

Research on Management Technology for Preheating of Char Granules in Large Preheated Fully Graphitized Anode Aluminum Electrolysis Cells

Xueji Wang

China Aluminum Co., Ltd. Liancheng Branch, Lanzhou, Gansu, 730335, China

Abstract

Large preheated aluminum electrolysis cells with 500kA capacity and above serve as core production equipment in modern aluminum industry. The quality of preheating initiation directly determines the service life of cell linings, current efficiency, and long-term operational stability. Char granule preheating has become the preferred process for large electrolysis cells due to its advantages of uniform thermal field distribution, minimal lining damage, and strong operational controllability. This paper systematically investigates key technical aspects of preheating initiation for 500kA aluminum electrolysis cells based on industrial production practices. Through analysis of preheating principles, preparatory work, process control, startup operations, post-startup stabilization, and common issue resolution, a refined management protocol is proposed. Practical implementation demonstrates that by optimizing char granule distribution parameters, precisely controlling temperature rise curves, enhancing thermal balance regulation, and standardizing startup procedures, the preheating initiation cycle can be shortened to 72-96 hours. The crack-free rate of cell linings increases to over 98%, while post-startup current efficiency remains stable above 92%. These improvements provide technical support for efficient and stable operation of large aluminum electrolysis cells.

Keywords

500kA aluminum electrolytic cell; coke particle roasting; start-up management; thermal field control; lining protection

大型预焙全石墨化阴极铝电解槽焦粒焙烧启动管理技术研究

王学己

中国铝业股份有限公司连城分公司, 中国·甘肃 兰州 730335

摘要

500kA 级及以上大型预焙铝电解槽作为现代铝工业的核心生产设备, 其焙烧启动质量直接决定电解槽内衬寿命、电流效率及长期运行稳定性。焦粒焙烧凭借热场分布均匀、内衬损伤小、操作可控性强等优势, 成为大型电解槽首选焙烧工艺。本文结合工业生产实践, 系统研究 500kA 铝电解槽焦粒焙烧启动的核心技术要点, 从焙烧原理、前期准备、工艺控制、启动操作、后期维稳及常见问题处理等方面展开分析, 提出一套精细化管理方案。实践表明, 通过优化焦粒铺设参数、精准控制升温曲线、强化热平衡调控及规范启动操作, 可将电解槽焙烧启动周期缩短至 72-96 小时, 内衬无裂纹率提升至 98% 以上, 启动后电流效率稳定在 92% 以上, 为大型铝电解槽高效平稳运行提供技术支撑。

关键词

500kA 铝电解槽; 焦粒焙烧; 启动管理; 热场控制; 内衬保护

1 引言

随着铝工业向大型、节能、智能化方向发展, 500kA 及以上等级电解槽已成为主流配置。电解槽焙烧启动是铝电解生产的关键工序, 其本质是通过可控加热使内衬材料逐步升温至电解质熔融温度(约 960-980℃), 并完成阴极体系活化与电解质体系构建的过程。焦粒焙烧利用焦粒层的电阻发热原理, 通过向阴极母线通入电流, 使焦粒产生焦耳热实

现内衬均匀升温, 相较于铝液焙烧、燃气焙烧等工艺, 具有热应力分布合理、阴极受热均匀、设备投资低等显著优势。

然而, 500kA 电解槽槽体尺寸大, 内衬结构复杂(炭块、耐火砖、保温层多层复合)、热容量大等特点, 焦粒焙烧启动过程中易出现热场分布不均、局部过热、内衬开裂、启动后期槽况波动等问题。据行业数据统计, 约 30% 的电解槽早期破损与焙烧启动阶段的操作不当直接相关, 由此造成的经济损失占电解槽全生命周期成本的 15%-20%。因此, 开展 500kA 电解槽焦粒焙烧启动精细化管理技术研究, 对提升铝电解行业生产效率、降低能耗、延长设备寿命具有重要现实意义。

