

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2024.10.010

铝电解槽不同铝水平高度电热场模拟对比

于帅康^{1,2}, 邓胜祥^{1,2}, Johnson Yap^{2,3}

(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 新能源及节能新技术国际实验室, 上海 201620;

3. SCORE EPCC SDN BHD, Bintulu, Malaysia)

摘要: 铝水平高度是铝电解过程中的重要指标, 合适的铝水平可保持良好的槽内物理场使电解槽稳定生产。因此, 找到合适的铝水平高度对电解槽良好工作至关重要。利用 SOLIDWORKS 建模软件绘制了四组 350 kA 不同铝水平电解槽, 通过 COMSOL 仿真软件分别对四组不同铝水平电解槽电场及热场进行模拟并对比某厂 350 kA 电解槽现场测试数据, 验证了模拟准确性。发现随着铝水平的不断升高, 电解槽内电势、电流密度及整体温度均呈下降趋势。通过电场热场对比, 认为 350 kA 电解槽铝水平位于 20~22 cm 区间为最优, 压降为 3 630~3 810 mV, 槽内高温约为 950 ℃。

关键词: 铝电解槽; 铝水平; 电场热场; 仿真模拟

中图分类号: TF821

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)10-0073-08

Comparison of Electric Heating Field Simulation for Aluminum Electrolysis Cells at Different Aluminum Horizontal Heights

YU Shuaikang^{1,2}, DENG Shengxiang^{1,2}, JOHNSON Yap^{2,3}

(1. Department of Energy and Power Engineering, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. International Laboratory of New Energy and Energy Saving New Technologies, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3. SCORE EPCC SDN BHD, Bintulu, Malaysia)

Abstract: The aluminum horizontal height is an important indicator in the aluminum electrolysis process, and an appropriate aluminum level can maintain a good physical field inside the cell to ensure stable production. Therefore, finding the appropriate aluminum horizontal height is crucial for the optimal operation of the cell. SOLIDWORKS modeling software was used to draw four sets of 350 kA aluminum electrolysis cells with different aluminum levels in this paper. Through COMSOL simulation software, the electric and thermal fields of the four sets of different aluminum electrolysis cells were simulated and compared with the on-site test data of a certain factory's 350 kA electrolysis cell, verifying the accuracy of the simulation. It was found that with the continuous increase of aluminum level, the potential, current density, and overall temperature inside the electrolytic cell all showed a downward trend. By comparing the electric and thermal fields, it is believed that the optimal aluminum level for a 350 kA electrolytic cell is in the range of 20–22 cm, with a pressure drop of 3 630–3 810 mV and a high temperature inside the cell of about 950 ℃.

Key words: aluminum electrolytic cell; aluminum level; electric field thermal field; simulation and simulation

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 电子行业工业节能与绿色标准化研究项目(SJJNZT1904-2019)

Fund: Research Project on Industrial Energy Conservation and Green Standardization in the Electronics Industry(SJJNZT1904-2019)

作者简介: 于帅康(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 新能源与节能方向。

通信作者: 邓胜祥(1970—), 男, 外籍院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源与节能新技术, 可视化仿真与智能控制。

引用格式: 于帅康, 邓胜祥, Johnson Yap. 铝电解槽不同铝水平高度电热场模拟对比[J]. 有色金属工程, 2024, 14(10): 73-80.

YU Shuaikang, DENG Shengxiang, JOHNSON Yap. Comparison of Electric Heating Field Simulation for Aluminum Electrolysis Cells at Different Aluminum Horizontal Heights[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(10): 73-80.

铝元素是地壳中含量最多的金属元素,铝及铝合金材料也以其性能优势成为市场上仅次于铁的第二大类金属,已被广泛应用于各领域^[1]。目前,工业炼铝的唯一方法是冰晶石-氧化铝熔盐电解法^[2],其工作设备是铝电解槽,电解槽工作稳定的基础是物理场的稳定。电流是整个电解过程的基础,电场也是物理场的基础,电场的稳定是整个电解槽物理场以及电解过程稳定的基础保障。热场可以直观的表现电解槽工作过程中各部的温度分布,电解过程中热场的分布会影响电解槽的运行状态和电解槽的耗能。因此,对电解槽工作过程中电场和热场的监测控制至关重要^[3]。

电解槽工作中,铝液的作用和影响也不容忽视,电解质中铝离子成为金属铝的反应是在铝液表面进行的,所以铝液才是电解过程中真正意义的阴极^[4],一定高度的铝液可隔绝阴极炭块和电解质并均匀槽底电流。适当高度的铝液可以稳定电解槽工作的电场和热场^[5],可以调整电解槽降压,且适当的铝液水平可平衡电解槽内部温度的分布,调整铝水平也可起到调整热平衡的作用^[6]。本文对不同铝水平电解槽进行了仿真模拟,以350 kA电解槽作为研究对象,利用 SOLIDWORKS 建模软件建立 18、20、22、24 cm 四种不同铝水平电解槽三维模型,运用 COMSOL 仿真软件分别对四种不同铝水平电解槽进行数值模拟,对比其电场及热场差异,探索铝水平高度变化对电解槽电场及热场的影响。

