

静水和动水环境中水下溢油浮射流 初步实验及数值模拟

廖国祥^{1,2}, 李艳妮³

(1. 国家海洋环境监测中心 大连 116023; 2. 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室 大连 116023;
3. 大连海事大学环境科学与工程学院 大连 116026)

摘要:为深入研究井喷和管道破损等海底事故后溢油在水下环境中的输移扩散过程,文章利用自制的组合式环形水槽(周长 9.7 m、宽 0.45 m、深 1 m),以阿曼原油与消油剂混合物和淡水(含示踪剂)为模拟污染物,初步开展静水和动水环境中海底溢油浮射流的物理模拟实验,并应用基于拉格朗日积分方法的水下溢油浮射流模型进行数值模拟比较分析。研究表明:静水环境中,水下溢油浮射流主要沿喷口的垂直中心线向水面输移扩散;非均匀流动水环境中,横流速度越大,浮射流输移轨迹的弯曲程度越明显;数值模拟的浮射流轨迹总体上与实验观测结果符合较好;研究结果可为今后相关物理实验和数值模型的改进研究提供有益参考。

关键词:水下溢油;浮射流;输移扩散;非均匀流;数值模拟

中图分类号:P76;X55

文献标志码:A

文章编号:1005—9857(2020)12—0071—07

Preliminary Experimental Study and Numerical Modeling of the Underwater Oil Spill Buoyant Jets in Static and Flowing Water Environments

LIAO Guoxiang^{1,2}, LI Yanni³

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, Dalian 116023, China;
3. Environmental Science and Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to study the transport and diffusion processes of oil spill in underwater environment after subsea accidents (e.g. subsea oil-well blowout, oil/gas pipeline leakage), this paper used an annular tank with dimensions of 9.7 m×0.45 m×1 m (perimeter×width×depth) as the basic test facility, and selected Oman crude oil, mixture of crude oil and chemical dispersant, fresh water (with ink as tracer) as simulated pollutants, and carried out a series of underwater buoyant jet physical experiments, and conducted the numerical modeling and comparative analysis by using

收稿日期:2020-03-13;修订日期:2020-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(42076215、41306099);国家重点研发计划项目(2018YFD0900606)。

作者简介:廖国祥,副研究员,博士,研究方向为海洋溢油数值模拟与风险评估、滨海湿地与海洋自然保护区监测评估

a Lagrangian integral method based underwater oil/gas buoyant jet model. Experimental results showed that the buoyant jets transported along the vertical line of the nozzle and spread in horizontal directions in the static water environment; while in the non-uniform cross flowing water environments, the buoyant jet trajectories were bent over by the stronger crossflow. It also showed that the numerical modeled trajectories of buoyant jets generally agreed well with the experimental observed data. The results of this paper can provide a useful reference for the improvement of physical experiments and numerical modeling in the future

Key words: Underwater oil spill, Buoyant jet, Transport and diffusion, Non-uniform crossflow, Numerical modeling

0 引言

自 2010 年墨西哥湾“深水地平线”深海溢油事故以来,水下溢油问题受到世界各海洋石油开发国家的高度重视和关注。近年来,我国不仅加强对渤海和南海的浅海油气资源开采,而且积极推进南海深水油气资源的勘探开发,发生水下溢油事故的风险日益增高。在此背景下,通过开展物理实验和数值模拟研究,深入认识水下溢油污染物在水下环境中的输移扩散过程,可为事故前的风险评估、事故时的应急决策和事故后的损害评估等提供重要的科学和技术支持。

国外学者自 20 世纪 70 年代起就开展了静水条件下的水下溢油浮射流实验,用于支持水下溢油模型的构建和验证^[1-3]。挪威学者分别于 1996 年和 2000 年先后开展 107 m 和 844 m 水下大型溢油现场实验^[4-5]。由于水下溢油现场实验的成本高昂,且不易观测污染物输移扩散的全过程,现有研究仍以实验室模拟实验研究为主。Socolofsky 等^[6]开展均匀流环境中的多相流实验,研究油气混合物的输移和分离特性;Masutani 等^[7]在高为 1.30 m、长和宽均为 0.55 m 的长方体水槽中开展原油样品喷射实验,根据射流形态确立油品破碎成油滴的边界;Brandvik 等^[8]利用直径为 3 m、高为 6 m 的大型垂直水槽开展系列实验,研究泄漏条件、油品特性和消油剂对油滴粒径分布的影响;Zhao 等^[9]在美国 Ohmsett 大型波浪槽中,利用直径为 25.4 mm、泄漏量为 6.3 L/s 的水下横管开展大型溢油实验,分析水下溢油的动力特性和油滴粒径分布。

