

循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究

王子杰

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 本文聚焦循环流化床锅炉全负荷调峰特性,阐述了其工作原理、结构特点、优势与应用,接着从调峰性能评价指标、调峰过程锅炉特性、调峰性能影响因素展开研究。随后深入探索全负荷下的燃烧、热力、传热特性,并构建调峰性能优化策略,涵盖燃料供应、燃烧、热力系统优化。研究表明,循环流化床锅炉通过合理设计与优化,可实现高效、环保、稳定的全负荷调峰,为电力等行业稳定运行提供有力支撑。

关键词: 循环流化床锅炉;全负荷调峰;特性分析

引言: 在电力行业不断发展与电网调峰需求日益迫切的当下,锅炉调峰能力成为保障电力系统稳定运行的关键因素。循环流化床锅炉凭借燃料适应广、环保性能优、负荷调节灵活等突出优势,在调峰领域备受关注。然而,全负荷调峰过程中,其燃烧、热力、传热等特性复杂多变,调峰性能受多因素制约。深入探究其全负荷调峰特性并构建优化策略,具有重要的现实意义。

1 循环流化床锅炉概述

1.1 工作原理

循环流化床锅炉(CFB)运用流态化燃烧技术,高速气流(一次风)从锅炉底部布风板向上穿过颗粒床层,让床料(燃料等)从静止变为类似流体的运动状态,形成“流化床”,使燃料与空气高效接触。未燃尽颗粒等被气流带至炉膛上部,部分因重力回落至密相区,部分随烟气进入分离器。分离器靠烟气旋转离心力分离固体颗粒,效率超99%,分离后的颗粒经返料装置(如U型阀)送回炉膛,形成“燃烧-分离-返料”循环,提高燃烧效率。分级燃烧是其核心设计,一次风维持流态化,二次风补充氧气,降低氮氧化物(NO_x)生成。同时,低温燃烧特性(850-950℃)进一步抑制热力型NO_x生成,NO_x排放浓度通常低于200mg/m³。

1.2 结构特点

循环流化床锅炉的结构设计围绕物料循环系统展开,主要分为燃烧室、分离器及回料装置三大核心部件。燃烧室分为密相区(颗粒浓度高,燃烧剧烈)和稀相区(颗粒浓度低,气固混合),内壁敷设防磨耐火材料(如碳化硅、高铬铸铁),以应对颗粒冲刷。分离器通常采用旋风分离器,利用烟气旋转产生的离心力实现气固分离,内部设置薄层防磨内衬(如氮化硅砖)。回料装置多为U型阀,利用物料高度差形成“非机械阀”,防止烟气反窜,确保颗粒均匀、连续地返回炉膛^[1]。辅助系统包括给煤装

置、石灰石给料装置、尾部受热面等。给煤通过螺旋给料机从炉膛下部或中部送入,确保燃料均匀分布;石灰石与燃料同步送入,在炉内高温下分解为氧化钙(CaO),与燃烧生成的二氧化硫(SO₂)反应生成硫酸钙(CaSO₄),实现炉内脱硫。尾部受热面由过热器、再热器、省煤器、空气预热器等组成,因烟气含尘量高,需加装防磨护瓦。

1.3 优势与应用

循环流化床锅炉的核心优势在于燃料适应性广、环保性能优异、负荷调节灵活。其可燃烧劣质燃料(如褐煤、煤矸石、油页岩、秸秆等生物质)及工业废料(如污泥、垃圾衍生燃料),因物料循环延长了燃料停留时间,即使低热值燃料也能充分燃烧。在环保方面,钙硫比(Ca/S)为1.5-2.5时,脱硫效率可达90%以上,无需额外脱硫设备;分级燃烧技术使NO_x排放浓度低于常规锅炉。负荷调节范围可达30%-100%,通过调整给煤量、风量及物料循环量,可快速适应电网或热负荷波动。应用领域涵盖电力行业、供热与工业蒸汽、废弃物处理等。电力行业多采用300MW及以下机组(如超临界CFB锅炉),用于燃烧劣质煤发电;供热领域为区域供热锅炉、化工/造纸行业提供蒸汽,利用生物质或工业废料供热;废弃物处理方面,可焚烧城市垃圾、污泥,实现能量回收与无害化处理。

2 全负荷条件下调峰性能研究

2.1 调峰性能评价指标

调峰性能的评价需综合效率、环保、稳定性等多维度指标。燃烧效率是核心指标之一,循环流化床锅炉的燃烧效率可达98%-99%,高于层燃炉(85%-90%)。环保指标包括NO_x排放浓度(通常<200mg/m³)、SO₂排放浓度(钙硫比1.5-2.5时脱硫效率>90%)及粉尘排放浓度(通过高效分离器可控制在较低水平)。负荷调节速率反映锅炉响应能力,如300MW亚临界CFB锅炉可实现

