

# 絮凝搅拌器内部流场特性数值模拟

王学涛, 崔宝玉, 魏德洲, 高淑玲

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在气液交界面形态对比和 LDV 试验验证基础上, 基于 CFX 侵入式实体模型, 应用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对容积为 1 L 的絮凝搅拌器内部流场特性进行了数值研究. 结果表明: 下循环区的流体运动速度和速度梯度较大; 搅拌强度增加, 速度梯度增大; 转速对叶轮附近切向速度梯度影响最大, 该区域切向速度梯度值与其他区域最大相差两个数量级; 下循环区湍流耗散率、湍流动能和涡流黏度较高; 在研究转速范围内, 转子转速对湍流动能影响相对较大, 对涡流黏度影响相对较小.

**关 键 词:** 絮凝搅拌器; 流场特性; 数值模拟; 侵入式实体模型; 速度梯度

中图分类号: TD 91

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)10-1442-05

## Numerical Simulation on Characteristics of Internal Flow Field in Flocculation Agitator

WANG Xue-tao, CUI Bao-yu, WEI De-zhou, GAO Shu-ling

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CUI Bao-yu, E-mail: cuibaoyu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the gas-liquid interface morphology comparison, LDV test verification and CFX immersed solid model, a numerical study was conducted on the characteristics of internal flow field in a 1 L flocculation agitator by using the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model. Results indicated that the velocity and its gradient are higher in the downward recirculating flow region, and the velocity gradient increases with the increase of stirring intensity. The rotational speed has larger influence on the tangential velocity gradient near the impeller, where the tangential velocity gradient is larger than that in other regions by two orders of magnitude. The turbulent dissipation rate, turbulent kinetic energy and eddy viscosity are higher in the downward circulation area. The rotational speed of impeller in the range of investigation has a larger impact on the turbulence kinetic energy, and a relatively small impact on the eddy viscosity.

**Key words:** flocculation agitator; flow field characteristics; numerical simulation; immersed solid model; velocity gradient

水处理作为矿山环境保护的重要组成部分, 对矿山可持续发展具有重要意义<sup>[1-3]</sup>. 随着絮凝理论与絮凝工艺不断成熟, 絮凝技术作为选矿厂废水处理和微细矿物颗粒团聚的重要方法之一, 广泛应用于矿泥脱水、微细粒浮选、尾矿浓密等工艺<sup>[4-7]</sup>. 为实现微细颗粒和絮凝剂的有效作用, 一般要将絮凝剂与矿浆充分混合, 从而增强絮凝效果, 而絮凝搅拌器内部三维流场特性直接影响微细颗粒间的相互作用, 同时对絮凝体结构、形态的

稳定性具有重要影响, 其内部流场特性存在可视性差、检测昂贵且难度高等缺点, 因此流场特性分布研究一直是絮凝搅拌过程研究的重点之一<sup>[8-9]</sup>.

目前絮凝搅拌器内部流场特性研究主要以单一液相模拟、简单试验测定为主. 随着计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 理论与研究手段的不断发展, CFD 被广泛应用于复杂多相流场数值模拟<sup>[10-12]</sup>, ANSYS CFX 作为 CFD 主要

仿真软件之一,其侵入式实体模型(immersed solid model)无需进行几何重构和网格重新划分,获得将单个连续流体域分割成多个非连续流体域的流体仿真结果<sup>[13]</sup>,因此本文应用该软件,采用适用范围广泛的标准  $k-\varepsilon$  湍流模型和均相自由面模型对容积为 1 L 的实验室型絮凝搅拌器内部流场特性进行了系统研究,研究结果对提高絮凝搅拌器工作性能提供一定参考依据。

## 1 模型的建立与验证

### 1.1 计算模型的建立

研究所用的絮凝搅拌器为圆柱式槽体,前倾 4 叶片式转子,其几何模型如图 1 所示,其坐标原点  $O(0,0,0)$  位于搅拌器内底面中心处。针对侵入式实体模型离散方法,应用 ICEM 分别对转子固体域和流体域进行结构网格划分,对转子叶片和流体域边界层处网格局部加密后进行网格装配体组装,其中转子网格质量高于 0.6,网格数为 789 739;流体域网格质量高于 0.9,网格数为 1 245 193。

