

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301011

亚临界压力下二氧化碳传热特性及临界 热流密度预测模型研究

刘清江, 雷贤良, 刘吉安

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

[摘要] 二氧化碳(CO₂)布雷顿循环系统有着紧凑、高效、灵活的特点在第三代光热系统和第四代核电系统中具有良好的应用前景, 而 CO₂ 传热恶化现象影响着机组的安全运行。为研究竖直上升管内 CO₂ 的传热恶化现象, 在实验室建立了 CO₂ 传热特性系统, 对比了亚临界与超临界状态下 CO₂ 传热特性, 获得了热工参数对 CO₂ 传热恶化的影响规律, 并建立了 CO₂ 临界热流密度预测关联, 预测值与实验值吻合良好, 误差在±30%以内。研究表明: 亚临界压力下, CO₂ 发生传热恶化时壁温峰值更高; 远离临界压力, 增加质量流量均有利于抑制传热恶化的发生。

[关键词] 二氧化碳; 传热恶化; 临界热流密度; 预测关联式

[引用本文格式] 刘清江, 雷贤良, 刘吉安. 亚临界压力下二氧化碳传热特性及临界热流密度预测模型研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 29-36. LIU Qingjiang, LEI Xianliang, LIU Ji'an. Study on heat transfer characteristics and critical heat flux prediction model of carbon dioxide under subcritical pressure[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 29-36.

Study on heat transfer characteristics and critical heat flux prediction model of carbon dioxide under subcritical pressure

LIU Qingjiang, LEI Xianliang, LIU Ji'an

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The carbon dioxide (CO₂) Brayton cycle system is compact, efficient and flexible, and has a good application prospect in the third generation photothermal system and the fourth generation nuclear power system. The deterioration of CO₂ heat transfer affects the safe operation of the unit. In order to study the deterioration of CO₂ heat transfer in the vertical riser, a CO₂ heat transfer characteristic system is established for experimental research, and the CO₂ heat transfer characteristics under subcritical and supercritical conditions are compared. The influence of thermal parameters on the deterioration of CO₂ heat transfer is obtained, and the prediction correlation of CO₂ critical heat flux is established. The predicted value is in good agreement with the experimental value (error ±30%). It is found that the peak value of wall temperature is higher when CO₂ heat transfer deteriorates at subcritical pressure. Far away from the critical pressure and increasing the mass flow rate are conducive to restraining the occurrence of heat transfer deterioration.

Key words: carbon dioxide; heat transfer deterioration; critical heat flux; prediction correlation

近年来, 二氧化碳(CO₂)布雷顿循环系统的提出^[1], 引起了广泛关注。相较于传统蒸汽朗肯循环, 超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环具备以下优

势: 1) 工质黏度低, 扩散性好, 使得流体压强高, 系统损耗小, 循环过程不存在相变、压缩功较低、热利用效率高等优点; 2) 整个循环过程都在高压下

收稿日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1867218); 中国华能集团有限公司能源安全技术专项(HNKJ20-H87-04)

Supported by: National Natural Science Foundation (U1867218); Energy Security Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd., (HNKJ20-H87-04)

第一作者简介: 刘清江(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为二氧化碳传热特性, xjtu_lqj@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者简介: 雷贤良(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进动力循环、高压汽液两相流, xianlianglei@xjtu.edu.cn。

运行,工质密度高,使得系统结构紧凑、体积小、重量轻;3)材料制造成本与运行成本低。由于具有以上优良特点,S-CO₂布雷顿循环系统在火电系统、第三代光热系统以及第四代核电系统中都有良好的应用前景。

为满足灵活性的需求,布雷顿循环系统常处于启停、变负荷运行状态,工作压力、流量等参数在宽广范围内变化。在低流量或高负荷条件下,系统换热器中可能出现传热恶化问题,不利于机组的安全运行。目前,S-CO₂布雷顿循环系统在新能源发电、舰船发电等领域应用中有着高灵活性的要求,而实际运行中可能会出现亚临界工况,其运行控制策略仍存在技术难点。目前CO₂传热特性研究主要集中在超临界条件下,因此,针对亚临界压力下CO₂传热特性的实验研究有着重要意义。

近年来,很多研究人员对CO₂传热特性进行了深入研究。Jackson^[2]详细阐述了传热恶化的作用机理,认为浮升力与流动加速效应对传热特性的影响,主要是改变近壁面区域流体内部剪切力的大小与方向,进而影响流体湍流程度。Fan等人^[3]研究发现,较低质量流量,较高热流密度条件下,传热恶化主要由浮升力效应引起,在较高质量流量情况下,传热恶化主要与流体近壁面的黏性底层局部增厚有关,造成这一现象的原因除了流体黏度的增加,还有浮升力效应导致的流体局部轴向速度过快。姜超等^[4]从物性参数和传热特性2方面综述了S-CO₂传热恶化现象的研究进展,研究表明,目前S-CO₂物性获取的手段不完善,高温高压区的实验数据有待补充,另外,针对S-CO₂传热恶化建立的标准缺乏评估与对比,适用工况有待验证。朱兵国等^[5]实验研究了7.5~21.0 MPa下,热流密度50~413 kW/m²,质量流速为519~1 500 kg/(m²·s)对CO₂传热特性规律,结果表明,随着热流密度的增加,壁温峰值点向入口段移动,传热恶化发生在流体温度低于拟临界温度而壁面温度高于拟临界温度附近。杨温等^[6]对CO₂在最高压力15 MPa工况下传热特性进行了研究,结果表明,CO₂的压力越高,传热系数在准临界温度处的峰值越低,传热系数随CO₂温度的变化越平缓,高温状态下,传热系数主要取决于CO₂流量的大小。杨亮等^[7]综述了国际上亚临界CO₂管内换热特性的研究,提供了多种亚临界CO₂沸腾传热关联式及其适用范围。Li等人^[8]对比了S-CO₂在管内向上流动和向下流动的传热特

