

660MW 直流锅炉的燃烧与调整探讨

韩伟伦, 刘晓航

杭州汽轮新能源有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/WCEST.2025030013

摘 要 : 直流锅炉的燃烧状况, 不仅影响锅炉自身的运行工况与参数变化, 还关系到机组的安全、经济及环保运行。因此, 机组在正常运行与启停过程中, 都需合理组织燃烧, 进行燃烧调整, 确保炉膛燃烧状态的稳定, 以满足机组变负荷运行的要求。本文围绕某厂锅炉布置形式、配套设备及选型特点展开探讨, 阐述了独特见解, 为同类型直流锅炉运行提供了调整办法。

关 键 词 : 直流锅炉; 运行工况; 燃烧调整; 燃烧状态

Discussion on Combustion and Adjustment of 660MW DC Boiler

Han Weilun, Liu Xiaohang

Hangzhou Turbine New Energy Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : The combustion performance of a once-through boiler not only affects its operational parameters and system stability, but also determines the unit's safety, economic efficiency, and environmental compliance. To ensure stable furnace combustion for variable load operations during normal operation and start-up/shutdown cycles, proper combustion management and adjustments must be implemented. This paper examines the boiler configuration, auxiliary equipment, and component selection characteristics at a specific plant, presenting unique insights that provide practical adjustment strategies for similar once-through boiler systems.

Keywords : DC boiler; operating condition; combustion adjustment; combustion state

一、锅炉概述

内蒙五间房产业园区某电厂一期工程装设 2 台 660MW 级燃煤汽轮发电机组, 其配套锅炉为 Π 型布置的超超临界参数变压直流炉, 采用单炉膛、前后墙对冲燃烧方式, 具备一次再热、平衡通风、固态排渣功能, 采用全钢结构架与紧身全封闭设计, 炉膛设计压力为 $\pm 6500\text{Pa}$, 炉膛布置如图 1 所示。锅炉

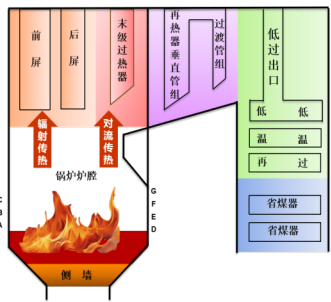


图 1 炉膛布置

前后墙共布置 7 层燃烧器, 前墙自下而上分为 A、B、C 三层煤粉燃烧器, 后墙自下而上分为 D、E、F、G 四层煤粉燃烧器。其中, A、D 层配备微油点火油燃烧器, B、E 层配备小油稳燃油燃烧器, 在最低稳燃负荷不超过 30% BMCR 的工况下, 可实现锅炉不投油长期安全稳定运行。燃烧系统由 HPAX-X 型低 NO_x 双调风旋流燃烧器、OFA 喷口、前后墙分隔仓风箱及火焰检测器等组成, 采用分级送风方式, 前后墙各设置 7 只 OFA 喷口。制粉系统为中速磨直吹式, 每台锅炉配置 7 台中速磨煤机, 燃烧设计煤种

时采用 6 台运行、1 台备用的模式, 煤粉细度控制为 $\text{R}_{90}=35\%$ 。

二、锅炉燃烧调整目的及燃烧调整试验

(一) 锅炉燃烧调整目的

锅炉燃烧必须保证着火燃烧稳定, 过热器出口蒸汽参数满足机组运行要求; 尽可能减少不完全燃烧损失和排烟热损失, 提高燃烧经济性; 保护水冷壁、过热器、再热器等受热面的安全、不超温超压, 不高温腐蚀; 燃烧调整适当, 燃料燃烧完全, 炉膛温度场、热负荷分布均匀; 最大限度减少粉尘、 SO_x 、 NO_x 的排放量, 达到环保指标要求。

