

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.027

生活垃圾焚烧飞灰水洗脱氯工程化研究与应用

吴成强¹, 蔡沈燕¹, 邵倩¹, 吕徐律², 许李²

(1. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310006; 2. 杭州富阳富隆环保科技有限公司, 浙江 杭州 311400)

摘要: 生活垃圾焚烧飞灰水泥窑协同处置已成为当下飞灰资源化处置的安全出路,水洗脱氯为其工程应用的关键环节。杭州市某垃圾焚烧飞灰水洗脱氯处置工程设计规模为 5×10^4 t/a,采用飞灰制浆+水洗+废水物化预处理+机械压缩蒸发(MVR)工艺,水洗后飞灰氯含量 $<0.9\%$ 、含水率 $<34\%$,水洗产生的废水经过处理后循环利用,并得到副产品氯化钠和氯化钾。工程运行结果表明,飞灰中氯含量和水灰比是决定工程处理成本的关键因素。

关键词: 垃圾焚烧飞灰; 水洗; 脱氯; 水灰比

中图分类号: TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0152-04

Research and Application of Incineration Fly Ash Dechlorination Project by Washing

WU Cheng-qiang¹, CAI Shen-yan¹, SHAO Qian¹, LÜ Xu-lü², XU Li²

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310006, China; 2. Hangzhou Fuyang Fulong Environmental Protection Technology Co. Ltd., Hangzhou 311400, China)

Abstract: The co-processing of domestic waste incineration fly ash in cement kiln has become the safe way for fly ash disposal, and the dechlorination by washing is the key process. The incineration fly ash dechlorination project by washing was designed with the capacity of 5×10^4 t/a. The combined process of slurring, washing, physiochemical pretreatment, and mechanical compression evaporation (MVR) was applied and the chlorine content and water content were below 0.9% and 34%, respectively. The wastewater from washing was treated and recycled, and the by-products of sodium chloride and potassium chloride were produced. The operation results show that chloride content and the ratio of water and fly ash are the key factors of operation costs.

Key words: incineration fly ash; washing; dechlorination; ratio of water and fly ash

随着城市化进程加快和人民生活水平的快速提高,城市生活垃圾产量迅猛增加,垃圾焚烧成为城市生活垃圾处置行之有效的方法,而垃圾焚烧过程中产生的飞灰属于危险废物,危害极大,亟需安全处置^[1]。近年来,垃圾焚烧飞灰的安全合理处置越来越受到关注,也成为中央环保督察组监管的重要对象。垃圾焚烧飞灰中富含铝、钙、硅,其中钙含量丰富,最高可达到40%以上,一般为20%~40%,硅含量基本达到2%以上,铝含量在1%左右^[2]。国家已

经多次出台规范性文件鼓励推动垃圾焚烧飞灰水泥窑协同处置。

垃圾焚烧飞灰中氯含量最高达20%以上,远高于《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)标准(原料氯离子含量 $\leq 0.06\%$),限制了其直接进入水泥窑协同处置^[3];《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》(HJ 662—2013)要求入窑物料中氯离子含量 $\leq 0.04\%$,因此,飞灰难以直接添加到水泥原料中,必须先经过脱氯处理,使氯含量降至 $<1\%$,才能

大幅提高水泥原料中飞灰添加量。水洗脱氯是关键,根据《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)中氯化物限值要求,水洗脱氯废水须循环利用,避免盐分和重金属对水体环境造成污染。

1 工程背景

2016 年前,浙江省垃圾焚烧飞灰均采用螯合填埋处理,甚至存在不规范填埋处置。随着城市发展和人口增加,杭州市垃圾填埋场和危废填埋场基本处于饱和状态,垃圾焚烧飞灰出路受到了严重制约。为了规范垃圾焚烧飞灰安全处置并实现飞灰资源化利用,2016 年杭州市在富阳区建成了国内第二个生活垃圾焚烧飞灰水洗脱氯水泥窑协同处置工程项目,并于 2018 年陆续在建德县、桐庐县和临安区建成了 3 家 5×10^4 t/a 规模的垃圾焚烧飞灰水洗脱氯水泥窑协同处置项目,处理后的飞灰进入水泥窑资

