

海上溢油下潜过程特征的实验考察*

严志宇 任杰 付红蕊 孙冰

(大连海事大学环境科学与工程学院)

摘 要 海上溢油行为的研究是预测其归宿、控制其危害的关键所在。由于目前对溢油下潜于水时所受多因素影响、经历多个子过程的综合效应不清,文章用挡板烧瓶模拟波浪,考察其行为特征。结果表明:波浪类型对下潜率影响最大,破碎波和规则波下油的下潜率差异可达 79.8%;上浮过程的影响可使得下潜率随时间出现最大值,随分散剂含量的增加有最大值。对比静置中下潜率的变化规律,可认为波浪通过夹带和破碎作用使油下潜,分散剂则增加了下潜稳定性。实验结果可对海面溢油下潜过程的预测提供理论依据和实验数据。

关键词 海上溢油;下潜特征;破碎波;分散剂

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2020.02.004

文章编号:1005-3158(2020)02-0016-04

0 引 言

随着现代化工业进程的加速,石油开采规模急剧扩大,大大促进了海上油运的迅速发展。不断发生的海上溢油事故使得石油成为海洋的主要污染物^[1]。研究溢油进入海洋环境的行为,对于确定预警方案和相应治理措施具有重要意义。海面油会下潜到水体中,其运动轨迹和归宿、对环境的影响会产生很大变化,因此对下潜油的形成条件、行为特性的研究非常迫切。

密度低于海水的溢油进入水体的下潜,是依靠波浪对油的夹带和破碎作用^[2],而化学分散剂通过降低油-水界面张力而增强油的破碎^[3-5]。目前对油在水体垂直分布的模型中,更多关注油滴粒径分布。这些研究反映了油性质(黏度、界面张力)对油滴尺寸的影响以及分散剂对油滴分散性的影响^[6-10]。但是大多数研究只是基于一个波浪在短时间作用的结果,是对单个因素单独建模,然后组合得出一个经验方程,如 Delvigne 和 Sweeney^[11]的建模方程。这样的模型不能很好地应用于自然海况。为解决这个问题,Reed^[12]将建模的范围扩大到考虑了黏度与表面张力的影响,通过引进韦伯数与雷诺数进行建模。Johansen^[13]提出对一个破碎波的整体过程与持续过程的研究,考虑了下潜后的再上浮过程。Li 等进一步考虑了动态黏度和惯性力等因素,引入 Ohnesorge 数进行建模,应用于表面破碎波和海底井喷的液滴

尺寸模型^[14-15]。

这些多因素、多过程的综合考虑使预测模型越来越复杂化。为提高预测准确度,应该对下潜机理及特征进行更深入研究和考察,使建立的模型既抓住主要矛盾,又使其形式简单,并具有较强的实用性和普适性。为此,本研究在前期工作的基础上,用挡板烧杯对不同类型的波浪进行模拟,考察溢油在波浪和分散剂这两个关键因素影响下的下潜规律,下潜规律主要从下潜率、下潜稳定性两个角度来分析。

1 实 验

本研究是用挡板烧瓶里人工海水和少量油、分散剂在振荡条件进行的。挡板烧瓶是国际上唯一的混合能量被实际校准的应用容器^[16],用这种小规模实验装置来模拟大规模大量油的情况,能够更好地实现条件控制,使操作标准化,且采集的样品能反映油在水体中的整体状态,能更清晰地了解各影响因素的关联。

实验原油样品为中东原油,室温 20℃ 黏度为 10.9 mm²/s,密度为 0.835 4 g/cm³,属于偏轻油质,易受波浪和分散剂影响,能较好反映其作用效果。所用分散剂为富肯 II 号。

将体积为 120 mL、盐度为 30‰ 的人工海水放入 150 mL 的挡板烧瓶中。取 100 μL 实验油轻轻地分配到水面的中心,等油膜扩展到黏度和油-水间表面张力达到亚平衡时,稳定 15 min 后再进行后续操

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1402301)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019329)资助。

严志宇,2001年毕业于大连海事大学轮机工程专业,博士,副教授,现在大连海事大学环境科学与工程学院从事海洋环境保护工作。通信地址:辽宁省大连市大连海事大学环境学院,116026。E-mail:yanzy@dlmu.edu.cn。

作^[17]。在这种统一的初始状态进行实验可使结果重复性好。再用微量移液枪加分散剂到油表面。DOR(分散剂与油的比例)分别为0, 1:25, 1:10。DOR 1:25是基于EPA方案^[18]、DOR 1:10是参考富肯II号分散剂的使用范围而确定的。

