

基于CFD的海底管道油气泄漏扩散模拟分析

吕国录¹, 张军², 杨云朋¹, 刘志萌¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学机械与能源工程学院,
福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对海底管道泄漏后的油气扩散特性进行了数值模拟研究。建立了海底管道上部区域的泄漏扩散模型, 利用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对该模型进行了油气泄漏后的扩散模拟, 并定量分析了泄漏物扩散距离。模拟结果表明: 该模型及模拟方法能够在一定程度上反映油气泄漏扩散真实情况, 且随着含气率增大, 大油滴越易破碎成大量的小油滴, 溢油扩散范围更广; 随着泄漏速度增大, 溢油横向漂移距离逐渐增大, 且变化接近线性分布; 海流速度对溢油的横向漂移有直接影响, 随着海流速度增大, 溢油的射流高度不断减小。

[关键词] 海底管道; 油气泄漏; CFD; 定量分析

[中图分类号] TE 88; X 55

Simulation and Analysis of Diffusion of Oil and Gas Leakage from Submarine Pipeline Based on CFD

LYU Guolu¹, ZHANG Jun², YANG Yunpeng¹, LIU Zhimeng¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanical and Energy Engineering, Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021, China)

Abstract: The leakage diffusion model of the upper part of the submarine pipeline was established in order to study the characteristics of oil and gas diffusion after submarine pipeline leakage. By using the computational fluid dynamics (CFD) method, the oil gas diffusion after the leakage was stimulated and the diffusion distance was quantitatively analyzed. The results show that the model and the simulation method can reflect the real situation of the oil gas leakage and diffusion to some extent, and large oil droplets more easily break into small oil droplets with the increase of the gas content, which will result in a wider range. Results also reveal that the horizontal drifting distance of the spilled oil gradually increases in the leakage velocity with a linear distribution. It suggests that the current velocity has a direct influence on the horizontal drifting of the spilled oil, which bring about the continuous decrement of the jet height.

Keywords: submarine pipeline; oil and gas leakage; CFD; quantitative analysis

[收稿日期] 2017-04-17

[修回日期] 2017-06-06

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2014J01201)

[作者简介] 吕国录(1989—), 男, 硕士生, 从事船舶及海上装置能源工程、海底油气泄漏研究。通信作者: 张军(1966—), 男, 副教授, 博士, 从事多相流动、海洋工程及海洋能综合利用、海底油气泄漏、流体机械优化等研究。

0 引言

随着海上油气田的开发,海底管道在输油方面发挥了重要作用,但因为长期受到海水冲刷腐蚀,管道老化等因素的影响,海底管道泄漏事故时常发生,不仅造成巨大的经济损失,也对海洋环境造成了污染,因此对海洋溢油问题展开研究具有重大意义。目前,国内外学者通过理论与数值分析建立了多种海洋溢油模型, Johansen 等^[1]建立了 DeepFlow 水下溢油模型,并利用试验进行了验证; Yapa 等^[2]和 Zheng 等^[3]基于拉格朗日控制体积法建立了一种较完善的溢油模型,同时考虑了溢油的扩散和溶解过程; Fannelop 等^[4]模拟了无海流工况下水下油井井喷事故产生的浮射漏油情况;王晶^[5]对溢油在水中运移扩散过程及影响其扩散的主要因素进行了研究;汪守东等^[6]在 Yapa 的溢油模型基础上建立溢油数学模型,首次考虑了溢油的乳化作用;李志刚等^[7]采用有限体积法及 VOF (volume of fraction) 方法,建立了溢油扩散数值模型,首先将数值模拟结果与 Fan^[8]的实验值进行对比,验证了数值模型的可靠性,其次研究了恒定海流下溢出速度与环境水深对溢油的影响;臧晓刚等^[9]进行了微孔溢油实验研究,该研究可为水下微孔泄漏的溢油扩散提供实验参考;张军等^[10]采用拉格朗日控制体积法建立了向下运动的羽动力模型,对水下管道向下泄漏的羽流特性进行了实验及理论研究;基于 Fluent 软件,高清军等^[11]、Zhu 等^[12]研究了不同操作压力、不同海流速度对溢油的影响。以上研究为海洋溢油问题的进一步研究提供了一定的基础数据和参考价值。

