[文章编号] 1007－7405(2025)04－0374－09 DOI:10.19715/j.jmuzr.2025.04.08

水下油气混输管道在不同流型下的泄漏过程数值模拟

吴凯旋，张 军

（集美大学海洋装备与机械工程学院，福建 厦门 361021）

[摘要] 针对管道内不同流型，基于Fluent对水下油气混输管道的泄漏过程进行了数值模拟。模拟结果表明：1）二维模型能准确模拟水平管道中四种典型流型（气泡流、分层流、冲击流和环状流）。2）不同流型下的油气泄漏扩散过程可分为两类，一类以油液为主、掺杂气泡的射流泄漏，如气泡流；另一类以高速气体为主、掺杂细小液滴的射流泄漏，如分层流、环状流和冲击流。3）气体泄漏表现出较高的喷射速率、扩散速度和范围。4）在以气体为主的泄漏过程中，管内气体折算速度对初期油气扩散形态影响较小。具体而言，气泡流下的泄漏呈混合液柱射流，持续不断喷射；分层流下的泄漏会激起一道液峰，致使气体包夹油液持续泄漏而出，泄漏形态相对减小；冲击流下的泄漏，由于流动的间歇性特征，液塞区高速流动使得溢油量较低，泄漏主要以气体为主；环状流下的泄漏同样以气体泄漏为主。

[关键词] 油气两相流；Fluent；混输管道；油气泄漏；数值模拟

[中图分类号] TE 88；X 55

Numerical Simulation of Leakage Processes in Subsea Oil and Gas Multiphase Pipeline Under Different Flow Patterns

WU Kaixuan, ZHANG Jun

(College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Considering different flow patterns within the pipeline, numerical simulations of the leakage process in underwater oil and gas mixed transportation pipelines were conducted based on Fluent. The simulation results demonstrate that the two-dimensional pipeline model accurately reproduces four typical flow patterns in horizontal pipelines: bubble flow, stratified flow, slug flow, and annular flow. The leakage and diffusion process under different flow patterns can be classified into two categories: bubble flow primarily forms a jet leakage with oil as the main component and entrained gas bubbles, while stratified flow, annular flow, and slug flow mainly form a jet leakage dominated by high-speed gas with entrained small liquid droplets. Gas leakage exhibits higher jetting rates, diffusion speeds, and ranges. In the gas-dominated leakage process, the gas equivalent velocity inside the pipeline has a minor impact on the initial morphology of oil and gas diffusion. Specifically, under bubble flow, continuous jetting of a mixed liquid column is observed; under stratified flow, a liquid peak is induced, leading to continuous leakage of gas entrapped with oil, resulting in a relatively smaller leakage morphology. Slug flow, due to its intermittent alternating flow, causes small oil spillage as the liquid slug region passes through the leakage orifice, maintaining gas-dominated leakage. Similarly, under annular flow, gas leakage predominates, with oil leaking through micro-holes on the pipe wall while dispersed liquid droplets in

[收稿日期] 2024－01－24

[基金项目] 福建省自然科学基金项目（2022J01334）

[通信作者] 张军（1966—），教授，博士，从事多相流体流动、流体静电雾化技术及海洋能利用等领域的研究。E-mail:bull0202@sina.com

the gas core remain unaffected.

Keywords: oil and gas two-phase flow; Fluent; multiphase pipeline; oil and gas leakage; numerical simulation

