

污泥焚烧工艺优化及污染物控制研究

谷奋

广州拉斯卡工程技术有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025060013

摘要：污泥焚烧作为高效减量化、无害化处理污泥的核心技术，在城市固废处置中占据重要地位。文章以综合垃圾处理设施污泥焚烧项目为研究对象，基于拉斯卡（RASCHKA）流化床焚烧技术，系统分析污泥焚烧工艺的核心流程与技术参数。探讨当前污泥焚烧面临的负荷适配、腐蚀防护、污染物协同去除等难题，并提出针对性解决措施，为污泥焚烧工艺的高效稳定运行及环保达标提供技术参考，助力实现污泥处理的低环境影响与高资源利用率目标。

关键词：污泥焚烧工艺；优化；污染物控制

Research on Optimization of Sludge Incineration Process and Pollutant Control

Gu Fen

Raschka Guangzhou Engineering & Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Sludge incineration, as a core technology for the efficient reduction and harmless treatment of sludge, occupies a crucial position in urban solid waste disposal. This article takes the sludge incineration project of an integrated waste treatment facility as the research object and systematically analyzes the core processes and technical parameters of the sludge incineration process based on the RASCHKA fluidized bed incineration technology. It explores the challenges currently faced by sludge incineration, such as load adaptation, corrosion protection, and synergistic removal of pollutants, and proposes targeted solutions to provide technical references for the efficient and stable operation of the sludge incineration process and environmental compliance, thereby contributing to the achievement of the goals of low environmental impact and high resource utilization in sludge treatment.

Keywords : sludge incineration process; optimization; pollutant control

引言

随着城市化进程加快与污水处理能力提升，污泥产量呈逐年递增趋势，其含有的重金属、有机物等污染物若处置不当，将对土壤、水体及大气环境造成严重威胁。污泥焚烧因具备减量化程度高、无害化彻底及能量回收潜力等优势，已成为主流处理技术之一。然而，污泥成分复杂、热值波动大等特性，导致焚烧过程存在工艺适配性差、污染物排放难控制等问题，制约了技术的推广应用。

一、工程概况

实现污泥的无害化处置与资源回收利用。

本项目为综合垃圾处理设施及附属建筑（EPC2包）中的污泥焚烧子项目，打造集污泥预处理、焚烧、余热回收、烟气净化于一体的全流程处理系统。项目设计遵循职业安全与健康最优、低环境影响、高能效等目标，具备高自动化水平与稳定运行能力。系统设计处理规模为 2×135 吨干污泥/天，接收来自污水处理厂（TWRP）的脱水污泥（干固体含量 $23\% \sim 35\%$ ），经预干化后干固体含量提升至40%，再送入流化床焚烧炉进行自燃燃烧。焚烧产生的余热通过锅炉回收用于蒸汽生产，烟气经静电除尘、布袋除尘、酸性洗涤、碱性洗涤等多段处理后达标排放，配套的补给水系统、除灰系统及废水处理系统确保整个工艺的闭环运行，

二、污泥焚烧工艺系统核心技术分析

（一）污泥预处理系统设计与运行特性

污泥预处理系统是保障焚烧工艺稳定运行的基础，主要包含接收、储存、进料及预干化等单元。项目采用两级倾斜式污泥接收螺旋输送机与水平式分配螺旋输送机，将脱水污泥输送至两座总储存容量为2天处理量的接收仓，仓底配备液压滑架与卸料螺旋输送机，有效防止污泥架桥堵塞。脱水污泥经进料泵输送至4台蒸汽加热圆盘式预干化机，通过间接加热将污泥干固体含量从26%左右提升至40%，满足焚烧要求^[1]。

(二) 流化床焚烧炉系统工作机制

污泥焚烧系统采用鼓泡流化床焚烧炉工艺，每条焚烧线配备一台流化床焚烧炉，炉体为钢板卷制圆柱形结构，内侧敷设耐火材料，外侧覆盖保温层，由风箱、流化砂层及悬浮段组成。焚烧炉设计焚烧温度为 850~900℃，烟气在悬浮段停留时间超过 2 秒，确保有机物完全燃烧。系统配备两台污泥布料器，通过可调速电机控制进料量，均匀将预干化污泥抛撒至流化砂层。

