

波浪作用下海上溢油潜入水体的动力学研究进展*

赵兴 付红蕊 玛莎 严志宇

(大连海事大学环境科学与工程学院)

摘要 海上溢油经过风化和海洋动力等多重作用下,会发生沉潜,进而异地上浮,其海上行为和环境危害已引起国内和国际上的关注。文章介绍了波浪作用下溢油潜入水体的不同过程,其包括油滴的夹带、分散、聚集和上浮;并对各国学者不同规模的研究方法、研究成果及近年来溢油潜浮动力学模型的推进情况进行介绍。最后,根据潜浮动力学模型建模要求,对当前研究进行评述,并提出建议。

关键词 溢油; 下潜; 波浪作用; 潜浮动力学; 模型

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.05.002

文章编号: 1005-3158(2018)05-0005-04

0 引言

随着现代化工业的壮大,石油开采愈加频繁,导致海上石油的勘探、开采与船舶运输溢油事故随之增加,石油已然成为海洋的主要污染物。表面溢油经过风化和海洋动力等多重作用下,部分溢油会进入水中或沉入海底发生沉潜,进而异地上浮,这部分溢油行为尽管在海面上不可见,但是却造成极大的生态灾难和经济损失,海洋石油污染已引起了各国的高度关注。

国际上早在上世纪60~70年代就开始关注潜浮油行为,最早记录潜浮油现象的是1967年发生在英吉利海峡的“托雷卡翁”号油轮溢油事故。研究方法从早期的现场调查,到现在对潜浮机理和动力学研究的部分实验室模拟研究,以及对不同动力学过程的建模模型,使得对潜浮油的理论上探究和实践应急处理上都得到了很大的突破。

我国对潜浮油的认识较晚,基本始于本世纪。从2006年,河北海事局开始关注潜浮油问题,并组织调查,掌握了我国关于潜浮油第一手资料。我国学者对潜浮行为关注较少,仅有少部分学者对溢油吸附过程做了相关研究,如赵云英发现季节性的凝聚和周期性的侵蚀也可以促使溢油发生吸附沉淀^[1]。我国在潜浮油研究方面与国际存在较大差距。

随着我国潜浮油再上岸污染事故的增加,造成了巨大的经济损失,所以对潜浮油的动力学研究分析十分迫切。同时,由于潜浮的油不易被现有的溢油观测方法观测到,如卫星遥感,飞机遥感等^[2],导致潜浮油

的轨迹预测,溯源问题以及污染控制处理问题的解决也造成了很大难度。本文拟对国内外海上溢油潜入水体的动力学研究进展进行综述,旨在为溢油潜浮过程的预测和危害评估提供信息、研究方法和建模建议。

1 波浪作用下油滴的潜浮过程

除自身密度外,海上溢油的潜浮行为主要由波浪作用导致,其原理是初始油膜在破碎波作用下会经历四个不同状态,分别是夹带、分散、聚集与上浮,这也代表着潜浮的不同过程。

1.1 油滴的夹带

在破碎波条件下,铺展的油膜被夹带进入水体并分裂成较大直径范围的液滴。Delvigne和Sweeney等^[3]认为影响夹带的主要因素为油膜面积,油层厚度,波浪的能量耗散。近年来,防止油面破裂的关键机制已被确定为界面张力(IFT)和黏性效应。同时,确定了溢油的黏度与风化时间成正比。

在Helfrich等^[4]的研究中给出夹带的过程是由于两种机制造成的:①在波峰的冲击下夹带包裹进入水柱中的油;②随后的界面剪切力拖曳油滴从油膜分离进入水柱。

1.2 油滴的分散

油滴的分散主要分为两个方面,包括自然分散和化学分散^[5]。

化学分散即使用化学分散剂降低油水界面张力来加速油的分散,并且当油滴进入水柱中时,降低油

*基金项目:国家重点研发计划子课题(2016YFC1402301);国家社科基金重大项目(17ZDA172)。

赵兴,2016年毕业于辽宁工程技术大学环境科学专业,现在大连海事大学环境科学与工程学院从事波浪作用下潜浮油的动力学研究。通信地址:辽宁省大连市甘井子区凌水路一号大连海事大学环工楼,116026

液滴的碰撞速率^[6-8]。化学分散可以形成比自然分散更小的油滴,一般低于 $80\ \mu\text{m}$ ^[9]。Li 等^[10]通过波浪槽进行分散剂分散效应的研究发现波浪的能量强度对分散剂的分散效果起到促进作用,并且建立了能量耗散率与分散剂效能的定量关系。

