

Analysis of the Application Effect of Low Nitrogen Combustion Technology for 350MW Anthracite Coal Boiler

Qing Xiao

Yangcheng International Power Generation Co., Ltd., Jincheng, Shanxi, 048000, China

Abstract

In response to the high NO_x emissions caused by the dominance of fuel nitrogen, delayed ignition, and strong oxidation in the lower part and near the nozzle of the 350 MW anthracite W-type flame boiler, an in-furnace low NO_x solution based on the unique spatial stratification, time scale, and oxygen pressure reconstruction of the W-type flame furnace was proposed. Through orthogonal experiments, the combination of primary air velocity of 20 m/s, front and rear arches / staged air ratio of 6:3:1, combustion air rate of 15%, and oxygen content at the furnace outlet of 3.5% was obtained. Engineering application shows that after the retrofit, NO_x decreased from approximately 350 mg/m^3 to approximately 180 mg/m^3 , and it remained stable below 200 mg/m^3 within the full-load range; the boiler thermal efficiency increased from 92.5% to 93.2%, and the power supply coal consumption decreased from 320 g/kWh to 319.2 g/kWh; based on every 10 billion kilowatt-hours, fuel cost savings were approximately 880,000 yuan, which could cover the additional maintenance costs of 40 to 60 million yuan and form a surplus. The results verified the effectiveness and economic feasibility of constructing a rich fuel reduction window and high-level blending after combustion on the furnace scale of the 350 MW anthracite W-type flame boiler.

Keywords

smokeless coal boiler; W-shaped flame boiler; low nitrogen combustion; air stratification; coal powder re-combustion; exhaust air

350MW 无烟煤锅炉低氮燃烧技术应用效果分析

肖清

阳城国际发电有限责任公司, 中国·山西 晋城 048000

摘要

针对 350 MW 无烟煤 W 型火焰机组燃料氮占主导、着火迟滞与拱下及近喷口氧化性强而导致的高 NO_x 排放, 提出以 W 型火焰炉特有空间分级、时间尺度与氧分压重构为核心的炉内低氮方案。通过正交试验优化得到一次风风速 20 m/s、前后拱 / 分级风配比 6:3:1、燃尽风率 15%、炉膛出口氧量 3.5% 的组合。工程应用表明, 改造后 NO_x 由约 350 mg/m^3 降至约 180 mg/m^3 , 全负荷范围稳定低于 200 mg/m^3 ; 锅炉热效率由 92.5% 提升至 93.2%, 供电煤耗由 320 g/kWh 降至 319.2 g/kWh; 按每 10 亿千瓦时计, 燃料成本节约约 88 万元, 可覆盖新增维护成本 40 至 60 万元并形成结余。结果验证了在 350 MW 无烟煤 W 型火焰炉膛尺度上构建富燃料还原窗口与高位掺混后燃的有效性及其经济性可行性。

关键词

无烟煤锅炉; W 型火焰锅炉; 低氮燃烧; 空气分级; 煤粉再燃; 燃尽风

1 引言

煤电在我国电力系统中仍占较大比重, 350 MW 等级机组具有保有量大、运行边界复杂等特征。无烟煤低挥发分、高固定碳与高着火温度使着火迟滞、辐射弱、燃尽受阻, 且在 W 型火焰锅炉拱下燃烧区易形成氧分压偏高与温峰, 从而放大燃料型 NO_x 通道。在超低排放常态化与碳达峰碳中和背景下, 单纯依赖末端脱硝难以兼顾成本与多工况适应, 炉内源头抑制成为刚性需求。然而, 在 W 型火焰前后拱燃烧、下部炉膛烟气下行再上行的结构中, 既要确保富燃料还原区

抑制初生 NO_x , 又要保证上部后燃的碳燃尽与受热面安全, 存在显著的多目标、多约束耦合问题^[1]。基于此, 本文围绕 W 型火焰炉型特性、时间尺度、空间分级与氧分压的协同重构, 提出空气分级与煤粉再燃协同、低氧组织与高位掺混过火风配合, 并通过前后拱燃烧器与炉墙辐射反馈、烟气再循环等硬件改造与 DCS 一体化控制, 力图在 350 MW W 型火焰尺度上获得可复现实施路径与全负荷稳定达标的工程解法。

