

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.004

反应釜内搅拌混合特性研究

张云电, 董昌帅, 储 瑞, 陈 健

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对新型搅拌器(三层旋桨式搅拌器)在反应釜中搅拌效果的问题,运用了计算流体力学(CFD)的方法,以工业上常用的框式搅拌器作为对比试验对象,对这两种搅拌器在 SolidWorks 软件中进行了三维建模,然后将建好的模型导入 Fluent 软件中进行了流场仿真分析。数据后处理应用 Tecplot 和 Excel 软件,从 Fluent 数据中提取出了两种搅拌器所形成的流场、有机溶液分布云图和选定横截面的有机溶液的体积分数,从这些数据中分析研究了新型搅拌器在反应釜中的搅拌混合效果。研究结果表明:新型搅拌器所形成的轴向混合流场比框式搅拌器形成的轴向循环流场更为科学,搅拌效果更好,而且新型搅拌器搅拌后的有机溶液分布更为均匀。

关键词: 计算流体力学; 流场; 体积分数; 混合

中图分类号: TH122; TS914.24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1101-05

Study on mixing characteristics in reactor

ZHANG Yun-dian, DONG Chang-shuai, CHU Rui, CHEN Jian

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of stirring effect of a new agitator (three-layer propeller agitator) in reactor, the grid agitator was used as the comparative test object in the method of computational fluid dynamics. The two agitators was modeled in SolidWorks software, and then the built model was imported into Fluent software for flow field simulation analysis. The Tecplot and Excel software were used in data post processing. From the analysis result data, these were found that the flow field, the organic solution distribution cloud diagram and the volume fraction of the organic solution of the selected cross-section. From these data, the mixing effect of the new stirrer in the reactor was studied. The results indicate that the axial mixing flow field formed by the new type of agitator is more scientific and the stirring effect is better than grid agitator. In addition, the distribution of the organic solution of the new agitator is more uniform.

Key words: computational fluid dynamic; flow field; volume fraction; mixing

0 引 言

搪瓷玻璃是一种稳定的材质,可应用于强酸、强碱和强腐蚀的工作环境中,在化工和生物制药等行业应用广泛。目前,我国只有框式、锚式、旋桨式和叶轮式的搅拌器实现了工业应用^[1],由于科学技术的不断更新,这些类型已经不能满足新工艺的要求。传统的搅拌器研发方法是通过小规模实验,观测搅拌槽内的宏观流动特性^[2],这种方式不仅需要大量的人力、物力,同时也需

要大量的前人经验,而且由于混合体系的多样性和物料的随机性,不能准确测定其搅拌槽内真实的流场情况,难以对搅拌器的性能做出准确分析^[3]。自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术高速发展和流体力学理论体系地逐渐完善,出现了一种全新的方法——计算流体力学(CFD),来研究搅拌器的搅拌混合特征^[4]。

CFD 软件可以模拟多种搅拌器在不同环境下的流场情况^[5-7],减少搅拌器的研发周期,准确描述搅拌器所形成的流场。

收稿日期: 2017-02-21

作者简介: 张云电(1956-),男,安徽淮南人,博士,教授,主要从事精密加工和特种制造方面的研究。E-mail: zzydd@hdu.edu.cn

本文将针对新型搅拌器（三层旋桨式搅拌器）在反应釜中搅拌效果的问题，运用计算流体力学的方法，以工业上常用的框式搅拌器作为对比试验对象，对这两种搅拌器在 SolidWorks 软件中进行三维建模，然后将建好的模型导入 Fluent 软件中进行流场仿真分析。

1 湍流模型

本文主要研究的是在不同的桨型下两种液体在反应釜内的混合特征，通过数值模拟来比较两种桨型下两种液体的混合程度。由于在反应釜内形成的是湍流，所以必须用湍流的相关理论来研究反应釜内的流场情况，处理湍流最准确的方法是直接数值求解。由于湍流的复杂性，需要建立的方程太多，且需要的计算机运算速度很高，目前仅适用于小型设备的低雷诺数的数值研究。

