

DOI: 10.19666/j.rlf.202208203

5 MW 级超临界二氧化碳燃气锅炉 性能评价研究及程序集成

谢 敏¹, 白文刚², 徐 力³, 苏宏亮⁴, 王 硕⁴, 戴博林⁵

(1. 哈尔滨电气科学技术有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 安徽省特种设备检测院, 安徽 合肥 230051;

4. 哈尔滨锅炉厂有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150046;

5. 哈电发电设备国家工程研究中心有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028)

[摘 要] 以超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环发电机组中主设备 S-CO₂ 锅炉作为研究目标, 以 5 MW 试验机组作为研究对象, 开展 S-CO₂ 锅炉性能指标评价体系研究。S-CO₂ 锅炉的核心性能指标为锅炉燃料效率、换热面吸热量占比、空气预热器性能、工质系统压降和锅炉 NO_x 排放浓度等。燃料效率计算中, 通过计算尾部烟气含氧量进行过量空气系数推算燃料消耗量和风量, 并改进排烟热损失的计算方法。引入了换热面吸热量占总吸热量比值作为 S-CO₂ 锅炉工质侧性能考核指标。建立了 5 MW S-CO₂ 燃气锅炉性能指标评价体系并集成程序且完成案例分析。实际工况与研究对象的设计参数 (设计效率 93.53%) 基本相当, 最终计算获得锅炉燃料效率未经修正为 92.05%, 锅炉燃料效率修正为 93.79%。

[关 键 词] 超临界二氧化碳锅炉性能评价; 能效修正计算; 性能计算集成

[引用本文格式] 谢敏, 白文刚, 徐力, 等. 5 MW 级超临界二氧化碳燃气锅炉性能评价研究及程序集成[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 165-172. XIE Min, BAI Wengang, XU Li, et al. Performance evaluation system and process integration of 5 MW class supercritical carbon dioxide gas-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 165-172.

Performance evaluation system and process integration of 5 MW class supercritical carbon dioxide gas-fired boiler

XIE Min¹, BAI Wengang², XU Li³, SU Hongliang⁴, WANG Shuo⁴, DAI Bolin⁵

(1. Harbin Electric Academy of Science and Technology Co., Ltd., Harbin 150028, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Anhui Special Equipment Inspection Institute, Hefei 230051, China; 4. Harbin Boiler Co., Ltd., Harbin 150046, China;

5. Harbin Power Equipment National Engineering Research Center Co., Ltd., Harbin 150028, China)

Abstract: Aiming to the performance analysis of boiler with supercritical carbon dioxide (S-CO₂) cycle, the boiler performance evaluation index system is built by taking the gas-fired boiler used in the 5 MW S-CO₂ Brayton cycle pilot unit at Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. as the research object. The core performance indexes of S-CO₂ boiler include the fuel efficiency of boiler, the ratio of heat absorption over the input heat for each heat exchanger, the performance of air preheater, the pressure drop of working fluid system, the NO_x emission concentration, and others. The fuel consumption and excess air coefficient are calculated via the measurement of oxygen concentration. Meanwhile, the calculation method of heat loss due to exhaust gas is improved. The ratio of heat absorption over the input heat for each heat exchanger is introduced, which shows the contribution of each heat exchanger on heat absorption process. Finally, the calculation process is integrated becoming to an executable program, and it is applied in the running and monitoring procedures. An operating case showed that, for the research

收稿日期: 2022-08-29 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFF0218104)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFF0218104)

第一作者简介: 谢敏 (1987), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新型动力循环系统研发, alice.m.xie@icloud.com。

object, the actual condition is basically the same as that of the design parameters. The finally calculated boiler fuel efficiency is 92.05% without correction and 93.79% with correction, the later is similar as the designed value (93.53%).

Key words: performance evaluation of supercritical carbon dioxide boiler; correction calculation of boiler thermal efficiency; performance calculation integration

近年来, 超临界二氧化碳 (supercritical carbon dioxide, S-CO₂) 布雷顿循环发电技术发展迅速。该技术被认为具有比传统发电循环技术更高的效率, 可以跟火电^[1-2]、余热^[3-4]、光热^[5-6]、新一代核堆^[7-8]等热源形式进行结合, 循环可以适用于各类中、高、低温热源情况。为了发展新型高效发电技术, 各国纷纷设立了研发计划。如美国的 Sunshot 计划^[9]及欧盟的 flex-sCO₂ 灵活性火电计划^[10]; 并开展了系统和核心设备的试验研究, 包括 Sandia 实验室的 205 kW 试验平台、10 MW 发电机组^[11], SwRI 研究院的 10 MW 发电透平试验^[12], KAERI 的 10 kW 循环试验系统^[13], 中科院工程热物理所的兆瓦级循环系统^[14], 华北电力大学 500 °C、26 MPa 传热试验平台^[15]。此外, 中国华能集团在 2021 年成功运行了世界首台 S-CO₂ 布雷顿循环发电系统, 发电功率 5 MW^[16]。

