

预冷发动机氢氦 PCHE 通道换热与热应力数值分析

王彦红, 李雨健, 贾玉婷, 李洪伟

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要 基于高超声速预冷发动机闭式氦布雷顿循环中印刷电路板换热器(PCHE)的应用,对 PCHE 氢氦通道的热固耦合特性进行了数值研究,着重阐述了热侧氦参数对换热的影响机制。探究了热侧壁温和换热系数的变化特征及其对冷侧换热的影响。考察了通道截面温度和湍动能的分布情况。通过熵产和综合换热系数评价了 PCHE 通道的性能,进行了通道热应力分析,建立了热侧和冷侧换热关联式(误差在 $\pm 15\%$ 以内)。结果表明:热侧压力对换热仅有微弱影响;热侧流量提高对热侧和冷侧换热均有增强作用。热侧进口温度下降导致热侧和冷侧换热减弱;热侧进口温度提高造成通道熵产显著增加,热侧流量增加造成通道熵产显著减小;高热应力出现在冷热流道之间和壁面两侧,局部最大热应力达到 25 MPa。

关键词 氢氦换热器;超临界压力;换热;热应力;熵产

中图分类号 V231.1 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)06-0063-10

Numerical analysis of heat transfer and thermal stress in the hydrogen-helium PCHE channel of precooled engine

WANG Yanhong, LI Yujian, JIA Yuting, LI Hongwei

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

Abstract Based on the application of printed circuit heat exchanger (PCHE) in the closed helium Brayton cycle of hypersonic precooled engine, the thermal-solid coupling characteristics of hydrogen-helium PCHE channel were numerically studied, and the effect mechanisms of hot-side helium parameters on heat transfer were emphatically expounded. The variation characteristics of hot-side wall temperature and heat transfer coefficient and the effect on cold-side heat transfer were investigated. The distributions of temperature and turbulent kinetic energy in channel cross-section were analyzed. The performance of PCHE channel was evaluated by the entropy generation and the comprehensive heat transfer coefficient, the thermal stress of channel was analyzed, and the heat transfer correlations of hot-side and cold-side were established (error within $\pm 15\%$). The results show that the hot-side pressure has only a weak effect on the heat transfer. The heat transfer of hot-side and cold-side is enhanced with the increase of hot-side mass flux. The decrease of hot-side inlet temperature causes the weakened heat transfer both of the hot-

收稿日期:2023-05-17;修回日期:2023-05-31

基金项目:国家自然科学基金(52106196);吉林省教育厅科技项目(JJKH20220100KJ)

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

通信作者:李洪伟(1982—),男,博士,教授,研究领域为微尺度多相流动与传热传质。

side and the cold-side. The increase of hot-side inlet temperature leads to the significant increase of channel entropy generation, and the increase of hot-side mass flux results in a significant decrease of entropy generation. High thermal stress occurs between the hot and cold flow channels and the side-walls, the maximum local thermal stress reaches 25 MPa.

Key words hydrogen-helium heat exchanger; supercritical pressure; heat transfer; thermal stress; entropy generation

0 引言

预冷发动机是空天飞行器推进系统的核心动力设备,在高超声速输运中发挥着重要作用。预冷发动机配置预冷器,通过氦冷却高温空气实现组合动力模式对接,需要设置闭式氦布雷顿循环回路^[1]。氦循环回路中氢氦换热器以氢作为冷侧对高温氦进行冷却,以保障预冷器中氦具有更优的预冷作用^[2]。氢氦换热器采用微通道结构,冷侧和热侧工质均工作于超临界条件下,通道中冷热流体的耦合换热机制和通道综合性能评价问题引起广泛的重视。

印刷电路板换热器(PCHE)作为一种紧凑型换热装置,具有传热能力强、耐高压和高温的显著优势^[3],通常设计为半圆形^[4-5]、圆形^[6]、三角形^[7]、梯形^[8]等通道截面,结构包括直通道^[9-10]、Zigzag通道^[11-12]、S型通道^[13]和翼型通道^[14-15],近年来对其换热性能进行了一定的研究。其中,超临界压力氦的换热性能及通道设计优化是PCHE的前沿学术问题^[16-17]。Chen等通过实验探究了以氦作为热侧工质PCHE的换热和压降特性,有效实现了通道换热和压降的关联式预测^[18-19]。Seo等对氢氦换热器的超临界换热特性进行了实验研究,逆流时PCHE的平均换热系数远高于顺流情况^[20]。随着热侧雷诺数增大和进口温度提高,平均换热系数显著增大,换热性能更好。Aneesh等对热侧为氦工质的PCHE进行数值模拟,研究发现单排通道比双排通道综合换热性能更好,具有半圆形通道截面PCHE的热工水力性能更优,高压下换热和流阻的综合性能增强^[21]。Kim等探究了热侧为含氦混合工质PCHE的流动换热机制,相比水平通道,竖直通道的热阻和流阻相对较小,综合换热性能更好^[22-24]。Baek考察了PCHE中氦的换热机制,轴向热传导是其在低

