

超重力下气泡聚并破碎特性的数值分析

陈自豪, 郭雪岩

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年3月7日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月9日

摘要

气泡广泛存在于自然界及工业生产中, 气泡的聚并破碎现象对气液两相流动及传热传质行为有重要的影响, 研究气泡在超重力场下的聚并破碎现象对工业生产具有重要的意义。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)与群平衡模型(Population Balance Model, PBM)耦合能有效地模拟气液两相流动, 且可以对气泡的聚并与破碎行为进行模拟。通过用户自定义函数(User Defined Functions, UDF)在径向上添加恒定力场, 运用CFD-PBM耦合模型对超重力场中的气液两相流进行了模拟研究, 探究超重力场对气泡运动行为及聚并破碎特性的影响, 并对超重力场中气泡的聚并破碎机理进行探究。研究表明, 超重力场对气泡的聚并破碎有着显著的影响, 当超重力场强度较小时其主要影响气泡的聚并, 大气泡含量较多, 气泡尺寸分布较窄; 随着超重力场强度的增加, 气泡的破碎行为逐渐增强, 小气泡的含量显著增多, 气泡的尺寸分布变宽。

关键词

气泡, 超重力, 群体平衡模型, 聚并, 破碎

Numerical Analysis of Bubble Coalescence and Breakup Characteristics under High Gravity

Zihao Chen, Xueyan Guo

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

Received: Mar. 7th, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 9th, 2022

Abstract

Bubbles exist widely in nature and in industrial production. The coalescence and breakup of bubbles have an important effect on gas-liquid two-phase flow and heat and mass transfer behavior. It is of great significance to study the coalescence and breakup of bubbles under different force fields

for industrial production. The CFD-PBM model can effectively simulate the gas-liquid two-phase flow and simulate the coalescence and breakup behavior of bubbles. A constant force field was added to the radial direction of the User Defined Function (UDF), and the gas-liquid two-phase flow in the high gravity field was simulated by using the CFD-PBM coupling model. The effects of the high gravity field on bubble motion and coalescence-breakup characteristics were investigated, and the coalescence-breakup mechanism of bubbles in the high gravity field was also investigated. The results show that the high gravity field has a significant effect on the coalescence of bubbles. When the intensity of high gravity field is small, it mainly affects the coalescence of bubbles, and there are more large bubbles and the size distribution of bubbles is narrow. With the increase of the strength of high gravity field, the bubble breakup behavior gradually increases, the content of small bubbles increases significantly, and the size distribution of bubbles becomes wider.

Keywords

Bubble, High Gravity, Population Balance Model, Coalescence, Breakup

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气泡广泛存在于自然界及工业生产中, 如石油、化工、动力、核能、生物制药、电化学等工业过程中[1] [2] [3] [4]。在工业生产过程中经常需要对气液进行分离, 目前气液分离主要分为重力分离、惯性分离、离心分离三大类[5], 离心分离是利用气液在旋转流场所受离心不同使其分离, 气液离心分离设备因其结构简单, 不存在运动构件安装维护简便, 占地面积小, 造价低等优点广泛应用于工业生产中。电化学工业生产过程中会产生大量气泡, 气泡富集于电极表面, 阻碍了电极与电解液的接触, 使电解效率降低, 导致电化学反应能耗增加, 为消除气泡对电化学反应的影响, 强化电化学反应过程, 国内外许多研究者将超重力强化技术引进电化学工业中[6] [7] [8], 消除了气泡对电化学反应的影响, 降低电化学反应的能耗。随着空间技术的快速发展, 超重力技术在工业上的应用逐渐增多, 对超重力场中气泡的运动状态及聚并破碎行为的研究, 对气液两相流超重力设备的设计及优化具有重要意义。

在大多数的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟中, 通常将气泡直径设定为一个固定值[9] [10] [11], 不考虑气泡的直径变化及局部尺寸分布, 这种简化只能较好地模拟均匀气泡流, 而对过渡流气泡流、非均匀气泡流及特殊受力条件下的气泡流动均不适用。因为均匀气泡流气泡直径较小, 尺寸分布范围较窄, 在流动的过程中气泡几乎不发生聚并破碎行为。工业生产中的气液流动现象十分复杂, 同一设备中往往存在多种流态的气泡流动, 在流动的过程中气泡的直径发生剧烈的变化, 其会影响气泡的局部尺寸分布、流型的转变、气含率分布, 从而对气液两相间的传热传质产生重要的影响。近年来, 群平衡模型(Population Balance Model, PBM)已经成为研究气泡运动状态的有效方法[12]。基于双流体模型框架耦合群平衡模型可以有效地描述气泡粒径变化, 能更好地对气泡运动状态进行模拟, 受到越来越多研究人员的关注[13] [14]。Hulburt [15]和 Randolph [16]率先提出了 PBM 模型, PBM 模型通过跟踪离散相数密度函数随聚并和破碎的变化来描述离散相粒径随时间和空间的分布情况。Hulburt 等将 PBM 模型应用到旋转流场中液滴的聚并与破碎的计算, 且首次提出了聚并与破碎核函数。Lee 等[17]将 PBM 模型模拟了气泡的聚并与破碎, 并用数密度函数代替概率密度分布。Luo 和 Svendsen [18]基于各向同性湍流理论建立了气泡破碎率, 认为气泡破碎是一种能量受限的现象, 当湍流涡旋的湍流能量大于气泡承受的

