

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.006

# 横向水流作用下气泡运动数值模拟

李永胜, 王治云, 杨 茉

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 由于气液两相体系中气泡的诸多流体力学行为不仅影响两相流的速度分布, 还可通过改变气液相界面等途径改变整个体系的传热传质效果, 对气液接触设备性能具有重要影响。课题组利用数值模拟对恒定水速下管道中喷射的气体进行分析, 追踪管道中气泡流的变化情况。气液两相流采用层流模型, 并运用 VOF 对气液两相界面进行追踪, 速度与压力的耦合求解采用 PISO 算法。计算结果表明: 气体在管道中成类似泡状流, 并受浮力作用逐步靠近上壁面形成连续的长气泡; 水流速度和气泡到达上壁面距离进口处的距离近似呈线性关系; 最大气泡粒径与进口水速负相关, 与进口流速正相关。研究结果可为相关气泡运动特性的进一步研究提供参考。

**关键词:** 管道; VOF 模型; 气液两相流; 气泡粒径; PISO 算法

中图分类号: O359.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2018)05-0029-05

## Numerical Simulation of Bubble Movement under Action of Transverse Flow

LI Yongsheng, WANG Zhiyun, YANG Mo

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093)

**Abstract:** Many hydrodynamic behaviors of bubbles in gas-liquid two-phase system not only affect the velocity distribution of two-phase flow, but also change the heat and mass transfer effects of the whole system by changing the gas-liquid interface, which has an important influence on the performance of gas-liquid contact equipment. Therefore, numerical simulation was used to analyze the injected gas in a pipe at constant water velocity, and the change of the bubble flow in the pipe after gas injection was tracked. The laminar flow model was adopted for the gas-liquid two-phase flow, VOF model was used to track the gas-liquid two-phase interface, and the PISO algorithm was used for the coupled solution of velocity and pressure. The calculation results show that the gas forms a bubble-like flow in the pipe and is gradually close to the upper wall due to the buoyancy to form continuous long bubbles. There is a linear relationship between the velocity of the water flow and the distance from the air bubble to the upper wall surface at the entrance. The maximum bubble size is negatively related to the inlet water speed and positively related to the inlet gas velocity. This study can provide reference for the further research on the relevant bubble motion characteristics.

**Keywords:** pipeline; VOF (volume of fluid) model; gas-liquid two phase flow; bubble particle size; PISO (pressure implicit split operator) algorithm

液体中气泡运动是现今流体力学研究的重要内容之一, 广泛存在于医药、生物、化工、舰艇、航空航天、热能与动力工程等领域。对气泡在液体中运动规律的研究具有重要的意义。例如水下发动机在作业时, 其直接排出的废弃气体在水中的运动状态是十分复杂的, 产生的气泡可能会出现碰撞、破碎和聚并。同样, 气泡

粒径变化情况也同样复杂。

考虑到气泡运动的复杂性以及计算机技术的发展, 国内外学者采用数值模拟对气泡运动进行研究, 并且应用了多种运动界面追踪的方法, 如 Level set 法<sup>[1-2]</sup>、Lattice-Boltzmann 法<sup>[3]</sup>、流体体积法 (volume of fluid, VOF)<sup>[4]</sup> 以及动网格法<sup>[5]</sup> 等。还有一些其他方

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51306121)。

第一作者简介: 李永胜(1991), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要研究方向为流动与传热的数值模拟。E-mail: lys\_come@163.com

法,譬如 Zaruba 等<sup>[6]</sup>使用高速摄影技术研究了矩形管道内气泡的运动,并且实现了气泡流中单个气泡的跟踪;王红一等<sup>[7]</sup>使用高速摄影机结合数字处理技术研究了气泡的面积、当量直径等,并提出了 2 种计算气泡粒径大小的计算方法。