2 350MW 无烟煤 W 型火焰锅炉低氮燃烧技术的理论基础

鉴于 350MW W 型火焰锅炉在前后拱布置燃烧器、烟气 W 型流动的炉膛配置, 该类机组多选用拱顶煤粉喷射、下

【作者简介】肖清 (1986-), 男, 中国湖北洪湖人, 本科, 工程师, 从事火电运行研究。

部炉膛分级配风与顶部燃尽风，把主燃区组织出拱下强回流与下行火焰。无烟煤呈低挥发分与高固定碳特性，着火温度高、活性低、辐射弱，燃尽依赖更长停留时间与更强紊流掺混，易在拱下喷口区域形成氧分压偏高与温峰，于是放大燃料侧的氮转化。

从机理划分来看，燃料型 NO_x 指燃料氮经氧化生成，在无烟煤燃烧中占主导，可用工程简式表征其量级为

$$E_{\text{NO}_x} = \eta_N \cdot w_N \cdot \frac{M_{\text{NO}_x}}{M_N}$$

其中， E_{NO_x} 为单位燃料 NO_x 排放量（单位：mg/kg）， η_N 为燃料氮转化系数（无量纲）， w_N 为燃料氮质量分数（单位：kg/kg）， M_{NO_x} 与 M_N 为 NO_x 与氮的摩尔质量（单位：kg/mol）。

据此，低氮燃烧的重点在于适配 W 型火焰流动特性、重构时间尺度、空间分级与氧分压。空气分级把拱下主燃区运行富燃料还原区，抑制初生 NO 并在上部炉膛引入燃尽风完成燃烧；燃料分级在下行火焰区上方引入再燃源，扩展还原窗口，把 NO 还原为 N_2 ；低氧燃烧在全炉压低过量空气系数与局部氧分压，从温度与动力学两端削弱热力型与燃料型路径。立足 350MW W 型火焰机组较大的炉膛容积与前后拱 + 下部可分层配风条件，上述耦合组织能够拉平温峰并延长还原停留时间，同时凭借上部后燃区保障无烟煤碳的燃尽，因而在该规模机组上具有工程必要性。

3 350MW 无烟煤 W 型火焰锅炉低氮燃烧技术的应用实施

3.1 低氮燃烧系统的方案设计

鉴于 350MW 无烟煤 W 型火焰锅炉采用前后拱燃烧器、下部炉膛配风、顶部燃尽风的炉膛结构，方案把低氮系统按空气分级与燃料分级协同进行配置，见图 1。前后拱燃烧器由一次风携带煤粉向下喷射形成 W 型火焰，配置动静叶可调旋流器，把拱下近区构成内回流；一次风占总风量控制在 0.16–0.20。分级风经分隔风箱与分区风门进入下部炉膛，采取下小上大的纵向配风，把拱下主燃区运行富燃料还原区，主燃区当量比维持在 0.80–0.90，同时稳定 W 型火焰形态、避免火焰冲刷水冷壁。燃尽风在炉膛上部设置可调角喷口，指向炉心，风量随负荷在 0.15–0.20 范围内滑调，以高位掺混完成后燃与碳燃尽。燃料分级选用煤粉再燃，在主燃区下行火焰上方布置一层再燃喷口，喷入细度 R90 小于 10% 的再燃煤粉，使再燃区当量比达到 1.05–1.10 并获得不小于 0.6 s 的还原停留时间。连接关系方面，送风机分别经一次风机与二次风道接入磨煤机与前后拱燃烧器风箱，燃尽风由送风支路单独供风，再燃喷口由专设小磨系统供给；所有执行机构接入 DCS，把风门开度、旋流角与喷口角度在负荷、炉膛氧量与烟气 NO_x 信号下开展协调。运行逻辑以建立拱下还原区为先，随后逐级引入上部风；再燃投用以炉膛温度 1100–1250 °C 与空预器前氧量 2.5–3.0% 作为准入条

件，并把再燃比稳定在 0.08–0.12。

3.2 燃烧关键参数的优化调整

鉴于 350 MW 无烟煤 W 型火焰炉膛的分级燃烧结构，优化工作运用正交试验方法，选取一次风风速、分级风纵向配风比例、燃尽风率以及炉膛出口氧量 4 个因子，构建以氮氧化物生成倾向以及燃尽安全为双目标的评价，并把还原区当量比以及受热面温度裕度纳入约束，使优化聚焦于 W 型火焰停留时间以及氧分压的协同重构。

由此得到适配无烟煤着火迟滞以及 W 型火焰长停留需求的组合：一次风 20 m/s，分级风上中下为 6:3:1，燃尽风率 15%，炉膛出口氧量 3.5%。该组合把喷口动量以及旋流匹配以维持拱下内回流并削弱拱下喷口氧化性，把分级风纵向分配梯度化以稳定火焰中心并扩展还原窗口，把燃尽风协同以形成高位掺混，并把出口氧量收敛在可兼顾碳燃尽与热力型路径抑制的区间^[2]。

