

牛子厚, 陈文学, 穆祥鹏, 等. 长距离有压输水工程滞留气团迁移特性模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 131-142. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.010

NIU Zihou, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, et al. Simulation study on migration characteristics of trapped air mass in long-distance pressurized water conveyance systems [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 131-142. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.010

# 长距离有压输水工程滞留气团迁移特性模拟研究

牛子厚, 陈文学, 穆祥鹏, 崔巍, 包娟

(中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**【目的】水气耦合作用及其模拟方法一直都是长距离有压输水管道水力学领域的科学难题, 对比不同水气二相流模型对水气耦合作用的模拟效果, 对长距离有压输水管道滞留气团演变与迁移过程研究具有重要意义。【方法】采取VOF、CLSVOF、CFD-PBM三种水气二相流模型对水流冲击管道盲端滞留气团的瞬变流案例进行模拟, 从气团瞬变压力、气团形态变化等方面展开对比分析。【结果】结果显示: 三种模型模拟第一波峰处最大压力的误差范围为0.78~1.45 m, 第一波谷处最小压力误差范围为-0.55~-0.03 m, 对于瞬变压力的模拟误差均在可接受范围内; CLSVOF模型模拟气团的破碎和聚并效果优于VOF和CFD-PBM模型, 更适用于长输管道滞留气团的迁移问题分析。【结论】结果表明: 采用CLSVOF模型, 模拟了长输管道滞留气团在水流冲击下的迁移过程, 发现滞留气团与水流之间存在明显的流速差, 在水流拖曳作用下, 气团以段塞流形式向下游输移, 并通过流型图验证了模拟结果的正确性, 证明了CLSVOF模型在长距离输水管道滞留气团迁移演变模拟方面的适用性。

**关键词:** 瞬变流; CFD; 数值模拟; 有压输水管道; 滞留气团; 流型

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV672.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0131-12



## Simulation study on migration characteristics of trapped air mass in long-distance pressurized water conveyance systems

NIU Zihou, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, CUI Wei, BAO Juan

(State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** [Objective] The water-air coupling and its simulation method have long been recognized as a scientific challenge in the hydraulics of long-distance pressurized water conveyance pipelines. Comparing the performance of different water-air two-phase

收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-09-18; 录用日期: 2024-09-27; 网络出版日期: 2024-11-28

**基金项目:** 国家重点研发计划“风险污染物全过程管控智慧决策支持平台集成与示范”(2021YFC3200905); 环北部湾广东水资源配置工程长距离大流量输水系统水流态势与“四预”关键技术研究专题(XJLY-2022 HT-61); 新疆水利水电勘测设计研究院有限公司资助项目“复杂地质条件下超长深埋隧洞复杂断面水力学及安全输水”

**作者简介:** 牛子厚(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事调水工程水力学研究。E-mail: n18713225131@163.com

**通信作者:** 穆祥鹏(1979—), 男, 正高级工程师, 博士研究生导师, 博士, 主要从事调水工程水力学、生态水力学研究。E-mail: swood2002@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

flow models in simulating the water-air coupling is essential for investigating the evolution and migration process of trapped air mass in long-distance pressurized water pipelines. [Methods] Three water-air two-phase flow models, VOF, CLSVOF, and CFD-PBM, were used to simulate transient flow scenarios of water flow impacting trapped air mass at pipeline dead end. A comparative analysis was conducted based on the transient pressure variations and morphological variations of the air mass. [Results] The result showed that the error range for the maximum pressure at the first peak simulated by the three models was 0.78 m to 1.45 m, and the error range for the minimum pressure at the first trough was -0.55 m to -0.03 m, both within acceptable error ranges in transient pressure simulation. The CLSVOF model outperformed both VOF and CFD-PBM models in simulating the fragmentation and coalescence of air mass, making it more suitable for analyzing the migration of trapped air mass in long-distance pipelines. [Conclusion] The result indicate that the CLSVOF model successfully simulates the migration process of trapped air mass under the impact of water flow in long-distance pipelines. A significant velocity difference between the trapped air mass and the water flow is observed. Under the drag force of the water flow, the air mass migrates downstream in the form of slug flow. The correctness of the simulation result is verified through flow pattern diagrams, demonstrating the applicability of the CLSVOF model in simulating the migration and evolution of trapped air mass in long-distance water conveyance pipelines.

**Keywords:** transient flow; CFD; numerical simulation; pressurized water conveyance pipeline; trapped air mass; flow pattern

## 0 引言

我国水资源时空分布严重不均, 区域水资源短缺问题直接影响当地经济社会发展, 解决这一困局最直接和有效的方法就是修建长距离调水工程<sup>[1]</sup>。受地形地质条件影响, 输水线路起伏多变, 在隧洞或管道充水过程中若排气阀安装不合理或排气不及时, 在管线局部高点容易出现滞留气团现象<sup>[2-4]</sup>, 不仅影响输水效率, 也给工程运行带来安全隐患。工程实践表明<sup>[5]</sup>: 滞留气团在水流冲击下会产生迁移、破碎、聚并等现象, 通过物理模型试验模拟水气二相流的瞬变过程存在测试困难、成本较高等问题<sup>[6]</sup>。为揭示气液两相流中气团瞬态特性及其与水流的耦合作用, 近十几年来众多学者开展了水气二相流 CFD 数值模拟研究。VOF 模型通过引入流体体积分数, 使不同相的流量可以在相之间迅速转换, 因其在模拟多相流体流动上的便利性, 在流体力学领域中气、液交界面的模拟上得到了广泛应用。刘德有<sup>[7]</sup>、ZHOU 等<sup>[8]</sup>采用 VOF 模型对水流冲击管道盲端滞留气团的瞬变过程进行模拟, 模拟得到的第一波峰波谷的瞬变压力极值与试验结果吻合良好; MARTINS<sup>[9]</sup>采用 VOF 模型模拟了管道充水过程中的最大瞬态压力, 发现气团体积达到最大压缩时有两种状态: 水气交界面较为清晰的空气压缩和水气界面较为混乱的总空气压缩; ZHOU 等<sup>[10]</sup>采用 VOF 模型和 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型研究了管道充水过程中气团迁移、压缩特性; 黄浩成等<sup>[4]</sup>采用 VOF 模型对管道高点气团随水流的运动现象进行了模拟, 分析了管道流速对排气性能的影响。

除了 VOF 模型, CLSVOF 模型和 CFD-PBM 模型

也是在水气二相流领域具有很大应用潜力的模型。CLSVOF 模型是将 VOF 与 Level Set 相结合, 并采用 CSF 表面张力模型反映水气之间的黏附作用和接触力。CLSVOF 模型结合了 Level Set 模型和 VOF 模型的优点, 能够准确地捕捉到气液两相流的相界面变化<sup>[11-12]</sup>。CLSVOF 由 SUSSMAN 等<sup>[13]</sup>首先提出, 并成功应用于三维自由液面的捕捉问题<sup>[14]</sup>; WANG 等<sup>[15]</sup>采用 CLSVOF 模型分析气液两相流通过驼峰管过程中的流型演变和压力脉动传播; ZHU 等<sup>[16]</sup>研究了水流冲击弯管垂直端气囊时的水力瞬态和热力学特性; 王晓升<sup>[17]</sup>采用 CLSVOF 对地下调蓄系统中发生的井喷现象进行了模拟, 认为相较 VOF, CLSVOF 对井喷现象模拟准确度更高。总体来说, CLSVOF 多应用于复杂气液两相流模拟, 特别是射流和经典气泡问题, 但在滞留气团迁移模拟方面的应用还较少见。

