

DOI: 10.19666/j.rlfed.202501009

# 超临界甲烷-氢气混合工质在水平圆管内 流动传热特性数值研究

吕英营<sup>1</sup>, 张丽<sup>2</sup>, 李刚<sup>3</sup>, 王长顺<sup>1</sup>, 海笑<sup>1</sup>, 高月<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>

(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;

3. 大连船舶重工集团装备制造有限公司, 辽宁 大连 116000)

**[摘要]** 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对超临界 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质在水平管内的流动传热特性进行数值模拟。分析了掺氢比为 0~30% 的 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质的热物理性质, 以及掺氢比为 0~15% 时水平管内的换热过程。重点研究了质量流速 (150~250 kg/(m<sup>2</sup>·s))、热流密度 (150~250 kW/m<sup>2</sup>) 对掺氢比为 10% 的 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质流动换热特性的影响。结果表明: 当掺氢比从 0 增加到 30% 时, CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质的拟临界温度从 190.4 K 略有升高随后立即降至 181.7 K, 拟临界压力从 4.3 MPa 升高到 12.3 MPa; 随着掺氢比 (0~15%) 的增加, 流体与壁面间换热强化; 增大质量流量强化了 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质的换热能力, 削弱了由浮力效应导致的换热恶化程度; 增加热流密度强化了混合工质下壁面的换热程度, 但类气膜的提前出现削弱了上壁面的换热程度。增大质量流速和热流密度可以不同程度地强化换热。研究结果可为掺氢天然气输送以及动力循环系统中的混合工质换热器提供理论参考。

**[关键词]** 超临界甲烷; 混合工质; 换热特性; 数值模拟

**[引用本文格式]** 吕英营, 张丽, 李刚, 等. 超临界甲烷-氢气混合工质在水平圆管内流动传热特性数值研究[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 24-31. LYU Yingying, ZHANG Li, LI Gang, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of supercritical methane-hydrogen mixture in a horizontal tube[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 24-31.

## Numerical study on flow and heat transfer characteristics of supercritical methane-hydrogen mixture in a horizontal tube

LYU Yingying<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, LI Gang<sup>3</sup>, WANG Changshun<sup>1</sup>, HAI Xiao<sup>1</sup>, GAO Yue<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>

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

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

3. Dalian Shipbuilding Industry Equipment Manufacturing Co., Ltd., Dalian 116000, China)

**Abstract:** The RNG  $k-\varepsilon$  model was used to numerically simulate the flow and heat transfer characteristics of supercritical CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> mixtures in horizontal pipe. The thermal physical properties of the CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> mixtures with hydrogen ratio of 0~30%, as well as the heat transfer process of the CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> mixtures with hydrogen ratio of 0~15% in the horizontal tube were analyzed. The influences of mass flow rate (150~250 kg/(m<sup>2</sup>·s)) and heat flux density (150~250 kW/m<sup>2</sup>) on flow and heat transfer of the mixed working fluid with hydrogen ratio of 10% were studied. The results show that when the hydrogen ratio increases from 0 to 30%, the pseudo-critical temperature of the mixed working fluid increases slightly from 190.4 K and then sharply decreases to 181.7 K, and the pseudo-critical pressure increases from 4.3 MPa to 12.3 MPa. With the increase of the hydrogen ratio (0~15%), the heat transfer between the fluid and the wall is strengthened. The increase of mass flow rate strengthens the heat transfer capacity of the mixed working fluid and weakens the heat transfer deterioration caused by buoyancy effect. The increase of heat flux strengthens the heat transfer degree of the wall under the mixed working medium, and weakens the heat transfer

收稿日期: 2025-01-08 网络首发日期: 2025-09-02

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研课题 (LJKMZ20220725)

Supported by: Fundamental Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKMZ20220725)

第一作者简介: 吕英营 (2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超临界流体流动传热技术, 13840197896@163.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。

degree of the upper wall due to the advanced appearance of the gas-like film. Increasing the mass flow rate and heat flux density can enhance the heat transfer to varying degrees. The research can provide theoretical reference for mixed working medium heat exchangers in hydrogen-doped natural gas transmission and power circulation systems.

**Key words:** supercritical methane; mixed working fluid; heat transfer characteristics; numerical simulation

近年来,超临界甲烷因具有安全环保、较高的能量密度和可循环利用等特点,被广泛应用于火箭推进系统、航天器发动机系统和制冷系统,以及超临界布雷顿循环<sup>[1]</sup>、超临界朗肯循环<sup>[2]</sup>等动力循环系统。而氢气作为一种清洁无污染、具有极高能量密度的能源载体,在未来能源体系中同样具有巨大的应用潜力<sup>[3-4]</sup>。甲烷与氢气形成超临界混合工质时,其传热过程变得极为复杂<sup>[5-6]</sup>。一方面,这种混合工质综合了甲烷和氢气各自的优点,在特定的能源转换系统中有望实现更高的热传递效率,例如在先进的燃气轮机、超临界二氧化碳布雷顿循环等系统中,这类传热工质可以提高整个系统的热功转换效率<sup>[7]</sup>。另一方面,超临界状态下不同比例甲烷掺氢对传热过程的影响尚不明确,给相关能源系统的设计、优化和安全运行带来了挑战<sup>[8-9]</sup>。

