

# 等离子飞灰熔融装置的研究和设计

王 华 张林进 黄新景 江苏中圣园科技股份有限公司

**【摘要】**随着等离子熔融技术在垃圾焚烧飞灰处理领域的推广，等离子飞灰熔融装置的工业化应用越来越受到业界的关注。通过构建试验平台，采用处理量150kg/h的等离子飞灰熔融设备，在满负荷连续运行的工况下，验证装置性能，飞灰熔融效果，分析运行过程中出现的问题，并提出解决方案，为飞灰熔融装置的设计和开发提供参考，加快等离子飞灰熔融装置的工业化应用进程。

**【关键词】**等离子飞灰熔融装置；焚烧飞灰；熔融；设计优化

**【DOI】**10.12316/j.issn.1674-0831.2024.04.080

## 引言

根据《国家危险废物名录》，生活垃圾焚烧飞灰被定性为危险废弃物，对其进行稳定化、无害化、资源化处理，对于保护生态环境、资源的再利用具有重要的意义。等离子体技术作为一种近年来在工业中得到广泛应用的新技术，在焚烧飞灰熔融处理领域的应用也越来越受到关注，与传统燃料的熔融热处理技术相比，热等离子体技术具有更高的温度和能量密度，可以实现飞灰的玻璃化，抑制重金属迁移，彻底分解二噁英等，国内学者前期开展了众多关于等离子技术应用于飞灰熔融处理方面可行性的研究，研究均表明：采用等离子技术对飞灰减容、重金属固化及二噁英的破坏效果显著，技术上可行，可实现对焚烧飞灰的无害化、稳定化处理，但对等离子飞灰熔融装置的开发研究还处于起步阶段，鲜有报道。

通过与某生活垃圾焚烧发电厂合作，在厂内搭建了一条处理量150kg/h的等离子焚烧飞灰熔融处理线，通过连续运行，验证飞灰熔融装置的熔融效果、设备性能，分析运行过程中设备出现的问题，并提出解决方案。

## 一、系统组成及主要装置

### 1.系统装置及流程

等离子焚烧飞灰熔融处理线主要由以下几部分组成（如图1所示）。

（1）熔融系统：由等离子熔融炉、1套150kW和1套100kW的等离子发生装置、电源装置组成。

（2）水冷系统：由循环水箱、板式换热器、水泵等组成，内循环的冷却水使用的是软化水，并配备有10m<sup>3</sup>的循环水箱，水箱内的水依次经过水泵、各个需要冷却的设备后，水温上升，再经过换热器换热降温，回到水箱。

（3）烟气处理系统：由烟气冷却器、引风机组成，流程为等离子熔融炉出来的烟气经过烟气冷却器急冷降温，再通过引风机送至垃圾焚烧厂的焚烧炉尾部烟气处

理系统中，经处理后达标排放，烟气接入口在布袋除尘器入口烟道。

（4）给料系统：由搅拌机、斗提机、炉前料斗、给料机组成。

（5）出渣系统：高温液态熔渣经过冷却水槽冷却后进行装袋，再运至专门的熔渣暂存区储存。

（6）辅助系统：制氮系统、压缩空气系统。

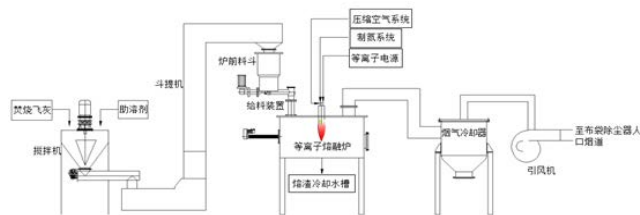


图1 系统主流程图

## 2.等离子熔融炉

熔融炉采用直流非转移弧等离子火炬，工作气体为压缩空气，氮气作为保护气保护阴极，添加了助溶剂的焚烧飞灰通过炉前给料装置送入炉内，再由推杆装置推入火炬高温区，高温烟气从尾部排出，液态熔渣从底部出渣口排出，落入水淬冷却水槽中。

