

文章编号:2095—0411(2015)02-0072-06

## 海底管线天然气泄漏过程数值模拟<sup>\*</sup>

文 闯<sup>1</sup>, 延 斌<sup>2</sup>, 王宪全<sup>3</sup>, 张玉蛟<sup>4</sup>, 王树立<sup>1</sup>, 杨 燕<sup>1</sup>

(1. 江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213016; 2. 中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026; 3. 胜利油田胜东社区辛兴物业公司, 山东 东营 257000; 4. 中国石油管道公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**采用 VOF (Volume Of Fluid) 多相流模型对海底管线天然气泄漏过程进行了数值模拟研究, 通过实验验证了数学模型的准确性和可靠性。结果表明: 在泄漏初期天然气上升的同时也会横向扩散并逐渐形成直径为 1.92m 一个气团, 随后气团脱离泄漏口继续向上运动, 气团将分裂为多个小气团, 海水将占据小气团之间的空隙。气团两侧会产生回流, 气液两种流体之间形成强烈的湍流运动, 加强天然气和海水的混合, 造成天然气泄漏过程中气液两相之间的相互渗透。泄漏流量的增大将导致天然气从泄漏口运动到自由表面所需时间的减小, 特别是在流量较小时, 下降幅度较为迅速。

**关键词:**海底管线; 天然气; 泄漏; VOF 模型

中图分类号: TE 88

文献标识码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 2095—0411. 2015. 02. 016

## Numerical Simulation of Natural Gas Leakage in Subsea Pipelines

WEN Chuang<sup>1</sup>, YAN Bin<sup>2</sup>, WANG Xian-quan<sup>3</sup>, ZHANG Yu-jiao<sup>4</sup>, WANG Shu-li<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026, China; 3. Xinxing Property Management Company in Shengdong Community, Shengli Oil Field, Dongying 257000; 4. Petrochina Pipeline Company, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The leakage process of natural gas in subsea pipelines was numerically simulated using the Volume Of Fluid (VOF) multiphase flow model. The numerical results were in good agreements with the experimental data verifying the accuracy and reliability of our developed mathematical model. The results showed that the natural gas went up in the seawater along with the horizontal diffusion in the preliminary stage of gas leakage. The motion formed a gas mass with the maximum diameter of 1.92m. Then, the gas mass broke away from the leak hole and rose to the surface sequentially. In the rise process, the gas mass broke up and formed some small gas masses. The seawater occupied the interspace between the small gas masses. Moreover, the backflow appeared in both sides of the gas masses and resulted in the strong turbulence motion. The turbulence enhanced the mixture of the natural gas and seawater and caused the permeation of the gas and liquid two phase flow in the leakage process in subsea pipelines. The increase of the leakage mass flow rate caused the decline of the required time of natural gas moving to the surface from the leakage hole. Especially, it declined quickly when the mass flow rate was small.

**Key words:** subsea pipeline; natural gas; leakage; VOF model

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-11-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51444005); 常州大学校基金项目资助(ZMF13020057)。

作者简介: 文闯(1985—), 男, 江苏宿迁人, 博士。通讯联系人: 杨燕(1982—), E-mail: yyan-petroleum@cczu.edu.cn

随着世界经济的快速发展,能源的消耗越来越大,作为一种相对的洁净能源,天然气的需求也越来越多。国家能源“十二五”规划也提出加快推进我国海洋油气田的勘探开发,提高天然气在我国一次能源消费中的比例。因此可以预见,作为对海上油气开发的支持,将建立大量的海底管线以进行油气输送。但由于自然环境恶劣和其他人为因素的破坏,海底管线的安全运行一直是油气集输领域的关注热点。首先,海底环境比较恶劣,管线容易发生腐蚀,导致腐蚀穿孔等问题;海底管线还容易受到海流冲刷和海底滑坡等事故的影响,导致安全隐患;而且,海底管线还容易受到船舶抛锚、渔船作业等人为因素的影响,导致管线泄漏等问题<sup>[1-2]</sup>。海底管线泄漏首先会影响正常的油气田开发,造成巨大的经济损失,而且还会影响向居民的供气,影响群众的日常生活;特别严重的是,泄漏的天然气还会发生火灾和爆炸等恶性事故,直接威胁到对海洋平台、船舶及人员的安全。

