

波浪作用下海上溢油潜浮于水的机理研究进展

付红蕊, 赵 兴, 玛 莎, 严志宇

(大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 从单油滴角度对波浪作用下漂浮溢油的入水过程(夹带、油滴的形成)、演变过程(油滴的变形、破碎和聚并)和上浮过程的研究现状进行综述, 介绍了溢油及相关领域的研究手段和实验方法, 总结了海上溢油潜浮于水的行为机理及分布规律, 并基于实验室和溢油现场的研究成果提出进一步需要探究的问题, 为海上溢油污染的应急决策、追踪预测和损害评估等方面提供思路和借鉴。

关键词: 溢油污染; 波浪作用; 油滴尺寸; 夹带; 油滴破碎与聚并

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)02-0091-06

DOI: 10.11759/hyxx20180804001

深海石油勘探规模的不断扩大使得溢油事故在石油开采和运输过程中经常发生, 溢油污染严重危害海洋中动植物及其他资源, 威胁近岸陆域生态环境, 影响人类财产安全^[1-4]。学者通过现场观测、实验室研究以及开发溢油模型和模拟系统来预测油的轨迹^[5-6], 理解和量化溢油的海上运动^[7], 在溢油事故的防范以及应急救援方面作出了大量贡献^[8]。然而溢油污染范围大, 持续时间长, 处理后残留溢油可能发生沉潜行为, 受温度、风、海浪等自然条件和人为因素的综合作用影响, 经过不确定时间的迁移和演化在合适的条件下会再次上浮。

由于沉潜后再上浮的油更不易追踪、预测和治理, 因此研究漂浮溢油在波浪作用下潜浮于水的机理对于掌握其分布规律以及行为归宿十分关键。本文将从油滴入水过程、油滴在水体中的演变过程以及油滴的上浮过程 3 个方面对波浪作用下溢油下潜、上浮行为机理进行综述, 包括夹带、变形、破碎、聚并、上浮等, 为海上溢油污染的应急决策、追踪预测和损害评估等方面提供思路和借鉴。

1 油滴入水过程

海上漂浮溢油主要通过分散进入水体, 包括两个主要过程, 即夹带并分解成液滴。

1.1 夹带

波浪对溢油的作用主要表现为波浪扰动(尤其破碎波)和波至余流。油滴入水过程中波浪两种作用机制: 一是波峰冲击使油进入水体和随后的界面剪切拖曳表面油/水进入水体; 二是油滴的初始向下运动

受尾流和破碎波引起的湍流的影响^[9]。夹带是在波浪作用下, 溢油从漂浮状态到浸没状态的一个过渡。通过现场试验可实时监测、采样收集溢油现场周围水体的石油粒子信息来研究波浪作用下溢油夹带过程及行为变化^[10], 但实际海况复杂, 难以观测到单液滴或液滴群的潜浮状态, 学者们大多在实验室中通过简化的实验手段来模拟波浪的作用过程, 有小规模试验如旋转烧瓶试验和挡板烧瓶试验^[11], 可以很好地控制参数的影响, 此外还有在台式设备中通过射流、搅拌、振荡、拍打等不同方式造波来模拟波浪的产生而进行的大中型规模试验^[12-15]。

波浪将油夹带到上部水体中, 夹带的量(体积)取决于油类型、油层厚度以及海况, 油进入到水体中的深度随着夹带期间波高的增加而变化^[16]。Zeinstra-Helfich 等^[17]研究油黏度、油层厚度和分散剂对夹带过程的影响时发现, 夹带非常黏稠的油会产生临时浸没在水体中的“油片”或“油斑”, 高黏度油(高于 5 Pa·s)将阻碍夹带过程, 通过加分散剂(化学分散)可以改变漂浮溢油的界面张力进而促进自然分散过程。但大多数条件下, 夹带的量与油层厚度呈线性增加的

收稿日期: 2018-08-04; 修回日期: 2018-10-15

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)

[Foundation: National Key Research and Development Plan Sub-Topic, No. 2016YFC1402301; National Social Science Fund Major Project, No. 17ZDA172]

