

文章编号:1674-2869(2015)01-0039-05

穿流型搅拌器结构参数优化

杨红^{1,2},王帆¹,王呈祥¹,曾真¹,刘洋¹,罗丹丹¹

1.武汉工程大学机电工程学院,湖北武汉430205;

2.化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北武汉430074

摘要:在特定搅拌槽条件下,针对穿流式斜叶桨式搅拌器,在常用的最高转速300 r/min以内,就开孔位置、开孔率、开孔直径等结构参数进行了数值模拟。将搅拌器以及附近区域都设为动区域进行模型简化处理,基于四面体网格对模型进行网格划分,采用多重参考系稳态处理法,选用标准k-ε湍流模型求解搅拌流场。引入搅拌系数K,从混合效果和功率消耗两方面综合评价搅拌器的优劣。搅拌功率实验和分布时间实验较好地验证了数值模拟的结论。研究表明,相较于传统搅拌桨,穿流式搅拌桨因能强化涡流扩散、减小桨叶投影面,可获得更好的混合效果和更低的功耗,且随着搅拌转速的增大,功耗降低的越明显;搅拌功率和混合时间随开孔率和开孔直径而变化,当开孔率为12%左右、开孔直径为8 mm左右时,搅拌功率和混合时间最小,最为优化。

关键词:穿流式搅拌桨;结构参数;优化研究;CFD数值模拟;分布时间实验;功率实验

中图分类号:TQ027

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.01.009

0 引言

搅拌是通过搅拌器使槽内介质某种循环,使液体、气体介质强迫对流并均匀混合。而为了达到这一目的,需要通过强制对流、均匀混合的器件来实现。穿流型搅拌器泛指仅通过对桨叶或挡板上开通孔以产生射流效果的新型搅拌器,相关研究表明,新型穿流型搅拌器不但减小了桨叶在搅拌旋转方向上的投影面积,从而减小了功率损耗;同时在搅拌混合时,桨的前面形成超压,桨后面形成负压,桨叶前后形成压差而产生射流,能进一步强化湍动程度。穿流型搅拌能够在节能、降耗情况下达到强化搅拌的目的^[1-2],并且在发酵工程等化工生产中得到应用^[3-4]。CFD数值模拟技术已广泛应用于搅拌流场研究^[5-8],在前期工作中,笔者已对特定搅拌槽条件下穿流型斜叶桨搅拌器的开孔位置进行了数值模拟和实验研究^[9],本文继续对开孔率和开孔直径等结构参数进行优化研究。通过对搅拌流场的CFD数值模拟,以及搅拌功率和混合时间等的实验对比,从混合效果和功率消耗两方面综合评价搅拌器的使用效果,进行参数优化,为穿流型搅拌器进一步的应用研究奠定基础。

1 研究对象及建模

本文的主要研究对象是穿流型搅拌器,以四叶桨式搅拌器为例。桨式搅拌器的转速适用范围为10~300 r/min,因此后文中的数值模拟与实验研究的最高速度定义为300 r/min。基于实验室现有的搅拌试验机,将模拟结果与实验结果进行比较分析,其槽体部分为圆柱形筒体,球形封头,内置四块挡板,全挡板条件,以水为介质进行研究。

将整个搅拌槽分为两个区域:动区域与静区域。动区域为包含搅拌器的区域,静区域包含整个静止的槽体部分。基于非结构网格对模型进行网格划分,采用MRF稳态处理法,假设流动是稳定的,选用标准k-ε湍流模型求解稳态下的搅拌流场。搅拌槽及搅拌器的具体结构参数及建模过程见文献^[9]。

2 模拟结果及分析

以45°斜叶穿流型搅拌器在转速为240 r/min下的模拟结果为例,远端开孔,对开孔率进行分析研究,选取部分穿流型搅拌器的横截面速度矢量图进行对比。如图1~4所示:(为方便说明,将云图以数字和半字划组合命名,如:45-8-8表示的是一个45°斜叶、开孔直径为8 mm和开孔率为8%的穿流型搅拌器,0-0表示为无孔。)