迄今为止,全球范围内的研究学者已针对混合工质的传热问题展开了深入研究,并进行了大量的实验与验证。Ding 等人<sup>[10]</sup>对超临界氢气在圆形水平通道内的流动和换热机理进行了数值研究,得出无重力时的换热系数小于有重力时的换热系数的结论。于博文等<sup>[11]</sup>研究了超临界 CO<sub>2</sub>-丙烷二元混合工质在水平圆管内的传热特性,着重考察了质量流速、组分浓度、热流密度等对流动传热的影响。林智博等<sup>[12]</sup>对比了超临界 CO<sub>2</sub>-R41 二元混合工质与纯 CO<sub>2</sub> 工质的传热特性,探究了组分浓度、热流密度等对流动传热的影响。武文华等<sup>[13]</sup>专注于超临界布雷顿循环领域,重点研究有应用潜力的 CO<sub>2</sub>-Xe 混合工质在垂直圆管内的流动换热规律及相应机理。刘佳等<sup>[14]</sup>对 CO<sub>2</sub>/DME (二乙醚) 混合工质进行了换热模拟分析,结果表明,相较于纯 CO<sub>2</sub> 工质,混合工质换热系数提高了 20%。贾冠伟等<sup>[15]</sup>总结了不同掺氢比对 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质热物理性质(密度、温度、比热容等)的影响。Tabkhi 等人<sup>[16]</sup>对比了 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 混合工质掺氢比大于 10% 和小于 10% 的管道对运行压力的影响,发现当掺氢比大于 15% 时,混合工质在超临界状态下不能满足管道输送的运行压力要求。

综上所述,当前对于超临界混合流体的学术探索,主流方向更多集中于以 CO<sub>2</sub> 为基底的二元混合工质,对于以超临界甲烷为基底的混合工质,其传热过程研究还处于起步阶段,在公开学术领域鲜有

报道。受流体热物理性质的影响,CH<sub>4</sub> 在超临界压力下与不同工质混合后具有不同的传热特性。随着能源技术向高效、清洁、紧凑方向发展,深入理解超临界甲烷-氢气混合工质的传热规律对于推动新型能源动力系统的发展具有至关重要的作用<sup>[17-18]</sup>。基于此,本文将深入研究超临界甲烷-氢气混合工质的传热特性,分析不同掺氢比对换热能力的影响以及影响传热的关键因素,为天然气与氢能在航空发动机等领域的合理应用提供理论依据和技术支持<sup>[19]</sup>。

## 1 数值模型及计算

### 1.1 物理模型和边界条件

图 1 为直管几何模型及参数,重力方向为 y 轴负方向 ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ )。

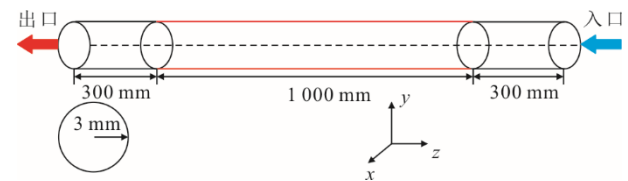


图 1 直管几何模型及参数

Fig.1 Geometric model and parameters of the straight tube

根据文献[20-21]中相关换热器的几何尺寸,设置圆管半径为  $r=3 \text{ mm}$ ,管长为  $1600 \text{ mm}$ ,并在管两端设有  $300 \text{ mm}$  绝热段,以避免入口段效应对流动传热的影响。中间直管段施加均匀的热流密度。设置质量流速  $G$  为  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,热流密度  $q$  为  $200 \text{ kW}/\text{m}^2$ ,设入口端为质量流量入口,出口端为压力出口,压力为  $8 \text{ MPa}$ ,其他边界条件见表 1<sup>[22-23]</sup>。

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

项目	数值
入口温度/K	150
热流密度/( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )	200
质量流速/( $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ )	200
管道内径/mm	6
绝热段长度/mm	300

### 1.2 模型与控制方程

甲烷掺氢氢气的混合工质在超临界状态下流动的连续性方程、动量方程和能量方程如下<sup>[20]</sup>。

连续性方程:

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

动量守恒方程:

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

能量守恒方程:

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

RNG  $k-\varepsilon$  湍流方程:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k u_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k u_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\delta \quad (5)$$

局部换热系数:

$$h = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (6)$$

二次流速度:

$$U_{xy} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (7)$$

式中:  $\rho$ 为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$ 为流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\varepsilon$ 为湍流耗散率;  $T$ 为流体温度,  $\text{K}$ ;  $p$ 为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $c_p$ 为流体定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $K$ 代表湍流动能;  $\mu$ 为流体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $i, j$ 代表不同方向分量;  $G_b$ 为流体湍动能因浮升力生成项;  $G_k$ 为流体湍动能因速度梯度生成项;  $C$ 为智能调节系数;  $h$ 为换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $q$ 为热流密度,  $\text{MW}/\text{m}^2$ ;  $U_{xy}$ 为流体截面速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $U_x$ 为流体沿  $x$  轴的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $U_y$ 为流体沿  $y$  轴的速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

