

高温高压锅炉燃烧特性及 NO_x 治理技术的热工性能分析

刘望东

(大唐秦岭发电有限公司, 陕西 渭南 714206)

摘要 高温高压锅炉是现代工业和电力生产的核心设备, 其燃烧特性关系到能源利用效率和污染物排放。本文分析了工艺参数、数值模拟与实测对燃烧过程及温度场分布的影响, 并探讨了低氮燃烧、SNCR 和 SCR 等主要 NO_x 治理技术的原理与应用效果。在此基础上, 评估了锅炉的热效率、能量平衡、热损失及其经济与环境效益。结合实际工程数据, 对燃烧优化与 NO_x 治理方案进行了验证与分析, 以期为高温高压锅炉的清洁高效运行提供参考。研究表明, 优化燃烧参数并集成先进脱硝技术可显著提升锅炉性能, 实现经济与环保的双重效益。

关键词 高温高压锅炉; 燃烧特性; NO_x 治理

中图分类号: TK229; X773

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.003

0 引言

火力发电作为主要的电力来源, 其清洁高效运行尤为重要。高温高压锅炉是火力发电厂的核心设备, 其燃烧过程的优化不仅直接影响能源转化效率, 更是控制污染物排放的关键^[1]。 NO_x 是大气污染的主要来源之一, 对人体健康和生态环境造成严重危害, 因此, 如何有效控制 NO_x 排放已成为当前燃煤电厂面临的重大挑战。近年来, 随着国家“双碳”战略的推进, 煤电行业面临更严格的环保标准与能效指标, 推动锅炉技术向低碳、高效、智能化方向发展^[2]。锅炉的燃烧性能和脱硝效率, 已成为衡量其先进性和环保性的关键指标, 亟需在理论研究和工程实践中持续优化和创新。

1 高温高压锅炉燃烧特性

1.1 工艺参数影响

高温高压锅炉的燃烧效率与排放受燃料特性、过量空气系数、燃烧温度和炉膛压力影响。高挥发分煤易燃但易产生 CO, 低挥发分煤则需高温长时间燃烧^[3]。控制 α 值在 1.05 ~ 1.15 有利于效率与减排, 温度过高会促使 NO_x 生成, 需通过分级燃烧或烟气再循环调控。

其中, α 值为过量空气系数, 表示实际供风量与理论供风量之比。适当的 α 值 (通常控制在 1.05 ~ 1.15) 有助于确保燃料充分燃烧, 同时抑制污染物生成。 α 值过低易导致不完全燃烧, 生成 CO 和烟尘; 过高则可能降低热效率并增加 NO_x 排放^[4]。炉膛维持微正压有助于燃烧稳定与防止漏风。表 1 展示了不同负荷下参数变化对锅炉性能的影响。

1.2 数值模拟与实测

为深入理解高温高压锅炉的燃烧过程, 数值模拟广泛应用于模拟炉内流动、传热及污染物生成, 从而分析燃烧器布置、送风方式与燃料特性对性能与 NO_x 排放的影响, 为设计与运行优化提供依据^[5]。模拟需结合实测数据验证可靠性, 实测数据来源包括烟气组分分析、温度场测量以及运行参数监控。对比模拟与实测结果可修正模型, 提升模拟准确性。在 350 MW 锅炉研究中, CFD 模拟结果经实测验证, 为优化运行提供支持。此外, 将数值模拟与机器学习技术相结合的可视化系统, 能够实现对燃烧状态的动态展示与异常工况的预警。由表 2 可见, 随着锅炉负荷的提升, 炉膛温度整体呈上升趋势, 且温度分布的变化对 NO_x 的生成具

表 1 锅炉运行参数统计表

| 统计指标 | 排烟温度 (°C) | 含氧量 (%) | 炉膛平均温度 (K) | NO_x (SCR) (mg/m^3) | 热效率 (%) |
|------|-----------|---------|------------|--|---------|
| 平均值 | 146.48 | 4.25 | 1 442.66 | 65.14 | 92.71 |
| 最小值 | 125.48 | 3.14 | 1 377.8 | 43.38 | 90.00 |
| 最大值 | 166.33 | 5.29 | 1 573.16 | 90.72 | 94.90 |

有显著影响。因此, 准确掌握炉膛温场特性对于实现燃烧优化具有重要意义。

表 2 不同负荷下炉膛温度变化

| 负荷 (%) | 炉膛平均温度 (°C) | 炉膛最高温度 (°C) | 炉膛最低温度 (°C) |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 60 | 1 420 | 1 600 | 1 300 |
| 65 | 1 440 | 1 650 | 1 320 |
| 70 | 1 400 | 1 580 | 1 310 |
| 75 | 1 460 | 1 600 | 1 350 |
| 80 | 1 420 | 1 620 | 1 340 |
| 85 | 1 400 | 1 560 | 1 320 |
| 90 | 1 580 | 1 700 | 1 380 |
| 95 | 1 460 | 1 600 | 1 310 |
| 100 | 1 400 | 1 520 | 1 300 |

