

DOI: 10.19666/j.rlfed.202409210

超临界二氧化碳锅炉传热管传热性能分析

王生鹏^{1,2}, 杨玉², 倪依柯², 吴家荣², 乔永强²,
张一帆², 李红智^{1,2}, 严俊杰¹

(1.西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;
2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 超临界二氧化碳(S-CO₂)循环发电技术具有更好的灵活性,在火力发电领域替代蒸汽发电技术对构建新型电力系统、建设现代能源体系、实现“双碳”目标具有重要战略意义。针对超临界二氧化碳锅炉(S-CO₂)实际运行范围内的传热特性进行了数值模拟和实验研究,分析了工质物性参数对传热性能的影响规律。结果表明:在相同的流量条件下,CO₂传热系数随导热系数的减小而降低,这是因为流体边界层热阻随导热系数降低而增大;在相同的导热系数条件下,CO₂传热系数随 Re 的增大而增大,这是因为当 Re 增大时,流体边界层变薄,边界层热阻降低;在管内CO₂工质压力为3~30 MPa,焓值为500~1 150 kJ/kg,工质 Re 为 $1.1 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^6$ 条件下,拟合得出考虑边界层物性修正的传热和阻力系数关联式,其平均偏差为3.33%,表明其具有较高精度。研究结果为后续S-CO₂锅炉的设计和基础研究奠定了基础。

[关键词] 超临界二氧化碳锅炉; 传热; 实验测量; 数值模拟

[引用本文格式] 王生鹏, 杨玉, 倪依柯, 等. 超临界二氧化碳锅炉传热管传热性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 95-103.
WANG Shengpeng, YANG Yu, NI Yike, et al. Study on heat transfer performance of heat exchange tubes of supercritical carbon dioxide boilers[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 95-103.

Study on heat transfer performance of heat exchange tubes of supercritical carbon dioxide boilers

WANG Shengpeng^{1,2}, YANG Yu², NI Yike², WU Jiarong², QIAO Yongqiang²,
ZHANG Yifan², LI Hongzhi^{1,2}, YAN Junjie¹

(1.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2.Xi'an Thermal Engineering Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power generation technology offers better flexibility, and its substitution for steam power generation technology in the field of thermal power generation is of significant strategic importance for constructing a new type of power system, establishing a modern energy system, and achieving the “dual carbon” goal. Through numerical simulation and experiment, the flow and heat transfer characteristics of S-CO₂ boilers within the actual operating range are analyzed, and the influence of working fluid flow states and physical properties on heat transfer and resistance performance is also investigated. The results show that, the heat transfer coefficient of CO₂ decreases with the thermal conductivity under the same flow conditions. This is because the thermal resistance of the fluid boundary layer increases as the thermal conductivity decreases. Under the same thermal conductivity conditions, the heat transfer coefficient of CO₂ increases with the Reynolds number (Re). The reason is that the fluid boundary layer becomes thinner as Re increases, reducing the boundary layer thermal resistance. For CO₂ working fluid inside the pipe with pressures ranging from 3 MPa to 30 MPa, enthalpy values of 500~1 150 kJ/kg, and Re between 1.1×10^5 and 2.1×10^6 , a correlation formula for heat transfer considering boundary layer property corrections is derived. The average deviations are 3.33%.

收稿日期: 2024-09-05 网络首发日期: 2024-12-24

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2023-CX-TD-18)

Supported by: Innovation Capability Support Program of Shaanxi (2023-CX-TD-18)

第一作者简介: 王生鹏(1980), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电厂电气、锅炉、汽轮机技术, wangshengpeng@tpri.com.cn.

通信作者简介: 杨玉(1989), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为超临界二氧化碳循环发电技术, yangyu@tpri.com.cn.

demonstrating it has high precision. The research lays a solid foundation for the design and research of subsequent S-CO₂ boilers.

Key words: supercritical carbon dioxide boiler; heat transfer; experiment measurement; numerical simulation

随着我国构建新型电力系统行动的推进, 稳定可控的热力发电技术将由主力电源向调节性和保障性电源转变^[1]。常规蒸汽发电技术由于存在气液相变、干湿态转换, 工艺流程长等特点, 在调峰深度、爬坡速度、低负荷能耗等方面面临严峻挑战^[2-4], 难以满足当前能源体系变革的新要求, 迫切需要发展更加灵活高效的新型动力循环发电技术, 支撑构建以新能源为主体的新型电力系统。

