超临界CO₂竖直光管内向上流动摩擦压降特性

张海松¹, 徐进良^{1,2*}, 朱鑫杰¹, 朱兵¹, 何孝天¹, 刘广林¹

1. 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 102206;

2. 华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206

* 联系人, E-mail: xjl@ncepu.edu.cn

2020-04-21 收稿, 2020-05-13 修回, 2020-05-15 接受, 2020-05-18 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFB0601801)和中央高校基本科研业务费专项资金(2019QN032)资助

摘要 超临界流体被广泛应用于工程技术领域, 包括核工程、电力工程或航空工程等, 但是由于物性剧烈的非线性变化, 传热与表面摩擦取决于多种影响因素, 导致超临界流体的流动压降特性并未得到较好地揭示. 本文研究了超临界二氧化碳(CO₂)在光滑圆管内热流密度 q_w 、质量流速 G 以及压力 P 对摩擦压降特性的影响, 比较了超临界CO₂和常物性流体摩擦压降特性, 并提出了一个预测超临界流体摩擦因子的新方法. 结果表明, 超临界CO₂的摩擦特性与常物性流体不同, 物性的剧烈非线性变化导致其流动特性异常复杂; 摩擦压降被多种边界条件共同影响, 可以表达为 $\Delta P_{f_exp}/\Delta P_{f_iso}=f(P, q_w, G, T_b/T_w)$ 的函数形式, 其中 ΔP_{f_exp} 和 ΔP_{f_iso} 分别为超临界流体摩擦压降和等温流体摩擦压降, T_b 和 T_w 分别为主流温度和壁面温度. 随着压力增大, 摩擦压降迅速减小. 给定入口温度, 超临界沸腾数(supercritical boiling number, SBO)对传热恶化发生时的流动特性有很大的影响, 简单的物性修正不是有效方法. 已存在的预测方法均不能预测其摩擦因子, 特别是较大的摩擦因子, 而我们提出的新关联式可以较好地预测. 除了物性对超临界压力下流动阻力特性的影响, 还应关注边界条件对摩擦特性的影响, 尤其是物性剧烈变化导致的拟沸腾过程, 这对进一步揭示其流动换热机理具有重要意义.

关键词 超临界二氧化碳, 边界条件, 物性, 拟沸腾, 摩擦压降, 传热

自18世纪50年代以来, 超临界流体及其相关应用被广泛研究, 涉及能源环境、食品科学、化学工程以及航空航天工程等领域^[1]. 在最近的20年里, 研究的重点是引入超临界水作为反应堆冷却剂^[2], 主要关注其在超临界压力下光管或强化管内的传热性能, 尤其是传热恶化预测^[3], 但缺少相关的流动压降实验数据和理论依据, 特别是缺少高 P/P_c (临界压力 $P_c=7.38$ MPa)下的实验结果^[4], 这对超临界流体在高压下的压降计算及循环优化提出了很大的挑战. 虽然这一领域已取得了惊人的进展, 但是对超临界流体独特的传热流动机理仍缺乏统一的认识^[5].

在研究非等温流体的流动和传热过程时, 通常以随温度变化较大的物性作为近似模型, 表征壁面温度对物性的影响, 而其他物理性质假定为常数. 对于远离临界点的液体, 通常使用变黏度模型作为较好的近似^[6], 其他物性参数被认为是常数. 传统观点认为, 超临界流体是绝对均匀的单相流体, 因此对超临界流体的流动传热研究, 通常是在常物性湍流流动理论的基础上, 考虑非等温性对其流动传热过程的影响. Mikheev^[7]考虑到超临界状态下的物性剧烈变化, 通过壁面温度和主流温度获得 Pr 无量纲比值, 对经典的等温流体摩擦因子关联式进行了修正, 其中等温流体摩擦

引用格式: 张海松, 徐进良, 朱鑫杰, 等. 超临界CO₂竖直光管内向上流动摩擦压降特性. 科学通报, 2020, 65: 3635–3643

Zhang H S, Xu J L, Zhu X J, et al. Friction pressure drop characteristics of supercritical CO₂ flowing upward in a vertical smooth tube (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3635–3643, doi: 10.1360/TB-2020-0441

