【航空动力系统】

方形通道内超临界甲烷换热数值研究

王彦红[1], 邵　璋[1], 王艳杰[2]

(1. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012;
2. 吉林建筑大学 电气与计算机学院, 吉林 长春 130018)

摘　要: 基于火箭发动机再生冷却运用, 对非对称热流施加于外表面顶部、侧面、底部方形通道中超临界压力甲烷的流动换热进行了数值研究。探究了三种加热模式下的换热特性和换热机理, 以及运行压力对换热的影响机制。提出了通道周向平均换热预测关联式。结果表明, 类膜态沸腾是传热恶化的原因, 相比于顶部加热和底部加热两种模式, 侧面加热时管道截面具有最大的二次流速度和强度, 提高运行压力有助于更多的热流被加热侧内壁面吸收, 更少的热流传递到其他内壁面。

关键词: 超临界压力; 甲烷; 传热恶化; 浮升力作用; 二次流强度

中图分类号: V 231.1　　**文献标识码**: A　　DOI: 10.13486/j.issn.2097-4973.2024.01.005

0　引言

再生冷却是航空航天推进系统有效的热防护技术[1], 其主要利用吸热型碳氢燃料具有高热沉值的特点。碳氢燃料流过发动机壁面内再生冷却通道, 带走机体气动热量和燃烧热量[2-3]。当通道内碳氢燃料处于超临界压力下时, 强变物性会引起复杂的流动换热问题[4-6]。因此, 再生冷却通道中超临界碳氢燃料换热引起广泛重视。

近年来, 对于通道内超临界碳氢燃料的换热已进行了大量的基础研究, 研究人员着重考察了拟临界区热物性剧烈变化引起的传热恶化问题。Zhu 等[7]对 U 型管中超临界甲烷的流动与传热展开分析, 指出 U 型管能明显改善弯管处的传热, 但弯管也降低了后续直管段的传热。Li 等[8]探究了竖直管内甲烷的换热过程及双峰壁温出现的机理, 提出了一种新的预测超临界甲烷传热恶化时临界热流密度的准则。Gao 等[9]建立了三角形、梯形、矩形等不同截面, 探究超临界甲烷在不同截面微通道内的热力性能。Chen 等[10]研究表明, 在通道中增加凹坑结构对甲烷换热有着很大的提升, 并指出韧窝通道的热增强机理使韧窝结构有效地增强了漩涡和湍动能。Maryam 等[11]针对矩形通道内超临界甲烷提出了改进的关联式, 并通过不同压力和质量流率等来修正关联式的准确性。Pizzarelli 等[12]考察了通道高宽比对甲烷换热和压差的综合影响机制。以上研究均忽略浮升力作用, 通道截面未观察到二次流现象。

考虑浮升力影响情况下, 方形通道内超临界碳氢燃料的换热研究也有一定报道。Ruan 等[13]指出浮力效应在伪临界点左右较强, 使得截面上温度和密度上分布不均匀, 产生明显的径向环流。Hu 等[14]、

收稿日期: 2024-04-05

基金项目: 吉林省教育厅科技项目(JJKH20220100KJ); 吉林省高教学会高教科研课题(JGJX2023D242)

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

Sun 等[15]关注了非对称加热和重力作用对换热的耦合机制，阐述了热流施加于通道外表面顶部和底部 RP-3 燃料不同的换热过程。甲烷的热物性与 RP-3 燃料具有显著差别。火箭发动机冷却系统通常采用甲烷作为冷却剂，顶部加热、侧面加热、底部加热将导致不同的浮升力作用，进而出现不同的换热机制，相关研究还鲜见报道。

本文对方形通道内超临界压力甲烷的换热开展数值研究，基于火箭发动机再生冷却运用，考虑了通道外表面顶部加热、侧面加热和底部加热情况，探究了不同运行压力下甲烷的换热特性和换热机制，可为火箭发动机再生冷却中甲烷的超临界换热过程提供理论基础。