温时换热性能差的主要原因^[25],减小PCHE截面积和降低质量流速使其在低温环境下的热力性能显著提高。文献[26-27]开展了轴向导热下PCHE的换热性能研究,运行压力较大时轴向导热对PCHE换热性能影响较小,传热熵产发生在高温区,轴向导热起到降低局部传热熵产的作用。目前,以氦为热侧工质的PCHE换热研究集中于微型燃气轮机回热器方面,随着高超声速飞行器推进系统的不断发展,其在预冷发动机中被广泛应用^[28]。预冷发动机氢氦换热器的研究集中于冷侧通道和热侧通道换热及压降的综合换热性能研究,仍需要基于流场和温度场阐述氢氦通道详细的换热机制。因为PCHE具有紧凑密集的冷侧和热侧流道,传热熵产更为突出,需要评价传热过程中的不可逆损失。同时,冷侧和热侧通道之间温度梯度高,容易出现热应力集中现象。因此,需要通过通道的熵产分析和热应力分析完善氢氦换热器的性能评估问题。

本文以预冷发动机热力循环的氢氦换热器为应用环境,对PCHE通道(冷侧为氢、热侧为氦)的热固耦合特性开展了数值研究,着重探究氦运行参数对通道换热的影响,创新在于通过熵产和综合换热系数评价通道综合换热性能,开展通道热应力分析,并建立热侧和冷侧的换热关联式。

1 数值模型

1.1 PCHE 通道模型

图1给出了PCHE通道示意图。通道宽为0.4 mm,高为0.55 mm,长为150 mm。冷侧氢和热侧氦逆向流动,两侧截面均为半圆,直径为0.26 mm,厚度为0.07 mm,两半圆间距为0.15 mm。 g 为重力加速度。设定冷侧和热侧的进口温度和质量流速,出口设置为静压边界。固壁和流体之间为交界面,通道上下壁面为周期边界,其余壁面为绝热面。

不考虑壁面粗糙度的影响。通道冷侧和热侧制定相同的网格方案,对近壁面做了网格加密,第1层网格无量纲距离 $y^+ < 1$,前3层网格 $y^+ \leq 5$ 。固体域划分15层网格。通过网格无关性分析确定通道截面网格数量为5200,长度方向网格数量为600。通道截面网格见图1。

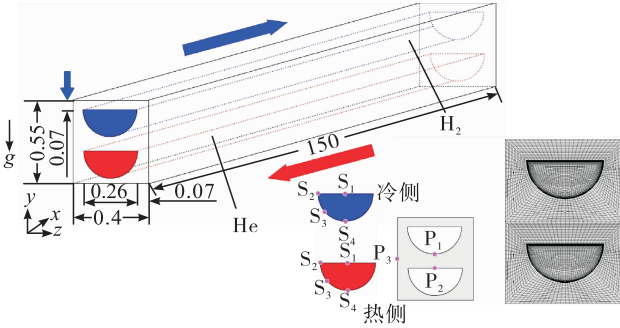


图1 通道模型与网格(单位:mm)

Fig.1 Model and mesh of channel(unit:mm)

1.2 控制方程

质量守恒方程为

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

动量守恒方程为

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

能量守恒方程为

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

RNG $k-\varepsilon$ 模型为

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

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

热传导方程为

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

热应力方程为

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^l \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1-\delta} (\varepsilon_{ij} - \alpha \Delta T) + (1-g)(\text{sgn } \sigma_{ij}) Y \quad (8)$$

式中: ρ 为密度; c_p 为比热容; λ 为热导率; μ 为动力黏度; u 为流速; T 为温度; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; ε_{ij} 为应变张量; ε_{ij}^e 为弹性应变张量; ε_{ij}^p 为塑性应变张量; ε_{ij}^l 为热应变张量; σ_{ij} 为应力张量; E 为弹性模量; δ 为泊松比; α 为线膨胀系数; Y 为材料屈服极限。数值计算中对冷侧流道和热侧流道设置了壁面边界位移全约束。

图2给出了超临界压力下氢和氦热物性参数随温度的变化情况^[29]。通道材料设定为热导率随温度线性增加的不锈钢。通过 Fluent 求解上述控制方程。

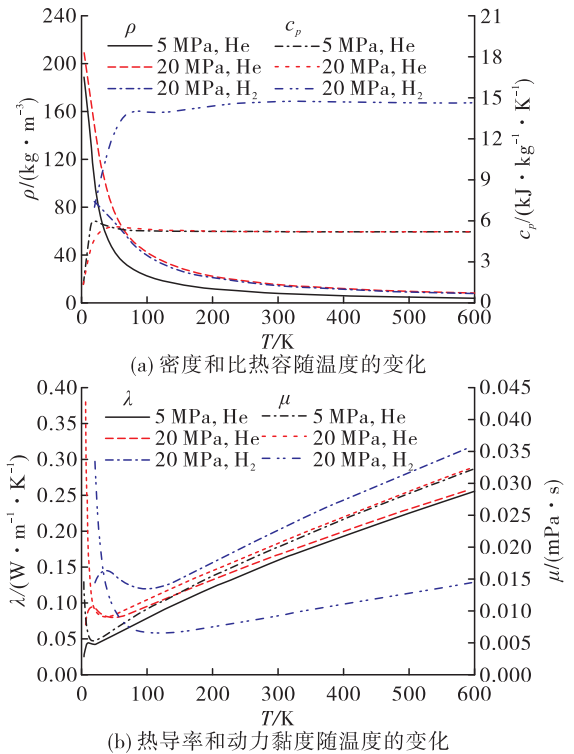


图2 热物性随温度的变化

Fig.2 Thermal properties variations with temperature

1.3 模型验证

通过文献[28]的逆流型氢氦 PCHE 通道进行湍流模型验证。通道宽为0.396 mm,高为0.48 mm,长为150 mm。流道半圆直径为0.263 mm,厚度为

