

DOI: 10.3969/j.issn/1671-6841.2012.02.012

实验室用悬浮式阴极铝电解槽及其电场的有限元分析

薛慧涛, 王明星, 刘忠侠, 刘志勇, 韩昭勇, 石磊

(郑州大学材料物理教育部重点实验室 河南 郑州 450052)

摘要: 提出了一种实验室用悬浮式阴极铝电解槽的结构形式,并用 200 A 和 300 A 该结构电解槽分别进行了纯铝及铝-钪合金的电解试验,用 ANSYS 软件对电解槽内的电势及电流密度分布进行了有限元分析.结果表明,电解槽的结构是可行的,电流效率可达 80% 左右.特别适合在实验室中用于铝电解技术的研究.

关键词: 铝电解槽; 悬浮式阴极; ANSYS 软件; 有限元分析

中图分类号: TF 821

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2012)02-0052-04

0 引言

在实验室从事铝及铝合金的电解技术研究时,经常要使用小型铝电解槽.目前,小型铝电解槽所采用的基本上都是外面设有金属保护套的石墨槽作为阴极,石墨棒或碳棒作为阳极的结构形式.小型电解槽的工作原理与大型槽相同,但由于电解电流较小,电解过程中电流产生的热量少,不足以维持铝电解所需的 950 °C 左右的高温,因此,必须采用外加热的方法来保证电解过程的正常进行.对于这种外热式小型铝电解槽,在电解过程中,槽内电解质均处于熔融状态,电解电流有可能流向石墨槽的侧壁,形成侧部导电.侧部导电实际上是增加了阴极的导电面积,大大降低了阴极的电流密度,导致电解槽的电流效率极低,甚至可能因阴极电流密度低于临界值而使电解槽失去电解铝的能力^[1].为了避免侧部导电,通常的做法是将尺寸合适的氧化铝刚玉管套在石墨槽的内侧,以阻断电流流向电解槽侧壁的通路.这种做法对于短时间工作、电流只有几十安培的微型铝电解槽是可行的,但对于几百安培的小型铝电解槽是不适用的.其主要原因是由于冰晶石熔体对氧化铝刚玉管有很强的腐蚀作用,导致其在电解槽中不能长时间存在,因而限制了电解槽的正常工作时间.此外,直径较大的氧化铝刚玉管的价格昂贵,使用成本较高.小型铝电解槽所存在的问题给铝电解技术的实验室研究造成了一定的不便.

为了解决现有小型外热式铝电解槽存在的不足,作者从改变铝电解槽阴极、阳极结构出发,提出了一种悬浮式阴极小型铝电解槽的结构形式.并利用 200 A 和 300 A 该结构电解槽进行了纯铝及铝-钪合金的电解试验,利用 ANSYS 软件对电解槽内的电位和电流密度分布进行了有限元分析.

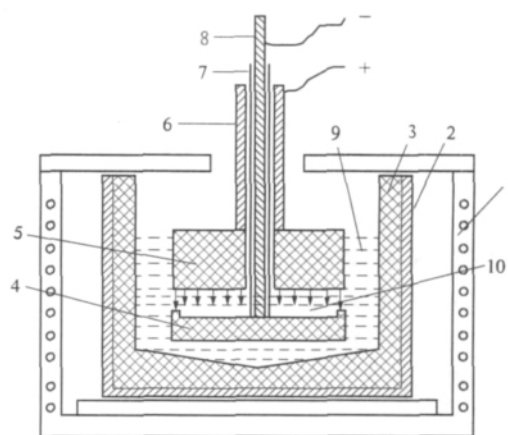
1 电解槽的结构及工作原理

图 1 给出的是悬浮式阴极铝电解槽的结构示意图.从图中可以看出,该电解槽与传统外热式铝电解槽的最大不同是,用一个石墨托盘作为电解槽的阴极,改变了传统铝电解槽用石墨槽体作为阴极的结构模式.由于石墨阴极托盘的边缘稍高,可以存放少量铝液并铺满整个阴极托盘,所以,在电解过程中,阴极托盘上的铝液是真正的阴极,这与一般的铝电解槽相同.

