



《热力发电》网络首发论文

题目：循环流化床锅炉变负荷特性研究
作者：聂浩，柯希玮，柳成亮，黄中，魏邵青，徐成兴，王君峰，吕俊复，岳光溪
DOI：10.19666/j.rlfid.202506096
收稿日期：2025-06-12
网络首发日期：2025-07-29
引用格式：聂浩，柯希玮，柳成亮，黄中，魏邵青，徐成兴，王君峰，吕俊复，岳光溪. 循环流化床锅炉变负荷特性研究[J/OL]. 热力发电. <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202506096>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19666/j.rlfed.202506096

循环流化床锅炉变负荷特性研究

聂浩^{1,2}, 柯希玮^{1,3,4}, 柳成亮^{2,3}, 黄中^{1,3,4}, 魏邵青^{2,3}, 徐成兴²,
王君峰^{1,3}, 吕俊复^{1,3,4}, 岳光溪^{1,3,4}

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2.晋能控股电力集团有限公司, 山西 太原 030006;
3.怀柔实验室山西研究院, 山西 太原 030032; 4.北京怀柔实验室, 北京 101499)

[摘要] 提高燃煤发电机组灵活运行能力对保障电力系统可靠稳定运行具有重要意义。本文深入分析了循环流化床(CFB)锅炉炉内热质传递过程,发现当负荷变化时,进入炉膛的风量快速响应,驱动稀相区颗粒悬浮浓度改变,从而引发燃烧侧向工质侧传热率的快速变化;与煤粉锅炉不同,CFB锅炉平均床温随负荷变化较小,变负荷过程中尽管热容很大,但热惯性没有充分表现出来,对变负荷速率不产生消极影响。因此,CFB锅炉的负荷调节过程是基于近恒温条件下传热系数的快速响应,与煤粉锅炉变负荷机制存在本质区别。此外,床料中相当数量的未燃尽碳在升负荷时可作为潜在的燃料供应源,当氧量供应提高时,燃烧率能够迅速提高。结合床料及浇注料蓄热,CFB锅炉可视为自带“储能”功能,为提高出力提供长期能量支持。降低平均床料粒度、减小给煤粒径,添加粉煤和循环灰等措施,能够进一步提高CFB锅炉的变负荷速率。300MW亚临界CFB煤电机组的试验结果显示,负荷升降速率可达4%-9% Pe/min,接近燃气轮机组的变负荷能力。本文研究表明CFB锅炉具备快速变负荷潜力,将在新型电力系统中发挥更为关键作用。

[关键词] 循环流化床锅炉; 快速变负荷; 蓄热; 对流传热; 工程实践

Investigation on the load change characteristics of the circulating fluidized bed boiler

NIE Hao^{1,2}, KE Xiwei^{1,3,4}, LIU Chengliang^{2,3}, HUANG Zhong^{1,3,4}, WEI Shaoqing^{2,3}, XU Chengxing²,
WANG Junfeng^{1,3}, LYU Junfu^{1,3,4}, YUE Guangxi^{1,3,4}

(1.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2.Jinneng Holding Power Group, Taiyuan 030006, China;
3.Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030002, China;
4.Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101499, China)

Abstract: Improving the flexibility of coal-fired power generation units is of great significance for ensuring the reliable and stable operation of the power grid. This paper deeply analyzes the heat and mass transfer process in the CFB boiler furnace. It is found that when the load changes, the air volume, as well as the fluidization velocity, responds rapidly, driving the change of the particle suspension density in the dilute phase zone, thus triggering the rapid change of the convective heat transfer coefficient and the total heat flux. Different from pulverized coal-fired boilers, the average furnace temperature of the CFB boiler changes little with load. During the load change process, although the heat storage capacity is large, the thermal inertia is not fully manifested, and it does not have a negative impact on the load change rate. Therefore, the load adjustment process of the CFB boiler is based on the rapid response of the heat transfer coefficient under near constant temperature conditions, which is essentially different from the load-changing mechanism of the pulverized coal-fired boiler. In addition, a considerable amount of unburned carbon in the bed material can serve as a potential fuel supply source when the load increases. When the oxygen supply is increased, the combustion rate can be rapidly improved. Combined

收稿日期: 2025-06-12

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFB4100301)

Supported by: Key Project of the National Fourteen Five Year Research Program of China(2022YFB4100301)

第一作者简介: 聂浩(1973), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电技术与管理, 18603516351@163.com。

通信作者简介: 柯希玮(1994), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流化床燃烧和灵活高效低碳锅炉技术, kexiwei@sxri.hrl.ac.cn。

with the heat storage of bed materials and castable, the CFB boiler can be regarded as having a built-in "energy storage" function, providing long-term energy support for load adjustment. Measures such as reducing the average bed material size, reducing the feeding coal size, and adding powdered-coal and circulating ash can further increase the load-changing rate of the CFB boiler. The test results on a 300MW subcritical CFB boiler unit show that the load increasing and decreasing rate can reach 4%-9% Pe/min, approaching the load-changing capability of a gas turbine unit. This paper demonstrates that the CFB boiler has the potential for rapid load change in principle and will play a more crucial role in the new power system dominated by renewable energy sources.

