

8 kA 稀土电解槽电磁搅拌数值模拟

逢启寿, 忻治霖, 林小程, 龚姚腾, 王郅阳

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

[摘 要] 稀土电解槽内流场速度不稳定, 阳极外侧流动过于缓慢, 不利于电解反应的充分进行和电解效率的提高。现有研究表明可通过外加磁场对电解质进行搅拌以控制稀土电解槽内的流动情况。对 8 kA 稀土电解槽进行电磁搅拌模拟, 设计在电解质外侧和底部安装不同安匝数铜线圈, 然后利用 Ansoft Maxwell 以及 Ansys Fluent 软件对电解质部分生成的磁场以及电磁搅拌下的流场进行有限元模拟分析, 得到以下主要结论: 侧面下方增设线圈在一定安匝数下无法产生电磁搅拌力; 侧面上方增设线圈为正弦波, 所需线圈安匝数小于底部, 而且流场稳定性也更好; 底部增设线圈所需安匝数远大于侧面上方, 且相比侧面上方位置电磁搅拌的槽内流动情况更为复杂混乱。

[关键词] 电解槽; 电磁搅拌; 磁感应强度; 感生电磁力; 线圈安匝数; 正弦电流; 数值模拟

[中图分类号] TF845.6 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)02-0030-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.02.005

稀土电解槽内流场速度不稳定, 阳极外侧流动过于缓慢, 不利于电解反应的充分进行和电解效率的提高^[1-2]。电磁搅拌以感生电流与磁场相互作用产生电磁力进行无接触搅拌, 能通过改变电流的大小改变电磁搅拌力从而达到对槽内流速的控制^[3-5]。电磁搅拌可促进稀土电解槽流动死区的流动, 使电解反应更加充分, 同时还能避免阴极析出的稀土金属在阴极表面吸附, 使其快速沉降于金属收集器中, 有效提高电解效率。

1986 年, 利夫博尔德贺利氏公司成功研制真空感应炉电磁搅拌设备, 大幅缩短了高级钢和合金钢的冶炼时间, 提高了生产效率^[6]。目前电磁搅拌技术主要应用于铝熔炼炉与各种连铸生产等设备^[7-8]。在冶金工业中, 生产实践证实电磁搅拌能提高熔体的纯度, 使熔体中的成分分布均匀, 特别是对需要严格控制析出金属纯度的冶金工艺提供了可靠技术保障^[9]。

稀土电解槽的工作温度高, 实际场内磁场强度

以及流速测量难度较大。对其仿真模拟可以直观地看到场内磁场分布和流动情况, 且降低稀土电解槽电磁搅拌装置的开发成本。前人关于电磁力对流体的作用做了如下研究: KIM 等^[11]对电磁力作用下圆柱周围的流动进行了仿真模拟, 结果表明在电磁力作用下流体绕圆柱流动时分离点向后移动; 周本谋^[12]等对不同电磁力分布下的圆柱尾流问题进行了仿真模拟研究, 结果表明电磁力可以控制流通绕流的形态; 陈宇昕^[13]对 10 kA 底部阴极稀土电解槽电-磁-流多物理场进行了耦合仿真研究。目前稀土电解槽的研究主要集中在槽内单独的电磁场, 对外加磁场进行搅拌的研究甚少, 但已有研究结果表明电磁力可以控制流体的流动, 可通过外加磁场对稀土电解槽进行搅拌来改善槽内电解质流动情况。

文献[1]研究结果表明电解槽电解过程中形成的最大流速为 1.5 m/s, 只有电磁搅拌的速度大于槽内生成的最大速度 1.5 m/s, 槽内流场才能以电磁搅拌为主导, 进而可控。本文对 8 kA 稀土电解槽进行电磁搅拌模拟, 设计在电解质外侧和底部安装不同安匝数铜线圈, 然后利用 Ansoft Maxwell 以及 Ansys Fluent 软件对电解质部分生成的磁场以及电磁搅拌下的流场进行有限元模拟分析, 考察安装位置与安匝数对电磁搅拌效果的影响, 为后续的稀土电解槽进一步优化提供参考。

[收稿日期] 2021-10-08 [修订日期] 2021-11-10

[录用日期] 2021-11-15 [出版日期] 2022-04-28

[作者简介] 逢启寿(1963—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 教授, 主要从事机械制造与稀土冶金设备设计制造。

[引用格式] 逢启寿, 忻治霖, 林小程, 等. 8 kA 稀土电解槽电磁搅拌数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(2):30-38.

1 模型的建立

1.1 建立仿真模型

图 1 为 8 kA 稀土电解槽的结构示意图,以电解质部分作为研究对象进行仿真模拟,模型结构如图 2 所示。仿真试验设计在电解槽外侧上方、外侧下方以及底部安装铜线圈进行模拟,仿真试验通入 1 Hz 的正弦波交流电。仿真软件中需要设置的公式见式(1)~(6)^[14-16]。

