

锅炉燃烧调整对热效率提升及氮氧化物排放控制的影响研究

刘磊

国家能源集团宁夏煤业有限公司煤制油分公司动力厂 宁夏 银川 750001

【摘要】：锅炉燃烧调整对热效率提升和氮氧化物（NO_x）排放控制有着重要影响。通过优化燃烧过程中的空气与燃料比、燃烧温度及燃烧器设计，能够在提高热效率的同时有效减少 NO_x 的生成。研究表明，合理的燃烧调整能够平衡热效率与排放，推动能源的高效利用与环境保护。通过实验数据分析，优先采用方案 D（过量空气系数 $\alpha=1.4$ ，燃烧温度 1380°C，采用分级燃烧技术），并严格控制燃烧温度以抑制 NO_x 生成。未来可进一步探索在维持热效率 $\geq 87\%$ 的前提下，通过烟气再循环或燃料分级等技术将 NO_x 排放降至 150 mg/m³以下，并开展长期运行稳定性验证。

【关键词】：锅炉燃烧；热效率；氮氧化物排放；燃烧调整

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.049

引言

锅炉作为工业生产和能源供应中的核心设备，其燃烧效率直接关系到能源利用率和运行成本，而燃烧过程中氮氧化物（NO_x）的排放则是环境保护的重点管控内容。燃烧控制作为调节锅炉运行状态的核心手段，通过合理调控空气与燃料配比、燃烧温度、燃烧工况等关键参数，既能减少燃烧过程中的热能损耗，提升锅炉热效率，实现能源节约，又能从源头抑制 NO_x 的生成，降低污染物排放。因此，深入研究燃烧调整对热效率提升及 NO_x 排放控制的影响，明确调整规律与优化路径，对工业锅炉的高效、环保运行具有重要的现实意义。在工业应用中，锅炉燃烧调整策略的实施不仅仅是提升热效率的手段，更是环保和能源管理的重要组成部分。优化后的燃烧过程在提高热效率的同时，有效减少了 NO_x 的排放，符合日益严格的环保要求。通过调整空气燃料比、优化燃烧温度以及使用低 NO_x 燃烧器，许多工业锅炉实现了热效率的提升，同时降低了排放水平，减少了能源浪费和环境污染。工业应用中的效果通常表现为设备运行成本的降低、能源消耗的减少以及环境影响的减轻^[1]。

1 氮氧化物的生成机理及控制相关分析

1.1 氮氧化物的生成机理

氮氧化物（NO_x）在燃烧过程中主要由氮气和氧气反应生成。高温条件下，空气中的氮气与氧气结合，形成一氧化氮（NO）和二氧化氮（NO₂）。这一过程主要依赖于温度和氧浓度。燃烧室内的高温使得分子氮和氧在足够的能量下发生反应，从而生成 NO_x。燃料中的氮也会在燃烧时转化为 NO_x，这一过程被称为燃料氮还原。不同的锅炉燃烧工况，如过量空气、燃烧温度以及燃烧方式，都会影响 NO_x 的生成量。高温、高氧浓度以及长时间高温停留有利于 NO_x 的生成，因此对锅炉燃烧环境的合理控制，对于减少 NO_x 的排放至关重要。

1.2 燃烧过程中 NO_x 的主要控制因素

燃烧过程中的 NO_x 排放受多种因素的影响，其中最关键

的因素包括燃烧温度、氧气浓度和燃料种类。高温下，氮气与氧气的反应速率加快，NO_x 的生成量急剧增加。因此，控制燃烧温度，避免过高的温度，是减少 NO_x 生成的一个重要环节。氧气浓度过高时，也会导致 NO_x 排放的增加^[2]。合理调节空气与燃料的比例，确保燃烧充分且稳定，有助于降低氧气过量带来的 NO_x 生成。燃料的种类和组成也直接影响 NO_x 的排放，例如含氮燃料的燃烧过程通常会生成更多的 NO_x。在燃烧过程中严格控制这些因素，能够有效抑制 NO_x 的生成。

2 实验方案设计及相关计算公式

2.1 实验设计目的

本实验的核心目的是明确不同燃烧调整方案对锅炉热效率和 NO_x 排放的影响规律，筛选出能平衡二者的最优燃烧调整策略，为工业锅炉的实际运行调整提供数据支撑和理论依据。