源化处理,水洗废水经过处理后循环利用。

2 设计要求及工艺流程

2.1 设计要求

本项目处置对象为杭州市生活垃圾焚烧飞灰,包括炉排炉和流化床锅炉焚烧飞灰。主要设计指标如表 1 所示。

表 1 飞灰水洗工程设计指标

Tab. 1 Design index for fly ash by washing

项 目	原灰	水洗后飞灰
氯含量	20.0	1.0
含水率	0.2	35
注: 水灰比为(2~3):1。		

设计飞灰水洗产生的废水水质和经过预处理进蒸发结晶前的水质指标见表 2。

表 2 飞灰水洗废水处理工程设计指标

Tab. 2 Design index for wastewater from fly ash by washing

项 目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Pb/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值
水洗废水	120	100	12 000	10	10	50	12
进蒸发设备水	50	1.0	20	0.1	0.1	0.1	6~7

水洗废水经预处理后再通过蒸发结晶,冷凝水循环利用,而蒸发结晶产生回收的氯化钠和氯化钾分别满足《工业盐》(GB/T 5462—2015)标准和《氯化钾》(GB 6549—2011)标准,见表 3。

表 3 氯化钠和氯化钾标准

Tab. 3 Sodium chloride standard and potassium chloride standard $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$

项 目	GB/T 5462—2015 (工业湿盐)			GB 6549—2011 (I 类工业用)		
	优级	一级	二级	优等品	一等品	合格品
氯化钠	≥ 96	≥ 95	≥ 93.3	≤ 1.2	≤ 2.0	≤ 4.0
氯化钾	—	—	—	≥ 62	≥ 60	≥ 58
水分	≤ 3	≤ 3.5	≤ 4	≤ 2	≤ 2	≤ 2
水不溶物	≤ 0.05	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 0.5
钙镁离子总量	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 0.7	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.2

2.2 工艺流程

生活垃圾焚烧飞灰水洗脱氯的工艺流程见图 1。飞灰由垃圾焚烧厂输送到处置现场灰仓中储存,然后按照一定水灰比在飞灰制浆单元内制备成均匀浆料。该浆料在飞灰水洗单元经过多级搅拌反应和脱水后,飞灰中的盐分充分洗涤溶解到水里,洗涤合格的飞灰由罐车输送到水泥窑,洗涤产生的废水进

入水洗水处理单元。水洗单元首先采用混凝沉淀及吸附等预处理技术去除重金属、钙离子、SS 和有机物,然后通过机械压缩蒸发(MVR)分离出氯化钠和氯化钾。氯化钠和氯化钾可分别作为氯碱行业原料和农肥。

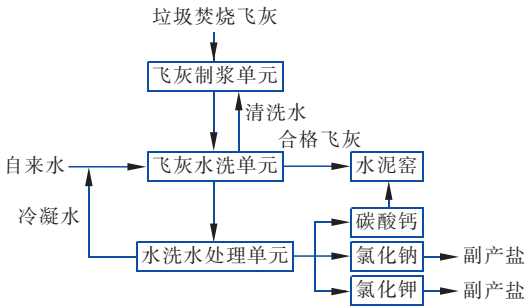


图 1 垃圾焚烧飞灰水洗脱氯工艺流程

Fig. 1 Flow chart of dechlorination by washing from incineration fly ash

3 主要处理单元与设计参数

① 飞灰制浆单元

飞灰制浆单元由灰仓、下料器、制浆罐、制浆贮池构成。 300 m^3 灰仓 6 个,每个灰仓配备布袋除尘器回收物料;下料器下料速率为 $1 \sim 8 \text{ t/h}$,功率为