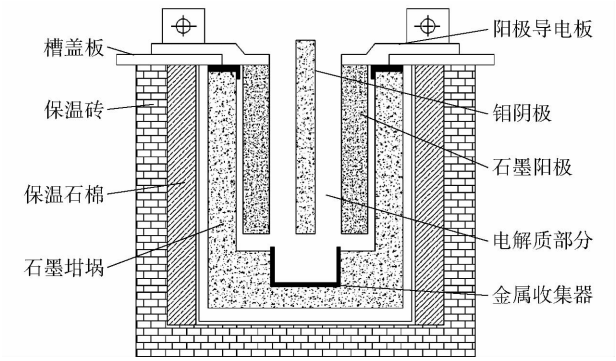


图 1 8 kA 稀土电解槽示意

Fig. 1 Schematic diagram of 8 kA rare earth electrolytic cell

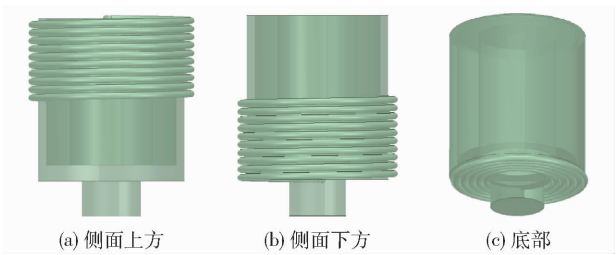


图 2 8 kA 稀土电解槽外加线圈位置

Fig. 2 Location of 8 kA rare earth electrolytic cell with external coil

正弦交流电表达式:

$$I = A_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

法拉第电磁感应定律:

$$\nabla \cdot E = \frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

安培定律:

$$\nabla \times H = J \tag{3}$$

高斯定律:

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{4}$$

$$\nabla \times B = \mu \left(J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \tag{5}$$

磁场强度本构关系:

$$B = \mu H \tag{6}$$

式(1)中, ω 为电流角频率, $A_{\max}$ 为电流峰值, I 为电流大小, t 为时间周期, φ 为初始相位。式(2)~(6)中, E 为电场强度, B 为磁感应强度, J 为电流密度, t 为时间, ε 为电解质的介电常数, μ 为电解质的磁导率, H 为磁场, $\nabla \cdot$ 为散度, $\nabla \times$ 为旋度。

1.2 模型假设与边界条件确定

1.2.1 模型假设

电解槽内物质及物理场众多,在考虑多因素情况下进行仿真计算太过繁杂,不利于计算收敛,对此进行如下模型假设。

- 1)将槽内熔盐电解质看作唯一存在的单一液体。
- 2)外加线圈产生的磁场在传递过程中无损耗影响。
- 3)忽略外加线圈与熔盐电解质间的壁面厚度。

1.2.2 边界条件的设置

- 1)外加线圈为铜线圈,通入电流为正弦波交流电,线圈安匝数以 1 000 AN 为间隔。
- 2)基于稀土电解槽内各区域压强的不同,大致可以分为上部、下部以及底部区域,因此电解槽外加线圈分别设置在电解槽外侧上部、外侧下部与底部。
- 3)由于电流频率过大、周期过小,周期内流速变化不直观,为了更直观了解电磁搅拌下流速周期内的变化,同时为减少变量,设置通入电流为 1 Hz,均沿线圈顺时针通入,电流初始相位为 0°。外加线圈及稀土电解槽各部分物性参数见表 1^[17]。

表 1 外加线圈电解槽各部分物性参数

Table 1 Physical parameters of each part of external coil electrolytic cell					
参数名称	铜	电解质	石墨	铝	真空
介电常数	1	81	1	1	1
磁导率	0.999 991	1.1	1	1	1
电导率/(S/m)	5.8×10^7	171.13	70 000	1.76×10^7	0
密度/(kg/m ³)	8 933	4 190	6 500	10 220	0

2 对不同位置对应电磁模拟分析

2.1 电解质侧面上方位置

由于熔盐电解质黏性较高,质量较大,为更深入

了解正弦波交流电下感生电磁场的变化,以电解槽外侧上方加设安匝数 1 000 AN 的铜线圈为代表,进行感生电磁场仿真模拟;以 5° 的电流相位角为间

隔,记录 1 Hz 正弦波电流下电解槽内最大感应磁场强度与感应电流密度周期变化数据,并绘制点线图,见图 3。

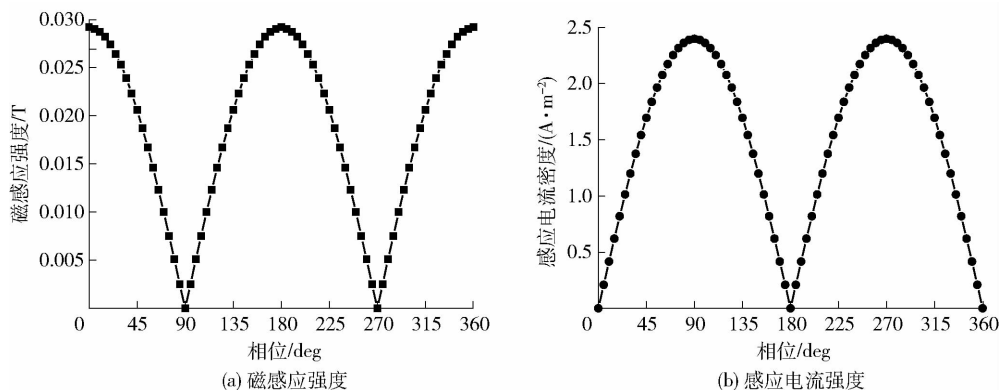


图3 侧面上方线圈 1 Hz/1 000 AN 正弦波电流下槽内最大磁感强度与感应电流强度周期变化

Fig. 3 Periodic changes of the maximum magnetic inductance and induced current intensities in the sine wave current current of the coil at the upper side at 1 Hz – 1 000 An