Key words: Circulating fluidized bed boiler; Fast load change; Energy storage; Convective heat transfer; Industrial practice

由于风电、光伏等可再生能源电力具有间歇性、波动性和随机性,对电力系统的可靠稳定运行构成严峻挑战。当某些时段风电、光伏出力大幅变化,供电与负荷需求之间的不平衡凸显时,需要电力系统内有一定规模的灵活性电源来削峰填谷,确保系统频率稳定。但在大规模储能技术取得革命性突破之前,电网对灵活、经济、可靠的传统能源仍具有高度依赖性,以煤电为代表的火电机组灵活性不足,将严重限制风光电力的实际增长。

在日内和日间时间尺度上,对灵活燃煤发电的需求表现为更宽的负荷调节范围和更高的负荷响应速率。受稳定燃烧等因素制约,煤粉锅炉机组的最小技术出力要达到 20% 以下是比较困难的^[1];不过,由于炉内热惯性较小,其负荷调节速率相对较快,结合熔盐储能、小粉仓等手段,煤粉炉的变负荷速率有望超过 3%Pe/min^[2-3]。

相比之下,循环流化床(CFB)锅炉内含有大量高温物料和耐火耐磨材料,蓄热量大,稳燃能力强,低负荷运行性能突出;特别是其可采用“停炉不停机”的压火运行方式,维持小时级近零负荷运行,即能够实现压火调峰^[4-5]。但传统观点认为,高床存量、低导热浇注料、大燃料粒径带来了流动惯性、储热惯性、传热惯性和燃烧惯性,导致负荷调节速率有限^[6-7]。《新一代煤电升级专项行动实施方案(2025—2027年)》中要求改造后现役 CFB 发电机组的变负荷速率为 0.8%~1.2%Pe/min,远低于对煤粉锅炉机组的要求(1%~2.2%Pe/min)。也就是说,现有研究普遍认为,CFB 锅炉难以实现快速变负荷,缺乏足够的灵活性。

大量学者围绕 CFB 锅炉变负荷速率提升开展了广泛研究,且多从克服热惯性角度入手。董中豪等提出使用高导热耐火材料^[8]。Sun 等人则尝试用金属格栅替代现有的耐火材料^[7],两者均从降低传热热阻角度考虑。减小燃料粒径,乃至用煤粉替代传统粗煤颗粒^[9],或用高热值煤替代部分原劣质煤^[10],通过提高燃料燃烧放热速率,以减少燃烧惯性。

Stefanitsis 等人^[11]提出利用额外的鼓泡流化床充当储热系统,将其与 CFB 锅炉结合,通过热物料储释热提高变负荷速率。

也有学者仅靠控制优化实现 CFB 锅炉变负荷速率的显著提升。刘吉臻等^[12]考虑燃料测和工质侧蓄热,建立了 CFB 锅炉能量存储模型以及基于该模型的机组协调控制策略,实现了 1.67%~2.67%Pe/min 的变负荷速率。前期在 300 MW 亚临界 CFB 锅炉上的试验也发现,仅通过优化运行策略并合理确定参数边界,能够实现压火前 10.4%Pe/min 的降负荷速率和扬火时 3.5%Pe/min 的升负荷速率^[4],这表明 CFB 锅炉灵活性潜力可能超出现有认知范围。

本文从 CFB 锅炉热质传递特性分析入手,深入探究变负荷过程中炉内传热率、燃烧放热率和蓄能量的动态变化及其匹配关系,据此评估 CFB 锅炉变负荷潜力,提出相应的设计或运行优化策略。最后在某 300 MW 亚临界 CFB 锅炉上开展工程试验,研究快速变负荷过程中各项参数变化规律,并对未来工作进行展望。

1 理论分析

1.1 CFB 气固两相传热过程分析

常规锅炉受热面表面吸热率随时间变化率可用下式表示:

$$\frac{\partial q_{\text{ad}}}{\partial \tau} = \frac{\partial [kA(T_b - T_f)]}{\partial \tau} = A \left[(T_b - T_f) \frac{\partial k}{\partial \tau} + k \frac{\partial (T_b - T_f)}{\partial \tau} \right] \quad (1)$$

