

# 穿流型搅拌器开孔位置的数值模拟

杨 红,王呈祥,肖 臻

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为进一步降低能耗,确定开孔位置对穿流型搅拌器的搅拌效果的影响,在相同的开孔尺寸及开孔率条件下,对八种不同开孔位置的穿流型搅拌器的搅拌流场和功率特性在液-液相条件下对相应搅拌进行了数值模拟.模拟过程中,开孔位置分为近端、中间和远端三种类型,均匀分布在对应的位置;整个搅拌釜分为动静区域,将搅拌轴、搅拌器及其周边区域都设为动区域,剩余区域为静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,选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型,采用多重参考系模型求解稳态下的搅拌流场.根据模拟结果及相关数据得出,穿流型搅拌器与普通搅拌器比较,可在更低的功耗下获得更大的速度梯度和更明显的涡流效应,有效强化搅拌;开孔位置在远端的穿流型搅拌器在相同转速下扭矩最小,功耗最低;开孔位置离搅拌轴越远,功耗下降越明显,且在一定转速范围内,搅拌转速越高,效果越明显.

**关键词:**穿流型搅拌器;功率特性;强化搅拌

**中图分类号:**TQ027

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.02.014

## 0 引 言

搅拌是化工过程的一个重要的单元操作,被用来进行各种操作,如固-液、气-液混合和化学反应等.搅拌过程是通过搅拌器的旋转向釜内流体输入机械能,使得流体获得适宜的流场,在流动场内进行动量、热量、质量的传递或者同时进行化学反应的过程.穿流型搅拌器泛指在搅拌器的桨叶或挡板上开通孔以达到穿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旋转方向上的投影面积,从而降低了能耗,同时在搅拌系统中产生射流,能进一步强化涡流扩散.穿流型搅拌能够在较小的能耗情况下达到强化搅拌效果的目的<sup>[1-3]</sup>,并且在湿法硫酸生产中得到广泛应用<sup>[4]</sup>.

近年来,基于计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)的数值模拟技术已成为搅拌过程研究的一个重要技术手段,而关于穿流型搅拌器的数值模拟研究较少,且主要集中在穿流型搅拌器对搅拌功率影响的定性研究上,并未对

开孔的具体几何结构参数进行研究.

搅拌桨开孔的影响因素包括开孔尺寸、开孔率、开孔位置等,本文针对常用的四叶桨搅拌器,在特定的搅拌槽和相同的开孔尺寸及开孔率条件下,对不同开孔位置下的搅拌器的搅拌流场和功率特性进行 CFD 数值模拟,为进一步的应用优化研究奠定基础.

## 1 研究对象与建模

### 1.1 研究对象

本文研究的是穿流型搅拌器开孔位置对搅拌效果及能耗的影响,即主要研究的是穿流型搅拌器开孔位置与湍流程度及功率之间的关系.在这个前提下,不考虑开孔尺寸等因素的影响,采用同样的开孔尺寸及开孔率等参数,把开孔位置当成对功率的主要影响因素来进行研究分析.基于实验室现有的搅拌试验机,搅拌槽为有机玻璃材质,圆柱形筒体,球皮封头,以水为介质进行研究.搅拌试验机的基本尺寸如表 1 所示.

表 1 搅拌槽基本尺寸表

Table 1 Agitation tank basic size

mm

筒体 直径	筒体 高度	底圆 直径	底圆 高度	挡板 高度	挡板数	轴径	搅拌器 直径	封头 直径	封头 深度	搅拌器 安装高度	搅拌器 厚度	搅拌器 宽度
480	540	190	80	500	4	28	250	190	80	150	4	50

收稿日期:2012-12-27

作者简介:杨 红(1971-),男,湖北宜都人,副教授,博士.研究方向:新型高效过程装备技术.

本研究采用常用的四叶桨搅拌器,分直叶和 $45^\circ$ 斜叶两种桨型,桨叶上的开孔位置分为三种,按照与搅拌轴的距离分为近端、中间和远端,以远端开孔为基准,每次向中心轴靠近 20 mm. 使用 Solidworks 建立的直叶远端开孔搅拌器的三维模型如图 1 所示,开孔的基本几何尺寸如图 2 所示. 按照以上的基本尺寸与特征,在 Fluent 前处理软件 Gambit 中进行建模及网格划分等操作.

