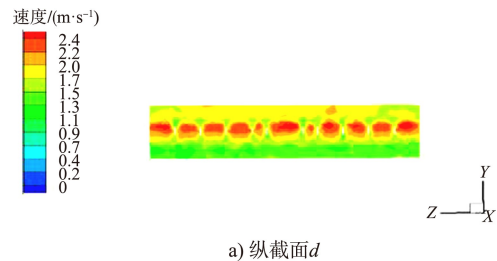
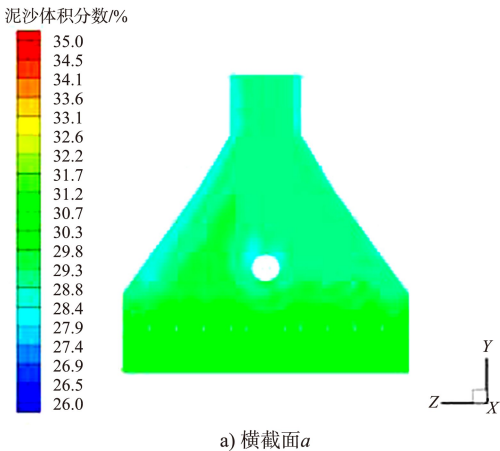


图 10 0°格栅纵截面泥沙速度云图

2.2.3 对泥沙体积分数进行分析

0°格栅横截面泥沙体积分数云图见图 11。在格栅的前沿部分, 由于格栅的阻挡作用, 泥沙浓度明显升高且速度最低, 出现泥沙堆积的现象。在耙头的中部, 由于格栅间隙相较于两侧略宽, 泥沙并未受到较大的阻拦, 浓度在格栅前后的变化不大, 且略有升高。而在图 11c) 中, 在格栅处出现了泥沙体积分数明显高于周围的块状区域, 说明在此处出现了泥沙集结成块的现象。