【作者简介】王学己(1983-), 男, 中国甘肃民勤人, 本科, 工程师, 从事铝冶炼研究。

2 焦粒焙烧基本原理与技术特点

2.1 焙烧原理

焦粒焙烧属电阻加热焙烧方式，其核心原理是在电解槽阴极炭块表面与阳极炭块之间铺设一定厚度的焦粒层，通过短路口将电解槽接入系列电路，使电流通过焦粒层形成回路。焦粒作为导电介质，其电阻值（通常为 $50\text{--}150\ \Omega \cdot \text{mm}$ ）产生焦耳热，热量通过热传导、热辐射传递至阴极炭块、内衬及槽壳，实现从室温到目标温度的逐步升温。同时，焦粒层在升温过程中部分氧化生成 CO 和 CO_2 ，形成透气性通道，避免内衬材料受热释放的水分和挥发分积累导致鼓包开裂。

2.2 技术特点

热场均匀性好：焦粒层覆盖整个阴极表面，发热点分布均匀，可有效控制阴极炭块上下、左右温差在 50°C 以内，减少热应力集中。

内衬损伤小：升温速率可通过电流调节精准控制，避免快速升温导致的内衬材料热膨胀不均问题，降低炭块开裂风险显著。

操作灵活性强：可通过调整焦粒粒径、铺设厚度、电流分配等参数，适配不同规格电解槽的焙烧需求。

成本效益显著：无需额外加热设备，利用电解系列自身电流即可实现焙烧，能耗仅为燃气焙烧的 $1/3\text{--}1/2$ 。

兼容性强：适用于多种内衬结构设计，可与石墨化阴极、半石墨化阴极等不同类型阴极材料匹配。

3 焦粒焙烧启动前期准备管理

前期准备是确保焦粒焙烧启动顺利进行的基础，需从设备检查、材料准备、工艺设计三个维度开展全面管控，杜绝因准备不足导致的焙烧失败或设备损伤。

3.1 电解槽设备检查

内衬质量检查：重点核查阴极炭块拼接缝隙（应 $\leq 2\text{mm}$ ）、炭块与槽底接触密实度、侧部耐火砖砌筑平整度。

导电系统检查：清理阴极钢棒与母线接触面氧化层，避免接触不良导致局部过热。

槽体结构检查：检查槽壳变形量（允许偏差 $\leq 5\text{mm/m}$ ）、端板固定强度、阳极提升机构灵活性，确保焙烧过程中阳极位置可精准调节。

监测系统调试：安装阴极炭块温度传感器（每个炭块 2 个测点），确保温度测量误差 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$ 。

3.2 焙烧材料准备

焦粒选择：选用碳含量 $\geq 85\%$ 、灰分 $\leq 10\%$ 、水分 $\leq 0.5\%$ 的冶金焦粒，粒径控制在 $2\text{--}6\text{mm}$ ，避免细粉过多导致电阻过小或结块。

辅助材料：准备石墨碎（固定碳 $\geq 98\%$ ，粒度 $2\text{--}4\text{mm}$ ，比电阻 $< 80\ \mu\ \Omega \cdot \text{m}$ ）。

启动原料：储备工业电解质（粒度 $< 30\text{mm}$ ，锂盐含量

$\leq 2.0\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.3\%$ ， $\text{SiO}_2 \leq 0.3\%$ 。），用量为电解槽有效容积的 $60\%\text{--}70\%$ ，铝液（ $\text{Al} \geq 99.7\%$ ）用量按阴极炭块上表面 $10\text{--}15\text{cm}$ 高度计算。

3.3 工艺方案设计

升温曲线制定：根据内衬材料热物理性能，制定三阶段升温方案：环境温至 300°C （升温速率 $5\text{--}6^\circ\text{C/h}$ ）、 300°C 至 700°C （升温速率 $7\text{--}8^\circ\text{C/h}$ ）、 700°C 至 960°C （升温速率 $4\text{--}5^\circ\text{C/h}$ ），总焙烧时间控制在 $72\text{--}96$ 小时。

电流分配方案：采用分流器分流方式，初始电流为系列电流的 $30\%\text{--}40\%$ ，每 $8\text{--}12$ 小时提升 $10\%\text{--}15\%$ ，直至达到额定电流的 $80\%\text{--}90\%$ ，避免冲击电流导致焦粒层击穿。

通电解槽分流器拆除原则：槽电压低于 3.0V 开始拆除分流器， 24 小时内拆除完毕。

应急预案制定：针对可能出现的局部过热、电阻异常等问题，制定相应的处理流程，配备备用传感器、电解质粉料（粒径 $\leq 25\text{mm}$ ）、紧固工具等应急物资。

