

再生冷却结构参数对煤油流动换热的影响及优化

秦 昂, 周章文, 张登成, 张艳华

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 为揭示冲压发动机燃烧室再生冷却结构参数对煤油流动换热的影响, 实现对结构参数的优化, 以单根再生冷却通道为研究对象, 在通道总数一定的情况下, 分别对 RP-3 航空煤油在不同内壁厚度、肋片厚度及高度的通道中流动换热进行了数值研究, 发现薄内壁的通道冷却效果好, 流动压力损失稍大; 厚肋片的通道冷却效果好, 但压力损失随肋片厚度的增大而急剧增大; 随着高度增大, 冷却效果变差, 但流动压力损失急剧减小; 3 种结构参数对油温的影响都很小。分别对影响机理进行了理论分析, 在此基础上, 为得到一种对流换热效果尽可能好以及流动压力损失尽可能小的冷却通道, 利用 Workbench 平台的目标驱动优化工具, 采用遗传算法对冷却通道进行优化设计, 经校验, 优化后的通道满足设计目标。

关键词 冲压发动机; 冷却结构; 冷却效果; 流动压力损失; 优化设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.002

中图分类号 V23 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0007-06

Research on Optimization and the Influence of Regenerative Cooling Structure Parameters on Kerosene Flow and Heat Transfer

QIN Ang, ZHOU Zhangwen, ZHANG Dengcheng, ZHANG Yanhua

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to reveal the influence of scramjet combustor regenerative cooling structure parameters on flow and heat transfer of aviation kerosene, and realize the optimization of the structure parameters under condition of the fixed total number of cooling channels, this paper researches respectively flow and heat transfer condition of No. 3 aviation kerosene in cooling channel with different inside wall thickness, fin thickness and aspect ratios taking single cooling channel as an object of study. The results show that the cooling effect is improved and the flow pressure loss increases slightly with decrease of the inside wall thickness. The cooling effect is improved and the flow pressure loss increases rapidly with increase of the fin thickness. The cooling effect deteriorates and the flow pressure loss decreases rapidly with increase of height. But the three structure parameters have little effects on the fluid temperature. In addition, the influence mechanism is theoretically analyzed respectively. On this basis, an optimal design of cooling channel is made by goal driven optimization and MOGA in Workbench for the best possible cooling effect and

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 陕西省工业科技攻关项目(2015GY098)

作者简介: 秦 昂(1993—),男,河南南阳人,硕士生,主要从事超燃冲压发动机的主动冷却研究。E-mail:18682931162@163.com

引用格式: 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 Ang, ZHOU Zhangwen, ZHANG Dengcheng, 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.

the smallest possible flow pressure loss. The checkout shows that the optimized structure meets the needs of the design pursuit.

Key words: scramjet; cooling structure; cooling effect; flow pressure loss; optimal design

冲压发动机燃烧室再生冷却结构参数对煤油的对流换热效果及流动压力损失影响显著^[1-7],通过影响油温进而影响到煤油能否充分燃烧而最终影响发动机性能^[8-9]。因此,对再生冷却结构参数影响煤油流动换热的特性及以提高换热能力、降低流动压力损失为目的的优化设计研究很有必要。

文献[2~5]主要研究了再生冷却结构参数对流动换热的影响效果,但均没有对结构参数影响流动换热的机理作出理论分析,也没有进行结构的优化研究;文献[6~7]忽略煤油径向的物性变化和热边界层的影响,利用简化的一维传热模型优化再生冷却结构,而且设计优化目标时仅考虑换热效果而没有考虑流动压力损失。实际上由于再生冷却结构是细长通道,煤油的流动阻力很大,优化的目标是要找到换热和流阻的最优折中点。

1 计算模型及方法

1.1 再生冷却结构模型和边界条件

图1中超燃冲压发动机燃烧室周围分布着 N 个再生冷却通道,除燃烧室四边角处通道外,其他通道具有相同的热边界条件,因此取单根通道作为研究对象,采用对称边界条件对计算模型进行简化, δ 为肋片厚度, H 为通道高度, W 为通道宽度, d 为外壁厚, e 为内壁厚度, l 为通道长度,取值为2 200 mm。固壁导热系数 λ_w 取为100 W/(m·K)。

