

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.03.011

400 kA 铝电解槽异形阴极炭块 对阴极电压降的影响

邢涛^{1,2}, 邓胜祥^{1,2}

- (1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院 能源与动力工程系, 上海 201620;
2. 上海工程技术大学 新能源与节能新技术研究所, 上海 201620)

摘要:传统阴极炭块顶部是平坦的, 阴极铝液流动时几乎没有阻力。使用表面凸起的阴极炭块进行研究, 目的是增加铝电解槽中铝液流动的阻力, 起到减波和减少铝液流动速度的作用, 以此降低水平电流密度、阴极电压和铝液流速, 保障铝电解槽生产安全稳定。通过 COMSOL 软件进行模拟, 发现随着阴极炭块表面凸起块数的增加, 阴极压降和水平电流密度均呈下降趋势, 其中阴极压降最大降幅为 39.8 mV, 水平电流密度最大降幅为 2 087 A/m², 并对某铝厂 400 kA 铝电解槽使用异形阴极炭块后进行测试, 测试结果与模拟结果一致。

关键词:铝电解槽; 阴极炭块; 数值模拟; 阴极电压; 电场测试

中图分类号: TF821 文献标志码: A 文章编号: 1007-7545(2024)03-0083-07

Effect of Special-Shaped Cathode Carbon Block on Cathode Voltage Drop in 400 kA Aluminum Electrolytic Cell

XING Tao^{1,2}, DENG Shengxiang^{1,2}

- (1. Department of Energy and Power Engineering, School of Mechanical and Automotive Engineering,
Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China;
2. Institute of New Energy and Energy Conservation Technology, Shanghai University of
Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The top of the conventional cathode carbon block is flat, and there is little resistance to the flow of the cathode molten aluminum. The purpose of this research is to increase the resistance of molten aluminum flow in the aluminum electrolytic cell, play a role in reducing the wave and reducing the flow speed of the molten aluminum, so as to reduce the horizontal current density, cathode voltage and aluminum liquid flow rate, and ensure the safety and stability of the production of the aluminum electrolytic cell. Through simulation by COMSOL software, it is found that as the number of protruding blocks on the surface of the cathode carbon block increases, both the cathode voltage drop and horizontal current density show a decreasing trend. The maximum 4 cathode voltage drop is 39.8 mV, and the maximum drop of horizontal current density is 2 087 A/m². The 400 kA aluminum electrolyzer using special-shaped cathode carbon blocks in an aluminum plant is tested, and the test results are consistent with the simulation results.

Key words: aluminum electrolyzer; cathode carbon block; numerical simulation; cathode voltage; electric field test

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 上海市 III 类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)

作者简介: 邢涛(2000-), 男, 硕士研究生; 通信作者: 邓胜祥(1970-), 男, 外籍院士, 教授, 博导

电解铝作为耗能高、碳排放高的有色金属行业,据统计^[1],2020年在有色金属行业中,二氧化碳排放量为全国总排放量的6.5%,其中铝电解行业排放量约为4.26亿t,占整个社会二氧化碳排放量的5%,电解铝的产能已经达到4300万t/a,属于行业中的佼佼者。然而生产过程中产生的二氧化碳已严重影响了生态环境,全球气候变暖使得海平面上升、冰川融化,引发了热浪侵袭、暴雨、水灾甚至干旱等自然灾害。在“双碳”目标的背景下,有效控制二氧化碳气体的排放,推动能源产业结构调整,大力发展低碳经济,努力减少电解铝行业碳排放、能源消耗具有十分重大意义。

铝电解槽阴极由阴极炭块和阴极钢棒组成。阴极炭块由无烟煤、焦炭和石墨等材料制成,安装在电解槽底部,起到保护电解槽、延长使用寿命的作用。阴极钢棒的材质是碳钢,嵌在阴极炭块中,使电流能够通过阴极钢棒传导到阴极炭块上,两头露在阴极炭块外,起到接地的作用。针对如何有效降低电解槽阴极电压,先前有学者已经做了大量的研究,通常在阴极钢棒上做一些改变。如冯乃祥等^[2]研究了单阴极钢棒和双阴极钢棒的曲面阴极。尹诚刚等^[3]研究了在阴极钢棒的某一段用绝缘材料填充,减少了在水平X方向铝液的水平电流。BLAIS等^[4]研究

了阴极钢棒倾斜高度对阴极电压的影响。

本研究与上述研究人员有些不同,是研究异形阴极炭块对阴极电压的影响。通过SOLIDWORKS三维软件进行建模,将模型导入COMSOL软件进行仿真,对普通阴极炭块以及异形阴极炭块逐个进行模拟计算分析,其中所有模型以及相关参数都是在理想状态下设立的。模拟完成后,对普通阴极炭块和异形阴极炭块的结果进行分析比较,得出相应结论。