### 1.3 网格独立性验证

利用 ICEM 软件对计算区域的三维模型进行切分, 图 2 为局部示意。由于壁面流场中的物理参数发生了急剧变化, 换热过程变得更为复杂, 因此需要对壁面进行加密处理<sup>[21]</sup>。

图 3 为混合工质在不同网格数下的传热系数对比。可以看出, 网格数增加, 换热系数变化逐渐平缓。综合考虑, 采用 1 197 594 网格数进行模拟<sup>[24]</sup>。

### 1.4 模型验证

利用 SIMPLEC 方法进行流场和压力场的耦合, 动量、能量方程以及动能方程均采用二阶迎风格式

离散, 湍流耗散率和湍动能采用一阶迎风格式离散。当残差均小于  $10^{-6}$  时将计算结果视为收敛。当前缺少甲烷掺氢混合工质的实验数据, 选取甲烷在水平直管内流动传热的实验数据<sup>[25]</sup>, 取圆管加热段 120 mm, 压力 10 MPa, 质量流速为  $11\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 进口温度为 123 K, 内、外半径分别为 0.80 mm 和 1.30 mm。

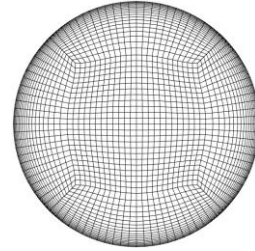


图 2 网格切面  
Fig.2 Grid section

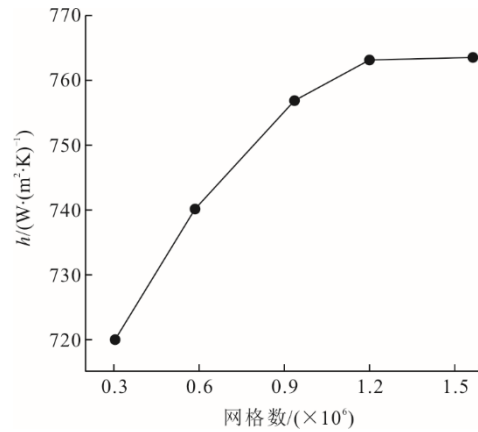


图 3 网格无关性验证  
Fig.3 Grid independence verification

图 4 为  $q=4\text{ MW}/\text{m}^2$  与  $q=5\text{ MW}/\text{m}^2$  2 种工况下, 内壁面温度随加热长度  $l$  的变化曲线。由图 4 可以看出, 模拟数据与实验数据具有相同的变化趋势, 且 2 种工况的最大相对误差为 2.1%, 可以保证数值计算的精准性, 故 RNG  $k-\varepsilon$  模型可用于甲烷掺氢混合工质流动换热研究。

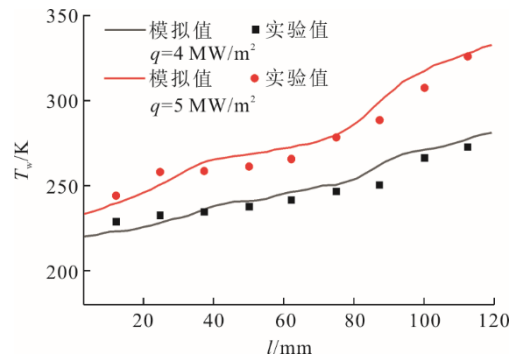


图 4 模型验证  
Fig.4 Model verification

## 2 结果与讨论

### 2.1 掺氢比对混合工质物理性质的影响

设置运行参数为：入口温度 150 K，热流密度 200 kW/m<sup>2</sup>，质量流速 200 kg/(m<sup>2</sup>·s)。

#### 2.1.1 掺氢比对混合工质拟临界温度与拟临界压力的影响

甲烷掺氢比直接影响混合工质的临界参数。当掺氢比过大时，拟临界压力过大，本文取 0~30% 掺氢比<sup>[26]</sup>。图 5 为掺氢比从 0 到 30% 变化时甲烷掺氢混合工质拟临界温度与拟临界压力的变化。随着掺氢比的增大，拟临界温度先从 190.4 K 略有升高，随后持续降至 181.7 K，而拟临界压力从 4.3 MPa 升高到 12.3 MPa。可得出结论，随甲烷掺氢比增大，混合工质拟临界压力增大，拟临界温度先略有上升然后持续下降，且下降速率逐渐增加。

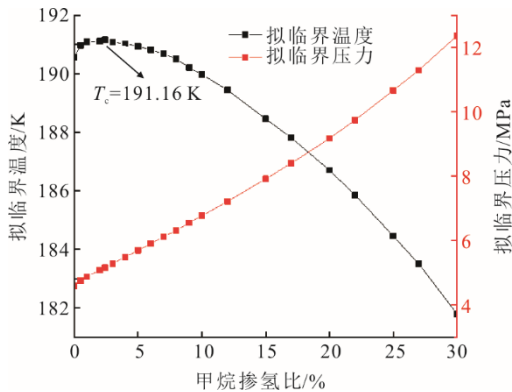


图 5 不同掺氢比时混合工质的拟临界参数  
Fig.5 Pseudo-critical parameters of the mixed fluids with different hydrogen mixing ratios