助燃风系统分为一次风与二次风，一次风作为流化风经空气预热器加热至最高 500℃，二次风用于优化悬浮段燃烧效果，额定负荷下过量空气系数设计为 1.8。焚烧炉配备启动燃烧器及 8 支柴油喷枪，可根据污泥热值波动灵活调节燃烧状态，当污泥热值较低时喷射柴油辅助燃烧，热值较高时喷水冷却炉温。

(三) 余热回收系统能量利用效率

余热回收系统的功能是回收焚烧烟气热量，用于蒸汽生产与助燃风预热，同时冷却烟气至后续处理系统可接受温度。系统采用自然循环五回程锅炉，包含膜式壁、蒸发器、过热器、省煤器及空气预热器等设备，给水经省煤器加热后进入汽包，通过下降管与上升管实现自然循环，产生的饱和蒸汽经过热器加热后输送至共用蒸汽集箱。

蒸汽主要用于污泥预干化机、除氧器、烟气再热器等设备的内部消耗，同时外供至污水处理厂与垃圾焚烧发电线。锅炉排污水经闪蒸罐回收热量后，冷却至 45℃以下排放或回用。空气预热器采用两步预热法，先利用低温省煤器将助燃风预热至 120℃，再通过锅炉内换热器加热至最高 500℃，有效提高燃烧效率并减少辅助燃料消耗。该余热回收系统通过优化流程设计与热量分配，实现了能量的高效回收与梯级利用，提升了项目的能源利用效率^[2]。

(四) 烟气处理系统污染物净化原理

烟气处理系统位于余热锅炉下游，采用“静电除尘 + 布袋除尘 + 低温省煤器 + 酸性洗涤 + 碱性洗涤 + 除雾 + 汞吸附”的组合工艺，确保多污染物协同去除。静电除尘器通过高压电场使粉尘带电吸附至极板，去除大部分粉尘颗粒；布袋除尘器进一步捕集细粉尘，保障粉尘去除效率；低温省煤器回收烟气热量，预热助燃风与锅炉给水，同时降低烟气温度。

酸性洗涤系统采用顺流式湿式洗涤装置，通过急冷段快速冷却烟气，再经酸性洗涤塔去除氯化氢、氟化氢等酸性污染物，循环液 pH 值控制在 0~1 之间；碱性洗涤塔采用熟石灰 / 石膏悬浊液作为吸收剂，与烟气逆流接触，去除二氧化硫、三氧化硫及残余酸性污染物，生成石膏副产品，洗涤液 pH 值维持在 5~6 之间。

三、污泥焚烧工艺优化及污染物控制研究的难题

(一) 污泥特性波动导致的工艺适配难题

污泥成分复杂且波动较大，给焚烧工艺的稳定运行带来严峻挑战。项目接收的脱水污泥干固体含量范围为 23% ~ 35%，挥发性固体含量在 50% ~ 65% 之间，净 calorific 值波动于 1.96~4.20

MJ/kg，这种波动导致焚烧炉热输入不稳定，影响燃烧效率。当污泥干固体含量过低或热值不足时，难以维持自热燃烧，需大量消耗柴油等辅助燃料，增加运行成本；而当干固体含量过高或挥发性固体占比过大时，焚烧炉内温度易超标，需喷水冷却，可能导致炉内结渣与腐蚀风险增加。

(二) 设备腐蚀与磨损的运行难题

污泥焚烧过程中，高温、高湿、高腐蚀性烟气及床料的冲刷，导致设备面临严重的腐蚀与磨损问题。焚烧炉内温度高达 850~900℃，烟气中含有氯化氢、二氧化硫、三氧化硫等酸性气体，在低温区域易形成硫酸雾等腐蚀性介质，对锅炉管束、空气预热器等设备造成严重腐蚀，缩短设备使用寿命。尤其是低温省煤器区域，烟气温度降至 90℃左右，处于露点腐蚀区间，腐蚀风险更为突出。流化床焚烧炉内的石英砂床料在流化状态下，对炉体壁面、风嘴及污泥布料器等设备产生持续冲刷磨损，导致设备密封性能下降，烟气泄漏风险增加^[3]。

