

## 75 kA 导流槽磁场及其引起的铝液流场模拟分析

李相鹏<sup>1,2</sup>, 李 劼<sup>2</sup>, 赖延清<sup>2</sup>, 刘业翔<sup>2</sup>, 冉永华<sup>3</sup>, 周 昊<sup>1</sup>, 岑可法<sup>1</sup>

(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;

3. 昆山铝业有限公司, 昆山 215313)

**摘 要:** 以商用有限元计算软件 ANSYS 为计算平台, 对 75 kA 导流型铝电解槽电磁场和电磁力场分布及其对铝液流动和波动的影响进行了模拟计算。结果表明: 阴极斜坡表面电磁场和电磁力场分布基本呈沿电解槽长轴对称分布, 且电磁力与重力方向相同, 这有利于阴极表面电磁力向聚铝沟排放, 而在电磁力作用下, 聚铝沟内铝液波动最大幅度为 0.021 m, 仍保持在安全范围之内, 不会引起两极短路现象的发生, 表明在现有 75 kA 普通预焙槽母线配置方案下, 可以维持导流型结构电解槽的正常运行。

**关键词:** 导流型铝电解槽; 磁场; 电磁力; 有限元方法

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

## Simulation and analysis of magnetic fields and flow fields of metal pad in 75 kA drained style aluminum reduction cell

LI Xiang-peng<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, LAI Yan-qing<sup>2</sup>, LIU Ye-xiang<sup>2</sup>, RAN Yong-hua<sup>3</sup>, ZHOU Hao<sup>1</sup>, CEN Ke-fa<sup>1</sup>

(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;

3. Kunshan Aluminium Co Ltd, Kunshan 215313, China)

**Abstract:** Numerical simulations was conducted based on the commercial finite element method software package ANSYS to study the influences of electromagnetic field and electromagnetic force distribution on flow fields and fluctuations of the molten metal in a 75 kA drained cell. The results show that, the distribution of magnetic field and electromagnetic force in the aluminum film on the cathode slope are in symmetry to the long axis of the cell, especially the magnetic force is in the same direction as the gravity force, which is in favor of the aluminum discharging from the cathode slope. The highest fluctuation of aluminum pad surface in the accumulation sump is 0.021 m, which still remains within the safe range, and will not cause interpolar short circuit, so a normal operation process could be maintained with the same bus bar configuration as the current 75 kA aluminum reduction cells.

**Key words:** drained style aluminum reduction cell; magnetic fields; electromagnetic force; finite element method

铝电解槽中强大的电流与电磁场相互作用产生电磁力, 使熔体在槽内产生循环流动, 促进传质传热; 同时也会引起铝液的波动、隆起甚至偏斜, 造成电解不稳定; 使局部极距减小, 甚至造成短路, 降低电流

效率, 增加电耗<sup>[1-2]</sup>。对预焙铝电解槽电磁力引起的熔体流场和电解稳定性已进行了很多研究<sup>[3-7]</sup>, 我国自 20 世纪 80 年代开始对铝电解产生的磁场进行模拟计算。近年来, 孙阳等<sup>[8-11]</sup>采用 Biot-Savart 定律对电解

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623703); 湖南省自然科学基金资助项目(5JJ30103)

收稿日期: 2006-09-08; 修订日期: 2007-01-24

通讯作者: 李 劼, 教授; 电话: 0731-8836268; E-mail: 13808488404@hnmcc.com

槽母线和熔体产生的电磁场进行计算,对铁磁元件产生的磁场采用表面磁荷法<sup>[8-9]</sup>、磁偶极子法<sup>[10]</sup>等进行模拟计算。Dupuis等<sup>[12]</sup>在 ANSYS 软件平台上建立了铝电解槽磁场分布计算模型,它考虑了邻槽母线、铁磁物质和空气对磁场分布的影响,结果较准确。杨溢等<sup>[13]</sup>使用 ANSYS 对 200 kA 以上的大型预焙铝电解槽电磁场进行计算,计算结果与现场实测的结果较吻合。从而证明了在有限元软件 ANSYS 上所建立的铝电解槽电磁场分布计算模型的准确合理性。

