

文章编号: 1004-0609(2006)06-1088-06

预焙铝电解槽阳极底部开排气沟对电解质流场的影响^①

李相鹏^{1,2}, 李 劫², 赖延清², 刘业翔², 周 昊¹, 岑可法¹

(1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027;

2. 中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 对预焙铝电解槽阳极底部开排气沟时周围电解质流场进行计算, 发现部分阳极气体可以通过排气沟向外排放, 减少气泡在阳极底部停留时间和阳极底掌气泡覆盖率, 从而有利于降低极间电阻压降和阳极效应系数, 减少电解能耗; 另一方面气体带动电解质进入排气沟, 然后进入电解槽侧部通道, 扩大了电解质循环通道, 促进了阳极周围电解质流动和槽内的传质传热, 有利于保持电解正常进行, 相比之下排气沟为通沟时较非通沟更有利于保持电解质流动稳定; 同时由于排气沟促进了阳极气体排放, 使铝液与阳极气体发生“二次反应”(即电解还原的铝卷入电解质中被阳极气体重新氧化)的机会减少, 有利于提高铝电解电流效率。

关键词: 预焙阳极; 排气沟; 阳极气体; 电解质流场

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

Influences of gas discharging grooves at bottom of prebaked carbon anodes on bath flow pattern in aluminum reduction cells

LI Xiang-peng^{1,2}, LI Jie², LAI Yan-qing², LIU Ye-xiang², ZHOU Hao¹, CEN Ke-fa¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Metallurgical Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Simulations on the bath flow fields around a prebaked carbon anode with gas discharging grooves at the bottom which could be applied on aluminum reduction cell was conducted. The results reveal that with the help of the grooves, anode gas discharging is facilitated, residence time of bubbles in the interpolar gap(or ACD) and the bubbles coverage of the anode bottom can be reduced, which greatly contributes to the decrease of the voltage drop in ACD and anode effects, so the energy consumption of the aluminum production can be lowered. On the other hand electrolyte dragged by gas bubbles goes into the grooves, then to the side channel of the cell, passageway for the bath circulation is widened, a relatively smooth bath circulation around the anode will be formed, which enhances the heat and mass transmission, therefore a good electrolysis operation can be obtained. Compared the grooves which extend through the whole length of the anode bottom with those do not, the former are more propitious to the stability of the bath flow, meanwhile as the grooves facilitate the gas venting, the so called “second reaction”, i. e. the aluminum reduced diffuse into the bath and react with the anode gas again, could be restrained to some extent, which would be beneficial to the improvement of the current efficiency.

Key words: prebaked carbon anodes; gas discharging grooves; anode gas; bath flow fields

目前预焙铝电解槽所采用的炭阳极均为底部水平平方块阳极, 由于底面面积较大, 不利于阳极气

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA327140)

收稿日期: 2005-09-16; 修订日期: 2006-01-10

通讯作者: 李相鹏; 电话: 0571-87952443-6416; E-mail: roclee_xp@163.com

体的排放。因此,在阳极底下,总有部分面积被电解产生的气泡所覆盖,使电解质与炭阳极之间接触面积减少,极间电阻增大;另外,采用这种阳极不利于极间的传质,电解过程中当极间氧化铝浓度降低,电解质同炭阳极之间的湿润性变差,析出的气体容易进入阳极和电解质的界面上,随着阳极气泡的逐渐增多,由小气泡聚合成较大气泡,形成连续的气体膜,就会引发阳极效应,同时极间产生过热,危害电解正常进行^[17]。解决这些问题的关键就在于如何优化阳极结构,使电解产生的气体排放更加方便,同时也使阳极周围形成的电解质流场能更好的促进槽内的传质传热。

目前一些国外预焙槽上采用底部开排气沟的炭阳极,但国内铝业界没有对此进行深入的研究。国外对于开排气沟阳极研究的公开报道也很少,仅在 1990 年美国的 Shekhar 等对底部开不同排气沟的惰性阳极对流场的影响进行了水模型试验,结果表明阳极底部开槽有利于减少阳极底部气泡覆盖率和促进极间氧化铝的传质^[4]。

