

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304075

超临界 660 MW 机组直流锅炉动态特性 仿真研究

王超^{1,2}, 张宝瑞³, 刘铠瑞², 樊海龙¹, 刘斌², 全向¹,
王利民², 车得福²

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;
2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
3. 内蒙古三峡蒙能能源有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

[摘要] 为提升煤电机组灵活性, 锅炉需具备良好的可控性和适应负荷快速变化的能力。锅炉灵活性与控制系统性能密切相关, 而后者是基于动态特性设计的。为研究锅炉的动态特性, 在 Dymola 平台中建立了某超临界 660 MW 机组直流锅炉的动态模型。结果表明: 当锅炉入口参数发生扰动时, 蒸汽温度的响应时间比蒸汽流量更长; 当给水温度、给水量与燃料量分别阶跃增加 5% 时, 主蒸汽温度分别变化 10.2 °C、-28.5 °C 和 35.7 °C; 在锅炉的水煤配比调节过程中, 给水量和燃料量变化时间不同会对主蒸汽温度产生不同的影响; 当给水量比燃料量延迟约 100 s 作用时, 主蒸汽温度在瞬态过程中的最大偏差相对于二者同时变化的情况减少了 27.4 °C; 当变负荷幅度相同时, 变负荷速率越大, 主蒸汽参数的波动越剧烈, 趋于稳定所需的时间越长。

[关键词] 动态特性; 直流锅炉; 水煤比; 变负荷; 灵活性

[引用本文格式] 王超, 张宝瑞, 刘铠瑞, 等. 超临界 660 MW 机组直流锅炉动态特性仿真研究[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 124-133. WANG Chao, ZHANG Baorui, LIU Kairui, et al. Simulation on dynamic characteristics of a supercritical 660 MW once-through boiler[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 124-133.

Simulation on dynamic characteristics of a supercritical 660 MW once-through boiler

WANG Chao^{1,2}, ZHANG Baorui³, LIU Kairui², FAN Hailong¹, LIU Bin², QUAN Xiang¹,
WANG Limin², CHE Defu²

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Inner Mongolia Three Gorges Mengneng Energy Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

Abstract: To improve the flexibility of coal-fired units, boilers need to have good controllability and the ability to adapt to rapid load changes. The flexibility of the boiler is closely related to the performance of the control system, which is designed according to the dynamic characteristics of boilers. To study the dynamic characteristics of boilers, a dynamic model of a supercritical 660 MW coal-fired boiler is built in the Dymola platform. The results show that the response time of steam temperature is longer than that of steam flow. When the feedwater temperature, feedwater flow, and fuel quantity are stepped increase by 5%, the main steam temperature changes by 10.2 °C, -28.5 °C, and 35.7 °C, respectively. In the process of adjusting the water-fuel ratio of the boiler, different times of change in feedwater and fuel flow can have different effects on the main steam temperature. The maximum deviation of the main steam temperature during the transient process reduces by 27.4 °C when the feedwater flow is delayed by approximately 100 s compared with the fuel flow. When the load change amplitude is the same, the larger the load change rate, the more severe the fluctuation of the main steam parameters, and the longer it takes to stabilize.

Key words: dynamic characteristics; once-through boiler; water-fuel ratio; load variation; flexibility

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 内蒙古电力科学研究院科技项目 (ZC-2021-01)

Supported by: Science and Technology Project of Inner Mongolia Power Research Institute (ZC-2021-01)

第一作者简介: 王超 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源电力系统优化与建模等, focuswangc@163.com.

通信作者简介: 王利民 (1988), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为深度调峰背景下燃煤电站锅炉灵活性理论与技术等, liminwang@xjtu.edu.cn.

截至 2022 年底,我国燃煤发电装机占比约为 43.8%,但发电量占比仍高达 58.4%,并承担了近 70%的调峰任务^[1]。燃煤发电仍是我国电力供应的最主要电源,也是保障我国电力安全稳定供应的“压舱石”^[2-3]。因此,在当前技术条件和装机结构下,现役煤电机组的灵活性改造具有性价比高、改造周期短且效果显著等优势,是解决当下新能源消纳问题最经济可行的方案^[4-6]。

我国燃煤机组的主力为煤粉电站锅炉,2021 年煤粉电站锅炉装机容量达到 9.35 亿 kW,占煤电总装机容量的 85%^[7]。提升燃煤机组的灵活性要求锅炉具有良好的可控性、更大的负荷调节范围以及适应负荷快速变化的能力。此外,锅炉低负荷运行面临着燃烧不稳定、水动力安全性差等问题^[8]。因此,亟需充分掌握超临界锅炉的动态特性,以便开发与先进的设计策略,实现深度灵活调峰。

国内外学者对超临界直流锅炉的动态特性进行了长期研究。王志刚等^[9]针对沁北电厂超临界 600 MW 机组直流锅炉建立了数学模型,分析了单因素阶跃扰动下主要换热设备的动态特性,但建模时将炉侧模型仅简化为 2 个静态的线性化模型,精度难以保证,且研究局限于入口参数的单一扰动情况。薛朝因等^[10]在 GSE 平台中分别建立了超临界燃褐煤锅炉主要热力设备的动态仿真模型,对比了不同设备的响应时间。康英伟等^[11]建立了超超临界 660 MW 机组直流锅炉水冷壁系统的数学模型,分析了给水量、燃烧率、入口给水比焓和汽水分离器压力发生阶跃扰动时水冷壁关键参数的动态特性,但模型仅局限于水冷壁区域。雒青等^[12]建立了锅炉换热器的动态模型,研究了不同边界条件发生阶跃扰动时各受热面的动态响应特性。

目前,针对超临界锅炉动态特性的仿真研究大多仅关注于单种扰动对局部热力设备的影响,而缺乏对锅炉整体热力系统在多种扰动方式下的动态

响应特性进行全面分析和比较。为此,本文基于 Dymola 仿真平台,以某超临界 660 MW 机组直流锅炉为研究对象,通过建立该锅炉的动态仿真模型,从全热力系统的角度对直流锅炉动态特性进行详尽分析。本研究旨在全面了解超临界锅炉的动态特性,探究不同扰动下的响应规律,为锅炉的灵活运行提供参考。

