

## “有机危废高效清洁稳定焚烧处置技术与装备”固废资源化专项

# 危废焚烧灰渣电炉高温熔融试验

华 昀

(恩菲城市固废(孝感)有限公司,湖北孝感432012)

**[摘要]** 焚烧灰渣占入窑焚烧危废总量的15%~25%,通常送危废填埋场填埋处理,存在潜在环境风险,灰渣的“零填埋”是大势所趋。某危废处置中心采用“回转窑焚烧+电炉高温熔融+强制洗涤”工艺处理有机危废,回转窑尾渣直接送电炉熔融处置,通过合理配料控制熔池温度1350~1450℃,采用水淬工艺处置熔融产物,生成水淬渣、洗涤水和烟气产物。水淬渣的酸浸和水浸结果表明其重金属浸出指标满足国家标准,玻璃体含量为98%,满足85%的标准要求,可作为绿色建材产品使用;进入水中的盐分以氯盐和硫酸盐为主;飞灰中的二恶英降解效率达到99%以上。灰渣高温熔融处置技术是一种高效、绿色的先进技术,为实现灰渣“零填埋”目标提供了一种切实可行的解决方案。

**[关键词]** 灰渣;高温熔融;电炉;水淬渣;洗涤水

**[中图分类号]** X705 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)05-0100-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.015

## 0 引言

根据生态环境部发布的《2024年中国生态环境状况公报》及行业数据汇总,2024年,全国危险废物产量约为1.3亿t<sup>[1]</sup>。危废焚烧灰渣产量通常占危废焚烧处置量的15%~25%(因废物成分、焚烧工艺不同而有所差异);2024年全国危废焚烧处置量约1100万t,据此估算HW18焚烧处置残渣全国产量约200万t,市场规模约为25亿元。目前,危废焚烧灰渣主流处置方式为安全填埋,但是安全填埋

“不安全”,潜在环境风险巨大,整合固化在长时间的环境暴露下有外溢的风险<sup>[2-4]</sup>。国家对危废填埋设施的审批趋严,并发布了刚性填埋场标准,而采用传统的焚烧技术仍然需要花费不菲的费用将炉渣送去安全填埋场。灰渣的“零填埋”是实现“无废城市”建设的重要一环,因此,采用预焚烧加高温熔融技术将会是未来危废处置的首选<sup>[5-6]</sup>。高温熔融使灰渣形成稳定的玻璃体结构(类似玻璃),将重金属(如铅、镉、汞)包裹在玻璃体网络中,其浸出率可降低至0.1mg/L以下(远低于填埋标准),避免土壤和地下水污染。另外,灰渣熔融后的产物(玻璃体)具有高强度、化学稳定性等特点,是优质的资源化原料。因此,将灰渣熔融工艺与熔渣的高附加值利用技术相结合,是危险废物处置产业升级的突破点,是未来行业的发展方向。

熔融电炉是一种利用电弧放电产生高温的工业设备,在实现灰渣(如工业废渣、电厂粉煤灰、冶金灰等)高温熔融处理中展现出显著优势<sup>[7]</sup>。熔融电炉具有高温、能量利用效率高及过程可控等特点。熔融电炉的加热方式是利用电弧直接作用在物料上,电能通过电弧直接转化为热能,热量主要集中在熔融池内,热损失仅来自炉体散热,能量转化效率可达60%~80%。根据《危险废物焚烧污染控制标

**[收稿日期]** 2025-09-25

**[基金项目]** 国家重点研发计划:有机危废高效清洁稳定焚烧处置技术与装备(2019YFC1907000);中国五矿集团有限公司科技专项计划项目:矿冶与城市固废协同处置及资源化技术路线研究。

**[作者简介]** 华昀(1975—),男,本科,工程师,主要从事固废处置及环保咨询工作。

**[引用格式]** 华昀. 危废焚烧灰渣电炉高温熔融试验[J]. 绿色矿冶,2025,41(5):100-105.

HUA Yun. High-temperature melting test of hazardous waste incineration Ash[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025,41(5):100-105.