从已有的研究基础数据来看,目前大都研究只针对单纯原油泄漏展开,对于油气混合微孔泄漏情况的研究还较少。为此,本文在国内外研究的基础上,依据计算流体力学基本理论,建立水下溢油数值模型,进行水下管道泄漏数值模拟研究,分析比较不同含气率、泄漏速度及海流速度对溢油扩散特性的影响,为海洋溢油的防治管理及海上溢油回收工作提供理论依据。

1 理论模型的建立

1.1 数学模型

依据计算流体力学理论,建立二维求解模型,其基本数学模型包括非定常不可压黏性流体流动连续性方程、动量方程及标准 $k-\varepsilon$ 湍流方程等基本方程;油-水-气三相流动界面采用 VOF 方法进行追踪。

1.1.1 基本方程

连续性方程: $\partial \mathbf{u} / \partial x + \partial \mathbf{v} / \partial y = 0$ 。其中: \mathbf{u} , \mathbf{v} 分别为 x 、 y 方向上的速度分量。

动量方程:

$$\begin{aligned} \partial(\rho \mathbf{u}_i) / \partial t + \partial(\rho \mathbf{u}_i \mathbf{u}_j) / \partial x_j = & -\partial p / \partial x_i + \partial[\mu \partial \mathbf{u}_i / \partial x_j + \mu_t (\partial \mathbf{u}_i / \partial x_j + \partial \mathbf{u}_j / \partial x_i) - \\ & 2(\rho k + \mu_t \partial \mathbf{u}_i / \partial x_i) \delta_{ij} / 3] / \partial x_j + S_i; \delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j, \\ 0, i \neq j. \end{cases} \end{aligned}$$

其中: ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{u}_i 、 \mathbf{u}_j 分别为 x 、 y 方向上的速度分量; p 为压力; μ 、 μ_t 分别为流体的运动黏性系数和湍动黏性系数; k 为湍动能; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; S_i 为广义源项。

湍流模型: $\partial(\rho k) / \partial t + \partial(\rho k \mathbf{u}_i) / \partial x_i = \partial[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \partial k / \partial x_j] / \partial x_j + G_k - \rho \varepsilon$;

$$\partial(\rho \varepsilon) / \partial t + \partial(\rho \varepsilon \mathbf{u}_i) / \partial x_i = \partial[(\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \partial \varepsilon / \partial x_j] / \partial x_j + C_{1\varepsilon} G_k / k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2 / k。$$

其中: G_k 为与平均速度梯度有关的湍动能生成项; ε 为湍动能耗散率; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.1.2 自由表面跟踪方法

原油泄漏后以射流的形式进入海水中,油-水-气三相流动相互作用。因为油-水-气三相具有明显的相界面,所以采用 VOF 方法可以更好地解决自由界面跟踪问题。

VOF 模型引入液体的体积分数 α_q 表示第 q 相流体所占体积与该单元总体积之比, $\alpha_q = 1$ 表示流体全为第 q 相流体, $\alpha_q = 0$ 表示单元内没有该物质。自由表面处的 α_q 应满足如下方程:

$$\partial a_q/\partial t + \boldsymbol{v} \cdot \nabla a_q = 0, \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1。$$

式中： α_q 为相体积分数； q 为各相编号， $q = 1,2,3$ ； \boldsymbol{v} 为该流体平均速度。

1.2 物理模型

Wilkening 等^[12]研究发现，二维数值模型计算结果与三维模型有较好的相似性。此外考虑到计算机硬件设备及计算时间，将实际溢油模型简化为二维模型，对油气泄漏过程进行模拟分析。通过 Fluent 中的 patch 操作得到数值水槽，设数值水槽尺寸为 20 m×20 m，在水槽底部靠左侧有一小孔作为泄漏孔，泄漏口和海流出入口均为速度入口，管壁为壁面边界，其余为压力入口。泄漏液体为原油，气体为甲烷（CH₄）。设置后的数值水槽如图 1 所示。



