

# 搅拌头偏心布置对物料悬浮颗粒分散性的影响

纪俊红<sup>1,2</sup>, 杨继超<sup>3</sup>, 李向龙<sup>3</sup>, 王 丽<sup>3</sup>

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819; 2. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 3. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 用聚丙烯代替悬浮颗粒, 采用数值模拟的方法对流场进行了深入研究。首先通过试验分析, 取得了满意的数值模拟效果后, 采用标准湍流模型对偏心搅拌流场进行模拟。然后针对不同模拟工况进行试验验证比较, 分析不同的偏心程度对速度分布、湍动能大小、物料(聚丙烯)混合效果以及混合时间的影响。研究表明, 偏心率为0.22左右, 浸入深度在容器高度的35%时, 流场分布比较均匀, 死区较小, 更有利于物料混合, 搅拌效果最好。

**关键词:** 固液分散; FLUENT 模拟; 偏心搅拌; 浸入深度

**中图分类号:** TF704.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0074-04

## Effects of Eccentric Distribution of Stirrer on Dispersivity of Suspended Particles

Ji Jun hong<sup>1,2</sup>, YANG Ji chao<sup>3</sup>, LI Xiang long<sup>3</sup>, WANG Li<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processes of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 3. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The polypropylene was used as suspended particle, and numeral simulation was performed to investigate the effects of different stirring styles. The model was first examined based on the CFD simulation and experiments to obtain the reasonable results, and then the  $k-\epsilon$  unsteady model was adopted to simulate the flowing field of eccentric agitation. The simulated results were verified with the experimental results to analyze the impacts of different eccentric degrees on the velocity distribution, turbulence kinetic energy, and mixing effects and time of polypropylene. The results showed that the offset ratio is about 0.22, and when the immersion depth is 35% of the bottle height, the flowing field is well distributed with small "death zone", which is beneficial to the mixing of polypropylene.

**Key words:** solid liquid dispersion; FLUENT simulation; eccentric agitation; immersion depth

近年来,人们对气-液搅拌槽进行了大量的试验研究,特别是针对脱硫剂的分散进行了许多试验,如调整搅拌深度和偏心率、加快搅拌速度、增加搅拌头尺寸等等。这些方法与传统的方法相比,具有处理气体能力强、相对搅拌功率高等优点,已逐渐在气-液搅拌反应器中推广应用<sup>[1]</sup>。在此基础上,很多学者对如何提高搅拌效率进行了许多有意义的研究。1997年,Brucato等研究者<sup>[2,3]</sup>用拉氏方法结合固体沉降速度模型和多相流模型,分别对标准搅拌槽和多层叶轮搅拌槽内固体颗粒的分布进行了模拟,结果和试验值吻合得很好;1999年程学文<sup>[4]</sup>用  $k-\epsilon$  二方程模型和颗粒随机轨道模型成功的模拟了竖管内固-液两相流动对搅拌头及壁面的冲刷腐蚀过程;2000年Micale等人<sup>[5]</sup>使用 Euler Euler 双流体模型对单层浆和多层浆的搅拌槽内中低浓度固体颗粒

的分散进行了研究;2002年钟丽、黄雄斌、贾志刚<sup>[6]</sup>使用商业软件 FLUENT,基于计算流体力学研究了搅拌器的功率曲线、固-液搅拌槽内固体浓度中  $\rho = 5\%$  的离底悬浮临界转速和固-液两相流连续相速度场;同年,徐姚、张政等<sup>[7]</sup>用拉氏方法对旋转圆盘上固液两相冲刷过程进行了模拟研究,得到了旋转圆盘内液体相和颗粒相的详细运动信息,包括液体流场的速度分布、颗粒运动状态、运动轨迹等;2004年李良超<sup>[8]</sup>对固-液搅拌槽内固体浓度  $\rho = 1.0\% \sim 5.4\%$  的液相速度进行了试验和模拟两方面研究,模拟的体系和试验的体系基本一致;同年,王峰等<sup>[9]</sup>用内外迭代法对搅拌槽内低浓度固-液体系进行了数值模拟,得到了判断固体颗粒完全离底悬浮的三种判据,并与试验数据有较好的吻合。

