

# 240 kA 铝电解槽新型节能阴极内衬结构的研究与应用

李 贤

(青海桥头铝电股份有限公司, 青海 西宁 810100)

**[摘要]** 某公司采用的铝电解槽在低电压生产工艺下存在角部伸腿肥大、电解质水平偏低、换极后电压摆动偏多等问题,利用电解槽大修机会,通过选用异型阴极钢棒、高石墨冷捣糊,改进人造伸腿,采用磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装技术和新型内保温材料,对电解槽阴极内衬结构进行优化改进。改进后,新型节能阴极内衬结构电解槽炉底压降降低了 39 mV,铝液电解直流电耗降低了 249 kWh/t-Al,保温效果和节能效果显著提高,确保了铝电解槽在低电压生产工艺下的能量平衡和长期稳定运行。

**[关键词]** 铝电解槽; 阴极内衬结构; 异型阴极钢棒; 炉底压降; 技术指标

**[中图分类号]** TF821      **[文献标志码]** B      **[文章编号]** 1008-5122(2021)01-0058-04

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.01.012

## The Research and Application of New Energy-Saving Cathode Lining Structure for 240 kA Aluminum Reduction Cell

LI Xian

**Abstract:** The aluminum electrolytic cell used in a company had the problems of large angle extension legs, low electrolyte level and excessive voltage swing after pole change under low voltage production process. The cathode lining structure of aluminum reduction cells was optimized and improved by selecting special-shaped cathode steel bars and high graphite content cold ramming paste, improving artificial extension legs, and using phosphorus pig iron casting cathode steel bar carbon block assembly technology and new internal insulation materials. After improvement, the bottom pressure drop of the new energy-saving cathode lining structure aluminum reduction cell was reduced by 39 mV, and the direct current consumption of aluminum liquid electrolysis was reduced by 249 kWh/t-Al, and the insulation effect and energy saving effect were significantly improved, which ensured the energy balance and long-term stable operation of aluminum reduction cell under low voltage production process.

**Key words:** aluminum reduction cell; cathode lining structure; special-shaped cathode steel bar; bottom pressure drop; technical index

## 0 前言

中国铝工业正处于重要的历史时期,电解铝产能“天花板”已经形成,许多电解铝企业承受着高电价或环保政策的巨大压力,部分电解铝企业面临着

**[收稿日期]** 2020-09-26

**[作者简介]** 李贤(1980—),男,青海民和人,大学本科,高级工程师,主要从事铝电解技术管理工作。

关闭或产能置换的风险。电解铝企业的工程技术人员不断进行技术创新,主要从阴极钢棒的材质、结构和导电率,内衬保温结构及材料的性能等方面进行研究,确保电解槽在低电压下能够维持能量平衡和平稳运行,使各项技术指标得到改善,从而提高企业核心竞争力。

## 1 传统阴极内衬结构存在的问题

某公司系列电解槽传统阴极内衬设计采取底部保温、侧部散热的设计思路。随着低电压生产工艺的逐步实施,槽电压降至 3.95 V 左右时,电解槽出现角部伸腿肥大、电解质水平偏低、换极后电压摆动偏多等现象<sup>[1]</sup>。分析电解槽的运行情况可知,原有的能量平衡状态已经打破了。通过采取外保温、强化操作质量等一系列措施进行弥补,电解槽还是达不到能量平衡。因此,为了进一步实施低电压生产工艺,必须优化电解槽阴极内衬结构。

电解槽的内衬结构优化设计主要从以下几方面考虑:

1) 减少铝液水平电流,减缓铝液波动,减少铝的二次反应,提高电解槽稳定性。

2) 改善阴极钢棒的材质和结构,增大阴极面积及导电率,降低炉底压降。

3) 保证电解槽在低电压下的能量平衡,解决制约低电压生产工艺实施的因素,确保电解槽在低电压下能够稳定运行,采用内保温结构设计技术。

基于以上几个问题,利用电解槽大修机会,选用异型阴极钢棒、高石墨冷捣糊,改进人造伸腿,优化阴极组装机,采用新型内保温材料,对电解槽阴极内衬结构进行优化。异型阴极钢棒可降低炉底压降,减少水平电流;高石墨冷捣糊具有环保性能、捣实性能及较小的焙烧收缩率;人造伸腿改造对加强侧部陶瓷纤维板保护及形成规整炉膛有积极作用;磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装技术可以降低炉底压降;内保温结构设计在低电压生产工艺中可确保电解槽能量平衡。

