

1-3-2019

Gas-liquid Flow Characteristics Study on the Amino Acid Fermentation Tank

Xiaodong Hu

Shandong University Of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

Qinglei Liu

Shandong University Of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

Fuyu Liu

Shandong University Of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

Dexin Zhang

Shandong University Of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

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.

Gas-liquid Flow Characteristics Study on the Amino Acid Fermentation Tank

Abstract

Abstract: Based on the Euler - Euler two-fluid model and population balance model, using MRF (multiple reference frame) method, the flow field of the rushton turbine stirred reactor and airfoil axial flow stirred reactor in fermentation tank is analyzed by Fluent. The information of the oxygen content and the size of bubble in the tank is obtained. The simulation results show that the axial flow produced by the airfoil axial flow stirred reactor and the radial flow produced by the rushton turbine stirred reactor interact with each other. The oxygen distribution is relatively uniform. There is an oxygen concentration near the mixing shaft and heat exchanger tube. The overall gas holdup is reached to 2.22%. The stirring power of the fermentation tank calculated by the simulation is 117.81 kW. The results of computational fluid dynamics (CFD) on fermentors are of industrial application value. The theoretical method used in the research has certain theoretical significance in solving the problems.

Keywords

amino acid fermentation, Euler model, multiple reference frame, gas holdup, population balance model

Recommended Citation

Hu Xiaodong, Liu Qinglei, Liu Fuyu, Zhang Dexin. Gas-liquid Flow Characteristics Study on the Amino Acid Fermentation Tank[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1988-1996.

氨基酸发酵罐内部气液流动特性研究

胡效东, 柳庆磊, 刘馥瑜, 张德新

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: 基于 Euler-Euler 双流体模型和群体平衡模型, 应用多重参考坐标系(MRF)方法, 运用 Fluent 分析发酵罐内由圆盘涡轮式搅拌器和翼型轴流式的三层搅拌器内部的流体特性, 计算发酵罐内部的氧气气含率及气泡大小。结果表明: 上两层搅拌器产生轴向流动, 最下层搅拌器产生径向流动, 相互作用形成循环流场。氧气分布比较均匀, 在搅拌轴和换热管附近有氧气集中的现象; 罐内部的整体气含率为 2.22%, 模拟计算得到发酵罐的搅拌功率为 117.81 kW。采用计算流体动力学方法对发酵罐的研究结果具有工业应用价值, 而在研究过程中用到的理论方法在解决问题时具有一定的理论意义。

关键词: 氨基酸发酵; 欧拉模型; 多重参考坐标系; 气含率; 群体平衡模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1988-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805047

Gas-liquid Flow Characteristics Study on the Amino Acid Fermentation Tank

Hu Xiaodong, Liu Qinglei, Liu Fuyu, Zhang Dexin

(Shandong University Of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Based on the Euler - Euler two-fluid model and population balance model, using MRF (multiple reference frame) method, the flow field of the rushton turbine stirred reactor and airfoil axial flow stirred reactor in fermentation tank is analyzed by Fluent. The information of the oxygen content and the size of bubble in the tank is obtained. The simulation results show that the axial flow produced by the airfoil axial flow stirred reactor and the radial flow produced by the rushton turbine stirred reactor interact with each other. The oxygen distribution is relatively uniform. There is an oxygen concentration near the mixing shaft and heat exchanger tube. The overall gas holdup is reached to 2.22%. The stirring power of the fermentation tank calculated by the simulation is 117.81 kW. The results of computational fluid dynamics (CFD) on fermentors are of industrial application value. The theoretical method used in the research has certain theoretical significance in solving the problems.

Keywords: amino acid fermentation; Euler model; multiple reference frame; gas holdup; population balance model

引言

我国是味精生产大国, 产量占全球近 70%,



收稿日期: 2016-07-17 修回日期: 2016-10-26;
基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014EEM018);
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术; 柳庆磊(1990-), 男, 山东, 硕士, 研究方向为动力工程; 刘馥瑜(1991-), 男, 硕士, 山东, 研究方向为化工过程机械。

董传亮指出我国谷氨酸发酵生产主要技术面^[1], 张伟鹏等认为通过模拟计算可以优化发酵罐结构, 这样, 也可以提升发酵生产量^[2]。发酵罐底部的气体分布器通入氧气后, 氧气在发酵液内产生气泡, 王红一等通过实验与理论计算得到气泡越小, 气泡的相对表面积越大的结论^[3], 气泡接触的液体就越多, 液体中氧的溶解速率就会越快,

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

• 1988 •

这对加快罐内介质反应具有积极作用。在整个发酵过程中, 发酵液中溶解氧的含量和均匀度是影响正常产酸的重要指标, 张庆文等对其做了论证^[4]。Yue-Qin Tang, 等认为理解发酵对改进发酵过程具有决定性作用^[5]。控制好溶解氧, 了解菌体在发酵过程中好氧情况, 适当增加或降低溶解氧会让发酵产量大大提升, 李小鑫等对此做了大量研究^[6]。研究发酵罐内的气液流动特性对发酵罐的工业设计应用具有重要参考意义。

