

## 铝电解槽熔体内氧化铝浓度分布的数值模拟

詹水清<sup>1</sup>, 李 茂<sup>1</sup>, 周子民<sup>1</sup>, 周益文<sup>2</sup>, 杨建红<sup>2</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中国铝业股份有限公司 郑州研究院, 郑州 450041)

**摘 要:** 应用欧拉双流体模型和氧化铝组分输运模型相结合的方法, 考虑阳极气泡影响的修正  $k-\epsilon$  湍流模型, 并引入合适的氧化铝溶解和消耗函数, 对铝电解槽熔体内氧化铝输运过程中的阳极气体-电解质气液两相流进行数值模拟。结果表明: 气体作用力和电磁力共同作用对电解质流场有重要影响; 气体作用在局部位置对氧化铝浓度的均匀分布有一定的效果, 而电磁力作用可以更好地将氧化铝快速输运到全槽区域; 氧化铝浓度分布呈周期状态变化, 且该周期状态变化与初始浓度无关; 下料点位置应布置在阳极间缝与中缝的交叉位置以及流场大漩涡流线的边缘处, 这有利于氧化铝快速溶解, 并随电解质运动将氧化铝输运到全槽区域, 使氧化铝浓度快速达到均匀。

**关键词:** 铝电解槽; 气液两相流; 氧化铝浓度分布; 数值模拟

中图分类号: TF821

文献标志码: A

## Numerical simulation of alumina concentration distribution in melts of aluminum reduction cells

ZHAN Shui-qing<sup>1</sup>, LI Mao<sup>1</sup>, ZHOU Jie-min<sup>1</sup>, ZHOU Yi-wen<sup>2</sup>, YANG Jian-hong<sup>2</sup>

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

2. Zhengzhou Research Institute, Aluminum Corporation of China Limited, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** The anode gas/electrolyte two-phase flow occurring during the transport process of alumina in the melts of aluminum reduction cells was simulated numerically by using an Euler-Euler two-fluid model coupled with a transport equation for alumina concentration. A modified  $k-\epsilon$  turbulence model was used to describe the liquid phase turbulence in the simulation by assuming the pseudo turbulence resulted from anodic gas. The effects of alumina dissolution and consumption were involved in the alumina transport equation. The simulated results show that both anode gas forces and electromagnetic forces (EMFs) have a significant impact on the bath flow field. The anode gas forces have certain effect on the uniform alumina distribution in some local positions, but the EMFs have a wider range of influence and promote the transport process in alumina in the whole cell quickly. The concentration distribution can reach a periodic state, and this final periodic state is independent of the initial condition. The feeding points should be located at the intersection positions of central channel and inter-anode channel as well as the edge of the large vortex streamlines to speed up the dissolution and transport process of alumina, resulting in the more uniform alumina distribution.

**Key words:** aluminum reduction cells; gas-liquid two-phase flow; alumina concentration distribution; numerical simulation

在现代霍尔-埃鲁特法(Hall-Héroult)炼铝过程中, 氧化铝作为主要原料加入铝电解槽内, 在电解质熔体

内完成溶解、扩散与输运过程, 并在碳阳极界面参加电化学反应而生成液态熔融铝和二氧化碳气体。气泡

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2010AA065201); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013zzts038)

收稿日期: 2014-03-04; 修订日期: 2014-06-17

通信作者: 李 茂, 副教授, 博士; 电话: 13055169363; E-mail: limao89@163.com

作用力和电场与磁场相互作用形成的电磁力共同作用对电解质流场有着重要的影响,而熔体内氧化铝浓度分布与电解质流场有着密切的关系。一方面,如果局部氧化铝浓度过高或氧化铝不及时溶解而产生局部沉淀,从而严重影响电解过程的电流分布,导致电解能耗升高和电流效率降低;另一方面,如果局部氧化铝浓度过低则会产生阳极效应,甚至导致电解槽无法正常运行<sup>[1]</sup>。

氧化铝的溶解、扩散与输运过程十分复杂,是一个流动、传热传质及化学反应同时进行的过程。国内外许多研究学者对氧化铝的溶解行为进行了深入研究,主要借助于实验室高温电解试验平台,采用快速拍照技术、电化学测量及样品检测分析等手段,研究氧化铝溶解过程反应机理及影响因素,并建立诸多数学模型来加以描述<sup>[2-9]</sup>。这些研究方法大多都引入了许多相关假设参数,且控制模型中的一些参数只在一定范围内合适,实验平台尺度非常小,特别是影响电解质流场的电磁力作用难以准确描述出来,不能适用于工业槽内氧化铝浓度分布的真实情况分析。

近些年来,有学者借助于现代计算流体力学方法对氧化铝的浓度分布行为进行了数值模拟研究。FENG等<sup>[10-11]</sup>对铝电解槽内氧化铝输运过程进行了数值模拟,研究下料点位置、下料策略和相关铝电解槽结构参数对氧化铝浓度分布的影响,但忽略电磁力对电解质流场的影响。张翻辉等<sup>[12-13]</sup>建立氧化铝输运过程的气液两相流多组分模型,并引入电解质涡结构分析方法研究电解质流场及下料配置对氧化铝浓度分布的影响。RENE等<sup>[14]</sup>对氧化铝的扩散和输运过程进行了数值模拟研究。THOMAS<sup>[15]</sup>采用自编程形式的数值计算方法考虑氧化铝颗粒的溶解过程,并基于电解质流场对氧化铝的输运过程进行了分析研究,但计算方法过于繁琐,准确性令人质疑,难以应用于工业槽计算。上述研究中,除THOMAS<sup>[15]</sup>的研究考虑了氧化铝的溶解过程外,其它研究都是假设氧化铝下料后瞬时溶解到电解质熔体内,虽然考虑了电解质流场的影响,但是这些模型都忽略了氧化铝溶解过程复杂且十分缓慢的关键特征,也没有通过计算说明氧化铝浓度分布呈周期性变化,在非周期变化时间内进行下料策略优化计算不太合理,并不能反应真实的氧化铝溶解、扩散与输运过程。

基于上述文献的研究成果,本文作者利用计算流体力学软件 FLUENT 对铝电解槽熔体内气液两相流多组分模型进行计算,对已有研究成果中的氧化铝溶解曲线进行拟合分析来代表实际的氧化铝溶解过程,并提出了合适的氧化铝消耗模型,研究分析了不同作

