

文章编号: 1000-8241(2014)01-0010-05

河流穿越管道小孔泄漏数值模拟

符泽第 兰惠清 张永龙 杜永平

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

摘要: 针对河流穿越管道泄漏后油品在水中的迁移扩散问题, 采用计算流体力学中的有限体积法, 选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 建立河流穿越管道小孔泄漏的数值仿真模型。模拟了柴油在水域中的迁移扩散过程, 并分析比较不同泄漏孔径、泄漏速度和水流速度条件下的油品体积分数和扩散范围。研究表明: 泄漏速度、泄漏孔径和水流速度不仅直接影响油品在水中的扩散轨迹及迁移方式, 而且会改变油品在水中的体积分数和扩散范围, 该研究可为建立河流穿越管道漏油应急预报系统提供理论参考。(图 10, 表 1, 参 10)

关键词: 河流穿越管道; 数值模拟; 小孔泄漏

中图分类号: TE991.2

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.01.003

Numerical simulation on small hole leakage of river crossing pipeline

FU Zedi, LAN Huiqing, ZHANG Yonglong, DU Yongping

College of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044

Abstract: Targeting at the diffusion of leaked oil for rivercrossing pipeline, finite volume method and $k-\varepsilon$ turbulent flow model are chosen to build a numerical simulation model of small hole leakage of river crossing pipelines. The diffusion process of diesel in water is simulated. The volume fraction and diffusion range of diesel under different leak hole diameter, leaking velocity and flow velocity of water are analyzed and compared. The results show that leaking velocity, diameter of leak hole and flow velocity of water can not only directly affect the diffusion trajectory and migration manner of diesel in water, but also change the volume fraction and diffusion range of diesel in water. This research can provide a theoretical reference to the construction of emergency prediction system of leakage accident of river crossing pipeline. (10 Figures, 1 Table, 10 References)

Key words: river crossing pipeline, numerical simulation, small hole leakage

受冲刷腐蚀、外力损伤及管道憋压等自然或人为因素的影响, 河流穿越管道泄漏事故频发, 不仅造成巨大的经济损失, 也给公共安全和环境带来极大的危害。因此, 研究油品在水中的迁移扩散规律对泄漏事故的应急抢险具有重大意义。目前, 国内外学者已提出 50 多种模型用以分析油品的迁移规律, 但基本是针对油品在水面的扩散问题而建立的。刘浩等^[1]针对水面油污染问题, 利用对流扩散方程研究油品在海面的运动状态; 李大鸣等^[2]在水动力学基础上建立了渤海海洋漏油模型, 分析了风场作用和无风作用两种条件下的油品扩散轨迹及范围; 娄厦等^[3]总结分析了不同的漏油模型。但是, 针对水下漏油事故, 如河流穿越管道小孔泄漏情况的研究则较少。国外, Milgram^[4]和

Fannelop 等^[5]模拟了无水流情况下的因水下油井井喷事故产生的垂直浮射漏油; Yapa 等^[6]提出了一种三维数学模型研究水下的油品浮射流。国内, 王晶等^[7]针对河流穿越管道单一孔口形成的气泡及油滴开展了研究; 汪守东^[8]等考虑了油品在水中泄漏过程中的乳化及对流问题, 获得了令人满意的数值结果; 高清军等^[9]采用流体体积法 (VOF) 研究了不同压力及水流速度下的漏油情况。以上研究大都针对海底管道遭受破坏或油田井喷造成的大量漏油情况, 对于河流穿越管道的小孔泄漏情况研究较少。

为此, 对河流穿越管道的小孔泄漏现象进行分析, 依据计算流体力学基本理论, 采用有限体积法求解流场的偏微分方程, 利用 VOF 方法解决非混合相的自

由相界面问题,应用 PISO 算法求解非稳态下压力速度的耦合,建立水下漏油数值模型,模拟油品在压力作用下迅速从泄漏口处喷射入水中,在水流和浮力的作用下上浮至水面的过程。通过比较不同泄漏口、水流速度及泄漏速度条件下,油品在水中不同的运动轨迹,为寻找泄漏点及制订环境处理应急方案提供支持。

1 仿真模型的建立

河流穿越管道小孔泄漏、油井井喷等水下泄漏事故的油品通常以射流和油滴形式在水体环境中迁移。大部分泄漏油品在压力作用下喷射进入水体,并在动量、水流和浮力作用下形成浮射流,油品失去初始动量后,将在周围水流动作用下沿水平方向迁移,在浮力作用下上浮至水面后形成油膜。由于水流的冲散作用,少部分的油品被分散成油滴在水体中迁移。

