

文章编号: 1009 - 444X(2022)02 - 0124 - 06

# 400 kA 铝电解槽阴极钢棒结构优化

鲍亮<sup>a</sup>, 邓胜祥<sup>a,b</sup>, 匡江红<sup>a</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:** 采用有限元仿真计算法对 400 kA 铝电解槽进行传统阴极钢棒结构和异型阴极钢棒结构下电场仿真模拟, 主要包括阴极电压压降和铝液水平电流大小. 通过分析异型阴极钢棒结构, 提出一种改进阴极钢棒结构, 此阴极钢棒具有凸起并延伸的特点. 研究表明, 改进阴极钢棒使铝电解槽电压和铝液水平电流进一步降低, 提高了电解槽电流效率, 单个槽子能耗降低约 33.6 kW·h, 改善了电解铝的稳定性.

**关键词:** 铝电解槽; 阴极钢棒; 阴极电压; 水平电流

**中图分类号:** TF821

**文献标志码:** A

## Structural optimization of cathode steel bar for 400 kA aluminum electrolytic cell

BAO Liang<sup>a</sup>, DENG Shengxiang<sup>a,b</sup>, KUANG Jianghong<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical and Automotive Engineering; b. Institute of New Energy and Energy Saving Technology, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Finite element simulation method was used to simulate the electric field of 400 kA aluminum electrolytic cell under the traditional cathode steel bar structure and the special-shaped cathode steel bar structure, which mainly included the cathode voltage drop and the level current of aluminum liquid. An improved structure of cathode steel bar was proposed by analyzing the abnormal structure of the cathode steel bar. The cathode steel bar has the characteristics of bulge and extension. The result shows that the improved cathode steel bar can further reduce the voltage and level current of aluminum electrolytic cell, thus improving the current efficiency of electrolytic cell, reducing the energy consumption of a single cell by about 33.6 kW·h, and improving the stability of electrolytic aluminum.

**Key words:** aluminum electrolytic cell; cathode steel bar; cathode voltage; level current

铝作为制造业基本材料广泛应用于生产生活各个方面的各个方面, 如航天、电力、军事、汽车、通信等领域. 我国是原铝产量大国, 截至 2021 年 1 月, 全国电解铝运行产能增至 3 955 万吨/年, 建成产能规模 4 320 万吨/年, 产能利用率达 91.6%. 2020 年全国全行业年度用电量超过 5 000 亿 kW·h, 约占全社

会用电总量 6.8%, 耗电量巨大<sup>[1]</sup>. 目前各大铝电解厂结合自身特点积极引进先进技术, 提高生产效率, 降低生产成本, 以利于企业长远发展. 随着我国十四五规划和战略规划碳中和的提出, 我国对能源结构进行进一步调整, 生产技术向着高效低耗倾斜, 这要求电解铝生产过程进一步提高电流

收稿日期: 2021 - 09 - 07

基金项目: 国家重点研究与发展委员会装备项目资助(2018YFB0605902)

作者简介: 鲍亮(1995 -), 男, 在读硕士, 研究方向为新能源与节能技术. E-mail: 2903086225@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、热工过程检测与参数软测量. E-mail: csdsx@163.com

效率、降低能耗、减少碳排放, 为国家战略做一份贡献。

铝电解槽阴极钢棒对铝电解槽电压和铝液水平电流产生影响, 其中铝液水平电流较大导致铝液波动较大, 降低电流效率<sup>[2]</sup>, 而且不利于铝电解槽寿命<sup>[3]</sup>。因此如何降低铝液水平电流是科技工作者不断追求的方向, Ban 等<sup>[4]</sup>提出部分绝缘钢条、低电阻率钢条和铜条阴极钢棒技术不仅可以降低槽压降提高电流效率<sup>[5]</sup>, 而且能够减少铝液水平电流<sup>[6]</sup>。关于电解铝阴极钢棒<sup>[7]</sup>的研究已有很多, 其中具有代表性的有阴极钢棒开缝技术、复合钢棒技术和异型钢棒技术<sup>[8-9]</sup>。李劫等<sup>[10]</sup>提出异型阴极钢棒技术, 将传统阴极钢棒<sup>[11]</sup>中间部分加高。由于阴极钢棒电阻率小于阴极炭块电阻率, 使得电流流向凸起部分阴极钢棒<sup>[12]</sup>, 进而达到减少水平电流的目的。