CFD-PBM 模型是将双流体模型和群体平衡模型 (Population Balance Model, PBM) 相结合。双流体模型未考虑气泡的聚并和破碎效应, 模拟结果误差较大<sup>[18]</sup>。PBM 模型考虑了离散相微粒生长、聚并等现象, 常用于模拟离散相微粒的分布和变化。因此, 将双流体模型和 PBM 模型耦合, 可以更加深入地探究气液两相流中气相的力学特性以及混合系统的流动特性, 更准确地描述离散相的分布和动态行为<sup>[19-20]</sup>。在化工行业, HULBURT 等<sup>[21]</sup>最先采用 CFD-PBM 模型, 模拟了鼓泡塔等反应装置内气泡的生长、聚并、破碎等现象; ZHANG 等<sup>[22]</sup>采用 CFD-PBM 模型, 模拟了气泡发生、生长、聚并、破碎过程; YANG 等<sup>[23]</sup>在气泡破碎模型中加入了密度修正项, 能更好地模拟压力对气泡破碎的影响。

综上所述, 随着计算机技术的持续进步, CFD 技术在气液两相流模拟方面的应用越来越广泛。当前多种气液两相流模型在水-气两相状态以及两相间作用力模拟方面各有侧重, 针对长距离有压输水管道建设与运行管理所关心的滞留气团破碎、聚并以及随水流迁移问题, 采用何种方法、如何实现气团形态及其运动的准确模拟, 是迫切需要解决的重要问题。本文通过对比 VOF、CLSVOF、CFD-PBM 三种主流的水气二相流模型对瞬变压力、气团破碎、聚并等瞬态过程的模拟结果, 分析各模型对于长输管道滞留气团迁移模拟的适用性, 并采用优选的水气二相流模型对长输管道滞留气团迁移问题进行初步的模拟和研究, 为长输管道水气二相流问题研究提供借鉴和参考。

## 1 气液二相流模型构建

### 1.1 VOF 模型

VOF 模型由 HIRT<sup>[24]</sup> 提出, 通过定义 0~1 的体积分数对不同相的界面进行捕捉, 基本方程<sup>[25-26]</sup>为

$$\alpha_a + \alpha_w = 1 \quad (1)$$

$$\rho = \alpha_a \rho_a + \alpha_w \rho_w \quad (2)$$

式中,  $\alpha_a$  为空气的体积分数;  $\alpha_w$  为水体的体积分数;  $\rho$  为混合密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_a$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_w$  为水体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

VOF 模型的控制方程为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (UF) = 0 \quad (3)$$

式中,  $F$  为气相和液相混合后的体积函数;  $U$  为速度矢量 ( $\text{m}/\text{s}$ )。

VOF 模型引入流体体积分数, 使不同相的流量可以在相之间迅速转换, 给模拟多相流体运动带来了极大便利。但是 VOF 模型在相邻网格界面处表面张力和相关压力跳跃计算不一致, 会导致内插和离散化误差, 从而出现伪速度以及相邻网格界面的物理量不连续<sup>[27]</sup>。

### 1.2 CLSVOF 模型

Level Set 方法在计算相界面曲率、法向向量等方面精确度较高, 但容易导致输运过程中质量不守恒, 通过 VOF 和 Level Set 两者结合可以同时克服两种方法的缺点。Level Set 方法通过定义一个符号距离函数  $\Phi$  对水气二相流界面进行捕捉,  $\Phi = 0$  表示两相流的界面, 某一点的  $\Phi$  值为该点到界面的距离;  $\Phi < 0$  表示界面以下的相;  $\Phi > 0$  表示界面以上的相。

$\Phi$  的控制方程为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (U\Phi) = 0 \quad (4)$$

法向量  $n$  及曲率  $k$  方程为<sup>[28-30]</sup>

$$n = \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \quad (5)$$

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \quad (6)$$

引入 Heaviside 函数  $H(\Phi)$

$$H(\Phi) = \begin{cases} 0 & \Phi < -a \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\Phi}{a} - \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\Phi}{a}\right) \right] & |\Phi| \leq a \\ 1 & \Phi > a \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $a$  为界面厚度。

光滑后的密度和黏度为

$$\rho(\Phi) = \rho_a + (\rho_w - \rho_a)H(\Phi) \quad (8)$$

$$\mu(\Phi) = \mu_a + (\mu_w - \mu_a)H(\Phi) \quad (9)$$

式中,  $\rho_a$ 、 $\rho_w$  分别为气相的密度和液相的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\mu_a$ 、 $\mu_w$  分别为气相的动力黏度和液相的动力黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

两相流流动控制方程为

$$\nabla U = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\rho(\Phi) \partial U}{\partial t} + \rho(\Phi) \nabla \cdot (UU) = -\nabla p +$$

$$\nabla \cdot \mu(\Phi) [\nabla U + (\nabla U)^T] - F_s + \rho(\Phi)g \quad (11)$$

式中,  $U$  为速度矢量 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $p$  为压力 ( $\text{Pa}$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $F_s$  为采用 CSF 模型的体积力密度 ( $\text{N}/\text{m}^3$ )。

CLSVOF 通过函数  $\Phi$  对界面法向量进行计算, 通过几何法对网格中心点到界面的最小距离  $d$  进行计算, 并对  $\Phi$  再次初始化, 即

$$\Phi = \begin{cases} d, & F(\Phi, t) < 0.5 \\ 0, & F(\Phi, t) = 0.5 \\ -d, & F(\Phi, t) > 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

### 1.3 CFD-PBM 模型

双流体模型模拟气液两相流时, 液体设置为连续相, 气体设置为离散相。双流体模型的连续性方程和动量方程为

$$\frac{\partial(\alpha_\varphi \rho_\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \rho_\varphi u_\varphi) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\alpha_\varphi \rho_\varphi u_\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \rho_\varphi u_\varphi u_\varphi) = -\alpha_\varphi \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \tau_\varphi) + \alpha_\varphi \rho_\varphi g + F_\varphi \quad (14)$$

$$\tau_{g/l} = \mu(\nabla u_{g/l} + \nabla u_{g/l}^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u_{g/l}) \mathbf{I} \quad (15)$$

式中,  $\alpha$  为相体积分数;  $\rho$  为相密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); 下角标

$\varphi = g$  为离散相,  $\varphi = l$  为连续相;  $\mathbf{u}$  为瞬时运动速度 (m/s);  $P$  为压力 (Pa);  $\mu$  为动力黏度 (Pa · s);  $\mathbf{I}$  为单位张量;  $\mathbf{g}$  为重力加速度 (m/s<sup>2</sup>);  $\mathbf{F}$  为相间作用力 (N/m<sup>3</sup>), 表示两相之间的动量传递;  $\boldsymbol{\tau}$  为黏性应力张量 (Pa)。

为了模拟滞留气团的破碎和聚并, PBM 模型表示为<sup>[31]</sup>

$$\underbrace{\frac{\partial n(V,t)}{\partial t}}_{\text{时间项}} + \underbrace{\nabla \cdot [n(V,t)\mathbf{u}_b(V,t)]}_{\text{对流项}} + \underbrace{\nabla_v \cdot \left[ \frac{dV_b}{dt} n(V,t) \right]}_{\text{传质和压力变化的影响}} = \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^V n(V-V',t)n(V',t)c(V-V',V')dV'}_{\text{聚并引起的源项}} - \underbrace{\int_0^\infty \beta(V,V')b(V')n(V',t)dV'}_{\text{破碎引起的源项}} - \underbrace{b(V)n(V,t)}_{\text{破碎引起的汇项}} \quad (16)$$

式中,  $V$  为母气泡体积;  $V'$  为子气泡体积;  $n(V', t)$  为体积是  $V'$  的气泡数密度函数;  $c(V - V', V')$  为气泡的聚并速率;  $\beta(V, V')$  为气泡体积从  $V$  破裂成  $V'$  的子气泡分布函数。

