

# 矩形通道内航空煤油流动换热数值研究

王壮壮<sup>1</sup>, 周章文<sup>1</sup>, 张登成<sup>1</sup>, 粟 银<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军工程大学基础部, 西安, 710051)

**摘要** 针对先进动力装置利用航空煤油实现再生冷却的现实需求,建立了矩形冷却通道流/固/热耦合的三维数值模型,分析了入口质量流量、压力、热流密度等工况条件对矩形通道内航空煤油流动传热特性参数的影响。结果表明:增大质量流量和减小热流密度都会提升航空煤油的换热能力;在一定压力范围内,压力对航空煤油换热的影响不明显,但随着压力的增加,煤油的换热能力变差;由于传热恶化的发生,上述工况对压力损失和摩擦阻力的影响较为复杂。

**关键词** 超临界压力;矩形通道;RP-3煤油;流动换热;

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.05.004

**中图分类号** V231.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0022-06

## A Numerical Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene in Rectangular Channel

WANG Zhuangzhuang<sup>1</sup>, ZHOU Zhangwen<sup>1</sup>, ZHANG Dengcheng<sup>1</sup>, SU Yin<sup>2</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In view of realizing an advanced power plant by using aviation kerosene to meet the needs of regenerative cooling, a three-dimensional numerical model of fluid-thermal-structural coupling in the rectangular cooling channel is established, and the influence of working conditions, such as inlet flow mass rate, pressure and heat flux density on the flow and heat transfer characteristics of aviation kerosene in the rectangular cooling channel is analyzed. The results show that increasing the mass flow rate and reducing the heat flux density will definitely enhance the heat transfer ability of aviation kerosene. Within the range of a certain pressure, the influence of pressure on aviation kerosene heat transfer is not obvious, but with the increase of pressure, the heat transfer ability of aviation kerosene becomes worse. Due to the occurrence of heat transfer deterioration, the influence of the working conditions as mentioned above on the pressure loss and the friction resistance is comparatively complicated

**Key words:** super-critical pressure; rectangular channel; RP-3 kerosene; flow and heat transfer

碳氢燃料凭借着体积热值和热沉高、易于携带等优势广泛用于先进空天动力装置的再生冷却系统中<sup>[1]</sup>。由于再生冷却系统特殊的工作环境,碳氢燃

料的工作压力一般大于其临界压力(RP-3煤油临界压力约为2.2 MPa),超临界压力下碳氢燃料在管内的流动换热现象较为复杂<sup>[2]</sup>,热物性会发生剧烈变

**收稿日期:** 2019-06-10

**作者简介:** 王壮壮(1994—),男,河南周口人,硕士生,主要从事超临界压力碳氢燃料流动传热研究。E-mail: zzwizyj@163.com

**引用格式:** 王壮壮,周章文,张登成,等. 矩形通道内航空煤油流动换热数值研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 22-27.  
WANG Zhuangzhuang, ZHOU Zhangwen, ZHANG Dengcheng, et al. A Numerical Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene in Rectangular Channel[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 22-27.

化,流动传热特性还会因压力、热流密度、入口质量流量等工况的影响而发生变化。

目前,国内外广泛开展了超临界状态下流体的换热研究。Kelbaliev 等<sup>[3]</sup>根据壁温分布特点,将碳氢燃料的传热分为正常传热、传热恶化和传热强化 3 个阶段。黄丹等<sup>[4]</sup>实验分析了竖直圆管内质量流量、压力和进口温度对煤油传热的影响,结果表明,提高质量流量或进口温度均使传热效果得到改善,压力对煤油传热影响不大。Hitch 等<sup>[5]</sup>通过实验研究了竖直管中 JP-7 航空煤油的传热恶化。目前,再生冷却通道多为矩形通道<sup>[6]</sup>,且为单侧加热,不均匀地受热使得其内部流动更为复杂。基于此种模型,王彦红等<sup>[7-8]</sup>分别对方形通道内甲烷与正癸烷的流动传热特性进行了数值模拟,分析了传热恶化产生的原因以及传热恶化引起的热传导异常和类模态沸腾现象。章思龙等<sup>[9]</sup>建立冷却通道三维模型,研究了流道截面积、高宽比和肋片厚度对正癸烷换热性能的影响。阮波等<sup>[10-11]</sup>分析了三维通道内压力、热流密度、高宽比等对甲烷流动换热的影响,重点分析了拟临界温度附近的传热恶化现象。张明等<sup>[12]</sup>探究了变截面冷却通道的高宽比对甲烷流动传热的影响,发现增大冷却通道高宽比可降低喉部燃气侧壁面最高温度。上述研究多为甲烷、正癸烷等单一物质,对于 RP-3 航空煤油的流动特性、流阻和压力损失的研究还少见报道。