本研究提出一种新型改进阴极钢棒, 建立电解槽单个电解单元模型进行有限元仿真<sup>[13]</sup>, 结合 400 kA 铝电解槽测试相关数据, 对新型阴极钢棒从铝液水平电流大小和阴极压降两个方面进行分析。

## 1 建立相关模型

### 1.1 铝电解槽模型

铝电解槽电解过程发生电化学反应较为复杂, 为模拟达到高效计算仿真目的, 本研究主要对 400 kA 铝电解槽阳极、铝液、阴极建立铝电解槽模型, 其中还具体包括阳极钢爪与磷生铁、磷生铁与阳极炭块、阴极钢棒与捣固糊、捣固糊与阴极炭块等接触电压。

利用 COMSOL 软件对单元电解槽模型进行四

面体网格划分, 数值计算铝电解槽稳态电场及铝液水平电流分布。本研究以 400 kA 铝电解槽单个电解单元为物理模型, 单个电解单元电流约为 8 330 A。

### 1.2 电场计算模型

铝电解槽电场模拟计算以稳态进行, 包括电流、电导率、电流密度等。导电微分方程为

$$\sigma_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中:  $V$  为阳极电压,  $V$ ;  $\sigma$  为电导率, S/m。

焦耳定律方程为

$$\sum V = \sum IR \quad (2)$$

式中:  $V$  为阳极电压,  $V$ ;  $I$  为阳极电流, A;  $R$  为阳极电阻,  $\Omega$ 。

铝液水平电流密度泊松方程为

$$\nabla^2 \varphi = V \frac{\sigma_a(h_e - h_{0e})}{\sigma_e h_{0a} h_{0e}^2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_a$  为铝液电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\sigma_e$  为电解质电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $h_e$  为铝液波动时电解质厚度, m;  $h_{0a}$  为铝液静止时厚度, m;  $h_{0e}$  为电解质静止时厚度, m。

### 1.3 接触压降

阴极钢棒与阴极捣固糊之间接触电压为

$$\varphi_c = I \times \frac{R_e}{S} \quad (4)$$

式中:  $\varphi_c$  为接触电压, V;  $I$  为电流, A;  $R_e$  为接触电阻率,  $\Omega \cdot m^2$ ;  $S$  为接触面积,  $m^2$ 。

### 1.4 模型求解过程

- 1) 边界条件: 单个铝电解槽模型外壁绝缘。
- 2) 初始条件: 电压为 0 V, 电流为 8 330 A。
- 3) 物性参数见表 1。
- 4) 状态设定: 稳态。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

参数	铝导杆	钢爪	磷生铁	阳极炭块	电解质	铝液	阴极炭块	阴极钢棒
电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	2.6×10 <sup>7</sup>	3.3×10 <sup>6</sup>	2.96×10 <sup>5</sup>	3.9×10 <sup>4</sup>	2.1×10 <sup>2</sup>	4.2×10 <sup>6</sup>	2.6×10 <sup>4</sup>	1.3×10 <sup>6</sup>