因子关联式采用的是Filonenko^[8]提出的关联式。Kirilov等人^[9]研究了临界点附近和超临界压力下流体的阻力和传热特性,推荐采用壁温和主流温度的密度比修正Filonenko关联式。Petukhov等人^[10]认为在超临界状态下,动力黏度对摩擦压降的影响较大,最终采用壁温和主流温度的黏度比对Filonenko关联式进行修正。Pioro等人^[11]回顾了1950~2006年超临界流体水力阻力特性实验研究,发现已存在的分析和数值方法均不能很好地估计临界点附近或超临界压力下的流动阻力,尤其是在湍流流动和高热流密度下。近年来,Fang等人^[12]回顾和分析了超临界压力下流体的摩擦因子研究,提出了一个包含密度、黏度、管径以及粗糙度影响的经验关联式。Wang等人^[13]通过环形通道内的超临界水实验,提出了一个包含密度、动力黏度和普朗特数的经验关联式。前人对不同工质和异型管内的流动阻力进行了大量探索,但是关于超临界流体的流动阻力特性仍未得到很好解决,原因之一可能是忽略了一些重要因素。除此之外,这些研究大多集中在较低的 P/P_c 范围内,缺少高压、高温参数下的实验结果,这阻碍了超临界流体相关动力循环进一步发展和应用。

本文通过实验研究了超临界二氧化碳(CO_2)在内径为8 mm的圆管内竖直向上流动过程中,不同边界条件和物性参数对其摩擦压降特性的影响,参数范围涵盖 $P=7.512\sim 21.036\text{ MPa}$ 、 $G=500\sim 1500\text{ kg m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 和 $q_w=15\sim 400\text{ kW m}^{-2}$,其中压力包含近临界压力和远离临界压力范围($1.02 < P/P_c < 2.85$);讨论了不同边界条件下,通过改变入口温度获得的摩擦压降随平均焓值变化特性。更让人感兴趣的是,给定入口温度时,摩擦压降随边界条件变化的规律,这不仅包含了物性影响,更能直接反映边界条件对摩擦压降的影响。最后,本研究提出了一个预测超临界流体摩擦因子的新经验关联式,为超临界流体的流动传热特性研究和工程设计提供参考。

1 实验系统和数据处理

1.1 实验系统和测试段设计

实验系统和实验段布置如图1所示。实验回路主要包括 CO_2 工质循环系统、冷却水循环系统以及工质充液回收系统。其中 CO_2 工质为纯度高于99.0%的工业 CO_2 ,主循环系统中的工质从高压泵流出过缓冲罐,然后进入预热器,在预热器中被加热到实验所需要的温度(电加热系统采用低压大电流通过不锈钢管本身的

电阻直接发热),最后流入实验段,如图1(a)所示。实验段采用规格为 $\phi 12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的1Cr18Ni9Ti不锈钢圆管,总长3600 mm,其中加热段长度为2000 mm,两端各留800 mm长的流动稳定段,作为不加热段处理。实验段几何结构和温压测点布置如图1(b)所示。实验段主流温度分别由进出口处的两个铠装热电偶测量。在实验段上取了39个等距截面,以保证捕捉到壁面的温度变化趋势,每个截面布置一个或两个K型(NiCr-NiSi)热电偶,用以获得实验段外壁面温度,整个实验段的表面包裹50 mm厚度硅酸铝保温棉,减少热量散失。

1.2 压降计算方法

由于取压管与实验段是垂直的位置关系,故实验中直接测得的压差 ΔP^* 为流体流经实验段的静压差,将其转换为总压差 ΔP :

$$\Delta P = \Delta P^* + \rho_0 g \Delta h, \quad (1)$$

其中 ρ_0 为引压管中常温下 CO_2 的密度, Δh 为测压点间的距离, g 为重力加速度。经过合理布置实验段,可忽略沿程阻力损失,故摩擦压降 ΔP_f 与 ΔP^* 的关系为

$$\Delta P_f = \Delta P^* - \Delta P_{ac} - \Delta P_g + \rho_0 g \Delta h. \quad (2)$$

ΔP_f 是流体沿通道流动时,由通道壁面的黏性引起的压降。 ΔP_f 和质量流速 G 是二次方关系,即

$$\Delta P_f = f \frac{L}{D} \frac{G^2}{2\rho}, \quad (3)$$

其中 L 为管长, D 为通道直径, f 为对应的摩擦阻力系数, ρ 为流体的密度。 ΔP_{ac} 是流体由于密度或速度变化引起的流动加速压降:

$$\Delta P_{ac} = \rho_{out} u_{out}^2 - \rho_{in} u_{in}^2 = G^2 \left(\frac{1}{\rho_{out}} - \frac{1}{\rho_{in}} \right), \quad (4)$$