为了便于阐述,仅考虑二维问题,定义如下假设:

- ①小孔泄漏过程是等温过程,不考虑温度对其的影响;
- ②管道充满油,不存在气体,泄漏扩散过程是油-水两相流问题;
- ③不考虑蒸发、乳化、溶解等运动及水面的漂移和风化过程。

1.1 数学模型

水下射流的基本数学模型包括非稳态不可压黏性流体的连续性方程、动量方程及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型等。方程的离散格式选用一阶迎风差分格式,求解动量方程速度与压力的耦合采用 PISO 算法,多相流的数值模拟采用 VOF 模型,而求解基本数学方程主要利用有限体积法(FVM)。有限体积法又称有限容积法,其基本思路是:将计算区域划分成一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积;将待解的微分方程对每一个控制体积积分,得出一组离散方程^[11]。有限体积法是目前广泛应用于流动与传热问题的数值计算的一种方法,导出的离散方程可以保证具有守恒特性,且离散方程系数的物理意义明确。河流穿越管道泄漏介质运动过程属于流体的湍流问题,适宜采用有限体积法求解。

1.2 物理模型

管材均为 X52、螺旋埋弧焊钢管,管道外防腐层为煤焦油瓷漆特加强级,补口采用热烤缠带。输送油品为柴油,管道位于河底(距水面 10 m),穿越管道采用大开挖方式敷设,稳管方式为水泥稳管,水流速度为

0.5 m/s。以管道、计算水域(10 m×20 m)为研究对象,确定直角坐标系。假定泄漏口位于管道上方,以 10 节点划分泄漏口(图 1)。由泄漏管道的二维模型可知,整个计算区域划分为三块,泄漏口上方的中间部分较狭小且呈三角形,需要较密的网格,适合采用 Tri 类型的网格;两侧区域稍大一些且呈四边形状,适合采用 Quad 类型的网格^[10]。为了保证网格的连续性和精度,泄漏口上方水域采用 Pave 划分方式划分 Tri 类型网格,其他水域使用 Map 划分方式划分 Quad 类型的网格,共 125 000 个单元(图 2)。

根据柴油和水的性质(表 1),计算时间步长为 0.001 s,除了能量的迭代收敛标准为 0.000 001 外,其他各个变量的计算迭代收敛标准为 0.001。边界条件:管壁为壁面,泄漏口和水流入口为速度入口,其他为压力出口。

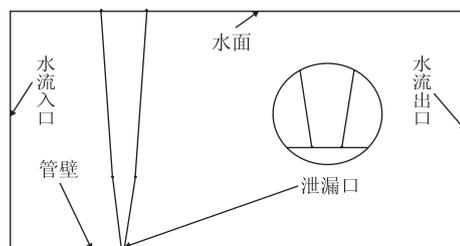


图 1 泄漏管道的二维物理模型

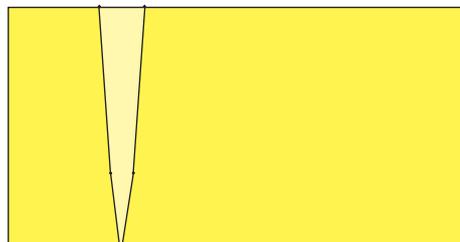


图 2 泄漏口上方及其周围水域的网格模型

表 1 柴油和水的性质参数

| 流体 | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) | 导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) |
|----|--------------------------------------|--|---|
| 柴油 | 730 | 0.002 48 | 0.149 |
| 水 | 998.2 | 0.001 003 | 0.6 |

2 扩散过程的模拟

模拟条件:泄漏口径 0.1 m、泄漏速度 20 m/s、水流速度 0.5 m/s。根据柴油在不同时刻的分布(图 3),1 s 时,柴油在压力作用下迅速漏出,由于水流作用,少部分柴油很快被冲散成油滴,油滴在浮力的作用下加速上升,油滴之间的距离增大,杂乱地扩散在水中;大部分柴油形成较规则的射流,并且在射流主轨迹上、下

两侧各形成一个逆时针的柴油流螺旋;随着柴油继续在水中泄漏,射流范围变大,水中分散的小油滴更多。2 s时,由于水流的作用,射流上方的柴油螺旋被水流冲散,分裂成许多大小不一的柴油油滴,在浮力作用下