式中: q_{ad} 为吸热热流, J/s; τ 为时间, s; A 为受热面面积, m^2 ; T_b 和 T_f 分别为炉侧和工质侧温度, K; k 为床侧向工质的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 可用式(2)计算。

$$k = \frac{1}{\frac{d}{(d-2\delta)h_b} + \frac{d}{2\lambda} \ln \left(\frac{d}{d-2\delta} \right) + \frac{1}{h_f}} \quad (2)$$

式中: d 为管子外径, m; δ 为管子壁厚, m; h_b 为床侧向受热面的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ 为管子金

属材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; h_f 为管内工质对受热面的换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

煤粉锅炉炉内传热以辐射换热为主, 传热率的变化依赖于烟气温度变化。与煤粉炉不同, CFB 炉内是气固两相流动系统, 变负荷过程中炉内温度变化很小, 传热率的变化主要依赖于烟气中颗粒浓度的变化^[13]:

$$h_p = \frac{H_p}{H_t} h_r + h_{p,c} + h_{g,c} \quad (3)$$

式中: $\frac{H_p}{H_t}$ 为受热面投影面积与烟气侧换热面积之比; h_r 、 $h_{p,c}$ 和 $h_{g,c}$ 分别为辐射换热系数、颗粒对流换热系数和气体对流换热系数, 前两者均可表示为颗粒悬浮质量浓度 C_s 的函数^[13]。

若忽略管内工质的传热热阻, 一些学者提出如下经验关联式^[14]:

$$k = aC_s^n T_b^m \quad (4)$$

式中: a 、 n 、 m 为经验常数。该式直接表达了传热系数和颗粒浓度的正相关关系。因此, 在讨论传热动态过程之前, 需先分析气固流动特性随负荷动态变化规律。

对于“一进二出”物料平衡体系的 CFB 锅炉, 随着给煤引入的宽筛分灰分, 经首次冷启动至满负荷运行后, 一部分窄筛分颗粒 (100~250 μm) 会在炉内累积, 当其床存量超过一定值后, 在特定风速下炉膛上部能够形成快速床状态^[15]。考虑锅炉正常运行时的负荷调节过程, 此时炉内包含了足够可被烟气夹带参与物料循环的有效床料。以升负荷为例, 增加烟气量即增加流化风速, 可增加床料扬析夹带量, 增大炉膛上部裸露受热面附近局部颗粒浓度, 从而提高了颗粒对流换热系数, 某 350MW 超临界 CFB 锅炉模型颗粒悬浮质量浓度及传热系数随锅炉负荷计算值如图 1 所示^[16]。而实验和模拟均表明, 气固流动状态随负荷和风速变化的响应时间均很短^[17-18], 这意味着燃烧测传热系数随时间变化率 ($\partial k/\partial \tau$) 十分显著。

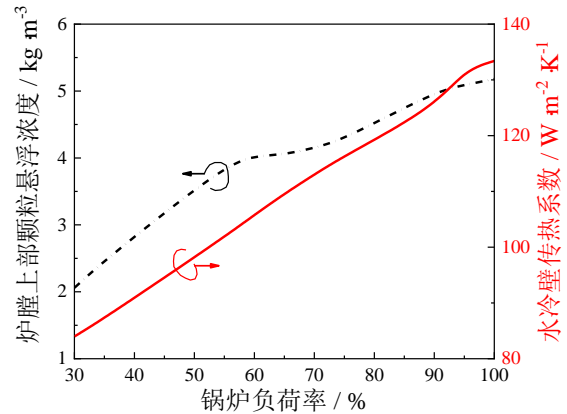


图 1 颗粒悬浮浓度及传热系数随锅炉负荷变化
Fig.1 Variation of particle suspension density and heat transfer coefficient with boiler load, as well as fluidization velocity

对式(1)右边第 2 项 (温度随时间变化率) 从两方面分析: 首先, 由于 CFB 炉内存有大量高温床料及耐磨耐火浇注料, 热惯性大, 加上床料颗粒间传热性能突出, 短时间内平均床温变化并不显著 (1.2 节); 其次, 负荷升 (降) 时, 除炉膛温度随之升高 (降低) 外, 水冷壁、过热器等受热面内工质温度也在一定程度上有所增加 (减少), 使得变负荷过程中传热温差 ($T_b - T_f$) 的变化率相比床温变化率更小。

1.2 CFB 燃烧释热与蓄热过程分析

炉内燃料燃烧放热率随时间变化率可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{re}}{\partial \tau} &= \frac{\partial \left[\Delta H_c^0 \sum (r_{C(d,\tau)} M_{C(d,\tau)}) \right]}{\partial \tau} \\ &= \Delta H_c^0 \left[\sum \left(r_{C(d,\tau)} \frac{\partial M_{C(d,\tau)}}{\partial \tau} \right) + \sum \left(M_{C(d,\tau)} \frac{\partial r_{C(d,\tau)}}{\partial \tau} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: q_{re} 为燃料燃烧放热热流, J/s ; ΔH_c^0 为燃料燃烧热, J/kg ; $r_{C(d,\tau)}$ 为粒径 d 的燃料颗粒在时刻 τ 的反应速率, kg/s ; $M_{C(d,\tau)}$ 为粒径 d 、时刻 τ 的燃料颗粒床存量, kg 。

