

搅拌器内湍流场的 CFD 模拟研究

张林进, 叶旭初

(南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 采用 CFD 技术研究了 DT 和 PTU 型桨叶搅拌器内的湍流场, 结果表明: 对于 PTU 和 DT 桨叶, 理论预测速度场分布规律与 LDA 测试结果吻合较好, 理论预测漩涡的空间位置坐标与实测值完全一致。预测速度值与实测值在桨叶叶尖附近相对误差比较大, 在离旋转中心轴线 $2R/3$ 处竖直线上, 对于 DT 桨叶搅拌器, CFD 预测的速度值和 LDA 测试值吻合比较好, 最大相对误差在 11% 左右。而对于 PTU 桨叶, 在同样的空间位置上, CFD 预测值与测试结果的变化趋势相吻合, 速度峰值附近的误差较大, 相对误差高达 30% 左右。

关键词: 搅拌器; 湍流; CFD; 激光测速

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-7643(2005)02-0059-05

搅拌是化工混合、传递、反应的主要过程之一, 其中约 85% 的为槽式搅拌容器, 充分掌握搅拌器内的湍流特性、温度、组分浓度分布等规律对搅拌器的性能优化设计、指导操作、自动化控制具有重大的现实意义^[1,2]。CFD (computation fluid dynamics) 技术是对流动、传热、传质、燃烧、化学反应等工程现象进行数值模拟分析的总称, CFD 技术应用在新产品开发、工程研究与优化设计、工程评估中是本世纪的重要发展方向。Montante G^[3] 等人对 PTU 桨叶搅拌器内固体颗粒的分布进行了实验测量和数值模拟, 结果证明理论预测的颗粒轴向浓度分布和实验结果比较吻合。侯拴弟^[4]、马青山^[5] 等人采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了搅拌槽内流体流动状态, 对流动场进行了宏观分析研究, 成功反映了搅拌槽内流体流型, 然而, 理论预测与实测之间的定量比较与误差分析还未见报导。本文以典型的 DT 和 PTU 型桨叶搅拌器内复杂的搅拌过程为研究对象, 对数值计算结果与 LDA 激光测试值^[6] 进行了量化的比较分析。

1 基本原理

搅拌器的主要流动特征是湍流, 描述湍流的基本方程可用通用形式表达为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\varphi) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r}) + S_{\varphi}$$

式中: φ 分别代表 u, v, w 及湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 等变量, S_{φ} 代表源项, 其具体表达式及湍流模型可见文献[7]。

网格划分采用滑移方法, 即在桨叶内部的网格采用随桨叶转动的移动网格 (slide - grids), 在桨叶外部的网格采用静态网格, 如图 1 所示。数值方法为 SIMPLE^[8]。

2 计算条件

模拟计算采用的搅拌器的几何结构如图 2 所示, 桶底类型为平底, 桶体高度为 250 mm, 直径 $2R$ 为 250 mm, 桨叶类型分别为 Pitched - blade Turbine (PTU) 和 Disc Turbine (DT) 两种, 周边均布 4 个挡板 (宽度为桶体直径的 $1/10$), 结构参数见表 1。

3 结果与分析

3.1 径向剖面速度场分布规律

图 3 是理论预测的 1 号搅拌器径向剖面上的流场与 LDA 测试结果比较图。

收稿日期: 2004-06-01

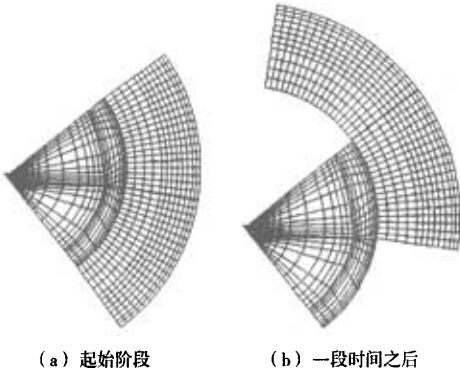
作者简介: 张林进 (1981-), 男, 江苏通州人, 硕士生, 主要研究方向为计算机模拟与工程数字化设计。

叶旭初 (联系人), 教授, Email: yexuchu@njut.edu.cn

表1 搅拌器结构参数

Table 1 Structural dimension of stirred tanks

类型	桨叶类型	桨叶角度/(°)	桨叶直径/mm	桨叶高度/mm	转速/(r·min ⁻¹)
1	PTU	45	125	125	177
2	DT	0	250/3	125	300
3	DT	0	250/3	250/3	200



