

新型阴极钢棒对铝电解槽电热场的影响

尹诚刚¹, 李 勘^{1,2}, 徐宇杰², 杨 帅², 赖延清², 江 南², 张红亮²

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 采用数值仿真的方法对应用一种可减小铝液中水平电流的新型阴极钢棒的 420 kA 级铝电解槽进行三维计算, 分析这种新型阴极钢棒对铝液中水平电流、槽电压以及电解槽温度分布的影响。结果表明: 新型阴极钢棒可有效地减小铝液中 X 方向的水平电流; 新型阴极钢棒中绝缘材料的加入在一定程度上增大了槽电压; 当钢棒和钢棒糊接触不是很好时, 新型阴极钢棒电解槽比传统阴极钢棒电解槽更容易出现阴极炭块和钢棒连接区域温度过高的情况。该计算结果可为铝电解槽在应用此种新型阴极钢棒后所获得的节能效果以及个别槽在运行过程中出现的问题提供理论依据。

关键词: 铝电解槽; 新型钢棒; 水平电流; 电热场; 数值模拟; 电接触

中图分类号: TF821 文献标志码: A

Effects of innovative cathode collector bars on thermal-electric field of aluminum reduction cells

YIN Cheng-gang¹, LI Jie^{1,2}, XU Yu-jie², YANG Shuai², LAI Yan-qing², JIANG Nan², ZHANG Hong-liang²

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: 3D thermal-electric field of 420 kA aluminum reduction cell with a kind of innovative cathode collector bar was calculated by using numerical simulation method. The effects of innovative cathode collector bars on horizontal current in aluminum liquid pool, cell voltage and temperature distribution were analyzed. The results show that the innovative cathode collector bar can effectively reduce the horizontal current density along X axis. The insulating materials in the innovative cathode collector bars increase the cell voltage to some extent. Under poor contact condition between the cathode collector bar and its paste, the cathode contact area of aluminum reduction cell with innovative cathode collector bars is easier to be overheated than that of aluminum reduction cell with conventional cathode collector bars. The research results can provide theoretical basis for the high energy efficiency achieved by most aluminum smelters and the problems in a few potlines during the application of the innovative cathode collector bar.

Key words: aluminum reduction cell; innovative cathode collector bar; horizontal current; thermo-electric field; numerical simulation; electric contact

工业炼铝采用传统的霍尔-埃鲁特法(Hall-Héroult)。在工业电解槽内, 熔融电解质和氧化铝通过一系列的电化学反应产生液态的原铝, 电解质和铝液

两种高温熔体在电磁力、重力以及气泡的作用下在槽膛内运动^[1]。电解槽电场和磁场相互作用产生的电磁力是引起槽内熔体运动的主要驱动力, 熔体运动产生

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51104187; 51204211); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100162120008); 国家自然科学基金资助项目(51274241)

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-09-20

通信作者: 张红亮, 副教授, 博士; 电话: 0731-88830474; E-mail: net_hotang@163.com

的铝液-电解质界面变形反过来改变熔体中电场和磁场的分布, 引起额外的扰动电磁力, 进一步改变熔体的流动及铝液-电解质界面的波动, 由此产生的波动不稳定分量可引起槽内磁流体的不稳定现象, 需要通过增大极距来对其加以抑制^[2-5], 从而使能耗增加。LINDSAY 等^[6]和 BOJAREVICS 等^[7]深入分析槽内流体电磁扰动机理, 指出铝液中水平电流和垂直磁场相互作用产生的扰动电磁力是导致磁流体不稳定现象的唯一重要因素, 因此, 优化铝液中的水平电流和垂直磁场能减少槽内磁流体的波动, 从而提高电解槽的稳定性。

为获得合理的电磁场分布, 改善铝电解槽的磁流体稳定性, 国内外学者开展了许多研究。刘业翔等^[8-9]等设计一种底部出电型的铝电解槽, 相比传统水平出电型的电解槽, 可以较大地降低铝液层中的水平电流和垂直磁场, 削弱电磁力对槽内熔体的影响, 实现熔体界面的高稳定性。KAENEL 等^[10]、JIANG 等^[11]以及 DAS 等^[12]通过对铝电解槽阴极炭块结构进行修改, 如使其上表面倾斜某一角度或在其表面加工凸起, 来改变铝液中电流的分布。杨帅等^[13]通过仿真方法研究了铝电解槽钢棒加高型阴极对铝液中水平电流的优化作用, 其结果表明合适的加高位置和加高高度可减小铝液中的水平电流并优化其密度分布。

