



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402739

引用格式:陈利琼,刘思汉,张鹏,等.急流型河流围油栏设计与拦油性能优化[J].科学技术与工程,2025,25(2):553-559.

Chen Liqiong, Liu Sihan, Zhang Peng, et al. Design and optimisation of oil spill recovery devices for fast-flowing river[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 553-559.

急流型河流围油栏设计与拦油性能优化

陈利琼¹, 刘思汉¹, 张鹏², 许铎¹, 胡洪宣³

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500; 2. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 成都 610500;
3. 国家管网西南管道公司, 成都 610000)

摘要 在处理水上溢油事故中,围油栏发挥着至关重要的作用。针对现有急流型河流围油栏较为单一的问题,依据传统围油栏参数,设计新型双层网栅围油栏,用于急流型河流的溢油回收。基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)中主流计算流体力学软件 FLUENT,建立二维数值水槽模型,以多相流法(volume of fluid, VOF)作为计算模型,模拟油水在新型围油栏作用下的瞬态分布,并以拦油量作为监测数据探索围油栏拦油性能优化方向。结果表明优化后的围油栏网格半径为 30 mm,孔隙率为 0.3。相比于传统围油栏,新型围油栏拦油量优于传统围油栏,为急流型河流围油栏设计提供了有效参考。

关键词 急流型河流; 围油栏; 拦油量; 性能优化
中图分类号 TE89; **文献标志码** A

Design and Optimisation of Oil Spill Recovery Devices for Fast-flowing River

CHEN Li-qiong¹, LIU Si-han¹, ZHANG Peng², XU Duo¹, HU Hong-xuan³

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. National Pipe Network Southwest Pipeline Company, Chengdu 610000, China)

[Abstract] Oil booms play a vital role in dealing with oil spills on water. Aiming at the single problem of existing oil booms in fast-flowing rivers, a new type of double-layer mesh fence was designed for oil spill recovery in fast-flowing rivers based on the parameters of traditional oil booms. Based on the mainstream CFD (computational fluid dynamics) software FLUENT, a two-dimensional numerical flume model was established to simulate the transient distribution of oil and water under the action of the new oil containment boom with VOF (volume of fluid) as the computational model, and the volume of oil intercepted was used as the monitoring data to explore the direction of optimizing the oil containment performance of the oil containment boom. Monitoring data was used to explore the optimization direction of oil containment performance of the oil containment boom. The results show that the optimised oil containment boom has a grid radius of 30 mm and a porosity of 0.3. Compared with the traditional boom, the new oil containment capacity of the new oil containment boom is better than that of the traditional boom, which provides an effective reference for the design of oil containment boom for fast-flowing rivers.

[Keywords] fast-flowing river; oil booms; oil interception; performance optimization

在石油开采和输送等工业活动中,溢油事故可能导致严重的环境污染和生态灾难^[1]。为了有效应对这一问题,围油栏作为一种重要的防护设施被广泛应用于溢油污染应急响应中^[2]。目前,中外学者对围油栏进行了一定的研究。杜剑等^[3]建立围油栏鲁棒优化调度模型,分析最坏情况下围油栏调运数量和去向,最大限度规避应急调度方案严重失效的风险;刘雪光等^[4]采用 SST k-omega 湍流模型,结合追踪多相流界面的流体体积法(volume of fluid,

VOF),分析澜沧江不同工况下溢油泄漏情况,为围油栏投放提供参考依据;赵建平等^[5]设计了一款海上沉潜油围油栏,并通过软件模拟仿真得到围油栏孔眼直径越小,围油栏抗流能力越好的优化方向;侯恕萍等^[6]设计了一种船舶近体围油栏,用于船舶溢油的近体应急围控,并通过 FLUENT 软件模拟分析不同参数下围油栏失效情况;Liu 等^[7]基于平滑粒子流体力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法建立了固液耦合和液态两相流的数值模

收稿日期:2024-04-16; 修订日期:2024-11-06

第一作者:陈利琼(1976—),女,汉族,四川遂宁人,博士(后),教授,博士研究生导师。研究方向:油气储运安全技术和工艺优化。E-mail: 121488667@qq.com。

型,通过对围油栏不同裙体的模拟结果,为围油栏裙体结构设计提供理论依据;Hou 等^[8]建立了一个多相流分析模型来模拟围油栏的油位,并使用 VOF 法跟踪油水界面,分析各种工况对围油栏拦油效果的影响。Shi 等^[9]通过物理建模实验研究了围油栏的失效机理,并根据数值结果评估了围油栏参数和动态因素对围油性能的影响。

虽然中外学者对围油栏进行了多方面研究,但依然存在以下问题。目前国外学者主要研究的为海上围油栏设计优化和围油栏投放方法,针对急流型河流围油栏方面研究内容较少。急流型河流水流湍急,对围油栏的稳定性和溢油防治效果提出了更高的要求。

