

高水分低热值褐煤八角切圆锅炉减少 NO_x 生成及降低 NO_x 排放的研究与调整

季恩昌

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘 要: 高水分低热值褐煤在八角切圆锅炉中的 NO_x 生成控制面临挑战, 其高挥发分特性与八角切圆复杂气流组织耦合, 使 NO_x 生成规律异于常规煤种。本文以某 600MW 超临界八角切圆褐煤锅炉为对象, 基于热态测试与燃烧调整试验, 分析了褐煤燃烧过程中热力型、燃料型及快速型 NO_x 的生成贡献与空间分布特征, 揭示了挥发分释放、温度场及氧浓度对 NO_x 转化的协同影响机制。研究提出“还原、分级、分离”协同减排策略, 结合 SCR 系统优化, 可协同实现 NO_x 排放低于 50mg/Nm³、氨逃逸低于 2.5ppm, 为同类型机组脱硝提供借鉴。

关键词: 褐煤锅炉; 八角切圆; NO_x 生成; SCR; 空气分级燃烧

引言: 褐煤作为我国重要的发电燃料, 其高挥发分、高水分、低热值的特性使燃烧组织面临挑战。八角切圆燃烧方式因其良好的火焰充满度和稳定的着火性能, 在大型褐煤锅炉中得到广泛应用。随着火电行业氮氧化物排放限值收严至 < 50mg/Nm³, 高水分褐煤八角切圆锅炉面临巨大的减排压力。本文从褐煤燃烧 NO_x 生成机理出发, 结合现场热态测试与调整试验, 分析八角切圆方式下 NO_x 的生成特性与空间分布规律, 提出针对性减排技术措施, 以为同类型锅炉的低氮燃烧改造与运行调整提供参考。

1 褐煤燃烧 NO_x 生成机理与八角切圆特性分析

1.1 高水分低热值褐煤的 NO_x 生成路径与特征

煤粉燃烧 NO_x 生成有热力型、燃料型和快速型三条路径, 褐煤锅炉中三者贡献比例异于常规煤种。热力型 NO_x 生成于高温富氧环境 (> 1500℃), 褐煤锅炉因水分蒸发吸热, 炉膛温度较烟煤锅炉低 80~150℃, 主燃烧区中心约 1100~1350℃, 热力型 NO_x 占比不超过 10%~18%。燃料型 NO_x 是主要来源, 占比 70%~85%, 褐煤挥发分高达 55%~60%, 挥发分氮在火焰内部大量释放, 氧化性气氛下转化为 NO_x 比例极高, 还原性气氛下则可被还原为 N₂。快速型 NO_x 在富燃料区生成, 褐煤挥发分高使碳氢自由基浓度较高, 占比约 5%~10%。高水分褐煤对 NO_x 生成具双重影响: 高挥发分若在还原性气氛下释放, 可抑制燃料型 NO_x, 但水分蒸发吸热降低炉膛火焰高温区温度, 削减热力性 NO_x 生成, 影响脱硝效率^[1]。

1.2 八角切圆方式下的燃烧组织特点与 NO_x 生成的耦合关系

八角切圆方式下, 八组燃烧器沿炉膛八角布置, 气流交汇于中心形成旋转火球, 其燃烧组织与 NO_x 生成存在多重耦合。首先, 炉膛气流充满度高、中心回流区大, 高温烟气回流有利于高水分褐煤着火, 但挥发分在高温区停留时间延长, 增加了燃料型 NO_x 生成几率。其次, 炉膛水平截面温度呈“中心高、周边低”格局, 中心区域氧浓度较低, 配风得当可形成还原性气氛将部分 NO_x 还原为 N₂, 配风失当则 NO_x 急剧增加。另外, 八角切圆气流旋转衰减慢, 炉膛上部残余旋转较强, 炉膛出口烟温偏差和氧量偏差较四角切圆更为显著, 影响 SCR 入口 NO_x 浓度分布的均匀性。

