

文章编号:1671-6833(2009)02-0001-05

双层桨叶搅拌器流场的 CFD 模拟与 PIV 测量

王定标¹, 杨丽云², 于艳¹, 向飒¹

(1. 郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001; 2. 新乡学院 化工与环境学院, 河南 新乡 453003)

摘 要: 利用 CFD 技术和 PIV 测量研究了搅拌器内双层桨叶不同位置的流场和浓度分布. 基于 Navier-Stokes 方程和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 求解搅拌器的湍流场, 考察了在不同转速和不同桨叶高度下搅拌器的流型变化和混合浓度情况. 结果表明: 改变双层桨叶位置, 流场的流型基本不发生变化, 均以桨叶为中心形成上下“双循环”流动; 随着加料位置和桨叶高度的变化, 对搅拌功率基本没有影响, 但对不同监测点的浓度变化较大, 对混合时间的影响也较大; 采用桨叶部位加料可以充分利用流体的湍流特性, 加快混合速度, 缩短混合时间, 节约成本, 提高经济效益.

关键词: 搅拌器; 双层桨叶; 流场; CFD; PIV

中图分类号: TQ 027. 2; TQ 018 **文献标识码:** A

0 引言

搅拌操作是工业反应过程的重要环节, 广泛应用于化工、冶金、食品、医药、发酵等领域. 国内外对搅拌器的研究逐步深入^[1-12], 美国莱宁公司利用实验和 CFD 技术开发了新型轴向流叶轮如 A310 和 A315 等系列, 其叶片的倾角和宽度随其径向位置变化而变化. Ranade^[3]等利用 CFD 方法研究了传统的直叶涡轮和斜四叶涡轮; Noorman^[4]等对单层涡轮桨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; Ranade 也计算了单层涡轮桨的三维浓度场分布. 国内学者也开始把 CFD 技术应用于各种不同的桨型^[5-8]、多层桨、内外组合桨中. 而目前, 国内外对搅拌器多层叶轮、层间距以及混合时间等方面的研究较少.

因此, 笔者采用数值模拟 CFD 技术以及实验测量的方法研究了双层桨叶不同位置安装的搅拌性能, 搅拌器的深入研究和新型搅拌器的设计开发具有一定指导意义.

1 搅拌器结构

当搅拌槽的长径比较大时往往采用双层桨

叶. 这时, 桨叶之间的层间距对流型、搅拌功率和混合速度均有影响. 搅拌器基本尺寸如表 1 所示.

表 1 搅拌器主要几何参数

槽直径	槽深度	桨直径	桨宽度	挡板宽度	挡板数
/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/个
200	400	90	15	20	4

桨叶高度是桨叶的水平中心线离搅拌槽底部的高度. 按桨叶高度分 I、II、III、IV 4 种类型, 其桨叶高度位置如表 2 所示.

表 2 桨叶高度位置参数

桨叶	I	II	III	IV
上层桨叶高度	282.5	242.5	242.5	282.5
下层桨叶高度	107.5	107.5	67.5	67.5

2 搅拌器 PIV 测量的实验装置

试验用搅拌器结构采用表 2 中 II 型结构, 实验装置采用有机玻璃制造, 槽内充以清水作为工作介质, 为补偿介质的折射率, 减少测量精度的偏差, 将搅拌槽放置于 380 mm × 380 mm × 450 mm 的方形玻璃水槽内. 实验中转速分别为 80, 120, 160, 200 r/min. 采用丹麦 Dantec 公司的 PIV 进行实验测量, 实验装置如图 1 所示.

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2009-01-06

基金项目: 河南省重大公益性科研招标项目(081100910100)

作者简介: 王定标(1967-), 男, 浙江杭州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事流程工业节能技术及装备的研究与开发, wangdb@zsu.edu.cn.

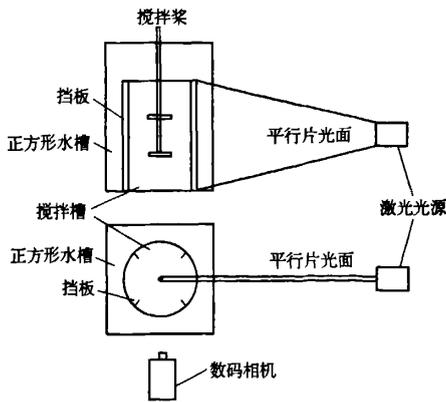


图1 实验装置
Fig. 1 Test equipment

3 搅拌器的 CFD 技术

3.1 数学模型

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u_i 为速度分量.