将挡板烧瓶放入30℃下的气浴恒温振荡器(中国常州金坛良友仪器有限公司, SHZ-B2)中。根据参考文献^[19]的条件, 振荡频率为125, 250 r/min, 分别模拟规则波和破碎波。在波浪作用时间分别为5, 30, 60, 120 min时, 取样测试油的下潜率, 其后静置0, 1, 5, 10 min时, 测试下潜稳定性。

取样时, 用移液管移取挡板烧瓶中30 mL的油水混合液体到125 mL的分液漏斗中, 用5 mL的正己烷萃取两次, 用紫外分光光度计(T6新世纪型紫外分光光度计)测试水体中油的含量。由下式计算下潜率。

$$DE(\%) = \frac{m_{wt}}{m} = \frac{m_{wt}}{\rho_{oil} V_{oil}} \times 100 \quad (1)$$

式中: 下潜率(DE)指在波浪作用下进入水柱中的油的质量占总油量的百分比; m_{wt} 为进入水中油的质量, g; ρ_{oil} 为油密度, g/cm³; V_{oil} 为加入油的总体积, mL。

2 结果与讨论

2.1 波浪对油下潜率的影响

在不同类型的波浪、不同DOR条件下, 中东原油下潜率测试的结果如图1所示。

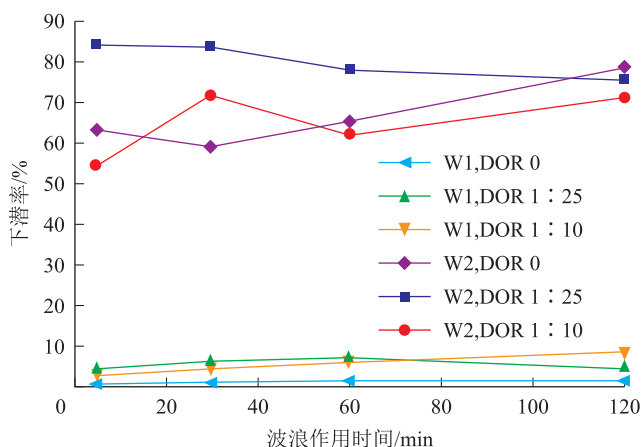


图1 不同条件下中东原油下潜率随时间的变化
(W1为规则波, W2为破碎波, 以下同)

从图1可看出, 相对于分散剂含量, 波浪类型的影响更大, 中东原油在规则波作用下其下潜率都小于破碎波作用结果。在DOR 1:25的条件下, 破碎波

比规则波作用下的下潜率最大高出79.8%。

一般情况, 油的下潜率随波浪作用时间增加而增加, 因为波浪作用有时间的累积效应。这在文献的模型计算中有所反映。但本实验中, 下潜率>60%时, 随波浪作用时间增长下潜率会下降。这说明在下潜的过程中同时存在上浮过程, 下潜量增加, 上浮也随之增加。也说明再上浮的油不易再下潜, 这对有分散剂的油更明显, 产生所谓的分散剂失效现象。

波浪对油的下潜作用和油密度小于海水而产生的上浮作用的对峙情况随时间而变化, 因而下潜率会出现最大值的情况。

2.2 分散剂对油下潜率的影响

从图1可看出, 在破碎波作用5 min时, DOR 1:25与DOR0的条件下, 油的下潜率差异为22%。相比之下, 规则波作用下的差异只有4%, 说明分散剂效果受波浪类型影响很大。其后, 可能因为分散剂部分失效及上浮作用等原因, 分散剂含量对下潜率的影响不明显。

本实验条件下, 破碎波、规则波下, 都是DOR 1:25时油的下潜率最大, 即下潜率和分散剂含量不是简单的单调递增关系。分析原因可能是随着分散剂增加, 下潜油增多导致上浮增强, 而上浮的油不易再下潜, 即产生了所谓分散剂失效的现象, 这与本研究的前期实验中观察到的情况一致。

2.3 油下潜的稳定性特征

真正下潜的油不是随波浪暂时翻滚于水面下, 而是能够在一定时间内悬停在水体中, 为此, 通过对波浪作用120 min后再静置取样分析, 研究了油的下潜稳定性, 结果如图2所示。