0　引言

海洋油气混输管道的泄漏风险[1]可能造成重大经济和生态损失，开展水下油气泄漏机理与应急处置技术研究具有重要意义。从 20 世纪 70 年代起，国外已经开始对水下溢油问题进行了大量的研究，且发展了一些具有代表性的数学模型。Johansen 等[2-3]提出了一种积分羽流模型 DeepBlow，并利用试验数据进行了验证；Zheng 等[4]和 Chen 等[5]基于拉格朗日控制体积分法建立了一个比较完善的兼顾溢油扩散、溶解以及卷吸过程的深水溢油模型——CDOG，这两个模型都能够模拟溢油在深海环境中的复杂行为动态。近 20 年，国内关于水下溢油的相关研究也在积极开展。汪守东等[6]推广了 CDOG 模型，在模型中首次考虑了溢油的乳化、扩散与溶解作用；王晶[7]改进了海底管道上蠕孔溢油计算模型，研究了水下溢油扩散过程以及影响其扩散行为的主要因素，对影响气泡/油滴尺寸的各种因素进行了深入分析；李新宏等[8]基于 VOF（volume of fluid）模型构建了水下气体泄漏数值模型，研究了泄漏速率、洋流流速和泄漏口尺寸对气体泄漏特性的影响。随后，李新宏等[9-10]多次使用相同的数值模型，先是建立了海底油气管道泄漏事故后果预测与评估模型，并对特定场景下的海底原油与天然气泄漏扩散过程进行了数值模拟与对比分析，然后探讨了不同水深对气体泄漏扩散特性的影响，并提出了一种用于快速计算水下气体扩散参数的模型。张军等[11]采用拉格朗日控制体积分法建立了能预测羽流半径及长度的向下运动的羽动力模型，模拟结果与实验结果基本相符，为该工况下的羽/射流特性研究提供了一定的参考价值。李志刚等[12]采用 VOF 方法追踪多相流界面，建立了海流作用下的溢油扩散模型，通过对比数值模拟结果与 Fan[13]的实验值及文献［4－5］的数值结果，验证了数值模型的准确性；研究了不同原油溢出速度与环境水深对溢油行为的影响。臧晓刚等[14]和吕国录等[16]对水下管道微孔（直径小于 5 mm 的孔）泄漏溢油进行了有关实验研究，获得了不同尺寸微孔泄漏与出流系数的关系、不同泄漏量时溢油油滴上升至水面的时间以及泄漏产生的浮羽射流的形态。孙媛等[17]特别针对水平管分层流下的微孔泄漏特性进行了数值和实验分析，采用 VOF 耦合 Level-set 算法分析了不同因素下的气液两相泄漏特性，并设计了实验装置验证数值以预测模型的准确性。上述研究成果为深入研究海洋溢油问题提供了关键的基础资料。

在油气混输管道中，油气两相流动存在不同流型[18]，不同流型下的泄漏规律显然不同。现有的水下管道泄漏的研究考虑管内流型较少。为此，本文对水下管道在不同流型下的泄漏过程进行了数值模拟，这对于理解混输管道泄漏后的油气迁移规律具有一定的参考价值。

1　模型建构

1.1　理论模型

为了清晰阐述水下混输管道油气泄漏过程的机理，本文建立了二维瞬态数值模型。该模型基于不可压缩黏性流体雷诺 N-S（Navier-Stokes）方程组[19]，求解的控制方程包括：质量守恒方程（连续性方程）、动量守恒方程以及 k-ε 湍流模型方程。

1.1.1　基本方程

连续性方程为 $\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j)=0$；动量守恒方程为 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij}\right\}+S_i$，$\delta_{ij}=\begin{cases}1, i=j\\0, i\neq j\end{cases}$。其中：$\rho$ 为流体密度（$kg\cdot m^{-3}$）；

t 为时间（s）；u_i、u_j分别为管道轴向和径向方向上的速度分量（m · s^{-1}）；p 为流体压力（Pa）；μ、μ_t分别为流体的动力黏性系数（Pa · s）和湍动黏性系数（Pa · s）；k 为湍流动能（J）；δ_{ij}为 Kronecker 符号；S_i为广义源项。

在以往有关溢油扩散的模拟研究中，k-ε 模型使用最为广泛。Tauseef 等[20]的研究表明，相较于其他两方程湍流模型，使用 k-ε 模型对泄漏扩散的模拟与实验结果更为吻合，具有更高的精度。因此采用 k-ε 湍流模型来封闭 N-S 方程组进行流场计算。k 方程为 $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_k}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon$；$\varepsilon$ 方程为 $\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_k}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon G_k}{k}-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}$。其中 k 为湍流动能（J）；ε 为湍流耗散率；u_k为平均速度（m · s^{-1}）；μ_k为湍流黏度（Pa · s）；G_k为平均速度梯度引起的湍动能生成项（m^2 · s^{-2}）；σ_k和σ_ε分别为 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数，$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.3$；$C_{1\varepsilon}=1.44$，$C_{2\varepsilon}=1.92$ 为经验常数。

1.1.2 VOF 方法

VOF 方法通常用于模拟两种或两种以上互不相溶的流体，能精确描绘流体中各相的分布，主要应用于处理流体间存在明显界面的情况，如段塞流、气液的交界等。溢油过程中油液以射流的形式进入海水中，油-气-水三相相互作用但互不相溶，且存在明显相界面，因此采用 VOF 方法可更好地跟踪多相流自由界面。

