

海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型的构建

吴晓丹^{1,2}, 宋金明¹, 李学刚¹, 袁华茂¹, 张 默^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 溢油扩展过程中油膜厚度的准确获得是进行溢油量估算和损失评估中需要解决的关键科学问题, 通过揭示溢油扩展中油膜厚度的理论变化特征来获得油膜厚度随溢油性质和海洋环境条件变化的定量关系, 构建海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型, 对溢油量估算至关重要。依据 Lehr 提出的油膜椭圆扩展模型构建了油膜厚度随溢油性质和海洋环境条件变化的定量关系, 剖析了溢油扩展过程中油膜厚度的变化特征。油膜厚度在溢油发生后最初 2 小时内会迅速减小, 此后衰减速度逐渐减小直至趋于稳定。对于原油来说, 通常在 6~7h 内会达到最小油膜厚度, 扩展终止。溢油密度对油膜厚度的影响表现为密度大的溢油初始厚度大, 达到平衡的时间也较长; 风速对于油膜扩展的影响巨大, 风速越大越有利于油膜的扩展, 油膜厚度越小; 温度也通过影响溢油油膜密度来影响油膜厚度的变化, 一定范围内, 高温促进油膜的扩展, 加快油膜厚度的变化速度。除溢油密度、风速和温度外, 溢油方式、海流、潮汐和溢油时间等因素也会影响油膜厚度的变化。

关键词: 溢油; 扩展; 油膜厚度; 变化特征; 影响因素

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)02-0068-07

近年来, 随着经济的迅速发展, 海上石油的开采与运输成为获取能源的重要途径, 海洋溢油时有发生, 导致海洋生态系统的毁灭性破坏, 海上溢油已成为近海生态环境恶化的重要因素, 成为主要的海洋灾害之一。溢油进入海洋水体后, 会迅速向四周扩展形成油膜。在发生溢油最初的数小时内, 扩展是溢油最为主要的动态过程。溢油事故发生后油膜的扩展主要受流场、风应力和随机扩散的影响, 其他还受沉降、降解和乳化等物理化学过程的影响^[1], 随着溢油扩展的进行, 油膜面积不断扩大, 油膜厚度逐渐减小。

油膜厚度是估算溢油量的关键参数, 同时也是应对溢油事故特别是制定溢油控制措施和评估分散剂性能必须知道的重要指标, 油膜厚度变化过程的解析对于阐明油膜扩展动力学机理也具有重要意义^[2]。

目前, 常用的获得海洋油膜厚度的方法主要有两种。一是将海面油膜板块化, 确定不同区域的油膜厚度。确定方法包括油色目测法和遥感测油法, 前者是利用油膜色彩对应的油膜厚度关系来估算油膜厚度^[3, 4], 此法受评估人主观影响大, 还受不同光线和色彩背景条件影响, 因此评估结果存在很大误差; 后者是依据油膜在不同光谱区反射、散射、吸收不同

的特征, 选择适当的光谱区来估算溢油油膜厚度^[5]。利用遥感技术估测油膜厚度还有许多技术难题, 尤其是天气条件、非油膜水色干扰等极大限制了其准确性^[6]。

另一种获得油膜厚度的方法是通过建立溢油扩展模型, 利用油膜扩展数学模型来估算油膜的厚度, 目前这种方法应用不多。在所有溢油扩展模型中, 应用最多的是 Fay 模型及其改进型。Fay^[7]针对油在水面的实际受力情况, 首先提出平静海面油膜为圆形扩展, 提出了油膜扩展经历的重力-惯性力平衡、重力-黏性力平衡和表面张力-黏性力平衡三个阶段。它的前提是海面平静, 忽略海流、风、波等的影响, 在大体积溢油扩展中, 油的性质不变, 垂向平衡, 在平静的水面上, 油膜扩展始终保持圆形, 扩展范围可以用直径来衡量。Fay 溢油扩展模型显然与实际海况有明显的差异, 也必然带来油膜厚度估算的很大误

收稿日期: 2009-08-06; 修回日期: 2009-11-10

基金项目: 国家海洋公益性项目(20080513); 国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估重点实验室开放基金(200912)

作者简介: 吴晓丹(1985 -), 女, 山东胶南人, 在读研究生, 主要从事海洋生物地球化学研究, E-mail: xiaodanwu@163.com; 宋金明, 通信作者, E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