性,发现CO₂在 $Re=1\ 900$ 时传热系数在向上流动时随热流密度的降低而增加,而向下流动时随热流密度的增加而增加。Bae等人^[9]在S-CO₂向上流动实验中观察到严重的传热恶化现象,但在向下流动中没有观察到相同现象,研究发现主要是浮升力不同导致该差异。Liao等人^[10]通过实验研究S-CO₂在竖管内的传热特性,结果表明在向下流动中也会出现传热恶化。He等人^[11]采用数值模拟方法模拟S-CO₂在竖管内的传热情况,结果表明传热恶化主要是由热加速效应引起的。Bazargan等人^[12]通过数值模拟研究了超临界流体在竖管内的向上的流动传热过程,发现流体受热时,密度降低导致湍流黏度降低是传热恶化发生的部分原因。

另外,研究人员也提出极限热流密度的相关预测公式来研究传热恶化的起始点。Katto等人^[13]研究了垂直加热管内强迫对流沸腾临界热流的广义关联式,尝试了临界热流密度(critical heat flux, CHF)广义相对方程的理论假设,并对7种不同流体的CHF实验数据进行了分析,从而发展了CHF的广义关联式。在此基础上,Katto等人^[14]进一步补充了实验数据,对原有关联式进行了改进,与前者相比具有更好的准确性及适用性。Urbano等人^[15]提出的S-CO₂预测关联式为 $q=0.000\ 02G^2$,该式依据实验数据以相对简单的方式拟合了极限热流密度和质量流速的关系,并将上式与传热恶化实验数据进行对比,结果吻合良好。罗毓珊等^[16]对比了亚临界与超临界压力下酸碱水洗煤油在小管径内的传热特性,并解释了亚临界与超临界压力下传热恶化机理的差异,且在实验基础上建立了临界热流密度预测式。高天泽^[17]研究了亚临界与超临界压力下碳氢化合物传热特性,并在前人基础上引入了入口过冷度影响,分别建立了亚临界与超临界压力下临界热流密度预测关联式。Wojtan^[18]、Yamagata^[19]等分别考虑了入口温度、质量流量、管道尺寸等对R134a、R245fa、超临界水传热恶化的影响,通过拟合实验数据建立了临界热流密度预测关联式。Kondratev^[20]、Protopopov^[21]、Pioro^[22]、Brassington^[23]、Petuhkov^[24]等提出的CHF预测关联式中除了质量流速和热流密度外,还引入了流体密度、黏度、 Re 、 Pr 、摩擦系数等的影响,并尝试了预测传热恶化开始时的具体温度。

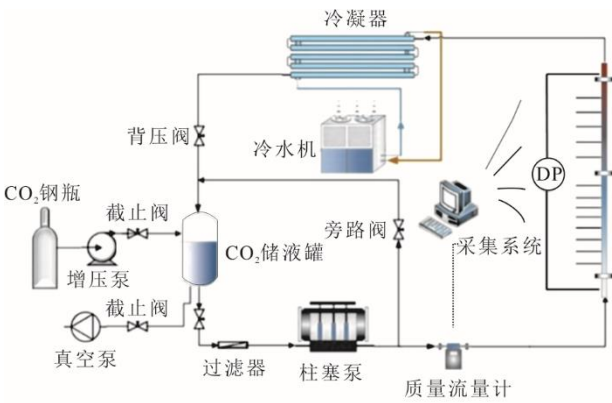
在实际工程运行中,布雷顿循环为满足灵活性的需求,常常处于启停、变负荷运行状态,工作压

力, 流量等参数在宽广范围内变化。而近年来的研究多集中在超临界压力下, 因此, 有必要针对不同压力下包括亚临界状态下的 CO₂ 传热特性进行研究。本文搭建了 CO₂ 传热特性实验平台, 开展亚临界条件下竖直升管道内 CO₂ 传热特性实验, 研究了系统参数对传热恶化的影响。实验参数范围为: 压力 $p=5.5\sim 6.5$ MPa, 质量流速 $G=245\sim 540$ kg/(m²·s)。根据实验数据建立临界热流密度预测关联式, 对 CO₂ 布雷顿循环系统的安全运行具有重要的指导意义。