目前,天然气的泄漏问题的研究主要集中在陆上管线<sup>[3-6]</sup>,利用组分输运模型对天然气在空气中的扩散现象进行分析<sup>[7]</sup>,其本质是单相、多组分气体之间的扩散问题。而海底管线天然气泄漏的研究很少,究其原因在于海底天然气泄漏过程是高度可压缩天然气在海水、空气中的扩散现象,其本质是可压缩气体-液体-不可压缩气体间的多相流动问题,模型的耦合求解较为困难。Cloete 等<sup>[8]</sup>利用 VOF 欧拉模型和离散相模型,对海底管线泄漏天然气在海水自由表面扩散情况进行了数值模型研究。景海泳等<sup>[9]</sup>也通过耦合欧拉-欧拉和欧拉-拉格朗日多相流模型,对海底管线天然气泄漏的泉涌高度进行了分析。上述研究均是在天然气泄漏量较小工况下进行的,研究中没有考虑气体可压缩性,和实际海底管线发生天然气的泄漏流量大、气体呈现高度可压缩等特性有较大区别。本文利用 VOF 欧拉多相流模型对海底管线天然气在海水中的扩散过程进行研究,计算中首次考虑了天然气的高度可压缩性和大流量工况,有利于加深对现场海底管线天然气泄漏过程的理解。

## 1 数学模型

海底管线天然气泄漏过程的本质是气体在液体中的扩散过程,是一种具有清晰界面的气液两相流流动。Volume of Fluid (VOF)模型是一种基于欧

拉格式的多相流模型<sup>[10]</sup>,对两相或多相不相容流体的多相流动问题的模拟有较好的可靠性和精确性。本文利用 VOF 模型对海底管线中天然气泄漏问题进行数值模拟,控制方程组主要包括连续性方程、动量守恒和能量守恒方程组及体积分数方程。

### 1.1 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{-1}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E + u_j p) - \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij} + u_i \tau_{ij}^{-1}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(q_j + q_j^{-1}) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 、 $u$ 、 $p$  分别为气体密度、速度、静压, $\tau_{ij}$  为粘性应力张量, $E$  为总能, $q_j$  为热通量, $t$  为时间。

体积分数方程:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{a_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (4)$$

式中  $a_q$  为第  $q$  相的体积分数, $S_{a_q}$  为源项, $\dot{m}_{pq}$  为  $p$  相向  $q$  相的质量传质, $\dot{m}_{qp}$  为  $q$  相向  $p$  相的质量传质。

组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

式中: $Y_i$  为第  $i$  组分的质量分数, $R_i$  为第  $i$  组分产生的净通量, $\bar{J}_i$  为第  $i$  组分的扩散通量, $S_i$  为源项。

### 1.2 湍流运动方程

在海底管线天然气泄漏过程中,由于管线压力较高,射流速度较大,流动呈现高度湍流状态,因此对高压天然气泄漏的数值计算研究来讲,湍流模型的选择尤为关键。综合考虑计算的精度和经济性,本文选用  $k$ - $\epsilon$  两方程湍流模型<sup>[11-12]</sup>,模型中的湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  通过以下方程求解:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon -$$

$$Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3}$$

$$G_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

式中:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

式中:  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $C_{\epsilon 3} = 1.0$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

## 2 数值计算方法

### 2.1 物理模型

以某海底凝析气管线为例,对水深 4m 的海底管线天然气泄漏进行研究,计算域选择为  $4\text{m} \times 4\text{m}$  的二维面域,管道直径为 323.85mm,泄漏口直径取 60mm,计算中泄漏点压力取 2 000kPa,建立的物理模型如图 1 所示。确定物理模型后需要对计算区域进行离散,网格划分策略采用结构化网格,考虑到泄漏口尺寸相对整个几何区域较小,划分网格是采用分区网格,提高网格的质量。在天然气的泄漏过程中,由于管线内压力较高,天然气呈现出很强的可压缩性,因此,天然气泄漏口设置为压力入口边界条件,水面设置为压力出口边界条件,底面和侧面设置为无滑移、无渗流壁面边界。