图 1 数值水槽

1.3 数值计算方法

Fig.1 Numerical flume

采用计算流体软件 Fluent 中的 VOF 模型，在泄漏孔径和水深一定情况下，分别研究了 3 种不同含气率、泄漏速度及 3 种不同海流速度对溢油的扩散影响，相关模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数
Tab.1 Model parameters

| 泄漏孔径 Leakage diameter/m | 水深 Water depth/m | 含气率 Gas content/% | 泄漏速度 Leakage velocity /(m·s ⁻¹) | 海流速度 Current velocity /(m·s ⁻¹) | 流体密度 Fluid density/(kg·m ⁻³) | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|--|--|---|-----------------|----------------------------|
| | | | | | 水 Water | 原油 Crude oil | CH ₄ Methane |
| 0.02 | 18 | 0,10,20 | 2,5,8 | 0.1,0.2,0.4 | 998.2 | 835 | 0.668 |

由于海底原油的密度为 830 ~ 970 kg·m⁻³，动力黏度为 0.1 ~ 1.338 Pa·s，本文选用 0#柴油的密度（835 kg·m⁻³）作为溢油的密度，其中动力黏度取 0.1 Pa·s。

压力与速度耦合问题采用 PISO（pressure implicit with splitting of operators）算法，其离散格式均采用默认格式，油 - 水 - 气三相界面追踪采用 VOF 方法，流体界面重构采用 Geo-Reconstruct 方法。

2 数值计算结果分析

2.1 不同含气率对溢油的影响

由于气体密度远小于原油密度，因此含气率表征了泄漏物的整体密度，含气率越大，油气混合物的整体密度就越小，进而决定了油气物在水中的扩散范围及油滴尺寸大小。以泄漏速度为 5 m/s，海流速度为 0.2 m/s，模拟分析不同含气率对溢油扩散的影响。含气率分别为 0%、10% 和 20% 工况下油气混合物的模拟扩散情况如图 2 所示。

由图 2 可以看出，泄漏初期，在海流的作用下，溢油轨迹大致相同，在泄漏速度和海流速度一定时，油滴受到海流的冲击作用，大油滴破碎成更多的小油滴分布在水中，在含气率为 0 时，泄漏后的原油主要以油带或大油滴的形式存在，扩散范围相对较小。含气率越大，油滴分布越零散，油气混合物的迁移距离也较远，扩散范围更广。不同种类的海底原油的密度及动力黏度有所差异，造成了油滴大小及泄漏后的扩散范围有所差异，当原油密度较大时，原油与流体的密度差变小，油滴所受到的浮力小，在相同的时间内溢油在竖直方向上的扩散范围有较大的差异；原油黏度主要对油滴尺寸及油滴之间的距离影响较大。

为了定量分析油气混合物在水中的泄漏扩散范围，定义油气输移的最大水平位移为 H_{\max} ，最大竖直位移为 V_{\max} ，每隔 4 s 记录 1 次，并进行数据处理。图 3 为三种不同含气率工况下，油气扩散距离 L_n 随泄漏时间变化的曲线图。