## 2 新型节能阴极内衬结构

### 2.1 异型阴极钢棒

自低电压生产工艺实施以来,随着槽电压的逐步降低,电解槽运行稳定性慢慢变差。为了提高电解槽稳定性,国内外诸多铝行业技术人员通过改变阴极钢棒的结构、材质和提高导电率等措施研

制了多种异型阴极钢棒<sup>[2-9]</sup>,以降低铝液的水平电流及炉底压降,进一步实现低电压生产,降低铝电解槽的直流电耗。

某公司研究应用的异型阴极钢棒将传统的通长型阴极钢棒改为分段式、加宽、加高的阴极钢棒,阴极钢棒尺寸由 4 330 mm × 65 mm × 180 mm 调整为 2 065 mm × 70 mm × 230 mm。分段式结构可减少钢棒的热变形,有效延长阴极炭块的使用寿命;增加钢棒高度和宽度可增大钢棒导电面积,降低炉底压降,减少水平电流。

由于阴极钢棒结构、尺寸发生了变化,从阴极组装、生产安全等技术角度考虑,对阴极炭块也作了相应的调整,将阴极炭块高度由 450 mm 调整到 480 mm,将阴极炭块的燕尾槽宽度由 90 mm 调整到 95 mm,将阴极炭块燕尾槽深度由 200 mm 调整到 230 mm。

### 2.2 高石墨冷捣糊

高石墨冷捣糊施工前,不需要对炭块、钢棒及糊料进行加热,施工温度为 17 ~ 42 °C,因为在该温度范围内施工高石墨冷捣糊极少有挥发,施工现场环境良好,有利于施工人员的身体健康,同时可大幅度降低劳动强度。焙烧启动期间,糊料与阴极炭块、糊料与异型炭块之间易产生大的收缩缝,人造伸腿易被冲掉,高石墨冷捣糊可有效解决上述难题。在温度 20 ~ 950 °C 内,冷捣糊的焙烧收缩率 ≤ 0.15%。

### 2.3 人造伸腿的改造

为了避免在高铝水平生产工艺下出现炉帮冲刷、侵蚀问题,形成完整的炉膛内型,减少铝液水平电流,将人造伸腿高度由 240 mm 提高到 275 mm。此外,在电解槽砌筑时,碳化硅砖、人造伸腿及陶瓷纤维板之间的间隙用氧化铝填满,确保电解槽启动初期的安全运行。

### 2.4 磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装

磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装技术能有效降低阴极钢棒与阴极炭块的接触压降,提高阴极钢棒耐腐蚀性能和导电性能,保证电解槽的磁流体稳定性和炉底压降,提高电解槽内衬的使用寿命,同时为铝电解生产节能提供空间<sup>[10]</sup>。

采用磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装技术,钢棒加热温度应控制在 600 ~ 700 °C,阴极炭块加热温度应控制在 450 ~ 550 °C,使炭块适应高温熔化磷生铁浇铸的热震,防止预热温差过大产生的强烈热冲击导致阴极块出现裂纹。

磷生铁具有良好的流动性、导电性能、冷脆性、膨胀性。采用磷生铁浇铸钢棒炭块组装技术,需要科学合理地调配磷生铁的成分。磷生铁成分直接影响浇铸钢棒炭块的组装质量及后期电解槽运行过程的炉底压降,故对浇铸磷生铁的常规五大元素 C、Si、Mn、P、S 进行了优化调整,磷生铁优化前后成分

表 1 磷生铁优化前后各元素含量

成分	C	S	Si	P	Mn
优化前含量/%	2.00 ~ 2.80	0.12 ~ 0.20	2.50 ~ 3.50	0.90 ~ 1.50	0.80 ~ 1.20
优化后含量/%	3.30 ~ 3.50	<0.15	1.80 ~ 3.00	0.80 ~ 1.30	0.50 ~ 0.70

