

圆盘涡轮式搅拌槽的数值模拟

刘敏珊, 张丽娜, 董其伍

(郑州大学 热能研究中心, 河南 郑州 450001)

摘 要: 用计算流体力学软件 FLUENT6.2, 多重参考系法对圆盘涡轮式搅拌槽在不同转速下的流动进行了整体数值模拟。采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型成功模拟了搅拌槽内的流动分布, 考察不同搅拌转速和不同计算方法下搅拌桨的功率准数, 给出搅拌槽内速度分布和湍流动能分布图, 为该领域研究者提供指导。

关键词: 圆盘涡轮式搅拌器; 数值模拟; 功率准数

中图分类号: TQ 021.1

文献标识码: A

0 引言

搅拌设备^[1]在工业生产中应用范围很广, 尤其是化学工业中, 在石油化工生产中被用于物料混合、溶解、传热、制备悬浮液、聚合反应、制备催化剂等。搅拌器通过使搅拌介质获得适宜的流动场而向其输入机械能量, 因而流动场的问题和搅拌能量问题一直是搅拌过程所研究的主要课题。

Jaworshki^[2]模拟了六直叶涡轮的流动场, 比较了标准 $k-\varepsilon$ 模型和 $RNGk-\varepsilon$ 模型两种模型对速度分布和流动特性的计算结果。Blackbure^[3]对湍流状态下的轴流式搅拌器进行模拟分析, 考察了网格数量对功率准数的影响, 其搅拌桨的边界条件通过实验获得。Lamberto^[4]考察了径向流搅拌器层流状态下的速度分布, 将计算值与模拟值进行对比。侯拴弟^[5]等模拟了斜叶涡轮搅拌槽流动场, 主要考察了搅拌桨与搅拌槽直径比、桨叶离槽底距离对搅拌槽内宏观流动场的影响。

作者对湍流状态下, 两种不同转速时搅拌槽内流动场和湍流动能分布进行模拟分析, 搅拌介质为水。使用的是多重参考系法 (Multiple Frames of Reference Method), 压力-速度耦合先使用 SIMPLE 算法, 差分格式采用一阶迎风进行收敛。网格加密后, 再使用 SIMPLIC 和二阶迎风格式进行收敛, 使得模拟结果与实际情况更为一致。且比模拟开始就使用 SIMPLIC 和二阶迎风格式进行收敛更为节省时间。同时对搅拌槽整体结构的模

拟, 相对以往的文献中大多利用对称模型仅模拟搅拌槽的一部分, 减少了对模型的依赖性。对搅拌槽内产生的现象从机理上进行分析说明, 为以后研究者提供指导。

1 搅拌槽的模拟

将计算域分为两个区域, 内部区域包括旋转的桨叶, 外部区域包括静止的挡板, 将动区域 (Fluid-move) 内的流体设定以搅拌桨相同转速进行旋转, 而静止区域 (Fluid-static) 内的流体则是静止的。将轴和桨定义为动边界, 边界类型均为壁面边界 (Wall)。其中搅拌轴处于静止流体区域内, 相对于区域内流体是运动的; 搅拌桨处于运动流体区域, 且和周围的流体以同样的转速进行运动, 因此相对于区域内流体是静止的。将挡板的外表面与槽壁定义为静止壁面边界条件。

2 搅拌槽结构

6片平直叶圆盘涡轮, 搅拌槽为圆柱形筒体, 槽体边缘均布四块挡板, 挡板宽度为 10 mm, 搅拌槽直径 D 为 400 mm, 高度为 500 mm, 搅拌桨离槽底 120 mm, $d_j/D = 0.33$, $d_j/l : b = 20:5:4$ 。搅拌转速 n 分别为 100 r/min 和 200 r/min。其中, d_j 为搅拌桨直径; l 为桨叶长度; b 为桨叶宽度。

3 计算方法

假设: ①搅拌槽内流体的时均运动为稳定流

收稿日期: 2006-11-01; 修订日期: 2006-12-19

作者简介: 刘敏珊 (1943-), 女, 河南商丘人, 郑州大学教授, 主要从事过程装备的节能及 CAD/CAE 技术研究工作。

动,忽略周期运动对搅拌槽内流体宏观运动的影响;②流体为连续的不可压缩牛顿流体,搅拌槽内流动为各向同性湍流。圆柱坐标系下,通用状态参数 Φ 的通用守恒方程式为

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w r \Phi) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right] + S_{\Phi}$$

