

基于 SPH 方法的围油栏仿真研究

刘家齐, 焦培刚*, 许云涛

山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250357

摘要:为解决计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法在模拟围油栏围控溢油时流-固耦合、水-油液体两相流中的不稳定性、计算效率差、将自由表面视为滑移壁且不考虑围油栏移动等问题,基于光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法建立适用于围油栏围控溢油的固-液耦合、液体两相流数值模型,将5种不同裙摆结构的围油栏导入两相液体相互作用的数值仿真模型中,通过SPH代码设定数值模拟相关参数,提高计算效率,得到较精确的围油栏滞油长度与溢油失效步长。结果表明:围油栏围控溢油能力与上、下裙摆高度比及裙摆角类型有关,上裙摆高度占比越大,围油栏的滞油表现越好;前折角型围油栏的滞油表现优于前转角型围油栏;滞油长度与油品性质有关,油品的密度和黏度越小,围油栏的滞油长度越大。

关键词:SPH方法;围油栏;固-液耦合;水-油两相流;滞油长度;失效步长

中图分类号:U698.7;O359;TE991

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)01-0116-08

引用格式:刘家齐,焦培刚,许云涛.基于SPH方法的围油栏仿真研究[J].山东交通学院学报,2024,32(1):116-123.

LIU Jiaqi, JIAO Peigang, XU Yuntao. Simulation study on oil containment boom based on SPH method [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(1): 116-123.

0 引言

海上开采石油和运输石油时易发生石油泄漏和溢出事故。全世界每年因航运而泄漏到海洋中的石油污染物高达200万t^[1]。溢油污染海洋环境,造成海洋生物大规模死亡,给沿海地区造成巨大经济损失,且持续时间较长。如何在石油泄漏后限制其外溢,防止石油大范围扩散是海洋工程中非常重要的课题。围油栏是石油泄漏应急响应中的重要工具,可有效遏制石油扩散,防止海洋环境污染加剧^[2-3]。

学者通过水槽试验研究溢油围控机制和围油栏失效情况。Brown等^[4]在室外流水通道中观察油品的围控和围油栏失效案例,获得有关围油栏失效机制的数据。Amini等^[5]通过试验研究围油栏失效的不稳定机制。Yang等^[6]采用改进的多相光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法模拟使用移动围油栏控制油泄漏,研究油的类型、围油栏的移动速度、裙摆角度、水波等因素对滞油效果的影响。围油栏的深度和类型是影响围油栏附近流速的主要因素。随计算机硬件、软件和数值方法的迅速发展,溢油数值模拟的应用越来越广泛。Gotoh等^[7]采用亚粒子尺度(sub-particle scale, SPS)表示运动粒子半隐式(moving particle semi-implicit, MPS)模型中湍流的影响。水域溢油问题涉及水-油两相流动的自由表面,围油栏对溢油的控制涉及复杂的流-固相互作用,处理两相流动、自由表面流动及流固相互作用是数值模拟的重要任务,基于网格的传统数值方法在同时追踪固体的运动、变形及自由表面、流体界面方面存在困难。溢油数值模拟主要依赖计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)软件

收稿日期:2023-04-20

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GNC106032);山东交通学院研究生科技创新项目(2022YK085)

第一作者简介:刘家齐(1998—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为智能制造,E-mail:499610733@qq.com。

*通信作者简介:焦培刚(1974—),男,山东聊城人,教授,工学博士,硕士研究生导师,主要研究方向为机械工程、虚拟现实、光滑粒子流体动力学,E-mail:jiaopeigang@126.com。

FLUENT 和 CFX,将自由表面视为滑移壁,且不考虑围油栏移动的数值结果与实际结果存在一定差距^[8-10]。

本文设计 4 种围油栏裙摆结构,分析其对围油栏滞油长度及失效时间的影响,采用改进的 SPH 方法,将溢油视为非牛顿流体,采用改进的亚粒子尺度(sub-particle scale,SPS)湍流模型,建立水-油两相流模型和流-固相互作用模型,对围油栏进行仿真研究,以期提高数值模拟的精度和效率,为围油栏裙摆结构设计提供理论依据。

