

Precise regulation of electrolytic aluminum process parameters and energy efficiency improvement technology

Ning Mao

Ningdong Aluminum Branch of Qingtongxia Aluminum Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750411, China

Abstract

In response to the “dual carbon” goals and energy efficiency benchmarking policy orientation of the electrolytic aluminum industry, and in response to the core demand for the coordinated improvement of process parameter regulation and energy efficiency. The system defines three core process parameters, namely voltage parameters, electrolyte parameters, and material and operation parameters, as well as their mechanisms of action. It deeply analyzes the regulation difficulties such as strong coupling, dynamic time-varying, nonlinearity and lag among the parameters, and clarifies the quantitative correlation between the parameters and the three major energy efficiency indicators of current efficiency, power consumption and material consumption. Based on industrial application practices and technological innovation achievements, a data-driven intelligent perception and modeling technology system is proposed. Precise regulation strategies such as dynamic matching of electrical parameters, closed-loop regulation of electrolyte systems, and integrated control of material operations are elaborated in detail, as well as system integration and engineering application solutions.

Keywords

Electrolytic aluminum; Process parameters; Data-driven; Energy efficiency improvement

电解铝工艺参数精准调控与能效提升技术

毛宁

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司, 中国·宁夏 银川 750411

摘 要

为响应电解铝行业“双碳”目标与能效标杆政策导向, 针对工艺参数调控与能效协同提升的核心需求。系统界定电压参数、电解质参数、物料与操作参数三类核心工艺参数及作用机制, 深入分析参数间强耦合、动态时变、非线性与滞后性等调控难点, 明确参数与电流效率、电能消耗、物料消耗三大能效指标的量化关联。结合工业应用实践与技术创新成果, 提出数据驱动的智能感知与建模技术体系, 详解电参数动态匹配、电解质体系闭环调控、物料操作一体化控制等精准调控策略, 以及系统集成与工程化应用方案。

关键词

电解铝; 工艺参数; 数据驱动; 能效提升

1 引言

铝作为现代工业核心基础原料, 电解铝是其主导生产方式。2024 年, 我国电解铝产量 4400 万吨, 同比增长 4.6%, 占全球总量的 58%, 位居世界首位^[1]。但行业高耗能特性显著, 面临“双碳”目标、欧盟 CBAM 碳壁垒及能效标杆政策的多重约束, 国家发改委及有关部门要求 2025 年底, 电解铝能效标杆企业占比达到 30%, 行业可再生能源利用比例达到 25% 以上, 再生铝产量达到 1150 万吨。传统依赖人工经验的调控模式, 已难以应对参数强耦合、槽内“黑箱”特性带来的优化挑战, 工艺参数精准调控与新兴技术融合应

用成为突破能效瓶颈的核心路径。本文整合最新工业应用与研究成果, 系统构建智能调控技术体系与全流程能效提升方案, 为行业高质量发展提供理论与实践支撑。

2 电解铝核心工艺参数与调控难点

2.1 核心工艺参数的界定与作用机制

电解铝生产的核心工艺参数可划分为电压参数、电解质参数、物料与操作参数三类, 其优化区间随技术进步持续迭代, 直接决定电解反应效率与能源消耗水平。

电压参数方面, 500kA 超大型电解槽已成为主流, 电流密度均匀性控制精度提升至 $\pm 2\%$ 以内; 极距最优区间收窄至 4.2-4.8cm, 通过动态匹配算法实现精准控制; 槽电压优化目标锁定 3.85-4.15V, 电流密度的均匀性直接影响电极反应效率与槽体寿命^[2]。电解质参数方面, 氧化铝浓度最优

【作者简介】毛宁 (1983-), 男, 中国宁夏青铜峡人, 本科, 工程师, 从事铝电解生产研究。

控制范围为1.5%-3.5%，波动幅度需控制在±0.3%以内以避免发生阳极效应与炉底沉淀等，过热度精准控制在8-12℃，过高导致热损失激增，过低易引发冷行程；分子比（CR值）优化至2.1-2.3，配合复合添加剂体系实现低温稳定运行；LiF添加量维持2%-3%，可使电解质初晶温度降低20℃，为低温电解奠定基础。物料与操作参数方面，阳极效应系数控制标准提升至0.05次/槽·日以下；采用精准点式下料与分区控制技术，实现氧化铝浓度均匀分布；炉膛内形与阳极电流分布的动态平衡通过智能监测系统实时维护，避免局部异常消耗。

2.2 工艺参数间的耦合关系与调控难点

电解铝工艺参数的强耦合、动态时变、非线性与滞后特性使其精准调整面临诸多挑战。多参数耦合导致单一调整引发连锁反应：电解质温度与槽电压呈正相关，温度升高降低电解质电阻，但槽电压提升会反向推高温度；极距与电流效率呈非线性关系，超临界值后电压降增加抵消效率收益；氧化铝浓度低于1.5%时阳极效应概率骤升，而效应发生会加剧电解质成分紊乱。

