

锅炉燃烧优化与低氮排放协同控制策略研究

史童星

国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司, 辽宁 本溪 117000

DOI:10.61369/ERA.2026100010

摘 要 : 燃煤锅炉目前是发电及工业供热中常用的技术, 其燃烧效率与氮氧化物超低排放之间长期有耦合性的制约关系, 单靠炉内低氮改造或末端脱硝手段不能很好满足运行经济与环保的双重要求。文中将锅炉燃烧所涉氮氧化物划为三类生成形式, 分别考察分级配风、燃料再燃及烟气再循环对炉内低氮的贡献, 分析炉内燃烧本身同 SCR、SNCR 类末端脱硝装置的配合困难, 进而提出从源头到终端、按流程分段控制的协同管理(即全流程)思路。

关 键 词 : 燃煤锅炉; 燃烧优化; 低氮排放; 协同控制; 分级燃烧; SCR 脱硝

Research on Collaborative Control Strategy for Boiler Combustion Optimization and Low Nitrogen Emission

Shi Tongxing

Benxi Thermal Power Branch, State Power Investment Corporation Northeast Electric Power Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117000

Abstract : Coal-fired boilers are widely applied in power generation and industrial heating sectors. There has long existed a mutually restrictive coupling relationship between improving combustion efficiency and achieving ultra-low nitrogen oxide emissions. A single in-furnace low-nitrogen retrofit or terminal denitrification adjustment cannot balance unit operational economy and environmental compliance requirements. This paper sorts out three formation pathways of nitrogen oxides during boiler combustion, analyzes the functional boundaries of in-furnace low-nitrogen technologies such as staged air distribution, fuel reburning and flue gas recirculation, explores the coordination conflicts between the in-furnace combustion system and terminal denitrification facilities including SCR and SNCR, and establishes a full-process collaborative control framework featuring source suppression, process regulation and terminal matching.

Keywords : coal-fired boiler; combustion optimization; low nitrogen emission; collaborative control; staged combustion; SCR denitrification

引言

就目前国内能源结构转型的情形而论, 燃煤机组在较长时间里要满足电网基本负荷及深度调峰需要, 锅炉运行的工况变化多而急, 低负荷稳燃、燃烧效率与 NO_x 超低排放的矛盾正趋于明显。按一般思路调整运行时, 若想把 NO_x 的原始排放压低, 操作上多是减少主燃区供氧、使燃尽风所占比例变大(即炉内还原气氛增多), 但此类调节本身有风险: 煤粉燃尽度不足、飞灰含碳高、锅炉热效率差、煤耗因而上升。若一味强求燃烧完全又会令主燃区含氧量及火焰温度偏高, 燃料型及热力型 NO_x 形成加快, 脱硝设备负担加重, 喷氨量上升造成费用增长, 同时有氨逃逸、硫酸氢铵沉积或空预器损坏之虞。

一、锅炉 NO_x 生成机理与协同控制约束关系

锅炉燃烧所产生氮氧化物以 NO 为主, NO_2 的相对含量较少, 其生成途径是热力型、燃料型及快速型三种, 不同类型 NO_x 在主导条件上大体有别, 相应地炉内调控方法有其适用范围。热力型 NO_x 是空气中的氮气于高温富氧状态中被氧化得到的产物, 反应速度随温度按指数规律上升, 若局部温度高于 1500°C 便出现大量生成, 停留时间、氧浓度对结果都有明显影响。燃料型 NO_x 从

煤炭所含氮有机物的热分解开始形成, 在煤粉系统中占总 NO_x 约 60%~80%, 应作为控制重点, 挥发性组分的气氛状况影响转化过程, 还原性气氛有利于含氮中间物变作氮气, 因而能减少 NO 生成。快速型 NO_x 由碳氢类自由基同氮气结合而成, 正常煤粉燃烧情形下所占比例很小, 工程设计中通常不把它当作优先项^[1]。

燃烧优化同低氮排放是典型的多目标耦合问题。采用分级燃烧使主燃区呈欠氧状态有利于减少 NO_x 的形成, 但欠氧太强会导致煤粉燃尽延后, 若此时所用的燃尽风或其布置不当, 炉膛出口

就可能出现未燃完组分过多的情况，热效率因而受损。对低氮改造作配合的贴壁风、多孔壁风能减缓还原性水冷壁的高温腐蚀，但贴壁风比例太大可能打乱总体配风设计，分级效果被削弱。烟气再循环办法可把炉内最高温区压低，抑制由热力产生之 NO_x ，不过炉温全局性地变弱对低负荷运行不利，稳燃条件更易破坏，灭火风险增大。

