

引文格式: 龚姚腾, 吕招东, 陈泽斌, 等. 8 kA 稀土电解槽单侧电导及阴极优化数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(3): 64-71.

GONG Yaoteng, LYU Zhaodong, CHEN Zebin, et al. Numerical simulation for optimization of one-side conductance and cathode of 8 kA rare earth electrolytic cell[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(3): 64-71.

8 kA 稀土电解槽单侧电导及阴极优化数值模拟

龚姚腾, 吕招东, 陈泽斌, 逢启寿

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

[摘要] 稀土电解槽导电板的分布位置对稀土电解槽的物理场会有影响, 为探究稀土电解槽中导电板分布的最优位置, 在本次仿真实验中为该导电板的分布引入一个等差数列的分布梯度, 通过对不同分布梯度下的槽内物理场仿真数值进行比较, 进而得到稀土电解槽导电板最优分布模型。在仿真过程中观察到阴极底部的尖角对实验结果影响较大, 在其他条件保持不变的基础上将阴极底部由圆柱优化为半球形, 通过与未优化的结构进行对比, 验证新型电解槽结构的合理性。仿真结果显示: 随着导电板由侧边位置向中间偏移, 电解反应时槽内的温度与阳极电势基本保持不变, 槽盖板与阳极间的电势差逐渐减小, 槽内电流密度缓慢增大。当将阴极钼棒底部由柱状结构改为球状结构后, 槽内电势分布更为均匀, 电流密度相较于之前的结构也有所增加, 优化后的结构能改善局部过热问题, 同时也使得电解效率增大。

[关键词] 稀土电解槽; 单侧导电板; 通电位置; 阴极底部结构; 物理场模拟; 结构优化; 局部过热; 电解效率

[中图分类号] TF834; TF803.2+7 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)02-0064-08
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.03.008

稀土是元素周期表中的镧系元素和钪、钇共十七种金属元素的总称^[1], 被广泛应用于冶金、能源、信息、农业、生物、航天等领域, 是现代工业发展的一类重要原料^[2]。

万安级以下的稀土电解槽仍在许多中小型企业中广泛使用, 这类电解槽由于其体积小、易操作等优点而广受市场青睐, 千安级稀土电解槽经过前人不断优化迭代, 现今的设计方案已经非常成熟, 但还有优化空间。忻治霖^[3]仅对电解槽导电板中位以及边位进行研究, 但未对小电流电解槽导电板单侧分布梯度进行分析, 张恒星^[4]对6 kA电解槽进行了较为深入的研究, 叶楠等^[5]对电解槽阴阳极极间距进

行了仿真模拟。而在查阅相关文献时发现前人未对导电板的分布有过深入研究, 为探究导电板分布的合理性, 对其不同分布结构进行仿真模拟, 为稀土电解槽提供更为合理的分布结构的理论依据。

本研究主要通过对某企业的两类8 kA电解槽进行研究, 观察发现该电解槽的导电板有两种不同的分布类型, 而通过查阅文献得知, 导电板的不同分布会对电解槽内的各物理场产生不同的影响^[6]。故而本次实验通过对电解槽槽盖板位置的导电板分布引入一个等差数列, 结合COMSOL的电热耦合模块模拟出稀土电解槽在工作时对应的电流密度、电势分布以及温度表现, 再结合实际生产过程对稀土电解槽的结构进行优化, 进一步减少仿真时的误差。研究表明, 电解槽内的电解效率与导电板的数量与分布有关, 可以通过改变导电板的分布位置以及导电板的数量来提高稀土电解槽的电解效率。

