

锅炉燃烧配风自动控制对热效率的提升作用

张嘉文

江西赣能股份有限公司丰城发电厂, 江西 宜春 331100

[摘要]本研究针对锅炉燃烧配风环节,通过构建参数实时采集与监测体系,建立基于氧含量-烟气温度双变量的动态配风控制模型,并设计实施智能自动控制系统,该系统可依据锅炉负荷变化,实现送风量与配风比例的自适应调节,通过闭环反馈机制动态修正燃烧工况,实际运行数据表明,系统能够有效降低过剩空气系数,显著提升燃烧效率与热效率,实现燃料消耗与污染物排放的双重削减,为工业锅炉节能增效与绿色运行提供技术支持。

[关键词]锅炉燃烧;配风自动控制;热效率提升;智能调节;氧含量反馈

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16902

中图分类号: TK223

文献标识码: A

The Effect of Automatic Control of Boiler Combustion Air Distribution on Improving Thermal Efficiency

ZHANG Jiawen

Fengcheng Power Plant of Jiangxi Ganneng Co., Ltd., Yichun, Jiangxi, 331100, China

Abstract: This study focuses on the combustion air distribution process of boilers. By constructing a real-time parameter collection and monitoring system, a dynamic air distribution control model based on oxygen content flue gas temperature dual variables is established, and an intelligent automatic control system is designed and implemented. The system can adaptively adjust the air supply and distribution ratio according to changes in boiler load, and dynamically correct the combustion conditions through a closed-loop feedback mechanism. Actual operating data shows that the system can effectively reduce excess air coefficient, significantly improve combustion efficiency and thermal efficiency, achieve dual reduction of fuel consumption and pollutant emissions, and provide technical support for energy-saving, efficiency improvement and green operation of industrial boilers.

Keywords: boiler combustion; automatic air distribution control; improved thermal efficiency; intelligent regulation; oxygen content feedback

引言

在能源成本攀升与环保政策趋严的双重背景下,提升工业锅炉热效率成为实现节能减排的关键路径,燃烧配风作为影响锅炉运行性能的核心要素,其比例精准度直接关联燃料燃尽率与污染物生成量,传统人工配风模式受经验主观性、响应延迟性制约,难以适应负荷动态变化需求,引入智能化自动控制系统,通过实时监测与动态调节优化配风过程,不仅可提升燃烧稳定性与经济性,更能满足环保排放要求,对推动工业锅炉高效、清洁运行具有重要现实意义与应用前景。

1 锅炉燃烧配风机制与传统控制存在的问题

1.1 锅炉燃烧过程及空气供给的基本原理

锅炉燃烧本质上是燃料化学能经高温氧化反应转化为热能的过程,其核心在于燃料与空气的高效混合与充分反应,作为燃烧反应的必要条件,氧气供给直接决定燃烧过程的完整性与效率,因此空气供给系统成为锅炉稳定运行的核心组件,在实际运行中,空气由鼓风机输送至炉膛,与燃料充分混合后引发燃烧反应,产生的高温烟气通过热交换器加热锅炉水或实现热能传递。

在燃烧控制体系中,空气供给通常划分为一次风与二次风协同作业,一次风承担输送燃料并启动初始燃烧的功

能,其风速与风量直接影响燃料的分散程度和着火稳定性;二次风则在燃烧中后期介入,通过补充氧气促进燃料的完全燃烧,提升燃尽率,由于锅炉负荷波动、燃料特性差异及燃烧工况变化,配风系统需具备动态调节能力。

1.2 理论空气量、过剩空气系数与热效率的关系

理论空气量是燃料完全燃烧所需的最小空气量,该参数基于燃料的化学组成和化学反应式计算得出,在理想条件下,当实际供风量与理论空气量相等时,燃料可实现完全燃烧,但受混合效率、反应时间等实际因素制约,此理想状态难以达成。过剩空气系数与锅炉热效率呈非线性关联,其数值选择对燃烧经济性具有决定性影响,当过剩空气系数过低时,氧气供给不足导致燃料无法充分燃烧,产生一氧化碳、碳氢化合物等污染物,并伴随黑烟排放;反之,系数过高则使过量空气吸收大量热量,造成排烟热损失显著增加,进而降低锅炉整体热效率。

