

# 横向水流作用下圆孔向上通气气泡流场 数值模拟

方明明<sup>1</sup>, 李杰<sup>1,2</sup>

(1.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院工程力学系, 上海, 200240;

2. 水动力学教育部重点实验室, 上海, 200240)

**摘要:** 横向水流作用下圆孔向上通气气泡流场广泛出现在船舶、化工、水中兵器等领域, 在此过程中表面张力、重力、气体压缩性等作用均不能忽略, 其流场往往呈现出多相、非定常的复杂流动特性。针对此问题开展的研究主要集中在通气泡形状演化、流场涡结构等方面。本文基于有限体积方法, 结合 VOF 界面捕捉方法与大涡模拟 (LES) 方法, 采用商用工程软件 (FLUENT), 建立了横向水流作用下圆孔向上通气气泡多相非定常流场的数值模拟方法, 其结果与相关文献实验结果接近。

研究表明: 受到横向水流的影响, 通出气体形成细长型通气泡, 随着长度增长、断裂的往复进行, 形成串型气泡流场。圆孔通气的通气泡前端表面呈现波动特征。通气泡的周期性断裂引起壁面经历高压脉冲。

**关键词:** 横流通气; 数值模拟

## 1 引言

横流作用下通气指的是气体以一定角度 (一般是  $90^\circ$ ) 射入某种流体, 呈现出多相、非定常的复杂流场状态, 在船舶海洋、化学化工、水中兵器等领域有着较多体现。根据两种流体的性质, 可以粗略地将流动分成两者同相的单相流和两者不同相的多相流。横向水流作用下圆孔向上通气气泡流场的研究来源于环境科学中的烟囱排烟的研究, 这是一种单相流。对此流动的研究主要集中在通气泡形状演化, 流场涡结构等方面。Marshall<sup>[1]</sup>研究了气泡形态变化, 其中单个泡是通过非球形界面形成, 气泡与孔口连接, 随后颈部断裂导致气泡分离, 这种现象依赖于气体动量, 表面张力和流体压力。Zlatko 等<sup>[2]</sup>实验结合数值模拟, 分析总结通气泡轨迹与偏转角的拟合公式。关于流场涡结构的研究, Margason<sup>[3]</sup>早期认为存在 3 种涡, 包括反旋涡对, 马蹄涡和尾迹涡, 在此基础上, Fric<sup>[4]</sup>得出存在第四种涡, 即射流剪切层涡, 这方面的研究尚未定论。

采用雷诺平均 NS 方程来研究横流作用下圆孔通气流场的文献占到大多数, 使用最广

泛的是  $k-\varepsilon$  模型,肖洋<sup>[5]</sup>验证了  $k-\varepsilon$  模型对横流作用下多孔射流数值模拟的可靠性和有效性。也有学者采用其他的湍流模型,比如大涡模拟,直接数值模拟等方法验证了流场特征。李国能<sup>[6]</sup>认为,大涡模拟在捕捉流场细节上优于  $k-\varepsilon$  湍流模型。吴钦<sup>[7]</sup>认为滤波器湍流模型可以更精细地描述与时间相关的气液多相复杂流动现象,提高对非定常流动计算过程的预测精度。

## 2 数学模型及数值计算方法

本研究的通气气泡流场呈现多相、非定常的特征,在建模及计算过程中需要考虑气体压缩性、黏性、重力等的影响。

### 2.1 数学模型

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_i + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + S_h \quad (3)$$

体积分数方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

气体状态方程:

$$p = \rho RT \quad (5)$$

多相流模型:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \\ \mu &= \alpha \mu_g + (1 - \alpha) \mu_l \end{aligned} \quad (6)$$

大涡模拟亚格子模型:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (7)$$

上述方程中,  $\rho$  为流场流体密度,  $u_i$  为流体速度,  $\alpha$  为气体体积分数,  $\kappa$  为气液分界面曲率,  $k$  为热传导系数,  $p$  为压力,  $\sigma_{ij}$  为应力张量,  $\tau_{ij}$  为亚格子应力张量,  $S_h$  为源项。