相比之下,对导流槽电磁力引起的流场的研究还没有见到相关的文献报道。导流槽阳极底面和阴极表面具有一定的倾角,槽底不再需要 20 cm 左右的铝液熔池,而只在阴极表面附有一层铝液膜,铝液从阴极表面析出后,沿斜坡流到聚铝沟。由于极距减小,导流槽对电磁场引起的电解不稳定更加敏感。这一系列的改变会影响到槽内电场分布<sup>[14-15]</sup>,进而影响槽内的电磁场分布和熔体受电磁力的改变。为了了解导流槽熔体内部电磁场、电磁力场的分布特征和电磁力引起的铝液和电解质流场模式及其对铝液波动的影响,本文作者对 75 kA 导流槽内磁场、电磁力场和铝液流场进行了计算。

## 1 75 kA 导流槽电磁场仿真计算模型

影响铝电解槽电磁场分布的因素主要有 3 个方面:母线配置(包括阴极钢棒和槽外母线)、铁磁质材料(如槽壳等)和槽内电流分布。

在 ANSYS 软件平台上建立了如图 1 所示的 75 kA 导流槽电磁场计算模型,包括槽外母线系统、阳极导杆到阴极钢棒之间的槽内导体部分。模型母线配置同现有 75 kA 普通预焙槽,计算考虑了铁磁物质、相邻

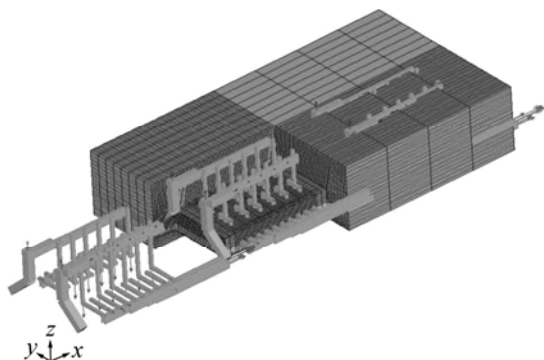


图 1 磁场和电磁力场分布计算网格模型

Fig.1 Meshed model of magnetic field and electromagnetic force simulation

前后两槽的影响。为了简化模型,将前后两槽以及所有母线简化为等效电流元。考虑到槽体磁场在空气中的磁漏,因此对空气进行了建模。

采用用于建立 75 kA 导流槽电磁场计算模型的材料单元有实体单元 SOLID5、微元单元 SOURC36 和无限单元 INFIN47 分别对槽内导体、空气包、母线进行建模。

## 2 求解方法和边界条件设置

采用 ANSYS 软件中的广义标量位法(GSP)对电解槽电磁场进行计算。采用该方法时,不需要对电流源部分建立实体模型,而是采用微元单元直接建立单元,从而可以与槽体部分的实体单元分开建模和网格划分,而且采用标量位法时,每个节点只有 1 个自由度,从而简化了模型,使处理时间减少。

边界条件包括电流边界、电压边界和磁位边界。阳极表面施加电压边界为 0;在阴极钢棒出电端施加电流边界,其数值采用电场计算的结果,见文献[14];取空气包远端角部一点的磁位为 0,作为基准点<sup>[11]</sup>。

计算分两步,第一步对电流源(即母线部分)磁场进行计算,第二步启用 Biot-Savart 计算模块对槽内导体产生的磁场进行计算,而铁磁元件的计算在两步计算中都是默认自动完成的,然后对两步计算的结果进行叠加,得出最后导流槽磁场的计算结果。模型计算还对电磁场和槽内电流相互作用产生的电磁力场进行了计算。模型计算在 Intel Pentium 4 处理器上完成,耗时 253 min。