用力下的电解质流场及氧化铝浓度分布特点、氧化铝浓度周期性变化规律和下料点位置配置设计过程,为氧化铝下料设计及优化提供了一定的技术指导作用。

## 1 数学模型

### 1.1 模型简化

铝电解槽熔体内氧化铝浓度分布受多方面因素的影响,在进行数值模拟时必须做一些相应的简化。

1) 铝电解槽熔体内初始氧化铝浓度都是均匀的,且熔体内多相流体系由阳极气体相和电解质混合液相(冰晶石和氧化铝)组成。

2) 假设阳极气泡尺寸不变,即不考虑气泡聚并和破碎等作用过程对氧化铝浓度分布的影响。

3) 不考虑电解质中温度分布不均匀的影响,假设电解作用过程中的温度始终保持在电解温度,因此,只需要求解气液作用过程中的连续性方程和动量方程。

### 1.2 气液两相欧拉模型及湍流模型描述

基于文献[16-18]的研究结论,采用欧拉双流体模型模拟铝电解槽熔体内气体和电解质两相体系,以充分考虑气液两相间的双向耦合。采用 Sato 模型来描述气体运动对电解质湍流的影响。针对铝电解槽熔体内气液两相流作用特点,曳力作用比较明显,是最大的相间作用力分量,因此,本文作者主要考虑曳力作用,而忽略非曳力的影响,采用 Schiller-Naumann 曳力系数模型。液相和气相湍流运动采用修正  $k-\varepsilon$  两相湍流模型进行计算。在此模型中,用修正的标准  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟液相湍流,该模型考虑了气液相间的湍流动量传递;而气相湍流模拟则基于 CHEN 等<sup>[19]</sup>提出的均相湍流粒子扩散理论来计算。

### 1.3 组分输运方程

对于电解质中第  $i$  组分(氧化铝)而言,其物质组分质量分数输运方程可表示如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_L \rho_L Y_{L,i}) + \nabla \cdot (\varphi_L \rho_L Y_{L,i} \mathbf{u}_L) = \nabla \cdot \left[ \varphi_L \left( \rho_L D_{L,i} + \frac{\mu_{t,L}}{Sc_{t,L}} (\nabla Y_{L,i}) \right) \right] + S_{L,i} \quad (1)$$

式中:  $\varphi_L$ 、 $\rho_L$  和  $\mathbf{u}_L$  分别为电解质的体积分数、密度和速度;  $Y_{L,i}$ 、 $D_{L,i}$  和  $S_{L,i}$  分别为电解质中第  $i$  组分(氧化铝)的质量分数、扩散系数和质量源项;  $Sc_{t,L}$  为湍流 Schmidt 准数。

1.4 氧化铝溶解和消耗模型

1.4.1 氧化铝溶解模型

在实际的电解质多组分体系里面,氧化铝的含量比较低(一般不超过 8%(质量分数)),属于低质量浓度体系,其溶解过程对电解质流场的影响很小。因此,本研究基于数值计算得到的分析结果<sup>[20]</sup>。图 1 所示为模拟值与 WELCH 等<sup>[2]</sup>及 THONATAD 等<sup>[21]</sup>实验值的比较。从图 1 中可以看出,模拟中与相关文献中提供的氧化铝溶解质量分数曲线形状比较接近,氧化铝溶解过程分为快速溶解和缓慢溶解两个阶段,但认为该溶解质量变化曲线处于工程问题所能接受的误差范围内。缓慢溶解过程的曲线对比误差较大,主要是因为影响氧化铝溶解过程的因素较多,包括氧化铝性质、电解温度、湍流条件和下料策略等,且大多具有非线性和强耦合等特点。本研究为节省计算量,对溶解过程作一定的简化假设,对氧化铝溶解质量曲线进行二次抛物线拟合分析,将拟合得到的公式对时间进行求导计算,近似代表下料点处的溶解速率。拟合得到的溶解模型函数为

$$m = -1.1237\exp(-\frac{t}{0.6816}) - 6.0021\exp(-\frac{t}{26.6927}) + 7.1229$$

(2)

$$S_1 = \frac{dm}{dt} = 1.6486\exp(-\frac{t}{0.6816}) + 0.2249\exp(-\frac{t}{26.6927})$$

(3)

式中:  $m$  为溶解的氧化铝质量变化函数;  $S_1$  为拟合得到的氧化铝溶解速率函数。

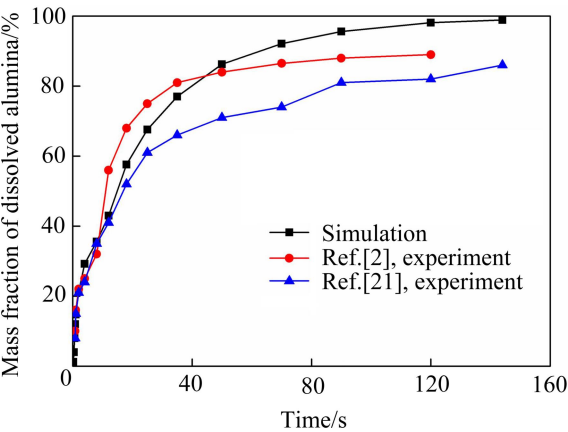


图1 模拟值与 WELCH 等及 THONATAD 等实验值的比较  
Fig. 1 Comparison of dissolution curves of alumina between simulated results and experimental results in Ref.[2] and [21]

1.4.2 氧化铝消耗模型

根据电解过程极距间熔体内络合离子反应理论,含氧络合阳离子会在阳极表面聚集,含铝络合阴离子在阴极表面聚集,且模型中假设极距间电流密度均匀,引入极距区域均一氧化铝消耗模型比较合理。1mol  $\text{Al}_2\text{O}_3$  获得 6 mol 电子后才变成 2 mol Al,氧化铝消耗模型可以用下式表达:

$$S_2 = -\frac{IM}{6FV}$$

(4)