(二) 燃烧调整试验

为保证直流锅炉燃烧稳定和安全经济运行, 新投产调试机组、运行一段时间后出现燃烧煤种、燃烧设备、炉膛结构等有较大变动时发生变化的机组或者经过大修后的机组, 均需要进行燃烧调整试验, 通常主要包括空气动力场试验、负荷特性试验、最低稳燃负荷试验、风量分配试验、经济煤粉细度试验、燃烧器静态调整试验及一次风压风速试验。通过试验可以确定最合理、经济的运行方式和参数控制要求, 为锅炉的安全运行、经济调度、自动控制及运行调整和事故处理提供必要的依据。

三、锅炉燃烧调整的手段

（一）锅炉启动初期调整

该厂锅炉启动过程中通常采取点燃 A、D 层微油燃烧器方式进行启炉，初期炉膛温度较低，燃烧器运行数量较少，热负荷不均匀，容易造成炉膛热偏差、局部超温和燃烧不稳的现象。我们应采取以下措施：1）锅炉冷态启动过程中尽快启动风道加热器，提前投入一次风及二次风暖风器，提高空气预热器入口一、二次风温，增强磨煤机入口风温，提高一次风干燥携粉能力，保证煤粉提前着火；2）降低一次风压力，防止炉膛过冷却的前提下适当增加二次风量，确保煤粉燃烧充分；3）提高煤粉浓度，适当开大顶层燃尽风门开度，降低火焰中心高度，使煤粉在锅炉燃烧停留时间增长，当一次风温达到 180℃ 以上时开启 A、D 层乏气送粉手动门，实现炉膛的分级燃烧；4）根据一次风温及出口烟气温度的，逐步增加制粉系统投入数量，同时退出油枪及风道加热器运行。

（二）正常运行过程中的燃烧调整

1）应正确调整制粉系统的运行方式。制粉系统的组合方式应根据机组负荷及煤质变化情况进行调整。尽可能保证下层制粉系统运行，降低火焰中心高度，保证煤粉在炉膛中的燃烧停留时间，使煤粉燃烧更充分，降低排烟损失。同时选择制粉系统运行方式时应充分考虑主、再热汽温及壁温变化，保证汽温和壁温不超限前提下尽可能消除两侧汽温热偏差，不用或者少用减温水进行调温。因该厂为直吹式制粉系统锅炉，故各煤粉燃烧器的煤粉气流应均匀；高负荷运行时，应将最大数量的煤粉燃烧器投入运行，并合理分配各煤粉燃烧器的供粉量，以均衡炉膛热负荷，减小热偏差；低负荷运行时，尽量少投煤粉燃烧器，保持较高的煤粉浓度；煤粉燃烧器投用后，及时进行风量调整，确保煤粉燃烧完全。配直吹式制粉系统的锅炉，负荷变化不大时，通过调整运行中制粉系统的出力来满足负荷的要求；负荷变化较大时，通过启、停制粉系统的方式满足负荷要求。若锅炉负荷增加时，应先开启磨煤机的入口热一次风调节挡板，增加磨煤机的通风出力，以利用磨煤机内的存粉作为增加负荷开始时的缓冲调节；然后再适当增加给煤量，同时相应地开大二次风门。反之当锅炉负荷降低时，则减少磨煤机的给煤量和通风量及二次风量。当煤质较差、负荷较低和燃烧不稳时，应及时投油稳燃，防止锅炉灭火，保证锅炉安全经济运行。

2）从设备原理来看，锅炉的送、引风机作为炉膛通风系统的核心设备，其出力调整直接关系到炉膛压力的稳定性。送风机负责将空气送入炉膛，为燃料燃烧提供氧气，而引风机则通过抽取炉膛内的烟气，维持炉膛处于微负压状态（通常设计值 -50~-100Pa）。两者的出力需形成动态平衡：若送风量过大而引风量不足，炉膛压力会由负转正，高温烟气可能外漏，不仅污染环境，还会威胁设备和人员安全；若引风过量而送风不足，炉膛负压过大会导致冷空气从炉墙缝隙、观察孔等部位大量渗入，降低炉膛温度，影响燃烧效率。因此，通过调节风机的变频转速或挡板开度来匹配出力，是维持炉膛压力正常的关键，这一过程需依托炉膛压力传感器的实时反馈，形成闭环控制，确保压力波动控制在

