# 国内外模拟溢油波浪水槽的最新研究进展

王巧敏,严志宇,孙冰,刘慧

(大连海事大学环境科学与工程学院 大连 116026)

摘要:利用模拟设备模拟海面真实溢油情景是研究溢油分散、污染损害评估及其组成变化特征最 方便、快捷的方式,因此模拟设备的水体环境越贴近海洋实际,研究数据越真实可靠。文章对国内 外模拟溢油的波浪水槽进行详细评述,主要包括美国国家溢油应急测试机构建立的 Ohmsett 波浪 水槽、加拿大贝德福德海洋学研究所的波浪水槽、挪威科技工业研究院的波浪水槽和国内比较典 型并已有相关报道的深圳市计量质量检测研究院的海上溢油风化模拟系统。通过对以上最具代 表性的国内外波浪水槽的介绍、分析和比较,借鉴国外研究经验,对我国模拟溢油波浪水槽的建构 提出建议,旨在为溢油研究工作者提供多种可参考的波浪水槽设备,完善现有模拟设备的不足。 关键词:溢油;波浪水槽;实验模拟

**中图分类号:**X55 文献标志码:A 文章编号:1005-9857(2017)04-0081-07

# Latest Research Progress of Wave Tank Used for Simulating Oil Spill at Home and Abroad

WANG Qiaomin, YAN Zhiyu, SUN Bing, LIU Hui

(Environmental Science and Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Reproducing the real situation of oil spill by using the simulation devices is the most convenient and fastest way to study spilled oil's dispersion, pollution damage assessment and composition variation characteristics. Therefore, water environment in simulation equipment is more similar to the sea, and the research data is more reliable. In this paper, wave tanks used for simulating oil spill at home and abroad were reviewed in detail, mainly including Ohmsett tank established by National Oil Spill Response Test Facility, USA, and the other two built by Bedford Institute of Oceanography, Canada and SINTEF Research Institute, respectively, and domestic oil spill weathering simulation system that is typical, reported and located in Academy of Metrology and Quality Inspection, Shenzhen. The most representative wave tanks above at home and abroad

通信作者:严志宇,副教授,博士,研究方向为溢油及其风化特性,电子信箱:120236122@qq.com

收稿日期:2016-11-02;修订日期:2017-03-12

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2016YFC1402301);国家自然科学基金项目(41206095、41576111、11675031);辽宁省教育厅科研项目 (L2015061);辽宁省科技厅科研项目(2015020596);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132016327).

作者简介:王巧敏,博士研究生,研究方向为分散剂对溢油特性及风化行为的影响,电子信箱:464451747@qq.com

were introduced, analyzed and compared, and the advice of oil spill simulation tank construction in China was also proposed in view of foreign experience, which aimed at providing a variety of wave tank equipment for reference to oil spill research workers and improving the deficiency in the existing analog devices.

Key words: Oil spill, Wave tank, Experimental simulation

目前国际上的模拟溢油设备按照规模大小主 要分为实验室小型台式设备、波浪水槽和海上围 隔。比较以上3种模拟环境可知,各设施的水体条 件逐渐扩大并接近海洋,甚至已是海洋水体。但因 现实条件和环境条件等诸多因素的限制,以上3种 模拟环境并不是同等重要地被用于实验研究。

对于实验室小型台式设备而言,大多采用实验 室漏斗、烧瓶、烧杯或基于三者改装的小型玻璃器 皿为容器,尽管拥有可以控制实验条件、仪器设备 简单易得、测试成本低、实验时间短、取样快、测试 结果重现性好、可对各种参数进行比较和实验结果 精密度高等优点,但其是体积非常小的测试,不适 合长期(几天或数周)研究,所得结果与海上现场结 果也不是简单的外推关系,不能充分模拟海洋的实 际状况,尤其是混合能源和水体分散油滴在水平和 垂直方向的平流与湍流扩散。因此,实验室小型台 式设备受固有空间限制,不能解决影响传输和稀释 效果的空间问题,获得的实验数据也很难应用于现 场实验推算。