压力时, 气泡发生破碎。Lehr 等[19]提出, 只有当湍流涡的惯性力大于气泡表面张力引起的附加压力时, 气泡才能破裂, 并提出了压力约束的气泡破裂模型。

近年来, 国内外对气泡在正常力场的运动进行了广泛的研究, 超腾飞和张华[20]通过流体体积法 (Volume Of Fluid, VOF) 对双气泡碰撞过程进行了模拟, 探究气泡直径、气泡间的距离等因素对气泡碰撞的影响。陈烁等[21]通过实验对气泡在均匀电场中的上升特性进行了研究。Zhang X B 等[22]研究了 CFD-PBM 的离散解法种中最小气泡直径、最大气泡直径和直径增长率等因素对数值模拟结果的影响, 并提出了离散解法中参数的优化方案。Zhang H 等[23]对 CFD-PBM 模型在不同操作条件和液体性质时的通用性进行了系统地研究, 研究表明当采用合适的破碎与聚并模型时, CFD-PBM 耦合模型具有较好的通用性。张华海和王铁峰[24]通过对不同操作压力和不同液体性质气液鼓泡床的模拟值与实验数据进行对比, 验证 CFD-PBM 耦合模型的通用性。高颂等[25]运用 CDF-PBM 耦合模型对离心泵内气泡的聚并与破碎进行了系统地研究, 并探究了气泡聚并与破碎的机理。

本文针对气液离心分离设备及气液超重力设备的工作特点, 将其简化为气泡在超重力中的运动, 通过 CFD-PBM 耦合模型对超重力下气泡的运动生长特性进行模拟分析, 并对气泡在超重力中的聚并及破碎机理进行探究。

2. 模型及求解方法

2.1. 超重力环境的构建

随着空间技术的快速发展, 超重力技术逐渐进入人们的视野并取得了长足的进展, 已经成为重要的强化技术之一。超重力是指比地球重力加速大的环境, 由于地球表面的重力加速度受到地球的限制不可改变, 所以实验室及工业生产中通过高速旋转产生的离心力来模拟超重力环境。针对气液两相在超重力设备中的受力特点, 本文通过用户自定义函数 (User Defined Functions, UDF) 在径向上添加一个恒定的力场模拟超重力环境, 从而实现气泡在超重力环境中的运动。

2.2. 几何模型

本文所采用的几何模型及边界条件如图 1 所示。气泡塔直径 R 为 200 mm, 高 H 为 600 mm, 气体进口直径为 10 mm。初始时塔内充满水, 底部气体入口为速度进口, 进气速度为 0.01 m/s, 气相体积分数为 1, 通入气泡直径为 5.04 mm。壁面采用无滑移边界条件, 上部出口为脱气边界条件, 即气相可以自由通过, 液相无法通过。

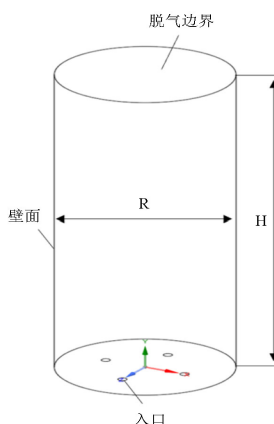


Figure 1. The geometric model and boundary conditions

图 1. 几何模型及边界条件

2.3. 数值模拟方案

本文使用 ANSYS Fluent 平台对超重力场中气泡的运动状态进行模拟, 群平衡方程采用离散方法进行求解, 将气泡按直径大小分为 17 组子气泡, 各子气泡组的直径见表 1。气泡在超重力场中的流动是气体驱动流, 气液流动状态为湍流, 在综合考虑计算精度及计算量的情况下本文选用雷诺时均法中的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

Table 1. Discrete bubble sizes in PBM model

表 1. PBM 模型气泡尺寸离散

气泡组	直径/mm	气泡组	直径/mm
Bin-0	40.32	Bin-9	5.04
Bin-1	32.00	Bin-10	4.00
Bin-2	25.40	Bin-11	3.18
Bin-3	20.16	Bin-12	2.52
Bin-4	16.00	Bin-13	2.00
Bin-5	12.70	Bin-14	1.59
Bin-6	10.08	Bin-15	1.26
Bin-7	8.00	Bin-16	1.00
Bin-8	6.35		

3. 数学模型

3.1. Euler-Euler 模型

在 Euler-Euler 双流体模型中离散相被看作连续的拟流体, 并认为离散相与连续相之间可以相互渗透, 该模型能较好地描述气液两相流, 且计算量较小能极大提高计算速度。双流体模型的基本方程主要包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。在温度恒定不考虑换热的情况下方程描述如下。

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ_k : 密度; α_k : 相含率; u_k : 速度; k 为 g 、 l 时分别代表气体与液体。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k u_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_k \tau_k) + \alpha_k \rho_k g + M_{l,k} \quad (2)$$

式中 p 为作用于两相间的压力; τ_k 为应力张量; g 为重力加速度; $M_{l,k}$ 为动量交换项, 相间动量交换主要是由于相间力引起的, 其包括曳力、升力、虚拟质量力、湍流分散力、壁面润滑力。

