

飞灰逆流循环梯度水洗系统的工程应用



夏天天*, 赵明宇, 胡晓伟, 郭利民, 李亮, 李胜

中洁蓝环保科技有限公司, 北京市 102218

摘要: 介绍了飞灰逆流循环梯度水洗脱氯的工艺技术, 并在工程项目实践出飞灰水洗技术的脱毒效果。本工艺技术包含飞灰储存系统、水洗系统、水质净化系统、蒸发分质结晶系统、烘干入窑系统以及尾气处理系统。脱毒后的飞灰氯含量 $\leq 1\%$, 产生的副产盐氯化钠、氯化钾符合中国国家标准, 满足“无害化、减量化、资源化”经济理念, 符合中国环保政策和可持续发展要求。系统设备的投资成本主要取决于主体设备的选择、工艺复杂度和自动化水平, 飞灰水洗单位处理成本约 400-800 元/吨灰。飞灰逆流循环梯度水洗系统的工程应用具有显著的长期价值以及经济效益和社会效益。

关键词: 飞灰; 逆流循环梯度水洗脱氯; 脱毒; 氯化钠; 氯化钾

DOI: [10.57237/j.wjese.2026.02.002](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2026.02.002)

Engineering Application of Counter-Current Circulating Gradient Water-Washing System for Fly Ash

Xia Tian-tian*, Zhao Ming-yu, Hu Xiao-wei, Guo Li-min, Li Liang, Li Sheng

Zhongjielan Environmental Technology Co. Ltd. Beijing 102218, China

Abstract: This paper introduces the counter-current circulating gradient water-washing dechlorination process for fly ash. The technology integrates fly ash storage, water washing, water purification, evaporative fractional crystallization, drying and kiln feeding, and tail gas treatment systems. Engineering practices prove the detoxification effect of fly ash water-washing technology: the chlorine content of detoxified fly ash is controlled within $\leq 1\%$, and the generated by-product sodium chloride and potassium chloride comply with national standards, satisfying the economic concept of “harmless treatment, volume reduction and resource utilization”. It complies with China’s environmental protection policies and requirements for sustainable development. The investment cost of the system and equipment mainly depends on the selection of main equipment, process complexity and automation level. The unit treatment cost of fly ash water washing is approximately 400-800 RMB per ton of ash. The engineering application of the countercurrent circulating gradient water washing system for fly ash demonstrates significant long-term value, economic benefits and social benefits.

Keywords: Fly Ash; Counter-current Circulating Gradient Water-washing Dechlorination; Detoxification; Sodium Chloride; Potassium Chloride

*通信作者: 夏天天, 1107992293@qq.com

1 引言

飞灰是生活垃圾焚烧设施的烟气净化系统捕集物和烟道及烟囱底部沉降的底灰，是垃圾焚烧的剩余物。生活垃圾焚烧飞灰是含水率极低的微细粉末状尘粒，呈浅灰或土黄色[1, 2]，一般含水率 $<5.0\%$ ，在潮湿气氛下由于吸水含水率会有所提高。焚烧飞灰的堆积密度一般在 $0.6\sim 0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 范围内[3]，特别易受含水率的影响。生活垃圾焚烧飞灰因其重金属浸出毒性较大而被归为危险废物[4]。焚烧过程中二噁英生成主要来源于尾部合成，合成的二噁英部分被飞灰所吸附，焚烧产生的致癌物“二噁英”90%都在飞灰中。

中国垃圾焚烧飞灰还含有极高的含氯率，可达到30%以上[5][6]，CaO和SiO₂的含量约占50%以上。垃圾焚烧飞灰中的氯可分为可溶氯与不可溶氯，垃圾焚烧飞灰中氯大部分以可溶性氯盐（无机氯）形式存在。可溶性氯通常占飞灰总氯的59%~93%[7]，主要以NaCl、KCl、CaCl₂等形式存在[6]；不可溶性氯通常占飞灰总氯的7%~41%[8]。直接填埋或直接资源化会腐蚀设备、污染环境、影响建材性能[9]。目前，去除飞灰中氯盐最广泛使用的方法是水洗脱氯[10]。