炉中原始 NO_x 的浓度对后端 SCR 入口负荷是直接制约，二者有上下游联系。炉内 NO_x 若减少，SCR 所要喷入的氨就少些，氨逃逸概率也较低；但炉内处理过分又会损害效率，此时应把煤价、还原剂价格及维护费一并考虑，以确定整体最优状态。协同控制的重点不是一味压低 NO_x ，而是按排放标准来安排锅炉效率、脱硝用资和腐蚀可能性，使所涉各项指标不超出合理界限，达到多方面协调、平衡的目的。

二、炉内低氮燃烧优化核心技术路径

（一）空气分级燃烧优化

空气分级是现在最常采用的炉内低氮技术，其基本思路是按主燃区、燃尽风来划分总风量，主燃区以欠氧状态燃烧，所用还原气氛可限制燃料氮转化为氧化物，燃尽风从炉膛上方进入，促使余热中可燃物全部燃尽。实际工程要同时做燃烧器改造及燃尽风系统设计。低氮旋流燃烧器利用中心回流构造使燃料、一次风较早结合，火焰温度不出现极端高峰，又让二次风有适当分布，不会造成某处高温富氧的现象。燃尽风可以是分离式或紧凑型，两种方式对炉温及停留时间的影响有别，适用锅炉形式亦非一律。

运行层面的关键参数包括总过量空气系数、主燃区过量空气系数、燃尽风占总风量比例、燃尽风喷口摆角与挡板开度。^[2] 总氧量不能一味降低，过低会造成 CO 大量生成与飞灰含碳量上升；主燃区过量空气系数通常控制在 0.7~0.85 区间，配合合理的燃尽风送入高度，保证煤粉在还原区停留足够时间。在机组变负荷运行时，燃尽风挡板不能采用固定开度，高负荷下可提高燃尽风比例强化低氮效果，低负荷下适度降低，优先保障稳燃与燃尽效果。同时配套贴壁风调整，在水冷壁近壁区域维持适度氧化性气氛，缓解 H_2S 引发的高温腐蚀，避免分级燃烧带来的设备副作用。

（二）燃料分级再燃技术

燃料分级也即再燃技术，以炉膛高度为标准分作主燃区、再燃区及燃尽区。主燃区应供给主要燃料，按近于当量比状态燃烧而产生 NO_x ；再燃区采用小量低氮再燃燃料，在缺氧又还原的气氛下形成 CH 、 NH 类自由基，把所遇的 NO 复原成氮气；之后利用燃尽风促使残余物氧化。就再燃燃料本身来说，可用天然气、生物质气或超细煤粉，低氮品种对减排更有利^[3]。

所涉技术可以将 NO_x 初始排放作较大幅度削减，但对系统本身改动较多（需加装输送再燃燃料的管道及喷口），宜用于新机组或大修时的同步改造。运行中要处理好再燃燃料比例以及再燃区的气氛状态，燃料太少不能获得足够还原效果，太多又会增

大未燃损失的可能性。再燃法多配合空气分级一起采用，可使低氮调控更灵活，对煤种固定、负荷不剧烈的大容量锅炉很有适用价值。

（三）烟气再循环与煤粉制备系统优化

烟气再循环抽取低温尾部烟气送入炉膛，降低整体氧浓度与火焰峰值温度，抑制热力型 NO_x ，多用于燃气锅炉与液态排渣锅炉，在煤粉锅炉中常作为辅助调控手段。再循环率需要匹配锅炉负荷，过高会降低炉膛温度，影响着火稳燃，还会增加引风机电耗。

煤粉制备系统优化属于源头辅助调控，煤粉细度直接影响着火速度与燃尽特性。煤粉过粗，着火推迟，燃尽变差；煤粉过细，制粉电耗上升，着火提前造成燃烧器区域温度偏高，加剧 NO_x 生成。需要根据煤种挥发分调整分离器挡板，控制经济细度。同时优化磨煤机投运组合，保证各层燃烧器热负荷分配均匀，避免局部热负荷集中形成高温区，实现炉膛温度场均匀化，减少局部 NO_x 峰值。

三、炉内燃烧与末端脱硝协同运行策略

（一）SCR/SNCR 系统与燃烧调整匹配

SCR 是主流末端脱硝工艺，核心是在催化剂窗口温度区间喷入氨气，将 NO_x 还原为氮气与水。SCR 运行性能与锅炉燃烧调整高度耦合，燃烧调整改变炉膛出口烟温、 NO_x 浓度分布、烟气流量，直接影响催化剂反应效率与喷氨控制效果。锅炉燃烧偏斜会造成 SCR 入口烟道 NO_x 分布不均，单一测点反馈无法反映截面真实浓度，传统整体喷氨容易出现局部过喷或欠喷，过喷带来氨逃逸，与三氧化硫结合生成硫酸氢铵，粘附空预器换热面造成堵塞腐蚀。