目前, 有一种以减小铝液中水平电流为目标的新型阴极钢棒在铝工业界得到了一定范围的应用^[14], 其显著特征是钢棒的某一段被由电绝缘材料填充的分割缝分成上下两部分。该钢棒结构的节能效果在部分铝厂得到了认可, 但在个别铝厂, 该结构下的系列铝电解槽在启动不久后出现相应位置阴极开裂、钢棒局部熔化的现象, 出现此现象的原因至今没有定论。同时, 有关此新型阴极钢棒及其对电解槽物理场影响的系统研究目前尚未见文献报道。

本文作者针对此种铝电解槽新型阴极钢棒, 通过在 ANSYS 平台上所开发的含电接触的电-热耦合切片模型, 计算应用此种钢棒结构的 420 kA 级铝电解槽的电热场分布, 分析新型阴极钢棒在减小铝液中水平电流方面的作用以及其引起的槽电压变化, 同时探究阴极钢棒和钢棒糊之间电接触对这种结构电解槽温度场分布的影响, 从仿真研究的角度对该新型阴极钢棒的应用效果及其可能出现的风险进行系统分析。

1 新型阴极钢棒

传统阴极钢棒和新型阴极钢棒的阴极剖面示意图

和钢棒模型示意图分别如图 1 和 2 所示。新型阴极钢棒的具体实现方式为将传统阴极钢棒沿长度方向在靠近出电端的一段开一道分割缝, 将这一段钢棒分成上下两部分, 分割缝中填充电绝缘糊, 钢棒上表面采用石墨与阴极炭块相连, 对钢棒未被分割的一段, 其侧面采用碳糊与阴极炭块相连, 对钢棒被分割的一段, 其侧面上半部分采用碳糊与阴极炭块相连, 下半部分采用电绝缘材料与阴极炭块相连。由于绝缘材料的加入以及用导电性优于碳糊的石墨连接钢棒上表面和阴极炭块, 因此, 新型阴极钢棒对铝电解槽整个阴极的电场分布会产生较大的影响, 将改变铝液中的电流走向, 从而为优化铝液中水平电流提供可能性。

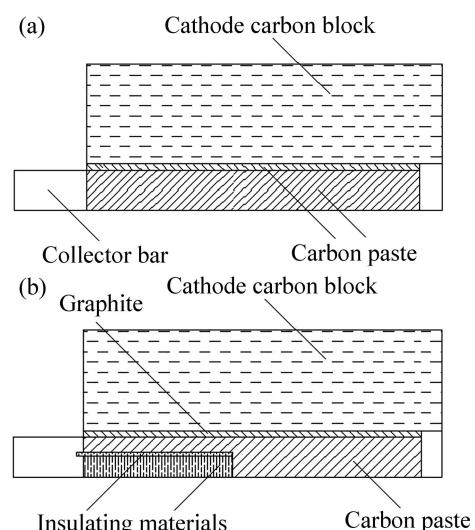


图 1 阴极结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of cathode structure: (a) Traditional cathode collector bar; (b) Innovative cathode collector bar

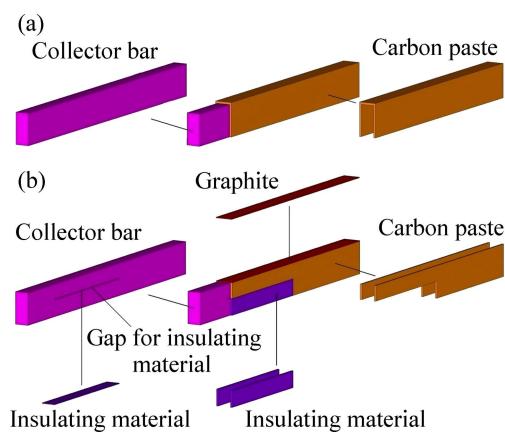


图 2 阴极钢棒的模型示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of cathode collector bar model: (a) Traditional cathode collector bar model; (b) Innovative cathode collector bar model

2 电-热耦合理论及模型

2.1 控制方程

计算铝电解槽的耦合稳态电热场, 导电部分和导热部分的控制方程分别为三维导电拉普拉斯方程(1)和三维导热泊松方程(2):

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{1}{\rho_X} \frac{\partial V}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\frac{1}{\rho_Y} \frac{\partial V}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[\frac{1}{\rho_Z} \frac{\partial V}{\partial Z} \right] = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_X 、 ρ_Y 、 ρ_Z 为各导电材料在三维方向上的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$, 其取值还与导体的温度相关; V 为电位, V 。

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[k_X \frac{\partial T}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[k_Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[k_Z \frac{\partial T}{\partial Z} \right] + q = 0 \quad (2)$$

式中: k_X 、 k_Y 、 k_Z 为各材料在三维方向上的导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为单位体积的生热率, 单位为 W/m ; T 为节点温度, 单位为 K 。

