

文章编号:1674-2869(2015)01-0044-05

直斜错位桨搅拌槽内流场的探究

舒安庆,王 敏,魏化中,刘 康

武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:为了进一步增强直斜错位搅拌桨的搅拌效果. 对桨叶直径 $D=160$ mm,不同桨叶间距的搅拌桨进行三维数值模拟,通过分析它们的宏观流场特征,综合速度、轴向速度、径向速度、切向速度的变化规律及死区分布规律,探究直斜错位桨的最优桨叶间距. 结果表明:当桨叶间距在 $3D/4-3D/4$ 范围内,各速度分布的不均匀性较小,搅拌槽中基本无死区且流体的循环范围最广. 当桨叶间距在 $D/2-D$ 范围内,高速区范围最大,且无明显变化. 当桨叶间距在 $3D/4-D$ 范围内,流体的平均速率较大,当桨叶间距为 $3D/4$ 时,轴向速度和径向速度较大,故搅拌效果较佳,混合效率较高. 因此,桨叶间距在 $3D/4-7D/8$ 范围内可取最佳值.

关键词:直斜错位搅拌桨;桨叶间距;FLUENT;流场;优化

中图分类号:TH137

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.01.010

0 引 言

搅拌设备在化学工业、生物工程、制药工程、材料加工及食品加工等领域有着广泛的应用^[1]. 现代化学工业越来越向复杂化和大型化发展,单一的桨型已不能满足对物料的混合要求^[2]. 搅拌槽内的流场结构对介质混合效果的好坏至关重要,对搅拌槽内流动特性的深入了解是搅拌设备优化设计的基础^[3]. 在直斜错位桨中,搅拌桨的直径、宽度、桨叶间距、直斜叶在搅拌槽中的分布位置,都会引起搅拌槽内流场的变化. 王令闪采用数值模拟的方法对最大叶片式桨结构尺寸做了优化,得到了最佳结构尺寸组合^[4]. 目前,对双层桨和错位桨的研究也有很大的进展,梁瑛娜等采用数值模拟的方法,研究了双层直斜叶及直斜组合搅拌桨搅拌槽三维流场特性^[5],崔蕴芳验证了六直叶交错上下变位对隔离区的破坏作用以及对流场的改善情况^[6]. 而对直斜错位桨结构参数优化的研究则较少.

通过 FLUENT 软件,采用多重参考系(MRF)的方法,探究了桨叶间距对直斜错位搅拌桨的流场的影响,对直斜错位桨的桨叶间距进行了优化,为直斜错位桨的设计及安装提供参考.

1 搅拌槽结构和控制方程

采用 FLUENT 软件对直斜错位搅拌桨流场进行数值模拟,搅拌介质为水,其操作密度为 998.2 kg/m^3 ,

操作粘度为 $0.001 \text{ 003 kg/m}\cdot\text{s}$. 文中使用直径 $D_1=500$ mm 搅拌槽,液面高度 $H=460$ mm,搅拌轴直径 $d=34$ mm,挡板宽度 $a=25$ mm,厚度 $b=4$ mm,长度 $l=450$ mm. 搅拌槽结构示意图如图 1 所示,搅拌桨结构参数如表 1 所示.

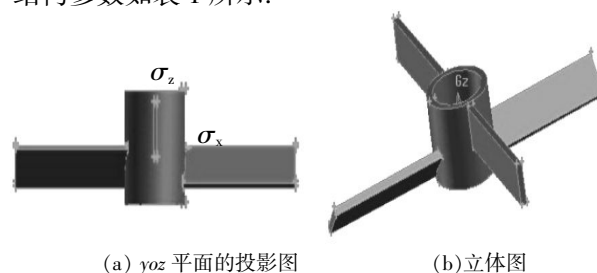


图 1 搅拌桨结构示意图

Fig.1 The structure of agitators

表 1 搅拌桨结构参数表

Table1 The size of agitators

| 桨叶直径 | 桨叶宽度 | 桨叶厚度 | 桨叶间距 | 桨叶间角 | 底层桨离底距 |
|---------------|---------------|--------------------|---------------|-------------------|------------------|
| D/mm | b/mm | δ/mm | L/mm | 度 $\theta/^\circ$ | 离 $L1/\text{mm}$ |
| 160 | 40 | 4 | 0 | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $D/8$ | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $D/4$ | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $D/2$ | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $3D/4$ | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $7D/8$ | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | D | 90 | 160 |
| 160 | 40 | 4 | $5D/4$ | 90 | 160 |

收稿日期:2014-09-12

作者简介:舒安庆(1964-),男,浙江宁波人,教授,硕士.研究方向:压力容器压力管道、流体机械和搅拌设备的研究开发、新型高效过程装备及仿真技术.

