

文章编号:1671-6833(2013)03-0059-04

不同组合桨搅拌器搅拌特性的数值研究

党林贵¹, 郭淑雪², 王定标³, 张硕果³, 曹海亮³

(1. 河南省锅炉压力容器安全检测研究院, 河南 郑州 450016; 2. 河南省科学技术协会, 河南 郑州 450008; 3. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要:采用 Fluent 软件的多重参考系(MRF)及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 针对双层平直桨叶、双层 45°折叶涡轮桨和两者组合搅拌桨这 3 种搅拌桨, 研究了不同桨叶类型搅拌槽内的流动混合特性和加料位置, 结果表明:45°折叶涡轮桨和平直叶桨的上下组合桨可以增强搅拌器内流体的上下流动, 促进混合, 其搅拌功率较双层平直叶桨下降 37.91%, 混合时间减少 50.48%; 选择上层桨叶尖端加料可以缩短搅拌器内液体的混合时间, 提高搅拌效率。

关键词:搅拌器; 组合桨; 搅拌特性; 数值模拟; 流场

中图分类号: TQ051.7; TK123

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.03.015

0 引言

搅拌釜式反应器广泛应用石油、化工、制药等化工过程。流体在搅拌釜内的流动特性直接影响着反应速率、反应选择率、热量传递及反应结果, 数值模拟可以方便地获得搅拌槽内的局部混合信息, 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改进, 使其效益更高。Nau-de 等^[1]利用 FLUENT 软件对一种轴流式搅拌桨的三维流场进行了计算, 并与实验数据进行了比较, 模拟与实验结果较为吻合。Ranade 等^[2-3]等利用 CFD 方法研究了传统的直叶涡轮和四斜叶涡轮, 与实验数据进行了比较, 结果表明标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能较好地反映搅拌槽内的湍流分布。王定标等^[4]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, 模拟与实验较为吻合。其他学者^[5-9]也对搅拌设备性能进行了较深入研究。但对多层组合桨搅拌器的流场、混合时间等的研究较少。笔者运用 CFD 技术对双层组合桨搅拌器进行了数值模拟, 研究了不同桨叶组合类型对搅拌器搅拌性能的影响。

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

选用工业广泛应用的两种桨型, 桨型如图 1

(a)平直叶桨, (b) 45°开启式折叶涡轮搅拌桨。对两种桨型的 3 种不同组合方式的搅拌器进行研究, 搅拌器结构如图 2 所示, 图 2(a)为 I 型即双层平直叶桨型; 图 2(b)为 II 型即双层 45°开启式折叶涡轮桨; 图 2(c)为 III 型即 45°开启式折叶涡轮桨-平直叶桨。搅拌槽直径为 200 mm, 深 400 mm, 搅拌桨直径 90 mm, 宽 15 mm, 4 个挡板均匀分布在槽四周, 宽 20 mm, 上层桨叶距搅拌器底部为 282.5 mm, 下层桨叶距底部 107.5 mm。



图 1 两种桨型结构图

Fig. 1 Structures of two types of impellers

1.2 数学模型

根据文献[4], 搅拌流场的控制方程组描述如下:

(1) 连续方程

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

(2) 动量方程

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

收稿日期:2012-11-12; 修订日期:2013-01-11

基金资助:河南省科技创新杰出青年基金项目(124100510020); 河南省教育厅自然科学研究项目(2011A480004); 河南省重大公益性科研项目(081100910100)

通信作者:王定标(1967-), 男, 浙江杭州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事节能技术及装备研究, E-mail: wangdb@zzu.edu.cn.

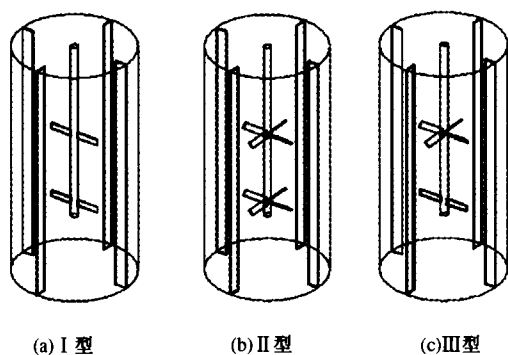


图2 3种组合桨搅拌器结构图

Fig.2 Structures of three types of stirred tank with different combined impellers

(3) 湍流 $R-\varepsilon$ 模型

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon G_k}{k \rho} - \frac{C_{\varepsilon 2} \varepsilon^2}{k}. \quad (4)$$

式中: p 为静压; τ_{ij} 为应力; ρg_i 为重力体积力; F_i 为源项; G_k 为湍流生成项; σ_ε 和 σ_k 分别是与湍动能和耗散率对应的常数。

1.3 计算方法

应用 fluent 软件进行计算, 采用稳态隐式分离方法, 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. 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.

