

静流式铝电解槽磁场仿真及设计

梁学民^{1,2}, 李 劫¹, 张红亮¹, 王有山², 吕晓军¹, 张翀辉¹, 刘业翔¹

(1. 中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 河南中孚实业股份有限公司, 巩义 451200)

摘 要: 通过对槽内磁场、电流场的分析和研究, 提出一种静流式铝电解槽的概念, 采用阴极垂直出电的方式代替目前的水平出电方式, 从而大幅度降低铝液层中的水平电流, 大幅度削弱电磁力对槽内熔体的影响, 进而减小铝液的流动和波动, 将电磁影响削弱到最低程度以实现熔体界面高稳定性, 并依此原理设计开发新型高效节能型铝电解试验槽。同时对母线配置进行设计, 在最优化母线配置下, 磁场数值仿真计算结果表明, 该电解槽垂直磁场最大值为 0.896 3 mT, 平均值为 0.360 2 mT, 远低于同规格普通电解槽的垂直磁场, 从而可获得电解槽超稳定运行条件, 为大幅度降低极距, 实现大幅度节能创造条件。

关键词: 静流式; 浅凹型阴极; 垂直出电; 磁流体

中图分类号: TF821

文献标志码: A

Magnetic field simulation and design of stationary stream pattern aluminum reduction cell

LIANG Xue-min^{1,2}, LI Jie¹, ZHANG Hong-liang¹, WANG You-shan²,
LÜ Xiao-jun¹, ZHANG He-hui¹, LIU Ye-xiang¹

(1. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Henan Zhongfu Industry Co., Ltd., Gongyi 451200, China)

Abstract: The concept of stationary stream pattern aluminum reduction cell was presented after analyzing the magnetic field and current flows of aluminum reduction cells. With this kind of innovative design, the electricity flows out of the cell in a vertical path instead of current horizontal path, so the current flow intensity in aluminum melt can be reduced sharply, and the effect of electromagnetic force on the melt is weakened. Furthermore, the flow and fluctuation of the aluminum melt becomes lower, and the effect of electromagnetic force decreases to the minimum level. Under the above principle, a novel kind of high efficient aluminum reduction test cell was designed. With optimal busbar designing method, the simulation results show that the maximum vertical magnetic field strength is only 0.896 3 mT, and the mean value is 0.360 2 mT, which are far below the values of ordinary cells with the same scale. Thus, the cell can perform steady with much lower polar distance, and the goal of substantially energy-saving target would be achieved.

Key words: stationary stream pattern; cathode shallow grooves; vertical electricity path; magnetic fluid

铝电解槽的电、热、磁以及磁流体力学稳定性等物理场的研究为电解槽的设计改进和工艺优化提供了重要的理论指导。如 DUPUIS^[1]提出一种电热场模拟方法, 可有效指导电解槽的槽壳设计, 避免电解过程

槽壳的过大变形。LI 等^[2]通过电解质-阳极气泡-铝液三相流场的计算, 解析出电解质-铝液界面电流效率的分布情况, 为优化工艺条件提高电流效率起到一定的参考价值。自 20 世纪 80 年代至 90 年代末, 在各种

物理场研究开发的基础上,我国相继成功开发了 180 kA、280 kA 和 320 kA 级大型铝电解槽,在世界铝工业的地位不断提高^[3]。近两年来,400 kA 级的超大型铝电解槽亦实现了工业化推广,标志着我国铝电解槽技术达到了国际领先水平^[4]。与此同时,由于计算机软件的进步,一批先进的仿真软件应用于实际设计中,如 ANSYS、MHD-VALDIS 等,使磁场、热场及流场的计算更为简便和有效。一批采用多立柱、槽底补偿、非对称补偿的大型槽母线设计,取得了较好的磁场平衡,其垂直磁场绝对值可达 0.5 mT 左右,各象限垂直磁场绝对值的平均值可达 0.4 mT 左右,满足了垂直磁场均匀化的要求^[5-6]。槽结构的设计和仿真计算也取得了较大进展,大跨度管桁架上部结构、多点同步提升技术成功应用。以上技术的集成应用,使我国超大型铝电解槽技术逐步成熟,为新型电解槽的开发奠定了良好基础。