式中:  $I$  为电流强度;  $M$  为氧化铝的摩尔质量;  $F$  为法拉第常数;  $V$  为阳极底掌与阴极界面之间的体积。

2 数值求解计算

2.1 几何模型

以国内某厂 300 kA 铝电解槽为研究对象,具体的结构参数如表 1 所列。阳极碳块尺寸为 1650 mm×660 mm×600 mm,大面和端面的尺寸分别为 200 mm 和 250 mm,阳极间缝和中缝宽度分别为 40 mm 和 180 mm,极距为 40 mm,电解质高度为 200 mm。图 2 所示为 300 kA 铝电解槽下料点位置示意图,共涉及 5 种下料点位置配置方案,分别为 P1、P2、P3、P4 和 P5。每种方案中都设计 4 个下料点,均满足一定的对称和等间距要求,其中 P1、P2、P3 和 P4 中的下料点处于阳极间缝与中缝交叉位置,P5 中的下料点处于阳极宽度一半的位置。下料点处于电解质表面下方相应位置的小立方体内,单个下料器的容量为 1.8 kg,下料基准周期为 144 s。

表 1 电解槽结构参数

Table 1 Structural parameters of aluminum reduction cell

| Parameter                 | Value        |
|---------------------------|--------------|
| Current/kA                | 300          |
| Anode carbon block/mm     | 1650×660×600 |
| Side channel/mm           | 200          |
| End channel/mm            | 250          |
| Inter-anode channel/mm    | 40           |
| Central channel/mm        | 180          |
| Anode cathode distance/mm | 50           |
| Bath height/mm            | 200          |

2.2 边界条件及初始条件

1) 边界条件: 阳极底掌设质量流量进口边界条

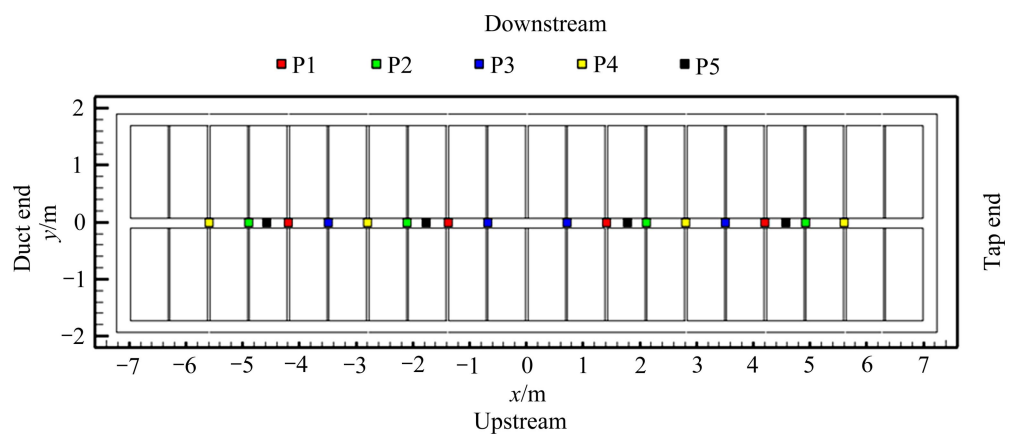


图 2 铝电解槽下料点位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of alumina feeding points in aluminum reduction cell

件, 气体进口质量流量可由法拉第公式得出, 与电流强度有关。电解质上表面为脱气边界条件, 该边界只允许阳极气体自由逸出, 对气体而言相当于出口条件, 而对电解质来说为自由壁面条件。其余为壁面条件, 对气相而言定义自由滑移壁面边界条件, 对液相而言定义无滑移壁面边界条件, 壁面处采用标准壁面函数。

2) 初始条件: 初始流体域内全部为电解质相, 且电解质中氧化铝组分初始质量浓度为 2.5%。

2.3 求解方法

采用 FLUENT 6.3 对数学模型进行非稳态求解, 压力-速度耦合采用 Phase-Coupled SIMPLE 算法, 连续性方程、动量方程和湍流方程均采用二阶迎风格式, 体积分数方程和组分输运方程采用 Quick 格式, 压力松弛因子取 0.7, 动量方程松弛因子取 0.2, 体积分数方程松弛因子取 0.2, 其余采用默认值。为了避免收敛困难, 先对气液两相流的流场进行稳态求解。得到稳定的流场后, 在其基础上再进行组分输运方程的非稳态求解, 计算时间步长为 0.05 s。

数值模拟计算中, 电磁力的转换插值计算方法、脱气边界条件、氧化铝下料和消耗速率都是以自编程函数 UDFs (User-defined functions) 的形式嵌入到计算模型中去, 计算中采用的气液两相物性参数如表 2 所列。

3 结果与分析

3.1 不同作用力下电解质流场分析比较

图 3 所示为不同作用力下极距区域水平截面电解质速度矢量及流线图。由图 3 可以看出, 阳极气体单

表 2 计算所用的物性参数

Table 2 Physical parameters of computational model

| Physical parameter                                      | Value                |
|---------------------------------------------------------|----------------------|
| $\rho_L/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                  | 2130                 |
| $\rho_G/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                  | 0.398                |
| $\mu_L/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $2.51\times 10^{-3}$ |
| $\mu_G/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $5.05\times 10^{-5}$ |
| $I/\text{kA}$                                           | 300                  |
| $D/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$                      | $1.0\times 10^{-8}$  |
| $M/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$                      | 102                  |
| $F/(\text{C}\cdot\text{mol}^{-1})$                      | 96485                |
| $V/\text{m}^3$                                          | 10.43                |
| $\eta/\%$                                               | 93                   |

独作用下, 电解质流场形成多个围绕单个阳极的小漩涡, 且每个阳极周围小漩涡的形态分布并不相同, 与其所处的位置有关。电磁力单独作用下, 电解质流场形成近似以  $x=0$  为对称轴的两个对称的大漩涡, 两个大漩涡的中心均分布在阳极中缝位置上。在阳极气体和电磁力共同作用下, 电解质流场比较紊乱, 两个大漩涡形态没有电磁力单独作用下的漩涡明显, 两个大漩涡流线并不连续, 这是由于单个阳极局部区域气体作用力的存在打乱了电磁力作用下的大漩涡流场。

3.2 不同作用力下氧化铝浓度分布

不同作用力下极距区域水平截面氧化铝浓度分布云图如图 4 所示。由图 4 可以看出, 阳极气体单独作用下, 全槽氧化铝浓度分布具有良好的对称性, 进电端(Upstream)和出电端(Downstream)的氧化铝浓度分布沿阳极中缝近似对称, D 端(Duct end)和 T 端(Tap end)