1 SPH 方法

SPH 方法是基于粒子的数值方法,最初用于天体物理学领域中天体的演化计算,主要思想是将流体连续体划分为大量的离散粒子,通过核函数对粒子进行平滑化处理获得流体的速度、压力等物理量,后逐渐应用于流体力学、物理学、材料科学等领域^[11-13],相较于传统有限体积法(finite volume method,FVM)和有限元法(finite element method,FEM),SPH 方法无需网格、可处理复杂边界和变形流体、可自适应地改变粒子密度等^[14-15]。

围油栏防溢油涉及复杂的水-油两相流和流-固耦合问题,SPH 方法适用于处理流动的复杂边界和多相流问题。可将流体视为 1 组质点,每个质点都有一定的质量、速度、密度等属性。计算质点间的相互作用,得到流体的运动状态和压力分布^[16-17]。建立不同的裙摆形状模型模拟围油栏的失效。

1.1 非牛顿流体

将溢油看做非牛顿流体可准确描述溢油的流动特性,预测围油栏的防护效果和溢油事故等。在工业应用和学术研究中应考虑材料(如聚合物、泥浆、糊状物和悬浮液等)的流变学特性,这些材料通常有屈服应力,低于屈服应力时,材料未发生形变,不流动。与牛顿流体不同,非牛顿流体的剪切应变与剪切应力的关系可能为非线性。不遵守牛顿黏度定律的流体可归类为有黏弹性、时间依赖性和非牛顿黏度的非牛顿流体。本文将 SPH 方法与广义的 Herschel-Bulkley-Papanastasiou(HBP)模型相结合,HBP 模型基于液体-沉积物两相流研究^[18],为非牛顿流体提供描述其流变行为的数学框架,该模型特别适合模拟黏塑性材料,如 Bingham 塑性、Bingham 假塑性和膨胀流体^[19]。在无屈服强度的情况下,广义的 HBP 非牛顿模型可用于模拟剪切变薄或剪切变厚的材料。在 SPH 方法中 HBP 模型的本构方程^[18]为:

$$\tau = \eta_{\text{app}} \dot{\gamma},$$

式中: τ 为剪切应力; η_{app} 为表观黏度, $\eta_{\text{app}} = \mu |\dot{\gamma}|^{n-1} + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} [1 - e^{-m|\dot{\gamma}|}]$,其中, τ_y 为流体的屈服应力, μ 为黏度, n 为幂律指数, m 为剪切速率增长参数; $\dot{\gamma}$ 为对称剪切率。

HBP 模型的剪切应力随 m 、 n 的变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知: n 不变, m 增大,初始阶段的剪切应力快速增大; m 不变, n 增大,后期剪切应力快速增大。