10.4%Pe/min的降负荷速率,并在1%极低负荷率下维持长时间稳定运行。运行稳定性通过床温波动(如压火期间平均床温以2.2°C/min的速度下降)、受热面温度偏差(如各受热面横向温度偏差基本在10°C以内)及设备运行参数(如汽轮机和发电机运行平稳)评估^[2]。

2.2 调峰过程中的锅炉特性分析

调峰过程中,锅炉特性随负荷变化显著。低负荷时,炉膛温度下降导致煤粉着火延迟,火焰中心温度降低,燃烧稳定性变差。例如,330MW火电机组在深度调峰时,负荷降低导致进入炉膛的燃料量和空气量减少,一次、二次风量匹配难度增加,易出现风煤混合不均,进一步影响燃烧效率。传热特性方面,低负荷时过热器和再热器的吸热量相对增加,易出现超温现象;受热面管壁温度分布不均匀程度加剧,在热应力作用下可能导致管道疲劳损坏。汽水循环方面,自然循环锅炉需通过提高锅水品质、降低水冷壁管热偏差等措施防止循环停滞和倒流;强制循环锅炉需优化循环泵运行参数,根据负荷变化调整转速和流量。

2.3 调峰性能影响因素分析

调峰性能受燃料特性、负荷变化速率、设备状态等多因素影响。燃料特性方面,煤质波动(如发热量、挥发分、灰分、水分变化)会显著影响燃烧稳定性。例如,煤质变差(发热量降低、挥发分减少)时,煤粉着火困难,易出现灭火现象;煤质中灰分含量增加会导致受热面结渣积灰加剧,影响传热效率。负荷变化速率方面,快速负荷变化会导致燃料量、空气量、给水量等参数难以迅速准确调节,破坏锅炉热平衡和物料平衡。设备状态方面,辅机设备(如风机、给水泵)在低负荷下偏离设计工况,可能引发风机抢风、失速甚至喘振、跳闸等问题;燃烧器磨损或设计不合理也会影响燃烧稳定性。

3 全负荷条件下特性精细研究

3.1 燃烧特性深度探索

燃烧特性研究是深入理解循环流化床锅炉运行机制的关键,需着重聚焦燃料着火、挥发分燃烧、焦炭燃烧及燃尽过程。当燃料进入炉膛,首先迎来干燥阶段,此时燃料中的水分受热蒸发,吸收大量热量。随后,挥发分开始析出,它与周围氧气迅速反应,释放出可观热量,推动炉膛内温度急剧升高。而焦炭则在高温环境下,与氧气发生激烈反应,生成二氧化碳。不过,部分焦炭可能无法在初次燃烧中完全燃尽,会随着物料循环系统,再次进入燃烧区域继续燃烧。循环流化床锅炉之所以燃烧效率高,很大程度上得益于物料循环机制,它极大延长了燃料在炉内的停留时间。以300MW亚临界CFB锅炉的

试验为例,燃料经过多次循环燃烧,使得燃烧效率高达98%以上^[3]。在燃烧区域划分上,着火区通常位于燃烧器出口附近,这里温度和氧气浓度适宜燃料初始燃烧;燃烧区处于炉膛中部,是燃料充分燃烧的主要区域;燃烬区则延伸至炉膛出口,确保燃料最终完全燃尽。不同区域的温度、氧气浓度及颗粒浓度存在显著差异,这些因素共同影响着燃烧效率。

3.2 热力特性深度剖析

热力特性研究对于循环流化床锅炉的安全稳定运行至关重要,需重点关注床温分布、受热面吸热比例及热应力。床温作为影响燃烧和脱硫的关键参数,循环流化床锅炉通过精准控制一次风量、二次风量以及物料循环量,将床温维持在850-950°C的理想范围。然而,在低负荷运行时,床温会出现下降趋势,导致燃烧效率降低。此时,就需要通过调整风煤比或者增加辅助燃料的方式,来维持床温的稳定。在受热面吸热比例方面,低负荷状态下,过热器和再热器的吸热量相对增加,这容易使它们出现超温现象,威胁设备安全;而省煤器和空气预热器的吸热量则会减少,进而影响汽水循环效率。热应力问题同样不容忽视,受热面管壁温度分布不均匀会导致热应力集中,长期处于这种状态下,可能引发管道疲劳损坏。以330MW火电机组在深度调峰时的情况为例,受热面管壁温度偏差加剧,为了降低热应力,保障机组安全运行,就需要通过优化汽水循环系统来加以改善。

3.3 传热特性深度探究

传热特性研究是优化循环流化床锅炉性能的重要环节,需深入分析对流传热、辐射传热及颗粒浓度对传热的影响。在循环流化床锅炉中,传热方式以对颗粒对流传热为主,辐射传热为辅。颗粒浓度是影响传热效果的关键因素,在密相区,颗粒浓度较高,颗粒之间的碰撞和热交换频繁,传热系数较大;而在稀相区,颗粒浓度较低,传热系数相对较小。当锅炉处于低负荷运行时,烟气流量会减小,颗粒浓度也随之降低,这会导致传热系数下降,进而影响受热面的吸热效率。以330MW火电机组在深度调峰时的情况为例,过热器传热系数降低,使得出口蒸汽温度出现超温现象。为了改善传热状况,保障机组正常运行,就需要通过调整燃烧参数,如改变风煤比、调整燃烧器运行方式等,或者增加受热面面积,来提高传热效率,确保蒸汽参数稳定在合理范围内。