近年来,我国学者积极开展水下溢油实验研

究,并取得显著进展。王晶^[10]和肖杰^[11]开展水下单孔口形成的气泡/油滴实验,研究海底管线微孔泄漏的油滴尺寸和上升速度;臧晓刚等^[12]在 2.0 m×1.0 m×1.8 m 的水箱中进行水下管道微孔溢油实验,研究在不同泄漏量时溢油油滴上升至水面的时间以及泄漏产生的浮羽射流的形态;钱国栋等^[13]在 1 m×1 m×2 m 的垂直水槽中开展“蓬莱 19-3”水下溢油模拟实验,并评估水下溢油的喷口直径和喷射速度对油滴破碎形成的油滴粒径分布的影响。

与此同时,真实海洋环境通常是非均匀的分层水流环境,而现有实验室实验研究以静水和均匀流环境为主,难以深入研究更接近真实海洋环境条件的水下溢油污染物输移扩散过程。因此,本研究基于自制的组合式环形水槽,初步开展静水和动水(非均匀横流)环境中水下溢油浮射流的物理模拟实验和数值模拟分析,以期水下溢油事故污染物输移扩散研究提供有益参考。

1 水下浮射流实验

1.1 材料与方法

1.1.1 物理实验装置

水下溢油浮射流物理模拟实验装置为 1 台自制的具有初步造波和造流功能的组合式环形溢油水槽(图 1)。

水槽周长 9.7 m、宽 0.45 m、深 1 m,其中槽壁材质为玻璃,易于观测实验过程。水槽由 2 个直段和 2 个弯段组成,选取水槽的一侧直段作为水下浮射流物理模拟实验区域,并利用 1 台空气压缩机和 1 个油罐制造水下溢油浮射流。须指出的是,物理模拟实验重点关注水下溢油浮射流的输移扩散过

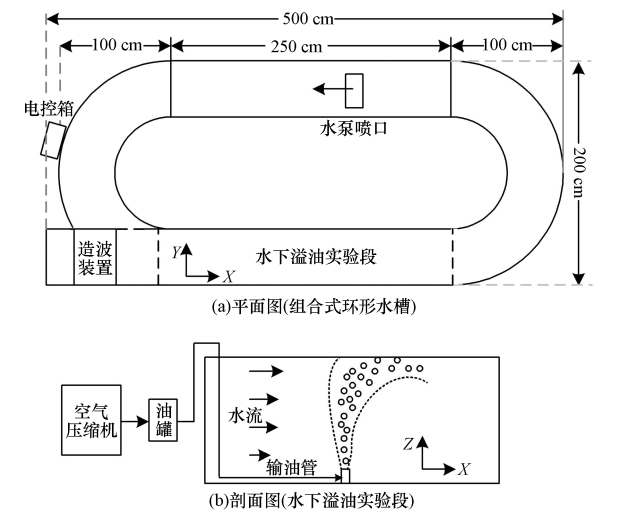


图 1 用于水下溢油浮射流物理模拟实验的组合式环形水槽

程,因此以水槽底部喷口中心为原点建立三维空间坐标系,其中 X 轴和 Y 轴分别为水平面的 E 向和 N 向(具体表示为污染物输移距离,单位为 m), Z 轴为垂直方向(具体表示为实验水深,单位为 m)。

1.1.2 水流环境模拟

真实海洋环境通常是非均匀流环境:1996 年挪威“DeepSpill”现场实验的结果表明水下 3 m、20 m、50 m 和 80 m 等不同深度呈不均匀状态,且随时间变化而动态变化,流速范围为 $0.03\sim0.10\text{ m/s}$ ^[4];我国学者对南海海流垂直结构的调查研究结果也展示了南海水下环境非均匀流的特点^[14-16]。因此,本研究结合组合式环形水槽的实际条件,通过调节水泵的功率和位置,制造 2 种不同平均速度的流动环境。在实验前,待水槽内的水流循环超过 15 min 且速度稳定后,利用超声波水流测定仪测定实验区域的水流速度,并记录 1 min 的时均速度值、最小值和最大值(表 1 和图 2),用于后续数值模拟分析。

