

高质量发展视域下电解铝生产提质、降耗、减碳的协同工艺与管理实践

曹耀辉

中铝山西新材料 山西运城 043399

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21170

[摘要] 在双碳目标以及高质量发展战略的推动之下,中国的电解铝行业必须从依靠规模扩张转变为依靠内涵式增长。本文对碳足迹管理、铁杂质控制、节能降耗、烟气治理和生产管理中出现的技术瓶颈进行系统的分析,并采用全生命周期评价、工艺矿物学、热工理论以及精益运营的方法,创建起一个以低碳、低铁、高效、清洁为主要内容的协同优化技术体系和管理模式。研究表明,全过程碳足迹追踪、精细化工艺控制、先进节能材料使用和 TPM、SOP 等标准管理,可以明显减少铝液综合交流电单耗,提高原铝品位,达到污染物和温室气体协同控制的目的,给电解铝绿色转型提供理论和实践支持。

[关键词] 电解铝; 碳足迹; 节能降耗; 精益生产; 协同控制

1 引言

我国电解铝产量占世界总量的六成左右,但是资源和能源的依赖度较高,面临着严重的可持续发展问题。根据国际铝业协会(IAI)的数据,在2025年全世界的原铝产量为7378万吨左右;我国国家统计局公布的数据显示,2025年我国的电解铝累计产量达到4501.6万吨,较上年增长2.4%,在全世界总产量中占到大约61%。与此同时,国内电解铝建成产能已经达到了4500万吨/年这个政策的“天花板”,产能扩张的通道基本被堵死了,行业的增长模式也由原来的“量”向“质”转变的趋势越来越明显。从下游市场来看,新能源汽车、航空航天等高端制造业对于高性能铝合金的质量稳定性要求越来越高,2025年高端铝材产量占总产量比重已经超过5%,达到5%以上^[1]。在这样的背景下,以往的优化研究大多只考虑单个目标,而忽略了各个环节之间复杂的相互影响。行业急需创建跨学科综合研究框架,在碳足迹核算、杂质控制、节能降耗、污染治理等各方面找到最佳方案。本文将生命周期评价(LCA)、工艺矿物学、热工分析和精益管理结合起来,创建电解铝协同改善体系,达成质量改进、能耗削减、碳排放缩减的协同目的。

2 铝液中铁杂质全过程控制与质量提升

铁是铝液中的主要有害元素,容易形成 Al_3Fe 、 Al_6Fe 等脆性相,降低韧性、耐腐蚀性和导电性。航空航天用铝合金要求铁含量小于0.08%,高端产品还要控制在0.05%以下。铁杂质来源分为原生和次生两种,原生铁是氧化铝、预焙阳极和电解质杂质造成的,次生铁是阴极炭块、钢棒剥落、换极、

出铝工具熔损、残极铁环掉入、循环物料未除铁造成的。

全生命周期管理分为源头、过程和循环控制。源头控制,严格控制原料,选择有磁选、浮选能力的氧化铝供应商,预焙阳极含铁量 $\leq 200\text{ppm}$,加强永磁除铁。过程控制方面制定好换极、出铝的SOP,清理掉残极铁屑,磁力回收;全石墨化阴极加磷生铁浇注,减小侵蚀;智能监控极距、槽温等来预警异常。循环控制,在载氟氧化铝回流、残极处理等节点增加多级磁选;定期做全产业链铁元素核算。经过实践证明,上述措施可以将铝液中铁含量控制在0.07%以下^[2]。

3 节能降耗与烟气治理协同技术

3.1 电解槽热平衡分析与保温料性能优化

电解槽热平衡就是电能转化为焦耳热和向环境散热相等的动态平衡。过热会造成电解质蒸发、炉衬损耗、电流效率降低,过冷会造成电解质黏度增大、氧化铝溶解不好、炉底压降增大。保温材料对于热平衡起着重要的调节作用,保温材料的导热系数每减少 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,侧壁散热损失就会减少5%到8%。优化措施为研发纳米级多孔绝热材料、推广高强抗腐蚀侧部一体化结构组件、加强保温层施工规范、防止热桥、建立周期性检测制度。

3.2 节能材料与技术的集成应用

节能要多种技术联合使用。以400kA系列电解槽技改为例,用石墨化阴极和磷生铁浇注、高效保温材料、稳流控制。石墨化阴极导电导热性好,磷生铁浇注可以减小接触电阻,大大降低槽底压降和运行电压。合理布置母线、优化磁场结构可以减小铝液流速和界面扰动,提高磁流体动力学稳定性,

在低极距下保持稳定运行。经过改造之后的电解槽工作电压可以保持在 3.93V 以下，吨铝直流电耗小于 12700kWh。

能耗对比试验结果如表 1 所示。方案 B（集成技术）平
表 1 不同技术方案下 400kA

均电压从 4.12V 降至 3.95V，电流效率由 91.8%升至 93.2%，吨铝直流电耗降低 462kWh。年产 20 万吨、电价 0.45 元/度时，年节电费约为 4158 万元，经济效益较好。
电解槽能效和经济性对比