收稿日期:2014-11-15

基金项目:武汉工程大学科学研究基金资助项目(14105061)

作者简介:杨红(1971-),男,湖北当阳人,教授,博士。研究方向:新型高效过程装备、机械设备智能监控等。

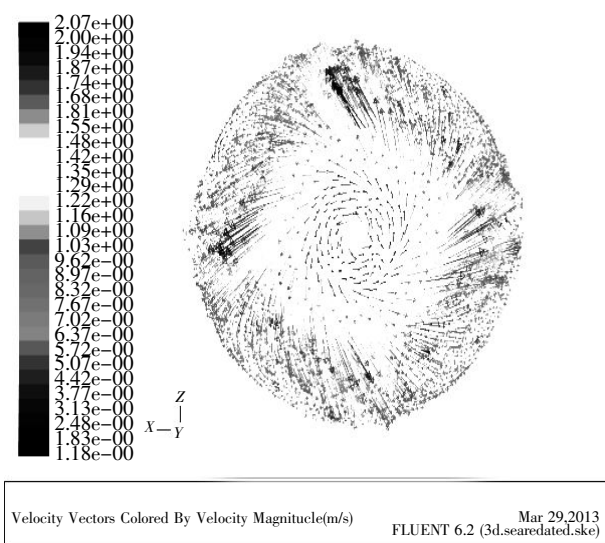


图 1 搅拌器 45-0-0 参数下速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector of 45-0-0 parameter

