

搅拌器内部二维流场数值模拟

徐建民, 李智勇, 雷斌, 黄伟, 陈聪

(武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要:采用 FLUENT 软件对搅拌器内部流动情况进行了二维数值模拟, 研究了不同桨叶直径、桨叶转速和桨叶数对搅拌器内部流场的影响. 结果显示: 在同一工况下, 桨叶直径为 600 mm 的搅拌效果比桨叶直径为 400 mm 和 500 mm 的搅拌效果好; 桨叶转速为 6rad/s 的搅拌效果比桨叶转速为 2rad/s 和 4rad/s 转速效果好; 八叶桨式搅拌器的搅拌效果较四叶桨式搅拌器和六叶桨式搅拌器稍好. 模拟证实搅拌器桨叶直径、桨叶转速和桨叶数的增加有利于搅拌的混合均匀, 但桨叶直径和桨叶数的增加使得搅拌器桨叶加工复杂, 生产成本提高; 桨叶转速也受制于搅拌器和搅拌轴的结构尺寸, 不能无限增大. 所以需要综合考虑各种因素的影响, 才能选出最合适最经济的桨叶直径、转速和桨叶数.

关键词:搅拌器; 数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: TF351.5⁺2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.02.011

0 引言

搅拌器是使液体、气体介质强迫对流并均匀混合的器件, 是以桨叶旋转来混合流体的设备, 用于混合不同的物质^[1-4]. 搅拌器使用非常广泛, 在各个领域中都有应用^[5]. 搅拌是工业过程的基础环节, 提高搅拌效率意义重大, 高效混合流体是搅拌器的最终目的^[6]. 计算流体动力学(简称 CFD)技术具有初步性能预测、内部流动预测、数值试验和流动诊断等作用. FLUENT 软件是目前处于世界领先地位的商业 CFD 软件包之一, 是模拟和分析复杂几何区域内流体流动的专用软件. 数值模拟是一种寻求提高搅拌叶轮性能的设计思想和设计方案中最快、最经济的方法^[7-8].

本文采用 CFD 技术用 FLUENT 软件来模拟在不同桨叶直径、转速和桨叶数的情况下, 得出搅拌器内流场分布图像, 故而可以直接观看到它的内部流动情况, 以期对搅拌器的优化设计工作提供参考.

1 控制方程

在定常条件下, 搅拌流场的不可压缩流动可用以下方程组描述

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}$$

(3) 湍动能方程:

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = P_r - \epsilon$$

(4) 湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{C_{\epsilon 1} \cdot \epsilon \cdot P_r - C_{\epsilon 2} \cdot \epsilon^2}{k}$$

2 数值模拟过程

本文研究的是桨叶直径、桨叶转速、桨叶数对搅拌器搅拌性能的影响. 采用桨叶直径分别为 400 mm(长 $H=190$ mm, 宽 $L=20$ mm)、500 mm(长 $H=240$ mm, 宽 $L=20$ mm)、600 mm(长 $H=290$ mm, 宽 $L=20$ mm)以研究桨叶直径对搅拌器的影响. 采用桨叶转速分别为 2 rad/s、4 rad/s、6 rad/s 以研究桨叶转速对搅拌器的影响. 采用四叶桨式搅拌器、六叶桨式搅拌器、八叶桨式搅拌器, 桨片都是直列式, 以研究桨叶数对搅拌器的影响. 搅拌桶的半径 $R=40$ cm, 坐标系原点位于搅拌叶轮中心, 基于旋转的速度和工质水, 可以确定搅拌器内部流动为湍流. 以四叶桨式搅拌器为例, 如图 1 所示.

收稿日期: 2013-01-22

作者简介: 徐建民(1965-), 男, 湖北武汉人, 教授, 硕士. 研究方向: 高效换热器的研究与开发.

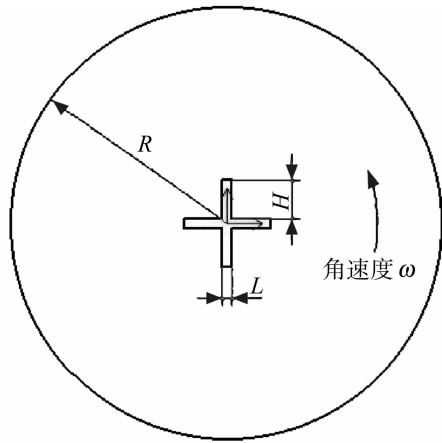


图 1 旋转碗的尺寸示意图

Fig. 1 The size sketch of rotating bowl

2.1 建立模型

搅拌器二维模型使用 Gambit 建立,外圆和内圆组成区域 1,内圆和桨叶组成区域 2. 以 Map 划分方式划分区域 1,以 Pave 平铺方式划分区 2. 网格图如图 2~4 所示.