## 3 结果与分析

### 3.1 铝液中电磁场分布

图 2 所示为极间铝液内部  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向磁场和 3 个方向合磁场(指磁感应强度)的分布图。由图 2 可见,铝液内部磁场基本上呈上下两侧(沿槽体长轴方向)对称分布,方向相反,并且  $x$  方向的磁场分布要比  $y$  方向和  $z$  方向的磁场分布值要大。从图 2(a)可以看出, $x$  方向磁场分布特征为极间两侧铝液较大,并向聚铝沟逐渐减小,最大值出现在两侧铝液偏向出电端处,正方向和负方向的磁感应强度最大值分别为  $7.6 \times 10^{-3}$  T 和  $-9.0 \times 10^{-3}$  T。

从图 2(b)可以看出, $y$  方向磁场分布出现两端大中间小的特征,在聚铝沟上方靠近槽进电端和出电端

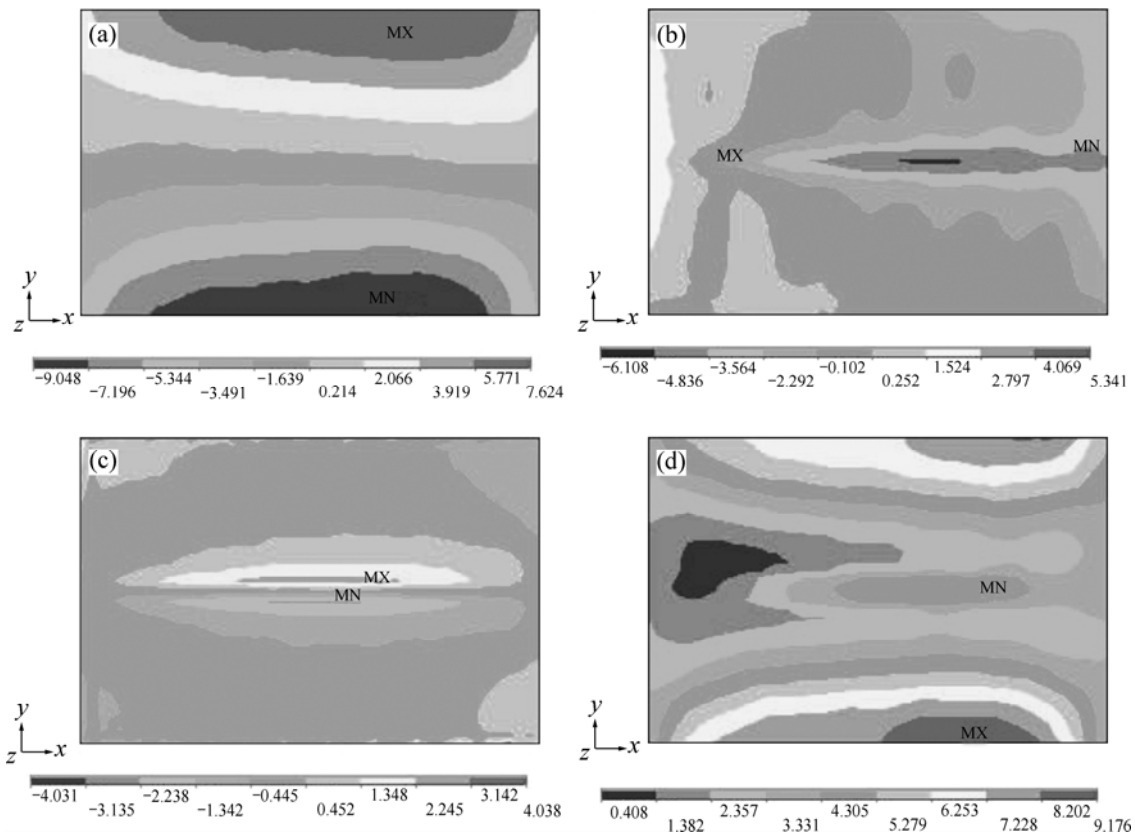


图 2 铝液磁场分布图

Fig.2 Distribution of magnetic field in metal pad: (a)  $x$  magnetic field; (b)  $y$  magnetic field; (c)  $z$  magnetic field; (d) Total magnetic field (Unit:  $10^{-3}$  T)