其中 u 为流体的速度,下标in代表进口,out代表出口。 ΔP_g 是重力引起的重力压降:

$$\Delta P_g = \int_0^L \rho g \sin \theta dx, \quad (5)$$

其中 θ 为实验段的倾角。

在超临界压力条件下,由于流体的密度剧烈变化,不能简单地认为密度为常数,需考虑密度的沿程积分效应。本文选取主流温度 T_b 的平均来考虑密度的平均:

$$\Delta P_g = g \left(\frac{T_{b_in} \rho_{in} - T_{b_out} \rho_{out}}{T_{b_in} - T_{b_out}} \right). \quad (6)$$

图 1 (网络版彩色)实验系统(a)和实验段布置(b)
Figure 1 (Color online) Test facility (a) and test section arrangement (b)

1.3 其他实验数据处理方法

实验段的实际加热功率 P_c 由下式计算:

$$P_c = \eta \cdot P_e, \quad (7)$$

其中 P_e 为电加热功率; η 为热平衡效率, 定义为流过整个加热段流体的焓升与电加热功率的比值. 流体任意位置 x 处的主流焓值 i_b 为

$$i_b(x) = i_{b_in} + \frac{4q_w x}{Gd_{in}}, \quad (8)$$

其中 d_{in} 为管子的内径. 实验段壁面热流密度 q_w 被定义为

$$q_w = \frac{P_c}{\pi d_{in} L}. \quad (9)$$

实验段外壁温可简化为具有内热源的一维稳态导热问题, 由下式直接计算:

$$t_{w_i} = t_{w_o} - \frac{q_w d_{in}}{2\lambda_w} \left(\frac{1}{2} - \frac{d_{in}^2}{d_{out}^2 - d_{in}^2} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} \right), \quad (10)$$

其中, t_{w_i} 和 t_{w_o} 分别为管子的内壁温和外壁温; λ_w 为管壁导热系数; d_{out} 为管子的外径. 除了上述物理量之外, 压降是一个过程量, 计算过程需选择合理的定性温度, 这里局部定性温度选择为相应的进出口温度的线性平均值. 为了保证实验结果的可信度, 每个工况下达到稳定状态后, 所有参数测量值均稳定60 s.

实验直接测量的进出口温度和主流温度不确定度均为0.5℃, 压力的不确定度为1%. 对于不能直接测量的参数, 单次测量不确定度按以下公式传递:

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}, \quad (11)$$

其中 x_i 为直接测得量的不确定度,热流密度、质量流速和摩擦系数的不确定分别为5.05%、2.05%和3.0%。

2 结果与讨论

2.1 边界条件变化对摩擦压降的影响

2.1.1 各压降随主流焓值变化特性

图2所示为 $P=15.545$ MPa时,总压降、摩擦压降、重力压降和加速压降随主流焓值的变化,其中 i_{pc} 为拟临界温度对应的焓值。在给定压力、热流密度和质量流速下,改变进口温度可以获得不同的摩擦压降,横坐标的焓值为进出口平均温度对应的焓值。随着焓值增大,总压降呈先减小再增大趋势,在拟临界焓值附近出现一个最小值。这主要是因为拟临界附近密度迅速减小,导致重力压降急剧降低,从而使总压降出现最小值。流动加速压降在拟临界焓值附近轻微增加,在整个过程中与其他压降相比非常小。当主流焓值超过拟临界焓值 i_{pc} 之后,总压降突然上升,这是摩擦压降变化较大导致的。整个焓值区间范围内,摩擦压降均呈上升趋势,但是在拟临界后上升得更快。从结果来看,随着焓值增大,摩擦压降逐渐占主要地位。

2.1.2 边界条件变化对摩擦压降的影响

如图3所示为给定其他参数,不同热流密度、质量流速或压力下摩擦压降随焓值变化情况。相同焓值下,随着热流密度增大,摩擦压降有所增加,不同热流密度对摩擦压降的影响较小(图3(a))。图3(b)所示为质量流速对摩擦压降的影响,随着质量流速从1000增大到1500 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$,相同焓值下的摩擦压降迅速增大,尤