电解槽的工作原理是:先将冰晶石、氧化铝及其他添加剂按一定比例放入电解槽,在阴极托盘上放入少量纯铝.然后,电炉通电,开始加热,使电解质全部熔化.此时,阴极托盘上的纯铝也已熔化并铺满阴极托盘.将电解槽的阳极和阴极接入直流电解电源,电流经阳极导电管流入阳极并通过熔融电解质进入阴极托盘上

的铝液.随后,电流经过石墨阴极托盘和阴极导电棒流回电源.在此过程中,电解质中的 Al^{3+} 不断向阴极移动,并在铝液阴极附近获得电子,还原成铝原子而进入阴极铝液.随着电解过程的进行,阴极托盘上的铝液不断增加,当铝液面稍高于石墨阴极托盘的边缘时,铝液开始溢出并流入石墨槽.石墨槽的底部是漏斗式结构,这有利于铝液的收集和出铝,同时也可以减少铝液与电解质的接触面积,降低铝的溶解率.随着电解过程的进行,铝液不断溢出,阴极托盘上的铝液面高度保持不变,但由于氧化作用,阳极不断消耗,使极距逐渐增加,可以通过向上提升阴极托盘的办法调整极距.

从电解槽的结构可以看出,石墨槽体不是电解槽的阴极,不存在侧部导电问题.根据电解电流的大小,合理设计阴极托盘的尺寸,可以得到一个理想的阴极电流密度,从而获得较高的电流效率.另外,绝缘保护管可以使用氮化硅结合的碳化硅瓷管,该瓷管具有较强的抗冰晶石熔体腐蚀的能力,可在进行较长时间的电解试验时,保护阴极导电棒免受电解质熔体的腐蚀.并且保护管的尺寸小,价格便宜.



1: 加热电阻丝; 2: 石墨槽保护套; 3: 石墨槽; 4: 石墨阴极; 5: 石墨阳极; 6: 阳极导电管; 7: 绝缘保护管; 8: 阴极导电棒; 9: 电解质熔体; 10: 铝液

图1 悬浮式阴极铝电解槽的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aluminum reduction cell with suspended cathode

2 电解试验

为了检验悬浮式阴极铝电解槽的可行性,用该结构的电解槽分别进行了纯铝和铝-钪合金的电解试验.电解槽的阴、阳极均用石墨加工而成,阴极导电棒绝缘保护管选用的是氮化硅结合的碳化硅管.用500 A/60 V某型号直流电源作为电解电源,加热电炉的功率为25 kW可调.

2.1 纯铝电解试验

纯铝电解试验使用的技术参数为:电解电流为200 A,电源电压为9.5 V,石墨阴极托盘的有效面积为 298 cm^2 ,极距为4.5 cm,电解质组成为 $91\% Na_3AlF_6 + 5\% Al_2O_3 + 2\% MgF_2 + 2\% CaF_2$.从接通电解电源开始,电解试验连续进行了11.6 h.经过清理,共获得纯铝 $W=618\text{ g}$.用公式(1)算出纯铝电解试验的电流效率约为79.4%.

$$\text{电流效率}(\%) = \frac{W}{0.3356It} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为电解出的净铝量(g); I 为电流(A); t 为电解时间(h).

2.2 铝-钪合金电解试验

铝-钪合金电解试验使用的技术参数为:电解电流为300 A,电源电压为10.2 V,石墨阴极托盘的有效面积为 391 cm^2 ,极距为4.5 cm,电解质组成为 $91\% Na_3AlF_6 + 5\% Al_2O_3 + 2\% MgF_2 + 2\% CaF_2$,并加入一定量的氧化钪.电解试验持续了12 h.共电解出Sc含量为0.06%的Al-Sc合金964 g.通过公式(1)计算的电流效率约为80%.

从电解试验的过程中可以发现,电解槽运行稳定,熔融电解质有明显的沸腾现象,并且有绿火苗冒出,表明电解槽的电流效率较高,试验结果也证实了这一点.试验结束后,对电解获得的纯铝和铝-钪合金的成分进行了分析,发现样品中的铁和硅的含量稍高.这可能与试验过程中使用铁质工具和氮化硅结合的碳化硅管受铝液浸蚀有关.通过改善操作工具和选用合适的保护管,问题应该能够得到解决.总之,通过试验证明悬浮式阴极铝电解槽是可行的,结构是合理的,在无需保护的情况下,避免了侧部导电,而且电流效率较高,可以在实验室中用于铝电解技术的研究.

