U形竖管内超临界甲烷传热异常行为机理研究*

宿诗雨^{1,2},姜文全¹,李 琳¹,杨 帜²,石杰峰²,李 洋²

(1. 辽宁石油化工大学 机械工程学院, 辽宁 抚顺 113001;2. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要:针对航空发动机的空气预冷系统U形竖管超临界流体传热异常问题,对超临界压力甲烷U 形竖管内传热行为进行了数值研究。探究了热流密度、质量流量和运行压力对换热的影响,从超临界甲 烷管内温度、速度、流动状态及无量纲数变化出发,阐述了超临界甲烷在U形管内异常传热现象形成的 机理。结果表明,在较高热流密度(95kW·m⁻²)下,浮升力导致的自然对流是上升直管段内传热恶化 的主要原因,运行压力的升高抑制了物性变化,促进了传热恶化向正常传热方向恢复。弯管段内的二次 流使混合对流转变为强制对流,二次流形成的迪恩涡改善了径向温度分布不均匀性,强化了弯管段及其 后续直管段的传热,且在弯管顶部位置传热的强化作用最为显著。

关键词: 航空发动机; 超临界流体; U形管; 迪恩涡; 空气预冷系统

中图分类号: V231.1; TK124 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 11-2206028-08 **DOI**: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2206028

Mechanism Analysis of Abnormal Heat Transfer Behavior of Supercritical Methane in a U-Tube

SU Shi-yu^{1,2}, JIANG Wen-quan¹, LI Lin¹, YANG Fan², SHI Jie-feng², LI Yang²

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: Aiming at the abnormal heat transfer of supercritical fluid in U-shaped tube of air pre-cooling system of aircraft engine, the heat transfer behaviour in U-shaped tube of supercritical pressure methane was numerically studied. The effects of heat flow density, mass flow rate and operating pressure on heat transfer were discussed, based on the change of temperature, velocity, flow state and dimensionless number in supercritical methane tube, the mechanism of abnormal heat transfer of supercritical methane in U-shaped tube is expounded. The results show that the natural convection caused by buoyancy is the main reason for the deterioration of heat transfer in the rising straight pipe section at a high heat flux $(95kW \cdot m^{-2})$. The increase of operating pressure inhibits the change of physical properties and promotes the deterioration of heat transfer direction. The secondary flow in the elbow section transforms the mixed convection into forced convection, Dean vortex formed by secondary flow improves the non-uniformity of radial temperature distribution, the heat transfer in the elbow section and its subsequent straight pipe section is enhanced, and the heat transfer enhancement effect is most significant at the top of the elbow.

^{*} 收稿日期: 2022-06-02;修订日期: 2023-03-22。

基金项目:国家自然科学基金 (52006094); 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (LJKMZ20220725; L2019024)。

作者简介:宿诗雨,硕士生,研究领域为超临界流体的流动与传热。

通讯作者:杨 帆,博士,副教授,研究领域为超临界流体的流动与传热。E-mail: yangfanfan0902@126.com

引用格式:宿诗雨,姜文全,李 琳,等.U形竖管内超临界甲烷传热异常行为机理研究[J].推进技术,2023,44(11):2206028. (SU Shi-yu, JIANG Wen-quan, LI Lin, et al. Mechanism Analysis of Abnormal Heat Transfer Behavior of Supercritical Methane in a U-Tube[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(11):2206028.)

Key words: Aero engine; Supercritical fluid; U-tube; Dean vortex; Air precooler

符亏表					
Bo^*	毕渥数	$h/(\mathbf{W}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{m}^{-2}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{K}^{-1})$	对流换热系数	$\mu/(Pa \cdot s)$	黏度
$c_p/(\mathrm{kJ}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1})$	定压比热容	l/mm	有效加热长度	$\theta/(\circ)$	弯管弯曲角度
De	迪恩数	p/MPa	压力	$\rho/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3})$	密度
d/mm	管径	$q/(\mathrm{kW}\cdot\mathrm{m}^{-2})$	热流密度	$\lambda/(\mathbf{W}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{m}^{-1}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{K}^{-1})$	导热系数
$G/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	质量流量	T/K	温度		

