

多煤种掺配适配锅炉燃烧稳定性技术

靳棧

阳城国际发电有限责任公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8425

[摘要] 在火电厂燃煤成本持续攀升、煤炭供应结构多元化的背景下，多煤种掺配技术成为平衡锅炉燃烧稳定性、节能环保与成本控制的关键手段。本文结合火电厂实际应用场景，分析多煤种掺配的核心目标与技术难点，从燃煤储存管理、掺配方案设计、燃烧过程优化三个维度提出适配锅炉燃烧稳定性的技术路径，通过案例验证其在提升燃烧效率、降低污染物排放及燃煤成本方面的成效，为火电厂燃煤管理提供实践参考。

[关键词] 多煤种掺配；锅炉燃烧；稳定性；火电厂；燃煤成本

Multi coal blending and adapting boiler combustion stability technology

Jin Yan

Yangcheng International Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of continuously rising coal costs and diversified coal supply structures in thermal power plants, multi coal blending technology has become a key means of balancing boiler combustion stability, energy conservation and environmental protection, and cost control. This article combines practical application scenarios in thermal power plants to analyze the core goals and technical difficulties of multi coal blending. It proposes a technical path for adapting boiler combustion stability from three dimensions: coal storage management, blending scheme design, and combustion process optimization. Through case studies, its effectiveness in improving combustion efficiency, reducing pollutant emissions, and coal costs is verified, providing practical reference for coal management in thermal power plants.

[Key words] multi coal blending; Boiler combustion; Stability; Thermal power plants; Coal cost

一、引言

火电厂作为能源供应的核心环节，其燃煤成本占总运营成本的 60% 以上。近年来，受煤炭市场价格波动、优质动力煤供应紧张等因素影响，单一煤种燃烧模式已难以满足火电厂经济性与环保性的双重需求。多煤种掺配技术通过将不同煤质特性的煤炭按比例混合，既能适配锅炉设计参数，保障燃烧稳定性，又能充分利用低质煤或低价煤资源，实现节能环保与成本控制的协同优化。

然而，多煤种掺配过程中，煤质特性（如发热量、挥发分、灰分、硫分等）的差异可能导致锅炉燃烧不稳定、结渣、积灰、污染物排放超标等问题。例如，某 300MW 火电厂曾因掺配比不当，导致锅炉炉膛结渣面积达 15%，被迫停炉清渣，造成直接经济损失超过 50 万元。因此，研究多煤种掺配与锅炉燃烧特性的适配技术，建立科学的储存、掺配及燃烧调控体系，

对火电厂安全高效运行具有重要现实意义。

二、多煤种掺配的核心目标与技术难点

2.1 核心目标

多煤种掺配的核心目标是在保障锅炉燃烧稳定性的前提下，实现“三赢”：一是燃烧效率最大化，通过煤种互补性提升燃烧速率与燃尽度，降低机械未完全燃烧热损失，使锅炉效率维持在 92% 以上；二是环保达标，控制掺配煤的硫分 $\leq 1.0\%$ 、氮含量 $\leq 1.5\%$ ，减少 SO_2 、 NO_x 排放，满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）中超低排放要求；三是成本最低化，在保证煤质指标的基础上，将低价煤、低质煤的掺配比例提高至 30%~50%，单吨燃煤成本降低 50~100 元。

2.2 技术难点

2.2.1 煤质特性差异的协同调控

不同煤种的挥发分（ V_{daf} ）、发热量（ $Q_{\text{net, ar}}$ ）、灰

熔点（ST）等关键指标差异显著。例如，高挥发分烟煤（ $V_{daf}=35\%\sim 45\%$ ）易燃但固定碳含量低（ $45\%\sim 55\%$ ），燃烧时火焰长、温度高，易导致炉膛结焦；低挥发分无烟煤（ $V_{daf}=5\%\sim 10\%$ ）固定碳含量高（ $75\%\sim 85\%$ ），但着火温度高（ $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ），燃烧缓慢，易造成机械未完全燃烧热损失增加。若掺配比例不当，可能导致着火延迟时间超过 100ms、燃烧效率下降 2% 以上，严重影响锅炉稳定性。