#### 2.1.2 掺氢比对混合工质热物理性质的影响

图 6 为氢气的热物性参数曲线，对比图 7 中纯甲烷的物理性质可知，氢气的热物性参数（如定压比热容、密度等）较小，当甲烷掺氢比增大到 2.4% 时，拟临界温度达到最高值 191.16 K，随后逐渐降低。以掺氢比 10% 为例，甲烷掺混 10% 氢气与纯甲烷工质在 8 MPa 下的物性参数（密度、定压比热容、导热率和动力黏度）对比根据美国国家标准与技术研究院（NIST）参考数据库进行计算<sup>[27]</sup>，并导入 Origin 绘图软件中。掺入氢气后工质的定压比热容、密度、热导率等热物性参数曲线整体向低温区移动。纯甲烷物性参数曲线在 210.1 K 温度下出现剧烈波动，定压比热容达到峰值，210.1 K 即为 8 MPa 压力下甲烷的拟临界温度 ( $T_{pc}$ )。同理，可得出结论，甲烷掺混 10% 氢气的拟临界温度为 195 K。

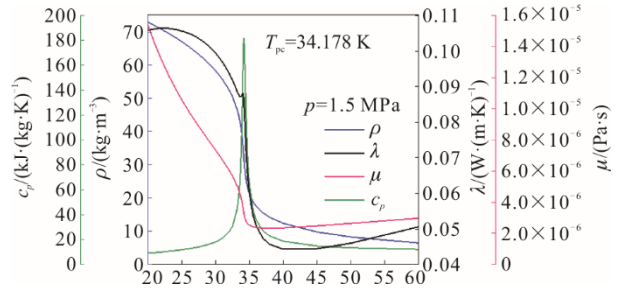


图 6 氢气热物性参数曲线

Fig.6 Thermal physical property parameters of hydrogen

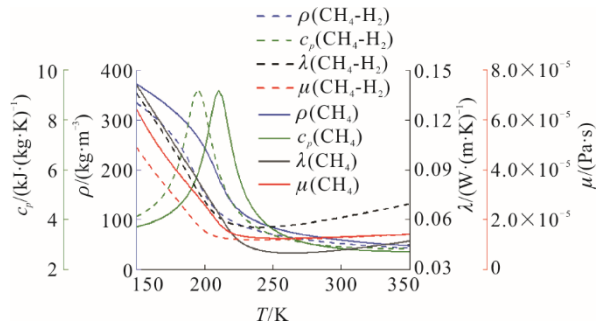


图 7 甲烷掺混 10% 氢气与纯甲烷的物性参数对比

Fig.7 Thermal physical property parameters of methane mixed with 10% hydrogen and pure methane

### 2.2 掺氢比对混合工质换热能力的影响

图 8 为水平直管内掺氢比(0~15%)对通道上、下壁面换热系数的影响。由图 8 可以看出：掺氢比为 0 时下壁面换热系数在  $Z=0.75$  m 处到达峰值；掺氢比在 5% 时下壁面换热系数在  $Z=0.8$  m 处到达峰值；掺氢比在 10% 和 15% 时，随掺氢比增大，下壁面换热系数增大，且换热系数峰值更靠近加热段入口  $Z=1.30$  m 处。由图 8 可知，当掺氢比增大时，上、下壁面换热系数均增大，下壁面由于氢气浓度增大，拟临界温度降低，比热容较早达到峰值，传热恶化阶段提前结束，因此高氢气浓度的工质更早达到换热系数峰值。

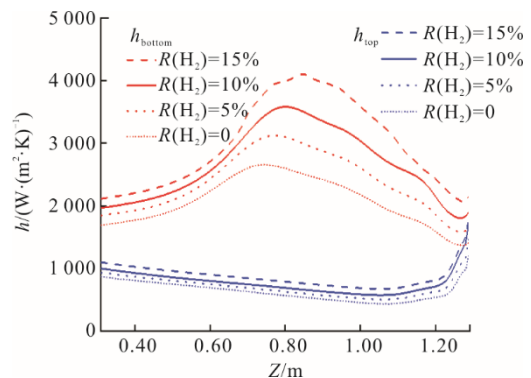


图 8 掺氢比对上、下壁面传热系数的影响

Fig.8 Effect of hydrogen mixing ratio on heat transfer coefficients of upper and lower walls

图 9、图 10 分别为壁面温度和特征截面流体密度云图。可以看出，近壁面流体密度较小，随着流动的进行，上壁面温度升高，可以推断由于浮升力作用，上近壁面流体形成一层类气膜，阻隔上壁面热量向主流传导，导致上壁面温度飞升，从而出现上壁面传热恶化问题，因此上壁面换热系数出现谷值（图 8）。对比纯甲烷工质，掺氢比为 15% 时，下壁面平均换热系数增加了 44%，上壁面平均换热系数增加了 38%，且在升温至拟临界温度附近因热物性性质变化引起的增强换热更加明显。

