

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406146

# 5 MW 超临界二氧化碳循环发电机组锅炉 建模与动态特性分析

乔永强<sup>1</sup>, 王生鹏<sup>2</sup>, 白文刚<sup>1</sup>, 张一帆<sup>1</sup>, 张旭伟<sup>1</sup>,  
李红智<sup>1</sup>, 杨玉<sup>1</sup>, 顾正萌<sup>1</sup>, 姚明宇<sup>1</sup>  
(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
2.中国华能集团有限公司华中分公司, 湖北 武汉 430077)

**[摘要]** 提升超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)锅炉调峰能力是实现S-CO<sub>2</sub>燃煤发电机组灵活运行的关键。研究S-CO<sub>2</sub>锅炉动态特性有助于优化锅炉运行控制。以西安热工研究院有限公司5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组锅炉为研究对象,基于热力学和传热学原理,建立了S-CO<sub>2</sub>锅炉动态仿真模型,并利用机组运行数据验证了模型的可靠性。基于仿真模型,开展了燃料量、工质流量、工质温度等不同边界条件阶跃扰动下S-CO<sub>2</sub>锅炉的动态特性分析。结果表明:S-CO<sub>2</sub>锅炉具有较大的热惯性,不同边界条件扰动下锅炉出口工质温度稳定时间不同,且随着边界条件扰动幅度增加,稳定时间变长;随着S-CO<sub>2</sub>锅炉热负荷升高,锅炉出口工质压力下降,出口工质流量会出现瞬时增大现象。

**[关键词]** 超临界二氧化碳锅炉; 仿真模型; 动态特性; 边界条件

**[引用本文格式]** 乔永强, 王生鹏, 白文刚, 等. 5 MW 超临界二氧化碳循环发电机组锅炉建模与动态特性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 39-48. QIAO Yongqiang, WANG Shengpeng, BAI Wengang, et al. Modeling and dynamic characteristic analysis for boiler in a 5 MW supercritical carbon dioxide cycle power unit[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 39-48.

## Modeling and dynamic characteristic analysis for boiler in a 5 MW supercritical carbon dioxide cycle power unit

QIAO Yongqiang<sup>1</sup>, WANG Shengpeng<sup>2</sup>, BAI Wengang<sup>1</sup>, ZHANG Yifan<sup>1</sup>, ZHANG Xuwei<sup>1</sup>,  
LI Hongzhi<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>, GU Zhengmeng<sup>1</sup>, YAO Mingyu<sup>1</sup>  
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;  
2. Huazhong Branch of China Huaneng Group Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Enhancing peak shaving capability of supercritical carbon dioxide (S-CO<sub>2</sub>) boiler is the key to realize flexible operation of S-CO<sub>2</sub> coal-fired power plants. Research on dynamic characteristics of S-CO<sub>2</sub> boiler is beneficial to optimize the boiler operation control strategies. A dynamic simulation model of S-CO<sub>2</sub> boiler is established by the principles of thermodynamics and heat transfer based on the boiler of a 5 MW S-CO<sub>2</sub> cycle power unit designed and built by Xi'an Thermal Power Research Institute, and the reliability of the model is validated with operational data from unit. Based on the simulation model, dynamic characteristics of the above S-CO<sub>2</sub> boiler under step disturbance of different boundary conditions, such as fuel flow rate, working fluid flow rate, and working fluid temperature, are analyzed. The results show that, the S-CO<sub>2</sub> boiler has large thermal inertia, stability times of working fluid temperature at the boiler outlet are different under disturbance of different boundary conditions. With the increase of disturbance range of boundary conditions, stability times become longer. With the increase of boiler heat load, the working fluid pressure at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet decreases, and the working fluid flow rate at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet increases instantaneously in the initial stages of a dynamic process.

收稿日期: 2024-06-23 网络首发日期: 2024-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4104400)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2023YFB4104400)

第一作者简介: 乔永强(1992), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为超临界二氧化碳发电系统动态仿真及控制优化, qiaoyongqiang@tpri.com.cn.

**Key words:** supercritical carbon dioxide boiler; simulation model; dynamic characteristics; boundary condition

在“双碳”战略目标引领下,我国加快构建以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>,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<sup>[2]</sup>,迫切需要加快发展灵活高效的燃煤发电技术<sup>[3]</sup>。超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)循环由于循环热效率高、系统及设备简单紧凑、运行灵活等优势,能够提高火电机组运行高效性和灵活性<sup>[4-5]</sup>。S-CO<sub>2</sub>锅炉是S-CO<sub>2</sub>火力发电机组的热源设备,其高效性、灵活性和安全性是S-CO<sub>2</sub>火力发电机组商业化应用的关键,但其存在入口工质温度高、质量流量大、工质远离大比热容区、再热气吸热比例高等一系列与常规蒸汽锅炉不同的特征,必须深入开展相关研究,以提升锅炉运行的高效性、灵活性和安全性。

针对S-CO<sub>2</sub>锅炉上述特点引起的烟气余热利用不足、工质压降较大、炉膛气冷壁壁温较高、再热气受热面布置等问题,学者们开展了广泛的研究,取得了丰硕的成果。

在锅炉高效运行与系统协同优化方面:Mecheri等人<sup>[6]</sup>采用锅炉尾部分隔烟道方法,利用主压缩机出口分流工质回收利用烟气余热;徐进良<sup>[7-8]</sup>、孙恩惠<sup>[9]</sup>等提出模块化设计理念和工质分流方案来解决大压降问题,利用顶底复合循环实现锅炉烟气热量全温区吸收利用;张一帆<sup>[10]</sup>、白文刚<sup>[11]</sup>等提出分流省煤器技术,利用高温回热器冷侧入口部分工质吸收利用烟气余热;孙瑞强等<sup>[12]</sup>采用烟道旁路、低温省煤器、辅助空气预热器(空预器)及主压缩机中间冷却的循环构型来降低锅炉排烟温度。