为了提高围油栏在急流环境下的应用效果,现基于双体围油栏设计思路设计一款新型围油栏装置,通过 Fluent 建立围油栏二维数值水槽,以多相流 VOF 法作为计算模型,通过合理设计的模型来获取急流条件下的围油栏油水分布规律,从而进一步确定围油栏性能的优化方向。并与传统围油栏进行比较分析,为急流型围油栏的设计与应用提供有效参考。

1 整体设计

根据双体围油栏设计思路^[10]和传统围油栏 PVC900 原型及参数,设计出一款双层网栅围油栏,如图 1 所示,参数如表 1 所示。围油栏由浮体、裙体、网栅等固定构成。浮子材料选用 EPE 防水棉,外包布采用 PVC 防水布,网栅材料采用铝合金。裙体前后设计两层,两层之间设定固定夹角 α ,裙体总高度为 H ,分为两个部分:上部分裙体实心高度为 H_0 ,用于隔离溢油;下部分裙体网栅设计有网孔,高度为 $H_1 + H_2$,用于减小水流冲击力。

2 模型建立

2.1 研究基础

计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)

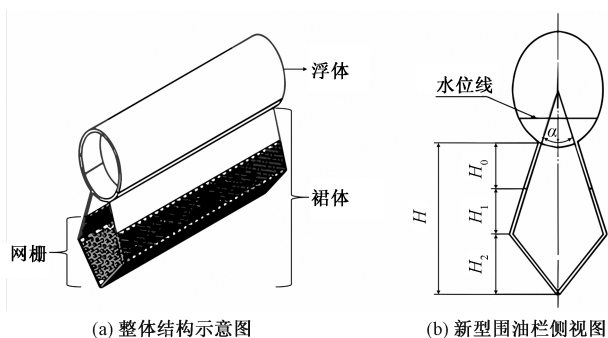


图 1 新型围油栏结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the new booms

表 1 围油栏尺寸参数

Table 1 Boom size parameters

参数	传统围油栏	双层网栅	参数	传统围油	双层网栅
	PVC900	围油栏		栏 PVC900	围油栏
长度/ mm	1 100	1 100	裙体高度/ mm	500	500
围油栏高/ mm	900	900	裙体实 心高度 H_0 /mm	—	150
浮子直径/ mm	280	280	上部网 栅高度 H_1 /mm	—	150
裙体厚度/ mm	10	10	下部网 栅高度 H_2 /mm	—	200
网格直径/ mm	—	70	孔隙度 K	—	0.2
吃水深度/ mm	480	480	裙体夹 角 α	—	30

成为现代流体力学分析的主要方法和手段^[11]。计算流体力学理论的主要研究内容是模拟和分析流体力学问题,主要研究方法是利用计算机通过数值方法进行流体力学控制方程的求解。其中 FLUENT 软件包含丰富且经过工程确认的物理模型,常应用于水流的计算模拟,由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因此能达到最佳的收敛速度并取得与实验接近的结果^[12]。因此对围油栏溢油拦控的研究采取 FLUENT 二维数值水槽,通过合理设计的模型来获取急流条件中围油栏作用下的油水分布规律。

2.2 计算模型

研究内容为在围油栏作用下,油水随时间分布的规律,油相处于空气相和水相之间,因此需引入界面追踪技术来监控各相之间的变化,从而探究实际拦油效果。目前 VOF 法最常针对的典型问题包括射流破碎、液体中的大气泡运动、溃坝后液体运动、稳态或者瞬态的气液界面追踪,适用于油水分布规律研究,因此选取多相流 VOF 法作为计算模型。

在急流型河流的实际环境中,流动雷诺数远超 2 000,属于湍流类型。选用 k-Epsilon 湍流模型,而 RNG k-Epsilon 湍流模型相对标准的 k-Epsilon 湍流模型更加适用于多相流瞬态分布研究,因此流场的整体控制方程以 RNG k-Epsilon 湍流模型为基础^[13]。湍流动能方程 k 为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为密度, kg/m^3 ; k 为紊动能, J ; ε 为耗散

率; t 为时间,s; x 为空间坐标; u 为 x 方向的流速,m/s; μ 为动力黏滞系数,Pa·s; μ_t 为紊动黏滞系数,Pa·s; σ_k 为湍动能的普朗特数, $\sigma_k = 1$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项,J。

扩散方程 ε 为

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式(2)中: $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; σ_ε 为耗散率的普朗特数; $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

其中:

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

式(3)中: v 为 y 方向的流速,m/s。

$$\mu_t = C_u f_u \rho \frac{k(k + \sqrt{v\varepsilon})}{\varepsilon} \quad (4)$$

式(4)中: C_u 为经验常数; f_u 为质量力,m/s²。

2.3 模型尺寸

模型尺寸对于模拟结果的准确性至关重要。为了减少边界约束对流动过程的干扰,同时要考虑拦油过程中计算相对空气相和油相统共高800 mm,其中油相的高度取决于油水掺混程度^[14];水相高1 500 mm;模型长度为8 000 mm;围油栏尺寸根据表1所述参数设计。

