

# 搅拌槽内流体力学特性的数值模拟研究

魏文礼, 李盼盼, 吕彬, 刘玉玲

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 采用 FLUENT6.3.26 软件求解气液两相流, 自由液面的捕捉采用 VOF (volume of fluid) 法, 辅以标准  $k-\varepsilon$  湍流模型数值求解气液两相流时均方程, 使用了半隐式 SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations) 算法求解速度与压力耦合方程组, 旨在研究搅拌槽在搅拌过程中流体流动的力学特性, 分析比较了不同水深处的水流沿半径方向的径向速度、切向速度及轴向速度的规律, 经过研究和分析发现模拟的速度值与实验值吻合良好, 为搅拌槽的设计和运行提供了参考。

**关键词:** 搅拌槽; 半隐式算法; 数值模拟; 径向速度; 切向速度; 轴向速度

中图分类号: O351

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0148-04

## Numerical simulation of hydraulic characteristics in a stirred tank

WEI Wenli, Li Panpan, LÜ Bin, LIU Yuling

(Key Laboratory of Ecological Water Conservancy Project in Northwest Arid Region of Shaanxi, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

**Abstract:** The paper used FLUENT6.3.26 to solve gas - liquid two - phase flow. The VOF (Volume of fluid) method was applied to track free surface. The gas - liquid two - phase time - averaged equation was numerically solved with standard  $k-\varepsilon$  turbulence model. The coupling velocity and pressure equation was solved with SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations) algorithm so as to study the mechanical properties of fluid flow in stirred tank during the mixing process, and compare the law of radial, tangential, and axial velocities along radius of water flow at different water depths. Result showed that the speed values of simulated and measured are in good agreement which can provide a reference for the design and operation of stirred tank.

**Key words:** stirred tank; SIMPLE; numerical simulation; radial velocity; tangential velocity; axial velocity

多叶轮的搅拌反应器广泛应用于生物、化学、食品等工业过程, 反应器内流场变化的研究对提高搅拌效率、优化反应器体型设计、节约搅拌成本等都具有重要的影响。

国内外学者近年来对搅拌槽也有很多研究成果<sup>[1-2]</sup>, 张翠勋等<sup>[3]</sup>为增强搅拌槽内流体的流动特性, 设计了一种半圆管形挡板, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型和多重参考系法对其内部湍流流场进行研究。通过与实验结果的比较, 验证了所建模型和模拟方法的可靠性, 并对搅拌槽内的流场、速度和湍动能分布及功率消耗进行分析, 并与标准搅拌槽进行对比。结果表明半圆管挡板能提高流体速度分布的均匀程度, 增大流体的轴向和切向速度以及湍动能, 而且功

率消耗略降低约 5%, 具有一定的节能功效。钱皎龙等<sup>[4-5]</sup>运用 Fluent 软件, 采用多重参考系法 (MRF) 和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟沉淀搅拌槽的实际流动情况, 分析了不同搅拌转速对三维流场的影响, 对其宏观流动特性、时均速度和搅拌功率进行详细的分析对比, 给出了最佳的搅拌转速。并分析了桨叶离底高度对三维流场的影响, 进而利用模拟出的数据计算出搅拌轴的功率。结果表明: 提高搅拌桨离底高度, 有利于提高混合效果。赵小英等<sup>[6]</sup>针对固 - 液 - 固三相流混合物料, 运用 Fluent 流体分析软件, 采用 Eulerian 多相流模型、RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行数值模拟, 分析三斜叶 - 三辅助 L 桨搅拌结构作用下立式搅拌槽内的流场分布规律以及搅拌

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578452); 陕西省工业科技攻关项目 (2016GY-180); 陕西省科学研究计划项目 (2014K15-03-05)

作者简介: 魏文礼 (1965-), 男, 陕西大荔人, 教授, 博士, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

