

8-17-2020

Characteristics Study of Internal Gas-Liquid Two Phase Flow Field of Three Layers of Air Stirred Tank Reactor

Xiaodong Hu

1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;;*

Dexin Zhang

1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;;*

Jiang Rong

2. *Engineering Training Center of Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;;*

Zenghui Wu

3. *Weihai Chemical Machinery CO., LTD, Weihai 264203, China;;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Characteristics Study of Internal Gas-Liquid Two Phase Flow Field of Three Layers of Air Stirred Tank Reactor

Abstract

Abstract: *The fluid dynamics and the gas-liquid distribution character in a three-layer stirred tank reactor with 2KSX (four wide blade propeller type stirrer) and PDT (parabolic disc turbine) were analyzed with the MRE (multi-reference frame) method based on Euler-Euler and population balance models. The total and local gas-hold were calculated. The conclusions show that: axial flow was produced by double stir upper KSX with radial flow produced by the third layer of PDT, gas-hold was improved with double-upper-layer stirrers axial driven and the lowest stirrer axial driven, gas-hold increased with the stirred time going on, which would not be extended with stirring with the time more than 26 s.*

Keywords

Stirred tank reactor, MRF, Euler-Euler model, CFD

Authors

Xiaodong Hu, Dexin Zhang, Jiang Rong, Zenghui Wu, and Tian Qiang

Recommended Citation

Hu Xiaodong, Zhang Dexin, Jiang Rong, Wu Zenghui, Tian Qiang. Characteristics Study of Internal Gas-Liquid Two Phase Flow Field of Three Layers of Air Stirred Tank Reactor[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 396-403.

三层搅拌式反应釜内部气液流动特性研究

胡效东¹, 张德新¹, 姜蓉², 武增辉³, 田强⁴

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学工程训练中心, 山东 青岛 266590;
3. 威海海化工机械有限公司, 山东 威海 264203; 4. 中国石油化工股份有限公司济南分公司, 山东 济南 250101)

摘要: 选用 Euler-Euler 多相流模型和群体平衡模型, 采用多重参考系(multi-reference frame, MRF)方法, 分析 2K SX(四宽叶旋桨搅拌器)+抛物线圆盘涡轮(parabolic disc turbine, PDT)三层搅拌器反应器内部流场和气液两相分布特性, 计算反应器内整体和局部气含率的分布。得出结论: 搅拌反应器内上层和中层搅拌桨产生轴向流动, 下层搅拌桨产生径向流动, 并且和反应器内壁的共同作用下形成一个循环变化的流动; 利用宽叶旋桨搅拌器的轴向驱动, 及抛物线圆盘涡轮搅拌器的径向驱动作用, 提高搅拌反应器的气含率, 使其局部气含率的分布较为均匀; 搅拌反应器内部的气含率随着搅拌时间的延长而增加, 当搅拌 26 s 之后, 内部的气含率基本不再变化, 延长搅拌时间并不能增加内部的气含率。

关键词: 搅拌式反应器; MRF; 欧拉模型; CFD

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 02-0396-08

Characteristics Study of Internal Gas-Liquid Two Phase Flow Field of Three Layers of Air Stirred Tank Reactor

Hu Xiaodong¹, Zhang Dexin¹, Jiang Rong², Wu Zenghui³, Tian Qiang⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Engineering Training Center of Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Weihai Chemical Machinery CO., LTD, Weihai 264203, China; 4. Ji'nan Branch, China Petroleum Chemical Co., Jinan 250101, China)

Abstract: The fluid dynamics and the gas-liquid distribution character in a three-layer stirred tank reactor with 2K SX (four wide blade propeller type stirrer) and PDT (parabolic disc turbine) were analyzed with the MRE (multi-reference frame) method based on Euler-Euler and population balance models. The total and local gas-hold were calculated. The conclusions show that: axial flow was produced by double stir upper K SX with radial flow produced by the third layer of PDT, gas-hold was improved with double-upper-layer stirrers axial driven and the lowest stirrer axial driven, gas-hold increased with the stirred time going on, which would not be extended with stirring with the time more than 26 s.

Keywords: Stirred tank reactor; MRF; Euler-Euler model; CFD

引言

搅拌式反应器主要由釜体、搅拌器、加热及冷

却系统、密封装置、驱动系统和控制系统等部分组成^[1]。气液两相搅拌反应器广泛应用于化工、制药和食品加工等行业。气相在液相内的含量、分布特性、气泡的大小均对搅拌反应器的工作特性有影响。实验法和数值模拟法是研究气液两相搅拌反应器的主要方法。采用 PIV 技术利用粒子对流体的跟踪性来测定流场速度的流动, 获得平面的瞬态速度场^[2]。而 LIF 测量技术可以用来测量搅拌反应器