1 铝电解槽异形阴极炭块结构及阴极压降

1.1 异形阴极炭块结构

异形阴极炭块^[5-7]与普通阴极炭块的区别在于每个阴极炭块顶部具有凸起的结构,凸起的形状可以是正方体、长方体、梯台和圆柱等,其宽度为17~35cm,凸起高度为9~15cm,且不超过铝液层高度。这些凸起与炭块连接在一起形成一个整体,凸起的方向可以与阴极炭块方向一致,也可以与阴极炭块方向相垂直,但这些凸起之间必须有间隙。铝电解槽结构、普通阴极炭块在电解槽中布局的剖面图和异形阴极炭块在电解槽中布局的剖面图如图1所示。

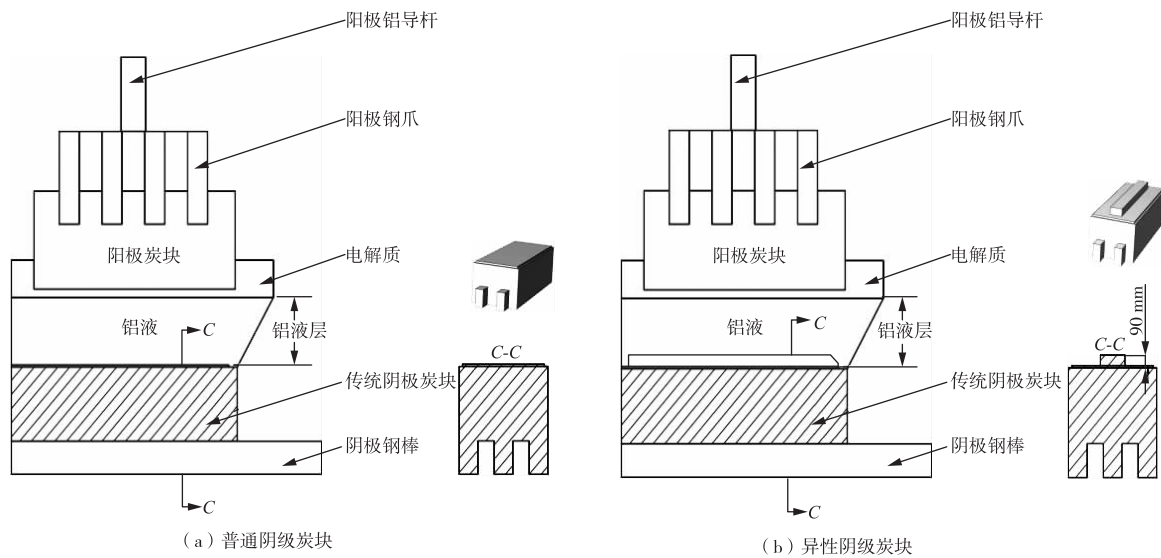


图1 不同阴极炭块铝电解槽剖面图

Fig. 1 Cross-sectional view of aluminum electrolytic cell with different cathode carbon block

1.2 阴极压降

铝电解槽中的阴极压降又称为槽底压降^[8],主要由三部分组成,分别是阴极炭块压降、阴极钢棒压降和阴极炭块与阴极钢棒之间的压降。其中电导率

的大小决定了阴极炭块的电压降,电导率与电压降为反比关系,电压降越小则电导率越大。温度的高低以及尺寸的大小决定了阴极钢棒的电压降。随着铝电解槽使用时间的增加,阴极炭块和阴极钢棒会

逐渐腐蚀,造成导电部分面积减少,阴极电压降会随之升高。阴极压降测量时不能接触阳极,当在更换阳极材料、发生电流异常、停电时都应该停止测量。测量公式如下:

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

式中, $V_{A_i\text{槽}}$ 和 $V_{B_i\text{槽}}$ 分别是在电解槽两侧均匀取的点及通过多功能天车打的测量点。

2 铝电解槽阴极电场计算模型

利用 COMSOL 软件对整个电解槽模型进行模拟的时间太长,为了达到高效的仿真结果,本研究对铝电解槽阴极其中一个阴极炭块进行模拟^[9],其中包括阴极炭块和阴极钢棒^[10]。将用 SOLIDWORKS 建好的模型导入 COMSOL 中,对模型进行材料属性的赋予,网格划分,网格划分为自由四面体,其精度高,由物理场控制,网格单元选择常规大小。本研究用 400 kA 铝电解槽为模型,数值计算时采用稳态计算。其中,阴极炭块电导率为 3.5×10^4 S/m,阴极钢棒电导率为 9.0×10^5 S/m。阴极炭块尺寸:1 695 mm × 660 mm × 480 mm、阴极钢棒尺寸:2 040 mm × 110 mm × 215 mm、电流 400 kA。尺寸大小和材料属性由某铝厂提供。