采用水模型实验,可以测定不同条件下流体的基本参数,但是要从本质上对流体的特征和性质进行了解,需要进行数值模拟。对于气液两相流的模拟,通常采用双液相模型(即所谓的 Euler-Euler 模型),双液相模型将气相假设为液相,采用连续的参数进行模拟,这种方法不能很好地描述气泡的分散特性,但对于工程上的应用基本足够^[57]。采用轨道模型的欧拉-拉格朗日法(Euler-Lagrange 方法)在气固、液固两相流模拟中使用较多,采用拉格朗日坐标系研究颗粒群的运动,把颗粒群按初始尺寸分组,各组颗粒沿其自身轨道运动^[8-11]。相比之下,将 Euler-Lagrange 方法用于气液两相流的模拟较少:Johansen 使用 Lagrangian 颗粒跟踪算法与球形气泡牵引参数近似计算结合的办法对气液两相流进行了计算^[12]。Fraser 等将这种方法用于霍耳-埃鲁特电解槽内电解质流场二维模型的计算^[13]。Purdie 等采用流场计算软件 Fluent 对半个阳极周围的电解质流场进行了三维模拟^[14]。

为了更好的了解阳极气泡在阳极底部的运动特征及其带动电解质流动的流场模式,本文采用 Euler-Lagrange 方法对阳极气体排放引起的气液两相流进行数值计算,采用轨道跟踪方法对气泡运动进行模拟。在商用流场计算软件 Fluent 上建立起了 75kA 预焙槽阳极气体排放引起的电解质流场计算模型,重点对阳极底部开通沟或非通沟时电解质流场进行了计算和对比分析。这种预焙槽是早年由 60

kA 自焙槽改造来的,目前仍在国内较多的厂家使用,因此具有一定的代表性,对之在其他方面的研究也较多^[15]。

1 建模计算

由于电解槽结构和电解过程的复杂性,需对计算模型作一定的简化。75kA 预焙槽有 12 组阳极,而且每个阳极周围的电解质流场应该有所不同,这主要是受位置、电流密度和槽内电磁力分布等方面的差异造成的。这里为了简化模型计算,将忽略这些差异,仅对单个阳极周围电解质流场进行模拟,而且没有考虑电磁力对流场的影响。在今后的工作中,将对整槽电解质流场进行模拟分析,同时尽可能加入电磁力的作用。

对于炭阳极底部开排气沟,考虑了通沟(方案 1)和非通沟(方案 2)两种情况。方案 1 采用通沟的形式,即排气沟沿阳极底部长轴方向贯穿阳极底部,沟宽 20 mm,深 150 mm,间距 220 mm,预焙槽阳极底部开排气沟后其周围的电解质模型网格划分图如图 1(a)所示;而方案 2 非通沟则是排气沟只在阳极底部形成一个半封闭的通道,一端与大面通道相通,另一端则是封闭的,靠近槽中部通道,排气沟端部到阳极侧壁距离 100 mm,其余尺寸与方案 1 相同,网格划分图如图 1(b)所示。

