

# 搅拌槽内三相混合特性的数值模拟<sup>\*</sup>

曹乔乔<sup>\*\*</sup> 郝惠娣 王 瑾 秦 佩 雷建勇

(西北大学化工学院)

**摘 要** 利用 Ansys CFX 软件对自吸式龙卷流型搅拌槽内的气、液、固三相混合特性进行了研究,从速度场、固相分布、湍动能、湍动能耗散及切应变速率等方面对其进行数值模拟,并与标准搅拌槽进行对比发现:自吸式龙卷流型搅拌槽具有良好的速度分布和固液悬浮性能,其湍动能和湍动能耗散分布合理,有利于物料之间的充分接触与混合,且其主要混合区域的剪切力小、功耗低,对介质的损伤小,节能效果明显。

**关键词** 搅拌槽 三相混合特性 数值模拟

中图分类号 TQ051.7<sup>+2</sup>

文献标识码 A

文章编号 0254-6094(2015)04-0548-06

流体搅拌技术,尤其是多相流搅拌技术广泛应用于石油、化工及生物发酵等领域。在生物化工领域,好氧发酵过程要求气、液、固三相既要有充分接触,又要避免高剪切对介质造成损伤。自吸式龙卷流型搅拌槽是一种新型气、液、固三相搅拌槽,兼具中心龙卷流型搅拌槽固液悬浮和自吸分散的优点<sup>[1~3]</sup>。借助 CFD 软件对搅拌槽内部的混合性能进行预测模拟仿真,探索搅拌槽内气、液、固三相的混合效果,可便于后续的结构优化和实验研究。由于搅拌槽内部混合具有复杂性,数值模拟主要集中在单相或两相,涉及到气、液、固三相的研究非常少<sup>[4]</sup>,因此需要对搅拌槽内三相模拟技术进行深入的研究。笔者在已有的研究基础上,利用 Ansys CFX 软件对自吸式龙卷流型搅拌槽内的气、液、固三相的混合性能进行数值模拟,研究三相的流动特性、固液悬浮、气液分散和剪切效果,并与标准搅拌槽进行对比,研究结果对工业搅拌设备的研发和优化设计具有一定的指导意义。

## 1 计算模型

### 1.1 几何模型

笔者选取的模拟对象为平底圆柱形搅拌槽

(图1)。桨叶采用六直叶圆盘涡轮桨<sup>[5]</sup>,该桨叶具有临界转速低、结构简单和混合性能好的优点<sup>[6,7]</sup>。自吸式龙卷流型搅拌槽底部有4块对数螺旋线导流板,桨叶上方安装定子结构(气体分散装置)来完成气体的吸入。模拟过程中,搅拌槽的转速应大于气体吸入临界转速和临界悬浮转速,故取400r/min。搅拌槽的具体几何尺寸如下:

搅拌槽内径  $D$  300mm

搅拌槽高度  $H$  400mm

液位高度  $H_l$  300mm

搅拌器直径  $D_j$  100mm

桨叶安装高度(自吸式龙卷流型搅拌槽)  $L$  180mm

桨叶安装高度(标准搅拌槽)  $L$  100mm

### 1.2 模拟物系

模拟温度为20℃。搅拌槽内存在气、液、固三相状态:气相为空气;液相为清水,其密度为998kg/m<sup>3</sup>,粘度为1mPa·s;固相采用粒径 $d_p$ 为50μm的石英砂,其密度 $\rho_s$ 为2650kg/m<sup>3</sup>,体积分数为0.5%,最初分布在搅拌槽底部,当桨叶转动起来后会逐渐悬浮起来充满整个搅拌槽。

