

海底输气管道泄漏天然气扩散风险研究

李新宏, 陈国明*, 朱红卫, 康前前

中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心, 青岛 266580

* 通信作者, offshore@126.com

收稿日期: 2016-11-15

国家重点研发计划课题“临海输气管道及陆上终端风险评估及防控技术”(2016YFC0802305)资助

摘要 针对海底输气管道在服役过程中发生泄漏引发天然气扩散问题, 采用计算流体动力学CFD方法, 建立海底输气管道泄漏天然气扩散后果预测与评估模型。围绕泄漏天然气在海水中以及从海面溢出后在大气中扩散两种场景, 预测天然气在海水中的运移轨迹, 评估天然气上浮时间、溢出位置和溢出区域大小等关键风险参数。预测天然气从海面溢出后在大气中的扩散过程, 评估天然气在海面形成的危险区域范围, 并考虑海面天然气爆燃场景, 评估爆燃超压、火灾高温和热辐射等伤害参数的变化规律。研究表明: 天然气水下扩散能够引起海面表层海水密度降低, 在海面形成的涌流效应, 可能对海面浮式结构物的稳定性产生影响; 天然气海面扩散风险主要为可燃气云被引燃之后可能发生爆燃事故; CFD模型能够实现对海底输气管道泄漏天然气扩散风险的有效预测和评估, 可为海底输气管道泄漏风险管理及应急决策提供参考。

关键词 海底输气管道; 泄漏; 天然气; 扩散; 风险评估; 计算流体动力学

目前, 我国已铺设的海底油气管道超过 6 000 km, 海底管道建设正处于蓬勃发展阶段。然而, 我国海底管道也面临新旧管道交替, 老龄海底管道数量逐渐增多等问题。此外, 由于恶劣的海洋环境以及第三方破坏等因素, 海底管道泄漏事件屡见不鲜^[1]。海底输气管道泄漏天然气扩散可能对海面渔船和海洋平台等浮式结构物的稳定性造成影响, 甚至导致更为严重的火灾和爆炸事故^[2]。珠海横琴终端和崖城 13-1 海底输气管道泄漏事故表明海底输气管道泄漏事故具有潜在的严重后果。科学认识海底输气管道泄漏天然气扩散所引发的风险问题, 对我国海底输气管道泄漏风险防控与事故应急具有重要意义。

挪威科技工业研究所(SINTEF)、挪威船级社(DNV)、挪威科技大学(NTNU)以及美国克拉克森大学(CU)等机构针对海洋浅层气和气田井喷引发的天然气在水体中扩散问题, 进行了Deepspill深水油气扩散

实验^[3], 建立了DeepBlow^[4]和CDOG等^[5-6]深水油气扩散积分模型, 开展了深水天然气运移轨迹预测、相变结晶和溶解等方面的研究。实验与仿真表明深水条件下海底的高压和低温环境会导致天然气发生相变和快速溶解, 最终无天然气从海面溢出。国内针对海底天然气扩散方面的研究报道较少, 尚处于初步研究阶段^[2,7]。此外, 针对海底输气管道泄漏天然气扩散问题, 国内外均未有考虑天然气从水下到水面扩散的全过程, 以及海面爆燃场景的系统研究报道。

现有研究^[3,5-6]表明深水条件下天然气在扩散过程中会发生相变结晶与溶解, 无天然气从海面溢出。因此, 深水条件下的天然气扩散问题, 从风险和安全角度可研究的价值较小。结合我国海洋油气田开发的实际情况, 笔者针对典型浅海区海底输气管道泄漏引发天然气扩散问题, 开展天然气在水下和水上的运移扩散过程以及后果影响研究, 实现对浅海区海底输气管

引用格式: 李新宏, 陈国明, 朱红卫, 康前前. 海底输气管道泄漏天然气扩散风险研究. 石油科学通报, 2016, 03: 390-400

LI Xinhong, CHEN Guoming, ZHU Hongwei, KANG Qianqian. Research into the risk of natural gas spread from submarine natural gas pipeline leakage. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 390-400. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.034

道泄漏天然气扩散风险的系统认识和有效评估,为我国海底输气管道泄漏风险管理与防控提供参考。

1 天然气扩散与爆燃数学模型

1.1 控制方程

海底输气管道泄漏天然气在水下和海面的扩散过程均遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒 3 个物理学定律, 3 个守恒方程可由统一的数学表达式给出^[8]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho\bar{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi) + S \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; φ 为通用变量; Γ 是扩散系数; S 为源项。

1.2 多相流模型

天然气在海水中的扩散运动属于多相流范畴, 独立的欧拉-欧拉方法无法扑捉到天然气扩散射流向羽流的转化过程, 计算结果具有较大的不确定性^[9]。Cloete 等^[10]研究表明与欧拉-拉格朗日耦合方法具有较好的预测效果。笔者采用流体体积模型 VOF 和离散相模型 DPM 耦合的方式, 将海水作为连续相, 将泄漏天然气作为离散相, 采用 VOF 模型对空气与海水之间的自由界面进行追踪, 采用离散相 DPM 模型对天然气气泡粒子的运动过程进行追踪求解, 从而实现水下天然气扩散过程的预测。

VOF 模型认为计算域内是相互贯穿的连续相, 且各相之间相互独立, 以体积率来衡量不同相的分布情况^[8]。DPM 是一种基于欧拉-拉格朗日方法的数值模型, 通过积分拉氏坐标系下的气泡粒子作用力的微分方程来求解离散相气泡粒子的运移轨迹, 为每一个气泡粒子施加一个平衡力, 使得离散相气泡粒子在扩散过程中, 其运动惯性与所受其他外力达到平衡, 气泡粒子受力平衡方程如下^[11]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (2)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (4)$$

式中, u 为流体相对速度, m/s; u_p 为气泡粒子速度, m/s; F_D 为拖曳力, N; μ 为流体动力粘度, Pa·s; ρ 为流体密度, kg/m³; ρ_p 为气泡粒子密度, kg/m³; d_p 为气泡粒子直径, m; Re 为相对雷诺数; C_D 为拖曳力系

数; g 为重力加速度, m/s²; F 为其他作用力, N;