式(2)中的 q 即为单位体积内由于电流通过而产生的热, 对于非导电部分, $q=0$; 对导电部分, 其生热率服从焦耳定律。因此, q 与式(1)中的电位有关, 故需要将两式进行耦合求解。此外, 电解质的生热率还考虑了补偿电化学反应热效应的部分。

2.2 接触压降

在阴极压降的构成中, 接触电压占据其中较大的比例。因此, 在电解槽的电场分析中, 需要引入阴极钢棒与钢棒糊之间的电接触。通过接触面的电流定义为

$$J = \kappa (\phi_t - \phi_c) \quad (3)$$

式中: κ 为接触电导率, 单位为 $1 \times 10^5 \text{ S}/\text{m}$; ϕ_t 和 ϕ_c 为接触面电势, V 。在 ANSYS 中通过定义接触对实常数引入接触电导率。阴极钢棒与钢棒糊之间的接触电导率根据文献[15]取 $1 \times 10^5 \text{ S}/\text{m}$ 。

阴极钢棒与钢棒糊之间的接触压降可由下式计算:

$$\varphi_c = I \frac{1}{\kappa S} \quad (4)$$

式中: φ_c 为接触电压, V ; I 为电流, A ; κ 为接触电导率; S 为接触面积, m^2 。

2.3 电-热耦合模型及边界条件

以某 420 kA 预焙阳极铝电解槽作为研究对象, 其关键结构及工艺参数列于表 1。

表 1 电解槽关键结构和工艺参数

Table 1 Important structural and technological parameters of aluminum reduction cell

Parameter	Value
Current/kA	420
Anode carbon block/mm	$1700 \times 665 \times 635$
Cathode carbon block/mm	$3680 \times 665 \times 470$
Collector bar/mm	$2200 \times 100 \times 230$
Cathode slot/mm	$3680 \times 125 \times 245$
Metal level/mm	220
Electrolyte level/mm	180
Anode cathode distance/mm	45
Number of anode carbon block	48
Number of cathode carbon block	24
Number of collector bar	96

新型阴极钢棒电解槽在传统阴极钢棒电解槽上所做调整如表 2, 其余参数不变。其中: a 表示从绝缘缝上表面到阴极钢棒上表面的距离; b 表示绝缘缝下表面到阴极钢棒下表面的距离; c 表示绝缘缝的厚度; d 表示绝缘缝的长度; e 表示绝缘缝到钢棒出电端端口的距离。

表 2 新型阴极钢棒电解槽所做的参数调整

Table 2 Parameter changes of aluminum reduction cell with innovative cathode collector bars

Parameter	Value
Cathode slot/mm	$3680 \times 125 \times 235$
a/mm	105
b/mm	120
c/mm	5
d/mm	900
e/mm	370

在有限元计算平台 ANSYS 上建立的新型阴极钢棒铝电解槽三维切片物理模型如图 3 所示, 为了展示其内部结构, 图中并未完整地显示整个模型。加入计算所需的材料属性, 对模型进行网格划分, 获得相应的有限元模型。

在实现电-热耦合的数值计算过程中, 要在模型中定义所需的边界条件。边界条件分为两类, 即电场边界条件和热场边界条件:

1) 在槽内与熔体接触的阴极、槽帮、伸腿、阳极以及上部结壳表面施加对流换热边界条件;

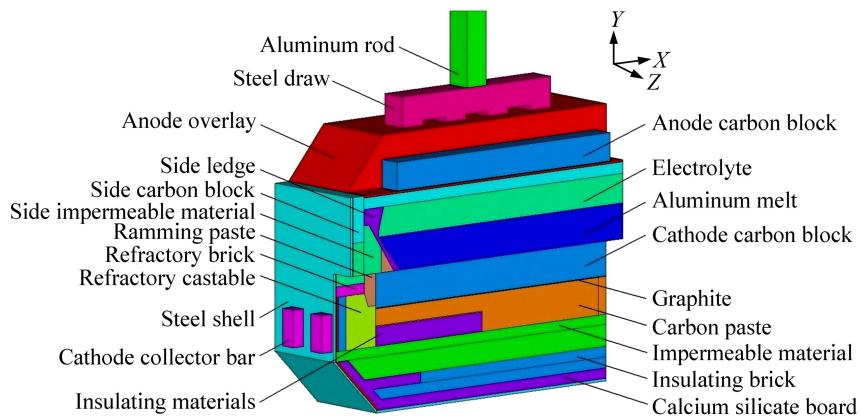


图3 新型阴极钢棒铝电解槽电-热耦合计算物理模型

Fig. 3 Physical model of thermal-electric calculation of aluminum reduction cell with innovative cathode collector bars

