

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209239

# 超临界二氧化碳燃煤发电系统锅炉耐热钢选材分析

邢刚<sup>1</sup>, 郑毫楠<sup>2</sup>, 徐进良<sup>2</sup>, 孙恩慧<sup>2</sup>, 乔加飞<sup>3</sup>, 王兵兵<sup>3</sup>, 胡锐<sup>2</sup>

(1. 国电电力发展股份有限公司, 北京 100101;

2. 华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 100096;

3. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102211)

**[摘要]** 采用超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)循环时, 炉膛管内工质温度较高, 耐热钢钢材等级需提升。S-CO<sub>2</sub>管内工质温度与壁温相差较大, 远高于水蒸气锅炉30~50℃的温差范围。工程应用的水蒸气锅炉受热面选材的要求与依据, 无法直接用于S-CO<sub>2</sub>锅炉。在材料边界条件下, 从材料的高温强度和腐蚀特性出发, 综合成熟耐热材料的使用情况和经济性能, 探讨将T23、T91、T92、TP347HFG、Super304H等耐热钢应用于S-CO<sub>2</sub>锅炉的可行性, 得到S-CO<sub>2</sub>锅炉的选材特点。研究表明: 在一定管结构条件下, T91可用于冷却壁选材, 传统水蒸气锅炉水冷壁管材, 如12Cr1MoVG、T21和T23等铁素体耐热钢将无法使用; 对于过热器, 只有热强性更好的奥氏体钢TP347HFG与Super304H在一定管结构参数条件下才符合受热面选材要求。

**[关键词]** S-CO<sub>2</sub>锅炉; 主蒸汽参数; 铁素体/马氏体钢; 奥氏体钢; 镍基合金

**[引用本文格式]** 邢刚, 郑毫楠, 徐进良, 等. 超临界二氧化碳燃煤发电系统锅炉耐热钢选材分析[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 157-164. XING Gang, ZHENG HaoNan, XU JinLiang, et al. The analysis of heat-resistant steel selection for coal-fired supercritical carbon dioxide boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 157-164.

## The analysis of heat-resistant steel selection for coal-fired supercritical carbon dioxide boiler

XING Gang<sup>1</sup>, ZHENG Haonan<sup>2</sup>, XU Jinliang<sup>2</sup>, SUN Enhui<sup>2</sup>, QIAO Jiafei<sup>3</sup>,  
WANG Bingbing<sup>3</sup>, HU Rui<sup>2</sup>

(1. Guodian Power Development Co.Ltd., Beijing 100101, China;

2. The Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy Utilization (North China Electric Power University), Beijing 100096, China;

3. CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co.,Ltd., Beijing 102211, China)

**Abstract:** To ensure the safe and reliable operation of supercritical carbon dioxide (S-CO<sub>2</sub>) power plant over a long period of time, referred to the material commonly used in traditional steam boiler, the material of S-CO<sub>2</sub> boiler is selected from high temperature strength and corrosion characteristics. When CO<sub>2</sub> flows through the boiler, the temperature of CO<sub>2</sub> is high, the temperature difference between CO<sub>2</sub> and tube wall temperature is large, over the 30~50℃ of steam boiler. Then the grade of the heat-resistant steel has to be upgraded. However, requirements and methods for the material selection for steam boiler cannot be directly used for S-CO<sub>2</sub> boiler. The feasibility of heat-resistant steels such as T23, T91, T92, TP347HFG and Super304H used in S-CO<sub>2</sub> boilers is explored from using maturity and economic performance. The results show that for cooling wall, T91 could be selected at certain tube structure, but 12Cr1MoVG, T21 and T23 et al used in steam boiler could not be selected. For superheater, only austenitic steel TP347HFG and Super304H meet the material selection requirements at certain tube structure.

**Key words:** S-CO<sub>2</sub> boiler; parameters of main vapor; ferritic/martensitic steel; austenitic steel; nickel base alloy

收稿日期: 2022-09-30 网络首发日期: 2023-04-28

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY2030XD XM-19-10.1)

Supported by: Science and Technology Project of CHN Energy (GJNY2030XD XM-19-10.1)

第一作者简介: 邢刚 (1980), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为工程热物理, gang.xing@chnenergy.com.cn.

目前,火力发电是我国主要的发电方式,为节能提效,减少碳排放,传统燃煤电厂通过提高蒸汽参数来提升效率,高蒸汽参数下的高效率发电机组对耐热材料提出了更高的性能要求。水蒸气在超高温(如 700 °C)下对金属材料的腐蚀现象非常严重,昂贵的镍基合金限制了通过提高参数进一步提高水蒸气朗肯循环热效率的可行性<sup>[1-2]</sup>。在保障能源安全的前提下,日益增长的减排压力促使研究人员寻找一种更加先进高效的动力循环来代替水蒸气朗肯循环以实现煤炭清洁高效利用。在众多清洁煤电技术中,高效紧凑的超临界二氧化碳(supercritical carbon dioxide, S-CO<sub>2</sub>)循环受到了广泛的关注。