1 引 言

随着航空航天业的快速发展,对航空燃料的需 求与日俱增,液化天然气(其成分97%为甲烷)作为 航空煤油的替代能源逐渐被业内学者所认可。另一 方面,超临界甲烷具有独特的换热特性,应用于航空 发动机空气预冷系统,能够有效提高航空发动机的 耐高温性能,从而延长发动机的使用寿命^[1]。从结构 上看,航空发动机空气预冷系统由多组U形弯细管道 组成,超临界甲烷在弯管段传热存在一定程度的强 化和恶化现象。文献[2-4]表明,超临界流体在直管 段内浮升力对传热起主导作用,而在弯曲段内,离心 力使低温流体甩向外母线,离心力产生的二次流增 强了径向掺混,对流传热系数可达到直管段的1.4~2 倍,离心力的作用随雷诺数的增大或曲率半径的减 小而增强,受流动方向的影响较小。此外,Gao等^[5]研 究表明,超临界流体在弯管中,产生离心力的强化作 用与其产生的迪恩涡密切相关。Zhu等^[6]研究认为, 超临界流体在弯管中因离心力增强而产生传热强化 作用仅限于弯曲段内,后续直管段内的传热被削弱。 张康等[7]研究表明,重力或浮升力导致的二次流产生 了一对反向迪恩涡,对边界层具有削弱作用。Chen 等[8]研究表明,当流体通过弯曲段后,高温流体向内 母线附近附着,导致了后续直管段内传热性能的改 变,高温流体的附着能力与重力和离心力间的夹角 有关。刘新新等^[9]指出拟临界点附近,离心力削弱了 弯管内的传热。综上可见,对超临界流体传热管道 形式的成熟研究多集中于单一直管[10-13]、螺旋管[14-18] 和蛇形管^[19-20]; 而在U形管内开展的研究中弯曲段 传热强化及对后续直管段传热的影响存在较大分 歧。此外,对超临界流体换热研究而言,多为工业领 域的超临界水和超临界 CO2等换热应用研究[21-23],而 作为航空领域极具潜力的新能源燃料超临界甲烷, 其U形细管传热异常机理及强化传热应用有待于进 一步研究。

为此,本文开展了竖直U形管内超临界甲烷对流

传热数值研究,探究不同操作参数对壁温和对流传 热系数的影响,分析温度场、流场和密度场的轴向和 径向分布,进而得出超临界甲烷U形管内强化传热异 常机理。

2 数值计算方法

2.1 几何模型

几何模型如图1所示,U形管路总长为1000mm, 其中直管段长度*l*为399.469mm,管径*d*为6mm,弯头 弯曲半径*r*为32mm。重力方向沿*z*轴负方向,超临界 压力下甲烷由管右侧入口竖直向上流入,经过弯曲 段后经左侧直管竖直向下流出。



2.2 控制方程

直角坐标系下,超临界甲烷流动的连续性方程、 动量方程和能量方程^[24]如下:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \right) = 0 \tag{1}$$

动量方程

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

2206028-2

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i \left(\rho E + p \right) \right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + u_i \tau_{ij} \qquad (3)$$

式中 ρ 为密度,u为流速,E为比内能。

有效黏度计算公式如下

$$\mu_{\rm e} = \mu + \mu_{\rm t} \tag{4}$$

式中μ为动力黏度,μ为湍流黏度。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型考虑了涡流对湍流的影响,提高了旋涡流动的精度,故本文采用强化壁面函数处理的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,湍动能(k)方程和耗散率(ε)方程如下^[25]

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k u_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \qquad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_s u_e \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1s} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2s} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s (6)$$

式中 α_k 和 α_e 是由 RNG 理论计算的逆有效普朗特数; C_{1e}, C_{2e} 分别为1.42,1.68。

2.3 边界条件

采用 REFPROP 软件^[26]获得 5MPa下甲烷的比热 容 c_p ,热导率 λ ,密度 ρ 和黏度 μ 等物性参数(如图 2 所 示)。将物性参数导入ANSYS软件中,通过线性插值 Piecewise-liner函数进行计算。进口为质量流量入口 边界条件,且进口温度恒为188K,壁面采用定热流密 度加热,出口为压力出口边界条件。

控制方程采用有限体积法进行求解,采用 SIM-PLE算法求解速度-压力耦合方程,动量方程和能量 方程采用 QUICK 格式进行离散,以二阶迎风格式离 散湍流动能(TKE)和湍流耗散率方程,当残差小于 10⁻⁶且进出口流量相等时,认为计算结果收敛。



