

引用格式:龚姚腾,吕招东,陈泽斌,等. 通电方式对稀土熔盐电解影响的数值模拟及分析[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(1): 112-118.

GONG Yaoteng, LYU Zhaodong, CHEN Zebin, et al. Numerical simulation and analysis of influence of electric mode on electrolysis of rare earth molten salt[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(1): 112-118.

# 通电方式对稀土熔盐电解影响的数值模拟及分析

龚姚腾, 吕招东, 陈泽斌, 逢启寿, 刘 胜, 万福兴

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

[摘要] 在稀土熔盐的电解过程中,不同的通电方式对槽内各物理场影响也不同,进而会对电解槽的电解效率产生一定的影响。本文以某企业8 kA 稀土电解槽为原型,通过 Comsol 的热电耦合模块研究通电铜板单侧与多侧分布的通电方式及通电铜板的不同位置分布下的电解槽电解时内部各物理场的变化情况,通过对比电流密度、电势差、电解温度的大小寻找最合适的通电方式。结果表明:只考虑电解效率时,导电板四侧中位通电最优分布方式,此时电解槽内电流密度最大,电能损耗最低,电解效果最好。若考虑制造成本以及可操作性,导电板单侧中位分布是最优解,这种设计的电解槽电解效率较高,同时也留出较大操作空间。其余几种分布均存在弊端,需要进一步完善。该研究旨在为稀土电解槽的结构优化提供参考意见。

[关键词] 稀土; 电解槽; 通电方式; 结构优化; 数值模拟; 电流密度; 电势差; 电解温度

[中图分类号] TF845; TF803 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)01-0112-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.01.014

国内稀土电解槽现如今在外观、结构研究方面已较为成熟<sup>[1]</sup>。例如,文献[2]对电解槽导电板单侧分布梯度进行了分析,得到了单侧导电板结构电解槽的最优分布;文献[3]对电解槽保温层厚度进行了研究,探究了保温层结构对电解槽内各物理场的影响;文献[4]对电解槽阴阳极极间距进行仿真模拟,得到了千安级电解槽的最优极间距。国外使用较为广泛的电解槽是外集群式电极垂直布置的稀土电解槽,这是一种大型的电解槽,结构能耗低,电解效率高,但是成本较高<sup>[5]</sup>。前人还未对槽盖板进行过相关的研究,电流是通过槽盖板的导电模块流入阳极,最后经由电解质熔盐向阴极接地处流出,本次试验就电解槽盖板通电方式对电解效率的影响进行了相关仿真分析。通过改变某企业8 kA 电解槽

盖板的导电板数量和位置分布,模拟计算出不同情况下电解槽对应的电流密度、电势分布以及温度表现,并结合实际生产过程优化通电分布方式,为千安级电流的电解槽结构优化提供理论依据。

