

基于拟沸腾理论的超临界CO₂管内传热恶化量纲分析

张海松 徐进良 朱鑫杰

Dimensional analysis of flow and heat transfer of supercritical CO₂ based on pseudo-boiling theory

Zhang Hai-Song Xu Jin-Liang Zhu Xin-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 044401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201546

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201546>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浮升力和流动加速对超临界CO₂管内流动传热影响

Effects of buoyancy and acceleration on heat transfer of supercritical CO₂ flowing in tubes

物理学报. 2020, 69(6): 064401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191521>

超临界压力CO₂在水平圆管内流动传热数值分析

Numerical analysis on flow and heat transfer of supercritical CO₂ in horizontal tube

物理学报. 2020, 69(4): 044401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191513>

气溶胶对大气CO₂短波红外遥感探测影响的模拟分析

Simulation analysis of aerosol effect on shortwave infrared remote sensing detection of atmospheric CO₂

物理学报. 2018, 67(3): 039202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171993>

基于拓展分离变量法的层合材料瞬态传热分析

Transient heat transfer analysis of laminated materials based on extended separation of variables

物理学报. 2018, 67(21): 214401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180743>

基于傅里叶变换红外光谱技术测量大气中CO₂的稳定同位素比值

Detection of stable isotopic ratio of atmospheric CO₂ based on Fourier transform infrared spectroscopy

物理学报. 2017, 66(22): 220204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.220204>

1.572 μm附近CO₂吸收光谱的测量

Measurement of absorption spectrum around 1.572 μm

物理学报. 2017, 66(10): 104206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104206>

基于拟沸腾理论的超临界 CO₂ 管内传热恶化量纲分析*

张海松¹⁾ 徐进良^{1)2)†} 朱鑫杰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)

(2020 年 9 月 17 日收到; 2020 年 10 月 8 日收到修改稿)

超临界流体广泛应用于工程技术领域, 其流动传热特性对工程设计具有重要意义, 但是, 由于超临界流体的物理微观和宏观行为的机理尚不清晰, 所以其异常的流动传热特性并未得到很好的解决. 普遍认为超临界流体在分子尺度上可分为类气和类液两种不同的特性, 直到最近通过实验在宏观上监测到超临界水类液和类气之间的转变, 且这一过程与拟沸腾理论一致, 使得问题逐渐变得清晰. 本文基于拟沸腾理论对超临界 CO₂ 异常流动传热行为进行了研究, 在假设类液和类气转换过程不均匀的情况下, 从经典的量纲分析和亚临界过冷沸腾理论模型出发, 提出了一个适用于超临界流体拟沸腾换热过程的分析方法. 通过引入表征类气膜生长速度与流体主流平均流速之比 $\pi = (q_w \cdot \rho_l) / (G \cdot \Delta i \cdot \rho_g)$ 和表征近壁区类气膜温度梯度 $\pi_{13} = (q_w \cdot \beta_{pc} \cdot d_i) / \lambda_g$ 两个无量纲数, 来表征拟沸腾如何导致传热恶化, 解释了超临界 CO₂ 竖直向上加热流动过程中的异常换热特性, 即较大的类气膜生长速度使近壁区快速聚集了较多的高温流体, 而较大的类气膜温度梯度使类气膜覆盖在壁面. 当核心的冷类液不能充分润湿热壁面时, 传热恶化. 新无量纲数较好的诠释了超临界流体拟沸腾诱导传热恶化机制, 为超临界拟沸腾传热研究提供了理论依据.

关键词: 超临界 CO₂, 拟沸腾, 传热恶化, 量纲分析

PACS: 44.05.+e, 44.15.+a, 44.27.+g

DOI: 10.7498/aps.70.20201546

1 引言

近年来, 超临界流体 (supercritical fluid, SCF) 广泛应用于食品加工、药物制取、材料合成、微纳米系统、污水处理及蒸汽发电等领域^[1-2]. 在能源利用领域, 当流体的压力和温度升高时, 通常会提高系统热力学循环效率, 使系统结构更加紧凑. 因此, 在基于热力学循环性能的工程系统中, SCF 已经为高压流体系统打开了一个新的领域. 但是, 按照传统热力学思路, SCF 为绝对均匀的单相流体, 在研究其强化传热及传热恶化现象过程中, 引入单

相传热中的浮升力和流动加速效应, 而各研究者提出的计算公式适用参数范围窄, 不能统一其他研究者的实验数据^[3], 这在工程应用中是不能接受的. 按照单相传热思路, 难以理解 SCF 异常的流动换热机理及较好地预测其传热特性, 这导致 SCF 相关动力循环设计需要依赖大量的实验数据, 以及付出很大的人力和物力^[4].

自 20 世纪 60 年代拟沸腾概念提出以来, Knappp 和 Sabersky^[5] 研究了超临界 CO₂ 池式传热, 采用 0.254 mm 直径镍铬金属丝为加热元件, 在近临界或略大于临界压力下, 观察到了类气泡传热, $q_w \sim T$ 曲线斜率变陡, 具有明显的沸腾传热特征, 还发现了类膜态沸腾传热, 并观察到气、液界面.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0601801) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2019QN032) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xjl@ncepu.edu.cn

Ackerman^[6]认为在超临界水管内流动传热实验过程中,存在类膜态沸腾现象,内螺纹结构可抑制膜态沸腾发生. Stewart等^[7]在超临界水均匀加热实验条件下,观测到了压力脉动和壁面温度的周期性振荡,认为这是类似“气膜”破裂造成的. Ambrosini^[8]研究表明,在加热通道内的超临界流体,可能会出现密度波振荡和 Ledinegg 不稳定性,这和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.从公开的文献看,超临压力下没有宏观可见的气、液界面^[9],但是,是否存在与流体密度变化相关的相变一直存在争议.近年来,SCF 基础研究已初步揭示不均匀异质结构端倪,2010年, Simeoni等^[10]采用非弹性 X 射线散射及 MD 模拟表明,尽管流体穿过 Widom 线 (Widom line, WL) 不属于一级相变,仍可将 SCF 区域划分为类液 (liquid-like, LL) 区和类气 (gas-like, GL) 区. Ha等^[11]引入机器学习方法对 SCF 分子进行标记,任一分子要么标记为 LL,要么标记为 GL,并发现存在 Widom 三角形,三角形内是 LL 和 GL 的混合物,即类沸腾区.至此,可以确定 SCF 在分子量级上确实可分为 GL 和 LL 两个不同的区域.2015年, Banuti^[12]采用理论分析方法,证明了存在类沸腾现象,并给出了临界点以上气液共存的拟沸腾曲线.最近, Maxim等^[13]在等压加热过程中,通过中子成像技术成功地监测到了超临界水通过 Widom 线时,密度发生 LL 和 GL 间的转变,并且这个过程和 Banuti 提出的拟沸腾理论^[12]一致.本课题组采用超临界拟沸腾理论进行了一系列研究^[14–16], Zhu等^[14]在内径为 10 mm 的光滑圆管内,对超临界 CO₂ 竖直向上流动传热过程进行了实验研究,发现当超临界拟沸腾数 SBO 超过 5.126×10^{-4} 时,发生传热恶化, Xu等^[15]进一步将这个结论推广到超临界 H₂O, R134 a 和 R22,不同的流体的临界值 SBO 不一样.张海松等^[16]通过理论分析了浮升力和加速度对 SCF 传热的影响,并通过实验数据验证了经典的衡量浮升力和加速度准则,发现传统的经典湍流理论采用太多假设,忽略了 SCF 的真实气体效应,提出的准则与实验数据相差较大.虽然,超临界拟沸腾或拟相变现象在数值、理论及实验方面均取得了较大进展,但是,还远远没有形成完整的理论体系,可以用来解决工程实际问题,因此,需要进一步深入的研究.

