

循环流化床锅炉变负荷特性研究

王 龙¹ 李 娟² 石腾达²

1. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能), 中国特种设备检测研究院 北京 100029
2. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 国家市场监管技术创新中心(锅炉清洁低碳高效燃烧与安全评价), 中国特种设备检测研究院 北京 100029

摘要: 循环流化床锅炉因燃料适应性强、燃烧效率高、污染排放低, 在电力、化工等领域广泛应用。变负荷运行是其响应电网调度、匹配用能需求的核心工况, 直接影响机组运行的稳定性、经济性与环保性。本文以300MW循环流化床锅炉为对象, 通过理论分析、试验测试与数值模拟, 探究变负荷中床温、床压等关键参数的动态变化, 分析燃料供给、风量调节等因素的影响机制, 提出优化控制策略。研究表明, 该策略可缩短响应时间、降低参数波动, 提升适应性, 为锅炉安全高效运行提供指导。

关键词: 循环流化床锅炉; 变负荷特性; 参数优化; 控制策略; 动态响应

引言: 随着我国电力系统向新能源高渗透转型, 风电、光伏等可再生能源大规模接入电网, 对火电机组调峰能力提出更高要求。循环流化床锅炉作为清洁高效燃烧设备, 在调峰运行中优势显著, 但存在变负荷响应滞后、参数波动大等问题。变负荷时锅炉内部流动、燃烧、传热相互耦合, 参数变化复杂, 控制不当易引发安全隐患。因此, 深入研究其变负荷特性, 揭示参数动态响应规律, 优化控制策略, 对提升调峰能力、保障安全运行、降低能耗意义重大, 可为工程实践提供参考。

1 循环流化床锅炉工作原理与变负荷运行机制

1.1 循环流化床锅炉工作原理

循环流化床锅炉基于气固两相流理论, 由炉膛、分离器、返料装置及尾部烟道构成, 工作过程涵盖燃料燃烧、气固分离、固体返料三环节。燃料经破碎筛分后进入炉膛下部密相区, 一次风从底部布风板送入, 使床料与燃料流化, 完成挥发分释放与初步燃烧; 二次风从炉膛中部送入, 补充氧气实现充分燃烧。高温烟气携固体颗粒上升, 经分离器分离后, 固体颗粒由返料装置送回炉膛循环燃烧, 净化烟气进入尾部换热排出。相较于传统煤粉锅炉, 其优势显著: 燃料适应性强, 可燃烧多种劣质燃料, 粒径范围0-10mm; 燃烧效率超97%, 流化状态使燃料与空气充分接触; 低温燃烧抑制NO_x生成, 炉内加石灰石脱硫效率超90%; 负荷调节范围宽, 30%-110%额定负荷可稳定运行, 调峰潜力大。

1.2 变负荷运行机制与分类

循环流化床锅炉变负荷运行通过调整燃料供给量、风量、循环倍率等, 改变炉膛燃烧强度与传热效率, 从

而调整蒸发量以匹配负荷需求。依据变负荷速度与范围, 可分为三类: 缓慢变负荷(≤1%额定负荷/分钟, 50%-100%负荷), 用于常规负荷调整, 参数变化平缓; 快速变负荷(1%-3%额定负荷/分钟, 40%-100%负荷), 用于电网调峰, 对控制策略要求高; 深度变负荷(≤40%额定负荷), 用于深度调峰, 易出现床温过低、流化不良等问题, 是研究重点^[1]。变负荷时各系统相互耦合, 燃料、风、水循环、返料系统调整相互影响, 如负荷升高时燃料与风量调整不同步, 会导致床温下降或燃烧不充分, 降低效率甚至引发结焦。

2 循环流化床锅炉变负荷特性试验研究

2.1 试验对象与试验方案

本文以300MW循环流化床锅炉为试验对象, 该锅炉为单炉膛、双分离器、单返料结构, 额定蒸发量945t/h, 蒸汽压力17.5MPa, 温度541°C, 床温850-950°C, 循环倍率15-20。燃料采用烟煤与煤矸石混合(7:3), 收到基低位发热量18.5MJ/kg, 粒径0-8mm。试验探究变负荷过程中关键参数变化规律, 分析相关因素影响, 采用分段变负荷方式, 进行30%-100%升负荷、100%-30%降负荷试验, 设置1%、2%、3%额定负荷/分钟三种速度, 每种速度稳定运行30分钟, 记录参数数据。测试参数包括床温、床压、风量、燃料量、蒸汽参数等, 采用高精度仪器, 数据采集频率1次/10秒, 试验前检查设备、校准仪器, 确保结果准确。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 变负荷过程中床温的动态变化特性