## 1 8 kA 稀土电解槽通电方式模型的建立

### 1.1 8 kA 稀土电解槽几何结构的建立

模拟设计某企业8 kA 稀土电解槽各导电板的分布状态如图1所示。通过仿真分析对比不同通电方式下电解槽内的各物理场参数,选择最优通电方式。

### 1.2 8 kA 稀土电解槽模型假设

1) 假设电解槽为绝缘体,同时不发生漏电现象;电流通过槽盖板导电板由阳极流入阴极,同时阴极棒处设置1个接地点。

2) 槽内阴阳极及坩埚为各点电势相等的等势体。

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

[收稿日期] 2023-09-05

[第一作者] 龚姚腾(1964—),男,浙江人,博士研究生,教授,主要研究方向为稀土冶金设备。

[通信作者] 吕招东(1998—),男,江西人,研究生,主要研究方向为稀土冶金设备。

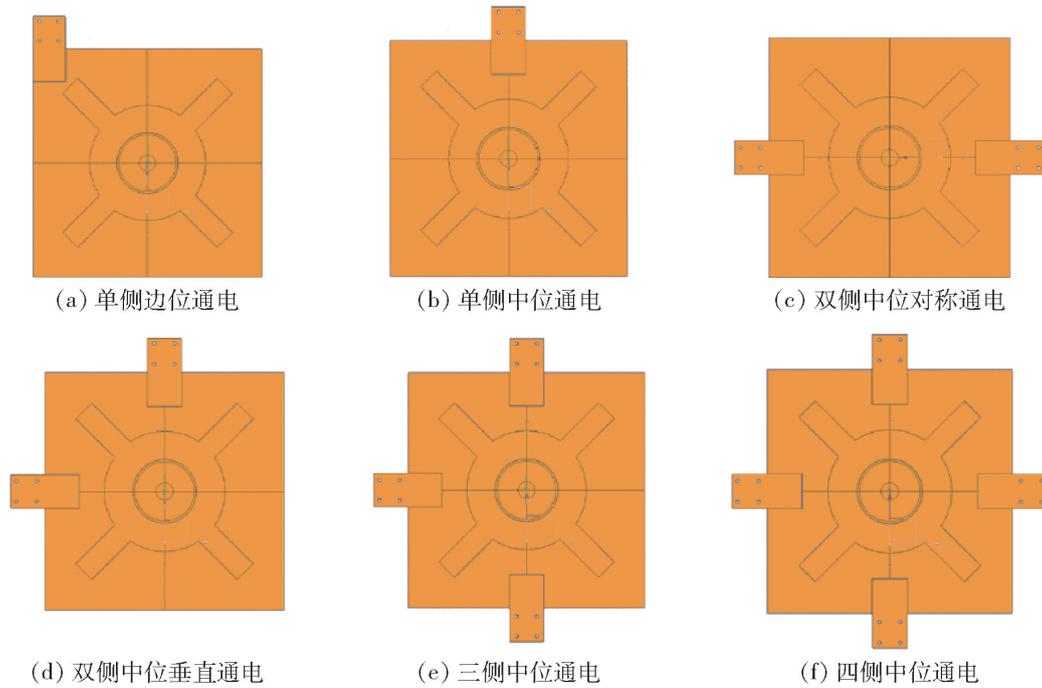


图1 6种不同分布方式

Fig.1 Six different distribution modes

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,且研究在稳态情况下进行<sup>[6]</sup>。

### 1.3 电热耦合边界条件的设置

1) 由于阳极石墨为非等势体,以电压为边界条件不符合实际电解过程,故选择以电流为边界条件,阳极处通入电流共为 8 000 A。

2) 由于阴极导电率高,整个阴极几乎为等势体,故在阴极处设置以电压为边界条件,大小为 0 V。

3) 电解槽通入电流为直流电。

4) 单侧导电板流入电流为 8 000 A, 双侧导电板流入电流分别为 4 000 A, 三侧导电板流入电流分别为 2 666.67 A, 四侧导电板流入电流分别为 2 000 A。

### 1.4 温度场控制方程仿真

热量传递有热传导、热对流、热辐射 3 种方式,温度高于绝对零度的物体都存在着热传导,要得到电解槽内的温度分布,就需要得到电解质内的温度如何随着位置变化而变化,根据傅里叶热场定律可以求出任何点的传导型热流密度。采用能量守恒定义一个电解质微元控制体,其常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程见式(1)<sup>[7]</sup>。通过该公式即可以得到电解质在三维坐标系下的各温度分布。

$$a \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\varphi}{\rho C} = 0 \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为单位时间内单位体积中热源的生成热,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $\rho$  为微元体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C$  为微元体的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $a = \lambda/(\rho C)$  为扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 其中  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为电解槽内温度,  $\text{K}$ ;  $x, y, z$  为电解槽内温度场三维空间坐标。

## 2 8 kA 稀土电解槽不同通电方式电流密度仿真模拟分析

结合各文献及实际工业参数<sup>[8]</sup>, 分别对单侧、双侧垂直、双侧平行、三侧、四侧通电方式进行数值模拟,通过 Comsol 的电场仿真模拟得到不同通电方式下各电流密度等值面参数,如图 2 所示。由于电解反应主要是集中在阴极的外表面,故阴极外表面的电流密度可视为电解槽有效电流密度,且随着导电板数量的增加,电解槽中阴极外表面的电流密度逐渐降低。如图 2(b) 所示,在单侧中位通电时有效电流密度最小,其值为  $76\,188 \text{ A}/\text{m}^2$ ;如图 2(f) 所示,当通电板到达 4 块时,此时有效电流密度最大,其值为  $78\,530 \text{ A}/\text{m}^2$ 。随着通电板数量的增加,电流密度也趋于稳定。

### 2.1 单侧边位通电与单侧中位通电数值仿真与分析

考虑到在单侧通电时,导电板偏置不同位置,模拟结果也不同<sup>[9]</sup>,本次实验对导电板处于中位及处于边位 2 种情况进行数值模拟,如图 3 所示。其中,图 3(a) 表示对电解槽电流密度所取测量点的位置