绘制网格时,对油相及围油栏附近以及油相分布概率最大的区域,即围油栏背部区域加密,增加拦油过程中的油相分布的精确度,网栅和裙体附近的网格边长从1 mm开始增长,加密区域到边界的网格增长率为1.02,最远端网格边长达50 mm。为验证网格无关性,绘制有 46×10^4 、 49×10^4 、 51×10^4 和 55×10^4 4种数量的网格,计算得到最大拦油量相对差值在2%以内时^[15],选择网格数量较少的 51×10^4 个网格的模型对流场进行数值模拟。网格模拟结果如图2所示。

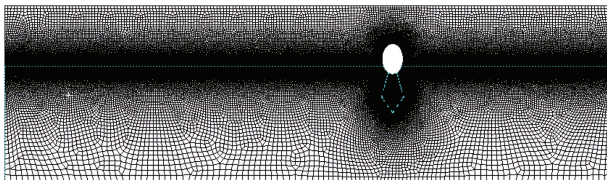


图2 围油栏网格模拟图

Fig. 2 Boom grid simulation

2.4 边界条件

对于三相(空气、油、水)入口,均设为速度入口,两相(空气、水)出口,均设为自由出流,底部水层边界设为对称边界,围油栏的边界和上部空气层

设为壁面。对于空气的速度,采取山区河流上方平均风速13.8 m/s。油、水速度分别按照设定区间选取。其余边界选择默认条件。

2.5 瞬态求解

为了更好地捕捉油水流动过程,对油相和水相分别监录,在边界出口设置监控器,记录油相的体积分,监控溢油逃散量。计算流动时长80 s,设置计算间隔0.005 s,计算16 000步。

3 拦油量计算

为了更进一步确定围油栏拦油性能,设计拦油效率评价准则,确定围油栏的有效拦油量。根据质量守恒定律,计算域各相流进和流出的质量流量相等。

$$\rho_1 u_1 dA_1 = \rho_2 u_2 dA_2 \quad (5)$$

式(5)中: ρ_1 为流体入口密度,kg/m³; ρ_2 为流体出口密度,kg/m³; u_1 为流体入口速度,m/s; u_2 为流体出口速度,m/s; dA_1 为流体入口微元断面,m²; dA_2 为流体出口微元断面,m²。

在明渠流动中,各相均视作不可压缩流体,因此油相体积流量关系为

$$Q_0 = Q_{oilinlet} - \sum Q_{oiloutlet} \quad (6)$$

式(6)中: Q_0 为溢油拦截流量,m³/s; $Q_{oilinlet}$ 为溢油入口流量,m³/s; $Q_{oiloutlet}$ 为出口溢油流量,m³/s。

根据Fluent中对计算域的监测功能,可以实现拦油过程中对关键数据的记录。评价拦油过程中的拦油效率,需要考虑以下变量。

(1)入口油流量。对计算域的入口进行监测设置,记录油相的入口流量,通过入口流量获取进入流场的溢油量 $Q_{oilinlet}$ 。

$$Q_{oilinlet} = U_{oilinlet} d\delta dl \quad (7)$$

式(7)中: $U_{oilinlet}$ 为溢油入口流速,m/s; $d\delta$ 为出口溢油流量,m; l 为单位宽度,取值1 m。

(2)出口油流量。

$$\sum Q_{oiloutlet} = \int_{waterwall}^{airwall} U_{oiloutlet} d\delta dl \quad (8)$$

式(8)中: $U_{oiloutlet}$ 为溢油出口流速,m/s; T_0 为溢油逃散时刻,s。

$$T_0 = T_{oiloutlet} - t' \quad (9)$$

式(9)中: $T_{oiloutlet}$ 为出口监测溢油逃散时刻,s; t' 为溢油越过围油栏到出口的时间,s。

$$t' = \frac{\Delta L}{\bar{U}_{oil}} \quad (10)$$

式(10)中: L 为围油栏背部到出口的距离,m; \bar{U}_{oil} 为逃散溢油平均流速,m/s。

(3)拦油量。对计算域内的油相体积进行监

测, 可以获取任一时间计算域内的油相体积数据, 观察得到计算域内从最初时刻到最终时刻过程中, 流场中油的体积变化。以 $t = 80 \text{ s}$ 作为拦油工作时长, 结合 fluent 监视模块对计算域进行体积流量统计, 获取计算域实时油相体积, 得到该时间区间内溢油拦控随时间的变化曲线, 从而确定最大拦油量所处时刻, 定义该时刻为“极限拦油时刻”。

4 模拟结果

对于急流型河流发生溢油事故后的围油栏溢油拦截过程, 由于风速对于围油栏的影响远远小于急流对围油栏的冲击, 以及河流上的浪高相比于海上的巨浪影响很小, 因此该模型假设围油栏的拦油过程是无外界波浪, 故从围油栏结构的角度来看, 拦油的主要影响因素有以下 2 点: ①通过率; ②围油栏裙体夹角。研究中引入的“通过率”为裙体部分的空隙和实心部分的比例关系; “裙体夹角”为围油栏双层裙体的角度关系。