## 2 测试与模拟结果对比分析

### 2.1 试验条件

本试验对正在运行的铝电解槽进行测试, 需要两名试验人员及一名工人穿戴试验专用服装协

同完成, 测试使用仪器有电压表、钩形铁棒等工具。

### 2.2 试验测量方法

阳极压降分为 5 部分, 包括夹具压降、铝导杆电压降、爆炸焊电压降、钢爪电压降、阳极炭块电压降。夹具和铝导杆压降测量如图 1 所示。

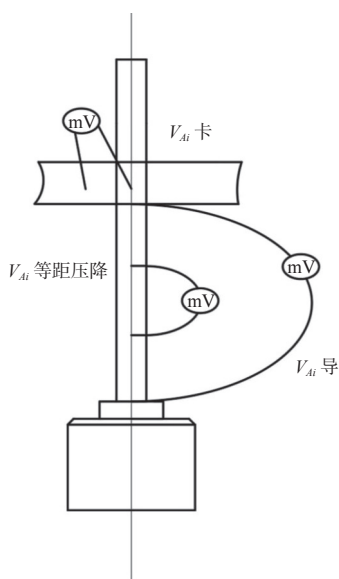


图 1 铝导杆压降测试图

Fig. 1 Voltage drop test diagram of aluminum guide rod

夹具压降: 阳极横母与阳极导杆间的压降测量, 记作  $V_{A1卡}, V_{A2卡}, \dots, V_{Ai卡}, V_{B1卡}, V_{B2卡}, \dots, V_{Bi卡}$ . 夹具压降计算公式为

$$V_{卡} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai等距} \times V_{Ai卡}) + \sum_{i=1}^n (V_{Bi等距} \times V_{Bi卡})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai等距} + \sum_{i=1}^n V_{Bi等距}} \quad (5)$$

铝导杆压降: 依次测量  $A、B$  两侧导杆压降, 测试值记作  $V_{A1导}, V_{A2导}, \dots, V_{Ai导}, V_{B1导}, V_{B2导}, \dots, V_{Bi导}$ . 铝导杆计算公式为

$$V_{导杆} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai等距} \times V_{Ai导}) + \sum_{i=1}^n (V_{Bi等距} \times V_{Bi导})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai等距} + \sum_{i=1}^n V_{Bi等距}} \quad (6)$$

爆炸焊压降: 依次测量  $A、B$  两侧爆炸焊片, 电压降测试值记作  $V_{A1爆}, V_{A2爆}, \dots, V_{Ai爆}, V_{B1爆}, V_{B2爆}, \dots, V_{Bi爆}$ . 测试方法如图 2 所示.

爆炸焊压降计算公式为

$$V_{爆} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai等距} \times V_{Ai爆}) + \sum_{i=1}^n (V_{Bi等距} \times V_{Bi爆})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai等距} + \sum_{i=1}^n V_{Bi等距}} \quad (7)$$

钢爪电压降: 依次测量  $V_{A1}, V_{A2}, \dots, V_{Ai}, V_{B1}, V_{B2}, \dots, V_{Bi}$  等每块阳极上 3 或 4 个钢爪压降.

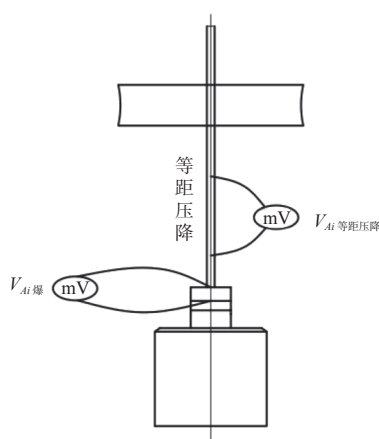


图 2 爆炸焊压降测试图

Fig. 2 Voltage drop test diagram of explosion welding

阳极钢爪压降记作  $V_{A1爪}, V_{A2爪}, \dots, V_{Ai爪}, V_{B1爪}, V_{B2爪}, \dots, V_{Bi爪}$ . 钢爪压降测试如图 3 所示.

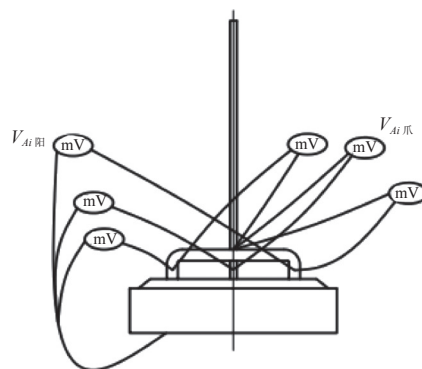


图 3 钢爪压降测试图

Fig. 3 Voltage drop test diagram of steel claw

钢爪压降计算公式为

$$V_{爪} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai等距} \times V_{Ai爪}) + \sum_{i=1}^n (V_{Bi等距} \times V_{Bi爪})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai等距} + \sum_{i=1}^n V_{Bi等距}} \quad (8)$$