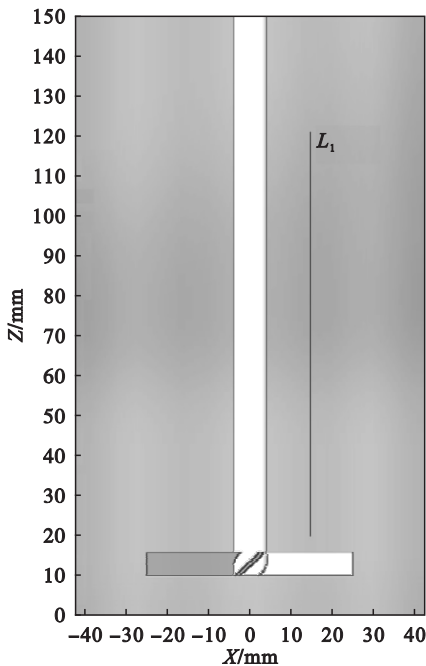


图 1 絮凝搅拌器模型

Fig. 1 Geometric model of flocculation agitator

### 1.2 数值计算方法的确定

絮凝搅拌器内部流场数值计算采用 CFX 流体计算软件,应用侵入式实体模型处理旋转域和非旋转域。在模拟计算中,CFX 求解器在浸入实体内部使用动量源的方式,强迫流体与固体一起

流动。忽略药剂和温度对搅拌过程的影响,气液两相采用标准自由液面的均相模型,气液相间表面张力系数为  $0.073 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  连续相流体湍流模型。

### 1.3 模拟条件与求解控制设定

连续相分别为 CFX 液相水和气相空气,搅拌器敞口为 Opening 边界条件,允许空气自由进出。转子部件作为侵入式实体域进行求解计算,壁面模型采用 scable 壁面函数、无滑移模型。数值计算选择高阶差分求解格式,迭代残差收敛精度为  $10^{-4}$ 。

### 1.4 模型的验证与分析

为验证所采用数值模型的可靠性,在叶轮转速为 400 r/min 时,应用 LDV 对相同结构参数的絮凝搅拌器内部气液两相流场进行了对比检测试验。选取纵截面上  $L_1(X=15 \text{ mm}, Y=0, Z=20 \sim 120 \text{ mm})$  位置为速度对比参考区,如图 1 中所示,其径向速度的 LDV 检测结果与 CFD 模拟结果对比如图 2 所示。由图 2 可知, $L_1$  参考位置的径向速度分布模拟结果与测试结果基本一致。在误差允许范围内,CFD 模拟结果总体对絮凝搅拌器内部流场特性预测具有较高的可靠性。

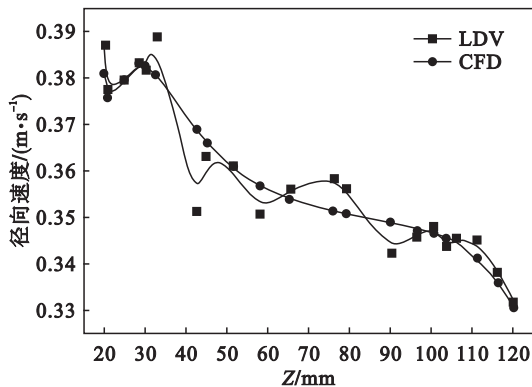


图 2 径向速度对比结果

Fig. 2 Comparison of radial velocity

为进一步验证数值模拟的可靠性,在叶轮转速分别为 150,200,360,455,600 r/min 条件下,对絮凝搅拌器内部气液自由液面形态进行了实拍和仿真模拟,对比结果如图 3 所示。由图 3 可知,在转子的搅拌作用下,絮凝搅拌装置内部液体在离心力作用下涌向器壁,中心部分形成负压,从表面“吸入”空气,液面下降,形成气液自由液面分界明显的旋涡,气液相间界面形态的数值模拟结果与实际非常接近,再次验证了所采用数值模型的可靠性。

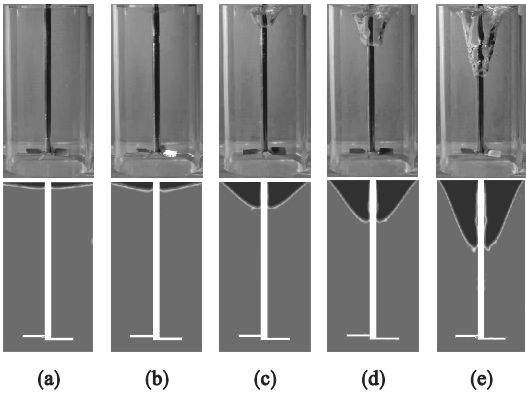


图 3 气液自由液面对比结果

Fig. 3 Comparison of free surfaces of gas and liquid

(a)—150 r/min; (b)—200 r/min; (c)—360 r/min;  
(d)—455 r/min; (e)—600 r/min.

