

生活垃圾焚烧发电项目调试关键技术与排放控制

何云静

宁夏建设职业技术学院, 宁夏 银川 750021

DOI: 10.61369/TACS.2025130041

摘 要 : 生活垃圾焚烧发电技术因其减量化、资源化、无害化优势已成为主流处理方式。为提升垃圾焚烧发电项目调试质量与运行效率, 本文围绕“燃烧稳定—效率提升—排放控制”主线, 系统梳理焚烧炉热态启动与耐火材料养护等调试前提, 重点研究一次/二次风组织优化、低温燃烧快速跨越及自动燃烧控制(ACC)联动策略。提出一种以炉膛温度阈值与时间判据为核心的辅助燃烧器联动方案, 并与一次风预热、配风精细化整定相结合, 形成可工程落地的低温燃烧控制路径。以某 750 t/d 垃圾焚烧发电项目为验证对象, 对调试初期与优化后关键性能指标及主要污染物排放进行对比。结果表明: 调试优化后锅炉热效率由 78.2% 提升至 81.5%, 吨垃圾发电量由 330 kWh/t 提升至 375 kWh/t, 热灼减率由 5.2% 降至 2.8%; 烟气颗粒物、NO_x、SO₂、HCl、CO 与二噁英浓度均显著下降并稳定低于国标限值。研究成果可为垃圾焚烧发电项目调试工艺的标准化与智能化提供实践参考。

关 键 词 : 生活垃圾焚烧; 调试技术; 低温燃烧控制; 配风优化; ACC 系统; 排放控制

Research on Key Commissioning Technologies and Emission Control for Municipal Solid Waste Incineration Power Generation Projects

He Yunjing

Ningxia College of Construction, Yinchuan, Ningxia 750021

Abstract : Municipal solid waste incineration (MSWI) power generation has become a mainstream treatment option due to its advantages in waste reduction, resource recovery, and harmless disposal. To improve commissioning quality and operational efficiency of MSWI power plants, this study follows the main line of "combustion stabilization - efficiency enhancement - emission control". Key commissioning prerequisites, including hot start-up procedures and refractory curing, are systematically summarized. The study focuses on optimizing primary/secondary air distribution, rapidly passing through low-temperature combustion stages, and coordinating the auto combustion control (ACC) strategy. An auxiliary burner linkage scheme is proposed based on furnace temperature thresholds and time criteria, and is integrated with primary-air preheating and refined air-distribution tuning to form an engineering-implementable pathway for low-temperature combustion control. A 750 t/d MSWI power generation project is used for validation by comparing key performance indicators and major pollutant emissions before and after commissioning optimization. Results show that boiler thermal efficiency increased from 78.2% to 81.5%, electricity generation per ton of waste rose from 330 kWh/t to 375 kWh/t, and loss on ignition decreased from 5.2% to 2.8%. Concentrations of particulate matter, NO_x, SO₂, HCl, CO, and dioxins decreased significantly and remained stably below the national emission limits. These findings provide practical references for standardization and intelligent upgrading of commissioning processes in MSWI power projects.

Keywords : municipal solid waste incineration; commissioning technology; low-temperature combustion control; air distribution optimization; acc system; emission control

引言

生活垃圾焚烧发电(MSWI)是我国城市固废处置体系的重要组成,其工程运行水平直接关系到能量回收效率、设备可靠性与公众关注的排放风险^[5]。相比稳定燃料,生活垃圾具有热值波动大、含水率变化强、可燃组分不均等特征,导致燃烧与锅炉受热、烟气净化呈强耦合关系。工程实践表明,项目能否实现长期稳定、经济且达标运行,很大程度取决于调试阶段对以下关键问题的解决:

(1) 耐火材料养护(烘炉)不足引发开裂脱落,造成炉膛密封与温度场失稳^[6];

- (2) 一次 / 二次风组织不合理导致燃烧不连续、CO 升高、锅炉效率下降^[3]；
- (3) 冷态启动与负荷爬坡期间低温燃烧持续时间长，增加二噁英生成风险^{[2][4]}；
- (4) 烟气净化系统投加与压降控制不匹配导致排放波动。

为此，本文提出面向工程调试的技术路线：以热态启动与材料养护为前提，以配风组织与 ACC 控制为核心，以性能与排放数据对比为验证，形成可复用的调试策略与评价框架^{[6][8]}。

一、工程对象与研究方法

(一) 工程对象与系统边界

研究对象为某 750t/d 生活垃圾焚烧发电项目（炉排炉 + 余热锅炉 + 烟气净化系统），研究边界涵盖：焚烧系统热态启动、一次 / 二次风组织、低温燃烧抑制及 ACC 联动控制、烟气净化系统调试与排放稳定性评价^[3-9]。

