

铝电解阳极炭渣减量化工艺研究与应用

王晓东, 张坤*

云南神火铝业有限公司, 云南 富宁 663400

DOI:10.61369/ERA.2025120004

摘要: 介绍了炭渣的现有来源及其对铝电解工艺的影响, 分析了在阳极炭块组装环节降低炭耗的措施, 以及在电解操作中减少炭渣产生的策略。总结了减少阳极炭渣的经验和技术措施, 这些措施显著提高了电解槽的电流效率, 有助于实现效益和产量的双重提升, 从而增强企业的盈利能力。

关键词: 铝电解; 炭渣; 电解槽; 炭阳极

Research and Application of Reduction Process for Anode Carbon Residue in Aluminum Electrolysis

Wang Xiaodong, Zhang Kun*

Yunnan Shenhuo Aluminum Industry Co., Ltd., Funing, Yunnan 663400

Abstract: This paper introduces the existing sources of carbon residue and its impact on the aluminum electrolysis process. It analyzes measures to reduce carbon consumption during the assembly of anode carbon blocks and strategies to minimize carbon residue generation during electrolysis operations. The paper summarizes the experiences and technical measures for reducing anode carbon residue, which have significantly improved the current efficiency of electrolytic cells and contributed to the dual enhancement of benefits and output, thereby strengthening the profitability of enterprises.

Keywords: aluminum electrolysis; carbon residue; electrolytic cell; carbon anode

引言

现代工业中, 金属铝的生产主要依赖于使用 Na_3AlF_6 和 Al_2O_3 的熔盐进行电解法。这个过程通常采用预焙阳极电解槽进行操作, 其中炭块阳极不仅发挥导电作用, 还参与化学反应。目前, 在全球范围内生产1吨铝通常会消耗约400公斤的阳极材料, 而理论上的消耗仅为334公斤, 这之间存在显著差距。过度使用阳极部分可能会进入电解质系统, 导致生成炭渣。据统计, 每生产一吨原铝, 大约会生成5到15千克的炭渣。2017年, 中国的原铝产量达到了3227万吨, 电解铝企业因此生产了约29万吨炭渣。炭渣含有氟等有害成分, 因此可能会对生态系统构成危害。这种废弃物在2016年被列入了《国家危险废物名录》, 编号为321-025-48, 并被鉴定为具有T类危险性质。这些炭渣会影响电解质系统, 导致电力消耗增加, 因此必须予以清除。从水中获取的炭渣中富含氟化物, 因此被视为危险废物, 对生态环境造成严重威胁。

根据国家政策规定, 炭渣不能随意丢弃或露天堆放, 必须在电解铝厂内进行无害化处理, 或委托具备资质的机构负责处理。电解铝行业面临处理高成本的危险废物和缴纳环保税的困扰, 所以, 找到一种高效的方式来管理铝电解过程中的炭渣并实现其资源化利用, 成为亟待解决的问题。

一、炭渣的来源

在高温条件下, 电解质中的碳阳极会受到气体的侵蚀或发生氧化反应, 从而导致碳残渣的产生。电解槽内形成的炭渣不仅仅是因为预焙阳极的质量问题造成的。铝电解槽内的炭渣可以通过多种方式形成: (一) 当铝电解过程进行时, 阳极炭块表面由于氧化作用而脱落, 这是炭渣形成的主要原因之一。(二) 在预焙

阳极的电化学反应中, 随着反应周期的持续进行, 阳极逐渐被耗损。这会造成高残极与周围保温材料之间的裂缝出现, 而阳极表面的高温氧化剥落是炭渣生成的主要原因。(三) 在标准生产过程中, 铝电解槽中的阴极炭块会与电解质中的钠离子反应, 同时受到高温液态铝的腐蚀和冲刷。这一过程使阴极炭块变得多孔松散, 最终导致其剥落并形成炭渣。

作者简介: 王晓东 (1974-), 男, 云南永城人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 金属冶炼生产工艺管理工作。

通讯作者: 张坤 (1973-), 男, 河南夏邑人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 金属冶炼生产工艺管理工作。

