



移动扫码阅读

曹熠, 乔海飞, 裴友峰, 等. 电弧炉高温熔融处理焚烧飞灰技术应用研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(2): 8-14.
CAO Yi, QIAO Haifei, PEI Youfeng, et al. Application research on high temperature melting treatment of incineration fly ash by electric arc furnace[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 8-14.

电弧炉高温熔融处理焚烧飞灰技术应用研究

曹熠¹, 乔海飞², 裴友峰², 沈毅¹, 胡波¹, 靳晓鹏¹,

随志明³, 杨亚萍³, 刘雪松^{3,*}

(1. 杭州玺富环保科技有限公司, 浙江 杭州 310018; 2. 光大环保能源(衢州)有限公司, 浙江 衢州 324000; 3. 绍兴文理学院 化学化工学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 基于焚化厂飞灰电弧炉高温熔融处理设备应用案例, 从飞灰预处理、进料、高温电弧炉、排渣系统、烟气处理等方面进行系统研究。结果表明: 飞灰预处理将二次飞灰产率由7.5%降低到6.1%, 并降低了二次飞灰中的Cl、S、Na、K、Zn、Pb含量; 高温熔渣直接水淬提升了熔体结构密度和能源利用效率; 复合陶瓷纤维滤筒可以实现烟气多种污染物的一体化脱除。

关键词: 焚烧飞灰; 电弧炉; 飞灰熔融技术; 水淬; 烟气净化

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)02-0008-07

Application research on high temperature melting treatment of incineration fly ash by electric arc furnace

CAO Yi¹, QIAO Haifei², PEI Youfeng², SHEN Yi¹, HU Bo¹, JIN Xiaopeng¹,
SUI Zhiming³, YANG Yaping³, LIU Xuesong^{3,*}

(1. Hangzhou Yifu Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China; 2. Everbright Environmental Protection Energy (Quzhou) Co., Ltd., Quzhou 324000, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The application of electric arc furnace for high temperature melting treatment of fly ash was systematically studied from fly ash pretreatment, feeding, high temperature electric arc furnace, slag discharge system, flue gas treatment and so on. The results showed that the pretreatment of fly ash reduced the generation rate of secondary fly ash from 7.5% to 6.1%, and also reduced the content of Cl, S, Na, K, Zn, Pb in the secondary fly ash. Direct water quenching of high temperature slag improved the structure density of melt and energy utilization efficiency. The composite ceramic fiber filter could remove various pollutants in flue gas simultaneously.

Key Words: Incineration fly ash; Electric arc furnace; Fly ash melting technology; Water quenching; Flue gas purification

0 引言

随着我国城镇化率的不断提高和人民生活水平的日益提升, 生活垃圾产生量也随之快速增加。据《中国统计年鉴 2020》, 2019 年全国生活垃圾清运量达到了 24 206.2 万吨。因此, 如何实现生活

垃圾“减量化、资源化、无害化”的问题越来越受到关注。其中, 生活垃圾的焚烧发电技术因减量化明显、占地少及可实现资源化、无害化等优势, 已逐渐成为我国生活垃圾主要处置方式。国家发改委和住建部联合发布的《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》中提出, 到 2025 年, 全

收稿日期: 2021-12-10; 责任编辑: 蒋雯婷

基金项目: 浙江省重点研发科技项目(2020C01134); 浙江省公益科技项目(LGG19B070002)

第一作者简介: 曹熠(1989-), 男, 福建龙岩人, 主要从事大气污染控制材料研发及工程应用。E-mail: 18850856158@139.com

通讯作者简介: 刘雪松(1983-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 副教授, 主要从事大气污染控制研究。E-mail: xuesongliu@usx.edu.cn

国城镇生活垃圾焚烧处理能力达到 80 万 t/d 左右,全国城镇生活垃圾焚烧处理能力占比为 65% 左右。然而,随着生活垃圾焚烧处理能力的不断扩大,焚烧后产生的飞灰量也在不断增多。

生活垃圾焚烧产生的飞灰(以下简称“飞灰”)中含有大量的剧毒有机污染物(如苯并芘、苯并蒽、二噁英等)和可溶性重金属(Hg、Cr、Cd、Pb、Cu、Ni 等),属于高度危险的固体废弃物(编码为 HW18)。其中,飞灰中的二噁英具有不可逆的致畸、致癌、致突变性,Hg 及其化合物具有极强的神经毒性,对人体的多个器官会产生严重的损害,若处置不当,会导致严重的二次环境污染。传统的飞灰处理技术为通过一定规范的预处理后进行填埋,虽然成本较低,但占用土地资源极大,且飞灰中的二噁英及重金属污染物并未消除,仍然存在浸出后污染水源等较大的环境安全隐患,也没有对飞灰进行有效的资源化利用。因此,探索一种能有效地促使飞灰“减量化、资源化、无害化”的具有实际应用价值的技术方案,已逐渐成为环保工作者关注的焦点之一。

