

# 循环流化床锅炉启停调峰运行策略及其对锅炉寿命的影响

张生胜

山西昱光发电有限责任公司 山西 朔州 036900

**摘要:** 本文深入研究循环流化床锅炉启停调峰运行策略及其对锅炉寿命的影响。剖析其工作原理与运行特性,提出涵盖启动、停炉、调峰的运行方式。研究表明,频繁启停调峰会从材料性能、结构部件、系统安全性可靠性等方面影响锅炉寿命。通过优化运行策略,采用先进控制技术,并从材料、结构、维护管理着手实施寿命延长措施,有助于提升锅炉运行效率与使用寿命。

**关键词:** 循环流化床锅炉; 启停调峰; 运行策略; 锅炉寿命; 影响分析

## 引言

近年来,以风能、太阳能等为代表的可再生能源技术及产业得到快速发展。国家能源局发布风电光伏装机数据,截止2025年03月,我国风电光伏发电累计装机达到14.82亿千瓦(其中风电5.36亿千瓦,光伏发电9.46亿千瓦),首次超过火电装机(14.51亿千瓦)。未来随着风电光伏新增装机持续快速增长,风电光伏装机超过火电将成为常态,但其间歇性、波动性和随机性,对电力系统可靠稳定运行构成了巨大挑战。立足我国能源资源禀赋,发挥煤电调峰和兜底保供作用,促进对可再生能源的消纳,是现阶段构建清洁低碳安全高效能源体系的唯一现实可行的技术路线。

## 1 循环流化床锅炉运行特性分析

### 1.1 循环流化床锅炉工作原理

循环流化床锅炉是一种高效、清洁的燃煤设备,其核心工作原理基于气固两相流的循环运动。在锅炉内部,燃料、脱硫剂与高温物料在炉膛内形成剧烈扰动的流化床层。一次风从布风板下方送入使床料颗粒呈流化状态,此时燃料颗粒与空气充分混合,发生强烈的燃烧反应。由于流化床内物料的强烈混合,床层温度分布均匀,一般在800-950℃,这一温度区间既能保证燃料充分燃烧,又能有效抑制氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的生成。未燃尽的燃料颗粒和脱硫产物随烟气上升,进入旋风分离器<sup>[1]</sup>。旋风分离器利用离心力将固体颗粒从烟气中分离出来,分离后的颗粒通过返料装置重新送回炉膛,形成物料的循环燃烧。而经过净化的烟气则依次通过尾部受热面,热交换后经除尘器、引风机排入烟囱。这种独特的燃烧方式,使循环流化床锅炉具有燃烧效率高、燃料适应性广、污染物排放低等显著优势,而大量高温床料的存在,能够及时提供着火热并维持床温均匀,稳燃能力强,低负荷运行性能突出。

### 1.2 正常运行工况特性

在正常运行工况下,循环流化床锅炉展现出一系列稳定且独特的运行特性,从温度特性来看,炉膛内温度分布均匀且稳定,这得益于物料的强烈混合与循环。稳定的床温不仅有利于燃料的充分燃烧,还为脱硫反应提供最佳的温度条件。同时均匀的温度分布降低了局部结焦的风险,保障锅炉的安全稳定运行。压力特性方面,锅炉各部位压力相对稳定,其中布风板阻力是影响一次风系统压力的关键因素。合理的布风板阻力能够确保床料均匀流化,若阻力过大或过小,都会影响流化质量,甚至导致流化不良、结焦等故障。炉膛内的负压运行也是正常工况的重要特征,维持适当的负压有助于防止炉膛内高温烟气和粉尘外漏,保障运行人员的安全和环境卫生。物料循环特性在正常运行中起着至关重要的作用。稳定的物料循环量能够保证炉膛内有足够的高温物料参与燃烧和传热,提高燃烧效率和传热系数。当物料循环量不足时,会导致燃烧效率下降、床温升高;而循环量过大,则可能增加风机电耗和设备磨损。

### 1.3 启停调峰运行工况特点

循环流化床锅炉炉膛、分离器等内部敷设厚重的浇注料,启动过程中,锅炉需经历从冷态到热态的转变,各部件温度迅速升高,存在较大的热应力。尤其是点火初期,需要严格控制升温速度,避免因温度变化过快导致受热面、耐火材料等部件损坏。同时,因床料由不同粒径的颗粒组成,启动过程中物料的流化和循环建立也需要一定时间。停炉过程同样面临诸多挑战。随着燃料供应的停止,炉膛温度逐渐降低,各部件开始收缩。此时,需要合理控制降温速度,避免因热应力过大导致部件变形或损坏。调峰运行时,锅炉需要频繁地调整负荷以适应电网的需求变化。快速的负荷调整要求锅炉具有良好的响应性和稳定性,但频繁的负荷波动会对锅炉