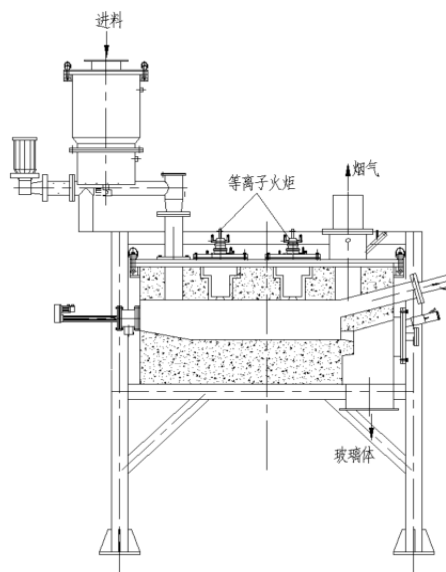


图2 等离子熔融炉结构示意图

## 二、试验运行情况

### 1. 飞灰特性

飞灰采用该电厂循环流化床焚烧飞灰，外观为黄褐色，飞灰的成分组成如下：

表1 生活垃圾焚烧飞灰组分

元素	Ca	O	Fe	Si	Al	Cl	S	K
Wt/%	40.6051%	20.7843%	9.5337%	6.8444%	5.5023%	5.4969%	2.1058%	1.7844%
元素	Mg	Na	Zn	Ti	P	Cu	Ba	Sr
Wt/%	1.4074%	1.3100%	1.0555%	1.0511%	0.8178%	0.4379%	0.4176%	0.2801%
元素	Mn	Pb	Cr	Br	Ni	Rb		
Wt/%	0.1800%	0.1756%	0.0841%	0.0651%	0.0405%	0.0203%		

可以看出，飞灰中有40%左右的元素成分为Ca，是高含Ca飞灰，参与熔融玻璃体渣形成的Si和Al元素仅占到了6.8%和5.5%左右。飞灰中还含有9.5%左右的Fe，Fe含量也较高。此外，飞灰中的S和Cl含量分别为2.1%与5.5%，它们将会转化为尾部烟气中的污染物SO<sub>2</sub>和HCl。同时，飞灰中还可直接检测到重金属成分由大到小排列分别为Zn、Cu、Ba、Mn、Pb、Cr、Ni，累积占到飞灰总质量的1.4%。

### 2. 试验过程

试验从设备进厂安装至完成72小时连续运行测试，共近5个月时间，试验过程中将飞灰与助溶剂按一定比例混合后入炉，启炉后逐步增加等离子发生器功率，根据炉膛温度情况开始往炉内少量加料，约1.5小时左右出渣口开始出渣，然后给料机自动投料，出渣口出渣连续稳定后逐步增加投料量。

运行时，压缩空气的压力保持在0.75MPa，氮气压力0.5MPa，水泵出水压力为0.45MPa，回水压力约0.04MPa，炉膛保持正压燃烧，炉内温度在1400℃左右。

## 三、装置性能分析

### 1. 飞灰处理能力及能耗

熔融装置飞灰处理量经济运行区间为100~145kg/h，处理1kg飞灰所需综合能耗在1.7~2.0kW·h之间。

#### (1) 熔渣

高温熔渣采用空冷及水淬两种冷却方式，两种方式冷却后的熔渣从外观来看，均表面光滑，玻璃化程度较好，无夹杂、无气孔，表观质量较好，经测算飞灰熔融后的质量挥发率约28%左右，减容率为65%左右，实现了垃圾焚烧飞灰减量化。