准》(GB 18484—2020)的规定,有机危废的热灼减率应小于5%,回转窑焚烧的复杂工况常导致焚烧不彻底,有机物含量超标。将这种灰渣送入电炉进行熔融处置,可以大幅降低持久性有机物污染。

某危废处置中心建设有一套逆流回转窑系统( $\Phi 3.4\text{ m} \times 9.0\text{ m}$ )和一台灰渣熔融炉(1 650 kVA),以实现有机危废的“回转窑焚烧+电炉熔融”短流程处置。回转窑焚烧处置能力为50 t/d,灰渣熔融处置能力为15 t/d。本文进行了灰渣高温熔融试验,分析了水淬渣的成分、毒性,二恶英分解效率等,以期同类项目提供参考。

## 1 试验

### 1.1 物料分析

试验原料为危废焚烧灰渣,辅料为石英砂。

危险废物种类繁多且成分多变,导致不同焚烧系统产出的焚烧炉渣千差万别,即便是同一焚烧线排放的炉渣成分也有很大差异,表1是三种炉渣的XRF分析。1#渣是某危废处置中心接收的危废焚烧灰渣,2#渣为某危废处置中心逆流焚烧线产出的焚烧炉渣,3#渣为上海某环保企业提供的危废焚烧炉渣。

从表1可知,这三种炉渣的最大区别在于氯、硫元素含量的差异性。1#渣是有机危废焚烧过程产生的炉渣和飞灰掺混的混合物,具有高氯、高硫的特点,这也是危废处置行业存在的普遍现象,给下游的处置工艺(例如填埋、熔融等)带来了挑战。

本试验采用2#灰渣作为处置对象,该灰渣含有较高的Cl、Na、Fe元素。

石英砂粒度为3~5 mm,化学成分见表2。

表1 危废焚烧炉渣化学成分分析

| 元素  | Ca   | Si   | Al   | Mg   | Fe    | Na   | K    | Cl   | Br   | F   | C    | S    | P    | Ti   | Zn   | Ba   | Mn   | Cu    | Cr   | Ni   | 其他   | $\Sigma$ |
|-----|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|----------|
| 1#渣 | 5.53 | 6.30 | 3.20 | 0.70 | 11.67 | 17.6 | 1.12 | 12.5 | 0.4  | 0.3 | —    | 3.02 | 2.11 | 1.00 | 0.80 | 0.43 | 0.27 | 0.26  | 0.10 | 0.06 | 32.6 | 100      |
| 2#渣 | 8.77 | 7.38 | 2.83 | 0.89 | 6.31  | 3.53 | 3.03 | 6.24 | 1.75 | —   | 5.3  | 1.34 | —    | 1.51 | 2.10 | 3.64 | 0.08 | 11.79 | 0.07 | 0.16 | 33.3 | 100      |
| 3#渣 | 17.0 | 13.2 | 7.72 | 1.45 | 15.9  | 1.05 | 0.34 | 0.09 | 0.01 | —   | 1.19 | 0.18 | 1.09 | 6.33 | 0.30 | 1.59 | 0.16 | 0.38  | 0.26 | 0.29 | 31.5 | 100      |

表2 石英砂化学成分分析

| 成分 | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Cl   | MgO  | 其他   | $\Sigma$ |
|----|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|------|------|----------|
| 含量 | 0.06 | 95.55            | 0.28                           | 3.06                           | 0.07              | 0.71             | 0.08            | 0.01 | 0.09 | 0.09 | 100      |

### 1.2 工艺流程

试验采用“电炉熔融+强制洗涤”的短流程工艺制度,电炉熔融工艺流程如图1所示。危废焚烧灰渣经过烘干后送入电炉。熔渣经急冷水淬得到粒

状水淬渣,熔融烟气经强制洗涤得到高盐废水。由于物料的盐分较高,在熔融工序和脱酸工序之间设置自动清灰装置,保证电炉的连续稳定运行。另外,在脱酸后端设置布袋,保证烟气达标排放。

