DOI: 10.19666/j.rlfd.202506007

660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉动态特性

乔永强[1,2]，严俊杰[3]，刘　明[3]，李红智[1,2]，王朝阳[3]，赵永亮[3]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西　西安　710054；
2. 高效灵活煤电及碳捕集利用全国重点实验室，陕西　西安　710054；
3. 西安交通大学能源与动力工程学院，陕西　西安　710049）

［摘　　要］以某 660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉为研究对象，基于 GSE 软件建立了二次再热锅炉动态仿真模型，详细计算了 100%THA 工况下煤量、给水流量、给水温度以及过量空气系数扰动后主蒸汽、一次再热蒸汽和二次再热蒸汽参数变化过程，并对比了 100%THA、75%THA、50%THA 工况下锅炉蒸汽温度的变化规律。结果表明：给水温度扰动后锅炉出口蒸汽参数的响应最慢，100%THA 工况下稳定时间约 2 300 s；过量空气系数扰动后响应最快，稳定时间约 720 s；煤量和给水流量则介于前两者之间，稳定时间分别约为 1 040 s 和 1 250 s；在煤量、过量空气系数、给水温度扰动后的初始阶段，锅炉出口蒸汽温度会出现短时“反向”变化；此外，二次再热锅炉的热惯性会随着负荷降低而增大。仿真计算的二次再热尾部三烟道燃煤锅炉动态特性，可为进一步优化机组运行控制策略提供依据。

［关　键　词］二次再热；超超临界；燃煤锅炉；动态特性；边界条件

［引用本文格式］乔永强，严俊杰，刘明，等. 660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉动态特性[J]. 热力发电，2026，55(3)：6-18.　QIAO Yongqiang, YAN Junjie, LIU Ming, et al. Dynamic characteristics of a 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 6-18.

Dynamic characteristics of a 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes

QIAO Yongqiang[1,2], YAN Junjie[3], LIU Ming[3], LI Hongzhi[1,2], WANG Chaoyang[3], ZHAO Yongliang[3]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. National Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Xi'an 710054, China;
3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The ultra-supercritical double-reheat power generation technology has become an important development direction of thermal power generation technology due to its high efficiency and low emissions. A dynamic simulation model of the double-reheat boiler was established by the GSE software based on a 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes. The variation laws of the main, primary, and secondary reheat steam parameters after disturbance by coal flow rate, feed-water flow rate, feed-water temperature and excess air coefficient under 100%THA working condition were calculated in detail. Moreover, the variation laws of steam temperature at the boiler outlet under the working conditions of 100%THA, 75%THA and 50%THA were compared. The simulation results show that the response of steam parameters at the boiler outlet is the slowest after feed-water temperature is disturbed, and the stability time is approximately 2 300 s under 100%THA working condition. The response of steam parameters at the boiler outlet is the fastest after excess air coefficient is disturbed, and the stability time is approximately 720 s. The stability times of the steam parameters at the boiler outlet are

收 稿 日 期：2025-06-05　修 回 日 期：2025-09-11　接 受 日 期：2025-09-18
基 金 项 目：陕西省重点研发计划项目资助（2023GXLH-002）
Supported by：Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2023GXLH-002)
第一作者简介：乔永强（1992），男，硕士，工程师，主要研究方向为二次再热燃煤机组再热汽温控制优化和超临界二氧化碳循环发电系统动态仿真，qiaoyongqiang@tpri.com.cn。

approximately 1 040 s and 1 250 s respectively after coal flow rate and feed-water flow rate are disturbed. In the initial stages of transient processes after coal flow rate, excess air coefficient and feed-water temperature are disturbed, there are short-term “reverse” changes in the steam temperature at the boiler outlet. In addition, the thermal inertia of the double-reheat boiler will increase as the boiler load decreases. The simulated dynamic characteristics of the double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes can provide the basis for further optimization of the unit operation control strategies.
Key words: double-reheat; ultra-supercritical; coal-fired boiler; dynamic characteristics; boundary condition

在“双碳”目标的战略引领下，燃煤发电正从电量主体性电源向基础支撑性、系统调节性电源转型升级[1-2]，二次再热超超临界燃煤机组参与深度调峰调频等成为运行常态，亟需开展机组运行控制策略调整与优化，以提高二次再热机组运行灵活性。

开展燃煤机组特别是燃煤锅炉动态特性研究[3]，对于提高机组运行灵活性具有重要意义。早期的燃煤机组动态特性研究主要集中于亚临界机组和超（超）临界一次再热机组。在亚临界汽包炉方面，学者们获得了汽包炉汽水参数变化规律，发现汽包会出现虚假水位现象。在超（超）临界直流炉方面，学者们主要开展了直流锅炉水冷壁建模和锅炉受热面热惯性研究。其中，黄锦涛等[4]建立了两相受热管动态模型，对 600 MW 超临界直流锅炉水冷壁在 3 种典型工况下的动态特性进行了计算和分析。王志刚等[5]建立了 600 MW 超临界直流锅炉的动态数学模型，对给水温度、给水流量、燃料量、减温喷水量阶跃扰动下的锅炉出口蒸汽参数动态响应特性进行了分析。薛朝囡等[6]基于 GSE 软件建立了 600 MW 超临界燃褐煤锅炉的动态仿真模型，研究发现省煤器、回转式空预器以及制粉系统的动态响应时间最长，其次是水冷壁、过热器和再热器，泵与风机的动态时间很短。雒青等[7]建立了烟气−金属−蒸汽换热器动态换热模型，研究发现省煤器对扰动的响应最慢，而高温受热面对扰动的响应最快。王超等[8]基于 Dymola 软件建立了 660 MW 超临界机组直流锅炉的动态模型，开展了给水温度、给水流量以及燃料量扰动分析，发现蒸汽温度的响应比蒸汽流量慢，当给水流量比燃料量延迟约 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。

近年来，随着高参数大容量二次再热燃煤机组的建设投运，为了确保新建机组安全稳定运行，研究人员重点对二次再热燃煤锅炉蒸汽温度的动态特性进行了研究。蔡宝玲等[9]基于 APROS 软件开发了超超临界二次再热机组仿真系统，并开展了风、煤、给水以及再循环烟气量、燃烧器摆角、烟气挡板等动态特性实验，验证了二次再热机组的运行控制技术。WANG 等人[10]基于 GSE 软件建立了 600 MW 超超临界二次再热塔式锅炉动态模型，并在 THA 工况下进行了煤、给水量、给水温度扰动下动态特性分析。叶青等[11]基于超超临界二次再热锅炉仿真模型，开展了 75%额定负荷下烟气挡板扰动时锅炉主、再热汽温动态特性分析。

总体来看，相比超（超）临界一次再热燃煤锅炉，二次再热超超临界锅炉具有更大的热惯性和迟延以及强烈的非线性特征[12]，且蒸汽温度、压力及流量存在多因素耦合作用，因此，有必要系统深入地开展超超临界二次再热燃煤锅炉动态特性研究。本文以某 660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉为研究对象，利用 GSE 软件建立了二次再热锅炉动态仿真模型，基于动态仿真模型详细研究了二次再热燃煤锅炉的动态特性，为进一步优化机组运行控制策略提供依据。

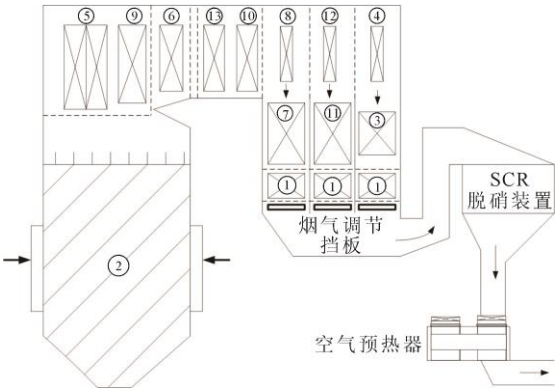
1 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉仿真模型

