

# 高温燃气与不同构型的再生冷却面板对流传热的数值模拟\*

胡江玉, 王宁, 周进, 潘余

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**对高温燃气与带有平行冷却通道的再生冷却面板之间的三维耦合传热开展了数值研究, 其中冷却通道内冷却剂为超临界压力煤油, 并结合理论分析探讨了冷却面板构型对耦合传热的影响。结果表明: 随燃气侧壁厚以及冷却通道宽度和高度的增大, 燃气侧壁面温度升高, 热流密度降低。研究还发现: 冷却通道不同壁面传递给煤油的热量占比几乎不随燃气侧壁厚变化, 但随冷却通道宽度和高度的改变而变化。

**关键词:**高温燃气; 再生冷却面板; 超临界压力; 耦合传热

**中图分类号:** V231      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-2486(2021)05-046-07

## Numerical simulation on convective heat transfer between high-temperature gas and regenerative cooling panels of different configurations

HU Jiangyu, WANG Ning, ZHOU Jin, PAN Yu

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The three-dimensional coupled heat transfer between high-temperature gas, regenerative cooling panels with parallel cooling channels were numerically investigated, in which kerosene of supercritical pressure was used as the coolant. Combined with theoretical analysis, the influence of panel configuration was studied and discussed. Results indicate that the temperature of the gas heated surface rise with the thickness of gas side wall, the width and height of the cooling channels, while heat flux of the gas heated surface decreases with the increase of these parameters. It was found that the percentage of the heat absorbed by kerosene from the bottom walls, side walls and top walls of the cooling channels hardly changes with the thickness of gas side wall, while it changes with the variation of width and height of the cooling channels.

**Keywords:** high-temperature gas; regenerative cooling panel; supercritical pressure; coupled heat transfer

热防护是超燃冲压发动机研制中面临的关键难题之一, 在众多解决方案中, 再生冷却<sup>[1-2]</sup>被认为是热防护的最佳选择。由于温度及热流密度是热防护设计的依据, 文献[3-5]采用实验或仿真的手段, 对超燃冲压发动机壁面温度及热流密度进行了研究。又由于目前在超燃冲压发动机的研究中, 大多采用碳氢燃料作为燃料, 且冷却通道内的压力通常高于燃料的临界压力, 因此文献[6-9]针对冷却通道内超临界压力碳氢燃料的流动及传热特性进行了研究。

由于矩形槽道易于加工, 再生冷却面板中冷却通道截面一般为矩形或梯形<sup>[10-13]</sup>。Wang等<sup>[14]</sup>对超临界压力甲烷在矩形冷却通道内的三维耦合传热进行了研究, 发现壁面材料导热系数和通道高宽比均会影响热流分布及耦合传热。刘<sup>[15]</sup>系统地研究了超临界压力正十烷在矩形通

道中的耦合传热特性, 指出了矩形通道中传热恶化是由近壁面流体的零速度梯度导致的, 且较高的壁面导热系数能够抑制热边界层的发展。Zhang等<sup>[16]</sup>的研究则表明, 壁温随矩形通道高宽比的增大先下降后上升, 最佳高宽比在4和8之间。此外, Sun等<sup>[17]</sup>还研究了方形冷却通道内浮升力对超临界压力煤油传热的影响, 发现浮升力对传热的影响随煤油压力的升高及壁面导热系数的增大而减小。

虽然关于超燃冲压发动机热防护方面的文献较多, 然而鲜有研究将高温燃气、再生冷却面板及冷却剂的耦合传热考虑在内。因此, 本文对高温燃气及带有平行冷却通道并以超临界压力煤油为冷却剂的再生冷却面板之间的三维耦合传热进行了数值模拟, 并结合理论分析, 探讨了冷却面板构型对耦合传热的影响。研究结果可以帮助理解再

\* 收稿日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776220)

作者简介: 胡江玉(1991—), 男, 湖北监利人, 博士研究生, E-mail: hujiangyuqw@sina.com;

王宁(通信作者), 男, 副研究员, 博士, E-mail: jaycozen@163.com

生冷却的真实传热过程,指导再生冷却面板的设计。

### 1 问题描述

图1(a)给出了超燃冲压发动机再生冷却面板的耦合传热示意图。热量主要经对流传热从高温燃气进入冷却结构,在冷却面板内部以热传导的方式传递,并通过对流传热的方式被冷却剂吸收。由于辐射传热占总热量的比例较低<sup>[5]</sup>,且燃气发射率和壁面吸收率及角系数等参数难以精确计算,因此研究中没有考虑辐射传热。