桨的应力分布情况。结果表明:与常规斜叶式搅拌桨相比,改进后的三斜叶-三辅助 L 桨搅拌结构更有利于提高多相流平均速度,优化混合物均匀程度,改善槽底或槽壁的搅拌死角。而姜昊昱等<sup>[7]</sup>则采用 CFD 软件对六直叶圆盘涡轮桨搅拌槽内的气、液、固三相流动状态进行了数值模拟,具体从桨叶安装高度进行细致的数值分析,得出能够获得槽内良好固液悬浮性能下的最优化结构,并和标准搅拌槽进行了对比。刘玉玲等<sup>[8]</sup>分别利用气液两相大涡模型和标准  $k-\varepsilon$  紊流模型,结合多参考系法进行了模拟计算,比较两种模型表明:叶片旋转区域紊流各向异性随着转速的增加而明显加强;基于各向同性假设的标准  $k-\varepsilon$  紊流模型不能描述流体流速的波动变化,而大涡模拟能够捕捉叶片附近区域流场的分布规律;在通气率一定的情况下,转轮转速的大小对下叶轮附近区域的含气率影响较小,而对上叶轮附近区域含气率的影响较大。杨锋苓等<sup>[9]</sup>采用数值模拟和实验结合的方法研究了无挡板搅拌槽内的湍流流场,发现数值模拟与实验的结果吻合良好。曹乔乔等<sup>[10]</sup>利用 CFD 技术对新型旋流式鼓泡的流场进行了模拟,考察了不同入口气速为 2,3,4,5 m/s 时对鼓泡塔内流场特性的影响,并对其速度云图,速度矢量图及液体体积分数图进行了分析。研究发现:当入口气速为 4 m/s 时,搅拌槽内的混合效果较好。其他学者<sup>[11-12]</sup>对搅拌槽内的气-液-固三相流场也进行了不同方面的深入研究。

本研究采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型封闭时均方程结合 VOF 法捕捉水面,模拟了六叶轮搅拌反应器内的气液两相流,分析搅拌器附近轴向、切向、径向的速度分布规律,为搅拌反应器的设计运行提供了参考。

## 1 数学模型

### 1.1 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型

标准  $k-\varepsilon$  湍流模型广泛应用于各种流场模拟中,有较高的经济性、稳定性和计算精度。标准  $k-\varepsilon$  模型是从实验中总结得出的半经验公式,主要基于紊流动能  $k$  和紊动能耗散率  $\varepsilon$ ,它是目前工程流场计算中使用最广泛的紊流模型<sup>[13-14]</sup>。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $u_i$  为沿  $i$  ( $i$  为笛氏坐标  $x, y$  或  $z$ ) 方向的速度分量;  $x_i$  为沿  $i$  方向的空间坐标分量。

雷诺时均方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i \quad (2)$$

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

紊流动能  $k$  和紊动能耗散率  $\varepsilon$  是两个基本未知量,方程分别为:

$k$  方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:  $u_i, u_j$  分别为  $i, j$  方向的时均速度分量;  $x_i, x_j$  分别是沿  $i, j$  方向的坐标分量;  $p$  为压强;  $\mu$  为分子黏性系数;  $u_i', u_j'$  分别为  $i, j$  方向的脉动速度;  $g_i$  为  $i$  方向的重力加速度;  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $\mu_t$  为湍动黏度;  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为紊动能耗散率;  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 函数:  $\delta_{ij} = 1, (i = j)$ ;  $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。

经验常数  $C_\mu = 0.09$ ;  $G_k$  是因平均梯度影响湍动能  $k$  的产生项;  $G_b$  为浮力作用引起的紊动能产生项;  $Y_M$  为可压缩的湍流脉动因膨胀而产生的对总耗散率的影响。  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  为经验常数,分别为 1.44, 1.92 和 0.09;  $\sigma_k = 1.0$  和  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  分别为与湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数。