表 1 组合式环形水槽实验段的不同水流环境条件			
水流环境	实验水深 (Z)/m	流速范围/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	垂向平均流速 (U_c)/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
静水	0.60	0	0
动水 1	0.60	2.5~3.9	3.48
动水 2	0.60	6.2~7.3	6.90

注:实验水深是指水槽底部喷口至水面的高度。

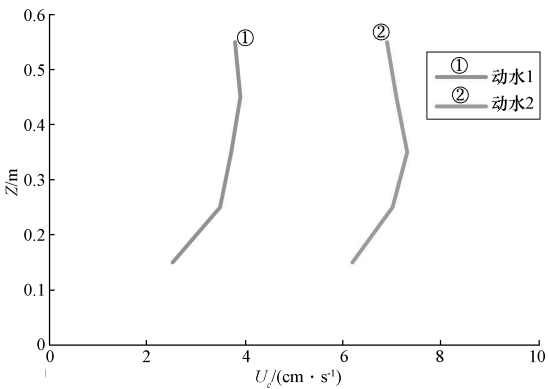


图 2 2 种非均匀流环境中不同深度的平均流速

1.1.3 实验条件和方案设计

参考国内外实验研究经验,结合本研究的物理实验装置实际情况,对模拟污染物、喷口直径、初始喷射速度和水流环境等实验条件参数进行分析与设计。

(1)模拟污染物。国内外多采用密度较小和黏度较低的原油开展浮射流实验:Brandvik 等^[8]采用密度为 839.3 kg/m^3 的 Oseberg 原油作为实验油品;臧晓刚等^[12]采用密度为 815 kg/m^3 的 0 号柴油作为实验油品。2010 年墨西哥湾“深水地平线”溢油事故发生后,挪威和美国学者为研究水下消油剂处理对溢油输移的影响,将原油和消油剂预混合后开展污染物浮射流实验研究^[8-9]。考虑到油品的获取难度,本研究选取大连港运输较多且密度较小和黏度较低的阿曼原油(20°C 时的密度为 872 kg/m^3)作为主要实验油品,并以阿曼原油与消油剂的混合物(剂油比为 $1:20$)作为水下浮射流实验的模拟污染物。为开展对比研究,选取淡水(添加蓝色或红色墨水作为示踪剂)作为模拟污染物。

(2)喷口直径。Brandvik 等^[8]开展的溢油浮射流系列实验的喷口直径为 $0.5\sim3.0\text{ mm}$,并在原油与消油剂混合物浮射流实验选取 1.5 mm 的喷口直径;臧晓刚等^[12]选取的实验喷口直径为 $2\sim3\text{ mm}$;钱国栋等^[13]选取的实验喷口直径为 $1\sim3\text{ mm}$ 。经综合比较,本研究选取 1.5 mm 和 2.0 mm 作为实验喷口直径。

(3)初始喷射速度和水流环境。主要通过前述

的组合式实验装置以及水泵和气泵等设备来调节和设定。

基于上述实验条件分析,制定水下溢油浮射流物理模拟实验方案(表 2)。

表 2 水下溢油浮射流物理模拟实验方案

实验序号	模拟污染物(P)($\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	喷口直径(d)/mm	初始喷射速度(U_j)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水流环境(U_c)/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	阿曼原油(872)	1.5	7.1	静水(0)
2			16.5	动水(3.48)
3	阿曼原油与消油剂混合物(878)	1.5	6.9	静水(0)
4			17.1	动水(3.48)
5	淡水(含示踪剂)(1 000)	1.5	9.4	静水(0)
6		2.0	8.9	静水(0)
7		2.0	10.4	动水(3.48)
8		2.0	11.1	动水(6.90)