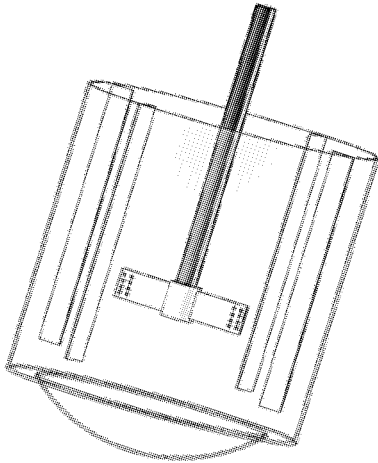


图 1 直叶远端开孔搅拌器模型

Fig. 1 Straight impeller distal type model

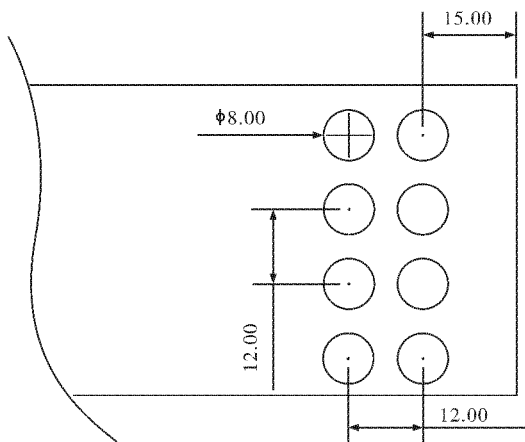


图 2 远端开孔基本尺寸

Fig. 2 Distal opening basic size

## 1.2 CFD 模型建立

搅拌釜数值模拟中的网格划分及边界条件定义等方法借助于已有的研究成果<sup>[5-8]</sup>. 该模型在前处理软件 Gambit 进行建模,运用布尔运算将整个搅拌釜划分成动区域和静区域两个区域:靠近搅拌桨的圆柱区域(近桨区)为动区域,其余部分为静区域. 通过 Gambit 采用非结构化网格将两个区域分别进行网格划分,给定不同的网格大小,得到不同的网格密度,以便于在 FLUENT 中进行求解计算. 以直叶远端开孔为例,网格划分结果如图 3 所示,可以很直观的看出动区域和静区域,为取得更加精确

的计算结果,在近桨区采用较为密集的网格.

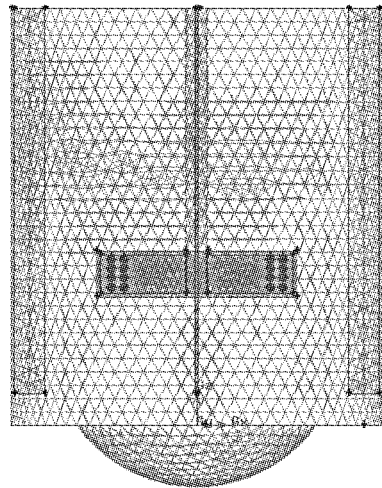


图 3 直叶桨远端开孔搅拌槽网格划分

Fig. 3 Mesh generation of straight agitator distal type

搅拌釜的数值模拟目前大多采用定常模式,选择  $k-\epsilon$  湍流模型,定义动静区域内介质为水. 由于水的密度相对较大,不可忽略重力作用,因此给予  $9.81 \text{ m/s}^2$  的重力加速度. 将动区域定义为 MFR(Moving Reference Frame),给予对应的速度,处在动区域的搅拌器给以相对速度为 0;静区域不给定初始速度;处在静区域的搅拌轴以与动区域对应的转速作为初始速度;在动区域与静区域之间采用 3 对交界面;压力与速度耦合使用 SIMPLE 算法,一阶迎风格式进行计算<sup>[9-11]</sup>. 这样的边界条件定义方式可以使得搅拌釜内的初始条件更加接近实际情况.

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 搅拌流场分析

通过以上提到的网格划分及定义方法得出八种搅拌器在四种速度下的计算结果,八种搅拌器分别为四种直叶搅拌器—直叶无孔搅拌器、直叶近端开孔搅拌器、直叶中间开孔搅拌器和直叶远端开孔搅拌器以及以此类推的四种斜叶搅拌器. 以斜叶无孔及斜叶近端开孔为例,图 4、图 5 分别是两种搅拌器在 200 r/min 转速下的搅拌槽纵截面的速度矢量图.

