

铝电解槽新型节能阴极结构技术的探究与应用

李成元, 刘京领, 王攀, 张坤, 练新强, 王玉西
(云南神火铝业有限公司, 云南 文山 663400)

[摘要] 石墨化阴极、高导电钢棒以及磷生铁浇铸技术在铝电解生产中逐步得到应用并取得一定效果。本文介绍了石墨化阴极炭块、高导电钢棒的优势以及磷生铁浇铸的步骤和要点,并基于生产实践对比石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸组装的阴极电解槽和半石墨质阴极+普通钢棒+糊料捣打组装的阴极电解槽的组装压降、启动后的炉底压降、电压、电流效率等经济指标。实践表明,石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸组装的阴极结构不仅可以有效降低阴极炭块与钢棒之间的压降,还可以提高电流效率,降低电耗,提高电解槽运行的稳定性,具有较好的节能降耗效果。

[关键词] 电解铝; 石墨化阴极; 高导电钢棒; 磷生铁浇铸; 节能降耗

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)03-0068-04

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.03.012

0 引言

当前,节能降耗是我国实现节约资源与保护环境的重要抓手,也是我国能源发展战略的核心内容^[1]。铝电解是铝产业链中高耗能、高排放的冶炼环节。自2021年8月26日国家发展和改革委员会印发《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》(发改价格[2021]1239号)以来,节能降碳成为当前电解铝企业生存和发展的首要议题。近几年,电解铝行业在优化筑炉材质的同时,积极探索并开发了系列新技术,如阳极开槽技术、阳极导杆与钢爪直焊技术、石墨化阴极技术、磷生铁浇铸技术等^[2],这些技术在实际应用中均取得了一定的节能效果,为行业的低碳转型提供了有力支持。

本文介绍了磷生铁浇铸+石墨化阴极+高导电钢棒浇铸组合的铝电解槽新型节能阴极结构技术的

优点、组装工艺要点,并基于生产实践,重点分析该技术对炉底压降、电压和电流效率等指标的影响。

1 铝电解槽新型节能阴极结构的优势

铝电解槽的炉底压降又称阴极压降,包括阴极炭块压降、阴极炭块与阴极钢棒连接压降、阴极钢棒压降三部分^[3]。电解槽炉底压降主要受阴极炭块材质、钢棒材质以及组装工艺影响。铝电解槽新型节能阴极结构主要选取的石墨化阴极、高导电钢棒以及磷生铁浇铸工艺。

1.1 石墨化阴极优势

石墨化阴极与普通半石墨质阴极相比,其优势主要体现在以下几方面。

1) 石墨化阴极电阻率通常不大于 $12 \mu\Omega \cdot m$ ^[4],而半石墨质阴极炭块电阻率通常在 $21 \sim 35 \mu\Omega \cdot m$,石墨化阴极电阻率小,导电性能良好,可以直接降低电解槽阴极物理压降,为降低设定电压创造空间。

2) 石墨化阴极炭块具有较低的钠膨胀率,可以更好地阻止钠通过炭块进入钢-炭接触面,使阴极压降的变化较为平缓^[5]。石墨化阴极的抗钠渗透性使其寿命可达2 000~3 000 d,而半石墨质阴极通常为1 200~1 800 d,相较而言,石墨化阴极可减少停槽检修频率。

3) 在高温(950℃)冰晶石-氧化铝熔盐环境中,石墨化阴极的化学稳定性更强,表面腐蚀速率低于半石墨质阴极,可减少腐蚀导致的阴极厚度损失。石墨化阴极的热膨胀系数($(1 \sim 3) \times 10^{-6}/^{\circ}C$)远低于

[收稿日期] 2024-09-20

[作者简介] 李成元(1988—),男,黑龙江宁安人,硕士,高级工程师,主要从事电解铝生产技术及管理工作。

[通信作者] 刘京领(1970—),男,硕士,高级工程师,主要从事冶炼生产管理和技术研究工作。

[引用格式] 李成元,刘京领,王攀,等. 铝电解槽新型节能阴极结构技术的探究与应用[J]. 绿色矿冶,2025,41(3): 68-71,76.

LI Chengyuan, LIU Jinling, WANG Pan, et al. Exploration and application of new energy saving cathode structure technology for aluminum electrolytic cells[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2025,41(3):68-71,76.