差。Mackay 在 Fay 溢油扩展模型中加入了风的影响，分别建立了厚油膜和薄油膜的扩展方程^[8]。Elliott 等^[9]的研究表明，不仅风而且由海流引起的湍流对油膜扩展都具有重要作用，同时溢油本身性质(如黏度和密度等)变化也会对溢油扩展产生影响。Lehr 等^[10, 11]对 Fay 溢油扩展模型进行了修正，考虑了流场及风场对油膜扩展的影响，认为油膜在海洋中的扩散不是圆形而是椭圆形的，长轴方向与风向一致。这就是油膜椭圆扩展模型，该模型比较实际地反映了油膜在风向上拉长的现象。表面流的剪切力使得油膜延伸扩展，仅仅微风也将导致顺风向上油膜厚度较厚^[12]。MIT 模式在 Fay 传统模式的基础上，考虑了油膜自身特征所致的扩展以及环境动力形成的油膜分散，建立了油膜扩展分散微分方程。

本文以 Fay 模型为基础，转化 Lehr 等^[13]油膜椭圆扩展模型表达式，并考虑到温度的影响，建立了油膜厚度随溢油性质和海洋环境条件变化的定量关系式，据该关系式逐因素分析了溢油扩展过程中油膜厚度的变化，总结了影响油膜扩展的主要因素，构建了海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型，这对确定一种比较准确、实时且全天候的海洋油膜厚度获取方法，最终获取溢油量具有重要科学意义和实际价值。

1 海洋溢油油膜椭圆扩展模型

Fay^[7]根据海面油膜所受的主导驱动力和阻力的情况，将油膜扩展过程分为 3 个阶段，分别为重力-惯性力阶段，重力-黏性力阶段和表面张力-黏性力阶段。除了在特大型的溢油事故中，重力-惯性力阶段将仅仅持续几分钟，而在最后的表面张力-黏性力阶段，油膜已经大部分发生风化分散至水体或是破裂成碎片。因此，估算溢油量要着重考虑中间的重力-黏性力阶段，此阶段的扩展公式可表述为：

$$S = k \left(\frac{(\rho_w - \rho_o) g V^2 t^{3/2}}{\rho_o \sqrt{\nu_w}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

其中， S 为油膜面积， g 为重力加速度， V 为初始油膜体积， t 为溢油时间， ν_w 为水动力黏度， ρ_o 为油的密度， ρ_w 为水的密度， k 为常数。根据上述公式可估计被观察区域的初始溢油量，但现场数据^[14, 15]表明 Fay 模型低估了油膜的增长，因此估算的溢油量并不准确。

Fay 模型之所以准确性差是因为它是建立在假设平静海面上油膜以圆形扩展的前提下的。而在实际溢油中，环境条件对溢油面积和油膜形状有重要

的影响，其中风就是一个重要的因素。现场监测表明，油膜在海洋中的扩散往往不是圆形而是椭圆形的，长轴方向与风向一致。

Lehr 等^[13]以 Fay 模型为基础加上了风的影响，修订了 Fay 扩展方程，建立油膜椭圆扩展模型：

$$S = \frac{\pi}{4} QR \quad (2)$$

$$Q = C_1 [(\rho_w - \rho_o) / \rho_o]^\alpha V^\beta t^\gamma \quad (3)$$

$$R = C_1 [(\rho_w - \rho_o) / \rho_o]^\alpha V^\beta t^\gamma + C_2 W^\delta t^\xi \quad (4)$$

其中， Q 和 R 分别为椭圆形油膜的长轴和短轴长度。假定 $W=0$ ，可以得出 $\beta=1/3$ ， $\gamma=1/4$ 。通过经验得到其他常数分别为 $\alpha=1/3$ ， $\delta=4/3$ ， $\xi=3/4$ ， $C_1=1.7$ ， $C_2=0.03$ 。

综合式(2)(3)(4)，得 Lehr 油膜椭圆扩展模型总表达式：

$$S = 2.27 [(\rho_w - \rho_o) / \rho_o]^{2/3} V^{2/3} t^{1/2} + 0.04 [(\rho_w - \rho_o) / \rho_o]^{1/3} V^{1/3} W^{4/3} t \quad (5)$$