超临界二氧化碳(S-CO₂)循环发电是以CO₂为工质的真实气体闭式布雷顿循环发电技术, 具有全过程无相变、工艺流程短、调节范围宽、爬坡速度快和低负荷能耗小等独特优势^[5-7], 其在火力发电领域替代蒸汽发电技术对构建新型电力系统, 建设现代能源体系, 实现“双碳”目标具有重要战略意义。美国Sandia国家实验室最早开展S-CO₂循环发电试验研究, 于2010年建成了250 kW试验台, 完成对关键设备和系统的性能测试^[8]。2012年, 日本东京工业大学完成了对一台额定功率为10 kW的S-CO₂循环试验机组的测试^[9]。美国西南研究院联合GE等公司于2023年完成10 MW S-CO₂循环发电试验台的机械建设工作^[10]。国内西安热工研究院有限公司于2022年完成了一台5 MW S-CO₂循环发电系统的性能测试, 升、降负荷速率分别达到8.59%Pe/min和11.13%Pe/min, 体现了S-CO₂循环发电的灵活性^[11]。中国科学院工程热物理研究所^[12]、欧盟CO₂OHeat项目^[13]也开展了S-CO₂循环关键核心部件或系统的试验研究。总的来说, 目前S-CO₂循环发电系统正处于从实验室走向工程应用的关键时期, 但是S-CO₂循环发电在实现成功商业化应用之前, 仍有若干关键科学技术问题需要解决。

S-CO₂锅炉是S-CO₂循环发电技术采用燃煤热源的关键核心设备。S-CO₂锅炉具有受热面整体温度水平高和工质流量大的特点^[14-15], 因此受热面内工质强化传热成为S-CO₂锅炉的关键核心问题之一^[16]。目前, 学术界和工业界对管内S-CO₂流动传热的研究多集中于临界点附近, 而对于高温高压状态下的CO₂流动传热研究较少, 这是因为临界点附近工质的物性变化最剧烈, 会引发传热异常现象, 更易吸引研究者的注意^[17-21]。例如, Kim等人^[22]实验测量了S-CO₂在竖直圆管内的传热性能, 实验中工质压

力约为8.5 MPa, 温度为29~115 °C, 该实验捕捉到了传热恶化现象, 并给出了相应工况下的传热关联式。Bae等人^[23]采用直接数值模拟方法对圆管内的S-CO₂传热性能进行了研究, 揭示了低 Re 下近临界点CO₂的传热恶化机理。Liu等人^[24]实验研究了S-CO₂在水平圆管内的流动和阻力特性, 实验中CO₂压力为7.5~8.5 MPa, 温度为25~67 °C, 最终给出了传热关联式模型, 误差为±15%。然而, 在额定工况下, S-CO₂锅炉中工质温度和压力都较高, 距离临界点较远, 工质物性接近常物性。在启、停和低负荷运行过程中, 锅炉中工质状态会向临界点接近, 但距离临界点仍较远, 此时物性变为非线性, 但其非线性程度相对临界点附近较弱。现有的常物性传热关联式模型难以准确计算靠近临界点的CO₂传热, 同时考虑近临界点CO₂非线性物性的传热关联式模型在高温高压的近常物性区域缺乏实验数据验证, 可能存在较大偏差。针对上述问题的研究还十分匮乏, 缺少能够涵盖整个S-CO₂锅炉运行范围的传热关联式模型。

鉴于此, 本文针对S-CO₂锅炉实际运行范围内传热管的传热特性进行研究, 分析工质流动状态和物性参数对传热和阻力性能的影响规律, 拟合新的传热关联式, 以期为后续S-CO₂锅炉的准确设计奠定基础。

1 研究方法

1.1 研究对象

额定运行工况下, S-CO₂锅炉中工质的状态远离临界点, 不大可能发生因物性变化而产生的传热恶化。同时为了降低流动阻力, S-CO₂锅炉传热管可采用光管结构。图1所示为本文传热管结构示意图, 该光滑圆管内径为14.6 mm, 管长为500 mm。为了研究S-CO₂在管内的传热特性, 给管壁施加了均匀的200 kW/m²的热流密度。管道进口为质量入口边界条件, 出口为压力出口边界条件。

图2为西安热工研究院有限公司20 MW S-CO₂锅炉在一次完整的启停过程中锅炉中工质状态的分布情况。从图2可以看出, 锅炉传热管中工质压力在5~20 MPa, 工质焓值在500~1 100 kJ/kg。该锅炉的受热面包括一次气受热面、二次气受热面和分

流省煤器。分流省煤器加热部分从低温回热器出口引出的高压工质、分流省煤器出口工质与高温回热器的高压侧出口工质汇合，然后进入一次气加热流程。一次气受热面包括炉膛气冷壁和过热器，二次气受热面为再热器。一次气受热面出口的工质进入高压透平做功，高压透平排气进入二次气受热面升温，然后进入低压透平做功。从图2可以看出，一次气和二次气的温度范围相当，但一次气压力高于二次气压力。

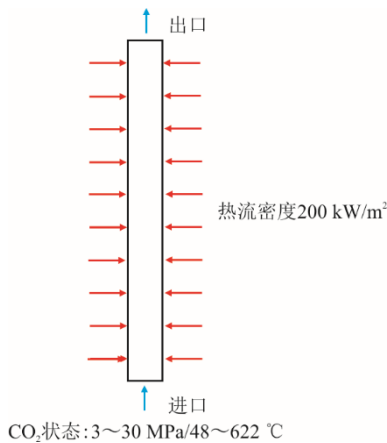


图1 传热管结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the heat transfer tube