### 1 计算模型

#### 1.1 计算模型和边界条件

高温燃烧室 4 个壁板内嵌有多个大小和受热环境均相同的再生冷却通道<sup>[13]</sup>,取壁板中间一个冷却通道进行研究。如图 1 所示,冷却通道高度和宽度均为 2 mm,四周壁厚为 0.5 mm。通道加热段长度  $l=1\ 000\text{ mm}$ ,加热段前端的绝热段长 200 mm,坐标轴  $z=0$  对应加热段起点位置。入口边界条件为质量流量入口,入口温度  $T_{in}=300\text{ K}$ ;将燃气侧壁面受热条件简化成恒定的热流,加热段边界为壁面边界条件,上壁面和两侧壁面均设置为绝热壁面;出口边界条件为压力出口,且出口压力大于煤油临界压力。RP-3 航空煤油在温度超过 820 K 后会明显发生热裂解反应<sup>[14]</sup>,本文各计算工况下出口煤油平均温度均低于 750 K,故忽略煤油裂解对计算结果的影响。

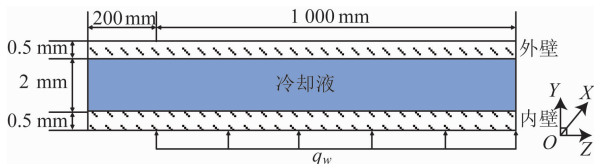


图 1 再生冷却通道模型示意图

在数值计算中,引入对流换热系数  $h$  表征超临界压力下煤油的换热性能。定义为:

$$h = q_w / (T_w - T_f) \tag{1}$$

式中: $T_w$  为加热壁面内侧温度; $T_f$  为平均油温,其定义为:

$$T_f = \frac{\int_A \rho u C_p T dA}{\int_A \rho u C_p dA} \tag{2}$$

式中: $u$  为流速; $\rho$  为煤油密度; $C_p$  为定压比热; $A$  为通道截面积。

摩擦阻力以剪切应力的形式存在,定义为:

$$\tau_w = -\mu_w (\partial v / \partial y)_w \tag{3}$$

#### 1.2 网格划分

划分黏性影响区网格时,需要控制第一层网格到壁面的距离,确保  $y^+ \leq 1$ ,本文采用 O-grid 创建结构化网格,并对黏性影响区的网格进行细化,划分 10 层以上网格,以保证对流场物理量的精确计算。计算模型关于平面  $yOz$  对称,因此取矩形通道的一半区域进行计算,图 2 为矩形通道截面网格划分结果。轴向网格则采取均匀划分方式。经过网格无关性分析,最终取  $2\ 698 \times 500$  网格进行计算。

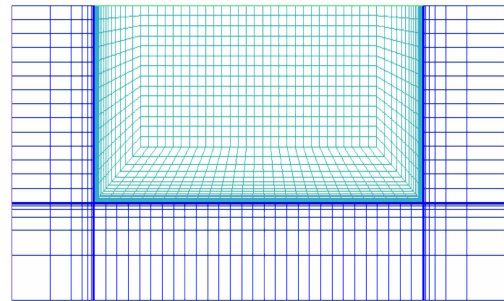


图 2 再生冷却通道截面网格

#### 1.3 碳氢燃料热物性模型

燃烧室壁面采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,RP-3 航空煤油采用仲峰泉等<sup>[15]</sup>提出的 10 组分替代模型,具体计算方法见文献<sup>[16~17]</sup>。图 3 为 3 MPa 压力下煤油的物性随温度的变化规律。