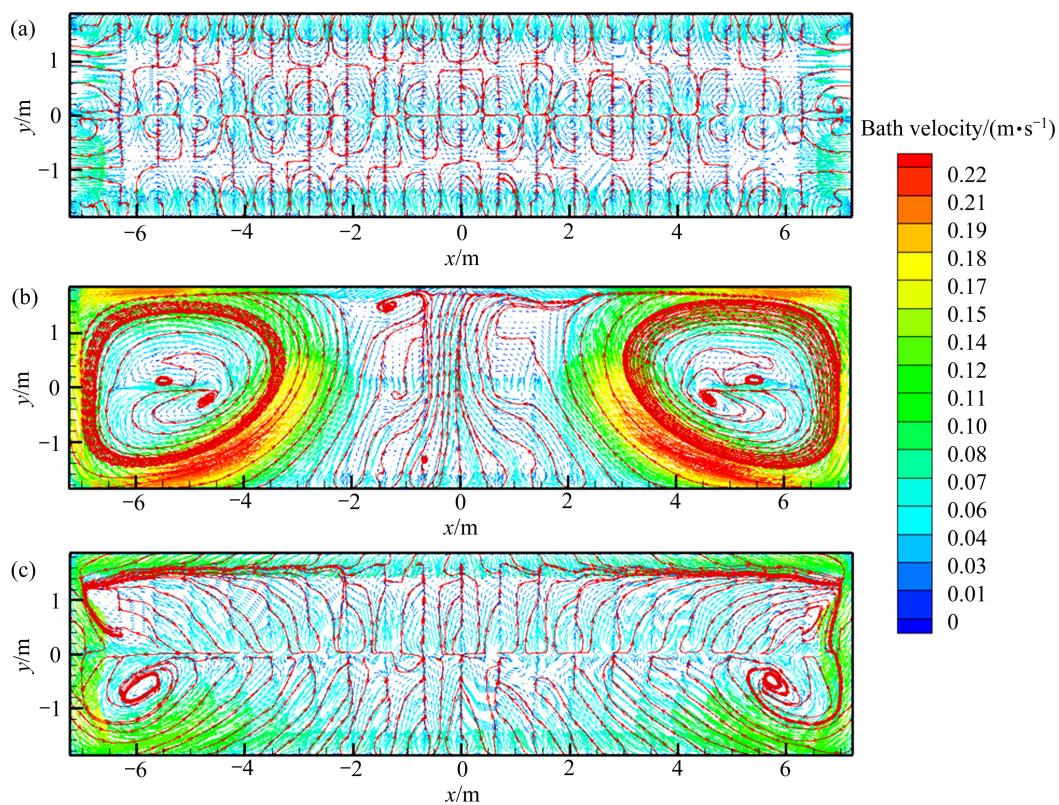


图 3 极距区域水平截面电解质速度矢量及流线图

**Fig. 3** Bath velocity vector and streamline distributions at horizontal plane in ACD ( $z=0.225$  m): (a) Anode gas forces only; (b) EMFs only; (c) Both anode gas forces and EMFs

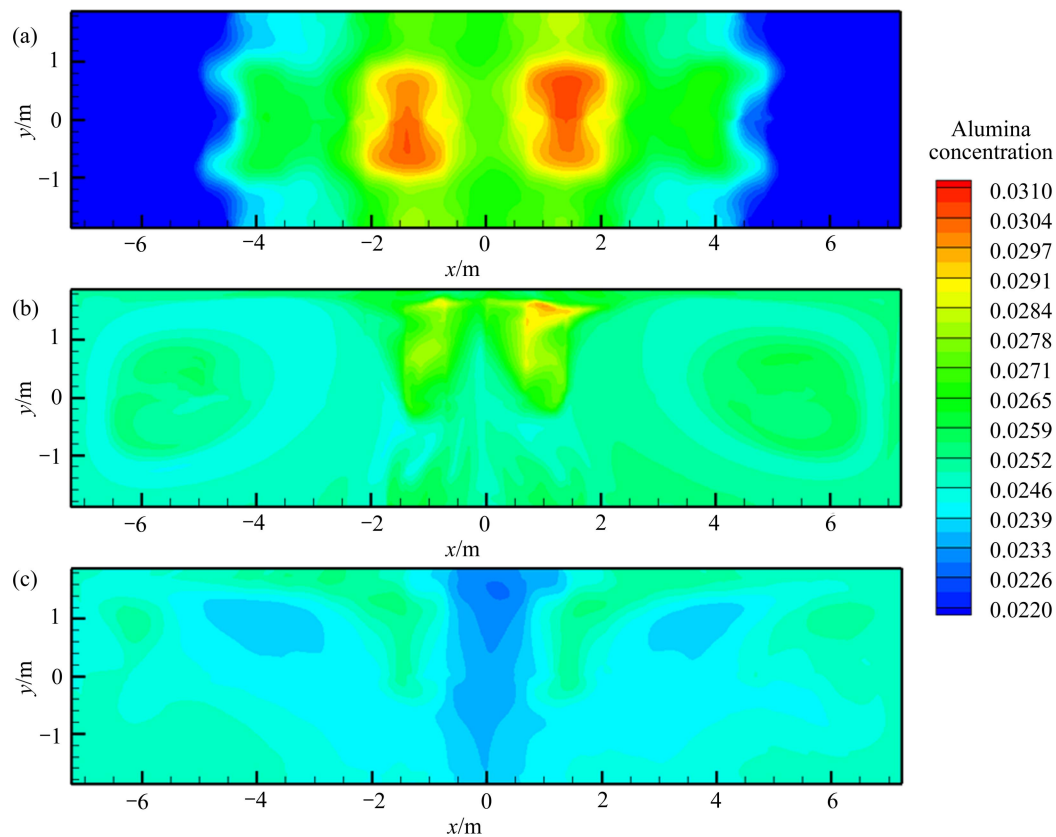


图 4 极距区域水平截面氧化铝浓度分布

**Fig. 4** Alumina concentration distributions at horizontal plane in ACD ( $z=0.225$  m): (a) Anode gas forces only; (b) EMFs only; (c) Both anode gas forces and EMFs