4.1 通过率

根据围油栏参数尺寸, 设计孔隙度在 $0.2 \sim 0.3$ 的范围中, 选取网格半径在 30 mm 和 50 mm 进行网格绘制, 固定变量裙体夹角 $\alpha = 30^\circ$, 流速 $u = 1.3 \text{ m/s}$, 油膜厚度为 10 mm 。设置如下 3 组对比项。

4.1.1 A-R30-K0.2

在半径为 30 mm , 孔隙率为 0.2 的围油栏进行剖视截图, 孔隙在裙体部分均匀排布。模拟结果如图 3 所示, 出口油流量如图 4 所示。

从图 3 可知, 拦油初期 $t = 0 \sim 14 \text{ s}$, 围油栏稳定拦油, 计算域出口油流量没有出现明显的波动。从图 3(a) 可知, 当 $t = 14.2 \text{ s}$ 时, 开始出现溢油夹带逃散, 瞬时峰值油流量为 $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$, 随后恢复稳态拦油状态; $t = 18.6 \text{ s}$ 时, 此时溢油开始进入裙体间夹层, 一部分随水流通过网隙逃散到围油栏背部, 另一部分被拦控在裙体间夹层, 并不断填充夹层空间。当 $t = 22.5 \sim 53.6 \text{ s}$, 再次出现溢油逃散, 该次连续溢油是通过裙体网隙的方式, 逃散时间持续长, 时长 21.1 s ; 当 $t = 35.2 \text{ s}$ 时, 出现最大瞬时油流量为 $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$, 如图 3(d) 所示; $t = 53.6 \sim 60.7 \text{ s}$, 此时计算域出口油流量趋于稳定, 这时的溢油已经完全冲散为油块, 无法形成连续的积油层, 冲散的油块从裙体间夹层逃走, 如图 3(f) 所示, 此时拦油已经完全失效。当 $t = 60.7 \text{ s}$ 以后, 计算域出口的溢油逃散瞬时流量监测值趋于稳定, 并呈现周期性变化, 最大瞬时油流量间隔约 10 s 。