本文假设超临界流体为不均匀的异质结构,采

用拟沸腾理论处理超临界流体的传热恶化现象,通过量纲分析得出了两个具有明确物理意义的新无量纲数,表征了拟沸腾如何诱导传热恶化发生.超临界 CO₂ 实验数据与理论分析结果吻合较好,实验数据来自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.最后,基于无量纲准则分析,提出了一个拟沸腾诱导超临界流体传热恶化机制,为超临界拟沸腾传热现象研究提供了理论依据.

2 超临界流体物性及拟沸腾理论

超临界流体的 GL 和 LL 转换发生在气液共存线的延长线上^[12],这条线被称为 WL,这个过程几乎是不连续的,图 1(a)展示了不同工质在超临界和亚临界压力下跨过饱和曲线和 WL 时的相图.当流体跨过 WL 或拟临界温度 T_{pc} 时,流体状态发生急剧改变,当温度低于 T_{pc} 时,流体处于 LL 态,当温度高于 T_{pc} 时,流体处于 GL 态.这两种状态在亚临界压力下分别对应液体和蒸气,超临界压力下的拟沸腾温度或拟相变温度定义为 T_{pc} ,相当于亚临界压力下的饱和温度 T_s . WL 的位置由 3 个热力学响应函数的极值确定,即比热容 c_p 、等温压缩系数 K_T 和膨胀系数 β_p :

$$c_p = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p, \quad (1)$$

$$K_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T, \quad (2)$$

$$\beta_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad (3)$$

其中, ρ 和 i 分别是流体的密度和焓值,下标 p 和 T 分别代表为压力和温度.当发生 LL 与 GL 转变时,比热容、等温压缩系数和膨胀系数在拟临界温度处达到最大值.当 Ma 数足够低和加热速率较高时,对整个加热系统有 $dp/p \ll dT/T$,压力对密度的影响相对较小.拟临界点处的比热容和膨胀系数对能量和动量传递过程中的影响相对较大.不同压力下,比热容、膨胀系数和等温压缩系数随温度变化趋势,如图 1(b)—(d) 所示,其中 T_c 为临界温度.当流体穿过 WL 时,比定压热容、膨胀系数和等温压缩系数出现峰值,随着压力升高,峰值逐渐减小,当压力接近 $p=3p_c$ (临界压力 $p_c=7.38$ MPa) 时,峰值逐渐变得平缓,这表明压力升高物性畸变变小.

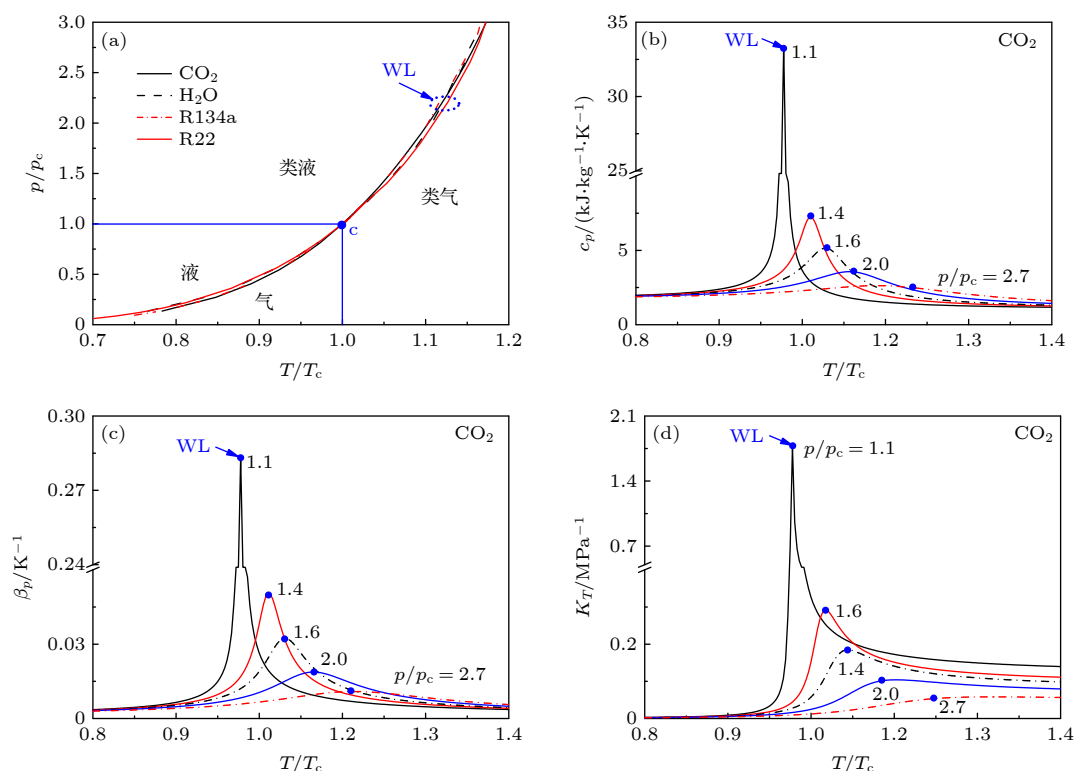


图 1 不同压力下的 SCF 穿越 WL 的物性变化

Fig. 1. The physical properties of SCF crossing WL under different pressures.

对于超临界流体,就区分 LL 和 GL 特性而言,最重要的是密度变化,又称为高密度和低密度流体.不同压力下,CO₂ 的密度随温度分布,如图 2 所示,对于亚临界压力,随着温度升高,密度逐渐降低,在相应压力的饱和温度下,CO₂ 由液态向气态转变的过程是不连续的.但是,当压力超过临界点,随着温度升高,超临界 CO₂ 的 LL 和 GL 在 WL 处转化是连续的.虽然,SCF 跨过 WL 不属于一级相变,但是,在一个有限的温度区间内,剧烈的密度变化,使其和亚临界流体跨过饱和温度的密度变

化仍高度相似.因此,在超临界压力下,LL 和 GL 的转换可认为发生在 1 个有限的温度区间内,这个过程和亚临界气、液相变过程类似.