经检测，熔渣中的主要成分为Ca、Fe、Si和Al。其XRD检测未见明显的晶体峰，证明为玻璃态物质。

表2是将熔渣按相应标准要求重金属浸出测试的结果。结果表明其重金属的浸出浓度不超过GB 8978中规定的最高允许排放浓度限值（第二类污染物最高允许排放浓度按照一级标准执行）的要求，也低于日本的国家标准，熔融所得的玻璃体熔渣不属于危险废弃物，实现垃圾焚烧飞灰的无害化处理。

表2 熔渣颗粒浸出数据结果

浸出金属		Cr (ppb)	Mn (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Cd (ppb)	Pb (ppb)
颗粒大小	大于20目	0.223	41.268	7.821	1.428	51.102	0.212	0.52	0.145
	20~40目	2.986	39.127	6.577	9.158	44.8	0.534	0.384	2.429
	40~60目	6.176	38.422	7.498	14.959	53.16	0.591	0.693	4.904
	小于60目	1.817	20.111	3.825	10.213	10.959	1.448	0.22	1.702
GB 8978污水综合排放标准 (二类污染物一级标准限值)		1500	2000	1000	500	2000	500	100	1000
符合		符合	符合	符合	符合	符合	符合	符合	符合
固体废物玻璃化处理产物技术要求征求意见稿(表2限值, 用作建筑材料和喷砂原料时)		水浸出							
/		100	20	1000	1000	10	5	10	
/		符合	符合	符合	符合	符合	符合	符合	
		酸浸出							
200		1000	200	1000	1000	100	30	300	
符合		符合	符合	符合	符合	符合	符合	符合	

水淬池内的废水经过化验低于GB/T14848-2017地下水质量标准(Ⅲ类水限值)，可直接排入城市污水管网。

#### (2) 二次飞灰

由于原料飞灰中的盐分熔点低，高温汽化后进入烟气中，在低温段从烟气中析出，形成二次飞灰，吸附在烟道管壁上，二次飞灰为白色粉末，易溶于水，水溶液为蓝色，通过取样化验。从化学成分构成可以看出，二次飞灰中主要以Na、K、S、Cl、Ti和Cu为主，多以氯盐和硫酸盐的形式存在。Na盐和K盐是高挥发性盐类，熔融过程以气态形式大量挥发，在尾部烟道沉积。Cu盐的存在使得二次飞灰溶解到水里呈蓝色。

#### (3) 烟气成分

烟气中的NO<sub>x</sub>、HCl、SO<sub>2</sub>和粉尘含量较高，尾部烟气处理装置需设置急冷装置、脱硝装置、脱酸装置、除尘装置和活性炭喷射装置以使烟气达到排放标准。

