

甲烷跨临界传热恶化影响因素分析*

张 萌, 孙 冰

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为了研究甲烷在跨临界条件下传热恶化现象的产生机理及影响因素, 对非对称加热条件下矩形通道内甲烷的跨临界流动与传热进行了三维数值仿真计算, 并就不同出口压力和壁面粗糙度对结果的影响进行了讨论。仿真结果表明, 甲烷在通道中由于温度分层, 使得其靠近壁面处的拟临界温度附近存在一段区域, 其定压比热容处于极大值而热导率处于极小值。二者均会阻碍流体之间的传热, 导致传热恶化现象的发生。此外, 将出口压力从6MPa提高到10MPa和14MPa, 表面平均传热系数分别增大了18.9%和6.5%, 壁面平均温度分别降低了22.9%和16.3%。将壁面粗糙度从 $0\mu\text{m}$ 提高到 $3.2\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$, 表面平均传热系数分别增大了56.3%和92.6%, 壁面平均温度分别降低了29.1%和39.3%。这表明, 增大出口压力与壁面粗糙度均可以抑制传热恶化, 显著降低壁面温度。然而, 当出口压力过大时, 由于甲烷吸热能力的降低反而会导致冷却效率下降。

关键词: 再生冷却; 数值仿真; 甲烷; 跨临界; 传热恶化

中图分类号: V434.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2020) 02-0382-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190265

Analysis of Influence Factors for Methane Transcritical Heat Transfer Deterioration

ZHANG Meng, SUN Bing

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the mechanism and influence factors of the transcritical heat transfer deterioration of methane, the transcritical flow and heat transfer of methane in a rectangular channel under asymmetric heating conditions were simulated numerically in three dimensions, and the effects of different outlet pressures and wall roughness on the results were discussed. The results show that there is a region near the pseudo-critical temperature at the wall where the constant pressure specific heat capacity is at the maximum while the thermal conductivity is at the minimum due to the temperature stratification of methane in the channel. Both of them will hinder the heat transfer between fluids which will lead to the heat transfer deterioration. In addition, when the outlet pressure increases from 6MPa to 10MPa and 14MPa, the average heat transfer coefficient increases by 18.9% and 6.5%, respectively, and the average wall temperature decreases by 22.9% and 16.3%, respectively. When the wall roughness increases from $0\mu\text{m}$ to $3.2\mu\text{m}$ and $5\mu\text{m}$, the average surface heat transfer coefficient increased by 56.3% and 92.6%, respectively, and the average wall temperature decreased by 29.1% and 39.3%, respectively. This indicates that increasing the outlet pressure and wall roughness can inhibit the heat transfer deterioration and significantly reduce the wall temperature. However, when the outlet pressure is too high, the cooling effi-

* 收稿日期: 2019-04-29; 修订日期: 2019-06-03。

作者简介: 张 萌, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机热防护。E-mail: zhang_m@buaa.edu.cn

通讯作者: 孙 冰, 博士, 教授, 研究领域为液体火箭发动机热防护。E-mail: sunbing@buaa.edu.cn

引用格式: 张 萌, 孙 冰. 甲烷跨临界传热恶化影响因素分析[J]. 推进技术, 2020, 41(2):382-389. (ZHANG Meng, SUN Bing. Analysis of Influence Factors for Methane Transcritical Heat Transfer Deterioration[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(2):382-389.)

ciency will be reduced due to the decrease of methane heat absorption capacity.

Key words: Regenerative cooling; Numerical simulation; Methane; Transcritical; Heat transfer deterioration

1 引言

再生冷却作为一种有效的热防护手段,其原理是将一种推进剂组元作为冷却剂,在喷注到推力室之前,先流过冷却通道对推力室内壁进行冷却,这种冷却方法在航空与航天领域都有着广泛的应用^[1-2]。与传统的氢、煤油相比,甲烷作为一种推进剂,相较于氢具有成本低、易制备和易存储等优点,相较于煤油具有比冲高、燃烧产物更环保等优点。因此,近年来,液氧/甲烷发动机在实验与仿真方面都得到了大量的研究^[3-8]。

Tomita等和Locke等^[3-4]对单喷嘴液氧/甲烷发动机进行了热试实验,观察了推力室内部的流场结构,并对壁面热流密度进行了测量。Song等和Sun等^[7-8]对液氧/甲烷发动机燃烧与再生冷却进行了耦合传热计算,并进一步研究了缩进长度对带有缩进室同轴剪切喷嘴的液氧/甲烷推力室燃烧性能和热载荷的影响。