Moulic<sup>[3]</sup>首先对 1 000 MW 级再压缩、二次再热 S-CO<sub>2</sub> 循环燃煤电厂进行了初步的概念设计。S-CO<sub>2</sub> 锅炉选用了塔式煤粉炉,为使锅炉压降可接受,炉膛冷却壁与过热器采用大管径设计,分别选用了 T91 与 Super304H 作为受热面管材,文中缺乏进一步对设计锅炉受热面壁温校核的计算。Bai 等人<sup>[4]</sup>对 300 MW 燃煤电厂,一次再热再压缩 S-CO<sub>2</sub> 循环锅炉进行了概念设计。锅炉炉型选用  $\Pi$  式炉,炉膛下部冷却壁采用螺旋管圈,上部冷却壁为垂直管屏,较大的设计管径使得管壁温较高,最大壁温高于 900 K。Xu 等人<sup>[5]</sup>为解决 S-CO<sub>2</sub> 循环大流量引起大锅炉压降的问题,创新性的提出了 1/8 分流减阻方法以及锅炉模块化设计。胡涵等<sup>[6]</sup>在此研究基础上,深入探究了分流模式下炉膛冷却壁的具体布置型式。发现冷却壁采用分流模式时,由于管子长度减小为原来的一半,采用螺旋管圈不仅无法起到均匀出口气温的作用,还会大大增加冷却壁压降,垂直管屏更适合模块化的 S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁。Zhou 等人<sup>[7]</sup>进一步为解决炉膛温度分布不均,提出了对称流动和局部炉膛截面积增大的锅炉布置策略,给出了上大下小炉膛+双炉膛结构+烟气再循环新锅炉构型。

现有 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的研究表明,当 S-CO<sub>2</sub> 循环应用于燃煤电厂时,S-CO<sub>2</sub> 锅炉炉膛工质侧存在工质温度高和质量流量大的问题,经典水蒸气锅炉结构无法直接应用于 S-CO<sub>2</sub> 循环,新锅炉构型应运而生。当下,需对所提出新型锅炉受热面耐热材料选择过程进行详细分析。本文以基于复叠原理的三压缩 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电系统(triple-compressions S-CO<sub>2</sub> coal-fired power generation system based on overlap energy utilization, TCO)为基础<sup>[8]</sup>,首先引出分流

模式下锅炉受热面的具体布置型式,进一步分析了 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面的管结构选型方法、耐热材料的筛选准则等问题,得到了锅炉耐热钢材选用特点,为 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面选材提供了理论依据。

## 1 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电循环

### 1.1 基于能量复叠利用的三压缩 S-CO<sub>2</sub> 循环

对于 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电系统的应用,循环构建面临 2 个主要问题。首先,S-CO<sub>2</sub> 循环的工质流量是水蒸气朗肯循环的 6~8 倍,循环压降对循环效率影响较大,会降低机组发电效率,存在压降惩罚效应;其次,S-CO<sub>2</sub> 循环更适合中高温热源(约 550 °C)。锅炉烟气温在 120~1 600 °C 较宽范围,难以仅通过简单的 S-CO<sub>2</sub> 布雷顿循环高效地实现烟气热量全温区吸收<sup>[5]</sup>。针对上述 2 个关键问题,提出了 TCO,循环效率代表着 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电机组效率极限。该循环采用三级压缩回热提高循环回热效果,采用二次再热、一次间冷布置提高循环平均吸热温度、降低循环平均放热温度,应用能量复叠利用原理高效吸收尾部烟道余热,应用锅炉模块化设计降低锅炉流动阻力。主蒸汽参数为 600 °C/30 MPa 时,该系统热效率可达 53.45%,显著提高了 S-CO<sub>2</sub> 循环应用于燃煤电厂的效率潜力,表 1 给出了详细的热力计算条件。本文以此循环为基础,深入探究 S-CO<sub>2</sub> 锅炉选材特点。

表 1 S-CO<sub>2</sub> 循环与锅炉耦合计算相关参数  
Tab.1 Parameters related to the calculation of the coupling between the S-CO<sub>2</sub> cycle and the boiler

项目	数值
透平入口温度 $T_3/^\circ\text{C}$	600
透平入口压力 $p_3/\text{MPa}$	30.0
再热气温度/ $^\circ\text{C}$	620/620
透平等熵效率 $\eta_{T,s}/\%$	93
压缩机 C1 的入口温度 $T_1/^\circ\text{C}$	32
压缩机 C1 的入口压力 $p_1/\text{MPa}$	7.6
压缩机的等熵效率 $\eta_{C,s}/\%$	89
回热器压降 $\Delta p/\text{MPa}$	0.1
回热器夹点温差 $\Delta T_{LTR}/\Delta T_{HTR}/^\circ\text{C}$	10
一次风温度 $T_{\text{pri air}}/^\circ\text{C}$	320
一次风入口温度 $T_{\text{pri air in}}/^\circ\text{C}$	31
一次风占总风量的比例/ $\%$	19
二次风入口温度 $T_{\text{sec air in}}/^\circ\text{C}$	23
二次风占总风量的比例/ $\%$	81
过量空气系数	1.2
锅炉排烟温度 $T_{\text{ig, ex}}/^\circ\text{C}$	123
环境温度 $T_a/^\circ\text{C}$	20

TCO 循环的工作流程如图 1 所示。S-CO<sub>2</sub> 工质在透平 T3 出口分流：一部分进入外置式空气预热器（空预器）（external air preheater, EAP）与高温回热器 2（high temperature regenerative heat exchanger, HTR2）的低压侧；另一部分进入压缩机 C3 并与 LTR 高压侧出口的工质汇合进入 MTR 高压侧。在 MTR 高压侧出口，工质与经过 C4 压缩的高压工质汇合，分别流入 HTR 高压侧与 HTR2 高压侧，小部分工质经过回热器 HTR2 高压侧、加热器 4a、加热器 4b，其余工质通过 HTR 高压侧进入加热器 1 吸热后与来自加热器 4b 的工质汇合进入透平 T1，之后依次经过加热器 2、透平 T2、加热器 3 与 T3，完成一个循环。