根据上述 20 MW S-CO₂ 锅炉中工质状态分布范围，考虑其他 S-CO₂ 锅炉参数波动情况，将研究的 CO₂ 工质状态扩展到压力参数 3~30 MPa、焓值参数为 500~1 150 kJ/kg 的范围。图3为该范围内 S-CO₂ 密度、比热容、黏度和导热系数的分布情况。从图3可以看出，S-CO₂ 工质热物性随压力和焓值的变化是非线性的。当 CO₂ 焓值为 500 kJ/kg 时，随着压力升高，CO₂ 状态逐渐接近其压力所对应的拟临界点，因此 CO₂ 的密度、比热容、黏度和导热系数都逐渐升高。如图 3a)所示，CO₂ 的密度从左上角向右下角逐渐降低，最大值为 450 kg/m³，最小值约为 25 kg/m³。如图 3b)所示，CO₂ 的比热容为左上角存在一个高值区域，最大值约为 1.75 kJ/(kg·K⁻¹)，左下角存在一个低值区域，最小值约为 1.03 kJ/(kg·K⁻¹)。如图 3c)和图 3d)所示，黏度和导热系数在左下角存在一个低值区域，最小值分别为 1.12×10⁻⁵ Pa·s 和 0.022 W/(m·K)，然后以一个类似环形的结构向外围逐渐增大，最大值分别为 3.90×10⁻⁵ Pa·s 和 0.055 W/(m·K)。

综上所述，运行过程中锅炉中 CO₂ 的状态参数分布较宽，物性变化显著，对锅炉中 CO₂ 的传热会产生显著影响。

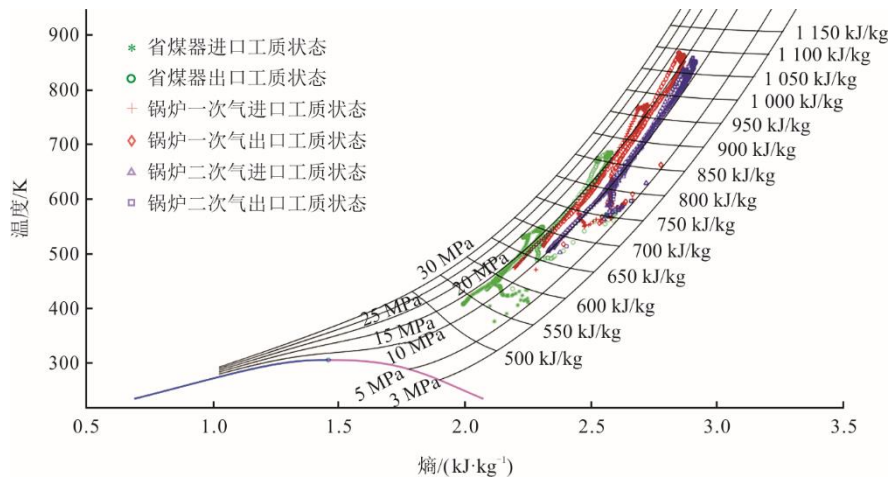
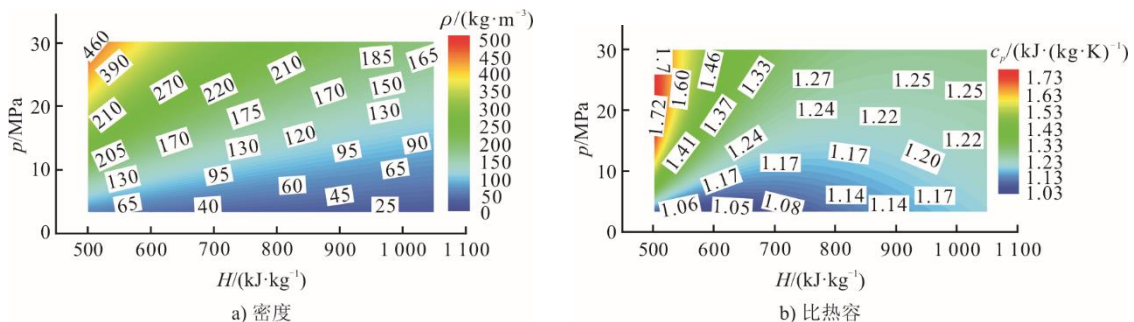
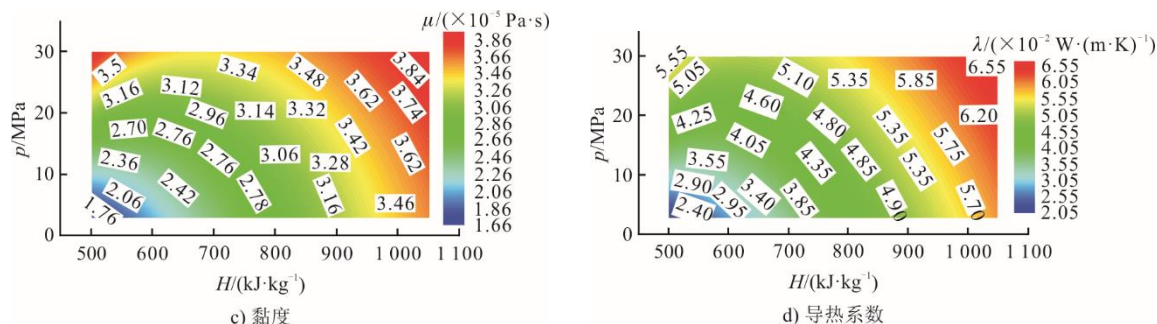


