

燃煤锅炉效率优化与燃料配比动态调控研究

靳强 刘洋 赵嘉宇 赵禹博

北方联合电力有限责任公司达拉特发电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 燃煤锅炉是工业生产与民生供暖的核心热能设备,运行效率关乎能源利用、运营成本和环保排放,燃料配比合理性是影响效率的关键。本文以燃煤锅炉为对象,阐述其结构与原理,明确运行现状与效率短板,分析燃料品质波动特性及与效率的关联,探究多因素对效率的影响机制。据此设计燃料配比动态调控策略,制定不同工况方案,从四个维度提出协同优化建议,实现效率提升与能耗降低,为锅炉运行提供参考,助力“双碳”目标。

关键词: 燃煤锅炉;效率优化;燃料配比;动态调控

引言:我国工业领域能源消耗中,燃煤占比较大,燃煤锅炉是主要用能设备,但平均运行效率低于国际先进水平,能源浪费严重。工业用煤品质不一、波动频繁,不合理燃料配比致锅炉燃烧不充分,降低效率、增加排放与运维成本,制约高效节能运行。“双碳”目标下,提升锅炉效率、优化燃料配比是工业绿色转型的迫切需求。本文聚焦此问题,梳理锅炉原理,设计调控策略与优化方案。

1 燃煤锅炉核心结构与工作原理

1.1 核心结构组成

燃煤锅炉是集燃料输送、燃烧、换热、排烟于一体的综合性热能设备,核心结构围绕燃烧与换热协同设计,含五大模块。燃烧系统是核心,含炉膛、燃烧器、炉排,炉膛为燃烧提供空间,燃烧器使燃料与空气均匀混合喷射,炉排承载燃料并均匀布煤。换热系统由省煤器等组成,将燃烧产生的热能传递给工质。燃料输送系统含给煤机等,负责燃料储存、破碎与输送,保障稳定供给。排烟系统由除尘器等构成,排出并净化烟气。控制系统采用 PLC 智能控制,实时监测运行参数,调控各系统协同工作,保障锅炉稳定高效运行,各模块协同性影响运行效率与稳定性。

1.2 核心工作原理

燃煤锅炉核心原理是将燃料化学能经燃烧转化为热能,再通过换热系统传递给工质。过程分四环节:燃料预处理时,磨煤机破碎燃料,给煤机送入炉膛,空气预热器预热空气后与燃料在燃烧器混合;燃烧反应中,混合燃料与空气在炉膛剧烈燃烧,释放热能,炉膛内壁传热给工质;热量传递时,高温烟气依次经各换热器,实现热能梯级利用;排烟时,冷却烟气经除尘器净化、引风机抽吸后由烟囱排出。锅炉效率取决于燃烧充分性、换热效率与热量损失控制,燃料配比合理性影响燃烧与

热量损失^[1]。

2 燃煤锅炉效率与燃料配比关联性分析

2.1 燃煤锅炉运行现状与效率短板调研

对不同行业120台燃煤锅炉运行现状调研发现,整体运行效率偏低,平均为82%。其中,工业生产用锅炉平均效率80.5%,民生供暖用锅炉平均效率83.5%,均存在明显短板。其一,燃烧不充分。因燃料配比不合理,燃料与空气混合比例失调,过量空气系数不当,使得燃料燃烧不完全,机械与化学未完全燃烧热损失合计超8%。其二,热量损失大。排烟温度高、炉膛散热严重,排烟热损失平均达10%,比合理范围高3个百分点,灰渣物理热损失达2.5%。其三,运行参数波动。锅炉负荷变化时未及时调整燃料配比,燃烧稳定性下降,效率波动幅度达5% - 8%。另外,部分锅炉燃料预处理不佳、设备老化严重,进一步加剧效率偏低,阻碍节能降耗目标达成。

2.2 燃料品质波动特性分析

燃煤锅炉主要燃料烟煤、无烟煤、褐煤,不同种类及同种不同批次品质波动大,是影响燃料配比与锅炉效率的关键。其波动体现在三方面:一是热值波动,烟煤热值 22000 - 29000kJ/kg,无烟煤 26000 - 32000kJ/kg,褐煤 10000 - 18000kJ/kg,同批次最大波动 15%;二是成分波动,碳、氢等元素含量不稳,碳 55% - 85%,氢 2% - 6%,水分 8% - 25%,灰分 10% - 30%;三是粒度波动,破碎后粒度 0.1 - 5mm,偏差大影响燃烧速度与混合均匀性。燃料品质随机波动使固定配比方案失效,影响燃烧充分性与锅炉效率稳定性。

2.3 燃料配比与锅炉效率关联性

燃料配比是指不同品质燃料的混合比例及燃料与空气的混合比例,其合理性直接决定燃料燃烧充分性,进而与锅炉效率形成强关联性。试验数据表明,当燃料混合配比合理、空气过量系数控制在1.2-1.3时,燃料燃烧最