针对炉膛气冷壁安全运行:杨玉<sup>[13]</sup>、张一帆<sup>[14]</sup>等提出在炉膛上部布置墙式再热器以提高再热气吸热比例,并采用上下气冷壁对称流动的方案来降低炉膛管壁温度;周敬等<sup>[15]</sup>认为减小管径可以降低气冷壁热流密度和温度偏差,并提出工质分流、对称流动及锅炉局部受热面扩张的策略;汪洋等<sup>[16]</sup>研究了炉膛分区后过热气冷壁相对炉膛高度对受热面管壁温度的影响;朱萌等<sup>[17]</sup>采用炉膛分段方法对1 000 MW等级S-CO<sub>2</sub>锅炉进行热力计算,发现换热量分布由辐射换热向对流换热转移,除炉膛外,其余受热面出口烟温均高于常规燃煤锅炉;杨丹蕾等<sup>[18]</sup>提出烟气再循环和气冷壁分区顺逆流布置的方案来降低炉膛受热面管壁温度,并引入螺旋气冷壁降低周向热流不均匀对管壁温度的影响;苏宏亮等<sup>[19]</sup>计算分析了5 MW等级S-CO<sub>2</sub>锅炉辐射受热面壁温特性,发现

高温烟室热辐射对金属管的安全强度有重要影响。此外,张一帆等<sup>[14]</sup>研究发现300 MW等级S-CO<sub>2</sub>锅炉炉膛受热面呈明显的负流量响应特性;闫凯等<sup>[20]</sup>提出质量流速500 kg/(m<sup>2</sup>·s)是气冷壁管屏内流量分配出现正、负流量特性转换的阈值,质量流速低于该值呈正流量特性,高于该值呈负流量特性。

在锅炉灵活运行方面:王富强等<sup>[21]</sup>将锅炉出口工质温度动态特性拟合为一阶惯性加纯滞后的传递函数模型,并进行控制效果分析;Zheng等人<sup>[22]</sup>提出燃烧器摆角与工质分流比相结合的气温控制策略来解决S-CO<sub>2</sub>锅炉全负荷范围内温度控制问题;李红智等<sup>[15]</sup>基于5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组开展了大量运行试验,结果显示该机组平均升、降负荷速率可达6.35%P<sub>e</sub>/min、-6.37%P<sub>e</sub>/min。

总体来看,目前S-CO<sub>2</sub>锅炉受热面布置与系统协同优化以及辐射受热面热力特性与气动力特性等方面研究较为充分,相关结论比较明晰,为锅炉的安全高效运行提供了有力支撑。但S-CO<sub>2</sub>锅炉瞬态运行特性方面的研究还比较缺乏,同时相比常规蒸汽锅炉,S-CO<sub>2</sub>锅炉工质特性不同且再热气吸热比例升高,其热力学和传热学机理发生显著变化,有必要深入开展S-CO<sub>2</sub>锅炉动态特性及运行控制优化研究,提升锅炉深度调峰和快速变负荷能力,满足锅炉灵活运行方面的需求。

为此,以西安热工研究院有限公司(西安热工院)5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组<sup>[23]</sup>锅炉为研究对象,基于热力学和传热学原理,采用数值计算方法,建立S-CO<sub>2</sub>锅炉动态仿真模型,并利用机组运行数据验证模型的可靠性。基于仿真模型,开展燃料量、工质流量、工质温度等锅炉边界条件阶跃扰动试验,计算分析S-CO<sub>2</sub>锅炉出口工质参数的动态响应规律,以期为该类型锅炉运行控制策略的制定和优化提供参考。

## 1 5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组锅炉概况

西安热工院5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组采用一次再热分流再压缩循环,机组额定参数20 MPa/600 °C/600 °C/80.67 kg/s。5 MW S-CO<sub>2</sub>循环发电机组锅炉(S-CO<sub>2</sub>锅炉)为一次再热燃气锅炉,主要设计参数和燃料分析见表1、表2,结构示意图如图1所示。该S-CO<sub>2</sub>锅炉整体呈L型布置,竖直炉膛内布置气冷壁,水平烟道分为2侧,一侧布置高、低

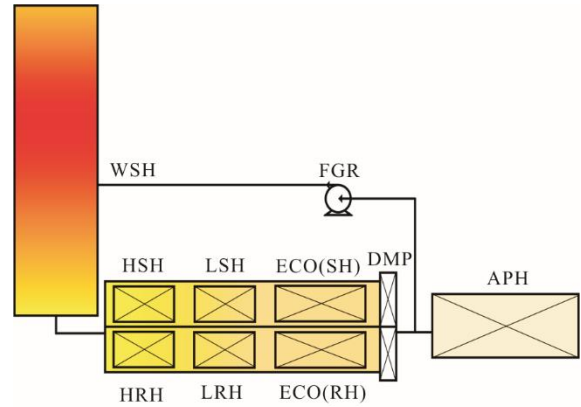
温过热器及并联的分流省煤器，另一侧布置高、低温再热器及并联的分流省煤器，空预器置于水平烟道尾部，在分流省煤器和空预器之间设置烟气调节挡板和烟气再循环回路。

表 1 西安热工院 5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉主要参数  
Tab.1 Main parameters of the 5 MW S-CO<sub>2</sub> cycle boiler in Xi'an Thermal Power Research Institute

| 项目                           | 数值     |
|------------------------------|--------|
| 主气流量/(t·h <sup>-1</sup> )    | 290.4  |
| 主气压力/MPa                     | 20.06  |
| 主气温度/°C                      | 600.00 |
| 再热气温度/°C                     | 600.00 |
| 气冷壁入口温度/°C                   | 475.82 |
| 分流省煤器流量/(t·h <sup>-1</sup> ) | 29.04  |
| 分流省煤器入口温度/°C                 | 202.43 |
| 排烟温度/°C                      | 138.00 |
| 锅炉效率/%                       | 93.53  |

表 2 5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉燃料主要成分  
Tab.2 Fuel compositions of the 5 MW S-CO<sub>2</sub> cycle boiler

| 项目                                  | 数值      |
|-------------------------------------|---------|
| w(CH <sub>4</sub> )/%               | 96.30   |
| w(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )/% | 0.48    |
| w(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )/% | 0.11    |
| w(CO <sub>2</sub> )/%               | 2.70    |
| w(N <sub>2</sub> )/%                | 0.05    |
| 低位发热量/(kJ·m <sup>-3</sup> )         | 33 240  |
| 天然气密度(标准工况)/(kg·m <sup>-3</sup> )   | 0.717 6 |



WSH—气冷壁；HSH—高温过热器；HRH—高温再热器；  
LSH—低温过热器；LRH—低温再热器；  
ECO(SH) —过热侧分流省煤器；  
ECO(RH) —再热侧分流省煤器；  
APH—空预器；DMP—烟气挡板；  
FGR—烟气再循环回路。

图 1 5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉结构示意图  
Fig.1 Structural diagram of the 5 MW S-CO<sub>2</sub> cycle boiler