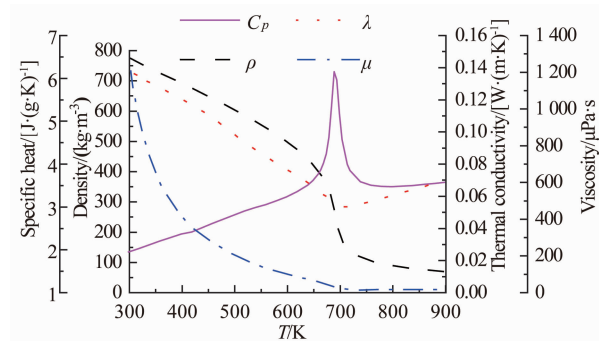


图 3 3 MPa 压力下 RP-3 航空煤油的热物性

#### 1.4 数值计算方法及验证

湍流模型为 RNG  $k-\epsilon$  两方程模型,近壁区由于湍流发展不充分,采用增强壁面处理法,通过有限容积法离散三维的 Navier-Stokes 方程,运用 SIM- PLEC 算法求解压力-速度耦合方程,动量和能量方

程均采用二阶迎风格式<sup>[17]</sup>。对仲峰泉等<sup>[15]</sup>在二级加热圆管内的实验进行仿真,结果如图4所示。温度计算值与实验值最大误差仅为8.3%,故认为计算方法可靠。

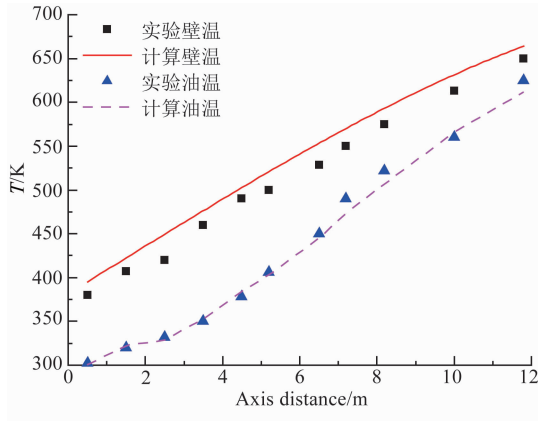


图4 油温、壁温分布

## 2 计算结果分析

### 2.1 流量对流动换热的影响

本节计算条件为:出口压力  $p_{out}=3\text{ MPa}$ ,热流密度  $q_w=3\text{ MW/m}^2$ ,质量流量  $m_{in}$ 分别为6、8、10、12 g/s。图5~6分别给出了不同流量下,对流换热系数和温度沿流动方向的变化。在流量较低时,冷却通道内出现了正常传热、传热恶化、传热强化3个阶段;随着流量增加,传热恶化位置逐渐后移直至在通道内消失,壁面温度和油温也逐渐降低。在传热恶化阶段,随着壁温的升高,加热壁面附近温度率先达到拟临界温度,此时煤油密度相比主流区域急剧减小,加热壁面附近流体速度急剧增大,与加热壁面之间存在较大的速度梯度,阻碍热量由加热壁面向主流区域的传递,因此此时壁面温度会发生突变,对流换热系数也急剧减小。由于传热恶化的影响,在出口处,6 g/s与8 g/s的计算条件下,出口壁温基本相同,但出口段6 g/s时的对流换热系数大于8 g/s的换热系数。