1 建立模型

1.1 控制方程

1.1.1 电场方程

铝电解槽内铝导杆、钢爪、阳极炭块、电解质、铝液、阴极炭块、阴极钢棒为导电部分进行稳态电场模拟计算,电解槽内部电流满足拉普拉斯微分方程及焦耳定律方程^[7]:

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

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

式中, V 为电压,单位为 V; σ 为电导率,单位为 S/m; I 为电流,单位为 A; R 为电阻,单位为 Ω 。

1.1.2 热场方程

铝电解槽内所有部分均进行导热,在 COMSOL 内进行稳态热场计算,满足拉普拉斯微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{\text{vol}} = 0 \quad (3)$$

式中, λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的导热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_{vol} 为导电部分焦耳热; T 为温度,单位为 K。

1.1.3 电热场方程组

电解槽导电和导热部分联立方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \\ \nabla \cdot \lambda \nabla T + q = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ 为电导率,单位为 S/m; T 为温度,单位为 K; λ 为导热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为导电部分焦耳热。

1.2 物理建模

利用 SOLIDWORKS 三维软件对遵义某铝厂 350 kA 铝电解槽模型进行绘制,为简化计算量,选取铝电解槽全槽 1/48 进行研究,除导电部分外,对内衬导热材料也进行合理构造^[8]。如图 1 所示,1 为阳极覆盖料;2 为电解槽外壳;3 为侧部炭块;4 为炉帮;5 为保温砖;6 为耐火砖;7 为硅板。模型主要尺寸如表 1 所示。

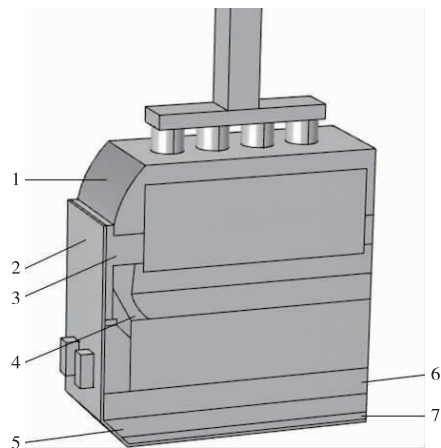


图 1 1/48 电解槽模型

Fig. 1 1/48 electrolytic cell model

表 1 350 kA 电解槽主要参数

Table 1 Main parameters of 350 kA electrolytic cell

Projects	Parameter
Current intensity/ kA	350
Anode carbon block size/mm	1 580×660×580
Cathode carbon block size/mm	1 700×700×480

1.3 模型验证

为证明模型准确性与模拟可靠性,将某铝厂 350 kA 电解槽正常生产时所测压降与相同环境下模型计算值进行比对,结果如表 2 所示。电解槽整

体压降误差约为 1.89%,考虑到测量出现误差和环境干扰,误差可忽略。因此,对电解槽模型进行模拟

是可行的。此外,利用 SOLIDWORKS 软件分别如上绘制四组仅铝水平高度存在差异的电解槽模型。

表 2 电解槽测量值模拟值对比

Table 2 Comparison of simulated values of electrolytic cell measurements

Projects	Analog value/ mV	Measurement value/ mV	Error/%
Electrolytic cell pressure drop	4 042	4 119	1.89

1.4 边界条件

本文对电解槽模拟计算采用 COMSOL 中电热耦合的方法,利用软件 AC/DC 模块以及传热模块进行电场及热场的计算,传热模块涉及到热对流,热传递以及辐射传热三种传热方式。仅铝导杆、阳极钢爪、阳极炭块、电解质、铝液、阴极炭块、阴极钢棒七部分进行导电,模型所有部分均进行热传递^[9]。

电场边界设定:1)铝导杆端头输入直流电 7 292 A;2)两个阴极钢棒端头设置接地,电势为 0。

热场边界设定:1)阳极覆盖料、铝导杆、阳极钢爪、槽壳对外界进行辐射传热及对流换热;2)铝电解槽模型侧面均做绝热处理;3)电解槽模型内部均进行热传递。

2 电场模拟对比

2.1 电势模拟

COMSOL 软件 AC/DC 模块是相关电场磁场计算模块,可有效完成本模拟对比相关电场计算,对电场边界条件以及参与导电部分物性进行设定后,分别对四组不同铝液高度铝电解槽进行稳态计算,模拟结果如图 2~5 所示,将模型透明化处理以使更直观观测压降及等势线。