1.1 锅炉参数

本文研究对象为某 660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉，该锅炉额定蒸汽参数为 31 MPa/605 ℃/623 ℃/623 ℃，采用二次中间再热、超超临界压力、变压运行的直流锅炉；锅炉整体呈全悬吊结构、单炉膛、Π型、紧身密封布置，燃烧器为前后墙对冲燃烧，尾部烟道采用三烟道结构，锅炉受热面布置如图 1 所示。

该锅炉的汽水流程为给水经过省煤器、螺旋管圈水冷壁和垂直管屏水冷壁加热后，引入启动分离器；从启动分离器出来的蒸汽依次经过低温过热器、屏式过热器和高温过热器吸热升温，高温过热器出来的主蒸汽进入汽轮机超高压缸膨胀做功，然后再依次流过一次低温再热器、一次中温再热器和一次高温再热器吸热升温；升温后的一次再热蒸汽进入汽轮机高压缸膨胀做功，然后再依次流过二次

低温再热器和二次高温再热器吸热升温，升温后的二次再热蒸汽进入汽轮机中低压缸膨胀做功。主蒸汽流程设有 2 级喷水减温装置，分别位于低温过热器出口和屏式过热器出口，减温水来自省煤器出口；两级再热蒸汽流程各设有 1 级喷水减温，分别位于一次中温再热器出口和二次低温再热器出口，再热器减温水来自给水泵中间抽头。该锅炉设计煤种为烟煤，煤质参数见表 1。



1—省煤器；2—水冷壁；3—低温过热器水平段；4—低温过热器竖直段；5—屏式过热器；6—高温过热器；7—一次低温再热器水平段；8—一次低温再热器竖直段；9—一次中温再热器；10—一次高温再热器；11—二次低温再热器水平段；12—二次低温再热器竖直段；13—二次高温再热器。

图 1 二次再热尾部三烟道燃煤锅炉受热面布置示意
Fig.1 Schematic diagram of heating surfaces arrangement for the double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes

表 1 煤质参数
Tab.1 Coal quality parameters

项目	数值	项目	数值
收到基全水分 w_{ar}(M)/%	8.25	收到基碳 w_{ar}(C)/%	54.80
收到基灰分 w_{ar}(A)/%	24.30	收到基氢 w_{ar}(H)/%	3.88
挥发分 w_{daf}(V)/%	38.64	收到基氧 w_{ar}(O)/%	7.16
空气干燥基水分 w_{ad}(M)/%	2.20	收到基氮 w_{ar}(N)/%	0.91
收到基低温发热量 $Q_{net,ar}$/(kJ kg^{-1})	21 430	收到基全硫 w_{ar}(S)/%	0.70

1.2 锅炉模型

由图 1 可知，二次再热尾部三烟道锅炉受热面多、结构复杂，直接看成整体来分析建模难度较大，需要对该锅炉进行模块划分。本文将锅炉模型分为汽水与烟风系统模型、炉膛燃烧与换热模型和回转式空气预热器模型。汽水与烟风系统模型采用 GSE 仿真平台的高精度两相流仿真软件 Jtopmeret 进行图形化建模。Jtopmeret 软件中使用两相流 6 方程模型，即在不同的相中，分别有质量、能量、动量的守恒方程，主要计算公式如下。

质量守恒方程：

$$A\frac{\partial(\alpha\rho)_{\mathrm{f}}}{\partial\tau}+\frac{\partial F_{\mathrm{f}}}{\partial z}=\frac{\partial \Gamma_{\mathrm{f}}}{\partial z}+\sum\frac{\partial S_{\mathrm{f}}}{\partial z} \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial F_{\mathrm{f}}}{\partial\tau}=-\frac{\alpha_{\mathrm{f}}A}{K_{\mu}}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+f_{\mathrm{f\text{-}w}}+f_{\mathrm{f-f}}+K_{\mu}\rho_{\mathrm{f}}g-\delta p_{\mathrm{pump}}\right)+\sum\delta S_{\mathrm{f}}v_{\mathrm{src}} \tag{2}$$

能量守恒方程：

$$A\frac{\partial(\alpha\rho h)_{\mathrm{f}}}{\partial\tau}+\frac{\partial(Fh)_{\mathrm{f}}}{\partial z}=A(\Gamma_{\mathrm{f}}h_{\mathrm{sat}}+Q-W)+\sum\delta S_{\mathrm{f}}h_{\mathrm{src}} \tag{3}$$

式中：τ为时间，s；z 为流体流动方向坐标，m；A 为节点的通流面积，m^2；α_{f} 为流体的份额，%；ρ_{f} 为流体的密度，kg/m^3；F_{f} 为流体的质量流量，kg/s；S_{f} 为源项流体的质量流量，kg/s；Γ_{f} 为汽液相变引起的质量流量，kg/s；K_{μ}为单位转换常数；p 为节点压力，MPa；$f_{\mathrm{f\text{-}w}}$ 为壁面对流体的摩擦系数；$f_{\mathrm{f\text{-}f}}$ 为流体之间的摩擦系数；g 为流体的重力加速度，m/s^2；δ 为单位长度的源流体，m^{-1}；δp_{pump} 为单位长度流体经过泵的压差，MPa/m；v_{src} 为源项流体的流速，m/s；h_{f} 为流体焓值，kJ/kg；h_{sat} 为饱和流体（气体或者液体）的焓值，kJ/kg；Q 为输入流体的热量，包括换热板的传热量、外部热源的传热量和流体另一相的传热量，kJ/s；W 为系统对外的技术功，kJ/s；h_{src} 为源项流体带入的焓值，kJ/s。

炉膛燃烧与辐射换热模型采用苏联 1973 年锅炉热力计算标准中炉内传热计算零维模型，认为炉膛内压力为微负压且保持不变，燃料在炉膛内瞬间完成燃烧，且放出所有化学热。

回转式空气预热器随着空气预热器转子的旋转，蓄热板传热元件依次连续经过烟气与空气的流道，重复被烟气加热和被空气冷却。其换热过程是一个非稳态的周期变化过程，且漏风较大，建立动态模型复杂也不精确，因此回转式空气预热器模型采用热力计算方法进行建模。本文研究的二次再热尾部三烟道锅炉采用四分仓回转式空气预热器，其结构如图 2 所示。

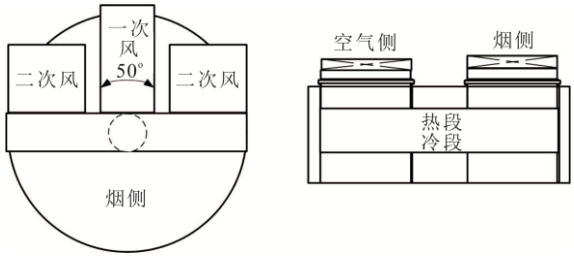


图 2 四分仓回转式空气预热器结构示意
Fig.2 Structural diagram of the rotary air preheater with four sub-chambers

炉膛燃烧与换热模型和回转式空气预热器模

型采用 Fortran 语言编程建模。当所有模块分析、建模完成，将模型耦合成一个整体，最终建立超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉仿真模型，具体如图 3 所示。本文模型详细的建模方法以及模型验证与文献[13]中相同。基于二次再热尾部三烟道燃煤锅炉动态模型，通过仿真计算获得 100%THA 工况、75%THA 工况、50%THA 工况、30%THA 工况下锅炉主要热力参数，具体见表 2。

