

低温溢油异常蒸发行为的数学模型与模拟

祁佩时, 邵志国, 刘云芝

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, qipeishi@163.com)

摘 要: 为了考察低温环境下溢油蒸发行为,通过浅盘蒸发试验测定了0#柴油和大庆原油在温度分别处于各自凝点附近的“低温”环境下的蒸发量,结合混合液蒸发机理,引入衰减因子 $e^{-k/\Delta\theta}$,建立低温溢油蒸发模型.研究表明:当环境与溢油凝点温差($\Delta\theta$)小于10℃时需采用改进模型预测蒸发过程,此时,油膜液相阻力增大,一定深度内(h)的挥发组分被蒸发掉,且 h 随 $\Delta\theta$ 减小而降低,柴油与大庆原油的液相阻力增加系数 k 分别为0.993和0.989.有冰水面溢油的蒸发过程受暴露于大气中的油膜面积(A_f)与厚度(h_o)影响较大,应采用 $(A_f h_o e^{-k/\Delta\theta})/V$ 为衰减系数的模型对其进行预测.改进后的模型可较好的预测低温条件下油品的蒸发过程.

关键词: 低温; 溢油蒸发; 浅盘实验; 覆冰率

中图分类号: X507 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2010)06-0893-06

The mathematical modeling and simulation on abnormal evaporation of spilled oil at low temperature

QI Pei-shi, SHAO Zhi-guo, LIU Yun-zhi

(State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, qipeishi@163.com)

Abstract: In order to predict the evaporative amount of spilled oil at low temperature, the shallow dish test was conducted to investigate the evaporation of diesel and Daqing crude oil, respectively. On the basis of the mixed liquid evaporation mechanism, Fingas' evaporation models were ameliorated by adding a coefficient $e^{-k/\Delta\theta}$. The experimental results indicate that the ameliorated models are adopted when the difference between air temperature and the oil's solidifying point ($\Delta\theta$) is less than 10℃. The volatile components come into the air from the oil surface within a certain depth (h), which decreases as ΔT decreases. The resistance coefficient k is 0.993 and 0.989 for the diesel and crude oil, respectively. The evaporation of oil on the water surface infested with ice is closely related to the exposed area (A_f) and thickness (h_o) of the oil slick, which can be simulated by the model appended with $(A_f h_o e^{-k/\Delta\theta})/V$. The ameliorated models can simulate the oil evaporation very well at low temperature.

Key words: low temperature; evaporation of spilled oil; shallow dish test; ice cover rate

近年来随着石油开发和石化工业的发展,突发性水域溢油污染事件时有发生.石油进入水体后,受风、浪、流、光照、温度和生物活动等因素的影响,无论在质量上还是化学组成等方面都随时间不断发生变化^[1-2].引起这些变化的主要过程是蒸发、光化学氧化、溶解、乳化、颗粒物质的吸附

沉降以及微生物降解等.其中,蒸发是水面油膜中石油烃的较轻组分从液态变为气态向大气进行质量传输的过程,是影响溢油性状变化与迁移行为的重要过程.不同溢油组分不同,蒸发过程也有差别,每一种烃类蒸发速率取决于其蒸气压,各种碳氢化合物的蒸气压随着其分子中原子数目的增加而降低,芳烃的挥发速率低于烷烃^[2-3].一般认为沸点低于37℃的石油分馏物几天之内就可以全部蒸发掉,新鲜原油在2~3d可以蒸发掉25%~

收稿日期: 2010-03-01.
基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2008AA06A411).
作者简介: 祁佩时(1955—),男,教授,博士生导师.

30%,一些轻质原油或成品油的蒸发损失可达总量的一半以上^[3-4].由于组成的改变,蒸发使油密度、粘度、表面张力增加,倾点上升,并影响扩散、乳化、溶解等其他风化过程^[5].因此,模拟蒸发过程有助于对水面溢油残留量的预报,便于制定应急决策和对环境损害进行评估.

