

【航空动力系统】

方形通道内超临界压力正癸烷
对流换热数值分析

王彦红, 于慧文, 邵 璋

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要:针对超燃冲压发动机热防护中碳氢燃料的再生冷却问题,对顶壁面恒定温度条件下方形通道内超临界压力正癸烷的对流换热进行了数值研究。详细分析了流固耦合下的对流换热机制,考察了运行压力和质量流速对换热的影响,建立了内壁面平均热流密度的预测关系式。结果表明:通道内壁面热流密度和换热系数随质量流速提高而增大;顶壁面流体比热容达到峰值后,近壁流体的体积热容大幅下降,出现了换热能力急剧减弱和热流异常分布的耦合现象,该现象在运行压力靠近临界压力的情况下尤为突出,压力提高到 5 MPa 以后则不再出现;内壁面热流密度的预测误差处于 $\pm 15\%$ 的范围。

关键词:超临界压力;正癸烷;对流换热;热流传导;预测关系式

中图分类号: V 231.1 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.006

0 引言

碳氢燃料(如正癸烷)作为冷却剂在超燃冲压发动机的再生冷却中发挥着重要作用。再生冷却通道内碳氢燃料工作于超临界压力下,强变热物性导致了复杂的流动传热问题^[1]。因此,通道内碳氢燃料的超临界对流换热是目前研究热点^[2-3]。

国内外学者对超临界压力下碳氢燃料的对流换热已开展了一定的研究。Zhu 等^[4]探究矩形通道正癸烷的超临界换热机制,提出强浮升力可促进正癸烷竖直向下流动的湍流强度,削弱正癸烷竖直向上流动的湍流强度,向下流动较之向上流动的换热效果更好。罗毓珊等^[5]研究表明,随着通道外表面热流密度升高,通道内航空煤油会出现正常换热、拟沸腾换热、类膜态沸腾换热、热裂解换热等换热过程。Zuo 等^[6]探究振动对碳氢燃料传热特性的影响,发现振动通过干扰热边界层的发展使进口段的换热增强,且传热的增强效果随雷诺数的增大而减弱。Dong 等^[7]提出一种翼型冷却通道,其通过改变热物性和旋流显著增强了换热效果,换热系数提高 24%。Wang 等^[8]进行内置螺旋线圆管中正癸烷换热研究,内置螺旋线形成螺旋流动冲刷壁面,换热能力提高。赵国柱和 Dang 等对碳氢燃料的换热进行了数值研究,发现壁温高于碳氢燃料拟临界温度后,正癸烷热物性剧变导致流速出现“M”型^[9],航空煤油热物性剧变引起湍动能下降^[10],这是传热恶化的原因。Sun 等^[11]探讨了浮升力对再生冷却通道内航空煤油换热的影响,观察到二次流和热流重新分配主导的换热过程,二次流和热流重新分配可以提升换热性能。陈尊敬和王雷雷等^[12-13]分别

收稿日期:2024-11-08

基金项目:吉林省教育厅科技项目(JJKH20220100KJ)

第一作者简介:王彦红(1983—),男,河北张家口人,副教授,博士,主要从事超临界碳氢燃料传热传质研究。

E-mail:wangyh.526@163.com

考察了方形通道内甲烷和航空煤油的冷却换热问题,当通道加热侧内壁面换热较弱时,热流会更多地传导到侧壁面,即热传导和超临界换热存在耦合机制,甲烷作为冷却剂的耦合机制相比航空煤油更加显著。对于再生冷却通道,热负荷并不施加在通道全周,固壁热传导和流动换热存在耦合机制^[14-15]。已有再生冷却换热研究集中于外壁面非对称施加恒定热流密度的情况,而外壁面非对称温度条件下对流换热和固壁热传导的耦合机制,还少见报道。

本文对顶壁面定温条件下方形通道内超临界压力时正癸烷的换热进行数值研究,探究运行压力和质量流速对换热的影响,着重分析传热恶化的形成机制,解决通道内侧平均热流密度的预测问题,研究成果可为再生冷却通道的设计提供理论指导。

1 数理模型与数值方法

1.1 物理模型

图 1 为方形通道的物理模型。方形通道的内截面为 2 mm×2 mm 的正方形,固体壁厚为 0.5 mm,通道总长为 900 mm。进口绝热段和出口绝热段均为 150 mm,用以保证进口流动的充分发展和减少出口边界条件的影响。中间 600 mm 为加热段,顶壁面施加恒定壁温边界。正癸烷进口给定质量流速和温度,出口设定为静压边界,进口和出口的壁面设定为绝热边界,即设定热流密度为 0 W/m²。固体和流体之间的耦合作用通过流固交界面的温度和热流密度相等来实现。计算模型关于 y 轴对称,取通道一半区域进行研究,以节省计算时间。