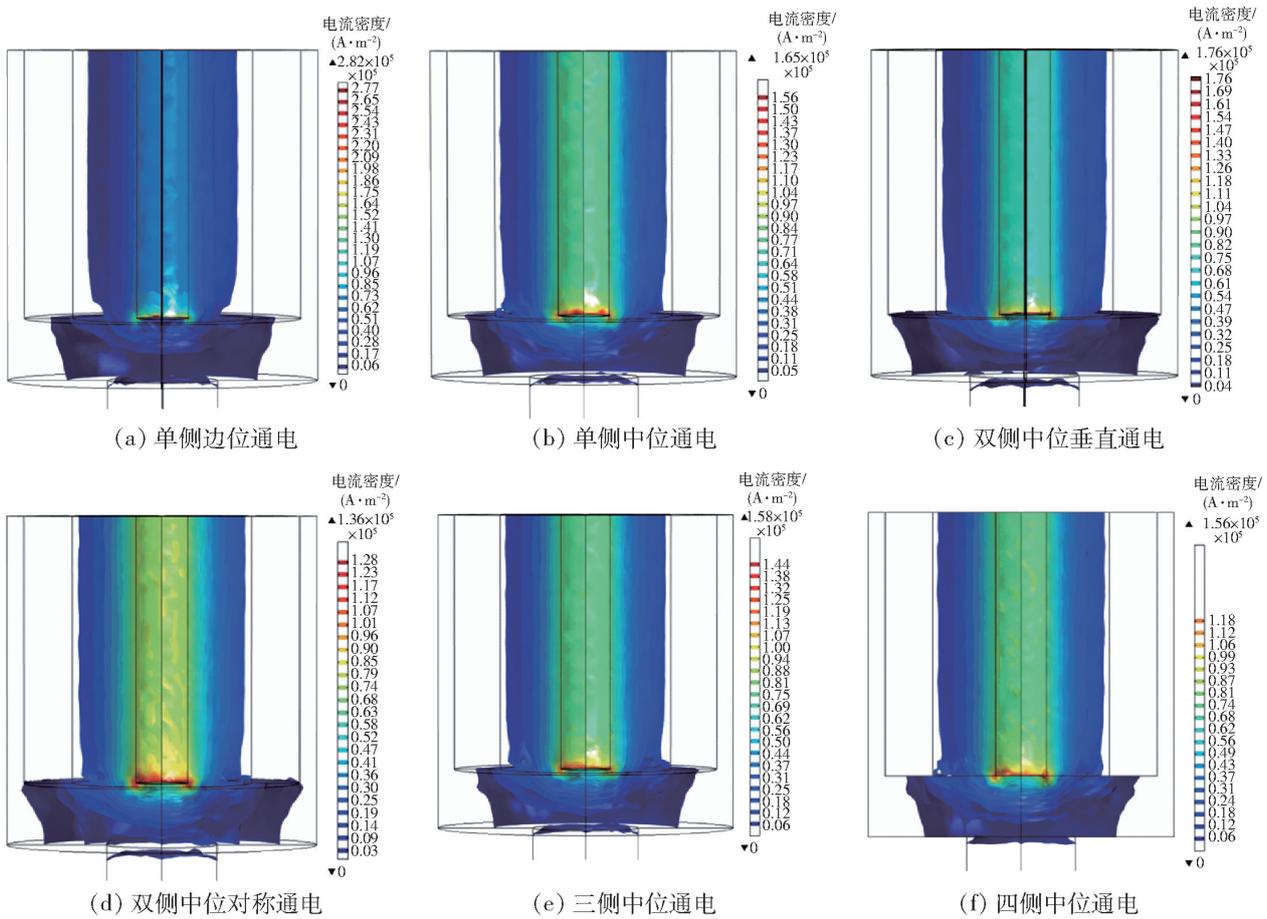


图2 不同通电方式时的电流密度

Fig.2 Current density at different power-on modes

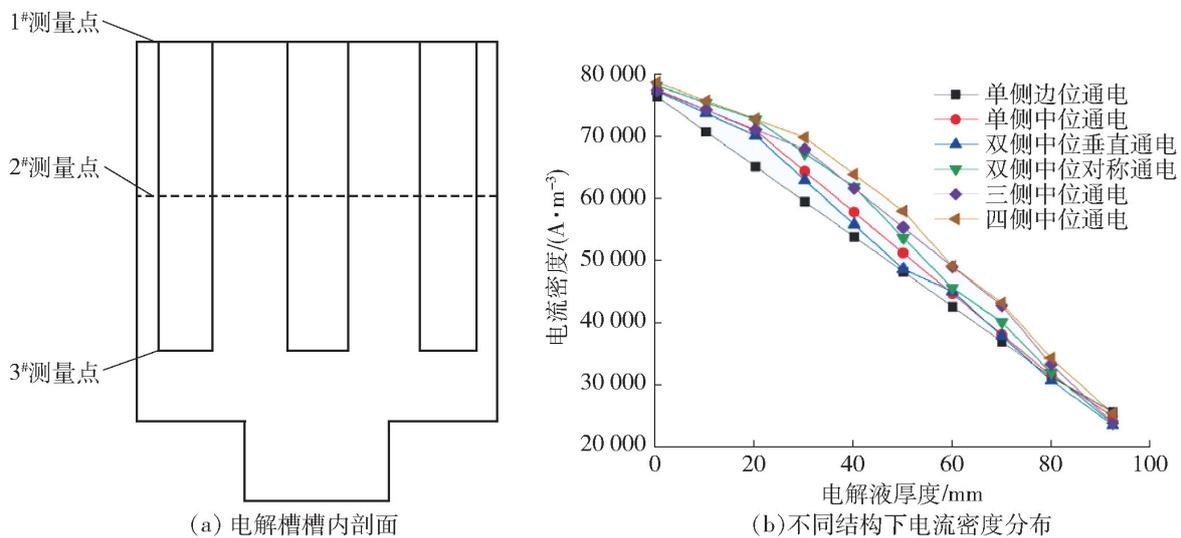


图3 槽内横向不同虚线位置取点的电流密度变化曲线

Fig.3 Variation curves of current density at different positions of horizontal dotted lines in the slot

选择,由于1号及3号测量点分别位于电解质的液面以及阴极底部位置,通过仿真结果可知在该位置处稀土金属离子几乎不发生还原反应。由于电解反应主要发生在槽内的中部位置,因此在2号测量点的测量值更能反映实际电流密度的变化规律。由图3(b)可知,在不考虑尖角处的电流密度影响下,当

导电板处于中位时,该结构电解槽的有效电流密度最大值为77 340 A/m<sup>2</sup>,最小值为24 608 A/m<sup>2</sup>;当导电板处于边位时,该结构电解槽的有效电流密度最大值为76 188 A/m<sup>2</sup>,最小值为25 397 A/m<sup>2</sup>。由于电流在通过导电板后流经槽盖板并最终流向电解液,对比单侧中位通电,单侧边位设计使得移动路径

最大,从而导致阻值也相应增大,使得电能在流动的过程中损耗也将更多,最终改变整体电流密度。由仿真可知,导电板中位分布时阴极的电流密度比导电板侧位分布时的电流密度要高出  $1\ 152\ \text{A}/\text{m}^2$ ,因此,在导电板的数量为1块时,导电板中位分布的电解效率比导电板侧位分布时要高。