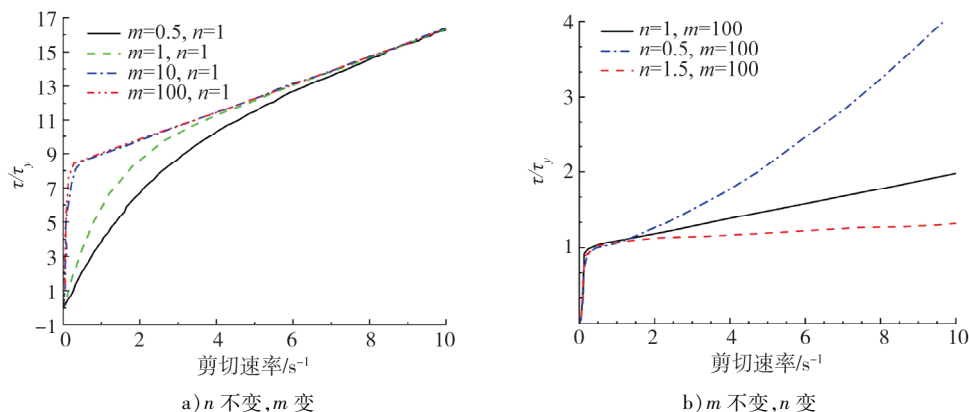


图 1 HBP 模型的初始剪切应力随 m 、 n 变化的曲线

1.2 计算方法

SPH方法通过1组物质点或粒子离散连续介质。在流体动力学模拟中,SPH方法根据周围粒子的速度、压力等物理属性,在每个粒子位置对离散的Navier-Stokes方程进行局部积分。由基于距离的二维函数或三维函数确定这组粒子的邻近性。在每个时间步内,计算每个粒子的新速度、新压力等物理量,粒子根据更新的计算结果移动^[20]。

1.2.1 SPH近似

采用基于插值函数的积分方程,将连续流体动力学的守恒定律从偏微分方程形式转化为适于基于粒子的模拟形式,给出特定点的估计值。这种插值或加权函数被称为核函数 W ,基本原理是用积分插值近似任何函数,积分函数^[21]

$$F(r) = \int F(r') W(r-r', h) dr',$$

式中: $W(r-r', h)$ 为光滑核函数, h 为光滑长度, r 为粒子所在坐标, r' 为粒子变化后坐标。

在离散表示法中,已知单个粒子a、b,粒子a所处位置坐标的插值近似为:

$$F(\mathbf{r}_a) \equiv W_{ab} m_b / \rho_b \sum_b F(\mathbf{r}_b), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_b$ 分别为粒子a、b在空间的位置向量; m_b 为粒子b的质量; ρ_b 为粒子b的密度; W_{ab} 为粒子a、b间的加权函数, $W_{ab} = W(r_{ab} - r_b, h)$ 。

在SPH方法中,核函数的选择对模拟结果的精度和计算效率有较大影响,核函数为粒子间的无量纲距离 q 的函数, $q = r/h$ 。本文采用光滑性和可微性较好的Wendland核函数处理流体黏性较高、液面形态变化较大的问题,Wendland核函数公式^[22]为:

$$W(r, h) = \alpha_D (1 - q/2)^4 (2q + 1), 0 \leq q \leq 2,$$

式中: α_D 为归一化常数,在二维中 $\alpha_D = 7/(4\pi h^2)$,在三维中 $\alpha_D = 21/(\pi h^3)$ 。本文只考虑影响域为 $2h$ 的内核。

1.2.2 控制方程

SPS方法是在每个SPH粒子周围添加一定数量的SPS颗粒,构建模流场中的剪切流动^[12]。这些SPS颗粒的运动方程为新方程组,包括额外的张力项和剪切黏性项,可增加模拟的黏性和耗散,使SPH方法更准确。动量守恒方程为:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + v_0 \nabla^2 v + \frac{1}{\rho} \nabla \tau,$$

式中: v 为速度, t 为时间, ρ 为流体密度, ∇P 为压力场的梯度, g 为重力加速度, v_0 为运动黏度, $\nabla^2 v$ 为雷诺平均速度矢量, $\nabla \tau$ 为SPS应力张量。

可按式(1)计算层流应力:

$$\sigma = (v_0 \nabla^2 v)_a = \sum_b m_b \left(\frac{4v_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) v_{ab},$$

式中: r_{ab} 为粒子a与b间的距离, $r_{ab} = r_a - r_b$; ∇_a 为粒子a的梯度算子; ρ_a 为粒子a的密度; η 为常数, $\eta^2 = 0.01h^2$; v_{ab} 为粒子a与b间的速度差, $v_{ab} = v_a - v_b$ 。

在SPH离散表示法中动量方程为:

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + g + \sum_b m_b \left[\frac{4v_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right] v_{ab}, \quad (2)$$

式中 P_a, P_b 分别为粒子a、b处的压力。

涡黏性假设采用Favre平均(针对可压缩流体)和Einstein符号(用于剪切应力分量方向 i 和 j)对SPS应力张量进行建模,公式为:

