

第20卷 第1期

海 洋 学 报

Vol. 20, No. 1

1998-01

ACTA OCEANOLOGICA SINICA

January, 1998

113 - 122

X843

# 有冰海域溢油运动数值模型研究

X55

夏定武 徐继祖

(天津大学海洋与船舶工程系, 天津 300072)

**摘要** 提出了寒冷海域溢油运动短期数值模型, 其中海冰运动预报模型针对不同海冰密集度的本构关系亦不同, 在近岸及密集度较高的冰带采用基于连续介质理论的粘塑性本构关系; 在冰边缘密集度较低的冰带采用基于离散介质理论的碰撞本构关系计算冰内力; 溢油运动预报模型包括连续冰盖及高、中、低密集度冰场中溢油的漂移和扩展过程的预报。模拟计算结果表明模型的建立是合理的, 该模型可用于事故溢油预报, 为溢油的围收治理提供依据。

**关键词** 海冰漂移, 溢油漂移, 溢油扩展

数值模型, 海洋

## 1 引言

目前渤海是我国最大的海上油气生产基地, 但每年冬季存在3个月左右的冰期, 因而在油气生产中必须考虑海冰条件。在海上采油及贮运过程中, 由于各种人为的或自然的原因, 存在着原油泄漏的可能性, 例如海底输油管道和贮罐的破裂与井喷等。这些泄漏的原油如果得不到及时的围收和处理, 对环境和生物的影响将是长远而巨大的, 污染的面积也会扩大, 自然也会带来直接或间接的经济损失。在冰季, 由于冰盖的遮蔽作用, 使得对溢油的处理变得更加困难。对溢油运动的轨迹及其扩展范围作出预报, 可为溢油的处理提供及时、准确的信息。研究表明, 冰的密集度及其漂移对溢油的漂移和扩展起着决定性的作用。当冰速相对于水流速度超过一定值时, 溢油会相对于冰运动; 对连续冰盖溢油全部位于冰盖下或上表面, 而对中、低密集度的冰带, 溢油主要位于冰间的开敞水面。本文提出了适合于溢油运动预报的海冰预报模型, 并在此基础上建立了溢油的漂移轨迹和扩展范围的预报模型。

## 2 冰区溢油的行为过程

持续时间甚短的大规模冰区溢油(瞬时溢油, 并且假设溢油的凝固点低于环境温度)同时具有以下几种行为过程<sup>[1]</sup>: (1)由于油的密度比水小, 溢油在重力和表面张力作用下以油膜形式向四周扩展, 范围愈扩愈大, 油膜厚度越来越薄, 但由于水面有冰, 扩展受冰密集度影

本文于1996-05-17收到, 修改稿于1996-10-15收到。

第一作者简介: 夏定武, 男, 30岁, 博士, 从事结构工程研究。

响很大。(2) 由于海流、风及海冰等因素的作用而引起油膜的漂移, 这一过程称为油膜迁移运动。(3) 原油中含有易于挥发的组分(在轻原油中含量较高), 其挥发速度随表面积的增大而增加, 随后又因油膜中挥发组分的减少而变慢, 这一过程称为油膜的挥发, 一般挥发速度与温度成正比, 位于冰盖下的油膜不与空气接触而不挥发。(4) 在油水交界面, 因分层失稳等因素的作用, 使一部分油与水混合成各种粒径的油滴扩散于不同深度水中, 大粒径油滴必然会上浮, 并重新与表面油膜聚集, 小粒径油滴则长时间在水中保持悬浮状态, 这一过程称为油膜的乳化。(5) 由海面流、风力的不均匀作用、海面破碎波及大尺度旋涡等因素作用而引起的油膜分散或破碎分散于水中, 这一过程称为油膜的离散。由于油与水间的粘滞阻力较大, 且有冰水表面的波浪很小, 所以在完全开放的自由水表面情况下明显存在的离散作用, 对于冰区溢油就不明显了。本文将建立前两种过程(扩展、漂移)所产生的油膜运动的数学模型, 而忽略由后三种过程所引起的油膜衰减的影响。

在无风的海面上, 溢油的漂移和扩展主要受海流、风和海冰的漂移以及海冰的密集度的影响。海域中有冰面积同总面积之比称为海冰密集度( $A$ )。考虑冰场中溢油漂移和扩展的特点, 将有冰海域按 $A$ 分为四种情况: 连续冰盖( $0.95 < A \leq 1$ )、高密集度( $0.8 < A \leq 0.95$ )、中等密集度( $0.3 < A \leq 0.8$ )和低密集度( $0 < A \leq 0.3$ )。

