[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.005

基于 CFD 的不同搅拌组合多相流流场研究

姚晨明^{1,2},石秀东^{1,2},彭晶鑫²

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:针对在设计发酵搅拌设备过程中往往依赖经验判断传质混合效果以及能耗等的现状,课题组利用 CFD 技术对 设计的4种搅拌模型进行气液两相流非稳态数值模拟。模拟采用了多面体网格划分物理模型以及滑移网格模型法求 解,探究了其速度场、气相体积分数和功率耗损情况。结果表明:相同工况下,不同搅拌组合的流场特性差异较大;上桨 采用径向流桨的搅拌组合形成的混合流场整体速度分布更均匀,能为釜内物质提供更佳的混合和传递效果;同时上桨和 底桨采用6半圆叶圆盘涡轮桨的搅拌组合C气液分散性能更好;功耗方面,搅拌组合A>组合C>组合B>组合D。模 拟结果及分析可为气液反应釜搅拌器的设计及优选提供重要的参考。

关键 词:搅拌器;传质混合效果;计算流体力学;气液两相流;非稳态

中图分类号:TQ051.7;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)04-0020-06

Research of Multiphase Flow Field with Different Stirring Combinations Based on CFD

YAO Chenming^{1,2}, SHI Xiudong^{1,2}, PENG Jingxing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

 Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology of Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In view of the current situation that the design of fermentation stirring equipment often relies on experience to judge the mass transfer mixing effect and energy consumption, the CFD technology was used to perform transient numerical simulations of gas-liquid two-phase flow on the four designed stirring models. The physical model of polyhedral mesh division and sliding mesh model were used to solve the problems and explore their velocity field, gas volume fraction and power consumption. The results show that under the same condition, the flow field characteristics under different stirring combinations are quite different. The overall velocity distribution of the mixed flow field formed by the mixing combination of the upper impeller and the radial flow impeller is more uniform, which can provide better mixing and transfer effect for the substances in the kettle. At the same time, the mixed flow combination C with six-blade semicircular disk turbine blades for the upper blade and the bottom blade has better gas-liquid dispersion performance. In terms of power consumption, mixing combination A > combination C > combination B > combination D. The simulation results and analysis can provide important reference for the design and optimization of the gas-liquid reactor agitator.

Keywords: stirrer; mass transfer effect; CFD (Computational Fluid Dynamics); gas-liquid two-phase flow; unsteady state

在气液搅拌釜内,流体动力学环境主要由通气条件、搅拌转速和湍流组成^[1]。通过搅拌输入机械能,

让整个发酵过程获得持续稳定的流场、动量、能量及物质传递,从而使相关生物化学反应稳定地进行,达到预

收稿日期:2020-12-30;修回日期:2021-05-20

基金项目:江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室项目(FMZ201801)。

第一作者简介:姚晨明(1994),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为轻工机械。E-mail:1321855300@ qq. com

期的发酵效果^[2]。合理的搅拌釜结构设计能够在发酵过程中为目标产物生产菌种提供一个有利于其生长繁殖的流体动力学环境。在对搅拌釜进行设计的初期,往往都是结合经验关联式通过试验的方式进行,这样的方式存在研发成本高、研发周期长等问题^[3]。因而,CFD数值仿真技术已经成为生物反应器研究中减少研发时间和成本、进行反应器优化及放大设计的重要手段^[45]。

谢明辉等^[6]在不同溶液中通过 CFD 数值仿真技 术与实验流体力学相结合的方式进行气液两相流研 究。研究发现气液传质性能依赖于桨型结构形式,不 同桨型结构产生不同的流场。桨型结构与物性一起决 定了气泡的动力学和传质性能。曹毅等^[7]对实验室 用搅拌釜进行气液两相流数值模拟研究,发现单桨叶 搅拌釜提供的流场环境难以满足聚赖氨酸微生物发酵 的需要,于是采用增加桨叶数目和桨叶类型对此问题 进行了优化。Wang 等^[8]对不同工况下多相系统的重 要水动力参数,如体积平均总气持率和时间平均局部 气持率、轴向液速等进行了详细的模拟和分析,进一步 预测了气泡的尺寸分布,揭示了气相的独特性质。

课题组以气液搅拌釜为研究对象,利用 CFD 技术 进行气液两相流非稳态求解,探究多种搅拌组合下搅 拌釜内流场特性以及能耗情况,为发酵设备中搅拌器 的设计及优选提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