飞灰逆流循环梯度水洗脱氯，是生活垃圾焚烧飞灰无害化、资源化处理的核心工艺，指通过多级逆流、循环利用、浓度梯度递降的水洗方式，高效溶出并脱除飞灰中可溶性氯盐，实现节水、高效、深度脱氯。

水洗脱氯：水与飞灰混合→氯盐溶解→固液分离→滤液（高盐废水）、滤饼（低氯湿灰）。

循环梯度：逆流漂洗+滤液循环，形成从高浓到低浓的氯离子梯度，用最少水实现最高脱氯率。

2 实验材料与试剂

2.1 材料

试验材料取自北京琉水环保科技有限公司进行水泥窑协同处置的飞灰。试验所需样品采用系统采样法，自进场飞灰运输罐车排灰口取样。每批试验飞灰用量为100 kg，环境温度20~35℃。

2.2 仪器及试剂

采用APT-2S型氯离子自动电位滴定仪测定原灰

和水洗飞灰(干基)的氯含量，采用Bruker S8型X射线荧光光谱仪(XRF)确定原灰的化学组成。

2.3 实验方法

飞灰逆流循环梯度水洗脱氯工艺流程如图1所示。由图1可知，飞灰与二级滤液混合搅拌，灰浆进入真空抽滤装置进行抽滤，得到一级滤饼和一级滤液，一级滤液去下一单元水质净化后进入蒸发；一级滤饼在不进行卸料打散搅拌的前提下，用三级滤液进行淋洗，压滤后得到二级滤液和二级滤饼；二级滤饼在不进行卸料打散搅拌的前提下，用清水进行淋洗，压滤后得到三级滤液和低氯飞灰。通过实验来验证对飞灰循环梯度水洗脱氯工艺的脱氯效果。

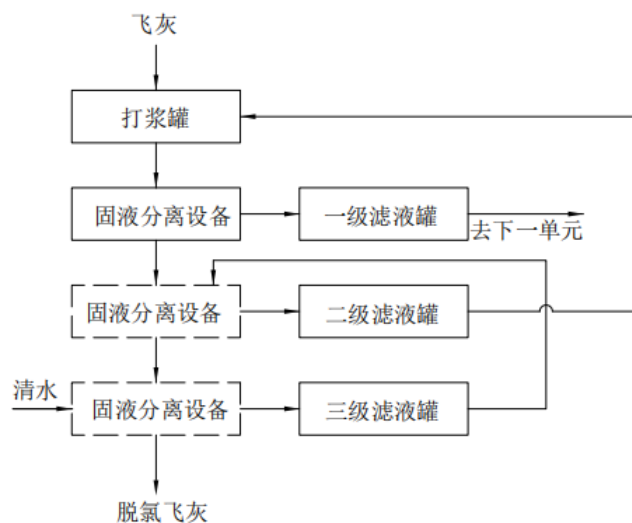


图1 流程图

1.一级（高氯）：飞灰 + 二级滤液→搅拌→压滤→一级滤饼（Cl⁻↓）、一级滤液（高浓，去后端水质净化）

2.二级（中氯）：一级滤饼 + 三级滤液→压滤→二级滤饼、二级滤液（去一级）

3.三级（低氯 / 深度）：二级滤饼 + 清水 / 冷凝水→压滤→成品低氯飞灰（Cl⁻≤0.5~1%）、三级滤液（去二级）



图 2 飞灰滤饼

2.4 原飞灰成分分析

表 1 原灰成分表

成分	数量	单位
Cl	11.79	%
Si	4.59	%

成分	数量	单位
Al	24.4	mg/kg
Fe	1.13	%
Ca	7.84	%
Mg	2.34	%
Na	0.88	%
K	1.36	%
S	1.30	%
F	43.6	mg/kg
Cu	10.8	mg/kg
Pb	53.6	mg/kg