自然分散对溢油分散的作用是主要的。自然分散的出现即海上破碎波的形成。Hanifeh 等^[11]对溢油的垂直分散过程的研究给出在溢油发生后,水体中任何一点的油浓度先增加到最大值然后减小,呈现一个抛物线的趋势。Pan 等^[12]在研究中给出波浪的混合能量与混合时间对溢油分散的影响。

1.3 油滴的聚集

油滴发生重新聚集主要是内在抵消力的平衡,其主要依赖于油的黏度特征。液滴聚结动力学依赖于碰撞频率(与剪切和微分表面/沉降速度成比例)和碰撞效果,这是由液滴表面热力学性质决定的^[10]。

当破碎波分散油膜形成分散相体积分数(浓度)较高时,碰撞频率和碰撞效果显著增加,更容易发生油的聚集。液滴碰撞的原因是由于它们之间的相对运动。此外,不同直径的液滴具有不同的上升速度,当液滴大小不一、上升速度不一致时会导致液滴碰撞。所以,液滴碰撞可以分为两种,分别是湍流碰撞和浮力碰撞^[13]。

1.4 油滴的上浮

液滴的上升速度取决于液滴的大小,由于其他因素(形状)与液滴大小非线性非单调相关^[13]。Zheng 和 Yapa^[14]引入了综合公式来计算浮力。公式基于三个方案提出:球形形状(小),椭圆形(中)和球形帽(大)。这些浮力速度公式已经通过实验数据验证,并被证明对油滴和气泡有效。

油滴的再上浮是考虑到了油滴与海水中的悬浮物的吸附所引起的。分散的油滴在下潜或者上浮的过程中,与悬浮颗粒物结合在一起,形成密度大于水的聚集体,在合适的温度、水力和环境条件下可能发生再次上浮,露出水面。NOAA^[15]在报告中关于1994年“Morris J Berman”事故描述到,每天可以观测到部分潜浮油再浮起。

2 溢油潜入水体的研究方法

通过多年来多位学者对海洋石油自然分散的研究表明,当暴露于破碎波时油膜倾向于作为液滴分散到水柱中^[16-21]。然而,在文献中提供的大部分 DSD 的实验数据都是定性的,并且是通过简化的实验技术模拟重现海洋的波浪获得的^[22]。这些技术包括挡板

烧瓶或实验室其他烧瓶,波浪槽实验和插入式喷射器^[23-27]。

实验室小型台式模拟挡板烧瓶法,有较好的再现性与可重复性,并且是唯一的混合能量可被实际校准的容器。大型模拟波浪槽法,能更接近真实的模拟自然海浪,并且可以持续长时间,重复多次实验得到可靠数据,其中以美国 Ohmsett 水槽最为典型。插入式射流造波法能有效的模拟单一破碎波对油膜的夹带破碎情况。以上三种方法是国际上得到广泛应用。

Pan 等在研究中利用挡板烧瓶实验,给出混合能量与混合时间对溢油分散的影响。同时,首次引入了预测平均液滴尺寸的建模方法,初步阐明了液滴尺寸破裂机理。

Li 等进行了一系列波浪槽实验,以确定化学分散剂作为波能消散函数的油分散效果。发现不同分散剂在不同的波浪条件下对溢油有效性的影响。

Reed 等^[25-26]在破碎波的条件对不同种类、不同风化条件的油进行了一系列实验来测量石油 DSD 的变化。同时对实验进行改进,使用一种插入式射流方法来代替由波浪产生的湍流。

Helfrich 等使用类似 Reed 等的喷射机构研究油层厚度对油品夹带和 DSD 的影响。研究发现,油夹带和溢油的分散是两个独立的过程,应该被溢油动力学模型所考虑。

3 潜浮动力学模型建立进展

建立准确有效的模型,来预测潜浮油的运动轨迹以及对其溯源是对潜浮油污染控制与治理有至关重要的意义。

模型的建立主要是针对油液滴不同的各个运动状态如夹带、分散、聚集、上浮,分为不同的子过程进行模拟。模型的模拟自 20 世纪 80 年代初以来,对潜浮油的实验研究和模式开发一直在进行中,在 1983 年 Huang 的溢油模型的综述中,给出了对自然分散过程启发性的解释:破碎波状态下的油滴分散进入水柱中,就像“油雨”。分散速率是油膜厚度,油-水界面张力,海洋状态以及破碎波覆盖率等因素影响的函数。

MervFingas^[28]在文章中对不同年代的不同溢油自然分散模型进行了对比并提出以下结论:①所预测的自然分散是一个暂时的现象,存在瞬时性缺点,油滴在水柱中的持久性未被测量。②Audunson 方程过度预测自然分散,尤其是在低海况或风速的情况下。③Delvigne 和 Mackay 模型达到几乎类似的结论,但

