垃圾焚烧炉燃烧稳定性控制与热效率改善技术应用

刘 俊

（缙云深能环保有限公司，浙江 丽水 321400）

摘 要 在垃圾焚烧炉运行过程中，入炉垃圾成分波动、热值变化以及燃烧状态滞后响应等因素容易引起炉膛温度偏移、蒸汽参数波动和热能利用不足等问题。本文结合自动燃烧控制（Automatic Combustion Control，ACC）系统、智能监测、炉排调节及空气精准控制等技术手段，分析燃烧稳定性控制方法，并探讨余热锅炉换热优化、热损失降低、烟气余热梯级利用等热效率改善路径。结果表明，依托多参数协同调节与数字化运行管理，可增强焚烧过程稳定性，强化能源转化效率，为垃圾焚烧机组高效、安全运行提供技术支撑。

关键词 垃圾焚烧炉；燃烧稳定性；自动燃烧控制；ACC系统；热效率

中图分类号：X705 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.024

0 引言

生活垃圾产生量持续增长，焚烧发电已成为城市固体废弃物减量化、无害化和资源化处理的重要方式。与传统燃煤锅炉相比，垃圾焚烧炉面对的燃料条件更加复杂，垃圾含水率、组分比例及低位热值随季节和区域变化明显，致使炉内燃烧过程具有较强的不确定性。在实际运行中，炉温控制、风量匹配、炉排推进速度以及余热回收效率之间存在紧密关联，单一参数调整难以适应复杂工况变化。随着智能控制技术的发展，垃圾焚烧机组逐渐采用自动燃烧控制、在线监测和数据分析等方式优化运行状态，为稳定燃烧和高效发电提供了新的技术路径。

1 垃圾焚烧炉燃烧稳定性的影响因素分析

生活垃圾属于成分复杂的非均质燃料，其含水率、低位热值及可燃组分比例变化会直接影响炉内着火、热释放和燃烧周期。厨余、有机物比例较高时，水分蒸发会消耗部分热量，致使燃烧响应变慢；塑料、纸类等高热值组分增加时，则容易造成炉膛热负荷升高[1]。垃圾进入炉排后需经历干燥、热解、氧化燃烧和燃烬等阶段，各阶段的温度条件、供氧水平及停留时间相互关联，任一环节偏离合理范围，均可能引起炉温波动、炉渣热灼减率升高等问题。机械炉排炉作为目前大型垃圾焚烧项目常用炉型，其运行稳定性受到给料速度、料层厚度、炉排行程以及一次风、二次风分配等因素共同影响。

2 垃圾焚烧炉燃烧稳定性控制关键技术

2.1 基于ACC系统的自动燃烧控制技术

自动燃烧控制（ACC）系统结合炉膛温度、主蒸汽流量、烟气氧量、一氧化碳浓度等运行参数，对给料、炉排和送风过程进行协同调节，使燃烧控制由人工经验调整转向自动反馈优化，系统通常依托分散控制系统（DCS）采集现场数据，根据垃圾热值变化和负荷需求修正控制参数，维持炉温与蒸汽负荷稳定。垃圾热值波动会改变炉内热释放过程，ACC系统可结合历史运行数据和实时工况判断燃烧负荷变化，并调整给料速度、炉排运行节奏及空气供应量，部分系统引入预测控制算法，根据炉温、蒸汽流量变化趋势提前修正控制指令，减少燃烧滞后现象，炉膛温度控制一般需满足850 ℃以上烟气停留要求，保证有机物充分分解，降低不完全燃烧风险。

2.2 智能监测与数据驱动控制技术

智能监测技术依托温度测点、烟气在线分析系统和火焰检测装置，对炉内燃烧状态进行连续监控，炉膛温度、氧含量、CO浓度及蒸汽参数等数据经过融合分析后，可判断燃烧完全程度，并辅助调整风量和炉排运行状态，不同监测参数对应不同控制目标，具体关系如表1所示。

烟气氧量控制通常结合过量空气系数进行分析：

$$\lambda=\frac{O_2+0.5CO}{21-O_2} \quad (1)$$

作者简介：刘俊（1999-），男，本科，助理工程师，研究方向：垃圾焚烧发电。

表 1 垃圾焚烧炉关键运行监测参数及控制作用

监测参数	典型检测对象	参数变化反映内容	控制调节方向
炉膛温度	炉膛高温区域	判断燃烧强度及热负荷分布	调整给料量、炉排速度和风量
烟气氧含量（O_2）	炉膛出口烟气	反映空气供应与燃烧完全程度	优化一次风、二次风比例
一氧化碳（CO）浓度	烟气在线分析系统	判断局部缺氧或燃烧不充分	增加混合风量，改善燃烧条件
主蒸汽流量	余热锅炉出口	反映垃圾热输入变化	调整燃料输入及燃烧负荷

