

# 燃烧调整对 NOx 排放及锅炉效率的影响

荣胜重

中铝山东有限公司 山东 淄博 255051

**摘要:**为破解火电厂锅炉效率与NOx减排的制约难题,本文通过实验探究燃烧调整对NOx排放及锅炉效率的影响,采用单一变量与多参数协同分析法,搭建实验系统,覆盖正常与低负荷工况,明确过量空气系数等关键参数的影响规律,构建协同优化模型并验证。结果表明,多参数协同调整可实现NOx排放达标与锅炉效率提升双赢,提出的优化策略及工程建议,为火电厂清洁高效运行提供技术支撑。

**关键词:**燃烧调整; NOx排放; 锅炉效率; 影响

**引言:**随着环保法规日趋严格,火电厂NOx减排压力持续增大,同时锅炉运行效率直接影响企业经济性,二者的平衡成为行业关注焦点。燃烧调整作为低成本、易操作的调控手段,可通过优化风煤比等参数优化燃烧过程。本文围绕燃烧调整对NOx排放及锅炉效率的影响展开实验研究,旨在明确参数影响规律,构建协同优化策略,解决二者制约问题,助力火电厂实现节能与环保协同发展。

## 1 燃烧调整及NOx排放、锅炉效率相关理论基础

### 1.1 锅炉燃烧调整核心理论

(1) 燃烧调整的定义与核心目标:通过科学调控燃烧相关参数,实现锅炉高效、清洁燃烧,核心是平衡锅炉燃烧效率与污染物排放,兼顾经济性与环保性。(2) 燃烧调整的关键参数:主要包括风煤比、过量空气系数、燃烧温度、二次风配比及燃料粒径,这些参数直接决定燃烧反应的充分性与稳定性。(3) 燃烧调整的基本原理:基于燃烧动力学理论,通过调控关键参数,优化燃料与空气的混合效果,调控燃烧反应进程,减少无效燃烧损耗。

### 1.2 NOx排放相关理论

(1) NOx的主要生成机理:分为热力型、燃料型、快速型三类,热力型由高温下氮气与氧气反应生成,燃料型来自燃料中氮元素,快速型生成量较少;低负荷工况下NOx生成量受燃烧温度影响显著。(2) NOx排放的影响因素:燃烧参数、燃料特性、炉膛结构均会影响NOx生成与排放,其中燃烧温度过高、过量空气系数不当会显著增加NOx排放。(3) NOx排放的检测方法与评价标准:常用烟气分析仪检测排放浓度,需严格遵循行业相关排放标准,确保排放达标<sup>[1]</sup>。

### 1.3 锅炉效率相关理论

(1) 锅炉效率的定义与计算方法:指锅炉有效利用热量与燃料输入热量的比值,常用正平衡法、反平衡法

计算,需核算各类热损失对效率的影响。(2) 影响锅炉效率的主要因素:包括燃烧不完全损失、排烟热损失、散热损失等,低负荷工况下,燃烧不完全损失和排烟热损失会明显增大,导致效率下降。(3) 锅炉效率的检测与评价指标:通过监测关键参数核算效率,依据相关标准划分效率等级,作为锅炉运行效果的评价依据。

## 2 燃烧调整对NOx排放的影响实验研究

### 2.1 实验装置与实验方案设计

(1) 实验装置:搭建含锅炉实验台、燃烧系统、NOx检测系统及参数监测设备的完整实验系统,其中NOx检测系统采用高精度烟气分析仪(测量范围0-5000mg/m<sup>3</sup>,精度±5mg/m<sup>3</sup>),参数监测设备包含热电偶(0-1300℃)、压力传感器等。完成设备安装、调试与校准,确保燃烧状态、NOx浓度及各参数采集精准,保障实验顺利推进。(2) 实验方案:选用电厂常用煤种(发热量22.3MJ/kg,灰分18.5%),采用单一变量法与多变量耦合分析法,探究燃烧参数对NOx排放的影响;设定正常负荷与低负荷工况,明确实验步骤、参数梯度、稳定运行时间(每工况≥30min)及数据采集节点(每5min1组)。(3) 实验数据采集与处理:实时记录NOx浓度、燃烧温度、过量空气系数等关键参数并整理,开展误差分析排除干扰,控制实验误差≤3%,采用标准化方法统一数据格式,保障数据可靠可比,为结果分析提供支撑。

### 2.2 单一燃烧参数调整对NOx排放的影响

(1) 过量空气系数调整的影响:固定其他参数,梯度调整过量空气系数(1.05-1.35),发现系数过高(>1.3)或过低(<1.1)均会使NOx排放升至800mg/m<sup>3</sup>以上,提炼变化规律,确定兼顾减排与燃烧稳定的最佳区间(1.15-1.25)。(2) 燃烧温度调整的影响:调控燃烧参数改变炉膛温度(850-1150℃),明确局部高温(>1100℃)会显著促进热力型NOx生成,使排放浓度上升30%以上,

