

# 强力波清灰技术在某 500 t/d 垃圾焚烧炉余热锅炉应用的试验研究

张智<sup>1</sup> 徐金忠<sup>2</sup> 周洪权<sup>1</sup> 宦晓鹏<sup>1</sup> 杨旭亮<sup>1</sup>

1. 上海环境卫生工程设计院有限公司 上海 200232

2. 上海天马再生能源有限公司 上海 201603

**摘要:** 生活垃圾燃烧产生的高温烟气,通过余热锅炉进行余热回收过程中,具有热负荷不稳定、灰尘含量大、腐蚀等特性,容易在余热锅炉形成积灰,从而降低受热面的换热效率。为确保烟气通过二、三烟道后,其温度能够降至指定范围,使用高效的清灰方式具有重要意义。通过分析现有的几种锅炉清灰技术并结合垃圾焚烧炉锅炉受热面特性,发现强力波清灰技术具有清洁高效、成本低、安全可靠等特点。以某 500 t/d 垃圾焚烧炉为研究对象,对比分析部署强力波清灰器前后过热器处的烟气温度。结果表明:在相同的负载条件下,适当频率的强力波清灰能够降低过热器进口平均烟气温度 25 ℃左右;在该焚烧炉运用强力波清灰设备后,延长了锅炉的运行周期,减少了启停炉的频次,对比激波清灰技术年运营成本预计降低 55%。论文为强力波清灰技术在垃圾焚烧炉余热锅炉的推广应用提供参考。

**关键词:** 垃圾焚烧炉;余热锅炉;强力波清灰;丙烷

## 1. 研究背景

垃圾焚烧作为一种有效的垃圾处理方式,在减少垃圾占地、减轻环境污染等方面发挥了重要作用。根据中国统计年鉴,2022 年中国的城市垃圾清运量已经突破 2.4 亿吨,其中 80% 的垃圾通过焚烧的方式进行无害化处理<sup>[1]</sup>。据不完全统计目前我国垃圾焚烧厂数量从 2017 年的 278 家发展到 2023 年 964 家,处置能力达  $1.035 \times 10^6$  t/d,无害化处理能力实现了快速提升。然而由于城市生活垃圾成分复杂多样、含尘量高,在燃烧过程中,由于高温热分解、氧化的作用,其中的不可燃物大部分滞留在炉排上以炉渣的形式排出<sup>[2]</sup>。小部分质小体轻的物质在气流携带及热泳力作用下,与焚烧产生的高温气体一起在炉膛内上升,经过热交换后从锅炉出口排出,形成含有颗粒物即飞灰的烟气流<sup>[3]</sup>。炉内的高温烟气不仅本身温度变化范围大,同时还将携带具有强腐蚀作用的小颗粒物,其熔融温度低,极易在锅炉的换热管的表面形成结焦以及积灰。积灰的存在将会限制换热面的换热能力,降低换热面的换热效率,导致炉内烟道各处以及排烟温度的升高。因此采用合理高效的清灰方式将不仅能够提高锅炉效率、缓解受热面腐蚀,还能够降低设备运行费用。

目前,常见的垃圾焚烧炉余热锅炉清灰方式包括机械清灰<sup>[4]</sup>、声波清灰<sup>[5][6]</sup>、激波清灰<sup>[7][8]</sup>以及水力清灰<sup>[9]</sup>等。如表 1 所示,这些清灰方式各有优缺点,需要根据垃圾特性和炉膛运行环境进行选择和应用。

表 1 几种锅炉清灰方式的优缺点

清灰方式	优点	缺点
机械清灰	清灰效果较好、投资少、运行费用低。	机械装置故障率高,维修量大,易对设备造成损伤。
声波清灰	故障率低,声波声压可叠加,不会对设备造成损害。	能量转换效率低,仅适合于松散性积灰。
激波清灰	冲击力强,作用范围大,清灰效果好。	技术难度高,使用存在安全风险。
水力清灰	作用范围更大,运行安全可靠,操作维护方便。	除灰用水量,管道磨损快,易结垢堵塞。

如图 1 所示为强力波清灰设备的运行示意图,向装置内通入按一定比例混合的丙烷和压缩空气,通过火花塞进行混合空气的爆燃,混合气体在燃烧室内快速膨胀并产生强力冲击波。强力波在过热器管束之间以超音速传播,直接作用于管束表面的沉积物,使得受热面上的积灰破碎脱落。不仅如此,强力波还将穿透积灰与结垢直接作用管束表面,并产生震动,该震动还将沿轴向持续传播。