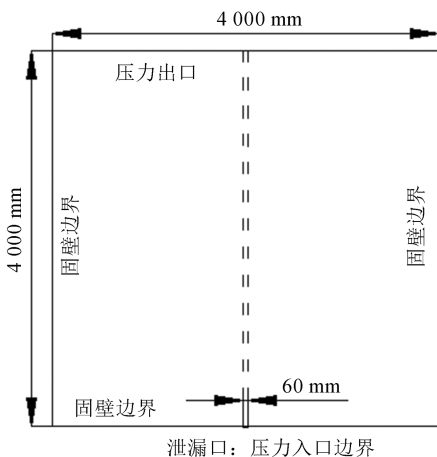


图 1 海底管线泄漏物理模型及边界条件

Fig. 1 Natural gas leakage in subsea pipelines: geometry and boundary conditions

### 2.2 数值方法

海底管线天然气泄漏是一种典型的瞬态过程,数值计算中采用基于压力基算法的 VOF 多相流模

型对瞬态流动问题进行建模和求解。鉴于天然气泄漏过程中呈现出较强的可压缩性和气液两相间存在较大的密度差,采用 VOF 隐式格式并考虑隐式体积力的影响,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法<sup>[13]</sup>,连续性方程、动量方程及能量方程采用二阶迎风差分格式。数值计算之前,需要对模型进行初始化设置,使计算的几何区域充满海水。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模型验证

实验中采用的气体搅拌罐的直径为 500mm,罐高 500mm,在罐底中心开有注气孔,注气孔直径 24mm<sup>[14]</sup>。实验中注气孔进口设定为气体流量入口,出口为自由表面,流体速度由激光多普勒测速仪测得,包括水流的轴向和径向速度,主要采集距离罐底 300mm 平面上从罐中心轴线到罐壁的水流速度。数值计算采用三维模型,取距离罐底 300mm 截面上的垂直速度为对比研究对象,数值计算结果和实验结果如图 2 所示。从图中可以看出,在距离中心较近的区域,数值计算结果比实验数据偏大;在距离中心区域较远的区域,数值计算结果比实验值偏小;总体来讲,数值模拟结果和实验数据较为一致,证明建立的数学模型具有很好的准确性和可靠性。

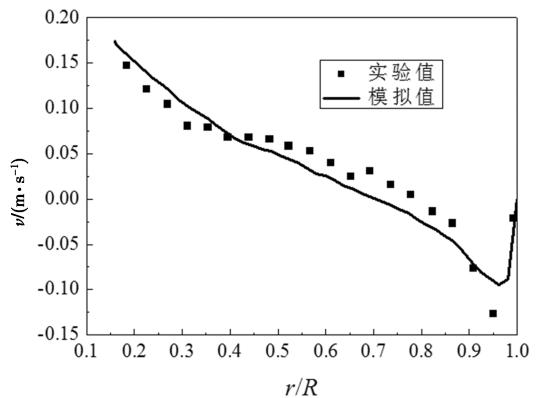
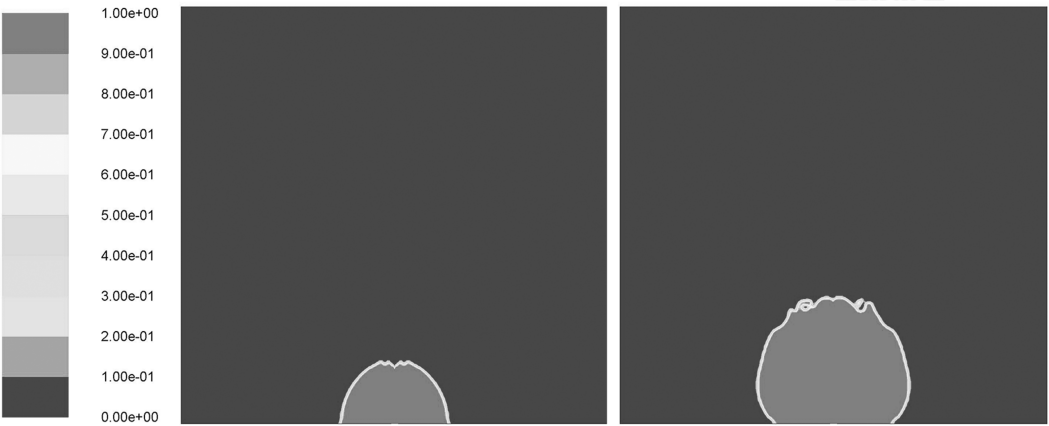


