火电厂集控运行中锅炉燃烧调整与煤耗优化措施分析

程永乐
中国华电科工集团有限公司，北京 100000

[摘要]集控运行下的锅炉燃烧调节和煤耗优化难题，就是风煤配比、燃烧器工况、煤质特性三者之间存在耦合关系，单个参数接近设计值的时候，排烟热损失和机械不完全燃烧损失会互相抵消。从燃烧效率、排烟热损失和辅机电耗三个方面来分析煤质和配风对煤耗的影响机理，提出燃料匹配、风量配比、燃烧器运行方式、负荷协同调节这四种措施，建立参数监测、热效率改善、DCS 智能控制、效果评价的实施体系。经过实践证明，在保证主蒸汽温度 569℃±2℃、炉膛负压-50~-150Pa 的条件下，用改进粒子群算法进行燃烧优化可以使得标准煤耗降低 2.1g/（kW·h），NOx 排放降低 12.3%。效果能否复现，看调整策略同机组煤质状况、负荷模式是否相适应。

[关键词]火电厂；集控运行；锅炉燃烧调整；煤耗优化
DOI：10.33142/hst.v9i9.20644　　中图分类号：TK229　　文献标识码：A

Analysis of Boiler Combustion Adjustment and Coal Consumption Optimization Measures in Centralized Control Operation of Thermal Power Plants

CHENG Yongle
China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract: The difficult problem of boiler combustion regulation and coal consumption optimization under centralized control operation lies in the coupling relationship between air coal ratio, burner operating conditions, and coal quality characteristics. When a single parameter approaches the design value, the exhaust heat loss and mechanical incomplete combustion loss will cancel each other out. Analyze the impact mechanism of coal quality and air distribution on coal consumption from three aspects: combustion efficiency, exhaust heat loss, and auxiliary power consumption. Propose four measures: fuel matching, air volume ratio, burner operation mode, and load coordination adjustment. Establish an implementation system for parameter monitoring, thermal efficiency improvement, DCS intelligent control, and effect evaluation. Through practical experience, it has been proven that using an improved particle swarm optimization algorithm for combustion optimization can reduce standard coal consumption by 2.1g/(kW·h) and NOx emissions by 12.3%, while ensuring a main steam temperature of 569 ℃±2 ℃ and a furnace negative pressure of -50 ~ -150Pa. Whether the effect can be reproduced depends on whether the adjustment strategy is suitable for the coal quality and load mode of the unit.

Keywords: thermal power plants; centralized control operation; boiler combustion adjustment; coal consumption optimization

引言

火电机组集控运行把锅炉、汽轮机和发电机放到同一个协调控制体系当中，锅炉燃烧调整由原来孤立的操作经验变成嵌入到控制逻辑中的参数寻优问题。煤耗是经济性综合体现，受锅炉热效率直接控制，又受厂用电率和管道效率间接影响。困难之处在于，调整手段的作用方向不一致，降低过量空气系数可以减少排烟带走的热量，但是会提高飞灰含碳量；增大燃尽风开度有利于抑制 NOx 生成，但是在部分负荷段反而提高了煤耗。因此煤耗优化不能简单地把所有的参数都朝设计值靠拢，而应该在相互制约的目标之间寻找一个可以接受的平衡。本文以集控运行的实际约束为起点，按照影响因素、调整措施、实施路径的顺序进行分析。

1 火电厂集控运行中锅炉燃烧调整和煤耗优化的基本原理

燃烧调整会通过三条途径影响煤耗。第一，燃烧效率路径。飞灰含碳量和炉渣含碳量表示机械不完全燃烧损失，风量不足、煤粉细度偏粗或者煤质偏离设计值都会增大该项损失。第二，排烟热损失路径。过量空气系数过大或者受热面被污染，使排烟温度和排烟容积增大，带走的热量

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

也随之增加。第三条为辅助机电耗路径。一次风机、送风机和引风机出力随着风量设定的变化而变化，风量冗余就变成了厂用电率的提高[1]。三条路径之间存在着明确的对立关系。燃尽风在 87%～100%负荷段增大燃尽风挡板开度可以减少 NOx 的产生量，但是煤耗会增大；在 75%～87%负荷段煤耗趋于平稳。燃烧调整的本质并不是消除损失，而是把三项损失的权重重新分配到一起。集控系统的价值在于，它可以使得再分配在线进行，即运行人员根据实时氧量、排烟温度和飞灰含碳量数据来判断当前工况下哪个损失处于边际增量的最高点，从而确定调整方向。煤耗优化的判据也由原来的单个指标合格变为综合代价最小。三条传导路径的作用特征及可调性汇总见表 1。