Fig. 2 Thermo-physical properties of methane at 5MPa

2.4 网格划分及独立性验证

利用 ICEM CFD 模块划分计算网格^[27-29],并对壁 面附近的网格进行局部加密,使无量纲高度 y⁺<1。 划分了数量分别为 956592,1550640,2842685 和 4658040的5套网格,在相同工况下进行数值模拟,壁 面温度分布对比结果如图3所示。当网格数量为 2842685时,继续细化网格不会再引起模拟结果的改 变,这表明网格3兼具计算效率和模拟准确性,可以 用于本文的数值计算。网格3的划分如图4所示,第 一层网格高度为3μm,径向比率为1.4。



Fig. 3 Mesh independence verification of U-tube



Fig. 4 Mesh division of U-tube

2.5 数值方法验证

本文根据Li等^[30]的实验建立了几何模型,超临 界 CO₂竖直向上流动,压力为 8.8MPa,入口温度为 25℃,进口雷诺数为 9000,热流密度为 7926W·m⁻²,模 拟结果与实验结果进行对比结果如图 5 所示,为便于 模拟与实验对比,横坐标为对比模型的长径比(*Ud*), 其为无量纲数。由于实验结果或受环境温度等因素 影响,其值略高于模拟结果,但二者的相对偏差仅为 1.6%,表明数值模型能够较好地反映超临界流体在 竖直管内的传热特性。

3 结果与讨论

本文模拟分析了热流密度 q,质量流量 G 和压力 p 对传热性能的影响,得到了温度场、流场和迪恩涡 分布,进而得到了雷诺数 Re,浮升力无量纲因子 Bo* 和迪恩数 De 的沿程分布,旨在对超临界甲烷 U 形管 内传热异常机理进行研究。



numerical result

3.1 运行参数的影响

3.1.1 热流密度对传热的影响

图 6 为热流密度对传热的影响。由图 6 可见,主流温度 T_b沿流动方向缓慢上升,T_b的升高速率从弯管段管长 *l*=0.5m 处降低,究其原因为在拟临界温度 T_{pc}(193.28K)下比热容激增,吸收相同热量导致的温升较小。随着热流密度的增大,壁面温度 T_w升高、对流传热系数 h 降低。在上升管段内,q=75kW·m⁻²工况下的壁面温度平缓上升,未出现峰值;当q升高至 85 和 95kW·m⁻²时,壁面温度先后出现一低一高两个峰值(如图 6(a)所示),同时对流传热系数出现两个谷值(如图 6(b)所示),两峰值间的距离随热流密度的升





高而增大。此变化表明,随着热流密度的增大,正常 传热转变为恶化传热,且传热异常区域增大。弯管 段内,壁面温度骤降、对流传热系数升高,传热性能显 著提高;弯管段的强化效果在0.5m<*l*<0.6m的范围内 有所减弱,且在低热流密度下更为显著,*q*=75kW·m⁻² 时的传热甚至略有削弱。下降段入口处(*l*=0.6m 处), 在第二次进口效应的作用下壁面温度阶跃式上升、 对流传热系数骤降;其下游试验段内,传热性能分两 阶段提高,第二阶段传热强化的起始位置随热流密 度的增大移向出口方向,出口附近的传热系数甚至 超过弯管段。

3.1.2 质量流量对传热的影响

图7给出了*p*=5MPa,*q*=95kW·m⁻²的工况下,质量 流量对流体温度(图7(a))和传热系数(图7(b))的影 响。随着*G*的升高,管内流体雷诺数增大、湍动能提 高,*T*_w和*T*_b降低、*h*升高。上升段内,传热出现两次恶 化,*G*的升高能够抑制传热恶化的程度,高*G*对*T*_w的 削弱在低*G*工况更加显著。弯曲段内,离心力抑制了 *T*_w的上升、改善了传热,0.5m<*l*<0.6m时传热强化程度 降低的现象在*G*下更为明显。下降段内,*h*在第二次 进口效应的作用下远低于弯管出口值,随后*h*逐渐升 高并超越其在弯管段的值。上升段内,浮升力削弱



Fig. 7 Effect of mass flux on heat transfer

了剪切应力,抑制了传热;而下降段内,浮升力与流动方向相反,增强了传热。浮升力随G的降低而增强,而弯管段对于抑制浮升力导致的传热恶化具有较好的效果,由此可见低G时下降段内流体对流h的升高更加明显。