收稿日期: 2014-09-17 修回日期: 2014-10-26;
基金项目: 中国博士后科学基金(2012M511015)
作者简介: 胡效东(1971-), 男, 山东, 博士, 副教授, 研究方向为化工设备先进制造技; 张德新(1989-), 男, 山东, 硕士, 研究方向为化工过程机械; 姜蓉(1976-), 女, 山东, 研究方向为机械设计理论。

<http://www.china-simulation.com>

内的混合反应, 考察偏心搅拌浆的方向、浆组合方式、加料点位置等参数对釜内混合性能的影响^[3]。非侵入性电子技术、单电压力测量技术和自由表面录像技术, 测量实验室用搅拌反应器内设定位置的气含量和气泡大小分布^[4]。有关反应器的研究体现在多个方面: 基于滑移网格的反应器内流体特性研究^[5]、反应器内流体动力学特性对流场内颗粒分散及悬浮效果的影响^[6]、搅拌反应釜内功率耗散情况^[7]等。而关于反应器内部结构对流场影响的研究方向有: 搅拌浆径比和浆叶间距对反应器流场的影响^[8]、反应器内挡板对其流体动力学特性的影响^[9]、搅拌浆转速对反应釜流场的影响^[10]。对反应设备内部气泡特性相关研究有: 多层搅拌反应釜内气含率特性研究^[11]、气液两相 CFD-PBM 耦合模拟^[12]等。反应器内流场流体动力学特性的研究方法主要有数值模拟^[13-15]、解析计算和实验方法。

本论文采用 Euler-Euler 双流体模型和群体平衡模型, 应用多重坐标等方法, 考虑气泡分散和聚合过程, 针对给定的 3 层搅拌反应器, 分析搅拌反应器内部的气液两相流体特性, 并计算整体和局部气含率, 研究该搅拌反应器的混合特性, 为工程实际应用提供理论依据。

1 气液两相流理论模型

本文主要研究气液两相搅拌反应器内部流体特性, 计算反应器内局部和整体气含率, 理论部分主要涉及 Euler-Euler 两相流模型、群体平衡模型和 Realizable k-ε 模型。

1.1 气液两相流基本方程组

在多相流模型中对各相连续介质的数学描述及处理方法均采用欧拉方法。气液两相流基本方程组, 主要包括连续性方程、动量方程。

连续性方程: 第 q 相的连续性方程见式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right) + S_q \quad (1)$$

其中, \vec{v}_q 为第 q 相的速度; m_{pq} 为从相 q 向相 p 的

传质; m_{qp} 为从相 p 向相 q 的传质; 传质机制可以单独制定。 S_q 为源项, 其缺省值为零, 也可以指定为常数或用户定义质量源项。

动量方程第 q 相的动量方程见式(2)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q \right) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \left(\vec{R}_{pq} + \overline{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \overline{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) + \left(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q} \right) \quad (2)$$

其中: g 为重力加速对; τ 为第 q 相的应力-应变张量见式(3)。

$$\overline{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (3)$$

其中, μ_q 和 λ_q 分别为第 q 相的剪切粘性系数和体积粘性系数; F_q 为外部体积力; $F_{lift,q}$ 为升力; $F_{vm,q}$ 为虚质量立; R_{pq} 为相间相互作用力; p 为各相共享的相同压力; v_{pq} 为相速度。

必须用相同相互作用力; R_{pq} 的适当的表达式使式(2)封闭。相间作用力与摩擦力、压力、粘连等效应有关, 并满足 $R_{pq} = -R_{qp}$ 和 $R_{qq} = 0$ 的条件。

FLUENT 采用一个简单的形式:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} \left(\vec{v}_p - \vec{v}_q \right) \quad (4)$$

其中: $K_{pq} = K_{qp}$, 为相间动量交换系数。

1.2 群体平衡方程

在 FLUENT 中, 群体平衡模型(PBM)可以系统的研究气泡聚并和破碎作用对气泡尺寸大小分布的影响, 从而更加深入了解气液两相系统中气泡的流动及变化行为。

PBM 模型用于气液两相模型中, 仅仅考虑气泡聚并和破碎作用时, 其表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(v,t) + \frac{\partial}{\partial t} (u_{gt}(v,t) n(v,t)) = B_B - D_B + B_C - D_C \quad (5)$$

$$B_B = \int_v^{\infty} g(\varepsilon; v) n(\varepsilon, t) d\varepsilon \quad (6)$$

$$D_B = n(v, t) \int_0^v g(v, \varepsilon) d\varepsilon \quad (7)$$

$$B_C = \frac{1}{2} \int_0^v Q(v - \varepsilon, \varepsilon) n(v - \varepsilon, t) n(v, t) d\varepsilon \quad (8)$$

$$D_C = n(v, t) \int_0^\infty Q(v, \varepsilon) n(\varepsilon, t) d\varepsilon \quad (9)$$