2.1 边界条件

边界条件为:阴极钢棒两端接地电压为零、铝电解槽通入 400 kA 的电流、铝电解槽外壁绝缘。

2.2 控制方程

铝电解槽电势分布控制方程为:

$$\sum U = \sum I \cdot R \quad (2)$$

$$\sigma_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla [\sigma \nabla V] = 0 \quad (4)$$

式中, I 为电流(A); R 为电阻(Ω); V 为电势(V); σ 为电导率(S/m)。

2.3 电流密度和水平电流

电流密度作为电解铝工业过程中一个重要参数^[11],其定义为通过单位面积的电流。合理有效控制电流密度可以提高电解铝的生产效率并提高金属铝的质量。

计算公式如下:

$$J = I/S \quad (5)$$

式中, J 为电流密度(A/m²); I 是电流(A); S 是截面积(m²)。其中 I 为标量,表示一个平面的电

流, J 为矢量,表示每一个点的电流。

电流密度受温度、电解质溶液和铝液的影响。电流密度与温度成正比,随着温度升高,电流密度随之增加。在高温的状态下,电解质溶液导电性增强,金属铝可以更好地从氧化铝溶液中析出。氧化铝溶液浓度与电流密度成反比,浓度越高,反应速率越快,电流密度就越高,反之则电流密度越低^[12]。为了保证电解铝过程高效稳定,需要对电流密度加以控制。有以下三种方法:1)改进铝电解槽结构,通常采用多阴极和多阳极结构。2)合理控制电解质溶液温度。3)适当调整铝液中各成分的比例。

电解铝过程中,铝溶液中的水平电流^[13]对电解铝生产过程极为重要,若控制不好,可能会带来严重的生产事故。因为铝溶液中水平电流与相互垂直的磁场相互作用,产生较大的磁场力会导致铝溶液不规则波动,使得铝电解槽生产不稳定。水平电流过大会使铝溶液加速流动,冲击破坏铝电解槽^[14],降低使用寿命。因此合理控制水平电流在实际生产过程是十分必要的。

电磁力计算公式如下:

$$F = J \cdot B \quad (6)$$

其中可以写成 x 、 y 、 z 三个方程:

$$F_x = J_y B_z - J_z B_y$$

$$F_y = J_z B_x - J_x B_z \quad (7)$$

$$F_z = J_x B_y - J_y B_x$$

式中, F 为电磁力(N/m²); B 为磁感应强度(T); J 为电流密度(A/m²)。

若方程中 $J_x = 0$, $J_y = 0$ 时,电磁力将不会受到垂直方向磁场的影 响,因此只要适当减小水平电流密度,就能使铝电解槽生产安全稳定。

2.4 模型验证

为了证明异形阴极炭块凸起高度对降低阴极电压没有太大影响,在模拟不同凸起的异形阴极炭块之前,对凸起部分高度为 90、100、110 和 120 mm 分别进行了模拟。这些模型采用相同的材料属性、电流大小和网格划分,在相同的边界条件下,得出随着凸起高度的增加,阴极部分的电势变化不大,其中 90 mm 为 273.2 mV,100 mm 为 273.5 mV,110 mm 为 273.9 mV,120 mm 为 274.0 mV,其最大变化幅度仅为 0.14%,几乎可以忽略不计。为了仿真效率高以及操作的可行性,忽略阳极部分电压降,如阳极压降、电解质压降和母线压降等,但忽略这部分并不会影响仿真结果的准确性。不同凸起高度模拟结果如图 2 所示。