注:阿曼原油与消油剂混合物的密度根据原油以及消油剂自身的密度和体积比例计算得到。

1.1.4 实验步骤和测定方法

实验开始:向水槽内注入淡水(温度为室温),使水深达到 0.65 m(喷口位于水槽底部高 5 cm 处,即喷口与水面的距离为 0.6 m);将配置好的模拟污染物(阿曼原油和淡水)添加至体积为 2 L 的“油罐”中;开启压缩气泵,通过调节管路的压力达到实验所需的压强,待压强稳定后打开待测溢油管道的开关,同时利用高清摄像机(分辨率为 $1\,920\times1\,080$ 像素,录像频率为 30 帧/s)摄录浮射流输移扩散的过程;污染物的流量和喷射速度根据模拟污染物的体积和持续泄漏时间计算确定。

实验结束:将实验过程视频的高清截图导入 Image-Pro Plus 软件,经过空间校正,标记浮射流左边界和右边界的主要拐点,并计算确定每个拐点的水平和垂直坐标;综合所有拐点的坐标,得到浮射流实验污染物输移轨迹和扩散范围的数据。

1.2 结果与讨论

静水和动水环境中原油(阿曼原油以及阿曼原油与消油剂混合物)和淡水(含示踪剂)浮射流输移扩散的实验结果如图 3 和图 4 所示。需要说明的是,污染物的输移扩散范围是根据处于相对稳定状态且边界容易识别的浮射流实验图像处理分析后确定的。

由图 3 和图 4 可以看出:①静水环境中,污染物浮射流基本沿着与喷口垂直的中心线向上运动;随

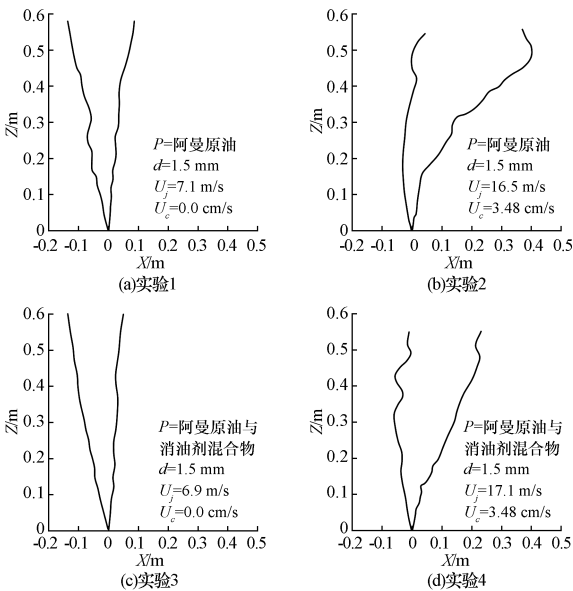


图 3 静水和动水环境中原油(阿曼原油与消油剂混合物)浮射流输移扩散的实验结果

着周围水体不断被卷吸进入浮射流,浮射流的垂直上升速度快速下降,同时其水平扩散范围逐渐变大。②动水环境中,由于初始喷射速度大于横向流速,泄漏初期的浮射流轨迹基本垂直向上;随着射流的浮升,周围水体被卷吸进入浮射流,浮射流中心轨迹逐渐弯曲;对比 2 种动水环境($U_c=3.48\text{ cm/s}$ 和 $U_c=6.90\text{ cm/s}$)中的淡水浮射流轨迹,横向水流速度越大,浮射流中心轨迹开始弯曲的高度越低,弯曲程度越明显。