- 2) 不指定熔体的温度, 仅制定环境温度, 环境温度的值根据现场测量和经验进行选取;
- 3) 电解槽与外界接触的表面为散热界面, 将热对流和热辐射折算成综合换热系数, 作为槽外换热边界条件设定;
- 4) 在槽内电解质的热生成率中加入电化学反应热效应;
- 5) 在阴极钢棒出电端的端口设置零电势边界条件, 在阳极导杆处设置电流入口载荷, 电流量的大小根据槽型和工艺确定。

在 ANSYS 平台上分别对传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽的电-热耦合模型进行计算, 获得电场和温度场的分布。

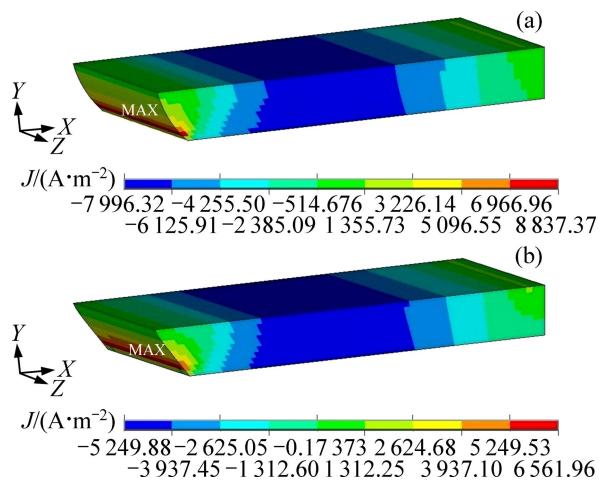
3 结果与分析

3.1 新型阴极钢棒对铝液中水平电流和槽电压的影响

传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽铝液中 X 方向水平电流密度分布如图 4 所示, Z 方向水平电流密度分布图 5 所示, 水平电流密度最大值与平均值列于表 3。

由图 4 可以看出, 在 X 方向上, 铝液中水平电流的流向绝大部分指向图中的 X 轴负方向, 即从电解槽全槽的中轴线指向钢棒的出电端, 且从电解槽中轴线到出电端, 水平电流密度表现为先增大后减小, 到接近槽帮的位置由于槽帮的阻挡而减小至 0 直至反向, 反向水平电流发生的范围很小, 对磁流体稳定性产生的影响很小, 因此, 表 3 中的最大水平电流密度指 X 负方向水平电流密度绝对值的最大值。由图 5 可以看

出, 铝液绝大部分区域 Z 方向的水平电流密度处于一个很小的值, 仅在底部靠近槽帮位置处有两个小区域的值较大。一方面, 槽帮底部对电流的阻挡使得电流在此有一定的汇集和流向的改变, X 方向和 Z 方向的水平电流密度都会有所增大; 另一方面, 因为钢棒对电流流向的引导与汇集作用, 此两区域的电流从铝液底部流入阴极炭块时会朝着钢棒所在的位置汇集, 从而有在 Z 方向上的水平偏转, 且两区域 Z 方向水平电流的方向相反。 Z 方向水平电流密度平均值仅为 X 方向水平电流密度平均值的 $1/20\sim1/30$ 左右, 对磁流体稳定性产生的影响同样较小。由表 3 可知, 相比传统阴极钢棒电解槽, 新型阴极钢棒电解槽铝液中 X 方向水平电流密度的平均值减小了 34.3%, 最大值减小了

图4 传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽铝液中 X 方向水平电流密度分布Fig. 4 Horizontal current density along axis X in aluminum reduction cell with conventional (a) and innovative (b) cathode collector bars

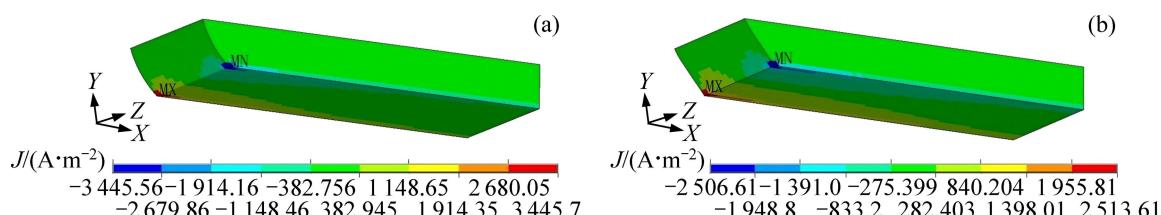


图 5 传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽铝液中 Z 方向水平电流密度分布

Fig. 5 Horizontal current density along axis Z in aluminum reduction cell with conventional (a) and innovative (b) cathode collector bars

表 3 传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽铝液中的水平电流密度

Table 3 Horizontal current density in aluminum reduction cells with conventional and innovative cathode collector bars