5.5 kW;60 m³ 制浆罐 3 个,搅拌器功率 30 kW;300 m³ 制浆贮池 1 个,搅拌器功率 15 kW。

② 飞灰水洗单元

飞灰水洗单元由水洗反应池、水洗中转池、脱水机和皮带输送机构成。

a. 水洗反应池。4 座,池容 20 m³,配备 4 套搅拌器,15 kW,配套脱水机进料渣浆泵 4 台,单台流量 90 m³/h、扬程 800 kPa、功率 75 kW。

b. 水洗中转池。4 座,池容 100 m³,配备 4 套搅拌器,22 kW,配套离心泵 4 台。

c. 脱水机。采用 6 台隔膜板框压滤机,过滤面积 550 m²,配套压榨泵 6 台,单台流量 30 m³/h、扬程 1.5 MPa、功率 30 kW。

d. 皮带输送机。3 台,带宽 1.2 m,功率 5.5 kW。

③ 水洗水处理单元

水洗水处理单元由调节池、混凝沉淀池、吸附池、砂滤罐、待蒸发水池和 MVR 构成。

a. 调节池。主要功能是贮存飞灰水洗水,尺寸为 10 m×4 m×5.5 m,停留时间为 10.6 h。配套提升泵 2 台,单台流量 25 m³/h、扬程 120 kPa、功率 4.0 kW。

b. 混凝沉淀池。主要功能是去除部分有机物、钙离子、重金属并调节 pH 值,混凝反应时间 1 h。采用竖流式沉淀池,表面负荷为 0.87 m³/(m²·h)。

混凝药剂主要为聚合氯化铝、聚丙烯酰胺、碳酸钠、盐酸。配套污泥泵 1 台,单台流量 15 m³/h、扬程 250 kPa、功率 4.0 kW。

c. 吸附池。采用固定吸附床,尺寸 4 m×2 m×5.5 m,吸附剂为蜂窝活性炭,装填量为 16 m³,可吊装拆换。

d. 砂滤罐。主要功能是过滤水中 SS。规格为 Ø2 m×3 m,滤速为 5.7 m/s,过滤介质为 1~2 mm 石英砂。配套反冲洗泵 1 台,单台流量 200 m³/h、扬程 100 kPa、功率 15 kW。

e. 待蒸发水池。主要功能是贮存飞灰水洗水预处理合格后的清水,尺寸为 5 m×4 m×5.5 m。配套提升泵 2 台,单台流量 25 m³/h、扬程 250 kPa、功率 7.5 kW。

f. MVR。主要功能是利用高效蒸汽压缩机压缩蒸发产生的二次蒸汽蒸发水分,结晶分离出氯化钠和氯化钾。设计蒸发量 15 t/h,出盐量 2 t/h,整套装机功率 1 300 kW,蒸汽消耗 0.8 t/h。配套设备有预热器、降膜蒸发器、强制循环蒸发器、结晶分离器、增稠器、离心机和空气压缩机等。

4 调试与运行

该系统自 2019 年 2 月开始单机调试,3 月进飞灰调试直降系统,4 月调试水处理预处理系统,5 月调试 MVR 蒸发系统。调试运行主要指标如表 4 所示。

表 4 飞灰水洗运行数据

Tab. 4 Operation data with water washing for fly ash

项 目	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	Ca/ (mg·L ⁻¹)	Pb/ (mg·L ⁻¹)	Zn/ (mg·L ⁻¹)	Cu/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	pH 值
水洗废水	10~120	10~80	10 200~12 000	2~6	1~9	35~50	30~100	11.6~12.2
进蒸发设备水	10~30	0.2~1.0	5~20	<0.08	<0.1	<0.1	3~6	6.6~6.9

