

文章编号: 1009 - 444X(2021)04 - 0340 - 06

## 500 kA 铝电解槽磁场数值模拟及测试分析

李尚玮<sup>a,b</sup>, 邓胜祥<sup>a,b</sup>, 匡江红<sup>b</sup>

(上海工程技术大学 a. 机械与汽车工程学院; b. 新能源与节能新技术研究所, 上海 201620)

**摘要:** 利用 SolidWorks 三维建模及 COMSOL 三维仿真模拟软件, 对 500 kA 铝电解槽进行数值模拟. 对某厂家 500 kA 铝电解槽进行磁场测试, 测试结果与模拟结果吻合较好. 得出 500 kA 铝电解槽的磁度分布, 并对 500 kA 铝电解槽进行磁场优化, 通过增加立柱母线和槽周母线到铝电解槽的距离降低立柱母线与槽周母线对铝液层的影响. 优化使得铝液层在 Z 轴方向上磁场分布趋于均匀稳定. 为改善生产工艺技术条件提供了技术支持.

**关键词:** 铝电解槽; 数值模拟; 磁场; 磁场优化

中图分类号: TF821

文献标志码: A

## Numerical simulation and test analysis of magnetic field in 500 kA aluminum electrolyzer

LI Shangwei<sup>a,b</sup>, DENG Shengxiang<sup>a,b</sup>, KUANG Jianghong<sup>b</sup>

(a. School of Mechanical and Automotive Engineering; b. Institute of new energy and new energy saving technology, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Using 3D modeling of SolidWorks and 3D simulation software of COMSOL, the numerical simulation of 500 kA aluminum electrolyzer was carried out. A magnetic field test on 500 kA aluminum electrolyzer of a manufacturer is carried, and the test results are in good agreement with the simulation results. The magnetic field distribution of 500 kA aluminum electrolyzer was obtained and optimized, the influences of the column bus bar and groove bus bar on the molten aluminum layer are reduced by increasing the distance between the column bus bar and aluminum electrolyzer as well as the distance between the groove bus bar and aluminum electrolyzer. After the optimization, the magnetic field distribution of the molten aluminum layer tends to be uniform and stable along the Z-axis direction. The simulation and test provide technical support for improving the technical conditions of production process.

**Key words:** aluminum electrolyzer; numerical simulation; magnetic field; magnetic field optimization

冰晶石-氧化铝熔盐电解法<sup>[1]</sup>是目前工业上冶炼铝的唯一方法, 冰晶石-氧化铝熔盐电解法是以直流电<sup>[2]</sup>作为生产能源, 而铝电解槽又有许多铁磁性材料, 因此在生产过程中铝电解槽内部及

周边会产生强大的静磁场. 随着我国电解铝行业的不断发展, 电解槽的槽体变得越来越大, 电流强度不断增加, 铝电解槽内部及周围的静磁场变得越来越大<sup>[3-4]</sup>. 磁场会与熔体中的电流相互作用

收稿日期: 2021 - 06 - 28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605902)

作者简介: 李尚玮(1996 -), 男, 在读硕士, 研究方向为能源装备与过程控制. E-mail: 358581392@qq.com

通信作者: 邓胜祥(1970 -), 男, 教授, 博士, 研究方向为新能源与节能新技术、可视化仿真与智能控制、热工过程检测与参数软测量、能源规划、节能评估与能源审计. E-mail: csdsx@163.com

产生电磁力<sup>[5]</sup>,使槽内熔体循环加速,铝液面容易产生隆起、偏斜和波动的现象,铝液层的不稳定会导致电流效率下降、电解槽能耗增加,影响电解槽工作稳定性同时减少电解槽的使用寿命<sup>[6-8]</sup>.不合理的磁场不利于电解铝的生产,因此铝作为国民经济建设不可或缺的基础原材料之一<sup>[9-10]</sup>,生产过程中的槽况至关重要,探究铝电解槽磁场分布不仅能为铝电解生产提供技术指导,还能帮助厂家节约成本,达到节能降耗的目的.为探究 500 kA 铝电解槽铝液层磁场分布,对某厂 500 kA 铝电解槽进行磁场模拟及测试.