由图 3(a) 可以看出,磁感强度随着电流相位角发生周期性变化,在相位角为 $180^\circ n$ ($n=0,1,2,\dots,\infty$) 时,磁感应强度达到最大值;电流相位为 $90^\circ + 180^\circ n$ ($n=0,1,2,\dots,\infty$) 时,磁感应强度为 0。由图 3(b) 可知,感应电流密度在电流相位角 $90^\circ + 180^\circ n$ ($n=0,1,2,\dots,\infty$) 时达到最大值,相位为 $180^\circ n$ ($n=0,1,2,\dots,\infty$) 时为 0。结合图 3 磁感强度和感应电流变化点线图,可以看出两者呈交叉变化,符合交变的电流产生交变的电磁场现象。

图 4、图 5 分别为侧面上方线圈 1 Hz/1 000 AN 正弦波电流下槽内磁感强度、感应电流密度周期变

化云图。由图 5 中可以看出,磁感应强度在相位角为 $0^\circ, 180^\circ$ 时为最大值,最大磁感强度分布于阳极外侧上方区域,且向阴极区域逐渐减弱,离线圈中部区域距离越远,其磁感应强度越小。电流相位角在 90° 时,磁感应强度趋向于 0,线圈所包围的阴极中间区域磁感强度最大,且向外减小,这是由于在感应磁场强度微弱的情况下,磁场分布会聚集在稀土电解槽内磁导率更大的介质钼阴极上^[18]。从图 5 可以看出,感应电流密度最大时,感应电流密度分布与磁感强度云图基本一致,电流密度最小值不同于磁感强度分布集中于阴极,而是距离线圈最近

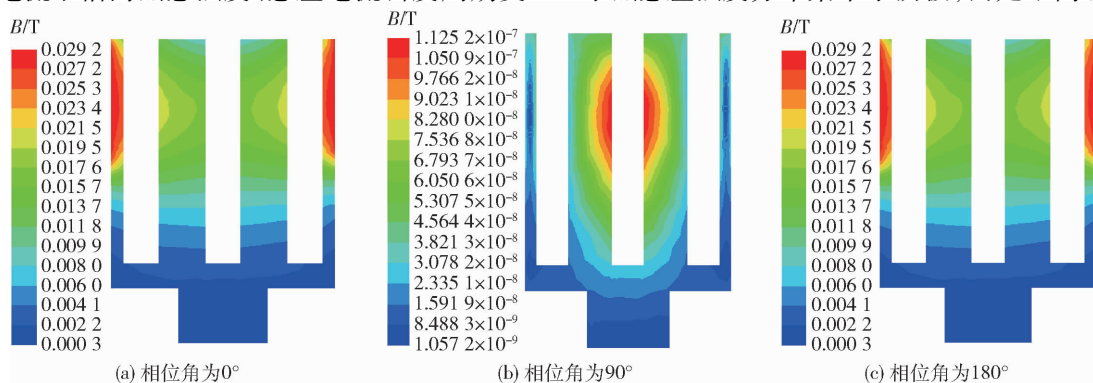


图4 侧面上方线圈 1 Hz/1 000 AN 正弦波电流下槽内磁感强度周期变化云图

Fig. 4 Periodic variation of magnetic induction intensity in the slot under 1 Hz/1 000 AN sinusoidal current of the coil above the side

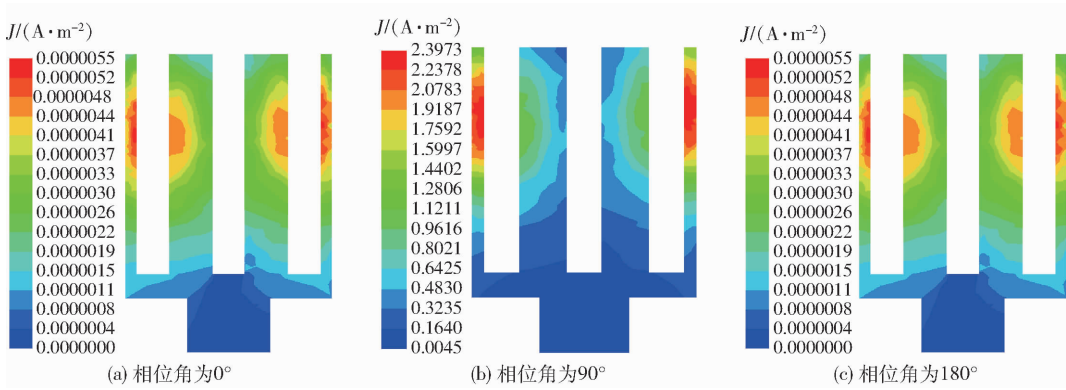


图 5 侧面上方线圈 1 Hz/1 000 AN 正弦波电流下槽内感应电流密度周期变化云图
Fig.5 Periodic variation of induced current density in the slot with 1 Hz/1000 A sinusoidal current flowing from the coil above the side