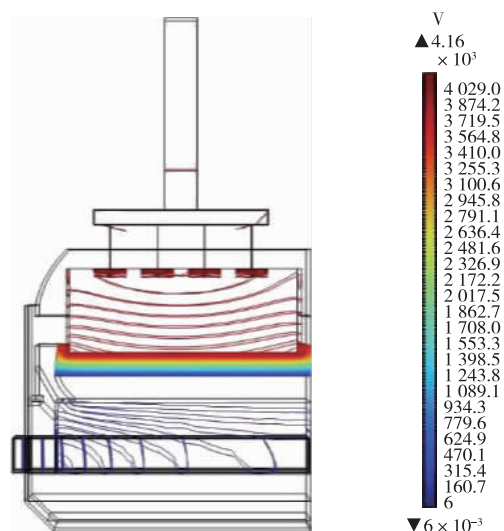


图 2 18 cm 铝水平电解槽电势

Fig. 2 18 cm aluminum horizontal electrolytic cell potential

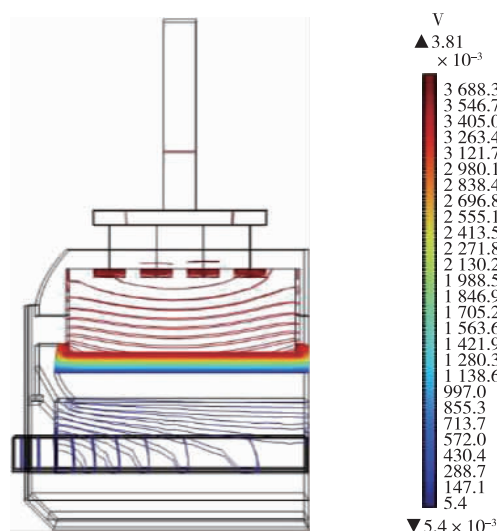


图 3 20 cm 铝水平电解槽电势

Fig. 3 20 cm aluminum horizontal electrolytic cell potential

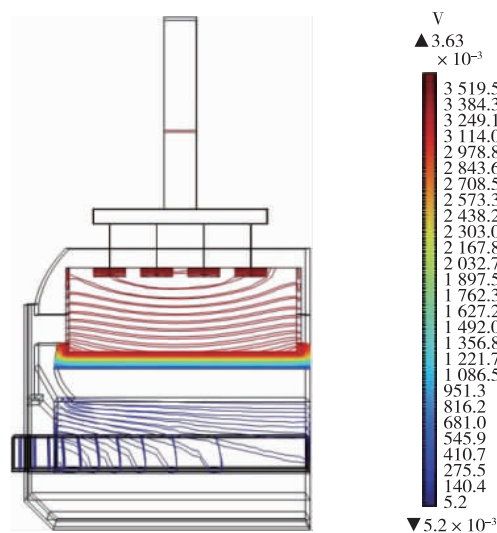


图 4 22 cm 铝水平电解槽电势

Fig. 4 22 cm aluminum horizontal electrolytic cell potential

如图 2~5 所示,18 cm 铝水平电解槽电势最高为 4 160 mV,最低为 6 mV;20 cm 铝水平电解槽电势最高为 3 810 mV,最低为 5.4 mV,最高电势较 18 cm 铝水平电解槽降低了 350 mV,约 8%;22 cm 铝水平电解槽电势最高为 3 630 mV,最低为 5.2 mV,最高电势较 20 cm 铝水平电解槽降低了

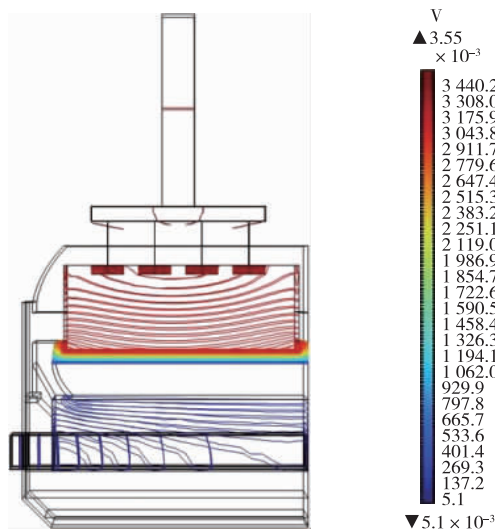


图5 24 cm 铝水平电解槽电势

Fig. 5 24 cm aluminum horizontal electrolytic cell potential

180 mV, 约 4.7%; 24 cm 铝水平电解槽电势最高为 3 550 mV, 最低为 5.1 mV, 最高电势较 22 cm 铝水平电解槽降低了 80 mV, 约 2.2%, 电势较低。