分别出现了正负方向的最大值  $5.3 \times 10^{-3}$  T 和  $-6.1 \times 10^{-3}$  T, 聚铝沟处铝液中磁场为负值。

$z$  方向磁场分布特征为中部靠近聚铝沟处较大, 向两侧铝液中逐渐减小, 在聚铝沟左右两侧靠近出电端的铝液中分别出现正负方向的最大值  $4.0 \times 10^{-3}$  T 和  $-4.0 \times 10^{-3}$  T, 其余部分铝液中磁场分布相对比较均匀, 如图 2(c)所示。

合磁场的分布与  $x$  方向磁场分布类似, 如图 2(d)所示。

总体来说 75 kA 导流槽内电磁场分布值较大, 尤其是  $z$  方向磁感应强度正负方向最大值达到  $4.0 \times 10^{-3}$  T 以上, 这对槽稳定性将造成不利的影响。对于小型普通预焙槽来说, 这是一种普遍现象, 引起这种电磁场分布特征的主要原因是缺少磁场补偿母线。不过对于普通预焙槽而言, 由于槽体较小, 铝液镜面面积相对较小, 较大电磁场引起的铝液波动和“二次反应”没有大型槽那么剧烈, 因此对于小型槽虽然槽内磁感应强度较大, 但一般不会对电解造成严重的危害<sup>[1]</sup>。

另外, 从磁场 3 个分量的计算结果图也可以看出,

出电端磁场值相对进电端磁场值要大,  $x$  方向电磁场最大值出现于上下两侧偏向出电端处,  $y$  方向磁场在出电端的聚铝沟上方达到负的最大值, 其绝对值要比进电端正方向磁场最大值稍大,  $z$  方向磁场的正负方向最大值均出现在中部铝液靠近出电端处。造成磁场这种分布特征的原因是 75 kA 电解槽纵向排列的工艺造成的, 槽内存在较大的沿长轴方向的水平电流, 使出电端涂层阴极和阴极钢棒中电流的分布大于进电端, 从而出现了出电端铝液中磁场分布大于进电端的现象。另外受聚铝沟处电流比较集中的影响, 该处具有较强的电磁场分布。

### 3.2 铝液中电磁力分布

图 3 所示为极间铝液电磁力分布图。可见, 铝液中电磁力场分布特征与电磁场分布特征类似, 也是成两侧沿长轴方向对称分布。以  $z$  方向电磁力为主, 最大值约为  $-4.0 \times 10^{-2}$  N, 从图 3(c)可以看出, 在两侧铝液中, 电磁力方向以  $z$  负方向为主, 与重力方向相同, 有利于促进铝液向聚铝沟流动, 而在进电端聚铝沟两