阳极炭块压降: 测量  $A、B$  两侧电压, 记作  $V_{A1阳}, V_{A2阳}, \dots, V_{Ai阳}, V_{B1阳}, V_{B2阳}, \dots, V_{Bi阳}$ . 阳极炭块压降计算公式为

$$V_{阳} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai等距} \times V_{Ai阳}) + \sum_{i=1}^n (V_{Bi等距} \times V_{Bi阳})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai等距} + \sum_{i=1}^n V_{Bi等距}} \quad (9)$$

阳极压降计算公式为

$$V_{阳} = V_{卡} + V_{导} + V_{阳炭块} + V_{爆} + V_{爪} \quad (10)$$

槽底阴极压降在电解槽 A、B 侧各均匀取 3 个点的位置揭开相应的槽盖, 用多功能天车打测定孔 6 个. 槽底阴极压降测试如图 4 所示.

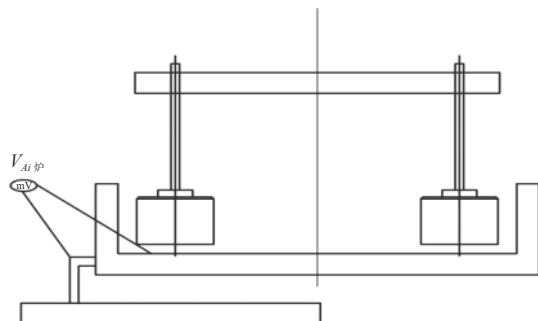


图 4 槽底阴极压降测试图

Fig. 4 Cathode voltage drop test diagram at tank bottom

槽底压降测试公式为

$$V_{\text{槽底}} = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} V_{A_i\text{槽}} + \sum_{i=1}^{n=3} V_{B_i\text{槽}}}{6} \quad (11)$$

极间电压由电解质电压和反电动势两部分组成, 通常在实际测量中难以测到反电动势. 对于预焙阳极电解槽, 阳极块数多, 阳极底部难以保持在同一平面, 故电解质压降亦难以测到精确值. 为此, 要测到精确值只有采用短路法. 在实际测量中可采用反减法或“电压-极距法”.

反减法: 将阳极母线电压降、阳极电压降、槽底电压降、阴极母线电压降测定完之后, 通过数据处理, 用测试期槽平均电压减去已知测试计算的槽各部分压降.

### 2.3 试验结果与模拟结果对比分析

通过项目测得运行中 400 kA 电解槽电压, 包括阳极压降、电解反应压降、气泡压降、电解质及铝液压降、阴极压降、接触压降等. 为使仿真过程高效和具有较高的可操作性, 忽略一些压降, 如电解反应压降、气泡压降, 但忽略这些压降不影响仿真结果的准确性.

电压测量与仿真计算结果见表 2. 由表可知, 阴极电压测量值 299.2 mV, 阴极电压仿真计算值 295.1 mV, 相差 4.1 mV, 误差约为 1.40%, 总压降电压测量值 2 056.0 mV, 总压降电压仿真计算值 2 040.1 mV, 相差 15.9 mV, 误差约为 0.77%. 根据正常运行电解槽各部件温度以及接触电压, 仿真过程相应调节各部位电导率, 仿真结果与测试结果基本相符.

表 2 电压测量值与仿真计算值

Table 2 Voltage measured value and simulation calculated value

部位	电压测量值/mV	电压仿真计算值/mV
阳极	—	265.0
电解质及铝液	—	1 480.0
阴极	299.2	295.1
总压降	2 056.0	2 040.1

## 3 结果与分析

### 3.1 传统阴极与异型阴极

传统阴极钢棒结构为长方体, 即上表面保持水平. 异型阴极钢棒中间凸起, 凸起部分成线性变化.

