

不同倾角条件下非均匀热流对超临界二氧化碳 对流换热的影响

申楠楠, 高明, 王治云, 钟绍庚

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为了探究超临界二氧化碳(SCO₂)对流换热的影响因素,在考虑了管道倾角和钢管壁厚引起热流密度不均的情况下,针对SCO₂在上、下半周不同热流密度条件、管道放置倾角、质量流量以及压力值时的换热情况进行了研究。模拟计算中金属管外径16 mm、内径12 mm、长度1 500 mm;外壁面热流密度为425.6 kW/m²;管内出口压力工况参数分别为7.6, 8.5和9.5 MPa;质量流量分别为101.788, 76.341和50.894 kg/s;管道倾角分别为0°(水平), 30°, 45°, 60°和90°(垂直)。结果表明:在均匀加热条件下,由于钢管导热的影响使钢管内壁上半周的热流密度低于下半周;随着倾角的增大,二次流动能降低,上半周的热流密度逐渐接近下半周,同时,下半周的换热系数减小,上半周的换热系数增大。在非均匀加热条件下,沿着流动方向,初始阶段上半周的换热系数高于下半周的换热系数,随着流体温度增加,这种现象会发生逆转。因为当质量流量和压力增加时,上、下半周的换热系数均会增加,并且可以降低管道内壁面峰值温度。而不同加热方式下,上、下半周的温差与二次流动能有关。

关键词:超临界二氧化碳;非均匀热流;倾角;换热性能

中图分类号:TM623

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.020

[引用本文格式]申楠楠, 高明, 王治云, 等. 不同倾角条件下非均匀热流对超临界二氧化碳对流换热的影响[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 164-172. SHEN Nan-nan, GAO Ming, WANG Zhi-yun, et al. Influence of non-uniform heat flux on convective heat transfer of supercritical carbon dioxide under different inclination angles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 164-172.

Influence of Non-uniform Heat Flux on Convective Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide under Different Inclination Angles

SHEN Nan-nan, GAO Ming, WANG Zhi-yun, ZHONG Shao-geng

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to investigate the influence factors of convective heat transfer of supercritical carbon dioxide(SCO₂), the heat transfer of SCO₂ under different heat flux densities, pipe placement angles, mass flow rates and pressure values in the upper and lower half cycles was studied, considering the uneven heat flux density caused by the pipe angles and the thickness of the steel pipe wall. The simulated metal pipe has outer diameter of 16 mm, inner diameter of 12 mm and length of 1 500 mm. The heat flux density on the outer wall is 425.6 kW/m². The outlet pressure parameters in the pipe are 7.6 MPa, 8.5 MPa and 9.5 MPa respectively; the mass flow rates are 101.788 kg/s, 76.341 kg/s and 50.894 kg/s respectively; the pipe inclination angles are 0° (horizontal), 30°, 45°, 60° and 90° (vertical) respectively. The results show that under the uniform heating condition, the heat flux density in the upper half cycle of the steel pipe inner wall is lower than that in the lower half cycle due to the heat conduction of the steel pipe;

收稿日期:2022-06-02; 修订日期:2022-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51976127)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976127)

作者简介:申楠楠(1992-),男,上海理工大学硕士研究生.

通讯作者:高明(1982-),男,上海理工大学副教授.

with the increase of inclination angle, the secondary flow kinetic energy decreases, the heat flux density in the upper half cycle gradually approaches that in the lower half cycle, at the same time the heat transfer coefficient in the lower half cycle decreases and that in the upper half cycle increases. Under the non-uniform heating condition, along the flow direction, the heat transfer coefficient in the upper half cycle is higher than that in the lower half cycle at the beginning, and as the fluid temperature increases, this phenomenon will reverse. When the mass flow and the pressure increase, the heat transfer coefficients both increase in the upper and lower half cycles of the pipe, and the peak temperature of the pipe inner wall can be reduced. The temperature difference between the upper and lower half cycles is related to the secondary flow kinetic energy under different heating methods.

Key words: supercritical carbon dioxide, non-uniform heat flux, inclination angle, heat transfer performance

引 言

超临界二氧化碳具有粘度低、密度高、安全性强等优点,在能源领域获得了广泛应用^[1]。超临界二氧化碳布雷顿循环发电系统^[2]的压缩功耗低、系统热效率高,在新一代核能、太阳能、煤电、余热回收等多个领域具有广阔的应用前景^[3]。换热设备作为超临界二氧化碳发电系统中的重要组成部分,其综合性能的研究关系着整个系统的发电效率及安全。

饶政华等人^[4]对直径为 2.16 mm 以内管中竖直向上流动的超临界二氧化碳湍流流动和换热进行数值模拟,结果表明,在恒温冷却条件下,当流体温度在拟临界温度附近时努塞尔数 Nu 最大;管径越小,换热系数越高,但对 Nu 的影响不大。杨温等人^[5]通过实验研究了水平管内宽温区超临界二氧化碳流体的换热,指出不同压力下流体在拟临界温度范围内换热系数较高;当温度超过拟临界温度后,换热系数趋于平缓,其值取决于质量流量的大小。刘遵超等人^[6]研究了不同压力条件下超临界二氧化碳在水平内螺纹管内的冷却换热性能,结果表明,相同雷诺数下,压力越小,流体的压降越大,换热性能越弱;相同压力下,雷诺数越大,压降越大。杨传勇等人^[7]对不同倾角下微细管内超临界二氧化碳层流流动中上、下母线的换热特性进行了研究,结果发现,在非垂直状态下, -60° 时上母线处的沿程壁温增加最大;垂直向上流动的换热系数高于垂直向下流动的换热系数。郭宇朦等人^[8]考虑了管道倾角及物性对超临界水传热特性的影响,提出了新的关联式预测管道上母线的换热情况。以上研究针对