## 2.2 双侧中位垂直通电与双侧中位对称通电数值仿真与分析

当导电板的数量为2块时,导电板有中位对称和中位垂直2种结构分布设计,不考虑尖角处的电流密度影响。当导电板为垂直结构分布时,其电解液部分电流密度最大值为  $77\ 110\ \text{A}/\text{m}^2$ ,最小值为  $23\ 310\ \text{A}/\text{m}^2$ ;当导电板的分布为对称时,其电解液部分电流密度最大值为  $77\ 960\ \text{A}/\text{m}^2$ ,最小值为  $23\ 560\ \text{A}/\text{m}^2$ 。对双侧分布的2种通电结构分析可以得到,2种结构的有效电流较为接近,且整体电压以及电解槽槽盖板电压降数值差距也较小,由图3(b)可知对称分布结构会优于垂直分布结构,这是因为双侧导电板对称分布时其电流密度也更均匀,电解液处反应效率也更高。对比2种通电方式的阴极附近处的电流密度大小,对称式分布的电流密度要比垂直式分布时的电流密度高出  $850\ \text{A}/\text{m}^2$ ,同时由于垂直式的设计使得导电板内的靠近导电板处的电流密度偏大,远离导电板处的电流密度偏小,这种设计将会影响稀土电解槽的电解效率。

## 2.3 三侧中位对称通电数值仿真与分析

当导电板的数量为3块时,阴极附近电流密度最大值为  $77\ 200\ \text{A}/\text{m}^2$ ,最小值为  $23\ 630\ \text{A}/\text{m}^2$ ,该设计与双侧中位垂直分布类似,靠近导电板处的电流密度偏大,远离导电板处的电流密度偏小。由图3(b)可知,三侧导电板在阴极附近的电流密度较单侧中位略低,由于该结构为非对称式设计,三侧导电板同时通入大电流后使得电解槽内部的电流无法保持恒定,因此电解槽内反应速率无法保持一致,在电解时会使得电解槽内部在不同位置处的反应速率不等,该设计不利于反应的进行。

## 2.4 四侧中位对称通电数值仿真与分析

当通电板的数量达到4块时,阴极附近电流密度最大值为  $78\ 530\ \text{A}/\text{m}^2$ ,最小值为  $25\ 190\ \text{A}/\text{m}^2$ ,由仿真可知,该设计相对于传统的单侧中位分布,电解槽内的电流密度有所增加。由图3(b)可知,四侧导电板设计在阴极外表面的电流密度达到最高,这是