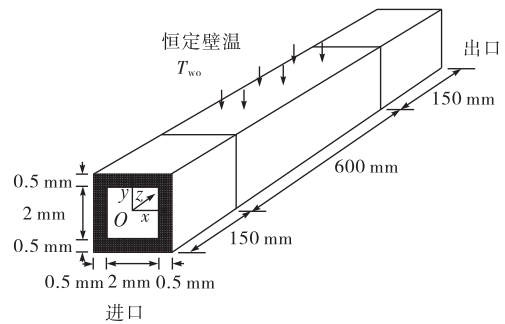


图 1 物理模型示意图

计算参数的设定如下:正癸烷进口温度为 425 K,中间加热段外壁面温度 $T_{w0} = 900$ K,压力 $p = 3 \sim 6$ MPa,质量流速 $G = 800 \sim 2\,000$ kg/(m²·s)。正癸烷的热裂解起始温度为 760 K,当通道出口温度低于该温度时可以忽略热裂解的影响。设计工况中通道出口温度均在 700 K 以下,不设置热裂解模型^[16-17]。

1.2 控制方程

数值计算需要求解流体域控制方程和固体域控制方程。流体域的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程,固体域求解热传导方程。湍流模型选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,并结合增强壁面处理方法,湍流模型如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_\epsilon \mu_e \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon. \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; u 为流速; k 为湍动能; ϵ 为耗散率; a_k 和 a_ϵ 为湍流普朗特数; $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, $C_{3\epsilon} = 0.0845$; G_k 为源于剪切力的湍流产生项; R_ϵ 为附加项。

1.3 数值方法

对通道计算域进行结构化网格划分,固体域和流体域近壁面网格均做了加密,以获得满足精度的计算数据。

超临界压力(2.1 MPa)下正癸烷的热物性参数(密度 ρ 、定压比热容 c_p 、热导率 λ 、动力黏度 μ)取自文献[9],图 2 给出密度和定压比热容随温度的变化情况。密度、定压比热容、热导率、动力黏度均采用分段线性函数的形式,通过插值法实时获取。固壁材料选用不锈钢 1Cr18Ni9Ti,热导率 $\lambda = 0.015\,25T + 10.6$,

单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

基于有限容积法离散控制方程,对流项和扩散项离散均选用了二阶迎风格式,选用 SIMPLEC 算法处理压力和速度的耦合,利用 Fluent 提供的双精度分离求解器进行计算。

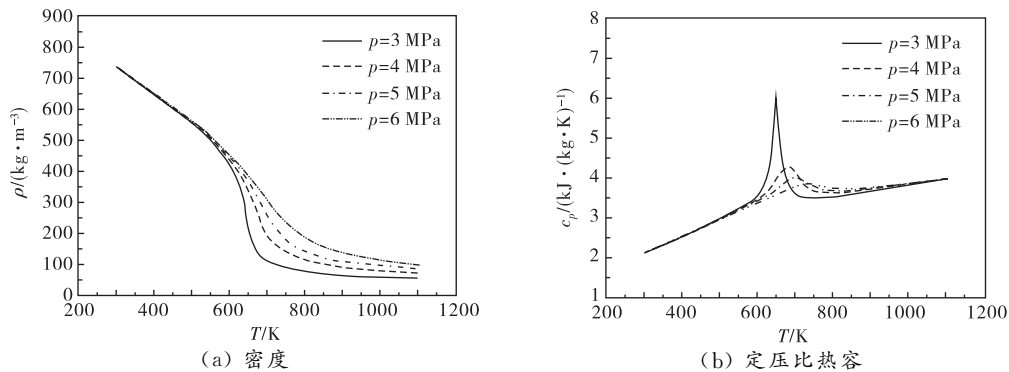


图2 密度和定压比热容随温度的变化情况

数值计算之前,开展了网格独立性分析。网格方案分为五组,通过截面网格数和轴向网格数来表征,依次为 $1\ 500 \times 1\ 000$ 、 $2\ 600 \times 1\ 000$ 、 $3\ 400 \times 1\ 000$ 、 $2\ 600 \times 600$ 、 $2\ 600 \times 1\ 800$ 。质量流速为 $1\ 000\ kg/(m^2 \cdot s)$,运行压力为 $3\ MPa$ 时对应的出口温度为 $686\ K$ 、 $691\ K$ 、 $691\ K$ 、 $687\ K$ 、 $691\ K$ 。因此,采用 $2\ 600 \times 1\ 000$ 的网格方案满足网格无关性要求,可以用于数值计算。