对于海上围隔而言,溢油现场测试的成本较高 且难以掌控管理,存在人为污染海洋环境的隐患, 风险较大;而且由于缺乏对实验和天气条件的控制 手段,研究结果常常具有不确定性和不可重复性。 即使是围隔实验,也因其过于昂贵和对海洋环境造 成影响,不便于推广。

采用波浪水槽模拟溢油既可避免实验室台式 设备的固有空间局限性,也可近似模拟海上混合能 量和水流影响,从而获得较为可靠和贴近海洋实际 的数据,还可在模拟海上条件的基本设置中重复研 究和评估溢油分散与风化<sup>[1]</sup>。因此,波浪水槽对于 指导溢油研究人员在应急响应中使用分散剂、评估 溢油污染和考察溢油风化特性等方面是一个重要 的工具。 国外最为典型的是美国的 Ohmsett 波浪水槽、 加拿大贝德福德海洋学研究所的波浪水槽和挪威 科技工业研究院的波浪水槽。国内目前已有报道 且最具代表性的是深圳市计量质量检测研究院的 海上溢油风化模拟系统。

## 1 美国的 Ohmsett 波浪水槽

美国国家溢油应急测试机构(National Oil Spill Response Test Facility, USA)建立的石油和危险材 料模拟环境测试水槽(Oil and hazardous materials simulated environmental test tank, Ohmsett)是目 前世界上最大的模拟海洋条件的波浪水槽,可以针 对各种各样的原油和成品油进行溢油测试、研究和 培训。该设备主要由美国内政部矿产管理服务中 心(Minerals Management Service, MMS)负责维护 和运营。相较于海上现场测试, Ohmsett 能提供一 个安全、可控和重复测试的环境, 有利于溢油处理 设备和技术的开发测试。关于 Ohmsett 的详细信 息可参见其官网(www.ohmsett.com), 其鸟瞰图和 内部结构如图1所示<sup>[2]</sup>。



图 1 美国石油和危险材料模拟环境测试水槽(Ohmsett)

Ohmsett 是混凝土式的波浪水槽,置于户外, 长、宽、深分别是 203 m、20 m 和 3.3 m,约 2 个足球 场大,充满约 984 万 L 清澈的天然海水。主要通过

续	表
~~	

添加海盐维持海水盐度(~35),通过含有硅藻土助 滤剂的叶式过滤系统维持水的清澈度,并使用次氯 酸钠的氯化作用控制藻类生长,以便提高水下视频 设备的测试质量。3 座桥横跨水槽可以沿着水槽壁 来回移动,主桥用于拖曳各种溢油响应设备,模拟 海上实际拖带或部署,桥上的石油排放系统可以模 拟溢油。水槽南端设置拍打式造波器、北端海滩设 置波浪吸收装置(消波器,主要将从北墙反射回来 的波削弱到槽的底部),以便模拟海浪(可产生高达 0.61~1 m、长约 45 m 的巨浪)。随着北端海滩的 降低,水槽也可产生高度约为 70 cm 的"港砍"。从 移动桥、控制塔和水下观景窗的一侧都可观测测 试,而且水面上方和下方都有数据收集和视频记录 系统。移动桥、溢油释放模式和造波系统都可在重 复的条件和设置下进行溢油响应,可使研究人员获 得特定性能的数据,以便开发和优化溢油控制系统 和设备。近年来 MMS 升级改善了 Ohmsett 的测 试功能,能提供可控制的冷水环境测试,便于模拟 现实的破冰条件,进一步扩展该设备的研究范围。

2001 年 Ross 等<sup>[3]</sup>研究在 Ohmsett 中模拟溢油 化学分散的可行性时提出,在 Ohmsett 中进行分散 剂效果测试不仅是可行的,还可根据已经开发出来 的特定实验程序成功实施。究其原因主要包括:设 备非常大,能产生波;实施大规模的分散剂测试是 可能的;可以控制大多数变量;可近距离观察石 油一分散剂相互作用的分散过程;与海上测试相 比,Ohmsett 相对廉价。因此,Ohmsett 是消除实 验室和海上测试之间隔阂的合理装置。1999-2006 年在 Ohmsett 中进行的溢油模拟研究如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