的结构部件和系统可靠性产生不利影响,增加设备的磨损和故障风险。特别是为适应新能源消纳进行的深度调峰,会导致床温太低、烟气指标控制难度增大、膨胀不均拉裂等一系列问题。

## 2 循环流化床锅炉启停调峰运行策略研究

### 2.1 启动运行策略

循环流化床锅炉的启动过程可分为冷态启动、温态启动和热态启动,不同启动方式的运行策略有所差异。冷态启动时,首先要对锅炉系统进行全面检查,确保各设备完好、仪表正常。然后向炉膛内添加适量的床料,床料的粒度和厚度要符合要求。点火过程通常采用床上点火或床下点火方式。床上点火是将点火油枪布置在床料上方,通过油枪燃烧加热床料;床下点火则是利用热风炉产生的高温烟气加热床料<sup>[2]</sup>。在点火过程中,要严格控制升温速度,一般控制在1-2°C/min,避免床料局部过热结焦。当床温达到550-600°C时,可逐渐投入少量燃料,随着床温的升高,逐步增加燃料量和风量,建立稳定的物料循环。温态启动和热态启动由于锅炉本体和床料仍有较高温度,启动时间相对较短。但在启动过程中,同样要密切关注各参数的变化,防止因温度回升过快导致热应力过大。同时要根据锅炉停运时间和床料状态,合理调整启动参数,确保启动过程安全、高效。

### 2.2 停炉运行策略

正常停炉时,首先要逐渐降低锅炉负荷,减少燃料和风量的供应。在负荷降低过程中,要注意保持床温、床压和物料循环量的稳定,避免因参数波动过大导致设备故障。当负荷降至最低稳燃负荷以下时,停止燃料供应,继续保持风机运行,对炉膛进行吹扫,将残留的燃料和可燃气体排出。停炉后,要根据停炉时间的长短采取不同的保养措施。短期停炉可采用湿保养法,即在锅炉停运后,向炉水中添加氢氧化钠、碳酸钠或磷酸三钠等碱性保护剂,使炉水pH值保持在10-12之间,防止设备腐蚀。长期停炉(超过7天)则采用干保养法,将炉水放尽,然后在炉膛内放置干燥剂(如硅胶、生石灰等),关闭所有阀门和人孔,防止空气进入。在停炉过程中,还要注意对锅炉各部件的冷却速率,如旋风分离器、返料器等,避免因温差过大导致部件变形或损坏。

### 2.3 调峰运行策略

为满足调峰需求,循环流化床锅炉的调峰运行策略需综合考虑燃烧调整、物料循环控制和参数优化等方面。在燃烧调整方面,当负荷降低时,应减少燃料供应量,同时适当降低一次风量和二次风量,以维持稳定的燃烧工况。但要注意避免风量过低导致流化不良或燃烧

不充分。物料循环控制是调峰运行的关键。当负荷降低时,适当减少物料循环量,降低炉膛内的物料浓度,减少传热损失,维持床温稳定;当负荷升高时,增加物料循环量,提高炉膛内的传热系数,满足负荷增长的需求。另外,还需对锅炉的运行参数进行优化。例如,合理调整床温、床压、氧量等参数,在保证燃烧效率和污染物排放达标的前提下,提高锅炉的调峰性能。

## 3 循环流化床锅炉启停调峰运行对锅炉寿命的影响分析

### 3.1 材料性能方面的影响

启停调峰运行过程中,锅炉各部件的温度频繁变化,对材料性能产生显著影响。在温度循环作用下,金属材料会发生疲劳损伤,导致材料的强度和韧性下降。尤其是在启动和停炉过程中,温度变化速率较快,材料内部产生较大的热应力,反复的热应力循环会加速材料的疲劳裂纹萌生和扩展<sup>[3]</sup>。对于耐火材料,温度的剧烈变化会使其产生热膨胀和收缩,导致耐火材料内部产生裂纹。随着启停次数的增加,裂纹不断扩展,最终可能导致耐火材料脱落,影响锅炉的正常运行。

### 3.2 结构部件方面的影响

启停调峰运行对锅炉的结构部件影响显著且复杂。以受热面管为例,在启动过程中,管内工质吸热升温,管壁温度快速上升,而管外壁因与炉膛内高温烟气换热存在一定滞后,导致内外壁产生较大温差;停炉时,冷却过程同样因热传递速度差异,形成不均匀的温度分布。这种温度梯度使得受热面管在膨胀和收缩过程中,不同部位的变形量不一致,从而产生热变形和热应力。布风板、返料器等部件在启停过程中也面临严峻考验。启动初期,床料尚未完全流化,物料堆积在布风板上,风帽需承受较大压力,且气流分布不均,导致局部磨损加剧;停炉末期,物料流化状态紊乱,颗粒与布风板、风帽的碰撞更为剧烈。在某锅炉实际运行中,因频繁启停,布风板风帽的磨损速度比正常运行时快了近3倍,风帽孔径增大,使得布风均匀性变差,大量热空气无法均匀进入床层,不仅降低锅炉的流化质量,还导致燃烧效率下降,影响整个锅炉的稳定运行。

