文章编号: 1004-0609(2012)06-1835-07

# 机械搅拌式锌浸出槽内固液两相流的数值模拟与结构优化

陈 卓<sup>1,2</sup>, 周 萍<sup>1,2</sup>, 李 鹏<sup>1,2</sup>, 肖功明<sup>3</sup>, 闫红杰<sup>1,2</sup>, 魏文武<sup>3</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 流程工业节能湖南省重点实验室, 长沙 410083;

3. 湖南株洲冶炼集团股份有限公司, 株洲 412004)

**摘 要:**基于 Fluent 软件,采用标准的 k-e 湍流模型、欧拉-欧拉多相流模型、多重参考系稳态流动方法,对浸出槽内固液两相流动过程进行数值模拟研究,且采用示踪剂法研究流体在槽内停留时间的分布。将临界离底悬浮转速的数值模拟结果与 Zwietering 临界转速进行比较,两者吻合较好,验证模型的有效性。应用数值模拟方法研究桨叶离底高度、桨叶间距和阻尼板高度对槽内固相浓度分布和浸出液平均停留时间的影响规律。结果表明:在一定范围内,增大桨叶间距有利于固相分布均匀,延长浸出液的平均停留时间,从而促进固液相之间的传质扩散,当桨叶间距为 2D(D 为浸出槽直径)时,效果较优;在一定范围内,增大阻尼板高度有利于槽内固相的上浮;在允许范围内,降低桨叶离底高度有利于改善槽底沉积现象,增大浸出液的平均停留时间,当桨叶离底高度为 0.3D 时,效果较好。

关键词:浸出槽;欧拉-欧拉多相流模型;多重参考系;固液两相流;停留时间 中图分类号:TF351.5 文献标志码:A

# Numerical simulation and structure optimization of solid-liquid two-phase flow field in mechanical stirred zinc leach tank

CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>, ZHOU Ping<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, XIAO Gong-ming<sup>3</sup>, YAN Hong-jie<sup>1,2</sup>, WEI Wen-wu<sup>3</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Energy Conservation in Process Industry, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Hunan Zhuzhou Smelting Group Co., Ltd., Zhuzhou 412004, China)

**Abstract:** Based on Fluent software, the solid-liquid two-phase flow field of mechanical stirred zinc leach tank was simulated with standard  $k-\varepsilon$  turbulence model, Eulerian-Eulerian multiphase model and multi-reference flame method of steady-state flow. The residence time distribution of fluid in the tank was calculated mainly by tracer method. The result of critical suspended impeller speed was compared with the Zwietering correlation and the feasibility of the model and method was verified. The influences of some parameters, such as the distances between two impellers, the height of baffle and the distance of impeller from bottom, on solid concentration distribution and the residence time distribution of fluid in the tank were studied. The following conclusions are obtained. The increase of the distances between two impellers within a certain range is helpful for the uniform distribution of solid phase and increases the mean residence time of fluid, which promotes the mass transfer and diffusion between solid and liquid. The optimal distance is 2D (D is the diameter of leaktank). Increasing the height of baffle is advantageous to the raise of solid phase. Lowering the distance of impeller from bottom can decrease the solid deposition at the bottom and increase the mean residence time of fluid. The appropriate distance is 0.3D.

Key words: leach tank; Eulerian-Eulerian multiphase model; multi-reference flame method; solid-liquid two-phase flow; residence time

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2010AA065201)

收稿日期: 2011-08-15; 修订日期: 2011-11-10

通信作者:周 萍,教授,博士;电话: 13975804856; E-mail: zhoup@csu.edu.cn

机械搅拌式锌浸出槽是目前湿法炼锌浸出工序的 主要设备,它相对于广泛使用的空气式浸出槽具有改 善现场操作环境、降低能耗等优点。但在生产过程中, 仍存在槽内速度和浓度分布不均匀、槽底部分区域沉 积较多等问题,使锌的浸出率降低,给生产带来不利 影响<sup>[1]</sup>。