2.2.2 储存过程中的煤质劣化

煤种在储存期间可能因氧化、受潮导致发热量下降、水分增加。褐煤等易自燃煤种的水分含量可达 30%~40%，储存周期超过 3 天，水分便可能增加 5%~8%，发热量降低 1~2MJ/kg；高挥发分烟煤储存过程中，若料堆温度超过 60℃，可能引发自燃，不仅破坏煤质，还存在安全隐患。某火电厂曾因褐煤储存不当，导致煤堆自燃，造成 1000 吨燃煤报废，直接损失约 80 万元。

2.2.3 实时掺配与锅炉负荷的动态适配

火电厂锅炉负荷随电网需求波动，每日负荷变化幅度可达 30%~50%。不同负荷下对燃煤的着火性、燃尽性要求不同：高负荷（80%~100%）时需燃煤快速燃烧释放热量，低负荷（40%~60%）时需燃煤持续稳定燃烧避免灭火。固定掺配比例难以适配动态负荷变化，可能导致低负荷时炉膛温度低于 800℃，高负荷时炉膛出口烟温超过 1100℃，引发受热面超温或爆管事故。

三、多煤种掺配的关键技术路径

3.1 燃煤储存管理技术

科学的储存管理是保障掺配煤质稳定性的基础，需针对不同煤种特性实施分类储存、精准管控。

3.1.1 分区储存与标识

根据煤种的挥发分、水分、自燃倾向性划分储存区域，采用“三隔离”原则：物理隔离（独立料场或料仓）、空间隔离（间距 $\geq 5\text{m}$ ）、标识隔离（明确区分）。高挥发分烟煤区配备防爆监测装置，低挥发分无烟煤区设置防雨棚，褐煤区采用全封闭料仓。储存区域需设置电子标识牌，实时显示煤种名称、主要指标（ Q_{net} , ar , V_{daf} , S_t , d 、水分 M_t ）、入库时间及预计储存周期，确保掺配时可追溯。例如，某火电厂将料场划分为 5 个区域，分别储存烟煤、无烟煤、褐煤、贫煤及混煤，每个区域设置独立的取料设备，避免交叉污染。

3.1.2 防劣化储存措施

低质煤防潮：对高水分褐煤采用“封闭料仓 + 除湿系统 + 温度监测”三位一体管理模式。料仓内安装温湿度传感器，当相对湿度超过 60% 时，自动启动工业除湿机；料仓底部设置 3° 倾斜角，底部安装排水阀，及时排出冷凝水。通过该措施，

褐煤储存期间水分增幅可控制在 2% 以内。

易自燃煤种管控：高挥发分烟煤采用“小批量、快周转”策略，储存周期严格控制在 7 天内，每日 9:00、15:00、21:00 三次监测料堆温度，采用红外测温仪扫描料堆表面，当温度超过 50℃ 时，立即启动喷淋降温系统（水温 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ）或翻堆机进行翻堆散热，确保料堆温度稳定在 40℃ 以下。

分层压实储存：对于粒度 $\leq 3\text{mm}$ 的煤粉，采用分层压实技术，每层煤堆厚度控制在 1.5~2m，使用履带式压路机压实（压强 $\geq 0.5\text{MPa}$ ），减少煤与空气接触面积。顶部覆盖阻燃防雨布，边缘固定并压重，防止风雨侵入。该技术可使煤粉氧化速率降低 40%~50%，储存期间发热量损失控制在 0.5MJ/kg 以内。

3.1.3 煤质预检测

煤种入库前需进行“全项检测 + 抽样复检”：全项检测包括工业分析（水分、灰分、挥发分）、元素分析（碳、氢、氧、氮、硫）、发热量测定及灰熔点检测，检测频率为每车 1 次；抽样复检由厂内实验室完成，每 500 吨煤抽样 1 次，重点检测挥发分与发热量，确保与供应商提供的数据偏差 $\leq 5\%$ 。检测数据实时录入燃煤管理系统（CMS），系统自动生成煤质分析报告，为后续掺配方案设计提供数据支撑。