是 Mackay 模型具有较少的输入因子,且没有风速的阈值。④在三个模型中,许多常数似乎是任意的,且在某些情况下是不必要的。⑤仅 Delvigne 的模型与实验数据有直接的相关性,其他模型都是构造的。⑥模型没有考虑合适的输入因素,例如 Audunson 模型不考虑任何油类的性质,也不考虑油滴尺寸,只考虑风速。

模型建立通过不断地完善改进,经考虑的输入因素越来越全面。其中,为了考虑解决分散相黏度因素,在分散剂处理产生的低油水界面张力的情况下, Johansen 和 Brandvik 等^[29-30]在研究中确定了两种破碎状态,一种受界面张力限制,一种受黏度限制。在前一种状态中,发现特征液滴与韦伯型无量纲数相关,而在后一种情况下,发现与雷诺数相关,并给出改进的 Weber 数模型。Johansen 等^[31]在文章中将油性界面张力(IFT)加入建模公式中,并与实验数据拟合得到良好一致性,明显改善了 Delvigne 和 Sweeney 的公式。同时提醒由于缺乏关于适用分散剂处理油的波诱导破碎实验数据,不建议将含有分散剂的实验试用此模型。

Pan 等^[12]考虑波浪的混合时间和混合能量对油分散与液滴尺寸的影响,基于 Hinze 和 Calabrese 等^[32-33]的韦伯数理论提出了预测平均液滴尺寸的建模方法。作者给出提醒低黏度和高黏度油以及有和没有分散剂的情况都有预期,当液滴尺寸分布演变时,高黏度的作用尚未得到彻底研究。

Li 等^[34]给出了考虑到分散效应,应用于表面破碎波和海底井喷的液滴尺寸模型。模型基于破坏性和恢复力的无量纲分析,明确地解决了分散剂应用引起的分散相黏度的影响,并基于瑞利泰勒不稳定性约束了最大稳定液滴尺寸。同时,在另一篇文章^[35]中给出了一种表面油夹带模型和液滴大小模型来估计表面破碎波下的油通量的算法。两个方程都用无量纲 Weber 数(We)和 Ohnesorge 数(Oh)来表示。与 Delvigne 和 Sweeney 模型相比较,新模型的夹带速率随风速增加的速度要快得多,并且在表面水层形成稳定液滴尺寸分布(液滴尺寸 $\approx 50 \mu\text{m}$)。

4 结论与展望

由于受油特性、观测困难以及实验室模拟波浪误差等因素的影响,导致潜浮油动力学研究的进程较慢,并对建立准确的潜浮动力学模型带来了很大的困难。

在实验手段上应该向真实有效的模拟自然海浪以及实验本身降低油挂壁,不均匀油滴粒径计算等误

差的方向努力。可以选择小范围可控的真实海况环境下进行潜浮油实验来降低自然因素对实验结果的影响。

在模型建立因素的考虑上大部分的研究都是定性的并且没有考虑波浪作用的能量累积阈值,波浪作用的最佳时限,波浪结合分散剂的阈值影响,以及其他的一些因素与波浪结合共同影响溢油下潜的特征,这对模型模拟准确性的提升以及模型模拟状态阶段的推进有重要的意义。

对下一步模型建立的研究方向应该是综合考虑波浪与其他作用因素对溢油下潜的影响。如波浪联合分散剂的阈值研究以及作用时间的最佳时限的片段研究,来推进相对应的模型修改,加深对溢油下潜动力学分析的研究,提升对现实海况下潜浮油模型模拟的准确性。

参考文献

- [1] 杨庆霄,赵云英,韩见波.海上溢油在破碎波作用下的乳化作用[J].海洋环境科学,1997,16(2):3-8.
- [2] 尹奇志,初秀民,孙星,等.船舶溢油监测方法的应用现状及发展趋势[J].船海工程,2010,39(5):246-250.
- [3] DELVIGNE G A L, SWEENEY C E. Natural dispersion of oil[J]. Oil & chemical pollution, 1988, 4(4):281-310.
- [4] ZEINSTRACH-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.
- [5] PAPADIMITRAKIS I, PSALTAKI M, MARKATOS N. 3-D oil spill modelling. Natural dispersion and the spreading of oil-water emulsions in the water column[J]. Global nest journal, 2011, 13(4):325-338.
- [6] LESSARD R R, DEMARCO G. The significance of oil spill dispersants[J]. Spill science & technology bulletin, 2000, 6(1):59-68.
- [7] COUNCIL N R. Oil spill dispersants: efficacy and effects [C]. The national academies press 2005.
- [8] 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.
- [9] ZEINSTRACH-HELFRICH M, KOOPS W, MURK A J. The NET effect of dispersants-a critical review of testing and modelling of surface oil dispersion[J]. Marine pollution bulletin, 2015, 100(1):102-111.
- [10] LI Z K, LEE K, KING T, et al. Evaluating chemical dispersant efficacy in an experimental wave tank: 1. Dispersant effectiveness as a function of energy dissipation rate