近 100 年来，为了简化数学模型，湍流学者提出了各种各样的湍流模式，这些模式总结起来分为两大类，一个是基于 Boussinesq 假设的涡粘模式，另一个是 Reynolds 应力模式^[8]。本次数值模拟研究采用的是涡粘模式中的 RNG K- ε 模型，计算工具是 Fluent 软件，数值解法是有限容积法^[9-10]。在建立数学模型时，假设两种混合的流体为不可压缩的牛顿流体，没有发生化学反应，没有发生热效应，忽略气穴对混合产生的影响。

在涡粘模式中，避免了直接求解 Reynolds 应力算式，引入了湍流粘度，使计算的关键从 Reynolds 应力过渡到湍流粘度。湍流粘度和 Reynolds 应力及平均速度相关：

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (1)$$

式中： μ_t —湍流粘度； μ_i —时均速度； k —湍流动能。

湍流动能表达式为：

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2)$$

确定 μ_t 时，根据方程数目的不同分为零方程、一方程和两方程模型。根据本次模拟需要，这里选取了两方程中的 RNG K- ε 模型。下面是关于 k 和 ε 两个未知量的 RNG K- ε 运输方程：

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

式中： G_k —由于平均速度梯度引起的湍动能； G_b —由

于浮力所引起的湍流动能产生项； Y_M —可压湍流中脉动膨胀的贡献； α_k ， α_ε —湍流动能和耗散率的有效湍流普朗特数的倒数。

湍流运输方程中关于耗散率 ε 方程右边的 R 可表示为：

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (5)$$

其中： $\eta = Sk/\varepsilon$ ； $\eta_0 = 4.38$ ， $\beta = 0.012$ ， $C_\mu = 0.0845$ 。

将 R 的表达式代入耗散率运输方程可得：

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中：

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} ;$$

在 RNG K- ε 模型中其他参数： $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ ， $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ ， $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$ 。

2 搅拌反应器建模与条件设置

2.1 搅拌器和反应釜三维模型

搅拌器与反应釜如图 1 所示。

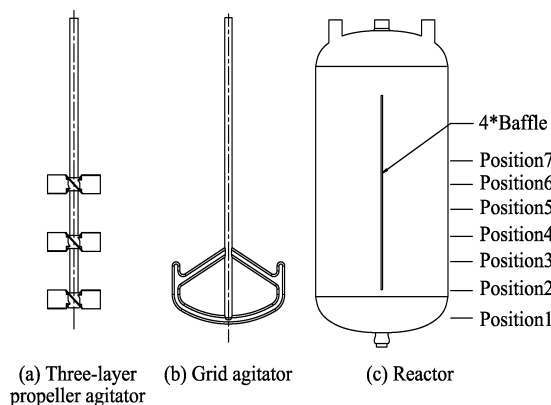


图 1 搅拌器与反应釜

本次研究的对象是三层旋桨式搅拌器和框式搅拌器，其中三层旋桨式搅拌器的桨叶直径为 800 mm，桨叶宽度为 360 mm，桨叶厚为 12 mm，桨叶与垂直于轴的面夹角为 45°，每层有 4 片桨叶均匀分布在搅拌轴上，共 3 层，相邻旋桨层之间的距离均为 800 mm，轴长为 4 000 mm，轴径为 125 mm，其三维图如图 1 (a) 所示。

框型搅拌器的搅拌框截面为 115 mm×60 mm，旋转

轴长 4 200 mm, 轴直径为 110 mm, 最大旋转直径为 1 700 mm, 框式搅拌器三维图如图 1 (b) 所示。

反应釜内径为 2 000 mm, 总高度为 4 200 mm, 根据工程的具体要求, 在旋桨式反应釜内壁设有相互垂直的 4 个挡板 2 700 mm×200 mm×20 mm, 挡板底面距离反应釜底部顶点距离为 800 mm, 框式反应釜内壁上无挡板, 其旋桨式反应釜如图 1 (c) 所示。