(三) 多污染物协同去除的技术难题

污泥焚烧产生的污染物种类繁多，包括粉尘、酸性气体 (HCl、SO₂、HF)、重金属 (Hg、Pb、Cr 等) 及二噁英类等持久性有机污染物，实现多污染物的协同高效去除是当前面临的核心技术难题。粉尘去除方面，虽然采用了静电除尘与布袋除尘的组合工艺，但对于细颗粒物 (PM2.5) 的去除效率仍有待提升，且布袋除尘器滤袋易堵塞，影响系统运行稳定性。酸性气体去除过程中，酸性洗涤与碱性洗涤系统的 pH 值控制难度较大，若 pH 值调节不当，会导致 HCl、SO₂ 等污染物去除不彻底，同时过量的吸收剂消耗会增加运行成本。重金属汞的吸附效率受烟气温度、湿度等因素影响显著，当烟气湿度较高时，脱汞塔内吸附剂孔隙易被液体堵塞，降低吸附效果。

(四) 能量回收与能耗平衡的优化难题

余热回收系统的能量利用效率与整个工艺的能耗平衡，是污泥焚烧工艺优化的重要方向，也是当前面临的主要难题之一。虽然项目配备了五回程锅炉与空气预热器等余热回收设备，但烟气热量损失仍较为显著，尤其是在低负荷运行时，锅炉热效率下降，能量回收效果不佳。蒸汽的分配与利用存在不合理之处，部分蒸汽外供至污水处理厂后，冷凝水未回收，造成能量浪费；而焚烧炉启动阶段，蒸汽需求较大，若依赖垃圾焚烧发电设施供应，会影响系统的独立性与灵活性。

四、基于污泥特性的自适应工艺调控措施

针对污泥特性波动问题，提出基于实时监测的自适应工艺调控方案。在污泥接收仓安装在线监测设备，实时检测污泥干固体含量、挥发性固体含量及热值等关键参数，数据传输至分布式控制系统 (DCS)，建立污泥特性数据库。根据监测结果，自动调节预干化机的蒸汽压力与输送速度，当污泥水分过高时，增加蒸汽供应量、降低输送速度，确保预干化后污泥干固体含量稳定在 40% 左右；当污泥热值较低时，提前增大柴油喷枪的辅助燃料供应量，或提高助燃风预热温度，保障焚烧炉自热燃烧稳定。

优化焚烧炉燃烧控制系统，采用模糊控制算法，根据热输入变化自动调节一次风与二次风的配比、污泥进料量，维持炉内温度在850~900℃的最佳区间。同时，在烟气处理系统设置污染物在线监测设备，根据HCl、SO₂等污染物浓度变化，自动调节酸性洗涤塔盐酸投加量与碱性洗涤塔石灰浆液供应量，确保污染物去除效率稳定。通过实时监测与自适应调控，实现工艺参数与污泥特性的精准匹配，提升工艺稳定性与污染物控制效果^[4]。

（一）设备防腐耐磨的技术升级措施

为解决设备腐蚀与磨损问题，采取多维度的技术升级方案。在设备材质选择方面，锅炉管束、空气预热器等易腐蚀设备采用耐腐蚀合金材料，如316L不锈钢，提高设备抗腐蚀能力；焚烧炉内壁、风嘴等易磨损部位采用耐磨陶瓷涂层或堆焊耐磨合金，增强设备耐磨性。优化设备结构设计，将低温省煤器的烟气温度控制在露点以上，避免硫酸雾凝结；在空气预热器采用两步预热法，提高冷空气入口温度，减少腐蚀风险。加强设备运行维护，定期对焚烧炉、锅炉等设备进行清灰与检查，及时清除积灰与结渣，避免局部腐蚀加剧；为柴油喷枪加装防堵装置，持续通入压缩空气吹扫，防止石英砂堵塞；定期检查布袋除尘器滤袋，及时更换破损滤袋，确保除尘效果。通过材质升级、结构优化与强化维护，有效降低设备腐蚀与磨损风险，延长设备使用寿命，保障系统稳定运行。