S-CO₂ 锅炉研究中主要关注锅炉管束的安全性和换热效率 2 方面。S-CO₂ 锅炉有大流量、大压降的特点, 易发生管道堵塞^[17], 尤其需要控制锅炉压降以减少对循环效率的影响^[18]; 另一方面, S-CO₂ 锅炉的入口工质温度相对汽水锅炉可能更高, 烟气余热利用是保障换热效率的核心问题^[19-20], 且锅炉换热面布置方式的改进对锅炉的性能影响巨大^[21-22]。

S-CO₂ 锅炉技术发展时间较短, 其质量评价体系在国内外尚属空白, 针对性开展锅炉性能评价技术的研究对 S-CO₂ 锅炉发展的指导意义重大。在电站锅炉的能效测试研究和应用中, 根据《锅炉安全技术规程》(TSG 11—2020) 所引用的相关节能规范, 电站锅炉的性能分析主要依靠《电站锅炉性能试验规程》(GB/T 10174—2015)^[23]来完成。锅炉效率的反平衡算法已经基本完善, 包括对锅炉散热损失的重新测定^[24-25]和给水温度对锅炉效率的修正方法研究^[26]等。但对于新型 S-CO₂ 锅炉的性能指标、评价体系, 可能与上述标准中规定的存在差异。本文以西安热工研究院 5 MW 示范工程中的 S-CO₂ 锅炉为研究对象 (图 1), 开展 S-CO₂ 锅炉的性能指标评价体系研究和程序集成。

1 锅炉性能的计算方法

5 MW S-CO₂ 锅炉呈 L 型布置, 在锅炉顶部设

置单一燃烧器。烟气侧, 5 MW S-CO₂ 锅炉与常规电站锅炉相似, 燃气与空气混合燃烧后在炉膛中与气冷壁进行换热, 而后烟气分为 2 部分: 一部分加热过热器、过热器侧省煤器; 另一部分加热再热器、再热器侧省煤器。随后烟气汇合, 进入空气预热器 (空预器) 中预热进入系统的空气。工质侧, 5 MW S-CO₂ 锅炉与常规电站锅炉有差别, 锅炉的给气分为 2 部分: 按设计工况, 约 90% 的工质来自布雷顿循环回热器出口, 因温度较高, 不经过省煤器预热; 另外约 10% 的低温补充工质, 通过分流进入过热器侧和再热器侧省煤器加热, 达到与回热器给气相当的温度后与后者汇合, 送入气冷壁。本文对其锅炉系统的边界进行了划定, 结果如图 2 所示。



图 1 5 MW S-CO₂ 锅炉现场照片
Fig.1 Photo of the 5 MW S-CO₂ boiler

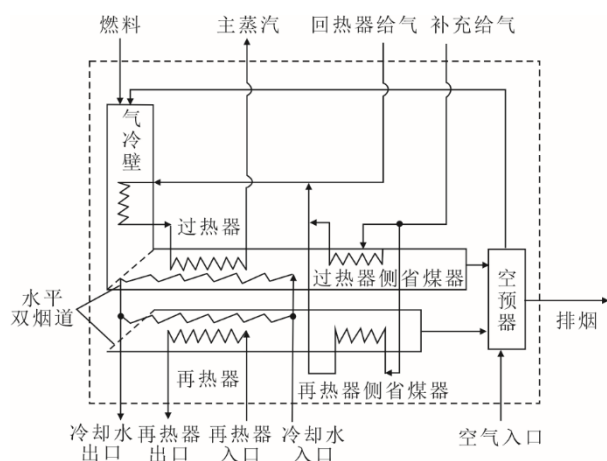


图 2 5 MW S-CO₂ 锅炉的系统及边界
Fig.2 System border of the 5 MW S-CO₂ boiler

根据国家市场监督管理总局特种设备安全与节能技术委员会锅炉分会的鉴定意见, 认为 5 MW

S-CO₂ 锅炉可参照执行《锅炉安全技术规程》(TSG 11—2020)。该规程中规定了“要符合锅炉节能管理有关安全技术规范 (TSG G0002—2010)”, 进而本文研究中参照 TSG G0002—2010 中引用的《GB/T 10184—2015 电站锅炉性能试验规程》开展 5 MW S-CO₂ 锅炉性能的相关分析。

1.1 反平衡法计算锅炉燃料效率

反平衡法是电站锅炉效率计算的主要方法, 主要是计算锅炉系统的各项热损失。S-CO₂ 燃气锅炉无固体未完全燃烧热损失 q_4 、灰渣物理显热损失 q_6 。因此, 其燃料效率 η 计算公式为:

$$\eta = (100 - (q_2 + q_3 + q_5 + q_{oth} - q_{ex})) / 100 \quad (1)$$

式中: q_2 为排烟热损失, %; q_3 为气体未完全燃烧热损失, %; q_5 为锅炉散热损失, %; q_{oth} 为其他热损失, %; q_{ex} 为外来热量与燃料低位发热量的百分比, %;

气体未完全燃烧热损失 q_3 、外来热量与燃料低位发热量的百分比 q_{ex} 计算方法与 GB/T 10184—2015 常用计算方法一致。下面对计算过程中与相关标准存在差异的计算方法进行讨论。

1) 排烟热损失 q_2

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_{net,ar}} \times 100 \quad (2)$$