式中: $n(v, t)$ 为气泡大小的个数密度概率函数; B_B , D_B , B_C , D_C 分别表示在破碎及聚并后气泡的产生及消亡速率; $g(\varepsilon; v)$ 是气泡破碎速率函数; $Q(v; \varepsilon)$ 是气泡聚并速率函数。

1.3 湍流模型 Realizable k- ε 模型

液体作为本论文研究的基本相, 由于搅拌器、挡板等结构的存, 搅拌反应器内流体存在较强的流线弯曲、漩涡和旋转的工况, 本论文湍流模型选用带旋流修正的 Realizable k- ε 模型, 关于 k 和 ε 的方程见(10)(11)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (11)$$

$$C1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (12)$$

式中: G_k 是由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 是由浮力产生的湍流动能; Y_M 由于在可压缩湍流中, 过渡的扩散产生的波动; C_2 , $C_{1\varepsilon}$ 是常量; σ_k 和 σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数。 S_k 和 S_ε 是用户定义的。

2 搅拌反应器建模及网格划分

2.1 几何物理模型

本文研究三层搅拌反应釜如图 1 所示。

实际搅拌反应器的结构上下两端为封头, 中间圆柱体结构。而上端封头在仿真分析中对实验影响较小, 所以此模型没有考虑。搅拌器内部有上中下三层搅拌桨, 其中上层和中层为四宽叶旋浆搅拌

器、下层为抛物线圆盘涡轮搅拌器; 反应器内壁有 4 块挡板。搅拌反应釜主要结构参数为: 釜高 750 mm, 其中圆柱部分高 590 mm; 反应器内径为 380 mm; 搅拌器外径为 140 mm, 如图 1 所示。

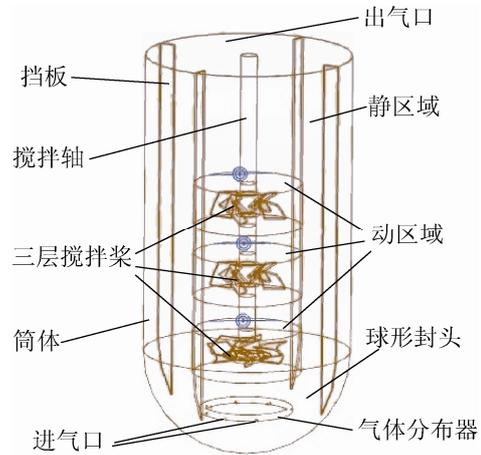


图 1 反应釜三维模型图

2.2 流体区域建模及网格划分

本文所研究三层搅拌反应器建模应用 UG3 维建模软件。如图 1 所示, 建模过程中将筒体和球形封头建为实体作为流体静止区域; 挡板、搅拌轴和气体分布器建成空心; 三层搅拌桨作为动区域另外独立建模, 之后, 将其与流体静止区域进行装配。

本文采用多重参考系(MRF)进行研究, 计算区域由液相和气相两部分组成, 其中计算液面高度为 590 mm, 并且需要把计算区域划分成动区域和静区域, 如图 2 所示。其中设置水位主相, 氩气为次相。

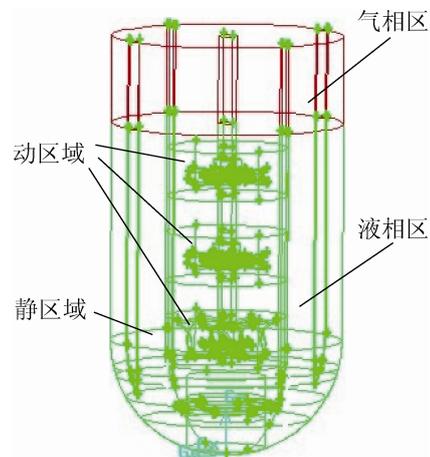
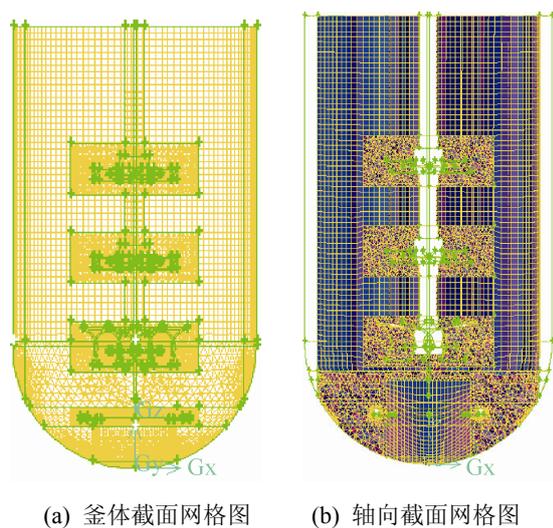