## 2 水流冲击管道盲端滞留气团的数值模拟

### 2.1 几何模型及边界条件

根据 ZHOU<sup>[8]</sup> 的研究案例, 建立管道盲端滞留气团的数学模型, 如图 1 所示。管径为 90 mm, 下水平管长度为 669.5 mm, 竖直管长度为 1 000 mm, 上水平管长度为 250 mm。在初始时刻, 设置下水平管和竖直管内充满水流, 上水平管内充满空气, 气体为理想气体。入口处采用压力进口, 0 时刻开始压力水头由 0 m 突变为 7.0 m, 且一直保持不变(相对于下平段中心高程的水位), 出口及其他边界均设置为壁面。

水-气两相间作用力有曳力、升力、虚拟质量力、表面张力等。曳力模型选取经典的 Schiller-Naumann 模型; 在研究两相快速分离时, 升力的影响较大, 其余情况升力的影响较小, 故数值模拟中忽略升力影响<sup>[32-33]</sup>; 当两相之间密度差较大时, 虚拟质量力对结果影响较大, 本研究虚拟质量力系数取 0.5, 气泡的破碎和聚并采用 LUO<sup>[33]</sup> 提出的模型。对于表面张力, 三种水气二相流模型皆选取 CSF 表面张力模型<sup>[34]</sup>, 表面张力系数选取 0.07 N/m。

### 2.2 湍流模型及网格无关性验证

湍流模型采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型<sup>[35]</sup>, VOF 和 CLSVOF 采用 PISO 算法, 压力格式为 PRESTO 格式, 密度、动量和能量的格式为二阶迎风格式, 湍动能项、湍流耗散项采用一阶迎风格式, 湍流模型采用一阶隐式格式求解。

CFD-PBM 模型采取 Phase Coupled SIMPLE 算法, 压力采用 PRESTO 格式, 其余项选取一阶格式。三种水气二相流模型的计算时间步长均为 0.000 5 s, 计算时长为 0.5 s。由于气团滞留于管道盲端, 所以管道盲端采取加密网格的形式, 其余地方采取非加密网格。

加密区选取 2 mm、3 mm、4 mm 三种不同尺寸网格, 以 VOF 模型的数值计算结果为例与试验结果进行对比分析验证。三种网格数量分别为 410 209 个、202 534 个、134 358 个, 在第一波峰压力处与试验值的绝对误差为 1.32 m、1.45 m、1.52 m, 随着网格数量提升, 计算精度虽然有所提高, 但区别较小。基于精度与计算效率的双重考虑, 最终加密区选用 3 mm 网格。

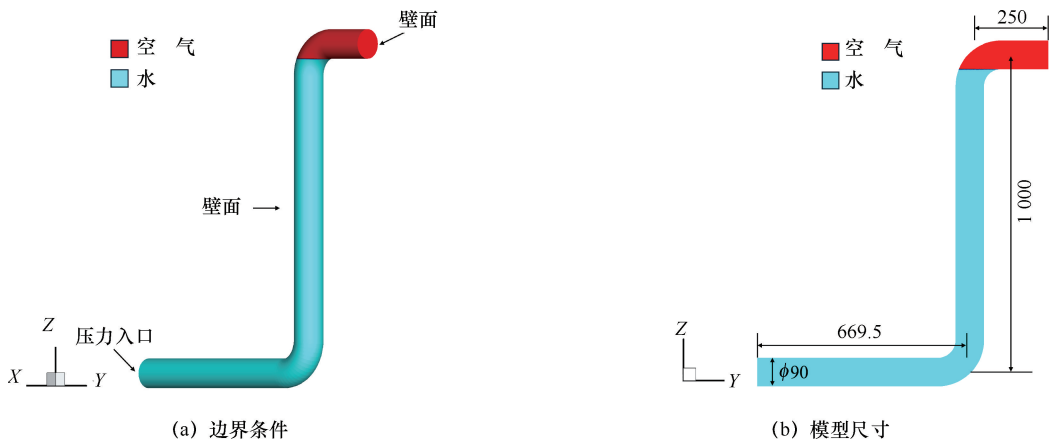


图 1 数学模型的边界条件及尺寸设置(单位: mm)

Fig. 1 Boundary conditions and dimension settings of mathematical model (Unit: mm)

### 3 水气两相流模型结果比较与适用性分析

#### 3.1 不同模型结果的最大压力比较

采用 VOF、CLSVOF、CFD-PBM 三种水气二相流模型分别对上文所述的水流冲击管道盲端滞留气团的水力瞬变过程进行模拟。各模型计算得到的气团压力过程如图 2 所示。由计算结果可知,三种模型第一波峰的极值压力分别为 15.57 m、15.53 m、14.90 m,相对 ZHOU<sup>[8]</sup> 的物理模型试验结果误差分别为 1.45 m、1.41 m、0.78 m,极值压力出现的时间分别为 0.112 5 s、0.115 0 s、0.112 5 s;在第二波峰处,三种模型极值压力分别为 11.58 m、11.38 m、12.49 m,误差分别为-0.08 m、-0.28 m、0.83 m,极值压力出现的时间分别为 0.345 s、0.345 s、0.330 s;三种模型在第一波谷的极值压力分别为 1.62 m、1.55 m、1.10 m,误差分别为-0.03 m、-0.10 m、-0.55 m,出现极值的时间分别为 0.220 s、0.225 s、0.220 s。

通过对比发现,VOF、CLSVOF、CFD-PBM 三种模型均可模拟水流冲击滞留气团的瞬变压力过程。对于最大瞬变压力,即第一压力波峰的模拟,各方法所得的压力波峰出现时刻和压力峰值结果差别很小,与试验结果相比,最高压力的误差范围为 0.78~1.45 m;三种模型模拟的第一压力波谷出现时刻基本一致,第一压力波谷值的误差范围为-0.55~-0.03 m。对于压力峰值的模拟,VOF 基本接近试验值,CLSVOF、CFD-PBM 压力结果偏小,但从工程应用角度而言,各模型所得绝对压力差别不大,在工程安全防护应用的可接受精度范围内。

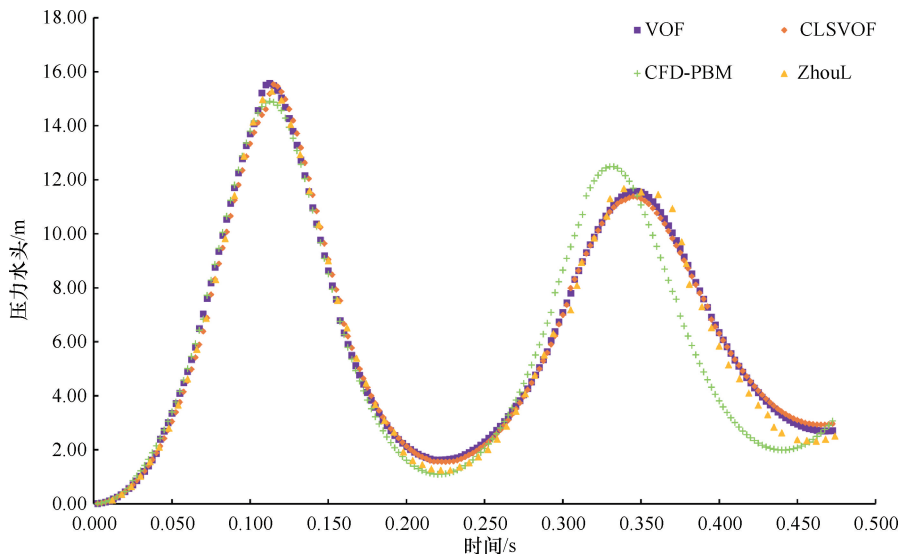


图 2 不同模型压力耦合

Fig. 2 Pressure coupling of different models

#### 3.2 不同模型的气团动态特性比较

取模型的中心纵剖面对比气团的动态特性结果,分别取第一波峰、第一波谷、第二波峰、第二波谷的极值时刻的气团形态进行对比分析,分别如图 3—图 6 所示。为了便于分析,将管道中心纵剖面分为①—④四个区。