### 1 建立坐标系

模拟前对目标铝电解槽建立坐标系,坐标图如图 1 所示.设进电侧为 A 侧,出电侧为 B 侧,坐标系 Y 轴正方向为电流方向,由进电侧指向出电侧(A 侧指向 B 侧).X 轴右侧为出铝端(TE 端),左侧为烟道端(DE 端),由烟道端指向出铝端.

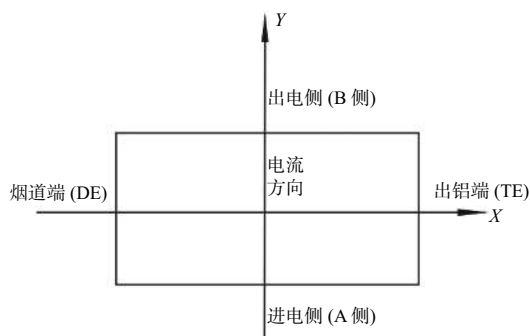


图 1 500 kA 铝电解槽坐标图

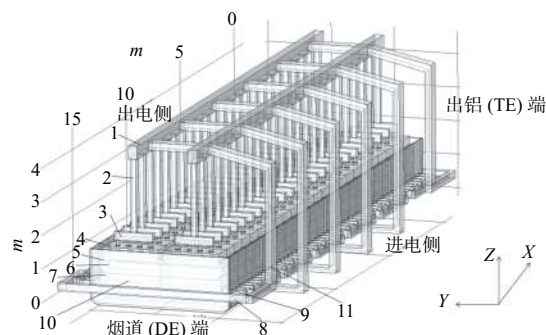
Fig. 1 Coordinate diagram of 500 kA aluminum electrolyzer

### 2 铝电解槽磁场模拟

铝电解槽磁场模拟可将其磁场分布呈现在计算机上,方便观察、发现磁场分布存在的问题,是试验铝电解槽磁场优化方案的重要手段.本研究根据某厂家铝电解槽数据,对其进行 1:1 建模.

#### 2.1 磁场模型

根据某厂 500 kA 铝电解槽数据,运用 Solid Works 三维建模软件建模,建模完成后将其导入到 COMSOL 三维仿真模拟软件进行模拟,模型图如图 2 所示. 500 kA 铝电解槽参数见表 1.



1—横梁刚;2—铝导杆;3—阳极钢爪;4—阳极炭块;5—电解质层;6—铝液层;7—阴极炭块;8—槽周母线;9—阴极钢棒;10—电解槽槽壳;11—立柱母线.

图 2 铝电解槽模型图

Fig. 2 Model diagram of aluminum electrolyzer

#### 2.2 数学控制模型

铝电解槽中包含大量铁磁材料和非铁磁材料,铁磁材料有阳极钢爪、钢梁、槽壳、立柱母线、槽周母线、铝导杆、阴极钢棒,这些都会对铝液层

表 1 500 kA 铝电解槽参数表

Table 1 Parameters of 500 kA aluminum electrolyzer

序号	项目名称	单位	参数
1	电流强度	kA	500
2	电解质水平	mm	360
3	铝液水平	mm	170
4	阳极炭块尺寸	mm×mm×mm	1 750×740×370
5	阳极炭块数	块	48
6	阳极钢爪数	个	48
7	阴极炭块尺寸	mm×mm×mm	3 810×740×510
8	阴极炭块数	块	48
9	阴极钢棒尺寸	mm×mm×mm	2030×105×225

的磁场产生影响. 由于铝导杆产生的磁场小且距离铝液层远, 影响可以忽略不计. 实际槽壳结构复杂, 本研究用一定厚度的钢壳替代复杂的槽壳结构, 达到简化模型的目的<sup>[11]</sup>. 磁场模拟时需要考虑立柱母线及槽周母线和槽底母线对于铝电解槽铝液层磁场的影响, 同时也要考虑空气对铝液层磁场的影响, 因此在电解槽外加上一定的空气域, 在计算时这部分磁场不能忽略. 对于非铁磁材料且不流通电流的部分, 因为对铝液层的磁场没有影响, 为避免不必要的计算, 在建立模型时将其省略. 模拟的电解槽采用大面六点进水的方式, 模拟需先在 COMSOL 三维模拟软件中模拟出电解槽的电流分布, 再根据电流分布生成磁场. 铝电解槽内的磁场问题满足稳态麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu H \quad (2)$$

式中:  $\nabla$  为哈密顿算符;  $H$  为磁场强度;  $J$  为电流密度;  $B$  为磁感应强度;  $\mu$  为磁导率.