图 2 反应釜流体区域分块方案

本文采用 FLUENT 软件的前处理软件 GAMBIT 进行网格划分。搅拌反应器包括三层搅拌桨、挡板、排气装置和球形封头等部件, 比较复杂, 在保证计算精度的前提下为了降低计算量, 本文采用六面体和四面体混合网格进行划分, 如图 3 所示。



(a) 釜体截面网格图 (b) 轴向截面网格图
(c) 桨叶区横截面网格图 (d) 无桨叶区横截面网格图

图 3 网格截面图

优先使用六面体网格, 在形状不规则的区域使用四面体网格。为了保证网格质量, 对模型进行分块处理。模型共划分为 11 块区域, 其中对动区域、气体分布器区域和球形封头等部分形状不规则区域采用四面体网格划分, 其余部分采用六面体网格划分, 生成网格总数为 912 585。网格划分完成后进行的网格质量检查截面图, 图 3(a) 图为釜体总图截图, (b) 图、(c) 图和 (d) 图分别为轴截面、桨叶区和无桨叶区截面图, 从各截面图可以看出, 网格质量符合要求。

2.3 设置边界条件和创建计算模型

设置三层搅拌桨区域为动区域, 其余部分为静区域。将动区域和静区域的重合面定义为滑移面, 边界条件设置为 interface。如图 4 所示, 一共有 7 对 interface 面, 每对 interface 面包含 2 个重合面。

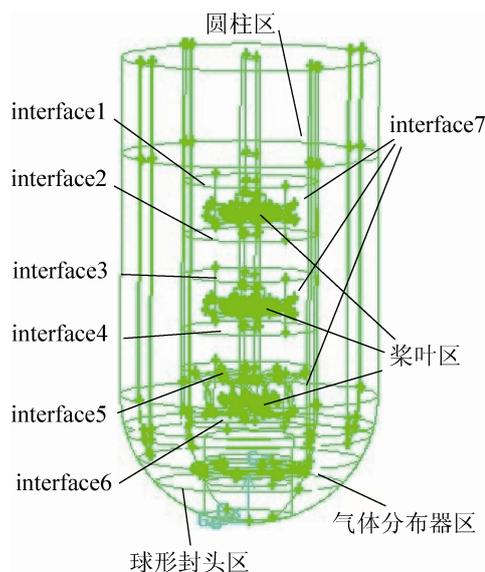


图 4 反应釜流体区域网格分块方案

三层搅拌桨和搅拌轴的面设置为 Moving Wall, 在 GAMBIT 中定义为无滑移固壁, 记为搅拌转动面。随后在 FLUENT 中重新定义这些面为 Moving Wall。本文研究的搅拌反应器为通气反应釜, 将排气管管口圆面设置为进气口, 定义为 velocity-inlet; 将模型上圆面设置为出气口, 定义为 pressure-outlet。在 FLUENT 中定义进气口 velocity-inlet 速度为 0.8 m/s, 定义出气口为 degassing, 其余面使用默认的无滑移固壁^[13]。

多相流采用 Euler-Eluer 模型。设置动区域为 Frame Motion, 角速度为 300 r/min。设置搅拌转动面随其所在区域转动, 相对速度为 0; 速度压力耦合方式选用 Phase coupled SIMPLE 算法。

3 仿真计算结果

本课题仿真结果基于瞬态模拟方法。设定搅拌

转速为 300 r/min, 搅拌器转动一周需 0.2 s, 记为 $1 T=0.2$ s。本课题仿真模拟结果分析拟选取四个时间点(0.5 T, 30 T, 80 T, 125 T)的结果进行对比分析, 0.5 T 为初始搅拌流场的模拟时刻, 模拟至 125 T 时刻后釜内流场及汽液两相分布特性已基本