附近的氧化铝浓度分布沿  $x=0$  截面近似对称。中间两个下料点附近区域氧化铝浓度较高,两侧下料点附近区域的氧化铝浓度较低,且高浓度的区域面积和低浓度区域的面积均比较大,不利于正常电解。这说明阳极气体对电解质的搅动作用是局部的,许多围绕单个阳极的小漩涡并不能及时将下料点附近的氧化铝扩散并输运到全槽区域。电磁力单独作用下,全槽氧化铝浓度分布形成两个比较明显的大漩涡,呈一定的对称性,但两个漩涡周边及内部区域的氧化铝浓度分布形态并不相同,两个漩涡靠近出电端交汇处的氧化铝浓度较高,但氧化铝浓度分布均匀性比阳极气体单独作用下的情况较好。在阳极气体和电磁力共同作用下,全槽氧化铝浓度分布也沿短轴  $x=0$  截面近似对称,没有出现如电磁力单独作用下的大漩涡分布,也没有出现明显的高浓度区域和低浓度区域,氧化铝浓度分布均匀性较好。

综合比较不同作用力下氧化铝浓度分布特点,可以得到如下结论:阳极气体单独作用下氧化铝浓度分布对称性较好,但均匀性较差,由于电解过程中长期难以达到周期状态,浓度大小变化范围非常大,中间若干下料点附近局部区域容易形成氧化铝“净累积”

高浓度区和两端下料点附近区域容易形成氧化铝“空消耗”低浓度死区;电磁力作用下氧化铝浓度分布具有一定的对称性,形成两个明显的漩涡分布,均匀性比阳极气体单独作用下的浓度分布较好,但浓度大小变化范围仍较大,虽没有明显的低浓度区域,但两个漩涡靠近出电端的交汇处容易形成高浓度区域。阳极气体和电磁力共同作用下氧化铝浓度分布具有一定的对称性,均匀性最好,不存在明显的高浓度区和低浓度区,比较符合真实的电解过程特点。说明阳极气体作用在局部位置对氧化铝的均匀分布有一定的效果,而电磁力作用可以更好地将氧化铝快速扩散到全槽区域,对全槽的氧化铝浓度分布起到决定性作用。

### 3.3 氧化铝浓度分布周期性变化分析

为定量考察阳极气体和电磁力共同作用下氧化铝浓度时空分布特点,模拟过程中取6个有代表性的氧化铝浓度监测点,它们的坐标分别为点1(5.6, 1.38, 0.24)、点2(3.5, 1.38, 0.24)、点3(1.4, 1.38, 0.24)、点4(-1.4, 1.38, 0.24)、点5(-3.5, 1.38, 0.24)和点6(-5.6, 1.38, 0.24),呈一定的对称分布。图5所示为6个不同浓度监测点处氧化铝浓度随时间变化过程。

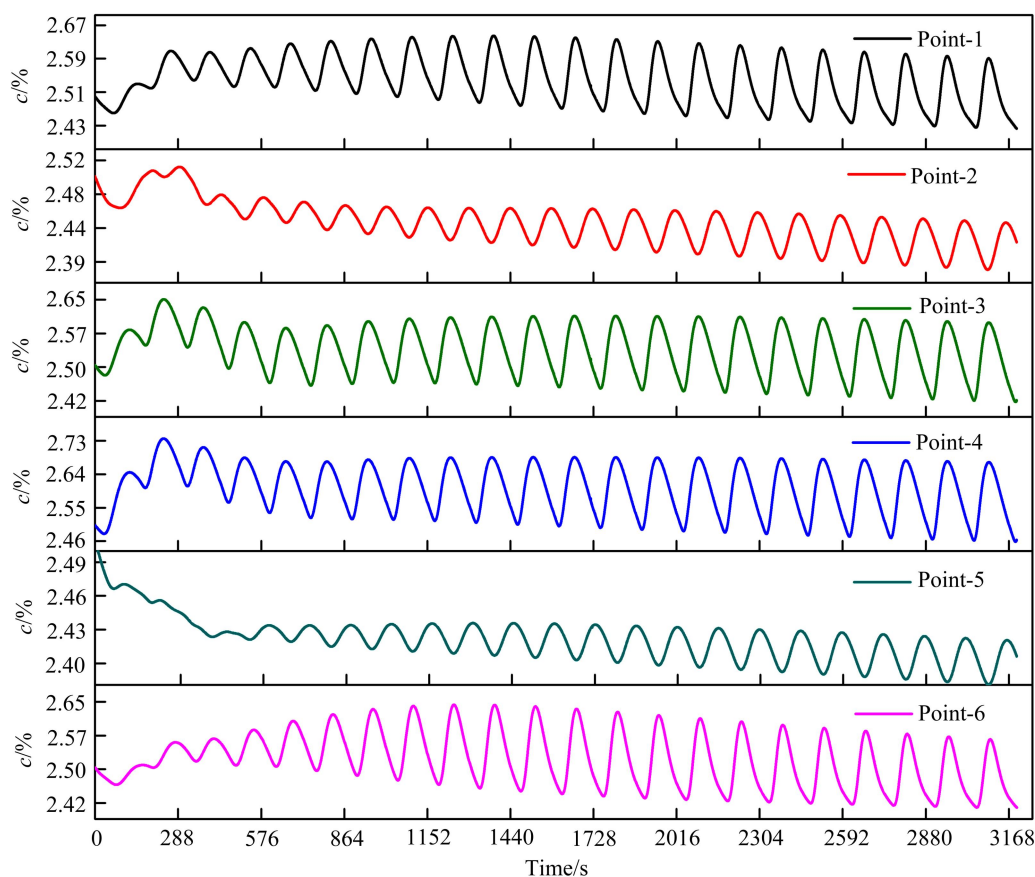


图5 6个不同监测点处氧化铝浓度变化

Fig. 5 Alumina concentration changes at six different points with time under both anode gas forces and EMFs



由图 5 可以看出, 阳极气体和电磁力共同作用下, 当电解时间  $t=1152$  s (第 8 个基准下料周期) 时, 各监测点的氧化铝浓度分布就已经近似达到周期性变化。

从理论上讲, 经下料加到铝电解槽熔体内的氧化铝总量和消耗的氧化铝总量保持一种动态物料平衡才能保持电解槽的平稳运行。但在实际生产中, 各种不确定性的因素和干扰因素引起的偏差都会导致氧化铝浓度发生变化, 难以保证不同周期内氧化铝浓度保持不变。