图2 各种压降随主流焓值的变化
Figure 2 Variations in pressure drops with bulk enthalpy

其是在拟临界点之后,质量流速的影响更明显。摩擦压降随质量流速增大明显主要是因为摩擦压降大小与质量流速的二次方的关系,而摩擦因子的变化是导致摩擦压降在拟临界点前后不同的主要原因。在给定的质量流速下,随着焓值增大,摩擦压降迅速增大。但是,对于质量流速为1500 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$,摩擦压降增加的幅度明显大于其他两个质量流速,质量流速增大和密度降落是导致摩擦压降剧烈变化的主要原因。如图3(c)所示,压力对摩擦压降的影响在拟临界点之前很小,但是随着焓值经过拟临界点,相同焓值下的摩擦压降迅速降低,并且随着焓值增大,摩擦压降降低的程度增大。这是由于压力升高会使密度和黏度均增大,但是密度增大使摩擦压降减小,而黏度增大使摩擦压降增大,综合效应是摩擦压降减小。显然,密度变化对摩擦压降影

图3 不同参数对摩擦压降的影响。(a) 在 $d_{in}=8$ mm、 $P=15.545$ MPa和 $G=1500$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下,热流密度对摩擦压降的影响;(b) 在 $d_{in}=8$ mm、 $P=15.545$ MPa和 $q_w=125.5$ kW m^{-2} 下,质量流速对摩擦压降的影响;(c) 在 $d_{in}=8$ mm、 $G=1500$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $q_w=175$ kW m^{-2} 下,压力对摩擦压降的影响
Figure 3 Effects of different parameters on frictional pressure drop. (a) The effect of heat flux on friction pressure drop at $d_{in}=8$ mm, $P=15.545$ MPa and $G=1500$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$; (b) the effect of mass flow rate on friction pressure drop at $d_{in}=8$ mm, $P=15.545$ MPa, and $q_w=125.5$ kW m^{-2} ; (c) the effect of pressure on friction pressure drop at $d_{in}=8$ mm, $G=1500$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and $q_w=175$ kW m^{-2}

响更重要。张伟强等人^[14]曾在超临界流体流动传热实验过程中报道过类似结果。

图4为给定其他参数时,热流密度、质量流速以及压力在不同焓值下对摩擦因子的影响。如图4(a)所示,随着热流密度增大,摩擦因子在拟临界焓值之前和附近有所减小,远离拟临界焓值后,影响变小。这主要是因为拟临界焓值之前和附近的热流密度随温度变化剧烈,较大热流密度下,流体的膨胀能力较大,壁面温度更高,这可能导致阻力系数比较大。随质量流速的增大,摩擦因子减小(图4(b))。这是因为质量流速增大,雷诺数 Re 明显增大,导致摩擦因子减小,并在拟临界焓值附近出现峰值。关于超临界流体摩擦因子的峰值现象,在Wang等人^[13]的实验过程中也被发现,作者认为这种异常现象的原因还不是十分清晰,应进一步研究。我们认为,超临界流体摩擦因子的峰值现象可能与传热过程的换热系数峰值类似,二者的相似性应引起重视。随着

压力增大,摩擦因子逐渐上升(图4(c))。在拟临界焓值之前,压力对摩擦因子的影响较小,当超过拟临界焓值之后,压力对摩擦因子的影响相对较大,并趋于稳定变化。这是因为随着焓值远离拟临界焓值,物性变化程度降低。压力在拟临界焓值前后的影响程度不同,可能是由于在拟临界焓值之前物性剧烈变化,不同物性对摩擦压降的影响相互抵消。

2.2 物性和摩擦特性随焓值变化

图5给出了不同压力、质量流速和热流密度下, Pr_b 、 Pr_w/Pr_b 、 ρ_w/ρ_b 、 μ_w/μ_b 和 f_{exp}/f_{iso} 随焓值的变化,其中 f_{iso} 是Filonenko^[8]提出的计算等温流体的摩擦因子经验关联式:

$$f_{iso} = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re_b - 1.64)^2} \quad (12)$$

所有工况的摩擦因子均在拟临界焓值附近出现了

图4 不同参数对摩擦因子的影响。(a) 在 $P=15.545 \text{ MPa}$ 和 $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下,热流密度对摩擦因子的影响;(b) 在 $P=15.545 \text{ MPa}$ 和 $q_w=90.1 \text{ kW m}^{-2}$ 下,质量流速对摩擦因子的影响;(c) 在 $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $q_w=90.1 \text{ kW m}^{-2}$ 下,压力对摩擦因子的影响
Figure 4 Effects of different parameters on friction factor. (a) The effect of heat flux on friction factor at $P=15.545 \text{ MPa}$ and $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; (b) the effect of mass flow rate on friction factor at $P=15.545 \text{ MPa}$ and $q_w=90.1 \text{ kW m}^{-2}$; (c) the effect of pressure on friction factor at $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $q_w=90.1 \text{ kW m}^{-2}$

