

生态环境

基于“大数据 + 机器学习 + 工艺机理模型” 方法的智能燃烧控制技术

姚心, 郭天宇, 骆嘉辉, 刘兵
(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 针对我国生活垃圾处理设施垃圾焚烧炉排炉系统智能控制应用难题,本文提出了一种基于“大数据 + 机器学习 + 工艺机理模型”的垃圾焚烧智慧控制技术解决方案,通过融合工业大数据、工艺机理模型与机器学习算法,针对垃圾焚烧核心设施焚烧炉,形成智能燃烧控制技术与系统,实现精准高效的智能化控制。介绍了智能燃烧控制系统的功能和控制回路,并将智能燃烧控制系统应用于某垃圾焚烧厂 400 t/d 垃圾炉排炉中。生产实践证明,系统上线后无需人工干预的投用率可达 96.53%,氧含量由 6.8% 降到 5.6%,炉温由 911.9 °C 上升至 977.4 °C,主蒸汽流量由 28.1 t/h 提高至 32.8 t/h。与人工控制相比,系统投用后的主要控制指标运行数据标准差可降低 10% 以上,显著提升了炉排炉运行稳定性。智能燃烧控制系统不仅可使运行指标满足环保与安全生产要求,还可实现各主要参数的稳定控制。本技术解决方案可为垃圾处理行业可持续发展提供有力技术支持与保障。

[关键词] 垃圾焚烧; 大数据; 机器学习; 智能燃烧控制

[中图分类号] X799.3

[文献标志码] B

[文章编号] 2097-2423(2025)01-0082-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.01.014

0 引言

随着城市规模的迅速扩张以及社会环保意识的不断增强,如何高效、无害地处理城镇生活垃圾已成为社会关注的重要话题。垃圾焚烧处理作为一种环保、资源可循环利用且减容效果显著的垃圾处理方式,对其进行技术革新及数智化产业升级已成为垃圾处理行业的重中之重^[1]。在国内垃圾焚烧领域,燃烧自动控制系统应用普遍不足,自动化水平较低,

这制约了垃圾焚烧处理效率与质量的提升。针对这一现状,本文提出了一种基于“大数据 + 机器学习 + 工艺机理模型”的垃圾焚烧智慧控制技术解决方案,旨在提升现有垃圾焚烧发电厂的智能化水平。针对垃圾焚烧核心环节,通过工业大数据、工艺机理模型以及机器学习等人工智能算法,开发一种垃圾焚烧智慧控制技术与系统,实现精准高效的智能化控制。通过智能控制系统的投用,可显著提高垃圾焚烧的效率及稳定性,为垃圾处理行业的可持续发展提供强有力的技术保障^[2]。

1 垃圾焚烧炉智能燃烧控制系统功能

通过融合工业大数据分析、人工智能技术与垃圾焚烧工程经验,开发一种垃圾焚烧炉智能燃烧控制系统,实现对垃圾焚烧炉排炉的精准、高效、智能化控制。智能燃烧控制系统核心功能包括主蒸汽流量智能控制、炉排速度智能控制、一次风及二次风智能控制等。

垃圾焚烧炉的控制是一个持续动态调节且多参数耦合调整的过程^[3]。首先,需要基于垃圾的热值

[收稿日期] 2024-12-13

[作者简介] 姚心(1984—),男,福建闽清人,硕士,正高级工程师,研究方向为大数据和智能控制。

[引用格式] 姚心,郭天宇,骆嘉辉,等.基于“大数据 + 机器学习 + 工艺机理模型”方法的智能燃烧控制技术[J].绿色矿冶,2025,41(1):82-87.

YAO Xin, GUO Tianyu, LUO Jiahui, et al. Intelligent combustion control technology based on the method of “big data + machine learning + process mechanism model” [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(1): 82-87.