目前,作为新兴的飞灰资源化技术之一,飞灰熔融固化技术被认为是最有效且最具市场前景的方案。该技术利用燃料或电力作为能源,在高温条件下将飞灰熔融为玻璃质熔渣,经无害处理后,熔渣可作为各种建筑材料的原料,满足垃圾循环再生和废弃物零排放的绿色生活理念。飞灰经高温熔融固化成玻璃质熔渣过程中,二噁英等有机污染物在高温条件下彻底分解或转变为气体物质,而放射性元素和重金属元素将被牢固地束缚于具有高致密结构的硅氧四面体中,不易浸出而污染环境,真正实现飞灰的减量化、资源化、无害化处理^[1]。

飞灰熔融固化技术一般可以分为低温烧结技术、直流热等离子体技术和高温熔融技术三种。低温烧结技术是将飞灰、燃料、助燃剂进行预混合后造粒,然后从上至下通过给料机匀速连续地进入烧结炉,与由下而上供入烧结机的预热空气发生层燃燃烧反应,燃烧释放的热量被飞灰与助燃剂吸收后发生固化反应,经一定条件保温后形成致密玻璃固化体,最终通过速冷后得到目标产物^[2]。但是,该技术相对研究较少,技术成熟度不高,二噁英的低温分解及易挥发重金属的污染控制问题仍有待解决。直流热等离子体技术是将飞灰与二氧化硅添加剂在飞灰预处理系统中进行造

粒,然后通过等离子体喷枪将飞灰颗粒熔融,二噁英等有机污染物在高温下分解,熔融液通过水冷却槽后快速降温玻璃化得到玻璃熔渣,重金属则被固化在玻璃熔渣中^[3]。该技术可实现飞灰的无害化、减量化和资源化处理,在发达国家已有一定规模的工业化应用,但由于处置成本高、技术难度大、二次飞灰等问题,在我国尚处于中试阶段,应用推广的过程还有待观察。高温熔融技术是目前使用最广泛、研究最多且经济效益较好的方案,其加热温度一般为 1 400 ℃,飞灰中的低沸点有机物在高温熔炉中与重金属形成烟气后通过空气预热器和冷却塔过滤收集排出,高沸点无机物重金属在炉底形成炉渣并通过传送装置收集,炉渣可以作为高质量的建筑材料,真正实现飞灰的无害化、减量化和资源化处理^[4]。

本文将国内外垃圾焚烧高温熔融技术的研究和应用进行了总结和梳理,并且详细介绍了台湾某焚化厂高温电弧炉熔融处理系统和辅助系统。同时,对各个系统中相应飞灰处理的具体工艺也进行了总结,提供了工程应用结果和经验,为研制高效、实用的飞灰技术提供新思路和实践依据。

1 国内外飞灰熔融技术应用研究进展

飞灰熔融固化技术的核心是熔融炉,根据热源的不同可分为燃烧式熔融炉和电力式熔融炉。日本在该技术上的研究开展得最早,在工业化领域的应用非常成熟^[5-10]。根据飞灰的特征,日本将垃圾焚烧发电产生的飞灰用电热式熔融炉进行处理,不用于发电的垃圾焚烧产生的飞灰会用燃烧式熔融炉进行处理。近十年来,焚烧发电逐渐成为我国生活垃圾处置的主流方式,但是焚烧所产生的飞灰除了用传统的填埋方式外,最主要的是通过固化稳定法进行处理。然而,通过固化稳定法处理后依然存在部分重金属超标且二次污染风险等缺陷。因此,开发具有高效、环保的新技术迫在眉睫。目前,高温飞灰熔融技术被认为是处置飞灰问题的最有效的方法之一,虽然我国相关技术的研究和应用都晚于欧美及日本等发达国家,但高等院所及相关企业在吸收国外先进经验及自我创新的基础上,很多中试级别的研究已取得了一定的成果。别如山^[11]等人在 2006 年提出了一种垃圾焚烧飞灰旋风高温熔融处理及再生利用新技术,对二噁英的处理效率可达到 99.9%,此项技术已申请国家发明专利。2007 年别如山等