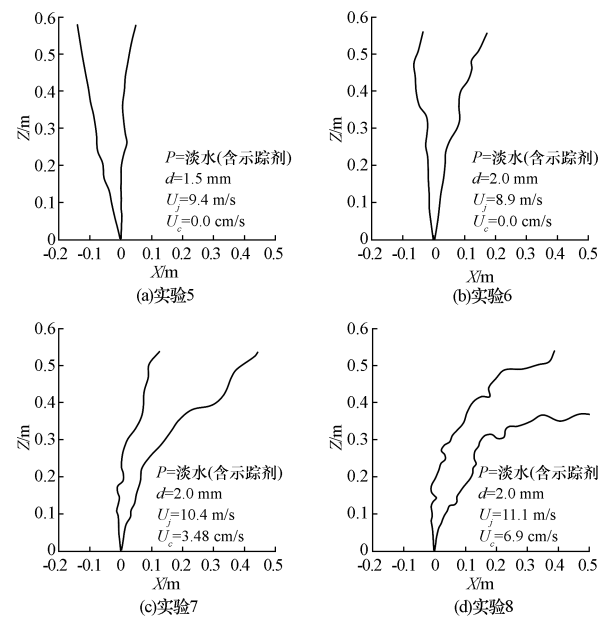


图 4 静水和动水环境中淡水(含示踪剂)浮射流输移扩散的实验结果

值得注意的是,在 $U_c = 3.48 \text{ cm/s}$ 的动水环境中,实验观测到的原油浮射流扩散范围比原油与消油剂混合物浮射流的大。这是因为原油自喷口喷射进入水体后破碎成为粒径更大的油滴,而粒径较大的油滴更易于脱离浮射流并浮升和扩散。此外,实验观测到的原油与消油剂混合物浮射流分散在水体中的油滴粒径明显更小,但受观测设备的限制,本研究未能对实验中油滴粒径的分布特征进行有效的定量分析。

2 数值模拟

2.1 水下溢油浮射流模型及其参数设置

本研究采用基于拉格朗日积分方法的水下溢油浮射流数值模型,模拟计算污染物输移轨迹和扩散范围。该模型将沿轨迹中心线的污染物视为一系列互不影响的控制单元体,每个控制单元体在水流环境中的运动则根据质量守恒、动量守恒和能量守恒等控制方程来计算确定。综合所有控制单元体的运动即可获得污染物的输移轨迹(图 5)。其中:每个控制单元体的厚度 $h = |\vec{V}| \Delta t$;质量 $m = \rho \pi b^2 h$; $\vec{V}$ 、 b 和 ρ 分别为控制单元体的速度矢量、半径和密度; Δt 为时间步长。

本研究仅给出数值模型的质量守恒方程和动量守恒方程,详细介绍可参见文献[17]和[18]。

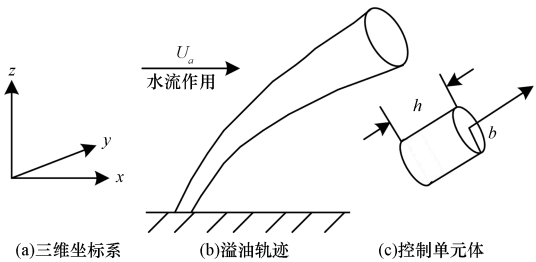


图 5 流动环境中水下溢油浮射扩散和数值模型

(1)质量方程。溢油在水下环境输移的过程中,周围水体的卷吸、湍流分散和溢油溶解等作用引起控制单元体质量的动态变化^[2]:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_a Q_e - \sum_i \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_d}{dt} \tag{1}$$

式中: ρ_a 为环境水体密度; Q_e 为卷吸作用引起的水流体积通量; dm_i/dt 为单位时间内溶解于水体的溢油质量损失; dm_d/dt 为单位时间内湍流扩散引起的溢油质量损失。

(2)动量方程。水下溢油污染物控制单元体在水体中的运动满足动量守恒^[2]:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{V}_a \frac{dm}{dt} + m \frac{\Delta\rho}{\rho} g \vec{k} - \rho 2bhC_D (|\vec{V}| - V'_a)^2 \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \tag{2}$$

式中: $\vec{V}$ 为控制单元体的输移速度矢量; $\vec{V}_a$ 为水流的速度矢量; $\Delta\rho$ 为水体与控制单元体的密度差,即 $\Delta\rho = \rho_a - \rho$; C_D 为拖曳系数; V'_a 为 $\vec{V}_a$ 在 x - y 水平面上的投影; $\vec{k}$ 为垂直方向 z 的单位矢量。