0.224 8 mm, 流道间距为 0.197 6 mm。图 3 给出了冷侧和热侧出口温度随热侧进口温度的变化情况, 运行参数为: 热侧进口温度 $T_{in,h} = 450$ K; 热侧流量 $\dot{m}_{in,h} = 0.01$ kg/s; 热侧压力 $p_h = 2.6$ MPa; 冷侧进口温度 $T_{in,c} = 295$ K; 冷侧流量 $\dot{m}_{in,c} = 0.01$ kg/s; 冷侧压力 $p_c = 3$ MPa。利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。可以看到, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的模拟结果和实验数据符合最好, 两者偏差均处于 $\pm 4.5\%$ 范围内, 证明 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可较好地适用于 PCHE 换热数值研究。

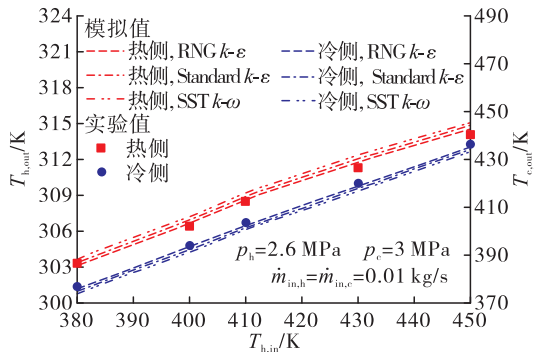


图 3 出口温度随热侧进口温度的变化情况

Fig. 3 Variation of outlet temperature with hot-side inlet temperature

2 数值结果与分析

2.1 换热特性分析

综合考虑热侧进口温度、热侧进口流量、热侧压力对换热的影响。冷侧进口温度、冷侧进口流量、冷侧压力不变。设计的计算工况如表 1 所示。

表 1 计算工况

Tab. 1 Calculated conditions

工况	$T_{in,h}/$ K	$\dot{m}_{in,h}/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_h/$ MPa	$T_{in,c}/$ K	$\dot{m}_{in,c}/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_c/$ MPa
1	450	0.01	5	300	0.01	20
2	450	0.01	20	300	0.01	20
3	450	0.02	5	300	0.01	20
4	400	0.01	5	300	0.01	20

图 4 给出了热侧平均壁温和平均换热系数沿流动方向的变化情况。

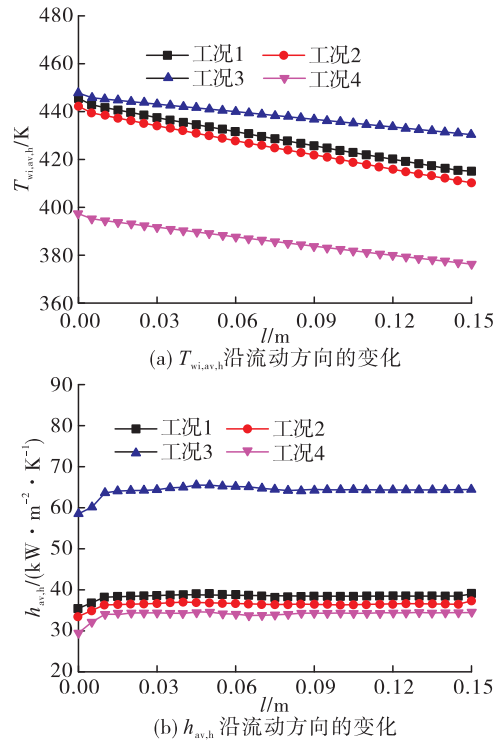
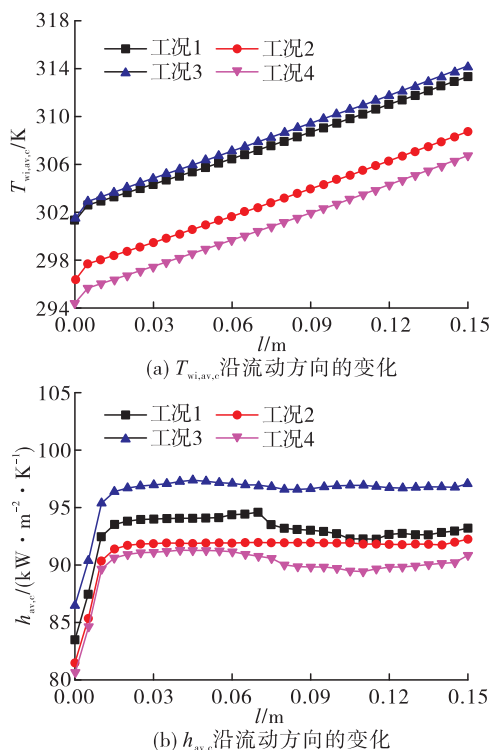