工质从 LTR 低压侧出口进行再分流：一部分依次经过冷却器 1、压缩机 C1、冷却器 2 和压缩机 C2 返回 LTR 高压侧；另一部分进入压缩机 C3 并与 LTR 高压侧出口的工质汇合进入 MTR 高压侧。在 MTR 高压侧出口，工质与经过 C4 压缩的高压工质汇合，分别流入 HTR 高压侧与 HTR2 高压侧，小部分工质经过回热器 HTR2 高压侧、加热器 4a、加热器 4b，其余工质通过 HTR 高压侧进入加热器 1 吸热后与来自加热器 4b 的工质汇合进入透平 T1，之后依次经过加热器 2、透平 T2、加热器 3 与 T3，完成一个循环。

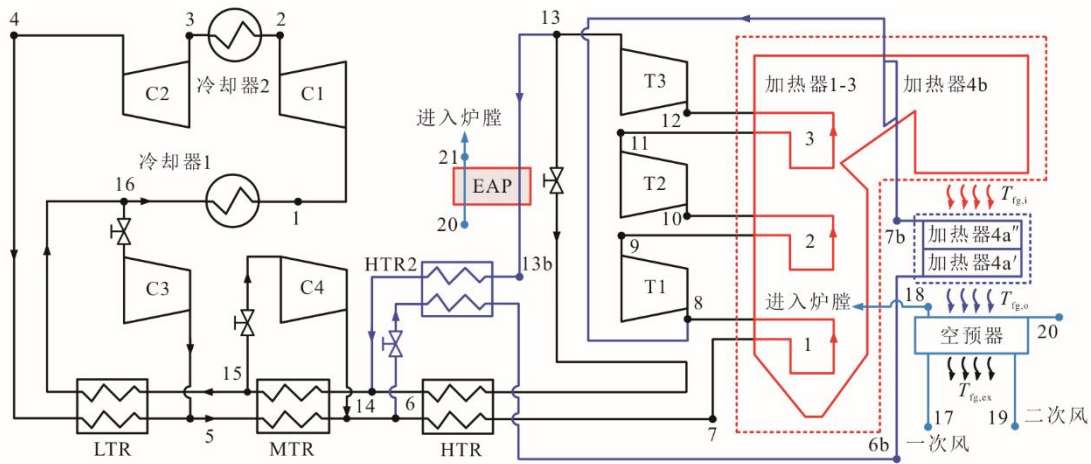


图 1 基于能量复叠利用的三压缩 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电系统  
Fig.1 Triple-compression S-CO<sub>2</sub> coal-fired power generation system with overlap energy utilization

### 1.2 S-CO<sub>2</sub> 循环锅炉受热面布置

S-CO<sub>2</sub> 循环应用于燃煤发电领域，锅炉设计会面临 2 个关键问题：一是炉膛入口工质温度较高，对于二次再热 S-CO<sub>2</sub> 循环，炉膛入口工质温度通常高于 500 °C，而传统水蒸气朗肯循环省煤器入口温度在 320 °C 左右；二是大循环流量引起大锅炉压降，S-CO<sub>2</sub> 循环流量比水蒸气朗肯循环大 6~8 倍，锅炉压降会明显降低 S-CO<sub>2</sub> 循环效率，而水蒸气朗肯循环效率对锅炉压降变化的敏感性较低。当主加热器压降和再热压降增加 1 MPa 时，S-CO<sub>2</sub> 循环热效率将分别降低 1% 和 2%<sup>[5]</sup>，再热压降对循环效率的影响较为明显，因此再热受热面应尽可能采用大管径。

S-CO<sub>2</sub> 锅炉和水蒸气锅炉的受热面布置如图 2 所示。图 2a)给出了分流模式下 TCO 循环锅炉模块化设计受热面布置方案，冷却壁耦合了分流与热负荷匹配策略，解决了冷却壁中工质温度高和质量流量大的问题。炉内的燃烧器区域热负荷最高，采用三分流来控制再热冷却壁壁温，同时保证压降可接

受。过热器与再热器依次布置在炉膛顶部，换热器 H4 用来吸收尾部烟道余热，实现烟气热量全温区吸收。图 2b)是传统水蒸气塔式锅炉受热面结构布置，炉膛下辐射区为带内螺纹管的螺旋管圈水冷壁，上辐射区为垂直管屏光管水冷壁。

## 2 锅炉计算模型

### 2.1 冷却壁壁厚与压降

管壁厚度依据中国现行的水蒸气锅炉国家标准进行计算确定<sup>[9]</sup>，壁厚与管内径、压力的乘积成正比，而管内径与工质流量和锅炉允许压降有关。

$$\delta = \frac{pd_i}{2\varphi_{\min}[\sigma] - p} + c \quad (1)$$

式中： $p$  为计算工质压力，MPa； $d_i$  为管内径，mm； $[\sigma]$  为耐热钢许用应力，MPa； $\varphi_{\min}$  为最小减弱系数取为 1； $c$  为厚度附加量。

通常，流体在管道内流动时，其压降一般由 4 部分组成，分别为摩擦压降、局部阻力压降、重位压降和

加速压降。锅炉管内沿程速度变化较小,加速压降相对较小,可以忽略不计,因此管路总压降可写成下式:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_{jb} + \Delta p_g \quad (2)$$