表 1　锅炉燃烧调整对煤耗的三条传导路径以及可调性对比

传导路径	关键中间指标	主要调整手段	对煤耗的作用方向	可调空间
燃烧效率路径	飞灰含碳量、炉渣含碳量	煤粉细度、一次风量、磨煤机组合	飞灰含碳量每降低 1 个百分点，煤耗下降约 1.2~1.5 g/（kW·h）	受煤质可磨性与燃尽特性约束，中等
排烟热损失路径	排烟温度、过量空气系数	二次风配比、氧量设定、吹灰优化	排烟温度每降低 10℃，锅炉效率提高约 0.5~0.6 个百分点	受受热面面积与沾污程度约束，中等偏大
辅机电耗路径	风机电流、厂用电率	二次风压滑压控制、风门开度	一次风机电耗率降低 0.30%对应煤耗约 0.19g/（kW·h）	受负荷与风量裕度约束，较小但响应快

从表 1 可知，三条路径的可调空间不是均衡的，排烟热损失路径的可调幅度最大，但是响应周期最长；辅机电耗路径的节煤量级最小，但是可以在班次内立即见效。燃烧调整的操作先后顺序一般是压缩辅机电耗、排烟热损失的多余部分，然后用燃烧效率路径作为兜底方案。

2 火电厂锅炉燃烧及煤耗影响因素分析

2.1 煤质特性与燃料供应的影响

煤质属于燃烧调整的边界条件，而不是可以自由改变的变量。入炉煤热值低于锅炉设计最低值时，高负荷下容易出现锅炉负荷不稳定、烟气量增大、排烟损失增加、风机出力不足等问题；挥发分过低影响燃烧稳定性，过高易造成燃烧器设备损坏。灰分过多会引发炉膛结渣和受热面积灰，水分过多会使炉膛火焰中心温度降低、制粉系统出力下降[2]。在实际运行中，机组一般都处在煤质与设计工况有偏差的工况。此时燃烧调整的目标不能是追求设计效率，而应该在现有的煤质下找到可以接受的煤耗水平。掺烧是典型的场景，随褐煤掺烧比例增大，炉内烟气上升流速变大，煤粉颗粒停留时间略微减小，但是由于褐煤反应活性高、煤粉容易破碎，所以平均锅炉热效率仍然可以保持在 91.7%以上。这就意味着煤质影响不是单纯的恶化，调整策略对于煤质变化的反应方式，很大程度上决定着煤耗的实际走向。

2.2 配风参数与锅炉运行工况的影响

配风是运行人员可以自由调节的最大的一个调节变量。一次风有输送和着火两个作用，风量过大时着火热增大、炉膛温度降低，风量过小时会堵塞管道或者燃烧不稳定。二次风控制主燃区的氧量水平与混合状况，燃尽风控制主燃区之后的补燃以及 NOx 还原。负荷工况会改变配风的效果。同一配风方式在不同的负荷下煤耗响应是不一样的。在 87%～100%负荷段和 50%～75%负荷段，增大燃尽风开度使 NOx 生成量减少，煤耗上升，燃烧和脱硝综合成本略有增加；在 75%～87%负荷段，NOx 下降的同时煤耗趋于稳定，综合成本反而略有降低。这就表明，配风方案不能用一个固定的模式去覆盖全部的负荷范围，应该根据负荷区间的不同而改变自己的优化目标。低负荷阶段还要考虑稳燃约束，风量降低的空间受到火焰稳定性的限制。

3 火电厂集控运行中锅炉燃烧调整的关键措施

3.1 燃料特性适配与给煤量优化

燃料适配的第一步就是建立入炉煤质和磨煤机组合的对应关系。不同煤种的可磨性及着火性不一样，把高灰分、难燃尽煤种放到下层磨煤机里，优质煤种放到中上层，可以利用炉膛下部较高的氧分压和温度水平来改善难燃煤的燃尽情况。给煤量优化不能简单地把总煤量与负荷相匹配，而应该考虑各个磨煤机出力是否均衡以及一次风压是否足够。煤质出现阶段性偏离的时候，调整策略要先于被动适应。挥发分下降时，可适当提高一次风温或者减小煤粉细度来补偿着火延迟；灰分升高时，要注意受热面吹灰周期是否能抑制排烟温度的上升趋势。给煤量的优化空间，实质上就是运行人员对煤质变化趋势的判断是否早于煤耗数据的反馈。