4.1.2 B-R30-K0.3

模拟半径为 30 mm , 孔隙率为 0.3 的围油栏出

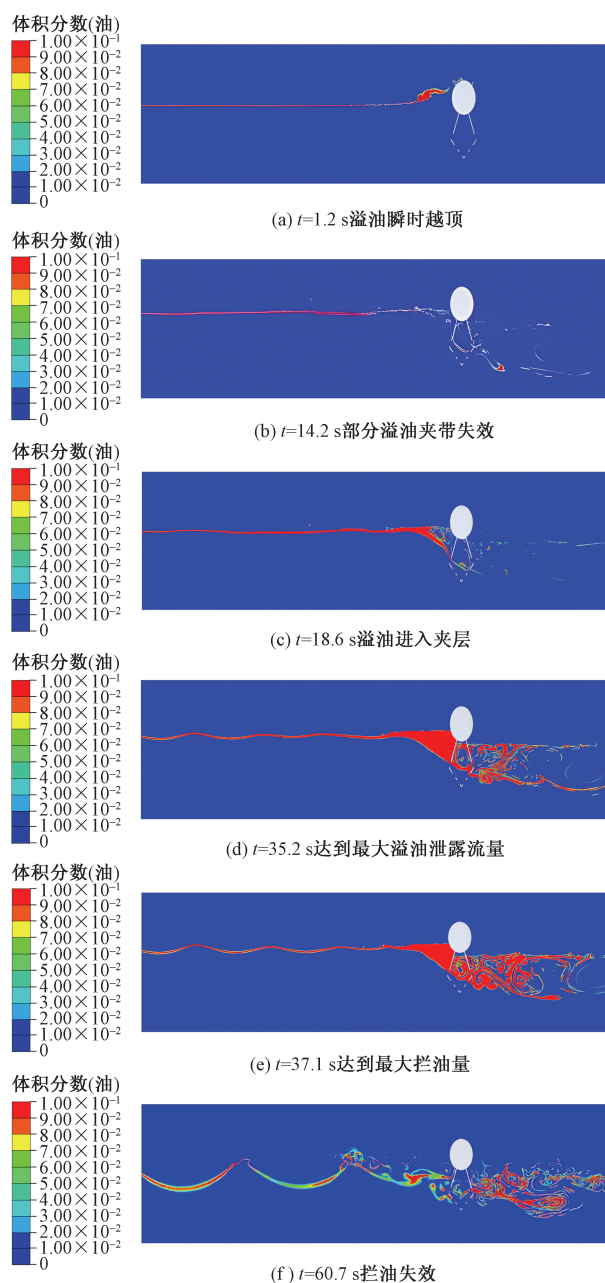


图 3 A-R30-K0.2 溢油瞬时分布图

Fig. 3 A-R30-K0.2 oil spill transient distribution map

油量结果如图 5 所示。

结合图 5, 在 $t = 46.1 \text{ s}$ 之前, 出口油流量没有明显波动, 只有极少量的油短暂的“越顶”失效或小型油块从围油栏网栅缝隙穿过, 随着拦油过程的推进, 溢油开始在围油栏前堆积, 当 $t = 46.1 \text{ s}$ 后开始出现拦油失效的情景, 此时溢油从围油栏底部开始逃散, 并且逃散量逐渐增加; 随后在 $t = 57.6 \text{ s}$ 时, 出口溢油流量达到最大值, 此时瞬时流量为 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在拦油时刻 $t = 66 \sim 76 \text{ s}$ 这段时间, 逃散的溢油在围油栏背部涡流的作用下向围油栏靠近。

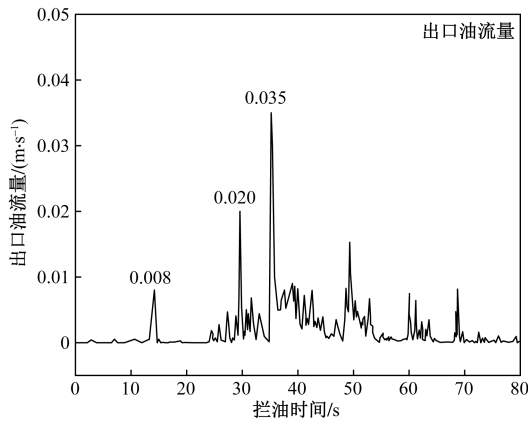


图4 A式围油栏泄油瞬时流量图

Fig. 4 Instantaneous flow diagram of oil release from A-type booms

4.1.3 C-R50-K0.2

模拟半径为 50 mm, 孔隙率为 0.2 的围油栏出口油量结果如图 6 所示。从图 6 可知, 初始阶段出口油流量没有明显波动, 围油栏前的溢油逐渐堆积, 仅微量溢油从网栅逃散。当 $t = 30.7$ s 时, 出口开始

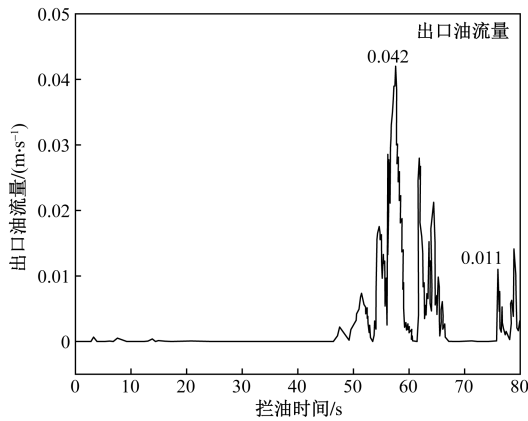


图5 B式围油栏泄油瞬时流量图

Fig. 5 Instantaneous flow diagram of oil release from type B booms

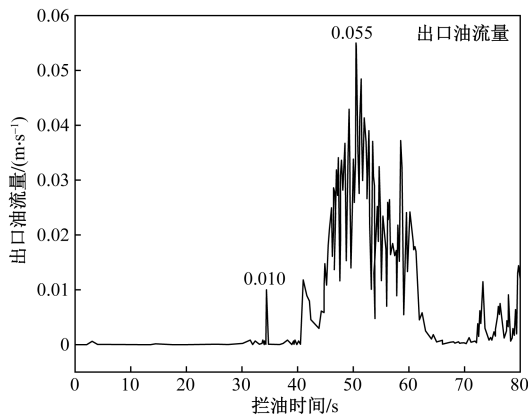


图6 C式围油栏泄油瞬时流量图

Fig. 6 Instantaneous flow diagram of oil release from C-type booms

持续监测到微量溢油, 同时, 溢油通过网隙进入裙体间夹层, 在 $t = 34.4$ s 出现第一次溢油流量峰值, 此时瞬时流量为 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。随后溢油开始进入夹层, 出口油流量减少, 维持了大约 5 s, 在 $t = 39.2$ s, 开始出现大量连续的溢油逃散, 同时围油栏裙体间的溢油量达到峰值。在 $t = 50.5$ s, 出口达到最大泄露流量峰值, 此时瞬时流量为 $0.055 \text{ m}^3/\text{s}$, 这段时间的溢油逃散持续到 $t = 65.2$ s, 在短暂恢复稳定出油大约 6 s 后, 再次出现溢油逃散。

4.2 裙体夹角

根据围油栏参数尺寸, 设计群体夹角在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 的范围中, 选取网格半径 $R = 30 \text{ mm}$ 进行网格绘制, 孔隙度为 0.3, 流速 $u = 1.3 \text{ m/s}$, 油膜厚度为 10 mm。设置如下 3 组对比项。 $\alpha = 30^\circ$ 模拟结果为 A-R30-K0.2 模拟结果。