图5 物性和摩擦因子的变化。(a) $P=12.021 \text{ MPa}$ 、 $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $q_w=83.4 \text{ kW m}^{-2}$; (b) $P=15.545 \text{ MPa}$ 、 $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $q_w=95.3 \text{ kW m}^{-2}$; (c) $P=15.545 \text{ MPa}$ 、 $G=1250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $q_w=80.35 \text{ kW m}^{-2}$
Figure 5 The variations of thermophysical properties and friction factor. (a) $P=12.021 \text{ MPa}$, $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $q_w=83.4 \text{ kW m}^{-2}$; (b) $P=15.545 \text{ MPa}$, $G=1500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $q_w=95.3 \text{ kW m}^{-2}$; (c) $P=15.545 \text{ MPa}$, $G=1250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $q_w=80.35 \text{ kW m}^{-2}$

不同大小的峰值, 其中12.021 MPa时最为明显. 对于压力为12.021 MPa的工况, 如图5(a)所示, $f_{\text{exp}}/f_{\text{iso}}$ 与 Pr_w/Pr_b 随焓值变化呈相反的规律变化, $f_{\text{exp}}/f_{\text{iso}}$ 总体上先增大, 在拟临界焓值附近达到最大, 然后再减小, 而 Pr_w/Pr_b 先减小, 在拟临界焓值附近达到最小, 然后再增大. 密度比、黏度比和 Pr 随焓值变化与 $f_{\text{exp}}/f_{\text{iso}}$ 没有很强的对应关系. 单从物性的角度看, Pr_w/Pr_b 和 $f_{\text{exp}}/f_{\text{iso}}$ 均随焓值变化表现出了相反的变化趋势. 类似的规律在其他工况中也被发现, 如图5(b)和(c)所示.

2.3 边界条件变化对沿程摩擦压降的直接影响

在一定的入口温度下, 给定其他边界条件就可以确定流体流过管道的摩擦压降, 此时不同参数对摩擦压降的影响规律更有意义, 这里对摩擦压降的直接影响是为了区别2.1.2小节通过改变进口温度获得的不同边界条件下对摩擦压降的影响. 如图6(a)所示, 随热流密度增大, 不同压力下的摩擦压降均呈增大趋势. 小热流密度下, 传热为正常传热, 不同热流密度对摩擦压降影响较小; 随着热流密度增大, 传热发生恶化, 摩擦压降也随着增大, 不同热流下的摩擦压降相差较大. 在给定热流密度下, 压力升高, 摩擦压降迅速减小. 在其他参数给定时, 增大热流密度会使摩擦压降增大, 尤其是恶化发生时的摩擦压降. 如图6(b)所示, 随着质量流速增大, 摩擦压降逐渐增大, 当质量流速超过 $750 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 后, 传热表现为正常传热, 摩擦压降几乎呈线性增大. 当质量流速为 $520 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 传热发生恶化, 此时的压降与 $750 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 后的摩擦压降规律明显不一致. 除了质量流速会直接增大摩擦压降之外, 摩擦压降随质量流速的变化规律还与正常或恶化传热有关.

传统观点认为, 理想的单相流体摩擦特性主要与

雷诺数 Re 有关, 而与热流密度无关. 但是, 从本文实验结果来看, 超临界流体的摩擦特性还与边界条件有关. 为了进一步揭示超临界流体的摩擦特性, 分析超临界 CO_2 摩擦因子的实验与式(12)计算得到的摩擦因子的比值和超临界沸腾数(supercritical boiling number, SBO)的关系, SBO的表达式为

$$\text{SBO} = \frac{q_w}{Gi_{\text{pc}}}. \quad (13)$$

这个无量纲数可以定性地表近壁区低密度层受到的膨胀力与惯性力的比值. 我们之前的研究发现, 对于超临界 CO_2 , 当SBO超过一定值时, 传热会发生恶化^[15], 这个结论进一步可以推广到超临界水和有机工质^[16]. 如图7所示, SBO对超临界摩擦因子有很大影响, 超临界摩擦因子既可能大于等温流体的摩擦因子, 也可能小于等温流体的摩擦因子, 并且随着SBO增大, 超临界流体的摩擦因子明显比等温流体的摩擦因子大. 因此, 以 $\Delta P_{f_{\text{exp}}}$ 和 $\Delta P_{f_{\text{iso}}}$ 分别表示超临界流体摩擦压降和等温流体摩擦压降, 超临界流体的摩擦特性可以表达成如下形式:

$$\frac{d(\Delta P_{f_{\text{exp}}})/dx}{d(\Delta P_{f_{\text{iso}}})/dx} = f\left(P, G, q_w, \frac{T_b}{T_w}\right), \quad (14)$$

并且这个比值可能大于1, 也可能小于1, 超临界流体的摩擦特性非常复杂.