对比图 4~5,从速度范围可知:开孔搅拌器的最大速度明显大于无孔搅拌器;在动区域,从速度矢量截面图来看,近端开孔搅拌器速度的密集度比无孔的大,开孔搅拌器的涡流强度比无孔搅拌器的强;在静区域,开孔搅拌器的涡流强度明显大于无孔的搅拌器,并且回流趋势也比无孔搅拌器明显.

### 2.2 功率特性分析

通过 Fluent 的后处理可以得到扭矩,因此可以通过下面的公式将扭矩与功率进行转化;功率

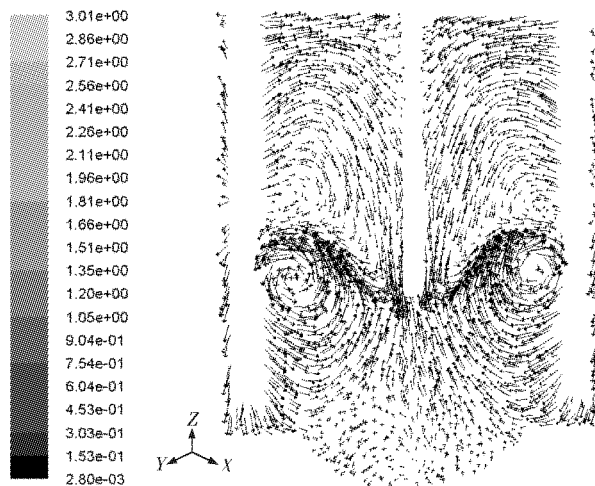


图4 斜叶近端开孔搅拌器纵截面矢量图

Fig. 4 Longitudinal vector diagram of oblique leaf near type punched impeller

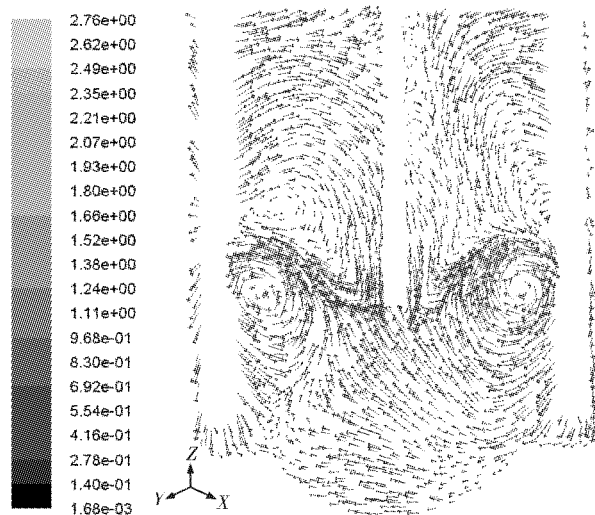


图5 斜叶无孔搅拌器纵截面矢量图

Fig. 5 Longitudinal vector diagram of oblique leaf impeller without hole

计算公式为

$$P = M\omega = \frac{\pi n M}{30} \quad (1)$$

式(1)中: $M$ 表示扭矩,单位: $N \cdot m$ ;  $\omega$ 表示角速度,单位: $rad/s$ ;  $n$ 表示转速,单位: $r/min$ 。

由公式(1)可知,若在同一搅拌槽且两个搅拌器在同一转速下,功率大小与扭矩大小成正比,即在特定转速下,扭矩决定功率大小。由于比较的是相同速度下不同搅拌器的功率之间的大小关系,因此只需比较相同速度下各搅拌器的扭矩大小即可。在数值模拟过程中,模拟了直叶无孔、斜叶无孔、直叶近端开孔和斜叶近端开孔等八种搅拌器在四组速度下的流场,通过 Fluent 的 Report 功能得到的搅拌器各转速下的扭矩,然后计算出各搅拌器在对应转速下功率,并绘出如图 6 所示的功率消耗与速度曲线。

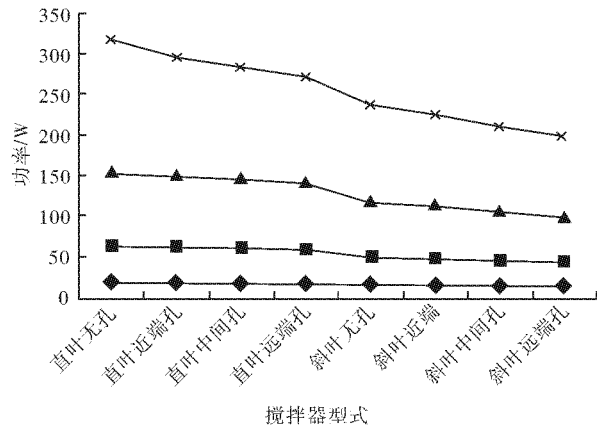


图6 各搅拌器的功率消耗与速度曲线图

Fig. 6 Power consumption and speed curve of all impellers

注:  $\times$ —300 r/min;  $\triangle$ —250 r/min;  $\square$ —200 r/min;  $\diamond$ —150 r/min