的槽内电导率最大的石墨阳极与槽壁之间的区域,且向外延伸的过程中逐渐减弱。

由上述描述分析电流 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 相位间,电流为顺时针流向,磁感线方向朝下,结合左手定则可知在槽内生电磁场产生的洛伦兹力方向指向槽外且顺时针转动变化,此时槽内熔盐整体重量相应增加,其顺时针方向转动有效的电磁力减小; $90^\circ \sim 270^\circ$ 相位间,电流为逆时针流向,磁感线方向向上,洛伦兹力方向指向槽外并逆时针转动变化,此时起到了类似磁悬浮的作用,槽内熔盐质量相对减轻,其逆

时针方向转动的电磁力有用功被相应放大。

综合分析,稀土电解槽内生电磁场所产生的洛伦兹力、安培力及电场力转动方向相同。感生电磁场中的力(统称为电磁力)结合磁力公式及电磁场数据变化可知,正弦波电流感生电磁力大小进行着周期性变化。

2.2 电解质侧面下方位置

在稀土电解槽侧面下方增设线圈,进行相应的感生电磁场仿真模拟,结果见图 6。图 6 表明,正弦波电流下只有感生磁场分布,感生电流无法形成。

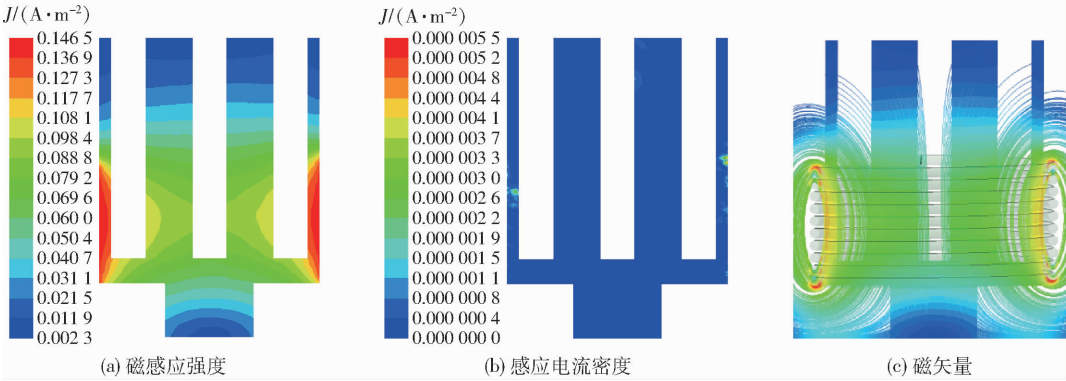


图 6 侧面下方线圈 5 000 AN 下磁感应强度、感应电流密度及磁矢量分布云图
Fig.6 Cloud map of magnetic induction intensity, induced current density and magnetic vector distribution under 5 000 AN coil at the lower side

对比下方线圈包围槽内区域与上方线圈包围槽内区域,不同之处在于下方包围区域底部间无阳极与阴极电导介质的存在,这也就造成了形成的感生电流在上下非均匀分布的电解质中流失,感生电流无法聚集,是电场分布无法形成的主要原因。感生

电磁力的产生离不开电荷的运动,电解槽侧面下方增设线圈通入交流电无法使槽内形成感生电场分布,即槽内无移动的电荷,因此无电磁力的产生。

2.3 电解质底部位置

电解槽底部线圈缠绕方式与侧面线圈不同,且

底部压强更大,熔体更不易被搅动,经过仿真得知底部线圈 1 000 AN 时产生的电磁感应强度不足以搅动熔体,能够起到电磁搅拌作用的底部所需线圈安匝数不低于 5 000 AN。

从图 7 可以看出,底部感生电磁场强度分布规

律与侧面上方相同,均表现为:在最大感生电磁场强度时,磁感应强度由线圈位置向外依次减弱;在最小感生电磁场强度时,磁感应强度聚集于磁导率较大且距线圈最近的阴极区域;感应电流密度汇聚于线圈上方电导率更好的石墨阳极区域。

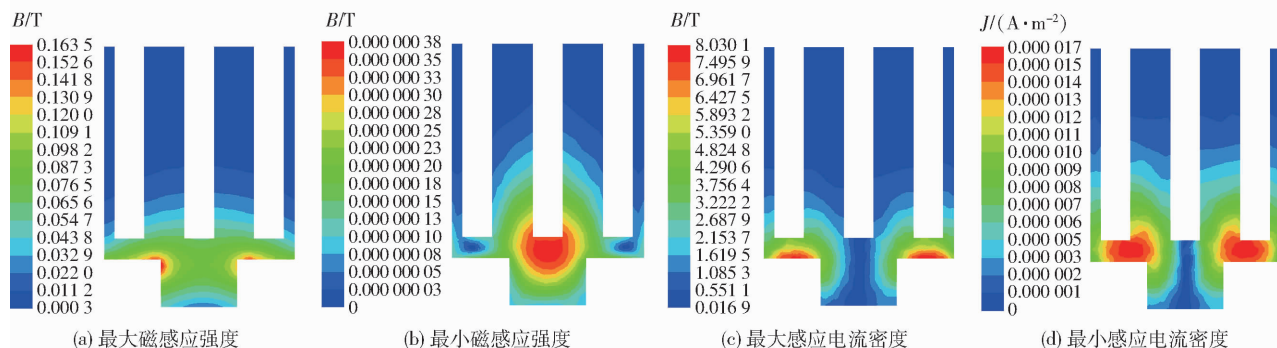


图 7 底部线圈 5 000 AN 下极值磁感应强度与感应电流密度分布云图

Fig. 7 Distribution cloud diagram of extreme magnetic induction intensity and induced current density at 5 000 AN of bottom coil