向上迁移;而下方的柴油螺旋范围变大,内部的射流已破裂为油滴,但外部的射流较完整。随着时间的推移,泄漏到水中的柴油越来越多,柴油的射流高度越来越高,范围也随之增大,6 s时射流已快接近水面。

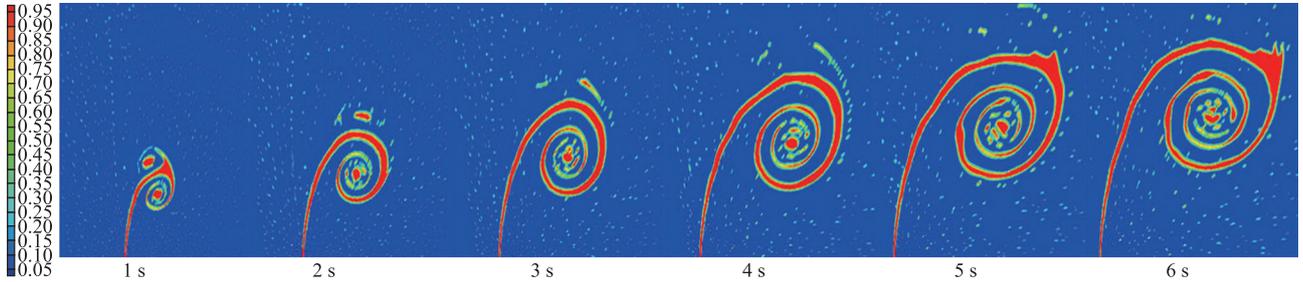


图3 不同时刻泄漏柴油的体积分数云图

3 数值计算结果分析

3.1 不同泄漏速度的计算结果

在水流速度 0.5 m/s、泄漏孔径 0.1 m 的条件下,分别计算泄漏速度为 5 m/s、10 m/s 和 20 m/s 工况下,泄漏 6 s 时柴油的扩散情况(图 4)。假设泄漏孔径

及水流速度一定,当泄漏速度较大时,柴油在压力作用下急速喷射出来,单位时间内柴油的泄漏量较大,柴油的动能也大,受横向水流作用影响较小,形成连续的螺旋状柴油射流;当泄漏速度较小时,泄漏柴油受水流影响较大,能形成射流但射流高度较低,不能形成射流螺旋,泄漏柴油以水平方向迁移为主。