2.5 实验数据与结果分析

表 2 实验数据

(25℃)原灰 1:3 打浆后测得一级滤液	
钙离子含量 g/L	15.33
氯离子含量 g/L	35.36
硫酸根含量 g/L	1.379

表 3 飞灰循环梯度水洗脱氯试验数据表

项目	氯含量 (固液比 1: 3、淋洗次数 2)	氯含量 (固液比 1: 2.5、淋洗次数 2)	氯含量 (固液比 1: 3、淋洗次数 3)	氯含量 (固液比 1: 2.5、淋洗次数 3)
一级滤饼	4.84q%	4.89%	4.97%	5.04%
二级滤饼	2.88%	3.03%	2.93%	2.89%
三级滤饼	0.46%	0.87%	0.55%	0.76%
四级滤饼	——	——	0.44%	0.62%

由表中数据可知，原飞灰中主要含有 Ca、Si、K、Na、Cl 等元素，一级水洗后的滤液中，Ca²⁺15.33g/L，Cl⁻35.36g/L，分析可知，可溶性钙离子占原灰中钙含量的 58.67%，可溶性氯占原灰氯含量的 90%。当飞灰和水的固液比分别为 1: 3 和 1: 2.5 时，三级滤饼的氯含量都<1%。在通过逆流循环梯度水洗飞灰满足氯含量的前提下，降低水洗固液比，可有效减少废水的蒸发量。图 2 为实验飞灰滤饼。

置飞灰规模为 5 万吨，图 3 为该项目立式压滤机设备工程应用现场。

3 工程应用案例

根据实验及中试情况申请的发明专利一种飞灰多级水洗集成系统与方法[11]和一种循环梯度飞回水系统和方案[12]，专利号分别为:ZL202210466775.2、ZL202010042428.8，授权公告号分别为:CN114716165 B、CN111111274 B。该项专利于 2024 年已经落地江西某水泥厂内，自调试运行以来，运行状况良好，已连续运行 2 年有余，性能指标稳定。该项目飞灰水洗线年处



图 3 立式压滤机设备工程应用现场

```

graph TD
    subgraph "飞灰储存系统"
        A[飞灰罐车] --> B[气力输送]
        B --> C[原灰仓]
    end

    subgraph "水洗系统"
        C --> D[预混罐]
        E[水洗系统] --> D
        D --> F[一级水洗罐]
        F --> G[卧螺离心机]
        G -- "一级滤液" --> H[反应罐A/B]
        H --- I[去水质净化系统]
        G --> J[二级水洗罐]
        J --> K[立式压滤机]
        L[各级水洗罐] --> K
        G -- "二级滤液" --> L
    end

    subgraph "烘干入窑系统"
        K --> M[输送机]
        M --> N[缓存仓]
        N --> O[混合机]
        O --> P[烘干机]
        P --> Q[除尘器]
        Q --> R[水洗飞灰仓]
        R --> S[成品灰料仓]
        S --> T[计量输送入窑]
    end