图2 20 MW S-CO₂ 锅炉中工质状态分布

Fig.2 Distribution of working fluid states of a 20 MW S-CO₂ boiler



图 3 S-CO₂ 热物性分布Fig.3 Schematic diagram of thermal property distribution of S-CO₂

为了系统研究 S-CO₂ 锅炉中工质的流动传热特性,设计了能够涵盖整个运行参数变化范围的模拟工况,如表 1 所示。本文拟研究单管中 CO₂ 的流动传热情况,CO₂ 进口参数范围 3~30 MPa、47.8~156.8 °C,进口温度对应进口压力下焓值为 500 kJ/kg 时的温度。每个进口状态参数下,模拟了 4 个 CO₂ 流量工况 (0.05、0.10、0.20、0.40 kg/s),对应 Re 范围为 $1.1 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^6$ 。由于模拟的光管长度为 500 mm,为了让管子出口的工质焓值最终达到 1 100 kJ/kg,以前一根管子的出口参数作为下一根管子的入口条件进行了连续多次模拟计算。

表 1 工况参数

Tab.1 Parameters of different cases

工况	流量/ (kg·s ⁻¹)	进口压力/ 温度(MPa/°C)	工况	流量/ (kg·s ⁻¹)	进口压力/ 温度(MPa/°C)
1	0.40	3/47.8	15	0.10	15/120.2
2	0.20	3/47.8	16	0.05	15/120.2
3	0.10	3/47.8	17	0.40	20/136.4
4	0.05	3/47.8	18	0.20	20/136.4
5	0.40	5/64.6	19	0.10	20/136.4
6	0.20	5/64.6	20	0.05	20/136.4
7	0.10	5/64.6	21	0.40	25/148.1
8	0.05	5/64.6	22	0.20	25/148.1
9	0.40	10/97.3	23	0.10	25/148.1
10	0.20	10/97.3	24	0.05	25/148.1
11	0.10	10/97.3	25	0.40	30/156.8
12	0.05	10/97.3	26	0.20	30/156.8
13	0.40	15/120.2	27	0.10	30/156.8
14	0.20	15/120.2	28	0.05	30/156.8

1.2 数值模拟方法

采用流体力学模拟软件 ANSYS Fluent 对 CO₂ 在圆管内的流动传热情况进行数值模拟。通过求解连续性方程、动量方程和能量方程获得流体区域的流动传热结果。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭方程组,因为该模型兼具 $k-\omega$ 模型在近壁面的精确性和 $k-\epsilon$ 模型在主流核心区的独立性和鲁棒性,前期已有很

多学者采用 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟 S-CO₂ 的流动传热特性^[25-26],验证了该模型的可靠性。

控制方程如下^[27]:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_i} + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{h})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\lambda_{\text{eff}}}{c_p} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

湍动能方程为:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{u}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (4)$$

比耗散率方程为:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{u}_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; u 为速度; p 为压力; λ 为导热系数; h 为焓; k 为湍动能; ω 为比耗散率; μ 为黏度; c_p 为比热容; x 为坐标; G_k 为湍动能生成项; G_ω 为特定耗散率生成项; Y_k 为湍动能 k 的耗散项; Y_ω 为比耗散率 ω 的耗散项; D_ω 为交叉扩散项。

CO₂ 的物性采用 Fluent 软件自带的 NIST 数据。由于本研究中 CO₂ 物性距离临界点较远,不满足发生传热恶化的条件,因此不考虑重力的影响。

1.3 实验方法

为验证数学模拟,在西安热工研究院有限公司阎良实验基地搭建的 S-CO₂ 热工实验平台上开展 CO₂ 传热实验。图 4 为实验系统示意,包括主循环回路系统、电加热系统、密封冷却结构测试系统、

冷却水系统、工质组分分析系统、抽真空系统、工质充装系统、仪表和 PLC 控制系统、电力供应系统以及监控系统。

实验系统的流量由 EMERSON 科氏力质量流量计测量，精度为±0.5%；压力通过智能式压力变送器测量，精度为 0.075 级；流体温度采用分别布置在实验段进出口的 2 支 3.0 mm 的 NiCr-NiSi 铠装热电偶测量，误差为±1.5℃。为衡量实验过程中物理量测量精度，采用不确定度表征测量质量。根据

不确定度计算公式^[28]，本文测量的温度、压力和流量的不确定度分别为 0.10%、0.25% 和 0.15%。

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \times \frac{\delta X_i}{X_i} \right)^2} \tag{6}$$