## 四、运行中出现的问题及解决方案

### 1. 排渣口间歇性冒烟

原因：由于熔融装置烟道接至电厂垃圾焚烧炉尾部布袋除尘器入口烟道处，此处烟道负压较大，熔融炉尾

部烟道上的引风机还未开启，其风机入口负压就达到2000Pa，又受焚烧炉运行中参数调整和布袋喷吹，导致熔融装置炉膛内压力波动，从而导致排渣口出现间歇性冒烟。

解决方案：通过在排渣口处增加烟道旁路、运行调整等方法，使出渣口冒烟问题得以解决。

### 2.推杆故障报警

原因：输入电压不稳，存在波动，导致推杆因电压过低故障报警；推杆因超负荷而故障报警。

解决方案：针对电压不稳，可增设稳压器，同时给料频率与推杆反复频率进行自动连锁，精准控制给料量，防止推杆超负荷而故障报警。

### 3.废气中氮氧化物过高

原因：熔融炉液态熔渣出口因为负压吸入了大量的冷空气与高温烟气混合，高温烟气温度约1400℃，空气中的N<sub>2</sub>大量分解并合成氮氧化物。

解决方案：将熔融炉熔渣出口设计成密闭式，杜绝大量冷空气混入降低氮氧化物的生成，同时在尾部烟道增加脱硝设备去除氮氧化物。

### 4.壳体底部焊缝破裂导致漏水

原因：因为设计缺陷再加上炉内为正压运行，导致部分烟气进入到浇注料体与壳体之间，烟气中氯化物含量较高，对焊缝腐蚀强烈。

解决方案：优化设计炉体结构，同时做好浇注料体上各个开口处与壳体的密封措施。

## 五、结论

1.搭建等离子飞灰熔融装置并进行系统试验验证了新型等离子体熔融炉在处理生活垃圾焚烧飞灰时的效果，空冷及水淬熔渣均表面光滑，玻璃化程度较好，无夹杂、无气孔，表现质量较好，飞灰熔融后的质量挥发率28%，减容率65%。熔渣满足国家排放标准及作为原材料二次利用时所要求的标准，水淬后的废水无需另外处理就达到了直接排放标准可直接排入城市污水管网，熔渣可以作为建材、微晶玻璃、保温材料的原材料得到再利用。

2.熔融装置飞灰处理经济运行区间为100~145kg/h，处理1kg飞灰所需综合能耗在1.7~2.1 kW·h之间。

3.二次飞灰主要以氯化物和硫酸盐的形式存在。Na盐和K盐是高挥发性盐类，熔融过程以气态形式大量挥发，主要在尾部烟道低温段沉积，Cu盐的存在使得二次飞灰溶解到水里呈蓝色。

4.烟气中NO<sub>x</sub>、HCl、SO<sub>2</sub>和粉尘含量较高，尾部烟气

处理装置需设置急冷装置、脱硝装置、脱酸装置、除尘装置和活性炭喷射装置以使烟气达到排放标准，但因烟气流速不大，约500Nm<sup>3</sup>/h，可混入到电厂垃圾焚烧炉的尾部布袋入口烟道中，经焚烧炉烟气稀释后达标排放。

对现有飞灰熔融装置可进一步优化，包括排渣口设计成密闭式结构，减少大量冷空气进入炉内，降低NO<sub>x</sub>产生量；推杆装置增设稳压器，给料频率与推杆反复频率进行自动连锁，精准控制给料量；做好浇注料体上各个开口处与壳体的密封措施，防止烟气进入浇注料体与壳体之间腐蚀壳体。

## 参考文献：

- [1]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[C]//中国环境科学学会(Chinese Society for Environmental Sciences).2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷).光大环境科技(中国)有限公司, 2019:10.
- [2]曹建峰, 白兆兴, 蔡世林.垃圾焚烧飞灰熔融固化炉开发与试验研究[J].工业锅炉, 2006(4):1-6.
- [3]黄文有, 孟月东, 陈明周, 等.等离子体熔融生活垃圾焚烧飞灰中试试验[J].环境工程技术学报, 2016, 6(05):501-508.
- [4]张春飞, 曹腾飞, 于晓亮, 等.危险废物焚烧飞灰等离子体熔融试验[J].中国粉体技术, 2023, 29(02):121-129.
- [5]翁万良, 赵莉丽, 黄相璇, 等.基于城市垃圾焚烧飞灰旋风熔融炉仿真模拟实验设计[J].山东化工, 2023, 52(24):248-250+256.DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2023.24.064.
- [6]周宇.危险废物焚烧飞灰熔融处理的试验研究[D].浙江大学, 2011.
- [7]杨浩.固废等离子体熔融处置技术的研究[D].杭州电子科技大学, 2021.
- [8]胡明, 虎训, 邵哲如, 等.等离子体熔融危废焚烧灰渣中试试验研究[J].工业加热, 2018, 47(2):13-19.
- [9]赵军, 王树众, 陈林.生活垃圾热解及等离子体熔融处理技术[C]. //首届中国工程院/国家能源局能源论坛论文集. 2010:808-812.
- [10]殷科.等离子体熔融工艺在危险废物处置中的应用[J].区域治理, 2022(28):211-214.
- [11]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.
- [12]汪嘉涛, 吴则江, 黄成贤.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.