

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404080

无量纲力对超临界氢气在 U 形管内 传热的影响

高月¹, 张丽², 海笑¹, 李洋¹, 杨帆¹, 李鹏飞¹, 王长顺¹

(1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001;

2. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

[摘要] 针对发动机换热器的冷却问题, 开展了超临界压力下氢气在竖直接管和 U 形管内流动传热特性研究。采用数值方法研究了压力和质量流率对管道换热的影响, 从而得到换热规律, 深入讨论弯管段的换热机理, 分析了无量纲力对换热的影响。结果表明: 压力贴近拟临界或质量流率增大均会增加对流换热系数, 产生换热强化; U 形管的弯管段可有效强化换热, 在 $\theta=90^\circ$ 附近达到峰值; 入口直管段存在浮升力作用, 但当压力高于 2.0 MPa 时, 由于密度差影响, 浮升力作用在弯管段后可忽略; 由二次流引起的迪恩涡是强化弯管段换热性能的主要因素, 其中对入口段的影响显著弱于出口段。

[关键词] 氢气; 超临界流体; U 形管; 传热特性; 迪恩涡

[引用本文格式] 高月, 张丽, 海笑, 等. 无量纲力对超临界氢气在 U 形管内传热的影响[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 68-76.
GAO Yue, ZHANG Li, HAI Xiao, et al. Effect of dimensionless force on heat transfer of supercritical hydrogen in U-shaped tube[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 68-76.

Effect of dimensionless force on heat transfer of supercritical hydrogen in U-shaped tube

GAO Yue¹, ZHANG Li², HAI Xiao¹, LI Yang¹, YANG Fan¹, LI Pengfei¹, WANG Changshun¹

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

Abstract: Against the cooling problem of engine heat exchangers, the flow and heat transfer characteristics of hydrogen in vertical and U-shaped tubes at supercritical pressures are studied. The influence of pressure and mass flow rate on heat transfer of the pipeline is studied by numerical method, and the heat transfer law is obtained. The heat transfer mechanism of the elbow section is discussed in depth, and the effect of dimensionless force on heat transfer is analyzed. The results show that, the closer the pressure is to the quasi-critical or when the mass flow rate increases, the convective heat transfer coefficient will increase, resulting in heat transfer enhancement. The bend section of the U-shaped tube can enhance heat transfer effectively, reaching a peak near $\theta=90^\circ$. There is a buoyancy effect in the straight pipe section at the inlet, but when the pressure is higher than 2.0 MPa, the buoyancy effect can be ignored after the hydrogen flows through the elbow section due to the influence of density difference. The Dean vortex caused by the secondary flow is the main factor to enhance the heat transfer performance of the elbow section, and the influence on the inlet section is significantly weaker than that on the outlet section.

Key words: hydrogen; supercritical fluid; U-shaped tube; heat transfer characteristics; Dean vortex

收稿日期: 2024-04-25 网络首发日期: 2024-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52006094); 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ20220725)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52006094); Fundamental Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKMZ20220725)

第一作者简介: 高月 (1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为超临界流体流动传热技术, 1762489593@qq.com.

通信作者简介: 杨帆 (1981), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为超临界流体流动传热技术, yangfanfan0902@126.com.

随着社会发展,我国的能源量需求不断增加,开发新能源刻不容缓^[1]。作为节能减排的模范大国,我国不断开发可再生能源。而氢能因其来源广泛、可存储、可再生、可发电、零污染等优点,受到了广泛关注^[2-5]。氢是一种清洁、高效的二次能源,可代替其他燃料应用于航天领域,还可以应用于工业生产中,作为冷却介质为大型发动机降温,但现阶段对此方面研究还存有许多不足,补充相关理论基础进而进行深入探索变得尤为重要。

目前,常用的冷却剂主要包括二氧化碳、碳氢燃料、甲烷等,各国学者针对这些介质的传热特性已经进行了各类实验及模拟研究^[6-9]。宿诗雨等^[10]分析了再生冷却通道内甲烷的冷却机理,发现在竖直管内发生传热恶化的主要原因是浮升力,在弯管段中迪恩涡的出现会强化换热,并在弯管中部位置表现最为突出;王彦红等^[11]对水平放置的 U 形加热通道内航空煤油的传热特性进行分析发现,受非均匀加热影响,直管段出现微弱二次流,弯管段受离心力作用热流偏移显著,出现强二次流,且提高入口温度可以有效提升换热效率;Fu 等人^[12]对碳氢燃料在 U 形管内进行流动换热实验,发现导热系数随弯曲半径的增大而减小,弯管段受离心力影响导热系数远大于直管段;Shokri 等人^[13]探究了甲烷在直/弯管内的流动传热变化,发现曲率半径对流体比热容变化有直接影响,提高底壁温度、降低出口压力或降低质量流率均可增加底壁附近流体速度及热流密度,进而强化管道换热,并使传热恶化位置提前。

氢气目前主要充当冷却介质被应用于工业及航空领域,多位学者对其流动传热特性进行了研究。Shanmugam 等人^[14]分析了冷却通道内肋条参数对氢气传热的影响,发现肋板角度、肋板尺寸、肋板取向均可对促进传热,弧形肋强化换热性能最优;周彪等^[15]着重分析了弯管段流体的流动换热机理,发现离心力使弯管处产生轴对称的涡流,流体向外侧偏移,流速更快,使得外侧换热得到强化,内侧换热恶化,在出口处传热恶化现象最严重;Li 等人^[16]探究了微肋冷却通道内氢气的流动传热特性,发现微肋在热边界层过厚时对通道冷却作用有限,只有通过促进主流流体热扩散才能使局部强化换热。