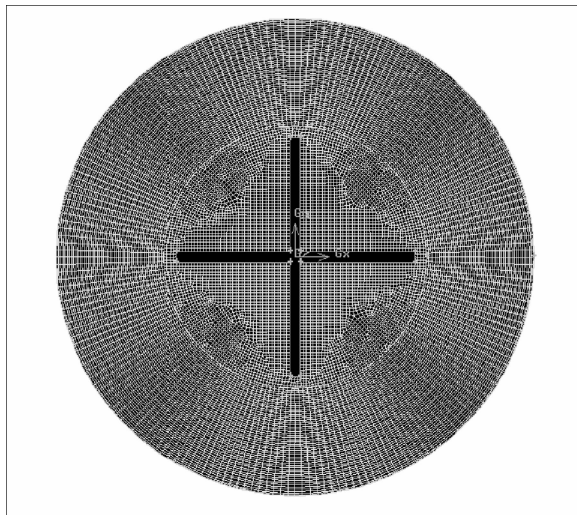


图 2 四叶桨式搅拌器网格划分图

Fig. 2 Four vane agitator mesh figure

2.2 边界条件

调节条件:将搅拌桶的外壁和搅拌器桨叶的边定义为 WALL,环形面和内部的面交界处是两条重合的边,设置它们为 INTERFACE 边界条件,名称分别叫做“interface_1”和“interface_2”. 由于使用的是 MRF 模型,还需要定义区域,即对不同的子域进行命名. 指定外面环面的类型为 FLUID,名称为“stationary”;指定内部的面类型为 FLUID,名称为“swirl”.

2.3 求解计算

FLUENT 软件选择单精度二维求解器;设置计算区域尺寸和单位制尺寸中的网格尺寸按厘米进行生成;使用压力基求解器;湍流模型选择

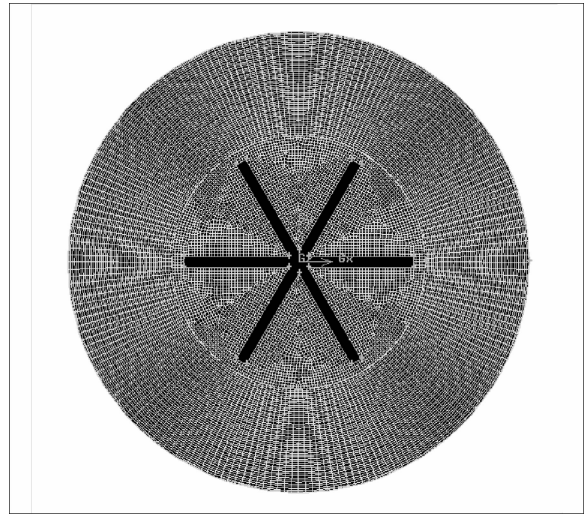


图 3 六叶桨式搅拌器网格划分图

Fig. 3 Six vane agitator mesh figure

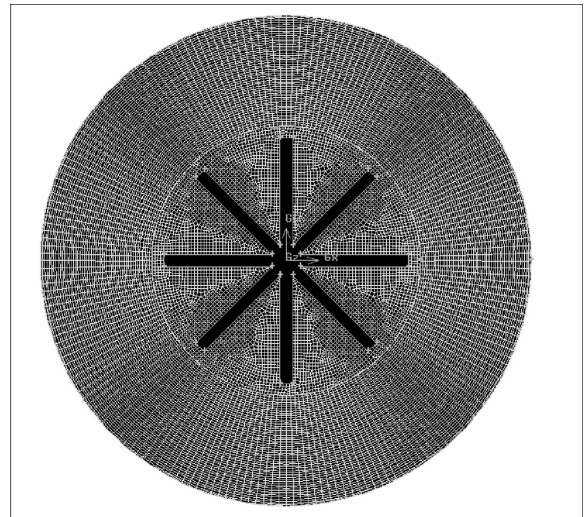


图 4 八叶桨式搅拌器网格划分图

Fig. 4 Eight vane agitator mesh figure

k-epsilon 双方程模型;定义流体的物理性质中,在 FLUENT Database 中调出水的物理参数;求解控制参数的设置中,差分格式采用一阶迎风方式,压力-速度耦合求解方式中选择 SIMPLE 算法.

