

电解铝生产工艺优化措施分析

马耀奎

国家电投集团铝电投资有限公司(宁夏能源铝业) 宁夏 青铜峡 751603

青铜峡铝业分公司 宁夏 青铜峡 751603

摘要: 本文以电解铝生产工艺为研究对象,分析了电解铝生产基本流程及现有工艺在能耗、环保、原料利用、设备适配等方面的问题。随后从原料预处理、电解槽操作参数、生产设备、能源利用、环保工艺五大核心环节,提出具体优化措施,同时构建落地保障机制并探讨行业应用前景。研究表明,优化措施可降低吨铝电耗、减少污染物排放、提升原料利用率,为电解铝行业绿色低碳转型提供切实可行的实践路径。

关键词: 电解铝; 生产工艺; 优化措施

引言: 电解铝作为工业重要基础产业,在支撑制造业发展的同时,面临高能耗、高排放的发展困境,吨铝交流电耗超13000kWh,碳排放达10-14吨,与“双碳”目标及行业可持续发展需求不符。国家电投集团青铜峡铝业分公司在生产中亦受原料损耗、设备效率低等问题制约。基于此,本文聚焦电解铝生产工艺优化,通过剖析现状问题,提出针对性优化方案,旨在降低能耗与排放,提升生产效益,为行业工艺升级提供参考。

1 电解铝生产工艺现状分析

1.1 电解铝生产基本工艺流程

电解铝生产以铝土矿为初始原料,先经破碎、研磨等预处理,通过拜耳法转化为氧化铝。原料准备阶段需按标准筛选氧化铝,控制纯度与粒度,并配制冰晶石、氟化铝等氟化盐体系作为电解质。核心电解环节在炭素耐腐蚀材料内衬的电解槽中进行,炭阳极与阴极接入直流电后,氧化铝在熔融电解质中分解,铝离子于阴极还原为铝液,氧离子在阳极生成氧气。铝液定期抽出后,经净化精炼去除杂质,最终通过铸造工艺形成铝产品,完成从原料到成品的全流程转化。

1.2 现有工艺存在的主要问题

能源利用方面,吨铝交流电耗普遍高达13000kWh以上,全年行业耗电量占全国居民用电6%以上,能耗成本占比突出。电压控制与电流效率的匹配性不足,成为制约节电的关键瓶颈。环保排放压力显著,单吨铝碳排放达10-14吨,氟化物粉尘与废气排放问题突出,行业年碳排放量接近全国总量的5%。原料、能源利用效率有待提升,炭素阳极消耗与电解质损耗量较大,部分企业原料预处理精度不足,影响后续电解反应稳定性。设备适配性存在短板,传统电解槽存在热量损失与电流分布不均问题,部分装备难以适配绿电供应的波动性,制约工艺

绿色转型进程^[1]。

2 电解铝核心工艺环节优化措施

2.1 电解铝原料预处理工艺优化措施

原料预处理是电解铝生产的基础环节,其质量直接影响后续电解过程的稳定性与效率,具体优化措施如下: (1) 氧化铝原料筛选与管控优化: 建立原料入场双重检测机制,先通过筛分法检测氧化铝粒度分布,确保-45 μm 粒度占比控制在18%-22%区间,避免细粉过多导致飞扬损失或粗粉过多影响溶解速度;再采用X射线荧光光谱仪检测杂质含量,将 SiO_2 、 Fe_2O_3 等有害杂质总含量控制在0.15%以下,从源头减少杂质对电解反应的干扰。(2) 氧化铝储存与输送优化: 改造原料仓通风系统,增设湿度传感器与自动除湿装置,将仓内湿度控制在60%以下,防止氧化铝吸潮结块;优化输送管道倾角与风速参数,将管道倾角调整为 15° - 20° ,风速控制在18-22m/s,减少输送过程中氧化铝磨损粒度细化,确保氧化铝溶解性能良好。(3) 氟化盐体系精准添加控制: 采用自动控制系统替代人工经验设定添加量,通过计算机专家模糊控制系统精准调控氟化铝添加量,将电解质分子比(NaF/AlF_3)控制在最佳区间;配料前对各类氟化盐进行预干燥处理,通过热风干燥机将水分含量降至0.1%以下,避免水分进入电解槽引发水解反应。(4) 炭素阳极预处理优化: 对炭素阳极进行表面清理与缺陷检测,通过工业机器人打磨去除表面粘附填充料,采用超声波探伤技术检测内部裂纹,将合格阳极率提升至98%以上;阳极安装前进行预热处理,通过残极、电加热或天然气加热预热装置将阳极温度预热至 150 - 200°C ,减少阳极与电解槽内高温电解质接触时的热冲击,降低低温阳极对电解槽扰动,加快阳极导电速度和电流分布均衡恢复,有利于炉膛控制保持。

