

关于铝电解工艺控制基础问题探究

李学风

青铜峡铝业股份有限公司青铜峡铝业分公司 宁夏 吴忠 751600

摘要: 铝电解作为金属铝生产的核心工艺,其控制水平直接决定生产效率、能耗与环保性能。本文聚焦铝电解工艺控制基础问题,系统探究工艺原理、关键参数及控制优化路径。阐述了铝电解电化学氧化还原反应机制与核心流程,明确极间电压、氧化铝浓度、槽温等关键参数的控制范围与作用机制。分析了温度控制失衡、极距-电压非线性关联、电解质体系动态失衡等基础问题,揭示参数耦合性与系统滞后性对工艺稳定性的影响。结合传统PID控制、模糊控制、数字孪生等技术,提出涵盖传统策略优化、现代技术应用、能耗管控及环保措施的综合解决方案。研究为提升铝电解电流效率、降低能耗、推动绿色生产提供理论与技术参考。

关键词: 铝电解工艺;控制基础问题;关键环节优化

引言: 随着行业对高效低碳需求的提升,工艺控制中的基础问题日益凸显,如热平衡波动、参数耦合干扰、自动化精度不足等,制约着技术升级。本文立足青铜峡铝业生产实践,以电解工艺基础原理为切入点,梳理电参数、物料参数与环境参数的调控逻辑。通过剖析温度、极距-电压、电解质体系等关键环节的控制难点,整合传统控制策略与现代智能技术,构建全流程优化体系,为解决铝电解工艺稳定性差、能耗高的问题提供系统性思路。

1 铝电解工艺基础原理

铝电解是通过电解熔融氧化铝生产金属铝的工业过程,其核心原理基于电化学氧化还原反应。在电解槽内,以熔融冰晶石(Na_3AlF_6)为电解质,氧化铝(Al_2O_3)作为溶质溶解其中,形成可导电的熔盐体系。通入直流电后,电解质中的离子发生定向迁移,在阴极和阳极分别发生还原与氧化反应,实现铝的提取。

从电化学机制看,当电流通过电解槽时,氧化铝在熔融电解质中解离为 Al^{3+} 和 O^{2-} 离子。在阴极(铝液层)表面, Al^{3+} 获得电子被还原为液态铝: $2\text{Al}^{3+}+6\text{e}^-=2\text{Al}$;在阳极(碳素阳极)表面, O^{2-} 失去电子与碳结合生成二氧化碳: $3\text{O}^{2-}-6\text{e}^-+3\text{C}=3\text{CO}_2\uparrow$ 。总反应式为 $2\text{Al}_2\text{O}_3+3\text{C}=4\text{Al}+3\text{CO}_2\uparrow$,反应过程需持续消耗氧化铝和碳素阳极,并释放大量热量。现代铝电解工艺系统由电解槽、供电系统、物料输送系统和环保设施构成。电解槽是核心设备,由阴极内衬、阳极装置、母线结构和槽壳组成,其中阴极区保持 $940\sim 960^\circ\text{C}$ 的熔融状态,确保电解质和铝液分层。供电系统提供稳定的直流大电流(通常为 $100\sim 600\text{kA}$),是维持电解反应的能量基础。工艺核心流程包括原料预处理、电解作业和产物收集。氧化铝经气力输送至电解槽上部料箱,通过自动下料系统精准补入电

质中;电解产生的液态铝定期从槽底吸出,经铸造加工为铝锭或铝合金;电解过程中产生的烟气经净化系统处理,回收氟化物并减少污染物排放^[1]。

2 铝电解工艺控制的关键工艺参数

铝电解工艺控制要通过精准调控核心参数实现高效生产,这些参数相互关联、协同作用,直接影响电流效率、能耗和产品质量。关键工艺参数可分为以下电参数、物料参数和环境参数三大类,构成完整的工艺控制体系。(1)电参数是电解过程的能量基础,极间电压和电解电流是核心指标。极间电压反映电解槽的能量状态,正常范围通常为 $3.8\sim 4.2\text{V}$,过高会增加能耗,过低则可能引发阳极效应。电解电流需保持稳定,波动幅度需控制在 $\pm 1\%$ 以内,电流稳定性直接影响铝离子还原效率。极距(阴阳极间距)是关联电参数与反应效率的关键,通常控制在 $4\sim 5\text{cm}$,极距过小易导致短路,过大则增加电压损耗。(2)物料参数决定电解体系的物理化学特性,氧化铝浓度是首要控制指标。电解质中氧化铝浓度需维持在 $1.5\%\sim 3.0\%$,过低会引发阳极效应,过高则导致电解质粘度上升。电解质分子比(NaF 与 AlF_3 的摩尔比)控制在 $2.2\sim 2.4$,直接影响电解质熔点和导电率。电解质水平和铝液水平需保持动态平衡,前者通常为 $20\sim 25\text{cm}$,后者为 $15\sim 20\text{cm}$,两者差值过大易破坏电解槽热平衡。(3)环境参数聚焦电解槽的热状态与物料平衡,槽温是核心监测指标,要稳定在 $940\sim 960^\circ\text{C}$ 。温度过高会加速阴极内衬腐蚀和铝液溶解损失,过低则导致电解质凝固。下料量与下料频率需匹配氧化铝消耗速度,现代电解槽采用多点定时下料,确保浓度均匀^[2]。

