

超重力条件下水平圆管内超临界正癸烷换热研究

王彦红, 陆英楠, 李浩然, 刘 浩

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要:为深入理解超重力下飞行器发动机的热管理问题,进行了水平通道中正癸烷的超临界换热数值研究。探究了拟膜态层换热机理,考察了热传导过程、二次流效应及其对管周向非均匀传热恶化的作用机制,提出了周向最大换热差别预测模型。建立了水平管的浮升力准则。研究发现:重力加速度增大致使流体域密度异常分层加剧,周向不平衡动能增加,二次流增强;固体域温度异常分层也加剧,增强了热流密度的周向分配。提高压力使流体密度变化趋缓,可削弱超重力对换热过程的影响。

关键词:超重力;超临界;热流分配;温度异常分层;二次流;数值分析

中图分类号:V231.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)05-0078-07

Effect of hyper-gravity on heat transfer of supercritical n-decane flowing in horizontal circular tube

WANG Yanhong, LU Yingnan, LI Haoran, LIU Hao

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

Abstract: In order to deeply understand the thermal management problem in aircraft engines under hyper-gravity conditions, a numerical investigation on supercritical heat transfer of n-decane in the horizontal channel has been conducted. The heat transfer mechanism of pseudo-film layer was explored. The heat conduction process, secondary flow characteristic and its effect on non-uniform deteriorated heat transfer along the circumferential direction of tube were investigated. A prediction model of circumferential maximum heat transfer difference was proposed. A buoyancy criterion for horizontal tubes was established. The research results indicate that the abnormal density stratification in the fluid domain is enhanced, the circumferential unbalanced kinetic energy is increased, and the secondary flow is strengthened with the increasing gravity acceleration. The abnormal temperature stratification in the solid domain is also aggravated, which enhances the circumferential distribution of heat flux. Increasing the pressure makes the weaker fluid density variation, which can restrain the influence of hyper-gravity on the heat transfer process.

Keywords: hyper-gravity; supercritical; heat flux distribution; abnormal temperature stratification; secondary flow; numerical analysis

收稿日期:2021-05-19;修回日期:2021-07-02

基金项目:国家自然科学基金(51576027)

作者简介:王彦红(1983—),男,博士,讲师,研究领域为超临界压力碳氢燃料传热传质。

0 引言

高超声速飞行器采用再生冷却技术处理发动机的热管理难题^[1]。航空燃料系统配置高压泵,燃料处于超临界条件下,其热物性受压力和温度共同支配,再生冷却通道中出现变物性换热问题^[2]。飞行器航速极高,航空发动机既有常规重力工况,也有因起飞或逃逸引起的超重力工况,换热优劣影响发动机热防护效果,制约飞行器的动力性能^[3]。

目前,再生冷却通道内航空燃料的换热特性已有较多研究。竖直通道内航空燃料强化换热由高比热容引起^[4];传热恶化表现为湍动能下降^[5]、“M”型流速^[6]、湍流强度削弱^[7]、浮升力^[8]、热加速^[9]、拟沸腾^[10]是传热恶化的原因。水平通道中航空燃料表现为周向非均匀换热特征,高热质比(热流密度与质量流速比值)且低压力下尤为显著^[11]。非均匀换热源于浮升力作用,浮升力导致强二次流,内表面热流密度重新分配^[12-13]。管道内径增加,浮升力作用增强,周向换热不均匀性加剧^[14]。方形通道内碳氢燃料换热在非对称加热和浮升力耦合作用下产生不同型式的二次流,不同加热方式下具有显著的换热差别^[15],提高通道热导率可以抑制该耦合作用^[16]。U型圆管^[17]和螺旋圆管^[18]中碳氢燃料在浮升力和离心力作用下也表现为周向非均匀换热问题。这些研究^[4-18]均基于常规重力工况。LYU等观察到超重力下水平通道航空煤油的两类传热恶化现象,增大重力加速度使传热恶化起始位置提前^[19]。Chen等探究了加速状态对正癸烷传热恶化的影响,提高重力加速度可以削弱第一次传热恶化的强度,而对第二次传热恶化没有影响^[20]。实际应用中,超重力会强化浮升力作用,对换热的影响不容忽视,尚需进行深入地分析和探讨。