### 3 海洋环境条件预报

油膜运动的环境动力因素包括海流、风及海冰, 流和风又是海冰运动的动力来源, 因此对海流和风的预报是不可缺少的。对我国的渤海来说, 它属于中纬度季风气候区域, 冬季寒冷干燥, 北风盛行, 常伴随强烈的寒流, 气温迅速下降, 每年冰期3~4个月; 潮流是海水运动的主要形式, 流速通常在1~2 kn(0.514~1.029 m/s), 最强潮流在老铁山水道附近达3~4 kn, 莱州湾的流速最弱为1 kn左右。非潮流流很弱, 比潮流要小一数量级, 包括风牵引流、沿岸流和黄海暖流的一个分支, 其中风牵引流最强。现在对渤海地区风及潮流预报的研究已很深入, 通过大气模式用数值方法可以预报风场, 亦可用各观测站的实测值来预测短期的风速场; 潮流的预报是建立潮流流体力学模型, 用数值方法将其离散化, 并给以合适的边值和初值条件从而解得预报值。由于海冰的预报对于溢油运动预报影响很大, 且对其研究的历史并不长, 下面对其进行较详细的阐述。

海冰运动(短期)预报模型是以动量守恒和质量连续方程为基础的, 其中的关键问题是确定计算冰内力的本构关系。海冰本构关系分为两大类: 基于连续介质理论的海冰本构关系和基于离散介质的海冰本构关系。前者适用于对冰盖中心部分及高密集度的海冰运动过程的模拟, 已有的经验表明其结果与实际吻合较好; 后者适用于对冰边缘带密集度较低部分的冰运动过程的模拟, 其模拟过程是合理的<sup>[2]</sup>。

为了区别不同密集度冰的本构关系, 对连续冰盖采用粘塑性本构关系, 而对具有离散介质性质的边缘冰带采用碰撞型本构关系。将两者结合可得到如下的海冰运动预报模型:

$$M \frac{D\vec{U}}{Dt} = -Mf\vec{k} \times \vec{U} + A\vec{r}_s + A\vec{r}_w - Mg \cdot \text{grad}H + \vec{F}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla h = \Phi_b + \text{diffusion}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla A = \Phi_A + \text{diffusion}, \quad (3)$$

式中, 第一个方程为动量平衡方程, 其右边第一项为柯氏力, 第二、三项分别为风和流作用于海冰上的力, 第四项为海洋表面斜度的影响, 第五项为冰内力, 亦为非线性项; 第二、三个方程为质量守衡方程.  $H$  是海面重力势;  $f$  为科氏力系数;  $\vec{k}$  为垂直于海洋表面的单位矢量;  $\vec{U}$  为冰速;  $A$  为冰密集度;  $h$  为网格内平均冰厚;  $M$  为单位面积冰质量,  $M=\rho_i h A$ . diffusion 为能量扩散项. 由于讨论的是短期预报, 故可忽略科氏力、海洋表面斜度及热力项  $\Phi_h$ 、 $\Phi_A$  等的影响. 风应力  $\vec{\tau}_v$  和海流应力  $\vec{\tau}_w$  由边界层理论得

$$\vec{\tau}_v = \rho_v C_v |\vec{U}_v| (\vec{U}_v \cos \Phi + \vec{k} \times \vec{U}_v \sin \Phi),$$

$$\vec{\tau}_w = \rho_w C_w |\vec{U}_w| - \vec{U} |[(\vec{U}_v - \vec{U}) \cos \gamma + \vec{k} \times (\vec{U}_v - \vec{U}) \sin \gamma]|,$$

式中,  $\rho_v$  和  $\rho_w$  分别为空气和水的密度;  $C_v$  和  $C_w$  分别是风、水流的曳力系数;  $\Phi$  和  $\gamma$  为转角;  $\vec{U}_v$ 、 $\vec{U}_w$  分别为风速和流速.