3.2 多煤种掺配方案设计技术

掺配方案需基于锅炉设计参数与煤质特性，通过试验与模拟确定最优比例，实现“特性互补、指标可控”。

3.2.1 掺配指标的约束条件

根据锅炉型号确定关键控制指标，形成“刚性指标 + 弹性区间”的管控体系：

电站煤粉锅炉（300MW 及以上）：刚性指标包括挥发分 $V_{daf}=20\%\sim 35\%$ 、发热量 Q_{net} , $ar=18\sim 22\text{MJ/kg}$ 、灰熔点 $ST\geq 1350^{\circ}\text{C}$ 、硫分 S_t , $d\leq 1.0\%$ ；弹性区间包括水分 $M_t=8\%\sim 12\%$ 、灰分 $A_d=15\%\sim 25\%$ 。

循环流化床锅炉（135MW 及以下）：刚性指标包括挥发分 $V_{daf}\geq 15\%$ 、发热量 Q_{net} , $ar\geq 16\text{MJ/kg}$ 、灰分 $A_d\leq 30\%$ ；弹性区间包括硫分 S_t , $d=0.8\%\sim 1.2\%$ 、水分 $M_t=10\%\sim 15\%$ 。

3.2.2 基于正交试验的比例优化

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计不同煤种掺配比例，以着火温度、燃尽率、结渣倾向为评价指标，确定最优掺配方案。例如，某火电厂针对烟煤（A）、无烟煤（B）、褐煤（C）三种煤种，设计 9 组掺配比例（A:B:C），测试结果显示：当比例为 4:3:3 时，混合煤 $V_{daf}=26\%$ 、 Q_{net} , $ar=19.5\text{MJ/kg}$ ，着火温度 320℃（较纯无烟煤降低 120℃），燃尽率 98.5%（较纯褐煤提高 3%），灰熔点 1380℃（高于结渣临界温度），综合性能最优。

3.2.3 动态掺配模型

结合锅炉负荷变化建立“负荷 - 煤质”动态响应模型，通过 DCS 系统实现实时调控：

高负荷（80%~100% 额定负荷）：提高高挥发分煤比例（烟煤 50%~60%、褐煤 20%~25%），控制混合煤 $V_{daf}=30\%\sim35\%$ ，缩短着火延迟时间至 $\leq 50\text{ms}$ ，确保热量快速释放，同时将炉膛出口烟温控制在 $1000\sim1050^\circ\text{C}$ ，避免受热面超温。

低负荷（40%~60% 额定负荷）：增加低挥发分煤比例（无烟煤 40%~50%、烟煤 30%~40%），控制混合煤 $V_{daf}=20\%\sim25\%$ ，延长燃烧持续时间，维持炉膛温度 $\geq 900^\circ\text{C}$ ，防止灭火。

变负荷阶段：当负荷变化率超过 $5\%/min$ 时，通过在线检测系统实时调整掺配比例，每次调整幅度 $\leq 5\%$ ，并提前 30 秒将调整信号发送至锅炉控制系统，实现煤质与负荷的平滑过渡。

3.3 燃烧过程优化技术

通过燃烧设备改造与运行参数调控，适配多煤种掺配后的燃烧特性，提升稳定性与效率。

3.3.1 燃烧器改造与配风优化

浓淡分离燃烧器：针对低挥发分煤占比高的混合煤，采用双通道浓淡分离燃烧器，通过煤粉浓缩器将一次风煤粉浓度从 0.5kg/kg 提高至 $1.0\sim1.2\text{kg/kg}$ ，增强着火稳定性。改造后，着火距离缩短 $1.5\sim2\text{m}$ ，火焰中心温度提高 $50\sim80^\circ\text{C}$ 。

分级配风：采用“一次风 + 二次风 + 三次风”分级配风模式，根据混合煤挥发分调整配风比例：高挥发分混合煤（ $V_{daf}\geq 30\%$ ）控制一次风率 $20\%\sim25\%$ 、二次风率 $60\%\sim65\%$ 、三次风率 $10\%\sim15\%$ ，避免火焰过长；低挥发分混合煤（ $V_{daf}\leq 25\%$ ）控制一次风率 $25\%\sim30\%$ 、二次风率 $55\%\sim60\%$ 、三次风率 $15\%\sim20\%$ ，确保燃尽。

3.3.2 在线监测与闭环调控

煤质在线分析：在给煤皮带上安装近红外光谱仪（检测精度 $\pm 0.5\%$ ），实时检测混合煤的水分、灰分、发热量，数据每 10 秒更新一次，传输至 DCS 系统与燃煤管理系统。

