

文章编号:1671-6833(2008)01-0001-04

45°涡轮桨搅拌槽内搅拌特性数值模拟研究

刘敏珊, 张丽娜, 董其伍

(郑州大学 热能工程研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要:采用多重参考系法(MRF)及标准 $k-\varepsilon$ 模型对工业中广泛应用的45°折叶涡轮桨搅拌槽内的搅拌特性进行模拟,考察不同监测点对混合效果的响应情况,发现不同监测点的响应出现明显的差别.对搅拌桨距槽底距离变化时,槽内搅拌流型以及速度矢量的分布和功率消耗情况进行模拟研究,结果表明:当 C/T 为0.278时,槽内流型发生转变;当流型转变时,搅拌桨消耗功率达到最低.

关键词:折叶涡轮桨;数值模拟;搅拌特性

中图分类号: TQ 021.1

文献标识码: A

0 引言

搅拌槽反应器广泛应用于化工、食品、冶金、造纸、石油和水处理等工业过程,其中液-液混合搅拌操作最为常见.圆盘涡轮搅拌装置因其制造简单、混合效果好而在工业中广泛使用,其中折叶涡轮搅拌桨因其低能耗而广受关注.侯拴弟^[1]等对斜四叶涡轮搅拌桨搅拌槽内流动场进行了数值模拟研究. K. Suzukawa^[2]等用激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)对开启涡轮搅拌桨倾斜角度对桨叶处尾涡的影响做了实验研究. K. H. Javed^[3]等用滑移网格法对六直叶涡轮搅拌桨的混合时间进行了模拟. K. Sakakura^[4]等用分离元素法研究了双螺旋纽带搅拌器搅拌槽逐级放大因素对混合时间的影响,模拟了搅拌槽内颗粒的循环时间和混合时间. 张国娟^[5]对六直叶涡轮和 CBY 搅拌桨搅拌槽的混合效果进行了模拟.

笔者应用 FLUENT 软件,对 45°折叶涡轮桨搅拌槽内的搅拌特性进行模拟,获得了搅拌槽内的流体流动和混合的细观信息和流动规律,为其在工业中的选取和设计提供可靠的依据.

1 流体流动和混合模型

假设:①搅拌槽内流体的时均运动为稳定流动,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.湍动能计算采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \overline{u_k k}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_k + \mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \overline{u_k \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon) \quad (2)$$

其中,

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k},$$
$$G_b = -\beta g_k \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad \mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

模型常数: $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

FLUENT 提供了模拟物质传递和反应的计算模型,笔者主要是模拟搅拌槽内的单相多组分宏观混合过程,不伴随化学反应发生,所以选用 FLUENT 软件中的物质传递模型(Species Model),激活物质传递项(Species-Transport),不激活反应项(Reactions).该模型通过解决第 i 个组分的对流扩散方程来求解第 i 个组分的局部质量分数 Y_i ,其质量守恒方程的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (3)$$

收稿日期:2007-10-08;修订日期:2008-01-10

基金项目:河南省杰出人才创新基金资助项目(0621001600)

作者简介:刘敏珊(1943-),女,河南商丘人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事过程装备的节能及 CAD/CAE 技术研究, E-mail: mslu@zhu.edu.cn.

式中: R_i 代表第 i 个组分的净化学反应生成速率; S_i 代表从分散项或用户自定义中加入的源项; J_i 代表组分 i 的扩散量。

2 模拟计算域结构及搅拌桨模型选用

模拟采用的搅拌器为 R-1 型 45° 折叶涡轮搅拌桨, 槽体为圆柱形, 均布 4 块挡板。搅拌槽直径 $T=0.27\text{ m}$, 液位高 $H=T$, 挡板宽为 $T/10$ 。搅拌桨直径 $D=T/3$, 桨叶离底距离 $C=T/3$, 工作介质为水。对搅拌桨距槽底距离的变化对槽内流型及搅拌桨的搅拌功率的影响进行模拟研究。示踪剂选择顶部加料(F1)和桨叶尖端加料(F2), 选取 3 个监测点分别位于表面(P1)、桨叶尖端(P2)及槽下部(P3)。其位置见图 1。由于搅拌混合液示踪剂的量相对槽内水的量很小, 所以将混合 KCl 的物性简化为与水的物性相同。搅拌槽结构如图 1 所示, 图中单位为 mm。

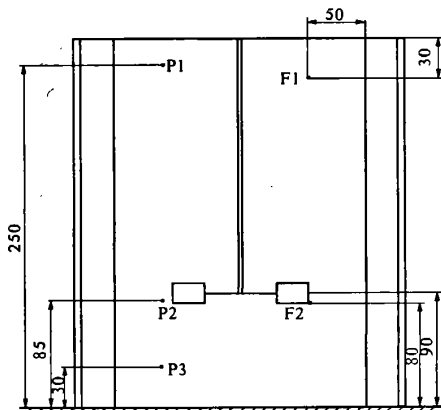


图 1 模拟搅拌槽结构

Fig. 1 Structure of simulated stirred tank

对搅拌桨的处理使用多重参考系法(MRF), 对搅拌设备的模拟, 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, 且和周围的流体以相同的转速进行运动, 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。

