

智能化技术在燃油燃气锅炉节能降耗中的应用 及经济效益评估

冯海霞 (中海壳牌石油化工有限公司, 广东 惠州 516086)

摘要: 本文系统梳理了智能燃烧调节控制、物联网运维管控等技术, 在燃油燃气锅炉节能降耗与环保达标工作中的具体应用路径。聚焦氮氧化物 (NO_x)、二氧化硫 (SO_2)、颗粒物等核心大气环保指标管控要求, 搭建了“环保达标-节能收益-成本控制”三维经济效益评价体系。该技术组合既能确保燃油燃气锅炉满足大气环保排放限值, 又具备显著的经济价值, 为燃油燃气锅炉行业的绿色转型奠定了良好基础。

关键词: 智能化技术; 燃油燃气锅炉; 节能降耗; 经济效益评估

中图分类号: TK229.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0055-03

Application of Intelligent Technology in Energy Conservation and Consumption Reduction for Oil/Gas Boilers and Economic Benefit Evaluation by

Feng Haixia (CNOOC Shell Petrochemical Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516086, China)

Abstract: This study systematically examines the practical applications of intelligent combustion control and IoT-based operation management in fuel/gas boiler energy conservation and environmental compliance. By focusing on key air quality indicators including nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO_2), and particulate matter, it establishes a three-dimensional economic evaluation framework encompassing environmental compliance, energy efficiency gains, and cost control. The integrated technology solution not only ensures compliance with emission standards but also delivers significant economic benefits, establishing a robust foundation for the green transformation of the fuel/gas boiler industry.

Keywords: intelligent technology; oil and gas boilers; energy conservation and consumption reduction; economic benefit evaluation

传统燃油燃气锅炉主要分为普通型和冷凝型两种, 其日常运行管控大多依靠人工调节与经验化运维的方式来开展, 这种模式很容易出现烟气余热利用不彻底、设备故障响应不及时等问题, 不光会导致锅炉运行能效一直处于偏低的状态, 还可能造成 NO_x 、 SO_2 等污染物排放超标。其中, 普通燃油燃气锅炉由于缺少冷凝余热回收相关的配套结构, 排烟热损失在整体能源损耗中所占的比例相对更高, 污染物排放浓度的波动也更为明显, 所以在节能改造与环保升级这两块, 它的需求是最迫切的。智能化技术可从燃烧、换热、设备运维等核心环节着手, 既能够与冷凝锅炉的余热回收功能形成良好的技术协同效应, 又能针对性提升常规锅炉的运行效率, 进一步保障锅炉环保排放达标状态的稳定性。结合以上这些背景情况, 本文重点分析了智能化技术在燃油燃气锅炉节能环保改造中的应用逻辑以及实际应用成效, 构建了融合环保指标的经济效益评估方法, 旨在为燃油燃气锅炉行业向高效、环保、智能化方向稳步发展提供帮助。

1 智能化技术在燃油燃气锅炉节能降耗与环保达标的应用

1.1 智能燃烧控制系统

传统燃油燃气锅炉的运行调节与控制, 大多依靠

人工手动操作或是简易 PID 调节的方式实现, 一旦遇到负荷波动、燃料理化性质改变等工况变化, 很容易出现空燃比失衡的问题, 这不仅会导致燃料燃烧不够充分, 情况严重时还会出现颗粒物排放超标的现象。

智能燃烧控制系统以闭环控制原理为基础搭建, 可实现燃烧效率与环保排放指标的协同管控, 其运行逻辑与各类燃油燃气锅炉的设备性能高度契合, 基本能适配不同类型锅炉的节能环保改造需求^[1]。同时, 它会结合机器学习算法, 动态调整空燃比和燃烧负荷, 在保证锅炉始终处于最佳燃烧效率的前提下, 精准控制污染物的排放。