人^[12]在鞍山锅炉厂生产的 75 t/h 旋风熔融炉上进行为期 10 h 的飞灰熔融试验,处理后灰尘中的重金属浸出量远远低于危险废物重金属标准浸出值。2010 年王学涛^[13]等人自行设计的 500 kg/d 的旋风熔融炉处理后的飞灰可达到减容化、玻璃化、无害化的效果。2008 年潘新潮等人^[14]通过自主研发的双阳及直流等离子体发生器对飞灰进行熔融化处理,处理后飞灰中的二噁英物质大大减少且熔渣具有无害化、资源化减容化的特点。胡明^[15]等人采用 50 kW 直流等离子体熔融炉进行玻璃化研究,发现添加石英砂可以显著降低熔融温度,而且冷却速率的增加有利于熔融后玻璃体的形成。2017 年卢欢亮等人^[16]在 2~3 t/d 的等离子体熔融高温处理设备进行中试试验,结果表明尾气污染物满足 GB 18484—2001《危险废物焚烧污染控制标准》排放要求。

在飞灰熔融固化技术的应用中,国外发达国家一般采用大量的重油、焦炭及电力作为能源。而我国由于受到核心设备依靠进口、运行成本及经济效益等因素的制约,使熔融固化技术的推广应用存在较大难度,大规模的工业化应用还较少。我国为了进一步降低飞灰熔融固化处理技术的运行成本,提高经济效益,一般会根据熔融炉的特性将飞灰进行预处理后再进行熔融固化处置。从该角度出发,我们目前使用的飞灰熔融炉主要有表面熔融炉、旋风熔融炉和等离子体熔融炉,前两者为燃烧式熔融炉,也是目前我国研究较多且使用

周期较长的设备;后者为电力式熔融炉,由于受国内经济制约及相关技术还不够成熟,在工业应用上还不多^[17-19]。鉴于此,本文以台湾某焚化厂的电弧熔融炉为研究对象,为我国探索一条“减量化、资源化、无害化、经济性”的垃圾焚烧飞灰熔融固化技术,提供理论基础和实践经验。

2 台湾某焚化厂飞灰高温电弧炉熔融技术简介

目前,台湾针对飞灰的处置方式有单一填埋与固化处理后独立分区掩埋两种。但飞灰中含有铜、锌、铅、镉、镍、铬、汞等重金属物质及极微量的有机污染物,采用上述两种方式依然存在重金属和有机物溶出并产生二次环境污染的风险。该焚化厂采用 1 200~1 600 ℃ 的电弧炉高温熔融技术对飞灰进行熔融固化处理,使飞灰受热处于熔融状态,飞灰中的有机废弃物经热解后被摧毁,低沸点重金属及盐类受热分解后随尾气挥发,其他重金属则与 CaO 和 SiO₂ 等无机物形成熔渣。该焚化厂的飞灰高温熔融固化设计处理量为 20 t/d,处理后的飞灰毒性特性需满足 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP 美国环保局推荐的标准毒性浸出方法) 的溶出标准,所形成熔渣需符合台湾资源化产品利用标准中的“人工矿物粒料”准入标准,焚烧后排放的烟气应满足台湾的法规要求。飞灰主要成分及重金属含量如表 1 和表 2 所示。

表 1 灰样的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of the ash sample

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	C	H ₂ O	其他
质量分数/%	41.50	8.47	2.10	1.05	4.50	2.79	1.52	8.50	18.50	4.10	4.26	2.71

表 2 灰样的主要重金属含量

Table 2 Content of main heavy metals in the ash sample

重金属成分	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr
质量分数/(mg·m ⁻³)	5.5×10 ⁶	6.23×10 ⁵	1.6×10 ⁶	8.00×10 ⁶	7.52×10 ⁵

焚化飞灰粒径的粒径分布利用镭射粒径测定仪进行测量,分析结果如图 1 所示。根据图 1 可知,焚化飞灰的粒径范围在 2.5~48.2 μm 之间,中位径(d_{50})约为 7.8 μm。

2.1 电弧炉高温处理系统及附属系统

2.1.1 工艺概述

该焚烧厂的工艺流程如图 2 所示。垃圾焚烧后产生的飞灰经设备收集后通过加料装置加入到核心设备电弧炉中,同时添加含铁物质进行配伍,

通过调节导电石墨电极的升降使炉料受电弧直接加热,当炉内温度达到 1 200~1 600 ℃ 后,炉内物料发生熔融熔化。熔融后的熔渣经水淬池降温后沉于池底,再通过池底斜管进入渣池,定期在板链式出渣机中进行分离,分离出的水回流至渣池,炉渣收集后回收利用。电弧炉飞灰高温熔融固化技术产生的废气依次经气体缓冲室、重力沉降室、干法除酸系统、活性炭吸附后,最终烟气中粉尘、脱酸副产物以及吸附了二噁英的活性炭通过复合陶