本文对超重力条件下水平圆管内超临界正癸烷的换热开展了数值研究,探究了运行参数对换热的影响,通过温度场和流场分布规律阐述了超重力对换热的作用机理,分析了二次流的特征,提出了周向最大内壁温差的预测准则,研究结果有利于超重力下航空发动机热防护的工程应用。

1 数值模型与数值方法

1.1 物理模型

图1给出了圆管的物理模型。圆管外径为3 mm,内径为2 mm。进口绝热段和出口绝热段长度均为150 mm,用以保证进口流动充分发展和避免出口效应影响;中间加热段长度为500 mm,外壁面给定均匀热流密度。进口为质量流速边界,给定质量流速和进口温度,出口为静压边界。进口和出口的圆环壁面设定为绝热边界。通过温度和热流密度相等来实现固壁和流体的耦合机制。重力加速度 a 施加在 y 方向,范围为 $0 \sim 6g$, $g = -9.8 \text{ m/s}^2$ 。取管顶部(Top)和管底部(Bottom)做换热分析。

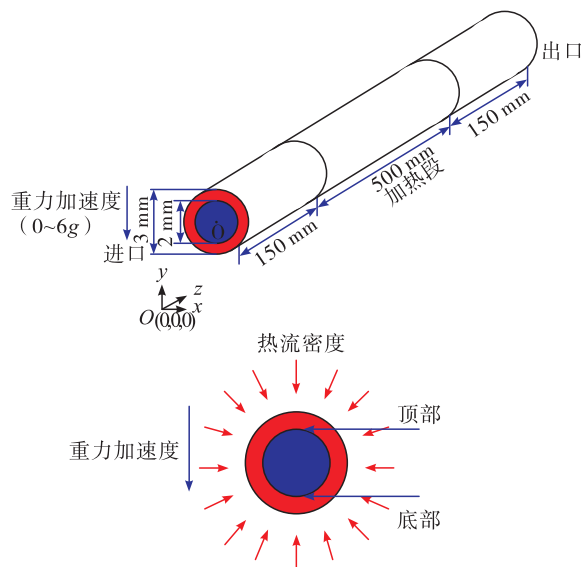


图1 水平圆管

Fig. 1 Horizontal circular tube

1.2 控制方程

连续性方程为

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

动量方程为

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

能量方程为

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

式中: ρ 为密度; u 为流速; c_p 为定压比热容; T 为温度; μ_e 为有效动力黏度; K_e 为有效热导率; δ_{ij} 为克罗内克符号。

选取 RNG k - ε 湍流模型结合增强壁面处理解决湍流换热问题。湍流模型如下

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

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[a_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (5)$$

式中: k 为湍动能; ε 为耗散率; a_k 和 a_ε 为湍流普朗特数; 常数项 $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{3\varepsilon} = 0.0845$; G_k 和 G_b 均为湍流产生项; R_ε 为附加项。

热传导方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (6)$$

不锈钢圆管的热导率 K 为 $20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

1.3 热物性

正癸烷的临界压力 p_{cr} 和临界温度 T_{cr} 分别为 2.1 MPa 和 618 K ^[21]。超临界压力下其密度、定压比热容、热导率和动力黏度^[21]采用分段线性函数加到 Fluent 19。图 2 给出了密度和定压比热容随温度的变化情况。

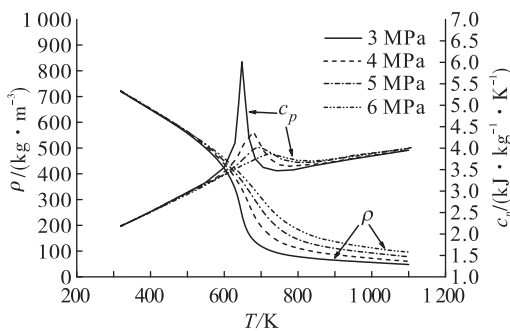


图 2 超临界条件下热物性随温度的变化情况

Fig. 2 Thermo-physical properties variations with temperature under supercritical condition