综上所述,当前对于超临界流体的传热研究更多集中在圆形或 U 形通道内^[17-19],对于二者局部换热能力进行对比的研究还很少见。基于此,本文对超临界压力下氢气在竖直管及 U 形管内的流动换

热进行了对比研究,着重分析了不同压力和质量流率对管道强化换热的影响,并通过无量纲力对氢气在管道内的流动机理做出简要阐述,旨在为超临界压力下氢的流动与传热后续探索提供理论参考。

1 数值计算方法

1.1 几何模型

模拟所使用的 U 形管及直管几何模型如图 1 所示。模型均竖直放置,重力方向为 z 轴负方向 ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)。氢气进出口方向如图 1 所示,通道截面为 $r=2 \text{ mm}$ 的圆形,曲率半径 $R=15 \text{ mm}$,U 形管的直管段长 380 mm ,并设置有 150 mm 绝热段用以避免入口段效应对传热的影响。

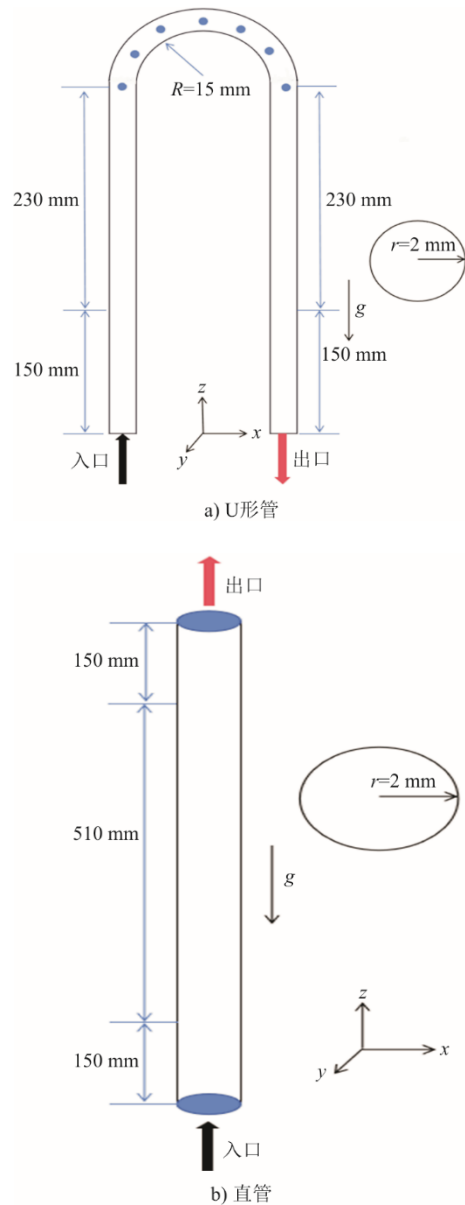


图 1 U 形管及直管几何模型

Fig.1 Geometric models of the U-shaped and straight tubes

1.2 控制方程

为确保氢气在管道中流动传热特性的稳定,需要对模型进行处理。通过对比各模型处理方法得知,使用 RNG $k-\varepsilon$ 模型结合强化壁面处理对换热结果的计算较为精准^[20]。 $k-\varepsilon$ 控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k u_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon u_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R\delta \quad (2)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \pi \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_e \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (4)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

式中: p 为压力, MPa; T 为流体温度, K; c_p 为定压比热容, J/(kg·K); μ 为动力黏度, Pa·s; i, j 代表不同方向分量; G_k 为湍动能因速度梯度生成项; G_b 为湍动能因浮升力生成项。

1.3 工质物性

氢气临界压力 1.3 MPa, 临界温度 34.178 K。

图 2 为 1.5 MPa 下氢气的定压比热容 c_p 、密度 ρ 、热导率 λ 和动力黏度 μ , 采用线性插值方法^[21]进行数值模拟计算。

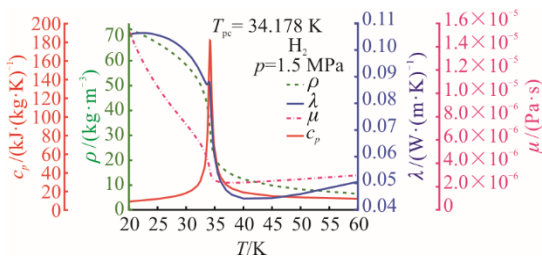


图 2 1.5 MPa 下氢气的热物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters of hydrogen at 1.5 MPa

1.4 边界条件

进口边界条件设置为质量流率入口, 温度为 33.5 K, 出口边界条件设置为压力出口, 加热段外部热流密度设置为恒定。其他边界条件见表 1。

表 1 直管和 U 形管边界条件

项目	数值	
	U 形管	直管
管道内径 d /mm	4	4
绝热段长度/mm	150	150
曲率半径/mm	15	
氢气流动方向	z 轴正方向	z 轴正方向
入口温度/K	33.5	33.5
热流密度/(kW·m ⁻²)	10	10