从相关试验数据来看, 过量空气系数对燃油燃气锅炉的节能降耗和环保减排效果, 影响还是比较显著的: 对于燃气冷凝锅炉而言, 把这个系数控制在 1.10-1.15 这个区间内, 锅炉热效率就能提升到 103% 以上, 而且 NO_x 排放浓度也能稳定控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下; 而针对普通燃油锅炉, 将该系数从 1.35 优化到 1.18 之后, 锅炉热效率从 88.2% 提升到了 92.5%, NO_x 排放浓度的下降幅度超过 25%, 颗粒物排放浓度也能控制在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。

同时, 系统整合分级燃烧、烟气再循环 (FGR)

及燃油雾化优化技术,对燃气锅炉重点抑制热力型 NO_x 生成,对燃油锅炉强化雾化燃烧以减少颗粒物与 SO_2 排放,在满足GB13271-2014《锅炉大气污染物排放标准》限值要求的基础上,可进一步降低污染治理附加成本。例如,某化工企业对4t/h燃油燃气冷凝锅炉改造后,通过该系统将过量空气系数稳定在1.15左右,单台日均天然气消耗量减少 120m^3 , NO_x 排放浓度稳定在 $25\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,无需额外投入末端治理设备,年节约环保运维成本2.3万元;某热力站3台6t/h普通燃油锅炉改造后,系数稳定在1.18,单台日均节油80kg, NO_x 、颗粒物排放浓度均达标,规避了环保处罚风险。

1.2 智能余热深度回收技术

排烟热损失在燃油燃气锅炉总热损失中占比达15%~20%,传统空气预热器仅能回收烟气显热,余热利用效率偏低,且高温排烟易导致后续环保处理设备负荷增加。智能余热深度回收技术在针对不同类型燃油燃气锅炉特性,以显热、潜热梯级利用为核心,通过差异化换热工艺与智能调控系统协同运行,既可提升能效,又降低排烟温度,减少污染物末端治理能耗,实现节能与环保成本的双重优化^[2]。

针对燃气冷凝锅炉,智能控制系统可精准调控排烟温度与给水温度,充分回收烟气中水蒸气的汽化潜热。当排烟温度从 59.9°C 降至 45°C 时,锅炉热效率同步从99.67%提升至103.16%;同时,低温排烟能有效降低脱硫脱硝设备的运行负荷,减少药剂消耗量,兼顾能效与环保。对于普通燃油燃气锅炉,借助智能高效空气预热器及温度调控装置,可将排烟温度从 150°C 左右降至 80°C 以下,热效率提升至92%以上。此外,排烟温度的降低能减少颗粒物逃逸量,降低布袋除尘器运行阻力,进而节约风机运行能耗,实现节能降耗与环保达标双向优化。

智能余热系统搭载多维度传感器,结合模糊控制算法动态调节换热流程,同时搭建余热梯级利用体系,减少化石燃料消耗,间接降低污染物排放总量。例如,某食品加工厂燃油燃气锅炉改造中,采用塔板喷淋式冷凝换热器搭配智能控制系统,改造后排烟温度从 150°C 降至 42°C ,年节约天然气 $7.5\text{万}\text{m}^3$, SO_2 排放总量减少18%,脱硫系统药剂消耗降低20%,年节约环保成本1.8万元;某药厂普通燃气锅炉加装智能高效空气预热器后,排烟温度降至 78°C ,年节气 $4.8\text{万}\text{m}^3$,除尘器风机能耗降低15%,进一步压缩了环保运维成本。

1.3 IoT+ 智能运维管理系统

运维管理粗放易导致燃油燃气锅炉运行效能下

滑、污染物排放波动,增加环保合规风险与非计划停机成本。IoT+ 智能运维管理系统依托“终端数据采集-云端分析处理-精准运维管控”模式,实现了锅炉运行与环保指标的全生命周期管控,为燃油燃气锅炉长期稳定达标、高效运转提供保障。该系统通过智能终端实时采集锅炉排烟温度、过量空气系数、热效率及 NO_x 、 SO_2 排放浓度等参数,经5G网络上传至云端平台,实现运行状态与环保指标的远程监控、可视化呈现。基于大数据分析算法,可预判普通锅炉空气预热器堵塞、燃油雾化器故障,以及冷凝锅炉冷凝器结垢等问题,提前发出维护预警,避免因设备故障导致污染物排放超标,将非计划停机率降低30%以上,间接减少环保处罚与应急处理成本^[3]。