2 搅拌器内部流场特性分布

2.1 速度及其梯度特性分布结果与分析

选定中等转子转速 360 r/min 进行数值模拟,  $Y=0$  截面液相速度分布特征模拟结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 在倾斜叶片式转子的高速搅拌作用下, 形成以转子叶片轴向高度为分界、具有轴向和径向混合作用的上、下两循环流, 并且沿转轴呈对称式分布. 同时, 因旋转转子带动流体运动, 转子区域液体运动速度较高, 尤其是转子叶片径向向外端区域, 转轴边界处流体运动速度较低.

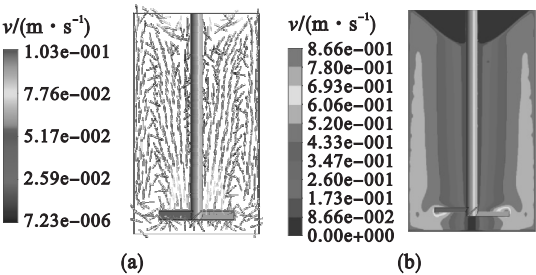


图 4  $Y=0$  液相速度分布

Fig. 4 Liquid velocity distribution in  $Y=0$  section

(a)—速度矢量图; (b)—表观速度云图.

微细颗粒在絮凝过程中, 流体剪切(速度梯度)对絮凝体的形成及其稳定性影响较大. 在上述模拟条件下, 对絮凝搅拌器内部流场速度梯度进行数值计算,  $Y=0$  截面上切向速度梯度模拟结果如图 5 所示. 由图 5 可知, 絮凝搅拌器内流体速度梯度沿转轴呈对称式分布, 在转子叶片外端区域切向速度梯度达到最大值, 约为  $142\text{ s}^{-1}$ , 因叶轮输入给液体的全部功率用于产生流量和压头, 流体所受剪切力大, 所以该区域具有较大速度梯度, 实现叶轮附近搅拌区的分散和混合作用. 气液

自由液面处由于气液密度差异大, 空气连续“吸入”与“涌出”, 流体剪切较大, 故此处速度梯度值同样较高. 在容器壁处由于受容器壁面剪切, 流体具有较高的切向速度梯度值, 因此高速度梯度区不易形成稳定的絮凝体.

为进一步研究搅拌强度对絮凝搅拌器内部流体速度梯度的影响, 分别在转子转速为 150, 200, 360, 455, 600 r/min 的条件下, 对其内部流体速度梯度特性分布进行模拟, 选取纵截面上  $L_2$  ( $X=20\text{ mm}$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0\sim150\text{ mm}$ ),  $L_3$  ( $X=-42.5\sim42.5\text{ mm}$ ,  $Y=0$ ,  $Z=13\text{ mm}$ ) 作为参考位置(如图 5 中所示)分别考察搅拌强度对轴向和径向位置的切向速度梯度的影响, 模拟结果分别如图 6, 7 所示.