然而,由于甲烷临界压力较低($p_{cr}=4.59\text{MPa}$)而临界温度($T_{cr}=190.53\text{K}$)较高,因此当其在进入再生冷却通道中时,一般会处在一个压力高于临界压力而温度低于临界温度的状态。此时,由于吸热温度升高会经历一个跨临界的过程,导致其物性剧烈变化从而引起传热恶化的发生^[9-14]。这会使得壁面温度急剧升高,对发动机的结构与使用寿命均产生严重的影响。

康玉东等^[9]研究了跨临界甲烷在冷却通道内所处的状态及其对流动换热的影响,但并没有就传热恶化的机理做进一步的分析。Urbano等^[10-11]研究了均匀加热条件下甲烷在圆管中的跨临界流动与传热,讨论了入口流量、热流密度等参数对传热恶化的影响。但并没有结合甲烷在通道中物性的变化对传热恶化的机理做深入的分析。Wang等^[12]对超临界甲烷在矩形通道内非均匀加热条件下的流动与传热进行了数值仿真研究,主要研究了固体壁面材料热导率与通道高宽比对其的影响。结果表明,固体热导率对壁面温度有显著的影响。而在给定入口质量流量的情况下,通道高宽比对流体流动与传热有很大的影响。

针对上述问题,本文采用数值仿真的方法对甲

烷在矩形通道中非对称加热条件下的跨临界流动与换热进行了三维稳态流动与传热研究。通过对甲烷在跨临界条件下的密度、定压比热等物性的分析,研究了其传热恶化的发生机理及条件。接着,通过改变出口压力、壁面粗糙度等边界条件,讨论这些参数对甲烷跨临界传热的影响。

2 方法

2.1 物理模型及网格划分

本文的研究对象包括内壁和冷却剂两部分如图1所示,其中矩形通道高 $h=3\text{mm}$,宽 $b=1\text{mm}$,内壁厚度均为 $t=1\text{mm}$,长度 $L=300\text{mm}$,在底面施加均匀的热流密度。由于几何模型的对称性,只取半个几何体作为计算域。网格划分也如图1所示,全部区域采用六面体结构化网格,其中流体域靠近壁面处加密以捕捉边界层内的流动特征,本算例中所采用的网格总数约为100万。

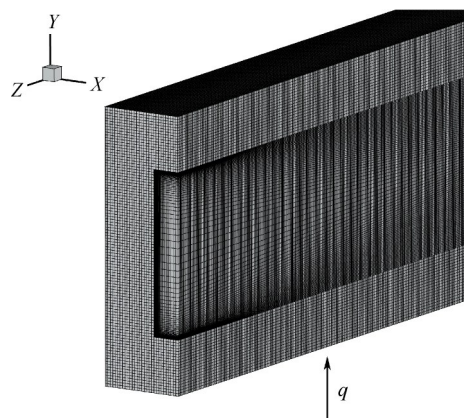


Fig. 1 Geometry and mesh of the computational model

2.2 控制方程及湍流模型

流体域的控制方程为三维稳态可压缩 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\phi) = \text{div}(\mathbf{D}_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中 div 表示该矢量的散度, ρ 是控制体密度, $\mathbf{U}$ 是速度向量, ϕ 是待求变量值, $\mathbf{D}_\phi$ 是广义扩散系数, $\text{grad}\phi$ 表示 ϕ 的梯度, S_ϕ 是单位控制体体积的广义源项。当 ϕ , $\mathbf{D}_\phi$ 及 S_ϕ 取不同的矢量时,该方程能代表连续方程、动量方程、能量方程和组分方程^[15]。固体域热传导控制方程采用傅立叶导热方程

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \quad (2)$$

采用 Fluent 17.2 进行计算。湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ (SKE) 湍流模型, 近壁区域处理采用标准壁面函数。

2.3 边界条件及物性参数

计算所需要的边界条件按照如下的方式给出: 入口边界取质量流量入口, 质量流量为 0.015 kg/s , 温度为 120 K 。出口边界取压力出口, 固体壁面与冷却剂侧对称面取对称边界条件, 流固耦合壁面取无滑移条件, 除加热面和流固耦合壁面以外其余壁面均取绝热边界。加热面为给定热流密度值 $q_w=10\text{ MW/m}^2$ 。为了研究压力与壁面粗糙度对甲烷跨临界传热的影响, 分别取 3 种出口压力与壁面粗糙度如表 1 所示。选取这三种压力可以模拟甲烷从靠近临界压力、物性变化剧烈的状态, 到远离临界压力、物性变化平缓的状态。