1 研究对象

本文以内蒙古自治区某超临界 660 MW 机组直流锅炉为研究对象。该锅炉为单炉膛、一次中间再热、平衡通风、紧身封闭布置、固态排渣、全悬吊结构、对冲燃烧方式 II 型布置,整体结构布置如图 1 所示。屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温过热器、低温再热器、空气预热器分别简称屏过、高过、高再、低过、低再、空预器。在额定工况下,锅炉的蒸发量为 2 104.9 t/h,主蒸汽压力为 29.4 MPa,主蒸汽温度为 605 °C,再热蒸汽压力为 6.79 MPa,再热蒸汽温度为 623 °C。锅炉设计煤种的元素分析与低位发热量见表 1。

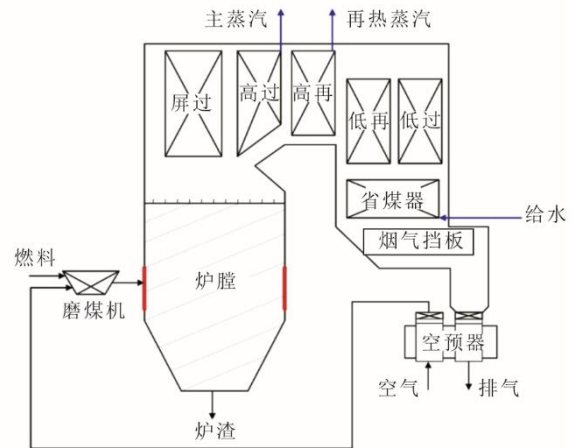


图 1 锅炉结构布置

Fig.1 Boiler structure arrangement

表 1 煤种成分及低位发热量
Tab.1 Coal quality data and LHV

$Q_{\text{net,ar}}(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{ar}}(\text{M})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{V})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{FC})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{O})_{\text{ar}}/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	$w_{\text{ar}}(\text{S})/\%$
18.52	11.40	26.04	35.84	26.72	48.63	3.27	9.07	0.84	0.75

2 动态模型建立与验证

本文的超临界 660 MW 直流锅炉的动态仿真模型主要利用 Modelica/ClaRaPlus 组件库进行建模。

2.1 数学模型

锅炉各个设备的模型均基于基本平衡方程。对

每个模块,均求解每个仿真步长的守恒方程。非稳态质量平衡:

$$\frac{d\rho}{dt}V = \sum \dot{m}_{\text{in}} - \sum \dot{m}_{\text{out}} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; V 为体积; \dot{m}_{in} 和 \dot{m}_{out} 分别为进口和出口的质量流率。

非稳态能量平衡:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{m} \left(\sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} + V \frac{dp}{dt} - hV \frac{d\rho}{dt} + \dot{Q} \right) \quad (2)$$

式中: h_{in} 和 h_{out} 分别为进口和出口的比焓; p 为压力; \dot{Q} 为热源项。

相邻炉层之间的辐射换热计算为:

$$\dot{Q} = A\sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} (T_{top}^4 - T_{out}^4) \quad (3)$$

烟气到管壁的辐射换热计算为:

$$\dot{Q}_{gas,wall} = A_{eff} \sigma \cdot \frac{\varepsilon_w}{\alpha_g + \varepsilon_w - \alpha_g \varepsilon_w} \cdot (\alpha_g T_w^4 - \varepsilon_g T_g^4) \quad (4)$$

式中: A_{eff} 为有效传热面积; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; ε_g 和 α_g 分别为气体的发射率和吸收率; ε_w 为壁面的发射率; T_g 和 T_w 分别为气体和壁面的温度。

烟气到壁面的对流换热计算为:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{eff} \alpha (T_w - T_g) \quad (5)$$

对流传热系数 α 按下式计算:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (6)$$

通过壁面的导热传热计算为:

$$\dot{Q} = -2\pi\lambda l \frac{\Delta T}{\ln \frac{d_o}{d_i}} \quad (7)$$

式中: λ 为导热系数; d_i 和 d_o 分别为管子的内径和外径; ΔT 为管壁内外温差。

管壁的金属蓄热方程为:

$$\rho_w A \delta_w c_{p,w} \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{g,w} - \dot{Q}_{w,v} \quad (8)$$

式中: ρ_w 为管壁材料密度; A 为管道横截面积; δ_w 为管壁厚度; $c_{p,w}$ 为金属比热容; T 为管壁温度; $\dot{Q}_{g,w}$ 为烟气到管壁的传热量, 即管壁金属吸热量; $\dot{Q}_{w,v}$ 为管壁到工质的传热量, 即管内工质吸热量。

管道内的湍流强制对流传热根据 Gnielinski 关联式^[13]计算:

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] \quad (9)$$

式中: l 为管长; f 为 Darcy 阻力系数, 按式(10)计算。

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (10)$$

2.2 仿真模型

采用集总参数法和分布参数法相结合的方法, 在 Dymola 平台建立了超临界 660 MW 机组直流锅炉的动态仿真模型, 具体如图 2 所示。

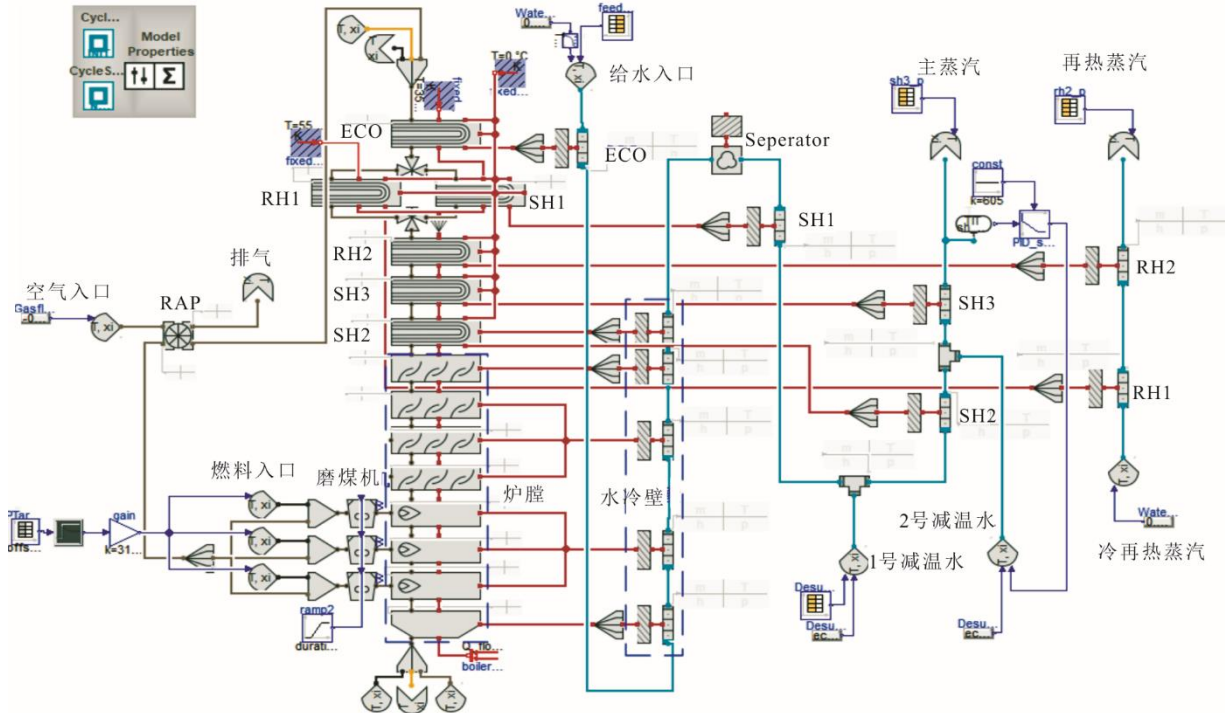


图 2 基于 Dymola 建立的超临界直流锅炉动态仿真模型

Fig.2 Dynamic simulation model of supercritical once-through boiler based on Dymola

建模时，将炉膛沿高度方向离散化，建立了一维的动态仿真模型。炉膛从下到上分别为冷灰斗区、燃烧器区和燃尽区，且每一燃烧器均布置一层磨煤机来供应风粉混合物。空预器采用分段集总参数法进行建模，水冷壁管道和换热器管道则采用分布参数法进行建模。

2.3 模型假设

为简化模型，本文做了以下基本假设：1) 将

空气均考虑为一次风，全部经由空预器加热后送入制粉系统^[4]；2) 炉内辐射换热只发生在相邻炉层之间^[5]。

2.4 模型验证

为验证锅炉动态仿真模型的准确性，将不同工况下模型的仿真结果与设计数据进行了对比，结果见表 2。由表 2 可见，该模型与所研究锅炉的关键数据相匹配，最大误差不超过±3%，满足工程实际要求。

表 2 不同工况下模型仿真值与设计值对比
Tab.2 Comparison between simulation results and design data under different working conditions

主要参数	100% BMCR			75% BMCR			50% BMCR		
	设计值	仿真值	相对误差/%	设计值	仿真值	相对误差/%	设计值	仿真值	相对误差/%
给水温度/℃	308.00	308.00	0	288.00	288.00	0	264.00	263.70	-0.110
给水压力/MPa	33.40	32.67	-2.190	24.77	24.57	-0.810	16.62	16.73	0.660
主蒸汽流量/(kg·s ⁻¹)	584.69	584.67	0.003	424.46	424.79	0.080	279.15	279.15	0
主蒸汽温度/℃	605.00	606.70	0.280	605.00	616.00	1.790	605.00	604.30	-0.120
主蒸汽压力/MPa	29.40	29.40	0	21.76	21.76	0	14.53	14.53	0
冷再热蒸汽温度/℃	382.00	382.00	0	386.00	386.00	0	393.00	392.67	0.084
冷再热蒸汽压力/MPa	6.79	6.79	0	5.06	5.06	0	3.42	3.42	0
再热蒸汽流量/(kg·s ⁻¹)	493.84	493.84	0	366.09	366.13	0.010	246.06	246.07	0.004
再热蒸汽温度/℃	623.00	617.4.00	0.900	623.00	617.00	-0.980	623.00	614.80	-1.320
再热蒸汽压力/MPa	6.61	6.61	0	4.93	4.93	0	3.33	3.33	0

3 结果与分析

3.1 单因素扰动下的动态特性

锅炉是一个多输入多输出且变量之间相互关联的被控对象，采用阶跃假设可以分别考察不同扰动对系统的影响，从而有助于设计合理的控制策略和控制器参数。因此，为研究锅炉的动态特性，本文对给水温度等入口参数采用了阶跃假设，即在 BMCR 负荷工况下，保证其他变量恒定，分别对给水温度、给水流量、给煤量与煤质施加阶跃扰动信号，观察并分析主要参数如过热蒸汽温度和主蒸汽流量的动态响应过程，评价系统的稳定性、响应速度和响应幅度等指标。

3.1.1 给水温度扰动

图 3 为给水温度阶跃+5%，即给水温度在 500 s 时刻从 308.0 °C 阶跃上升到 323.4 °C，各受热面出口工质温度和主蒸汽流量的动态响应曲线。由图 3 可知：省煤器出口温度由 345.8 °C 逐渐上升到 358.0 °C 保持稳定；分离器出口温度由 428.5 °C 先下降到 560 s 时的 425.3 °C 再逐渐升高到 437.7 °C 保持稳定；低过出口温度由 476.0 °C 先降低到 640 s 时的

470.6 °C 再逐渐升高到 492.5 °C 保持稳定；屏过出口温度由 550.6 °C 逐渐降低到 650 s 时的 540.9 °C 再逐渐升高到 572.6 °C 保持稳定；高过出口温度由 599.8 °C 先降低到 680 s 时的 589.6 °C 再逐渐升高至 622.4 °C 保持稳定；低再出口温度由 519.1 °C 逐渐上升到 521.3 °C 保持稳定；高再出口温度由 628.8 °C 逐渐升高到 633.0 °C 保持稳定。

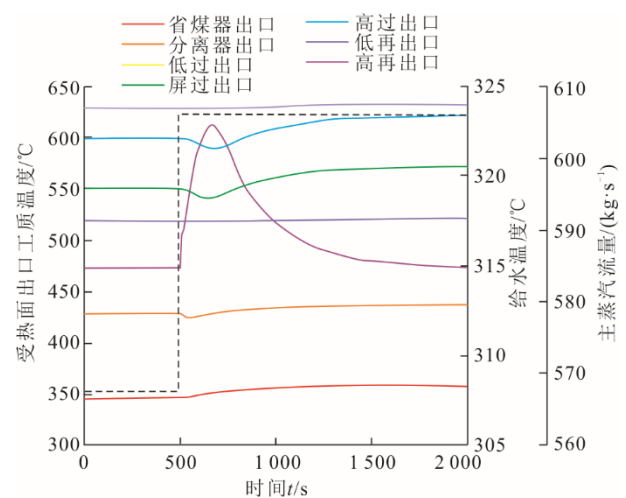


图 3 给水温度阶跃+5%时直流锅炉关键参数动态特性
Fig.3 Dynamic characteristics of key parameters of once-through boiler when feedwater temperature steps by +5%

