

- 泥初探[J]. 有色矿冶, 2015, 31(2): 36-38.
- [21] 陈学刚. 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术的现状与持续发展[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(1): 5-10, 29.
- [22] 许良, 霍佳梅. 再生铅回收绿色冶金[J]. 蓄电池, 2017, 54(6): 266-270.
- [23] 赵振波, 陈选元. 底吹直接脱硫还原废铅膏半工业试验[J]. 蓄电池, 2016, 53(5): 207-209, 213.
- [24] 吴艳新, 黄晓丰, 王拥军, 等. 废铅酸蓄电池铅膏底吹还原熔炼工艺及生产实践[J]. 世界有色金属, 2016(14): 97-98.
- [25] 李利丽, 赵振波, 陈选元. 双底吹熔炼铅膏生产再生铅的工业实践[J]. 资源再生, 2019(1): 58-60.
- [26] 赵振波, 陈选元, 李利丽, 等. 两种强化熔炼再生铅新工艺的比较[J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(4): 29-31.
- [27] 袁枚芝, 李勇, 刘涛, 等. 浅析再生铅行业清洁生产技术应用[J]. 有色设备, 2016, 30(2): 46-48.
- [28] 贾著红, 马雁鸿, 吴红林, 等. 一种 Ausmelt 炉处理废铅膏的方法: CN106756088A[P]. 2017-05-31.
- [29] 贾著红, 马雁鸿, 吴红林, 等. 一种顶侧熔炼处理废铅膏的方法: CN106756087A[P]. 2017-05-31.

(上接第9页)

- [3] 王作云. 论钢铁企业的氢气制取[J]. 工厂动力, 1998(3): 24-30.
- [4] Razzaq R, Li Chunshan, Zhang Suojian. Coke oven gas: Availability, properties, purification, and utilization in China [J]. Fuel, 2013, 113(nov.): 287-299.
- [5] 王维兴. 钢铁联合企业副产煤气如何科学利用[N]. 中国冶金报, 2016-01-28.
- [6] 胡建江, 谢国威. 钢铁企业煤气资源的利用途径[J]. 冶金能源, 2015, 34(3): 3-6, 35.
- [7] Onozaki M, Watanabe K, Hashimoto T. Hydrogen production by the partial oxidation and steam reforming of tar from hot coke oven gas [J]. Fuel, 2006, 85(2): 143-149.
- [8] Dehghani A, Bridjanian H, Farshi A. Selection separation method for hydrogen and light hydrocarbons gases from waste-gas streams of a petroleum refinery [J]. Petroleum Science and Technology, 2012, 30(21): 2196-2207.
- [9] 李佩佩, 翟燕萍, 王先鹏, 等. 浅谈氢气提纯方法的选择[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(3): 115-119.
- [10] 刘聪敏. 吸附法浓缩煤层气甲烷研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社化学与应用化学出版中心, 2005.
- [12] 王学松. 膜分离技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [13] 林刚, 陈晓惠, 金石, 等. 气体膜分离原理、动态与展望[J]. 低温与特气, 2003, 21(2): 13-18.
- [14] Shishatskiy S, Nistor C, Popa M, et al. Polyimide asymmetric membranes for hydrogen separation: influence of formation conditions on gas transport properties [J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 8(5): 390-397.
- [15] 聂飞, 贺高红, 窦红, 等. HYSYS 中膜分离单元的优化[C]//第二届石油和化工行业节能节水技术论坛论文集汇编. 南京, 2007.
- [16] 王鹏宇. 气体膜分离过程 HYSYS 模拟系统的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [17] Seader J D, Seider W D, Lewin D R. Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation [M]. Wiley, 2004.
- [18] 李国, 贺高红, 罗强. 催化裂化吸收稳定系统流程模拟及优化[J]. 化工进展, 2006, 25(S1): 57-60.