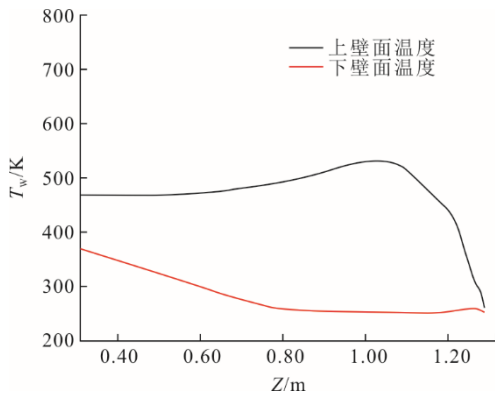


图 9 上、下壁面温度变化曲线

Fig.9 Temperature curves of the upper and lower wall

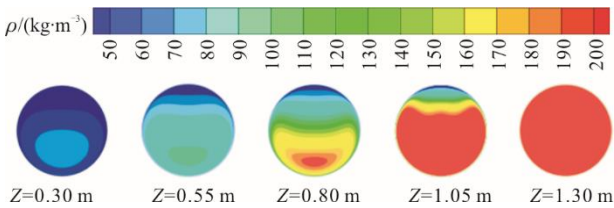


图 10 水平直管特征截面流体密度

Fig.10 Fluid density in characteristic cross-sections of the straight channel

### 2.3 特征截面流体换热性能

图 11 为掺氢比 10%、质量流速  $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下，圆管内特征截面温度分布云图。图 12 分别给出了水平圆管内横截面 ( $y=0 \text{ m}$ )、纵截面 ( $x=0 \text{ m}$ ) 内温度随流动距离变化云图。

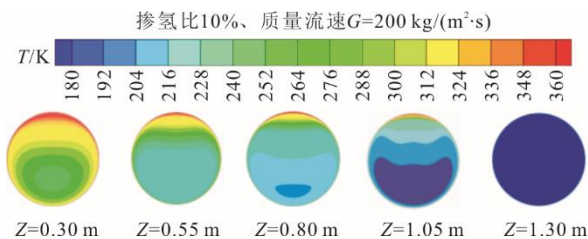


图 11 水平直管内特征截面温度分布

Fig.11 Temperature distributions on characteristic cross-sections of the horizontal straight pipe

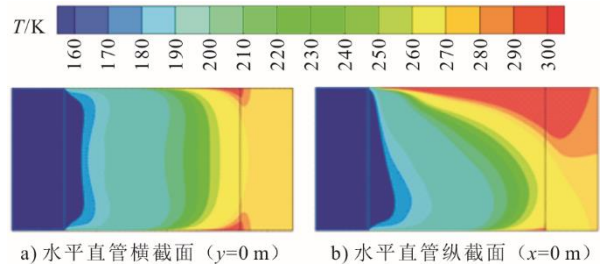


图 12 水平直管横、纵截面温度云图

Fig.12 Cloud images of temperature in transverse and longitudinal section of the horizontal straight pipe

$\text{CH}_4\text{-H}_2$  混合工质在水平管道内流动，图 12a) 中流体温度出现梯度变化，是由于管内近壁侧升温较快。图 12b) 的现象是由于浮升力使高密度低温流体贴附于下壁面附近，下壁面换热得到强化，高温低密度流体由下壁面向上壁面迁移。

图 13 为格拉晓夫数  $Gr$  随流动距离的变化。可以看出， $Gr$  在  $Z=1.00 \text{ m}$  附近达到峰值，此时上、下壁面温差达到最大值，导致浮升效应最强，冷流体在通道顶部竖直向下流动，热流体在通道底部沿通道两侧向上流动（图 14），在  $Z=1.00 \text{ m}$  处，两股冷流体在通道顶部形成对流，产生两个新的涡流，削弱了上壁面换热恶化程度，验证了图 9 中上壁面温度在  $Z=1.00 \text{ m}$  附近不再急剧上升的现象。随后，这两股涡流在  $Z=0.80 \text{ m}$  附近消失。

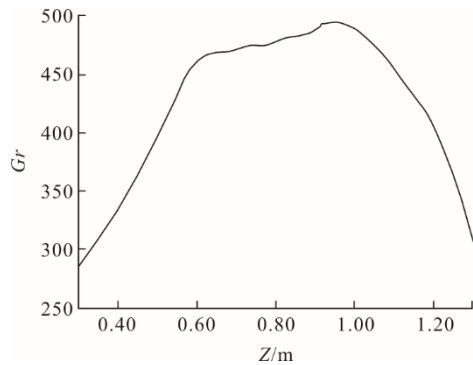


图 13  $Gr$  随流动距离的变化

Fig.13 Changes of  $Gr$  with flow distance

### 2.4 质量流速对传热的影响

图 14 为不同质量流速对超临界甲烷掺氢混合工质换热的影响。可以看出， $\text{CH}_4\text{-H}_2$  (90%/10%) 二元混合工质在质量流速  $G=150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时，在  $Z=1.20 \text{ m}$  处提前产生一对新的涡流。