CFB 锅炉的给煤粒径相比煤粉炉较粗, 燃料燃烧过程可简单分为挥发分快速燃烧和焦炭 (燃碳) 慢速燃烧双控环节。在有限时间内, 受扩散控制的焦炭燃烧速率变化不显著且其床存量保持相对稳定, 即式(5)右边第 2 项不显著。因此, 负荷调节瞬间热量释放速率变化快慢主要取决于燃料给入流率变化量 ($\partial M_{C(d,\tau=0)}/\partial \tau$) 及初始燃烧反应性大小 ($r_{C(d,\tau=0)}$)。

炉内总蓄热量随时间变化率可用下式表示:

$$\frac{\partial Q_{hs}}{\partial \tau} = q_{re} - q_{ad} \approx c_{p,s} \left(M_s \frac{\partial T_b}{\partial \tau} + T_b \frac{\partial M_s}{\partial \tau} \right) \quad (6)$$

式中： Q_{hs} 为炉内总蓄热量，J； $c_{p,s}$ 为炉内固体蓄热体平均比热容（为简化分析，这里将床料、浇注料、金属等不同蓄热体整体考虑），J/(kg·K)； M_s 为炉内蓄热体总质量，kg。

短时间内负荷快速变化时，总床料量变化不大（ $\partial M_s / \partial \tau$ 很小），式(6)右边第2项可以忽略。而大质量蓄热体的显热储热提供了动态过程的惯性环节，其既延缓了燃烧放热导致床温升高的速率，也为因受热面吸热引发的床温降低提供了一个缓冲；同时，流化状态下床料颗粒间导热性能良好，维持了相对均匀且稳定的床温分布。

1.3 CFB 变负荷机制与优化

由上述分析可以认为，负荷变化时，烟量即流化风速的快速调节引起稀相区颗粒悬浮质量浓度变化，瞬时改变对流换热系数，从而主导了燃烧侧向工质侧传热量的快速响应，这构成了CFB锅炉快速变负荷的基础。而炉内大量高温物料（显热储热）、即燃碳燃烧放热（化学储能）以及床料颗粒间良好的传热性能，使床温变化较小。若进一步保证瞬时燃料燃烧放热量 q_{re} 与工质吸热量 q_{ad} 相等，则短时间内能够维持炉内平均温度基本不变，这为变负荷过程提供了长期能量支持。

若想充分发挥CFB锅炉快速变负荷的优势，可考虑同时提高 q_{ad} 和 q_{re} 的变化率，保持两者相对平衡。从吸热角度看，提升锅炉物料循环性能、降低平均床料粒度（即提高床质量），可有效提高颗粒悬浮质量浓度随流化风速变化速率；进一步地，在升负荷时额外添加循环灰粒度细床料或在降负荷时从返料阀等处排出部分循环灰（循环干预），可加快炉内颗粒质量浓度变化，从而提升变负荷过程中床侧传热系数 k 的响应速率与变化幅度。

从燃烧放热角度看，可在负荷调节阶段使用燃烧性能好的燃料（燃烧干预）强化式(5)右边第1项。一方面，可掺配褐煤等热值高、着火点低的优质燃料（提高燃烧热 ΔH_c^0 ）；另一方面，相同条件下燃料粒径越小，反应速率 r_c 越快（图2）^[19]。因此适当减小给煤粒径，尝试将常规0~8 mm的给煤粒度降至0~1 mm，采用粉煤CFB燃烧（PC-CFB）技术路线，能够显著提升锅炉变负荷速率。此外，PC-CFB技术还具有降低风机电耗、减轻受热面磨损、减少

NO_x 原始排放、增强低负荷稳燃能力等优势^[20]，具有广阔的应用前景。

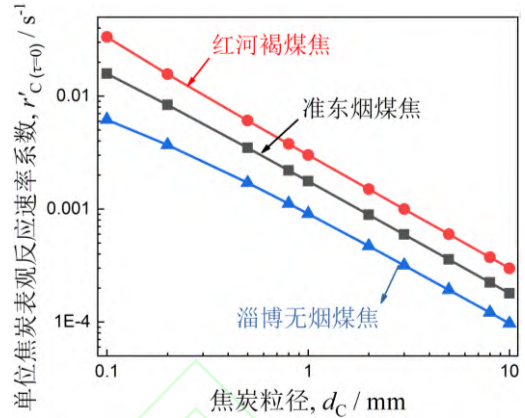


图2 不同粒径及种类焦炭燃烧速率比较
Fig.2 Effects of particle size and coal type on the char combustion rate