[收稿日期] 2023-12-10 [修订日期] 2024-01-09

[录用日期] 2024-01-12 [出版日期] 2024-06-01

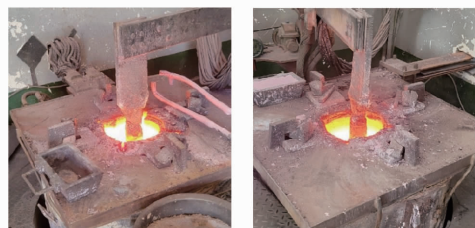
[第一作者] 龚姚腾(1964—), 博士, 教授, 研究方向为稀土冶金设备。

[通信作者] 吕招东(1998—), 硕士研究生, 研究方向为稀土冶金设备。

1 模型建立

1.1 稀土模型的建立

本文研究对象以某企业千安级电流电解槽为例,该企业中的 8 kA 单侧电解槽主要有以下两类,如图 1 所示,分别是导电板单侧中位通电以及导电板单侧边位通电。



(a) 单侧中位分布 (b) 单侧边位分布

图 1 稀土电解槽导电板分布

Fig.1 Distribution of conductive plate in rare earth electrolytic cell

通过忻治霖^[3]的研究可知导电板在不同的通电位置会使槽体内的电流密度与电势分布有较大差异。由于电解槽的槽盖板间距极大,仅两种分布类型无法得出导电板的最优分布位置,因此本次仿真实验为导电板分布引入一个等差数列,通过对比导电板不同分布位置下电解槽内的电热耦合情况,寻找导电板最优分布方案,提高电解槽的使用寿命与电解效率。如图 2 所示,该模型为 8 kA 稀土电解槽三维结构示意图,以该结构作为仿真实验的模型,通过不断改变槽盖板上导电板的分布位置进行仿真,进而得到不同的物理场。

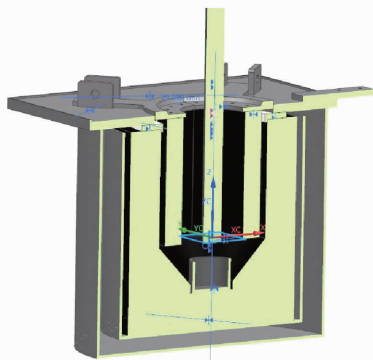


图 2 8 kA 稀土电解槽三维结构

Fig.2 Three dimensions structure of 8 kA rare earth electrolyser

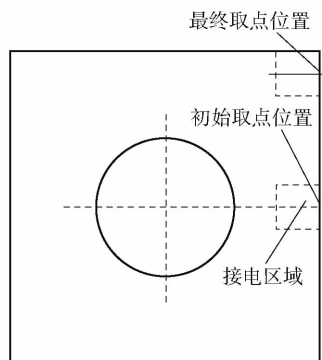


图 3 槽盖板等差数列模型

Fig.3 Groove cover arithmetic sequence model

如图 3 所示,将该电解槽导电板初始取点位置与最终取点位置间引入一个等差分布数列,假设该导电板处于中间位置时为初始位置,处于侧边位置时为最终位置,已知电解槽盖板宽度为 1 050 mm,导电板宽度为 150 mm,根据式(1)等差数列确定取值位置。式(1)中,取 n 为 11, d 为 45 mm,则导电板分别在离初始位置 0 mm、45 mm、90 mm、135 mm、180 mm、225 mm、270 mm、315 mm、360 mm、405 mm、450 mm 处取值。

$$a_n = a_1 + (n - 1)d \quad (1)$$

如图 4 所示,传统柱面阴极钼棒底部的等势线分布不均匀,电解过程中易发生尖角效应,在加热的过程中尖角处易发生电流密集,从而导致局部过热或过烧现象^[7]。因此在保留阴极钼棒上半区域柱形不变的前提下将阴极钼棒的底部区域改为球形,如图 5 所示,从而为电解过程提供更稳定的结构。