1.4 模型验证

以水平微管内超临界压力正癸烷的换热实验数据^[18]进行模型验证。文献[18]中管材料为不锈钢 $1Cr18Ni9Ti$,管内径为 $1.5\ mm$,壁厚为 $0.75\ mm$,加热段长度为 $1.3\ m$ 。实验工况为压力 $4\ MPa$ 、质量流速 $702\ kg/(m^2 \cdot s)$ 、热流密度 $299\ kW/m^2$ 。

图3给出了管外壁温度和努塞尔数沿流动方向的变化情况。可以看到,管外壁温度和努塞尔数计算值与实验结果相对误差分别为 4.64% 和 6.09% ,均在 10% 以内,证明本文采用的湍流模型可靠,计算结果具有较高的精度。

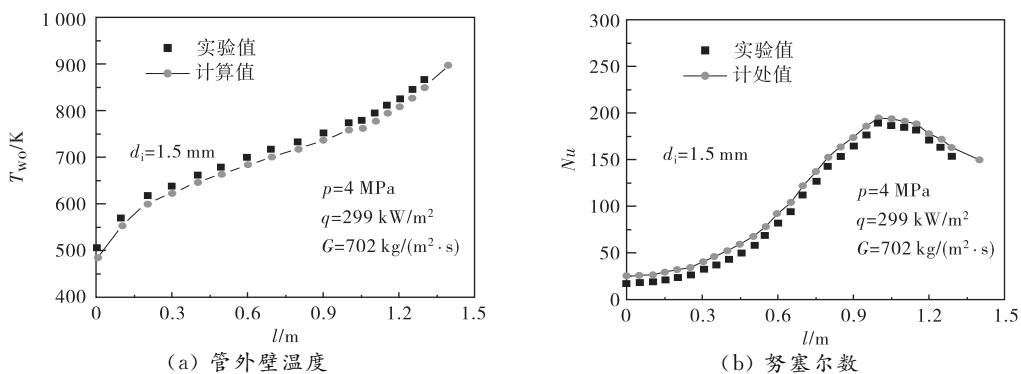


图3 湍流模型验证

2 数值结果与分析

2.1 运行压力的影响

本节考察运行压力对通道内超临界换热的影响。正癸烷质量流速为 $1\ 000\ kg/(m^2 \cdot s)$,运行压力为 $3 \sim 6\ MPa$ 。

图4给出了不同压力下顶壁面换热参数沿流动方向的变化情况。由图4(a)和图4(b)可知,顶壁面温度沿流动方向平缓增加,主流温度逐渐增大,压力改变对管壁温度的影响可以忽略。压力提高导致主流比

热容减小,热平衡条件下通道下游的主流温度升高。图 4(c)和图 4(d)表明,压力为 3 MPa 时,热流密度在 $l=180$ mm 位置出现异常下降,换热系数下降,说明该压力下存在热流密度异常分配导致的换热弱化问题。这是因为压力接近拟临界压力时壁面附近正癸烷的热导率较低,壁面边界层传热热阻较大,热流分配减小,换热减弱。