机制层面，一次风过低会削弱煤粉射流掺混，过高又会抬升局部氧分压从而放大燃料型通道；分级风比例若偏向下层会削弱富燃料区，若过度上移则未燃碳升高并把后燃负荷外移。燃尽风需与 W 型火焰行程时间协同，过小难以完成后燃，过大易冲散还原带并降低还原反应选择性。出口氧量围绕 3.5% 调控，可抑制热力型路径，同时完成碳的后期反应，使低氮燃烧与燃尽要求在工程边界内取得平衡。

$$\eta = \frac{Q_{\text{net}} - Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{net}}}$$

其中， η 表示燃烧效率（无量纲）， Q_{net} 为入炉燃料低位发热量对应的供热量（单位：kJ）， Q_{loss} 为散失热量之和（单位：kJ）。

3.3 配套设备的改造与升级

鉴于 350 MW 无烟煤 W 型火焰机组前后拱燃烧、下行火焰的结构约束，配套设备改造围绕拱顶喷口结构优化、卫燃带布置适配 W 型火焰、壁面辐射反馈增强以及烟气再循环布置来开展，以在硬件层面支撑富燃料还原区的稳定构建并拉平炉内温峰。拱顶燃烧器更换为低氮旋流型，选用可调动静叶与渐缩喉口，把旋流数在 0.6–0.9 范围内滑调以强化拱下内回流，同时把喷口下倾角调整至 8–15° 以稳定 W 型火焰、避免贴壁冲刷。关键技术要点在于把一次风动量、旋流角与二次风环隙缝宽协同匹配，维持拱下喷口近区负压核稳定；同时开展风箱漏风封堵与喷口迎风部位耐磨衬板加固，降低煤尘冲蚀与二次风旁路效应，从而把分级风量的有效性保留下来^[3]。

从着火支撑角度来看，前后拱及炉膛上部近喷口区域增设卫燃带，把水冷壁外侧布置 0.8–1.2 m 宽的高辐射耐火护带，并施加高发射率涂层以增强辐射回馈与 W 型火焰锚定；为抑制局部过热与结渣，护带与膜式壁过渡采用倒角处理并布置壁温监测点，同时依靠喷口旋流与分级风整形把回流核限定在护带覆盖范围。烟气再循环系统在省煤器出口抽

取含氧较低且温度较高的烟气，配置小型惯性分离与调压风机后引入分级风风箱上部，把再循环比控制在 5–12% 区间以降低局部氧分压与峰温。需重点关注的是，再循环支路设置止回与快速切断机构以抑制倒灌，送风系统对叶轮强度与轴功率开展校核以应对新增压降；在磨煤干燥受限的运行场景下，把 FGR 优先接入分级风侧来维持一次风温度与制粉系统稳定。完成设备改造后，把旋流角、喷口角度、再循环比与分层风门纳入 DCS 联动，以炉膛氧量、分层 NO_x 与火焰图像作为反馈信号开展协同控制，使硬件升级与燃烧组织策略形成一致的运行响应。

4 350MW 无烟煤 W 型火焰锅炉低氮燃烧技术的应用效果评估

4.1 氮氧化物排放指标的对比分析

立足本机组在 W 型火焰炉空气分级、煤粉再燃以及燃尽风协同的燃烧组织，氮氧化物排放的对比分析聚焦浓度、负荷敏感性与达标性。改造前后代表性稳态点对比可见，机组未实施低氮方案时 NO_x 浓度约 350 mg/m³，引入低氮燃烧后约 180 mg/m³，见表 1。结合 50%、75%、100% 三档负荷的变化，低负荷段受炉膛温度与氧分压双重制约，浓度维持较低；随负荷提升，火焰温峰与拱下喷口氧化性增强使改造前曲线抬升明显，而改造后依靠拱下富燃料还原区与上部燃尽风形成的还原窗口把斜率拉平，100% 负荷仍控制在 190 mg/m³ 附近。需重点关注的是，燃尽风联动把后燃定位在高位掺混区，避免后燃冲散还原带，进而稳定燃料型路径的还原反应。与国家超低排放限值 200 mg/m³ 对比，改造后三档负荷全部位于限值之内，100% 负荷裕度约 10 mg/m³，50% 与 75% 负荷裕度约 20 至 30 mg/m³，形成全负荷范围的稳定达标特征。