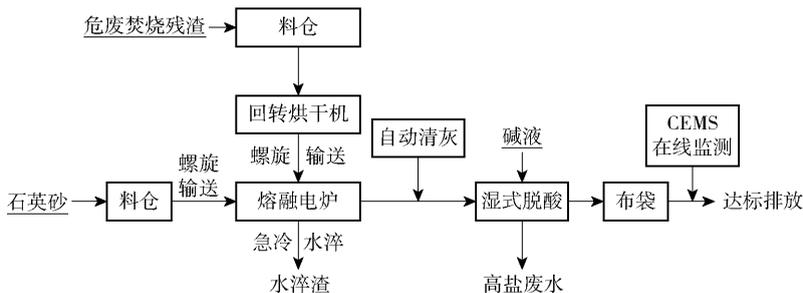


图1 电炉熔融工艺流程图

## 2 灰渣熔融工程试验

2022年12月2日,项目组正式起弧化渣,12月17日停炉并排放底渣,连续稳定运行16天。试验采用三班两倒制度,结合二次电流和电压操控电极升降,控制熔池温度1 350~1 450℃。排渣制度与

能耗的关系见表3。由表3可知,如果一天排一次熔渣,可以将能耗降低至1 531 kW·h/t。

表3 排渣制度与吨灰渣能耗的关系

| 排渣制度/(次/天)   | 3     | 2     | 1     |
|--------------|-------|-------|-------|
| 吨灰渣能耗/(kW·h) | 1 981 | 1 755 | 1 531 |

灰渣含水率与石墨电极消耗量的关系见表4。由表4可知,将灰渣的自由水降低至1%以下,可实现吨灰渣的电极消耗量为8.1 kg。

表4 灰渣含水率与石墨电极消耗量的关系

|                             |      |      |      |      |     |
|-----------------------------|------|------|------|------|-----|
| 灰渣含水率/%                     | 12.5 | 9.9  | 6.4  | 3.1  | 0.9 |
| 电极消耗量/(kg·t <sup>-1</sup> ) | 25.7 | 19.5 | 15.8 | 10.3 | 8.1 |

### 3 试验结果分析

#### 3.1 水淬渣化学成分

高温熔体采用水淬工艺,得到粒径≤10 mm的水淬渣,CaO/SiO<sub>2</sub> = 1.26。其XRD分析如图2所示。由图2可知,在30°附近有一个明显的“馒头峰”,这是典型的玻璃态物质特征。

由于危废焚烧残渣中的NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>含量高达15%以上,在炉渣熔融处置过程中,熔融玻璃体不可避免的夹杂着氯化钠进入水淬渣池,导致玻璃渣中包裹着NaCl,氯含量为1.76%~3.46%,如表5所示。氯元素较高,对于酸溶失率不利,需要进行多次水洗,才可将氯元素含量降低至0.5%~1%。