边界条件: 将计算区域分为两个区域, 内部动区域包括旋转桨叶, 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, 加料所选材料作为示踪剂, 桨叶旋转速度为 120 r/min.

计算过程考察不同位置加料对监测点处示踪剂浓度变化的影响, 选取 3 个加料点, 分别为液面加料 (F_1)、上层桨叶尖端加料 (F_2) 和下层桨叶尖端加料 (F_3), 具体分布如图 3 所示.

根据数值模拟得到不同工况下的力矩值 M 和混合时间 θ_m , 计算出混合时间数 T_m 、混合效率 W_v 等参数. 搅拌功率由公式(5)计算得到:

$$P = M\omega = \pi NM/30 \quad (5)$$

式中: M 为扭矩, $N \cdot m$; ω 为角速度, rad/s ; N 为搅

拌轴的转速, r/min .

混合时间 θ_m 采用 95% 规则, 即当示踪剂浓度达到最终稳定浓度值的 $\pm 95\%$ 时, 该时间即为混合时间, 表示为 θ_{95} . 对比不同搅拌情况下的混合速率时, 采用无量纲的混合时间即混合时间数 T_m

$$T_m = \theta_m N. \quad (6)$$

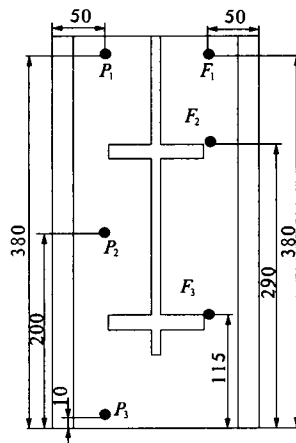


图3 加料点和监测点位置示意图

Fig.3 Locations of the feeding points and monitoring ones

混合效率常用单位体积混合能 W_v 来表示, 是单位体积搅拌功率 P 和混合时间 θ_m 的乘积,

$$W_v = P\theta_m/V. \quad (7)$$

式中: V 为搅拌槽内液体的总体积.

2 结果与分析

2.1 3种组合桨搅拌器的混合时间及功率计算

表 1 所示为 3 种组合桨搅拌器混合时间及功率消耗的数值模拟结果. 由表 1 可见, 双层涡轮桨 (II型) 和涡轮/直叶上下组合桨 (III型) 的搅拌功率明显低于双层平直叶桨 (I型), 分别节约 73.53% 和 37.89% 的功率; 功率准数前者降低了 6.99%, 后者增高了 11.89%; 最低混合时间前者增加了 18.17%, 后者降低了 50.48%; 单位体积混合能前者降低了 68.72%, 后者降低了 69.26%. 比较分析可以看出, 涡轮/直叶上下组合桨可以明显降低搅拌功率, 缩短示踪粒子在搅拌槽内的混合时间, 因此, 在满足混合要求的前提下, 采用涡轮/直叶上下组合桨将更为经济节能.

2.2 3种组合桨搅拌器流场分布的对比研究

图 4 为 3 种组合桨搅拌器流场分布图. 由图 4 可知, 总的流型是以叶轮为界形成循环涡流, 不同点在于双层平直叶桨在桨叶尖端形成上下两个循环, 由于平直桨叶旋转时主要产生径向流和切向流, 其上下流型相似, 不利于上部液体和下部液

体的混合.而双层涡轮桨由于折叶射流作用,主要产生切向流和轴向流,因而产生了从上到下的大循环流动.然而由于下部涡轮桨旋转时中部液体产生较大的抽吸力,从图(b)可以看出,流体沿着中部搅拌轴的壁面迅速流向下层桨叶,使得中部液体湍动微弱,不利于中部液体的混合.涡轮/直叶上下组合桨在搅拌槽内上下层桨叶处形成不同的循环流动,上部形成了轴向流和切向流,而下部形成了径向流和切向流,由于流动形态的不同,从上部涡轮桨叶中心轴向向下的流体与平直桨叶产生漩涡流相遇,使得搅拌釜中部的湍动更加强烈,易与中部液体的搅拌.整体上两种流型相互破坏,相互影响,更有利于流体的上下湍动,促进混合.