第一波峰时刻的水气分布如图 3 所示。在第一波峰时刻气团受水流冲击,体积出现了较大压缩。VOF 和 CLSVOF 结果基本一致,气团主要处于①区、②区,大气团形态相同,水流进入①区,到达盲端壁面处,在①区贴近上壁部分出现一系列小气泡。CFD-PBM 结果在①区中出现了明显的掺气现象,水流未到达盲端壁面处。在②区处虽然水流有压缩气团的趋势,但是相比 VOF 和 CLSVOF 结果,气团形变较小。

第一波谷时刻的水气分布如图 4 所示。在该时刻压力减小、气团体积膨胀,三种模型得到的气团都膨胀至管道④区。VOF 和 CLSVOF 模型得到的气团形态较为接近,均存在一条贯穿①②区的连续水流,将气团分离成两个;CLSVOF 结果在气团分离部分的水气界面更为清晰、光滑,在④区气团头部的掺气现象更为明显。CFD-PBM 模型得到的气团形态差别较大,并未被水流冲击成两个气团,而是整体拉长膨胀,向④区移动,整个气囊的水气界面附近掺气现象最为严重。

随之而来的第二个波峰时刻的水气分布如图 5 所示,此时绝大部分气团又被水流压缩回①区和②区。VOF 和 CLSVOF 模型得到的气团形态总体较为接近,略有差别。受水流压缩后,VOF 模型在①②区内得到 3 个气团,而 CLSVOF 模型气团已基本在①②区内重新聚并为一个。CFD-PBM 模型结果仍与 VOF、CLSVOF 模型结果差别较大,掺气水流沿着①区和②区的交界处,将气团一分为二。CFD-PBM 模型得到的气团形变和破碎程度均较小,水流的掺气程度更大。

第二个波谷时刻的水气分布如图 6 所示,此时压力降低,气团再次膨胀,范围扩大至①—④四个区域,三种模型得到的气团形态各不相同,存在较大差别。VOF 结果主要为处于①—③区的三个大气团;CLSVOF 气团的结果则更为破碎,呈现出相对分布更均匀的多

第二个波谷时刻的水气分布如图 6 所示,此时压力降低,气团再次膨胀,范围扩大至①—④四个区域,三种模型得到的气团形态各不相同,存在较大差别。VOF 结果主要为处于①—③区的三个大气团;CLSVOF 气团的结果则更为破碎,呈现出相对分布更均匀的多

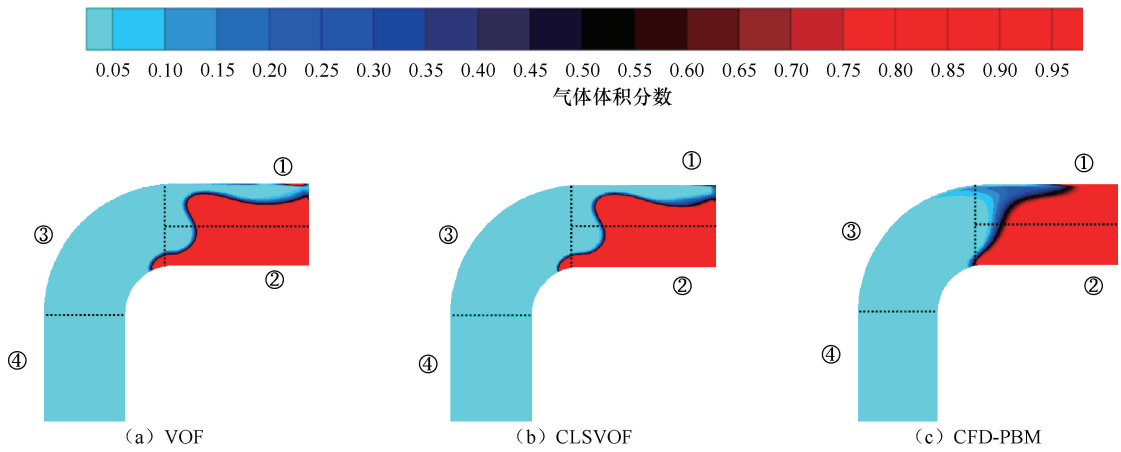


图3 第一波峰时刻水气分布

Fig. 3 Water-air distribution at the first peak

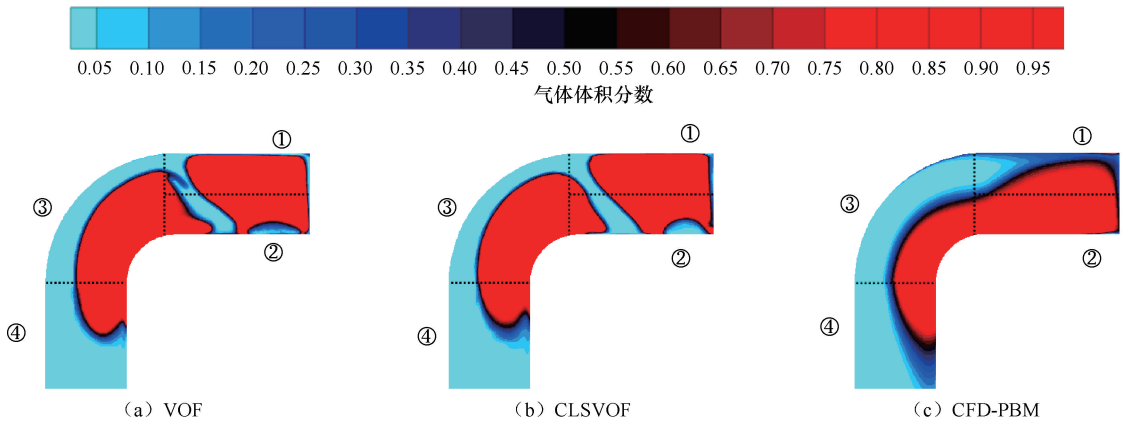


图4 第一波谷时刻水气分布

Fig. 4 Water-air distribution at the first trough

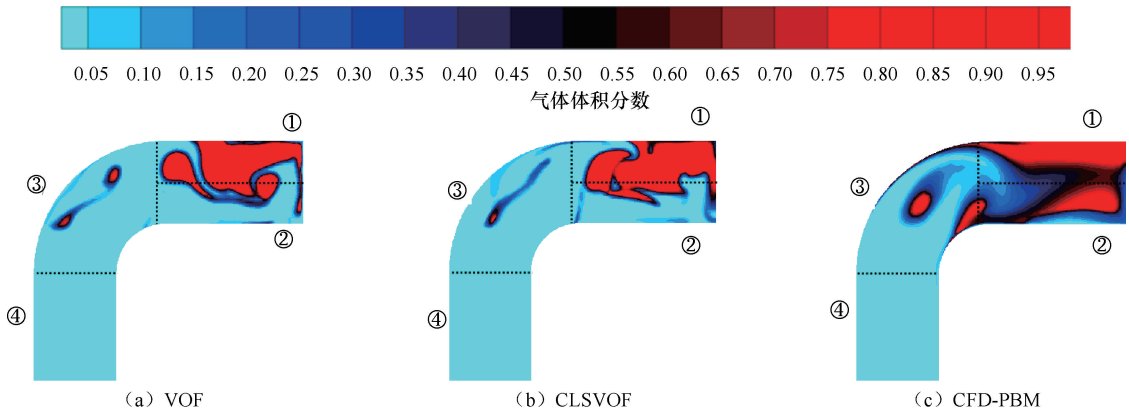


图5 第二波峰时刻水气分布

Fig. 5 Water-air distribution at the second peak

个气团；CFD-PBM 结果以几乎占据①—②整个区域的整体气团为主，在③区则是3 个小气团及掺气水流的形式。

### 3.3 模型适用分析

通过上述计算结果比较可知，在气团影响下的

瞬变流模拟方面，三种模型均可做到对于管道瞬态压力的捕捉，特别是在第一个波峰和波谷的模拟方面，无论压力极值和时间相位均差别很小，说明三种模型均可用于水流冲击滞留气团的瞬变压力分析。同时也说明在初始气团体积、位置、初始水力条件相同的情

