

双层桨搅拌槽内流动特性的 CFD 研究

Study on flow characteristics in stirred vessel with double impellers with CFD

樊梨明 李庆生

FAN Li-ming LI Qing-sheng

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 211816, China)

摘要:基于多重参考系法和 Realizable $k-\epsilon$ 模型,利用 Fluent 软件对双层 CBY 桨搅拌槽内不同桨间距下流场进行整体数值模拟,并将模拟结果与文献试验结果进行比较,考察桨间距对流场分布、上下层桨叶区速度及功率消耗的影响。结果表明:随着桨间距的增大,槽内流体流型由“连接流”变为“分散流”,与试验结果具有较好的一致性;桨间距对下层桨叶区速度影响较大,对上层桨叶区速度影响不大;随着桨间距的增大,搅拌功率逐渐增加,单位体积功率逐渐降低。

关键词:双层 CBY 桨;流场;功率消耗;CFD

Abstract:Based on the multiple reference frame method and Realizable $k-\epsilon$ model, the whole flow field in a stirred tank with double CBY impellers was numerically simulated using fluent software. The simulation test results were compared with literature. The effects of the blade spacing on the flow field distribution, the lower blade speed and power consumption were examined. The results showed that with the increase of blade spacing, flow pattern from the “connecting flow” into “dispersed flow”, and the test results have good consistency. The influence of blade spacing to the velocity distributions below the upper impellers was relatively large and the influence of blade spacing to the velocity distributions below the lower impellers was little. With the increase of blade spacing, the stirring power increased gradually and the power per unit volume decreased.

Keywords: double CBY impellers; flow field; power consumption; CFD

搅拌设备广泛应用于石油、化工、食品等工业生产中^[1]。流体在搅拌槽中的流动特性直接影响着反应速率、热量传递和反应结果^[2]。国内外学者^[3-4]对单层桨搅拌槽的研究已较为成熟,对双层桨搅拌槽的研究较少。双层桨搅拌槽相对于单层桨搅拌槽而言,槽内流体流动更加复杂。郭欣等^[5]采用 PIV 方法考察了桨间距、离底高度、浸没深度对双层 CBY 桨搅拌槽内流场分布的影响,由于试验条件的限制仅得到部

分流场数据。王定标等^[6]采用 PIV 和 CFD 方法对双层桨式搅拌槽内不同加料位置和桨间距下的混合时间进行了研究。张少坤等^[7]采用标准湍流模型和滑移网格法,考察了双层六直叶涡轮桨桨间距对流场结构的影响,并与文献试验结果进行了比较。周勇军等^[8]采用欧拉多相流模型研究了双层改进型 INTER-MIG 桨式叶轮不同转速、桨叶离底高度和桨间距对固液混合性能的影响。但关于桨间距对双层 CBY 桨搅拌槽内流动特性的 CFD 研究还未见报道。

本试验拟利用 Fluent 软件对双层 CBY 桨搅拌槽内不同桨间距下流场进行整体数值模拟,并将模拟结果与文献^[5]试验结果进行比较,考察桨间距对流场分布、上下层桨叶区速度及功率消耗的影响,为搅拌槽的优化设计提供一定的参考。

1 数学物理模型

1.1 搅拌槽模型

为了与文献^[5]试验结果对比,建立搅拌槽模型:搅拌槽直径 $T=476\text{ mm}$,槽内均布 4 块挡板,挡板宽 $T/10$ 。搅拌桨为长薄叶(CBY)搅拌桨,桨径 $D=0.4T$,桨叶根部与轴夹角为 45° ,桨叶端部宽 0.020 m ,根宽 0.032 m 。工作介质为水,两桨平行布置, C_1 为下层桨离底高度, C_2 为桨间距, C_3 为上层桨浸没深度,计算中采用恒定转速 N 为 90 r/min 。搅拌槽结构示意图见图 1。