1 实验系统与方法

1.1 CO₂ 传热特性实验系统

本研究自主搭建了 CO₂ 竖直管传热特性实验平台, 采用 CO₂ 闭式循环。系统主要设计参数为: 压力 12 MPa, 循环介质温度 0~327 °C, 流量 0~0.65 m³/h。为减少实验系统热损失, 维持系统温度稳定, 确保实验数据准确, 实验系统结构主体采用高绝热性材料包覆, 实验系统结构如图 1 所示。在实验过程中, 储液罐安装于系统高位, 储液罐内 CO₂ 液体经过过滤器进入高压泵, 在柱塞泵的作用下, CO₂ 进入实验段被加热后流入冷凝器, 被外管内的冷流体降温至液相后返回储液罐, 完成系统循环。



a) 实验系统



b) 实物照片

图 1 实验系统

Fig.1 Experimental system and physical picture

加热方式为三点式加热, 将 380 V 用电经过变压器转变为低电压大电流的实验用电, 通过铜片和

与其连接的铜极板加热实验段, 同时, 为达到恒定热流密度的边界条件, 管道材质保证均匀。数据采集系统由 NI 公司的 PXI 机箱、直流电源、NI 数据采集板卡、电压电流变送器、压力变送器、压差变送器、质量流量计等部件组成。压力、压降、质量流量、电流电压等信号均以 4~20 mA 输送至采集板卡, 经过处理转变为 1~5 V 电压信号。

1.2 实验段结构

实验段结构如图 2 所示。实验段选取 $\phi 10$ mm × 2 mm 的 304 不锈钢圆管, 圆管进出口均设计了 300 mm 的充分发展段, 实验段总长 1 800 mm, 加热段长度为 1 200 mm。

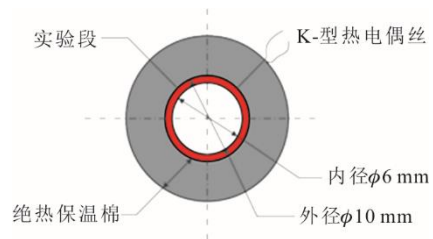


图 2 实验段示意

Fig.2 Schematic of experimental section

在实验段前的主路管道位置、加热段之前、加热段之后、以及加热段后的主路管道位置布置压力测点, 便于得到实验段总压降、进口压降以及实验段压降。实验系统在实验段前的主路管道、加热段前后以及实验段后的主路管道上都设置了铠装热电偶, 监测不同位置的流体温度。外壁面温度通过管外壁面设置多个 K 型热电偶获取。

1.3 数据处理

热流密度 q (kW/m²) 计算公式为:

$$q = \frac{U \times I \times \eta}{\pi d L} \quad (1)$$

式中: U 为加热电压, V; I 为加热电流, A; η 为加热效率; d 为加热段内径, m; L 为实验段加热长度, m。

实验过程中, 为减小散热损失, 实验系统中各实验部件之间采取了保温措施, 并引入了加热效率 η 进行修正:

$$\eta = \frac{G(h_{out} - h_{in}) \times \pi d^2}{4U \cdot I} \quad (2)$$

式中: G 为实验段质量流速, kg/(m²·s); h_{out} 和 h_{in} 分别为实验件流体进出口的焓值, kJ/kg。

经过多次校验, 本文实验系统加热效率良好, 均在 95% 以上。实验中, 修正热负荷时取 $\eta=95\%$ 。

外壁温 T_{ow} 由热电偶测量得到, 按一维内热源导热公式计算内壁温 T_w :

$$T_w = T_{ow} + \frac{q_s}{16\lambda_{wall}}(d_o^2 - d^2) - \frac{q_s d_o^2}{8\lambda_{wall}} \ln \frac{d_o}{d} \quad (3)$$

$$q_s = \frac{4U \times I \times \eta}{\pi(d_o^2 - d^2)L}$$

式中: q_s 为等效体热流密度, kW/m^3 ; λ_{wall} 为导热系数, $\lambda_{wall}=0.014 1T+14.633, \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

实验数据在测量过程中存在一定误差, 实验数据的不确定度见表 1。

表 1 实验数据不确定度
Tab.1 Uncertainty of experimental data

测量参数	不确定度/%
质量流量 $M/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.60
压力 p/MPa	0.23
压降 $\Delta p/\text{kPa}$	2.50
外壁温 $T_{ow}/^\circ\text{C}$	0.40
流体温度 $T_b/^\circ\text{C}$	0.40
电压 U/V	1.80
电流 I/A	0.69
质量流速 $G/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	2.09
热负荷 $q/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2})$	2.78

2 结果与讨论

2.1 超临界/亚临界压力下 CO_2 传热特性对比

压力是影响 CO_2 传热特性的重要因素, 超临界压力与亚临界压力条件下物性有着显著的差异。这是由于不同于亚临界流体的沸腾, 在超临界压力下, 流体往往被视为单相的工质, 随着温度的升高, 流体物性在某一范围内会发生剧烈而非线性的变化^[25] (图 3 由 NIST Refprop 绘制)。因此, 本文首先对亚临界压力与超临界压力下 CO_2 传热特性进行了对比。