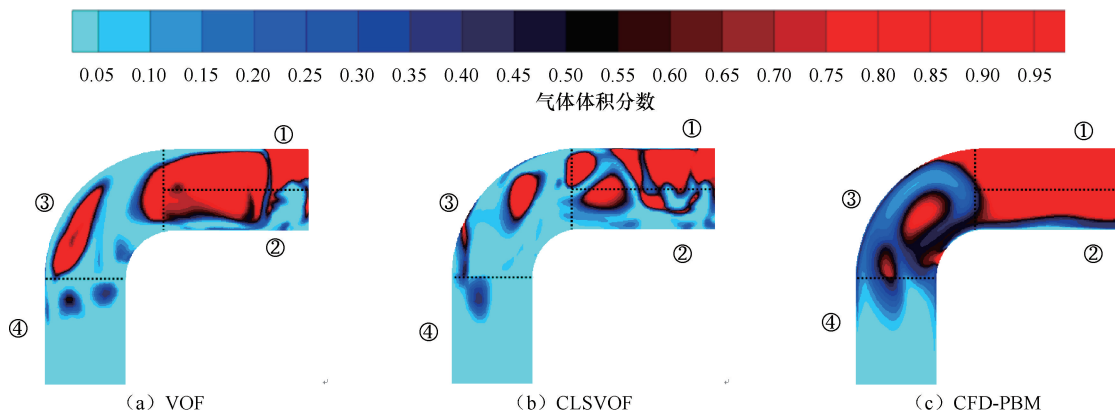


图6 第二波谷时刻水气分布

Fig. 6 Water-air distribution at the second trough

况下,气团在水流冲击下的破碎、聚并过程对于瞬变压力极值的影响较小。

在对气团迁移、破碎、聚并的动态过程模拟方面,由于气团在水流中受到的作用力包括浮力、重力、管壁对气泡的支撑力、表面张力等,在水流静止的情况下,众多作用力保持平衡,维持气团的形态不发生变化。当水流突然开始冲击滞留气团,不仅会产生拖曳力、摩擦阻力、虚拟质量力等作用力,而且原有作用力的大小和方向发生变化。当水流的冲击力超过表面张力等抵抗变形的力时,导致表面张力无法继续维持气团的完整性,气团形态会发生显著变化,甚至出现破裂和分离的复杂现象。三种模型在水-气两相状态以及两相间作用力模拟方面各有侧重,故模拟结果体现出较大的差别。

从气团形态和气液界面来看,VOF和CLSVOF结果在第一波峰和第一波谷时类似,VOF模型和CLSVOF模型的区别在于对局部气泡细节以及掺气水流模拟方面;但从第二波峰和第二波谷时刻来看,CLSVOF模型气团破碎过程更加剧烈,在水流作用下分成了大小不一的气团,而VOF模型在反映气团破碎、聚并方面效果较差,并且在模拟过程中VOF相界面处存在较明显的阶跃现象,CLSVOF模型的水气界面更加光滑。这主要是因为VOF模型是基于流体体积分数建立的,对于水气界面上的细小结构和液滴的形成与破裂等现象模拟困难。CLSVOF模型则通过Level Set与VOF结合,提高了计算相界面曲率、法向向量等方面的精度。

而CFD-PBM模型得到的气团压缩过程是以整体变形为主,在反映气团破碎、聚并方面存在局限性,气团即使发生破碎,也是以较大气团的形式存在。PBM模型对于分散相微粒的分布模拟能力较好,所

以CFD-PBM模型更适于模拟水流掺气效果。

总体比较而言,CLSVOF模型对于气团的迁移、破碎、聚并过程的模拟效果更为精细和准确,避免了VOF模型在水气界面的阶跃现象。对于在长距离输水管道的滞留气团迁移问题,不但需要模拟水流冲击气团时的水力瞬变压力,还要回答滞留气团能否排出、以什么样的形态排出、多久排出等问题。因此对于此类问题,采用CLSVOF模型能够获得更有参考价值的结果。

## 4 有压输水管道滞留气团迁移过程模拟与分析

为了进一步验证CLSVOF模型对长距离输水工程气团迁移的模拟效果,以一段长度为10 m的水平有压管道、出口斜管及出水池为研究对象,假设在水平管道中部存在一段滞留气团,采用CLSVOF模型模拟气团随水流的迁移过程,分析其动力特性。

### 4.1 数学模型边界条件

数学模型的水平管道长度为10 m,直径为66 mm;斜管段的逆坡为1:16.67,斜管段的水平投影长度为1.5 m,管道的入口流速为0.32 m/s;管道出口为大气压。由于滞留气团上浮于管道断面上部,所以管道上半部分采用3 mm加密网格,中下部分采取5 mm网格,共计9 565 304个网格,输水管道建模情况如图7所示。湍流模型选取Realizable  $k-\varepsilon$ 模型;求解方法选取PISO算法,时间步长为0.005 s,下文数值模拟结果均采用模型数据。

### 4.2 气团迁移结果分析

初始时刻在模型管道中部设置一个滞留气团,气团长度为10 cm,厚度为1 cm。在初始0时刻,管道沿线的流速为0,自下一时间步长起,在管道入口

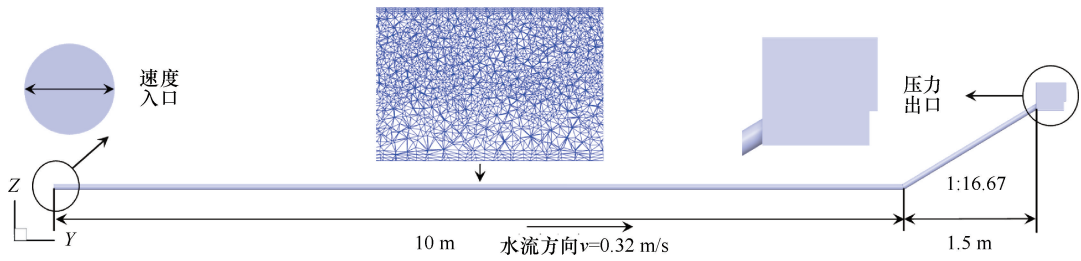


图7 长距离输水管道模型边界条件及尺寸

Fig. 7 Boundary conditions and dimensions of long-distance water conveyance pipeline model

突然施加 0.32 m/s 的流速, 并维持不变, 对气团随水流的迁移与演变情况进行模拟。

0.1~0.7 s 内气团变化过程如图 8 所示。由图 8 可知, 在 0.1 s 时刻, 在水流的冲击扰动下, 气团发生了拉长与变形, 随后在水流的拖曳作用下, 气团不断被拉长, 其形态演化出下游的鼻部、中间的过渡区以及上游的尾部;

数值模拟得到的  $T=3.0$  s 的气团形态如图 9 所示。从图 9 可知, 气团的流型发展为分层流、段塞流

共存, 并向水平管道末端移动。

16.2 s、19.0 s 和 19.5 s 时刻的气团形态分别如图 10—图 12 所示。从图上结果可知, 滞留气团以段塞流的形式逐步向下游输移, 在  $T=16.2$  s 时刻气团缓慢迁移至水平管道末端;  $T=19.0$  s 时刻滞留气团开始以单个小气团的形式, 逐渐向出口迁移, 小气团沿斜管上升速度为 0.6 m/s;  $T=19.5$  s 时刻, 随着水流持续的拖曳和浮力作用, 小气团到达斜管出口, 气团输移速度增至 0.8 m/s, 随后排出管道。