2.2 网格划分与模拟条件

本文研究的搅拌器与反应釜均是用 SolidWorks 建模, 将建好的模型导入 Gambit 中, 在 Gambit 中划分网格, 划分好网格后, 导入 Fluent 进行分析计算。在划分网格时采用结构网格与非结构网格相结合的方式, 反应釜内壁设置为固定边界条件, 液面设置为自由滑移液面。对旋转区域采用非结构网格进行划分, 其他区域采用六面体结构化网格设计, 对两种模型划分的网格如图 2 所示。



图 2 两种搅拌器的网格模型

针对本次数值模拟, 按照工厂的实际情况, 框式搅拌器的搅拌器速度设定为 50 r/min, 旋转方向为顺时针; 旋桨式搅拌器的旋转速度设定为 206 r/min, 旋转方向为顺时针。反应釜内有效搅拌液体体积为 10 000 L, 设定总液面高度为 3 200 mm, 水溶液的高度为 1 200 mm, 使有机溶液和水溶液的比例接近 2 : 1。

3 仿真结果分析

3.1 宏观流场分析

3.1.1 框式搅拌器流场分析

框式反应釜内不同位置的流场图如图 3 所示。

限于篇幅, 横切面流场图这里只选取图 1 (b) 位置 1 和 3, 纵切面流场选取经过搅拌框的纵切面 1 和与之相垂直的纵切面 2。

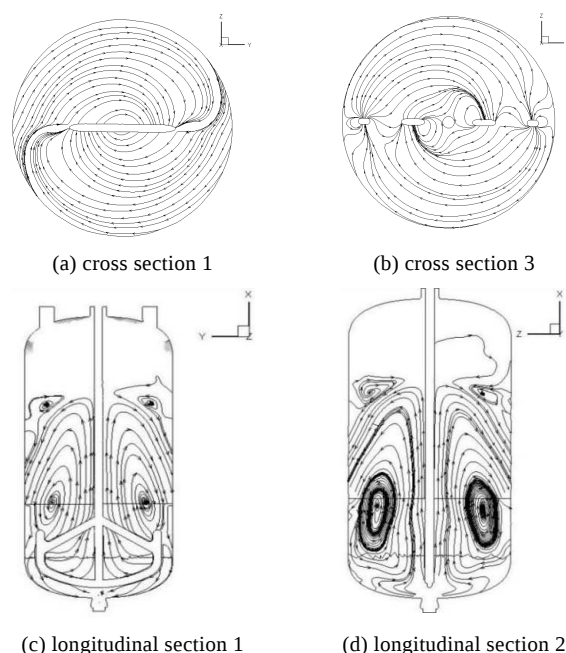


图 3 框式搅拌器流场

从横截面流场可以得出, 在横截面上流体以轴的周向流动为主, 多数横截面流场以横截面 1 为代表。从横截面 3 得出, 搅拌框有肋板的平面形成涡流。从纵切面流场图可以得出, 整个反应釜在搅拌轴与搅拌槽内壁之间形成了一个大的循环流和一个小的循环流, 液体之间的混合主要靠这两个循环流。在反应釜底部流场线很疏, 反映了液体在反应釜底部流速低, 不同液体之间交换扩散性差, 不利于液体之间的混合。