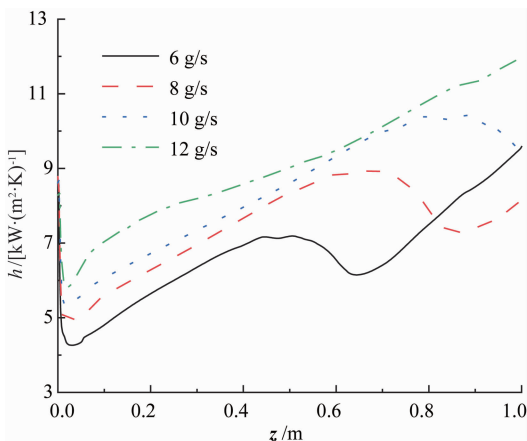


图5 流量对对流换热系数影响

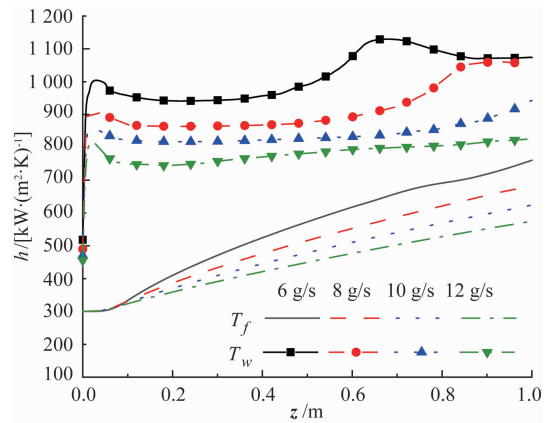


图6 流量对冷却通道油温、壁温分布影响

就壁面温度变化来说,与6 g/s时相比,随着流量增加,壁面最高温度分别减小了5.6%、15.3%、24.8%。流量对壁温影响不是线性,在有传热恶化发生时,流量增加2 g/s,壁面最高温度减小5.6%,而在未发生传热恶化或者现象不明显时,流量同样增加2 g/s,壁面最高温度减小约10%,此时流量的增加对壁温减小的贡献较大,可见传热恶化对煤油换热能力的影响较为显著。

图7给出了冷却通道内压力损失分布。在未发生传热恶化时,压力损失变化曲线更倾向于直线;在发生传热恶化时,压力损失急剧增加,出口处6 g/s时的压力损失甚至接近于10 g/s时的压力损失。传热恶化不仅影响航空煤油的换热能力,也极大降低了煤油的流动效率。随着流量增加,压力损失增加较快,12 g/s时出口处压力损失约0.7个大气压,约为10 g/s时的1.8倍,较大的流量虽然强化了煤油换热效果,但也极大增大了压力损失,过大的压力损失会降低煤油的输运特性与喷射特性,因此选取入口流量时需综合考虑换热效果与流动损失。

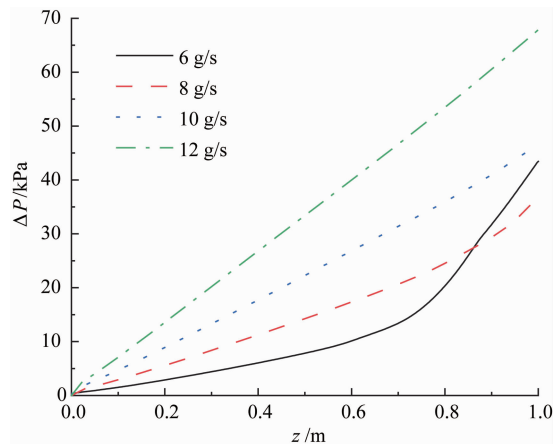


图7 流量对冷却通道内流动压力损失分布影响

图8给出了冷却通道剪切应力分布,在未发生传热恶化时,流量越大,剪切应力也越大,沿流动方向,剪切应力平稳增加。这是由于沿流向随着温度的升高,密度逐渐减小导致流速增大,近壁区的速度

梯度  $dv/dy$  随之增大,而动力黏度沿流向逐渐减小,理论上流体剪切应力的大小均与  $dv/dy$  和  $\mu$  呈正相关,故  $dv/dy$  和  $\mu$  的反向变化导致剪切应力缓慢增加。在发生传热恶化区域剪切应力迅速增大,出口处 6 g/s 时的剪切应力甚至远大于 12 g/s 时的剪切应力,这是由于此时加热壁面附近存在较大的速度梯度,而壁面处动力黏度保持在较小的水平,因此剪切应力迅速增大。