可见,给水温度扰动时分离器、低过、屏过与高过的出口工质温度的变化规律相同,均呈现先减小后增大的趋势,且随流程向后波谷值出现地越晚,趋于稳定所需要的时间越长,主蒸汽温度响应时间约为1200s。给水温度变化对再热蒸汽温度的影响较小。这是因为在扰动的最初阶段,过热器区域的烟温基本不变,而蒸汽流量却在增大,因此过热器的换热量会减小,导致过热蒸汽温度降低。

给水温度增大会导致工质比容减小,单位质量工质所占体积增大,从而导致锅炉内部工质的贮存量减少。在相同的给水流量下,锅炉内部工质的贮存量减少会导致蒸汽产生速率加快,从而主蒸汽流量增加,最大值为604.6 kg/s(对应的时刻为660s)。但由于给水流量并未改变,最后仍将恢复到原来的边界值,整体的响应时间约为1010s。

3.1.2 给水流量扰动

图4为给水流量阶跃+5%,即给水流量在500s时刻从584.7 kg/s阶跃上升到613.9 kg/s,各受热面出口工质温度和主蒸汽流量的动态响应曲线。由图4可知:省煤器出口温度由344.7℃逐渐降低到342.1℃后保持稳定;分离器出口温度由433.0℃逐渐降低到425.8℃后保持稳定;低过出口温度由481.1℃逐渐降低到464.8℃;屏过出口温度由557.5℃逐渐降低到531.5℃后保持稳定;高过出口温度由605.1℃逐渐降低到576.6℃后保持稳定;低再出口温度由513.5℃逐渐降低到511.4℃后保持稳定;高再出口温度由622.1℃逐渐降低到617.9℃后保持稳定。

由于燃料发热量不变,给水流量阶跃增加将使得锅炉的加热段和蒸发段延长,从而导致蒸汽流量逐渐增大,直至与扰动后的给水流量相等,响应时间约为610s。

各受热面出口工质温度均呈现降低趋势,这是因为蒸汽量的增加和过热段的缩短。其中主蒸汽温度降幅最大(28.5℃),响应时间约为770s。

3.1.3 燃料量扰动

图5为燃料量阶跃+5%,即燃料量在500s时刻从310.80 t/h阶跃上升到326.34 t/h,各受热面出口工质温度和主蒸汽流量的动态响应曲线。由图5可知:省煤器出口温度由344.7℃逐渐上升到347.3℃保持稳定;分离器出口温度经历一定延迟后由433.0℃逐渐升高到445.6℃保持稳定;低过出口温度由481.1℃经历一定延迟后逐渐升高到

504.5℃保持稳定;屏过出口温度由557.5℃经历一定延迟升高591.5℃保持稳定;高过出口温度由605.1℃经历一定延迟升高至640.8℃保持稳定;低再出口温度由513.5℃经历一定延迟后逐渐升高至520.3℃保持稳定;高再出口温度由622.1℃经历一定延迟后逐渐升高到634.7℃保持稳定。

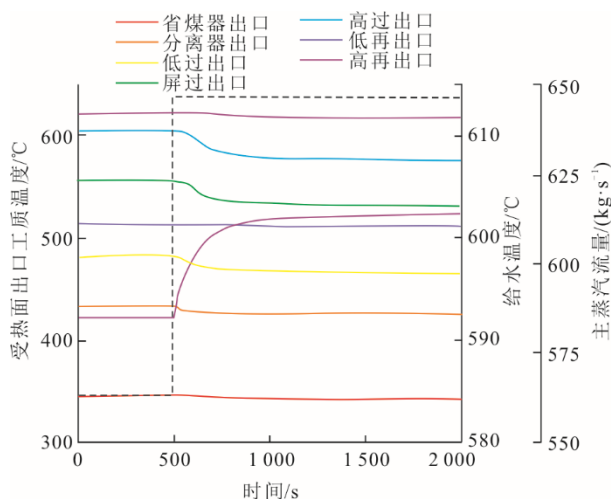


图4 给水流量阶跃+5%时直流锅炉关键参数动态特性
Fig.4 Dynamic characteristics of key parameters of once-through boiler when feedwater flow steps by +5%

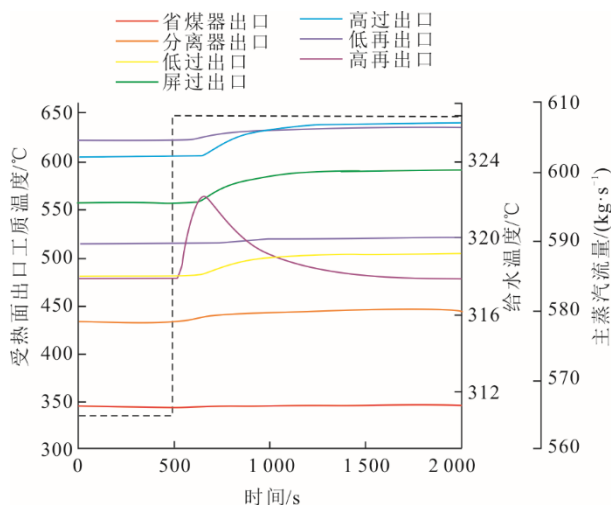


图5 燃料量+5%阶跃扰动下直流锅炉关键参数动态特性
Fig.5 Dynamic characteristics of key parameters of once-through boiler when fuel quantity steps by +5%

随着燃料量的增加,在经过一段时间的延迟后,所呈现出的是各受热面吸热量的增加,出口工质温度逐渐增大的过程,且增大的幅度各不相同,主蒸汽温度增加幅度最大,约为35.7℃。这是由于燃料量增大使得炉膛热负荷增大,而锅炉的受热面积不变,因此单位面积的吸热量增加,最终导致蒸汽温度逐渐升高。主蒸汽温度出现延迟是由于锅炉存在

较大的热惯性，内部热量传递需要一定时间，使得主蒸汽温度无法立即响应。

主蒸汽流量表现出先升高后降低的特点，这是因为燃料量增加使得受热面吸热量增加，加热段和蒸发段工质流量增大，从而导致蒸汽流量增大。过程中主蒸汽流量的最大值为 596.5 kg/s (对应的时刻为 650 s)，响应时间约为 830 s。