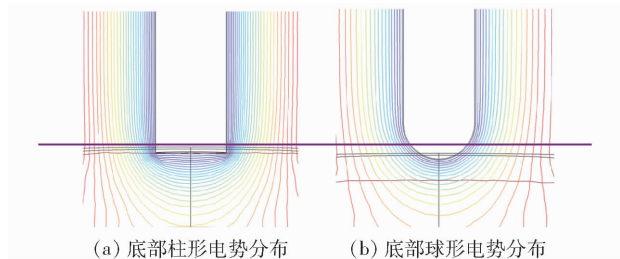


图 4 阴极底部电势分布

Fig.4 Potential distribution at the bottom of the cathode

1.2 电热耦合边界条件的设置

1) 在该仿真实验中将电解槽假设为绝缘体,同时也不会发生漏电现象,电流通过槽盖板上的导电板由阳极流向阴极。

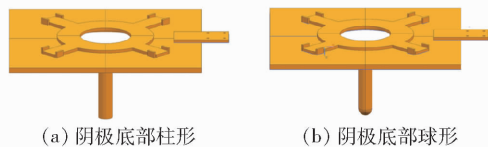


图5 电解槽阴极优化

Fig. 5 Electrolytic cell cathode optimization

2) 由于现实情况下的稀土电解槽工作时均采用电流控制,故在导电板处设置一个电流入口,其数值大小为 8 kA。

3) 由于电流是由石墨阳极通向阴极铝棒,故在阴极铝棒处设置一个接地点。

1.3 稀土电解槽模型假设

1) 假设槽内阴、阳极及坩埚为各点的电势相等

的等势体。

2) 该电解槽通入电流为直流电,不用考虑趋肤效应。

3) 除槽盖板以外,电解质内电场分布相对电解槽为中心对称,且不同结构电解槽流入电流均相等。

4) 忽略电解过程中由于气泡产生以及流体流动过程对电场结果产生的影响且该研究是以稳态情况进行研究。

1.4 热场数学模型

热量传递有热传导、热对流、热辐射三种方式^[8]。在稀土电解的过程中阴阳离子的移动,槽内电解质的流动以及电解槽表面与空气接触部分均会产生对流交换热量,其导热系数如表 1 所示。

表1 稀土电解槽换热系数计算公式^[9]

Table 1 Calculation formula of heat transfer coefficient of rare earth electrolyzer

适用范围	条件	公式	备注
电解槽熔盐表面	水平方向上的冷却面向下与层流加热面向上	$\alpha = 1.7 \Delta T^{1/3}$	α 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
电解槽槽盖	水平方向上的冷却面向下与层流加热面向上	$\alpha = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4}$	ΔT 为温度差, $^{\circ}C$
电解槽侧部	竖直方向上的竖直表面与圆柱面	$\alpha = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4}$	L 为水平或竖直长度, m
电解槽底部	水平方向上的冷却面向下与层流加热面向上	$\alpha = 0.61 \left(\frac{\Delta T}{L^2} \right)^{1/5}$	

傅里叶公式可以表达热传导过程中温度变化率以及内部热流量的关系,见式(2)。

$$Q = -\lambda F \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

式中: Q 表示等温面法线方向的热流密度, W/m^2 ; λ 表示导热系数, $W/(m \cdot K)$; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 表示等温面法线方向的温度梯度, K/m 。

在稀土电解的过程中,电解槽阴、阳极之间会产生大量的焦耳热,由于阳极外侧以及电解槽底部的电解质几乎没有电流流过,所以该区域电解质几乎没有热量产生,槽内热量传递的方向是中间电解质区域向四周传递。

2 导电板位置对电流密度的影响

2.1 底部柱型导电板等差分布电解质电流密度仿真分析

导电板位置分布对槽内电解时电流密度的影响如图 6 所示,由于氧化还原反应主要集中在阴极铝

棒的表面,故对阴极表面选取合适的电流密度点进行分析。

如图 7 所示,在该电解槽阴极中部表面建立 x - y 坐标系,由于在前面假设中将阳极石墨设置为等势体,阴极铝棒设置为接地,因此电解过程中电势的分布在 y 轴上保持一致,而在 x 轴上随着阴阳极距离的变化而变化,电势大小决定电流密度的大小,因此电流密度在 y 轴上保持是相等的,而在 x 轴上随着与阴极距离的增大,电流密度逐渐减小。因此以稀土电解槽发生电解反应的主要位置,即阴极中部表面作为参考,沿着 x 轴取距离电解槽阴极最近的 5 个点的电流密度绘图,如图 6(b)所示。当导电板位置发生偏移时,所选取的阴极附近的电流密度大小基本保持不变,即导电板在偏移 0 ~ 315 mm 位置时电流密度均为 79 200 A/m^2 ,相较于 360 ~ 450 mm 处的电流密度 79 190 A/m^2 仅有 10 A/m^2 的变化。仿真结果表明,导电板分布位置的改变对电解过程中的电流密度影响较小。