作者简介: 付红蕊(1995-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 研究方向为波浪作用下溢油潜浮机理, 电话: 18342292407, E-mail: 806835298@qq.com; 严志宇, 通信作者, 电话: 0411-84724362, E-mail: 120236122@qq.com

关系,受波高的轻微影响,而基本上与油类型和分散剂的使用无关。此外,Zeinstra-Helfich 等^[9]在实验室中使用喷射装置模拟波浪研究射流的不同阶段导致的不同油层夹带状态,并用高速摄像机记录油在水下的夹带过程,起初的约 0.1 s 会夹带空气和部分油产生“气袋”,射流开始运动气袋破裂,油被拖入射流向运动形成 0.15 s 的稳定阶段,射流继续运动会变得不稳定和粗糙,最终形成液滴。这解释了波浪作用下,漂浮溢油被夹带到水体过程中不同阶段的机理,在波浪的稳定阶段更多引起的是“界面剪切”,其会拉下周围(水或油)表面,油被夹带入水随波浪运动,在波浪的不稳定阶段将产生油滴,且相对大部分的油被夹带在大液滴中。

1.2 油滴的形成

波浪作用下的高能量耗散率和增强的液滴涡流碰撞频率使得油膜破裂形成油包水液滴并分散到水体中,海流通过平流扩散将分散的油滴进行稀释进而增加了这种效果^[18]。波浪强度影响油滴的入水率,Li 等^[19]在加拿大贝德福德海洋学研究所设计室外波浪槽(32 m×0.6 m×2 m,平均水深 1.5 m)中构建了一个能够产生不同能量波的实验波浪系统,可以获得从常规的不间断波到破碎波等不同类型的波浪,与常规波相比,破碎波可使漂浮溢油的分散效率增加 25%,溢出的碎浪比普通的波浪更有效率,但比冲击波浪的效率低,规则的波浪只是使油在水面上移动而不是分散它。

夹带油的初始量和能量输入决定了小油滴的体积。随着油层厚度的增加,油滴尺寸略有增大,而分散剂的应用使得油滴的尺寸被大大减小,一定的波浪强度还会提高分散剂的分散效果^[20]。Li 等^[21]在大气压下进行试验以确定不同波浪强度条件下水中油滴尺寸大小,研究表明大部分分散的油滴直径在 100 μm 以下,而对于化学分散的油则低于 70 μm(黏度大于 2 Pa·s 的油除外)。Camilli 等^[22]在深水地平线(DWH)事故中估计破裂点处流体速度为 0.2~0.8 m/s。Paris 等^[23-24]将这些参数输入到 Boxall 等的水中油内惯性液滴尺寸模型中,估算 DWH 中水中油滴的平均液滴直径,计算结果表明,液滴直径在 1~300 μm 范围内,对于添加和不添加分散剂的情况,平均直径在 10~20 μm 和 50~70 μm,与 Li 的结论相符,但实际海况复杂,模型需要现场验证得到进一步修正。Aman 等^[13]使用高压蓝宝石高压釜装置通过改变压力和搅拌速

度建立作为雷诺数函数的油滴大小模型,并在墨西哥湾井喷现场进行测试对模型进行调整,结果显示良好的一致性。波浪破碎引起的湍流混合、波浪的搅拌混合过程、波致应力等影响油滴的初始向下运动过程^[25-26],这些尺寸形状不规则的油滴克服浮力被混合或分布在海面以下明显深度的水层内,即混合层,混合层的深度通常会延伸到与波高相同的深度。平均液滴尺寸随波浪高度增加而降低,这与胶体科学理论一致,即认为在其他相似条件下,更高的能量输入将油分解成更小的液滴。