实验段的外壁面温度采用焊接在 10 个截面上的 20 支 0.5 mm 的 NiCr-NiSi 热电偶测量；测量壁温热电偶引线采用耐高温聚四氟补偿导线，镀锡屏蔽编织。实验段上的测点布置如图 5 所示。

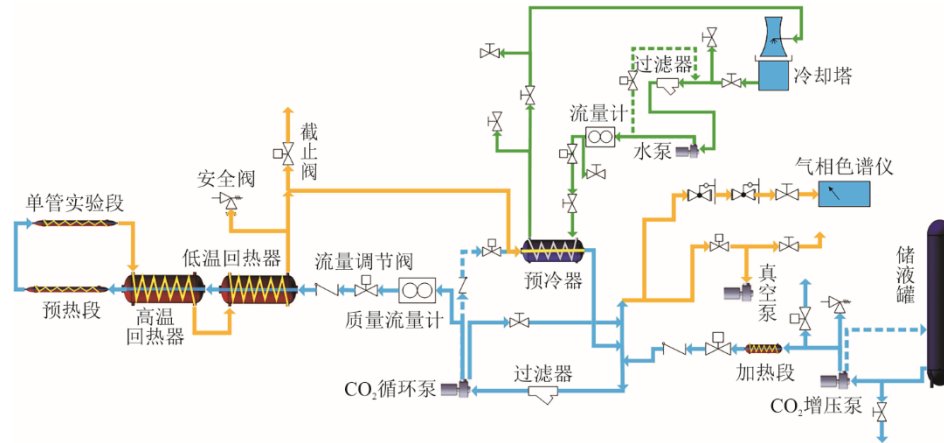


图 4 实验系统示意
Fig.4 Schematic diagram of the experimental system

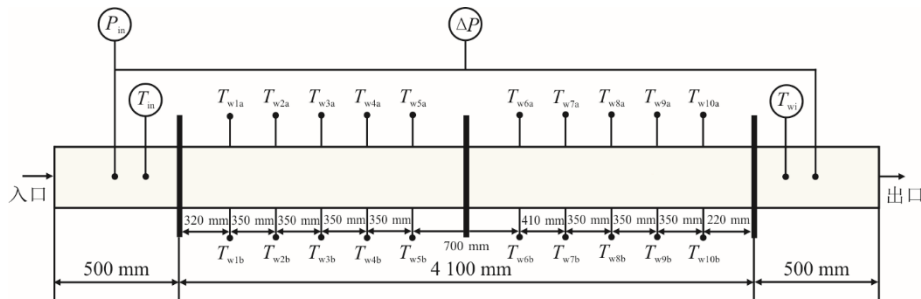


图 5 实验段及其测点布置
Fig.5 Experimental section and the measuring points arrangement

根据 S-CO₂ 锅炉气冷壁参数的实际运行范围，实验段选用 T91 管，内、外径分别为 23、45 mm，总长度 5 100 mm。如图 6 所示，圆管水平布置于支架上，为减少进出口的影响，设置 500 mm 长的入口段与出口段，有效加热段长度 4 100 mm。加热段采用三点加热方式，3 个铜极板分别位于加热段的中间和两端，中间铜极板接大电流发生器正极，两侧铜极板接负极，形成闭合回路以减少电流损失。

实验系统中 CO₂ 储液罐内压力为 2.4 MPa、温度为-40 ℃的液态 CO₂ 工质经 CO₂ 增压泵加压，随后经过加热段达到超临界状态，并经过充装闸阀、止回阀进入主循环回路。



图 6 实验段照片
Fig.6 Photo of the experimental section

主循环回路 CO₂ 工质流经 CO₂ 循环泵和孔板流量计后分为 2 路：一路作为 CO₂ 流量调节旁路，直

接进入预冷器后回到 CO₂ 循环泵入口；另一路依次经过质量流量计、调节阀、止回阀、低温套管式回热器、高温套管式回热器和预热段到达单管实验段入口，单管实验段和预热段均采用 2 台 48 kW 的大电流发生器提供交流电加热。从单管实验段流出的 CO₂ 又回到高温、低温回热器，最后经过预冷器将余热传递给冷却水，与主循环回路的气源汇合，构成一个完整循环。