揭示温度分布与NO<sub>x</sub>排放的内在关联。(3) 二次风配比调整的影响: 调整一次风与二次风比例(1:1.2-1:2.0)及喷射角度(30°-60°), 发现合理配比可优化燃烧氛围, 抑制NO<sub>x</sub>生成, 使排放降低15%-20%, 明确不同配比及角度的调控差异<sup>[2]</sup>。(4) 燃料粒径调整的影响: 选用不同粒径煤种, 发现粒径过大燃烧不充分、过小易致局部高温, 均会使NO<sub>x</sub>排放升高25%左右, 确定适宜粒径范围, 分析其减排作用。

### 2.3 多参数协同燃烧调整对NO<sub>x</sub>排放的影响

(1) 风煤比与二次风配比协同调整的影响: 探究两者耦合作用, 发现合理风煤比(1.8-2.2)搭配优化二次风配比(1:1.5-1:1.8), 协同减排效果达30%以上, 优于单一参数调整(≤20%), 明确最优协同参数区间。(2) 燃烧温度与过量空气系数协同调整的影响: 将温度控制在950-1050°C、过量空气系数优化至1.15-1.25, 有效抑制两类NO<sub>x</sub>生成, 使排放降至500mg/m<sup>3</sup>以下, 验证协同调控可行性<sup>[3]</sup>。(3) 低负荷工况协同调整效果: 针对低负荷调峰工况, 协同调整风煤比(1.7-2.0)、二次风配比(1:1.6-1:1.9)及温度(900-1000°C), 使NO<sub>x</sub>排放降低28%, 为实际调峰生产提供技术参考。

### 2.4 实验结果分析与讨论

(1) 实验结果总结: 提炼燃烧参数对NO<sub>x</sub>排放的影响规律, 明确过量空气系数、燃烧温度影响最显著(贡献率35%、40%), 多参数协同减排效果更优(≥30%), 梳理不同工况最优参数范围。(2) 异常现象分析: 针对NO<sub>x</sub>排放异常波动(±80mg/m<sup>3</sup>), 分析原因主要为炉膛温度波动(±50°C)、设备校准偏差、煤质不均等, 提出改进措施保障数据有效。(3) 模拟对比验证: 结合CFD数值模拟, 将实验数据与模拟数据对比, 误差控制在5%以内, 验证实验数据准确可靠, 为后续研究提供支撑。

## 3 燃烧调整对锅炉效率的影响实验研究

### 3.1 实验装置与实验方案优化

(1) 实验装置: 沿用前文锅炉实验台、燃烧系统及NO<sub>x</sub>检测系统, 补充排烟温度传感器(0-300°C, 精度±1°C)、烟气成分分析仪等效率检测设备, 完善全参数监测系统, 调试设备至稳定, 确保效率参数采集精准。(2) 实验方案优化: 基于前文实验工况, 优化锅炉效率测试方案, 固定煤种与设备参数, 仅调整燃烧参数, 设置8组梯度实验, 覆盖不同参数组合, 同步记录效率与燃烧数据, 保障实验连续性与可比性<sup>[4]</sup>。(3) 锅炉效率计算与数据处理: 采用反平衡法计算效率, 测定各项热损失核算有效利用热量; 开展误差分析, 控制实验误差≤2.5%, 标准化处理数据, 确保结果可靠。

### 3.2 单一燃烧参数调整对锅炉效率的影响

(1) 过量空气系数调整的影响: 系数<1.1时, 燃料燃烧不完全, 损失增至8%以上, 效率降至88%以下; 系数>1.3时, 排烟热损失升至12%, 同样降效, 实验确定最优值为1.18-1.22。(2) 风煤比调整的影响: 风煤比低于1.7或高于2.3时, 燃烧不充分或空气浪费, 调整至1.8-2.2, 可使燃烧不完全损失降低3%-5%, 排烟热损失降低2%-3%, 效率提升1.5%-2.5%。(3) 燃烧器运行参数调整的影响: 调整燃烧器角度至45°-55°优化火焰分布, 调整点火顺序提升稳定性, 两者均能降低热损失0.8%-1.2%, 使锅炉效率升至91%以上。

### 3.3 多参数协同燃烧调整对锅炉效率的影响

(1) 风煤比与燃烧温度协同调整的影响: 风煤比1.9-2.1搭配温度980-1020°C, 可使燃烧不完全损失降至3%以下, 避免局部高温散热损失, 实现热损失最小化, 效率达92.5%以上。(2) 二次风配比与过量空气系数协同调整的影响: 将二次风配比控制在1:1.6-1:1.8、系数1.18-1.22, 可使排烟热损失降至8%以下, 燃烧不完全损失降至3.5%以下, 效率提升2.0%-3.0%。(3) 低负荷工况协同调整效果: 针对低负荷下效率≤86%的问题, 协同调整风煤比1.7-2.0、二次风配比1:1.6-1:1.9及温度900-1000°C, 可使效率提升3.5%-4.0%, 为调峰优化提供依据<sup>[5]</sup>。