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = v_i \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} C_1 \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2, \quad (3)$$

式中: τ_{ij} 为亚粒子应力张量; ν_i 为湍流黏度, $\nu_i = [(C_s \Delta l)]^2 |S|^2$, 其中 C_s 为 Smagorinsky 常数, $C_s = 0.12$, Δl 为粒子间距, $|S|^2 = 2S_{ij}S_{ij}$, S_{ij} 为 SPS 应变张量; k 为湍流动能系数; δ_{ij} 为克罗内克函数; C_1 为常数, $C_1 = 0.0066$; Δ 为滤波宽度; $|S_{ij}|$ 为应变率张量。

式(2)可写为:

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + g + \sum_b m_b \left[\frac{4\nu_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right] v_{ab} + \sum_b m_b \left(\frac{\tau_{ij}^b}{\rho_b^2} + \frac{\tau_{ij}^a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} \quad (4)$$

可认为每个粒子的质量保持不变,但粒子的密度波动。通过 SPH 形式下的质量守恒方程或连续性方程计算密度变化,计算公式为:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

根据 Monaghan^[23](1994)的方法,在 SPH 形式下,将流体视为弱可压缩流体,采用状态方程确定流体压力

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (6)$$

式中: B 为常数,表示物质的体积模量, $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$, 其中, c_0 为参考密度 ρ_0 下的声速, $c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}$, $\rho_0 = 1\,000 \text{ kg/m}^3$; γ 为参数, $\gamma = 7$ 。

2 数值模型

为验证试验效果,在数值水槽模型^[6]中加入 SPS 湍流模型及非牛顿流体溢油。数值水槽如图 2 所示。水槽长 19.80 m,水深 2.25 m,水槽左侧设置造波器,制造一阶规则波,右侧设置消波区,围油栏在拖船的控制下以恒定水平速度 v_b 向左移动,在垂直方向上可自由移动。

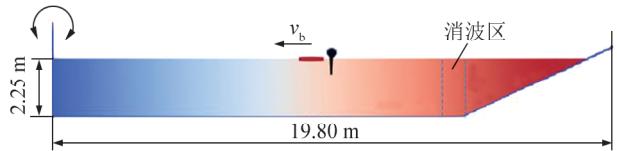


图 2 数值水槽示意图

研究不同裙摆形状对围油栏拦油效果的影响,探索如何优化浮体结构,提高防溢油能力,设计 4 种改进裙摆固体浮子式围油栏,结构参数如表 1 所示。

A 为未改进围油栏, B、C、D、E 为改进后的围油栏。围油栏结构包括吊杆、臂架和裙摆组,裙摆分为前折角型(图 3a)和前转角型(图 3b)),围油栏类型如图 4 所示。B、D 型围油栏的 $H_1 = H_2$, C、E 型围油栏的 $H_1 = 2H_2$ 。裙摆高 0.75 m,裙摆角 α 为裙摆与垂直方向的夹角, B、C 型围油栏的裙摆角均为 45° 。在围油栏前布置厚 0.01 m,长 2.00 m 的薄油层。围油栏移动速度不小于 0.50 m/s 时,围油栏拦油失效,围油栏的临界速度^[24]为 0.25~0.50 m/s。

表 1 围油栏结构参数

围油栏	H_1/m	H_2/m
A	0.750	0
B	0.375	0.375
C	0.500	0.250
D	0.375	0.375
E	0.500	0.250

