

城市垃圾发电锅炉技术特性的分析

王 磊

天津滨海新区环汉固废综合处理有限公司 天津 300480

摘要: 城市垃圾发电锅炉技术涵盖炉排炉、流化床炉及回转窑等多种类型。炉排炉结构简单、运行稳定,但维护成本高;流化床炉燃烧效率高、环保性能好,但设备复杂;回转窑适合特种垃圾处理,但能耗大。技术核心在于垃圾预处理、燃烧控制、余热利用及烟气净化。通过优化燃烧工艺、采用高效净化技术,可显著提升发电效率,降低污染物排放,实现垃圾资源化与无害化处理。

关键词: 城市垃圾;发电锅炉;技术特性

引言:随着城市化进程加速,城市垃圾产量与日俱增,传统填埋方式面临土地资源紧张、环境污染等严峻挑战。城市垃圾发电作为资源化、无害化处理的有效途径,其关键设备—垃圾发电锅炉的技术特性备受关注。锅炉的性能直接影响垃圾燃烧效率、发电效益以及污染物排放控制。深入剖析其技术特性,能为提升垃圾发电水平、推动可持续发展提供有力支撑。

1 城市垃圾发电锅炉技术基础

1.1 垃圾焚烧锅炉分类与工作原理

(1) 炉排炉:机械炉排炉通过阶梯式炉排运动,实现垃圾翻搅与推进,保证充分燃烧,适应成分复杂的城市垃圾;滚动炉排炉以滚动炉排片替代传统炉排,减少机械故障,提升燃烧效率,广泛应用于中小型垃圾焚烧项目。(2) 流化床锅炉:循环流化床借助高速气流使床料呈流化态,垃圾与床料充分混合燃烧,热效率高且污染物排放低;鼓泡流化床气流速度较低,床层呈鼓泡状态,适合处理低热值垃圾,设备维护成本相对较低。(3) 回转窑式焚烧炉:通过回转窑体的旋转,使特殊垃圾(如医疗垃圾、危险废物)在窑内均匀受热、彻底焚毁,具备抗冲击负荷强、适应性广的优势,但处理量较小,多用于特种垃圾处理场景。

1.2 技术核心环节

(1) 垃圾预处理:分选去除金属、玻璃等不可燃物,破碎减小垃圾粒径,干燥降低含水率(通常将含水率控制在50%以下),为高效燃烧奠定基础。(2) 燃烧过程控制:合理配比一次风(助燃并冷却炉排)与二次风(强化扰动、减少不完全燃烧),通过温度场监测维持炉膛温度850℃以上,抑制二噁英生成。(3) 余热利用系统:优化锅炉受热面(水冷壁、省煤器等)布置,提升热量吸收效率;合理设定蒸汽参数(温度、压力),最大化转化为电能。(4) 烟气净化技术:采用脱酸(石灰浆喷射)、

除尘(布袋除尘器)、二噁英控制(活性炭吸附+高温分解)等组合工艺,确保烟气达标排放^[1]。

2 城市垃圾发电锅炉关键技术特性分析

2.1 热力性能特性

(1) 燃烧效率:城市垃圾热值波动范围大(1000-2800kJ/kg),对燃烧稳定性影响显著。当热值低于1500kJ/kg时,易出现炉膛温度跌破800℃、燃烧不充分的问题,需投加辅助燃料维持工况;若热值超2200kJ/kg,炉排局部易过热结渣,需调整炉排转速与一次风量。通常情况下,垃圾热值每波动500kJ/kg,燃烧效率波动可达3%-5%,需通过实时监测与动态调整,将效率稳定在85%以上。(2) 热损失分析:排烟热损失占总热损失的40%-60%,主要与排烟温度(通常180-230℃)和过量空气系数相关,排烟温度每升高15℃,热损失增加约0.8%,需优化受热面布置降低排烟温度。不完全燃烧热损失包含化学(CO、CH₄未燃尽)与机械(炉渣未燃碳)损失,前者通过二次风强化扰动控制,后者通过调整垃圾停留时间(1.5-2h)减少,两类损失合计需控制在5%以内^[2]。(3) 蒸汽参数与发电效率:主蒸汽参数直接决定汽轮机做功能力。当前主流参数为4.0-6.5MPa、400-450℃,参数越高发电效率越高。例如,主蒸汽压力从4.0MPa提升至6.5MPa,汽轮机内效率提升4%-5%;温度从400℃升至450℃,发电效率提高2%-3%。但需匹配耐高温高压的受热面材质,避免设备损坏。

2.2 环保性能特性

(1) 污染物排放特征:NO_x生成分为热力型(炉膛温度超1000℃时N₂与O₂反应)与燃料型(垃圾含氮化合物燃烧),低温燃烧可减少热力型NO_x;SO_x源于垃圾中硫化物燃烧,高硫垃圾(硫含量>0.5%)排放量大;颗粒物以飞灰为主(粒径1-10μm),随烟气排出;二噁英在炉膛温度<800℃或烟气降温至200-400℃时易生成,需