其中，溢油面积 S 的单位为 10^3 平方米，风速 W 的单位为节，溢油体积 V 的单位为桶，溢油时间 t 的单位为分钟。

本文对 Lehr 油膜椭圆扩展模型总表达式(5)形式进行如下转化：

$$V = Sh \quad (6)$$

将油膜厚度(h)作为参数引入到定量表达式中，并在式中考虑到温度对溢油密度的影响^[16]：

$$\rho_o = \rho_{o,T} = \rho_{o,20} + (13.561 - 0.191x_1) \times 10^{-3} - (63.9 - 0.87x_1) \times 10^{-5} T^{1.02} \quad (7)$$

$$x_1 = \text{INT} [100(\rho_{o,20} - 0.8001)] \quad (8)$$

综合式(5)(6)(7)(8)，推导得本文所建油膜厚度随溢油性质(密度、溢油类型)和海洋环境条件(风速、温度)等变化的定量关系式：

$$h = \frac{\rho_{o,T}}{(\rho_w - \rho_{o,T})S} \left(\frac{-179W^{4/3}t + \sqrt{(179W^{4/3}t)^2 + 30940t^{1/2}S}}{15470t^{1/2}} \right)^3 \quad (9)$$

其中，溢油面积 S 的单位为平方米，风速 W 的单位为米/秒，溢油时间 t 的单位为分钟，油膜厚度 h 的单位为米， ρ_o 、 ρ_w 单位为克/立方厘米， $\rho_{o,T}$ 为对应温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 时的原油密度，单位为 g/cm^3 ， x_1 为与密度有关的模数，INT 是取整函数。

式(9)即为本文所构建海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型，该式基于 Lehr 油膜椭圆扩展模型总表

达式(5), 通过转化表达方式引入参数油膜厚度(h)获得。较 Lehr 油膜椭圆扩展模型, 除另考虑到了温度的影响外, 海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型还更加直观地反映了海洋溢油油膜厚度与风速、溢油密度等因素的定量关系, 为将来确定比较准确、实时且全天候的海洋油膜厚度获取方法提供重要科学依据。

2 溢油油膜的扩展特征与厚度的变化

2.1 油膜厚度随时间变化的基本特征

油膜扩展到一定程度后会停止扩展, 其原因是净扩展系数由正值变为负值, 因此变化的快慢是决定油膜扩展最终厚度的因素。然而判断的变化并不是一件简单的事情, 首先因为值是由溢油中极低浓度的表面活性剂决定的; 其次原油是由各种不同组分组成, 各自具有不同的值、不同的挥发性和溶解性; 再次海水的温度、盐度和其他的生物特征在一定程度上也影响值^[17]。研究表明, 当原油扩展的最终油膜厚度达到 0.01 cm, 汽油、煤油和轻质柴油等最终油膜厚度达到 0.001 cm 时, 扩展过程将终止^[18]。

现场监测表明海面溢油呈椭圆形扩展, 这是因为如果污染物进入到一个均匀的速度场, 它们将会随着流场均匀地平流且不发生变形, 然而由于流场空间上并不均匀, 速度具有梯度, 所以污染区域将会沿着主要风速梯度方向延长并且具有明显增大的扩散系数。Jeffery^[19]报道, 油膜的长轴在 4 天内随着时间线形增长, 而短轴在最初几个小时内迅速增长, 之后趋于稳定。Cormack^[20]结果表明, 油膜短轴长度和 Fay 公式预测的结果基本一致, 而长轴长度则是预测的 10 倍之多。Elliott 等^[10]实验结果表明, 长轴随时间线形增长, 而短轴在前 20 min 迅速增长, 此后几乎趋于稳定不增长状态。影响油膜扩展的因素很多, 其中风速是决定长轴增长的最主要的因素, 风不仅可以产生垂直剪切也可以决定浪高, 影响产生的油滴尺寸。密度、黏度和表面张力等因素也将影响油滴尺寸和增长速度。

从前人的研究不难看出, 椭圆形油膜的短轴会在很短时间内迅速增长, 然后趋于稳定; 而长轴则会在扩展终止前不断增长。据此可以推知, 油膜面积会在短时间内增长很快, 之后增长趋于缓慢, 相应的, 油膜厚度在最初一段时间内会迅速减少, 之后缓慢减小, 最后扩展至最小的油膜厚度。

