

双搅拌高效澄清萃取槽混合室均混时间的数值模拟

吕超, 张子木, 赵秋月, 刘燕
(东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 利用CFD软件FLUENT 12.0, 采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、Eulerian多相流模型及Morsi-Alexander相间曳力系数模型, 使用滑移网格法处理桨叶的旋转区域, 对新型萃取槽混合室内的液-液体系的均混时间以及搅拌功率进行数值模拟。结果表明: 随着搅拌转速的增大, 搅拌桨消耗的功率增加, 水油两相的均混时间减小。搅拌桨转速达到400 r/min后, 增大转速则搅拌功率继续增大, 但对液-液两相均匀混合时间的影响不大。

关键词: 高效萃取槽; 均混时间; 功率; 数值模拟; 液-液两相流

中图分类号: TQ 027.35

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0809-04

Numerical Simulation on Mixing Time of High Efficient Clarification and Extraction Tank with Double Stirring

LYU Chao, ZHANG Zi-mu, ZHAO Qiu-yue, LIU Yan

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Qiu-yue, E-mail: zhaoqy@smm.neu.edu.cn)

Abstract: Mixing time and stirring power in the mixing room of a new type extraction tank were simulated by CFD software FLUENT 12.0, in which the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and the Eulerian multiphase flow model were selected, the interphase drag coefficient was determined by using Morsi-Alexander model, the sliding mesh method was used to process the rotation area of the blade. The results showed that with the increasing of agitation speed, the power consumption increases and the mixing time of liquid-liquid system is reduced. When stirring speed was over 400 r/min, the power increases continually and the mixing time does not change obviously.

Key words: efficient extraction tank; mixing time; power; numerical simulation; liquid-liquid two-phase flow

目前,我国稀土生产企业使用的混合-澄清槽大多存在澄清室与混合室体积比过大(多在2.5:1以上)影响澄清效率的问题。为改善这一现状,本课题组开发了“双搅拌高效澄清萃取槽”。在澄清室中加入搅拌装置,破碎来自混合室的油水包裹,加速两相分离。新型萃取槽的两相分离指标均达到或超过了现有传统工业萃取槽,澄清性能优越,且澄清室体积缩小了50%以上。

对于混合澄清槽而言,混合室的混合程度直接影响澄清室的分离效果。转速过小,高速旋转的叶轮产生强烈剪切力形成的破碎区较小,两相混合不均匀,萃取反应发生不充分;转速过

大,形成的破碎区较大,但两相液滴破碎严重,分散相粒度过小,不利于澄清室内液滴的凝聚,也会影响澄清分离效果。文献[1-2]分别对单层搅拌反应器内的混合过程和搅拌反应器内的三维浓度场进行了模拟,实验结果和数值模拟趋势保持一致。

本文从CFD的角度,对新型高效萃取槽的混合室的混合过程进行较全面的模拟研究。考察混合室内不同搅拌转速下均混时间的变化,与模拟得到的功率值联合分析,确定最佳混合转速,既确保两相有足够的传质时间,又保证分散相粒度适宜,以利于下一步两相分离。

收稿日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204040, U1202274, 51004033, 50974035); 国家高技术研究发展计划项目(2010AA03A405, 2102AA062303)。

作者简介: 吕超(1985-),男,辽宁锦州人,东北大学博士研究生,东北石油大学秦皇岛分校讲师; 刘燕(1970-),女,湖南湘西人,东北大学教授。

1 数学模型的建立

1.1 建模及网格划分

实验使用的水、油两相物性参数如表 1 所示.

表 1 水和油的物性参数		
Table1 Physical characteristics of water and oil		
物质	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
水相	1 047. 4	0. 001 97
油相	867. 7	0. 006 27

实验装置尺寸为 200 mm × 200 mm × 300 mm, 液面高度为 210 mm. 搅拌桨采用开式 45 度桨, 桨叶直径 100 mm, 搅拌桨位于混合槽中心位置, 距底面高度为 90 mm.

用搅拌器仿真软件 MIXSIM 建立数学模型并划分网格(图 1), 其中对搅拌桨部分网格进行加密处理, 整体网格数量为 284 204 个.

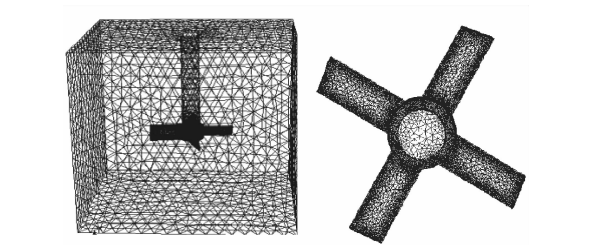


图 1 网格示意图
Fig. 1 Schematic grid

(a)—混合室的网格划分; (b)—搅拌桨的网格划分.