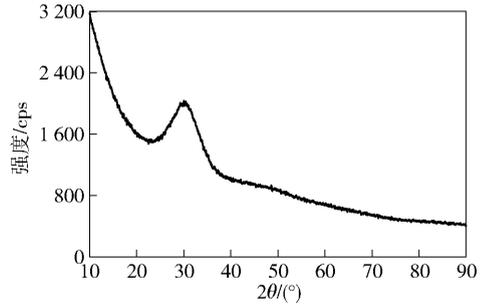


图2 水淬渣的XRD图

表5 水淬渣化学成分分析

| 元素 | 第一炉   |      |       | 第二炉   |       |      |      | 第三炉  |      |      |      | 第四炉  |      |      |      | %    |     |
|----|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|    | 流槽渣   |      |       | 水淬渣   | 流槽渣   |      |      | 水淬渣  | 流槽渣  |      |      | 水淬渣  | 流槽渣  |      |      |      | 水淬渣 |
|    | 1     | 2    | 3     |       | 1     | 2    | 3    |      | 1    | 2    | 3    |      | 1    | 2    | 3    |      |     |
| C  | 0.70  | 0.80 | 0.82  | 0.99  | 0.88  | 0.76 | 0.81 | 0.97 | 0.84 | 0.83 | 1.08 | 1.34 | 0.78 | 0.77 | 0.83 | 0.80 |     |
| N  | 0.68  |      |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      | 0.55 |      | 0.66 |      |     |
| O  | 30.6  | 28.4 | 29.9  | 26.7  | 29.8  | 27.7 | 30.2 | 29.8 | 28.7 | 31.3 | 28.5 | 29.0 | 28.1 | 28.2 | 28.7 | 27.7 |     |
| Na | 4.85  | 4.88 | 4.82  | 7.12  | 6.17  | 6.21 | 6.11 | 6.57 | 5.79 | 5.53 | 6.86 | 5.96 | 5.65 | 5.21 | 5.52 | 6.10 |     |
| Mg | 0.91  | 0.97 | 0.98  | 0.91  | 0.82  | 0.80 | 0.78 | 0.70 | 0.77 | 0.70 | 0.64 | 0.70 | 0.67 | 0.76 | 0.72 | 0.68 |     |
| Al | 5.68  | 5.51 | 5.61  | 5.16  | 5.53  | 5.74 | 5.94 | 4.91 | 5.35 | 5.12 | 4.95 | 4.97 | 5.20 | 5.04 | 4.91 | 4.75 |     |
| Si | 13.2  | 13.0 | 13.1  | 12.4  | 13.1  | 13.3 | 12.8 | 13.0 | 13.7 | 13.6 | 12.1 | 12.6 | 14.5 | 13.5 | 13.7 | 13.5 |     |
| P  | 1.62  | 1.68 | 1.69  | 1.56  | 2.05  | 2.14 | 2.05 | 1.92 | 1.99 | 1.83 | 1.75 | 2.05 | 2.15 | 2.02 | 2.04 | 2.02 |     |
| S  | 0.91  | 0.86 | 0.89  | 1.06  | 0.98  | 0.97 | 1.00 | 1.24 | 1.15 | 1.11 | 2.21 | 1.56 | 0.86 | 0.78 | 0.84 | 0.87 |     |
| Cl | 0.85  | 0.86 | 0.84  | 3.46  | 1.33  | 1.25 | 1.57 | 2.32 | 1.23 | 1.33 | 3.14 | 1.82 | 2.31 | 1.26 | 1.36 | 1.76 |     |
| K  | 0.37  | 0.39 | 0.38  | 0.46  | 0.45  | 0.48 | 0.52 | 0.59 | 0.57 | 0.56 | 0.78 | 0.50 | 0.67 | 0.63 | 0.62 | 0.64 |     |
| Ca | 25.8  | 26.4 | 26.4  | 25.8  | 22.8  | 23.5 | 22.6 | 25.3 | 25.1 | 24.4 | 21.0 | 24.1 | 23.2 | 22.9 | 22.3 | 23.8 |     |
| Ti | 2.15  | 2.11 | 1.98  | 2.05  | 2.28  | 2.34 | 2.29 | 2.15 | 2.42 | 2.23 | 1.94 | 2.07 | 2.39 | 2.32 | 2.24 | 2.22 |     |
| Cr | 0.54  | 0.53 | 0.49  | 0.45  | 0.46  | 0.61 | 0.55 | 0.35 | 0.54 | 0.46 | 0.60 | 0.49 | 0.52 | 0.47 | 0.51 | 0.71 |     |
| Mn | 1.54  | 1.59 | 1.55  | 1.44  | 1.09  | 1.20 | 1.14 | 1.00 | 1.11 | 1.01 | 0.95 | 1.02 | 0.85 | 0.81 | 0.78 | 0.85 |     |
| Fe | 8.18  | 8.81 | 8.36  | 7.77  | 9.83  | 10.8 | 9.50 | 7.31 | 8.57 | 8.23 | 10.7 | 9.42 | 11.0 | 12.9 | 12.2 | 11.3 |     |
| Ni | 0.02  | 0.03 | 0.03  | 0.06  | 0.02  | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.10 |     |
| Cu | 0.04  | 0.04 | 0.04  | 0.06  | 0.07  | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.94 | 0.55 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.08 |     |
| Zn | 0.25  | 0.24 | 0.25  | 0.25  | 0.34  | 0.38 | 0.36 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.38 | 0.37 | 0.56 | 0.57 | 0.55 | 0.57 |     |
| Br | 0.04  | 0.04 | 0.04  | 0.16  | 0.05  | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.05 | 0.06 | 0.17 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.09 |     |
| Sr | 0.13  | 0.14 | 0.13  | 0.12  | 0.12  | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.12 |     |
| Y  | 0.008 |      | 0.008 | 0.009 | 0.008 | 0.01 | 0.01 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
| Zr | 0.10  | 0.11 | 0.11  | 0.11  | 0.15  | 0.18 | 0.16 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.12 |     |
| Ba | 1.59  | 1.93 | 1.56  | 1.83  | 1.54  | 1.49 | 1.29 | 1.10 | 1.46 | 1.05 | 1.16 | 1.07 | 1.28 | 0.96 | 1.27 | 1.18 |     |