本文采用数值模拟方法对发酵罐内气液两相流动状况进行分析研究, 分析气液两相在罐内的变化, 得到发酵罐内气泡粒径大小以及总体气含率和局部气含率的分布情况。分析此发酵罐的性能, 可以为该类发酵罐的工业设计、优化和应用提供依据。

1 气液两相流理论模型

本文主要研究发酵罐内部的气液两相流体特性, 通过模拟发酵罐内局部气含率分布和大小以及总体气含率的大小, 气泡尺寸大小以及气泡粒径分布, 结合流场进行分析, Li-na Kong 等认为这样做更符合实际情况^[7]。CHADDAN 等采用 Luo 等^[8]模型对气泡间的相互作用(聚并和破碎)进行分析研究。理论部分主要涉及连续性方程、动量方程、Euler-Euler 两相流模型(此模型包含有多个动量方程和连续方程来求解相, 而且压力项和界面交换系数耦合在一起)、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采用欧拉方法。气液两相流基本控制方程包括连续性方程、动量方程。

连续性方程: 第 q 相的连续性方程见公式(1)。

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

式中: 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。 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 相的动量方程见公式(2)。

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

式中: g 为重力加速度; τ 为第 q 相的应力-应变张量见公式(3)。

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

式中: 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; $F_{vm,q}$ 为虚质量力; 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。必须用相间相互作用力; 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, 如公式(4)。

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

式中: $K_{pq} = K_{qp}$, 为相间动量交换系数。

1.2 湍流模型 Realizable k-ε 模型

液体作为本论文研究的基本相, 由于搅拌反应器、挡板等结构的存在, 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 的方程见公式(5)~(7)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (6)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (7)$$

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_{1e} 是常量； σ_k 和 σ_e 是 k 方程和 e 方程的湍流 Prandtl 数。 S_k 和 S_e 是自定义的。

1.3 群体平衡方程

De rijk S E 等对气泡尺寸分布进行测量研究，气泡尺寸是影响计算结果的关键问题^[9-11]。李孟等认为利用群体平衡模型 (Population Balance Model, PBM) 模拟的气泡尺寸大小以及气泡分布更贴近实际，更精确^[12]。而蒋昌波等得到气泡在液体中的运动过程不稳定，其受各种力的作用，会发生变形的结论^[13]。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，其表达式见公式(8)~(12)：

$$\frac{\partial}{\partial t} n(v, t) + \frac{\partial}{\partial t} (u_{gr}(v, t) n(v, t)) = B_B - D_B + B_C - D_C \quad (8)$$

$$B_B = \int_v^\infty g(\varepsilon; v) n(\varepsilon, t) d\varepsilon \quad (9)$$

$$D_B = n(v, t) \int_0^v g(v, \varepsilon) d\varepsilon \quad (10)$$

$$B_C = \frac{1}{2} \int_0^v Q(v - \varepsilon; \varepsilon) n(v, t) d\varepsilon \quad (11)$$

$$D_C = n(v, t) \int_0^\infty Q(v; \varepsilon) n(\varepsilon, t) d\varepsilon \quad (12)$$

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。

2 构建发酵罐模型及划分网格

2.1 创建发酵罐流体模型

杨锋苓等认为发酵罐内流体的流动是一个非

稳态的过程^[14]。此发酵罐共有 3 层搅拌反应器，如图 1 所示。图 1 中：1 为出气口；2、3 为翼型轴流式搅拌器；4 为圆盘涡轮式搅拌器；5 为气体分布器；6 为挡板；7 为转轴；8 为消泡器。最下层为圆盘涡轮式搅拌器，如图 2(a)所示。上两层均为翼型轴流式搅拌器，如图 2(b)所示。在上封头附近有一消泡器，用于破坏生成的气泡，控制泡沫的增加，消除大量气泡。发酵罐内均匀设置十六个挡板，挡板是由圆管组合而成，用于罐内换热以及阻止氨基酸溶液在搅拌时打旋。运用三维软件 PROE 绘制氨基酸发酵罐的三维模型，发酵罐上下封头为标准椭圆封头，短半径为 1 040 mm，其中直边段为 40 mm，罐内径为 4 000 mm。上封头处有一出气口，孔径为 150 mm，气体分布器位于罐底部，分布器上共 8 个小孔，孔径为 150 mm。氨基酸溶液液位高度是 10 280 mm。

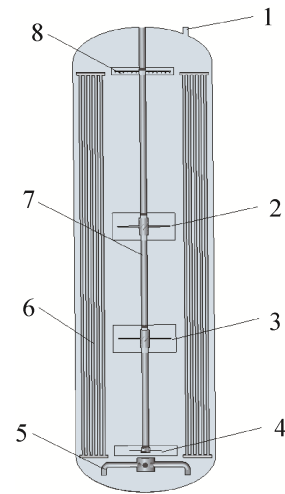
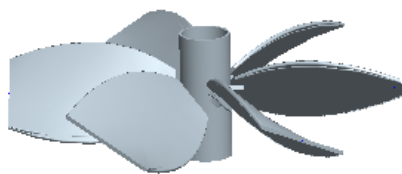