1.5 网格无关性验证

U 形通道和直管存在相似性, 因此对 U 形通道进行网格独立性分析^[22]。采用 ICEM 前处理软件进行网格划分, 为提高边界处流动及传热特性相关数据观测的准确性, 对壁面处的网格进行局部加密处理, 以无量纲距离 $y^+ < 1$ 作为网格划分依据, 结果如图 3 所示。

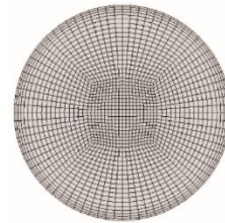


图 3 管截面网格

Fig.3 Mesh generation for the tube cross-section

通过对照 4 组网格选定最优网格, 网格数量及壁面温度如图 4 所示。在相同工况下, 随着网格数量的增加壁面温度变化曲线逐渐趋于重合, 考虑到人工及计算时间等因素, 最终选用网格数 1 710 708 作为本次模拟网格划分。

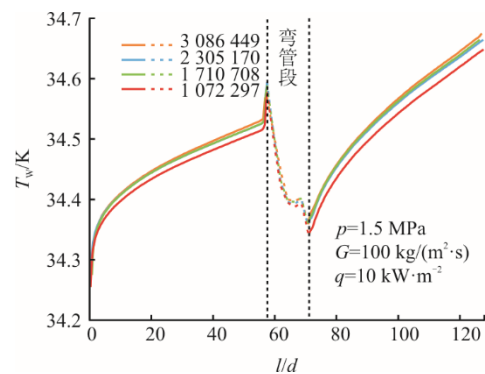


图 4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

1.6 数值方法验证

压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法, 动能和动量方程以及湍流动能和湍流耗散率均采用二阶迎风格式离散。收敛残差均设置为 10^{-8} , 当残差基本保持不变, 且进出口流量近似相等时, 可认为计算结果收敛。为验证所选用计算模型的合理性, 与 Fu 等人^[12]所作实验基础数据进行对比, 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 模拟得到的外壁面处温度与实验结果变化趋势相同, 总体呈升高趋势, 仅在弯管入口处略微降低, 二者最大误差为 1.9% 左右, 偏差范围合理, 证明本次模拟选用计算方法合理。

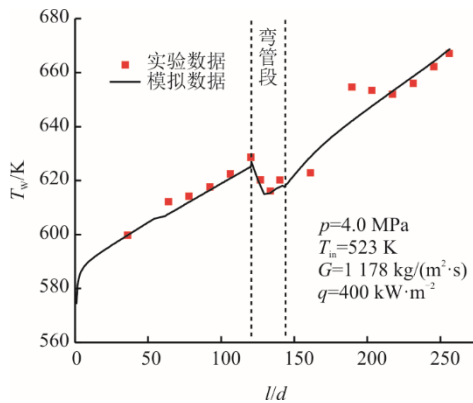


图 5 数值方法验证

Fig.5 Verification of the numerical method

2 结果与讨论

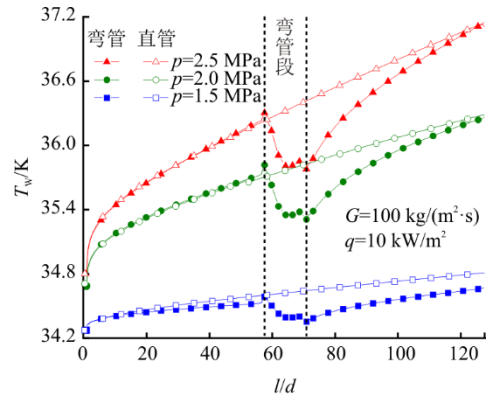
2.1 压力对传热的影响

本节讨论运行压力对换热的影响, 运行参数为: 热流密度 10 kW/m^2 , 质量流量 $100 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$, 入口温度 33.5 K , 压力 1.5 、 2.0 、 2.5 MPa 。

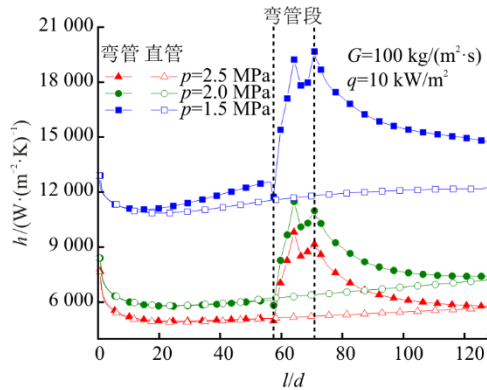
图 6 给出了不同压力下壁面温度 T_w 和传热系数 h 沿流动方向的变化情况。由图 6 可以看出: 直管段壁面温度均沿流向升高, 压力较高时尤为显著; 压力的增加使壁面温度变化幅度减缓, 对传热的影响逐渐降低, 弯管段更明显, 这是由于管道内运行压力距离拟临界压力越远, 氢气的物性变化越平稳, 浮升力对其影响越小; 弯管段壁面温度骤降, 传热系数迅速上升, 随着压力的升高弯管段处出现温度极值点, 传热系数也对应出现谷值, 温度极值点逐渐向弯管出口处移动。根据传热系数增长速率可以看出, 压力对垂直管的影响明显小于弯管。

由图 6a) 可以看出, 垂直管壁温直至出口处仍有缓慢上升趋势, 而 U 形管外壁温度迅速降低, 出现温度谷值, 但随流动的进行差距逐渐缩小直至出口处温度与直管壁温近似, 这在图 6b) 中也有体现,