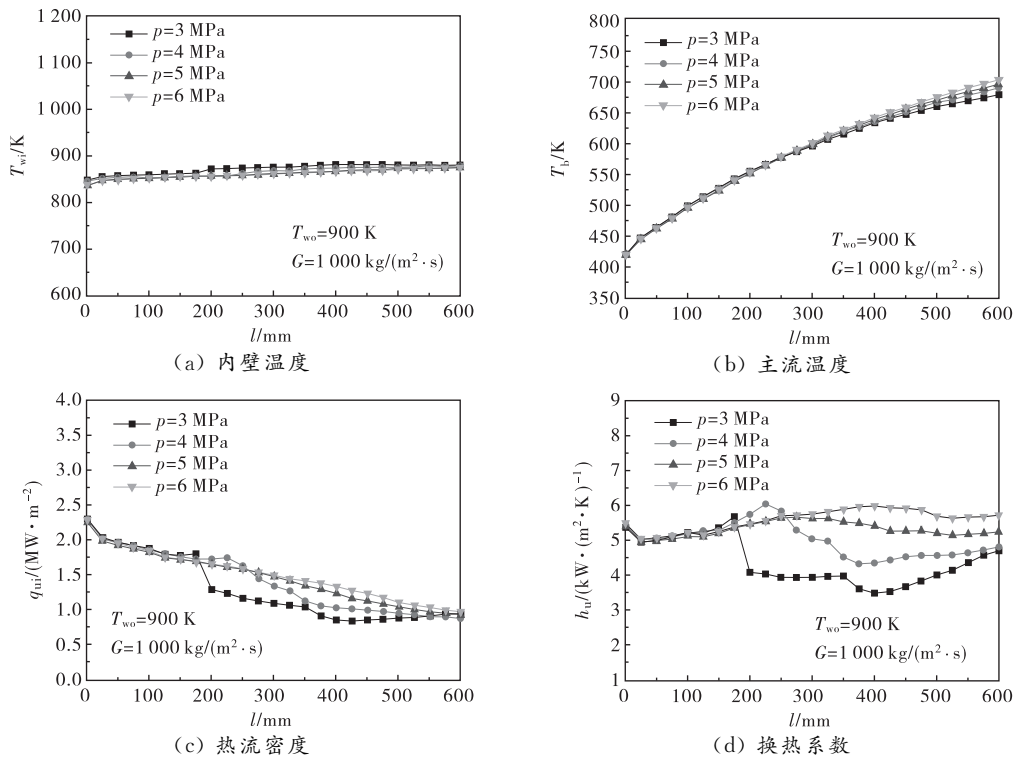


图 4 不同压力下顶壁面换热参数沿流动方向的变化情况

随着压力提高到 4 MPa,顶壁面热流密度增大,热流密度异常下降的起始位置后延,换热得到改善和提高。压力提高到 5 MPa 后,热流密度沿流动方向线性下降,热流密度异常下降不再出现,换热系数不再下降。压力为 6 MPa 时,热流密度和换热系数相比压力为 5 MPa 时进一步提高。换热系数的变化特征与热流密度相似,说明热流密度分布决定了顶壁面换热能力的强弱。

图 5 给出了不同压力下侧壁面换热参数沿流动方向的变化情况。

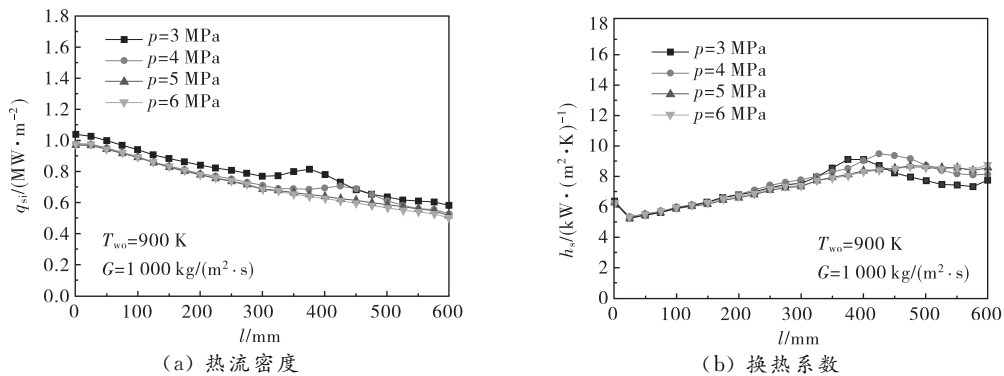


图 5 不同压力下侧壁面换热参数沿流动方向的变化情况

由图 5 可以看到,压力为 3 MPa 时,侧壁面热流密度在 $l=300$ mm 位置开始出现峰值,说明顶壁面热流密度异常下降导致热流更多的向侧壁面传导,侧壁面热流密度异常增大位置滞后于顶壁面热流密度异常下降位置。压力为 4 MPa 时,侧壁面热流密度峰值下降且延后出现。压力为 5 MPa 和 6 MPa 时,侧壁

面热流密度沿流动方向线性下降。侧壁面换热系数也取决于热流密度分布情况,压力为 3 MPa 和 4 MPa 时,侧壁面换热系数出现局部峰值,换热系数峰值位置与热流密度峰值位置相对应,高压时换热系数峰值延后出现。压力为 5 MPa 和 6 MPa 时,换热系数沿流动方向平缓变化,而且两种压力下的换热没有差别。压力为 5 MPa 时具有最好的换热状况,可以避免顶壁面热流异常下降带来的换热削弱,继续提高运行压力对改善换热性能几乎没有作用。

图 6 给出了通道截面温度分布情况。由图 6 可以看出,压力为 3 MPa 和 6 MPa 时固壁温度分布相近。随着压力提高,流体温度等值线向底部偏移,说明顶壁面附近流体温度分布不同。因为不同压力下正癸烷热物性的变化有很大差别,顶壁面的换热状况存在较大差别,在下文中通过顶壁面流体比热容进行分析。