其中 VOF 在界面追踪方法中以其求解简便、精度较高、追踪界面锐利性好和计算成本低等优点深受国内外学者欢迎,具有较好的应用前景。武搏等<sup>[8]</sup>采用 VOF 方法,对气液两相的交界面进行了追踪,证实其在水下气液两相流动研究的可行性。蒋炎坤等<sup>[9]</sup>基于 VOF 模型提出了一种计算气泡形心坐标、运动轨迹以及速度大小的方法,但是只考虑了单个气泡,而没有考虑多气泡运动的情况。Tsui 等<sup>[10]</sup>将 VOF 方法和 Level set 方法进行耦合,对静水中上升的气泡进行了三维数值模拟。

课题组基于 VOF 方法以及界面重构法 (piecewise linear interface construction, PLIC) 在水平直管中追踪了气泡在固定水流速度和气体速度下的运动状态,并通过自编后处理数据程序提取模拟结果数据,获得气泡运动中的粒径个数及其大小,分析其中气泡运动中的粒径变化,旨在为相关气泡运动特性研究提供参考。

### 1 模型和计算方法

气液两相流界面的运动和分布特性对气泡形态变化、流型以及分布都有影响,通过采用 VOF 方法来追踪气液两相界面的运动,可以精确地捕捉到气泡运动时两相交界面的形状变化。

#### 1.1 控制方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \tag{1}$$

式中: $\rho$  为按上式计算的体积加权平均密度; $\nabla$  为哈密顿算子; $\mathbf{v}$  为速度矢量。

2) 考虑表面张力的动量方程

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vof}}. \tag{2}$$

式中: $p$  为压强; $\mu$  为黏性系数; $\mathbf{F}_{\text{vof}}$  为表面张力源项; $\mathbf{g}$  为重力加速度。

3) 表面张力

VOF 模型中的表面张力模型是 Brackbill 等<sup>[11]</sup>提出的连续表面力模型 (continuum surface force, CSF)。在 VOF 模型中需要考虑表面张力就意味着在动力方程中增添源项。该模型将表面张力定为一种作用于相

界面区域网格单元内流体的体积力  $\mathbf{F}_{\text{vof}}$ , 并将其引入到动量方程式(2)中:

$$\mathbf{F}_{\text{vof}} = \sum_{\text{pairs } ij, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)}. \tag{3}$$

式中: $\sigma_{ij}$  为  $i, j$  相流体表面应力; $\alpha_i, \alpha_j$  分别为  $i, j$  相流体体积分数; $\rho_i, \rho_j$  分别为  $i, j$  相流体密度; $k_i, k_j$  分别为  $i, j$  相流体表面曲率。

#### 1.2 VOF 方法

VOF 方法是一种前端捕捉的界面追踪方法,由 Hirt 等<sup>[4]</sup>在 1981 年提出。VOF 方法中提出了相函数  $F$  的概念,其值等于控制体积单元中流体所占体积与该控制单元体积之比,数值为 0 ~ 1。如果第  $k$  相流体在单元中的相函数表示为  $\alpha_k$ ,则有

$$\begin{cases} \alpha_k = 0 & \text{单元中充满该相流体,} \\ 0 < \alpha_k < 1 & \text{单元中存在第 } k \text{ 相流体与其他流体的界面,} \\ \alpha_k = 1 & \text{单元中不含第 } k \text{ 相流体.} \end{cases}$$

相函数输运方程

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0. \tag{4}$$

式中, $\alpha_q$  为第  $q$  项体积分数。

对于气液两相流公式(1) ~ (2)中  $\rho$  和  $\mu$  由体积分数决定:

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l, \tag{5}$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l. \tag{6}$$

式中:下标  $g, l$  分别为气相、液相。

#### 1.3 计算模型和边界条件

1) 层流模型

由于计算资源和时间的限制,本项目采用层流模型进行计算,并且 VOF 模型是当前在工程计算中应用得最广泛的层流计算模型之一,在精度上具有广泛的认可度。

2) 两相流动模型

本项目模拟是气液两相流动,采用多相流计算模型。对于流动中存在少量气泡的两相流动问题,一般研究者采用 VOF 模型,这种模型可以捕捉气液分界面并追踪气泡运动轨迹。速度与压力的耦合求解采用的是 PISO 算法。