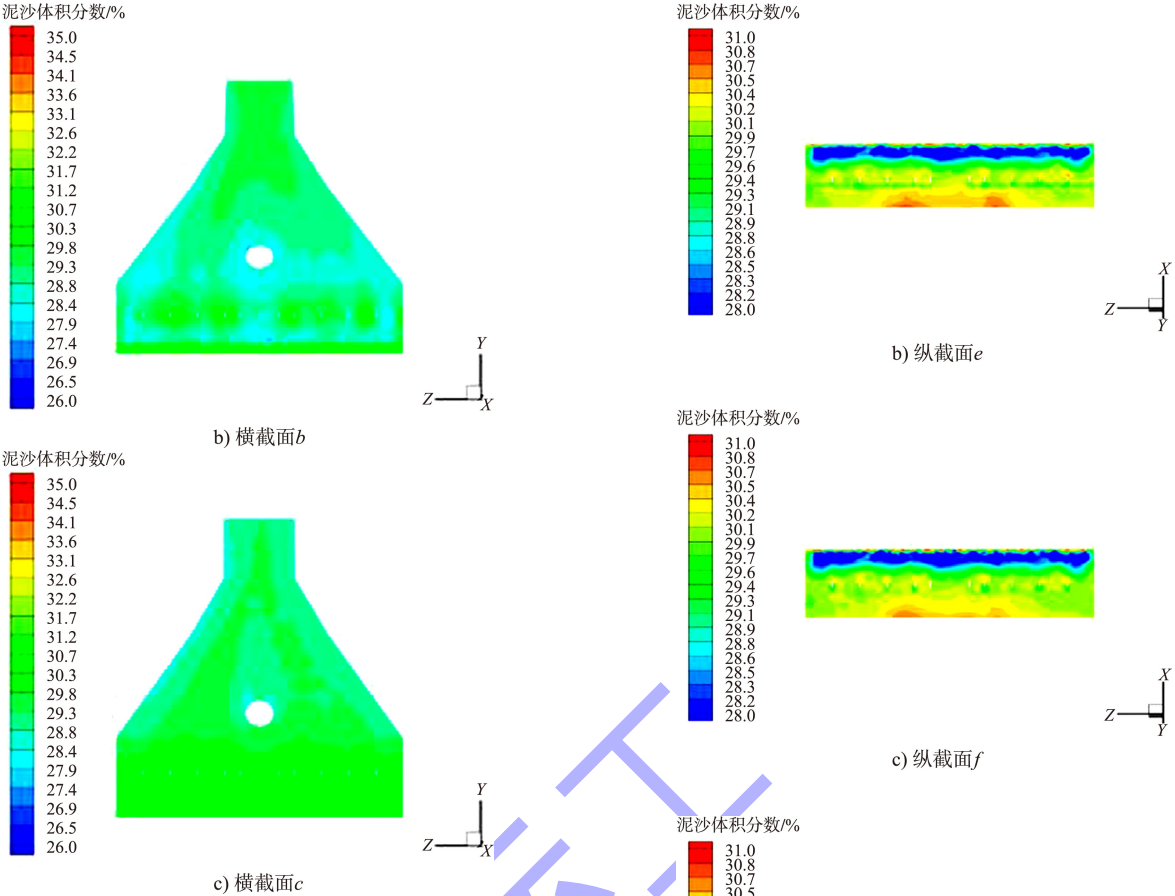


图 11 0° 格栅横截面泥沙体积分数云图

0° 格栅纵截面泥沙体积分数云图见图 12，格栅顶部的泥沙浓度明显低于底部。格栅的顶部由于高压喷嘴的作用，在很大程度上降低了泥沙的体积分数，出现大面积低浓度区域，体积分数最小，而在底部，由于泥沙从底部进入耙头且距离高压喷嘴较远，再加上重力的作用，泥沙体积分数较高，且此处极易发生泥沙集结成块的现象，造成格栅的阻塞。随着截面的后移，泥沙高体积分数的区域面积逐渐减少，顶部体积分数较低的区域面积也在减小，故泥沙浓度随着泥沙在流场中的运动逐渐稳定，但仍存在上下分层的现象。

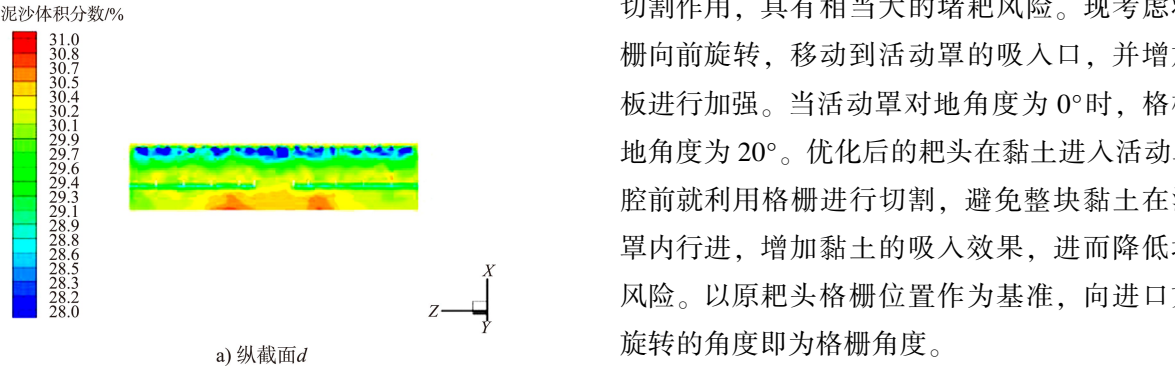


图 12 0° 格栅纵截面泥沙体积分数云图

2.3 格栅角度对内流场的影响

原格栅安装于耙头固定体吸入口，当耙齿切割挖掘起的黏土疏浚物到达格栅时，由于累积的黏土厚度较大，难以起到格栅对大块硬质黏土的切割作用，具有相当大的堵耙风险。现考虑将格栅向前旋转，移动到活动罩的吸入口，并增加筋板进行加强。当活动罩对地角度为 0° 时，格栅对地角度为 20°。优化后的耙头在黏土进入活动罩内腔前就利用格栅进行切割，避免整块黏土在活动罩内行进，增加黏土的吸入效果，进而降低堵耙风险。以原耙头格栅位置作为基准，向进口方向旋转的角度即为格栅角度。

以格栅在耙头固定体入口作为基准, 逐渐向活动罩进口方向偏移, 从 0°~80°旋转格栅后, 选取 20°、40°、60°、80°进行分析, 得到其速度云图, 见图 13。可以看出, 在耙头固定体入口处总是有较强的旋流, 导致固定体入口处存在低速区, 格栅前移可以使该低速区变小; 角度为 80°时, 活动罩高压冲水附近流动速度最大, 有利于对黏土的破碎; 由于存在高压冲水, 活动罩顶部的流动速度较大, 黏土不易在活动罩顶部黏结。