稳定。本文所要分析的模拟结果主要有速度云图、流场迹线图和气液两相图。

3.1 不同时刻流场速度分布变化

图 5 为不同时刻搅拌反应釜纵截面速度云图。

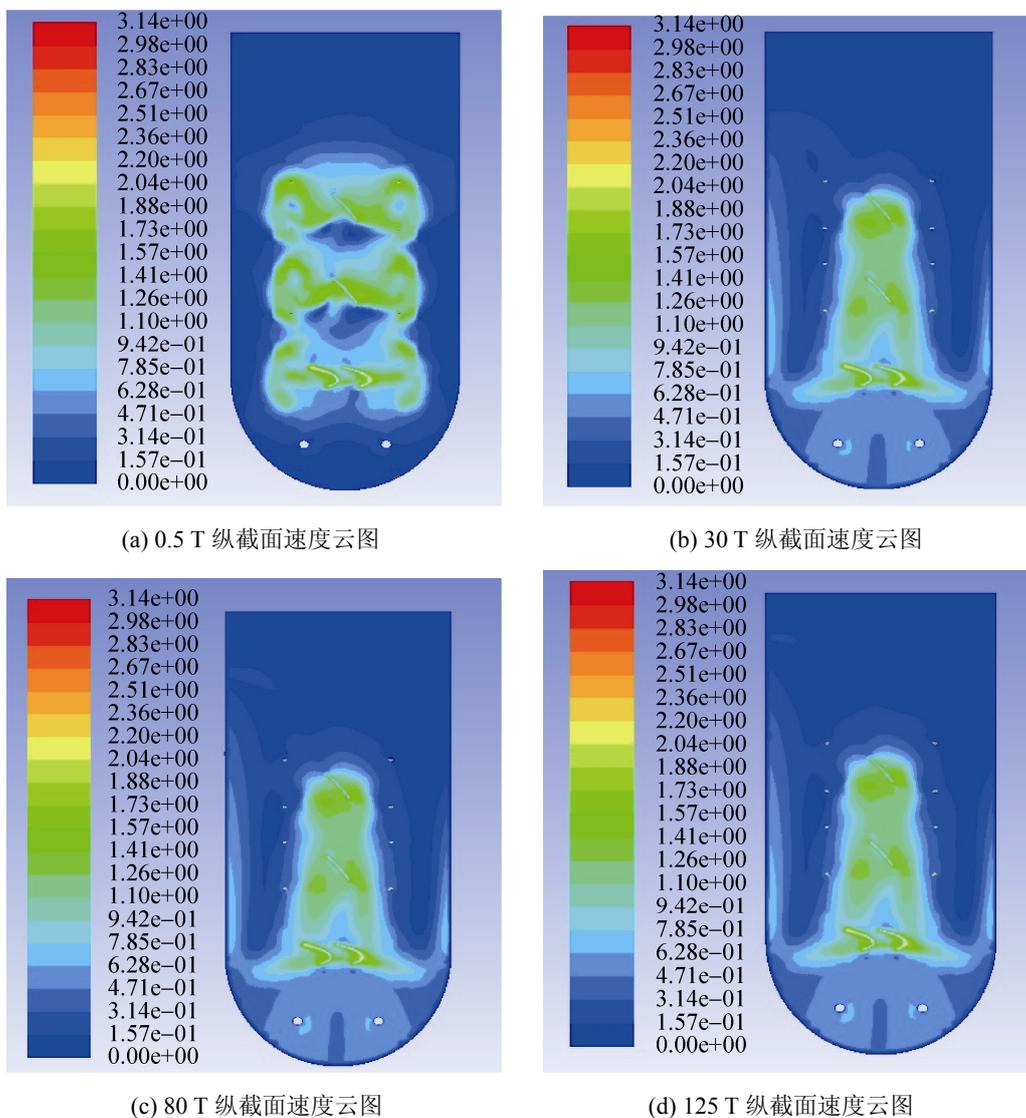


图 5 不同时刻纵截面速度云图

图 5(a)为 0.5 T 时的速度云图, 此时高速区主要集中在搅拌桨周围, 远离搅拌桨区域速度相对较小。随着时间的推移, 搅拌桨和中搅拌桨所产生的轴流式影响渐渐加强, 并且引起液面的扰动, 如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。上搅拌桨和中搅拌桨主要产生轴向流动, 下搅拌桨主要产生径向流动,

反应釜内液体做径向流动时, 在到达反应釜内壁后与之产生碰撞, 液体流动方向发生变化, 产生 2 个支流。向上流动部分受上层搅拌桨的影响参与到其产生的轴向流运动, 向下流动部分与反应釜底部相碰撞后又继续回到其径向流动, 所以反应釜内流场流动规律如上所述做周而复始的循环运动。

3.2 不同时刻流场矢量分布变化

图 6 为不同时刻反应釜内流场矢量图。刚开始搅拌时, 在上层搅拌桨和中间搅拌桨附近轴向和径向均产生比较明显的流动, 下层搅拌桨产生的径向流动更为明显, 如图 6(a)所示。

随着搅拌时间的延长, 反应釜内液体在 3 个桨叶区作环流上升运动其中也包括了较少的环流下降运动, 并且在桨叶区运动比较强烈。由三维流线

图可以看出最下方桨叶区液体的环流下降运动较为强烈, 这是由于最下方桨叶区没有受到其他桨叶区产生的环流上升作用的影响, 如图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)所示。最上方桨叶区的液体通过环流上升到液面后向心部流动, 继而沿搅拌轴向下返回桨叶区, 这就造成了气液两相分界面出现中心下凹、四周上升的锥形的现象。但是, 当超过 30 T 时, 搅拌反应器内部的流速和流向差别不大。