在弯管段壁温谷值处换热系数出现峰值, 换热能力提升 $39.48\% \sim 59.73\%$ 。此外, 在 1.5 MPa 下直管与 U 形管平均壁温差距最大, 因为弯管处的二次流使 U 形管流体间扰动能力提升, 增强整体换热能力, 壁面温度降低, 与周星^[23]通过实验所得规律相同。



a) 壁面温度



b) 换热系数

图 6 不同压力下壁面温度和传热系数沿流动方向的变化
Fig.6 Changes of wall temperature and heat transfer coefficient along the flow direction at different pressures

图 7 为 U 形管特征截面 ($\theta=90^\circ$) 处氢气的黏度、密度、定压比热容和导热系数在不同压力下的径向变化情况。由图 7 可以看出, 氢气黏度在径向变化并不明显, 受二次流影响其在内母线附近略高, 压力为 1.5 MPa 时径向平均黏度较小, 氢气流动速度较快, 雷诺数达到最大, 说明 1.5 MPa 下二次流动能最大, 随着压力的升高, 平均黏度变化逐渐减小, 径向密度趋势与黏度相同, 均出现明显分层, 内外侧母线附近存在明显密度差, 进而出现较大速度梯度, 外侧质量流率高, 流体掺混作用剧烈, 使外母线附近换热能力明显强于内母线。由图 7 可知, 在 1.5 MPa 下, 径向截面物性参数变化较为剧烈, 管道内侧梯度变化更明显, 二次流对管道传热的强化作用远高于其他工况。

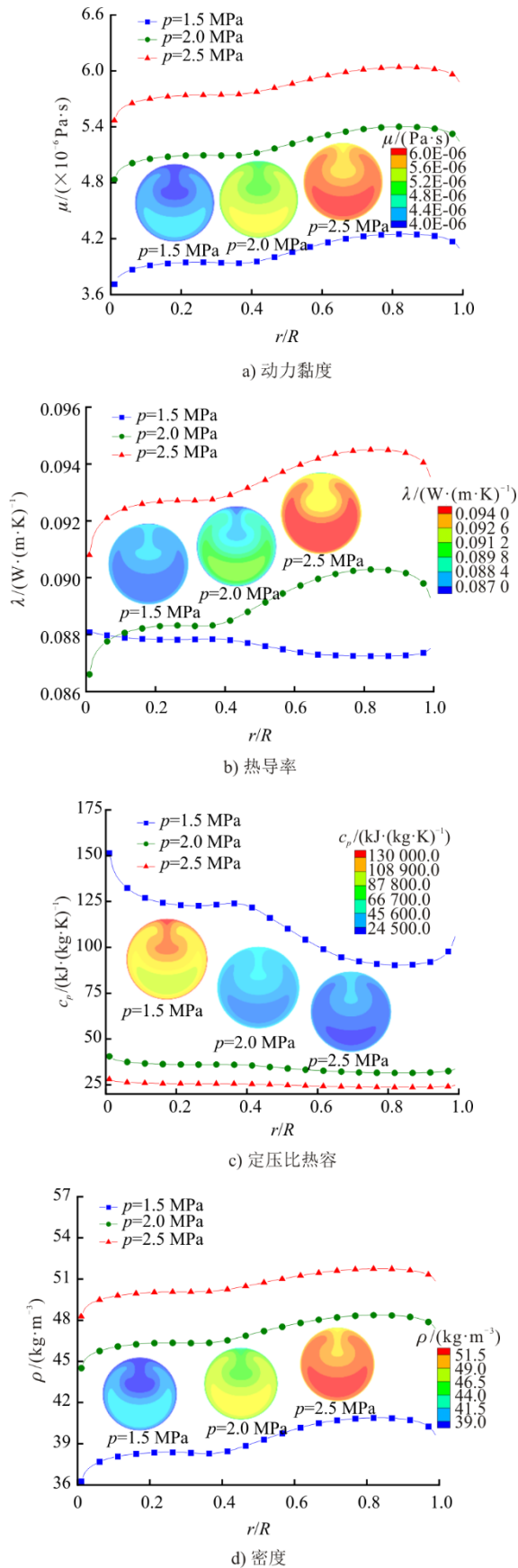


图7 不同压力下氢气热物性参数沿管道径向变化
Fig.7 Radial variations of thermophysical parameters of hydrogen at different pressures

2.2 质量流率对传热的影响

本节讨论质量流率对换热的影响，运行参数为：热流密度 10 kW/m^2 ，压力 1.5 MPa ，入口温度 33.5 K ，质量流率 75 、 100 、 $125 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 。

图8给出了不同质量流率下壁面温度 T_w 和换热系数 h 沿流动方向的变化情况。由图8可以看出：竖直管及U形管入口直管段温度均随着质量流率的增大而减小，且质量流率增大，二者差距逐渐减小，这是由于质量流率变大，管内流速加快，湍流强度增加，流体间扰动作用加剧，此时弯管段对于管道内流体影响较小；相同质量流率下，直管段管道外壁温呈现上升趋势，对流换热系数变化趋势仅入口初始段与之对应，后出现迅速下降趋势，之后呈现缓慢上升状态，这是由于入口处突然出现高热流密度，管壁迅速升温，流体间出现明显温度梯度，使壁面出现分层，阻碍热量传递，壁面处温度激增；随着流动的进行，温差逐渐缩小，分层逐渐减小，恢复正常传热。