3.1.4 煤质扰动

受煤炭市场等因素的影响，燃煤机组不得不通过掺烧不同煤种或更换煤种来提高经济性，这就加剧了锅炉煤质波动剧烈的问题。煤质变化是影响锅炉运行性能的关键因素，其中 $w_{ar}(C)$ 和 $w_{ar}(M)$ 的变化是煤质变化中最主要的因素^[16]。因此，为了简化计算过程，我们通过模拟 $w_{ar}(C)$ 和 $w_{ar}(M)$ 的变化来代表煤质变化。以研究 $w_{ar}(C)$ 的影响为例，为避免其他变化对煤质的影响，假设其他因素之间的相对比例保持不变，如下式所示：

$$\begin{aligned} H_{ar,design} : O_{ar,design} \cdots M_{ar,design} &= \\ H_{ar,varied} : O_{ar,varied} \cdots M_{ar,varied} \end{aligned} \quad (11)$$

变化后的各组分计算为：

$$x_{varied} = \frac{1 - C_{ar,varied}}{1 - C_{ar,design}} x_{design} \quad (12)$$

式中： x 为其余组分的收到基质量分数；下标 **varied** 和 **design** 分别代表变化后和变化前的组分。

随后，对其他组分的质量分数进行归一化处理，使煤中各元素质量分数之和等于 100%。

$w_{ar}(C)$ 和 $w_{ar}(M)$ 在 250 s 发生扰动，主蒸汽温度变化趋势分别如图 6 和图 7 所示。由图 6、图 7 可知： $w_{ar}(C)$ 阶跃降低时主蒸汽温度大幅降低，流量先降低后增大； $w_{ar}(M)$ 阶跃降低时，主蒸汽温度逐渐升高，流量先增大后减小。这是因为煤种成分变化会影响燃烧过程的放热量。 $w_{ar}(C)$ 降低时燃料放热量大幅降低，受热面吸热量减小，进而导致蒸汽流量降低。同时，煤质变化还会影响到煤粉的燃烧速率，从而导致主蒸汽温度的降低。 $w_{ar}(M)$ 降低时则相反。

可见，煤质中含碳量变化对主蒸汽参数的影响最大。煤质变化时，主蒸汽温度的响应也存在延迟。

3.2 多因素扰动下的动态特性

单独改变燃料量或给水流量都会对整个过程造成显著影响，这一点尤其体现在过热蒸汽温度的剧烈变化。因此，保持给水量与燃料量的协调变化对稳定主蒸汽温度至关重要。由于燃料燃烧放热与

热量传递的迟延，燃料量扰动下的过热蒸汽温度的变化存在滞后。因此，应该是燃料量调节先动作，给水量调节动作滞后于燃料量，通过选择合适的滞后时间，就能使燃料量与给水量在完成锅炉负荷控制的同时，减小对过热蒸汽温度的影响。

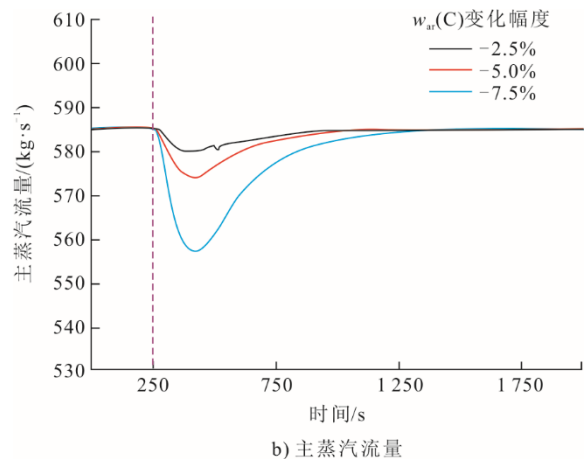
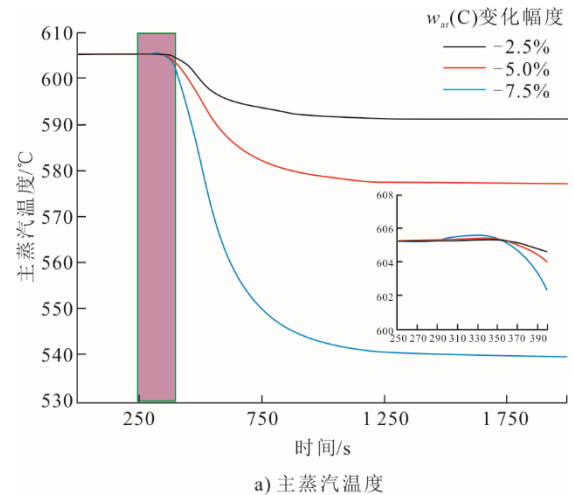
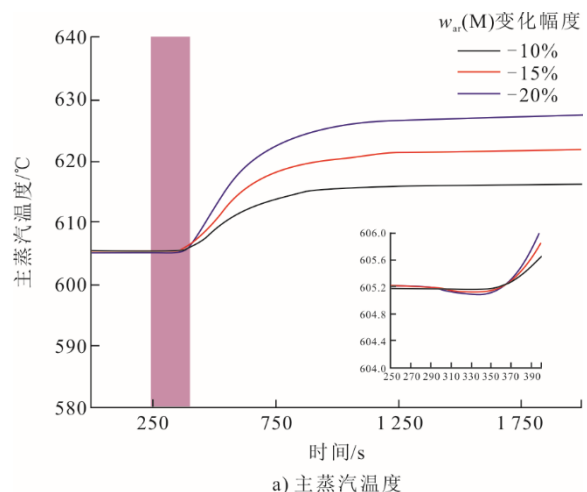


图 6 $w_{ar}(C)$ 阶跃减小时主蒸汽参数的动态特性
Fig.6 Dynamic characteristics of main steam parameters when $w_{ar}(C)$ steps by reduction