3.1.3 压力对传热的影响

压力对U形管内超临界甲烷对流传热的影响如 图8所示。由图8(a)可见,T,在上升段随压力的升高 而增大,进入弯管段后,5MPa下Tb的升高速率明显大 于在 6MPa 和 7MPa 的工况。由此可见,下降段内 5MPa下的T_b显著高于其在6MPa和7MPa工况的数 值。由图8(b)可见,p的升高对传热影响的程度由强 转弱,且p对直管内传热的影响比在U形管内更为明 显。当p由5MPa升高至6MPa时,传热被显著增强, 上升段内低p下的第二次传热恶化消失,且第一次传 热恶化的程度也被大大削弱。当p为6MPa和7MPa 下的T_w和h几乎重合,p对传热的影响可以忽略。分 析可知,5MPa压力下模拟工况接近甲烷的临界压力 p_=4.539MPa,在此工况下的密度发生剧烈变化导致 了显著的浮升力效应,传热恶化程度较高;随着压力 p逐渐远离 p_{o} ,物性的变化逐渐平缓,使得压力p对传 热的影响可以忽略。尤其在直管上升段内,浮升力 是影响传热的主导因素;而U形管内,浮升力受抑制,





离心力对传热的影响占主导,故压力*p*对弯管内传热的影响较小。

3.2 机理分析

3.2.1 温度、速度云图分析

图9给出了p=5MPa,G=150kg·m⁻²·s⁻¹,q=95kW·m⁻² 工况下纵向截面的温度和速度云图。如图9(a)所 示,上升段内,温度云图关于z轴对称,弯管段内, 离心力将密度较高的低温流体甩向外侧壁面,温度 出现不均匀分布,上游的高温流体紧贴内侧壁面, 。 之向温度分布不均匀性较强;最远点附近,离心力 显著削弱了内侧壁面附近的热边界层,温度分布均 匀性增强;下游的热边界层厚度略有增厚,但低于 其在上游的厚度。下降段内离心力的影响仍然存 在,内侧壁面温度高于外侧壁面,而后高温流体随 离心力的减弱向外侧壁面移动,径向温度分布变得 均匀。

如图 9(b)所示,上升段内的速度分布关于z轴对称,壁面附近流动边界层内流体的粘滞力较强,因此 流速明显低于主流区流体。弯管段内,0°<θ<45°及 90°<θ<180°(θ角定义如图 10所示)时内母线附近出 现高速区,速度分布不均匀程度较高;45°<θ<90°时, 速度分布均匀性提高,传热性能得到改善。下降段 内,不同区域的流速由高到低依次为外母线、主流 区、内母线,由于离心力作用的减弱,下游的流速排 序为主流区>外母线≈内母线。





3.2.2 迪恩涡分析

图 10为弯管段不同位置截面上的温度云图及流 线分布。如图 10 所示, θ=0°截面处温度云图呈同心 圆分布,且由壁面向圆心方向逐渐降低,此时的流线 方向与 x 轴平行,方向由内母线指向外母线。弯管段 内,内母线附近形成了较厚的热边界层,离心力导致 了二次流的产生,在截面上形成了一对反向对称的 迪恩涡。0°<θ<45°内,迪恩涡位于内母线附近;45°< θ<90°时,迪恩涡移向外母线且靠近侧壁面,二次流切 削热边界层使其变得狭长,促进了流体径向掺混。 90°<θ<180°时,迪恩涡范围继续扩大,热边界层受到 挤压变得扁平。

弯管段内的二次流强化了传热,对照图9(b)中 "高速区"出现的位置可知,迪恩涡随着速度的增大 移向内母线方向;迪恩涡促进流体的径向扰动,削弱 了内母线附近的热边界层,温度分布均匀性的提高 抑制了浮升力对传热的恶化,θ=90°时,迪恩涡的扰动 最为充分,具有更好的传热性能。



Fig. 10 Distribution of temperature and streamline along flow direction in the curved section

