

# 电厂锅炉燃烧系统的优化

王亚飞

大唐宝鸡热电厂 陕西 宝鸡 721000

**摘要：**本文聚焦电厂燃烧系统前沿技术。基于 AI 的自学习优化，借助大数据与机器学习，可自主感知、学习与优化，未来将构建预测模型、开发自学习算法、融合物联网构建数字孪生模型，提升智能化水平。碳捕集与燃烧优化耦合研究是关键，当前碳捕集技术各有优劣，未来重点探索关联规律、开发适配策略、优化协同控制，以推动电厂低碳高效发展，助力“双碳”目标达成。

**关键词：**锅炉燃烧系统；燃烧效率；NO<sub>x</sub> 减排；智能优化

**引言：**在能源需求持续增长与“双碳”目标约束下，电厂燃烧系统面临高效运行与碳减排的双重挑战。传统燃烧系统优化方式难以满足复杂多变的工况需求，且碳捕集技术的应用带来新问题。在此背景下，基于 AI 的自学习优化以及碳捕集与燃烧优化的耦合研究应运而生，成为推动电厂燃烧系统升级、实现可持续发展的关键路径。

## 1 电厂锅炉燃烧系统基础理论

电厂锅炉燃烧系统的基础理论围绕燃料与氧化剂的化学反应过程展开，其核心目标是实现高效、稳定且低污染的燃烧。燃烧本质上是燃料中的可燃成分与氧气发生剧烈氧化反应，释放热能的过程，涉及流动、传热、传质和化学反应的协同作用。燃烧过程可分为三个阶段：准备阶段，燃料吸热升温，挥发分析出并与空气混合；燃烧阶段，挥发分与氧气剧烈反应，温度迅速升高，同时焦炭开始燃烧；燃尽阶段，剩余焦炭在氧气扩散和混合作用下缓慢燃尽。燃烧稳定性取决于放热与散热的动态平衡，当放热速率大于散热速率时，燃烧可稳定维持；反之则可能熄火。影响燃烧效率的关键因素包括炉膛温度、空气供应量、混合强度及燃料停留时间<sup>[1]</sup>。高温环境能加速化学反应，但需避免结渣；适量空气确保燃料充分燃烧，过量则降低炉温并增加排烟损失；强烈的混合促进氧气与燃料的接触，提高燃烧速度；足够的炉膛容积保证燃料有足够停留时间完成燃尽。此外，燃烧器设计、燃料特性（如挥发分、灰分、细度）及燃烧方式（如分级燃烧）也对燃烧效率产生显著影响。

## 2 电厂锅炉燃烧系统优化方法研究

### 2.1 基于数值模拟的燃烧过程分析

基于数值模拟的燃烧过程分析是锅炉燃烧系统优化的重要手段，通过借助计算流体力学（CFD）技术，结合燃烧动力学模型，对炉膛内燃料燃烧、烟气流动、热量传递及污染物生成等过程进行精准模拟，为优化方案制定提供理论支撑。模拟过程中，首先建立炉膛几何模型，根据锅炉实际结构还原炉膛尺寸、燃烧器布置、受热面分布等关键参数；随后选取合适的数学模型，包括湍流模型、燃烧模型、辐射换热模型及污染物生成模型，其中湍流模型常用 k-ε 模型，燃烧模型根据燃料类型选用煤粉燃烧模型或气体燃烧模型。通过数值模拟可直观获取炉膛内温度场、速度场、浓度场的分布规律，识别燃烧过程中存在的问题，如火焰中心偏移、局部温度过高或过低、燃料与空气混合不均等。与传统实验方法相比，数值模拟具有成本低、周期短、可重复性强的优势，可快速模拟不同运行参数、燃烧器结构下的燃烧效果，为后续燃烧系统优化提供科学依据，减少实验试错成本。

### 2.2 实验平台搭建与数据采集

实验平台搭建与数据采集是验证数值模拟结果、获取燃烧系统实际运行规律的核心环节，需结合锅炉实际运行工况，搭建贴合现场的实验平台并建立完善的数据采集体系。实验平台主要由小型模拟炉膛、燃烧器、燃料供给系统、送风引风系统、测量系统及控制系统组成，其中模拟炉膛需模拟实际锅炉的炉膛结构和燃烧环境，燃烧器采用与现场一致的类型，确保实验结果的代表性<sup>[2]</sup>。测量系统是数据采集的关键，需布置温度传感器、压力传感器、气体分析仪、流速传感器等设备，分别采集炉膛内不同位置的温度、压力、烟气成分（NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO 等）、空气及燃料流速等参数。数据

采集过程中,需控制实验变量,如改变过量空气系数、风粉配比、燃烧器角度等,记录不同工况下的各项参数数据,确保数据的准确性和完整性。通过对采集的数据进行整理、分析,可验证数值模拟模型的合理性,同时挖掘燃烧参数与燃烧效率、污染物排放之间的关联规律,为燃烧系统优化提供真实可靠的实验数据支撑。