Table 1 Outlet pressure and wall roughness for each case

Case	p_e/MPa	Roughness/ μm
1	6	3.2
2	10	3.2
3	14	3.2
4	10	0.0
5	10	5.0

在本文中, 综合考虑计算精度与计算成本两方面的因素, 采用文献[8]中的方法来处理甲烷的物性。甲烷在各个压力下的密度、定压比热、粘性和热导率等随温度的变化数据由 National institute of standards and technology (NIST) 得到, 再利用二维插值的方法使用用户自定义函数 (UDF) 写入到 Fluent 中进行计算。采用这种方法可以准确模拟甲烷在不同压力、不同温度下, 各个物性的变化情况。内壁材料取铜, 其热导率设置为从 $365\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ($T=298\text{ K}$) 到 $325\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ($T=650\text{ K}$) 的线性函数。

2.4 模型验证

为了验证本文所采用的模型在计算甲烷跨临界传热的可靠性, 选取文献[16]中的甲烷跨临界实验作为基准实验, 该实验作为甲烷跨临界传热的经典实验之一, 得到了广泛的数值模拟研究^[10-12, 16]。将其中的 Test Case#26 (TC26) 的实验数据作为验证数据。由于原试验件几何形状较为复杂, 因此本文将计算域简化为一个矩形通道, 其横截面如图 2 所示, 详细的几何尺寸可见文献[16]。其中入口为质量流量入口, 质量流量为 0.02 kg/s , 入口温度为 140 K , 出口给定出口背压为 12 MPa , 加热总功率为 12 kW , 考虑 5% 的

热损失, 换算到加热面上热流密度约为 12 MW/m^2 。壁面粗糙度按照文献[17]所给的数据取 $14.5\mu\text{m}$ 。图 3 给出了计算所得 $z=-4\text{ mm}$ 与 $z=8\text{ mm}$ 处的壁面温度与实验值的比较, 由图可知, 预测结果与实验值相比非常接近, 最大误差为 3.9%, 因此本文所采用的模型可以用来进行接下来的研究。

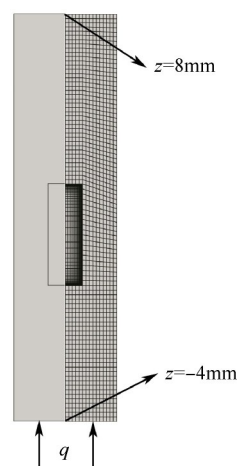


Fig. 2 Computational grids of the test article cross section

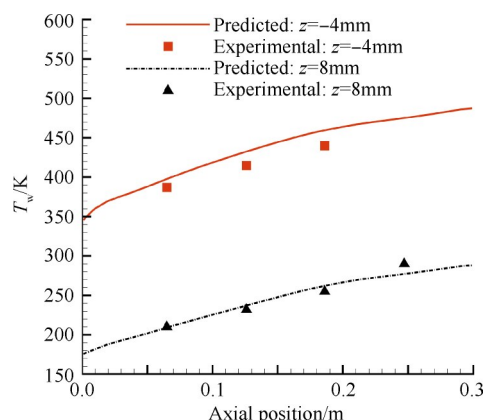


Fig. 3 Comparison of experimental and predicted values of wall temperature

3 结果与讨论

3.1 网格无关性分析

在进行结果讨论之前, 首先对网格无关性进行分析。表 2 给出了三种网格数目, 图 4 为三种网格数目下 Case 1 加热面壁面温度沿轴向变化。由图可知, 粗网格结算结果与其它两种相比存在较大区别, 而后两种网格数目的计算结果差别不大。因此综合考虑计算精度与计算成本, 选择中间数目的网格来进行后续的研究。

3.2 压力对结果的影响

在分析压力对甲烷跨临界传热的影响之前, 图 5

Table 2 Various grid arrangements for grid independence test

Region	Coarse grid	Base grid	Fine grid
Solid	1.5×10^5	4.5×10^5	9×10^5
Fluid	9.0×10^4	5.4×10^5	2.16×10^6