3 模拟结果与分析

从图 2 可以看出, 折叶涡轮在桨叶上下形成两个漩涡, 上部漩涡处混合较弱, 下部漩涡较小, 混合较上部漩涡混合好, 流型仍以径向流为主。由于桨叶倾角变小, 流场内的剪切力减小, 使得槽内横向混合减弱, 循环区速度分布较为平坦, 速度值较小。

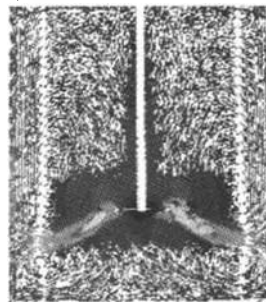


图 2 45°折叶涡轮搅拌槽速度矢量分布图

Fig. 2 Vector plot of velocity of stirred tank with 45°pitched blade turbine

图 3 为搅拌桨转速为 200 r/min 时的浓度场分布, 从浓度场分布可以明显看出不同时刻搅拌槽内的混合情况, 示踪剂在液面沿切向传递, 同时, 沿轴向方向向搅拌桨区域流动, 在这部分混合过程中, 对流扩散起主要作用, 因为该区域湍流程度相对于桨叶区较低。当示踪剂达到搅拌桨区域后, 便随着搅拌桨排出流流向槽壁, 然后沿槽壁向上向下流动。在搅拌桨与槽壁间区域, 示踪剂混合主要为涡流扩散, 因为该区域湍流程度相对较高。随后, 示踪剂向液面和槽底流动, 最后, 在槽内示踪剂浓度达到均一分布。

从图 4 中 3 个监测点不同加料位置时的浓度响应曲线可以看出, 两个加料点在每个监测点所得的浓度变化曲线趋势相似, 但综合各图来看, 在每个监测点处, 桨叶加料时的混合时间均要比顶

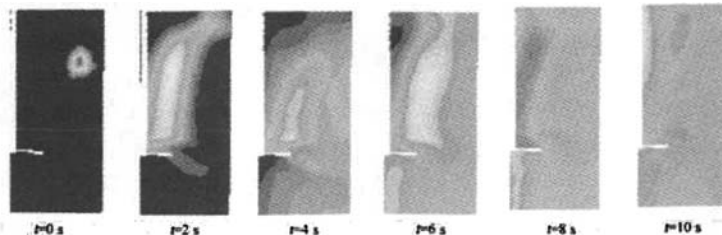


图 3 不同时刻浓度分布图

Fig. 3 Concentration distributed plot in different time

部加料时短.同时,桨叶加料时所得到的浓度变化曲线均比顶部加料时所得到的波动要大一些.主要是因为把组分加到液体表面处,在加料处将产生类似于层间混匀的情况,而可能使混匀的时间加长.加进的物料加到有搅拌装置产生的主体流动中,这样,混匀过程就由槽内物料循环次数来控制,并使混匀时间缩到最短.

图5为45°折叶涡轮搅拌槽在桨叶离槽底距离不同时的速度场.从图中可以看出流型与桨叶距槽底间距有明显关系.在相同搅拌转速 $n = 200 \text{ r/min}$ 下,当桨叶离槽底距离较远时,流体在到达槽底部前过早转向,槽底部区域流体由槽壁流向槽中心,在桨叶以下区域形成诱导循环区域.这时槽体内形成两个相对独立的流动区域,即主体循环流域和二次诱导循环流.随着桨叶离槽底距离增加,桨叶区径向流趋势增强,叶轮区射流倾角增大.由于诱导循环区流体速度值较小,为弱流区域,此流动形态不适应于固体颗粒的悬浮.随着桨叶与槽底间距的减小,桨叶区流体径向流动很弱,径向速度很小,流体主要以轴向流动为主,当 $C = 75 \text{ mm}$,即 $C/T = 0.278$ 时,桨叶下部两个漩涡消失,流体到槽底后转而向上运动,槽内形成一个整体的循环区域,随着桨叶离槽底距离的减小,槽上部混合减弱,所以桨叶不能离槽底太近.