于半石墨质阴极($(4 \sim 6) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),在电解槽启动或温度波动时不易开裂。

4)石墨化阴极的密度更高($1.75 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$),硬度更大,能承受铝液流动和电磁力的机械冲刷,减少表面剥落;半石墨质阴极密度低($1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$),更易磨损。且石墨化阴极的抗压强度($25 \sim 35 \text{ MPa}$)高于半石墨质阴极($15 \sim 25 \text{ MPa}$),在电解槽装炉和运行中更耐压。

因此,石墨化阴极凭借其良好的导电性、较低的吸钠膨胀率、稳定的化学性、高密度和优异的抗压强度,在节能降耗和延长槽寿命上更具优势。

1.2 高导电钢棒的优势

高导电钢棒具有更高的导电性能,这得益于其优化的材料成分和制造工艺。高导电钢棒与普通钢棒的成分对比见表1。

表1 高导电钢棒与普通钢棒成分对比 %

元素	C	Si	Mn	P	S
普通钢棒	≤ 0.12	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 0.035	≤ 0.04
高导电钢棒	≤ 0.008	≤ 0.006	≤ 0.003	≤ 0.012	≤ 0.03

从表1可以看出,高导电钢棒的各项杂质元素明显低于普通钢棒,为降低其电阻率提供条件。高导电钢棒的电阻率($13 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)低于普通钢棒($18 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$),所以高导电钢棒内部电流流动时遇到的阻力更小,从而降低了电能损耗。这种特性使得高导电钢棒在降低电解槽的炉底压降、优化电解槽内水平电流分布、实现电解槽的平稳高效运行等方面具有更高优势。此外,高导电钢棒还可降低铝电解过程中的吨铝直流电耗,实现节能降耗的目的。

1.3 磷生铁浇铸的优势

阴极钢棒与阴极炭块之间的接触压降在组装时期就已经由组装方式决定^[6],目前其组装方式有两种。

一种是糊料捣打,即利用糊料填充钢棒和阴极之间的缝隙,并进行捣实将两者连接到一起的方法。受炭素材料收缩及电解质侵蚀的影响,利用糊料捣打方式组装的阴极炭块在启动后期随着槽龄的增加,其阴极压降上升幅度较大。

另一种是磷生铁浇铸,即将融化的磷生铁浇铸在阴极钢棒与阴极炭块之间的缝隙中,冷凝后使之成为一体的方法。阴极炭块磷铁浇铸技术不仅可以降低“铁-碳”压降及铝液水平电流,还可以改善阴极电流分布的均匀性,提高电解槽运行的稳定性^[7]。

通过对比不难看出,磷生铁浇铸组装的阴极电解槽的阴极压降更具优势。

2 磷生铁浇铸组装工艺

新型节能阴极结构如图1所示。磷生铁浇铸组装工艺主要分几个步骤:即预组装、阴极炭块和钢棒的预热、组装后期处理。在组装过程中,磷生铁的成分配比、预热温度、浇铸顺序等都会影响阴极的浇铸质量和使用寿命。

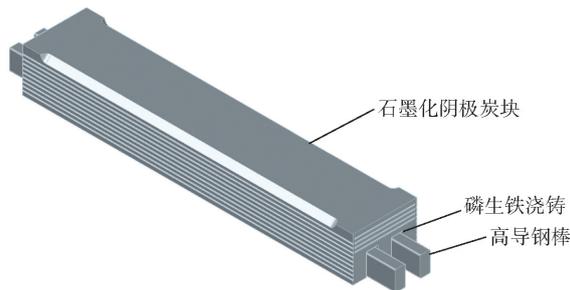


图1 阴极炭块组结构示意图

2.1 预组装

2.1.1 操作前的检查

操作前对阴极炭块进行全面检查,确保阴极炭块无裂纹,无明显掉角,尺寸等外观符合要求。检查钢棒是否进行了抛丸处理,钢棒表面氧化层是否清理干净,确保后期组装压降,尺寸检验合格。

2.1.2 钢棒与阴极炭块的组合

首先,在钢棒端头标记出钢棒探出阴极炭块的具体位置,以此作为将钢棒吊入阴极炭块的标线,在阴极炭块端头标记后期石英砂填充的位置。

其次,在阴极钢棒放入燕尾槽之前,在阴极钢棒两端的落点放置石棉板和硅酸铝纤维绳,其主要作用是将阴极钢棒两侧垫高,避免阴极钢棒和阴极炭块接触,方便后期拆除后用碳化硅火泥填充空隙。

