

# 基于不同多相流模型的气浮接触区流动的模拟研究

伏雨<sup>1,2</sup>, 龙云<sup>1,2</sup>, 龙新平<sup>1,2\*</sup>

(1.水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072

2.武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072, Email: [xplong@whu.edu.cn](mailto:xplong@whu.edu.cn) )

**摘要:** 气浮接触区是溶气气浮法的关键流动区域, 是微气泡产生和气液混合的区域, 内部涉及多相流、旋涡等复杂流动现象, 其流动状态对分离结果具有重要影响。本文分别采用欧拉-欧拉和 Mixture 多相流模型耦合标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对一典型的气浮接触区流动进行动态模拟研究。结果显示, 在进气速度为 0.175m/s, 含气率为 0.1 时, Mixture 模型模拟得到的气泡在接触区内混合更为均匀, 接触时间更长, 气泡浓度也相对较高。为进一步对气泡间的聚并行为进行探究, 在欧拉-欧拉模型的基础上加入群体平衡模型进行模拟计算, 进气口气泡初始粒径设置为 40 $\mu\text{m}$ 。结果显示随着反应时间和气泡上升高度的增加, 气泡在混合过程中发生碰撞、聚合, 气泡粒径随之增大, 最大粒径为 113 $\mu\text{m}$ 。分析表明, 伴随气泡粒径的增大, 气泡上升速度增加; 同时流场内涡旋结构的产生, 增加了粒子间碰撞频率。

**关键词:** 气浮; 接触区; 多相流模型; 气泡聚并

## 1 引言

气浮工艺作为一种快速高效的两相分离技术, 最初用于矿物浮选, 现已广泛应用于海水淡化、污水处理等领域。其主要原理是向池内通入微气泡, 使其在接触区内与流体充分混合裹挟微小颗粒, 利用密度差分层在分离区实现分离除污目的。

气浮接触区是气浮池组成的重要部分, 是微气泡产生、多相混合的区域, 诸多学者对其流动进行了相关研究。在实验方面, 研究者通过激光法<sup>[1,2]</sup>和图像分析法<sup>[3]</sup>可以实现对接触区的气泡粒径的有效观测。目前, 图像分析法在测量气泡粒径上应用较为广泛, 但仍存在一定的局限性。在模拟研究方面, Fawcett<sup>[4]</sup>在未考虑边界效应的情况下, 用二维模型模拟了接触区和分离区的流型。Guimet<sup>[5]</sup>等采用欧拉-欧拉模型对一个小型气浮池进行了二维流动数值模拟, 其模拟结果与 Lundh 的实验结果一致, 但是模拟中的含气率很低。近年来,

为进一步探究气泡之间的相互作用,不少学者将群体平衡模型(Population Balance Model, PBM)应用于气液两相流模拟中。段欣悦等<sup>[6]</sup>分别采用基于群数密度传递模型和多气泡组质量传递模型的群体平衡方程对多粒径气液泡状流进行模拟,陈阿强等<sup>[7]</sup>利用该模型对气浮接触区进行了模拟,得到气泡粒径分布与试验结果基本一致。

由于接触区内多相流动的复杂性,目前国内外对于接触区气泡粒径以及含气率分布缺乏系统性研究。本文分别采用欧拉-欧拉和 Mixture 多相流模型耦合标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对一典型的气浮接触区流动进行动态模拟研究,以探究不同多相模型对于含气率和速度分布的影响。并在欧拉-欧拉模型的基础上加入 PBM 模型,对微气泡间的聚并行为进行分析。

## 2 控制方程及数值方法

接触区的流动为两相流动,本文分别采用 Mixture 和欧拉-欧拉多相流模型与标准  $k-\varepsilon$  湍流模型耦合对流场进行计算。而微气泡间的聚并行为则引入群体平衡模型。

### 2.1 群体平衡模型

根据群体平衡原理将离散相气泡分布与微观行为相结合,建立适用于两相流系统的气泡数密度输运方程为:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i n_i) = B_i^C + B_i^B - D_i^C - D_i^B \quad (1)$$

式中:  $n_i$  为单位时间、单位空间内气泡数量的分布函数,  $B_i^C$ 、 $B_i^B$  分别代表由聚并、破裂导致的气泡数量增多的变化,  $D_i^C$ 、 $D_i^B$  分别表示由聚并、破裂造成的气泡数量减少的情况。