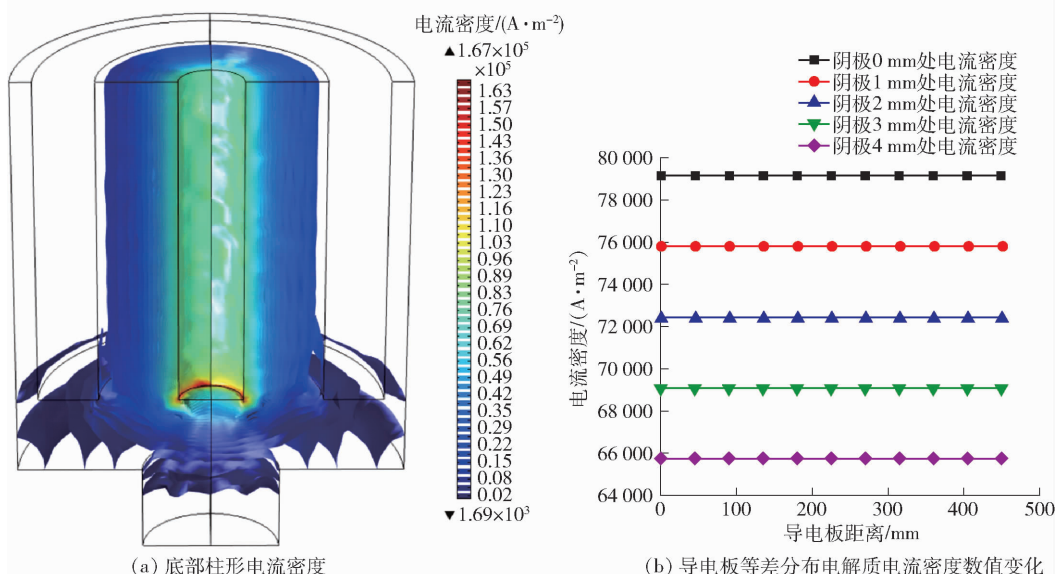


图 6 底部柱形电流密度分布

Fig. 6 Current density distribution at column bottom

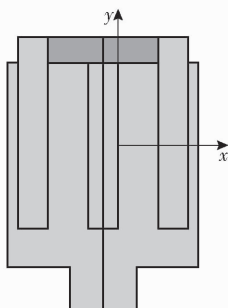


图 7 稀土电解槽电流密度取点

Fig. 7 Fetch point of current density of rare earth electrolytic cell

2.2 底部球形导电板等差分布电解质电流密度仿真分析

导电板位置分布对电解槽阴极底部球状结构的电流密度影响如图 8 所示。由图可知,当电解槽阴极底部改为球状结构之后,相较于电解槽阴极柱底,电流密度变化不大。如图 8(b)所示,在导电板偏移位置为 0 mm 处时电流密度达到最大,此时靠近阴极表面的电解质电流密度达到 $80\,700 \text{ A/m}^2$,在偏移 45 mm 时电流密度骤降至 $80\,180 \text{ A/m}^2$,当偏移位置到达 90 mm 之后其电流密度基本保持不变。此时阴极底部球状结构的电流密度与阴极底部柱状的电流密度变化基本相同,即随着测量点与阴极距离的增大电流密度逐渐降低。相较于阴极底部柱状结构,当底部改为球形时导电板偏移位置对电解槽电

解时的电流密度影响不明显。

3 导电板位置对电势分布的影响

3.1 底部柱形导电板等差分布槽体电势仿真分析

导电板不同分布位置对电势的影响仿真结果如图 9 所示。以纵坐标为槽盖板电压和阳极电压,横坐标为导电板偏移距离,将实验结果绘制成图 9(b),由该图可知导电板的整体电势随着导电板分布梯度的变化而变化,导电板由中间位置逐渐过渡到电解槽边位时,电解槽的整体电压呈现升高的趋势。

由上述仿真结果可知,导电板分布位置变化对电解槽石墨阳极电势影响极小,其电势随着导电板的位置几乎不发生改变。而当导电板位置由中间位置向电解槽边位过渡时,电解槽整体电压升高,而在发生电解反应的区域电势几乎不发生变化,能耗计算公式见式(3)。

$$W = IVt \quad (3)$$

式中: W 表示耗能, $W \cdot h$; I 为设备运行时的电流, A; V 为设备运行时输入的电压, V; t 表示通电运行时间, h。

电解槽导电板由中位向边位移动时,电解反应处的电势并无变化,而电解槽槽盖板与石墨阳极之间的电势差逐渐增大,电势差由中间位置的 270 mV 增大至槽盖板边位的 530 mV,即表明功耗