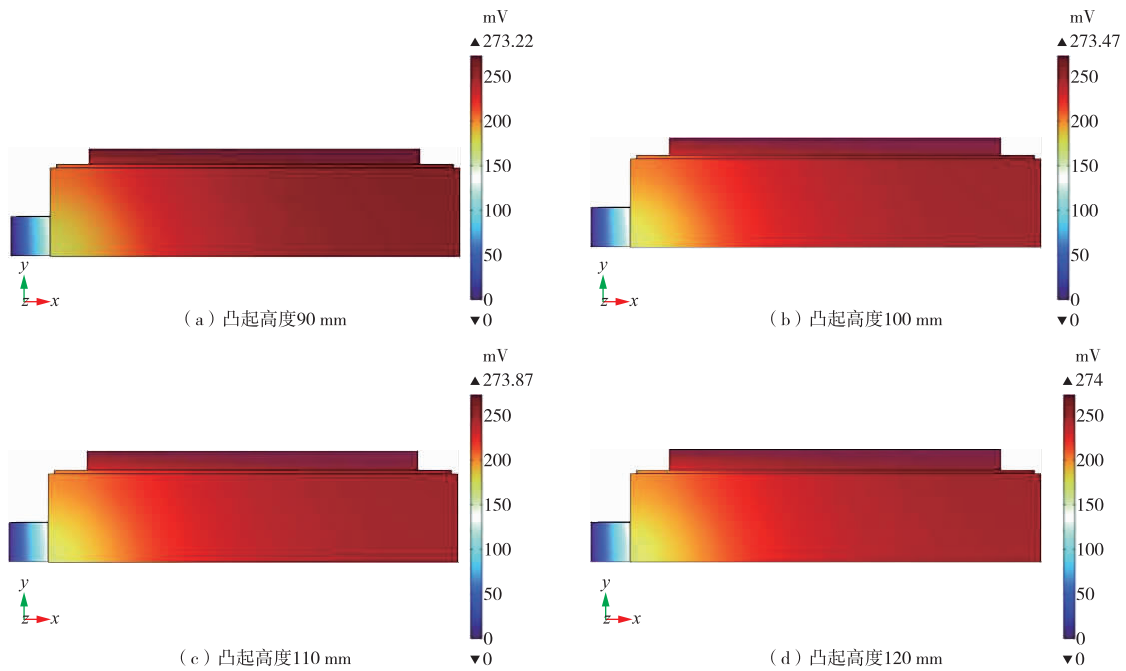


图2 不同凸起高度异形阴极炭块的电势分布图

Fig. 2 Potential distributions of special-shaped cathode carbon block with different protrusion height

在某铝厂经过一段时间的测试,证明凸起高度对降低阴极电压没有影响。因此在模拟不同凸起的阴极炭块时,不需要考虑凸起高度,仅需考虑凸起部分在炭块表面的布局。使用 COMSOL 软件进行模拟是可行的。

3 铝电解槽异形阴极炭块电场模拟及测试

3.1 电场模拟

设计了六种不同布局的阴极炭块,如图3所示,下面对六种阴极炭块进行电场模拟^[15]。为了能够更清楚地观察数据,仅列出阴极炭块的电势等值线图。各异形阴极炭块阴极压降如图4所示。从图4可知,普通阴极炭块阴极压降为288.2 mV,异形阴极炭块一的阴极压降为273.3 mV,异形阴极炭块二的阴极压降为267.7 mV,异形阴极炭块三的阴极压降为263.0 mV,异形阴极炭块四的阴极压降为258.0 mV,异形阴极炭块五的阴极压降为249.0 mV。

由上述数据可知,五组异形阴极炭块的阴极压降都低于普通阴极炭块的阴极压降,随着阴极炭块表面凸起数量的增加,阴极压降呈下降趋势,其中异形阴极炭块五对比普通阴极炭块,阴极压降降幅最

大,为39.8 mV。

铝电解槽电流从阳极流入,阴极流出,中间流经铝溶液。铝溶液中的水平电流受到垂直磁场力的作用,对电解槽产生了影响。普通阴极炭块表面呈水平状,铝液流速不均匀,可能造成铝液流速过快也可能停滞不动。异形阴极炭块设计,使得铝溶液在凸起的长方体块之间具有流动性,铝溶液流速平缓,波动较小,可以很好地解决上述问题。通过模拟几种不同凸起的阴极炭块,分析对比水平X方向铝溶液的电流密度大小,其水平电流密度对比结果如图5所示。各异形阴极炭块电流密度最大值如图6所示。由图6可知,普通阴极炭块水平电流密度最大值为8 187 A/m²,异形阴极炭块一的水平电流密度最大值为7 565 A/m²,异形阴极炭块二的水平电流密度最大值为7 143 A/m²,异形阴极炭块三的水平电流密度最大值为6 876 A/m²,异形阴极炭块四的水平电流密度最大值为6 623 A/m²,异形阴极炭块五的水平电流密度最大值为6 100 A/m²。通过分析水平X方向各种异形阴极炭块电流密度的最大值,得出随着阴极炭块表面凸起长方体数量的增加,水平电流密度呈下降趋势,其中异形阴极炭块五对比普通阴极炭块,水平电流密度降幅最大,下降了2 087 A/m²。