1.3 爆燃模型

考虑天然气从海面溢出以后, 可能被点火源引燃从而发生爆燃事故。采用通用有限速率模型对爆燃过程中的化学反应进行模拟, 预测爆燃过程中超压、高温和热辐射等伤害参数。通用有限速率模型是基于组分质量分数的输运方程解, 利用预先定义的化学反应机制对化学反应进行模拟。反应速率以源项的形式出现在组分输运方程中, 采用涡耗散模型计算反应速率, 并对湍流-化学反应之间的相互作用进行描述, 爆燃过程中大部分天然气都能快速燃烧, 整体反应速率由湍流混合控制, 反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下式给出^[12]:

$$R_{i,r} = \min \left(v'_{i,r} M_{w,r} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v_{R,r} M_{w,R}} \right), v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (5)$$

式中, Y_p 为任何一种产物的组分质量; Y_R 为某种产物的质量组分; A 和 B 为经验常数, 分别取 4 和 0.5。

2 天然气扩散与爆燃数值模型

2.1 网格模型

海底输气管道泄漏天然气的扩散包括海面以下水中的扩散和从海面溢出之后在大气中的扩散两个过程。天然气扩散的全过程分别受海流和风的驱动, 整个扩散过程如图 1 所示。仿真过程中首先对天然气在水下的运动过程进行研究, 评估天然气在海面的溢出位置、溢出速度以及溢出区域范围。以此作为水上扩散模型的初值条件, 研究天然气在海面的扩散范围, 并考虑可能的点火场景, 研究海面爆燃场景的发展过程和影响范围。

综合考虑仿真效果与计算效率, 建立二维网格模型对海底输气管道泄漏天然气扩散过程进行模拟。以 100 m 水深为例, 分别建立水下和水上扩散网格模型, 水深 100 m, 水面宽度 150 m, 海底泄漏口位置坐标为 (55, 0)。天然气水上扩散模型高 150 m, 宽 300 m, 下部泄漏口位置和大小需以天然气水下扩散计算结果为依据。泄漏口附近流场梯度变化较快, 采用尺寸函数对泄漏口附近的网格进行加密, 整个模型采用适应性较好的三角形网格, 采用上述方法建立的非结构体

网格模型如图2所示。

2.2 边界条件

天然气水下扩散模型中,海流入口采用速度入口边界,浅海区海流速度采用式(6)确定^[13]。由于计算域足够长,海流流场能够充分发展,故海流出口采用自由出口边界。泄漏口采用喷射源进行粒子释放,粒子尺寸服从Rosin-Rammler分布,计算域上部设置为墙面允许粒子逃逸。天然气水上扩散模型中,计算域顶部流体变量梯度为零,来风口采用速度入口边界条件,风速梯度服从指数变化规律^[14],出风口选用自由出口边界。

$$v_z = v_s (z/H)^{1/7} \quad (6)$$

式中, v_z 为距海底高度 z 处的海流流速, m/s; v_s 为海面流速, m/s; H 为水深, m。

海面天然气爆燃模拟过程中,考虑到爆燃反应过

程中气体的可压缩性,将海面流出面设置为压力边界条件,设置表压为零,便于从计算域内推导流体密度和速度变量。天然气和空气混合燃烧为单步完全反应,采用弱点火方式,点火能量为100 mJ^[12]。

2.3 计算方法

天然气扩散全过程求解采用瞬态算法,空间方向上使用有限体积法进行离散,扩散项和源项采用中心差分格式,对流项用二阶迎风格式,时间方向上采用二阶隐式积分。水下扩散求解过程中,采用随机轨道模型计入气泡粒子在湍流流场中扩散的附加拖曳力,压力速度耦合采用PISO算法,并在多相流模型中开启隐式体力公式,以提高重力场中模型求解的稳定性。水上扩散过程中压力速度耦合采用SIMPLE修正算法。

水下和水上扩散过程均分为两步。首先计算稳定

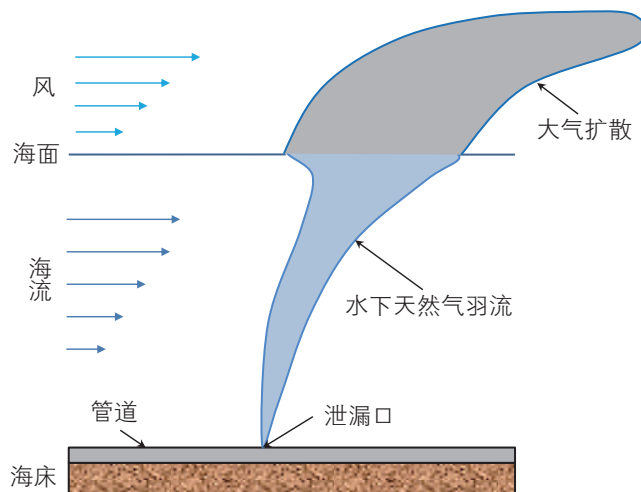
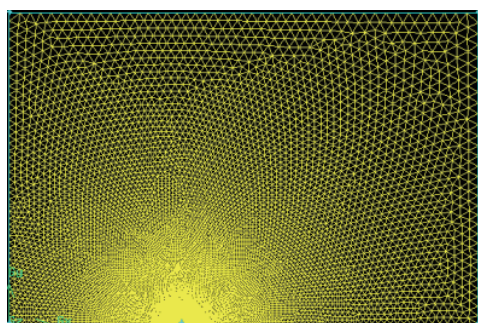
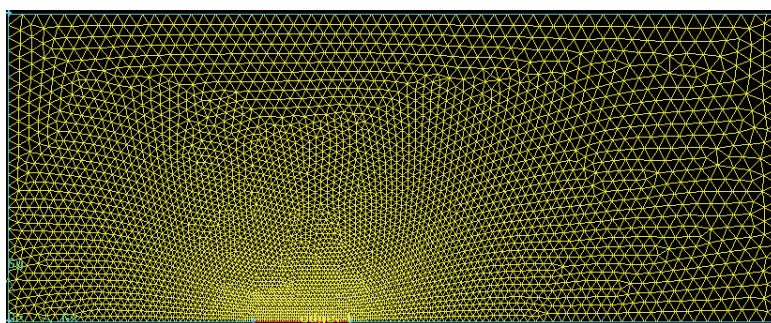


图1 海底输气管道泄漏天然气扩散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of natural gas diffusion from submarine pipeline leakage