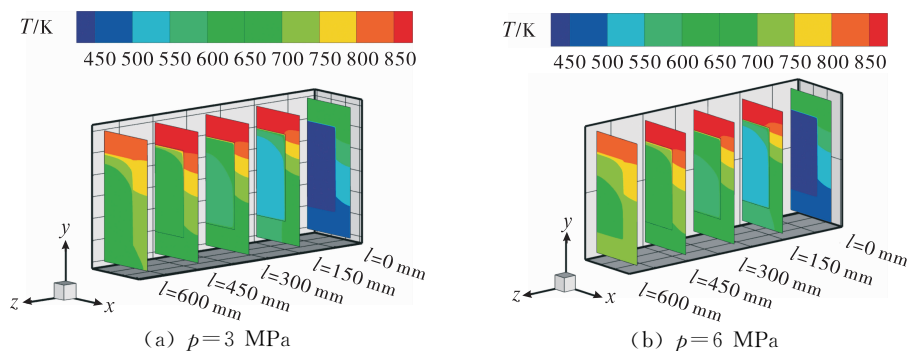


图 6 通道截面温度分布情况

图 7 给出了不同压力下顶壁面流体体积热容比值(即壁面流体体积热容 $(\rho c_p)_{wi}$ 与主流流体体积热容 $(\rho c_p)_b$ 的比值)沿流动方向的变化情况。由图 7 可以看到,沿流动方向,体积热容比值呈现了与图 4(c)热流密度相似的变化规律。通道顶壁面流体比热容达到峰值后,顶壁流体体积热容与主流流体体积热容相比较小,单位体积流体吸热能力大幅下降,热流不能被及时吸收,故而更多地传递到侧壁面,通过侧壁流体的对流换热吸收。压力为 3 MPa 时,顶壁面体积热容下降更突出,顶壁面流体吸热能力更弱,顶壁面热流密度向侧壁面传递更加显著。随着压力提高,正癸烷密度和热容比随温度的变化趋于平缓,通道内顶壁面热流异常分布逐渐减弱。压力达到 5 MPa 以后,由吸热能力减弱引起的热流异常分布现象不再出现。

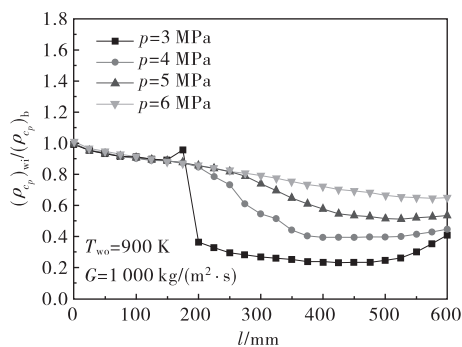


图 7 $(\rho c_p)_{wi}/(\rho c_p)_b$ 沿流动方向的变化

2.2 质量流速的影响

正癸烷压力为 3 MPa,质量流速为 1 000~1 600 kg/(m²·s)。图 8 给出了不同质量流速下顶壁面换热参数沿流动方向的变化情况。由图 8(a)可以看到,质量流速提高有利于提升换热效果,通道上游管壁温度有所下降,通道下游管壁温度基本不受影响。图 8(b)中,根据热量守恒,质量流速提高相当于流量增大,同一截面相对进口的温升减小,故主流温度下降。图 8(c)和图 8(d)中,质量流速改变影响顶部固壁的热传导过程,高质量流速下顶壁面承担的热流密度更高,换热系数随之增加。说明质量流速改变对流固耦合产生影响,进而改变热传导和内壁面热流的分配,因为高质量流速具有提升换热能力的作用,顶壁面的热流密度更多。

图 9 给出了不同质量流速下侧壁面换热参数沿流动方向的变化情况。由图 9 可见,随着质量流速提高,侧壁面热流密度也增大,且高质量流速下侧壁面热流密度峰值向通道下游移动。这说明高质量流速有