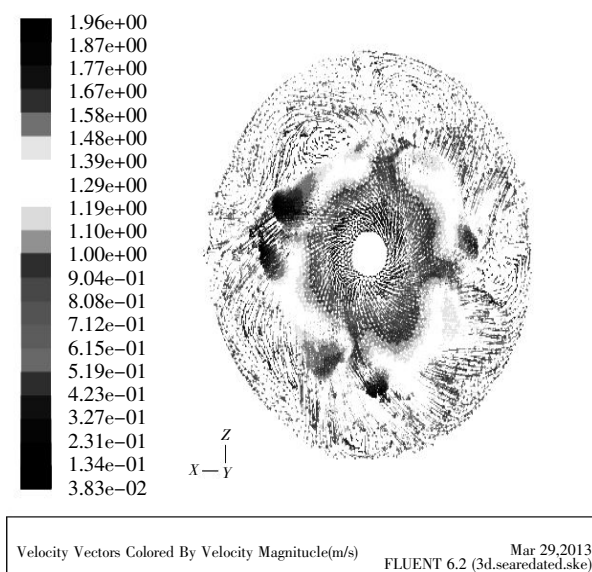


图 4 搅拌器 45-6-12 速度矢量图

Fig.4 Velocity vector of 45-6-12 parameter

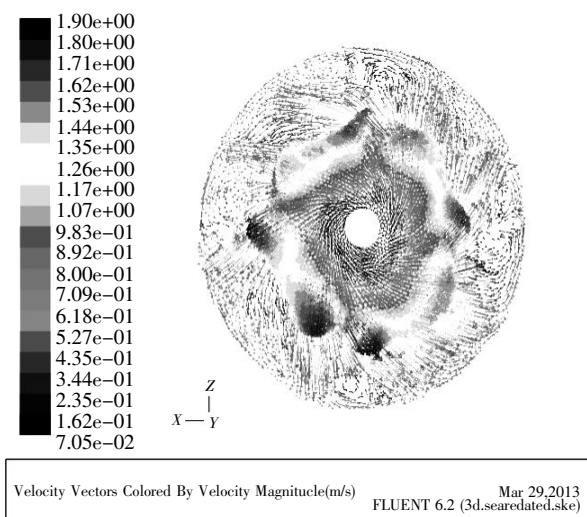


图 2 搅拌器 45-8-6 速度矢量图

Fig.2 Velocity vector of 45-8-6 parameter

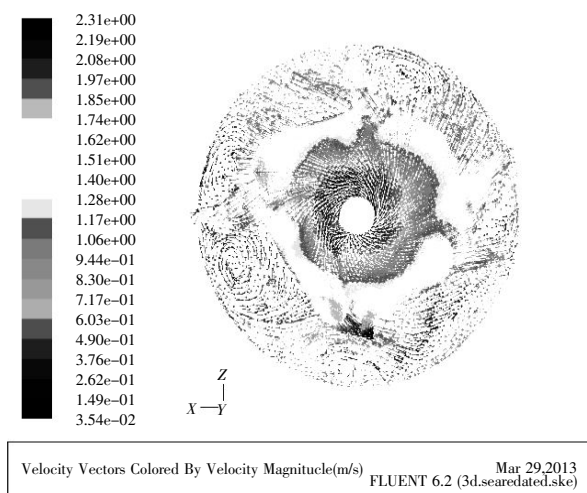


图 3 搅拌器 45-8-12 速度矢量图

Fig.3 Velocity vector of 45-8-12 parameter

由于穿流型搅拌器开孔是在桨叶上,所以桨叶区附近的速度影响比较明显.从图 1~4 的速度矢量图可以看出,穿流型搅拌器与传统的搅拌器相比,其桨叶区的速度变化比较明显,而且其最大速度也增大了许多,其中不开孔的搅拌器在桨叶区的速度较小,搅拌器 45-8-12 的速度梯度和搅拌器周围速度增大比较明显;从速度范围来看,不同搅拌器的最大速度都有差别,其中搅拌器 45-8-12 的最大速度最大;结合两个不同方面比较,穿流型搅拌器(见图 3),桨叶区速度较大,而且非桨叶区的速度也比其他搅拌器的速度大,且速度梯度明显;而穿流型搅拌器的速度场绝对优于传统搅拌器,而且开孔率和开孔直径对速度影响较大.

各个穿流型搅拌器之间相比,搅拌器 45-8-12 的搅拌效果最佳.从上述比较分析看,在桨叶上开孔具有很大的优点,而且结构参数对其流场有影响.

在此定义一个搅拌系数 $K=\partial v/P$,其中 ∂ 是搅拌器类型与物料的函数,即当搅拌器型式和物料确定的情况下, ∂ 保持不变,本次模拟结果中,搅拌槽的参数未发生变化,因此,搅拌系数与 v/p 直接相关; v 表示的是最大速度; p 表示搅拌功率.

由于搅拌系数与搅拌功率相关,而搅拌功率从宏观上反应了搅拌器的能耗问题,最大速度也从宏观上一定程度的反应了搅拌槽内湍流程度的大小,因此搅拌系数可以从能耗和涡流强度两个方面反应搅拌器的性能.计算出在相同转速下不同搅拌器的 v/p ,如图 5 所示.

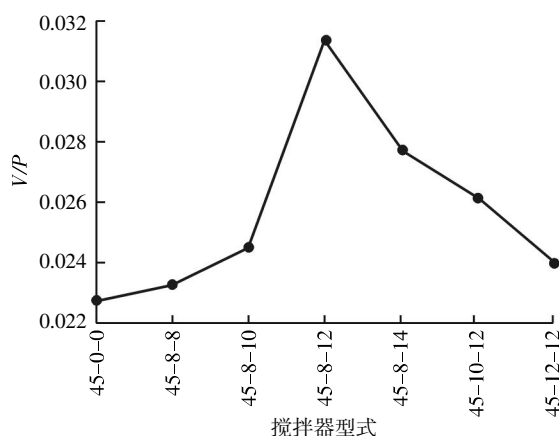


图 5 240 r/min 下不同搅拌器的搅拌系数

Fig.5 The mixing coefficients of different agitator in 240 r/min

由图 5 可知搅拌器 45-8-12 的 v/P 最大, 搅拌器 45-8-5 的 v/P 最小, 即说明穿流型搅拌器 45-8-12 的搅拌效果最佳。

通过以上比较可以知道, 穿流型搅拌器功率小于传统四叶桨式搅拌器; 当开孔位置和开孔直径一定时, 搅拌功率随着开孔率的增大而减小; 当开孔率一定时, 开孔直径为 8 mm 的搅拌器功率最小。