1.2 模型的选择

流体流动遵守质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律. 本文中不涉及温度的变化, 故只考虑质量守恒方程及动量守恒方程. 流动处于湍流状态, 系统还要遵守湍流方程^[3-4]. 本文研究的是液-液两相流问题, 故选择 Euler 模型^[5-6]. 不同的交换系数模型里选用的曳力函数不同, 本文所用曳力模型为 Morsi-Alexander 模型^[7], 因为此模型应用范围广泛, 对于较大的雷诺数依然成立.

曳力函数为

$$f=\frac{C_D Re}{24}, \tag{1}$$

$$C_D=a_1+\frac{a_2}{Re}+\frac{a_3}{Re^2}. \tag{2}$$

其中: C_D 为曳力系数; Re 为雷诺数; a_1, a_2, a_3 为常数, 与 Re 的大小有关.

1.3 边界条件及数值解法

使用软件 FLUENT12.0 来求解离散方程, 用 $k-\varepsilon$ 模型^[8] 计算湍流性能, 用 Euler 模型对混合室

搅拌槽的液-液体系进行数值模拟, 采用标准壁面函数法处理近壁区域. 本文用滑移网格法^[9] 来处理桨叶的旋转区域. 离散格式采用二阶迎风格式, 所有变量的收敛标准设置为残差小于 10^{-3} . 边界类型设置为壁面边界, 搅拌釜内壁定义为静止壁面边界条件, 自由液面定义为对称边界条件.

1.4 均混时间的计算方法

1.4.1 水模型实验方法

实验中的两种液体分别为水相、油相, 其中水相含有稀土离子, 电导率较大, 油相电导率为零. 在混合室选取 2 个监测点, 分别位于混合室的不同位置 a_1, a_2 , 如图 2 所示, 观察电导率与时间的变化关系, 判断水油两相是否混合均匀.

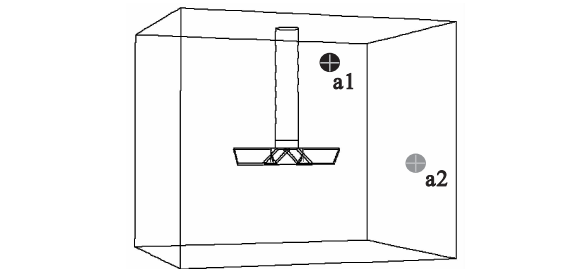


图 2 多通道电导率仪监测位置示意图
Fig. 2 Monitoring locations of multi-channel conductivity meter

1.4.2 数值模拟的方法

具体处理方法是确定示踪剂的加入区域, 如图 3 所示, 选择柱体为加料区 A, 柱体半径为 10 mm, 然后把示踪剂在加料区内的初始浓度设为 1, 其他区域的初始浓度设为 0. 先进行稳态流场的计算, 将稳态计算收敛后的结果作为初始值, 再用滑移网格法进行非稳态计算, 此时只需计算示踪剂浓度的输运方程, 可以加速收敛, 提高求解效率, 从而节省大量的计算时间. 研究表明, 该法所得的均混时间模拟结果与同时联立求解所有方程所获得的结果相差很小, 可以忽略. 计算完成后即可得到示踪剂的浓度随时间的变化过程, 根据 95% 的原则, 可以计算得到均混时间, 并比较图 3 中监测点 $a_1 \sim a_5$ 的结果.

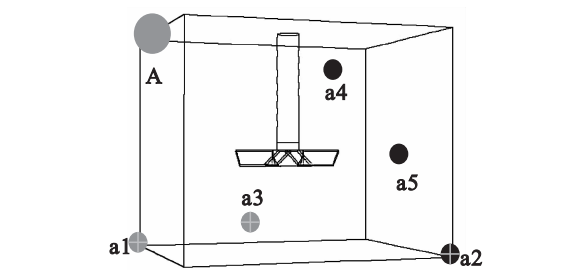


图 3 加料点及监测点示意图
Fig. 3 Schematic diagram of feeding points and monitoring points

2 结果与讨论

2.1 实验及模拟结果

电导率的变化能够反映油、水两相的混合程度,水模型实验中采用多通道电导率仪同时测定两监测点处的电导率变化,并由计算机记录数据,经图形处理分析得到两监测点处电导率随时间的变化图,图4a~图4d分别为搅拌桨转速为200,300,400及500 r/min时两监测点的电导率变化情况.初始电导率为0;当电导率值达到稳定时,混合室内油、水两相均匀混合,此段时间即为油、水两相的均混时间.