床温是燃烧稳定性核心指标, 试验表明, 升负荷时

床温整体上升,且与变负荷速度密切相关:1%速度时,床温从780℃平稳升至920℃,波动±15℃,响应滞后30秒;2%速度时,上升加快,波动±25℃,负荷70%时出现短暂骤升;3%速度时,波动达±40℃,负荷60%、80%时骤升,最高达960℃,接近结焦温度。降负荷时床温整体下降,规律与升负荷相反:速度越慢,下降越平稳,波动越小;3%速度时,床温降至730℃,低于稳定燃烧最低温度750℃,出现燃烧不稳定、流化不良,需及时调整参数避免熄火。

2.2.2 变负荷过程中床压与循环倍率的变化特性

床压反映床料量与流化状态,循环倍率影响燃烧与传热。升负荷时,二者均上升,负荷从30%升至100%,床压从5kPa升至12kPa,循环倍率从12升至18,速度越快,上升越快,因燃料与风量增加,固体颗粒循环强度提升。降负荷时,二者均下降,速度越快下降越快,快速降负荷时床压短暂波动,因燃料减少过快、返料响应滞后,床料分布不均;负荷30%时,循环倍率降至12以下,床料不足,易出现流化不良^[2]。

2.2.3 变负荷过程中蒸汽参数的变化特性

主蒸汽压力与温度是输出能量核心指标,升负荷时随负荷上升而升高:1%速度时,压力从5.2MPa升至17.5MPa,温度从480℃升至541℃,波动分别为±0.3MPa、±3℃,响应滞后40秒;2%速度时,波动加大,负荷80%时短暂超温;3%速度时,波动达±0.8MPa、±8℃,超温超压频繁,影响安全。降负荷时二者随负荷下降,速度越慢波动越小;3%速度时,易出现低温低压,负荷30%时温度可能低于470℃,导致蒸汽带水,损坏汽轮机叶片。

3 循环流化床锅炉变负荷特性影响因素分析

3.1 燃料特性的影响

燃料特性是基础影响因素,包括发热量、粒径分布、灰分含量。发热量越高,升负荷所需燃料越少,响应越快;换用15MJ/kg劣质煤时,燃料量需增加20%,响应时间延长至50秒,床温波动±30℃。粒径控制在0.5-6mm时变负荷特性最佳,过小易致床温骤升,过大燃烧缓慢、流化阻力大。灰分从25%升至35%时,升负荷响应时间延长30%,床温波动增加±10℃。

3.2 运行参数的影响

3.2.1 风量调节的影响

风量调节是核心控制手段,一次风维持流化、提供部分氧气,风量不足导致流化不良、响应滞后,过大则床温下降、效率降低,控制在额定风量40%-60%时流化最佳。二次风补充氧气、调整温度分布,配比30%-40%时,燃烧效率最高、参数波动最小,NO_x生成量≤300mg/Nm³;

配比过低燃烧不充分,过高则床温下降、NO_x增加。

3.2.2 循环倍率的影响

循环倍率反映固体颗粒循环强度,控制在15-20时变负荷特性最佳,30%-110%负荷可稳定运行;过高则分离器、返料负荷增加,参数调整难度大;过低则固体颗粒不足,床温波动大、燃烧不稳定,易熄火。

3.2.3 燃料供给速度的影响

燃料供给速度直接决定燃烧强度,升负荷时过快致床温骤升、参数波动,过慢则响应滞后;降负荷时过快致床温骤降,过慢则能源浪费。升负荷时供给速度控制在0.5-1.0t/h·%额定负荷,降负荷时0.3-0.8t/h·%额定负荷,匹配变负荷速度时特性最佳。

3.3 设备结构的影响

炉膛高度38m、截面积24m²时,燃料停留3-5秒,燃烧充分、变负荷特性好;高度降至32m,停留时间缩短至2秒,未燃尽碳增加15%,响应时间延长40%。分离器效率≥99%时,循环倍率稳定;降至95%以下,循环倍率波动±3,参数波动剧烈。U型返料装置响应≤10秒、返料均匀,轻微堵塞时返料量减少30%,循环倍率降至12以下,床温波动±35℃。

4 循环流化床锅炉变负荷优化控制策略

4.1 优化控制目标

循环流化床锅炉变负荷优化控制,核心是构建多维度协同的动态调节体系,以适应电网调峰、保障机组安全经济运行。一是提升负荷响应速度,优化控制算法与执行机构响应,使调整速率超5%/min,缩短过渡时间,满足快速调峰需求。二是严格把控参数,将床温波动控制在±5℃内、主蒸汽压力偏差在±0.2MPa内、温度波动在±3℃内,防止出现床层结焦、受热面超温等隐患^[3]。三是提高燃烧效率至98%以上,降低NO_x排放至200mg/Nm³以下,减少燃料消耗与污染。