1.4 数值方法

通过结构化“O 型”网格划分计算域。流体域近壁网格需要加密,第 1 层网格满足 $y^+ < 1$,前 3 层网格满足 $y^+ \leq 5$ 。管壁网格尺寸由外部向内部沿径向逐渐减小,共 15 层。表 1 制定 5 种方案,即改变截面网格数量和轴向网格数量考察网格无关性。进口温度为 600 K ,质量流速为 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,壁面热流密度为 $600 \text{ kW}/\text{m}^2$,压力为 3 MPa ,重力加速度为 $2g$ 。研究发现,网格方案为 3200×800 时,截面网格数量和轴向网格数量继续增加,对出口温度 T_{out} 和出口流速 u_{out} 基本没有影响,满足网格无关性要求。管截面网格划分见图 3。基于 Fluent 19 求解控制方程,通过二阶迎风差分格式离散控制方程,压力和流速耦合通过 SIMPLEC 算法处理,隐式 Gauss-Seidel 迭代处理。

表 1 网格无关性分析

Tab. 1 Grid-independence analysis

网络方案	T_{out}/K	$u_{out}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2 800 × 800	789.43	14.28
3 200 × 800	791.53	15.02
3 600 × 800	791.84	15.22
3 200 × 400	789.37	14.36
3 200 × 1 200	791.62	15.12

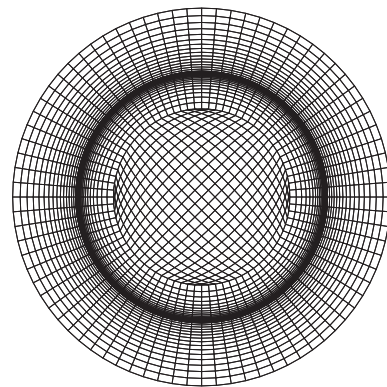


图 3 管截面网格

Fig. 3 Mesh configuration in the tube cross section

1.5 模型验证

选择文献[11]常规重力下的实验方案验证湍

流模型。水平圆管的管外径为 2.20 mm,管内径为 1.86 mm,管加热长度为 500 mm。RP-3 航空煤油进口温度 T_{in} 为 573 K,压力 p 为 3 MPa,质量流速 G 为 538 kg/(m²·s),管壁热流密度 q 为 320 kW/m²。图 4 给出管内壁温度沿管轴向(l 为局部加热长度)的变化情况。数值结果与实验结果的相对偏差基本落在 $\pm 5\%$ 的范围,说明湍流模型有效且合理。超重力条件下尚无实验数据,增大重力加速度基本不影响湍流模型的有效性^[19]。