### 2.3 模拟结果

将模型导入到 COMSOL 三维仿真软件中, 设置好电流条件, 在 COMSOL 中将电流条件以及各部分材料参数设置好后进行仿真计算, 模拟的铝液层(图 2 中的 6) 3 个坐标轴方向的磁场分布结果如图 3 所示.

由图 3(a) 和 3(b) 可知, 铝液层  $X$  轴方向上的磁场大小大部分在 10~15 Gs, 只有极小部分区域磁场强度在 40 Gs 以上. 而  $Y$  轴方向磁场大小分布均匀, 基本为 20~40 Gs, 只有出铝端极小部分磁场大小达到 120 Gs, 对于整体影响不大. 由图 3(c) 可知, 铝液层  $Z$  轴方向大小进电侧明显大于出电侧, 而进电侧中间磁场大小高于两端的磁场大小. 由于立柱母线和槽周母线距离铝电解槽太近, 导致立柱母线和槽周母线的磁场对于铝液层的磁场影响较大. 可在后续优化中适当增加立柱母线和槽周母线到铝电解槽的距离, 减少立柱母线和槽周母线对于铝液层磁场的影响.

## 3 磁场测试

磁场测试是铝电解槽 3 场测试中重要的一环, 不仅能验证模拟的准确性, 还能帮助厂家把握槽况, 对指导电解铝生产有着重要意义. 本研究选取

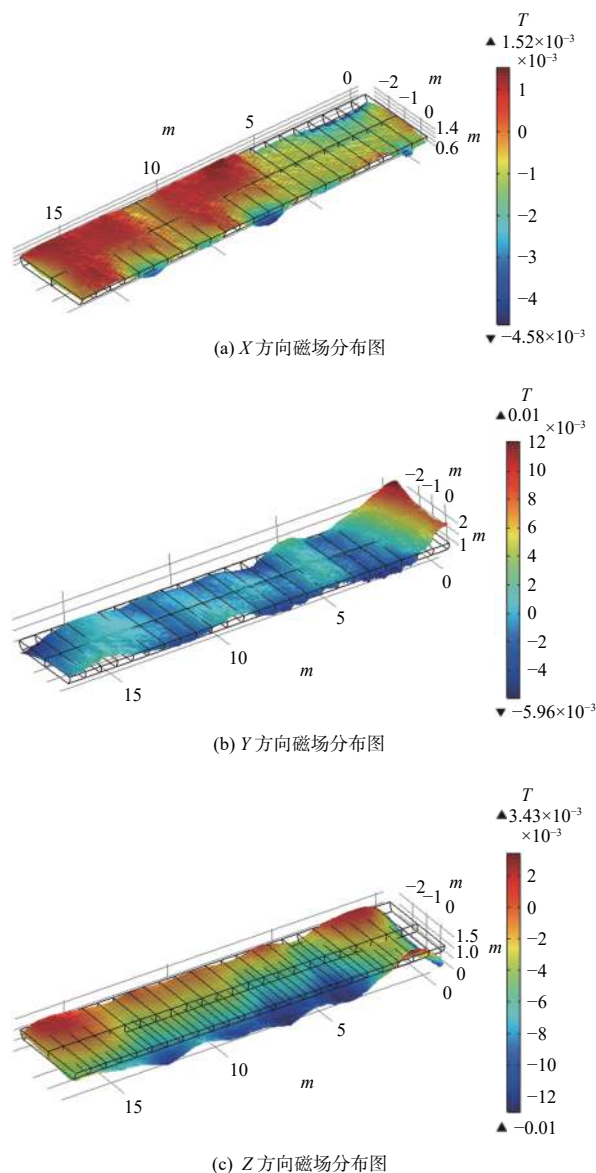


图 3 坐标轴方向磁场分布图

Fig. 3 Magnetic field distributions in axis directions

国内某厂家 500 kA 铝电解槽进行磁场测试. 磁场测量仪器采用美国贝尔公司生产的三维高斯计 (MODEL9950), 其测量量程为 0.01~3×10<sup>5</sup> Gs. 这款三维高斯计既可以测量直流电产生的磁场也可以测量交流电产生的磁场, 并且具有自动选择量程的功能, 可保证测试精度. 在测量过程中, 为避免磁场对仪器干扰, 对高斯计进行铁磁屏蔽. 铝电解槽测试点位如图 4 所示. 测试结果和模拟结果记录见表 2.