1.3 传统人工配风方法的问题分析

(1) 响应滞后性。人工配风依赖操作人员观察锅炉运行参数后,手动调节风门位置以及风机风量,调整频率受人工监控时间间隔的局限,难以迅速应对负荷的变动,此滞后状况往往造成燃烧状态有较大幅度的波动,有碍锅炉实现稳定运行。

(2) 依赖操作经验。传统配风方法极大地依靠操作人员的现场经验及判断力,不同班组、人员间调节策略的差异十分显著,往往会造成运行参数波动和效率高低不一,处于人员经验匮乏或操作出错时,甚至会出现燃烧不完整、炉膛温度过高这类不良结果。

(3) 难以实现实时优化。人工控制受信息获取的滞后、控制手段粗糙的影响而受限,难以达成按秒级变化精准调节风量的目标,更无法借助氧量、烟气温度等多维数据对燃烧状态做动态优化,这引发锅炉运行长期处于次优,甚至低效的局面。

1.4 传统配风对热效率的负面影响案例简析

在某燃煤工业锅炉的运行实例里,因长期采用人工配风这种模式,过剩空气系数维持在 1.8 以上,远超 1.2~1.4 的最佳控制界限,过多空气不仅让燃烧温度下降,还造成大量未被利用的热能随烟气排放出去,经测算可知,热效率损失达 5% 以上,部分企业在高负荷状态下人工调风出现滞后现象,引起燃烧欠佳、黑烟排放且煤耗提高的情况,这些案例充分彰显了,传统配风方式在动态响应能力及调节精度上存在明显欠缺,难以契合现代高效且环保锅炉的运行规范。

2 自动配风控制系统的技术原理与构成

2.1 系统结构构成

自动配风控制系统主要是由风门执行机构、氧量在线分析仪、温度/压力传感器及控制器与算法模块等关键组件搭建而成,各组件彼此协作配合,完成燃烧配风的智能式调控。

调节送风量及配风比例的核心装置为风门执行机构,多采用电动或者气动的执行器,其响应迅速,定位精准度高,可按照控制信号自动把风门开度进行调整,实现空气供应与燃料燃烧实时匹配,实时监测锅炉烟气中含氧量由氧量在线分析仪完成,为评定燃烧状态给出关键依据,是反馈控制过程中的关键传感装置。

于锅炉主要管道及烟道位置布置温度与压力传感器,可连续采集燃烧温度、炉膛压力以及排烟温度等运行参数,为控制系统提供燃烧效率及安全性的评判根据,控制器跟算法模块作为系统的脑力核心。

2.2 控制策略与调节方式

自动配风控制系统控制策略的构建,一般以 PID 控制为基础,采用比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 三个环节对氧含量误差开展反馈式调节,由此完成对风门开度或者风机转速的精细把控,PID 控制有着结构简单、响应迅速、调节精度佳等长处,符合工业锅炉实时控制方面需求。

为提高系统对复杂燃烧环境的适应水平,某些先进的控制系统额外引入了模糊控制或神经网络控制技术,模糊控制依靠规则推理展开,能于系统模型不精准、存在不确定性之际,仍旧展现出较强的调节本领。

系统多数采用实时动态调节及预测反馈机制,借助对燃烧负荷、氧量变化、烟气温度等多变量的实时分析,预测负荷变化态势,预先对风量设定做修正,防止出现滞后

状况,促进燃烧稳定性进而提高热效率。

2.3 与锅炉主控系统的集成模式

自动配风控制系统往往与锅炉主控系统 (像 DCS 或 PLC) 实现深度集成,搭建起统一的运行管控平台,采用标准通信协议,配风系统能把采集到的实时数据传递给主控系统,完成对锅炉整体运作状态的集中监控与统筹调控。