该搅拌釜主要由带挡板的3层搅拌桨和椭圆封头的筒体组成。筒体底部装有环形气体分布器,气体分布器的气体出口向下。考虑到该模型的复杂性以及气液两相流模拟时对网格质量的要求较高,对该模型进行了简化处理,具体见图1所示。不同的搅拌桨组合,对微生物发酵性能有很大影响,会影响最终产物的产量。同时,多层搅拌时,底桨是气液分散性能好坏的关键^[9]。课题组选取6直叶圆盘涡轮桨(RT-6)、6叶半圆式圆盘涡轮桨(CD-6)、下推式45°的4斜直叶桨共3种桨型组成的4种3层搅拌组合进行模拟,搅拌组合见图2所示,旋转方向为顺时针旋转,模型具体结构参数见表1。

1.2 控制方程

课题组使用 Eulerian-Eulerian 双流体模型来模拟 计算气液两相流问题,不考虑温度及模拟物料的化学 反应,因此忽略组分运输项和源项,简化的气液两相流 连续性方程如下:







图2 搅拌组合简化模型



表1 模型主要结构参数

Table 1	Main	structural	narametere	of	model	mm
rable r	Mam	structurat	parameters	or	model	mm

名称	内径	外径	高度	长度	宽度	距离
罐体	240		600			
搅拌轴		22				
气体分布器	80	90				
气体分布器至罐底						33
挡板				410	22	
挡板至罐顶						150
挡板至罐壁						11
6 直叶圆盘涡轮桨		90		23	20	
6 半圆叶圆盘涡轮桨		90		23	20	
4 斜直叶桨		90		30	20	
3 种桨叶间						105

$$\frac{\partial(\phi_m \rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_m \rho_m u_m) = 0_{\circ} \qquad (1)$$

式中: ϕ_m 表示 *m* 相的体积分数,即 $\Sigma \phi_m = 1$; ρ_m 为该相的密度值,kg·m⁻³; u_m 代表该相的速度,m·s⁻¹;*m* 代表液相(1)或气相(g)。

动量方程如下:

$$\frac{\partial(\phi_m \rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_m \rho_m u_m u_m) =$$

 $-\phi_m \nabla p + \nabla \cdot (\phi_m \tau_{eff,m}) + \phi_m \rho_m g + F_{ex,m} + M_m$ 。(2) 式中: $F_{ex,m}$ 为相间作用力,N; M_m 表示主相与次相间由 于湍流和相对运动等因素造成的动量交换,kg・m・ s⁻¹;p为所有气液相共享的压力,Pa; ϕ_m, ρ_m, g 为气液 相所受重力,N。

 $\tau_{eff,m}$ 为第 m 相的压力应变张量,其表达式如下:

$$\boldsymbol{\tau}_{eff,m} = \boldsymbol{\mu}_{m} (\nabla u_{m} + \nabla u_{m}^{T}) + (\boldsymbol{\lambda}_{m} - \frac{2}{3}\boldsymbol{\mu}_{m}) \nabla u_{m} \cdot \boldsymbol{I}_{o}$$
(3)

式中: λ_m 和 μ_m 是 *m* 相的剪切和动力黏度, N · s · m⁻²; *I* 为单位张量。

在气液两相流中,曳力是气液两相间的主要作用 力,对于本研究的气液两相流问题采用 Kolev 等^[10]提 出的曳力系数模型,在 FLUENT 中被称为通用曳力模 型(universal drag)。该模型广泛适用于包括非球形气 泡等各种气泡流的气泡变形情况下的气泡曳力计算, 其计算公式如下:

$$F_{D} = \frac{1}{2} A_{d} C_{D} \rho_{1} | u_{g} - u_{1} | (u_{g} - u_{1}); \qquad (4)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1Re^{0.75})_{\circ}$$
 (5)

式中: C_D 表示气液相间曳力系数; A_d 为气泡横截面 积, cm²; ρ_1 表示液相密度值, kg・m⁻³;Re 为雷诺数; u_g 和 u_1 表示气相及液相的速度, m・s⁻¹。