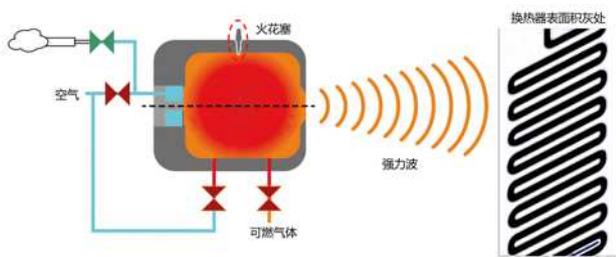


图 1 强力波清灰示意图

强力波清灰技术以持续高效、高覆盖率、灵活调整、安全节能以及安装与维护方便为核心优势。但由于技术难度限制，该方案暂时未能大范围的运用在国内的垃圾焚烧厂，现将该技术在某地区垃圾焚烧厂的 500 t/d 焚烧线余热锅炉上开展试验，计划研究强力波清灰对关键位置烟气温度的影响及其清灰频率的改变对清灰效果的影响，同时从经济性的角度评估该技术的推广应用价值，为垃圾焚烧发电厂的锅炉清灰设计及运营维护提供参考借鉴，以期达到节能减排和提高设备长周期运行水平的目的。

## 2. 试验设计与方法

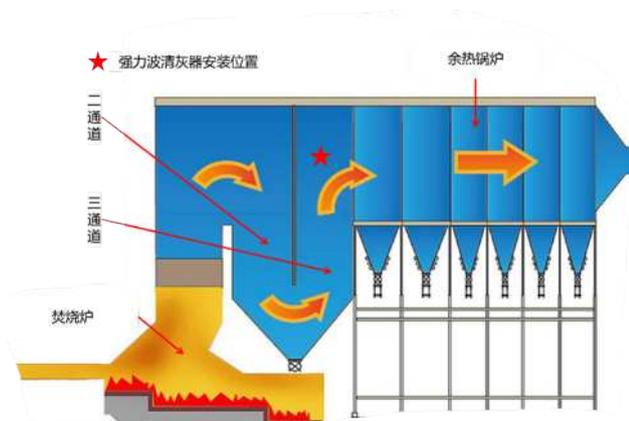


图 2 强力波清灰器布置示意图

该强力波清灰系统应用于某厂 500 t/d 焚烧线，余热锅炉采用单锅筒自然循环水管锅炉，锅炉主蒸汽额定温度 400 ℃，锅炉主蒸汽额定压力 4.0 MPa，省煤器出口设计温度为 195 ℃。本锅炉在过热器、省煤器每一段对流受热面前都设有吹灰器，其中二、三通道设置激波吹灰器，尾部烟道和省煤器部分采用机械振打吹灰器。如图 2 所示，强力波清灰系统布置在余热锅炉的三烟道上方，该系统主要由 PWG (Power Wave Generator) 清灰器、PWG 控制面板、PWG 控制系统以及丙烷瓶组等组成，其现场安装见下图 3。



图 3 强力波清灰系统现场安装图

为研究强力波清灰的试验效果，设定焚烧余热锅炉的主蒸汽负荷为 50.0 t/h，PWG 清灰强度设置为 35 MPa，在焚烧余热锅炉稳定运行一段时间后，调整清灰器的使用频率为每天两次；为探究不同启用频率下的清灰效果，提高清灰器的使用频率至每天四次。由于受垃圾成分变化影响，试验期间各参数有一定程度的波动，为减少余热锅炉的热负荷波动对清灰效果分析的影响，提取试验期内主蒸汽流量在 49~51 t/h 范围内的特定运行数据。据筛选后的数据绘制试验期间的特定运行参数变化图，进而对比分析强力波清灰试验阶段前后共 72 天内关键参数变化，特别是三烟道过热器进口左右两侧的烟气温度变化，借此反应清灰器的清灰效果。

## 3. 试验结果分析

整个试验期间余热锅炉的关键运行参数变化情况如图 4 所示，本次试验中首次使用强力波清灰的时间为第 22 天，提高使用频率的时间为第 39 天。由于垃圾成分复杂多变，运行期间余热锅炉的各参数均有一定程度的波动，主蒸汽设定流量为 50.0 t/h，但瞬时蒸汽流量处于 49.0~51.0 t/h。试验阶段，三烟道过热器进口左侧平均烟气温度约为 581.9 ℃，上下波动幅度接近 80 ℃，相比而言右侧平均烟气温度要低近 25 ℃。