在实际应用的场景下,自动配风模块可当作主控系统的子模块运行,还可独立部署,然后跟主控系统达成互联互通效果,系统可依照主控系统输出的负荷指令自动调控送风量,跟燃料供给实现动态的契合,且在锅炉出现异常状态的情况下协同响应,提高锅炉运行的安全性和可靠水平。

该集成模式既提升了系统协同运作能力,也提高了控制精度,也方便操作人员经由统一界面对锅炉运行实施监视和干预,很大程度简化了操作流程及管理难度。

3 自动配风系统对锅炉热效率提升的实际作用分析

3.1 实验或工程案例介绍

某大型化工企业的燃煤锅炉改造项目实施期间,采用自动配风控制体系,对一台额定蒸发量达 20t/h 的链条炉实施升级改造,系统借助氧量闭环控制的手段,马上调整风门的开度大小,维持排烟含氧量于合理界限内,为核实系统起到的效果,进行了连续一个月的跟踪记录 and 对比分析,对象是改造前后的锅炉运行参数。

系统实施工作开展前,依靠人工对风门进行调节以运行锅炉,氧含量出现大幅波动,燃烧状态稳定性欠佳,平均起来热效率为 78.2%;系统正式启用后,氧含量维持在 3.8%~4.5% 这个范围,燃烧实现更充分效果,锅炉热效率涨至 83.7%,单位蒸吨的耗煤从原本的 142kg 降至 131kg,节能收效明显。

经排烟分析数据显示出,自动控制系统极大地降低了烟气中一氧化碳 (CO) 及氮氧化物 (NO_x) 的排放浓度,原本 245ppm 的 CO 减少到了 91ppm,原先 485ppm 的 NO_x 降至 360ppm,显示出配风优化有效增进了燃烧完全度与环境排放成效。如表 1 所示。

表 1 指标对比

指标对比	改造前	改造后	变化幅度
锅炉热效率 (%)	78.2	83.7	↑ 5.5
单位蒸吨耗煤 (kg)	142	131	↓ 11
CO 排放浓度 (ppm)	245	91	↓ 62.9%
NO _x 排放浓度 (ppm)	485	360	↓ 25.8%

3.2 效果评估指标

热效率提升幅度是衡量自动配风系统效能的核心参数,以实际工程案例数据为据,系统投运后锅炉热效率从 78.2% 提升至 83.7%,实现 5.5% 的增长,直观体现燃料化学能向热能的转化效率优化,同时有效降低了排烟热损失与不完全燃烧损失,经能耗核算,该系统每年可减少煤炭消耗约 480t,

对应碳排放量削减超 1200t，显著提升能源利用效率。

能耗降低指标在动态工况下优势显著，面对负荷波动，自动配风系统凭借实时调节能力，精准匹配风量与燃料量，确保锅炉稳定运行于高效燃烧区间，实测数据显示，在高负荷工况下，系统单位热能产出成本同比下降 8%，有效规避了传统人工调节模式下因风量失衡导致的能源浪费问题。

环境指标改善程度是系统环保价值的重要体现，通过精确控制氧含量，系统将一氧化碳（CO）排放浓度从 245ppm 降至 91ppm，降幅达 62.9%；氮氧化物（NO_x）排放浓度从 485ppm 降至 360ppm，下降 25.8%。

3.3 经济与环境效益分析

自动配风系统创造的经济效益呈现多元化特征，以年运行时长 8000h 计算，系统每小时节煤量达 11kg，年度累计节约燃煤 88t，按 800 元/t 的煤炭价格估算，仅燃料成本一项每年可节省约 7 万元，若叠加政府节能减排补贴、碳排放权交易收益等附加经济价值，系统的综合投资回报率将进一步提升。在环境效益层面，系统展现出显著的减排成效。经测算，每年可减少二氧化碳（CO₂）排放约 220 吨，同时大幅削减二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）等大气污染物排放。如表 2 所示。