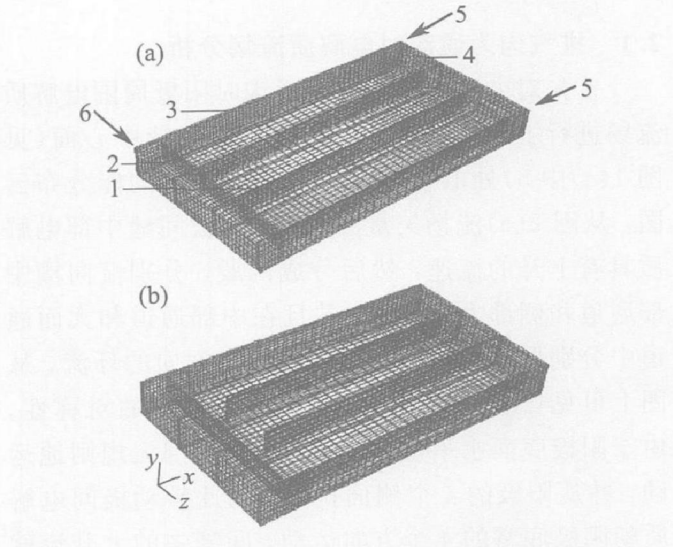


图 1 阳极周围电解质流场计算机仿真模型网格划分图

Fig. 1 Meshed bath model around anode simulation of flow fields
1—Bath in gas discharging grooves;
2—Center channel of cell; 3—Slot;
4—Side channel; 5—Center of slot;
6—Center of center channel

建模的另一个重要问题是边界条件的设置, 本计算模型将电解质与阴极的接触面(铝液熔池表面)、电解质与炉帮接触面、电解质与阳极底部和侧部的接触面视为平壁, 采用静止壁面边界条件, 施加“no slip”边界, 将这些壁面上分散相的边界条件设为“reflect”, 即气泡遇到这些边界可以反弹回液相中。

将电解质上表面与空气接触的界面也定义为静止壁面, 与前面的壁面边界条件不同的是, 分散相边界条件设为“escape”, 气泡与这个面接触时可以从其表面逃逸, 以此模拟电解质表面阳极气体的自由排放。将阳极间缝中心面(见图 1 中 5)、槽中部通道中心面(见图 1 中 6)定义为对称面, 其表面压力和速度梯度为 0, 并且垂直表面的速度分量为 0。

在阳极底部定义 480 个气泡射流, 假设气泡等效直径均为 1 cm 的非球形气泡, 并且无规律地分布在阳极底部作为分散相初始条件。将分散相(即气泡相)与连续相(即电解质)之间定义为相互作用, 以实现二者动量传递的计算。

电解质时均流是通过求解质量和动量守恒方程求得, 并将气体运动产生的动量作为方程的源项。采用标准二方程模型对湍流进行仿真计算, 方程组采用标准 SIMPLE 算法和二阶迎风插值进行求解, 以增加计算精度和收敛速度。

2 计算结果与分析

2.1 排气沟为通沟时电解质流场分析

首先对方案 1 排气沟为通沟时阳极周围电解质流场进行了计算。图 2 所示为阳极间缝中心面(见图 1(a)中 5)处电解质流场矢量图和湍动能分布云图。从图 2(a)流场矢量图来看, 阳极间缝中部电解质具有上升的流速, 然后分成两股, 分别流向槽中部通道和侧部大面通道, 并且在中部通道和大面通道中分别形成逆时针和顺时针两个方向的环流, 从图上可见, 这两股流体的分布具有一定的对称性。由于阳极底面水平, 阳极气体会在底部无规则地运动, 并从阳极的 4 个侧面排出, 因此带动极间电解质朝阳极底掌的 4 个方向运动, 间缝中的上升流就是因为阳极底掌气体从阳极长边一侧排放进入到阳极间缝中所引起的。最大的电解质流速为 0.217 m/s ; 在阳极间缝中心面处流体具有较大的湍动能, 如图 2(b)所示, 湍动能最大值为 $4.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。对比图 3 给出的无排气沟阳极间缝中电解质流场矢量图和湍动能分布云图可以看出, 二者阳极间缝的