在气液两相流中由气泡径向分布以及液相湍动引起的力叫做湍流扩散力。这种力的作用是使气泡在径向上分布得更加均匀,其计算公式如下:

$$F_{TD} = C_D C_{TD} \frac{\boldsymbol{v}_t}{\boldsymbol{\delta}_t} \left(\frac{\nabla \boldsymbol{\phi}_g}{\boldsymbol{\phi}_g} - \frac{\nabla \boldsymbol{\phi}_1}{\boldsymbol{\phi}_1} \right)_{\circ}$$
(6)

式中: C_{TD} 为湍流扩散系数; C_D 为气液两相间的曳力系数; δ_t 为湍流 Schmidt 数; v_t 为亚网格黏度, m²·s⁻¹; ϕ_g 和 ϕ_1 表示气相及液相的体积分数。对于本课题气液两相流问题采用 Burns-et-al 模型^[11]。

1.3 网格划分

课题组在模拟过程中采用 FLUENT Meshing 划分

多面体网格。多面体网格在划分复杂模型时相较于非 结构化自由四面体网格具有更高的精度,而其数量只 有四面体网格数量的 1/5~1/3^[12]。以搅拌组合 A 为 例,取模型上桨叶周围一点的液相速度,以及总搅拌功 率作为指标,考察了 3 种不同网格数量对液相速度分 量以及搅拌功率的影响,具体如表 2 所示。从表 2 中 可以看出随着网格数量的增加,该点的液相速度值和 搅拌桨的搅拌功率值逐渐趋于平稳,模拟结果几乎接 近,同时考虑到计算机资源和模拟时间等因素,最终选 取 86.31 万左右的网格数量。不同的搅拌桨组合,划 分的网格数量有所偏差,课题组选取的网格数量基本 维持在 86 万左右,对最终模拟结果影响不大。

表2 网格无关性验证结果

Table 2 Grid independence verification results

网格数量	液相速度/(m・s ⁻¹)	搅拌功率/W
5.81×10^{5}	121.1	127.5
8.63×10^{5}	86.5	91.4
14.68×10^{5}	84.2	89.7

1.4 计算条件

课题组采用 ANSYS FLUENT 软件进行数值仿真。 气液两相流模拟时采用滑移网格模型法(SM), Eulerain-Eulerain 双流体模型,湍流模型选择 RNG κ-ε 模型,进行瞬态求解。求解过程中监测整体气相体积 分数和搅拌轴力矩系数变化,当气相体积分数以及力 矩系数不再发生明显变化且趋于稳定时,停止求解,此 时得到的结果即为最终结果。求解时采用单一气泡模 型,设定气泡直径为2 mm^[6-7]。Khopkar 等^[13]研究发 现气液搅拌釜主体区域中虚拟质量力和升力影响较 小,因此气液两相之间的作用力不考虑升力和虚拟质 量力的影响。曳力模型采用 universal drag 模型,湍流 扩散力模型采用 Burns-et-al 模型。

模拟物料选取空气和水。具体参数:水的密度为 998.3 kg·m⁻³,黏度为1.00×10⁻³ Pa·s;空气的密 度为1.225 kg·m⁻³,黏度为1.79×10⁻⁵ Pa·s。模拟 工况为通气量1.3 m³·h⁻¹,转速 850 r·min⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 速度场

图 3 为相邻 2 挡板中间平面上通过数值模拟得到 的液相速度云图(左)与矢量图(右)。

通过观察图 3 的速度云图发现组合 B 和组合 D 整体区域速度分布不均匀,低速区域范围较大,特别是 上桨叶上方区域整体速度偏小,不利于物质的传递与 混合,高速区域主要集中在桨叶叶端附近以及桨叶下 方;搅拌组合 A 以及组合 C 整体区域速度分布相较于 组合 B 和 D 来说更加均匀,低速区域范围较小,整体 的流动混合效果较佳,物质传递效率较好,高速区域主 要分布在桨叶叶端周围。







如图 3 的速度矢量图所示,搅拌组合 A 和 C 的右 半部分共有 4 个循环区域。上桨和底桨都是径向流搅 拌桨,其产生的径向流首先射向壁面,然后向上或者向 下流动,形成典型的径向双循环流动,与孙东东等^[14] 描述一致。同时由于中间轴向流搅拌桨的存在,可以 看到上桨的下循环区域与底桨的上循环区域之间存在 流动交换,这样有利于循环与循环之间的物质传递。 搅拌组合 B 和 D 的右半区域共有一大一小 2 个明显 的循环区域,而上桨叶上方区域未见明显的循环区域。 大循环区域主要位于上桨叶与底桨叶之间,其产生是 由于径向流底桨在上桨及中桨形成的轴向循环区域发 生了合并从而形成了大循环区域。