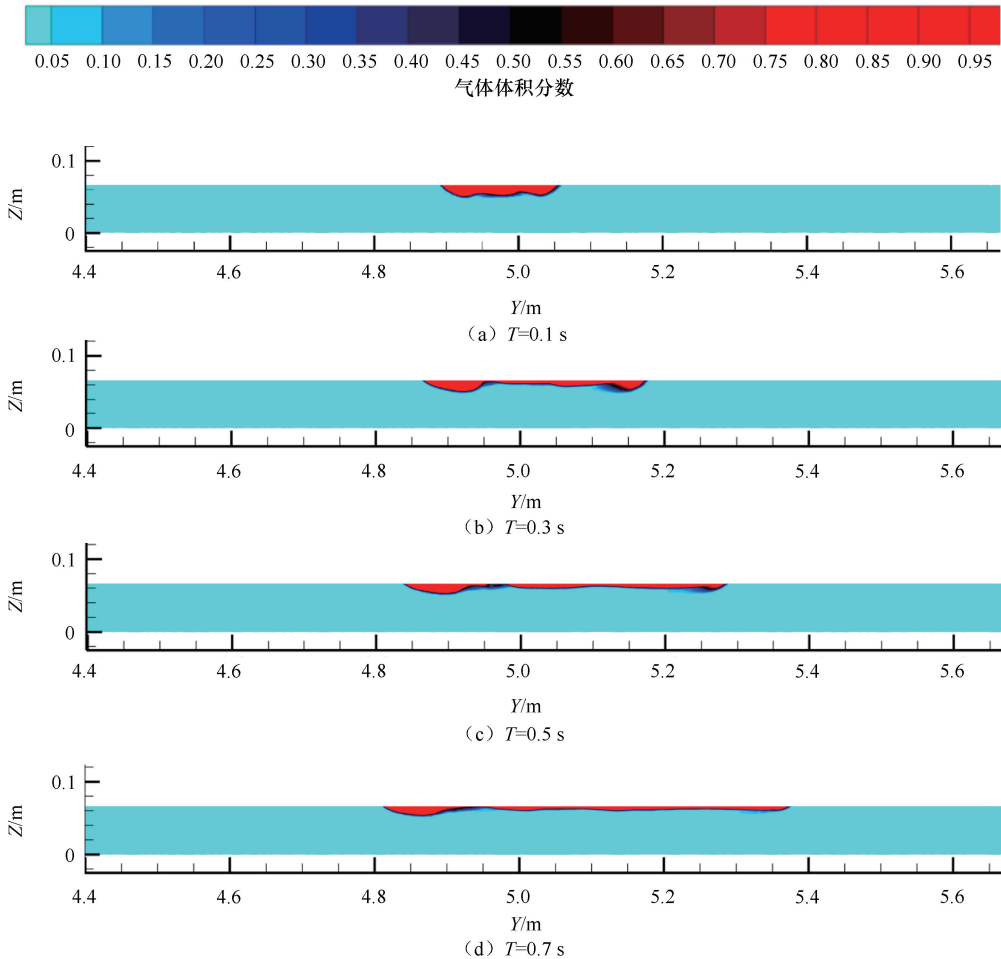


图8 不同时刻气团变化过程

Fig. 8 Air mass variation process at different times

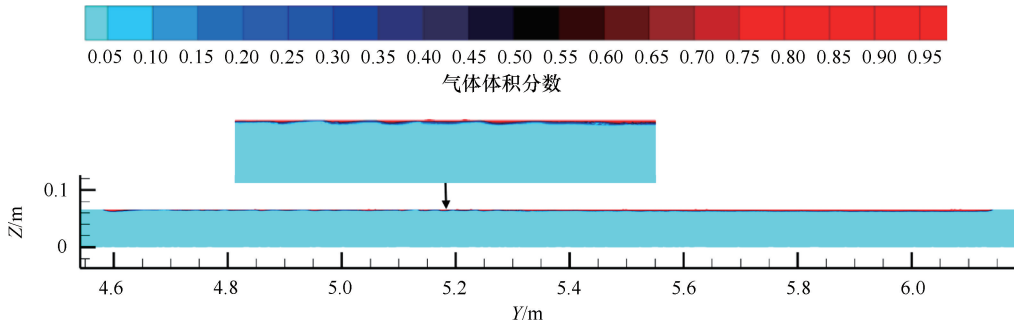


图 9  $T=3\text{ s}$  时气团形态  
Fig. 9 Air mass morphology at  $T=3\text{ s}$

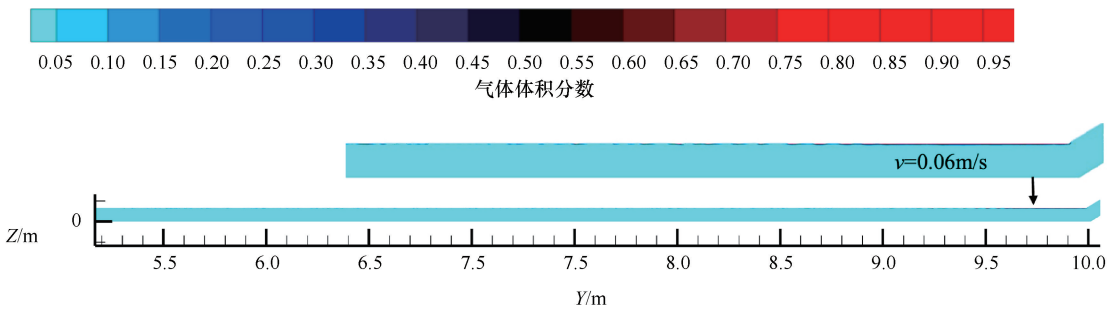


图 10  $T=16.2\text{ s}$  气团形态  
Fig. 10 Air mass morphology at  $T=16.2\text{ s}$

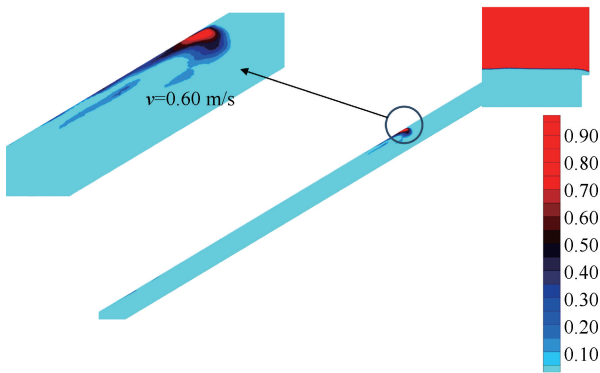


图 11  $T=19.2\text{ s}$  气团形态变化  
Fig. 11 Air mass morphological variation at  $T=19.2\text{ s}$

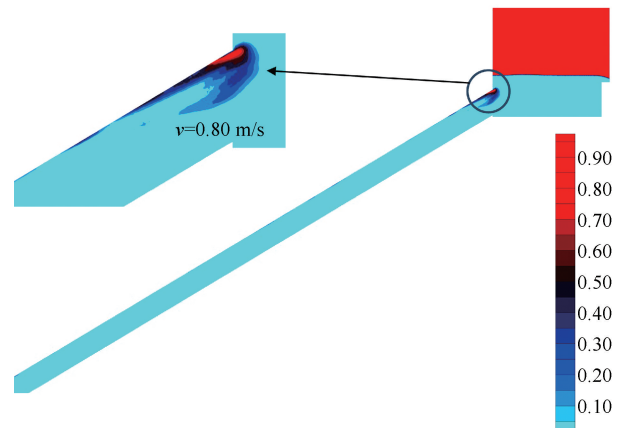


图 12  $T=19.5\text{ s}$  气团形态变化  
Fig. 12 Air mass morphological variation at  $T=19.5\text{ s}$

