

# 横向来流内单孔气泡形成的理论与实验研究

张珍, 叶秉晟, 黄荐, 徐畅, 王一伟\*, 黄晨光

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190;

中国科学院大学工程科学学院, 北京, 100049; \*Email: wangyw@imech.ac.cn)

**摘要:** 水下气泡的运动是水下航行器减阻和化工领域中的基础问题。本研究针对横向来流条件下气泡形成的现象进行了研究, 主要包括循环水槽实验和理论模型的建立与求解。首先用开有通气孔的平板模型在循环水槽中进行实验, 并配合高速摄像设备记录气泡各时刻的形态。然后依据力平衡、运动学方程和量纲分析建立了气泡膨胀阶段和分离阶段的理论模型, 利用四阶 Runge-Kutta 算法并结合初始条件进行数值求解, 得到气泡在各个时刻的质心位置、倾斜角度和气泡尺寸大小。最后将数值计算结果与实验结果进行对比, 结果表明两者具有良好的一致性, 均方根误差为 5.38%, 进而证实了理论模型的可靠性。

**关键词:** 两相流动; 气泡形成; 数值求解; 循环水槽

## 1 引言

在力学机理研究方面, 大量学者长期在全船尺度的层面探索气层减阻问题, 而很少涉足小至气泡尺度层面的研究, 因此小尺度范围内的力学机理研究还很匮乏。向开有微气孔板通入气体的实验发现, 随着通气量的增加, 平板上将经历微气泡状态、过度状态、气层状态三个阶段<sup>[1]</sup>。气泡融合形成气层转变过程的物理机制与相似律研究, 是该方向未来工作的重点<sup>[2]</sup>。理论方面, 假定气泡大体为圆球, 运用力学原理建立了物理模型<sup>[3]</sup>。实验方面, 可以在循环水槽中进行实验来研究水下气泡的形成<sup>[4]</sup>。对于准静态的气泡生长过程的分析, 结果较为吻合<sup>[5]</sup>, 而在横向来流条件下对单个通气孔喷出气泡的生长过程的研究还存在一定缺陷<sup>[6-7]</sup>。

Yoshinori<sup>[8]</sup>在大通气量的情况下忽略了惯性力和浮力, 对单孔气泡喷出现象进行简化, 并进行数值求解, 与实验结果的误差在 $\pm 15\%$ 之间。应用理论方法和循环水槽实验研究了平板气泡喷出现象, 基于力平衡、运动方程和量纲分析建立了理论模型, 并进行数值求解得到气泡在各个时刻的数值解并与循环水槽实验中的结果进行比对, 结果表明理论计算结果与实验测量结果具有较好的一致性。

## 2 循环水槽实验

为了探究横向来流对气泡生长的影响,本研究用开有通气孔的平板模型在循环水槽中进行了实验,实验装置的连接如图 1 所示,按照平板、过滤阀、流量计、阻力管、控制阀、气瓶的顺序,用相应直径的供气管和快速接头连接。其中 $1\text{m}\times 0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$ 的水槽中的流速均匀,速度 $U_1$ 可达到的范围为 $0.01\sim 0.3\text{m/s}$ ,湍流度为 $0.5\%$ ,通气装置置于 $0.40\text{m}\times 0.27\text{m}$ 的金属平板上,气流量 $Q$ 范围为 $80\sim 500\text{ml/min}$ 。实验中主动控制来流速度,并调整流量阀使得流量计示数达到指定的数值,在循环水槽外配合每秒 10000 帧拍摄速度的高速摄像设备记录气泡各时刻的形态,针对不同来流速度及通气流速的工况进行了共计 64 组实验。

气流量为 $100\text{mL/min}$ ,横向来流速度为 $0.1\text{m/s}$ 的单个周期的实验结果如图 2 所示, $x$ 方向为顺横向来流的方向, $y$ 方向为气泡竖直上升的方向,我们将上个气泡脱落与下一个气泡脱落之间的时间间隔记作气泡形成的周期 $T$ ,气泡形成颈部以前的阶段为膨胀阶段,之后为分离阶段。