### 表 1 1999—2006 年在 Ohmsett 中进行的 分散剂效果研究项目

年份	主要溢油模拟研究
1999	Ohmsett 中模拟溢油分散效果测试的可行性研究
2000	开发 Ohmsett 中进行模拟研究测试协议
2000	去除 Ohmsett 水体中溶解的分散剂的技术研究
2002	冷水中分散剂处理阿拉斯加和加拿大原油的效果测试
2002	冷水和破冰条件下测试分散剂效果

年份	主要溢油模拟研究
2003	冷水中分散剂处理 5 个阿拉斯加原油的效果测试
2004	国家研究委员会进行分散剂效果演示实验
2004	Ohmsett 中模拟测试结果与海上实验结果的相关性
2005	分散剂处理加州黏性原油的效果测试
2005	分散剂在平静海面的使用效果
2005	非破波条件下研究 OCS 原油的化学可分散性
2005	分散剂处理实际溢油乳剂的效果测试
2006	冷水中分散剂处理阿拉斯加原油的效果测试

综上可知,Ohmsett 是一个非常好的、值得借鉴的模拟溢油水槽。除表 1 中的研究项目外,研究 人员使用该水槽还做了大量冷水域环境中分散剂 效果测试<sup>[5-7]</sup>、石油黏度对分散剂效果影响测 试<sup>[8-10]</sup>以及平静水体中分散剂效果研究<sup>[11]</sup>等实验。

#### 2 加拿大贝德福德海洋学研究所的波浪水槽

贝德福德海洋学研究所的波浪水槽如图 2 所示<sup>[12]</sup>,位于加拿大渔业海洋部近海石油和天然气环境研究中心(Center for Offshore Oil and Gas Environmental Research, Canada)。该槽由涂有环氧树脂涂层的钢铁制成,容积大小经历 2 个阶段的发展<sup>[12-13]</sup>:第一阶段波浪水槽的长、宽、高分别是 16 m、0.6 m和 2 m,平均水深约 1.25 m,随着研究的深入和发展,为产生更多能量较大的波以及减少水槽末端波的干涉等,其长度被翻倍;第二阶段波 浪水槽的长、宽、高分别是 32 m、0.6 m和 2 m,平均水深约 1.5 m。此外,该波浪水槽的水流特性也经历从"台式死水"到"流动活水"的转变<sup>[14-15]</sup>。

波浪水槽内不同的前进波由水槽一端计算机 控制的拍打式造波器产生,造波器与1个可调凸轮 连接,通过控制其行程长度达到改变波浪长度和高 度的目的,波的频率由凸轮(由电动马达驱动)的旋 转速度控制;造波器可以根据实验要求产生不同类 型的波浪,包括规则非破波以及指定长度、高度和 频率的破波。水槽尾端是波吸收装置,由8个多孔 不锈钢钢板组成,这些钢板上有孔隙直径大小为 0.2~2.5 cm 的孔,孔隙度在40%~70%之间;板的 顺序和间距是经实验测试得到的,目的是减弱回到



混合区的反射波能量,即减少对前进波的反射和干 涉<sup>[16]</sup>。水槽可在1h内完成排水和充水,便于进行 独立实验,但需预防各个实验之间油或分散剂的积 累。波浪强度由每单位质量的能量耗散率(评估海 上原油混合和分散程度的可伸缩参数<sup>[17]</sup>)量化,即 在水槽不同位置使用声学多普勒测速计测量时间 序列的速度完成<sup>[18]</sup>。水槽的水动力特征在其他地 方也有报道<sup>[19-20]</sup>。

该波浪水槽主要通过测试一定时间节点处、不同水平、不同深度的水体油浓度和油滴粒径分布, 模拟、分析和评价分散剂处理原油的效果<sup>[15]</sup>。水体 油浓度越高,溢油分散效果越好;水体油滴粒径越 小,油颗粒的悬浮状态越稳定。此外,该波浪水槽 也可以通过分析各项指标(水体油浓度、油滴粒径 分布和能量耗散率等)考察不同环境条件对分散剂 效果的影响。目前该研究方法已被国际广泛接受, 研究成果(包括波浪类型、温度、分散剂种类、油品 特性等因子对溢油分散效果的影响等)在国际会议 和期刊上多次发表,并成功应用于监测墨西哥湾 "深水地平线"溢油事故中分散剂的使用效果<sup>[21]</sup>。