4.2 具体优化控制措施

4.2.1 燃料供给优化控制

燃料预处理是保障循环流化床锅炉变负荷稳定性的基础。要建立入炉燃料质量动态检测机制,用在线元素分析仪与激光粒度仪实时监测燃料发热量(17-20MJ/kg)、粒径分布(0.5-6mm占比≥90%)及灰分含量(≤25%),依结果自动调整混煤比例。如灰分超标,系统自动将优质无烟煤掺配比例提至35%,启动破碎与筛分装置处理大颗粒。动态调节采用前馈-反馈复合策略:前环节基于负荷指令与历史数据模型预测燃料需求,提前10-15秒调给煤机转速;反馈环节通过床温、氧量等参数实时采集,用模糊PID控制器微调给煤量,确保降负荷时

床温波动不超 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

4.2.2 风量优化调节策略

风量调节是控制燃烧状态与流化质量的核心手段。一次风采用床压与流化速度闭环控制：通过床层压差传感器（量程0-20kPa）监测密相区阻力，结合流化速度计算模型（基于Ergun方程修正版），将床压控制在5-12kPa、流化速度维持在2.5-3.5m/s。变负荷时，一次风量变化率需与燃料供给速率严格匹配，例如当负荷以8%/min速率上升时，一次风量同步增加12%，并通过变频风机实现风量精准调节（精度 $\pm 1\%$ ）。二次风则采用床温与NO_x协同控制策略：通过红外测温仪（精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）监测稀相区温度，结合SNCR脱硝系统的NO_x排放数据（采样周期15秒），将床温维持在850-950 $^{\circ}\text{C}$ 、NO_x浓度 $\leq 300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

4.2.3 循环倍率优化控制

循环倍率直接影响物料平衡与热量传递效率。采用分离器效率与返料量闭环控制：通过高效旋风分离器（切割粒径 $d_{50} = 15\mu\text{m}$ ）实现 $\geq 99\%$ 的颗粒分离效率，结合返料腿压力差（量程0-10kPa）监测返料量，将循环倍率控制在15-20。定期启动脉冲气流清灰装置（压力0.6MPa）清理分离器积灰，避免因分离效率下降导致循环倍率波动。深度变负荷时，系统动态调整床料量：当负荷低于40%时，通过返料阀排出部分粗颗粒床料；当负荷高于90%时，启动床料添加系统补充细颗粒物料，维持循环倍率 ≥ 12 。^[4]

4.2.4 蒸汽参数优化控制

采用负荷指令与蒸汽参数复合控制，实时采集参数，预测蒸汽需求调整燃烧与换热；压力偏高时减料减风、调整烟道挡板，偏低时加料加风。温度采用分段调节，炉膛出口温度950-1050 $^{\circ}\text{C}$ ，尾部结合烟气再循环与挡板调节，

提前调整减温水量，确保温度稳定在541 $^{\circ}\text{C}$ 左右，波动 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内。

4.3 优化控制效果验证

将优化策略应用于该300MW锅炉，试验验证表明，变负荷响应时间缩短30%（从40秒至28秒）；床温波动降低40%（ $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 至 $\pm 9^{\circ}\text{C}$ ），快速变负荷时无超温；蒸汽参数波动分别降低50%、60%，无超温超压；燃烧效率提升2.5%，未燃尽碳从3.2%降至2.4%；NO_x降低15%至255mg/Nm³，30%-110%负荷可稳定运行，满足调峰需求。

结束语

本文通过多方法结合，系统研究循环流化床锅炉变负荷特性，探究关键参数动态变化规律，分析燃料、运行参数、设备结构的影响机制，提出优化控制策略并验证有效性。研究表明，变负荷速度越快，参数波动越大、稳定性越差，优化相关控制策略可显著提升变负荷性能。本文成果完善了其变负荷特性理论体系，为安全高效运行提供支撑与指导，对推动其在电网调峰中应用具有重要意义，未来可结合智能化技术，进一步提升变负荷智能化水平。

参考文献

- [1] 聂浩,柯希玮,柳成亮,等.循环流化床锅炉变负荷特性研究[J].热力发电,2025,54(12):1-8.
- [2] 罗鸿伟.700MW高效超超临界循环流化床锅炉变负荷特性[J].云南电力技术,2025,53(4):79-82.
- [3] 张戎迪,卢啸风,王学深,等.大型循环流化床锅炉变负荷运行时给煤延迟特性研究[J].热力发电,2023,52(9):39-47.
- [4] 刘梁,高凯旋,谢德清,等.超临界循环流化床锅炉变负荷特性模拟[J].热力发电,2025,54(7):43-53.