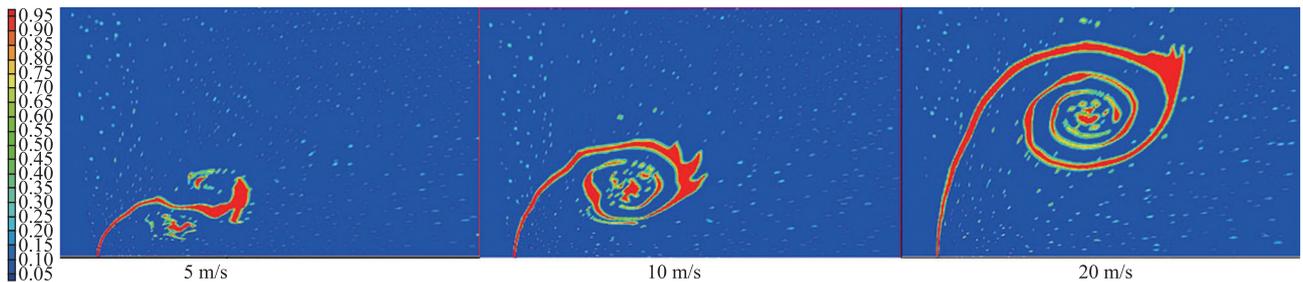


图4 不同泄漏速度下泄漏 6 s 时柴油的体积分数云图

为了定量分析柴油在水中的泄漏扩散范围,为事故后的处理提供理论支持,定义射流的最大竖直位移、最大水平位移分别为 V_{max} 、 H_{max} (图 5)。

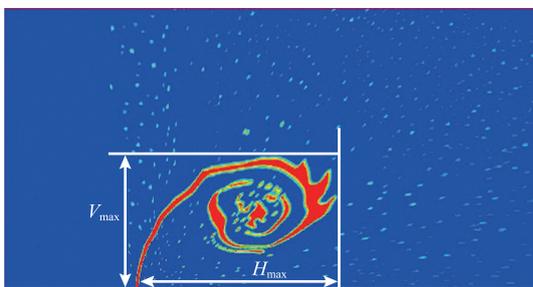


图5 柴油射流 V_{max} 和 H_{max} 的定义

每隔 1 秒记录 1 次 V_{max} 和 H_{max} (图 6),3 种不同泄漏速度的 V_{max} 的增速大体由 2 部分速率组成,即前 2 s 速率大、2 s 后的速率较小,且泄漏速度越大, V_{max} 的增速也越大;3 种泄漏速度的 H_{max} 与泄漏时间基本成线性关系,泄漏速度越大, H_{max} 的增速也越大。

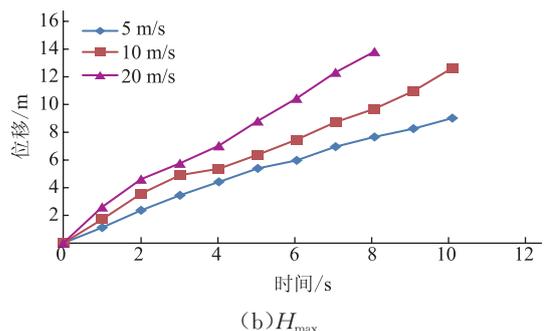
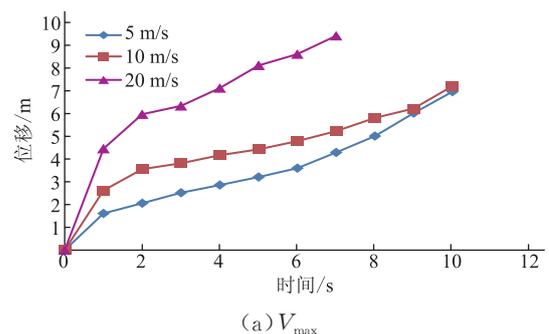


图6 不同泄漏速度的 V_{max} 和 H_{max} 变化趋势图

3.2 不同泄漏口孔径的计算结果

在水流速度 0.5 m/s 和泄漏速度 20 m/s 的条件下,分别计算泄漏口孔径为 0.1 m 和 0.01 m 工况下,泄漏 6 s 时柴油的扩散情况(图 7)。泄漏口孔径越小,水流对柴油扩散方式影响越大。当泄漏口较大时,柴油在

水中形成连续的射流,且射流高度较高;当泄漏口较小时,由于泄漏量较小,此时水流对柴油运动的影响处于主导地位,泄漏的柴油不能形成连续的射流,只能形成间断性的射流,随水流在水下漂流,并逐渐在浮力作用下缓慢上浮。

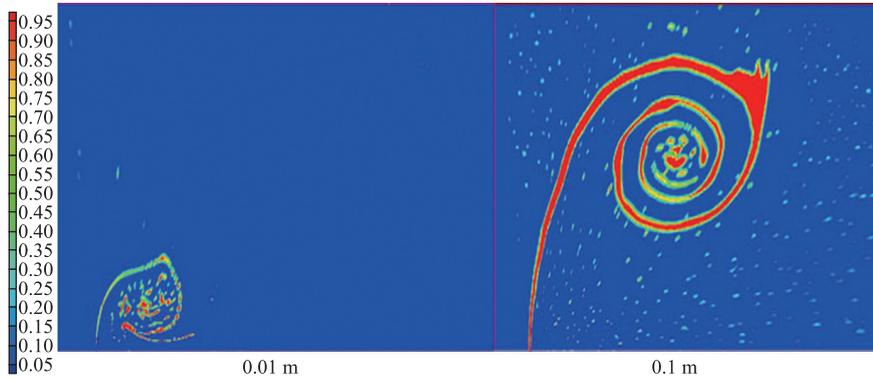


图 7 不同泄漏孔径工况下泄漏 6 s 时柴油体积分数云图

0.1 m 孔径的 V_{\max} 前 2 s 的增速较快,2 s 后的增速较慢;而 0.01 m 孔径的 V_{\max} 基本以恒定增速增加,速率远小于 0.1 m 的速率。0.1 m 孔径的 H_{\max} 增

