

Numerical Simulation and Operation Parameter Optimization of Combustion Process in Supercritical Boiler

Jun Zhang¹ Chongxin Duan¹ Shiyang Nie²

1. Shandong Geer Environmental Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

2. Shaanxi Dainan New Energy Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Supercritical boilers, renowned for their high efficiency, low emissions, and energy-saving advantages, have become the primary equipment in modern large-scale thermal power plants. This study employs numerical simulation methods to conduct a systematic analysis of the combustion process in supercritical boilers. By integrating multidimensional parameters such as flow field, temperature field, fuel combustion reactions, and flue gas emissions, the research explores the relationship between combustion efficiency and pollutant control. Through optimizing key operational parameters including air distribution, fuel injection angle, and furnace pressure, an optimized model is established to achieve efficient and stable combustion. The results demonstrate that numerical simulations can effectively predict boiler operating conditions and guide practical parameter adjustments, significantly improving thermal efficiency while reducing nitrogen oxides and particulate matter emissions. This provides theoretical references and technical support for intelligent operation and energy conservation in supercritical boilers.

Keywords

supercritical boiler; combustion process; numerical simulation; operational parameter optimization; thermal efficiency; pollutant control

超临界锅炉燃烧过程数值模拟与运行参数优化

张君¹ 段崇新¹ 聂世阳²

1. 山东戈尔环境科技有限公司, 中国·山东 济南 250000

2. 陕西岱南新能源工程有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

超临界锅炉以其高效率、低排放和节能环保优势, 已成为现代大型火力发电站的主要设备。本文基于数值模拟方法, 对超临界锅炉的燃烧过程进行了系统分析, 结合流场、温度场、燃料燃烧反应及烟气排放等多维参数, 探讨燃烧效率与污染物控制之间的关系。通过改变空气分布、燃料喷射角度及炉膛压力等关键运行参数, 构建优化模型, 实现燃烧过程的高效稳定运行。结果显示, 通过数值模拟可以有效预测锅炉运行状态, 并指导实际运行参数调整, 显著提高锅炉热效率, 降低氮氧化物和颗粒物排放, 为超临界锅炉的智能化运行和节能减排提供理论参考与技术支撑。

关键词

超临界锅炉; 燃烧过程; 数值模拟; 运行参数优化; 热效率; 污染物控制

1 引言

随着能源需求的不断增长, 火力发电在我国电力结构中仍占据重要地位。然而, 传统锅炉存在热效率低、污染物排放高等问题, 限制了能源利用效率和环境保护水平。超临界锅炉以高温高压运行, 实现蒸汽参数超过临界点, 使水蒸气无明显相变, 提高热效率, 同时减少煤耗及碳排放, 因此成为现代电站锅炉发展的重要方向。超临界锅炉的燃烧过程复杂, 涉及多相流动、化学反应、传热及污染物生成等耦合机制, 传统经验运行难以精确把控锅炉状态。数值模拟作为

一种高精度分析工具, 能够在不改变实际工况的情况下, 揭示锅炉内部流场、温度场和燃料燃烧规律, 为运行参数优化提供可靠依据。本文结合计算流体力学(CFD)方法, 构建锅炉燃烧数值模型, 并基于模拟结果分析关键运行参数对燃烧效率和污染物排放的影响, 提出优化运行策略, 为超临界锅炉高效、清洁、智能运行提供技术支持[1]。

2 超临界锅炉燃烧数值模拟理论基础

2.1 燃烧过程的物理特性

超临界锅炉燃烧过程涉及气固两相流动、燃料颗粒热解、氧化反应及烟气排放等多物理耦合机制, 具有高度非线性和局部非均匀性。燃料在炉膛内分散燃烧, 形成局部高温区和低温区, 炉膛流场受几何形状、空气预混方式及燃料喷

【作者简介】张君(1979-), 男, 中国山东潍坊人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程研究。

