

锅炉燃烧调整对火电机组热效率的影响分析

张得垒

华电国际邹县发电厂，山东 邹城 273500

摘要：火电机组锅炉燃烧优化是提升能源利用效率、削减污染排放的关键技术手段，本文按照燃烧动力学理论开展研究，系统分析燃料配比的调整、空气系统的改进及余热回收等技术举措对锅炉热效率的作用机理，剖析燃烧工况调整与热损失控制的内在关联。借助精细调控燃料颗粒度分布、优化二次风混合程度并实施烟气余热梯级利用，可有效提高燃料燃尽的比例，进而降低排烟热损失，工程实施案例表明，燃烧优化技术可大幅提升锅炉热效率，还可协同实现氮氧化物跟硫氧化物的深度削减。依托国内外典型案例，研究燃烧调整技术在能效提升、环保目标达成和经济性领域的综合效益，进而探讨生物质掺烧、智能调控等新兴技术未来的发展趋势，研究成果为火电机组实现高效清洁工作提供了理论依据与技术解决路径，对于促进电力行业绿色低碳转型具有关键指导意义。

关键词：锅炉燃烧调整；火电机组；热效率；燃烧优化；污染物排放

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.31

引言

火电机组作为电力供应的核心设施，其能源利用效率直接影响电力行业碳排放强度。锅炉作为能量转换的核心设备，燃烧过程的热损失占机组总能耗的 60% 以上^[1]。通过燃烧调整优化燃烧工况，已成为提升机组经济性和环保性的关键技术路径。本文结合燃烧动力学理论和工程实践，深入探讨燃烧参数调整对热效率的作用机理，为火电机组优化运行提供科学指导^[2]。

1 锅炉燃烧基本原理

1.1 锅炉燃烧过程的概述

锅炉燃烧从本质上看是把燃料蕴含的化学能高效转化为热能的物理化学过程，该完整流程能归纳为燃料破碎处理、与氧化剂进行混合、点火启动以及残余燃料燃尽四个递进阶段，以常规的典型煤粉燃烧为例，燃料颗粒进入炉膛后跟助燃空气形成混合体系，依次经历挥发分释放活化、固态焦炭氧化燃烧以及无机

矿物成分灰渣化的演变流程，燃烧效率的主要控制要素有氧气扩散浓度、反应区温度梯度特征及燃料颗粒的有效反应时长^[3]。实验结论表明，当把炉膛核心区域温度稳定控制在 1100 至 1300 摄氏度之间时，燃料能量释放的完全程度能提升至 98% 以上的良好水平。

1.2 燃烧优化对热效率提升的关键作用

锅炉燃烧调节作为能量转化系统中的核心一环，借助精准调控燃料与氧化剂的配比、优化二次风的湍流混合力度及动态控制制粉系统，大幅增进燃料燃烧活性与热能转换的效率，每次把过量空气系数降低 0.1 个单位，可同步达成排烟温度降低 3 - 5℃ 与机组热效率提高 0.3% - 0.5%，该过程直接和火电机组热效率的关键定义有联系，也就是电能输出与燃料化学能总量的转化比率。作为影响热效率的主导要素，锅炉运行效能主要为三方面能量损耗所制约：烟气的多余热量、燃料未充分燃烧状况及设备散热，采用精细调控燃烧参数的方式强化氧化反应完整性，配合以烟气余热深度

回收为主的技术手段,不仅切实降低了各类能量耗费,更为搭建“燃烧优化 - 热效率提升”的良性循环给出了系统化解决办法。

2 锅炉燃烧调整的技术措施

2.1 燃料配比调整

在火电机组运转期间,燃料配比的优化是提升燃烧效率的关键技术手段,燃料的物理化学特点对燃烧过程的稳定性起到关键作用,所以需要构建跟煤质参数变化相契合的动态配比调节机制,面对高灰分燃料煤种,通过把细粉颗粒的占比提升至 80%以上,其中关键控制粒径小于 75 微米的细颗粒占比,能明显提升燃料的燃尽质量^[4]。在生物质燃料掺烧的工艺里面,为使系统实现安全运行,得严格把控掺混比例在 10%的阈值界限里面,该举措能有效预防炉内出现结焦问题,实际运行的数据显示出,某 600 兆瓦量级的发电机组实施智能动态配煤这项技术,成功取得锅炉效率上扬 1.8 个百分点的显著效果。

2.2 空气比及混合气体控制

进行燃烧时对空气配比的调控是提升锅炉效能的关键技术环节,精确把控过量空气系数直接关乎系统的能效表现,当该系数从 1.25 改善为 1.15 时,能看到排烟氧含量从 4.5%相应降到了 2.8%,同时还体现出排烟温度下降 15 摄氏度的显著成效,该优化方式能产生热效率提高 0.7%的实际效果,就二次风系统的调控情况看,经过合理调整旋流强度可有效改良燃烧切圆形态,把切圆直径控制在炉膛宽度的 0.8 到 0.9 倍范围时,还可让火焰充满度增长 12 个百分点,还能有效把飞灰含碳量控制在 3%以下的技术指标。