对亚临界气液加热系统,流体在饱和温度下的气、液界面上吸收汽化潜热,由液态转化为气态,这个过程是等温的.对于超临界压力下,根据 Banuti^[12] 的拟沸腾理论,流体由 LL 转变为 GL 时,这个过程不仅流体的微观结构发生变化,而且必须伴随着流体的温度升高.因此,SCF 的 LL 和 GL 转变发生在 1 个低于 T_{pc} 的温度 T 和高于 T_{pc} 的温度 T^+ 区间内.

从热力学看,可将 SCF 按温度分为 3 个区域,当 $T_b < T^-$ 时,流体为单一的 LL 态;当 $T_b > T^+$ 时,流体为单一的 GL 态;当 $T^- \leq T_b \leq T^+$ 时,流体发生了 LL 态和 GL 态间的转变,这个温度区间是 LL 和 GL 共存状态.因此,SCF 相变焓 Δi 定义为

$$\Delta i = \int_{T^-}^{T^+} c_p(T) dT = i(T^+) - i(T^-). \quad (4)$$

对于压力为 10 MPa 的超临界 CO₂,拟沸腾相变焓 Δi 和跨过的温度区间的确定方法^[12],如图 3(a) 和图 3(b) 所示,类液态比热容 $c_{p,l}$ 为温度 $3T_{pc}/4$ 处对应的比热容,如图 3(a) 中的 A 点对应的比热容为类气态比热容,由 (5) 式确定:

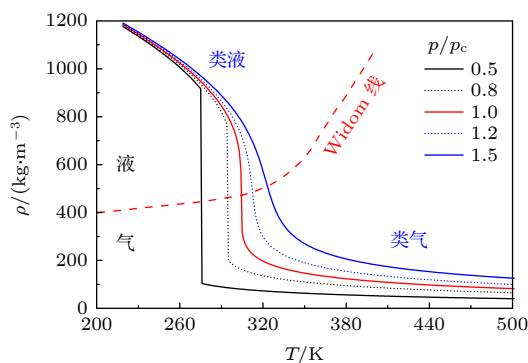

 图 2 不同压力下的 CO₂ 密度随温度变化分布

 Fig. 2. Density of CO₂ varies with temperature under different pressures.

$$c_{p,g} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}, \quad (5)$$

其中: 下标 g 和 l 分别表示类气和类液; γ 是比热容比 ($\gamma=1.15$); R 为气体常数, $R=R_g/M$, R_g 气体分子常数, 其值为 $8.31451 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$; M 为流体分子质量, 对于 CO_2 , 其值为 44 g/mol . 那么, 确定类气流体焓 i_g 直线方程为

$$i_g = c_{p,g}(T + 273.15). \quad (6)$$

确定类液流体焓的直线方程的方法 (涉及的温度单位均是 $^{\circ}\text{C}$), 如图 3(b) 所示. 点 $\bar{B}$ 对应温度为 $3T_{pc}/4$ 处的焓值 $i_{\bar{B}}$, 在点 $\bar{B}$ 处的曲线斜率为 $c_{p,l}$, 与图 3(a) 中的 $\bar{A}$ 点重合, 因此, 过点 B 且斜率为 $c_{p,l}$ 的直线方程可以表达为

$$i_l = c_{p,l}T + i_{\bar{B}} - \frac{3}{4}c_{p,l}T_{pc}, \quad (7)$$

其中下标 pc 表示拟临界. 红色曲线为过点 (T_{pc}, i_{pc}) 的切线方程 (见图 3(b)), 这个切线分别和确定类液流体焓和类气流体焓的直线方程存在 1 个交点 A 和 B , 因此, 可分别确定 T^- 和 T^+ 的值, 再根据 4) 式可以确定 SCF 的拟相变焓 Δi . 根据这个

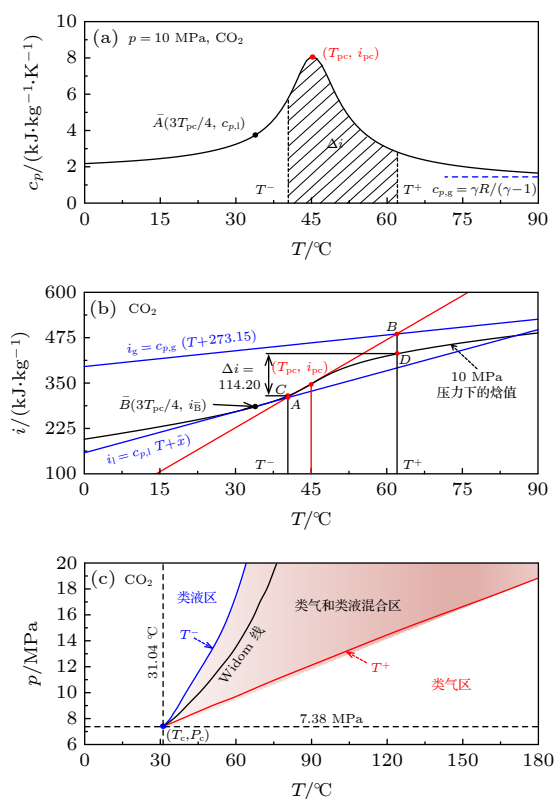


图 3 超临界 CO_2 拟沸腾相变焓 Δi 定义和跨越温差 ΔT
Fig. 3. Defining pseudo-boiling enthalpy Δi and temperature span ΔT of S- CO_2 during pseudo-boiling.

方法可确定出超临界 CO_2 在不同压力下的 T^- 和 T^+ , 如图 3(c) 所示.

3 超临界流体管内竖直向上加热流动换热特性

3.1 不同参数对超临界 CO_2 壁温分布的影响

图 4(a)—(d) 给出了不同参数下, 内壁温 T_{wi} 随焓值 i_b 的变化分布情况. 当压力为 7.995 MPa 、质量流速为 $520 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和管径为 8 mm 时, 一旦传热恶化 (heat transfer deterioration, HTD) 发生, 壁温先是上升, 然后出现 1 个明显的峰值, 然后再下降, 随着热流密度逐渐增大, 壁温飞升值越大, 并且恶化点向低焓值区间移动, 这个过程和亚临界膜态沸腾非常相似, 如图 4(a) 所示. 如果给定其他参数 (见图 4 中蓝色字体对应的工况), 分别改变质量流速 G 和压力 p 及内径 d_i , 内壁温 T_{wi} 随焓值 i_b 变化分布如图 4(b)—(d) 所示. 增大 G 或 p 可以减小传热恶化程度, 甚至使恶化传热变为正常传热 (normal heat transfer, NHT), 而管径对恶化起始点没有影响, 但是改变了传热恶化时的壁温飞升量级, 当传热恶化发生后, 管径减小, 恶化程度减小, 这和亚临界膜态沸腾规律类似 [17].