```

图 4 工艺流程方框图

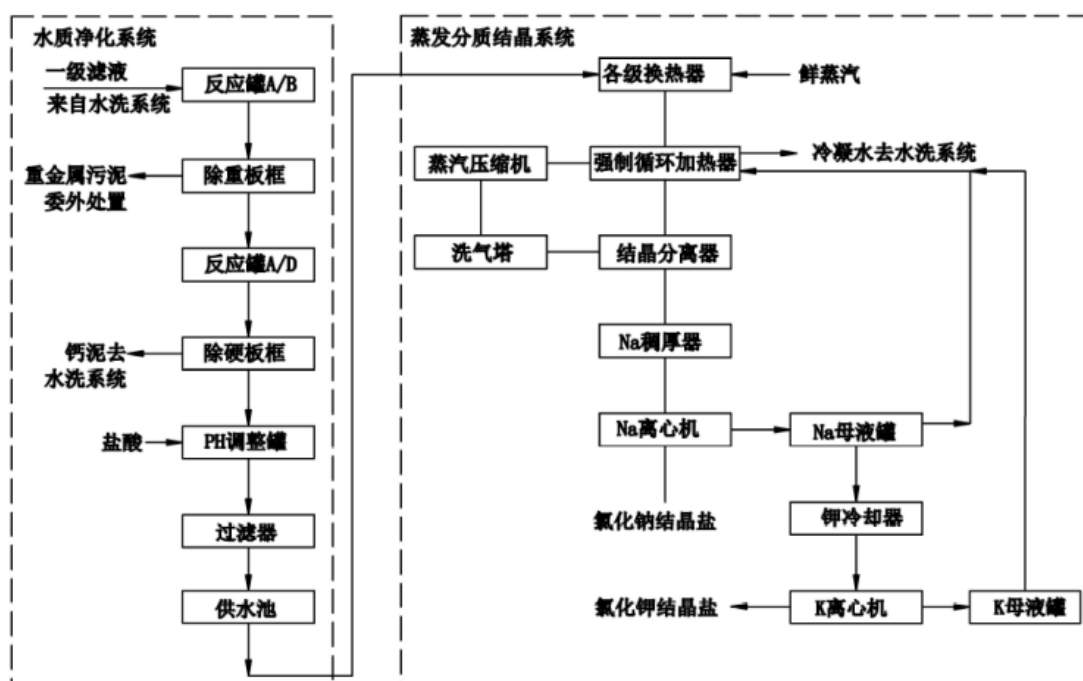


图 5 工艺流程方框图

3.2 工艺流程说明

此水泥窑协同处置飞灰项目包含飞灰储存系统、水洗系统、水质净化系统、蒸发分质结晶系统、烘干入窑系统以及尾气处理系统，工艺流程方框图如图 4 和图 5 所示。

3.2.1 储存系统

本项目设置了两个飞灰原灰贮存仓，罐车来灰经过气力输送装置输送进原灰仓内，原灰仓设置气吹和震打防止原灰粘壁和“架桥”，仓顶设置除尘器。

3.2.2 水洗系统

采用逆流循环梯度水洗工艺对飞灰进行水洗，飞灰与二级水洗液在预混罐内充分混合后，进入一级水洗罐，第一级水洗——飞灰制浆后进入卧螺离心机固液分离，洗脱灰进入下一级的二级打浆罐进行第二次洗涤，水洗液进入到水质净化处理系统；第二级水洗——来自二级打浆罐的灰浆进入立式压滤机固液分离，洗脱灰不卸料将在立式压滤机内进行第三次洗涤，水洗液逆流进入到预混罐制浆；第三次水洗——清水洗涤液泵入立式压滤机的滤腔后穿过滤饼经滤布后排出，滤液返回第二级水洗罐，之后每一级的水洗液都返回上一级。水洗后的飞灰含水率 $\leq 37\%$ ，氯含量 $\leq 1\%$ 。通过逆流循环梯度水洗，飞灰中氯离子的有效去除率在 95% 以上，飞灰水洗设计冗余水洗次数可多至 5 次。

3.2.3 水质净化系统

飞灰组分中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 在纯水中溶解度极低，氯化银、氯化亚汞几乎不溶于水； NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 ZnCl_2 、 CuCl_2 易溶于水， NaF 可溶于水但遇钙、镁离子易生成氟化物沉淀。飞灰水洗后浸出液含有目标钠盐、钾盐，同时共存 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 碱土金属离子、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等重金属离子及悬浮细微灰渣；若要分离提纯 NaCl 、 KCl 混合盐，需预先除去浸出液中的钙、镁离子、各类重金属离子与悬浮固体杂质[13]。

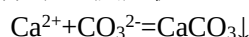
飞灰水洗产生的水洗液胶体含量高、自然沉降性能差、悬浮颗粒物浓度高，同时因体系可溶性盐含量高，水洗液电导率数值偏高；受飞灰来料、洗涤工况波动影响，水质稳定性较差。蒸发分盐装置对进水盐浓度、硬度、杂质及浊度均设有严格控制要求，为保障蒸发系统

长期连续稳定运行，水洗液需配套水质净化单元处理。

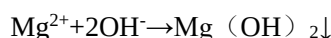
该净化系统集成重力沉降、絮凝强化沉淀、pH 调节、化学沉淀、多级精密过滤等组合工艺，可有效解决梯级循环洗涤水洗液处置难点。经净化处理后，水洗液硬度稳定控制在 50mg/L 以内、浊度 $\leq 5\text{NTU}$ ，满足蒸发分盐系统进水水质要求。