(2) 动量守恒方程 (Navier - Stokes 方程)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: p 为静压; τ_{ij} 为应力, $\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu$

$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$; ρg_i 为重力体积力; F_i 为源项 (可以包括其它模型源项或者用户自定义源项), 对于湍流模型, $F_i = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j'})$, 其中, $-\rho \overline{u_i u_j'}$ 是雷诺应力, 表示湍流的影响, 雷诺应力采用 Boussinesq 假设.

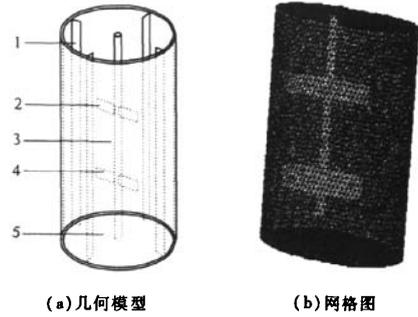
另外, 对于湍流场, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型以及对流扩散的混合模型.

3.2 网格划分

采用多重参考系法, 将搅拌器分为两个部分: 搅拌桨区和桨外区域. 搅拌桨区采用旋转坐标系, 桨外区域采用静止坐标系. 采用非结构化四面体混合型网格划分. 搅拌器三维几何模型以及网格划分如图 2 所示.

3.3 边界条件

将计算域分为两个区域, 内部动区域包括旋转的桨叶, 将动区域内的流体设为与搅拌桨相同转速进行旋转, 外部静区域包括槽壁, 将静区域内的流体视为静止. 将轴和桨定义为动边界, 将槽壁



(a) 几何模型 (b) 网格图
1 - 挡板; 2 - 桨叶; 3 - 搅拌轴; 4 - 桨叶; 5 - 搅拌槽

图2 搅拌器几何模型及网格图

Fig. 2 Mode and mesh of stirred vessel

定义为静止壁面边界条件. 计算时所选介质为水, 加料所选材料为示踪剂, 桨叶旋转速度为 80, 120, 160, 200 r/min.

考察不同监测点和加料点位置对混合时间的影响, 取 3 个加料点, 分别为表面加料 (F1)、上层桨叶尖端加料 (F2) 和下层桨叶尖端加料 (F3), 3 个监测点分别位于表面 (P1)、槽中间 (P2) 及槽底部 (P3), 具体分布如图 3 所示.

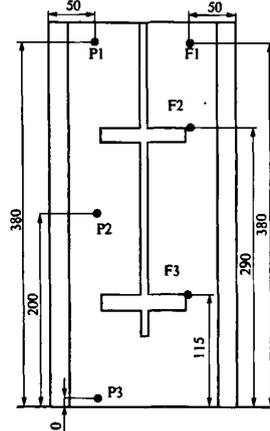


图3 加料点和监测点位置图

Fig. 3 Location of feeding and monitoring spot

3.4 求解策略

应用 FLUENT 软件, 流场的计算采用稳态的隐式分离方法; 流场稳定后选择非稳态的隐式分离方法模拟宏观混合过程. 压力 - 速度的耦合求解采用 PISO 算法, 对流项的离散使用二阶迎风差分格式.

4 结果与分析

4.1 实验验证

图 4 所示为在不同搅拌转速下实验和数值模拟得到的流场分布图 (取一半流场), 每幅图中左

为数值模拟结果,右为实验结果。

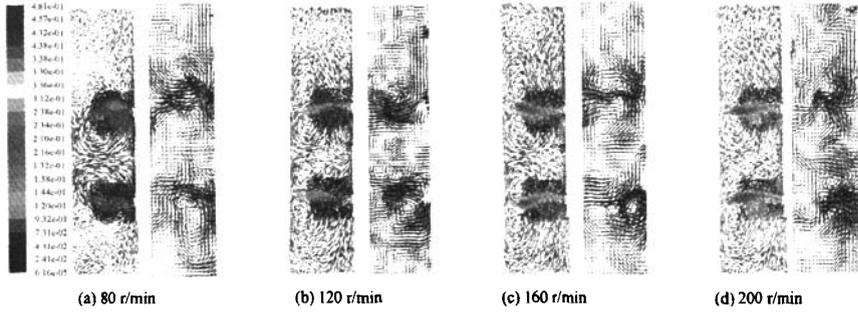


图 4 利用实验测量和 CFD 技术得到的不同转速下流场分布的比较图

Fig. 4 Comparison of the predicted flow fields stirred by different speed ratios with experiments