(a)水下扩散



(b)水上扩散

图2 网格模型

Fig. 2 Mesh model

海流流场和风场,然后引入泄漏源与稳定海流流场或海面风场进行耦合求解。考虑可能的爆燃场景时,在海面天然气扩散求解的基础上,引入点火源进行可燃气体云燃烧求解,并采用Fluent软件中的P1模型计算爆燃火焰产生的热辐射。

3 海底输气管道泄漏天然气水下扩散分析与讨论

3.1 天然气水下扩散过程

目标海底输气管道的输送压力为5 MPa,天然气的输送温度为40℃,管道外径为15 in,取100 mm的泄漏孔径,假定目标海底输气管道的泄漏速率为38 kg/s,海面流速为0.4 m/s。该工况条件下的海底输气管道泄漏天然气的扩散过程如图3所示。据图可知,受管道内高压的驱动作用,泄漏天然气以喷射状涌入海水中,并快速向上部空间发展。天然气向海面扩散过程中,压力逐渐降低。受海流的冲刷作用,天然气

羽流逐渐呈分散状。 $t=68$ s时,天然气扩散至海面,在海面形成直径约为37.2 m的气体释放区域,气体释放区域中心距离海底泄漏口的水平距离约为24.3 m。

为分析海底输气管道泄漏天然气扩散空间范围变化规律,本文定义了天然气羽流扩散参数(如图4所示), W_p 和 H_p 分别为天然气羽流扩散的水平宽度和垂直高度。图5为海底输气管道泄漏天然气扩散羽流空间范围的变化过程。据图5可知,受管道内初始高压驱动和浮力的作用,泄漏发生时天然气羽流主要向上部空间发展。此外,天然气进入海水之后,由于环境压力降低,天然气体积迅速膨胀。受海流的冲刷作用,天然气羽流顶部逐渐呈分散状,天然气羽流水平尺寸也逐渐增大。天然气羽流空间参数的总体变化规律为:在垂直方向的发展速度大于水平方向,而且天然气羽流垂直高度和水平宽度的差值(H_p-W_p)随扩散时间逐渐增大,最大差值为48 m。

3.2 天然气水下扩散后果分析

图6为海底输气管道泄漏天然气扩散至海面时计

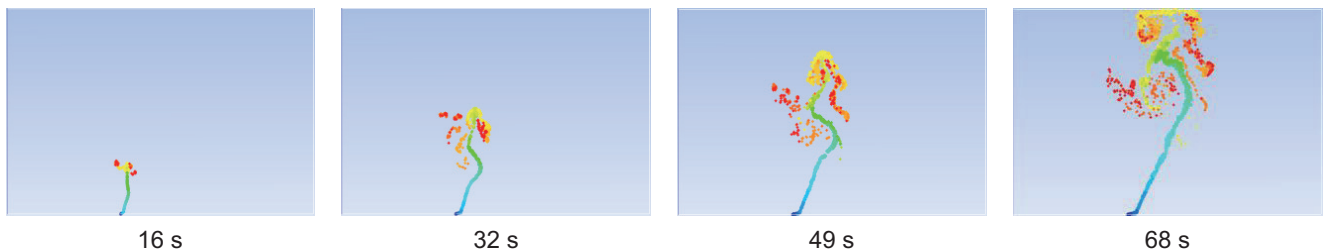


图3 天然气在水下的扩散过程

Fig. 3 Diffusion process of natural gas in seawater

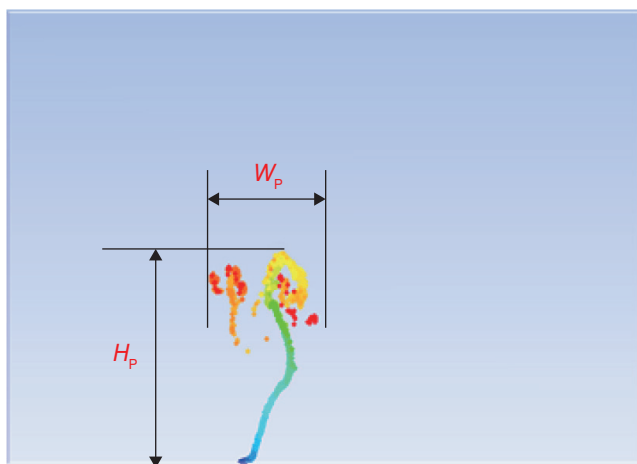


图4 天然气羽流空间参数定义

Fig. 4 Spatial parameter definition of natural gas plume

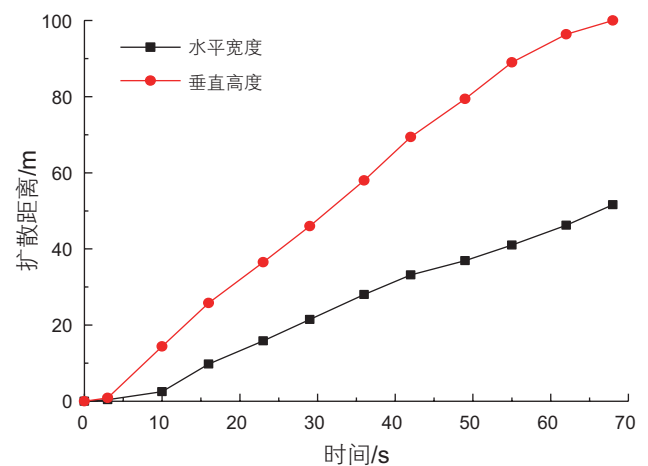


图5 水下天然气羽流空间范围变化规律

Fig. 5 Change rule of spatial parameter of natural gas plume

算域内垂向速度分布。天然气在水下扩散引起海水速度改变,区域形状同天然气羽流形状基本一致,速度整体分布特征为从羽流中心向羽流外部递减。如图中矢量所示,天然气向上扩散过程中,引起两侧海水向下部运动,形成近似对称结构的漩涡流动。距海底50 m以上的区域,海流速度增大,天然气垂直上浮速度与海流水平速度耦合,在该区域形成强烈的漩涡流动,海水和天然气运动速度增大至7~10 m/s左右。由于初始泄漏压力驱动和海水浮力作用,天然气扩散至海面时仍具有一定的速度,其大小与水深和管道压力等因素有关。该速度能够在海面形成喷射水柱和涌流效应,导致海面表层海水回流,引起海平面高度发生变化如图7所示。