3.2 超临界和亚临界压力下传热恶化

对于亚临界压力, 随着液体不断被加热, 液体的主流过冷度降低, 壁面及靠近壁面的液体边界层温度逐渐升高, 故壁面上的汽化核心增多, 以至于气泡布满壁面, 如果气泡不从壁面跃离, 而是在近壁处形成气泡层, 这会阻碍主流液体润湿壁面, 而气泡下面的液体快速蒸干形成气膜, 最终导致传热恶化. 对于超临界压力, 在高热流 q_w 和低质量流速 G 等特定条件下, 壁面温度会出现峰值, 如图 5 中的红色曲线, 黑色曲线为亚临界压力下偏离核态沸腾 (departure from nucleate boiling, DNB), 这两个压力下的传热恶化时的壁温分布非常类似, 均出现了严重的壁温飞升, 随后再恢复的过程. 这种现象在实际工程中应该避免, 但还没有可靠的理论来解释和预测超临界压力下的传热恶化.

为进一步解释这两种现象的相似性, 给出了公开文献中 R134a [18]、 R22 [19–20] 和 H_2O [21–22] 在超临界压力下的内壁温 T_{wi} 、主流温度 T_b 及拟相变温度 T_{pc} 相对大小的关系, T_{wi}/T_{pc} 和 T_b/T_{pc} 随焓值

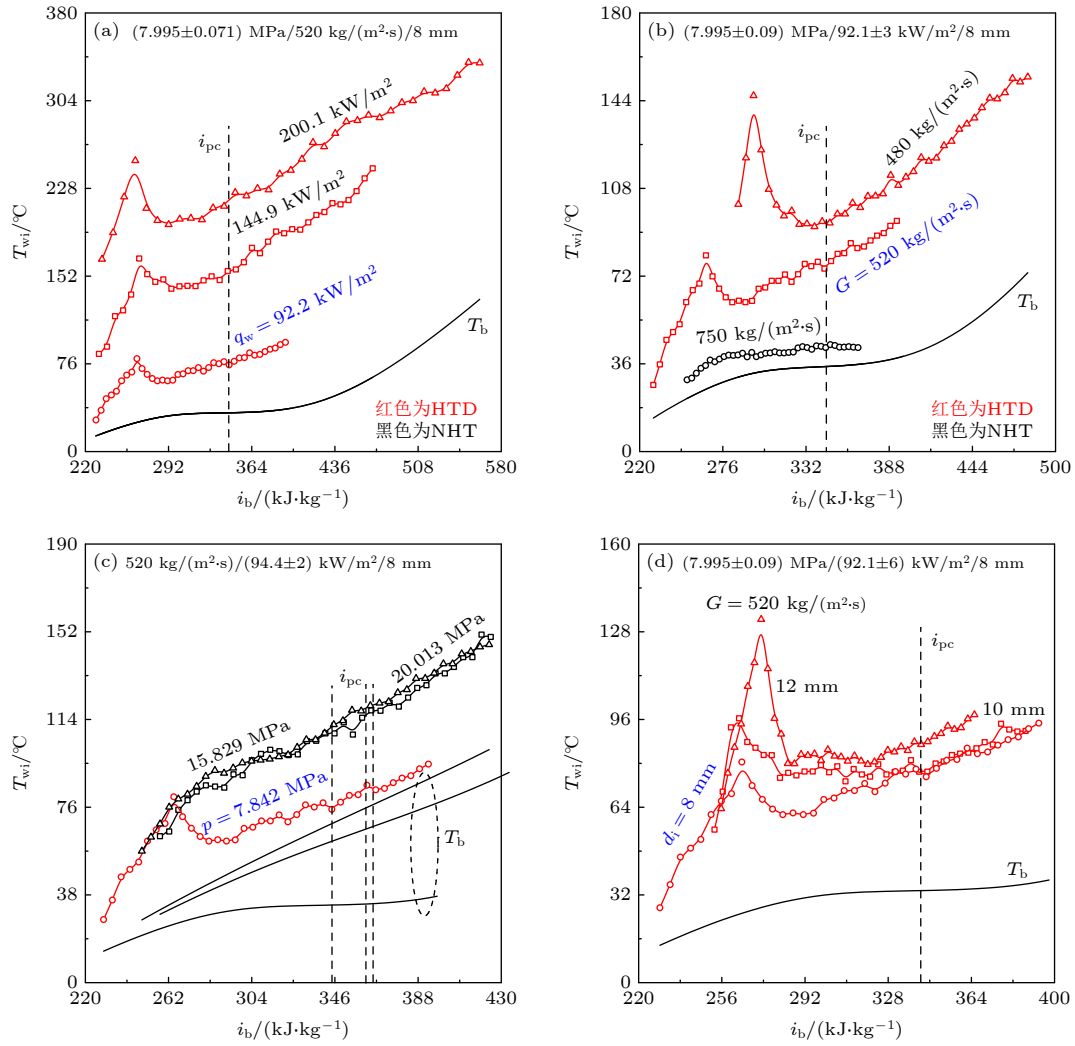

 图 4 不同参数下 CO₂ 内壁温随焓值变化分布

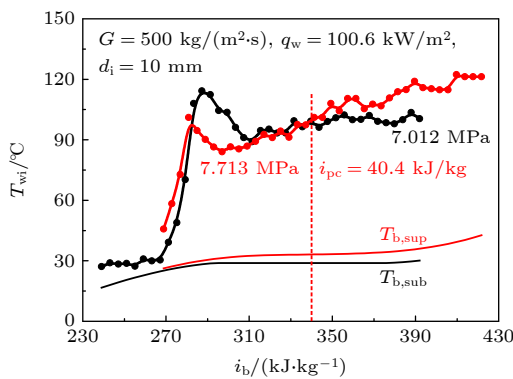
 Fig. 4. The inner wall temperature distribution of S-CO₂ with enthalpy under varies parameters.


图 5 亚临界 DNB (黑色) 和超临界压力下传热恶化壁温 (红色) 分布对比

Fig. 5. Comparison of wall temperature distribution subcritical DNB (black) and supercritical heat transfer deterioration (red).

的分布关系,如图 6(a)—(f) 所示. 当 SBO 相对较小时,不同的 SCF 无量纲内壁温 T_{wi}/T_{pc} 随焓值变化平稳,壁面没有明显的峰值,但当 SBO 相对较大时,发现 3 种工质均在 T_{wi}/T_{pc} 略微大于 1,而 T_b/T_{pc} 小于 1 时,发生传热恶化,甚至会出现多次恶化现象. 这是因为当 T_{wi}/T_{pc} 略微大于 1 时,拟临界点刚好出现在近壁区,根据我们之前的研究,当 SBO 分别超过各自的临界值时^[15],类气膜 (又称为低密度层) 会在近壁区充分膨胀,导致其厚度增加,从而导致传热恶化,而当 SBO 相对较小时,类气膜不能充分膨胀,传热没有明显的恶化. 故当 $T_b < T_{pc} < T_{wi}$ 时,LL 开始向 GL 转化,这个过程导致了超临界和亚临界传热恶化时的壁温分布具有相似性.