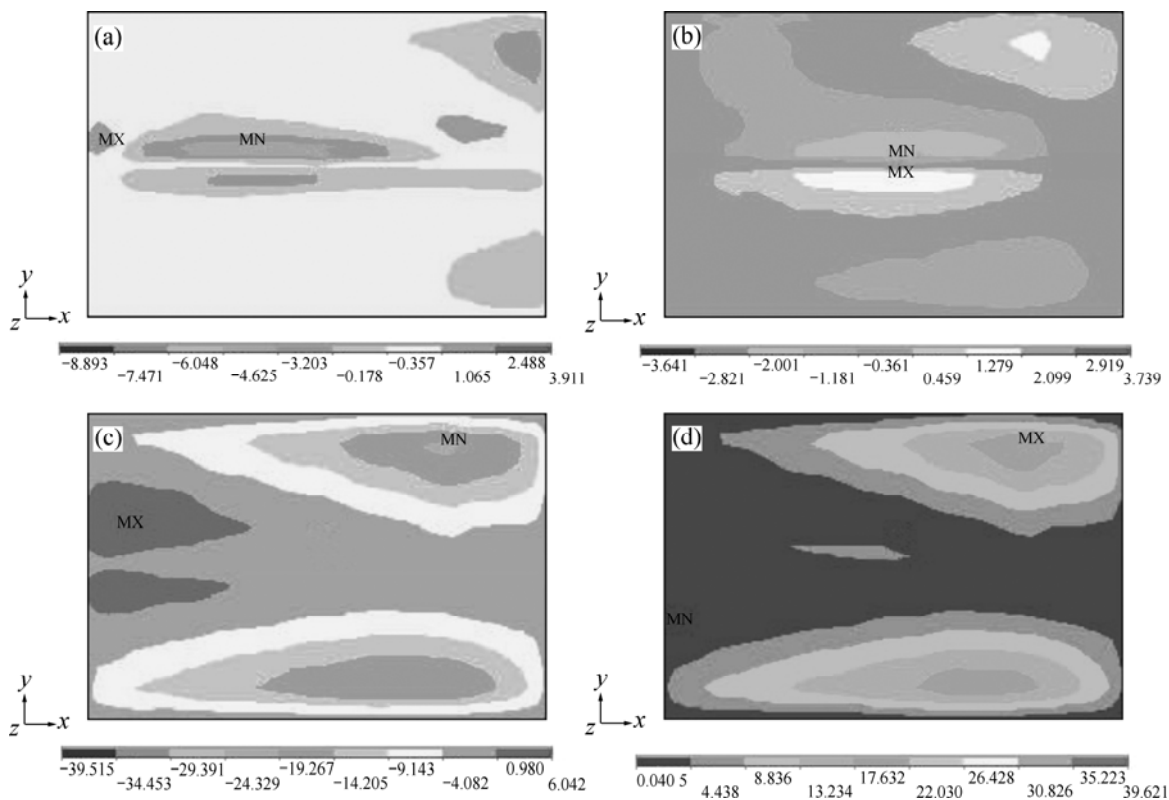


图3 铝液中电磁力分布云图

Fig.3 Distribution of magnetic force in metal pad: (a) x magnetic force; (b) y magnetic force; (c) z magnetic force; (d) Total magnetic force (Unit:  $10^{-3}$  N)

侧较小面积范围内铝液中存在 z 正方向电磁力, 其值较小, 约为  $6.0 \times 10^{-3}$  N。x 方向和 y 方向的电磁力分布较小, 正负方向绝对值最大值均在  $1.0 \times 10^{-2}$  N 以下。从图 3(a)可以看出, 在聚铝沟两侧靠近进电端处存在一定的 x 负方向电磁力分布, x 正方向最大值出现在紧靠进电端聚铝沟左侧的铝液中。3 个方向的合电磁力与 z 方向电磁力分布特征相似。

### 3.3 极间铝液流场和聚铝沟处铝液表面波动分析

极间铝液和聚铝沟内铝液形成稳定的循环后, 铝液在极间形成 4 个回流区, 如图 4 所示。聚铝沟处铝液出现较大的 x 负方向的流体流速, 并在进电端(左端)的极间形成两股, 分别朝向阴极炭块顶部的流体, 从而使靠近进电端极间铝液的流速是沿斜坡向上, 并在极间两侧铝液中形成 2 个较大的回流; 在出电端(右端)靠近端部铝液的流向也是沿斜坡朝上, 在出电端形成 2 个较小的回流。左端 2 个回流区较大, 这主要是受聚铝沟两侧偏左端较大的 x 负方向电磁力作用引起的(见图 3(a))。由图可见, 流速最大值达到 0.7 m/s 以上,

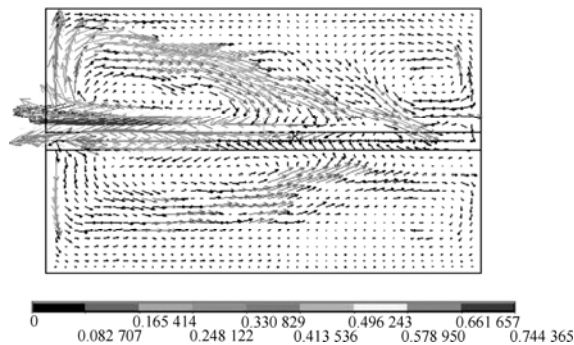


图4 铝液流场速度矢量图

Fig.4 Velocity vector distribution of metal pad (Unit: m/s)