但是这些基本都侧重于固-液搅拌基础理论及其模型

收稿日期: 2013-03-06    修回日期: 2013-08-10    网络出版时间: 2013-08-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130822.1705.008.html>

作者简介: 纪俊红(1972-),女,内蒙古包头人,副教授,博士,主要从事流体机械方面研究。E-mail: ji\_jh@163.com

的研究,而对于偏心搅拌槽内部的数值模拟分析,研究尚未深入,尤其是对于偏心混合时间的研究,尚未见报刊。因此,有必要在以上基础上,加大对模拟方法的研究,从而为实际脱硫提供参考。考虑到只有合理地设置搅拌参数才能增加悬浮颗粒与水的接触机率、反应速率,进而达到降低搅拌功率消耗、缩短物料混合时间,降低搅拌成本的目的。因此,本文利用数值模拟方法,结合试验分析,对偏心搅拌流场及其影响因素进行探讨,进而为工程实际提供参考。

## 1 建立模型

### 1.1 数学模型

#### 1.1.1 控制微分方程

(1) 体积分数方程。多相流计量中,相的体积分率是一个重要参数,记为  $\alpha_q$ , 代表每一相所占的空间的大小。每一相都满足质量、动量守恒方程。相  $q$  的体积定义为:

$$V_q = \int \alpha_q dV \quad (1)$$

式中:  $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ 。

(2) 连续性方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \frac{(\alpha_q v_q)}{\Delta} = \frac{1}{\rho_q} \left( \sum_{p=1}^n m_{pq} - \alpha_q \frac{d\rho_q}{dt} \right) \quad (2)$$

式中:  $m_{pq}$  为从相  $p$  到相  $q$  的质量转移;  $v_q$  为  $q$  相的速度;  $\rho_q$  为  $q$  相的密度。

(3) 动量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l v_l) + \frac{(\alpha_l \rho_l v_l)}{\Delta} = -\alpha_l p + \frac{\tau_l}{\Delta} + \alpha_l \rho_l g + \alpha_l \rho_l (F_l + F_{Lif,l} + F_{Vm,l} + \sum_{s=1}^n (K_{ls}(v_l - v_s) + m_{ls} v_{ls})) \quad (3)$$

式中:  $\tau_l$  为液相的剪切-拉伸应力;  $F_l$  为外力;  $F_{Lif,l}$  为升力;  $F_{Vm,l}$  为内部质量力;  $v_{ls}$  为相间速度;  $m_{ls}$  为相间的质量转移;  $K_{ls}$  为相间动量交换系数;  $v_l$  为液相的速度;  $v_s$  为固相的速度;  $\rho_l$  为液相的密度;  $p$  为压强,  $g$  为当地重力加速度。

#### 1.1.2 边界条件及网格划分

在利用 Gambit 软件的过程中,把容器上边界设为压力出口(Pressure outlet),把容器壁和搅拌桨叶设为壁面边界条件(Wall),由于搅拌桨是运动的,因此这两个壁面边界条件是分开来设的。

本次研究采用 Eulerian 模型来进行模拟。研究模型存在许多不规则的区域,在模型网格划分时,对搅拌头附近的网格进行了加密,见图 1,网格总量约为 80 万。

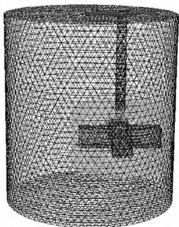


图 1 网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model grids

### 1.2 物理模型

#### 1.2.1 搅拌槽结构

本文利用水模型来试验模拟搅拌槽中的流体流动现象,

用聚丙烯代替悬浮颗粒,通过一个透明的树脂玻璃器皿来观察搅拌槽内部的流动情况,见图 2。

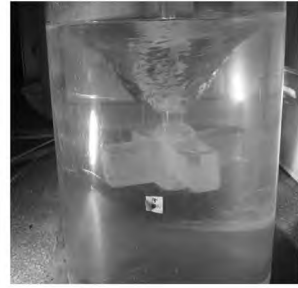


图 2 水模型试验图片

Fig. 2 A picture of water model

出于将试验结果与模拟结果进行对比的目的,此容器直径 0.45 m,高 0.45 m,厚度为 0.002 m,搅拌头浸入深度为 0.15 m。这与模拟过程中建立的模型尺寸一致。