图8为水下天然气扩散过程中引起海水密度变化分布。天然气向海面扩散过程中,沿扩散轨迹能够引起海水密度改变。当前水深的环境压力和温度条件下,

天然气在扩散过程中的损耗较小,海水密度改变的主要原因是天然气与海水混合引起局部区域海水平均密度下降。羽流底部天然气分布较为集中,引起海水密度下降较为明显,羽流顶部天然气较为分散,海水密度改变量较小,具体下降量与管道泄漏速率以及水深有关。表层海水密度改变对海面浮式结构物的稳定性至关重要。

当前水深和泄漏速率条件下,近海面部分区域的海水密度降低至 900 kg/m^3 左右。假设船舶或平台的吃水深度为 h ,当海水密度下降至 900 kg/m^3 时,其吃水深度将会增大至 $1.14 h$ 。当气体泄漏量更大时,海面海水密度会降至更低的水平,船舶或平台的吃水深度会增至更大。海面表层海水密度降低与海面涌流效应耦合,能够对海面船舶或平台的稳定性产生严重影响,造成其发生倾斜或倾覆。

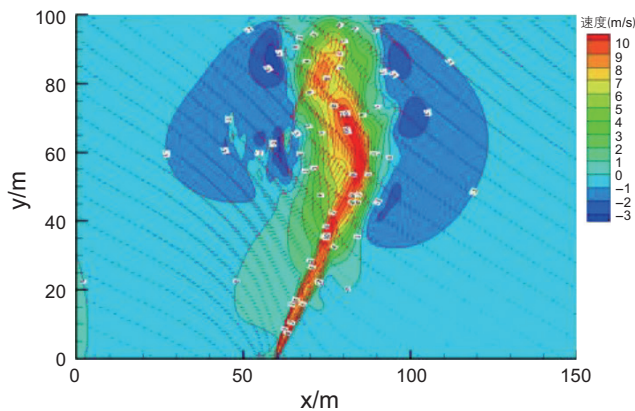


图6 天然气水下扩散速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of natural gas diffusion in seawater

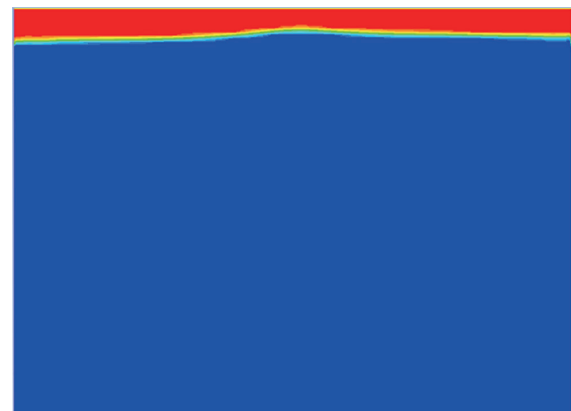
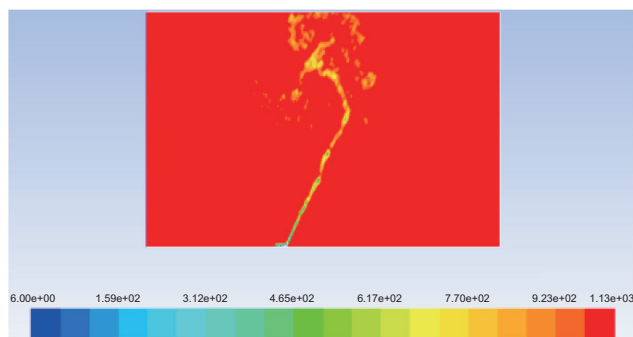
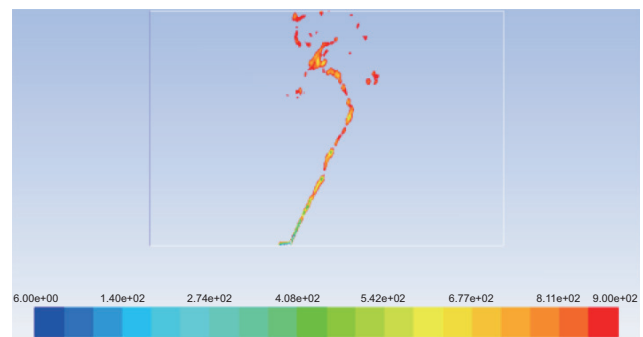


图7 海面涌流效应

Fig. 7 Fountain or "boil" zone in sea surface



全区域密度分布



最大密度 900 kg/m^3 的区域分布

图8 天然气扩散引起海水密度变化分布

Fig. 8 Density change distribution of seawater caused by natural gas diffusion

4 海底输气管道泄漏天然气海面扩散分析与讨论

4.1 天然气海面扩散过程

取海面风速 1.5 m/s, 以天然气水下扩散结果作为输入参数进行海面扩散分析。采取保守评估的思想, 不计天然气水下扩散过程中的损耗, 假设溢出区域内所有气体均垂直从海面释放进入大气进行扩散。天然气的主要组分为甲烷, 约占 95%, 其他组分占 5%。甲烷的爆燃极限为 5%~15%, 将甲烷 5% 浓度等值面定义为天然气的扩散范围, 当前工况下由于海面风场的作用, 天然气从海面溢出之后立即被空气稀释, 甲烷 15% 浓度等值面始终在气体释放区域正上偏下风向 3~5 m 的范围内, 相比整个气体扩散范围, 其分布区域较小。因此, 可将甲烷浓度 5% 等值面的覆盖区域作为危险区域。

图 9 为天然气从海面溢出后在大气中的扩散过程与危险区域分布。泄漏初始阶段, 天然气主要向海面上部扩散, 并在海面风场作用下往下风向扩散。随着泄漏的持续, 海面上的可燃气体体积逐渐增大。 $t=60$ s 左右, 可燃气体垂向扩散距离达到最大, 约为 53.5 m。距离海面越远风速越大, 天然气向上扩散的动能逐渐耗尽, 在风场作用下主要向下风向扩散, 气云垂向高度逐渐降低。 $t=150$ s 以后, 海面天然气扩散状态趋于稳定, 可燃气体高度逐渐降低, 在近海面 0~24 m 的高度范围内往下风向扩散。 $t=250$ s 以后, 天然气扩散基本达到动态稳定状态, 天然气云高度大约为 20 m, 沿下方向形成的扩散长度大约为 206 m。浅海区域导管