2 现场试验

2.1 试验对象

在上述理论指导下，于2024年7月在山西国峰煤电300 MW亚临界CFB锅炉上开展了压火调峰和快速变负荷现场试验。锅炉基本结构如图3所示，主要设计参数见表1。

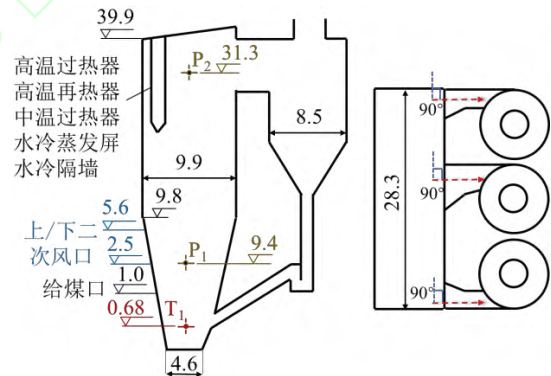


图3 300MW亚临界CFB锅炉主要结构(m)
Fig.3 Structure of the 300MW subcritical CFB boiler(m)

表1 BMCR工况下锅炉主要设计参数

Tab.1. Main operation parameters of boiler under BMCR condition

项目	数值
设计煤种	烟煤(低位热值 14.5 MJ/kg)
蒸发量/(t·h ⁻¹)	1 085
主蒸汽温度/℃	541.0
主蒸汽压力/MPa	17.5
再热蒸汽进/出口温度/℃	329.0/541.0
再热蒸汽进/出口压力/MPa	3.847/3.667
给水温度/℃	280.6

该锅炉由一个膜式水冷壁炉膛、3 台冷却式旋风分离器和一个由汽冷包墙包覆的尾部竖井 3 部分组成。炉内前墙布置有 6 片高温过热器管屏、6 片中温过热器管屏、6 片高温再热器管屏及 1 片水冷隔墙，后墙布置 2 片水冷蒸发屏。分上下两层二次风口，前墙布置 8 个上二次风口和 4 个下二次风口，后墙布置 10 个上二次风口和 4 个下二次风口。给煤系统含 4 个原煤仓，单仓容积 490 m³，1 个原煤仓对应 2 台皮带式给煤机，单台最大出力为 50 t/h，8 个给煤口采用前墙集中等间距布置方式。

采用炉内石灰石脱硫（3 个返料器布置 6 个石灰石给入口）结合炉外半干法脱硫工艺，炉内低氮燃烧结合 SNCR 烟气脱硝工艺（共 6 根尿素喷枪均布置于分离器进口水平烟道上），满足硫氮污染物超低排放要求。

汽轮机为 CZK300/260-16.67/0.4/538/538 型、亚临界一次中间再热、单轴、双缸双排汽、直接空冷、调整抽汽供热凝汽式汽轮机。通流结构介于反动式与冲动式透平之间，级数少；整锻转子，高压通流反向布置，中压通流正向布置，低压通流对称布置，轴向推力自平衡；采用双层缸结构，通流部分轴向间隙大，径向间隙小，具有较好的热负荷适应性。

2.2 试验流程

试验所用烟煤的工业和元素分析数据见表 2。基于燃烧干预指导思想，相比于日常粗给煤，本试验调整了给煤粒径，提高了细颗粒的比例，验证降低给煤粒径对提高灵活性的作用。给煤粒径分布如图 4 所示。

表 2 试验煤种工业和元素分析
Tab.2 Proximate and ultimate analysis of the coal

工业分析/%				热值/(MJ kg ⁻¹)
M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	Q _{ar,net,p}
7.30	42.49	14.52	35.69	14.22
元素分析/%				
C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}
40.70	2.42	5.67	0.60	0.82

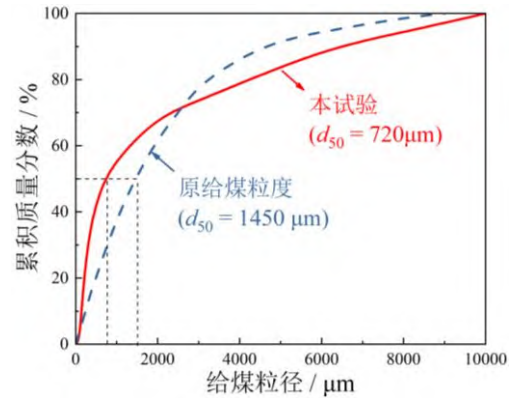


图 4 试验给煤粒径分布

Fig.4 Feeding coal particle size distribution in this test

本次试验操作规程与前几次压火调峰试验类似^[4-5]，但更关注压火结束时热态再启过程，即负荷从 1%Pe 持续爬升至中间负荷并稳定一段时间，观察大范围负荷快速变化过程中各项参数变化规律，主要操作流程如下。