由冰的相对运动引起的内力分量可由下式计算:

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}. \quad (4)$$

由表达式可以看出, 冰内力由冰应力张量给出, 它又与本构关系式有关. 如前所述, 对连续冰盖采用粘塑性本构关系, 对边缘冰带采用基于浮冰碰撞的本构关系, 于是可得本构关系的一般表达式:

$$\sigma_{ij} = P' \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} + Q' \dot{\epsilon}_{ij} - R' \delta_{ij}, \quad (5)$$

式中,  $\dot{\epsilon}_{kk}$  和  $\dot{\epsilon}_{ij}$  为应变率张量;  $\delta_{ij}$  为  $\delta$ -函数;  $P'$ 、 $Q'$  和  $R'$  为系数, 其表达式见表1. 表中各有

表1 本构关系中的力学特性系数

力学模型	$P'$	$Q'$	$R'$
粘塑性模型	$\xi - \eta$	$2\eta$	$P/2$
圆盘碰撞模型	$\eta = \frac{\rho_i(1+\beta)}{4} \frac{A^{3/2} V'}{A_0^{1/2} - A^{1/2} 3\pi} \frac{2D}{A_0^{1/2} - A^{1/2}}$	$\eta = \frac{\rho_i(1+\beta)}{4} \frac{A^{3/2} V'}{A_0^{1/2} - A^{1/2} 3\pi} \frac{2D}{A_0^{1/2} - A^{1/2}}$	$\eta = \frac{\rho_i(1+\beta)}{2} \frac{A^{3/2} V'}{A_0^{1/2} - A^{1/2}} \sqrt{2} V'$

关符号的含义为:  $\eta$  和  $\xi$  分别为剪、容粘性系数;  $\rho_i$  为冰密度;  $A_0$  为网格最大可能冰密集度;  $A$  为网格实际冰密集度;  $\beta$  为冰的恢复系数;  $D$  为浮冰块平均直径;  $V'$  为浮冰间相对运动平均速度, 由能量守衡决定.  $\dot{\epsilon}_{ij}$  和压缩强度  $P$  表达如下:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right),$$

$$P = P_0 h \exp[-C(1 - A)],$$

式中,  $U_i$  和  $U_j$  分别为冰在  $x_i$  与  $x_j$  方向的分速度;  $P_0$  和  $C$  为经验常数.

#### 4 冰区溢油运动数值模型

本模型包括两部分: 冰区溢油迁移运动预报及油膜扩展预报. 下面对不同冰密集度下油膜迁移和扩展的不同特点分别加以讨论. 由于溢油的凝固点高于环境温度, 溢油会很快凝成固块而不会扩展. 因此下面所讨论的油膜运动均是在溢油的流点低于环境温度的条件下进行的, 即油为液态.

#### 4.1 冰区溢油迁移运动预报

连续冰盖下溢油的漂移与冰盖下表面的粗糙度、溢油的物理特性和流与冰的相对速度有关<sup>[3]</sup>。一般来说，粗糙度较大的冰盖下的油膜相对于冰静止；对于粗糙度较小的冰盖下的油膜，当相对流速达到15~20 cm/s时，油膜会产生一个顺流向相对于冰盖的速度。本文所考虑的是光滑的冰盖，即油膜扩展平衡时的厚度大于冰粗糙度。

静止光滑冰盖下油膜扩展平衡厚度计算经验公式为

$$\delta_{eq} = 1.67 - 8.5\Delta\rho_w, \quad (6)$$

式中， $\Delta = (\rho_w - \rho_o)/\rho_w$  为油和水的相对密度， $\rho_w$  和  $\rho_o$  分别为水和油的密度。当冰表面的粗糙高度小于油膜平衡厚度  $\delta_{eq}$  时，可以认为冰盖是小粗糙度或光滑的。

当流速大到一定程度，使油膜相对于冰盖产生运动时的流速称为临界流速 (threshold velocity,  $U_{th}$ )，对于小粗糙度冰盖，临界速度  $U_{th}$  的经验公式为

$$U_{th} = \frac{305.79}{88.68 - \mu_o}, \quad (7)$$

式中， $\mu_o$  为油的动力粘滞系数。流速大于临界流速  $U_{th}$  时，流速和油膜的相对速度关系为

$$(1 - \frac{v}{v_c})^2 = \frac{k}{0.115F_s^2 + 1.105}, \quad (8)$$

式中，

$$F_s = v_c(\Delta g \delta_{eq})^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

式中， $v$  为油膜相对于冰盖的平均漂流速度； $v_c$  为相对于冰盖的流速； $k$  为粗糙率放大系数，为冰盖粗糙高度的函数。根据实验数据，假设  $k$  为曼宁糙率系数  $n$  的线性函数，对于光滑冰盖 ( $n=0$ )， $k=1.0$ ；对  $n=0.055$ ， $k=2.60$ 。油膜速度等于冰盖速度和油膜相对于冰盖速度的合速度。 $F_s$  为油膜傅氏系数。