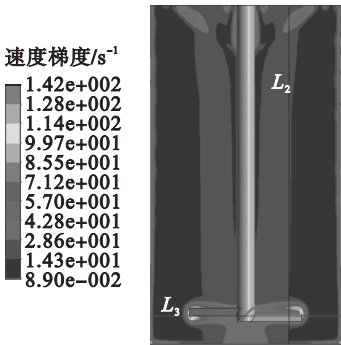


图 5  $Y=0$  切向速度梯度分布

Fig. 5 Tangential velocity gradient in  $Y=0$  section

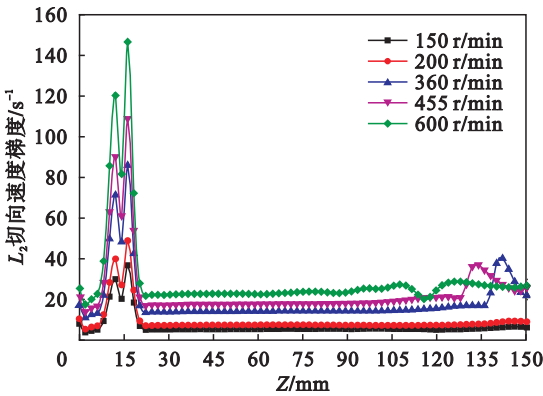


图 6 转速对  $L_2$  切向速度梯度影响

Fig. 6 Effect of rotational speed on tangential velocity gradient of  $L_2$

结合图 5、图 6 可知, 转速对转子附近区域流体切向剪切影响较大, 随着转速的增加, 切向速度梯度整体呈增加趋势. 在下循环区域( $Z=0\sim10\text{ mm}$ ), 受容器底部剪切和负压“吸入”作用, 流体速度梯度呈先降低后增加趋势; 在上下循环分界区域( $Z=10\sim25\text{ mm}$ ), 受倾斜式叶片的搅拌与分流作用, 流体切向速度梯度急剧增加后又急剧降低. 在上循环区域( $Z=25\sim130\text{ mm}$ ), 切向速度



梯度基本保持不变,该区域相对较低的切向速度梯度保证了絮凝体在运动过程中结构和形态的相对稳定性.当转子转速高于 360 r/min 时,容器敞口处 ( $Z = 130 \sim 150$  mm) 受气液自由交界面影响,此处流体速度梯度有所增加.对比可知,叶片区切向速度梯度值大约为上循环区的 5~7 倍,差异较大.结合图 5、图 7 可知,在径向位置上,切向速度梯度随着径向半径的增加,依次呈缓慢增加、急剧增加、急剧降低后急剧增加的趋势;随着搅拌强度的增加,切向速度梯度增加,且转子转速对容器壁面、叶片附近区域的切向速度梯度值影响较大;相同转速条件下,叶片外端区域流体运动切向速度梯度值为壁面和其他叶片附近区域的 2 倍左右,为径向距离在 30~40 mm 区域的 100 倍左右,相差两个数量级,差距较大,因此搅拌器内部不同区域处絮凝剂和微细颗粒分散效果不同,且絮凝体在不同区域的稳定性和结构也存在较大差异.

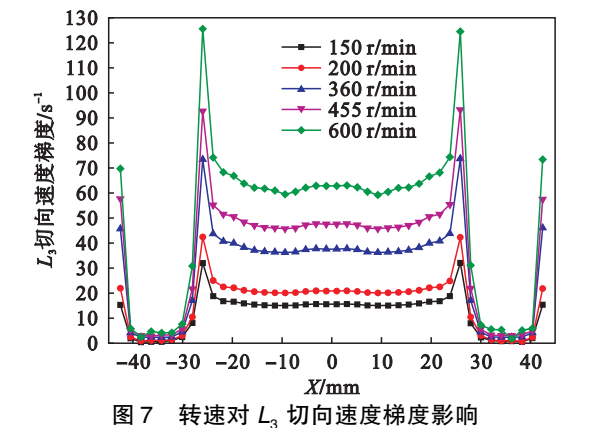


图 7 转速对  $L_3$  切向速度梯度影响  
Fig. 7 Effect of rotational speed on tangential velocity gradient of  $L_3$

2.2 湍流特性分布结果与分析

絮凝搅拌器内部为复杂三维湍流流场,而湍流特性和絮凝搅拌过程中微细颗粒和絮凝剂的分散、微细颗粒间接触碰撞、絮凝体的稳定性具有密切关系,且湍流特性检测难度较高,因此对其内部湍流特性进行数值模拟,取  $Y = 0$  截面上湍流特性模拟结果进行分析,模拟结果如图 8 所示.

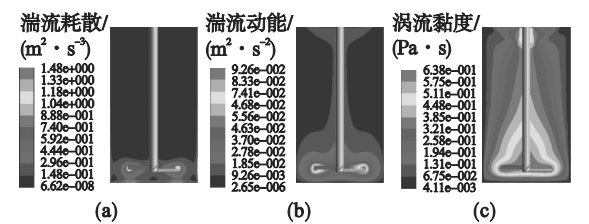


图 8  $Y = 0$  截面湍流特性分布  
Fig. 8 Turbulence characteristics in  $Y = 0$  section  
(a)—湍流耗散; (b)—湍流动能; (c)—涡流黏度.