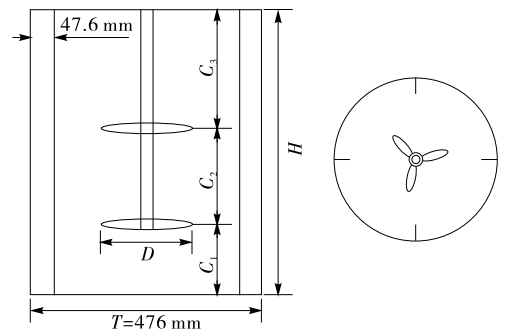


图 1 搅拌槽结构示意图

Figure 1 Structure of the stirred tank

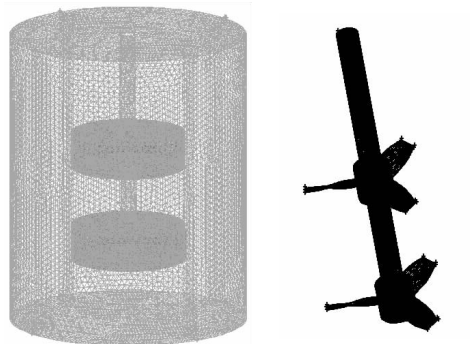
作者简介:樊梨明(1990—),男,南京工业大学在读硕士研究生。

E-mail:flm050412@163.com

收稿日期:2015-09-25

1.2 网格划分

采用非结构化网格四面体对搅拌槽进行划分,对搅拌桨叶及搅拌轴进行网格加密处理,以增加计算精度。经网格无关性验证,满足精度要求。网格划分情况见图2。



(a) 搅拌槽网格图 (b) 搅拌器网格图

图2 搅拌槽网格划分

Figure 2 Grids for the stirred tank

2 数值模拟方法

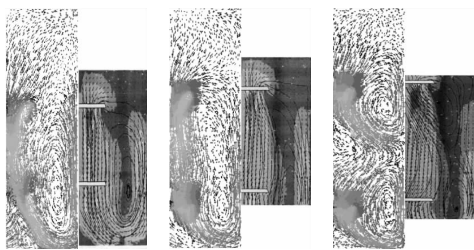
利用 Fluent12.0 软件对双层 CBY 桨搅拌槽内不同桨间距下流场进行整体数值模拟,选用三维稳态求解器,考虑流体重力,采用多重参考系法来处理运动的桨叶与静止的挡板之间的关系,采用标准壁面函数法处理近壁区域的流动计算,湍流模型选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,压力速度耦合使用 SIMPLE 算法,差分格式采用二阶迎风,计算残差设定为 $1e-5$ 。计算时监测扭矩系数,当其趋于稳定值时认定为计算收敛。

3 模拟结果与分析

3.1 不同桨间距下流场分布

图3为离底高度 $T/3$,浸没深度 $0.5T$ 时,不同桨间距下的流场分布图,每幅图中左侧为数值模拟结果,右侧为文献[5] PIV 试验结果。对比可以发现,湍流模拟的流场可以反映出实际流场的特征,模拟与试验的涡心位置完全相同,模拟结果与试验结果具有较好的一致性。

由图3(a)可知,当 $C_2 = 0.4T$ 时,桨间距较小,两层桨的流动可以较好地连接起来,搅拌槽内是一个大的整体轴向循环流动,这种流型称之为“连接流”。经上层桨排出的流体垂直地进入下层桨,被下层桨叶吸入后向槽底部排出,在槽底部



(a) $C_2=0.4T$ (b) $C_2=0.6T$ (c) $C_2=0.8T$

图3 不同桨间距下流场分布

Figure 3 Flow field distribution under different blade spacing

转为径向流动,再在槽壁附近转为向上的轴向流动,被上层桨叶吸入后进入下一次循环。下层桨叶与槽壁之间的流体速度较小,在下层桨右侧形成了一个旋涡。由图3(b)可知,当 $C_2 = 0.6T$ 时,搅拌槽内仍然是一个大的整体轴向循环流动。由图3(c)可知,当 $C_2 = 0.8T$ 时,桨间距较大,下层桨对上层桨排出流体的抽吸作用明显减弱,上层桨排出的流体向槽壁倾斜,一部分直接返回上层桨,另一部分流体被下层桨吸入,经下层桨叶排出的流体在槽壁附近转为向上的轴向流动后直接返回下层桨。上下两层桨右下方各自形成了一个旋涡,这种流型称之为“分散流”。