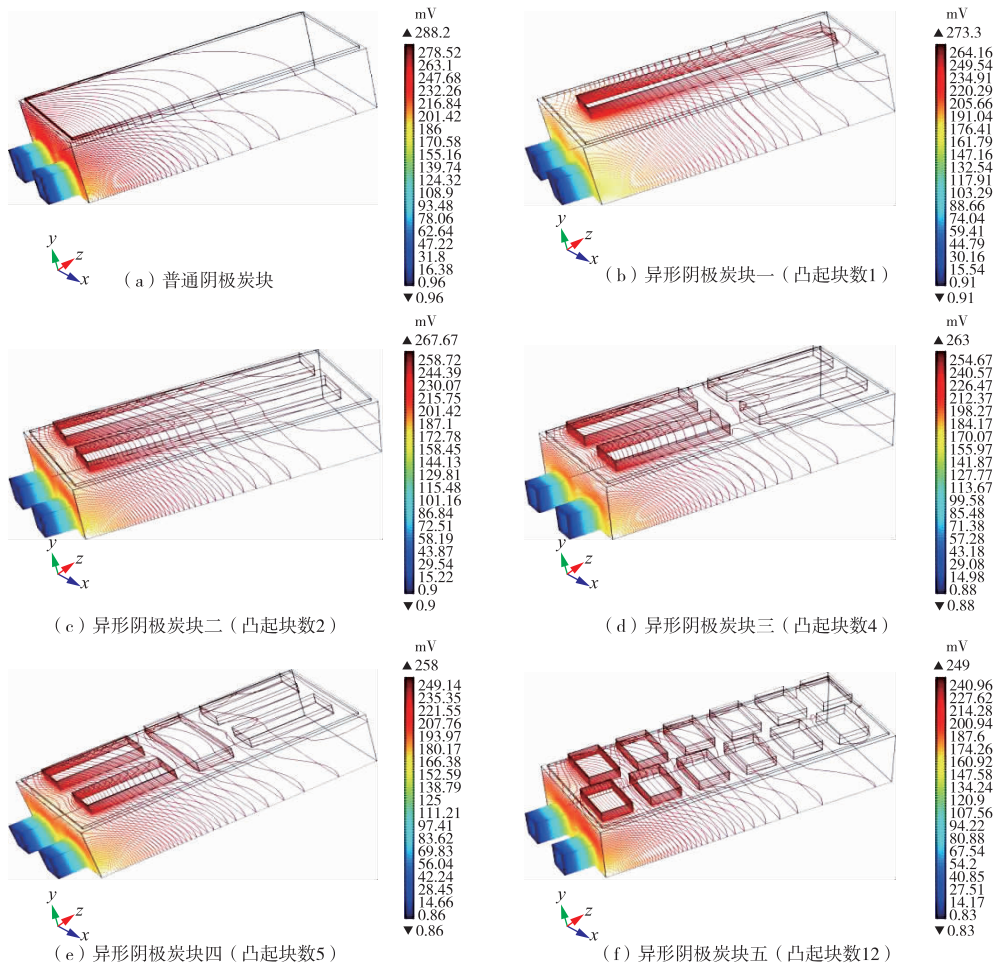


图3 不同异形阴极炭块电势分布图

Fig. 3 Potential distributions of carbon block with different special-shaped cathode blocks