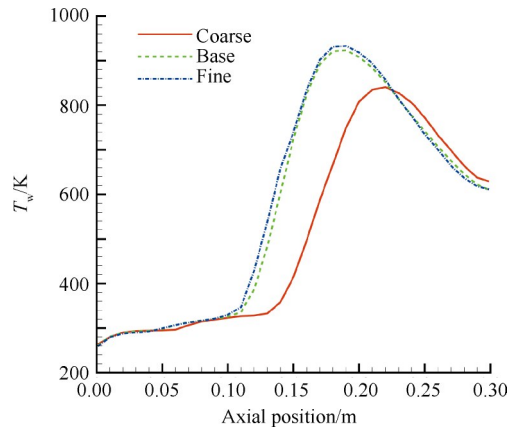


Fig. 4 Streamwise variations of wall temperature of case 1 for three grid level

给出了不同 p_e 压力下甲烷的定压比热容和导热系数随温度的变化。由图可知,甲烷的定压比热和导热系数在拟临界温度附近会分别出现极大值与极小值。而随着压力逐渐升高远离其拟临界压力,甲烷物性变化会逐渐变得平缓。

沿冷却剂流动方向(z 轴)分别取 $z=0.0\text{m}$ (冷却剂入口), $z=0.1\text{m}$, $z=0.2\text{m}$ 和 $z=0.3\text{m}$ (冷却剂出口) 4 个截面。图 6 给出了 4 个截面冷却剂温度云图。由图可知,随着冷却剂在冷却通道中吸热温度升高,截面上的温度出现了严重的分层现象,靠近壁面处温度较高,而在靠近流体中心区域温度较低。当靠近壁面处的甲烷温度逐渐超过其拟临界温度 190.5K 时,湍流核心区域的温度仍然低于拟临界温度。此时在靠近壁面处甲烷的物性会发生剧烈变化,对整体传热产生影响。

图 7, 8 分别给出了 $p_e=6\text{MPa}$, 4 个截面上甲烷定压比热容与热导率分布,由图 5 可知,在拟临界温度附近甲烷定压比热容存在极大值而热导率存在极小值。因此,当靠近壁面处甲烷温度逐渐达到其拟临界温度时,定压比热容会逐渐达到其峰值。而随着其温度继续升高超过其拟临界温度时,定压比热又会迅速降低。由于这样的原因,使得靠近壁面处的高温流体与湍流核心区域的低温流体之间存在定压比热容处于极大值的区域。而基于同样的原因,甲烷热导率在相同的区域处于极小值。这两方面原因

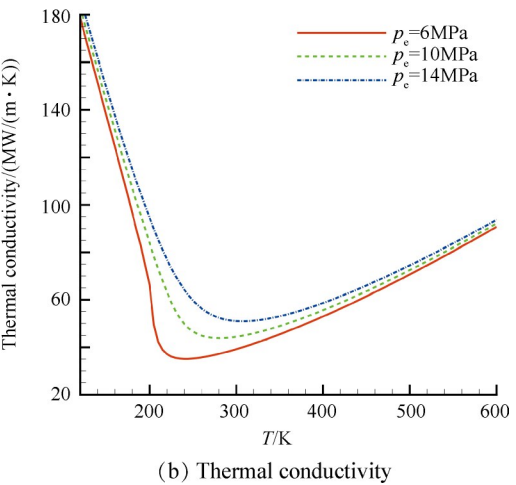
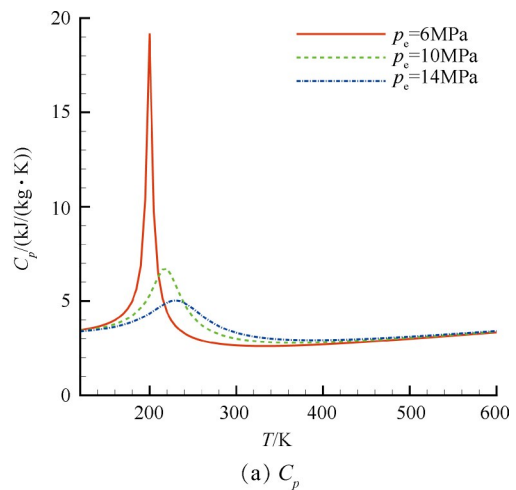


Fig. 5 Physical properties of methane vary with temperature under different pressures