表 1 350MW 无烟煤 W 型火焰锅炉改造前后氮氧化物排放指标对比表

负荷	改造前 NO _x 浓度 mg/m ³	改造后 NO _x 浓度 mg/m ³	改造前 达标性	改造后 达标性
50%	320	170	不达标	达标
75%	350	180	不达标	达标
100%	370	190	不达标	达标

4.2 锅炉运行经济性的影响评估

在额定蒸发量与供热负荷边界下，依据热平衡与各项热损失核算，改造后锅炉热效率由 92.5% 提升至 93.2%。该提升主要源于把炉膛过量空气系数压低后导致排烟热损失下降，依靠拱下富燃料还原区与高位掺混燃尽风减少未完全燃烧损失，同时把温峰拉平后缓解受热面结渣引起的辐射受阻。由此折算至等厂用电率与等发电侧工况，供电煤耗由 320 g/kWh 降至 319.2 g/kWh，体现出低氧组织与燃尽风协同对有效供热的持续贡献。在送引风压头与风量联动优化

后，辅助用电不升反降的边际效应得到保持，避免把煤耗收益被额外电耗抵消；并且在再燃煤粉细度 R90 小于 10% 以及炉膛出口氧量 3.5% 的运行边界内，该效率与煤耗改善具有可重复性^[4]。

从成本侧来看，按山西产区低硫无烟煤到厂含税价格 1100 CNY/t 计，以上述煤耗差额折算到每 10 亿 kWh 发电量，可获得燃料成本节约约 88 万元。需重点关注的是，低氮旋流拱顶燃烧器可调动静叶与高发射率护带来检修频次与易损件更换的增量，再叠加烟气再循环支路风机与阀门的维护支出，综合测算折算为每 10 亿 kWh 约 40 至 60 万元。结合两端量级，可以把燃料侧节约覆盖维护端增量并形成正向结余，且该结余在 50 至 100 负荷区间内随氧分压与喷口掺混稳定性变化而保持波动较小。由此可见，在不改变既有供电边界条件的情形下，该低氮燃烧技术具备明确的经济性可行性，能够把改造投资转化为运行期现金流的可预期改善^[5]。

5 结语

本文面向 350 MW 无烟煤 W 型火焰锅炉提出并验证了以拱下富燃料还原区构建为核心的低氮燃烧组织及其硬件配套与控制策略。通过一次风、分级风纵向分配、燃尽风的协同，使还原窗口在炉内形成并与高位掺混后燃匹配；在硬件侧以拱顶可调旋流低氮燃烧器、W 型火焰适配卫燃带与烟气再循环共同拉平温峰与降低局部氧分压；在控制侧以炉膛氧量、分层 NO_x 与火焰图像闭环调节，实现跨负荷稳态运行。工程应用显示，NO_x 排放较改造前显著下降并全负荷稳定满足超低限值，锅炉效率与供电煤耗同步优化，综合经济性为正。实践中，推荐的一次风风速、分级风纵向配比、燃尽风率与炉膛出口氧量等参数区间可为同类型 W 型火焰无烟煤机组提供可操作的初值与调整方向。后续应针对煤质波动、深调峰与长周期积灰结渣等情形完善在线诊断与自适应控制，拓展与 FGR 比例、再燃比及喷口旋流的协同优化模型，进一步提升在更宽工况范围内的排放稳定性与运行经济性。

参考文献

- [1] 罗威,丁大林,龙德林,周子怡,李胜兰,姚霖.燃气蒸汽锅炉低氮燃烧技术在天然气净化厂的应用[J].油气田环境保护,2025,35(05):25-28+35.
- [2] 马俊腾.工艺加热炉低氮燃烧技术及其应用路径分析[J].皮革制作与环保科技,2025,6(05):11-13.
- [3] 刘佳宁,张文振,刘欣,谢妍,李驰,李明,牛涛,王赫阳.40 MW 燃煤锅炉混氨燃烧 NO_x 生成特性数值模拟[J].洁净煤技术,2025,31(05):69-79.
- [4] 杨琨,张涛,泮浩翔,丁士发.氨煤混烧对墙式切圆锅炉燃烧的影响分析[J].动力工程学报,2025,45(06):805-812.
- [5] 田舒曼,李宇航,张普选,王志超,邓磊,车得福,晋中华.燃煤电站锅炉掺氨 NO_x 生成特性研究进展[J].热力发电,2025,54(04):1-12.