流场模型十分相似, 而湍动能分布也很接近, 只是在数值上, 无排气沟时较大。

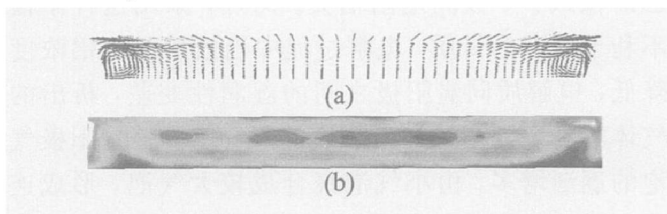


图 2 具有排气沟阳极间缝中心面处流体速度矢量图和湍动能分布云图

Fig. 2 Distributions of mean velocity vectors and contours of turbulent kinetic energy in slot center of anode with grooves

(a) —Mean velocity vectors (maximum: 0.217 m/s);

(b) —Turbulent kinetic energy
(maximum: $4.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$)

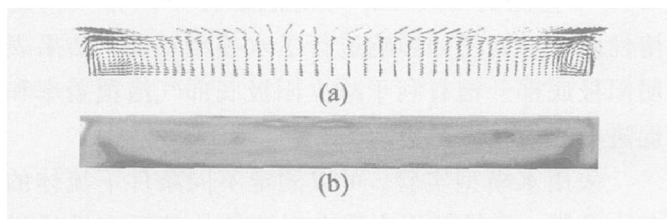


图 3 无排气沟阳极间缝中心面处流体速度矢量图和湍动能分布云图

Fig. 3 Distributions of mean velocity vectors and contours of turbulent kinetic energy in slot center of anode without grooves

(a) —Mean velocity vectors (maximum: 0.246 m/s);

(b) —Turbulent kinetic energy
(maximum: $5.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$)

图 4 所示为阳极周围电解质流场矢量图。从图上可以看出, 排气沟内电解质的流动与阳极间缝中电解质的流场分布类似, 也是从中部分别流向两端的中部通道和大面通道, 形成两股对称的流体, 可见排气沟也具有与阳极间缝类似的功能, 即方便气泡排放和促进极间电解质流动。从图上可以看出极间部分电解质向两端流到大面通道和中部通道中, 其余电解质则在阳极气体排放的带动下, 直接进入阳极间缝和排气沟内, 并向两端流到大面通道和中部通道中。进入到大面通道和中部通道中的电解质以及阳极间缝和排气沟中部分电解质也会向下进入到极间, 这样形成了整个的电解质循环。这种电解质循环加速了极间电解质和阳极四周电解质的循环流动, 促进了槽内的传质传热。图 5 所示为没有排气沟时, 阳极周围电解质流场矢量图。与具有排气沟阳极周围电解质流场类似之处在于阳极间缝中

电解质流场的流动,不同的是由于缺少排气沟的导向作用,极间电解质将随气泡排放无规则地朝各个方向运动。

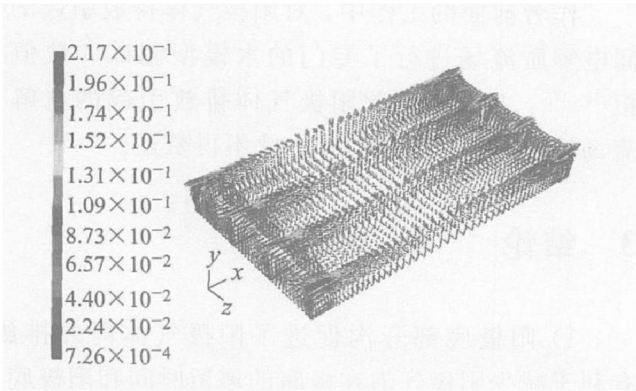


图 4 具有排气沟阳极周围
电解质流场分布矢量图

Fig. 4 Mean velocity vectors distribution in
bath around anode with grooves(m/ s)