3) 实际模型

图 1 所示为数值模拟计算模型,模型为长 1.5 m,直径 0.1 m 的水平管道。左侧为 2 个液体进口,直径皆为 0.047 5 m;中间为进气口,直径 0.005 0 m;右侧为出口,直径为 0.1 m。计算区域中采用气、水流速入

口边界条件,其他壁面采用无滑移边界条件。由于计算区域图形较规则,网格划分采用区域结构化划分,生成网格全为四边形网格,共 599 000 个且网格质量优良,网格尺寸最大是 0.500 083 0 mm,最小为 0.499 844 6 mm。水的流量对应入口速度,空气流量对应入口速度,出口为恒定压力。计算过程为:开始阶段通入水,管道内全部充满动态水直至达到动态平衡;然后打开进气口,开始通入气体。在 25 °C 标准大气压下,水的物性参数为  $\rho_1 = 998 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_1 = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表面张力  $\sigma = 0.072 \text{ N/m}$ ; 空气的物性参数为  $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_g = 1.789 4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

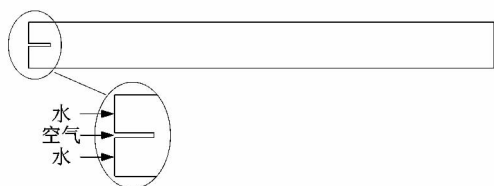


图 1 模型示意图

Figure 1 Model diagram

## 2 结果与讨论

待管道内充满水并达到动态平衡后,打开空气进口开始向管道内充空气。图 2 所示为气体、水流速度分别为 0.8, 1.0 m/s, 时间为 1.893 79 s 时气泡运动情况分布,黑色区域为气相,白色区域为液相。气体在进口处喷射后,流动呈现类似“弹状流”的形式,并且在浮力作用下,逐渐向管道上壁面靠拢,并形成气泡连续的堆积状态,最终流出管道。气泡在运动过程中受到表面张力、曳力、重力及虚质量力等力综合作用,逐渐变形直至破碎成多个小粒径气泡,但主流区仍以大气泡为主。而水在重力的影响下,逐渐趋向于沿管道下部流动。



图 2 气体、液体速度分别为 0.8, 1.0 m/s 时气泡运动情况

Figure 2 Bubble motion at gas-liquid velocity of 0.8, 1.0 m/s

### 2.1 流速对气泡运动的影响

图 3 所示为气体和流体速度均为 1.0 m/s, 气泡在 2.499 95 ~ 3.249 95 s 时的运动轨迹。由图中可以看到,气体进入管道中是非连续性流动,从进口处开始形成气泡,并且随着时间推移气泡逐渐靠近上壁面,形成气泡堆积的趋势。气泡在开始运动阶段多呈现出

规则形状,颗粒感(即气泡形状)随着运动逐渐增强。在气泡接近上壁面时,单个气泡逐渐呈现半月形状即为长气泡形态,且多个连续气泡形成泡状流。

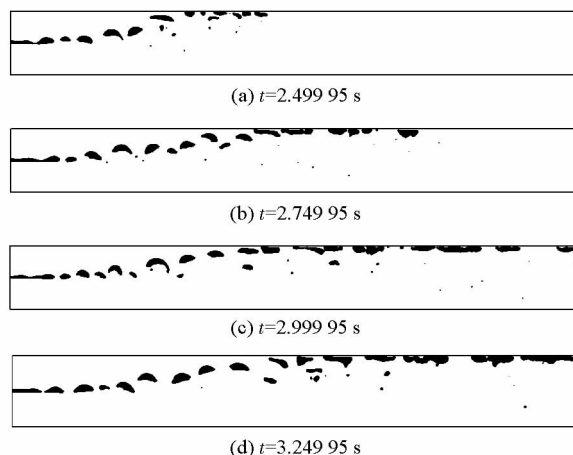


图 3 气液速度皆为 1.0 m/s 时气泡运动情况

Figure 3 Bubble motion at gas-liquid velocity of 1.0 m/s

课题组研究的是气泡在具有一定速度的液相中运动,故而气泡在流动时会受到液相的推力作用;同时因为气泡刚喷入管道中时速度比液相速度大所以也会受到液相的阻力作用。当进口处水流和气体速度分别发生变化时,气泡运动同样也会发生变化。课题组分别探究了水相速度和气相速度对气泡运动的影响以及对气泡粒径大小的影响。