图 4 $T_{wi,av,h}$ 和 $h_{av,h}$ 沿流动方向的变化情况

Fig. 4 Variations of $T_{wi,av,h}$ and $h_{av,h}$ along the flow direction

换热系数定义为 $h = q_{wi}/(T_{wi} - T_b)$, 其中, q_{wi} 为内壁热流密度, T_{wi} 和 T_b 分别为内壁温度和主流温度。由图 4 可以看到, 受到冷侧氢的冷却作用, 热侧壁温沿流动方向逐渐减小, 换热系数受进口热边界层发展影响先增大, 之后较为恒定。以工况 1 作为基准, 随着热侧压力提高, 热侧通道壁温和换热系数均略有下降, 分别减少了 4 K 和 3 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。由于随着压力升高, 氢的热导率增大, 热侧热阻减小, 壁温下降。由于壁面与流体的温差减小, 换热得到增强。随着热侧流量增加, 热侧冷却需求增大, 热侧平均壁温增大了 40 K; 由于热侧热流密度增大, 平均换热系数增大, 增大了 25 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。热侧进口温度减小, 热侧冷却需求下降, 导致热侧壁温下降, 出口位置壁温减小了 20 K; 因为热侧热流密度减小, 换热系数下降, 沿程换热系数减小了 8 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

图 5 给出了冷侧平均壁温和平均换热系数沿流动方向的变化情况, 探究热侧参数对冷侧换热的影响机制。

图5 $T_{wi,av,c}$ 和 $h_{av,c}$ 沿流动方向的变化情况Fig.5 Variations of $T_{wi,av,c}$ and $h_{av,c}$ along the flow direction

由图5可以看到,冷侧壁温沿流动方向逐渐增大,进口热边界层发展区换热系数先增大,之后出现小幅浮动。随着热侧压力提高,固壁热导率增大,热传导过程的温度梯度减小,冷侧壁温下降,同时冷侧热流密度减小,故换热系数下降。热侧流量增大导致热侧冷却需求增加,冷侧壁温增大;冷侧热流密度增大,壁面与流体温差减小,故换热增强。热进口温度减小导致热侧冷却需求下降,冷侧壁温下降;冷侧热流密度下降,壁面与流体温差增大,换热削弱。

图6给出热侧和冷侧通道 $S_1 \sim S_4$ 不同周向位置的壁温分布情况。由图6可以看到,热侧通道壁温按照 S_4, S_3, S_1, S_2 依次减小,主要是因为距离冷侧通道越远,热传导的热阻越大,热侧热流越不能被有效吸收。而冷侧通道壁温按照 S_4, S_3, S_2, S_1 依次减小,主要是因为距离热侧通道越近,热传导分配的热流密度越大。

图7给出了 $l = 75 \text{ mm}$ 位置通道截面的流体温度和固体温度分布情况。由图7可以看到,热侧流体温度从流体侧壁至中心位置逐渐上升,流体温度分层明显,流体温度周向分布不均匀,故通道壁面

热流密度周向不均匀。以工况1为基准,压力提高,温度降低;流量提高,温度增大;进口温度减小,温度下降。冷热侧流道与固壁之间的温度梯度较大,冷侧流体温度基本保持不变。随着热侧进口温度的增加,热侧流道与固壁之间温度分层更为明显。