表 1 3 种组合桨搅拌器的混合时间及功率消耗
Tab.1 Mixing time and power of three types of stirred tanks with different combined impellers

搅拌器 类型	加料 点	混合 时间 θ_{95}/s	混合时 间数 T_m	单位体 积混合 能 W_v	功率 消耗 P/W	功率 准数 N_p
I	F1	70.2	140.4	839.8		
	F2	62.2	124.4	744.1	0.150 3	3.188
	F3	68.5	137.0	819.5		
II	F1	101.2	202.4	320.4		
	F2	73.5	147.0	232.7	0.039 8	2.965
	F3	98.0	196.0	310.3		
III	F1	63.9	127.8	474.6		
	F2	30.8	61.6	228.8	0.093 3	3.567
	F3	59.9	119.8	444.9		

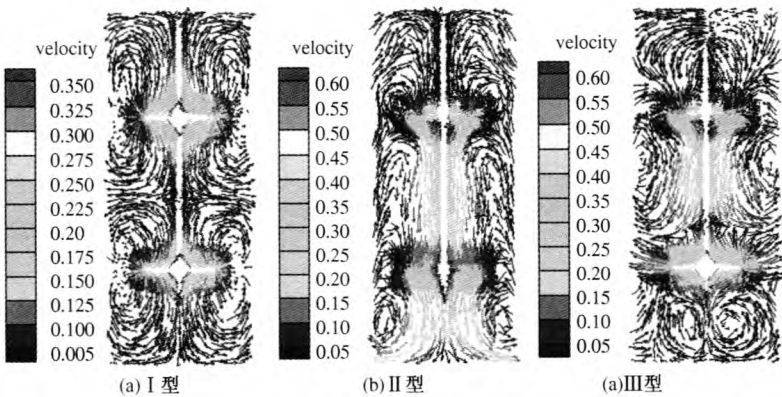


图 4 3 种组合桨搅拌器的流场分布图
Fig.4 Flow fields of three types of stirred tanks with different combined compellers

2.3 不同监测点示踪剂浓度的变化

图 5 为 3 种组合桨在加料位置(F_1 、 F_2 、 F_3)变化时不同监测点(P_1 、 P_2 、 P_3)的示踪剂浓度(质量分数)与混合时间变化图.对于同一个搅拌器,例如搅拌器Ⅲ,从 P_1 、 P_2 、 P_3 3 个监测点处示踪粒子浓度的稳定趋势可看出,在上层桨叶处加料时,其浓度最先达到稳定,表明其混合时间最短;在液面处加料,混合时间最长;在下层桨叶处加料,混合时间则介于两者之间.对于其它两种搅拌器也表现出了类似的现象.由于桨叶区的能量耗散率远高于液面处的能量耗散率,因此其质量传递速率也高于液面处,这导致示踪剂在桨叶处加入时的传递和扩散速率要远高于在液面处加入,所以在桨叶处加料的混合时间低于在液面处和下层桨叶处加料时的混合时间.因此,为了促进双层搅拌器内液体的快速混合,在相同条件下采用上层桨叶加料可有效地缩短宏观混合时间,提高混合效率.

另外从图 5 中可以看出,搅拌器Ⅲ中示踪粒

子的浓度最先达到稳定.例如,搅拌器Ⅲ在上层桨叶加料时, P_2 处示踪剂的浓度在近 20 000 时间步长时已达到稳定,而搅拌器Ⅰ型和Ⅱ型在 50 000 多时间步长时才达到稳定,说明采用涡轮/直叶上下组合桨的搅拌器的搅拌混合时间最短,混合效率最高.