均匀热流密度下的换热特性,而在一些工程条件下,如核电、光热发电以及火电中,热流密度并非均匀的,热流密度的不均匀性会造成加热壁面存在温差,所产生的热应力会造成安全隐患。为此, Qiu 等人^[9]研究了非均匀热流密度对集热管的影响,通过模拟发现,集热管周向表面的温度分布趋势与热流密度分布相同,均为 M 分布;接收器表面平均努塞尔数随着雷诺数的增大而增大。Fan 等人^[10-11]对垂直管内向上流动的超临界二氧化碳在非均匀加热条件下的换热进行了模拟,指出上母线存在壁温峰值和换热恶化,随着换热管内压力的增加,换热恶化程度降低,并根据实验数据在努塞尔数关联式中引入粘性进行修正;随后在关联式中引入比定压热容和热流密度,使得预测值误差在 $\pm 25\%$ 以内。Jajja 等人^[12]通过实验研究了非均匀热流密度对并联矩形微通道和有菱形交错微通道的换热系数及压降的影响,结果表明,矩形通道高宽比从 1 增加到 2 时,换热系数增强,并且有交错阵列结构的通道传热性能更优越,但压降也随之增加。Li 等人^[13]运用数值模拟的方式探究 3 种不同轴向热流密度分布下垂直上升管内超临界二氧化碳的最优换热,当采用分段线性函数的热流密度时换热效果最好。从以上研究中可以看出,以往对超临界二氧化碳的研究只限于对圆管上、下母线及特定圆周角或总换热系数的影响进行研究,对因钢管壁厚导热不均引起热流密度不均以及非均匀加热下条件倾斜管对上、下半周换热性能影响的研究较少。

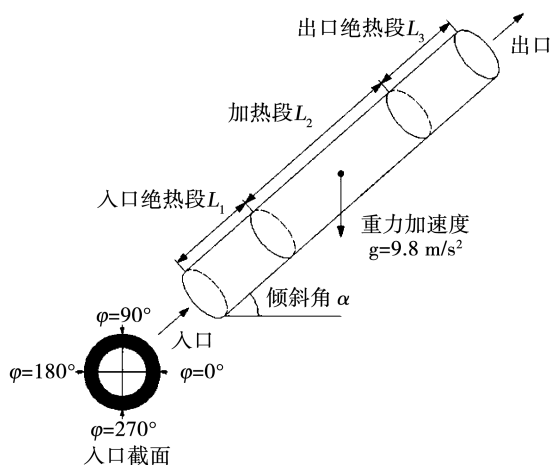
因此,本文基于 FLUENT 软件,在均匀热流和非均匀热流加热方式下,对 5 种不同倾角的换热管进行数值模拟,得到了沿流动方向钢管内壁上、下半周

的热流密度、温度以及换热系数的分布,对比分析了钢管内壁上、下半周平均热流密度和换热的差异,并进一步研究了改变压力和质量流量对换热性能的影响。

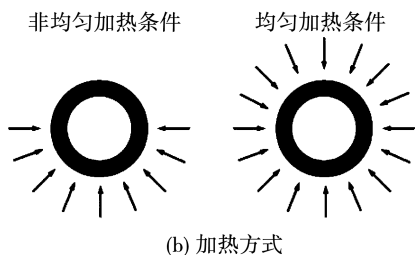
1 研究方法

1.1 物理模型

研究对象为内径 12 mm、外径 16 mm、加热段长为 1 020 mm 的圆管,为避免入口效应以及模拟时回流带来的影响,在入口和出口段各设置 240 mm 的绝热段。加热管的物理模型如图 1(a)所示。倾斜角定义为流动方向和水平方向的夹角,以入口流体流动方向建立三维坐标系,研究流体流动方向的换热。圆管的圆周角定义为 φ ,即上、下母线的圆周角分别为 90° 和 270° 。模拟的加热方式分为均匀加热和非均匀加热,如图 1(b)所示。从入口沿着流动方向看,非均匀加热的圆周为 φ 从 180° 经过 270° 直到 360° 的半个圆周,均匀加热为整个圆周。



