

# 含铝废渣在净水剂生产中的资源化应用实践

邓勇新 吴锴 谢飞航 朱杰 杨逊伟

乳源东阳光电化厂, 中国·广东 韶关 512721

**摘要:** 乳源东阳光电化厂在氯碱生产过程中年均副产盐酸 60 万吨, 同时关联企业化成箔公司产生大量含铝废渣 ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  含量  $\geq 65\%$ )。为实现“以废治废”目标, 本研究开发了以副产盐酸与含铝废渣为原料生产聚合氯化铝 (PAC) 的绿色工艺。通过酸解-聚合两段式反应控制, 实现废渣中铝元素溶出率  $\geq 92\%$ , 所得 PAC 产品盐基度达 65%~85%, 符合 GB/T 22627—2014《水处理剂 聚合氯化铝》标准。项目建成 10 万吨/年生产线, 年消纳废渣 7.2 万吨、废酸 12 万吨, 降低危废处置成本 720 万元/年, 新增产值 4800 万元/年。实践表明, 该技术为氯碱-铝加工产业链的固废协同处置提供了可复制范例。

**关键词:** 含铝废渣; 副产盐酸; 聚合氯化铝; 资源化; 循环经济

## Practice of Resource Utilization of Aluminum Containing Waste Residue in Water Purification Agent Production

Deng Yongxin Wu Kai Xie Feihang Zhu Jie Yang Xunwei

Ruyuan Dongyangyang Electrification Plant, Shaoguan, Guangdong, 512721, China

**Abstract:** During the chlor alkali production process, the Ruyuan Dongyangyang Electrification Plant produces an average of 600000 tons of hydrochloric acid per year as a byproduct. At the same time, the affiliated enterprise, Huacheng Foil Company, generates a large amount of aluminum containing waste residue ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  content  $\geq 65\%$ ). To achieve the goal of “treating waste with waste”, this study developed a green process for producing polyaluminum chloride (PAC) using by-product hydrochloric acid and aluminum containing waste residue as raw materials. By controlling the two-stage reaction of acid hydrolysis and polymerization, the dissolution rate of aluminum element in the waste residue is  $\geq 92\%$ , and the obtained PAC product has a basicity of 65%~85%, which meets the standard of GB/T 22627—2014 *Water Treatment Agent Polyaluminum Chloride*. The project has built a 100000 ton/year production line, with an annual consumption of 72000 tons of waste residue and 120000 tons of waste acid, reducing the cost of hazardous waste disposal by 7.2 million yuan/year and increasing the output value by 48 million yuan/year. Practice has shown that this technology provides a replicable example for the collaborative disposal of solid waste in the chlor alkali aluminum processing industry chain.

**Keywords:** Aluminum containing waste residue; By-product hydrochloric acid; Polyaluminum chloride; Resource utilization; Circular economy

## 1 概述

### 1.1 含铝废渣特性与资源化潜力

含铝工业废渣主要来源于铝冶炼(赤泥)、型材加工(酸/碱渣)、电子箔制造(中和渣)等过程。其成分以氧化铝、氢氧化铝及硅钙化合物为主(见表 1), 传统处置方式以填埋为主, 但存在以下问题:

①环境风险: 可溶性铝离子淋溶导致土壤酸化( $\text{pH} \leq 5.5$  时迁移性增强);

②资源浪费: 废渣中铝含量达 15%~70%, 显著高于铝土矿品位 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  40%~60%)。

本研究所用含铝废渣来自化成箔生产中的中和工序, 经碱熔压滤后形成以无定形  $\text{Al}(\text{OH})_3$  为主的含铝滤渣, 其高反应活性为酸溶提铝创造了条件。

表 1 典型含铝废渣成分对比 (wt%)

废渣类型	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	含水率
赤泥	20~25	15~20	15~25	10~15	25~35
铝型材渣	40~60	5~10	1~5	0.5~2	15~25
化成箔渣	65~75	< 3	3~8	< 1	30~40

### 1.2 聚合氯化铝 (PAC) 的市场与技术需求

PAC 作为高效无机絮凝剂, 2022 年全球市场规模达 45 亿美元 (Grand View Research 数据), 在中国市政污水处理领域的应用占比超 80%。传统 PAC 生产依赖铝矾土或氢氧化铝精矿, 存在两大痛点:

①原料成本占比超 60% (铝矾土价格 > 800 元/吨);