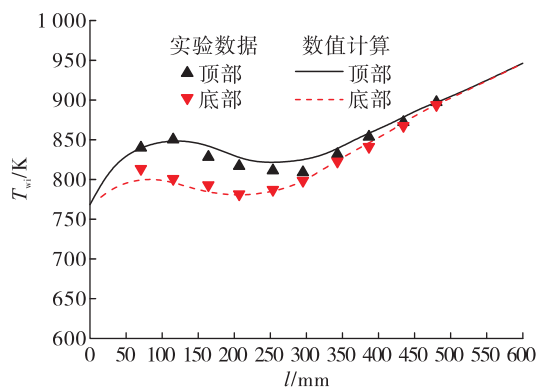


图4 数值模型验证

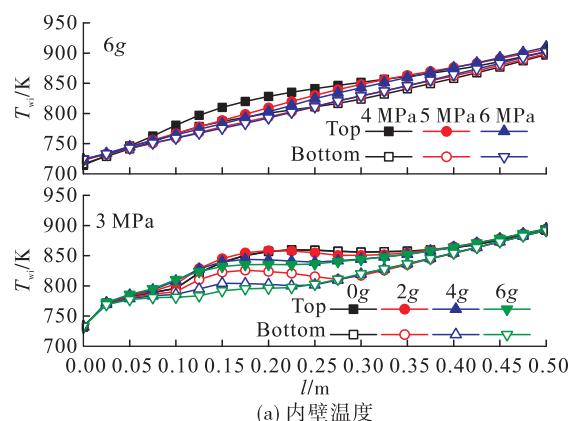
Fig. 4 Numerical model validation

2 数值结果与分析

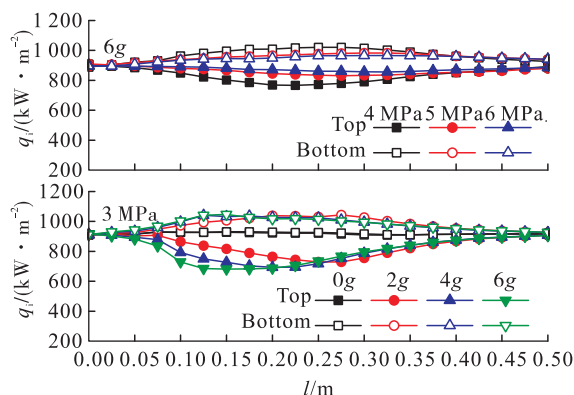
2.1 超重力下的换热特性分析

图 5 给出了管内壁温度、管内壁热流密度和换热系数沿管轴向的分布情况。进口温度设定为 600 K,质量流速为 1 200 kg/(m²·s),外壁热流密度为 600 kW/m²。重力加速度范围为 0~6g。由图可以看到,运行压力为 3 MPa 且重力加速度为 0g 时,从 $l=0.075$ m 位置开始出现管壁温度陡增和换热系数剧降,即突出的传热恶化问题。过程中热流密度基本恒定。因为无浮升力作用,管顶部和管底部的换热参数相同。重力加速度为 2g 时,管周向出现壁温的非均匀分布问题,管顶部壁温高于管底部,这源于超重力产生的浮升力作用。随着重力加速度增加,管壁温度下降,超重力改善了热防护效果;管顶部和管底部的壁温差增大,说明浮升力作用加剧。管底部热流密度高于管顶部,分别出现了热流密度峰值和谷值,说明浮升力致使周向热流重新分

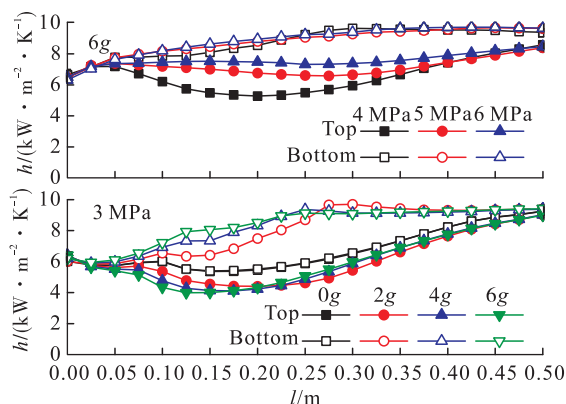
配,更多热流由管顶部传递到管底部吸收利用。重力加速度增加,浮升力增强,热流密度周向差别增大。管壁温度和热流密度的分布状况共同导致了管顶部先恶化后强化过渡到管底部只强化的换热特征,即周向不均匀的换热问题。重力加速度为 6g 时,运行压力提高,管壁温度、热流密度、换热系数的异常变化减弱,不仅传热恶化受到抑制,周向不均匀换热也减弱。



(a) 内壁温度



(b) 内壁热流



(c) 换热系数

图5 换热参数的轴向分布情况

Fig. 5 Axial distribution of heat transfer parameters

2.2 周向不均匀换热机理分析

图 6 给出了管截面温度和无量纲质量流速的分布情况。无量纲质量流速定义为 $\pi_c = \rho u / G$ 。管截面选取 $l = 0.2 \text{ m}$ 位置。由图可以看到,运行压力为 3 MPa 且重力加速度为 $0g$ 时,流体域和固体域温度等值线均是规则的圆形。质量流速也呈周向均匀分布的特征,近壁面质量流速相对主流质量流速较小,即紧贴壁面的局部流量较小,出现流动性能较差 ($\pi_c < 0.6$) 的流体层,称为拟膜态层。拟膜态层阻隔了热流的有效吸收,引起传热恶化现象。沿管轴向,首先近壁燃料密度急剧减小,拟膜态层不断增厚,传热恶化加剧;随后近壁流速迅速上升,拟膜态层逐渐减薄,换热恢复。