基于上述分析, 经过多个基准下料周期后, 铝电解槽中若干监测点的氧化铝浓度分布近似呈周期性状态变化。从更长的电解时间计算来看, 一方面, 只要保证氧化铝下料量和消耗量是守恒的, 就可以进一步认为全槽氧化铝浓度也是近似呈周期性状态变化, 且这种周期状态的变化特点与电解质流场息息相关。另一方面, 计算过程中发现, 如果改变初始的氧化铝浓度分布, 但其大小范围满足正常的电解需求, 计算到一定的时间后, 全槽氧化铝浓度分布变化应该也会达到某种周期状态, 并且与初始浓度分布没有直接关联。

### 3.4 下料点配置优化设计

在铝电解槽内, 下料点配置设计对于氧化铝浓度分布具有重要意义, 主要包括下料器的个数、下料量和下料点位置的设计。下料点的个数在一定程度上取决于电解槽容量大小, 一般设计为 4~6 个; 现代预焙铝电解槽均采用定容下料器, 对于 300 kA 以上铝电解

槽大多采用 1.8 L 级下料器, 即每个下料器每次下料 1.8 kg; 下料点的位置既要满足一定的工艺要求, 比如下料点的安装间隔距离要合理等, 同时还要与下料点处的流场联系起来。如果下料点位置设计不当, 则无论怎么优化下料配置均难以达到氧化铝浓度分布均匀的效果。因此, 下料点位置的设计是下料配置过程优化计算的前提。

前面主要研究氧化铝浓度分布的通用决定性因素, 即电解质流场的影响, 必须综合考虑气体和电磁力共同作用力才能求解得到符合实际工业铝电解槽内的流场状况, 才能进一步正确分析下料点配置对氧化铝浓度分布的影响规律。氧化铝浓度分布总会达到周期性状态变化, 并且该周期状态变化与初始浓度无关, 为氧化铝下料配置过程优化计算提供了很多方便, 计算时可以任意定义合适的初始浓度分布, 而不影响计算结果。因此, 为节省计算耗时, 只计算了 10 倍长的基准下料间隔时间, 即每种方案都计算到  $t=1440$  s, 但主要对第 10 个周期内 ( $t=1296$  s 到  $t=1440$  s) 的数据进行分析讨论。

5 种不同方案下  $t=1440$  s 时极距区域水平截面氧化铝浓度分布如图 6 所示。由图 6 可以看出, 不同方案下氧化铝浓度分布形态不同, 都存在一定的低浓度区域和高浓度区域, 浓度过高或者过低均不合适, 说明下料点位置对氧化铝浓度分布有着重要影响。

本文作者将高浓度 ( $c > 2.55\%$  (质量分数)) 区域和低浓度 ( $c < 2.40\%$  (质量分数)) 区域分别进行积分求面

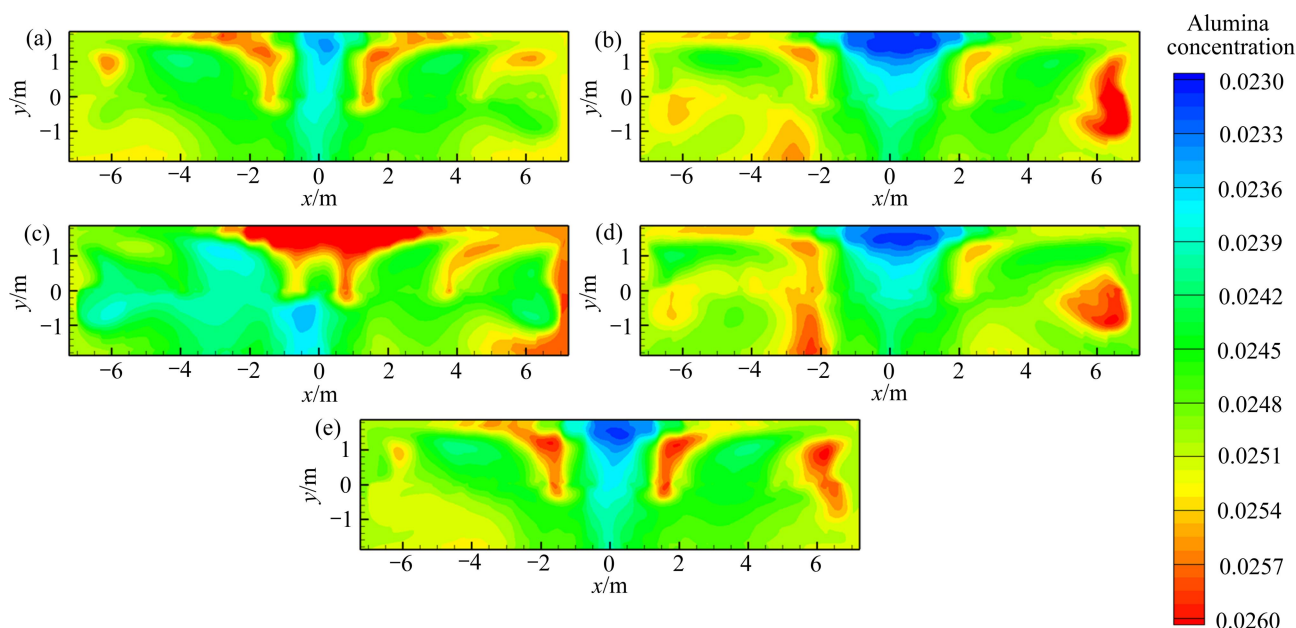


图 6 不同下料方案下极距区域水平截面氧化铝浓度分布

Fig. 6 Alumina concentration distributions at horizontal plane in ACD under different feeding methods ( $t=1440$  s): (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5

积进行比较。需要说明的是,这里的高浓度和低浓度具体数值大小的范围是相对的,在基准下料方式下都仍然处于正常的电解所需的氧化铝浓度范围,只是为了对比不同下料点位置方案的不同,寻找最优的方案。图7所示为第10个周期内不同时刻不同方案中高浓度区和低浓度区面积大小的对比分析。由图7可以明显看出,P3方案一直存在大面积的高浓度区域,P2、P3、P4和P5方案都存在大面积的低浓度区域,经比较初步判定P1方案为最优方案。