2 结果与讨论

图 7 为本文所用模型与实验测试的圆管内工质平均温度沿流动方向的对比情况。从图 7 可以看出，数值模拟结果与实验结果符合得很好，最大偏差小于 0.1%。

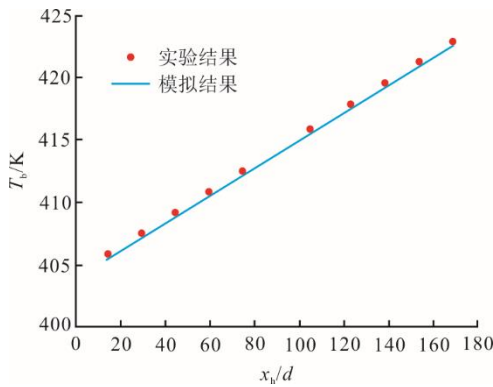


图 7 模拟结果与实验结果对比
Fig.7 Comparison between experimental and numerical results

图 8 为圆管内 S-CO₂ 在不同压力下的传热系数随流量和物性的变化规律。在相同压力条件下，CO₂ 的传热系数随流量的增大而增大。如图 8a) 所示，随着工质流量从 0.05 kg/s 增大到 0.40 kg/s 时，圆管内传热系数从 350~800 W/(m²·K) 增大到 3 000~4 500 W/(m²·K)。在相同流量条件下，CO₂ 的传热系数随导热系数的减小而降低；在相同导热系数条件下，CO₂ 的传热系数随 *Re* 的增大而增大。这是因为对于导热系数比较低的流体而言，流体边界层的热阻是换热热阻的主要组成部分，当流体导热系数减小时，流体边界层的热阻变大，因此传热系数会降低；当 *Re* 增大时，流体边界层变薄，边界层热阻降低，传热系数增大。如图 8a) 所示，当流量为 0.40 kg/s，CO₂ 导热系数从 60 mW/(m·K) 降低到 20 mW/(m·K) 时，管内传热系数从 4 500 W/(m²·K) 降低到 3 000 W/(m²·K)，降低了约 33.3%，对应的工质 *Re* 从 1.0×10⁶ 增大到 2.1×10⁶，表明导热系数

降低的不利影响大于 *Re* 增加的有益影响。当流量为 0.20、0.10、0.05 kg/s 时，传热系数最小值相对最大值的降低程度分别为 36.4%、46.7%、66.7%。

随着工质压力从 3 MPa 增大到 30 MPa，各模拟工况中 *Re* 降低，但工质导热系数变大，导致传热系数增大。如图 8b) 所示，工质流量为 0.40 kg/s 时的管内传热系数为 4 300~5 100 W/(m²·K)，流体导热系数为 38~60 mW/(m·K)，对应的工质 *Re* 为 0.95×10⁶~1.3×10⁶。

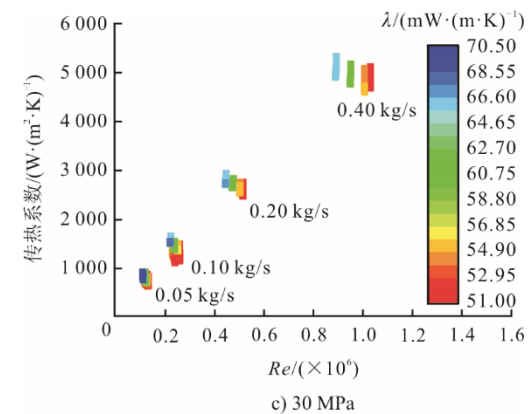
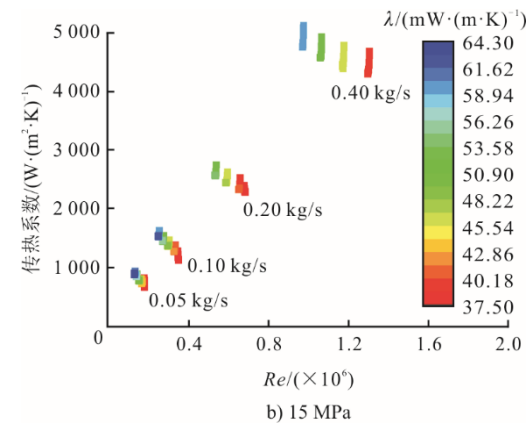
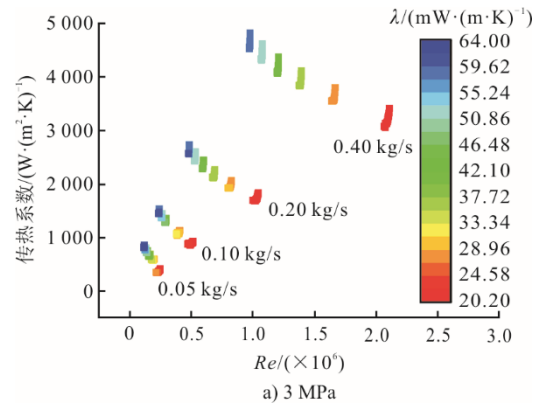


图 8 圆管内 S-CO₂ 传热特性
Fig.8 Heat transfer performance of S-CO₂ in circular pipe

如图 8c) 所示，工质流量为 0.40 kg/s 时的管内传热系数为 4 800~5 400 W/(m²·K)，流体导热系数

为 51~66 mW/(m·K)，对应的工质 Re 为 $0.88 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^6$ 。同时，随着压力增加，导热系数变化范围变窄，其对传热系数的影响程度逐渐变小。

由于非线性物性对锅炉传热管内的 CO_2 传热特性均具有显著影响，常规定物性关联式难以反映锅炉宽运行工况范围内的传热性能。为此，本文在考虑物性变化影响的 Jackson 关联式的基础上，采用遗传算法对锅炉传热管内的 CO_2 传热和阻力系数关联式进行拟合，具体流程如图 9 所示。传热关联式的初代种群数量取 2 000，基因的交叉和变异率分别设置为 0.9 和 0.1，迭代次数设置为 50。

