

热能动力工程炉内燃烧控制技术

杨雪亮

河北西柏坡发电有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.17007

[摘要] 本文围绕热能动力工程炉内燃烧控制技术展开研究,重点拆解蒸汽压力控制、炉膛压力控制等六大关键控制技术,以期能为热能动力工程燃烧系统的优化升级提供理论参考与实践方向,助力行业实现“高效、安全、低碳”的发展目标。

[关键词] 热能动力工程; 炉内燃烧; 燃烧控制技术; 优化策略

中图分类号: O643.2+1 **文献标识码:** A

Thermal Power Engineering: In-Furnace Combustion Control Technology

Xueliang Yang

Hebei Xibaipo Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the research of in-furnace combustion control technology in thermal power engineering, with an emphasis on six key control techniques, including steam pressure control and furnace pressure control. The aim is to provide theoretical references and practical directions for the optimization and upgrading of combustion systems in thermal power engineering, thereby supporting the industry in achieving the development goals of "high efficiency, safety, and low carbon."

[Key words] Thermal Energy and Power Engineering; In-Furnace Combustion; Combustion Control Technology; Optimization Strategies

引言

随着工业的快速发展,热能动力工程炉内燃烧技术得到广泛地应用,不仅能够优化资源利用,还能够提高炉内环境安全性。传统的炉内燃烧控制主要依靠人为的经验调节,很难对燃料种类变化和负荷突变等工况做出准确的判断,可能会导致燃烧不充分、炉结焦、污染物超量的问题。而自动化技术、传感技术和智能算法的发展使燃烧控制从以往单一参数调节发展到现在的多变量协同控制,从经典控制向智能控制方向转变,这就要求采取更合理更高效的控制策略来达到良好的燃料利用率及最低的污染物排放率,也是实现“双碳”目标的重要手段。

1 热能动力工程与炉内燃烧控制概述

1.1 热能动力工程

热能动力工程是当前工业、能源领域的核心学科,涉及到机械工程、电子科学、计算机科学和材料科学等多个领域。热能动力工程主要是把热能转变成机械能、电能等的过程,注重提高工作效率、提升稳定性以及重视环保节能。

传统的化石能源(煤炭、石油、天然气)面临资源枯竭和污染严重的问题,为了能够持续供应能源,在全球大力推动能源结构多样化,在扩大利用太阳能、风能、地热能、核能的同时加大开发新的清洁能源力度^[1]。热能动力工程不仅包含清洁使用化

石能源,如煤、石油等能源的研究,同时也包括将各种新能源,如核能、风能、太阳能、生物质能等转化为热能的技术研究;还涉及内燃机、锅炉、航空发动机等各种动力设备的设计、试验等问题,涉及热力循环、传热传质等难题。

目前,基于智能化技术构建了智能化的能源管理系统,实现了在能源系统工作时对能源状态进行实时监测和精准调控。以发展绿色低碳为导向的理念推动各行各业向绿色发展方式转变。作为能源领域的基础学科,热能动力工程以绿色、低碳的模式为工业、建筑等行业提供高效的热能动力,使能源利用与环境保护相协调。

1.2 炉内燃烧控制

燃烧控制是指通过调整空气和燃料的比例来实现燃烧过程最优的方法,其实质是根据氧传感器检测到的烟气中的氧含量情况不断校正燃烧比,以平衡燃烧效率与污染物排放^[2]。主要应用在工业锅炉、电站等方面,需要考虑燃烧率的算法、过量空气的修正算法等核心算法。

炉内燃烧控制是热能动力工程的“大脑”。通过对炉膛内的温度、压力、烟气成分等主要参数进行测量,并根据采集到的数据控制燃料供给量、空气配比和燃烧器工作状态等执行机构的工作情况来达到对燃烧过程的有效控制。