②酸溶工序能耗高 (反应温度通常需要 100°C 以上)。

本研究创新点: 利用含铝废渣中无定形  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的低温反应活性, 在常压条件下实现高效酸溶, 同步解决副产盐

酸消纳与含铝废渣处置问题。

## 2 含铝废渣来源与特性分析

### 2.1 含铝废渣生成工艺解析

含铝废渣产生于乳源东阳光化成箔公司硝酸铵钙生产线的中和工段（见图 1）：在生产硝酸铵钙（复合肥）时，会产生大量的中和渣。首先将中和渣添加到化浆罐中，补加石灰乳除去中和渣的磷元素，然后再加入液碱，控制液碱和氢氧化铝的苛性比为 1.6~2.5，搅拌后使得中和渣充分溶解。然后将化浆罐中的浆液输送至板框压滤机，经板框压滤机充分压滤后，所得滤液打入滤液缓冲罐。滤液经换热器进入调晶罐，再加入氢氧化铝，充分混合后再打入分解罐，在氢氧化铝晶种作用下开始分解，得到含氢氧化铝晶体分解液，再将分解液打入板框压滤机，滤渣即为氢氧化铝半成品（含铝废渣）。

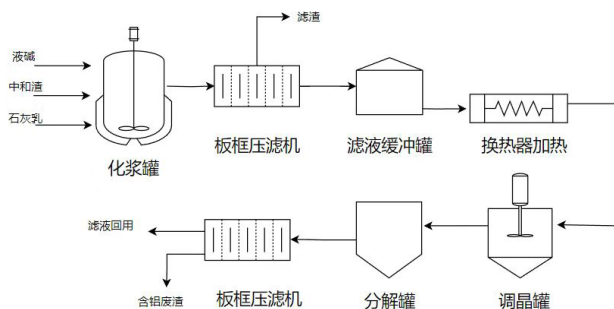


图 1 含铝废渣产生于乳源东阳光化成箔公司硝酸铵钙生产线的中和工段

含铝废渣成分验证（ICP-OES 检测，n=5）：

$Al_2O_3$ : 68.2 ± 2.1%;

CaO: 5.3 ± 0.8%;

$P_2O_5$ : 1.2 ± 0.3%;

灼减 (LOI): 24.5 ± 1.5% (主要为结晶水)。

### 2.2 原料来源

副产盐酸：来自乳源东阳光电化厂（HCl 31 ± 0.5%，含微量 NaCl）。

铝酸钙粉：外购（ $Ca(AlO_2)_2 \geq 68%$ ， $Al_2O_3 \geq 55%$ ）。

## 3 生产工艺开发与优化

### 3.1 生产工艺流程

采用“酸解—聚合”二级反应模式（见图 2）。

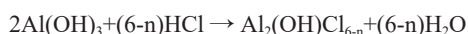
①酸解工段：将 31% 盐酸与含铝废渣按 1 : 1 比例加入反应釜，在 90℃ 条件下反应 1.5 小时；

②聚合工段：加入铝酸钙粉（添加量为盐酸重量的 0.2 倍），在 102℃ 条件下聚合反应 1 小时；

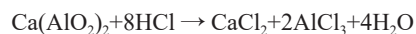
③压滤工段：反应完成后经板框压滤机压滤，得到液体 PAC 产品。

### 3.2 关键反应机理

酸解阶段（低温常压）：



聚合阶段（热活化）：



盐基度 (B) 调控公式：

$$B = [OH] / (3[Al^{3+}]) \times 100\%$$

通过铝酸钙粉添加量控制 B 值于 65%~85% 最佳絮凝区间 ( $k=0.38$ ,  $R^2=0.97$ )。

### 3.3 工艺参数优化

通过正交试验优化得到最佳工艺参数（见表 2）。

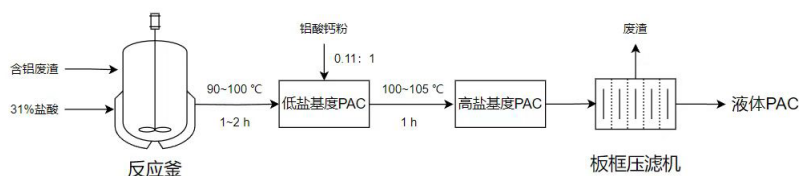


图 2 采用“酸解—聚合”二级反应模式

表 2 反应条件对铝溶出率的影响

参数	范围	最优值	铝溶出率
酸解温度 (°C)	85~100	90	92.5%
酸解时间 (h)	1~3	1.5	91.8%
渣酸比	0.8 : 1~1.1 : 1	1 : 1	93.1%
聚合温度 (°C)	95~110	102	B 值 ↑ 15%

