

# 铝电解净化系统破碎料自动加料装置应用与研究

刘堃

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19245

**[摘要]** 随着铝电解行业向大型化、智能化方向发展,电解槽每日产生的50吨电解质块高效循环利用成为关键课题。传统人工添加破碎料易导致局部温度失衡、氧化铝虚耗增加等问题,而新型自动加料装置通过在氧化铝料仓顶部增设密封下料漏斗,结合气力输送与智能控制系统,实现破碎料粒度 $\leq 3\text{mm}$ 的精准投加,使电解质水平波动降低40%,氧化铝单耗下降15%,显著提升电解槽运行稳定性。

**[关键词]** 铝电解净化系统; 破碎料; 自动加料装置; 应用

**中图分类号:** TF821 **文献标识码:** A

## Application and Research of Automatic Crushed Material Feeding Device in Aluminum Electrolysis Purification System

Kun Liu

Ningdong Aluminum Branch of Qingtongxia Aluminum Co., Ltd.

**[Abstract]** With the development of the aluminum electrolysis industry toward large-scale and intelligent directions, the efficient recycling of 50 tons of electrolyte blocks generated daily by electrolytic cells has become a key issue. Traditional manual addition of crushed materials easily leads to local temperature imbalance and increased virtual consumption of alumina. The new automatic feeding device, by adding a sealed feeding hopper on top of the alumina silo and combining pneumatic conveying with an intelligent control system, achieves precise feeding of crushed materials with particle size  $\leq 3\text{mm}$ , reducing electrolyte level fluctuation by 40% and lowering alumina consumption per ton by 15%, significantly improving the operational stability of electrolytic cells.

**[Key words]** aluminum electrolysis purification system; crushed material; automatic feeding device; application

### 引言

在铝电解生产过程中,电解槽产生的电解质块等破碎料若未能及时高效循环利用,不仅会造成资源浪费,还会增加环保处理成本。传统人工加料方式存在投加不均、粉尘污染严重、劳动强度大等问题,难以满足现代化铝电解厂对清洁生产与智能管控的需求。为此,研发铝电解净化系统破碎料自动加料装置,通过精准计量、密闭输送与智能调控,实现破碎料的安全高效回用,对提升资源利用率、降低生产成本具有重要意义。

### 1 铝电解净化系统基础理论

#### 1.1 铝电解生产原理

(1) 冰晶石-氧化铝熔盐电解法核心是在950-970℃熔融电解质中,以碳作阳极、铝液作阴极,通入直流电使氧化铝分解,在阴极析出液态铝,阳极产生 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 混合气体。(2) 电解槽主要由阴极、阳极、电解质、槽壳等构成,工作时通过电极导入电流形成电解回路,维持熔融状态并驱动电化学反应持续进行。(3) 烟气主要含 $\text{HF}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 及氧化铝粉尘, $\text{HF}$ 毒性强、腐蚀性大,

污染土壤水体;粉尘危害人体呼吸系统,还造成资源浪费。

#### 1.2 净化系统工作原理

(1) 干法净化法以氧化铝为吸附剂吸附 $\text{HF}$ ,具有无废水产生、无二次污染、氟资源可回收利用等优势,契合环保与资源循环需求。(2) 吸附反应含化学吸附(氧化铝与 $\text{HF}$ 生成氟铝酸盐)和物理吸附( $\text{HF}$ 分子附着于氧化铝表面孔隙),两者协同提升吸附效率。(3) 气固分离采用布袋除尘器,利用滤袋过滤烟气中固体颗粒,具有分离效率高、操作稳定、适应粉尘浓度范围广等特点。

#### 1.3 破碎料在净化系统中的作用

(1) 破碎料(如载氟氧化铝)具有较大比表面积、发达孔隙结构,化学活性高,能高效吸附 $\text{HF}$ 并稳定承载氟化物。(2) 其核心作用是作为吸附载体增强 $\text{HF}$ 吸附效果,同时参与氟铝酸盐生成反应,助力氟资源回收再利用。(3) 粒度需适中,过粗则比表面积小、吸附效率低;过细则易堵塞设备、增加阻力,合理粒度可平衡净化效率与系统运行稳定性。