3 电解槽电场的有限元分析

3.1 电解槽内电磁场的数学模型及有限元分析模型的建立

从试验结果可以看出,悬浮式阴极铝电解槽的结构形式是可行的.为更全面地了解电解槽结构的合理

性,并且为电解槽的进一步改进提供理论依据,有必要了解电解槽内的电场分布和电流密度分布.为此,用 ANSYS 有限元分析软件对电解槽进行了有限元分析.与分析有关的电磁场的数学模型可参见文献 [2-4].

在分析过程中,为了避免确定阳极、阴极以及石墨槽体与电解质熔体接触面的电流边界条件,用 ANSYS 有限元分析软件对电解槽的电场进行了整体计算.按照电解槽的实际尺寸建立阳极、阴极、电解质以及槽体的实体模型并进行了网格划分,如图 2 所示.图 2 中,中间带圆孔的圆柱体为阳极(圆孔是阴极导电棒及其保护管的出口),中部圆环为电解质熔体,外部圆环则是电解槽的槽体,阴极包裹在电解质熔体中,其网络划分在图中的下部.极距取为 4.5 cm.对模型进行网格划分时,采用的是自由划分方式,划分的单元数共计 59 849 个,节点 85 426 个.

在 ANSYS 稳态电流传导分析中,采用 solid 98 单元,自由度为电压,载荷为电流.石墨与电解质熔体的电阻率等材料属性见文献 [5-6],采用温度 950 °C 时的材料参数.对阳极顶部面上的节点进行耦合电压自由度,从其面上任一个节点加载正值电流载荷,对阴极与阴极导电棒的连接面上的节点进行耦合电压自由度,设定为零势面,且对其面上任一个节点加载负值电流载荷,最后进行求解计算.求解电场时的边界条件为:

- 1) 取石墨阴极托盘与阴极导线棒连接面为基础电位,定义为零势面;
- 2) 阳极输入载荷电流为 300 A,阴极输出载荷电流为 -300 A,负号代表电流是流出方向;
- 3) 计算时不考虑反电动势,也就是不考虑分解电压和阳极过电压;
- 4) 槽体因没有与电源相连,其周围的空气视为绝缘.

3.2 分析结果及讨论

图 3 给出电解槽内电解质中的等电位分布图.从图中可以看出,槽体及其邻近区域的电解质基本上是一个等势体,且与石墨阴极之间的电压很低,在 0.5 V 以下,因此,在槽体与阴极之间形成的电流应该是非常小的.在阳极与阴极之间的区域内,等电位线的密度最大,表明该区域内的电位梯度最大,因而,电场强度最强,电流密度最大.

图 4 给出电流密度在电解槽中的分布情况,从图中可以看出,阴、阳极之间的电流密度分布最为密集,在中心区阴极导电棒绝缘保护管附近和边缘处尤为如此,而其他区域的电流密度分布很少.由此可见,电解电流从阳极流出后,主要是通过阴、阳极之间的电解质熔体流入阴极,只有少量电流从其他区域流入阴极,也就是说,电解电流主要从阴极的上表面进入阴极,然后再回到电源,这也正是我们所希望达到的效果.



图 2 铝电解槽模型的网格划分图
Fig. 2 Sketch of mesh of aluminum reduction cell model

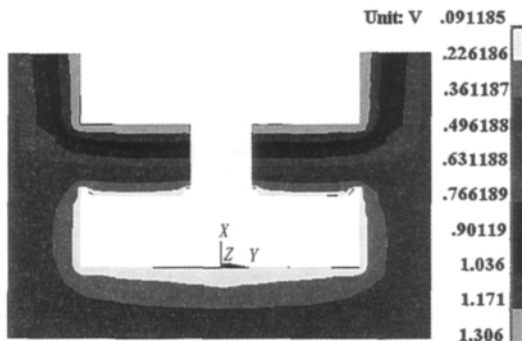


图 3 铝电解槽中电解质的等电位分布图
Fig. 3 Equipotential distribution of electrolyte in the aluminum reduction cell