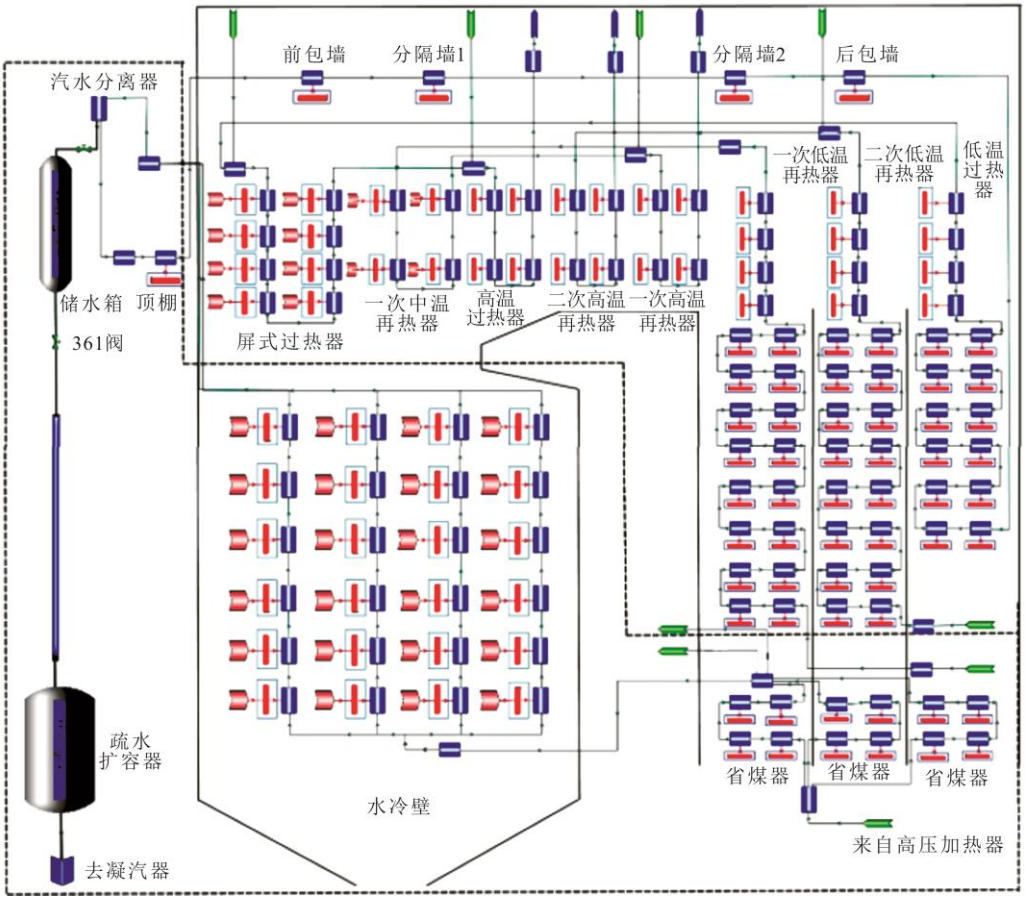


图 3　二次再热尾部三烟道燃煤锅炉仿真模型

Fig.3 Simulation model of the double-reheat coal-fired boiler with triple-rear passes

表 2　不同工况下二次再热锅炉主要热力参数仿真值和设计值

Tab.2 Simulated and design values of main thermodynamic parameters of the double-reheat boiler under different working conditions

主要热力参数	100%THA		75%THA		50%THA		30%THA	
	仿真值	设计值	仿真值	设计值	仿真值	设计值	仿真值	设计值
主蒸汽流量/(kg s^{-1})	454.7	461.0	336.3	341.0	219.3	222.3	135.4	137.9
主蒸汽压力/MPa	31.110	31.200	23.400	23.450	15.270	15.570	9.860	10.270
主蒸汽温度/℃	605.2	605.0	604.8	605.0	604.9	605.0	604.8	605.0
一次再热蒸汽流量/(kg s^{-1})	423.5	423.5	307.7	307.7	204.1	204.1	130.2	128.2
一次再热蒸汽压力/MPa	9.720	10.130	7.460	7.460	4.840	4.990	2.810	3.080
一次再热蒸汽温度/℃	623.1	623.0	622.9	623.0	621.8	623.0	597.6	593.0
二次再热蒸汽流量/(kg s^{-1})	364.3	364.3	269.5	269.5	181.8	181.8	115.9	115.9
二次再热蒸汽压力/MPa	3.060	3.070	2.250	2.290	1.370	1.550	0.670	0.930
二次再热蒸汽温度/℃	622.9	623.0	622.7	623.0	622.4	623.0	583.3	583.0

2 二次再热尾部三烟道燃煤锅炉动态特性

在二次再热机组调峰运行过程中，给水流量、煤量、风量频繁波动，且可能出现高压加热器切除引起给水温度下降等，这些对锅炉的汽水参数有很大影响。基于二次再热锅炉动态模型，将上述变量视作锅炉的边界条件，选取稳态 100%THA 工况，

进行边界条件阶跃扰动试验，分析锅炉出口蒸汽参数的动态响应规律，同时对比不同负荷下边界条件阶跃扰动后锅炉蒸汽温度动态特性的变化规律。

2.1 煤量阶跃扰动

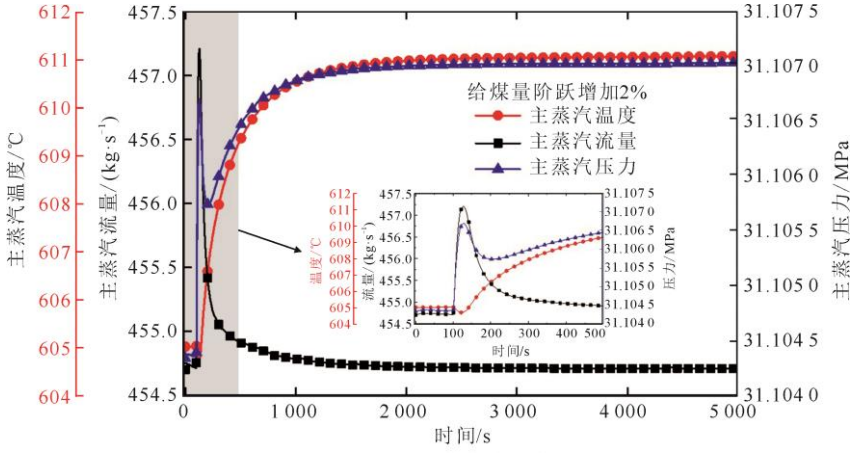
1）100%THA 工况煤量阶跃扰动

在稳态运行第 100 s 时，煤量阶跃增加 2%，由 64.32 kg/s 增加到 65.61 kg/s，主蒸汽参数、一次再热蒸汽参数和二次再热蒸汽参数的动态变化规律如图 4 所示。