1.3 高水分褐煤与八角切圆耦合条件下 NO_x 生成的空间分布特征

热态测试表明, 八角切圆褐煤锅炉炉膛内 NO_x 浓度呈明显空间差异。沿炉膛高度方向, 主燃烧区 (标高 23~45m) NO_x 浓度逐步升高, 在燃烧器区域出口处达峰值 (约 310.7~500.5mg/Nm³); 进入燃尽区后, 空气分级形成还原性气氛, 部分 NO_x 被还原, 至炉膛出口降至 210~402mg/Nm³, 还原率约 20%~25%, 低于四角切圆锅炉的 30%~35%, 表明八角切圆残余旋流削弱了空气分级还原效果。沿炉膛水平方向, NO_x 浓度与温度场呈正相关, 高温区域对应 NO_x 浓度明显偏高, 两侧偏差可达 50~80mg/Nm³, 反映出温度偏差与 NO_x 生成偏强的叠加放大效应, 这一空间分布差异是配风优化的关键依据。

2 NO_x 排放影响因素与热态测试分析

2.1 过量空气系数对 NO_x 排放的影响

过量空气系数是影响 NO_x 生成的核心运行参数, 同时应满足低负荷稳燃要求, 确保锅炉充分燃尽, 采取高负荷低氧量、低负荷高氧量控制策略, 通过控制主燃烧区氧浓度调节还原性气氛的强弱, 减少 NO_x 生成。测试表明, 高负荷期间锅炉的运行氧量从较高的 3.5% 逐渐下降至 3.1%、2.8% 时, NO_x 生成浓度从 252mg/Nm³ 下降至 211 mg/Nm³, 同时降低脱硝系统的喷氨量; 低负荷期间锅炉的运行氧量从 5.2% 降低至 4.7%、4.2% 时, 锅炉的 NO_x 生成浓度从 374 mg/Nm³ 下降至 300 mg/Nm³, 脱硝压力减轻, 容易实现达标排放。低氧工况下主燃烧区处于还原性气氛, 挥发分氮转化为 N₂ 的比例增大, 抑制 NO_x 生成; 高氧工况下氧化性气氛增强, 挥发分氮氧化加剧, NO_x 生成量增加。但过低氧量 (< 2.5%) 会导致飞灰含碳量升高和燃烧不稳, 需在 NO_x 与燃烧效率之间寻找平衡。建议褐煤八角切圆锅炉炉膛出口氧量控制在 2.8% ~ 4.2%, 既保证 NO_x 排放处于较低水平, 又维持较高的燃烧效率^[2]。

2.2 二次风配比与分级送风对 NO_x 减排的作用

二次风配比是抑制 NO_x 生成的核心手段。测试数据显示, 高负荷期间燃尽风门从两层 100% 逐步开大至三层、四层 100% 后, 主燃烧器区风量减少, 锅炉效率下降 0.24%, NO_x 生成浓度则从 242mg/Nm³ 下降至 204mg/Nm³, 脱硝系统喷氨量下降。300MW 负荷以下, 一层燃尽风门从 5% 逐渐开大至 50%、100% 后, 锅炉的 NO_x 生成浓度从 283mg/Nm³ 逐渐下降至 248mg/Nm³, 降幅达 15%。随着燃尽风比例增大, 主燃烧区风量减少, 还原性气氛增强, 挥发分氮被还原的比例提高; 同时燃尽区补充氧气保证煤粉后期燃尽。若主燃烧区缺氧严重, 飞灰含碳量升高 (由 0.1% 升至 0.3%), 且火焰稳定性下降, 二次风比例对 NO_x 也有影响, 二次风过大会过早混入挥发分释放区, 强化氧化性气氛, 综合考虑 530MW 负荷时二次风门设定为 70% 左右。415MW 负荷时, 二次风门开度为 50%。300MW 负荷时二次风门开度按 40%。推荐褐煤八角切圆锅炉 SOFA 风控制 510MW 负荷以上时燃尽风门开度控制在三层 100%。415MW 负荷时燃尽风门开度两层均控制在 100%。在 300MW 负荷时, 燃尽风门开度按照一层 100% 运行, 在 210MW 负荷时, 燃尽风门开度 5% 运行。NO_x 生成约 210 ~ 290mg/Nm³, 飞灰含碳量约 0.12% ~ 0.24%。