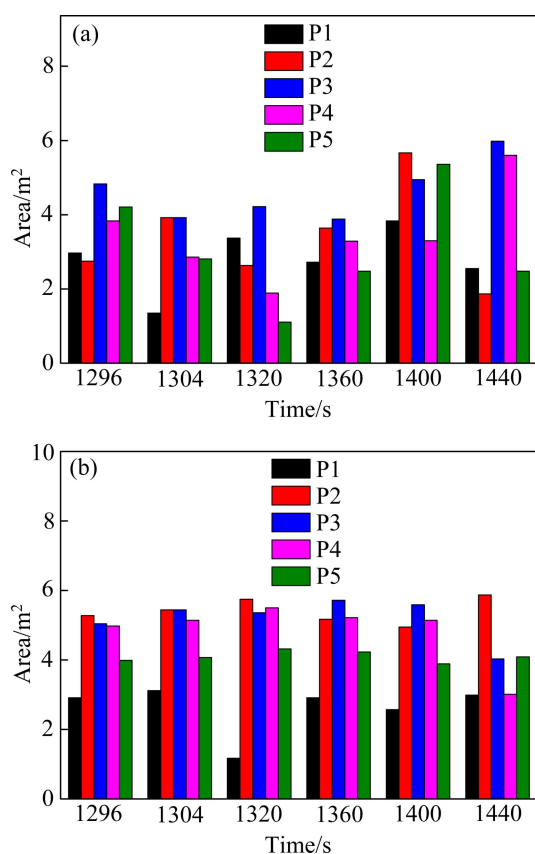


图7 一个周期内不同时刻不同方案中高浓度区和低浓度区面积比较

**Fig. 7** Comparison of areas of alumina concentrations between different feeding methods with select time in one feeding cycle: (a) High alumina concentration; (b) Low alumina concentration

由于P1、P2、P3和P4方案中的下料点位置都处于阳极间缝和中缝交叉位置,P5方案中的下料点位置处于阳极宽度一半位置,且P5方案中每个下料点分别处于P1和P2方案中各个下料点对应位置的中间处。因此,可以将P1、P2、P3和P4方案归为一类进行对比,还可以将P1、P2和P5方案归为一类进行对比。图8所示为P1、P2、P3和P4方案中氧化铝浓度

标准偏差对比分析,得到氧化铝浓度标准偏差由大到小顺序为P1、P4、P2、P3。氧化铝浓度标准偏差越小,说明氧化铝浓度分布越均匀,从浓度均匀性角度来看,各方案最优顺序由大到小依次为P1、P4、P2、P3。因此,进一步判定P1方案为最优方案。这主要是因为P1方案中的下料点位置处于电解质流场中较大尺寸的漩涡流线的边缘,有利于氧化铝随电解质快速扩散与运输到全槽区域。

图9所示为P1、P2和P5方案中氧化铝浓度标准偏差对比情况。在一个周期前面一段时间内,P5方案中氧化铝浓度标准偏差最大,而在后面一段时间内,P5方案氧化铝浓度标准偏差介于P1和P2方案氧化铝浓度标准偏差之间,总体来说,P5方案中氧化铝浓度分布均匀性最差。从图6中也可以明显得出,相对于P1方案来说,P5方案中低浓度面积较大。这说明下料点布置在阳极间缝与中缝交叉位置最为合适,有利

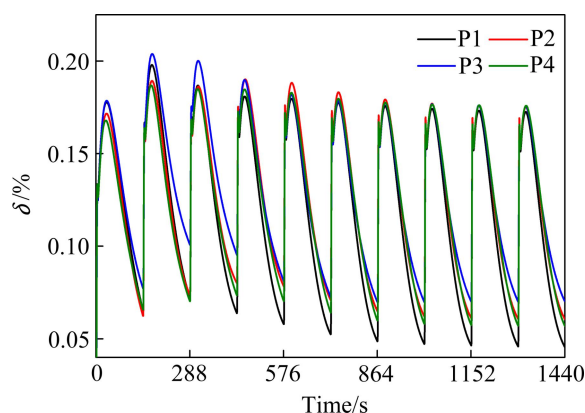


图8 P1、P2、P3和P4方案中氧化铝浓度标准偏差对比  
**Fig. 8** Comparison of standard deviations of alumina concentrations between P1, P2, P3, P4 feeding methods with time

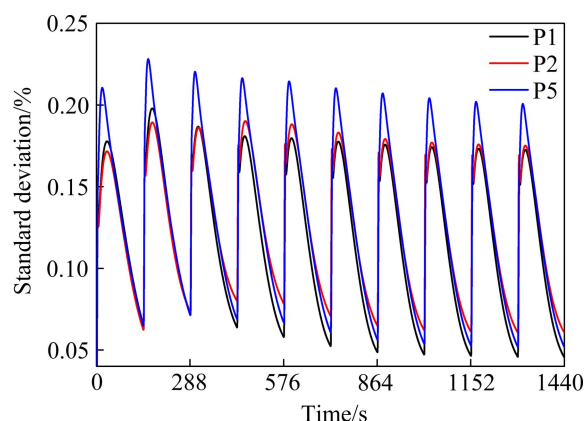


图9 P1、P2和P5方案中氧化铝浓度标准偏差对比  
**Fig. 9** Comparison of standard deviations of alumina concentrations between P1, P2, P5 feeding methods with time



于氧化铝浓度快速达到均匀。这与气体对电解质的作用有很大的关系,因为阳极间缝与中缝交叉位置的湍流强度较大,有利于氧化铝的快速溶解与输运,这与文献[11–13, 22]的研究结论基本一致。

## 4 结论

1) 气体单独作用下,电解质流场形成多个围绕单个阳极的小漩涡,且每个阳极周围的小漩涡的形态分布并不相同;电磁力单独作用下,电解质流场形成近似两个对称的大漩涡,两个大漩涡的中心均分布在阳极中缝位置上;气体和电磁力共同作用下,电解质流场比较紊乱,两个大漩涡形态没有只受电磁力作用时的漩涡明显,漩涡流线并不连续。

2) 电解质流场对氧化铝浓度分布具有较大的影响,气体作用在局部位置对氧化铝的均匀分布有一定的效果,而电磁力作用可以更好地将氧化铝快速输运到全槽区域,对全槽氧化铝浓度分布起到决定性作用。因此,准确计算出合理的电解质流场比较关键。