目前,蒸发过程的模拟主要有2种类型:准组分法和分析法^[5-8].前者把油视为由一系列分子量不同的烃类组成的混合物,总蒸发量是各组分蒸发量的加和;后者则是将油视为混合类基质,建立基质的蒸发速率与风速、蒸气压、油膜面积的经验关系.其中,应用最为广泛的是由 Stiver 和 Mackay 提出的蒸发模型^[7],应用时需针对不同油品输入恒定的质量迁移系数和蒸气压.但该模型没有充分考虑混合液组分迁移控制步骤的不同对溢油蒸发的影响,忽略了纯液体与混合液蒸发的差异.Fingas 根据浅盘蒸发试验^[9]提出:作为混合物的油的蒸发速率对时间来说不是常数,一般蒸发损失量与时间成对数关系,油的蒸发不是严格地受边界层控制,并提出简化模型模拟溢油的蒸发过程.

低温环境下(油品凝点附近),溢油中高沸点组分可能会凝固而使粘度随温度非线性增加,表现出非牛顿流体的特性^[10],而且低温时油膜表面“结皮”,这些因素会使溢油蒸发行为有别于常温^[3].对此,Berger 和 Mackay 根据 Whitman 双膜理论,将挥发物质的迁移阻力按气、液相阻力之和计算,并给出一简单的用油粘度计算液相阻力的经验方程^[10].但由于方程中相关系数较难获得,且不适合描述近半流态油中组分的迁移,此问题仍没得到很好的解决.因此,本研究采用浅盘蒸发试验考察了市售 0# 柴油和的大庆原油分别在各自凝点附近温度下的蒸发行为,结合前人对原油等混合液蒸发机理的研究成果,抓住蒸发的主要控制步骤,对 Fingas 提出的蒸发模型进行改进,建立了适于预测高粘度油蒸发过程的模型,为低温溢油蒸发行为的预测提供依据,进一步完善了溢油蒸发模型的理论研究.

1 模型的建立

1.1 蒸发传质分析

与纯液体两阶段蒸发过程不同,石油等混合液的蒸发由以下3步骤组成^[5]:1)液体体相易挥发组分向液体表相的迁移;2)挥发分子从液体表相进入气相边界层;3)挥发分子从边界层向环境的扩散.控制步骤决定液体蒸发的特点、影响因素

及蒸发速率方程的形式.根据文献[5,9],实际水面溢油受第2步控制.由于此时蒸发受风速、蒸发面积影响较小,与原油组成和各组分性质有关,在抓住主要影响因素的前提下,速率方程得以简化.因此认为 Fingas 提出以下模拟溢油蒸发的模型较为合理.

$$E = [0.165 \times (\%D) + 0.045 \times (\theta - 15)] \times \ln t. \quad (1)$$

对于少数油品(如柴油、Bunker C light、FCC Heavy Cycle 等)符合 t 的平方根形式的方程:

$$E = [0.254 \times (\%D) + 0.01 \times (\theta - 15)] \times \sqrt{t}. \quad (2)$$

其中: E 为蒸发质量分数, $E = \Delta W/W$, ΔW 为溢油蒸发损失质量, W 为溢油初始量, $\%D$ 为 180 °C 蒸馏时的质量分数, θ 为环境温度, t 为蒸发时间.