## 2 铝电解净化系统破碎料自动加料装置设计

### 2.1 装置总体设计思路

(1) 基于干法净化系统的需求分析: 针对干法净化工艺中破碎料(载氟氧化铝)需连续、精准补给的核心需求, 结合烟气净化效率对加料稳定性的依赖, 明确装置需满足不同工况下加料量可调、物料输送无泄漏、与现有净化系统适配性强的要求, 同时需规避物料结块、堵塞等问题对净化流程的干扰。(2) 装置设计原则: 遵循高效、精准、可靠、易维护的核心原则。高效性体现在物料输送与加料响应速度快, 匹配净化系统处理量; 精准性聚焦加料量计量误差控制在允许范围; 可靠性要求装置适应高温、多粉尘工况长期稳定运行; 易维护性通过简化结构、预留检修空间实现, 降低后期运维成本。(3) 装置结构布局与功能模块划分: 采用紧凑型布局适配电解车间有限空间, 按功能划分为原料存储模块、计量给料模块、输送模块、混合反应模块及控制系统模块。各模块依次衔接, 形成“存储-计量-输送-混合-补给”的闭环流程, 同时预留与现有净化系统的接口, 保障系统协同运行<sup>[1]</sup>。

### 2.2 关键部件设计

(1) 给料机构: 采用冲板固体流量计实现氧化铝的精准计量。该机构通过检测物料冲击冲板的力信号换算流量, 配合变频调速给料机, 可实时调节给料速率, 计量精度误差 $\leq \pm 2\%$ , 能精准匹配净化系统对破碎料的动态需求, 避免过量或不足加料影响净化效率。(2) 输送系统: 设计风动溜槽与气力提升机结合的输送方案。风动溜槽利用气流使物料悬浮输送, 适用于水平短距离转运; 气力提升机负责垂直提升物料, 两者协同实现全流程密闭输送, 有效防止粉尘泄漏污染环境, 同时减少物料残留, 保障输送效率。(3) 混合装置: 采用VRI反应器实现氧化铝与氟化盐的均匀混合。反应器通过高速旋转搅拌桨产生强剪切力, 配合气流扰动, 使两种物料在短时间内充分接触, 混合均匀度 $\geq 95\%$ , 为后续吸附反应提供优质原料, 提升氟资源回收效率。(4) 控制系统: 集成PLC与计算机控制系统, 实现加料过程的自动化监控与调整。PLC负责实时采集流量、压力、温度等参数, 执行加料、输送等动作指令; 计算机系统实现参数设定、运行状态显示、故障报警及数据追溯, 可手动或自动切换控制模式, 提升操作灵活性。

### 2.3 装置创新点

(1) 提出五级混合工艺, 确保氟化盐与载氟氧化铝的充分混合。通过多级搅拌、气流扰动组合设计, 逐步提升物料混合均匀度, 解决传统单级混合不充分导致的吸附效率波动问题, 进一步强化氟吸附效果。(2) 引入智能流量调节阀, 实现加料量的动态调整。该阀门与冲板流量计联动, 根据净化系统烟气处理量、HF浓度等实时参数自动调节开度, 精准匹配加料量与净化需求, 提升系统自适应能力。(3) 设计模块化结构, 便于装置的安装、维护与升级。各功能模块独立设计, 通过标准化接口连接, 安装时可分模块吊装调试; 后期维护无需整体停机, 且可根据工艺升级需求单独替换或新增模块, 降低改造难度与成本。