2 油滴在水中的演变过程

油滴在夹带、半潜以及上浮过程中进行迁移、碰撞、破碎、聚并等行为直到它们达到稳定的尺寸分布。悬浮的油滴随着局部水流流动的速度和方向而移动,在迁移过程中由于受外部剪切流动或自身布朗运动的影响会产生相互碰撞。液滴碰撞是由于它们的相对运动而发生的,包括湍流碰撞(波浪引起的混合层中湍流导致液滴间相对运动)和浮力碰撞(由于不同直径的液滴具有不同的上升速度而引起的液滴间相对运动),当液滴逐渐接近到一定程度时,其由于受到水力作用、范德华力、双电层作用、空间位阻等综合作用而产生变形^[27],这些则直接导致液膜的破裂、液滴的聚并等微观过程^[28]。

目前溢油领域在研究水体中油滴演变机理方面报道较少,大多研究的是基于油滴位置、尺寸、浓度等信息的液滴尺寸分布(DSD)如何决定油滴命运以及建立油滴运动轨迹的模型。油滴的破碎和聚并速率决定了分散油液的液滴尺寸分布,Li 等^[14]基于破碎力和恢复力的无量纲分析,针对各种湍流条件开发了统一的油滴尺寸分布模型,适用于表面破碎波和地下井喷条件下的油滴形成。颜筱函对溢油在水面的运动行为和归宿的理论研究进行系统的整理和归纳,拉格朗日方法中计算网格固定在研究对象质心,在研究对象运动或变形的过程中与之始终保持重合,因此用来模拟油品泄漏后的运动轨迹。蒙特卡罗方法在原有的拉格朗日体系内引入了随机抽样和概率统计。在确定扰动因素强度,时间尺度的前提下,通过给予每个跟踪质点一组随机数,求得质点的扰动运动的方向和位移^[29]。然而分析油滴变形、破碎与聚并等微观机理对于理解波浪作用下单油滴的演变规律也是非常重要的,其他领域如流体力学中有相关流场中液滴行为变化的研究成果对于认知油滴在

海水中行为过程有借鉴作用。

2.1 油滴的变形

学者对于液滴的变形过程主要是在稳定的剪切或拉伸流场中对液滴稳定性进行研究,液滴受到压力作用产生变形,表现在轴向拉长或扁平化两种形式,且与外加场的强度、液滴大小和相界面张力有关^[30]。胡盟平等通过分散相液滴界面膜的受力及其在剪切力作用下的变形分析,初步解释了剪切场中乳化液分散相液滴的运动聚集规律,即剪切作用使液滴拉伸,液滴间的间距减小,集聚成较大液滴的几率增加,随着剪切强度增加液滴拉伸长短径比(液滴长短径比影响液滴破碎过程)增加,液滴被剪切成两个或多个小液滴的可能性将随之增加^[31]。

Gromer 等^[32-33]研究了聚合物溶液中 2 个正十四烷液滴之间的相互作用,并用力的曲线分析了两油滴在接近和远离时的相互作用状况,由于液滴之间距离趋近产生相互作用导致液膜开始变形并越来越薄,但聚合物分子仍然存在其中,随着部分聚合物被挤出局部液膜变厚出现“黑点”,相应的力曲线上出现一个阶跃,随着液滴距离继续靠近其面积扩大直到达到最大点,之后两液滴突然分离。这为理解波浪作用产生的湍流环境中油滴之间相互作用机理提供了参考,但实际海况中波浪产生的剪切和拉伸作用相对复杂,还缺乏具体的理论模型来对这些过程进行解释。

2.2 油滴的破碎和聚并

油滴的破碎和聚并是外部湍流混合能使油滴变形和油滴内部力抵消的平衡,较大的混合能量将导致较小的油滴,油滴内部力取决于油性质(有或没有分散剂)^[34]。较高黏度的油会产生较大的液滴,其较大的体积分数具有更高的聚并机会。油滴的破碎受波浪产生的湍流作用和油本身性质的共同影响。

液滴破碎是不同机制的结果,例如湍流脉动及碰撞,流体冲蚀,黏性剪切力和液滴表面不稳定性等。湍流脉动及碰撞是液滴破碎的主要原因,液滴受到湍流脉动作用在其表面上的压力,或是碰撞作用而产生初始振荡,当振荡的幅度超过一定程度后,液滴会变形并向某一个方向拉伸直到产生两个或更多的子液滴^[35]。波浪产生的湍流对液滴表面的黏性剪切力也会试图破坏液滴的形状,而液滴表面张力和内部黏性力又会使其维持现有的形状,流体有足