(a) 物理模型



(b) 加热方式

图 1 物理模型及加热方式

Fig. 1 Physical model and heating methods

1.2 网格划分

模型的计算域采取结构化网格,如图 2 所示。近壁面处因流体粘性出现边界层,为了精准地获取

流体流动换热状况,对边界层内的网格进行加密处理。对于湍流流动,壁面率 Y^+ 需要小于 1,增长比例为 1.1 ~ 1.2 之间。图 2 中流体域网格密集,管壁固体域网格稀疏,为了实现固体域网格到流体域网格的平滑过渡,从固液交界面向两侧网格高度逐渐增加,且固体域首层网格高度为流体域首层网格高度的 60 倍。为确保计算结果不受网格数量的影响,分别对 106 万、188 万、358 万、531 万和 739 万的网格数进行了网格无关性验证。选取管子长度在 540 mm 位置,探究此位置网格数变化对壁面温度和流体温度的影响。对比发现,当网格数在 531 万时,壁面温度和流体温度几乎不随网格数的增加而变化,因此本文选取 531 万网格数进行计算和分析。

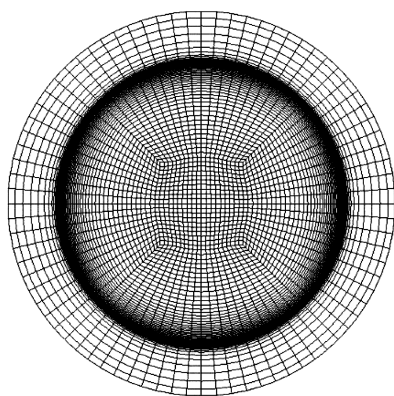


图 2 计算面网格

Fig. 2 Surface mesh for computation

1.3 数学模型

由于求解的是稳态问题,所以控制方程中不含有时间导数,各个物理量仅是空间的函数。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ —流体密度, kg/m^3 ; u_i —笛卡尔坐标系(相互垂直的 3 个方向)中 i 方向的速度, m/s 。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] + \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: u_j —笛卡尔坐标系中 j 方向的速度, m/s ; μ —动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; δ_{ij} —克罗内克函数,当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; g_i — i 方向的重力加速度, m/s^2 ;

p —压力,Pa。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[c_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

式中: c_p —比定压热容,J/(kg·K); T —热力学温度,K; μ_t —湍流动力粘度,Pa·s; Pr, Pr_t —普朗特数和湍流普朗特数。

本模拟采用的模型为标准的 $k-\varepsilon$ 两方程模型,该模型包括:

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_3 G_b) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: k —湍流动能,J; σ_k —湍动能对应的湍流普朗特数; G_k —由于速度梯度产生湍流动能,J; G_b —由于浮升力产生湍流动能,J; ε —湍流动能耗散率,%; σ_ε —湍流耗散率对应的湍流普朗特数;其余参数为常数。

该模型中常数 $c_1, c_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, Pr_t$ 分别取 1.44, 1.92, 1, 1.3 和 0.85, G_k 和 G_b 根据湍流模型进行计算^[9]。压力和速度耦合采用 SIMPLIC 算法,动量和能量离散方程的离散采用 QUICK 格式,湍流动能和湍流耗散率采用二阶迎风格式,松弛因子采取默认值,除能量收敛残差为 10^{-8} 外,其余收敛残差均为 10^{-6} 。当残差基本保持不变,并且出口温度以及质量流量的误差小于 1% 时,认为计算结果收敛。对于超临界二氧化碳流体,由于其物性参数受到温度以及压力的变化影响很大,因此调用真实气体模型实现流体的变物性计算。边界条件采用质量流量入口、压力出口,加热段壁面为第 2 类边界条件。固体材料为 SA-213T12,其热导率随温度的变化如表 1 所示^[14]。

为验证湍流模型选取的准确性,将该湍流模型运用到文献[15]的实验模型中,计算结果与所列实验工况进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,计算结果与模拟的结果吻合较好,模拟得到的换热系数与实验测量换热系数的误差在 5% 以内,

说明了该模型的准确性。

表 1 热导率表
Tab. 1 Thermal conductivity

温度/K	热导率/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
373	46
473	44.5
573	42.5
673	39
773	37