架平台上层甲板距海面的高度大约为 10~20 m, 船舶等其他海洋结构物距离海面的高度更小。因此, 可燃气体云可能会覆盖海面气体释放区域下风向的海洋平台或者船舶。

图 10 为天然气在海面扩散的垂向速度分布。天然气在海面扩散初期, 其速度分布与天然气在水下扩散时形成的速度场(图 6)较为相似。扩散初期天然气向海面上部空间扩散, 引起气云两侧空气回流, 形成漩涡流动, 加上海面风场的影响, 气云运动速度加快。随着扩散持续进行, 气云空间体积充分发展, 向上部扩散的趋势减弱, 垂向高度逐渐降低, 垂向扩散速度也逐渐减小。当海面扩散达到稳态以后, 天然气在海面风场作用下主要向下风向扩散, 其在垂直方向的速度基本为零(图 10, $t=300$ s)。

4.2 天然气海面扩散爆燃场景分析

天然气从海面溢出并在大气中扩散时, 海面船舶运动或海洋平台作业可能将其引燃发生爆燃事故, 对海面船舶、海洋平台及作业人员造成严重伤害。假设天然气在海面扩散 5 min 时, 距离气体溢出区域下风向约 97 m 处出现点火源, 扩散气体可被引燃而发生爆燃事故。图 11 为海面可燃气体爆炸之后, 点火源处的超压变化过程。由于海面为完全开敞空间, 且海面气体溢出区域面积较大, 气体溢出之后被稀释, 浓度相对偏小, 所以可燃气体云爆炸之后产生的超压值较小, 最大超压约为 800 Pa。由超压伤害准则^[15]可知, 该超压不会对人员和设备造成伤害。因此, 当前工况下可忽略海面天然气的爆炸超压影响, 将爆燃火灾作为主要的风险进行研究, 探讨其发展过程和伤害效应。

可燃气体云爆炸历时极为短暂, 爆炸之后可燃气体

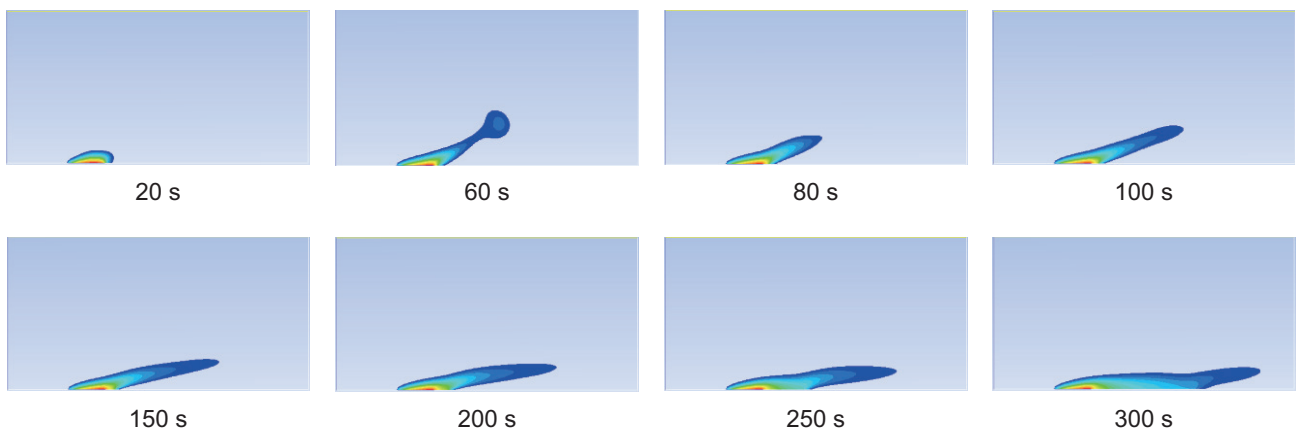


图 9 海面天然气扩散过程与危险区域分布

Fig. 9 Diffusion process of natural gas above sea surface and corresponding dangerous area

