

水煤浆循环流化床燃烧及运行分析系统研究

王芳勇 史 媛

胜利石油管理局有限公司热力分公司 山东 东营 257000

摘 要: 本文围绕水煤浆循环流化床燃烧及其运行分析系统展开深度探究。首先探讨燃烧过程的物理化学机制以及影响燃烧的关键要素。在此基础上,详细阐述运行分析系统的架构设计,涵盖数据采集、处理、分析与决策支持等核心环节。通过实际工业案例,直观展示运行分析系统在优化燃烧过程、削减污染物排放以及提升能源利用效率方面所取得的显著成效。

关键词: 水煤浆; 循环流化床; 燃烧过程; 运行分析系统

1 引言

在全球能源需求增长和环保要求提升的背景下,煤炭的高效清洁利用成为重要课题。水煤浆作为一种流体燃料,兼具煤炭的能源特性和燃油的流动性,为煤炭利用提供了新途径。循环流化床燃烧技术因燃料适应性强、燃烧效率高、污染物控制好,成为煤炭清洁燃烧的重要方式。两者的结合展现出良好应用前景。然而其燃烧过程复杂,涉及多相流动、传热传质与化学反应,受多种因素影响。为实现高效稳定运行与减排目标,亟需构建完善的运行分析系统,开展深入研究具有重要意义。

2 水煤浆循环流化床燃烧过程分析

2.1 物理化学机制

水煤浆循环流化床燃烧过程是一个复杂的物理化学过程,主要包括水煤浆的雾化与蒸发、煤粉的干燥与热解、挥发分的燃烧以及固定碳的燃烧等阶段。当水煤浆通过燃烧器喷入炉膛后,首先在高温气流的作用下发生雾化,形成细小的液滴。液滴中的水分迅速蒸发,使煤粉颗粒暴露出来。随后,煤粉颗粒在高温环境下发生干燥和热解反应,释放出挥发分。挥发分与空气中的氧气发生剧烈的燃烧反应,产生大量的热量,使炉膛温度升高。在挥发分燃烧的同时,固定碳也开始燃烧,固定碳的燃烧速度相对较慢,但燃烧持续时间长,是燃烧过程中热量释放的主要来源。在燃烧过程中,还伴随着一系列的物理变化,如气固两相的流动、传热传质等。气固两相的流动状态直接影响着燃烧的均匀性和效率,良好的气固混合可以保证燃料与空气充分接触,提高燃烧效率。传热传质过程则涉及到热量从高温区域向低温区域的传递以及燃烧产物的扩散等。

2.2 关键影响因素

水煤浆特性: 水煤浆的浓度、黏度、粒度分布等特性对燃烧过程有着重要影响。水煤浆浓度过高会导致雾

化困难,雾滴粒径增大,使得煤粉与空气的接触面积减小,燃烧不完全,甚至可能产生黑烟和未燃尽碳。浓度过低则会增加运输和储存成本,同时也会降低燃烧效率。黏度是水煤浆流动性的重要指标,黏度过大或过小都会影响水煤浆的流动性和雾化效果。黏度过大,水煤浆在管道中流动阻力增大,容易堵塞管道;黏度过小,则可能导致水煤浆分层,影响燃烧稳定性。粒度分布不均匀会导致燃烧过程中部分煤粉颗粒燃烧不充分,大颗粒煤粉需要更长的燃烧时间,而小颗粒煤粉可能过早燃尽,从而降低燃烧效率。

运行参数: 给浆量、风量、风温、炉膛温度等运行参数对燃烧过程起着关键作用。给浆量与风量的匹配直接影响着燃烧的稳定性 and 效率。如果给浆量过大而风量不足,会导致燃烧不完全,产生黑烟和未燃尽碳,同时炉膛内氧气浓度降低,可能引发不完全燃烧产物的积聚,增加爆炸的风险。反之,如果风量过大而给浆量不足,会使炉膛温度降低,影响燃烧效率,还可能导致热量损失增加。风温的高低会影响水煤浆的蒸发和着火速度,适当提高风温可以加快水煤浆的雾化过程,使煤粉颗粒更快地达到着火温度,从而加快燃烧过程^[1]。但风温过高可能会导致燃烧器部件的热应力增大,缩短设备的使用寿命。炉膛温度是燃烧过程的重要指标,过高或过低的炉膛温度都会影响燃烧效率和污染物排放。炉膛温度过高,可能会导致NO_x生成量增加,同时也会加速设备的热腐蚀;炉膛温度过低,则会使燃烧不完全,降低燃烧效率。