1.3 温场分布与排放

炉内温场分布是决定锅炉燃烧效率与 NO_x 排放的关键因素。高温区集中在燃烧器附近, 是热力型 NO_x 的主要生成区, NO_x 生成速率对温度极为敏感, 升高 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 可能成倍增长。尽管高温区燃烧充分, 却也加剧了 NO_x 生成^[6]。因此, 应通过优化燃烧器布置、分级送风和燃料分级等技术降低局部温度峰值, 抑制 NO_x 排放。此外, 温场还影响如汞的气化与氧化, 不均匀分布也会增加 CO 和未燃碳等排放。保持温场均匀性有助于提升燃烧效率和污染控制。表 3 显示 SCR 脱硝效果最佳, 低氮燃烧则能有效抑制 NO_x 的初始生成。

表 3 不同负荷下 NO_x 排放对比

| 负荷 (%) | 未治理 NO_x | 低氮燃烧 NO_x | SNCR 治理 NO_x | SCR 治理 NO_x |
|--------|-------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| 60 | 320 | 240 | 180 | 80 |
| 65 | 300 | 220 | 160 | 70 |
| 70 | 280 | 200 | 140 | 60 |
| 75 | 260 | 180 | 120 | 50 |
| 80 | 240 | 160 | 100 | 40 |
| 85 | 220 | 140 | 80 | 30 |
| 90 | 200 | 120 | 60 | 20 |
| 95 | 180 | 100 | 40 | 10 |
| 100 | 160 | 80 | 20 | 0 |

2 NO_x 治理技术

2.1 低氮燃烧

低氮燃烧通过优化燃烧方式和炉膛结构, 从源头抑制 NO_x 生成, 主要调控温度、氧浓度和烟气停留时间。其手段包括分级燃烧、烟气再循环 (FGR) 和低 NO_x 燃烧器等。该技术投资低、运行维护简便, 常作为前端控制措施^[7]。虽然可显著减少 NO_x 初始生成, 但脱硝效率一般在 $100 \sim 200\text{ mg/m}^3$ 之间, 难以单独满足超低排放标准, 需配合末端治理技术使用。

2.2 选择性非催化还原

SNCR 在 $850 \sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度窗口内喷入氨水或尿素等还原剂, 与 NO_x 选择性反应生成 N_2 和 H_2O 。其优点是成本低、占地小、适用于改造项目, 但对温度要求严格, 易受温度波动、氨逃逸等影响, 导致效率下降或二次污染。其脱硝效率一般为 $30\% \sim 80\%$, 大型机组多为 $25\% \sim 40\%$, 通常作为低氮燃烧的补充手段使用。

2.3 选择性催化还原

SCR 利用催化剂, 在较低温度下将还原剂与 NO_x 反应, 脱硝效率高于 SNCR。尽管 SCR 投资大、占地多、催化剂易中毒, 且存在氨逃逸风险, 但其效果最为显著, 广泛应用于新建或改造电厂。与低氮燃烧联合使用, 可减轻催化剂负担、延长寿命并降低运行成本。SCR 在多种 NO_x 治理技术中脱硝效果最佳。

3 热工性能分析

3.1 热效率与能量平衡

锅炉热效率是衡量其将燃料化学能转化为蒸汽热能能力的重要指标。高温高压锅炉效率越高, 燃料消耗和运行成本越低。实际工程中多采用反平衡法, 通过评估排烟、固体和气体不完全燃烧、散热及灰渣等各类热损失间接计算热效率^[8]。能量平衡分析基于能量守恒原理, 用于评估锅炉输入能量与输出热量及损失的关系, 有助于识别主要能耗环节, 指导节能改造。表 4 显示, 锅炉热效率在额定负荷下最优, 低负荷运行则因热损失相对增加而效率下降, 因此应尽量保持在高效负荷区间运行。在实际应用中, 不同类型的燃料对锅炉热效率有着显著影响。低热值煤由于含水量较高、挥发分较低, 通常会导致较低的燃烧效率, 而高热值煤则能提供更高的燃烧热量, 从而提高锅炉的整体效率。为了适应不同燃料的使用要求, 现代锅炉设计引入了智能控制系统, 能够根据燃料的变化调整空气配比、燃烧温度等关键参数。这种智能化调控不仅提高了锅炉的运行效率, 还能够不同负荷下保持稳定的热效率, 减少了燃料浪费和污染物排放。