离散冰场中油膜大部分浮于水面，只有少量在冰盖下面。油膜在漂移时所受的作用力为上、下表面风、流的曳力、侧面冰侧壁的摩擦力和推力。由于浮冰与油膜表面粗糙的不同，风和流的曳力不同，油表面光滑，曳力比冰小。油膜要与冰一起运动，其所需的作用力要由冰的推力和摩擦力来提供，当作用力足够大时，油膜与冰一起运动。冰的密集度越大，推力和摩擦力也越大；当密集度小于某一临界值时，冰的作用力不足以带动油膜一起运动，这时油膜就会产生相对于冰的运动。离散冰场中油膜漂移的现场观测和实验研究表明，当冰密集度低到一定程度时，油膜可以流过冰场而进入开敞海域。这个临界密集度与油的特性有关，粘

性越小则临界密集度越大。低密集度时，由于冰很少，对油的漂移不起作用，与开敞水面的相类似；中、高等密集度时，由于冰侧壁的推力和摩擦力的作用，油随冰一起运动<sup>[4-5]</sup>。

#### 4.2 冰场中油膜的扩展

溢油的扩展包括两个方面，一为扩展时油膜的厚度随时间变化，另一为油膜污染区域的延伸范围（如图1定义，其污染范围包括此范围内的冰和油面积之和）随时间变化。

##### 4.2.1 油膜扩展厚度<sup>[1]</sup>

油膜扩展过程中油膜厚度越来越薄，直到扩展平衡时达

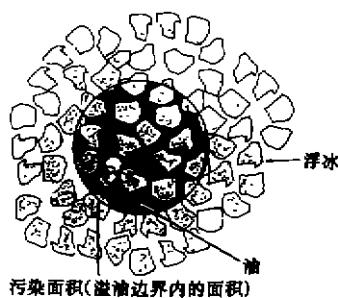


图 1

到最小值。冰区溢油的扩展与开敞水面时不同, 冰密集度不同时油膜的扩展亦不同。

自由水面上油膜的扩展过程包括三个阶段: 重力-惯性、重力-粘性和粘性-表面张力, 每个阶段均以其主要作用力而得名。当油位于冰盖下面时, 扩展驱动力为水对油的浮力, 其扩展过程包括浮力-惯性和浮力-粘性两个阶段。

假设冰盖下无流, 且油膜均匀地向四周呈圆形扩展。对于浮力-惯性阶段, 驱动力为浮力, 阻力为惯性力。这时从油膜中取一圆形单元进行分析, 其所对中心角为  $d\theta$ , 作用于单元上的浮力  $dF_g$  为

$$dF_g = \frac{d\theta g(\rho_w - \rho_o)Rh^2}{2}, \quad (10)$$

式中,  $h$  为油膜平均厚度;  $R$  为油膜半径。

设惯性力为  $dF_i$ , 由牛顿第二定律得

$$dF_i = \frac{dm dv}{dt}, \quad (11)$$

式中,  $v$  为径向扩展速度  $R/t$ ;  $dm = d\theta R^2 h \rho_o$ ;  $t$  为所经历时间; 故

$$dF_i = -\frac{d\theta \rho_o R^3 h}{2t^2}. \quad (12)$$

在此阶段,  $dF_g + dF_i \approx 0$ , 将  $h = V/(\pi R^2)$  代入, 其中  $V$  为溢油总体积, 可得扩展半径:

$$R = K_1 \left[ \left( \frac{\rho_w}{\rho_o} - 1 \right) g V \right]^{1/4} t^{1/2}. \quad (13)$$

对浮力-粘性阶段, 驱动力仍为浮力, 阻力为粘摩阻力。考虑图2所示冰盖下正在扩展的圆形油膜, 其柱坐标下的N-S方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \\ = g_r - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu_o}{\rho_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $V_r$  为径向速度;  $V_\theta$  为角速度;  $V_z$  为竖向速度;  $\partial p/\partial r$  为径向压力梯度;  $\mu_o$  和  $\rho_o$  分别为油的粘性系数和密度。如果忽略加速度项, 式(14)在轴对称情况下可简化为

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} - \frac{1}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (15)$$

由式(15)可得

$$V_r = C_1 e^{z/r} + C_2 e^{-z/r} - \frac{R^2}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial R}, \quad (16)$$