通常多相流的流动受到管道直径、倾斜度、不同流体的体积分数、流量、表面张力等参数的影响, 会表现出不同的流型, 通常出现分层流、波状流、段塞流等型态。流型图是前人基于大量实验数据和理论研究综合绘制而成的可用于判别气液二相流流型的方法。通过搜集相关文献, 本研究的长输管道模型直径等几何参数处于 Scott 和 Mandhane 流型图的适用范围内<sup>[36]</sup>, 所以根据气团和水流的模拟结果, 采用上述两种流型图分析水平管道内的水气二相流型, 以验证模拟结果的合理性。选取  $T=3\text{ s}$  时刻的段塞流参数进行流型分析, 如图 13 所示。两种流型图的判别结果

均为段塞流, 与模拟结果一致, 在一定程度上验证了气团迁移模拟结果的正确性。

## 5 结果讨论

目前, 关于水流冲击滞留气团的研究中, 多偏向于使用极值压力对模型结果的准确性进行验证<sup>[37-38]</sup>, 但是对于长输管道滞留气团问题, 除了考虑压力外, 气团在水流作用下发生的迁移、破碎、聚并等一系列变化同样需要进行准确模拟。通过已有研究可知, VOF 模型已经被证明可以用于模拟水流冲击滞留

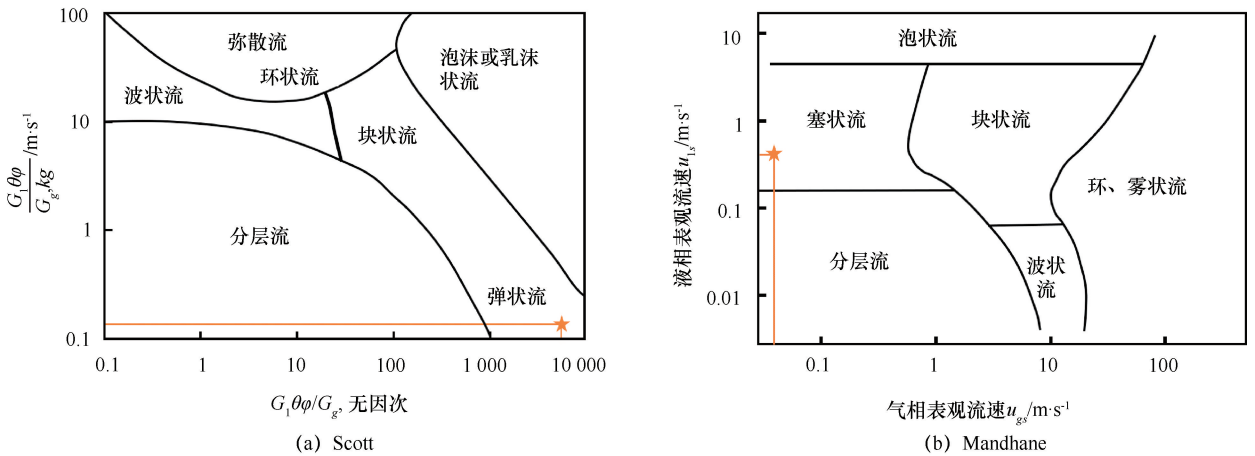


图 13 流型图判别结果  
Fig. 13 Flow pattern classification results

气团的极值压力模拟，由 3.1 节的对比分析可知，CLSVOF、CFD-PBM 与 VOF 模型在模拟水流冲击气团的极值压力和极值压力出现时刻上差别较小，三种模型的主要差别在于对气团动态特性的模拟分析方面。VOF 模型和 CLSVOF 模型对于气团形变过程的模拟结果比较接近，但是 CLSVOF 模型吸收了 Level Set 方法在计算相界面曲率、法向量方面的优势，在反映水气界面上的细小结构和液滴的形成与破裂方面表现更好，同时避免了 VOF 模型中的阶跃现象，这与王晓升<sup>[17]</sup>在对井喷现象模拟时的观点一致，所以 CLSVOF 比 VOF 更适用于长输管道气团迁移特性研究，针对长距离输水管道滞留气团迁移过程的模拟结果，通过流型图也在一定程度上证明了 CLSVOF 的有效性。CFD-PBM 模型在反映气团破碎和聚并方面和另外两种模型有所差距，PBM 模型更适合模拟分散相微粒的分布，在掺气模拟方面应该更有优势。

通过流型图对段塞流进行了判别，仅属于定性的验证工作，对于长距离有压输水管道滞留气团的形态演变及迁移模拟的准确性验证以及进一步的优化完善，还有待相关原型观测或物理模型试验的开展。

## 6 结论

本研究首先针对水流冲击管道盲端滞留气团的瞬变流问题，对比分析了 VOF、CLSVOF、CFD-PBM 三种模型在水气二相流模拟方面的异同，讨论了各水气二相流数学模型的适用条件，在此基础上针对长输管道滞留气团迁移问题，开展了数值模拟。研究表明如下。

(1) 水流冲击管道盲端滞留气团的瞬变流模拟表明，三种水气二相流模型均可实现对管道瞬态压力的

模拟，所得的瞬态压力极值差别不大。说明在初始气团体积、位置、初始水力条件相同的情况下，气团在水流冲击下的破碎、聚并过程对于瞬变压力极值的影响不大。

(2) 三种模型在模拟气团的动态过程方面存在差异，CLSVOF 对于气团迁移、破碎、聚并过程的模拟效果更为精细和准确，采用 CLSVOF 模型开展长距离输水工程滞留气团的迁移研究更为合适。

(3) 采用 CLSVOF 模型对有压管道滞留气团迁移过程的模拟结果表明，气团迁移过程的流型为分层流、段塞流共存，以单个小气团的形式向管道下游输移，并通过流型图对模拟结果的合理性进行初步验证。

## 参考文献 (References):

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.  
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[2] 杨开林. 输水管线空气阀进排气孔径的合理选择 [J]. 水利学报, 2024, 55(5): 537-548.  
YANG Kailin. Reasonable selection of intake and exhaust diameters for air valve in water pipelines [J]. Shuili Xuebao, 2024, 55(5): 537-548.

[3] 罗爽, 陈奇, 刘霞, 等. 基于 TFM 模型的滞留气团数值模拟方法及 PIV 试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(1): 50-55.  
LUO S, CHEN Q, LIU X, et al. Numerical simulation investigation of entrapped air pocket based on TFM model and PIV test research [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,