3.2. 群体平衡模型

在最近十几年中, CFD-PBM 耦合模型迅速发展, 对复杂的气液两相流表现出良好的预测性[26]。双流体模型经常应用在工程中气液两相流的模拟, 因为双流体模型存在一个严重的局限性, 其假设每个气泡都具有相同的粒径, 粒径大小是模拟需要输入的参数, 然而实际情况中粒径的大小很难估计且粒径的

大小在运动的过程中不断变化。CFD-PBM 耦合模型克服了这一局限性。

群平衡模型比较通用的描述方程如下:

$$\frac{\partial n(V, x, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [un(V, x, t)] = S \quad (3)$$

上式中 $n(V, x, t)$ 为气泡分布的数密度函数, 其值与气泡体积 V 、空间变量 x 及时间 t 有关。 S 为气泡破碎与聚并的源项, 其表示如下:

$$\begin{aligned} S = & \frac{1}{2} \int_0^V c(V-V', V', t) n(V-V', x, t) n(V', x, t) dV' \\ & - \int_0^\infty c(V, V', x, t) n(V, x, t) n(V', x, t) dV' \\ & + \int_{\Omega_V} b(V') \beta(V|V', x, t) n(V', x, t) dV' \\ & - b(V, x, t) n(V, x, t) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)右侧分别表示两个体积较小的气泡聚并成体积为 V 的气泡的源项; 体积为 V 的气泡与其他体积的气泡聚并的消灭源项; 体积较大的气泡破碎生成体积为 V 的气泡的源项; 体积为 V 的气泡破碎成其他体积气泡的源项。

气泡在湍流流动中的聚并可能是由多种机制引起的, 如湍流波动、粘性剪切应力、湍流捕获、浮力和尾迹相互作用[27]。本文选取 Luo [28]的聚并模型, 直径为 d_i 的气泡与直径为 d_j 的气泡聚并的核函数表示如下:

$$c(d_i, d_j) = \varpi_c P_c \quad (5)$$

$$\varpi_c = \frac{\pi}{4} \sqrt{2\varepsilon^{1/3}} (d_i + d_j)^2 (d_i^{2/3} + d_j^{2/3})^{1/2} \quad (6)$$

$$P_c(d_i, d_j) = \exp(-0.4) \frac{[0.75(1 + \xi_{ij}^2)(1 + \xi_{ij}^2)^{1/2}]}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l} + 0.5\right)^{1/2} (1 + \xi_{ij})^2} We_{ij}^{1/2} \quad (7)$$

式中, ϖ_c 表示直径为 d_i, d_j 的两气泡碰撞的频率, 1/s; P_c 表示碰撞后聚并的效率; $We_{ij} = \frac{\rho_l d_i u_{ij}}{\sigma}$; $\xi_{ij} = \frac{d_i}{d_j}$ 。

气泡的破碎过程非常复杂, 与液体的流动及气液之间的相互作用密切相关, 现广泛使用的破碎模型为 Luo & Svendsen 模型与 Leher 模型。本文选采用 Luo & Svendsen 模型, 该模型认为当气泡与湍流涡发生碰撞, 且湍流涡所具有的能量大于气泡破碎所需要的能量时气泡发生破碎, 一个体积为 v_i 的气泡破碎为两个体积为 v_j 和 $(v_i - v_j)$ 的子气泡其破碎模型描述如下:

$$b(v_i) = \frac{1}{2} \int_0^{v_i} \Omega(v, v_i) dv \quad (8)$$

$$\Omega(v_j, v_i) = 0.923(1 - \alpha_g) \left(\frac{\varepsilon_l}{d_i^2}\right)^{1/3} \int_{\xi_{\min}}^1 \frac{(1 + \xi)^2}{\xi^{11/3}} \exp\left(-\frac{12c_f \sigma}{2\rho_l \varepsilon_l^{2/3} d_i^{5/3} \xi^{11/3}}\right) d\xi \quad (9)$$

式中 $\Omega(v_j, v_i)$ 为破碎频率, $\xi_{\min} = \lambda_{\min}/d_i$, $\lambda_{\min} = (11.4 - 31.4)\eta$, $\eta = (\mu_l/\rho_l)^{0.75}/\varepsilon_l^{0.25}$,

$$c_f = \left(\frac{v_j}{v_i}\right)^{2/3} + \left(1 - \frac{v_j}{v_i}\right) - 1。$$

4. 结果与讨论

4.1. 压力与速度的径向分布

本文通过用 UDF 在径向上添加了不同的超重力场, 其强度为 1 g、3 g、5 g、8 g、10 g、12 g, 对气泡在不同径向加速下的运动状态进行模拟。图 2 为不同超重力场下压力的径向分布。从图 2 可以看出, 压力沿径向逐渐增大, 且压力随超重力强度的增大而增大, 该压力分布特点证明了本文通过 UDF 实现了不同超重力场的添加, 从而实现气泡在超重力场中的运动。