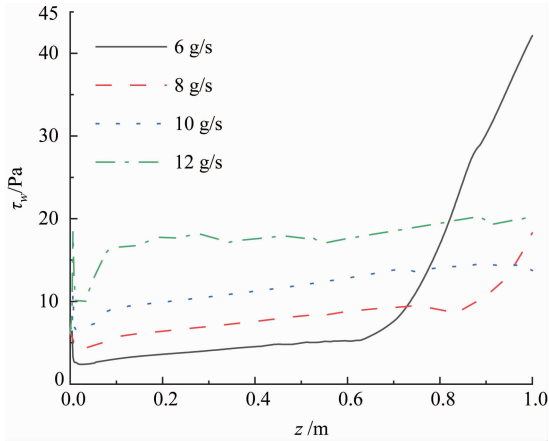


图 8 流量对冷却通道内剪切应力分布影响

### 2.2 压力对流动换热的影响

本节计算条件为:  $q_w = 3 \text{ MW/m}^2$ ,  $m_{in} = 8 \text{ g/s}$ ,  $p_{out}$  分别为 3、4、5 MPa。图 9~10 分别给出了不同压力下,对流换热系数和温度沿流动方向的变化。随着压力升高,通道内传热恶化现象得到改善,传热恶化位置逐渐后移,在 5 MPa 时,传热恶化消失,但此时对流换热系数较小,壁面温度也较高。可以发现,压力的变化对平均油温影响较小,但在 5 MPa 压力下传热恶化现象却没有发生,这是由于随着压力升高,对应的拟临界温度也升高,3 MPa 和 4 MPa 压力下,在拟临界温度附近,热物性变化较为剧烈,而 5 MPa 压力下在拟临界温度附近热物性变化较为平稳,且随着压力升高,煤油密度增大,流速降低,导致传热效率降低,故 5 MPa 压力下壁温较高,对流换热系数也较小。

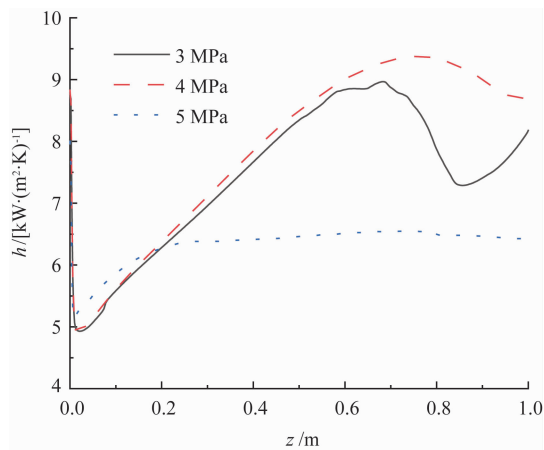


图 9 压力对对流换热系数影响

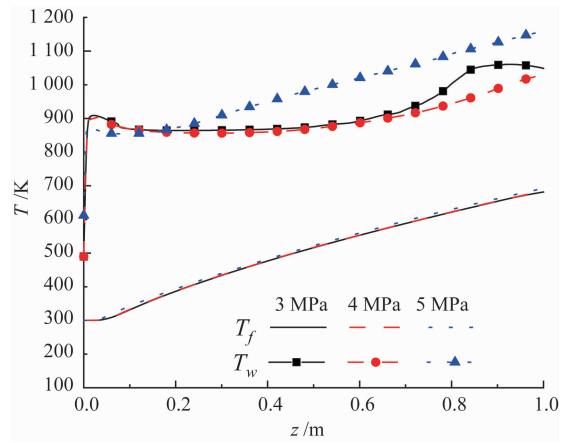


图 10 压力对冷却通道油温、壁温分布影响

图 11 给出了冷却通道内压力损失分布,压力的变化对压力损失影响较为复杂。沿流动方向,压力损失的变化较为平缓,在 3 MPa 和 4 MPa 压力下,压力损失几乎一致;5 MPa 压力下,压力损失较大,且沿流动方向,与 3 MPa 和 4 MPa 相比,压力损失的差距也越来越大。