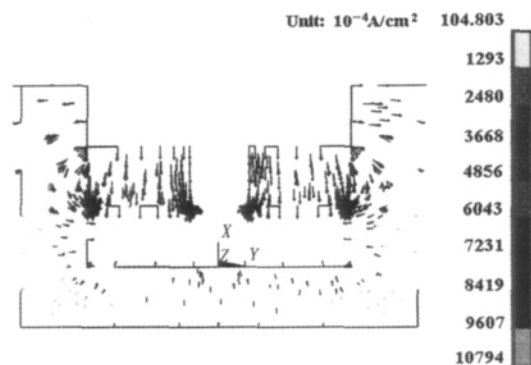


图 4 铝电解槽中电解质的电流密度分布
Fig. 4 Distribution of current intensity of electrolyte in the aluminum reduction cell

图 5 给出沿石墨阴极托盘上表面径向的电流密度分布曲线.从图中可以看出,阴极表面的电流密度分布不够均匀,在中心区阴极导电棒绝缘保护管附近和阴极表面边缘处,电流密度较大,这与图 4 显示的结果一

致.其原因可能主要与阴极托盘上表面的结构有关.为了避免铝液侵蚀阴极保护管,在其周围设有一个稍高于阴极表面的环形石墨凸台,而石墨阴极表面的边缘也稍高,高出阴极表面的部分会出现尖端效应,因而,该处的电流密度较高.尽管电解电流在阴极托盘上分布的均匀性较差,但电流密度的大小在整个阴极表面上均超过了铝电解所需的临界值 0.28 A/cm^2 ^[7],说明在电解过程中,铝的析出是可能的,而这一点已被实际的电解试验所证实.

4 结论

通过利用悬浮式阴极铝电解槽进行纯铝及铝-钪合金电解试验和使用 ANSYS 软件对电解槽内的电位及电流密度分布进行有限元分析,可以得出如下结论:

- 1) 悬浮式阴极铝电解槽的结构合理,不存在侧部导电问题.电解槽工作稳定,电流效率可达 80% 左右,可在实验室用于铝电解技术的研究.
- 2) 在阳极与阴极之间的区域内,等电位线的分布最为密集,表明该区域的电势梯度最大,电场强度最强;电解电流主要通过阴、阳极之间的电解质熔体流入阴极,只有少量的电流从其他区域流入阴极,电流利用率较高.

参考文献:

- [1] 邱竹贤. 铝冶金物理化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 240-245.
- [2] 刘中兴, 伍永福, 张宏光. 稀土熔盐电解槽电场的仿真模拟[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008(1): 34-37.
- [3] 高洁. 基于 ANSYS 的铝电解槽电场分布计算与电极结构优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 13-16.
- [4] 张榴晨, 徐松. 有限元在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 11-36.
- [5] Adachi M, Shioyama H. The temperature dependence of electrical resistivity of polycrystalline graphite in the range of 900 K ~ 2 800 K[J]. Carbon Techniques, 1991(146): 33-35.
- [6] 邱竹贤. 铝电解原理与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 107-112.
- [7] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 247-249.

Experimental Aluminum Reduction Cell with Suspended Cathode and Finite Element Analysis of Its Current Field

XUE Hui-tao, WANG Ming-xing, LIU Zhong-xia, LIU Zhi-yong, HAN Zhao-yong, SHI Lei
(Key Laboratory of Material Physics of the Ministry of Education, Zhengzhou University,
Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A structural style of aluminum reduction cell with suspended cathode was proposed. The electrolytic tests for producing pure aluminum and aluminum-scandium alloy were carried out by using 200 A and 300 A aluminum reduction cell with suspended cathode, respectively. The distributions of the potential and the current density of the aluminum reduction cell were analyzed by using the finite element software ANSYS. The results showed that the structure of the aluminum reduction cell with suspended cathode was rational. The current efficiency of the cell was about 80%. It was especially suitable for being used to study the aluminum electrolysis technology in laboratory.

Key words: aluminum reduction cell; suspended cathode; software ANSYS; finite element analysis

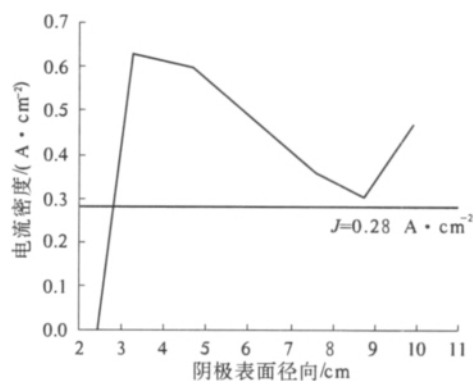


图5 阴极表面径向电流密度分布

Fig. 5 Current density distribution of cathode surface along radial direction