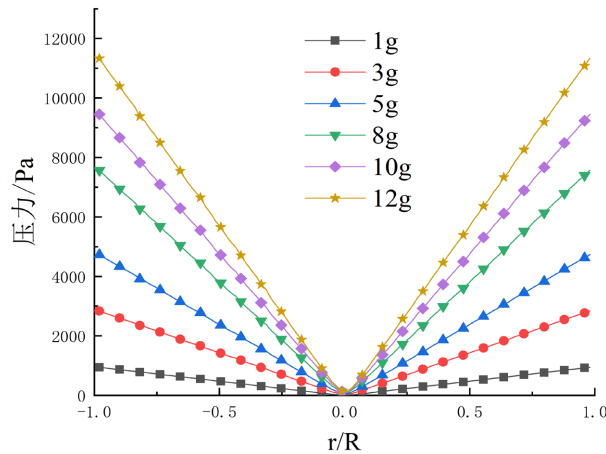


Figure 2. Radial distribution of pressure under different gravitational accelerations

图 2. 不同重力加速度下压力的径向分布

图 3 为不同超重力强度下气速与液速在径向的分布。由图 3(a)可以看出, 气速呈双峰分布, 气速随着径向加速度的增加不断增大, 但气速在径向上的分布逐渐变窄。由于液体的密度大于气体的密度, 所以液体在径向上所受的力大于气体在径向上所受的力, 在不同径向力的作用下气相向气泡塔中心聚集。当超重力强度增大时, 气液两相在径向上受力的差值增大, 使气相向气泡塔中心更加聚集, 所以随着超重力强度的增大, 气速在径向上的分布变窄; 随着超重力强度的增加, 气泡不断向气泡塔中心聚集, 中心气含率随之增大, 所以气相的最大速度随之增加。在气泡上升的过程中需要将气泡塔中心处的液体排向两侧, 中心处的液体径向速度较大而轴向速度较小, 气泡塔中心处的液体阻碍了气体的运动, 所以气泡塔中心处气速较小, 气速在径向上呈双峰分布。

由图 3(b)可以得到, 当在 $-0.5 < r/R < 0.5$ 的范围时, 液速随着径向加速度的增加而增大, 在 $r/R = 0.5$ 时液速较小, 当靠近壁面时液速逐渐增加。因为塔内的气液两相流动为气体驱动流, 在塔中心位置气体带动液体向上运动, 液速随气速的增大而增大, 而壁面处的液体沿轴向向下运动, 在 $r/R = 0.5$ 处液体速度的方向发生改变。

4.2. 气含率及气泡数密度分布

图 4 为不同超重力场中气含率的径向分布。气含率在塔中心处较大, 在远离塔中心处气含率接近于 0; 随径向加速度的增大, 气含率显著增加, 气含率由 0.26 增加到 0.67。由于气液两相在超重力场中受到的径向力不同, 液体受到的径向力较大, 使液体向塔壁面聚集, 而气体受到的径向力较小, 使气体向塔中心聚集; 当超重力场的强度较大时气液两相所受径向力的差值变大, 气相在液相的作用下向塔中心处运动, 使得塔中心气含率随超重力强度的增加而增大。

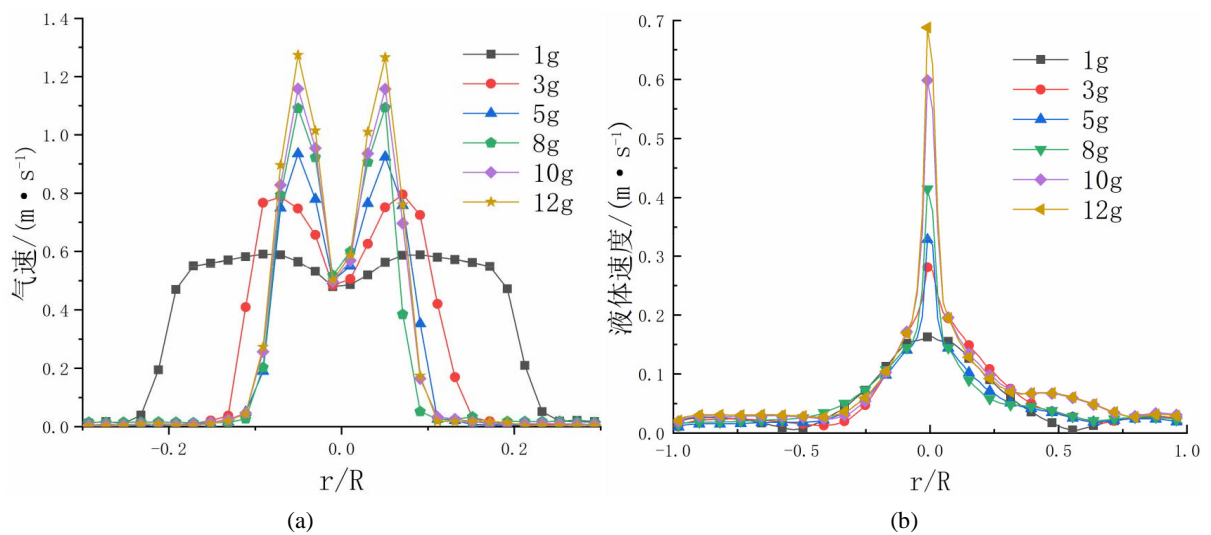


Figure 3. Radial distribution of gas-liquid velocity under different high gravity
图 3. 不同超重力下气液速度的径向分布