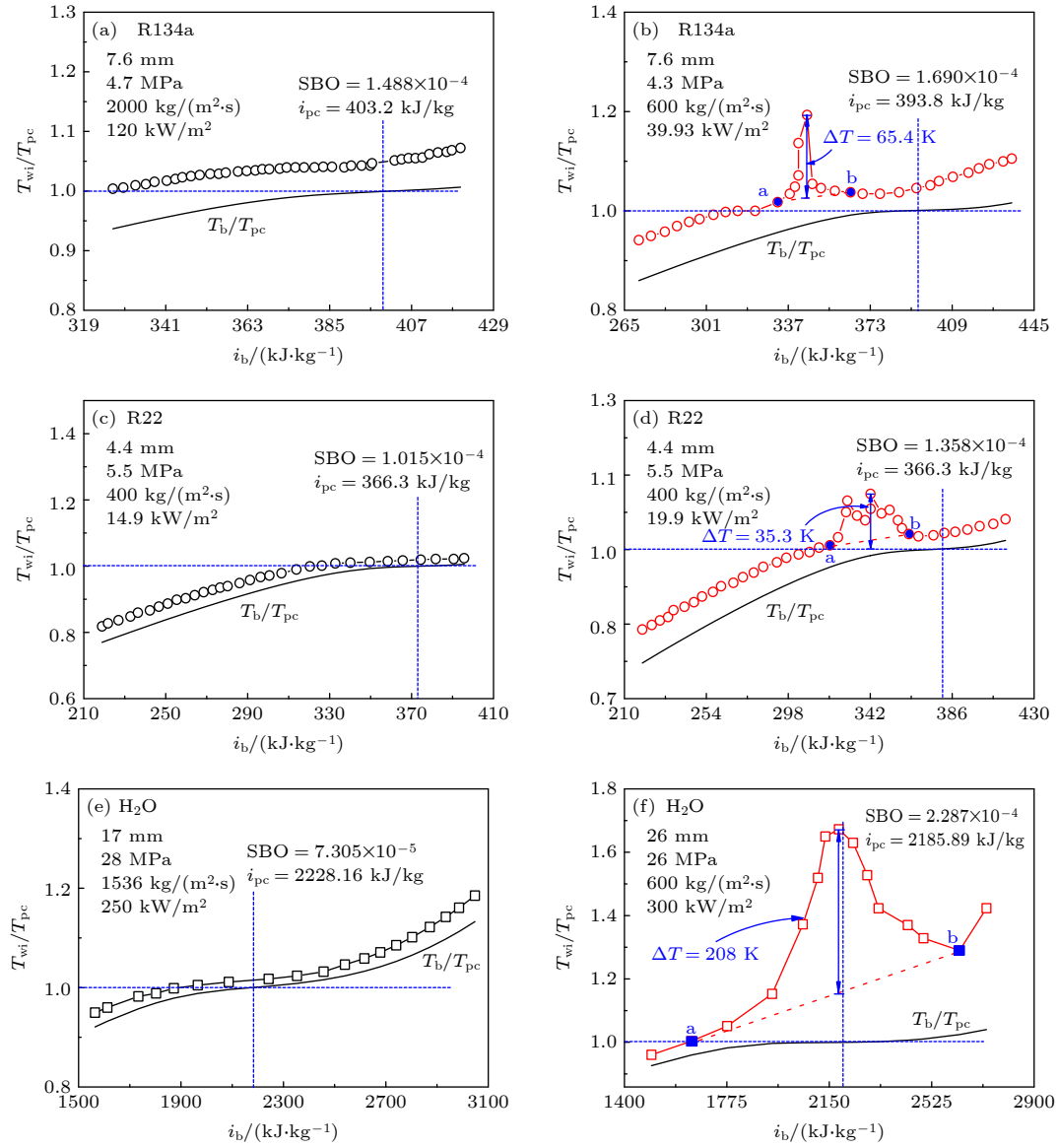

 图 6 不同超临界流体在正常传热和恶化传热过程中的 T_{wi}/T_{pc} 和 T_b/T_{pc} 随焓值变化分布

Fig. 6. Distribution of T_{wi}/T_{pc} and T_b/T_{pc} with enthalpy during normal heat transfer (NHT) and heat transfer deterioration (HTD) of different supercritical fluids.

4 量纲分析

如果做如下假设: 1) 假定超临界流体类气和类液转化是不均匀的, 这个过程和亚临界压力相变过程中的液体和气体转化类似, 超临界流体的类气和类液转化发生在拟相变温度 T_{pc} 处, 这样超临界类气和类液的物性参数都具有明确的定义; 2) 超临界流体的相变焓 Δi 由 Banuti^[12] 的拟沸腾理论确定, 当拟相变过程发生在 1 个温度区间内时, 这个过程和亚临界沸腾类似。

对于竖直向上加热的管内 SCF 流动传热过程, 选择以下变量: 1) 描述系统的宏观参数, 即: 热流

密度 q_w 、质量流速 G 、超临界进口欠热度 $i_{pc} - i_{in}$ 、重力加速度 g 、径向长度 d_i 、轴向长度 L ; 2) 影响系统流动与传热的物性参数, 即: 比热容 $c_{p,l}$ 和 $c_{p,g}$ 、密度 ρ_l 和 ρ_g 、导热系数 λ_l 和 λ_g 、黏度 μ_l 和 μ_g 、体膨胀系数 β_l 和 β_g 以及拟相变焓 Δi 。所选取的变量没有包含压力和温度, 这是因为压力和温度均是通过物性影响系统的流动与传热过程, 这些物性参数已经包含在所选取的变量中。如果忽略热能和机械能之间的转化, 那么, 合理地假设在 SCF 流动传热过程中, 存在如下关系: $f(q_w, G, \Delta i, g, d_i, L, c_{p,l}, c_{p,g}, \rho_l, \rho_g, \lambda_l, \lambda_g, \mu_l, \mu_g, \beta_l, \beta_g) = 0$ 。这是关于管壁与流体之间的热传递问题, 这里选择基本量纲为 M 、

L, τ, T , 上述 16 个有量纲数很容易构造出 7 个无量纲数: $L/d_i, c_{p,l}/c_{p,g}, \rho_l/\rho_g, \lambda_l/\lambda_g, \mu_l/\mu_g, \beta_l/\beta_g$ 以及 $(i_{pc}-i_{in})/\Delta i$, 其中无量纲数 $(i_{pc}-i_{in})/\Delta i$ 类似于亚临界中的过冷度数, 这个无量纲数表示在超临