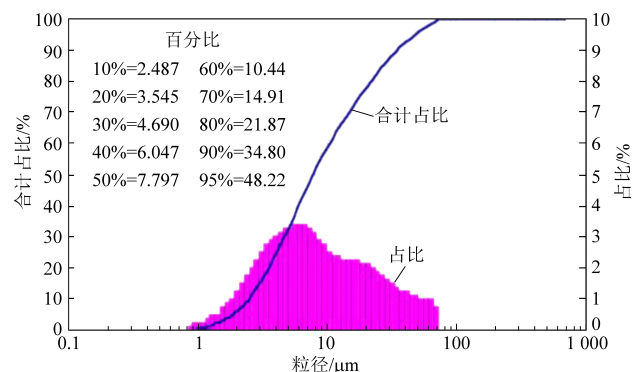


图1 焚烧飞灰的粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution map of incineration fly ash

瓷纤维滤筒被捕集,干净的烟气经引风机排入烟囱。为了节约资源,电弧熔融炉及烟气处理系统共用一套冷却水循环系统对水淬池、重力沉降室等组件进行热量交换。

2.1.2 飞灰预处理系统

该焚烧厂的飞灰预处理系统首先将生产各环节的飞灰以吨袋包装后运输至熔融炉上料系统附近,随后通过飞灰真空上料系统输送至储槽,再用螺旋输送机输送至计量罐,定量地将飞灰输送至混料系统的加料口。为了防止熔融过程中大量轻质较细飞灰被烟气除尘系统抽走,降低出渣成品

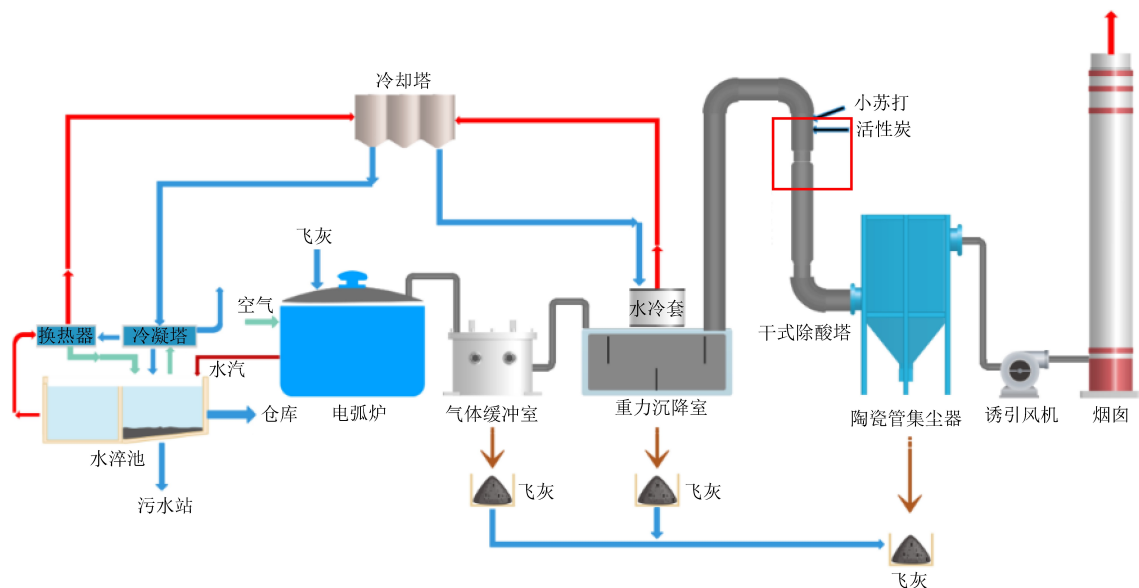


图2 飞灰处理的工艺流程图

Fig.2 Process flow chart of fly ash treatment

量,增加烟气中粉尘浓度,该处理设施采用对辊式压球设备对飞灰进行预处理,飞灰在双轴混料机中与水进行混合增加粘度,随后通过对辊式压球设备制成尺寸为 $37\text{ mm}\times 27\text{ mm}\times (12\sim 14)\text{ mm}$ 的