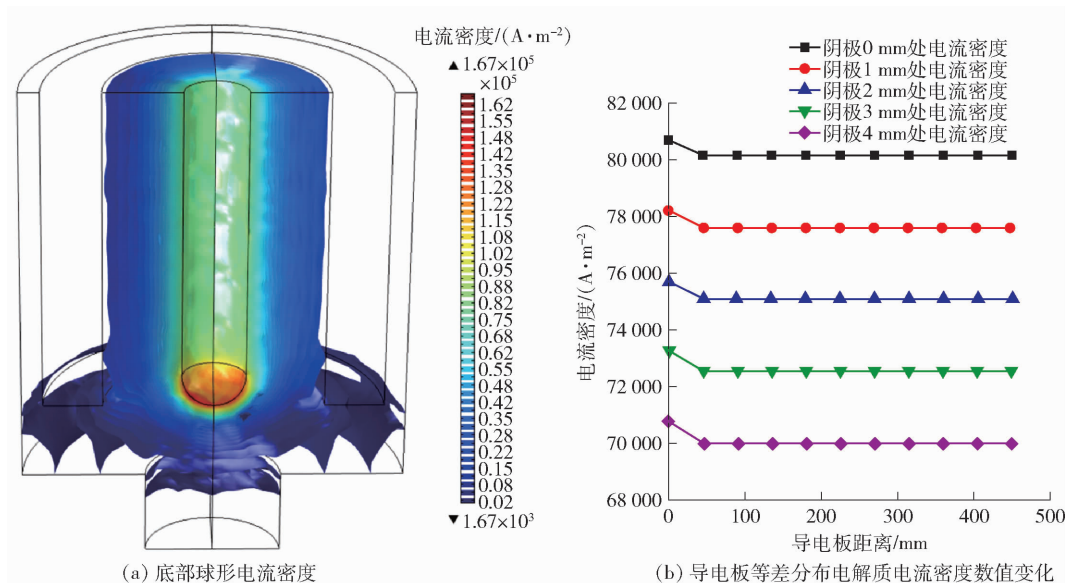


图8 底部球形电流密度分布

Fig. 8 Current density distribution at spherical bottom

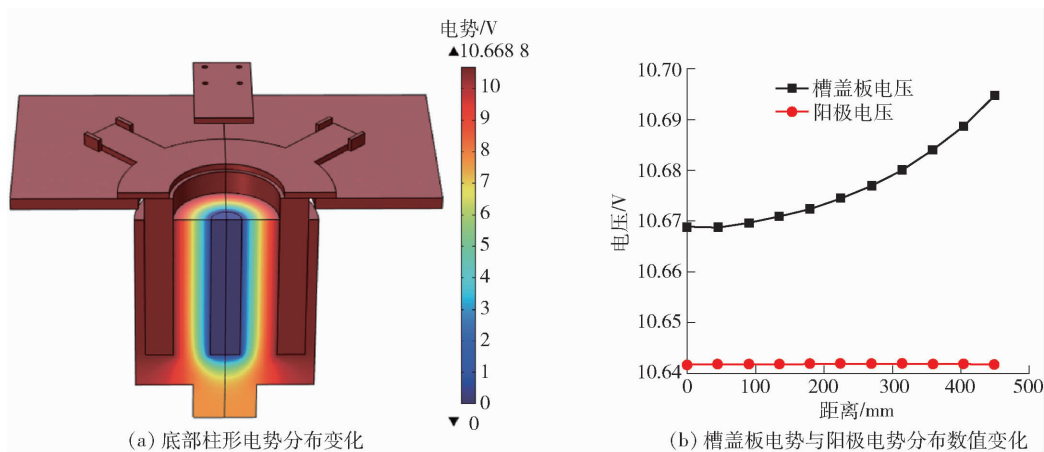


图9 底部柱形电势分布

Fig. 9 Potential distribution at column bottom

也随着增大;当导电板处于中间位置时,电解槽槽盖板与石墨阳极之间的电势差最小,相同反应条件下耗能也最低,仿真结果表明,导电板边位分布的设计不合理。

3.2 底部球形导电板等差分布槽体电势仿真分析

将阴极底部改为球状后,导电板分布与电势分布如图 10 所示,其数值变化规律与柱状阴极底部较为相似。当导电板处于中间位置时,电解槽整体电压与阳极电压都处于最大值,同时阳极电势也基本保持不变,且随着导电板偏离距离越来越大,电解槽槽盖板与阳极电势间的电压降逐渐增大,其值由

0 mm 处的 270 mV 增加到 450 mm 处的 529 mV。

而在电势大小的对比中,可以看出阴极底部球形结构的电势会整体高于底部柱形,这一现象的原因是由于电解槽阴极底部的结构改变所造成的。电解槽阴极柱状底部结构与阴极球状底部结构的电势线分布如图 10(b) 所示,由于柱形底部的结构易发生尖角效应,使得阴极底部的电势分布不均匀,进而使得尖角处更易发生电压聚集的现象,改为球底后电势线分布更均匀,这种结构将有利于延长阴极的使用寿命。同时,阴极底部改为球底后,在底部发生的电解反应的极间距也发生改变,进而使得电压也