冷却壁管的摩擦压降、重力压降可由式(3)、式(4)计算。

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} f \frac{l}{d_i} \frac{G^2}{\rho_f} \quad (3)$$

$$\Delta p_g = \rho_f g H \quad (4)$$

式中:  $\rho_f$  为工质密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $l$  为冷却壁管长,  $\text{m}$ ;  $d_i$  为管道内径,  $\text{m}$ ;  $G$  为工质质量流速  $\text{kg/s}$ ;  $H$  为气冷壁管高度; 式(3)中摩擦阻力系数  $f$  的取值可根据 Filonenko 公式得到<sup>[10]</sup>。

$$f = \frac{1}{(1.821 \lg Re_f - 1.64)^2} \quad (5)$$

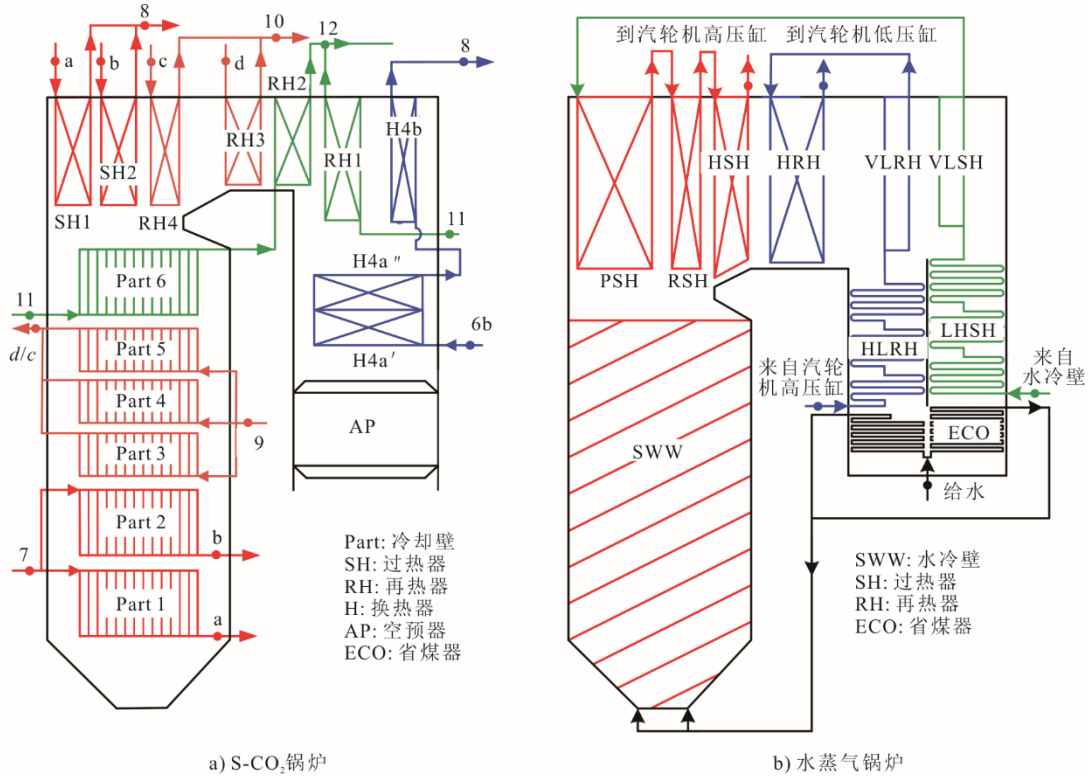


图2 锅炉受热面布置  
Fig.2 Heating surfaces layout of boiler

式中:  $Re_f$  为工质的雷诺数。管道系统中安装连接有各种管件,如弯头、阀门等。当流体流经这些管件时会产生局部阻力压降,各管件的局部阻力压降主要依据试验确定。当在计算中考虑局部阻力压降时,程序计算只考虑了关键的局部阻力压降(式(6))。

$$\Delta p = \frac{1}{2} \frac{G^2}{\rho_f} \left( \frac{l}{d_i} \frac{1}{(1.821 \lg Re_f - 1.64)^2} + \xi_{jb} \right) + \rho_f g H \quad (6)$$

式中:  $\xi_{jb}$  为局部阻力系数。

### 2.2 冷却壁壁温

在现代大型电站锅炉中,随着主蒸汽参数的不断提高,需对管壁温度进行准确计算,从而使得选用耐热管材的使用性能与其所承受的高温高压环境相匹配。在给定热负荷分布的情况下,膜式壁管壁的温度可以通过 S-CO<sub>2</sub> 流体温度,利用 Fourier 定律计算出管内外壁温度<sup>[11]</sup>。

$$T_i = T_f + \frac{q_{equiv} \cdot d_o}{d_i \cdot \alpha_f} \quad (7)$$

$$T_o = T_i + \frac{q_{equiv} \cdot d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (8)$$

在 S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁内工质温度较高,始终远离拟临界区域,工质物性变化平缓,近似为常物性流体。选用 D-B 公式<sup>[12]</sup>计算工质对流换热系数  $\alpha_f$ 。

$$\alpha_f = \frac{\lambda_f}{d_i} 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_f$  为工质导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $d_i$ 、 $d_o$  分别为管道内外径,  $\text{m}$ ;  $Pr_f$  为工质普朗特数。等效热流密度  $q_{equiv}$  与管外表面有关,可由以下关系式确定:

$$q_{equiv} = \frac{q \cdot (s - d_o + \pi \cdot \frac{d_o}{2})}{\pi d_o} \quad (10)$$

式中:  $T_f$  为工质温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  为金属导热系数;  $s$  为节

距, m;  $q$  外管壁热流密度;  $T_i$ 、 $T_o$  分别为管内、外壁温,  $^{\circ}\text{C}$ 。用于强度计算与管材选择的计算壁温  $T_c$  为<sup>[13]</sup>:

$$T_c = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (11)$$

### 2.3 循环热效率

本文采用循环热效率  $\eta_{th}$ , 以评估系统的热力学性能, 定义为工质单位质量流量所做净功  $w_{net}$  和单位质量流量总吸热量  $q_{total}$  之比, 表示为:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{total}} \quad (12)$$