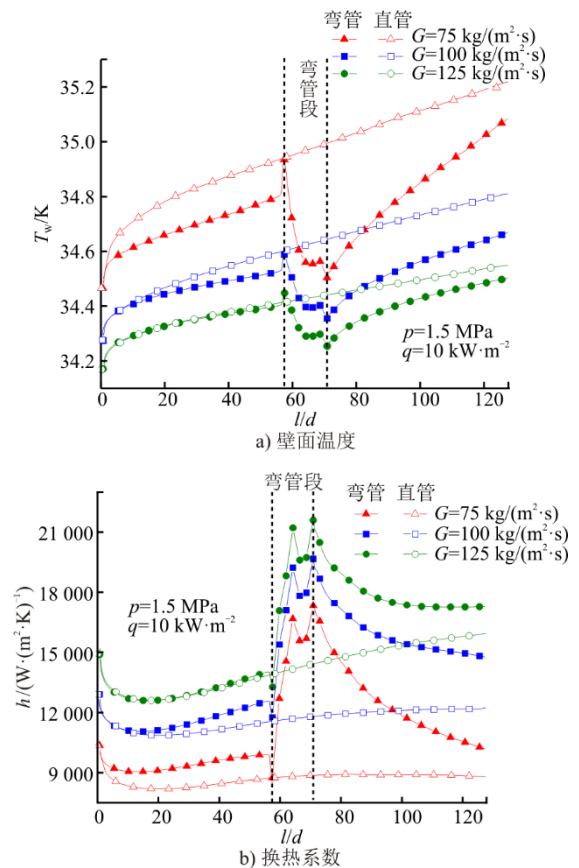


图8 不同质量流率下壁面温度和换热系数沿流动方向变化
Fig.8 Changes of wall temperature and heat transfer coefficient along the flow direction at different mass flow rates

由图8b)可以看出：相较于直管，弯管段出现明显强化换热现象，流体流速增加，边界层受到剧

烈切削变薄，流体与壁面间导热能力增强，壁面温度急剧降低，换热系数相应急剧上升；弯管段换热系数在 90°附近出现明显峰值，换热系数达到最大，较相同位置的直管提升 84.62%~97.65%，其中提升最为明显的为 $G=75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 工况。

图 9 为 U 形管特征截面 ($\theta=90^\circ$) 处氢气的黏度、密度、定压比热容和导热系数在不同质量流率下的径向变化情况。由图 9 可以发现：质量流率增加对热物性的影响由外母线指向内母线并逐渐减小，这是由于二次流的作用使氢气流速产生明显分层，外母线附近流体流速较快，强化传热；质量流率由 $75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 升高到 $100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 对热物性的影响明显高于由 $100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 升高到 $125 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，这是由于质量流率较低，二次流使流体产生较大湍动能，湍流强度在 $75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 工况下高于其余工况；当质量流率增加，由密度差所引起的自然对流随着径向截面梯度减小，二次流强度降低，强化换热能力升高幅度放缓；质量流率为 $75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，外母线附近导热系数与其余工况出现明显差异， r/R 在 $0\sim 0.15$ 区间内导热系数升高，此时二次流流速较慢，不能很好切削热边界层，从而使外母线附近存在较大换热系数梯度。

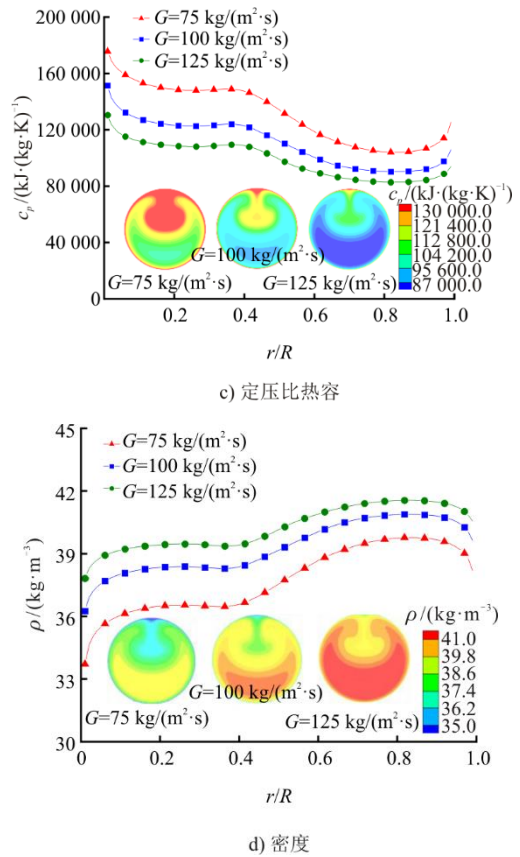
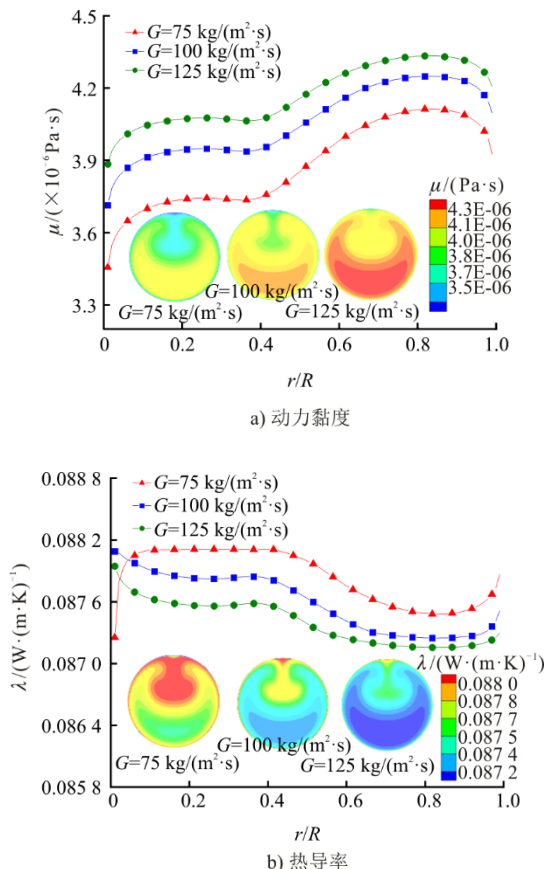