允许范围内。^[1-6]

3）从燃料特性角度分析，不同煤种的燃烧特性差异显著，对过量空气系数的需求也各不相同。设计煤种的燃烧试验数据是确定最佳过量空气系数的核心依据——例如，烟煤的最佳过量空气系数通常在 1.1~1.2 之间，而贫煤则可能需要 1.2~1.3，而该电厂位处褐煤煤炭基地，燃烧煤种多为褐煤，褐煤的燃烧特性决定了较高的过量空气需求，其过量空气系数最佳区间为 1.3~1.5。这一系数若偏小，燃料燃烧不充分，会增加机械未完全燃烧热损失（ q_4 ）和化学未完全燃烧热损失（ q_3 ），导致锅炉效率下降；若偏大，过量空气会带走炉膛内的大量热量，增加排烟热损失（ q_2 ），同样影响经济性。同时，炉膛及附属设备（如空气预热器、省煤器、炉墙法兰等）的漏风问题会直接破坏过量空气系数的稳定性。

4）从负荷调节逻辑来讲，锅炉负荷变化的本质是燃料燃烧释放热量与蒸汽带走热量的动态平衡，而风量则是确保这一平衡高效实现的关键。当增加负荷时，若先增加燃料量而非风量，会导致燃料因缺氧而燃烧不完全，不仅增加 q_3 、 q_4 损失，还可能产生一氧化碳、碳黑等污染物，甚至在高温区形成局部还原性气氛，引发受热面结渣、腐蚀等问题；反之，先增加风量可提前为后续燃料燃烧储备充足氧气，确保燃料及时、充分燃烧。同理，减负荷时若先减少风量，会导致剩余燃料因氧气不足而燃烧恶化，而先减少燃料量可在风量相对充足的前提下，让剩余燃料充分燃尽，再逐步降低风量以匹配较低的燃料量，避免因风量过大造成排烟热损失增加。

5）从运行人员调节方式上看，值班人员需根据入炉煤质（如挥发分、发热量、灰分等）的实时变化，动态调整一、二次风的参数：对于挥发分高的煤种，应适当降低一次风速以延长煤粉在着火区的停留时间，同时提高二次风混入速度以强化燃烧；对于发热量低的煤种，需增加一次风量以确保煤粉输送浓度合理，同时加大二次风风压以增强扰动，促进燃烧完全。通过精准控制一、二次风的配比、风速和风压，可在炉内形成“着火迅速、燃烧强烈、燃尽彻底”的良好工况，最终实现锅炉在不同负荷下的安全、高效、低污染运行。

6）定期检查燃烧器、受热面的运行情况，若有结渣、堵灰和污染现象，及时调整，采取措施予以消除。锅炉运行中，燃烧器和受热面的状态直接关系到燃烧效率与设备安全，定期检查并及时处理结渣、堵灰和污染问题，是维持锅炉稳定运行的关键环节。从燃烧原理来看，燃烧器的作用是将燃料与空气充分混合并点燃，若燃烧器喷口结渣，会改变燃料的喷射角度和混合路径。比如褐煤燃烧时，其高挥发分特性使得火焰根部温度较高，若一次风风速偏低或风粉混合不均，未充分燃烧的煤粉颗粒就容易黏附在喷口边缘，逐渐形成焦渣。这些结渣会缩小喷口截面积，导致局部风速升高，进而破坏空气与燃料的混合比例，造成燃烧不完全，增加飞灰可燃物含量。同时，结渣的导热性差，会使喷口金属温度升高，长期运行可能导致喷口变形甚至烧损，进一步恶化燃烧工况。受热面的结渣、堵灰则与烟气特性密切相关。炉膛内的高温烟气携带大量灰颗粒，当烟气冲刷水冷壁、过热器等受