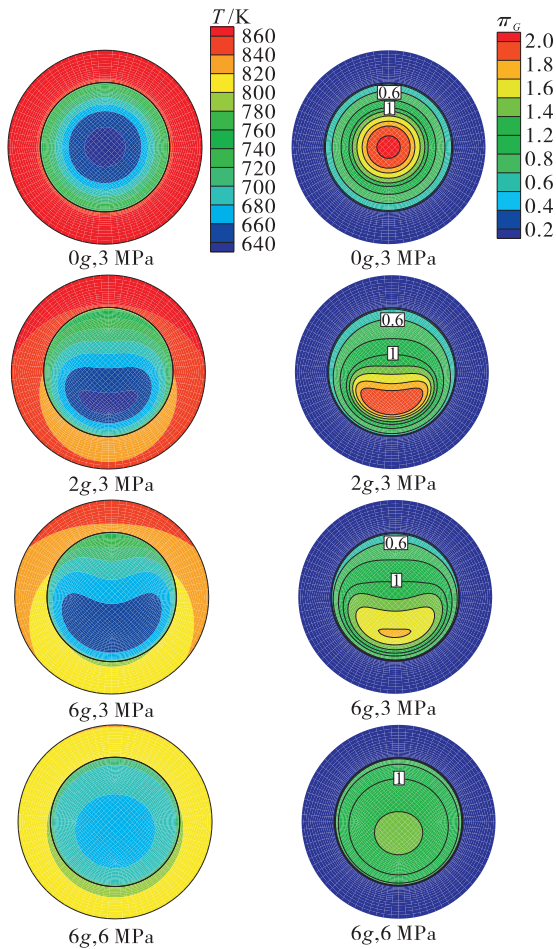


图 6 温度和无量纲质量流速的分布情况

Fig. 6 Distribution of temperature and dimensionless mass flow rate

通过图 6 还可以观察到,重力加速度为 $2g$ 时,固体域和流体域温度沿重力方向均出现了非规则圆环的异常分层问题。固体域温度等值线向下偏

移,说明固壁热传导受到影响,出现周向非均匀的热传导过程,热流密度由管顶部转移到管底部。流体域温度中心向下偏移,温度等值线呈心形。流体温度异常分层导致密度的异常分层,产生周向密度梯度,出现周向不平衡动能。拟膜态层沿管周向出现非均匀现象,管顶部较厚,沿圆周方向逐渐减薄。重力加速度提高减小了拟膜态层厚度;而流体温度异常分层减弱,整体趋于低温区,密度对温度的变化更加敏感,浮升力作用增强。提高运行压力,流体温度和质量流速等值线逐渐过渡为规则圆环,拟膜态层弱化,浮升力作用和拟膜态机制减弱。

2.3 二次流分析

图 7 给出了二次流动能的分布情况。二次流动能定义为 $k_{\text{sec}} = (u_x)^2 + (u_y)^2$ 。由图可以看到,相比无重力工况,周向不平衡动能驱动下管截面产生二次流问题。管中心冷流体向下流动冷却底壁面,对换热有强化作用;热流体在管顶部形成驻点,流动性能最差,导致换热减弱。二次流动能最大值位于两侧接近壁面,说明该位置周向密度差别最大,对二次流的驱动作用最强。二次流对周向非均匀换热和固体温度异常分层发挥了作用。重力加速度提高使二次流动能增大,运行压力增大则使二次流动能受到严重削弱。