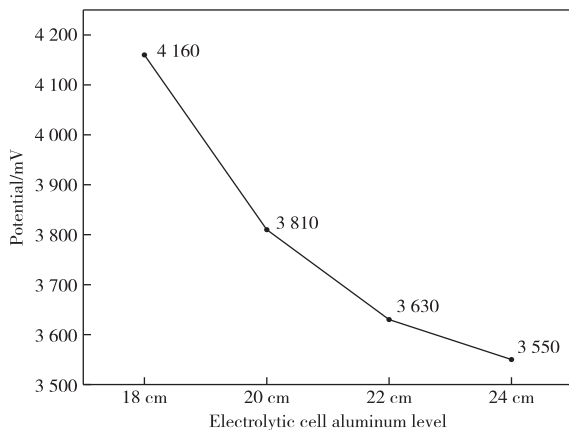


图6 不同铝水平电解槽电势对比

Fig. 6 Comparison of potential in electrolytic cells with different aluminum levels

如图6所示,随着铝电解槽铝水平高度的变化,电解槽的电势也有很大变化。铝电解槽电势随着铝水平的升高而不断降低,且降低趋势呈越来越小的变化,铝水平每升高2 cm,电势都有不同程度的降低,20 cm 铝水平电解槽相较于18 cm 铝水平电解槽降低幅度最大,电势降低约8%。通过各铝水平高度下电解槽压降对比得出,电解槽铝水平在20~22 cm 区间内,压降最合理。

2.2 铝液横向电流模拟

电解槽工作过程中,电流经铝导杆垂直流入电解槽,此电流为垂直电流,电流流经电解槽内导电部

分从阴极钢棒横向流出,由于流入方向和流出方向垂直,电解槽铝液中会产生横向电流,不仅如此,由于电解槽槽况及工艺条件的差异,也会产生横向电流^[10]。横向电流在电解槽工作过程中,不会产生原铝且增加能耗,影响电解槽生产效率,横向电流密度受铝液影响^[11]。因此,电解过程中对铝液的控制中调控电流密度至关重要。COMSOL 软件中 Evaluation 3D 表格功能可以直观观察模拟结果中各坐标点的值,在电解槽模型中作铝液横截面,借助 Evaluation 3D 表格功能观测各点横向电流密度。不同铝水平电解槽铝液横向电流密度对比如图7所示。

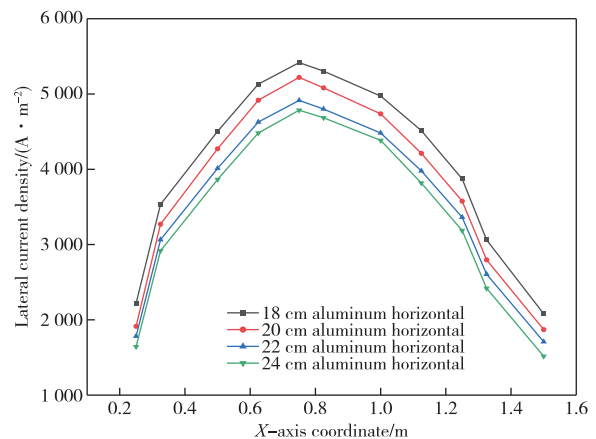


图7 水平电流密度对比

Fig. 7 Horizontal current density comparison

如图7所示,随着铝水平高度的升高,铝电解槽铝液截面的水平电流不断降低,18 cm 铝水平电解槽水平电流密度峰值约为 5 440 A/m²; 20 cm 铝水平电解槽水平电流密度峰值约为 5 218 A/m²,与18 cm 铝水平电解槽相比,电流密度峰值降低了222 A/m²; 22 cm 铝水平电解槽水平电流密度峰值约为 4 993 A/m²,与20 cm 铝水平电解槽相比,电流密度峰值降低了225 A/m²; 24 cm 铝水平电解槽水平电流密度峰值约为 4 883 A/m²,与22 cm 铝水平电解槽相比,电流密度峰值降低了100 A/m²。

2.3 电场测试对比

为验证模拟准确性,对铝厂350 kA 电解槽正常工作不同铝水平状态下电压降进行测试。对比结果如表3所示,测量值随铝水平变化趋势与模拟结果相同,不断降低。模拟值与测量值存在较小误差,考虑实际工作环境不稳定,误差均在允许范围内。所以,利用仿真软件对不同铝水平电解槽电场模拟准确可行。

表 3 不同铝水平电解槽电势测量值模拟值对比

Table 3 Comparison of simulated values of potential measurements in electrolytic cells with different aluminum levels

Aluminum level/ cm	Analog value/ mV	Measurement value/mV	Error/ %
18	4 160	4 231	1. 67
20	3 810	3 928	3. 01
22	3 630	3 688	1. 57
24	3 550	3 464	2. 48