Cathode collector bar type	Maximum current density of axis X/(A·m ⁻²)	Average current density of axis X/(A·m ⁻²)	Maximum current density of axis Z/(A·m ⁻²)	Average current density of axis Z/(A·m ⁻²)
Conventional	7 996.32	4 577.44	3 445.75	155.65
Innovative	5 249.88	3 040.38	2 513.61	168.14

35.6%，Z 方向水平电流密度的平均值增大了 8.0%，最大值减小了 27.1%。

槽电压是影响铝电解能耗的重要指标，电解行业长期来致力于低电压电解技术的研究，以降低能耗。新型阴极钢棒中绝缘材料的加入必然影响槽电压的大小。电解槽电-热切片模型计算所得的槽体导电部分的欧姆压降如图 6 所示，将各部分的电压分布绘制表格如表 4 所示。结合图 6 与表 4 可知，相比传统阴极钢棒电解槽，新型阴极钢棒电解槽的槽体欧姆压降增大了 33 mV，增加的部分在阴极压降，主要是由于钢棒中加入了电绝缘材料，增大了电路的电阻，所以在相同系列电流下电压增大。此外，槽体欧姆压降加上反应电压 1 723 mV、气泡压降 203 mV，所得的传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽的槽体系总压降分别为 3.80 V 和 3.83 V，若按照母线系统压降为 0.2 V 计算，则二者的槽电压分别为 4.00 V 和 4.03 V 左右，同时，由于阴极电阻的差异所造成整体电阻的不同，两种电解槽的阳极压降、熔体压降有极小的差别。以上各项数值均在正常的范围之内。此外，本次计算时所取的极距较大，为 4.5 cm，因此电解质部分的压降相对较高，若采用开槽阳极，再结合理想的磁场及磁流体稳定性设计，极距还可进一步降低，可使总电压继续降低，以保证槽电压处于一个较低的水平。

总的来说，新型阴极钢棒能较大幅度地降低电解槽铝液中的水平电流，对改善电解槽的磁流体稳定性具有积极作用，但同时又在一定程度上增大了槽电压。从目前运用新型阴极钢棒电解槽的各铝电解厂所得的

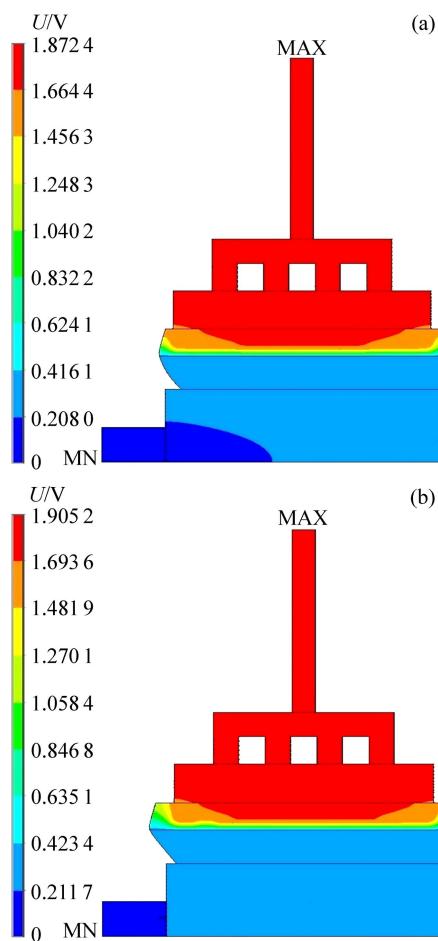


图 6 铝电解槽欧姆压降图

Fig. 6 Ohmic voltage drop aluminum reduction of cell: (a) Cell with conventional cathode collector bars; (b) Cell with innovative cathode collector bars

表4 电压平衡表

Table 4 Balance of voltage drop

Cell type	Anode voltage drop/mV	Bath voltage drop/mV	Cathode voltage drop/mV	Electrochemical voltage/mV	Bubble voltage drop/mV	Busbar voltage drop/mV	Total cell voltage/mV
Cell with conventional cathode collector bar	289	1297	286	1723	203	200	3 998
Cell with innovative cathode collector bar	293	1 285	327	1 723	203	200	4 031