### 3.2 水淬渣毒性浸出分析

取水淬渣混合物进行毒性浸出实验,参考《固体废物玻璃化处理产物技术要求》(GB/T 41015—2021),分别进行水浸出和酸浸出检测,以及酸溶失

率和玻璃体含量检测,结果分别见表6和表7。

试验测得的水淬渣酸溶失率为2.51%,低于限值3%的要求;玻璃体含量为98%,满足85%的要求。重金属的水淬渣水浸和酸浸试验结果均满足标

表6 玻璃渣产物毒性水浸出含量检测

| 元素  | 氟离子 | 六价铬    | 铜     | 锌     | 镉     | 铅     | 铍*    | 钡     | 镍     | 砷     | 硒     | 锰     | 汞*    |
|-----|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 水浸出 | 0.9 | <0.004 | 0.027 | 0.023 | 0.001 | 0.005 | <0.04 | 0.100 | 0.005 | 0.002 | 0.007 | 0.007 | <0.02 |
| 限值  | 1.0 | 0.05   | 1.0   | 1.0   | 0.005 | 0.01  | 0.002 | 0.7   | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.1   |       |

注: \* 的单位为  $\mu\text{g/L}$ 。

表7 玻璃渣产物毒性酸浸出含量检测

| 元素  | 砷     | 锰     | 锌     | 铜     | 镉      | 铅     | 铬     | 镍     |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 酸浸出 | 0.004 | <0.01 | 0.086 | 0.016 | 0.0005 | 0.004 | 0.023 | 0.041 |
| 限值  | 0.1   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 0.03   | 0.3   | 0.2   | 0.2   |