3 结果及分析

3.1 桨叶直径的影响

以四叶桨式搅拌器为例,2 rad/s 的桨叶转速,分别模拟桨叶直径为 400 mm、500 mm、600 mm 的桨叶,速度矢量图如图 5~7 所示.

结果分析:从图 5~7 的速度矢量图中可以看到,随着桨叶直径的增大,使整个搅拌设备内的流场分布更均匀,流体混合更充分,搅拌器内速度分布变好,速度在各个区域内都很同步,但桨叶直径的增大,使得材料用量增加,制造费用提高,安装麻烦,还会增加其本身的受力,使其使用寿命降低.

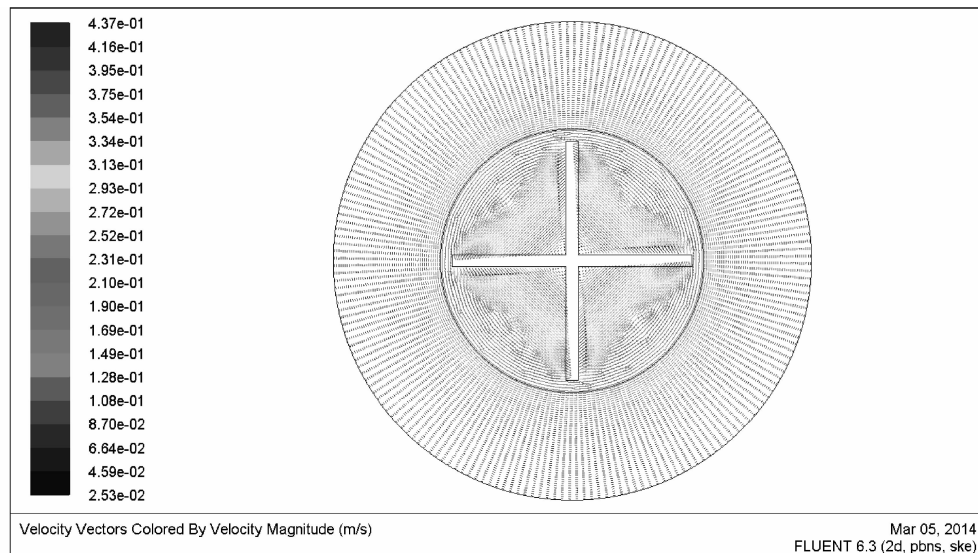


图 5 400 mm 桨叶直径速度矢量图

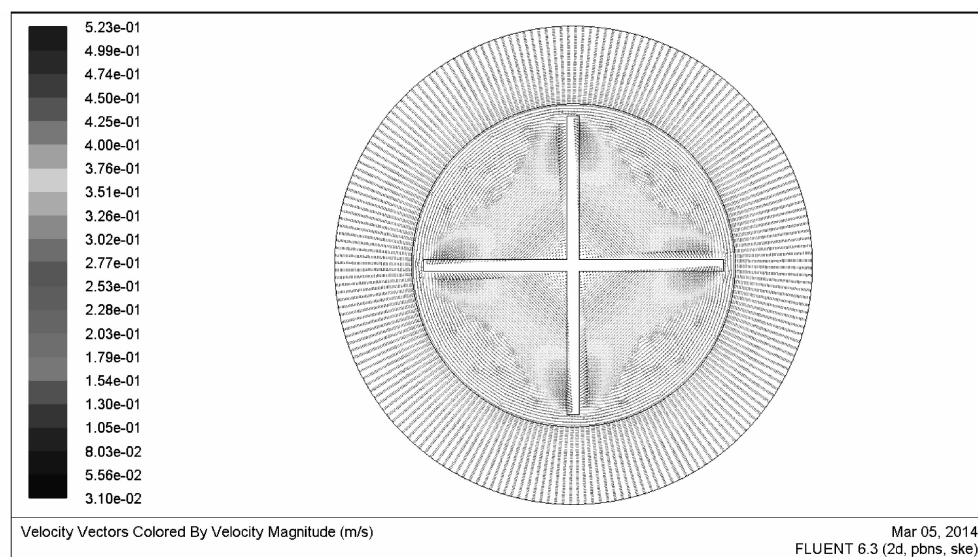
Fig. 5 Velocity vector diagram of blade diameter $d=400$ mm