VOF 方法的主要思路是通过引入流体的体积分数 α_q 来追踪明显的相界面。α_q 表示第 q 相流体在该单元所占体积与该单元总体积之比。$\alpha_q=1$ 表示第 q 相流体充满该单元，$\alpha_q=0$ 则表示第 q 相流体不存在于该单元内。自由表面处的 α_q 应满足方程 $\frac{\partial\alpha_q}{\partial t}+\boldsymbol{v}\cdot\nabla\alpha_q=0$，$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q=1$。式中：$\alpha_q$ 为相体积分数；q 为各相编号，取值为 1、2、3；$\boldsymbol{v}$ 为该流体平均速度（m · s^{-1}）。

1.2 物理模型

1.2.1 基本假设

为了更准确、高效地反映泄漏的过程并对其进行分析，应在实际情况的基础上作出以下合理假设：1）由于实际水下油气管路的走向较为复杂，本文将对应用最为广泛的水平直管进行研究分析，将溢油扩散过程简化为水平直管小孔溢油问题。2）油、气、水均被视为不可压缩流体。3）忽略油液气体在水体中的溶解、乳化等化学过程和生物降解等生物过程。4）将泄漏过程视为等温绝热过程，忽略相间的热交换，因此控制方程可忽略能量方程。

1.2.2 边界条件

Wilkening 等[21]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。为减少计算资源消耗及提高计算效率，故将油气泄漏模型简化为二维模型，对混输管道油气泄漏过程进行模拟分析。

根据物理模型（图 1），建立相应二维的油气两相流管道微孔泄漏结构模型。为保证管道内油气两相流充分发展并稳定，本次数值模选用 4 m 长直圆管进行多相流油气混输流型模拟。为便于后续实验对照，管道内径设为 60 mm，管道厚度为 3 mm，左端为混输流体速度进口，右端为混输流体压力出口，出口表压为 0.35 MPa，管路中两相流体分别选用原油和甲烷。湍流特性通过湍流强度及水力直径来描述，计算得到湍流强度为 4%，水力直径为 0.06 m。在水管上部距离左侧入口 2 m 处设置一直径为 4 mm 的小孔作为溢油孔，小孔上方为 2.0 m × 2.4 m 的水箱，水箱内水深为 2.4 m，液面上端是压力出口边界（大气压边界）。基于上述物理条件设置得到溢油网格模型，如图 2 所示。

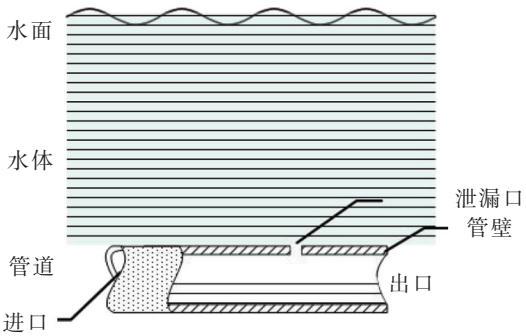


图 1　物理模型

Fig.1　Physical model

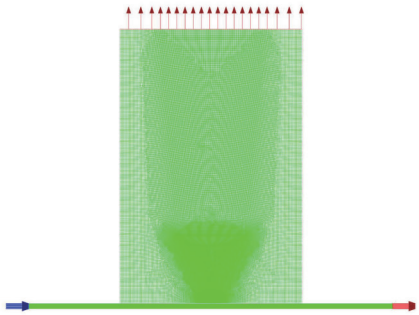


图 2　溢油网格模型

Fig.2　Oil spill mesh model

1.3　计算方法

对于细长管道流动，双精度解算器能提供更快的收敛性和更高的精度。同时考虑到流型发展变化以及油气泄漏运动是一个非稳态的过程，基于压力的求解器采用压力修正算法，特别适用于求解不可压缩流体流动问题，因此选用瞬态压力基求解器。为了提高重力场中油气泄漏扩散模型的稳定性，VOF 模型中选择隐式体积力来平衡方程中的压力项和体积力项。压力速度耦合问题采用 PISO 算法，动量方程采用二阶迎风差分格式离散，体积分数采用 Geo-Reconstruct 算法离散。为了确保计算的精确性，计算迭代收敛标准均设为 1.0×10^{-3}。设定的相关计算工质物性参数见表 1。

表 1　相关计算工质物性参数

Tab.1　Physical parameters of the relevant calculated substances

工质	ρ/(kg·m^{-3})	μ/(Pa·s)	σ/(N·m^{-1})
原油	880.000 0	0.009 000 0	0.035
甲烷(CH_4)	0.667 9	0.000 010 9	
海水	1 020.000 0	0.001 750 0	0.072