利于热传导过程,侧壁面分配的热流密度增大,整体热防护需求条件下顶壁面和侧壁面热传导加强,顶壁面和侧壁面的热流密度增大,底壁面几乎不发挥再生冷却作用。

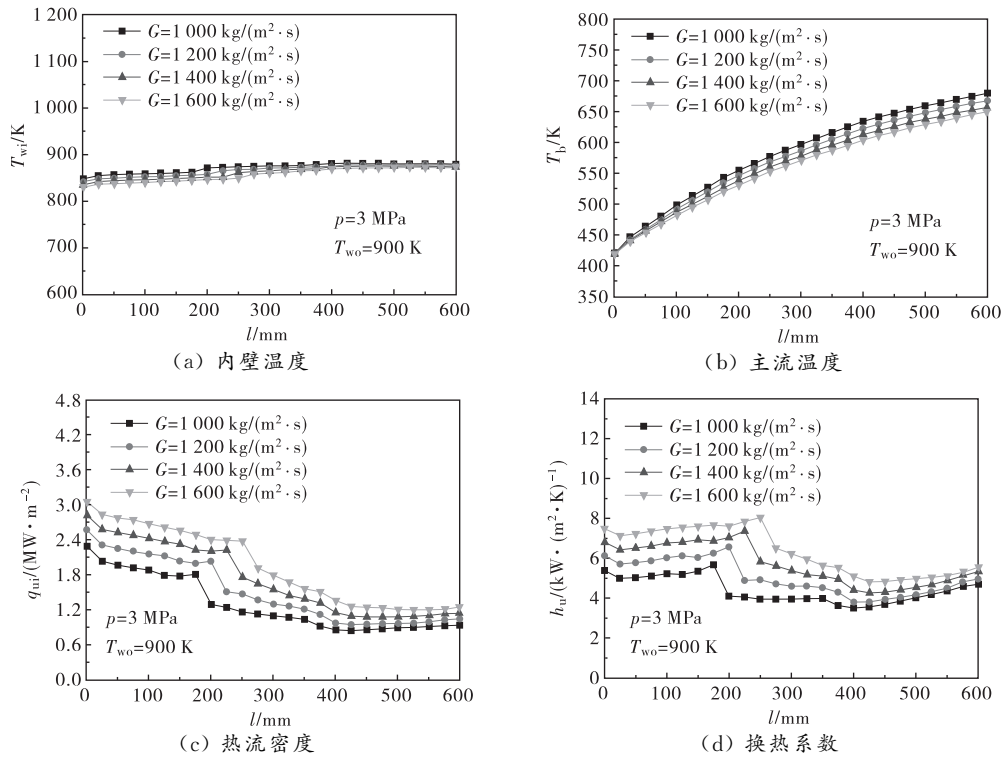


图 8 不同质量流速下顶壁面换热参数沿流动方向的变化情况

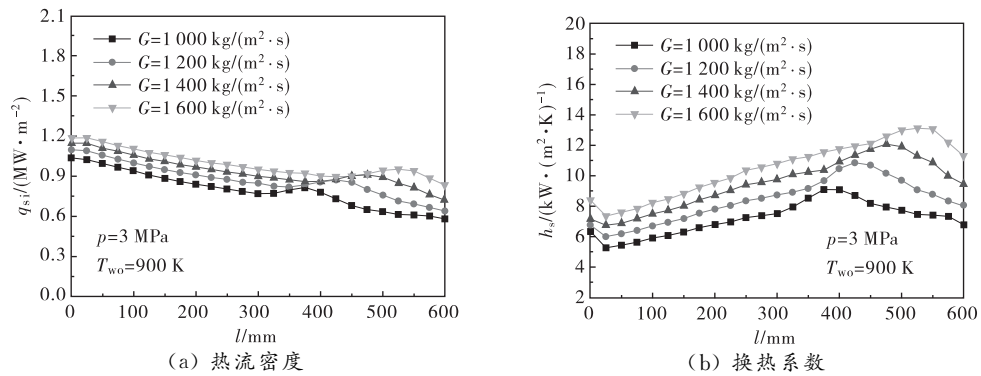


图 9 不同质量流速下侧壁面换热参数沿流动方向的变化情况

2.3 内壁热流密度预测

前述分析表明,通道内壁热流密度沿流动方向呈非均匀分布,且顶壁面和侧壁面的热流密度分布特征不同,特别是低压力时的热流密度分布情况更加复杂,这与圆管内壁热流密度沿流动方向均匀分布有明显差别。因此,对通道内壁热流密度进行预测,显得尤为必要。 q_{wi} 和 q_{si} 分别表示顶壁面和侧壁面的平均热流密度,通道内壁热流密度通过顶壁面流体与主流体体积热容的比值进行表征。基于数值结果,采用多元线性回归,建立了 q_{wi} 和 q_{si} 的预测关系式,顶壁面和侧壁面表达形式分别为

$$\frac{q_{wi}}{q_{re}} = 0.0013 Re^{0.52} Pr^{1.52} \left(\frac{(\rho c_p)_{wi}}{(\rho c_p)_b} \right)^{0.41}, \tag{3}$$

$$\frac{q_{si}}{q_{re}} = 0.005 Re^{0.33} Pr^{1.25} \left(\frac{(\rho c_p)_{wi}}{(\rho c_p)_b} \right)^{-0.04}. \tag{4}$$