界压力下类液流体温度低于相应压力下拟临界温度差值. 这里暂时剔除几何长度 L 和物性参数 $c_{p,g}, \rho_g, \lambda_g, \mu_g, i_{pc}-i_{in}$, 此时, 将上述物理量的量纲列成矩阵如下, 每 1 个纵列表示 1 个变量的量纲矢量:

	q_w	G	$c_{p,l}$	ρ_l	λ_l	μ_l	β_l	d_i	g	Δi
M	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
L	0	-2	2	-3	1	-1	0	1	1	2
τ	-3	-1	-2	0	-3	-1	0	0	-2	-2
T	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	0

将上述量纲矢量表示成矩阵的形式有:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & -3 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ -3 & -1 & -2 & 0 & -3 & -1 & 0 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

这是 1 个 4 行 10 列的矩阵, 运用几何方法很容易证明向量组是线性无关的, 并且这个矩阵的矩阵秩为 4, 组成 6 个无量纲数 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6$, 因此, 在完整的集合中共得到 13 个无量纲数, 根据 π 定理, 表达成无量纲方程的形式如下:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{13}) = 0. \quad (8)$$

进一步可得:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{q_w}{G\Delta i} \quad (\text{拟沸腾数}) \\ \pi_2 &= \frac{Gd_i}{\mu_l} \quad (\text{液相雷诺数}), \\ \pi_3 &= \frac{Gd_i}{\mu_g} \quad (\text{气相雷诺数}), \\ \pi_4 &= \frac{c_{p,l}\mu_l}{\lambda_l} \quad (\text{液相普朗特数}), \\ \pi_5 &= \frac{c_{p,g}\mu_g}{\lambda_g} \quad (\text{气相普朗特数}), \\ \pi_6 &= \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (\text{液相与气相密度比}), \\ \pi_7 &= \frac{\lambda_l}{\lambda_g} \quad (\text{液相与气相导热系数比}), \\ \pi_8 &= \frac{\mu_l}{\mu_g} \quad (\text{液相与气相黏度比}), \\ \pi_9 &= \frac{c_{p,l}}{c_{p,g}} \quad (\text{液相与气相比热容比}), \\ \pi_{10} &= \frac{\beta_l}{\beta_g} \quad (\text{液相与气相膨胀系数比}), \end{aligned}$$

$$\pi_{10} = \frac{L}{d_i} \quad (\text{管长与管径的比值}),$$

$$\pi_{11} = \frac{i_{pc} - i_{in}}{\Delta i} \quad (\text{超临界过冷度数}),$$

$$\pi_{12} = \frac{gd_i^3 \rho_l^2}{\mu_l^2} \quad (\text{弗劳德-雷诺数}),$$

$$\pi_{13} = \frac{q_w \beta_g d_i}{\lambda_g} \quad (\text{类气膜温度梯度数}).$$

实际上, 从上述的物理量可得出的无量纲数远比表中的多, 但是 Buckingham^[23] 研究表明, 合理的选择无量纲数, 剔除无用的无量纲数, 对实际问题分析更有益处, 这里得到的无量纲数组主要是基于以下考虑: 1) 无量纲数包含的独立变量容易被实验控制, 尽量避免同 1 个变量出现在不同的无量纲数组中, 可最大限度的优化实验; 2) 保留了经典的无量纲数, 包括雷诺数、普朗特数及弗劳德-雷诺数等, 这些无量纲数在大量的实验数据中得到验证, 物理意义已经非常明确, 具有普遍的适用性; 3) 这里对传热恶化分析是类比亚临界流动沸腾过程中的过冷沸腾, 认为 SCF 发生传热恶化主要是由于类气膜或低密度层覆盖壁面引起的, 因此, 管内传热主要机理由类气膜导热和类液体对流组成; 4) 所选择的无量纲数包含的物理量应受实验影响产生的误差尽量小.

在上述无量纲数中, π_{13} 这个无量纲数表征了近壁区的类气膜内的温度梯度大小的无量纲数, 当

这个无量纲数较大时,表明近壁区的温度梯度较大.从物性来说,当发生拟相变过程中的温度梯度足够大时,SCF密度分布更接近亚临界压力下的相变过程中的密度分布(见图2),从而产生了类似于亚临界相变过程中的表面张力作用,为了更好地表达近壁区附近类气膜的温度梯度对类气膜膨胀过程的影响,将 π_{13} 表达为

$$\pi_{13} = \frac{q_w \beta_{pc} d_i}{\lambda_g}, \quad (9)$$

其中,类气膜密度 ρ_g 的定性温度为 $(T_b + T_{wi})/2$,类液密度 ρ_l 的定性温度为 T_b ,如果类气膜的厚度很小,类气膜的密度定性温度也可采用 T_w 估计, β_{pc} 为拟临界温度下的膨胀系数.在图7中,红色代表正常传热,黑色代表恶化传热,当热流密度为 239.1 kW/m^2 时,传热发生明显恶化时(见图7(a)),对应的类气膜内的温度梯度也同样存在1个先增大后减小的趋势(见图7(b)),这表明在恶化时,近壁区物性剧烈变化,较大的温度梯度使类气膜覆盖在壁面上,热量集聚在近壁区.但是,对于低热流密度的正常传热,类气膜内的温度梯度相对较小,而

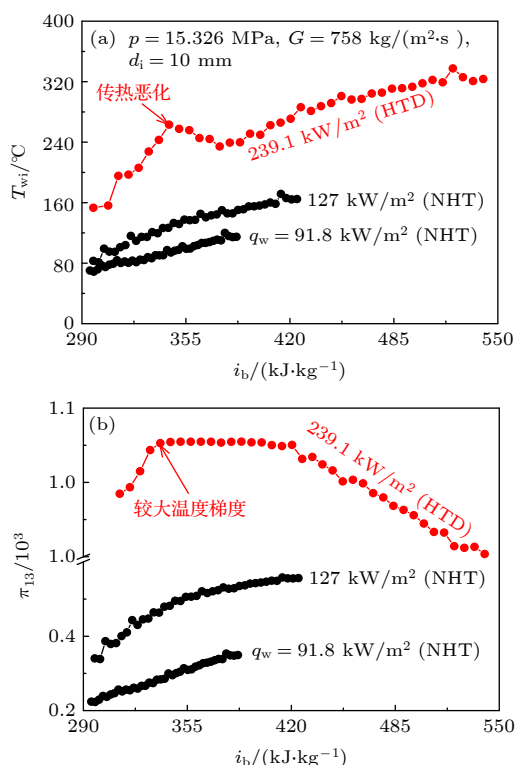


图7 正常和恶化传热下类气膜内的温度梯度和内壁温随焓值分布

Fig. 7. Distribution of temperature gradients and inner wall temperature with enthalpy in gas-like film under normal heat transfer (NHT) and heat transfer deterioration (HTD).