研究油气混输管道中油气泄漏行为，要先分析不同流型下的两相流动特性。因此，水下油气混输管道泄漏过程分两步求解完成：1）以管道油气混合速度入口为初始条件，独立求解管道流域油气稳定流型和上方水域；2）开放管壁微孔，连通管道与水域，求解管内不同流型下的水下油气泄漏过程。

水下油气混输管道以分层流居多，当油气产量波动时，冲击流、气泡流和环状流也有出现。故对水平管内这四种典型流型进行研究，原始数据（见表 2）取自 Mandhane 流型图（见图 3）[22]。

表 2　水平管内流型模拟数据

Tab.2　Simulation data of flow patterns in horizontal pipes

序号	气相折算速度 v_{sg}/(m·s^{-1})	液相折算速度 v_{sl}/(m·s^{-1})	对应流型
1	0.40	4.00	气泡流
2	0.40	0.10	分层流
3	10.00	4.00	冲击流
4	49.50	0.50	环状流

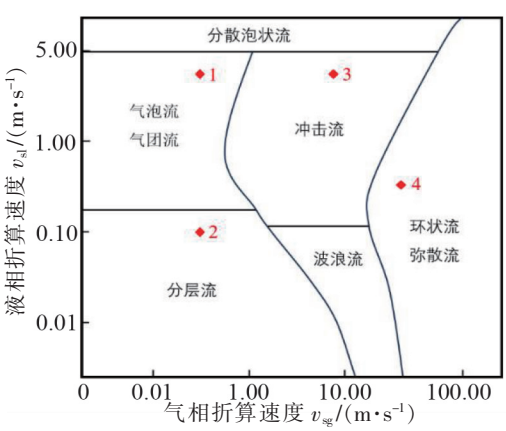


图 3　Mandhane 流型图

Fig.3　Mandhane flow pattern map

2 数值模拟

2.1 油气混输管道内油气两相流流型模拟

图 4 是油气混输管道内油气两相流流型的数值模拟结果，展示了 4 种典型流型的油相体积分数云图（红色为油相存在区域，蓝色为气相存在区域）；该模拟基于表 2 中的原始数据进行，其最终稳定结果与图 3 中的流型归属相一致，从而确认了模型在所研究条件下预测流型的准确性。图 4a 中油气相混合在一起向前流动，气体以各种形状的气泡存在于油液中，管内此时为气泡流。图 4b 可明显看出来是分层流，气相与油相的上下分层明显，相界面光滑且不存在波浪。图 4c 中油气两相的掺杂较为复杂，气体流速较大，在混输管内聚合成大的气团，在重力作用下集中在管道上部，油液被气流冲击呈波浪状，且时不时有比较大的波浪直触管道上壁，此时出现的是冲击流。图 4d 中液相在二维管道中以液膜形式在管道上下壁面连续流动，快速流动气流集中在管道中部，同时气芯中携带弥散细小液滴，管内此时为环状流。通过与实际流型对比，管内冲击流的模拟结果并不是十分理想，但与阮龙飞[23]在管道气液两相流流型中的二维模拟结果基本一致。推测原因是：冲击流是较复杂的三维流动现象，在水平管道的二维仿真模拟中，模拟过程不能很好地体现重力的作用以及还原三维流动。