### 2.3 多目标优化模型构建

电厂锅炉燃烧系统优化属于多目标优化问题,核心目标是在提升燃烧效率、降低污染物排放的同时,保障锅炉安全稳定运行,因此需构建科学合理的多目标优化模型。模型构建首先明确优化目标,主要包括三个核心维度:一是经济性目标,即提升锅炉燃烧效率,降低发电煤耗;二是环保目标,即减少  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、颗粒物等污染物排放,满足环保排放标准;三是安全性目标,即控制炉膛温度、负压等参数在合理范围,避免结渣、腐蚀、熄火等安全隐患。随后选取优化变量,包括风粉配比、过量空气系数、燃烧器角度、煤粉细度等可调节参数,同时明确各变量的约束条件,如炉膛温度不超过  $1500^\circ\text{C}$ 、负压维持在合理范围、污染物排放不超标等。最后采用合适的优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,对多目标优化模型进行求解,得到最优的运行参数组合,实现燃烧效率、污染物排放与运行安全性的协同优化,为燃烧系统优化策略的制定提供量化依据。

## 3 燃烧系统优化策略与实施

### 3.1 燃烧器结构优化

燃烧器结构优化是改善燃料与空气混合效果、提升燃烧效率、降低污染物排放的关键策略,主要针对燃烧器的喷口结构、布置方式、旋流强度等进行优化设计。对于旋流燃烧器,可通过优化旋流器结构,调整旋流强度,增强燃料与空气的混合均匀性,延长燃料在炉膛内的停留时间,促进燃料充分燃烧;同时优化喷口形状,采用收缩-扩张型喷口,减少气流扰动,避免局部高温区形成,从而降低热力型  $\text{NO}_x$  生成。对于直流燃烧器,可调整喷口间距和角度,优化煤粉射流轨迹,使火焰在炉膛内均匀分布,避免局部结渣和受热不均;此外,可采用浓淡分离燃烧器,将煤粉分为浓相和淡相分别喷入炉膛,浓相区燃料浓度高、燃烧温度高,提升燃烧效率,淡相区空气充足、温度较低,减少  $\text{NO}_x$  生成<sup>[3]</sup>。燃烧器结构优化需结合锅炉炉膛结构、燃料特性,通过数值模拟和实验验证,确定最优结构参数,实施后可有效改善燃烧工况,提升燃烧效率 3%-5%,同时降低  $\text{NO}_x$  排放 10%-15%。

### 3.2 风粉配比动态调控

风粉配比动态调控是适应燃料特性变化、维持燃烧过程稳定的核心优化策略,其核心是根据燃料参数、锅炉负荷的变化,实时调整一次风、二次风的风量及煤粉供给量,确保燃料与空气始终处于最佳混合比例。首先建立风粉配比与燃烧效率、污染物排放之间的关联模型,通过数据采集和分析,确定不同燃料特性、不同锅炉负荷下的最优风粉配比范围。随后搭建动态调控系统,实时采集燃料热值、水分、灰分等参数,以及锅炉负荷、炉膛温度、烟气成分等运行参数,通过控制系统自动调整一次风送粉量、二次风风量,实现风粉配比的动态自适应调控。例如,当燃料热值降低时,适当增加送风量、减少煤粉供给量,避免燃料不完全燃烧;当锅炉负荷升高时,同步增加风粉供给量,维持过量空气系数在合理范围。风粉配比动态调控可有效解决燃料特性波动、负荷变化导致的燃烧不稳定问题,提升燃烧效率的同时,降低  $\text{CO}$  和  $\text{NO}_x$  排放,确保锅炉在不同工况下均能稳定高效运行。

### 3.3 智能控制技术应用

智能控制技术在燃烧系统优化中的应用,可实现燃烧过程的精准调控、自主适应,大幅提升燃烧系统的运行效率和稳定性,主要包括模糊控制、神经网络控制、模型预测控制等技术。模糊控制可针对燃烧过程中存在的非线性、不确定性因素,如燃料特性波动、参数耦合等,通过模糊规则实现对风粉配比、燃烧器角度等参数的精准调控,无需建立精确的数学模型,适应能力强。神经网络控制通过模拟人体神经网络结构,对燃烧过程中的大量数据进行学习和分析,挖掘参数之间的复杂关联,实现对燃烧效率、污染物排放的精准预测和调控,可有效应对工况突变带来的影响。模型预测控制则基于燃烧过程的数学模型,预测未来一段时间内的运行状态,提前调整控制参数,避免参数波动过大,确保燃烧过程稳定。智能控制技术的应用,可实现燃烧系统的自主优化、自我诊断和故障预警,减少人工干预,降低运行成本,同时进一步提升燃烧效率和环保性能。