现将偏心率  $e$  定义为偏心距离与搅拌槽半径的比值,根据经验,本文就  $e$  分别等于 0.13、0.22、0.31 三种情况下,物料的分散情况进行研究。

#### 1.2.2 试验程序

首先,向试验器皿中注入 0.33 m 深度的水,然后,设定好搅拌头的转速、深度、偏心距,并启动装置。摄影机会全程记录流体系统从开始搅拌一直达到稳定状态的过程中的流体流动现象。具体模型尺寸见表 1。

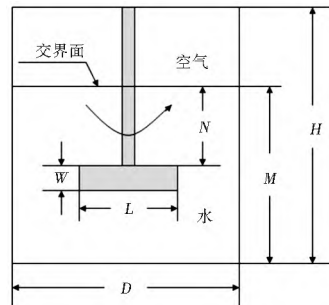


图 3 搅拌槽结构

Fig. 3 Structure of stirring vessel

表 1 搅拌槽尺寸

Table 1 Dimensions of stirring vessel

项目	尺寸/m
搅拌槽高度 $H$	0.45
搅拌槽直径 $D$	0.45
液面高度 $M$	0.33
桨叶宽度 $W$	0.06
桨叶长度 $L$	0.22
桨叶浸入深度 $N$	0.10、0.15、0.20

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 湍流模型校核

从 Gambit 软件中导出模型文件,并导入到 Fluent 中,采用 Eulerian 多相流模型进行模拟,对 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型进行校核。表 2 列出了中心搅拌情况下涡直径的模拟值与试验值的数据。转速 100 r/min,桨型采用 0.22 m  $\times$  0.05 m  $\times$

0.05 m, 涡直径随着浸入深度的增加而减小。

表 2 模拟与实验的漩涡直径对比

Table 2 Comparison of simulated and experimental vortex diameter values m

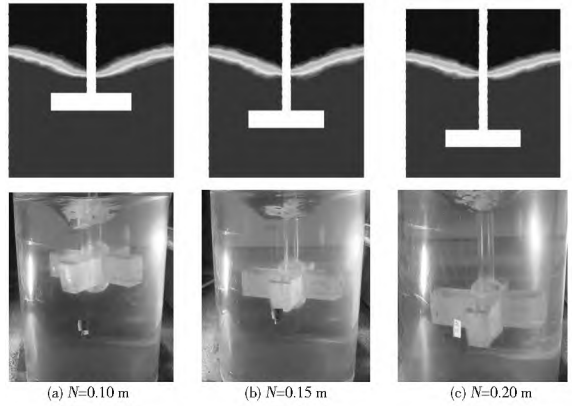
浸入深度 $N$	0.100	0.150	0.200
涡直径模拟值	0.301	0.291	0.275
涡直径试验值	0.296	0.281	0.270

从表 2 来看, 模拟值与试验值基本吻合, 但是模拟的涡深结果略大。原因可能是由于模拟时考虑的条件比较理想化, 不受其他外界条件的影响, 而试验时, 由于桨轴不是很稳定, 有时候会有微小的横向摆动; 还有其他外界的不确定因素, 进而影响到试验结果。图 4 中还可看到, 漩涡的深度随着桨叶的浸入深度加深而减小。总体来看, 模拟值与试验值相差不大, 说明该模型适用于计算此问题。

## 2.2 偏心搅拌的影响

### 2.2.1 偏心搅拌的速度分布

使用表 1 尺寸的搅拌槽, 在浸入深度为 0.15 m 的情况下进行模拟, 达到平衡后, 所得的速度分布见图 5。



(a)  $N=0.10$  m (b)  $N=0.15$  m (c)  $N=0.20$  m

图 4 不同浸入深度下两相分布

Fig. 4 Two-phase distribution under different immersion depths

从图 5 容易得出, 偏心搅拌时, 达到稳定状态后罐内铁水的速度分布呈“>”形状分布, 其最低速度区域起始于液面涡心。偏心率越大, 搅拌槽底部获得速度越大, 上部的速度则基本保持不变, 因此偏心搅拌槽内的流体速度分布更加均匀, 减少了混合的“死区”<sup>[10-13]</sup>。对某些偏心距来讲, 即使在  $Re < 50$  的时候也能引起搅拌槽内流场的混沌, 直至消除常规