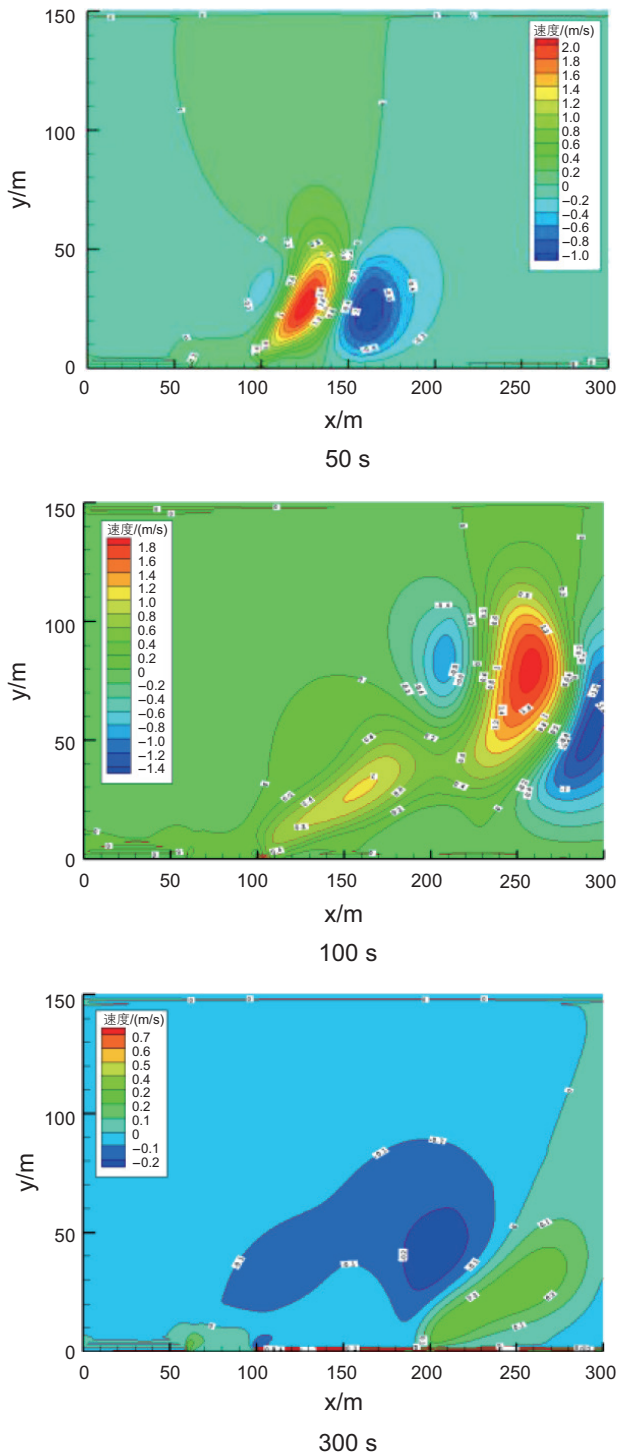


图 10 海面天然气扩散速度分布

Fig. 10 Velocity distribution of natural gas diffusion above sea surface

进入燃烧阶段,图 12 为海面爆燃火焰的发展过程。爆燃初期,海面可燃燃气几乎全部进入燃烧状态,燃烧区域内的温度急剧上升。随着燃烧反应的持续,海面下风向天然气充分燃烧,火焰高度逐渐升高,高温影响区域逐渐增大。由于扩散阶段海面形成的可燃燃气云

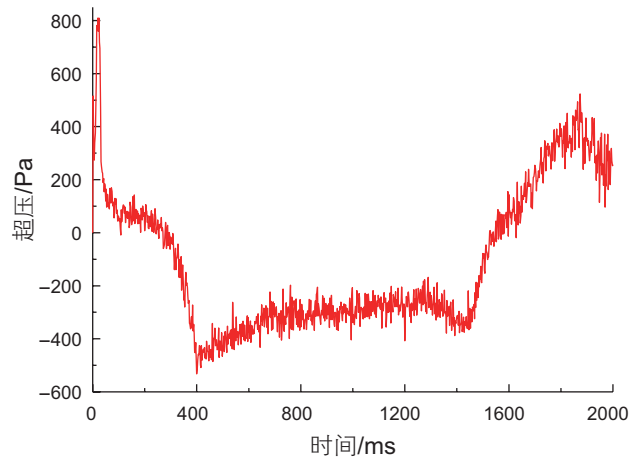


图 11 海面天然气扩散爆炸超压变化过程

Fig. 11 Change process of overpressure caused by natural gas explosion

体积较大,当其全部参与反应时,爆燃火焰规模达到最大。 $t=15$ s左右时,爆燃火焰发展至全盛阶段,此时火焰高度达 120 m左右,火焰最高温度达到 2 000 K。海面火焰达到全盛以后开始向上部空间蔓延,火焰范围进一步增大。随着燃烧的持续,海面可燃燃气云逐渐被消耗,参与反应的可燃气体量逐渐减小,爆燃火焰进入衰减阶段,影响范围逐渐减小,外层火焰温度逐渐降低。 $t=150$ s以后,爆燃火焰发展基本达到稳定,并转化为稳定的池火燃烧,火焰从气体释放区域向上部空间发展,并向下风向偏移。

根据高温伤害准则^[12],根据人体临界伤害温度 391 K、人体严重伤害温度 453 K、钢结构部分失效临界温度 673 K 和钢结构全部失效温度 873 K 等 4 种温度界限,分别建立爆燃火焰全盛阶段和稳定阶段的临界温度等值面,如图 13 所示。火焰全盛阶段,气体溢出区域下风向向基本都会受到火焰高温的影响,可能导致海面船舶或平台结构完全失效,造成人员严重伤亡。火焰稳定阶段,临界高温区域主要分布在气体溢出区域上部偏下风向位置。

图 14 为点火源垂直方向爆燃火焰温度和热辐射强度的变化规律。与火焰扩散趋势对应,点火源附近区域温度迅速增大,随火焰扩散该区域温度呈现波动变化,40 s以后逐渐稳定下降。由于火焰达到稳态时,形成的高温区域主要分布在气体溢出区上方,点火源附近区域基本不受影响。稳定下降阶段 3 个监测位置的温度下降至人体临界伤害温度 391 K 的时间分别为 42、56 和 64 s。热辐射也是火灾的重要伤害参数,当其超过一定值时能够对设备和结构产生严重破坏,并造成人员伤亡。点火源附近区域的热辐射强度