3 挪威科技工业研究院的波浪水槽

挪威科技工业研究院(SINTEF)利用数值算法 计算破波对海面溢油影响时,分别使用长方形和椭 圆形波浪水槽进行溢油物理化学特性以及自然分 散油滴粒径分布等一系列研究,并建立油滴破裂尺 寸与破波能量之间的关系<sup>[22]</sup>。其中长方形水槽长 5 m、宽 0.5 m,水深为 1 m,油膜厚约 1~2 mm;通 过调节槽末端(右)嵌上的造波器频率和振幅,控制 破波的发生位置和大小,以提供一系列的可控波, 并让波浪在特定位置聚集所需的能量,消波器安装 在槽的另一端,以消除或减少波反射(图 3)。





为获得高能量的崩碎波,还开发了"瀑布式冲 击流"装置,即由安装在水槽上方一定高度处、装满 9 L 水的树脂玻璃槽倾斜到水平位置而产生波浪。 为确定造波器的波振幅与"瀑布式冲击流"自由降 落高度之间的对应关系,树脂玻璃槽内水体落下的 高度也可通过向上或向下移动负载其的固定板实 现(图 4)。

此外,研究者还可通过比较一定高度的破波所 产生的油滴尺寸分布与"瀑布式冲击流"水体自由 下落导致的油滴尺寸分布,实现"瀑布式冲击流"与 破波能量的校准,并在改装后的椭圆形风化水槽 (图 5)中进行长期的溢油风化实验,使溢油不仅处 于破波环境,同时也处于"瀑布式冲击流"带来的崩 碎波中,更加贴近海洋实际地分析溢油自然分散的 物化性质和粒径大小。



图 4 "瀑布式冲击流"的形成



(a) 波浪水槽实物



约有 4.8 m<sup>3</sup>的海水循环于周长约为 10 m 的水 槽(置于 0℃~20℃的温控室中),风洞中放置 2 个 风扇用于模拟各种风速。"瀑布式冲击流"可以一 定的时间间隔进行,在此之前造波器要先几分钟关 闭,以便石油被限制于冲入下游测试区的障碍物后 面,使分散油滴重新铺平成均匀的浮油,这有利于 计算油膜厚度和黏度与油滴分散大小的关系(图 6)。值得注意的是,每次实验狭窄油层的油膜厚度 都不同,由于油包水乳剂的密度接近海水密度,更 倾向形成厚油层,自由下落高度必须时常增加,以 弥补由于黏度和油膜厚度增加而造成的油膜破裂。



图 6 "瀑布式冲击流"的实验原理

除以上使用频率较高、文献报道较多的大型波 浪水槽外,国外还有配备人工沙滩的模拟水槽。 如,美国德克萨斯州海岸线环境研究机构的波浪水 槽(33.5 m×2.1 m×2.4 m)设有坡度为10°的模拟 沙滩<sup>[23]</sup>,以研究分散剂及时处理溢油的可行性和优 点;加拿大曾在 SL ROSS 波浪水槽(11 m×1 m× 1 m)测试分散剂的有效性,并将该结果与英国相似 条件下处理相同油的海上测试结果相比较<sup>[24]</sup>。

### 4 国内海上溢油风化模拟系统

国内已报道的、最具代表性的模拟溢油波浪水 槽是深圳市计量质量检测研究院的海上溢油风化 模拟系统(图 7)<sup>[25]</sup>。

该系统是"十一五"期间"水上溢油预测预警与 应急决策技术"课题的技术成果之一。池体的长、 宽、高分别是5m、3m、2m,实际水位高0.9m;主 要由溢油池、水流模拟装置、程序控制系统和监视 系统组成,安置于室外;池中有2块平行拨水板,并 设置侧面推进器模拟海水真实的平流、局部环流或 湍流流动状态;该设备的其他相关参数和作用原理 参见参考文献[26]。基于这一模拟装置,研究者分 析溢油水体水质<sup>[27]</sup>、风化过程中的溢油化学组成成 分<sup>[28]</sup>和物理特性<sup>[25]</sup>的变化,为溢油预警预测、漂移 动态预报技术、环境归宿和溢油鉴别提供更接近实 际数据的技术和科学依据。