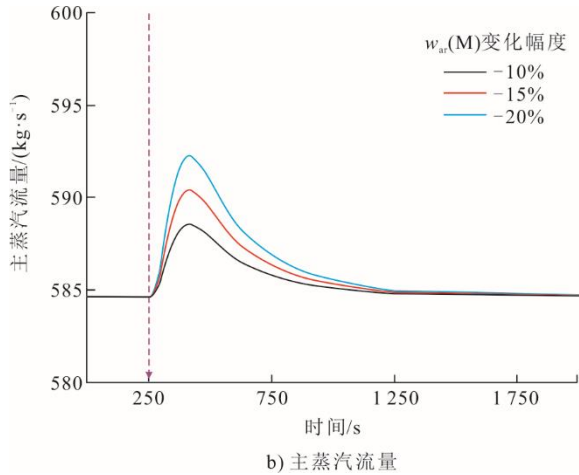


图 7 $w_{ar}(M)$ 阶跃减小时主蒸汽参数的动态特性
Fig.7 Dynamic characteristics of main steam parameters when $w_{ar}(M)$ steps by reduction

3.2.1 扰动幅度不同

图 8 为燃料量和给水量在相同时刻阶跃不同幅值情况下主蒸汽温度和流量的动态响应特性。

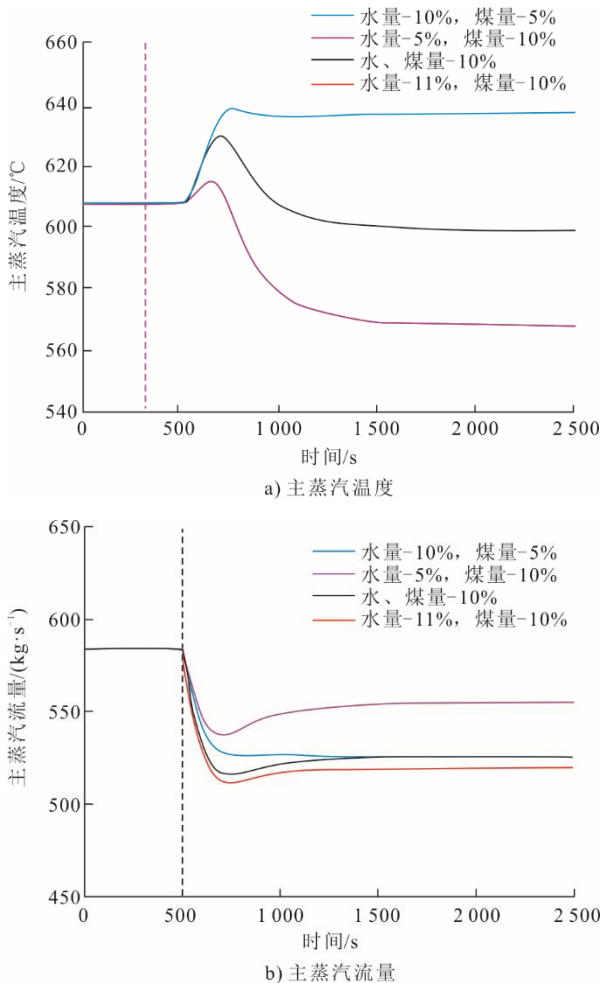


图 8 水和煤阶跃不同幅值时主蒸汽参数变化规律
Fig.8 Variation law of main steam parameters when water and fuel steps with different amplitudes

由图 8a)可以看出：主蒸汽温度呈现先升高后降低的趋势。当给水量减小幅度大于给煤量减小幅度的 5%（水量减小幅度过大）时，主蒸汽温度最终远高于目标值；当给水量减小幅度小于给煤量减小幅度 5%时，主蒸汽温度将远低于目标值；当二者减小幅度相同时，主蒸汽温度最终略低于目标值；当给水量的减小幅度大于给煤量减小幅度的 1%时，主蒸汽温度的稳态值与目标值大致相等。

根据图 8b)可知，主蒸汽流量最终的稳态值只与给水流量的变化幅度有关，而与给煤量无关，但给煤量变化幅度的不同会影响主蒸汽流量的波谷值。这是因为给煤量的变化会引起受热面吸热量的变化，进而影响蒸发量。

3.2.2 扰动时间不同

图 9 为燃料量和给水量变化时间不同的情况下主蒸汽温度和流量的动态响应特性，二者降低的幅度均为 10%。

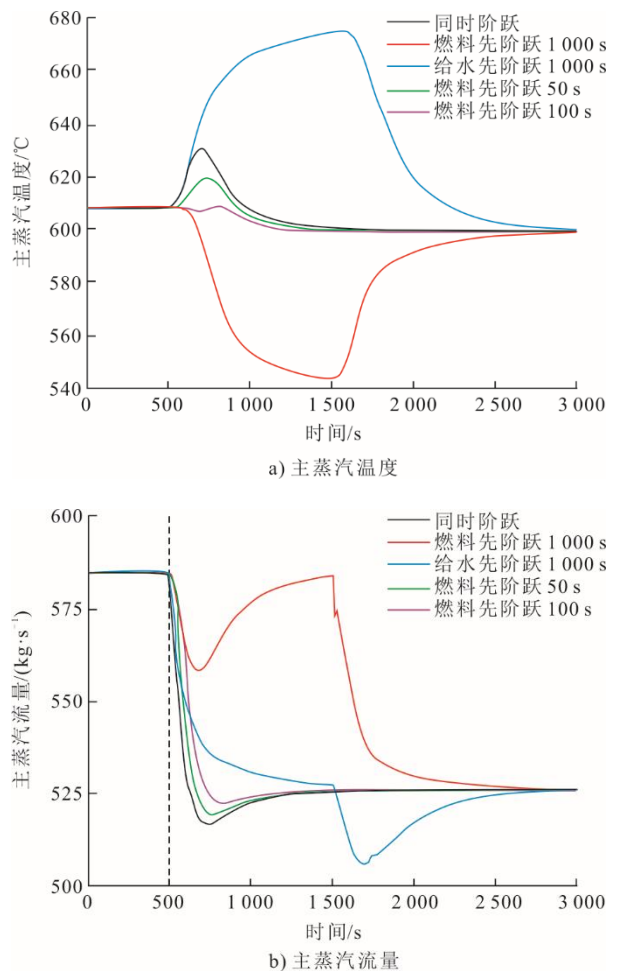


图 9 水和煤不同时刻阶跃时主蒸汽参数变化规律
Fig.9 Variation law of main steam parameters when water and fuel steps at different times

由图 9a)可以看出,当给水量比燃料量早 1 000 s 降低时,主蒸汽温度因给水流量的减小而迅速升高,在给煤量也变化后,主蒸汽温度出现一定的延迟后急剧降低。当燃料量早 1 000 s 降低时,主蒸汽温度则先减小后增加。当给煤量和给水量同时变化时,由于给水量的响应更快,主蒸汽温度会先急剧增加,达到峰值之后急剧减小,增大和减小的斜率大致相等,变化幅度较小。当燃料量比给水量提前 100 s 降低时,主蒸汽参数的变化更为平滑。