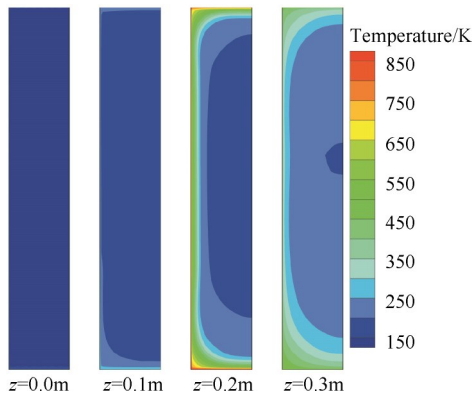


Fig. 6 Temperature distribution of coolant on each section

均会阻碍两部分流体之间的传热,从而导致传热恶化现象的发生。

图 9 给出了 4 个截面对称轴上流体速度沿 y 轴方向的变化,当冷却剂刚进入通道时,其流速分布基本符合 U 型速度分布,即在湍流核心区域流速较高,在靠近壁面处速度逐渐降低直至 0。随着冷却剂温度升高,由于温度、密度分层导致逐渐出现了 M 型速度

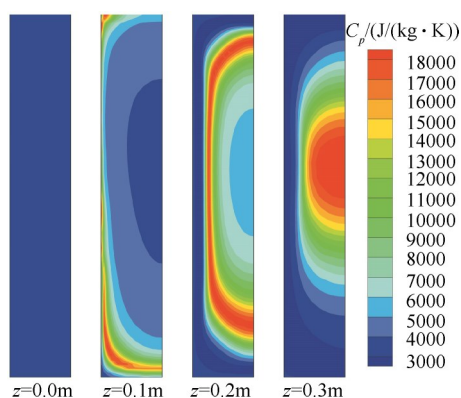


Fig. 7 Distribution of specific heat of coolant on each section

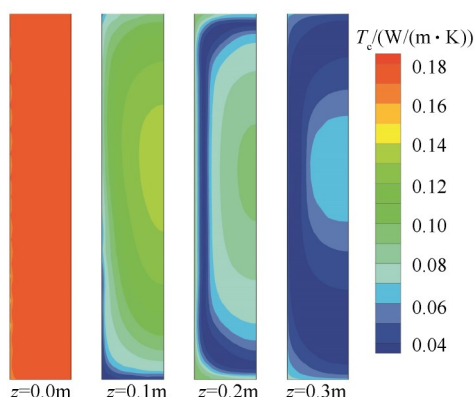


Fig. 8 Thermal conductivity distribution of coolant on each section

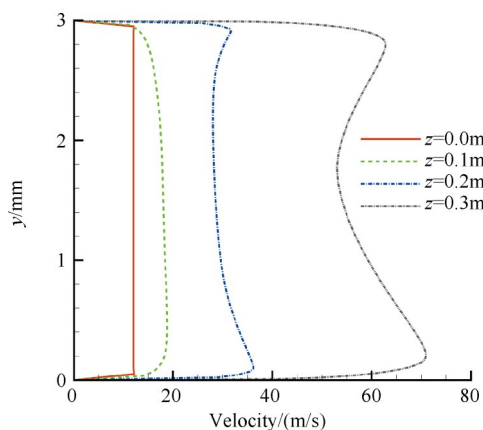
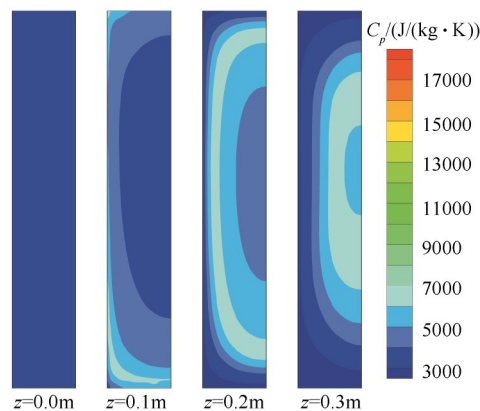


Fig. 9 Variation of fluid velocity along the symmetrical axis on each section

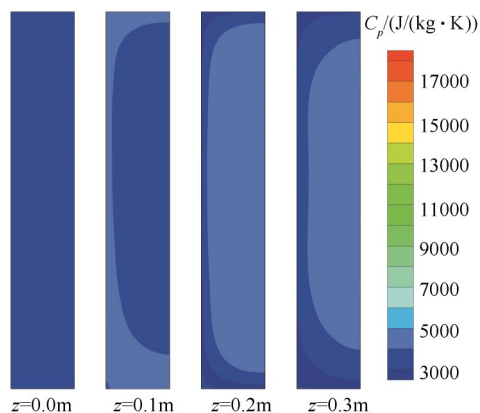
分布,在靠近壁面处出现了局部的高速流动区域,文献[11]指出这也是一个传热恶化发生的标志。

图 10, 11 分别给出了 $p_c=10\text{MPa}$ 和 14MPa 下各截面上定压比热容与热导率分布。从图 10 中可以看出,随着压力升高,甲烷在拟临界温度附近的定压比热容峰值逐渐降低,因此各截面上定压比热容的分布逐渐变得均匀,使得流体之间的传热得到改善。