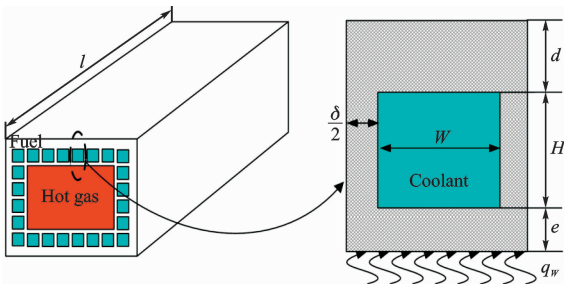


图1 超燃冲压发动机燃烧室及再生冷却通道模型示意图
Fig. 1 Model sketch of scramjet combustor and regenerative cooling channel

边界条件:

1) 入口边界条件设置为质量流量入口, $m_{in} = 0.04$ kg/s, 入口温度 $T_{in} = 300$ K;

2) 出口边界条件设置为压力出口, $p_{out} = 3$ MPa, 以此保证管内煤油始终处于超临界压力状态(RP-3煤油临界压力约为2.2 MPa);

3) 将燃气侧壁面受热条件简化成恒定的热流, 为保证湍流在加热段均匀发展及出口条件不影响管内煤油的流动换热, 通道前后两端各设置100 mm的绝热段, 加热段热流密度 $q_w = 3$ MW/m² (取马赫数为6~8的超燃冲压发动机的再生冷却系统壁面热流峰值3 MW/m²进行计算^[10]);

4) 上壁面和两侧壁面均设置为绝热壁面。

1.2 煤油替代模型

航空煤油是由上千种碳氢化合物组成的复杂物质, 为简化计算, 本文采用文献[11]提出的RP-3航空煤油的十组分替代模型, 利用NIST SUPERTRAPP计算程序^[12]获得3 MPa压力下煤油的物性随温度的变化规律, 见图2。然后通过分段多项式拟合, 获得煤油的物性参数与温度的函数关系式。

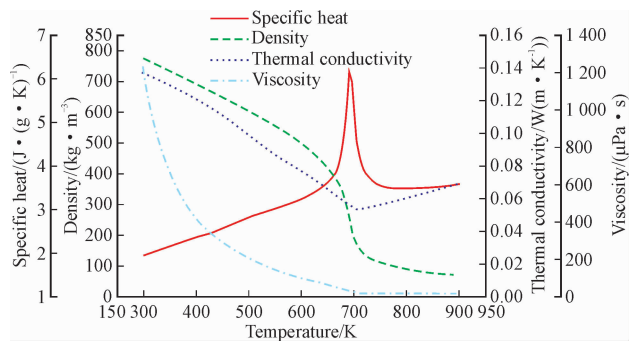


图2 3 MPa压力下RP-3煤油的热物性

Fig. 2 Thermophysical properties of RP-3 kerosene at supercritical pressure of 3 MPa

1.3 数值方法

湍流模拟采用RNG $k-\epsilon$ 两方程模型, 近壁区采用增强壁面处理法^[13]。采用有限容积法离散三维的Navier-Stokes方程, 对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用二阶中心差分格式, 压力-速度耦合求解采用SIMPLEC算法。

1.4 计算方法验证

目前缺乏超临界压力下煤油在矩形管内流动换热的实验数据, 在对煤油传热的实验研究中, Zhong F Q等^[11]通过二级加热/输运系统加热圆管的研究具有典型性; 在对煤油流动的实验研究中, 李中洲等^[14]进行的长为575 mm、直径为1 mm的小圆管内煤油流动研究更具代表性。为了验证本文计算方法的正确性, 分别对两者实验研究进行数值模拟, 并与实验数据进行比较验证, 结果见图3。模拟计算的结果与实验值的结果吻合度较好, 最大误差不超

过 8%,故本文采用的计算方法可靠。

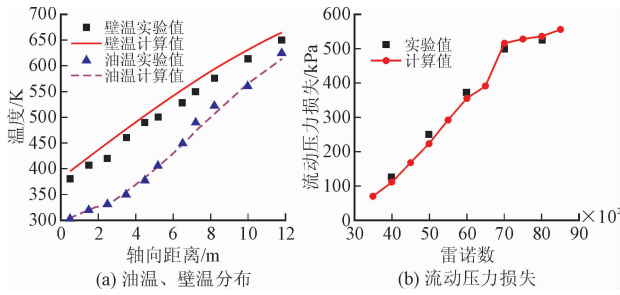


图 3 计算数据与实验数据的比较

Fig. 3 The comparison of computations' data and experiments'

