

锅炉负荷波动对 NOx 生成特性的影响研究

李亚川 刘玉洁 郝乐杨

建投邢台热电有限责任公司，河北 邢台 054400

[摘要]电力系统有调峰需求时锅炉负荷会波动，这会对 NOx 生成特性产生影响，文章对此进行了系统研究，用数值模拟和工业实验相结合的方法构建含详尽化学反应机理的燃烧模型以分析负荷波动幅度、波动速率以及煤种特性对 NOx 生成过程影响规律。结果显示，负荷下降时炉内温度场分布有很大变化且燃烧区域下移、高温区域变小，从而使热力型 NOx 生成量减少，并且由于氧浓度分布和还原区停留时间共同影响，燃料型 NOx 在中等负荷下可能排放浓度会升高。此外，负荷波动速率对 NOx 生成影响明显，因为快速调负荷会使空气配比暂时失调，进而使 NOx 瞬时浓度峰值增加 15%~25%。文中还建立负荷-NOx 排放预测模型并提出基于负荷预判的协调控制策略，这能有效降低负荷波动时的 NOx 排放，给电厂灵活调峰时低氮燃烧技术优化提供理论依据和技术支持，其研究成果对提升燃煤电厂环保性能和运行经济性有着重要应用价值。

[关键词]锅炉负荷；NOx 生成；燃烧特性；波动工况；排放控制

DOI: 10.33142/hst.v8i11.18317

中图分类号：TK227

文献标识码：A

Study on the Influence of Boiler Load Fluctuations on NOx Generation Characteristics

LI Yachuan, LIU Yujie, HAO Leyang

Construction Investment Xingtai Thermal Power Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054400, China

Abstract: When there is a demand for peak shaving in the power system, the boiler load will fluctuate, which will have an impact on the NOx generation characteristics. This article systematically studies this and uses a combination of numerical simulation and industrial experiments to construct a combustion model with detailed chemical reaction mechanisms to analyze the impact of load fluctuation amplitude, fluctuation rate, and coal type characteristics on the NOx generation process. The results show that when the load decreases, there is a significant change in the temperature field distribution inside the furnace, and the combustion zone moves downwards and the high-temperature zone becomes smaller, resulting in a decrease in the production of thermal NOx. Additionally, due to the combined effects of oxygen concentration distribution and residence time in the reduction zone, the emission concentration of fuel NOx may increase at moderate loads. In addition, the fluctuation rate of load has a significant impact on NOx generation, as rapid load adjustment can temporarily disrupt the air ratio, thereby increasing the peak instantaneous concentration of NOx by 15% ~ 25%. The article also establishes a load -NOx emission prediction model and proposes a coordinated control strategy based on load prediction, which can effectively reduce NOx emissions during load fluctuations and provide theoretical basis and technical support for optimizing low nitrogen combustion technology during flexible peak shaving in power plants. The research results have important application value for improving the environmental performance and operational economy of coal-fired power plants.

Keywords: boiler load; NOx generation; combustion characteristics; fluctuating operating conditions; emission control

引言

国民经济支柱产业的电力行业因可再生能源大规模并网而使燃煤发电机组遭遇空前调峰运行压力，近五年中国电力系统调峰深度不断加大，2018 年煤电机组调峰负荷率为平均 70%，到 2022 年已降至 50% 以下且有些地区极限调峰水平达 30%~40%，国家能源局数据显示 2022 年中国可再生能源装机占比超 47% 从而使常规燃煤电厂

运行方式由基荷转成频繁启停、深度调峰的辅助服务模式。

锅炉运行模式的这种转变让其频繁遭遇负荷波动工况，这对燃烧过程以及污染物排放有着深远影响，而燃煤电厂的主要污染物之一是氮氧化物（NOx），它的生成机制和锅炉负荷、燃烧温度、空气分配等联系紧密，不过现有的关于 NOx 生成与控制的研究大多聚焦于稳态满负荷状况，负荷波动工况下 NOx 生成特性的认识还不系统，