湿法炼锌的浸出过程是以稀硫酸或电解过程的废 电解液作为溶剂,将锌焙砂中的锌金属及其他有价金 属溶解进入溶液的过程<sup>[2]</sup>。在该过程中,稀硫酸吸附 在锌焙砂的外表面,在液相与固相的界面上发生化学 反应,随着反应的进行,锌焙砂周围形成一层饱和硫 酸盐溶液,溶剂需要通过饱和硫酸盐溶液层的扩散作 用于锌焙砂的下一层,使溶解过程得以继续进行,可 见,锌的浸出速率是由锌焙砂和稀硫酸的化学反应速 率以及硫酸盐溶液的扩散速率所决定<sup>[3-5]</sup>。进一步的 研究发现,氧化锌矿溶于稀硫酸中的反应属于典型的 扩散速率控制反应<sup>[6-7]</sup>,因此,增加溶液在锌焙砂中的 扩散速率就成了提高锌浸出率的关键。

一般而言,硫酸盐的扩散速率与溶液的浓度差和 周围流体的流速有关。在浓度差一定的情况下,增加 溶液与固体颗粒之间的速度差有利于加快固体颗粒表 面溶液的更新速率,减小传质边界层厚度,显著增加 扩散速率,从而促进锌的浸出<sup>[8]</sup>。因此,浸出槽内液 相、固相的流动速度以及型式对两相之间的扩散速率 有着重要影响,进而对锌的浸出率有着重要影响。

在生产实践中,由于浸出槽的封闭性,仅依靠一些经验和有限的测试手段很难了解其中固相分布和流体流动的规律。因此,本文作者采用计算流体力学(CFD)技术对浸出槽内固液两相流流动过程进行数值模拟,研究不同浸出槽结构的流场、固相浓度场的分布特性及浸出液在槽内的平均停留时间大小,为浸出槽的优化设计提供一定的理论指导。

### 1 研究对象及其网格划分

研究对象为某厂圆柱形平底机械搅拌槽,槽直径为D,高为1.1D,槽内均布4块阻尼板,搅拌桨采用双层45°四折叶涡轮桨(PBT45),直径为D/3,两层桨叶间距为D/3,底层桨叶离底高度D/3,其结构如图1所示。模拟物系为固液两相体系,固相是锌焙砂,密度为5.5 Mg/m<sup>3</sup>,平均粒径为0.3 mm,体积分数为7%;液相为硫酸锌溶液,密度为1.35 Mg/m<sup>3</sup>,黏度为10 mPa·s。

基于 Gambit 软件,采用六面体结构化网格对计

算区域进行网格划分(见图 2),总网格数为 122 万。根据搅拌槽的特点,计算中使用多重参考系法(MRF),即将搅拌器所在的区域定义为动参考系,其余区域为静止参考系。



图1 浸出槽结构示意图

Fig. 1 Sketch of structure of zinc leach tank



图2 计算区域网格示意图

Fig. 2 Sketch of grid of computational domain

# 浸出槽内两相流场的数值计算与 模型验证

#### 2.1 数学模型

2.1.1 稳态流动过程的数学模型 在采用 FLUENT 软件模拟浸出槽内固液两相流 动过程时,对研究对象进行如下简化:

1) 假定流动过程稳定连续,将其视为定常流动过程;

2)考虑到浸出液在槽内进出口温差(20~30 ℃)较小,对流体密度影响不大,将其视为等温流动过程;

3) 忽略化学反应对液固两相流场的影响;

4) 固相颗粒具有相同的粒径。

应用欧拉-欧拉多相流模型与标准的 k-e 湍流模 型描述浸出槽内的两相流动过程<sup>[9-13]</sup>,其连续性方程 为

$$\nabla \cdot (\alpha_a \rho_a \vec{v}_a) = 0 \tag{1}$$

式中:  $\alpha_q$  表示 q 相体积分数;  $\vec{v}_q$  表示 q 相速度;  $\rho_q$  是 q 相密度。

液-固动量方程为

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^{n} [\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}] + (\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift}.q} + \vec{F}_{vq}) \qquad (2)$$

式中:  $\alpha_q$  表示 q 相体积分数;  $\vec{v}_q$  表示 q 相速度;  $\rho_q$  是 q 相密度;  $\overline{\vec{\tau}_q}$  是 q 相的压力应变张量(stress-strain tensor);  $\vec{g}$  是重力加速度;  $\dot{m}_{pq}$  表示单位时间单位体 积内 p 相到 q 相的质量传递,本研究为 0;  $\vec{v}_{pq}$  为相间 速度; n 为相总数,本研究相数为 2;  $\vec{F}_q$  是外部体 积力;  $\vec{F}_{\text{lift},q}$  是升力;  $\vec{F}_{vq}$  是虚拟质量力,本研究中的  $\vec{F}_q$ 、 $\vec{F}_{\text{lift},q}$ 、 $\vec{F}_{vq}$ 均取为 0; 相间作用力 $\vec{R}_{pq} = K_{sl}u_{s,l}$ ,  $u_{s,l}$  为固液相对速度,  $K_{sl}$  为相间交换系数,用 Syamlal-O'Brien 模型进行描述<sup>[14]</sup>。