够的力量克服液滴恢复力时液滴将发生变形并伸长为哑铃状进而分裂为两个等径的大子液滴和一系列小的液滴,也可能会伸长为圆柱状并破碎为很多小的液滴,这种情况称为完全破碎^[36]。同时,由于波浪的冲蚀和油滴表面不稳定性,会在油滴表面产生速度梯度,油滴主体被冲刷产生一系列小油滴,因此破碎的机理变得更加复杂。

聚并的前提是碰撞,当两液滴间界面膜厚度在“挤压”作用下不断变薄直到达到一个临界值就会出现聚并,液滴的形态、液滴间的相互作用和外场力的作用影响聚并过程,若在液滴接触的时间内有足够能量完成液膜排液,则在液膜破裂后两液滴发生聚并,若不能则在外部流场力的作用下发生分离^[37]。Zhu 等^[38]在循环水渠中通过改变泄露压力差和剪切流速度研究油滴的水下运输规律,提出了油滴两种聚并模式,一种为湍流聚并,即水中湍流可以将两个相邻的油滴推进,在表面张力和粘性力作用下两个油滴连接并结合成一个新的液滴;一种为追赶聚并,两个油滴在运动过程中由于速度不同后者追赶上了前者合并成一个新的液滴。

3 油滴的上浮过程

油滴上浮时受到的作用力主要包括:重力、浮力、曳力、表面张力、黏性力等,油滴由于波浪作用被夹带进入混合层并达到一定进入深度时,油滴的动量不足以驱动其向下运动,浮力作用会导致其以一定速度上浮,油滴的上浮速度取决于油滴的大小,同时也受波浪、水流等其他因素影响。

在一个波浪周期内,混合层中较大的油滴会迅速上浮回到表面浮油状态,而较小的油滴趋于稳定的分散,由于其上浮速度较低因此可保持较长时间的悬浮^[34],在上浮过程中随着下个波浪周期与新夹带的油在水下重新分布,在超过一个波浪周期的时间段这些较小油滴重新回到水面的速率呈指数衰减^[39]。目前学者比较关注油滴的上浮轨迹以及回到水面的时间和位置,Li 等^[40]在圆柱形容器中模拟深海中单油滴的形成过程,指出油滴在浮动进展中形状变化为椭圆形,油滴的形成是反复收缩和膨胀的运动过程,所以其运动轨迹为螺旋线,波动发生在水平方向。Zhu 等^[38]研究了剪切流在油滴群上浮过程影响,实验发现油滴到达表面所需的时间随着剪切流速的增加而增加,油滴漂浮率基本不变,水平运移速率

与剪切流速相近。但实际海水中湍流环境复杂,油滴在上浮过程还可能与颗粒物之间的相互作用,易溶解的轻质油组分溶解在水中以及生物降解等,油滴的性质也会因此改变,导致其随后的运动状态发生改变, Li 等^[40]研究了研究了温度、盐度和分散剂对不同水深的石油烃含量的影响,结果表明,其浓度随温度升高而升高,但随着盐度的增加而降低,添加分散剂增加了石油烃在水中的比例。

孙宝楠等^[41-42]根据雷诺数将上浮过程中油滴分为两部分来研究,水体中小油滴服从 Stokes 定律,大油滴服从 Reynolds 定律,上浮速度的表达式为:

$$w(r)=k_w r^p,$$

当油滴雷诺数 $Re < 50$ 时, $p=2$, 系数 $k_w=2g(1-\rho')/9\nu$; 当 $Re > 50$ 时, $p=0.5$, 系数 $k_w=[16g(1-\rho')/3]^{1/2}$; 其中, r 为油滴粒径, g 为重力加速度, ρ' 为油滴密度, ν 为运动黏度, 油滴雷诺数 $Re=2rw/\nu$ 。得到的结果显示较小粒径的油滴以较慢的速度上浮, 停留在水体中一段时间才能重新出现在表面上, 具有上浮速度非常小的油滴可能永远不会到达表面, 它们通过湍流扩散被广泛分散并经历快速的生物降解。学者在建立液滴上浮过程的相关模型中通常假设液滴粒径大小低于 $70\ \mu\text{m}$ 的油滴将无限期地留在水体中^[43], Zeinstra-Helfich 等^[39]在研究由分散和风切变引起的油膜伸长和纵向体积分布中指出海上真实观测到的现象是这部分油滴确实倾向于集聚在水中, 但经过很长时间后还是会在回到表面油膜, 以往模型的计算结果会高估漂浮溢油的消失速度。

4 结论与展望

漂浮溢油在波浪作用下以油包水形式被夹带入水, 在垂直方向上受到的波浪拍打冲击作用以及在水平方向上水流的剪切和拉伸作用导致油滴的变形, 油滴在水体中经历迁移、碰撞、破碎、聚并等过程直到达到稳定的分布, 粒径较大的油滴迅速上浮回到表面浮油, 粒径较小的油滴在水中保持较长时间的悬浮以较慢的速度上升, 在此期间油滴与颗粒物之间相互作用, 易溶解的轻质油组分溶解在水中以及被生物降解等可能导致其永远不会回到水面。实际海况条件下油滴的潜浮行为十分复杂, 并且溢油事故漏油量、溢油类型、人为分散剂的喷洒等条件同时影响了溢油再次出现在海面的时间和位置, 实验室的研究成果和建立的模型需要在溢油现场中得到进一步的验证和修改。未来的工作还需要考察溢

油下潜上浮的条件阈值和发生时间, 包括测试不同压力、水文条件、底质条件、悬浮物特征、有/无溢油分散剂作用下, 溢油在海水垂向浓度、粒径分布、性质组成随时间的变化规律, 以得到体现溢油沉潜与油品特征、环境条件、风化过程的关联方式和沉潜油发生条件及机会窗口。

参考文献:

- [1] 包木太, 皮永蕊, 孙培艳, 等. 墨西哥湾“深水地平线”溢油事故处理研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 55-62.
Bao Mutai, Pi Yongrui, Sun Peiyan, et al. Research progress on the treatment of oil spill accidents for Deepwater Horizon Macondo[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 55-62.
- [2] Liu Xin, Guo Mingxian, Wang Yebao, et al. Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 194-202.
- [3] 温艳萍, 吴传雯. 大连新港“7.16 溢油事故”直接经济损失评估[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(4): 91-96.
Wen Yanping, Wu Chuanwen. Evaluation of direct economic loss of “7.16 Oil Spill Accident” in Dalian new port[J]. China Fisheries Economics, 2013, 31(4): 91-96.
- [4] 蔡成翔, 焦淑菲, 尹艳镇. 我国近岸海域石油污染现状及其防治措施[J]. 化工技术与开发, 2012, 41(8): 14-17.
Cai Chengxiang, Jiao Shufei, Yin Yanzhen. Present situation of oil pollution in coastal waters of China and control measures[J]. Chemical Technology and Development, 2012, 41(8): 14-17.
- [5] Liu Tianyi, Sheng Y P. Three dimensional simulation of transport and fate of oil spill under wave induced circulation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 80(1/2): 148-159.
- [6] Kim H J, Lee M J, Oh S W, et al. A study on development of operational system for oil spill prediction model[J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2011, 17(4): 375-382.
- [7] Nixon Z, Michel J. Predictive modeling of subsurface shoreline oil encounter probability from the Exxon Valdez oil spill in Prince William sound[J]. Alaska Environment Science and Technology, 2015, 49(7): 4354-4361.
- [8] 李小虎, 吴云波, 崔小爱. 基于三维水动力模型的溢油扩展迁移规律的数值模拟[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 86-88.
Li Xiaohu, Wu Yunbo, Cui Xiaoi. Numerical simulation of the extended migration law of oil spill based on three-dimensional hydrodynamic model[J]. China Water Transport (the second half of the month), 2018, 18(1): 86-88.
- [9] Zeinstra-Helfich M, Koops W, Dijkstra K, et al. Quan-