图 4 给出了亚临界压力 $p=6.6 \text{ MPa}$, 质量流速 $G=540 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下壁面温度和传热系数沿流动方向变化情况。由图 4 可见: 当热流密度较低 ($q=46.13 \text{ kW}/\text{m}^2$) 时, 壁面温度沿管长变化较小, 几乎维持在 28°C 附近, 略高于 6.6 MPa 压力下对应饱和温度 $T_{\text{sat}}=26.1^\circ\text{C}$; 传热系数沿管长分布呈增长趋势, 由 $2.62 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 增至 $13.00 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 增长了 398.08% 。在热流密度 $q=64.32 \text{ kW}/\text{m}^2$, 长径比 $Z/d < 165$ 时, 壁面温度变化平缓, 维持在 28°C 附近; 当 $Z/d > 165$ 时, 壁面温度开始出现明显上升, 传热系数也在此处开始明显下降, 由 $8.68 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 降至 $3.63 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 出现 DNB (偏离核态沸腾, 第一类

传热恶化)。随着热流密度的不断增加, 实验段上游流体仍处于正常传热, 传热系数缓慢增加, 但是热流密度的增加使传热恶化的起始点不断提前, 传热恶化范围逐渐扩大, 壁面温度也逐渐升高。热流密度 $q=141.05 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时, 在 $Z/d=35$ 处出现传热恶化, 壁温升高至 194°C ; 热流密度 $q=156.13 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时, 在 $Z/d=22$ 处出现传热恶化, 壁温升高至 222°C 。

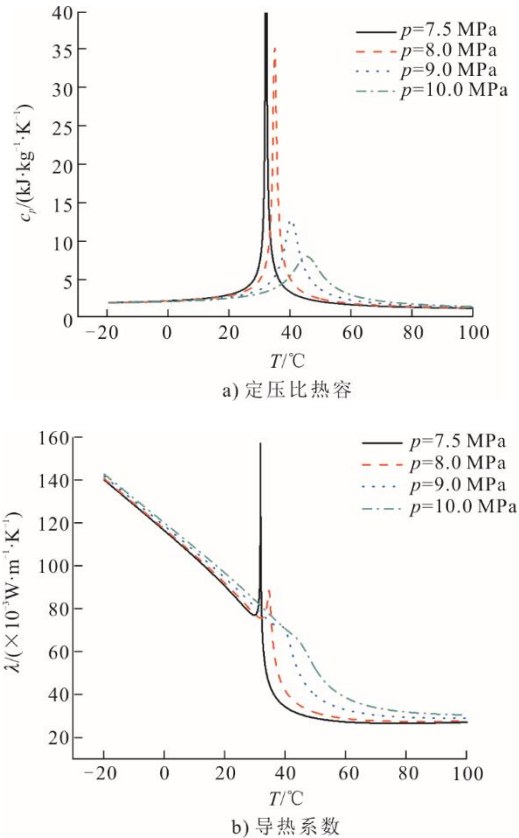
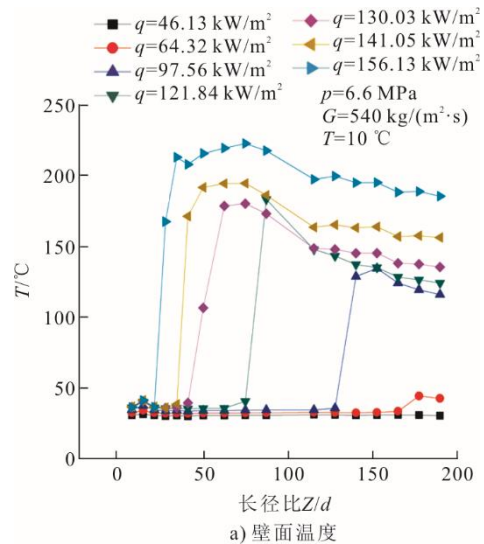


图 3 超临界压力下 CO_2 热物性变化
Fig.3 Variation of CO_2 thermophysical properties at supercritical pressures



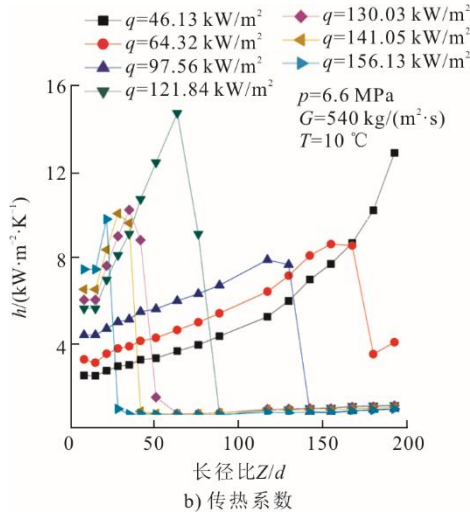


图 4 亚临界压力下 CO₂ 壁温和传热系数分布
Fig.4 Distribution of wall temperature and heat transfer coefficient along tube under subcritical pressure

图 5 为超临界压力 $p=7.5$ MPa, 质量流速 $G=392$ kg/(m²·s) 下壁面温度和传热系数沿流动方向变化情况。与亚临界压力下传热特性相比, 可以看出两者存在显著差异。