此外,我国模拟溢油的波浪水槽还包括:张秀



(a) 系统实物



1- 拨水板; 2- 侧面推进装置; 3- 盛水胶囊; 4- 拨水板的行程杆;
5- 拨水板的气缸; 6- 红外摄像头; 7- 监控及存储装置; 8- 控制器;
9- 溢流管; 10- 水下摄像头。

(b) 系统原理

图 7 海上溢油风化模拟系统

芝等<sup>[29-30]</sup>、杨庆霄等<sup>[31]</sup>和赵云英等<sup>[32]</sup>研究溢油分 散效果所采用的长×宽×高分别为25m×0.6m× 1.2m、25m×0.5m×0.8m和15m×1.0m× 0.8m的波浪水槽;钱国栋<sup>[33-35]</sup>研究盐度对溢油分 散效果影响所采用的长×宽×高为7m×0.5m× 0.5m的波浪水槽,研究"波浪条件"和"剂油比"对 2种分散剂作用于渤海原油效果时所采用的长× 宽×高为5m×0.3m×0.4m的波浪水槽,以及评 价水面和水下溢油分散剂有效性时所采用的长× 宽×高为5m×0.3m×0.4m和2m×1m×1m 的波浪水槽等。

5 结语

利用波浪水槽开展中试规模的溢油模拟研究, 不仅可以反映溢油在水体中的乳化分散过程、油滴 的迁移与稀释过程,而且可以反映溢油自身物理特 性及其组成的化学变化。由于波浪水槽能够提供 充分的扩散空间,有效降低由于乳化油颗粒重新聚 集上浮水面造成的实验误差,更能反映出原油在真 实环境下的自然或化学分散结果。

比较国内外波浪水槽设备可以发现,国外水槽

规模比较大,大多是户外型,功能齐全,可控参数 多,测试角度多,测试结果往往更具权威性和综合 性;此外还有专门的研究机构对其进行综合管理和 利用,设施维护好、利用率较高。相比之下,国内目 前报道的模拟溢油水槽都较小,与国外规模还有差 距,也缺乏专门的认证机构或科研组织单位开展有 针对性且范围较广的模拟研究,有效利用率较低; 一些不成规模(或小规模)的水槽分散在各研究单 位,彼此间缺乏实验数据的统一和共享,阻碍我国 该领域的发展。我国海岸线较长,拥有大面积内 湖、内河及开阔海洋,划片建立规模统一的大型户 外或室内可控模拟溢油设备,明确测试组织机构和 维护单位是溢油研究领域的迫切需求和发展必要。

#### 参考文献

- [1] NRC.National research council: understanding oil spill dispersants:efficacy and effects[M].Washington, D C: National Academies Press, 2005.
- [2] MULLIN J V.Dispersant effectiveness experiments conducted on Alaskan and Canadian crude oils in very cold water[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.2004.
- [3] ROSS S, BUIST I, POTTER S, et al. Dispersant testing at Ohmsett:Feasibility study and preliminary testing[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute,2001.
- [4] MULLIN J V, TRUDEL K. Five years of dispersant testing in the OHMSETT wave tank: controversial problems, limits of response technology, methods and training [C]//International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2006.
- [5] BELORE R.Large wave tank dispersant effectiveness testing in cold water [ C ]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute.2003.
- [6] MULLIN J, BELORE R, TRUDEL K. Cold water dispersant effectiveness experiments conducted at Ohmsett with Alaskan crude oils using Corexit 9500 and 9527 dispersants[C]//International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2008.
- [7] BELORE R, TRUDEL K, MULLIN J V, et al. 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.
- [8] TRUDEL K, BELORE R, GUARINO A, et al. Determining the viscosity limits for effective chemical dispersion: relating Ohmsett

results to those from tests at-sea[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute,2005.