#### 2.1.1 液相速度对气泡运动的影响

图 4 所示为截取时间 5.173 54 s 时液体不同速度时的气泡运动情况。由图可以看出水流速度 0.2 m/s 情况下,液体进口处回流现象明显并有气泡堆积,进口处粒径较大;水流速度为 0.4 m/s 时,进口处回流现象减弱,并且主流区气泡粒径变小;水流速度为 0.6 m/s 时管道内回流现象进一步减弱,并且气泡颗粒感增强;水流速度 0.8 m/s 时气泡的颗粒感最强、主流区大气泡数量明显较多,并且回流现象最弱,气泡靠近上壁面距离进口处最远。可知在进口处气体速度一定时,液相速度越大,气泡回流现象越弱,气泡破碎较少、颗粒感增强并且气泡靠近上壁面的距离越远。

#### 2.1.2 气相速度对气泡运动的影响

图 5 中,控制水速为 0.8 m/s, 时间 5.173 54 s, 气体进口速度分别为 1, 2, 3 和 4 m/s 时的气泡运动情况。图 5 中气体速度为 1 m/s 时气泡较为连贯的斜向上流动并且颗粒感较强,小粒径的气泡散落在管道周围,气泡粒径普遍较小;气体速度为 2 m/s 时气泡粒径

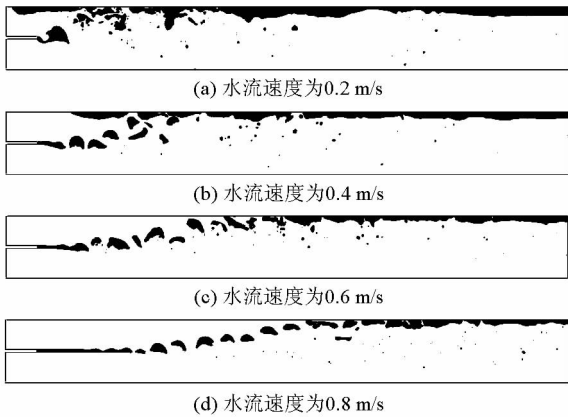


图4 气体速度为1.0 m/s下气泡运动情况

Figure 4 Bubble motion at gas velocity of 1.0 m/s

较气体速度为1 m/s时气泡粒径稍大,形态呈“追赶型”,并且气泡到达上壁面时间变短;气体速度为4 m/s时气泡运动特点是气泡破碎较少、粒径较大及密集程度最高,可视气泡最多,气泡间的追赶程度加深。由图总结得出,当水流速度一定时,气体进口速度越大,主流区气泡粒径越大,但气泡破碎较少,气泡间追赶程度加深。

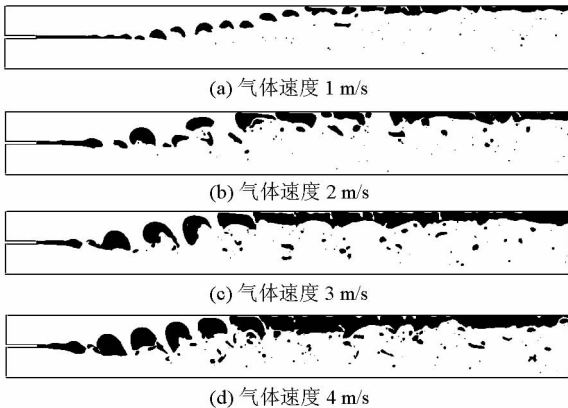


图5 水流速度为0.8 m/s时气泡的运动情况

Figure 5 Bubble motion at water speed of 0.8 m/s

### 2.1.3 气泡到达管道上壁面特性分析

图6所示为进口处水流速度分别为0.2, 0.4, 0.6, 0.8和1.0 m/s, 气体进口速度为2 m/s, 气泡刚刚接近上壁面的时候, 气泡在管道中所对应的运动情况。根据用户自定义方法查到气泡个数分别为3, 10, 4, 16和8, 最大气泡粒径分别为8.750 159, 4.971 430, 5.954 290, 4.556 901和4.669 000 mm。