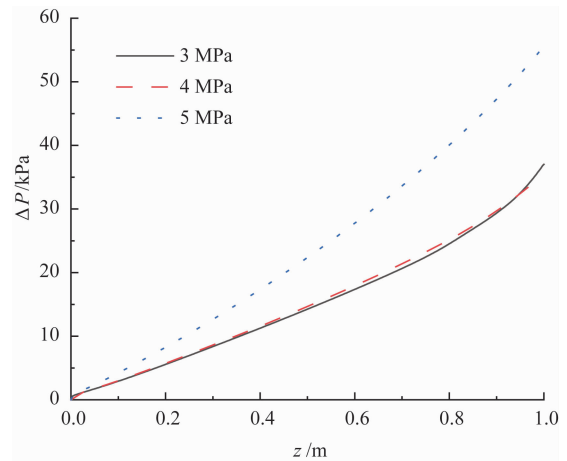


图 11 压力对冷却通道内流动压力损失分布影响

图 12 给出了冷却通道剪切应力分布,5 MPa 压力下,沿流动方向,剪切应力增加较为缓慢,但是在数值上远大于 3 MPa 和 4 MPa,较大的剪切应力也使得 5 MPa 压力下的压力损失较大。在数值上,压力对剪切应力的影响也远大于流量的影响。

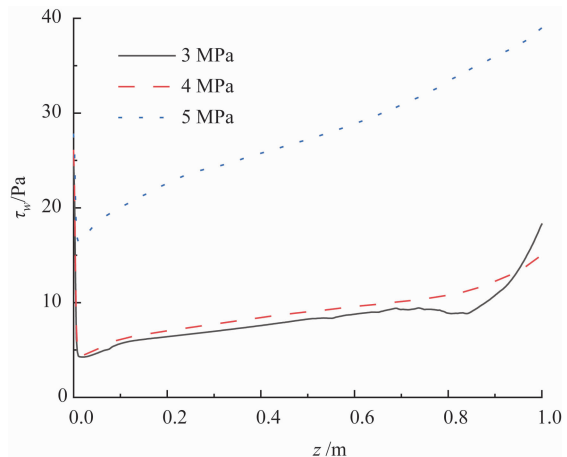


图 12 压力对冷却通道内剪切应力分布影响

### 2.3 热流密度对流动换热的影响

本节计算条件为： $p_{out} = 3 \text{ MPa}$ ， $m_{in} = 8 \text{ g/s}$ ， $q_w$  分别为  $2 \text{ MW/m}^2$ 、 $2.5 \text{ MW/m}^2$ 、 $3 \text{ MW/m}^2$ 。图 13~14 分别给出了不同压力下，对流换热系数和温度沿流动方向的变化。随着热流密度的降低，通道内传热恶化现象得到有效改善，传热恶化位置逐渐后移并在通道内消失。这主要是由于热流密度的降低使得冷却通道壁面温度和平均油温得到显著降低，推迟壁温和油温达到拟临界温度。热流密度对换热的影响不是线性的，在未发生传热恶化时， $2.5 \text{ MW/m}^2$  和  $3 \text{ MW/m}^2$  时的壁面温度相差较小， $3 \text{ MW/m}^2$  时壁面温度在传热恶化阶段上升较快，在数值上， $2 \text{ MW/m}^2$  时的壁面温度比  $2.5 \text{ MW/m}^2$  和  $3 \text{ MW/m}^2$  的工况下始终低  $100 \text{ K}$  以上。