式中: 离开锅炉系统边界的烟气带走物理显热 Q_2 包含了干烟气带走的热量 $Q_{2,fg,d}$ 和烟气所含水蒸气带走的热量 $Q_{2,wv,fg}$, 在 GB/T 10184—2015 计算 $Q_{2,fg,d}$ 时, 设置了基准温度 t_{re} 。

分析燃烧侧的能量转换过程可知 (图 3), q_{ex} 计算的空气携带热量 ΔH_{ex} 为过程 1—2, q_2 计算的排烟携带热量 ΔH_{fg} 为过程 2'—3, 二者间存在 2—2' 过程的差异, 对此本文按式(3)修正。其余部分计算方法与 GB/T 10184—2015 保持一致。

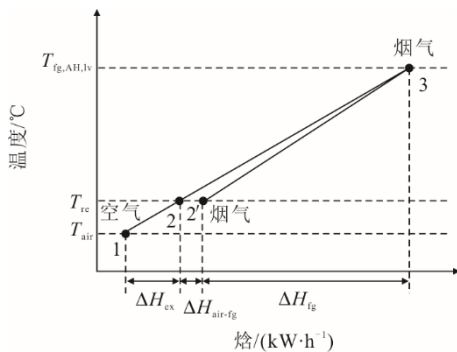


图 3 5 MW S-CO₂ 锅炉空气-烟气携带热量的变化
Fig.3 The different of heat dissipation between air and flue gas in the 5 MW S-CO₂ boiler

$$Q_{2,corr} = Q_2 + (V_{fg,d,AH,lv} c_{p,fg,d} t_{re} - V_{a,d,th,g} \alpha_{cr} c_{p,a,re} t_{re}) \quad (3)$$

式中: $V_{fg,d,AH,lv}$ 为每标准立方米燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积, m^3/m^3 ; $c_{p,fg,d}$ 为干烟气定压比热容, $kJ/(m^3 \cdot K)$; t_{re} 为基准温度, 取 $25\text{ }^\circ\text{C}$; $V_{a,d,th,g}$ 为燃气燃料的理论干空气量, m^3/m^3 ; α_{cr} 为过量空气系数; $c_{p,a,re}$ 为基准温度下空气定压比热容, $kJ/(m^3 \cdot K)$ 。

2) 锅炉散热损失 q_5

5 MW S-CO₂ 锅炉作为新工质锅炉, 其散热损失无法按 GB/T 10184—2015 附录 I 计算。本文根据设备表面温度法计算 5 MW S-CO₂ 锅炉散热损失: 首先对锅炉表面进行网格划分并测量表面温度分布和环境温度; 然后通过式(4)计算锅炉的散热热流密度。

$$q = \alpha \times (T_w - T_F) \quad (4)$$

式中: α 为壁面的表面换热系数; T_w 为外壁表面温度, K ; T_F 为环境温度, 取 $300\text{ }K$ 。

计算表面换热系数 α 为辐射换热系数 α_r 、自然对流换热系数 α_{ca} 和强制对流系数 α_{cw} 之和。

$$\alpha_r = \varepsilon \sigma \left(\frac{T_w^4 - T_F^4}{T_w - T_F} \right) \quad (5)$$

式中: ε 为壁面的表面热发射率, 取 0.8; σ 为辐射常数, $5.67 \times 10^{-8}\text{ }W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

$$\alpha_{ca} = 1.31(T_w - T_F)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\alpha_{cw} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{H} \quad (7)$$

式中: λ_a 为空气的热导率, $W/(m \cdot K)$; Nu 为努塞尔数; H 为外壁表面高度, m 。

最终, 锅炉的散热损失按各网格散热损失值的算术平均值求得:

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (8)$$

式中: A_i 为第 i 个网格的面积, m^2 。

3) 其他热损失 q_{oth}

5 MW S-CO₂ 锅炉设置了过热器、再热器冷却水, 吸收的热量未被利用, 其带走热量 Q_{cw} 计算公式为:

$$Q_{cw} = \frac{q_{m,cw}}{q_{m,f}} (H_{cw,lv} - H_{cw,cn}) \quad (9)$$

式中: $q_{m,cw}$ 为进入锅炉系统边界的冷却水质量流量, kg/h ; $q_{m,f}$ 为燃料消耗量, m^3/h ; $H_{cw,lv}$ 为冷却设备出口冷却水焓, kJ/kg ; $H_{cw,cn}$ 为冷却设备入口冷却水焓, kJ/kg 。

在本系统中有燃料消耗量测量设备,但考虑到仪表误差可能增大计算误差,在反平衡计算中,本文考虑通过实测烟气氧含量反推燃料消耗量的方法。具体过程如下:

$$q_{m,f} = \frac{Q_{out}}{Q_{net,ar} \eta / 100} \quad (10)$$

式中: Q_{out} 为锅炉系统有效输出热量, kJ/h; $Q_{net,ar}$ 为燃料收到基低位发热量, kJ/m³; η 为锅炉燃料效率。

计算中,由于 η 受到 $q_{m,f}$ 的影响,所以需要多次迭代计算求解,锅炉燃料消耗量的计算流程如图 4 所示。首先在不计入冷却水吸热损失的情况下,以仪表测量 $q_{m,f}$ 作为初代 $q_{m,f}$, 计算锅炉系统燃料效率 η_0 ; 然后计算出新一代 $q_{m,f}$, 并将新一代 $q_{m,f}$ 作为输入参数, 带入重新计算新的 η_i , 直至代间 $q_{m,f}$ 差值小于设定值为止。