图 1 发酵罐计算模型
Fig. 1 Fermentation tank calculation model



(a) 圆盘涡轮式搅拌器



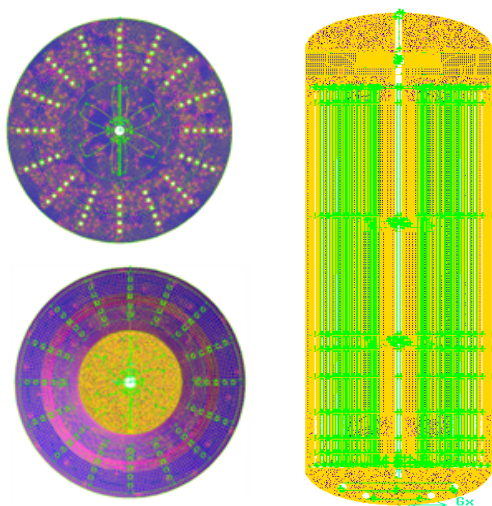
(b) 翼型轴流式搅拌器

图 2 搅拌器模型

Fig. 2 Stirrer model

2.2 网格划分及其质量检查

采用前处理软件 GAMBIT 对发酵罐计算模型进行划分网格, 本模型中含不规整的结构, 因此, 需采用六面体及四面体混合网格划分计算区域。为了更准确描述敏感区域的流动特性, 本工作对桨叶以及环形气体分布器周围进行了网格加密处理, 苏顺开等人认为这有利于模型的仿真计算^[15]。将本模型分成多个区域进行划分网格, 共划分成 19 个体, 将含有挡板, 气体分布器, 搅拌反应器, 消泡器, 上下椭圆封头的区域分别切分出来, 然后用四面体网格进行划分。其他区域均使用六面体网格进行划分。网格总数为 5 407 718 个, 网格质量最差为 0.954 254, 在 0.9 以上有 141 个, 如图 3 所示, 图 3(a)为轴向截面网格图, 图 3(b)为含有桨叶的横截面网格图。



(a) 轴向网格

(b) 横向网格

图 3 网格视图

Fig. 3 Grid view

2.3 设置边界条件和初始计算条件

在 GAMBIT 中发酵罐中的出气口设置为压力出口 (Pressure outlet), 进气口设置为速度入口 (Velocity inlet), 搅拌轴和桨叶设置为 Moving wall, 其他设置为 Wall。将速度入口的速度大小设置为 2.56 m/s, 搅拌轴和桨叶的转速设置为 120 rpm, 压力出口的出口压力为 1 个大气压。罐内部环境温度为 403 K, 压力为 0.15 Mpa, 采用压力耦合算法, 湍动能、耗散率离散格式、压力、动量以及体积分分数均采用一阶迎风格式, 其他参数均采用默认值, 模拟过程采用非稳态求解器求解, 陈婷等人认为这样较符合实际情况^[16]。

采用 Euler 双流体模型^[17]和 Realizable k- ϵ 湍流模型对两相流动进行模拟, 陈阿强等认为加入 PBM 模型模拟气泡的聚并与破碎得到模拟结果更可信^[18], 气液两相分别为氧气和氨基酸溶液, 两相参数如表 1 所示。

表 1 气液两相参数

Tab. 1 Gas-liquid two-phase parameters

参数	粘度/Pa.s)	密度/(kg/m ³)
气相(氧气)	1.919×10^{-5}	1.299 9
液相(氨基酸)	4×10^{-3}	1.04×10^{-3}

3 结果与讨论

本次模拟仿真结果是基于瞬态模拟方法得到的。搅拌转速为 120 rpm, 搅拌器转动周期为 0.5 s, 记为 $1T=0.5$ s。仿真模拟结果分析拟选取三个时间点(10 T、212 T、400 T)的结果进行对比分析, 10 T 为初始搅拌流场时刻, 模拟至 400 T 后, 相比 212 T 时刻, 流场速度区域面积没有明显变化较罐内流场速度变化及气液两相分布特性已基本稳定。本文主要对发酵罐内的速度场、气液两相和气泡粒径分布数值模拟结果进行分析。下面分析使用的流场, 气液两相以及气泡粒径分布图均是由 Fluent 软件导出数据后通过 Tecplot 软件处理得到的。

3.1 发酵罐内流场分析

如图4所示,两层翼型轴流式搅拌反应器主要产生轴向流动,从图4中可以清晰看到速度较大处位于桨叶下方附近,下方圆盘涡轮式搅拌桨主要产生径向流动,速度较大处位于桨叶的径向方向。在10 T时刻高速区主要集中在搅拌反应器附近,在挡板处产生一部分高速区域,速度分布主要受到桨叶影响,轴流式桨叶产生轴向流,径向流式桨叶产生径向流。212 T时刻,速度场基本达到稳定,此时速度受到桨叶与挡板以及发酵罐内壁的相互作用,速度较大区域更加宽阔。气体分布器正上方区域的速度变化较大,这主要是受到气泡的影响,气泡向