从图 6 中可以发现,斜叶搅拌桨的功率明显小于直叶搅拌桨;当转速小于 300 r/min 时,转速越大,节省功率效果越明显;相同转速下,功率大小随着桨叶形式和开孔位置变化;功率最大的是直叶无孔搅拌器,最小的是斜叶远端开孔搅拌器;对于同一类型的搅拌器而言,无孔搅拌器的功率最大,而远端开孔的搅拌器扭矩最小,并且功率随着开孔位置与搅拌轴的距离的增大而减小。

### 3 结 语

以上针对常用的四叶桨式搅拌器,分直叶和 45°斜叶两种桨型,在桨叶上按照与搅拌轴的距离分近端、中端和远端进行开孔,在液-液相条件下对相应搅拌槽进行了数值模拟。模拟结果分析可得出以下结论:

(1)斜叶桨与直叶桨相比能明显降低能耗,获得更佳的搅拌流型。

(2)相同条件下,桨叶开孔的穿流型搅拌器与普通搅拌器比较,在更低的功耗下,可获得更大的速度梯度和更明显的涡流效应,有效地强化搅拌。

(3)相同的开孔尺寸及开孔率条件下,开孔位置离搅拌轴越远,功耗下降越明显,且在模拟范围内(300 r/min),搅拌转速越高,效果越明显。

数值模拟结果与相关理论分析及实际使用情况一致,表明穿流型搅拌器有较好的综合性能,是一种加工方便,使用效率高,值得大力推广的新型搅拌器。

### 致谢

衷心感谢武汉工程大学机电工程学院搅拌实验室提供的相关实验数据,同时也感谢中国五环工程有限公司的张远新参入数值模拟及相关工作。

**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.
- [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.
- [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.
- [4] 赵清华,梁玉祥. 穿流式搅拌桨在水一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.
- [5] 邹晨,谢明辉,周国忠,等. 穿流式搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 机械设计与制造,2012(4):239-241.
- [6] 周志忠,施力田,王英琛,等. 搅拌槽内近浆区流动场的数值研究[J]. 高校化学工程学报,2002,16(1):17-21.
- [7] 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,2004.
- [8] 雷 晶. 基于 FLUENT 软件搅拌器的流体模拟[J]. 油气田地地面工程,2010,29(8):25-26.
- [9] 杨红,张远新,王呈祥,等. 涡轮搅拌器搅拌特性数值模拟与实验研究[J]. 装备制造技术,2012(3):1-3.
- [10] 董厚生,魏化中,舒安庆. 磷酸反应槽内临界离底悬浮转速的 CFD 模拟[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(10):86-89.
- [11] 刘玉华,喻九阳,郑小涛. 气-气混合器的三维流场数值模拟[J]. 武汉工程大学学报,2008,30(2):108-110.

## Numerical simulation of hole position of punched impeller

**YANG Hong, WANG Cheng-xiang, XIAO Zhen**

(Mechanical and Electrical Engineering School, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To further reduce energy consumption and explore the hole position effect on the mixing of punched impeller, numerical simulation was taken with eight kinds of different hole position punched impellers about mixing flow field and power characteristics under the same hole size and opening rate in the liquid-liquid conditions tank. In simulation process, holes position were classified into three types of near end, middle end and distal end with holes uniform distribution on corresponding position; the shaft, agitator and surrounding area were set to be the moving area and the residual area were static area by simplified treatment of model based on tetrahedral mesh of the model grid. The standard k-ε turbulence model of numerical simulation method and moving reference frame were used to solve steady-state mixing flow field. It is found that, compared with normal impeller, punched impeller reaches greater velocity gradient, more obvious eddy current and strengthen stirring of tank. The lowest power consumption is reached by choosing the punched impeller of distal type. The obvious effect of power consumption is reached by increasing the distance of hole and axis, meanwhile, the higher of mixing speed, and the more obvious of the effect at certain speed range.

**Key words:** punched impeller; torsional moment; stirring enhances

本文编辑:陈小平