由图 8a,8b 可知,在转子的高速搅拌作用下,转子的机械能转化成流体的湍流动能,湍流速度在空间上存在着随机涨落,从而形成了显著的速度梯度.絮凝搅拌器内部流体在分子黏性力作用下通过内摩擦不断地将湍流动能转化为分子运动的动能,因为转子叶轮处湍流耗散率较高,所以在转子处形成较高湍流动能分布区域,尤其是转子叶片径向向外端,而气液自由液面受空气扰动影响较大,相对稳定层被破坏,相邻流层间不但有滑动,还有相互混合作用,所以气液自由液面处湍流动能也相对较高.涡流黏性是流体流动状态的反映,表观理解是组分黏度的增加,由图 8c 可知,转子区域由于随机脉动造成强烈涡团扩散和级联散列,因而该区域涡流黏度较高.

同样以图 5 中  $L_2$  为参考位置,考察转子转速对絮凝搅拌器内部流体湍流动能和涡流黏度特性分布的影响,其模拟结果分别如图 9,10 所示.由图 9,10 可知,转速对叶轮区域 ( $Z = 0 \sim 30$  mm) 湍流动能和涡流黏度影响较大,且此区域流体湍流动能和涡流黏度随轴向高度的增加而大幅度增加后又急剧降低,与该区域速度梯度变化趋势较为

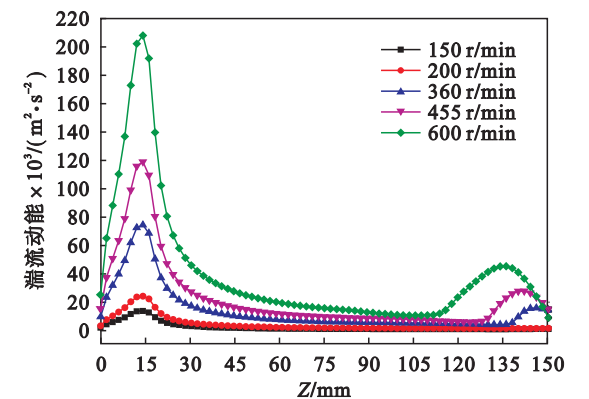


图 9 转速对湍流动能的影响  
Fig. 9 Effect of rotational speed on turbulence kinetic energy

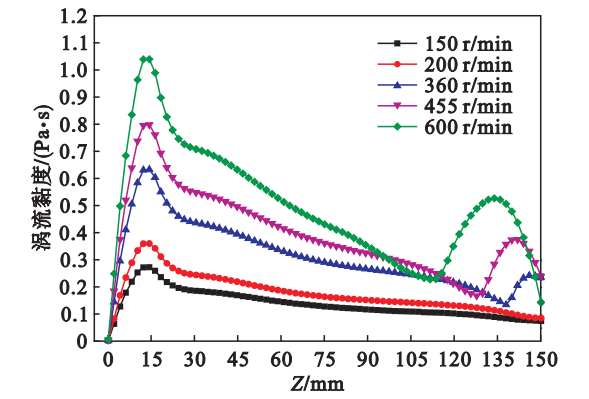


图 10 转速对涡流黏度的影响  
Fig. 10 Effect of rotational speed on eddy viscosity

一致,尤其是转子叶片附近( $Z \approx 15 \text{ mm}$ );在所研究的转速范围内,高转速( $600 \text{ r/min}$ )与低转速( $150 \text{ r/min}$ )条件下的流体湍流动能值大约相差两个数量级,而高转速条件下的涡流黏度仅为低转速条件下的 4 倍左右,其值在同一数量级。转速对低速条件和上循环混合区湍流动能影响较小;高转速条件下( $455$  和  $600 \text{ r/min}$ ),由于自由液面的深度增加,流体受循环空气扰动影响,自由液面处流体湍流动能和涡流黏度略有增加,此处湍流动能和涡流黏度的增加在一定程度上降低了自由液面处絮凝体的稳定性。