此外,通过对比三种压力下各截面上热导率分布可以发现,由于不同压力下甲烷热导率随温度变化相差不大,因此不同压力下热导率分布比较接近。



(a) $p_c=10\text{MPa}$



(b) $p_c=14\text{MPa}$

Fig. 10 Distribution of specific heat of coolant on each section for different pressures

图 12 给出了三种压力下通道表面传热系数与壁面温度沿轴向的变化,其中表面传热系数的定义为

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} \quad (3)$$

式中 q_w 为热流密度, T_w 和 T_b 分别为壁面温度与流体温度。

由图 12 可知,出口压力为 6MPa 时,表面传热系数在 $z=0.1m$ 处有个剧烈的下降过程,表明在此处开始出现了传热恶化,随后,随着甲烷温度进一步升高,物性逐渐变得均匀,使得换热得到改善,表面传热系数有一个抬升的过程。因此壁面温度沿轴向在 $z=0.1m$ 处突增直至达到峰值,随后温度逐渐降低。

由之前分析可知,随着压力的升高,甲烷物性随温度变化逐渐平缓,在截面上的分层得到减弱,这会改善流体之间的传热,使得表面传热系数变化趋于

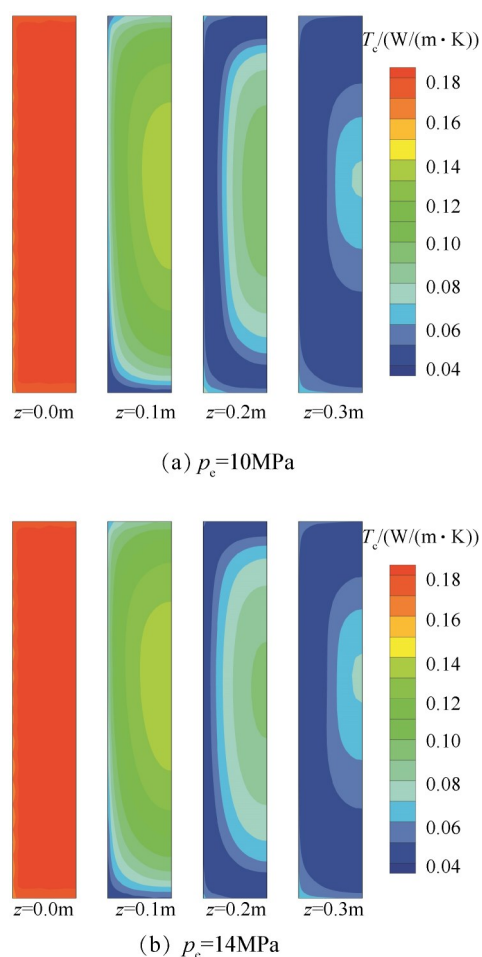


Fig. 11 Thermal conductivity distribution of coolant on each section for different pressures

平缓,壁面温度也得到了显著降低,如图12所示。此外,当压力过高时,虽然甲烷物性随温度变化更加平缓,但由图12可知,出口压力在14MPa下的表面传热系数相比于出口压力为10MPa下的反而更低。这是由于随着压力的升高,由图5(a)可知甲烷的定压比热容在拟临界温度下的峰值会逐渐降低,而定压比热容是表征流体吸热能力的一个参数,因此定压比热容过低会使得流体吸热能力大大降低,反而使得表面传热系数下降。通过对三种出口压力下的表面传热系数与壁面温度进行定量分析可知,相较于6MPa压力下的结果,出口压力分别为10MPa和14MPa下的表面传热系数平均值分别增大了18.9%和6.5%,而壁面温度平均值分别降低了22.9%和16.3%。