技术指标来看, 此种钢棒结构通过减小水平电流所带来的能耗降低值大于由槽电压升高所导致的能耗增加值, 因此具有节能的作用。

3.2 阴极电接触对新型阴极钢棒电解槽温度场的影响

接触电阻是不同的导电体相互接触时在接触面产生的电阻, 其主要受到导电体材料的性质、接触面状态、压力、温度、使用的电压和电流等多方面因素的影响, 所以并不是一个固定值。同时, 在铝电解过程中, 电解质不断渗入阴极炭块, 阴极钢棒及与其接触的钢棒糊亦发生着膨胀与收缩变形, 这些都将导致钢棒与钢棒糊之间的接触情况发生变化, 从而引起接触电导率的改变^[16]。所以, 有必要对不同接触电导率下的电解槽电热场进行计算与分析。分别对阴极钢棒和钢棒糊之间接触电导率为 1.2×10^5 S/m、 1.0×10^5 S/m 及 0.9×10^5 S/m 的新型阴极钢棒电解槽的电热模型进行计算, 得到的温度场分布情况如图 7 和表 5 所示。同时, 为加以对比分析, 分别对上述接触电导率下的传统阴极钢棒电解槽的电热模型进行了计算, 所得温度分布数据列于表 5, 为展现接触电导率的降低对传统阴极钢棒电解槽温度场分布产生的实质影响, 表 5 也列出了其接触电导率为 0.47×10^5 S/m 时的温度场计算结果, 该电导率为传统阴极钢棒电解槽温度场分布发生明显改变的临界接触电导率。

从表 5 可以看出, 在采用钢棒与钢棒糊之间不同接触电导率进行电热场计算的过程中, 以 1.0×10^5 S/m 为基准, 当接触良好时(即接触电导率大于 1.0×10^5 S/m), 传统阴极钢棒电解槽和新型阴极钢棒电解槽的最高温度均出现在熔体区, 电解槽温度分布正常, 其中, 新型阴极钢棒电解槽的温度分布如图 7(a) 所示; 当接触不甚良好的情况下(即接触电导率相对 1.0×10^5 S/m 有所降低), 电解槽的电热场将发生变化。对于新型阴极钢棒电解槽, 当电导率较小幅度下调时, 电解槽就出现了钢棒和钢棒糊接触面上某一区域的温

度超过熔体温度的情况, 相比而言, 传统阴极钢棒电解槽只会在接触电导率降低较多的情况下才出现类似情况, 如表 5 中当接触电导率取 0.47×10^5 S/m 时的计算结果。当钢棒和钢棒糊之间接触不甚良好时, 新型

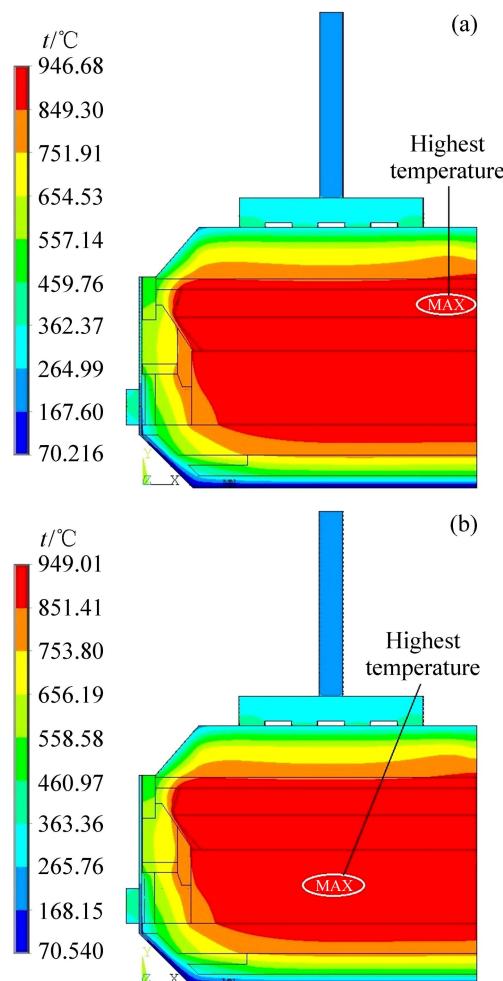


图 7 钢棒和钢棒糊之间不同电接触情况下新型阴极钢棒电解槽温度场的分布

Fig. 7 Temperature field distribution of aluminum reduction cell with innovative cathode collector bars under different electrical contact conditions between cathode collector bar and its paste: (a) Good contact condition; (b) Poor contact condition

表5 钢棒和钢棒糊之间不同接触电导率下电解槽熔体区和阴极区的最高温度值

Table 5 Highest temperatures in bath and cathode of aluminum reduction cell under different electrical contact conductivities between cathode collector bar and its paste

Cell type	Electrical contact conductivity/(S·m ⁻¹)	Highest temperature of bath/°C	Highest temperature of cathode/°C	Area of highest temperature of cell
Innovative cathode collector bars	1.2×10^5	946.68	944.18	Bath
	1.0×10^5	946.84	946.82	Bath
	0.9×10^5	947.34	949.01	Cathode
Conventional cathode collector bars	1.2×10^5	946.87	941.37	Bath
	1.0×10^5	946.85	941.42	Bath
	0.9×10^5	946.86	941.48	Bath
	0.47×10^5	946.76	946.90	Cathode