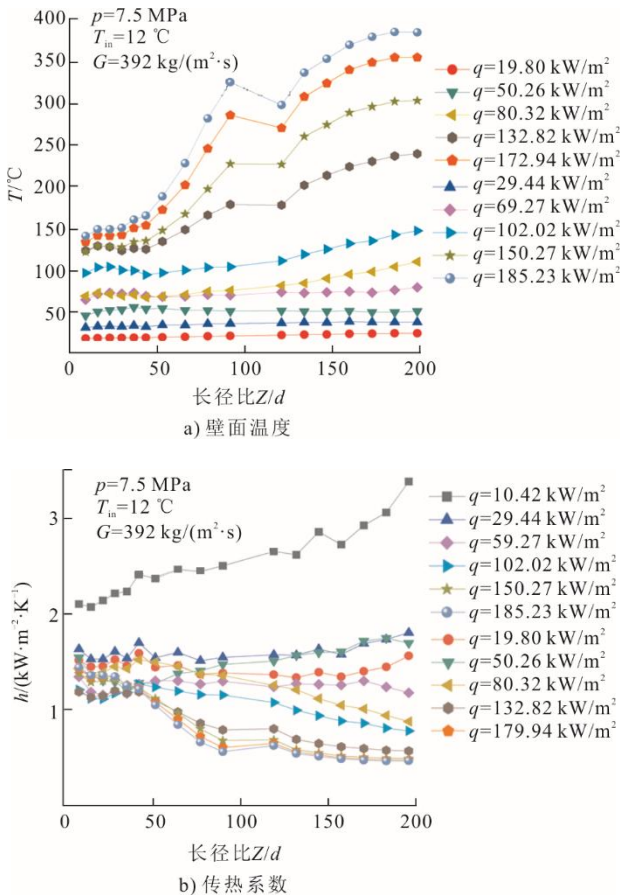


图 5 超临界压力下 CO₂ 壁温和传热系数分布
Fig.5 Distribution of wall temperature and heat transfer coefficient along tube under supercritical pressure

由图 5 可见, 超临界压力下, 不同热流密度时, 壁面温度沿流动方向呈上升趋势, 但没有出现明显的壁温峰值产生, 且同一位置下, 热流密度越高, 壁面温度越高。

对比发现: 在超临界压力下, 壁面温度没有出现峰值, 而在亚临界压力情况下, 出现了明显的壁温峰值; 并且随着热流密度的增加, 亚临界压力下更容易出现壁温峰值和传热系数的急剧降低, 这在实际工程中可能会严重威胁安全运行。

2.2 质量流量的影响

图 6 给出了亚临界压力 $p=5.5$ MPa, 入口温度 $T_{in}=15$ °C, 热流密度 $q=60$ kW/m², 质量流量分别为 245、392、540 kg/(m²·s) 时, 壁面温度与传热系数沿流动方向变化情况。

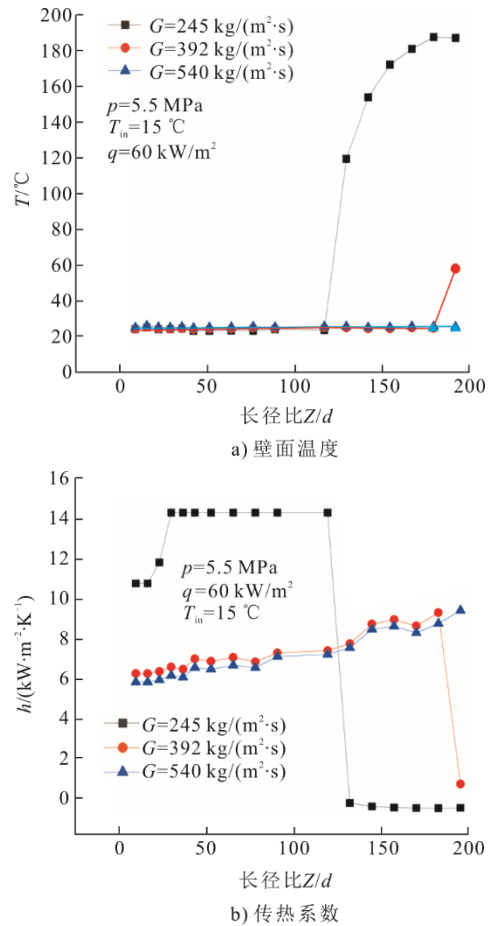


图 6 不同质量流量下壁温和传热系数沿流动方向分布
Fig.6 Distribution of wall temperature and heat transfer coefficient with the enthalpy of main stream under different mass flow rates

由图 6 可以看出: 高质量流量 ($G=540$ kg/m²·s) 下, 壁面温度沿流动方向变化较小, 维持在 25 °C 左右, 传热系数沿流动方向逐渐增加; 低质量流量 ($G=245$ kg/m²·s) 下, 壁面温度在 $Z/d=117$

($h_f=250.13 \text{ kJ/kg}$)处出现飞升,最高温度达到 $187 \text{ }^\circ\text{C}$,同时传热系数 h 急剧减小,由 $14.26 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 减至 $0.61 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,降低了 95.72% 。另外,在同一热流密度下,随着质量流量的增加,传热恶化起始点逐渐推后直至消失,传热系数峰值不断升高。

因此,质量流量的增加能够有效推迟或者消除传热恶化的发生,并且降低壁温飞升的幅值。随着质量流量的增加,管内流动的湍流强度也随之增加,管内工质可以有效带走壁面高温的热量,从而削弱传热恶化的发生,降低壁面温度。