式中: ρ 为流体密度; Γ_{Φ} 为参量 Φ 的湍流交换系数(连接动量方程和湍流方程的纽带)。

$$\Gamma_{\Phi} = \frac{\mu_i + \mu}{\sigma_{\Phi}} = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\Phi}}$$

式中: μ_i 为湍流黏度; S_{Φ} 为参量 Φ 微分方程源项,其具体表达式参见文献[6]。

$$\begin{aligned} \text{湍流动能计算}^{[7]}: \overline{q'^2} &= \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \frac{1}{2} \frac{\partial q'^2}{\partial t} \\ &+ \frac{1}{2} \overline{U_i} \frac{\partial q'^2}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \overline{u_i} \frac{\partial \langle q'^2 \rangle}{\partial x_i} = - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u'_i q'^2}) \dots \\ &- \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{u'_i \frac{p'}{\rho}} \right) \\ &+ \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\overline{u'_j} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \right] - \varepsilon \end{aligned}$$

式中: $\overline{U_i}$ 为 i 方向的平均速度, u'_i 和 \tilde{u}_i 分别为 i 方向的脉动速度和时均速度。

搅拌槽内雷诺数 Re ($Re > 10^4$) 的计算:

$$Re = \frac{\rho N_{rps} D^2}{\mu}$$

功率准数分别按下面两种方法计算,一是通过模拟得到不同转速下的扭矩值,由下面公式得到搅拌功率

$$P = M\omega = 2\pi NM \quad (1)$$

式中: M 为扭矩, $N \cdot m$; ω 为角速度。

$$P = N_p \rho N^3 D^5 \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; N_p 为功率准数; N 为转速; D 为搅拌桨直径。

通过(1)和(2)两式可得到搅拌器功率准数。

二是通过对由于黏性耗散引起的搅拌槽内的功率消耗用单位质量的湍流耗散率 ε 对体积进行积分得到

$$P = \int \rho \varepsilon dV \approx 4\rho \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \Delta V_i$$

联立式 $N_p = P/(\rho N^3 D^5)$ 求出相应雷诺数 Re 下的功率准数 N_p 。

4 模拟结果与讨论

通过有限体积法,求解质量和动量守恒方程,

获得控制体积内的速度和湍流动能分布。

4.1 两挡板间的速度矢量

通过图1可以看出,六直叶涡轮属于径向流搅拌器,旋转桨叶在叶轮区产生高速径向射流,径向射流在流动过程中夹带周围流体,撞击到挡板后,径向排出流分为两部分,一部分沿挡板向上流动,一部分向下流向槽底。到达液面或槽底后,流体流动转向径向流回轴中心,分别向下或向上流回叶轮区。模拟计算成功地反映了六直叶涡轮的“双循环”流动形式。转速高时,槽内流场分布更为均匀。