### 3.4 燃料适应性改进

燃料适应性改进是解决电厂燃料种类复杂、特性波动大,确保燃烧系统稳定运行的重要优化策略,主要从燃料预处理、燃烧调整、设备改造三个方面入手。在燃料预处理方面,建立完善的燃料检测和分选体系,对不同种类、不同特性的燃料进行分类存放、混合配比,使入炉燃料的热值、水分、灰分等参数保持稳定,避免单

一燃料特性波动对燃烧过程造成影响；同时通过煤粉磨制系统优化，调整煤粉细度，使煤粉更易着火、燃烧充分，提升燃料利用率。在燃烧调整方面，针对不同燃料特性，优化燃烧参数，如调整过量空气系数、风粉配比、燃烧温度等，适应燃料的着火特性和燃烧特性，例如对于高挥发分燃料，适当降低燃烧温度，减少 NO<sub>x</sub> 生成；对于低热值燃料，适当增加送风量，确保充分燃烧。在设备改造方面，对燃烧器、炉膛等设备进行适应性改造，如采用宽调节范围的燃烧器，提升对不同燃料的适应能力，避免因燃料变化导致的燃烧不稳定、结渣等问题，确保燃烧系统在多种燃料工况下均能高效稳定运行。

#### 4 未来展望

##### 4.1 氢能/氨能燃烧技术融合

氢能和氨能作为清洁低碳燃料，其与电厂锅炉燃烧系统的融合是未来燃烧技术发展的重要方向，可有效实现碳减排目标，推动电力行业绿色转型。氢能具有燃烧效率高、无碳排放、燃烧产物无污染的优势，氨能则具有储存运输便捷、燃烧稳定、可替代化石燃料的特点，两者与传统燃料（煤、气）混合燃烧，可大幅降低碳排放和污染物排放。未来研究重点将集中在氢能/氨能与传统燃料的混合燃烧特性、燃烧稳定性控制、燃烧器适应性改造等方面，解决氢能燃烧速度快、易发生回火，氨能燃烧速度慢、NO<sub>x</sub> 生成量较高等问题。通过优化混合比例、改进燃烧器结构、调整燃烧参数，实现氢能/氨能与传统燃烧系统的高效融合，同时开发专用的氢能/氨能燃烧设备，提升燃烧系统的安全性和经济性。另外，还需完善氢能/氨能的制备、储存和输送体系，降低应用成本，推动氢能/氨能燃烧技术在电厂中的规模化应用，助力“双碳”目标实现。

##### 4.2 基于 AI 的燃烧系统自学习优化

随着 AI 技术发展，基于 AI 的燃烧系统自学习优化是未来核心方向，能实现自主感知、学习与优化。与传统智能控制不同，它借助大数据分析、机器学习，持续学习燃料、运行、环境等参数数据，不断优化控制模型

与策略，适应不同工况，无需人工干预达最优状态<sup>[4]</sup>。未来重点构建深度学习预测模型，精准预测燃烧效率、污染物排放和设备状态；开发自学习算法，依历史和实时数据自动调整优化目标与参数，实现多目标协同；融合物联网、大数据构建数字孪生模型，实现可视化监控与全生命周期优化。此技术将提升智能化水平，降低成本、提高效率、减少排放。

##### 4.3 碳捕集与燃烧优化的耦合研究

碳捕集与燃烧系统优化耦合研究，是实现电厂碳减排与高效运行协同的关键，是未来研究重点。当前碳捕集技术有燃烧前、后捕集和富氧燃烧捕集，燃烧后捕集应用最广，但会增加排烟阻力、降低燃烧效率、提高成本。耦合研究核心是通过优化燃烧系统，降低碳捕集负面影响。未来重点探索燃烧参数与碳捕集效率、能耗的关联规律，优化燃烧过程，减少烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度波动；开发适配碳捕集的燃烧优化策略，如富氧燃烧与优化耦合；优化协同控制，实现两者同步稳定运行，推动电厂低碳高效发展，助力“双碳”目标实现。

#### 结束语

基于 AI 的燃烧系统自学习优化与碳捕集和燃烧优化的耦合研究，为电厂燃烧系统的发展带来了新的契机。前者借助先进技术提升智能化，后者致力于解决碳减排与高效运行的矛盾。随着研究的深入，这些技术将不断完善，助力电厂实现低碳、高效、稳定运行，在保障能源供应的同时，为全球气候治理贡献力量。

#### 参考文献

- [1] 金伟. 电厂锅炉燃烧系统的优化 [J]. 电气传动自动化, 2024, 46(2): 76-80.
- [2] 解晨晨, 王跃龙. 超临界燃煤电厂锅炉燃烧系统的优化实验与效能提升探究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(21): 168-170.
- [3] 何宇峰. 多目标优化在发电厂锅炉燃烧控制系统中的应用研究 [J]. 电力设备管理, 2025(23): 119-121.
- [4] 王昊. 某发电厂 4 号锅炉制粉系统调整及燃烧优化试验研究 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 249-251.