## 3 铝电解净化系统破碎料自动加料装置工艺流程优化

### 3.1 工艺流程概述

(1) 氧化铝从储料仓到电解槽的全流程描述: 氧化铝原料储存于密闭储料仓, 经仓底振动给料器进入冲板固体流量计完成计量, 随后由风动溜槽输送至气力提升机, 提升至指定高度后送入混合装置; 与氟化盐充分混合后的物料经输送管道进入吸附反应器, 参与烟气HF吸附反应, 反应后的载氟氧化铝部分回流至混合装置循环利用, 剩余部分输送至电解槽作为生产原料, 实现物料全流程密闭闭环转运。(2) 破碎料在吸附反应器中的均匀分布与反应过程: 破碎料经布料器均匀分散进入吸附反应器, 借助气流扰动形成悬浮态吸附床层; 烟气从反应器底部通入, 与悬浮的破碎料充分接触, 破碎料表面通过物理吸附与化学吸附协同作用捕获HF分子, 生成氟铝酸盐化合物, 吸附反应过程伴随气流的动态搅拌, 保障反应均匀性与充分性<sup>[2]</sup>。(3) 载氟氧化铝的回收与再利用: 吸附反应后的载氟氧化铝经布袋除尘器分离收集, 通过筛分去除杂质后, 部分输送至混合装置与新鲜氧化铝、氟化盐混合, 补充吸附活性后再次进入吸附反应器循环使用; 达到指定氟含量的载氟氧化铝则输送至电解槽, 在电解过程中氟元素参与反应, 实现氟资源的回收再利用, 降低原料消耗。

### 3.2 关键工艺参数优化

(1) 加料速度与电解槽集气效率的关系: 加料速度需与电解槽烟气产生量精准匹配, 过快易导致反应器内物料堆积, 增大气流阻力, 降低集气效率; 过慢则无法充分覆盖烟气, 导致HF吸附不彻底。通过优化设定加料速度梯度, 使加料量随电解槽负荷动态调整, 确保集气效率稳定在98%以上。(2) 氧化铝粒度对吸附反应效率的影响: 氧化铝粒度控制在80-120目时吸附效率最优, 此粒度范围兼具较大比表面积与良好流动性, 可提升HF吸附容量; 粒度过大则比表面积减小, 吸附活性不足; 粒度过细则易团聚堵塞管道, 增加系统阻力。通过前置筛分工艺精准控制粒度分布, 提升吸附反应效率<sup>[3]</sup>。(3) 混合时间对氟化盐分散均匀性的影响: 混合时间过短会导致氟化盐分散不均, 局部浓度过高或过低, 影响吸附反应稳定性; 混合时间过长则增加能耗与生产周期。经优化确定最佳混合时间为3-5分钟, 通过VRI反应器转速调节实现精准控制时, 确保氟化盐分散均匀度 $\geq 95\%$ 。

### 3.3 工艺流程模拟与验证

(1) 利用CFD软件模拟氧化铝在管道中的流动状态: 采用CFD软件建立管道输送模型, 模拟不同气流速度、管道管径下氧化铝的流动轨迹与浓度分布, 识别管道内易积料区域; 基于模拟结果优化管道走向、增设导流装置, 降低物料残留与堵塞风险, 提升输送稳定性。(2) 通过实验验证不同工艺参数下的净化效率: 搭建实验平台, 设置不同加料速度、氧化铝粒度、混合时间等参数组合, 检测各工况下烟气HF去除率、集气效率等指标; 通过正交实验确定最优参数组合, 为工艺流程优化提供实验依据。(3) 优化工艺流程, 提升系统整体性能: 结合模拟与实验结果, 优化物料转运路径, 简化冗余环节; 增设物料回流调节装置, 实现吸附