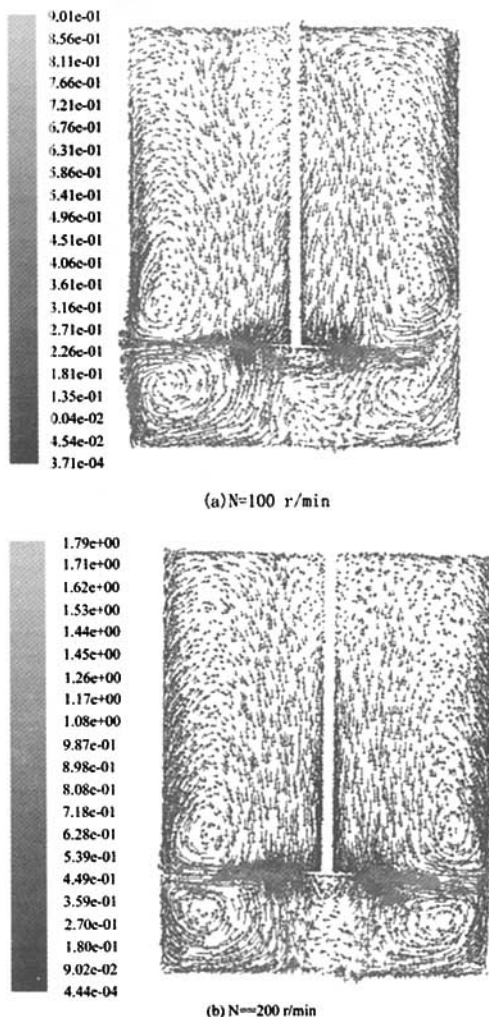


图1 两挡板间速度矢量图

Fig.1 Vector plots of velocity between two baffles

4.2 搅拌桨所在平面的速度矢量

从图2中可以看出,在高转速下,排除流量明显增大。环绕叶轮的液流是处于非各向同性的湍

动状态,因而产生了湍动.紧靠容器壁,此处是叶轮的输出流和器壁相碰撞后,再受挡板作用改变方向的地方.

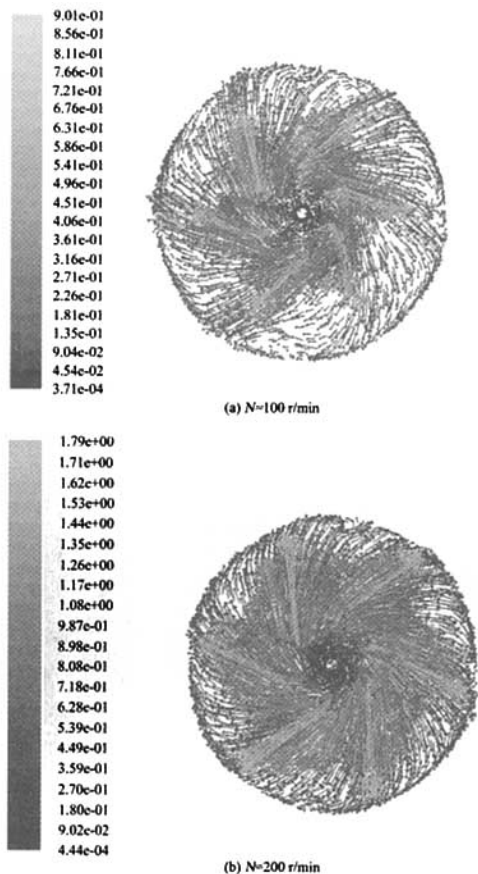


图2 搅拌桨所在平面的速度矢量图
Fig.2 Vector plots of velocity of the surface of impeller

4.3 搅拌桨所在平面的湍流动能

从图3可知,湍动最大能耗值位于叶轮后部的涡流处,挡板前面,叶轮顶端和器壁的中央也消耗一部分动能.能耗随搅拌速度的增加而变化.在搅拌容器中,吸入叶轮的液体出于强烈湍动状态,因而此部分没有耗散掉的湍动能量回入叶轮,湍动能大部分是被其中的粘滞所消耗掉.

4.4 两种功率准数计算结果比较

从表1可以看出两者计算得到的数值比较接近,湍流状态下,功率准数值随雷诺数的变化不大.通过湍流动能耗散率计算得到的要比通过计算扭矩得到的小大约25%~33%,这种情况认为是由于湍流模型模拟方法的固有缺陷造成的^[8].

万方数据

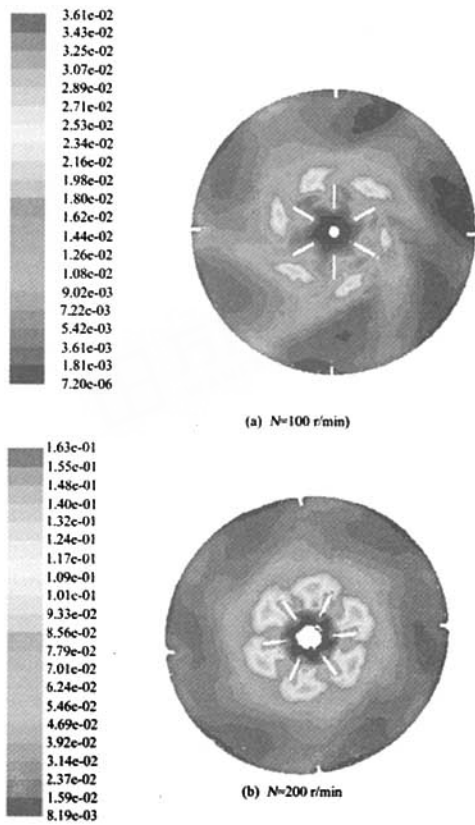


图3 搅拌桨所在平面的湍流动能云图
Fig.3 Contour plots of turbulence kinetic energy of the surface of impeller