式中,  $C_1$  和  $C_2$  可根据以下边界条件求解:

$$V_r|_{z=0} = 0, \quad V_r|_{z=-h} = u_i,$$

其中  $u_i$  为界面速度, 求解得

$$C_1 = \frac{u_i + \beta u_o (1 - e^{-h/R})}{2 \sinh(h/R)}, \quad (17)$$

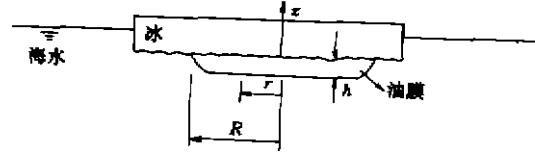


图 2

$$C_2 = -\frac{u_i + \beta u_0 (1 - e^{-h/R})}{2 \sinh(h/R)}, \quad (18)$$

式中,  $\beta = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{k^2}{u_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial R}$ ,  $u_0$  为常数, 具有速度量纲.

对式 (16) 求导可得上、下界面处的速度梯度:

$$\left( \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{\beta u_0 [\cosh(h/R) - 1] - u_i}{R \sinh(h/R)},$$

$$\left( \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)_{z=-h} = \frac{-\beta u_0 [\cosh(h/R) - 1] - u_i \cosh(h/R)}{R \sinh(h/R)}.$$

冰/油和油/水界面作用于油膜上的总粘滞阻力为

$$\tau_v = \mu_0 \left[ \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)_{z=0} + \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)_{z=-h} \right] = \frac{-\mu_0 u_i}{R \sinh(h/R)} [1 + \cosh(h/R)]. \quad (19)$$

除中心附近以外,  $h/R$  很小, 因而  $\sinh(h/R) = h/R$ ,  $\cosh(h/R) = 1$ , 故

$$\tau_v = -\frac{2\mu_0 u_i}{h}. \quad (20)$$

假设  $u_i$  和  $h$  相对于  $r$  的速度近似相同, 则作用于单元上的粘性力为

$$dF_v = -\frac{\mu_0 u_i}{h} d\theta R^2. \quad (21)$$

式中,  $u_i$  为界面速度; 浮力仍由式 (10) 表达. 在浮力—粘性阶段,  $dF_v + dF_g \approx 0$ , 则

$$u_i = \frac{(\rho_w - \rho_o)gh^3}{2\mu_0 R}. \quad (22)$$

进一步假设  $u_i \propto dR/dt$ , 则一次性溢油类型的扩展速度公式为

$$R = K_2 \left[ \frac{(\rho_w - \rho_o)gV^3}{\mu_0} \right]^{1/8} t^{1/8}. \quad (23)$$

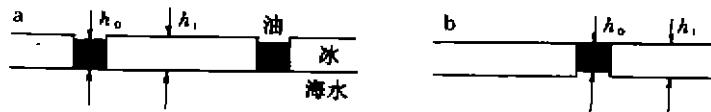
式中,  $K_2$  为无量纲常数, 与相对粗糙度有关. 当冰为小粗糙度时,  $K_2$  为常数.

由于浮力—粘性阶段开始时的油膜半径与浮力—惯性阶段结束时油膜半径相等, 由式 (13) 和 (23) 相等可得浮力—惯性阶段所持续的时间是

$$t = \left( \frac{K_2}{K_1} \right)^{8/3} \left[ \frac{\rho_o^2 V}{g \mu_0 (\rho_w - \rho_o)} \right]^{1/3}.$$

在高密度冰场中, 由于浮冰之间的缝隙相当小, 这时被围于冰之间水面上的油膜不能通过扩展渗过缝隙, 而只能从冰上表面或下表面通过冰场而扩展.

当为高密度冰情时, 油膜向四周的扩展是从浮冰的上表面或下表面进行的. 当冰密度 ( $\rho_i$ ) 小于油密度 ( $\rho_o$ ) 时, 冰浮于油中, 油在下表面向四周扩展; 反之, 则在上表面向四周扩展, 这时向四周扩展的油量由式 (13) 与 (23) 计算; 扩展达到平衡时, 油与冰所处状态如图3.



a. 油密度  $\rho_o$  大于冰密度  $\rho_i$       b. 油密度  $\rho_o$  小于冰密度  $\rho_i$

图 3

根据浮力平衡原理, 求得的图3a、b 中的平衡油膜厚度分别为

$$h_{o1} = \frac{\rho_i}{\rho_o} h_i, \quad (24)$$

$$h_{o2} = \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w - \rho_i} h_i. \quad (25)$$