3.2 一次风与二次风配比调整

一次风调节以保证着火稳定、输送可靠为底线。低负荷或者燃用低挥发分煤时，一次风量应控制在满足送粉的最低水平，防止着火热过大会造成热负荷过高。二次风调节以主燃区氧量分布为中心，它的目的不是把省煤器出口氧量固定在一个数值上，而是使各个层二次风挡板开度与对应层给煤机出力相匹配[3]。将空气预热器出口二次风压力由定值控制改为随机组负荷变化的滑压控制，将氧量校正回路中校正二次风挡板开度改为校正二次风压力，可以

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

使得锅炉排烟温度降低 4.03℃，机组煤耗降低 0.19g/（kW·h），一次风机电耗率降低 0.30%。该案例表明，配风调节的收益并不只是单纯地依靠风量数值的改变来实现的，更深层次的是依靠控制回路结构的匹配性调整。当二次风压设定值不变的时候，低负荷段风门开度小、风压裕量被浪费，滑压控制使风压随着负荷需求一起缩小。

3.3 燃烧器运行方式与炉膛燃烧优化

燃烧器运行方式的选择要兼顾炉膛热负荷分布均匀性以及 NOx 控制的要求。投运层数和组合方式会影响火焰中心的位置，下层燃烧器出力偏大时，炉膛下部热负荷集中，有利于稳燃但是会加重冷灰斗结渣；上层出力偏大时，火焰中心被抬高，排烟温度也随之升高。比较稳妥的方法就是根据负荷段来确定投运层基准，然后用磨煤机组合微调各层出力分配。燃尽风要分负荷区使用。75%～87%负荷段，适当增大燃尽风开度，在保证煤耗基本稳定的前提下可减少 NOx 的产生，属于综合代价较低的调整窗口。但是当负荷在 50%～75%之间时，燃尽风增大造成的煤耗代价就变得明显了，这时应该先保证燃尽，NOx 的控制被放在次要的地位上。燃烧器摆角的调整属于辅助措施，是为了解决由于煤质变化造成的火焰中心偏离而采取的措施，并不是经常进行的调节变量。

3.4 负荷变化下燃烧参数协同调节

变负荷时风量和煤量响应速度的不同，就是煤耗瞬时恶化的主要原因。给煤量指令发生变化的时候，磨煤机出力和煤粉进入炉膛会存在滞后现象，风量如果跟随过快，就会造成过量空气系数短时间偏高，排烟热损失增大；风量跟随过慢，则燃烧缺氧。协同调节的关键是给风量指令加上与给煤滞后相适应的惯性环节，使风煤比在动态过程中保持在可以接受的范围内。深度调峰工况下，它就成为协调的新任务。当该 1000MW 超超临界机组处在 34%额定功率的深度调峰时，经过锅炉的优化调整之后，锅炉热效率得到修正，修正后的锅炉热效率为 94.09%，比原来的锅炉热效率提高了 0.94%。低负荷段的风量裕度本来就小，任何一次过调都会造成风机失速或者燃烧不稳，所以协同调节的参数整定要偏保守一些，把稳定放在前面。

4 火电厂集控运行中锅炉煤耗优化的实施路径

4.1 基于运行参数监测的燃烧精细化调整

精细化调整的前提就是参数的可信度。集控系统中氧量、排烟温度、飞灰含碳量测点如果有系统性的误差，那么之后所有的调整都会偏离真实的方向。飞灰含碳量的在线检测十分重要，它直接对应着机械不完全燃烧损失的大小，但是取样的代表性以及仪表的标定状态也需要列入日常检查的范畴。在参数可信的基础上，精细化调整的操作逻辑就是用供电煤耗作为最终的判定标准，但是以中间指标为调整的依据。氧量发生变化时，观察排烟温度和飞灰含碳量的反向反应，如果飞灰含碳量上升幅度大于排烟热损失下降幅度，那么该氧量调整方向是不可取的。该判断不需要等到煤耗统计周期结束，可以在班次内完成。