3 对不同位置对应不同安匝数模拟仿真

为确认电磁场分布是否受安匝数的影响,以 1 000 AN 为间隔,依次对稀土电解槽侧面上方增设线圈进行 2 000 ~ 5 000 AN 下正弦波电流感生电磁场仿真模拟,得到图 8 正弦波电流下的最大磁感应强度与感应电流密度点线图。由图 8 可知,随着安匝数的增大,电解槽内磁感应强度与感应电流密度随之增大。

同上以 1 000 AN 为间隔,依次对稀土电解槽底部添加线圈进行 6 000 ~ 9 000 AN 下正弦波电流感生电磁场仿真模拟,由图 9 可知,随安匝数的提高,感生电磁场云图分布无明显变化,唯有电磁场强度不断增加。

由图 10 得知槽内洛伦兹力随安匝数的变化趋势,洛伦兹力作为电磁力中的微观力,对比图 11 可知其与总体电磁力的变化趋势一致,且 F_z 值远大于其余分量,槽内底部区域需负载重力远大于上方,对应所需电磁力更大。

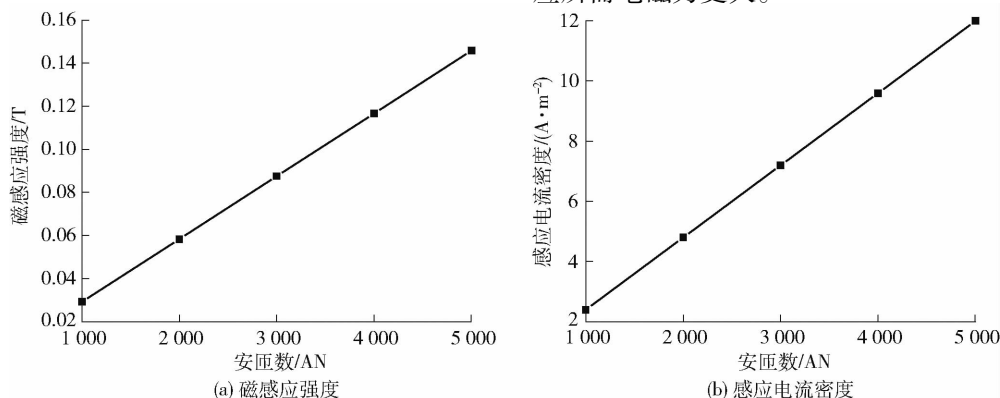


图 8 侧面上方线圈正弦波电流 2 000 ~ 5 000 AN 下槽内最大磁感应强度与感应电流密度点线图

Fig. 8 Point plot of the maximum magnetic induction intensity and induced current density in the slot under the sinusoidal current of the coil above the side from 2 000 AN to 5 000 AN

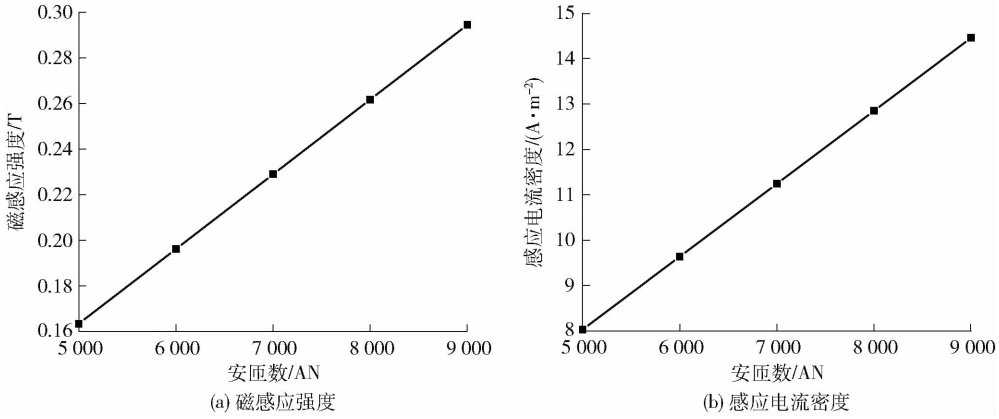


图 9 底部线圈正弦波电流 6 000 ~ 9 000 AN 下槽内最大磁感应强度与感应电流密度点线图

Fig. 9 Point plot of the maximum magnetic induction intensity and induced current density in the slot under the sinusoidal current of the bottom coil at 6 000 ~ 9 000 AN

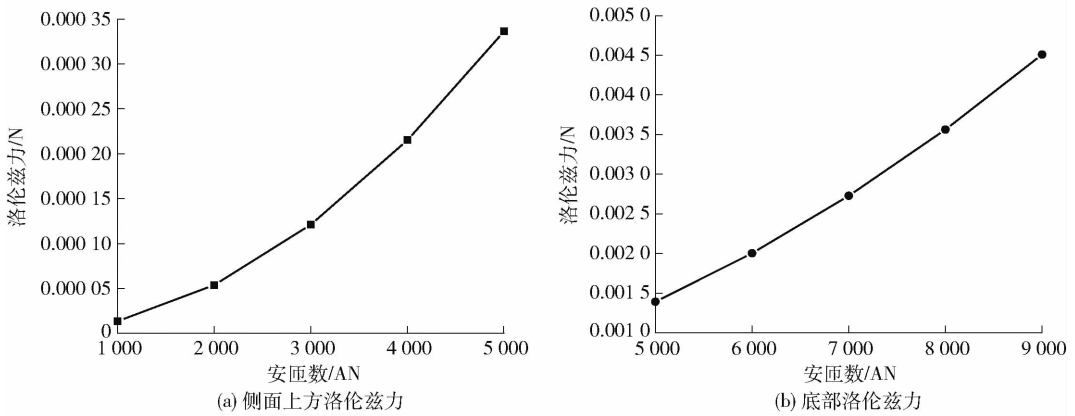


图 10 侧面上方及底部电磁搅拌下槽内最大洛伦兹力点线图

Fig. 10 Point plot of the maximum Lorentz force in the tank under electromagnetic stirring at the top and bottom of the side