充分, 锅炉效率可达88%以上; 当燃料配比失衡, 优质煤与劣质煤混合比例不合理, 会导致燃烧速度不一致, 未完全燃烧热损失增加, 锅炉效率下降3%-5%; 当空气过量系数低于1.1, 燃料燃烧氧气不足, 化学未完全燃烧热损失增加, 效率下降4%-6%; 当空气过量系数高于1.4, 排烟量增加, 排烟热损失上升, 效率下降2%-3%。此外, 燃料粒度配比不合理, 粗颗粒与细颗粒比例失衡, 会导致燃料在炉膛内停留时间不均, 部分燃料未充分燃烧就被排出, 进一步降低锅炉效率, 凸显了燃料配比调控对效率提升的重要性^[2]。

2.4 多因素耦合关联性分析

燃煤锅炉效率受燃料配比、运行负荷、燃烧参数、设备状态等多因素耦合影响, 各因素相互作用、相互制约, 共同决定锅炉运行效率。燃料配比与运行负荷的耦合最为显著, 当锅炉负荷上升时, 燃料消耗量增加, 若未同步调整燃料配比与空气量, 会导致燃烧不充分, 效率下降; 当负荷下降时, 若维持高燃料供给与固定配比, 会造成燃料浪费与效率降低。燃料配比与燃烧参数存在协同耦合关系, 炉膛温度、燃烧速度等参数受燃料配比影响, 同时也会反作用于燃料燃烧效果, 例如炉膛温度过低会导致燃料燃烧不完全, 需通过优化燃料配比提升燃烧温度, 进而提升效率。此外, 设备状态与燃料配比存在耦合, 设备老化会导致换热效率下降、燃料混合不均匀, 需结合设备状态调整燃料配比, 才能实现锅炉效率最大化。

3 燃煤锅炉燃料配比动态调控策略设计

3.1 调控策略设计原则与目标

燃料配比动态调控策略遵循“科学性、适应性、经济性、稳定性”四大原则。科学性原则基于燃料品质波动与锅炉效率的关联规律, 采用精准监测与智能调控技术优化配比; 适应性原则确保策略可适配燃料品质、运行负荷的变化, 具备灵活性; 经济性原则实现效率提升与燃料消耗、调控成本降低的平衡, 追求效益最大化; 稳定性原则保障调控平稳, 避免参数波动引发锅炉运行异常。调控目标分为三层: 短期实现配比精准调控, 减少燃料浪费, 使锅炉效率提升5%-8%; 中期稳定运行效率, 将波动幅度控制在2%以内, 降低污染物排放; 长期实现配比与锅炉运行协同优化, 推动锅炉高效、节能、环保运行, 助力节能降耗与“双碳”目标落地。

3.2 燃料配比动态调控核心逻辑与框架

燃料配比动态调控的核心逻辑是“实时监测-数据分析-精准调控-反馈优化”的闭环管控, 通过实时捕捉燃料品质、锅炉运行参数变化, 结合关联规律动态调整配

比, 保障燃烧充分与效率稳定。调控框架由四大模块组成: 监测模块实时采集燃料热值、成分、粒度及锅炉负荷、炉膛温度等参数, 监测精度达 $\pm 2\%$; 数据分析模块处理监测数据, 判断品质波动与运行状态, 计算最优配比; 调控执行模块依据最优参数, 调整给煤机、磨煤机等设备运行参数, 实现精准调控; 反馈优化模块监测调控效果, 对比实际与目标效率差值, 优化算法与配比参数, 形成闭环以持续提升调控效果^[3]。

3.3 关键调控环节设计

燃料配比动态调控的关键环节包括四个紧密衔接的部分, 保障调控顺畅有效。燃料品质在线监测环节采用智能设备, 实时检测燃料热值、成分等参数, 检测周期不超过5分钟, 及时捕捉品质波动; 配比参数精准计算环节结合监测数据、锅炉负荷及燃烧参数, 采用模糊控制算法, 计算优质煤与劣质煤、燃料与空气的最优混合比例; 调控参数实时执行环节通过PLC控制系统, 联动相关设备精准调整燃料输送量、空气供给量等, 调控响应时间不超过10秒; 调控效果动态反馈环节实时监测锅炉效率、燃烧充分性等指标, 将数据反馈至数据分析模块, 及时修正配比参数, 确保效率稳定在目标范围。

3.4 不同工况下的针对性调控策略

结合燃煤锅炉不同运行工况特点, 制定针对性调控策略以实现效率最优。高负荷工况下, 因燃料消耗大, 将优质煤与劣质煤混合比例控制在7:3, 空气过量系数调至1.25-1.3, 加快燃烧速度确保燃料充分燃烧; 低负荷工况下, 减少燃料消耗, 混合比例调整为5:5, 空气过量系数降至1.15-1.2, 避免空气过多增加排烟热损失, 同时延长燃料在炉膛停留时间提升燃尽率。燃料品质波动大时, 增加监测频率, 热值偏低则提高优质煤占比, 水分、灰分偏高则优化破碎粒度并增加空气供给。启停工况下, 逐步调整配比与空气量, 避免参数突变导致燃烧不稳定, 保障锅炉平稳启停、减少能源浪费。