椭圆形饼状体后送入电弧炉。通过飞灰预处理系统把飞灰制成规则椭圆形饼状颗粒,可以将二次飞灰产率由7.5%降低到6.1%,进而可降低二次飞灰中的Cl、S、Na、K、Zn和Pb含量。

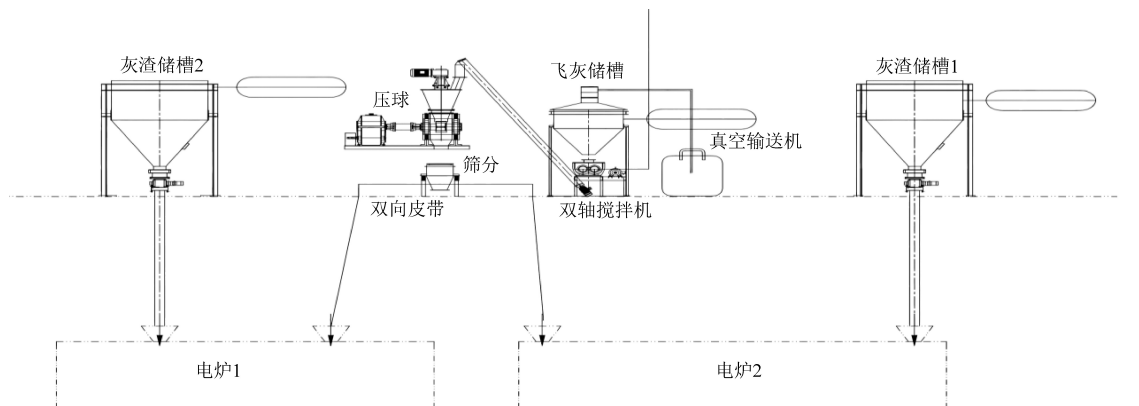


图3 飞灰预处理(进料)系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of fly ash pretreatment (feed) system

2.1.3 高温熔融处理系统

(1) 电弧炉本体

该焚烧厂采用 2 台 800 kVA 三相电弧炉作为高温熔融处理设备,系统由电炉主体、电极升

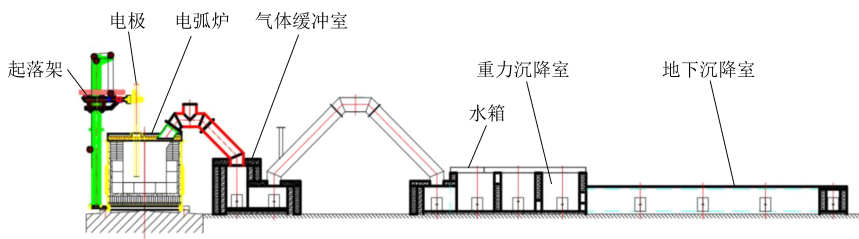


图 4 高温熔融系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of high temperature melting system

表 3 电弧炉主要参数

Table 3 Main parameters of electric arc furnace

项目	参数
电弧炉内容积/ m^3	12.7
平均冶炼周期/h	24
出渣方式	正面溢流方式
电极心圆直径/mm	260
熔融温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 200~1 600
相电抗绝对值/ Ω	10
额定容量/kVA	800
一次电压/kV	10
二次电压/V	85~120
二次额定电流/A	8 000
电极材质	石墨

(2) 排渣方式

由于电弧炉排出的熔渣为液态高温渣,直接冷却容易凝固形成体积较大固体颗粒,不易于后续运输及处理利用,因此,该焚烧厂设置了水淬装置,将高温炉渣急冷降温并崩裂为小颗粒固体渣。根据熔渣的比重在高低位设置了两个排渣口,对于浮于上层的比重较轻的玻璃态物质(Ca、 SiO_2 等),通过高位排渣口排出,对于重金属富集的沉降于炉膛底部的熔渣,待富集至一定量后用低位排渣口排出,这部分熔渣含有较多的贵金属,具有较大再利用价值。