注: H_1 为上裙摆高度, H_2 为下裙摆高度。

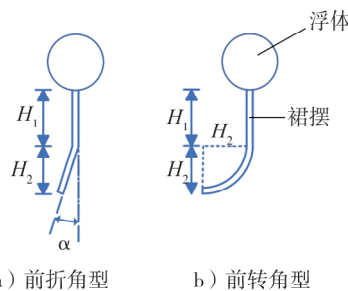


图 3 改进的围油栏结构示意图

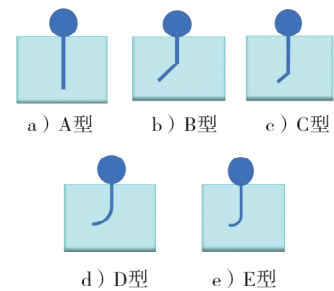


图 4 围油栏类型示意图

分析浮子式围油栏裙摆形状对滞油效果及失效时间的影响,主要包括不同结构围油栏在移动速度为 0.30 m/s 下的滞油效果和移动速度为 0.50 m/s 时的失效时间。为使数值模拟结果更精确,将模拟时

间 30 s 划分为 300 个步时。

3 数值模拟结果分析

采用 SPH 代码,对更改裙摆形状后的围油栏防溢油进行数值模拟,时间积分采用 Symplectic Position Verlet 数值积分格式,其优势为可在长时间积分中较好地保持能量和动量守恒,计算简单且高效。采用修正动态边界条件(modified dynamic boundary condition, mDBC)的边界处理方法,边界粒子的排列与内部粒子一致,在边界界面处设置半个粒子间距的界面。采用虚拟节点和校正的 SPH 算法可更准确地计算流体属性,尤其是边界角落和复杂几何形状^[24]。

采用非牛顿流体对溢油进行数值建模,使模拟结果更准确,更方便观察溢油控制的物理过程。在自由曲面、移动界面和流固相互作用的广泛应用中,已证明 SPH 代码与改进算法的有效性^[25],可用于研究不同因素对溢油控制的影响,其他数值模拟参数如表 2 所示。

表 2 其他数值模拟参数

维度	域的尺寸	初始粒子间距离/m	h/m	流体粒子数/个	边界粒子数/个
2D	20 m×2.5 m	0.02	0.033 9	126 308	2 136

3.1 滞油长度

设定围油栏的移动速度为 0.30 m/s,进行数值模拟的全过程中未出现临界现象。轻油、重油、水的滞油密度分别为 850、950、1 000 kg/m³,运动黏度分别为 3.32×10^{-6} 、 3.00×10^{-2} 、 1.00×10^{-6} m²/s。波速相同、不同围油栏结构下,围油栏对重油、轻油的滞油长度如表 3 所示。

表 3 不同油品、围油栏结构下围油栏的滞油长度

油品	密度/ (kg·m ⁻³)	围油栏的滞油长度/m				
		A 型	B 型	C 型	D 型	E 型
重油	950	0.621	0.731	0.745	0.721	0.699
轻油	850	0.652	0.765	0.778	0.735	0.710

由表 3 可知:改进围油栏结构后,围油栏对重油、轻油的滞油长度均增大。重油情况下,B、C、D、E 型围油栏的滞油长度比 A 型分别增大 0.110、0.124、0.100、0.078 m;轻油情况下,B、C、D、E 型围油栏的滞油长度比 A 型分别增大 0.113、0.126、0.083、0.058 m。B、C 型围油栏中, $H_1 = 2H_2$ 的围油栏的溢油长度大于 $H_1 = H_2$ 的围油栏,C 型围油栏结构优于 B 型;D、E 型围油栏的前转角越大,滞油长度越大,防溢油效果越明显,D 型围油栏结构优于 E 型。 $H_1 = H_2$ 时,B 型围油栏的滞油长度比 D 型大 0.010 m; $H_1 = 2H_2$ 时,C 型围油栏的滞油长度比 E 型大 0.046 m,前折角型围油栏结构的滞油效果优于前转角型。5 种围油栏对重油的滞油长度小于轻油,表明滞油长度与油品性质有关,油品的密度和黏度越小,围油栏的滞油长度越大。