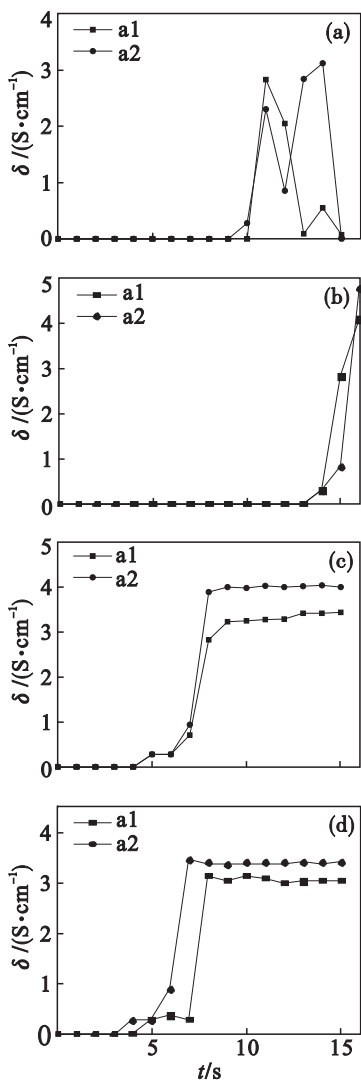


图4 不同监测点处电导率随时间的变化曲线
Fig. 4 Curves of conductivity changing with time at different monitoring points
(a)—200 r/min; (b)—300 r/min;
(c)—400 r/min; (d)—500 r/min.

由图4观察可得,200 r/min时电导率波动很大,很难达到稳定状态,即200 r/min很难使水相和油相混合均匀.300 r/min时虽然经过一段时间

后两监测位置的电导率达到平衡,但差值很大,说明水相和油相在混合室内流场并不稳定,呈波动状态,不适合作为最佳的混合搅拌速度.400,500 r/min时,观察得出各个监测点处电导率很快达到平衡稳定,且各点处的电导率差别不大.

数值模拟中,需要在混合室中先用标准模型进行稳态流场的计算,将稳态计算收敛后的结果作为初始值,再用滑移网格法进行非稳态计算.设定加料点A和监测点a1~a5如图3所示,模拟得到不同转速下各个监测点示踪剂的浓度变化情况如图5所示.

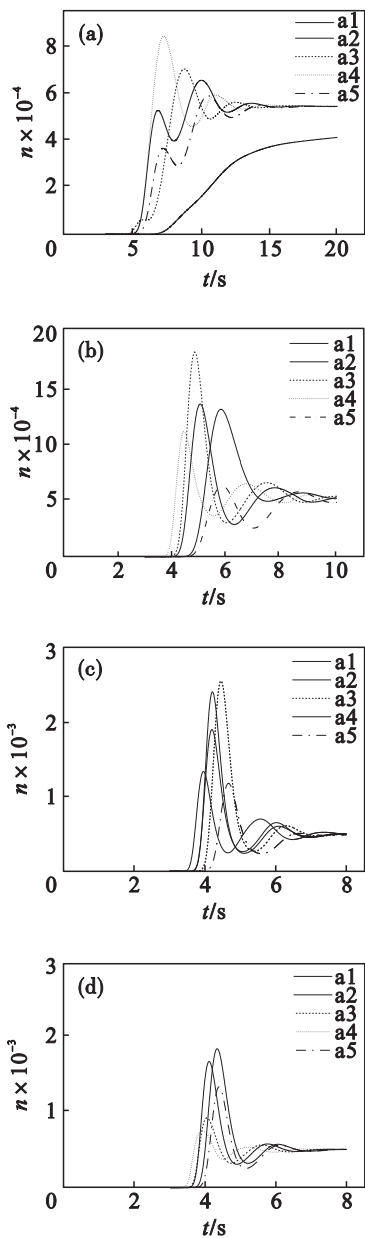


图5 不同监测点处示踪剂浓度随时间的变化曲线
Fig. 5 Curves of concentration changing with time at different monitoring points
(a)—200 r/min; (b)—300 r/min;
(c)—400 r/min; (d)—500 r/min.

图5a~图5d分别为搅拌桨转速200,300,400及500 r/min时各监测点的示踪剂浓度变化

情况. 当搅拌转速为 200 r/min 时, 监测点 a2 处长时间内均未达到平均浓度, 说明此时混合室内水、油两相很难混合均匀. 当搅拌转速为 300 r/min 时, 约 10 s 时各监测点的示踪剂浓度相近, 并保持良好的稳定性, 说明此时反应器内部混合情况良好. 而搅拌转速为 400, 500 r/min 时混合室大约在 7 s 时各检测点示踪剂浓度相近并持续稳定, 说明当搅拌转速达到一定界限后, 增大搅拌转速并不能达到增强搅拌效果、降低均混时间的目的.