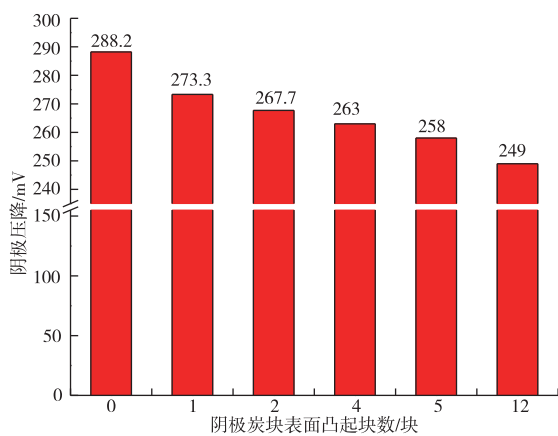


图4 各异形阴极炭块阴极压降

Fig. 4 Cathodic pressure drop of each heterogeneous cathode carbon block

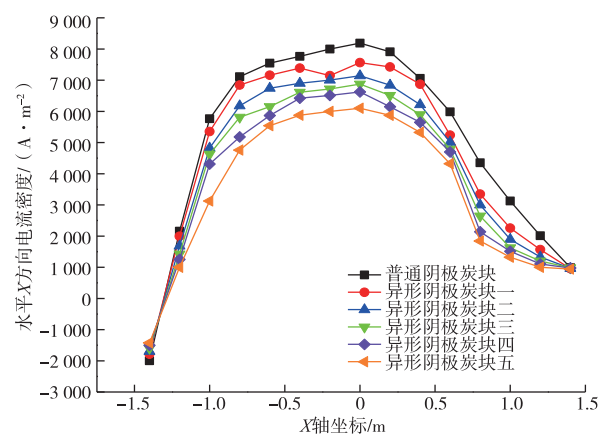


图5 不同阴极炭块水平电流密度对比图

Fig. 5 Comparison of horizontal current densities of different cathode carbon blocks

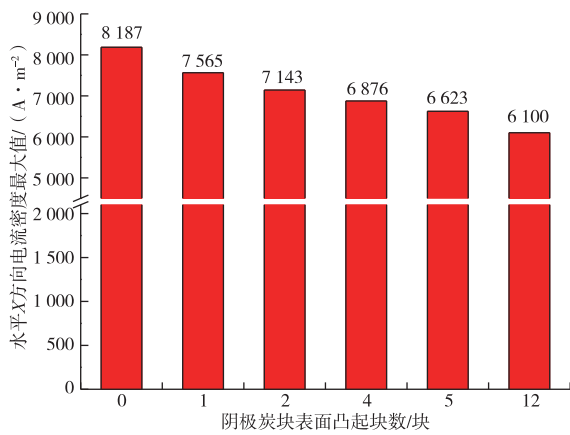


图6 各异形阴极炭块电流密度最大值
Fig. 6 The maximum current density of each special-shaped cathode carbon block

从上文可知,减小水平电流可以增强磁场稳定性,提高铝电解槽使用寿命。因此,设计新型异形阴极炭块可以保障铝电解工业长期稳定发展,确保电解铝行业的安全。

3.2 现场测试

为了证明模拟数据的准确性,对某铝厂400 kA铝电解槽进行测试。其测试结果如表1~2所示。

表1 阴极电压降测量值与模拟值对比

Table 1 Comparison of measured and simulated cathode voltage drop values

项目	测量值/mV	模拟值/mV	误差/%
普通阴极炭块	293.4	288.2	1.77
异形阴极炭块一	279.8	273.3	2.32
异形阴极炭块二	271.5	267.7	1.40
异形阴极炭块三	267.1	263.0	1.54
异形阴极炭块四	254.8	258.0	1.24
异形阴极炭块五	243.4	249.0	2.25

表2 表面凸起数量对铝液流速的影响

Table 2 Effect of surface protrusion quantity on aluminum liquid flow rate

凸起数量/块	0	1	2	4	5	12
铝液平均流速/(cm·s ⁻¹)	22.8	20.5	18.8	15.9	14.3	12.7

由图7可知,测量值呈下降趋势,与模拟值结果一致。测量值和模拟值之间存在一定误差,但误差范围在5%以内。在工程应用中,模拟结果与测试结果之间的误差为±10%以内是可以接受的,因此该误差在允许范围内,表明用COMSOL软件进行仿真是有效的。其存在误差原因可总结为以下三点:1)用SOLIDWORKS建的阴极炭块模型相对于铝厂使用的阴极炭块结构简单;2)铝电解槽运行过程中阴极电压存在不稳定性;3)测量时存在一

定的误差。由表2可知,随着凸起数量的增加,铝液流速逐渐缓慢,使得流场更均匀。流速过快会导致熔体剧烈波动,对极距造成影响,导致铝二次反应,降低产能,严重时还会对电解槽槽壳造成破坏。因此,使用异形阴极炭块来减缓铝液流速也是十分重要的。