## 2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉动态仿真模型及验证

为分析 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的动态特性，通过自编程建立了 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的动态仿真模型，并利用机组运行数据对模型的可靠性进行了验证。

### 2.1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉动态仿真模型

S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面间的连接关系如图 2 所示。

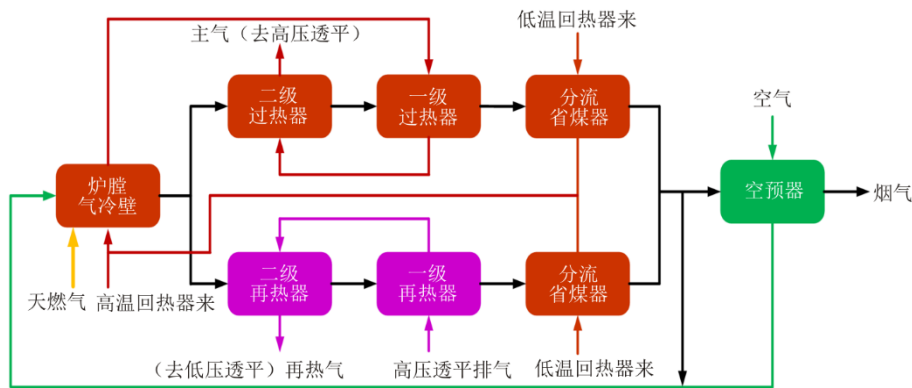


图 2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面连接关系  
Fig.2 Connection relations of heating surfaces for the S-CO<sub>2</sub> boiler

由图 2 可知，该锅炉工质流程分为主气流程和再热气流程，其中：主气流程为约 10% 流量工质流过分流省煤器后，与气冷壁入口约 90% 流量的工质混合，然后依次流过气冷壁、低温过热器、高温过热器；再热气依次流过低温再热器、高温再热器。烟风流程为：冷空气经空预器加热后，与送入炉膛的天然气混合后燃烧，产生的高温烟气沿炉膛向下流动并在水平分隔烟道处分为 2 路，依次流过高温

过（再）热器、低温过（再）热器及并联的分流省煤器，在分流省煤器出口烟道汇合，最后流经空预器离开锅炉；再循环烟气引自分流省煤器出口，与空预器出口热空气混合后进入燃烧器。

考虑到 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面较多且传热机理不同以及工质与烟气耦合换热等因素，必须对仿真模型进行合理划分。为此，将锅炉所有受热面模型分为烟气与管壁换热（烟气侧换热）和管壁与工质换热

(工质侧换热), 并进一步将烟气侧换热分为炉膛烟气传热和其他受热面烟气传热。炉膛内烟气温度高达 1 000 °C 以上, 传热主要以辐射方式为主, 对流传热占比非常小, 其烟气侧换热计算采用热负荷边界, 热负荷通过炉膛热力计算模型获得。过热器、再热器、分流省煤器以及空预器的烟气侧传热计算采用对流传热模型。包括炉膛气冷壁在内的所有受热面管内工质传热计算采用对流传热模型。最终将所有模型耦合为整体, 构成 S-CO<sub>2</sub> 锅炉仿真模型。

### 2.1.1 炉膛热力计算模型

炉膛辐射热负荷由输入锅炉的有效热量和离开炉膛的烟气焓值决定。输入锅炉的有效热量主要包括燃料的发热量及随燃料带入炉膛的空气的热量。假设燃料在炉膛内瞬间燃烧并释放出所有化学热, 炉膛内烟气压力保持微负压不变。模型主要公式如式(1)、式(2)所示。

$$Fq_{ave} = \varphi \cdot (Q_{ef} - h_1) \cdot B_j \quad (1)$$

$$Q_{ef} = Q_{ar.net} \left(1 - \frac{q_3 + q_6}{100 - q_4}\right) + Q_a \quad (2)$$

式中:  $F$  为炉膛有效辐射换热面积, m<sup>2</sup>;  $q_{ave}$  为炉膛换热面平均热负荷, kW/m<sup>2</sup>;  $\varphi$  为保热系数, 本文  $\varphi = (100 - q_5) / 100$ ;  $Q_{ef}$  为单位质量燃料的入炉有效热量, kJ/kg;  $h_1$  为炉膛出口烟气焓值, kJ/kg;  $B_j$  为计算燃料量, kg/s;  $Q_{ar.net}$  为燃料收到基低位发热量, kJ/kg;  $Q_a$  为随单位质量燃料带入炉内的空气的热量, kJ/kg;  $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_5$ 、 $q_6$  分别为化学未完全燃烧热损失、机械未完全燃烧热损失、散热损失、灰渣物理热损失, %, 因为本文 S-CO<sub>2</sub> 锅炉为燃气锅炉, 所以  $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_5$ 、 $q_6$  分别取 0.4、0、0.3、0。

由于锅炉炉膛沿高度方向热负荷分布存在差异<sup>[23]</sup>, 将炉膛气冷壁沿高度划分为 4 段, 假设每段辐射换热特性均匀, 引入热负荷不均匀系数  $\eta_j$  (图 3), 沿炉膛高度方向由上到下各段  $\eta_j$  分别取 1.0、1.2、1.1、0.7, 气冷壁辐射热负荷计算公式如下。

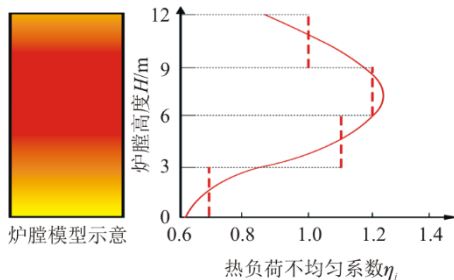


图 3 S-CO<sub>2</sub> 锅炉气冷壁热负荷不均匀系数

Fig.3 Non-uniform coefficient of heat flux of gas cooling wall of the S-CO<sub>2</sub> boiler

$$q = q_{ave} \cdot \eta_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^4 \eta_j = 4 \quad (4)$$

式中:  $q$  为气冷壁辐射热负荷, kW/m<sup>2</sup>;  $q_{ave}$  为炉膛换热面平均热负荷, kW/m<sup>2</sup>。

### 2.1.2 对流传热模型

高温烟气流过过热器等对流受热面将热量传递给管内的 CO<sub>2</sub> 工质, 传热过程模型如图 4 所示。分别将高温烟气流和 S-CO<sub>2</sub> 工质流划分为若干节点, 金属管壁划分为若干换热板, 节点之间采用介质流线连接, 节点与换热板之间采用热流线连接。

