

研究论文

用 CFD 研究搅拌槽内的混合过程

周国忠 王英琛 施力田

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要 在 CFX 软件的基础上开发了用于混合过程计算的程序, 并在流动场计算的基础上对单层涡轮浆搅拌槽内的混合过程进行了初步的数值研究. 对速度场和浓度场联立求解与单独求解两种处理方法分别进行了计算, 计算得到的浓度响应曲线与文献数据趋势一致, 两种方法计算的混合时间变化规律一致, 联立求解计算得到的混合时间略小于单独求解, 但是联立求解的计算量非常大. 计算结果表明: 混合过程与计算采用的流动场密切相关; 混合时间大小不仅与监测点位置有关, 还与加料位置有关, 在搅拌桨附近加料混合时间最小, 在槽底部加料混合时间最大.

关键词 混合时间 计算流体力学 (CFD) 涡轮搅拌桨 搅拌槽

中图分类号 TQ 018

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 07-0886-05

CFD STUDY OF MIXING PROCESS IN STIRRED TANK

ZHOU Guozhong, WANG Yingchen and SHI Litian

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract A program for mixing calculation was developed based on the commercial CFD code CFX4. It was used in the numerical study of mixing process of a single Rushton turbine in the stirred tank. Coupled and segregated solutions of momentum and mass equation were adopted. The calculated concentration response curve was consistent with the literature data. Both solutions predicted the same change of mixing time, but the value of mixing time from coupled solution was shorter than that from segregated solution. Coupled solution needed much more computational efforts than segregated solution. The mixing process relied on the flow field used for mixing calculation. The value of mixing time was dependent on the position of detection and feeding. When the tracer was fed near the impeller, the mixing time was the shortest. When it was fed near the bottom of the tank, the mixing time was the longest.

Keywords mixing time, computational fluid dynamics (CFD), Rushton turbine, stirred tank

引 言

搅拌混合广泛应用在许多工业过程中, 如化工、冶金、生化、食品等. 在许多情况下, 物料的混匀过程及其快慢对该操作是至关重要的. 对局部流动和混合信息的了解不仅有助于改善整个过程的产率, 减少副产物, 还能够指导反应器的设计, 使其效益更高. 近年来, 随着 CFD 技术的发展, 利

用数值模拟的方法获得局部信息已经成为现实. 利用 CFD 方法可以节省大量的研究经费, 而且可以获得实验手段所不能得到的数据. CFD 将对搅拌设备的开发带来革命性的变化^[1].

Noorman^[2]对单层涡轮浆搅拌槽内的混合过程进行了实验研究和数值模拟, 其示踪剂响应曲线与实验结果趋势一致, 但在细节上有较大差别. Lunden^[3]的研究结果与他们一致. Schmalzriedt^[4]也计

2001-10-09 收到初稿, 2001-12-17 收到修改稿.

联系人: 施力田. 第一作者: 周国忠, 男, 29 岁, 博士.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 29976002).

Received date: 2001-10-09.

Corresponding author: Prof. SHI Litian.

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 29976002).

算了单层涡轮桨的三维浓度场分布, 并利用文献数据进行了验证, 认为其结果与湍流模型密切相关. Jaworski^[3] 利用 FLUENT 软件模拟计算了双层涡轮桨的混合过程, 计算的混合时间 θ_{95} 是实验值的 2~3 倍, 他们认为主要是由于各循环间的传质过程被低估所致. 搅拌槽内混合过程的数值计算比较复杂. 国内, 毛德明^[4] 利用混合模型研究了搅拌槽内的混合过程. 而真正将流动场与混合时间结合起来的研究尚未见报道.

本文在 CFX 软件的基础上开发了混合过程计算程序, 将流动场与混合时间的计算结合起来, 从计算流体力学的角度研究了涡轮搅拌桨的混合过程.

1 流体力学模型

对浓度场的计算需要求解浓度输运方程, 在圆柱坐标系下质量守恒方程式为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(uc) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rc) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(wc) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D_{eff}}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} \right) + S_c$$

式中 S_c 为方程的源项; D_{eff} 为湍流扩散系数, $D_{eff} = \frac{\nu_{eff}}{Sc}$, Sc 为 Schmidt 数, ν_{eff} 为湍流运动黏度, 取速度场中的值.