2 计算结果对比及分析

为方便后面作对比,设定一组初始对照算例的通道参数,高度 H_0 、宽度 W_0 、外壁厚 d_o 、内壁厚 e_0 、肋片厚 δ_0 分别为 4 mm、4 mm、3 mm、2 mm、2 mm。

2.1 内壁厚对流动换热的影响

改变内壁厚 e ,研究 e 分别取值 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 情况下的通道流动换热情况。图 4 显示,随着内壁厚度的增加,最高壁温逐渐升高,出口油温差别不大,流动压力损失变化很小,只是略微有所下降。

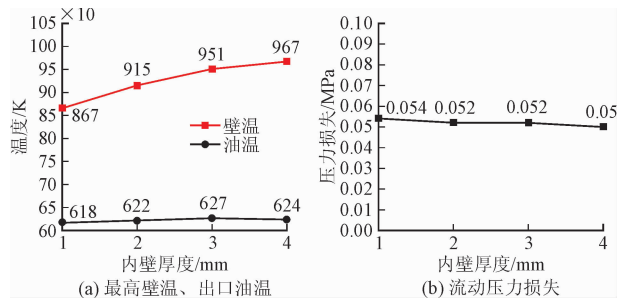


图 4 壁面、煤油的温度与流动压力损失随内壁厚度的变化
Fig. 4 Variation of wall and kerosene temperature and flow pressure lose with thickness of inside wall

图 5 给出了不同内壁厚度的加热面中心线壁温沿通道的分布。由图可知,内壁厚大的加热面温度较高,不同内壁厚度的油温沿轴向的变化曲线基本重合。

根据热平衡原理可知,热量必将被煤油全部吸收,即:

$$q_w = C_p \cdot m_{in} (T_{out} - T_{in}) / A_g \quad (1)$$

影响煤油出口温度 T_{out} 的外在因素为热流密度 q_w 、进口质量流量 m_{in} 和加热面面积 A_g ,三者均为恒定值,故内壁厚度的改变对管内油温产生的影响很小。因此图 5(b)中 4 种通道油温沿轴向的变化曲

线基本重合,出口油温大小相近。

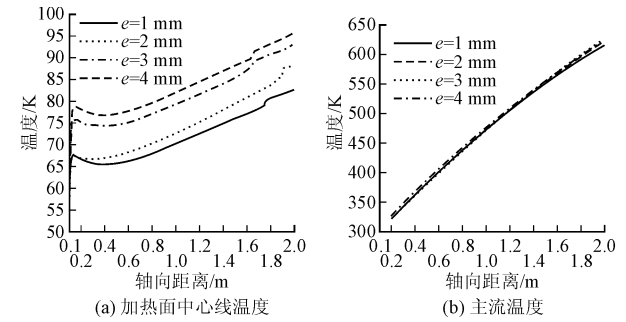


图 5 不同内壁厚度的通道加热面中心线温度、主流温度沿轴向的分布

Fig. 5 Distribution of centerline temperature in heating surface and bulk temperature along axial direction of channel with different thickness of inside wall

4 种通道在同一轴向位置处油温相近,则煤油的密度 ρ 、粘度 μ 等物性也基本相等,见图 6,并且流道截面几何形状(当量直径 d_h)不变,故流速 v 及摩擦阻力系数 c_f 相近,因此,根据流体力学基本计算公式(2)可知:

$$\Delta p_{loss} = p_{in} - p_{out} = \frac{l}{2d_h} \rho v^2 c_f \quad (2)$$

4 种通道的流动压力损失 Δp_{loss} 基本相等。

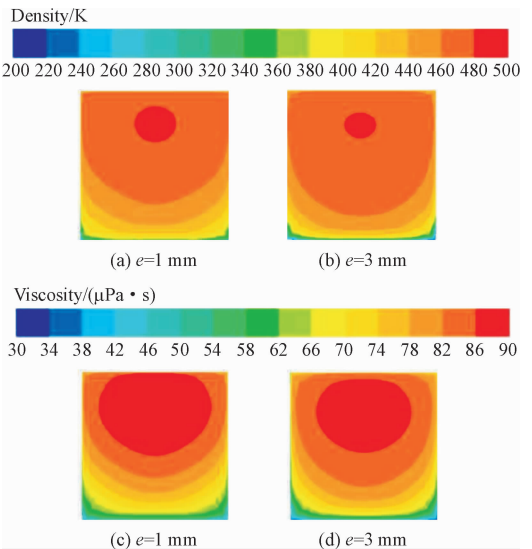


图 6 $e=1$ mm 和 $e=3$ mm 的 2 种通道在 $z=2.1$ m 处煤油密度与黏度的分布云图

Fig. 6 Distributions of kerosene density and viscosity of two channels with $e=1$ mm and $e=3$ mm at $z=2.1$ m