式（1）中，λ 表示过量空气系数，合理控制该参数有助于兼顾燃烧完全性与排烟热损失，结合历史运行数据建立燃烧预测模型，可提前识别热值变化和负荷波动趋势，为自动控制提供数据支撑[2]。

2.3 炉排运行参数优化技术

机械炉排炉中，炉排速度、料层厚度和翻动频率直接影响垃圾停留时间与燃烬程度，炉排速度过快会缩短高温反应时间，增加未燃物排出风险；速度过慢则可能造成局部热负荷集中，引起结渣问题。炉排优化通常结合炉膛温度、蒸汽负荷及料层状态进行调节，料层厚度影响一次风穿透效果，合适的料层高度有利于保持稳定燃烧区域，部分大型焚烧炉采用分段炉排控制方式，将干燥区、燃烧区和燃烬区分别调节，使垃圾完成水分蒸发、挥发分析出和残余碳燃烧等过程。

2.4 燃烧空气精准控制技术

空气供应直接影响垃圾干燥、挥发分氧化和燃烬过程，一次风主要作用于炉排上垃圾层，为初始燃烧提供氧气，并影响料层内部热量传递；二次风用于强化炉膛上部烟气混合，促进可燃气体进一步氧化。精准送风控制通常结合炉温、氧量和 CO 浓度变化，对一次风、二次风比例进行动态调整，一次风量不足容易造成料层缺氧，过量供风则会增加烟气量和排烟热损失；二次风喷口布置及风速优化能够改善炉内气流组织，减少局部缺氧区域，依托 ACC 系统与空气控制技术融合，可形成燃料输入、炉排运动和供氧调节的协同控制模式，使焚烧炉适应不同垃圾热值和负荷变化，为后续余热利用和热效率优化提供稳定运行条件。

3 垃圾焚烧炉热效率改善技术应用

3.1 优化余热锅炉换热性能

余热锅炉承担垃圾焚烧热能回收任务，其换热效率直接影响蒸汽产量和发电水平，高温烟气进入锅炉后，依次经过辐射受热面、对流受热面及省煤器完成热量传递，生成过热蒸汽供汽轮机发电，由于垃圾焚烧烟气含有飞灰、酸性气体及碱金属盐类物质，长期运行容易造成受热面积灰和腐蚀，增加换热热阻，降低传热能力[3]。锅炉运行优化通常结合受热面结构调整、吹灰系统维护以及材料防护措施展开，采用蒸汽吹灰、水力清灰等方式清除管壁积灰，可保持换热表面洁净状态；针对高温腐蚀区域，选用耐腐蚀材料并优化烟气温度控制，有助于延长设备运行周期，余热锅炉热效率可依据输入热量与有效吸热量进行评价：

$$\eta=\frac{Q_{steam}}{Q_{fuel}}\times 100\% \tag{2}$$

式（2）中，η 为锅炉热效率，Q_{steam} 为蒸汽吸收热量，Q_{fuel} 为垃圾燃烧释放热量，运行过程中需结合蒸汽参数、烟气温度及设备安全要求，优化换热过程。

3.2 降低燃烧过程热损失

垃圾焚烧过程中的热损失主要包括不完全燃烧损失、排烟损失、炉渣带热损失和设备散热损失，其中不完全燃烧与炉内供氧条件、垃圾停留时间以及燃烧混合程度密切相关，依托 ACC 系统对炉温、氧量和 CO 浓度进行联动调节，可改善燃料燃烬状态，减少可燃物随飞灰和炉渣排出的情况。排烟温度直接影响余热回收水平，烟气出口温度过高会造成热量浪费，温度过低则可能引起低温腐蚀风险，运行中通常结合受热面状态和烟气特性控制排烟参数。炉排末端燃烬区域优化也有助于降低物理热损失，调整炉排速度和燃烧停留时间使残余可燃物进一步氧化，设备保温性能同样影响热效率，加强炉墙、烟道及锅炉外壳密封维护，可减少散热损失，使燃料释放的热量更多用于蒸汽生成和能源转换。

3.3 实施烟气余热梯级利用

垃圾焚烧烟气经过余热锅炉后仍具有一定热能，单一发电模式难以充分利用全部热量，依托烟气温度等级差异开展梯级利用，可将高温热量用于蒸汽生产，中低温余热用于供热、垃圾预热及污泥干化等环节[4]。垃圾预热是改善燃烧条件的重要方式，部分项目利用低温烟气余热降低入炉垃圾含水率，减少炉膛内水分蒸发造成的热量消耗，使燃烧过程保持稳定，厂区供热模式则可结合周边用能需求，将发电后的低品位热能继续开发，提高单位垃圾处理量对应的能源产出，烟气余热利用需要兼顾经济性和设备安全性，低温烟气中含有酸性组分，换热设备设计需避开酸露点腐蚀区

