

电厂锅炉燃烧效率影响因素及简易优化措施

郝乐杨 李亚川 刘玉洁

建投邢台热电有限责任公司, 河北 邢台 054400

[摘要]电厂锅炉燃烧效率是个需要系统研究的问题, 文章对此进行了研究并通过实验分析和现场测试探讨了影响锅炉燃烧效率的主要因素, 像燃料品质变化、空气配比不当、设备老化磨损、操作管理水平不足等因素都在其中。研究发现燃料水分增加1%会使锅炉效率下降0.3%到0.5%, 过量空气系数每增加0.1锅炉效率平均降低0.6%, 设备磨损使得漏风率每增加10%效率就大约下降0.8%。针对这些问题提出了一系列简易优化措施, 一是建立燃料品质动态监测系统以使燃烧参数能自适应调整, 二是一次风比例要优化且过量空气系数需控制在1.15到1.25之间, 三是定期检修和实施预防性维护来降低设备漏风率, 四是给操作人员开展专业培训并优化运行策略。上述措施在现场应用之后效果明显, 锅炉燃烧效率平均提升了2.3%且热效率提高了1.8%, 每年大概能节约标煤5000吨并且减少12500吨的二氧化碳排放, 经济效益和环境效益都很显著, 该研究成果对电厂锅炉运行优化有实用的参考价值。

[关键词]锅炉燃烧效率; 影响因素; 过量空气系数; 漏风率; 优化措施

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18044 中图分类号: TM621 文献标识码: A

Factors Affecting Combustion Efficiency of Power Plant Boilers and Simple Optimization Measures

HAO Leyang, LI Yachuan, LIU Yujie

Construction Investment Xingtai Thermal Power Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054400, China

Abstract: The combustion efficiency of power plant boilers is a problem that requires systematic research. This article conducted a study on this and explored the main factors affecting boiler combustion efficiency through experimental analysis and on-site testing, such as changes in fuel quality, improper air ratio, equipment aging and wear, and insufficient operational management level. Research has found that a 1% increase in fuel moisture can lead to a 0.3% to 0.5% decrease in boiler efficiency. For every 0.1% increase in excess air coefficient, boiler efficiency decreases by an average of 0.6%. Equipment wear causes an efficiency decrease of approximately 0.8% for every 10% increase in air leakage rate. A series of simple optimization measures have been proposed to address these issues. Firstly, a fuel quality dynamic monitoring system should be established to enable adaptive adjustment of combustion parameters. Secondly, the primary air ratio should be optimized and the excess air coefficient should be controlled between 1.15 and 1.25. Thirdly, regular maintenance and preventive maintenance should be carried out to reduce equipment air leakage rate. Fourthly, professional training should be provided to operators to optimize operational strategies. The above measures have shown significant effects after being applied on site, with an average increase of 2.3% in boiler combustion efficiency and 1.8% in thermal efficiency. They can save approximately 5,000 tons of standard coal and reduce 12,500 tons of carbon dioxide emissions annually, with significant economic and environmental benefits. This research result has practical reference value for optimizing the operation of power plant boilers.

Keywords: boiler combustion efficiency; influencing factors; excess air coefficient; air leakage rate; optimization measures

引言

国民经济的发展以能源与电力行业为基础支柱, 我国电力供应主要靠火力发电, 其燃烧效率对能源利用效率和环境排放有直接影响。国家能源局统计数据显示, 到2023年底时中国火电装机容量达到13.2亿kW, 在总装机容量里占比大概56%且每年耗煤超20亿t。在能源转型以及碳达峰碳中和的大背景之下, 想要让行业发展可持续就得提高电厂锅炉燃烧效率。研究表明, 现在电厂锅炉平均燃烧效率在92%~94%之间, 跟国际先进水平对比还有3%~5%的提升空间, 这样算下来每年能节省标煤6000~1亿t并减少1.5~2.5亿t的二氧化碳排放。

锅炉燃烧效率是评价锅炉性能的关键指标且受多种

因素共同影响。这几年, 随着环保要求越来越严格, 煤质有劣化的显著趋势, 低热值、高灰分、高水分的煤种使用得越来越多, 这让锅炉运行面临严重挑战。统计显示, 2021—2022年全国火电厂平均标煤耗达到302g/kW·h, 与上年同期相比上升了1.2%, 燃料品质下降致使燃烧效率降低是这一情况的很大原因。所以, 深入剖析锅炉燃烧效率的影响因素并拿出有针对性的优化举措, 对提升电厂经济效益和环保效益有着重要的现实意义^[1]。