3 热场模拟对比

3.1 整体热场对比

铝电解槽工作中短时间内可认为稳态,利用 COMSOL 软件传热模块设定边界条件以及电解槽各部分传热物性后进行电热耦合稳态模拟,结果如

图 8~11 所示。通过各组电解槽等温线整体看,温度线密集部分为温度变化大的部分,等温线大量分布于电解槽侧部内衬以及底部保温砖和硅板部分,说明侧部内衬及保温砖温度梯度大,温度变化快,侧部内衬和保温砖散热及保温性能良好,内衬模型合理,能有效对外界散热并保存电解槽内部热量。

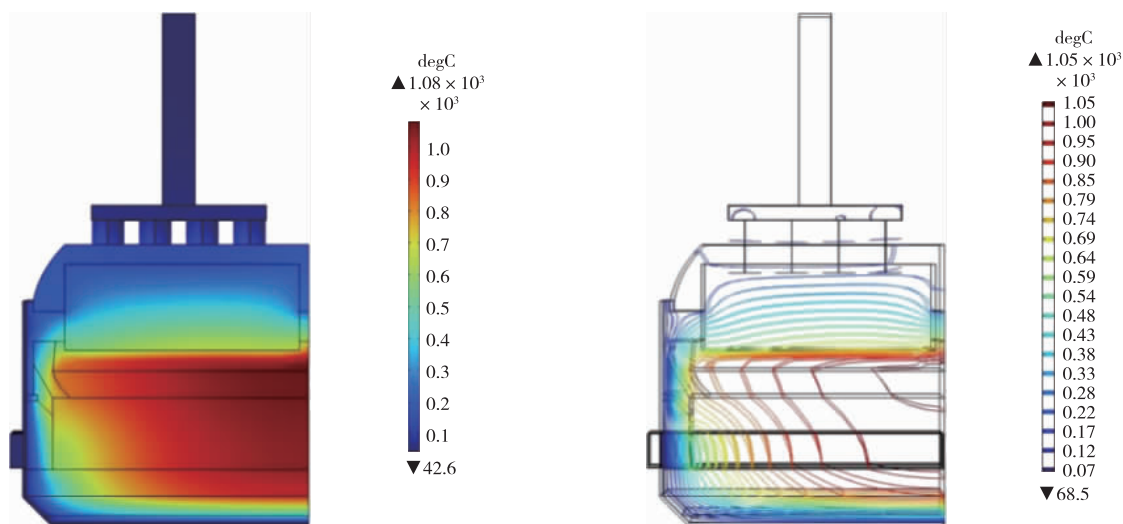


图 8 18 cm 铝水平电解槽温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of 18 cm aluminum horizontal electrolytic cell

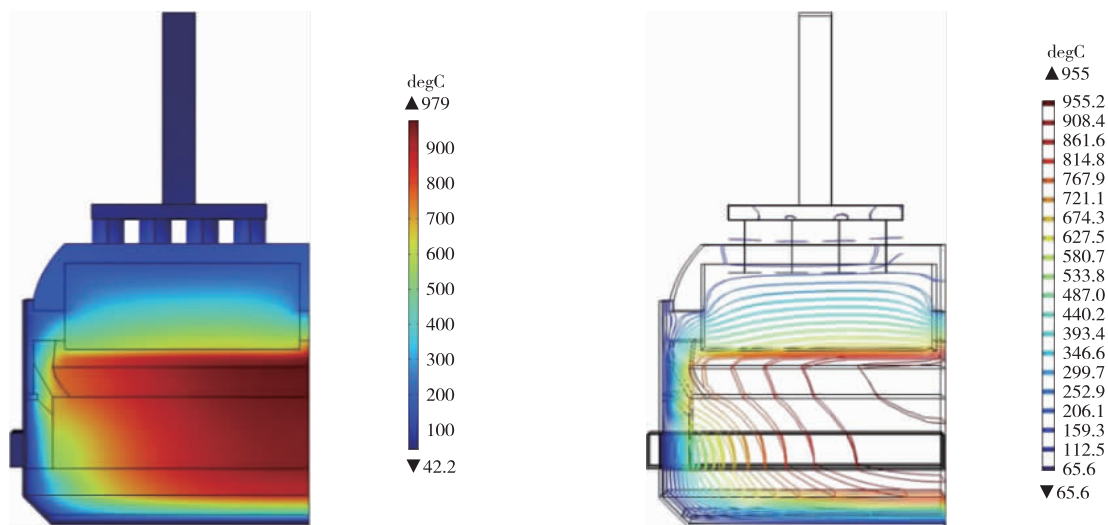


图 9 20 cm 铝水平电解槽温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of 20 cm aluminum horizontal electrolytic cell