随着质量流速的增加，上、下壁面换热系数均明显上升（图 15），下壁面换热系数峰值远离入口处，上壁面换热恶化程度减小，对比混合工质质量

流速  $G=150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  工况,  $G=250 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时下壁面换热系数增加了 55.9%, 上壁面换热系数增加了 47.6%。由此可知, 在圆形直管道下壁面处, 质量流

速越大, 工质达到拟临界温度所需流动距离越长, 换热恶化开始阶段越远离入口, 浮升力作用所引起的一对新涡流越晚出现, 强化换热段也随之推迟出现。

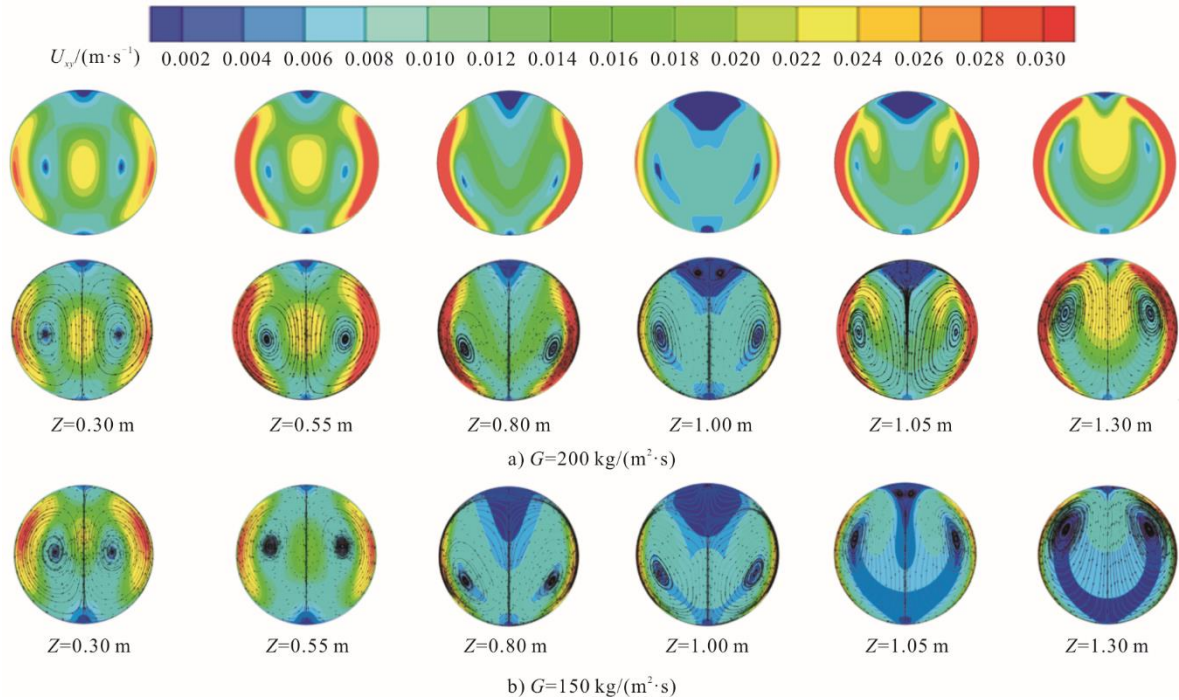


图 14 水平直管截面速度分布云图

Fig.14 Contour map of cross-sectional velocity distribution in the horizontal straight tube

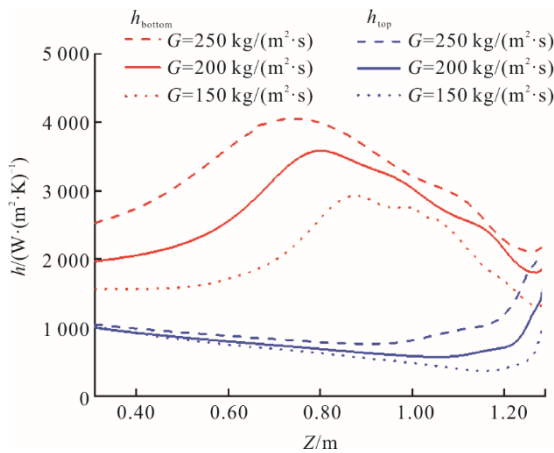


图 15 质量流速对换热系数的影响

Fig.15 Effect of mass flow velocity on heat transfer

对于圆形直管道上壁面, 增大质量流速会削弱浮升力对主流体的影响, 如图 16 所示。在较高质量流速下, 近上壁面流体密度梯度较为密集, 即热边界层变薄, 换热恶化效果减弱, 因此增大质量流速可削弱由浮升力影响的换热恶化程度。

### 2.5 热流密度对传热的影响

图 17 为  $P=8 \text{ MPa}$ 、 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,  $\text{CH}_4\text{-H}_2$  (90%/10%) 二元混合工质换热系数沿管长的变化规律。