图 1 是根据式(9)获得的海上溢油油膜厚度(h)随时间(t)变化的关系, 其前提是针对 $T=20^{\circ}\text{C}$, 原油 $\rho_{o,T}=0.950\text{ g/cm}^3$, $\rho_w=1.03\text{ g/cm}^3$, $w=5\text{ m/s}$, $s=10^6\text{ m}^2$ 。

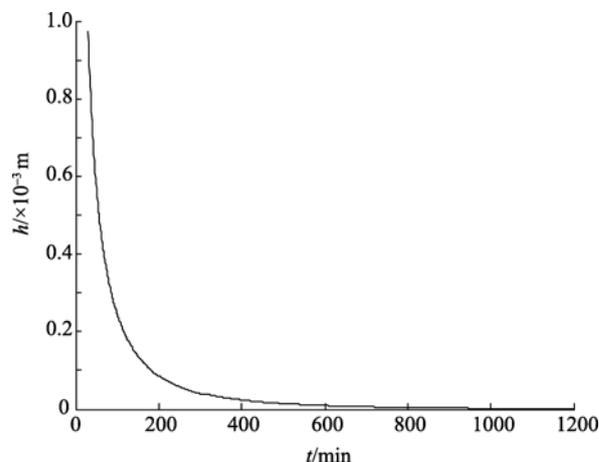


图 1 海上溢油油膜厚度随时间变化

Fig. 1 Variation of oil-membrane thickness with the time

溢油发生的前 30 min, 海面油膜处于不稳定期, 在此不考虑其油膜厚度的变化特征。图 2 是根据图 1 将溢油的前 10 h 分为 30~120 min、120~240 min、240~360 min、360~480 min、480~600 min 五段考虑了的油膜厚度的衰减速度。

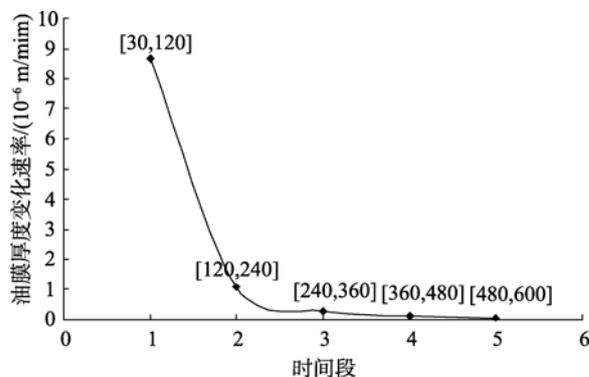


图 2 海洋溢油油膜厚度衰减速率曲线

Fig. 2 Decreasing rate for oil-membrane thickness of oil spill

图 1 表明, 油膜厚度随着溢油时间的流逝不断减小, 结合图 2, 油膜厚度在前 2h 的衰减速度远大于后面几个小时, 因此可推知在溢油发生后 2h 内油膜厚度迅速减小, 这是因为这一阶段椭圆形油膜的短轴迅速增加, 使得油膜面积迅速增加, 从而油膜厚度会迅速变小; 而在 2h 以后油膜厚度的衰减速度逐渐减少并趋于稳定, 这是因为此时椭圆形油膜的短轴基本上不变, 而长轴线形增加。如果原油扩展油膜厚度到 0.01 cm 时不再扩展, 那么 $\rho_o=$

0.950 g/cm³ 原油油膜的扩展将在 6~7 h 后趋于平衡。

2.2 不同条件下海上溢油油膜厚度的变化特征

2.2.1 不同油密度油膜厚度的变化

依据公式(9), 如果 $T=20^{\circ}\text{C}$, $\rho_w=1.03\text{ g/cm}^3$, $W=5\text{m/s}$, $S=10^6\text{m}^2$, 改变溢油密度 $\rho_{o,T}=0.965\text{ g/cm}^3$ (重油), $\rho_{o,T}=0.950\text{ g/cm}^3$ (原油), $\rho_{o,T}=0.925\text{ g/cm}^3$ (柴油) 下油膜厚度随着时间的变化曲线, 如图 3 所示。