上运动的过程中对流场速度有一定的补充作用。从图中还发现在罐内的一些速度死区长大,这是速度达到稳定后,流场稳定下来,在原来速度死区周围速度较小的流场因不再受到冲击,速度减小,形成更大的死区。400 T时刻,速度场达到稳定,不再随着转动时间的增加而变化。最下层搅拌器产生的径向流继续向四周扩散,产生的流动迅速填充到离开的流体区域,离开的流体又立刻参与到下个区域流动。上两层搅拌器产生的轴向流向下流动,与最下层搅拌器生成的向上向下两股流动混合在一起,形成稳定的循环流场,此时速度场分布更为均匀。

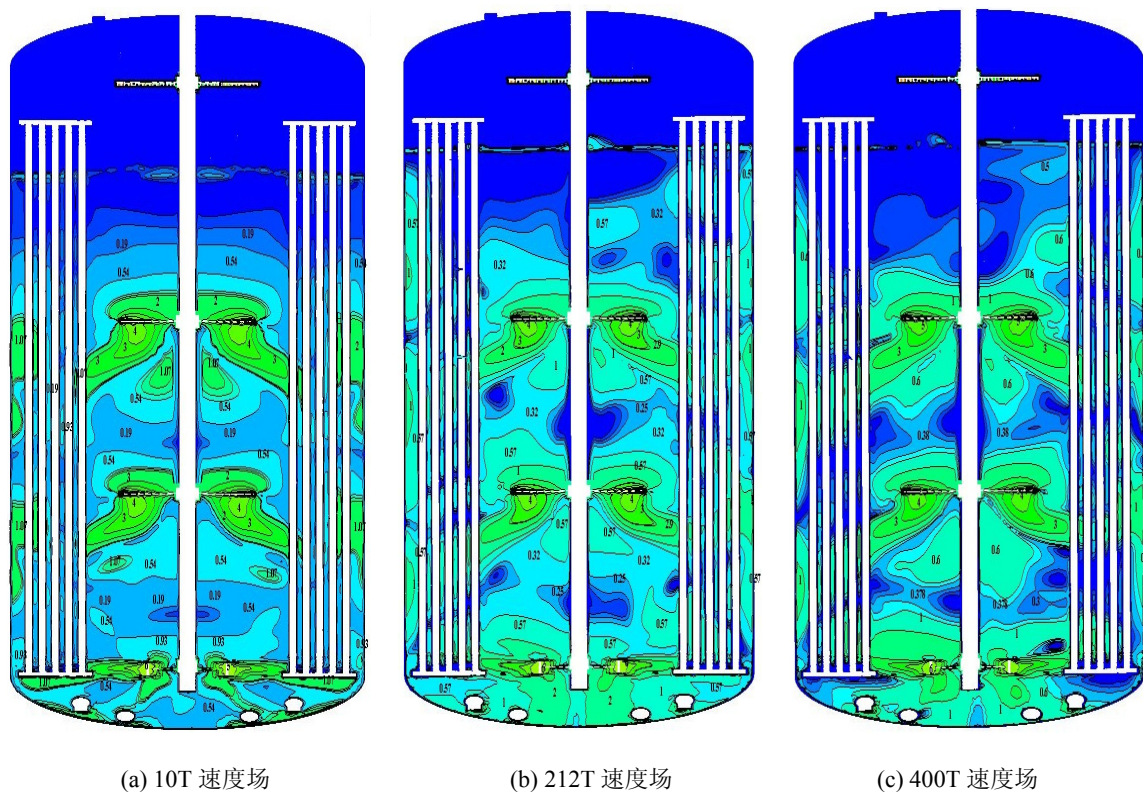


图4 不同时刻流场分布图
Fig. 4 Distribution of flow field at different time

3.2 发酵罐内气液两相分布变化

如图5所示,图(a)为初始时刻发酵罐内气液两相分布,宋月兰等人认为通过轴向局部气含率清晰地观察气泡在罐内的分布状况^[19]。陈迎等人将平均气含率看做是描述气液两相分散状态的一个

重要参数,是气泡大小分布和局部气含率的综合反映^[20]。初始时刻,氧气通过气体分布器进入罐内,上升过程中经过最下层的圆盘涡轮式搅拌桨,受到其作用,流向罐壁附近,触碰罐壁后氧气主要向上运动。在挡板处气含率最高可以达到10%,最下层

搅拌桨和气体分布器区域最高气含率也达到了 10%。212 T 时刻, 如图 5(b), 氧气已上升到液面处, 罐内氧气分布相对均匀, 在最下层搅拌反应器下方氧气含量很低, 这是因为氧气由径向流型搅拌桨带到罐内壁附近, 由于浮力作用, 氧气大多沿着壁面附近向上运动。在挡板处的氧气含量较高, 这是因为挡板阻碍了氧气在发酵罐内部的运动, 使一部分氧气滞留在挡板上, 造成挡板局部气含率较高。而在三层桨叶附近氧气气含率都较低, 这主要是桨叶在旋转的过程中将氧气带离了桨叶区域。在上下桨叶之间的区域, 气含率分布较为均匀, 气含