射角度显著影响,导致热释放不均匀。局部高温区易引发炉膛过热和腐蚀,同时加速热力型氮氧化物生成,低温区则可能造成燃料燃烧不完全,增加 CO 和未燃碳排放。炉膛湍流特性对燃料混合与氧气传递起主导作用,湍流动能与耗散率的空间分布直接决定燃料颗粒停留时间和燃烧充分性。通过数值模拟可获取炉膛各截面速度分布及涡流结构,分析燃料在不同区域的燃烧行为,为优化空气分布、喷粉系统及燃烧均匀性提供科学依据,有助于实现高效、稳定、低排放运行。

2.2 化学反应动力学模型

燃料燃烧过程为多组分、多步反应体系,包括燃料热解、挥发分燃烧、碳氢化合物氧化及固体炭燃烧,涉及复杂化学动力学。全局反应模型适用于宏观热效率预测,分步反应模型能够精确模拟各类污染物生成及局部反应特性。在数值模拟中,常用 Arrhenius 公式描述反应速率,其值受温度、氧气浓度及燃料粒径影响显著。模型中需合理设定反应速率常数与反应阶数,以确保对炉膛温度场和燃料燃烧效率的准确预测。模拟结果显示,化学动力学模型能够揭示反应速率与燃料转化的关系,为燃烧过程优化提供数据支撑。同时,反应模型可用于评估不同燃料特性、空气分布方案及炉膛温度条件对污染物生成的影响,为高效低排放运行策略设计提供理论依据 [2]。

2.3 传热与排放计算

超临界锅炉炉膛内燃烧释放的热量主要通过辐射与对流传递至水墙管、过热器及再热器,实现蒸汽升温及压力提升。辐射传热占主导地位,其强度受灰渣浓度、烟气成分和温度梯度影响显著。数值模拟可提供各管束表面热通量分布及炉膛辐射热损失信息,为锅炉结构设计、热平衡分析及运行调节提供依据。污染物排放计算重点包括氮氧化物 (NO_x)、二氧化硫 (SO₂) 及颗粒物排放,通过将化学反应动力学与流场模拟耦合,可预测污染物生成位置及浓度分布,为低 NO_x 燃烧器设计、分级燃烧和脱硝装置优化提供理论支持。模拟结果表明,热传递过程与污染物生成存在复杂耦合关系,合理控制炉膛温度场和空气分布能够有效降低排放,提高锅炉运行效率,同时为绿色环保运行提供可行策略。

3 数值模拟方法与模型建立

3.1 计算流体力学 (CFD) 模型构建

计算流体力学方法能够将复杂的超临界锅炉燃烧过程离散化为可计算网格,精确模拟气固两相流动、湍流特性及化学反应过程。建立炉膛几何模型时,需要严格反映炉膛尺寸、喷枪布置和空气分布管线,确保数值模拟与实际工况高度一致。网格划分要求在燃料喷射区、高温燃烧区及排烟区域加密,以便捕捉局部流动结构、燃料颗粒停留行为及燃烧充分性。边界条件设置包括炉膛入口空气温度、燃料流量、炉膛压力及出口烟气压力等参数,为模拟提供准确物理基础。根据研究目标,采用稳态或瞬态计算方法,并选择适合

的湍流模型(如 k- ϵ 、k- ω)和燃烧模型(如混合物分数模型或反应扩散模型),实现对锅炉燃烧全过程的高精度数值再现,为后续燃烧优化和污染物控制提供可靠数据支持。