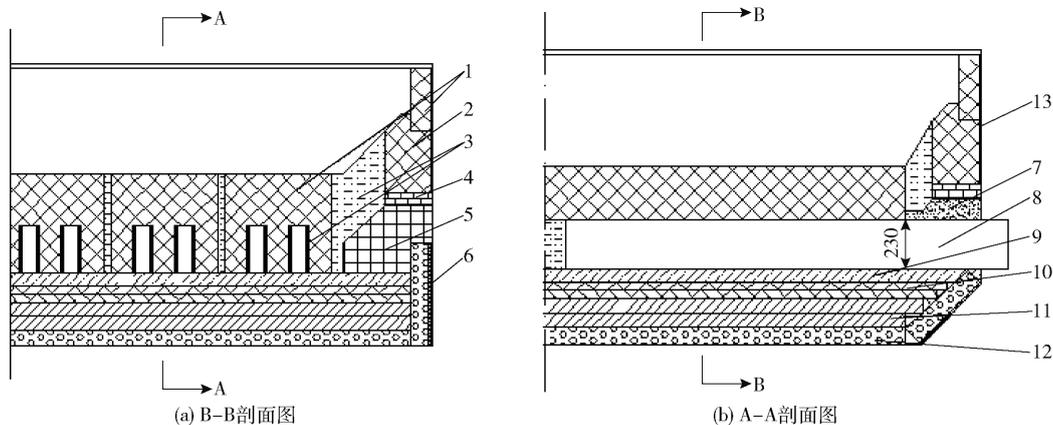
根据电解槽结构特点,将电解槽分为 4 个区域:侧部熔体区、侧部阴极区、侧下部保温区、底部保温

见表 1。

## 2.5 内保温结构设计

随着电解槽低电压生产工艺的进一步推进,如何确保电解槽具有稳定的能量平衡、合理的温度分布以及形成理想的炉膛内型,成为技术研发的重要课题。

区。按区域对电解槽结构及热平衡设计进行分析,电解槽阴极内衬结构优化改进如图 1 所示。



1 - 侧部调整炭块、底部炭块; 2 - 侧部异形炭块; 3 - 炭间糊、周围糊; 4 - 耐火砖; 5 - 高强浇注料; 6 - 陶瓷纤维板; 7 - 轻质浇注料; 8 - 阴极钢棒; 9 - 干式防渗料; 10 - 蛭石防渗隔热砖; 11 - 蛭石保温砖; 12 - 硅酸钙保温板; 13 - 纳米板

图 1 铝电解槽内衬结构设计示意图

1) 侧部熔体区: 铝液和电解质直接接触的侧部炭块及人造伸腿区域。该区域的结构及热平衡设计,决定了电解槽对应的工作电压及炉帮的形成状态,影响电解槽的安全稳定生产及各项技术指标。设计该区域结构时,采用了侧部异形炭块,在炭块与槽壳之间加厚度为 10 mm 的陶瓷纤维板保温层。

之所以选择侧部异形炭块,是因为侧部异形炭块整体烧制成型,其上槽施工较扎糊便捷,不会在生产过程中产生扎糊分层的情况,整体性优于扎糊。

2) 侧部阴极区: 熔体区以下,阴极炭块与槽壳间的区域。电解槽生产过程中,阴极炭块吸钠,最终会导致槽壳变形和炭块中部隆起甚至折断,所以侧部阴极区的设计采用陶瓷纤维板、低强保温砖、高强浇注料的结构。陶瓷纤维板抗压性能低,受力后容易收缩,是缓冲应力的理想材料,但是陶瓷纤维板受潮后,性能将大打折扣,所以在含水浇注料与陶瓷纤

维板之间添加低强保温砖,起隔潮、保温和进一步缓冲膨胀的作用。

3) 侧下部保温区: 侧部阴极区以下,船型槽壳斜面区域。该区域的保温对于阴极炭块内部的温度分布及炉底压降会产生一定的影响。因此,侧下部保温区的设计采用 20 mm 厚陶瓷纤维板和 80 mm 厚硅酸钙保温板的结构。

4) 底部保温区: 阴极底部至槽壳底部的区域。该区域底部结构应具有足够的耐压强度,能够抵御重力、内应力引起的变形;同时,底部保温区还应具有较好的保温性能,以减少阴极表面沉淀。所以底部保温区的结构设计自下而上采用 65 mm 厚硅酸钙保温板、130 mm (2 × 65 mm) 厚蛭石保温砖、84 mm (2 × 42 mm) 厚蛭石防渗隔热砖、69 mm 厚干式防渗料。

电解槽砌筑时要注意:所有缝隙均用氧化铝粉填充;蛭石防渗隔热砖采用专用粘接剂湿砌;蛭石保

温砖、蛭石防渗隔热砖与槽底斜面的硅酸钙保温板接触处的缝隙使用蛭石防渗隔热砖粉料填充。

### 3 新型节能阴极内衬结构应用效果

#### 3.1 炉底压降

某公司在 10 台 240 kA 铝电解槽上完成了新型节能阴极内衬结构改造,目前电解槽已安全运行了 657 d。对同期焙烧启动的 10 台新型节能阴极内衬结构电解槽和传统阴极内衬结构电解槽的炉底压降进行统计、分析,结果见表 2。