由于出现在聚铝沟处, 不会给极间电解造成太大影响。极间铝液受到重力方向电磁力影响, 绝大部分面积内铝液具有向聚铝沟的流动速度, 有利于生成铝液向聚铝沟汇集。图 5 所示为聚铝沟处两相界面的波动图, 图中 x 坐标负方向为进电端, 正方向为出电端, 由图可见, 在聚铝沟两端的铝液受电磁力的影响, 表面波动幅度比较大, 因此聚铝沟处铝液波动呈现出两端上扬, 中间下沉的分布特征, 最大值达到 0.021 m。而

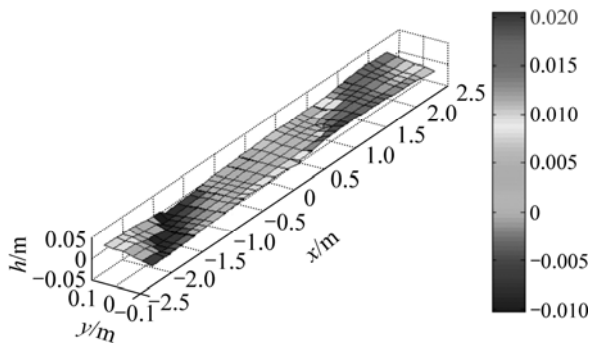


图 5 聚铝沟处铝液表面波动幅度  $h$

Fig.5 Fluctuation of metal pad in aluminum accumulation sump (Unit: m)

75 kA 导流槽极距在 0.030 m 左右, 如果电解未出现异常, 就不会引起极间短路现象的发生。

由于缺少导流槽实际运行的结果作为检验, 为了验证电磁场计算模型的正确性, 对某厂 154 kA 两端进电预焙铝电解槽电磁场分布进行了现场测试, 所采用的磁场测试仪器为美国 BELL 公司生产的三维高斯计 MODEL9950。对比现场测试结果表明, 计算值与测试值基本吻合, 因此认为本研究所建立的铝电解槽电磁场计算模型是合理的。

## 4 结论

1) 铝液中电磁场和电磁力场分布类似, 呈现沿长轴方向对称分布的特征。 $x$  方向磁场分布较大, 合磁场分布与  $x$  方向磁场分布类似。而电磁力分布以  $z$  方向为主, 尤其是极间铝液主要受  $z$  负方向电磁力, 方向与铝液重力方向相同, 有利于促进阴极表面析出铝液向聚铝沟顺利排放, 而聚铝沟处铝液中也存在着较大的电磁力。

2) 当聚铝沟处充满铝液时, 铝液在槽内形成稳定的循环流场, 在极间形成 4 个回流区, 速度最大值达到 0.7 m/s 以上。

3) 受聚铝沟处较大电磁力的影响, 该处铝液表面波动呈现出两端上扬, 中部下凹的特征, 两端铝液波动幅度最大值达到 0.021 m。如果电解不出现较大的异常, 对于极距为 0.030 m 左右的导流槽, 这个波动幅度不会引起极间短路现象的发生。因此也说明在现有 75 kA 普通预焙槽母线配置方案下, 导流型结构电解槽可以保持正常运行。