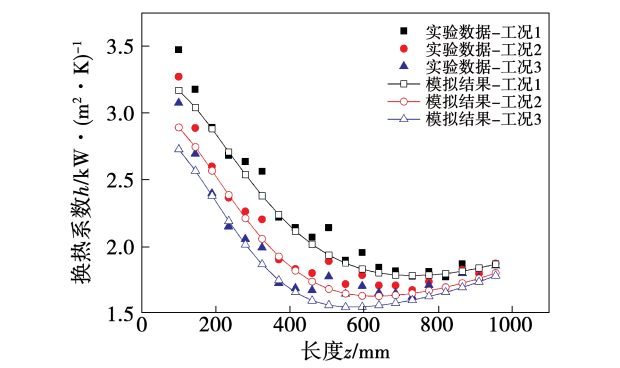


图 3 沿流动方向换热系数
Fig. 3 Heat transfer coefficient along flow direction

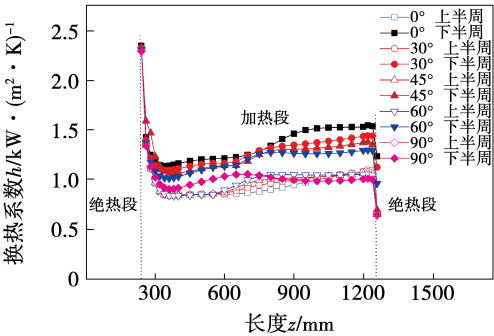
2 计算结果与分析

2.1 均匀加热对换热系数的影响

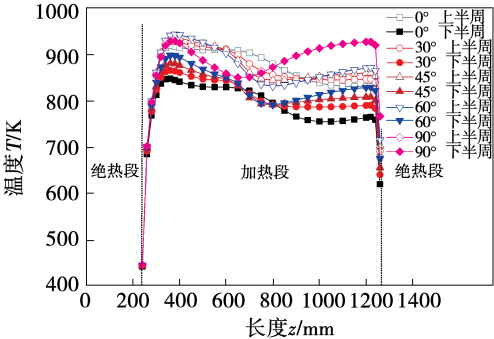
首先对管道倾角为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° , 均匀加热,入口温度为 304.5 K,出口压力为 7.6 MPa 的工况进行模拟。图 4 为在各倾角条件下,沿流动 z 方向上半周内壁面(简称为“上半周”)和下半周内壁面(简称为“下半周”)的换热系数和温度的变化。从图 4(a)中可以看出,在管道倾角为 0° 时,上半周的换热系数低于下半周;随着管道倾角的增加,上、下半周的换热系数逐渐接近;当管道倾角为 90° 时,两者的换热系数相等(换热系数曲线重合)。

由于加热段和入口段相接触存在金属间的导热(轴向导热),起始位置热流密度降低,实际约为 320 kW/m^2 ,而中间部分上、下半周的平均热流密度约为 510 和 610 kW/m^2 。起始位置处的热流密度占加热段中间部分的 60%,并且起始流体与壁面的温差是中间部分的 30%,所以起始位置处的上、下半周流体的对流换热系数极高,约为稳定段的 2 倍。起始位置之后,壁温急剧升高,此过程称为“传热恶

化”。因为近壁面的流体温度均高于拟临界温度，这部分流体密度低、比定压热容小、流速高、主流温度低于拟临界温度，强大的浮升力使得湍流层流化，湍动能降低，换热系数迅速降低，且降低速率逐渐减小。



(a) 上半周与下半周的对流换热系数



(b) 均匀加热下温度变化

图 4 均匀加热下倾角对换热系数和温度的影响
Fig. 4 Influence of inclination angles on heat transfer coefficient and temperature under uniform heating condition

从图 4(b) 可以看出，随着流体温度增加，在换热管道的中间段 360 ~ 1 200 mm 的范围内，随着湍动能恢复，上、下半周的对流换热系数逐渐增加，壁面温度逐渐下降，此过程称为“传热恢复”；随着湍流发展，湍流边界层厚度逐渐增加，上、下半周换热系数增速减小甚至出现降低，此过程称为“传热下降”。当管道倾角增加时，浮升力在垂直于截面方向的分力降低，二次流减弱，下半周近壁面的高温流体向上半周聚集且较低温度的流体向下半周聚集的作用降低（简称“流体聚集”）。而高温流体阻碍换热，低温流体有利于换热，故上半周换热增加，下半周换热减弱。浮升力沿流动方向的分力逐渐增加，会引起湍流边界层厚度增加，影响传热的进行：在 45° 倾角范围内边界层厚度薄，抑制传热作用很

弱，换热系数仍维持增加，但增速降低；在 60° 倾角时，边界层厚度增加中等，抑制传热作用小，换热系数趋于稳定；在 90° 倾角时，边界层厚度增加大，抑制传热作用增大，换热系数下降。

在加热段末端，轴向导热使得加热末端热流密度急剧降低，换热系数快速下降，此过程称为“传热末端”。

当管道倾角不变时，由于流体的聚集，致使上半周温度高、下半周温度低，选取加热段任一截面，其温度分布如图 5 所示。因钢管的导热系数随温度的升高而降低，这使得更多的热量传递到下半周，故上半周的热流密度小于下半周。随着倾角增加，聚集能力下降，上、下半周热流逐渐接近。

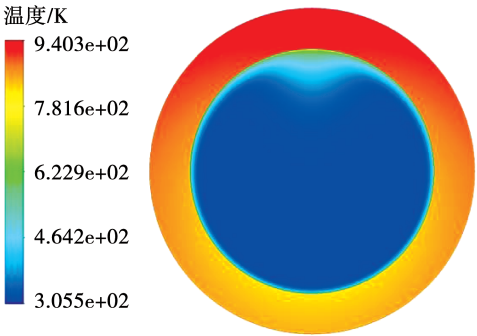


图 5 均匀加热下加热段面的温度分布
Fig. 5 Temperature distribution of heating zone plane under uniform heating condition

由于上半周的平均温度高且与流体温度的温差大，根据 $h = q/\Delta t$ 以及上半周面的热流密度低于下半周面，故上半周换热系数小于下半周；随着管道倾角的增大，上、下半周的热流密度、温度换热系数逐渐接近；当倾角为 90° 时，上、下半周的热流密度、温度换热系数相等。

2.2 非均匀加热对换热系数的影响

非均匀与均匀加热时流体参数相同，仅在加热段 L_2 下半周存在恒定热流密度，上半周与下半周热流密度如图 6(a) 所示。不同热流密度下，上、下半周热流密度差值如图 6(b) 所示。在非均匀加热时，由于管壁的导热性，使上半周存在一定的热流密度，但上半周的热流密度仍远小于下半周，上、下半周的热流密度比值为 0.55 左右；而在均匀加热条件下，钢管外壁上、下半周均施加相同的热流密度，由于管壁导热性的存在，所以在上、下半周仍存在热流密度差值，但差值较小。