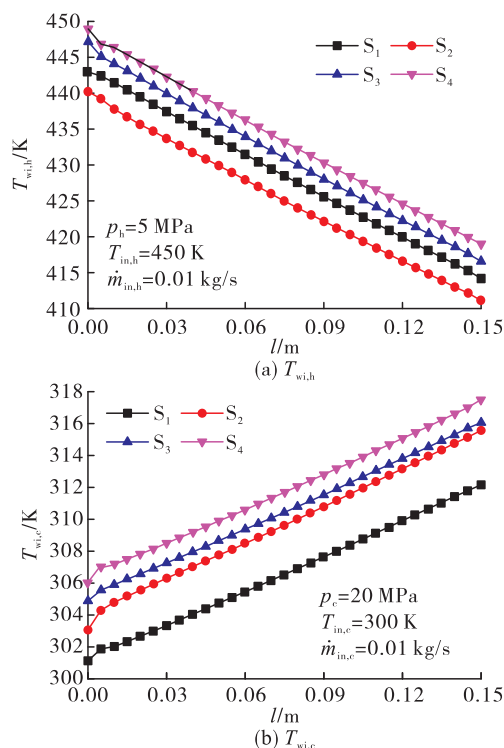


图6 壁面温度的周向分布情况

Fig.6 Circumferential distribution of wall temperature

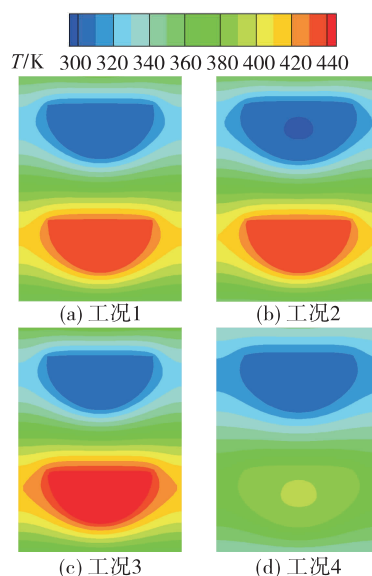


图7 通道截面的温度分布情况

Fig.7 Temperature distribution in the channel cross-section

图 8 给出了热侧流体湍动能的分布情况,取 $l = 75 \text{ mm}$ 位置。由图 8 可以看到,由流体中心至通道近壁面湍动能渐增,壁面附近湍流强度最大,这是因为越靠近壁面速度梯度越大,湍动能越强,最大湍动能达到 $90 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 。顶部和侧面夹角位置的湍动能较小,形成流动滞止点,夹角附近会出现局部高湍流区,这也是周向壁温非均匀的原因。以工况 1 为基准,随着热侧压力增加,动力黏度增大,局部雷诺数减小,湍动能减小;随着流量增加,局部雷诺数增大,湍动能增大;随着进口温度减小,动力黏度减小,局部雷诺数增大,湍动能增大。

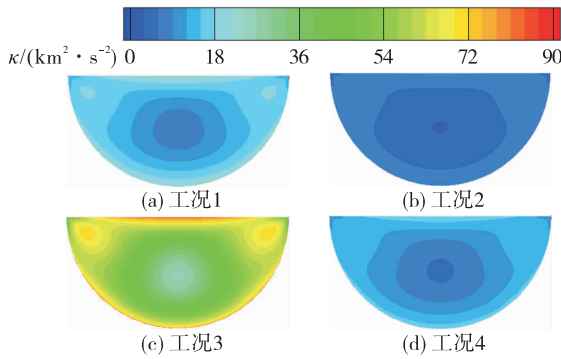


图 8 热侧湍动能分布情况

Fig. 8 Distribution of hot-side turbulent kinetic energy

通过熵产 S_g 和熵产无量纲数 $N_{s,T}^{[30]}$ 考察通道换热过程的不可逆热损失情况。

熵产 S_g 的表达式为

$$S_g = \frac{\lambda}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (9)$$

熵产无量纲数 $N_{s,T}$ 的表达式为

$$N_{s,T} = \frac{\iiint_V S_g dV}{Q/T_{in}} \quad (10)$$

表 2 给出了不同热侧工况下的热力参数数据。随着热侧压力提高, S_g 、 $N_{s,T}$ 略有增加, 说明通道换热

过程熵产受热侧压力的影响极弱。随着热侧流量增大, S_g 显著减小, $N_{s,T}$ 下降, 说明高流量时通道热量传递过程的热损失更小。随着热侧进口温度下降, S_g 显著减小, $N_{s,T}$ 下降, 说明减小热侧进口温度主要起到了减小热量传递过程热损失的作用。

表 2 不同热侧条件下的热力参数

Tab. 2 Thermal parameters at different hot-side conditions

$T_{in,h}/$ K	$\dot{m}_{in,h}/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_h/$ MPa	$S_g/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$N_{s,T}/10^{-2}$
450	0.01	5	2 519.39	1.85
450	0.01	20	2 709.61	1.93
450	0.02	5	1 026.21	0.66
400	0.01	5	1 357.62	1.33

通过综合换热系数评价 PCHE 通道的换热性能^[21], 换热指标如下。

热侧放热量为

$$Q_h = \dot{m}_{in,h} c_{p,h} (T_{in,h} - T_{out,h}) \quad (11)$$

冷侧放热量为

$$Q_c = \dot{m}_{in,c} c_{p,c} (T_{out,c} - T_{in,c}) \quad (12)$$

对数平均温差为

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{in,h} - T_{out,c}) - (T_{out,h} - T_{in,c})}{\ln \frac{T_{in,h} - T_{out,c}}{T_{out,h} - T_{in,c}}} \quad (13)$$

综合换热系数为

$$U_A = \frac{Q_m}{\Delta T_{LMTD}} = \frac{Q_h + Q_c}{2 \Delta T_{LMTD}} \quad (14)$$

表 3 给出了不同热侧工况下综合换热系数。由表 3 可以看出:随着热侧压力的增加,综合换热系数减小,说明热侧压力对综合换热性能的影响微弱;提高热侧流量,通道的综合换热系数增加,说明热侧流量的增加显著提升了通道的综合换热性能;减小进口温度,通道的综合换热性能显著下降。

表 3 不同热侧条件下的综合换热系数

Tab. 3 Comprehensive heat transfer coefficient at different hot-side conditions

$T_{in,h}/\text{K}$	$\dot{m}_{in,h}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	p_h/MPa	Q_h/kW	Q_c/kW	Q_m/kW	$\Delta T_{LMTD}/\text{K}$	$U_A/(\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$
450	0.01	5	1.564 48	1.573 97	1.569 22	18.77	83.61
450	0.01	20	1.620 68	0.886 12	1.253 40	15.32	81.80
450	0.02	5	1.676 35	1.686 34	1.681 34	13.67	122.99
400	0.01	5	1.044 61	1.051 00	1.047 81	12.53	73.62

2.2 热应力分析

高超声速预冷发动机闭式氦布雷顿循环中 PCHE 处于高温高压环境下,可能导致高热应力进

而削弱通道材料强度。本节探究 PCHE 通道的热应力分布情况,热应力 σ 的计算式为^[31]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \quad (15)$$