2.3 压力的影响

图 7 给出了质量流量 $G=540 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,入口温度 $T_{in}=15 \text{ }^\circ\text{C}$,热流密度 $q=90 \text{ kW}/\text{m}^2$,压力为 5.5 、 6.0 、 6.5 MPa 下,壁面温度与传热系数沿流动方向变化情况。由图 7 可见,压力 p 由 5.5 MPa 增至 6.5 MPa ,传热恶化起始点提前,壁温飞升的峰值降低,传热系数随着压力增大逐渐降低。

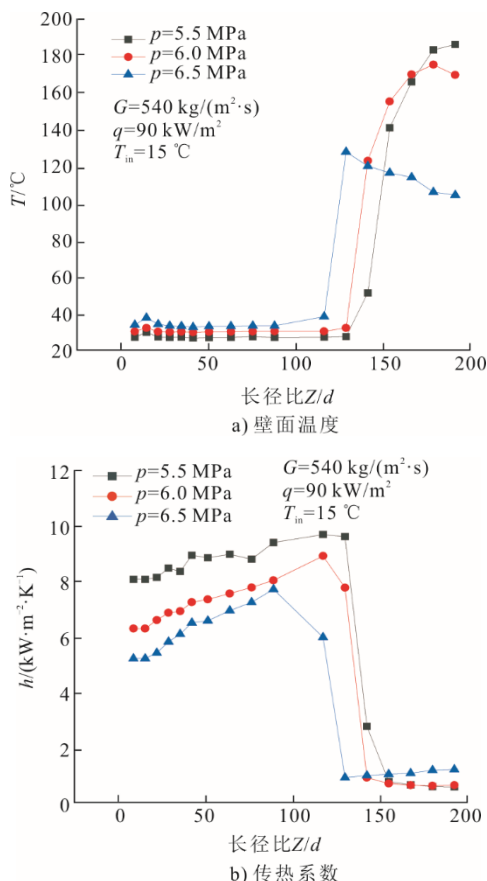


图 7 不同压力下壁温和传热系数沿流动方向分布
Fig.7 Distribution of wall temperature and heat transfer coefficient along tube under different pressures

相同热负荷下,越接近临界压力,传热恶化起始点提前。这一现象可能是由于压力接近临界点时

CO_2 热物理性质的非线性变化造成的(图 8)。越接近临界点,气体密度越高,意味着许多较小的气泡更难脱离壁面,更容易合并,从而导致传热恶化发生。

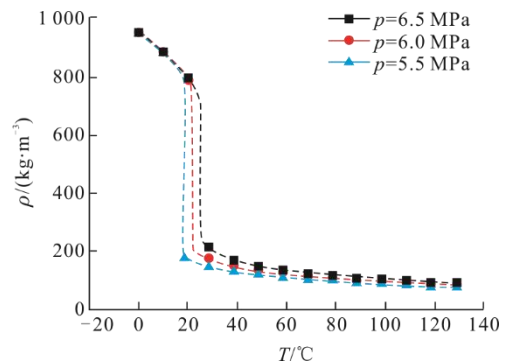


图 8 不同压力下 CO_2 密度随温度变化
Fig.8 Density change of CO_2 with temperature under different pressures

3 临界热流密度预测关联式

临界热流密度(CHF)是管内流动沸腾传热的重要参数之一。实验结果也表明,当热流密度超过 CHF 时,壁面温度会急剧上升,这可能导致设备壁面烧毁,并发生严重事故^[26-30]。因此,对 CHF 的准确预测对工程实际运行安全有重要意义。

预测临界热流密度的经验关联式有很多,但是受到实验条件影响,每个关联式都有各自的适用范围,当超过其适用范围后,预测结果可能会有较大偏差。在前人基础上,对本实验条件下 CO_2 临界热流密度模型进行重新构建。本文在 Wojtan^[18]在 Katto-Ohno 关联式^[14]的基础上针对 R134a 和 R245fa 提出的预测关联式和 Kosar 关联式^[31]与本文实验结果进行对比。

Katto-Ohno 关联式^[14]形式为:

$$\frac{q}{Gh} = f\left(\frac{\rho_L}{\rho_V}, \frac{\sigma\rho_L}{G^2L}, \frac{L}{D}\right) \quad (4)$$

式中: q 为临界热流密度, W/m^2 ; G 为质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; h 为汽化潜热, J/kg ; ρ_L 、 ρ_V 分别为液态密度及气态密度, kg/m^3 ; σ 为表面张力, N/m ; L 、 D 分别为管长、管直径, m 。

Wojtan 等人^[18]在 Katto-Ohno 关联式^[14]的基础上,针对 R134a 和 R245fa 的临界热流密度进行了研究,并提出了相应的预测关联式:

$$\frac{q}{Gh} = 0.437 \left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right)^{0.073} We_L^{-0.24} \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.72} \quad (5)$$

Kosar 关联式^[31]为:

$$q = 0.003 5GhWe^{-0.12} \quad (6)$$

高天泽^[17]在 Wojtan 基础上结合了亚临界状态下

工质的实验参数进行了改进，得到以下关联式：

$$\frac{q}{Gh} = 0.0001294 \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{-0.46} We^{-0.020} Ja^{0.80} \quad (7)$$

根据本文实验结果所得 CHF 与上述公式的预测结果进行对比，结果如图 9 所示。由对比结果可知，以上关联式均不能很好地预测亚临界压力下管内 CO₂ 的 CHF，仅有 33% 的实验数据与预测值误差在 ±30% 以内。