2 计算策略

2.1 搅拌槽结构与网格划分

计算所采用的搅拌槽槽体为圆柱形, 均布 4 块挡板. 搅拌槽直径 $T=0.5 \text{ m}$, 液位高 $H=T$, 挡板宽为 $T/10$, 离槽壁 0.008 m . 搅拌桨为标准六直叶涡轮, 搅拌桨直径 $D = T/3$, 桨叶离底距离 $C = T/3$. 工作介质为水. 计算中搅拌转速为 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 在此条件下, 叶端线速度为 $U_{tip} = 1.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 搅拌 Reynolds 数为 $Re = 5.56 \times 10^4$. 根据流动的对称性, 计算域选取了槽体的一半. 图 1 所示为监测点 P1, P2, P3 和加料点 I1, I2, I3 在槽内的位置. 监测点与对应加料位置高度相同. 所有位置点均在两相邻挡板之间槽壁的中点处.

计算中采用的网格是结构化的六面体网格, 这种网格的划分比较复杂, 但在计算过程中的收敛性较好. 图 2 所示为划分的网格, 网格分布是 $39 \times 36 \times 60 (r \times \theta \times z)$, 共 78921 个网格, 叶片表面的网格分布是 10×9 . 由于采用滑移网格法进行计算, 桨叶区的网格随着桨叶一起转动, 在转动与静止的

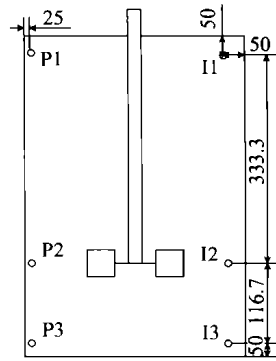


Fig. 1 Position of feeding and detecting

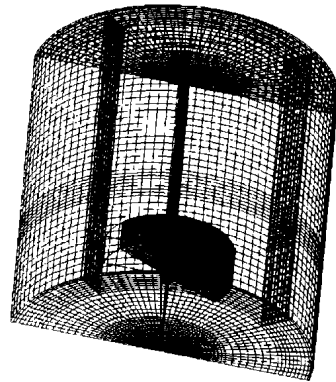


Fig. 2 Grid in stirred tank
界面上要定义非匹配边界条件.

2.2 计算方法

计算使用的软件是 CFX 4.4. 流动场的计算采用滑移网格法. 由于滑移网格法计算量非常大, 为节省时间, 在计算开始时选取一个较大的时间步进行计算, 以消除初始效应. 在最后一轮计算时选用小的时间步进行计算, 以获得稳定的流动场.

混合时间是描述混合过程的重要参量, 本文中混合时间是指物料达到完全均匀的 95% 所需要的时间 (θ_{95}). 混合时间的计算是通过加入用户标量 (USER SCALAR), 然后计算其浓度分布来实现的. 示踪剂初始浓度的计算首先根据物理坐标找到相应的网格点, 该网格点和其相邻的 6 个网格均定义示踪剂的初始浓度为 1.0, 其他区域均为 0. 示踪剂混合过程是一个随时间变化的动态过程, 计算过程需要采用滑移网格法. 在具体计算时采用了两种方法: 第 1 种方法在计算时同时解算所有的方程; 第 2 种方法在计算时只计算示踪剂浓度的输运方程, 速度、湍流参数等的输运方程被锁定, 不再进行计算, 这样可以大大节省计算时间. 由此就可以得到示踪剂浓度随时间的变化过程, 根据浓度的变化过程可以计算混合时间, 并可以将监测点的浓度变化

与实验数据进行比较.

为考察流动场对混合过程的影响, 计算流动场时采用了两种不同的湍流模型, 分别为标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型.

3 结果与讨论

图 3 所示是加料位置为 II 时不同时刻示踪剂的浓度分布图. 由此可以直观地观察到示踪剂的分散过程.