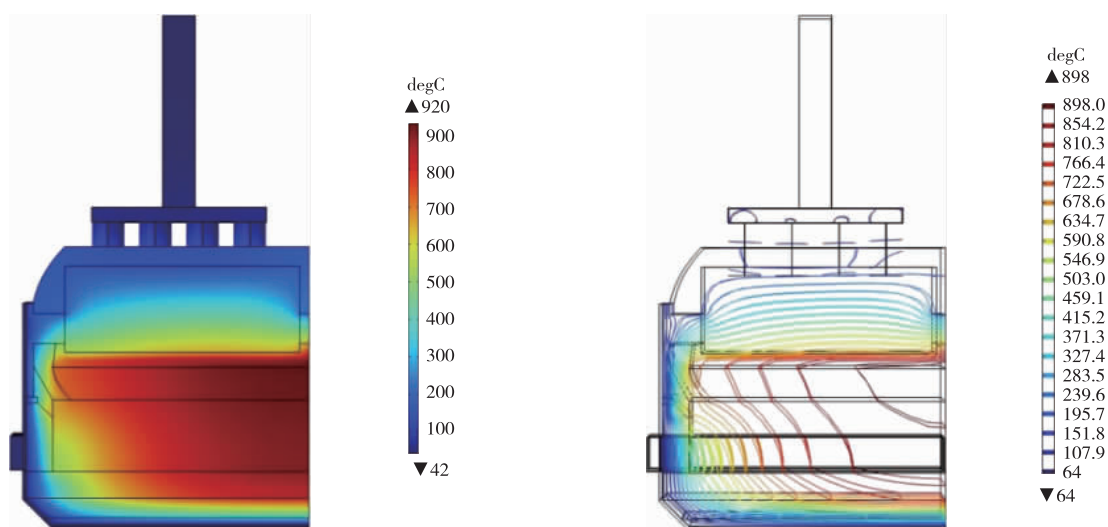


图 10 22 cm 铝水平电解槽温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of 22 cm aluminum horizontal electrolytic cell

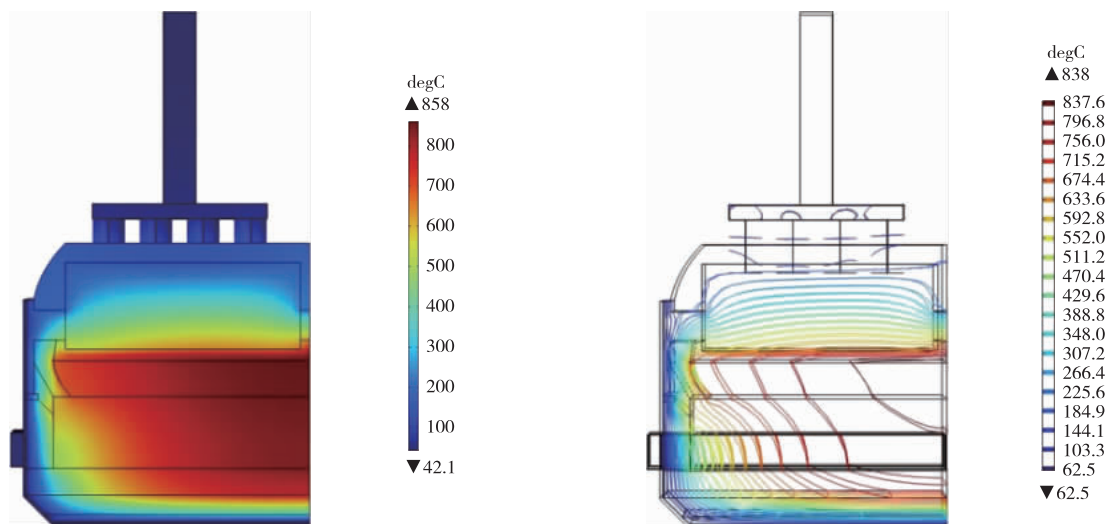


图 11 24 cm 铝水平电解槽温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of 24 cm aluminum horizontal electrolytic cell

根据图 8~11 可知,18 cm 铝水平电解槽等温线分布合理,内部最高温度为 1 080 ℃,电解槽外部最低温度为 42.6 ℃,高温略高;20 cm 铝水平电解槽等温线分布合理,内衬模型合理,内部最高温度为 979 ℃,电解槽外部最低温度为 42.2 ℃,较 18 cm 铝水平电解槽,高温降低了 101 ℃,约 9.36%;22 cm 铝水平电解槽等温线分布合理,内衬模型合理,内部最高温度为 920 ℃,电解槽外部最低温度为 42 ℃,较 20 cm 铝水平电解槽,高温降低了 59 ℃,约 6%;24 cm 铝水平电解槽等温线分布合理,内衬模型合理,内部最高温度为 858 ℃,电解槽外部最低温度为 42.1 ℃,较 22 cm 铝水平电解槽,高温降低了 62 ℃,约 6.7%,温度场整体偏低;随着铝液铝水平的升高,电解槽内温度随之升高,18 cm 铝水平升