4 焦粒焙烧过程精细化控制

焦粒焙烧过程的核心是维持热场均匀性和升温稳定性，需通过实时监测、精准调节、动态优化实现全过程管控。

4.1 焦粒铺设质量控制

焦粒铺设是决定热场分布的关键环节，直接影响焙烧效果。

焦粒与石墨碎准备：焦粒与石墨碎的混合物（质量比 $7:3$ ），角部阳极铺设质量比 $9:1$ 。

铺设厚度：单块阳极使用焦粒量 20kg ，阴极炭块表面焦粒层厚度控制在 25mm ，边缘区域可增加至 $25\text{--}30\text{mm}$ ，确保边缘散热损失得到补偿。

铺设均匀性：使用焦粒框（尺寸与阳极底掌尺寸相同），采用分区铺设方式，先铺设炭块中心区域，再向边缘扩展，使用刮板刮平，确保厚度偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，避免局部过薄导致电流集中。

阳极定位：将阳极炭块平稳放置在焦粒层上，确保阳极底掌与焦粒层全面接触（接触面积 $> 95\%$ ），阳极中心偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ ，相邻阳极间距偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。

4.2 升温过程控制

升温速率是影响内衬寿命的核心参数，需严格按照预设曲线执行。

低温阶段（环境温 - 300°C ）：重点排除内衬水分和挥发分，升温速率控制在 $5\text{--}6^\circ\text{C/h}$ 。每 4 小时记录一次各测点温度，确保槽壳各部位温差 $\leq 30^\circ\text{C}$ ，若出现局部升温过快，可通过降低局部电流密度缓解。

中温阶段（ $300\text{--}700^\circ\text{C}$ ）：内衬材料开始剧烈热膨胀，升温速率提升至 $7\text{--}8^\circ\text{C/h}$ 。加强阴极钢棒温度监测（控制在 $200\text{--}250^\circ\text{C}$ ），避免钢棒过热导致强度下降。

高温阶段（ $700\text{--}960^\circ\text{C}$ ）：内衬材料热膨胀趋于稳定，

升温速率降至 4-5℃/h。重点监测阴极炭块温度（最终达到 950-980℃），确保所有炭块温度偏差 ≤40℃，同时测量阳极电流分布，出现异常需及时调整对应阳极位置。

4.3 热平衡调控

500kA 电解槽热容量大，热平衡调控需兼顾加热效率与内衬保护。

阳极保温：阳极炭块顶部覆盖优质系统循环料或新鲜氧化铝（厚度 100-150mm），防止阳极散热过快导致顶部与底部温差过大。

侧部散热控制：侧部炭块温度控制在 800-850℃，若温度过高，可适当增加侧部散热孔开度；若温度过低，需加强侧部保温，避免侧部内衬过早失效。

4.4 过程监测与记录

建立全方位监测体系，确保焙烧过程可追溯、可调控。

温度监测：安排专人每 4 小时实时测量记录槽壳、阴极炭块、阴极钢棒、阳极的温度数据。

数据记录：建立专项台账，详细记录升温时间、温度数据、电流参数、调整措施等，形成完整的焙烧档案。

5 电解槽启动操作与后期维稳

焙烧完成后，需通过规范的启动操作构建稳定的电解质体系和铝液层，实现从焙烧到正常生产的平稳过渡。

5.1 启动时机判断

当满足以下条件时，可启动电解槽：

焙烧时间达到 96h；

阴极炭块平均温度达到 900-950℃，且所有炭块温度偏差 ≤40℃。

5.2 启动操作流程

电解质灌入：灌入准备好的液体电解质（约 20-25t），温度控制在 980-1000℃，避免低温电解质导致内衬骤冷。

电压提升：灌入电解质后，逐步抬升电压至 7V-8V，确保阳极底掌与液体电解质完全接触，阳极底掌没入电解质内 5-8cm，避免电压过高导致电解质飞溅。

灌入铝液：电解槽启动后 24h 第一次灌铝，灌入总量 2/3，32h 后第二次灌铝，灌入计划剩余量，两次灌铝完成后电压控制在 5.0V，铝水平保持在 16 ~ 17cm 左右，测量铝液温度（控制在 960-970℃）和电解质分子比（维持在 3.0），若分子比过低，可加入碳酸钠调整。