图 9 不同质量流率下氢气热物性参数径向变化
Fig.9 Radial variations of thermophysical parameters of hydrogen at different mass flow rates

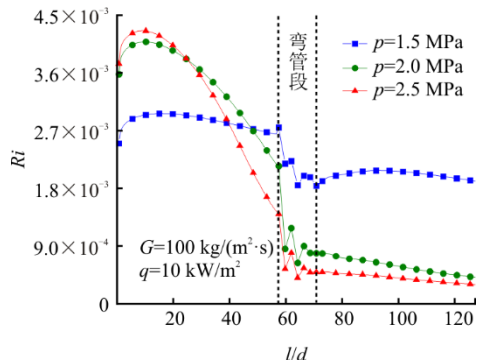


2.3 无量纲力分析

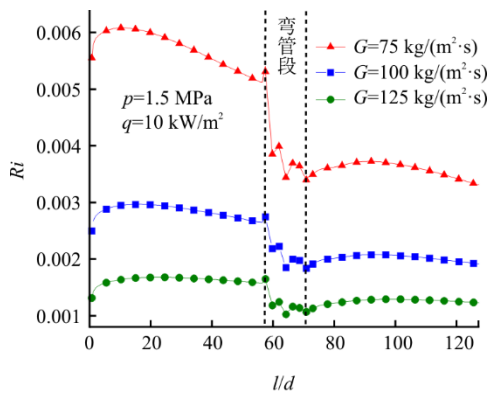
Ri 被认为是判断管道内浮升力对流动传热影响的标准，以 0.001 为判断界限，低于此标准则浮升力对换热影响可忽略^[24]。图 10 给出了浮升力 Ri 沿流动方向的分布情况。

由图 10 可以看出，当压力改变时，入口和出口直管段均受到入口效应的影响 Ri 出现峰值，上升直管段沿程 Ri 数均大于 0.001，浮升力因素应被考虑。压力改变，曲线出现多次重合， Ri 数在 1.5 MPa 下变化趋势最为平缓，2.5 MPa 下变化趋势呈现断崖式降低，结合雷诺数及温度变化曲线可以看出，此时浮升力主要受由主流与壁面间密度分层引起的速度差的影响。在未达到拟临界温度时，密度随压力减小而骤降，管道内流体流速迅速升高，浮升力较小。在弯管段及后续直管段仅 1.5 MPa 压力下 Ri 数大于 0.001，随着压力的增加，达到拟临界温度后，密度变化并不显著，速度梯度减小，因此在 2.0 MPa 和 2.5 MPa 压力下浮升力较小，对换热影响可忽略不计。质量流率变化是通过改变氢气流速，从而对通道换热能力产生影响，通道内由二次

流引起的迪恩涡对流体扰动增强，但 Ri 数减小明显。由此可见，随着质量流率增加，浮升力作用减弱，离心力对换热占据主导作用。



a) 不同压力下



b) 不同质量流率下

图 10 Ri 沿流动方向的分布

Fig.10 Distribution of Ri along the flow direction

为进一步分析弯管段迪恩涡的影响，绘制出 De 沿流动方向的变化情况，结果如图 11 所示。迪恩数计算公式如式(6)所示^[25]：

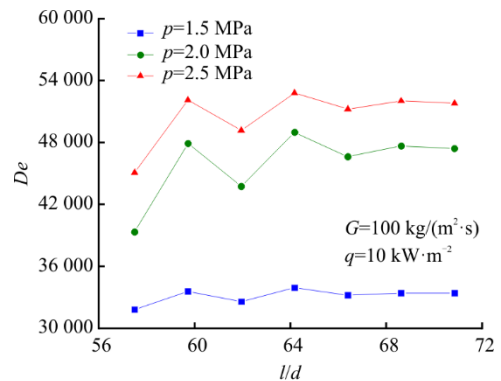
$$De = Re \cdot (r/R)^{1/2} \quad (6)$$

图 11a)中：沿流动方向 De 在进入弯管时迅速上升，此时迪恩涡的出现对传热强化的作用最为明显，壁温骤降， h 升高幅度显著；随着流动的进行， h 上升速率逐渐减小，这是由于随主流速度和温度的升高，氢气主要受自然对流的影响， Re 增长速率变缓，这在高压力下更为显著，说明高压力下二次流对传热的作用更强。