从图 4 可以看出,在不同转速下,搅拌槽内均形成了以叶轮为界的上下双循环流动形式,总体上,PIV 实验测量和数值模拟得到的速度矢量图基本一致,验证了数值模拟的正确性。同时还可以看到,无论转速怎么变化,双层平直叶桨的径向流型没有改变,桨叶区流体在叶片的旋转作用下形成高速径向射流,流向器壁,撞击到器壁后一分为二,一部分沿槽壁向上流动,一部分向下流动,在叶片的抽吸作用下,流体发生转向又流回桨叶区,形成典型的双循环流动形式,并且,随着转速增大,旋涡的范围和强度均增大。

4.2 4 种桨叶高度下搅拌器功率

表 3 所示为不同桨叶高度下搅拌器功率的数值模拟结果。从表 3 可见,搅拌桨叶位置发生改变

表 3 不同桨叶高度下搅拌器功率

Tab.3 Stirred vessel power under different height of agitation

类型	功率消耗/W	功率准数 N_p	单位体积功率 $P_v/(W \cdot m^{-3})$
I	0.143 432	3.041 765	11.413 95
II	0.150 333	3.188 113	11.963 11
III	0.148 228	3.143 479	11.795 62
IV	0.151 346	3.209 592	12.043 70

变,搅拌功率、功率准数、单位体积功率变化程度不大,说明桨叶位置一定程度的变化不会对搅拌功率、功率准数、单位体积功率产生很大的影响。

4.3 4 种桨叶高度位置的流场分布

图 5 所示为 4 种桨叶位置情况下由数值模拟得到的流场分布图。由图 5 可以看出,在桨叶直径、转速一样的情况下,尽管双层平直叶桨的桨叶位置发生了变化,但各种情况的流场分布图并没有发生多大的变化,都是以桨叶为中心形成上下双循环流动,在桨叶尖端上下各形成两个漩涡。随着两层桨间距离的减小,相邻两层桨叶的液流速度相近,导致混合效果不太好,因此在加入示踪粒子时搅拌时间相对较长。

4.4 示踪剂浓度变化情况

图 6~9 所示为 4 种不同桨叶高度位置下在 3 个不同加料位置(F1、F2、F3)、不同监测点(P1、P2、P3)的示踪剂浓度 K_a 与混合时间图。从图中可以看出,不同监测点的示踪剂浓度响应曲线和混合时间差别很明显。