4.2.1 $\alpha = 15^\circ$

设计群体夹角为 15° , 围油栏拦油流量如图 7 所示。结合图 7, 拦油初期 $t = 0 \sim 30$ s, 围油栏稳定拦油, 只有极少量的油短暂的“越顶”失效。随着溢油在围油栏前堆积, 当 $t = 18.8$ s 时, 溢油底部分层, 部分溢油直接穿过裙体夹层缝隙开始逃散。随着逃散流量不断增大, $t = 38.3$ s 瞬时峰值油流量为 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 。 $t = 46.2$ s, 围油栏前的溢油逐渐减少, 部分溢油进入裙体夹层, 大量的溢油短暂积累在围油栏背部。但当 $t = 64.2$ s, 溢油在波流作用下无法累积, 大量的溢油离开计算域, 瞬时峰值油流量为 $0.047 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.2.2 $\alpha = 45^\circ$

设计群体夹角为 45° , 围油栏拦油流量如图 8 所示。从图 8 可知, 拦油初期 $t = 0 \sim 21.2$ s, 围油栏稳定拦油, 计算域出口油流量没有出现明显的波动。随着溢油在围油栏前堆积, 当 $t = 18.2$ s 时, 溢油底部分层, 部分溢油直接穿过裙体夹层缝隙开始

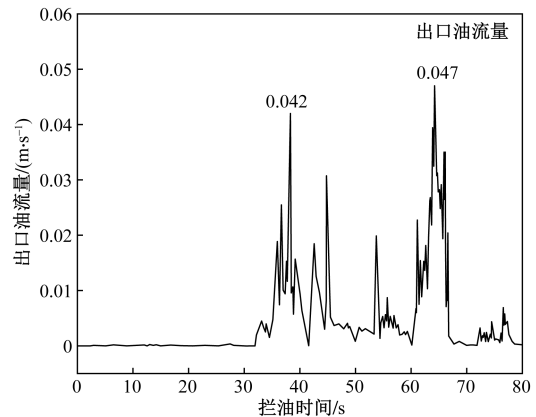


图7 $\alpha = 15^\circ$ 围油栏泄油瞬时流量图

Fig. 7 $\alpha = 15^\circ$ boom drain oil instantaneous flow rate map

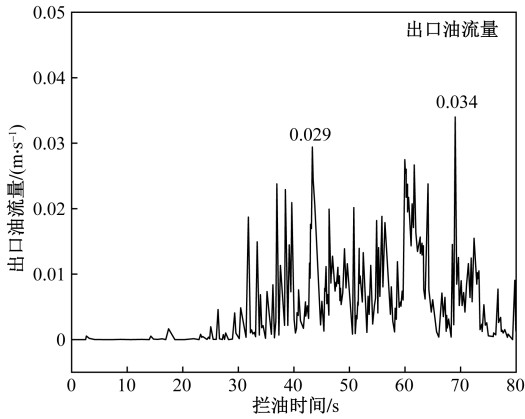


图8 $\alpha = 45^\circ$ 围油栏泄油瞬时流量图

Fig. 8 Instantaneous flow rate of oil draining from $\alpha = 45^\circ$ booms

逃散, $t = 26.6$ s, 大量溢油穿过裙体夹层, 一部分拦截在裙体间夹层, 一部分向围油栏背部逃散。当 $t = 43.3$ s, 出现泄油流量瞬时峰值为 $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$, 同时该时刻围油栏前的溢油量达到最大。 $t = 46.0$ s 围油栏拦截溢油量达到最大, 此时围油栏裙体夹层没有被溢油全部填充, 大量逃散的溢油在围油栏背部堆积。 $t = 69$ s, 此时溢油在波流作用下无法累积, 大量的溢油离开计算域, 瞬时峰值油流量为 $0.034 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.3 拦油规律分析

4.3.1 通过率

观察不同通过率的三组模拟结果, 对比最大拦油量及其对应时刻, 如图9所示。三组的溢油拦截量随时间变化的总体趋势一致, 但是具有不同的极限拦油时刻和最大拦油量, A-R30-K0.2 最大拦油量为 0.313 m^3 , 对应的极限拦油时刻 37.1 s; B-R30-K0.3 最大拦油量为 0.380 m^3 , 对应的极限拦油时刻 55.9 s; C-R50-K0.2 最大拦油量为 0.294 m^3 , 对应的极限拦油时刻 45.4 s。从结构上来看, B-R30-K0.3 具备的拦油量分别比 A 型高出了 21.4% , 极限拦油时刻推迟了 18.1 s; 比 C 型高出了 29.3% 。