1) 压火前机组负荷维持在 135 MW 左右，调节控制主蒸汽压力为 9 MPa、主/再热蒸汽温度为 545~550 °C、床压为 8 kPa；停运所有冷渣器，给煤量增加 10 t/h，直至床温提升至 830~840 °C；申请退出部分保护动作，包括锅炉跳闸 (BT) 且主蒸汽温度小于 420 °C 触发 ETS、床温小于 600 °C 未投油、蒸汽阻塞、全燃料丧失等。

2) 快速降负荷锅炉主燃料关断 (MFT)，手动关闭过/再热器减温水调门、电动门，停运石灰石二级输送系统；短时间继续维持高压流化风机、引风机、二次风机和一次风机运行，当床温温升开始下降、氧量上涨后，锅炉手动 BT，迅速关闭所有风门和烟气挡板，开始进入压火运行状态。

3) 压火过程中机组负荷维持在 2~3 MW，监测主蒸汽/再热蒸汽温度变化率应小于 5 °C/min、主/再热蒸汽过热度不小于 70 °C、调节级蒸汽和金属温差不小于 56 °C、高压缸内壁上下温差不大于 35 °C、平均床温 (四周测点平均值) 不小于 500 °C，否则立即恢复机组运行。

4) 快速升负荷 (热态再启) 顺次启动引风机、高压流化风机、二次风机和一次风机，并短时调整一次风机出力 75% 以上、二次风机最小出力，使风量快速增加以重建物料循环；后快速启动给煤机，燃料着火燃烧，床温逐渐升高，机组负荷爬升至指定值。

3 试验结果与讨论

机组输出功率和主蒸汽流量随时间变化如图 5 所示。由图 5 可知, 停煤停风后, 机组功率快速下降, 不到 5 min 从 137 MW (47%Pe) 降至 3 MW (1%Pe), 平均负荷下降速率超过 9.0%Pe/min。在汽机不解列、不依靠外部热源及辅助燃料条件下, 锅炉总压火热备时间达 110 min。

退出压火状态后重新投煤送风, 未投油助燃一次扬火成功, 主蒸汽流量及机组功率快速爬升, 在 11 min 内从 3 MW (1%Pe) 回升至 159 MW (53%Pe), 宽负荷变化范围内平均升负荷速率达 4.7%Pe/min; 其中短时最高升负荷率超过 14%Pe/min (从 43 MW 到 86 MW)。

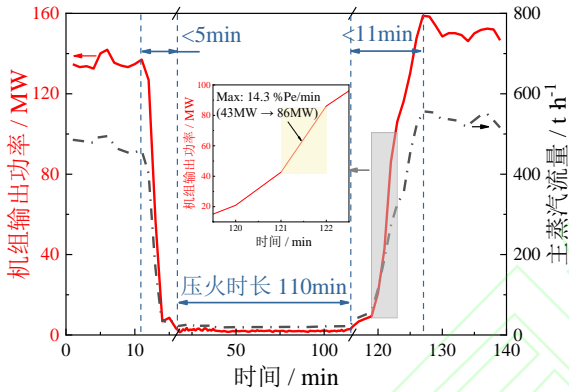


图 5 机组输出功率和主蒸汽流量随时间变化
Fig.5 Variation of unit power and main steam flow over time

图 6 展示了锅炉变负荷与压火过程中, 平均床温及稀相区压降变化。其中, 20 个床温测点布置在炉膛密相区四周, 热电偶在床料内探入深度有限 (约 120 mm), 所显示的床温值仅能反映近壁面区很薄范围内的温度。

与第 1 节分析一致, 负荷开始变化后, 稀相区压降迅速响应, 表明炉膛上部颗粒悬浮浓度快速变化, 继而引起受热面表面传热系数即炉侧向工质侧热量传递快速改变; 相比之下, 床温变化更加平缓, 存在滞后性。特别地, 扬火时在由固定床转向流化状态时, 床内传热加强, 中心区高温颗粒同时向边壁区移动, 反映出近壁面测量床温显著升高, 实际上整体平均床温变化更加缓慢。这充分表明 CFB 锅炉变负荷过程与颗粒浓度的密切联系。

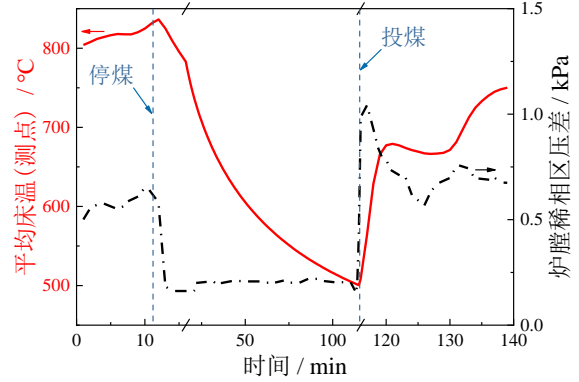


图 6 平均床温和稀相区压差随时间变化
Fig.6 Variation of average bed temperature and pressure drop across dilute phase zone over time