- 2023, 41(1): 50-55.
- [4] 黄浩成, 陈奇, 蒋劲, 等. 管道滞留气团运动特性 PIV 实验与数值模拟[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 72-80.  
HUANG H C, CHEN Q, JIANG J, et al. PIV experiment and numerical simulations of behaviors of residual air mass in water pipelines[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 72-80.
- [5] 李小芹, 孟利平, 李浦, 等. 滞留气体对水电站引水系统运行稳定性的影响[J]. 水力发电, 2017, 43(6): 89-92.  
LI X Q, MENG L P, LI P, et al. Influence of residual gas on operating stability of water diversion system for hydropower station [J]. Water Power, 2017, 43(6): 89-92.
- [6] 王勇, 熊伟, 丁志瑶, 等. 基于 CFD 有压管道水锤特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1156-1162.  
WANG Yong, XIONG Wei, DING Zhiyao, et al. Analysis of water hammer characteristics in pressurized pipeline based on CFD [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1156-1162.
- [7] 刘德有, 周领, 索丽生, 等. 水流冲击管道内滞留气团现象的 VOF 模型仿真分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 390-394.  
LIU D Y, ZHOU L, SUO L S, et al. Simulation and analysis of the rapid filling in pipeline containing trapped air mass with VOF models [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(3): 390-394.
- [8] ZHOU L, LIU D Y, OU C Q. Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with VOF model [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011, 5(1): 127-140.
- [9] MARTINS N M C, DELGADO J N, RAMOS H M, et al. Maximum transient pressures in a rapidly filling pipeline with entrapped air using a CFD model [J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, 55(4): 506-519.
- [10] ZHOU L, WANG H, KARNEY B, et al. Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(8): 04018045.
- [11] 罗皓天, 刘莉, 袁俊杰, 等. 气泡在液态铅铋金属中的运动特性及曳力系数模型研究[J]. 核技术, 2024, 47(6): 131-142.  
LUO Haotian, LIU Li, YUAN Junjie, et al. Motion characteristics and drag coefficient of bubbles in liquid lead-bismuth eutectic [J]. NUCLEAR TECHNIQUES, 2024, 47(6): 131-142.
- [12] LI Y L, YU C H. Research on dam-break flow induced front wave impacting a vertical wall based on the CLSVOF and level set methods [J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 442-462.
- [13] SUSSMAN M, SMERKA P, OSHER S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(1): 146-159.
- [14] SUSSMAN M, PUCKETT E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 301-337.
- [15] WANG Q B, HU J Y, SONG M M, et al. Study on the transient flow characteristics of a hump water pipeline based on the random distribution of bubbles [J]. Water, 2023, 15(21): 3831.
- [16] ZHU J H, DUAN X Y, WU G H, et al. Numerical investigations of hydraulic transient and thermodynamic characteristics of water flow impacting air pocket inside pipe based on CLSVOF [J]. Journal of Hydroinformatics, 2022, 24(4): 856-874.
- [17] 王晓升. 地下调蓄隧道系统滞留气团释放过程的井喷特性研究 [D]. 上海: 上海大学, 2020.  
WANG X S. The Study on the Geysers Induced by the Release of Trapped Air in a Storage Tunnel System [D]. Shanghai: Shanghai University, 2020.
- [18] 王乐, 苏军伟, 郑西朋, 等. 低速下不同入口位置塔式曝气池气液两相数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 164-172.  
WANG L, SU J W, ZHENG X P, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow at various inlet positions in bubble column at low gas velocity [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 164-172.
- [19] ZHANG H H, SAYYAR A, WANG Y L, et al. Generality of the CFD-PBM coupled model for bubble column simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 219: 115514.
- [20] WANG T, XIA Z H, CHEN C X. Coupled CFD-PBM simulation of bubble size distribution in a 2D gas-solid bubbling fluidized bed with a bubble coalescence and breakup model [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 202: 208-221.
- [21] HULBERT H M, KATZ S. Some problems in particle technology [J]. Chemical Engineering Science, 1964, 19(8): 555-574.
- [22] ZHANG X B, ZHENG R Q, LUO Z H. CFD-PBM simulation of bubble columns; Effect of parameters in the class method for solving PBEs [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 226: 115853.
- [23] YANG N, XIAO Q. A mesoscale approach for population balance modeling of bubble size distribution in bubble column reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 170: 241-250.
- [24] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [25] 汪怡然, 俞晓东, 刘甲春, 等. 深隧系统多工况入流冲击滞留气团研究 [J]. 西南交通大学学报, 2024: 59(3): 685-690.  
WANG Yiran, YU Xiaodong, LIU Jiachun, et al. Multiple-mode transient inflow impact with entrapped air pocket in deep storage tunnel systems [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(3): 685-690.
- [26] 周天忠, 钟有信, 林治宇, 等. 复杂地铁站多工况洪水入侵规律与人员疏散路径分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 27-35.  
ZHOU Tianzhong, ZHOUG Youxin, LIN Zhiyu, et al. Analysis of flood intrusion law and personnel evacuation route of complex metro station under multi-conditions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 27-35.
- [27] MULBAH C, KANG C, MAO N, et al. A review of VOF methods for simulating bubble dynamics [J]. Progress in Nuclear Energy, 2022, 154: 104478.
- [28] 刘东喜, 庄宿国, 王晋, 等. 基于 CLSVOF 方法的两层液体晃荡

- 数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 116-121.
- LIU D X, ZHUANG S G, WANG J, et al. Numerical simulation of two-layer liquid sloshing using CLSVOF method [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(8): 116-121.
- [29] 戴剑锋, 樊学萍, 蒙波, 等. 单液滴撞击倾斜液膜飞溅过程的耦合 Level Set-VOF 模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 415-420.
- DAI J F, FAN X P, MENG B, et al. A coupled level-set and volume-of-fluid simulation for splashing of single droplet impact on an inclined liquid film[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(9): 415-420.
- [30] 张春超, 潘艳秋, 杜宇杰, 等. 喷雾冷却中液滴撞击带气泡液膜的数值模拟[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1735-1741.
- ZHANG C C, PAN Y Q, DU Y J, et al. Numerical simulation of droplet impacting liquid film with bubbles in spray cooling [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 1735-1741.
- [31] 张文龙, 侯燕, 靳海波, 等. 加温加压下 CFD-PBM 耦合模型空气-水两相流数值模拟研究[J]. 化工学报, 2021, 72(9): 4594-4606.
- ZHANG W L, HOU Y, JIN H B, et al. Numerical simulation of air-water two-phase flow under elevated pressures and temperatures using CFD-PBM coupled model[J]. CIESC Journal, 2021, 72(9): 4594-4606.
- [32] LU C X, QI N N, ZHANG K, et al. Experiment and CFD simulation on gas holdup characteristics in an internal loop reactor with external liquid circulation [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2009, 7(1): 1-22.
- [33] 高一博, 耿琳琳, 王振, 等. 基于欧拉-欧拉方法的气液两相流数值模型发展综述[J]. 力学与实践, 2022, 44(5): 1021-1036.
- GAO Yibo, GENG Linlin, WANG Zhen, et al. A review of numerical models development for gas-liquid two-phase flow based on eulerian-eulerian method. [J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(5): 1021-1036.
- [34] 赵道利, 邓晓飞, 孙维鹏, 等. 导水叶栅对冲击式水轮机喷射机构流动特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1081-1087.
- ZHAO Daoli, DENG Xiaofei, SUN Weipeng, et al. Influence of guide vane on flow characteristics of Pelton turbine injector [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1081-1087.
- [35] 马佳杰, 周领, 刘德有, 等. 管内水流冲击滞留气团的 CFD 模拟方法验证[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 110-113.
- MA J J, ZHOU L, LIU D Y, et al. Verification of CFD simulation on the filling of pipeline with standing air mass[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 110-113.
- [36] 梁福顺. 水平管内气液两相流流型识别与含气率的实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LIANG F S. Experimental Study on Identification of Gas-Liquid Two-Phase Flow Pattern and Void Fraction in Horizontal Pipe [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [37] 卢坤铭, 周领, 刘静. 水流冲击多段滞留气团的三维数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(3): 264-269.
- LU K M, ZHOU L, LIU J. Three-dimensional numerical simulation of transient pipe flow with multiple entrapped air pockets[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(3): 264-269.
- [38] 卢坤铭, 周领, 曹波, 等. 起伏管道内水流冲击滞留气团的三维动态特性模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 384-389.
- LU Kunming, ZHOU Ling, CAO Bo, et al. Three-dimensional simulations on dynamic characteristics of flow impacting entrapped air pocket in undulating pipeline[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020, 38(4): 384-389.

(责任编辑 王璐)