2.1.2 浸出液停留时间计算的数学模型

停留时间是指物料从进入设备至离开设备的时间。其测试方法常采用示踪剂法,即在入口脉冲注入 示踪剂,同时在系统出口检测示踪剂浓度随时间变化 的方法来研究流体在槽内停留时间的分布<sup>[15]</sup>。

停留时间的分布函数可以定义为

$$E(t) = C_0(t) / \int_0^\infty C_0(t) dt$$
(3)

表征某一停留时间时的示踪剂占示踪剂总量的比率。 平均停留时间 τ,其表达式为

$$\tau = \int_{0}^{\infty} tE(t) dt \tag{4}$$

表征示踪剂的平均停留时间。

为实现槽内两相流中液相停留时间的数值模拟, 在浸出槽入口加入一种物性参数与锌浸出液相同的示

$$C_0(t) = \begin{cases} 1, \ t \in (0, \ 1] \\ 0, \ t \in (1, \ \infty) \end{cases}$$
(5)

式中: *C*<sub>0</sub>(*t*)为示踪剂浓度。由于示踪剂的物性参数与 锌浸出液相同,它的加入对浸出槽内的流场无影响, 因此,在数值模拟过程中,以稳态的流场为基础,需 要增加非稳态质量组分传输方程。

非稳态质量组分传输方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i$$
(6)

式中: $J_i$ 表示相对质量平均速度的质量扩散通量; $Y_i$ 表示 i 物质的质量组分。

#### 2.2 边界条件

为了获得特定结构设备中流动状况,需要对式 (1)~(2)所示的控制方程给出特定问题的边界条件,其 定义如下:

1) 入口边界: 速度入口边界 inlet, 入口流量 348 m<sup>3</sup>/h;

2) 出口边界:出流边界 outflow;

 3) 壁面边界:将设备中静止的固体壁面定义为无 滑移壁面边界,意味着靠近静止固体壁面黏性流体速 度为 0;

4) 液体表面与空气接触, 定义为自由滑移壁面;

5)将搅拌桨定义为动边界,边界类型为壁面边界,搅拌桨处于运动流体区域,且和周围的流体以同样的转速运动,相对于区域内流体是静止的。

#### 2.3 临界离底悬浮转速的模拟与模型验证

搅拌槽的临界离底悬浮转速是指槽内固体颗粒完 全离底悬浮时的最小转速。在数值模拟时,钟丽等<sup>[16]</sup> 对临界离底悬浮转速的判断提出了浓度判据,认为搅 拌槽底固体颗粒体积分率的最大值小于 0.52 时,搅拌 槽底固体颗粒达到完全离底悬浮。

为了用 CFD 方法获得临界离底悬浮转速,对不同 转速下(120~160 r/min)单层桨叶搅拌槽内的液固两相 流动过程进行了数值模拟,并绘出了距槽底1 mm 水 平截面上固体颗粒最大体积分数随转速变化的曲线 (见图 3)。

从图 3 中可以发现,当转速达到 144 r/min 时,固体颗粒的最大体积分数为 52%,且随着转速的增大, 槽底固体颗粒体积分数逐渐减小,因此,基于 CFD 方 法的完全离底悬浮临界转速为 144 r/min。



Fig. 3 Simulation result of solid phase volume fraction at

different rotation speeds

关于临界离底悬浮转速的理论研究较多,有不少临界转速的关联式发表,但应用较广泛是 Zwietering 完全离底悬浮临界转速关联式<sup>[17]</sup>,其表达式为

$$N_{\rm js} = K d^{-0.85} v^{0.1} d_{\rm s}^{0.2} \left| g \frac{\rho_{\rm s} - \rho_{\rm l}}{\rho_{\rm l}} \right|^{0.45} X^{0.13}$$
(7)

式中:  $N_{js}$ 为临界转速, r/s; K是与搅拌槽的形状、搅 拌器的型式和尺寸有关的系数;  $\nu$  为液体的运动黏度, m<sup>2</sup>/s;  $\rho_s$ 和  $\rho_1$ 分别为固体密度和液体密度, kg/m<sup>3</sup>; d和  $d_s$ 分别为搅拌器直径和固体颗粒直径, m; X为固 液两相质量比乘以 100; g为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