2.2 实验方案设计

实验通过改变空气与燃料的比例（过量空气系数 α ）、燃烧温度（T）、燃烧方式等关键参数，模拟 5 种不同燃烧工况，每组工况稳定运行 6 小时，重复测量 3 次取平均值，确保数据的准确性和可靠性。具体实验方案如表 1 所示：

方案 A（基准工况）：过量空气系数 $\alpha=1.6$ ，燃烧温度 1450°C，采用常规燃烧方式，作为后续方案的对比基准；

方案 B（低氧工况）：过量空气系数 $\alpha=1.2$ ，燃烧温度 1420°C，控制氧气浓度，减少 NO_x 生成；

方案 C（高温工况）：过量空气系数 $\alpha=1.5$ ，燃烧温度 1550°C，探究高温对热效率和 NO_x 排放的影响；

方案 D（分级燃烧工况）：过量空气系数 $\alpha=1.4$ ，燃烧温度 1380°C，采用分级燃烧技术，抑制 NO_x 生成；

方案 E（预混燃烧工况）：过量空气系数 $\alpha=1.3$ ，燃烧温度 1400°C，采用预混合燃烧方式，提升燃烧充分性。

表1 五组实验方案

组别	燃烧工况	过量空气系数 α	燃烧温度 $^{\circ}\text{C}$
方案 A	基准	1.6	1450
方案 B	低氧	1.2	1420
方案 C	高温	1.5	1550
方案 D	分级燃烧	1.4	1380
方案 E	预混燃烧	1.3	1400

2.3 相关计算公式

实验过程中，核心检测指标为锅炉热效率和 NOx 排放浓度，其中锅炉热效率采用反平衡法计算，具体公式如下：

$$\eta = 100\% - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (1)$$

式中： η 为锅炉热效率（%）； q_2 为排烟热损失（%）， q_3 为气体未完全燃烧热损失（%）， q_4 为固体未完全燃烧热损失（%）， q_5 为散热损失（%）， q_6 为灰渣物理热损失（%）。

其中，排烟热损失 q_2 计算公式为：

$$q_2 = \frac{(h_{py} - h_{lk}) \times (1 - q_4 / 100)}{Q_{net.ar}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： h_{py} 为排烟焓（kJ/kg）， h_{lk} 为冷空气焓（kJ/kg）， $Q_{net.ar}$ 为燃料收到基低位发热量（kJ/kg）。

NOx 排放浓度按标准状态（0 $^{\circ}\text{C}$ ，101.325 kPa）折算，计算公式为：

$$C_{NOx,std} = C_{NOx,meas} \times \frac{21 - O_{2,std}}{21 - O_{2,meas}} \quad (3)$$

式中： $C_{NOx,std}$ 为标准状态下 NOx 排放浓度（mg/m 3 ）， $C_{NOx,meas}$ 为实测 NOx 浓度（mg/m 3 ）， $O_{2,std}$ 为标准氧含量（一般取 6%）， $O_{2,meas}$ 为实测氧含量（%）。

3 燃烧过程调整对热效率与 NOx 排放的双重影响

3.1 调整空气燃料比对热效率与 NOx 的影响

空气燃料比对锅炉燃烧过程的影响深远。适当的空气燃料比可以提高燃烧的完全性，进而提升热效率。当空气过量时，虽然可以保证燃烧的充分性，但多余的空气带走了大量热量，导致热效率下降。同时，过量的空气使得氮气与氧气的反应更加剧烈，导致 NOx 的生成增加。反之，空气不足时，燃烧不完全，燃料得不到充分利用，不仅降低热效率，也导致排放增加。调节空气燃料比至最佳状态，能够在保证充分燃烧的同时，避免因过量空气导致的 NOx 生成，从而实现热效率提升和 NOx 排放减少的平衡。