燃气侧对流换热热流密度为:

$$q_g = h_g(T_{aw} - T_{wg}) \quad (1)$$

式中, $h_g$ 为燃气侧对流换热系数, $T_{aw}$ 为燃气的绝热壁温, $T_{wg}$ 为燃气侧壁温。

冷却结构内部等效热传导流密度为:

$$q_s = \frac{k}{\delta_c}(T_{wg} - T_{wc}) = h_{s,eq}(T_{wg} - T_{wc}) \quad (2)$$

式中, $k$ 为壁面材料的导热系数, $\delta_c$ 为燃气侧材料壁厚。 $h_{s,eq}$ 可以理解成冷却结构的等效换热系数, $T_{wc}$ 为冷却剂侧壁温。

冷却通道等效对流换热热流密度为:

$$q_c = h_{c,eq}(T_{wc} - T_b) \quad (3)$$

式中, $h_{c,eq}$ 为冷却剂的等效对流换热系数, $T_b$ 为冷却剂主流温度。

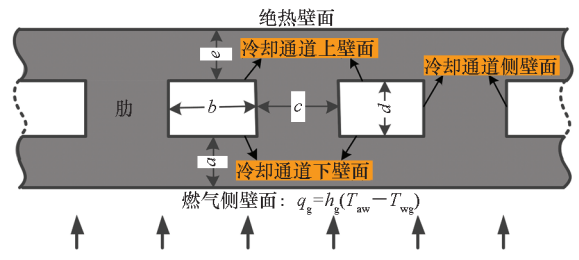
根据守恒原理,则有:

$$q = h_g(T_{aw} - T_{wg}) = h_{s,eq}(T_{wg} - T_{wc}) = h_{c,eq}(T_{wc} - T_b) \quad (4)$$

由此可见,热流密度与温度及传热系数之间存在强烈的耦合关系。

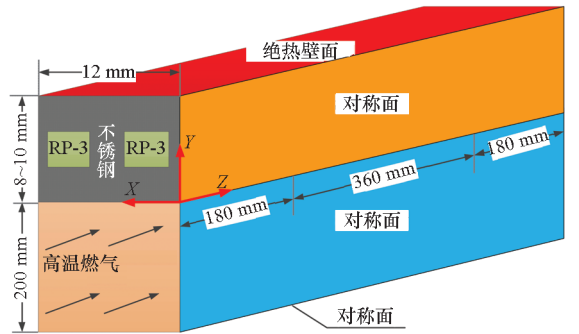
计算域如图1(b)所示,入口段和出口段均留出180 mm来降低进、出口段对计算结果的影响。煤油入口为质量流量入口,给定质量流量和温度,煤油出口设置为压力出口。燃气入口为质量流量入口,燃气出口设置为压力出口。计算域燃气流动参数参考某高总温加热器出口燃气流动参数,在出口经扩张后燃气质量流率为 $0.5 \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ,总温为 $1\,900 \text{ K}$ ,静压为 $75 \text{ kPa}$ ,煤油入口温度为 $333 \text{ K}$ ,计算域煤油总流量为 $36 \text{ g/s}$ 。冷却结构燃气侧壁面及冷却通道内壁面均为耦合传热面,其他面根据实际物理过程分别设置为对称面或绝热面,研究中煤油流动方向和燃气流动方向均为 $Z$ 轴正方向。

研究中不同冷却面板的结构尺寸如表1所示。其中, $a$ 为燃气侧壁厚, $b$ 为冷却通道宽度, $c$ 为相邻冷却通道间肋厚, $d$ 为冷却通道高度, $e$ 为



(a) 耦合传热示意图

(a) Schematic diagram of coupled heat transfer



(b) 计算域

(b) Computational domain

图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

绝热侧壁厚, $m$ 为单根冷却通道内煤油的质量流量, $n$ 为计算域冷却通道数量。

表1 冷却面板构型

Tab. 1 Configuration of the cooling panels

编号	a/ mm	b/ mm	c/ mm	d/ mm	e/ mm	m/ (g/s)	n
#1	3	3	3	3	3	18	2
#2	2	3	3	3	3	18	2
#3	4	3	3	3	3	18	2
#4	3	2	4	3	3	18	2
#5	3	4	2	3	3	18	2
#6	3	2	2	3	3	12	3
#7	3	3	3	2	3	18	2
#8	3	3	3	4	3	18	2