强化电流下 500 kA 铝电解槽工艺探析

刘 驰

(内蒙古锦联铝材有限公司, 内蒙古 霍林郭勒 029200)

[摘要] 在研究国内电解槽电流强化的空间、电流强化对电解槽热平衡和稳定性的影响的基础上, 针对国内某电解铝企业 500 kA 电解系列进行电流强化实践, 探讨了电流强化后应采取的措施。在生产中, 通过工艺参数调整, 采用“智能打壳+槽控机”双控制系统, 优化电压, 保持低分子比、高铝液水平、低铝液温度及过热度等措施, 500 kA 电解槽电流提升至 518 kA, 电流密度从 0.804 A/cm^2 提高至 0.833 A/cm^2 , 且获得了良好的热平衡及稳定性, 吨铝能耗降低了 $152 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 从而论证了电解槽强化电流的可行性。

[关键词] 强化电流; 铝电解槽; 电流密度; 热平衡; 分子比; 过热度; 电解槽稳定性

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2021)04-0016-04

DOI: 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.04.004

Discussion and Analysis on Technical Process of 500 kA Aluminum Cell under Intensified Current

LIU Chi

Abstract: Based on study of the space of intensified current and the effect of current intensification on cell heat balance and stability, the current intensification practiced on the 500 kA electrolytic cell line of an electrolytic aluminum enterprise in China was done, and the necessary measures to be taken after current intensification were discussed. During the production, by adjustment of process parameters, and the measures such as using “intelligent shelling + slot control” double control system, optimizing voltage, keeping low molecular ratio, high liquid aluminum level, low liquid aluminum temperature and super-heat, the current of 500 kA cell was increased to 518 kA, and the current density was increased from 0.804 A/cm^2 to 0.833 A/cm^2 , with good heat balance and stability, energy consumption was reduced by $152 \text{ kW}\cdot\text{h}$, which demonstrated the feasibility of intensified current applied on the cell.

Key words: intensified current; aluminum cell; current density; heat balance; molecular ratio; super-heat; stability

0 前言

受新冠疫情得到控制、经济恢复利好的刺激, 2020 年 4 月电解铝价格从 12 200 元/t 一路攀升至

2021 年 4 月的 17 700 元/t, 吨铝利润、铝价创近 9 年新高。在国家“能源双控”及“碳达峰、碳中和”的要求下, 如何在确保安全、环保的前提下, 降低吨铝能源消耗、提高铝液产量、增加企业经济和社会环保效益是电解铝企业需要认真研究的问题。

随着中国电解铝的飞速发展, 电解槽的设计水平越来越高, 国内铝电解槽的阳极电流密度逐步从 0.70 A/cm^2 提升至 0.81 A/cm^2 。某企业 500 kA 电解槽设计电流密度为 0.804 A/cm^2 , 通过工艺条件的优化、智能打壳及槽控系统的升级及精准的操作管理, 成功地将 500 kA 电解槽的电流提升至

[收稿日期] 2021-03-25

[作者简介] 刘驰(1977—), 男, 河南太康人, 本科, 工程师, 从事铝电解技术与生产管理, 现任内蒙古锦联铝材有限公司副厂长兼总工程师。

[引用格式] 刘驰. 强化电流下 500 kA 铝电解槽工艺探析[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(4): 16-19, 36.

518 kA,解决了电解槽的热平衡和稳定性问题,取得了吨铝能耗降低150 kW·h以上,铝液产量提升近4.65%的良好效果,经济效益、环保效益显著。

1 铝电解槽电流强化的空间

铝产量计算公式^[1]为:

$$Q = 0.3356It\eta \quad (1)$$

式中: Q ——铝产量,t;

I ——系列电流强度,kA;

t ——时间,h;

η ——电流效率,%。

根据式(1),提高电解槽产量有两种途径:一是提高电解槽的电流效率;二是提高系列电流强度。众所周知,对于电解铝厂来说,电解槽设计完成后,再要提高电流效率非常困难,一般电流效率有0%~3%的上升空间,但可能会以增加电力消耗为代价。而提高电流强度一直是国外电解铝广泛采用的成熟技术。表1是国内外电解铝厂提升电流的案例^[2]。

表1 电解铝企业强化电流的实施情况

企业名称	原设计 电流/kA	强化后 电流/kA	阳极电流 密度/A·cm ⁻²
法铝(AP30)	300	390	>0.99
海德鲁(Hydro)	420	450	>0.99
力拓加铝(Pechiney)	300	350	0.98
迪拜(Dubai)	300	370	>1.0
国内(SY500)	500	505	0.81
国内(DEU400)	400	408	0.81