一般认为,下循环区域较高的湍流动能有助于絮凝剂和微细颗粒的分散,以及增加微细颗粒间的碰撞概率,上部循环区域相对较低的湍流动能有助于增强所形成的絮凝体的稳定性;过小的湍流动能一定程度上不利于微细颗粒在液体中的均匀分散,过大的湍流动能又在一定程度上降低絮凝体结构和形态的稳定性,破坏已经形成的絮凝体,因此下循环区相对较高的湍流动能和上循环区相对较低的湍流动能分布对提高搅拌机工作性能具有一定强化作用。而涡流黏度的本质是涡扩散,所以转子区域较高涡流黏度在一定程度上有助于絮凝剂和微细颗粒在混合液中的扩散,增强微细颗粒和絮凝剂的表面作用以及颗粒间的相互碰撞。

### 3 结 论

1) 应用 CFX 的侵入式实体模型及标准自由液面均相模型,能够较好模拟絮凝搅拌机内部气液两相流场特性分布,且转速越高,气液自由液面越深。

2) 研究所用絮凝搅拌机内部流场特性沿转轴呈对称式分布;搅拌区流场速度和速度梯度较大,转速对叶轮附近区域切向速度梯度影响较大;搅拌强度增大,速度梯度增大;转速对搅拌机上循环区速度梯度影响相对较小。

3) 下循环区湍流耗散率、湍流动能和涡流黏度较高,且转子转速对此区域湍流动能和涡流黏度影响较大;转子转速对上循环区湍流动能影响较小;随着轴向高度的增加,湍流耗散率、湍流动能和涡流黏度整体呈逐渐降低趋势。

4) 絮凝搅拌机内部流场特性分布研究实现了其复杂三维流场的可视化,对提高絮凝搅拌机工作性能具有一定指导意义。

### 参考文献:

- [1] Garrido T, Mendoza J, Arriagada F. Changes in the sorption, desorption, distribution, and availability of copper, induced by application of sewage sludge on Chilean soils contaminated by mine tailings [J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, 24(5): 912–918.
- [2] Younger P L, Henderson R. Synergistic wetland treatment of sewage and mine water: pollutant removal performance of the first full-scale system [J]. *Water Research*, 2014, 55(10): 74–82.
- [3] 冯章标, 何发钰, 邱廷省. 选矿废水治理与循环利用技术现状及展望[J]. 金属矿山, 2016, 45(7): 71–76.  
(Feng Zhang-biao, He Fa-yu, Qiu Ting-sheng. Research status and prospects of mineral processing wastewater treatment and cyclic utilization technology [J]. *Metal Mine*, 2016, 45(7): 71–76.)
- [4] Kirwan L J. A study of polyacrylate and hydroxamate co-dosing flocculation of stabilized bauxite residue material [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, 91(1): 28–33.
- [5] Shibata J, Fuerstenau D W. Flocculation and flotation characteristics of fine hematite with sodium oleate [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 72(1/2/3/4): 25–32.
- [6] Elizaveta F. Shear, selective and temperature responsive flocculation: a comparison of fine particle flotation techniques [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 99(1/2/3/4): 1–10.
- [7] Botha L, Davey S, Nguyen B, et al. Flocculation of oil sands tailings by hyperbranched functionalized polyethylenes [J]. *Minerals Engineering*, 2017, 108: 71–82.
- [8] Alalm M G, Nasr M, Ookawara S. Assessment of a novel spiral hydraulic flocculation/sedimentation system by CFD simulation, fuzzy inference system, and response surface methodology [J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 169: 137–150.
- [9] Prat O P, Ducoste J J. Simulation of flocculation in stirred vessels Lagrangian versus Eulerian [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, 85(2): 207–219.
- [10] Zhang J F, Zhang Q, Qiao G. A lattice Boltzmann model for the non-equilibrium flocculation of cohesive sediments in turbulent flow [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2014, 67(2): 381–392.
- [11] Gheshlaghi M E, Goharizi A S, Shahriar A A, et al. Modeling industrial thickener using computational fluid dynamics (CFD), a case study: tailing thickener in the Sarcheshmeh copper mine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(6): 885–892.
- [12] 李振亮. 基于 VOF 法的絮凝搅拌机流场数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20): 6008–6014.  
(Li Zhen-liang. Numerical simulation of flow field in flocculation stirrer based on VOF method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(20): 6008–6014.)
- [13] Yoon Y, Park B H, Shim J, et al. Numerical simulation of three-dimensional external gear pump using immersed solid method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118: 539–550.