1 数值模型

1.1 物理模型

图 1 给出方形通道物理模型，图中 g 为重力加速度，考察浮升力作用的影响。通道内边长为 2 mm，壁厚为 0.5 mm。通道进口和出口的绝热段长度均为 150 mm，中间加热段长度为 500 mm，均匀热流密度分别施加在外表面顶部(TH)、侧面(SH)和底部(BH)。进口给定质量流速和进口温度，出口为静压边界，进出口环形壁面为绝热边界。固体域和流体域之间为耦合界面。H 位置位于加热内壁面，S、S_1、S_2 位置位于侧内壁面，O 位置位于加热面的对立面。进口温度为 120 K，运行压力为 6～12 MPa。质量流速设定为 1000 kg/(m^2 · s)，外表面热流密度为 2 MW/m^2。

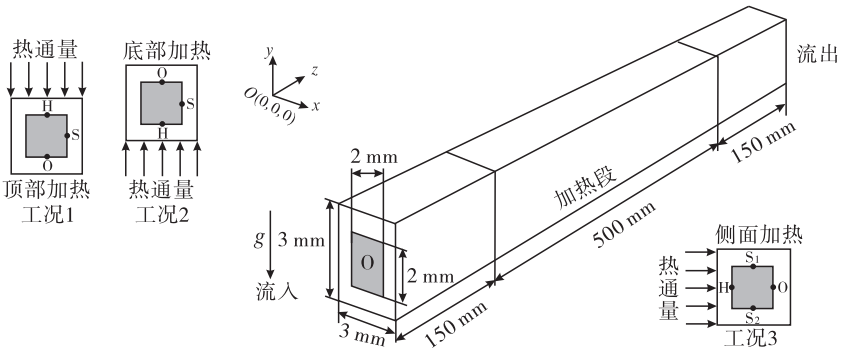


图 1 方形冷却通道

1.2 控制方程

质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、标准 k-ε 模型、热传导方程分别为

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

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

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

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

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)\frac{\varepsilon}{k}-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k},$$

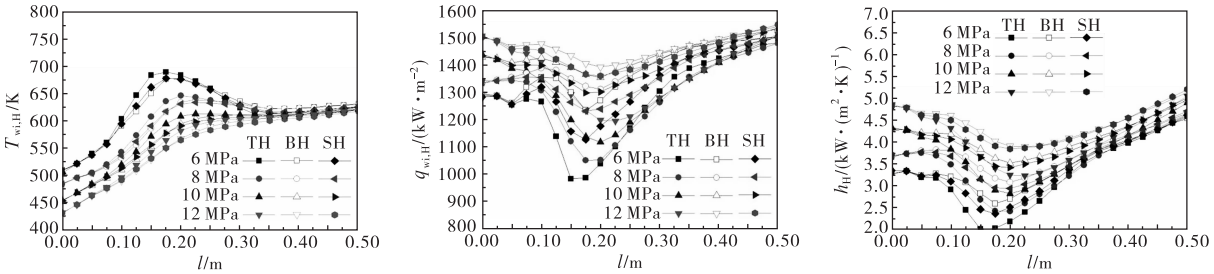
$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)=0。$$

式中：ρ 为密度，c_p 为比热容，K 为热导率，μ 为动力黏度，k 为湍动能，ε 为耗散率，T 为温度，u 为流速，其他变量的定义见文献[16]，甲烷的热物性见文献[17]。网格方案为 4120×800，基于 Fluent 14.5进行求解，计算设置与文献[18-19]相同。该数值模型的有效性已在文献[14-15]得到验证，可用于本文的数值研究。

2　计算结果与分析

2.1　换热特性与机理

本节探究方形通道内超临界甲烷的换热特性和换热机制。图 2 给出三种加热模式下 H 位置通道内壁温度、内壁热流密度和换热系数的轴向分布情况。由图 2(a)可以看到，通道内壁温度从 $l=0.075$ m 位置起陡然增加，说明出现了显著的传热恶化现象。该传热恶化区内壁热流密度沿轴向先减小后增大，意味着更多的热流由加热内壁面传递到侧壁面和对立面。



(a) 内壁温度　　(b) 内壁热流密度　　(c) 换热系数

图 2　三种加热方式下换热参数的轴向分布

由图 2(b)和图 2(c)可以看出，换热系数的轴向变化类似于内壁热流密度，验证了传热恶化问题。顶部加热模式内壁温度高于侧壁加热模式，随后是底部加热情况，内壁热流密度和换热系数的变化特征则相反。随着压力提高，内壁温度、内壁热流密度和换热系数的异常变化减弱，这源于热物性随温度的变化减弱。显然，高压力条件下传热恶化受到抑制。同时，因为流体密度分层减弱，高压力时三种加热模式的换热差别减小，即浮升力作用减弱。