分析图6中气泡运动情况, 可以得到气泡靠近壁面最近处距离进水口的长度与管道直径比  $L/D$  分别为: 1.065 4, 1.574 1, 2.351 2, 2.711 5和3.484 3。

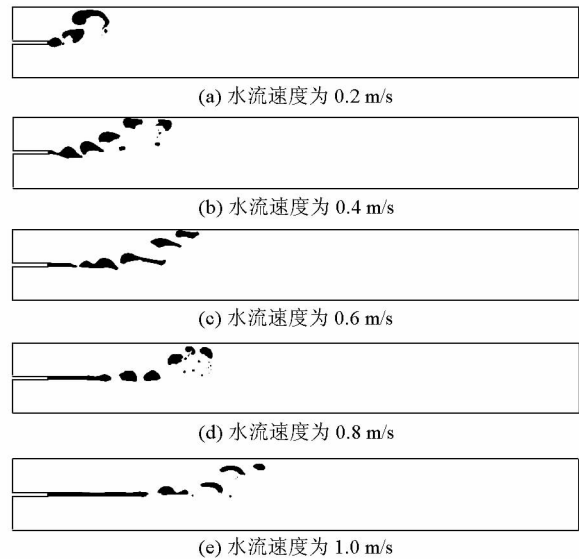


图6 气体进口速度为2 m/s时, 气泡刚到达上壁面的状态图

Figure 6 State diagram of bubble reaching upper wall at gas inlet velocity of 2 m/s

使用 Origin 拟合工具, 将气泡距进气孔长度与水流速度拟合, 如图7所示。

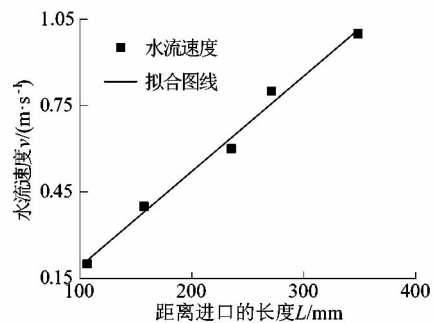


图7 气泡距进气孔长度与水流速度拟合图

Figure 7 Fitting diagram of bubble distance from inlet length to flow velocity

拟合公式为

$$v = 33.145L/D - 0.14153; R^2 = 0.9868. \quad (7)$$

式中:  $L$  为气泡和壁面最近处距离进水口的长度, m;  $D$  为管道直径;  $v$  为进口水流速度, m/s;  $R^2$  为拟合公式方差。

由公式(7)可以得出, 水流速度和气泡到达上壁面距离进口处的距离呈线性关系。

## 2.2 流速对气泡粒径大小的影响

### 2.2.1 气相速度对气泡粒径的影响

在整个管道中气泡在运动过程中主要因为浮力的作用会向上壁面靠拢, 在管道上内壁形成堆积, 会对结

果分析产生影响,故课题组采用用户自定义方法,将所有接近上壁面 3 mm 内的气泡淘汰,分析剩余管道中气泡运动变化。

图 8 所示为控制水速为 1.0 m/s,气体速度分别为 1,2,3 和 4 m/s 时最大气泡的索特平均直径(Sauter meandiameter)。由于先向管道充水直至管道中水流动态平衡,故而图中所示为自气体开始喷射进管道中开始计时。从图中可以轻易观察到,气体速度为 3 m/s 时,最大气泡粒径最初很小并迅速增大但变化速率在逐步变小,气泡粒径达到峰值 8.9 mm 后极缓慢增大,速率接近于零。气体速度分别为 1,2 和 4 m/s 时的粒径变化趋势与气体速度为 3 m/s 时类似。从图中可知,气泡粒径峰值是随气体速度的增大而增大。