## 2.2 数值计算方法

使用 SIMPLE 算法来耦合压力速度, 二阶迎风格式离散密度和能量项, 压力项使用 PRESTO! 格式。

## 2.3 计算域、网格及边界条件

参照 ZlatkoRek<sup>[2]</sup> 的实验, 本文建立带有圆柱的长方体计算域(图 1)。计算域的 X, Y, Z 三个方向几何尺寸分别为 67.5D, 24D, 25D, 通气孔中心距离水流入口 5D, 通气孔长度为 2D, 其中 D=1.6mm 为通气圆孔直径。如图 2, 计算域采用六面体结构化网格, 网格总数为 520000, 壁面附近区域的网格加密。

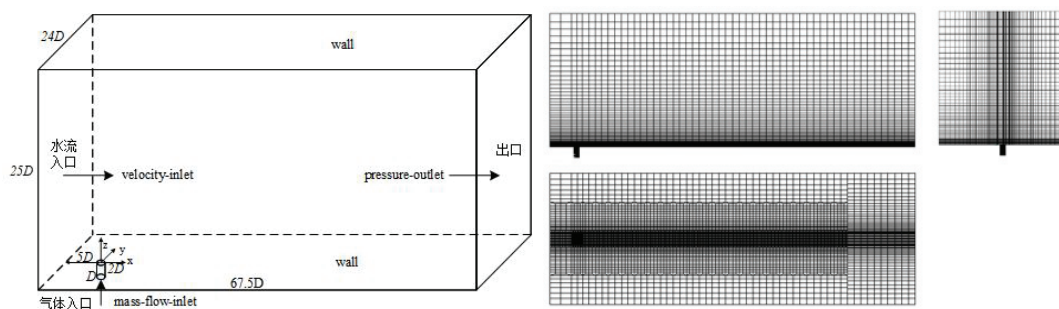


图 1 计算域图 2 网格三视图

横向水流沿 X 方向, 左侧为速度入口, 右侧为压力出口, 沿与横流垂直的 Z 方向向上通气, 其余边界均为壁面。迭代步长为  $10^{-4}$  s。计算工况的环境压力为 1atm, 重力加速度  $g=9.81\text{m/s}^2$ , 水流密度  $\rho_l=998.2\text{kg/m}^3$ , 黏度  $\mu_l=1.008\times 10^{-3}\text{kg/ms}$ , 气体为理想气体,  $\mu_g=1.789\times 10^{-5}\text{kg/ms}$ , 表面张力系数  $\sigma=0.072\text{N/m}$ 。横向水流速度入口边界  $v_l=0.723\text{m/s}$ , 气体质量流量入口  $Q_g=3\times 10^{-5}\text{kg/s}$ 。

## 3 计算结果及讨论

### 3.1 气泡外形演化

受到横向水流的影响, 通出气体形成细长型通气泡, 随着长度增长、断裂的往复进行, 形成串型气泡流场。任意选取一个近似的周期,  $t=1.050\text{—}1.080\text{s}$ , 气液界面变化如图 4 所示。可以看出, 从  $t=1.050\text{s}$  发生断裂开始, 通气泡沿 X 方向逐渐变细小。继续通气, 通气

泡下游明显增大，同时也可以看到，通气泡断裂分离出来的气泡因表面张力而收缩，表面趋于光滑。 $t=1.075s$  时发生明显的颈缩现象，水流在颈缩处向气泡挤压，使其大约在通气泡长度的 60% 处发生断裂分离。圆孔通气的通气泡前端表面呈现波动特征。