3.2 桨间距对上下层桨叶区速度分布的影响

图4为不同桨间距对下层桨叶区速度分布的影响。由图4可知,桨间距对下层桨叶区速度的影响较大,随着桨间距的增大,最大速度由 $r = 0.22T$ 处过渡到 $r = 0.12T$ 处,且最大速度经历了由大变小再变大的过程。这是因为桨间距较小时,两桨的相互作用明显,下层桨叶区速度较大;随着桨间距的增大,两桨的相互作用减弱,下层桨叶区速度减小;当桨间距继续增大时,两桨的相互作用非常弱,上下层桨形成各自独立的循环区,下层桨叶区速度又增大。图5为不同桨间距对上层桨叶区速度分布的影响。由图5可知,桨间距对上层桨叶区速度的影响不大,随着桨间距的增加,上层桨叶区的速度略有下降。

3.3 桨间距对功率消耗的影响

基于 CFD 方法的搅拌功率计算:

$$P = M\omega = \frac{\pi NM}{30} \tag{1}$$

式中:

P ——搅拌功率, W;

M ——扭矩, N·m;

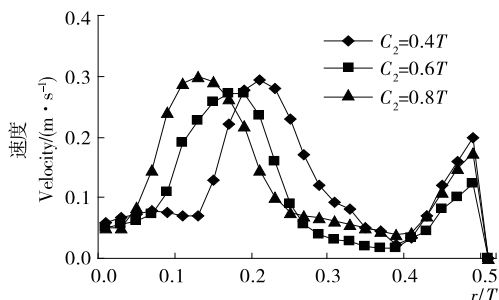


图4 下层桨叶区速度分布

Figure 4 Velocity distributions below the lower impeller

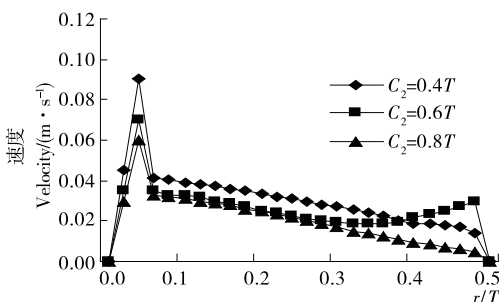


图5 上层桨叶区速度分布

Figure 5 Velocity distributions below the upper impeller

ω ——搅拌器角速度,rad/s;

N ——搅拌器转数,r/min。

单位体积功率表达式:

$$P_v = \frac{P}{v} \quad (2)$$

式中:

P_v ——单位体积功率,W/m³;

v ——搅拌槽内流体体积,m³。

由表 1 可知,当下层浆离底高度 C_1 和上层浆浸没深度 C_3 一定时,随着浆间距的增大,搅拌功率逐渐增加,单位体积功率逐渐降低。这是因为随着浆间距的增大,搅拌槽中的流体增多,搅拌功率必然增加,但是所增加的流体位于两浆之间,浆叶对这部分流体的抽吸作用较强,从而促使单位体积功率降低。

表 1 不同浆间距下搅拌功率、单位体积功率计算结果

Table 1 The results of stirring power, power per unit volume under different blade spacing

浆间距	搅拌功率/W	单位体积功率/(W·m ⁻³)
$C_2 = 0.4T$	0.60	5.72
$C_2 = 0.6T$	0.68	5.60
$C_2 = 0.8T$	0.75	5.41