最后,使用天车将抛丸处理后的阴极钢棒吊入阴极炭块燕尾槽,要求钢棒高出阴极炭块的高度尽量保持一致,若某侧高度偏低,可增加端头的石棉板,若略高,可用大锤夯实。

钢棒与阴极炭块组装遵循的最主要原则:钢棒放入燕尾槽后应尽量放在中间,钢棒与燕尾槽两侧的间距要尽量保持一致,从而保证后续浇筑过程的空间,以及确保燕尾槽内的钢棒与阴极平炭块整,角度合适,间距准确。

2.1.3 石英砂的填充

首先,将石英砂与水玻璃混合(可采用混捏锅搅拌),要求混合后的石英砂手抓能成团。如果水玻璃过少,封堵效果不好;如果水玻璃过多,不利于后续石英砂的清理。

其次,将混合好的石英砂填充到钢棒中间缝隙,重点填充钢棒与阴极炭块之间的缝隙、阴极炭块燕尾槽内槽,并将钢棒下侧也填充石英砂,捶打夯实。

最后,将特殊工具按照之前的标记插入,确保钢棒与阴极炭块垂直,将混合好的石英砂填充到钢棒与阴极炭块端头之间的燕尾槽缝隙中,填充后捶打夯实。

2.2 阴极炭块和钢棒的预热以及浇铸

2.2.1 阴极炭块和钢棒的预热

阴极炭块与钢棒的预热原理是将相邻两组阴极炭块内的8根钢棒串联后形成一个闭合的回路,通电后钢棒会逐步发热,而阴极炭块则通过钢棒发热后的热辐射进行加热。

预组装好的阴极炭块放入加热小车前,先确定好阴极炭块摆放位置,要求阴极钢棒与加热设备一一对应。阴极炭块放置尽量保证水平,若同一组阴极两端高度存在差异,须进行调整。

加热设备通过气动的方式与阴极钢棒紧密衔接,如果阴极加热设备与钢棒接触不良,会出现打火现象。通过阴极加热设备控制器设置加热温度和时间。加热时间一般控制在2.5~3.0 h,要与磷生铁融化进度相匹配。加热期间采集3个钢棒和3个阴极炭块的温度,温度因阴极炭块和钢棒大小不同而有所差异,一般控制在400~600℃。

2.2.2 磷生铁的熔炼和浇铸

磷生铁熔炼过程的加料顺序:先在熔炼炉底部加入石墨碎(作为增碳剂),然后一次性将废铁加满炉,开始通电加热;待废铁融化一部分后依次加入锰铁、废铁继续加热,要求每次废铁都加满炉;待炉内铁水量达到2/3时,将磷铁、硅铁、废铁依次加入;待整炉化满铁水时,将上层铁渣打捞干净,并加入除渣剂3~4 kg。

磷生铁熔炼过程要注意两点。第一要控制各元素的配比,若配比达不到要求,则会影响磷生铁浇铸的质量。各元素在磷生铁水中的作用见表2。

第二要控制好铁水出炉的温度和浇铸温度。一般铁水出炉的温度控制在1450℃左右,根据季节会有所调整,浇铸时的温度不应低于1300℃。保证温度的主要目的是防止浇铸过程温度过低,铁水流动性变差,而不能将整个浇铸区域浇铸满,从而导致钢棒和阴极的接触面积减少,最终影响组装压降。

磷生铁浇筑过程:首先将加热炉与阴极钢棒脱离,操作加热小车退出加热箱;将熔炼好的磷生铁水倒入小包内,将上层铁渣打捞干净并添加3~4 kg除渣剂;将小包吊至加热小车附近,并将倒水口对准

表2 磷生铁水中各元素的作用及控制范围

名称	作用	控制范围/%
碳	调整铁水温度,有利于提高导电性能,可使铸铁膨胀,抵消冷却时的体积收缩	2.8~3.3
硅	可以减少铸铁收缩,促进石墨化进程	2.8~3.1
锰	增加铸铁收缩,具有脱硫作用,还具有石墨化作用,含量不宜过高	0.5~0.8
磷	增加铸铁收缩,具有脱硫作用,还具有石墨化作用,含量不宜过高	1.0~1.2
硫	具有热脆性,降低流动性,造成气孔收缩、热膨胀,影响铁-碳压降	≤0.1

需要浇筑的阴极炭块。将小包内的磷生铁水浇铸到钢棒与阴极炭块之间的缝隙中,整个浇铸过程要流畅均匀、落点准确。

3 生产实践

通过测量采用磷生铁浇铸技术组装的石墨化阴极和高导电钢棒的阴极压降,统计通电后的炉底压降和运行后的经济指标,并与采用普通方式组装的阴极电解槽进行对比。

3.1 组装压降

测量利用不同组装方式组装的两种阴极的铁-碳压降,测量电流均采用200 mA,测量位置也一致。测量结果见表3。

表3 不同组装形式的阴极组装压降

类型	测量电流/mA	测量间距/m	测量组数/组	压降平均值/mV
石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸	200	1	28	22.5
半石墨质阴极+普通钢棒+糊料捣打	200	1	28	43.6