热面时，若受热面壁温接近或超过灰的软化温度，灰颗粒就会黏附在管壁上形成结渣。以该厂燃烧褐煤为例，其灰分中碱金属含量较高，灰的软化温度通常较低，在炉膛高温区域更易发生结渣。结渣层会像隔热层一样阻碍热量传递，导致受热面吸热量减少，为维持额定蒸发量，不得不增加燃料消耗，此时出口烟温升高，可能引发过热器超温。而堵灰多发生在省煤器、空气预热器等低温受热面，烟气中的硫酸蒸汽在低温管壁上凝结，与灰颗粒结合形成黏性积灰，逐渐堵塞烟气通道，增加烟气阻力，使引风机电耗上升，甚至因通风不足限制锅炉出力。^[7-10]

实际运行中，这些问题相互影响、逐步恶化：燃烧器结渣导致燃烧不良，使烟气中未燃尽碳颗粒增多，加重受热面积灰；而受热面结渣、堵灰又会改变烟气流动工况，反过来影响燃烧器周围的温度场和气流场，形成恶性循环。因此，定期检查需结合运行参数变化综合判断：炉膛出口烟温异常升高、过热器温差增大

或引风机电流持续上升时，往往预示受热面存在结渣或堵灰问题。处理时需针对性施策：燃烧器结渣可调整一、二次风配比，提高一次风风速增强对喷口的吹扫，结渣较厚则在停炉时机械清理或高压水冲洗；受热面结渣可优化燃烧调整以降低炉膛局部温度，或运行中投入蒸汽、声波等吹灰器及时清除；堵灰和污染除定期吹灰外，还需控制受热面壁温（如调整空气预热器入口冷风温度，将壁温提至烟气露点以上），避免低温腐蚀。^[11]

四、结语

掌握锅炉各运行工况及各系统运行特性，加强运行人员调节技能培训，熟悉燃烧调整手段，时刻关注机组负荷变化，做到勤调、微调和精调是锅炉安全经济运行的必要条件，对火力发电企业降低成本和减少设备故障率、提高经济效益有着重要意义。

参考文献

[1] 李奇隼, 吴珺斐, 万兵, 等. 660MW 超临界直流锅炉大比例燃用准东煤燃烧调整试验分析 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(03): 136-142.

[2] 丽萍. 600MW 超临界直流锅炉的燃烧调整分析 [J]. 集成电路应用, 2020, 37(07): 116-117.

[3] 思权, 林松品. 350MW 超临界机组直流锅炉的燃烧优化调整 [J]. 科技创新与应用 2020, (07): 111-112.

[4] 周宇成. 630MW 超临界机组直流锅炉燃烧结焦原因与改进措施分析 [J]. 中国机械, 2024, (22): 109-112.

[5] 谢建斌. 670 MW 超临界对冲燃烧直流锅炉低氮改造技术探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(09): 152-154.

[6] 李奇隼, 吴珺斐, 万兵, 等. 660MW 超临界直流锅炉大比例燃用准东煤燃烧调整试验分析 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(03): 136-142.

[7] 陈金花. 燃煤烟气中 SO3 形成的影响因素探讨 [J]. 节能, 2019, 38(10): 175-176.

[8] 陈義元. 燃煤混燃低浓度甲烷的烟气污染物生成特性及选铁尾矿脱硝影响研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2024.

[9] 蒋军成. 燃煤锅炉中受热面的灰污染监测研究 [J]. 能源与环保, 2023, 45(01): 215-220+227.

[10] 卫健, 肖嘉鸣, 汪涛. 660 MW 锅炉受热面灰污监测及智能吹灰系统实践应用 [J]. 能源研究与管理, 2022, (01): 87-92.

[11] 袁天霖, 马国伟, 王长安, 等. 燃用高碱煤锅炉积灰结渣模型与数值模拟研究现状及进展 [J/OL]. 煤炭学报, 1-23.