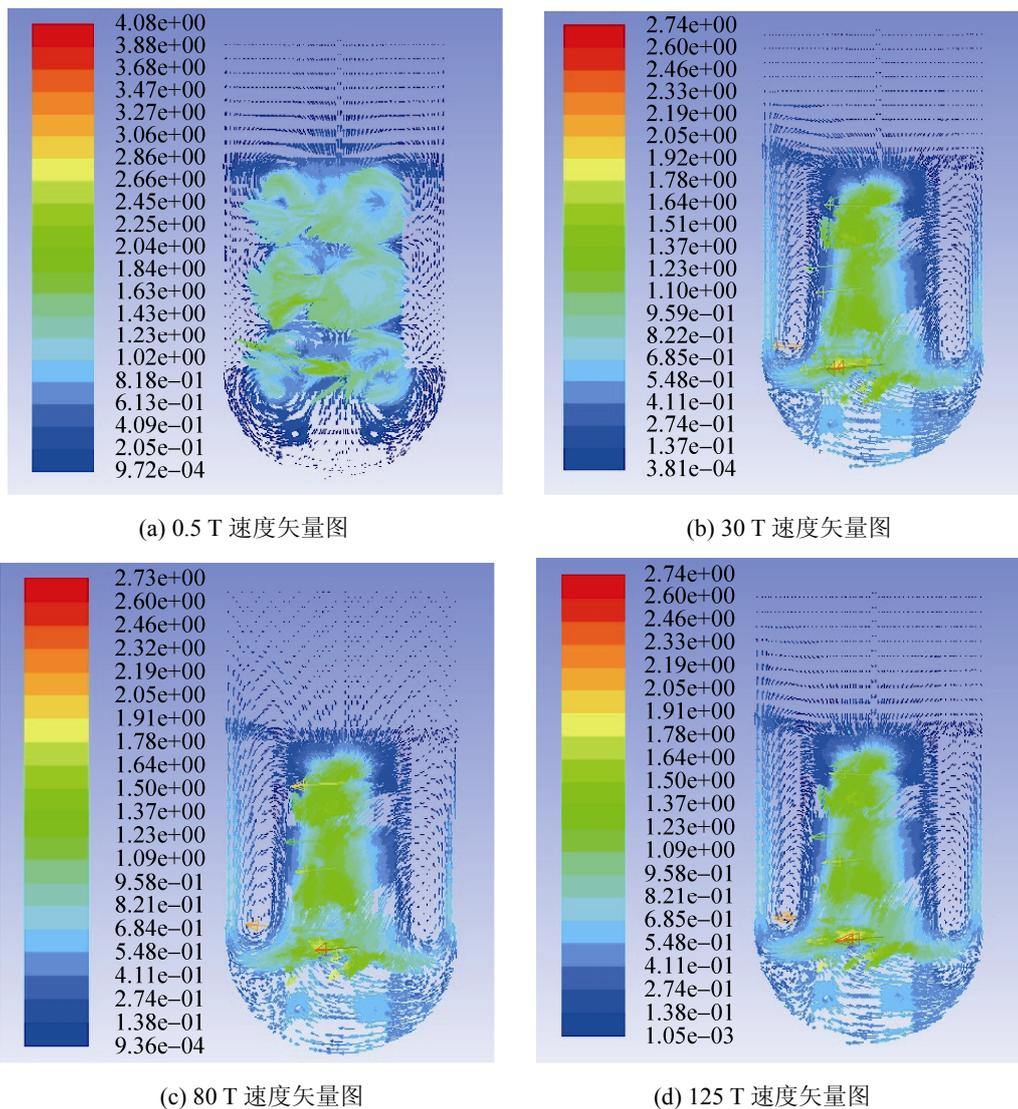


图 6 不同时刻反应釜内流场轴截面速度矢量图

由矢量图可以清晰直观的看到反应釜内流场流体运动规律: 上层和中间搅拌桨主要引起反应釜内流体轴向流动, 下层搅拌桨主要引起径向流动。

由下层搅拌桨产生的径向流到达反应釜内壁时与之发生碰撞并分成 2 部分, 一部分流体沿内壁向上并且受上面两层搅拌桨的扰动影响继续参与到轴

向流运动中；另一部分流体沿内壁向下流动，当到达反应釜底部时与之发生二次碰撞后返回向上流动，当到达下层搅拌桨的扰动区域后受其影响继续参与径向流动，与速度云图模拟结果相一致，如图 6 中的矢量图所示。反应釜内流体如上所述做周而复始的循环流动。

3.3 不同时刻气液两相分布变化

图 7 分别为 0.5 T, 30 T, 80 T, 125 T 时刻气

含率不同分布区间内气液两相分布图。反应釜内由空气和水组成气液两相，图 7(a)为 0.5 T 时气液两相分布云图，此时反应釜内部并无明显变化，通气对反应釜内气含率影响较小。随着搅拌时间的延长，反应器上端的气液分界面产生波动并形成锥形，在上层搅拌反应桨上方气含率增大，这是由于上层搅拌桨转动将气液分界面上的空气吸入液相所致，图 7(b)为 30 T 时的气液两相分布云图。