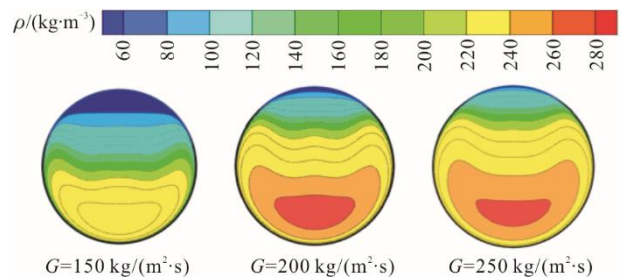


图 16 质量流速对流体密度的影响

Fig.16 Effect of mass flow velocity on density of the fluid

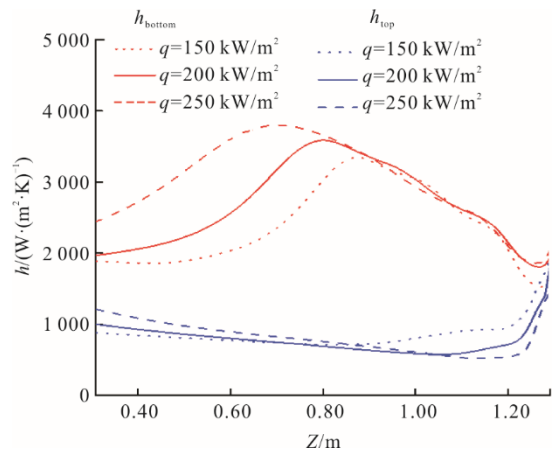


图 17 热流密度对换热系数的影响

Fig.17 Effect of heat flux density on heat transfer coefficient

对比热流密度  $150 \text{ kW/m}^2$  工况, 热流密度为  $250 \text{ kW/m}^2$  时, 上壁面换热系数下降了  $5.6\%$ , 且前半程较为明显, 这是由于热流密度的增加导致类气膜形成较早, 换热恶化程度比较剧烈。下壁面换热系数整体增加了  $26.55\%$ , 且前半程变化较小, 后半程明显变大。这是由于前半程热流密度增加, 下壁面温度急剧升高, 下壁面温度与主流温度的差值也较大, 热流密度与温差的比值变化较小, 换热系数变化趋于平缓。而在后半程, 换热系数增大是因为主流温度已超过拟临界温度, 工质比热容下降, 主流升温速率加快。此时, 下壁面温度与主流体温差的变化较小, 而热流密度在增加, 根据式(6), 热流密度与温差的比值(即换热系数)显著增大。

### 3 结 论

通过数值模拟对比了  $\text{CH}_4$  及不同掺氢比的  $\text{CH}_4\text{-H}_2$  混合工质在水平直管中的传热特性, 分析了掺氢比对混合工质热物理性质及换热过程的影响, 讨论了质量流速和热流密度对换热特性的影响, 主要结论如下:

1) 随掺氢比增大, 混合工质拟临界压力增大, 拟临界温度略有升高(掺氢比低于  $2\%$  时)随后降低且降低速率增加, 流体与壁面之间换热系数增大。

2) 当掺氢比从  $0$  增加到  $15\%$  时, 下壁面平均换热系数增加了  $44\%$ , 上壁面平均换热系数增加了  $38\%$ 。同时, 伴随着混合工质拟临界温度的降低, 其比热容的峰值提前到达, 流体与下壁面的换热系数峰值提前出现。

3) 对比质量流速  $150 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  工况, 混合工质在质量流速  $250 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  时, 下壁面换热系数增加了  $55.9\%$ , 上壁面换热系数增加了  $47.6\%$ 。质量流速的增加延迟了下壁面换热系数峰值的出现, 削弱了上壁面由浮升力引起的换热恶化程度。相较于热流密度  $150 \text{ kW/m}^2$  工况, 热流密度为  $250 \text{ kW/m}^2$  时上壁面换热系数下降了  $5.6\%$ , 下壁面换热系数整体增加了  $26.55\%$ 。综上所述, 增大质量流速能显著强化上、下壁面换热并抑制浮升力导致的恶化效应; 而增加热流密度虽强化了下壁面换热, 但因其类气膜提前形成而削弱了上壁面换热。二者对换热的强化程度和机理有所不同。

#### [参 考 文 献]

[1] 王长顺, 宋昕洋, 杨帆, 等. 利用液化天然气冷能的冷热电联供系统热力分析与优化[J]. 热力发电, 2024,

- 53(11): 21-30.  
WANG Changshun, SONG Xinyang, YANG Fan, et al. Thermal analysis and optimization of combined cooling, heating and power system using LNG cold energy[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 21-30.
- [2] 陈旭阳, 杨帆, 姜文全, 等. 基于 LNG 冷能的卡琳娜-三级有机朗肯循环性能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2024, 44(5): 90-96.  
CHEN Xuyang, YANG Fan, JIANG Wenquan, et al. Performance analysis of the Kalina-Three-Stage Organic Rankine combined cycle based on LNG cold energy[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2024, 44(5): 90-96.
- [3] 王彦红, 蒋雷, 薛帅, 等. 预冷通道中超临界甲烷换热特性分析[J]. 化工进展, 2024, 43(4): 1690-1699.  
WANG Yanhong, JIANG Lei, XUE Shuai, et al. Analysis on heat transfer characteristics of supercritical methane inprecooling channels[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(4): 1690-1699.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 许伟聪, 邓帅, 张建元, 等. 基于混合工质组分调节的热力循环构建研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4104-4116.  
XU Weicong, DENG Shuai, ZHANG Jianyuan, et al. Progress of thermodynamic cycle construction based on mixed working fluid composition regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4104-4116.
- [8] 吕森林, 李加兴, 胡二江, 等. 甲烷掺混氢气长直管道压力振荡特性研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(3): 908-914.  
LYU Senlin, LI Jiaying, HU Erjiang, et al. Study on pressure oscillation characteristics of methane mixed with hydrogen in long straight tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(3): 908-914.
- [9] 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.
- [10] DING L, WANG X, NIU M, et al. Numerical investigation of supercritical flow and heat transfer mechanism in printed circuit heat exchanger (PCHE) channels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 62: 31-47.
- [11] 于博文, 李浩然, 洪文鹏, 等. 超临界  $\text{CO}_2$ -丙烷混合物管内传热特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(2): 465-471.  
YU Bowen, LI Haoran, HONG Wenpeng, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics for supercritical  $\text{CO}_2$ -propane mixture in tubes[J]. Journal of Engineering