由于导电板相较于阴极为对称式设计,电流由阳极流经电解质最终流向阴极,恒定的电流能使得电解反应更好的进行,由于四侧的电流大小均相等,在靠近阴极附近的稀土金属被电解出来后,其内部的电解质在反应速率上也能保持一致,由该仿真结果可知,在电流密度这项参数上,四侧中位对称分布是最优的方案。

## 3 8 kA 稀土电解槽不同通电方式温度仿真模拟分析

通过 Comsol 的热场仿真模拟得到不同通电方式下槽内热场分布,结果如图4所示。结果表明,改变电解槽的通电方式,不同导电板分布的电解槽内部的温度并没有发生较大变化。根据温度分布的云图可知,电解槽内温度由电解质从上至下为先增加后减少,且温度最高区域在  $1\ 348\ \text{K}$  附近,在实际生产过程中,现场工人测得炉口温度能达到  $1\ 353\ \text{K}$ ,该仿真结果与实际相符<sup>[10]</sup>,故该温度场仿真有较高准确性。由该仿真结果可知,只改变电解槽的通电方式是不会影响槽内的温度变化。

## 4 8 kA 稀土电解槽不同通电方式电势分布仿真模拟分析

通过 Comsol 的电场仿真模拟得到不同通电方式下槽内整体电势分布,结果如图5所示。结果表明,电压最大处发生在单侧边位的通电方式上,为  $10.17\ \text{V}$ 。由于导电板处于电解槽槽盖板的边缘位置,电流流经槽盖板的损耗相比其他通电方式会更大,由于电解槽通入电流为直流电,电解槽槽盖电压计算公式见式(2)<sup>[9]</sup>。

$$U = IR = \frac{IK}{\gamma} \quad (2)$$

式中: $K$ 为电阻常数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $\gamma$ 为槽盖板电导率,  $\text{S}/\text{m}$ 。

由于在侧边分布导电板,电流由槽盖板流经阳极内的路径最长,因此其电阻常数也较高。由于在该次仿真中电解槽内部温度均相同,因此电解槽底部熔融状态下电解质的各项物理参数不会随着导电板的不同分布而变化,而导电板单侧边位的分布方式使得电压在槽盖板处有了更大的消耗,在仿真实验中表现为更大的压降,因此电解槽稳定工作时整体所需的电压也将更大,由图5(e)、(f)可知整体电

