

溢油分散剂的乳化效果及油滴粒径分布影响因素的研究

张欣欣¹, 于跃¹, 何山¹, 熊德琪¹, 姜玲玲¹, 朱睿²

(1. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300452)

摘要: 以 GM-2 型溢油分散剂和微普紧急泄漏处理液为研究对象, 探究不同条件下其处理 120[#]燃料油的乳化效果及对油滴粒径分布的影响。结果表明, 提高温度、分散剂与燃料油配比(DOR)以及加强波浪作用均可显著提高溢油分散剂的乳化效果, 油滴粒径更小, 分布更集中, 且液面下较浅处的乳化液浓度较大。GM-2 型分散剂乳化效果优于微普分散剂。当温度为 25℃, DOR 为 30%, 推波频率为 1 次/s 时, GM 乳化效果达到最佳, 油滴平均粒径为 5.62 μm。

关键词: 溢油分散剂; 120[#]燃料油; 乳化效果; 粒径分布

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)09-0069-10

doi: 10.11759/hyqx20151229001

世界经济快速发展的同时, 人类对石油的需求量也在日益增加, 海上石油开采与运输监管方面的众多漏洞使得溢油事故发生率呈逐年增长趋势^[1]。2004 年在巴拿马籍与德国籍油轮相撞的事故中, 溢油量达到 1200 t, 并形成了 16.7 km × 200 m 的油带; 而 2010 年 7 月发生在大连新港的输油管道爆炸事故也导致约 50 km² 的海域受到污染^[2]。溢油事故不仅破坏了生态环境, 海洋生物也受到了严重的影响^[3-9]。为了及时消除溢油带来的危害, 人们采用了物理处理法、化学处理法和生物处理法等清除溢油; 其中, 物理法是溢油事故应急采取的最基本手段。但在后期处理时, 溢油分散剂仍是首选, 也是应用最普遍的方法^[10-13]。

溢油分散剂的主要组分是表面活性剂, 表面活性剂中含有亲油基团和亲水基团, 分别与油和水产生亲和作用, 使溢油分散成 O/W 型乳化粒子, 降低了油水界面的表面张力; 同时, 在机械搅拌混合或波浪的作用下, 溢油和海水的接触面积增大, 从而提高了微生物对溢油的降解速度, 使之分解成 CO₂、H₂O 等水溶性物质, 最终加速了海洋溢油的清除^[14-18]。

溢油分散剂的性能指标主要包括物理性能、乳化性能和生物毒性, 其中乳化性能是分散剂质量综合检验项目中最重要的指标之一, 它直接反映分散剂乳化分散原油的能力^[19-20]。目前已有研究指出, 分散剂与燃料油配比(dispersant oil ratio, 简称 DOR)、温度及盐度均会影响溢油分散剂对原油的乳化效果^[10, 21]。本研究选取 120[#]燃料油为实验油品, 通过改变 DOR、温度、推波频率和取样深度, 对 GM-2 溢油分

散剂和微普紧急泄漏处理液的乳化效果及油滴粒径进行分析, 以确定溢油分散剂的最佳使用条件, 为溢油分散剂在实际溢油情况下科学、合理地使用提供参考依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

砂滤海水: 取自大连市星海湾, 经沉淀、过滤、煮沸后用于实验。盐度为 31.35, 电导率为 47.3 ms/cm, pH 值约为 8.13。

实验油品: 120[#]船用燃料油(购自大连船用燃料公司), 运动黏度低于 120 mm²/s, 直链烷烃占 36.38%, 芳香烃占 32.91%。

溢油分散剂: GM-2 型溢油分散剂(高效常规型分散剂, 购自青岛光明环保技术有限公司, 主要成分是脂肪酸酯表面活性剂和脂肪烃溶剂); 微普紧急泄漏处理液(生物修复型环保溢油处理产品, 购自北

收稿日期: 2015-12-2; 修回日期: 2016-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276105/D0608); 辽宁省博士启动基金项目(201501190)

[Foundation: The National Natural Science Foundation of China, No.41276105/D0608; The Doctoral Scientific Research Foundation of Liaoning Province, No. 201501190]

作者简介: 张欣欣(1991-), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事环境毒理学研究, E-mail: zhangxxj1109@163.com, 电话: 13889512235; 熊德琪(1967-), 通信作者, 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋生态毒理学与溢油损害评估研究, E-mail: xiongdeqi@dlmu.edu.cn

京威业源生物科技有限公司, 主要成分是脂肪醇醚表面活性剂、溶剂、助剂、微生物菌剂和营养液)。

1.2 主要仪器和试剂

实验仪器: 华夏科创 OIL460 型红外分光测油仪; Nikon ECLIPSE TS100 显微镜; Nikon D3300 单反数码相机; 机械造波器。

主要试剂: 红外测油专用 CCl_4 (天津光复精细化工研究所); 无水 Na_2SO_4 分析纯 (天津市科密欧化学试剂有限公司)。

1.3 实验方法

称取 50 g 120[#]船用燃料油及一定比例(参照实验变量 DOR)溢油分散剂于 20 L 海水中。启动造波器并计时, 取样时间分别为 3、10、30、60 和 120 min, 取样量为 10 mL (5 mL 用于萃取, 5 mL 用于测粒径)。样品需 4℃ 密封保存以备用。实验中分别设置海水的温度为 15、20、25℃; DOR 为无分散剂、10%、20% 和 30%; 推波频率为无波浪、0.5 次/s 和 1 次/s; 取样深度为液面下 3 cm 和 10 cm 处。

油滴粒径测定采用显微镜观察装置以及 Nano Measurer 1.2 图像处理软件。由于溢油分散剂加入初期反应迅速, 乳化液浓度变化较大, 油膜扩散与稀释作用也比较明显, 所以本实验选用 30 min 时的乳化液样品, 快速取样, 在显微镜下观察并拍照, 以获得更加稳定准确的对比结果。

1.4 油浓度测定

本实验采用红外光度法(GB/T16488-1996《水质石油类和动植物油的测定》)测定水样中油分浓度。

取 5 mL 样品于 100 mL 的分液漏斗中, 以 CCl_4 为萃取剂, 萃取两次。取下层液体置于锥形瓶中, 加

入过量无水 Na_2SO_4 干燥, 过滤后, 用红外分光测油仪测定其石油烃浓度。每组进行 3 次平行实验。

1.5 数据处理

根据国标《GB18188.1-2000 溢油分散剂技术条件》中实验室小规模油品配置办法, 30 s 乳化率和 10 min 乳化率的计算公式如下^[22]:

(1) 常规型分散剂乳化率计算公式

$$T = \frac{51.2C\alpha}{m_1 \times 10^6} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 浓缩型分散剂乳化率计算公式

$$T = \frac{51C\alpha}{m_1 \times 10^6} \times 100\% \quad (2)$$

其中: T 为乳化率, %; m_1 为标准油加入量, g; C 为由萃取液吸光度值从标准曲线上查得或根据回归计算的油分浓度, mg/L; α 为萃取液稀释倍数; 51.2 为人工海水、油及常规型分散剂体积(mL)之和的数值; 51 为人工海水及油体积(mL)之和的数值。

由公式(1)、(2)可见, 乳化率 T 和水样中油分浓度 C 成正比, 因此, 本研究将直接以乳化液浓度表示乳化率, 即乳化液浓度越大, 表示乳化率越高, 乳化效果越好。

2 结果与分析

2.1 温度对分散剂乳化效果的影响

当推波频率为 1 次/s, DOR 为 30%, 不同实验温度条件下 GM-2 分散剂和微普分散剂的乳化液浓度随时间的变化曲线如图 1 所示。在 3 min 时, 温度对 GM-2 分散剂乳化液浓度的影响并不明显; 10 min 时, 各温度条件下的乳化液浓度均达到峰值。随着反应

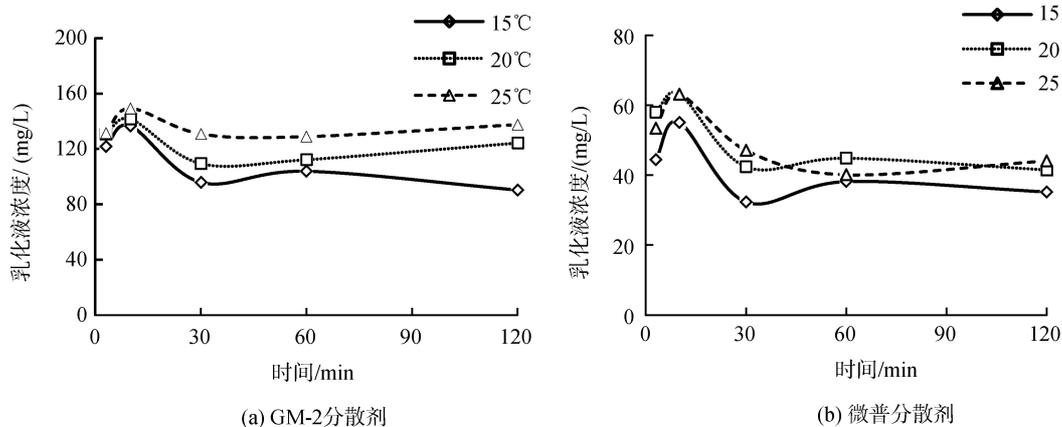


图 1 不同温度条件下 120[#]燃料油乳化液浓度随时间的变化(DOR 为 30%, 波浪频率 1 次/s)
Fig. 1 Effect of temperature on the concentration of 120[#] fuel oil emulsion (DOR = 30%, 1 wave/s)

时间的增加, 乳化液逐渐被稀释, 相较于 10 min 时均有所减小, 且逐渐趋于平稳。GM-2 分散剂乳化液浓度随时间变化整体呈先增大后减小的变化趋势, 且均随温度的升高而有所增大。与 GM-2 分散剂乳化液浓度变化相似, 微普分散剂加入后 10 min 时的乳化液浓度达到峰值, 且随时间变化呈现出先增大后减小再趋于平稳的趋势; 但其在 15℃ 时乳化液浓度较小, 而 20℃ 和 25℃ 的乳化液浓度差异并不显著。总体来看, GM-2 分散剂的乳化效果(乳化液浓度 90.35 mg/L)优于微普分散剂的乳化效果(乳化液浓度 63.29 mg/L)。

2.2 DOR 对分散剂乳化效果的影响

在推波频率为 1 次/s, 时间为 120 min 的条件下, 本文研究了分散剂加入 120 min 时的乳化液浓度随 DOR 的变化情况(图 2)。图中数据为平均值±标准误差($n=4$), “*”表示该组数据与相邻 DOR 组之间差异

显著($P<0.05$); “**”表示差异极显著($P<0.01$)。

由图可知, 不同 DOR(DOR 为 10%、20%和 30%)下, 两种分散剂的乳化液浓度均极显著大于无分散剂时($P<0.01$); 当 DOR 为 10%和 20%时, 随着 DOR 的逐渐增加, 两种分散剂的乳化液浓度均极显著增大($P<0.01$); 当 DOR 为 30%时, 各温度条件下的 GM-2 分散剂乳化液浓度增幅较小, 但仍极显著大于 DOR 为 20%时的乳化液浓度($P<0.01$); 对于微普分散剂, 温度为 15℃ 时其乳化液浓度与 DOR 为 20%时的乳化液浓度无显著差异($P>0.05$), 温度为 20℃ 和 25℃ 时, 差异显著($P<0.05$)。总体来看, 两种分散剂的乳化液浓度受 DOR 影响较大, 随着 DOR 增大, 乳化液浓度也逐渐增大, 与微普分散剂(乳化液浓度 44.11 mg/L)相比, DOR 对 GM-2 分散剂的乳化效果(乳化液浓度 51.81 mg/L)的影响更大。