### 3.4 实验结果分析与讨论

(1) 实验结果总结: 过量空气系数、风煤比影响最显著(贡献率32%、38%), 多参数协同提升幅度(2.0%-4.0%)高于单一参数(1.0%-2.5%), 核算各工况效率提升数值。(2) 参数耦合影响: 明确风煤比与二次风配比、温度与系数的耦合效应, 协同可弥补单一参数局限, 使效率最大化达93%。(3) 与NO<sub>x</sub>排放关联分析: 结合前文NO<sub>x</sub>数据, 探索效率与NO<sub>x</sub>平衡关系, 明确参数优化后效率提升3%时, NO<sub>x</sub>可控制在500mg/m<sup>3</sup>以下, 为后续协同优化奠定基础。

## 4 燃烧调整参数协同优化策略及验证

### 4.1 优化目标与约束条件

(1) 优化目标: 以NO<sub>x</sub>排放达标为首要前提, 结合前文实验研究结果, 最大限度提升锅炉效率, 破解效率与减排的制约关系, 实现火电厂节能降耗与环保达标双赢, 为实际生产提供可落地的优化方向。(2) 约束条件: 明确四项核心约束, 包括燃烧稳定性约束, 避免参数调整导致炉膛熄火、火焰波动; 设备运行安全约束, 防止参数超标损坏锅炉及辅助设备; 排放法规约束, 严格符合行业NO<sub>x</sub>排放标准; 煤质波动约束, 适配实际生产中煤质成分变化, 确保优化策略具备通用性。

#### 4.2 燃烧调整参数协同优化模型构建

(1) 优化模型的建立：基于前文单一及多参数实验数据，结合CFD数值模拟结果，构建以NO<sub>x</sub>减排与锅炉效率提升为核心的多目标优化模型，明确风煤比、过量空气系数等关键参数与目标的关联函数。(2) 优化算法选择：选用遗传算法与粒子群算法相结合的方式，兼顾算法收敛速度与求解精度，通过算法迭代求解，得到不同工况下最优燃烧调整参数组合，规避单一算法的局限性。(3) 模型参数校准：结合前文实验实测数据，对模型中的关键参数进行调整校准，修正误差，提升模型对实际燃烧过程的拟合度，确保模型的准确性与工程实用性。

#### 4.3 优化策略的实验验证

(1) 验证实验方案设计：沿用前文实验装置，按照优化模型输出的参数组合设定实验工况，同时设置优化前的原始工况作为对照，保持实验条件一致，规划规范的实验步骤，确保验证结果具有可比性。(2) 验证结果分析：对比优化前后NO<sub>x</sub>排放浓度与锅炉效率的变化，结果表明，优化后NO<sub>x</sub>排放稳定达标，锅炉效率较优化前有明显提升，验证了优化策略的有效性与可行性。(3) 不同工况下的适用性验证：针对正常负荷、低负荷两种核心工况，分别开展优化策略适配性测试，确认优化参数组合在不同负荷下均能实现减排与提效目标，提升策略的适用范围。

#### 4.4 优化策略的工程应用建议

(1) 针对不同煤种的参数调整建议：根据煤质特性（挥发分、水分、灰分等），动态调整燃烧参数，对高挥发分煤种优化风煤比，对高水分煤种适当提升燃烧温度，

确保策略适配不同煤质。(2) 火电厂实际应用中的操作要点：结合火电厂现有锅炉设备与运行流程，提出简洁可落地的参数调整方案，明确各参数的调整梯度与操作时序，降低现场操作人员的执行难度。(3) 智能调控技术的融合建议：结合ECU控制系统、大数据分析技术，实时采集锅炉运行参数与煤质数据，实现燃烧参数的实时动态优化，提升优化策略的自动化水平与运行稳定性。

#### 结束语

本文通过实验验证，实现NO<sub>x</sub>排放达标与锅炉效率提升双赢，需以多参数协同调整为核心，将过量空气系数控制在最优区间，协同优化风煤比与二次风配比，调控炉膛燃烧温度避免局部高温，适配燃料粒径并结合CFD数值模拟优化模型。同时兼顾燃烧稳定性与设备安全，动态适配煤质波动，可使NO<sub>x</sub>排放稳定达标，锅炉效率较优化前显著提升，为火电厂清洁高效运行提供可落地的技术支撑。

#### 参考文献

- [1]刘勇先,熊笔周,谭志强,等.超临界W火焰锅炉NO<sub>x</sub>排放特性的试验研究[J].能源与节能.2022,9(5):67-70.
- [2]李强.浅析锅炉燃烧调整对氮氧化物排放的影响[J].通讯世界.2021,24(3):124-126.
- [3]王秋粉,王毅岩.火电厂锅炉低氮燃烧改造及运行优化调整[J].山东工业技术.2023,36(6):180-183.
- [4]陆叶.锅炉燃烧调整对NO<sub>x</sub>排放影响的研究[J].中国战略新兴产业.2021,9(10):83-85.
- [5]刘贵超.煤粉锅炉燃烧调整对氮氧化物排放量及热效率影响的试验研究[J].工业锅炉.2022,14(2):155-157.