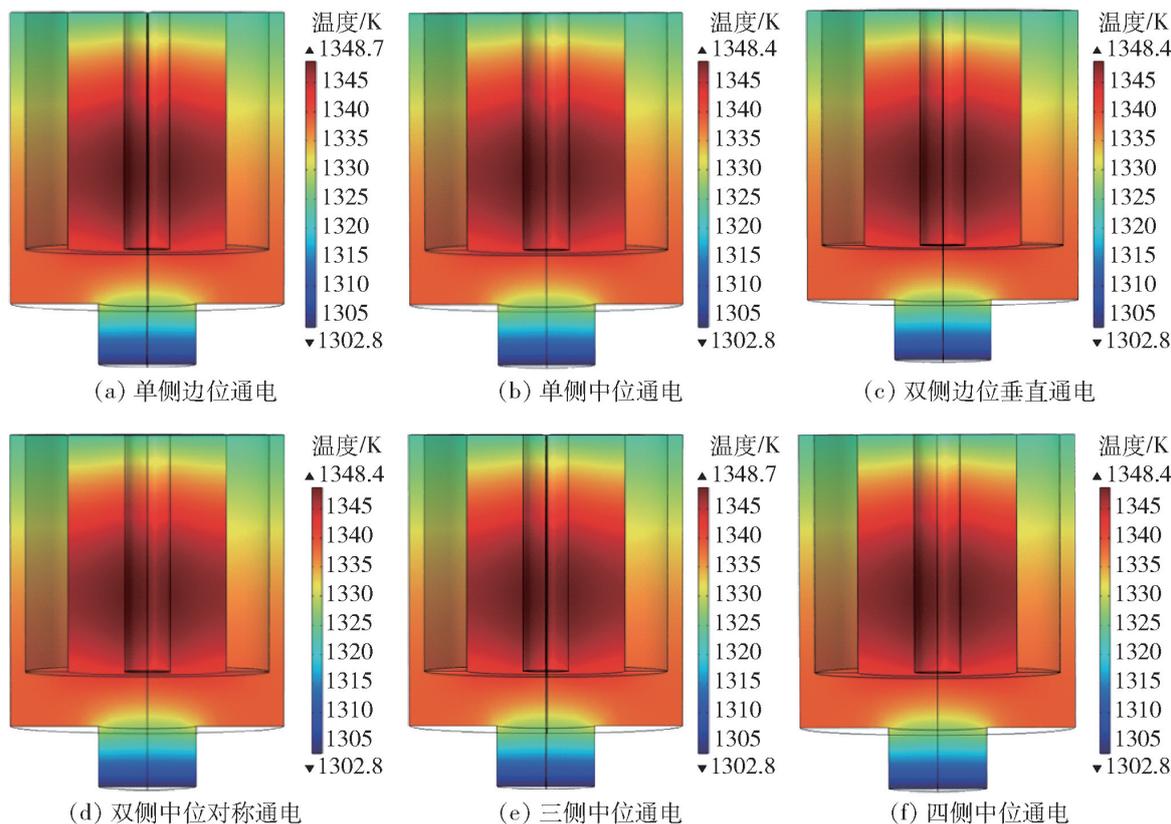


图4 槽内温度分布

Fig.4 Temperature distribution in the tank

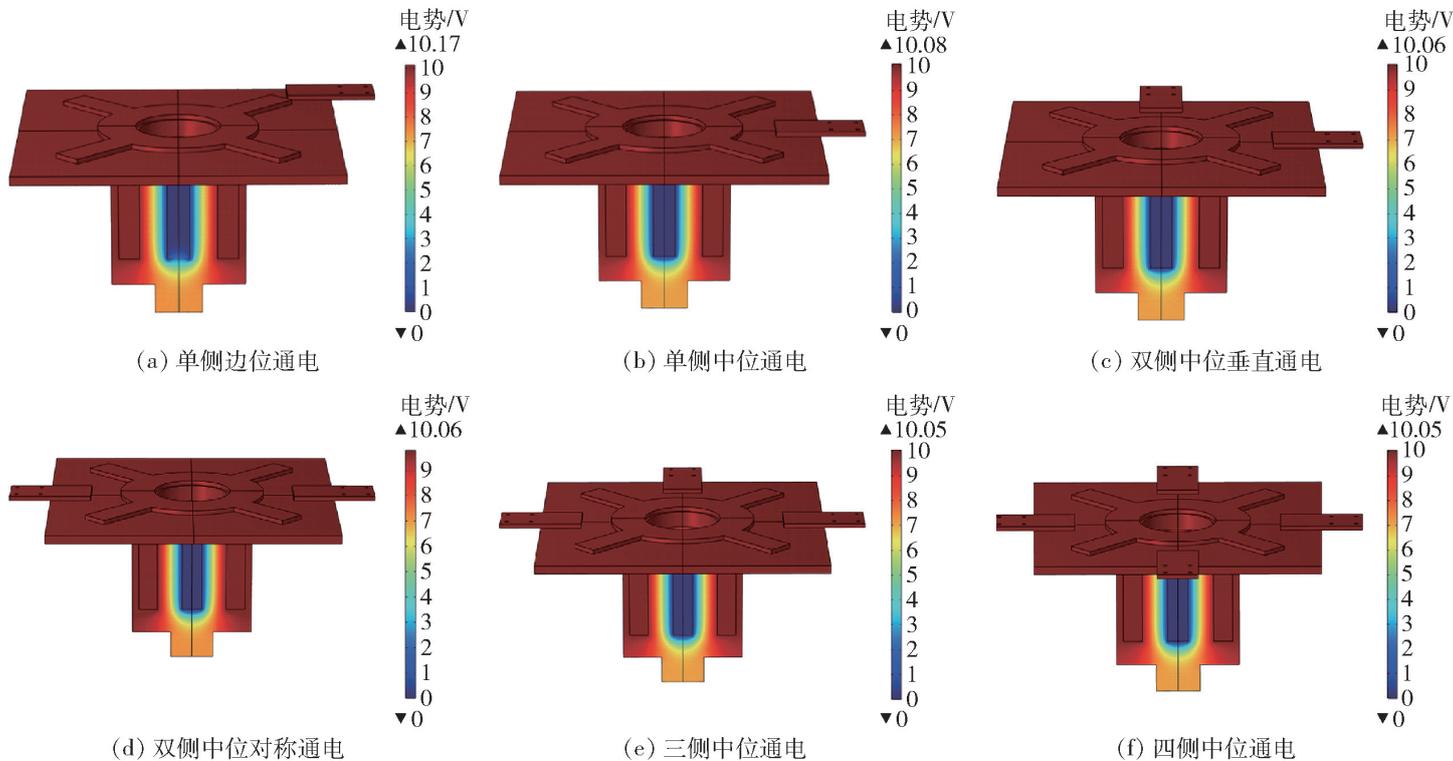


图5 电解槽整体电势分布

Fig.5 Overall potential distribution of electrolyzer

压最小的通电方式为三侧中位及四侧中位通电,这是由于导电板的数量增加,流入电解质内部的电流分布更均匀,在路径上消耗的电压更少,因此该结构

使得电解槽稳定工作时的整体电压更小,更利于电解反应的进行。

通过 Comsol 的电场仿真模拟得到不同通电

方式下槽内电解质部分的电势分布,结果如图6所示。数据表明,单侧边位结构下的电解槽电解质部分的最大电势为10.11 V,而此时电解槽整体电势为10.17 V,因此导电板单侧边位设计的电解槽其槽盖板与阳极间的压降值为60 mV;单侧中位的槽盖板与阳极间的压降值为30 mV;双