### 1.2 模拟自由水面的 VOF 法

VOF 方法的基本原理<sup>[15]</sup>是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数  $F_w(t, x_i)$  来确定自由面 ( $i = 1, 2, 3$ ),追踪流体的变化而非追踪自由液面上质点的运动:  $F_w(x_i, t) = 1$ ,则表示该单元被液体充满;当  $F_w(x_i, t) = 0$ ,则表示它是一个空单元;若  $F_w(x_i, t) \in (0, 1)$ ,则表示该单元部分充满液体。

描述  $F_w$  的控制方程为:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \frac{\partial(u_i F_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

引入 VOF 后,  $\rho, \mu$  是  $F_w(t, x_i)$  的函数,其表示式为:

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \quad (7)$$

$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \tag{8}$$

式中： $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和空气的密度； $\mu_w$  和  $\mu_a$  分别为水和空气的分子黏性系数。

将上述方程(6)、(7)和(8)与紊流数学模型基本方程(1)至(5)根据实际工况施加相应的边界条件后,就可得到相应各未知变量,如压力、流速、紊动能、紊动耗散率以及水体体积率函数等的分布。

2 数值模拟

2.1 计算模型

本研究用 Murthy B N<sup>[16]</sup> 在 2008 年做的一个有关搅拌系统的流场结构测试的物理实验来作为物理模型。物理模型主要参数如下:搅拌系统的直径为  $D = 0.3\text{ m}$ ,叶轮的直径为  $0.1\text{ m}$ ,叶轮的安装高度为  $0.1\text{ m}$ ,搅拌系统内的水深为  $H = 0.3\text{ m}$ ,模型总高为  $0.4\text{ m}$ ,叶轮的转速为  $4.5\text{ rps}$ (顺时针转动)。如图 1 所示。

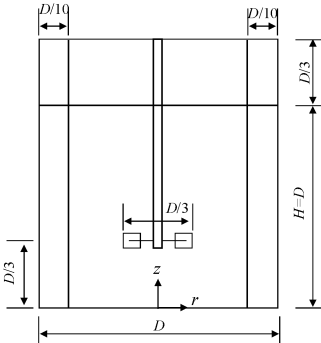


图 1 模型截面尺寸图

2.2 网格划分

在网格划分时为了提高网格质量,将叶轮及导流板均当作 0 厚度处理,计算模型的总网格数为 220 800,模型的三维区域图如图 2 示,网格图如图 3 示,图示网格为了显示清楚将  $z$  方向及  $r$  方向的网格节点数均变为实际网格节点的 1/2。

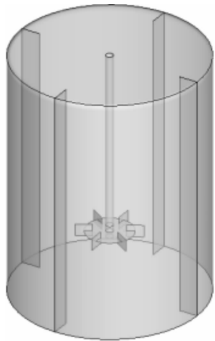


图 2 计算区域图

2.3 边界条件及求解方法

自由水面的捕捉采用 VOF 法,紊流模型采用标准  $k - \varepsilon$  模型,叶轮数学模型采用多参考系模型。在计算时顶面为压力边界,相对压强为 0,在壁面处采用壁面函数。初始时给搅拌系统中充水水深为  $0.3\text{ m}$ 。计算所采用时间步长为  $0.005\text{ s}$ ,计算总时间为  $9\text{ s}$ ,此时残差曲线都降至  $10^{-5}$  以下,认为计算收敛。

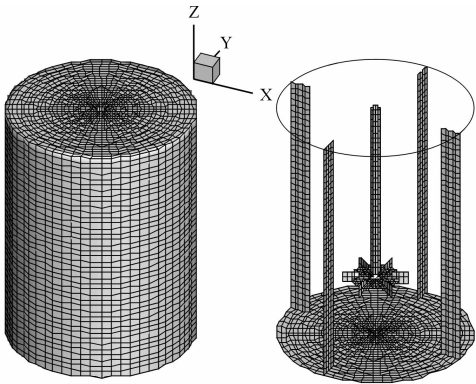


图 3 计算区域网格图

本研究采用 Fluent 6.3.26 计算流体力学软件,求解的基本方程为 N - S 方程,并采用有限体积法对方程进行离散。在对流场结构模拟及优化过程中紊流数学模型采用 Standard  $k - \varepsilon$  模型、多相流模型采用 VOF 模型、转轮的数学模型采用多参考系模型。