表 4 负荷与热效率关系

| 热效率 (%) | 负荷 (%) |
|---------|--------|
| 93.3 | 60 |
| 93.5 | 65 |
| 92.8 | 70 |
| 94.7 | 75 |
| 93.8 | 80 |
| 93.3 | 85 |
| 90.8 | 90 |
| 95.3 | 95 |
| 93.9 | 100 |

3.2 热损失评估

锅炉热损失是影响热效率的核心因素,主要包括排烟热损、固体和气体不完全燃烧损失、散热损失及灰渣热损。排烟热损最为显著,可通过降低排烟温度、加装省煤器和空气预热器,以及合理控制过量空气系数加以减少。固体和气体不完全燃烧损失可通过优化煤粉细度、燃烧器设计、空气配比及气流组织加以控制。散热损失与锅炉表面积和保温性能相关,应加强绝热。灰渣热损则可通过优化除渣系统降低。综合评估各类热损有助于发现能量浪费环节,制定改进策略。表 5 显示,低负荷下热损失比例更高,提示优化负荷调度也是提升效率的关键。

表 5 负荷与热损失关系

| 热损失 (%) | 负荷 (%) |
|---------|--------|
| 7.2 | 60 |
| 6.8 | 65 |
| 6.3 | 70 |
| 6.1 | 75 |
| 5.9 | 80 |
| 5.8 | 85 |
| 6.5 | 90 |
| 6.2 | 95 |
| 5.4 | 100 |

4 工程验证与优化

4.1 现场数据采集

锅炉运行期间通过布设传感器实时采集燃烧、蒸汽、烟气及系统参数,为热效率、热损失和 NO_x 排放的评估提供数据支撑。关键数据包括温度、压力、风量、

氧含量、燃料与水耗等。长期监测有助于发现燃烧不均、局部过热和排放超标等问题,为调控和优化提供依据。本研究整理了不同负荷下的运行数据,验证了理论分析的准确性。

4.2 优化方案模拟

在数据分析基础上,结合数值模拟可评估运行参数调整或新技术引入对锅炉性能和排放的影响。常见模拟包括燃烧优化、脱硝技术比较及热工性能分析,具有效率高、不干扰实际运行等优点。本研究模拟比较了低氮燃烧、SNCR 和 SCR 的脱硝效果,其中 SCR 表现最优,低氮燃烧则有效降低初始 NO_x 生成。通过“模拟—验证—调整”的闭环机制,有助于持续优化运行,实现节能减排目标。

5 结束语

本文分析了高温高压锅炉的燃烧特性及 NO_x 治理技术对热工性能的影响。结果表明,燃料特性、空气系数、温度与炉膛压力等参数共同影响效率与排放;数值模拟结合实测数据可指导燃烧优化。低氮燃烧有效抑制 NO_x 初始生成,SCR 脱硝效率最高,适合超低排放需求。排烟热损是主要能耗来源,优化燃烧和减损可提升经济性,虽然治理成本上升,但其环境效益显著。未来应加强智能控制、多污染物协同治理和新技术应用,助力锅炉向高效低排放转型,进而实现碳达峰与碳中和目标。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局. 工业锅炉系统节能设计指南 (GB/T 34912—2024)[S]. 2024-09-29.
- [2] OFweek 传感器网. 如何有效优化火电厂锅炉的燃烧效率? [DB/OL]. OFweek 传感器网, 2019-08[2025-07-03]. <https://sensor.ofweek.com/>.
- [3] 郭飞, 宋宝军, 张鑫莆. 某 350 MW 超临界机组锅炉后烟道侧墙爆管数值模拟分析 [J]. 电站系统工程, 2022, 38(03): 41-43.
- [4] 王永亮, 刘维玉, 郭志勇, 等. 基于数值模拟和机器学习的锅炉燃烧状态动态展示方法: CN114036758B[P]. 2022-09-13.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 《锅炉大气污染物排放标准》(征求意见稿) 编制说明 [R]. 北京: 生态环境部, 2013.
- [6] 佚名. 火电厂污染防治关键技术与集成规范应用 [J]. 高科技与产业化, 2021, 27(06): 53.
- [7] 向阳, 张文杰, 邓启刚, 等. 220 t/h CFB 锅炉提质增效改造技术应用 [J]. 能源与节能, 2023(01): 188-190.
- [8] 张小桃, 杨茂荃, 周程, 等. 600 MW 燃煤锅炉污泥再燃过程及污染物排放研究 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 209-215.