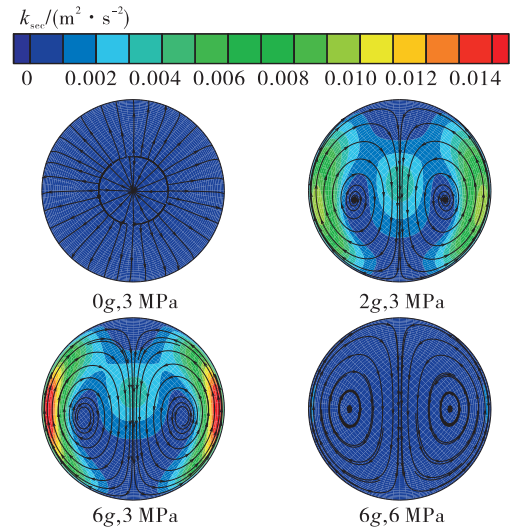


图 7 二次流动能的分布情况

Fig. 7 Distribution of secondary flow kinetic energy

图 8 给出了二次流涡量 J^n 沿流动方向的变化情况。二次流涡量 J^n 的定义为

$$J^n = \frac{1}{A} \iint_A \left| \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right| dA \quad (7)$$

式中 A 为流通面积。

图8的结果表明,二次流涡量沿流动方向先上升后下降,其峰值与管顶部和管底部最大壁温差值出现的位置一致。随着重力加速度提高,浮升力作用增强,二次流涡量增大,二次流增强;同时,二次流涡量峰值向进口方向前移,说明重力加速度变化对壁温陡增阶段二次流的影响更为显著。运行压力提高,二次流涡量显著减小,二次流减弱,其峰值移向出口方向。

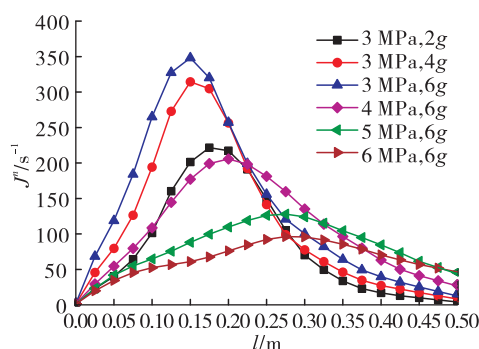


图8 二次流涡量的轴向分布情况

Fig. 8 Axial distribution of secondary flow vorticity

2.4 最大内壁温差的特性和预测

图9给出了不同热质比(q/G)和重力加速度下管顶部和管底部最大内壁温度差随压力的变化情况。由图可以看到,运行压力提高造成最大壁温差逐渐减小,而重力加速度增加和热质比增大均使周向壁温差扩大。

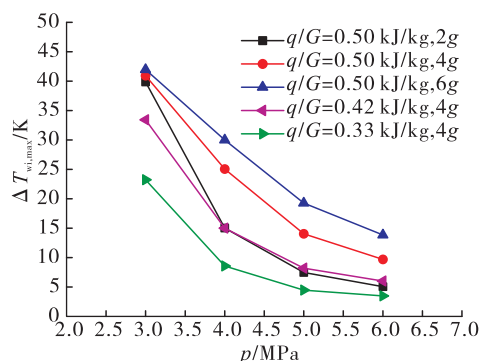


图9 最大内壁温差随压力的变化情况

Fig. 9 Variation of maximum inner-wall temperature difference with pressure

基于数值结果,建立了最大内壁温差的预测准则为

$$\Delta T_{wi,max} = \frac{238.25(q/G)^{2.12}(a/g)^{0.49}}{(p/p_{cr})^{2.40}} \quad (8)$$

图10给出了最大壁温差数值结果与预测数据的比较情况。可以发现,两者误差满足 $\pm 15\%$ 的要求,预测公式具有较高的精度。其适用的运行范围: $0.33 \text{ kJ/kg} \leq q/G \leq 0.50 \text{ kJ/kg}$ 、 $3 \text{ MPa} \leq p \leq 6 \text{ MPa}$ 、 $2g \leq a \leq 6g$ 。