阴极钢棒电解槽的最高温度点位置具体位于图7(b)中白圈框定的区域,其最高温度点附近的钢棒和阴极炭块的温度分布情况如图8所示,在接触电导率进一步降低的情况下,该区域的接触压降将进一步增大,从

而在单位面积上产生更多的热量,温度将持续升高,若长期维持很高的温度,该区域出现钢棒缓慢融化(形成铁碳化合物,熔点降低)、阴极开裂的情况是有可能的。

由上述计算和分析表明,新型阴极钢棒电解槽出现阴极钢棒接触区域的温度超过熔体温度的风险要高于传统阴极钢棒电解槽,其主要原因在于新型阴极钢棒使得阴极钢棒接触区域的垂向电流密度有较大幅度的增加,进而增大了因电接触引起的发热量。如图7(b)中白色框定的区域,其平均垂向电流密度达到了 6843 A/m^2 ,相比而言,传统阴极钢棒电解槽同区域的平均垂向电流密度为 5009 A/m^2 。因此,对于新型阴极钢棒电解槽而言,都应对任何可能引起钢棒和阴极炭块连接区域的接触电导率下降的设计方案和施工措施给予高度重视,并有针对性地进行改良。

4 结论

1) 新型阴极钢棒由于其特殊的结构,能够使铝液中的电流更多地垂直流入阴极炭块,从而较大幅度地减小铝液中的水平电流,达到提高电解槽磁流体稳定性的目的。在本研究中,和传统阴极钢棒电解槽相比,新型阴极钢棒电解槽铝液中X方向上水平电流密度的平均值和最大值分别降低了34.3%和35.6%。

2) 新型阴极钢棒中绝缘材料的添加使得整个阴极电阻增大,槽电压有所升高,从而电解能耗增加。但结合目前已投入生产的新型阴极钢棒电解槽所获得的技术指标分析可知,其通过减小水平电流所带来的节能量大于由槽电压升高所增加的能耗量,因此,可节约电解能耗。在本研究中,新型阴极钢棒电解槽槽电压比传统阴极钢棒电解槽槽电压高出33 mV。

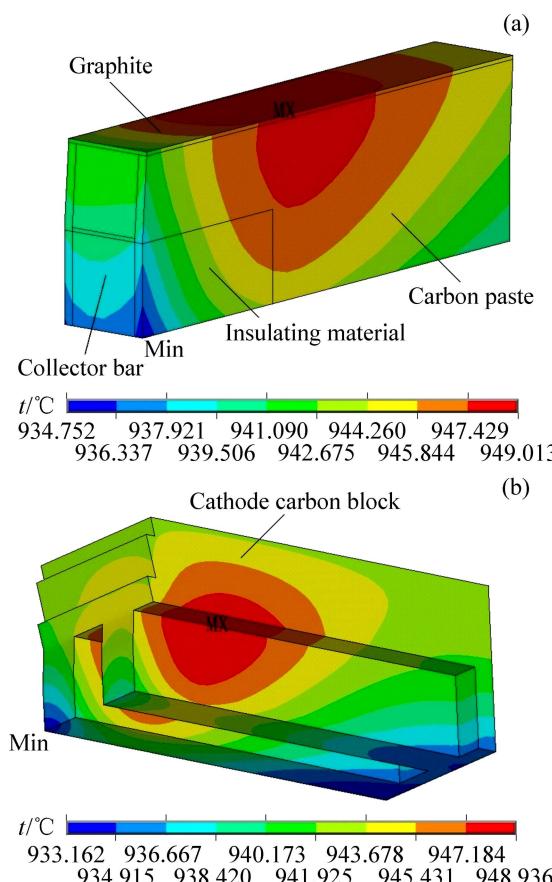


图8 钢棒与钢棒糊之间接触不良情况下新型阴极钢棒电解槽最高温度附近钢棒和阴极炭块温度分布

Fig. 8 Highest temperature distribution in cathode of aluminum reduction cell with innovative cathode collector bars under poor contact condition between cathode collector bar and its paste: (a) Cathode collector bar; (b) Cathode carbon block

3) 阴极钢棒和钢棒糊之间电接触的变化对新型阴极钢棒电解槽的温度分布具有较大的影响, 不良好的电接触将使新型阴极钢棒电解槽更容易出现阴极接触区域温度过高的现象。因此, 在新型阴极钢棒的应用过程中, 应高度重视阴极区域的设计方案和施工措施, 防止阴极炭块和钢棒连接区域接触电导率较低的情况出现。

