

氧化铝焙烧炉智能优化控制策略分析

郭欣

山西华兴铝业有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i7.8994

[摘 要] 焙烧是氧化铝生产的关键冶金工序，焙烧炉负责完成氢氧化铝脱水、脱除结晶水、晶型转变等环节，炉内工况直接决定氧化铝冶金指标，同时影响生产线燃料消耗。目前氧化铝生产线内，多采用单回路 PID 控制方式，而焙烧炉属于大滞后、多变量强耦合冶金热工设备，进料量、燃料热值和炉膛负压等扰动因素频繁出现，难以实现精准调控，易导致成品冶金指标不稳。文章通过分析氧化铝焙烧冶金工艺机理，探究传统控制方案的应用短板，提出构建多变量自适应控制、工况预测前置调节、风料负荷协同优化的智能控制体系，有效改善炉窑运行稳定性，为氧化铝行业焙烧炉自动化升级提供启示。

[关键词] 氧化铝；焙烧炉；智能控制；冶金

Analysis of Intelligent Optimization Control Strategies for Alumina Roasting Furnaces

Guo Xin

Shanxi Huaxing Aluminum Industry Co., Ltd.

[Abstract] Roasting is a critical metallurgical process in alumina production, where the roasting furnace performs essential steps such as aluminum hydroxide dehydration, removal of crystallization water, and crystal form transformation. Furnace operating conditions directly determine alumina's metallurgical properties and significantly influence production line fuel consumption. Current alumina production lines predominantly employ single-loop PID control systems. However, roasting furnaces are complex metallurgical thermal equipment characterized by significant time lag and strong multivariable coupling, with frequent disturbances from factors like feed rate, fuel calorific value, and furnace negative pressure, making precise control challenging and often leading to unstable product quality. By analyzing the metallurgical mechanisms of alumina roasting processes and identifying limitations of traditional control approaches, this study proposes an intelligent control system integrating multivariable adaptive control, real-time condition prediction-based regulation, and coordinated optimization of air-material load dynamics. This framework effectively enhances furnace operational stability and provides valuable insights for automation upgrades in alumina roasting furnaces.

[Key words] alumina; calcination furnace; intelligent control; metallurgy

党的二十大报告强调，建设现代化产业体系，要“推动制造业高端化、智能化、绿色化发展”，同时加快实施创新驱动战略，加快实现高水平科技的自立自强。氧化铝冶金全流程中，氢氧化铝焙烧是决定最终产品品质的核心热工环节，焙烧炉内发生连续的物理及冶金化学反应，炉膛温度、烟气氧含量、系统负压等参数深度耦合，设备呈现典型的非线性特性。基于人工干预，不仅增加岗位劳动强度，还易造成炉内反应条件波动，影响生产质量。因此，有必要深入探究氧化铝焙烧炉智能优化控制路径，积极引入新技术、新工艺，推动铝冶炼装备智能转型。

1 氧化铝焙烧炉工艺机理分析

氧化铝焙烧炉以高温作用，驱动氢氧化铝发生逐级热分解反应，低温段脱除游离附着水，中温段分解结晶水，高温段完成三水铝石及一水铝石向 α - Al_2O_3 的晶型转变。炉内以高温烟气作为换热介质，通过对流、辐射等方式实现热量传递，再利用物料和烟气逆向运动确保反应充分进行。反应进程和产物质由炉温场分布、烟气组分、停留时间共同决定，热力反应与传质过程深度融合，这也是导致设备存在非线性、强耦合特性的根本原因。

2 氧化铝焙烧炉传统控制方案应用缺陷

2.1 常规控制架构

目前氧化铝焙烧炉控制系统多基于DCS平台搭建，采用单变量、单回路独立PID控制架构，控制回路涵盖炉膛温度、燃气流量、助燃风配比、炉膛负压调节等。各控制回路相互独立运行，控制参数提前人工整定，系统仅根据单一参数实时偏差进行修正，缺乏多变量联动约束，工况自适应逻辑应用不足。该控制架构仅适用于理想稳态工况，但在实际铝冶炼生产中，焙烧炉属于连续运行热工设备，原料含水率、燃气热值、环境

温度等均存在随机波动。固定参数PID控制无法根据工况变化实时修正控制系数，动态调节能力欠缺，控制系统抗干扰能力弱，基础控制架构难以匹配焙烧炉冶金生产特性。

2.2 多变量耦合的失效表现

氧化铝焙烧炉热工过程中，存在强耦合、大滞后、非线性特征，是控制失效的关键原因。炉内温度、燃烧风量、燃气量等参数互相影响，任意单一回路调节都会引发连锁工况波动，比如燃气流量增加会提高炉内温度，同时增大烟气排量，导致炉膛负压偏移；为修正负压而调整引风机频率后，又会改变炉膛风量场，造成局部温度回路，燃烧不充分，难以提升能源节约、减少能源损失^[1]。传统单回路控制互不兼容，需各自调节，易出现参数反复超调、系统振荡、稳态偏差过大等问题。同时，焙烧炉热传递存在一定滞后，PID属于事后调节方式，难以精准预判工况变化，进而引发冶金质量问题。