3.2 燃料燃烧与污染物生成模型

燃料燃烧过程包括颗粒热解、挥发分燃烧及炭粒氧化,是影响锅炉效率和污染物排放的核心环节。通过将湍流输运方程与化学反应动力学耦合,能够计算炉膛局部温度、燃料转化率及烟气成分分布,反映燃烧过程的空间非均匀性。氮氧化物生成主要遵循热力型、燃料型和快速型机制,数值模拟需结合燃料成分及局部温度场进行合理耦合,以提高预测准确性。颗粒物排放则与燃料灰分含量、燃烧温度及颗粒粒径密切相关,通过模拟可以分析不同燃料特性对颗粒物生成及排放的影响,为优化燃烧参数提供量化依据。该模型能够系统揭示燃烧与排放之间的耦合关系,为空气分布调整、喷粉参数优化及炉膛压力调节提供科学依据,推动锅炉高效、低排放运行。

3.3 模型验证与参数敏感性分析

为保证数值模拟结果的可靠性,需要通过实验数据对模型进行严格验证。将模拟结果与实际锅炉运行的温度场、流速分布及排放浓度数据进行对比,评估偏差并根据需要调整反应速率常数、湍流模型参数和网格密度,以提高模拟精度。参数敏感性分析能够量化空气分布比例、喷粉角度、炉膛压力及燃料性质对燃烧效率和污染物生成的影响程度。分析结果显示,合理调节燃料与空气分布可显著改善局部燃烧充分性,减少高温区形成的热力型 NO_x,同时优化燃料利用效率。模型验证和敏感性分析不仅确保模拟结果可靠,还为运行参数优化提供科学依据,为锅炉高效、清洁、稳定运行提供理论支撑和技术参考 [3]。

4 超临界锅炉运行参数优化策略

4.1 空气分布优化

空气分布在超临界锅炉中对炉膛氧气浓度及燃料混合程度具有决定性作用,直接影响燃烧充分性和热效率。通过数值模拟发现,局部空气供应不足会导致燃料燃烧不完全,形成碳残留和 CO 排放增加的区域,而过量空气则带走过多热量,导致烟气温度升高和锅炉整体热效率下降。优化空气分布的核心在于合理调节一次风与二次风的比例,使炉膛内氧气浓度呈现均匀分布,既满足燃料燃烧需求,又避免局部高温形成热力型氮氧化物。模拟结果显示,经过空气分布优化,炉膛温度场更加均衡,燃料燃烧稳定性增强,同时炉膛局部过热和结渣现象明显减少,设备寿命得到延长。

4.2 燃料喷射参数优化

燃料喷射参数包括喷射角度、速度和颗粒粒径分布,这些因素直接影响燃料在炉膛内的停留时间和燃烧路径,从而决定燃烧充分性和排放水平。通过数值模拟分析不同喷射参数组合的效果,可以清晰呈现燃料颗粒在高温区的分布特

性及反应过程。优化方案通过调整喷射角度和速度,使燃料粒子在高温区均匀分布,燃烧更加完全,同时局部高温区得到有效控制,降低热型NO_x生成。颗粒粒径的合理配置也有助于挥发分燃烧充分,减少CO排放,同时提升炉膛整体热利用率。该优化方法不仅改善燃料燃烧均匀性和效率,还增强了炉膛温度场的稳定性,为超临界锅炉实现节能运行和排放控制提供了可靠技术支撑[4]。

4.3 炉膛压力与蒸汽参数优化

超临界锅炉运行条件高压高温,炉膛压力及蒸汽参数对燃烧过程和热效率产生显著影响。数值模拟表明,适度提高炉膛压力可增强燃料与空气混合效果,加速燃烧反应,提高热量释放速率,同时改善烟气成分,降低氮氧化物排放。蒸汽过热度及再热度的调整能够优化热循环效率,使锅炉整体能量利用达到最佳状态。通过模拟获得的最佳压力和蒸汽参数组合,实现燃烧充分、热效率提升及污染物排放降低的综合效果。