## REFERENCES

- [1] 黄永忠, 王化章, 王平甫, 甘益人, 李 劫. 铝电解生产[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 182.  
HUANG Yong-zhong, WANG Hua-zhang, WANG Ping-fu, GAN Yi-ren, LI Jie. Aluminum electrolysis production[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 182.
- [2] 梅 焱, 周子民, 彭小奇. 有色冶金炉窑仿真与优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 131-144.  
MEI Chi, ZHOU Jie-min, PENG Xiao-qi. Simulation and optimization of metallurgical furnaces for non-ferrous metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 131-144.
- [3] Zikanov O, Thessm A, Davidson P A, Ziegler D P. A new approach to numerical simulation of melt flows and interface instability in Hall-Heroult cells[J]. Metall Mater Trans B, 2000, B31: 1541-1550.
- [4] WU Jian-kang, HUANG Ming. Finite element analysis of magnetohydrodynamics stability of an aluminum reduction cell[C]//Light Metals. Warrendale: TMS, 2002: 511-514.
- [5] ZHOU Ping, MEI Chi, ZHOU Nai-jun, JIANG Chang-wei. Effect of electromagnetic force on turbulent flow of molten metal in aluminum electrolysis cell[J]. J Cent South Univ Technol, 2004, 11(3): 265-269.
- [6] Shcherbini S A, Rozin A V, Lukashchuk S Y. The 3D modeling of MHD stability of aluminum reduction cells[C]//Light Metals. Warrendale: TMS, 2003: 373-377.
- [7] Segatz M, Vogelsang D, Droste G. Modeling of transient magneto hydrodynamic phenomena in Hall-Heroult cells[C]//Light Metals. Warrendale: TMS, 1993: 361-368.
- [8] 孙 阳, 冯乃祥, 崔建忠. 186 kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的三维数值计算[J]. 金属学报, 2001, 53(3): 332-336.  
SUN Yang, FENG Nai-xiang, CUI Jian-zhong. Tridimensional numerical calculation of magnetic field in a 186 kA large prebake anode aluminum reduction cell[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 53(3): 332-336.
- [9] 孙 阳, 冯乃祥, 崔建忠. 铝电解槽磁场的三维数值计算[J]. 计算物理, 2002, 19(4): 325-328.  
SUN Yang, FENG Nai-xiang, CUI Jian-zhong. Three-dimensional numerical calculation of magnetic fields in aluminum reduction cells[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, 19(4): 325-328.
- [10] 曾水平, 蔡祺凤, 梅 焱, 刘业翔. 铝电解槽内磁场的三维数值分析[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 1995, 26(5): 618-622.  
ZENG Shui-ping, CAI Qi-feng, MEI Chi, LIU Ye-xiang. The calculation and analysis of the magnetic field in aluminum reduction cell[J]. Journal of Central South University of

- Technology: Science and Technology, 1995, 26(5): 618-622.
- [11] 姜昌伟, 梅 焱, 周乃君, 徐顺生. 用标量电位法与双标量磁位法计算铝电解槽三维磁场[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 1021-1025.
- JIANG Chang-wei, MEI Chi, ZHOU Nai-jun, XU Shun-sheng. Computation of 3D magnetic field in prebaked cells using scalar voltage potential method and two scalar magnetic potentials method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 1021-1025.
- [12] Dupuis M, Tabsh I. Thermo-electro-magnetic modeling of a Hall-Heroult cell[C]//Mannweiler U. Proceeding of the ANSYS Sixth International Conference. San Francisco: CIM, 1994: 3-13
- [13] 杨 溢, 李朗如. 大型铝电解槽磁场的有限元法综合分析[J]. 有色金属, 2002, 54(3): 66-69.
- YANG Yi, LI Lang-ru. Magnetic field and analysis of large aluminum reduction cell by using finite element method[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(3): 66-69.
- [14] 李相鹏. 75 kA 导流型铝电解槽物理场仿真与优化[D]. 长沙: 中南大学, 2004: 93-94.
- LI Xiang-peng. Physical fields simulation and optimization of the 75 kA drained aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2004: 93-94.
- [15] 李 劫, 李相鹏, 赖延清, 万押平, 周向阳, 赵恒勤, 刘业翔. 导流槽阴极导杆安装方式对阴极表面电流分布的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 1017-1020.
- LI Jie, LI Xiang-peng, LAI Yan-qing, WAN Ya-ping, ZHOU Xiang-yang, ZHAO Hen-qin, LIU Ye-xiang. Influences of different collector bar installations on cathode current distribution of drained cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 1017-1020.

(编辑 杨幼平)