高温燃气包含多种组分,各组分密度均选用理想气体模型,比热采用温度的四次多项式来计算,在 $300 \sim 1\,000 \text{ K}$ 及 $1\,000 \sim 5\,000 \text{ K}$ 区间分别由不同的四次多项式计算,黏性及导热系数由气体分子动力学理论进行计算,混合气体的物性由理想气体混合理论进行计算。高温燃气中 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 的质量分数分别为 $53.1\%$ 、 $23.3\%$ 、 $14.6\%$ 和 $9.0\%$ 。

冷却剂为国产航空煤油 RP-3, 研究中选用十组分替代模型<sup>[7]</sup>, 由 SUPERTRAPP 程序<sup>[18]</sup>对超临界压力下煤油的物性进行计算。4 MPa 压力下, 煤油十组分替代模型的物性随温度变化情况如图 2 所示。由于冷却通道内压降与煤油压力相比很小, 可以认为冷却通道内煤油的物性仅随温度变化。

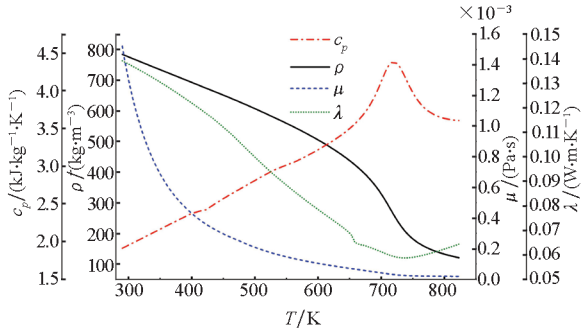


图 2 4 MPa 压力下十组分替代煤油物性随温度变化  
Fig. 2 Thermophysical properties of 10-component kerosene surrogate as function of temperature at 4 MPa

## 2 数值方法

### 2.1 控制方程及湍流模型

采用 ANSYS Fluent 19.2 软件开展数值仿真。无外力作用及内热源的条件下, 稳态流动的雷诺平均方程如下所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (6)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij}\right] \quad (7)$$

Wang 等<sup>[4]</sup>的研究表明, SST  $k-\omega$  模型<sup>[19]</sup>在计算高温高速气流与燃烧室壁面的传热上具有相当高的精度。Tao 等<sup>[9]</sup>发现, 与其他模型相比, 在绝大多数工况下, SST  $k-\omega$  模型能够更准确地预测冷却通道内超临界压力煤油的传热。因此, 选用基于有限体积法的压力基求解器和包含低雷诺数修正的 SST  $k-\omega$  湍流模型对流动及耦合传热进行求解。

### 2.2 算例验证及网格无关性

在之前的研究<sup>[20]</sup>中, 已经对数值仿真方法进

行了验证, 数值方法能够用来模拟高温燃气、再生冷却面板及超临界压力煤油的三维耦合传热。

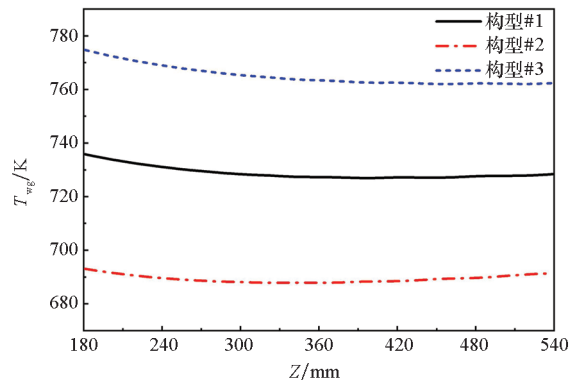
采用 ICEM 软件划分网格, 计算域全部采用结构化网格。网格无关性结果表明, 当燃气和冷却通道壁面边界层网格不超过  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$  时, 燃气侧壁面温度  $T_{\text{wg}}$  和热流密度  $q_g$  的相对误差在 1% 以内。且当燃气和冷却通道壁面边界层最小网格为  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$  时, 燃气及冷却通道近壁面第一层网格均在黏性底层内, 可以较精确地求解边界层内的流动和传热。燃气和冷却通道壁面最小网格均为  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ , 不同冷却结构构型下, 计算域总网格量在 3 388 000 到 4 032 000 之间。