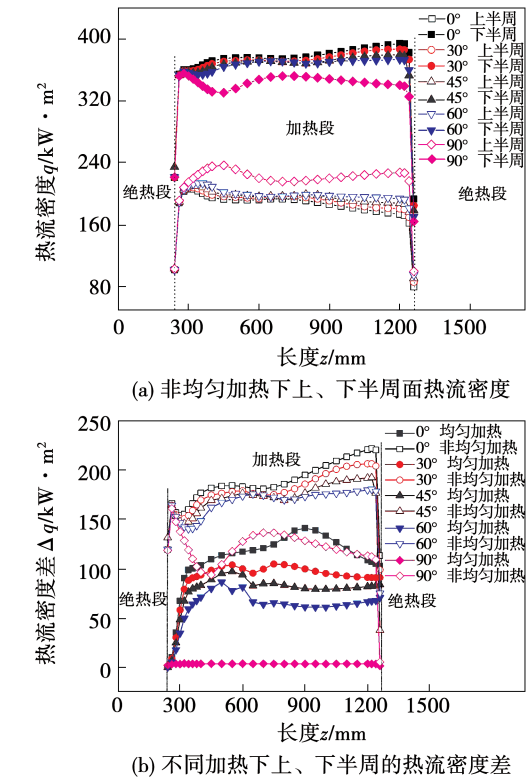


图 6 不同加热方式上、下半周热流密度和热流密度差值
Fig.6 Heat flux density and heat flux density difference in upper and lower half cycles under different heating methods

图 7 为非均匀加热上、下半周壁面温度的变化。从图中可以看出,上、下半周平均温度变化均呈现先迅速上升而后趋于稳定的变化趋势,并且上半周的壁面平均温度小于下半周,因为上半周热流密度远小于下半周(图 6(a)所示)。对比均匀加热上、下半周壁面温度变化(图 4(b)所示),两种热流密度下壁温变化相同点为:均包含传热恶化、传热恢复、传热降低以及因末端金属的导热而产生的传热下降的过程;不同点为:均匀加热条件下,存在一个峰值温度,在峰值(380 mm)温度前后温度变化剧烈,而在非均匀加热条件下,存在两个峰值温度,在峰值(450 和 800 mm)温度前后温度变化比较平缓。在传热恢复阶段之后,均匀加热条件下,不同倾角下换热系数表现为 3 种变化;而在非均匀加热条件下,边界层厚度会存在最大值,壁面温度达到第 2 个峰值温度,而后壁面温度逐渐平缓^[16]。相比非均匀加热条件,均匀加热条件下热流密度大,密度差导致的浮升力更大,使湍流层流化严重,因此壁面峰值温度更高,峰值温度点更靠近加热段的起始位置,同时需要经过更长的加热段,才能使湍流恢复、湍流边界层的

厚度达到最大。而非均匀条件下热流密度较小,所以加热段会存在传热恶化、恢复、下降、稳定和末端导热的整个过程。

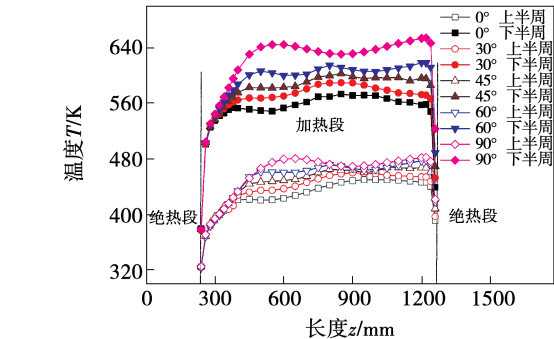


图 7 非均匀加热上、下半周温度
Fig.7 Upper and lower half cycles temperature under non-uniform heating condition

不同加热方式下上、下半周温差随倾角的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在均匀热流条件下,上、下半周的温差随倾角的增加而减小;在非均匀加热条件下,上、下半周的温差随倾角的增加而增大。在均匀加热时,随着倾角的增大,二次流动能从 $3\ 090\ mm^2/s^2$ 逐渐降低至 $1.327\ mm^2/s^2$,二次流动能减小会降低流体的聚集,降低温差;在非均匀加热条件下,上、下半周热流的比值在 0.55 左右,随着倾角的增大,二次流动能的减小会增强下半周高温流体与上半周低温流体之间的壁面温差。

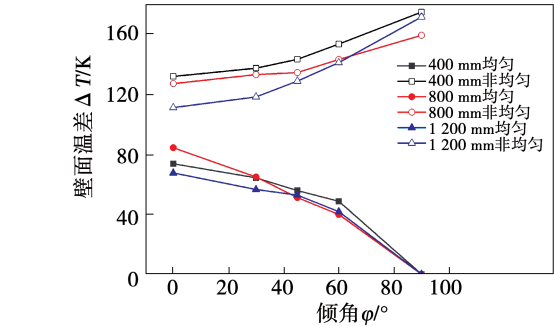


图 8 不同加热方式上、下半周温差随倾角的变化
Fig.8 Variation of upper and lower half cycles temperature difference with pipe inclination angles under different heating methods