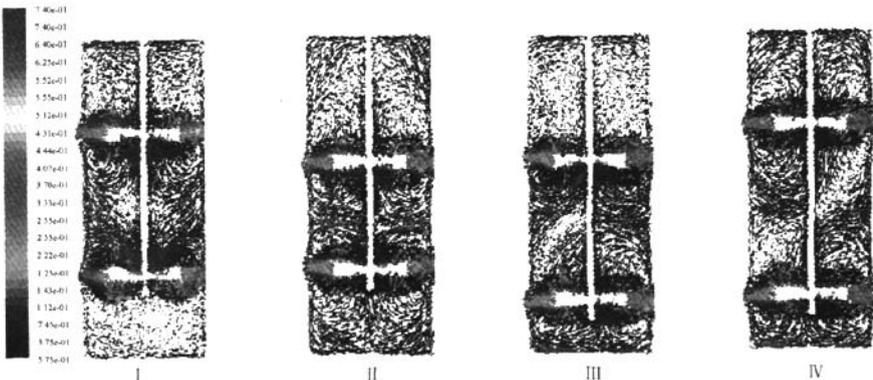


图 5 4 种桨叶位置下流场分布图

Fig. 5 Flow fields of stirred vessel under different height of agitation

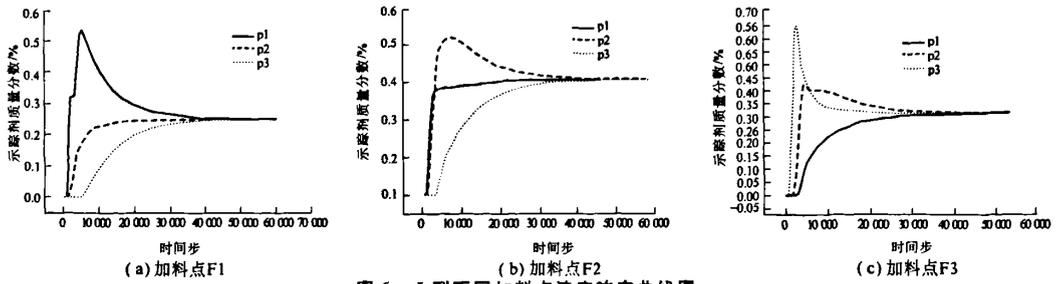


图6 I型不同加料点浓度响应曲线图

Fig. 6 Concentration distribution of monitoring spot under different feeding spot for I

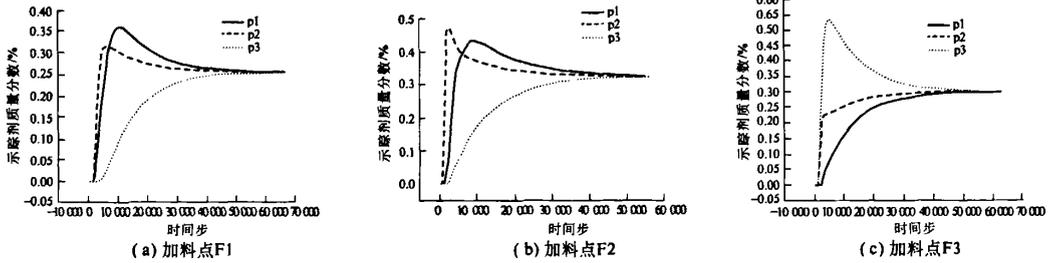


图7 II型不同加料点浓度响应曲线图

Fig. 7 Concentration distribution of monitoring spot under different feeding spot for II

从图6,7可以看出,在加料位置F1和F2处, P1位置处的浓度波动最大,而P2和P3处的浓度波动较小,这主要是由于P1和F1处于同一高度,而且平直叶桨流动场内切向速度分量较小造成的.在液面和槽底位置处监测点的混合时间要比在槽中间位置处监测点的混合时间要长.在加料

位置F3处,情况发生很大变化,对于I型,P2的波动较大,P1和P3波动较小.对于II型,P3波动较大,P1和P2波动较小,相同的加料位置和监测点,由于桨间距发生变化,浓度相应曲线图也发生很大的变化,可见,槽中间位置处监测点的混合时间短于液面和槽底处监测点的混合时间.

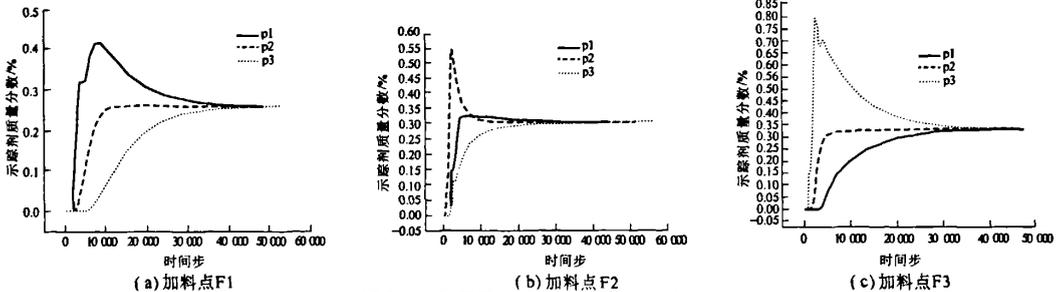


图8 III型不同加料点浓度响应曲线图

Fig. 8 Concentration distribution of monitoring spot under different feeding spot for III