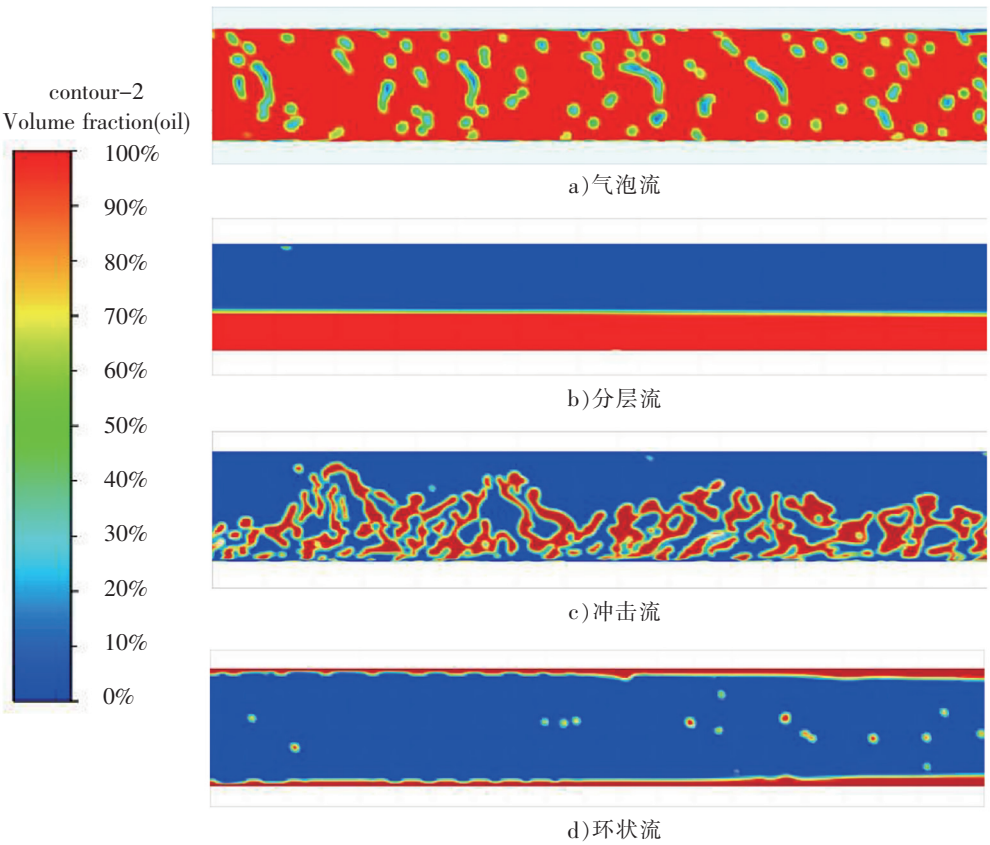


图 4 油气混输管道内油气两相流流型模拟结果

Fig.4 Simulation results of oil and gas two-phase flow patterns in multiphase pipelines

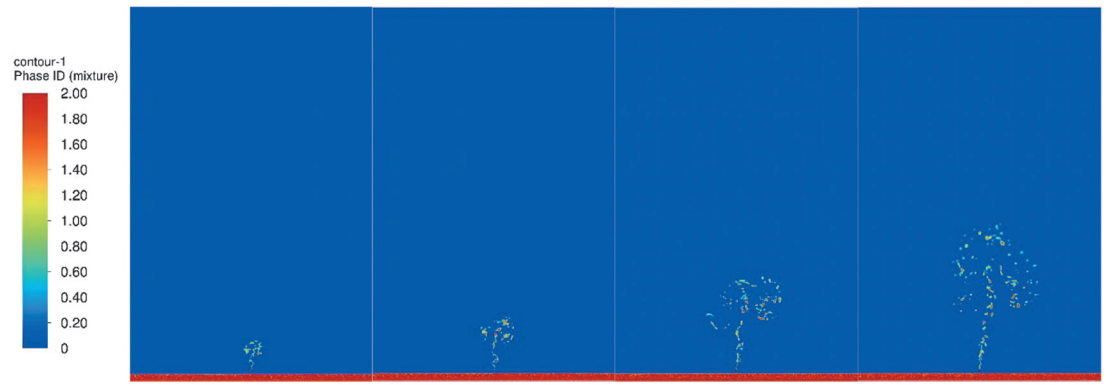
2.2 泄漏过程模拟

取一阶段形成的不同稳定流型作为泄漏阶段的初始状态，设定管道上面为静水水域且泄漏孔径为 4 mm。在此基础上进行数值模拟，并利用所得计算结果对不同流型的泄漏过程进行对比研究。

2.2.1 气泡流下的泄漏

图 5 为气泡流下泄漏油气的扩散过程，清晰展示了油-气-水三相分布。其中：蓝色区域代表海

水，红色区域代表原油，绿色区域代表天然气。观察不同时刻相分布云图（图 5）可知，泄漏开始后，在管内压力作用下，油液夹带着气泡喷射入水中，在泄漏口上方形成一段连续混合液柱。由于孔径非常小，液柱直径也小，在初始动量作用下不断上升，射流的运动导致水体沿射流两侧产生剧烈的涡流和涡旋，使得周围水体被卷入射流中形成卷吸区域，混合液柱上段逐渐分散成油滴和气泡混合团。随着泄漏的发展，这种混合过程导致了射流与周围水体的物质交换，使得射流内外的物质混合并扩散，羽流不断地扩张，径向范围变大。从图 5c 和图 5d 还可发现，羽流上升的时候存在偏摆的现象。