严格控制燃烧与降温过程。(2)净化技术效果:SNCR脱硝通过炉膛喷射氨水,在850-1100℃区间还原NO_x,效率40%-60%;SCR脱硝借助催化剂(300-400℃),效率超80%。半干法脱酸用石灰浆中和SO_x,脱酸效率85%-95%;活性炭吸附可去除99%以上的二噁英与重金属,配合布袋除尘器,能将颗粒物排放浓度控制在10mg/m³以下,满足国标要求。(3)残渣处理:炉渣热灼减率需<3%,达标炉渣经磁选除铁后可作建筑骨料;飞灰含重金属与二噁英,需采用水泥固化或螯合稳定化处理,固化后浸出液重金属浓度需符合《危险废物填埋污染控制标准》,确保无二次污染。

2.3 运行适应性特性

(1)垃圾成分适应性:针对高水分(含水率>60%)垃圾,需机械挤压脱水至50%以下,同时提高一次风温度(200-300℃)强化干燥;低热值(<1200kJ/kg)垃圾采用“分段燃烧”,前部投辅助燃料,后部二次风助燃,维持炉膛温度850℃以上。(2)负荷调节能力:电网调峰需锅炉快速变负荷(变化率5%-8%/min),但易导致炉膛温度波动、效率下降。变负荷时需协调调整给料量、风量:负荷从100%降至60%,给料量减少35%-40%,一次风风量降25%-30%,维持过量空气系数1.6-1.8,确保效率不低于80%。(3)长期运行稳定性:受热面腐蚀多因HCl、SO_x在400-600℃与金属反应,需用ND钢、镍基合金等耐腐蚀材质,或提高壁温防控;积灰结渣易发生在水冷壁与对流管束,通过定期蒸汽/声波吹灰、控制炉膛出口烟温(850-950℃),可减少积灰,保障年运行时间超8000h^[3]。

3 城市垃圾发电锅炉不同炉型的技术特性对比

3.1 机械炉排炉

(1)优点:对垃圾预处理要求极低,无需复杂破碎、分选,可直接处理成分混杂的原生城市垃圾,大幅降低预处理成本;炉排采用阶梯式机械传动,能精准控制垃圾在炉膛内的停留时间(通常为1.5-2h),配合稳定的一次风供给,燃烧工况波动小,年运行稳定性可达90%以上,适合连续规模化发电。(2)缺点:炉排片长期处于800-1000℃高温环境,且需承受垃圾摩擦与冲击,平均使用寿命仅3-5年,更换维护成本高;炉膛内垃圾燃烧易出现局部温度不均,低温区域(<800℃)易生成二噁英,需额外投入活性炭吸附与高温分解设备,增加环保处理成本。(3)适用场景:适用于人口密集、垃圾日产量大(>500吨/日)的大型城市垃圾处理厂,如一线城市生活垃圾焚烧发电项目,可通过规模化运行摊薄设备与维护成本,保障发电效益。

3.2 流化床锅炉

(1)优点:采用石英砂等床料,垃圾与床料在高速气流作用下充分混合,燃烧效率可达92%-95%,较机械炉排炉高5%-8%;炉膛温度均匀控制在850-950℃,避免局部高温,热力型NO_x生成量减少30%-40%,原生NO_x排放浓度低,减轻后续脱硝压力;对垃圾粒径要求灵活,可适应不同成分垃圾的燃烧需求。(2)缺点:当垃圾热值低于1500kJ/kg时,需持续添加煤、生物质等辅助燃料维持流化燃烧,辅助燃料成本占比可达运行成本的15%-20%;床料循环依赖旋风分离器、返料器等复杂系统,设备易出现磨损与堵塞,平均每3个月需停机检修,影响连续运行效率。(3)适用场景:适合垃圾热值较低(1000-1800kJ/kg)或含水率较高(>55%)的地区,如南方多雨城市、中小城镇垃圾处理项目,可通过高效燃烧与低NO_x排放特性,平衡垃圾处理与环保要求。

3.3 回转窑式焚烧炉

(1)优点:窑体可360°旋转,垃圾在窑内翻滚燃烧,能彻底焚毁医疗垃圾、工业危废等含毒有害成分的特殊垃圾,焚毁去除率超99.9%;通过调整窑体转速(0.5-2r/min)与燃烧器功率,可灵活控制炉膛温度(600-1200℃),适应不同类型危险废物的焚烧需求,污染物分解更彻底。(2)缺点:窑体加热需消耗大量天然气或重油,单位垃圾处理能耗是机械炉排炉的2-3倍,运行成本高;单台窑处理规模小,通常为50-200吨/日,难以满足大规模城市垃圾处理需求;窑衬耐火材料易受高温腐蚀与机械冲刷,每2-3年需更换,维护周期长。(3)适用场景:主要用于工业危险废弃物协同处置项目,如化工园区危废处理、医疗垃圾专用焚烧线,或作为大型垃圾处理厂的补充设施,处理常规炉型难以焚烧的特殊垃圾^[4]。