(a) 起始阶段 (b) 一段时间之后

图1 网格滑移示意图

Fig. 1 Illustration of the rotation of the sliding mesh

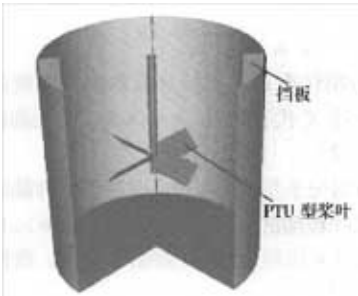
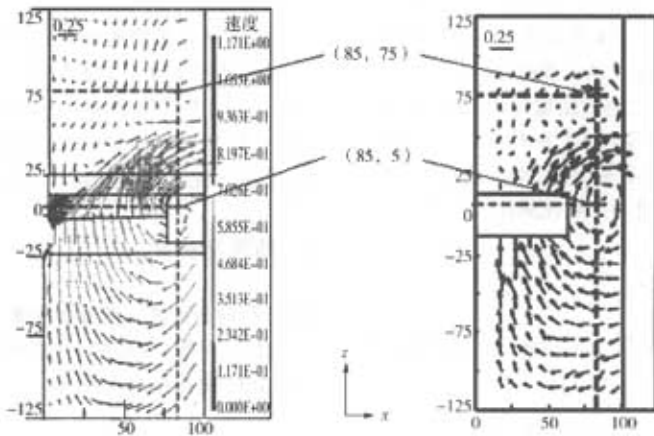


图2 搅拌器的几何效果图

Fig. 2 Geometry of mixer

从图3(a)可以看出,流体一方面被高速旋转的桨叶“甩出”,另一方面还受到桨叶的挤压作用,因此在桨叶上缘的叶尖附近速度值最大,并且带有较强的轴向分量,该点理论模拟与实测的结果相一致。由于流体受到桶壁的制约与桨叶附近的负压区的引导,在桶内的流体似乎分成上下两股,形成了纵向截面上一大一小的两个涡区,涡心位置分别是(85,5)和(85,75),参见LDA的测试结果图3(b),预测与实测的涡心位置几乎完全相同,如图中虚线的交点所示。图3(b)中,桨叶区的空白是因为LDA测试受桨叶旋转的干扰而无法准确测量造成的。

图4、图5分别是理论预测的2、3号DT型桨叶的搅拌器在径向剖面上的速度矢量场与LDA测试结果对比图。从图4、图5中均可以看出,在DT桨叶的叶尖附近,排出的流体仅具有径向速度,同时,流体在桨叶的径向剖面的上下各形成一个漩涡,比较理论预测与LDA测试结果可以看出:理论预测的涡心位置与实测位置吻合较好。



(a) CFD模拟的瞬时速度场(单位:mm) (b) 实测的时均速度场(单位:mm)