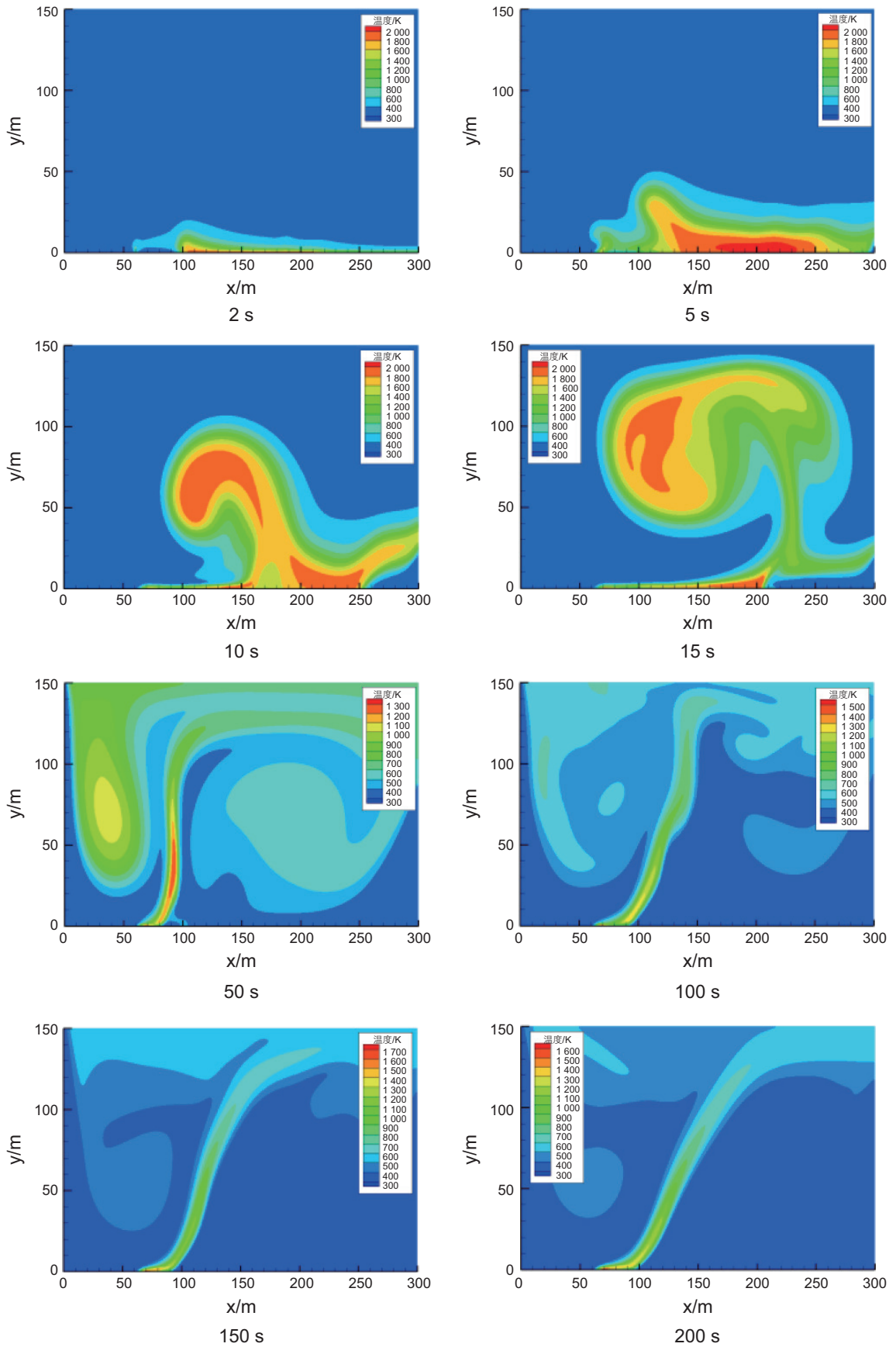


图 12 海面爆燃火焰发展过程

Fig. 12 Development process of deflagration flame above sea surface

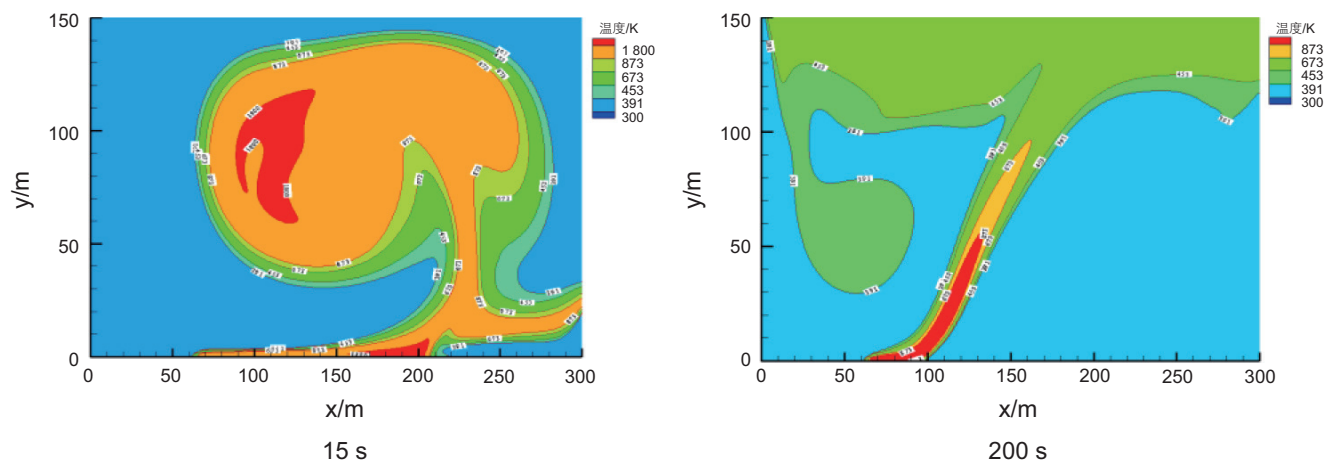


图 13 临界损伤温度区域分布

Fig. 13 Area distribution of critical damage temperature

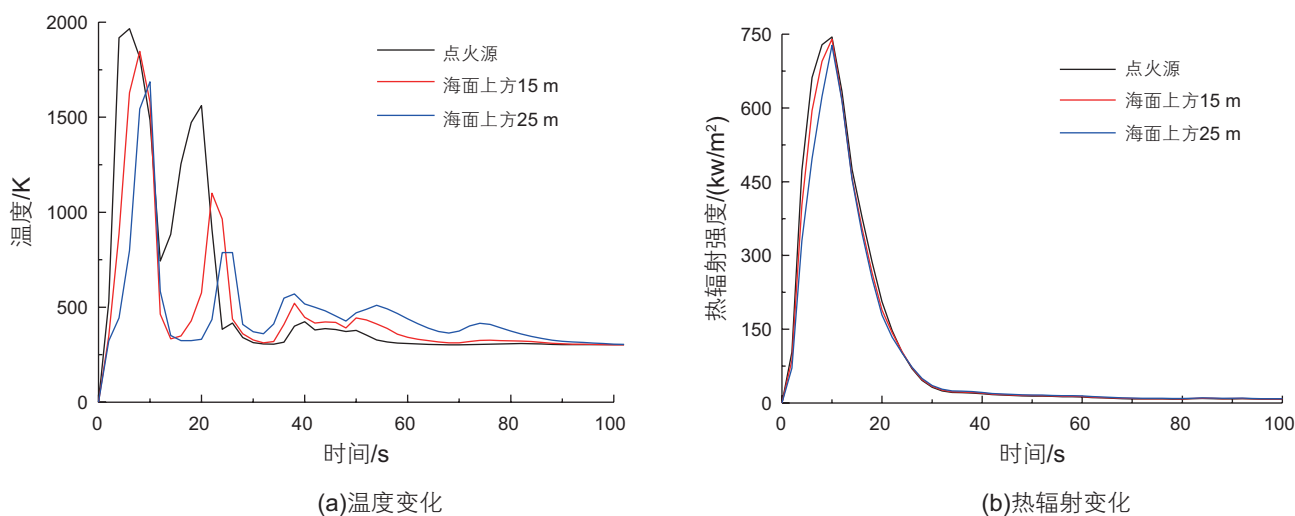


图 14 点火区域垂直方向火焰温度和热辐射强度变化

Fig. 14 Change process of high temperature and heat radiation intensity in vertical direction of ignition source