(二) 技术路线与关键措施

- (1) 热态启动与养护：按温升分段控制进行烘炉，避免耐火材料因水分滞留产生开裂脱落风险^{[5][9]}；
- (2) 配风优化：建立一次风“穿透—分配—稳定火床”的控制思路，二次风强化后燃区混合与燃尽^{[3][6]}；
- (3) 低温燃烧快速跨越：通过辅助燃烧器、一次风预热与 ACC 逻辑协同，减少低温段停留^{[3][4][6][8]}；
- (4) 排放控制联动：烟气净化系统按“单元—联动—一边界工况—稳定运行”顺序整定，提高连续达标能力。

(三) 评价指标体系

为评价调试优化对项目运行水平的影响，本文从“效率—稳定—燃尽—排放”四个维度构建指标体系：

- (1) 效率指标：锅炉热效率、发电效率、吨垃圾发电量、厂用电率，用于反映能量转换水平与系统自耗。
- (2) 稳定性指标：垃圾低位热值稳定性（波动 / 趋稳）及关键过程参数（炉膛温度、含氧量、CO 等）的波动幅度与异常次数，用于表征工况扰动与运行稳定程度。
- (3) 燃尽指标：以热灼减率（LOI）为核心（可辅以炉渣 / 飞灰未燃尽或燃尽率），用于评价燃烧完全性与未燃尽损失。
- (4) 排放指标：颗粒物、NO_x、SO₂、HCl、CO 与二噁英浓度，按 GB 18485—2014 限值对标判定，必要时补充地方标准或欧盟限值对比^{[1][5]}。

二、调试关键技术与控制策略

(一) 热态启动与耐火材料养护要点

耐火材料在未充分养护条件下投入运行易发生开裂、变形甚至脱落，导致炉膛漏风与温度场恶化，进而影响燃烧稳定与排放^{[5][9]}。工程上应采用分阶段温升与保温策略：常温至 150℃排分离水、再升至 350℃排结晶水，随后分段升至 550℃、850℃并进入整套启动准备；全程严格执行材料厂家曲线，避免“赶火”。

(二) 一次 / 二次风组织优化

一次风承担料层干燥与火床稳定的基础作用^{[3][6]}。冷态初投垃圾时应强调一次风的“穿透能力与分配精细化”，避免仅以风机变频调节造成“高压大流量”冷却火床、引起燃烧不连续^{[3][6]}。二次风以强化后燃区湍流混合为目标，应与炉膛含氧与 CO 水平联动整定，使可燃气体充分燃尽、降低不完全燃烧产物并提高热效率^{[3][6]}。

(三) 低温燃烧控制与 ACC 联动方案

低温燃烧阶段是污染控制与稳定运行的关键窗口^{[1][9]}。本文采用“辅助燃烧器联动 + 一次风预热 + ACC 温控逻辑”组合^{[3][4][6][8]}：

辅助燃烧器联动：当炉膛温度瞬时低于 855℃或连续 10 min 低于 865℃时自动启动辅助燃烧器；当炉膛温度连续 10 min 高于 880℃时自动停止。该策略引入时间判据与滞回，避免频繁启停并缩短低温段停留时间。

一次风预热：点火前或低负荷工况提升一次风温度，增强料层干燥与着火连续性，为稳定燃烧与排放控制提供基础^{[3][9]}。

ACC 分步投用：先稳定测量信号与执行机构，再依次投用炉温、O₂与蒸汽流量等闭环，最终以热灼减率最小化作为综合目标进行参数固化^{[3][4][6][8]}。

三、数据来源与统计口径

(一) 数据来源

- (1) 性能数据：来自项目调试阶段运行记录与性能统计，包括锅炉热效率、发电效率、厂用电率、吨垃圾发电量、热灼减率（LOI）等。
- (2) 排放数据：来自调试期与稳定运行期的在线监测 / 检测统计值，包括颗粒物、NO_x、SO₂、HCl、CO 与二噁英等^{[1][5]}。
- (3) 热值数据：来自垃圾低位热值统计与运行记录，用于表征燃料侧扰动及稳定性变化。

(二) 统计口径

为保证排放评价的可比性与可复现性，本文以《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485—2014）为主要对标依据，并参考欧盟《废物焚烧指令》（WID）进行补充对比^{[1][2]}。具体如下：

- (1) 统计窗口：调试前采用连续 72h 均值，调试后采用连续 168h 均值，稳定运行后采用月度均值，分别表征未固化、优化后与长期运行阶段的排放水平与稳定性。
- (2) 对标方法：按 GB 18485—2014 限值逐项判定达标；在

满足国标基础上，参考 WID 限值对主要污染物进行对比评价^{[1][2]}。

（3）折算与处理：排放浓度按标准要求进行折算，折算所需含氧量数据取自 CEMS；当不同统计窗口存在负荷或热值差异时，采用“多窗口对比+稳定期验证”降低偶然工况影响。