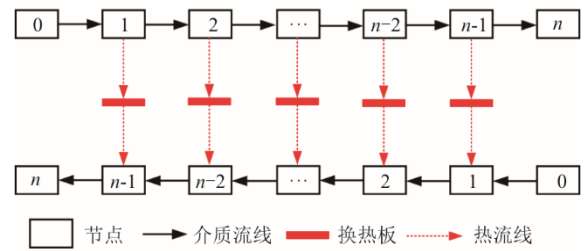


图 4 对流传热模型示意

Fig.4 Schematic diagram of convective heat transfer model

假设每个节点和换热板内热力学参数均匀分布, 对流受热面内守恒方程如式(5)~式(8)所示。

$$\frac{16m_{i,j}^2}{\pi^2 d_i^4} \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_j} \right) + \rho_i g H + f_{i,j} \frac{8l_{i,j}}{\pi^2 d_i^5} \frac{m_{i,j}^2}{\rho_i} = p_i - p_j \quad (5)$$

$$\frac{16m_{j,k}^2}{\pi^2 d_j^4} \left( \frac{1}{\rho_j} - \frac{1}{\rho_k} \right) + \rho_j g H + f_{j,k} \frac{8l_{j,k}}{\pi^2 d_j^5} \frac{m_{j,k}^2}{\rho_j} = p_j - p_k \quad (6)$$

$$V \frac{d\rho_j}{d\tau} = m_{i-j} - m_{j-k} \quad (7)$$

$$V \frac{d(\rho u)_j}{d\tau} = m_{i-j} h_i - m_{j-k} h_j - \alpha A (t_{j,f} - t_{j,m}) \quad (8)$$

式中:  $\tau$  为时间, s;  $V$  为节点体积, m<sup>3</sup>;  $A$  为换热板面积, m<sup>2</sup>;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $H$  为节点相对高度, m;  $p$  为节点内介质压力, Pa;  $d$  为节点水力直径, m;  $f$  为流动阻力系数;  $l$  为介质流线长度, m;  $m$  为介质流量, kg/s;  $\rho$  为节点内介质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u$ 、 $h$  分别为节点内介质比内能和比焓, kJ/kg;  $\alpha$  为介质与换热板的对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $t_m$ 、 $t_f$  分别为换热板温度和介质温度, °C; 上述变量的下标  $i$ 、 $j$ 、 $k$  为相邻的 3 个节点编号, 下标  $i-j$ 、 $j-k$  为相邻的流线编号。

忽略管壁金属物性变化以及管壁轴向导热, 管壁温度的计算公式为:

$$c_m \rho_m A \delta \frac{dt_m}{d\tau} = \alpha_h A (t_{f,h} - t_m) - \alpha_c A (t_m - t_{f,c}) \quad (9)$$

式中： $c_m$  为换热板比热容，kJ/(kg·K)； $\rho_m$  为换热板密度，kg/m<sup>3</sup>； $\delta$  为换热板厚度，m； $\alpha_h$  为烟气侧对流换热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)； $t_{f,h}$  为烟气温度，℃； $\alpha_c$  为工质侧对流换热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)； $t_{f,c}$  为工质温度，℃。

S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面管内工质远离大比热容区，物性变化不大，工质侧对流传热系数采用 Dittus-Boelter 关联式<sup>[24]</sup>，计算公式如式(10)所示。

$$\alpha_c = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re_c^{0.8} Pr_c^{0.4} \quad (10)$$

式中： $\alpha_c$  为管内工质的对流传热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)； $\lambda$  为工质的导热系数，W/(m·K)； $d$  为管子内径，m； $Re_c$  为工质的雷诺数； $Pr_c$  为工质的普朗特数。

S-CO<sub>2</sub> 锅炉工质侧阻力系数采用 Colebrook-White 关联式<sup>[25]</sup>，计算公式如式(11)所示。

$$f_c = \frac{1}{\left[ 2 \lg \left( \frac{2.51}{Re_c \sqrt{f_c}} + \frac{\Delta}{3.7} \right) \right]^2} \quad (11)$$

式中： $f_c$  为管内工质的阻力系数； $Re_c$  为工质的雷诺数； $\Delta$  为 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面管内的相对粗糙度，取 0.005<sup>[26]</sup>。

5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉对流受热面均为顺列排布的光管管束，且均为烟气横向冲刷。烟气侧对流传热系数计算公式<sup>[27]</sup>如式(12)所示。

$$\alpha_h = 0.2 C_s C_z \frac{\lambda}{d} Re_h^{0.65} Pr_h^{0.33} \quad (12)$$

式中： $\alpha_h$  为管外烟气的对流传热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)； $C_s$  为管束几何布置方式的修正系数，与管子的相对节距有关； $C_z$  为沿烟气行程方向管子排数的修正系数，取决于计算管束各个管组的平均排数； $\lambda$  为烟气的导热系数，W/(m·K)； $d$  为管子外径，m； $Re_h$  为烟气的雷诺数； $Pr_h$  为烟气的普朗特数；根据 S-CO<sub>2</sub> 锅炉几何尺寸， $C_s=1$ ， $C_z=1$ 。此外，假设炉膛及烟道内烟气压力保持微负压不变，可以忽略烟气侧压降，烟气压力取 0.1 MPa。

工质物性采用 NIST 物性数据库，烟气物性基于 NIST 物性数据库自定义编制物性表。

### 2.2 仿真模型验证

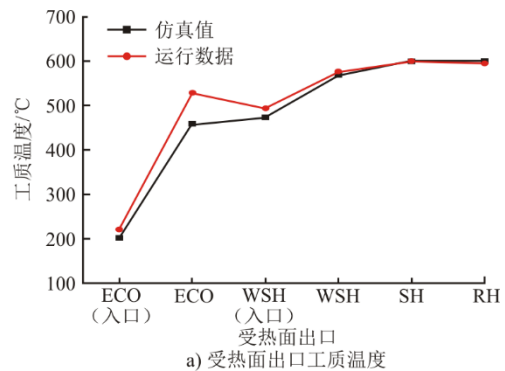
建立 S-CO<sub>2</sub> 锅炉仿真模型，获得稳态工况的计算结果，并与运行数据进行对比验证，结果见表 3。锅炉出口工质温度和排烟温度是衡量锅炉能量利用水平以及仿真模型计算精度的重要参数。由表 3 可知，锅炉出口工质温度误差在 1.0% 以内，排烟温