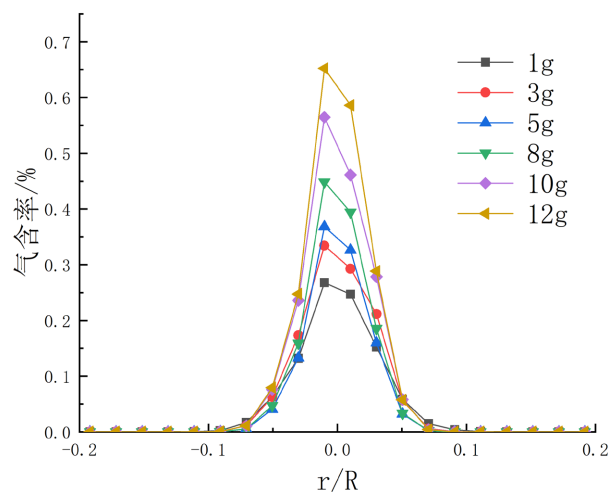


Figure 4. Radial distribution of gas holdup under different high gravity intensities
图 4. 不同超重力强度下气含率的径向分布

由图 5 可知, 随着超重力场强度的增加气泡尺寸分布范围逐渐变宽; 当超重力场强度为 1 g 时, 气泡尺寸分布较窄, 主要是直径为 5~7 mm 的气泡; 当超重力强为 8 g 时, 小气泡的数量开始明显增多; 当超重力强度继续增加时, 气泡主要由直径为 1~16 mm 的气泡组成。初始时通入液体中的气泡直径为 5.04 mm, 当超重力强度较小时, 气泡以较小的速度向塔中心聚集, 所以气泡与气泡的碰撞概率较大, 气泡在向塔中心聚集的过程中, 气泡与气泡的速度方向不同, 气泡到达塔中心一起沿轴向向上运动, 在塔中心气泡的接触时间较长, 所以气泡之间的聚并效率较大, 气泡以聚并为主。当超重强度较大时, 气泡以较大的速度向塔中心聚集并以较大的速度沿轴向上升, 气液在塔内的流动为湍流, 湍流涡所具有湍动能较大, 当湍流涡的湍动能大于气泡破碎所需要的表面能时气泡发生破碎, 所以随着超重强度的增大, 气泡的破碎逐渐增强, 小气泡数量随之增多。

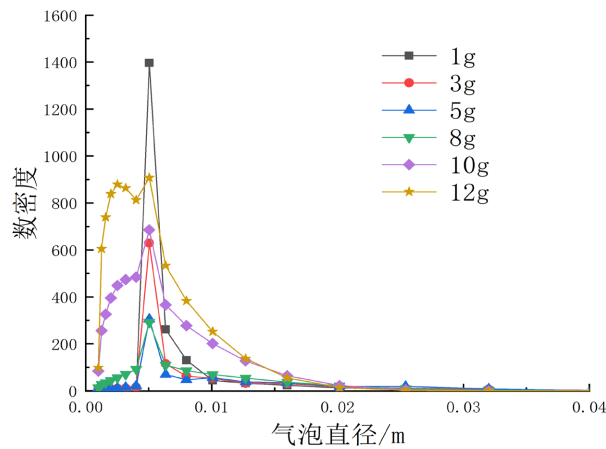


Figure 5. Bubble number density distribution under different high gravity intensities

图 5. 不同超重力强度下气泡数密度分布

4.3. 气泡的聚并与破碎

针对以上不同超重力场中气含率及气泡数密度的分布特点, 本部分选取超重力强度分别为 1 g、5 g、10 g 的超重力场讨论气泡聚并与破碎的规律。图 6 是超重力强度为 1 g 时各子气泡组在轴向上的分布。如图所示, 当 $Y < 0.1$ m 时气相主要由 bin-9 组的子气泡组成, 在 $Y = 0.1$ m 处气体子气泡组的占比开始发生明显变化, 沿轴向 bin-8 至 bin-2 子气泡组的含量呈现先增加后减小的变化趋势; bin-0 与 bin-1 子气泡组的含量沿轴向逐渐增加; bin-10 至 bin-16 子气泡组的含量在轴向上也不断增加, 但其含量非常小。初始时通入液体中的气泡为 bin-9 子气泡组, 其他直径的子气泡组均由 bin-9 子气泡组聚合并或破碎产生, 所以当在超重力强度为 1 g、 $Y < 0.1$ m 时, 气泡未发生明显的聚并与破碎; 沿轴向 bin-9 子气泡组先聚并生产 bin-8 子气泡组, 而 bin-7 子气泡组在 bin-8 子气泡组产生并增加后才产生, 所以根据 bin-9 至 bin-0 子气泡组沿轴向的变化趋势可知, 气泡在发生聚并的过程中, 先聚并形成相邻直径的大气泡, 再由相邻直径的大气泡聚并形成更大直径的气泡。因为气泡大概在 $Y = 0.1$ m 处的塔中心汇聚, 在气泡汇聚沿轴向向上运动的过程中, 气体和液体之间存在一定的速度差, 在气液间产生一定的剪切力, 使部分气泡发生破碎, 所以 bin-10 至 bin-16 子气泡组沿轴向逐渐增加。