3 铝电解工艺关键控制环节的基础问题分析

3.1 铝电解槽温度控制基础问题

铝电解槽温度控制的核心矛盾在于热平衡的动态不稳定性。电解过程中,电能转化的热能与槽体散热始终处于动态博弈状态,高温环境(940-960℃)下微小的热输入波动就可能引发温度偏离最优区间。温度检测存在固有局限,传统热电偶插入深度与位置易受电解质对流影响,导致测量值与实际槽温存在偏差。更关键的是温度与其他参数的强耦合性,极距调整、氧化铝下料量变化都会通过电阻或反应热变化间接影响温度,形成“参数扰动-温度波动-二次调整”的连锁反应,增加稳定控制难度。

3.2 电解槽极距与极间电压控制基础问题

极距与极间电压控制的核心难题源于物理量与电信号的非线性关联。极距作为阴阳极间距的物理参数,直接决定电解电阻,但实际测量中难以实现实时精准检测,通常需通过极间电压间接推算,而电压还受电解质电阻、接触电阻等多重因素干扰,导致推算偏差。电压波动存在多源性,阳极气体逸出、铝液波动都会引发瞬时电压扰动,而控制系统对这类高频波动的响应存在滞后。极距调整的机械惯性与电压变化的即时性存在矛盾,机械传动的延迟会导致“过调-回调”现象,而极距微小变化($\pm 0.5\text{cm}$)就可能使电压偏离最优区间,影响电流效率。

3.3 电解质体系特性与控制基础问题

电解质体系控制的基础问题集中体现为成分与性能的动态失衡。电解质中氧化铝浓度、分子比(NaF/AlF_3)、添加剂含量等参数存在复杂交互作用,例如分子比升高会提升氧化铝溶解度,但会降低电解质导电率。氧化铝溶解过程存在滞后性,下料量与实际溶解浓度间存在时间差,易导致局部过饱和或欠饱和。电解质水平与铝液水平的平衡控制困难,电解质蒸发、铝液吸出等操作会打破原有分层状态,而两者的界面张力变化会进一步加剧波动。杂质(如铁、硅)的持续积累会改变电解质熔点和粘度,且难以通过常规手段实时监测,导致体系特性逐渐偏离设计基准。

3.4 铝电解过程能耗控制基础问题

能耗控制的核心局限在于能量转化的低效性与不可控损失。电解过程电能利用率仅约50%,大量能量以热辐射、烟气带走等形式损失,而这些损失受环境温度、槽体密封性能等不可控因素影响显著。电流效率与能耗存在权衡矛盾,提升电流效率需优化工艺参数,但可能增加电阻损耗;降低电压虽能减少能耗,却可能引发阳极效应。能耗构成的复杂性增加了优化难度,电解槽母线损耗、阳极压降、电解质压降等分项能耗难以精准计

量,导致整体能耗优化缺乏明确靶向。

3.5 铝电解工艺自动化控制基础问题

自动化控制的基础瓶颈在于检测与调控的技术局限。高温、强腐蚀的槽内环境导致传感器寿命短、精度低,氧化铝浓度、电解质成分等关键参数难以在线实时检测,依赖离线分析造成调控滞后。控制系统的算法模型与实际工艺存在偏差,传统PID控制难以应对多参数耦合的非线性过程,而智能算法的训练数据与真实工况的差异会导致控制策略失效。设备执行机构存在响应延迟,如下料阀、阳极升降装置的机械惯性会放大控制误差^[3]。

4 铝电解工艺关键控制环节优化与自动化升级技术体系

4.1 传统控制策略优化

传统控制策略优化以稳定工艺参数、保障基础生产效率为核心目标,通过经典控制理论与工艺特性的深度结合实现精准调控,具体如下:(1)基于PID的槽电压控制系统聚焦电压稳定性提升,通过比例、积分、微分参数的动态整定,实时补偿电解过程中的电压波动。系统需根据槽温变化、电解质状态调整控制增益,在维持电压基准值的同时,减少因参数耦合引发的超调现象,确保电解反应处于稳定的能量输入区间。(2)物料平衡计算模型以质量守恒定律为基础,构建氧化铝消耗、铝液产出与原料补给的动态平衡关系。模型需纳入电解效率、物料损耗等修正系数,通过实时采集下料量、出铝量等数据,动态调整补给节奏,避免因物料失衡导致的工艺波动。结合电解质循环特性优化物料分布,确保氧化铝在电解槽内均匀溶解,减少局部浓度偏差。(3)效应预报与抑制技术通过建立阳极效应前兆参数监测体系,实现效应的提前预警与主动干预。系统持续追踪电压波动频率、电解质电阻变化等特征参数,结合历史数据构建效应发生概率模型,在效应萌发阶段通过调整下料量、极距等参数抑制效应发展,降低效应对电流效率和能耗的负面影响,同时减少效应发生时的污染物排放。