所以在实际生产时，锅炉负荷波动期间 NO_x 排放浓度常常不好稳定控制，这既影响环保达标运行，又限制电厂灵活调峰的能力。

超低排放标准越来越严格，在这样的大背景下，若能深入掌握负荷波动对 NO_x 生成特性的影响规律，对优化燃烧调整策略、达成全负荷范围内的稳定低氮燃烧就很重要。本研究采用数值模拟和工业实验相结合的方式，系统剖析不同负荷波动状况下炉内燃烧特性变化与 NO_x 生成机理之间的耦合关系，探究负荷波动速率、幅度还有煤种特性对 NO_x 生成进程的影响规律，以期给电厂灵活调峰运行时的低氮燃烧控制供应理论依据和技术支撑。

2 锅炉负荷波动机理及特性

2.1 锅炉负荷波动的定义与表征

锅炉负荷在电力需求有变或者调峰运行的时候，从一种负荷状态转到另一种负荷状态的动态过程就叫锅炉负荷波动，从时域特性来讲，负荷波动能用波动幅度、波动速率和波动频率这三个关键参数来表征，其中波动幅度是负荷变化的百分比，一般按额定负荷的百分比算，像 40%~100% 这样的负荷波动，波动速率是单位时间里负荷的变化量，典型的一般为每分钟 1%~3% 额定负荷，在 AGC 调节模式下能达到每分钟 5%~8% 额定负荷，波动频率表明单位时间里负荷变化的次数且与电网调峰需求的时间特性相对应^[1]。

从工程实践而言，负荷波动依据波动类型能分成规律性波动与随机性波动两类，其中规律性波动主要由电网调度计划造成，体现为负荷升降有秩序的过程，而随机性波动大多源于电网频率调整、机组 AGC 调节或者运行扰动，具有突发性和难以预见的特点。国家能源集团 2021 年运行数据显示，现代燃煤发电机组日均负荷变化次数在 2015 年是 3~5 次，到 2021 年变为 8~12 次，并且单次负荷变化的幅度和速率都有很大提高，这就使得锅炉燃烧系统快速调整的能力需要满足更高的要求。

2.2 负荷波动下的锅炉运行参数变化

负荷波动时，锅炉运行参数有着明显的动态变化特点，其中给煤量和一次风量是主要调节变量且随着负荷下降而削减，由于一次风速降低会使粉煤在燃烧器里的停留时长变长进而让煤粉的分散性与流动生成变化，以某 350MW 机组运行数据为例，负荷从 100% 降到 50% 时，一次风速由 28m/s 降至 20m/s，使得煤粉颗粒在燃烧器停留的时间增加了大约 40%，影响了燃料和空气的混合以及初始燃烧特性。

配风系统的二次风量和三次风量这两个关键参数，其

调整方式直接关系到炉内氧气分布以及分级燃烧效果，在负荷下降时，二次风速和三次风速的变化常难以与一次风完全同步，从而使空气分配比例出现暂时性失调，并且锅炉负荷发生变化时炉膛温度场、压力场也会重新分布，工业测试显示，从 100% 降到 60% 负荷的过程中，主燃烧区温度平均下降 150~200℃ 且温度场重心下移，水冷壁吸热特性随之改变，这些参数变化不但影响燃烧稳定性与效率，而且对 NO_x 生成过程也有复杂影响，尤其在快速调负荷的时候，参数的非线性变化更为明显。

2.3 负荷波动对燃烧过程的影响

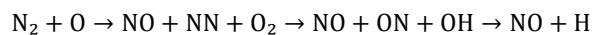
燃烧过程受锅炉负荷波动的主要影响体现在燃烧区域分布、火焰稳定性、燃烧强度等方面，当负荷降低时给煤量与风量都会减少，从而导致燃烧区域整体下移、高温区域面积缩小且温度随之降低，以某 350MW 机组数值模拟结果为例，100% 负荷降至 50% 负荷后主燃区最高温度从 1650℃ 降到大概 1450℃，高温区 (>1400℃) 体积减少了约 45% 并且燃烧强度也明显减弱，温度场这样变化会直接影响燃料里挥发分析出、固定碳燃烧以及 NO_x 生成的速率和数量^[2]。