侧中位的2种分布槽盖板与阳极的压降值为20 mV;三侧及四侧分布的槽盖板与阳极间的压降值为10 mV。由此可见,随着导电板的增多,电解槽槽盖板至电解液处的电压降也逐渐减少,该措施有利于降低反应时的电阻热,使得电解过程能量损耗降至最低。

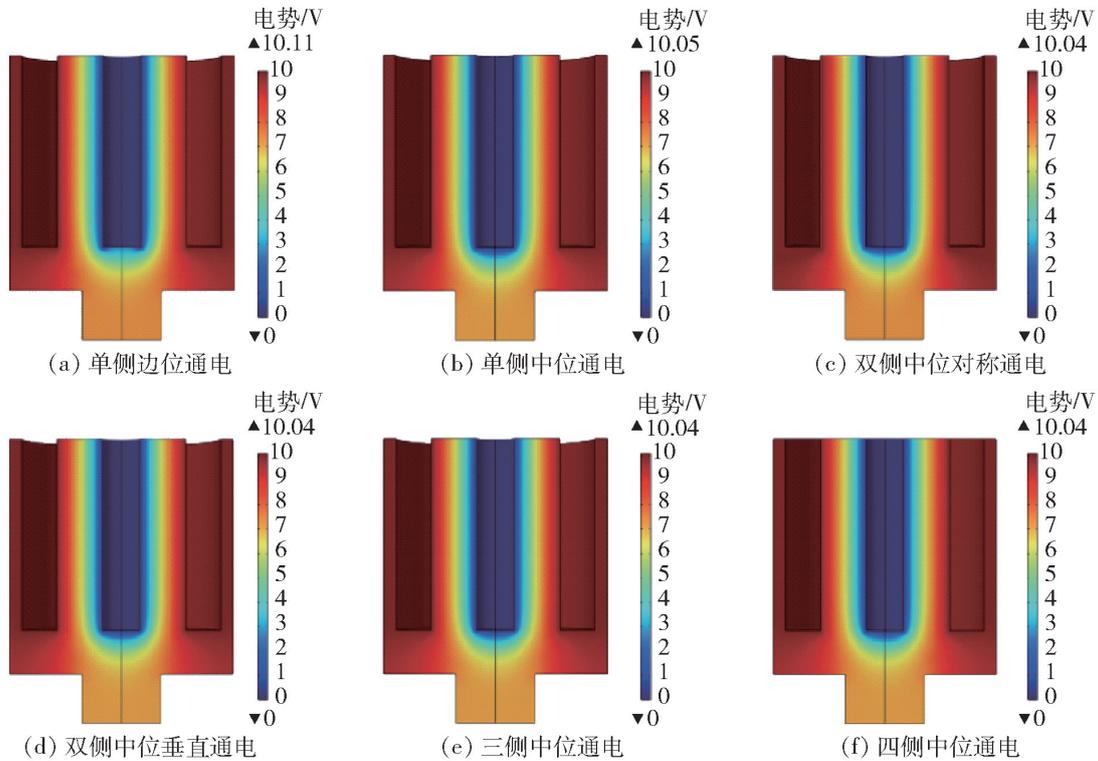


图6 电解质电势分布

Fig. 6 Electrolyte potential distribution

## 5 结论

影响电解槽的电解效率的因素主要是电流密度、温度以及电势分布,故而可以通过分析这3个物理场来判断哪种方式的电解效率更高。

1) 当导电板为单侧且位于侧边时,电解槽的电流密度最小,同时整体电压降最大。如果以这种方式工作,相比于其他方式,不仅电解效率更低,同时耗能最大,故侧位通电一般不予考虑。

2) 当导电板为单侧且位于中位时,这是目前使用最为广泛的一种通电方式,相比于多侧位通电,其电流密度值最小,且电流密度的分布也不均匀,该结构能广泛使用的原因是其构造成本低,同时较少的导电板数量也为工人的操作提供便利。