3 结果分析与讨论

将计算结果与实验结果进行比较:主要比较不同水深处的水流沿半径  $r$  方向的径向速度( $u_1$ )、切向速度( $u_2$ )及轴向速度( $u_3$ )。在比较中将  $u_i (i = 1、2、3)$  用叶轮的叶片端部速度  $U_{ip}$  无量纲化,将半径  $r$  用搅拌系统的半径  $R$  无量纲化。比较水深为:  $z = 0.044\text{ m}$ 、 $z = 0.100\text{ m}$ 、 $z = 0.154\text{ m}$ 、 $z = 0.244\text{ m}$  断面上沿径向测线的速度分布。图 4 显示了径向速度的比较结果,图 5 显示了切向速度的比较结果,图 6 显示了轴向速度的比较结果。

3.1 径向速度比较分析

由径向速度的比较结果图 4 可以看出,在靠近搅拌罐的底部( $z = 0.044\text{ m}$ ),模拟值与实验值吻合度较好,并且此处径向流速为负值,即在径向方向水流由四周向中心流动,这主要是由于转轮的转动对其下部水体的卷吸作用所致。在转轮中心位置附近一定区域内( $z$  为  $0.100、0.154\text{ m}$ ),除转轮中心位置  $z = 0.100\text{ m}$  处靠近转轮处的模拟值与实验值的吻合度较差外,其余位置处模拟值与实验值的吻合都较好,并且在此区域中在  $r/R < 0.5$  处,径向流速值很小且