应用该数值模型,对前述水下溢油浮射流物理模拟实验开展数值模拟比较分析。具体的数值模拟参数如表 3 所示。

表 3 水下溢油浮射流数值模拟的参数设置

模拟参数	参数取值和说明
模拟污染物(P)	阿曼原油、阿曼原油与消油剂混合物、淡水(含示踪剂)(表 2)
环境水体密度(ρ_a)	淡水, $\rho_a = 1\,000 \text{ kg/m}^3$
浮射流初始半径(b)	0.75 mm 和 1.0 mm(对应的喷口直径分别为 1.5 mm 和 2.0 mm)
浮射流初始喷射速度($\vec{V}$)	8 个实验的 U_j 值(表 2)
时间步长(Δt)	0.001 s
非均匀流速($\vec{V}_a$)	实测平均流速(垂向分 5 层)(表 1 和图 2)

2.2 数值模拟结果与实验观测数据的比较

数值模拟结果与实验观测数据的比较如图 6 和图 7 所示。

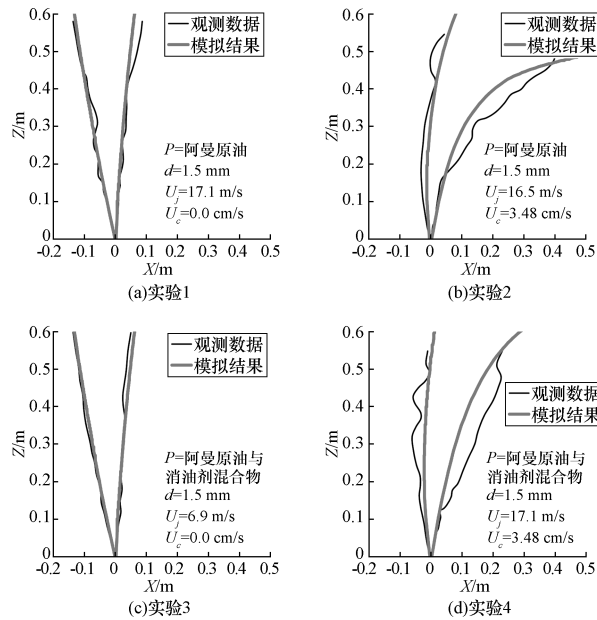


图 6 静水和动水环境中原油(阿曼原油与消油剂混合物)浮射流输移扩散数值模拟结果与实验观测数据的比较

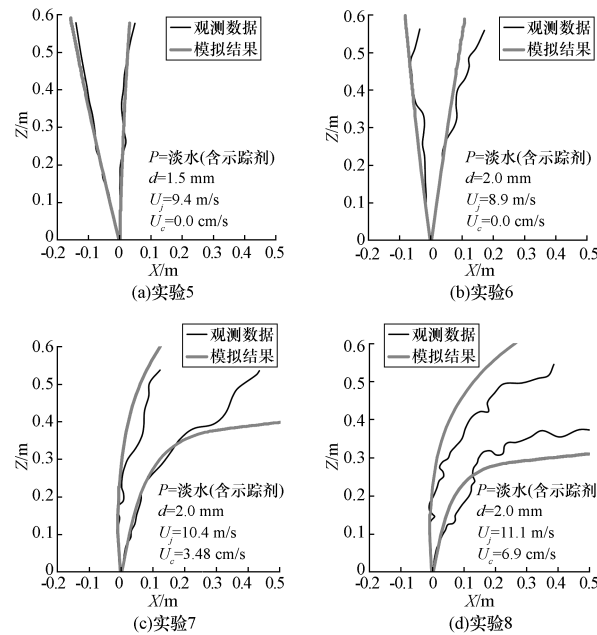


图 7 静水和动水环境中淡水(含示踪剂)浮射流输移扩散数值模拟结果与实验观测数据的比较

由图 6 和图 7 可以看出:无论是原油还是淡水,静水环境中的污染物浮射流输移轨迹和扩散范围的数值模拟结果与实验观测数据的吻合程度均较高;与静水环境相比,在平均速度为 3.48 cm/s 和 6.90 cm/s 的非均匀流动水环境中,污染物浮射流在初始射流动量占主导作用阶段(自喷口至其以上的 0.1 m 处)的输移轨迹与扩散范围基本吻合;随着非均匀流动水体被卷吸进入浮射流,尽管输移轨迹的数值模拟结果与实验观测数据总体吻合,但扩散范围存在一些差异。考虑到数值模型输入的环境流速是垂向 5 层实测流速的平均值而不是实时测定的分层流速等因素,本研究所采用的水下溢油浮射流模型总体上能够较好地模拟预测污染物浮射流的输移扩散趋势。