（二）多污染物协同去除的工艺优化措施

针对多污染物协同去除难题，对烟气处理工艺进行优化升级。在粉尘去除方面，优化静电除尘器的电场参数，增加电极振荡频率，提高细颗粒物去除效率；在布袋除尘器滤袋表面涂覆PTFE涂层，增强滤袋抗堵性与除尘效果，确保粉尘排放浓度低于50 mg / 标准立方米。酸性气体去除方面，采用分段控制策略，酸性洗涤塔通过自动加药系统精准控制pH值在0~1之间，强化HCl、HF的去除；碱性洗涤塔优化喷淋层设计，增加气液接触面积，同时采用石灰浆液浓度在线监测，确保脱硫效率稳定在

99%以上。

重金属汞控制方面，在烟气再热器后增设脱汞塔，将汞排放浓度控制在20 μg / 标准立方米以下。二噁英控制方面，严格控制焚烧炉温度在850℃以上，延长烟气停留时间至2秒以上，抑制二噁英生成；在布袋除尘器前喷射活性炭，吸附烟气中的二噁英，确保二噁英排放浓度低于0.05纳克 / 标准立方米。通过工艺优化与技术升级，实现多污染物的协同高效去除。

（三）能量回收与能耗优化的改进措施

为提升能量回收效率、实现能耗平衡，采取一系列改进措施。优化余热回收系统，在锅炉尾部增设低温省煤器，进一步回收烟气余热，提高锅炉热效率；改进蒸汽集箱的分配方案，优先保障污泥预干化机等内部设备的蒸汽供应，外供蒸汽根据需求动态调节，同时回收外供蒸汽的冷凝水，用于补给水系统，减少水资源浪费。优化预干化工艺，采用余热蒸汽作为预干化机的加热热源，降低新鲜蒸汽消耗；利用预干化机在干化污泥过程中产生的乏汽，由风机引流经过污泥-乏汽夹套管，对管道中常温污泥进行升温加热，充分利用了乏汽中的残余的能量；根据污泥水分变化，动态调节预干化机的运行参数，提高干化效率。补给水系统采用变频控制技术，根据用水量变化调节水泵转速，降低能耗；优化离子交换树脂的再生工艺，减少盐酸、氢氧化钠等化学品消耗，同时回收再生废水用于反冲洗，提高水资源利用率^[5]。

结束语：文章以实际污泥焚烧工程项目为研究对象，系统分析了污泥焚烧工艺的核心技术的相关内容，深入探讨了工艺优化与污染物控制面临的难题，并提出了针对性的解决措施。通过实施自适应工艺调控、设备防腐耐磨升级等措施，可有效提升污泥焚烧工艺的运行稳定性、能量利用效率与污染物控制效果。未来，污泥焚烧工艺应进一步结合现代科技实现工艺参数的精准预测与优化控制；研发新型耐腐蚀、耐磨材料与高效污染物控制技术，持续降低运行成本与环境影响。

参考文献

- [1] 朱铭铭. 污泥干化焚烧项目中的污染识别及污染控制技术分析 [J]. 建筑科技, 2023, 7(3): 131-135.
- [2] 顾敏燕, 段妮娜, 朱俊. 污泥电厂掺烧烟气二次污染物来源及控制标准分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(1): 186-191.
- [3] 季艳, 李俊成. 市政污泥干化焚烧处理技术探究 [J]. 绿色科技, 2024, 26(12): 149-153.
- [4] 李聪. 生活垃圾焚烧厂污泥干化及协同焚烧的应用及研究 [J]. 能源与节能, 2020(7): 73-76.
- [5] 王驰, 何汇洲, 张先芝, 等. 多种协同处置污泥技术对比分析 [J]. 砖瓦, 2025(2): 39-43.