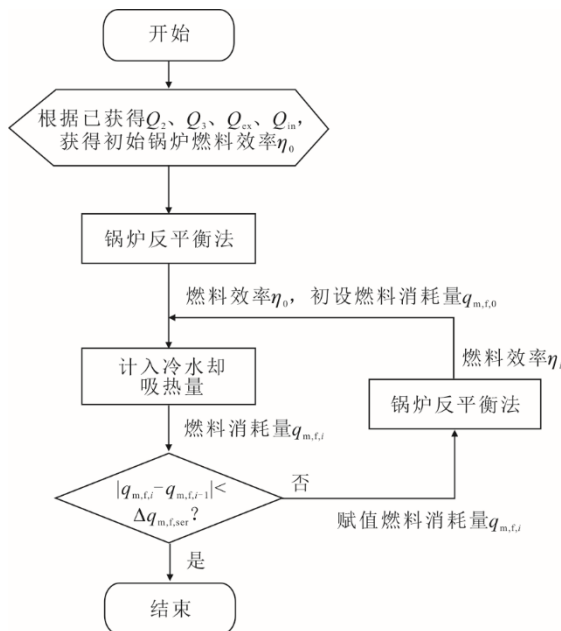


图 4 锅炉燃料消耗量的计算流程

Fig.4 Flow chart of the fuel consumption calculation

4) 锅炉效率的修正

GB/T 10184—2015 中规定的换算到设计(保证)条件下的锅炉效率计算方法要求试验工况接近锅炉的设计工况。但因 5 MW S-CO₂ 锅炉以示范、试验为主, 负荷波动较大, 所以不同工况下均需要计算锅炉效率。对于明显偏离设计条件的情况, 可以利用进风温度、给水温度对排烟温度的修正, 实现相同负荷条件下锅炉运行状况的对比, 此时假设锅炉负荷与设计值偏差所导致的工质流量变化对锅炉效率影响一致。

本文研究的空气预热器布置与常规锅炉无异, 进风温度偏离设计值时对排烟温度的修正按国标修正即可; 同时, 省煤器的布置有特殊性, 在水平双烟道中分别布置了省煤器, 设计工况下, 省煤器流量等比例, 且均为气冷壁总进气量的 5%, 给气温度为 25 °C。在进风温度对排烟温度修正的基础上, 进一步对省煤器给气温度偏离设计值进行修正, 其修正值 $t_{fg,cr,AH}$ 按式(11)计算:

$$t_{fg,cr,AH} = \frac{q_{m,SE} t_{fg,cr,SH} + q_{m,RE} t_{fg,cr,RH}}{q_{m,SE} + q_{m,RE}} \quad (11)$$

式中: $q_{m,SE}$ 、 $q_{m,RE}$ 为过热器侧、再热器侧省煤器给气流量, kg/s; $t_{fg,cr,SH}$ 、 $t_{fg,cr,RH}$ 为过热器侧、再热器侧省煤器给气温度对排烟温度的修正, 以过热器侧省煤器为例, 给气温度对排烟温度的修正按式(12)计算, 再热器侧类似。

$$t_{fg,cr,SH} = t_{fg,AH,lv,cr,a} + \left(\frac{t_{fg,Eco,en,SH} - t_{fg,Eco,lv,SH}}{t_{fg,Eco,en,SH} - t_{fw,Eco,m}} \right) \times \left(\frac{t_{fg,AH,lv,cr,a} - t_{a,AH,end}}{t_{fg,AH,en,m} - t_{a,AH,end}} \right) (t_{fg,Eco,d} - t_{fw,Eco,m}) \quad (12)$$

式中: $t_{fg,AH,lv,cr,a}$ 为换算到设计的空气预热器进口空气温度下的排烟温度, °C; $t_{fg,Eco,en,SH}$ 为过热器侧省煤器进口烟温, °C; $t_{fg,Eco,lv,SH}$ 为过热器侧省煤器出口烟温, °C; $t_{fw,Eco,m}$ 为实测省煤器给气温度, °C; $t_{a,AH,end}$ 为设计空气预热器进口空气温度, °C; $t_{fg,AH,en,m}$ 为实测空气预热器进口烟气温度, °C; $t_{fg,Eco,lv,SH}$ 为过热器侧省煤器出口烟温, °C; $t_{fw,Eco,d}$ 为设计省煤器给气温度, °C。

5) 反平衡法的锅炉性能计算指标体系

本文研究的 5 MW S-CO₂ 燃气锅炉性能指标评价体系研究中, 以反平衡法的锅炉效率计算为核心, 通过归纳、汇总计算过程所需参数和锅炉效率的计算指标可以形成锅炉效率计算指标体系。性能计算指标体系主要包括锅炉设计参数群、设计燃料参数群、实测入炉燃料参数群、实测空气参数群、实测尾部烟气参数群及实测锅炉负荷参数群等, 具体如图所示。在此基础上, 充分考虑锅炉运行过程中与性能密切相关的其他指标, 如换热面性能、空预器性能、工质系统压降和锅炉 NO_x 排放浓度等指标, 则可构建完整的 5 MW S-CO₂ 燃气锅炉性能指标评价体系。