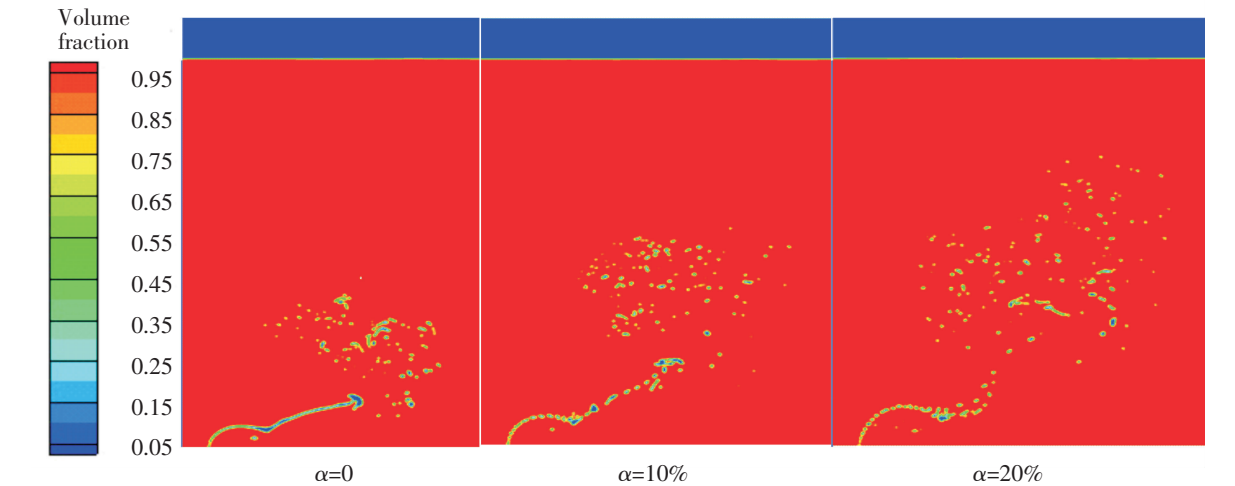


图 2 不同含气率下油-水-气分布图

Fig.2 The distribution of oil-water-gas under different gas contents

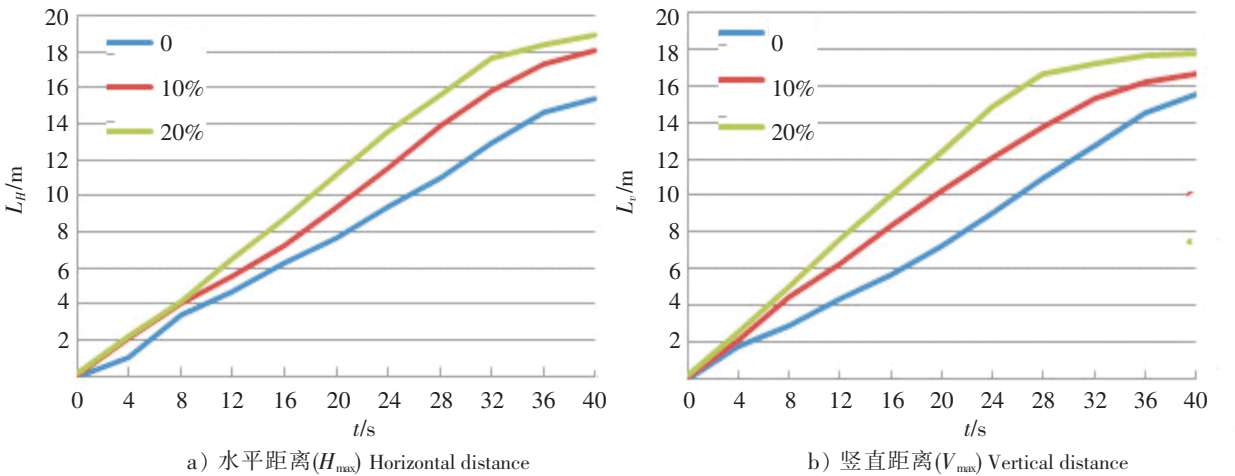


图 3 不同含气率下溢油水平和竖直漂移距离

Fig.3 The horizontal/vertical drifting distance of the spilled oil under different gas contents

由图 3 可以看出，含气率越大，泄漏物的扩散位移也就越大，油气混合物的扩散范围更广。这是由于气体的密度远远小于原油的密度，随着含气率的增加，油气混合物的整体密度减小，在海流的作用下，油滴更容易被冲散，形成更小的油滴，在浮力和海流的作用下，油气混合物的扩散距离较远。

2.2 不同泄漏速度对溢油的影响

泄漏速度表征了油气溢出时的初始动量，初始动量大小决定了浮射流的长度，动量越大，浮射流的长度越大；出流速度越大，初始动量越大，表明溢油到达海面的时间就越短。在恒定海流速度为 0.2 m/s，含气率为 10% 工况下，泄漏速度 v 分别以 2，5，8 m/s 三种工况进行数值模拟，图 4 为同一时刻油气混合物的扩散情况，图 5 为三种不同泄漏速度下溢油水平和竖直漂移距离。