2.1.4 烟气处理系统

该焚烧厂烟气处理系统由气体缓冲室、重力沉降室、干法脱酸系统、陶瓷纤维滤筒集尘系统组成。

高温飞灰熔融处理后的烟气先进入气体缓冲室,通过配制的泄爆阀等装置将高温状态下的可燃成分的爆炸风险消除,并在发生气爆时即时泄压保护生产设备的安全。

随后烟气进入重力沉降室,含尘气流进入重力沉降室后因截面积增大,大颗粒粉尘动能降低

降系统、电极、给料装置、前床、冷却系统、变压器、高压控制系统、低压控制系统、烟气冷却系统构成,如图 4 所示。电弧炉的主要参数如表 3 所示。

并在惯性作用下与迷宫式挡板碰撞后被收集至灰门。在重力沉降室布置水冷换热系统,通过与重力沉降室壳体上的水冷壁换热带走烟气热量,确保烟气温度满足后续工艺要求。

干法脱酸系统是以小苏打为脱酸剂的 DSI 干法脱硫工艺,小苏打初始粒径 180~200 μm ,经分级研磨设备后粒径控制在 25 μm 以下,最大使用量 100 kg/h。小苏打经气力研磨后喷入干法脱酸塔,脱酸塔下部设有文丘里装置进行烟气加速。

末端采用“活性炭+复合陶瓷纤维滤筒”工艺对二噁英和粉尘进行脱除,其中活性炭(活性炭采用美国卡尔冈碳素公司产品,200 目颗粒活性炭,比表面积 1 000 m^2/g ,最大使用量 2.5 kg/h)用于吸附低温析出的重金属,复合了高效催化剂的陶瓷纤维滤筒(材质为硅酸铝纤维)能够有效地去除高温粉尘及固体中的二噁英等有机物,处理后的烟气通过烟囱进行排放。复合陶瓷纤维滤筒收集的飞灰因富集了大量 Zn、Pb 等重金属,收集后的飞灰重新进入电弧炉进行熔炼。

表 4 为该焚烧厂各工艺段的烟气量及温度。

2.1.5 水淬排渣系统

有研究指出,冷却速率越大,熔体从溶化性温度降温到玻璃转变温度以下所需时间越短,同时熔渣粘度快速提高,导致结晶速率下降,增加熔体结构中聚集体的形成几率,这样就容易形成短程有序而长程无序的玻璃体^[6]。

为使冷却后熔渣满足 TCLP 标准,该焚烧厂采用直接水淬方式对高温熔渣进行急冷处理,具体工艺参数为:每台电弧炉以 2 h/次的频率进行排渣,排渣量为 3 000 kg/次,每次排渣持续 10 min,两台炉交替排渣;水淬池处理时间为 2 h/次,其中冷却时间为 1 h,物料取出时间为 1 h。

表 4 各工艺段烟气量及温度

Table 4 Flue gas volume and temperature of each process section

项目	单位	烟气	进料	灰渣	电弧炉 出口	重力沉降 室进口	重力沉降 室出口	干式除 酸入口	陶纤管 入口	陶纤管 出口	烟囱 出口
进料	kg/h	/	3 000	3 000	/	/	/	/	/	/	/
烟气量	kg/h	2 300	/	/	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300
烟气量(标准状态)	Nm ³ /h	1 782	/	/	1 782	1 782	1 782	1 782	1 782	1 782	1 782
烟气量(工况条件)	Am ³ /h	1 945	/	/	5 035	5 035	3 217	3 087	3 087	3 087	2 956
温度	℃	25	25	1 200	499	499	220	200	200	200	180

水淬池及蒸汽收集装置如图 5 所示。水淬池进料后,物料带来的热量迅速加热水淬池中的水,并产生大量水蒸气,含有热量的水蒸气被风机抽入冷凝塔,通过喷淋水进行冷凝降温换热后返回水淬池。水淬池的水与熔融物料接触后,溢出的高温水通过溢流堰溢出至外围,再通过溢流管进入溢流池。冷凝水泵将溢流池的水抽出后通过板式换热器与冷却水进行稳定的控温换热,将热量从水淬池移除至冷塔冷却。通过板式换热器降温后的水淬池水通过雾化喷嘴雾化后与水淬池上方溢出的水蒸气接触直接换热,将水蒸气冷凝,冷凝水自回流水淬池。由于水淬操作作为间歇式,板式换热器是一个动态换热过程,设计板式换热器按约 10℃ 端差考虑(实际运行在初期高于该数值,换热效率更高)。