2.2 电解槽操作参数优化措施

电解槽各项工艺技术条件参数是决定电解效率与能耗的关键,要结合生产实际动态调整,具体优化措施如下:(1)电解质体系过热度精准控制:采用电解质分子比、过热度现场测量新技术,在电解车间现场快速测量电解质分子比、处境温度、电解质温度数据,根据测量数据变化快速调整电解质成分。当初晶温度过高、过热度小时,适当增加氟化铝添加量,降低分子比以降低初晶温度;当初晶温度过低时,减少氟化铝添加量或适当提高槽电压,确保电解质过热度稳定在8-12℃的最佳区间。(2)优化电解槽控系统算法参数,安装布设全槽阳极电流分布数据测量采集装置,采用高精度阳极水平母线位置传感器实时精准监测阳极母线高度、槽电压对应变化,将极距控制在4.5-5.0cm的合理范围;根据电解槽电流负荷变化合理调整极距,当电流负荷提升10%时,极距相应增加0.2-0.3cm,避免极距过小导致电流效率大幅下降;建立极距调整台账,记录每次调整的时间、电流负荷、极距数值,形成标准化调整方案。(3)电流密度优化设定:结合电解槽容量与原料特性,通过仿真模拟计算不同电流密度下的电解效率与能耗,确定最佳电流密度区间;对于200kA电解槽,将电流密度控制在0.8-0.85A/cm²;对于300kA以上大型电解槽,电流密度控制在0.75-0.8A/cm²,在保证电解效率的同时降低电能消耗。

(4)电解质水平与铝液水平控制:采用悬挂钎测量法或开发自动机器人设备测量电解质水平与铝液水平,消除人工测量误差,将电解质水平控制在20-22cm,铝液水平控制在18-26cm;定期测量并调整两水平高度,当电解质水平下降时,及时调整电压、铝水平、覆盖料厚度;当铝液水平过高时,适当增加出铝任务量,避免铝液水平过高导致电解槽炉膛恶化。(5)槽电压精准控制:采用智能槽控系统,结合复杂电解质体系特性优化程序参数设定,根据电解槽槽电阻、分子比、槽温等参数运行状态自动根据程序调整槽电压,将槽电压稳定在设定区间;当槽电压波动超过设定值时,系统自动报警并分析波动原因,若因极距变化导致波动,自动触发极距调整程序;若因电解质成分异常导致波动,提示操作人员或自动调整氟化盐添加量^[2]。

2.3 电解铝生产设备优化措施

生产设备的性能与稳定性直接影响生产效率,要从结构改进与性能提升两方面优化,具体优化措施如下:

(1)电解槽结构优化:改进电解槽内衬材料,采用石墨化阴极炭块替代传统石墨质阴极炭块,降低阴极电阻率,减少槽底压降;在电解槽侧壁增设保温层,采用轻

质高铝砖与陶瓷纤维板复合结构,将槽体散热损失降低15%-20%;优化阴极表面形状,采用异形阴极,削弱铝液流速和波动高度,减少铝液二次反应,提升电流效率。(2)阳极组装设备升级:改造阳极组装机的压力控制系统,采用伺服电机驱动压装机,将组装压力控制在12-15MPa,确保钢爪与炭块连接紧密;增加焊接质量检测模块,通过视觉识别系统检测焊接焊缝宽度与高度,将焊接合格率提升至99%以上;优化阳极组装生产线布局,采用环形输送线替代直线输送线,减少物料转运时间,将组装效率提升20%。(3)铝液铸造设备改进:优化铸造机冷却系统,采用闭式循环冷却方式,通过板式换热器提高冷却效率,将铸锭冷却时间缩短15%-20%;在铸造机出口增设在线质量检测装置,采用涡流探伤技术检测铸锭内部缺陷,采用激光测径仪检测铸锭尺寸精度,确保铸锭合格率达到99.5%以上;改进铸造机浇铸系统,采用多点浇铸方式替代单点浇铸,减少铝液冲击,避免铸锭产生缩孔与裂纹。(4)原料输送设备优化:升级氧化铝输送风机,采用变频离心风机替代传统风机,根据输送量自动调整风机转速,降低风机能耗30%-40%;在输送管道拐弯处加装耐磨衬板,采用高铬合金衬板替代普通钢板,延长管道使用寿命2-3倍;改进氟化盐输送螺旋输送机,增加螺旋叶片的耐磨涂层,减少物料残留,将输送效率提升15%。

2.4 电解铝生产能源利用优化措施

电解铝生产能耗高,需通过多途径提升能源利用效率,具体优化措施如下:(1)电能消耗优化:采用高效节能变压器,选用损耗值低于1.5%的非晶合金变压器,降低变压过程中的电能损耗;在电解槽供电系统中加装无功补偿装置,采用SVG静止无功发生器,将功率因数提升至0.95以上,减少无功功率消耗;优化电解槽供电曲线,根据生产负荷变化调整供电功率,避免高峰时段超负荷供电,降低电能浪费。(2)余热回收利用:在电解槽烟管加装余热回收装置,采用热管式余热锅炉,将电解槽烟气散发的热量转化为蒸汽,蒸汽用于预热原料或供应厂区供暖,实现余热利用率达到30%以上;在铝液铸造环节设置余热回收换热器,利用铸锭冷却过程中释放的热量加热循环水,用于车间清洁或员工生活用水,减少新鲜水加热能耗。(3)绿色能源替代:在厂区建设分布式光伏电站,利用厂房屋顶与闲置场地安装光伏组件,将光伏电力接入电解铝生产供电系统,替代部分市电供电,降低化石能源消耗;与风电企业建立长期合作,签订绿色电力采购协议,确保绿色电力占比逐年提升。