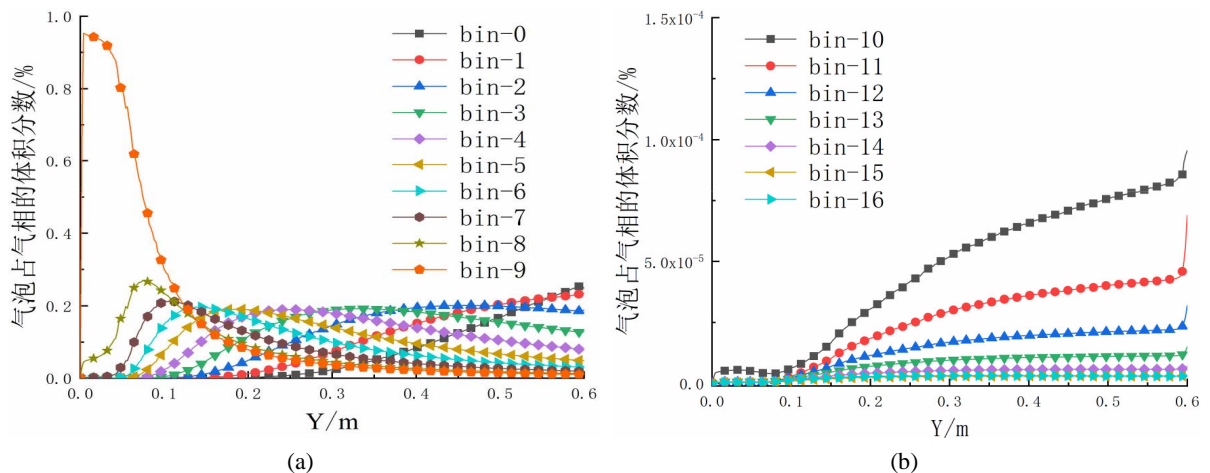


Figure 6. The axial distribution of bubble size when the high gravity intensity is 1 g

图 6. 超重力强度为 1 g 气泡尺寸的轴向分布

图 7 是超重力强度为 5 g 时各子气泡组在轴向上的分布。图 7(a)是由通入子气泡组 bin-9 聚并生成的大气泡在轴向上的分布, 有图可知, 聚并在气泡塔底面处已发生, bin-9 子气泡组沿轴向含量逐渐减小, 而 bin-8 至 bin-4 子气泡组沿轴方的含量先增加后减小, 当 $Y > 0.3$ m 时气泡主要由 bin-0 至 bin-3 子气泡组组成。图 7(b)是由 bin-9 子气泡组破碎生成的小气泡在轴向上的分布, 气泡发生破碎行为较少, 小气泡占气泡的含量较小, 在小气泡中 bin-10 子气泡组的生成较多。

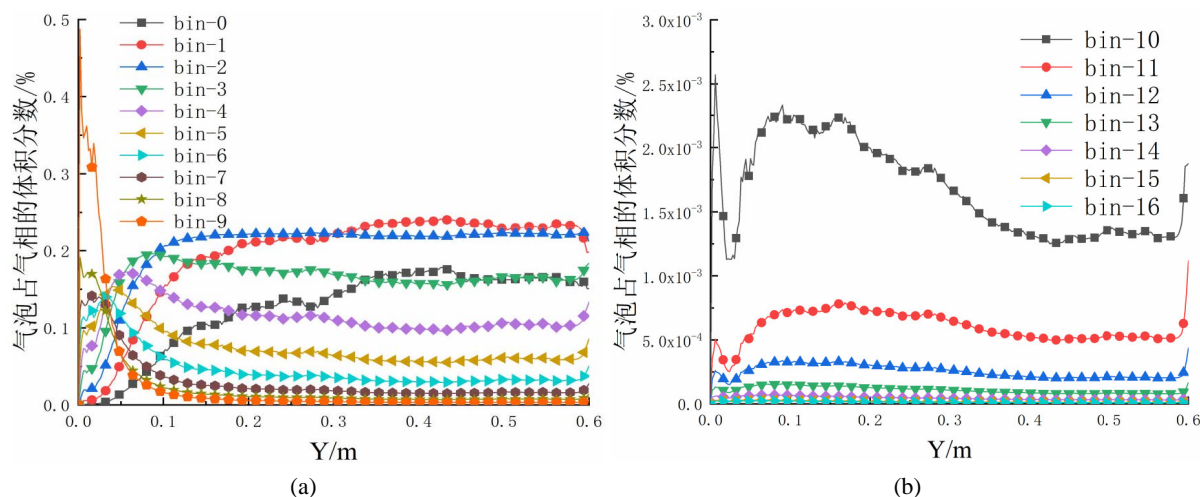


Figure 7. The axial distribution of bubble size when the high gravity intensity is 5 g