尽管从炉内传热及燃烧角度分析, CFB 锅炉具备快速变负荷潜力。但负荷调节质量不仅取决于负荷变化速率, 还包括系统稳定性、安全性和污染物排放控制水平。主蒸汽温度和压力随时间变化如图 7 所示。压火后快速升负荷过程中, 主蒸汽温度快速升高, 瞬时最高升温速率接近 10 °C/min, 且在较长时间内波动, 可能影响到锅炉受热面、主蒸汽管道及下游汽轮机运行安全与寿命。这对机组控制系统, 特别是风煤水协调控制、减温水与主汽温度控制等提出了更高的要求。

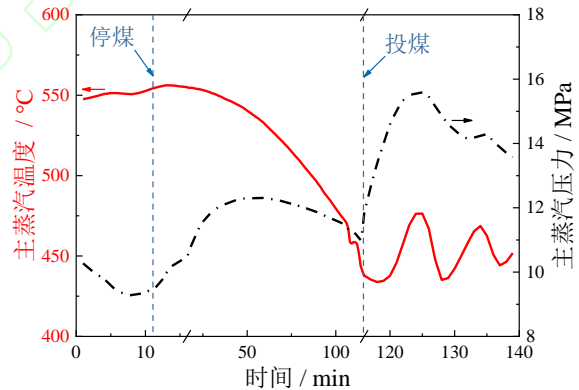


图 7 主蒸汽温度和压力随时间变化
Fig.7 Variation of main steam temperature and pressure over time

另外, 在扬火后锅炉再启阶段, 短时间内硫氮污染物排放易大幅增加并高出限值 ($\rho(\text{NO}_x) \leq 50 \text{ mg/m}^3$, $\rho(\text{SO}_2) \leq 35 \text{ mg/m}^3$), 具体如图 8 所示。由图 8 可知, 随着机组负荷快速升至 40%Pe, 脱硫岛后净烟气 NO_x 和 SO_2 排放质量浓度瞬时值也达到峰值, 分别为 91 mg/m^3 和 357 mg/m^3 (干基、标态、氧体积分数 6%), 超限时间 8~9 min。这与再启时炉内氧量较高导致 NO_x 原始排放高、低温下 SNCR

脱硝效率及炉内石灰石脱硫效率低、低烟气量下炉外半干法脱硫效率低等因素有关。但 NO_x 和 SO_2 小时排放均值分别为 38 mg/m^3 和 35 mg/m^3 ，仍满足超低排放要求。

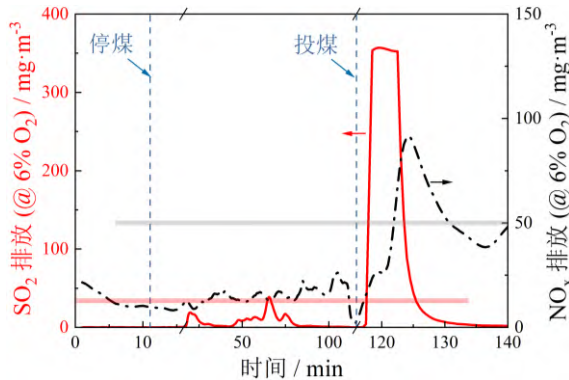


图 8 NO_x 和 SO_2 排放随时间变化

Fig.8 Variation of NO_x and SO_2 emissions over time

从上述分析和试验结果可以认为，提高 CFB 锅炉变负荷速率的技术瓶颈不再是炉内燃烧及传热过程，而是系统控制水平与机组安全性限制。未来需进一步分析 CFB 煤电机组快速变负荷过程中锅炉-汽机-发电机整体特性，掌握各参数动态变化规律，明晰适应灵活运行的参数安全边界，寻求实现高可靠自动控制，并特别关注高负荷变化率及频繁变负荷下锅炉受热面、浇注料、汽轮机等关键设备与材料的安全风险，尽可能减小灵活运行对机组寿命的影响。

4 结 论

本文重点分析了 CFB 锅炉在变负荷条件下的热质传递本质，并在此基础上开展相关工程试验，主要结论如下。

1) 考虑炉内颗粒悬浮浓度随风速的动态变化规律及大量高温物料的“储热”作用，CFB 锅炉的负荷调节过程是基于“近恒温”条件下炉内受热面表面传热系数的快速响应，原理上具备快速变负荷潜力。