二、炭渣对铝电解生产过程的影响

（一）炭渣对槽控机模糊控制系统的影响

如果电解槽中的电解质中积累的炭渣^[2]没有及时清理，将直接影响氧化铝在电解质中借助超浓相输送后的溶解速度。在生产中，电解质含有高碳成分，导致火眼口更容易因电解质飞溅而形成结壳。这显著影响了电解槽接收的进料量。在这种情况下，槽电阻的变化可能会干扰槽控机的模糊控制机制，使得氧化铝浓度的判断不准确，甚至可能引发系统失稳。此类问题可能会导致槽控机发出错误指令，或持续过度加工，进而使氧化铝在炉底过量沉积，最终造成炉底不断恶化。

（二）炭渣对主要经济指标的影响

当液态电解质中的碳渣浓度达到特定的临界水平时，电解质电阻将显著增加，导致电解槽的操作电压升高。此情况可能扰乱电解槽的能量平衡，并导致温度升高。当阳极底部积累的炭渣达到一定水平时，电解槽中的垂直电流将逐步减弱，而水平电流则会增强并流向侧壁。这将增加电解槽的热量负担，导致直流电能的消耗量增加。

（三）炭渣对电解槽槽况的影响

如果电解槽中电解质的炭渣积累过多而未被及时去除，这会使电解槽的工作电压提升，增加发热量，导致电解质温度上升，异常过热。这种情况最终会导致热槽效应，从而显著影响电解厂各个生产区域的正常运行。在电解车间或工区中发生热槽现象时，这会悄然降低电解槽的电流效率，并导致平均电压升高。在电解池中，由于阳极的氧化反应和阴极的钠吸附，会加速引发膨胀和损坏问题。

（四）炭渣对系列安全的影响

在当下，许多大型预焙铝电解槽普遍应用的是中部投料的工艺技术。这种工艺通过在电解槽中实现磁场、电场和热场的平衡，促使电解质与铝液保持连续流动。在这个过程中，生成的炭渣会随着电解质和铝液的流动而移动，并在电解槽侧面的宽广区域堆积。当炭渣积累过多时，可能导致槽内阳极温度升高，形成长炭渣包。在这种情况下，水平电流容易在炭渣和长包位置的侧面引起局部的过热和放电，导致炉壁严重发热变红，可能引发漏炉问题，从而对整个系列的安全稳定运行带来重大威胁。

三、组装生产阳极炭块的降炭措施

（一）保持石油焦成分的一致性。

与供应商紧密互动，以保障石油焦采购计划的稳固。炉顶料中的钒含量必须维持在680PPm以下，而炭阳极中的钒含量应控制在600PPm以下。石油焦配料系统设备的正常运行和配料的精准性，需要对石油焦配料的皮带秤进行不定期检查。此外，还需定期对这些皮带秤进行校准。

1. 稳定残极加入比例

目前，残留物中的灰分、铁和钠含量相对较高，所以不适合进行过高比例的混合。残余率应保持在11%到13%范围内，最高

用量不可超过15%。调整残极滚筒筛的转速，定期检查除铁设备的工作状态，并在皮带输送机上添加磁性滚筒，以有效管理残极中的铁和钠含量。

2. 做好煅烧炉维护维修

通过使用热修、冷修和大修等技术，提升煅烧炉的密封效果，确保每台炉子运行的稳定性，保证煅后焦的质量符合标准，并提高其产量。我们要求加速在煅烧炉上安装自动控温设备，以减少因控温技术和责任心因素对煅后焦质量的影响，从而保障其质量的稳定性。

3. 优化阳极生料的配比和流程管理，持续改善生产控制参数

400kA和500kA阳极在强度、密度以及电阻率特性上有所不同。虽然单个块的重量会有所影响，但仍然可以通过改进配方和混合工艺来提升。引入纯度检测装置有助于提高研磨制粉的纯净度。为符合理规要求，纯度必须达到或超过80%。调整混合物配方，确保大颗粒的比例维持在21%以上。为确保工厂沥青的质量，需将宝舜沥青的应用比例控制在不超过五分之一。探讨通过延长材料的混合时间和降低混合时的温度，以提高混合质量，从而进一步增加糊料的可塑性；在成型过程中，需要严格控制振动的持续时间、激振力和振动高度。振动时间应设定在110到120秒内，振动高度应保持在665至670毫米之间。这种调整有助于确保阳极的强度和体积密度保持均匀。