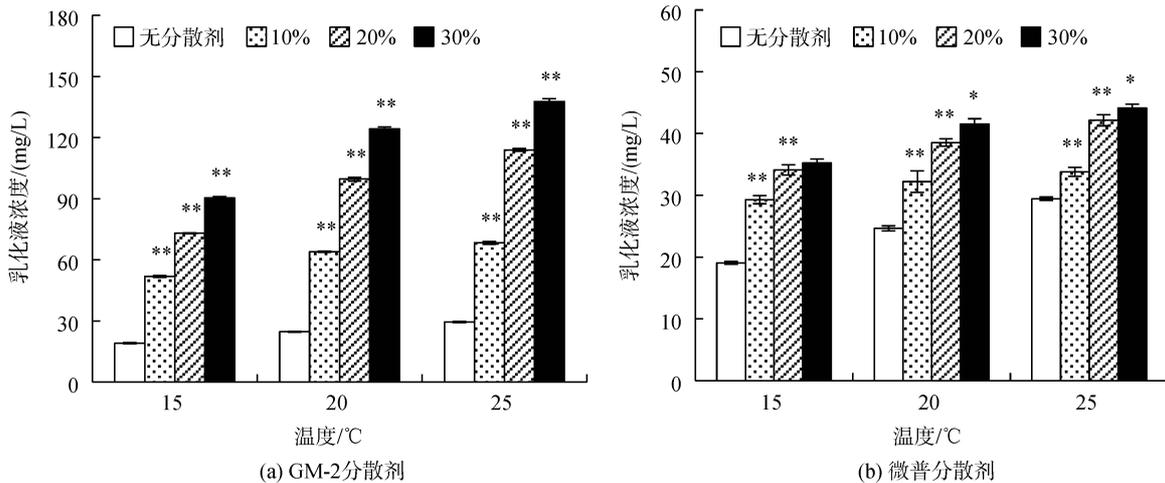


图 2 不同 DOR 条件下 120# 燃料油乳化液浓度随温度的变化(推波频率 1 次/s)

Fig. 2 Effect of DOR on the concentration of 120# fuel oil emulsion (1 wave/s)

2.3 波浪作用对分散剂乳化效果的影响

在温度为 20℃, DOR 为 30% 条件下, GM-2 分散剂和微普分散剂在不同推波频率条件下乳化液浓度随时间变化的曲线如图 3 所示。经对比发现, 两种分散剂的乳化液浓度在同一推波频率下随时间的变化规律相似。无波浪作用时, 乳化液浓度随着时间增加逐渐减小; 推波频率为 0.5 次/s 时, 乳化液浓度先减小后逐渐增大; 推波频率为 1 次/s 时, 乳化液浓度先增大后减小; 但不同推波频率下的乳化浓度最终均逐渐趋于稳定。总体来看, 两种分散剂在推波频率为 1 次/s 时的乳化液浓度均大于无波浪和推波频率为 0.5 次/s 时。将两种分散剂的乳化液浓度进行对比发现, GM-2 分散剂的乳化液浓度(乳化液浓度 66.13 mg/L)明显

大于微普分散剂(乳化液浓度 63.29 mg/L), 说明 GM-2 分散剂的乳化效果受波浪作用的影响更为突出。

2.4 取样深度与分散剂乳化效果的关系

为研究取样深度与乳化液浓度的关系, 本研究采用乳化效果更显著的 GM-2 分散剂进行实验, 同时设定温度为 20℃, 推波频率为 1 次/s。图 4 中表示不同 DOR 条件下, 取样深度为液面下 3 cm 和 10 cm 处时样品的乳化液浓度随时间的变化。图 4 a 中空白对照组中两条曲线的变化规律相似, 都是瞬时乳化液浓度较大, 后迅速减小, 再缓慢增大最终趋于稳定。而图 4 b, c, d, 在分散剂加入 10 min 时, 液面下 3 cm 处样品乳化液浓度出现了峰值, 浓度显著大于液面下 10 cm 处的样品, 且前者约为后者的 1.2~1.5 倍。

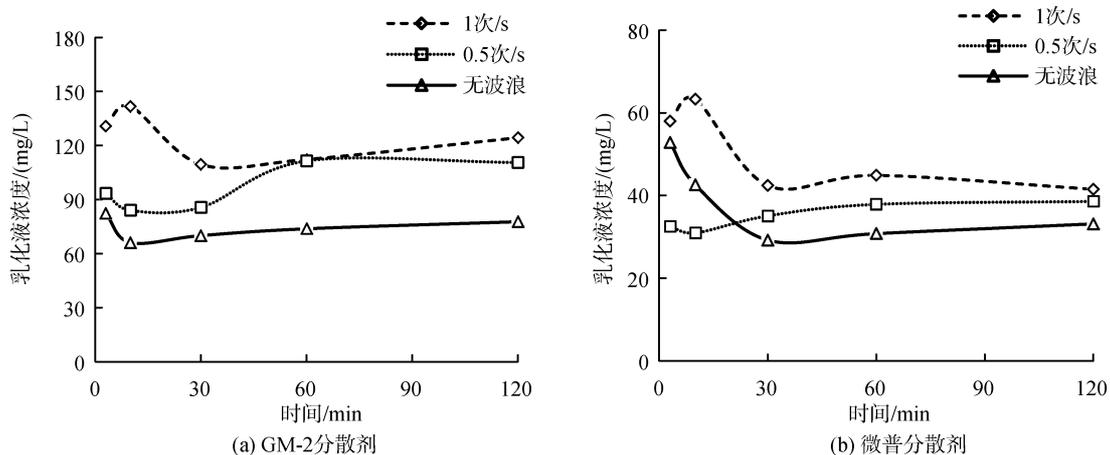


图 3 不同推波频率条件下 120[#]燃料油乳化液浓度随时间的变化(20℃, DOR 为 30%)

Fig. 3 Effect of wave frequency on the concentration of 120[#] fuel oil emulsion (20℃, DOR = 30%)