度误差为 10.7%。

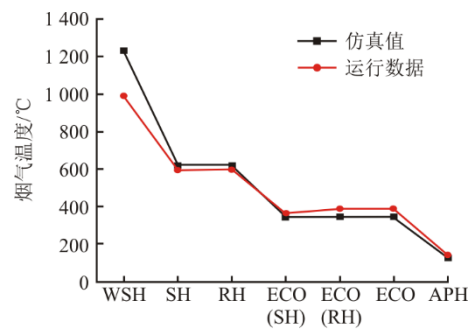
表 3 S-CO<sub>2</sub> 锅炉稳态工况主要热力参数仿真值与运行数据  
Tab.3 Operational data and simulation values of main thermodynamic parameters of the S-CO<sub>2</sub> boiler under steady state condition

| 项目        | 运行数据   | 仿真值    | 误差/%  |
|-----------|--------|--------|-------|
| 主气温度/℃    | 599.46 | 599.95 | 0.08  |
| 主气压力/MPa  | 19.352 | 20.064 | 3.55  |
| 再热气温度/℃   | 594.74 | 600.03 | 0.88  |
| 再热气压力/MPa | 13.543 | 14.777 | 8.35  |
| 热空气温度/℃   | 328.92 | 285.36 | 15.26 |
| 排烟温度/℃    | 142.17 | 128.43 | 10.70 |

受热面热力参数验证结果如图 5 所示。图 5a) 为受热面出口工质温度仿真值与运行数据，可以看出：受热面出口工质温度仿真值的分布趋势与运行数据一致；仿真值与运行数据对比，过热器出口工质温度误差为 0.08%，再热器出口工质误差为 0.88%。图 5b) 为受热面出口烟气温度仿真值与运行数据，可以看出：烟气温度仿真值分布趋势与运行数据一致；仿真值与运行数据对比，空预器出口烟气温度误差为 10.7%。



a) 受热面出口工质温度



b) 受热面出口烟气温度

图 5 S-CO<sub>2</sub> 锅炉稳态工况热力参数模型验证

Fig.5 Model validation for thermodynamic parameters of the S-CO<sub>2</sub> boiler under steady state condition

稳态工况验证结果表明，锅炉出口工质温度和排烟温度的计算精度满足要求，所建立模型具有较高的可靠性。

在开展 S-CO<sub>2</sub> 锅炉动态仿真计算时,不仅要保证仿真模型在稳态工况下具有较高可靠性,而且在瞬态过程中也要具有较高的计算精度。为此,选取 S-CO<sub>2</sub> 锅炉机组从初始工况(过热器出口参数 316 °C/12.5 MPa/60 kg/s,再热器出口参数 308 °C/9.9 MPa/60 kg/s)经过约 1 000 min 升温升压,到达最终稳定工况(过热器出口参数 594 °C/16.3 MPa/66 kg/s,再热器出口参数 584 °C/12.3 MPa/66 kg/s)的运行为例,进行仿真模拟。此过程中过热器和再热器出口工质温度仿真值与运行数据对比如图 6 所示。由图 6 可以看出,过热器和再热器出口工质温度在瞬态过程中变化趋势一致,误差较小,表明本文模型在瞬态过程中也具有较高的计算精度和可靠性。

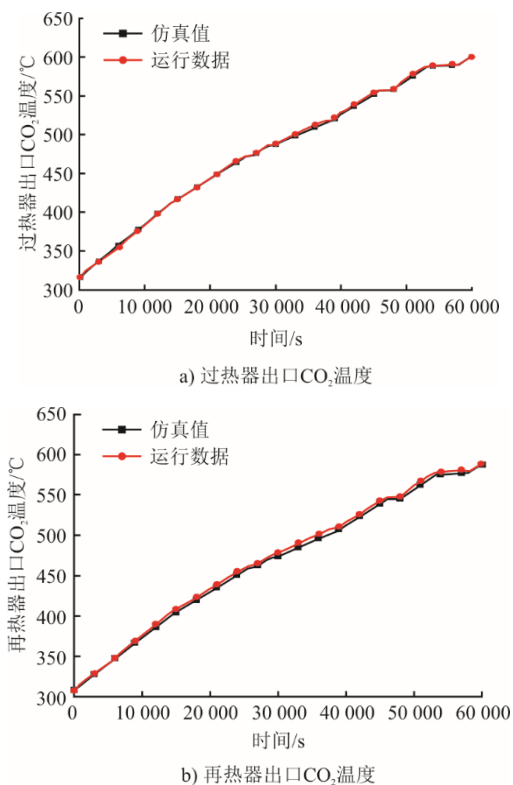


图 6 S-CO<sub>2</sub> 锅炉瞬态过程模型验证  
Fig.6 Model validation for the S-CO<sub>2</sub> boiler during transient processes

### 3 S-CO<sub>2</sub> 锅炉动态特性分析

提升 S-CO<sub>2</sub> 锅炉调峰能力是实现 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电机组灵活运行的关键。研究和分析 S-CO<sub>2</sub> 锅炉动态特性,有助于优化锅炉变负荷运行控制。为此,开展 S-CO<sub>2</sub> 锅炉在主要边界条件扰动下的动态特性分析。选取锅炉 BRL 工况,所有控制均不投入时,分别开展燃料量、工质流量及工质温度阶跃扰动试验,研究 S-CO<sub>2</sub> 锅炉过热器出口工质(主气)和再

热器出口工质(再热气)的动态响应规律。

#### 3.1 主要边界条件阶跃扰动

##### 3.1.1 燃料量阶跃扰动

在第 100 s 时,燃料量阶跃增加 4%,由 1.488 0 t/h 增加到 1.547 5 t/h,此时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化趋势如图 7 所示。