图 7 为 4 种内壁厚度的通道在 $z=2.1$ m 处内壁温度云图,a 为煤油侧,b 为加热侧,可以看出,峰值温度出现在加热侧上。由于内壁厚增加,导致内壁导热热阻增大,致使峰值温度升高。

2.2 肋片厚度对流动换热的影响

在再生冷却通道总数 N 一定的情况下,改变肋

片厚度 δ , 研究 δ (对应的通道宽 W) 分别取值 1(5) mm、2(4) mm、3(3) mm、4(2) mm 情况下的通道内流动换热情况。图 8 显示, 随着肋片厚度的增大, 最高壁温逐渐减小, 出口油温基本不变, 流动压力损失急剧增大。

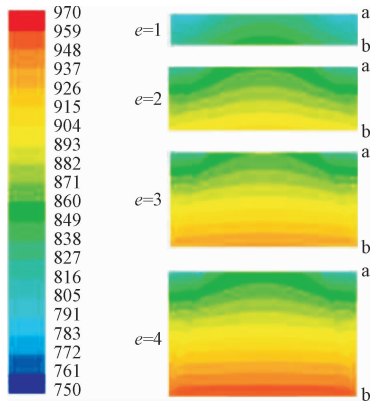


图 7 不同内壁厚度的通道在 $z=2.1$ m 处内壁温度云图
Fig. 7 Inside wall temperature nephogram of channels with different inside wall at $z=2.1$ m

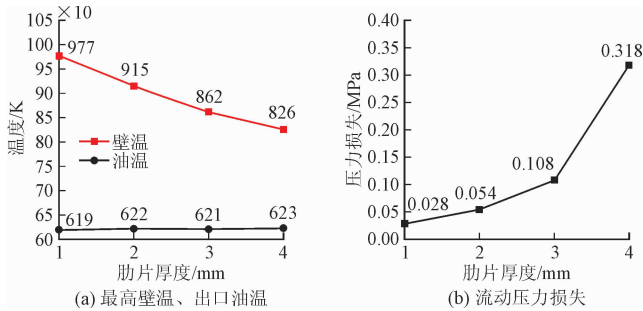


图 8 壁面、煤油的温度与流动压力损失随肋片厚度的变化
Fig. 8 Variation of wall and kerosene temperature and flow pressure loss with thickness of fin

根据式(1)可知, 由于肋片厚度不是影响煤油出口温度的外在因素, 故肋片厚度的改变对出口油温基本没有产生影响。在再生冷却通道总数 N 一定情况下, 随着肋片厚度的增大进口截面减小, 相同流量下通道内流速增大, 导致边界层扰动作用增强, 流体微团热交换加剧, 对流换热能力提高, 根据牛顿冷却公式(3)可知:

$$q_w = h(T_w - T_l) \quad (3)$$

对流换热系数 h 增大, 油温 T_l 基本不变, 热流密度 q_w 为恒定值, 故壁温 T_w 下降。根据式(2)可知, 流动压力损失与流速的平方成正比关系, 随着肋片变厚, 流速均匀增大, 而流动压力损失急剧增大。

2.3 通道高度对流动换热的影响

改变通道高度 H , 研究 H 分别取值 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 情况下通道内流动换热情况。图 9 显示, 随着通道高度的增大, 最高壁温逐渐升高, 出口油温基本不变, 流动压力损失急剧减小。

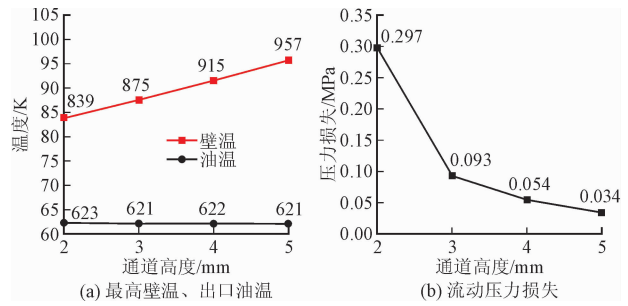


图 9 壁面、煤油的温度与流动压力损失随通道高度的变化
Fig. 9 Variation of wall and kerosene temperature and flow pressure loss with channel height