是随着焓值缓慢地增大,传热没有明显的恶化现象.

如果对 π_1 和 π_6 简单的组合,可以得到1个新的无量数:

$$\pi = \pi_1 \cdot \pi_6 = \frac{q_w}{G \Delta i} \frac{\rho_l}{\rho_g}. \quad (10)$$

这个无量纲数表征了类气膜的径向生长速度 $q_w/(\rho_g \Delta i)$ 和主流流体的平均速度 G/ρ_l 之比.如图8(a)所示,给出了正常传热和恶化传热下的新无量纲数 π 、内壁温和换热系数随焓值分布,对于正常传热,类气膜生长速度相对于主流流体的速度较小,热量被及时带走,因此,传热没有明显的恶化现象.但是,当类气膜生长速度相对较大时,主流流体没有及时通过对流带走近壁区的热量,热量集聚在近壁面,传热恶化发生,如图8(b)所示,在传热恶化时,这个无量纲数同样出现1个峰值.

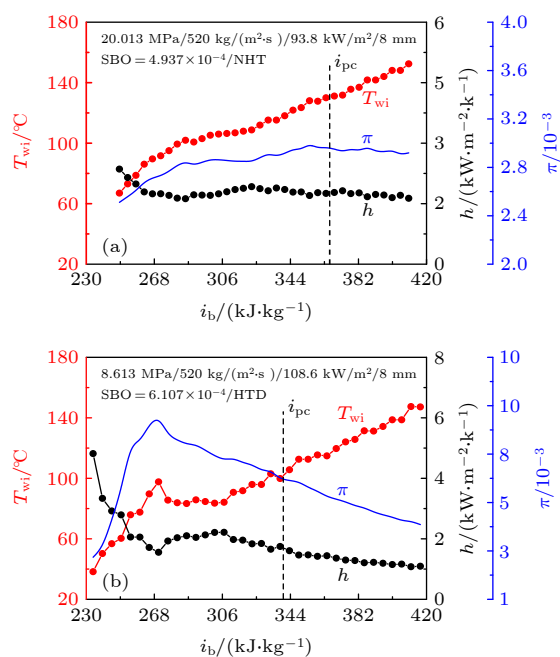


图8 正常传热和恶化传热下的新无量纲数 π 、内壁温 T_{wi} 和换热系数 h 随焓值分布

Fig. 8. Distribution of the new dimensionless number π , inner wall temperature T_{wi} and heat transfer coefficient h with enthalpy under normal heat transfer (NHT) and deteriorated heat transfer (HTD).

5 新无量纲数描述超临界流体拟沸腾作用机制

采用新无量纲数描述拟沸腾诱导 SCF 传热恶化过程,如图9(a)所示,当传热发生明显的恶化时,管内类气膜膨胀变厚,在近壁区形成1个凸起.

如图 9(b) 所示, 当传热恶化时, 较厚的热类气膜覆盖在壁面, 管中心为相对较冷的类液流体, 较冷的类液流体不能充分润湿壁面导致传热恶化, 当类气膜变薄时, 传热又发生恢复, 类气膜越厚, 传热恶化越严重. 图 9(c) 给出了新无量纲数 π 和 π_{13} 在管内轴向距离的局部分布, 较大的 π 表明较大的类气膜生长速度, 热量没有被及时带走, 而较大的类气膜温度梯度使类气膜覆盖在近壁区, 在峰值附近出现了 1 个峰值, 这个值越大, 流动越接近亚临界过冷沸腾过程, 故传热恶化, 这两个无量纲数一个表征类气膜生长速度与主流平均速度大小, 一个表征类气膜内的温度梯度大小.

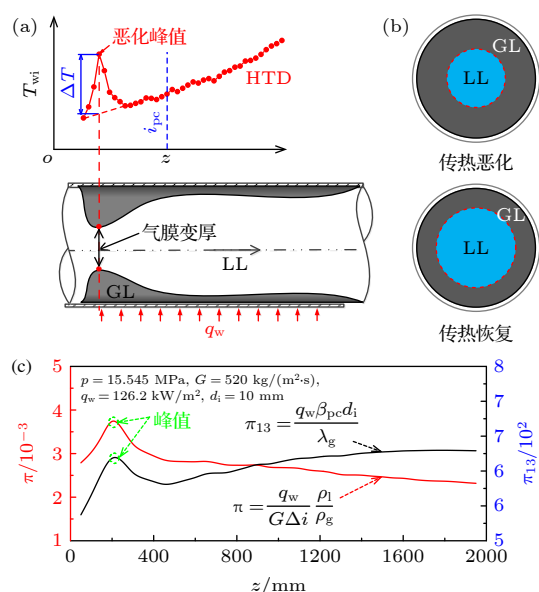


图 9 新无量纲数作用超临界流体拟沸腾传热恶化机制
Fig. 9. New dimensionless action on number deterioration of pseudo-boiling heat transfer mechanism.

6 结 论

由于 SCF 物性剧烈的非线性变化, 导致其流动传热特性异常复杂, 如何更好的处理其内部温度与速度场之间的关系方面, 许多研究者对其进行了诸多探索^[24–26], 这极大推动了 SCF 理论和实验方面的进展, 这些研究大都是从理想的单相流体概念出发, 忽略了 SCF 的实际气体效应. 目前, 关于 SCF 的异常传热特性研究已进入了瓶颈期, 尤其是对传热恶化的预测, 在没有明确其内部的物理过程的情况下, 难以有进一步的较大突破. 因此, 如何利用壁面温度、主流温度及已知参数等少量信息最大限度

地表征其内部物理过程, 仍然是目前的主要任务.

本文放弃了传统的理想单相流体概念, 依据拟沸腾理论, 从经典的量纲分析和亚临界过冷沸腾理论模型出发, 对 SCF 传热恶化进行了研究, 得出了 2 个新无量纲数, 即 $\pi = (q_w \rho_l) / (G \Delta i \rho_g)$ 和 $\pi_{13} = (q_w \beta_{pc} d_i) / \lambda_g$. 前者表征了超临界类气膜生长速度与流体主流流速之比, 这个比值越大, 类气膜在近壁区生长的越快, 大量的热量聚集在近壁区, 而后者表征了类气膜内的温度梯度 $(q_w \beta_{pc} d_i) / \lambda_g$, 这个数越大, 表明流动越接近亚临界过冷沸腾, 较大的温度梯度使类气膜覆盖在壁面, 最终导致传热恶化. 实验结果表明, 超临界 CO₂ 传热恶化壁温和亚临界过冷沸腾恶化壁温相似, 与拟临界温度 T_{pc} 相关的拟沸腾现象能够较好的解释二者的相似性. 对于超临界 CO₂ 竖直向上加热流动过程中, 增大压力或减小质量流速能够减小传热恶化程度, 甚至能够消除传热恶化. 在目前的实验中, 发现管径对传热恶化起始点没有影响, 但是, 对传热恶化的壁温飞升程度有明显的影响, 管径越大, 恶化越严重. 根据拟沸腾理论研究了其内部流动传热场的特性与已知参数和物性之间的联系和规律, 量纲分析得到的结果可用于不同流体间的相似理论分析, 这对推动 SCF 传热理论研究具有一定意义.