2.4 超临界摩擦因子新的经验关联式

超临界流体的摩擦因子计算主要是在等温流体经典摩擦因子经验公式的基础上, 考虑横截面的温差对其的影响. Kirillov等人^[9]认为密度是影响超临界流体摩擦因子与等温流体摩擦因子不同的主要因素, 提出

图6 不同参数对摩擦压降的影响. (a) 不同压力下的热流密度对摩擦压降的影响; (b) 不同压力下的质量流速对摩擦压降的影响

Figure 6 Effects of different parameters on frictional pressure. (a) The effect of heat flux on frictional pressure drop under different pressures; (b) the effect of mass flow rate on frictional pressure drop under different pressures

图7 不同SBO下的超临界CO₂流动压降特性
Figure 7 Pressure drop characteristics of supercritical CO₂ under different SBO

关联式为 $f=f_{iso}(\rho_w/\rho_b)^{0.4}$. Petukhov等人^[10]认为,黏度是影响超临界流体摩擦因子变化的主要因素,采用壁面和主流温度下的黏度比修正,表达式为 $f=f_{iso}(\mu_w/\mu_b)^{0.22}$. Mikheev^[7]考虑到超临界流体的物性剧烈变化,通过壁温和主流温度获得 Pr 无量纲比值修正关联式为 $f=f_{iso}(Pr_w/Pr_b)^{0.33}$. 为了评价不同形式的经验关联式的有效性,选取平均相对误差(e_A)、平均绝对相对误差(e_R)和均方根相对误差(e_S)评估预测结果. 对于单个预测数

据,一般采用相对误差(e)衡量其与真实值的误差大小:

$$e = \left(\frac{R_{pre} - R_{exp}}{R_{exp}} \right) \times 100\%, \quad (15)$$

其中 R_{pre} 和 R_{exp} 分别为预测值和实验值. 其余误差分别定义为

$$e_A = \frac{1}{n} \sum_1^n e_i \times 100\%, e_R = \frac{1}{n} \sum_1^n |e_i| \times 100\%,$$

$$e_S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n e_i^2} \times 100\%. \quad (16)$$

根据以上实验结果和分析,考虑壁面温度对物性的影响和超临界拟沸腾过程,提出经验关联式

$$\frac{f}{f_{iso}} = 2.514 \left(\frac{q_w}{G_{lpc}} \right)^{0.12} \left(\frac{Pr_b}{Pr_w} \right)^{0.3}. \quad (17)$$

通过实验获得8 mm管径下的实验数据以评价不同关联式的预测结果,如图8所示. 不同形式的关联式均不能预测超临界CO₂的摩擦因子,尤其是当摩擦因子大于0.03时, Kirillov等人^[9]的关联式预测能力最差, Mikheev^[7]关联式各项误差均优于另外两个关联式,但是结果非常发散. 这些关联式均是从理想的单相流体出发,认为超临界流体的异常流动传热行为是由物性变

图8 经验关联式计算的摩擦因子与实验数据比较. (a) 新关联式; (b) Mikheev^[7]关联式; (c) Petukhov等人^[10]关联式; (d) Kirillov等人^[9]关联式
Figure 8 Friction factor predicted by empirical correlations with respect to the test data. (a) New correlation; (b) Mikheev^[7] correlation; (c) Petukhov et al.^[10] correlation; (d) Kirillov et al.^[9] correlation

化导致的。但是,从三种不同类型的关联式预测结果来看,采用物性对等温流体摩擦因子修正的方法并不能预测超临界流体的摩擦因子。除此之外,我们之前的研究表明,单相理想的流体概念也同样不能很好地处理超临界流体的异常传热行为^[17]。但是,新关联式预测的平均相对误差、平均绝对相对误差和均方根相对误差分别为-8.78%、18.86%和24.31%,精度大大提升。