表1 两种计算方法下的功率准数

Tab.1 Power numbers in both computed methods			
$N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$Re \times 10^{-4}$	N_p/M	N_p/ε
100	2.714	3.030 54	2.001 52
200	5.428	3.078 04	2.312 86

5 结论

笔者利用FLUENT软件研究了搅拌器的不同转速下的流场分布,叶轮所在平面的湍动能分布,以及不同转速下的功率准数.根据对单层标准六直叶涡轮的研究结果得到如下结论:

(1)对于径向流叶轮,其作用体积定义为围绕叶轮的圆柱体积,流体从轴向流入,从径向流出.动能通过搅拌桨传送到搅拌槽壁,大部分能量在搅拌桨上下循环流重新生成.动能耗散主要是(尾)涡流区.

(2)从流场分布图中可以看到液体沿挡板向上爬行,挡板改变槽内流体流动状态.不同的转速时,完全湍流的状态下,搅拌功率准数基本不变.

(下转第128页)

Development of the Post-doctoral Network Assessment Module System

YANG Zu-xuan¹, LI Yi-xing²

(1. Personnel Department, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Mathematics and Information Science, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: With the increase of the post-doctoral stations, on the one hand the development speed should be properly controlled, and on the other hand, it also demands the units that have established the stations to strengthen the management and improve the quality of the postdoctoral enrollment and training. In view of this, the organization of the inspection and evaluation of the units was done. Mainly based on the existing post-doctoral management information system established by ministry of personnel, this paper puts forward the idea of the development of the post-doctoral network assessment module system, establishes network structure diagram of evaluation implementation. By means of postdoctoral management information system platform, a more scientific and effective evaluation of the station units can be made.

Key words: post-doctoral; evaluation; network

(上接第 124 页)

(3) 两种不同的搅拌转速比较得出, 转速不同, 功率准数基本相同, 但在高转速下, 槽内流场分布较为均匀。槽顶和槽底部的流场收敛较好。且形成漩涡变小。且标准湍流模型可以准确模拟搅拌槽内的流场分布。

参考文献:

- [1] 陈乙崇, 衣 军, 王尚武, 等. 搅拌设备设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [2] JAWORSKI Z, DYSTER K N, MOORE I P T, et al. The use of angle resolve LDV data to compare two differential turbulence models applied to sliding mesh CFD flow simulation in a stirred tank[J]. Rec Prog Gen Proc, 1997, 11(51): 187 - 193.
- [3] BLACKBURN H M, ELSTON J R, NICLASSEN D A, et al. A hybrid method for simulation of axial flow impeller driven mixing vessels[J]. Applied Mathematical Modeling, 2000, 24: 795 - 805.
- [4] LAMBERTO D J, ALVAREZ M M, MUZZIO F J. Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 1999(54): 919 - 942.
- [5] 侯拴弟, 钟孝湘, 王英琛, 等. 斜叶涡轮搅拌槽流动场数值研究[J]. 北京化工大学学报, 1999, 26(4): 1 - 4.
- [6] 侯拴弟, 张 政, 王英琛, 等. 螺旋桨搅拌槽内流动场二维数值模拟[J]. 北京化工大学学报, 1998, 25(3): 1 - 7.
- [7] DUCCI A, YIANNESKIS M. Turbulence kinetic energy transport processes in the impeller stream of stirred vessels[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 2780 - 2790.
- [8] NG K, YIANNESKIS M. Observations on the distribution of the energy dissipation in stirred vessels[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78: 334 - 341.

The Simulation of Rushton Turbine Stirred Tank

LIU Min - shan, ZHANG Li - na, DONG Qi - wu

(Thermal Energy Research Centre, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The flow fields in the stirred tank under different velocity of rotating is numerically simulated by using computational fluid dynamics (CFD) package FLUENT 6. 2 with multi - reference frame (MRF) and standard turbulent model is used in the simulation. The power numbers of different velocity and methods of calculation are observed and compared. The distributions of velocity vectors and turbulence kinetic energy are given. According to the article the author wants to give important guidance to the researchers in this region.

Key words: rushton turbine stirred tank; numerical simulation; power number