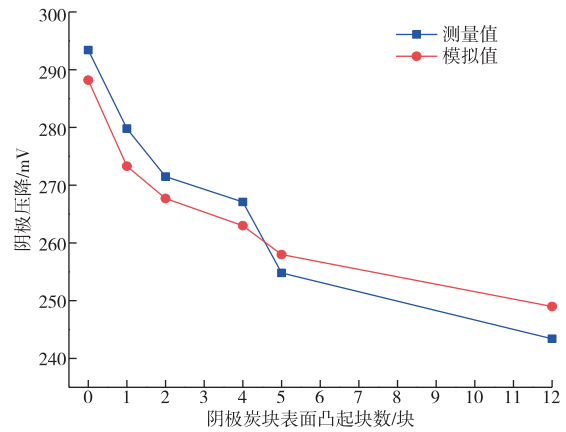


图7 测量值与模拟值对比折线图

Fig. 7 Line chart comparing measured and simulated values

4 异形阴极炭块分析

通过以上模拟可以得出,异形阴极炭块相比于普通阴极炭块有诸多好处。在传统铝电解槽中,存在电流效率损失这一现象,即已经电解析出的金属铝重新以化学态的形式溶解在电解质溶液中,阳极气体随之将它氧化。金属铝溶解造成的损失,导致电流效率降低。而异形阴极炭块能使铝液流速平缓,液面更稳定,有利于提高电解效率。异形阴极炭块对比普通阴极炭块在电解槽中的垂直磁场强度有所降低,这是因为异形阴极炭块使得水平电流得到降低,电流越低,电解槽内的铝液波动相对越小,电流分布就更均匀。水平电流过大还会对铝电解槽内部造成磨损,大大减少了铝电解槽的使用寿命。

异形阴极炭块作用于铝电解槽底部,起到导电和内衬的作用。随着阴极炭块表面凸起长方体块数的增加,阴极压降呈下降趋势,表明异形阴极炭块对比普通阴极炭块在节能方面更有利。从经济性角度分析,凸起1块长方体的阴极炭块(即异形阴极炭块一)结构简单,生产成本更低且生产更便捷,在实际工业生产中更能被广泛运用。从水平X方向电流密度角度分析,电流密度呈下降趋势。水平电流密度的下降有利于垂直磁场的稳定,有利于电解槽安全稳定生产。

从流速来看,随着凸起数量的增加,铝液流速减缓,有利于铝电解槽流场的稳定。结合阴极电压、水平电流密度和铝液流速三个重要参数,阴极炭块表面凸起块数越多,铝电解槽更加节能,使用的寿命就越长。

然而,铝电解槽阴极侵蚀和损耗也是一个致命的问题。通过借鉴某厂的实测数据,异形阴极炭块表面凸起部分年消耗速度小于等于 10 mm,随着时间的增加,磨损会加剧,本设计采用凸起 90 mm 的长方体,按照此速度磨损,铝电解槽的使用寿命达到 7~8 a。

5 结论

1) 铝电解槽异形阴极炭块凸起高度对阴极电压几乎没有影响,但凸起高度一定要小于铝液层高度。

2) 结合阴极电压、水平电流密度和铝液流速三个重要参数,阴极炭块表面凸起块数越多,铝电解槽更加节能,使用的寿命就越长。

3) 异形阴极炭块可以保障铝电解槽的安全稳定生产以及为传统铝厂的改进升级提供一种方案。

4) 异形阴极炭块的设计,对比普通阴极炭块,优势更加明显。符合绿色低碳发展理念。在“双碳”目标的大背景下,改进升级铝电解槽、优化能源结构、降低碳排放是非常有意义的。