协同优化的基础是实现分区精准喷氨，在烟道增设多点取样测量装置，搭建分区喷氨格栅，根据各区域 NO_x 浓度动态分配喷氨量。同时建立炉内原始 NO_x 与 SCR 入口浓度的关联模型，将燃烧调整参数作为前馈信号，提前修正喷氨设定值，避免滞后控制造成排放波动。SNCR 依靠高温区喷入还原剂实现脱硝，反应温度窗口狭窄，对炉膛温度场敏感，燃烧调整改变火焰中心位置会直接影响 SNCR 反应效率，因此采用 SNCR 的锅炉，必须将火焰中心控制、炉膛温度分布纳入协同调整范围^[4]。

（二）全工况参数协同整定方法

锅炉不同负荷区间的约束条件差异明显，高负荷下炉膛温度充足，稳燃余量大，可优先采用深度分级配风降低原始 NO_x ；中低负荷时炉膛温度水平下降，稳燃与燃尽成为首要约束，低氮调整幅度需要收敛，防止飞灰含碳量陡增。多煤种掺烧工况下，入炉煤挥发分、氮含量、热值波动会同步改变 NO_x 生成特性，配煤方案需要与分级配风参数联动调整，高氮煤种应适度提高燃尽风比例，降低主燃区热负荷密度。

协同整定所用的流程应划为静态试验及动态修正两部分。先对锅炉的热力性能作初步摸底试验（按典型负荷考虑），把过量空气系数、燃尽风配比、燃烧器角度及煤粉细度按正交方式调

节,记录 NO_x 的排放、热效率、飞灰含碳量、SCR 入口烟温、氨逃逸诸项数据,确定多变量响应规律,找到各条件对应的最佳参数,列出基本运行卡。由此出发,以机组 DCS 为平台补充前馈内容,利用负荷命令、煤质信息、磨煤机实际状态来完善控制回路,使切换工况时参数能自动适应,避免由人工延迟导致的效率低或排放超限现象。

(三) 智能协同控制体系构建

传统锅炉控制多采用单回路 PID,各子系统独立调节,燃烧、制粉、脱硝之间缺少联动,难以应对非线性、大滞后的燃烧过程。机器学习与多目标优化算法为协同控制提供新路径,利用机组历史运行数据筛选关键特征变量,构建 NO_x 排放与锅炉效率预测模型,以 NO_x 达标、热效率最优、脱硝运行成本最低作为优化目标,求解最优控制参数组合。

所称的智能协同控制是数据采集、模型预测、优化决策及执行控制四者结合的框架。数据层以炉膛温度、分层风量、煤量、含氧量、烟气组分、SCR 出口或入口浓度为对象来获取实时信息;模型部分负责 NO_x 软测量以及燃烧状态分析;决策上按约束

要求做参数设计,给出配风、喷氨类控制值;执行端把指令发到挡板、给煤装置及喷氨调节阀作相应调整。对模型本身不断输入新运行资料予以更新,使煤质变差或调峰较深时仍能应对良好。智能系统不取代运行人员,只作优化建议,不夺人工控制权,锅炉安全由此得到保证。

四、结论与展望

对锅炉燃烧做优化、对低氮排放作协同控制,其重点即为避免炉内燃烧调节和末端脱硝各自孤立地运行,按 NO_x 形成机制来设计源头分级低氮、全过程参数配合、末端精确脱硝的整体调控方案。所用炉内方法(空气分级、燃料再燃或烟气再循环)可使 NO_x 在源头减少,脱硝装置负担随之下降,不过各类调整都有适用边界,若处理不当便可能造成燃烧不稳、高温腐蚀、稳燃困难一类的问题。炉中原始 NO_x 的分布要趋于均匀、SCR 要分段喷氨、多变量与前馈控制要结合,才利于协同控制的实现。

参考文献

- [1] 王晶,廖昌建,王海波,等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(02): 91-104.
- [2] 张浩杰,余其乐,游春发,等. 基于 MOEA/D 和 NSGA-II 算法的燃煤锅炉多目标燃烧优化 [J]. 广西电力, 2026, 49(01): 25-32.
- [3] 丁旭,付康康,康博士,等. 1000MW 塔式炉燃烧系统建模及低氮高效燃烧策略研究 [J]. 综合智慧能源, 2024, 46(12): 34-41.
- [4] 吴云龙. 大型电站锅炉燃烧优化与 NO_x 减排协同控制技术研究 [J]. 电站系统工程, 2025, 41(05): 45-48.