参考文献

- [1] Tsai W C, Wang Y 2019 *Prog. Polym. Sci.* **98** 101161
- [2] Knez Z, Markocic E 2014 *Energy* **77** 235
- [3] Pizzarelli M 2018 *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **95** 132
- [4] Wang H, Leung L K H, Wang W S, Bi Q C 2018 *Appl. Therm. Eng.* **142** 573
- [5] Knapp K K, Sabersky R H 1966 *Int. J. Heat Mass Transf.* **9** 41
- [6] Ackerman J W 1970 *J. of Heat Transfer* **92** 490
- [7] Stewart E, Stewart P, Watson A 1973 *Int. J. Heat Mass Transfer* **16** 257
- [8] Ambrosini W 2007 *Nucl. Eng. Des.* **237** 1164
- [9] Ma T, Wang S H 2011 *AIP Advances* **1** 042101
- [10] Simeoni G G, Bryk T, Gorelli F A, Krisch M, Ruocco G, Santoro M, Scopigno T 2010 *Nat. Phys.* **6** 503
- [11] Ha M Y, Yoon T J, Thusty T, Jho Y, Lee W B 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 1734
- [12] Banuti D T 2015 *J. Supercrit. Fluids* **98** 12
- [13] Maxim F, Contescu C, Boillat P, Niceno B, Karalis K, Testino A, Ludwig C 2019 *Nat. Commun.* **10** 1
- [14] Zhu B G, Xu J L, Wu X M, Xie J, Li M J 2019 *J. Int. J. Therm. Sci.* **136** 254
- [15] Xu J L, Zhang H S, Zhu B G, Xie J 2020 *Sol. Energy* **195** 27

- [16] Zhang H S, Zhu X J, Zhu B G, Xu J L, Liu H 2020 *Acta Phys. Sin.* **6** 064401 (in Chinese) [张海松, 朱鑫杰, 朱兵国, 徐进良, 刘欢 2020 物理学报 **6** 064401]
- [17] Yildiz S, Groeneveld D C 2014 *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **54** 27
- [18] Zhang S Y 2015 *Ph. D. Dissertation*(Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [张思宇 2015 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [19] Kang K H, Chang S H 2009 *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** 4946
- [20] Yamashita T, Yoshida S, Mori H, Morooka S, Komita H 2003 *GENES4/ANP2003*, Kyoto, Japan., Sep. 15–19, 2003 1119
- [21] Lei X L, Li H X, Zhang W Q, Dinh N T, Guo Y M, Yu S Q 2017 *Appl. Therm. Eng.* **113** 609
- [22] Shen Z, Yang D, Chen G M, Xiao F 2014 *Int. J. Heat Mass Transfer* **68** 669
- [23] Buckingham E 1914 *Phys. Rev.* **4** 345
- [24] Luo F, Xu R N, Jiang P X 2014 *J. Eng. Thermophysics* **6** 1170 (in Chinese) [罗峰, 胥蕊娜, 姜培学 2014 工程热物理学报 **6** 1170]
- [25] Liu S H, Huang Y P, Liu G X, Wang J F, Wang J Y 2019 *Nucl. Power Engineering* **40** 18 (in Chinese) [刘生晖, 黄彦平, 刘光旭, 王俊峰, 王金宇 2019 核动力工程 **40** 18]
- [26] Liao C J, Li H X 2015 *J. Eng. Thermophysics* **1** 111 (in Chinese) [廖长江, 李会雄 2015 工程热物理学报 **1** 111]

Dimensional analysis of flow and heat transfer of supercritical CO₂ based on pseudo-boiling theory*

Zhang Hai-Song¹⁾ Xu Jin-Liang^{1)2)†} Zhu Xin-Jie¹⁾

1) (*Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, 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*)

(Received 17 September 2020; revised manuscript received 8 October 2020)

Abstract

Supercritical fluids are widely used in engineering technology, and the flow and heat transfer characteristics are very important for engineering design. However, due to the fact that the physical micro- and macroscopic behaviors of supercritical fluids are still open, neither the heat transfer mechanism nor the flow mechanism of supercritical fluids has been well revealed. It is widely believed that liquid-like (LL) and gas-like (GL) supercritical fluid are two phases distinguishable on a molecular scale. Only recently, has it become clear that the macroscopic transition from LL to GL supercritical state, when crossing the Widomline, is successfully detected in experiment, and explained based on the pseudo-boiling concept. In this paper, the abnormal flow and heat transfer behavior of supercritical CO₂ are studied based on the pseudo-boiling theory. On the assumption that the transition from LL to GL is heterogeneous, an analysis method for pseudo-boiling heat transfer is developed from classical dimensional analysis and subcritical subcooled boiling theory of models. To analyze the pseudo-boiling resulting in heat transfer deterioration process of supercritical fluid, two dimensionless numbers which are $\pi = (q_w \cdot \rho_l) / (G \cdot \Delta i \cdot \rho_g)$ and $\pi_{13} = (q_w \cdot \beta_{pc} \cdot d_i) / \lambda_g$ are proposed to explain the anomalous heat transfer characteristics in vertical upward heating flow. The former π reflects the rate of conversion between gas-like and liquid-like fluid. The larger gas-like conversion rate promotes the rapid production of more high-temperature fluid in the near-wall region, and the latter π_{13} characterizes the temperature gradient of gas-like film near the wall: the larger temperature gradient causes the gas film to cover the wall surface. The heat transfer deterioration may occur when the cooler liquid-like fluid of the core region cannot rewet the hot wall adequately. The new dimensionless numbers can successfully explain the heat transfer deterioration of supercritical fluid flow induced by pseudo-boiling. Our work paves the way to understanding the heat transfer and flow for supercritical fluids which establishes a relation among the internal flow, heat transfer field characteristics, boundary conditions and physical properties based on the pseudo-boiling theory preliminarily. The results of dimensional analysis can be applied to the similarity theory analysis of different fluids, which is of significance for promoting the theoretical research of supercritical fluid heat transfer on the basis of pseudo-boiling concept.

Keywords: supercritical carbon dioxide, pseudo-boiling, heat transfer deterioration, dimensional analysis

PACS: 44.05.+e, 44.15.+a, 44.27.+g

DOI: 10.7498/aps.70.20201546

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB0601801) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2019QN032).

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