参考文献

- [1] 杨慧彬,王跃全. 加强电解铝企业碳排放管理 助力“双碳”目标实现[J]. 中国环境监察,2023(7):74-75.
YANG H B, WANG Y Q. Strengthening carbon emission management in electrolytic aluminum enterprises to help achieve the “dual carbon” goal [J]. China Environmental Supervision, 2023(7):74-75.
- [2] 冯乃祥,彭建平,王耀武,等. 铝电解高效节能技术应用与研究现状[J]. 材料与冶金学报,2010,9(增刊1):1-7.
FENG N X, PENG J P, WANG Y W, et al. Application and research status of high-efficiency energy-saving technology in aluminum electrolysis [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2010, 9(Suppl. 1):1-7.
- [3] 尹诚刚,李劼,徐宇杰,等. 新型阴极钢棒对铝电解槽电热场的影响[J]. 中国有色金属学报,2014,24(1):246-253.
YIN C G, LI J, XU Y J, et al. The effect of a new type of cathode steel rod on the electric field of aluminum electrolysis cells [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1):246-253.
- [4] BLAIS M, DÉSILETS M, LACROIX M. Optimization of the cathode block shape of an aluminum electrolysis cell[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1/2):439-446.
- [5] SONG Y. Performance of the cathodes with trapezoidal protrusions in aluminum electrolysis cells [J]. JOM, 2017, 69(12):2844-2850.
- [6] PENG J. Increasing the energy efficiency of aluminum-reduction cells using modified cathodes [J]. JOM, 2017, 69(10):1767-1772.
- [7] TAO W J, LI T F, WANG Z W, et al. Impact of the usage of a slotted cathode carbon block on thermoelectric field in an aluminum reduction cell [J]. JOM, 2015, 67(5):929-937.
- [8] 王默雷,邓胜祥. 400 kA 铝电解槽阴极钢棒倾斜高度对阴极电压降的影响[J]. 轻金属,2023(2):34-39.
WANG M L, DENG S X. The influence of the tilt height of the cathode steel rod on the cathode voltage drop in a 400 kA aluminum electrolysis cell [J]. Light Metals, 2023(2):34-39.
- [9] TAO W J, LI T F, WANG Z W, et al. Numerical simulation of current distribution in cathode carbon block of an aluminum reduction cell [J]. JOM, 2015, 67(11):2675-2680.
- [10] 蒲海年,周嗣东. 高导电钢棒技术在 400 kA 电解槽上的应用[J]. 中国有色冶金,2015,44(2):39-40,73.
PU H N, ZHOU S D. Application of high conductivity steel rod technology in 400 kA electrolytic cells [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015, 44(2):39-40,73.
- [11] 刘正,颜非亚,郭海龙,等. 大型铝电解槽水平电流计算分析与应用[C]//中国科学技术协会,贵州省人民政府. 第十五届中国科协年会第 15 分会场:全国铝冶金技术研讨会论文集. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社,2013:223-232.
LIU Z, YAN F Y, GUO H L, et al. Calculation, analysis and application of horizontal current in large aluminum electrolysis cells [C]//China Association for Science and Technology, Guizhou Provincial People's Government. Proceedings of the 15th China Association for Science and Technology Annual Conference; Proceedings of the National Aluminum Metallurgy Technology Symposium. Beijing: Chinese Academic Journal (CD version), Electronic Journal Press, 2013:223-232.
- [12] SONG Y, PENG J P, DI Y Z, et al. The impact of cathode material and shape on current density in an aluminum electrolysis cell [J]. JOM, 2016, 68(2):593-599.

- [20] 刘兆庭,路贵民,于建国. NaCl-KCl-CaCl₂ 熔盐体系中 Mg²⁺ 在 Mo 电极上的阴极过程[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(12):27-32.
LIU Z T, LU G M, YU J G. Cathodic process of Mg²⁺ on Mo electrode in NaCl-KCl-CaCl₂ melt[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2018(12):27-32.
- [21] 房孟钊,廖春发,王旭,等. NaCl-KCl-Na₂WO₄ 体系熔盐电解制备钨粉的电化学特性研究[J]. 有色金属工程,2019,9(11):39-44.
FANG M Z, LIAO C F, WANG X, et al. Electrochemical characteristics of tungsten powder prepared by molten salt electrolysis of NaCl-KCl-Na₂WO₄ system [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(11):39-44.
- [22] HUA Z S, LIU H, WANG J, et al. Electrochemical behavior of neodymium and formation of Mg-Nd alloys in molten chlorides[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2017,5(9):8089-8096.
- [23] MIRCESKI V, SKRZYPEK S, STOJANOV L. Square-wave voltammetry [J]. ChemTexts, 2018, 4 (4): 17. DOI:10.1007/s40828-018-0073-0.
- [24] ZHANG M, HAN W, ZHANG M L, et al. Electrochemical formation process and phase control of Mg-Li-Ce alloys in molten chlorides [J]. Journal of Rare Earths,2013,31(6):609-615.
- [25] TANG H, YAN Y D, ZHANG M L, et al. Fabrication of Mg-Pr and Mg-Li-Pr alloys by electrochemical co-reduction from their molten chlorides [J]. Electrochimica Acta,2013,107:209-215.

(上接第 89 页)

- [13] 王俊伟,周云峰,方斌,等. 降低水平电流减少铝液动态波动铝电解节能技术研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2020(4):26-29.
WANG J W, ZHOU Y F, FANG B, et al. Study on energy saving of aluminum reduction by reducing horizontal current and decreasing dynamic fluctuation of molten aluminum[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2020(4):26-29.
- [14] 周媛,余龙进,曾振双. 500 kA 铝电解槽阴极破损分析及对策[J]. 绿色矿冶,2023,39(4):50-54.
ZHOU Y, YU L J, ZENG Z S. Analysis and countermeasures for cathode damage in 500 kA aluminum electrolytic cells[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2023,39(4):50-54.
- [15] 姜艳丽,郑奇,喻亮,等. 异型阴极结构铝电解槽热应力场仿真[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(5):37-42.
JIANG Y L, ZHENG Q, YU L, et al. Numerical simulation of thermal-stress field in aluminum reduction cells with innovation cathode[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2015(5):37-42.