图 2 数值结果和实验值的对比研究

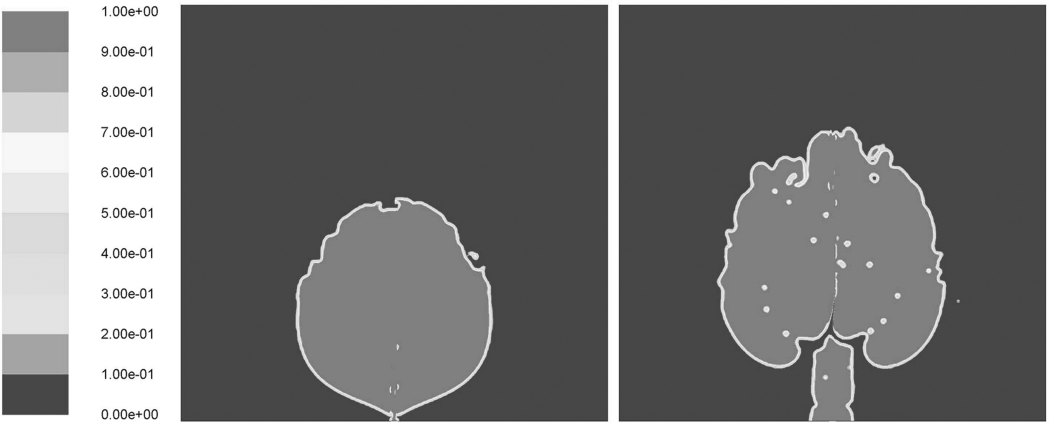
Fig. 2 Comparison of numerical results and experimental data

### 3.2 天然气泄漏过程

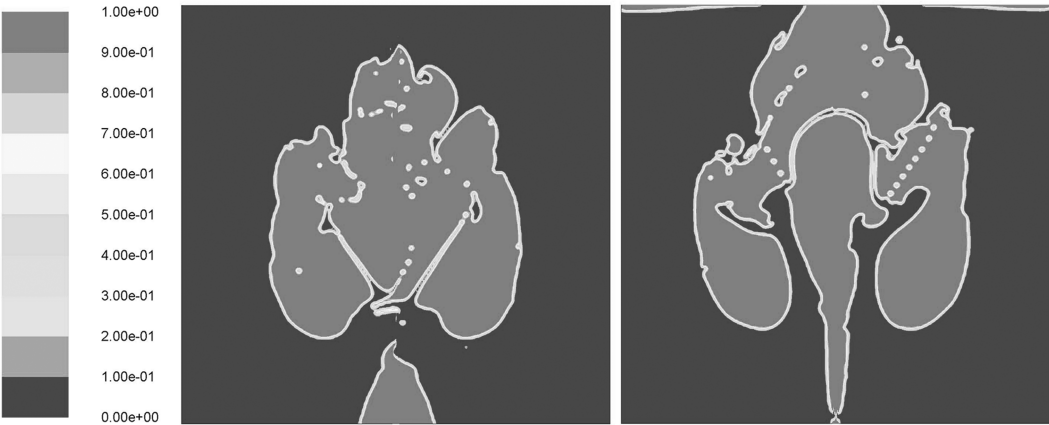
在验证了数学模型的准确性和可靠性以后,利用建立的数学模型对某海底管线内高压天然气的泄漏过程进行数值模拟研究,分析天然气在海水中的泄漏扩散情况,计算中泄漏点压力取 2 000kPa,典型的泄漏过程如图 3 所示。从图中可以看出,在



(a)0.1 s 和 0.3 s 时天然气浓度分布情况



(b)0.6 s 和 0.8 s 时天然气浓度分布情况



(c)1.0 s 和 1.2 s 时天然气浓度分布情况

图 3 海底管线天然气泄漏过程

Fig. 3 Leakage process of natural gas in subsea pipelines

泄漏初期,由于管线内天然气压力较高,天然气在向上运动的同时也沿着管壁在海水逐渐向四周扩散,形成气团;随着泄漏时间的延长,由于天然气的连续泄漏且压力较高,气团可以将海水排开并逐渐长大,最终形成一个上窄型的球型气团并脱离泄漏口。在本文的数值模拟中,0.1s 时刻形成直径约为 1.06m 的半球型气团,到达 0.3s 时,气团直径增加