图 7. 超重力强度为 5g 气泡尺寸的轴向分布

图 8 是超重力强度为 10 g 时各子气泡组在轴向上的分布。其与超重力强度为 1 g、5 g 时的子气泡组在轴向上的分布特点存在明显的不同, 在轴向上含量最大的子气泡的直径减小, 气泡主要 bin-5 至 bin-3 子气泡组组成, 且大气泡组在轴向上的含量存在一定的波动, 因为当超重力强度为 10 g 时, 气泡塔中心处气含率较大, 气体与液体的速度较重力强度较小时有明显的增加, 湍流强度增加, 湍流动能增大, 使大气泡得聚并及破碎行为变得剧烈, 各直径的子气泡组之间不断相互生成。由图 8(b)可得, 较超重力强度为 1 g、5 g 时, bin-10 至 bin-16 子气泡组的含量显著增加, 因为当超重力强度为 10 g 时, 气体与液体之间的速度差增大, 使气液两相间的剪切力增强, 在剪切力的作用下气泡的破碎行为不断增加, 使小气泡的含量逐渐增大。

5. 结论

本文为了研究气泡在气液离心分离设备及超重力设备中运动行为及气泡聚并与破碎特性, 根据气液离心分离设备及超重力设备中气液的受力特点, 将其简化为气泡在超重场中的运动, 通过 UDF 在径向上添加一个恒定超重力场。通过 CFD-PBM 模型模拟了气泡在不同超重力场的运动, 分析了不同超重场对塔内气液速度、平均气含率、气泡数密度分布的影响, 并揭示了超重力中气泡聚并破碎的规律。结论如下:

1) 气泡在超重力的作用下向塔中心处聚集, 气相主要分布在塔中心处, 平均气含率随着超重力场强度的增加而增大。

2) 当超重力强度较低时, 气泡主要发生聚并, 大直径气泡所占比例较大, 气泡的尺寸分布范围较窄; 当超重力强度大于 8 g 时, 气泡破碎显著增多, 小气泡数量明显增加, 气泡尺寸分布范围变宽。

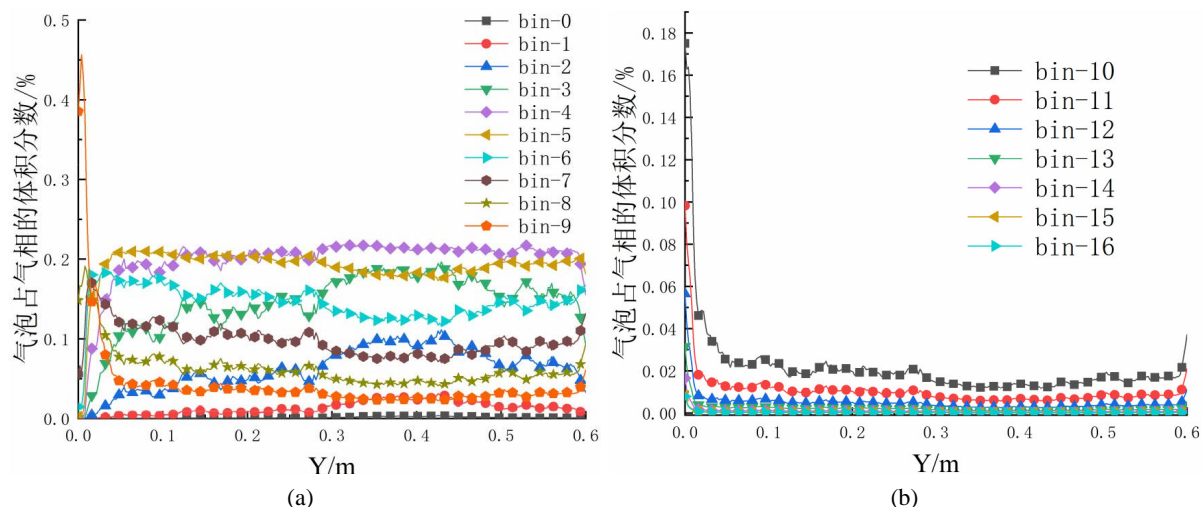


Figure 8. The axial distribution of bubble size when the high gravity intensity is 10 g
图 8. 超重力强度为 10g 气泡尺寸的轴向分布

3) 在超重力中气泡沿气泡塔轴向发生剧烈聚集与破碎现象,随着超重力场强度的增加,在轴向上占比最大的子气泡组的直径逐渐减小,小气泡的占比逐渐增加,气泡发生破碎与聚并的位置不断靠近气泡塔底部。