## 4 生产设备选型与质量控制

### 4.1 设备选型与自动化控制

反应釜：玻璃钢内衬防腐砖材质，配备变频搅拌装置（0~100r/min）。

DCS 系统：实时监控温度（控制精度 ± 1℃）、pH（控制精度 ± 0.2）、压力（-0.02MPa）。

压滤机：景津自动压榨式板框压滤机（XMZ100/1200），滤液浊度 ≤ 15NTU。

## 4.2 产品质量控制

产品经 SGS 检测, 各项指标符合 GB/T 22627-2014 标准要求 (见表 3)。

表 3 PAC 产品质量指标

项目	标准要求	实测值
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量 (%)	≥ 10.0	10.5~11.0
盐基度 (%)	45~90	70~85
密度 (20℃, g/cm <sup>3</sup> )	≥ 1.19	1.22~1.25
不溶物 (%)	≤ 1.5	0.8~1.2

## 5 环保与经济效益分析

### 5.1 三废处理方案

废气处理: 采用“冷凝+两级吸收”工艺, 见图 3。

冷凝器回收 HCl ≥ 95%, 碱洗塔 (NaOH 10%) 净化效率 99.2%。

废水处理: 吸收塔废液全部回用于酸解工段, 实现废水零排放。

固废处理: 压滤滤渣 (主要成分为硫酸钙) 送水泥厂作钙质原料, 年利用量约 8000 吨。

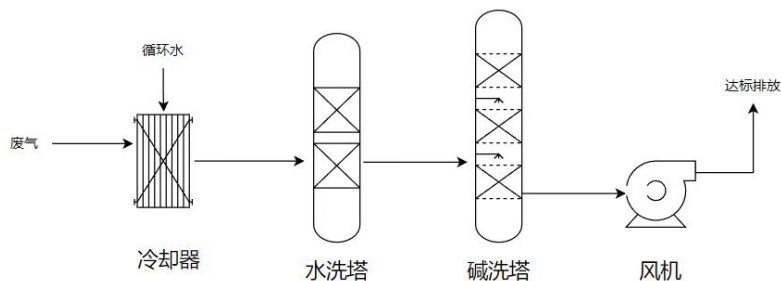


图 3 “冷凝+两级吸收”工艺

### 5.2 经济效益核算

10 万吨 / 年 PAC 项目经济效益分析见表 4。

表 4 项目经济性分析 (单位: 万元)

项目	废渣工艺	传统工艺	差值
原料成本	2800	4600	-1800
危废处置费	-720*	0	-720
能源消耗	900	1200	-300
总成本	3860	5800	-1940
年产值	4800	6000	-1200
净利润	960	200	760

注: 避免的处置成本按传统危废处置费用 100 元 / 吨计算。

## 6 结论

①技术可行性: 利用含铝废渣 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 65%) 与副产盐酸在常压条件下生产 PAC, 铝溶出率 > 92%, 产品盐基度稳定在 65%~85%, 各项指标符合国家标准要求。

②环保效益: 实现废渣、废酸、废水“三废”闭环处理, 年减排危废 7.2 万吨, 最终外排固废降至 8000 吨 / 年。

③经济价值: 吨 PAC 生产成本降低 33.4%, 年新增利润 760 万元, 投资回收期 < 4 年。

④推广意义: 为氯碱-铝加工产业集群提供“废渣→净水剂”的循环经济范式, 符合《“十四五”工业绿色发展规划》要求, 具有广泛的推广应用价值。

### 参考文献:

- [1] 李伟, 张明, 王强. 赤泥资源化利用技术进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1450-1460.
- [2] GB/T 22627—2014 水处理剂 聚合氯化铝[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] 王磊, 刘红, 陈刚. 工业废酸生产聚合氯化铝工艺优化[J]. 环境工程, 2020, 38(8): 112-116.
- [4] EPA. Aluminum Production Wastes Recycling Guidelines[R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2022.
- [5] 国家发展和改革委员会. “十四五”循环经济发展规划[Z]. 2021-07-01.

作者简介: 邓勇新 (1978-), 男, 中国湖南常德人, 本科, 中级工程师, 从事化工技术、节能环保技术研究。