图 6 500 mm 桨叶直径速度矢量图

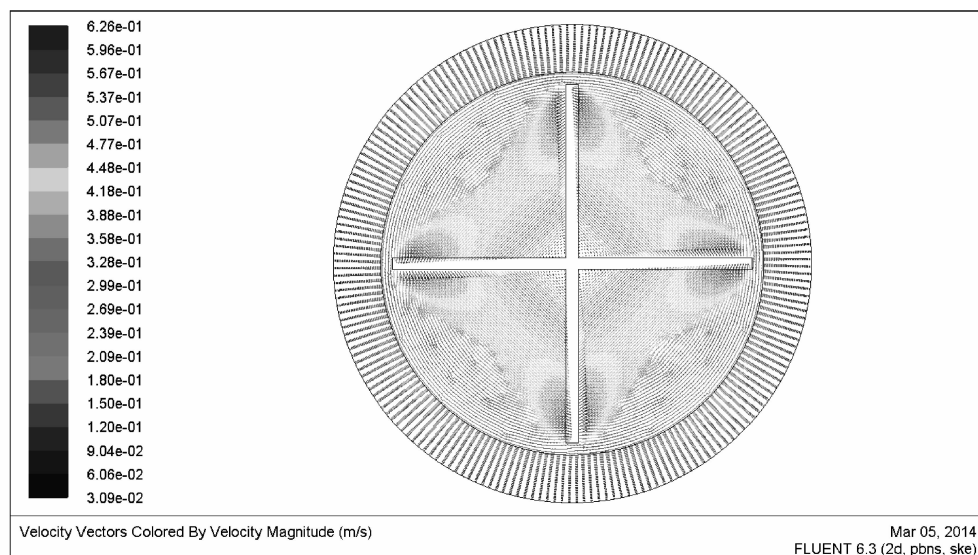
Fig. 6 Velocity vector diagram of blade diameter $d=500$ mm

图 7 600 mm 桨叶直径速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector diagram of blade diameter $d=600$ mm

3.2 桨叶转速的影响

以四叶桨式搅拌器为例,桨叶直径为400 mm,

分别对桨叶转速为 2 rad/s、4 rad/s、6 rad/s 进行数值模拟,速度矢量图如图 8~10 所示.

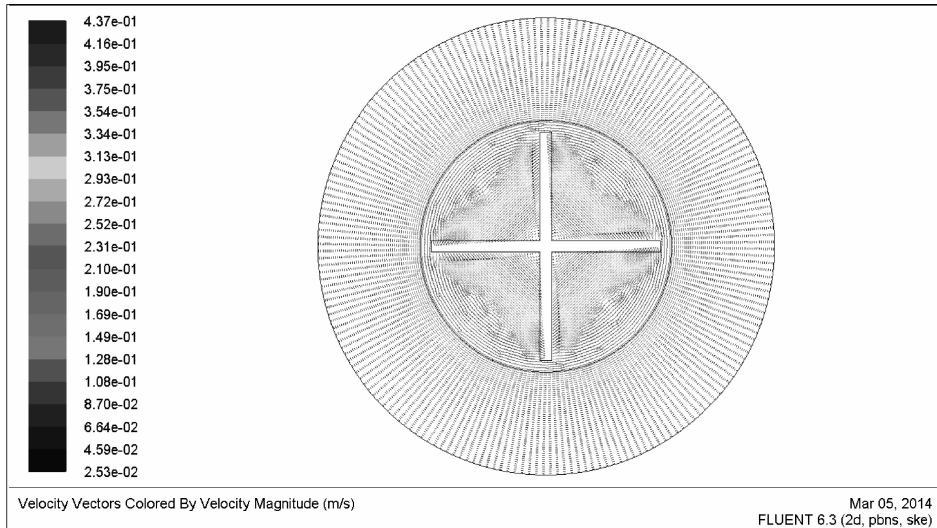


图 8 2 rad/s 桨叶速度的速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector diagram of blade angular velocity $\omega=2$ rad/s