1.2 模型的建立

环境温度低于溢油凝点时,油膜凝固,且表面结皮而停止蒸发.所以认为“低温”是相对溢油凝点而言,以大庆原油为例,其凝点在 26 °C 左右^[5],在此温度以下,原油凝固蒸发停止;对于 0# 柴油,只有低于 0 °C 时才凝固.故本试验着重考察溢油凝点附近温度下的蒸发行为.此时溢油粘度较高,扩展较慢,油膜相对较厚,蒸发量降低,蒸发速率减缓^[3].分析可知:原油中含有一定量的蜡(即正构烷烃),当温度降低时,液态原油中的蜡质按相对分子质量大小次第析出,开始时形成的连续相是液态烃,分散相是蜡晶的二相体系^[10-11],粘度增高,易挥发组分迁移到表层的阻力增大,迁移至边界层的速率降低,蒸发过程由第2步控制向第1步控制过度.当温度继续降低,原油中析出的蜡晶增多、长大,首先形成平面状结晶,并互相聚集成三维海绵网状的凝胶体^[12],液相阻力继续增加,油膜内距边界层越近的挥发组分越容易迁移至表层,而油膜深层组分由于阻力与路径的增大迁移至表层的数量减少,此时蒸发过程已完全由第1步控制.温度进一步降低,析出的蜡晶继续增多,把油包在其中,使油失去流动性,凝胶体会阻止油膜内部挥发组分向油膜表层的迁移,液相阻力更大,油膜只有表层一定厚度(h)内的易挥发组分蒸发掉^[5,12-13].温度降至凝点以下,原油完全凝固, h 减小到 0,蒸发停止.假设油膜内各组分分布均匀,一定温度下的可蒸发组分全部集中在厚度为 h 的油膜内.考虑到 h 的减小与低温导致液相迁移阻力增加有关,可迁移至液相表层的挥发组分所在油膜的深度表示为:

$$h=h_0e^{-\frac{k}{\Delta\theta}} \tag{3}$$
其中: h_0 为油膜厚度, $\Delta\theta=\theta-\theta_0$, θ 为环境温度, θ_0 为溢油凝点, k 为阻力增加系数, k 值与油品有关.所以式(1)、式(2)可分别表示为:

$$E=e^{-\frac{k}{\Delta\theta}}[0.165\times(\%D)+0.045\times(\theta-15)]\times\ln t. \tag{4}$$
$$E=e^{-\frac{k}{\Delta\theta}}[0.254\times(\%D)+0.01\times(\theta-15)]\times\sqrt{t}. \tag{5}$$

当温度继续降低至凝点时,溢油凝固,认为 h 近似为0,此时蒸发停止^[5,14].

在应用式(4)、式(5)预测油品蒸发时需要解决以下2个问题:1)确定蒸发发生异常的温度范围,即环境温度高出溢油凝点多少时采用改进模型;2)确定阻力增加系数 k 与油膜表层厚度 h 变化规律.

2 实 验

根据文献[14],将油品分3类:第1类是轻质燃料油(煤油,汽油,柴油等),蒸发速率较大,蒸发半衰期在1周左右;第2类是重质原油(辽河原油,大庆原油等),基本上不存在蒸发半衰期, $n-C_{18}$ 以前可挥发烃类含量低于50%,即无论多长时间蒸发损失始终小于总油量的一半;第3类是稳定难挥发油品(机油,润滑油等),蒸发过程中化学组成基本不变.本研究以柴油和大庆原油为研究对象,考察其在各自凝点附近温度下的蒸发过程,借此验证上述模型改进的可行性,确定改进模型中的必要参数.

2.1 实验方法

不同温度下,分别对市售0#柴油和大庆原油进行浅盘蒸发试验^[3,6],通过测量残油质量得到蒸发量随时间的变化关系.将一定量的试验油注入面积一定的不锈钢浅盘($\Phi 50\text{ cm}\times 3.00\text{ cm}$)中,油品在一定温度下蒸发(无风环境).残油质量通过传感器测定(每隔8 h测量1次).测得数据经数据采集仪输入并存储在电脑中.考察时间为120 h.为减少试验误差,每项试验重复进行3次,结果取平均值.

2.2 实验仪器与装置

质量传感器(LC5100,量程为0~3 kg,精度为1 g,工作温度为-10~50℃);恒温箱(FYL-YS-100L,可恒定温度为0~48℃,温度调节为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$);不锈钢制的浅盘;刻度尺最小刻度1 mm.