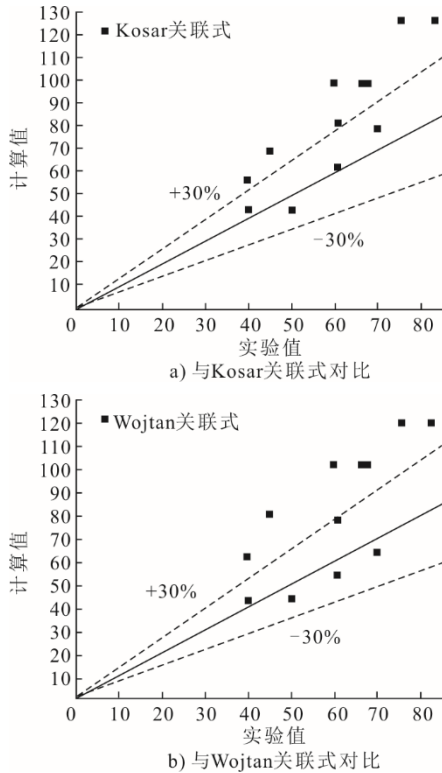


图 9 实验结果与临界热流密度预测关联式结果对比
Fig.9 Comparison between the experimental results and the prediction correlation of critical heat flux

在 Wojtan 关联式^[18]的基础上，考虑到本文的实验工况并未涉及管长及管径变化的影响，因此忽略了无量纲数 L/D 的影响，得到了以下预测关联式：

$$\frac{q}{Gh} = e^{-3.3474} \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{-0.5986} We^{-0.3222} Ja^{0.2876} \quad (8)$$

式(8)适用于压力 5.0~6.5 MPa、质量流速 245~540 kg/(m²·s)、管径为 6 mm 的光滑竖直上升管。

结合高天泽^[17]对环己烷、正戊烷等实验数据，与上述关联式进行对比，得到结果如图 10 所示。从图 10 可以看出，偏差均处于 ±30% 误差带内，吻合良好，可用于工程实际。

引起该误差的原因主要包括以下几点：1) 受实验设备的限制，增加 1~2 W/m² 进行操作，导致了临界热流密度 1%~3% 的误差；2) 由于实验过程中传

热恶化现象发生仅通过实验人员观察壁面温度判断，这也会导致误差产生；3) 仪器测量精度等也会导致误差产生；4) 实验段加工时管道厚度直径等可能会有微小差异。

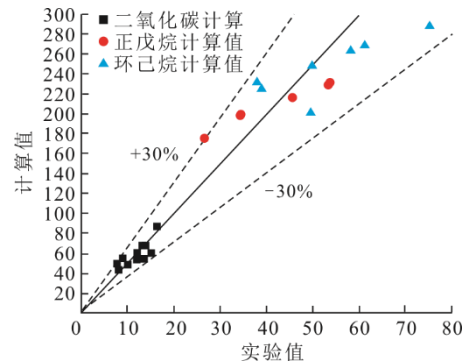


图 10 预测关联式与实验数据的拟合度
Fig.10 Fitting degree between prediction correlation and experimental data

4 结 论

本文进行了亚临界压力条件下，压力与质量流量对 CO₂ 在竖直上升内传热特性影响的实验研究，得到了以下结论。

- 1) 与超临界工况下对比发现，相同工况条件下，亚临界工况 CO₂ 在未发生传热恶化时对流特性更好，发生传热恶化会使 CO₂ 传热系数急剧减小。
- 2) 与超临界工况相比，相同工况条件下，CO₂ 在亚临界压力下更容易发生传热恶化，且壁温峰值更高。
- 3) 在相同热负荷下，压力在 5.5~6.5 MPa 时，压力越接近临界压力，CO₂ 传热恶化起始点越靠近出口段。
- 4) 建立了新的临界热流密度预测关联式，模型预测值与实验值吻合良好，误差处于 ±30% 以内，可用于工程实际。

[参 考 文 献]

- [1] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy conversion, 1968, 8(2): 85-90.
- [2] JACKSON J D. Models of heat transfer to fluids at supercritical pressure with influences of buoyancy and acceleration[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 1481-1491.
- [3] FAN Y H, TANG G H, LI X L, et al. Correlation evaluation on circumferentially average heat transfer for supercritical carbon dioxide in non-uniform heating vertical tubes[J]. Energy, 2019, 170(1): 480-496.
- [4] 姜超, 董鹤鸣, 谢敏, 等. 超临界二氧化碳传热恶化现象研究进展[J]. 热力发电, 2021, 50(10): 1-13. JIANG Chao, DONG Heming, XIE Min, et al. Research progress on heat transfer deterioration of supercritical carbon dioxide[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(10): 1-13.