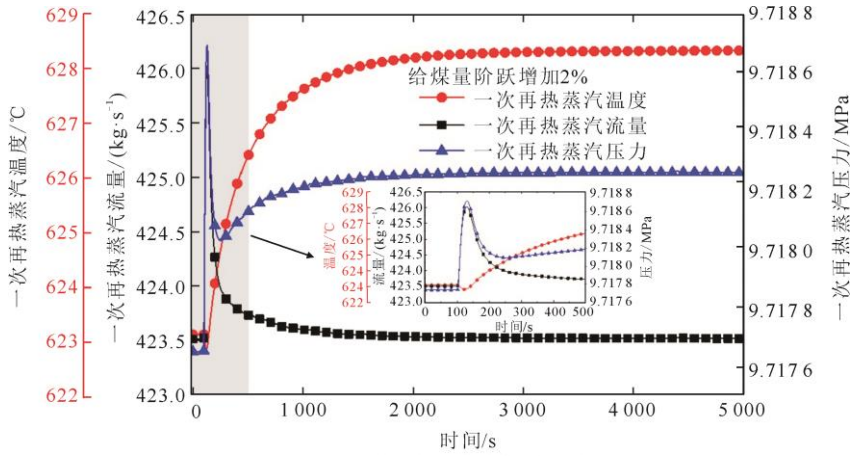
由图 4a)可知：在煤量阶跃增加 2%后，主蒸汽温度由初始值 605.2 ℃先迅速下降，然后上升，在约 1 040 s 后趋于稳定，最终稳定值为 611.7 ℃；主蒸汽流量由初始值 454.72 kg/s 先迅速上升，然后下降，最终稳定值与初始值基本相等；主蒸汽压力由初始值 31.104 5 MPa 先迅速上升，然后下降，接着上升，最终稳定值高于初始值。由图 4b)和图 4c)可知，一、二次再热蒸汽参数的变化规律与主蒸汽参数相似，但一、二次再热蒸汽温度的稳定时间相比主蒸汽温度更长，分别约为 1 200 s 和 1 260 s。

煤量阶跃增加后导致蒸汽温度升高，但在过渡过程的初始阶段，燃烧热负荷的突然增大引起蒸汽流量突然上升，这导致主蒸汽和两级再热蒸汽温度在初始阶段出现短暂下降。同时，煤量增加会引起蒸汽压力升高，但在过渡过程的初始阶段，蒸汽流量的瞬间增大导致蒸汽压力出现瞬时升高，随后蒸汽流量回落使得压力短暂降低，最终由于蒸汽温度升高带动蒸汽压力再次升高。

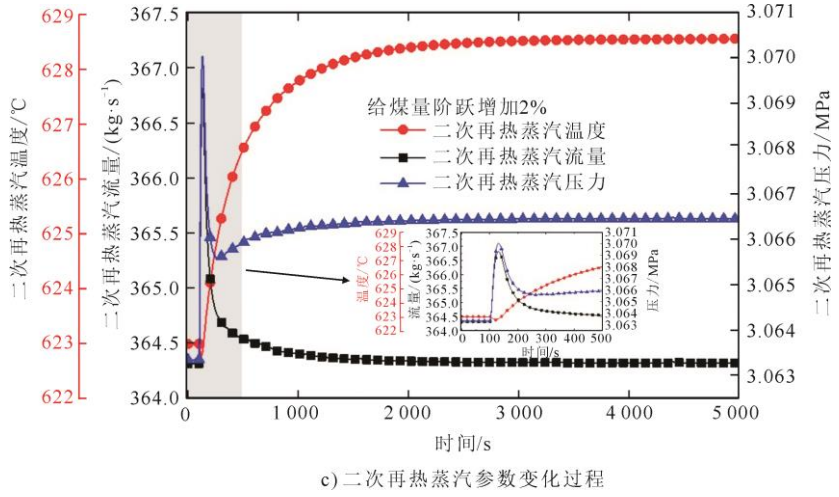
与一次再热机组相比，煤量扰动后，二次再热锅炉出口蒸汽流量的动态响应与一次再热锅炉蒸汽流量的动态响应[13]相似，但两者蒸汽温度和蒸汽压力动态响应存在较大差异，二次再热锅炉的蒸汽温度在初始阶段出现了短时“反向”变化，二次再热锅炉的蒸汽压力变化更加复杂，呈现强烈的非线性特征；且二次再热锅炉由于汽水流程较长，受热面更多，动态响应的稳定时间相比一次再热锅炉更长。



a) 主蒸汽参数变化过程



b) 一次再热蒸汽参数变化过程



c) 二次再热蒸汽参数变化过程

图 4 100%THA 工况煤量阶跃增加 2%后的蒸汽参数变化

Fig.4 Changes of steam parameters after a step increase of 2% in coal quantity under 100% THA operating condition

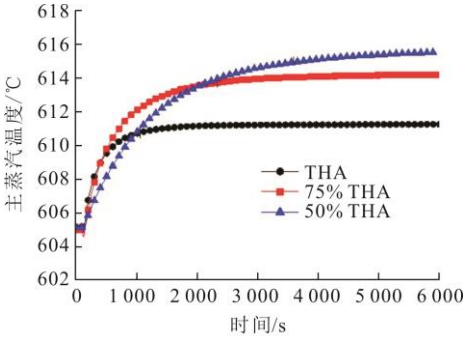
2）不同负荷下煤量阶跃扰动比较

在 100%THA、75%THA、50%THA 工况下，稳态运行第 100 s 时，煤量阶跃增加 2%，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的动态变化过程、稳定时间及最大变化幅度分别如图 5 和表 3 所示。其中，稳定时间为动态过程结束时刻减去动态过程初始时刻，本文认为温度实时值与最终稳定值之差的绝对值小于 0.5 ℃时，动态过程结束；最大变化幅度为动态过程温度实时值与初始值之差的最大值。由图 5 可知，不同负荷下煤量阶跃增加后，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度变化趋势基本一致，均为先短暂下降，然后不断升高并稳定。由表 3 可知，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度在不同负荷下的变化量不同，且随着锅炉负荷降低，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的稳定时间变长，热惯性变大。这是因为随着负荷降低，蒸汽压力降低，蒸汽从超临界状态变为亚临界状态，汽水流程从没有蒸发段变为有蒸发段，导致锅炉稳定时间变长，热惯性变大。

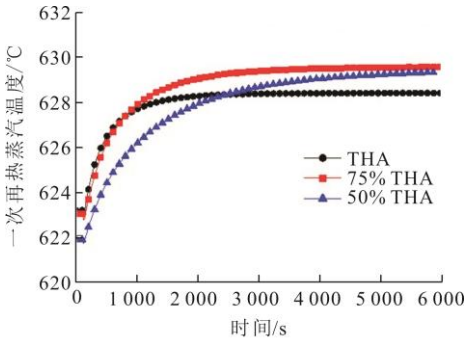
2.2 过量空气系数阶跃扰动

1）100%THA 工况过量空气系数阶跃扰动

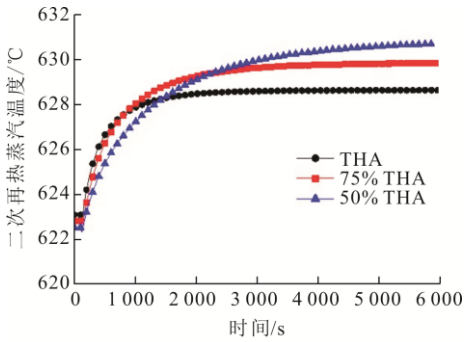
在稳态运行第 100 s 时，过量空气系数阶跃增加 2%，由 1.113 0 增加到 1.135 3，主蒸汽参数、一次再热蒸汽参数和二次再热蒸汽参数的动态变化规律如图 6 所示。由图 6a)可知：在过量空气系数阶跃增加 2%后，主蒸汽温度由初始值 605.2 ℃先迅速上升，然后下降，在 720 s 后趋于稳定，最终稳定值为 600.5 ℃；主蒸汽流量由初始值 454.72 kg/s 先迅速下降，然后上升，最终稳定值与初始值基本相等；主蒸汽压力由初始值 31.104 5 MPa 先迅速下降，然后上升，接着再下降，最终稳定值低于初始值。



a) 主蒸汽温度的动态变化



b) 一次再热蒸汽温度的动态变化



c) 二次再热蒸汽温度的动态变化

图 5 不同负荷下煤量阶跃增加 2%后的蒸汽温度变化

Fig.5 Changes of steam temperature after a step increase of 2% in coal flow rate at different unit loads