3) 氧化铝浓度分布呈周期状态变化,且该周期状态变化与初始浓度无关,但与电解质流场息息相关,可为铝电解下料策略设计计算及优化提供一定的方便和技术指导作用。

4) 下料点位置的设计与电解质流场中较大尺寸的漩涡结构特征密切相关,应布置在漩涡流线的边缘比较好,有利于氧化铝随电解质快速输运到全槽区域;还应将下料点位置设计在阳极间缝和中缝交叉位置,有利于氧化铝浓度快速溶解与输运。

## REFERENCES

- [1] 刘业翔,李 劫. 现代铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.  
LIU Ye-xiang, LI Jie. Modern aluminum electrolysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [2] WELCH B J, KUSCHEL G I. Crust and alumina powder dissolution in aluminum smelting electrolytes[J]. JOM, 2007, 59(5): 50–54.
- [3] 徐君莉,石忠宁,高炳亮,邱竹贤. 氧化铝在熔融冰晶石中的溶解[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2003, 24(9): 832–834.  
XU Jun-li, SHI Zhong-ning, GAO Bing-liang, QIU Zhu-xian. Dissolution of alumina in molten cryolite[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2003, 24(9): 832–834.
- [4] KAN Hong-min, ZHANG Nin, WANG Xiao-yang. Dissolution rate determination of alumina in molten cryolite-based aluminum electrolyte[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(4): 897–902.
- [5] HAVERKAMP R G, WELCH B J. Modelling the dissolution of alumina powder in cryolite[J]. Chemical Engineering and Processing, 1998, 37(6): 177–187.
- [6] BEREZIN A I, ISAEVA L A, BELOLIPETSKY V M, PISKAZHOVA T V, SINELNIKOV V V. A model of dissolution and heating of alumina charged by point-feeding system in “virtual cell” program[C]// KVANDE H. Light Metals 2005. San Francisco CA: TMS, 2005: 151–154.
- [7] LILLEBUEN B, BUGGE M, HOIE H. Alumina dissolution and current efficiency in Hall–Héroult cells[C]// BEARNE G. Light Metals 2009. San Francisco CA: TMS, 2009: 389–394.
- [8] 张家奇. 基于数学模型的铝电解槽动态过程及其预报系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
ZHANG Jia-qi. Principal electrolysis processes and corresponding prediction system for aluminum electrolysis cells based on mathematical models[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [9] VASYUNINA N V, VASYUNINA I P, MIKHALEV Y G, VINOGRADOV A M. The solubility and dissolution rate of alumina in acidic cryolite aluminous melts[J]. Russian Journal of Non-ferrous Metals, 2009, 50(4): 338–342.
- [10] FENG Y Q, COOKSEY M A, SCHWARZ M P. CFD modeling of alumina mixing in aluminium reduction cells[C]// HAGNI A M. Light Metals 2010. Seattle, WA: TMS, 2010: 451–456.
- [11] FENG Y Q, COOKSEY M A, SCHWARZ M P. CFD modeling of alumina mixing in aluminium reduction cells[C]// LINDSAY J. Light Metals 2011. San Diego, CA: TMS, 2011: 543–548.
- [12] 张翊辉. 铝电解槽内熔体涡运动与氧化铝输运过程的数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
ZHANG He-hui. Numerical study of vortex flow of melts and transport process of alumina in aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 李 劫,张翊辉,张红亮,徐宇杰,杨 帅,赖延清. 大型铝电解槽电解质流场涡结构的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2082–2089.  
LI Jie, ZHANG He-hui, ZHANG Hong-liang, XU Yu-jie, YANG Shuai, LAI Yan-qing. Numerical simulation on vortical structures of electrolyte flow field in large aluminium reduction cells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2082–2089.
- [14] von KAENEL R, ANTILLE J, ROMERIO M, BESSON O. Impact of magnetohydrodynamic and bubbles driving forces on the alumina concentration in the bath of an Hall–Héroult cell[C]// BARRY S. Light Metals 2013. San Antonio: TMS, 2013: 585–590.
- [15] THOMAS H. Numerical simulation and optimization of the alumina distribution in an aluminium electrolysis pot[D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011.

- [16] 詹水清,周子民,李 茂,董 英,周益文,杨建红. 开孔阳极铝电解槽熔体中气液两相流数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(10): 3612–3619.
- ZHAN Shui-qing, ZHOU Jie-min, LI Mao, DONG Ying, ZHOU Yi-wen, YANG Jian-hong. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in aluminum reduction cells with perforated anodes[J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3612–3619.
- [17] ZHAN Shui-qing, LI Mao, ZHOU Jie-min, YANG Jian-hong, ZHOU Yi-wen. A CFD–PBM coupled model predicting anodic gas size distribution in aluminum reduction cells[C]// GOHN G. Light Metals 2014. San Diego: TMS, 2014: 777–782.
- [18] 詹水清,周子民,李 茂,董 英,周益文,杨建红. 铝电解槽熔体内阳极气体分布特性的模拟研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(7): 2424–2431.
- ZHAN Shui-qing, ZHOU Jie-min, LI Mao, DONG Ying, ZHOU Yi-wen, YANG Jian-hong. Numerical simulation of anodic gas distribution in aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(7): 2424–2431.
- [19] CHEN P, DUDUKOVIC M P, SANVAL J. Three-dimensional simulation of gas column flows with gas coalescence and breakup[J]. Journal of AICHE, 2005, 51(3): 696–712.
- [20] 周子民,李 茂,杨建红,周益文,詹水清. 铝电解槽熔体内多相多场仿真结题报告[R]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZHOU Jie-min, LI Mao, YANG Jian-hong, ZHOU Yi-wen, ZHAN Shui-qing. A concluding report on the multi-phase and multi-field coupled simulation in the melts of aluminum reduction cells[R]. Changsha: Central South University, 2013.
- [21] THONSTAD J, JOHANSEN P, KRISTENSEN E W. Some properties of alumina sludge[C]// MCMINN C J. Light Metals 1980. San Francisco: TMS, 1980: 227–239.
- [22] CHESONIS D C, JOHANSEN S T, ROLSETH S, THONSTAD J. Gas induced bath circulation in aluminium reduction cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1989, 19(5): 703–712.

(编辑 李艳红)