将测试值与模拟值汇总, 绘成曲线图, 如图 5 所示. 由图 5 可知, 模拟值与测试值吻合情况较好, 只有个别点的测试值与模拟值存在差异. 误差

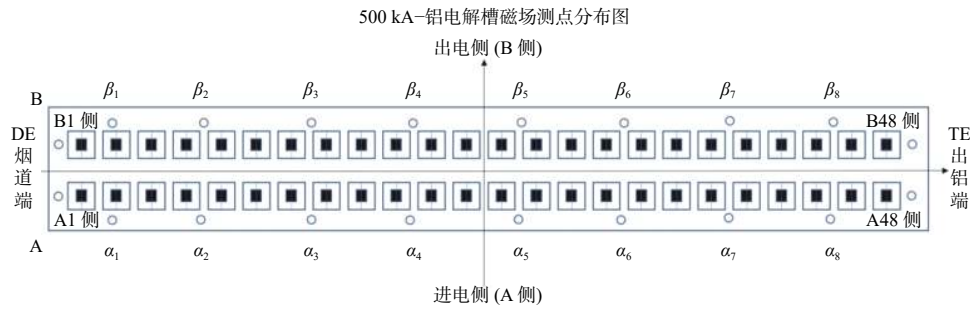


图 4 500 kA 铝电解槽磁场测点分布图

Fig. 4 Distribution of magnetic field measuring points of 500 kA aluminum electrolyzer

表 2 磁场测试与模拟结果

Table 2 Magnetic field test and simulation results

Gs

项目	测点	$B_x$ 实测	$B_x$ 模拟	$B_y$ 实测	$B_y$ 模拟	$B_z$ 实测	$B_z$ 模拟
进电侧(A侧)	$\alpha_1$	17	16	40	38	-123	-90
	$\alpha_2$	19	17	46	43	-84	-79
	$\alpha_3$	40	20	25	30	-50	-61
	$\alpha_4$	-45	-28	-48	45	-120	-92
	$\alpha_5$	-10	-11	-33	36	-110	-89
	$\alpha_6$	-30	-28	-44	42	-70	-68
	$\alpha_7$	15	17	38	37	-50	-50
	$\alpha_8$	9	11	-48	48	20	10
出电侧(B侧)	$\beta_1$	13	12	-38	36	36	33
	$\beta_2$	26	23	-41	40	30	31
	$\beta_3$	12	13	-44	42	40	45
	$\beta_4$	14	15	-52	50	39	28
	$\beta_5$	13	12.6	-60	62	16	11
	$\beta_6$	15	15	-54	50	46	45
	$\beta_7$	-20	-19	-44	42	43	40
	$\beta_8$	-15	-14	-28	30	39	26
端部测点	A <sub>1</sub> 侧	14	13	-36	33	-28	-25
	B <sub>1</sub> 侧	10	11	-30	28	-35	32
	A <sub>48</sub> 侧	9	13	-26	25	-40	-38
	B <sub>48</sub> 侧	-15	-13.9	28	31	-60	62

产生的主要原因有测量点的定位并不十分精确、测试期间电流与电压有波动、槽膛内形的不规整、铝液运动的影响等<sup>[12]</sup>。在测试过程中存在测点定位不准确的现象,因此有几个实际测点的位置与计划测点的位置存在偏差,造成测试值与模拟值之间的误差。但总的来说,测试值与模拟值的误差

比较小,误差在允许范围内。测试值和模拟值显示,500 kA 铝电解槽铝液层 Z 轴方向上的磁场过大,容易使槽内熔体循环加速,铝液面会因为磁场与铝液的电流相互作用产生的电磁力上下波动,进而影响电流效率,使电流效率下降,增加能耗,导致产量下降。