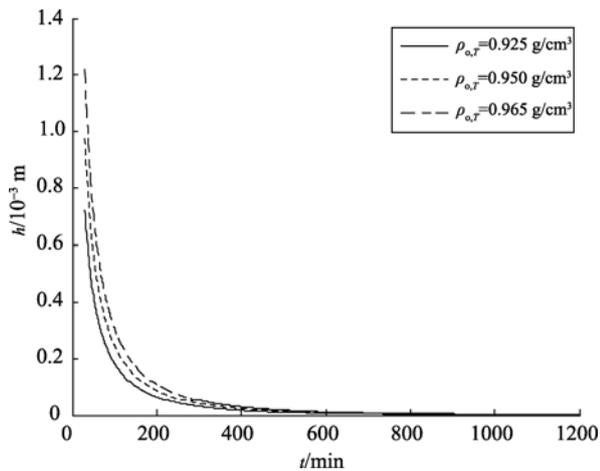


图 3 不同密度溢油油膜厚度随时间变化

Fig. 3 Variation of oil-membrane thickness for different densities of oils

图 3 表明密度对于油膜扩展的速度影响不大, 不同密度的溢油在海面中扩展的趋势基本一致, 只是密度较大的溢油初始油膜厚度会较大, 达到平衡的时间也较长而已。

2.2.2 不同风速溢油油膜厚度随时间变化

依据公式(9), 如果 $T=20^{\circ}\text{C}$, $\rho_{o,T}=0.950\text{ g/cm}^3$ (原油), $\rho_w=1.03\text{ g/cm}^3$, $S=10^6\text{m}^2$, 改变风速 $w=0\text{ m/s}$, $w=5\text{ m/s}$, $w=10\text{ m/s}$ 条件下油膜厚度随着时间的变化曲线, 如图 4 所示。

以往研究表明, 溢油长期扩展的主要因素是油膜和水表面的风力, 油膜运动速度大约为水表面 10m 以上风速的 3%。图 4 也很好地验证了这一结论, 当 $w=0$ 时, 油膜厚度的变化较 $w=5\text{m/s}$, $w=10\text{m/s}$ 时显然要慢得多, 这也表明之前的理论中假定油膜只是在平静水面上的扩展是片面的, 风速对于油膜扩展的影响是不容忽视的。风速越大越有利于油膜的扩展, 这是因为风速是决定长轴增长的最主要的因素, 风不仅可以产生垂直剪切也可以决定浪高, 影响产生的油滴尺寸^[10], 大油滴能够很快扩展而小油滴则

比较缓慢^[12]。

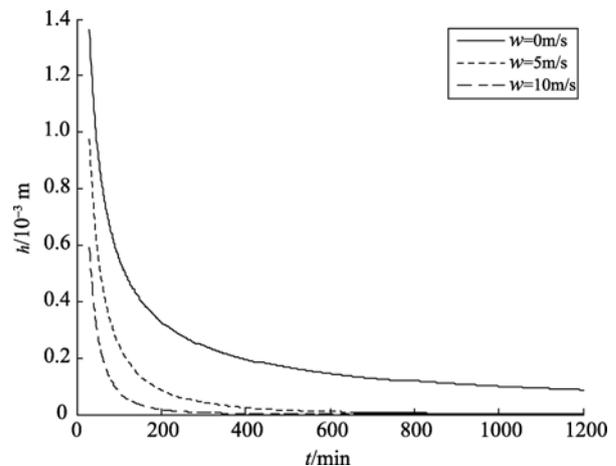


图 4 不同风速条件下溢油油膜厚度随时间变化

Fig. 4 Variation of oil-membrane thickness for different wind speeds

2.2.3 不同温度溢油油膜厚度随时间变化

依据公式(7), (8), (9), 如果 $\rho_{o,20}=0.950\text{ g/cm}^3$ (原油), $\rho_w=1.03\text{ g/cm}^3$, $S=10^6\text{m}^2$, 改变温度 $T=10^{\circ}\text{C}$, $T=20^{\circ}\text{C}$, $T=30^{\circ}\text{C}$ 条件下油膜厚度随着时间的变化曲线, 如图 5 所示。