2.3 实验材料

本实验选用市售0#柴油和大庆原油为研究

对象,油品物理参数见表1.

表1 油品物理参数				
油品	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏度/ $(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	凝固点/ $^{\circ}\text{C}$	蜡质量分数
0#柴油	0.85	6~9 (10℃时)	<-2	<10%
大庆原油	0.86	32~36 (35℃时)	26	22.6%~24.1%

3 结果及分析

3.1 温度对蒸发过程的影响

为了考察温度对油品蒸发的影响,分别在高于0#柴油和大庆原油各自凝点10℃的温度内对其进行浅盘蒸发试验,测定不同时间内的蒸发量,并采用式(1)和式(2)模拟柴油与大庆原油的蒸发过程,结果如图1、图2所示.

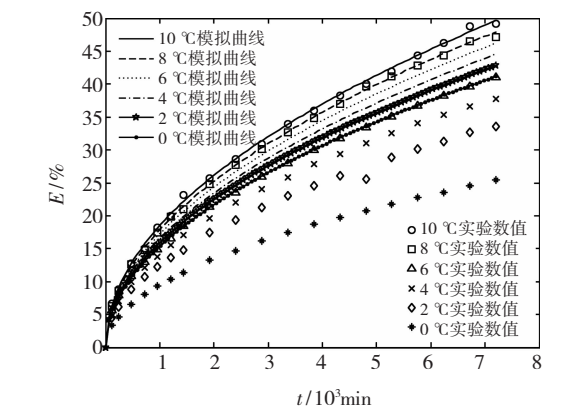


图1 不同温度下0#柴油的蒸发曲线

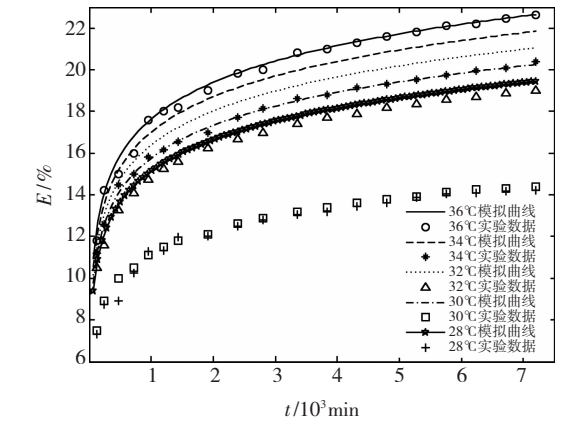


图2 不同温度下大庆原油的蒸发曲线

对于两种油品,10℃和36℃时的蒸发过程仍可用Fingas提出的方程模拟,但当环境温度与油品凝点的温差小于10℃时,采用式(1)和式(2)计算出的蒸发量比实际蒸发量偏高,而且温差越大,偏差量也越大.由此可以认为,当环境温度高出溢油凝点10℃以上时,仍可采用Fingas提出的溢油蒸发模型,但当温差小于10℃时,必须对模型进行改进.此外,溢油在凝点附近蒸发量虽然较模拟值小,但随时间变化关系仍符合Fingas蒸发方程的形式,

这也证明了在原方程基础上添加衰减函数的可行性. 值得注意的是对于大庆原油, 当环境温度与油凝点温差 $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 蒸发量随时间变化基本相同. 分析其原因可知: 对蜡质含量相对较高的重质原油, 低温使得蜡晶更快地增长, 迅速形成三维海绵网状的凝胶体, 将深层的易挥发组分包裹, 阻止其向表面迁移, h 会随温度降低更快的减小, 在一定温差以下 (对大庆原油, $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), h 基本恒定, 而且已不再受 $\Delta\theta$ 影响, 在此温差以下的任何温度 ($\Delta\theta > 0$), 只有表层一定厚度内 (h_e) 的组分蒸发损失掉, h_e 与油品组成有关.