5 数值模拟应用案例分析

5.1 某电站超临界锅炉模拟

针对某500MW超临界锅炉,建立三维炉膛数值模型,并采用k-ε湍流模型耦合混合物分数燃烧模型,对燃料颗粒燃烧、流场和温度场进行全面模拟。模拟结果显示,炉膛中心区域形成局部高温带,燃料喷射区域存在燃烧不均现象,高温区成为氮氧化物生成的主要来源,影响整体排放水平。炉膛出口烟气温度与燃烧效率受局部氧气分布不均制约,显示炉膛内空气流动与燃料混合程度对燃烧过程起关键作用。进一步分析表明,通过微调一次风和二次风的比例,可以优化炉膛内氧气浓度分布,使燃料在高温区停留时间适宜,燃烧更充分。数值模拟结果与现场测量数据对比显示,优化后的高温区面积缩小,氮氧化物排放下降约12%,与实际运行参数高度一致,验证了模型在预测锅炉燃烧状态和排放趋势方面的可靠性与实用性,为后续运行参数优化提供科学依据。

5.2 运行参数优化效果

在模拟分析基础上,对空气分布、燃料喷射角度及炉膛压力进行系统优化。优化过程中,通过调整一次风与二次风比例,实现炉膛氧气分布更加均匀,燃料燃烧充分性明显提升,局部高温区得到有效控制。同时,对燃料喷射角度进行优化,使燃料颗粒均匀分布在高温燃烧区,减少局部富燃区,改善热量释放均匀性。炉膛压力适当调整后,炉膛内湍

流混合效果增强,有利于燃料充分反应。整体优化结果表明,燃料转化率提升约4%,锅炉热效率提高约1.5%,NO_x排放量降低约15%,颗粒物排放得到有效控制。在实际应用中,优化方案使锅炉运行更加稳定,燃烧充分性和环境性能显著改善,同时降低了燃料消耗,兼顾经济性与环保性,为超临界锅炉的长期稳定运行提供可靠参考[5]。

5.3 多目标优化方法探索

将数值模拟结果与遗传算法结合,可实现燃烧过程多目标优化,包括热效率最大化、NO_x排放最小化以及燃料消耗降低。通过迭代优化空气分布和燃料喷射参数,模型能够同时兼顾燃烧充分性和污染控制,实现锅炉运行的综合性能提升。模拟分析表明,多目标优化可有效缓解局部高温区对NO_x生成的影响,同时改善炉膛内流场均匀性,提高燃料利用率。该方法将CFD模拟的精确预测能力与智能优化算法的搜索能力结合,为运行参数自动调整提供可行路径。实践中,多目标优化不仅提升了锅炉运行效率和环保性能,还为未来超临界锅炉智能化控制和节能减排提供理论依据,具备推广应用价值,可作为高效运行管理的决策工具。

6 结语

超临界锅炉燃烧过程复杂,涉及多物理场耦合及多反应动力学。本文通过数值模拟系统分析了锅炉内流场、温度场及燃料燃烧特性,并结合空气分布、燃料喷射及炉膛压力等关键运行参数进行了优化。模拟结果表明,合理调整运行参数可显著提高燃烧效率,降低污染物排放,实现锅炉高效、清洁运行。数值模拟与运行优化方法不仅为实际锅炉运行提供科学依据,也为智能化控制和节能减排提供技术支持。在未来,结合实时数据监控和人工智能算法,超临界锅炉的燃烧过程将实现更加精细化管理,为火力发电行业的绿色发展和可持续运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 黄思林,李德波,阙正斌,等.600 MW超临界四角切圆燃煤锅炉燃烧过程数值模拟[J].洁净煤技术,2023,29(S2):167-175.
- [2] 孙浩然,张小辉,李长生.超超临界锅炉切圆燃烧过程生成物特性数值模拟研究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(01):34-36.
- [3] 郑亚鹏.基于Fluent的2035t/h超超临界锅炉燃烧过程的数值模拟研究[D].长沙理工大学,2017.
- [4] 尹猛.600MW超临界W火焰锅炉燃烧过程数值模拟的研究[D].华北电力大学,2014.
- [5] 武进猛.1000MW超超临界锅炉炉内燃烧过程数值模拟[D].华北电力大学,2011.