3 结论

通过实验研究了超临界CO₂在竖直光管内向上流动过程中的摩擦特性,压力涵盖了从近临界压力到2.85P_c压力范围。超临界流体与常物性流体的摩擦特性有很大区别。传统观点认为,单相等温流体的摩擦特性仅与Re和管壁粗糙度有关。而对于超临界流体来说,除了物性剧烈非线性变化之外,摩擦特性还受边界条件影响,尤其是当传热恶化发生时,热流密度对整体摩擦

特性影响很大,这在以前的流动特性研究中常常被忽略。超临界流体的摩擦压降可以表达为 $[d(P_{f,exp})/dx]/[d(P_{f,iso})/dx]=f(P, q_w, G, T_b/T_w)$ 的形式,简单地对等温流体摩擦因子经验关联式进行修正并不有效,已存在的经验关联式与实验结果相差较大,尤其是当摩擦因子较大时。我们提出的新关联式不仅包含了壁面温度对物性的影响,而且考虑了超临界拟沸腾过程对流动特性的影响。今后的研究过程中,除了考虑壁面温度对物性的影响,还应着重关注超临界流体流动摩擦与传热间的关系,尤其是物性剧烈变化导致的类似于亚临界流动沸腾过程中的行为,这通常称为超临界拟沸腾或拟相变过程。Ambrosini^[18]曾报道过,在加热通道内的超临界系统中,可能会出现密度波振荡和Ledinegg不稳定性,这与亚临界压力下的沸腾表现出了非常相似的定性和定量行为,但是超临界流体和亚临界流体间的相似性并没有引起足够的重视。

致谢 感谢国家电投集团新疆能源化工有限责任公司叶鹏,华北电力大学能源动力与机械工程学院吴新明、闫鑫的帮助。

参考文献

- 1 Cabeza L F, de Gracia A, Fernández A I, et al. Supercritical CO₂ as heat transfer fluid: A review. *Appl Therm Eng*, 2017, 125: 799–810
- 2 Rahman M M, Xu J D, Beni M S, et al. Supercritical water heat transfer for nuclear reactor applications: A review. *Ann Nucl Energy*, 2016, 97: 53–65
- 3 Pizzarelli M. The status of the research on the heat transfer deterioration in supercritical fluids: A review. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2018, 95: 132–138
- 4 Sun E H, Xu J L, Li M J, et al. Connected-top-bottom-cycle to cascade utilize flue gas heat for supercritical carbon dioxide coal fired power plant. *Eng Conv Manag*, 2018, 172: 138–154
- 5 Huang D, Wu Z, Sunden B, et al. A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress. *Appl Energy*, 2016, 162: 494–505
- 6 Bringer R P, Smith J M. Heat transfer in the critical region. *AIChE J*, 1957, 3: 49–55
- 7 Mikheev M A. Fundamentals of Heat Transfer. Moscow: Gosenergoizdat Publishing House, 1956
- 8 Filonenko G K. Hydraulic resistance of pipelines. *Therm Eng*, 1954, 4: 40–44
- 9 Kirillov P L, Yurev Y S, Bobkov V P. Handbook of Thermal-Hydraulic Calculations. Moscow: Energoatomizdat Publishing House, 1990
- 10 Petukhov B S, Kurganov V A, Ankudinov V B. Heat transfer and flow resistance in the turbulent pipe flow of a fluid with near-critical state parameters. *High Temp*, 1983, 21: 81–89
- 11 Pioro I L, Duffey R B, Dumouchel T J. Hydraulic resistance of fluids flowing in channels at supercritical pressures (survey). *Nucl Eng Des*, 2007, 231: 187–197
- 12 Fang X D, Xu Y U, Su X H, et al. Pressure drop and friction factor correlations of supercritical flow. *Nucl Eng Des*, 2012, 242: 323–330
- 13 Wang H, Bi Q, Wu G, et al. Experimental investigation on pressure drop of supercritical water in an annular channel. *J Supercritical Fluids*, 2017, 131: 47–57
- 14 Zhang W Q, Li H X, Zhang Q, et al. Experimental study on flow resistance of supercritical pressure water in an internally ribbed tube (in Chinese). *Proc Chin Soc Elect Eng*, 2013, 17: 20–26 [张伟强, 李会雄, 张庆, 等. 内螺旋管内超临界水的流动阻力特性实验研究. 中国电机工程学报, 2013, 17: 20–26]
- 15 Zhu B G, Xu J L, Wu X M, et al. Supercritical “boiling” number, a new parameter to distinguish two regimes of carbon dioxide heat transfer in tubes. *Int J Therm Sci*, 2019, 136: 254–266
- 16 Xu J L, Zhang H S, Zhu B G, et al. Critical supercritical-boiling-number to determine the onset of heat transfer deterioration for supercritical fluids. *Sol Energy*, 2020, 195: 27–36
- 17 Zhang H S, Zhu X J, Zhu B G, et al. Effects of buoyancy and acceleration on heat transfer of supercritical CO₂ flowing in tubes (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 064401 [张海松, 朱鑫杰, 朱兵国, 等. 浮升力和流动加速对超临界CO₂管内流动传热影响. 物理学报, 2020, 69: 064401]
- 18 Ambrosini W. On the analogies in the dynamic behaviour of heated channels with boiling and supercritical fluids. *Nucl Eng Des*, 2007, 237: 1164–1174