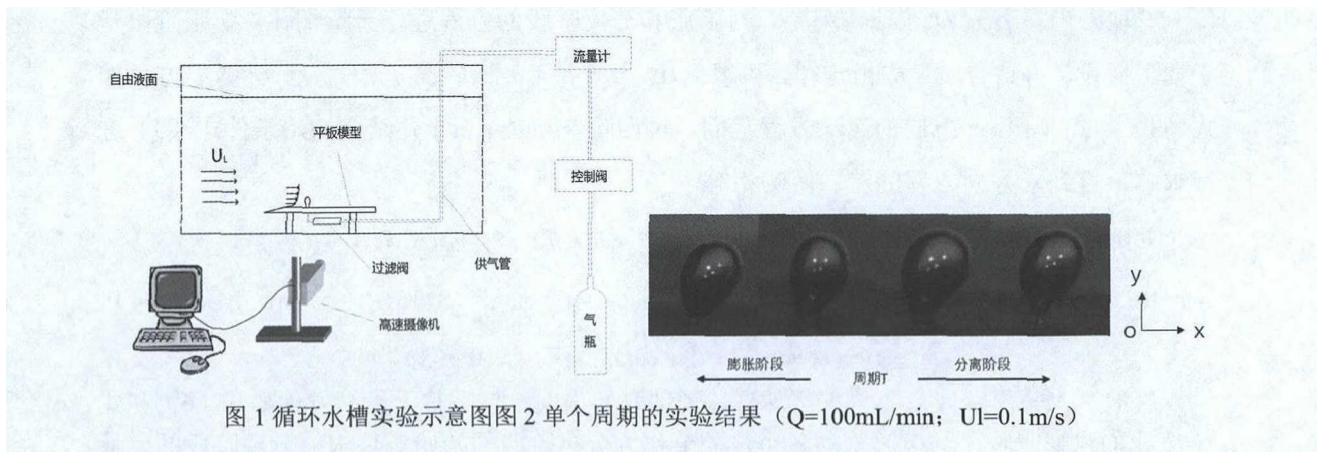


图 1 循环水槽实验示意图图 2 单个周期的实验结果 ( $Q=100\text{mL/min}$ ;  $U_1=0.1\text{m/s}$ )

## 3 理论模型

横向来流中气泡形成的动力学机制是复杂的,因为需要考虑速度梯度、倾斜角度和气泡间相互作用以及气液之间的相互作用,气泡在形成过程中会受到浮力( $F_B$ )、表面张力( $F_\sigma$ )、通气动量通量力( $F_M$ )、惯性力( $F_I$ )以及黏性阻力( $F_D$ )的作用。在球形泡的假设下,我们给出了气泡在水平和竖直方向所满足的平衡方程及运动学方程。

$$F_{Dx} = F_{\sigma x} + F_{Ix} \quad (1)$$

$$F_B + F_M = F_{\sigma y} + F_{Dy} + F_{Iy} \quad (2)$$

气泡所受力的表达式如下:

$$F_B = \pi g D_B^3 (\rho_L - \rho_g) / 6, F_M = 4 \rho_g Q^2 / \pi D_N^2$$

$$F_{\sigma x} = \pi \sigma D_N \phi \cos \phi / ((\pi/2)^2 - \phi^2) F_{\sigma y} = \pi \sigma D_N \sin \phi / \phi$$

$$F_{Dx} = C_D \rho_L \pi D_B^2 (u_L - dx/dt)^2 / 8, F_{Dy} = C_D \rho_L \pi D_B^2 (dy/dt)^2 / 8$$

$$F_x = C_{Mx} \rho_L (Q(u_L - dx/dt) - Q t d^2 x / dt^2), F_y = C_{My} \rho_L (Q dy/dt + Q t d^2 y / dt^2)$$

其中  $D_B$  为气泡的生长直径;  $D_N$  为孔口直径;  $u_L$  为横向来流速度;  $Q$  为气流量;  $\rho_L, \rho_g$  分别为液相和气相的密度;  $\mu_L, \mu_g$  分别为液相和气相的黏度;  $g$  为重力加速度;  $\sigma$  为表面张力;  $x, y, \phi, t$  分别表示气泡质心的位置、与竖直方向的夹角以到达该位置所用的时间; 孔口速度  $u_g = 4Q / (\pi D_N^2)$ ;  $C_{Mx}, C_{My}$  为附加质量系数, 分别取 11/16 和 1/2<sup>[10]</sup>。

$$\text{参数的无量纲化: } \bar{D}_B = D_B / D_N, \bar{u}_g = u_g / u_L, \bar{\rho} = \rho_g / \rho_L, \bar{\mu}_g = \mu_g / \mu_L$$

$$\bar{t} = t / (D_N / u_L), \text{Re} = \rho_L u_L D_N / \mu_L, \text{We} = \rho_L u_L^2 D_N / \sigma, \text{Fr} = \rho_L u_L^2 / ((\rho_L - \rho_g) g D_N)$$