## 3 结果与讨论

### 3.1 燃气侧壁厚

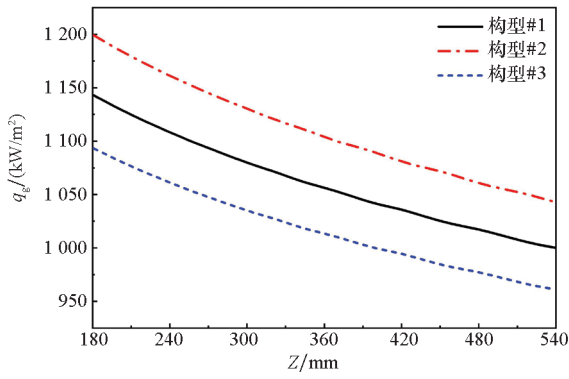
对高温燃气与构型#1、构型#2 和构型#3 的耦合传热进行了仿真, 不同燃气侧壁厚下, 燃气侧壁面中线处温度  $T_{\text{wg}}$  及热流密度  $q_g$  沿流动方向的变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,  $T_{\text{wg}}$  随燃气侧壁厚的增大而升高,  $q_g$  随燃气侧壁厚的增大而降低。这主要是因为, 随燃气侧壁厚的增大, 耦合传热的总热阻增大, 进而使得耦合传热热流密度下降, 壁温升高。

此外, 图 3(b) 还表明, 燃气侧壁面对流换热热流密度为  $10^6 \text{ W/m}^2$  的量级。以构型#1 为例, 由于燃气在近壁面边界层内的滞止及传热作用, 近壁面处燃气静温约为 1 050 K, 而燃气壁温约为 730 K。在极端条件下, 即燃气发射率、壁面吸收率均为 1 时, 高温燃气对壁面的辐射热流密度最大, 约为  $50 \text{ kW/m}^2$ , 仅约为对流传热热流密度的 5%。实际上, 燃气发射率及壁面吸收率均远小于 1, 且壁面之间存在相互反射, 辐射热流密度将更低。这表明燃气辐射不会对研究结果带来明显的影响。



(a)  $T_{\text{wg}}$  沿程变化

(a) Variation of  $T_{\text{wg}}$  along the flow direction



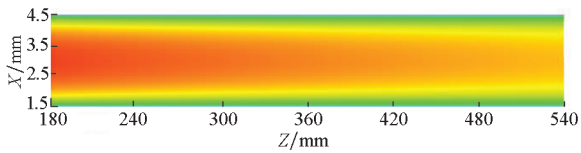
(b)  $q_g$  沿程变化

(b) Variation of  $q_g$  along the flow direction

图3 不同燃气侧壁厚下燃气侧壁面中心线处  $T_{wg}$  及  $q_g$  沿程变化

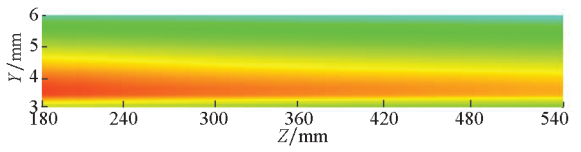
Fig.3 Variation of  $T_{wg}$  and  $q_g$  along the flow direction at the centerline of the gas side wall at different gas-side-wall thickness

在壁面导热和冷却通道内对流传热的综合作用下,冷却通道各个壁面的热流密度分布会存在差异。图4给出了构型#1中冷却通道各个壁面的热流密度分布云图。可以发现,冷却通道各个壁面的热流密度均沿流动方向降低,这和燃气侧



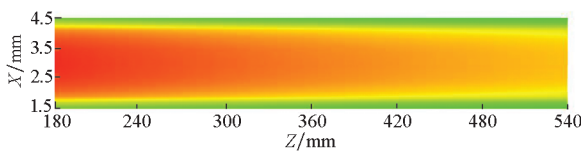
(a) 冷却通道下壁面

(a) Bottom wall of the cooling channel



(b) 冷却通道侧壁面

(b) Side wall of the cooling channel



(c) 冷却通道上壁面

(c) Top wall of the cooling channel

图4 构型#1中冷却通道壁面热流密度分布云图

Fig.4 Heat flux distribution of the cooling channel walls in configuration #1

热流密度沿流动方向降低的趋势一致。冷却通道下壁面的热流密度最高,侧壁面的热流密度次之,上壁面的热流密度最低。从图4中还可以发现,下壁面和上壁面热流密度分布在X方向具有对称性,而侧壁面热流密度峰值在靠近燃气的一侧。