- [9] BELORE R, LEWIS A, GUARINO A, et al. Dispersant effectiveness testing on viscous, US Outer Continental Shelf crude oils and water-in-oil emulsions at Ohmsett[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute,2008.
- [10] TRUDEL K, BELORE R, 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):1 606-1 614.
- [11] LEWIS A, TRUDEL K, BELORE R, et al. Large-scale dispersant leaching and effectiveness experiments with oils on calm water [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60 (2): 244-254.
- [12] LI Z, 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.
- [13] LI Z, LEE K, KING T, et al. Assessment of chemical dispersant effectiveness in a wave tank under regular nonbreaking and breaking wave conditions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(5):903-912.
- [14] LI Z,LEE K,KING T, et al. Oil droplet size distribution as a function of energy dissipation rate in an experimental wave tank[C]//International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute,2008.
- [15] LI Z, LEE K, KING T, et al. Evaluating crude oil chemical dispersion efficacy in a flow-through wave tank under regular non-breaking wave and breaking wave conditions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(5): 735-744.
- [16] LI Z, LEE K, KING T, et al. Evaluating chemical dispersant efficacy in an experimental wave tank: 2-Significant factors determining in situ oil droplet size distribution[J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(9):1 407-1 418.
- [17] KAKU V J.BOUFADEL M C.VENOSA A D.Evaluation of mixing energy in laboratory flasks used for dispersant effectiveness testing [J]. Journal of Environmental Engineering, 2006,132(1):93-101.
- [18] KAKU V J.BOUFADEL M C.VENOSA A D.et al.Flow dynamics in eccentrically rotating flasks used for dispersant effectiveness testing[J].Environmental Fluid Mechanics,2006, 6(4):385-406.
- [19] WICKLEY-OLSEN E, BOUFADEL M C, KING T, et al. Regular and breaking waves in wave tank for dispersion effec-

tiveness testing[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute,2008.

- [20] VENOSA A D.KAKU V J.BOUFADEL M C. et al. Measuring energy dissipation rates in a wave tank [C]//International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2005.
- [21] LI Z, LEE K, KEPKEY P E, et al. Monitoring dispersed oil droplet size distribution at the Gulf of Mexico Deepwater Horizon spill site[C]//International Oil Spill Conference Proceedings.American Petroleum Institute,2011.
- [22] REED M, JOHANSEN Ø, LEIRVIK F, et al. Numerical algorithm to compute the effects of breaking waves on surface oil spilled at sea[R].2009.
- [23] PAGE C A,BONNER J S,SUMNER P L, et al.Behavior of a chemically-dispersed oil and a whole oil on a near-shore environment[J].Water Research,2000,34(9):2507-2516.
- [24] BELORE R, TRUDEL K, LEE K. Correlating wave tank dispersant effectiveness tests with at-sea trials [ C ]// International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2005.
- [25] 李思源,赵彦,周永生,等.两种原油在溢油风化模拟过程的性能变化比较[J].广东化工,2010,37(5):103-106.
- [26] 吴海涛,乔冰,谢月亮,等.海上溢油风化模拟装置的研制 [C]//海上污染防治及应急技术研讨会论文集.2009.
- [27] 李思源,肖峰,周永生,等.海上溢油风化模拟过程中海水水质 变化的研究[C]//海上污染防治及应急技术研讨会论文 集.2009.
- [28] 凌萍,谢月亮,乔冰,等.海上溢油风化模拟实验中油品组成的 变化[C]//海上污染防治及应急技术研讨会论文集.2009.
- [29] 张秀芝,李筠,隋俨.海上溢油风蚀特性及化学分散效果的影响因素研究[J].水运科学研究所学报,1996,12(4):6-12.
- [30] 张秀芝,李筠,隋俨,等.海上溢油风化特性及化学分散效果的 影响因素研究[J].海洋环境科学,1997,16(3):40-45.
- [31] 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.
- [32] 赵云英,马永安,吴吉琨,等.波浪槽模拟海况检验消油剂的乳 化性能[J].海洋环境科学,2004,23(4):67-70.
- [33] 钱国栋.海上溢油消油剂使用效果的盐度影响试验分析[J]. 航海工程,2016,45(3):131-134.
- [34] 钱国栋.消油剂对原油乳化效果评估波浪槽实验[J].海洋环 境科学,2016,35(2):274-278.
- [35] QIAN G D, ZHAO Y P, REN X H, et al. Research on development and effectiveness evaluation technology of new environment-friendly oil spill dispersant [J]. Aquatic Procedia, 2015(3):245-253.