传统阴极钢棒和异型阴极钢棒几何模型, 如图 5 和图 6 所示. 传统阴极钢棒高度为 200 mm, 异型阴极钢棒中间突起高度为 350 mm, 突起点距离两侧为 900 mm, 此异型阴极钢棒结构尺寸具有一定代表性, 即铝液水平电流峰值相对较小.

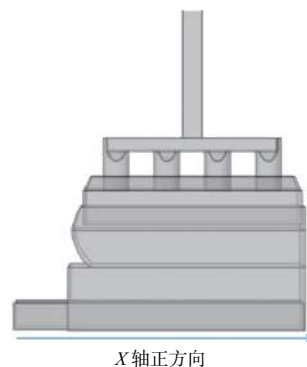


图 5 传统阴极钢棒

Fig. 5 Traditional cathode steel bar

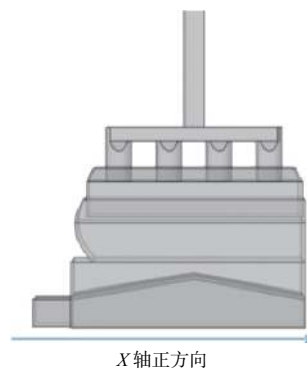


图 6 异型阴极钢棒

Fig. 6 Special-shaped cathode steel bar

对铝电解槽电场进行仿真模拟, 得到两种不同阴极钢棒阴极压降, 如图 7 和图 8 所示. 传统阴

极钢棒阴极压降为 295.1 mV, 异型阴极钢棒阴极压降为 233.1 mV, 异型阴极钢棒阴极压降较传统阴极压降降低 62.0 mV.

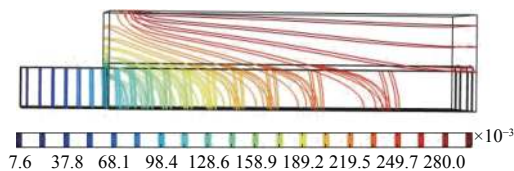


图 7 传统阴极钢棒 200 mm 压降

Fig. 7 200 mm voltage drop of traditional cathode steel bar

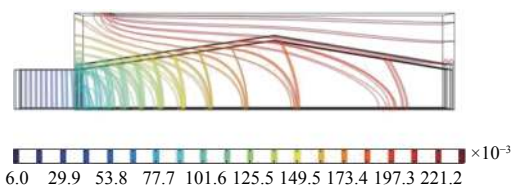


图 8 异型阴极钢棒 300 mm 压降

Fig. 8 300 mm voltage drop of special-shaped cathode steel bar

传统阴极与异型阴极铝液水平电流, 如图 9 所示. 由图可知, 传统阴极铝液水平电流最大值为 8 100 A/m<sup>2</sup> 左右, 异型阴极铝液水平电流最大值为 6 700 A/m<sup>2</sup> 左右, 异型阴极比传统阴极水平电流最大值减少 1 400 A/m<sup>2</sup> 左右, 水平电流最大值位置向铝电解槽中心移动约 300 mm. 结合异型阴极钢棒结构分析此结构对从阴极出电端到突出点这段铝液水平电流改善较大, 而从突出点到电解槽中心这段铝液水平电流改善微小, 因此提出对异型阴极钢棒后部分结构进行改进.

### 3.2 改进型阴极钢棒

根据电流路径电阻最小法则, 即电流路径在一个单系统中受到电阻的影响, 电流总选择电阻较小的路径. 铝液水平电流的产生主要是铝液到阴极钢棒出口电阻较小, 通过改进阴极钢棒结构改变电流流经路径.

改进阴极钢棒结构是将异型阴极钢棒突出点位置水平延伸, 如图 10 所示. 对不同水平高度阴极钢棒建模, 仿真计算阴极电压和铝液水平电流, 如图 11 所示.