- [J]. Environmental engineering science, 2009, 26 (6): 1139-1148.
- [11] IMANIAN H, KOLAHDOOZAN M, AMIR R, et al. Vertical dispersion process of oil Spills[C]// Asia-Pacific conference on information technology & ocean Engineering, 2011.
- [12] 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, 2017, 166: 246-254.
- [13] NISSANKA I D, YAPA P D. Oil slicks on water surface: Breakup, coalescence, and droplet formation under breaking waves[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 114 (1): 480-493.
- [14] ZHENG L. Buoyant velocity of spherical and non-spherical bubbles/droplets[J]. Journal of hydraulic engineering, 2000, 126(11): 852-854.
- [15] BERMAN, BARGE MORRIS J. NOAA's scientific response[R]. HAZMAT report 95-10. 1995:1-72.
- [16] DALING P, BRANDVIK J. A study of the formation and stability of water-in-Oil emulsions [C]. Proceedings of the tenth Arctic and marine oil spill program technical seminar, Edmonton, Alberta. Environment Canada, Ottawa, 1988.
- [17] LIN J T, GADELHAK M, LIU H T. A study to conduct experiments concerning turbulent dispersion of oil slicks [C]. 1978.
- [18] MING L, GARRETT C. The relationship between oil droplet size and upper ocean turbulence[J]. Marine pollution bulletin, 1998, 36(12): 961-970.
- [19] TL KING. Oil droplet size distribution as a function of energy dissipation rate in an experimental wave tank[C]. International oil spill conference. 2008.
- [20] 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.
- [21] ZHI CHEN, CHE SHEN ZHAN, KENNETH LEE. Formation and vertical mixing of oil droplets resulting from oil slick under breaking waves—a modeling study [J]. Environmental forensics, 2009, 10(4): 347-353.
- [22] SHAW J M. A microscopic view of oil slick break-up and emulsion formation in breaking waves[J]. Spill science & technology bulletin, 2003, 8(5): 491-501.
- [23] KAKU V J, BOUFADEL M C, ASCE M, et al. Evaluation of mixing energy in laboratory flasks used for dispersant effectiveness testing[J]. Journal of environmental engineering, 2006, 132(1): 93-101.
- [24] LI Z, LEE K, KEPKAY P, et al. Monitoring dispersed oil droplet size distribution at the gulf of Mexico deepwater horizon spill site[C]// International oil spill conference, 2011.
- [25] REED M, JOHANSEN Ø, LEIRVIK F. Natural dispersion of heavy oil products and weathered crude oils[C]. Presented at the interspill conference, 2009.
- [26] REED M, JOHANSEN Ø, LEIRVIK F, et al. Numerical algorithm to compute the effects of breaking wave on surface oil spilled at sea [C]. Sintef, trondheim, Norway, 2009.
- [27] ZEINSTRACHELFRICH 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.
- [28] FINGAS M. A review of natural dispersion models[C]// Amop technical seminar on environmental contamination and response, 2014.
- [29] JOHANSEN Ø, BRABDVIK P J, FAROOQ U. Droplet breakup in subsea oil releases—part 2: predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants[J]. Marine pollution bulletin, 2013, 73(1): 327-335.
- [30] JOHAN B P, UMER F, JOHN D E. Subsurface oil releases—experimental study of droplet size distributions phase 2[J]. Rivista di biologia, 2015(54): 235-250.
- [31] JOHANSEN Ø, REED M, BODSBERG N R. Natural dispersion revisited[J]. Marine pollution bulletin, 2015, 93(1/2): 20-26.
- [32] HINZE J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes[J]. Aiche journal, 2010, 1(3): 289-295.
- [33] CALABRESE R V, CHANG T P K, DANG P T. Drop breakup in turbulent stirred-tank contactors. Part I: Effect of dispersed-phase viscosity [J]. Aiche journal, 2010, 32(4): 657-666.
- [34] 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 subsea blowout releases considering dispersant effects[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 114(1): 247-257.
- [35] LI Z, SPAULDING ML, 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.

(收稿日期 2018-07-31)

(编辑 王蕊)