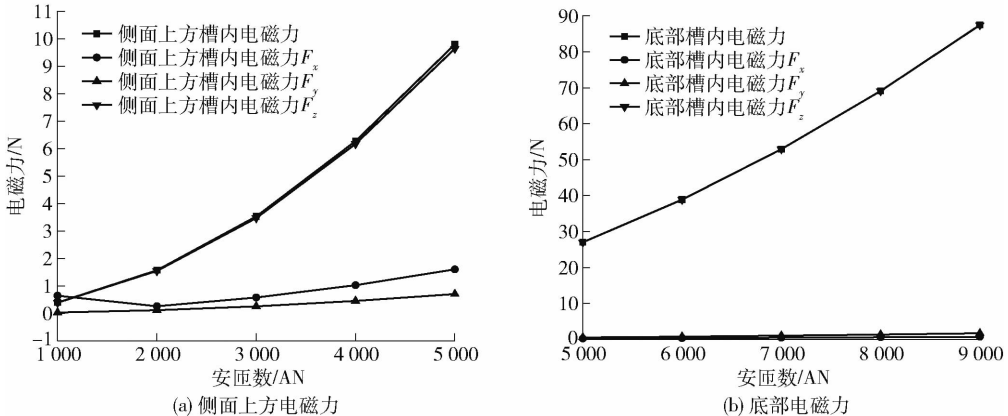


图 11 侧面上方及底部电磁搅拌下槽内最大电磁力点线图

Fig. 11 Point plot of the maximum electromagnetic force in the tank under electromagnetic stirring at the top and bottom of the side

4 对不同位置磁搅拌的槽内流动模拟仿真

对电解槽侧面上方增设线圈通入或在底部增设线圈通入 1 Hz 正弦波电流进行电磁搅拌仿真模拟。前者用 1 000 ~ 5 000 AN 下的电磁搅拌,后者用 5 000 ~ 9 000 AN 下的电磁搅拌,得到对应的槽内 1 h 流场最大流速变化情况见图 12。结合电解槽内

所需搅拌速度大于 1.5 m/s,图 12 中显示侧上方电磁搅拌下其所需安匝数为 3 000 AN,对应所需总搅拌力为 3.5 N,且流速在 1.6 m/s 以上;底部电磁搅拌所需安匝数为 6 000 AN,对应所需总搅拌力为 38 N。从图 13 中可以看出,电磁搅拌 20 min 后,侧上方电磁搅拌下的槽内流速整体接近,底部电磁搅拌下的槽内下部流速明显大于上部,不利于控制稳定流速。

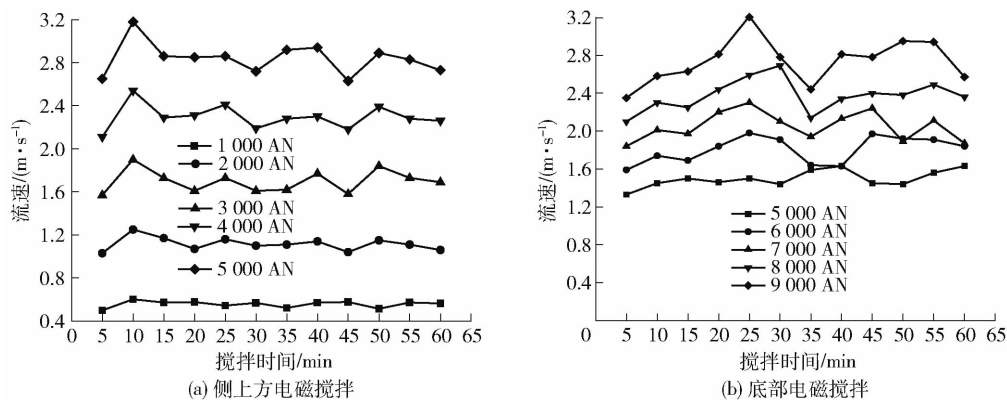


图 12 不同位置电磁搅拌下槽内 1 h 最大流速变化

Fig. 12 Variation of the maximum flow velocity at 1h in the tank under electromagnetic stirring at different positions