1.2 换热面性能分析

由于本文研究对象在工质上与常规电站锅炉

存在差异，因此本节从工质吸热过程方面讨论 S-CO₂ 工质换热面的性能。5 MW S-CO₂ 燃气锅炉的受热面包括气冷壁、再热器、再热器侧省煤

器、过热器及过热器侧省煤器，此外，本节还加入对再热器、过热器冷却水保护系统换热过程的考虑。

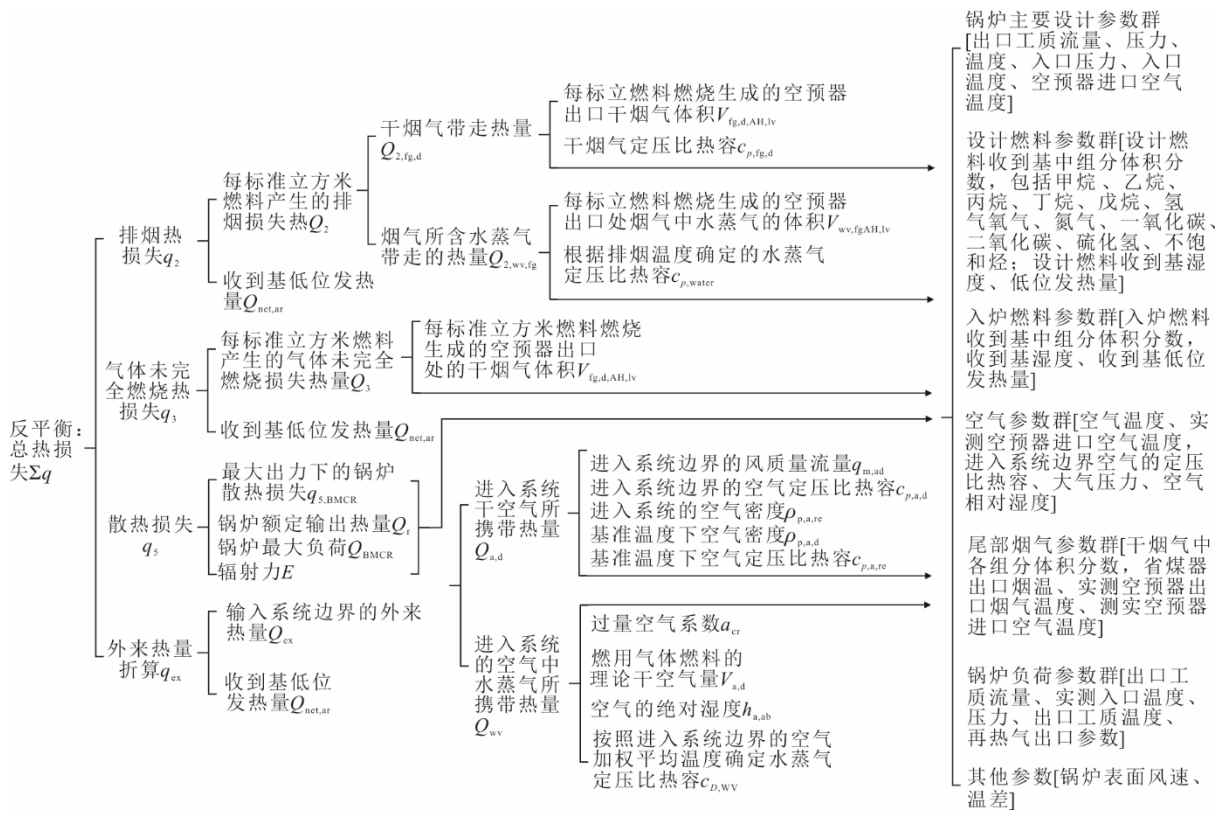


图 5 5 MW S-CO₂ 燃气锅炉反平衡法性能计算指标体系

Fig.5 Index system for performance calculation of the 5 MW S-CO₂ gas-fired boiler based on indirect balance method

吸热面的总热量 Q_{sum} 包括 CO₂ 工质从过热器侧省煤器中吸收的热量 Q_{SH-ECO} 、再热器侧省煤器中吸收的热量 Q_{RH-ECO} 、气冷壁中吸收的热量 Q_{GCW} 、过热器中吸收的热量 Q_{SH} 、再热器 Q_{RH} 中吸收的热量及过热器冷却水带走的热量 $Q_{Cooling}$ ，计算公式为：

$$Q_{sum} = Q_{SH-ECO} + Q_{RH-ECO} + Q_{GCW} + Q_{SH} + Q_{RH} + Q_{Cooling} = q_{SH-ECO} \Delta H_{SH-ECO} + q_{RH-ECO} \Delta H_{RH-ECO} + q_{GCW} \Delta H_{GCW} + q_{SH} \Delta H_{SH} + q_{RH} \Delta H_{RH} + q_{Cooling} \Delta H_{Cooling} \quad (13)$$