4.2 基于锅炉热效率的运行经济性优化

热效率优化要区分可调损失和固定损失。排烟热损失中受热面沾污造成的部分可以通过吹灰优化回收，过量空气系数偏大多数可以通过配风调整来压缩。机械不完全燃烧损失中煤粉细度偏粗可以通过分离器挡板调整来改善，而煤质本身难燃尽的部分属于调整无法消除的边界。在 540MW 负荷下，单台磨煤机运行并掺烧褐煤时，修正后的锅炉效率最高达到 92.28%，供电煤耗为 299.62g/（kW·h）；60%掺烧比例、三台磨煤机运行工况下，同负荷供电煤耗升高到 301.72g/（kW·h）。对比可知，热效率提高不一定要增大掺烧比例或者增加磨煤机运行台数，运行方式的简单化在某些工况下反而可以降低煤耗。经济性优化的标准应该是具体的负荷和煤质组合下实际的效率，而不是设备运行的充分程度。

4.3 基于集散控制系统的燃烧智能优化

DCS 层面的优化，它的优点就是把调整的经验固化成可以复现的控制逻辑。采用自寻优控制、人工智能控制和前馈控制技术对原 DCS 控制模块进行替换后，一次风机电耗和飞灰含碳量的降低使发电标准煤耗减少 1.04g/（kW·h），SCR 入口 NOx 平均浓度由原来的 301mg/m³ 降到 219mg/m³，下降了 27%。实质就是把燃烧调整过程中依靠运行人员经验来完成的步骤，变成依靠实时数据来进行闭环修正的过程。更进一步的智能优化使用了多目标算法。以煤耗率、NOx 排放和蒸汽参数为多目标，对燃煤量、一次风、二次风、燃尽风配比、氧量设置以及燃烧器摆角进行优化，使用自适应惯性权重机制，使得系统可以满足主蒸汽温度、炉膛负压的硬约束条件，并且还能使标准煤耗降低 2.1g/（kW·h）。需要说明的是，由于基准工况的设定以及约束条件的宽严程度不同，因此这类优化收益数值不能直接比较，而且也会受到其他因素的影响。

4.4 燃烧调整效果评价与运行管理机制完善

效果评价的关键就是区分调整贡献和工况变化贡献。煤耗的班次对比如果跨越了负荷段或者煤质批次，那么数值的差别不能全部归因于燃烧调整。较为可行的办法是选取同一负荷区间、同一煤质来源的稳定运行时段作为比较基准，把调整前后煤耗差值作为评价对象，记录氧量、排

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

烟温度和飞灰含碳量的变化方向，用以判断煤耗变化是否来自预期的传导路径。管理机制的完善要从经验的保留出发，而不是只考核结果。将某煤质和负荷组合下验证有效的配风方案、磨煤机组合及氧量设定值列入运行规程的工况对照表，使以后的班次遇到类似的情况可以有依据。对智能优化系统给出的建议值要保留人工确认环节，防止算法在煤质剧烈波动的时候输出偏离实际的指令。

5 结语

火电厂集控运行中燃烧调整和煤耗优化的本质就是，在燃烧效率、排烟热损失和辅机电耗这三者互相制约的代价之下，根据当前煤质和负荷情况来确定一个可以接受的平衡点。煤质特性划定调整的边界，配风参数给可支配的调节空间，而负荷工况决定同一个调整手段的收益方向会反转。四类调整措施的有效性，都以该种条件匹配为前提，而不是通用规则的机械执行。从实施路径上看，参数监测是否可信、热效率判断是否具有工况针对性、DCS 优化是否合理、效果评价是否清楚，都会影响到优化措施能不能由一次试验变成持续的能力。既有工程数据中显示的节煤幅度，从 0.19g/（kW·h）的控制回路修正到 2.1g/（kW·h）的智能优化，其差别就说明，煤耗优化的空间很大程度上取决于调整手段和具体机组条件是否匹配，而不是一个固定的数值承诺。

[参考文献]

[1]冯子豪.基于粒子群优化的火电厂集控运行参数优化方法[J].现代工业经济和信息化,2025,15(10):118-120.

[2]丁湧.1000MW 超超临界燃煤锅炉深度调峰研究[J].发电技术,2024,45(3):382-391.

[3]徐侠,牛志岗.1000MW 超超临界锅炉燃烧与脱硝过程优化[J].电力科技与环保,2024,40(2):152-159.

作者简介：程永乐（1990—），男，江西九江武宁人，工程师，江西南昌理工学院电气工程及其自动化，现就职于中国华电科工集团有限公司，从事火电厂集控运行工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.