图9给出了不同热侧工况下通道截面热应力的分布情况,取 $l = 75 \text{ mm}$ 位置。

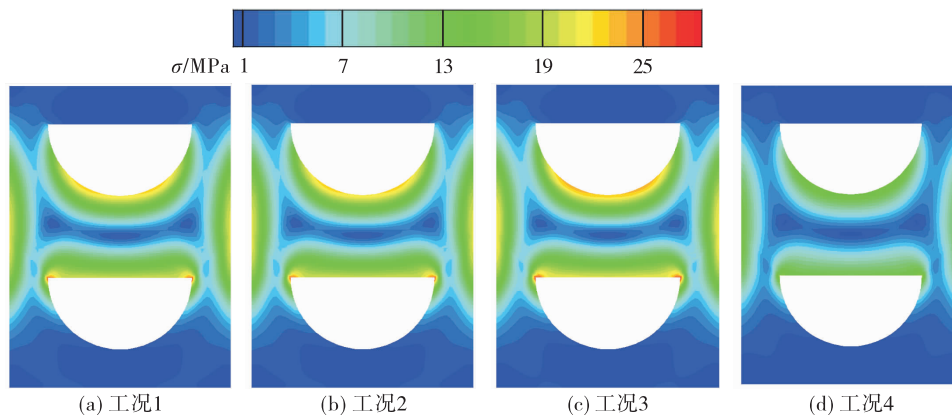


图9 通道截面的热应力分布情况

Fig. 9 Thermal stress distributions in the channel cross-section

由图9可以看出,热应力主要集中于冷侧流道底部、热侧流道顶部、热侧接近夹角的侧壁面、通道两侧等4个位置,最大热应力达到25 MPa。这是由于固壁材料的温度梯度所致。热侧流量和热侧压力对热应力的影响较弱。减小热侧进口温度,冷侧流体和热侧流体的温差下降,通道间热传导的温差减小,材料温度梯度减小,热应力显著削弱。

图10给出了工况1不同位置热应力沿热侧流动方向的分布情况。

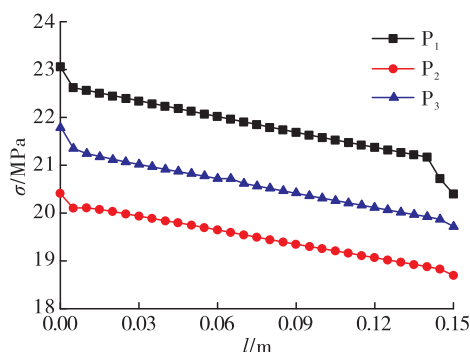
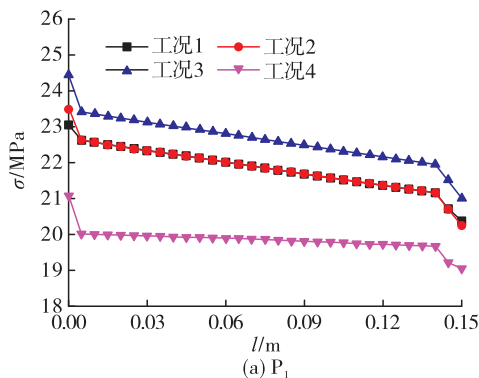


图10 热应力沿热侧流动方向的变化情况

Fig. 10 Thermal stress variation along the hot-side flow direction

冷侧流道底部、热侧流道顶部、通道两侧热应力取图1的 P_1 、 P_2 、 P_3 位置。可以看到, P_1 位置热应力最高,其次为 P_3 位置,最小为 P_2 位置。热应力在热侧进口区较大,沿热侧流动方向热应力逐渐下降。这是因为冷侧流体和热侧流体逆向流动,热侧流体温度逐渐降低,冷侧流体温度不断提高,热侧流体和冷侧流体之间的温度差值减小,通道间的热传导温差下降,热应力削弱。

图11给出了不同热侧参数下热应力沿热侧流动方向的变化情况。由图11可以看到,压力对通道热应力的影响微弱。随着热侧流量的增大,通道热应力增大,且热应力沿流动方向的分布更加均匀。而随着热侧进口温度下降,通道之间的温度梯度减小,通道热应力减小。



(a) P_1

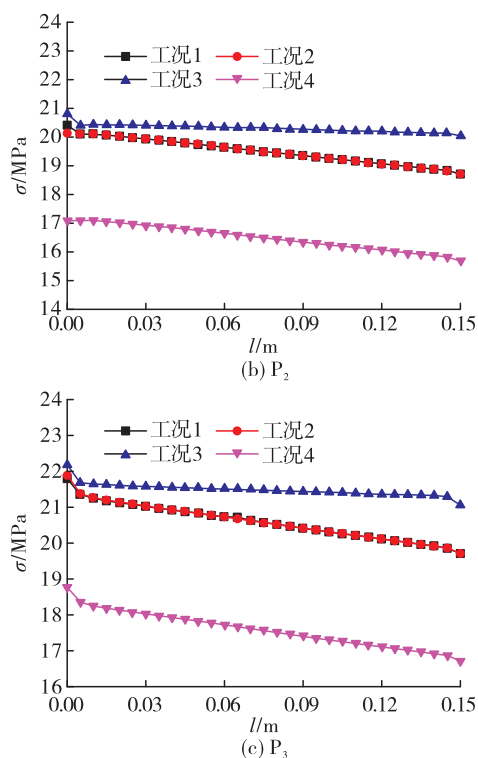


图 11 热侧参数对热应力沿热侧流动方向变化的影响
Fig. 11 Effects of hot-side parameters on thermal stress variation along the hot-side flow direction