- [5] 朱兵国, 吴新明, 张良, 等. 垂直上升管内超临界CO₂流动传热特性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(4): 1282-1290.
ZHU Bingguo, WU Xinming, ZHANG Liang, et al. Flow and heat transfer characteristics of supercritical CO₂ in vertical tube[J]. CIESC Journal, 2019, 70(4): 1282-1290.
- [6] 杨温, 肖刚, 邢凯翔, 等. 超临界CO₂换热特性实验研究[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 29-34.
YANG Wen, XIAO Gang, XING Kaixiang, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of supercritical CO₂[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 29-34.
- [7] 杨亮, 丁国良, 黄冬平, 等. 亚临界二氧化碳换热特性研究进展[J]. 制冷学报, 2003(4): 28-34.
YANG Liang, DING Guoliang, HUANG Dongping, et al. Review on heat transfer of subcritical carbon dioxide[J]. Journal of Refrigeration, 2003(4): 28-34.
- [8] LI Z H, JIANG P X, ZHAO C R, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in a vertical circular tube [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 34(8): 1162-1171.
- [9] BAE Y Y, KIM H Y, KANG D J. Forced and mixed convection heat transfer to supercritical CO₂ vertically flowing in a uniformly-heated circular tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1295-1308.
- [10] LIAO S M, ZHAO T S. An experimental investigation of convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in miniature tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(25): 5025-5034.
- [11] HE S, KIM W S, JACKSON J D. A computational study of convective heat transfer to carbon dioxide at a pressure just above the critical value[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(13): 1662-1675.
- [12] MOHSENI M, BAZARGAN M. A new analysis of heat transfer deterioration on basis of turbulent viscosity variations of supercritical fluids[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(12): 1-7.
- [13] KATTO Y. A generalized correlation of critical heat flux for the forced convection boiling in vertical uniformly heated round tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(12): 1527-1542.
- [14] KATTO Y, OHNO H. An improved version of the generalized correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in uniformly heated vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(9): 1641-1648.
- [15] URBANO A, NASUTI F. Conditions for the occurrence of heat transfer deterioration in light hydrocarbons flows[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013, 65(10): 599-609.
- [16] 罗毓珊, 陈昕宽, 胡志宏, 等. 高参数小管径内煤油的传热特性研究[J]. 工程热物理论, 2005, 26(4): 609-612.
LUO Yushan, CHEN Tingkuan, HU Zhihong, et al. Investigation on heat transfer characteristics for kerosene under high parameter and in small diameter tube[J] Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(4): 609-612.
- [17] 高天泽. 跨临界压力下碳氢化合物传热特性实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 1.
GAO Tianze. Experimental study on heat transfer characteristics of hydrocarbons under trans-critical pressure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021: 1.
- [18] WOJTAN L, REVELLIN R, THOME J R. Investigation of critical heat flux in single, uniformly heated microchannels[C]. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale: ECI, 2005.
- [19] YAMAGATA K, NISHIKAWA K, HASEGAWA S, et al. Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(12): 2575-2593.
- [20] KONDRAT'EV N S. About regimes of the deteriorated heat transfer at flow of supercritical pressure water in tubes[C]. Transactions of the IVth All-Union Conference on Heat Transfer and Hydraulics at Movement of Two-Phase Flow inside Elements of Power Engineering Machines and Apparatuses, 1971: 71-74.
- [21] PROTOPOPOV V S, KURAEVA I V, ANTONOV A M. Approach to determination of the conditions of occurrence of deteriorated heat transfer regimes at supercritical pressures[J]. High Temperature, 1973, 11(3): 529-532.
- [22] PIORO I L, KHARTABIL H F, DUFFEY R B. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels—empirical correlations (survey)[J]. Nuclear Engineering & Design, 2004, 230(1/2/3): 69-91.
- [23] BRASSINGTON D J, CAIRNS D N H. Measurements of forced convective heat transfer to supercritical helium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1977, 20(3): 207-214.
- [24] PETUKHOV B S, PROTOPOPOV V S, SILIN V A. Experimental investigation of worsened heat transfer conditions with the turbulent flow of carbon dioxide at supercritical pressure[J]. High Temperature, 1972, 10(2): 304-310.
- [25] HUBER, M. L. SYKIOTI, E. A. ASSAEL, M. J. PERKINS, R. A. Reference correlation of the thermal conductivity of carbon dioxide from the triple point to 1 100 K and up to 200 MPa[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2016, 45(1): 013102.
- [26] 李平姣. 超临界二氧化碳循环燃煤流化床锅炉的构型研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 2.
LI Pingjiao. Research on the configuration of supercritical carbon dioxide circulating coal-fired fluidized bed boiler [D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 2.
- [27] LIU X, ZHONG W, LI P, et al. Design and performance analysis of coal-fired fluidized bed for supercritical CO₂ power cycle[J]. Energy, 2019, 176: 468-478.
- [28] 晋文超, 葛宋. 国外超临界二氧化碳循环发电技术发展及应用前景[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(11): 6-9.
JIN Wenchao, GE Song. The international development of supercritical carbon dioxide brayton cycle power generation technology and its application[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(11): 6-9.
- [29] 董力. 超临界二氧化碳发电技术概述[J]. 中国环保产业, 2017(5): 48-52.
DONG Li. Summarization on power technology of supercritical carbon dioxide[J]. China Environmental Protection Industry, 2017(5): 48-52.
- [30] 孙嘉. 超临界二氧化碳循环发电系统动态特性及控制应用分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 2.
SUN Jia. Dynamic characteristics and control application analysis of supercritical carbon dioxide cycle power generation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 2.
- [31] KOSAR A, KUO C J, PELES Y. Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(23/24): 4867-4886.

(责任编辑 杨嘉蕾)