图5给出了冷却面板内部传热示意图。从图中可以看出,热量经燃气侧固壁的导热进入冷却通道下壁面,其热量传递路径最短,因而下壁面的热流密度最高。由于冷却通道下壁面的对流传热系数  $h_{c,b}$  在X方向具有对称性,且越靠近壁面中心线,对流传热系数  $h_{c,b}$  越大,因此下壁面热流密度在X方向具有对称性,且越靠近壁面中心线,热流密度越高。热量经燃气侧固壁和肋的导热进入冷却通道的侧壁面,因而侧壁面的热流密度低于下壁面。沿Y方向,热量不断被侧壁面吸收,故肋的传热量沿Y方向不断减小,而侧壁面的对流传热系数  $h_{c,s}$  沿Y方向先增大后减小,这两者的综合作用使得侧壁面热流密度的峰值在靠近燃气的一侧。经燃气侧固壁和肋的导热且未被侧壁面吸收的热量,最终经绝热侧固壁的导热进入冷却通道的上壁面。由于热量的传递路径较远,因此上壁面的热流密度远低于下壁面和侧壁面。基于和下壁面同样的原因,上壁面热流密度在X方向也具有对称性,且越靠近壁面中心线,热流密度越高。

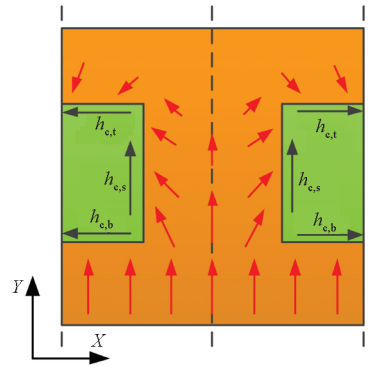


图5 冷却面板内部传热示意图

Fig.5 Schematic diagram of heat transfer in cooling panel

图6给出了构型#1、构型#2和构型#3中冷却通道不同内壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的比例。从图6中可以看出,随燃气侧壁厚的变化,冷却通道不同壁面传递给煤油的热量占比几乎不发生变化。当冷却结构燃气侧厚度变化时,冷却通道的形状和尺寸不变,且壁面热流密度的差异在10%以内。在煤油入口参数不变的情况下,冷却通道内煤油的流动和传热特性也不存在明显差异。因此,冷却通道各个壁面传递给煤



油的热量占煤油总吸热量的比例也不存在明显差别。燃气侧壁厚为 2 mm、3 mm 和 4 mm 时,从冷却通道下壁面传给煤油的热量分别占 43.52%、43.48% 和 43.43%,从冷却通道的侧壁面传给煤油的热量分别占 44.69%、44.67% 和 44.65%,从冷却通道上壁面传给煤油的热量分别占 11.78%、11.85% 和 11.92%。

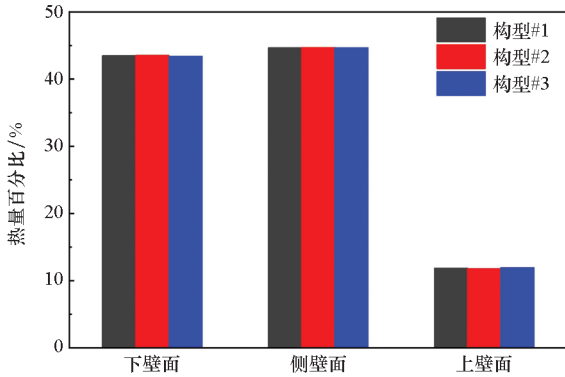
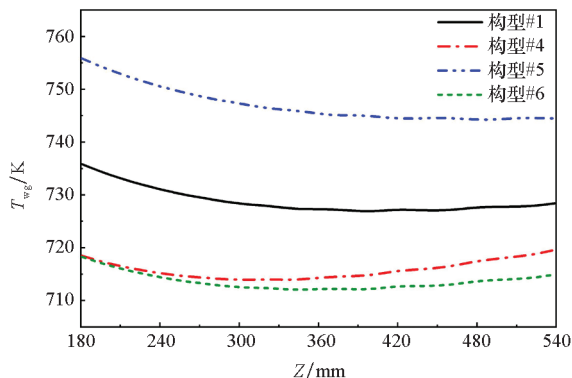