为了进一步降低电解槽工作电压达到节能的目的,近几年有研究者提出了不同的思路减缓熔体的流动。WANG 等^[7]开发了在阴极表面构筑凸台,以阻挡铝液的流动和液面的波动,从而降低极距实现低电压运行,被称为阻流式电解槽;刘风琴等^[8]在阴极碳块表面有规律的开细长沟槽,将铝液导入槽端部得出铝池,在较低铝水平的操作条件下,液面的波动得到有效抑制,这种结构被称为导流式电解槽,这一方案使理想的导流型电解槽设想成为可能。以上这些方法均取得了不同程度的效果,但由于阴极结构的完整性受到破坏,在阴极材料没有突破的情况下,难以实现长期的低电压稳定运行,还会使槽寿命受到影响。同时由于未能从改变磁场和电流、磁流体稳定性这一源头上取得突破,也会使实际运行效果大打折扣。

由于前述的两种技术路线在现实生产条件下都不能摆脱电磁力对生产过程产生的影响,单纯的阻流或导流都无法取得长期低电压稳定运行的效果,解决磁流体稳定性仍然是低电压节能技术的核心问题,为此,本文作者提出了一种静流式电解槽的概念,通过大幅降低铝液层中的水平电流和垂直磁场分布,使熔体界面达到静流效果,从而实现大幅度降低电压,减小铝电解直流电耗。目前,所设计的 12 台静流式铝电解槽已陆续投入工业运行试验。

1 静流式铝电解槽及其总体设计

在铝电解电化学过程中,实际起阴极作用的是铝

液表面而不是阴极炭块表面。在铝电解槽熔池内,电解质熔体和铝液在无电磁力存在时,液体界面波动在重力和粘性阻力的作用下逐渐恢复稳定,铝液表面是平的。在运行的电解槽上由于电磁力的存在,驱使熔体在熔池内流动并造成电解质/铝液交界面(即铝液表面)的变形与波动,从而引起铝电电极极距变化或短路,影响电流效率和电能消耗,同时进一步引起电流、磁场和电磁力的扰动,而变化的电磁力又反过来作用于熔体流动和波动,造成铝电解生产过程是否稳定运行的问题。这是电磁场和流场耦合的动力体系,称之为磁流体动力学(Magneto-hydrodynamics, MHD)^[6]。实际铝电解槽是四周封闭的流动区域,边界反射形成的驻波代表了真实的流动现象。MHD 稳定性问题与技术经济指标如电能消耗和电流效率直接相关^[2],一直是铝电解槽研究设计的难点问题和技术关键。

1.1 槽内导体对磁场和电流分布的影响

槽内广泛分布的导体对磁流体稳定性的影响由电解槽固有的结构决定,进行磁流体模拟计算时,常常把它作为一个基本量^[9-10]。槽内导体电流和槽外周围母线电流两种情况下的垂直磁场分布,如图 1 所示。图 1 中 TE 和 DE 分别代表槽子的出铝端(Tap end)和烟道端(Duct end)。槽内导体电流产生的磁场可视为合磁场分布的基本形式,在考虑炉帮的条件下磁场垂直分量 B_z 呈对角互为极值的分布形式,如图 1(a)所示。槽外周围母线电流产生的磁场比槽内导体电流产生的磁场弱,其在进电端两个角部与前者同向叠加增强磁场,在出电端两个角部与前者反向叠加消弱磁场,如图 1(b)所示。可见,槽内导体产生的磁场是不可忽视的^[10]。

槽内导体造成的垂直磁场最大达到 2 mT,是由槽内水平电流产生的,且主要是阴极钢棒中的电流。槽内导体中,电解质的电阻比铝液电阻大得多^[11],电流从阳极穿过电解质到达铝液界面,在电解质层电流的分布是垂直而均匀的;在铝液层,由于其良好的导电性与上层电解质和下层碳块的导电性不可比性(相差 100 倍以上),因而传统槽在铝液层都会产生一定水平电流分量^[12],如图 2 所示。