在中等冰密集度冰场中, 油膜主要通过浮冰之间的缝隙向四周扩展, 当油泄于冰排中时, 油作用在冰排上一个静液压力, 将冰推向四周推移, 冰对油的阻力为冰的惯性力和冰/水界面的粘摩擦力。当静液压力不足以克服阻力时, 冰排将停止运动, 这一阶段也许相当于开敞水面的重力-惯性阶段。在油将冰排推开的同时, 它也会部分地渗进冰间的缝隙, 在冰排运动停止后, 油继续渗过冰缝向四周扩展, 直至重力、表面张力平衡而扩展结束。油的实际扩展速度等于冰排运动引起的速度和渗入冰场的速度之和。达到平衡时油膜厚度要比开敞水面时大得多, 达到平衡所需时间比开敞水面时要小。在无风海面上, 单位时间内向四周扩展的油量可由 Ross 等<sup>[6]</sup>根据实验对 Fay<sup>[7]</sup>的理论公式进行修改而得到的冷水表面油膜的扩展速度公式:

$$R = K_1 (\Delta g V^2 t^{3/2} \mu_o^{-1/2})^{1/6}, \quad (26)$$

式中,  $K_1$  为常数;  $\Delta = (\rho_w - \rho_o)/\rho_o$ ;  $\mu_o$  为溢油的运动粘性系数。

低密集度时, 油的扩展与开敞水面时相同, 因此, 可以用冷水表面的溢油扩展公式(26)来计算低密集度时冰场中油的扩展。

#### 4.2.2 油膜污染的范围

密集度大于0.95时, 可认为冰盖为连续冰盖, 这时所有的油均在冰盖下。油膜扩展达到平衡时, 浮力与界面张力平衡。作用在圆形单元上的界面张力为

$$dF_t = d\theta R \sigma_n, \quad (27)$$

式中,  $\sigma_n$  为油/水界面张力。由式(10)与式(27)相等, 即  $dF_t \approx dF_g$ , 可得扩展平衡时油膜半径  $R_t$ :

$$R_t = K_3 \left[ \frac{g(\rho_w - \rho_o)}{\sigma_n} \right]^{1/4} V^{1/2}, \quad (28)$$

由此亦可得油膜平衡厚度  $T_w$  和污染面积  $A_t$ :

$$T_w = \frac{V}{A_t} = K_3^{-2} \left[ \frac{\sigma_n}{g} (\rho_w - \rho_o) \right]^{1/2}, \quad (29)$$

$$A_t = \pi R_t^2. \quad (30)$$

冰密集度高时, 由于油不能从冰之间的缝隙向周围扩展, 只能从冰的上表面或下表面向冰之间的缝隙扩展, 因此, 油的污染范围分布在冰的上(或下)表面及冰之间的水面上, 而且大部分还是集中于冰之间的水面上, 这是因为它的厚度要比冰盖上表面(或下表面)的大得多。油的污染范围面积为

$$A_t = \frac{V}{T_w A + (1 - A) h_o}. \quad (31)$$

中等密集度时油的扩展与低密集度时不同, 此时部分油位于冰下, 部分油浮在水面上。冰下面的油是由于油从水中上升时碰到单个浮冰, 然后向四周扩展。如果  $A_{te}$  为单个浮冰的面积,  $T_w$  为单位面积冰下的油膜扩展平衡时的体积, 那么在浮冰下的油的体积为

$$V_w = A_{te} T_w C,$$

式中,  $C$  为油与平均浮冰相遇的概率, 这里假设  $C$  与冰密集度相同. 其余的油在水面扩展, 这部分油的体积为

$$V_t = V - V_{\text{in}} = T_w A_t A. \quad (32)$$

污染范围最终的覆盖面积为

$$A_t = \frac{V - A_{\text{in}} T_w C}{T_w A}, \quad (33)$$

式中,  $T_w$  为开敞冷水表面平衡的油膜厚度, 根据文献[5]总结有关实验结果得到  $T_w$  的经验公式为

$$T_w = \frac{\mu_0}{125}. \quad (34)$$

低冰密集度时溢油的扩展与开敞冷水表面相似. 可以认为这种情况是油全部浮在水面上, 冰下无油, 冰密集度只影响溢油污染区域的范围, 此时溢油污染的最大范围面积为

$$A_t = \frac{V}{T_w (1 - A)}. \quad (35)$$

## 5 数值方法

溢油运动模型包括溢油运动的预报和环境条件的预报. 在溢油的环境动力条件预报中, 风与流的预报为冰和溢油预报的基础. 在大气模式中, 为了使各种气象要素协调, 只能选某一要素为初值, 作为初始场进行预报. 对于潮流模式, 为用数值方法解微分方程, 采用有限差分法解边值问题, 用隐式格式将微分方程变成线性方程组, 解之而得预报结果.