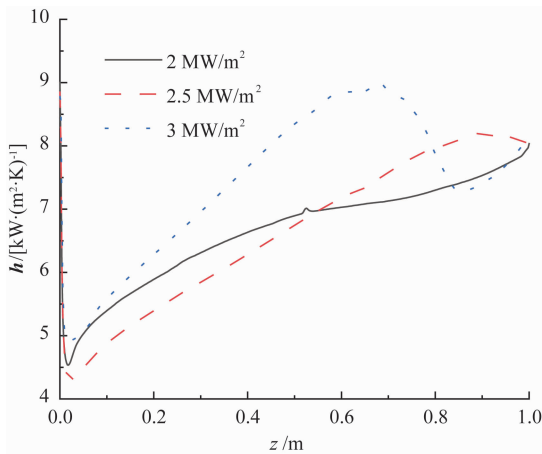


图 13 热流密度对对流换热系数影响

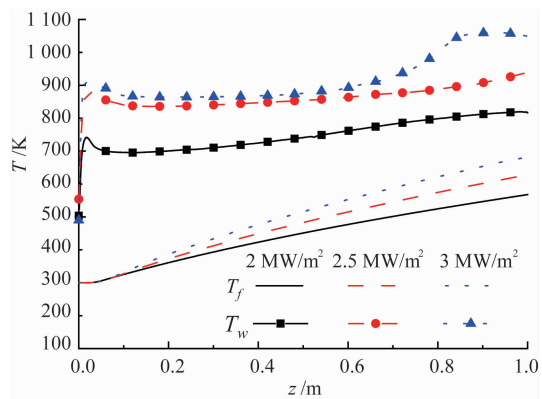


图 14 热流密度对冷却通道油温、壁温分布影响

图 15 给出了冷却通道内压力损失分布，随着热流密度的减小，压力损失略微增加，其变化曲线也更趋向于直线。相比较于对温度的影响来说，热流密度对压力损失的影响较小。

图 16 给出了剪切应力分布， $2 \text{ MW/m}^2$  的剪切应力变化较为复杂，经历了迅速增加、基本不变和缓慢降低的过程。入口段剪切应力的变化可能是入口效应的影响导致的，入口处油温与壁温差距较大，壁面与煤油之间过冷度较大，煤油换热能力不足，导致

壁温急剧升高，有些学者把这一现象认为是入口处发生了传热恶化<sup>[18]</sup>；剪切应力基本不变，其原因也是  $dv/dy$  和  $\mu$  的反向变化；剪切应力缓慢降低，这是由于随着壁温的升高，壁面附近动力黏度减小。 $3 \text{ MW/m}^2$  时在传热恶化初期也出现了剪切应力降低的现象，这是由于此时壁温增加较快，壁面附近动力黏度迅速减小，导致剪切应力减小。

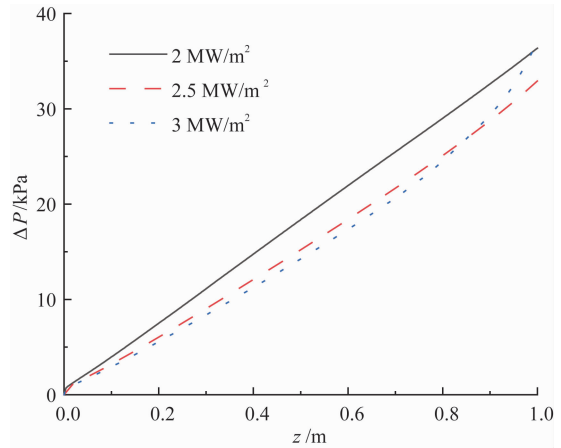


图 15 热流密度对冷却通道内流动压力损失分布影响

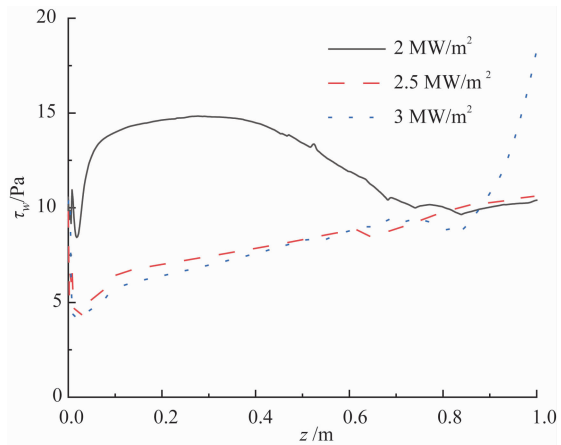


图 16 热流密度对冷却通道内剪切应力分布影响

### 3 结论

1) 增大质量流量和减小热流密度能够提升航空煤油的换热能力，使得发生传热恶化的位置后移甚至在通道内消失；在一定压力范围内，压力对航空煤油换热的影响不明显，但随着压力的增加，煤油的换热能力变差，虽然压力的增加能有效防止传热恶化的发生，但增加了壁面温度。