1.2 静流式铝电解槽

针对槽内导体对磁场和电流分布影响的特点,减小或消除铝液层水平电流分量和阴极汇流棒电流,能够有效削弱电磁场对熔体流动和波动的影响^[13],使槽内造成熔体波动的原始推动力大大削弱或消除,熔体

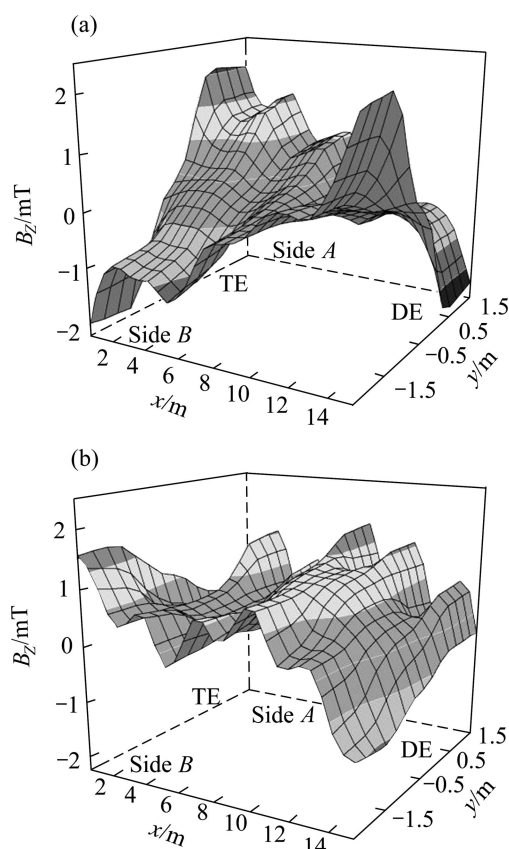


图1 不同电流源对铝液中间垂直磁场的作用

Fig.1 Comparison of vertical magnetic field caused by different current sources: (a) Conductor inside pot; (b) Busbar around pot

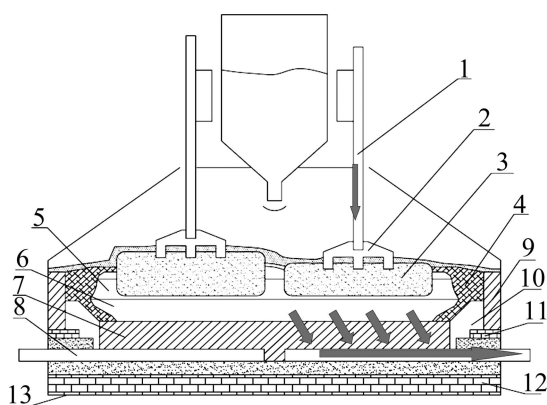


图2 预焙阳极铝电解槽结构示意图(传统式)

Fig.2 Structure diagram of prebaked anode pot (ordinary pattern): 1—Aluminum rod; 2—Steel draw; 3—Anode carbon block; 4—Side ledge; 5—Electrolyte; 6—Aluminum melt; 7—Cathode carbon block; 8—Cathode collect bar; 9—Side carbon block; 10—Surrounding paste draw; 11—Refractory brick; 12—Insulating brick; 13—Steel shell

界面波动在重力和粘性阻力的作用下逐渐达到平静,即静流的状态。达到这一目标需要有一种全新的槽内导体结构配置,为此,本文作者提出一种静流式铝电解槽结构,其原理如图3所示,对于垂直钢棒的数量,可根据实际需求选择。

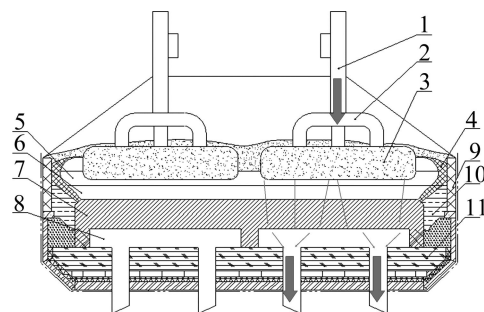


图3 预焙阳极铝电解槽结构示意图(静流式)