2.2 对比分析

对比水模型实验和数值模拟实验结果(表 2), 搅拌转速为 200 r/min 时, 混合室内水、油两相很难在短时间内实现均匀混合. 搅拌转速为 300 r/min 时, 实验得到的均混时间和模拟得到的均混时间误差较大, 这是由于实验测得电导率变化从水、油两相分离状态下加搅拌得到, 而数值模拟在混合过程的求解是在稳态流场计算结果的基础上进行的. 搅拌转速为 400 与 500 r/min 时, 实验和模拟都能较快地使水、油两相均匀混合, 并且误差相对较小, 这说明 400 r/min 以上转速能较快地使水、油两相均匀混合并达到流场的稳定.

表 2 不同搅拌转速下的均混时间			
Table 2 Mixing time at different speeds			
搅拌转速/(r·min ⁻¹)	300	400	500
实验得到的均混时间/s	16	8.5	7.8
模拟得到的均混时间/s	10	7.5	7.0

2.3 功率特性分析

数值模拟得到不同搅拌转速下的功率, 如表 3 所示. 对于混合过程来说, 合适的搅拌转速既可以缩短均混时间, 又可以达到节能目标. 功率与混合室的均混时间的关系如图 6 所示.

表 3 不同搅拌转速下的功率					
Table 3 Power at different speeds					
转速/(r·min ⁻¹)	200	300	400	450	500
P/W	0.3589	1.3163	3.0987	4.4329	6.1966

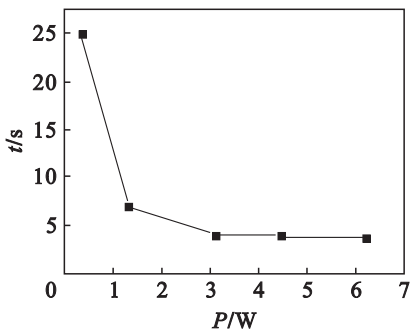


图 6 搅拌功率和均混时间的关系

Fig. 6 Relationship between power and mixing time

对于一个混合反应过程来说, 选择一个合适的搅拌转速可以在缩短均混时间的同时节省能耗. 由图 6 可以直观看出均混时间和功率的关系: 开始阶段, 随着功率的增加, 反应器内油、水两相的均混时间急剧下降, 当功率消耗到一定程度后, 即从 3.098 7 W 开始, 功率的增加对反应器的均混时间减小作用不大. 综上, 最终选择实验范围内混合室的最佳功率为 3.098 7 W, 转速为 400 r/min.

3 结 论

- 1) 水模型实验中各监测点的电导率变化趋势表明, 搅拌转速越大, 多通道电导率仪各监测点电导率值差别越小, 达到稳定的时间越短.
- 2) 数值模拟中各监测点的示踪剂浓度变化表明, 随着搅拌转速增大, 各监测点示踪剂浓度完全相等的时间缩短, 水、油两相均匀均混时间也随之减小.
- 3) 通过数值模拟得到不同搅拌转速下的功率及水、油两相均混时间. 随着搅拌转速的增大, 搅拌桨消耗的功率增加, 水、油两相的均混时间减小. 搅拌转速到达一定转速后, 转速的增加即功率的增大对降低均混时间意义不大.

参考文献:

[1] Noorman H, Morud K, Hjertager B H, *et al.* CFD modeling and verification of flow and conversion in a 1m³ bioreactor [C]//Proceeding 3rd International Conference Bioreactor and Bioprocessing Fluid Dynamics. Cambridge, 1993: 241 – 258.

[2] Schmalzriedt S, Reuss M. Application of computational fluid dynamics to simulations of mixing and biotechnical conversion process in stirred tank bioreactors [C]//Proceeding of 9th Europe Conference on Mixing. Paris, 1997: 171 – 178.

[3] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004. (Han Zhan-zhong, Wang Jing, Lan Xiao-ping. FLUENT fluid engineering simulation and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.)

[4] 吴江航, 韩庆书. 计算流体力学的理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (Wu Jiang-hang, Han Qing-shu. Theory methods and applications of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1988.)

[5] Goldschmidt M J V, Beetstra R, Kuipers J A M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds; comparison and validation of 3D discrete particle and continuum models[J]. Powder Technology, 2004, 142(1): 23 – 47.

[6] Bowen R M. Continuum physics [J]. Theory of Mixtures, 1976, 3: 1 – 127.

[7] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. New York: Academic Press, 1972.

[8] Fluent Inc. FLUENT user's guide [M]. Lebanon: ANSYS Inc, 2006.

[9] Bakker A, Laroche R D, Wang M H, *et al.* Sliding mesh simulation of laminar flow in stirred reactors [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1997, 75(1): 42 – 44.