## 3 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面设计

### 3.1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面材料选择特性

对于电站水蒸气锅炉, 已经形成了同时考虑强度和耐腐蚀性的成熟耐热钢体系。目前, 我国三大锅炉制造厂超临界锅炉常用材料为 T22/P22、T23/P23、T91/P91、TP347H 钢; 超超临界锅炉常用材料 T91/P91、T92/P92、Super304H、TP347HFG、HR3C 钢等<sup>[14-15]</sup>。此外, 超临界锅炉常用材料已顺利实现国产化。这些材料成为 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电系统关键部件的选材目标, 目前 S-CO<sub>2</sub> 环境下的高温部件典型耐热钢材料的腐蚀及相容性机理试验正在进行中。已有试验结果表明, 高温 S-CO<sub>2</sub> 环境下, 不同种类耐热钢抗腐蚀性能变化趋势为, 铁素体钢、奥氏体不锈钢以及镍基合金抗高温腐蚀性能依次增强。需注意, S-CO<sub>2</sub> 对金属材料的腐蚀机理与高温高压水蒸气不同<sup>[16]</sup>, S-CO<sub>2</sub> 环境下耐热材料表面不仅会发生氧化腐蚀, 同时会出现渗碳腐蚀现象。渗碳腐蚀将造成受热面工质侧表面铬元素贫化和碳积聚, 引起氧化膜剥落, 连续的剥落会加速材料表面的腐蚀速率, 也会引起循环较小通道截面处的堵塞等。本研究将根据已有高温 S-CO<sub>2</sub> 环境下腐蚀试验结论, 从钢材高温强度的角度出发, 分析锅炉各受热面在高温高压环境下对材料强度的要求, 避免 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面超温。

图 3 为相同主蒸汽参数条件下, TCO 循环与传统水蒸气朗肯循环锅炉沿烟气流动方向各受热面管内工质温度变化情况。相同主蒸汽参数条件下, 由于 S-CO<sub>2</sub> 循环锅炉炉膛入口工质温度较高, 沿烟气流动方向锅炉管内各点工质温度均高于水蒸气锅炉, 受热面管内温升较小。由壁温计算公式(7)及式(8)可知, 工质主流温度的升高必然引起管壁温提高, 对受热面金属材料的性能要求相应提高, 锅炉造价也会随之上升。

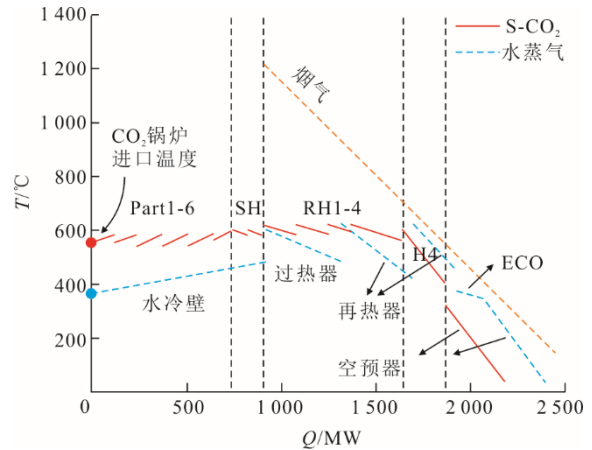
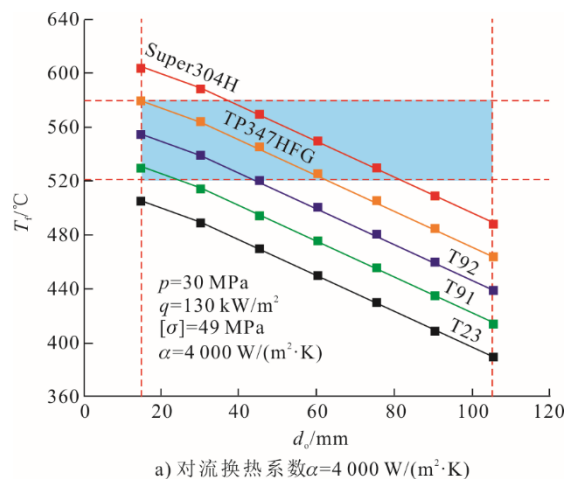


图 3 S-CO<sub>2</sub>/水蒸气锅炉受热面沿程主流温度  
Fig.3 Main stream temperature along the heating surface of S-CO<sub>2</sub>/steam boiler

在我国, 通常要求耐热钢在使用温度下的最小许用应力不低于 49 MPa<sup>[15]</sup>, 表 2 列出了几种典型锅炉受热面耐热钢在 $[\sigma]=49$  MPa 时所能承受最高温度。以典型燃煤锅炉的设计准则为指导, 图 4、图 5 给出了在材料边界条件下将 T22、T91、T92、Super304H 等应用于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉和水蒸气锅炉受热面的可行性。由图 4 与图 5 可见, 相同热负荷条件下, 随工质主流温度提高, 受热面壁温将提高, 为使受热面不超温过热, 需减小管径或提升钢材等级。

表 2 下限许用应力 $[\sigma]=49$  MPa 下典型耐热钢适用极限温度  
Tab.2 The maximum temperature of typical heat-resistant steel under the lower limit allowable stress  $[\sigma]=49$  MPa

钢号	温度/ $^{\circ}\text{C}$
T22	550
T23	600
T91	625
T92	650
TP347HFG	675
Super304H	700



a) 对流换热系数 $\alpha=4000$  W/(m<sup>2</sup>·K)

