

北极通航船舶溢油的运动数值预测与应急处置

梁霄¹, 李巍^{2,3}, 林建国²

(1. 大连海事大学 交通装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026; 3. 哈尔滨工程大学 水下智能机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于北极海域脆弱的生态环境特点, 为了将溢油污染危害降至最低, 以 FLUENT 为研究平台, 建立多项因素共同作用下的船舶溢油模型, 分析溢油在有冰海域中的运动特点。结果表明: 当冰盖存在时溢油会黏附于冰的下表面, 扩散范围小于相同温度下自由海面上的油膜扩散范围; 部分溢油会被卷吸到冰盖表面并继续迁移, 加速了冰盖的融化; 溢油点距离冰盖较近时造成的污染范围小于较远时的污染范围。以此为基础对冰区溢油防治措施的应用进行探讨, 提出可在冰区采用围油栏与积冰联合围控、在积冰较多海水中喷洒消油剂以及在距离北极大陆较远海域使用燃烧法等应急措施来控制溢油污染, 有助于我国北极通航环境管理办法的制定。

关键词: 北极; 船舶通航; 溢油污染; 数值预测

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)05-0061-05

北极地区常年低温^[1], 海洋生物抵御船舶污染的能力十分有限。现有研究表明: 通过加拿大北极区域的西北通道是连接欧洲和亚洲的捷径, 2007 年夏季首次出现的无冰现象极大增加了未来北极区域贸易航线开通的可能性^[2]。但是航线开通后, 船舶碰撞和不规范操作引起的溢油会给脆弱的北极生态带来诸多污染和潜在干扰^[3-4], 未得到及时处理的溢油会与北极生物接触^[5]而逐渐进入生物链中^[6-7], 甚至引起全球的环境变化^[8]。因此, 研究船舶溢油对北极环境的影响并给出相应的防治措施势在必行。

有冰海域和无冰海域的环境条件具有明显差异: 有冰海域海水温度接近或等于海水的冰点, 溢油与大气、海水和海冰发生作用, 其行为和归宿变得更为复杂。然而近 20 年来, 对于有冰海域溢油的预测研究却较为少见。一些学者通过小规模溢油实验对溢油冰面扩展半径公式予以表达^[9]。Keevil 等^[10]对溢油于冰的下表面扩散规律进行了研究。Ross 等^[11-12]通过可控试验对溢油在具有漂流冰的海水中的扩散规律进行了研究。然而, 由于不同环境下的溢油是不同的, 关于石油的扩展表述都是经验公式, 并不能实现广泛的应用。

本研究以 FLUENT 为研究平台, 采用基于压力解法的 PISO 算法解决非稳态条件下压力速度耦合问题, 采用流体体积法 (VOF) 解决非线性自由表面边界追踪问题, 利用 FLUENT 的用户自定义函数 (UDF)

建立数值水域, 在此基础上建立船舶溢油模型, 动态模拟冰区溢油漂移扩散变化的全过程, 从而分析溢油在有冰水环境中的运动特点, 以提出有效的冰区溢油污染防治措施。

1 模型与方法

1.1 控制方程

海洋中的海水总是处于不停的运动之中, 是多种力相互作用的结果。因此, 在海水运动中起支配作用的基本定律为质量守恒和动量守恒定律。对于自由面流动问题, 流体是不可压缩的, 流体的黏性系数为常数, 控制方程为 N-S 方程。

连续型方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

描述问题所使用的坐标系是欧拉直角坐标系,

收稿日期: 2010-10-27; 修回日期: 2011-03-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QN052)

作者简介: 梁霄(1980-), 男, 汉族, 辽宁大连人, 讲师, 博士, 从事水动力学研究, 电话: 18940816386, E-mail: liangxiao19801012@126.com

水平方向 x 轴, 右向为正, 垂直方向 y 轴, 向上为正。 u 、 w 分别为 x 、 y 方向的速度分量, ρ 是流体的密度, p 是流体的压力, ν 是流体的运动学黏性系数。

标准 k - ε 输运方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + & \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k & \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + & \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon & \end{aligned}$$

式中: G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, G_b 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项, Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的普朗特数, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项。