表 3 不同负荷下煤量阶跃增加 2%后蒸汽温度的稳定时间和最大变化幅度

Tab.3 The stability time and maximum change amplitude of steam temperature after a step increase of 2% in coal flow rate at different unit loads

工况	主蒸汽温度		一次再热蒸汽温度		二次再热蒸汽温度	
	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃
100%THA	1 042	+6.1	1 204	+5.2	1 265	+5.6
75%THA	2 259	+9.2	2 023	+6.5	2 145	+7.0
50%THA	3 726	+10.3	3 284	+7.4	3 484	+8.2

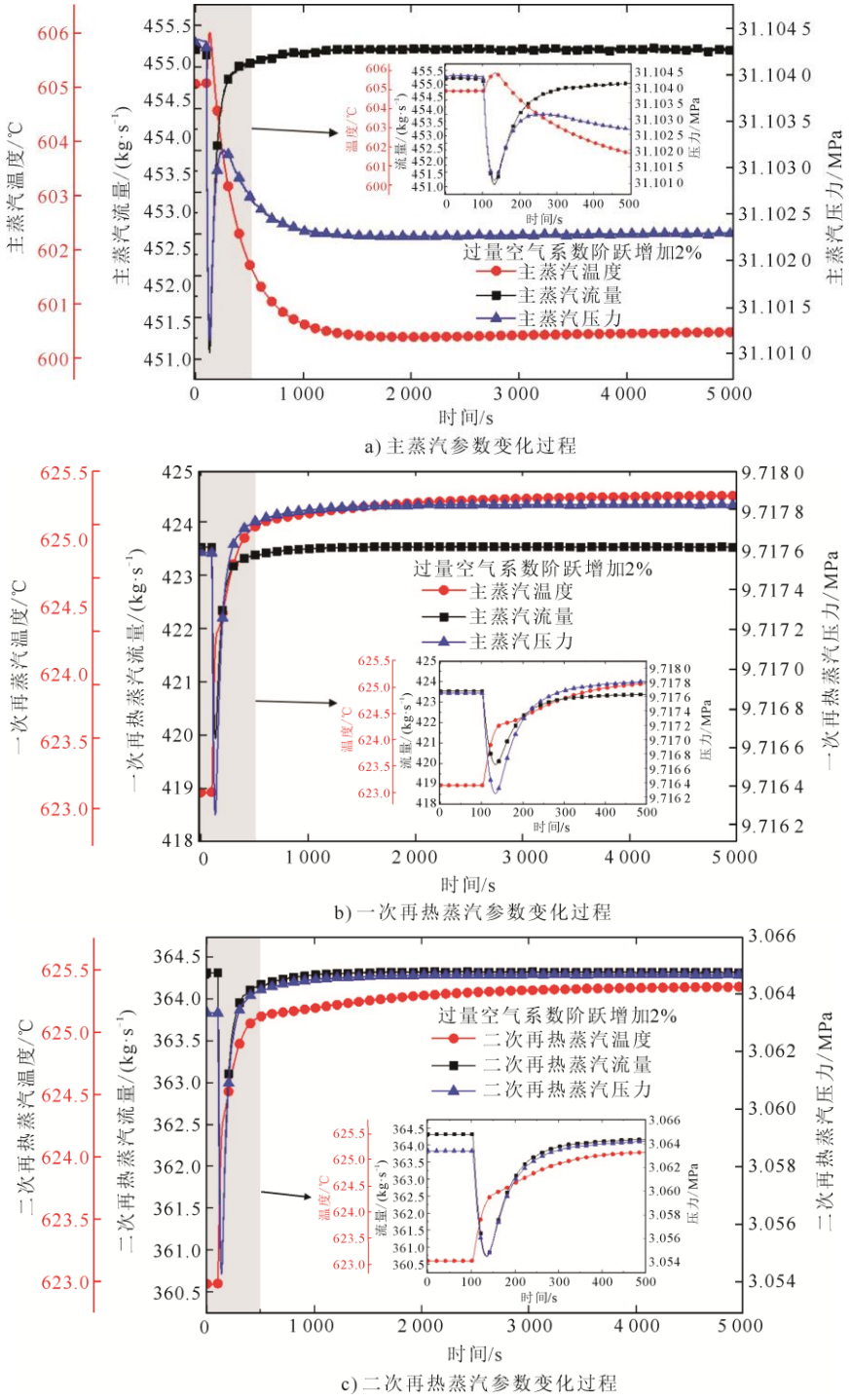


图 6 100%THA 工况过量空气系数阶跃增加 2%的蒸汽参数变化

Fig.6 Changes of steam parameters when the excess air coefficient undergoes a step-increase of 2% under 100%THA operating condition

由图 6b)可知，在过量空气系数阶跃增加 2%后，一次再热蒸汽温度由初始值 623.1 ℃上升，在 310 s 后趋于稳定，最终稳定值为 625.3 ℃；一次再热蒸汽流量由初始值 423.51 kg/s 先迅速下降，然后上升，最终稳定值与初始值基本相等；一次再热蒸汽压力由初始值 9.717 7 MPa 先迅速下降，然后上升，最终稳定值高于初始值。由图 6c)可知，二次再热蒸汽参数与一次再热蒸汽参数变化规律相似。

在过量空气系数阶跃增加后，锅炉内对流换热增强，辐射换热减弱，主蒸汽流程大部分受辐射换热，因此主蒸汽温度和压力下降。但在过渡过程的初始阶段，由于辐射换热减弱引起主蒸汽流量突然下降，主蒸汽温度出现短暂上升，主蒸汽压力迅速下降，随着主蒸汽流量回升，主蒸汽压力短暂上升，随后继续下降。

在过量空气系数阶跃增加后，锅炉内对流换热增强，再热蒸汽流程主要受对流换热，因此再热蒸汽温度和压力上升。在过渡过程的初始阶段，再热蒸汽流量随着主蒸汽流量突降而减少，再热蒸汽压力出现短暂下降。

2）不同负荷下过量空气系数阶跃扰动比较

在 100%THA、75%THA、50%THA 工况下，稳态运行第 100 s 时，过量空气系数阶跃增加 2%，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的动态变化过程、稳定时间及最大变化幅度分别如图 7 和表 4 所示。

由图 7 可知：不同负荷下过量空气系数阶跃增加后，主蒸汽温度变化趋势一致，先短暂上升，然后下降并稳定；但两级再热蒸汽温度动态响应曲线在负荷降低时出现峰值，曲线呈现先上升后下降，且负荷越低，此趋势越明显。由表 4 可知，过量空气系数增加后，主蒸汽温度降低，两级再热蒸汽温度升高，但蒸汽温度变化幅度对负荷不敏感；随着锅炉负荷降低，主蒸汽和两级再热蒸汽温度的稳定时间变长，热惯性变大。