搅拌流场的控制方程组:

1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = S_m$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla (\tau) + \rho g + F$$

2 模拟求解的方法

由于搅拌槽和搅拌桨的结构不规则,网格划分采用非结构化网格,为了提高近桨区的计算精度,将近桨区的网格进行加密处理^[7],整个搅拌模型被划分为 103 099 个网格。模拟计算采用的是 MRF 多重参考系模型,桨叶所在区域采用旋转坐标系,其他区域采用静止坐标系^[8]。因此,将搅拌槽整体区域分为包括搅拌槽的静区和包括搅拌桨的动区,设置为 FLUID。搅拌器和搅拌轴都设为动壁面 WALL,搅拌槽壁和挡板设为静壁面 WALL,搅拌槽顶部为自由液面,搅拌槽中动区和静区的重合面设为交接面,FLUENT 在计算过程中,自己在交接面处进行插值传递。求解器选用压力基求解器,湍流模型选择标准的 k-ε 双方程湍流模型,数值模拟的搅拌转速设为 5 rad/s,设定流动性质为稳态流动,使用稳态隐式分离求解,动量方程按照一阶迎风格式离散求解,压力速度耦合选用 SIMPLE。改变桨叶间距,分别通过 FLUENT 软件模拟其流场。

3 结果分析

3.1 宏观流场分析

图 2 为不同桨叶间距的搅拌槽中 $y=0$ 截面速度矢量图,从图 2 中可以看出,在搅拌槽中形成了 4 个涡环,上面两个大涡环,下面两个小涡环,且为对称分布。搅拌槽中低速区主要分布在槽底和液面处,随着桨叶间距的增大,窝心的位置上移,循环区在轴向上的覆盖面积增大,有利于减小搅拌槽中的滞留区。当桨叶间距 L 从 0 mm 增大到 $\frac{5D}{8}$,两个小窝环的循环区范围呈增大趋势,窝心由槽底位置向槽壁靠拢,继续增大桨叶间距,则循环范围减小,当 $L=\frac{5D}{4}$ 时,两个小窝环的循环中心又回到槽底处。随着桨叶间距的增大,上面两个大涡环的循环范围依次变广,当桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 范围内,大涡环的循环范围最广,随后继续增大桨叶间距大

涡环的循环减小。虽然 $L=0$ mm 和 $L=\frac{5D}{4}$ 时,槽底低速区较小,但 $L=0$ mm 时,循环区范围较小,在槽顶可能形成较大的低速区,搅拌槽中,流体的整体流动效果并不佳。 $L=\frac{5D}{4}$ 时,搅拌槽中形成了明显的隔离区,因此槽中整体混合性能较差。图 2 中高亮区为速度较大区,当桨叶间距在 $\frac{D}{2} \sim D$ 范围内,高亮区范围最大且无明显变化。