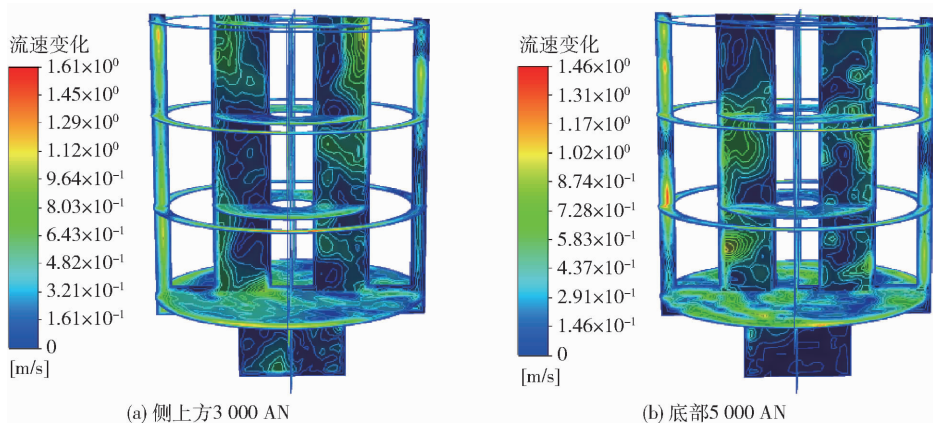


图 13 不同位置对应安匝数电磁搅拌下 20 min 所生成的流场云图

Fig. 13 Flow field cloud map generated by electromagnetic stirring at different positions corresponding to ampere-turns for 20 min

综上,电解槽侧面上方或底部位置增设线圈进行的电磁搅拌,侧面上方位置电磁搅拌流场流速稳定性较好于底部位置,所需搅拌安匝数也远小于底部。从能耗和可控性方面考虑,选择侧上方进行电磁搅拌更为合理。

5 结论

对 8 kA 稀土电解槽进行电磁搅拌模拟,考察安装位置与安匝数对电磁搅拌效果的影响,得到以下结论。

1) 磁感应强度随着电流相位角发生周期变化, 在相位角为 $180^\circ n$ ($n=0, 1, 2, \dots, \infty$) 时, 磁感应强度达到极大值; 电流相位角为 $90^\circ + 180^\circ n$ ($n=0, 1, 2, \dots, \infty$) 时, 磁感应强度减弱到极小值; 感应电流密度则相反。随着安匝数的增大, 电解槽内磁感应强度与感应电流密度云图分布并无明显变化。感生电磁场强度最大时, 电磁场强度由线圈中段区域向外逐渐减弱; 感生电磁场强度最小时, 磁感应强度聚集于阴极区域, 感应电流密度汇聚于阳极石墨区域。

2) 电解槽内正弦波电流产生的电磁力均由线圈中间段向外减弱。正弦波电流产生的电磁力大小呈周期变化, 电磁周向搅拌力在周期内呈前 $1/4$ 与末 $1/4$ 周期内沿线圈电流方向顺时针方向转动, $1/4 \sim 3/4$ 周期电磁力沿线圈电流方向逆时针方向转动。电流方向逆时针方向转动。正弦波电流下总体逆时针转动感生电磁力有用功大于顺时针转向。

3) 对电解槽侧面上方、侧面下方及底部增设线圈进行电磁搅拌模拟仿真, 得到以下结论: 侧面下方增设线圈在一定安匝数下无法产生电磁搅拌力; 侧面上方增设线圈, 正弦波, 所需安匝数均小于底部, 且流场稳定性也更好; 底部增设线圈所需安匝数远大于侧面上方, 且相比侧面上方位置电磁搅拌的槽内流动情况更为复杂混乱。

4) 电解槽侧面上方增设线圈, 1 Hz 正弦波电流电磁搅拌安匝数需 3 000 AN, 对应所需总搅拌力 3.5 N, 底部需 6 000 AN, 对应所需总搅拌力 38 N。考虑到能耗与槽内流体的可控性问题, 在电解槽侧上方进行电磁搅拌更为合适, 并且可有效改善流动死区的问题。

[参考文献]

- [1] 王海辉. 10 kA 稀土电解槽的设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
WANG Haihui. Design of 10 kA rare earth electrolytic cell[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [2] 张雪娇. 稀土电解槽内杂质运动轨迹的数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
ZHANG Xuejiao. Numerical simulation of impurities trajectory in rare earth electrolytic cell[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.
- [3] 张敬, 方文华, 汤涛, 等. 有色金属直流电磁搅拌的多场耦合数值模拟分析与设计[J]. 有色金属工程, 2020, 10(9): 50-58.
ZHANG Jin, FANG Wenhua, TANG Tao, et al. Numerical simulation analysis and design of DC electromagnetic stirring of nonferrous metals[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2020, 10(9): 50-

58.