由图可知, 改进阴极钢棒阴极 250 mm 电压为 247.2 mV, 改进异型阴极 250 mm 铝液水平电流最大值 7 230 A/m<sup>2</sup>; 改进阴极钢棒阴极 300 mm 电压

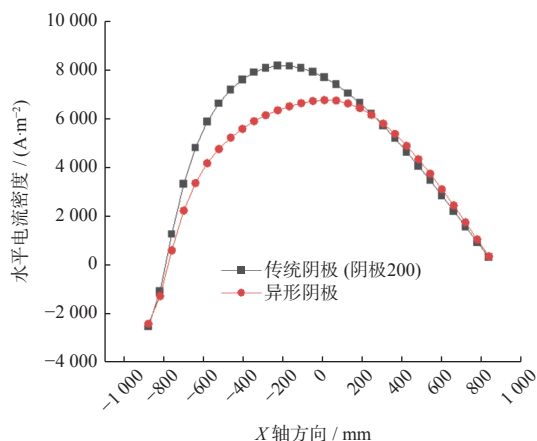


图 9 传统阴极与异型阴极铝液水平电流

Fig. 9 Aluminum liquid level current of between traditional cathode and special-shaped cathode

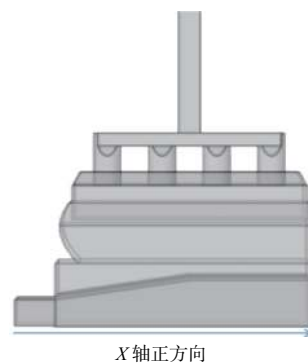


图 10 改进阴极钢棒

Fig. 10 Improved cathode steel bar

为 236.9 mV, 改进异型阴极 300 mm 铝液水平电流最大值 6 338 A/m<sup>2</sup>; 改进阴极钢棒阴极 350 mm 电压为 227.1 mV, 改进异型阴极 350 mm 铝液水平电流最大值 5 500 A/m<sup>2</sup>; 改进阴极钢棒阴极 375 mm 电压为 247.2 mV, 改进异型阴极 375 mm 铝液水平电流最大值 4 950 A/m<sup>2</sup>; 改进阴极钢棒阴极 400 mm 电压为 212 mV, 改进异型阴极 400 mm 铝液水平电流最大值 4 509 A/m<sup>2</sup>.

改进阴极钢棒阴极 250 mm 相比传统阴极钢棒 200 mm, 阴极压降降低 47.9 mV, 改进阴极钢棒阴极 300 mm 相比改进阴极钢棒阴极 250 mm, 阴极压降降低 12.3 mV, 改进阴极钢棒阴极 350 mm 相比改进阴极钢棒阴极 300 mm, 阴极压降降低 3.8 mV, 改进阴极钢棒阴极 375 mm 相比改进阴极钢棒阴极 350 mm, 阴极压降降低 10.8 mV, 改进阴极钢棒阴极 400 mm 相比改进阴极钢棒阴极 375 mm, 阴极压降降低 10.3 mV. 经分析, 随着改进阴极钢