Fig.3 Structure diagram of pre baked anode pot (stationary stream pattern): 1—Aluminum rod; 2—Steel draw; 3—Anode carbon block; 4—Side ledge; 5—Electrolyte; 6—Aluminum melt; 7—Cathode carbon block; 8—Cathode steel bar; 9—Side carbon block; 10—Surrounding past draw; 11—Refractory brick; 12—Insulating brick; 13—Steel shell

1.3 静流式电解槽的总体设计

铝电解槽要实现的总体目标是通过槽内导体及槽周围母线的配置,来实现槽内磁场的平衡和磁场强度的最小化,实现槽内熔体高磁流体稳定性(即静流),以提高电流效率和降低电耗,优化工艺^[2,13]。

静流式铝电解槽阴极采用底部出电模式铝电解槽的阴极钢棒由水平钢棒和垂直钢棒组合而成,电流经阳极、电解质、铝液、阴极,最后由钢棒从槽底导出,并经过母线进入到下一台槽,对阴极结构和母线结构等进行全新的设计和优化,并提出了浅凹式阴极/槽底出电、对称补偿的高磁流体稳定性母线配置等先进技术。电解槽主体的初步设计如图4所示。

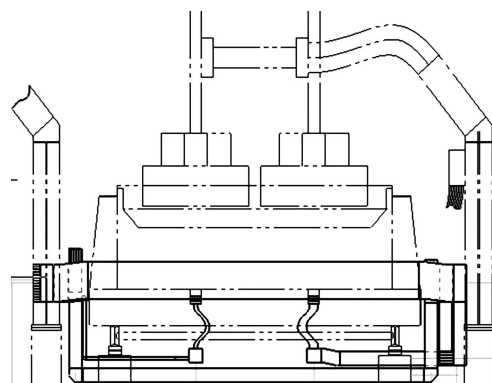


图4 静流式铝电解槽底部母线设计方案

Fig.4 Bottom busbar design of stationary stream pattern pot

2 静流式电解槽的内衬结构与母线配置

内衬结构设计和母线配置的好坏与电解槽的稳定高效运行密切相关，也是新槽型设计过程中最重要的考虑因素。本文作者针对静流式电解槽，分别从内衬结构和母线配置两个方面，重点介绍其设计思路和工业实施方案。

2.1 静流式电解槽新型内衬结构

由于钢棒从底部穿出电解槽，其内衬需做相应的改变，如图 6 所示，主要由底部开孔的槽壳、槽底保温层、穿过保温层的垂直钢棒(见图 5)及钳入垂直钢棒

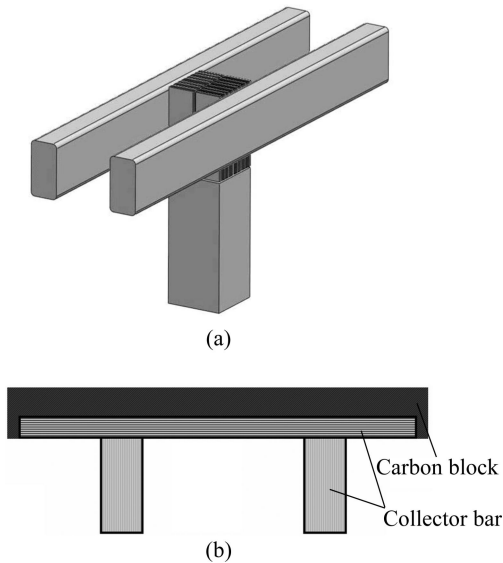


图 5 阴极炭块结构示意图
Fig.5 Schematic diagram of cathode structure: (a) Collector bar; (b) Collector bar and carbon block

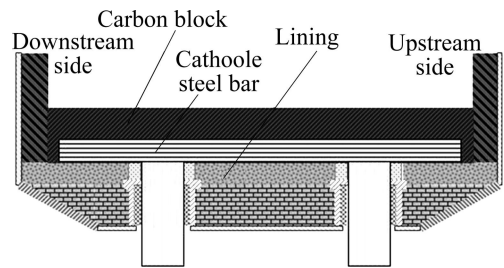


图 6 阴极内衬结构示意图
Fig.6 Schematic diagram of structure of cathode linings

(水平部分)的阴极炭块组成。阴极钢棒与炭块通过钢棒糊捣固后形成一个整体，并要求阴极钢棒与炭块表面有较高的垂直度和精确的相对位置，以保证安放炭块时的对位。

该结构电解槽采用底部出电的结构，这样就使得槽底散热增加^[14]。因此，在槽底整体加强保温的基础上，再在垂直钢棒周围区域进一步加强保温，以避免等温线的上移，保证电解槽在合理的热平衡状态下生产^[15]。