图 3 给出近壁面(距 H 位置 0.03 mm)流体局部质量流速 ρu 的轴向变化情况。由图 3 可以看到，受热作用下壁面附近流体密度减小、比体积增加，迫使高密度流体向流体中心汇聚，壁面附近流体局部质量流速减小，流动性能非常差，相当于高温类气态流体覆盖内壁面，形成类膜态沸腾阻碍热量从内壁面向主流传导，引起传热恶化现象。顶部加热模式具有最突出的传热恶化问题，然后是侧面加热模式和底部加热情况。

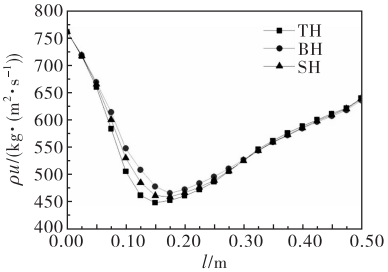
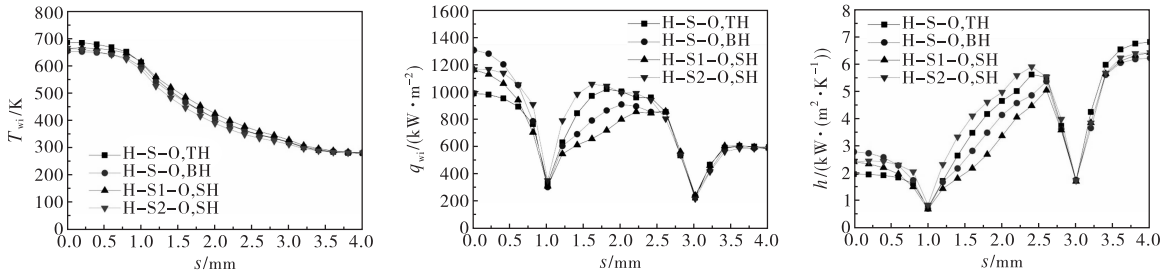


图 3　质量流速轴向分布

图 4 给出了内壁温度、内壁热流密度和换热系数的周向分布情况。



(a) 内壁温度　　(b) 内壁热流密度　　(c) 换热系数

图 4　换热参数的周向分布

图 5 给出了 $l=0.15$ m 处截面局部质量流速的分布情况。运行压力取 6 MPa 工况。加热面：侧壁加热模式内壁温度、热流密度和换热系数处于顶部加热模式和底部加热模式之间。顶部加热模式具有最大的低质量流速范围和最严重的传热恶化问题，随后是侧面加热模式，最后是底部加热情况。侧壁面：顶部

加热和底部加热时换热参数处于侧壁加热的两个周向线之间。侧壁加热模式上部近壁面相比下部近壁面具有更大的低质量流速范围。对立面:不同加热模式的换热参数和局部质量流速基本相同。三种加热模式不同的换热特征源于加热方向和重力方向的耦合机制,其导致了流型和二次流强度的差别。

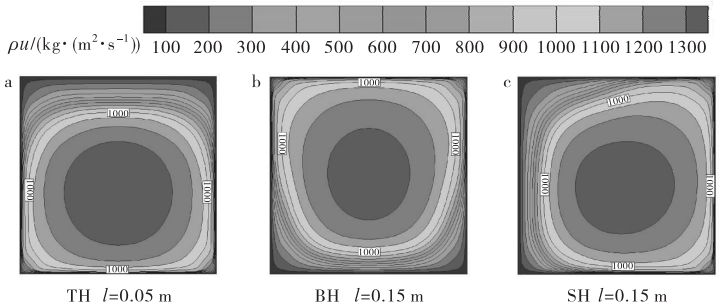


图 5 局部质量流速分布

2.2 二次流流型和强度

图 6 给出了三种加热模式下固体域和流体域温度分布情况。运行压力为 6 MPa 工况。P_1 位置,主流温度低于拟临界值,热物性平缓变化,三种情况下固体域和流体域具有相同的温度分布特征,说明该截面浮升力作用很弱,固壁热传导不受浮升力影响。随后,与底部加热和侧面加热相比,顶部加热模式固壁具有较高的温度和较大的温度梯度,P_3 位置之后观察到相反的温度分布现象。三种加热模式流体域温度分布差别显著,故而出现不同的浮升力作用。显然,四个截面固壁热传导受浮升力影响,尤其是浮升力引起侧面加热模式固体域和流体域温度的非对称分布问题。