1.2 自由液面追踪法

波浪水域水面属于气、水两相分界面, 水下溢油属于油、水、气三相流, 适合采用 VOF 法。VOF 引入体积分数 a_q , 表示第 q 种物质在该单元格内所占有的体积, $a_q=0$ 表示空, $a_q=1$ 表示充满, $1 - a_q$ 表示有 a_q 这么多体积的 q 种物质。在该问题中, $q=1, 2, 3$ 分别表示气、水和油。自由表面处 a_q 应满足下列方程:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \bar{v} \nabla a_q = 0, \quad q = 1, 2, 3 \dots$$

计算控制条件:

$$\sum_{q=1}^n a_q = 1$$

式中: \bar{v} 为该单元平均速度。

整个流场中不同部分的密度是不一样的, 在两种物质混合的单元内, 采用如下算法计算其密度;

$$\rho = \sum_{q=1}^n a_q \rho_q, \quad q = 1, 2, 3$$

VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积比来模拟多种不能混合的流体, 其方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) & \\ = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) \right] + \rho \bar{g} + \bar{F} & \end{aligned}$$

1.3 数学模型

对模型进行假设; 不考虑船舶摇晃对油舱液位的影响; 三相流中油、水和气均不可压缩且不互溶; 溢油过程为绝热过程, 不考虑相间的热量交换; 海水中没有碎冰存在。

船在某种外力作用下一侧开裂, 裂口位于背向水流方向的一侧, 油舱为矩形, 其内装有密度为 985 kg/m^3 的柴油。计算区上部为空气, 下部为水, 在右侧区域有冰盖存在, 如图 1 所示。由于整个计算区域为规则的矩形, 为了节省计算资源, 缩短计算时间, 所有网格均采用矩形结构网格。

使用二维、非定常、分离隐式求解器求解, 在 VOF 模型中将相的数量设置为 3, 其中基本相为空气, 第二相为水, 第三相为油。采用 Geo-Reconstruct 自由面重构格式。在运行环境中设置参考压力值为标准大气压, 并计重力影响, 设置工作流体密度, 即基本相空气的密度为 1.225 kg/m^3 。

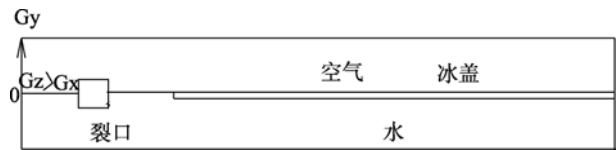


图 1 数值水域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical water area

模型左端为速度入口, 右端为速度出口。初始时刻, 对计算区域进行初始化, 使自由面以上区域的体积分数为 0, 自由面以下区域水的体积分数为 1。水流速度方向与模型左侧入口边界垂直; 计算区域最上端边界为压力进口, 方向与边界垂直; 最下端边界为壁面; 油舱裂口部分设置为内部边界, 其他部分设置为壁面边界。采用基于压力求解的 PISO 算法解决非稳态条件下压力速度的耦合问题。为了满足计算精度和计算时间的双重需要, 数值计算的时间步长取 0.005 s 。

2 数值模拟结果分析

石油从油舱溢出后的运动轨迹如图 2~图 5 所示, 图中黑色区域为空气, 浅黑色区域为水, 灰色区域为油, a 图溢油地点距冰盖近, b 图距冰盖远。

溢油初期, 在液面差的作用下, 石油从油舱底

部裂口喷射而出，形成射流或羽流进入到外部海水中，且在来流的作用下很快被冲散成油滴状。油的密度小于海水密度，因此，油以油滴群的形式在浮力作用下向水面上升。由于海流的存在，油在溢出后会被来流夹带向海流传播方向倾斜。当溢油地点与冰盖相距较近时，上升的油滴到达冰盖边缘后会被其阻挡，黏附于冰的下表面，如图 2(a)所示。而溢油点距离冰盖较远时，短时间内石油无法到达冰盖区域，油滴会不受阻挡地上升到海水表面，如图 2(b)所示。