负荷波动会使火焰稳定性下降，尤其在低负荷工况下更明显，拿 2020—2022 年某 350MW 机组运行数据来分析，负荷小于 40% BMCR (锅炉最大连续蒸发量) 的时候，火焰摆动幅度会增大大概 30% 且局部燃烧不完全的现象也增多，因为低负荷时风速降低，煤粉和空气的动量比失衡，混合就没那么均匀，并且燃烧器出口的气流组织有变化，旋流强度减弱，使得靠近燃烧器的地方氧气分布不匀，出现局部富氧或者贫氧的情况，这对 NO_x 的生成影响很大，所以负荷快速变化时，上述燃烧特性方面的变化更剧烈，这就让锅炉控制系统的响应速度和调节精度需要达到更高的要求。

3 NO_x 生成机理及影响因素

3.1 热力型 NO_x 生成机理

在高温条件下，空气里的 N₂ 与 O₂ 会反应生成热力型 NO_x，其生成的主要依据是 Zeldovich 机理，温度高于 1400℃ 时氮分子和氧原子间的三重键就会断裂并产生反应性更佳的氮原子，之后这些氮原子跟氧气一反应就形成了 NO，这一过程可用下面这个化学反应方程式来描述。

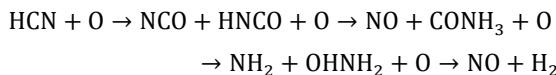


温度升高时热力型 NO_x 生成速率会按指数级增长且其生成还与停留时长、氧浓度紧密相关，近期研究表明燃烧温度从 1400℃ 升至 1600℃ 后热力型 NO_x 生成速率能增加 4~5 倍，所以高负荷工况下炉温较高导致热力型 NO_x

成主要 NO_x 来源，大概占总排放量的 60%~70%。

3.2 燃料型 NO_x 生成机理

煤里的含氮化合物在燃烧时会转化成燃料型 NO_x，这一转化主要体现在挥发分析出以及焦炭燃烧这两个阶段，其中挥发分析出阶段，煤里大概 60%~80% 的含氮化合物会变成 HCN、NH₃ 之类的中间产物，这些中间产物在氧化性环境里能快速变为 NO，在还原性环境里则会成为 N₂，而到了焦炭燃烧阶段，剩下的含氮化合物在温度较高的时候分解并和氧反应就形成了 NO。



燃料型 NO_x 的生成被煤种的氮含量以及挥发分析出特性决定，研究显示燃料型 NO_x 转化率为 20%~40% 这一区间且其与燃烧温度的相关性比热力型 NO_x 要弱，不过它跟燃烧区氧浓度分布还有停留时间关系更大，所以在不同负荷工况下有着独特生成特性^[3]。

3.3 负荷波动条件下的影响因素分析

在负荷波动的情况下，NO_x 的生成过程被多种相互交织的因素所影响，因为负荷发生变化会使炉内温度场重新构建，这对热力型 NO_x 有直接作用，并且根据 2019 到 2023 年多台机组的测试数据，当负荷从 100% 降到 60% 的时候，主燃区平均温度会下降大概 150°C，从而使热力型 NO_x 的生成量减少 40%~50%，不过燃料型 NO_x 的变化趋向更复杂，因为它受氧浓度分布的变化和还原区停留时间两方面的影响。

负荷波动速率这一关键影响因素，当负荷快速变化（每分钟超过 5% 额定负荷）的时候，配风系统和燃料供应系统的响应有时滞后差异从而造成空燃比暂且失衡，实验数据表明快速减负荷时局部过量空气系数波动在 0.8 到 1.5 之间使 NO_x 浓度出现 15%~25% 的瞬时峰值，并且煤种特性也会影响负荷波动时 NO_x 的生成规律，高挥发分、低氮含量的煤种负荷波动时 NO_x 排放特性更稳定而低挥发分、高氮煤种对负荷变化更敏感，这主要是因为煤里含氮化合物的热解特性和在还原区的转化效率不同所致。

4 负荷波动对 NO_x 排放特性的影响

4.1 不同负荷变化率下的 NO_x 生成规律

对于燃煤电厂而言，在应对电网调峰需求的时候，锅炉负荷变化率是影响 NO_x 排放特性的重要因素，实验数据显示，负荷变化率从每分钟 2% 提升至每分钟 8% 时，NO_x 瞬时排放浓度能增长 15%~25%，因为在负荷变化率高的情况下，空气和燃料的配比很难精准匹配，短时间内局部区域氧浓度会波动，从而促使 NO_x 生成，2019—2023 年