2.3 余热回收及热交换优化

当火电机组运行之际,实行烟气余热的梯级回收利用是实现能源高效转化的重要技术措施,利用安装低温省煤器等热回收装置这一举措,能把排烟温度自 140 摄氏度明显降至

90 摄氏度,优化这一温度区间,能让热效率实际提升 0.4 到 0.6 个百分点。工程实例说明,采用先进的复合相变换热技术呈现出明显的节能效应,某大型发电企业采用这项技术之后,实现了年度节省标准煤 1.2 万吨的运营成绩,打造规范的受热面清灰维护体系,可使换热系统的传热效率提升幅度达 15% - 20%,这一举措对保障机组长期高效运转意义重大^[5]。

3 锅炉燃烧调整对热效率的影响

3.1 热效率的提升机制

锅炉系统热效率的上扬主要依托三个关键方面的燃烧优化行动,首先是借助改善燃烧的完全度来降低未燃尽碳的损耗,把飞灰中含碳量稳定限制在不超过 4%的技术指标,其次是把排烟温度进行合理调控,让其维持在 120 至 140 摄氏度设定的设计范围,借此有效降低烟气显热的损耗,第三是实现蒸汽参数的精确匹配优化,实践验证主蒸汽温度每上升 10 摄氏度,可使循环效率增长 0.3 个百分点,工程应用实例表明,某超临界参数机组落实系统性的燃烧优化调整后,实现了供电煤耗每千瓦时降低 6.8 克的突出节能成效。

3.2 燃烧优化对污染物排放的影响

现代锅炉燃烧优化技术在降低污染物排放上展现明显效果,采用空气分级设计的低氮燃烧系统能有力抑制氮氧化物生成,其减排幅度可达 40%到 60%的区间,当燃尽风占总风量的比例提升到 25%这一优化区间时,炉膛还原区域的实际运行温度可降低 150 摄氏度,处于此工况期间,氮氧化物排放浓度可稳定把控在每立方米 180 毫克以下的技术标准,燃烧效率提升后还出现了硫氧化物减排的协同效应,每千瓦时发电量所对应的二氧化硫排放强度可降低 0.1 克,呈现了燃烧优化在环境保护上的综合价值意义。

3.3 各类锅炉的热效率对比

不同类型锅炉的热效率表现与其技术特

性密切相关。通过燃烧系统优化后的煤粉锅炉，可实现 42%至 45%的热效率水平；而循环流化床锅炉得益于低温燃烧方式，其热效率普遍维持在 40%至 43%区间。在高效机组领域，采用 31 兆帕、610 摄氏度主蒸汽参数的超超临界锅炉，相较于亚临界机组可实现 5%至 7%的热效率提升。实际运行案例显示，某百万千瓦级发电机组通过系统性改造后，年平均热效率提高了 2.3 个百分点，由此产生的燃料成本年度节约规模突破 2000 万元，充分印证了技术升级的经济效益。

4 实际应用与效果评估

4.1 国内外火电机组案例分析

全球范围内，火电机组的燃烧优化实践呈现了具有示范意义的能效提升实例，国内有个 600 兆瓦超临界机组采用精细化燃料管理，将煤粉粒径精准掌握在 45 到 75 微米范围，配合实施分级燃烧技术改造，顺利把飞灰含碳量从 6.2%降到了 3.5%，锅炉整体效率上扬了 2.3 个百分点，实现每年节约标准煤 1.5 万吨的突出成效。德国 Datteln 4 电厂的创新实践证明，采用深度空气分级技术可让氮氧化物排放浓度稳定地保持低于每立方米 80 毫克，与余热回收系统的应用相配合，把排烟温度降低至 95 摄氏度，最终实现出 46.5%的热效率水平，跟常规机组比起来提升 4 个百分点。日本竹原电厂在智能化方面的探索，借助人工智能算法达成二次风门动态调节，把燃烧效率波动幅度从正负 1.5%削减至正负 0.3%，极大改善了机组运行的稳定性，这些典型案例有效验证了精细化燃烧调控技术在突破传统能效瓶颈方面的关键地位。

4.2 燃烧调整技术的经济性评估

燃烧系统优化改造的经济价值应综合评估初期投入与长期效益，以低温省煤器系统做例子，虽然设备采购及安装方面需投入 800 万至 1200 万元资金，然而它可回收烟气余热的