均匀和非均匀加热上、下半周换热系数的大小存在不同:在均匀加热条件下,上半周的换热系数始终不会超过下半周(图 4(a));非均匀条件下,会存在上半周换热系数大于下半周的情况,如图 9 所示。当管道倾角小于 90° 时,换热过程分为两个阶段:第 1 阶段,流体的温度低于拟临界温度,下半周近壁面

流体温度高于上半周,且均远高于拟临界温度,由于流体越接近拟临界温度换热效果越好,并且下半周的热流密度高于上半周,而热流密度越高越容易导致湍流层流化,进而降低换热,因此上半周的换热系数高于下半周;第2阶段,随着流体温度高于拟临界温度,密度较高的低温流体聚集在下半周,因此下半周的换热系数高于上半周。当管道倾角为90°时,流动截面方向无二次流,这使右侧(下半周)聚集高温流体,左侧(上半周)聚集低温流体,而温度越低越有利于换热,故左侧的换热系数高于右侧。

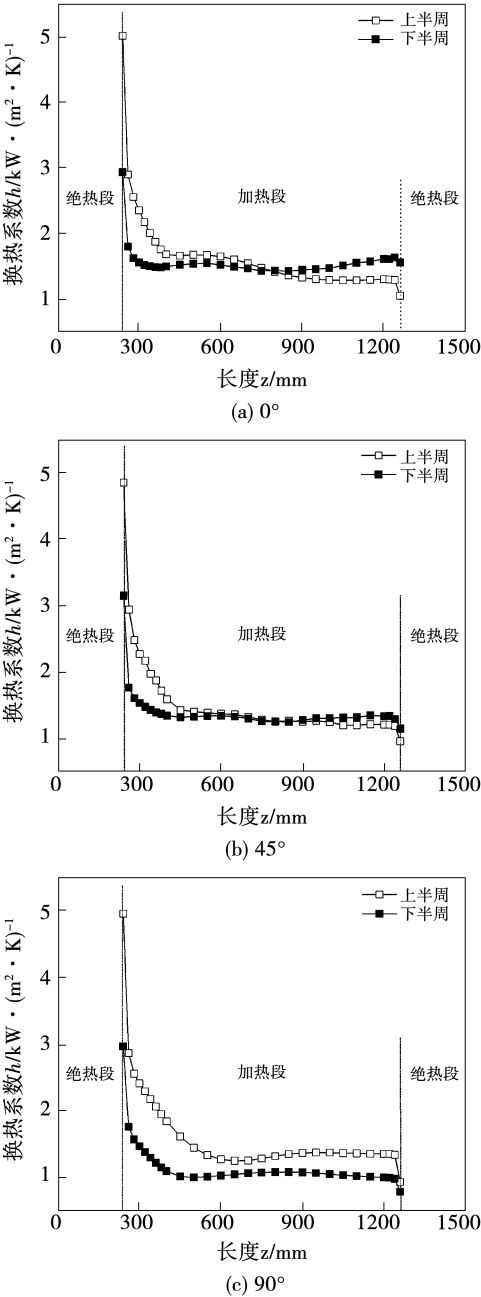


图9 管道倾角对换热系数的影响

Fig.9 Influence of pipe inclination angles on heat transfer coefficient

2.3 非均匀加热质量流量对换热系数的影响

当入口温度在304.5 K,压力为7.6 MPa,管道倾角为30°时,分别对3种质量流量下非均匀加热的工况进行模拟,结果如图10所示。对比图9可以发现,换热系数的变化趋势相同。当质量流量从50.894 g/s增加至76.341和101.788 g/s时,雷诺数也从 1.15×10^5 增加至 1.73×10^5 和 2.3×10^5 ,粘性底层厚度降低。同时,由于质量流量越大流体温度升高的幅度越低,这使更多的流体处于拟临界温度附近的大比热区域范围。在该区域内,由于流体的比定压热容大,换热性能好,因此质量流量越大,换热系数越高。在相同的入口温度条件下,当质量流量增加时,流体需要吸收更多的热量,经过的加热段更长才能升高至拟临界温度,因此第1阶段与第2阶段转变的位置点逐渐推迟,即上、下半周换热系数相等的点推迟。