从表1可以看出,国外阳极电流密度都超过了0.85 A/cm²,个别企业甚至达到了1 A/cm²,不仅产量得到了提升,而且电解槽指标优秀,成本降低明显。而我国的电解槽的阳极电流密度大部分低于0.81 A/cm²,与国外的0.85~1 A/cm²相差巨大。因此,我国电解槽电流提升有着巨大的潜力。

2 电流强化对电解槽热平衡的影响

在正常的铝电解槽生产过程中,槽电压和电流基本保持在一定的范围内,电解槽处于稳定的热平衡状态。当电解槽电流增加时,电解槽体系内产生的总热量发生变化,原来的热平衡就会被打破。

电解槽内的热量通过槽帮、侧部块、侧部耐火材料、钢棒及槽壳等传递到周围空气中。电流强化时,

由于电流增大,电解槽内的总热量会增加。增加的热量是电流变化值与电解质压降值的乘积。增加的热量使电解槽熔池内的熔体温度升高,从而导致槽帮表面的温度升高。当温度超过槽帮的初晶点温度时,槽帮就会熔化、减薄,热量经过侧部向外界环境传递时所遇到的热阻减少,因此传递的热量增加,最终引起电解槽槽壳表面温度升高;同时槽帮熔化,又会引起槽内电解质分子比升高,即电解质熔体的初晶点温度升高,从而减弱槽帮熔化的趋势。在这两方面的作用下,电解槽最终达到新的热平衡,此时电解槽的表面向外散发的热量恰好与电流升高而引起的槽内热量增加量相等^[2]。

综上所述,当电流强化时,若不采取任何技术措施,槽膛会变大,铝液镜面也会增大,铝的熔解损失增加,导致电流效率降低。因此,衡量强化电流后电解槽能否达到热平衡的标准在于:炉膛大小保持基本不变,电流效率不降低。国内外的生产实践表明,通过减少电解槽热收入和增加散热,可以有效解决电解槽电流强化后的热平衡问题,实现电解槽稳定运行。

3 电流强化对电解槽稳定性的影响

根据国际铝专家T.塞勒(T. Seil)提出的铝电解槽稳定性物理模型^[3],为使电解槽处于稳定生产状态,铝液高度和极距的乘积必须大于稳定性极限值,即:

$$D_s \times H_m > S \quad (2)$$

$$\text{其中,} \quad S = A \times B_z \times I_p \quad (3)$$

式中: H_m ——铝液高度,cm;

D_s ——极距,cm;

A ——常数,取 5×10^{-6} m/Gs·kA;

B_z ——垂直磁场强度算术平均值,Gs;

I_p ——电流强度,kA;

根据式(2)和(3),得到:

$$D_s \times H_m > A \times B_z \times I_p \quad (4)$$

式(4)表明,当电解槽系列电流强度和垂直磁场强度增大,则铝液稳定性降低;而当极距和铝液高度增高,则铝液稳定性增加。

当 D_s 、 H_m 、 B_z 不变时,电解槽稳定性与电流强度有很大关系。若提高电流,增大垂直磁场强度,则电解槽向不稳定方向发展。因此,若想在提高电流后继续保持电解槽的稳定性,则必须提高极距或铝液高度。在强化电流期间,原则上极距尽量保持不变,但对摆动较大的电解槽可以适当调高极距。随

着电流的强化,逐步提高铝液高度,可减弱磁场力对铝液的作用,使铝液隆起程度降低,铝液界面波动变小,从而提高电解槽的稳定性。

4 电流强化后的匹配措施

4.1 采用“智能打壳+槽控机”双控制系统

随着控制技术的发展,在日常操作和工艺参数一定的情况下,与传统控制方式相比,智能打壳系统和槽控机的有效结合能大大减轻工人劳动强度,精准地提高电解槽氧化铝浓度的均匀性,让工人有充足的精力管理维护电解槽。

智能打壳系统及槽控机控制的中心任务是实现电解槽热量和物料的动态平衡,不出现粘锤头包、堵料、卡锤头现象,实现电解槽平稳、高效运行,降低人工劳动强度。在电流强化条件下,阳极电流密度升高,电解槽的敏感性非常强。除了实现传统功能,智能打壳系统和槽控机还能实现如下功能:

- 1) 电磁阀结构适应气缸动作,气缸响应速度快,可以减少打壳锤头接触电解质时间。
- 2) 电解槽下料口状态检测准确率超过 90%,火眼冒火率 67% 以上。
- 3) 打壳和下料实现异步。
- 4) 每个下料点均可实现单点打壳和单点下料。
- 5) 每个下料点均可实现单点停料。
- 6) 槽控机可以自动判断和处理堵料、结包问题,需要时可以自动停止加料。
- 7) 窄氧化铝浓度(1.8% ~ 2.8%)控制功能,实现氧化铝的平稳添加和完全熔解,并通过过量、欠量加工形式的频繁转换来减弱过量、欠量加料对电解槽热平衡体系的干扰,保持稳定的低氧化铝浓度。

8) 动态的目标寻优。把浓度控制的下料间隔与过热度控制结合起来,实现下料间隔、电压等参数的自动寻优。

4.2 严格精细的标准化操作

采用电流强化(高阳极电流密度)模式生产,熔体流速会增加,极距和稳定性边界范围变小,必须采用精细的标准化操作,才能保证电解槽磁流体的稳定,进而保持电压和氧化铝浓度处于槽控机的控制区间,为计算机控制创造适宜的条件,从而取得较高的电流效率。

4.3 合理匹配电解工艺技术条件

我国电解质体系分为高锂盐电解质体系(LiF

含量 7% 以上)、中锂盐电解质体系(LiF 含量 3% ~ 7%)和低锂盐电解质体系(LiF 含量 3% 以下)。在此仅讨论低锂盐电解质体系。生产实践表明:保持合理匹配的技术条件是电解槽长期稳定运行的前提,也是电流强化成功的基本要求。针对电流强化后热量增加及磁流体稳定性降低的问题,必须采取提高电流效率、增加能量利用率、增加散热以保持热平衡、提高铝液高度、稳定磁场的措施。

4.3.1 优化电压

电压的大小归根到底反映的是极距的高低,若增大极距,铝的氧化损失会减少,电流效率会提高;但若极距过高,电解质压降升高,电能消耗会增加,导致温度升高,电流效率下降。若缩小极距,铝的氧化损失会增加,电解质压降降低,电能消耗降低,从而电流效率也会降低^[1]。一般来说,从生产成本角度考虑,在低电价区域,采用高电压策略;在高电价区域,采取低电压策略,但高电流密度电解槽极距一般不低于 40 mm,对应的电压保持在 3.88 ~ 4.00 V,500 kA 槽型低锂盐电解质体系电压一般保持在 3.90 ~ 4.00 V。

4.3.2 保持低分子比

在生产实践中,分子比是决定电解槽稳定性的重要因素,选择合适的分子比最为重要。低分子比有利于降低电解温度,减少铝的氧化损失,提高电流效率,有文献^[1]报道,分子比每降低 0.1,电流效率提高 0.5%。但是,分子比也不能过低,因为若分子比过低,电解质的导电率下降,生产中容易掉电压,甚至产生“压槽”事故。另外,分子比降低,会导致电解质熔解氧化铝的能力下降,产生沉淀,引起电解槽摆动,降低效率,提高电耗。受制于国内氧化铝的现状,500 kA 槽型低锂盐电解质体系的分子比为 2.2 ~ 2.4,运行稳定,效率较高^[3]。

4.3.3 保持较高的铝液高度

较高的铝液水平,有利于提高电流效率。在相同条件下,如果槽内铝水平较高,因铝的导电性好,热量可很快散发出去,使槽温均匀,同时还可利用铝的导热性来降低槽温,使炉膛稳定,收缩铝液镜面,减少铝液损失。另外,较高的铝液水平,可以削弱水平电流与垂直磁场的交互作用力,使铝液更加稳定,以弥补磁场不平衡所产生的不足,有利于提高电流效率^[2]。但铝液水平过高又会导致电解槽走冷行程、化上口的槽帮,引发病槽,降

低电流效率。500 kA 槽型低锂盐电解质体系的铝液高度一般保持在 25 ~ 29 cm。

4.3.4 较低的铝液温度及过热度

确定电压、电解质分子比、铝液高度后,铝液温度和过热度也就基本确定。根据菲克(Fick)第一定律^[4] $Rm = Dt \times dc/dz$ (其中 Rm 是铝的反熔速率, Dt 是电解质中紊流和层流扩散速率, z 是由边界层算起的垂直距离, c 为极距),当铝液温度升高时,铝在电解质熔体中饱和溶解度增加,铝与电解质熔体间的界面张力降低,电解质的循环速度加快,扩散率随着温度的升高而增大。故电解温度升高时,扩散速率增大,铝的二次反应加剧,铝的损失加大,电流效率降低。