选取参考量  $\rho_L u_L^2 D_N^2$  作为参考<sup>[9]</sup>, 对膨胀和分离阶段的方程进行无量纲化, 膨胀阶段基于球形假设, 再结合质量守恒定律, 可得到  $dy/dt = dD_B / 2 dt = Q_g / \pi D_B^2$ , 其无量纲方程如式 (3) 和式 (4)。x 方向的运动方程我们通过四阶 Runge-Kutta 并结合初始条件式 (5) 进行求解, 直到 y 方向方程的左右两侧相等。

$$\pi C_{Mx} \bar{u}_g d^2 \bar{x} / d\bar{t}^2 / 4 + \pi C_{Mx} \bar{u}_g (d\bar{x} / d\bar{t} - 1) / 4 = C_D \pi \bar{D}_B^2 (1 - d\bar{x} / d\bar{t})^2 / 8 - \pi \phi \cos \phi / \text{We} / ((\pi/2)^2 - \phi^2) \quad (3)$$

$$-\pi / 16 \bar{D}_B^2 C_{My} \bar{u}_g^3 + \pi / 16 \bar{D}_B^2 C_{My} \bar{u}_g^2 = \pi \bar{D}_B^3 / (6\text{Fr}) + \pi \bar{\rho} \bar{u}_g^2 / 4 - C_D \pi \bar{D}_B^2 \bar{u}_g^2 / 8 / 16 \bar{D}_B^4 - \pi \phi \sin \phi / \text{We} / \phi \quad (4)$$

$$t = 0: x = x' = x'' = 0; y = D_N, y' = y'' = 0 \quad (5)$$

气泡进入分离阶段后不再保持球形, 颈部开始出现拉伸, 其无量纲方程如式 (6) 和式 (7) 我们将膨胀阶段结束时刻的各个量的值作为分离阶段的初始条件求解分离阶段的无量纲方程, 当气泡的质心位置到孔口的距离  $S$  满足方程 (8)<sup>[8]</sup>, 数值求解结束。

$$\pi C_{Mx} \bar{u}_g d^2 \bar{x} / d\bar{t}^2 / 4 + \pi C_{Mx} \bar{u}_g (d\bar{x} / d\bar{t} - 1) / 4 = C_D \pi \bar{D}_B^2 (1 - d\bar{x} / d\bar{t})^2 / 8 - \pi \phi \cos \phi / \text{We} / ((\pi/2)^2 - \phi^2) \quad (6)$$

$$\pi C_{My} \bar{u}_g d^2 \bar{y} / d\bar{t}^2 / 4 + \pi C_{My} \bar{u}_g d\bar{y} / d\bar{t} / 4 = \pi \bar{D}_B^3 / (6\text{Fr}) + \pi \bar{\rho} \bar{u}_g^2 / 4 - C_D \pi \bar{D}_B^2 (d\bar{y} / d\bar{t})^2 / 4 - \pi \phi \sin \phi / \text{We} / \phi \quad (7)$$

$$S - D_B / 2 \geq D_N \quad (8)$$

## 4 结果分析

图 3 是不同气流量和横向来流速度下气泡的形成周期的变化情况。随着气流量的增大, 气泡形成的周期均呈现下降趋势, 而且随着流量的增大, 周期趋于稳定。将趋于稳定时刻