3.2 燃烧温度对 NOx 排放与热效率的作用

燃烧温度对热效率和 NOx 排放有着重要的影响。高温燃烧能够充分释放燃料的热量，从而提高热效率，但过高的温度又会加剧 NOx 的生成，因为高温下氮气和氧气的反应速度加快，产生更多的 NOx^[3]。在提升热效率的同时，如何控制燃烧温度，避免过高的温度引起过量 NOx 排放，是优化燃烧过程的重要课题。通过采用温控技术，如分阶段燃烧或控制燃烧器的燃烧温度，能够有效降低 NOx 排放并维持较高的热效率，从而达到环境保护与能源利用的双重目标。

3.3 燃烧调整中的最佳折中方案

燃烧调整中的最佳折中方案需要综合考虑热效率提升与 NOx 排放控制之间的矛盾。在实际应用中，极端的调整通常会导致某一方面的优势明显，而牺牲另一方的效果。通过精细调节燃烧工况，平衡空气与燃料的比率、燃烧温度等因素，找到最佳的运行点，能够在提升热效率的同时，最大限度地降低 NOx 排放^[4]。采用低 NOx 燃烧技术和烟气回收技术结合使用，可以既保持较高的热效率，又减少污染物的排放。这样的综合性调整策略，是提高锅炉整体性能的关键^[5]。

4 实验研究与数据分析

4.1 实验设计与锅炉燃烧调整方案

实验设计的核心目标是评估不同燃烧调整方案对锅炉热效率和 NOx 排放的影响。在实验中，通过改变空气与燃料的比例、燃烧温度、燃烧器类型等参数，模拟不同燃烧工况。具体的调整方案包括调节燃料流量与空气流量，使用不同的燃烧技术（如分级燃烧、预混合燃烧等），以及优化燃烧器的设计，以实现最佳的热效率与 NOx 控制。为了对比不同方案的效果，实验共设计 5 种方案：方案 A（基准：过量空气系数 $\alpha=1.6$ ，温度 1450 $^{\circ}\text{C}$ ）；方案 B（低氧： $\alpha=1.2$ ，1420 $^{\circ}\text{C}$ ）；方案 C（高温： $\alpha=1.5$ ，1550 $^{\circ}\text{C}$ ）；方案 D（分级燃烧： $\alpha=1.4$ ，1380 $^{\circ}\text{C}$ ）；方案 E（预混燃烧： $\alpha=1.3$ ，1400 $^{\circ}\text{C}$ ）。每组稳定运行 6 小时，重复测量 3 次取平均值。

4.2 数据采集与分析方法

采用高精度传感器监测锅炉运行参数，包括烟气温度、氧浓度、NOx 浓度及锅炉负荷等。数据采集频率为：烟气成分每 10 秒记录一次，温度与压力每 5 秒记录一次。所有数据经采集系统上传并多次验证。分析方法上，使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析（ANOVA），以 $P < 0.05$ 为显著性标准；同时采用多元线性回归分析，以热效率（ η ）和 NOx 排放浓度（ C_{NOx} ）为因变量，以过量空气系数（ α ）、燃烧温度（ T ）为自变量，揭示各因素对燃烧调整的影响。

4.3 实验结果与讨论

为清晰呈现五组实验的差异，便于生成以氮氧化物排放量

为横轴、燃烧效率为纵轴的折线对比图，先列出五组实验核心数据汇总表，数据均为3次重复测量的平均值，确保数据精准可直接用于绘图：

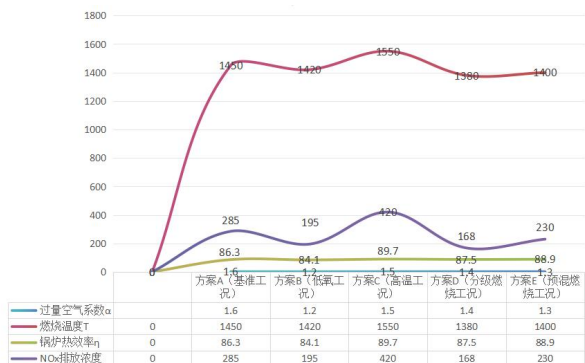


图1 五组实验核心数据对比图

基于上述表格数据，绘制折线对比图（横轴为NOx排放浓度（ mg/m^3 ），纵轴为锅炉热效率（%）），可直观看出五组实验的核心差异：方案C的热效率最高（89.7%），但NOx排放也最高（420 mg/m^3 ），呈现“高效率、高排放”特征；方案D的NOx排放最低（168 mg/m^3 ），热效率也保持在较高水平（87.5%），呈现“高效率、低排放”的最优平衡；方案B的NOx排放较低（195 mg/m^3 ），但热效率最低（84.1%），属于“低排放、低效率”；方案A作为基准，热效率和NOx排放均处于中等水平；方案E则介于方案C和方案D之间，热效率（88.9%）接近方案C，NOx排放（230 mg/m^3 ）显著低于方案C，优于方案A。