但须指出的是,由于实验过程中未能获取油滴粒径分布数据,更加精细化的溢油浮射扩散过程以及流动环境中大粒径油滴脱离浮射流后输移扩散过程尚未得到充分考虑。这也意味着现有水下溢油浮射流数值模型仍须结合更加精细的油滴粒径分布实验数据进一步验证和改进,以提高模拟预测结果的准确度。

3 结语

本研究尝试通过物理模拟实验和数值模拟分析相结合的方式,初步探析不同流动环境中水下溢油浮射流的输移扩散特征。开展的主要工作包括:应用自制的组合式环形水槽,以原油(阿曼原油与消油剂混合物)和淡水(含示踪剂)作为模拟污染物,开展静水和动水环境中水下浮射流的物理模拟实验;应用基于拉格朗日积分方法的数值模型,开展数值模拟并结合物理实验结果进行比较和分析。

由于实验装置和观测设备的限制,浮射流实验过程中非均匀流的实时流场以及油滴粒径的动态分布等参数未能有效获得,导致模型数值模拟与实验观测的污染物浮射流扩散范围存在一定的差异。但总体来说,本研究初步获得的物理模拟实验和数值模拟分析结果可为今后水下溢油物理实验和数值模型的改进研究提供有益参考。

参考文献

[1] FANNELØP T K, SJØEN K. Hydrodynamics of underwater

- blowouts[M].Trondheim:Ship Research Institute of Norway, Marine Technology Centre,1980.
- [2] YAPA P D,ZHENG L.Simulation of oil spills from under water accidents I:model development[J].Journal of Hydraulic Research,1997,35(5):673—687.
- [3] ZHENG L,YAPA P D.Simulation of oil spills from underwater accidents II:model verification[J].Journal of Hydraulic Research, 1998,36(1):673—688.
- [4] RYE H,BRANDVIK P J,STROM T.Subsurface blowouts;results from field experiments[J].Spill Science & Technology Bulletin,1997,4(4):239—256.
- [5] JOHANSEN Ø.Development and verification of deep-water blowout models [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47: 360—368.
- [6] SOCOLOFSKY S A,ADAMS E E.Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow [J]. Journal of Hydraulic Research,2002,40(6):661—672.
- [7] MASUTANI S M,ADAMS E E.Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills[R].Hawaii: Hawaii Natural Energy Institute, University of Hawaii,2001.
- [8] BRANDVIK P J,JOHANSEN Ø,LEIRVIK F,et al.Droplet breakup in subsurface oil releases-Part 1:experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection[J]. Marine Pollution Bulletin,2013,73:319—326.
- [9] ZHAO L,SHAFFER F,ROBINSON B,et al.Underwater oil jet:hydrodynamics and droplet size distribution[J].Chemical Engineering Journal,2016,299:292—303.
- [10] 王晶.海底管线溢油在水体中的运移扩散过程研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [11] 肖杰.海底管线微孔泄漏油滴尺寸与上升速度研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [12] 臧晓刚,张军,陈怀民,等.水下输油管微孔溢油的实验研究[J].海洋技术学报,2016,35(2):104—108.
- [13] 钱国栋,赵宇鹏,于顺.蓬莱 19-3 原油水下溢油的模拟实验[J].海洋环境科学,2016,35(6):901—907.
- [14] 邱章,方文东.南海北部春季海流的垂向变化[J].热带海洋学报,1999,18(4):32—39.
- [15] 杜岩,王东晓,陈荣裕,等.南海西边界 ADCP 观测海流的垂直结构[J].海洋工程,2004,22(2):31—38.
- [16] 王雪竹,李培良,张婷婷.南海中部深水海盆的潮流垂直结构[J].海洋学报,2009,31(1):20—27.
- [17] 廖国祥,高振会.水下溢油事故污染物输移扩散的数值模拟研究[J].海洋环境科学,2011,30(4):578—582.
- [18] 廖国祥,高振会,熊德琪.水下油气溢漏事故污染物输移预测模型[J].大连海事大学学报,2010(4):115—120.