该新型阴极组与内衬结构不但可以从工程的角度方便开展现场施工，而且还能有效避免由于底部开孔造成内衬早期破损的风险。

2.2 静流式电解槽阴极母线配置

电解槽最优的母线配置是其垂直磁场的最大值与平均值尽可能小，为了保证磁流体的稳定性，使电解槽中铝液层的垂直磁场值能够达到最低^[9, 16]，根据静流式电解槽的结构特点，设计多种母线配置方案进行仿真优化，得出最优的母线配置。母线配置简图如图 7 所示，其现场施工如图 8 所示。

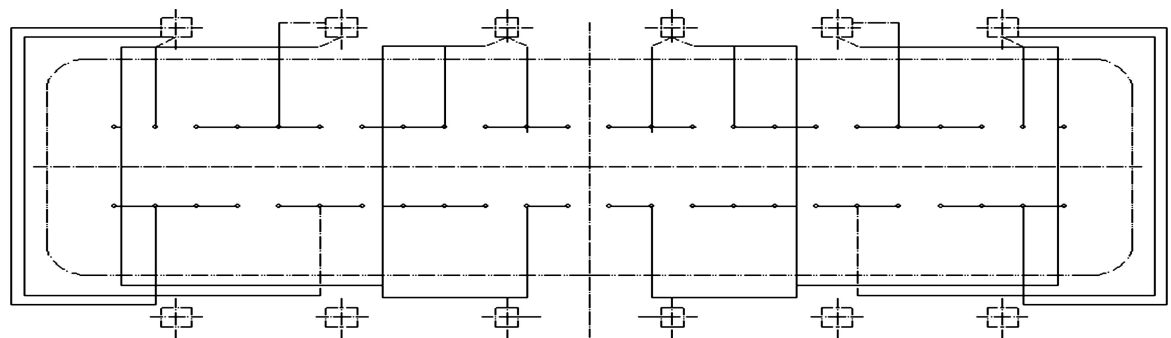


图 7 静流式电解槽的母线配置简图
Fig.7 Busbar scheme of stationary stream pattern pot



图 8 静流式电解槽母线现场施工图
Fig.8 Construction site of stationary stream pattern pot

3 静流式铝电解槽物理场仿真 计算

采用电磁模拟软件进行模拟计算, 磁场和母线用量等参数列于表 1, 计算得到静流式铝电解槽磁场具体分布计算结果如图 9(a)~(c)所示。

从以上可以看出, 磁场计算结果比较理想。铝液垂直磁场绝对值的平均值为 0.360 2 mT, 垂直磁场最大值为 0.896 3 mT。磁场平均值与传统母线配置方案比较接近, 磁场的最大值远低于传统母线配置方案的^[16], 表明这种出电方式可以保证较小的垂直磁场梯度和水平电流分量, 体现了静流式铝电解槽的技术特点。