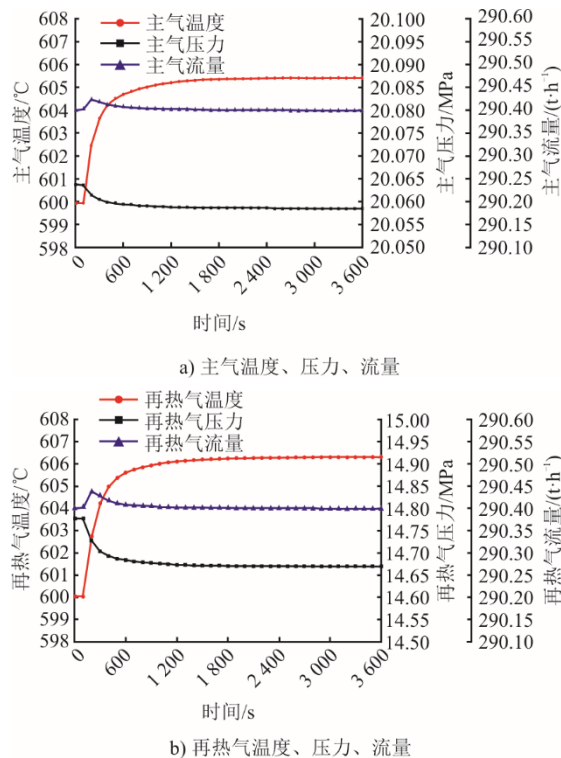


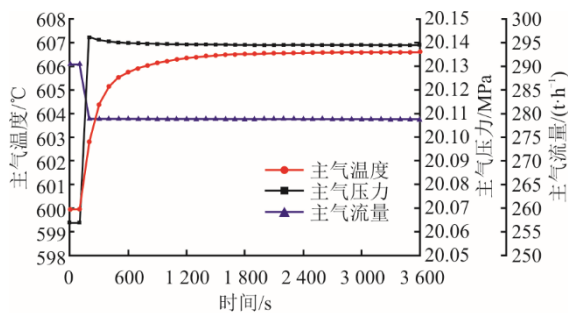
图 7 燃料量阶跃增加时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化趋势  
Fig.7 Change trends of parameters at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet with step increase of fuel flow rate

由图 7 可知:随着燃料量阶跃增加,锅炉热负荷迅速升高,但由于锅炉管壁金属的蓄热作用,主气温度和再热气温度缓慢升高;主气压力和再热气压力随着燃料量增加而降低,因为此时工质密度减小、流速增大,锅炉管内工质流动阻力增大,引起出口压力下降,这与超临界水锅炉出口蒸汽压力随热负荷增大而升高有明显区别;在过渡过程的初始阶段,主气流量和再热气流量出现瞬时增大的现象,且再热气压力较低,流量变化幅度更大,这是因为随着锅炉燃烧热负荷的增加,工质温度升高、密度减小引起锅炉管内工质储量减少,进而促使锅炉出口工质流量短时间增大,且再热气由于压力低,密度变化更加剧烈,导致流量增大幅度更大;随着工况变化逐渐趋于稳定,主气流量和再热气流量重新恢复至初始值。由此可见,虽然 S-CO<sub>2</sub> 锅炉管内的工质远离大比热容区,没有类似超临界水的

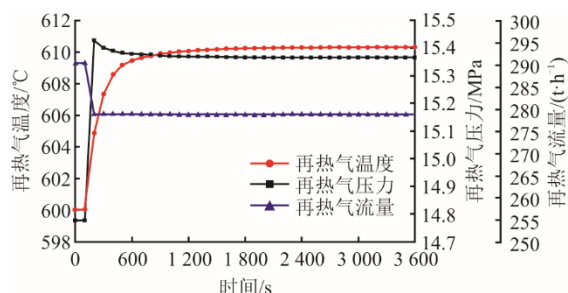
蒸发过程,但随着燃料量的增加或减小,工质流量仍然会出现瞬时增大或减小的现象。

### 3.1.2 工质流量阶跃扰动

在第 100 s 时,锅炉入口工质流量阶跃减少 4%,由 290.4 t/h 减少至 278.784 t/h 此时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化趋势如图 8 所示。



a) 主气温度、压力、流量



b) 再热气温度、压力、流量

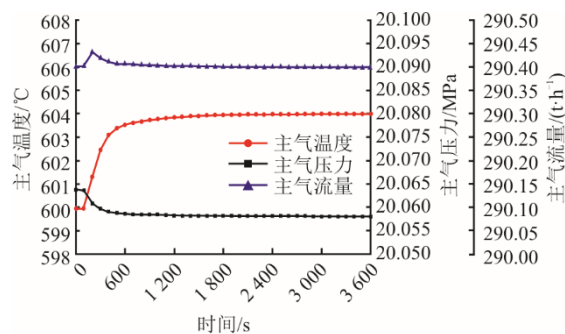
图 8 工质流量阶跃减少时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化趋势  
Fig.8 Change trends of parameters at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet with step decrease of working fluid flow rate

由图 8 可知:随着锅炉入口工质流量阶跃减少,此时燃烧热负荷不变,锅炉相对热负荷增加,主气温度和再热气温度缓慢升高;由于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉管内工质均处于过热状态,没有蒸发过程,因此工质流量的阶跃减少导致锅炉管内工质流动阻力突然减小,主气和再热气压力迅速升高,然后随着工质温度的升高,压力逐渐降低,但仍然较初始值高,且相比主气,再热气压力低,工质物性变化更大,因此再热气压力变化幅度更大;主气流量和再热气流量随着锅炉入口工质流量的阶跃减少而迅速减少。

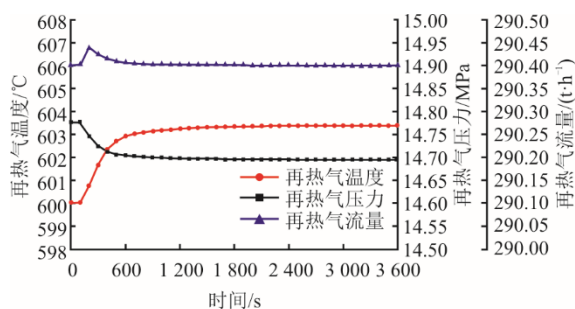
### 3.1.3 工质温度阶跃扰动

在第 100 s 时,锅炉入口工质温度阶跃增加 4 °C,此时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化如图 9 所示。由图 9 可知:随着锅炉入口工质温度阶跃升高,主气温度和再热气温度缓慢升高;主气压力和再热气压力降低,这与燃料量阶跃增加时相同,均为锅炉管内工质流动阻力增大所致;在过渡过程的初始阶

段,主气流量和再热气流量出现瞬时增大的现象,这是因为锅炉入口工质温度阶跃增加,引起锅炉管内工质密度减小,工质储量减少,进而导致锅炉出口流量短时间内升高;随着工况变化逐渐趋于稳定,主气流量和再热气流量重新恢复至初始值。



a) 主气温度、压力、流量



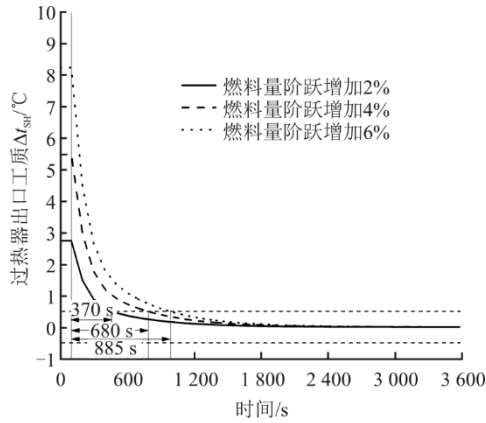
b) 再热气温度、压力、流量

图 9 工质温度阶跃增加时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口参数变化趋势  
Fig.9 Change trends of parameters at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet with step increase of working fluid temperature