由图 4、图 5 可知，泄漏速度对油气混合物的扩散方式影响较大，溢油速度越大，表明油气从泄漏口溢出时的初始动量越大，此时具有最大的加速度，速度相对较小，在溢油上升过程中，溢油的初始动量逐渐减弱直到消耗殆尽，之后油气的加速度不断减小，但运动速度仍在增大，这就造成了垂直

方向上油气扩散距离相对较大。从图 4 还可以看出: 泄漏速度较大时, 泄漏物喷射进入水中后, 泄漏口附近海水将会受到扰动, 出现卷吸现象, 局部区域海水运动加剧, 将会出现图 4 中溢油轨迹向右倾斜的弧状轨迹, 在海流的联合作用下, 油气物横向扩散距离也较大, 在整个溢油过程中, 由于受到海水的阻力, 油气的速度先增大后减小, 最终依靠浮力及海流的作用, 继续向上、向右传播。在泄漏速度较小时, 溢油主要以零散的小油滴分布在海水中, 而当泄漏速度逐渐增大时, 海水中小油滴、油带和油团逐渐增多, 且水下溢油扩散面积增大, 这在一定程度上也增加了溢油的回收工作难度。

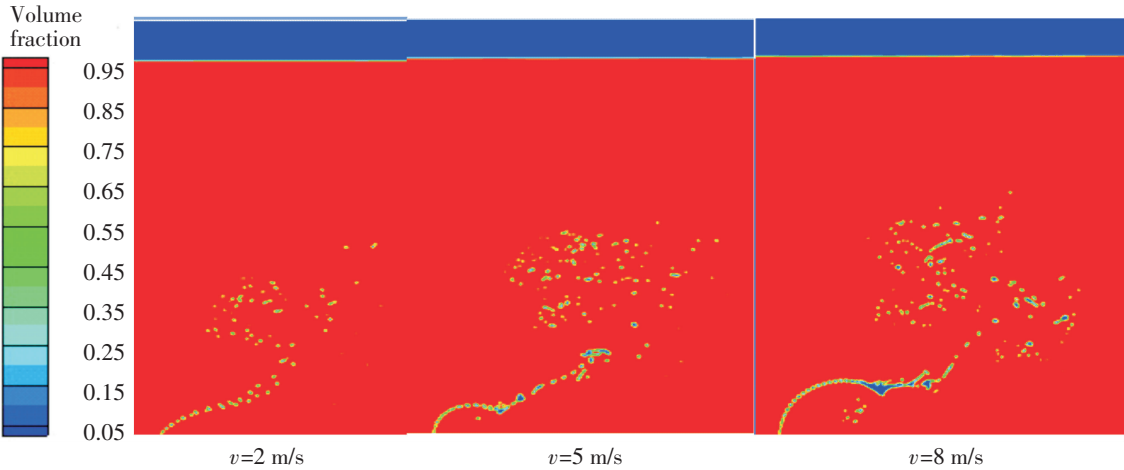


图 4 不同泄漏速度下油-水-气分布图

Fig.4 The distribution of oil-water-gas under different leakage velocities

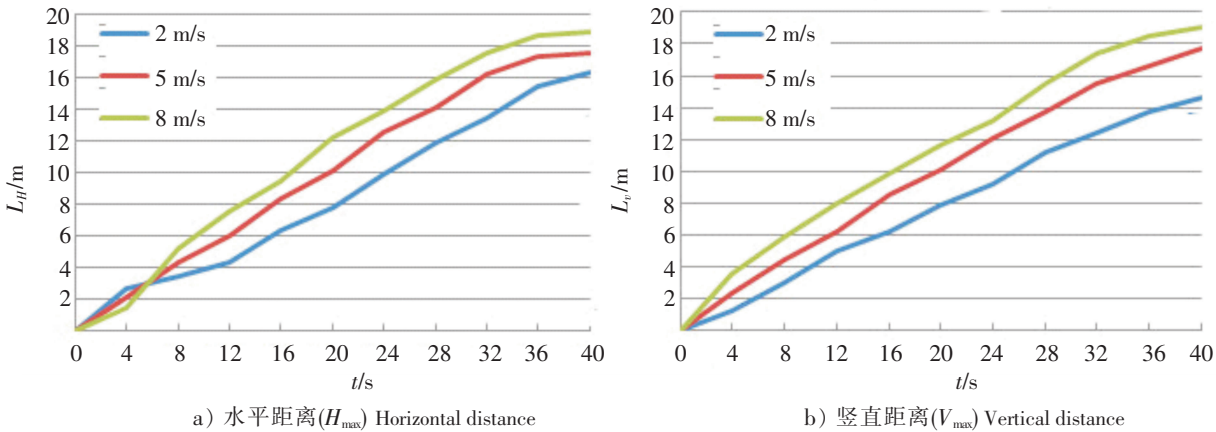


图 5 不同泄漏速度下溢油水平和竖直漂移距离

Fig.5 The horizontal/vertical drifting distance of the spilled oil under different leakage velocities

2.3 不同海流速度对溢油的影响

在泄漏速度一定时, 海流速度对溢油的横向扩散有直接影响, 在泄漏速度为 5 m/s, 含气率为 10% 工况下, 分别模拟分析不同海流速度对溢油的扩散影响, 设海流速度为 0.1, 0.2, 0.4 m/s, 不同海流速度下油气混合物的扩散情况如图 6 所示, 图 7 为不同海流速度下溢油水平及竖直漂移距离。

由图 6、图 7 可知, 海流速度对油气混合物横向扩散影响较大。在海流速度较小时, 初始时刻水平位移的增速较小, 竖直位移的增速较大, 且海流速度越大, 水平方向的扩散距离越远。从图 6 中可以看出, 海流速度对溢油的扩散轨迹影响较大, 海流速度较小时, 射流的高度较大, 射流向右偏移的角度较小, 此时油滴之间的距离也较小; 油气混合物的扩散距离 H_{max} 和 V_{max} 与泄漏时间基本成线性关系。