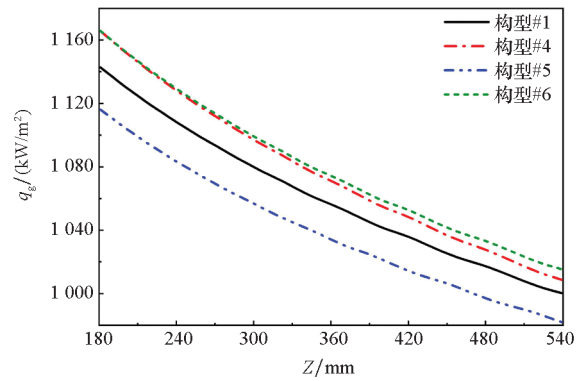
图 6 不同燃气侧壁厚下冷却通道各个壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的百分比  
Fig. 6 Percentage of heat absorbed by kerosene from the channel walls at different thickness of gas side wall

### 3.2 冷却通道宽度及肋厚

对高温燃气与构型#4、构型#5 和构型#6 的耦合传热进行了仿真,不同冷却通道宽度及肋厚下,燃气侧壁面中线处温度  $T_{wg}$  及热流密度  $q_g$  沿程变化如图 7 所示。从图 7 可以看出,当计算域冷却面板内冷却通道数为 2 时,随冷却通道宽度增大,耦合传热面的温度升高,热流密度下降。这主要是因为,在煤油流量不变的条件下,随冷却通道宽度增大,煤油的流速和雷诺数降低,冷却通道内煤油的传热系数减小。与构型#1 相比,构型#6 中冷却通道的流道总面积不变,而通道宽度  $b$  和肋厚  $c$  均减小,计算域内冷却通道的数量由 2 增加到 3,提升了肋对传热的强化作用。因此与构型#1 相



(a)  $T_{wg}$  沿程变化  
(a) Variation of  $T_{wg}$  along the flow direction



(b)  $q_g$  沿程变化  
(b) Variation of  $q_g$  along the flow direction

图 7 冷却通道不同宽度及肋厚下燃气侧壁面中线处  $T_{wg}$  及  $q_g$  沿程变化

Fig. 7 Variation of  $T_{wg}$  and  $q_g$  along the flow direction at the centerline of the gas heated surface at different channel width and rib thickness

比,构型#6 的燃气侧壁面温度降低,热流密度增大。

图 8 给出了构型#4、构型#5 和构型#6 中冷却通道不同壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的百分比。从图 8 中可以发现,当冷却面板中冷却通道数量为 2 时,冷却通道下壁面吸热量占比随冷却通道宽度的增大而上升。这是因为,冷却通道下壁面的面积随冷却通道宽度的增大而增大,这会增大下壁面煤油吸热量的占比。冷却通道宽度为 2 mm、肋厚为 4 mm 时,冷却通道下壁面、侧壁面和上壁面吸热量占比分别为 31.95%、56.97% 和 11.08%。冷却通道宽度为 4 mm、肋厚为 2 mm 时,冷却通道下壁面、侧壁面和上壁面吸热量占比分别为 53.86%、35.16% 和 10.99%。