（4）异常数据处置：对启停炉、设备故障、校准维护等非正常工况数据进行标识，并按现场管理要求剔除或单列说明；对突变数据进行一致性校核，必要时与手工/实验室检测结果交叉核校。

四、结果与讨论

（一）调试前后关键性能指标对比

为验证调试优化措施对系统运行性能的影响，对调试初期与调试优化后关键性能指标进行对比分析，结果见表1。总体而言，调试优化后锅炉热效率与发电效率明显回升，厂用电率显著下降，热灼减率（LOI）满足控制要求，吨垃圾发电量接近设计值，表明调试方案在提升燃烧稳定性、强化能量转换与改善运行经济性方面具有综合效果。

表一 调试前后关键性能指标对比

性能指标	设计值	调试初期值	调试优化后值	改善幅度	达标情况
垃圾低位热值 (kJ/kg)	6500	5800 (波动大)	6700 (趋稳)	+15.5%	优于设计
锅炉热效率 (%)	82.0	78.2	81.5	+4.2 个百分点	达到设计
发电效率 (%)	24.0	21.0	23.8	+13.3%	达到设计
厂用电率 (%)	18.0	22.5	17.4	-22.7%	优于设计
热灼减率 (%)	≤ 3.0	5.2	2.8	-46.2%	达标
吨垃圾发电量 (kWh/t)	380	330	375	+13.6%	达到设计

由表1可见，调试优化后锅炉热效率与发电效率分别提升至81.5%和23.8%，吨垃圾发电量提高至375 kWh/t，表明机组能量转换水平明显恢复；厂用电率降至17.4%，热灼减率降至2.8%并达标，说明系统自耗降低且燃尽水平得到改善。总体上，关键指标达到或优于设计目标。

（二）主要污染物排放调试前后对比

表2给出了调试前（72h 均值）、调试后（168h 均值）及稳定运行后（月度均值）的排放对比。调试优化后各项污染物均显著下降且长期稳定低于国标限值，体现出燃烧控制与烟气净化联动调试的有效性。

表二 主要污染物排放调试前后对比（年均值/统计口径见表注）

污染物	国标限值	调试前 (72h 均值)	调试后 (168h 均值)	稳定运行后 (月度均值)
颗粒物 (mg/m ³)	30	22.5	7.8	5.2
NOx (mg/m ³)	300	175	88	74

污染物	国标限值	调试前 (72h 均值)	调试后 (168h 均值)	稳定运行后 (月度均值)
SO ₂ (mg/m ³)	100	65	32	28
HCl (mg/m ³)	60	38	7.5	6.0
CO (mg/m ³)	100	55	28	20
二噁英 (ng TEQ/m ³)	0.1	0.075	0.028	0.018

表注：调试前统计窗口为连续72h 均值；调试后为连续168h 均值；稳定运行后为月度均值

由表2可见，调试优化后主要污染物排放水平显著下降，并在稳定运行期进一步降低，整体均远低于 GB 18485—2014 限值^[1]。例如颗粒物由22.5 mg/m³ 降至7.8 mg/m³（稳定期5.2 mg/m³），SO₂与HCl 分别由65、38 mg/m³ 降至32、7.5 mg/m³（稳定期28、6.0 mg/m³），NOx 由175 mg/m³ 降至88 mg/m³（稳定期74 mg/m³），CO 由55 mg/m³ 降至28 mg/m³（稳定期20 mg/m³）。二噁英由0.075 ng TEQ/m³ 降至0.028 ng TEQ/m³，稳定期进一步降至0.018 ng TEQ/m³。结果表明，燃烧控制与烟气净化系统联动调试有效提升了排放控制水平，并具备连续稳定达标能力。

（三）协同机理分析

综合表1与表2结果可见，调试优化带来的效率提升与排放降低呈现显著协同性，其机理可概括为“源头稳定—过程跨越—末端固化”的闭环路径：一方面，通过一次风穿透与分配精细化、二次风强化混合与燃尽，料层干燥与火床稳定性增强，燃烧由间歇向连续均匀转变，未燃尽损失与CO 水平下降，从而为锅炉受热面稳定换热与蒸汽参数维持提供更平稳的热输入，支撑锅炉热效率与发电效率回升；另一方面，通过辅助燃烧器联动、一次风预热及 ACC 温控策略缩短低温燃烧持续时间并抑制炉温跌落，降低二噁英生成窗口暴露并削弱燃料波动向系统放大的链式效应，使入口烟气边界条件更加稳定；在此基础上，烟气净化系统可实现投加量、清灰与运行压差的参数窗口固化，颗粒物与酸性气体等污染物浓度进一步降低并长期稳定，同时风机与引风系统运行点更匹配、无效能耗减少，从而体现为厂用电率下降与排放持续低位运行^{[3][4][6][9][11][5]}。