- Thermophysics, 2022, 43(2): 465-471.
- [12] 林智博, 陶乐仁, 邱晗, 等. 超临界 CO<sub>2</sub>/R41 混合工质在螺旋槽管内冷却流动传热特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9): 793-799.  
LI Zhibo, TAO Leren, QIU Han, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub>/R41 mixtures in spirally fluted tube[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9): 793-799.
- [13] 武文华, 张鑫奕, 闫晨帅, 等. 基于传热阻力的超临界 CO<sub>2</sub>-Xe 混合工质对流换热特性数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8948-8957.  
WU Wenhua, ZHANG Xinyi, YAN Chenshuai, et al. Numerical analysis on characteristics of supercritical CO<sub>2</sub>-Xe mixture convective heat transfer based on heat transfer resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8948-8957.
- [14] 刘佳, 张信荣, 徐建阳. CO<sub>2</sub>/DME 混合工质在水平管内对流换热的数值研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2011, 33(3): 110-114.  
LIU Jia, ZHANG Xinrong, XU Jianyang. Numerical Study on convective heat transfer of CO<sub>2</sub>/DME mixture in a horizontal tube[J]. Journal of Xiangtan University, 2011, 33(3): 110-114.
- [15] 贾冠伟, 张子扬, 许未晴. 掺氢天然气的热物理特性研究进展[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(30): 12817-12827.  
JIA Guanwei, ZHANG Ziyang, XU Weiqing. Review of Thermophysical properties of hydrogen-blended into natural gas[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(30): 12817-12827.
- [16] TABKHI F, AZZARO-PANTEL C, PIBOULEAU L, et al. A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(21): 6222-6231.
- [17] 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.
- [18] 海笑, 姜文全, 高月, 等. 超临界甲烷在矩形通道内传热特性研究[J]. 低温工程, 2024(3): 28-37.  
HAI Xiao, JIANG Wenquan, GAO Yue, et al. Study on heat transfer characteristics of supercritical methane in rectangular channel[J]. Cryogenics, 2024(3): 28-37.
- [19] HAEMISCH J, SUSLOV D, OSCHWALD M. Experimental and numerical investigation of heat transfer processes in rocket engine cooling channels operated with cryogenic hydrogen and methane at supercritical conditions: full article[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2021, 19(1): 96-105.
- [20] YIN D D, ZHOU Y L, GUO X T. Study on heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub>/propane mixtures in vertical tube[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 196: 110223.
- [21] 尹丹丹, 周云龙, 郭新田, 等. 上升管内超临界 CO<sub>2</sub>/丙烷混合物传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(11): 3446-3456.  
YIN Dandan, ZHOU Yunlong, GUO Xintian, et al. Study on heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub>/propane mixtures in upward pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(11): 3446-3456.
- [22] 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.
- [23] 李澎煜, 林曦鹏, 王亮, 等. 竖直波纹流道内超临界氮气流动与传热研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2605-2614.  
LI Pengyu, LI Xipeng, WANG Liang, et al. Study on supercritical nitrogen flow and heat transfer characteristics in a vertical corrugated channel[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8): 2605-2614.
- [24] 于博文, 何孝天, 徐进良. 超临界 CO<sub>2</sub> 池式换热实验与数值模拟研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(4): 636-644.  
YU Bowen, HE Xiaotian, XU Jinliang. Experiment and numerical simulation of supercritical CO<sub>2</sub> pool heat transfer[J]. Scientia Sinica, 2024, 54(4): 636-644.
- [25] GU H, LI H, WANG H, et al. Experimental investigation on convective heat transfer from a horizontal miniature tube to methane at supercritical pressures[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 490-498.
- [26] 王玮, 王秋岩, 邓海全, 等. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130-136.  
WANG Wei, WANG Qiuyan, DENG Haiquan, et al. Feasibility analysis on the transportation of hydrogen-natural gas mixtures in natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 130-136.
- [27] CHENG H, ZHAO J Y, ROWINSKI M K. Study on two wall temperature peaks of supercritical fluid mixed convective heat transfer in circular tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 257-267.

(责任编辑 李园)