评估情况设定焚烧炉主蒸汽流量的目标值,这是调整焚烧炉膛内炉排运动速度及进风量的关键依据^[4]。

焚烧炉排炉的炉排组自上而下分别是干燥段、燃烧段、燃尽段。由于垃圾的热值不像煤粉那样稳定,需根据垃圾的热值变化情况灵活设置垃圾入炉速度,包括给料器及三段炉排的速度,从而精确控制焚烧炉内的垃圾进料速度^[5]。

在垃圾焚烧过程中,一次风及二次风起着至关重要的作用。一次风通过炉排下方的风门按需向各段炉排送入适量的空气,为炉排上的垃圾提供氧气助燃;二次风由焚烧炉的前拱或燃烧室上部送入,为垃圾的干燥及燃烧过程提供过量的空气,二次风不仅加速垃圾的干燥过程,还能确保炉膛内的烟气混合物充分燃烧,保证焚烧效率及烟气排放质量^[6]。

通过精准调控给料器速度、炉排速度、一次风与二次风送入的大小与时机,可以维持垃圾焚烧炉的持续稳定运行,并且满足环保达标排放要求。

2 垃圾焚烧智能控制系统控制回路

2.1 给料器速度控制回路

给料器速度控制回路采用神经网络技术,通过不断学习操作数据及运行反馈,持续优化控制策略。针对性依据每台炉相应的效益要求,结合当前的垃圾燃烧情况,准确判断垃圾料的热值波动,以适应焚烧炉工作条件的变化。通过对垃圾层厚度的精确控制,实现向燃烧炉恒定的智能给料,从而保证负荷的稳定。该回路具备自适应学习能力,通过不断从海量运行数据及分析结果中汲取经验,结合当前的运行情况,不断优化控制策略,以确保给料器精准达到相应焚烧炉的实际运行要求。同时,该回路对料层厚度的精准调控能够有效避免物料厚度不均匀导致的负荷波动,保障垃圾焚烧过程的稳定性。给料器速度控制逻辑如图1所示。



图1 给料器速度控制逻辑

2.2 炉排速度控制回路

炉排速度调节控制回路以运行积累的历史大数据为依据,结合各类传感器测点的实时信息,判断整个垃圾焚烧炉的燃烧火线长度、着火点位置、燃尽点位置与物料厚度情况,以诊断炉内燃烧过程的状态与效率。通过调节各段炉排速度智能调控垃圾焚烧炉各个部位的料层厚度,使其保持在有利于燃烧的最佳水平。将燃烧火线长度控制在合适范围,既能防止火线过短导致炉温下降影响燃烧效率及负荷,又能避免火线太长造成垃圾燃烧不完全,导致生料排出及污染物排放不达标的问题。炉排速度控制逻辑如图2所示。

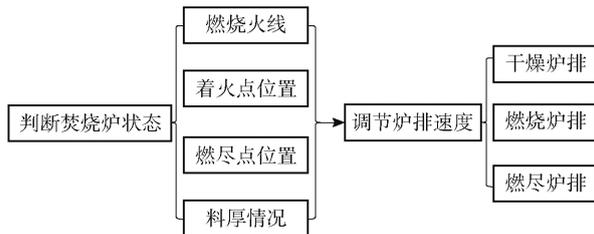


图2 炉排速度控制逻辑

2.3 一次风机频率控制回路

一次风系统调节采用模糊控制与机器学习算法等手段,实现对一次风机频率的精确控制,并将维持负荷所需的燃烧空气合理分配至焚烧炉各个工艺段的仓室风门。该回路配合炉排行进速度,智能地控制垃圾燃烧强度,实现负荷的稳定。通过合理设置一次风的频率和格段配比,不仅可以提高垃圾焚烧处理的效率,还能保证负荷的稳定输出。更为关键的是,一次风的合理分配可保证空气和垃圾的合理配比,有效抑制 NO_x 等污染物的生成,进一步降低对环境的污染。一次风机频率控制逻辑如图3所示。