的气流量记作临界气流量，随着气流量的增大，模型求解结果和实验结果吻合度更高。

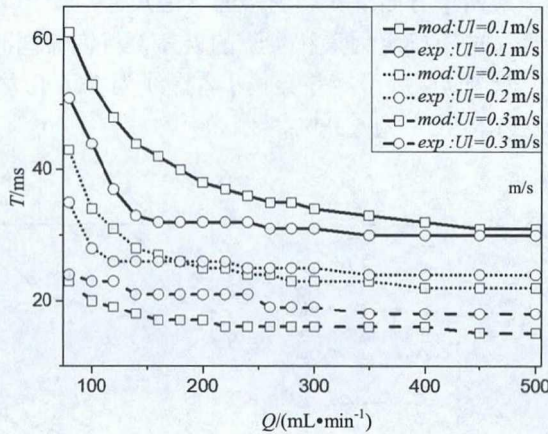


图3 单孔气泡形成周期的模型求解和实验结果对比

气泡的质心变化是气泡形成过程中的一个重要的参考量，气泡在不同时刻质心位置的变化如图4所示。图4(a)为顺来流方向的气泡质心变化，图4(b)为气泡在竖直方向的变化趋势，均显示了模型和实验具有良好的吻合性。其中图4(a)中五角星标注的点为气泡膨胀阶段结束的点，可看出随着来流速度的增大，加速了气泡的脱落进而加速了膨胀阶段的结束时刻。

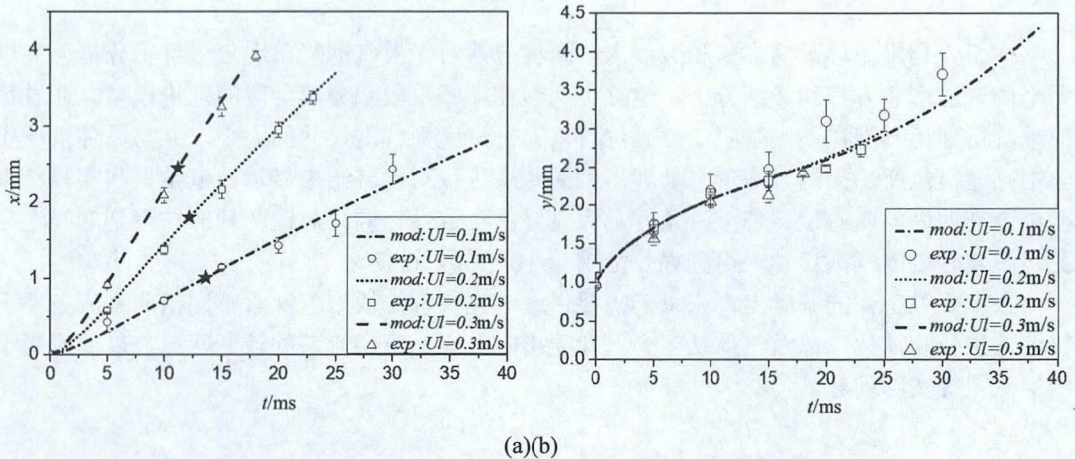


图4 气流量  $Q=200\text{mL}/\text{min}$  时气泡在一个周期内质心位置变化

图5显示了模型结果和实验结果中气泡轴倾斜角度变化的比较结果。结果显示随着横向来流速度的增大，气泡轴与竖直轴之间的夹角变大，与气泡水平质心位置随来流速度的

变化具有一致性。

在横向来流速度为 0.1m/s、0.2m/s 及 0.3m/s，气流量在 80~500ml/min 条件下，分别得到了气泡在实验和数值求解两个方面从孔口脱落的气泡尺寸，如图 6 所示，其中黑色实心点代表所有结果，由于模型的不确定因素和实验的误差，气泡脱离时刻气泡径的大小均匀分布在实线（1: 1 线）的两侧，两者至间差异较小，虚线为上下最大误差线，分别为+6.8%和-10.67%，均方根误差（RMSE）为 5.38%。