式中： ΔH 为各换热器的焓差。本文研究对象的 2 个省煤器分别设置于 2 个水平烟道的过热器/再热器之后，设计工况下流量为主蒸汽流量的 10%，且流量可调。分析中，以各换热面吸热量占总吸热量的比值 (Q_i/Q_{sum}) 来考察各换热面的贡献。

1.3 其他性能指标

除锅炉效率外，锅炉性能评价体系中还包含空

预器性能、工质系统压降和锅炉 NO_x 排放浓度 3 项指标，结合锅炉效率对其整体性能做出评价，研究对象的这 3 项指标与国标规定并无差异。

2 程序集成

在 GB/T 10184—2015 的基础上，建立了符合 5 MW S-CO₂ 锅炉的锅炉燃料效率反平衡算法及修正算法，基于工质换热过程的锅炉换热面性能计算方法，并引入考虑了其他评价锅炉性能的指标，形成了 5 MW S-CO₂ 锅炉性能指标评价体系。基于以上理论分析方法，本文在 Python 3.2 中实现了整个指标评价体系算法的程序集成，程序结构如图 6 所示。集成程序包含了用户层、界面层、计算层和数据层。其中，使用 PYQT5 建立了程序交互式界面，用于用户数据的输入、展示、用户需求自定义或工程现场集散控制系统数据的接入；基于 Python 3.2 实现性能计算算法部分；提供基于结构化查询语言的数据存储系统，用于数据库建设、动态数据

访问、指定区间数据调用以及计算指标结果存储等，程序界面示意如图 7 所示。

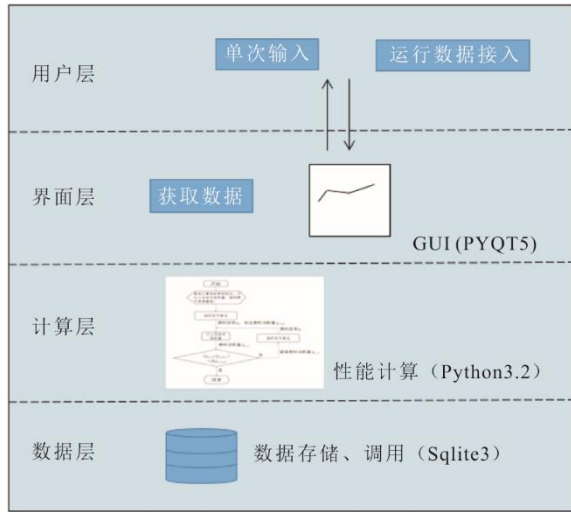


图 6 5 MW S-CO₂ 锅炉性能评价集成程序结构
Fig.6 Structure of the 5 MW S-CO₂ boiler performance evaluation integration program

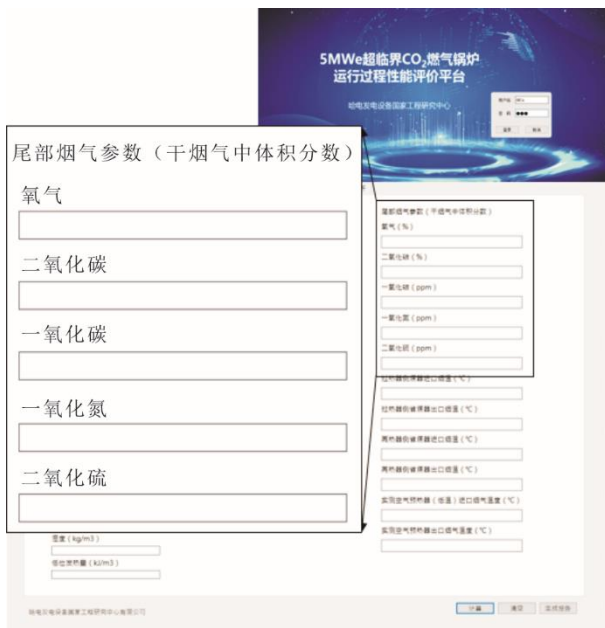


图 7 5 MW S-CO₂ 锅炉性能评价集成程序界面示意
Fig.7 Interface display of the 5 MW S-CO₂ boiler performance evaluation integration program

3 结果及讨论

基于第 1 节研究内容，本文在第 2 节集成程序上进行了案例的应用，讨论某工况连续运行 2 h 下锅炉运行情况的性能评价。根据运行现场测试数据（部分数据见表 1），通过程序计算获得该案例的性能计算结果见表 2。

表 1 主要参数测量及锅炉设计值汇总
Tab.1 Summary of measurement results of principal parameters in the study case and the design case