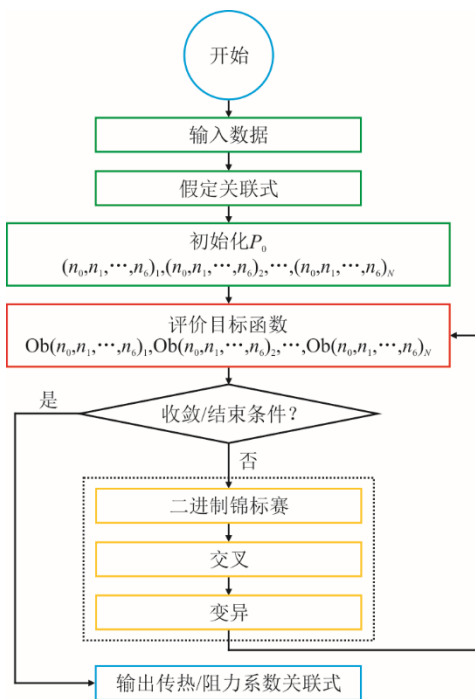


图 9 传热和阻力系数关联式拟合流程
Fig.9 Schematic process of the fitting process of the heat transfer and frictional correlations

图 10 为遗传算法的拟合过程，传热关联式的平均误差在 3 代之后降低到 3.33%，具有较高的精度。拟合获得的传热关联式为：

$$Nu = 0.033 14 Re^{0.781 9} Pr^{0.930 4} \times \left(\frac{Cp_w}{Cp_b}\right)^{0.431 1} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)^{0.260 4} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.762 6} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_b}\right)^{0.009 5} \quad (7)$$

图 11 为 Nu 关联式计算值与数值模拟值对比。从图 11 可以看出，新拟合的关联式计算值与数值模拟值之间符合得很好，大部分数据的偏差均在 ±15% 以内，表明新的传热关联式具有较高精度。

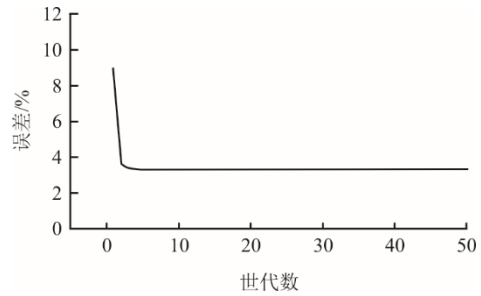


图 10 关联式拟合迭代过程
Fig.10 Iteration process of the correlations fitting

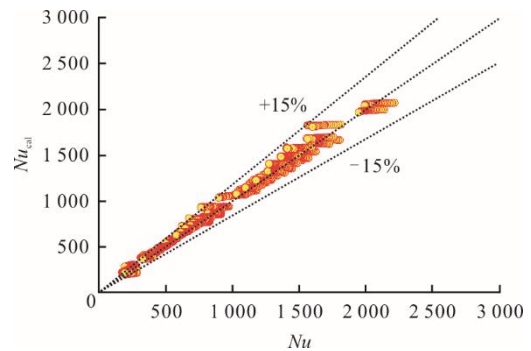


图 11 Nu 关联式计算值与数值模拟值对比
Fig.11 Comparison between the calculated and simulated Nu

图 12 为传热关联式(7)与几种常见传热关联式在计算本文圆管内 S- CO_2 传热实验数据的对比。从图 12 可以看出，本文提出的传热关联式与实验数据相符性更好，尤其是在低 Nu 范围。Dittus Boelter 公式和 Gnielinski 公式计算结果总体偏高，Petukhov Popov 公式在 Nu 为 800~1 100 范围内计算结果偏低，在 Nu 为 300~800 范围内具有较高的计算精度。本文传热关联式在 Nu 为 100~1 100 范围内均具有较高的计算精度，该公式计算结果与实验值的偏差大部分都在 ±25% 以内。当 Nu 小于 200 时，Dittus Boelter 公式、Gnielinski 公式和 Petukhov Popov 公式与实验结果的偏差均较大。

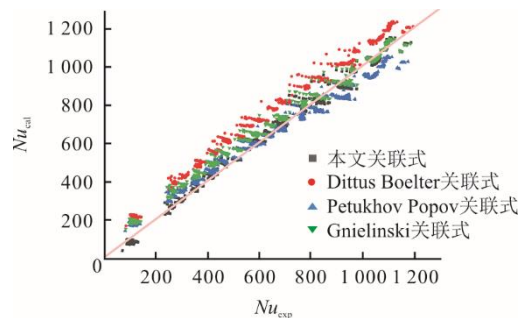


图 12 传热关联式对比
Fig.12 Comparison between different heat transfer correlations

3 结 论

针对 S-CO₂ 锅炉的实际运行工况研究了圆管内 S-CO₂ 的流动传热特性, 分析了物性、流量等参数对管内 CO₂ 的流动传热性能的影响规律, 拟合了能够涵盖整个运行区间的圆管内 CO₂ 传热和阻力系数关联式, 主要结论如下。