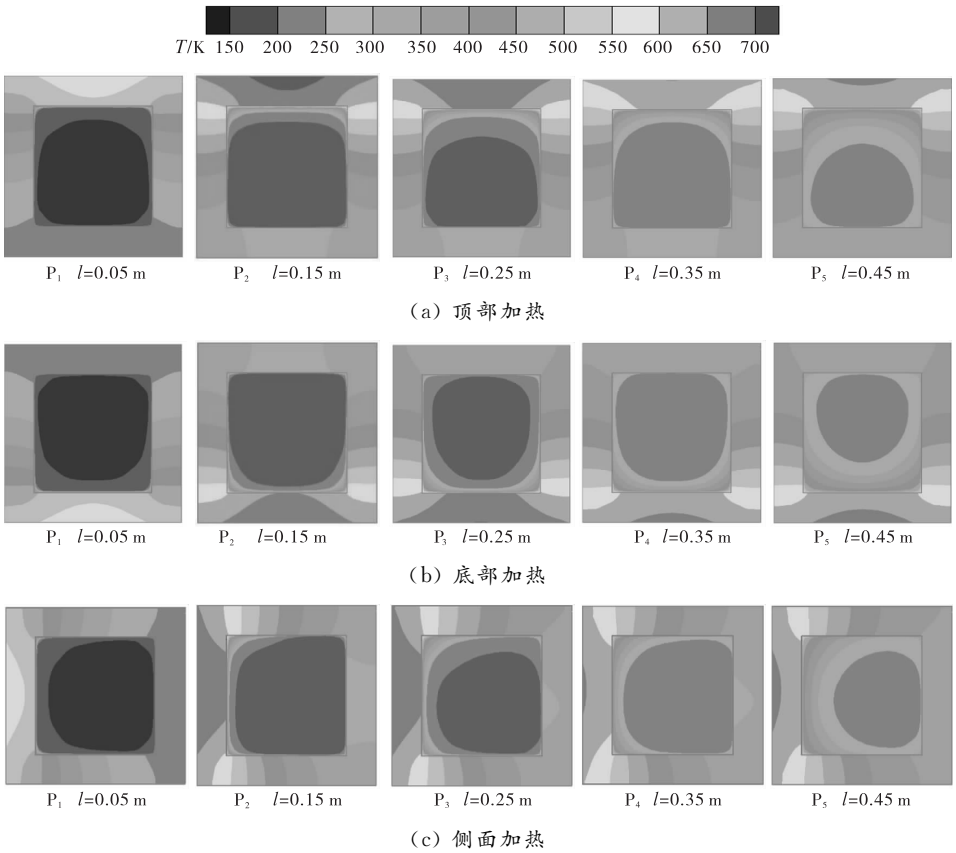


图 6 固体域和流体域温度分布

图 7 给出了三种加热模式下二次流流型和流速($u_{sec}=((u_x)^2+(u_y)^2)^{0.5}$)的分布情况。运行压力为

6 MPa 工况。通道外表面非对称加热条件下，固壁热传导引起内壁热流密度再分配，加热侧内壁面具有最高的热流密度，侧面热流密度较小，对立面热流密度最小，壁面附近流体的加热程度不同，近壁流体密度下降且非等值，而主流温度低密度高，形成截面密度分层和周向密度梯度。因此，浮升力导致二次流，即密度差产生的自然对流。顶部加热时二次流涡由中部向下部偏移，底部加热时二次流涡由下部向上部偏移，两者均为对称双涡。侧面加热时存在一个主涡，通道夹角区还有局部涡出现。侧面加热时二次流速度最大，随后为底壁面加热模式和顶壁面加热模式。