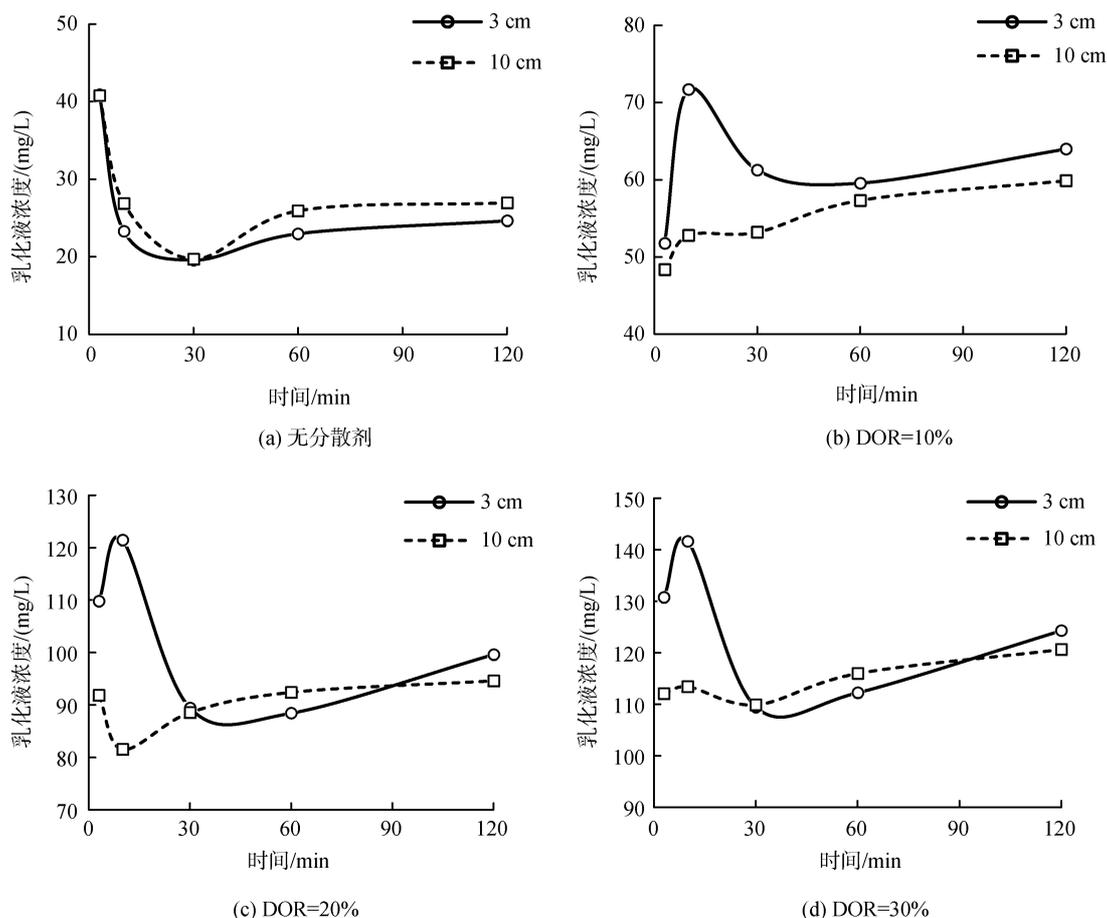


图 4 不同取样深度条件下 120[#]燃料油乳化液浓度随时间的变化(波浪频率 1 次/s, 20℃)

Fig. 4 Effect of sampling depth on the concentration of 120[#] fuel oil emulsion(1 wave/s, 20℃)

随着反应时间的增加, 液面下 10 cm 处样品的乳化液浓度逐渐增大; 而液面下 3 cm 处样品的乳化液浓度先减小, 随后逐渐增大, 120 min 时其乳化液浓度大于液面下 10 cm 处的乳化液浓度。

2.5 乳化液粒径分布分析

2.5.1 温度对乳化液粒径分布的影响

当推波频率为 1 次/s, DOR 为 30%时, 对乳化液的油滴粒径进行测定, 考察温度对乳化效果的影响

(图 5)。实验结果表明, 温度为 15℃时, 油滴粒径分布较为分散, 最小的油滴粒径为 1 μm, 最大的油滴粒径为 25 μm; 20℃时, 乳化液油滴粒径主要集中在 3~8 μm 之间, 仍有少量油滴粒径大于 15 μm; 温

度为 25℃时, 粒径大于 15 μm 的油滴基本没有出现, 油滴的平均粒径为 5.62 μm。由此可见, 在 DOR 与推波频率一定时, 温度越高, 油滴的粒径越小, 分布越集中。

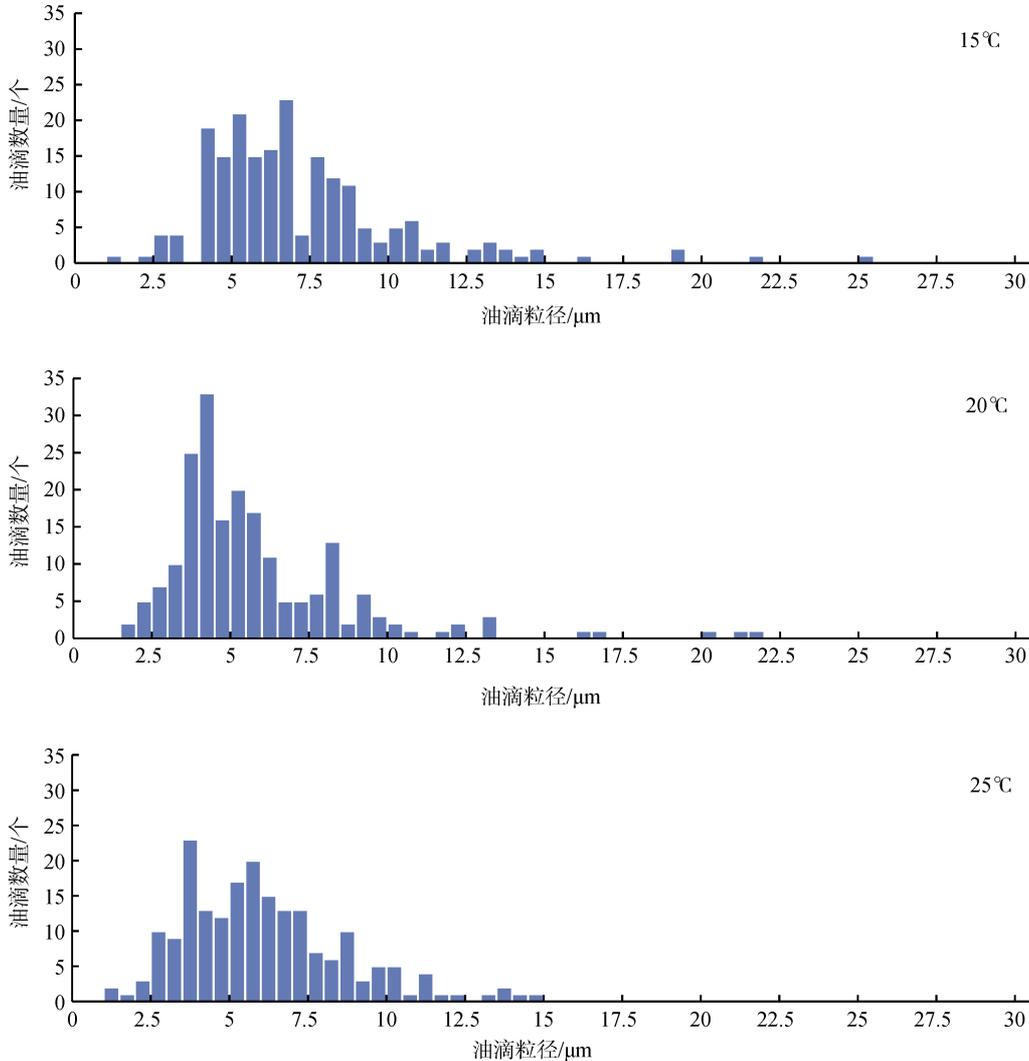


图 5 温度对乳化液粒径分布的影响(推波频率 1 次/s, DOR 为 30%)
 Fig. 5 Effect of temperature on particle size distribution(1 wave/s, DOR = 30%)