率在 3% 左右。在 400 T 时刻为气液两相的稳定时刻, 此时氧气在罐内的分布已基本稳定, 由图 5(c) 所示, 死区较 212 T 时刻有所减少, 其主要集中在最下层搅拌桨下方区域。挡板处氧气含率较高, 氧气含量最高处在气体分布器出口处和最下层搅拌桨附近, 氧气在罐内分布较为均匀。在挡板以及桨叶周围气含率很高, 挡板处气含率最高达到 15%, 而在桨叶周围气含率最高达到 8.3%, 液体出口处的气含率达到了 35%。FLUENT 软件可以记录各时刻液位高度, 始末两时刻液位高度差, 计算升高体积, 通过计算, 得到发酵罐整体气含率达到 2.22%。

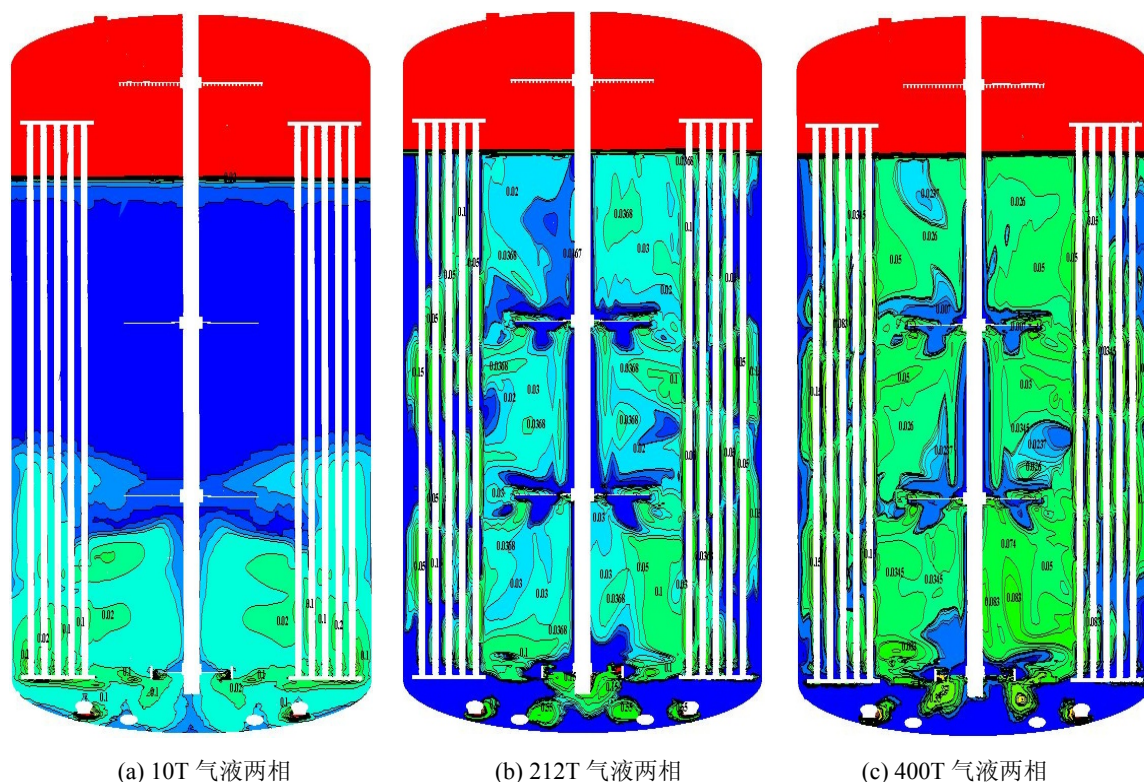


图 5 不同时刻气液两相分布

Fig. 5 Gas-liquid two-phase distribution at different time

3.3 发酵罐内气泡粒径分布

如图 6 所示, 图 6(a)为初始时刻 10 T 粒径分布, 初始时刻, 气体分布器产生的气泡, 受到浮力的影响, 向上运动, 正如王世冲等人对气泡扩散的研究, 他们认为气泡的扩散是搅拌机构和气泡运动共同作用的结果^[21]。当气泡经过最下层的

圆盘涡轮式搅拌桨后, 部分气泡被桨叶打碎排向壁面附近, 气泡沿着壁面向上运动。初始时刻, 粒径在 8~26 mm 之间的气泡含量最高, 在氧气出口处的粒径在 5.7 mm 左右, 此时气泡刚上升到最下层搅拌桨附近, 受到搅拌桨搅拌剪切的影响很小, 因此, 罐底部气泡最小, 随着气泡上升, 气泡会碰撞融合并逐渐长大。由于挡板的存在, 部分气

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

• 1993 •

泡在挡板位置破碎，气泡粒径变小。212 T时刻时，罐内气泡含量增多，在上升的过程中，小气泡相互融合形成粒径较大的气泡，如图6(b)所示，在罐内底部的气泡粒径较小，而在液面附近的气泡粒径达到最大，而且氧气气含率最高。当气泡经过上两层轴流式搅拌桨的时候，气泡被桨叶打碎后重新聚合，此时产生的气泡较小，上两层搅拌桨处的气泡粒径仅有8 mm。而在径向，由于挡板的存在，气