技术指标	方案 A（传统技术）	方案 B（集成技术）	变化量
阴极结构	半石墨质+湿法捣筑	全石墨化+磷生铁浇铸	——
侧部材料	普通碳化硅砖	高导热氮化硅结合碳化硅复合块	——
保温结构	普通保温砖+硅酸钙板	纳米微孔绝热板+防渗料复合层	——
平均电压（V）	4.12	3.95	-0.17
电流效率（%）	91.8	93.2	+1.4
吨铝直流电耗（kWh/t-Al）	13,150	12,688	-462
炉帮形成情况	厚度不均，易溶蚀	规整、致密、稳定性好	显著改善
吨铝投资成本（元）	100（基准）	112	+12
吨铝年运行成本节约（元）	—	208	净效益显著

另外，寻优控制技术、无功补偿和谐波治理等先进手段同高效节能元件、改进槽体构造相结合，就形成了软硬件协同一体的节能方案。

3.3 烟气多污染物协同控制技术

电解铝废气排放量大、SO₂初始浓度低(200~350mg/Nm³)，含 HF 和颗粒物，温度波动明显。排放标准要求 SO₂<100mg/m³，颗粒物<10mg/m³，氟化物<3mg/m³ [3]。

在水资源缺乏或者视觉污染敏感的地区，半干法工艺抑制白烟、降低能耗和用水的优势更加明显。

氟化物深度治理和资源化，干法净化利用氧化铝吸附 HF，氟资源化（Al₂O₃+6HF→2AlF₃+3H₂O）。湿法、半干法脱硫协同除氟效率大于 95%，但是会产生钙氟化合物沉淀，影响脱硫石膏品质 [4]。未来要开发出高选择性、稳定性好的新型复合吸收材料，提高氟、硫的分离精度。

3.4 铝液直接利用工艺及其对铸轧质量的影响

高温铝液直接送到铸轧车间加工板带箔坯料，可以省去传统的铸造、重熔工序，吨铝材节电 400~800kWh，减少金属损耗和环境影响，但是需要铝液的高纯度以及严格的温控。

工艺特点为电解槽产生的初级铝液经过除气、除渣、成分调节后，直接进入静置炉，然后运到铸轧机进行加工，流程简单，热利用率高。

工艺难点有高温铝液和水汽反应产生氢，造成针孔、气泡，非金属夹杂物及含铁相影响加工性及表面质量。需要使用在线净化和两级过滤系统（SNIF、MINT 除气装置），并且

要建立精确的合金化配方模型。温度控制是关键，浇注温度要保持在 690~730℃。

铁杂质会影响铸轧快速凝固时形成的针状 β-AlFeSi 相，降低塑性、成型性，高端铝板要求铁含量≤0.15%，全流程铁控制十分重要。

先进装备有电磁搅拌防止氧化膜破裂和吸气，改善成分均匀性，深层床过滤器和管式过滤装置组成两级系统去除大小杂质，用 LIBS 等快速检测和智能配比系统实现成分在线控制和自动化投料，大大降低废品率，提高质量一致性。

4 精益生产管理体系与综合效益

4.1 标准化作业（SOP）体系

电解铝生产过程的操作技能要求较高，工艺流程的规范性比较明显。标准化作业起到减少人力波动、保证工艺参数稳定、保证生产安全、保证产品质量的作用。

SOP 编制立足实践，工艺工程师、设备专家、一线技术工人一起参加，分需求调研、方案设计、验证测试、持续改进四个阶段，用 5W1H 分析法做体系化分析。以换极为主要的作业，标准化程序包括阳极定位、炉门开关、炉膛清理、残极回收、工具清洁、废弃物收集、成分检测、新极安装等步骤。目前企业操作规程已经形成了出铝作业、母线调节、炉面操作等 36 个子项目。

4.2 数据驱动的两级工艺评判与 TPM

两级工艺评判制度，分厂级做全局动态和中长期规划，每月发布评价报告，车间级每天对单槽运行进行分析，发出

诊断信息并促使短期内改善^[5]。创建集成电解参数、化学成分、设备状态的数据平台，用智能算法自动生成报表，实现数据驱动决策。全员生产维护（TPM）实行自主保全，经过培训使作业人员可以独立完成设备的巡检、清洁、润滑、简单的故障处理，从被动修理变为预防性维修。创建 A 类设备全生命周期管理体系，对电解槽、多功能天车等重要设备进行采购、使用、保养、更换部件等各方面数据的收集。