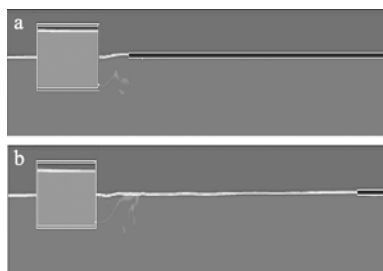


图 2 10 s 时船舶溢油三相物质分布
Fig. 2 Distribution of oil-water-air at 10 s



图 3 20 s 时船舶溢油三相物质分布
Fig. 3 Distribution of oil-water-air at 20 s

随着舱内液面的降低，内外压力差变小，油的溢出速度和溢油量也随之减小，溢出口处的石油浓度明显降低。溢油沿着先前油滴尾流轨迹，在水流和浮力作用下渐渐上浮。如图 3(b)所示，到达海面后溢油在重力、表面张力、惯性力和黏性力的共同作用下以薄膜的形式向四周扩展，油膜厚度逐渐变薄。而溢油点离冰盖较近时，油膜的迁移扩散受冰的下表面影响，在摩擦力作用下扩散速度较小，扩散距离 18.65 m 明显小于相同温度下自由海面的油膜扩散距离 26.37m，如图 3(a)。

另外，由于油膜受到冰盖的阻挡会在冰盖边缘形成涡流，部分石油会被卷吸到冰盖表面，并在后续水流作用下在冰盖表面迁移扩散，如图 3(a)所示。该模拟结果与 Comfort 等在加拿大北极高纬度地区进行的溢油实地实验得到的前期现象极为类似，即

当溢油发生位置接近冰盖区时，部分石油会迁移到冰盖表面，随着时间的推移油会被雪吸收或被风带走，从而使冰表面的石油减少甚至消失。这一现象对北极环境会产生重大影响，即石油会缩短冰盖融化的时间，增加冰盖融化的几率，当冰盖上有油存在时，其太阳光的吸收率比普通的冰要高出 30%，使冰的融化时间提前 7~21 天。



图 4 40 s 时船舶溢油三相物质分布
Fig. 4 Distribution of oil-water-air at 40 s

如图 4(b)所示，溢油持续一段时间后，部分石油会受到海流冲刷与水混合成各种粒径的油滴而扩散于不同深度水中。北极海域的温度较其他海域低，油与水间的黏滞阻力较大，导致溢油的扩散和运动速度较慢。而且，由于海水温度低，甚至接近零度，在完全开敞的自由表面情况下明显存在的溢油离散作用在冰区溢油中并不明显，水面处容易形成厚的油膜。另外，距离冰盖较近的溢油和距离冰盖较远的溢油产生的油膜除上述特点外还具有其他明显的差别。如图 4(a)所示，泄漏点距离冰盖较近的溢油产生的油膜会漂浮于冰盖以下，由于冰盖下表面的摩擦阻碍作用，油膜迁移速度较之自由海面的油膜迁移速度要小，因此其油膜面积小于泄漏点距离冰盖较远的溢油产生的油膜面积。



图 5 100 s 时船舶溢油三相物质分布
Fig. 5 Distribution of oil-water-air at 100 s

如图 5(a)所示，冰盖下面的油滴上升到冰盖的底面之后会因受到冰层的阻挡而逐渐聚集，这一数

值模拟的结果与 Greene 等^[13]应用实验室的有冰水槽对溢油在冰的下表面的运动情况进行观察得到的现象相同;石油在冰面以下形成了一定厚度的油膜。此时,由于油舱内外的压力差降为 0,舱内石油不再溢出,已经溢出的石油以油膜的形式在水流作用下逐渐迁移扩散。如图 5(b)所示,当溢油点较远时,溢出的石油抵达冰盖边缘后受到了冰盖的阻碍,出现了与图 3(a)类似的现象;在涡流的作用下部分油膜被冲刷到冰盖表面,随着时间的推移会出现风化等现象而逐渐消失。但是,大部分溢油仍会迁移至冰盖以下顺水扩散,由于不与空气接触,溢油风化作用几乎不存在,这就需要人为采取补救措施来清理溢油。将图 5(b)与图 3(a)进行对比分析可知,前者所示的现象是油舱内石油全部溢出的结果,比之后者其溢油量要大,因此在冰盖边缘形成的油膜厚度 0.263 m 远远大于后者的 0.072 m,更利于溢油的清理。