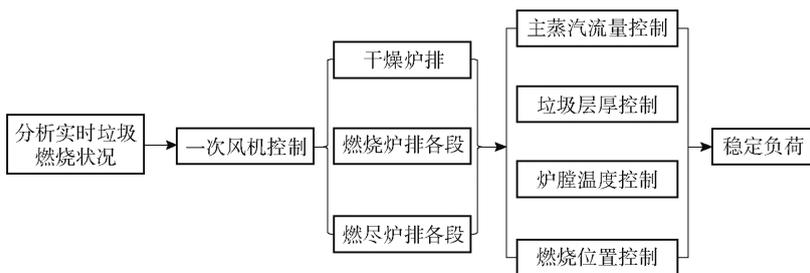


图3 一次风机频率控制逻辑

2.4 二次风机频率控制回路

二次风频率控制回路主要配合一次风系统进行焚烧炉出口氧含量控制与炉温控制。通过选用合适的算法模型,对二次风机频率控制回路进行训练,使锅炉出口氧含量与炉膛各测点温度控制在合适范围。该回路的精准调控有助于进一步降低 CO 的生成量,确保炉排上部的烟气混合物能够充分均匀燃烧。二次风机频率控制逻辑如图 4 所示。

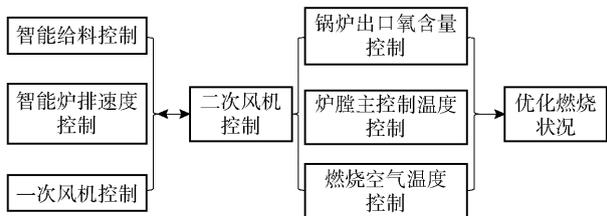


图 4 二次风机频率控制逻辑

2.5 一次风温度控制回路

一次风作为垃圾焚烧过程中最初的燃烧空气供给,其温度控制对于燃烧的稳定性 and 效率至关重要。通过监测一次风进口和出口的温度,搭建一次风空预器入口与支路的开度配比控制模型,对一次风温度进行精确控制,以保证焚烧炉炉温与负荷的稳定。一次风温度控制回路如图 5 所示。

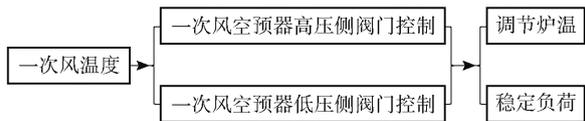


图 5 一次风温度控制回路

2.6 主蒸汽流量调控回路

维持锅炉蒸汽压力与流量的稳定是垃圾焚烧系统的核心控制目标。主蒸汽指标的稳定不仅能确保焚烧炉稳定运行,降低能耗,减少污染排放,还能提高垃圾焚烧处理效果。通过控制调节燃烧炉排阶段的空气输入速度与流量,以垃圾焚烧电厂的负荷需求为寻优目标,使锅炉的输出蒸汽总流量保持在给定水平。主蒸汽流量控制回路如图 6 所示。



图 6 主蒸汽流量控制回路

2.7 炉温调控回路

炉温稳定可维持锅炉蒸汽输出,减少烟气携带污染物排放^[7]。为实现炉温控制,依据人工经验及工艺机理,训练合适的模型来调节整体负荷与二次

风流量,使炉均温度维持在一定范围内。炉温调控逻辑如图 7 所示。

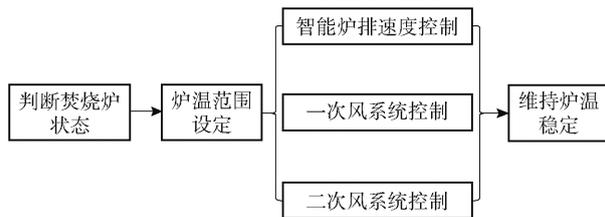


图 7 炉温调控逻辑

2.8 氧含量调控回路

烟气中 CO 浓度与烟气中 O₂ 浓度及炉温密切相关。即当 O₂ 浓度因燃烧空气不足而变低时,或因空气供应过量而在低炉温条件下不完全燃烧时,CO 浓度上升。为此,采用氧含量优化模型,确保一级省煤器入口氧量 4% ~ 6%。当氧含量超出或低于该范围,系统报警,并通过二次风频率等回路的控制,使 O₂ 浓度保持给定水平。氧含量调控逻辑如图 8 所示。