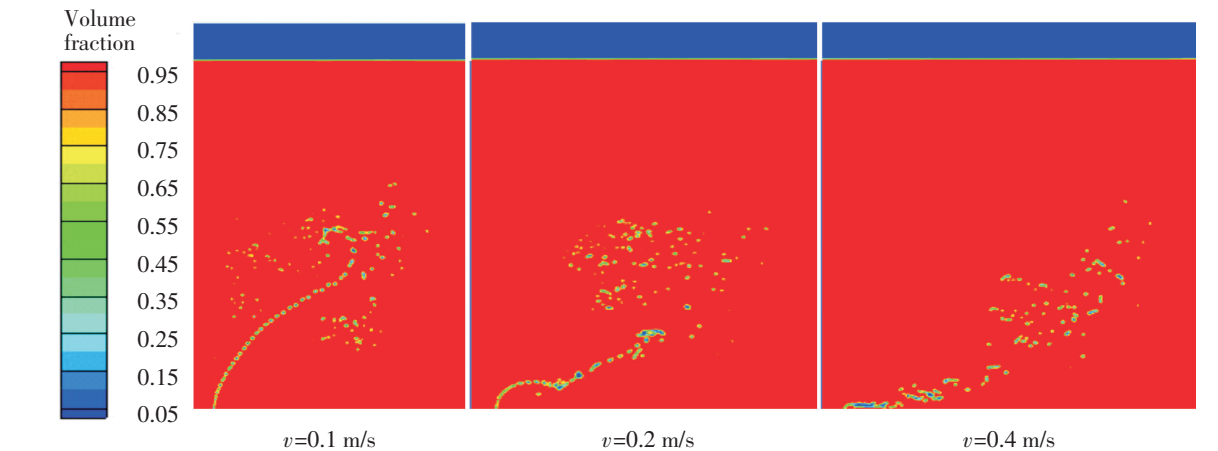


图 6 不同海流速度下油-水-气分布图

Fig.6 The distribution of oil-water-gas under different current velocities

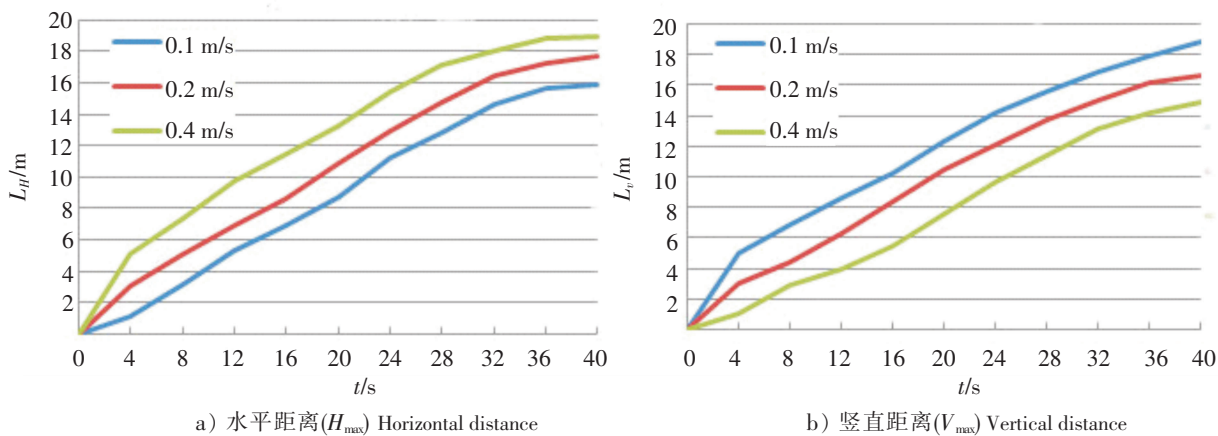


图 7 不同海流速度下溢油水平和竖直漂移距离

Fig.7 The horizontal/vertical drifting distance of the spilled oil under different current velocities

3 结论

基于 CFD 方法，对海底管道油气泄漏现象进行了模拟研究，模拟得到了不同含气率、泄漏速度及不同海流速度对溢油的扩散影响，得到主要结论如下：

- 1) 当泄漏速度和海流速度一定时，含气率对油气混合物的扩散影响最大，含气率越大，油滴越容易被冲散，在海流和浮力的作用下，油气混合物的输移距离越远，扩散的范围更广。
- 2) 泄漏速度表征了溢油出流时的初始动量，对油气混合物的扩散方式影响较大，泄漏速度及海流速度越大，油气混合物的水平输移距离越大，污染物的扩散范围较大。不同工况下，油气物的扩散距离与泄漏时间基本成线性关系。
- 3) 本研究可以为海洋溢油的回收利用提供理论依据，可以科学合理地评估不同情况下海底管道泄漏扩散范围，也可以为快速准确地检测泄漏点及建立合理的应急系统提供可靠的理论依据与技术支持。

[参考文献]

[1] JOHANSEN. Development and verification of deep-water blowout models [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, <http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

47(9-12): 360-368.

- [2] YAPA P D, ZHENG L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development [J]. Journal of Hydraul Res, 1997, 35(5): 673-687.