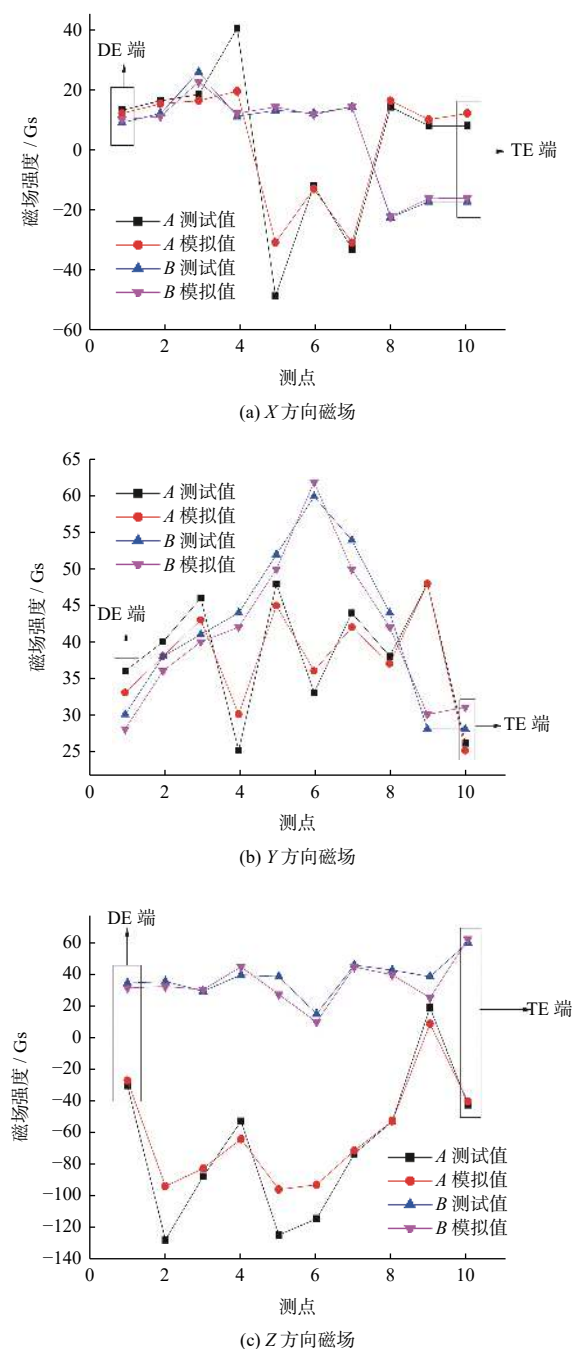


图 5 铝液层磁场测试值与模拟值对比

Fig. 5 Comparison of magnetic field test value and simulation value of molten aluminum layer

### 4 磁场优化

针对立柱母线和槽周母线距离电解槽过近导致 500 kA 铝电解槽铝液层垂直方向磁场过大的问题, 尝试将立柱母线和槽周母线与电解槽之间的距离分别增加 20、30 和 40 cm, 模拟结果如图 6 所示。由图可知, 当增加立柱母线和槽周母线与电解槽之间的距离, Z 轴方向的磁场大小有明显的降

低, 大部分区域磁场强度为 20~40 Gs, 只有小部分区域的磁场大小偏高。随着立柱母线和槽周母线到电解槽距离的增大, Z 轴方向磁场越来越小, 铝液层 Z 轴方向的磁场趋于均匀稳定。但考虑厂房大小, 增加 30 cm 的距离不仅符合生产条件的需求还满足生产成本的要求。