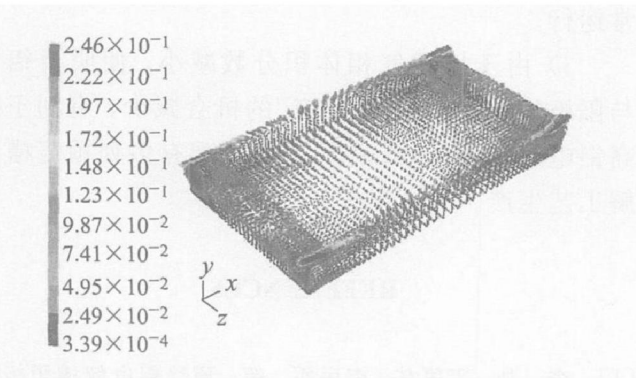


图 5 无排气沟阳极周围
电解质流场分布矢量图

Fig. 5 Mean velocity vectors distribution in
bath around anode without grooves(m/ s)

图 6 所示为阳极周围电解质湍动能分布云图,由图可见,在流体内部湍动能分布较均匀,尤其是在槽中部通道、大面通道、阳极间缝、排气沟内和极间均具有较大的湍动能分布,需要特别指出的是,在图上可以看出阳极底部排气沟内电解质流动形成了较大的湍动能分布,而这部分湍流的形成是由于阳极底部气体向槽中排放所引起的,可见排气沟的应用促进了阳极气体的排放,有利于减少阳极气体在极间的停留时间和阳极底掌气泡覆盖率。对比图 7 无排气沟时阳极周围电解质流场湍动能分布图可以看出,具有排气沟时,极间电解质湍流较强,可见排气沟的存在促进了极间电解质的流动,有利于将极间电解产生的热量通过对流向外传递,防止极间过热,同时也有利于阳极周围具有较高氧化铝浓度的电解质向极间输送,即促进了槽内的传质传热。

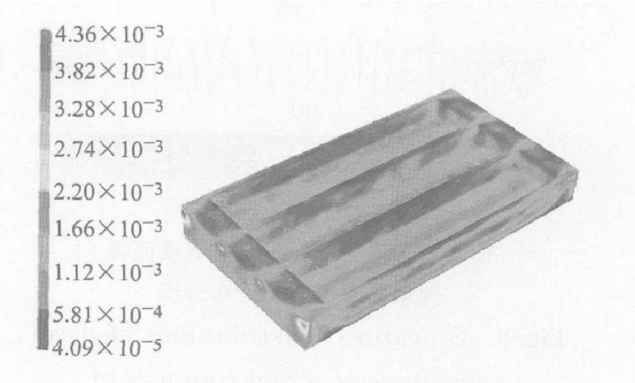


图 6 具有排气沟阳极周围
电解质湍动能分布云图

Fig. 6 Turbulent kinetic energy of
bath around anode with grooves(m²/ s²)

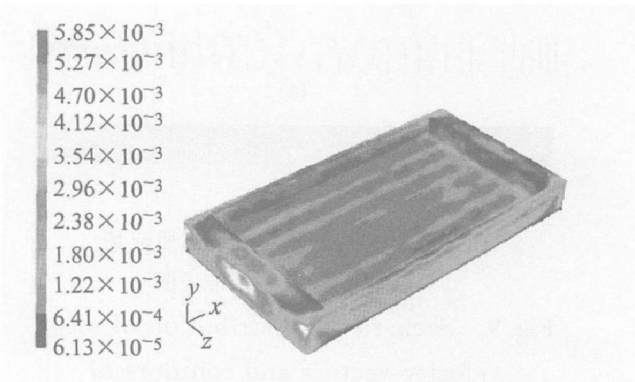


图 7 无排气沟阳极周围电解质湍动能分布云图

Fig. 7 Turbulent kinetic energy of
bath around anode without grooves(m²/ s²)

2.2 排气沟为非通沟时电解质流场分析

阳极底部排气沟为非通沟时(方案 2, 见图 1 (b)), 阳极间缝中心面的电解质流场分布与通沟时类似, 流速最大值也比较接近, 从湍动能分布云图来看, 最大值为 $4.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$, 比方案 1 有所增大。