通过表3可看出,石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸技术组装的阴极的铁-碳压降只有22.5 mV,而利用普通组装方式组装的阴极铁-碳压降达到了43.6 mV。由此可见,前者具有明显优势,可为后期电解槽降低电压提供有效空间。

3.2 炉底压降

将采用磷生铁浇铸技术和糊料捣打方式组装成的两种阴极分别用于两台电解槽,并对通电后每个月的炉底压降变化进行跟踪,具体情况如图2所示。

由图2可以看出,启动初期采用磷生铁组装的阴极电解槽炉底压降只有175 mV,而采用普通组装方式的电解槽启动压降高达267 mV;且随着时间的延长,炉底压降不断上升,一年后采用糊料捣打方式

组装的阴极电解槽炉底压降较启动初期上涨了24 mV,而采用磷生铁组装的阴极电解槽阴极炉底压降仅上升了8 mV,较为稳定。

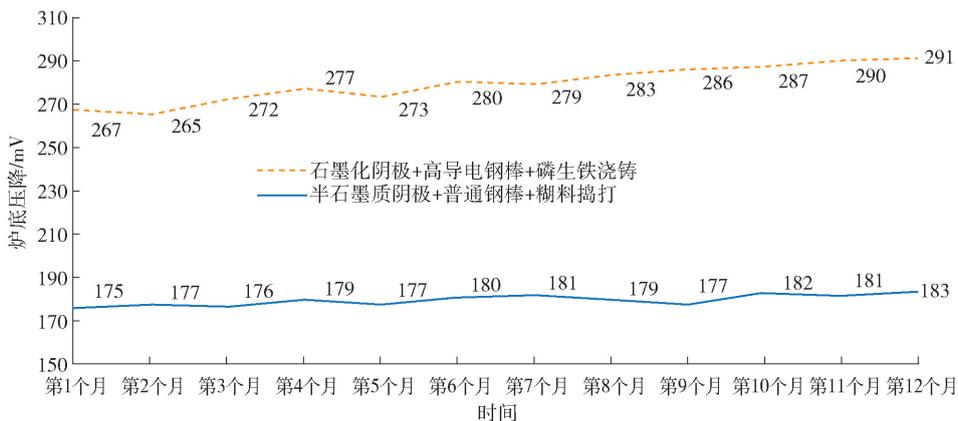


图2 两种组装方式组装成的阴极电解槽炉底压降变化

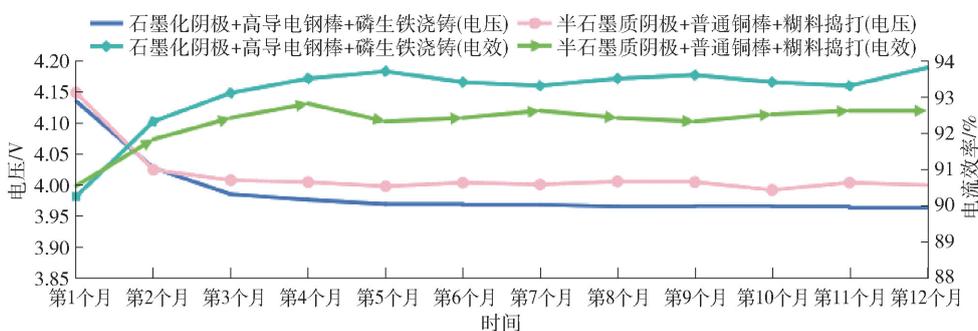


图3 两种组装方式组装成的阴极电解槽电压和电流效率变化

从图3可以明显看出,石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸组装的阴极电解槽在电流效率和电压方面都有较好的表现,3个月的非正常期过后其电压一直保持在3.962 V左右,电流效率一直保持在大约93.3%,折合直流电耗约12 654 kW·h/t,半石墨质阴极+普通钢棒+糊料捣打组装的阴极电解槽3个月非正常期过后电压基本维持在4 V左右,电流效率约为92.5%,折合直流电耗约12 886 kW·h/t。由此可见,石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸的阴极在节能降耗上有明显的优势。