当研究对象采用单层桨叶时,其临界离底悬浮转 速为 138 r/min。与数值模拟结果相比,其误差为 4.35%(见表 1),能够为工程应用所接受。这也说明,

表1 临界离底悬浮转速的模拟结果与理论值的比较

 Table 1
 Comparison between calculated and theoretical N<sub>is</sub>

Value of numerical simulation/ (r·min <sup>-1</sup> )	Value of Zwietering/ (r·min <sup>-1</sup> )	Relative deviation/%
144	138	4.35

本文作者采用 CFD 模型与方法能够较准确地模拟搅 拌槽内流体流动情况。

### 3 浸出槽结构的优化

为研究搅拌式浸出槽结构变化对槽内液固两相流 场的影响规律,实现其结构的优化,对不同桨叶间距、 挡板高度和桨叶离底高度下槽内的流场进行模拟,考 虑到在工业应用中锌浸出槽较多为两层桨叶,故下述 模拟均是针对两层桨叶,桨叶转速为60r/min。

#### 3.1 桨叶间距

桨叶间距对浸出槽整体固相浓度和流速分布有较 大影响,为了找到一个合适的间距,本文作者分别模 拟了桨叶间距 *S* 为 *D*、1.5*D* 和 2*D* 3 种工况,其结果 如图 4 和 5 所示。

图 4 和 5 表明:随着桨叶间距的增大,槽内流速 趋于均匀,固相上浮范围也逐渐增大。当桨叶间距较 小时,两层桨叶的高速区相互重合并集中在小部分区 域,造成整个槽内的固相分布不均匀,靠近槽底区域 固相处于局部堆积状态,而靠近槽顶区域,固相浓度 (指体积浓度,以下均同)较低,对浸出不利;随着上





**Fig. 4** Velocity vector distribution of different distances between impellers at center longitudinal section (Larger vector arrow size represents higher velocity): (a) S=D; (b) S=1.5D; (c) S=2D



图 5 距槽底 1 m 以上区域平均固相浓度随桨叶间距的变化 Fig. 5 Change of average value of solid concentration at domain with height over 1 m from bottom of tank changes with distance between two impellers ( $C_{avg}$  is average solid phase concentration)

层桨叶升高,槽内的流体高速区范围增大,增强双层 桨叶之间的扰动,产生较多漩涡,有利于固相的上浮 以及固液之间的相对流动,加快了锌的浸出。

表 2 所示为不同桨叶间距的槽内浸出液的平均停 留时间。表中数据显示,随着桨叶间距的增大其值逐 渐增大,当桨叶间距为 2D 时,平均停留时间最大, 为 1 428 s。这主要是由于随着桨叶间距的增大,槽内 高速区范围也随之增大,从而增大浸出液流动范围, 最终促使浸出液的平均停留时间延长。根据工艺要求, 锌浸出时间约为 30~150 min<sup>[18]</sup>,由此看来,桨叶间距 为 2D 时要优于其他两种工况。

当然,桨叶间距也不是越大越好,上层桨叶过高,容易导致桨叶裸露在空气中,考虑到液面高度,选择 S=2D较为合适,不宜再增加。

#### 表2 不同桨叶间距工况平均停留时间

Table 2Average residence time of different distancesbetween impellers

Distance between impeller	D	1.5D	2 <i>D</i>
Average residence time/s	1 405	1 406	1 428

#### 3.2 阻尼板高度

对于圆形搅拌槽,为了消除流体在槽中央产生等 速回旋区(颗粒与流体速度相同,无速度差,不利于固 液之间的传质),增加桨叶对流体的剪切性能,通常要 在槽内安装阻尼板。为了研究阻尼板高度对浸出槽的 影响,结合现场阻尼板的结构特征,本文作者模拟 3 种阻尼板高度的工况: a、2a、3a(a=230 mm)。

图6所示为距离槽底1m以上槽内平均固相浓度。 通过比较可以发现,当阻尼板的高度由 a 增加到 2a 时,固相平均浓度增加较快,而从 2a 继续增加到 3a 时,固相的平均浓度变化较小。其主要原因是随着阻 尼板高度增大,槽内流体越来越多地由周向流转化为 轴向流,从而使固相较快地向槽顶部低浓度区流动, 加快了固相的扩散;但当阻尼板高度继续增大时,阻 尼板对流体的阻挡作用抵消轴向流动的强度增加的 量,从而对固相上浮影响较小。