相比通沟时非通沟内的电解质流场有明显的区别, 前面已经对排气沟为通沟时沟内电解质流场模式进行了描述, 具体如图 8 所示, 沟内电解质流动与阳极间缝中电解质流场类似, 在中部存在上升流, 然后分成两股, 分别流向中部通道和大面通道; 而采用非通沟时由于只有一端与侧部相通, 其内部电解质是朝一端流动, 在出口端即靠近大面一端电解质流速和湍动能较大, 如图 9 所示, 这种情况下在极间、阳极间缝、排气沟内和大面通道中均具有较大的湍动能, 而在中部通道中湍流较弱, 仅在阳极间缝处具有较大的湍动能。

3 种情况下的计算结果均列于表 1。从表中数据可以看出, 没有排气沟的阳极周围电解质流速以

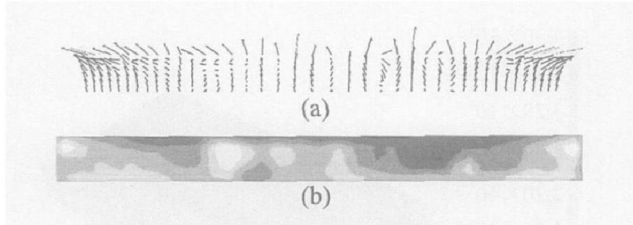


图 8 方案 1: 排气沟内电解质流场
矢量图和湍动能分布云图

Fig. 8 Scenario 1: distributions of mean velocity vectors and contours of turbulent kinetic energy in grooves

(a) —Mean velocity vectors (maximum: 0. 217 m/s);
(b) —Turbulent kinetic energy
(maximum: $4. 09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$)

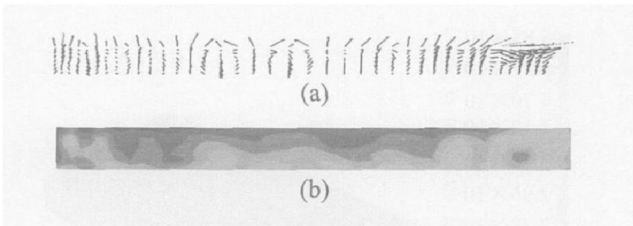


图 9 方案 2: 排气沟内电解质流场
矢量图和湍动能分布云图

Fig. 9 Scenario 2: distribution of mean velocity vectors and contours of turbulent kinetic energy in grooves

(a) —Mean velocity vectors (maximum: 0. 214 m/s);
(b) —Turbulent kinetic energy
(maximum: $4. 39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$)

表 1 不同阳极周围电解质流场特征

Table 1 Features of bath flow fields around different anodes

Anode	Maximum turbulent kinetic energy/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	Maximum turbulent dissipation rate/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	Maximum turbulent intensity/ %	Maximum velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Scenario 1	$4. 36 \times 10^{-3}$	$1. 36 \times 10^{-2}$	5. 22	0. 217
Scenario 2	$4. 67 \times 10^{-3}$	$1. 30 \times 10^{-2}$	5. 40	0. 214
Without grooves	$5. 85 \times 10^{-3}$	$2. 54 \times 10^{-2}$	6. 24	0. 247

及湍动能、湍动能耗散率和湍流强度均大于有排气沟的, 因此可以认为阳极底部开排气沟有利于降低阳极底部电解质流速和保持电解质流动的稳定。同时对比通沟和非通沟时流场计算结果可以看出, 非通沟时流体的剧烈程度要大于通沟时的, 这是由于通沟的存在减小了流体在阳极周围流动的阻力, 使

流体运动更平稳。

2.3 模型验证

作者前面的工作中, 对阳极气体排放引起的极间电解质流场进行了专门的水模型测试和数值模拟^[16, 17], 并验证了此阳极气体排放引起的电解质流场计算模型的合理性, 在此不再赘述。