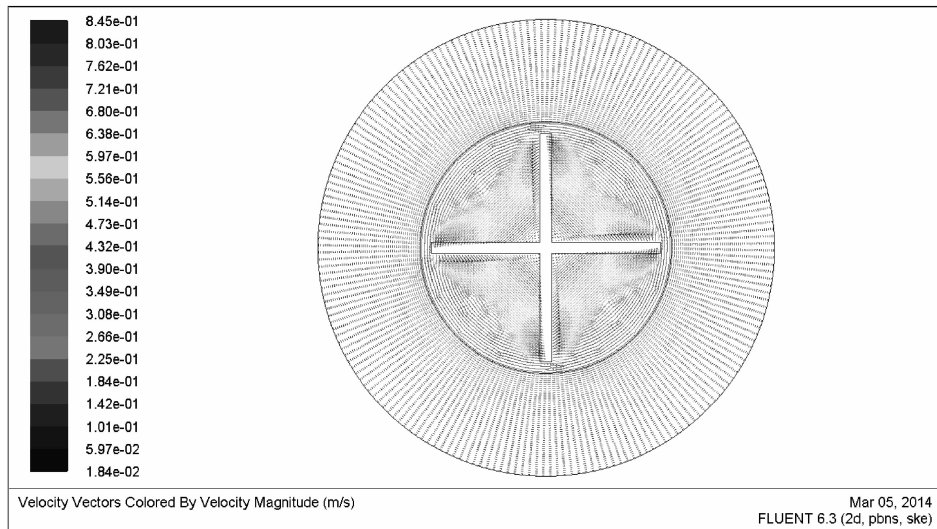


图 9 4 rad/s 桨叶速度的速度矢量图

Fig. 9 Velocity vector diagram of blade angular velocity $\omega=4$ rad/s

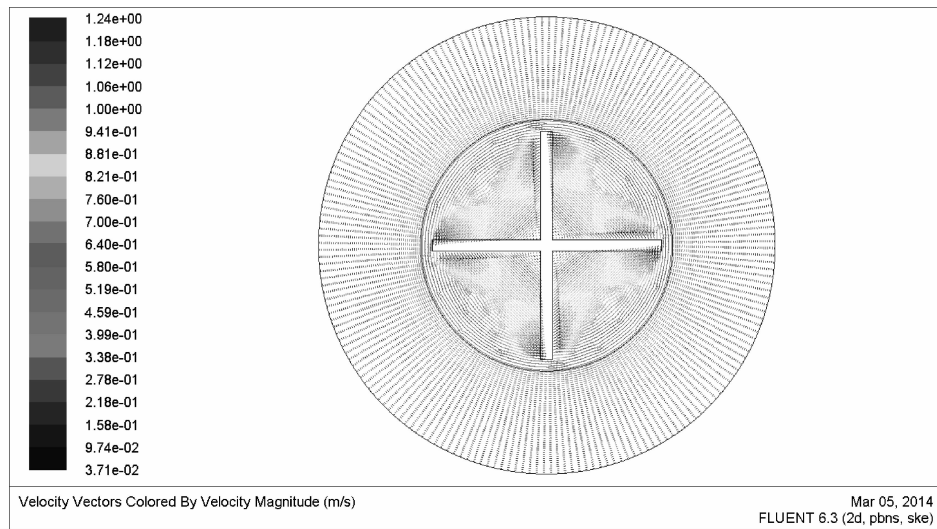


图 10 6 rad/s 桨叶速度的速度矢量图

Fig. 10 Velocity vector diagram of blade angular velocity $\omega=6$ rad/s

结果分析:从图 8~10 的速度矢量图中可以看出,随着转速的提高,搅拌器内流场分布更加均匀,搅拌效果明显增强,但是转速的提高会加大搅拌轴的受力,电机功率也会增大,能耗增加,从而可能导致搅拌器和搅拌轴的结构尺寸需要重新设计。

3.3 桨叶数的影响

本文以桨叶尺寸直径为 400 mm 转速为 2 rad/s 为例,分别对四叶桨式搅拌器、六叶桨式搅拌器、八叶桨式搅拌器进行数值模拟,速度矢量图如图 11~13 所示。