2.5 电解铝生产环保工艺优化措施

环保工艺优化是电解铝行业可持续发展的必然要求，需从污染物控制与固废利用两方面推进，具体优化措施如下：（1）氟化物排放控制：改进电解槽密封结构，采用柔性密封罩替代传统刚性密封罩，在密封罩与电解槽接口处加装耐高温密封胶条，将氟化物逸散量降低40%-50%；优化烟气净化系统，在原有布袋除尘器前增设静电除尘装置，先通过静电除尘去除大颗粒粉尘，再通过布袋除尘器吸附细小氟化物颗粒，将氟化物去除率提升至99%以上；定期更换布袋除尘器的滤袋，选用聚四氟乙烯材质滤袋，延长滤袋使用寿命，确保净化系统稳定运行。（2）二氧化硫排放控制：在烟气净化系统中增设脱硫装置，采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺，将二氧化硫去除率控制在95%以上；优化脱硫剂配比，将石灰石浆液浓度控制在20%-25%，根据烟气中二氧化硫浓度动态调整浆液喷淋量，避免脱硫剂浪费；对脱硫副产品石膏进行脱水处理，通过真空皮带脱水机将石膏含水率降至15%以下，便于后续回收利用。（3）废槽衬无害化处理：建立废槽衬分类处理系统，先通过机械拆解将废槽衬中的炭块、耐火砖、钢棒分离；对炭块采用热解处理技术，在800-900℃的惰性气体环境下热解去除氟化物，热解后的炭块可作为燃料或再加工为炭素制品；对耐火砖采用酸浸处理，通过盐酸溶液浸泡去除残留氟化物，处理后的耐火砖可作为建筑骨料再利用。（4）阳极残块回收利用：对阳极残块进行筛选，将残极率低于30%的残块进行破碎处理，破碎后粒度控制在5-10mm，作为炭素原料重新掺入阳极糊中；对残极率高于30%的残块要重新上槽使用，减少浪费。（5）废水循环利用：改造厂区污水处理系统，采用“调节池+厌氧池+好氧池+MBR膜分离+反渗透”的处理工艺，将生产废水与生活废水处理后将达到循环水水质标准^[3]。

3 电解铝生产工艺优化落地保障与行业应用前景

3.1 优化措施落地保障机制

从管理与技术层面构建保障体系，确保优化措施有效推行。（1）建立专项管理小组，明确原料、电解、环保等环节责任分工，制定月度优化指标考核制度，将能耗、排放数据与部门绩效直接挂钩，对指标达标团队给

予专项奖励，未达标团队限期整改；（2）加强技术人员培训，每月开展1-2次电解槽参数调控、设备维护等实操培训，联合高校开展电解质体系优化等专项课题研究，每年选派技术骨干赴先进企业交流学习，提升技术专业能力；（3）完善数据监测体系，搭建覆盖全生产流程的数字化平台，实时采集原料消耗、设备运行、环保排放数据，每小时生成数据分析报告，通过大数据分析及时调整优化方案，避免参数偏离最佳区间。

3.2 行业推广应用前景

结合行业发展趋势，优化措施具备广泛应用价值。

（1）对于新建电解铝项目，可直接采用优化后的设备与工艺参数，如选用石墨化阴极电解槽、全自动配料系统，降低项目初期能耗与环保投入，缩短项目投产达标周期；（2）针对老旧生产线改造，通过分步替换电解槽内衬、升级供电系统等方式，避免整体停产损失，实现低成本改造升级，适配现有生产节奏；（3）在“双碳”目标推动下，绿色能源替代与余热回收技术可与区域新能源项目联动，如与周边风电场、光伏电站签订直供协议，助力行业构建“绿电-电解铝”一体化生产模式，为行业低碳转型提供可复制的实践路径^[4]。

结束语：本文围绕电解铝生产工艺优化展开系统研究，从现状分析到核心环节优化，再到落地保障与应用前景探讨，形成完整研究体系。提出的原料筛选、参数调控、设备改造等措施，可有效解决现有工艺痛点，降低能耗与环保压力。后续可进一步探索智能化技术与电解工艺的融合，提升参数调控精度。

参考文献

- [1]冯冰.电解铝生产工艺的优化分析[J].世界有色金属,2021,46(15):124-125.
- [2]徐谋.电解铝生产工艺的优化方式分析[J].世界有色金属,2021,46(17):7-8.
- [3]赵成.电解铝生产工艺的优化研究[J].现代盐化工,2022,49(6):46-48.
- [4]苏旭东,李振军.电解铝节能降耗生产工艺分析探讨[J].工程施工新技术,2024,3(9):11-12