出现正负交替现象,在  $r/R > 0.5$  处,径向速度为正。在靠近水面处的一定区域内( $z$  为 0.154、0.244 m),

径向流速以负流速为主,在此区域中靠近搅拌槽顶面模拟结果与实验结果之间的误差较大。

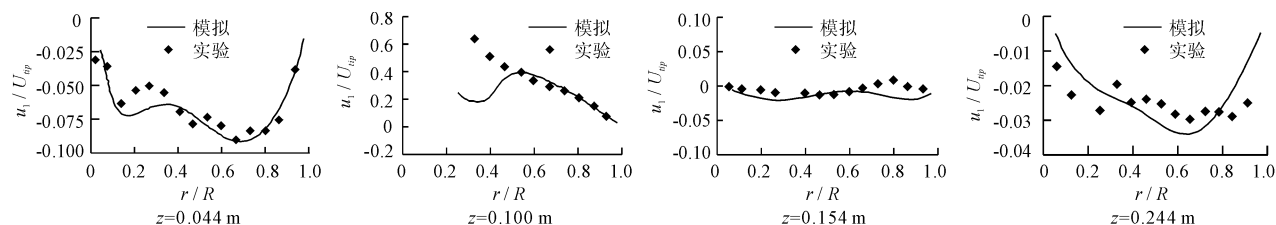


图4 径向速度比较

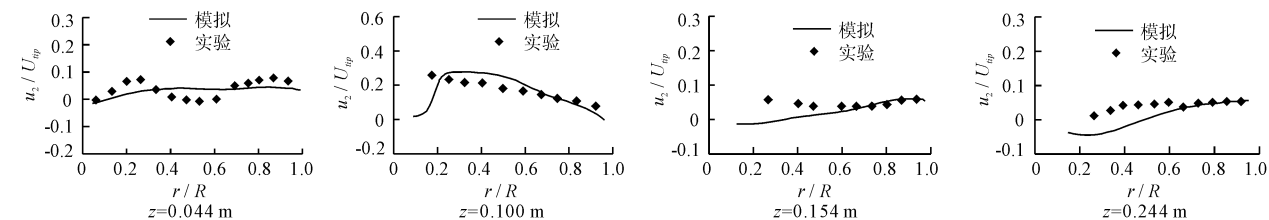


图5 切向速度比较

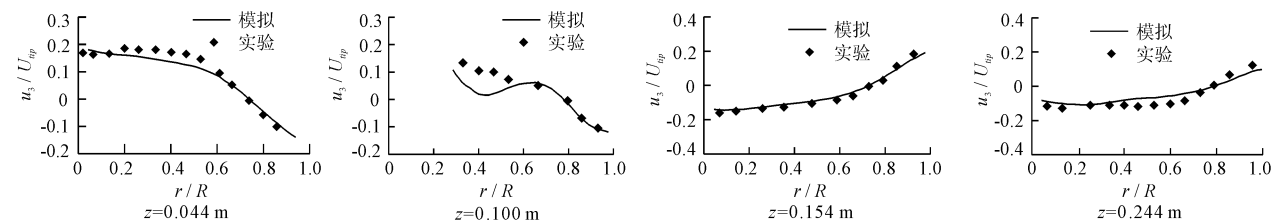


图6 轴向速度比较

### 3.2 切向速度比较分析

由切向流速的比较结果图5可见,当  $r/R > 0.6$  时,模拟结果与实验结果的吻合度较好。当  $r/R < 0.6$  时两者稍有偏差,这主要是由于在转轮及其附近区域内流场结构本来就很复杂,实验数据的提取比其他区域更容易产生误差,并且转轮的数学模型是将其实际运行情况作了适当的简化后的结果,所以在对切向流速进行模拟时,才会在靠近转轮区域出现偏差。

### 3.3 轴向速度比较分析

由轴向流速的比较结果图6可见,轴向速度模拟值与实验值的吻合度整体较好。并且轴向速度在沿径向测线出现了正负交替的分布现象。在转轮的安装位置  $z = 0.100$  m 之下在靠近中心轴处轴向速度为正,而在靠近搅拌罐的外壁面处轴向速度为负。在转轮的安装位置  $z = 0.100$  m 之上,在靠近中心轴处的轴向流速却为负,而在靠近搅拌罐外壁面处轴向速度为正。这说明在转轮附近的一定区域内,在立面上转轮上下方各存在一个漩涡,并且漩涡的方向是相反的。

## 4 结 论

速度模拟结果与实验结果的吻合度整体较好,说明本文所选的数学模型对于转轮附近流场结构的模拟是可靠的。通过对轴向速度的分析发现在转轮附近的一定区域内,即:在转轮上下方各存在一个漩涡,并且漩涡的方向是相反的。该数学模型对搅拌槽反应器的优化设计和高效运行的研究提供了一个有效手段。

### 参考文献:

- [1] Shi Dai'en, Cai Ziqi, Eaglesham A, et al. Effects of bubbly flow on bending moment acting on the shaft of a gas sparged vessel stirred by a Rushton turbine[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(3): 482-489.
- [2] Bao Yuyun, Yang Jie, Wang Bingjie, et al. Influence of impeller diameter on local gas dispersion properties in a sparged multi-impeller stirred tank[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015(23): 615-622.
- [3] 张翠勋, 杨锋琴, 连继咏. 半圆管挡板搅拌槽内的湍流流场[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(1): 76-81.