溢油为重油时,5 种围油栏结构的滞油效果如图 5 所示。

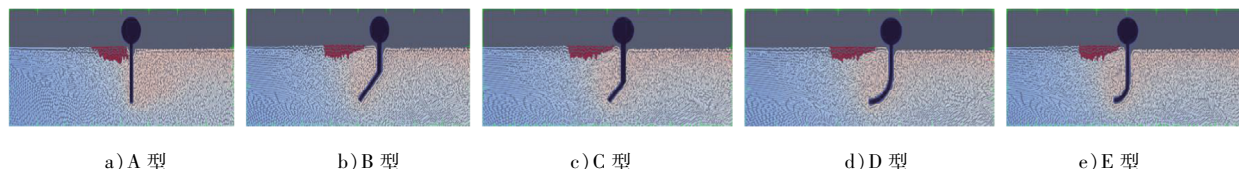


图 5 重油下 5 种结构围油栏的滞油效果对比

由图 5 可知:随围油栏向左侧恒速移动,溢油在围油栏左侧聚集,5 种围油栏结构对溢油的聚集长度及形状不同;改进后的围油栏的滞油长度比 A 型围油栏大,折角型和转角型围油栏均可提高围油栏的围油性能; H_1 与 H_2 之比影响围油栏的滞油效果,B、C、D、E 型围油栏的滞油长度随 H_1 的增大、 H_2 的减小而增大,滞油效果提高;C 型围油栏左侧的溢油分布更均匀,B 型围油栏左侧出现溢油聚集增厚现象;D 型围油栏左侧溢油分布更均匀,E 型围油栏左侧出现溢油聚集增厚现象,C、D 型围油栏的溢油集聚效应

弱,溢油从围油栏下方逃窜的概率更小,失效的可能性更小。

3.2 失效时间

在重油、有波、围油栏速度为 0.50 m/s 时,A、B、C、D、E 型围油栏的失效步长分别为 122、155、175、148、143 步时,改进后围油栏的失效步长均增大,防溢油效果明显提高。在有波、围油栏速度为 0.50 m/s 时,B、C 型围油栏的失效时间比 A 型延长 33、53 步时, $H_1 = 2H_2$ 时的围油时间比 $H_1 = H_2$ 长,C 型围油栏结构设计优于 B 型;D、E 型围油栏的失效时间比 A 型延长 26、21 步时,D 型围油栏结构设计优于 E 型,前转角越大,防溢油时间越长,防溢油效果越明显。 $H_1 = H_2$ 时,B 型围油栏的防溢油时间比 D 型围油栏延长 7 步时; $H_1 = 2H_2$ 时,C 型围油栏的滞油时间比 E 型围油栏延长 32 步时,前折角型围油栏结构设计优于前转角型。

水流速度大于 0.50 m/s 时,A 型围油栏最早出现石油逃逸现象,B、C、D、E 型围油栏出现石油逃逸现象的时间有所增加。有波、围油栏速度为 0.50 m/s 时,5 种围油栏的失效临界情况如图 6 所示。由图 6 可知:溢油聚集到一定程度时出现逃逸现象,相对于 A 型围油栏,改进后的 B、C、D、E 型围油栏改变了失效形式。A 型围油栏失效时溢油沿围油栏裙摆下移后逃逸,改进后的围油栏是在溢油聚集到一定程度时,在溢油左侧下移到围油栏底部逃逸。受结构、运动惯性和流体力学影响,C 型围油栏的溢油聚集程度大于 B 型,E 型围油栏的溢油聚集程度大于 D 型,折角 C 型、转角 E 型围油栏的溢油聚集效果较好。