4. 优化焙烧升温曲线

在适当的情况下，应尽可能延长保持温度的时间。高保温时间 $\geq 60h$ ；提高装炉质量，通过精确控制炉面红料、负压和温度差等焙烧工艺参数，保证阳极焙烧过程的稳定性。将控制排烟架的温度差维持在 $\pm 30^{\circ}C$ （边火通道控制在 $\pm 40^{\circ}C$ ）。4P燃烧架的温度差应保持在 $\pm 10^{\circ}C$ ，而5P和6P燃烧架的温度差需限制在 $\pm 5^{\circ}C$ 以内，以保证阳极焙烧工艺的质量稳定。

5. 优化阳极黏结物清除工艺

加强对阳极粘接填料的清理和检查工作。若自动化设备未能彻底清理，需要及时调整清理机器人，并进行人工辅助清理。

四、电解生产中的炭渣减量措施

为及时有效降低电解生产中的炭渣量，应采取以下主要措施：

1. 提高对电解槽的管理和维护，以避免阳极氧化带来的问题。在更换极片的过程中，需要迅速添加原料，并调整其边缘形状，从而保证保温材料的紧密贴合，防止阳极暴露。尽量减少使用大锤头，以避免其对中缝绝缘材料或电解质造成损害。发现材料接触点上有阳极氧化现象时，建议采用氧化镓电解质进行防护。

2. 加强对电解槽换极操作质量的管理，确保炉膛保持清洁，确保技术条件的稳定和合理，避免阳极发生故障并防止电解温度升高。极转换周期被调整为35天，同时剩余极点的高度维持在16厘米以上。

3. 强化阳极浇铸的管理，保证浇铸工艺的优良，防止由于

质量缺陷出现阳极偏流、破损或脱落的问题，以避免局部温度升高，进而减轻阳极氧化的风险。

4. 加强对电解槽技条件的监控，确保其平稳运行，减少长效效应的出现，并防止因技条件不当而引起电解质过热。

5. 增加清理炭渣的频率，减少电解质中的炭渣量，以提升电解质的导电性能。为避免炭渣积累、电解液电阻增大、局部放电及极距过低等因素引起的电解温度上升等负面现象，必须降低阳极掉渣的概率。^[3]

6. 对炭渣的捞取量进行精准测量和统计，进行详细分析，并与阳极炭块生产公司保持及时沟通与反馈。这将有助于精确地评估炭阳极的品质，并为制定相应的提升质量措施奠定基础。

五、结束语

炭阳极的质量问题以及电解铝生产中管理的难题，导致炭渣

含量上升，使得炭阳极的单耗指标提高。这种情况对电解槽的安全稳定运行和经济效益造成了显著的负面影响。

通过调整工艺参数和优化炭渣回收操作，维持合适的电解质浓度及其过热程度，加强电解槽的日常保养，并执行标准化回收程序，对回收的炭渣进行二次分离处理。^[1]

通过采取这些行动，电解槽中的炭渣明显减少，氟盐的使用量也下降，同时电流效率显著提高。此外，这也确保了电解槽内部的清洁和设备状态的稳定。1月份时，每吨铝料能产生约3公斤的铝炭渣，而到了3月份，这个数字下降到平均1.5公斤铝炭渣，每天的炭渣回收量因此减少了3.7吨。自从实施三班倒工作制度以来，捞渣频次下降，减少了人为操作的干扰，电解质的波动幅度也变小，从而降低了二次反应的发生，提高了电流的效率。这不仅提升了生产效能和产量，还增强了企业的盈利水平。

参考文献

-
- [1] 刘艳, 胡广艳等. 铝电解槽炭质固体废弃物综合利用进展 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(01): 166-171.
 - [2] 刘宣伟, 李登辉. 电解槽内炭渣对铝电解生产过程的影响 [J]. 冶金管理, 2021(03): 24-25.
 - [3] 张海龙. 电解铝工业减污降碳及超低排放技术 [J]. 世界有色金属, 2022(11): 1-3.