4 结论

本文在介绍磷生铁浇铸过程和难点的基础上,对比了石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸组装和半石墨质阴极+普通钢棒+糊料捣打组装的阴极电解槽的指标情况。实践结果表明,石墨化阴极+高导电钢棒+磷生铁浇铸的组合方式在电流效率、电压方面较普通半石墨质阴极+普通钢棒+糊料捣打的组装方式分别高出0.8%、38 mV,在电耗上则

3.3 电压和电流效率指标情况

将两种阴极组成的电解槽通电后,对其电压和电流效率指标进行统计,结果如图3所示。

减少232 kW·h/t,具有良好的节能降耗效果。

[参考文献]

- [1] 张阳,巨建龙,胡红武,等. 石墨化阴极浇铸技术在200 kA铝电解槽的应用实践[J]. 轻金属,2023,(7):33-36.
- [2] 韩博,廖长总,李威,等. 绿色低碳深度节能电解技术体系在330 kA电解系列上的应用[J]. 绿色矿冶,2023,39(4):41-45,77.
- [3] 王令丰. 铝电解槽阴极炭块组装压降与炉底压降关系分析[J]. 轻金属,2013,(2):42-44.
- [4] 工业和信息化部. 铝电解用石墨化阴极炭块:YS/T 699—2018[S]. 北京:冶金工业出版社,2018.
- [5] 卢延峰,白斌,曹曦. 石墨化阴极炭块在400 kA节能型电解槽上的应用[J]. 有色冶金节能,2017,33(3):31-34.
- [6] 李成元,张宁,马军创. 电解槽启动初期炉底压降升高原因分析及处理措施探讨[J]. 山西冶金,2023,46(5):182-184.
- [7] 侯金龙,胡红武. 500 kA铝电解槽新式节能阴极结构技术的应用研究[J]. 有色设备,2018,31(4):19-22.

Experimental Research on the Recovery of Alkali Metal Salts from the Fly Ash of Alumina Rotary Kilns

LI Shaohui¹, MA Haiyan¹, YANG Yingzhuo¹, XU Honggang², LIU Xiwu¹, JIANG Mei³

(1. Shandong Aluminium Vocational College, Weihai 264402, China;

2. Chalco Southeast Copper Co., Ltd., Ningde 352100, China;

3. Chalco Shandong Co., Ltd., Zibo 255051, China)

Abstract: In this paper, potassium chloride was recovered from the electric dust of alumina rotary kiln by water leaching method. The effects of different treatment conditions on the recovery of potassium chloride from fly ash in the processes of water leaching dissolution, impurity removal and purification, and segmented crystallization were investigated. The effects of liquid-solid ratio, seed addition and other factors on the separation and purification of KCl were investigated. The test results show that the effective recovery rate of potassium chloride is more than 90%, and the KCl product is a single phase, which meets the industrial potassium chloride standard. The process of extracting potassium chloride by water immersion method is simple, safe, low equipment requirements, energy saving and environmental protection, which provides a new idea for the resource utilization of electric dust collection in alumina rotary kiln.

Key words: rotary kiln; electrostatic precipitator; potassium chloride; water-immersion; recycling and utilization

(上接第 71 页)

Exploration and Application of New Energy Saving Cathode Structure Technology for Aluminum Electrolytic Cells

LI Chengyuan, LIU Jingling, WANG Pan, ZHANG Kun, LIAN Xinqiang, WANG Yuxi

(Yunnan Shenhuo Aluminum Co., Ltd., Wenshan 663400, China)

Abstract: Graphitized cathode, high conductive steel rod and phosphorus pig iron casting technology have been gradually applied in electrolytic production and achieved certain results. In this paper, the advantages of graphitized cathode and high conductive steel bar, as well as the steps and key points of phosphorus pig iron pouring were introduced. Based on the production practice, the economic indexes such as assembly voltage drop, furnace bottom pressure drop, voltage and current efficiency after start-up of cathode electrolytic cell assembled by graphitized cathode + high conductive steel bar + phosphorus pig iron casting and cathode electrolytic cell assembled by semi-graphitic cathode + ordinary steel bar + paste tamping were compared. The results show that the cathode structure assembled by graphitized cathode + high conductive steel rod + phosphorus pig iron casting can not only effectively reduce the iron-carbon voltage drop between the cathode carbon block and the steel rod, but also improve the current efficiency, reduce the power consumption and improve the stability of the electrolytic cell operation, which has a good effect of energy saving and consumption reduction.

Key words: electrolytic aluminum; graphitized cathode; highly conductive steel rod; cast phosphorus pig iron; energy saving and consumption reduction