3 冰区溢油污染应急方法

基于北极区域的溢油特点,溢油应急方法有诸多不同之处。在普通海域,溢油后最常采用的应急措施是用围油栏将油膜围住,以免造成大范围污染。在有冰海域,当溢油现场积冰多并足以形成天然屏障时,可以考虑利用积冰围控溢油,当溢油黏度较大时采用油拖网,当溢油黏度较小时采用吸油拖栏将溢油驱赶到天然屏障内予以清除,如图 5(b)所示即为其中一种情况。由于冰盖和高密度积冰的存在,在冰盖下会存在相当厚度的油膜,如图 5(a)所示,此时可以利用网目适宜的拖网进行拖曳围控。

其次,可选用化学消油剂。在普通海域,消油剂经喷撒和搅拌后,渗透溢油而接触油水分界面,就能将水中浮油分成微小颗粒,易被微生物降解,在水面油膜较薄的情况下能立即消除浮油外观特征。在有冰海域中,由于浮冰的相互作用有助于分散剂的分散,其搅拌过程较之普通海域要更为便捷。但是经过分散剂处理的溢油,其毒性大,且形成的油块会沉降到海底难以清除,对北极生态系统是一种较大的考验。因此,如要将分散剂应用于冰区溢油应急反应,还需要对分散剂、油以及积冰这三者之间的相互作用和分散剂对生物的毒性作用进行更深入的研究。

再次,还有一种方法为燃烧法^[14],可以在短时间内处理大量溢油,处理费用低。但先决条件一是及时,二是油膜至少要 3 mm 厚。而且,在冰区海域应

用该法要考虑到燃烧产物对北极生物生长和繁殖的影响,以及燃烧时产生的浓烟对大气的污染,因此只能在离北极大陆相当远的公海才使用此法。另外,燃烧残留物也应周密的考虑:在碎冰条件下燃烧的残留物大约为 2 mm 厚,比较厚的重油膜燃烧并冷却后残留物很容易沉降,而轻质油燃烧残留物则不太容易下沉,通常漂浮在水面上^[15]。可用大型滤网、罗网或一般手动工具回收漂浮残留物,也可使用高黏度吸油毡或高黏度撇油器进行处理。对于易下沉的残留物应尽快采取水下拖曳等方法予以清除。

最后,由于普通海域的海洋微生物具有数量大、种类多、适应性强、分布广等特点,用细菌来清除海水表面的油膜和海水中溶解的石油烃具有物理、化学方法不可比拟的优点。但是,在有冰海域,生物对石油类物质降解能力有限,耗时较长,且易向生物链中引入毒性物质。因此,需要明确石油对北极生物的作用后才能应用。

在以上四种溢油处理技术中,机械回收是最基本、最普遍的方法,其灵活性强,溢油回收率高,不存在二次污染,是冰区溢油事故处理的首选方法。化学处理方法可以在恶劣的海况下使用。相比之下,燃烧法因为成本低、具有很高的开发价值,适用于距离北极大陆较远的公海。生物降解技术一般应用在溢油清除技术的第二步,在一些特定的环境条件下适用。

4 结论

对北极航线开通后船舶溢油在有冰海域的运动特点和应急处置进行了探讨,得到如下结论:

(1) 溢油点距离冰盖区域较近的情况下,上升的油滴会黏附于冰的下表面,扩散距离明显小于相同温度下自由海面上的油膜扩散距离;向外扩散的部分油膜会被卷吸到冰盖表面,并继续迁移扩散;其油膜面积小于距离冰盖较远的溢油产生的油膜面积。

(2) 溢油点距离冰盖区域较远的情况下,溢油初期油滴会上升到自由海面,其后受到冰盖边缘阻挡一部分迁移到冰的上表面,另一部分形成较厚的油膜浮于冰的下表面,其厚度大于距离冰盖较近的溢油形成的油膜厚度,利于溢油的回收。该数值模拟结果与国内外相关实验现象相符,提出的计算方法在计算结果上符合实际。