<sup>\*</sup> 西北大学研究生创新人才培养基金项目(YZZ12040) 陕西省教育厅科研项目基金(11JK10-21)。

<sup>\*\*</sup> 曹乔乔,女,1990年5月生,硕士研究生。陕西省西安市,710069。

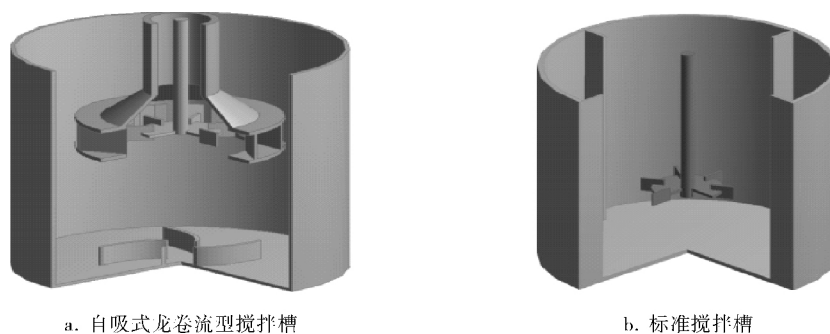


图 1 搅拌槽模型

## 2 数值模拟

### 2.1 模拟方法

流体湍流模型采用修正后的 RNG  $k-\varepsilon$  模型, 气、固两相为零方程模型。液固和气液均采用欧拉-欧拉双流体模型, 并用非稳态模拟方法进行求解, 每一步最大迭代次数设为 20, 收敛准则为 RMS, 质量、动量和湍流方程的收敛残差设为  $1 \times 10^{-4}$ 。动、静区域之间采用多重参考系法 (MRF) 进行处理, 通过交界面进行质量、动量和能量的传递, 采用 Scalable 壁面函数对边界层进行处理。气液之间的曳力模型采用 Grace 模型<sup>[8]</sup>, 固液之间的曳力模型采用 Schiller 模型。采用 SIMPLE

算法对速度-压力耦合进行求解, 考虑到三相混合时间较长, 将总时间设为 8.00s, 步长设为 0.01s, 对求解对象进行迭代, 直至结果到达预期的收敛效果<sup>[9]</sup>。

### 2.2 网格划分

采用非结构四面体网格对搅拌槽内的计算域进行划分, 结果如图 2 所示。自吸式龙卷流型搅拌槽的网格划分总节点数约为 139 679 个, 网格 (单元) 数约为 576 060 个; 标准搅拌槽的网格划分总节点数为 65 786 个, 网格数为 275 946 个。采用 Inflation 对桨叶、气体分散装置、导流板和壁面进行网格细化。

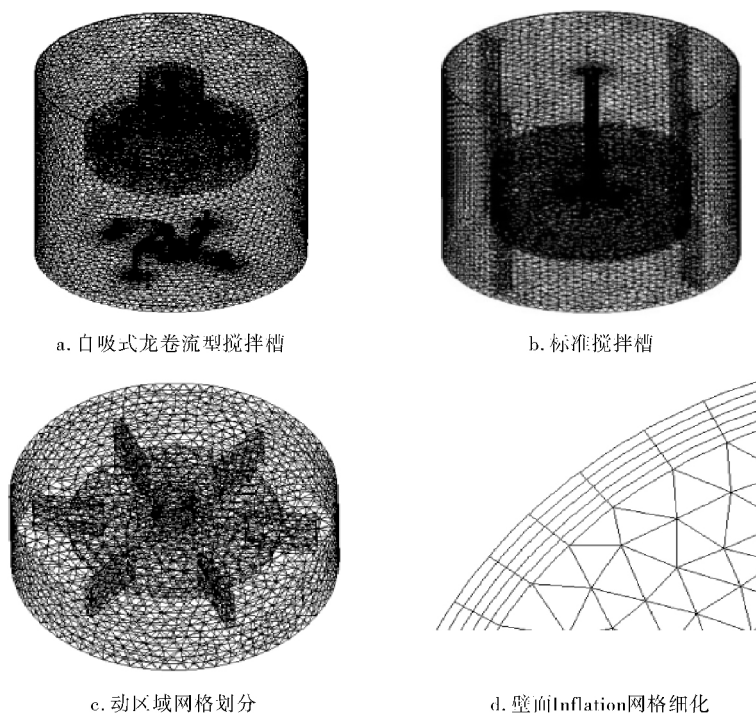


图 2 搅拌槽整体和局部网格划分

## 2.3 边界条件

设置槽壁、导流板、搅拌轴和桨叶为固体绝热壁面条件,液体为无滑移固体壁面边界,固体颗粒和气体为自由滑移固体壁面边界。对于边界条件参数,气体吸入口设置为入口边界,气相分率为1,液面设置为气体出口脱气条件。