- [4] 王伟, 刘风亮, 贾洪利, 等. 电磁搅拌线圈的一种改进设计[J]. 铸造技术, 2012, 33(7): 869-871.
WANG Wei, LIU Fengliang, JIA Hongli, et al. Improved design of electromagnetic stirring coil[J]. Foundry Technology, 2012, 33(7): 869-871.
- [5] LI Guanglong, QU Yingdong, YANG Yaohua, et al. Effect of mechanical combined with electromagnetic stirring on the dispersity of carbon fibers in the aluminum matrix[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8106.
- [6] 西德赖包德赫仁公司. 真空感应炉用的电磁搅拌装置[J]. 特殊钢, 1986(1): 78.
Leibold-Heraeus Company. Electromagnetic stirring device for vacuum induction furnace[J]. Special Steel, 1986(1): 78.
- [7] 李兴波, 崔秀兰, 张保林. 电磁搅拌器在铝熔炼过程中的应用及效果[J]. 黑龙江科技信息, 2010, 4(22): 60.
LI Xingbo, CUI Xiulan, ZHANG Baolin. Application and effect of electromagnetic stirrer in aluminum smelting process[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010, 4(22): 60.
- [8] 彭霞林, 易兵, 李伟红, 等. 优化工艺下电磁搅拌对板坯冶金效果的影响[J]. 连铸, 2021, 4(3): 13-17.
PENG Xialin, YI Bin, LI Weihong, et al. Effect of electromagnetic stirring on metallurgical effect of slab under optimization of continuous casting process[J]. continuous casting, 2021, 4(3): 13-17.
- [9] 董晟全, 王春景, 杨通, 等. SiCP/Al 水平连铸电磁搅拌结晶器的设计[J]. 西安工业学院学报, 2001(4): 336-342.
DONG Shengquan, WANG Chunjing, YANG Tong, et al. The design of electromagnetic stirring chilling device used in SiCP/Al horizontal continuous casting process[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2001(4): 336-342.
- [10] 李桂东, 麻永林, 邢淑清, 等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场-流场数值模拟[J]. 铸造技术, 2019, 40(3): 276-282.
LI Guidong, MA Yonglin, XING Shuqing, et al. Numerical simulation of electromagnetic field and flow field in square wave electromagnetic stirring of continuous casting mould[J]. Foundry Technology, 2019, 40(3): 276-282.
- [11] KIM S J, LEE C M. Investigation of the flow around a circular cylinder under the influence of an electromagnetic force[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(3): 252-260.
- [12] 周本谋, 范宝春, 陈志华, 等. 电磁力连续控制圆柱绕流态变化的研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004(1): 10-14.
ZHOU Benmou, FAN Baochun, CHEN Zhihua, et al. Investigation of the flow field structure controlling around a circular cylinder by means of electromagnetic forces[J]. Fluid mechanics experiment and measurement, 2004(1): 10-14.
- [13] 陈宇昕. 10 kA 底部阴极稀土电解槽电-磁-流多物理场耦合仿真[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.
CHEN Yuxin. Coupled simulation of multiple physical fields in a

- 10 kA rare earth electrolysis Cell[D]. Baotou: Inner Mongolia University Of Science and Technology, 2013.
- [14] 王会祥,王常青. 直流和方波脉冲电流作用下不锈钢析氢的电化学研究[J]. 化工管理, 2017(34): 80-83.
WANG Huixiang, WANG Changqing. Electrochemical study of hydrogen evolution of stainless steel under the action of direct current and square wave pulse current[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(34): 80-83.
- [15] 王亚非,贾华,袁日栋. 电磁搅拌器磁场形态研究及选择[J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1549-1553.
WANG Yafei, JIA Hua YUAN Ridong. Research and selection of magnetic field morphology of electromagnetic stirrer[J]. Foundry Technology, 2018, 39(7): 1549-1553.
- [16] 吉光,高秀华,张洪才,等. 凝固末端电磁搅拌位置优化及其对高碳钢连铸圆坯内部质量的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 34-38.
- Ji Guang, GAO Xiuhua, ZHANG Hongcai, et al. Optimization of F-EMS position and its effect on internal quality of high carbon steel continuous casting round billet[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(9): 34-38.
- [17] 伍永福,李亮亮,刘中兴,等. 6 kA 新型铈电解槽内电磁场的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016, 4(10): 25-28.
WU Yongfu, LI Liangliang, LIU Zhongxing, et al. Numerical simulation of electromagnetic field in 6 kA novel cerium electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016, 4(10): 25-28.
- [18] 方文华. 基于多场耦合的有色金属直流电磁搅拌系统数值模拟及参数优化[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2020.
FANG Wenhua. Numerical simulation and parameter optimization of non-Ferrous metal DC electromagnetic stirring system based on multi-field Coupling. Yueyang: Hunan Institute of Science and Technology, 2020.

Numerical simulation of electromagnetic agitation in 8 kA rare earth electrolytic cell

PANG Qi-shou, XIN Zhi-lin, LIN Xiao-cheng, GONG Yao-teng, WANG Zhi-yang

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

Abstract: The flow field velocity in rare earth electrolytic cell is not stable, the flow outside the anode is far too slow, which is not beneficial to the full electrolytic reaction and the improvement of electrolysis efficiency. The existing study shows the flow status in the electrolytic cell can be controlled by applying external magnetic field to agitate the electrolyte. In this paper, simulation is conducted of the electromagnetic agitation for the 8 kA rare earth electrolytic cell, and design is made that copper coils of various ampere turns are put outside and at the bottom of the electrolyte, then by using the softwares of Ansoft Maxwell and Ansys Fluent, the finite element analysis and simulation are conducted for the magnetic field generated by electrolyte and the flow field is subjected to electromagnetic agitation, the following conclusions are got: the addition of coils on the lower part of the side cannot generate electromagnetic agitating force in a certain ampere turns; for the coil added on the upper part of the side, the wave form is sine wave, the ampere turns of the coil needed are less than those of the bottom, and the flow field stability is better; the needed ampere turns of the coil added at the bottom are far more than those on the upper part of the side, and compared with the position at the upper part of the side, the flow status in the cell subjected to electromagnetic agitation is more complex and chaotic.

Key words: electrolytic cell; electromagnetic agitation; magnetic induction intensity; induced electromagnetic force; ampere turns of coil; sine current; numerical simulation