2.5.2 DOR 对乳化液粒径分布的影响

当温度为 20℃, 推波频率为 1 次/s, DOR 对乳化液油滴粒径分布的影响如图 6 所示。由图可知, 在无分散剂时油滴颗粒分布较为分散, 粒径从 8.5~53 μm 均有分布, 多数集中分布在 15~32 μm。加入分散剂后, 油滴平均粒径减小, 当 DOR 为 10%时, 油滴粒径分布在 1.5~39 μm 范围内, 以 3~15 μm 居多; 当 DOR 为 20%时, 油滴粒径主要分布在 4~14 μm 之间; 当 DOR 为 30%时, 油滴粒径集中在 2~8 μm, 仅有少数油滴粒径大于 10 μm。通过计算得出不同 DOR 条

件下, 乳化液油滴的平均粒径分别为: 23.69 μm, 11.32 μm, 8.81 μm 及 5.37 μm, 这说明随着 DOR 的增大, 经溢油分散剂处理后的油滴粒径逐渐变小, 分布也更加集中。

2.5.3 波浪作用对乳化液粒径分布的影响

当温度为 20℃, DOR 为 20%, 推波频率对乳化液油滴粒径分布的影响如图 7 所示。实验结果表明, 无波浪作用时乳化液中油滴粒径分布很不均匀, 多数集中在 8.5~31 μm 之间, 少数油滴分散于 45 μm 以上。而推波频率 0.5 次/s 时, 油滴粒径明显减小, 主

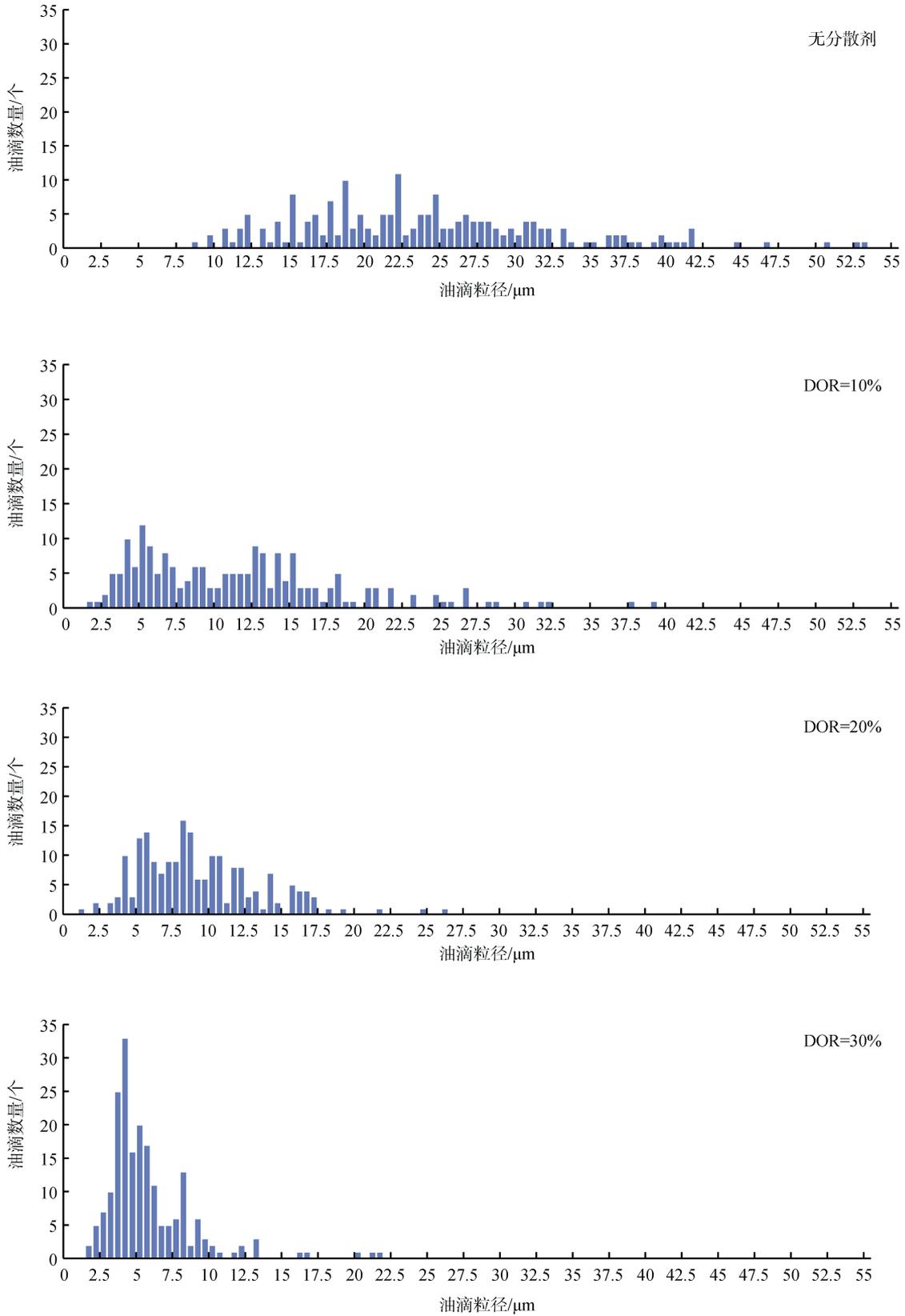


图 6 DOR 对乳化液粒径分布的影响(推波频率 1 次/s, 20℃)
 Fig. 6 Effect of DOR on particle size distribution (1 wave/s, 20℃)