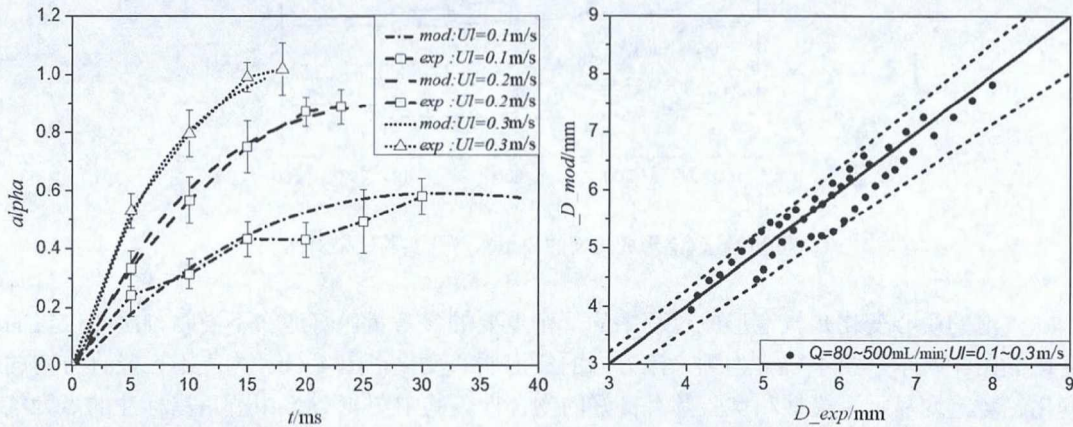


图 5 气流量  $Q=200\text{mL}/\text{min}$  时气泡上升的倾斜角图 6 模型求解和实验结果的比较

## 5 总结

本研究利用循环水槽实验和数值求解两种方法对平板气泡喷出现象进行了分析，通过力平衡、运动学方程和量纲分析，建立了气泡在膨胀阶段和分离阶段的理论模型。通过数值求解得到了气泡在不同时刻的质心位置，上升角度及气泡尺寸的大小，并与循环水槽实验中高速摄像所拍摄的气泡形态处理得到的结果进行对比。结果显示数值结果和实验结果在单个周期内的质心位置和上升角度具有良好的一致性，同时对比两种方法得到的气泡从孔口脱离时刻的气泡尺寸，得到误差范围在-10.67%~+6.87%。

在本研究工作的基础上，未来仍需要进一步完善理论模型，探索不同横向来流条件下气泡的生长和演化，以及气体从多个气孔喷出时气泡—气层流态的转变状况，以便应用于气层减阻等实际问题。

## 致谢

本研究由中国科学院战略性先导科技专项(B类)课题：新概念高速潜航器及深海采矿关键力学问题研究资助（课题编号：XDB06041200）。

## 参考文献

- 1 Elbing B R, Mäkiharju S, Wiggins A, et al. On the scaling of air layer drag reduction[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 717(2):484-513
- 2 AIAA. URANS Study of Air-Layer Drag Reduction in a High-Reynolds-Number Flat-Plate Turbulent Boundary Layer[J]. *Aiaa Journal*, 2010.
- 3 Nahra H K, Kamotani Y. Prediction of bubble diameter at detachment from a wall orifice in liquid cross-flow under reduced and normal gravity conditions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(58):55-69.
- 4 Loubière K, Castaignède V, Hébrard G, et al. Bubble formation at a flexible orifice with liquid cross-flow[J]. *Chemical Engineering & Processing*, 2004, 43(6):717-725.
- 5 Gerlach D, Biswas G, Durst F, et al. Quasi-static bubble formation on submerged orifices[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2005, 48(2):425-438.
- 6 Martín M, Montes F J, Galán M A. On the influence of the liquid physical properties on bubble volumes and generation times[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(16):5196-5203.
- 7 李彦鹏, 关卫省. 横向流中曝气气泡生成动力学及模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10):1751-1755.
- 8 Kawase Y, Ulbrecht J J. Formation of drops and bubbles in flowing liquids[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development*, 1981, 20(4).
- 9 Kim I, Kamotani Y, Ostrach S. Modeling bubble and drop formation in flowing liquids in microgravity[J]. *Aiche Journal*, 1994, 40(1):19-28.

### **Theoretical and experimental research on the single bubbles formation in transverse flow**

ZHANG Zhen, YE Bing-sheng, HUANG Jian, XU Chang, WANG Yi-wei, HUANG Chen-guang

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

\*Email: [wangyw@imech.ac.cn](mailto:wangyw@imech.ac.cn)

**Abstract:** Underwater bubble motion is a fundamental issue in the applications of underwater vehicle drag reduction and chemical industry. This study focuses on the phenomenon of bubble formation under lateral flow conditions, the establishment and solution of circulating sink

experiments and theoretical models included. Our experiments were carried out in a circulating water tank using a vented flat plate model, and the shape of the air bubbles at various times was recorded with a high-speed camera device. At the same time, the theoretical model of bubble expansion stage and detachment stage was established based on the force balance, kinematics equation and dimension analysis. Using fourth order Runge-Kutta algorithm with initial conditions, we can obtain the centroid position, inclination and the angle and size of the bubble at every moment. At last, compared the numerical solution results with experimental results, both of them have good consistency (RMSE=5.38%), and this study confirmed the reliability of the theoretical model.

**Key words:** Two-phase flow; Bubble formation; Numerical simulation; Circulation flume