3.2 阻力增加系数的确定与模型的验证

3.2.1 参数的确定

为了确定阻力增加系数 k , 分别对式 (4)、式 (5) 左右两边取对数, 得到如下关系式:

$$\ln E = -\frac{k}{\Delta\theta} + \ln \{ [0.165 \times (\%D) + 0.045 \times (\theta - 15)] \times \ln t \}; \quad (6)$$

$$\ln E = -\frac{k}{\Delta\theta} + \ln \{ [0.254 \times (\%D) + 0.01 \times (\theta - 15)] \times \sqrt{t} \}. \quad (7)$$

将不同时间内的蒸发量代入式 (6) 和式 (7), 以 $1/\Delta\theta$ 和 $\ln E$ 为坐标轴作图, 斜率 k 即为阻力增加系数, 如图 3、图 4 所示. 不同时间内的 $\ln E$ 与 $1/\Delta\theta$ 均有较好的线性关系.

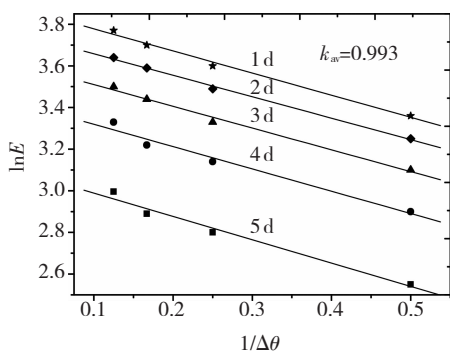


图 3 柴油阻力增加系数

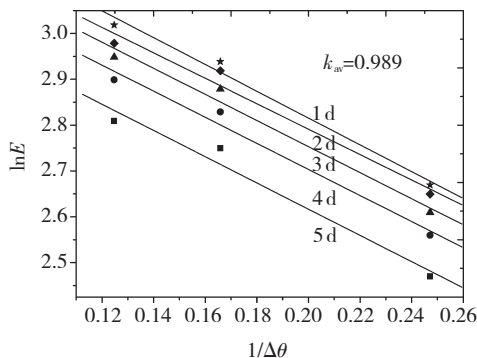


图 4 原油阻力增加系数

3.2.2 模型的验证

为了验证改进模型, 对低温油品的蒸发进行模拟实验, 分别在 $0 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内测定 0# 柴油与大庆原油的蒸发质量分数, 并与蒸发模型计算结果相比较, 考察时间为 8 h, 结果如图 5 所示. 可以看出: 对于柴油与大庆原油, 温度分别高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时蒸发量随温度降低呈线性递减, 基本符合 Fingas 蒸发模型, 可是一旦低于此温度, 蒸发量呈指数型降低, 可用改进模型进行描述, 且改进模型与原模型可以很好的衔接, 实验值与模拟值吻合较好.