3 结论

对平直叶桨和 45°折叶涡轮桨的 3 种组合桨搅拌器内的流场进行了数值模拟,考察了不同加料位置对混合效果的影响,得到了以下结论:

- (1)3 种流型基本是以叶轮为界形成上下循环流,不同点在于双层平直叶桨在桨叶尖端形成上下两个循环,而双层涡轮桨形成了从上到下的大循环流动,涡轮/直叶上下组合桨使上下两种流型互相影响,更有利于流体的上下湍动和混合.
- (2)不同加料位置对混合效果存在一定的影响.在上层桨叶处加料,混合时间最短;在液面处加料,混合时间最长.在条件相同的情况下,应选

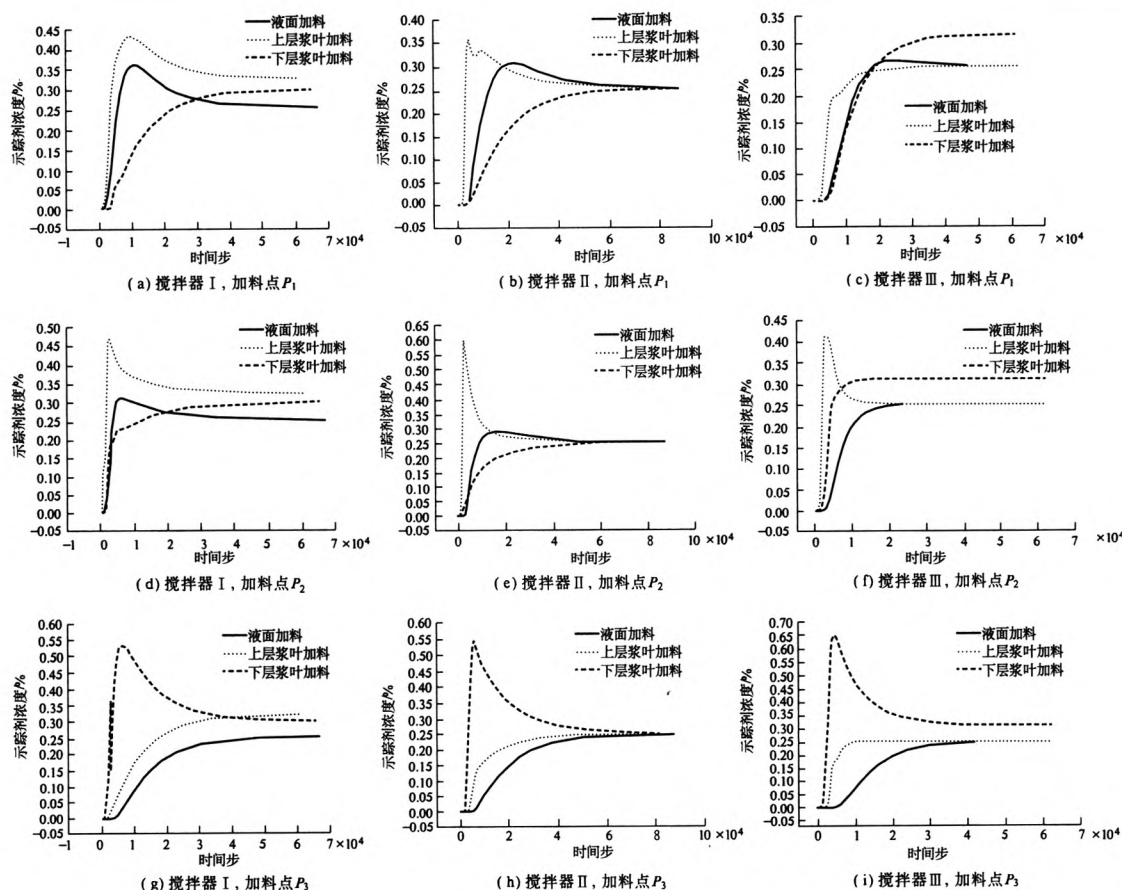


图 5 3 种组合桨在加料位置变化时不同监测点示踪剂的浓度变化曲线

Fig. 5 Concentration of tracer particles at different monitoring points vs locations of different feeding points in three types of stirred tanks with different combined impellers

择在搅拌器的上层浆叶处加料. 采用 45° 涡轮桨和平直桨组合的搅拌器(Ⅲ型)的混合效率最高.