泡粒径在距离罐内壁最远的挡板位置达到最大，最大粒径有24 mm，随着继续向罐内壁运动，气泡逐渐变小，在罐内壁处的气泡粒径进一步减小，在径向方向上，气泡粒径变化呈现出抛物线式变化。400 T时刻，此时气泡粒径分布已稳定，在发酵罐下封头位置以及桨叶附近气泡粒径较小，气泡仅有6 mm左右，大部分气泡粒径在18 mm左右。

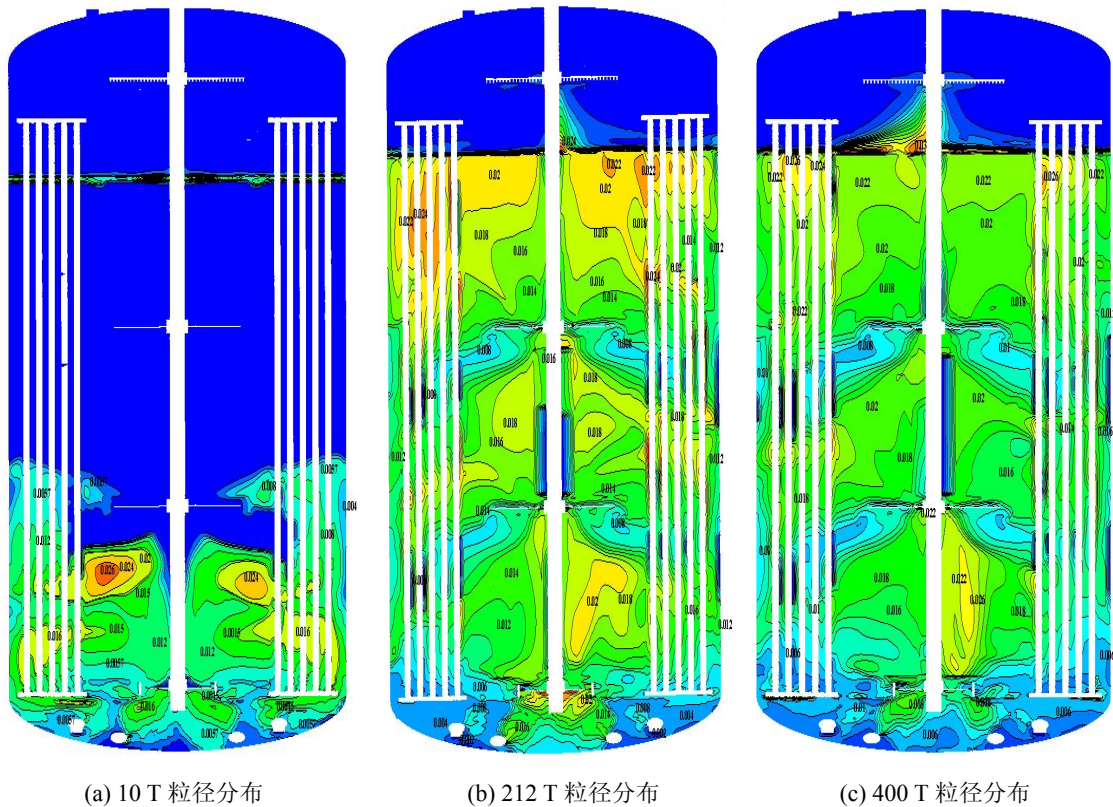
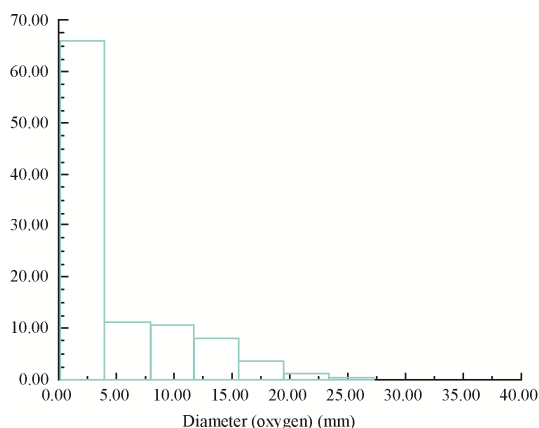


图6 不同时刻气泡粒径分布
Fig. 6 Particle size distribution of bubbles at different time

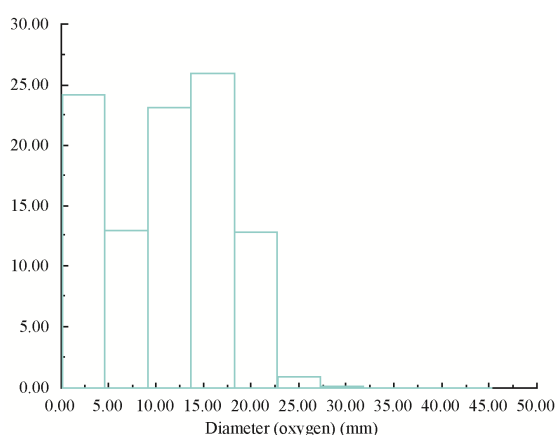
3.4 发酵罐内气泡粒径比例分布

如图7所示，在10 T时刻，气泡刚从进气口进入罐内，小气泡含量最高，较大气泡含量较低，而在212 T时刻后，气泡粒径大小含量最高的在区间0.1~23.7 mm内，说明罐内流场稳定后粒径在0.1~23.7 mm范围内的气泡对罐内内部氨基酸反应的影响最大，从模拟结果中知道，气泡粒径范围重要集中在0.1~23.7 mm之间占总气泡粒径的