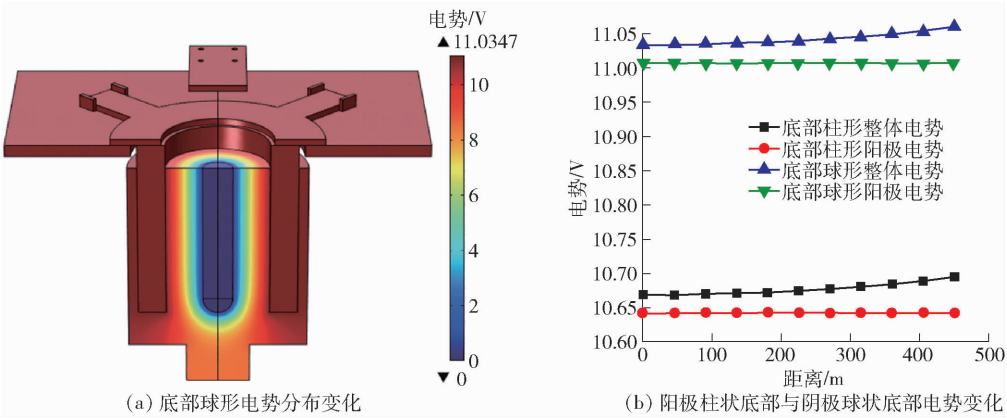


图 10 底部球形电势分布

Fig.10 Potential distribution at spherical bottom

有所提高,取 0 mm 位置处的电能消耗作为对比,电解槽阴极球底整体电势相较于阴极柱底整体电势提升了 365.9 mV,而该电解槽为 8 kA 型的结构,因此每昼夜能耗高出了 70.25 kW·h。

4 导电板位置对温度场分布的影响

4.1 底部柱形导电板等差分布槽内温度仿真分析

导电板不同分布位置下电解质温度变化如图 11 所示,在电解过程中仅改变导电板的分布位置对电解质内部的温度变化并无影响,由于电解质的反应主要集中在阴极钼棒表面位置,同时反应场所在电解槽的中偏上部分,故图中电解质内部温度的变化规律由电解槽槽口从上至下先升高后降低,最高电解温度达到 1 350.2 K,该高温区域集中在电解槽的中偏上部分,在液面及阳极石墨处电解槽的温度

较低,由于在液面处的槽口是敞开的,电解槽电解时一部分热量会通过与空气的热交换而损失掉,同时槽底部的金属接收区也由于不断向外界散热,同时还要接收金属单质,故该处温度相对最低。在石墨阳极外侧的电解质不参与反应,故该处的温度相较于反应部分的温度也更低。通过查阅相关文献可知,稀土电解槽在电解过程中的最适温度为 1 325.15 ~ 1 353.15 K,这一仿真结果与实际值较为接近。

4.2 底部球形导电板等差分布槽内温度仿真分析

当把阴极钼棒底部改为球状结构后电解液的温度如图 12 所示,电解液中的最高温度变化至 1 351.7 K。综合上所述,当把阴极钼棒更改为球底后,在通入相同的电流后,电解槽内的电流密度增大,阳极电势也有所增高,由于电解的基本原理是