3 实验对比分析

3.1 搅拌功率实验

利用搅拌试验机调节转速可测得相对应的扭矩, 通过下面的公式将扭矩与功率进行转化, 功率计算公式为

$$P = M \cdot \omega = \pi N M / 30$$

其中:

M ——扭矩, $N \cdot m$;

ω ——角速度, rad/s ;

N ——示转速, r/min 。

当 45°斜叶搅拌器的开孔直径为 8 mm 时, 得到的功率图, 如图 6 所示; 当斜叶搅拌器的开孔率为 12% 时, 得到的功率图, 如图 7 所示。

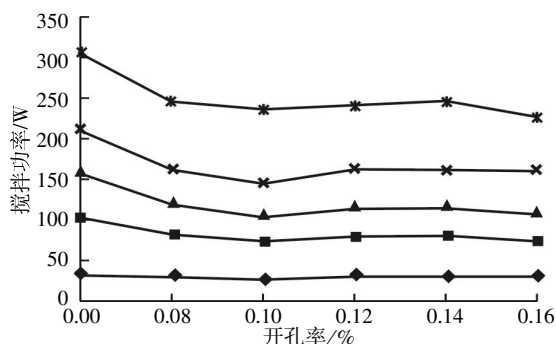


图 6 不同开孔率搅拌器实验功率

Fig.6 Agitation power in different opening rate

注: ◆ 80 r/min; ▲ 200 r/min; * 300 r/min; ■ 160 r/min; × 240 r/min;

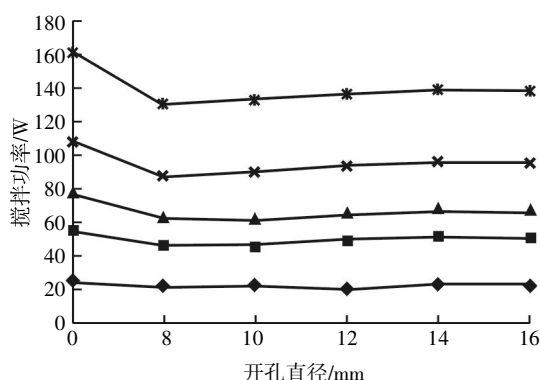


图 7 不同开孔直径搅拌器实验功率

Fig.7 Agitation power in different hole diameter

注: ◆ 80 r/min; ▲ 200 r/min; * 300 r/min; ■ 160 r/min; × 240 r/min

根据上表可以得出以下结论: 穿流型搅拌器与传统搅拌器相比, 搅拌功率有大幅下降; 穿流型搅拌器的搅拌功率都随着开孔率的不断增大而减小, 而且开孔率越大变化幅度越小。不开孔和 12% 开孔率的穿流型搅拌器功率差值很大; 从 12% 开孔率下, 从 6 mm 孔径到 16 mm 孔径范围内, 8 mm 孔径的功率消耗最低, 可以说明 8 mm 孔径为最佳开孔直径。

3.2 混合时间实验

混合时间是判断混合效果的最重要的性能指标之一。混合时间(也可称为分布时间)是指将两种完全互溶、但其物理或化学性质(如电导率、颜色、温度、折光率等)有差异的流体通过搅拌使之达到规定混均标准时所需的时间。