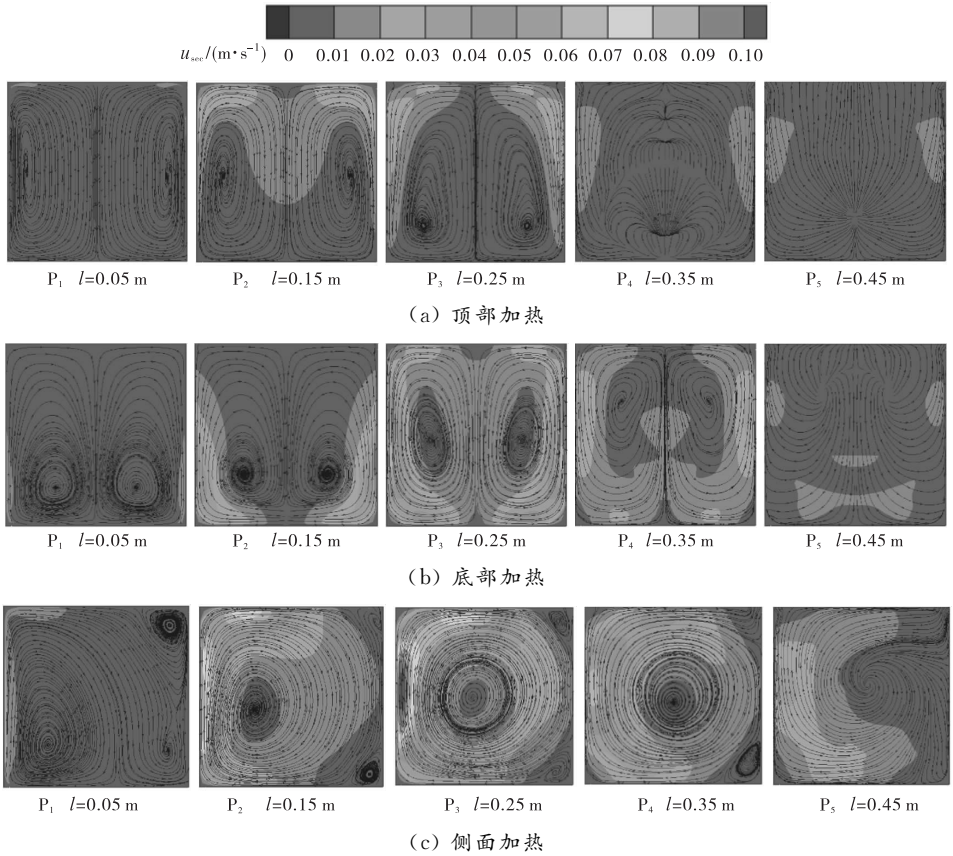


图 7　不同截面二次流分布

通过二次流强度对二次流影响进行量化分析，二次流强度为[20]

$$Se = \frac{\rho_b d^2}{A\mu_b}\int_A \left|\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}\right| \mathrm{d}A。$$

式中：A 为流体截面积，d 为水力直径。

图 8 给出三种加热模式在不同压力下二次流强度的轴向变化情况。

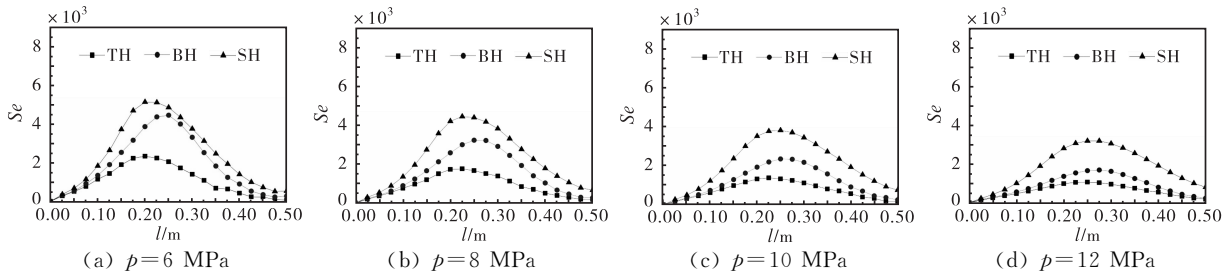


图 8　二次流强度沿流动方向的变化

由图 8(a)～(d)均可以看到，侧面加热时二次流强度最大，随后是底部加热模式和顶部加热情况。顶

部加热时二次流强度峰值最早出现，随后为侧面加热模式和底部加热模式。随着压力提高，二次流强度减小，同一加热模式下不同压力的二次流强度峰值出现位置相近。

2.3 换热关联式

换热关联式对于再生冷却系统设计和运行极为重要。浮升力对不同加热模式下通道内壁温度和内壁热流密度分布具有显著影响，而对周向平均内壁温度和内壁热流密度基本没有影响，因此，三种加热模式的平均换热性能也相近。本文基于数值计算结果，参考文献[18]换热关联式形式，通过多元线性回归拟合指数和常数项，得到如下换热关联式：

$$Nu_{\mathrm{av}}=3.43Re_{\mathrm{b}}^{0.36}Pr_{b}^{0.18}\left(\frac{\rho_{\mathrm{wi,av}}}{\rho_{b}}\right)^{0.54}。\tag{1}$$