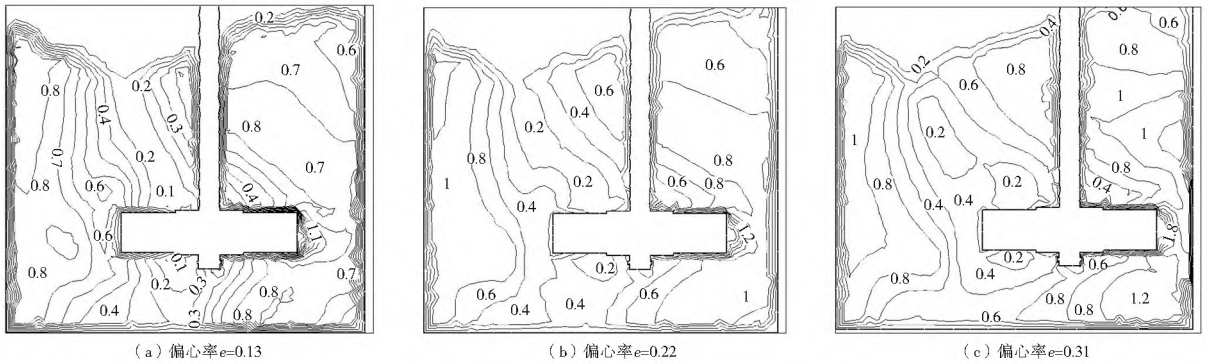


图 5 偏心搅拌下, 转速 120 r/min 时垂直截面上的液相速度分布

Fig. 5 Liquid velocity distribution in the vertical section under the conditions of eccentric agitation with the rotating speed of 120 r/min

搅拌时候的分层现象, 有利于物料混合, 进而缩短了脱硫时间<sup>[14-16]</sup>。现仍截取罐底  $Z=0.43$  m 处的横截面, 再加上  $Z=0.15$  m 处的横截面(原点位于底面中心)。比较在此固定转速下, 不同偏心方位在不同截面上的速度分布, 见图 6 和图 7。

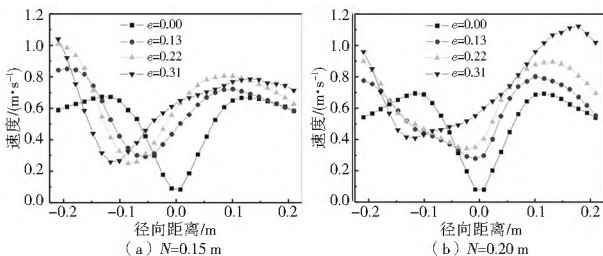


图 6  $Z=0.43$  m 截面上 120 r/min 转速下不同偏心距离搅拌的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of different offsets with the rotating speed of 120 r/min in the section of  $Z=0.43$  m

从图 6、图 7 可以看出, 在罐底和液面铁水的速度因为桨叶的偏离而加大, 而浸入深度的增加加剧了速度的变化, 液面速度最低点对应着涡心的位置, 从整体上观察, 偏心率越大越好; 在偏心搅拌的情况下, 桨叶的浸入深度对水的速度

分布有很大影响, 浸入深度越深, 死区越小。由于加大深度更好的破坏了隔离区, 因此流体速度有所增加。

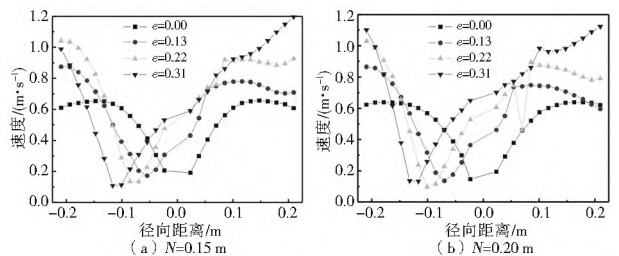


图 7  $Z=0.15$  m 截面上 120 r/min 转速下不同偏心距离搅拌的速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution of different offsets with the rotating speed of 120 r/min in the section of  $Z=0.15$  m