2.3 负荷变化对 NO_x 排放的影响规律

负荷变化是影响 NO_x 排放的重要运行因素。满负荷 (600MW) 时炉膛温度高、氧量充足, NO_x 生成约 280 ~ 320mg/Nm³; 随负荷降至 450MW, 温度水平下降,

NO_x 降至 240 ~ 270mg/Nm³; 300MW 低负荷时进一步降至 190 ~ 220mg/Nm³。低负荷工况 NO_x 生成较低, 但 CO 排放升高、燃烧不稳、SCR 入口烟气温度偏低使脱硝反应不充分, 氨气流量过喷, 氨逃逸率升高, 脱硝效率下降。因此, 低负荷时需通过配风优化调整, 采用倒塔、收腰配风, 降低主燃区风量、提高风箱压力, 适当提高炉膛出口氧量至 3.5% ~ 4.5% 等手段维持脱硝效果。

2.4 煤质波动对 NO_x 生成的影响

风磨煤机制粉系统, 对燃烧褐煤要求比较单一, 褐煤水分、挥发分、灰分波动大, 对 NO_x 排放产生直接影响。挥发分升高 (Vdaf 由 40% 升至 60%) 时, NO_x 增加约 15% ~ 25%; 水分升高 (由 40% 升至 50%) 时, 炉膛温度下降使 NO_x 略降约 3% ~ 8%, 但燃烧稳定性变差; 低位发热量降低 (由 9.62MJ/kg 降至 7.62MJ/kg) 时需提高给煤量, 热负荷集中区域 NO_x 生成速率加快。建议煤质波动时相应调整运行参数——挥发分升高时适当增加 SOFA 风量 2% ~ 4% 以强化还原, 发热量降低时需同步调整磨煤机组合方式, 维持炉膛热负荷均衡, 减少 NO_x 生成的局部峰值。

3 低氮燃烧调整技术措施与优化

3.1 空气分级燃烧深度优化

空气分级燃烧的关键在于合理分配主燃区与燃尽区的风量比例与送入位置。基于热态测试, 将 SOFA 喷口高度上移 1.5m, 延长主燃区还原性气氛停留时间, CO 体积分数由 800ppm 升至 1200ppm, 还原效果增强。SOFA 风率由 8% 提升至 16% ~ 18%, 主燃区过量空气系数由 1.20 降至 1.05 ~ 1.08, 强化还原性气氛; 燃尽区补入后期空气保证燃尽。调整二次风配比: 下层辅助风开度 55% (维持着火初期氧化性气氛), 中层二次风开度由 45% 降至 35%, 上层二次风开度 40%, SOFA 风随负荷调整。优化后 SCR 入口 NO_x 由 340mg/Nm³ 降至 302mg/Nm³, 降幅约 12%。

3.2 二次风系统与燃烧器区域气氛控制

二次风系统控制通过调节辅助风和周界风二次风门开度, 优化燃烧器区域的氧量分布。将辅助风二次风挡板由 60% ~ 30% 下调至 50% ~ 25%, 降低辅助二次风送入的氧量, 增强燃烧器区域的还原性气氛, 挥发分氮的还原比例提高, NO_x 排放降低约 5% ~ 10%。燃烧器周界风比例由原 50% ~ 35% 调低至 40% ~ 20%, 推迟风与煤粉射流的混合时机, 确保煤粉在低氧环境中完成挥发分析出, 避免了周界风过早混入导致的 NO_x 增加^[3]。

3.3 八角切圆动量均衡与炉膛出口 NO_x 浓度场优化

针对八角切圆炉膛两侧温度偏差和 NO_x 浓度场不均的问题,实施了燃烧器动量均衡调整。八角各角燃烧器的二次风门开度,将各角二次风量偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内,消除局部高氧区。同时通过调整风扇磨煤粉分配器开度及各粉管调平挡板,确保一次粉管风速偏差 $< 5\%$,磨煤机本角各层粉管浓度均匀可控,调整各层燃烧器出力,调整给煤机出力或磨煤机组合方式优化等手段,使炉膛两侧热负荷偏差不超过 5% 。均衡调整后,炉膛出口 NO_x 浓度场均匀性显著改善,两侧偏差由原 $60 \sim 80 \text{ mg/Nm}^3$ 收窄至 $\pm 20 \text{ mg/Nm}^3$ 以内,SCR 入口 NO_x 分布的相对标准偏差由 0.25 降至 0.09,有利于提高 SCR 脱硝系统的运行效率并减少氨逃逸。