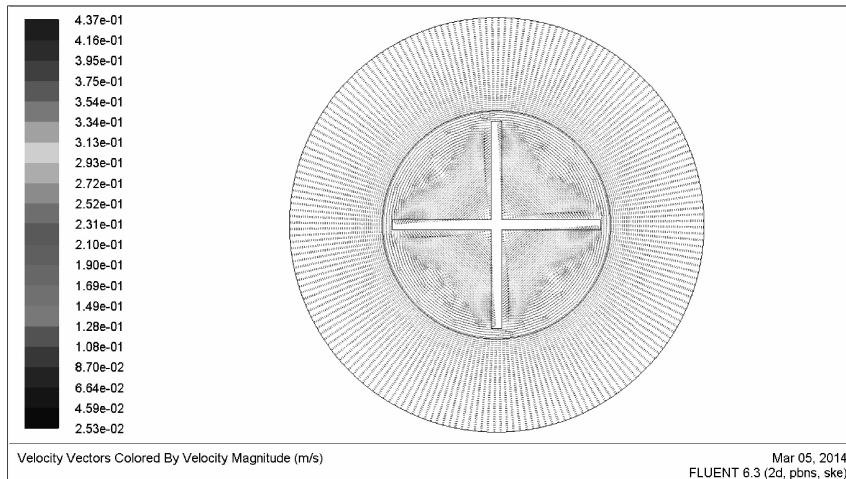


图 11 四叶桨式搅拌器的速度矢量图

Fig. 11 Velocity vector diagram of four vane agitator

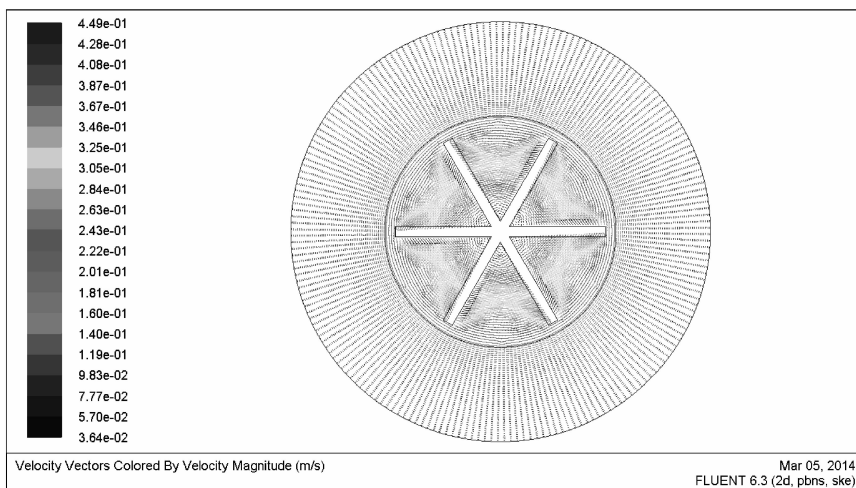


图 12 六叶桨式搅拌器的速度矢量图

Fig. 12 Velocity vector diagram of six vane agitator

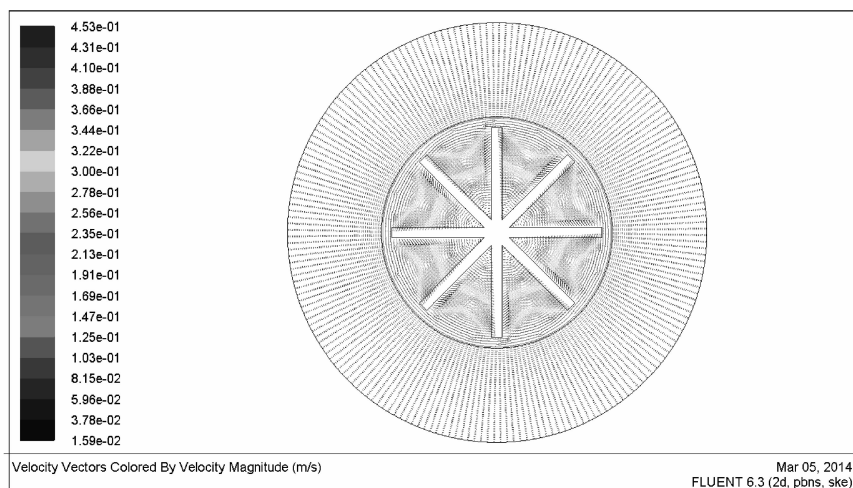


图 13 八叶桨式搅拌器的速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagram of eight vane agitator