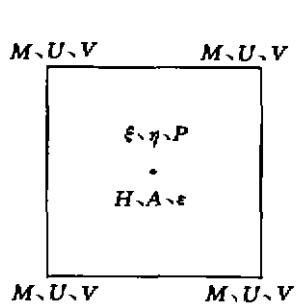


图4 变量的空间分布

海冰预报方程(1)、(2)和(3)构成封闭的联立方程组, 利用有限差分法作为初值问题来求解. 对空间使用中心差分, 对时间使用向前差分, 用超松弛迭代法解代数方程组. 空间差分使用交错网格, 这种网格能保持连续方程的质量守恒和动量方程的能量守恒. 图4为变量空间分布示意图. 动量方程(1)采用隐式格式, 每个时间步长进行两次松弛求解, 一次是使非线性方程线性化, 一次是对冰的平移, 其稳定性对于时间步长无限制. 连续性方程(2)和(3)的差分采用 Lax-Wendroff 格式, 这种格式对于对流方程是非常有效的, 并且由于采用显式方法积分, 保证其稳定性的条件为

$$\Delta t \leq \Delta x [2(U^2 + V^2)]^{-1/2}.$$

在进行溢油运动预报时, 溢油运动预报所采用的网格比海冰预报网格更细, 这是由于溢油污染的范围可能仅占海冰预报网格面积的1/10. 如果要更精确预报溢油的位置及污染的范围, 预报网格应更细. 溢油运动预报网格节点上的冰及其他环境要素, 采用冰预报网格相邻节点值的面积加权平均. 本文空间网格采用1 km×1 km. 首先读入风、流及溢油的有关参数及初始数据; 预报风、流的速度及冰的速度、厚度和密集度; 然后计算对应冰情下的平衡油膜厚度; 再根据漂移和扩展模型计算迁移和扩展到相应网格中的油量及油膜位置. 重复上述过程到所需的时刻为止.

## 6 预报实例

为了进一步理解海冰密集度对污染区域面积的影响, 本文对无风海面上溢油污染面积与密集度的关系进行了敏感性分析, 选取的有关数据为溢油体积  $V=1000\text{m}^3$ 、油的运动粘滞系数  $\mu_0=125\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、油的密度  $\rho_0=900\text{kg/m}^3$ 、海冰厚度  $h=0.25\text{m}$ 、浮冰形状假设为圆形、直径  $D=10\text{m}$ 。图5绘出了污染面积—海冰密集度关系曲线, 图5a为中、低密集度(即  $A\leq0.8$ )的结果; b为高密集度( $0.8 < A \leq 0.95$ )的结果; c为连续冰盖下( $A > 0.95$ )溢油污染的面积, 这时所有的油均在冰盖下面, 其污染面积不受密集度影响, 为常数。由图可以看出, 中、低密集度时溢油的污染范围要比高密集度和连续冰盖下的大得多, 连续冰盖下的又要比高密集度时的大, 这是由于不同密集度类型中油的扩展途径不同造成的。

本文还采用文献[5]中的实测资料, 运用根据本模型编制的计算机程序进行模拟计算, 结果示如图6。模拟所采用的有关数据如下: 在无风海面上, 冰密集度  $A=0.6$ , 冰厚  $h=0.7\sim1.5\text{m}$ 、浮冰直径  $D=12\text{m}$ 、冰速  $x$  方向分量  $u=0.07\text{m/s}$ 、 $y$  方向分量  $v=-0.05\text{m/s}$ 、溢油体积  $V=5000\text{m}^3$ 、油密度  $\rho_0=900\text{kg/m}^3$ 、海水密度  $\rho_w=1025\text{kg/m}^3$ 、冰密度  $\rho_i=910\text{kg/m}^3$ 、油的运动粘滞系数  $\mu_0=100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、时间步长  $\Delta t=3600\text{s}$ ; 计算网格尺寸:  $\Delta x=\Delta y=1000\text{m}$ 。