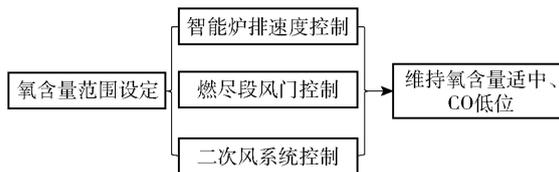


图 8 氧含量调控逻辑

3 智能燃烧控制系统上线应用及效果分析

智能燃烧控制系统于 2022 年 6 月在某垃圾焚烧厂进行了上线测试。该厂 3# 炉焚烧系统的控制只有少数控制器使用传统的 PID 控制调节,其余大多依靠人工经验进行操作,控制过程通常留有极大的调整余量;运行人员排班情况为四班三倒,每班次包括 1 值长、2 主操、3 副操、3 巡检,共 9 人,操作人员的调控策略差异较大。焚烧系统控制存在以下问题:

- 1) 人工控制没有固定的定量规范可以依循,对个人经验有极强的依赖性。
- 2) 人工控制留有极大的调整余量,容易造成系统运行波动大、运行状态不稳定。
- 3) 垃圾焚烧过程包含大量的复杂反应,不同被控制变量的响应时间差异性极大。
- 4) 火焰温度是表征燃烧状态的最重要参数之一,目前对火焰温度的判断主要依靠现场操作人员以火焰颜色判断温度的经验,具有很强的主观性。
- 5) 现有的炉焚烧系统缺少对炉膛燃烧工况状态的诊断,无法对火焰偏烧、垃圾过厚、烟雾状态等情况

进行自动识别,需运行人员进行实时观测和判断。

6) 垃圾焚烧人员培训耗时耗力。人员上岗后适应期长,调控问题多,前期发电效率低。同时人员调控系统需要较高的调节频率,全天 24 h 调节周期,夜晚值班人员精力损耗高,系统调节存在污染超标等高风险。

7) 现有自动控制系统(如 ACC)只能在一定条件下实现控制,难以适应国内垃圾水分含量高、成分波动大的特点,对垃圾热值数据库有极强的依赖性。

因此,实现垃圾焚烧发电系统的智能控制,能更好地发现系统变化趋势并及时快速调节,减少燃烧

控制滞后时间,提高生产效率;减少污染物排放,解决人力问题,创造经济效益。

该厂已基本实现自动化,仪器仪表相对准确,DCS 系统运行良好,智能燃烧控制具备较好的落地条件。

系统投用现场运行大屏展示(图 9)。运行大屏可展示主蒸汽流量实时走势、炉均温度实时走势、氧含量实时走势、焚烧系统实时数据等,以及显示工业摄像头等感知视频及数据结果,还可对比分析核心参数的三日均值,统计智能燃烧控制系统的每班次投用率等数据。



图 9 系统现场投用展示效果

智能燃烧控制系统(ICC)上线投用时间为 6 月 30 日下午 13 点 59 分至 7 月 1 日凌晨 2 点 02 分。投用期间,焚烧炉炉温可基本保持在 920 ~ 1 050 ℃,主蒸汽流量维持在 30 ~ 37 t/h,炉况运行良好。系统连续投用 12 h,平均投用率可达 96.53% (表 1),期间系统因液压油泵跳闸、OPC 通讯中断、燃烧剧烈导致氧量过低越限等特殊情况暂时中断使用,但基本在 3 ~ 5 min 之内解决并重新投用。