3.2.3 无量纲数分析

图 11 给出了浮升力无量纲因子 Bo*和雷诺数 Re 沿流动方向的分布。上升段内,当1<0.265m时,壁面 附近的流体与主流体之间的温差较大,Bo*出现峰 值,此时浮升力导致的自然对流对传热起主导作用, 强制对流强度较低, Re 增长迟缓。当0.265m≤l<0.4m 时, $T_{\rm b}$ 快速升高并接近 $T_{\rm nc}$, μ 的降低促进了Re的增大, 强制对流对传热的影响逐渐强于自然对流,Bo*沿流 动方向降低。弯管段内, Bo*降低、Re升高, 二者的变 化在 $l=0.5m(\theta=90^{\circ})$ 时最为明显,此时离心力显著强 化传热,h出现峰值。下降段内,Bo*较低而Re仍保持 较高水平,强制对流为传热的主导因素,h逐渐增大。 随着q的增大,Bo*在0m<l<0.265m内升高,在余下管 段内减小,下降段内浮升力对传热的影响几乎可以 忽略;在上升段和弯管段内 Re 随 q 的增大而增大,下 降段内 Re 随 q 的增大而减小,但始终保持较高水平, 此表明弯管段二次流的强化作用在下降段仍然存

在,并且导致了h的升高。

二次流引起的迪恩涡强度可用迪恩数 De 定量表征,即

$$De = Re \cdot \left(r/R \right)^{0.5} \tag{7}$$

弯管段内的 De 分布如图 12 所示, De 沿流动方向 增大, 迪恩涡抑制了自然对流, 因此 Bo*降低、Re 升 高。 l=0.5m时 De 升高的速率最快, 二次流对传热产 生了显著的强化作用, 此时 h 增大, 甚至在低 q 下出现 峰值; 上游弯管段 De 的升高速率大于下游弯管段, 不 同 q 下 De 的差异沿流动方向逐渐减小, 高 q 时下游弯 管段的 De 变化较为平缓。



Fig. 11 Distribution of dimensionless number Bo* and Re



Fig. 12 Distribution of *De* in the curved section

4 结 论

本文对U形竖管内超临界甲烷传热异常行为机 理进行了数值研究,得到如下结论:

(1)模拟对比分析得到较高热流密度的质量流量工况下,上升直管段出现了两次传热恶化,异常传热区的范围随热流密度的升高而增大,接近临界压力时,压力的增大抑制了浮升力对传热的恶化效应,促使传热恶化的恢复,降低热流密度、提高质量流量或提高压力均能够强化传热。

(2)弯曲段内,惯性引起的二次流在截面形成了 迪恩涡,削弱了热边界层,增强了流体的径向掺混, 促进了传热由混合对流传热向强制对流传热的转 变,二次流的强化作用并未消失,且显著强化了后续 直管段。

(3)在弯管段产生的迪恩涡随流速改变,其位置发生移动,进而导致强化性能的改变。迪恩涡随流速的降低移向外母线,最远点(θ=90°)附近,迪恩涡位于截面的竖直中心,带动流体参与径向掺混,传热强化作用显著增强。

致 谢:感谢国家自然科学基金及辽宁省教育厅科学研 究经费项目的资助。

参考文献

- [1] 黄 文,邓宏武,徐国强,等.U型管内超临界压力航空煤油压降特性[J].航空动力学报,2011,26(3): 583-587.
- Lu Z L, Zhu Y H, Guo Y X, et al. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Supercritical Pressure Hydrocarbon Fuel in a Horizontal Section of a Rotating U-Duct [J]. Journal of Heat Transfer, 2019, 141: 101702.
- [3] Cui X Y, Guo J F, Huai X L, et al. Numerical Investigations on Serpentine Channel for Supercritical CO₂ Recuperator[J]. Energy, 2019, 172: 517-530.
- Fu Y C, Wen J, Zhi T, et al. Experimental Research on Convective Heat Transfer of Supercritical Hydrocarbon Fuel Flowing through U-Turn Tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 43-55.
- [5] Gao Z G, Bai J H, Zhou Jun, et al. Numerical Investigation of Supercritical Methane in Helically Coiled Tube on Regenerative Cooling of Liquid Rocket Electromechanical Actuator[J]. Cryogenics, 2020, 106: 103023.
- [6] Zhu L B, Lu Y P, Tong J F, et al. Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Supercritical Methane Flow and Heat Transfer in a U-Tube [J]. Energies, 2021, 14

(18): 5714.