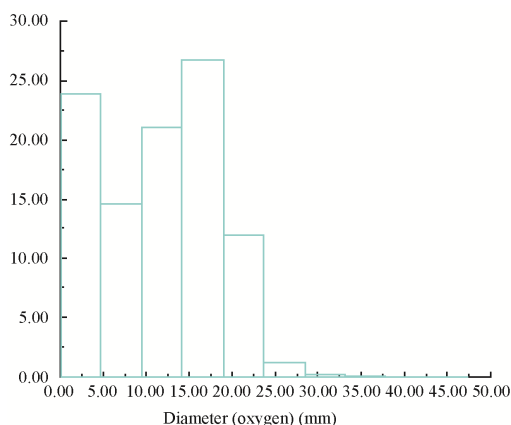
98.46%，其中0.1~4.82 mm占23.9%；4.82~9.55 mm占14.7%；9.55~14.27 mm占21.12%；14.27~19 mm占26.74%；19~23.7 mm占12%，气泡在该粒径范围内所占比例非常大，主要是该范围内气泡运输氧气量大，影响氨基酸发酵，气泡粒径超过23.7 mm占总量的1.4%，对氨基酸溶氧反应影响很小。



(a) 10 T 粒径柱状图



(b) 212 T 粒径柱状图



(c) 400 T 粒径柱状图

图 7 不同时刻不同气泡粒径百分比

Fig. 7 Percentage of different bubble sizes at different time

3.5 搅拌功率计算

通过 Fluent 软件模拟出发酵罐的扭矩 $M=9\ 380.392\ 7\ \text{N}\cdot\text{m}$, 已知搅拌转速 n 为 $120\ \text{r}/\text{min}$, 由公式 $P=M\times 2\ \pi n/60\ 000$ 计算搅拌功率: 得到 $P=117.81\ \text{kW}$ 。

4 结论

本文采用数值模拟的方法对氨基酸发酵罐内的流场, 气液两相以及气泡分布进行了研究, 得出以下相关结论:

(1) 氨基酸发酵罐的整体气含率达到 2.22% , 这为氨基酸的发酵反应的进行提供了充足的氧气。罐内氧气分布较为均匀, 仅在挡板处以及气体分布器位置含量相对较高。

(2) 从氨基酸发酵罐内的气泡粒径分布和气泡粒径比例分布图中显示粒径范围在 $0.1\sim 23.7\ \text{mm}$ 的气泡含量最高, 它们对罐内氨基酸发酵的影响最大。

(3) 通过模拟计算得到发酵罐的搅拌功率为 $117.81\ \text{kW}$, 与额定功率 $135\ \text{kW}$ 相差不大。

参考文献:

- [1] 董传亮. 谷氨酸发酵过程的故障诊断研究[D]. 无锡: 江南大学生物化工系, 2008: 3-8.
DONG Chuanliang. Study on Fault Diagnosis of Glutamic Acid Fermentation Process[D]. Wuxi: Department of Biochemistry, Jiangnan University, 2008: 3-8.
- [2] ZHANG Weipeng, YONG Yumei, ZHANG Guangji, et al. Mixing Characteristics and Bubble Behavior in an Airlift Internal Loop Reactor with Low Aspect Ratio[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering (S1004-9541), 2014, 22(6): 611-621.
- [3] 王红一, 董峰. 气液两相流中上升气泡体积的算方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2444-2449.
WANG Hongyi, DONG feng. A Method for Calculating the Volume of Rising Bubbles in Gas-liquid Two Phase Flow[J]. Journal of instruments and instrument, 2009, 30(11): 2444-2449.
- [4] 张庆文, 骆巍, 刘永奎, 等. CFD 数值模拟在柠檬酸发酵罐搅拌系统设计过程中的应用[J]. 现代化工, 2011, 31(7): 86-90.
ZHANG Qingwen, LUO Wei, LIU Yonglei, et al. Application of CFD Numerical Simulation in the Design of Agitating System of Citric Acid Fermentor[J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(7): 86-90.
- [5] Yue-Qin Tang, Toru Shigematsu, Shigeru Morimura, et al. Dynamics of the Microbial Community during Continuous Methane Fermentation in Continuously