4.2 现代控制技术应用

现代控制技术应用具体如下:(1)模糊控制理论在槽况诊断中的应用。通过模拟人工操作经验构建模糊规则库,实现对复杂非线性工艺的有效管控。系统将槽温、电压、电解质水平等参数的偏差及变化率作为输入变量,经过模糊化、规则推理与去模糊化处理,输出优化的控制指令,尤其适用于参数耦合强、干扰因素多的电解工况,提升槽况诊断的灵活性与准确性。(2)基于LSTM神经网络的参数预测技术。通过采集历史生产数据中的温度、电压、物料消耗等时间序列信息,训练神

经网络学习参数变化规律,实现对未来数小时内工艺参数的精准预测。预测结果可为操作人员提供决策支持,提前采取调控措施,避免参数越限引发的工艺波动,增强过程控制的前瞻性。(3)数字孪生技术。通过构建电解槽虚拟数字模型,实现物理实体与虚拟空间的实时映射。模型整合槽体结构、热场分布、电化学反应等多维度数据,通过实时接收物理槽的传感器数据更新虚拟状态,模拟不同控制策略下的工艺响应。

4.3 能源消耗优化路径

能源消耗优化路径如下:(1)直流电耗构成分解为精准节能提供靶向依据,通过区分理论电耗与附加电耗明确节能空间。理论电耗基于电化学反应原理计算最低能量需求,附加电耗则涵盖电阻损耗、热损失等非必要消耗,需通过优化母线结构、改善电极接触状态等措施降低电阻损耗,通过强化保温、优化槽体散热设计减少热损失,实现电耗构成的合理化分配。(2)动态功率调节策略通过与电网负荷协同实现能源高效利用,基于电网负荷峰谷特性与电解工艺允许波动范围,制定柔性功率调节方案。在电网负荷低谷时段适度提升电解功率,充分利用低价电能;在负荷高峰时段合理降低功率,避免用电成本上升。调节过程需严格控制参数变化速率,确保电解槽热平衡与工艺稳定性不受显著影响。(3)余热回收系统设计聚焦电解过程中余热的高效利用,通过在电解槽外壳、阳极导杆等高温部位设置换热装置,回收烟气与设备散热中的热能。回收的热量可用于厂区供暖、热水供应或驱动小型发电设备,减少化石能源消耗。

4.4 环境影响控制措施

环境影响控制措施包含几下方面:(1)全氟碳化物(PFCs)减排技术。通过优化工艺控制与设备改造减少排放源。在工艺层面,通过精准控制氧化铝浓度、降低阳极效应发生率从源头减少PFCs生成;在设备层面,改进阳极结构与电解槽密封性能,减少气体泄漏。采用高

效烟气收集系统与吸附净化技术,对产生的PFCs进行末端处理,降低排放浓度,满足环保标准要求。(2)电解废渣资源化利用方案实现固废减量化与资源化,针对电解槽大修产生的废阴极炭块、废渣等危险废物,通过高温无害化处理去除氟化物等有害成分,再利用其碳含量与理化特性开发新型建材或作为燃料回收能量。建立废渣分类收集与溯源体系,确保处理过程的环境安全性,形成“产生-处理-再利用”的闭环管理模式。(3)碳排放核算与碳中和路径构建全生命周期排放管理体系,通过建立物料平衡与能源消耗台账,量化生产各环节的碳排放强度,明确减排重点环节。结合清洁能源替代,逐步提高水电、光伏等可再生能源在供电结构中的占比;通过技术改造提升能源利用效率,降低单位产品碳排放^[4]。

结束语:铝电解工艺控制是一项涉及多参数协同、多技术融合的系统工程。本文通过对工艺原理、关键参数及控制问题的深度分析,明确了热平衡调控、参数协同优化、能耗环保协同等核心方向。传统控制策略与现代智能技术的结合,为解决温度波动、参数耦合等难题提供了有效路径。未来需进一步强化传感器技术升级、算法模型迭代与设备性能优化,推动控制精度与智能化水平提升。研究成果对铝电解行业降低能耗、减少排放、实现高质量发展具有实践指导意义,为后续技术创新奠定理论基础。

参考文献

- [1]陈少华.复杂电解质体系下铝电解工艺控制技术[J].科技创新与应用,2019(35):104-105.
- [2]周亮.低温铝电解、铝电解工艺与控制技术的研究[J].世界有色金属,2021(1):14-15.
- [3]郭万辉.铝电解工艺中的自动化控制技术研究[J].中国金属通报,2025(10):1-3.
- [4]黄德江.复杂电解质环境中的铝电解工艺优化与控制技术研究[J].中国金属通报,2023(24):19-21.