准要求的限值。

### 3.3 进入水中的盐分

进入水中的盐分包括两部分:一是随熔渣排放

到水淬渣池中的盐分,二是随烟气进入湿式脱酸中的盐分。因此,分别取水淬渣池和洗涤水池的水进行检测。四炉次的分析数据见表8。

表8 炉渣熔融进入水中的盐分分析

| 种类   | Cl | S      | Fe    | Ca    | Mg    | Al    | Mn     | Cr   | Pb   | Zn    | Cd    | Cu   | Ni   |
|------|----|--------|-------|-------|-------|-------|--------|------|------|-------|-------|------|------|
| 水淬渣池 | 一炉 | 23 170 | 3 124 | 1.35  | 1.77  | —     | 201.49 | 0.27 | 1.53 | 2.72  | 1.43  | 0.91 | 0.49 |
|      | 二炉 | 20 900 | 1 892 | 1.44  | 1.70  | —     | 213.90 | 0.27 | 1.68 | 2.08  | 2.83  | 0.73 | 0.40 |
|      | 三炉 | 18 670 | 1 890 | 2.93  | 1.60  | —     | 233.45 | 0.28 | 1.80 | 2.14  | 0.32  | 0.75 | 0.37 |
|      | 四炉 | 20 210 | 2 090 | 1.05  | 0.76  | —     | 237.72 | 0.25 | 0.94 | 1.90  | 0.72  | 0.75 | 0.50 |
| 洗涤水池 | 一炉 | 22 020 | 575   | 457.5 | 51.04 | 114.5 | 185.43 | 37.5 | 1.68 | 16.01 | 273.5 | 1.51 | 7.44 |
|      | 二炉 | 37 670 | 3 980 | 1.31  | 76.07 | 109.5 | 213.67 | 38.5 | 1.62 | 2.91  | 254.5 | 1.65 | 0.37 |
|      | 三炉 | 32 580 | 2 883 | 2.16  | 58.27 | 98.5  | 232.72 | 26.5 | 1.81 | 3.2   | 52.5  | 1.81 | 0.45 |

由表8可知,无论是水淬渣池还是洗涤水池的水,均含有较高的 $\text{Cl}^-$ 离子和 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子。在忽略玻璃渣中氯元素的情况下,危废焚烧残渣中的氯盐( $\text{NaCl}$ 和 $\text{KCl}$ )通过挥发进入烟气的比例约为59.7%,以熔盐形式进入水淬渣池的比例约为40.3%。显然,这个比例不是固定不变的,与进料方式和保温时间密切相关。

洗涤水池中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子来自碱液捕集的烟气中的 $\text{SO}_2$ 气体,水淬渣池中的硫元素可能来自熔渣中的熔融态硫酸盐,这需要对危废焚烧炉渣的组成

进一步分析研究。另外,水中含有较多重金属( $\text{Mn}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 等),在开展分盐之前需要去除重金属。

### 3.4 洗涤水分析

洗涤水包括水淬渣池水和烟气洗涤水,分别进行蒸发结晶送检分析,化学成分见表9。蒸发结晶盐的XRD分析结果如图3所示。两种高盐水中主要的元素为 $\text{Cl}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{S}$ 等元素,但是XRD分析仅能定性分析出 $\text{NaCl}$ 和 $\text{KCl}$ 两种物质,硫酸盐的含量过低未检出。

表9 洗涤水蒸发结晶盐的化学成分分析

| 元素     | Cl   | O    | Na   | K    | S    | Ca   | Br   | F    | 其他   |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 水淬渣池水盐 | 36.1 | 17.7 | 24.2 | 16.7 | 3.38 | 1.46 | 0.26 | —    | 0.20 |
| 烟气洗涤水盐 | 28.9 | 17.1 | 22.5 | 22.4 | 4.69 | 3.11 | 0.33 | 0.11 | 0.86 |

### 3.5 二恶英分析

为了分析灰渣中的二恶英去除效果,取危废焚

烧灰渣和水淬渣进行二恶英毒性当量(TEQ)分析,按照《固体废弃物二恶英类的测定 同位素稀释 高

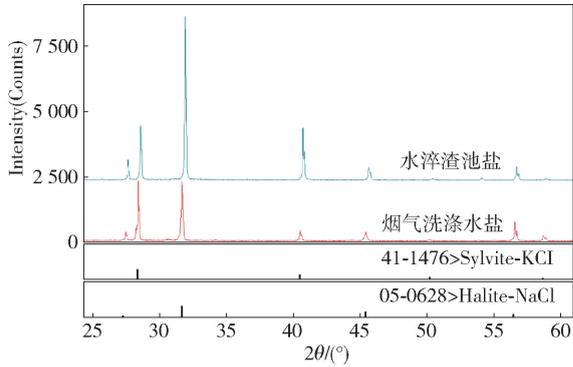


图3 两种洗涤水蒸发结晶盐的XRD分析

分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ77.3—2008)进行检测。结果显示飞灰中的二恶英TEQ质量分数为0.53 μg/kg,水淬渣的TEQ质量分数为0.00053 μg/kg,降解效率≥99.9%。