式中: q_{wi} 和 q_{si} 的单位为 MW/m^2 ; q_{re} 为参考热流密度,取 $1 \text{ MW}/\text{m}^2$; Re 为主流雷诺数; Pr 为主流普朗特数。两式的适用条件为: $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq G \leq 2000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $3 \text{ MPa} \leq p \leq 6 \text{ MPa}$ 。通过式(3)和式(4)可以分别对顶壁面和侧壁面的热流密度进行预测。

图10给出了通道内壁面热流密度经验公式值与数值结果的比较情况。由图10可以看到,两热流密度关系式预测值和计算值均符合良好,相对误差基本在 $\pm 15\%$ 以内,仅有2个预测数据相对误差略超过 -15% ,表明拟合关系式具有可靠的精度。

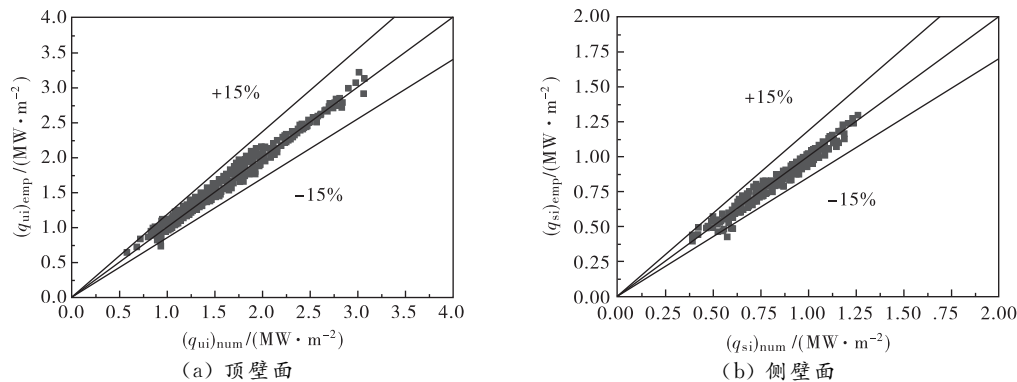


图10 通道内壁面热流密度经验公式值与数值结果的比较情况

3 结论

对顶壁面外侧施加恒定温度条件下方形通道内超临界压力正癸烷的对流换热进行了数值研究,得到如下结论:

(1) 相同外壁温度条件下,质量流速和压力对顶壁面温度的影响较弱。压力为 3 MPa 时,顶壁面热流密度出现异常下降,造成顶壁面的换热削弱。通道侧壁面热流密度出现异常增大,侧壁面热流密度峰值位置滞后于顶壁面热流密度谷值位置,侧壁面热流密度突增导致局部换热增强。压力提高到 4 MPa 时,通道内壁面热流密度异常分配趋于通道下游,且受到削弱。压力为 5 MPa 和 6 MPa 时,热流异常分配观察不到,热流异常分配造成的顶壁面换热削弱不再出现。

(2) 随着质量流速提高,换热能力增强,顶壁面和侧壁面热流密度均增大,顶壁面和侧壁面换热均增强。随着质量流速提高,热流密度异常分配起始位置趋于通道下游。

(3) 顶壁面流体定压比热容达到峰值后,壁面附近正癸烷体积热容相比主流体热容显著下降,流体吸热能力下降,顶壁面热流密度异常减小,热流更多地由侧壁面吸收,这是通道内壁面热流密度异常分配的原因。

(4) 基于顶壁面流体与主流体体积热容比值,建立了顶壁面和侧壁面热流密度的预测关系式,预测数据与数值数据的误差处于 $\pm 15\%$ 的范围。

参考文献:

- [1] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 2009, 23(3): 543-550.
- [2] HUANG D, RUAN B, WU X Y, et al. Experimental study on heat transfer of aviation kerosene in a vertical upward tube at supercritical pressures [J]. Chinese journal of chemical engineering, 2015, 23(2): 425-434.
- [3] 张斌, 张春本, 邓宏武, 等. 超临界压力下碳氢燃料在竖直圆管内换热特性 [J]. 航空动力学报, 2012,