图3 PTU 桨叶搅拌器内典型截面上的流场速度分布比较图

Fig. 3 Comparison between velocities in PUT impeller stirred tanks

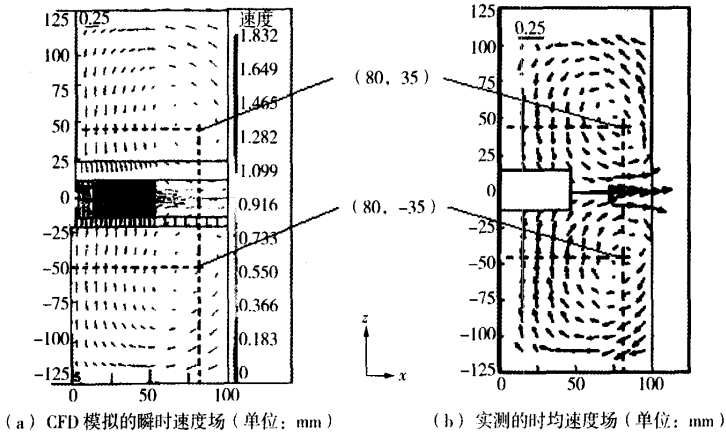


图 4 DT 桨叶搅拌机内典型截面上的流场速度分布比较图

Fig. 4 Comparison between velocities in DT impeller stirred tanks

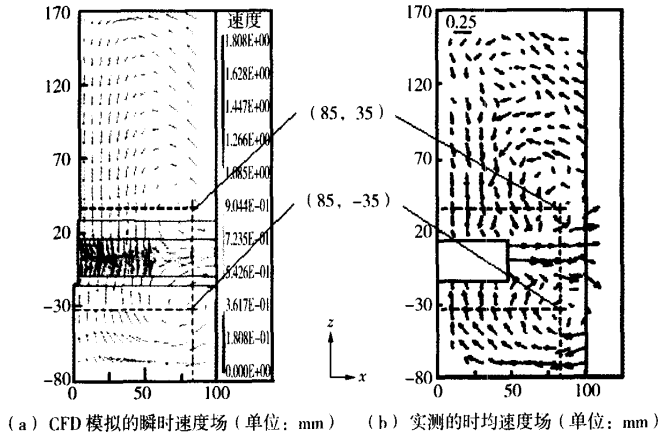


图 5 DT 桨叶搅拌机内典型截面上的流场速度分布比较图

Fig. 5 Comparison between velocities in DT impeller stirred tanks (speed: 200 r/m)

上述结果表明: 无论是倾斜式的 PTU 桨叶, 还是直桨叶 (DT 型桨叶), CFD 模拟预测的速度场的整体流动与实测结果特征完全一致, 说明 CFD 用于搅拌器的理论分析研究, 不但可行, 而且准确性也较高。

3.2 速度值的比较

理论预测的整体速度场虽然能达到理想的结果, 但是, 相应的速度值的大小在定量上的吻合程度如何? 通过预测值与实测值的定量分析比较后发现: 理论预测的速度值与实测值相对误差比较大的区域是在桨叶的叶尖附近, 因此, 选择离旋转中心轴

线 $2R/3$ 处竖直线上的速度变化规律作为比较对象。

图 6、图 7 分别是理论预测的 PTU 和 DT 桨叶在离旋转轴中心线 $2R/3$ 处竖直线上的速度变化规律与实测值的比较图。从图 6 可以看出: 对于 PTU 桨叶来说, 理论预测值与测试结果的变化趋势吻合较好, 对应峰值的空间坐标基本一致, 但是, 理论预测值普遍比实测值偏高, 尤其在桨叶以上的区段, 两者的相对误差高达 30% 左右。图 7 中, DT 桨叶搅拌机中理论预测值与 LDA 测试结果和在定量上吻合较好, 最大相对误差在 11% 左右。

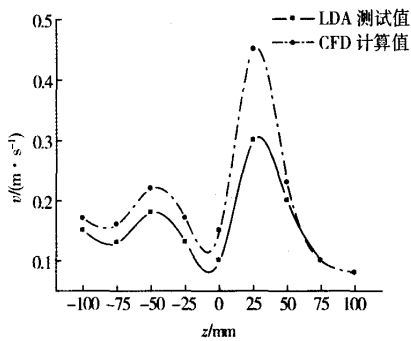


图6 PTU 桨叶 $x = \frac{2}{3}R$ 处的速度值比较图

Fig. 6 Comparison between velocities at $x = \frac{2}{3}R$ in PTU impeller stirred tanks

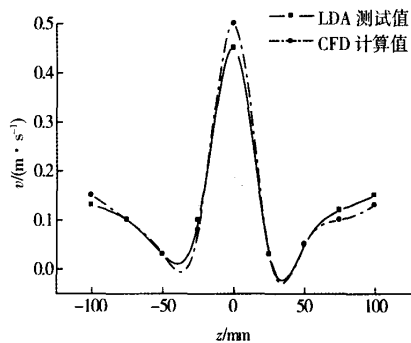


图7 DT 桨叶 $x = \frac{2}{3}R$ 处的速度值比较图

Fig. 7 Comparison between velocities at $x = \frac{2}{3}R$ in PTU impeller stirred tanks (300 r/min)

综合图6、图7可知:CFD预测的速度峰值、变化锐度普遍较测量值偏高。理论预测值高于实测值可能是合理现象,这因为,理论预测结果是桨叶在该位置上的瞬时速度值,而LDA测得的是在测试的一段时间内的平均速度值,即 $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$,最大值和最小值均被平均掉了。而桨叶在通过该剖面的瞬间,桨叶附近的速度肯定大于桨叶经过前后的一段时间内的平均速度值。此外,由于在LDA测试过程中,测量点沿径向移动也容易出现测点偏移,导致实测结果偏低。