速大于 0.01 m 孔径的 H_{\max} 增速,基本为恒定增速;而 0.01 m 孔径的增速为阶梯形式的上升,但均小于 0.1 m 孔径的增速(图 8)。

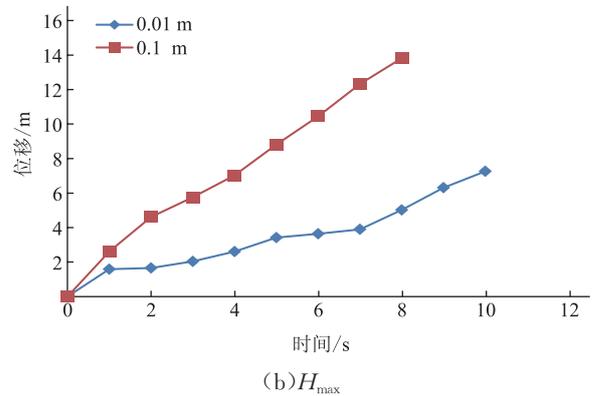
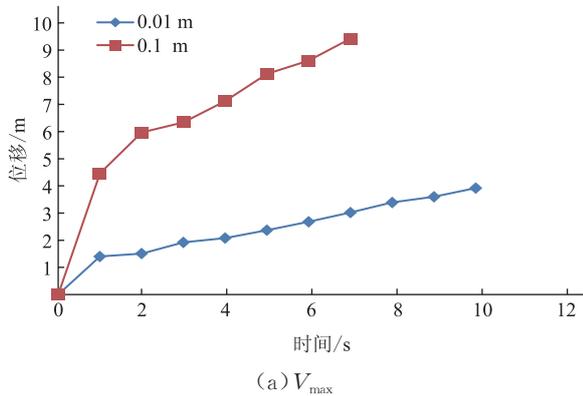