- Stirred Tank Reactors[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering* (S1389-1723), 2015, 119(4): 375-383.
- [6] 李小鑫, 高明昊, 张苗苗, 等. 解氧对 γ -聚谷氨酸合成的影响[J]. *中国生物工程杂志*, 2015, 35(3): 42-48.
LI Xiaoxin, GAO Minghao, ZHANG Miaomiao, et al. The Effect of Oxygen Removal on The Synthesis of Gamma Polyglutamic Acid[J]. *Chinese Journal of Bioengineering*, 2015, 35(3): 42-48.
- [7] Li-na Kong, Wei Li, Lu-chang Han, et al. On the Measurement of Gas Holdup Distribution Near the Region of Impeller in a Gas-Liquid Stirred Rushton Tank by Means of γ -CT[J]. *Chemical Engineering Journal* (S1385-8947), 2012, 35(2): 191-198.
- [8] CHADDAN, MALONEMF, DOHERTYMF. Feasible Products for Kinetically Controlled Reactive Distillation of Ternary Mixtures[J]. *AIChE J* (S0001-1541), 2000, 46(5): 923-936.
- [9] De rijk S E, Van der graaf J M, Den blanken J G. Bubble Size in Flotation Thickening[J]. *Water Research* (S0043-1354), 1994, 28(2): 465-473.
- [10] Leppinen D M, Dalziel S B. Bubble Size Distribution in Dissolved Air Flotation Tanks[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology* (S0273-1223), 2004, 53(8): 531-543.
- [11] Fan Xin, He Limin, Wang Xin, et al. Experimental Study of Bubble Size Distribution of Multiphase-pump Dissolved Air Flotation[J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (S1810-2328), 2010, 31(7): 1159-1162.
- [12] 李孟, 李向阳, 王宏智, 等. 鼓泡塔气液两相流不同曳力模型的数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2015, 15(2): 181-189.
LI Meng, LI Xiangyang, WANG Hongzhi, et al. Numerical Simulation of Gas-liquid Two-phase Flow in Bubble Column with Different Drag Model of Drum[J]. *Journal of Process Engineering*, 2015, 15(2): 181-189.
- [13] 蒋昌波, 王刚, 邓斌, 等. 不同尺度水平并列气泡运动特性三维数值研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2): 233-245.
JIANG Changbo, WANG Gang, DENG Bin, et al. Three dimensional numerical study of parallel bubble motion characteristics at different scales[J]. *Journal of Applied Foundation and Engineering Science*, 2015, 23(2): 233-245.
- [14] 杨锋苓, 周慎杰. 搅拌槽内单相湍流场数值模拟研究进展[J]. *化工进展*, 2011, 30(6): 1158-1169.
YANG Fengling, ZHOU Shenjie. Progress in Numerical Simulation of Single Phase Turbulent Flow in Stirred Tank[J]. *Progress in Chemical Industry*, 2011, 30(6): 1158-1169.
- [15] 苏顺开, 季新跃, 郑志永, 等. 新型搅拌桨用于黄原胶溶液气液传质的计算流体力学模拟[J]. *化学工程*, 2010, 38(10): 171-176.
SUN Shunkai, JI Xinyue, ZHENG Zhiyong, et al. Computational Fluid Dynamics Simulation of Gas-liquid Mass Transfer in Xanthan Gum Solution Using New Stirred Propeller[J]. *Chemical Engineering*, 2010, 38(10): 171-176.
- [16] 陈婷, 余健, 王烽, 等. 基于CFD的三相内循环生物流化床操作参数影响的分析[J]. *水污染防治*, 2015, 7: 19-23, 40.
CHEN Ting, YU Jian, WANG Feng, et al. Analysis of Operation Parameters of Three-phase Internal Circulation Biological Fluidized Bed Based on CFD[J]. *Prevention And Control of Water Pollution*, 2015, 7: 19-23, 40.
- [17] 胡效东, 张德新, 姜蓉, 等. 三层搅拌式反应釜内部气液流动特性研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(2): 396-403.
HU Xiaodong, ZHANG Dexin, JIANG Rong, et al. Study on The Characteristics of Gas-liquid Flow in The Three Level Stirred Reactor[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(2): 396-403.
- [18] 陈阿强, 王振波, 孙治谦. 基于相群平衡模型的浮选气泡聚并模拟[J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 4780-4787.
CHEN Aqiang, WANG Zhenbo, SUN Zhijian. Flotation Bubble Coalescing Simulation Based on Phase Group Equilibrium Model[J]. *Journal of Chemical Industry*, 2015, 66(12): 4780-4787.
- [19] 宋月兰, 高正明, 李志鹏. 多层新型桨搅拌槽内气-液两相流动的实验与数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2007, 7(1): 24-28.
SONG Yuelan, GAO Zhengming, LI Zhipeng. Experimental and Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Multi-Layer Stirred Tank[J]. *Journal of Process Engineering*, 2007, 7(1): 24-28.
- [20] 陈迎, 章彦卿. 基于CFD的羰基合成反应器放大及桨型优化[J]. *化学反应工程与工艺*, 2015, 31(4): 297-306.
CHEN Ying, ZHANG Yanqing. The Amplification And Oar Optimization of The Carbonyl Synthesis Reactor Based on CFD[J]. *Chemical Reaction Engineering And Process*, 2015, 31(4): 297-306.
- [21] 王世冲, 柯东杰. 旋转喷吹水模拟试验中的气泡形态研究[J]. *轻合金加工技术*, 2010, 31(4): 8-12.
WANG Shichong, KE Dongjie. Study on Bubble Morphology in The Simulation Test of Rotary Blowing Water[J]. *Light Alloy Processing Technology*, 2010, 31(4): 8-12.