2 热能动力工程炉内燃烧控制技术的重要性

2.1 提升能源利用效率, 降低运行成本

我国工业锅炉平均燃烧效率约为88%, 较国际先进水平(95%)存在7个百分点的差距, 主要原因是由于燃烧控制不够准确。通过改进燃烧控制技术, 实现对过量空气系数的精确控制, 防止风量过大导致的排烟热损失或者风量过小导致燃料没有完全燃烧造成的损失, 节约能源消耗。

2.2 保障系统运行安全, 规避事故风险

热能动力系统炉内燃烧过程是在高温、高压下运行的, 在运行过程中极易发生安全事故, 因此燃烧控制技术成为保证安全的最后一道防线。通过对燃料量和风量配比的实时调整, 可以防止由于燃料供给量骤然减少或风量过大而引起炉膛熄火或者燃料积存过多和风量不足而导致的可燃混合物爆炸; 通过对炉膛内温度分布情况的实时调节控制, 能够保证炉膛内没有某一点的温度过高而造成结焦以及对烟气温度和成分加以控制来减少低温腐蚀对受热面的破坏。

2.3 减少污染物排放, 满足环保要求

随着《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)、《工业锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2022)等政策的严格实施, 燃烧控制技术成为污染物减排的关键抓手^[3]。通过低氧燃烧、分级配风等控制技术, 抑制高温型NO_x的生成, 通过飞灰含碳质量浓度控制, 减少未燃尽炭粒的生成同时配合除尘设备, 降低颗粒物排放量, 满足国家“超低排放”要求。

3 热能动力工程炉内燃烧技术的应用

3.1 蒸汽压力控制

在热能动力工程炉内燃烧控制系统中, 蒸汽压力控制环节保证了锅炉的稳定运行及能量的充分利用, 从不同的方面实施多维化、精细化控制措施, 主要包括蒸汽流量控制、进气速率控制、水位控制以及炉内温度控制等。蒸汽流量的调整是在蒸汽管路上加装蒸汽调节阀, 根据需要调节阀门开度来实现蒸汽流量控制, 并最终实现蒸汽压力稳定在一定范围内, 从而满足外界负荷的变化要求。进气量调节主要针对的是燃烧所需要的空气供给量, 通过对进气速率和数量的有效控制, 增加燃料的完全燃烧程度, 尽量减少不完全燃烧带来的能量损失, 而由于燃烧效率与蒸汽产生速率有着正相关性, 因此在燃烧过程中必须保证进气量的充足。

水位控制不可忽略, 水位应保持在一定范围内。水位过高会使蒸汽带水增多, 从而降低蒸汽品质, 并且会造成压力不稳定。通过水位控制器检测水位变化情况, 并及时调节至设定值, 可以保证蒸汽压力稳定。另外, 炉内温度也影响着蒸汽的产生速度以及蒸汽的压力大小, 可以通过先进的温度传感器、温控装置实时监测与调节炉内温度, 以此来保证蒸汽压力稳定。

在实际应用中, 常采用实时的数据采集—分析—反馈的方式构成闭环控制系统, 并结合各种传感器和执行器实现精确测量和发出准确的操作指令, 达到控制蒸汽压力的目的。

3.2 炉膛压力控制

炉膛压力控制是在确保锅炉正常安全运行的同时防止烟气外泄及能量损益的重要控制手段, 其目的在于使炉膛压力处于设定的负压范围内, 从而使“烟气生成量”与“烟气排出量”时刻保持平衡。

基于控制逻辑, 采用“前馈—反馈复合控制”的方案最为广泛。前馈信号以送风量为控制量。当送风量增大时, 系统能根据增加量提前发出引风机调节指令, 将原来风量发生较大变化后引起的压力滞后波动提前降低。而反馈信号是由炉膛压力传感器检测到的数据, 在线判断燃烧系统是否出现大面积泄漏, 如果实测炉膛压力接近于零或者稍大于零, 可以认为整个燃烧系统处于微负压运行状态, 则增大引风机转速或增大入口挡板开度使烟气从系统中排出的能力加强, 反之则降低引风机出力, 防止由于风门关得太死造成大量冷空气被吸入。目前多数锅炉使用变频调速控制引风机, 与传统的挡板调节方式相比能够节约能源15%~20%, 并且调节精度较佳, 还会建立“极端工况保护机制”, 当瞬时压力达到高压限值(如+50Pa)时打开炉膛泄压阀并给出声光报警, 当压力值低于低压限值(如-300Pa)时将限制引风机的最大出力防止炉墙损坏。