表 1 上线投用时间

班次	工作时间	投用时间	ICC 上线时间段 实际投用比例/%
0630 早	8:00—16:00	13:59—16:00	
0630 中	16:00—24:00	16:00—24:00	96.53
0701 晚	0:00—8:00	0:00—2:02	

智能燃烧控制系统上线前 12 h 主要指标、上线 12 h 主要指标的统计数据见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知,与投用前 12 h 数据对比,氧含量由 6.8%

下降至 5.6%,炉温由平均 911.9 ℃ 上升至 977.4 ℃,主蒸汽流量由 28.1 t/h 提高至 32.8 t/h,主要生产指标在智能燃烧系统上线后均有一定优化效果,生产效率提高。与人工控制相比,主要控制指标运行数据标准差可降低 10% 以上,进一步提高了垃圾焚烧炉排炉运行的稳定性。

表 2 上线前 12 h 主要指标

上线前(未投用) ICC)0630 (01:58—13:58)	氧含量/%	主蒸汽流量/ t·h ⁻¹	平均炉温/℃
均值	6.849 823 889	28.127 344 03	911.911 611 4
标准差	1.360 180 25	2.728 408 088	33.302 144 77

表 3 已上线 12 h 主要指标

首次上线测试 (0630 13:59— 0701 02:02)	氧含量/%	主蒸汽流量/ t·h ⁻¹	平均炉温/℃
均值	5.621 177 732	32.818 803 32	977.412 540 9
标准差	0.865 070 877	2.166 379 962	28.325 985 26

智能燃烧控制系统投用后效果提升显著,具体表现为:

1) 实现智能化控制。将运行人员的丰富经验融入控制逻辑之中,实现多参数的同步监测分析,形成更为精准、全面的控制决策。智能化控制升级不仅提高垃圾焚烧炉的运行效率,还能确保焚烧过程的稳定性与安全性。

2) 系统投用方式便捷。系统自适应学习能力强,经过相对较短时间内的运行数据学习与调试,即可一键迅速投入焚烧炉的实际控制中,极大缩短了系统上线前的调试人力及时间成本,简捷友善的交互界面也方便现场人员操作及查看。

3) 兼容性强,无缝衔接现有 DCS 系统;可轻松替代原有的 ACC,在手动模式下支持两种控制系统的切换,确保操作的灵活性、可靠性。

4) 稳定性强,主要控制指标波动显著降低。与人工控制相比,主要控制指标运行数据标准差可减小 10% 以上,显著提升系统运行稳定性。这项优化不仅有助于延长焚烧炉的使用寿命,还能有效解决运行不稳导致的排放不达标及焚烧效率低等问题。

4 结论

本文提出了一种基于“大数据 + 机器学习 + 工艺机理模型”的垃圾焚烧智慧控制技术解决方案,通过对多工况、多参数条件下垃圾焚烧炉的大量现场工况数据进行分析与挖掘,运用“大数据 + 人工智能”技术,建立核心算法模型,有效挖掘蕴含在大数据中的操作人员经验,并通过不断自学习,形成能

够自适应现场工况变化的智能燃烧控制系统。该智能燃烧控制系统在生产运行过程中,能够使运行指标完全满足环保达标、安全稳定的生产要求,并实现对各主要参数的更稳定控制。本系统已在某垃圾焚烧厂的 400 t/d 垃圾炉排炉上线应用,系统完全无需人工干预的上线投用率可达 96.53%。与人工控制相比,采用该系统的主要控制指标运行数据标准差可降低 10% 以上,进一步提高了垃圾焚烧炉排炉运行稳定性的。相较于传统的逻辑程序控制(ACC),本系统可实现更适合我国垃圾特性的智能控制。

[参考文献]