- [5] Hurst C, Reeves E. An economic analysis of Ireland's first public private partnership[J]. The International Journal of Public Sector Management, 2004, 17(5): 379 - 388.
- [6] 柯永建, 王守清, 陈炳泉. 英法海峡隧道的失败对 PPP 项目风险分担的启示[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 97 - 102.
- [7] Ernest E A, Albert P C C. Identifying public private Partnership(PPP) risks in managing water supply projects in Ghana[J]. Journal of Facilities Management, 2013, 11(2): 152 - 182.
- [8] 杨飞雪, 黄丹林. 城市轨道交通 PPP 项目风险分担机制研究[J]. 综合运输, 2014(7): 50 - 56.
- [9] 陈通, 杜泽超, 姚德利. 基于 PPP 视角的公共项目风险因素重要性调查分析[J]. 山东社会科学, 2011(11): 127 - 130.
- [10] 邓小鹏, 李启明, 熊伟, 等. 城市基础设施建设 PPP 项目的关键风险研究[J]. 现代管理科学, 2009(12): 55 - 56 + 59.
- [11] Ahwireng - Obeng F, Mokgohlwa J P. Entrepreneurial risk allocation in public private infrastructure provision in South Africa[J]. South African Journal of Business Management, 2002, 33(4): 29 - 39.
- [12] 查京民, 林金明, 姜敬波. 基于效用理论的建设——移交项目风险分担研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(10): 28 - 31.
- [13] 廖志达, 张智慧. 基于效用理论的土地征收价格模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(6): 936 - 939.
- [14] 郑晓云, 杨晓冬, 杨晓庄, 等. 基于效用理论的公路建设项目综合评价研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007, 23(1): 120 - 123.
- [15] 穆蔚鹏. PPP 项目融资风险分担机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [16] 刘新平, 王守清. 试论 PPP 项目的风险分配原则和框架[J]. 建筑经济, 2006(2): 59 - 63.
- [17] Clifton C, Duffield C F. Improved PFI/PPP service outcomes through the integration of Alliance principles[J]. International Journal of Project Management, 2006, 24(7): 573 - 586.
- [18] Medda F. A game theory approach for the allocation of risks in transport public private partnerships[J]. International Journal of Project Management, 2007, 25(3): 213 - 218.
- [19] Mohamed Chohra, Mu Shiyu, Cheng Hu. Risks and new transformation of PPP contracts[J]. Journal of Southeast University, 2011, 27(4): 458 - 462.
- [20] 苏峻. 南水北调投资 PPP 模式值得推广[N]. 中国证券报, 2014 - 12 - 15(4).

(上接第 151 页)

- [4] 钱蛟龙, 雷泽勇, 邓健, 等. 不同搅拌转速的沉淀搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2015, 29(1): 71 - 74 + 83.
- [5] 钱蛟龙, 雷泽勇. 沉淀搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 机械工程师, 2015(3): 30 - 32.
- [6] 赵小英, 杜飞龙, 向贤礼. 基于 Fluent 的搅拌槽内多相流数值仿真及研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(7): 109 - 112.
- [7] 姜昊罡, 郝慧娣, 李忙刚, 等. 搅拌槽内桨叶安装高度的数值模拟[J]. 广东化工, 2015, 42(7): 153 - 154.
- [8] 刘玉玲, 赵小军, 魏文礼. 搅拌槽内气液流动大涡数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 381 - 386.
- [9] 杨锋苓, 周慎杰, 张翠勋. 无挡板搅拌槽内的自由表面湍流流场研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 179 - 183.
- [10] 曹乔乔, 郝惠娣, 王瑾. 旋流式鼓泡塔内部流场特性的实验模拟[J]. 当代化工, 2015(4): 815 - 817.
- [11] Li Wanbo, Geng Xingye, Bao Yuyun, et al. Micro mixing characteristics in a gas - liquid - solid stirred tank with settling particles[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(3): 461 - 470.
- [12] 舒安庆, 王敏, 魏化中, 等. 直斜错位桨搅拌槽内流场的探究[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(1): 44 - 48.
- [13] 周俊波, 刘洋, 等. FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [14] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [15] Shen Y M, Ng CO, Zheng Y H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two - equation k -  $\epsilon$  turbulence modeling[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(1): 87 - 95.
- [16] Murthy B N, Joshi J B. Assessment of standard k -  $\epsilon$ , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(22): 5468 - 5495.