3) 对双侧分布2种通电方式进行分析,2种方式有效电流较为接近,且整体电压以及电解槽槽盖板电压降数值差距也较小,但结合该仿真结果以及

实际生产情况可知,双侧垂直分布这种设计会导致电解槽内的电解反应不充分,不利于反应的进行。

4) 对三侧及以上通电结构分析可以得到,在电解效率上,四侧中位分布的结构会优于三侧中位分布,这是因为四侧分布的电解槽不仅电流密度更大,而且电流密度分布也更均匀,同时也有更优秀的能耗比,这种结构完美解决了三侧导电板电解槽内部电流不均衡的问题,为电解反应提供了更合适的环境。

### [参考文献]

- [1] 冀燕子,肖发新,孙树臣,等. 大电流稀土熔盐电解槽槽型研究进展[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(1): 38-45.  
JI Yanzi, XIAO Faxin, SUN Shuchen, et al. Research progress on model cell of high current rare earth reduction cell [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2022, 40(1): 38-45.
- [2] 逢启寿,刘胜,万福兴. 不同保温层厚度下稀土电解槽电热场分析[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(1): 68-74.  
PANG Qishou, LIU Shen, WAN Fuxing. Electrothermal field analysis of rare earth electrolytic cell under different thickness of

- insulation layer[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2023, 52(1): 68-74.
- [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] 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 Electrode Location on Electric Field in 6kA Rare Earth Electrolytic Cell [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021, 360(2): 157-159, 163.
- [5] 王海辉, 逢启寿, 郜飘飘. 稀土电解槽温度场的模拟分析与研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2017, 45(4): 12-15.  
WANG Haihui, PANG Qishou, GAO Piaopiao. Simulation Analysis and Research on Temperature Field of Rare Earth electrolyzer [J]. *Rare Metals and Cemented Carbide*, 2017, 45(4): 12-15.
- [6] 文棠根, 张斌, 张家微等. 6 kA 稀土钽电解槽多相流动数值模拟[J]. *有色金属科学与工程*, 2023, 14(5): 706-715.  
WEN Tanggen, ZHANG Bin, ZHANG Jiawei, et al. Numerical simulation on three-dimensional multiphase flow in rare earth electrolytic cell[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2023, 14(5): 706-715.
- [7] 逢启寿, 忻治霖, 林小程, 等. 稀土电解槽电化学三维时变流场数值模拟[J]. *有色金属科学与工程*, 2022, 13(3): 152-158.  
PANG Qishou, XIN Zhilin, LIN Xiaocheng, et al. Numerical simulation of the electrochemical 3D time-varying flow field in a rare earth electrolytic cell [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2022, 13(3): 152-158.
- [8] 张恒星, 吕晓军, 袁水平, 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, LU Xiaojun, ZHONG Shuiping, et al. Electric field numerical and cathode structure optimization of rare earth electrolysis cell [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2020, 38(5): 667-676.
- [9] 张胜全, 王准, 高永涛, 等. 钽电解氟化物体系熔化温度及高温物相的研究[J]. *稀土*, 2018, 39(2): 66-73.  
ZHANG Shengquan, WANG Zhun, GAO Yongtao, et al. Neodymium fluoride electrolysis system melting temperature and high temperature phase of the study [J]. *Journal of rare earths*, 2018, 33(2): 66-73.
- [10] 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 [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2021, 39(4): 601-607.

## Numerical simulation and analysis of influence of electric mode on electrolysis of rare earth molten salt

GONG Yaoteng, LYU Zhaodong, CHEN Zebin, PANG Qishou, LIU Sheng, WAN Fuxing

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

**Abstract:** In the electrolytic process of rare earth molten salt, different electrification modes have different effects on the physical fields in the cell, which will also have a certain impact on the electrolytic efficiency of the cell. In this paper, the 8 kA rare earth electrolytic cell of an enterprise is taken as the prototype, through the thermoelectric coupling module of Comsol, the single-side and multi-side power-on mode and the change of the internal parameters of electrolytic cell under the distribution of different positions of the electrified copper plate are studied to find the most suitable power-on mode. The purpose of this study is to provide reference for structure optimization of rare earth electrolytic cell. The results show that: when only the electrolytic efficiency is considered, the median distribution of the four sides of the conductive plate is the optimal structure, and the current density in the electrolytic cell is the highest, the electric energy loss is the lowest, and the electrolytic effect is the best. Considering the manufacturing cost and operability, the single-side median distribution of the conductive plate is the optimal solution. The electrolytic cell with this design has higher electrolytic efficiency and leaves more room for operation. The other distributions have drawbacks and need to be further better.

**Key words:** rare earth; electrolytic cell; mode of power supply; optimization of structure; numerical simulation; current density; potential difference; electrolysis temperature