2) 由于入口效应的影响，壁温在入口段会明显上升，换热系数和摩擦阻力在入口段会出现先减小后增大的现象。

3) 由于传热恶化的发生，导致壁面温度快速上升，同时压力损失和摩擦阻力也急剧增加，传热恶化不仅影响煤油的换热能力，对煤油的流动状态也有

很大影响。

### 参考文献 (references)

- [1] SOBEL D R, SPADACCINI L J. Hydrocarbon Fuel Cooling Technologies for Advanced Propulsion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119: 344-351.
- [2] 金焯, 沈赤兵, 吴先宇, 等. 超燃冲压发动机再生冷却技术研究进展[J]. 火箭推进, 2016, 42(5): 66-73. JIN X, SHEN C B, WU X, et al. Progress of Regenerative Cooling Technology for Scramjet[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 66-73. (in Chinese)
- [3] KELBALIEV R F, ISKENDEROV M Z. Investigation of Characteristic Features of Critical Heat Transfer under Conditions of Boiling of Subcooled Hydrocarbons in A Close-To-Critical Pressure Range[J]. High Temperature, 2005, 43(3): 459-465.
- [4] 黄丹, 陈景祥, 朱华, 等. 超临界压力下航空煤油在竖直管内的传热研究[J]. 热科学与技术, 2016, 15(1): 1-6. HUANG D, CHEN J X, ZHU H, et al. Experimental Study on Heat Transfer of Research on Optimization and the Influence of Supercritical Kerosene in Vertical Upward Tube[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2016, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] HITCH B, KARPUK M. Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow Instabilities in Supercritical Fuels[Z]. AIAA, 1997-3043.
- [6] YU F, HONG Y H, TAO L. Flow Field and Heat Transfer Analysis of Local Structure for Regenerative Cooling Panel[J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(2): 172-178.
- [7] 王彦红, 李素芬. 方形通道内超临界碳氢燃料传热恶化数值研究[J]. 推进技术, 2016, 37(12): 2377-2384. WANG Y H, LI S F. Numerical Study on Heat Transfer Deterioration of Supercritical Hydrocarbon Fuel in Square Channels[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(12): 2377-2384. (in Chinese)
- [8] 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. WANG Y H, LI S F, DONG M. Numerical Study on Turbulent Heat Transfer of Supercritical n-Decane in a Square Regenerative Cooling Channel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(11): 1669-1676. (in Chinese)
- [9] ZHANG S L, FENG Y, ZHANG D. Parametric Numerical Analysis of Regenerative Cooling in Hydrogen Fueled Scramjet Engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(25): 10942-10960.
- [10] RUAN B, MENG H. Three-Dimensional Numerical Study of Supercritical Pressure Effect on Heat Transfer of Cryogenic Methane[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1480-1487.
- [11] RUAN B, MENG H. Supercritical Heat Transfer of Cryogenic-Propellant Methane in Rectangular Engine Cooling Channels[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2012, 26(2): 313-321.
- [12] 张明, 孙冰. 液氧/甲烷发动机变截面冷却通道传热数值研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(2): 9-15. ZHANG M, SUN B. Numerical Study of Heat Transfer in Variable Cross-Section Cooling Channels of LOX/Methane Rocket Engines[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(2): 9-15. (in Chinese)
- [13] YOUN B, MILLS A F. Cooling Panel Optimization for the Active Cooling System of A Hypersonic Aircraft[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1995, 9(1): 136-143.
- [14] FAN X J, YU G, LI J G, et al. Effects of Entry Conditions on Cracked Kerosene-Fueled Supersonic Combustor Performance [J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(10): 2199-2217.
- [15] 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.
- [16] 秦昂, 周章文, 张登成, 等. 再生冷却结构参数对煤油流动换热的影响及优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 7-12. QIN A, ZHOU Z W, ZHANG D C, et al. Research on Optimization and the Influence of Regenerative Cooling Structure Parameters on Kerosene Flow and Heat Transfer[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(4): 7-12. (in Chinese)
- [17] 秦昂, 张登成, 魏扬, 等. 超燃冲压发动机再生冷却结构的多目标优化设计[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1331-1339. QIN A, ZHANG D C, WEI Y, et al. Multi-Objective Optimization on Regenerative Cooling Structure of Scramjet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(6): 1331-1339. (in Chinese)
- [18] 贾洲侠, 付衍琛, 孔凡金, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 在水平细圆管内对流换热特性实验研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(3): 233-240. JIA Z X, FU Y C, KONG F J, et al. Experimental Study of Convective Heat Transfer of Aviation Kerosene RP-3 in Horizontal Tube under Supercritical Pressures[J]. Spacecraft Environment and Engineering, 2018, 35(3): 233-240. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)