图4(a)~(c)为液相速度在不同高度处的径向特 征线上的分布情况。截取径向特征线 Z₁ 研究搅拌釜 上桨和中桨之间区域流动混合情况;截取径向特征线 Z,研究搅拌釜中桨和底桨之间区域流动混合情况;截 取径向特征线 Z₃ 研究搅拌釜釜底区域流动混合情况。 从图中可以看出,在3个不同高度 Z_1 = 310 mm、 Z_2 = 190 mm、 Z_3 = 72 mm 的径向特征线上,4 种搅拌组合的 液相速度的方向分布规律都与其矢量图一致。在 Z_1 = 310 mm 处搅拌组合 B 和 D 的液相速度在搅拌桨附近 区域相比于组合 A 和 C 大,然而在靠近壁面处却相 反,说明在上桨位置采用径向流搅拌桨能够为附近流 体提供很好的径向流动,避免釜内壁面附近的物质无 法参与循环交换。但是在上桨与中桨之间提供的流体 轴向循环速度并不能与轴向流搅拌桨相比。在 Z_2 = 190 mm 处,整体上搅拌组合 B 和 D 的液相速度较大, 这是因为上桨及中桨都采用了轴向流搅拌桨,使其提 叶圆盘涡轮桨为底桨的组合 A 和 B 的速度变化规律 相似且速度大小相差不大。同样地,以6半圆叶圆盘 涡轮桨为底桨的组合 C 和 D 速度变化规律相似且速 度大小相差不大。

从速度场的分析来看,上桨和中桨采用轴向流搅 拌桨形成的流场会得到较大的轴向循环速度,但是速 度过于集中在桨与桨之间的区域,而上桨采用径向流 搅拌桨后形成的流场整体速度分布较均匀,没有过于 集中的高速区域,更适合于釜内物质的整体循环混合 和传递。





图4 液相速度径向分布图

Figure 4 Radial distribution diagram of liquid phase velocity





图 5 特征线示意图 Figure 5 Schematic diagram of characteristic line

2.2 气相体积分数

图 6 为气相体积分数在相邻 2 挡板中间平面上的 分布情况。从图 6 中可以看出:不同搅拌组合所产生 的流型不同,气体分布情况也不同。釜内气体在每层 桨附近及循环区域内部,气相体积分数明显高于其他 区域。结合图 3 液相速度云图以及矢量图的分析可以 知道导致这种现象的原因是桨叶后方压力低,在压差 的作用下,气泡从高压区向低压区运动,使得气泡容易 在该区域内聚集,同时搅拌桨所形成的循环涡使得气 体在循环区域内滞留时间延长,增加了该区域的气相 体积分数。而底桨由于采用了圆盘式的结构设计,使 得在底桨下方区域聚集了大量气体,气相体积分数高。



图6 气相体积分数轴向分布

Figure 6 Axial distribution of gas volume fraction 图 7 为底桨附近横截面上的气相体积分数分布云 图。从图 7 中可以看到:6 直叶圆盘涡轮桨的桨叶后 方有气泡堆积区域,形成了较大的气穴,而6 半圆叶圆 盘涡轮桨桨叶后方的气体堆积区域较少,形成的气穴 并不大^[15],而其搅拌区域周围气体分布更均匀一些,平均气相体积分数也高于6直叶圆盘涡轮桨的搅拌区域。

综合上述分析可以知道:整体上,搅拌组合 A 和 C 的气体分布比搅拌组合 B 与 D 的更均匀一些,有利于 好氧微生物的发酵;6 半圆叶圆盘涡轮桨相比于6 直 叶圆盘涡轮桨在径向上的气体分散性能更好一些,能 使气体有效地扩散到周围,更加均匀地分布。因此总 体上搅拌组合 C 的气液分散效果更好一些。

气相体积分数/%





fraction distribution cloud map

2.3 通气搅拌功率

表 3 给出了各搅拌组合通过数值模拟以及实际试 验得到的通气搅拌功率。

表3 通气搅拌功率

Table 3 Aeration mixing power

搅拌组合	仿真总功率/W	试验总功率/W	误差率/%
A	121.1	127.5	-5.0
В	86.5	91.4	-5.4
С	116.7	124.1	-5.9
D	84.2	89.7	-6.1