3.1.2 三层旋桨式搅拌器的宏观流场分析

三层旋桨式搅拌器反应釜内不同位置的流场图如图 4 所示。

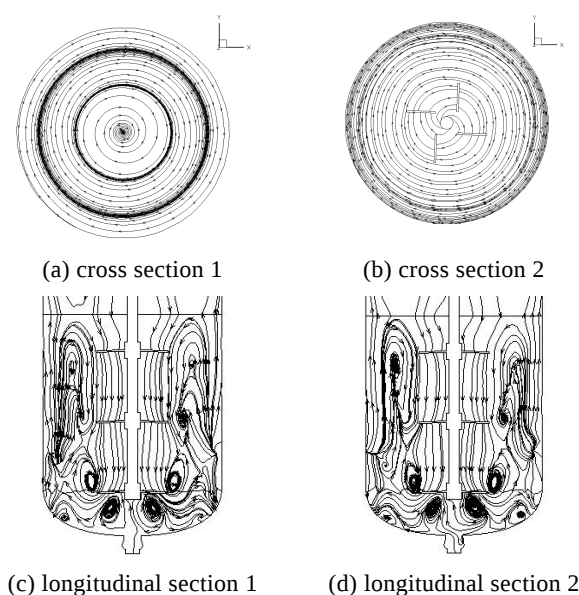


图 4 旋桨式搅拌器流场

横截面流场图选取图 1(a) 中位置 1 和 2, 纵切面流场图选取经过搅拌轴和桨叶中心线的两个相互垂直的面, 这两个面为纵切面 1 和 2。

从横截面流场图中可以看出, 液体在垂直于轴的平面上绕着搅拌轴做旋转运动, 流动形式单一。在纵切面流场图可以看出, 三层旋桨式搅拌器的上面两层桨叶尾端各形成了一个轴向的闭合流, 最下层桨叶上、下两侧各产生一个轴向的闭合流, 这是旋桨式搅拌器和反应釜内壁共同作用的结果。图 3 中纵切面 2 流场显示靠近反应釜底部边缘形成了一个小小的涡流, 这个涡流形成了一个相对封闭的区域, 在学术上称为流体死区^[11]。从整体上来看, 旋桨式搅拌在反应釜内形成的是混合型流场, 这种流场对液体之间的混合有很好的效果。

3.2 有机溶液分布云图分析

3.2.1 框式搅拌器有机物体积分数分布云图

本次模拟设置的有机溶液和水溶液的比例为 2:1, 所以在完全混合时, 在理想状态下反应釜内任何一处的微元体积中, 有机溶液占微元体积的 0.67, 在图中显示的颜色较浅且分布均匀。颜色深则代表两种液体的混合效果差, 颜色深浅不一则表示没有充分混合。

框式搅拌器有机溶液分布云图如图 5 所示。

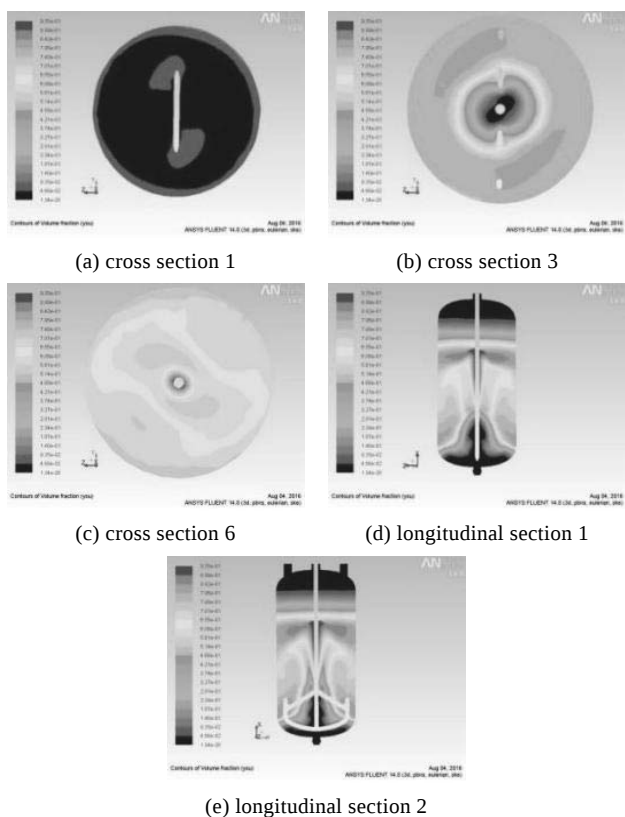


图 5 框式搅拌器有机溶液分布

横截面选取的是图 1(c) 中 1、3、6 的位置, 纵切面选取经过桨叶中间相互垂直的面。图 5(a) 显示

反应釜底部颜色比较深, 反映出反应釜底部两种溶液的混合效果不好。反应釜其余位置颜色深浅不一, 说明还没有充分混合均匀。由图 5 可知, 框式搅拌器除了在反应釜底部的搅拌混合效果差外, 其余部分的混合效果一般, 和框式搅拌器的流场分析的结果是一致的。