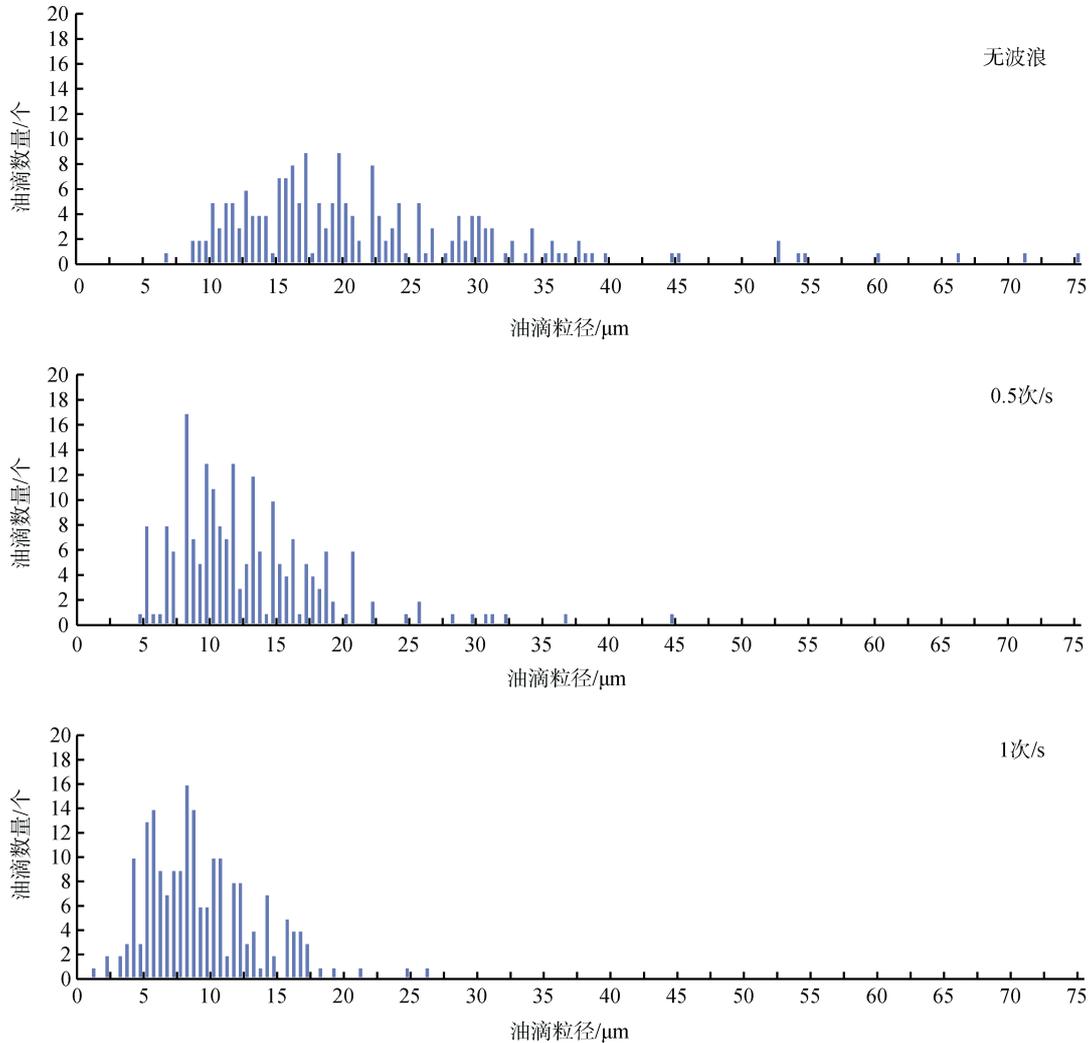


图7 推波频率对乳化液粒径分布的影响(20℃, DOR 为 20%)

Fig. 7 Effect of wave frequency on particle size distribution (20℃, DOR = 20%)

要集中在 5~20.5 μm 之间, 不再出现 45 μm 以上的油滴。当推波频率为 1 次/s 时, 颗粒进一步细化, 粒径为 4~14 μm 的油滴占绝大部分, 平均粒径约为 8.81 μm。由此可见, 波浪作用可以提高溢油分散剂的乳化效果。

3 讨论

自然条件下, 石油的降解过程较慢, 溢油事故中多通过喷洒溢油分散剂快速分散油膜, 减小油滴粒径, 进而提高石油降解速度, 减小溢油事故对沿海生态环境及沿岸设施的损害程度。本研究中, 不同 DOR 条件下的平均粒径分别为 23.69、11.32、8.81 和 5.37 μm, 该数据直接证明了分散剂有助于减小油滴粒径的观点。从整体来看, GM-2 分散剂的乳化效果显著优于微普分散剂, 但化学分散剂的使用一直备受争议, 有研究表明化学分散剂与石油烃形成的

乳化液会对海洋生物产生毒性效应^[23-28]。作为化学分散剂的替代品, 生物分散剂具有毒性小、高效、安全等优点, 在溢油事故的后期处理中具有很大的应用前景^[29]。

溢油分散剂的加入可以使开始集中于波浪槽中心的油滴逐渐扩散, 油水接触面积增大, 海水和油之间得到了充分混合, 乳化率提高, 乳化液浓度增大。而通过对油滴粒径的研究发现, 提高温度、DOR 和推波频率能够显著提高溢油分散剂的乳化效果, 任意一个条件的缺失都会使乳化效果不理想。当温度低于 20℃时油的粘度较大, 不利于分散剂乳化作用的发生, 此时, 乳化液浓度相对较小; 随着温度的升高油粘度逐渐减小, 油水界面的表面张力减小, 分散剂扩散速度加快, 乳化效果更明显。温度由 15℃ 升至 25℃时, 平均粒径也从 6.78 μm 减小至 5.62 μm,