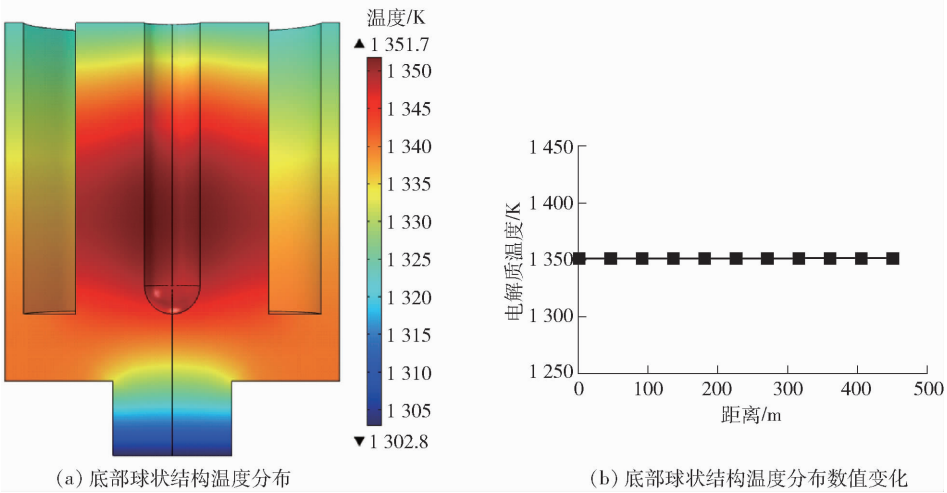


图 11 底部柱形温度分布

Fig.11 Temperature distribution at column bottom

非金属元素在阳极失去电子,形成气泡向空气中逸出或是与刚形成的金属单质继续反应形成新的氧化物,这一过程的反应速率依赖于电解时的温度,而电解反应时所产生的温度又依赖于焦耳热,表达为式(4)。

$$Q = I^2 R t \quad (4)$$

式中: Q 为电解槽工作时产生的焦耳热, J ; I 为电解过程中通入的电流大小, A ; R 为熔融状态下电解液的电阻, Ω ; t 电解槽工作的时间, s 。

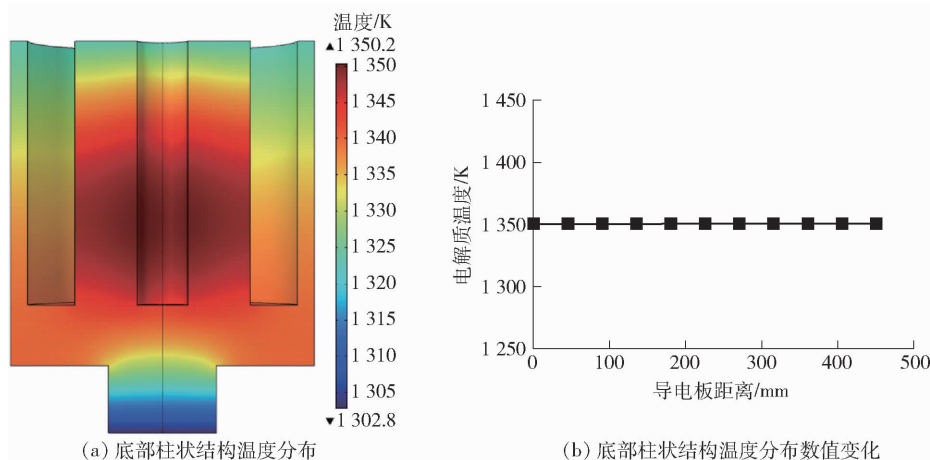


图 12 底部球形温度分布

Fig. 12 Temperature distribution at spherical bottom

同一导电板分布下,阴极球底相较于阴极柱底的结构电流密度会更高,因此焦耳热也会更多,故阴极球底电解槽电解反应中的最大温度会高于阴极柱底电解槽。

5 结论

本文采用 COMSOL 软件对不同电解槽槽盖板位置的导电板及改变阴极底部结构进行了物理场模拟,得到以下主要结论。

1) 综合 COMSOL 仿真结果来看,当导电板处于中间位置时电流密度最大,当阴极底部为柱状结构时,电解槽达到稳态后电流密度最大值为 $79\,200\text{ A/m}^2$,当阴极底部为球状结构时,电解槽达到稳态后电流密度最大值为 $80\,700\text{ A/m}^2$ 。当导电板位于其他位置时电流密度相对较小,电解效率相对较低。

2) 导电板的分布对电解槽整体的电势影响较大,当导电板处于边位时电解槽的整体电压达到最大,当阴极底部为柱状结构时,槽盖板与阳极间的电势差为 530 mV ,当阴极底部为球状结构时,槽盖板与阳极间的电势差为 529 mV 。当导电板处于中间位置时槽盖板与阳极间的电势差最小,两种结构均为 270 mV 。而电解槽阴极球底电解槽相较于阴极

柱底电解槽整体电势提升了 365.9 mV 。

3) 改变导电板的位置对电解槽的温度变化没有影响,因为导电板位置的改变对阳极电压几乎没有影响,同时对阴极附近的电流密度改变也很小,因此该结论符合实际。

4) 当把阴极底部改为球状后,在阴极附近的电流有所提高,在 0 mm 处的电流密度提高了 $1\,500\text{ A/m}^2$;同时阳极电压也有所提高,相较于阴极底部柱状结构,阴极底部球状结构的阳极电压提高了 366 mV ;阴极底部球状电解槽的电解温度相较于阴极底部柱状电解槽提高了 1.5 K ;将阴极底部改为球状能减小阴极棒的尖角效应,提高阴极铝棒的使用寿命。