参数	工况 (2 h 平均)	设计
主气温度/°C	597.90	600.00
主气流量/(t·h ⁻¹)	279.80	290.40
主气压力/MPa	20.55	20.06
空预器后实测烟气含氧量/%	5.95	
排烟温度/°C	139.35	138.00
炉膛出口烟温/°C	987.70	1 221.00
过热器出口烟温/°C	593.70	612.00
再热气出口烟温/°C	599.90	610.00
过热器侧分流省煤器出口烟温/°C	363.25	372.00
再热器侧分流省煤器出口烟温/°C	386.50	366.00
燃料成分 (体积分数) [CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , C ₅ H ₁₂ , C ₆ H ₁₄ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ O, H ₂]/%	[93.27, 3.89, 0.64, 0.22, 0.07, 0.03, 1.19, 0.69, 0, 0]	[93.27, 3.89, 0.64, 0.22, 0.07, 0.03, 1.19, 0.69, 0, 0]
实测空预器进口空气温度/°C	25.00	
省煤器实测给气温度/°C	270.75	202.43
锅炉设计效率/%		93.53

表 2 案例性能计算结果汇总
Tab.2 Summary of performance calculation results of the study case

参数	数值
排烟热损失/%	6.03
修正排烟热损失/%	5.98
气体未完全燃烧热损失/%	0
散热损失/%	0.64
外来热量与燃料低位发热量的百分比/%	0
其他热损失/%	1.29
锅炉燃料效率 (不含修正) /%	92.05
锅炉燃料效率的修正/%	93.79
气冷壁吸热量占比/%	54.81
过热器吸热量占比/%	16.62
再热器吸热量占比/%	18.07
省煤器吸热量占比/%	9.11
冷却水吸热量占比/%	1.38
空预器烟气侧效率/%	67.32
工质系统压降/MPa	1.03
烟气 NO _x 排放体积分数/(μL·L ⁻¹)	<30.00

其中，排烟热损失为 6.03%，经修正后为 5.98%，气体未完全燃烧损失、外来热量与燃料低位发热量的百分比可忽略不计（2 位有效数字）；散热损失为 0.64%，其他热损失（冷却水）为 1.29%，最终计算获得锅炉燃料效率未经修正为 92.05%，通过对排烟热损失、入口空气温度、省煤器给气温度的修正后，

锅炉燃料效率修正为93.79%，如图所示。该工况实际运行情况与研究对象的设计参数（设计效率93.53%）基本相当，验证了设计方法有效、运行过程可靠。

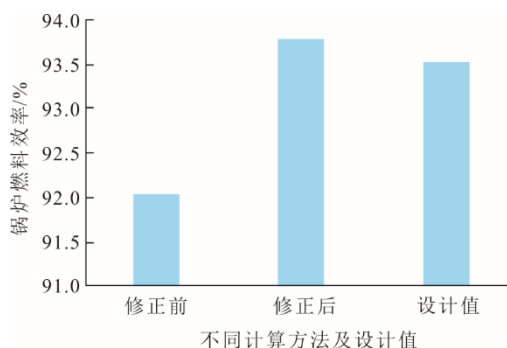


图8 对锅炉燃料效率进行修正前、后以及额定设计值的对比
Fig.8 Compression among the non-corrected, corrected and designed fuel efficiencies

换热面性能方面，气冷壁吸热量占总换热量的54.81%，占比最高；再热器吸热量占18.07%和过热器吸热量占16.62%；平行布置2台省煤器吸热量共计占比9.11%；冷却水吸热量占比为1.38%。

其他性能指标中，空预器烟气侧换热效率为67.32%，工质系统压降1.03 MPa，烟气NO_x排放体积分数小于30 μL/L。

4 结论

本文以S-CO₂布雷顿循环发电机组中主设备S-CO₂锅炉作为研究目标，以西安热工院5 MW试验机组作为研究对象，开展S-CO₂锅炉性能指标评价体系研究，在接近额定工况条件下实测数据如下。

1) 排烟热损失为6.03%，修正后为5.98%，散热损失为0.64%，其他热损失（冷却水）为1.29%，最终计算获得锅炉燃料效率未经修正为92.05%，修正后为93.79%。

2) 该实际工况运行情况与研究对象的设计参数（设计效率93.53%）基本相当，验证了设计方法有效、运行过程可靠。

3) 气冷壁吸热量占总换热量的54.81%，占比最高；其次是再热器吸热量占18.07%和过热器吸热量占16.62%；平行布置2台省煤器吸热量共计占比9.11%；冷却水吸热量占比为1.38%。

[参考文献]

[1] LI H Z, ZHANG Y F, YANG Y, et al. Preliminary design assessment of supercritical CO₂ cycle for commercial scale coal-fired power plants[J]. Applied Thermal