若水洗液预处理水质不达标，会直接导致蒸发装置实际出力不足、运行能耗上升，系统需频繁停机清洗除垢，严重干扰连续生产；长期超标进水还会加剧设备结垢、腐蚀，造成设备损毁，产生高额停产及维修损耗。

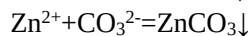
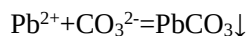
水洗液含有大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，系统投加碳酸钠沉淀药剂去除硬度： Ca^{2+} 与碳酸根结合生成难溶于水的碳酸钙沉淀，反应机理：



Mg^{2+} 难以单独通过碳酸钠完全去除，工艺配套投加氢氧化钠，依靠氢氧根生成氢氧化镁沉淀：



碳酸钠同时可与水洗液中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等重金属离子反应，生成重金属碳酸盐沉淀：



体系中大量生成的絮体在沉淀过程中会产生共沉淀效应，通过吸附、包裹捕获微量、及其碳酸盐沉淀物，进一步提升重金属离子整体去除效率。

水洗液：来自飞灰水洗单元的水洗液送入投加药剂的两级反应罐充分搅拌反应，反应完成后由提升泵输送至除重板框压滤机固液分离，压滤产生含重金属污泥；分离滤液依次进入 A~D 四座除硬反应罐进行深度化学沉淀反应，反应出水经泵送入除硬板框压滤机再次过滤，压滤产生脱钙污泥。压滤达标滤液输送至 pH 调节罐，与酸罐投加的酸性药剂中和调 pH，控制体系 pH 值稳定在 6~9 区间；调 pH 后废水经精密过滤器截留微量悬浮物，最终自流进入产水供水池，供给后端蒸发分盐工序。

重金属污泥：板框压滤机固液分离处理后产生重金属污泥，通过吨袋接收后委外处置。

脱钙污泥：板框压滤机固液分离处理后产生脱钙污泥，经过板框压滤返回水洗单元与湿灰一起进入烘干系统。

药剂：纯碱经纯碱仓计量螺旋输送进入化碱罐，经化碱泵泵入反应罐进行反应，重金属捕捉剂、氢氧化钠、絮凝剂等药剂通过药剂泵投入反应罐中，酸经过酸泵

进入 pH 调整罐。

3.2.4 蒸发分质结晶系统

钾钠盐分质回收系统是保证废水零排放，资源回收利用的重要部分，是企业实现减量化、回收再利用的关键环节。

前端水质净化送过来的溶液，经过与冷凝水、不凝气、鲜蒸汽的三级换热，达到温度要求后，输送至 MVR 蒸发器中，进行蒸发、浓缩、结晶，溶液中氯盐达到浓度要求后，经离心机分离出固体物，离心母液返回蒸发系统。整个蒸发过程中产生的冷凝水送至飞灰水洗系统再用[14]。

水洗液：从供水罐来的原料液由进料泵打入冷凝水预热器、不凝气预热器和生蒸汽预热器，与系统冷凝水、不凝气以及生蒸汽进行换热，温度升至蒸发温度，进入蒸发器，进行蒸发浓缩。

浓缩+钠盐：原料液先在降膜蒸发器内换热，在气液分离器中蒸发浓缩；浓缩液通过出料泵进入强制循环换热器内进行加热浓缩并结晶，最后进入结晶分离器进行闪蒸分离。设计的蒸发温度为 90℃。加热物料的过程中，这部分蒸汽冷凝成水流至冷凝水罐并由冷凝水泵打至前端与原料液进行换热。浓缩液达到所要求的浓缩比后开始出料，含结晶的浓缩液经钠出料泵送至稠厚器后经离心机分离出氯化钠晶体，钠母液返回系统。

蒸汽：从气液分离器和结晶分离器出来的二次蒸汽经过洗汽塔洗涤，洁净的二次蒸汽进入压缩机压缩，升温加压后的蒸汽一部分进入降膜蒸发器加热物料，另一部分进入三级进口压缩机继续压缩升温，三级压缩机出来的蒸汽回到强制循环换热器中继续加热物料；加热物料的过程中这部分蒸汽冷凝成水，通过冷凝水泵打入冷凝水预热器与原料液换热后排除系统。