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 液相速度矢量

两种搅拌槽的液相速度矢量如图3所示,比

较两种搅拌槽的流型,自吸式龙卷流型搅拌槽的六圆盘涡轮桨为径向流桨,但整体以轴向流为主,槽内的接触和混合是由产生的龙卷流完成的,故桨叶下方具有较大的速度,桨叶上方速度较小;标准搅拌槽中以径向流为主,主要依靠涡轮的转动完成接触和混合,桨叶区域速度较大。因此自吸式龙卷流型搅拌槽的混合区域更大且流场分布更均匀,混合效果会更理想。

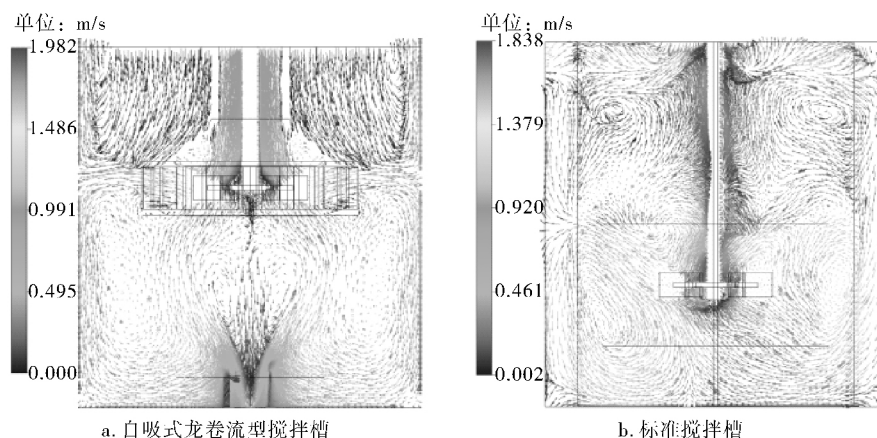


图3 两种搅拌槽的液相速度矢量

### 3.2 气相速度矢量

两种搅拌槽的气相速度矢量如图4所示。自吸式龙卷流型搅拌槽吸入气体后在槽底产生较大的速度且分布均匀,这说明气体分散装置能很好地处理气液分散问题,而且对固液悬浮影响不大;对于标准搅拌槽,气体通过轴孔通入液相后,一部分因浮力的作用上升并由液面排出,另一部分通

过涡轮桨的破碎和径向流的带动作用被分散到液相中,且在搅拌桨区域出现速度最大值。比较两种搅拌槽的气相速度分布,自吸式龙卷流型搅拌槽内气泡分散的更彻底,气液和气固的接触面积更大,更有利于物料的混合,而标准搅拌槽中气泡的运动方向以向上为主,气泡在上升时逐渐变大,接触不如前者充分。

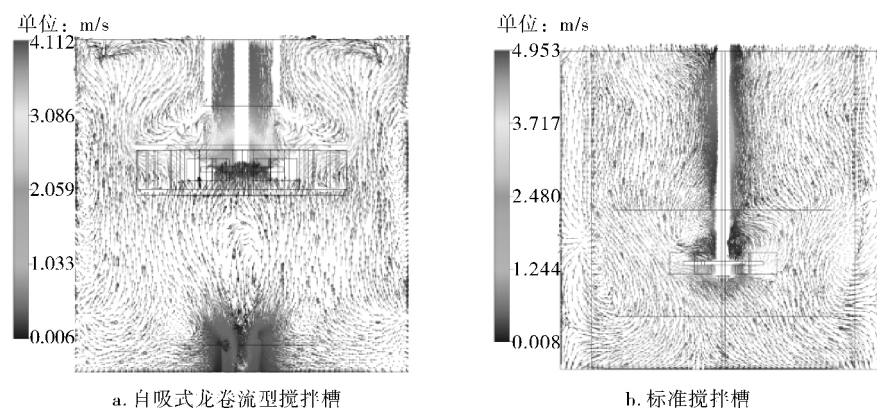


图4 两种搅拌槽的气相速度矢量

### 3.3 固相体积分数

图 5 为两种搅拌槽内稳定状态时的固相体积分数,由图 5 可见:自吸式龙卷流型搅拌槽内的固相颗粒能够分布到槽内大部分区域,在桨叶上方颗粒含量极低,这与其混合机理有关;标准搅拌槽下方 1/3 区域内有明显的固相