3.2.2 三层旋桨式搅拌器体积分数分布云图

旋桨式搅拌器有机溶液分布云图如图 6 所示。

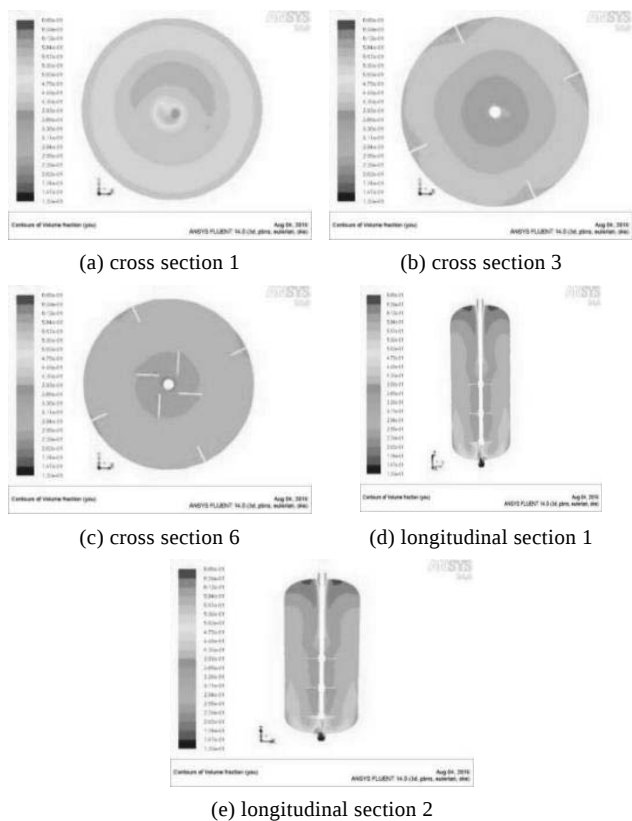


图 6 旋桨式搅拌器有机溶液分布

横截面选取的是图 1(c) 中 1、3、6 的位置。从图中可以看到, 无论是横截面还是纵切面的有机溶液分布云图, 图中颜色比较统一均匀, 表明有机溶液在反应釜内的分布比较均匀, 反映出旋桨式搅拌器在整个反应釜内混合效果好。

3.3 不同横截面节点处数据处理

此次数据处理针对图 1(c) 中的 7 个横截面, 用 Tecplot 软件提取出每个截面内节点处有机溶液体积分数^[12]。运用数理统计的原理, 计算出有机溶液在各个截面上有机溶液体积分数平均值和标准差 A, 其标准差公式为:

$$A = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{i=1}^X (n_i - \bar{n})^2} \quad (7)$$

式中: n_i —选取横截面第 i 个节点有机溶液的体积分数;
 X —选取横截面的总节点个数; $\bar{n}$ —选取横截面内所

有节点的有机溶液体积分数的平均值。

各截面有机溶液的平均体积分数越接近理想的体积分数, 表示搅拌效果越好。标准偏差 A 越小, 表示截面上节点处的有机溶液体积分数在截面平均值上下波动越小, 代表混合的效果越好。反之, 代表混合效果差。有机溶液分布的均值图如图 7 所示。

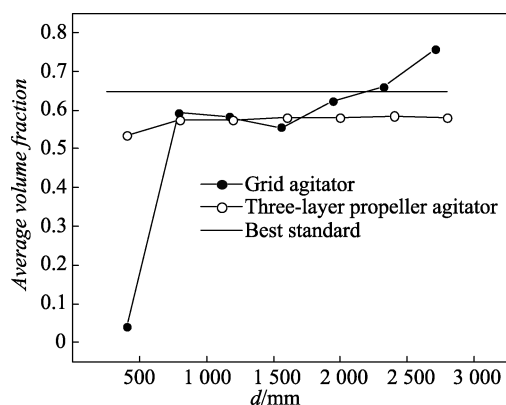


图 7 两种搅拌器在不同截面的有机溶液的平均体积分数

从图 7 中可以看出: 旋桨式搅拌器的有机溶液平均体积分数是一条近似水平的直线, 与理想的体积分数很接近。而框式搅拌器是一条变化幅度很大的折线, 尤其是在反应釜底部 800 mm 以内, 有机溶液体积占有率很低。