对于PTU桨叶,结构比DT复杂,测量误差相对

增大;另一方面,在数值计算过程中是假定流体与桨叶之间不发生速度滑移的,但是,实际上,当转速较快时,流体跟叶片之间就有可能发生速度滑移,由于PTU是倾斜桨叶,发生速度滑移的趋势比DT强,所有这些可能是造成PTU桨叶在 $x = 2R/3$ 处数值计算值与试验测试值相对误差高达30%的原因。

4 结论

(1)对于PTU和DT桨叶,理论预测的速度场分布规律与LDA测试结果吻合较好,理论预测的漩涡的空间位置坐标与实测值完全一致。

(2)理论预测速度值与实测值在桨叶叶尖附近的相对误差比较大,在离旋转中心轴线 $2R/3$ 处竖直线上,对于DT桨叶搅拌机,CFD预测的速度值和LDA测试值吻合比较好,最大相对误差在11%左右。而对于PTU桨叶,在同样的空间位置上,CFD预测值与测试结果的变化趋势相吻合,速度峰值附近的误差较大,相对误差高达30%左右。

(3)CFD预测的结果较试验研究可能更合理,而且具有更强的适应性,对各种几何结构的搅拌器、多层桨叶,牛顿、非牛顿流体,组分流、反应流等过程,能够提供较为准确的数值模拟结果,为实现搅拌器的性能优化设计提供了有效的分析手段。

参考文献:

- [1] 沈惠平,张锁龙,葛乐通,等. 三叶折叶桨搅拌流场三维速度分布规律的研究[J]. 机械科学与技术,1998,17(20):302-306.
- [2] 侯拴弟,张政,施力田,等. 轴流式搅拌器湍流运动特性[J]. 化工学报,2000,51(20):259-263.
- [3] Montante G, Micale G, Magelli F, et al. Experiments and CFD predictions of solid particle distribution in a vessel agitated with four pitched blade turbines [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2001,79(8):1005-1010.
- [4] 侯拴弟,张政,王英琛,等. 涡轮桨搅拌槽流动场数值模拟[J]. 化工学报,2001,52(3):241-245.
- [5] 马青山,聂毅强,包雨云,等. 搅拌槽内三维流场的数值模拟[J]. 化工学报,2003,54(5):612-618.
- [6] 毛德明,冯连芳,许国军,等. 用LDA研究搅拌器内的流场[J]. 高校化学工程学报,1996,10(3):258-262.
- [7] 叶旭初,胡道和. 窑内多通道喷煤燃烧器的旋转射流场的数值模拟[J]. 南京化工大学学报,1998,20(1):36-39.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.

CFD numerical simulation on turbulent flow in stirred tanks

ZHANG Lin-jin , YE Xu-chu

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The turbulence field in PTU and DT impeller stirred tanks had been studied by CFD. The numerical simulations of the speed distribution of flow were in good agreement with experimental results. The relative error is larger around the blade tip. On the line of the DT impeller stirred tank which was at the distance of $2R/3$ to the axis, the predicted velocities were satisfaction with LDA and the maximum relative error was about 11%. On the same location of the PTU impeller stirred tank, though the changing tendency of velocities was approximately identical, the error of peak value was lager and the relative error was about 30%.

Key words: stirred tank; turbulence; CFD; LDA

· 下期文章摘要预报 ·

框架结构半主动控制优化设计

林 森, 明宝华, 周星德

以框架结构为研究对象,在设计出作动器的前提下,对结构设计参数进行摄动,以控制效果为优化目标来确定最优设计参数。在模型降价方面,选择了基于系统内平衡理论的降价方法。考虑到磁流变阻尼器的非线性特点及结构设计参数发生摄动时系统的可控性,研究了控制力为阶跃函数和具有较大的增益裕度的广义预测控制,并提出了相应的半主动控制方法,最后给出了计算实例。

静力压桩的拉格朗日法模拟与桩周土体固结分析

戚科骏, 宰金珉, 王旭东, 梅国雄

静力压桩过程是一种稳态贯入过程,常规的有限元方法较难模拟。基于更新的拉格朗日列式法分析压桩时产生的大变形,引入桩-土界面间的接触作用,桩周土体采用 Mohr - Coulomb 模型,运用有限元方法进行数值分析,与传统有限元方法相比,更好地实现了静力压桩过程的数值模拟。在此基础上,进一步分析了压桩结束后桩周土体超静孔压消散的固结过程。