注: 原飞灰氯含量为 8.2%~20.0%,水洗后飞灰氯含量为 0.4%~0.9%、含水率为 32%~34%。

调试运行发现,不同垃圾焚烧厂的氯含量差异较大,而钠、钾的相对比例比较稳定。飞灰中钙含量很高,在水中溶解度基本饱和。随着水灰比提高,钙溶出总量显著增加,水洗废水处理碳酸钠用量大幅上升,从而导致处理成本显著升高。水洗废水中有有机物的含量变化不大,同一垃圾焚烧厂的飞灰含量相对稳定。由于垃圾焚烧飞灰的黏性大,浆料流动性很差,极易导致飞灰水洗单元管道、泵体及其他设备的堵塞,造成运行的不稳定。

MVR 是水洗水处理单元的关键设备。为了确

保 MVR 的正常运行和氯化钠、氯化钾的品质,必须尽量去除水中的 SS、重金属、钙离子和有机物。在运行过程中发现,通过合理控制药剂组分和工艺参数,可以保证 MVR 长期稳定运行。蒸发结晶可以回收氯化钠和氯化钾副产品。副产氯化钠可以满足《工业盐》(GB/T 5462—2015)工业湿盐二级品要求,副产氯化钾经过干燥后满足《氯化钾》(GB 6549—2011)国家标准优等品要求。由于飞灰中氯化钠和氯化钾含量的波动,根据半年运行统计结果,其年产生量分别约为 8 200、4 355 t/a。

由于飞灰中盐分高,高氯水的腐蚀性很强,设备及管道极易腐蚀。设计所采用的设备及管材为不锈钢 316 L 和钛钢。

5 投资与运行成本

该工程总投资约 8 200 万元,不包括土地费用。装机功率为 3 200 kW,直接运行成本(电费+药剂)约为 800 元/t,飞灰中氯、钙及重金属含量会极大地影响处理成本。氯含量越高时,则飞灰水洗用水量越多,从而导致蒸发成本升高,同时因水量增加从而导致钙离子和其他重金属离子总量会升高,进一步增加了脱钙和去除其他重金属离子所投加的纯碱等药剂成本;其他间接费用包括 MVR 损耗及管道设备腐蚀维护、水泥窑接纳费用以及其他费用,会进一步增加处理成本。另外,副产品氯化钠和氯化钾销售后可以适当增加部分收益,按照氯化钠和氯化钾市场价分别为 150 元/t 和 1 800 元/t 计,则副产品销售收益为 907 万元/a。

6 结论

① 5×10^4 t/a 垃圾焚烧飞灰处理工程经调试运行,水洗后飞灰中氯 $\leq 0.9\%$ 、含水率 $\leq 34\%$,水洗废水循环利用,生产的氯化钠和氯化钾分别满足《工业盐》(GB/T 5462—2015)标准和《氯化钾》(GB 6549—2011)标准。

② 本工程项目水灰比控制在 2~3,为了确保水洗后飞灰中氯 $< 1\%$,当飞灰中氯含量高时,水灰比需要适当提高。

③ 水洗水处理单元通过 MVR 蒸发水洗废水实现了水的循环利用,其中钙离子及其他重金属离子的有效去除是影响氯化钠和氯化钾副产品的重要因素。

④ 飞灰水洗制成的浆料黏稠易结垢并堵塞管

道阀门,需要及时维护管理。

参考文献:

- [1] Tian H Z, Gao J J, Lu L. Temporal trends and spatial variation characteristics of hazardous air pollutant emission inventory from municipal solid waste incineration in China [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46 (18): 10364 - 10371.
- [2] Phua Z, Giannis A, Dong Z L, et al. Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization [J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26 (17). DOI: org/10.1007/s11356-019-05217-8.
- [3] 程琳. 浅谈国内生活垃圾焚烧飞灰的处置技术[J]. 资源节约与环保, 2019(3): 55.
Cheng Lin. Discussion on disposal technology of domestic waste incineration fly ash [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2019(3): 55 (in Chinese).



作者简介:吴成强(1972—),男,湖南岳阳人,博士,副教授,主要从事水污染控制技术研究及应用工作。

E-mail: wucq@zjut.edu.cn

收稿日期:2019-11-11

实施国家节水行动,建设节水型社会