有机溶液分布的标准差图如图 8 所示。

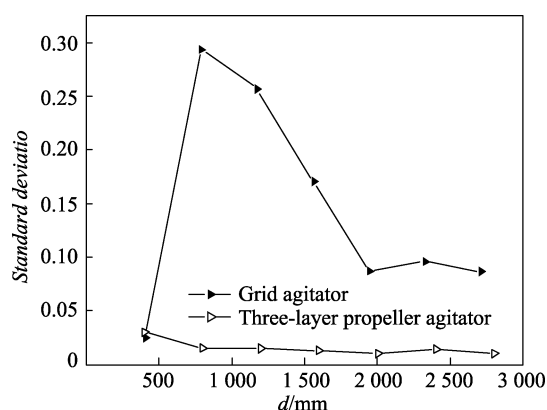


图 8 两种搅拌器在不同截面的有机溶液体积标准差

从图 8 中可以看出: 三层旋桨式搅拌器的有机溶液体积分数标准差比框式搅拌器的体积分数标准差低, 表示前者在选取的各个截面上的体积分数稳定在均值附近。结合两图可以看出三层旋桨式搅拌器的混合效果要好于框式搅拌器的混合效果, 尤其是在距离反应釜底部

500 mm 左右, 旋桨式搅拌的两种液体已经均匀分布在整個反应釜中, 而在相同的搅拌时间内框式反应釜内水溶液还有部分集中在底部, 说明框式搅拌器搅拌的速率慢, 效果差。

4 结束语

(1) 从流场分析上看, 三层旋桨式搅拌器在轴向方向上形成的混合流, 框式搅拌器在轴向方向上形成的轴向流, 而混合流比轴向流更有利于液体之间的混合;

(2) 从有机溶液体积分布云图上看, 三层旋桨式搅拌器的反应釜内有机容器分布比较均匀, 而框式搅拌器反应釜的底部有机溶液分布很少;

(3) 从对每个节点的统计分析上看, 三层旋桨式搅拌器的反应釜内有机溶液分布更均匀, 混合效果较好。

此次模拟准确度虽然需要工厂的实验来进一步证明, 但是其展现的规律和趋势是值得借鉴的, 为进一步研究搅拌桨的混合性能提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 梁瑛娜, 高殿荣. 双层直斜叶及其组合桨搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 290-297.
- [2] 杨红, 张远新, 王程祥, 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.
- [3] 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: 烟台大学机电汽车工程学院, 2011.
- [4] 周国忠, 王英琛, 施力田. 用 CFD 研究搅拌槽内的混合过程[J]. 化工学报, 2003, 54(7): 886-890.
- [5] 王睿. 四种搅拌器放大技术的实验研究与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2007.
- [6] 华依青. 搅拌器在化工单元设备中的选用[J]. 化工设计, 2004, 14(6): 10-14.
- [7] 郎涛, 施卫东, 陈刻强, 等. 带有前置搅拌装置污水泵的流动特性研究[J]. 流体机械, 2015, 43(11): 29-33.
- [8] 高歌, 闫文辉, 吴俊宏, 等. 计算流体力学——典型算法与案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [9] 唐学林, 余欣, 任松长. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M]. 济南: 黄河水利出版社, 2006.
- [10] 付强, 魏岗, 关晖, 等. 高等流体力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014.
- [11] 周本浩. 大双叶片搪玻璃搅拌器的实验研究与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2006.
- [12] 张凯, 王瑞金, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

张云电, 董昌帅, 储瑞, 等. 反应釜内搅拌混合特性研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1101-1105.

ZHANG Yun-dian, DONG Chang-shuai, CHU Rui, et al. Study on mixing characteristics in reactor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1101-1105.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>