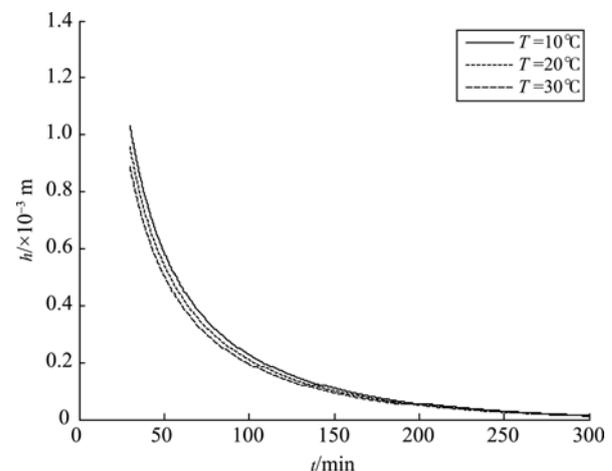


图 5 不同温度条件下溢油油膜厚度的变化

Fig. 5 Variation of oil-membrane thickness for different temperatures

海洋水体温度会影响溢油密度的变化, 进而影响海面油膜的扩展。图 5 中不难看出, 高温会加快油膜的扩展, 使得溢油迅速铺展在海面上达到油膜扩展的最小厚度。除了通过改变溢油密度来影响油膜扩展外, 温度还会影响包括蒸发、乳化在内的风化过程, 这些过程也会引起油膜厚度的变化。

图 3、图 4、图 5 表明, 溢油密度、风和温度均是油膜厚度变化的影响因素, 根据文献报道、经验总结和上述分析, 温度只是会影响溢油的密度, 而密度只是会影响溢油扩展的初始厚度和达到扩展所需要的时间, 风速应是对油膜厚度变化影响最大的因素, 图 4 中可明显看出, 风的加入大大地加快了油膜扩展的速度, 同时风速越大, 越利于扩展。通过认识风对油膜扩展重要性, 可以提高油膜厚度估算的准确性, 并且可以根据实际海况制定合理的处理溢油的措施。

3 扩展中影响油膜厚度的其他因素

影响油膜扩展的因素也必将相应的影响油膜厚度的变化。API 的研究表明海洋环境要素会影响溢油的扩展过程。根据前人研究和上述应用推导的油膜厚度的表达式绘制的图形, 影响油膜厚度的因素除油种、风速和温度外, 还有以下几个方面:

(1)溢油方式。常见的溢油方式主要有瞬时溢油与连续溢油两种。在连续溢油方式下, 后期入水溢油的加入会对前期入水溢油的扩展过程产生影响, 而瞬时溢油则没有这种情形, 因为每一部分都要经历相同的过程^[12]。从溢油方式不同的结果来看, 连续溢油的扩展尺度比同条件下瞬时溢油的扩展尺度要大。而实际溢油事故多为在一定时段内的连续溢油, 无论在有风或无风时, 它的影响范围都大于瞬时溢油。

(2)风生海流。通过风水槽溢油实验, 研究了不同风、水流组合情况下溢油的扩展情况。结果表明, 风与水流同向时, 风速的变化对于瞬间溢油油膜的扩展尺度影响很小, 对连续溢油油膜的扩展尺度随风速增加而增加; 风与水流反向时, 油膜的扩展尺度与风速和水流速度之间的相对大小有关^[21]。

(3)潮汐。通过带吹风的潮汐水槽中的溢油试验及分析, 发现溢油在非非常的潮汐水流中的扩展易受潮流变化的影响。在无风条件下, 潮汐水流的周期变化对油膜的扩展产生决定影响, 涨潮时, 油膜常被压缩, 而落潮时, 油膜却常被拉伸。油膜在紊动水流、风浪及涨、落潮波的作用下, 开始发生破碎, 破碎作用被卷入水中参与乳化或其他风化过程中去。对于感潮溢油的预警来说, 切断溢油源显然是控制影响范围的首要措施, 其次在涨潮阶段对溢油尽快进行抢险回收(因此时油膜被压缩较厚)可减小作业难度^[22]。

(4)溢油时间。溢油时间的不同会使油膜的扩展处于不同的阶段, 有不同的力起主导作用, 所以这也是一个影响因素, 各个阶段的大致时间可以根据 Fay 三阶段的两相邻阶段扩展直径相等的条件来确定。