钾盐：钠稠厚器溢流至钠母液罐的浓缩液泵入冷却器中，配入一定量母液后，经真空闪蒸和冷却水降温至 35-40℃，停留一定时间后，泵入离心机脱水分离，此时结晶主要为氯化钾，离心后的母液返回强制循环蒸发器。

不凝气：蒸发过程中产生的不凝气经过不凝气换热器换热后，经真空泵组排出系统。

3.2.5 烘干入窑系统

飞灰经洗脱系统处置后，洗脱灰的含水率 35%左右。为了降低洗脱灰入窑前的含水率，同时降低能源消耗，考虑运行的稳定性，采用对洗脱灰进行混合烘干的处理方式，即混合后的洗脱灰经配有打散装置的烘干机进行烘干处理。

飞灰经洗涤、烘干，有效去除了大量的氯离子、钾钠离子，降低了水分，然后送入暂存仓，利用气力输送设备通过密封管道直接输送到窑尾，进入水泥窑煅烧。在水泥窑高温煅烧过程中二噁英完全分解，重金属被有效固化在水泥熟料晶格中[15]，实现了飞灰的无害化处置。经过水洗后的飞灰，在新型干法水泥窑的掺加量可达到水泥窑熟料生产能力的 5%左右。在水泥窑协同处置飞灰的过程中，控制入窑飞灰与入窑常规原料、燃料的投加量匹配，使入窑物料中重金属及氯元素的最大允许投加量不大于 HJ662—2013 中 6.67 条表 1 的限值的要求[16]，保持水泥窑工况稳定，有效的解决了入窑物料含氯高而窑尾易结皮堵塞的问题[14]，且对水泥熟料质量无不良影响。

3.2.6 尾气处理系统

飞灰水洗搅拌、调 pH、蒸发结晶会释放废气，分为水洗主工段废气、配套药剂储罐废气、蒸发废气、有组织粉尘四类，主要成分有氨气、酸性废气 HCl、水雾夹带细盐雾、微量恶臭、少量 VOCs、水蒸汽及飞灰细粉等。本项目所有水洗反应设备加盖密封，负压抽风，车间微负压防止废气外溢，通过全流程采用负压收集引风至废气处理装置经“酸洗+碱洗+活性炭吸附”处理后经烟囱外排，外排废气污染物 VOCs 执行《工业企业挥发性有机物排放控制标准》(DB12/254-2020)表 1 中其它行业标准限值；NH₃ 执行《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)中 15m 高烟囱排放速率限值；HCl、H₂SO₄、NO_x 执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)表 2 中标准限值要求。

3.3 主要设备

水洗单元主要设备：卧螺离心机和立式压滤机，水质净化单元主要设备为板框压滤机，蒸发单元主要设备为进口离心压缩机和蒸发器。

表 4 水洗单元主要设备对比

对比项目	卧螺	立压
装机功率	120kW	53kW
运行功率	32kW	14.22kW
能耗水平	高速旋转，单机单位灰处理电耗稍高	进料 + 高压压榨综合能耗略低；带滤饼水洗工况下综合能耗优于离心机
运行模式	连续自动化进料、排渣，24h 不间断运行	间歇批次运行，进料 - 压榨 - 洗涤 - 吹气 - 卸料循环，单周期 15~40min，程序间断，设备连续运行，需与配套罐体容积前后衔接
固液分离效果	分离效率中等，滤液悬浮物 100~300mg/L，胶体、细灰截留差	分离效果优异，高压压榨可大幅脱除附着盐溶液；滤液浊度低，悬浮物≤10mg/L
占地与布置	卧式长条设备，配套输送、加药系统长；可多层串联布置	立式紧凑结构，单位处理量占地更小，模块化布置，需要要求厂房层高
耗材维护	易磨损件：螺旋叶片、耐磨衬板；飞灰硬度高，磨损快，半年~1 年需检修补焊	核心耗材为滤布，高氯腐蚀性水洗液易腐蚀滤布，6~12 个月更换；油缸、密封件定期维护
自动化程度	全连续无人值守，进料、排渣自动连续	全自动程控，但存在卸料间歇，需配套缓存罐缓冲流量波动