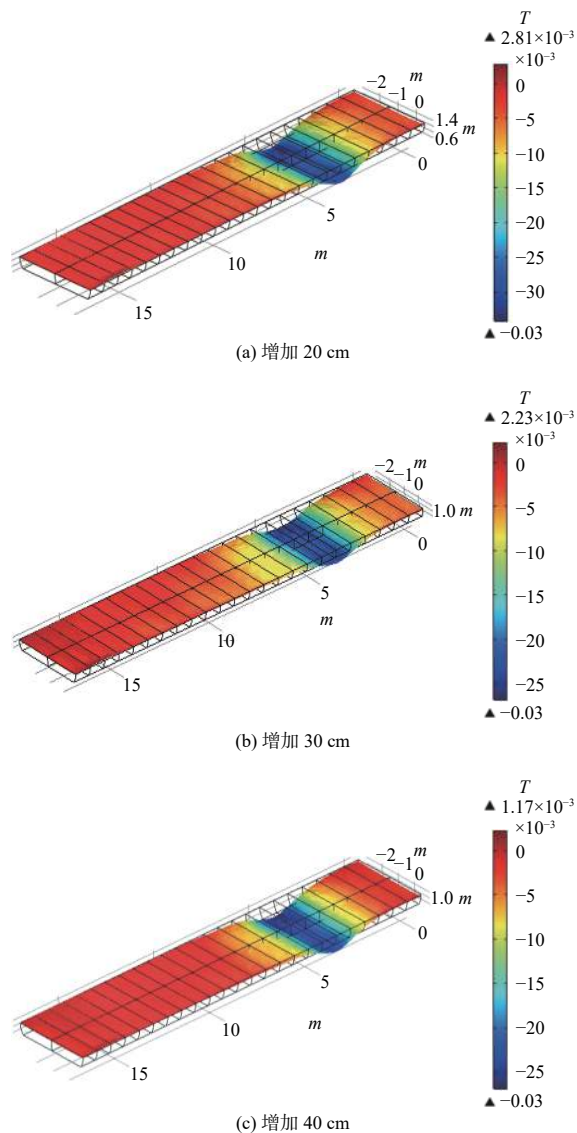


图 6 增大母线距电解槽距离后 Z 方向磁场分布图  
Fig. 6 Magnetic field distribution in Z direction after increasing distance between bus bar and electrolyzer

### 5 结 语

- 1) 模拟 500 kA 铝电解槽在正常生产条件下的磁场, 并对某厂家 500 kA 铝电解槽进行磁场测试, 结果显示两者吻合情况较好。
- 2) 模拟和测试结果显示 500 kA 铝电解槽铝液

层磁场在  $X$  轴和  $Y$  轴方向上分布均匀, 大小在合理范围内. 在  $Z$  轴方向上, 进电侧磁场明显大于出电侧, 且进电侧中间磁场大小高于两端大小.

3) 为解决因  $Z$  轴方向上磁场过大而引起电解槽铝液层不稳定的问题, 分别增加立柱母线和槽周母线与电解槽之间的距离 20、30、40 cm 来降低  $Z$  轴方向磁场大小, 增加距离后铝电解槽  $Z$  轴方向磁场分布趋于均匀稳定, 同时数值也有大幅度下降, 且随着距离的增大铝液层  $Z$  轴方向大小逐渐降低, 但考虑到生产成本, 增加 30 cm 为最优.

#### 参考文献:

- [1] KACPRZAK D, GUSTAFSSON M J, TAYLOR M P. A finite element analysis of busbars and magnetic field of an aluminum reduction cell [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 3192–3194.
- [2] GRJOTHEM B, WELCH B J. Aluminium smelter technology[M]. Dusseldoff: Aluminium-Verlag, 1980.
- [3] 王旋, 刘伟, 李广彬, 等. 350 kA 系列铝电解槽磁场模拟计算及优化 [J]. *金属材料与冶金工程*, 2015, 43(6): 30–34.
- [4] 张含博, 陈端, 王旋, 等. 500 kA 铝电解车间空间磁场的研究 [J]. *轻金属*, 2019(7): 25–28.
- [5] 张大庆, 段中波, 曹亚兵. 500 kA 铝电解槽的磁场分布与电流效率 [J]. *甘肃冶金*, 2019, 41(1): 39–41.
- [6] 黄永忠, 王化章, 王平甫, 等. 铝电解生产 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [7] 邱竹贤. 铝电解 [M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [8] 毛宇, 毛继红, 班允刚, 等. 一种7点进电500 kA 铝电解槽母线设计及应用 [J]. *世界有色金属*, 2019(4): 238–239.
- [9] 陈端, 王旋, 刘伟. SY500 铝电解槽流动场的数值模拟与测试研究 [J]. *有色冶金节能*, 2019, 35(5): 24–28.
- [10] 毛宇, 毛继红, 班允刚, 等. 集约型600 kA 铝电解系列母线装置设计及应用 [J]. *中国金属通报*, 2019(3): 103, 105.
- [11] 闫照文, 汪友生, 苏东林, 等. 大型铝电解槽三维电磁场的数值模拟 [J]. *电工技术学报*, 2003, 18(5): 23–26.
- [12] 姜昌伟, 周乃君, 梅焱, 等. 154 kA 预焙铝电解槽三维磁场的双标量磁位法计算 [J]. *有色金属*, 2003, 55(3): 76–80.

(编辑: 韩琳)