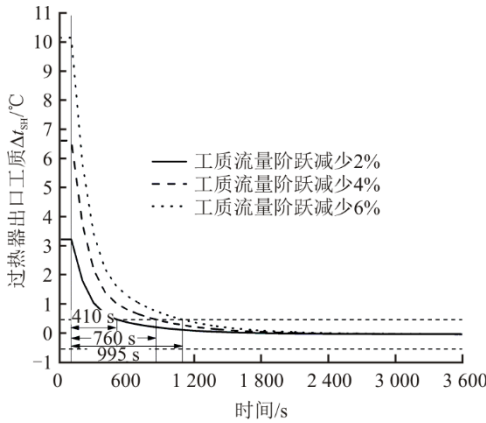
## 3.2 不同边界条件扰动下锅炉热惯性对比

由前文仿真结果可知,由于锅炉管壁金属的蓄热作用,在燃料量等边界条件扰动下,S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口工质参数的响应变化存在较大的热惯性,稳定时间较长。为了精确评估不同边界条件阶跃扰动下 5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉的热惯性,选取 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口工质温度变化最终稳定值  $t_s$  与实时值  $t_r$  的差值  $\Delta t$ ,当工质温度差值  $|\Delta t|$  小于 0.5 °C 时,认为动态过程结束,锅炉达到稳定工况。下面以 S-CO<sub>2</sub> 锅炉过热器出口工质温度为例进行说明。

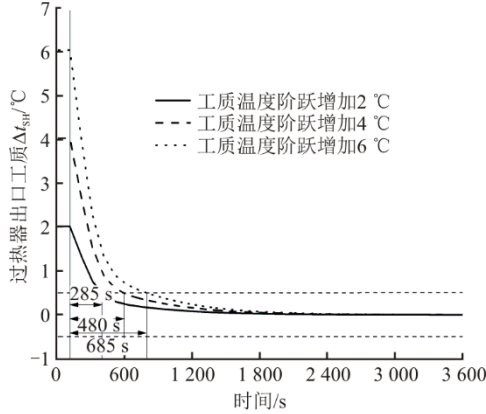
图 10 为不同边界条件扰动下 S-CO<sub>2</sub> 锅炉热惯性对比。由图 10 可知,随着燃料量等边界条件阶跃扰动幅度的增加,S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口工质温度稳定时间变长,这是因为燃料量等边界条件扰动幅度越大,锅炉管壁金属蓄热量的变化越大,导致锅炉工况稳定时间越长。燃料量等边界条件扰动下 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口工质温度稳定时间详细数据见表 4。



a) 燃料量不同幅度阶跃增加



b) 工质流量不同幅度阶跃减少



c) 工质温度不同幅度阶跃增加

图 10 不同边界条件扰动下 S-CO<sub>2</sub> 锅炉热惯性比较  
Fig.10 Comparison of thermal inertias of S-CO<sub>2</sub> boiler under disturbance of different boundary conditions

表 4 不同边界条件扰动下 S-CO<sub>2</sub> 锅炉过热器出口工质温度稳定时间

Tab.4 Stability time of working fluid temperature at the S-CO<sub>2</sub> boiler superheater outlet under disturbance of different boundary conditions

| 燃料量阶跃幅度 | 稳定时间/s | 工质流量阶跃幅度 | 稳定时间/s | 工质温度阶跃幅度 | 稳定时间/s |
|---------|--------|----------|--------|----------|--------|
| +2%     | 370    | -2%      | 410    | +2°C     | 285    |
| +4%     | 680    | -4%      | 760    | +4°C     | 480    |
| +6%     | 885    | -6%      | 995    | +6°C     | 685    |

### 3.3 工质分流量阶跃扰动

图 11 为锅炉入口工质总流量保持不变，工质分流量阶跃扰动下的主气温度和再热气温度变化。

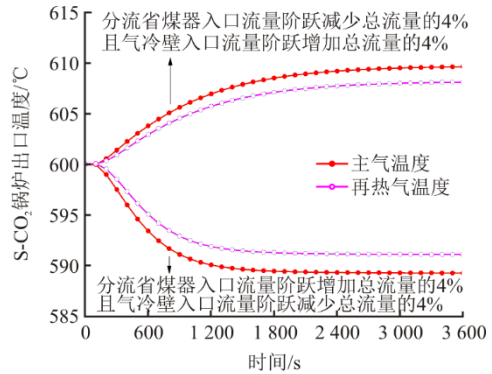


图 11 工质分流量阶跃扰动时 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口温度变化  
Fig.11 Changes of temperatures at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet with step disturbance of working fluid separation

由图 11 可知：随着分流省煤器入口流量减少以及气冷壁入口流量增加，工质进入锅炉的热量增加，主气温度和再热气温度升高；反之，主气温度和再热气温度降低；且主气温度比再热气温度变化幅度大。考虑该 5 MW S-CO<sub>2</sub> 循环发电机组锅炉采用了分流省煤器技术，分流省煤器内换热后的工质汇入气冷壁入口，进一步分析，在分流省煤器入口流量减少时，进入空预器的烟气温度升高，使得空预器出口的热风温度抬升，且再循环烟气温度也升高，两者导致炉膛温度升高，炉膛气冷壁辐射换热增强，过热器和再热器对流换热相对减弱，因此主气温度上升幅度比再热气温度更大。相反，在分流省煤器入口流量增加时，炉膛气冷壁辐射换热减弱，过热器和再热器对流换热增强，主气温度下降幅度比再热气温度更大。但对于大容量 S-CO<sub>2</sub> 锅炉，其炉膛上部布置再热气冷壁<sup>[13]</sup>，则当工质分流量扰动时，主气温度和再热气温度变化幅度将接近。