为了验证熔融烟气的二恶英含量是否超标,同期送检烟气洗涤水,按照《水质二恶英类的测定同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ77.1—2008)进行检测。结果发现水中的二恶英

TEQ质量分数低于检出限值。由此可知,飞灰高温熔融技术对二恶英降解非常高效、安全。

### 3.6 排放烟气分析

电炉熔融烟气的主要有害成分包括:SO<sub>2</sub>、HCl、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、CO等。经湿法脱酸后,除了CO气体,其他气体均满足《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2020)规定的排放限制。后期需要在烟囱处设置燃烧装置,保证达标排放。

## 4 灰渣熔融经济性分析

### 4.1 物料平衡分析

试验共处置了163.1 t危废焚烧灰渣,另外处置过程中用到了11.3 t石英砂和1.9 t石灰进行调质,石墨电极消耗率为0.7%,约1.3 t,忽略耐火材料的侵蚀量,总入项为177.6 t;出项主要为水淬渣125.2 t,渣池水盐为7.3 t,洗涤水盐为7.6 t,剩下的烟气为37.3 t,物料平衡见表10。

表10 飞灰熔融物料平衡计算

| 入项   |       |      | 出项       |       |      |
|------|-------|------|----------|-------|------|
| 物料   | 用量/kg | 占比/% | 物料       | 用量/kg | 占比/% |
| 灰渣   | 1000  | 91.8 | 水淬渣      | 767.7 | 70.5 |
| 石英砂  | 69.3  | 6.4  | 渣池水盐(干基) | 45.0  | 4.13 |
| 石灰   | 11.6  | 1.1  | 洗涤水盐(干基) | 47.6  | 4.37 |
| 石墨电极 | 8     | 0.7  | 烟气(含尘)   | 228.7 | 21.0 |

### 4.2 成本估算

灰渣熔融试验的综合成本包括燃动力费、材料费、人工费和设备折旧费,共计1540元/t,见表11。

表11 熔融成本分析

| 序号 | 名称    | 吨灰成本/元 | 备注                                  |
|----|-------|--------|-------------------------------------|
| 1  | 燃动力费  | 940    | 耗电量1174 kW·h                        |
| 2  | 材料费   | 200    | 吨灰电极消耗8.01 kg,石英砂消耗250 kg,碱液消耗75 kg |
| 3  | 人工费   | 160    | 三班两倒,炉前工6人,辅工6人                     |
| 4  | 设备折旧费 | 240    | 年限平均法                               |

## 5 熔融技术发展趋势的探讨

危废灰渣熔融技术的发展正从“无害化处理”向“资源能源协同回收”跃迁,绿色化、智能化、材料创新与循环经济构成其核心驱动力。

1)绿色化是危废焚烧灰渣熔融技术的基础。

灰渣中的有机物、重金属和可溶性盐在熔融过程发生了显著变化,毒性含量和毒性浸出限值均能满足国家标准规定。熔融技术彻底消除了危险废物的属性,这也是其相较于其他工艺技术的最大优势。

2)智能化是危废焚烧灰渣熔融技术发展的生命力。这不仅体现在工艺参数(熔融温度、熔融压力、烟气在线监测和入炉物料监控)、电气参数(电流、电压及功率)和机械控制参数(电极升降距离、阀门开度等),还体现在全流程协同管理、设备健康维护、资源循环优化、风险预警及跨系统融合等多个维度,覆盖从“物料入厂”到“副产品出厂”的全生命周期。以某危废处置中心的电炉示范工程为例,通过控制高温烟气用于灰渣物料的烘干脱水,可节省天然气23 m<sup>3</sup>/t;在中控室内可显示“有机危废-焚烧灰渣-水淬渣”的实时能量流和物质流,为企业的经济决策提供最优方案。