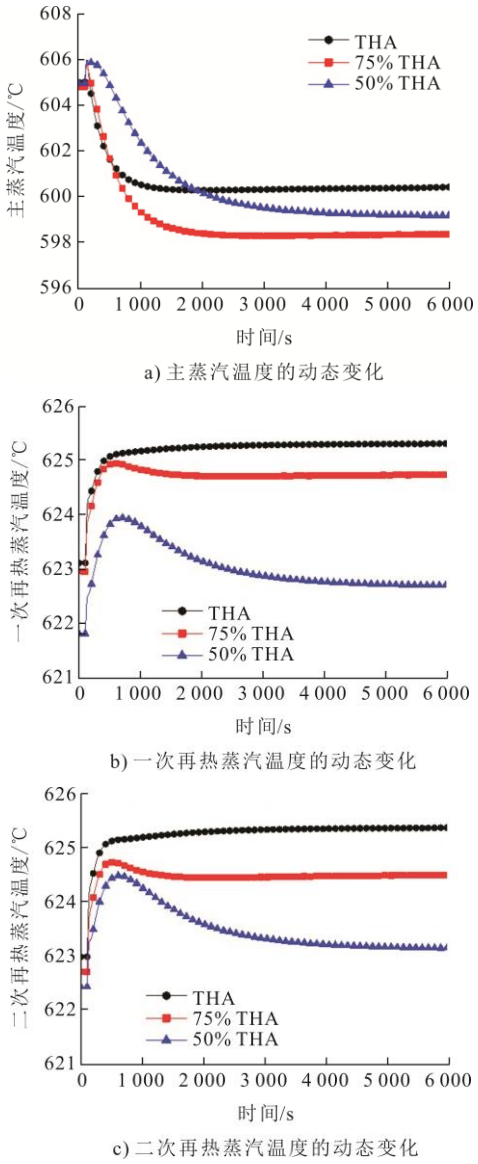


图 7　不同负荷过量空气系数阶跃增加 2%后蒸汽温度变化

Fig.7 Changes of steam temperature after a step increase of 2% in excess air coefficient at different unit loads

表 4　不同负荷下过量空气系数阶跃增加 2%后蒸汽温度的稳定时间和最大变化幅度

Tab.4 The stability time and maximum change amplitude of steam temperature after a step increase of 2% in excess air coefficient at different unit loads

工况	主蒸汽温度		一次再热蒸汽温度		二次再热蒸汽温度	
	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃
100%THA	717	–4.7	309	2.2	290	2.4
75%THA	1 269	–6.5	950	2.0	894	2.0
50%THA	2 630	–5.8	1 887	2.1	1 882	2.1

2.3 给水流量阶跃扰动

1）100%THA 工况给水流量阶跃扰动

在稳态运行第 100 s 时，给水流量阶跃增加 2%，由 460.97 kg/s 增加到 470.19 kg/s，主蒸汽参数、一次再热蒸汽参数和二次再热蒸汽参数的动态变化规律如图 8 所示。

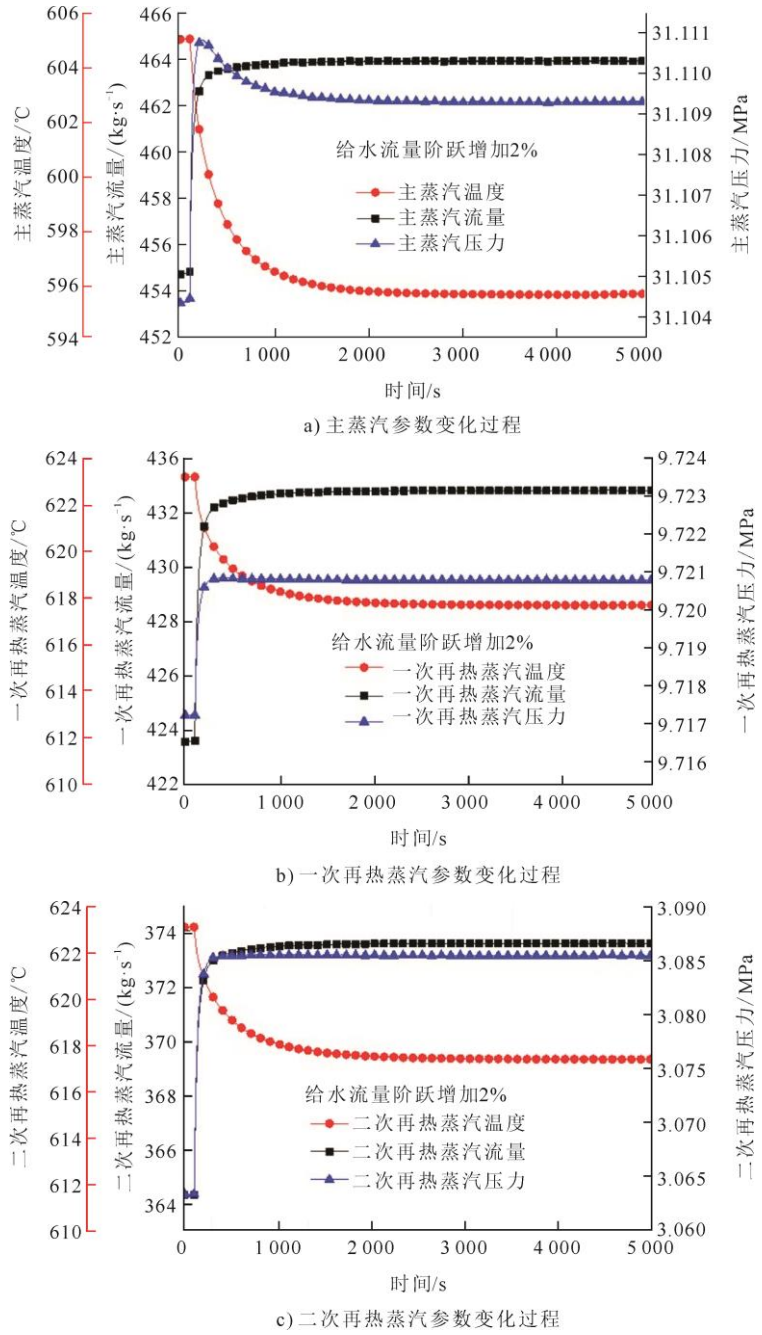


图 8 100%THA 工况给水流量阶跃增加 2%后的蒸汽参数变化

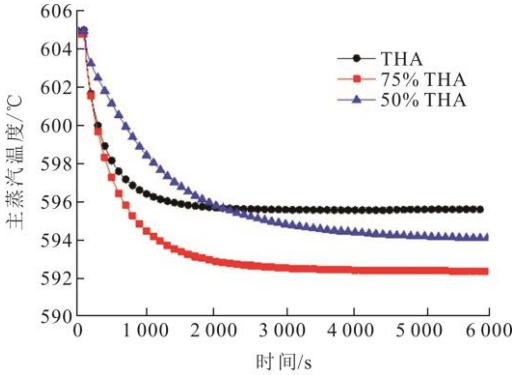
Fig.8 Changes of steam parameters after a step increase of 2% in feed-water flow rate under 100% THA working condition

由图 8a)可知：在给水流量阶跃增加 2%后，主蒸汽温度由初始值 605.2 ℃不断下降，在约 1 250 s 后趋于稳定，最终稳定值为 595.5 ℃；主蒸汽流量由初始值 454.72 kg/s 迅速上升，最终稳定值为 463.90 kg/s；主蒸汽压力由初始值 31.104 5 MPa 先迅速上升，后缓慢下降，最终稳定值高于初始值。由图 8b)和图 8c)可知，一、二次再热蒸汽参数的变化规律与主蒸汽参数相似，由于没有考虑汽机侧的流动过程，且再热器系统相对较小，在给水流量阶跃增加后，两级再热汽温与主蒸汽温度稳定时间接近。与一次再热机组相比，给水流量扰动后，二次再热锅炉出口蒸汽参数的动态响应与一次再热锅炉蒸汽参数的动态响应[13]相似，但二次再热锅炉的稳定时间更长。