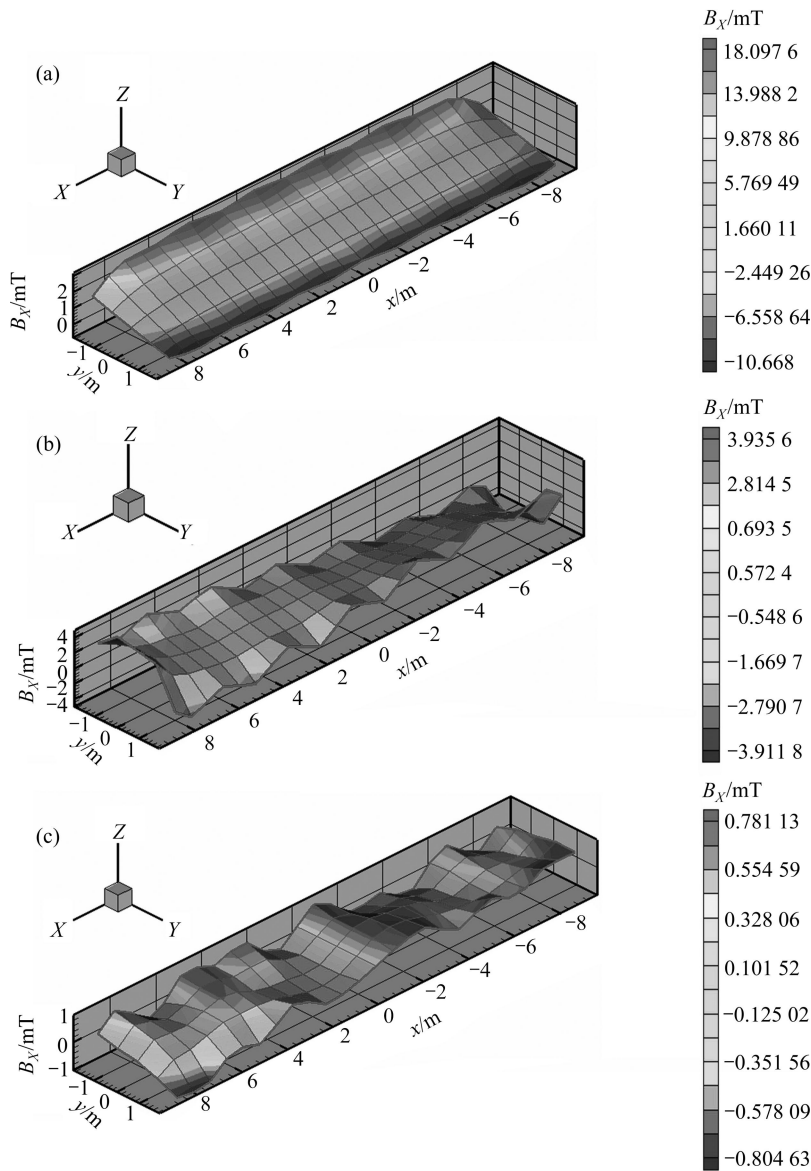


图 9 铝液内磁场分布
Fig.9 Distribution of magnetic field in aluminum melt: (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

表 1 磁场计算结果

Table 1 Calculation results of magnetic field

Parameter	Value
$B_{X,max}$	19.626 5 mT
$ B_X _{ave}$	8.489 5 mT
$B_{Y,max}$	-4.887 9 mT
$ B_Y _{ave}$	1.185 8 mT
$B_{Z,max}$	0.896 3 mT
$ B_Z _{ave}$	0.360 2 mT
Cathode busbar dosage	58 700 kg
Voltage drop of busbar	233/mV
Ampere density	38 A/cm ²

由于磁流体的超稳定, 在最优条件下, 该电解槽的设计电压降保持在 3.7~3.9 V 之间, 电流效率 94% 以上, 因此, 尽管母线用量略有增加, 但直流电耗可保证在生产每吨铝为 12 MW·h, 因此, 从经济上来说, 该设计仍然具有较大的节能前景。

4 结论

1) 提出了一种静流式铝电解槽, 不但能够使槽内熔体中垂直磁场分布得到削弱和均匀化, 还能够有效减少熔体中的水平电流分量, 从根本上大幅削弱槽内熔体流动和波动的两个主要因素的影响

2) 设计和开发了静流式铝电解槽配套的阴极、母线和内衬结构, 并构造了相应的试验槽。

3) 通过电磁场模拟结果表明, 采用底部出电的电解槽通过优化母线配置, 可大幅度降低槽内垂直磁场强度, 且磁场的分布与均匀性体现了静流式电解槽高具备了极高的磁流体稳定性, 为大幅度降低极距, 实现大幅度节能创造条件。

REFERENCES

[1] DUPUIS M. Mathematical modelling of aluminum reduction cell potshell deformation[C]//Light Metals Seattle, USA: TMS, 2010: 417-422.

[2] LI Jie, XU Yu-jie, ZHANG Hong-liang, LAI Yan-qing. An inhomogeneous three-phase model for the flow in aluminium reduction cells[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(1): 46-54.