1.4 清洁能源耦合与环保协同调控技术

依托智能化技术实现清洁能源与燃油燃气锅炉耦合运行,既能深化节能效果,又能降低污染物排放强度,减少环保治理成本,是行业低碳转型的重要路径。例如,天然气掺氢燃烧智能调控系统可根据氢燃料掺混比例(最高20%)自动优化燃烧参数,搭配冷凝锅炉余热回收特性,热效率再提升2%, CO_2 排放量减少15%, NO_x 排放浓度进一步降低至 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,无需额外升级末端治理设备。对普通燃油燃气锅炉,太阳能集热器、热泵系统与智能调控联动运行,预热给水可减少8%~12%的燃料消耗,间接地降低污染物排放总量,配套系统根据辐照强度动态调整策略,保障给水温度与环保指标稳定。

2 融合大气环保指标的经济效益评估体系与案例分析

2.1 经济效益评估的核心指标

本文构建了“投资收益-回报周期-环保成本”三维评估框架,核心指标包括总投资成本、年综合收益、新增运行成本及静态投资回收期,重点融入环保相关指标,实现经济与环保效益的协同量化。总投资成本涵盖设备采购(含环保监测模块)、安装调试、方案设计及环保合规改造费用;年综合收益包括节气节油收益、节水收益、环保补贴及环保成本节约(含末端治理药剂、能耗、罚款规避等);新增运行成本对应改造后电耗、设备维修费、环保监测设备运维费等支出。

静态投资回收期计算公式为:静态投资回收期=总投资成本÷(年综合收益-新增运行成本)

其中环保成本节约占比不低于20%,确保评估贴合环保达标需求^[4]。针对燃油与燃气锅炉差异补充指标:燃气锅炉加入 NO_x 排放浓度降低幅度、环保补贴金额;燃油锅炉加入颗粒物与 SO_2 治理成本节约、雾

化系统优化收益,确保评估结果贴合实际改造场景与环保管控要求。

2.2 实际改造案例的评估分析

以某食品加工厂一台4t/hWNS4-1.25Q型燃油燃气冷凝锅炉智能化改造项目为实例,结合普通燃油燃气锅炉改造共性,开展融合环保指标的经济效益评估,结果如下:①改造实施方案:为冷凝锅炉加装智能燃烧控制系统(含污染物在线监测模块)、智能冷凝余热回收系统及IoT智能运维平台,配套防腐与水质中和系统,同步优化燃烧与环保调控逻辑,确保NO_x排放浓度≤30mg/m³、颗粒物≤10mg/m³;同吨位普通燃油燃气锅炉采用“智能燃烧控制+高效空气预热器+简易IoT环保监测模块”方案,适配设备特性与环保需求。②投资成本:对冷凝锅炉开展智能化改造的总投入为18万元,其中核心设备的购置费用12万元,安装施工费用4万元,设计与调试环节的费用合计2万元;同等吨位的普通锅炉智能化改造总投资仅11万元,二者的成本差异主要在于普通锅炉无需额外加装冷凝换热器,仅在环保监测模块的投入上增加了0.8万元。③收益与成本分析:冷凝锅炉完成智能化改造后,热效率由92%提升至103.5%,每年可节约燃气7.5万m³,单是节气这一项,每年就能创造24万元的收益;叠加每年1.2万元的节水收益、2.4万元的环保补贴,以及2.3万元的年度环保成本节约,综合计算后年度总收益可达29.9万元。需要说明的是,该锅炉改造后会新增相关运营成本,含新增电耗、设备日常维护及环保监测运维等费用,合计1.6万元,经核算,其年度净效益为28.3万元,静态投资回收期仅0.64年。