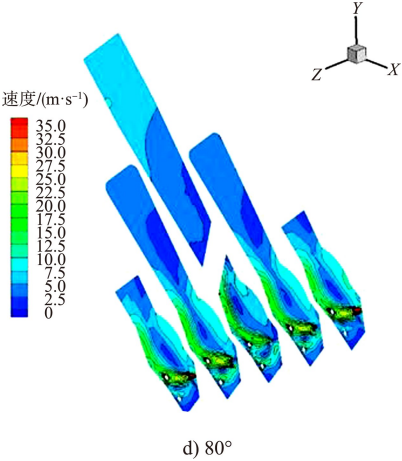
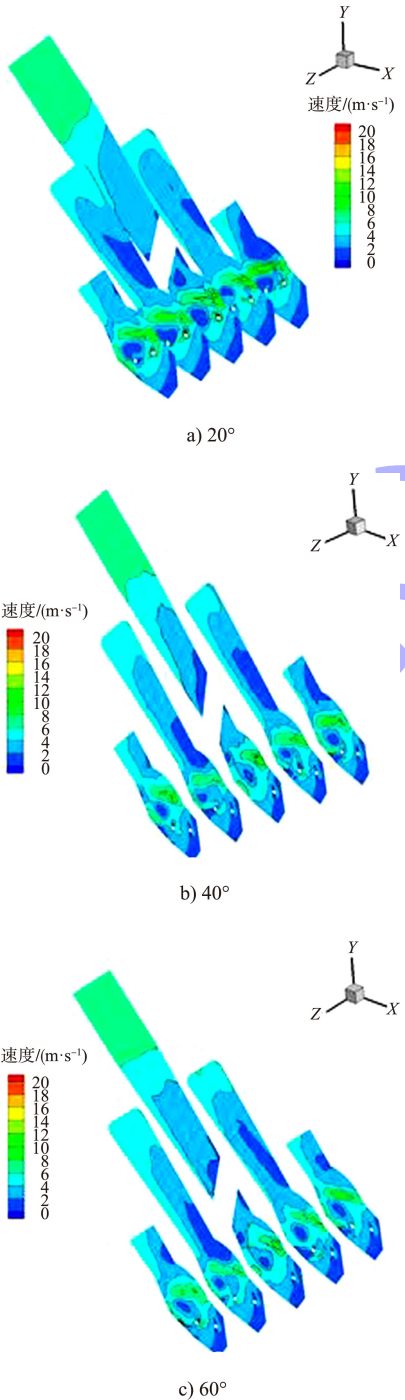


图 13 不同格栅角度的速度云图

结合“浚海 2”船在连云港港现场施工的数据, 当耙头遇到黏土时, 耙头泥浆浓度急剧下降, 格栅网眼和耙头内部出现堵塞现象, 此时若继续施工, 将增大能耗, 疏浚效率大幅下降。根据数值仿真的结论, 建议在此时旋转格栅角度, 当旋转至 50°时, 高压冲水能对格栅进行一定的冲刷作用, 泥浆浓度有一定回升, 继续旋转至 80°, 即前移至耙头吸入口, 泥浆浓度大幅提升, 表明格栅前移确实能有效降低挖黏土过程的堵耙现象。

3 结论

- 1) 在耙头进口处、格栅后、进水管后存在低速回流区, 进口速度增大能减少低速回流区, 可提升耙头的工作效率。
- 2) 在格栅顶部由于高压喷嘴的存在, 压力较高, 泥沙在格栅上半部分进入吸泥管, 受高压喷嘴和吸泥管的挤压作用, 其速度较快, 随后由于重力作用和格栅的阻挡作用, 容易发生结块现象。
- 3) 格栅角度变化改变了耙头内部流场结构, 增加格栅角度有利于水射流对黏土的冲蚀混合, 同时格栅能在黏土团进入耙头前对土块进行切割, 现场试验证明能有效提高挖泥船的工作效率。

参考文献:

[1] 宋赞好. 耙吸式挖泥船是航道疏浚业的生力军[J]. 港口科技, 2008(6): 25-27.