4 结语

溢油进入海洋环境后经过扩展过程, 油膜表面积变大, 但厚度相应变小。平静海面上, 油膜呈圆形扩展, 并将依次经历重力-惯性力阶段, 重力-黏性力阶段和表面张力-黏性力阶段, Fay 和 Blokker 提出了最为广泛的扩展公式, 而实际结果表明, Fay 理论得出的结果大大低估了油膜的实际增长。然而实际溢油条件并非发生在平静海面上, 在假设扩展油膜形状为椭圆形且长轴方向与风向方向一致的前提下, 考虑到风速等的影响后取得了较好的预测结果。本文根据前人研究和 Lehr 提出的油膜椭圆扩展模型中的方程建立了油膜厚度随溢油性质和海洋环境条件变化的定量关系, 总结了影响油膜扩展的因素主要有油种、风速、温度、溢油方式、风生海流、潮汐和溢油时间等, 其中风速可能是影响油膜扩展的最主要的因素, 这些因素也将相应影响油膜厚度的变化。然而国内外大量研究主要考虑海洋流场, 对于风环境要素采用简单的参数化方法计算, 使得风场在时间(通常采用一常量或几小时一次)和空间(通常全场采用均一的数值)的分辨率不够, 影响预测效果, 特别是当溢油事故发生在恶劣的天气条件下, 其预测效果更得不到保证, 而且有必要加强海浪对溢油扩展的影响研究, 以提高溢油预报精度。

以上溢油扩展油膜厚度的理论模型主要考虑了风速、温度等因素的影响, 而且模型的解涉及到的参数繁多, 在实际情况下, 为在较短时间内获得溢油量, 需要快速给出溢油油膜厚度, 所以应对溢油扩展油膜厚度模型结果中的繁杂参数通过模拟试验和现场订正予以简化, 同时还应考虑其他的物理、化学和生物等复杂过程对溢油油膜厚度的影响, 实现海上溢油油膜厚度的快速准确获得, 这是海洋溢油扩展油膜厚度的理论模型研究下一步应重点突破的关键科学问题。

参考文献:

[1] 陈义中, 朱建荣, 陈昞睿, 等. 渤海原油码头溢油漂

- 移扩散的数值模拟[J]. 华东师范大学学报, 2006, 6: 25-33 .
- [2] Brown C E, Fingas M F . Development of airborne oil thickness measurements[J] **Marine Pollution Bulletin**, 2003, **47**(9-12): 485-492 .
- [3] 马厚琰, 张士魁, 王振先, 等. 海上溢油分类和其运动规律以及溢油量、污染量的估算[J]. 环境与可持续发展, 1989, 7: 12-14 .
- [4] 高振会, 杨建强, 崔文林 . 海洋溢油对环境与生态损害评估技术及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. 122-124 .
- [5] 赵冬至, 张存智, 徐恒振 . 海洋溢油灾害应急响应技术研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2006 . 109-138 .
- [6] 李四海 . 海上溢油遥感探测技术及其应用进展[J]. 遥感信息, 2004, 2, 53-57 .
- [7] Fay J A . The Spread of Oil Slick on a Calm Sea[A] . David P H . Oil on the Sea[C] . New York : Plenum Press , 1969 . 53-63 .
- [8] 娄厦, 刘曙光 . 溢油模型理论及研究综述[J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(10): 33-37 .
- [9] Elliott A J, Hurford, N, Penn C J . Shear Diffusion and the Spreading of Oil-Slicks[J] . **Marine Pollution Bulletin**, 1986, **17**(7): 308-313 .
- [10] Lehr W J, Cekirge H M, Fraga J, *et al* . Empirical studies of the spreading of oil spills[J] . **Oil and Petrochemical Pollution**, 1984, 2: 7-12 .
- [11] Lehr W J, 1996. Progress in oil spread modeling[R]. Ottawa, Canada: Proceedings of the Nineteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Environment Canada, 1996, 889-894.
- [12] Lehr W, Jones R, Evans M, *et al* . Revisions of the ADIOS oil spill model[J] . **Environmental Modelling & Software**, 2002, **17**(2): 191-199 .
- [13] Lehr W J, Fraga R J, Belen M S, *et al* . A New Technique to estimate initial spill size using a modified Fay-Type spreading formula[J]. **Marine Pollution Bulletin**, 1984, **15**(9): 326-329 .
- [14] Murray S P . Turbulent diffusion of oil in the ocean [J]. **Limnology and Oceanography**, 1972, 27: 651-660 .
- [15] Conomos T J . Movement of spilled oil as predicted by estuarine non tidal drift[J]. **Limnology and Oceanography**, 1974, 20: 159-173 .
- [16] 康志勇, 辽河油区原油密度与温度关系的统计方程 [J] . 石油勘探与开发, 1999, **26**(4): 107-109 .
- [17] Hoult D P .Oil Spreading on Sea[J] .**Annual Review of Fluid Mechanics**, 1972, 4: 341-368 .
- [18] Nazir M, Khan F, Amyotte P, *et al* . Multimedia fate of oil spills in a marine environment-An integrated modelling approach[J] .**Process Safety and Environmental Protection**, 2008, **86**(B2): 141-148 .
- [19] Jeffery P G . Large-Scale Experiments on the Spreading of Oil at Sea and Disappearance by Natural Factor[R]. Washington, DC: Proceedings of Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, American Petroleum Institute, 1973. 469-474 .
- [20] Cormack D, Nichols J A, Lynch B . Investigation of Factors Affecting the Fate of North Sea Oils Discharged at Sea[M] . UK: Warren Spring Laboratory Publication, 1978 .
- [21] 郭运武, 刘栋, 钟宝昌, 等 . 风对河道溢油扩展、漂移影响的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, **23**(4): 446-452 .
- [22] 刘栋, 林卫青, 钟宝昌, 等 . 感潮河道溢油扩展、漂移特性实验[J]. 水动力学研究和进展, 2006, **21**(6): 744-751 .