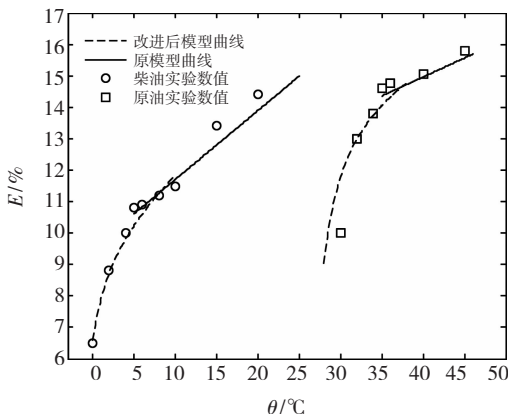


图 5 不同温度时蒸发实验与模型预测的蒸发量比较

3.3 油膜厚度对蒸发量的影响

为了考察低温环境下, 油膜中不同深度的易挥发组分迁移至边界层的差异, 相同条件下, 改变浅盘中的溢油量, 测定 3 d 内油膜厚度分别为 5、10、15、20、25、30 mm 时的蒸发量, 结果如图 6、图 7 所示. 可以看出, 油膜厚度对溢油的绝对蒸发量是有影响的. 无论是柴油还是原油, 不同温度下油膜蒸发量均随其厚度的增加而增大, 这显然是由于油膜厚度增加, 溢油量增多, 可迁移至边界层的易挥发组分增多的缘故引起的. 比较溢油蒸发量增加速率随油膜厚度的变化可知, 当油膜较薄时, 蒸发量增加较快, 随后增加速率减缓, 且温度越低, 蒸发量减缓时的油膜厚度也越小. $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溢油蒸发量在厚度为 20 mm 时才开始减缓, 而在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 15 mm 厚油膜蒸发质量就已达到总量的 80% 以上, 并随油膜进一步增厚蒸发量没有显著增加. 此现象恰好证明了油膜液相阻力随温度的降低而增大, 挥发组分多集中在距表层一定厚度内 (h) 的油膜中, 而且 h 随温度的降低而减小.

对于大庆原油, $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的蒸发量随油膜厚度变化基本相同, 这说明当环境温度与凝点温差小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 原油中析出的蜡晶凝胶体结构相对稳定, 液相阻力基本恒定, h 不再与 $\Delta\theta$ 有

关,本试验条件下, h 近似取 10 ~ 15 mm.

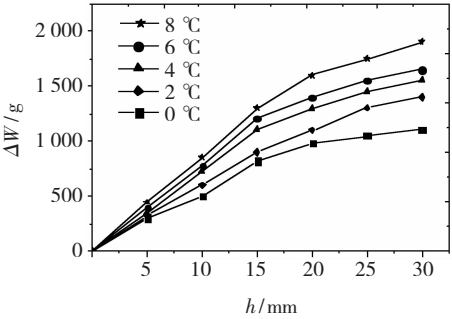


图6 油膜厚度对柴油蒸发的影响

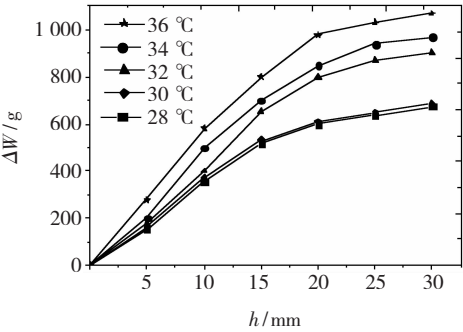


图7 油膜厚度对大庆原油蒸发的影响

3.4 有冰水面溢油的蒸发模拟

对于有冰水面,由于冰层覆盖,蒸发作用显著减弱甚至完全停止^[15-16]. Brandvik 和 Faksness 通过循环水槽试验^[17]测定不同覆冰率下溢油蒸发量是不同的:覆冰率越高,暴露于大气中油膜面积越小,溢油蒸发量越小;此外,根据本文对低温环境下溢油蒸发过程的分析可知:一定温差下, h 只与温度有关,并不因油膜整体增厚而增加,而油膜面积的减小使得挥发组分总量减小,因此蒸发量随冰层覆盖率的增加而减小. 另一方面,对于高覆冰率水面溢油蒸发量的降低则是由于溢油扩散或渗透到冰层下面,无法与大气接触所引起的. 根据以上分析,建议采用以下模型模拟覆冰水面溢油的蒸发过程:

$$E = \frac{A_i h_o e^{-\frac{k}{\Delta\theta}}}{V} [0.165 \times (\%D) + 0.045 \times (\theta - 15)] \times \ln t; \tag{8}$$

$$E = \frac{A_i h_o e^{-\frac{k}{\Delta\theta}}}{V} [0.254 \times (\%D) + 0.01 \times (\theta - 15)] \times \sqrt{t}. \tag{9}$$

其中: V 为溢油体积; A_i 为有冰水面暴露于大气中油膜的面积; h_o 为扩展平衡时暴露于大气中油膜的厚度. 由此可见确定暴露于大气中的油膜面积与厚度对有冰水面溢油蒸发至关重要. 根据文献^[15],按照冰区与水域总面积之比(C)将冰区分