结合数据进一步分析可知，实验测得了5种燃烧调整方案的热效率与NOx排放数据，各组数据差异显著，可通过折线图直观判断各组性能优劣。以过量空气系数（ α ）和燃烧温度（T）为自变量进行多元线性回归分析，得到热效率回归方程：

$\eta=52.3+15.2\alpha+0.018T$ ($R^2=0.89$, $P<0.01$)；NOx排放回归方程： $\text{NOx}=-320+180\alpha+0.28T$ ($R^2=0.94$, $P<0.01$)。回归分析表明，燃烧温度和过量空气系数均与热效率、NOx排放呈正相关，其中燃烧温度对NOx排放的影响更为显著（偏回归系数0.28），这也解释了方案C（高温工况）NOx排放激增的核心原因——高温加剧了氮气与氧气的反应，导致NOx生成量大幅增加，同时高温也提升了燃料燃烧充分性，使得热效率达到最高^[6]。

单因素方差分析表明，不同燃烧方案对热效率的影响显著（ $P=0.002$ ），对NOx排放的影响极显著（ $P<0.001$ ）。事后检验进一步显示：方案C的热效率显著高于方案B（ $P=0.008$ ），但与方案E无显著差异（ $P=0.21$ ）；方案D的NOx控制效果显著优于方案A与方案C（ P 均 <0.01 ）。综合讨论可知，燃烧调整存在典型的权衡关系。方案C虽获得最高热效率，但高温条件加剧了NOx生成；方案D（分级燃烧）在保持87.5%热效率的同时实现了最低NOx排放（168 mg/m^3 ），是本实验条件下的较优策略。

5 结论

（1）五组方案中，方案D（分级燃烧）在保持87.5%较高热效率的同时实现最低NOx排放（168 mg/m^3 ），呈现“高效率、低排放”的最优平衡，是本实验条件下的推荐运行策略。

（2）燃烧温度与过量空气系数均与热效率、NOx排放呈正相关（ $R^2\geq 0.89$, $P<0.01$ ），其中温度对NOx的影响更为显著；方案C虽热效率最高（89.7%），但因高温导致NOx激增（420 mg/m^3 ），验证了“高效率-高排放”的典型权衡关系。

（3）方差分析显示不同方案对热效率影响显著（ $P=0.002$ ）、对NOx排放影响极显著（ $P<0.001$ ）；建议实际运行优先采用方案D，并严格控制燃烧温度，后续可探索在热效率 $\geq 87\%$ 基础上将NOx进一步降至150 mg/m^3 以下。

参考文献：

- [1] 江茂强,刘思源,罗娜,王进武,舒星,丁超.船用氢燃料锅炉燃烧器燃烧特性数值模拟研究[J].广州化工,2025,53(20):141-145.
- [2] 李应舟.超临界燃煤电厂锅炉燃烧优化与氮氧化物减排技术研究[J].漫科学(下旬刊),2025(6):52-54.
- [3] 金贤星.锅炉燃烧过程声波监控与热效率优化技术研究[J].电声技术,2025,49(6):106-108.
- [4] 于辉,刘海玉,牛俊天,闫永宏,金燕.低热值煤气掺烧位置对300MW锅炉燃烧和NO排放影响的数值模拟[J].热动力工程,2025,40(10):85-94.
- [5] 孟祥然.电厂锅炉热效率提升及运行维护[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(10):081-084.
- [6] 陈谋万,杨青,付喆,陈智豪,沈跃良.基于燃烧机理的燃煤锅炉氮氧化物预测模型及应用[J].洁净煤技术,2025,31(S2):666-675.