颗粒分布,其余大部分区域固相颗粒含量非常低。这说明标准搅拌槽在处理固液悬浮时效果远不如自吸式龙卷流型搅拌槽,固相颗粒的分布范围比较小,与液相的接触不充分。因此自吸式龙卷流型搅拌槽处理固液悬浮时相对于标准搅拌槽具有更好的效果。

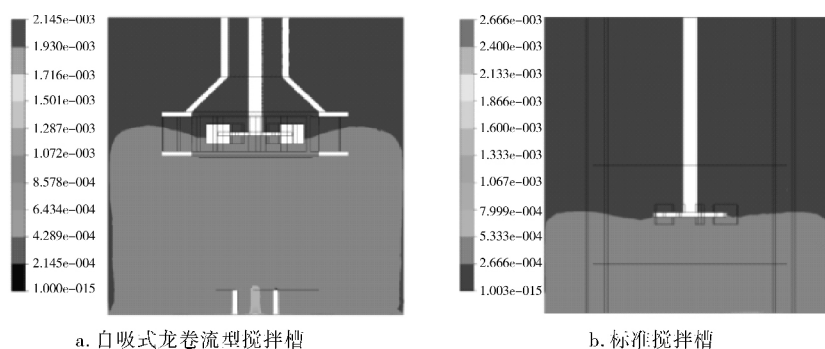


图 5 两种搅拌槽内稳定状态时的固相体积分数

### 3.4 湍动能

两种搅拌槽高 10mm 截面处的湍动能如图 6 所示。自吸式龙卷流型搅拌槽槽底大部分区域的湍动能分布较为广泛而且均匀,有利于底部固相颗粒的离底悬浮,为上升的龙卷流提供能量,由于强烈的向心流,湍动能的峰值出现在导流板的尖端;标准搅拌槽的湍动能最大值出现在槽壁,并由

槽壁向中心逐渐递减,湍动能最小值出现在挡板后方,该区域为流动死区,峰值出现在挡板之间的槽壁附近。相对于自吸式龙卷流型搅拌槽,其湍动能分布落差很大。自吸式龙卷流型搅拌槽的湍动能分布均匀且较大,尤其是其中心处的湍动能高于标准搅拌槽的,因此有利于形成上升的龙卷流,带动固相颗粒悬浮,达到固液接触和混合的目的。

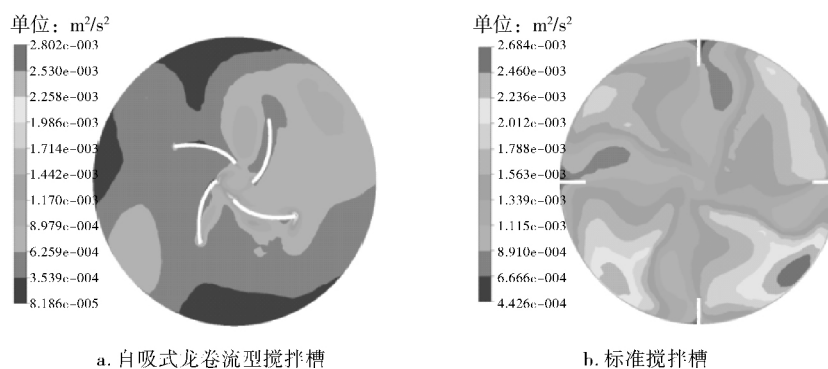


图 6 两种搅拌槽高 10mm 截面处的湍动能

### 3.5 湍动能耗散

湍动能耗散影响物料分布和混合状况,对相间的传质影响很大,因此对搅拌槽来说湍动能耗散非常重要<sup>[10]</sup>。两种搅拌槽高 10mm 截面处的液相湍动能耗散如图 7 所示。自吸式龙卷流型搅拌槽的湍动能耗散主要集中在导流板区域和槽壁区域,部分湍动能耗散为分子内能,这是由于液相与导流板、槽壁的撞击过程中会产生速度突变,并