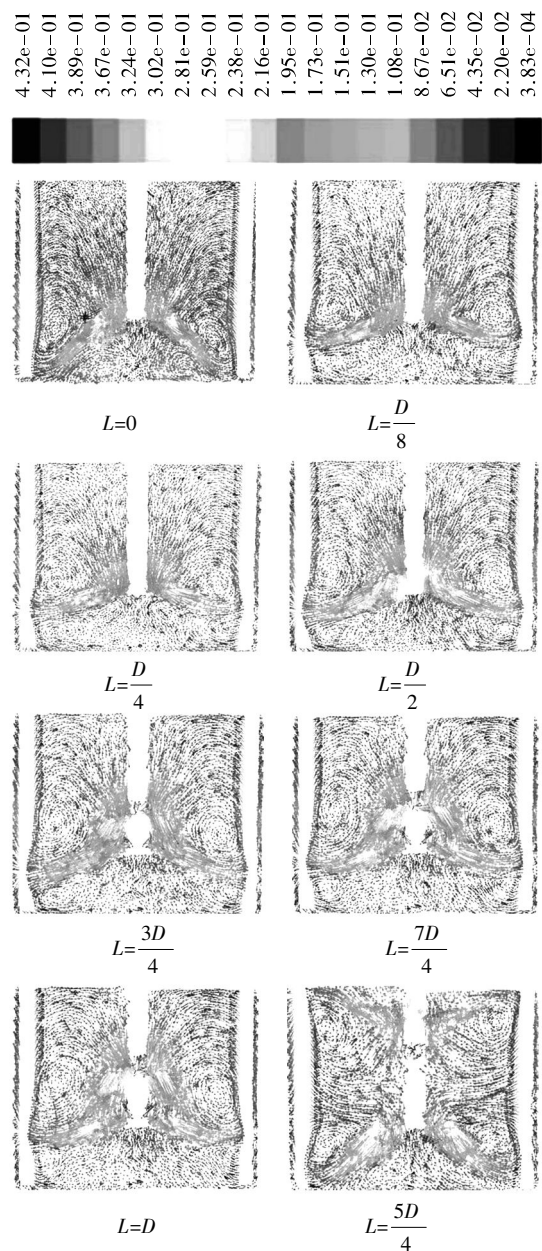


图 2 搅拌槽中 $y=0$ 截面速度矢量图

Fig.2 The velocity vector of $Y=0$ cross section in stirred tanks

3.2 速度分布

图 3 为平均综合速率和各分速度的大小随不同桨叶间距的变化曲线图,从综合速率变化曲线图中

可知,随着桨叶间距的增大,平均速率先有略微的增大,而后下降,在桨叶间距 $L=\frac{D}{4}$ 左右,平均速率出现一个极小值,继续增大桨叶间距,平均速率大幅度上升,达到最大值后,在桨叶间距为 $\frac{3D}{4} \sim D$ 范围内,平均速率基本无变化,继续增大桨叶间距,平均速率急剧下降. 因此当桨叶间距为 $\frac{3D}{4} \sim D$ 时,搅拌槽中的平均速度较大.