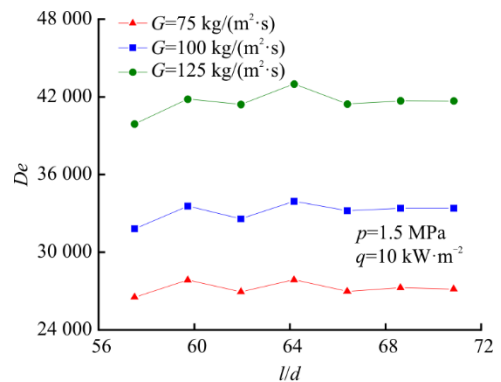
图 11b)中，不同质量流率下 De 变化趋势相同，沿流动方向 De 无明显变化。但与图 11a)不同的是， G 升高使 De 在 100~125 kg/(m²·s)区间升高速率大于 75~100 kg/(m²·s)区间，这是由于流速升高使管道内端动能升高。

为深入分析换热机理，划分了 4 个特征截面：

P_1 ($l=0.380$ m)、 P_2 ($l=0.407$ m)、 P_3 ($l=0.416$ m)、 P_4 ($l=0.433$ m)。在 1.5 MPa 压力下，弯管段特征截面速度云图及流线分布情况如图 12 所示。



a) 不同压力下



b) 不同质量流率下

图 11 De 沿流动方向的分布

Fig.11 Distribution of De along the flow direction

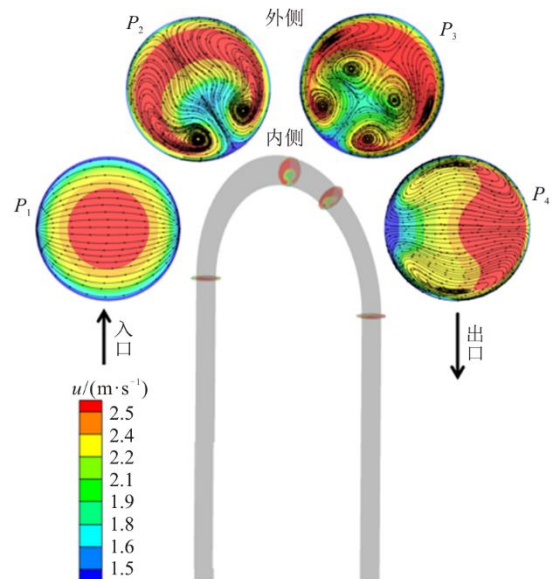


图 12 弯管段不同特征截面上的速度云图及流线分布
Fig.12 Temperature cloud and streamline distribution on different characteristic cross-sections of the elbow section

由图 12 可以看出：氢气速度在管内 P_1 位置时

呈现主流向壁面逐渐降低的阶梯分布, 流线方向由外侧壁面均匀指向内侧壁面, 无二次流动; 随着流动的进行, 高流速阶梯呈现“未封闭扇形”分布, 并逐渐向外侧壁面移动, 出现二次流动; 在 P_2 位置, 流线分布逐渐发生变化, 因二次流动产生迪恩涡并向内母线方向移动, 此时换热性能达到最优, 这与图 6 中对流换热系数变化相贴合; 在 P_3 位置, 图中出现多对沿轴对称且方向相反的迪恩涡, 流体间掺混剧烈, 此时受惯性力作用, 截面上的流动方向转变迅速, 流动阻力骤增, 流速分层明显, 部分迪恩涡对传热起到阻碍作用, 换热系数略微降低; 在 P_4 位置, 主流附近迪恩涡逐渐消失, 仅存的一对迪恩涡向壁面偏移, 持续挤压边界层, 直至流出弯管段。

3 结 论

1) 与垂直管相比, U 形管的弯管段由于二次流作用, 整体换热能力得到强化; 迪恩涡的数量及位置也会对换热性能产生影响, 且高压下更显著。

2) 压力减小、质量流率增加均会使氢气流动速度加快, 热边界层受到挤压, 使 U 形管的换热能力提升; 当质量流率 $G=75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, U 形管 90° 位置处较直管换热能力提升约 97.65%; $p=1.5 \text{ MPa}$ 时, 换热能力提升约 59.73%。

3) 1.5 MPa 压力下, 当氢气质量流率改变时, Ri 均大于 0.001, 整段管道受浮升力和离心力的共同作用。但当质量流率一定, 压力大于 2.0 MPa 时, Ri 数远小于 0.001, 浮升力作用在流入弯管后可忽略, 管道内流体主要受离心力作用。

[参 考 文 献]