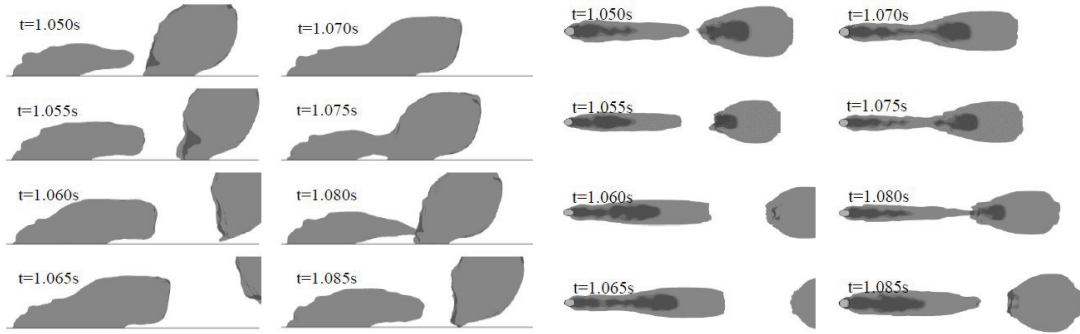


图 4 一个周期的气液界面变化

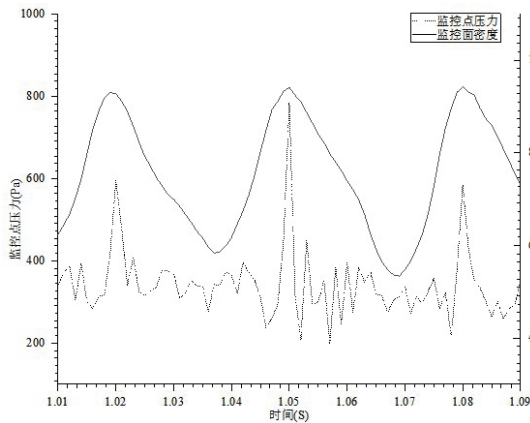


图 5 监控点压力与监控面密度变化

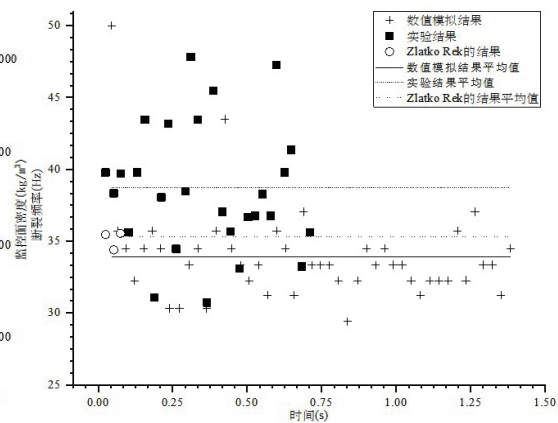


图 6 气泡断裂频率

在通气泡断裂的平均位置  $x=10D$  处设置  $14D \times 14D$  的密度监控面，并在壁面  $(10D, 0, 0)$  处设置压力监控点，图 5 显示监控点压力与监控面平均密度随时间变化曲线。通过  $t=1.05s$ ， $t=1.08s$  两个时刻可以发现压力，密度，气液界面变化的特征是相对应的，通气泡的周期性断裂引起壁面经历高压脉冲。高压点之间的壁面压力呈现不规则小幅振荡。

### 3.2 气泡位置

参考 ZlatkoRek<sup>[2]</sup>用来确定气泡位置的方法，用一个矩形框将气泡包围，矩形框的中心坐标  $(x/D, y/D)$  定义成气泡位置坐标。

将其实验结果与本文数值模拟结果进行对比，选取  $t=1.070s$  时的气液界面图像，如图 7 所示。横向水流作用下圆孔向上通气的流场是一种复杂的非定常流动，不同周期内气

泡的位置和形状存在差异，因此将气泡位置取平均值，如表 1 所示。除了气泡 2 误差超过 10%，其它气泡位置坐标在实验值附近轻微波动。

从气泡分布及整体形态来看，数值模拟能够反映圆孔通气流场主要特征。但是数值模拟结果气泡表面比实验更加光滑，气泡 1 在 X 方向偏短，原因可能是局部网格还不够精细。

表 1 不同时刻气泡坐标 ( $x/D, y/D$ )

项目	通气泡	气泡 1	气泡 2
平均值	( 8.34,2.30 )	( 25.63,5.55 )	( 40.38,10.31 )
实验结果	( 8.9,2.5 )	( 27.8,5.6 )	( 42.6,9.2 )
误差 (%)	( 6.29,8.00 )	( 7.80,8.93 )	( 5.21,12.06 )