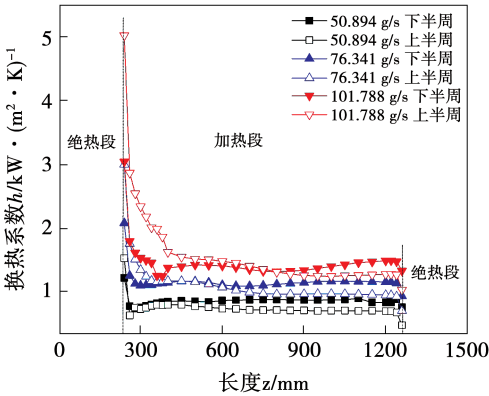


图10 质量流量对换热系数的影响

Fig.10 Influence of mass flow rates on heat transfer coefficient

图11为质量流量对上、下半周热流密度的影响。

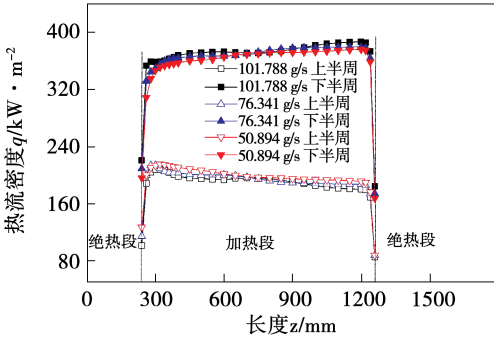


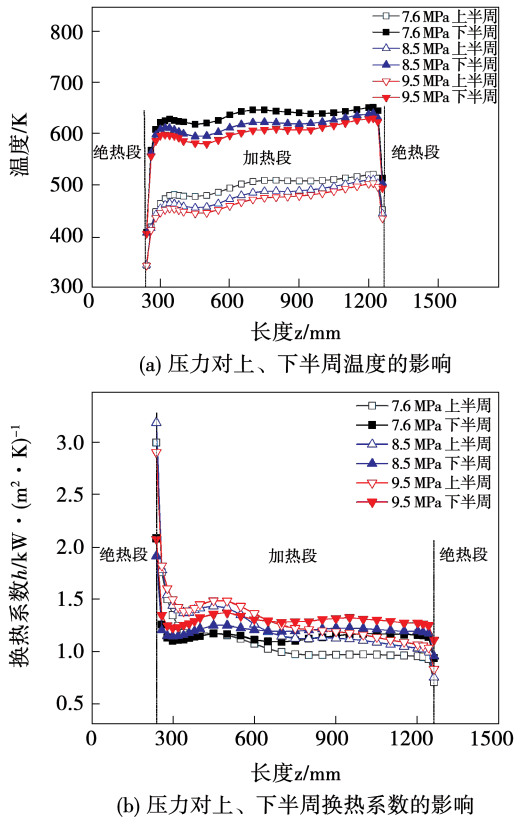
图11 质量流量对上、下半周热流密度的影响

Fig.11 Influence of mass flow rates on heat flux density in upper and lower half cycles

在非均匀加热条件下,质量流量不会影响上、下半周热流密度的变化趋势。各质量流量下,下半周热流密度随着管长的增加呈现上升趋势,而上半周热流密度随着管长的增加则呈现减小趋势。

2.4 非均匀加热压力对换热系数的影响

图 12 (a) 为质量流量 76.341 g/s、管道倾角 30°、压力分别为 7.6、8.5 和 9.5 MPa 的条件下,上、下半周壁面的平均温度变化趋势。



(a) 压力对上、下半周温度的影响

(b) 压力对上、下半周换热系数的影响

图 12 压力对上、下半周温度和换热系数的影响

Fig. 12 Influence of pressure on temperature and heat transfer coefficient in upper and lower half cycles

从图 12(a) 中可以看出,在加热段上、下半周壁面温度均出现了两次波峰(大致在 340 和 700 mm 处),与李志辉等人^[17]的相关研究中,在低压状态下均匀加热壁面温度的变化趋势相一致。从图 12(a) 中不同压力下的壁温对比可以看出,当压力升高时,上、下半周壁面温度波峰和波谷值均有所下降。这主要是由于热流密度较高时,近壁面流体温度远高于拟临界温度范围,这部分超临界二氧化碳流体的比定压热容随压力的增大而升高,增强了吸热能力,导致壁面温度的波峰和波谷降低。与图 7 中具有相

同管道倾角的 30° 曲线(质量流量为 101.788 g/s, 压力为 7.6 MPa) 进行对比,由于质量流量更大、湍流强度更强和换热能力更好,使得图 7 中第 1 个峰值温度更低,在同样的条件下,湍流层流化推迟。因此,图 7 中峰值温度降低,峰值温度对应的位置向后移。

图 12(b) 为不同压力下上、下半周换热系数的变化曲线。当入口温度相同时,随着压力的升高,流体的拟临界温度升高,流体达到对应压力下的拟临界温度所需热量也随之升高,即在加热段的更远位置才能达到拟临界温度,因此图 12(b) 中上、下半周换热系数的交点随压力增加而推迟。

3 结 论

针对超临界二氧化碳在不同管道倾角以及不同热流情况下,对上、下半周平均换热性能的影响进行了研究,并且考虑壁厚导热的影响,得到如下结论:

(1) 在均匀加热非垂直流动时,超临界二氧化碳近壁面流体温度远高于拟临界温度,浮升力导致上半周聚集换热能力差的高温流体,下半周聚集换热能力好的低温流体,因此下半周的换热系数高于上半周。流体的聚集使得上壁面温度高于下壁面温度,而金属的温度低、导热系数高,更多的热量传递到下半周,因此下半周的热流密度大于上半周。随着倾角增大,聚集作用降低,上、下半周温差和热流密度差逐渐降低。