动态时变特性受多重因素影响：新启动槽、正常运行槽、2200天以上槽，三个阶段的参数优化区间差异显著，需适配内衬性能变化；绿电耦合带来的电流波动，进一步增加参数调控难度。非线性与滞后性加剧调控复杂度：氟化盐添加后成分稳定需数小时，易导致过度调整；相同极距调整在不同过热度区间对电流效率影响差异达1%-3%；传统离线检测难以满足实时调控需求，检测周期从数小时缩短至分钟级的在线分析技术成为刚需。

极端工况识别难度大：过热度异常易引发漏槽等安全风险，传统人工观察火眼状态误差大，需依赖图像识别等技术实现精准判断槽状态。

2.3 工艺参数与能效指标的关联性分析

工艺参数与电流效率、电能消耗、物料消耗及碳排放四大核心能效指标存在明确量化关联，成为精准调控的核心依据。电流效率方面，极距从45mm优化至42mm可提升效率0.8%，但小于38mm时效率偏低；过热度每超过5℃，电流效率下降约0.5%-1%；氧化铝浓度在2%-3%区间时效率最优，通过多参数协同调整，部分先进企业已实现94.5%以上的稳定电流效率。

电能消耗方面，其核心是电解质电压降，每降低0.1V可减少吨铝电耗100kWh；同时采用石墨化阴极可降低阴极电压降0.1-0.2V，配合TiB₂涂层阴极可减少铝液再氧化，吨铝直流电耗可降至12.95kWh；利用绿电耦合场景下，通过柔性调节机制，可将额外电耗增量控制在0.25kWh以内。物料与碳排放方面，阳极效应系数从0.2次/槽·日降至0.05次以下，可减少氟化盐挥发损耗30%；传统工艺吨铝碳排放达12.8吨CO₂，惰性阳极技术可将其降至0.3吨以下，实现近零排放。

3 电解铝工艺参数精准调控关键技术与方法

3.1 基于数据驱动的参数智能感知与建模技术

在数字技术不断发展、广泛应用的今天，电解铝行业的数字化水平大幅提升。数据驱动技术已成为突破电解铝工艺参数调控瓶颈的核心手段。通过多源数据融合、AI智能模型构建和数字孪生仿真，能实现槽况精准感知与参数前瞻优化，为能效提升奠定基础。

多源数据融合感知构建全维度监测网络：采用红外热像仪、电压传感器、阳极电流监测装置，结合槽底测温机器人实现强磁高温环境下的自主巡检，巡检效率提升60%；在线成分分析技术将电解质成分检测周期缩短至分钟级；通过工业互联网网关整合4000+个监测点数据，涵盖磁场分布、温度梯度、铝液流动状态等关键信息，经清洗标准化后形成全流程数据链^[7]。

大数据平台通过工业互联网网关整合历史生产、实时监测、原料质检及设备运维数据，形成全流程数据链，经清洗标准化后保障数据质量，为模型构建提供支撑。工艺参数预测与优化模型是核心引擎，通过机器学习实现智能决策，状态预测模型以多类参数为输入，精准预测电解质温度、电流效率等变化趋势。阳极效应预警模型通过识别电压波动特征实现早期预警，准确率较高。

3.2 核心工艺参数的精准调控策略与技术

以数字技术为支撑，针对三大核心参数优化需求，构建自适应、闭环化的精准调控新模式，实现效率与能耗的动态平衡^[8]。

电参数调控方面，基于槽电压分解与电流效率目标，开发极距自适应优化算法，电解质电压降升高时自动下调极距，电流效率下降时适度上调并补偿氟化盐添加量；针对绿电耦合的电流波动，采用整流侧有源滤波与虚拟惯量补偿机制，实现±15%功率柔性调节，响应延迟控制在30秒内，调节准确率达94.7%；分级匹配阳极配置，新槽阶段逐步提升电流强度，正常运行阶段优化阳极排布，确保电流分布均匀性。

电解质体系调控方面，基于在线分析数据与预测模型，构建分子比实时控制系统，调整氟化盐补加量及下料频率，维持冰晶石比与氧化铝浓度稳定，实现成分动态平衡。通过成分优化实现较低温度电解，减少铝液溶解、阳极碳耗及氟化盐挥发，大幅降低电耗且保持较高电流效率。

物料与操作参数调控方面，基于浓度软测量模型开发自适应算法，结合槽电阻波动与电解质状态动态调整下料频率，实现氧化铝浓度±0.3%的精准控制；通过分布式阳极电流数据预处理与特征提取，判断换极、出铝等工况变化，针对性调整操作参数；智能维护炉膛内形，对沉淀过多、结壳过大等问题精准施策，延长电解槽寿命。