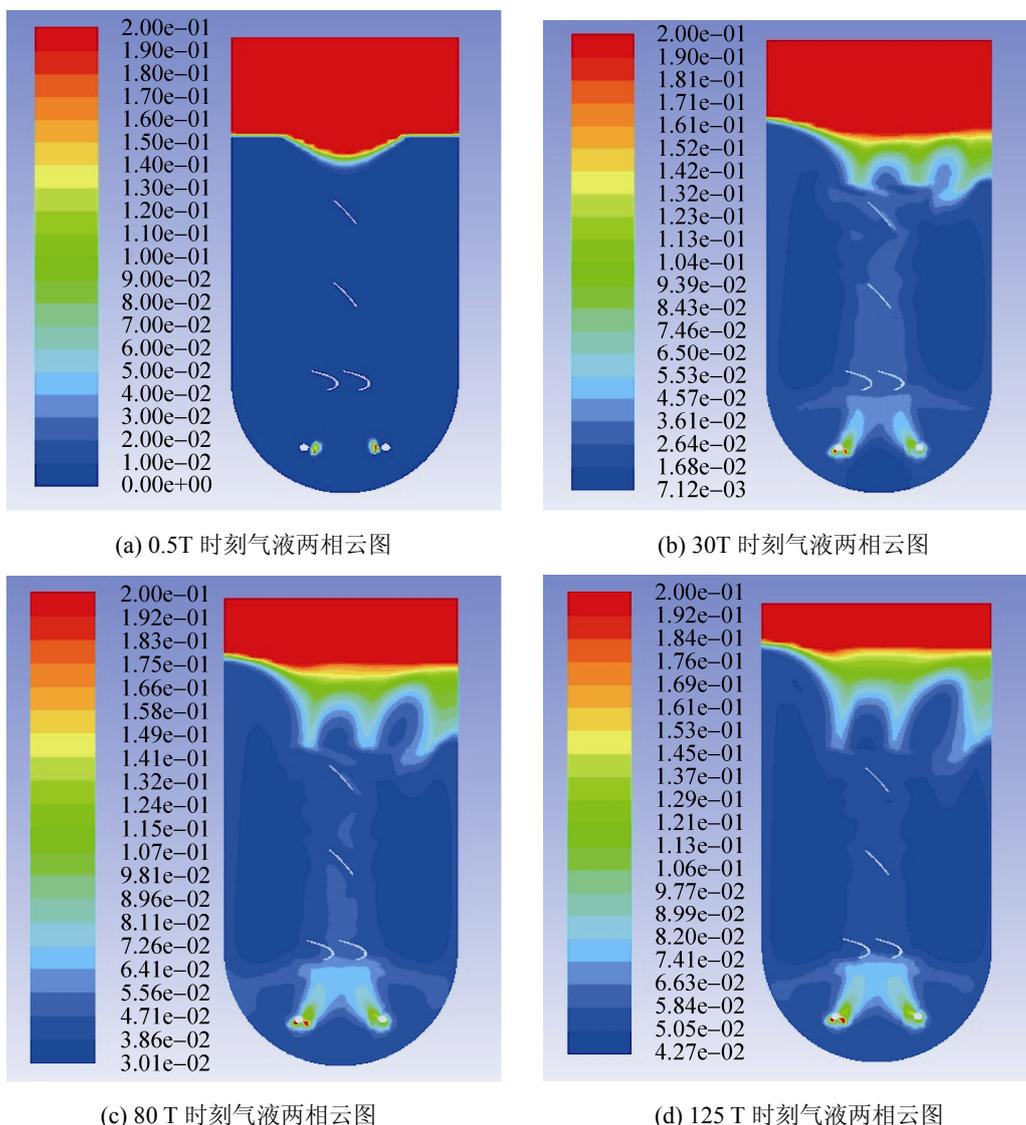


图 7 不同时刻反应釜内气液两相分布云图

随着搅拌时间的推移，由于上层搅拌桨在反应釜内引起轴向流的作用增强，使搅拌桨周围的气含率升高。与此同时随着三层搅拌桨对反应釜内流场

的影响，通气口向反应釜内通入的空气随着液体流动并且改变了周围的气含率，图 7(c)和图 7(d)分别为 80 T 和 125 T 时的气液两相分布云图。此时，

三层搅拌桨和通气装置的共同作用下, 反应釜内流场趋于稳定。从开始到 125 T 时刻反应釜内气含率以近似线性的方式逐渐增大, 当达到 125 T 时刻, 反应釜内气含率达到稳定状态, 保持在 5% 左右, 且内部最小气含率为 4.27%。