使用炉膛压力控制是把风量、燃料量的调节联系在一起的一种有效手段。比如, 锅炉负荷增加时, 燃料量和送风量随之增加, 此时引风机也应相应加大出力, 保证压力一直处于一个合适范围内, 防止出现因为参数调节的不同步带来的烟气外溢或者耗热量过大等问题。

3.3 燃料供应控制

燃料供给调节, 要根据负荷调节燃料供给量, 保证输送料稳定, 还要满足不同燃料特性的需要, 以免因供料不稳定引起燃烧工况混乱。固体燃料(如: 煤粉、生物质)用“给料设备转速闭环控制”的方法, 通过称重传感器或皮带秤实时检测给料量, 并与负荷需求设定值比较, 对给煤机、螺旋给料机等给料设备的转速进行调整。还设有“异常检测模块”, 当给料量下降50%以上时, 减少送风量, 防止炉膛熄火; 当给料量增大时, 暂不增加送风量, 以防止燃料堆积造成爆燃。对于混燃场景, 如煤粉—生物质混燃, 还需通过燃料成分在线分析仪, 动态调整不同燃料的比例, 确保总发热量稳定。

液体燃料控制采用“燃油阀开度+压力调节”方式, 根据负荷指令调节燃油阀开度, 并以燃油泵变频控制的方式维持燃油压力, 保证燃料雾化效果(雾化颗粒直径<100 μ m), 避免因雾化不良而达不到完全燃烧状态。因此设置了“燃油加热控制”, 根据燃油的黏度实时调整加热温度, 在低温环境下防止燃油黏度过大堵塞管路。

气体燃料控制是采用“流量闭环+安全联锁”的方式, 依靠实时测量的气体流量来控制燃气阀的开度实现燃气流量的精确调节, 当燃气出现泄漏时, 使用燃气泄漏检测仪(检测精度 \leq 0.19LEL)进行检测, 发现燃气泄漏时立即关闭燃气紧急切断阀, 启动排风装置, 防止发生燃爆事故。

3.4 烟气氧含量控制

烟气氧含量直接反映“空气过量程度”,是判断燃烧是否充分、热损失是否合理的关键指标,控制目标为将氧含量稳定在3%-5%(电站锅炉)或4-6%(工业锅炉),平衡“充分燃烧”与“低热损失”的关系。

检测环节使用“氧化锆氧分析仪”在省煤器出口设置,在线监测数据时间≤测量精度±0.1%,每3个月需要利用标准气体进行校准以保证监测数据精准;部分先进的在线监测系统还配备有“激光原位检测装置”,用于炉膛出口氧含量分布的实时监测,避免单一检测点数据偏差导致的控制误差。

控制逻辑采用“氧量-送风量串级控制”,主回路采用烟气氧含量作为控制目标,副回路选择送风量作为被控变量。当氧含量大于设定值时,则减小送风量;当氧含量小于设定值时,则增大送风量,而且要保证送风量与燃料量(即过量空气系数)维持在1.05-1.2。系统还会预设“负荷-氧量适配曲线”:低负荷(<50%额定负荷)时,氧含量设定值提高至5%-6%,防止空气不足导致燃烧不完全;高负荷(>80%额定负荷)时,设定值降至3%-4%,减少排烟热损失。