根据图 9b)可知,当给水量先变化 1 000 s 时,主蒸汽流量逐渐降低,在给煤量也降低后,主蒸汽流量先减小后增加。此时,主蒸汽流量的波谷值最低。当给煤量先降低 1 000 s 时,主蒸汽流量先减小再增加,在给水量也降低后,主蒸汽流量迅速减小。当给煤量和给水量同时降低相同的比例时,主蒸汽流量先急剧减小再缓慢增加。其中,增加的趋势是给煤量作用的结果。当燃料量比给水量延迟一定时间后降低时,主蒸汽流量的变化更平滑。由于 5 种情况下给煤量与给水量变化幅度均相同,因此最终稳态值相同。

3.3 变负荷瞬态特性

3.3.1 不同变负荷幅度

分别对锅炉在 100%~75% BMCR 和 100%~50% BMCR 负荷的运行过程进行模拟。2 个过程的降负荷速率相等,均为 2.5 %/min,即降负荷过程分别位于 250~850 s 和 250~1 450 s。主蒸汽参数的动态特性如图 10 所示。

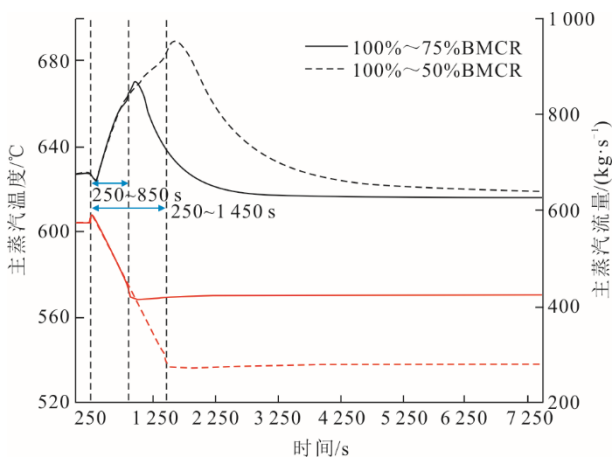


图 10 不同变负荷幅度下主蒸汽参数动态特性
Fig.10 Dynamic characteristics of main steam parameters under different load variation ranges

在降负荷过程中,由于水侧响应更迅速,导致蒸汽流量先上升,进而引起主蒸汽温度降低,但随

着蒸汽流量持续下降,主蒸汽温度也随之升高。整体上,主蒸汽温度升高是由于蒸汽流量降低,并且这一降低先于燃料响应速度,从而导致主蒸汽温度升高。因此,在降负荷过程期间,主蒸汽温度呈现先减小后增加的趋势。当负荷达到目标值后,主蒸汽温度则先增大后减小。主蒸汽流量在降负荷的起始时刻迅速增大,经过一定时间后逐渐降低。在降负荷过程结束时,主蒸汽流量经过一段时间的急剧降低过程后缓慢回升至稳定值。由于负荷降低时,给水流量会相应地减小,所以最终的结果小于初始稳态值。降负荷的幅度越大,主蒸汽温度和流量的变化幅度也会越大,主蒸汽温度在降负荷结束时刻的增大过程会越短暂。

3.3.2 不同变负荷速率

图 11 为锅炉在不同降负荷速率的情况下从 100% BMCR 降低到 75% BMCR 过程中主蒸汽温度和流量的动态响应特性。过程中变负荷速率分别为 2.0%/min、2.5%/min、3.0%/min,即变负荷过程分别位于 250~1 000 s、250~850 s 和 250~550 s。

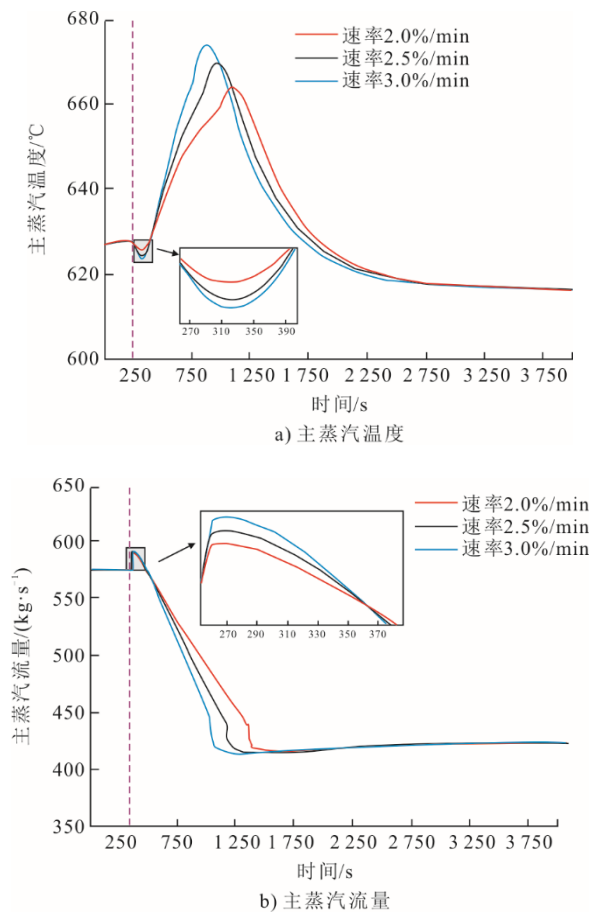


图 11 不同变负荷速率下主蒸汽参数动态特性
Fig.11 Dynamic characteristics of main steam parameters at different load variation rates

由图 11 可知,不同变负荷速率下,主蒸汽温度在瞬态过程中的最低点位于同一时刻,且该时刻为 320 s。在降低至目标负荷后,主蒸汽温度的变化率会发生变化,且呈现出先升高后减小的趋势。主蒸汽流量在降负荷过程中先迅速升高后缓慢降低,且降负荷速率越大,流量升高的幅度就越大。当负荷降至目标值时,流量的变化率先急剧降低后缓慢回升至稳定值。由于变负荷的幅度相同,因此不同降负荷速率下主蒸汽的温度和流量最终的稳定值是相等的。此外,3 种情况下主蒸汽参数达到稳定的时刻大致相等。因此可以得出结论:随着变负荷速率的提高,主蒸汽参数趋于稳定所需的时间有所延长。