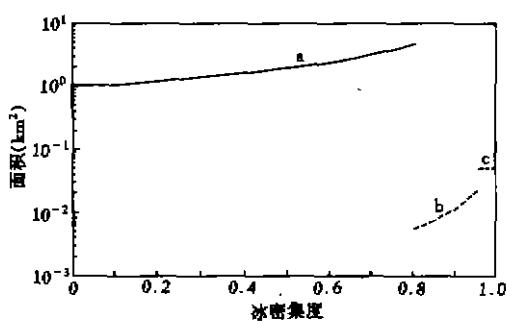


图5 溢油污染面积与海冰密集度的关系

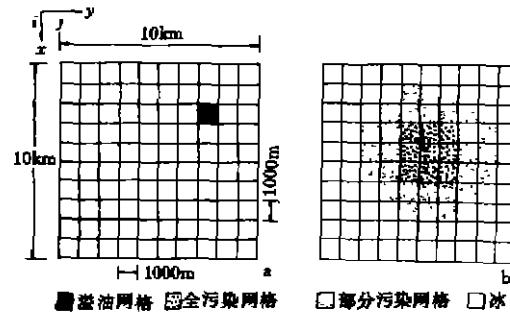


图6 冰区溢油运动模拟

a. 溢油位置 b. 12模拟所得污染范围

本文模拟结果与文献的结果比较接近。在该文献中, 12 h模拟所得污染范围为36个网格, 溢油漂移为:  $x$  方向为3 km,  $y$  方向为2 km。本文模拟结果为: 12 h模拟所得污染范围为37个网格, 溢油漂移为:  $x$  方向为3.024 km,  $y$  方向为2.16 km。

## 7 结论

本模型中的海冰预报模型的本构关系分别考虑了连续介质和不连续介质两种情况, 这不仅考虑了冰场的实际状况, 而且也符合溢油在冰场中漂移和扩展计算时的需要, 较现有的使用单一本构关系的海冰预报模型似更合理。

冰密集度不同, 溢油的扩展途径和最终污染面积亦不同: 相同溢油体积、其他条件相同时, 中、低密集度时溢油污染面积要比高密集度时大得多, 一般也大于连续冰盖下的污染面积, 在建立模型时应按冰密集度不同分别对待。

本模型考虑了流对冰盖下溢油漂移的影响及不同密集度时油膜的不同扩展途径, 所考虑因素较现有模型更为全面。与文献中实测资料比较, 本模型的模拟计算结果吻合得很好。尽管如此, 本模型仍然有许多地方需要完善, 因此应进行一系列实验室和现场实验来积累数据对该模型进行修改完善, 同时在理论上应进行更深入的研究。在冰期偶然发生溢油事件时, 应尽量全面地进行数据记录。

### 参考文献

- 1 夏定武. 渤海海冰运动及冰期溢油运动数值预报模型研究 [硕士学位论文]. 天津大学, 1994
- 2 Lu Q M, Larsen J, Tryde P. A dynamic and thermodynamic sea ice model for subpolar regions. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(C8), 13 433~13 457
- 3 Cox J C, Schultz L A. The containment of oil spilled under rough ice. *Oil Spill Conf.*, American Petroleum Institute, 1983
- 4 Free A P, Cox J C, Schultz L A. Laboratory studies of oil spill behavior in broken ice fields. *Rept. AD. A114-178*, 1982
- 5 Venkatesh S, HEL-Tahan. Modelling the behavior of oil spills in ice-infested waters. *Atmosphere—Ocean*, 1990, **28**(3): 303~329
- 6 Ross S L, Dickins D. Fields research spills to investigate the physical and chemical fate of oil in pack ice. *Environmental Studies Revolving Fund Rep.* No. 062, Canada, 1987
- 7 Fay J A. The spread of oil slicks on a calm sea. In: *Oil on the Sea*, New York: Plenum Press, 1969

## Investigation on numerical modelling of spill oil movement in sea ice infested waters

Xia Dingwu,<sup>1</sup> Xu Jizu<sup>1</sup>

1. Department of Ocean Engineering and Naval Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072

**Abstract**—A numerical model of spill oil movement for those waters with sea ice is presented in the paper. In description of the sea ice movement in the model, different constitution laws of the sea ice are employed to estimate sea ice forces according to its compactness: a visco-plastic model, which is based on the continuous medium theory, is accepted for the nearshore areas with high compactness of sea ice; and a collision model is used for those marginal areas with low compactness of sea ice, which is based on the discret medium theory. In the prediction models of spill oil drifting/spreading movements the following situations of sea ice are considered: sea ice with low, middle and high compactness, respectively, in addition to that in an integral ice cover. The results of simulation calculations by using the model indicated its correctness and applicability in prediction of the potential influence in a cold region offshore oil spill accident.

**Key words** Sea ice drifting, spill oil drifting, spill oil spreading