3 结论

- 1) 阳极底部开沟促进了阳极气体向外排放, 有利于减少阳极气泡在极间的停留时间和阳极底部气泡覆盖率, 进而降低极间电阻压降和阳极效应系数, 减少电解能耗。
- 2) 排气沟的应用促进了阳极周围电解质循环流动和槽内的传质传热, 有利于保持电解过程的正常运行。
- 3) 由于极间气相体积分数减小, 使阴极铝液与阳极气体发生“二次反应”的机会减少, 有利于提高铝电解电流效率, 建议应用于现有多列预焙槽电解工艺生产。

REFERENCES

[1] 李 劫, 丁凤其, 李民军, 等. 预焙铝电解槽阳极效应的智能预报方法[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(1): 29-32.
LI Jie, DING Fen-qi, LI Min-jun, et al. Intelligent anode effect prediction method for prebaked2anode aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University of Technology(Science and Technology) 2001, 32(1): 29-32.

[2] Camera L, Alfred F. Carbothermic Aluminum Production Using Scrap Aluminum As a Coolant[P]. US 6475260, 2002-11-05.

[3] Georges B S. Aluminum Production Cell and Cathode[P]. US 6358393, 2002-03-19.

[4] Shekhar R, Evans J W. Modeling studies of electrolyte flow and bubble behavior in advanced Hall cells[J]. Light Metals, 1990: 243-248.

[5] Peirano E, Delloume V, Johnsson F, et al. Numerical simulation of the fluid dynamics of a freely bubbling fluidized bed: influence of the air supply system[J]. Powder Technology, 2002, 122(1): 69-82.

[6] Pain C C, Mansoorzadeh S, Gomes J L M, et al. A numerical investigation of bubbling gas-solid fluidized bed dynamics in 2-D geometries[J]. Powder Technol-

- gy, 2002, 128(1): 56 - 77.
- [7] Huilin L, Yurong H, Gidaspow D. Hydrodynamic modelling of binary mixture in a gas bubbling fluidized bed using the kinetic theory of granular flow [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(7): 1197 - 1205.
- [8] Bertrand F, Leclaire L A, Levecque G. DEM-based models for the mixing of granular materials[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(8): 2517 - 2531.
- [9] Maio F P D, Renzo A D. Analytical solution for the problem of frictional-elastic collisions of spherical particles using the linear model[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(16): 3461 - 3475.
- [10] LUO Kun, JIN Han-hui, FAN Jian-ren, et al. Large eddy simulation of the gas-particle turbulent wake flow [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(1): 106 - 110.
- [11] Tatamoto Y, Yoshihide M, Tomoya Y, et al. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(2): 437 - 447.
- [12] Johansen S T, Robertson D G C, Woje K, et al. Fluid dynamics in bubble stirred ladles: Part II. mathematical modeling[J]. Metall Trans B, 1998, 19B(4): 755 - 764.
- [13] Kevin J F, Mark P T, Andrew M J. Electrolyte heat and mass transport process in heroult electrolysis cells[J]. Light Metals, 1990: 221 - 226.
- [14] Purdie J M, Bilek M. Impact of anode gas evolution on electrolyte flow and mixing in aluminium electro-winning cells[J]. Light Metals, 1993: 355 - 360.
- [15] 刘业翔, 李相鹏, 李 劫, 等. 导流槽阴极热应力分布计算和结构优化[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2004, 35(6): 869 - 874.
- LIU Ye-xiang, LI Xiang-peng, LI Jie, et al. Thermal stress sump cathode bus-bar drained style aluminum reduction cell[J]. J Cent South Univ (Science and Technology), 2004, 35(6): 869 - 874.
- [16] LI Xiang-peng, LI Jie, LAI Yan-qing, et al. Physical modeling of the gas induced bath flow in a drained aluminum reduction cell[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(5): 1017 - 1022.
- [17] LI Xiang-peng, LI Jie, LAI Yan-qing, et al. Mathematical simulation of the gas induced bath flow in a drained aluminum reduction cell[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(6): 1221 - 1226.
- (编辑 陈爱华)