与之相对应的是,相同吨位的普通锅炉改造后,热效率从86%提升至93%,每年可节约燃气5.2万m³,节气收益为17万元,同时每年还能实现1.8万元的环保成本节约,年度总收益为18.8万元;改造后新增的各类相关成本为0.9万元,年度净效益则为17.9万元,静态投资回收期是0.61年。总的来说,这两类锅炉的智能化改造,都能通过实现环保达标来降低企业的隐性成本,从实际收益和可行性来看,都具备很高的实施价值和行业推广意义。

3 燃油燃气锅炉智能化改造的关键注意事项

3.1 防腐防护与环保设备适配

燃气冷凝锅炉的改造和日常运维工作中,有个关键点就是要选用耐酸防腐的材质,同时搭配上智能水质监测系统,这样做的目的很明确,就是为了避免酸性冷凝水对设备造成腐蚀,防止因为设备损坏而影响环保排放达标。而普通燃油锅炉呢,就需要重点做好空气预热器的清灰工作和管路结垢的防护事宜,毕竟

这直接关系到锅炉燃烧效率的稳定,也能保障各项环保排放指标不出现大的波动。除此之外,还得建立起配套的环保监测设备校准机制,定期对NO_x、SO₂监测传感器的精度进行校验,不然很容易因为监测数据有偏差,给企业带来环保合规方面的风险。

3.2 技术适配性与环保成本平衡

在燃油燃气锅炉的节能环保改造过程中,不能盲目跟风改造,得结合锅炉自身的类型、吨位以及实际的环保排放限值,科学合理地选择适配的改造方案。简单来说,针对中小吨位的普通燃油锅炉,优先采用“智能燃烧控制+简易环保监测”的改造方案就很合适,这样既能保证改造效果,又能控制好投入成本,实现性价比最大化;而针对大型燃油燃气锅炉,就可以在基础改造的基础上,再叠加IoT运维、清洁能源耦合等技术,从而实现深度节能和环保升级的双重目标。另外,改造的时候还要重点把控环保设备的投入占比,在确保改造效果达到要求的前提下,尽量让整体投资成本处于可控范围之内,避免出现成本超支的情况^[5]。

综上所述,燃油燃气锅炉的智能化改造始终以大气环保指标的管控为核心方向,改造过程中需结合企业实际的节能需求与成本控制目标,科学选择适配的技术改造方案。借助智能燃烧调控、余热回收以及IoT运维等技术的协同运用,能够在保障锅炉环保排放达标的同时有效提升企业的经济效益,最终实现环境效益与经济效益的双赢。展望未来,相关主管部门与行业主体还需要进一步优化技术适配体系,平衡好环保投入与经济收益之间的关系,推动燃油燃气锅炉行业朝着高效、环保、低成本的方向转型发展,进而为我国大气污染治理工作与能源结构优化调整,提供坚实的产业支撑。

参考文献:

- [1] 陈晋如,孟扬.高效纳米远红外节能涂料在燃气锅炉中的应用研究[J].节能与环保,2025(08):64-71.
- [2] 裴俊华,吕岩岩,王杨,等.燃气冷凝锅炉高效节能特性分析研究[J].工业锅炉,2025(04):14-19.
- [3] 原辉.燃气供热电站余热锅炉连排余热利用改造研究[J].能源科技,2025,23(03):49-51.
- [4] 奚力强.9F燃气-蒸汽联合循环电厂节能降噪技术的研究与应用[J].上海节能,2020(08):949-957.
- [5] 高玉姜.福州地区燃气工业锅炉能耗现状及分析[J].低碳世界,2020,10(07):16-17.

作者简介:

冯海霞(1991-),男,河北衡水人,专科,助理工程师,研究方向:热电联产。