在附近出现极小的漩涡,加剧能量的损耗;标准搅拌槽在中心区域的湍动能耗散较小,在槽壁和挡板处的湍动能耗散较大,且比自吸式龙卷流型搅拌槽的耗散值大,说明液相与挡板和槽壁作用后形成了更多的小漩涡,加剧了湍动能耗散,不利于相间的接触与混合。因此自吸式龙卷流型搅拌槽在能量耗散方面取得了较大改进,能够避免损失大量的湍动能,有利于提高槽内能量的传递效率。

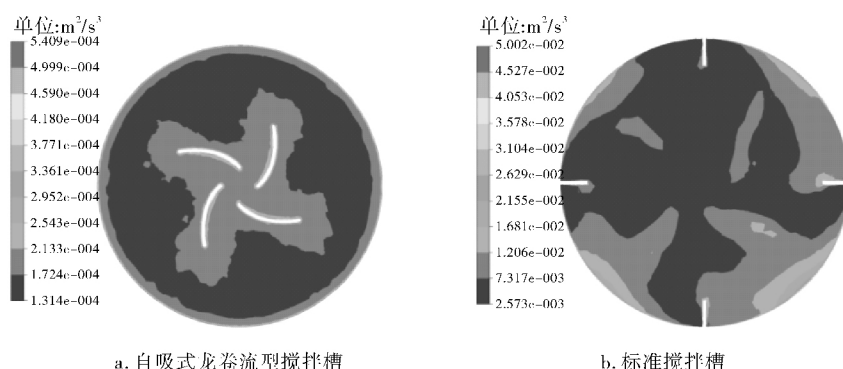


图7 两种搅拌槽高10mm截面处的液相湍动能耗散

### 3.6 切应变速率

两种搅拌槽内的切应变速率分布如图8所示。自吸式龙卷流型搅拌槽内的切应变速率的最大值出现在导流板顶部,桨叶和导流板区域的切应变速率较大,桨叶下方的主要混合区域的切应变速率较小,细胞和酶在该区域混合接触时不会受到太大的损伤;标准搅拌槽的切应变速率主要分布在桨叶区域、槽底和槽壁处,最大值出现在桨叶后方,而桨叶上方的大部分区域的切应变速率

非常低,这与标准搅拌槽内的速度分布有关。整体而言,两种搅拌槽的平均剪切速率相差不大,自吸式龙卷流型搅拌槽的混合主要依靠龙卷流形成的循环,虽然底部导流板处的切应变速率相对其他区域较大,但一旦运转起来,底部大部分固相物料都会悬浮起来,主要集中在桨叶与导流板之间的混合区域;而标准搅拌槽桨叶所在的区域即为主要的混合区域,此处产生的剪切力较大,混合过程中可能会对生物介质造成一定的损伤。

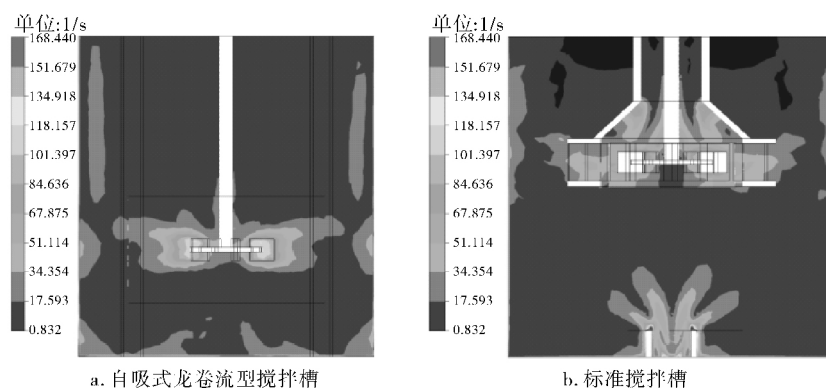


图8 两种搅拌槽的切应变速率分布

### 3.7 功耗性能

搅拌功率准数  $N_p$  是搅拌设备最重要的特性参数之一,它表征了搅拌设备功耗性能的大小,其表达式为:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_j^5}$$

式中  $N$  —— 搅拌转速  $r/min$ ;

$P$  —— 功率  $W$ ;