REFERENCES

- [1] 刘业翔, 李 勘. 现代铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 324.
- LIU Ye-xiang, LI Jie. Modern aluminum electrolysis[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2008: 324.
- [2] SNEYD A D. Interfacial instabilities in aluminium reduction cells[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 236: 111–126.
- [3] ANTILLE J P, DESCLOUX J, FLUECK M, ROMERIO M V. Eigenmode and interface description in a Hall-Heroult cell[C]//ECKERT E C. Light Metals 1999. San Diego, CA: TMS, 1999: 333–338.
- [4] SUN H, ZIKANOV O, FINLAYSON B A, ZIEGLER D P. The influence of the basic flow and interface deformation on stability of Hall-Heroult cells[C]//KVANDE H. Light Metals 2005. San Francisco, CA: TMS, 2005: 437–441.
- [5] 徐宇杰, 李 勘, 张红亮, 赖延清. 基于非线性浅水模型的铝电解磁流体动力学计算[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 191–197.
- XU Yu-jie, LI Jie, ZHANG Hong-liang, LAI Yan-qing. MHD calculation for aluminium electrolysis based on nonlinear shallow water model[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(1): 191–197.
- [6] LINDSAY R I, DAVISON P A. Stability of interfacial waves in aluminum reduction cell[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 362: 327–331.
- [7] BOJAREVICS V, ROMERIO M V. Long waves instability of liquid metal-electrolyte interface in aluminum electrolysis cells: A generation of Sele's criteria[J]. European Journal of Mechanics B, 1994, 13: 33–56.
- [8] 刘业翔, 梁学民, 李 勘, 张红亮, 徐宇杰, 丁凤其, 邹 忠. 底部出电型铝电解槽母线结构与电磁流畅仿真优化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1688–1695.
- LIU Ye-xiang, LIANG Xue-min, LI-Jie, ZHANG Hong-liang, XU Yu-jie, DING Feng-qi, ZOU Zhong. Simulation and optimization of bus structure and eletric-magneto-flow field of aluminum reduction cells with vertical bottom bars[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1688–1695.
- [9] 梁学民, 李 勘, 张红亮, 王有山, 吕晓军, 张翮辉, 刘业翔. 静流式铝电解槽磁场仿真及设计[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2251–2257.
- LIANG Xue-min, LI Jie, ZHANG Hong-liang, WANG You-shan, LÜ Xiao-jun, ZHANG He-hui, LIU Ye-xiang. Magnetic field simulation and design of stationary stream pattern aluminum reduction cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2251–2257.
- [10] KAENEL R V, ANTILLE J. Modeling of energy saving by using cathode design and inserts[C]//LINDASAY S J. Light Metals 2011. San Diego, CA: TMS, 2011: 569–574.
- [11] JIANG Yan-li, FEN Nai-xiang, PENG Jiang-ping, WANG Yao-wu, QI Xi-quan. Calculation of aluminum flow field at interface of molten aluminum and electrolyte in new cathode aluminum cell[C]//JOHNSON J A. Light Metals 2010. Seattle, WA: TMS, 2010: 409–414.
- [12] DAS S, LITTLEFAIR G. Current distribution and Lorentz field modeling using cathode designs: A parametric approach[C]//SUAREZ C E. Light Metals 2012. Orlando, FL: TMS, 2012: 847–851.
- [13] 杨 帅, 李 勘, 徐宇杰, 张红亮, 张翮辉, 邹 忠, 赖延清. 铝电解槽钢棒加高型阴极对铝液中水平电流的优化[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2951–2959.
- YANG Shuai, LI Jie, XU Yu-jie, ZHANG Hong-liang, ZHANG He-hui, ZOU Zhong, LAI Yan-qing. Optimization of horizontal current in metal pad by using cathode with heightened collector bars in aluminum reduction cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2951–2959.
- [14] 沈阳铝镁设计研究院有限公司. 一种大幅降低铝电解槽铝液中水平电流的结构: 中国, 201020566373.2[P]. 2011-06-15. Shenyang Aluminum & Magnesium Engineering & Research Institute Co. Ltd. Method for greatly reducing horizontal current in aluminum liquid of aluminum electrolytic cell: China, 201020566373[P]. 2012-05-16.
- [15] LI Jie, LIU Wei, LAI Yan-qing, WANG Zhi-gang, LIU Ye-xiang. Analysis of cathode voltage drop in aluminum electrolysis cells with an electric contact model[C]//SORLIE M. Light Metals 2007. Orlando, FL: TMS, 2007: 465–470.
- [16] BEELER R. An analytical model for cathode voltage drop in aluminum reduction cells[C]//CREPEAU P N. Light Metals 2003. San Diego, CA: TMS, 2003: 241–245.

(编辑 李艳红)