3.4 运行能耗分析

表 5 项目运行能耗分析

成本分析					
序号	项目	消耗量	价格（参考）		
	年处置量	吨	50000		
	化工材料	单位	吨耗	单价/元	吨运行费/元
一	1 盐酸	吨	0.021	200	4.20
	2 碳酸钠	吨	0.126	1300	163.80
	3 重捕剂	吨	0.0032	3900	12.29
	4 PAC/PAM	吨	0.0011	3000	3.25
二	耗电	kwh	295	0.75	221.25
三	蒸汽	吨	0.18	200	36.00
四	耗水	吨	1	3	3.00
五	人员费用	人	20	100000 元/年/人	66.67
六	维保费			40	40.00
七	检测费用				2.40
八	合计	生产运行成本（吨飞灰）			552.75

注：表格中单价属于常规价格，可根据当地实际价格调整。由于飞灰波动性较大的特性，设计参数在可控范围内浮动±10%。

1.设备投资成本：规模化处理线（日处理 150 吨飞灰）设备初期投资约 4000-6000 万元，具体取决于工艺复杂度和自动化水平。

2.运营成本：

运行能耗：水洗搅拌、固液分离及废水蒸发需消耗大量电力，约占运营成本的 30%-45%；

人工与维护：规模化运营需专业技术人员，年维护费用约为设备投资的 5%-15%；

总成本：常规工况下，飞灰水洗单位处理成本约 400-800 元/吨（含废水处理）。

3.5 创新点

采用卧螺离心机和立式压滤机相结合的技术形式，利用卧螺离心机的连续性、立式压滤机的节能性，取其各自的优势，保证原灰水洗脱氯满足 HJ/T 2822-2024 水泥替代原料 处理后的生活垃圾焚烧飞灰[17]标准中氯离子含量不大于 1%的要求。

药剂使用量减小，该逆流循环梯度水洗系统相比三级卧螺水洗+卧螺除钙工艺，絮凝剂用量降至 25%。1B 卧螺离心机、2B 卧螺离心机、3B 卧螺离心机、脱钙卧螺共四级絮凝剂加药点，本工程项目只有脱钙一级加药点。

序批式除钙彻底，水处理系统采用多个反应罐序

批式反应除钙，根据对缓存水池水质的在线检测，可以肯定序批式反应能稳定除钙，保证钙离子不超标，多级反应罐除钙调节可控。

4 经济和社会效益分析

4.1 经济性分析

1) 资源回收价值

水洗可回收飞灰中的可溶性盐氯化钠、氯化钾，经提纯后可作为工业原料，达到副产品标准，每吨盐可收益 600-1800 元（视纯度和市场行情），部分抵消处理成本。

水洗后的飞灰满足建材资源化标准水泥熟料添加（如制砖、路基材料），资源化利用可进一步降低处置成本，甚至产生收益。

2) 避免罚款与合规成本

若飞灰未经合规处理导致环境污染，企业将面临高额罚款（最高可达数百万元），水洗工艺可帮助企业满足环保标准，规避法律风险。

4.2 社会效益分析

飞灰水洗的社会效益主要体现在环保、资源利用及公共健康等方面，具有显著的长期价值。

1) 环境保护与风险防控

飞灰中含有高浓度可溶性氯化物、重金属（如铅、镉）及二噁英等污染物，若直接填埋或利用，可能通过雨水淋溶污染土壤和地下水。水洗可去除的可溶性盐和部分重金属，大幅降低后续处置的环境风险。

减少“二次污染”，水洗后的飞灰更易通过稳定化（如螯合）或高温处理（如熔融）实现无害化，避免盐分对固化体稳定性的破坏，降低污染物泄漏概率。

2) 资源循环利用

飞灰中含有大量无机成分（如硅、铝、钙等），水洗除盐后可作为再生建材原料（如制备混凝土、免烧砖、路基填料等），替代天然砂石，减少矿产资源开采，符合“循环经济”理念。