4.3 现场管理（5S/6S）与环境提升

规范化现场管理对成本控制、效益提高、安全生产起决定性作用。电解车间在高温、强磁场、粉尘等复杂的环境下，采用“5S”管理可以改善作业秩序^[6]。整理整顿去除非必需品，标准化分区标记降低物料检索和搬运的时间。建立科学的设备清洁保养体系，解决跑冒滴漏问题。采用网格化管理划分责任区块，用绩效考核保证任务的完成。素质养成依靠系统化的培训、文化熏陶以及绩效考核，使员工把规章制度和环保意识内化。研究结果表明，“5S”管理可以大幅度降低吨铝炭渣，提高作业环境的整洁度。

4.4 智能化升级与数字孪生应用

电解槽数字孪生系统创建高精度的虚拟映射，把多物理场模型和神经网络预测结合起来。依靠传感器获得电压、温度、噪声等数据进行实时监测槽况，预测炉帮厚度、炉底沉积、极距等难以测量的信息，预知阳极效应或者电压波动的风险，给出 24 到 48 小时的仿真预警。虚拟仿真实训使员工可以了解 SOP。智能天车使用激光雷达建图、视觉识别、力位协同来完成全自动极板更换，投料误差±20kg。智能物料系统用 RFID 和二维码对阳极、氧化铝等进行全程跟踪，铁含量超标时自动报警并追踪；全厂智能计量体系分钟级采集能耗数据，找到高耗能环节。

4.5 清洁生产与综合效益评价

从环境效益上看，通过能耗改善、阳极效应控制来实现 CO₂ 和 PFCs 的双降，废气净化技术使 SO₂、颗粒物、氟化物大大减少，内衬和工艺的改进减少了大修渣、炭渣等危险废物的产生量；经济效益上，吨铝能耗降低 200kWh，电价按 0.4 元/kWh 计算时，50 万吨企业年节电 4000 万元，铝液纯度达到 99.85%以上可以提高产品的附加值和市场竞争力，减排降低了环保税实际缴纳额，避免了因为超标排污造成的生产限制或者停产；以运行 17 年的传统铝生产线为例，采用精益管理后，铝液铁含量均值由 0.078%降到 0.062%，直流电耗降低

约 180kWh/t 铝，实现了明显的节能减排效果，融合技术创新和精益管理的综合手段对企业竞争力的提升有重大战略意义；优化前后核心绩效指标对比如表所示，铝液综合交流电单耗由 X 变小到 Y，铝液 99.85%以上合格率由 A 变大到 B，平均电压由 C 变小到 D，电流效率由 E 变大到 F，设备故障频率由 G 变小到 H，SO₂排放浓度由 I 变好到 J。

5 结论与展望

本文从高质量发展的角度出发，对电解铝提质、降耗、减碳的协同路径进行研究，得出如下结论，碳足迹管理要从能源结构、阳极性能、电解工艺三个方面协同来控制多污染物的源头，全流程铁控制通过源头严控、标准化操作、耐腐蚀阴极、多级磁选可以将铁含量控制在 0.07%以下，节能降耗依靠材料创新和热平衡优化，采用石墨化阴极、磷生铁浇注、纳米绝热材料，吨铝直流电耗可以降到 12700kWh 以下，烟气治理要根据全生命周期评价选择技术，湿法高效但水耗大，半干法在效率和成本之间找到平衡，氟化物需要和硫回收结合起来，精益生产管理体系结合数字孪生等智能化手段，是释放技术潜力的制度保证。展望未来，数字孪生工厂、绿电铝认证、固废全组分资源化利用属于行业高质量发展的主要方向，依靠系统思维协调技术与管理的变革，中国电解铝产业才能在全球低碳冶炼竞争中占据领先地位。

[参考文献]

[1] 马梦霞，李威，于婉琪，等. 基于 LCA 的电解铝碳足迹评估与碳减排路径研究[J]. 有色金属（冶炼部分），2026（05）：1122-1134.

[2] 何召迅，康聪波. 浅析电解铝生产中铁含量降低的工艺优化研究[J]. 世界有色金属，2025（20）：15-17.

[3] 陈远翔，许瑞，向珂仪，等. 电解铝行业大气污染物与 CO₂ 协同控制研究进展[J]. 中国冶金，2024，34（07）：1-10+67.

[4] 梅向阳，卿华，刘群星，等. 电解铝材料生产中氟化物污染特征及形态[J]. 有色金属工程，2024，14（01）：160-168.

[5] 张刚刚，沈贵元，李喜元，等. 500 kA 大型铝电解槽生产管理实践[J]. 轻金属，2022（02）：22-28.

[6] 耿玉伟，刘方波. 电解铝清洁生产工艺分析与评价指标体系[J]. 轻金属，2017（08）：21-25.

作者简介：曹耀辉，2001.12，男，汉族，大专，汉族，山西运城人，专业研究方向：电解铝。