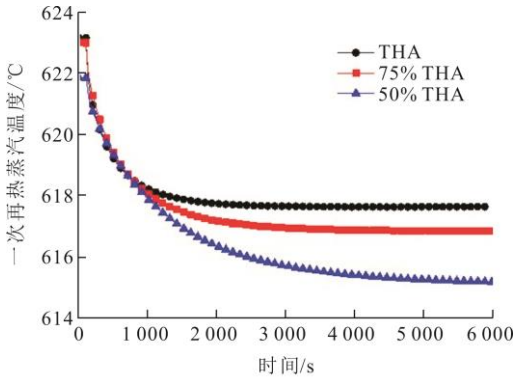
给水流量阶跃增加而煤量不变，主蒸汽流量增加，主蒸汽温度下降；在过渡过程的初始阶段，由于主蒸汽流量迅速增加，主蒸汽压力先迅速升高，随着主蒸汽温度下降，主蒸汽压力转而下降并最终稳定。

2）不同负荷下给水流量阶跃扰动比较

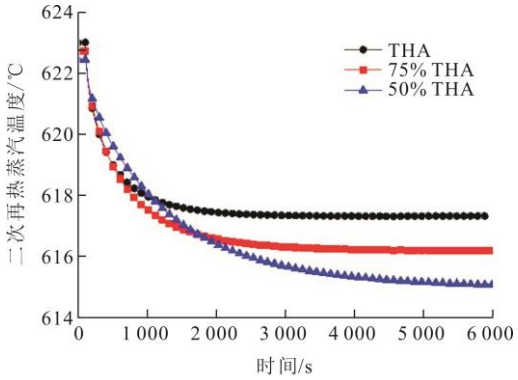
在 100%THA、75%THA、50%THA 工况下，稳态运行第 100 s 时，给水流量阶跃增加 2%，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的动态变化过程、稳定时间及最大变化幅度分别如图 9 和表 5 所示。由图 9 可知，不同负荷下给水流量阶跃增加后，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度变化趋势基本一致。由表 5 可知，随着锅炉负荷降低，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的稳定时间变长，热惯性变大。此外，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度在不同负荷下对给水流量扰动的敏感程度不同，变化幅度有较大差异。



a) 主蒸汽温度的动态变化



b) 一次再热蒸汽温度的动态变化



c) 二次再热蒸汽温度的动态变化

图 9 不同负荷下给水流量阶跃增加 2%后的蒸汽温度变化
Fig.9 Steam temperature changes after a step increase of 2% in feed-water flow rate at different unit loads

表 5 不同负荷下给水流量阶跃增加 2%后蒸汽温度的稳定时间和最大变化幅度
Tab.5 The stability time and maximum change amplitude of steam temperature after a step increase of 2% in feed-water flow rate at different unit loads

工况	主蒸汽温度		一次再热蒸汽温度		二次再热蒸汽温度	
	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃
100%THA	1 245	–9.5	1 086	–5.5	1 139	–5.7
75%THA	2 042	–12.5	1 677	–6.1	1 776	–6.5
50%THA	3 485	–10.9	3 036	–6.6	3 211	–7.3

2.4 给水温度阶跃扰动

1）100%THA 工况给水温度阶跃扰动

在稳态运行第 100 s 时，给水温度阶跃减小 10 ℃，由 314 ℃减小到 304 ℃，主蒸汽参数、一次再热蒸汽参数和二次再热蒸汽参数的动态变化规律如图 10 所示。由图 10a)可知：在给水温度阶跃减小 10 ℃后，主蒸汽温度由初始值 605.2 ℃先上升，然后下降，在 2 300 s 后趋于稳定，最终稳定值为 594.4 ℃；主蒸汽流量由初始值 454.72 kg/s 先迅速下降，然后上升，最终稳定值与初始值基本相等；主蒸汽压力由初始值 31.104 5 MPa 先迅速下降，然后上升，接着再下降，最终稳定值较初始值低。由图 10b)和图 10c)可知：在给水温度阶跃减小后，由于忽略了汽轮机的流动过程且再热器较小，因此两级再热汽温与主蒸汽温度变化趋势相同且稳定时间接近；两级再热蒸汽流量的变化与主蒸汽流量几乎同步；两级再热蒸汽压力变化趋势与主蒸汽压力一致，先下降后上升，最后缓慢下降至稳定值。与一次再热机组相比，给水温度扰动后，二次再热锅炉出口蒸汽参数的动态响应与一次再热锅炉的动态响应[13]相似，但二次再热锅炉的稳定时间更长。

在给水温度阶跃减小后，主蒸汽温度下降，但在过渡过程的初始阶段，给水温度减小使得加热段变长，过热段变短，主蒸汽流量和压力短暂下降，

促使主蒸汽温度短暂升高；随着主蒸汽流量和压力回升，主蒸汽温度由升转降；当主蒸汽温度下降到初始值附近，主蒸汽压力继而下降且最终稳定值低于初始值。

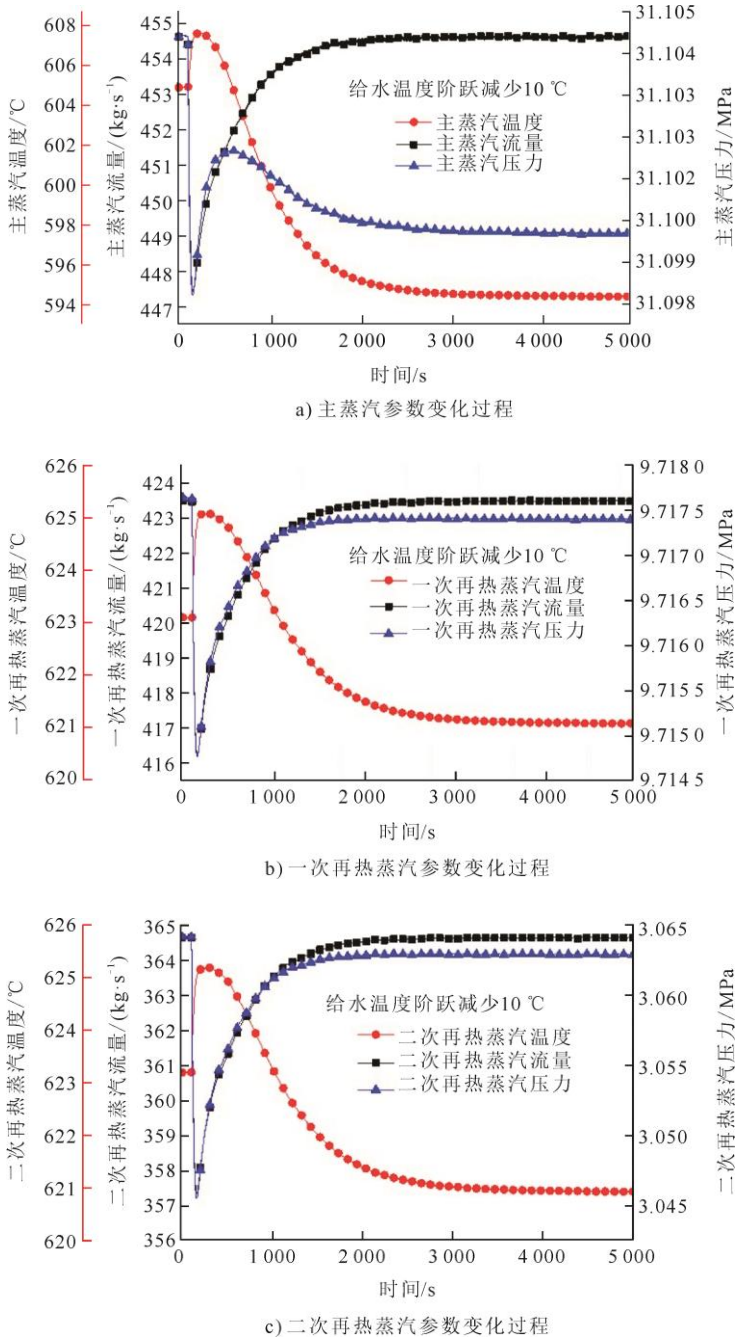


图 10 100%THA 工况给水温度阶跃减少 10 ℃后的蒸汽参数变化

Fig.10 Changes of steam parameters after a step decrease of 10 ℃ in feed-water temperature under 100% THA working condition