在计算浓度分布时, 本文采用了两种方法: 第 1 种方法是联合求解所有的方程; 第 2 种方法是假设速度场稳定, 单独计算浓度场. 图 4 给出了两种方法的计算结果, 括号内的数据为混合时间 θ_{95} . 从图中可以看出, 监测点的响应曲线基本是一致的, 只在局部位置略有变化. 第 2 种方法计算的混合时间普遍要比第 1 种方法略大. 产生这种差别的原因主要是由于搅拌槽内的流动场并不是稳定不变的, 而是呈现周期性和三维非稳态, 流场的不稳定性可以促进传质过程的进行, 从而使得混合时间降低. 联合求解的缺点是计算工作量非常大, 完全相同的条件下其计算量是第 2 种方法的 2.2 倍. 若根据流动场的要求再减小时间步, 增大迭代步数, 其计算量将增大 1~2 个数量级. 因此, 许多研究者都采用了稳定流动场的假设, 即本文所述的第 2 种方法, 如 Schmalzriedt^[4]、Jaworski^[5]. 从计算结果看, 两种方法对混合时间的预报规律是一致的, 仅在数值大小上略有差异. 第 2 种方法完全可以将问题表述清楚, 同时它可以大大降低计算工作量, 并可针对质量传递与动量传递各自的特点采取不同的处理方法, 具有较大的灵活性. 本文在后面的计算

均采用第 2 种计算方法.

图 5 所示分别是在标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型计算的流动场基础上得到的浓度响应曲线和混合时间的比较. 从图中可以看出, 在不同的监测位置浓度响应曲线明显不同, 表明搅拌槽内浓度场的变化依赖于流动场. 在监测位置 P1, P3 处 RNG $k-\epsilon$ 模型的混合时间大于 $k-\epsilon$ 模型的混合时间; 而在监测位置 P2 处则刚好相反, $k-\epsilon$ 模型的混合时间大于 RNG $k-\epsilon$ 模型的混合时间. 因此, 混合过程与计算采用的流动场密切相关.

图 6 所示是在 3 个不同加料位置、不同监测点的浓度响应曲线与混合时间. 从图中可以看出, 不同监测点的浓度响应曲线和混合时间差别较大. 在加料位置 II 处, P1 位置处的浓度波动最大, 而 P2 和 P3 位置处的浓度波动较小, 这主要是由于 P1 与 II 处于同一高度, 而且涡轮桨流动场内的切向速度分量较大造成的. 在液面位置处的混合时间均要比在槽底位置处的混合时间短. 在桨叶高度处监测点的混合时间则与加料位置有关. 在液面处加料时, P2 的混合时间低于 P1 和 P3 的混合时间; 而在另两个加料位置处, P2 的值则介于液面 P1 和槽底 P3 计算值之间.

混合时间不仅与监测点位置有关, 还与加料位置有密切关系. 在槽底 I3 处加料, 混合时间最长; 在桨叶高度处 I2 加料, 混合时间最短; 在液面 I1 处加料, 则介于其他两个位置之间. 该结论对于快速反应非常重要, 众多文献也发现在搅拌桨附近加料后的混合速率比其他区域的快很多. 这主要是由于该位置处的速度较大, 湍动强烈, 因而能很快地将物料分散到槽内其他区域.