至 20 cm 铝水平阶段温度下降幅度最大。对比可看出电解槽铝水平位于 20~22 cm 区间,温度及温度分布最佳,高温在 950 ℃左右。

3.2 局部热场对比

阴极炭块温度对电解槽工况非常重要,合理的阴极炭块温度及分布可以保证阴极炭块部分不被破坏,单独对阴极炭块温度进行观测对比,结果如图 12~15 所示。18 cm 铝水平电解槽阴极炭块大部分在 900 ℃以上,高温 1 060 ℃,靠近阴极钢棒一角温度较低,低温 589 ℃,高温偏高;20 cm 铝水平电解槽阴极炭块大部分在 900 ℃以上,高温 971 ℃,靠近阴极钢棒一角温度较低,低温 545 ℃,高温较 18 cm 铝水平电解槽高温降低 89 ℃,整体保温良好,可保证阴极炭块不受电解质渗入破坏;22 cm 铝



图 12 18 cm 铝水平电解槽阴极炭块温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of cathode carbon block in 18 cm aluminum horizontal electrolytic cell



图 14 22 cm 铝水平电解槽阴极炭块温度分布

Fig. 14 Temperature distribution of cathode carbon block in 22 cm aluminum horizontal electrolytic cell



图 13 20 cm 铝水平电解槽阴极炭块温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of cathode carbon block in 20 cm aluminum horizontal electrolytic cell



图 15 24 cm 铝水平电解槽阴极炭块温度分布

Fig. 15 Temperature distribution of cathode carbon block in 24 cm aluminum horizontal electrolytic cell

水平电解槽阴极炭块大部分在 900 ℃ 以上, 高温 912 ℃, 靠近阴极钢棒一角温度较低, 低温 521 ℃, 高温较 20 cm 铝水平电解槽高温降低 59 ℃; 22 cm 铝水平电解槽阴极炭块高温 851 ℃, 靠近阴极钢棒一角温度较低, 低温 487 ℃, 高温较 22 cm 铝水平电解槽高温降低 61 ℃。对比得出电解槽铝水平为 20 cm 时, 阴极炭块温度及温度分布最优, 对阴极炭块保护效果良好。

3.3 热场测试对比

同样对铝厂电解槽进行了能量测试, 对熔体区和阴极炭块区槽表面温度进行统计, 测量值与 Evaluation 3D 表格功能所计算的区域温度模拟值进行对比验证模拟准确性, 测试对比结果如表 4 所示。测量温度与计算温度存在一定误差, 但误差都在 5% 之内, 表明正常工作状态下电解槽温度与本模拟结果较吻合, 可证明热场模拟的准确性。

表 4 不同铝水平电解槽表面温度测量值模拟值对比

Table 4 Comparison of simulated surface temperature measurements of electrolytic cells with different aluminum levels

Projects	18 cm horizontal	20 cm horizontal	22 cm horizontal	24 cm horizontal
High temperature measurement values in the melt zone/℃	352	334	322	310
Calculated value of high temperature in the melt zone/℃	337	322	314	302
Error/%	4.26	3.59	2.48	2.58
Measurement of average temperature in the melt zone/℃	327	309	296	283
Calculated average temperature in the melt zone/℃	313	298	288	271
Error/%	4.28	3.55	2.7	4.24
High temperature measurement values in the cathode carbon block area/℃	258	246	239	226
Calculated value of high temperature in the cathode carbon block area/℃	267	256	231	219
Error/%	3.48	4.06	3.34	3.09
Measurement of average temperature in the cathode carbon block area/℃	231	221	218	197
Calculated value of average temperature in the cathode carbon block area/℃	242	230	209	189
Error/%	4.76	4.07	4.12	4.06

4 结论

1)通过 COMSOL 软件中 AC/DC 模块及传热模块分别对四组不同铝液高度电解槽进行电热耦合计算,电解槽铝水平为 18 cm 时,电势为 4 160 mV,铝液横向电流密度为 5 440 A/m²,整体最高温度为 1 080 ℃;电解槽铝水平为 20 cm 时,电势为 3 810 mV,铝液横向电流密度为 5 218 A/m²,整体最高温度为 979 ℃;电解槽铝水平为 22 cm 时,电势为 3 630 mV,铝液横向电流密度为 4 993 A/m²,整体最高温度为 920 ℃;电解槽铝水平为 24 cm 时,电势为 3 550 mV,铝液横向电流密度为 4 883 A/m²,整体最高温度为 858 ℃。