为连续冰盖($0.95 < C \leq 1$)、高密集度($0.8 < C \leq 0.95$)、中密集度($0.3 < C \leq 0.8$)、低密集度($0 < C \leq 0.3$)4 种情况. 对于连续冰盖,所有的油均在冰盖下,与大气隔绝, A_f 为 0 m^2 ,蒸发过程已经停止^[15]. 低冰密集度时溢油的扩展与开敞冷水表面相似,可认为此时油全部浮在水面上,冰下无油,而且与面积一定的浅盘相比,实际开阔水域中冰层对油膜面积的影响较小^[15,18],此时仍可用式(5)、式(6)预测溢油蒸发过程. 对于高、中冰密集度,文献^[15,19]给出了计算暴露于大气中油膜面积的公式:

$$A_f = \frac{V - A_{ie} h_{ui} C}{h_o C}. \tag{10}$$

对于高密集度水面:

$$h_o = \frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w - \rho_o} h_i. \tag{11}$$

对于中密集度水面:

$$h_o = 2.0 \times \left[\frac{\sigma_o}{(\rho_w - \rho_o) g} \right]^{1/2}. \tag{12}$$

其中: ρ_i 为冰层密度; ρ_o 为油密度; ρ_w 为水密度; σ_o 为油-水界面张力; A_{ie} 为单个浮冰的面积; h_{ui} 为单位面积冰下扩散平衡时油膜的厚度,按照连续冰盖下油膜扩散平衡时的厚度计算^[15]; h_i 为冰层厚度; g 为重力加速度.

为了验证改进模型对有冰水面溢油的蒸发进行模拟实验,在加高的浅盘(边缘高为 6 cm)中注入 0 °C 清水,水面上铺置一定量的薄冰板(厚度约为 4 cm),覆盖浅盘面积比例分别为 60% 和 90%. 注入 0# 柴油,0 °C 时测定柴油蒸发量随时间的变化,结果如图 8 所示,此时蒸发量按溢油体积计.

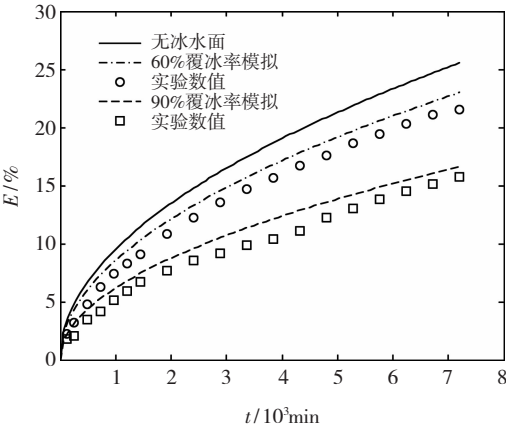


图8 不同覆冰率下 0# 柴油的蒸发曲线

可以看出,相同条件下,冰层密集度越高,溢油蒸发量越小. 改进模型对有冰水面溢油蒸发过程的模拟值较实验值偏高,这是因为实验是在面积一定的浅盘中进行的,随着覆冰率的增加暴露

于空气中的油膜面积呈比例减小,而实际水域面积辽阔,通常情况下岸边对溢油扩展面积的限制较小,覆冰率对油膜面积的影响较实验室内在固定容器中模拟溢油蒸发时冰层对油膜面积的影响要小得多,即在相同覆冰率下,实验室中 A_f 较实际水面上的要小,所以实验值较模拟值偏低。

4 结 论

1)在原油等混合液蒸发机理的基础上,结合低温时油品的蒸发行为特点,提出在温度处于溢油凝点附近的“低温”环境下,溢油蒸发主要受液-体相易挥发组分向液体表相的迁移控制。液相阻力随温度的降低而增加, h 随温度的降低而减小,进而导致蒸发量的降低。