上述结论表明,在一定范围内,提高出口压力有助于改善传热恶化,降低壁面温度。但压力过高则会降低甲烷的吸热能力,使得冷却效果降低。

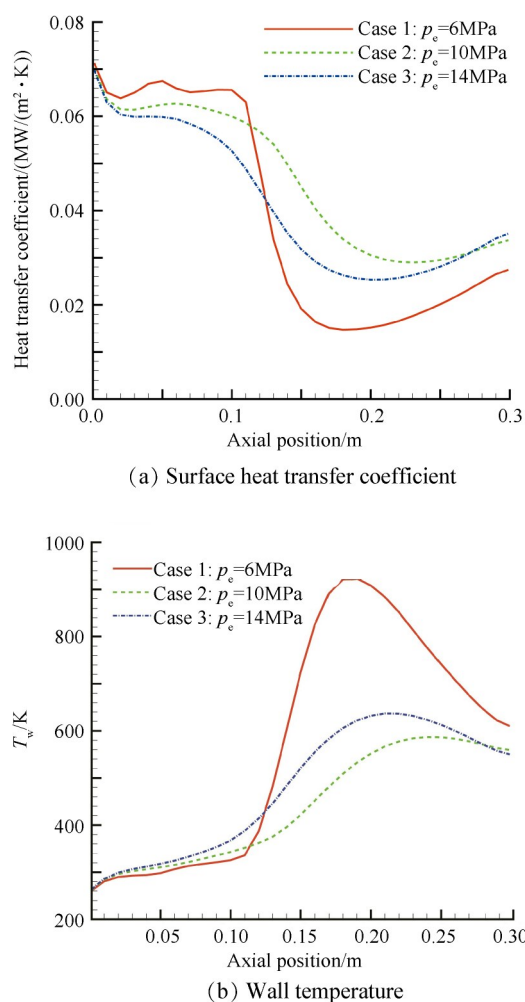


Fig. 12 Streamwise variations of surface heat transfer coefficient and wall temperature for different pressures

3.3 壁面粗糙度对结果的影响

为了研究通道内壁面粗糙度对甲烷跨临界传热的影响,分别取 $0.0\mu\text{m}$ 、 $3.2\mu\text{m}$ 和 $5.0\mu\text{m}$ 三种壁面粗糙度,其余条件均保持不变。三种粗糙度下通道表面传热系数与壁面温度沿轴向变化如图13所示。

通过对图13的分析,可以看出,当壁面粗糙度增大时,表面传热系数有了明显的升高,且变化更加平缓。对比各个粗糙度下的壁面温度可知,壁面粗糙度增大到 $5.0\mu\text{m}$ 时,温度沿轴向变化已经没有了明显的峰值,表明传热恶化已经基本消失。通过对各个粗糙度下的表面传热系数与壁面温度进行定量分析可知,与粗糙度为 $0.0\mu\text{m}$ 工况相比,粗糙度为 $3.2\mu\text{m}$ 和 $5.0\mu\text{m}$ 工况下的表面传热系数平均值分别增大了56.3%和92.6%,而壁面温度平均值分别降低了29.1%和39.3%。但增大粗糙度会使得总压损失增大,虽然本文没有就此进行讨论,在实际应用中应当考虑这一因素。

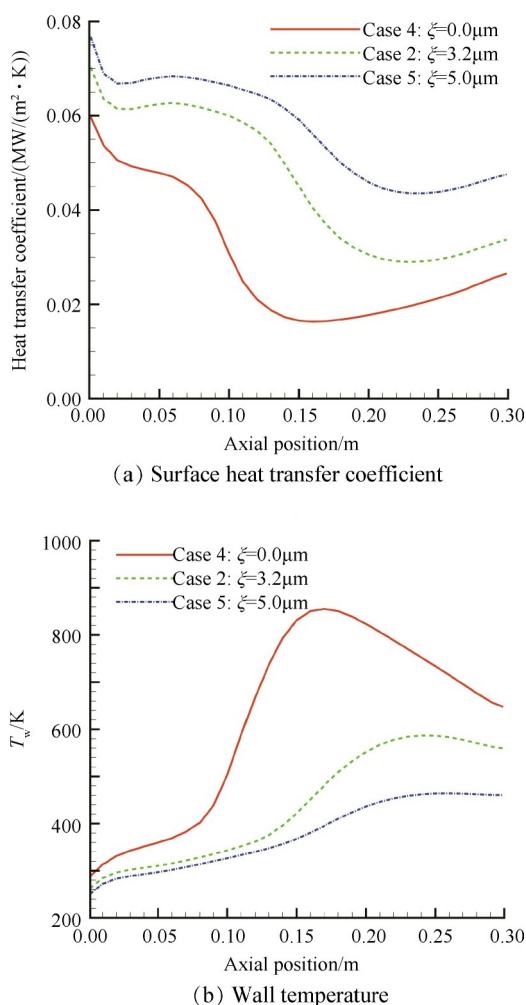


Fig. 13 Streamwise variations of surface heat transfer coefficient and wall temperature for different roughness