本文研究的气浮池模型中气泡粒径极小,发生破碎的概率较小,因此只考虑气泡聚并过程。采用 Luo 聚并模型,其气泡碰撞频率和聚并概率公式如下:

$$\omega_{ag}(V_i, V_j) = \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 n_i n_j \bar{u}_{ij} \quad (2)$$

$$P_{ag} = \exp \left\{ -c_1 \frac{[0.75(1+x_{ij}^2)(1+x_{ij}^3)]^{1/2}}{(\rho_2 / \rho_1 + 0.5)^{1/2} (1+x_{ij})^3} We_{ij}^{1/2} \right\} \quad (3)$$

### 2.2 几何区域及网格

本文对一典型气浮池的二维模型进行模拟,气浮接触区模型尺寸及网格划分如图 1 所示。整体采用结构化网格划分,在壁面及进气口附近进行局部加密处理。利用三套网格进行无关性验证,结点总数分别为:42637、65431、98742。其中,后两套网格计算所得接触区含气率分布基本无异,第一套网格略有偏差。因此本文采用结点数为 65431 的网格进行计算。边界条件设置为:进水口速度为 0.108m/s,进气口速度为 0.175m/s,含气率设置为

0.1, 出口压力为 101325Pa, 其余设置为壁面。

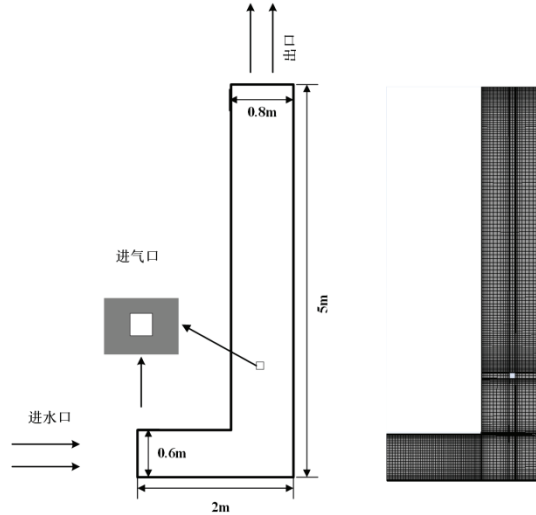


图1 气浮接触区模型及网格划分

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 多相模型对含气率分布影响

图2给出了不同多相流模型下得到的气体体积随时间变化曲线图。Mixture模型所得含气率分布在70s以后变化较为平稳, 气泡在接触区内停留时间较长, 有利于气液两相充分混合。欧拉-欧拉模型模拟曲线在45s之后出现两次不同幅度的下降, 其中t=170s左右大量气体逸出, 导致流场中气泡浓度整体低于Mixture模型预测结果。

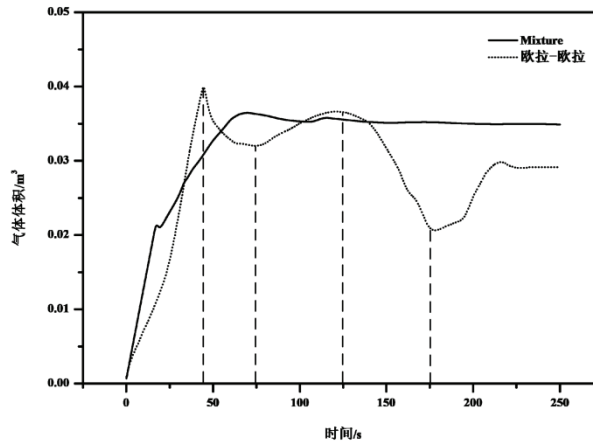


图2 不同多相流模型下气体体积随时间变化曲线图



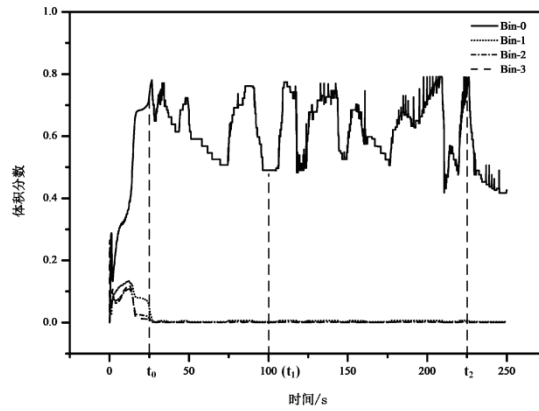
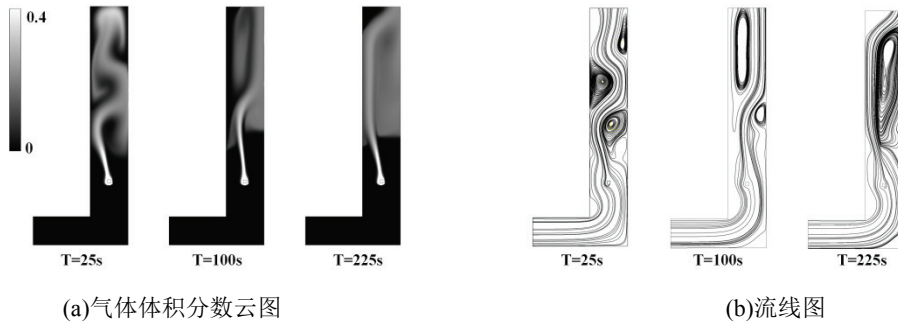