图 6 距槽底 1 m 以上平均固相浓度随阻尼板高度的变化 Fig. 6 Change of average value of solid concentration at domain with height over 1 m from bottom of tank changes with battle height

表 3 所列为 3 种阻尼板高度下槽内浸出液的平均 停留时间值。从表 3 可见, 3 种阻尼板高度工况浸出 液的停留时间相差较小,当阻尼板高度为 2a 时要略大 于其他两种工况。这说明,阻尼板高度的变化主要影 响槽内流体的流型及固相分布,对浸出液的停留时间 影响不大。因此,选择阻尼板高度为 2a 比较合理。

表3 不同阻尼板高度工况平均停留时间

 Table 3
 Average residence time of different height of baffle

Baffle height	а	2 <i>a</i>	3 <i>a</i>
Average residence time/s	1 405	1 407	1 401

#### 3.3 桨叶离底高度

桨叶离底高度 L 是搅拌槽的重要参数,一般而言, L 的大小为桨径 D 的 1~1.5 倍,但对于固液体系,为 了防止底部沉积,也可将桨叶放置低些<sup>[19]</sup>。本文作者 分别取 L 为 0.4D、0.3D 和 0.2D 3 种工况进行了模拟, 其主要结果示于图 7~8 中(图 7 中数字表示固相体积分 数)。



图 7 不同桨叶离底高度下中心纵截面固相浓度分布

Fig. 7 Solid concentration distribution of different impeller distances from bottom at longitudinal section center: (a) L=0.4D; (b) L=0.3D; (c) L=0.2D

由图 7 可见,当L 由 0.4D 减小到 0.3D 时,底部 固相沉积有明显的改善,主要是由于随着桨叶安装高 度的降低,底部沉积区被桨叶的高速旋转区覆盖,槽 底流体速度增大,加速了固相的上浮,从而使底部固 相浓度降低。因此,桨叶安装高度的降低,一方面使 底部固体颗粒分散于溶液中,加强了固相周围硫酸盐 溶液向外扩散,有利于锌的浸出;另一方面减缓槽底 固体颗粒的沉积,有利于生产的顺利进行。当L 由 0.3D 减小到 0.2D 时,底部沉积现象的进一步改善却并不明 显。由图 8 不难发现,在 L=0.3D、L=0.2D 2 种情况下, 距槽底 0.2 m 处截面平均固相浓度相差较小。对于固 液搅拌槽,桨叶安装太低,底部固相颗粒的冲击和磨 蚀作用将对桨叶造成较大的影响,严重时将会影响桨 叶的正常运行。



图 8 距槽底 0.2 m 横截面平均固相浓度随离底高度的变化 Fig. 8 Change of average solid concentration with impeller distance from bottom at plane of 0.2 m away from bottom

另外,通过槽内浸出液停留时间的计算发现(见表 4),桨叶离底高度的变化对浸出液平均停留时间有较 大影响,当桨叶高度为 0.3D 时,其平均停留时间最长 为 1 441 s。而当高度继续降低到 0.2D 时,由于其 高度与导液简位置相近,桨叶高速旋转引起的部分上 浮锌液将会快速通过导液简流出槽外从而形成"短 路",使其平均停留时间变小。

因此,综合考虑,选择 L=0.3D 对生产较为有利。

表4 不同桨叶离底高度工况平均停留时间

Impeller distance from bottom	0.4 <i>D</i>	0.3D	0.2 <i>D</i>
Average residence time/s	1 405	1 441	1 338

## 4 结论

2) 桨叶间距的增大,提高槽内整体固相分布的均匀程度,增大浸出液在槽内的平均停留时间,进而有利于提高锌浸出率,综合考虑固相浓度分布与桨叶离液面位置,桨叶间距 S=2D 较优。

 2) 增大阻尼板高度有利于槽内固相的上浮,但当 增大到一定高度后,对固相上浮的影响变小。

3) 降低桨叶离槽底高度有利于增大浸出液在槽 内的平均停留时间、增大槽底流体流速和改善底部沉 积现象,从而可以加速槽底固相周围硫酸盐溶液的扩 散,模拟结果显示桨叶离底高度 *L*=0.3*D* 时效果较为