4 结论

为了研究出口压力和壁面粗糙度对甲烷跨临界传热恶化的影响,本文对甲烷在非对称加热条件下矩形通道中的流动与传热进行了三维稳态仿真计算。通过对计算结果进行分析,得到了如下结论:

(1)在甲烷通道中由于非对称加热会产生严重的温度分层,其物性在拟临界温度附近发生剧烈变化,使得靠近壁面处的高温流体与湍流核心区域的低温流体之间存在一段区域,其定压比热容处于极大值而热导率处于极小值,二者均会阻碍流体之间的传热,进而导致传热恶化现象的发生。

(2)将出口压力从6MPa提高到10MPa和14MPa,表面平均传热系数分别增大了18.9%和6.5%,壁面平均温度分别降低了22.9%和16.3%。这表明,在一定范围内,提高出口压力会使甲烷在拟临界温度附近的物性变化趋于平缓,有助于改善传热恶化,降低壁面温度。但压力过高则会降低甲烷的吸热能力,

反而使得冷却效率减弱。

(3)相较于增大出口压力,当壁面粗糙度增大时,对表面传热系数的增大和对传热恶化抑制效果更加明显。将壁面粗糙度从 $0\mu\text{m}$ 提高到 $3.2\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$,表面平均传热系数分别增大了56.3%和92.6%,壁面平均温度分别降低了29.1%和39.3%。但增大粗糙度会增大总压损失,因此在实际设计当中应合理选择壁面粗糙度。

参考文献

- [1] 蔡国飙,李家文,田爱梅,等. 液体火箭发动机设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [2] 章思龙,秦江,周伟星,等. 高超声速推进再生冷却研究综述[J]. 推进技术,2018,39(10):2177-2190. (ZHANG Si-long, QIN Jiang, ZHOU Wei-xing, et al. Review on Regenerative Cooling Technology of Hypersonic Propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(10): 2177-2190.)
- [3] Tomita T, Ueda S, Kawashima H, et al. Status of Experimental Research on High Performance Methane-Fueled Rocket Thrust Chamber[R]. AIAA 2011-5935.
- [4] Locke J, Pal S, Woodward R. Chamber Wall Heat Flux Measurements for a LOX/CH₄ Uni-element Rocket[R]. AIAA 2007-5547.
- [5] Wang T S, Luong V. Hot-Gas-Side and Coolant-Side Heat Transfer in Liquid Rocket Engine Combustors[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8(3): 524-530.
- [6] Liu Q, Luke E A, Cinnella P. Coupling Heat Transfer and Fluid Flow Solvers for Multidisciplinary Simulations[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, 19(4): 417-427.
- [7] Song J W, Sun B. Coupled Numerical Simulation of Combustion and Regenerative Cooling in LOX/Methane Rocket Engines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106(8): 762-773.
- [8] Song J W, Sun B. Coupled Heat Transfer Analysis of Thrust Chambers with Recessed Shear Coaxial Injectors[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 132(3):150-160.
- [9] 康玉东,孙冰. 再生冷却通道跨临界甲烷流动传热研究[J]. 航空动力学报,2010,25(11):2494-2497.
- [10] Urbano A, Nasuti F. Onset of Heat Transfer Deterioration in Supercritical Methane Flow Channels[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2013, 27(2): 298-308.
- [11] Urbano A, Nasuti F. Parametric Analysis of Heat Transfer to Supercritical-Pressure Methane [J]. *Journal of*

- Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 26(3): 451–463.
- [12] Wang L L, Chen Z J, Meng H. Numerical Study of Conjugate Heat Transfer of Cryogenic Methane in Rectangular Engine Cooling Channels at Supercritical Pressures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(1): 237–246.
- [13] Wang Y Z, Hua Y X, Meng H. Numerical Studies of Supercritical Turbulent Convective Heat Transfer of Cryogenic-Propellant Methane [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, 24(3): 490–500.
- [14] 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(1): 600–607.
- [15] 康玉东, 孙冰. 燃气非平衡流再生冷却流动传热数值模拟 [J]. 推进技术, 2011, 32(1): 119–124. (KANG Yu-dong, SUN Bing. Numerical Simulation of Regenerative Cooling Flow and Heat Transfer with Non-equilibrium Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(1): 119–124.)
- [16] Votta R, Battista F, Salvatore V, et al. Experimental Investigation of Transcritical Methane Flow in Rocket Engine Cooling Channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101(5): 61–70.
- [17] Shokri M, Ebrahimi A. Improvement of Heat-Transfer Correlations for Supercritical Methane Coolant in Rectangular Channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 216–230.

(编辑:梅 瑛)