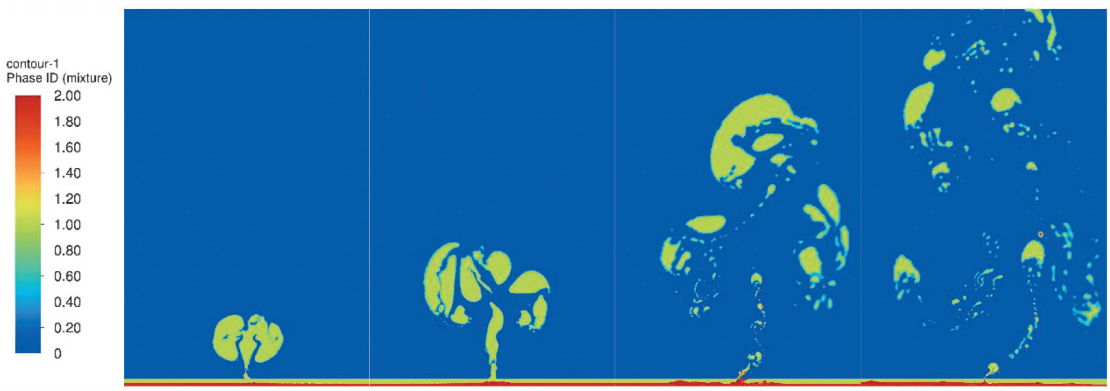
a）t=0.5 s　　b）t=1.0 s　　c）t=2.0 s　　d）t=3.0 s

图 5　气泡流下的油-气-水分布图

Fig.5　Oil-gas-water distribution under bubble flow pattern

2.2.2　分层流下的泄漏

图 6 为分层流下泄漏油气的扩散过程。由图 6 可知，泄漏初始，管道内油气分层明显，相界面光滑，在管内压力的驱动下，管内气体以较大速率喷射而出涌入海水，快速向上部空间发展，在泄漏区域上方形成蘑菇状气云团，管内油液并未溢出但泄漏孔前方油液面剧烈波动。随着时间的推移，气团半径不断增大，上部气体开始逐渐脱离气团。部分气体脱离后，中部气体上升较快，气团两侧形成卷吸区域，湍流运动导致气体不断分裂，与海水掺杂程度加剧。管道内部液面波动愈发剧烈，在两端气流作用下，局部放大图显示液面尖峰抵达孔口。随后，如图 6d 所示，随着泄漏气体的不断向上扩散，核心大气团从尾部开始不断分裂，气泡体积不断减小，边缘与海水混杂程度进一步提升，泄漏气体影响范围在横向宽度上增加。泄漏孔处由于油液参与泄漏，混合液柱直径变小，同时受到孔口两端气流速度不一致和气泡羽流卷吸的影响，泄漏向右方偏移。



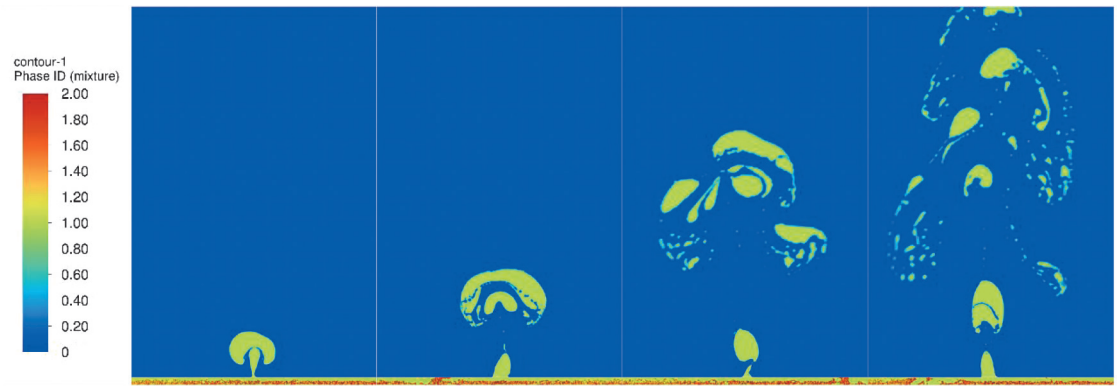
a）t=0.5 s　　b）t=1.0 s　　c）t=2.0 s　　d）t=3.0 s