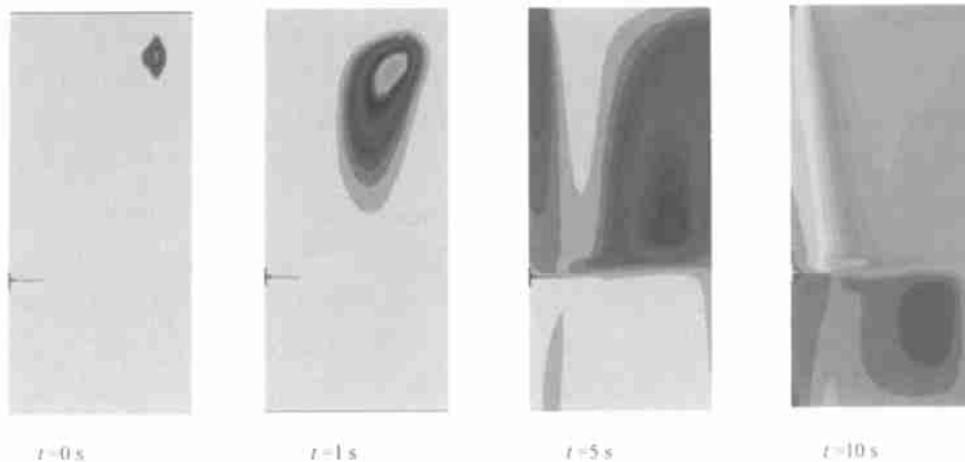


Fig. 3 Concentration distribution of tracer at different times

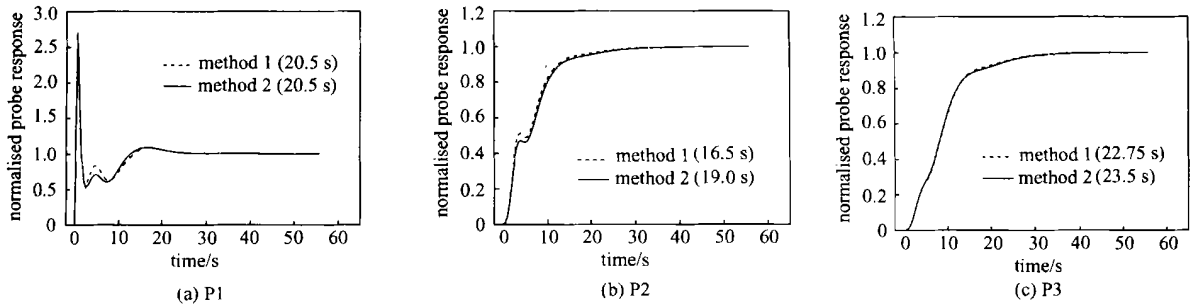


Fig. 4 Comparison of concentration response curve and mixing time for two computational methods (feeding position is II)

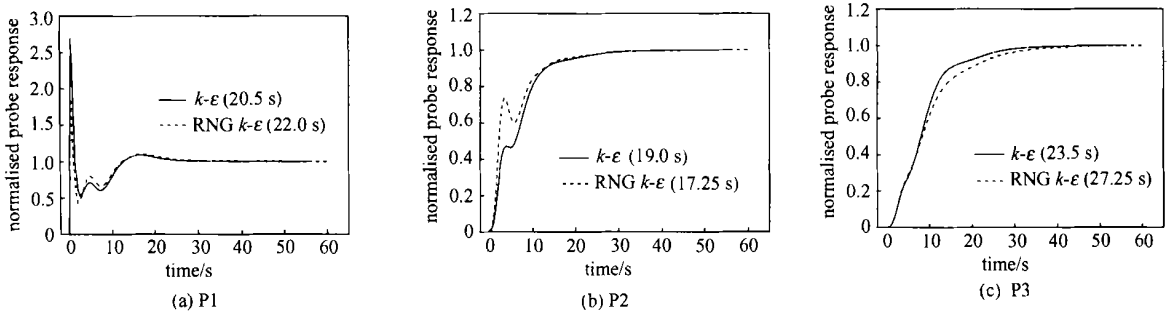


Fig. 5 Comparison of concentration response curve and mixing time for different flow field calculated using different turbulent model (feeding position is II)