设备结构: 燃烧器、流化床炉膛、物料循环系统等设备的结构设计对燃烧过程有着重要影响。燃烧器的雾化效果直接影响水煤浆的燃烧性能,合理的雾化角和雾化粒径可以提高燃烧效率。雾化角过小,会导致雾滴分布范围狭窄,煤粉与空气的混合不均匀;雾化角过大,

则可能使部分雾滴喷到炉膛壁上,造成结渣和腐蚀。流化床炉膛的高度、直径以及布风板的结构等会影响气固两相的流动和混合,进而影响燃烧的均匀性和稳定性。如果炉膛高度过低,固体颗粒在炉内的停留时间不足,燃烧不完全;炉膛直径过大,可能会导致气固两相的混合不均匀,出现局部高温或低温区域。布风板的结构不合理,可能会导致气流分布不均匀,出现死区或流化不良的现象。物料循环系统的分离效率和返料量会影响固体颗粒在炉内的停留时间和燃烧程度。分离效率低,会使大量未燃尽的固体颗粒随烟气排出,降低燃烧效率;返料量不稳定,会影响炉膛内的物料平衡和温度分布。

3 运行分析系统架构设计

3.1 数据采集模块

数据采集模块是运行分析系统的基础,负责实时采集水煤浆循环流化床燃烧过程中的各种数据。采集的数据涵盖燃烧参数(如给浆量、风量、风温、炉膛温度、压力等)、污染物排放参数(如SO₂、NO_x、粉尘浓度等)、物料循环参数(如旋风分离器进出口压差、返料量等)以及设备运行参数(如风机转速、泵的流量和压力等)。

数据采集通过安装在锅炉各关键部位的传感器和测量仪表实现。例如,采用热电偶来测量温度,热电偶是一种基于热电效应的温度传感器,它能够将温度信号转换为电信号,具有测量精度高、响应速度快等优点。压力传感器用于测量压力,常见的压力传感器有应变式压力传感器和压电式压力传感器等,它们可以将压力变化转换为电信号输出。流量计用于测量气体和液体的流量,根据测量原理的不同,流量计可分为差压式流量计、涡街流量计、电磁流量计等多种类型。气体分析仪用于分析烟气成分,如采用红外气体分析仪可以准确测量烟气中SO₂、NO_x等气体的浓度。

采集到的模拟信号经过信号调理电路转换为数字信号,信号调理电路主要包括放大、滤波、线性化等环节,其作用是提高信号的质量和稳定性。转换后的数字信号通过数据采集卡或分布式控制系统(DCS)传输到上位机进行存储和处理^[2]。数据采集卡是一种将模拟信号转换为数字信号并传输到计算机的设备,它具有高精度、高速度等特点。DCS是一种集散控制系统,它可以将锅炉的各个子系统进行集中管理和分散控制,实现数据的实时采集和传输。

3.2 数据处理模块

数据处理模块对采集到的原始数据进行预处理,以提高数据质量。预处理过程包括数据清洗、滤波、归一化等操作。数据清洗用于去除数据中的异常值和噪声。

在实际运行过程中,由于传感器故障、电磁干扰等原因,采集到的数据中可能会存在一些异常值,这些异常值会影响后续的数据分析结果。数据清洗通过设定合理的阈值或采用统计方法,将超出正常范围的数据点剔除或进行修正。滤波可以平滑数据曲线,减少随机误差的影响。常用的滤波方法有移动平均滤波、中值滤波等。移动平均滤波是通过在一定时间窗口内的数据进行平均处理,来消除数据的随机波动;中值滤波则是取一定窗口内数据的中值作为滤波结果,对脉冲噪声有较好的抑制效果。归一化则将不同量纲的数据转换为统一的标准,便于后续分析。归一化方法有多种,如线性归一化、Z-score归一化等。线性归一化是将数据线性地映射到一个指定的区间,如[0,1];Z-score归一化则是将数据转换为均值为0,标准差为1的标准正态分布。

3.3 数据分析模块

数据分析模块采用多种分析方法对处理后的数据进行深入挖掘,提取有价值的信息。常用的分析方法包括统计分析、相关性分析、趋势分析等。

统计分析:计算数据的均值、方差、标准差等统计量,了解数据的分布特征和离散程度,为后续分析提供基础。例如,通过计算炉膛温度的均值和标准差,可以了解炉膛温度的平均水平和波动情况。如果标准差较大,说明炉膛温度波动较大,可能存在燃烧不稳定的问题。