表 2 经济与环境效益分析

项目	数值估算
年节煤量（吨）	≈88
年节约燃料成本（元）	≈70,000
年减排 CO ₂ （吨）	≈220
CO、NO _x 减排比例	CO ↓ 62.9%，NO _x ↓ 25.8%

经过综合分析可察，自动配风控制系统对锅炉运行状态的优化体现在技术层面，还明显增强了经济性与环保水平，属于实现工业锅炉节能提效的有效手段。

4 推广应用中的挑战与发展趋势展望

4.1 当前应用中存在的问题

自动配风控制系统的控制精度高度依赖传感设备的可靠性，氧量分析仪、温度压力传感器易受高温、腐蚀、粉尘等恶劣环境影响，出现信号漂移、数据失真或硬件故障，一旦传感器性能下降，系统接收的烟气氧含量、炉膛温度等关键参数将偏离实际值，导致控制算法误判，引发风量调节失准，甚至造成燃烧工况恶化。

系统维护的复杂性成为制约其广泛应用的技术瓶颈。自动配风系统集成了 PID、模糊控制等多种算法，涉及传感器、执行机构、通信网络等多类硬件设备。在高温、高湿、强电磁干扰的锅炉房环境中，设备故障率显著增加，而故障排查需兼具自动化控制、电气维护、通信协议等多领域知识成本与收益的矛盾阻碍了技术普及。自动配风系统的初期投资涵盖传感器阵列、控制器、执行机构等硬件采购，以及安装调试、系统编程、人员培训等费用，对于中小企业而言资

金压力较大，尽管长期节能效益可观，但多数企业更关注短期现金流，加之初期系统调试需消耗大量人力物力，导致投资回报周期延长，降低了企业采用新技术的积极性。

4.2 未来发展方向

智能化升级将成为自动配风系统的核心趋势，借助大数据分析平台，系统可整合锅炉历史运行数据、实时负荷曲线、天气预报等多维信息，运用深度学习、强化学习等人工智能算法，构建动态燃烧模型，实现基于预测的自适应配风控制。例如。模块化与标准化设计是推动产业规模化的关键路径，将传感单元、控制模块、执行机构进行标准化封装，可大幅简化系统安装流程，降低工程实施难度，统一通信协议和数据接口规范，能够实现与不同品牌锅炉主控系统、DCS 平台的无缝对接。

与碳排放监管体系的融合是顺应“双碳”战略的必然选择，自动配风系统实时采集的氧含量、排烟温度、燃料消耗量等数据，可直接用于计算碳排放强度与总量。

4.3 推广建议

政策驱动与财政激励是加速技术推广的核心动力，政府可设立专项节能改造基金，对采用自动配风系统的企业给予设备补贴；通过税收减免、绿色信贷优惠降低企业投资成本。针对中小企业技术与资金短板，可开发轻量化自动配风系统，简化控制架构与操作流程，降低部署成本，推广“设备租赁+远程运维”服务模式，由专业机构提供设备安装、调试、维护一站式解决方案。

5 结语

自动配风控制系统在提升锅炉能效、降低污染物排放方面已展现显著成效，契合“双碳”战略目标与工业绿色发展需求，尽管当前面临传感器可靠性、维护成本、初期投资等挑战，但随着智能化、模块化技术的突破，以及政策支持与服务模式创新，该技术将逐步克服应用障碍，在工业锅炉领域实现更广泛的应用，为能源节约与环境保护提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]程相澳.生物质锅炉燃烧特性分析及配风自动控制系统研究[D].河南:河南农业大学,2024.
 - [2]张源博.电站锅炉燃烧器配风控制逻辑策略研究[D].吉林:吉林大学,2020.
 - [3]周铮.生物质锅炉自动控制系统的设计与研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
 - [4]冯惠.发电厂锅炉燃烧控制系统的调整策略分析[J].集成电路应用,2023,40(6):346-347.
 - [5]王晓炜,张志耀,许晓峰,等.生物质循环流化床锅炉燃烧波动分析与对策[J].工业锅炉,2023(4):21-23.
- 作者简介：张嘉文，男，19960425，沈阳化工大学，能源与动力工程。