2)在 Fingas 提出的蒸发模型上增加 1 个与温度有关的衰减因子 $e^{-k/\Delta\theta}$,建立了适于预测高粘度及低流态溢油蒸发的模型。

3)通过浅盘蒸发实验考察了市售 0# 柴油和大庆原油的蒸发行为,验证了 h 随温度降低而减小的事实及模型改进的合理性。当环境温度与溢油凝点温差大约低于 10 °C 时可采用改进模型对其蒸发过程进行模拟,0# 柴油和大庆原油的阻力增加系数 k 分别为 0.993 和 0.989。

4)当原油泄漏于有冰水面时,溢油蒸发过程受 A_f 影响较大,引入衰减系数 $(A_f h_0 e^{-k/\Delta\theta})/V$ 改进 Fingas 方程以模拟实际水面溢油蒸发过程,并针对不同冰况,提出了溢油蒸发的模拟方案与 A_f 、 h_0 的计算方法。

参考文献:

[1] 赵云英, 杨庆霄. 溢油在海洋环境中的风化过程[J]. 环境海洋科学, 1997, 16(1): 45-52.

[2] OWENS E H, ROBERT H H, MURRAY S P, *et al.* Containment strategies for marine oil spill in nearshore waters[C]//Oil Spill Conference. [S. l.]: [s. n.], 1985: 114-120.

[3] 吕馨. 海洋中重度风化溢油指纹鉴别技术的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2004.

[4] NIELSEN F, OLSEN E, FREDENSLUND A. Prediction of isothermal evaporation rates of pure volatile organic compounds in occupational environments: a theoretical approach based on laminar boundary layer theory[J]. Annual occupation hygiene, 1995, 39(4): 497-511.

[5] 严志宇. 海上溢油风化过程的研究及模拟[D]. 大

连:大连海事大学, 2001.

[6] SEBASTIÃO P, GUEDES-SOARES C. Modeling the fate of oil spills at sea[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1995, 2(2/3): 121-131.

[7] STIVER W, MACKAY D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures[J]. Environ Sci Tech, 1984, 18(11): 834-840.

[8] FINGAS M F F. A literature review of the physics and predictive modeling of oil spill evaporation[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 42: 157-175.

[9] FINGAS M F F. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 107: 27-36.

[10] BERGER D, MACKAY D. The evaporation of viscous or waxy oil: when is a liquid-phase resistance significant[C]//Proceedings of the seventeenth arctic marine oil spill program technical seminar. Ottawa: Environment Canada, 1994, 1: 77-92.

[11] 潘旭海, 华敏, 蒋军成, 等. 石脑油及原油边界层蒸发特性的实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2006, 19(3): 64-67.

[12] 郭光臣, 董文兰, 张志廉. 油库设计与与管理[M]. 北京:石油大学出版社, 2006.

[13] KATSUHIRO O, NORIMICHI W, YASUAKI H, *et al.* Changes in evaporation rate and vapor pressure of gasoline with progress of evaporation[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44: 756-763.

[14] 杨庆霄, 徐俊英, 李文森. 海上石油蒸发过程的研究[J]. 究海洋学报, 1990, 12(2): 187-193.

[15] 夏定武, 徐继祖. 有冰海域溢油运动数值模型研究[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 113-122.

[16] PRINCE R C, OWENS E H, SERGY G A. Weathering of an Arctic oil spill over 20 years: the BIOS experiment revisited[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44: 1236-1242.

[17] BRANDVIK P J, FAKSNESS L G. Weathering processes in Arctic oil spill: meso-scale experiments with different ice conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 55(1): 1-7.

[18] YAPA P D, WEERASURIYA S A. Spreading of oil spilled under floating broken ice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(8): 278-288.

[19] 王鹏, 李志军. 冰区溢油行为的初步数值模拟[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 334-337.

(编辑 魏希柱)