- [1] 杨培培,骆嘉辉,姚心,等. 基于垃圾焚烧运行参数的主蒸汽参数预测研究[J]. 有色设备,2021,35(1): 15-19.
- [2] 刘海威,刘诚,张瑛华,等. 智能低碳型垃圾焚烧发电厂建设方案与应用实践[J]. 城市管理与科技,2023,24(1):45-48.
- [3] 应雨轩,林晓青,吴昂键,等. 生活垃圾智慧焚烧的研究现状及展望[J]. 化工学报,2021,72(2):886-900.
- [4] 邹包产,韩秋喜,王文凯,等. 炉排炉垃圾焚烧控制策略[J]. 环境工程,2013,31(2):80-82,86.
- [5] 曾卫东,薛宪民,薛景杰. 炉排炉垃圾焚烧控制特点[J]. 热力发电,2004,33(12):57-58.
- [6] 柴源. 生活垃圾焚烧发电厂自动燃烧控制系统与燃烧控制因素的关系[J]. 电力系统装备,2022(9):30-32.
- [7] 郭天宇,姚心,贺迪龙,等. 基于可见光辐射特性的垃圾焚烧炉膛火焰温度测量方法与装备[J]. 绿色矿冶,2023,39(2):65-69.

Intelligent Combustion Control Technology Based on the Method of “Big Data + Machine Learning + Process Mechanism Model”

YAO Xin, GUO Tianyu, LUO Jiahui, LIU Bing

(China ENFI Enigeering Corporation, Beijing 100038)

Abstract: In response to the application challenges of intelligent control for the grate furnace system of domestic waste incineration facilities in China, this paper proposed a smart control technology solution for waste incineration based on “big data + machine learning + process mechanism model”. By integrating industrial big data, process mechanism models and machine learning algorithms, an intelligent combustion control technology and system was developed for the incinerator, the core facility of waste incineration, achieving precise and efficient intelligent control. The function and control loop of the intelligent combustion control system are introduced, and the intelligent combustion control system was applied to a 400 t/d waste grate furnace in a waste incineration plant. The production practice showed that after the

system is put into operation, the operation rate without manual intervention can reach 96.53%, the oxygen content decreased from 6.8% to 5.6%, the furnace temperature increased from 911.9 °C to 977.4 °C, and the main steam flow increased from 28.1 t/h to 32.8 t/h. Compared with manual control, the standard deviation of the operation data of the main control indexes after the system was put into use can be reduced by more than 10%, which significantly improved the operation stability of the grate furnace. The intelligent combustion control system can not only make the operation index meet the requirements of environmental protection and safe production, but also realize the stable control of the main parameters. This technical solution can provide strong technical support and guarantee for the sustainable development of the waste disposal industry.

Key words: waste incineration; big data; machine learning; intelligent combustion control

(上接第 76 页)

Research and Application of Remote Sensing Monitoring Methods for Green Mines

ZHANG Yong¹, WANG Kunfei², GUO Bin¹, WANG Liang²

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Geological Survey and Research Institute, Hohhot 010000, China;

2. Zhongguancun Green Mine Industry Alliance, Beijing 100089, China)

Abstract: In recent years, great achievements have been made in the construction of green mines, but there are also problems such as the difficulty of multi-sectoral collaborative supervision and the high proportion of qualitative indicators. Benchmarking the new evaluation indicators of green mine construction, using high-resolution remote sensing images to carry out green mine assessment, review and supervision, is conducive to improving the level of green mine assessment and strengthening green mine supervision. Based on the new stage, new situation and new requirements of green mine, aiming at the characteristics of mine mining, ecological restoration, environmental protection and other scenes, this paper expounds and analyzes the working mechanism of remote sensing monitoring of green mine on the basis of combing the working process of remote sensing monitoring. This paper analyzed the monitoring objects and contents of remote sensing monitoring in the ecological environment, resource development mode, comprehensive utilization of resources, green low carbon and so on. According to the stage characteristics of green mine construction, this paper discusses the key points of remote sensing monitoring in the early, middle and late stages of green mine construction, so as to realize the purpose of rapid filtering and screening of problem mines.

Key words: green mine; remote sensing monitoring; evaluation index