式中：Re 为雷诺数，Pr 为普朗特数，下标 b 表示主流值。

图 9 给出拟合关联式计算努塞尔数与数值结果的比较情况。可以看到，预测的努塞尔数变化趋势与数值数据符合良好，两者的相对偏差基本在±15%的范围之内，该关联式对于通道周向平均换热状况具有较好的预测精度，可以用于火箭发动机不同加热条件的再生冷却工程应用。适用的压力范围为 6～12 MPa，质量流速范围为 1000～3000 kg/(m^2·s)，外表面热流密度为 2～4 MW/m^2。

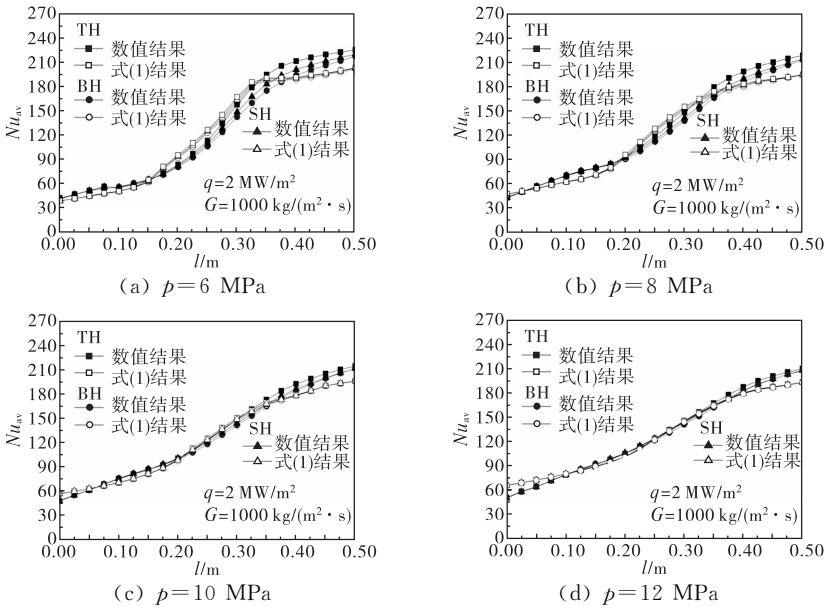


图 9 努塞尔数经验关联式计算值与数值数据比较

3 结论

对方形通道内超临界甲烷的换热开展了数值研究，获得下述结论：(1) 通道壁面附近局部低质量流速，类似于类气态膜覆盖内壁面，阻碍了热量由壁面向主流传递，导致了传热恶化问题。顶部加热时传热恶化最突出，随后是侧面加热和底部加热模式。提高运行压力可以有效地抑制加热内壁面传热恶化程度。(2)不同加热模式下，重力和加热方向的耦合机制导致不同的浮升力作用和二次流流型。侧面加热时具有最高的二次流速度和二次流强度，随后为底部加热和顶部加热模式。(3)拟合了通道周向平均换热的预测关联式，适用于三种非对称加热条件下火箭发动机再生冷却的工程运用。

参考文献：

[1] URBANO A, NASUTI F. Parametric analysis of heat transferto supercritical-pressure methane [J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 2012, 26: 450-463.

[2] GU H F，LI H Z，WANG H J，et al. Experimental investigation on convective heat transfer from a horizontal miniature tube to methane at supercritical pressures[J]. Applied thermal engineering，2013，58：490-498.

[3] RUAN B，HUANG S Z，MENG H，et al. Transient responses of turbulent heat transfer of cryogenic methane at supercritical pressures[J]. International journal of heat and mass transfer，2017，109：326-335.