2）不同负荷下给水温度阶跃扰动比较

在 100%THA、75%THA、50%THA 工况下，稳态运行第 100 s 时，给水温度减小 10 ℃，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的稳定时间及最大变化幅度、动态变化过程分别如表 6 和图 11 所示。由图 11 可知，不同负荷下给水温度阶跃减小后，主蒸汽 温度和两级再热蒸汽温度变化趋势基本一致。由表 6 可知，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度在不同负荷下的变化量不同，且随着锅炉负荷降低，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度的稳定时间变长，热惯性变大。

表 6 不同负荷下给水温度阶跃减少 10 ℃后蒸汽温度的稳定时间和最大变化幅度

Tab.6 The stability time and maximum change amplitude of steam temperature after a step decrease of 10 ℃ in feed-water temperature at different unit loads

工况	主蒸汽温度		一次再热蒸汽温度		二次再热蒸汽温度	
	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃	稳定时间/s	最大变化幅度/℃
100%THA	2 317	−10.7	1 919	−2.0	1 955	−2.3
75%THA	3 263	−12.2	2 685	−2.8	2 766	−3.1
50%THA	4 132	−7.7	3 701	−2.6	3 793	−2.9

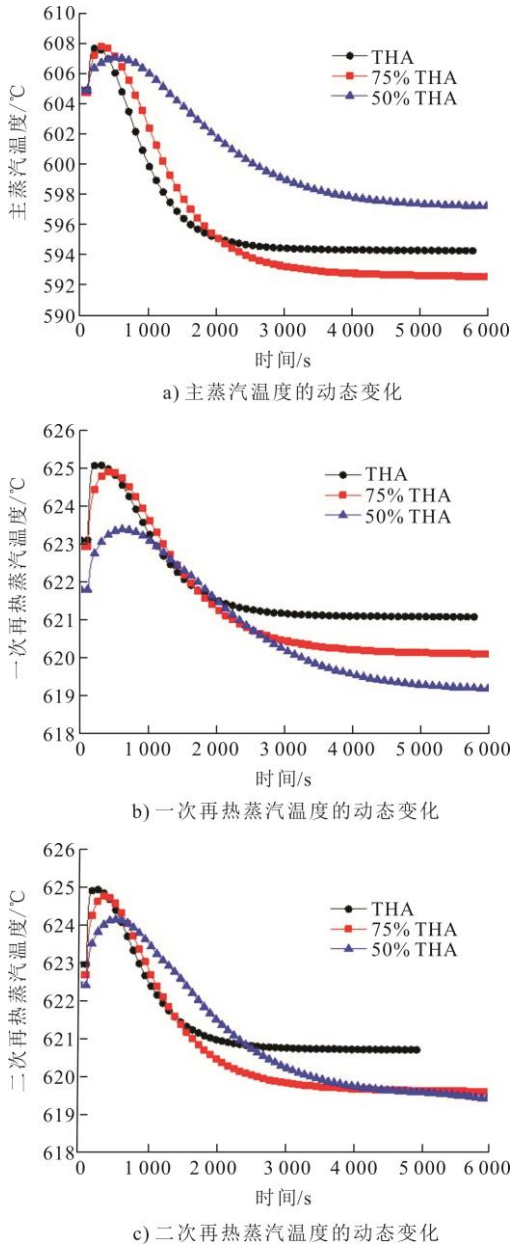


图 11 不同负荷下给水温度阶跃减少 10 ℃后的蒸汽温度变化

Fig.11 Steam temperature changes after a step decrease of 10 ℃ in feed-water temperature at different unit loads

3 结　论

1）煤量、过量空气系数、给水温度扰动后，在过渡过程的初始阶段，主蒸汽温度和两级再热蒸汽温度出现短时“反向”变化，主蒸汽流量和两级再热蒸汽流量出现瞬时增大或减小，主蒸汽压力和两级再热蒸汽压力随蒸汽流量变化也出现瞬时增大或减小现象。

2）在煤量、过量空气系数、给水流量、给水温度 4 个边界条件中，给水温度扰动后锅炉出口蒸汽参数的响应最慢，100%THA 工况下稳定时间约 2 300 s；过量空气系数扰动后响应最快，稳定时间约 720 s；煤量和给水流量扰动后响应速度介于前两者之间，稳定时间分别约为 1 040 s 和 1 250 s。

3）二次再热锅炉蒸汽参数的动态响应随着锅炉负荷降低而变长，热惯性变大。因此，二次再热锅炉在低负荷运行时，需要重点关注各种扰动对锅炉蒸汽参数的影响。

[参 考 文 献]

[1] 王月明, 牟春华, 姚明宇, 等. 二次再热技术发展与应用现状[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 1-11.
WANG Yueming, MU Chunhua, YAO Mingyu, et al. Review of the development and application of double-reheat power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 1-11.

[2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知: 发改能源〔2022〕210 号[A/OL]. (2022-01-29) [2025-06-05]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of *The 14th Five-Year Plan for Modern Energy System*: FGNY〔2022〕No.210[A/OL]. (2022-01-29) [2025-06-05]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.

[3] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 1.
ZHANG Chenyue. Dynamic characteristics and mathematic model of boiler[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987: 1.

[4] 黄锦涛, 陈听宽. 超临界直流锅炉蒸发受热面动态过程特性[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 71-75.
HUANG Jintao, CHEN Tingkuan. Dynamic characteristics of evaporating heating surface in supercritical once-through boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 71-75.

[5] 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.

[6] 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 equipment in lignite-fired supercritical boiler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 37-43.

[7] 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): 78-85.
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): 78-85.

[8] 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.

[9] 蔡宝玲, 高海东, 王剑钊, 等. 二次再热超超临界机组动态特性分析及控制策略验证[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5288-5299.
CAI Baoling, GAO Haidong, WANG Jianzhao, et al. Dynamic process characteristic analysis and control strategy verification on double-reheat ultra-supercritical coal-fired power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5288-5299.

[10] WANG Z, LIU M, WANG C Y, et al. Study on dynamic characteristics of a 600 MW ultra-supercritical double-reheat boiler[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Applied Energy. Hong Kong, China, 2018.

[11] 叶青, 王朝阳, 易广宙, 等. 超超临界二次再热尾部三烟道锅炉汽温动态特性及协同优化控制[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 117-126.
YE Qing, WANG Chaoyang, YI Guangzhou, et al. Dynamic characteristics and coordinate control optimization of steam temperatures for an ultra-supercritical double-reheat boiler with three rear ducts[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 117-126.

[12] WANG Z, LIU M, ZHAO Y L, et al. Comparison on thermodynamic characteristics of single-and double-reheat boilers under off-design working conditions and during transient processes[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115620.

[13] WANG C Y, QIAO Y Q, LIU M, et al. Enhancing peak shaving capability by optimizing reheat-steam temperature control of a double-reheat boiler[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114341.

（责任编辑　邓玲惠）