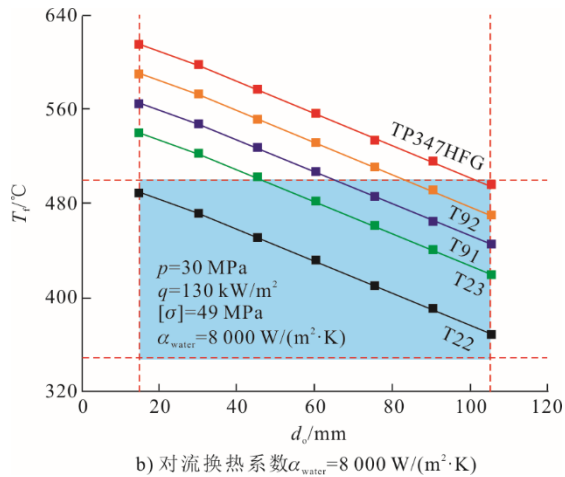


图4 S-CO<sub>2</sub> 锅炉与水蒸气锅炉冷却壁(水冷壁)受热面耐热钢选择

Fig.4 Steel selection of cooling wall(waterwall) for S-CO<sub>2</sub> boiler and steam boiler

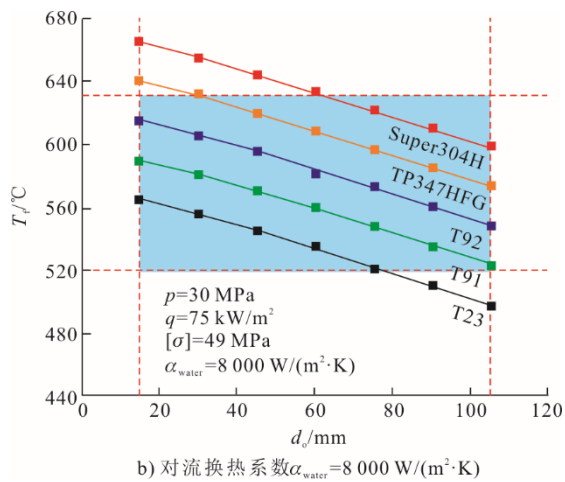
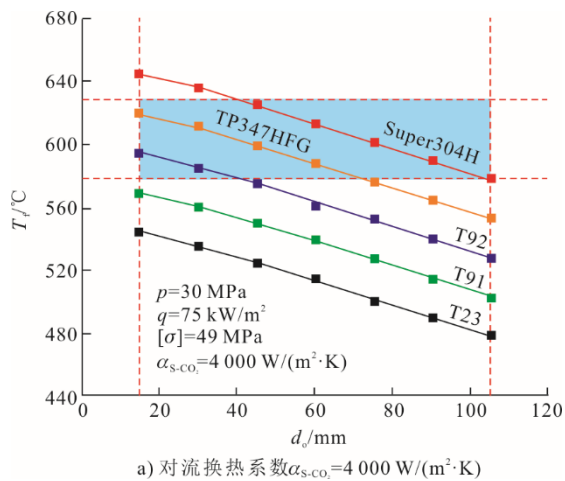


图5 S-CO<sub>2</sub> 锅炉与水蒸气锅炉过热器受热面耐热钢选择

图4 为在冷却壁(水冷壁)热负荷  $q=130 \text{ kW/m}^2$ 、工质压力  $p=30 \text{ MPa}$  条件下, S-CO<sub>2</sub> 锅炉管内工质温度大致在  $520\sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$ , 水蒸气锅炉管内工质温度

大致在  $350\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。从材料高温强度出发, 在一定管结构条件下, TP347HFG、Super304H 与部分 T91, 满足 S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁选材要求, 而无法使用 12Cr1MoVG、T22 和 T23 等水蒸气锅炉常用铁素体耐热钢。在实际工程应用时, 综合考虑耐热材料的技术、使用和经济性能, S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁应尽可能选用铁素体钢材 T91。

图5 为在过热器受热面热负荷  $q=75 \text{ kW/m}^2$ 、工质压力  $p=30 \text{ MPa}$  假设条件下, S-CO<sub>2</sub> 锅炉管内工质温度大致在  $580\sim 630 \text{ }^\circ\text{C}$ , 水蒸气锅炉管内工质温度大致在  $520\sim 630 \text{ }^\circ\text{C}$  内。从材料高温强度角度出发, 只有热强性更好的奥氏体钢 TP347HFG 与 Super304H 在一定管结构参数条件下符合 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面选材要求。对于水蒸气锅炉低温过热器, 金属温度小于  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 可采用 T23 耐热钢; 金属温度小于  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  的高温过热器, 可选耐热钢种类多样。随着受热面平均热负荷减小, 相同主蒸汽参数下, 可用耐热钢范围将扩大。

### 3.2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面结构选择特性

除需满足锅炉管材高温强度的要求外, 还需保证管内压降合理。通过增大管径, 可以降低管内工质的质量流速, 减小压降。由于 S-CO<sub>2</sub> 循环工质流量大, 其锅炉冷却壁在满足性能要求的前提下应尽可能选择稍大的管内径。冷却壁(水冷壁)管壁厚随管内径的变化如图6所示。管内工质压力  $p=30$ 、19、12 MPa 分别代表 S-CO<sub>2</sub> 循环主蒸汽压力、一次再热蒸汽压力和二次再热蒸汽压力。由图6可见: 随管内径增大, 冷却壁(水冷壁)管壁厚逐渐增加; 相同外径下, 管内工质压力越高, 管壁厚也越大, 较高的运行压力下管壁厚对管内径变化敏感。