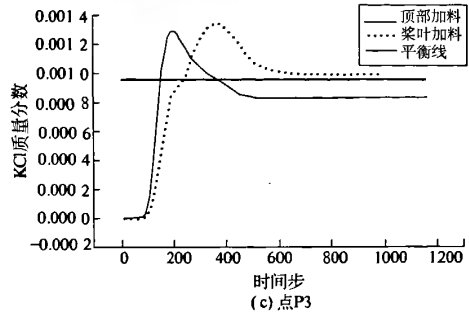
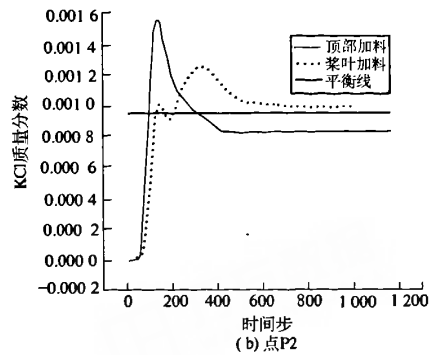
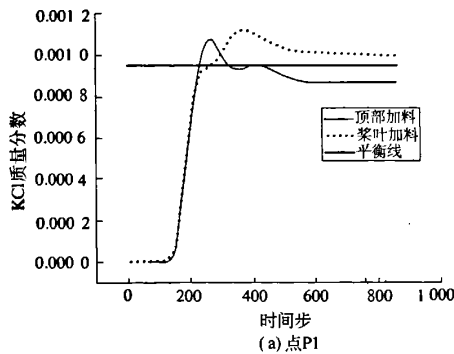


图4 3个监测点不同加料位置时的浓度响应曲线
Fig.4 Curves of concentration response of three observable points with different injected points

从表1中可以看出,当槽内流动为完全径向流时,搅拌器消耗的功率随 C 的减小而增加.当桨叶排出流体碰到槽底后,其功率有个突降阶段,在达到完全轴流流动时,搅拌桨的功率达到最低.之后,随着 C 的减小,功率增加.由此,我们可以得到,在轴流状态下,可以在消耗动力较小的情况下,获得较大的循环流量.其中 M 为搅拌桨扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; P 为搅拌桨所消耗的功率, $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$.

4 结论

(1)45°折叶涡轮桨搅拌槽当 $C = 90 \text{ mm}$ 时,折叶涡轮在桨叶上下形成两个漩涡,上部漩涡处混合较弱,下部漩涡较小,混合较上部漩涡混合好,流型仍以径向流为主.

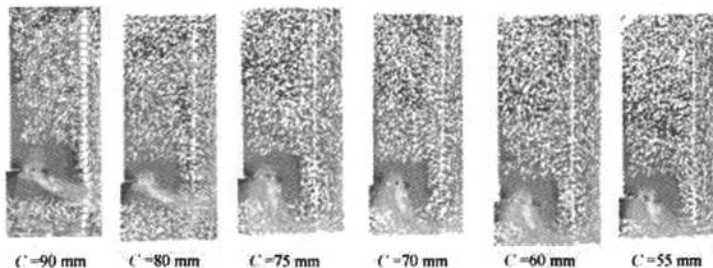


图5 桨叶距槽底距离不同时速度矢量图

Fig.5 Vector plots of velocity in stirred tank under different distance between impeller and bottom

表 1 桨叶距槽底距离不同时功率对比
Tab.1 Power under different distance between impeller and bottom

C/mm	90	80	75	70	60	55
M/(N · m)	0.019 49	0.019 67	0.014 96	0.015 91	0.016 68	0.021 66
P/(J · s ⁻¹)	0.407 99	0.411 75	0.313 16	0.333 05	0.349 17	0.454 20

(2)从流场分布和浓度场分布可以看出,槽内的混合过程与流动场密切相关.液面监测点的浓度响应比较平缓,桨叶监测点波动比较大.

(3)在 $C/T=0.278$ 时,流型开始从径向流转为轴向流.在径向流状态下,消耗功率随 C 的减小而增加,达到轴向流时,搅拌器消耗功率有个突降,然后随着 C 的减小而增加,但功率仍低于径向流动时的搅拌功率.可见轴流型搅拌桨在节省功率消耗方面,具有相当大的优势.同时,为减小功率消耗, C 可选在刚刚达到轴流状态时的桨距槽底间距.

参考文献:

[1] 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,1999,4(26): 1-4.
[2] SUZUKAWA K, MOCHIZUKIB S, OSAKAC H.

Effect of the attack angle on the roll and trailing vortex structures in an agitated vessel with a paddle impeller [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 2791-2798.

[3] 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.
[4] 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, 703(71): 766-772.
[5] 张国娟.搅拌槽内混合过程的数值模拟[D].北京:北京化工大学化学工程学院,2004.
[6] 戴干策,陈敏恒.化工流体力学[M].北京:化学工业出版社,1988.

Numerical Simulation of Mixing Characteristics in A Stirred Tank with
45° Pitched Blade Turbines Impellers

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

(Thermal Energy Engineering Research Centre, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In the paper, multi-reference frame (MRF) is used to simulate the impellers, and standard $k-\epsilon$ turbulent model is used in the simulation. The characteristics of the 45°pitched blade turbines (PBT) impellers in the tank, which is widely used in the industry, are studied in the paper. The responses of different observation points to mixing effects are studied, and the results show that the mixing time of observation in the surface is longer than the observation near the impellers. The type of flow, the vector distribution of velocity and the power consumption in the tank under different distance between impeller and bottom of tank are researched, and the results show that the type of flow changes when the C/T is 0.278. The power consumption of impellers is the lowest when the type is changed.

Key words: PBT; numerical simulation; mixing characteristics