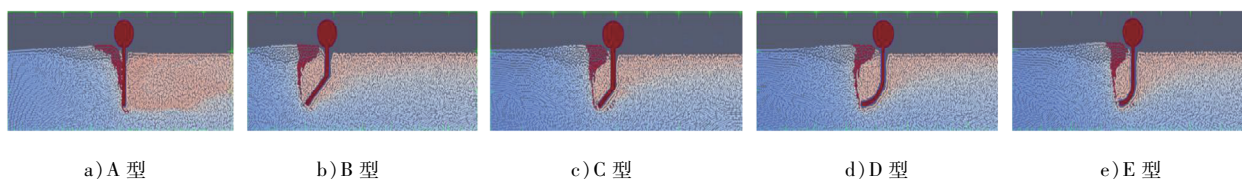


图 6 速度为 0.50 m/s 时 5 种结构围油栏的失效临界情况对比

4 结束语

采用光滑粒子流体动力学方法对改进的围油栏防溢油过程进行数值模拟,克服基于网格的传统数值方法在同时追踪固体物体运动、变形及自由表面和流体界面时的困难,精准模拟围油栏围控溢油的过程,仿真结果更精确。与传统围油栏结构相比,改进裙摆结构的围油栏的围油效果更好。

目前的观察结果是定性分析,下一步可与试验数据对比,进一步验证数值模拟结果的准确性,研究更多影响因素对围油栏围控溢油的影响。

参考文献:

- [1] 周正,郑鲁,马斌. 固体浮子式橡胶围油栏的产品特点及其技术局限性[J]. 珠江水运,2021(19):111-113.
- [2] 张勤,孙永明. 海上溢油围油栏研究现状[J]. 绿色科技,2015(4):284-285.
- [3] 王姣. 触目惊心的海洋污染[J]. 世界环境,2019(3):55-58.
- [4] BROWN H M, GOODMAN R H, AN C F, et al. Boom failure mechanisms: comparison of channel experiments with computer modelling results[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1996, 3(4):217-220.
- [5] AMINI A, DE CESARE G, SCHLEISS A J. Velocity profiles and interface instability in a two-phase fluid: investigations using ultrasonic velocity profiler[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46:683-692.
- [6] YANG X F, LIU M B. Numerical modeling of oil spill containment by boom using SPH[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, 56:315-321.
- [7] GOTOH H, IKARI H, YASUOKA T. Simulation of armor blocks in front of caisson breakwater by DEM-MPS hybrid model [C]//Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: ISOPE, 2009.
- [8] AMINI A, SCHLEISS A J. Numerical modeling of oil-water multiphase flow contained by an oil spill barrier[J]. Engineering

- Applications of Computational Fluid Mechanics, 2009, 3(2):207-219.
- [9] CHENGN. Numerical simulation of oil-boom failure with CFX 4. 3[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2002, 29(5):25-29.
- [10] FENGX, WU W Q, WU W F. Numerical simulation technology of oil containment by boom[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 8:40-47.
- [11] 杨秋足, 徐绯, 王璐, 等. 一种基于黎曼解处理大密度比多相流 SPH 的改进算法[J]. 力学学报, 2019, 51(3): 730-742.
- [12] 杨彩虹, 管延敏, 康庄, 等. SPS 湍流模型在 SPH 模拟黏性流动问题中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(1):59-65.
- [13] VIOLEAU D, BUVAT C, ABED-MERAIM K, et al. Numerical modelling of boom and oil spill with SPH[J]. Coast Engineering, 2007, 54(12):895-913.
- [14] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. The Astronomical Journal, 1977, 82(12): 1013-1024.
- [15] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181:375-389.
- [16] YANG X F, PENG S L, LIU M B, et al. Numerical simulation of ballast water by SPH method[J]. International Journal of Computational Methods, 2012, 9(1):1240002.
- [17] 沈雁鸣, 陈坚强. SPH 方法对气液两相流自由界面运动的追踪模拟[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2):157-161.
- [18] FOURTAKAS G, ROGERS B D. Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using smoothed particle hydrodynamics (SPH) accelerated with a graphics processing unit (GPU)[J]. Advances in Water Resources, 2016, 92:186-199.
- [19] 乔成, 潘华利, 欧国强. 两相光滑粒子流体动力学方法在动床溃坝问题中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(5):625-632.
- [20] TAGLIAFIERRO B, MANCINI S, ROPERO-GIRALDA P, et al. Performance assessment of a planing hull using the smoothed particle hydrodynamics method[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(3):244-261.
- [21] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics[M]. [S. l.]: World Scientific Publishing, 2003.
- [22] LIND S J, ROGERS B D, STANSBY P K. Review of smoothed particle hydrodynamics: towards converged Lagrangian flow modelling[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering, 2020, 476(2241):20190801.
- [23] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 110(2): 399-406.
- [24] CORMACK D. Response to marine oil pollution[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 1999.
- [25] SHAO J R, LI H Q, LIU G R, et al. An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics[J]. Computers Structures, 2012, 100:18-26.