## 4 结 论

1) S-CO<sub>2</sub> 锅炉具有较大的热惯性，不同边界条件扰动下锅炉出口工质温度稳定时间不同，且随着边界条件扰动幅度增加，稳定时间变长。

2) S-CO<sub>2</sub> 锅炉工质吸热过程没有蒸发段，全程均处于远离大比热容区的过热状态，随着锅炉热负荷升高，S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口工质压力下降，出口工质流量会出现瞬时增大的现象，且再热气由于压力较低，流量的瞬时变化幅度更大。

## [参 考 文 献]

- [1] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.  
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [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 [EB/OL]. (2022-01-29)[2024-06-22]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html).  
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[EB/OL]. (2022-01-29) [2024-06-22]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html).
- [3] 国家能源局, 科学技术部. 关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知: 国能发科技〔2021〕58号 [EB/OL]. (2021-11-29)[2024-06-22]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c\\_1310540453.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm).  
National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the 14th Five-Year Plan for Scientific and Technological Innovation in the Field of Energy: GNFKJ[2021]No.58[EB/OL]. (2021-11-29) [2024-06-22]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c\\_1310540453.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm).
- [4] LE MOULLEC Y. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO<sub>2</sub> capture using a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. Energy, 2013, 49: 32-46.
- [5] LI H Z, ZHANG Y F, BAI W G, et al. Control strategies and dynamic experimental tests on the wide-range and rapid load regulation of a first pilot multi-megawatts fossil-fired supercritical CO<sub>2</sub> power system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 279: 116748.
- [6] MECHERI M, LE MOULLEC Y. Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles for coal-fired power plants[J]. Energy, 2016, 103: 758-771.
- [7] XU J L, SUN E H, LI M J, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant[J]. Energy, 2018, 157: 227-246.
- [8] 徐进良, 刘超, 孙恩慧, 等. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 1-10.  
XU Jinliang, LIU Chao, SUN Enhui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10.
- [9] SUN E H, XU J L, HU H, et al. Overlap energy utilization reaches maximum efficiency for S-CO<sub>2</sub> coal fired power plant: a new principle[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 99-113.
- [10] ZHANG Y F, LI H Z, HAN W L, et al. Improved design of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle for coal-fired power plant[J]. Energy, 2018, 155: 1-14.
- [11] BAI W G, ZHANG Y F, YANG Y, et al. 300 MW boiler design study for coal-fired supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 66-73.
- [12] 孙瑞强, 杨凯旋, 王博, 等. 超临界二氧化碳燃煤发电系统低温余热回收的技术经济性优化[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 120-129.  
SUN Ruiqiang, YANG Kaixuan, WANG Bo, et al. Economic optimization of low-temperature waste heat recovery in supercritical carbon dioxide coal-fired power system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 120-129.
- [13] YANG Y, BAI W G, WANG Y M, et al. Coupled simulation of the combustion and fluid heating of a 300 MW supercritical CO<sub>2</sub> boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 259-267.
- [14] 张一帆, 王安, 白文刚, 等. 300 MW 超临界二氧化碳锅炉气动力特性及壁温分布[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1700-1706.  
ZHANG Yinfan, WANG An, BAI Wengang, et al. Thermal fluid dynamic characteristics and wall temperature distribution of a 300mw supercritical CO<sub>2</sub> boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1700-1706.
- [15] ZHOU J, XIANG J, SU S, et al. Key issues and practical design for cooling wall of supercritical carbon dioxide coal-fired boiler[J]. Energy, 2019, 186: 115834.
- [16] 汪洋, 郑志敏, 李鹏鹏, 等. 300 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 二次再热燃煤锅炉系统设计[J]. 动力工程学报, 2022, 42(3): 197-206.  
WANG Yang, ZHENG Zhimin, LI Pengpeng, et al. System design of 300 MW S-CO<sub>2</sub> secondary reheating coal-fired boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(3): 197-206.
- [17] 朱萌, 周敬, 陈磊, 等. 1 000 MW 超临界二氧化碳燃煤机组锅炉设计研究[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(6): 567-574.  
ZHU Meng, ZHOU Jing, CHEN Lei, et al. Study on 1 000 MW coal-fired unit boiler design for supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(6): 567-574.
- [18] 杨丹蕾, 唐桂华, 范元鸿, 等. 引入烟气再循环的超临界二氧化碳燃煤锅炉冷却壁布置及壁温特性分析[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 144-150.  
YANG Danlei, TANG Guihua, FAN Yuanhong, et al. Cooling wall arrangement and wall temperature characteristic analysis for supercritical carbon dioxide coal-fired boiler with flue gas recirculation[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 144-150.
- [19] 苏宏亮, 黄莺, 殷亚宁, 等. 5 MW 超临界二氧化碳实验锅炉热力特性与壁温耦合计算模型[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 151-156.  
SU Hongliang, HUANG Ying, YIN Yaning, et al. Coupled calculation model of thermal characteristics and metal temperature of a 5 MW supercritical carbon dioxide boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 151-156.
- [20] 闫凯, 张建文, 乌晓江. 超临界二氧化碳工质管屏流量分配特性分析[J]. 锅炉技术, 2022, 53(2): 21-27.  
YAN Kai, ZHANG Jianwen, WU Xiaojiang. Study on flow distribution characteristics of supercritical carbon dioxide in a tube panel[J]. Boiler Technology, 2022, 53(2): 21-27.
- [21] 王富强, 牛海明, 刘千, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 燃煤发电机组锅炉出口 CO<sub>2</sub> 温度鲁棒分数阶 PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> 控制[J]. 热动力工程, 2022, 37(11): 7-14.  
WANG Fuqiang, NIU Haiming, LIU Qian, et al. Robust fractional-order PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> control of boiler outlet CO<sub>2</sub> temperature for supercritical carbon dioxide coal-fired

- generating plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11): 7-14.
- [22] ZHENG H N, MIAO Z, XU J L. Partial load operation characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> coal-fired power generation system[J]. Energy, 2024, 291: 130415.
- [23] LI H Z, ZHANG Y F, YAO M Y, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO<sub>2</sub> power cycle pilot loop[J]. Energy, 2019, 174: 792-804.
- [24] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1.  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1.
- [25] DOSTAL V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2004: 1.
- [26] 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管: GB 13296—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 1.  
Seamless stainless steel tubes for boiler and heat exchanger: GB 13296—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 1.
- [27] 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京锅炉厂, 译. 北京: 机械工业出版社, 1976: 53-55.  
Standard method of thermodynamic calculation for boilers[M]. Beijing Boiler Factory, translated. Beijing: China Machine Press, 1976: 53-55.

(责任编辑 李园)