[参考文献]

- [1] 龚姚腾, 林小程, 逢启寿, 等. 稀土电解槽阳极腐蚀消耗规律研究[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(4): 601–607.
GONG Yaoteng, LIN Xiaocheng, PANG Qishou, et al. Anode corrosion consumption pattern in rare earth electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, 39(4): 601–607.
- [2] 刘中兴, 冯猛, 伍永福, 等. 基于 COMSOL 软件的稀土电解过程数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 242–248.
LIU Zhongxing, FENG Meng, WU Yongfu, et al. Numerical simulation of rare earth electrolysis process based on COMSOL software[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(13): 242–248.

[3] 忻治霖. 稀土电解槽通电结构对阳极压降及槽内磁流场的影响研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2022.
XIN Zhilin. Research on the effect of electric structure on anode pressure drop and magnetic flow field in rare earth electrolysis cell [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.

[4] 张恒星, 吕晓军, 衷水平, 等. 稀土电解槽电场仿真与阴极结构优化[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(5): 667–676.
ZHANG Hengxing, LYU Xiaojun, ZHONG Shuiping, et al. Electric field numerical simulation and cathode structure optimization of rare earth electrolysis cell [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(5): 667–676.

[5] 逢启寿, 叶楠, 张浩, 等. 6 kA 稀土电解槽电极位置对电场影响的模拟分析[J]. 机械设计与制造, 2021, 360(2): 157–159, 163.
PANG Qishou, YE Nan, ZHANG Hao, et al. Simulation analysis of influence of electrode location on electric field in 6 kA rare earth electrolytic cell [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, 360(2): 157–159, 163.

[6] 吕晓军, 张恒星, 刘颂, 等. 稀土金属电解槽阳极消耗对电场的

影响[J]. 中国稀土学报, 2019, 37(4): 481–490.
LYU Xiaojun, ZHANG Hengxing, LIU Song, et al. Effect of anode consumption of rare earth electrolysis cell on electric field [J], Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2019, 37(4): 481–490.

[7] 廉华, 任永红, 郭海涛, 等. 大尺寸阴极稀土电解槽的电场模拟计算[J]. 稀土, 2021, 42(6): 100–113.
LIAN Hua, REN Yonghong, GUO Haitao, et al. 3D electric field simulation on rare earth electrolytic cell with large cathode [J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(6): 100–113.

[8] 闫晓明. 10 kA 新型稀土电解槽电场和流场的模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
YAN Xiaoming. Simulation of electric field and flow field for the new 10 kA rare earth electrolysis cell [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2012.

[9] BANNER Jane, AKTER Ayesha, WANG Ruofan, et al. Rare earth nickelate electrodes containing heavily doped ceria for reversible solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2021, 507: 230248.

Numerical simulation for optimization of one-side conductance
and cathode of 8 kA rare earth electrolytic cell

GONG Yaoteng, LYU Zhaodong, CHEN Zebin, PANG Qishou

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The physical field of rare earth electrolyzer is affected by different distribution positions of conductive plates. In order to explore the optimal location of the conductive plate distribution in the rare earth electrolytic cell, in this simulation, an arithmetic series distribution gradient is introduced for the distribution of the conductive plate, the simulation values of physical field in the groove under different distribution gradients are compared, then the optimal distribution model of conductive plates in rare earth electrolytic cell is obtained. During the simulation, it is observed that the sharp angle at the bottom of the cathode has a great influence on the experimental results, on the basis of other conditions remaining unchanged, the bottom of the cathode is optimized from a cylinder to a hemispherical shape, and the rationality of the new electrolytic cell structure is verified by comparing with the unoptimized structure. The simulation results show that as the conductive plate shifts from the side to the middle, the temperature and anode potential in the tank remain unchanged, the potential difference between the cover plate and the anode gradually decreases, and the current density in the tank slowly increases. When the bottom of the cathode molybdenum rod is changed from a cylindrical structure to a spherical structure, the potential distribution in the tank is more uniform, and the current density is also increased compared with the previous structure. The optimized structure can improve the local overheating problem and increase the electrolytic efficiency.

Key words: rare-earth electrolysis cell; one side conductive plate; power up location; physical field simulation; structural optimization; local overheating; electrolysis efficiency