Engineering, 2019, 158: 113785.
 [2] SHI Y, ZHONG, W Q, SHAO Y J, et al. System analysis on supercritical CO₂ power cycle with circulating fluidized bed oxy-coal combustion[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(3): 505-518.
 [3] SIDDIQUI M E, ALMITANI K H. Proposal and thermodynamic assessment of S-CO₂ Brayton cycle layout for improved heat recovery[J]. Entropy, 2020, 22: 305.
 [4] HAROON M, SHEIKH N A, AYUB A, et al. Exergetic, economic and exergo-environmental analysis of bottoming power cycles operating with CO₂-based binary mixture[J]. Energies, 2020, 13(19): 1-19.
 [5] GARG P, SRINIVASAN K, DUTTA P, et al. Comparison of CO₂ and steam in transcritical Rankine cycles for concentrated solar power[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1138-1146.
 [6] DUNIMA S, JAHN I, HOOMAN K, et al. Comparison of direct and indirect natural draft dry cooling tower cooling of the sCO₂ Brayton cycle for concentrated solar power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1070-1080.
 [7] HANDWERK C S, DRISCOLL M J, HEJZLAR P. Optimized core design of a supercritical carbon dioxide-cooled fast reactor[J]. Nuclear Technology, 2007, 164(3): 320-336.
 [8] POPE M A. Thermal hydraulic design of a 2 400 MWth direct supercritical co-cooled fast reactor[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006: 1.
 [9] MEHOS M, CRAIG T, JENNIE J, et al. On the path to sunshot: advancing concentrating solar power technology, performance, and dispatchability[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2016: 1.
 [10] MECHERI M. SCO₂ closed Brayton cycle for coal-fired power plant: an economic analysis of a technical optimization[C]. 2nd European Supercritical CO₂ Conference. 2018: 15.
 [11] WRIGHT S A, CONBOY T M, PARMA E J, et al. Summary of the Sandia supercritical CO₂ development program[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2011, 21(12): 1562-1564.
 [12] MOORE J, CICH S, DAY-TOWLER M, et al. Development and testing of a 10 MWe supercritical CO₂ turbine in a 1 MWe flow loop[C]. ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2020: 1.
 [13] CHO J, CHOI M, BAIK Y J, et al. Development of the turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle[J]. International Journal of Energy Research, 2016, 40(5): 587-599.
 [14] 吕国川, 王晓放, 祝畅, 等. MW级超临界二氧化碳向心涡轮设计及分析[J]. 工程热物理论, 2022, 43(1): 67-73.
 LYU Guochuan, WANG Xiaofang, ZHU Chang, et al. Aerodynamic design and analysis of a MWe supercritical carbon oxide radial-inflow turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(1): 67-73.
 [15] ZHU B, XU J, WU X, et al. Supercritical "boiling" number, a new parameter to distinguish two regimes of carbon dioxide heat transfer in tubes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 136: 254-266.
 [16] 王林, 白文刚, 李红智, 等. 5 MW级超临界二氧化碳锅炉启动过程中气冷壁堵塞原因分析与对策[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 142-148.

- WANG Lin, BAI Wengang, LI Hongzhi, et al Cause analysis and countermeasures for gas wall blockage of a 5 MW class supercritical carbon dioxide boiler. Thermal Power Generation[J], 2022, 51(5): 142-148.
- [17] 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.
- [18] 孙恩慧. 超高参数二氧化碳燃煤发电系统热力学研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.
SUN Enhui. Thermodynamic research on ultra-high parameter carbon dioxide coal-fired generation system[D]. North China Electric Power University, 2020: 1.
- [19] MOULLEC Y L. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Energy, 2013, 49: 32-46.
- [20] ZHANG Y F, LI H Z, HAN W L, et al. Improved design of supercritical CO₂ Brayton cycle for coal-fired power plant[J]. Energy, 2018, 155: 1-14.
- [21] 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 Yifan, WANG An, BAI Wengang, et al. Thermal fluid dynamic characteristics and wall temperature distribution of a 300 MW supercritical CO₂ boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1700-1706.
- [22] 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.
- [23] 电站锅炉性能试验规程: GB/T 10184—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 18.
Performance test code for utility boiler: GB/T 10184—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 18.
- [24] ZHANG S S, QI G L, GUAN J, et al. The heat loss test and calculation of 240 t/h circulating fluidized bed boilers[C]//2015 International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering (SEEE 2015). 2015: 2.
- [25] 齐国利, 管坚, 冷浩. 关于锅炉热效率测试结果之排烟温度修正方法的探讨[J]. 电站系统工程, 2013(1): 13-14.
QI Guoli, GUAN Jian, LENG Hao. Discussion on correction of exit gas temperature for boiler thermal efficiency test results[J]. Power System Engineering, 2013(1): 13-14.
- [26] 杨海生, 张伟. 锅炉性能试验中给水温度对锅炉效率的修正计算探讨[J]. 锅炉技术, 2018, 49(6): 27-30.
YANG Haisheng, ZHANG Wei. Discussion on calculation of boiler efficiency correction from the boiler feedwater temperature deviation during boiler performance test[J]. Boiler Technology, 2018, 49(6): 27-30.

(责任编辑 邓玲惠)

广告目次

上海凯泉泵业(集团)有限公司.....	封三
南京常荣声学股份有限公司.....	后彩插 1
北京柏兰达环境工程有限公司.....	后彩插 2
中科润资(重庆)节能科技有限公司.....	后彩插 3
西安热工研究院有限公司.....	后彩插 4—8
《热力发电》杂志重点期刊.....	后彩插 9
《热力发电》订阅宣传页.....	后彩插 10
海阳市谊合建筑机械有限公司.....	后彩插 11
隔而固(青岛)振动控制有限公司.....	后彩插 12

RELI FADIAN

热力发电



扫一扫关注我们

ISSN 1002-3364
CN 61-1111/TM

邮发代号：国外 M3261
国内 52-103

定价：30.00 元/期
360.00 元/年

ISSN 1002-3364



9 771002 336237

0.6