呈现出迅速增大而后急速减小的变化趋势, 30 s以后基本达到稳定状态。稳定之后3个监测位置的热辐射强度均在 $8\sim 10\text{ kw/m}^2$ 之间。根据热辐射破坏准则^[15], 9.5 kw/m^2 热辐射强度能够导致人员二级烧伤, 因此, 点火源附近区域始终在热辐射的影响范围内。

5 结论

(1) 浅海区海底输气管道泄漏天然气的扩散过程包括水下扩散和海面扩散2个阶段。天然气水下扩散引发的风险主要为在扩散过程中可能对海面浮式结构物的稳定性产生影响。天然气从海面溢出在大气中扩散的风险应主要考虑在海面下风向形成可燃气体云, 遭遇

潜在点火源会发生爆燃事故。

(2) 泄漏天然气能够在较短的时间内扩散至海面, 形成不规则倒锥形羽流结构, 并在海面形成一定规模的溢出区域。天然气水下扩散能够引起海面表层海水密度降低, 并在海面形成涌流效应, 对海面浮式结构物的稳定性产生影响。

(3) 天然气在海面扩散达到稳态之后主要向下风向继续发展, 15%浓度等值面始终分布在海面气体溢出区域附近 $3\sim 5\text{ m}$ 范围内, 而5%浓度等值面分布区域较大, 最终形成高度约 20 m , 长度约 206 m 的可燃气体云团, 可能对下风向船舶或平台形成完全覆盖。

(4) 实例工况下, 天然气在海面发生爆燃的超压值较小, 其对人员和设备的伤害效应以爆燃火灾产生的

高温和热辐射为主。爆燃火焰发展和全盛阶段能够覆盖点火源所在区域, 稳定之后主要火焰主要分布在海面气体溢出区域上部偏下风向; 而热辐射的伤害效应始终能够影响到点火源附近区域。

参考文献

- [1] LI X, CHEN G, ZHU H. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 103: 163-173.
- [2] 尹群, 刘海燕, 李良碧. 海底输气管道泄漏风险定量分析[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 23(3): 189-192. [YI Q, LIU H Y, LI L B. Quantitative risk analysis of gas leak from subsea pipe[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 23(3): 189-192.]
- [3] JOHANSEN Ø, RYE H, MELBYE A G, et al. DeepSpill JIP—Experimental discharges of gas and oil at helland hansen[R]. Trondheim, Norway: SINTEF Applied Chemistry, 2000.
- [4] JOHANSEN Ø. DeepBlow—a Lagrangian plume model for deep water blowouts[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2000, 6(2): 103-111.
- [5] YAPA P D, CHEN F. Behavior of oil and gas from deepwater blowouts[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(6): 540-553.
- [6] YAPA P D, DASANAYAKA L K, BANDARA U C, et al. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(5): 559-572.
- [7] 李新宏, 朱红卫, 陈国明, 等. 海底管道泄漏天然气扩散规律数值模拟[J]. *油气储运*, 2016, 35(02): 215-220. [LI X H, ZHU H W, CHEN G M, et al. Numerical simulation on the gas diffusion law due to leakage of submarine pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(02): 215-220.]
- [8] 李新宏, 李秀美, 陈国明, 等. 2 000 m 超深水水下分离器泄漏油气扩散特性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(01): 38-43. [LI X H, LI X M, CHEN G M, et al. Study on dispersion characteristics of leaking oil and gas from subsea separator in 2000m ultra deepwater[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(01): 38-43.]
- [9] OLSEN J E, SKJETNE P. Current understanding of subsea gas release: A review[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2015.
- [10] CIOETE S, OLSEN J E, SKJETNE P. CFD modeling of plume and free surface behavior resulting from a sub-sea gas release[J]. *Applied Ocean Research*, 2009, 31(3): 220-225.
- [11] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. *Fluent 12 流体分析及工程仿真*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 187. [ZHU H J, LI Y H, XIE L H. *Fluent 12 fluid analysis and engineering simulation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 187.]
- [12] 魏超南, 陈国明, 刘康. 浮式生产系统泄漏天然气爆燃特性与安全区域[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 786-794. [WEI C N, CHEN G M, LIU K. Leakage gas deflagration characteristics and safety area of FPSO[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 786-794.]
- [13] 徐兴平. *海洋石油工程概论*[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007: 131. [XU X P. *Offshore oil engineering survey*[M]. Dongying: China university of petroleum press, 2007: 131.]
- [14] 张淮水, 刘安国, 宋珊, 等. 海面风的特征分析[J]. *青岛海洋大学学报*, 1989, 19(2): 48-54. [ZHANG H S, LIU A G, SONG S, et al. The analysis of the wind characteristics over the sea surface[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1989, 19(2): 48-54.]
- [15] 魏超南. 油气泄漏及连锁灾害下浮式生产系统风险评估[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. [WEI C N. Risk assessment and control strategy for FPSO subjected to oil & gas leakage and chain effects[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.]

Research into the risk of natural gas spread from submarine natural gas pipeline leakage

LI Xinhong, CHEN Guoming, ZHU Hongwei, KANG Qianqian

Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract In terms of the risk from submarine natural gas pipeline leakage, a computational fluid dynamics (CFD) model is developed to predict and assess the consequence of natural gas escape. In the present study, both of the scenarios that natural gas escapes into sea water and above the sea surface are included. The escape trajectory of natural gas in seawater is predicted,

and the critical risk parameters like rise time, spill position and spill region etc. are assessed using the developed CFD model. Based on the assessment results of natural gas movement in seawater, the transport process and corresponding danger areas of natural gas above the sea surface are also determined. In addition, considering the likelihood of ignition, the deflagration scenario of natural gas above sea surface is simulated and analyzed in the present study for assessing the overpressure, high temperature and heat radiation, etc. The study results indicate that natural gas escape in seawater could lead the density of surface water to decrease, and form a “boiled” zone or fountain, which would have an effect on the stability of floating structures on sea surface. A deflagration accident may occur when the natural gas above sea surface is ignited by a ship or platform. The CFD model developed in this paper could be employed to predict and assess the risk of natural gas from submarine pipeline leakage effectively, and provide an educational reference for risk management and emergency decision-making for submarine natural gas pipeline leakage.

Keywords submarine natural gas pipelines; leakage; natural gas; risk assessment; CFD

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.034

(编辑 马桂霞)