当考虑燃料量与给水量响应时间的差异后,主蒸汽温度在变负荷期间的波动得到明显改善,最大温差减小了 27.4 °C,具体如图 12 所示。因此,直流锅炉的水煤比控制中需要考虑到火侧与水侧响应时间的差异。

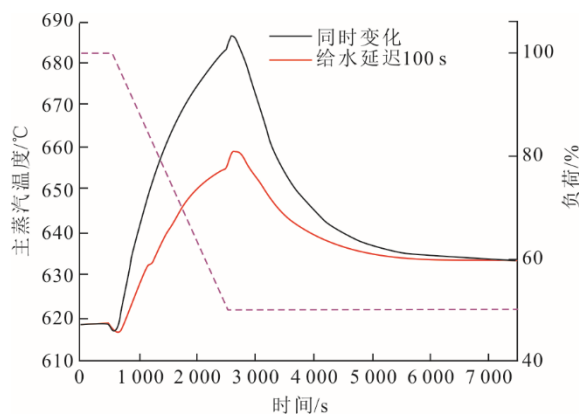


图 12 水煤配比改善前后主蒸汽温度的响应特性

Fig.12 Dynamic characteristics of main steam temperature before and after improvement of water-coal ratio

4 结 论

本文以某超临界 660 MW 机组直流锅炉为研究对象,在 Dymola 平台中建立了该锅炉的仿真模型,不同工况下该模型的仿真结果与设计值均吻合良好。在 BMCR 工况下通过单边界阶跃扰动与多边界阶跃扰动,研究了蒸汽参数的动态响应特性。通过锅炉变负荷典型动态过程的仿真研究,获得了不同变负荷幅度及不同变负荷速率下锅炉主蒸汽参数的变化规律,得出如下结论。

1) 当发生同样扰动时,蒸汽温度的响应时间大于蒸汽流量。

2) 当给水温度、给水量与燃料量均阶跃增大

5%时,主蒸汽温度分别变化 10.2、-28.5、35.7 °C。

3) 直流锅炉水煤比控制应当考虑给水量与燃料量响应时间的差异,当给水量比燃料量延迟约 100 s 作用时,主蒸汽参数在瞬态过程中的最大偏差明显减小。

4) 当变负荷速率相同时,负荷变化的幅度越大,负荷指令达到目标值后蒸汽温度趋于稳定所需要的时间越长;当负荷变化的幅度相同时,变负荷速率越快,主蒸汽参数的波动越剧烈,趋于稳定所需的时间越长。

[参 考 文 献]

- [1] 国家能源局. 煤电达峰须加强需求侧管理[EB/OL]. (2023-04-23) [2023-05-06]. http://www.nea.gov.cn/2023-04/23/c_1310713059.htm. National Energy Administration. Demand side management should be strengthened to reach the peak of coal power [EB/OL]. (2023-04-23) [2022-05-06]. http://www.nea.gov.cn/2023-04/23/c_1310713059.htm.
- [2] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394. LIU Jizhen, ZENG Deliang, TIAN Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [3] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8790. OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8772-8790.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 全国煤电机组改造升级实施方案[R/OL]. (2021-10-29)[2023-04-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/P020211103333054582799.pdf>. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The implementation plan for the transformation and upgrading of national coal power unit [R/OL]. (2021-10-29)[2023-04-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/P020211103333054582799.pdf>.
- [5] RICHTER M, OELJEKLAUS G, GÖRNER K. Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2019, 236: 607-621.
- [6] GONZALEZSALAZAR M A, KIRSTEN T, PRCHLIK L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1497-1513.
- [7] 李军, 笪耀东, 刘雪敏, 等. 我国锅炉装备绿色低碳发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 212-221. LI Jun, DA Yaodong, LIU Xuemin, et al. Green and low-carbon development path of boiler equipment in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 212-221.
- [8] 周科, 何敏强, 牛田田, 等. 超临界 660 MW 褐煤锅炉

- 深度调峰负荷水力特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 88-95.
- ZHOU Ke, HE Minqiang, NIU Tiantian, et al. Research on hydrodynamic characteristics at deep peak load regulation of 660 MW supercritical lignite boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 88-95.
- [9] 王志刚, 雷兆团, 张广才. 超临界 600 MW 机组直流锅炉动态特性研究[J]. 热力发电, 2010, 39(9): 14-20.
- WANG Zhigang, LEI Zhaotuan, ZHANG Guangcai. Study on dynamic behavior of once-through boiler equipped for supercritical 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(9): 14-20.
- [10] 薛朝囡, 翟梦旭, 严俊杰, 等. 超临界燃褐煤锅炉热力设备动态特性研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 37-43.
- XUE Zhaonan, ZHAI Mengxu, YAN Junjie, et al. Dynamic characteristics of thermal components in lignite-fired supercritical boiler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 37-43.
- [11] 康英伟, 李月, 郑鹏远, 等. 660 MW 超超临界直流锅炉水冷壁系统动态特性仿真[J]. 热能动力工程, 2018, 33(10): 52-59.
- KANG Yingwei, LI Yue, ZHENG Pengyuan, et al. Dynamic characteristics simulation the water-cooled wall system of a 660 MW ultra-supercritical once-through boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(10): 52-59.
- [12] 雒青, 王伟, 范庆伟, 等. 火电机组快速变负荷的锅炉动态响应分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 78-84.
- LUO Qing, WANG Wei, FAN Qingwei, et al. Study on the dynamic characteristics of boiler during fast load regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 78-84.
- [13] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows[J]. International Chemical Engineering, 1976, 16(2): 359-368.
- [14] 冯福媛, 郑淇薇, 陈衡, 等. 深度调峰背景下火电机组变负荷过程蒸汽参数反馈特性研究[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 59-64.
- FENG Fuyuan, ZHENG Qiwei, CHEN Heng, et al. Feedback characteristics of steam parameters during load variation in thermal power units in the context of deep peaking[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 59-64.
- [15] 王际洲. 燃煤发电机组热力系统机理模型及非设计工况运行特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 1.
- WANG Jizhou. Researches on thermal system mechanism modelling and off-design operating performance of a coal-fired generation units[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1.
- [16] YIN J, LIU M, ZHAO Y, et al. Dynamic performance and control strategy modification for coal-fired power unit under coal quality variation[J]. Energy, 2021, 223: 120077.

(责任编辑 邓玲惠)