- [3] LI ZHENG, POOJITHA D, YAPA. Simulation of oil spills from underwater accidents II: Model verification [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 35(1): 673-688.
- [4] FANNELOP T K, HORSCHBERG S, KUFFERJ. Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 229: 629-657.
- [5] 王晶. 海底管线溢油在水体中的运移扩散过程研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [6] 汪守东, 沈永明. 海底管线溢油数学模型研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, S1: 191-197.
- [7] 李志刚, 蒋梅荣, 余建星. 基于 VOF 方法的海底管道溢油扩散数值模拟研究 [J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 100-110.
- [8] FAN L N. Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids [J]. Economia Aziendale Online Web, 1967, 609(s 1-2): 211-222.
- [9] 臧晓刚. 水下油气管道泄漏及油气扩散特性研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [10] 张军, 臧晓刚, 张园春, 等. 水下管道向下泄漏的羽/射流特性 [J]. 化工学报, 2016, 67(12): 4969-4975.
- [11] 高清军, 褚云峰, 林建国. 海底管线溢油的数值模拟 [J]. 大连海事大学学报, 2007, S2: 169-171.
- [12] ZHU H, LIN P, PAN Q. A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline [J]. Energy, 2014, 64(1): 887-899.
- [13] WILKENING H, BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2206-2215.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)