4 SCR 系统优化与协同脱硝效果

4.1 精准喷氨策略与氨逃逸控制

SCR 系统脱硝效率与氨逃逸控制高度依赖喷氨格栅的精准调节与催化剂活性管理。针对八角切圆锅炉出口 NO_x 浓度场均匀性较差的特点,实施分区喷氨策略——将 AIG 分为 8 个独立控制分区,依据对应区域 NO_x 浓度独立设定喷氨量,实现“按需喷氨”。600MW 负荷下,分区喷氨后 SCR 出口 NO_x 分布相对标准偏差由 0.23 降至 0.08,氨逃逸由 4.5ppm 降至 2.2ppm。定期评估催化剂活性,当活性下降至初始值 70% 以下时,采取增加吹灰频次、化学清洗或加装备用层等措施恢复性能,避免过度喷氨导致逃逸升高。通过精准喷氨与催化剂管理协同,机组在 300 ~ 600MW 宽负荷范围内 NO_x 排放稳定低于 35 mg/Nm^3 ,氨逃逸低于 2.5ppm。

4.2 提高 SCR 入口烟气温度的措施

高水分褐煤燃烧时水分蒸发吸热,低负荷下 SCR 入口烟温常低于催化剂最佳反应窗口 ($> 320^\circ\text{C}$),导致脱硝效率下降、氨逃逸上升。提温措施包括:深调工况投入省煤器给水旁路,减少省煤器吸热,210MW 负荷下 SCR 入口温度由 288°C 提升至 310°C ;实施烟

气旁路改造,从省煤器入口或炉膛抽取高温烟气 (约 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$) 与省煤器出口烟气混合,240MW 负荷下由 288°C 提升至 320°C 以上;优化制粉系统组合,确保 1357 或 2468 切圆主力磨运行,关闭磨煤机出口第五层气动插板门,提高下层粉管煤粉浓度,保证稳燃的同时使火焰中心下移,炉膛出口烟温升高 $8 \sim 15^\circ\text{C}$ 。综合措施确保 180MW 以上负荷 SCR 入口温度稳定在 310°C 以上,脱硝效率维持 $85\% \sim 90\%$,氨逃逸控制在 2.5ppm 以下^[4]。

结束语

本文通过热态测试与燃烧调整试验,系统研究了高水分低热值褐煤八角切圆锅炉的 NO_x 生成特性与减排路径。燃料型 NO_x 占总量 $75\% \sim 80\%$,控制主燃区还原性气氛是减排关键;八角切圆炉膛两侧温度偏差使 NO_x 空间分布差异显著,动量均衡调整可有效改善 SCR 入口浓度场均匀性。通过空气分级、配风优化、动量均衡调整及 SCR 精准喷氨、烟气升温等组合措施,机组在宽负荷范围内可实现 NO_x 排放低于 50 mg/Nm^3 、氨逃逸低于 2.5ppm。褐煤高挥发分既是 NO_x 来源,也为还原抑制提供了条件,关键在于构建“炉内低氮燃烧 + SCR 精准脱硝”协同体系。

参考文献

- [1] 郭宝群,岳嘉豪,丛茂展,等. 600 MW 超临界低热值褐煤八角切圆锅炉低负荷稳燃技术 [J]. 发电技术,2026,47(2):295-303.
- [2] 白健美,陈辉,黄林滨,等. 1000MW 超超临界八角双切圆锅炉降低水冷壁高温腐蚀试验研究 [J]. 电力科技与环保,2023,39(2):111-119.
- [3] 李子祥,张启超,乌晓江,等. 660MW 高水分褐煤锅炉超低负荷运行特性研究 [J]. 热力发电,2024,53(5):82-92.
- [4] 刁保圣,彭彬彬,李子祥,等. 风率分配对 660MW 机组褐煤锅炉煤粉燃烧性能影响的数值研究 [J]. 热力发电,2023,52(9):195-204.