2) 理论分析表明，减小平均床料粒径、降低给煤粒径、采用粉煤 CFB 燃烧 (PC-CFB)、循环干预 (添加细床料) 等措施，可进一步提高 CFB 锅炉的负荷变化速率。

3) 在某 300 MW 亚临界 CFB 煤电机组上的试验结果显示，锅炉启停阶段 1%~50%Pe 宽负荷调节范围内，平均负荷升降速率可达 4%~9%Pe/min，接

近燃气轮机组的变负荷能力。

[参 考 文 献]

- [1] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 17-23.
- [2] 王艳, 徐进良, 谢剑, 等. 支撑超灵活燃煤发电的储能系统熔盐筛选[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14 [2025-05-10].
WANG Yan, XU Jinliang, XIE Jian, et al. Molten salt selection for thermal energy storage system of ultra-flexible coal-fired power plant[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14 [2025-05-10].
- [3] 丁思变, 谭亲雄, 丁宏宇, 等. 基于增设小粉仓的新型制粉系统方案设计及控制策略研究[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 79-88.
DING Sibian, TAN Qinxiong, DING Hongyu, et al. Scheme design and control strategy of a novel coal pulverizing system based on addition of small pulverized coal silos[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 79-88.
- [4] 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): 184-194.
QIAO Leilei, WANG Xiaquan, NIE Hao, et al. Investigation on the operation characteristics of circulating fluidized bed boiler unit for full-load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 184-194.
- [5] 宋海峰, 王君峰, 安仲红, 等. 350 MW 超临界循环流化床煤电机组启停调峰试验[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 63-70.
SONG Haifeng, WANG Junfeng, AN Zhonghong, et al. Experimental study on start-stop peak regulation of a 350 MW supercritical circulating fluidized bed coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 63-70.
- [6] 汤仔华, 宋国良, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2279-2292.
TANG Zaihua, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2279-2292.
- [7] SUN G R, WU H W, LIU S Z, et al. Thermal Inertia of 330 MW circulating fluidized bed boiler during load change[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(5): 1771-1783.
- [8] 董中豪, 卢啸风, 史丽超, 等. 炉膛耐火材料热惯性对循环流化床锅炉调峰速率的影响[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 514-524.
DONG Zhonghao, LU Xiaofeng, SHI Lichao, et al. Influence of thermal inertia of refractory material in furnace on the peak regulating rate of circulating fluidized bed boiler[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 514-524.
- [9] TANG Z H, SONG G L, YANG X T, et al. Research on combustion and emission characteristics of circulating fluidized bed during load changes[J]. Journal of the

- Energy Institute, 2022, 105: 334-341.
- [10] 潘雄峰, 马素霞, 陈俊, 等. 循环流化床低热值煤-高热值煤粉动态复合燃烧试验研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(6): 447-451.
PAN X F, MA S X, CHEN J, et al. Dynamic co-combustion experiments with low calorific raw coal and high calorific pulverized coal in a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(6): 447-451.
- [11] STEFANITSIS D, NESIADIS A, KOUTITA K, et al. Simulation of a CFB boiler integrated with a thermal energy storage system during transient operation[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 169.
- [12] 刘吉臻, 洪烽, 高明明, 等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4130-4137.
LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Research on the control strategy for quick load change of circulating fluidized bed boiler units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4130-4137.
- [13] LU J F, ZHANG J S, YUE G X, et al. Method of calculation of heat transfer coefficient of the heater in a circulating fluidized bed furnace[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7): 540-550.
- [14] LAFANECHERE L, JESTIN L. Study of a circulating fluidized bed furnace behavior in order to scale up to 600 MW[C]. Proceeding of the 3rd International Symposium on Coal Combustion, Beijing, 1995.
- [15] YUE G X, CAI R X, LU J F, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler-the review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China[J]. Powder Technology, 2017, 316: 18-28.
- [16] KE X W, MARKUS E, YANG H R, et al. Prediction and minimization of NO_x emission in a circulating fluidized bed combustor: A comprehensive mathematical model for CFB combustion[J]. Fuel, 2022, 309: 1221133.
- [17] DENG B Y, ZHOU T, ZHANG Y, et al. Hydrodynamic characteristics in the full-loop circulating fluidized bed under load regulation. Part 1: experimental investigation[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 268: 118361.
- [18] DENG B Y, ZHOU T, ZHANG Y, et al. Hydrodynamic characteristics in the full-loop circulating fluidized bed under load regulation. Part 2: simulation[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 264: 118158.
- [19] KE X W, LI Y R, JIANG L, et al. Experimental and modeling investigation on char combustion and char-nitrogen evolution characteristics under different conditions[J]. Journal of the Energy Institute, 2022, 102: 256-267.
- [20] 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 430-437.
LYU Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 430-437.

(责任编辑 邓玲惠)