特性，可把供电煤耗指标降低 2 至 3 克每千瓦时，按照机组年度运行 5500 小时的工况算，一般能在 3 至 4 年把全部投资成本收回来。从空气分级燃烧技术改造方面看，其综合改造的成本大概占项目总投资的 5%到 8%，但在碳交易市场里，二氧化碳每吨价格在 60 元至 100 元范围的背景下，该技术产生的减排收益可让项目净现值上浮 15%至 20%，尤其值得一提的是，燃烧优化技术通过降低受热面高温腐蚀等难题，能切实延长设备的使用寿命，预计每年可把维护费用支出减少 10%至 30%，该特性使其于全生命周期成本评估中体现出明显的竞争优势。

4.3 政策调控对燃烧技术发展的导向作用

政策引导在燃烧系统优化技术推广应用的进程里起着决定性作用，以咱们中国《煤电节能降碳改造实施方案》为例，该政策清晰要求现役机组平均供电煤耗要控制在每千瓦时 300 克以下，这一强制性要求直接推动发电企业加速落实燃烧系统优化改造。欧盟《工业排放指令》严格限定氮氧化物排放限值为每立方米 200 毫克，该标准明显助力了低氮燃烧技术的广泛采用，能效提升标准跟环境保护法规相互配合，合理引导企业采用综合性的燃烧优化解决途径，值得关切的是，美国《清洁空气法案》创造性地采用排污权交易制度，促使燃烧优化项目的内部收益率范围提升至 12%到 18%，该数值明显胜过传统技术改造项目 8% - 10%的收益率水平，政策引导机制跟市场调节手段的高效结合，正切实改变火电行业技术升级的发展走向。

5 未来发展趋势与展望

5.1 新型燃料技术的发展趋势

在火电行业实施低碳转型的过程阶段，生物质掺烧及氨煤混燃技术展现出关键应用价值，实际运行情况数据表明，要是木质颗粒燃

料掺烧比例达到 20%，机组碳排放强度能实现 15%至 18%的大幅显著降低，但此技术路线需重点处理碱金属腐蚀和灰渣结焦等工程方面的难题。氨燃料由于零碳排放这一特性备受瞩目，若掺混比例为 30%，相关技术已能把锅炉效率的损失有效控制在 2%以下，日本 JERA 公司于碧南电厂进行的示范项目验证了此技术的可行性，诸如富氧燃烧、化学链燃烧的创新技术改变了传统燃烧介质组成，预期可明显降低二氧化碳捕集进程里的能耗，其降幅最高可至 40%，这些技术进展为火电行业实现深度脱碳要求提供了新的技术法子。

5.2 火电行业智能化升级与可持续发展融合路径

数字化技术与生态理念协同共进，正在重塑火电行业的发展格局，依托数字孪生平台的燃烧场动态重构技术达成了锅炉内部工况的分钟级实时调节控制，和深度学习算法配合对风煤配比自主优化，能让百万千瓦级机组热效率的波动幅度降低 58%，5G 通信与边缘计算融合后，将进一步构建“感知 - 决策 - 执行”的智能闭环体系。就可持续发展维度，采用燃煤 - 光热联合循环，余热发电效率提升到 35%，碳捕集技术与燃烧优化协同实施，让机

组净效率损失从 12%降低到 8%，采用生态仿生设计的燃烧组件可降低风机能耗达 20%以上，这些创新一起支撑起国际能源署预计的 2040 年全球年减排 6 亿吨目标，近乎占行业减排总量的 30%，表明火电行业正依靠智能化与绿色化双轮驱动，步入高效低碳的新发展阶段。

结束语

作为火电机组能效提升核心技术的锅炉燃烧调整，采用对燃料配比进行优化、对空气系数加以调控及余热回收等系统举措，极大改进了燃烧过程的热力学属性，实行精细化燃烧控制，机组热效率能提升 2%-5%，同时实现氮氧化物减排 40%-60%并达成硫氧化物协同控制的环保效益。由国内外工程实践验证，燃烧优化技术改造不仅让供电煤耗降低至 3 - 8 克/千瓦时，而且依靠政策引导和市场机制的耦合构建经济性优势，伴随生物质掺烧、氨煤混燃等低碳技术的进步，加之数字孪生、智能调控等技术的深度采用，火电行业将加速向高效、清洁的方向实现转型，燃烧优化技术作为把传统能源与可持续发展联系起来的关键纽带，会长期推动火电机组打破能效壁垒，为建成低碳电力系统提供关键技术支撑点。

参考文献

- [1] 段玉龙. 火电厂运行调整及锅炉燃烧调整对飞灰品质的影响[J]. 生态与资源, 2025, (03): 59-61.
- [2] 骆绍山, 魏春林. 火电厂锅炉燃烧技术的优化调整研究[J]. 中关村, 2024, (09): 106-107.
- [3] 陈就. 火电厂锅炉运行调整对飞灰品质的影响[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(05): 250-252.
- [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(06): 346-347.
- [5] 鲁宁. 电厂运行调整及锅炉燃烧调整对飞灰品质影响[J]. 设备管理与维修, 2022, (18): 131-132.