图 6　分层流下的油-气-水分布图

Fig.6　Oil-gas-water distribution under stratified flow pattern

2. 2. 3 冲击流下的泄漏

图 7 为冲击流下泄漏油气的扩散过程。从图 7 可知，泄漏初始阶段，管道孔口泄漏为气体泄漏。管道中油液受重力作用沉积于管道底部，并沿着管道水平方向运动，而气体自泄漏孔持续喷射而出，形成气柱直径远大于孔径的蘑菇状云团，此时初始动量处于整个泄漏过程的最高阶段，浮力射流卷吸作用明显，两侧气团产生回流。随着泄漏的进一步发展，连续气体裂解形成多个气团，在气泡羽流上升过程中，中心气体得到更快的泄漏孔气源补充，致使气泡不断聚合分裂，中部气体以大气团气泡为主，边缘羽流气泡不断被撕裂为细小气泡。同时，管道内本就呈波浪状的油液在气流的扰动下，波动更剧烈。这种剧烈的波动一方面影响管道内部流场的，另一方面也造成了气体泄漏速度的波动。此外，剧烈的波动还使得部分油液触及管道上壁，从而溢入水中。并且随着泄漏的稳定，连续两个脱离孔口的气泡在上升过程中，后面的气泡运动速度明显快于前面的气泡，甚至经过一小段时间，后面的气泡会追上前面的气泡并聚合破裂。



a) t=0.5 s b) t=1.0 s c) t=2.0 s d) t=3.0 s

图 7 冲击流下的油-气-水分布图

Fig.7 Oil-gas-water distribution under segment plug flow pattern

2. 2. 4 环状流下的泄漏

图 8 为环状流下泄漏油气的扩散过程。与图 5 分层流泄漏扩散过程对比，在泄漏初始，管道内气体体积分数为 99%，此时泄漏过程基本为管内气体泄漏。气体自微孔持续喷射进入海水区域，在泄漏区域上方形成气团。随着时间的推移，气团受浮力作用竖直向上升，中间的气泡上升速度较快，导致两侧气团回流，气团形状变为月牙形。随着高度不断上升，气团分裂为多个小气团，影响范围扩大，四周的气泡在向上升的同时，也以缓慢的速度横向运动。管道内气芯中弥散的高速液滴并不会泄漏而出，环状液膜上部的少许液滴会经由微孔与气流一同涌入水中。



a) t=0.5 s b) t=1.0 s c) t=2.0 s d) t=3.0 s

图 8 环状流下的油-气-水分布图

Fig.8 Oil-gas-water distribution under annular flow pattern

2.2.5　不同流型下的泄漏过程比较

对比图 5 ~ 8 可知，管道内不同流型泄漏扩散过程均经历相似射流/羽流阶段，但由于不同流型中气液组成不同，泄漏流体组成也并不统一，其中气泡流下的泄漏主要为掺杂少量气体的油液泄漏，而分层流、环状流和冲击流下的泄漏可能主要为掺杂液滴的气体泄漏。由于密度不同，在同样的压力驱动下，分层流、冲击流和环状流下的泄漏具有更高的泄漏喷射速率。气泡流下泄漏时呈现一段直径接近泄漏孔径的混合连续液柱，液柱克服周围水体的阻力，动量快速衰减，在泄漏孔上方逐渐分散成细小的油滴和气泡。分散开的油滴和气泡在剩余动量和浮力作用下，开始与水体之间的卷吸和掺混，将水也带入上升的羽流中，溢油扩散径向范围变大。

分层流、冲击流和环状流下的泄漏初期具有类似的扩散形态，并没有受到管道内不同气体速度的显著影响。泄漏初期，这三种流型下的气体均以连续喷射形式涌入水中，并在自身压力、环境压力和界面张力的作用下，形成气柱直径显著大于泄漏孔径的气云团，同时呈现出间歇性的颈缩与胀鼓现象。随着气团持续上升，初始动量快速消耗，浮力的作用开始显现，并对周围水体有一定的卷吸作用。羽流卷吸的水体不断增多，并伴随羽流一起向上发展，从而使得羽流的边界也不断向两侧扩张。同时，由于气液的剪切作用，羽流边缘速度降低，气团边缘会频繁发生破裂聚并。

相比之下，此时的气体泄漏扩散过程（指分层流、冲击流、环状流）比气泡流下的混合液泄漏具有更大的喷射高度、射流直径、扩散速度和扩散范围。但是随着泄漏的发展，由于管道内气液分布的差异，泄漏情况也有所不同：在分层流下，平静的液面会由于压力差以及气流的夹带激起液峰，并通过泄漏孔在气流包夹下持续泄漏而出；在冲击流下，其近似周期性的波浪状液峰会导致液滴断续泄漏而出；在环状流下，管道壁面的液滴会通过微孔与气流一同喷射涌入水中，同时气芯中的弥散液滴则保持高速向前行进的趋势，且因其油液含量极低，对气体泄漏扩散并无显著影响。