### 2.2.2 湍动能分布

同速度分布一样, 偏心搅拌槽内的平均湍动能要大于常规搅拌器的湍动能。从图 8 可以看出: 中心搅拌时, 湍动能基本都是对称分布的, 上部的湍动能要大于下部的湍动能, 湍动能在液面处达到最大。这是因为在液面附近, 包含着物料的混合、气液的交换等运输过程, 而且水流动受到的阻力

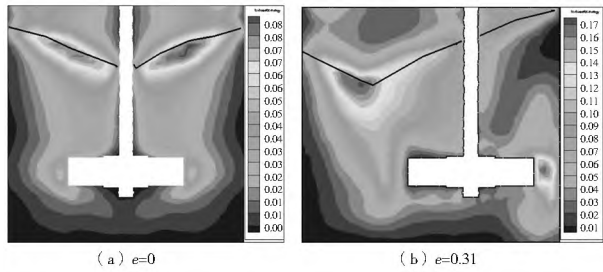


图8 浸入深度0.20 m, 转速120 r/min, 中心搅拌与偏心搅拌的湍动能分布

Fig. 8 Distribution of turbulent kinetic energy of the centric and eccentric agitations with the immersion depth of 0.20 m and the rotating speed of 120 r/min

较小, 湍动能的损失较小, 同时伴随着涡的不断生成和消失,

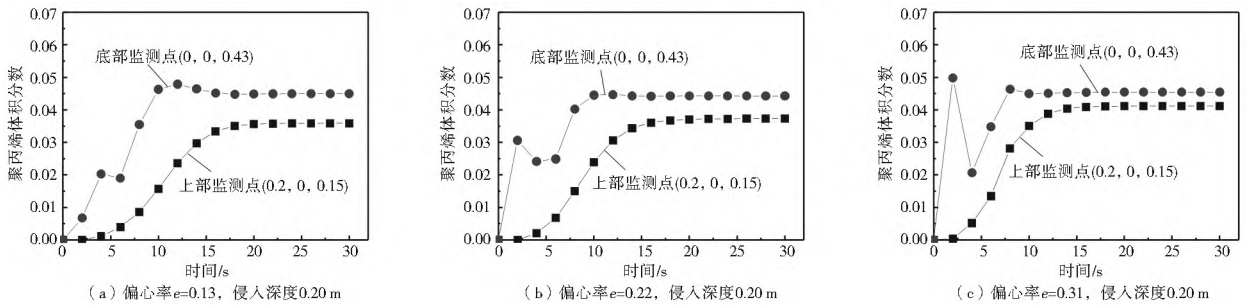


图9 120 r/min 转速时的监测点浓度曲线变化

Fig. 9 Variation curves of concentrations at the monitoring points with the rotating speed of 120 r/min

从图9中可以看出, 在120 r/min 转速下, 不同偏心率对应的颗粒浓度相差不大, 但偏心率越大搅拌槽内浓度差越小。偏心状态下, 混合时间随着偏心率的增大而逐渐减小, 其中, 偏心率从0.13到0.22的时候, 搅拌时间的减小幅度最大, 达到了29%, 从0.22到0.31则减小幅度降到10%, 鉴于偏心同样会增加对槽壁的冲刷, 因此, 偏心量也不宜过大。综上所述, 在120 r/min 的转速下, 偏心率在0.22, 浸入深度为0.2 m 的条件下, 混合效果最好。