[4] PIZZARELLI M，NASUTI F，ONOFRI M. Analysis of curved-cooling-channel flow and heat transfer in rocket engines[J]. Journal of propulsion and power，2011，27：1045-1053.

[5] YANG Z Q，BI Q C，LIU Z H，et al. Heat transfer to supercritical pressure hydrocarbons flowing in a horizontal short tube[J]. Experimental thermal and fluid science，2015，61：144-152.

[6] PU H，LI S F，DONG M，et al. Convective heat transfer and flow resistance characteristics of supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal rectangular mini-channel[J]. Experimental thermal and fluid science，2019，108：39-53.

[7] 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)：5714-5714.

[8] 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.

[9] GAO Z G，WANG T H，BAI J H，et al. Thermal performance investigation of supercritical methane in minichannel heat sink on flight vehicle actuator under geometry effect of cross section[J]. Numerical heat transfer，part A：applications，2023，83(3)：315-330.

[10] CHEN Y J，LIU Z H，HE D Q. Numerical study on enhanced heat transfer and flow characteristics of supercritical methane in a square mini-channel with dimple array[J]. International journal of heat and mass transfer，2020，158：119729.

[11] MARYAM S，ABBAS E. Improvement of heat-transfer correlations for supercritical methane coolant in rectangular channel[J]. Applied thermal engineering，2019，147：216-230.

[12] PIZZARELLI M，NASUTI F，ONOFRI M，et al. Heat transfer modeling for supercritical methane flowing in rocket engine cooling channels[J]. Applied thermal engineering，2015，75：600-607.

[13] RUAN B H，LIN W S. Numerical investigation on heat transfer and flow characteristics of supercritical methane in a horizontal tube[J]. Cryogenics，2022，124：103482.

[14] HU J Y，ZHOU J，WANG N，et al. Numerical study of buoyancy's effect on flow and heat transfer of kerosene in a tiny horizontal square tube at supercritical pressure[J]. Applied thermal engineering，2018，141：1070-1079.

[15] 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.

[16] 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.

[17] URBANO A，NASUTI F. Conditions for the occurrence of heat transfer deterioration in light hydrocarbons flows[J]. International journal of heat and mass transfer，2013，65：599-609.

[18] 王彦红,陆英楠,李素芬,等. 周向非均匀加热水平圆管内超临界正癸烷换热特性[J]. 化工学报,2021,72(3):1342-1353.

[19] 王彦红,陆英楠,李素芬,等. U 型圆管中超临界压力 RP-3 航空煤油换热数值研究[J]. 化工学报,2021,72(9):4639-4648.

[20] WANG Y H,LU Y N,LI S F,et al. Numerical study on non-uniform heat transfer deterioration of supercritical RP-3 aviation kerosene in a horizontal tube[J]. Chinese journal of chemical engineering,2020,28:1542-1557.

Numerical Research on Heat Transfer of Supercritical Methane in a Horizontal Square Channel

WANG Yanhong[1],SHAO Zhang[1],WANG Yanjie[2]

(1. *School of Energy and Power Engineering*,
Northeast Electric Power University,*Jilin* 132012,*China*;
2. *School of Electrical and Computer Science*,
Jilin Jianzhu University,*Changchun* 130018,*China*)

Abstract:Based on the rocket engine regenerative cooling application,the flow and heat transfer of supercritical-pressure methane in a square cooling channel with asymmetric heating on the top,bottom,and side outer-walls have been numerically investigated. The characteristic and mechanism of heat transfer under these three heated modes are studied. The effect of operating pressure on heat transfer is discussed. The prediction correlation for average heat transfer in the channel circumferential direction is proposed. The results show that the pseudo-film boiling leads to the heat transfer deterioration. There are the largest secondary flow velocity and intensity in the side heated mode compared with other two heated conditions. Increasing the operating pressure helps the greater proportion of heat flux to be absorbed by the heated inner-wall,and less heat flux is transmitted to other inner-walls.

Keywords: supercritical-pressure; methane; heat transfer deterioration; buoyancy effect; secondary flow intensity

(责任编辑:唐立平)

引用格式 王彦红,邵璋,王艳杰. 方形通道内超临界甲烷换热数值研究[J]. 山东航空学院学报,2024,41(1):47-54.
WANG Y H,SHAO Z,WANG Y J. Numerical research on heat transfer of supercritical methane in a horizontal square channel[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics,2024,41(1):47-54.