工业实验数据表明，350MW 机组负荷快速下降阶段（每分钟 ≥5%）时，NO_x 生成量平均比稳态工况多出 17.3%。

在低负荷变化率（≤3%/min）这种工况下，一次风和二次风的配比能被控制系统及时调整从而使炉内燃烧环境保持比较稳定，数值模拟结果表明那时燃烧区温度场的变化较为平缓、热力型 NO_x 的生成受到控制且燃料型 NO_x 转化率的波动不到 5%，不过即便低负荷变化率的情况下，炉内温度分布不均匀还是会致使局部高温区 NO_x 生成量暂时增加，所以需要优化锅炉协调控制策略来应对负荷变化时的排放特性。

4.2 负荷波动幅度与 NO_x 排放关系

NO_x 排放特性受负荷波动幅度这一另一重要参数的影响，研究表明二者之间是非线性关系，以典型 350MW 燃煤机组为例，负荷波动幅度在小于 30% 额定负荷时，NO_x 排放浓度随其增加基本呈线性增长，但波动幅度超 30% 后，NO_x 排放浓度增长率明显提高，工业实验数据表明，负荷从 100% 降到 50% 时，NO_x 排放浓度平均增加 22.3%，负荷从 50% 降到 30% 虽然下降幅度小些，NO_x 排放浓度却增加了 35.7%^[4]。

炉内燃烧状态会因大幅度的负荷波动而发生根本性改变，具体体现为燃烧区域明显下移、燃尽区缩短以及局部空气过量系数波动大幅加剧。2021—2023 年电力行业统计数据显示，在有深度调峰需求时，超临界机组于低负荷（30%~40% 额定负荷）下运行的时段增加了 37%，从而使得 NO_x 排放控制面临更为严峻的挑战。负荷波动幅度大且频次高的工况不利于现有 SCR 脱硝系统的效率，使实际脱硝效率较设计工况低 5%~8%，所以需要开发适用于波动工况的新型脱硝技术并优化控制策略。

5 结论

本研究采用数值模拟和工业实验相融合的方法来系统分析锅炉负荷波动给 NO_x 生成特性带来的影响规律并得出如下主要结论：负荷变化率是影响 NO_x 瞬时排放的关键要素，在负荷变化率达到每分钟 5% 及以上时，NO_x 排放浓度会比稳态工况增加 15%~25%，这是因为空气与燃料配比出现了短暂停滞。负荷波动幅度跟 NO_x 排放是非线性关系，当负荷变化量超过 30% 额定负荷时，炉内燃烧状态从根本上改变且 NO_x 生成机理从以热力型为主转为以燃料型为主，从而让低负荷区间内的排放控制更复杂^[5]。

上述研究表明，随着电力系统调峰需求不断攀升，可采用如下技术举措：依据负荷预判开发空气分级优化控制策略，使负荷发生变化时燃料与空气能精确匹配，并且针

对不同负荷波动状况构建分段式 NO_x 控制模型，尤其要重点关注 30%~50% 低负荷区间的排放特征，同时优化 SCR 系统喷氨控制逻辑以提升其对负荷波动的适应性，这一研究成果给燃煤电厂在灵活调峰的情况下有效控制 NO_x 排放提供理论依据与技术支持，对提高电力系统环保性能和运行经济性有重要的应用价值。

[参考文献]

- [1] 张塞红,武文斐,李保卫.负荷对切圆锅炉气固两相流动特性影响的研究[J].热科学与技术,2013(2):78-83.
- [2] 金炳文.制粉系统运行对锅炉 NO_x 生成影响的研究[J].科技与企业,2013(19):271-272.
- [3] 周尧天.低负荷下运行氧量对锅炉燃烧及 NO_x 生成特性的影响研究[J].电工技术,2024,11(13):136-138.
- [4] 景雪晖,唐权利,朱建平,等.低负荷一次风掺烟量对 II 型切圆锅炉 NO_x 生成特性影响 [J].热力发电,2020(12):88-92.
- [5] 朱复东.配风对新型造粒生物质锅炉炉膛 NO_x 生成特性影响研究[J].环境生态学,2021(10):69-75.

作者简介：李亚川（1990.3—），毕业院校：河北联合大学，所学专业：热能与动力工程，当前就职单位：建投邢台热电有限责任公司，职务：集控运行值班员，职称级别：中级工程师。