说明适当地升高温度可提高分散剂的乳化效果,减小油滴粒径,所形成的 O/W 型的油滴其粒径更均匀。苏君夫^[30]使用大阪工业试验所法和 Labofina 法两种方法研究水温对溢油分散剂使用效果的影响时也得到了相类似的结论,IFO 380 溢油事故的成功处理也归功于水温^[31]。另外,研究发现 DOR 对乳化效果也有显著影响,当 DOR 增大时,表面活性剂的含量也随之增多,从而降低了油水界面的表面张力,乳化效果提高^[21],与微普分散剂相比,使用 GM-2 分散剂乳化液浓度增大得更为显著。当 DOR 为 20%~30%时,乳化液浓度增加变缓,说明分散剂的使用存在最佳 DOR;包木太等^[21]对其所使用的溢油分散剂的 DOR 进行研究发现,25℃时最佳 DOR 范围在 0.30~0.35 之间,20℃时为 0.45,15℃时为 0.5 以上;李品芳等^[32]指出溢油分散剂的用量起码为溢油量的 20%,以 30%~40%为宜,可见,分散剂的用量与乳化率并不是呈线性增加,过量使用反而可能会对海洋生态造成威胁。而波浪作用能使溢油分散剂尽快地发挥作用,并将水体表面的小油滴带入水体内部,从而增大了乳化液浓度^[33]。经计算得出当温度为 20℃,DOR 为 20%时无波浪作用、推波频率为 0.5 次/s、1 次/s 时的平均粒径分别为 22.01 μm,12.59 μm 和 8.81 μm,结果证明在波浪的作用下,油滴粒径会显著减小,进而增大乳化液浓度,该过程有利于溢油事故中油品的快速清除。但是,波浪作用过于强烈也会抑制分散剂与溢油之间的相互作用,致使溢油分散剂的乳化效果降低^[31]。

从图 4 来看,液面下的不同深度的乳化液浓度有所不同,刚加入溢油分散剂时,水体表面油膜被分散成小油滴,油滴密度小,主要富集在表面。随着时间的推移,原本在波浪槽中心较浅处的乳化液被逐渐稀释,油滴逐渐扩散到液面以下更深处,因此,液面下 10 cm 处的乳化液浓度不断升高,但增幅不显著。而 120 min 时液面下 3 cm 处的乳化液浓度略高于液面下 10 cm 处,这是由于水和油滴的密度差造成的。该结果表明,溢油事件发生时,分散剂的使用使海洋表层水中石油烃的含量增加,水体表面的浮游生物成为最容易受到污染的海洋生物。同时,浮游生物作为海洋生态系统食物链的基础,可通过生物放大作用,将石油烃污染传递给其他生物,进而威胁营养等级较高的海洋生物的生存^[12]。

4 结论

(1) 温度的升高可提高分散剂的乳化效果,乳

化液的油滴粒径也更小。但在溢油事故中海水的温度会随季节发生变化,该因素在一定程度上限制了分散剂的乳化效果。

(2) 分散剂与燃料油比对乳化效果影响较为显著,其对 GM-2 型溢油分散剂乳化效果的影响更为突出。随着分散剂投加量的增加,油滴粒径逐渐减小,但乳化液浓度增长速率逐渐变缓,说明需合理控制分散剂的用量,过多使用反而达不到预期乳化效果。

(3) 波浪作用也可在一定程度上减小油滴粒径,提高溢油分散剂的乳化效果,但波浪作用不易过于强烈,否则会降低分散剂的乳化效果。

(4) 取样深度较浅处的乳化液浓度较大,液面下 3 cm 处的乳化液浓度在 10~30 min 时约为液面下 10 cm 处乳化液浓度的 1.2~1.5 倍;最终,较浅处乳化液浓度大于较深处。

参考文献:

- [1] 陈涛. 美国海洋溢油事件的社会学研究[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 2012, 29(2): 110-117.
Chen Tao. Sociological study on American oil spill event[J]. China Agricultural University Journal of Sciences Edition, 2012, 29(2): 110-117.
- [2] 康维, 魏志强. 海上溢油污染及清理方法[J]. 清洗世界, 2012, 28(11): 29-32.
Kang Wei, Wei Zhiqiang. Marine oil spill pollution and cleaning method[J]. Cleaning World, 2012, 28(11): 29-32.
- [3] 杨省世. 我国水上船舶溢油应急能力现状及建设规划研究[J]. 海事研究, 2009, (3): 37-41.
Yang Shengshi. A study on the present status of the oil spill emergency response and capability plan of our country[J]. Maritime Workshop, 2009, (3): 37-41.
- [4] Mei H, Yin Y. Studies on marine oil spill and their ecological damage[J]. Oceanic and Coastal Sea Research, 2009, 8(3): 312-316.
- [5] 方曦, 杨文. 海洋石油污染研究现状及防治[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 78-80.
Fang Xi, Yang Wen. The current status of petroleum pollution of the ocean and the prevention[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(9): 78-80.
- [6] Tran T, Yazdanparast A, Suess E A. Effect of oil spill on birds: a graphical assay of the deepwater horizon oil spill's impact on birds[J]. Computational Statistics, 2014, 29(1): 133-140.
- [7] Sureda A, Tejada S, Box A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon levels and measures of oxidative stress in the Mediterranean endemic bivalve *Pinna nobilis* exposed to the Don Pedro oil spill[J]. Marine Pollution