2)铝水平每升高 2 cm,电解槽电势都有不同程度降低,且降低趋势逐渐平缓,横向电流密度也随铝水平的升高而降低。20 cm 铝水平电解槽较 18 cm 铝水平电解槽电势降低 8%,22 cm 铝水平电解槽较 20 cm 铝水平电解槽电势降低 4.7%,24 cm 铝水平电解槽较 12 cm 铝水平电解槽电势降低 2.2%。通过电场对比得出,电解槽铝水平位于 20~22 cm 间,压降为 3 630~3 810 mV,结果最优。

3)随着铝水平的升高,电解槽整体温度和局部温度都呈降低趋势。电解槽铝水平为 18 cm 时,槽内最高温为 1 080 ℃,高温偏高;铝水平为 20 cm 时,槽内最高温为 979 ℃,且等温线分布合理,内衬保温良好;铝水平为 22 cm 时,槽内最高温为 920 ℃;铝水平为 24 cm 时,槽内最高温为 858 ℃,整体温度偏低。通过热场对比得出,电解槽铝水平位于 20~22 cm 间,温度场分布最优。

4)通过电场热场两基础物理场模拟整体对比,电解槽铝水平在 20~22 cm 区间内,槽况最佳。

参考文献:

- [1] 袁序弟. Automobile 汽车用铝前景及铝材需求[J]. 有色金属再生与利用,2005(10):19-21.
YUAN Xudi. Outlook and demand for aluminum materials for automobiles [J]. Nonferrous Metal Recycling and Utilization,2005(10):19-21.
- [2] 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.
WANG Xuan,LIU Wei,LI Guangbin,et al. Simulation and optimization of magnetic field in 350 kA series aluminum electrolytic cells [J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering,2015,43(6):30-34.
- [3] 周小淞,柴婉秋. 420 kA 铝电解槽电热场仿真及实测分析[J]. 有色金属设计,2023,50(2):19-21,34.
ZHOU Xiaosong, CHAI Wanqiu. Simulation and measurement analysis of electric heating field in 420 kA aluminum electrolytic cells [J]. Nonferrous Metal Design,2023,50(2):19-21,34.
- [4] 陈伟. 石墨化阴极在 400 kA 系列铝电解槽的应用[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(6):53-58.
CHEN Wei. Application of graphite cathode in 400 kA series aluminum electrolytic cells [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2024(6):53-58
- [5] 曹曦,赵志彬,付松,等. 铝电解槽铝水高度技术路线分析研究[J]. 轻金属,2022(7):25-29.
CAO Xi,ZHAO Zhibin,FU Song,et al. Analysis and research on the technical route of aluminum liquid height in aluminum electrolysis cells[J]. Light Metals,2022(7):25-29.
- [6] 张钦崧. 影响铝电解槽稳态热平衡的因素分析[J]. 轻金属,2019(12):25-29.
ZHANG Qinsong. Analysis of factors affecting the steady-state thermal equilibrium of aluminum electrolysis cells[J]. Light Metals,2019(12):25-29.
- [7] 翟柄德,邓胜祥. 330 kA 铝电解槽异形阴极碳块对水平电流的影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(6):59-64.
ZHAI Bingde,DENG Shengxiang. The influence of irregular cathode carbon blocks on horizontal current in 330 kA aluminum electrolysis cells [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2024(6):59-64.
- [8] 明勇,周乃君. 铝电解槽侧壁换热系统的仿真与应用[J]. 工程热物理学报,2019,40(9):2115-2125.
MING Yong,ZHOU Naijun. Simulation and application of side wall heat exchange system in aluminum electrolysis cells[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2019,40(9):2115-2125.
- [9] 张阳,张亚楠,于强,等. 铝电解槽侧部余热高效回收技术工业试验研究[J]. 有色金属工程,2023,13(8):78-83,160.
ZHANG Yang,ZHANG Yanan,YU Qiang,et al. Industrial experimental research on high-efficiency recovery technology of side waste heat in aluminum electrolysis cells[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(8):78-83,160.
- [10] 王强华. 铝电解槽水平电流探讨[C]// 2009(重庆)中西部第二届有色金属工业发展论坛论文集.
WANG Qianghua. Discussion on Horizontal Current of Aluminum Electrolytic Cells[C]// 2009 (Chongqing) Second Central and Western Nonferrous Metals Industry Development Forum.
- [11] 邢涛,邓胜祥. 400 kA 铝电解槽异形阴极炭块对阴极电压降的影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(3):83-89.
XING Tao,DENG Shengxiang. Effect of special-shaped cathode carbon block on cathode voltage drop in 400 kA aluminum electrolytic cell [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2024(3):83-89.