4 燃煤锅炉效率协同优化建议

4.1 燃料配比动态调控与燃烧参数协同优化

燃料配比动态调控需与燃烧参数协同优化, 才能实现锅炉效率最大化, 避免单一调控导致的效率提升瓶颈。一方面, 基于燃料配比调整燃烧参数, 当优化燃料配比后, 同步调整炉膛温度、燃烧速度、空气供给节奏, 确保燃料燃烧充分, 例如提高优质煤占比后, 适当提升炉膛温度至1100-1200℃, 加快燃烧速度, 减少未完全燃烧热损失; 另一方面, 结合燃烧参数反馈优化燃料配比, 当炉膛温度过高时, 适当降低优质煤占比, 避免燃料过度燃烧导致热量损失; 当燃烧速度过慢时, 调整

燃料粒度配比,增加细颗粒燃料占比,提升燃烧速度。同时,采用智能协同调控算法,实现燃料配比与燃烧参数的同步动态调整,将燃烧效率提升至95%以上,进一步降低热量损失,推动锅炉效率协同提升。

4.2 燃料预处理与配比调控协同优化

燃料预处理是提升燃料配比合理性、推动锅炉效率优化的基础,需与燃料配比动态调控协同推进,减少燃料品质波动对效率的影响。优化燃料破碎工艺,采用分级破碎技术,将燃料粒度控制在0.5-3mm,确保粒度均匀,提升燃料混合与燃烧均匀性,为配比调控奠定基础;增设燃料干燥设备,将燃料水分含量控制在8%-12%,减少水分过高导致的燃烧不完全与热量损失,同时稳定燃料热值,降低品质波动幅度^[4]。建立燃料分类储存体系,将不同品质、不同种类的燃料分开储存,便于配比调控时快速调取,精准控制混合比例;预处理过程中实时监测燃料品质,将数据同步至配比调控系统,实现预处理与配比调控的联动优化,进一步提升燃料燃烧效果与锅炉效率。

4.3 设备运维与配比调控协同优化

设备运行状态直接影响燃料配比调控效果与锅炉效率,需将设备运维与配比调控协同优化,确保设备处于最佳运行状态,充分发挥配比调控的节能作用。建立定期设备运维制度,定期对燃烧器、换热器、给煤机等关键设备进行检修、保养,及时更换老化、磨损部件,例如定期清理燃烧器喷嘴,确保燃料与空气混合均匀;定期清洗换热器管道,提升换热效率,降低排烟热损失。结合设备运维状态调整燃料配比,当燃烧器雾化效果下降时,适当优化燃料粒度与空气供给比例,弥补设备性能不足;当换热效率下降时,调整燃料配比提升燃烧温度,减少热量浪费。同时,将设备运维数据与配比调控数据联动分析,优化运维方案与配比调控策略,实现设

备运维与配比调控的协同增效,进一步提升锅炉效率。

4.4 经济性与效率协同优化

锅炉效率优化与燃料配比调控要兼顾经济性,防止为提升效率而使燃料与调控成本增加,达成效率与经济性协同。一方面,优化燃料采购与配比。在满足燃烧要求和效率目标基础上,合理搭配优质煤与劣质煤,将劣质煤占比控制在50%-70%,依据市场价格动态调整混合比例,以此控制燃料成本。另一方面,优化调控系统运行成本。选用节能型监测与调控执行设备,降低设备能耗,同时简化调控流程,减少人工运维开销。另外,建立效率与经济性评价体系,定期核算锅炉效率、燃料消耗成本及调控成本,对比不同方案和措施的经济效益,从中选出效率高、成本低的最优方案,实现锅炉高效运行与经济效益最大化的双重目标。

结束语

燃煤锅炉效率优化与燃料配比动态调控是工业领域节能降耗、推动绿色转型的重要举措,直接关系到能源利用水平、运营成本与环保目标的实现。未来,需结合智能化技术发展,进一步优化调控算法,提升调控精度,推动燃料配比动态调控与锅炉智能化运行深度融合,持续提升锅炉效率,为工业领域节能降耗与“双碳”目标实现提供更有力的支撑。

参考文献

- [1]陈志远.燃煤锅炉燃烧优化技术研究进展[J].动力工程学报,2022,42(3):185-192.
- [2]孙立国.高志强.基于智能控制的一次风配比优化系统设计与应用[J].自动化仪表,2023,44(2):56-62.
- [3]陈大鹏.赵阳.燃料质量对燃煤电厂运行成本及环境影响的研究[J].能源与环境,2022(2):68-72.
- [4]韦美福.燃煤锅炉灵活性运行下的燃烧优化控制方法研究[J].资源节约与环保,2024(11):116-119.