到 1.48m,泄漏时间增加到 0.6s 时,形成球型气团,此时气团直径达到最大约为 1.92m。

当气团离开泄漏口以后继续向上运动,中心部分天然气上升较快,气团两侧却产生回流,激烈的湍流运动开始造成气团的分裂;与此同时,海水也开始渗透进入气团,造成气团中掺杂着海水。从图中可以看出,在 0.8s 时,气团下部已经开始分裂,并夹杂



少量的海水;到达 1.0s 时,气团在向上运动的同时也逐渐分裂成 3 个部分,海水也逐渐占据气团之间的空隙;当泄漏达到 1.2s 时,气团之间的空隙逐渐增加并充满海水,气团在向横向扩散的同时气团顶部已经达到海水的自由表面,并在海水表面向四周扩散。

3.3 天然气泄漏过程回流情况分析

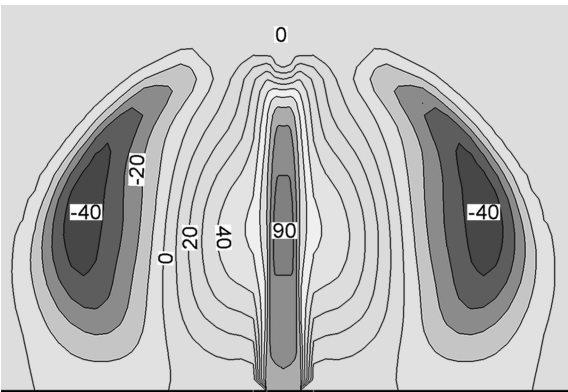
图 4 为海底管线天然气泄漏过程中不同时刻垂直速度的分布情况,计算中泄漏点压力取2 000kPa。从图中可以看出,在泄漏初期(0.1s),泄漏口上方气体泄漏速度较大,天然气向上快速运动,速度可达 80m/s,造成两侧的海水向下运动,向下的速度可以达到 40m/s,形成较强的回流;随着时间的延长,气团持续向上运动并伴随着的海水回流,两种流体之间形成强烈的湍流运动,这一湍流过程将加强天然气和海水的混合,造成天然气泄漏过程中气液两相之间的相互渗透。

3.4 泄漏时间分析

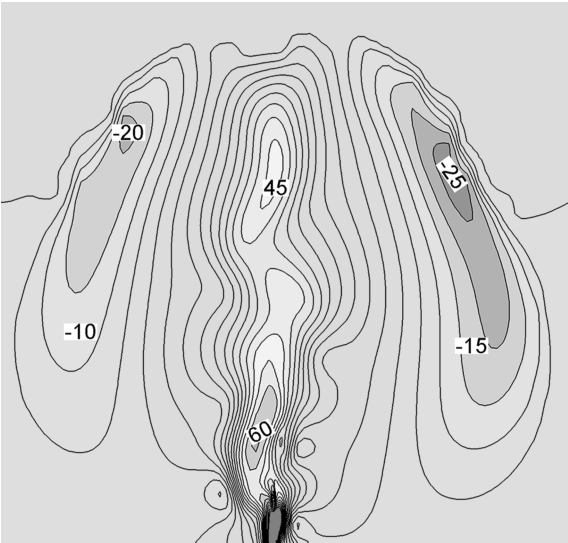
当泄漏口面积一定时,天然气泄漏流量随着泄漏管线压力的升高而增大,造成天然气从泄漏口扩散到海水表面的时间也不同。图 5 为海水深度为 4m、泄漏点压力取 2 000kPa 时,天然气从泄漏口运动到自由表面的时间随着泄漏流量的变化情况。从图中可以看出,随着泄漏流量的增大,天然气从泄漏口运动到自由表面所需时间逐渐减小;特别是在流量较小时,下降幅度较为迅速,流量较大时,下降幅度较为缓慢。