- Bulletin, 2013, 71(1-2): 69-73.
- [8] 熊德琪, 刚猛, 吕福荣, 等. 0#柴油分散液对马粪海胆 CAT 活性的影响[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(3): 112-115.
Xiong Deqi, Gang Meng, Lü Furong, et al. Effects of No.0 diesel oil dispersion liquid on CAT activity of *Hemicentrotus pulcherrimus*[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36(3): 112-115.
- [9] Lee K W, Shim W J, Yim U H, et al. Acute and chronic toxicity study of the water accommodated fraction (WAF), chemically enhanced WAF (CEWAF) of crude oil and dispersant in the rock pool copepod *Tigriopus japonicas*[J]. Chemosphere, 2013, 92(9): 1161-1168.
- [10] 于沉鱼, 曹立新, 李玉琴. 消油剂乳化率影响因素研究[J]. 交通环保, 2000, 21(1): 18-23.
Yu Chenyu, Cao Lixin, Li Yuqin. Study on the factors of influencing the efficiency of emulsification of oil dispersant[J]. Environmental Protection in Transportation, 2000, 21(1): 18-23.
- [11] 闫季惠. 海上溢油与治理[J]. 海洋技术, 1996, 15(1): 29-34.
Yan Jihui. Oil spill and cleanup[J]. Ocean Technology, 1996, 15(1): 29-34.
- [12] 王超. 石油乳化液对海胆基因突变和甲基化的影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
Wang Chao. Effects of gene mutation and methylation under petroleum hydrocarbon emulsion pollution on sea urchin[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [13] Zheng M, Ahuja M, Bhattacharya D, et al. Evaluation of differential cytotoxic effects of the oil spill dispersant Corexit 9500[J]. Life Science, 2014, 95(2): 108-117.
- [14] 范志杰. 化学消油剂处理海面溢油效率问题的分析和讨论[J]. 海洋通报, 1991, 10(1): 95-99.
Fan Zhijie. Effectiveness of chemical dispersants in treating oil spill at sea[J]. Marine Science Bulletin, 1991, 10(1): 95-99.
- [15] 高亚丽, 朱睿, 吕昕璐, 等. 生物降解型消油剂处理燃料油对黄海胆(*Glyptocidaris crenularis*)胚胎发育的影响[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 535-542.
Gao Yali, Zhu Rui, Lü Xinlu, et al. Effects of fuel oil processed by bioremediation dispersant on embryonic development of *Glyptocidaris crenularis*[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(4): 535-542.
- [16] 赵玉慧, 张友箴, 孙培艳. 化学消油剂在溢油污染控制中的应用及其今后发展方向[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(S1): 97-100.
Zhao Yuhui, Zhang Youchi, Sun Peiyan. Application and further development of dispersants in pollution control of oil spill[J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(S1): 97-100.
- [17] 赵淑梅, 郑西来, 高增文, 等. 生物表面活性剂及其在油污生物修复技术中的应用[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 234-238.
Zhao Shumei, Zheng Xilai, Gao Zengwen, et al. Biosurfactant and its application to bioremediation for oil pollution[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 234-238.
- [18] Desai J D, Banat I M. Microbial production of surfactants and their commercial potential[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 1997, 61(1): 47-64.
- [19] 吴之庆, 徐学仁. 消油剂乳化率检验中标准曲线的选择[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(2): 46-52.
Wu Zhiqing, Xu Xueren. The selection of the standard curve for inspection of emulsifiability of dispersants[J]. Marine Environmental Science, 1995, 14(2): 46-52.
- [20] 李明, 钱国栋, 牛志刚, 等. 消油剂乳化性能评价方法及影响因素研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2015, (2): 52-57.
Li Ming, Qian Guodong, Niu Zhigang, et al. Research progress in the evaluation methods and influential factors of dispersants' emulsifying properties[J]. Ocean Development and Management, 2015, (2): 52-57.
- [21] 包木太, 管丽君, 马爱青, 等. 化学消油剂乳化效果影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(9): 53-58.
Bao Mutai, Guan Lijun, Ma Aiqing, et al. Study on influencing factors of chemical oil dispersant emulsification[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(9): 53-58.
- [22] 中华人民共和国国家标准. GB18188.1-2000. 溢油分散剂 技术条件.
Standard of the Peoples' Republic of China. GB 18188.1-2000. Oil Spill Diapersant- Technical Regulations.
- [23] 程树军, 杨丰华, 刘忠华, 等. 石油开发污染物毒性监测的实验生物筛选 II. 消油剂对水生动物的毒性比较[J]. 热带海洋, 1999, 18(3): 95-99.
Cheng Shujun, Yang Fenghua, Liu Zhonghua, et al. Selection of laboratory animals for toxicity monitoring of oil exploitation contaminants II. Comparative study on acute toxicity of oil dispersant to aquatic animals[J]. Tropic Oceanology, 1999, 18(3): 95-99.
- [24] 于晓明, 刘海映, 张国胜, 等. 消油剂对红鳍东方鲀幼鱼的急性毒性效应[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(2): 179-182.
Yu Xiaoming, Liu Haiying, Zhang Guosheng, et al. Acute toxicity of oil dispersant to redfin puffer *Takifugu rubripes*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(2): 179-182.
- [25] Koyama J, Kakuno A. Toxicity of heavy fuel oil, dispersant, and oil-dispersant mixtures to a marine fish,

- Pagrus Major*[J]. Fisheries Science, 2004, 70(4): 587-594.
- [26] Shafir S, Van Rijn J, Rinkevich B. Short and long term toxicity of crude oil and oil dispersants to two representative coral species[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(15): 5571-5574.
- [27] 段美娜, 杨柏林, 丁光辉, 等. 消油剂处理溢油对海胆 Cy II a 和 SP-Runt 基因突变效应[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 468-472, 480.
Duan Meina, Yang Bolin, Ding Guanghui, et al. Effects on mutation of Cy II a and SP-Runt gene in sea urchins of dispersed oil[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 468-472, 480.
- [28] Almeda R, Hyatt C, Buskey E J. Toxicity of dispersant Corexit 9500A and crude oil to marine microzooplankton[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 76-85.
- [29] 张国平, 郭志新, 陈厚忠. 生物处理法在船舶溢油事故中的应用探讨[J]. 交通科技, 2008, (3): 107-108, 111.
Zhang Guoping, Guo Zhixin, Chen Houzhong. Discussion on the biological purification method for the ship oil spillage[J]. Transportation Science & Technology, 2008, (3): 107-108, 111.
- [30] 苏君夫. 影响消油剂使用效果的因素研究[J]. 海洋环境科学, 1990, 9(4): 18-23.
Su Junfu. Study on the factors of influencing the efficiency of emulsification of oil dispersant[J]. Marine Environmental Science, 1990, 9(4): 18-23.
- [31] 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.
- [32] 李品芳, 陈鹭玲. 关于化学消油剂的几点思考[J]. 交通环保, 2002, 23(3): 30-32.
Li Pinfang, Chen Luling. Discussion on chemical dispersants[J]. Environmental Protection in Transportation 2002, 23(3): 30-32.
- [33] 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.

Factors influencing dispersant effectiveness and particle size distribution

ZHANG Xin-xin¹, YU Yue¹, HE Shan¹, XIONG De-qi¹, JIANG Ling-ling¹, ZHU Rui²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. China national offshore oil corporation Tianjin branch, Tianjin 300452, China)

Received: Dec. 29, 2015

Key words: Oil spill dispersant; 120[#] fuel oil; Dispersant effectiveness; Particle size distribution

Abstract: The effectiveness of chemical and biological dispersants (GM-2 and Weipu) on 120[#] fuel oil and their particle size distributions were investigated under different conditions. The results demonstrate that dispersant effectiveness obviously increases with increasing temperature, dispersant oil ratio (DOR), and wave frequency. The optimum dispersant effectiveness demanded smaller particle size, more centralized particle distribution, and higher concentrations of emulsion at shallower sampling depths. The optimum operation conditions of the GM-2 dispersant were T = 25 °C, DOR = 30%, 1 time/s wave frequency, and average particle size of 5.62 μm under these conditions.

(本文编辑: 康亦兼)