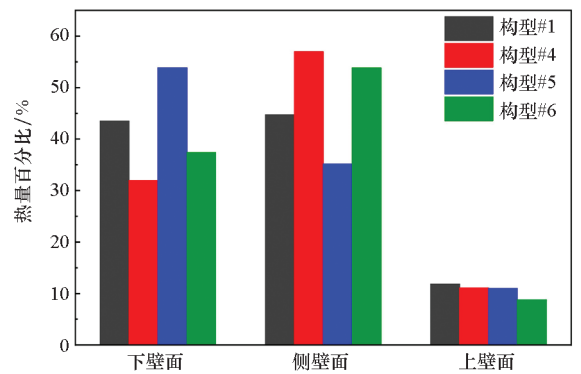


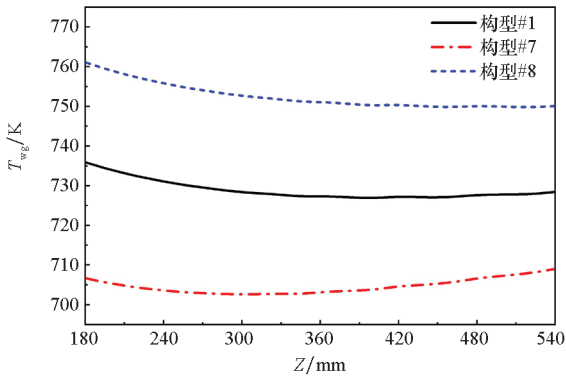
图 8 冷却通道不同宽度及肋厚下各个壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的百分比  
Fig. 8 Percentage of heat absorbed by kerosene from the channel walls at different channel width and rib thickness

肋厚和冷却通道宽度均为 2 mm 时,冷却通道下壁面、侧壁面和上壁面吸热量占比分别为

37.39%、53.83%和8.78%。与构型#1相比,构型#6中冷却通道下壁面的总面积不变,而侧壁面积增大,因而构型#6中下壁面吸热量的占比低于构型#1,而侧壁面吸热量的占比高于构型#1。而与构型#4相比,构型#6中冷却通道数增加,冷却通道下壁面的总换热面积增大,因而构型#6中下壁面吸热量的占比高于构型#4。

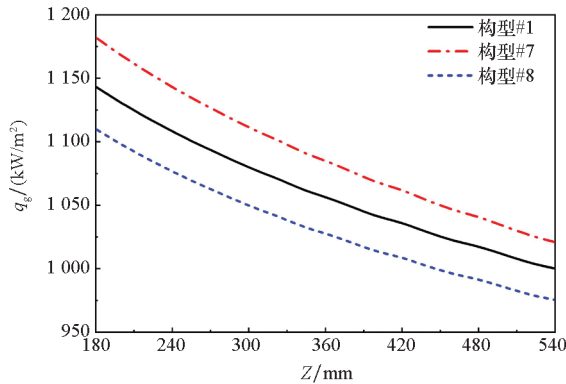
### 3.3 冷却通道高度

对高温燃气与构型#7和构型#8的耦合传热进行了仿真,不同冷却通道高度下燃气侧壁面中线处温度 $T_{wg}$ 及热流密度 $q_g$ 沿程变化如图9所示。从图9可以发现,在冷却通道宽度和冷却剂流量不变的条件下,随冷却通道高度增大,耦合传热面的温度上升,热流密度降低。这主要是因为,在煤油流量不变的条件下,随冷却通道高度增大,冷却通道内煤油的流速和雷诺数下降,煤油的传热系数降低,从而使得耦合传热面热流密度下降,温度升高。



(a)  $T_{wg}$  沿程变化

(a) Variation of  $T_{wg}$  along the flow direction



(b)  $q_g$  沿程变化

(b) Variation of  $q_g$  along the flow direction

图9 不同冷却通道高度下壁面中线处 $T_{wg}$ 及 $q_g$ 沿程变化

Fig.9 Variation of  $T_{wg}$  and heat flux  $q_g$  along the flow direction at the centerline of the gas side wall at different channel height

图10给出了构型#7和构型#8中冷却通道不同壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的比例。从图10可以发现,冷却通道侧壁面吸热量占比随冷却通道高度的增大而增大,而下壁面和上壁面吸热量占比随之下降。这是因为,冷却通道侧壁面的面积随冷却通道高度的增大而增大,这会增大冷却通道侧壁面吸热量的占比。此外,冷却通道高度的增加会增大肋的导热热阻,这会降低通过肋的导热传递到上壁面的热量,因此冷却通道高度的增加会降低冷却通道上壁面吸热量的占比。冷却通道高度为2 mm时,从冷却通道下壁面传给煤油的热量占总热量的47.66%,从侧壁面传给煤油的热量占36.67%,从上壁面传给煤油的热量占15.67%。冷却通道高度为4 mm时,从冷却通道下壁面、侧壁面和上壁面传给煤油的热量分别占39.60%、50.83%、9.57%。