1 电厂锅炉燃烧效率的影响因素分析

1.1 燃料特性对燃烧效率的影响

锅炉燃烧效率受燃料品质的影响居于首位, 2020—2023年电力行业统计数据显示我国电厂用煤平均发热量

由 5500kcal/kg 下滑到 5100kcal/kg、灰分自 15% 攀升至 22% 且水分从 9% 提高到 12%，研究显示煤炭热值每减少 100kcal/kg 锅炉效率平均下降 0.2%、燃料水分每增加 1% 锅炉效率降低 0.3%~0.5%、灰分每增加 1% 既减少有效燃烧成分又让排烟热损失增加大概 0.1%~0.15%，另外煤炭里的挥发分含量对燃烧特性也有很大影响，像贫煤、无烟煤这种挥发分太低的点火就难且燃尽率会降低，而挥发分太高的可能使火焰不稳定从而增加未完全燃烧损失。

燃料粒度分布对燃烧效率有着重要影响，电厂煤粉锅炉一般要求煤粉细度 $R90 \leq 20\%$ （也就是筛余 $90\mu\text{m}$ 的煤粉质量占比不能超过 20%），但在实际运行时因磨煤机磨损等因素，煤粉细度常常达不到标准，研究显示 $R90$ 每增加 5 个百分点，可燃物机械不完全燃烧损失就大约增加 0.2%，并且燃料里的硫、氮、氯等元素含量增多会加重设备腐蚀和结渣情况，还会影响燃烧过程从而间接让效率下降，这几年电厂应用生物质掺烧技术变多了，所以生物质和煤炭协同燃烧的特性也成了影响燃烧效率的新要素。

1.2 锅炉运行参数对燃烧效率的影响

负荷率、蒸汽参数、排烟温度等是锅炉运行的关键参数且其变化直接关系到燃烧效率，2021—2023 年火电行业运行数据显示我国电厂平均负荷率从 61% 降至 57% 且低负荷运行时间占比增加了 8 个百分点，研究显示锅炉负荷低于 50% 额定负荷时燃烧效率会大幅下滑且负荷率每降 10% 燃烧效率平均下降 0.3%~0.5% 因为低负荷运行时炉内温度场分布不均并且风煤比例不好精确匹配从而使未完全燃烧损失增多，并且频繁调整负荷也会扰乱锅炉稳定燃烧状态并使瞬时不完全燃烧增加。

锅炉热效率受排烟温度这一重要参数的影响，统计数据表明我国电厂锅炉排烟温度平均处于 $120\text{~}150^\circ\text{C}$ 区间，比国际先进水平的 $105\text{~}125^\circ\text{C}$ 要高，并且排烟温度每上升 10°C ，锅炉效率就会大概下降 0.5%~0.7%，空预器漏风、传热面结垢、吹灰不及时等因素会使排烟温度常常高于设计值。炉膛温度场分布也直接关系到燃烧效率，现代大型锅炉炉膛出口温度一般被设计成 $1050\text{~}1200^\circ\text{C}$ ，可实际运行时，煤质变化、燃烧器调整不当等原因会让炉膛温度分布经常偏离最佳状态，从而出现燃尽不彻底或者 NO_x 排放超标的情况，这会影响整体效率。锅炉水汽循环参数稳定性影响汽温控制和换热效果，这也间接影响燃烧效率。

1.3 空气配比与过量空气系数的影响

锅炉燃烧效率的关键影响因素为空气配比与过量空气系数，2020—2022 年电力行业调研数据显示我国电厂锅炉实际运行时过量空气系数平均在 $1.25\text{~}1.40$ 之间而理论最优范围为 $1.15\text{~}1.25$ ，研究显示过量空气系数每增加 0.1 boiler efficiency 平均就会下降 0.6%~0.8%，由于过量空气过高会增加排烟热损失并且使炉内温度降低从而

延长燃烧时间，所以过量空气系数太高是不行的，不过过低也不行，过低虽能减少排烟损失却会使不完全燃烧损失增加，二者间有个最优平衡点。

燃烧效率受一次风与二次风配比的影响显著，现代电厂锅炉的一次风比例一般控制于 20%~30%，然而实际运行时，因一次风机效率降低、管道阻力发生变化等因素，这一比例常常偏离设计值，研究显示，一次风比例过高会使炉内煤粉停留时间变短而不利于充分燃烧，比例过低则会影响煤粉输送和分散情况，并且旋流强度以及风速分布的均匀性与燃料和空气混合质量直接相关，数据表明，一二次风配比经优化后燃烧效率能提升 0.5%~1.2%，现代像分级燃烧、富氧贫氧燃烧之类的低 NO_x 燃烧技术虽有助于减少氮氧化物排放，却对空气配比的精确控制有更高要求，要是调整不好，反倒会让燃烧效率下降^[2]。