为了研究搅拌时间(转数)对于反应器整体气含率的影响, 分别分别计算了 10 T~200 T 内的气含率, 如图 8 所示。从 0 T~130 T 内的气含率基本上呈直线上升, 但是从 130 T~200 T 内气含率基本没有变化。说明搅拌效果随着时间的延长逐渐增加, 但是搅拌到一定转数之后, 气含率基本恒定, 不再随搅拌时间的延长而增加。

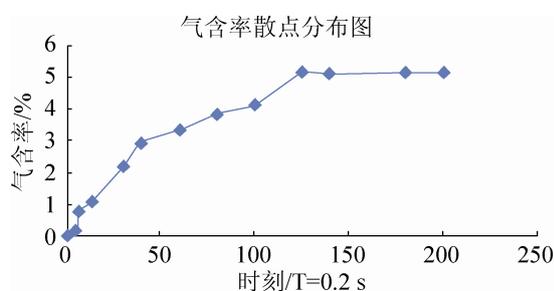


图 8 气含率散点分布图

4 结论

本论文采用 Euler-Euler 双流体模型和群体平衡模型, 应用多重坐标方法, 考虑气泡分散和聚合过程, 针对给定的三层搅拌反应器, 分析搅拌反应器内部的气液两相流体特性, 并计算整体和局部气含率, 研究该搅拌反应器的混合特性。得出如下结论:

(1) 搅拌反应器内上层和中层搅拌桨产生轴向流动, 下层搅拌桨产生径向流动, 并且和反应器内壁的共同作用下形成一个循环的流场。

(2) 利用 2K5X(四宽叶旋桨搅拌器)的轴向驱动作用和 PDT(抛物线圆盘涡轮搅拌器)的径向驱动作用, 能够提高搅拌反应器的气含率, 使其局部气含率的分布较为均匀。

(3) 搅拌反应器内部的气含率随着搅拌时间的延长而增加, 当搅拌时刻达到 130 T 时刻之后, 内部的气含率基本不再变化。延长搅拌时间并不能增加内部的气含率。

参考文献:

- [1] 邵潜, 龙军. 化学反应器分析 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2005.
- [2] 王文坦, 张梦雪, 金涌, 等. 激光诱导荧光技术在液体混合可视化研究中的应用 [J]. 化工学报, 2013, 64(3): 771-778.
- [3] 赵静, 蔡子琦, 高正明. 组合桨搅拌槽内混合过程的实验研究及大涡模拟 [J]. 北京化工大学学报, 2011, 38(6): 22-28.
- [4] K Samaras, M Kostoglou, T D Karapantsios, et al. Effect of Adding Glycerol and Tween 80 on Gas Holdup and Bubble Size Distribution in an Aerated Stirred Tank [J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects (S0927-7757), 2014, 441(3): 815-824.
- [5] 胡效东, 田强. 基于滑移网格的反应釜内部流体动力学特性研究 [J]. 压力容器, 2013, 30(7): 30-55.
- [6] Altway A, Setyawan H, Margonoet G, et al. Effect of particle size on simulation of three-dimensional solid dispersion in stirred tank [J]. Chem Eng Res Des (S0263-8762), 2001, 79(8): 1011-1016.
- [7] 沈春银, 陈剑佩, 张家庭, 等. 气液两相机械搅拌釜中水翼-涡轮组合桨的功率消耗 [J]. 华东理工大学学报, 2012, 28(6): 578-583.
- [8] 侯权, 潘红良, 冯巧波. 基于 FLUENT 的搅拌反应罐流场的优化研究 [J]. 机械设计与研究, 2005, 21(3): 78-82.
- [9] 潘传九, 葛文娜, 陆晓峰. 基于 CFD 的搅拌釜流场数值模拟及预测 [J]. 化工进展, 2012, 31: 87-91.
- [10] 毕学工, 岳锐. 基于 FLUENT 的搅拌流场模拟研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2012, 35(5): 321-324.
- [11] 丁程兵. 多层搅拌反应釜内气含率的实验研究与数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [12] 徐琰, 董海峰, 田肖, 等. 鼓泡塔中液体-空气两相流的 CFD-PBM 耦合模拟 [J]. 化工学报, 2011, 10(62): 2699-2706.
- [13] Zhang Qinghua, Mao Zaisha, Yang Chao, et al. Numerical simulation of barium sulfate precipitation process in a continuous stirred tank with multiple-time-scale turbulent mixer model [J]. Ind Eng Chem Res (S0888-5885), 2009, 48(1): 424-429.
- [14] Gentric C, Mignon D, Bousquet J, et al. Comparison of Mixing in Two Industrial Gas-Liquid Reactors Using CFD Simulations [J]. Chem. Eng. Sci. (S0009-2509), 2005, 60(8/9): 2253-2272.
- [15] Kelly W, Gigas B. Using CFD to Predict the Behavior of Power law Fluids Near Axial-flow Impellers Operating in the Transitional flow Regime [J]. Chem. Eng. Sci. (S0009-2509), 2003, 58(10): 2141-2152.