3　结论

本文对水下油气管道在不同流型时的泄漏过程进行了数值模拟，揭示了流型对泄漏规律的影响，得到以下 4 点主要结论：

1）建立的二维管道模型可再现 Mandhane 流型图关于水平管道中典型的 4 种流型，即气泡流，分层流，冲击流和环状流，且模拟的流型形态与有关学者的流型实验较为吻合。

2）水平油气混输管道四种流型泄漏扩散过程大致可以分为两类：一类形成的是以油液为主并掺杂少量细小气泡的射流泄漏，主要是气泡流；另一类形成的是以高速气体为并主掺杂细小液滴的射流泄漏，包括分层流、环状流以及冲击流。

3）水下油液与气体泄漏扩散过程具有相似的射/羽流结构，但气体泄漏具有更高的泄漏喷射速率，并且扩散速度和扩散范围远大于原油为主的射流；分层流、环状流以及冲击流中不同的气体折算速度对初期油气扩散形态无显著影响。

4）气泡流下泄漏时，以油液掺杂气泡的混合液柱射流为主，持续不断喷射而出；分层流下泄漏时，由于压强差和气流夹带会使油液在两边气流的包夹下持续泄漏而出，泄漏形态有所变小；冲击流泄漏时，因为其间歇性的交替流动，当液塞区经过泄漏孔口时，会有油液溢出，此时由于油液运移速度较快，溢油量并不多，泄漏还是以气体泄漏为主；环状流下泄漏时，几乎同样为气体泄漏，管道上壁的油液会经由微孔溢出，而气芯中弥散的液滴则不受影响。

[参 考 文 献]

[1]宗学聪,李新松,轩红超,等. 海底油气管道泄漏事故树分析及泄漏溢油应急处置[J]. 现代职业安全,2022,(11):8-83.

[2]JOHANSEN. DeepBlow- a Lagrangian plume model for deep water blowouts[J]. Spill Science & Technology Bulletin,2000,

(6):103-111.
[3]JOHANSEN. Development and verification of deep-water blowout models[J]. Marine Pollution Bulletin,2003,47(9-12):360-368.
[4]ZHENG L,YAPA P D,CHEN F H. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts (Part I):theory and model formulation [J]. Journal of Hydraulic Research,2002,41(4):339-351.
[5]CHEN F H,YAPA P D,ZHENG L. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts (Part II):comparison of numerical simulations with "Deepspill" field experiments[J]. Journal of Hydraulic Research,2002,41(4):353-365.
[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,增刊 1:19-197.
[7]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.
[8]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(2):215-220.
[9]李新宏,朱红卫,陈国明,等. 海底管道泄漏油气扩散规律数值仿真与对比分析[J]. 安全与环境学报,2017,17(2):608-614.
[10]李新宏,陈国明,徐长航,等. 水深对海底管道泄漏水下气体扩散行为的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(5):17-22.
[11]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.
[12]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.
[13]FANNELOP T K,HIRSCHBERG S,KUFFER J. Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets [J]. Journal of Fluid Mechanics,1991,229:629-657.
[14]臧晓刚,张军,陈怀民,等. 水下输油管微孔溢油的实验研究[J]. 海洋技术学报,2016,35(2):104-108.
[15]吕国录,张军,刘志萌,等. 水下管道微孔溢油扩散特性及油滴尺寸分布[J]. 海洋技术学报,2017,36(6):59-64.
[16]吕国录,张军,杨云朋,等. 基于 CFD 的海底管道油气泄漏扩散模拟分析[J]. 集美大学学报(自然科学版),2017,22(4):5-57.
[17]孙媛,曹学文,梁法春,等. 水平管分层流下微孔泄漏特性数值模拟和实验分析[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(12):14-20.
[18]陈家琅,陈涛平. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,2010.
[19]章争荣,张湘伟. 二维定常不可压缩粘性流动 N-S 方程的数值流形方法[J]. 计算力学学报,2010(3):415-421.
[20]TAUSEEF S M,RASHTCHIAN D,ABBASI S A. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2011,24(4):37-376.
[21]WILKENING H,BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2007,32(13):2206-2215.
[22]MANDHANE J M,GREGORY G A,AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow,1974,1(4):537-553.
[23]阮龙飞. 管道气液两相流流型及热-流-固耦合数值模拟研究[D]. 武汉:长江大学,2015.

(责任编辑　彭海滨　英文审校　郑青榕)