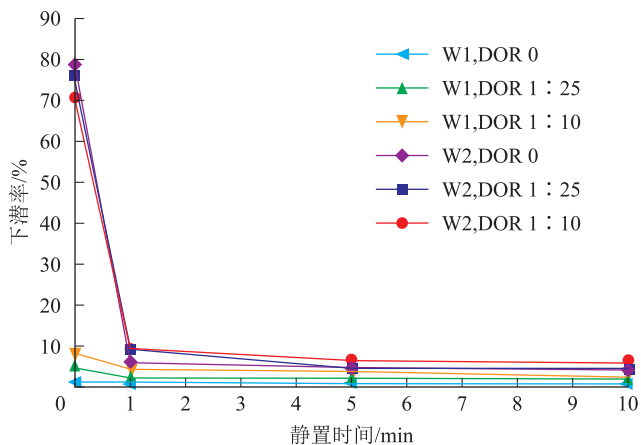


图2 波浪作用120 min后油下潜率随静置时间的变化

通过图 2 可看出,原油在静置中油的下潜率快速下降,在静置 1 min 时就基本减小到稳定值。没有在 1 min 之内取值,是因为振荡后的水体尚未完全静止。1~10 min 变化不大,说明此时的下潜率反映的是稳定下潜于水体的油。为此,对静置 1 min 后油的下潜率,见图 3,进行分析。

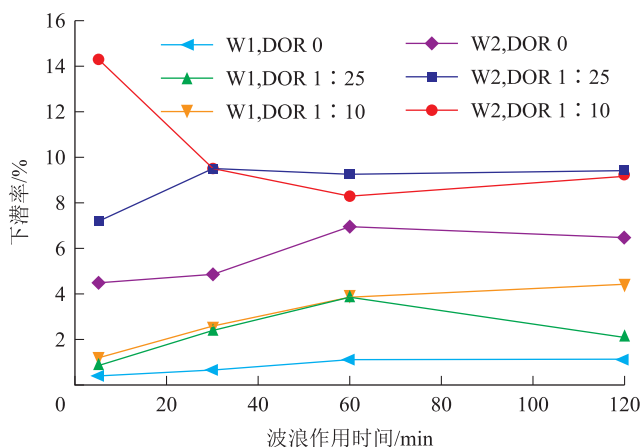


图 3 波浪在不同条件作用后静置 1 min 时油的下潜率

从图 3 可看出,稳定 1 min 后油的下潜率也是受波浪类型影响最大。DOR 1:10、波浪作用 5 min 时,破碎波作用下的下潜率比规则波的高出 13.1%,而分散剂带来的最大差异为 9.8%。

比较图 1 和图 3 可看出,分散剂含量对油的下潜率和稳定 1 min 后的下潜率的影响规律不同,稳定下潜率与 DOR 基本为单调递增关系。这说明波浪和分散剂对稳定下潜率的作用效果不同:波浪增加油的下潜率,但受上浮过程影响,分散剂却是增加下潜油的稳定性。

3 机理探讨

从实验结果可以看出油的下潜率随时间变化是复杂的:无分散剂的油下潜率随时间增加,可看出波浪作用有随时间累积的特点;从下潜率随波浪作用时间的增加会出现下降的情况,可看出上浮过程的凸显,以及油的再下潜性会下降的特征;在受波浪时间累积效应小、上浮过程影响小的破碎波作用初始阶段,可分析分散剂含量的影响,并能发现分散剂在波浪作用一段时间后效果会降低的现象。

上浮过程的凸显发生在存在分散剂、下潜率较大(>60%)时,此时,随波浪作用时间增加,下潜率下降,且降至无分散剂之下(见图 1 中破碎波的情况)。这说明上浮油的再下潜性降低,可能是多组分的油中易分散组分下潜后不易上浮,上浮的都是不易下潜的

组分。分散剂也可能在下潜中部分留在水体,与上浮油分离,表现出分散效果随时间下降的特点。

波浪通过夹带及破碎,使漂浮油进入水体,易上浮。所以说波浪更多地是增加下潜的量,而分散剂却增加破碎的油,小油滴的增加使稳定的下潜率增加。这可解释分散剂含量对下潜率有最佳值,但对静置 1 min 后的稳定下潜率却基本有单调递增关系。

本文用挡板烧瓶进行海面溢油下潜过程的模拟,无论是波浪还是油膜状态,都能得到很好的控制,易实现标准化。和在风化槽中实验模式^[20]不同,本实验对水中下潜油进行整体分析,没有考虑油在水体中深度分布,而是将重心放在漂浮油离开水面进入水相的过程,并非文献中将其和在水体中垂直运动一起研究,这样更有助于下潜机理分析和模型的建立。本实验用静置一段时间后油的下潜率代替文献中粒径分布来反映稳定下潜于水体中油的状态,有助于实验数据和实际海况进行有效关联。这种将小型的、标准化的测试结果反映了多因素、多过程的综合下潜效果,可作为海上溢油下潜的预测模型的输入,使实验测试和数学计算相结合建立一套实用且简化的预测模型成为可能。

4 结论

在不同类型的波浪作用下、不同 DOR 条件下,用振荡的挡板烧瓶研究了海上溢油下潜于水体的过程特征,结果发现:

1)波浪类型是油下潜的关键因素,破碎波比规则波作用下的下潜率最大高 79.8%;分散剂通过与破碎波耦合,增加下潜油的稳定性;下潜油上浮过程中可能发生组分分异,使上浮油下潜性下降,表现为分散剂随时间有所失效。

2)本研究采用的小型、易标准化的实验手段可用于溢油下潜过程的预测,简化对多因素、多过程的综合效果的计算,使建立一个更实用和简化的海面溢油下潜过程预测模型成为可能。

参考文献

- [1] 刘月. 溢油沉潜特征的实验研究[D]. 大连:大连海事大学, 2013:1-65.
- [2] ZEINSTRA-HELFRICH M, KOOPS W, MURK A J. How oil properties and layer thickness determine the entrainment of spilled surface oil[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 110(1):184-193.

- [3] LESSARD R R, DEMARCO G. The significance of oil spill dispersants[J]. Spill science & technology bulletin, 2000, 6(1): 59-68.
- [4] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Oil spill dispersants: efficacy and effects[M]. Washington D C: The National Academies, 2005.
- [5] CHAPMAN H, PURNELL K, LAW R J, et al. The use of chemical dispersants to combat oil spills at sea: A review of practice and research needs in Europe[J]. Marine pollution bulletin, 2007, 54(7): 827-838.
- [6] ZEINSTRÄ-HELFRICH M, KOOPS W, DIJKSTRA K, et al. Quantification of the effect of oil layer thickness on entrainment of surface oil[J]. Marine pollution bulletin, 2015, 96(1/2): 401-409.
- [7] DALING P S, LEIRVIK F, ALMAS I K, et al. Surface weathering and dispersibility of MC252 crude oil[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 87(1/2): 300-310.
- [8] TRUDEL K, BELORE R C, MULLIN J V, et al. Oil viscosity limitation on dispersibility of crude oil under simulated at-sea conditions in a large wave tank[J]. Marine pollution bulletin, 2010, 60(9): 1606-1614.
- [9] LI Z, LEE K, KING T L, et al. Oil droplet size distribution as a function of energy dissipation rate in an experimental wave tank[C]. Int oil spill Conf. 2008: 621-626.
- [10] LI Z, LEE K, KING T, et al. Assessment of chemical dispersant effectiveness in a wave tank under regular non-breaking and breaking wave conditions[J]. Marine pollution bulletin, 2008, 56(5): 903-912.
- [11] DELVIGNE G A L, SWEENEY C E. Natural dispersion of oil[J]. Oil & chemical pollution, 1988, 4(4): 281-310.
- [12] REED M, JOHANSEN Ø, LEIRVIK F, et al. Numerical algorithm to compute the effects of breaking wave on surface oil spilled at sea[R]. SINTEF, Trondheim, Norway, 2009.
- [13] JOHANSEN Ø, REED M, BODSBERG N R. Natural dispersion revisited[J]. Marine pollution bulletin[J]. 2015, 93(1/2): 20-26.
- [14] LI Z, SPAULDING M, FRENCH MCCAY D, et al. Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and sub-sea blowout releases considering dispersant effects[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 114(1): 247-257.
- [15] LI Z, SPAULDING M L, FRENCH MCCAY D. An algorithm for modeling entrainment and naturally and chemically dispersed oil droplet size distribution under surface breaking wave conditions[J]. Marine pollution bulletin, 2017, 119(1): 145-152.
- [16] VENOSA A D, HOLDER E L. Determining the dispersibility of South Louisiana crude oil by eight oil dispersant products listed on the NCP product schedule[J]. Marine pollution bulletin, 2013, 66(1/2): 73-77.
- [17] PAN Z, ZHAO L, BOUFADEL M C, et al. Impact of mixing time and energy on the dispersion effectiveness and droplets size of oil[J]. Chemosphere, 2016, 166: 246-254.
- [18] VENOSA A, HOLDER E. Laboratory-scale testing of dispersant effectiveness of 20 oils using the baffled flask test[S]. US Environmental Protection Agency, 2011.
- [19] ZHAO L, WANG B, ARMENANTE P M, et al. Characterization of turbulent properties in the EPA baffled flask for dispersion effectiveness testing[J]. Journal of environmental engineering, 2016, 142(1).
- [20] LI Z, LEE K, KING T, et al. Effects of temperature and wave conditions on chemical dispersion efficacy of heavy fuel oil in an experimental flow-through wave tank[J]. Marine pollution bulletin, 2010, 60(9): 1550-1559.

(收稿日期 2019-04-15)

(编辑 王蕊)

环境保护 从我做起