据文献报道,在同等的外部环境及装备条件下,电解液温度每降低 10 °C^[4],可使电流效率提高 2% ~ 3%,原因主要是温度升高后,铝的溶解度和扩散速度增加,尤其是扩散至阳极氧化区时速度增加明显,电流效率损失加大。所以,在铝电解生产中,尽量选择低温生产。但分子比确定后,初晶点温度也就确定了,而铝液温度为初晶点温度与过热度之和,要想进一步降低铝液温度,只有尽可能保持低的过热度。500 kA 槽型低锂盐电解质体系电解温度一般在 945 ~ 955 °C,过热度为 8 ~ 10 °C。

5 强化电流下 500 kA 铝电解槽生产应用

5.1 主要技术参数运行情况

某企业于 2020 年 1 月在 500 kA 电解槽系列推广应用电流强化工艺技术,经过近 3 个月的调整,电解槽各项技术参数稳定,生产运行平稳,表 2 是强化电流前后技术参数的对比。

通过以上技术条件的配置,电流强化(电流提升 3.6%)后,电解槽实现了在高电流密度、高铝液水平、低温、低过热度、低氧化铝浓度、低效应系数条件下的稳定运行,电解槽的炉膛没有变大,反而更加规整,消除了角部伸腿生长的隐患,为降低能耗、提高产量奠定了基础。

5.2 主要技术经济指标

电解槽的稳定运行,规整的炉膛内型,为取得良好的技术经济指标打下了基础,表 3 是强化电流前后电解槽的技术经济指标对比情况。

从表 3 可以看出,电流效率提升了 1.45%,吨铝电耗降低了 152 kW·h,炭耗降低了 9 kg/t,指标取

得了明显提升。

表 2 强化电流前后 500 kA 电解槽技术参数对比

序号	技术条参数	电流强化前	电流强化后
1	系列电流/kA	500	518
2	设定电压/V	3.90 ~ 3.96	3.93 ~ 3.99
3	平均电压/V	3.92 ~ 3.99	3.95 ~ 4.01
4	电解质水平/cm	15 ~ 18	15 ~ 18
5	铝液高度/cm	25 ~ 27	27 ~ 29
6	槽温/°C	950 ~ 960	945 ~ 955
7	过热度/°C	8 ~ 12	6 ~ 10
8	分子比	2.45 ~ 2.55	2.3 ~ 2.4
9	氧化铝浓度/%	2.0 ~ 3.5	1.8 ~ 2.8
10	锂盐浓度/%	1.3 ~ 1.8	1.3 ~ 1.8
11	阳极电流密度/A·cm ⁻²	0.804	0.833
12	1秒以上效应系数/(次/槽/日)	0.12	0.07
13	针振值/mV	10 ~ 14	12 ~ 16
14	炉帮厚度/cm	16 ~ 18	15 ~ 18
16	保温料厚度/cm	20 ~ 22	18 ~ 20

表 3 强化电流前后电解槽的技术经济指标对比

序号	技术经济指标	电流强化前	电流强化后
1	单槽日产量/t	3.69	3.88
2	运行电流/kA	500.00	518.00
3	槽电压/V	3.98	3.99
4	电流效率/%	91.70	93.03
5	直流电耗/kW·h·t ⁻¹	12 933.00	12 781.00
6	氧化铝单耗/kg·t ⁻¹	1 916.00	1 916.00
7	炭块毛耗/kg·t ⁻¹	458.00	449.00
8	氟化盐单耗/kg·t ⁻¹	16.50	18.20
9	吨铝炭渣量/kg·t ⁻¹	0.55	0.35

6 效益分析

6.1 经济效益

按照一个电解槽系列产量 50 万 t/a 计算,仅核算节约的电能与增加的产量效益,炭块和氟化铝等指标的增加和降低忽略不计。

1) 整流效率按 0.98 计算,全年节约电能: $500\,000 \times (12\,933 - 12\,781) / 0.98 = 77\,551 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。

2) 全年生产按 365 d 计算,采用 360 台电解槽,全年增产: $(3.88 - 3.69) \times 365 \times 360 = 24\,966 \text{ t}$ 。

(下转第 36 页)