Construction of theoretical model for thickness of marine oil spilled

WU Xiao-dan^{1,2}, SONG Jin-ming¹, LI Xue-gang¹, YUAN Hua-mao¹, ZHANG Mo^{1,2}

(1. Key laboratory of Marine Ecology & Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. The Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; China)

Received: Aug. 6, 2009

Key words: oil spill; spreading; oil-membrane thickness; variation characteristics; controlling factors

Abstract: The exact data of oil-membrane spreading on the seasurface is the key scientific question in estimating the spilled quantity and assessing the damage. It is vital that establishing a quantitative relationship between oil slick thickness and spilled oil property as well as marine environmental conditions and constructing a theoretical model for the factors controlling thickness of marine oil spilled by revealing the variation characteristics for oil-membrane thickness. Based on the ellipse spreading model proposed by Lehr, the quantitative relationship was deduced in this article, which can analyze its variation characteristics. The result showed that thickness of oil film decreased sharply during the first two hours, and then the attenuation rate decreased gradually to a constant value. For crude oil, it needed 6~7h to reach the minimum thickness. Density of oil affected the initial thickness and extended the equilibrium time. However, wind speed had a great effect on the thickness of oil film. The higher wind speed was found to be beneficial to spreading, which made the thickness thinner. In addition, temperature influenced the variation of oil-membrane thickness by changing the density of oil spilled. Above all, higher temperature enhanced the spreading of oil spilled and speeds up the variation of oil-membrane thickness. Besides the factors of spilled oil density, wind speed and temperature, styles of oil spilled, current, tide and release time were still considered as the influence factors in the variation of oil-membrane thickness.

(本文编辑: 张培新)

《海洋科学》杂志 2010 年征订启事

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性期刊，是中国自然科学核心期刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨，及时、快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等，对重大科研和应用性研究成果特别予以优先报道。主要刊载内容有：海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍（有偿刊登）等。

本刊为月刊，每月 9 日出版，大 16 开本，96 页，每期定价 30 元，全年定价 360 元。本刊国内外公开发行（国际刊号：ISSN1000-3096；国内刊号：CN37-1151/P；国内邮发代码：2-655；国外发行代号：M6666）。全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域研究的科技人员踊跃订阅。邮局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中名列前茅，订户遍及全国 20 多个省、市、自治区，影响面广，宣传力大，欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告，价格优惠。

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》编辑部地址：山东省青岛市南海路 7 号，266071

电话及传真：0532-82898755

E-mail：pxzhang@qdio.ac.cn