4.3.2 裙体夹角

观察不同裙体间夹角的三组模拟结果, 对比最大拦油量及其对应时刻, 如图10所示。三组的溢油拦截量随时间变化的总体趋势一致, 但是具有不同的极限拦油时刻和最大拦油量, 围油栏裙体夹角 $\alpha = 15^\circ$ 最大拦油量为 0.282 m^3 , 对应的极限拦油时刻 35.3 s; 围油栏裙体夹角 $\alpha = 30^\circ$ 最大拦油量为 0.313 m^3 , 对应的极限拦油时刻 37.1 s; 围油栏裙体夹角 $\alpha = 45^\circ$ 最大拦油量为 0.354 m^3 , 对应的极限拦油时刻 46.0 s。因此从结构上来看, 围油栏裙体夹角 $\alpha = 45^\circ$ 具备的拦油量分别比夹角 $\alpha = 15^\circ$ 高出了 25.5% , 极限拦油时刻推迟了 18.1 s; 比夹角 $\alpha =$

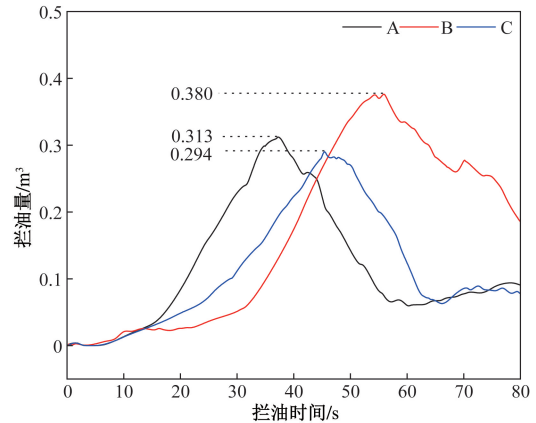


图9 3种通过率拦油量对比图

Fig. 9 Comparison of oil interceptions for the three passage rates

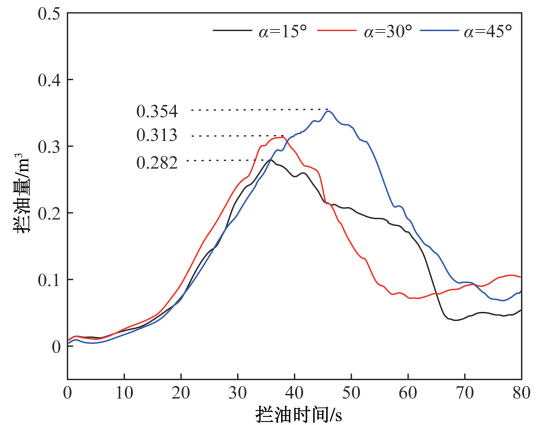


图10 3种夹角拦油量对比图

Fig. 10 Comparison of oil stopping volume of three clamping angles

30° 高出了 13.1% 。从裙体夹角来看, 围油栏裙体夹角 $\alpha = 15^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$ 变化趋势基本相同, 表现出一致性, 较为不同的是, 围油栏裙体夹角 $\alpha = 15^\circ$ 在 $47 \sim 67$ s 的曲线出现了凸起, 这是因为, 这段时间, 围油栏背部溢油积累速率较高, 减缓了溢油逃散速率。而围油栏裙体夹角 $\alpha = 45^\circ$ 对应的拦油曲线表现出更高的拦油量, 并推迟了极限拦油时刻。

4.4 新旧围油栏拦油效率对比分析

为了验证新型双层网栅围油栏 (B-R30-K0.3) 的拦油效果, 设计在相同条件下传统围油栏的拦油模拟仿真进行对比。模拟结果如图11所示。

从极限拦油时刻的状态对比图来看, 传统围油栏前油水液位较为稳定, 而双层网栅围油栏前有比较明显的液位波动; 从拦油体积来看, 双层网栅围油栏在拦油极限时刻的储油量相对更多。从拦油量上考虑, 新型围油栏优于传统围油栏。

由于围油栏处于急流中, 流速较快, 造成新型

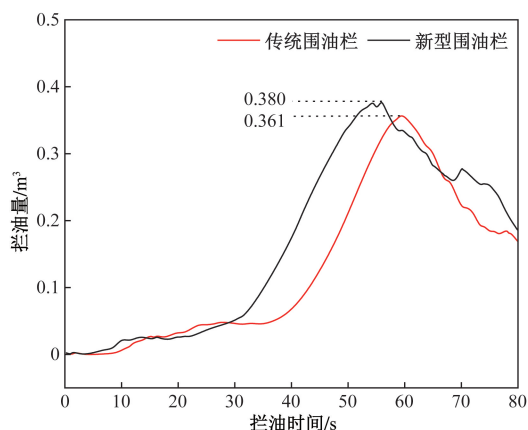


图 11 新旧围油栏拦油量对比图

Fig. 11 Comparison of oil stopping capacity of old and new booms

围油栏前油水液位不稳定的原因可能与围油栏结构附近的涡流情况相关,不同的涡流分布推迟或者减缓了对应溢油逃散的速率,因此,对于新型围油栏的拦油效率可从围油栏附近产生的涡流进行进一步的研究优化。