图4 出口处不同粒径气泡含量随时间变化图



(a) 气体体积分数云图

(b) 流线图

图5 几个典型时刻气体体积分数云图及流线图

## 4 结论

本文采用数值模拟方法对一典型的气浮接触区流动进行动态模拟研究，对比了欧拉-欧拉和 Mixture 多相流模型对含气率分布的影响。并在欧拉-欧拉模型的基础上加入群体平衡模型对气泡间的聚并行为进行探究，得到主要结论如下：

(1) 气浮两相接触区模拟中，在进气速度为  $0.175\text{m/s}$ ，含气率为  $0.1$  时，应用 Mixture 模型模拟得到的气体在接触区内混合更为均匀，接触时间更长，气泡浓度也相对较高。

(2) 伴随反应时间和气泡上升高度的增加，气泡在混合过程中相互碰撞发生聚并行为，导致气泡粒径随之增大。

(3) 在气泡上升阶段流场内速度梯度较大，内部产生湍流，引发多个旋涡结构。旋涡结构的产生增加了气泡间聚并频率。

## 参 考 文 献

- 1 Sung J S , Burgess J M . A laser-based method for bubble parameter measurement in two-dimensional fluidised beds[J]. Powder Technology, 1987, 49(2):165-175.
- 2 Xu R . Particle Characterization: Light Scattering Methods[J]. China Particuology, 2003, 1(6):271-0.
- 3 Han M Y , Park Y H , Yu T J . Development of a new method of measuring bubble size[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2002, 2(2):77-83.
- 4 Fawcett N S J. The hydraulics of flotation tanks: computational modelling[J]. Dissolved Air Flotation, 1997: 51-71.
- 5 Guimet V, Broutin C, Vion P, et al. CFD modelling of high-rate dissolved air flotation[A].Proc., 5th Int. Conf. on Flotation in Water and Wastewater Systems[C]. Seoul: Seoul National Univ., 2007: 113-119.
- 6 段欣悦, 厉彦忠, 张孜博等. 两种群体平衡模型在大规模多粒径泡状流中的应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(12):92-98.
- 7 陈阿强, 王振波, 王晨等. 气浮接触区气泡聚并行为的数值模拟[J]. 化工学报, 2016, 67(6).

## Numerical simulation of contact zone of dissolved air flotation tank based on different multiphase models

FU Yu<sup>1,2</sup>, LONG Yun<sup>1,2</sup>, LONG Xin-ping<sup>1,2\*</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Water Jet Theory and New Technology, Wuhan, 430072;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072, Email:

[xplong@whu.edu.cn](mailto:xplong@whu.edu.cn))

**Abstract:** The contact zone is a region where micro bubbles are generated and gas-liquid mixed and involves multiphase flow and vortex structure which has an important effect on the separation result. In this paper, the Mixture model and Euler-Eulerian model coupled with the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model were employed to simulate the dynamic flow of a typical DAF tank. The gas distribution showed that when the inlet velocity is 0.175m/s and the gas content is 0.1, the bubbles were more evenly mixed, the contact time was longer, and the gas concentration was higher simulated by Mixture model. In order to further study the bubble coalescence behavior, the population balance model(PBM) was added to simulate the two phase flow based on the Euler-Eulerian model. The initial particle size was set to 40 $\mu\text{m}$ . As the reaction time and the bubble rising height increased, the bubbles collided and coalesced during the mixing process, and the particle size was increased to 113 $\mu\text{m}$ . It is found that with the increase of the particle size, the rising speed of the bubble also increases, and the vortex structure enhances the collision frequency between the bubbles.

**Key words:** flotation; contact zone; multiphase models; bubble coalescence