2.3 换热关联式

预冷发动机热力循环氢氦 PCHE 通道中超临界压力工质的换热关联式少见报道,通过拟合数值数据和实验数据^[28],提出热侧氦和冷侧氢的换热关联式,具体形式如下。

热侧氦的换热关联式为

$$Nu = 0.41 Re_h^{0.39} Pr_h^{0.65} \left(\frac{l}{d} \right)^{0.21} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.35} \quad (16)$$

式中: Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; Nu 为努塞尔数; d 为通道水力直径; 下标 b 和 w 分别表示主流和壁面。

式(16)的适用范围为: $5 \text{ MPa} \leq p_h \leq 20 \text{ MPa}$;
 $3.5 \times 10^6 \leq Re_h \leq 7.5 \times 10^6$ 。

冷侧氢的换热关联式为

$$Nu = 0.26 Re_c^{0.46} Pr_c^{0.87} \left(\frac{l}{d} \right)^{0.22} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.71} \quad (17)$$

式(17)的适用范围为: $5 \text{ MPa} \leq p_h \leq 20 \text{ MPa}$;
 $1.0 \times 10^7 \leq Re_c \leq 1.5 \times 10^7$ 。

图 12 和图 13 分别给出拟合关联式计算 Nu 与数值数据和实验数据^[28] 的比较情况。可以看到,换

热关联式预测值与数值结果和实验数据的相对偏差较小,在 $\pm 15\%$ 的误差范围内,这为预冷发动机氢氦换热器设计提供了基础依据。

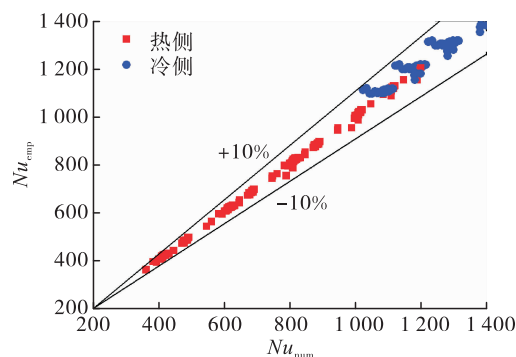


图 12 Nu 预测值与数值结果对比情况
Fig. 12 Comparison of Nu between prediction values and numerical results

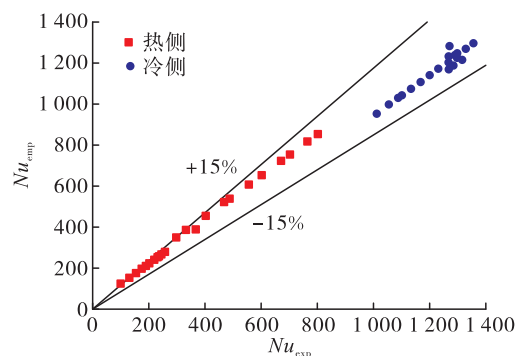


图 13 Nu 预测值与实验结果对比情况
Fig. 13 Comparison of Nu between prediction values and experience results

3 结论

基于高超声速预冷发动机热力循环中氢氦换热器的应用环境,对冷侧流体为氢、热侧流体为氦 PCHE 通道内的超临界换热开展了数值模拟研究,得到如下结论。

1) 热侧压力对热侧换热的影响较弱,热侧进口流量提高和热侧进口温度下降分别导致热侧换热显著增强和减弱。热侧换热影响传热热阻,对冷侧换热具有耦合作用。

2) 热侧压力对熵产、综合换热系数的影响微弱。热侧进口温度提高,熵产增大,熵产增大了

1 161.77 kJ/(mol·K), 热量传递过程的不可逆损失增加, 增加了 10 W/K。热侧流量提高, 通道传热过程熵产减小, 熵产减小了 1 493.18 kJ/(mol·K), 综合换热系数增大, 增大了 39.38 W/K, 说明热侧流量是影响通道整体换热性能最主要的因素。

3) 热应力集中于冷侧流道底部、热侧流道顶部、热侧侧壁面上部、通道两侧, 最大热应力达到 25 MPa。冷侧流道底部的热应力要大于通道两侧的热应力, 热侧流道顶部的热应力最小。热应力沿热侧流动方向不断减小, 高热应力源于通道局部高的温度梯度。提高热侧流体进口温度, 通道热应力显著增大。