结果分析:从图 11~13 的速度矢量图可以看出,随着桨叶数的增加,搅拌器内的搅拌效果得到增强,流场分布比较均匀,但效果不是很明显。同时增加桨叶数会带来一些负面效果,它会增加材料用量从而使得成本增加;也会使得材料应力增大,减少使用寿命,因此对于增加桨叶数的方法来提高搅拌效果应该综合各方面考虑,选择合适的桨叶数。

4 结 语

搅拌器桨叶直径、桨叶转速和桨叶数的增加有利于搅拌的混合均匀,但是桨叶直径和桨叶数的增加不仅使得搅拌器桨叶加工复杂,技术要求高,而且使得材料用量增加,成本也会提高;桨叶转速也受制于搅拌器和搅拌轴的结构尺寸,不能一味地增大。只有考虑各种因素,才能确定出最经济最合适的桨叶直径、转速和桨叶数。

致 谢

感谢武汉工程大学机电工程学院过程装备与腐蚀防护实验室的全体人员对本研究的支持与帮助。

参考文献:

- [1] 郝惠娣,伍星,李宝璋,等.自混式圆盘涡轮搅拌器的性能[J].西北工业大学学报:自然科学版,2000,30(6):501-502.
HAO Hui-di, Wu Xing, LI Bao-zhang, et al. A study on mass transfer and kinetic properties of self-mixing disk turbine stirred reactor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University: Natural science edition, 2000, 30(6): 501-502. (in Chinese)
- [2] 胡锡文,林兴华. 8种搅拌器搅拌特性的实验研究[J]. 化工机械, 2005, 32(5): 259-262.
HU Xi-wen, LIN Xing-hua. Experimental investigation on the mixing characteristics of eight mixers[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2005, 32(5): 259-262. (in Chinese)
- [3] 周本浩. 大双叶片式搅拌器搅拌特性的研究[J]. 轻工机械, 2007, 25(3): 39-41.
ZHOU Ben-hao. Research of mixing characteristic of the large-two-blade impeller[J]. Light Industry Machinery, 2007, 25(3): 39-41. (in Chinese)
- [4] 周睿. 双叶片组合式搅拌器搅拌特性的实验研究[J]. 化工机械, 2007, 34(2): 65-68.
ZHOU Rui. An experimental investigation on the mixing characteristics of the combinatory two-blade impellers[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2007, 34(2): 65-68. (in Chinese)
- [5] 顾雪萍,冯连芳,王嘉俊,等. 泛能式搅拌浆搅拌特性研究[J]. 化学工程, 2003, 31(4): 54-55.
GU Xue-Ping, FENG Lian-fang, WANG Jia-jun, et al. Power, heat transfer and mixing characteristics of full zone agitator[J]. Chemical Engineering, 2003, 31(4): 54-55. (in Chinese)
- [6] 王战辉,李瑞瑞,范晓勇,等. 搅拌器内部流场数值模拟[J]. 广州化工, 2013, 11(17): 159-160.
WANG Zan-hui, LI Rui-rui, FAN Xiao-yong, et al. Numerical simulation of stirrer internal flow[J]. Chemical Engineering, 2013, 11(17): 159-160. (in Chinese)
- [7] 徐建民,胡小霞,彭坤,等. 内插自振弹簧换热器脉冲流强化换热数值分析[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(9): 66-69.
XU Jian-min, HU Xiao-xia, PENG Kun, et al. Numerical analysis of interpolation vibration spring heat exchange tubes under pulse flow[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(9): 66-69. (in Chinese)
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986. (in Chinese)

Numerical simulation research of agitator inside two-dimensional flow field

XU Jian-min, LI Zhi-yong, LEI Bin, HUANG Wei, CHEN Cong

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: The FLUENT software was used to study the influence of different blade diameter, blade speed on the internal flow inside agitator. The results show that the blade mixing effect under the diameter of 600 mm is better than that under 400 mm and 500 mm; the blade mixing effect under the speed of 6 rad/s is better than that under 2 rad/s and 4 rad/s; the blade mixing effect in eight vane agitator is better compared with the four vane agitator and the six vane agitator in the same condition. It concludes that the increase of the blade diameter, the blade speed and the number of blades benefits mixing uniformly; the increase of the blade diameter and the number of blades makes the manufacture of agitator blade complex and increases its cost; the blade speed is limited by the agitator structure size. So it's necessary to consider all conditions to select suitable blade diameter, speed and the number of blades.

Key words: agitator; numerical simulation; computational fluid dynamics

本文编辑:陈小平