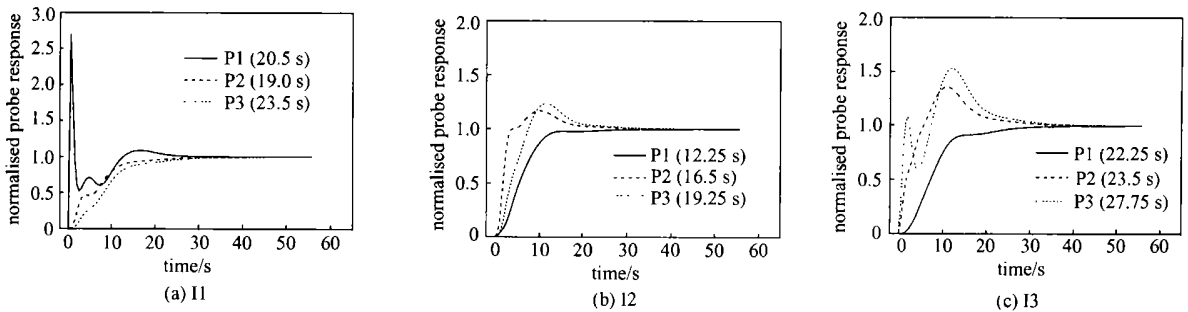


Fig. 6 Concentration response curve and mixing time at different feeding position

4 结 论

在 CFX 软件的基础上开发了混合过程计算程序, 在国内首次从 CFD 的角度对搅拌槽内的混合过程进行了数值研究. 根据对单层涡轮搅拌桨的研究结果得到如下结论.

(1) 速度场与浓度场联立求解与单独求解计算的混合时间变化规律一致, 单独求解所得到的混合时间要比联立求解略大. 单独求解完全可以将问题表述清楚, 同时其计算工作量小, 计算比较灵活.

(2) 采用不同湍流模型的流动场计算的混合时间明显不同, 表明混合过程与计算采用的流动场密切相关.

(3) 混合时间的大小与加料位置和监测点的位置都有关系. 在搅拌桨附近加料所得的混合时间最小, 在槽底处加料混合时间最大; 相同加料位置, 监测点在槽底部时混合时间最大.

(4) 本文所得结果虽其绝对值的准确性需要用实验予以确认, 但相对值的规律性是可取的, 因此, 用于比较同一桨型、选择最佳加料位置、比较不同桨的混合特性、优选桨型是有价值的.

符 号 说 明

- C——桨叶离底距离, m
- c——浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
- D——搅拌桨直径, m

H ——槽内液位高度, m
 k ——湍流动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
 Re ——Reynolds 数
 r ——径向距离, m
 T ——搅拌槽直径, m
 t ——时间, s
 u ——轴向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 v ——径向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 w ——切向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 z ——轴向距离, m
 ϵ ——湍流耗散率, $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}$
 θ ——切向位置
 θ_{95} ——混合时间, s

Beijing: Mechanical Industry Press, 2000

- 2 Nooman H, Morud K, Hjertager BH, Tragardh C, Larsson G, Enfors S O. CFD Modeling and Verification of Flow and Conversion in a 1 m^3 Bioreactor. In: Proc 3rd Int. Conf. Bioreactor and Bioprocessing Fluid Dynamics. Cambridge: 1993. 241—258
- 3 Lunden M, Stenberg O, Andersson B. Evaluation of a Method of Measuring Mixing Time Using Numerical Simulation and Experimental Data. *Chem. Eng. Commun.* 1995, 139: 115—136
- 4 Schmalzriedt S, Reuss M. Application of Computational Fluid Dynamics to Simulations of Mixing and Biotechnical Conversion Processes in Stirred Tank Bioreactors. In: Proceedings of 9th Europe Conference on Mixing, Paris, 1997. 171—178
- 5 Jaworski Z, Bujalski W, Otomo N, Nienow A W. CFD Study of Homogenization with Dual Rushton Turbines—Comparison with Experimental Results. *Trans. IChemE.*, 2000 78A: 327—333
- 6 Mao Deming (毛德明). Basal Study of Flow and Mixing in Stirred Tank with Multiple Impeller; [dissertation] (学位论文). Hangzhou: Zhejiang University, 1997

References

- 1 Wang Kai (王凯). Mixing Equipment Design (混合设备设计).

《化工学报》 赞助单位

四川大学化工学院

浙江大学化学工程与生物工程学系

大连理工大学化工学院

北京化工大学

浙江工业大学化工学院

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室

武汉化工学院

上海化工研究院

西南化工研究设计院

上海交通大学化学化工学院

华南理工大学化工学院

石油大学(北京)