4) 提出了热侧氦和冷侧氢的换热关联式, 预测误差处于 $\pm 15\%$ 的范围, 其为预冷发动机 PCHE 通道设计提供了依据。

参考文献

- [1] 邓诗雨, 金志光, 柯玉祥. 宽域组合发动机低速段冲压通道阻力特性[J]. 火箭推进, 2022, 48(6): 44-51.
DENG S Y, JIN Z G, KE Y X. Drag characteristics of ramjet channel of combined cycle engine at low speeds[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(6): 44-51.
- [2] 张业雷, 赵剑, 马挺, 等. 印刷电路板式氦加热器热力设计方法与性能[J]. 火箭推进, 2023, 49(1): 36-43.
ZHANG Y L, ZHAO J, MA T, et al. Thermal design method and performance of printed circuit helium heater[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(1): 36-43.
- [3] WANG Y M, XIE G N, ZHU H T, et al. Assessment on energy and exergy of combined supercritical CO₂ Brayton cycles with sizing printed-circuit-heat-exchangers[J]. Energy, 2023, 263: 125559.
- [4] HUANG C Y, CAI W H, WANG Y, et al. Review on the characteristics of flow and heat transfer in printed circuit heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 190-205.
- [5] YOO J W, NAM C W, YOON S H. Experimental study of propane condensation heat transfer and pressure drop in semicircular channel printed circuit heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 182: 121939.
- [6] KUBO Y, YAMADA S, MURAKAWA H, et al. Correlation between pressure loss and heat transfer coefficient in boiling flows in printed circuit heat exchangers with semicircular and circular mini-channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 204: 117963.
- [7] KIM I H, NO H C. Physical model development and optimal design of PCHE for intermediate heat exchangers in HTGRs[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 243: 243-250.
- [8] ANEESH A M, SHARMA A, SRIVASTAVA A, et al. Effects of wavy channel configurations on thermal-hydraulic characteristics of Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 304-315.
- [9] YOON S J, O'BRIEN J, CHEN M H, et al. Development and validation of Nusselt number and friction factor correlations for laminar flow in semi-circular zigzag channel of printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1327-1344.
- [10] KIM D E, KIM M H, CHA J E, et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(12): 3269-3276.
- [11] PARK J H, KWON J G, KIM T H, et al. Experimental study of a straight channel printed circuit heat exchanger on supercritical CO₂ near the critical point with water cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119364.
- [12] SARMIENTO A P C, MILANEZ F H, MANTELLI M B H. Theoretical models for compact printed circuit heat exchangers with straight semicircular channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 115435.
- [13] KHAN H H, ANEESH A M, SHARMA A, et al. Thermal-hydraulic characteristics and performance of 3D wavy channel based printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 519-528.
- [14] YOON S H, NO H C, KANG G B. Assessment of straight, zigzag, S-shape, and airfoil PCHEs for intermediate heat exchangers of HTGRs and SFRs[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 270: 334-343.
- [15] 刘晨, 李启明, 邹杨, 等. 翼型翅片 PCHE 的结构参数优化与流动传热的数值模拟[J]. 核技术, 2021, 44(11): 84-92.
- [16] PAN X, ZHANG S L, JIANG Y G, et al. Key parameters effects and design on performances of hydrogen/helium heat exchanger for SABRE[J]. International Journal of

- Hydrogen Energy, 2017, 42(34): 21976-21989.
- [17] YOON S J, SABHARWALL P, KIM E S. Numerical study on crossflow printed circuit heat exchanger for advanced small modular reactors [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 250-263.
- [18] CHEN M H, SUN X D, CHRISTENSEN R N, et al. Experimental and numerical study of a printed circuit heat exchanger [J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 97: 221-231.
- [19] CHEN M H, SUN X D, CHRISTENSEN R N, et al. Pressure drop and heat transfer characteristics of a high-temperature printed circuit heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 1409-1417.
- [20] SEO J W, KIM Y H, KIM D, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics in straight microchannel of printed circuit heat exchangers [J]. Entropy, 2015, 17(5): 3438-3457.
- [21] ANEESH A M, SHARMA A, SRIVASTAVA A, et al. Thermal-hydraulic characteristics and performance of 3D straight channel based printed circuit heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 474-482.
- [22] KIM I H, NO H C. Thermal hydraulic performance analysis of a printed circuit heat exchanger using a helium-water test loop and numerical simulations [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(17/18): 4064-4073.
- [23] KIM I H, NO H C. Thermal-hydraulic physical models for a Printed Circuit Heat Exchanger covering He, He-CO₂ mixture, and water fluids using experimental data and CFD [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48: 213-221.
- [24] KIM I H, NO H C, LEE J I, et al. Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(11): 2399-2408.
- [25] BAEK S, KIM J H, JEONG S, et al. Development of highly effective cryogenic printed circuit heat exchanger (PCHE) with low axial conduction [J]. Cryogenics, 2012, 52(7/8/9): 366-374.
- [26] 张海燕, 郭江峰, 淮秀兰, 等. PCHE 内轴向导热对局部换热性能的影响研究 [J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4590-4598.
- [27] 唐凌虹, 杨博皓, 李文军. 轴向导热对印刷电路板式换热器换热性能影响 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 1055-1062.
- [28] LI H X, LIU H X, ZOU Z. Experimental study and performance analysis of high-performance micro-channel heat exchanger for hypersonic precooled aero-engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116108.
- [29] 王翔宇, 徐向华, 梁新刚. 微小通道氢—氦换热器传热分析与结构改进 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(11): 3061-3067.
- [30] HESSELGREAVES J E. Rationalisation of second law analysis of heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(22): 4189-4204.
- [31] 吴家荣, 李红智, 杨玉, 等. 超临界二氧化碳动力循环中印刷电路板换热器芯体机械应力和热应力耦合分析 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 640-650.