Summary for “超临界CO₂竖直光管内向上流动摩擦压降特性”

Friction pressure drop characteristics of supercritical CO₂ flowing upward in a vertical smooth tube

Haisong Zhang¹, Jinliang Xu^{1,2*}, Xinjie Zhu¹, Bingguo Zhu¹, Xiaotian He¹ & Guanglin Liu¹

¹ Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

* Corresponding author, E-mail: xjl@ncepu.edu.cn

Supercritical fluids are widely used in engineering technology, including nuclear engineering, electrical engineering or aircraft engineering and so on. The accurate prediction of pressure drops is crucial to design and optimization of advanced power systems such as solar driven supercritical carbon dioxide (CO₂) Brayton cycle. However, due to the drastic nonlinear change of physical properties, heat transfer and surface friction depend on effects of various factors, so the flow pressure drop characteristics of supercritical fluids have not been well revealed. In traditional view, it is impossible to identify liquid from gas beyond the critical point, thus supercritical fluids are an absolutely homogeneous structure with a single-phase. The single-phase ideal assumption is used to deal with supercritical friction pressure drop which is mainly related to Re and wall roughness, and the classically empirical correlation of isothermal flow is modified by physical properties to predict supercritical fluids friction factor. However, the single-phase ideal assumption cannot explain and predict supercritical friction pressure drop. In this paper, the effects of heat flux q_w , mass flow rate G and pressure P on the friction pressure drop characteristics of supercritical CO₂ in a smooth circular tube are investigated experimentally, and the frictional pressure drop characteristics of supercritical CO₂ are compared with those of isothermal flow. The tested pressures, mass fluxes and heat fluxes cover the ranges of 7.512–21.036 MPa, 500–1500 kg m⁻²s and 15–400 kW m⁻², respectively. Finally, a new correlation is proposed to predict the friction factor of supercritical CO₂. The results show that the friction characteristics of supercritical CO₂ are different from those of constant physical fluids. Its physical properties change dramatically, resulting in the complexity of its flow phenomena and the actual gas effect of the supercritical fluids should be considered. The friction pressure drop is related to boundary conditions and also correlated in a simple form as $\Delta P_{f_exp}/\Delta P_{f_iso} = f(P, q_w, G, T_b/T_w)$, where ΔP_{f_exp} and ΔP_{f_iso} are supercritical fluids friction pressure drop and isothermal flow friction pressure drop, T_b and T_w are bulk temperature and wall temperature, respectively. As the pressure increases, the frictional pressure drop decreases rapidly. Given the inlet temperature, the supercritical-boiling-number (SBO) have great influence on the flow characteristics when heat transfer deterioration occurs. Simple modification correlations by property variation is not an effective method for the supercritical fluids friction factor, and none of correlations can predict the supercritical fluids friction factor, especially the larger friction factor. The new correlation can predict the friction factor of supercritical CO₂. In addition to the effects of physical properties on the flow characteristics of supercritical fluids, we should also pay attention to the effects of boundary conditions on the flow characteristics, especially in the supercritical pseudo-boiling process caused by the drastic change of physical properties. Supercritical pseudo-boiling has a large impact on heat transfer and skin friction for fluids with large property variations. The flow characteristic similarity of supercritical and subcritical flow boiling should be paid attention. Our work is important for further understanding of heat transfer and flow for supercritical fluids.

supercritical carbon dioxide, boundary condition, physical property, pseudo-boiling, friction pressure drop, heat transfer

doi: [10.1360/TB-2020-0441](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0441)