燃烧参数联动调控：建立“煤质 - 参数”联动模型，当混合煤发热量波动 $\pm 1\text{MJ/kg}$ 时，自动调整：①炉膛温度（ $\pm 50^\circ\text{C}$ ）通过改变燃烧器摆角（ $\pm 5^\circ$ ）实现；②过量空气系数（ ± 0.1 ）通过调整送风量实现；③给煤量（ $\pm 3\%$ ）通过调节给煤机转速实现。某火电厂应用该技术后，锅炉出口烟温波动幅度从 $\pm 80^\circ\text{C}$ 降至 $\pm 30^\circ\text{C}$ ，主蒸汽压力波动从 $\pm 0.3\text{MPa}$ 降至 $\pm 0.1\text{MPa}$ 。

3.3.3 结渣与积灰预防

混煤灰熔点调控：通过掺配高灰熔点煤（如 $ST\geq 1400^\circ\text{C}$ 的无烟煤），将混合煤 ST 控制在 1350°C 以上，同时在燃煤中添加氧化镁（添加量 $0.5\%\sim1\%$ ），提高灰渣流动性，降低结渣倾向。

吹灰周期优化：根据混合煤灰分特性与受热面温度场分布，采用“分区定时 + 温度触发”吹灰模式：高灰分煤种（ $A_d\geq 25\%$ ）时，炉膛吹灰周期 8 小时 / 次、过热器吹灰周期 12 小时 / 次；低灰分煤种（ $A_d\leq 20\%$ ）时，炉膛吹灰周期 12 小时 / 次、过热器吹灰周期 24 小时 / 次；当受热面壁温超过设计值 10°C 时，自动启动吹灰程序。

四、应用案例

某 300MW 煤粉锅炉火电厂原采用单一烟煤（ Q_{net} ， $ar=22\text{MJ/kg}$ ， S_t ， $d=1.2\%$ ）燃烧，燃煤成本 450 元 / 吨，硫排放浓度 300mg/Nm^3 （接近限值 200mg/Nm^3 ）。实施多煤种掺配技术后，采用“烟煤（50%）+ 无烟煤（30%）+ 褐煤（20%）”的掺配方案，运行半年后成效如下：

燃烧稳定性：混合煤 $V_{daf}=24\%$ ， Q_{net} ， $ar=20\text{MJ/kg}$ ，着火温度稳定在 350°C ，炉膛出口烟温波动 $\leq \pm 40^\circ\text{C}$ ，未发生结渣或灭火现象，锅炉连续运行时间从 30 天延长至 60 天。

节能环保：硫分从 1.2% 降至 0.8%， SO_2 排放浓度降至 180mg/Nm^3 （满足超低排放标准）；锅炉效率从 91.5% 提升至 92.0%，年节约标准煤 1.2 万吨，减少 CO_2 排放约 3 万吨。

成本控制：褐煤（300 元 / 吨）与无烟煤（380 元 / 吨）采购价较原烟煤低 150 元 / 吨，混合煤综合成本降至 390 元 / 吨，年减少燃煤成本约 800 万元。

五、结论

多煤种掺配适配锅炉燃烧稳定性技术是火电厂应对煤炭市场变化、实现降本增效的重要手段。通过科学的储存管理保障煤质稳定，基于正交试验与动态模型设计掺配方案，结合燃烧设备改造与在线调控优化燃烧过程，可有效平衡燃烧稳定性、环保性与经济性。

未来，需进一步探索人工智能技术在动态掺配中的应用，通过大数据分析实时预测煤质变化与锅炉响应，实现全自动化掺配调控，为火电厂智能化升级提供支撑。同时，应加强掺配煤种的协同燃烧机理研究，为不同类型锅炉提供更精准的掺配方案。

【参考文献】

- [1]岑可法。煤的清洁燃烧理论与技术 [M]. 杭州：浙江大学出版社，2021。
- [2]周武。电站锅炉燃烧调整与优化 [J]. 中国电机工程学报，2022，42（5）：1689-1700。
- [3]吕俊复。煤种特性对锅炉燃烧稳定性的影响研究 [J]. 热能动力工程，2023，38（2）：35-41。
- [4]徐旭常。燃烧学 [M]. 北京：机械工业出版社，2020。
- [5]孙献斌。火电厂燃煤掺烧技术与实践 [J]. 电力科学与工程，2022，38（4）：1-7。