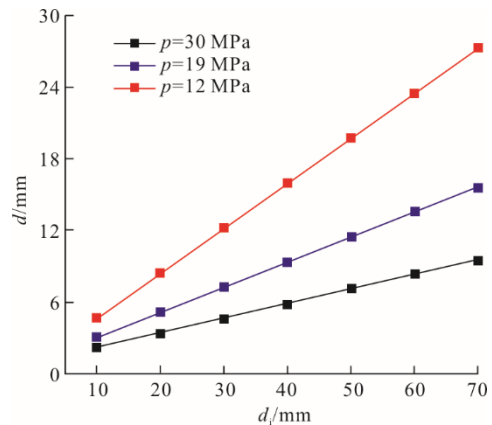


图6 冷却壁(水冷壁)管壁厚随管内径的变化

图 7 为图 6 受热面管道在受热面壁面热负荷  $q=130 \text{ kW/m}^2$ ，工质温度  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  时，受热面管子计算壁温随管外径的变化情况。由图 7 可见：随管外径增大，管壁温升高，管内工质压力越大，壁温上升越快；当管内工质压力较大，适当减小管径可以有效降低冷却壁（水冷壁）壁温。当 S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁外径与水蒸气锅炉水冷壁处于同一水平，即  $d_o=38 \text{ mm}$ 、 $p=30 \text{ MPa}$  时，S-CO<sub>2</sub> 锅炉计算壁温  $T_c$  达  $630 \text{ }^\circ\text{C}$ ，高于工质温度约  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而通常认为水蒸气锅炉受热面壁温一般高于蒸汽温度  $30\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ，因此传统水蒸气锅炉受热面选材的要求与依据，将无法直接用于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉选材。需根据准确的 S-CO<sub>2</sub> 锅炉传热计算，量化受热面耐热钢材料提升程度，得到 S-CO<sub>2</sub> 锅炉选材的一般规律。

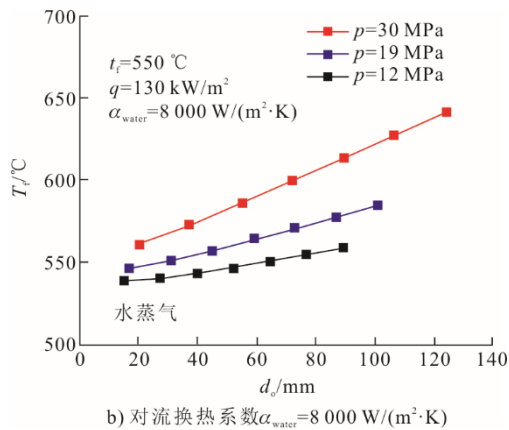
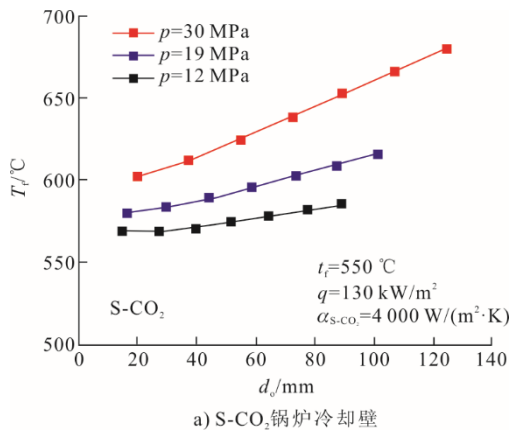


图 7 冷却壁管计算壁温随管外径的变化  
Fig.7 The calculated wall temperature varies with the outer diameter of the tube

图 8 为确定主流参数下受热面可承受壁面热负荷随管径变化情况。由图 8 可见，随管径增大，管子可承受的壁面热负荷逐渐减小，TP347HFG、Super304H 等较高等级耐热钢材使用性能对管径变化更为敏感。工质参数一定时，在材料边界条件下，

根据已知锅炉热负荷与管结构参数，可初步确定受热面耐热钢选择类型。

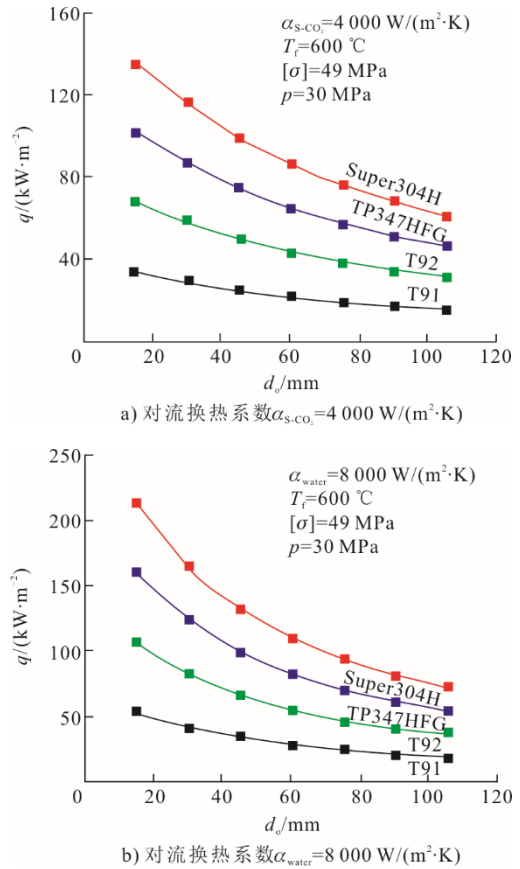


图 8 受热面热负荷随管径变化  
Fig.8 The heat load of the heating surface varies with the tube diameter