1) 在相同流量条件下, CO₂ 传热系数随导热系数的减小而降低, 这是因为流体边界层热阻随导热系数降低而增大; 在相同导热系数条件下, CO₂ 传热系数随 Re 的增大而增大, 这是因为当 Re 增大时, 流体边界层变薄, 边界层热阻降低。

2) 在管内 CO₂ 工质压力为 3~30 MPa, 焓值为 500~1 050 kJ/kg, 工质 Re 为 $1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^6$ 时, 拟合出了考虑边界层物性修正的传热和阻力系数关联式, 其平均偏差分别为 3.33%, 具有较高的精度, 为后续 S-CO₂ 锅炉的设计和研发奠定了基础。

[参 考 文 献]

- [1] WANG H S, OUYANG Z Q, DING H L, et al. Experimental study on the flexible peak shaving with pulverized coal self-preheating technology under load variability[J]. Energy, 2024, 289: 129830.
- [2] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 136-148.
MA Tingshan, WANG Yan, LYU Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Suppl.1): 136-148.
- [3] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 189-198.
WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 189-198.
- [4] 王志轩, 张晶杰, 董博, 等. “双碳”目标下燃煤电厂灵活性改造及政策建议[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(3): 213-220.
WANG Zhixuan, ZHANG Jingjie, DONG Bo, et al. Research on technology and policy of flexibility renovation for coal-fired power plants under carbon peaking and carbon neutrality goal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(3): 213-220.
- [5] 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.
- [6] 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 CO₂ power system[J]. Energy

- Conversion and Management, 2023, 279: 116748.
- [7] LIU Y P, WANG Y, HUANG D G. Supercritical CO₂ Brayton cycle: a state-of-the-art review[J]. Energy, 2019, 189: 115900.
- [8] CONBOY T, PASCH J, FLEMING D. Control of a supercritical CO₂ recompression Brayton cycle demonstration loop[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135: 111701.
- [9] UTAMURA M, HASUIKE H, OGAWA K, et al. Demonstration of supercritical CO₂ closed regenerative Brayton cycle in a bench scale experiment[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo, Copenhagen, Denmark, 2012: GT2012-68697.
- [10] MARION J, MACADAM S, MCCLUNG A, et al. The STEP 10 MWe sCO₂ pilot demonstration status update[C]. Proceedings of ASME Turbo Power Expo, Rotterdam, The Netherlands, 2022: GT2022-83588.
- [11] 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 CO₂ power system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 279: 116748.
- [12] 朱玉铭, 姜玉雁, 梁世强, 等. 超临界二氧化碳布雷顿发电循环压缩机实验研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 11-20.
ZHU Yuming, JIANG Yuyan, LIANG Shiqiang, et al. Experimental research progress of supercritical carbon dioxide Brayton cycle compressor[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 11-20.
- [13] <https://co2olheat-h2020.eu/>. [2024-09-05].
- [14] YANG Y, BAI W G, WANG Y M, et al. Coupled simulation of the combustion and fluid heating of a 300 MW supercritical CO₂ boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 259-267.
- [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] 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.
- [17] LI H Z, ZHANG Y F, YAO M Y, et al. An improved modeling on convection heat transfer of supercritical fluids for several advanced energy systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111: 771-781.
- [18] CHU X, LAURIEN E. Flow stratification of supercritical CO₂ in a heated horizontal pipe[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 116: 172-189.
- [19] YOON S H, KIM J H, HWANG Y W, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics during the in-tube cooling process of carbon dioxide in the supercritical region[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 26: 857-864.
- [20] ZHAO C R, JIANG P X. Predictions of in-tube cooling pressure drops for CO₂ mixed with lubricating oil at supercritical pressures[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73: 529-538.
- [21] WANG L, PAN Y C, LEE J D, et al. Experimental investigation in the pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in the uniformly heated horizontal miniature tubes[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2020, 162: 104839.

- [22] KIM D E, KIM M H. Two layer heat transfer model for supercritical fluid flow in a vertical tube[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2011, 58: 15-25.
- [23] BAE J H, YOO J Y. Direct numerical simulation of turbulent supercritical flows with heat transfer[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17: 105104.
- [24] LIU Z B, HE Y L, YANG Y F, et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop of supercritical CO₂ cooled in a large tube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70: 307-315.
- [25] 李舟航, 唐国力, 吴玉新, 等. 基于无量纲结构因子的低质量流速内螺纹管中超临界水流动和传热性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 3007-3014.
LI Zhouhang, TANG Guoli, WU Yuxin, et al. Identification of non-dimensional tube geometry parameter for heat transfer of supercritical water in internally ribbed tubes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 3007-3014.
- [26] 朱兵国, 何吉祥. 变截面耦合通道 PCHE 内超临界 CO₂ 热工水力性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(6): 1749-1756.
ZHU Bingguo, HE Jixiang. Study on thermal and hydraulic performance of supercritical CO₂ in coupled channel PCHE with variable cross-section[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(6): 1749-1756.
- [27] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [28] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 1: 3-17.

(责任编辑 李园)