4 结 论

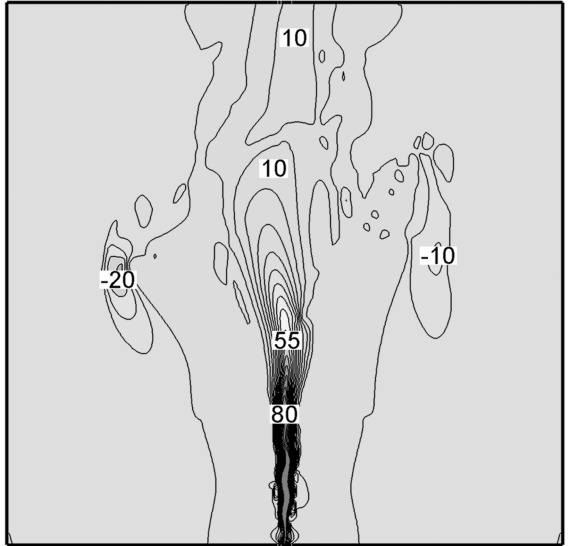
1)泄漏初期,天然气在向上运动的同时也沿着管壁在海水中横向扩散,形成直径约为 1.92m 的球形气团;气团随后离开泄漏口并继续向上运动,中心部分天然气上升较快,气团两侧速度较小造成气团分裂,气团之间的空隙逐渐增加并充满海水,气团达到海水的自由表面后会在海水表面向四周扩散。



(a)0.1 s 时垂直速度分布情况



(b)0.6 s 时垂直速度分布情况



(c)1.2 s 时垂直速度分布情况

图 4 不同时刻垂直速度分布

Fig. 4 Vertical velocity at different times

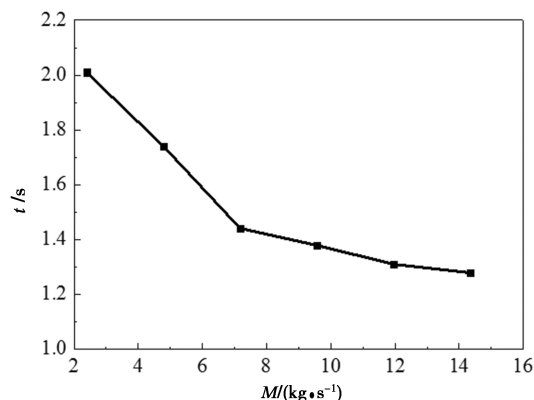


图5 泄漏量对天然气从泄漏口到自由表面运动时间的影响

Fig. 5 Effect of leakage mass flow rate on time from leakage hole to surface

2)气团两侧海水向下运动速度可以达到 40m/s,形成强烈的回流,造成天然气和海水的混合和相互渗透。

3)泄漏流量的增大将导致天然气从泄漏口运动到自由表面所需时间的减小,特别是在流量较小时,下降幅度较为迅速。

## 参考文献:

- [1]潘大新,霍有利.海上油气田工程油气泄漏事故风险分析[J].海洋环境科学,2009,28(4):426-429.
- [2]郝永梅,高乾,邢志祥,等.城市燃气管道失效风险等级评定方法研究[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(2):38-42.
- [3]周宁,崔伟,潘东.罐区重质气体泄漏扩散的数值模拟分析[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(3):28-32.
- [4]李朝阳,马贵阳.埋地与架空输气管道泄漏数值模拟对比分析

[J].天然气工业,2011,31(7):90-93.

- [5]周宁,潘东,赵会军,等.基于小波包分析的模拟天然气管道泄漏声发射定位[J].常州大学学报(自然科学版),2011,23(3):9-12.
- [6]Zhang J, Lei D, Feng W. An approach for estimating toxic releases of  $H_2S$ -containing natural gas [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 264: 350-362.
- [7]董刚,唐维维,杜春,等.高压管道天然气泄漏扩散过程的数值模拟[J].中国安全生产科学技术,2009,5(6):11-15.
- [8]Schalk C, Jan E O, Paal S. CFD modeling of plume and free surface behavior resulting from a sub-sea gas release [J]. Applied Ocean Research, 2009, 31: 220-225.
- [9]景海泳,余建星,杜尊峰,等.海底管道水下气体扩散 FLUENT 仿真分析[J].海洋技术,2012,31(3):82-85.
- [10]Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39: 201-225.
- [11]刘雪东,刘佳阳,朱小林,等.结构参数对拉伐尔喷管空化特性影响的数值模拟[J].常州大学学报(自然科学版),2014,26(2):43-47.
- [12]陶进峰,徐学慧.平焰燃烧三维热态速度场的数值模拟[J].常州大学学报(自然科学版),2012,24(1):33-36.
- [13]Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1972, 15: 1787-1806.
- [14]Domgin J F, Gardin P, Brunet M. Experimental and numerical investigation of gas stirred ladles[C]// Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne:CSIRO, 1999: 181-186.

(责任编辑:殷丽莉)