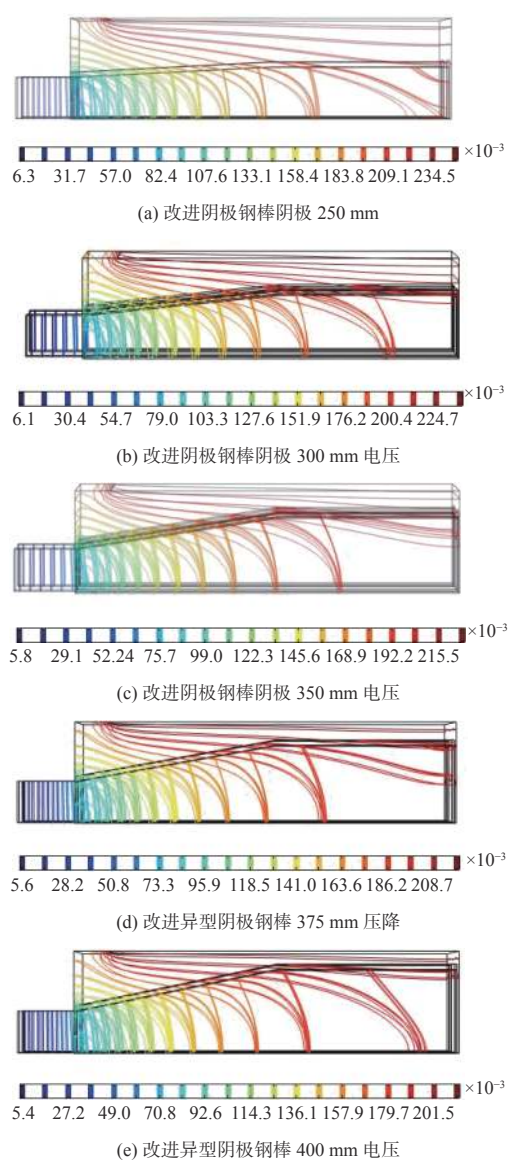


图 11 改进阴极钢棒阴极

Fig. 11 Improved cathode steel bar cathode

棒阴极高度增加, 阴极压降下降幅度逐渐减少, 其中水平高度 200 mm 到突出点 250 mm 阴极压降降幅最大。

随着改进阴极钢棒阴极高度的升高, 铝液水平电流逐渐降低, 阴极 200 铝液水平电流最大值  $8\ 151\ \text{A}/\text{m}^2$ , 阴极 250 铝液水平电流最大值  $7\ 230\ \text{A}/\text{m}^2$ , 阴极 300 铝液水平电流最大值  $6\ 338\ \text{A}/\text{m}^2$ , 阴极 350 铝液水平电流最大值  $5\ 512\ \text{A}/\text{m}^2$ , 阴极 375 铝液水平电流最大值  $4\ 950\ \text{A}/\text{m}^2$ , 阴极 400 铝液水平电流最大值  $4\ 509\ \text{A}/\text{m}^2$ 。突出点高度提高 50 mm, 铝液水平电流降低  $800\sim 900\ \text{A}/\text{m}^2$ , 如图 12 所示。

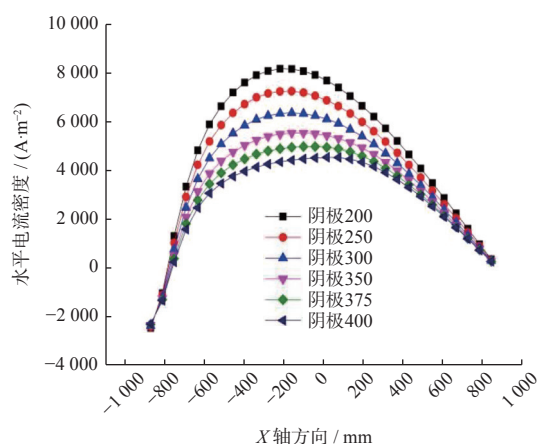


图 12 不同高度改进阴极钢棒铝液水平电流

Fig. 12 Aluminum liquid level current of improved cathode steel bar at different heights

## 4 结 语

仿真不同高度阴极钢棒, 得出如下结论。

1) 异型阴极钢棒较传统阴极钢棒在电压和铝液水平电流方面具有较大提升, 但是异型阴极模拟结果的水平电流数据显示异型阴极钢棒从突出点到铝电解槽中心这段铝液水平电流降低不是很理想。

2) 在异型阴极钢棒基础上提出改进阴极钢棒, 在相同突出点高度下比较改进阴极钢棒和异型阴极钢棒阴极电压和铝液水平电流, 其中阴极电压降低 62 mV, 铝液水平电流降低  $1\ 400\ \text{A}/\text{m}^2$ 。

3) 针对改进阴极钢棒进一步研究, 对不同高度突出点的改进阴极钢棒建模仿真数值计算得出, 随着突出点高度的增加, 相应阴极电压和铝液水平电流不断降低。

## 参考文献:

- [1] 张琨, 曹曦. 超低能耗铝电解技术研究和经济效益分析 [J]. 有色冶金节能, 2020, 36(2): 22-25.
- [2] 边韩国. 电解槽寿命的影响因素 [J]. 中国有色金属, 2014(8): 60-61.
- [3] YANG S, LI J, XU Y J, et al. Optimization of horizontal current in metal pad by using cathode with heightened collector bars in aluminum reduction cell [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2951-2958.

(下转第 188 页)