表 3 中搅拌组合 A 和 C 分别由 2 个径向流桨和 1 个轴向流桨组成,而搅拌组合 B 和 D 分别由 2 个轴向 流桨和 1 个径向流桨组成。从表中可以得到通气搅拌 功率大小顺序为组合 A > 组合 C > 组合 B > 组合 D。 再结合各搅拌组合选用的桨型,又可以知道在相同的 工况和结构参数下,径向流搅拌桨的功率要比轴向流 搅拌桨大,6 直叶圆盘涡轮桨的功率要比 6 半圆叶圆 盘涡轮桨大。模拟结果与试验测得的结果基本相符, 误差率在可接受范围内。同时数值模拟得到的搅拌功 率要比实际工作时的搅拌功率偏小,偏小的原因是数 值模拟时未考虑流场中存在的固体区域以及其他阻力 等因素。

3 结论

课题组基于 CFD 技术采用滑移网格模型法(SM) 研究了气-液两相流下不同搅拌组合的非稳态流场特性,得到了以下结论:

 在相同工况条件下,不同的搅拌组合形成的流 场特性有很大区别。上桨采用径向流桨的搅拌组合形 成的混合流场整体速度分布更均匀,没有过于集中的 高速区域,更适合于釜内物质的整体循环混合和传递。 同时上桨和底桨采用6半圆叶圆盘涡轮桨的搅拌组合 C 气液分散性能更好一些。

2) 总的功耗方面,搅拌组合 A>组合 C>组合 B
 >组合 D。

课题组的研究对发酵设备中搅拌器的设计及优选 有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 李进,石秀东,汪晨,等.基于 Fluent 的大型苏氨酸发酵罐内搅拌 流场仿真分析[J].食品与机械,2019,35(1):120-123.
- [2] 宋金礼.发酵罐内搅拌过程的数值模拟与参数优化[D].大连:大连理工大学,2015:1-2.
- [3] 厉鹏,刘宝庆,金志江. 搅拌釜内流场实验研究与数值模拟的进展 [J]. 化工机械,2010,37(6):799-804.
- [4] TAGHAVI M, ZADGHAFFARI R, MOGHADDAS J, et al. Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(3):280 - 290.
- [5] MORCHAIN J, GABELLE J C, COCKX A. A coupled population balance model and CFD approach for the simulation of mixing issues in lab-scale and industrial bioreactors [J]. AIChE Journal, 2014, 60 (1):27-40.
- [6] 谢明辉.多层搅拌式生物反应器内溶液流变性质对流场特性影响的研究[D].上海:华东理工大学,2013:1-147.
- [7] 曹逸,朱腾飞,张建华,等.生物反应器内不同桨叶组合计算流体 力学模拟[J].化学工程,2011,39(2):47-51.
- [8] WANG H N, JIA X Q, WANG X, et al. CFD modeling of hydrodynamic characteristics of a gas-liquid two-phase stirred tank [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(1):63-92.
- [9] 倪伟佳,段作营,桑美纳,等.采用 CFD 数值模拟技术优化发酵罐 内桨叶组合[J].生物学杂志,2012,29(4):81-85.
- [10] KOLEV N I. Multiphase flow dynamics [J]. Thermal and Mechanical Interactions, 2011, 12(3):1-699.
- [11] BRENNEN C E. Fundamentals of multiphase flow [M]. Hong Kong; Cambridge University Press, 2005;67-86.
- [12] 张静,陈先培,吴亮亮,等.基于多面体网格的离心泵性能预测分析[J].通用机械,2019(7):60-64.
- [13] KHOPKAR A R, AUBIN J, XUREB C, et al. Gas-liquid flow generated by a pitched blade turbine: PIV measurement and CFD simulations[J]. Industrial & Engeering Chemistry Research, 2003, 42(21):5318-5332.
- [14] 孙东东,郑志永,李晶,等. 基于 CFD 模拟的新型径向流搅拌桨 设计[J]. 过程工程学报,2017,17(4):677-683.
- [15] 丁程兵.多层桨搅拌釜内气含率特性的实验研究与数值模拟
 [D].南京:南京理工大学,2014:32.