为便于比较本实验测量的数值是在相同的测试条件下进行的与不同开孔率以及不同开孔直径的关系如图 8 和图 9 所示。

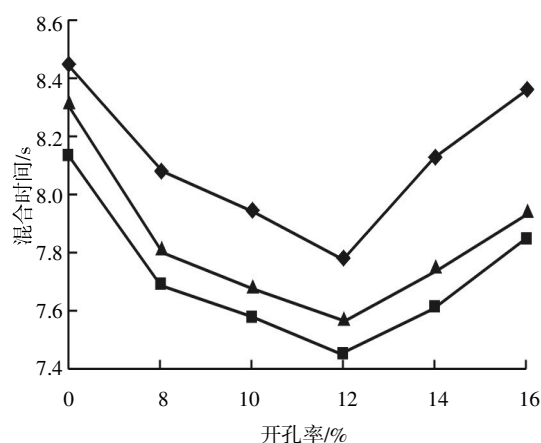


图 8 不同开孔率下的混合时间

Fig.8 The mixing time in different opening rate

注: ◆ 四直叶; ■ 45°斜叶; ▲ 60°斜叶

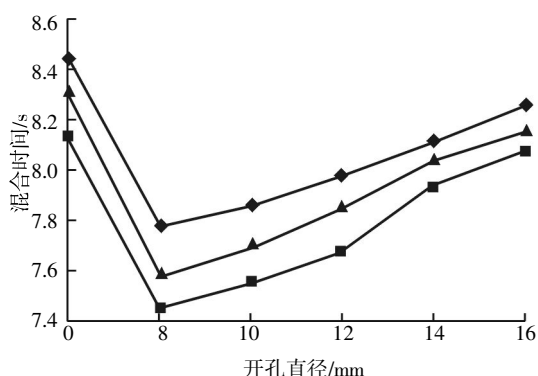


图 9 不同开孔直径下的混合时间

Fig.9 The mixing time in different hole diameter

注: ◆—四直叶; ■—45°斜叶; ▲—60°斜叶

由图 9 可知,当远端开孔径为 8 mm 时,开孔率为 12% 的搅拌器混合时间最短,因此 12% 的开孔率为搅拌效果最好的开孔率,即最佳开孔率. 在远端开孔和同一开孔率下,搅拌器孔径为 8 mm 的混合时间最短,即孔径为 8 mm 为最佳开孔直径.

4 结 语

以上从数值模拟和实验研究两个方面对传统的四叶桨搅拌器和相应的穿流型搅拌器进行了对比分析研究. 在不同转速下,就开孔位置、开孔直径和开孔率三个方面对穿流型搅拌器进行了对比分析,讨论了三种因素对搅拌槽的搅拌流场、搅拌功率、混合效果等性能指标的影响. 研究表明,在特定搅拌槽条件下,在桨式搅拌器常用的最高转速 300 r/min 以内:

(1)同等条件下,穿流型搅拌器与传统桨式搅拌器相比,搅拌混合效果更好、功耗更低,且随着搅拌转速的增大,功耗降低的越明显.

(2)在相同开孔直径和开孔位置条件下,搅拌功率和混合时间随开孔率而变化,当开孔率为 12% 左右时,搅拌功率和混合时间最小,最为优化.

(3)在相同开孔位置和开孔率的情况下,搅拌功率和混合时间随开孔直径而变化,当开孔直径为 8 mm 左右时,搅拌功率和混合时间最小,最为优化.

搅拌功率实验和分布时间实验较好验证了数值模拟的结果,表明穿流型搅拌器有较好的综合性能,相关研究方法和结构参数的优化结果,为穿流型搅拌器的进一步应用研究奠定了基础.

致 谢

感谢武汉工程大学机电院研究基金的支持!