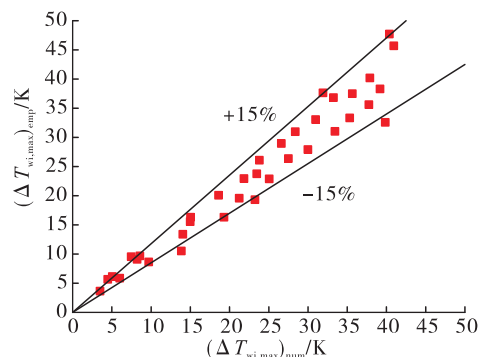


图10 最大内壁温差预测数据与数值结果对比情况

Fig. 10 Comparison between prediction data and numerical results of maximum inner-wall temperature difference

3 结论

1)通道壁面附近拟膜态层引起了传热恶化现象,浮升力作用造成了周向非均匀换热问题。重力加速度提高使拟膜态效应削弱。重力加速度提高,流体周向不平衡动能增大,浮升力作用加剧,二次流强度增大,周向非均匀换热增强。

2)运行压力提高导致拟膜态层减薄,还起到弱化浮升力和二次流的作用,致使传热恶化和周向非均匀换热均受到显著地抑制。

3)周向最大内壁温差随着运行压力提高而减小,随着热质比和重力加速度增加而增大。提出了最大内壁温差的预测准则。

参考文献:

- [1] YAN J G, LIU S C, GUO P C, et al. Experimental investigation on convection heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in a long mini tube[J]. Experimental Thermal and Flu-

- id Science, 2020, 115: 110100.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ZHANG C B, XU G Q, GAO L, et al. Experimental investigation on heat transfer of a specific fuel (RP-3) flows through downward tubes at supercritical pressure[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 72: 90-99.
- [5] 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.
- [6] HUA Y X, WANG Y Z, MENG H. A numerical study of supercritical forced convective heat transfer of n-heptane inside a horizontal miniature tube[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2010, 52(1): 36-46.
- [7] PU H, LI S F, JIAO S, et al. Numerical investigation on convective heat transfer to aviation kerosene flowing in vertical tubes at supercritical pressures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 857-871.
- [8] LIU B, ZHU Y H, YAN J J, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of n-decane at supercritical pressures in small vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 734-746.
- [9] ZHANG J Z, LIN J P, HUANG D, et al. Numerical study of heat transfer characteristics of downward supercritical kerosene flow inside circular tubes[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2018, 19(2): 158-170.
- [10] LIU Z H, BI Q C, GUO Y, et al. Convective heat transfer and pressure drop characteristics of near-critical-pressure hydrocarbon fuel in a minichannel[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 1047-1054.
- [11] WEN J, HUANG H R, JIA Z X, et al. Buoyancy effects on heat transfer to supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal miniature tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1173-1181.
- [12] SUN X, XU K K, MENG H, et al. Buoyancy effects on supercritical-pressure conjugate heat transfer of aviation kerosene in horizontal tubes[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2018, 139: 105-113.
- [13] 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.
- [14] CHENG Z Y, TAO Z, ZHU J Q, et al. Diameter effect on the heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in horizontal tubes under turbulent conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 39-53.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WEN J, HUANG H R, FU Y C, et al. Heat transfer performance of aviation kerosene RP-3 flowing in a vertical helical tube at supercritical pressure [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 853-862.
- [19] LYU L L, WEN J, FU Y C, et al. Numerical investigation on convective heat transfer of supercritical aviation kerosene in a horizontal tube under hyper gravity conditions[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 105962.
- [20] CHEN Y Q, LI Y, LIU D C, et al. Influences of accelerating states on supercritical n-decane heat transfer in a horizontal tube applied for scramjet engine cooling[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 109: 106424.
- [21] WANG Y H, LI S F, DONG M. Numerical study on heat transfer deterioration of supercritical n-decane in horizontal circular tubes[J]. Energies, 2014, 7(11): 7535-7554.
- [22] SONG K W, HU W L, LIU S, et al. Quantitative relationship between secondary flow intensity and heat transfer intensity in flat-tube-and-fin air heat exchanger with vortex generators[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 1064-1070.