$\rho$  —— 液体密度  $kg/m^3$ 。

其中,功率  $P = 2\pi MN$ 。应用 Ansys CFX 中的函数计算工具 Function Calculator 计算两种搅拌

槽进气后的扭矩和搅拌功率,从而得到两种搅拌槽进气后基于液相的功率准数。两种搅拌槽功耗参数的计算结果见表1,从表1可以看出,自吸式龙卷流型搅拌槽的功率准数低于标准搅拌槽的,体现了其高效、节能的优势<sup>[11]</sup>。

表1 搅拌槽的功耗参数结果

搅拌槽类型	扭矩 $M/N \cdot m$	功率 $P/W$	功率准数 $N_p$
自吸式龙卷流型搅拌槽	0.191	8	2.70
标准搅拌槽	0.358	15	5.06

#### 4 结论

4.1 自吸式龙卷流型搅拌槽的液相速度场形成两个大的漩涡,有利于物料之间充分地接触与混合,气相速度在槽底分布均匀,有利于气相向槽底扩散。

4.2 自吸式龙卷流型搅拌槽的固相颗粒分布在搅拌槽的大部分区域,而标准搅拌槽只在下方的1/3区域内有明显的固相颗粒分布,其余的大部分区域固相颗粒含量非常低,前者更有利于固液的悬浮与混合。

4.3 自吸式龙卷流型搅拌槽具有良好的湍动能和湍动能耗散分布,混合区域的湍动能较大,湍动能耗散较小,能够避免损失大量的湍动能,有利于提高槽内能量的传递效率。

4.4 自吸式龙卷流型搅拌槽主要混合区域的剪切力小且功耗低,对介质的损害较小,适用于生物化工领域,功耗大幅降低,节能效果明显。

#### 参 考 文 献

- [1] 郭笃信,魏玉梅,李宝璋,等. 中心龙卷流型搅拌装置[P]. 中国:972394036,1998-08-12.
- [2] 张庆文,刘永垒,石东升,等. 自吸式反应器特性参数的实验研究[J]. 化学工程,2011,39(12):77~80,94.
- [3] 何志敏,李可求. 自吸式气液反应器的设计与应用[J]. 中国医药工业杂志,2000,31(1):34~36.
- [4] 程景才,毛在砂,杨超. 搅拌槽内液-固-固三相流数值模拟研究[J]. 化学反应工程与工艺,2008,24(2):97~102.
- [5] Renuand E, Alain L. Experimental Analysis of Hydrodynamics in a Radially Agitated Tank [J]. AIChE Journal, 2003, 49(3): 585~603.
- [6] 刘敏珊,张丽娜,董其伍. 涡轮桨搅拌槽内混合特性模拟研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(10):1700~1702.
- [7] Ng K, Fentiman N J, Lee K C, et al. Assessment of Sliding Mesh CFD Predictions and LDA Measurements of the Flow in a Tank Stirred by a Rushton Impeller [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1998, 76(6): 737~747.
- [8] Grace J R, Wairegi T, Nguyen T H. Shapes and Velocities of Single Drops and Bubbles Moving Freely through Immiscible Liquids [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1976, 54: 167~173.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [10] Baldi S, Yianneskis M. On the Quantification of Energy Dissipation in the Impeller Stream of a Stirred Vessel from Fluctuating Velocity Gradient Measurements [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(13): 2659~2671.
- [11] 郭笃信,郝惠娣,魏玉梅,等. 新型高效节能搅拌设备——中心龙卷流型搅拌槽[J]. 化学工程,2002,30(4):28~31.

(收稿日期:2014-09-04,修回日期:2015-06-29)

## Numerical Simulation of Three-phase Mixing Characteristics in Stirring Tank

CAO Qiao-qiao, HAO Hui-di, WANG Jin, QIN Pei, LEI Jian-yong

(School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract** The Ansys CFX software was adopted to investigate into the mixing characteristics of the gas-liquid-solid flow in the self-suction tornado flow stirring tank; and simulating it from the velocity fields, solid phase distribution, turbulence kinetic energy, shearing rate and power consumption was implemented and compared with the standard agitation tank to show that this self-suction tornado flow stirring tank has better velocity distribution and solid-liquid suspension performance to benefit both contact and mixture of the reactants, and the shear stress in the main mixing area becomes lower and asks for low power consumption together with obvious energy-saving effect.

**Key words** stirring tank, three-phase mixing characteristics, numerical simulation