水淬熔渣的外观如图 6 所示。冷却、干燥后熔渣的主要用于预拌混凝土。



图 6 水淬熔渣外观照片

Fig.6 The picture of the appearance of water quenching slag

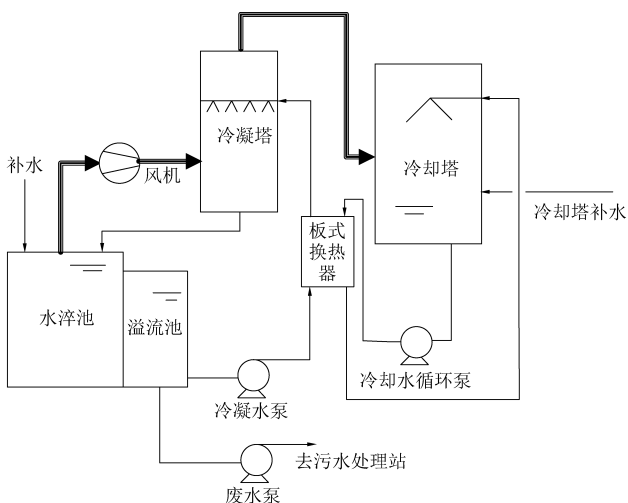


图 5 水淬池蒸汽回收流程示意图

Fig.5 Schematic diagram of steam recovery process of water quenching tank

2.1.6 冷却水循环系统

该焚烧厂配置循环水量为 200 t/h 的冷却水循环系统,两台电弧炉系统共享一套水冷循环系

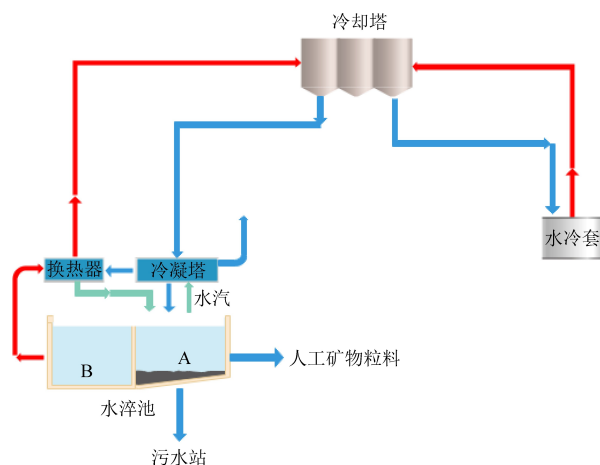


图 7 冷却水循环系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of cooling water circulation system

统,冷却水循环有两个回路,如图 7 所示。

(1) 水淬冷却水循环(冷却塔→冷凝塔→板式换热器→冷却塔)

该处理设施采用直接水淬冷却熔渣,电弧炉排出的高温炉渣经水淬池换热冷却后沉于池底。水淬池接收炉渣高温热量后部分蒸发形成水蒸气,水蒸气经冷凝塔后形成冷凝水回落至水淬池,冷凝塔有专门空气排放口排空空气,冷凝塔用水由经过换热器降温后的水淬池水供给。

水淬池由中间隔断分隔成两个独立水池 A 和 B, 炉渣只通过 A 侧排出。当炉渣排入 A 池后该侧水温上升且水位上升并溢流至 B 池, B 池中热水通过板式换热器降温后雾化喷入冷凝塔并流回 A 池, 板式换热器冷端水补充至 A 池。水淬部分冷却水循环水量为 86.12 t/h, 冷却水热端水温 47 °C、冷端水温 32 °C, 温差 15 °C。

(2) 重力沉降室水冷壁冷却水循环

该部分冷却水循环水量为 10.25 t/h, 冷却水热端水温 47 °C、冷端水温 32 °C, 温差 15 °C。考虑到水冷壁换热面可能造成结渣、挂渣的现象。在设计的时候沉降室的水冷壁换热组件采用模块化设计, 每个模块都可以在检修期间快速替换, 替换下来的部件可以清理后继续使用。

2.2 运行情况

该处理设施于 2021 年年初完成建设并投入使用, 熔渣冷却后形成玻璃体的重金属浸出浓度远低于 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP 美国环保局推荐的标准毒性浸出方法) 标准要求, 目前正在申请相关资质。

表 5 与美国 EPA-TCLP 法检测的熔渣重金属浸出浓度结果对比

Table 5 Comparison of heavy metal leaching concentration of slag detected by EPA-TCLP method in the USA

重金属成分/(mg·L ⁻¹)	Pb	Cd	Cu	Cr
美国 EPA-TCLP 标准	5.0	1.0	15.0	5.0
该焚烧厂	0.23	ND	2.03	1.85

3 结 论

本文对国内外垃圾焚烧飞灰高温熔融处理技术发展情况进行了介绍, 同时详细介绍了台湾某焚化厂飞灰高温电弧炉熔融处理系统及其辅助系统。该项目以电弧炉为核心处理设备, 辅以飞灰预处理设备、烟气处理系统、排渣水淬系统、冷却水循环系统, 在确保熔渣符合 TCLP 溶出标准的同时, 提升了系统运行稳定性和可靠性。该项目在设计、运行方面的创新和经验可归纳为以下几点:

(1) 通过飞灰预处理系统, 将飞灰制成规则椭圆形饼状颗粒, 将二次飞灰产率由 7.5% 降低到 6.1%, 进而可降低二次飞灰中的 Cl、S、Na、K、Zn 和 Pb 含量。

(2) 对高温熔渣直接进行水淬处理, 在确保玻璃体稳定形成的同时, 提升熔体结构密度和能源利用效率。

(3) 烟气处理系统中采用复合陶瓷纤维滤筒, 实现了二噁英、粉尘、氮氧化物、硫和其他酸性气体的多污染物一体化脱除。

参考文献

- [1] 杨凤玲, 李鹏飞, 叶泽甫, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰组成特性及重金属熔融固化处理技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (1): 169-180.
- [2] 赵俊东, 王恒, 杨永昌, 等. 垃圾焚烧飞灰烧结处理新工艺及炉内气流特性研究 [J]. 工业炉, 2010, 32 (6): 22-26.
- [3] 汪嘉涛, 吴则江, 黄成贤, 等. 等离子体熔融固化垃圾焚烧飞灰技术的分析 [J]. 节能与环保, 2021 (6): 36-37.
- [4] 方正, 王俊杰, 赵震乾, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰熔融制备微晶玻璃技术现状分析及其研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43 (4): 506-509.
- [5] 多田光宏, 岩崎克博, 平岡英伸, 等. NKK 電気抵抗式灰熔融炉の炉内解析 [J]. NKK 技報, 2002 (176): 21-25.
- [6] 水野昌幸, 田中貴博, 大塚裕之, 等. 焼却炉の熱性能解析 [J]. 石川島播磨技報, 2004 (6): 361-367.
- [7] 黒田幸生, 大塚裕之, 水野昌幸, 等. 焼却炉・溶融炉の熱解析技術 [J]. 石川島播磨技報, 2002 (4): 208-211.
- [8] 吉成直人, 梅田十次郎, 西野順也, 等. 直流電気抵抗式灰熔融技術の商品化 [J]. 石川島播磨技報, 1998 (2): 83-88.
- [9] 黒田幸生, 成澤道則, 水野昌幸, 等. 為焼却灰高性能溶融炉技術の研究開発 [J]. 石川島播磨技報, 2000 (3): 110-113.
- [10] 井上里志, 水野昌幸, 成澤道則, 等. パーナ式溶融炉の開発 [J]. 石川島播磨技報, 2003 (2): 58-67.
- [11] 别如山, 刘欢鹏. 垃圾焚烧飞灰旋风炉高温熔融处理及再生利用新技术 [C] // 中国环境科学学会固体废物专业委员会年会暨固体废物资源化与循环经济学术会议. 中国环境科学学会, 2006.
- [12] 别如山, 张庆红, 惠阳. 垃圾焚烧飞灰旋风炉高温熔融试验研究 [J]. 工业锅炉, 2009 (4): 1-4.
- [13] 王学涛, 焦有宙, 金保升, 等. 焚烧飞灰旋风熔融炉的设计与运行 [J]. 锅炉技术, 2010, 41 (5): 68-71.
- [14] 潘新潮, 马增益, 王勤, 等. 等离子体技术在处理垃圾焚烧飞灰中的应用研究 [J]. 环境科学, 2008 (4): 1114-1118.
- [15] 胡明, 杨仕桥, 邵哲如, 等. 生活垃圾焚烧飞灰等离子体熔融玻璃化技术研究 [A]. 中国环境科学学会. 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第二卷) [C]. 中国环境科学学会: 中国环境科学学会, 2019: 10.
- [16] 卢欢亮, 王中慧, 汪永红, 等. 等离子体熔融技术处理垃圾焚烧飞灰的中试研究 [J]. 环境卫生工程, 2017, 25 (4): 51-53+57.
- [17] 孙进, 谭欣, 纪涛, 等. 生活垃圾焚烧飞灰典型组分对其熔融特性的影响 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29 (4): 59-63+72.
- [18] 陈秀彬, 李震, 高胜斌, 等. 垃圾焚烧飞灰高温旋流熔融固化试验 [J]. 发电设备, 2007 (6): 491-494.
- [19] 陈怀俊, 牛芳, 王乃继, 等. 垃圾焚烧飞灰高温热处理技术研究进展 [J]. 煤质技术, 2021, 36 (5): 1-14.