- 27(3):595-603.
- [4] ZHU J Q,ZHAO C F,CHENG Z Y,et al. Experimental investigation on heat transfer of n-decane in a vertical square tube under supercritical pressure[J]. International journal of heat and mass transfer,2019,138:631-639.
- [5] 罗毓珊,陈昕宽,胡志宏,等. 高参数小管径内煤油的传热特性研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(4):609-612.
- [6] ZUO Y,HUANG H R,FU Y C,et al. Vibration effects on heat transfer characteristics of supercritical pressure hydrocarbon fuel in transition and turbulent states[J]. Applied thermal engineering,2023,219:119617.
- [7] DONG M Q,HUNG H Y. Investigation of supercritical pressure hydrocarbon fuel heat transfer performance in rotating wing shape channels with different wing structural parameters[J]. Case studies in thermal engineering,2024,62:105144.
- [8] WANG H D,XU R N,JIANG P X,et al. Investigation on heat transfer enhancement of supercritical hydrocarbon fuel in rotating channel interpolated with spiral wire[J]. Applied thermal engineering,2024,248:123151.
- [9] 赵国柱,宋文艳,张若凌,等. 超临界压力下正十烷流动传热的数值模拟[J]. 推进技术,2014,35(4):537-543.
- [10] DANG G X,ZHONG F Q,ZHANG Y J,et al. Numerical study of heat transfer deterioration of turbulent supercritical kerosene flow in heated circular tube[J]. International journal of heat and mass transfer,2015,85:1003-1011.
- [11] SUN X,MENG H,ZHENG Y. Asymmetric heating and buoyancy effects on heat transfer of hydrocarbon fuel in a horizontal square channel at supercritical pressures[J]. Aerospace science and technology,2019,93:105358.
- [12] 陈尊敬,王雷雷,孟华. 考虑发动机冷却通道固壁内耦合导热影响的低温甲烷超临界压力传热研究[J]. 航空学报,2013,34(1):8-18.
- [13] 王雷雷,徐可可,孟华. 航空煤油超临界压力流/固/热耦合数值模拟[J]. 工程热物理学报,2013,34(7):1357-1360.
- [14] 王彦红,李素芬,东明. 方形再生冷却通道内超临界正癸烷湍流传热数值研究[J]. 推进技术,2015,36(11):1669-1676.
- [15] WANG L L,CHEN Z J,MENG H. Numerical study of conjugate heat transfer of cryogenic methane in rectangular engine cooling channels at supercritical pressure[J]. Applied thermal engineering,2013,54(1):237-246.
- [16] RUAN B,MENG H,YANG V. Simplification of pyrolytic reaction mechanism and turbulent heat transfer of n-decane at supercritical pressures[J]. International journal of heat and mass transfer,2014,69:455-463.
- [17] DANG G X,ZHONG F Q,CHEN L H,et al. Numerical investigation on flow and convective heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J]. Science China technological sciences,2013,56(2):416-422.
- [18] ZHANG L,ZHANG R L,XIAO S D,et al. Experimental investigation on heat transfer correlation of n-decane under supercritical pressure[J]. International journal of heat and mass transfer,2013,64:393-400.

Numerical analysis on convective heat transfer of n-decane in regenerative cooling channel

WANG Yanhong, YU Huiwen, SHAO Zhang

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Numerical study on convective heat transfer of supercritical-pressure n-decane in a square channel under constant top-wall temperature conditions was performed, focusing on the regenerative cooling problem of hydrocarbon fuel in the thermal protection of scramjet engines. A detailed analysis was conducted on the convective heat transfer mechanism under fluid-solid coupling, and the effects of operating pressure and mass flux on heat transfer were examined. The predictive correlations were established for the average heat flux on the inner-walls. The results show that the heat flux and heat transfer coefficient on the channel inner-wall increases with the increase of mass flux. After the fluid specific heat capacity near the top-wall reaches its peak, the volumetric heat capacity of near-wall fluid decreases significantly, resulting in a coupling phenomenon of rapid weakening of heat transfer capacity and abnormal distribution of heat flux. This phenomenon is particularly prominent when the operating pressure is close to the critical pressure, and it no longer occurs when the pressure increases to 5 MPa. The prediction error of inner-wall heat flux is within the range of $\pm 15\%$.

Keywords: supercritical pressure; n-decane; convective heat transfer; heat conduction; predictive correlation

(责任编辑:唐立平)

引用格式 王彦红,于慧文,邵璋. 方形通道内超临界压力正癸烷对流换热数值分析[J]. 山东航空学院学报,2025,42(2): 43-51.

WANG Y H, YU H W, SHAO Z. Numerical analysis on convective heat transfer of n-decane in regenerative cooling channel[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics,2025,42(2):43-51.