(3) 不同桨叶组合方式对搅拌功率和混合时间的影响较大. 涡轮/直叶上下组合桨可以明显地降低搅拌功率, 缩短示踪粒子在搅拌槽内的混合时间, 因此, 从经济利益考虑, 在满足混合要求的前提下, 应优先选用涡轮/直叶上下组合桨.

参考文献:

- [1] NAUDE I, XUEREB C, BERERAND J. Direct prediction of the flows induced by a propeller in an agitated vessel using an unstructured mesh[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1998, 76: 631-640.
- [2] RANADE V V, JOSHI J B. Flow generated by a disc turbine; part ii. mathematical modelling and comparison with experimental data[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1990, 62: 34-50.
- [3] RANADE V V, JOSHI J B. Flow generated by pitched blade turbines II: simulation using $\kappa-\varepsilon$ model[J]. Chemical Engineering Communications, 1989, 81(1): 225-248.
- [4] 王定标, 杨丽云, 于艳. 双层桨叶搅拌器流场的 CFD 模拟与 PIV 测量[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(2): 1-5.
- [5] 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, 2(45): 99-112.
- [6] 张国娟. 搅拌槽内混合过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学化工学院, 2004.
- [7] 梁瑛娜, 高殿荣. 双层直斜叶及其组合桨搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 290-297.
- [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模拟[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(3): 315-319.
- [9] 赵静, 程先明, 高正明. 组合桨液相搅拌槽内流动特性的实验研究及数值模拟[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 22-27.

(下转第 80 页)

- 效力学模型[J]. 宇航学报, 2011, 32(2): 242-249.
- [10] HKS. ABAQUS/Standard version 6.5 user's manual [M]. Rhode Island, USA: Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. 2002.
- [11] 廖振鹏, 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] GRIMES R G, LEWIS J G, SIMON H D. A Shifted block lanczos algorithm for solving sparse symmetric generalized eigenproblems[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1994(15): 228-272.

The Dynamics of the Problem Modeling and Numerical Simulation of Liquid Sloshing in Liquid Storage Container

JIA Shan-po, ZHAO You-qing, XU Cheng-xiang

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: Based on acoustic models, the fluid can be modeled as an acoustic medium, discretized with acoustic elements, and the free surface of the fluid must be 'skinned' with membrane elements, and a grounded spring is attached to each node on the free surface of the fluid. Using the finite element package ABAQUS, we established the finite element model of 3D liquid sloshing in rectangular tank, analysed the eigenfrequencies and the modals of liquid sloshing, and the numerical results were compared with analytical solution. The results show that, by ABAQUS numerical simulation with high precision, this work illuminates the availability and reliability of the proposed method, which provides a new analysis method for the study of dynamic analysis of 3D liquid sloshing. Finally, the author analyzed the shaking frequency and liquid depth, width of the relationship of such systems with different liquid height to width ratios considered.

Key words: liquid sloshing; numerical model; liquid-filled container; dynamic characteristics; mode

(上接第 62 页)

Numerical Study of Mixing Characteristics in Stirred Tanks with Different Impeller Combinations

DANG Lin-gui¹, GUO Shu-xue², WANG Ding-biao³, ZHANG Shuo-guo³, CAO Hai-liang³

(1. Henan Province Institute of Boiler and Pressure Vessel Safety Testing, Zhengzhou 450016, China; 2. Henan Association for Science and Technology, Zhengzhou 450008, China; 3. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, the multi-reference frame (MRF) and standard $k-\varepsilon$ turbulent model were used to simulate the flow pattern and mixing characteristics in the stirred tanks with double layer straight impeller, double 45° inclined impeller and double layer straight and inclined combined impeller. The results showed that double layer combined impeller can enhance the turbulence and mixing of the upper fluid and lower one in the stirred tank. Moreover, compared with the double layer straight impeller, double layer combined impeller can save 37.91% of stirring power and reduce 50.48% of mixing time. Furthermore, compared with the feeding patterns from the fluid surface and the lower blade, the feeding pattern from the upper blade can obviously save the mixing time and improve the efficiency of mixing.

Key words: stirred tank; impeller combination; mixing characteristics; numerical study; flow field