[3] LIANG Xue-min. China—world leader in primary aluminum

technology[J]. Light Metal AGE, 2009(2): 28-31.

[4] 梁学民. 400 kA 铝电解槽技术与开发[J]. 轻金属, 2009(12): 26-30.

LIANG Xue-min. Study and development of technology for 400 kA aluminium electrolysis cell[J]. Light Metals, 2009(12): 26-30.

[5] LI Jie, LIU Wei, LAI Yan-qing, Li Qing-yu, LIU Ye-xiang. Coupled simulation of 3D electro-magneto-flow field in hall-heroult cells using finite element method[J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2006, 19(2): 105-116.

[6] 吴其芬, 李 桦. 磁流体力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007: 135-233.

WU Qi-feng, LI Hua. Magneto fluid mechanics[M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2007: 135-233.

[7] WANG Zi-qian, FENG Nai-xiang, PENG Jian-ping, WANG Yao-wu. Study of surface oscillation of liquid aluminum in 168 kA aluminum reduction cells[C]//Light Metals Seattle. WA: TMS, 2010: 485-488.

[8] 刘凤琴, 杨宏杰, 顾松青, 蔡 旭, 魏秀明, 陈开斌. 一种导流型铝电解槽用阴极碳块: 中国, 200910086175[P]. 2009-11-04.

LIU Feng-qin, YANG Hong-jie, GU Song-ming, CAI Xu, WEI Xiu-ming, CHEN Kai-bin. A type of cathode carbon block used for the drained style aluminum reduction cell: China, 200910086175[P]. 2009-11-04

[9] 周 萍. 铝电解槽内电磁流动模型及铝液流动数值仿真的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002: 35-99.

ZHOU Pin. A research on mathematical models of electromagnetic hydrodynamics and numerical simulation of metal pad flow in aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2002: 35-99.

[10] 刘 伟, 李 劼, 赖延清, 徐宇杰, 刘业翔. 铝电解槽电磁流场数学建模及应用[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18 (5): 909-916.

LIU Wei, LI Jie, LAI Yan-qing, XU Yu-jie, LIU Ye-xiang. Development and application of electro-magneto-flow mathematic model of aluminum reduction cells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18 (5): 909-916.

[11] 杨重愚. 轻金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 67-154.

YANG Zhong-yu. Metallurgy of light weight metals[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2006: 67-154.

[12] 田应甫. 大型预焙铝电解槽生产实践[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2003: 67-89.

TIAN Yin-fu. Production Practice of Large pre-baked aluminum reduction cells[M]. Changsha: Press of Central South University of Technology, 2003: 67-89.

[13] 李 劼, 徐宇杰, 刘 伟, 赖延清. 基于波动模式耦合的铝电解

- 槽磁流体稳定性傅立叶级数法分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 213–217.
- LI Jie, XU Yu-jie, LIU Wei, LAI Yan-qing. Aspect ratio research based on magneto-hydrodynamic stability in aluminum reduction cells[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27 (2): 213–217.
- [14] 周乃君, 崔大光, 周正明, 夏小霞. 铝电解槽电热场 1/4 槽模型有限元解析方法及应用[J]. 轻金属, 2006(11): 37–40.
- ZHOU Nai-jun, CUI Da-guang, ZHOU Zheng-ming, XIA Xiao-xia. Numerical simulation and application on thermal-electric field of a quarter of aluminum reduction cell[J]. Light Metals, 2006(11): 37–40.
- [15] 李 劫, 邓星球, 赖延清, 刘凤琴, 刘业翔. 160 kA 预焙铝电解槽在低分子比和低温条件下的三维电热场[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 875–879.
- LI Jie, DENG Xing-qiu, LAI Yan-qing, LIU Feng-qin, LIU Ye-xiang. 3D Thermo-electric of 160 kA prebaked aluminum reduction cell at low cryolitic ratio and temperature[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2004, 35(6): 875–879.
- [16] 刘 伟. 铝电解槽多物理场数学建模及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 62–75.
- LIU Wei. Mathematical modeling of multiple physical fields and its application in aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2008: 62–75.

(编辑 李艳红)