图 8 不同泄漏孔径下 V_{\max} 和 H_{\max} 增速变化趋势图

3.3 不同水流速度的计算结果

在泄漏孔径 0.1 m、泄漏速度 20 m/s 的条件下,分别计算水流速度为 0.2 m/s、0.5 m/s 和 1 m/s,泄漏 3 s

时柴油的扩散情况(图 9)。3 种工况下,射流的形状及变化过程相似,即均由双螺旋状逐渐变成螺旋状的射流;同时,水流速度越大,射流高度越小,且螺旋越大。

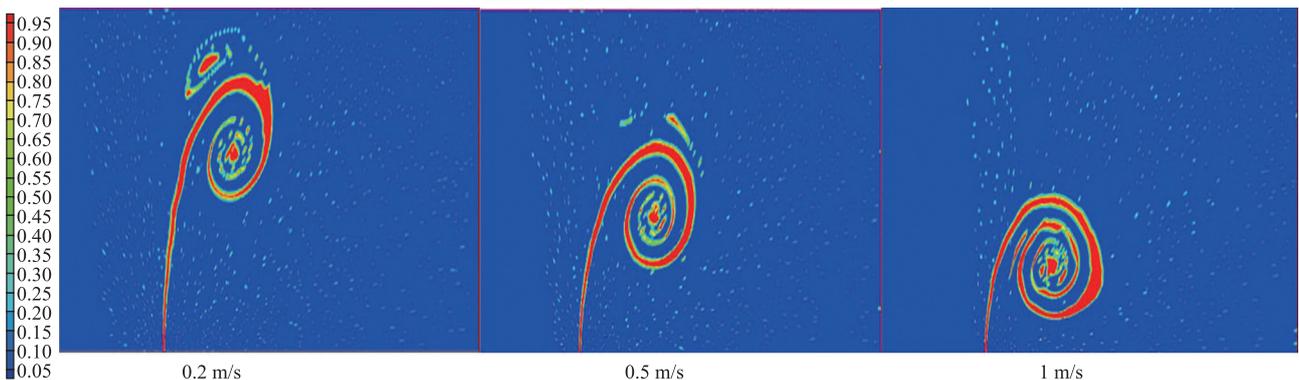


图 9 不同水流速度下泄漏 3 s 时的柴油体积分数

水流速度越小,柴油的 V_{\max} 越大,增速越大;柴油的 H_{\max} 与泄漏时间基本成线性关系(图 10)。

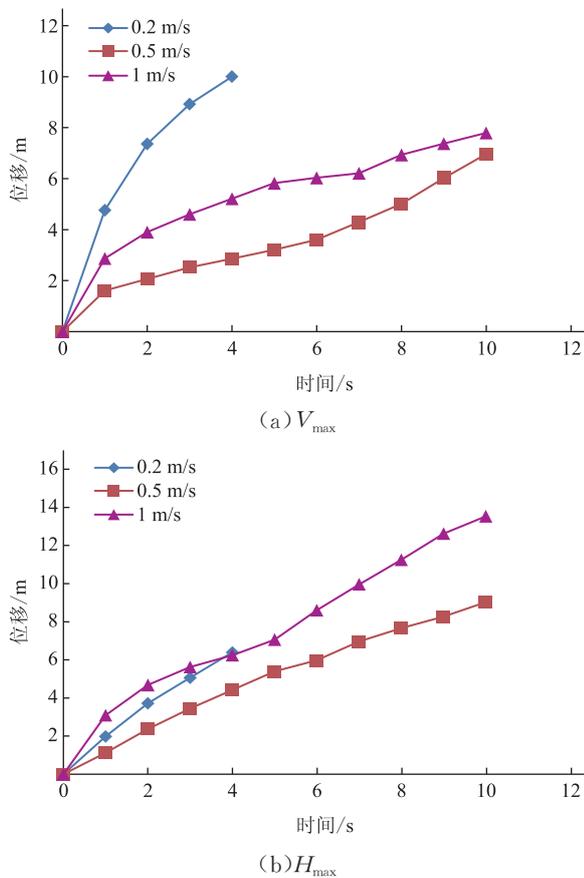


图 10 不同水流速度下 V_{\max} 和 H_{\max} 增速变化趋势图

4 结论

通过对河流穿越管道泄漏的二维两相流场的数值模拟,对比研究不同泄漏速度、泄漏口孔径和不同水流速度条件下的柴油泄漏扩散情况,分析柴油在水下的迁移扩散轨迹,定量分析了水中各处的柴油体积分数分布情况与泄漏扩散范围。数值模拟计算结果表明:泄漏口孔径越小,柴油越容易以油滴而非射流的形式在水中扩散;泄漏速度及泄漏口孔径越大,泄漏量也越大,上升射流高度也越高,泄漏扩散范围越大。但实验的局限性在于只考虑了泄漏口孔径、泄漏速度及水流速度的影响,至于其他条件下的漏油过程有待进一步研究。相关研究不仅可以科学合理地评估不同情况下河流穿越管道泄漏范围及体积分数,也能为更快速准确地检测出泄漏点、事故后果评估以及建立合理的应急系统提供可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 刘浩,尹宝树,林建国.海面溢油对流扩散的反向计算[J].海洋环境科学,2004,23(2):16-19.
- [2] 李大鸣,刘江川,吴丹,等.渤海海洋溢油的数学模型[J].天津大学学报,2012,45(1):50-57.
- [3] 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.
- [4] MILGRAM J H. Mean flow in round bubble plumes[J]. J Fluid Mech, 1983, 133:345-376.
- [5] FANNELOP T K, HORSCHBERG S, KUFFER J. Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets[J]. J Fluid Mech, 1991, 229:629-657.
- [6] YAPA P D, ZHENG Li. Simulation of oil spills from underwater accidents: I Model development[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(5):673-687.
- [7] 王晶.海底管道溢油数学模型研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [8] 汪守东,沈永明.海底管道溢油数学模型研究[J].大连理工大学学报,2006,46(增刊):191-197.
- [9] 高清军,褚云峰,林建国.海底管道溢油的数值模拟[J].大连海事大学,2007,33(增刊2):169-171
- [10] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010.

(收稿日期:2013-03-06; 修回日期:2013-10-20; 编辑:李在蓉)



基金项目: 国家质量监督检验检疫总局公益性行业科研专项课题“埋地管道泄漏事故分析与事故应急关键技术研究”, 201010025-04; 中央高校基本科研课题“埋地管道内轻质非水相流体的泄漏扩散规律研究”, 2013JBM074。

作者简介: 符泽第,在读硕士生,1988年生,2011年毕业于北京交通大学机电学院机械工程及自动化专业,现主要从事油气管道安全方向的研究工作。

FU Zedi, reading master, born in 1988, graduated from College of Mechanical, Electronic and control Engineering, Beijing Jiaotong University, mechanical engineering & automation, in 2011, engaged in the research of oil and gas pipeline safety.

Tel: 010-51684699; Email: 11121545@bjtu.edu.cn