回收的可溶性盐可用于工业生产（如融雪剂、化工原料），实现“废物资源化”，降低对原生资源的依赖。

3) 公共健康保障

飞灰中的重金属和二噁英具有强毒性和生物累积性，若处置不当，可能通过空气、水或食物链进入人体，引发癌症、神经系统疾病等健康问题。水洗工艺通过降

低污染物释放风险，保护周边居民（尤其是垃圾焚烧厂附近人群）的健康。

提升公众对垃圾焚烧行业的接受度：飞灰无害化处理技术的完善可减少“邻避效应”，推动垃圾焚烧项目的顺利实施，缓解城市垃圾处理压力。

4) 推动行业技术升级

飞灰水洗技术的应用和优化可带动环保装备制造业（如高效分离设备、废水处理系统）的发展，促进相关技术的研发与创新（如低能耗除盐、重金属协同去除工艺）。

助力“双碳”目标，通过资源回收减少原生材料消耗和填埋场占地，降低垃圾处理全生命周期的碳排放，符合国家绿色发展战略。

5 前景与展望

通过多级逆流循环梯度水洗技术脱除飞灰中的氯盐，处理工艺在去除飞灰中氯盐的工业应用中已取得显著效果。系统具有不用加絮凝剂，塔式保护，容错功能，药剂用量少，自动化程度高用水量少，能耗低，占地少等特点，可以安全有效处理、处置垃圾焚烧飞灰造成的环境及社会问题，同时系统循环水洗均能够实现系统闭环，保障水的利用率，提高水洗效率，降低废水产生。

短期需承担设备和运营成本，但结合资源回收和后续处置成本节约，长期可实现盈利，尤其适合规模化、配套资源化利用的项目。多级逆流循环梯度水洗技术可以显著降低环境风险、保障公众健康、推动资源循环，是实现垃圾焚烧飞灰“减量化、无害化、资源化”的关键技术，符合国家环保政策和可持续发展要求。

参考文献

[1] 孔祥蕊. 生活垃圾焚烧飞灰处理技术研究进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(7): 4102-4117.

[2] 刘项. 垃圾焚烧飞灰处理技术研究进展 [J]. 应用化工, 2021, 50(9): 2501-2508.

[3] 倪海凤. 国内城市生活垃圾焚烧飞灰研究现状与进展 [J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(3): 24-30.

[4] 胡玉龙. 垃圾焚烧飞灰的资源化利用进展 [J]. 2023, 37(4): 41-46.

[5] 熊金磊. 我国城市生活垃圾焚烧飞灰中高氯含量特性及其影响 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 117-119.

- [6] 吕烨佳. 焚烧飞灰深度资源化技术进展及展望 [J]. 环境卫生工程, 2024, 32(4): 1-7.
- [7] WU B R, WANG D Y, CHAIX, et al. Characterization of chlorine and heavy metals for the potential recycling of bottom ash from municipal solid waste incinerators as cement additives [J]. *Frontiers of environmental science*, 2016, 10(4): 8.
- [8] 江思敏. 生活垃圾焚烧飞灰脱氯资源化新思路 [J]. 再生利用, 2024, 17(8): 32-35.
- [9] 李佳瑶. 生活垃圾焚烧飞灰处置方法与综合利用探讨 [J]. 资源节约与环保, 2024, 3: 29-45.
- [10] 王伟杰. 城市垃圾焚烧飞灰利用处置技术研究 [J]. 广州化工, 2023, 51(21): 98-100.
- [11] 夏天天. 一种飞灰多级水洗集成系统和方法: ZL202210466775. 2 [P]. 2024-07-05.
- [12] 李亮亮. 一种循环梯度飞灰水洗系统和方法: ZL202010042428. 8 [P]. 2025-06-17.
- [13] 马斌斌. 城市生活垃圾焚烧飞灰资源化处置技术及产品概述 [J]. 环境化学, 2023, 42(8): 2669-2687.
- [14] 黄庆. 浅谈水泥窑协同处置生活垃圾焚烧飞灰技术 [J]. 科技与创新, 2023, 6: 140-142.
- [15] 周海. 垃圾焚烧飞灰特性及其重金属固化/稳定化研究发展 [J]. 应用化工, 2024, 53(6): 1398-1405.
- [16] 环境保护部. HJ 662-2013 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 13-14.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. HJ/T 2822-2024 水泥替代原料 处理后的生活垃圾焚烧飞灰 [S]. 北京: 中国建设科技出版社, 2015: 2.