图 9 给出了不同容量等级的 S-CO<sub>2</sub> 循环效率路径，热效率详细计算过程可参考文献[5]。

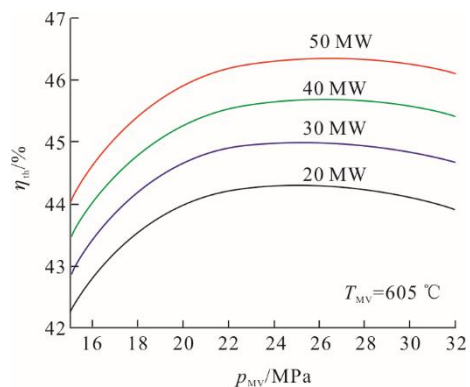


图 9 不同容量等级的循环效率路径  
Fig.9 Cycle efficiency paths of different capacity levels

由图 9 可见：随着系统容量增大，压缩机、透平效率提高，循环效率同样提高；在一定主蒸汽温度（temperature of main vapor, TMV）下，存在最

优主蒸汽压力 (pressure of main vapor, PMV) 使得循环实现最高效率。在工程实际应用过程, 可根据材料边界条件, 通过确定主蒸汽温度范围, 进而在循环最优主蒸汽压力下得到 S-CO<sub>2</sub> 锅炉初步的选材方案。

## 4 结 论

本文给出了同时解决锅炉内工质大压降与实现尾部烟道烟气余热全温区吸收的 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面布置方案。借鉴燃煤电厂水蒸气锅炉选材过程, 分析了在材料边界条件下, 将 T23、T91、T92、TP347HFG、Super304H 等应用于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的可行性, 给出了 S-CO<sub>2</sub> 循环燃煤发电机组耐热材料的选择特点, 以供决策。

1) 采用 S-CO<sub>2</sub> 循环时, 由于炉膛管内工质温度较高, 需提高耐热钢钢材等级。通常水蒸气锅炉管内工质温度与壁温相差 30~50 °C 左右, S-CO<sub>2</sub> 锅炉温差远高于这一范围。

2) 水蒸气锅炉受热面选材的要求与依据不适合直接用于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉。在一定管结构的条件下, T91 和 T92 满足 S-CO<sub>2</sub> 锅炉冷却壁选材要求, 热强度更好的奥氏体钢 TP347HFG 与 Super304H 在一定管结构条件下符合过热器受热面选材要求。

3) 工质的温度和压力均影响受热面材料的选型, 工质温度和压力越高, 管外壁温度越高, 所需材料等级越高, 反之可选用耐热水平较低的材料。

4) 管径影响高温耐热钢的选择, 管径越大, 管壁温越高, 选材水平越高, 对于同一材料, 管径越大, 材料所能承受的热负荷越小。

### [参 考 文 献]

- [1] VISWANATHAN R, SARVER J, TANZOSH J M. Boiler materials for ultra-supercritical coal power plants: steamside oxidation[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(3): 255-274.
- [2] YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 37-45.
- [3] MOULLEC Y L. 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(1): 32-46.
- [4] BAI W, ZHANG Y, 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: 9431117362208.
- [5] XU J, SUN E, LI M, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant[J]. *Energy*, 2018, 157(15): 227-246.
- [6] 胡涵, 孙恩慧, 刘超, 等. 超临界二氧化碳分流模式锅炉冷却壁的概念设计[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 204-214.  
HU Han, SUN Enhui, LIU Chao, et al. Conceptual design of supercritical CO<sub>2</sub> coal fired boiler cooling wall in split-flow mode[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39 (22): 204-214.
- [7] 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.
- [8] XU J, WANG X, SUN E, et al. Economic comparison between sCO<sub>2</sub> power cycle and water-steam Rankine cycle for coal-fired power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 238: 114150.
- [9] 大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则: DL/T 831—2015[S]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2015-09-01. Guide on selection of furnace characteristic parameters for large pulverized coal fired boilers: DL/T 831—2015[S]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co.,Ltd, 2015-09-01.
- [10] LIU Z, HE Y, QU Z, et al. Experimental study of heat transfer and pressure drop of supercritical CO<sub>2</sub> cooled in metal foam tubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 85: 679-693.
- [11] JIANG P, ZHANG L, XU R. Experimental study of convective heat transfer of carbon dioxide at supercritical pressures in a horizontal rock fracture and its application to enhanced geothermal systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 39-49.
- [12] DITTUS F W, BOELTER L. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type[J]. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 1985, 12(1): 3-22.
- [13] 樊泉桂. 超超临界锅炉设计及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1.  
FAN Quanguai. Design and operation of ultra-supercritical boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 1.
- [14] LI H, ZHANG Y, YANG Y, et al. Preliminary design assessment of supercritical CO<sub>2</sub> cycle for commercial scale coal-fired power plants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158: 113785.
- [15] 赵钦新, 朱丽慧. 超临界锅炉耐热钢研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 291-302.  
ZHAO Qinxin, ZHU Lihui. Research on heat resistant steels for supercritical boiler[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010: 291-302.
- [16] 肖博, 朱忠亮, 李瑞涛, 等. 超临界二氧化碳工质发电系统候选材料高温腐蚀研究现状与进展[J]. *热力发电*, 2020, 49(10): 36-43.  
XIAO Bo, ZHU Zhongliang, LI Ruitao, et al. Research status of high temperature corrosion of candidate materials for power generation system using supercritical carbon dioxide as working fluid[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(10): 36-43.

(责任编辑 邓玲惠)