4 城市垃圾发电锅炉技术挑战与优化策略

4.1 主要技术挑战

(1)垃圾成分波动导致的燃烧不稳定:城市垃圾含水率、热值随季节与区域变化显著(含水率30%-70%、热值800-2800kJ/kg),易造成炉膛温度骤升骤降,出现熄火或结渣风险,导致燃烧效率波动幅度达10%-15%,影响发电稳定性。(2)低温燃烧下的二噁英再合成风险:烟气降温至200-400℃区间时,未完全分解的二噁英前体物易在飞灰表面重新合成,若焚烧工况波动(如炉膛温度低于850℃),二噁英排放浓度可能超出国标限值(0.1ngTEQ/m³)。(3)高温受热面腐蚀与积灰问题:烟气中HCl、SO_x等酸性气体在高温(400-600℃)下与受热面金属反应,导致管壁腐蚀速率达0.2-0.5mm/年;同

时, 飞灰中碱金属化合物易在受热面沉积结渣, 热阻增加30%-50%, 降低换热效率。(4) 残渣与飞灰的二次污染控制: 炉渣若热灼减率超标 (> 3%), 易滋生细菌并释放有害气体; 飞灰含重金属 (Pb、Cd等) 与二噁英, 若固化处理不彻底, 浸出液可能污染土壤与地下水。

4.2 优化策略

4.2.1 燃烧过程优化

(1) 智能风量控制系统: 基于炉膛温度、烟气O₂浓度实时反馈, 通过PLC控制系统自动调节一次风 (冷却炉排+助燃) 与二次风 (强化扰动) 配比, 当温度波动超50℃时, 风量调整响应时间 < 10s, 维持炉膛温度稳定在850-950℃, 确保燃烧效率稳定在85%以上。(2) 分级燃烧技术: 将炉膛分为低氧燃烧区与高氧燃尽区, 燃烧区供风率控制在70%-80%, 抑制热力型NO_x生成; 燃尽区补充二次风, 保证可燃物完全燃烧, 可使NO_x排放量降低25%-35%, 减少后续脱硝处理压力。

4.2.2 污染物协同控制

(1) 低温脱硝催化剂研发: 开发Mn-Ce复合氧化物基低温SCR催化剂, 适配烟气200-300℃温度区间, 脱硝效率超80%, 避免传统高温催化剂 (300-400℃) 因烟气温度波动导致的失活问题, 提升脱硝系统适应性。(2) 飞灰熔融固化技术: 采用1200-1400℃高温熔融处理飞灰, 使重金属形成稳定的玻璃体结构, 固化率达99%以上, 熔融渣经冷却后可作为建筑骨料资源化利用, 较传统固化工艺大幅降低二次污染风险。

4.2.3 材料与结构改进

(1) 耐腐蚀合金材料应用: 在过热器、省煤器等关键受热面, 采用哈氏合金C-276或镍基合金825, 其抗HCl、SO_x腐蚀性能较普通碳钢提升3-5倍, 将腐蚀速率控制在0.05-0.1mm/年, 延长设备使用寿命至8-10年。(2) 受热面表面涂层技术: 在受热面管壁喷涂Al₂O₃-TiO₂陶瓷

涂层, 厚度50-100 μm, 涂层表面光滑度提升, 减少飞灰附着, 积灰清除率提升60%以上, 换热效率可恢复至设计值的95%, 降低因积灰导致的能耗损失。

4.2.4 数字化与智能化升级

(1) 基于数字孪生的燃烧仿真: 构建锅炉三维数字模型, 导入垃圾成分、风量、温度等实时数据, 仿真模拟不同工况下的燃烧过程, 提前预判结渣、熄火风险, 优化炉排转速、给料量等参数, 减少实际运行中的试错成本。(2) 机器学习预测模型: 基于历史垃圾成分、燃烧数据训练机器学习模型, 垃圾热值预测误差 < 5%, 可提前1-2小时调整燃烧策略; 同时构建设备故障预警模型, 对受热面腐蚀、风机故障等问题识别准确率超90%, 实现主动运维, 减少非计划停机时间。

结束语

城市垃圾发电锅炉技术特性研究意义重大。通过对其分类、核心环节、关键特性及不同炉型的剖析, 我们明确了各类锅炉的优劣与适用场景。面对技术挑战, 所提出的优化策略为提升锅炉性能、降低污染提供了方向。未来, 随着材料科学、智能控制等领域的进步, 城市垃圾发电锅炉将更高效、环保。持续探索创新, 能让其更好地服务于城市垃圾处理与能源利用, 推动可持续发展。

参考文献

- [1] 沈家远. 浅谈垃圾发电厂垃圾焚烧锅炉改造经济分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2020, (03): 37-38.
- [2] 翟志君. 城市生活垃圾焚烧发电厂锅炉安装技术探讨[J]. 城市周刊, 2021, (14): 61-62.
- [3] 胡钢. 大型生活垃圾焚烧发电锅炉稳定燃烧的策略浅析[J]. 科学与信息化, 2021, (07): 69-70.
- [4] 罗栋. 生活垃圾焚烧发电机组燃烧器控制方式的改进[J]. 科技与创新, 2020, (19): 130-131.