### 3 结论

使用偏心布置的搅拌头能有效的改善流场动力特性。中心搅拌时, 桨叶的轴向力比较小, 因此死区比较大, 在这些区域内, 颗粒与水的混合很大程度上决定于扩散作用, 因此湍动强度比较小, 过程进行的比较缓慢。当采用偏心布置时, 搅拌槽内底部的速度比中心布置的要大, 其他区域则基本持平; 此外, 由于偏心搅拌破坏了隔离区, 因此水的纵向运动大大增强, 更有利于物料的交流; 最后, 达到一定程度后, 偏心搅拌的混合时间并不会有明显变化, 因此不能一味的增加偏心距离。总体而言, 偏心布置的流场湍动强度较高, 可以更快的使颗粒与水进行混合, 混合均匀程度较高。并且, 偏心距越大, 水获得速度越大。对某些偏心距来讲, 即使在  $Re < 50$  的时候也能引起搅拌槽内流场的混沌, 直至消除常规搅拌时候的分区现象, 有利于物料混合。但是, 偏心距越大, 对壁面的冲刷就会越剧烈。

#### 参考文献 (References):

[1] 宋月兰. 多层桨搅拌槽内气液两相流的数值模拟[D]. 北京: 北

能大量补充消耗的湍动能。从物料的混合角度来看, 颗粒的卷入混合可能会尽可能地从中湍动能较大区域通过。物料沿轴线进入水流内部, 再由桨叶将其打散随流体流动至容器内部各处。偏心搅拌时湍动能分布有两个明显的峰值区, 在液面涡心附近和靠近容器壁一侧桨叶叶端, 容器内部湍动能无明显弱区, 近壁面湍动能远大于中心搅拌, 而整个容器内部, 水相的湍动能是中心搅拌的2倍。从物料的混合角度看, 颗粒卷入的湍动能高速区既宽且深, 颗粒到达桨叶附近的叶端, 有利于颗粒的混合。

#### 2.2.3 偏心搅拌的混合时间

从上述分析可知, 加大浸入深度可以提高搅拌效率。为了分析偏心率大小对固液混合效果的影响, 在  $N = 0.2$  的时候, 对三种不同偏心率下的混合时间进行了比较。

京化工大学, 2006: 245-248. (SONG Yue lan. Numerical Simulation of Gas Liquid Flow in a Stirred Tank with a New Multiple Impeller[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006: 245-248. (in Chinese))

[2] Brucato A, Ciofalo M, Godfrey J, et al. Experimental Determination and CFD Simulation of Solids Distribution in Stirred Vessels Proc 5th Int Comfron Multiphase Flow in Industrial Plants[J]. Amalfi, 1996, 28(3): 26-27.

[3] Brucato A, Ciofalo M, Godfrey J, et al. On the Simulation of Solid Particle Distribution in Multiple Impeller Agitated Tanks Via Computational Fluid Dynamics[J]. AIDIC Conf Ser, 1997, (2): 287-294.

[4] Zhang zheng, Cheng Xuewen. Numerical Simulation of Erosion Corrosion in the Liquid-Solid Two-Phase Flow [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2000, 8(4): 347-355.

[5] Micale G. CFD Simulation of Particle Distribution in Stirred Vessel[J]. Trans IChemE, 2000, 78(A): 435-444.

[6] 钟丽, 黄雄斌, 贾志刚. 卧液搅拌槽内颗粒离底悬浮临界转速的CFD模拟[J]. 北京化工大学学报, 2003, (6): 19-21. (ZHONG Li, HUANG Xiong bin, JIA Zhigang. CFD Modeling of Solids Just-suspended Impeller Speed in Stirred Tanks[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2003, (6): 19-21. (in Chinese))

[7] 徐姚, 张政. 旋转圆盘上液固两相流冲刷磨损数值模拟研究[J]. 北京化工大学学报, 2002, 29(3): 13-16. (XU Yao, ZHANG Zheng. Numerical Simulation of Abrasive Erosion in the Liquid-solid Two-phase Rotary flow[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2002, 29(3): 13-16. (in Chinese))