(3) 基于数值模拟分析得到的冰区溢油特点,

提出可在冰区采用围油栏与积冰围控、在积冰较多海水中喷洒消油剂以及在距离北极大陆较远的海域使用燃烧法等溢油应急措施,来控制船舶溢油污染对北极生态环境产生的危害。

参考文献:

- [1] Løset S, Shkhinek K, Gudmestad O T, et al. Comparison of the physical environment of some Arctic seas[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29: 201-214.
- [2] Pietri D, Soule A B, Kershner J, et al. The Arctic shipping and environmental management agreement: a regime for marine pollution [J]. *Coastal Management*, 2008, 36(5): 508-523.
- [3] Magnus S E, Øyvind E, Øyvind B, et al. Prevention of oil spill from shipping by modeling of dynamic risk [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 1619-1633.
- [4] Henrik J, Rolf C S, Endre A, et al. The Arctic is no longer put on ice: Evaluation of Polar cod as a monitoring species of oil pollution in cold water [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60: 390-395.
- [5] Liv-Guri F, Per Johan B. Distribution of water soluble components from oil encapsulated in Arctic sea ice: Summary of three field seasons [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54: 106-114.
- [6] Marie L H, Shaw D B, Moody A J, et al. Immunotoxicity and oxidative stress in the Arctic scallop *Chlamys islandica*: Effects of acute oil exposure [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73: 1440-1448.
- [7] Henry P H. A preliminary assessment of threats to arctic marine mammals and their conservation in the coming decades [J]. *Marine Policy*, 2009, 33: 77-82.
- [8] Krapivin V F, Phillips G W. Application of a global model to the study of Arctic basin pollution: radionuclides, heavy metals and oil hydrocarbons.[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2001,16: 1-17.
- [9] Chen E C. Arctic winter oil spill test [J]. *Technical Bulletin*, 1972, 68: 20.
- [10] Puskas J K, McBean E A, Kouwen N. Behaviour and transport of oil under smooth ice. *Canadian Journal of Civil Engineering* [J]. 1987, 14: 510-518.
- [11] Venkatesh S, Tahan H E, Comfort G, et al. Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters [J]. *Atmosphere Ocean*, 1990, 28(33): 303-329.
- [12] Spaulding M L. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling [J]. *Oil Chemistry Pollution*, 1988, 4: 39-55.
- [13] Greene G. D, Leinonen P J, Mackay D. An exploratory study of the behaviour of crude oil spills under ice.[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1977, 55: 696-700.
- [14] Buist I, Dickins D. Tests to determine the limits to in situ burning of thin oil slicks in brash and frazil ice [C]//Majors L. *Proceedings of 26th Arctic and marine oil spill program technical seminar*. Canada: Environment Canada Press, 2003.10-12.
- [15] 宋守奎, 姜勒凤. 冰区溢油动态因素与现场应急处置 [J]. *水运科学研究* 2008, 3(1): 9-13.

Forecast and emergency response of oil spill on the arctic shipping route

LIANG Xiao¹, LI Wei^{2,3}, LIN Jian-guo²

(1. College of Traffic Equipment and Ocean Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
3. Science and Technology on Underwater Vehicle Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Received: Oct., 27, 2010

Key words: arctic; shipping rout; oil spill pollution; simulation forecast

Abstract: Based on the fragile ecosystem of arctic environment, the oil spill pollution in arctic shipping route was discussed. The simulation of oil spill in ice waters was built by FLUENT. The movement characteristics of oil spill in ice waters were analyzed. The results showed that the oil adhered to the ice lower surface easily, while its diffusion area was less than that on the free sea surface at the same temperature; some oil was entrained to the ice upper surface and was further transported, which accelerated the ice melting. The pollution area caused by oil spill near the ice sheet was less than that caused by oil spill far away from the ice sheet. In view of the data, the prevention and treatment methods of oil spill were discussed. The containing combination of boom and pack ice, spraying oil dispersant in icy waters and burning oil in the sea far away from arctic continent were suggested for the arctic sea waters, which could help China to establish the environment management methods for fragile ecosystem.

(本文编辑:康亦兼)