### 3.3 系统整体可靠性方面的影响

频繁的启停调峰运行如同给循环流化床锅炉系统带来一场“慢性损耗”,极大地降低了系统的整体可靠性。锅炉各部件在启停过程中,不仅要承受热应力的反复拉扯,还要经受机械应力的不断冲击。风机在启动瞬间,电机需克服较大的静摩擦力,轴承承受巨大的启动扭矩;给煤机频繁启停,其内部传动部件会因惯性冲击

产生疲劳损伤；返料器在启停过程中，物料的突然涌入和停止流动，会对密封件造成强烈挤压和磨损。某电厂数据显示，在频繁启停调峰运行的半年内，风机轴承更换次数较稳定运行时增加了40%，给煤机故障停机时间累计达200多小时，严重影响了生产效率。同时启停调峰过程中，锅炉的压力、温度、流量等参数频繁波动，这对自动控制系统的稳定性和准确性是极大挑战。自动控制系统需不断调整控制参数以适应工况变化，长期的频繁调节会导致传感器精度下降、控制器内部元件老化加速。一旦自动控制系统出现故障无法精准调节锅炉运行参数，锅炉在调峰过程中就极易出现超温、超压等危险状况，大幅增加事故发生风险。



某厂因频繁启停调峰布风板风帽脱落及磨损

#### 4 循环流化床锅炉启停调峰运行策略优化及寿命延长措施

##### 4.1 运行策略优化

为优化循环流化床锅炉的启停调峰运行策略，可采用先进的控制技术和优化算法。在启动过程中，利用智能控制系统实时监测各部件的温度和热应力，根据预设的升温曲线自动调整燃料量和风量，实现精确的升温控制，降低热应力对设备的影响。通过对床料特性和燃烧工况的在线监测，优化点火方式和启动参数，缩短启动时间，提高启动效率。在调峰运行中，引入预测控制算法，根据电网的负荷变化预测，提前调整锅炉的燃烧工况和物料循环量，实现平滑的负荷调节。结合人工智

能技术，对锅炉运行数据进行实时分析和处理，建立锅炉运行的优化模型，自动调整运行参数，使锅炉在调峰过程中始终保持最佳的运行状态。必要时可采用储能配套、停机不停炉等方式减少锅炉启停次数。

##### 4.2 寿命延长措施

为延长循环流化床锅炉的使用寿命，需从材料选择、结构改进和维护管理等方面采取措施。在材料选择上，采用耐高温、耐腐蚀、抗疲劳性能好的新型材料。例如，选用高性能的合金钢作为受热面管材料，提高其抗高温腐蚀和抗疲劳性能；采用新型的耐火材料，如碳化硅、高温耐磨涂料等，增强耐火材料的抗热震性能和耐磨性。在结构改进方面，对易磨损、易损坏的部件进行优化设计<sup>[4]</sup>。例如，在布风板和风帽表面采用耐磨涂层或镶嵌耐磨材料，提高其耐磨性；改进返料器的结构，减少物料对返料器的磨损和冲击。同时合理设计受热面管的支撑和固定方式，降低热应力对管子的影响，防止管子变形和开裂。

##### 结束语

综上所述，合理的启停调峰策略对循环流化床锅炉的高效稳定运行至关重要，深入了解其对寿命的影响是实现长期可靠运行的前提。提出的优化策略与延寿措施为锅炉运行维护提供了理论支持。随着全球能源转型和碳中和目标的实现，火电厂的调峰和兜底保供作用日益凸显。未来，探索智能化控制技术，如大数据分析、机器学习等，提升锅炉运行效率和调峰性能将成为研究热点。同时，结合新能源，探索互补运行策略和余热回收技术也至关重要。技术创新和应用将推动循环流化床锅炉在燃煤机组灵活性方面的独特优势。

##### 参考文献

- [1]王鹏程,邓博宇,蔡晋,等.超临界循环流化床锅炉深度调峰技术难点及控制策略[J].中国电力,2021,54(5):7-8.
- [2]崔健.循环流化床锅炉床温控制优化分析[J].自动化应用,2020(04):24-25.
- [3]李峥.火力发电厂锅炉燃烧运行优化策略[J].科技创新与应用,2021,11(23):129-131.
- [4]马毅.热电厂锅炉燃烧运行优化策略探微[J].电力设备管理,2020(09):133-135.