- tification of the effect of oil layer thickness on entrainment of surface oil[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 96(1/2): 401-409.
- [10] Payne J R, Driskell W B. Macondo oil in northern Gulf of Mexico waters - Part 1: assessments and forensic methods for deepwater horizon offshore water samples[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 129(1): 399-411.
- [11] Pan Zhong, Zhao Lin, Boufadel M C, et al. Impact of mixing time and energy on the dispersion effectiveness and droplets size of oil[J]. *Chemosphere*, 2017, 166(1): 246-254.
- [12] Li Zhengkai, 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.
- [13] Aman Z M, Paris C B, May E F, et al. High-pressure visual experimental studies of oil-in-water dispersion droplet size[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 127: 392-400.
- [14] Li Zhengkai, Spaulding M L, Mccay D F. 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*, 2017, 114(1): 247-257.
- [15] Belore R C, Trudel K, Mullin J V. Large-scale cold water dispersant effectiveness experiments with Alaskan crude oils and Corexit 9500 and 9527 dispersants[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(1): 118-128.
- [16] Li Zhengkai, Spaulding M L, Mccay D F. 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.
- [17] Zeinstra-Helfich 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.
- [18] 毕凡, 宋金宝. 大洋涌浪耗散研究及模式应用的进展及主要问题[J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 128-134.
Bi Fan, Song Jinbao. Progress and main problems in research and application of ocean surges[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(9): 128-134.
- [19] Li Zhengkai, Lee K, King T. 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.
- [20] 张欣欣, 于跃, 何山, 等. 溢油分散剂的乳化效果及油滴粒径分布影响因素的研究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 69-78.
Zhang Xinxin, Yu Yue, He Shan, et al. Study on the emulsification effect of oil spill dispersant and the influencing factors of oil droplet size distribution[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(9): 69-78.
- [21] Li Zhengkai, Lee K, King T, et al. Oil droplet size distribution as a function of energy dissipation rate in an experimental wave tank[C]//Mccarthy M W, Grennan D. *International Oil Spill Conference Proceedings*. Washington: IOSC, 2008: 621-626.
- [22] Camilli R, Di Iorio D, Bowen A, et al. Acoustic measurement of the Deepwater Horizon Macondo well flow rate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(20): 20235-20239.
- [23] Boxall J A, Koh C A, Sloan E D, et al. Droplet size scaling of water-in-oil emulsions under turbulent flow[J]. *Langmuir*, 2012, 28(1): 104-110.
- [24] Paris C B, Le Hénaff M, Aman Z M, et al. Evolution of the Macondo well blowout: Simulating the effects of the circulation and synthetic dispersants on the subsea oil transport[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(24): 13293-13302.
- [25] 刘子龙, 史剑, 蒋国荣. 海浪破碎对北太平洋海表面温度模拟的影响[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 122-129.
Liu Zilong, Shi Jian, Jiang Guorong. Effects of wave breaking on sea surface temperature simulation in the north pacific ocean[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 122-129.
- [26] 刘子龙, 史剑, 蒋国荣, 等. 海浪搅拌混合对北太平洋海表面温度模拟的影响[J]. *海洋科学*, 2016, 40(12): 131-137.
Liu Zilong, Shi Jian, Jiang Guorong, et al. Effects of sea wave mixing on sea surface temperature simulation in the North Pacific Ocean[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(12): 131-137.
- [27] Cui Shuguang, Manica R, Tabor R F. Interpreting atomic force microscopy measurements of hydrodynamic and surface forces with nonlinear parametric estimation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 113703.
- [28] Nissanka I D, Yapap D. Oil slicks on water surface: Breakup, coalescence, and droplet formation under breaking waves[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 480-493.
- [29] 颜筱函. 溢油模型及求解方法研究[J]. *当代化工*, 2017, 46(3): 481-484, 488.
Yan Xiaohan. Study on oil spill model and solution method[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2017, 46(3): 481-484, 488.
- [30] 刘阁, 陈彬, 张贤明, 等. 油水乳化液分散相动力学的研究进展[J]. *石油化*, 2012, 41(11): 1333-1336.
Liu Ge, Chen Bin, Zhang Xianming, et al. Research progress on the dispersion phase of oil-water emulsions[J]. *Petrochemicals*, 2012, 41(11): 1333-1336.
- [31] 胡盟明, 董守平. 油水乳化液中分散相液滴的力学行为初探[J]. *流体力学实验与测量*, 2000(4): 46-50.