- [7] 张 康,韩昌亮,任婧杰,等.SCV蛇形换热管内超临界LNG 传热特性数值模拟[J].化工学报,2015,66 (12):4789-4795.
- [8] Chen W, Yang Z N, Yang L, et al. Numerical Investigation of Heat Transfer and Flow Characteristics of Supercritical CO₂ in U-Duct [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 532-539.
- [9] 刘新新,山 訴,张世杰,等.竖直直管和螺旋管内 超临界CO₂换热特性对比研究[J].工程热物理学报, 2020,41(1):56-60.
- [10] 颜建国,朱凤岭,郭鹏程,等.高热流低流速条件下 超临界 CO₂在小圆管内的对流传热特性[J].化工学 报,2019,70(5):1779-1787.
- [11] 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.
- [12] 白万金,徐肖肖,吴杨杨.低质量流速下超临界CO₂ 在管内冷却换热特性[J].化工学报,2016,67(4): 1245-1250.
- [13] 王 珂,谢 金,刘遵超,等.超临界二氧化碳在微 细管内的换热特性[J].化工学报,2014,65(增刊1): 323-327.
- [14] Liu X X, Xu X X, Jiao Y Z, et al. Flow Structure with Mixed Turbulent Flow of Supercritical CO₂ Heated in Helically Coiled Tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116684.
- [15] 王彦红,陆英楠,李洪伟,等.竖直螺旋管中超临界 RP-3航空煤油换热数值研究[J/OL].北京航空航天大学 学报,2021,DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0421.
- [16] 徐肖肖, 吴杨杨, 刘 朝, 等.水平螺旋管内超临界 CO₂冷却换热的数值模拟[J].物理学报, 2015, 64 (5): 258-264.
- [17] Zhang S J, Xu X X, Liu C, et al. The Heat Transfer of Supercritical CO₂ in Helically Coiled Tube: Trade-Off Between Curvature and Buoyancy Effect [J]. *Energy*, 2019, 176: 765-777.
- [18] 王淑香,张 伟,牛志愿,等.超临界压力下 CO₂在螺旋管内的混合对流换热[J].化工学报,2013,64
 (11):3917-3926.
- [19] 黄 腾,李雪芳,柯道友,等.不同几何参数竖直蛇 形管内超临界压力CO₂流动与换热数值模拟[J].清华 大学学报(自然科学版),2020,60(3):263-270.
- [20] 罗 峰,胥蕊娜,姜培学.细蛇形管内超临界压力CO₂
 层流对流换热数值研究[J].工程热物理学报,2014, 35(6):1170-1175.
- [21] 杨 珂,闻 洁.浮升力对旋转U形通道流动与换热影响的数值研究[J].推进技术,2016,37(9):1696-1702.(YANG Ke, WEN Jie. Numerical Investigation of

Buoyancy Influence on Flow and Heat Transfer Characteristics in Rotating Square U-Duct[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1696-1702.)

- [22] You T H, Pan Y, Zhai Y L, et al. Heat Transfer in a U-Bend Pipe Flow at Supercritical Pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 191: 122865.
- [23] Liu S H, Huang Y P, Wang J F, et al. Numerical Investigation of Buoyancy Effect on Heat Transfer to Carbon Dioxide Flow in a Tube at Supercritical Pressures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 595-606.
- [24] 孙 鹏,路义萍,韩昌亮,等.几何因素对U形管内超 临界甲烷流动换热影响[J].哈尔滨理工大学学报, 2021,26(4):132-137.
- [25] 刘占斌,费继友,杨一凡,等.管径对超临界CO2管内 流动换热的影响研究[J].工程热物理学报,2016,37 (2):358-360.

- [26] Lemmon E W, McLinden M O, Huber M L. NIST Standard Reference Database 23[DB/CD]. USA: REFPROP (Version 9.0), 2010.
- [27] 李琳,姜文全,李婷婷,等.竖直圆管内超临界压力低温甲烷传热的数值研究[J].辽宁石油化工大学学报,2021,41(5):67-71.
- [28]杨 帆,刘 畅,姜文全,等.超临界压力下低温甲 烷传热特性数值研究[J].中国石油大学学报(自然科 学版),2018,42(6):140-144.
- [29] Li L, Jiang W Q, Li Y, et al. Analysis and Prediction of Heat Transfer Deterioration of Supercritical Pressure Cryogenic Methane in a Vertical Tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121824.
- [30] 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]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34: 1162– 1171.

(编辑:梅 瑛)