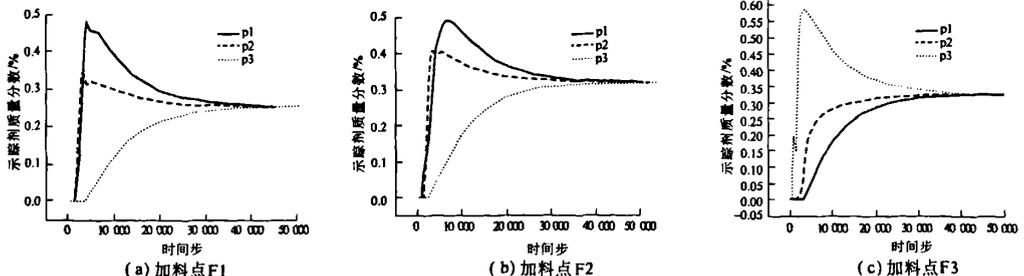


图9 IV型不同加料点浓度响应曲线图

Fig. 9 Concentration distribution of monitoring spot under different feeding spot for IV

从图8,9可以看出,对于顶端加料和底层加料浓度响应曲线,尽管有差别,但总体趋势还是非常一致的.对于Ⅲ型的F2加料,由浓度响应曲线可知该桨叶位置处选择F2为加料点,可以充分利用流体的湍流特性,加快混合速度,缩短混合时间,节约成本,提高经济效益.

5 结论

(1)对改变搅拌器双层桨叶位置的混合过程进行数值模拟并加以实验测量,考察了双层桨叶不同位置对混合效果的影响.改变双层桨叶位置,流场的流型基本不发生变化,都是以桨叶为中心形成上下“双循环”流动.

(2)随着加料位置和桨叶间距的变化,对搅拌功率基本没有影响,不同监测点的浓度变化较大,对混合时间的影响也较大.液面的监测点混合时间稍长,桨叶部位的监测点混合时间短,可以充分利用流体的湍流特性,加快混合速度,缩短混合时间,节约成本,提高经济效益.

参考文献:

- [1] JAVED K H, MAHMUD T, ZHU J M. Numerical simulation of turbulent batch mixing in a vessel agitated by a rushton turbine[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2006, 45(2): 99 - 112.
- [2] SAKAKURA K, SHIOJIMA T, YAMAMOTO S. Numerical simulation of double helical ribbon agitators using three - dimensional DEM simulation [J]. *Japan Society of Mechanical Engineers*. 2005, 71(703): 766 - 772.
- [3] DESHPANDE, VAIBHAV R, RANADE, et al. Simulation of flows in stirred vessels agitated by dual Rushton impellers using computational snapshot approach [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2003, 190(2): 236 - 253.
- [4] NOORMAN H, MORUD K, HJERTAGER B H, et al. CFD modeling and verification of flow and conversion in a 1 m³ bioreactor[C]//*Proc 3rd Int Conf Bioreactor and Bioprocessing Fluid Dynamics*. Cambridge, 1993: 241 - 258.
- [5] 侯拴弟, 张政, 王英琛. 轴流桨搅拌槽三维流场数值模拟[J]. *化工学报*, 2000, 51(1): 70 - 75.
- [6] 张国娟, 闵健, 高正明. 翼形桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. *高校化学工程学报*, 2005, 19(2): 169 - 174.
- [7] 苗一, 潘家祯, 牛国瑞. 多层桨搅拌槽内的宏观混合特性[J]. *华东理工大学学报:自然科学版*, 2006, 32(3): 357 - 360.
- [8] 孙会, 潘家祯, 崔宁. 带有内外组合桨的搅拌设备内流场的数值研究[J]. *高校化学工程学报*, 2005, 19(3): 315 - 319.

CFD Simulation and PIV Measurement of Flow Fields in Stirred Vessel with Double - flat Agitator

WANG Ding - biao¹, YANG Li - yun², YU Yan¹, XIANG Sa¹

(1. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical and Environment Engineering, Xinxiang College, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The CFD technique and PIV were adopted to investigate the flow field and concentration distribution in Stirred Vessel with double - flat agitator. Based on the Navier - Stokes equations and standard turbulence model, turbulent flow fields were solved, and the flow pattern and mixed concentration were analyzed under the different speeds and different heights of agitator. Results show that different positions of double - flat agitator did not change the flow pattern of flow fields, and “double loop” flow were formed as the center of agitation; the basic power was not affected by the location of the agitator, but concentration on different monitoring spot and mixing time was obviously affected; feeding position on location of agitator can take full advantage of fluid turbulence characteristics to accelerate the mixing speed, shorten the mixing time, save costs and increase economic efficiency.

Key words: stirred vessel; double - flat agitator; flow field; CFD; PIV