3)材料创新与循环经济是危废焚烧灰渣熔融

技术的必然结果。灰渣熔融的产物包括熔渣和熔盐。以某危废处置中心的电炉示范工程为例,可以直接水淬得到水淬渣和高盐水,水淬渣可进一步制备水泥掺合料或人工细骨料,高盐水进行分质结晶得到工业盐产品,或者将热熔渣直接制备矿渣棉产品,熔盐制备新型盐产品。

## 6 结论

1) 试验采用配料烘干加料化料-灵活控温保温的操作模式,共处置了 163.1 t 的危废焚烧灰渣,连续运行 16 天(含起弧化料);试验测得综合能耗 1 531 kW·h/t,电极消耗量 8.1 kg/t。

2) 熔融产物包括水淬渣、烟气和进入水中盐分。水淬渣的酸溶失率为 2.51%,低于 3% 的标准限制,重金属的毒性浸出均符合要求;烟气经过湿法脱酸装置,酸性气体满足要求,但是后期需要增加再次燃烧装置燃烧 CO,以满足达标排放;进入水中的盐分以氯盐和硫酸盐为主,由于含有重金属离子,需要考虑采用脱除重金属和分盐的工艺,获得满足毒性浸出要求的单组分盐分。

3) 灰渣熔融处置技术是一种高效、绿色的先进

技术,为实现灰渣“零填埋”目标提供了一种切实可行的解决方案。从应用者的角度出发,还应平衡好熔融处置的综合成本和产品效益的关系,以经济可行性和技术先进性带动产业的升级。

### [参考文献]

- [1] 生态环境部. 2024 中国生态环境状况公报[S/OL]. [2025-09-28]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/sthjcg/hjzljcyj/202506/t20250605\\_1120773.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/sthjcg/hjzljcyj/202506/t20250605_1120773.shtml).
- [2] 李兴杰. 国内部分地区危废焚烧灰渣特征调研分析[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(4): 59-66.
- [3] 张国辉, 洪斌, 李子雄, 等. 危险废物焚烧处理技术研究进展及展望[J]. 湖南有色金属, 2023, 39(4): 89-92.
- [4] 高术杰, 胡立琼. 典型有机危废的产排特性分析[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(5): 1-8.
- [5] 田艳锦, 苏秀凤, 孙振国, 等. 危险废物焚烧炉渣的熔融与资源化研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 21-23.
- [6] 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.
- [7] 杨志魁. 矿热电炉最佳运行参数的探讨[J]. 铁合金, 2001(3): 22-25.

# High-Temperature Melting Test of Hazardous Waste Incineration Ash

HUA Yun

(ENFI Municipal Solid Waste Treatment (Xiaogan) Co., Ltd., Xiaogan 432012, China)

**Abstract:** Hazardous waste incineration ash accounts for 15% ~ 25% of the total amount of incineration into the kiln. It is usually sent to hazardous waste landfill for landfill treatment, which has potential environmental risks. The “zero landfill” of ash is the general trend. A hazardous waste disposal center adopts the process of “rotary kiln incineration + electric furnace high temperature melting + washing” to treat organic hazardous waste. The slag from the kiln tail was directly sent to the electric furnace for melting and disposal. The temperature of the molten pool was controlled by reasonable ingredients. The temperature was 1 350 ~ 1 450 °C, and the melting products were treated by water quenching process to generate water quenching slag, washing water and flue gas products. The results of acid leaching and water leaching of water quenched slag show that the leaching index of heavy metals meets the national standard, the vitreous content is 98%, which meets the standard requirement of 85%, and can be used as green building materials. The salts entering the water are mainly chloride and sulfate. The degradation efficiency of dioxins in fly ash reached more than 99%. Ash melting disposal technology is an efficient, green advanced technology, which provides a feasible solution for achieving the goal of “zero landfill” of ash.

**Key words:** ash residue; high temperature melting; electric furnace; water quenched slag; washing water