相关性分析:研究不同参数之间的相关性,找出影响燃烧性能和污染物排放的关键因素。例如,分析给浆量与风量、炉膛温度与污染物排放浓度之间的相关性。可以采用皮尔逊相关系数来衡量两个变量之间的线性相关程度,相关系数的取值范围在[-1,1]之间,绝对值越接近1,表示两个变量之间的相关性越强。通过相关性分析,可以为运行参数的优化提供依据。如果发现给浆量与风量之间存在较强的正相关关系,说明在调整给浆量时需要相应地调整风量,以保持燃烧的稳定。

趋势分析:通过对历史数据的分析,研究各种参数随时间的变化趋势,预测锅炉的运行状况,提前发现潜在的问题。例如,通过分析炉膛温度的变化趋势,如果发现炉膛温度逐渐升高,可能预示着炉内结渣或燃烧过于剧烈;如果炉膛温度逐渐降低,可能意味着燃料供应不足或燃烧效率下降^[3]。趋势分析可以采用时间序列分析方法,如移动平均法、指数平滑法等,对数据进行建模和预测。

3.4 决策支持模块

决策支持模块根据数据分析模块的结果,为运行人员提供优化建议和决策支持。该模块采用优化算法和专

家系统技术,根据锅炉的运行目标和实际运行状况,对运行参数进行优化调整。

优化算法:建立数学模型,以燃烧效率、污染物排放浓度等为目标函数,对给浆量、风量、风温等运行参数进行优化求解,得到最优的运行方案。常用的优化算法有遗传算法、粒子群算法等。遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法,它通过不断地进行选择、交叉和变异操作,搜索最优解。粒子群算法则是模拟鸟群或鱼群的群体行为,通过粒子之间的信息共享和协作,寻找最优解。通过优化算法,可以在满足环保要求的前提下,实现锅炉的高效运行。

专家系统:将运行人员的经验和专业知识进行编码,形成知识库。知识库中包含了各种故障现象、原因以及相应的处理方法。当系统检测到异常情况时,根据知识库中的规则为运行人员提供决策建议,指导其采取相应的措施^[4]。例如,当系统检测到炉膛温度突然升高时,专家系统会根据知识库中的规则,判断可能的原因,如燃料供应过多、风量不足等,并给出相应的处理建议,如减少给浆量、增加风量等。

4 运行分析系统应用案例

4.1 案例背景

某化工企业拥有一台水煤浆循环流化床锅炉,额定蒸发量为130t/h,额定蒸汽压力为5.29MPa,额定蒸汽温度为485℃。该锅炉以劣质煤制成的水煤浆为燃料,在运行过程中存在燃烧不稳定、污染物排放波动较大等问题。为了提高锅炉的运行性能,降低污染物排放,该企业引入了水煤浆循环流化床运行分析系统。

4.2 系统应用效果

燃烧稳定性提高:运行分析系统实时监测炉膛温度、压力等参数,通过数据分析发现部分时段风量波动较大导致燃烧不稳定。系统根据分析结果,自动调整风机

转速,稳定风量供应。经过调整后,锅炉燃烧稳定性显著提高,燃烧中断次数从每月平均5次降低到1次以下。

污染物排放降低:系统监测到SO₂和NO_x排放浓度存在波动,通过相关性分析发现与脱硫剂加入量和过量空气系数有关。系统优化了脱硫剂加入策略和过量空气系数,使SO₂排放浓度从原来的350mg/m³降低到180mg/m³以下,NO_x排放浓度从原来的220mg/m³降低到120mg/m³以下。

能源利用效率提升:运行分析系统对给浆量和风量进行优化匹配,提高了燃烧效率。锅炉的热效率从原来的88%提高到了91%,年节约煤炭约3000吨。

结语

水煤浆循环流化床燃烧及运行分析系统研究对于提高煤炭利用效率、降低污染物排放具有重要意义。通过对燃烧过程的深入分析和运行分析系统的精心构建,可以实现对燃烧过程的实时监测、精准分析和有效优化,显著提高锅炉的运行性能。尽管该技术及运行分析系统在发展过程中面临一些挑战,但随着技术的不断进步和创新,以及政府、企业和科研机构的共同努力,相信其将在未来的能源领域发挥更加重要的作用,为实现能源的可持续发展和环境保护目标做出更大贡献。

参考文献

- [1]原铎,王雨果,甄鹏,等.超细水煤浆燃烧特性的数值模拟研究[J].电力科技与环保,2025,41(02):281-293.
- [2]马耀东,杨文清,孙明星,等.水煤浆气化炉原料煤配煤的研究与利用[J].化工管理,2025,(10):154-156.
- [3]成志建,翟永军.70MW超低排放燃水煤浆循环流化床锅炉开发[J].工业锅炉,2018,(02):8-10+20.
- [4]柯希玮,张纆,杨海瑞,等.水煤浆循环流化床锅炉物料平衡特性模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(01):86-95.