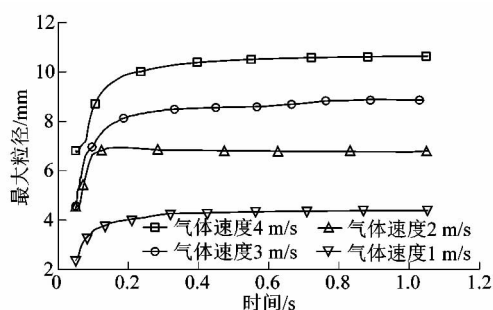


图 8 不同气速下最大粒径变化

Figure 8 Maximum particle size change at different gas velocity

### 2.2.2 液相速度对气泡粒径的影响

图 9 中控制气体速度为 3 m/s,液相速度分别为 0.2,0.4,0.6,0.8 和 1.0 m/s 时最大气泡的索特平均直径。由图可以看出,当液相速度为 0.6 m/s 时,因为气体刚刚注入,管道内两相流不稳定,最大气泡粒径由最初较小随着时间变化迅速变大,到一定时刻粒径大小达到峰值后保持不变。在气液速度一定时,最大气泡粒径随时间变化的总趋势大致相同。易知,不同水流速度下,最大气泡粒径峰值是随水流速度的增大而减小。

## 3 结论

1) 由于受到浮力的作用,气体喷射到管道的过程中,气泡流会逐渐集中到管道的上壁面,并且回流现象比较明显。

2) 虽然气泡在管道内的运动过程中,气泡形态变化是非线性无规则的,但进口水速和气泡到达上壁面距离进口处的长度近似呈线性关系。

3) 进口气速和水速增大都会加速气泡的破碎以及减少气泡的脱离时间,从而产生使管道内最大气泡

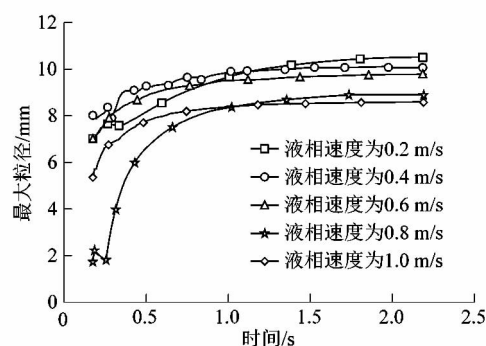


图 9 不同液相速度时的最大粒径

Figure 9 Maximum particle size variation under different flow velocity

粒径变小的效果;但是在相同时间内进口气速增大同样可以使管道内的气体体积增加,产生使最大气泡粒径变大的效果。前者所产生的效果弱于后者所产生的效果,最终结果是使最大气泡粒径变大。

### 参考文献:

- [1] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature - depending speed; algorithms based on Hamilton Jacobi formulation [J]. Journal of computational physics, 1988, 79(1): 12 - 49.
- [2] 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.
- [3] GUNSTENSEN A K, ROTHMAN D H, ZALESKI S, et al. Lattice boltzmann model of immiscible fluids [J]. Physical review A, 1991, 43: 4320 - 4327.
- [4] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201 - 225.
- [5] RYSKIN G, LEAL L G. Numerical solution of free-boundary problems in fluid mechanics; part 1 and 2 [J]. Journal of fluid mechanics, 1984, 148: 1 - 35.
- [6] ZARUBA A, KREPPER E, PRASSER H M, et al. Experimental study on bubble motion in a rectangular bubble column using high-speed video observations [J]. Flow measurement and instrumentation, 2005, 16(5): 281.
- [7] 王红一,董峰. 气液两相流中上升气泡体积的计算方法 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2446.
- [8] 武博,郝宗睿,陈涛,等. 水下气泡运动的数值模拟 [J]. 中国科技论文, 2010, 5(8): 650.
- [9] 蒋炎坤,褚开星. 基于 VOF 方法发动机水下排气气泡特性研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 12.
- [10] TSUI Y Y, LIU C Y, LIN S W. Coupled level-set and volume-of-fluid method for two-phase flow calculations [J]. Numerical heat transfer: part B fundamentals, 2017, 71(2): 173 - 185.
- [11] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of computational physics, 1992, 100(2): 335 - 354.