(2) 在非均匀加热条件下,金属的导热性会使未加热壁面上、下半周的热流密度比值为 0.55 左右。在加热段的初期,由于下半周的热流密度较高导致湍流层更严重,因此下半周的换热系数低于上半周;当流体温度略高于拟临界温度时,同一截面处密度高、换热好的流体聚集在下半周,因此下半周换热系数高于上半周。不同管道倾角条件下,二次流引起上、下半周温差的变化:非均匀加热条件下,上、下半周温差随倾角增加而增加;均匀加热条件下,上、下半周温差随倾角增加而减少。

(3) 在非均匀加热条件下,增加质量流量,流体升温幅度减小,更多的流体处于换热能力较好的拟临界范围,从而使壁面温度降低,换热增强;质量流量不会影响上、下半周热流的变化趋势,不同质量流

量下,随着管长的增加下半周热流密度呈现上升趋势,而上半周热流密度则呈现减小趋势。

(4) 在非均匀加热条件下,随着压力的升高,近壁面高温流体的比定压热容升高,流体吸热能力增强,故上、下半周换热系数均增加。质量流量和压力的升高对壁面峰值温度以及上、下半周的温差具有减弱作用。

参考文献:

[1] 吴 刚,毕勤成,王 汉,等. 超临界压力水在倾斜上升管内传热的试验研究[J]. 西安交通大学学报,2011,45(5):6-11.
WU Gang, BI Qin-cheng, WANG Han, et al. Heat transfer characteristics of supercritical water in inclined upward tube[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5):6-11.

[2] 童家麟,赵寅丰. 超临界二氧化碳布雷顿循环研究进展[J]. 精细与专用化学品,2021,29(1):6-11.
TONG Jia-lin, ZHAO Yin-feng. The progress review of supercritical CO₂ Brayton cycle research[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2021, 29(1):6-11.

[3] 黄彦平,王俊峰. 超临界二氧化碳在核反应堆系统中的应用[J]. 核动力工程,2012,33(3):21-27.
HUANG Yan-ping, WANG Jun-feng. Application of supercritical carbon dioxide in nuclear reactor system[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(3):21-27.

[4] 饶政华,廖胜明. 超临界二氧化碳管内湍流流动和传热的数值模拟[J]. 流体机械,2005,33(1):71-75,59.
RAO Zheng-hua, LIAO Sheng-ming. Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer of supercritical carbon dioxide in tubes[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(1):71-75,59.

[5] 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 Kai-xiang, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of supercritical CO₂[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12):29-34.

[6] 刘遵超,王 珂,刘 彤,等. 超临界 CO₂ 在内螺纹管内换热特性研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(2):402-405.
LIU Zun-chao, WANG Ke, LIU Tong, et al. Study on heat transfer characteristics of supercritical CO₂ in internal rifled tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(2):402-405.

[7] 杨传勇,徐进良,王晓东,等. 管道倾斜角度对超临界 CO₂ 管内换热特性的影响[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(9):1522-1528.
YANG Chuan-yong, XU Jin-liang, WANG Xiao-dong, et al. Effect of tube inclination angel on heat transfer characteristics of supercritical CO₂ in tube[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(9):1522-1528.

[8] 郭宇朦,李会雄,张 庆,等. 倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热关联式的建立[J]. 西安交通大学学报,2016,50(1):72-77,123.
GUO Yu-meng, LI Hui-xiong, ZHANG Qing, et al. Establishment of heat transfer correlation for the supercritical water flow near the upper generating line of an inclined upward smooth tube[J]. Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1):72-77,123.

[9] QIU Yu, LI Ming-jia, HE Ya-ling, et al. Thermal performance analysis of a parabolic trough solar collector using supercritical CO₂ as heat transfer fluid under non-uniform solar flux[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 115:1255-1265.

[10] FAN Y H, TANG G H. Numerical investigation on heat transfer of supercritical carbon dioxide in a vertical tube under circumferentially non-uniform heating [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138:354-364.

[11] 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, 2018, 170:480-496.

[12] JAJJA S A, SEQUEIRA J M, FRONK B M. Geometry and orientation effects in non-uniformly heated microchannel heat exchangers using supercritical carbon dioxide[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112:109979. 1-109979. 18.

[13] LI Xin, SUN Feng, XIE Gong-nan, et al. Supercritical CO₂ flowing upward in a vertical tube subject to axially nonuniform heating [J]. Numerical Heat Transfer Applications, 2020, 78(12):717-737.

[14] LI Zhou-hang, LU Jun-fu, TANG Guo-li, et al. Effects of rib geometries and property variations on heat transfer to supercritical water in internally ribbed tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78:303-314.

[15] DONG E K, KIM M H. Experimental investigation of heat transfer in vertical upward and downward supercritical CO₂ flow in a circular tube[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2011, 32(1):176-191.

[16] 李志辉,姜培学,赵陈儒,等. 超临界 CO₂ 在垂直圆管内对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(3):461-464.
LI Zhi-hui, JIANG Pei-xue, ZHAO Chen-ru, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in vertical circular tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3):461-464.

[17] 汪森林,李照志,邵应娟,等. 超临界二氧化碳垂直管内传热恶化数值模拟研究[J]. 化工学报,2022,73(3):1072-1082.
WANG Sen-lin, LI Zhao-zhi, SHAO Ying-juan, et al. Numerical simulation on heat transfer deterioration of supercritical carbon dioxide in vertical tube [J]. CIESC Journal, 2022, 73(3):1072-1082.