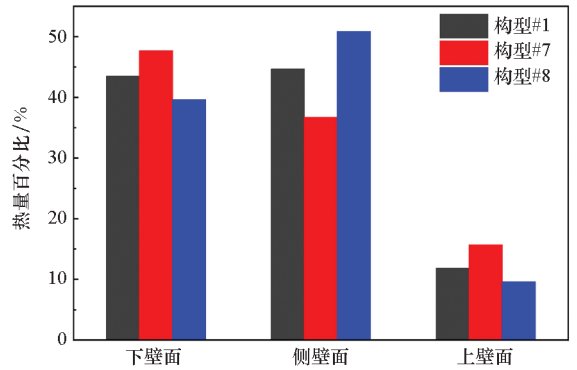


图10 冷却通道不同高度下各个壁面传递给煤油的热量占煤油总吸热量的百分比

Fig.10 Percentage of heat absorbed by kerosene from the channel walls at different channel height

## 4 结论

本文对高温高速燃气与采用超临界压力煤油为冷却剂的再生冷却面板之间的三维耦合传热特性进行了仿真研究,得到了燃气侧壁面温度及热流密度分布等信息,揭示了冷却结构构型对耦合传热的影响。结果表明,随燃气侧壁厚、冷却通道宽度和高度的增大,燃气侧壁面温度升高,燃气侧壁面热流密度降低。冷却通道不同壁面传递给煤油的热量占比几乎不随燃气侧壁厚变化。随冷却通道宽度的增大,由冷却通道下壁面传递给煤油的热量占比明显升高。随冷却通道高度的增大,下壁面和上壁面传递给煤油的热量占总吸热量的比例降低,侧壁面传递给煤油的热量的比例增大。

## 参考文献 (References)

- [1] ZHU Y H, PENG W, XU R N, et al. Review on active thermal protection and its heat transfer for airbreathing hypersonic vehicles [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10): 1929 – 1953.
- [2] ZHANG S L, LI X, ZUO J Y, et al. Research progress on active thermal protection for hypersonic vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 119: 100646.
- [3] TRELEWICZ J R, LONGTIN J P, GOULDSTONE C, et al. Heat flux measurements in a scramjet combustor using embedded direct-write sensors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 31(4): 1003 – 1013.
- [4] WANG X, ZHONG F Q, GU H B, et al. Numerical study of combustion and convective heat transfer of a Mach 2.5 supersonic combustor [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 883 – 896.
- [5] 艾青, 夏新林, 孙凤贤. 壁面热特性对超声速燃烧室热环境的影响[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8): 1373 – 1375.  
Ai Qing, XIA Xinlin, SUN Fengxian. Influences of wall thermal characteristics on thermal environment in supersonic combustors [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(8): 1373 – 1375. (in Chinese)
- [6] ZHAO W Z, SONG Z C, LI H Z, et al. Research on heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure in circular tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96: 507 – 515.
- [7] 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.
- [8] LI Z Z, LIU G Z, ZHANG R L. Heat transfer to supercritical hydrocarbon fuel in horizontal tube: effects of near-wall pyrolysis at high heat flux [J]. Chemical Engineering Science, 2021, 229: 115994.
- [9] TAO Z, CHENG Z Y, ZHU J Q, et al. Effect of turbulence models on predicting convective heat transfer to hydrocarbon fuel at supercritical pressure [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1247 – 1261.
- [10] 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.
- [11] POWELL O A, EDWARDS J T, NORRIS R B, et al. Development of hydrocarbon-fueled scramjet engines: the hypersonic technology (HyTech) program [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(6): 1170 – 1176.
- [12] WENNERBERG J, JUNG H, SCHUFF R, et al. Study of simulated fuel flows in high aspect ratio cooling channels[C]// Proceedings of 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006: 1 – 14.
- [13] PIZZARELLI M, NASUTI F, ONOFRI M. Coupled wall heat conduction and coolant flow analysis for liquid rocket engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 29(1): 34 – 41.
- [14] 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.
- [15] 刘志琦. 超燃冲压发动机主动冷却通道内的超临界流动与传热过程数值模拟[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.  
LIU Zhiqi. Numerical simulation of flow and heat transfer in cooling channels of active cooled scramjet engines [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] ZHANG S L, QIN J, XIE K L, et al. Thermal behavior inside scramjet cooling channels at different channel aspect ratios[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 32(1): 57 – 70.
- [17] 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.
- [18] HUBER M L. Users' guide of NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures database (SUPERTRAPP) [M]. Boulder: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [19] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598 – 1605.
- [20] HU J Y, WANG N, ZHOU J, et al. A parametrical study on convective heat transfer between high-temperature gas and regenerative cooling panel [J]. Energies, 2021, 14(6): 1784.