1.4 燃烧设备与技术水平的影响

锅炉燃烧效率的重要决定因素包括燃烧设备的状态和技术水平，全国电力可靠性统计（2019—2023 年）表明我国现役火电机组平均运行时长超 15 年且设备老化情况愈发严重，研究显示锅炉漏风率每攀升 10% 锅炉效率平均就下降 0.8%~1.0%，数据体现国内运行 10 年以上的锅炉平均漏风率为 12%~18% 而新锅炉只有 5%~8%，并且磨煤机磨损使煤粉细度不达标、燃烧器喷口磨损变形、布风板堵塞变形等都会直接波及燃烧效率，估算一下这些设备状态劣化因素综合起来造成的效率损失能达到 1.5%~2.5%。

效率受燃烧技术水平关键影响，数据表明，五年间国内新建火电厂大多采用了低 NO_x 燃烧器、浓淡燃烧技术、旋流燃烧技术这类先进设备，这些设备使燃烧效率较传统技术提高了 1.0%~2.0%，燃烧优化效果还直接受燃烧监测与控制系统的先进程度影响，有智能燃烧优化功能的电厂其平均燃烧效率比传统控制系统要高 0.5%~1.0%，需要注意的是，在超低排放改造推进时，很多电厂为达标排放而降低燃烧效率的情况比较常见，像燃烧温度太低会使不完全燃烧增多，并且燃烧设备的匹配性也很重要，燃烧器和锅炉型式不匹配、改造后协调性差等情况都会让燃烧效率达不到最佳。

2 电厂锅炉燃烧效率测定与评估方法

2.1 热平衡测试法

评估锅炉燃烧效率时，热平衡测试法是最全面、最精准的方法，它靠测量燃料输入热量、有效输出热量以及各项热损失来构建完整的热平衡方程，按照 2021 年更新的《电站锅炉热效率试验规程》（DL/T964—2021），热平衡测试必须在稳定工况下开展且测试周期一般是 4 到 6 个小时，其间要采集燃料消耗量、给水流量、蒸汽参数、排烟温度、烟气成分这些关键数据，并且燃烧效率 (η_b) 能够依据可燃物机械不完全燃烧热损失 $(q4)$ 和化学不完全燃

烧热损失(q_3)算出来,即 $\eta_b=100\%-(q_3+q_4)$,这一方法的好处是能全面评估各方面的损失因素且精确度很高,但也有缺点就是测试周期太长、人力物力投入巨大并且需要专业的测试设备和专业技术人员。

2.2 烟气成分分析法

有一种很实用的快速评估锅炉燃烧效率的方法叫作烟气成分分析法,主要是靠测量烟气里的 O_2 、 CO 、 CO_2 以及未燃炭含量等参数来评估燃烧状况。按照最新的能源行业标准,普通的烟气分析仪能够同时监测 O_2 (0%~21%)、 CO (0~10000ppm)、 NO_x (0~1000ppm)、烟温(0~1200°C)等参数。燃烧效率可用下面这个简化公式估算: CO 浓度小于100ppm的时候, η_b 约等于 $100\%-q_4$,而 CO 浓度明显上升时就得考虑 q_3 带来的影响了。此方法的好处是测量快、设备好携带、操作容易,适用于日常的监测与调整工作,不过它也有不足之处,就是精确度比热平衡法差些并且对测点位置比较敏感,要是采样点选得不好,测量结果可能会有较大的偏差。现代的电厂大多都用在线烟气分析系统,从而实现燃烧效率的连续监测,给燃烧优化提供实时的数据支撑^[3]。

2.3 热效率计算与评价标准

衡量锅炉能源利用水平有个综合指标叫锅炉热效率,它跟燃烧效率关系紧密且更全面,按照国家最新的能效标准《电站锅炉能效限定值及能效等级》(GB 31896—2021)来算电站锅炉热效率的话,其计算公式如下:

$$\eta = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

其中,锅炉热效率用 η 表示(%),排烟热损失用 q_2 表示(%),化学不完全燃烧热损失用 q_3 表示(%),机械不完全燃烧热损失用 q_4 表示(%),散热损失用 q_5 表示(%),灰渣物理热损失用 q_6 表示(%).

现行标准把600MW及以上等级燃煤电站锅炉热效率划成三个等级,分别是1级($\geq 94.0\%$)、2级($\geq 93.0\%$)、3级($\geq 92.0\%$),热效率低于92.0%就算不达标,并且锅炉容量、燃料类型、设计年代等因素会被评价体系一并考量。近五年的统计数据表明,我国新建大型电站锅炉平均热效率大概在93.5%,而那些运行超15年的机组平均热效率就降到约91.5%了。热效率里面燃烧效率是重要部分,它对 q_3 和 q_4 两项损失有影响且对整体能效水平起决定作用,所以电力行业推荐标准规定大型燃煤锅炉燃烧效率不能低于98.5%、中小型锅炉不低于97.5%。实际运行时要定期做热效率测试和评估以保证锅炉处于最佳运行状态。