3.3 工艺参数调控系统集成与工程化应用

工艺参数精准调控的落地依赖系统化集成与工程化适

配。通过构建层级化系统、集成关键装备及适配应用场景，实现技术从研发到工业化转化。

智能控制系统采用“感知-数据-模型-控制”四级架构：感知层整合传感器、巡检机器人、在线分析仪等设备；数据层采用边缘计算+云端存储模式，边缘节点快速处理实时数据，云端存储分析海量历史数据。模型层集成预测模型、优化算法及数字孪生模块，按需调用模型决策。控制层连接执行机构并与传统控制系统交互，完成感知分析决策执行闭环。应用后参数调整响应速度从数十分钟缩短至秒级，控制精度大幅提升。

关键装备与技术集成是系统落地的硬件支撑。在线分析装备集成多种光谱仪实现成分双重校验，配备智能下料、阳极升降等装置，精准执行调控指令。同时构建人机协同决策系统，将模型优化建议推送至终端，经人工确认或微调后自动执行，兼顾精准性与灵活性，提升操作人员效率及异常处理速度。新建槽采用阶梯式参数提升与数字孪生预演策略，缩短启动周期并降低能耗。老龄槽与病槽通过诊断模型识别问题，针对性制定调控策略，恢复电流效率并降低电耗。

4 基于精准调控的能效提升关键路径

4.1 降低直流电耗

直流电耗是电解铝最核心的能耗指标，其优化需依托槽电压结构优化与电流效率提升的双重协同。槽电压优化的核心是拆解构成并降低各环节损耗，针对占比最高的电解质电压降，通过自适应极距优化算法将极距稳定在最优区间，结合低温电解技术降低电解质电阻。采用高导电性电极材料可减少阳极电压降损耗。阳极效应的精准抑制同样关键，通过电压波动早期预警与高效熄灭策略，将效应频率控制在极低水平，避免额外电耗。电流效率提升为降电耗提供核心支撑，通过多参数协同调控可显著提升效率，将电解温度稳定在低温区间，减少铝液二次溶解损失。

4.2 余热梯级利用与能源循环

充分回收电解生产过程中的余热资源，构建“生产-余热-再利用”的能源循环体系。槽壳散热高效回收：在电解槽大面设置散热片，小面开设散热孔，通过余热回收装置收集表面散热，用于车间供暖、热水供应或驱动制冷机组，降低辅助能源消耗。烟气余热深度利用：针对150以上℃的电解槽烟气，采用高温换热器回收热量，预热燃烧空气或生产

用热水，提升能源综合利用效率；结合干法净化系统，实现余热回收与烟气净化协同。

4.3 辅材消耗优化与全流程系统协同优化

氟化盐、阳极炭块等辅材消耗不仅影响成本，其生产与损耗还产生间接能耗，通过工艺参数精准调控可形成降消耗-减间接能耗的良性循环。氟化盐消耗控制核心是电解质成分精准调控，采用复合添加剂体系降低电解质初晶温度与表面张力，减少高温挥发。通过阳极效应主动抑制，避免效应时的剧烈挥发，同时构建成分闭环调控系统动态补充，避免过量浪费。阳极碳耗优化需工艺与生产协同，电解环节通过低温技术降低阳极氧化速率，精准调控电流分布避免局部异常消耗，延长阳极寿命。生产环节优化阳极配方与焙烧工艺，提升致密度与导电性，减少电解中的掉块、裂纹损耗及压降损失。辅材消耗的降低不仅减少采购成本，更能降低其生产过程中的化石能源消耗，实现综合能耗间接优化。

生产调度协同方面，基于5G+工业互联网技术构建智能生产调度平台，实时整合各电解槽运行数据、能源供应数据与市场需求信息，动态调整生产计划，在电网电价低谷时段安排高能耗生产任务，降低能源成本；通过设备负荷均衡分配，避免部分槽体过载运行，延长设备寿命并降低整体能耗。

5 结语

电解铝工艺参数精准调控是能效提升与低碳转型的核心路径，需深度融合数字孪生、AI算法、绿电耦合等新兴技术与传统工艺。本文明确了核心工艺参数的最新优化区间与耦合规律，构建的“数据感知-智能建模-精准调控-系统协同”技术体系，已验证可有效降低直流电耗、提升余热利用率与辅材利用效率。未来需进一步推进惰性阳极规模化应用、数字孪生与多物理场仿真深度融合、绿电耦合调控技术迭代，完善“能效-低碳-智能”三位一体的技术路线，为全球电解铝行业绿色转型提供“中国方案”。

参考文献

- [1] 邹珊珊. 电解铝整流系统的谐波电流与无功功率问题分析[J]. 世界有色金属, 2023(11): 13-15.
- [2] 孙炜麟. 电解铝出铝环节工艺参数智能调控技术探索[J]. 冶金与材料, 2025, 45(02): 46-48.
- [3] 刘晨阳. 基于机器学习的生产工艺参数寻优[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.