参考文献:

- [1] 陈志平,章序文,林兴华,等.搅拌与混合设备设计选用手册[M].北京:化学工业出版社,2004:1-15.
CHEN Zhi-ping,ZHANG Xu-wen,LIN Xing-hua, et al. Mixing manual and design of mixing equipment selection [M].Beijing:Chemical Industry Press,20:04:1-15. (in Chinese)
- [2] 赵之平,角仕云,陈澄华,等.新型穿流搅拌釜的研究(II)混合机理[J].化工进展,2002,22(z1):85-88.
ZHAO Zhi-ping,JIAO Shi-yun,Chen Cheng-hua,etl. Study of Mixing Mechanism for a New-type Stirred Tank with Penetrated Baffle [J]. Progress in Chemical Engineering,2002,22(z1):85-88.(in Chinese)
- [3] 刘静,向群,王能勤.新型穿流型搅拌器的搅拌机理分析及实验研究[J].西南交通大学学报,1999,34(3):295-299.
LIU Jing,XIANG Qun,WANG Neng-qin.Agitation Mechanism and Its Application Research of a New-Type Punched Agitator[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999,34(3):295-299.(in Chinese)
- [4] 赵清华,梁玉祥.穿流式搅拌桨在水-磷石膏系统中的搅拌性能研究[J].四川化工与腐蚀控制,2001,4(6):10-13.
ZHAO Qing-hua,LIANG Yu-xiang.Study on performance of punched impeller in the water and phosphogypsum [J].Sichuan Chemical and corrosion control, 2001,4(6):10-13.(in Chinese)
- [5] 张远新.液-液相搅拌槽的数值模拟与实验研究[D].武汉:武汉大学,2012:59-60.
ZHANG Yuan-xin.Jet-Type Paddle Impeller Numerical Simulation and PIV Experiment Research [D].Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012:59-60. (in Chinese)
- [6] 钟丽,黄雄斌,贾志刚.用 CFD 研究搅拌器的功率曲线[J].北京化工大学学报,2003,30(5):4-8.
ZHONG Li,HUANG Xiong-bin,JIA Zhi-gang.Power curve simulation in a stirred tank by using CFD [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2003,30(5):4-8 (in Chinese)
- [7] 雷晶.基于 FLUENT 软件搅拌器的流体模拟 [J].油气田地面工程,2010,29(8):25-26.
LEI Jing.Fluid simulation of agitator based on F-FLUENT[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29 (8):25-26.(in Chinese)
- [8] 周本浩,周睿,林兴华.大双叶片式搅拌特性的研究[J].轻工机械,2007,25(3):39-41.

- ZHOU Ben-hao, ZHOU Rui, LIN Xing-hua. Research of Mixing Characteristic of the Large-two-blade Impeller [J]. Light Industry Machinery, 2007, 25(3): 39–41. (in Chinese)
- [9] 杨红, 王呈祥, 肖臻. 穿流型搅拌器开孔位置的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(2): 65–68.
- YANG Hong, WANG Cheng-xiang, XIAO Zhen. Numerical simulation of hole position of punched impeller [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(2): 65–68. (in Chinese)

Optimizing structural parameters of punched impeller

YANG Hong^{1,2}, WANG Fan¹, WANG Cheng-xiang¹, ZENG Zhen¹, LIU Yang¹, LUO Dan-dan¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety (Wuhan Institute of Technology),
Wuhan 430074, China

Abstract: Aimed at punched agitator with pitched blade, the structural parameters of hole position, hole diameter and opening rate were numerically simulated in specific stirring tank. The agitator and its surrounding area were set as moving area for simplified treatment of model. Based on tetrahedral mesh of the model grid, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and moving reference frame were used to solve steady-state mixing flow field. Mixing coefficient was introduced to evaluate the combination property of stirrer from the mixing effect and power consumption. Numerical results are well verified by the experiments of mixing time and mixing power. It is found that the punched impeller can get a better mixing effect and lower power consumption compared with traditional agitator blade. The punched impeller can intensify the eddy diffusion and reduce blade projection plane. The reduction of power consumption is more obvious as the speed increases. The changes of mixing power and mixing time depending on the hole diameter and the opening rate. The mixing power and mixing time are minimum and optimal when the opening rate is about 12% and the diameter is about 8 mm.

Keywords: punched impeller; structural parameters; time-distribution; power

本文编辑:陈小平