实际应用中,烟气氧含量控制需与炉膛温度、CO浓度协同。例如,若氧含量达标但CO浓度升高(>100ppm),说明燃料与空气混合不良,需调整二次风分配比例,而非单纯增减送风量,确保燃烧效率与热经济性最优。

3.5 温度分布调节控制

当炉膛内各点的温度分布不均匀时,会在局部出现过高的温度,使受热面上产生较大的热偏差,并造成NO_x排放量大增,其目的是保证炉膛截面温度偏差≤100℃,火焰中心位置处于设计范围内,如距离炉顶部1/3处。

采用“红外热成像仪+热电偶阵列”的组合方法对温度进行监测:利用红外热成像仪对整个炉膛的温度场进行实时测量,并可以清晰地看出高温区、低温区的位置;另外还通过热电偶阵列对燃烧器、水冷壁管壁等处的温度进行定点测量,避免单一方式监测存在的弊端。

调节手段主要包括三方面:一是燃烧器喷口角度调节,通过电动执行机构调整喷口上下倾角(范围-30°~+30°),若炉膛上部温度过高,向下调整喷口降低火焰中心,反之则向上调整;二是配风均匀性控制,调节各燃烧器的二次风挡板开度,避免局部空气过量形成高温区或空气不足形成低温区;三是烟气再循环,将300~400℃的低温烟气部分送回炉膛,降低局部高温(抑制热力型NO_x生成),同时均匀温度分布,该技术可使温度偏差缩小30%,NO_x排放量减少20%。

系统还会设置“结焦预警功能”,当局部温度持续超过1600℃,自动触发预警,调整对应区域的喷口角度与配风,抑制结焦发展,延长锅炉连续运行周期。

3.6 飞灰含碳质量浓度控制

飞灰含碳质量浓度是衡量固体燃料燃尽程度的核心指标(飞灰含碳量每增加1%,锅炉效率下降约0.1%),控制目标为电站煤粉锅炉≤5%,工业锅炉≤8%,其核心是通过多参数协同优化,解决燃料与空气混合不良、燃尽时间不足等问题。

检测环节采用“在线飞灰含碳分析仪+离线灼烧法”结合:在线分析仪(如γ射线法、微波法)实时检测飞灰含碳量,检测周期≤10分钟;每日采用离线灼烧法(将飞灰在815℃下灼烧3小时,计算质量损失)校准在线数据,确保检测误差≤0.5%。

控制逻辑围绕“飞灰含碳量-燃料特性-燃烧参数”关联模型展开,若飞灰含碳量过高且粒径检测显示粗颗粒占比超20%,增加磨煤机出力,减小煤粉粒径(控制R90=15%-20%,即90 μm筛余物占比),提升燃料燃尽速率;若粒径达标但含碳量仍高,增加二次风风量,优化燃料与空气混合效果,同时确保烟气氧含量不低于3%;若上述调整无效,在不超温结焦的前提下,适当提高炉膛平均温度(如从1300℃提升至1350℃),加快炭粒燃烧反应速度。

4 结语

综上所述,热能动力工程炉内燃烧控制技术能够控制蒸汽压力、炉膛压力、燃料供应、烟气氧含量、温度分布调节、飞灰含碳质量浓度,从而有效实现炉内燃烧的高效性与安全性,提高了能源的利用率,有效减少能耗,推动了行业的持续稳定发展。随着我国科技水平的不断提高,热能动力工程炉内燃烧控制技术未来应朝着更加智能化、一体化的方向发展,为推动工业领域实现绿色可持续发展做出重要贡献。

[参考文献]

- [1]徐衍辉.热能动力工程炉内燃烧控制技术的运用[J].现代制造技术与装备,2023,59(S01):94-96.
- [2]胡远.热能动力工程炉内燃烧控制技术的运用探析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):37-40.
- [3]牛广奔.热能动力工程炉内燃烧控制技术的运用分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(4):073-075.

作者简介:

杨雪亮(1983--),男,汉族,河北石家庄人,本科,工程师,从事热能动力工程研究。