五、图件

为直观展示调试优化前后燃烧工况与排放水平的变化，设置图1、图2进行对比分析。

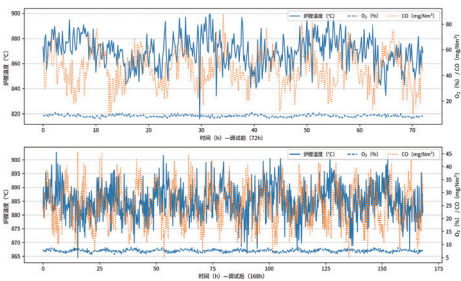


图1 调试前后炉膛温度、O₂与CO 的趋势对比

图注：①统计窗口（72h/168h）；②采样间隔5 min

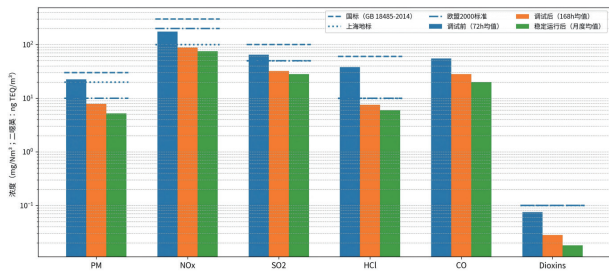


图2 三阶段主要污染物排放对比

图注: ①三阶段对应调试前72h均值、调试后168h均值、稳定期月度均值; ②对数坐标; ③单位 mg/m³、ng TEQ/m³

六、局限性与不确定性

(1) 本文结论基于单项目(750 t/d)工程调试与运行数据验证,垃圾成分、热值分布、季节性波动与设备配置差异可能影响参数窗口的普适性,后续需在不同规模与不同工艺路线项目中开展对比验证。

(2) 数据采用不同统计窗口(72h/168h/月度均值),能体现调试阶段到稳定期的趋势,但仍可能受到垃圾热值与负荷分布差异影响;建议后续引入更长周期的同口径对比与不确定性

分析。

(3) 本文聚焦工程可落地的调试与控制策略,对ACC控制参数整定过程尚未给出完整控制理论建模与最优性证明,后续可结合数据驱动或模型预测控制方法进一步提升鲁棒性与自适应能力^{[3][4][6][8]}。

七、结论

(1) 调试优化显著提升了系统综合性能:锅炉热效率由78.2%提升至81.5%,发电效率由21.0%提升至23.8%,吨垃圾发电量由330kWh/t提升至375 kWh/t,厂用电率由22.5%降至17.4%,热灼减率由5.2%降至2.8%并达标。

(2) 主要污染物排放在调试后显著下降且稳定运行期进一步降低:颗粒物、NO_x、SO₂、HCl、CO与二噁英均稳定低于国标限值,表明燃烧控制与烟气净化联动调试具备长期达标能力^{[1][5]}。

(3) “配风精细化+低温燃烧快速跨越+ACC联动控制”可形成可复制的调试技术路线,通过缩短低温燃烧时间、稳定炉膛温度场与提高燃尽水平,实现效率提升与排放降低的协同优化^{[3][4][6][8]}。

参考文献

- [1] 生态环境部,国家质量监督检验检疫总局.生活垃圾焚烧污染控制标准:GB 18485-2014[S].北京:中国环境出版社,2014.
- [2] European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2000/76/EC on the incineration of waste[S]. Official Journal of the European Communities, 2000, L 332: 91-111.
- [3] 孙晓军,肖正,王志强.生活垃圾焚烧厂自动燃烧控制系统的原理与应用[J].环境卫生工程,2009,17(4):20-23.
- [4] 刘鑫.垃圾焚烧发电厂自动燃烧控制系统的研究与开发[J].环境卫生工程,2018,26(4):64-66.
- [5] 谢星宇.简析城市生活垃圾焚烧发电技术及装备[J].山东工业技术,2018(23):6-7.
- [6] 曾卫东,田爽,袁亚辉,常威武.垃圾焚烧炉自动燃烧控制系统设计与实现[J].热力发电,2019,48(3):109-113.
- [7] 严浩文,张蓓,王志强,龙吉生,金兴乾,郭欣维.生活垃圾焚烧发电项目烟气再循环技术工程实践与分析[J].环境卫生工程,2025,33(1):98-102.
- [8] 张健.ACC技术在垃圾焚烧发电项目的应用分析[J].华东电力,2014,39(8):1664-1667.
- [9] 黄旌.炉排式垃圾焚烧炉运行中的两个问题分析及措施[J].科技创新导报,2017,14(9):82-83.
- [10] 吴斯鹏,张会妍,王涛.垃圾焚烧发电厂垃圾料层厚度控制探讨[J].环境卫生工程,2020,28(1):40-42.