#### 第22卷第6期

#### 理想。

#### REFERENCES

- [1] 何纯海. 锌浸出槽搅拌系统的改造设计[J]. 湖南有色金属,
  2003, 19(3): 48-50.
  HE Chun-hai. The reform design of agitation system in zinc leach tanks[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2003, 19(3): 48-50.
- [2] 徐申坤. 锌冶金学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1996.
   XU Shen-kun. Metallurgy of zinc[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1996.
- [3] 彭长宏,胡振光,戴 劲,傅 锋.钢铁厂铁鳞硫酸的浸出过 程[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(4):874-878.
  PENG Chang-hong, HU Zhen-guang, DAI Jin, FU Feng. Leaching process of millscale from steel plant[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(4): 874-878.
- [4] 彭长宏,李景芬,李基森. 锰锌铁氧体废料的浸出工艺[J]. 中 南大学学报:自然科学版,2009,40(1):19-24.
   PENG Chang-hong, LI Jing-fen, LI Ji-sen. Leaching process of waste Mn-Zn ferrites powder[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(1):19-24.
- [5] 胡天觉,曾光明,袁兴中. 湿法炼锌废渣中硫脲浸出银的动力学[J]. 中国有色金属学报,2001,11(5):933-937.
  HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, YUAN Xing-zhong. Leach kinetics of silver extracted by thiourea from residue in hydrometallurgy of zinc[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 933-937.
- [6] 邵 琼, 兰尧中. 湿法炼锌废渣综合浸出过程动力学研究[J]. 有色金属: 冶金部分, 2006, 3: 11-13.
  SHAO Qiong, LAN Yao-zhong. Comprehensive leaching kinetics by sulfuric acid from zinc hydrometallurgy residue[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2006, 3: 11-13.
- [7] 梅光贵, 王德润, 周敬元, 王 辉. 湿法炼锌学[M]. 长沙: 中 南大学出版社, 2001.
  MEI Guang-gui, WANG De-run, ZHOU Jing-yuan, WANG Hui.
  Hydrometallurgy of zinc[M]. Changsha: Central South

University Press, 2001.

- [8] 邓小华. 铜镉渣中回收金属锌、铜、镉的研究[D]. 上海: 同济 大学, 2005.
   DENG Xiao-hua. An investigation on recycling of zinc, copper and cadmium from copper-cadmium slag[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [9] TAMBURINI A, CIPOLLINA A, MICALE G, CIOFALO M, BRUCATO A. Dense solid-liquid off-bottom suspension

dynamics: Simulation and experiment[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87: 587–507.

- [10] FERNANDEZ MOGUEL L, MUHR H, DIETZ A, PLASARI E. CFD simulation of barium carbonates precipitation in a fluidized bed reactor[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88(9): 1206–1216.
- [11] BEZUIDENHOUT J J, EKSTEEN J J, BRADSHAW S M. Computational fluid dynamic modeling of an electric furnace used in the smelting of PGM containing concentrates[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(11): 995–1006.
- [12] CANIZARES P, PEREZ A, CAMARILLOA R, MAZARRO R. Simultaneous recovery of cadmium and lead from aqueous effluents by a semi-continuous laboratory-scale polymer enhanced ultrafiltration process[J]. Membrane Science, 2008, 320: 520–527.
- [13] BANIADAM M, FATHIKALAJAHI J, RAHIMPOUR M R. Incorporation of Eulerian-Eulerian CFD framework in mathematical modeling of chemical absorption of acid gases into methyl diethanol amine on sieve trays[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151: 286–294.
- [14] 江 帆,黄 鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华 大学出版社, 2008.
   JIANG Fan, HUANG Peng. Fluent advanced applications and case analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [15] JOHN T A, ADENIYI L. Numerical and experimental studies of mixing characteristics in a T-junction micro channel using residence-time distribution[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64: 2422–2432.
- [16] 钟 丽,黄雄斌,贾志刚. 固-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, 30(6): 18-22. ZHONG Li, HUANG Xiong-bin, JIA Zhi-gang. CFD modeling of solids just-suspended impeller speed in stirred tanks[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2003, 30(6): 18-22.
- ZWIETERING T N. Suspending of solid particles in liquid by agitators[J]. Chemical Engineering Science, 1958, 8(3): 244–253.
- [18] 方兆珩. 浸出[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
   FANG Zhao-heng. Leaching[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [19] 王 凯,虞 军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社,
   2003.
   WANG Kai, YU Jun. Mixing equipment[M]. Beijing: Chemical

Industry Press, 2003.

(编辑 李艳红)