2.3 人工干预模式弊端

由于传统自动控制精度不足，抗扰动能力差，工业现场焙烧炉长期依赖人工二次调控。生产过程中，操作人员需实时监控多项数据，如炉温、负压和氧含量等，针对进料波动、燃气热值变化等工况，需频繁手动修正阀门开度及控制设定值，高度依赖操作人员经验。但不同班组操作标准不统一，严重降低工况调节一致性，难以实现标准化生产，降低氧化铝焙烧炉整体控制效能。在异常工况下，如负荷调整、原料切换和设备波动等，人工响应存在滞后性，无法提前预调节，极易造成短时工况失控。另外，持续的人工干预不仅大幅提升人为误操作风险，还会造成生产工况长期波动，使得燃气能耗浪费，难以保障产品合格率稳定性，严重制约氧化铝冶炼工序智能化升级。

3 氧化铝焙烧炉的智能优化控制路径

3.1 加强多变量自适应控制

基于氧化铝焙烧炉多变量强耦合特性，应搭建多变量自适应控制体系，替代原有的单回路PID控制模式，有效破解控制短板。管理人员需将核心变量作为调控主体，包括炉膛各分区温度、燃气流量、助燃风量和炉膛负压，打破各回路之间的数据壁垒，建立变量联动约束关系。在PID算法基础上，可引入自适应修正模块，结合炉内实时运行工况，动态调整比例、积分及微分参数，更好地适应多变工况。同时，系统根据入炉氢氧化铝含水量和瞬时进料量等实时数据，需划分运行区间，在稳态生产、负荷升降、原料波动等不同工况下，可自动切换至对应控制参数组合。另外，管理人员需引入模糊控制逻辑，对变量间耦合干扰进行解耦处理，当某一参数出现偏差时，同步联动关联参数共同修正，有效弱化变量耦合造成的负面影响，增强氧化铝焙烧炉动态抗干扰能力。

3.2 基于预测的前置调节

氧化铝焙烧炉智能控制中，应引入工况预测技术，创新时频双域融合大模型(TF-LFM)多步预测方法，为预防性调节提供有力支持，从根源缩短调节滞后时长^[2]。根据现场DCS系统采集的运行数据，应创建时序工况预测模型，选取进料流量、燃气压力和环境温度等易波动参数作为输入特征，预判未来数分钟内各项关键指标变化趋势。同时，模型可基于焙烧炉热工反应规律持续优化，不断提升预测精度，提前捕捉原料切换、负荷调整等引起的工况变化。并且，控制系统可根据预测结果提前下发调节指令，预先调整执行机构状态，从被动纠偏转变为主动预判。例如，当预测到炉温即将出现偏移，前置调节模块可提前微调风燃配比，有效弥补设备大滞后引发的控制缺陷，大幅削减工况波动幅度，进而强化控制系统稳定性。

3.3 构建协同优化算法

为兼顾产品质量、生产能力和设备运行安全，应基于风、

料、燃等要素构建协同优化算法，以氧化铝成品灼减达标、燃气单耗最低、炉膛负压稳定为优化目标，结合焙烧冶金工艺要求设定参数约束阈值，划定安全运行区间，由此实现多目标最优调控。以实时进料量为基准，应建立物料与燃料匹配模型，根据入炉物料总量及其理化性质，精准计算理论燃气供给量、助燃风量基础值，避免风燃配比失衡，产生良好的经济效益和社会效益^[3]。同时，还需联动引风系统协同调控负压，当燃料、风量调整导致烟气排放量变化时，算法同步修正风机出力，保证炉膛负压始终处于合理范围，以防出现漏风或回火等安全隐患。

4 结束语

综上所述，文章围绕氧化铝焙烧炉冶金热工特性，剖析传统单回路PID控制的耦合震荡、人工依赖等缺陷，从多变量自适应解耦、时序预测前置调控、风料燃多目标协同算法三方面搭建智能控制方案，可削弱工况滞后与参数耦合干扰，稳定氧化铝产品指标、降低燃料消耗，为铝冶炼炉窑智能化绿色改造提供工程参考。

[参考文献]

- [1]卢智勇.氧化铝生产节能减排问题探究[J].世界有色金属,2023,(17):196-198.
- [2]王明刚,汪斯杰,王凯,等.基于时频双域融合大模型的氧化铝焙烧主炉温度多步预测[J].冶金自动化,2026,50(3):67-77+182.
- [3]贾章椿,毛鹏.氧化铝高温焙烧窑烟气SCR脱硝系统优化改造[J].有色冶金节能,2021,37(5):56-59.

作者简介：郭欣，1992年5月9日，男，山西省运城市河津市，汉族，大学本科，助理工程师，研究方向：氧化铝焙烧炉系统。