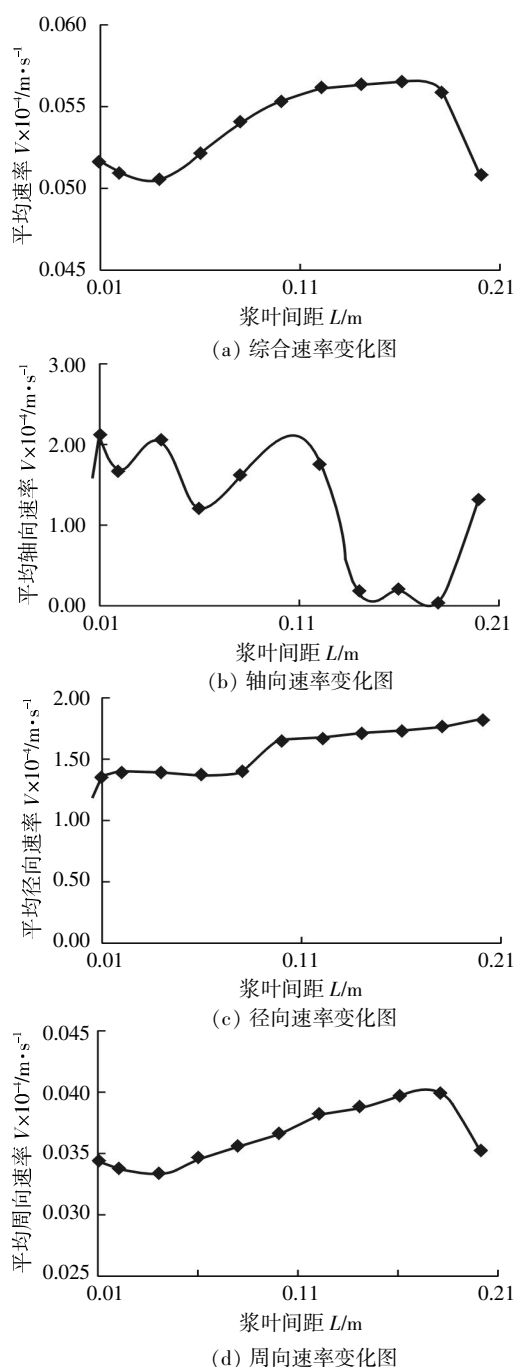


图3 速率变化曲线图

Fig.3 The change of the velocity

在搅拌过程中,物料主要随桨叶做圆周运动^[1],从周向速率变化图 3 中可看出,在速度的三个分速度中周向速度是最大的,但增大周向速度并不能有效改善搅拌效果和提高混合效率. 从轴向速率变化曲线图中可以看出,在桨叶间距为 $L=\frac{D}{8}, L=\frac{D}{4}, L=\frac{3D}{4}$ 左右附近,轴向速率有极大值. 从径向速率变化图中可以看出,当桨叶间距从 0 mm 增大到 $\frac{D}{8}$,平均径向速率依次增大,当桨叶间距从 $\frac{D}{8}$ 增大到 $\frac{D}{2}$,平均径向速率基本保持不变,之后继续增大桨叶间距,平均径向速率略微增大,在 $L=\frac{5D}{8}$ 处达到最大值,继续增大桨叶间距,平均径向速率基本不变. 径向速度也为剪切速度,它对流体具有强大的剪切和破碎作用,有利于搅拌,而轴向速度主要起循环作用,有利于物料的混合. 因此要改善搅拌槽中的搅拌效果和提高混合效率,需减小搅拌槽中流体的周向速度,增大流体的轴向速度和径向速度. 综合考虑,桨叶间距为 $L=\frac{3D}{4}$ 左右最佳.

图 4 为综合速度沿轴向分布图,从图 4 中可以看出,当桨叶间距从 0 mm 增大到 D ,速度的变化曲线基本一致,而当 $L=\frac{5D}{4}$ 时,速度的变化曲线与其它桨叶间距的变化曲线差别显著. 这表明,此时上层直叶桨和下层斜叶桨的相互作用较小. 从图 4 中可知,当桨叶间距为 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 时,速度上升和下降曲线坡度较小,这表明搅拌槽中,各速度的不均匀性较小.

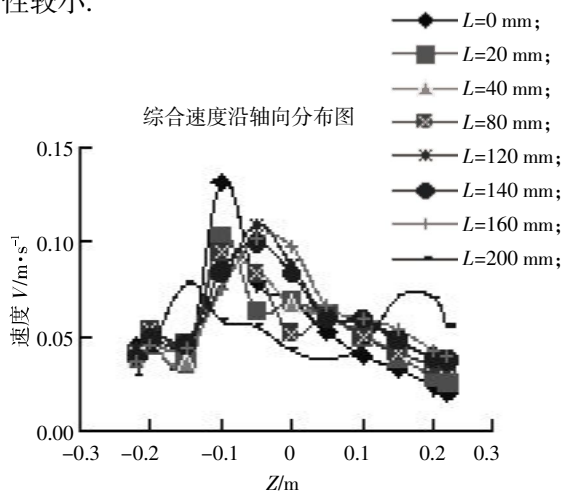


图4 综合速度沿轴向变化曲线图

Fig.4 The change of the velocity along the axial

3.3 死区分布

图5为不同桨叶间距的搅拌槽中 $y=0$ 截面速度云图,文中规定将速率 $v \leq 0.02$ m/s的区域称为死区,从图5中可以看出,死区主要分布在搅拌槽的槽底和槽顶.随着桨叶间距的增加,死区范围减小,当桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 范围内,死区基本消失,继续增大桨叶间距,死区范围增加,此时,主要是槽底出现死区,槽顶低速区依然减小.

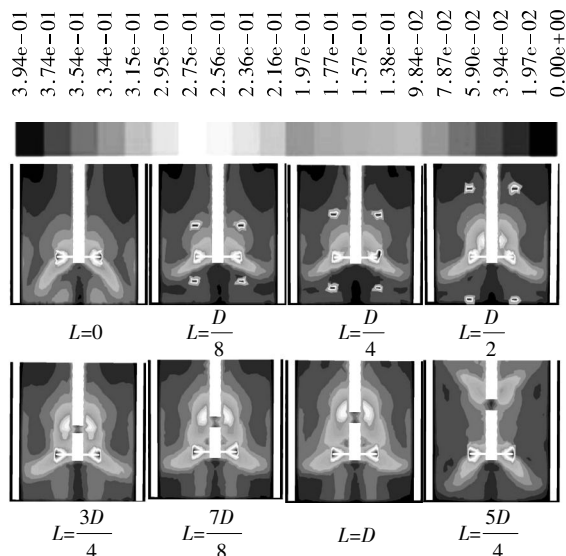


图5 搅拌槽中截面速度云图

Fig.5 The contours of velocity of $Y=0$ cross section

4 结 语

随着桨叶间距的增大,循环中心上移,循环区在轴向上的覆盖面积增大,有利于较小搅拌槽中的滞留区.当桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 范围内,循环范围最广,当桨叶间距在 $\frac{3D}{2} \sim D$ 范围内,高亮区范围最大,且无明显变化.

当桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim D$ 范围内,搅拌槽中的平均速率较大,当桨叶间距为 $\frac{3D}{4}$ 时,搅拌槽中的搅拌效果较佳,混合效率较高,当桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 范围内,搅拌槽中各速度的不均匀性较小,搅拌槽中基本无死区.

综上所述,桨叶间距在 $\frac{3D}{4} \sim \frac{7D}{8}$ 范围内可取最佳值.

致 谢

感谢武汉工程大学机电工程学院过程装备模拟与仿真实验室所有成员对该研究的支持和帮助!

参考文献:

- [1] 梁瑛娜.直-斜叶组合桨搅拌槽内三维流场的数值模拟与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2008.
LIANG Ying-na. Study on the numerical simulation and experiment of the Three-dimensional flow field in Straight-gradient impeller stirred tank [D]. Qin huang-dao: Yanshan University, 2008. (in Chinese)
- [2] 于亚辉.双层交错桨搅拌槽层流流场的数值模拟与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2010.
YU Ya-hui. Numerical simulation and experimental Research on the flow field of Double-staggered impeller stirred tank [D]. Qinhuangdao: Yan shan University, 2008. (in Chinese)
- [3] 张少坤,尹侠.双层桨搅拌槽内流场的数值模拟[J].食品与机械,2011,27(1):71-73.
ZHANG Shao-kun, YIN Xia. Numerical simulation of fluid flow in stirred tank with double impellers [J]. Food&Machinery, 2011, 27(1): 71-73. (in Chinese)
- [4] 王令闪.数值模拟法优化最大叶片式桨结构尺寸的研究[D].烟台:烟台大学,2011.
WANG Ling-shan. Study on the optimization of maxblend impeller structure size by numerical simulation [D]. Yantai: Yantai University, 2011. (in Chinese)
- [5] 梁瑛娜,高殿荣.双层直斜叶及其组合叶桨搅拌槽三维流场数值模拟[J].机械工程学报,2008,44(11):290-297.
LIANG Ying-na, GAO Dian-rong. Numerical simulation of the three-dimensional flow field in stirred tank with double straight and inclined impeller and its combination [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 290-297. (in Chinese)
- [6] 崔蕴芳.错位叶片搅拌槽内的混沌混合模拟和实验研究[D].济南:山东大学,2008.
CUI Yun-fang. Chaotic simulation and experimental research of the flow field stirred by dislocated blades [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [7] 魏化中,陶保林,舒安庆,等.磷酸陈化槽两相流搅拌的数值模拟[J].武汉工程大学学报,2012,34(12):54-57.
WEI Hua-zhong, TAO Bao-lin, SHU An-qing, et al. Numerical simulation of two phase flow in phosphate aging tank [J]. J Wuhan Inst Tech, 2012, 34(12): 54-57. (in Chinese)

- [8] 童长仁,李俊标,黄金堤,等.基于多参考系与滑动网格模型的搅拌器流场仿真[J].山西冶金,2011,34(2):4-6.
TONG Chang-ren,LI Jun-biao,et al. Based on multi-reference with sliding mesh of the stirrer flow field simulation [J]. Shanxi Metallurgy,2011,34 (2):4-6.(in Chinese)

Flow field in stirred tank of straight-gradient dislocated agitator

SHU An-qing, WANG Min, WEI Hua-zhong, LIU Kang

School of Mechanical & electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To improve the stirring performance, the fluid flow in stirred tank with different agitators was numerically simulated by FLUENT as agitator diameter is 600 mm. The optimal span of the agitator was explored by analyzing the characteristic of flow field, the distribution of velocity, axial velocity, radial velocity, tangential velocity and dead-zone volume. The research indicates that the larger area of fluid circulation and the more uniform velocity distribution appear in stirred tank, and dead-zone largely disappears when the span of blades is between $3D/4$ and $7D/8$; the large-scale regional speedy fluid is observed and it does not change obviously when the span is between $D/2$ and D ; the fluid moves with the larger average velocity in stirred tank when the span is between $3D/4$ and D ; the better mixture performance and higher stirred efficiency can be obtained due to the larger axial velocity and radial velocity when the span is $3D/4$. Therefore, the optimal span of blades can be obtained in the scope of $3D/4$ to $7D/8$.

Keywords: straight-gradient dislocated agitator; span; flow field

本文编辑:陈小平