表 2 两种电解槽的炉底压降测量结果

项目	炉底压降/mV
传统阴极内衬结构电解槽	304
新型节能阴极内衬结构电解槽	265

从表 2 可以看出,新型节能阴极内衬结构电解槽与传统阴极内衬结构电解槽相比,炉底压降平均降低了 39 mV,这表明新型节能阴极内衬结构电解槽的炉底压降降低效果比较明显。

#### 3.2 保温效果

电解槽阴极内衬结构优化改进后,随机抽取几台传统阴极内衬结构电解槽和新型节能阴极内衬结构电解槽,测量分析钢棒温度、槽帮温度、炉底温度,结果见表 3。

表 3 两种电解槽的各项温度测量结果

项目	钢棒	槽帮	炉底
	温度/℃	温度/℃	温度/℃
传统阴极内衬结构电解槽	286	352	147
新型节能阴极内衬结构电解槽	245	274	82

从表 3 可以看出,新型节能阴极内衬结构电解槽与传统阴极内衬结构电解槽相比,钢棒温度、槽帮温度、炉底温度分别降低了 41 ℃、78 ℃、65 ℃,这表明新型节能阴极内衬结构电解槽的内衬保温结构保温效果比较明显。

#### 3.3 技术经济指标

电解槽阴极的内衬结构优化改进后,统计分析了传统阴极内衬结构电解槽和新型节能阴极内衬结构电解槽的技术经济指标,结果见表 4。

从表 4 可以看出,新型节能阴极内衬结构电解槽与传统阴极内衬结构电解槽相比,电流效率有所损失,但是平均电压降低了 90 mV,铝液电解直流电耗降低了 249 kWh/t-Al,这表明电解槽阴极内衬结

表 4 两种电解槽的技术经济指标统计分析结果

项目	电流	平均	直流电耗/
	效率/%	电压/V	(kWh/t-Al)
传统阴极内衬结构电解槽	92.20	3.98	12 864
新型节能阴极内衬结构电解槽	91.89	3.89	12 615

构优化改进后节能效果非常显著。

### 4 结束语

利用电解槽大修机会,通过选用异型阴极钢棒、高石墨冷捣糊,改进人造伸腿,采用磷生铁浇铸阴极钢棒炭块组装技术和新型内保温材料,对电解槽阴极内衬结构进行优化改进,解决了电解槽在低电压生产工艺下角部伸腿肥大、电解质水平偏低、换极后电压摆动偏多等问题,确保电解槽在低电压下的长期稳定运行,也取得了显著的节能效果,降低了企业生产成本,提高铝行业的核心竞争力。

#### [参考文献]

- [1] 郎学春,李贤. 保温型内衬结构在 240 kA 铝电解槽上的应用[J]. 有色冶金节能,2014,30(4):23-25,33.
- [2] 杨帅,李劼,徐宇杰,等. 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.
- [3] 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:CN201020566373.2[P]. 2011-06-15.
- [4] 中南大学. 一种可调控铝液中水平电流的铝电解槽阴极结构:CN201110089796.9[P]. 2011-09-14.
- [5] 湖南中大业翔科技有限公司. 一种非均匀导电的铝电解槽阴极结构:CN2011201113203.2[P]. 2011-11-23.
- [6] 尹诚刚,李劼,徐宇杰,等. 新型阴极钢棒对铝电解槽电热场的影响[J]. 中国有色金属学报,2014,24(1):246-253.
- [7] 赵应彬,王平,陈谦. 300 kA 新式异型阴极双钢棒铝电解槽生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分),2014(2):28-30.
- [8] 李劼,尹诚刚,张红亮,等. 铝电解槽异型阴极钢棒的对比仿真研究[J]. 轻金属,2013(1):40-47.
- [9] 李勇,刘升,王有来,等. 全保温型内衬配置在 300 kA 铝电解槽上的应用[J]. 有色金属(冶炼部分),2012(10):20-22.
- [10] 王运江,王世民,温铁军,等. 新型纳米孔节能材料在 300 kA 电解槽上的应用[J]. 轻金属,2012(4):38-40,44.