出铝：铝液灌入后第二天开始出铝。

阳极调整：启动后 48 小时内，每 8 小时测量一次阳极电流分布，调整阳极高度，确保各阳极电流偏差 ≤3%，避免偏流导致局部过热。

5.3 后期维稳措施

启动后 1-3 个月是电解槽槽况稳定的关键期，需采取针对性措施：

电解质体系优化：定期检测电解质成分，维持 Al_2O_3 含

量在 2.5%-3.5%， CaF_2 含量在 4%-6%，通过调整添加剂比例，降低电解质初晶温度，提高流动性。

铝液管理：控制铝液高度在 16-20cm，保持铝液界面平稳，避免剧烈波动导致阴极炭块磨损。每两天分析一次铝液纯度，确保 $Al \geq 99.7\%$ 。

内衬保护：启动后 90 天内逐步将槽电压降至 3.85V，监测槽壳温度变化，若局部温度异常升高，可能存在内衬破损，需及时排查处理，减少内衬冲击。

6 常见问题及解决方案

6.1 启动后槽电压波动

现象：槽电压波动幅度 >30mV，电解质流动性差，铝液界面不稳定。

原因：电解质成分不合理（分子比过高或过低）； Al_2O_3 含量波动过大；阳极电流分布不均。

解决方案：调整电解质分子比，加入氟化铝或碳酸钠；优化氧化铝下料频率，采用小批量、高频次下料；重新调整阳极高度，确保电流分布均匀；若电解质流动性差，可加入适量 LiF（1%-2%）改善。

6.2 侧壁、阴极钢棒过热

现象：侧壁、阴极钢棒温度 >400℃，出现发红现象。

原因：电流分配不均导致局部电流集中；钢棒材质存在缺陷。

解决方案：吹风冷却降温，将温度控制在 300℃ 以内；通过调整阳极安装高度，调整电流分配，均衡各支路电流；若钢棒过热严重，需停槽处理。

7 工业应用案例

某铝业公司 500kA 电解系列共 288 台电解槽，采用本文提出的焦粒焙烧启动管理方案，取得显著成效：

焙烧启动周期：平均为 96 小时，较传统方案缩短 16 小时，生产效率提升 15.4%。

内衬质量：电解槽启动后内衬无裂纹率达到 98.3%，较行业平均水平提升 8.7 个百分点。

运行指标：启动后 1 个月内电流效率稳定在 90% 以上，吨铝直流电耗降至 12800kWh/t，较行业平均水平降低 500kWh/t。

设备寿命：已运行 3 年的电解槽内衬完好，预计使用寿命可达到 8 年以上。

该案例表明，通过精细化的焦粒焙烧启动管理，可有效解决大型电解槽焙烧启动过程中的技术难题，实现高效、节能、长寿运行。

8 结论

500kA 级及以上大型铝电解槽焦粒焙烧启动管理是一项系统工程，需统筹设备、材料、工艺、操作等多方面因素，核心在于实现热场均匀性、升温稳定性与内衬保护性的有机

统一。通过严格的前期准备、精准的升温曲线控制、动态的热平衡调控、规范的启动操作及科学的后期维稳,可显著提升焙烧启动质量,延长电解槽寿命,提高生产效率,降低能耗。

未来,随着智能化技术在铝电解行业的应用,可进一步开发焦粒焙烧启动智能监测系统,通过 AI 算法实时优化升温曲线和电流分配,实现焙烧过程的自动化、精准化控制。同时,研发新型焦粒材料和内衬保温材料,进一步降低焙烧能耗,提升内衬抗热震性能,为大型铝电解槽的可持续发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 中国有色金属工业协会。铝电解槽焙烧启动技术规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] 李劫, 刘业翔。现代铝电解技术 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018.
- [3] 张鉴。大型预焙铝电解槽焦粒焙烧工艺优化 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2021 (5): 32-37.
- [4] 刘风琴, 陈开斌。500kA 电解槽焦粒焙烧热场模拟与工艺优化 [J]. 轻金属, 2022 (3): 23-28.
- [5] 杨升, 李庆余。大型铝电解槽焙烧启动过程中的内衬保护技术 [J]. 有色金属工程, 2020, 10 (7): 89-94.
- [6] 陈忠伟。铝电解槽焦粒焙烧常见问题及处理措施 [J]. 世界有色金属, 2021 (12): 1-2.