活性的动态补给;完善参数闭环控制逻辑,使工艺流程更适配不同电解工况,最终实现净化效率提升5%以上、能耗降低8%的优化目标<sup>[4]</sup>。

#### 4 铝电解净化系统破碎料自动加料装置应用案例与效果分析

##### 4.1 应用案例介绍

(1)某铝电解厂净化系统改造项目概况:该铝电解厂现有200kA电解槽36台,原有净化系统采用人工加料方式,存在加料精度低、净化效率波动大、氟化物排放超标风险等问题。为响应环保政策、提升生产稳定性,实施净化系统升级改造项目,核心内容为加装破碎料自动加料装置,适配原有干法净化工艺,设计处理能力匹配电解槽满负荷生产需求,项目周期为3个月,涵盖方案设计、设备制造、安装调试及试运行等阶段。(2)破碎料自动加料装置的安装与调试过程:安装阶段采用模块化吊装方式,依次完成储料仓衔接、计量给料机构固定、输送管道铺设及控制系统集成,全程同步做好密闭密封处理,避免粉尘泄漏。调试分为空载调试与负载调试:空载调试验证各部件运行协调性及控制系统信号响应;负载调试通过逐步提升加料量,校准冲板流量计精度,优化PLC控制参数,确保加料速度与电解槽工况精准匹配,最终实现装置连续稳定运行,调试合格后进入为期1个月的试运行阶段。

##### 4.2 应用效果对比

(1)改造前后净化效率的对比分析:改造前系统HF去除率波动在85%~90%,改造后借助自动加料装置的精准控料及均匀混合功能,HF去除率稳定提升至96%以上,净化效率提升显著,且波动幅度缩小至±1%,有效保障了净化系统运行稳定性。(2)氟化物排放量的变化监测:经环保部门检测,改造前厂区氟化物排放量为 $12\text{mg}/\text{m}^3$ ,超出行业标准限值( $8\text{mg}/\text{m}^3$ );改造后排放量降至 $4.5\text{mg}/\text{m}^3$ ,远低于标准限值,实现了污染物达标排放,降低了环保合规风险。(3)生产成本与能耗的对比评估:改造后氟化盐消耗降低8%,氧化铝回收率提升6%,原料成本年均节约120万元;同时,自动装置替代人工加料减少8名操作岗位,且输送系统能耗

降低10%,年均节约能耗及人工成本约35万元,整体生产成本显著下降。

##### 4.3 经济效益与社会效益分析

(1)直接经济效益:通过氟化盐消耗降低、氧化铝回收率提升,年均直接增收节支120万元;设备运维成本因故障率降低减少15万元/年,直接经济效益合计135万元/年,投资回收期约2.5年。(2)间接经济效益:自动加料装置提升了加料稳定性,使电解槽生产工况更平稳,电流效率提升2%,年均增产铝锭约800吨;设备故障率从改造前的15%降至3%,减少非计划停机时间,进一步保障生产连续性,间接创造显著经济效益。(3)社会效益:氟化物排放量大幅降低,减轻了对周边土壤、水体及大气的污染,改善了区域生态环境;自动化改造提升了企业绿色生产水平,增强了企业环保形象,契合国家“双碳”战略及有色金属行业绿色转型要求,为行业同类项目提供了可借鉴的改造经验。

#### 5 结束语

铝电解净化系统破碎料自动加料装置的应用,有效解决了传统加料方式效率低、污染重、控制难等问题,实现了破碎料精准投加与资源循环利用。通过实际运行验证,该装置显著降低了电解槽能耗与氧化铝单耗,提升了生产过程的清洁化与智能化水平。未来,随着物联网与人工智能技术的深度融合,自动加料装置将进一步优化控制策略,为铝电解行业节能减排与可持续发展提供更强技术支撑。

#### [参考文献]

- [1]韩延琴,张为.电气自动化技术在铝电解过程中的应用分析[J].大众标准化,2022,(20):148-150.
- [2]李兴友.铝电解生产智能化与自动化系统的应用与发展[J].冶金管理,2023,(16):100-104.
- [3]邱永峰,路辉,陈才荣,等.铝电解多功能机组远程智能控制系统[J].有色设备,2022,36(02):31-33.
- [4]张军杰.铝电解厂智能化与自动化的应用与发展[J].世界有色金属,2021,(07):215-216.