- 2004, (19): 355-357. (in Chinese)
- [5] 刘立才, 陈鸿汉. 梯度法在水文地质参数估值中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2003, (3): 39-41. (LIU Lì cai, CHEN Hong han. Application of Gradient Method to Calculation of Hydrogeological Parameters[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (3): 39-41. (in Chinese))
- [6] 刘瑞新. 蜀山背斜岩溶水系统特征研究[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(9): 41-45. (LIU Ruì xin. A Study on the Shushan Anticline Karstic Water System Characteristics[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(9): 41-45. (in Chinese))
- [7] 朱斌, 武强. 断层影响下的地下水流数值模拟[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(1): 31-35. (ZHU Bin, WU Qiang. Groundwater Modeling under the Effect of Faults[J]. Journal of Gui Ling Institute of Technology, 2005, 25(1): 31-35. (in Chinese))
- [8] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 科学出版社, 2007. (XUE Yuqun, XIE Chunhong. Groundwater Modeling[M]. Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 周训, 陈明佑. 埋藏型岩溶地下水源地的三维数值模拟[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 6-11. (ZHOU Xun, CHEN Mingyou. 3D Numerical Modeling To Groundwater Wellhead in Buried Karst Area[J]. Karst in China, 2006, 25(1): 6-11. (in Chinese))
- [10] 林传年, 李利平. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1470-1476. (LIN Chuannian, LI Lì ping. Research On Forecast Method of Tunnel Water Inrush In Complex Karst Areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1470-1476. (in Chinese))
- [11] 戴春华. 中梁水库岩溶水流数值模型及渗漏量计算[D]. 南京: 河海大学, 2004. (DAI Churhua. Numerical Modeling of Karst Groundwater and Calculation of Leakage Quantity in the Area of Zhongliang Reservoir[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [12] 龚睿. 隧道工程建设对隔档式岩溶富水背斜地下水环境的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010. (GONG Rui. Study on the Impact of Tunnel Construction on the Groundwater Environment of the Partition Style Karst Water rich Anticline[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [13] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, (2): 107-110. (FU Kai long. An Analysis of the Karst Ground Collapse and Water Yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusu Expressway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (2): 107-110. (in Chinese))
- [14] 王忠忠, 支兵发. 广州江村水源地岩溶地下水场数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(4): 45-47. (WANG Zhongzhong, ZHI Bingfa. Karst Groundwater Modeling in Water Resource Area of Jiang Village, Guangzhou[J]. Geohazard and Environment Protection, 2009, 20(4): 45-47. (in Chinese))
- [15] 罗敏. 岩溶蓄水构造区隧道涌突水量计算探析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (LUO Min. Analyses of Tunnel Water inrush Calculation in Karst Water storing Structure Areas[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))

(上接第 77 页)

- [8] 李良超, 张仲敏, 黄雄斌. 固-液搅拌槽内近壁区液相速度研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(1): 35-38. (LI Liangchao, ZHANG Zhongmin, HUANG Xiongb. Determination of Liquid Velocity Near Wall Region in a Solid-liquid Stirred Tank[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(1): 35-38. (in Chinese))
- [9] Wang Feng, Mao Zaisha, Shen Xiangqian. Numerical Study of Solid-Liquid Two-Phase Flow in Stirred Tanks with Rushton Impeller (ò) Prediction of Critical Impeller Speed[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(5): 610-614.
- [10] Fokema M D, Kresta S M, Wood P E. Importance of Using Correct Boundary Conditions for CFD Simulations of Stirred Tanks[J]. Can J Chem Eng, 1994, 72: 177-183.
- [11] Ranade V V, Joshi J B. Flow Generated by a Turbine, Part I: Experimental [J]. Trans Inst Chem Eng, 1990, 68: 19-23.
- [12] Xu Y, McGrath G. CFD Predictions of Stirred Tank Flows [J]. Trans Inst Chem Eng, 1996, 17: 471-475.
- [13] Harbey A D, Rogers S E. Steady and Unsteady Computational Study of Multiple Impeller Flows[J]. AIChEJ, 1996, 42: 2701-2712.
- [14] 周国忠. 搅拌槽内流动与混和过程的实验研究及数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2002. (ZHOU Guozhong. Experimental and Numerical Study on Fluid Dynamics and Mixing Process in Stirred Tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2002. (in Chinese))
- [15] 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. (ZHANG Guojuan. Numerical Simulation of Mixing Process in a Stirred Tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese))
- [16] 杨敏官, 冯浪, 康灿, 等. 偏心搅拌槽内颗粒悬浮特性的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 129-131. (YANG Minguan, FENG Lang, KANG Can. Experimental Study on Critical Suspension Speed of Shaft in Eccentrically Stirred Tank [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 129-131. (in Chinese))