参考文献

- [1] Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., *et al.* (2017) The Dual Effect of Viscosity on Bubble Column Hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, **158**, 509-538. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.003>
- [2] Tomiyama, A., Celata, G.P., Hosokawa, S., *et al.* (2002) Terminal Velocity of Single Bubbles in Surface Tension Force Dominant Regime. *International Journal of Multiphase Flow*, **28**, 1497-1519. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00032-0)
- [3] Tomiyama, A., Tamai, H., Zun, I., *et al.* (2002) Transverse Migration of Single Bubbles in Simple Shear Flows. *Chemical Engineering Science*, **57**, 1849-1858. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00085-4)
- [4] Yang, N. and Xiao, Q. (2017) A Mesoscale Approach for Population Balance Modeling of Bubble Size Distribution in Bubble Column Reactors. *Chemical Engineering Science*, **170**, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.01.026>
- [5] 蔡禄, 孙治谦, 朱丽云, 等. 气液旋流分离技术应用研究进展[J]. 石油机械, 2021, 49(1): 102-109.
- [6] 高璟, 刘有智, 常凌飞. 超重力技术在电化学反应过程中的应用进展[J]. 化学工程, 2011, 39(6): 12-15+49.
- [7] 王明涌, 邢海青, 王志, 等. 超重力强化氯碱电解反应[J]. 物理化学学报, 2008, 24(3): 520-526.
- [8] 李皓月, 刘有智, 高璟, 等. 超重力-电催化-Fenton 耦合法处理含酚废水[J]. 过程工程学报, 2015, 15(6): 1006-1011.
- [9] Sanyal, J., Vásquez, S., Roy, S., *et al.* (1999) Numerical Simulation of Gas-Liquid Dynamics in Cylindrical Bubble Column Reactors. *Chemical Engineering Science*, **54**, 5071-5083. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00235-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00235-3)
- [10] Oey, R.S., Mudde, R.F. and van den Akker, H.E.A. (2003) Sensitivity Study on Interfacial Closure Laws in Two-Fluid Bubbly Flow Simulations. *AIChE Journal*, **49**, 1621-1636. <https://doi.org/10.1002/aic.690490703>
- [11] Tabib, M.V., Roy, S.A. and Joshi, J.B. (2007) CFD Simulation of Bubble Column—An Analysis of Interphase Forces and Turbulence Models. *Chemical Engineering Journal*, **139**, 589-614. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.09.015>
- [12] Gemello, L., Plais, C., Augier, F., *et al.* (2019) Population Balance Modelling of Bubble Columns under the Heterogeneous Flow Regime. *Chemical Engineering Journal*, **372**, 590-604. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.109>
- [13] Hu, G., Ma, Y., Zhang, H., *et al.* (2021) Investigation on Sub-Models of Population Balance Model for Subcooled Boiling in Vertical Gas-Liquid Flow by Comprehensive Evaluation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **167**, Article ID: 120816. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120816>
- [14] Guo, K.Y., Wang, T.F., Liu, Y.F., *et al.* (2017) CFD-PBM Simulations of a Bubble Column with Different Liquid

- Properties. *Chemical Engineering Journal*, **329**, 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.071>
- [15] Hulburt, H.M. and Katz, S. (1964) Some Problems in Particle Technology: A Statistical Mechanical Formulation. *Chemical Engineering Science*, **19**, 555-574. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(64\)85047-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(64)85047-8)
- [16] Randolph, A.D. (1964) A Population Balance for Countable Entities. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **42**, 280-281. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450420612>
- [17] Lee, C.H., Erickson, L.E. and Glasgow, L.A. (1987) Bubble Breakup and Coalescence in Turbulent Gas-Liquid Dispersions. *Chemical Engineering Communications*, **59**, 65-84. <https://doi.org/10.1080/00986448708911986>
- [18] Luo, H. and Svendsen, H.F. (1996) Modeling and Simulation of Binary Approach by Energy Conservation Analysis. *Chemical Engineering Communications*, **145**, 145-153. <https://doi.org/10.1080/00986449608936473>
- [19] Lehr, F., Millies, M. and Mewes, D. (2002) Bubble-Size Distribution and Flow Fields in Bubble Columns. *AIChE Journal*, **48**, 2426-2443. <https://doi.org/10.1002/aic.690481103>
- [20] 赵腾飞, 张华. 气泡碰撞过程中形变及破碎现象影响因素分析[J/OL]. 计算物理, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2011.O4.20210701.1903.004.html>, 2021-12-16.
- [21] 陈烁, 王太, 苏硕, 谢英柏, 等. 均匀电场中气泡上升特性的实验研究[J]. 力学学报, 2021, 53(10): 2736-2744.
- [22] Zhang, X.B., Zheng, R.Q. and Luo, Z.H. (2020) CFD-PBM Simulation of Bubble Columns: Effect of Parameters in the Class Method for Solving PBEs. *Chemical Engineering Science*, **226**, Article ID: 115853. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115853>
- [23] Zhang, H., Sayyar, A., Wang, Y., et al. (2020) Generality of the CFD-PBM Coupled Model for Bubble Column Simulation. *Chemical Engineering Science*, **219**, Article ID: 115514. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115514>
- [24] 张华海, 王铁峰. CFD-PBM 耦合模型模拟气液鼓泡床的通用性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 487-495.
- [25] 高颂, 徐燕燕, 李继香, 叶爽, 黄伟光. 基于 TFM-PBM 耦合模型的离心泵内微气泡破碎合并的模拟研究[J]. 化工学报, 2021, 72(10): 5082-5093.
- [26] Liang, X.-F., Pan, H., Su, Y.-H. and Luo, Z.-H. (2016) CFD-PBM Approach with Modified Drag Model for the Gas-Liquid Flow in a Bubble Column. *Chemical Engineering Research and Design*, **112**, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.06.014>
- [27] Liao, Y. and Lucas, D. (2010) A Literature Review on Mechanisms and Models for the Coalescence Process of Fluid Particles. *Chemical Engineering Science*, **65**, 2851-2864. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.02.020>
- [28] Luo, H. (1993) Coalescence, Breakup and Liquid Circulation in Bubble Column Reactors.