5 结论

探究新型围油栏在急流条件下的拦油性能,根据围油栏拦油作业提出二维数值水槽的研究模型,并合理搭建“油-气-水”瞬态多相流的数学模型进行模拟,同时制定拦油效率评价准则。得到以下结论。

(1) 围油栏通过率模拟结果显示减少网格直径大小,并适当增加网格个数可提高拦油量。

(2) 围油栏裙体夹角对拦油性能呈现出较为稳定的规律,随着围油栏裙体夹角增大,可以增加围油栏最大拦油量,并推迟极限拦油时刻。

(3) 对比相同模拟条件下,新型围油栏在拦油极限时刻的储油量相对更多,并且新型围油栏的极限拦油量高于传统围油栏。

(4) 新型围油栏的进一步优化可从围油栏附近形成的涡流进行研究,以期达到推迟拦油时刻和提高拦油量的目的。

参 考 文 献

[1] 汪澍, 严佳宁, 杨玉锋, 等. 河流溢油事故流域环境风险量化模型研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1349-1356.
Wang Shu, Yan Jianing, Yang Yufeng, et al. Quantitative environmental risk assessment model for oil spills in river basin[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1349-1356.

[2] Li P, Cai Q H, Lin W Y, et al. Offshore oil spill response practices and emerging challenges [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 6-27.

[3] 杜剑, 王军, 王美蓉, 等. 水上重大溢油事故围油栏鲁棒优化调度研究[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 113-119.

Du Jian, Wang Jun, Wang Meirong, et al. Robust optimal arrangement of oil containment booms for major marine oil spill accident [J]. China Navigation, 2023, 46(2): 113-119.

[4] 刘雪光, 张伟浩, 吴东容, 等. 中缅原油管道澜沧江跨越段原油泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2021, 40(1): 96-106.
Liu Xueguang, Zhang Weihao, Wu Dongrong, et al. Numerical simulation of oil leakage and diffusion in the Lancang River crossing section of the China-Myanmar crudeoil pipeline [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2021, 40(1): 96-106.

[5] 赵建平, 安伟, 张庆范, 等. 海上沉潜油围油栏的设计[J]. 船海工程, 2020, 49(2): 45-48.
Zhao Jianping, An Wei, Zhang Qingfan, et al. Design of oil boom of submersible oil at sea [J]. Marine Engineering, 2020, 49(2): 45-48.

[6] 侯恕萍, 王钦政, 张俊, 等. 船舶近体应急围油栏的设计与研究[J]. 船海工程, 2017, 46(1): 148-152.
Hou Shuping, Wang Qinzheng, Zhang Jun, et al. Simulative siege of oil study of shipborne lash-up oil boom laid close to broken hull [J]. Ship Engineering, 2017, 46(1): 148-152.

[7] Liu J Q, Jiao P G, Xu Y T. Research on oil boom performance based on Smoothed Particle Hydrodynamics method [J]. PLoS One, 2023, 18(7): e0289276.

[8] Hou T T, Sun H Y, Jiao B, et al. Numerical and experimental study of oil boom motion response and oil-stopping effect under wave-current action [J]. Ocean Engineering, 2024, 291: 116439.

[9] Shi Y, Li S W, Zhang H Q, et al. Numerical modeling of floating oil boom motions in wave-current coupling conditions [J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(4): 602-608.

[10] 弯昭锋, 彭宏恺, 廖飞云. 基于多功能溢油回收船的线面式溢油回收技术研究[J]. 船海工程, 2013, 42(3): 184-187.
Wan Zhaofeng, Peng Hongkai, Liao Feiyun. Study on line-plane spilled oil recovery method in the multiple function spilled oil recovery ship [J]. Marine Engineering, 2013, 42(3): 184-187.

[11] Wong K F V, Barin E, Lane J. Field experiments at the ohmsett facility for a newly designed boom system [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2002, 7(5): 223-228.

[12] 王俊岭, 熊玉华, 张亚琦, 等. 排水管道堵塞时的 CFD 数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6607-6613.
Wang Junling, Xiong Yuhua, Zhang Yaqi, et al. CFD numerical simulation on blockage of drainage pipeline in utility tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6607-6613.

[13] 张炎炎. 基于流固耦合的围油栏拦油效果研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
Zhang Yanyan. Study on oil containment by oil booms based on fluid-structure interaction [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.

[14] 张嘉, 罗浩勇. 稠油及其乳液流变性能研究[J]. 当代化工, 2020, 49(6): 1150-1153.
Zhang Jia, Luo Haoyong. Study on rheological properties of heavy oil and its emulsion [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(6): 1150-1153.

[15] 刘厚林, 徐欢, 吴贤芳, 等. 基于流固耦合的导叶式离心泵强度分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 27-30.
Liu Houlin, Xu Huan, Wu Xianfang, et al. Strength analysis of a diffuser pump based on fluid-structure interaction [J]. Vibration and Shock, 2013, 32(12): 27-30.