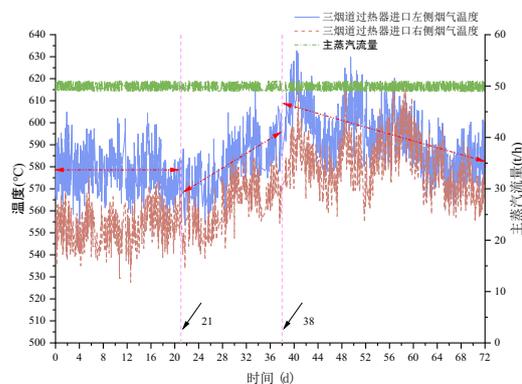


图 4 相同负载不同工况下三烟道过热器进口左右两侧烟气温度变化情况

通过比较图 4 中三烟道过热器进口左右两侧烟气温度变化情况,可以间接体现强力波清灰的效果。清灰前 21 天,左右两侧烟气温度分别在 570 °C 和 550 °C 上下波动;开始每天两次启用清灰器后,左右两侧烟气温度在 17 天内缓慢上升,提高幅度在 20 °C 上下,这是由于该频次的强力波清灰并不能很好的遏制住由锅炉负载的变化引起的烟气温度变化;随后提高强力波清灰器的启用频率至每天四次,可以看到左右两侧烟气温度在 34 天内逐步下降近 25 °C,该现象可以说明每天四次,强度为 35 MPa 的强力波清灰在长时间内的清灰效果显著,能够提高烟道内金属换热面的换热能力,使得烟气温度降低。

#### 4. 运行成本经济分析

以某 500 t/d 为例,焚烧线余热锅炉采用激波清灰技术,通常布置 50 个清灰点,一次性设备投资 80 万,每天消耗 7 瓶乙炔,费用约 840 元,每年运营费用约 28 万元,使用寿命为 10 年,折算每年费用约为 36 万。

同样以该炉型为例,在试验阶段,强力波清灰装置技术主要消耗的原料包括丙烷和压缩空气,同时也会产生电力和检修方面的费用。一台强力波清灰设备每天消耗 80 克丙烷,费用为 0.8 元;每天消耗 2.4 升压缩空气,电力费用为 0.4 元;折算每天维修费用为 1.625 元;每年运营费用约为 940 元。通常情况下,500 吨/天的垃圾焚烧炉会配备 2 套强力波清灰装置,单台设备投资 80 万,使用寿命为 10 年,折算每年费用约为 16.2 万。相较于激波清灰方案,该方案能够节省 55% 的运营成本,约 20 万/年。

#### 5. 存在问题与展望

试验主要针对是否在某 500 t/d 焚烧线余热锅炉上投运强力波清灰系统以及其使用频率对清灰效果的影响进行了性能测试。目前仍存在以下几个问题:

(1) 对于长期投运下的清灰降温效果以及锅炉运行稳定性,此次试验的整体周期相对较短,还需要对更长周期下的运行数据进行分析。

(2) 对于强力波清灰器的运行参数对清灰效果的影响,此次试验仅调整了设备的使用频率,考虑到强力波对设备换热面可能的冲击,还未对高强度强力波的清灰效果进行试验。

(3) 对与用于评估清灰效果的烟气温度的测量,由于受到炉内温度分布不均,温度传感器积灰等对测量结果的影响,需要提高其测量的准确性。

#### 6. 结论

(1) 以合适的频率启用强力波清灰器不仅能够有效的清除金属换热器表面的积灰,还能够显著的提高换热器的换热能力,从而达到降低烟气温度的目的,此次试验中三烟道过热器进口左右两侧烟气温度降低了约 25 °C。

(2) 强力清灰对比激波清灰技术,在设计寿命内,虽然一次性投资较高,由于运营费用低,年运营费用同比降低 55%。

#### 参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

[2] Jia t y, chen s p, teng l l, et al. Characteristics and mechanism of slagging in a 500 t/d MSW incinerator. Journal of the Energy Institute, 2024, 114.

[3] Yang w, gupta r, song z j, et al. Mechanism of soot and particulate matter formation during high temperature pyrolysis and gasification of waste derived from MSW. Waste Management, 2024, 182: p. 21–31.

[4] 汤晓勇, 田晓东, 许名熠, 等. 机械振打清灰装置在垃圾焚烧余热锅炉上的应用 [J]. 节能, 2019, 38(11):112–115.

[5] 孔庆有, 熊定标, 张越. 声波吹灰器和蒸汽吹灰器应用比较分析 [J]. 电力设备管理, 2023(20):293–295.

[6] 孔庆有, 汤云峰, 方晶剑. 声波吹灰器在锅炉吹灰中的应用 [J]. 电力系统装备, 2023(9):131–133.

[7] 焦志武. 激波吹灰器在 250t/d 机械炉排垃圾焚烧余热锅炉的运用 [J]. 能源与节能, 2018(3):76–78.

[8] 刘洪升. 采用气能激波旋转吹灰器解决余热锅炉积灰问题 [J]. 水泥, 2017(12):46–47.

[9] 曾育坤, 曹阳, 杜海亮, 等. 水力清灰技术在某 600t/d 垃圾焚烧炉余热锅炉应用的试验研究 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30(1):51–56.

[10] 蔡文宇, 沈滨. 垃圾焚烧炉在线清灰系统应用 [J]. 化工管理, 2022(24): 40–43.

#### 作者简介:

张智 (1980–), 硕士, 高级工程师, 主要从事生活垃圾清洁焚烧技术设计与研究。

#### 资金来源

上海市科技创新行动计划项目 (23DZ1201400)

上海环境 2023 年度科技创新行动计划项目 (AHJ–HJY2–0005–2023)