4 结论

利用 Fluent 软件对双层 CBY 浆搅拌槽内不同浆间距下流场进行整体数值模拟,考察了浆间距对流场分布、上下层

浆叶区速度及功率消耗的影响,主要结论:① 随着浆间距的增大,槽内流体流型由“连接流”变为“分散流”,与试验结果具有较好的一致性,但是模拟与试验也存在一定的误差,毕竟模型是基于各向同性求解出来的,而实际搅拌槽中的流体流动状态为各向异性;② 浆间距对下层浆叶区速度的影响较大,对上层浆叶区速度的影响不大;③ 随着浆间距的增大,搅拌功率逐渐增加,单位体积功率逐渐降低。

参考文献

- [1] 王凯, 虞军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-2.
- [2] 党林贵, 郭淑雪, 王定标, 等. 不同组合浆搅拌器搅拌特性的数值研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(3): 59-62.
- [3] 刘敏珊, 张丽娜, 董其伍. 涡轮浆搅拌槽内混合特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1700-1702.
- [4] Ochieng A, Onyango M S, Kumar A, et al. Mixing in a tank stirred by a Rushton turbine at a low clearance[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(5): 842-851.
- [5] 郭欣, 李志鹏, 高正明. 双层翼型浆搅拌槽内流动特性的 PIV 研究[J]. 过程工程学报, 2010, 10(4): 632-637.
- [6] 王定标, 杨丽云, 于艳, 等. 双层浆叶搅拌器流场的 CFD 模拟与 PIV 测量[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(2): 1-5.
- [7] 张少坤, 尹侠. 双层浆搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 71-73.
- [8] 周勇军, 卢源, 陈明濠, 等. 改进型 INTER-MIG 搅拌槽内固液悬浮特性的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 744-749.
- [9] 傅金泉. 中国酒曲技术的发展和展望[J]. 酿酒, 2002, 29(2): 7-9.
- [10] 沈怡芳. 白酒生产技术全书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 104-113.
- [11] 马荣山, 于影. 麸曲酱香型白酒的酿制研究[J]. 中国酿造, 2010(1): 138-140.
- [12] 李运蕾, 姚奎章, 佟兰欣, 等. 生香 ADY 和 TH-AADY 在衡水老白干酒生产中的应用[J]. 酿酒科技, 1998(2): 44-45.
- [13] 王国良, 宋俊梅, 曲静然. 产香微生物的应用现状[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(7): 157-160.
- [14] 秦含章. 国产白酒的工艺技术和实验方法[M]. 北京: 学苑出版社, 2000: 947-979.
- [15] 郭勇. 酶工程原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 8-9.
- [16] 黄丹, 储玉龙, 尚志超, 等. 大曲酯化酶根霉菌的分离及产酶条件研究[J]. 食品与发酵科技, 2010(3): 30-32.
- [17] 张永生, 魏新军, 韩伟元, 等. 白酒中微量成分的气相色谱-质谱分析与鉴定[J]. 酿酒科技, 2011(3): 101-103.
- [18] 罗惠波, 王毅, 王大地, 等. 小曲中产香霉菌的优选及培养条件优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 32-34.
- [19] 张翠英. 优良果酒酵母的分离选育及发酵性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006: 13-19.
- [20] 赵海霞, 华惠敏, 吴桂君. 野生苹果酒产香酵母的分离及筛选[J]. 中国酿造, 2014, 33(6): 119-122.
- [21] 卫春会, 黄治国, 黄丹, 等. 高温大曲高产蛋白酶菌株的分离鉴定及其产酶性能研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 24-29.
- [22] 蒋雪薇, 盛灿梅, 周倩, 等. 琼脂块法快速平板初筛米根霉 L-乳酸高产菌株[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 8-10.
- [23] 刘艺文, 刘素纯. 产柚苷酶高产菌株的筛选[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 55-58.

参考文献

- [1] 傅金泉. 中国酒曲技术的发展和展望[J]. 酿酒, 2002, 29(2): 7-9.
- [2] 沈怡芳. 白酒生产技术全书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 104-113.
- [3] 马荣山, 于影. 麸曲酱香型白酒的酿制研究[J]. 中国酿造, 2010