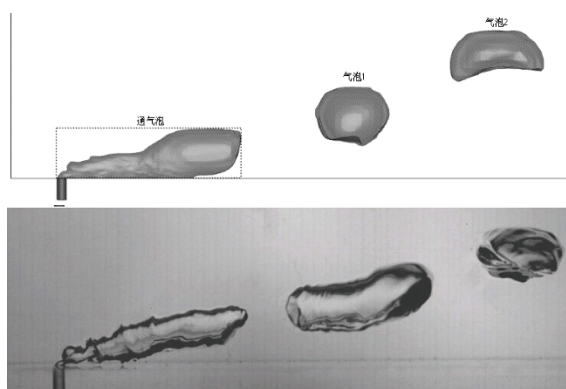


图 7 (上图) 气液界面模拟结果 (下图) 实验结果

### 3.3 断裂频率

在一定速度的横向水流作用下，通气泡会发生偏转，拉长，断裂分离等周期行为，断裂频率由通气泡的两个相邻断裂的时间间隔计算得到。

如图 6，绘制断裂频率的实验结果，参考文献 Zlatko<sup>[2]</sup>的模拟结果以及本文数值模拟结果。表 2 中实验的断裂频率平均值为 38.7Hz，本文得到的平均值为 33.9Hz，计算结果与实验结果均有一定的散布，体现出气泡发展演化、断裂分离的不规则性。

表 2 实验与模拟对比

	平均值 (Hz)	方差
实验结果	38.7	18.4
Zlatko Rek 的结果 (误差)	35.3(8.8%)	0.4
本文模拟结果 (误差)	33.9(12.4%)	10.9

## 4 结论

参照 Zlatko<sup>[2]</sup>实验, 基于有限体积方法, 结合 VOF 界面捕捉方法与大涡模拟 (LES) 方法, 建立了横向水流作用下圆孔向上通气多相非定常流场的数值模拟方法, 气泡位置, 断裂频率的数值模拟结果与实验接近。

给定的实验条件下, 受横向水流的影响, 通出气体形成细长型通气泡, 随着长度增长、断裂的往复进行, 形成串型气泡流场。通气泡断裂时, 水流在颈缩处向气泡挤压, 使其大约在通气泡长度的 60% 处发生断裂分离。周期性断裂引起壁面经历高压脉冲。圆孔通气的通气泡前端表面呈现波动特征。

接下来将进一步定量分析通气泡形态及气泡演化过程, 研究不同参数下流场规律。

## 参考文献

- 1 Marshall, Stephen H. Air bubble formation from an orifice with liquid cross-flow [D]. Sydney: University of Sydney, 1992.
- 2 Zlatko R., Jurij G., Mounir B., Claude D. Numerical simulation of gas jet in liquid cross flow with high mean jet to cross flow velocity ratio [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 172: 667-676.
- 3 Margason, R. J., Fifty Years of Jet in Crossflow Research. Computational and Experimental Assessment of Jets in Crossflow. 1993. Agard-Cp-534: 1-41.
- 4 Fric T F, Roshko A. Vortical structure in the wake of a transverse jet [J]. Journal of Fluid Mechanics. 1994. 279: 1-47.
- 5 肖洋, 梁嘉斌, 李志伟. 射流孔间距对横流中两孔射流稀释特性的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 20-25.
- 6 李国能, 周昊, 杨华. 横流中湍流射流的数值研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 88-91.
- 7 吴钦, 王国玉, 付细能, 等. 绕平板气液两相流数值计算方法 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5): 475-500.

## **Numerical Simulation of upwards ventilation flow field from a circular orifice with liquid cross flow**

FANG Ming-ming<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

1(Department of Engineering Mechanics, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240)

2(Key Laboratory of Hydrodynamics, Ministry of Education, Shanghai, 200240)

**Abstract:** The upwards ventilation flow field from a circular orifice with liquid cross flow is widely used in ships, chemical industry, underwater weapons and other fields. In this process, surface tension, gravity, gas compressibility and other effects cannot be ignored, and the flow field often presents multiphase, unsteady and complex flow characteristics. The research on this issue mainly focuses on the shape of the bubble and vortex structure. Based on the finite volume method, combined with the VOF interface capture method and the large eddy simulation (LES) method, the commercial engineering software (FLUENT) is used to establish a numerical simulation method for the multi-phase unsteady flow field. The results are in good agreement with the experimental results of related literatures. The results show that, with the influence of the cross flow, the outgoing gas forms a slender bubble, and as the length increases and the fracture reciprocates, a string-shaped bubble flow field is formed. The front end surface of the bubble exhibits a wave characteristic. The periodic breakage of the jet bubble causes the wall to experience high pressure pulses.

**Key words:** Cross-flow ventilation; Numerical simulation