- Hu Mengming, Dong Shouping. Study on the mechanical behavior of dispersed phase droplets in oil-water emulsion[J]. *Fluid Mechanics Experiments and Measurement*, 2000(4): 46-50.
- [32] Gromer A, Gunning A P. Atomic force spectroscopy of interactions between oil droplets in emulsions[J]. *Microsc Anal*, 2011, 25(1): 9-12.
- [33] 王玮, 李楷, 宫敬, 等. 分散体系中液滴间力学行为[J]. *科学通报*, 2015, 60(24): 2272-2281.
Wang Wei, Li Wei, Gong Jing, et al. Mechanical behavior between droplets in a dispersed system[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(24): 2272-2281.
- [34] Zeinstra-Helfich M, Koops W, Dijkstra K, et al. 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.
- [35] 张鹏举. 液液分散体系中液滴破碎机理的实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
Zhang Pengju. Experimental study on droplet breakage mechanism in liquid-liquid dispersion system[D]. Beijing: Beijing Chemical Technology University, 2016.
- [36] Zhao Hui, Ge We. A theoretical bubble breakup model for slurry beds or three-phase fluidized beds under high pressure[J]. *Chinese Engineering Science*, 2007, 62(1): 109-115.
- [37] 饶莉. 液-液分散体系中液滴的动力学行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
Rao Li. Study on the dynamic behavior of droplets in liquid-liquid dispersion system[D]. Beijing: Beijing Chemical Technology University, 2016.
- [38] Zhu Hongjun, You Jiahui, Zhao Honglei. An experimental investigation of underwater spread of oil spill in a shear flow[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1): 156-166.
- [39] Zeinstra-Helfich M, Koops W, Muek A J. Predicting the consequence of natural and chemical dispersion for oil slick size over time[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2017, 122(9): 7312-7324.
- [40] Li Haoshuai, Meng Leng, Shen Tiantian, et al. The formation process and responsive impacts of single oil droplet in submerged process[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(1): 139-146.
- [41] 孙宝楠. 波浪破碎过程对油滴垂直混合的作用研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.
Sun Baonan. Study on the effect of wave breaking process on vertical mixing of oil droplets[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2010.
- [42] 孙宝楠, 连展, 杨永增. 波浪破碎过程对油滴垂直混合影响的数值模拟及实际验证[J]. *船海工程*, 2018, 47(2): 15-19.
Sun Baonan, Lian Zhan, Yang Yongzeng. Numerical simulation and actual verification of the effect of wave breaking process on vertical mixing of oil drops[J]. *Ship and Sea Engineering*, 2018, 47(2): 15-19.
- [43] Mccay D F. Oil spill impact modeling: Development and validation[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(10): 2441-2456.

Research progress on the mechanisms of submerging and floating marine oil spills under wave action

FU Hong-rui, ZHAO Xing, Joanès Bénédicte Massamba-Courtois, YAN Zhi-yu
(Environmental Science and Engineering Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Received: Aug. 4, 2018

Key words: oil spill pollution; wave action; oil droplet size; entrainment; fracture and coalescence

Abstract: From the perspective of single oil droplets, research on the processes of distribution (entrainment, oil droplet formation), evolution (oil droplet deformation, fracture, and coalescence), and floating for marine oil spills is summarized. Research and experimental methods in oil and related fields are introduced, and the behavioral mechanisms and distribution laws of spills are summarized. Based on the research results of laboratories and oil spill sites, problems requiring further exploration are identified. This paper provides ideas and references for emergency decision-making, tracking prediction, and damage assessment of marine oil spill pollution.

(本文编辑: 刘珊珊)