4 调峰性能优化策略构建

4.1 燃料供应系统优化

燃料供应系统优化需从燃料预处理、给煤方式及石灰石给料三方面精准发力。燃料预处理上,破碎机是关

键设备,它能将大块燃料破碎至合适粒度,像煤粉粒度控制在0-10mm,这样的粒度能增加燃料与空气的接触面积,使燃烧更充分,极大提高燃烧效率。同时,配煤掺烧技术不可或缺,不同煤种特性各异,有的热值高但硫分高,有的热值低但硫分低,按比例混合后,能稳定入炉煤质,让燃烧过程更稳定可控。在给煤方式上,螺旋给料机凭借其稳定的输送能力,可从炉膛下部或中部给人燃料,确保燃料均匀分布在炉膛内。低负荷时,燃料与空气混合难度增加,此时通过调整给煤机转速,可控制燃料进入量,或增加给煤点,让燃料更分散地与空气接触,改善混合效果。石灰石给料方面,与燃料同步送入能保证脱硫剂与SO₂及时充分反应。低负荷时,燃烧生成的SO₂量变化,通过调整石灰石给料量,或采用变钙硫比控制,根据SO₂生成量精准供给石灰石,可有效提高脱硫效率,减少污染物排放。

4.2 锅炉燃烧系统优化

锅炉燃烧系统优化要聚焦风煤比控制、燃烧器改造及分级燃烧技术。风煤比控制是基础,通过大量试验,能确定不同负荷和煤质条件下的最佳风煤比。在低负荷时,一次风量过大易吹散燃料,导致燃烧不充分,适当降低一次风量、增加二次风量,可使风煤混合更均匀,让燃料在炉膛内稳定燃烧。燃烧器改造方面,浓淡燃烧器能将燃料分成浓相和淡相,浓相着火早、燃烧稳定,淡相补充氧气,提高燃烧效率;钝体燃烧器利用钝体产生回流区,稳定火焰;火焰稳燃船燃烧器可改善燃烧器出口流场,增强燃烧稳定性。定期检查和维修燃烧器,及时修复或更换磨损部件,能保证燃烧器始终处于良好工作状态。分级燃烧技术上,优化一次风和二次风的配比,能降低NO_x生成。低负荷时,调整二次风喷口位置,可改变气流方向,使燃料与空气更好混合,或增加二次风量,补充燃烧所需氧气,改善燃烧效率,实现高效低排放燃烧。

4.3 锅炉热力系统优化

锅炉热力系统优化需从汽水循环调整、受热面防磨及辅助设备改进三方面全面推进。汽水循环调整中,自

然循环锅炉依赖水和水蒸气的密度差形成循环,提高锅水品质可减少结垢,降低水冷壁管热偏差能防止局部过热,避免循环停滞和倒流。强制循环锅炉靠循环泵驱动,优化循环泵运行参数,根据负荷变化调整转速和流量,能保证汽水循环稳定^[4]。受热面防磨上,过热器、再热器等受热面长期受高速烟气冲刷,易磨损,加装防磨护瓦或采用耐磨材料,可增强其抗磨损能力,延长使用寿命。定期清理受热面积灰,能提高传热效率,让热量更有效地传递给工质。辅助设备改进方面,对风机、给水泵等辅机进行变频改造,可根据负荷需求调整转速,降低低负荷下的能耗。增加辅机备用设备,当一台设备出现故障时,备用设备能及时投入运行,提高系统可靠性。例如电厂增设省煤器烟气旁路,减少省煤器吸热量,提高烟气温度,使燃烧更稳定,有效改善了低负荷下的燃烧状况。

结束语

循环流化床锅炉在全负荷调峰领域展现出独特优势与潜力。通过对其调峰特性全面研究,我们清晰认识到燃烧、热力、传热等特性随负荷的变化规律,以及影响调峰性能的多方面因素。而优化策略的构建,从燃料供应到燃烧、热力系统,为提升调峰性能指明方向。未来,随着技术不断进步,循环流化床锅炉全负荷调峰能力将进一步提升,为能源领域高效、清洁、稳定发展发挥更大作用。

参考文献

- [1]乔磊磊,王孝全,聂浩,等.循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究[J].中国电机工程学报,2025,45(1):184-193.
- [2]聂鑫,谢海燕,杨冬,等.循环流化床机组锅炉深度调峰负荷水循环安全性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2766-2776.
- [3]武振国,杨楚轲,张守玉,等.变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展[J].煤炭转化,2025,48(2):78-91.
- [4]张帅柠,高明明,王勇权,等.循环流化床锅炉宽负荷一体化脱硫建模研究[J].发电技术,2025,46(4):849-856.