Simulation study on oil containment boom based on SPH method

LIU Jiaqi, JIAO Peigang^{}, XU Yuntao*

School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: A numerical model for solid-liquid coupling and two-phase flow is developed based on the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method to address issues such as flow-solid coupling, instability in two-phase flow of water and oil, poor computational efficiency, and the assumption of a slip wall with no consideration of oil barrier movement in traditional computational fluid dynamics (CFD) methods for simulating oil spill containment using oil booms. Five different skirt structures of oil booms are incorporated into the numerical simulation model of two-phase liquid interaction. By setting relevant parameters in the SPH code, the computational efficiency is improved, and accurate values for the length of oil retention by the oil boom and the

oil spill failure step were obtained. The results show that the effectiveness of oil spill containment by the oil boom depends on the ratio of upper and lower skirt heights and the type of skirt angle. A higher ratio of upper skirt height leads to better oil retention performance. The oil boom with a forward folding skirt angle performs better than the one with a forward turning skirt angle. The length of oil retention is influenced by the properties of the oil; smaller density and viscosity of the oil result in a greater length of oil retention.

Keywords: SPH method; oil boom; solid-liquid coupling; water-oil two-phase flow; length of oil retention; failure step

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 55 页)

experimental design is conducted to determine the optimal mass fractions of warm mix additives and flame retardants. The warm-mix flame-retardant asphalt mixture is designed and evaluated for its road performance. The optimal mixing and compaction temperatures for the warm mix flame-retardant asphalt mixture are determined through experiment, and its road performance, fatigue resistance, and flame retardation are evaluated. The results show that the optimal mixing temperature is 150 °C, and the optimal compaction temperature is 140 °C. The water stability and fatigue resistance of the warm mix flame-retardant asphalt mixture are significantly improved, and its performance at high and low temperatures is also enhanced. Analysis of parameters such as combustion time, mass loss, and residual stability indicate that the warm mix flame-retardant asphalt mixture can increase the flame retardation of road materials, and improve the basic road performance of materials after fire accidents, and provide data foundation for the application of warm mix flame-retardant asphalt mixtures in tunnel projects.

Keywords: road engineering; warm-mix flame-retardant asphalt; road performance; flame retardancy

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 109 页)

improper organization of ship safety management has the greatest impact on ship grounding accidents; Organizational influence and unsafe behavior prerequisites have a greater impact on ship grounding accidents, followed by unsafe behavior and supervision; Lack of team cooperation has the least impact on ship grounding accidents. Combined with the analysis results, the preventive measures for ship grounding accidents are put forward, which can provide reference for effective prevention and reduction of ship grounding accidents caused by human errors.

Keywords: ship grounding; HFACS; FCMs; human factor analysis

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 115 页)

fishbone diagram method from the perspective of fishing vessels. The causes of the accidents are used as nodes in a Bayesian network for inference and validation. Posterior probability inference and sensitivity analysis are employed to explore the causal chain of accidents. The results indicate that human factors have the greatest impact on collisions involving fishing vessels near the coast, followed by management factors. Among the human factors, high sensitivity is observed for failure to display proper lights and signals, failure to take effective evasive actions, negligence in lookout, and inadequate crew qualifications. These factors have a significant impact on collisions involving fishing vessels in the vicinity of the coast.

Keywords: fishing boat; collision accident; fish-bone diagram; Bayesian network; causation analysis

(责任编辑:王惠)