- [1] State of the global climate 2020[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2021: 1.
- [2] 王林, 曹宇. 国外氢能利用情况及对我国发展的启示[J]. 上海节能, 2021(5): 444-448.
WANG Lin, CAO Yu. Utilization of hydrogen energy and its enlightenment to China's development[J]. Shanghai Energy Conservation, 2021(5): 444-448.
- [3] QUAN X X, ZHOU X, YU D H. The future of hydrogen energy: bio-hydrogen production technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(79): 33677-33698.
- [4] ZHANG S L, FENG Y, ZHANG D, et al. Parametric numerical analysis of regenerative cooling in hydrogen fueled scramjet engines[J]. Hydrogen Energy, 2016, 41(25): 10942-10960.
- [5] 张家俊, 国丽萍. 氢能管道输送技术最新进展[J/OL]. 化工进展, 1-9[2024-12-04]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2164>.
ZHANG Jiajun, GUO Liping. Latest progress in hydrogen pipeline transportation technology[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, 1-9[2024-12-04]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2164>.
- [6] WANG J. Cooling capacity optimization of hydrocarbon fuels for regenerative cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117661.
- [7] WANG J, JIN H C, GAO H, et al. Cooling capacity optimization of hydrocarbon fuels for regenerative cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117661.
- [8] 蒋雪峰, 田勇, 邵卫卫, 等. 超临界二氧化碳压缩机特性数值模拟[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1685-1694.
JIANG Xuefeng, TIAN Yong, SHAO Weiwei, et al. Numerical simulation of supercritical CO_2 compressors characteristic[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1685-1694.
- [9] ZHANG C, GAO H, ZHAO J, et al. Working state map of hydrocarbon fuels for regenerative cooling[J]. Propulsion and Power Research, 2023, 12(2): 199-211.
- [10] 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): 175-182.
SU Shiyu, JIANG Wenquan, 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): 175-182.
- [11] 王彦红, 李浩然, 李洪伟. U 型再生冷却通道内超临界航空煤油换热特性数值模拟[J]. 航空发动机, 2023, 49(4): 16-25.
WANG Yanhong, LI Haoran, LI Hongwei. Numerical simulation on heat transfer characteristics of supercritical aviation kerosene in a U-shaped regenerative cooling channel[J]. Aeroengine, 2023, 49(4): 16-25.
- [12] FU Y C, WEN J, TAO Z, 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.
- [13] SHOKRI M, EBRAHIMI A. Heat transfer aspects of regenerative-cooling in methane-based propulsion systems[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 82: 412-424.
- [14] SHANMUGAM A R, PARK K S. Flow and heat transfer of supercritical hydrogen in a regenerative cooling channel with the arc ribs of a rocket engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121451.
- [15] 周彪, 吉宇, 孙俊, 等. 超临界氢气在弯管中的流动换热计算[J]. 核动力工程, 2019, 40(5): 197-201.
ZHOU Biao, JI Yu, SUN Jun, et al. Numerical investigations of supercritical hydrogen flow and heat transfer in curved tube[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(5): 197-201.
- [16] LI X, ZHANG S, ZUO J, et al. Flow and heat transfer characteristics of supercritical hydrogen in unilateral heated channels with micro-ribs[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 221: 119900.
- [17] 李延富, 苏成杰, 孙晓东, 等. 水平管内低质量流量超临界二氧化碳异常传热行为研究[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 73-80.
LI Yanfu, SU Chengjie, SUN Xiaodong, et al. Study on abnormal heat transfer behavior of supercritical carbon dioxide at low mass flow rate in horizontal tube[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 73-80.
- [18] GAO Y M, YANG G X, ZHAI Y L, et al. Enhancement of supercritical heat transfer in U-bend by partial

- curvature[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, 107: 109401.
- [19] 王亚慧, 雷贤良, 刘云帆, 等. 竖直上升直肋管内超临界二氧化碳换热特性与肋结构优化[J]. *热力发电*, 2023, 52(11): 1-9.
WANG Yahui, LEI Xianliang, LIU Yunfan, et al. Heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide and structural optimization in vertical straightly-ribbed-tube[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(11): 1-9.
- [20] 杨帆, 王国付, 姜文全, 等. 超临界压力甲烷异常传热行为的机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(7): 1583-1589.
YANG Fan, WANG Guofu, JIANG Wenquan, et al. Mechanism investigation on spacial heat transfer behavior of supercritical pressure methane[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(7): 1583-1589.
- [21] 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): 66-71.
LI Lin, JIANG Wenquan, LI Tingting, et al. Numerical study on heat transfer of supercritical pressure cryogenic methane in vertical pipes[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2021, 41(5): 66-71.
- [22] 葛韶华, 艾贵琳, 杨帆, 等. 超临界 CO₂ 及其混合物在竖直圆管内的传热特性数值研究[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2023, 43(3): 75-80.
GE Shaohua, AI Guilin, YANG Fan, et al. Numerical study on heat transfer characteristics of supercritical CO₂ and its mixture in vertical circular tubes[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2023, 43(3): 75-80.
- [23] 周星. 浮升力—离心力对回弯及其上下游直管中超临界流体换热的实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023: 1.
ZHOU Xing. Experimental study on heat transfer of supercritical fluid in return bend and upstream and downstream straight pipe with floating lift-centrifugal force[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023: 1.
- [24] 赵敏, 杨雨青, 栾林林, 等. 重力对超临界甲烷绕管内冷凝换热影响[J]. *化学工程*, 2022, 50(5): 25-29.
ZHAO Min, YANG Yuqing, LUAN Linlin, et al. Effect of gravity on condensation heat transfer of supercritical methane in winding tube[J]. *Chemical Engineering*, 2022, 50(5): 25-29.
- [25] 王彦红, 李雨健, 李洪伟, 等. S 型通道内超临界 RP-3 航空煤油换热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(9): 2442-2450.
WANG Yanhong, LI Yujian, LI Hongwei, et al. Research on heat transfer characteristics of supercritical RP-3 aviation kerosene in a S-shaped channel[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(9): 2442-2450.

(责任编辑 李园)