域，并结合防腐材料和温度控制措施保证长期运行。

3.4 结合数字化平台开展运行优化

数字化平台能够整合燃烧、锅炉、汽轮机及环保系统运行数据，为热效率分析提供数据基础，平台持续采集炉膛温度、一次风量、二次风量、蒸汽流量、排烟温度等关键参数，结合历史运行曲线分析能耗变化规律，辅助优化运行参数。数字孪生和数据分析技术的发展，使垃圾焚烧机组具备状态预测能力，依托设备运行数据建立模型，可分析不同垃圾热值、负荷变化及控制参数组合下的运行状态，为燃烧调整和设备维护提供参考，结合故障趋势分析，对炉排、风机、受热面等关键设备开展预测维护，可减少性能衰减对热能利用效率的影响。数字化管理与自动控制系统融合后，能够形成数据采集、状态分析和参数优化相结合的运行模式，强化垃圾焚烧机组能源利用水平和长期运行稳定性。

4 案例分析

4.1 案例概况

某生活垃圾焚烧发电项目采用往复式机械炉排炉，设计处理能力500 t/d,配套余热锅炉额定蒸汽量48 t/h，额定压力6.4 MPa、温度450 ℃，设计热效率不低于83%，垃圾低位热值适用范围为5 443 kJ/kg～9 211 kJ/kg，炉排面积87.49 m^2，平均停留时间约90 min，主要运行参数见表2。

表2 某垃圾焚烧项目运行优化主要参数

项目参数	数据
炉型	往复式机械炉排炉
垃圾处理能力	500 t/d
年运行时间	≥8 000 h
余热锅炉额定蒸汽量	48 t/h
主蒸汽压力	6.4 MPa
主蒸汽温度	450 ℃
设计锅炉热效率	≥83%
垃圾低位热值范围	5 443 kJ/kg～9 211 kJ/kg
炉排面积	87.49 m^2
垃圾平均停留时间	约90 min

针对热值波动，项目将自动燃烧控制（ACC）系统用于给料炉排、燃烧炉排及风量协同调节，依据目标蒸发量、料层厚度和炉膛参数修正给料速度、炉排动作与一次风分配，该控制方式使燃料输入、空气供应和燃烧进程保持匹配，增强复杂垃圾组分条件下的负荷适应能力。

4.2 技术应用效果分析

该项目采用ACC系统后，燃烧控制由单参数调整转向多参数协同控制，炉膛温度、氧量、蒸汽负荷及炉排状态等数据形成联动反馈，使燃烧过程能够根据垃圾性质变化及时调整，减少人工经验调节造成的滞后影响[5]。从热能利用角度看，稳定的燃烧状态有助于维持余热锅炉受热面换热条件，项目余热锅炉排烟温度控制在180 ℃～210 ℃范围，稳定的烟气热量输入能够保证蒸汽参数连续输出，强化垃圾焚烧能源转化能力，炉排优化后，垃圾平均停留时间约90 min，燃烧过程覆盖干燥、氧化和燃烬阶段，有助于降低未燃物随炉渣排出的风险。该案例表明，垃圾焚烧炉运行优化需要结合自动控制、炉排调节、空气分配和数据分析等多项技术，依托ACC系统对燃烧过程进行精细化管理，可增强机组负荷适应能力，强化复杂燃料条件下的运行稳定性，为同类型垃圾焚烧发电项目技术改造提供参考。

5 结束语

垃圾焚烧炉运行水平的提升依赖于燃烧控制精度与能源利用效率的协同优化，面对垃圾成分波动、热值变化以及设备长期运行带来的影响，单一参数调节模式已难以满足高效运行需求，智能控制、精准调节和系统优化逐渐成为机组稳定运行的重要支撑。依托自动控制与数字化管理手段，焚烧过程能够保持更加稳定的热量释放状态，余热资源得到充分利用，设备运行经济性进一步强化。未来，垃圾焚烧技术将向精细化、智能化方向发展，在符合环保要求的基础上兼顾能源回收效率与设备可靠性，推动垃圾处理由末端处置向资源循环利用转变。

参考文献：

[1] 钱国栋,王亚飞,张剑波,等.垃圾焚烧炉内CO浓度等级在线监测视频识别算法研究[J].环境卫生工程,2026,34(03):53-61,69.

[2] 孟德润,张宏博,张晴,等.垃圾焚烧炉数值模拟及燃烧优化研究[J].环境工程,2025,43(06):197-203.

[3] 陈世旺,邓奠忠,龚凌诸,等.垃圾燃料特性对焚烧炉运行的影响研究[J].当代化工研究,2025(08):98-100.

[4] 容毅浜,刘效洲,刘杰成,等.垃圾焚烧炉稳态运行燃烧参数的优化研究与应用[J].热能动力工程,2025,40(02):94-99.

[5] 崔觉珂.垃圾焚烧发电厂燃烧控制及环保排放探究[J].皮革制作与环保科技,2024,05(22):158-159,162.