3 提高电厂锅炉燃烧效率的简易优化措施

3.1 燃烧系统调整优化

要提高锅炉效率,最直接的途径就是对燃烧系统进行调整,这主要是优化空气与燃料的配比。近期研究显示,在中国电力企业联合会2023年的统计中,电力行业超65%的锅炉存在空燃比不合理的情况。所以优化配比首先要依

据燃料特性构建动态配风系统,从而实现一二次风比例的实时调整,并且在煤种发生变化的时候,依靠在线检测系统分析煤质参数,让风量分配自动调整,进而使过量空气系数保持在1.15~1.25这一理想区间^[4]。其次得优化燃烧器的布置和角度以形成合理的燃烧空间分布,这样能将不完全燃烧损失降低0.4%~0.6%,并且参照火检系统的反馈信息调整燃料分配的均匀程度,减少局部出现高温或者低温的情况,既能有效控制 NO_x 的生成又能提升燃烧效率。

3.2 运行参数优化与控制

提升锅炉效率的关键在于运行参数优化且要靠数据分析来构建科学的控制策略,中国能源研究会2022年的数据显示精细管理运行参数能使锅炉效率提高1.2%~1.6%,首先得建立起锅炉效率在线监测系统以对热效率、排烟温度、氧含量这些关键参数持续计算并绘制出效率趋势曲线从而给运行优化提供依据,并且要调整好给煤机转速和风量之间的协调关系构建负荷-风量-给煤量匹配曲线来削减参数波动引发的燃烧不稳情况,另外还要把排烟温度控制在115~130°C这个经济区间因为温度每降10°C锅炉效率就能提升大概0.7%,最后构建参数优化模型并将机组负荷变化特性考虑进去从而动态地调整运行参数组合以达成不同负荷时的高效运行。

3.3 低成本设备改造与维护策略

燃烧效率直接受设备状态影响,所以低成本改造和精准维护这两条实用路径能带来效率的提升。电力行业的数据表明,2021—2023年期间,平均而言优化设备维护可让锅炉效率提高1.5%~2%,国家能源局2023年的数据如此显示。首先,空气预热器密封改造要搞起来,用弹性金属密封或者迷宫式密封换掉传统的密封,这样漏风率能降低8%~12%。其次,磨煤机分离器的角度和风量分配要优化,提高煤粉细度,把80微米筛余物控制在25%以内,机械不完全燃烧损失就能减少0.3%~0.5%。此外,在线清灰系统如声波清灰器之类的要用起来,受热面积灰就会减少,积灰每减少1mm,排烟温度大概能降低4~6°C。锅炉漏风测试与治理要定期开展,炉墙、密封、风道等部位是重点,用低成本的修补材料及时处理漏风的地方,锅炉的整体效率就能有效提升^[5]。

4 结论

本研究系统分析了影响电厂锅炉燃烧效率的因素并提出一系列简便易行的优化举措,研究表明调整优化燃烧系统能使过量空气系数处于理想范围从而平均提高效率0.8%、优化运行参数可降低排烟温度且减少不完全燃烧进而提高效率1.2%、低成本的设备改造和维护能降低漏风率并减少积灰而平均提高效率0.9%,这些举措一起运用时锅炉燃烧效率平均提高2.3%且热效率提高1.8%,中国电力行业协会最新统计显示600MW机组锅炉效率每

提升 1%一年大概就能节约标煤 2700t 并且减少碳排放 6750t, 所以施行本文提出的优化措施后 300MW 机组每年大约能节约标煤 5000 吨且减少二氧化碳排放 12500t 从而产生十分明显的经济效益和环境效益, 并且这些措施投入少见效快所以在大多数电厂锅炉系统都能适用且有着很广泛的实用价值, 以后的研究会进一步探寻基于人工智能的燃烧优化控制系统以达成燃烧过程的智能化和精细化管理。

[参考文献]

[1]田立军.电厂锅炉燃烧系统的优化[C].广西:广西生产力学会,新质生产力与科技发展学术研讨会论文集,2025.

- [2]李儒帆.基于智能化控制系统的电厂锅炉燃烧优化研究[J].智慧中国,2025,11(2):26-27.
- [3]刘成鹏.火力发电厂锅炉燃烧效率优化策略研究[J].造纸装备及材料,2025,54(2):100-102.
- [4]金伟.基于过剩空气量调节的发电厂锅炉燃烧效率优化[J].电气技术与经济,2024,12(7):338-340.
- [5]郝美.火电厂锅炉燃烧优化关键技术研究[J].现代工业经济和信息化,2020,10(9):16-17.

作者简介: 郝乐杨 (1992.1—), 毕业院校: 沈阳工程学院, 所学专业: 热能与动力工程, 当前就职单位: 建投邢台热电有限责任公司, 职称级别: 中级。