通道高度对通道流动换热的影响机理与肋片厚度的相似, 都是通过影响进口截面积进而影响流速和湍动能最终影响到壁温特性与流动压力损失大小, 但影响规律相反。

3 结构参数的优化

3.1 优化方案

对于超燃冲压发动机再生冷却结构的设计, 追求这样的目标: 在给定的空间范围内, 满足散热要求的同时流阻尽可能小, 因此本文将平均对流换热系数 \bar{h} 和平均流动阻力系数 \bar{c}_f 作为优化目标。

目标函数 1: 平均对流换热系数最大

$$\max \bar{h}(X) \quad (4)$$

$$\bar{h}(X) = \frac{\bar{q}_{w,f}}{T_{w,f} - \bar{T}_f} \quad (5)$$

式中: $\bar{q}_{w,f}$ 是冷却液侧壁面平均热流密度; $T_{w,f}$ 、 \bar{T}_f 为整个通道的平均壁温和平均油温, \bar{T}_f 定义为:

$$\bar{T}_f = \frac{\int_v \rho u C_p T dV}{\int_v \rho u C_p dV} \quad (6)$$

目标函数 2: 平均流动阻力系数最小。

$$\min \bar{c}_f(X) \quad (7)$$

$$\bar{c}_f(X) = \frac{p_{in} - p_{out}}{l} \frac{1}{0.5 \rho_{out} v_{out}^2} \quad (8)$$

式中: ρ_{out} 为出口密度; v_{out} 为出口速度。因为出口的密度和速度最能反映不同结构的通道流阻大小, 故这里选择 ρ_{out} 和 v_{out} 作为 $\bar{c}_f(X)$ 的因子。

将优化设计变量取为:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]^T = [e, H, W]^T \quad (9)$$

冷却通道结构参数的取值范围有一定的设计要求。另外, 还需保证再生冷却结构最高壁温在材料允许的范围, 此处设定材料最高允许温度为 1400 K (铬镍钢材料的耐温极限^[7])。在燃烧室再生冷却通道的总数 N 一定的情况下, 取如下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} 0.5 \text{ mm} \leq e \leq 4.5 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq H \leq 8 \text{ mm} \\ 1 \text{ mm} \leq W \leq 5 \text{ mm} \\ W + \delta = 6 \text{ mm} \\ T_{w, \max} \leq 1\,400 \text{ K} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

目前在 Workbench 平台上进行结构的优化设计在已得到了广泛应用^[15-17],利用 Workbench 优化不仅可以获得满足设计目标的结构,还可以通过灵敏度分析判断各个结构参数对目标函数的影响程度^[18]。在再生冷却通道结构参数的优化中,利用 Workbench 平台的目标驱动优化工具(Goal Driven Optimization),采用多目标遗传算法(MOGA)对其进行优化设计,具体设置过程如下:

1)为输入参数 e 、 H 、 W 、 δ 赋初值,在 Design Modeler 中参数化建模;

2)在 Meshing 中划分网格,为近壁区划分 15 层网格;

3)在 FLUENT 中设置数值方法与边界条件,输入煤油的热物性函数关系式;

4)在 CFD POST 中定义 \bar{h} 和 \bar{c}_f 的表达式,并将其设置为输出参数;

5)在 Design of Experiments 中为输入参数设置上下限,并设置 28 个设计点拟合生成响应面;

6)在 Goal Driven Optimization 中设置优化目标: $\max \bar{h}$, $\min \bar{c}_f$,重要性均设置为“较高”,在今后设计时可根据实际情况对两者重要性进行调整。优化算法选择 MOGA,设定在响应面的生成样本点数为 1 000,迭代样本数为 300。

图 10 给出了初始设计点 H_0 、 W_0 、 e_0 附近输出变量对输入变量的敏感度。显然,对于单根冷却通道, \bar{c}_f 受 W 和 H 的影响程度较强,受 e 的影响很微小; \bar{h} 受影响程度的大小顺序依次是 H 、 W 和 e ,三者影响的程度相近。因此,在对通道结构的设计时可优先考虑改变 W ,为工业设计提供参考。

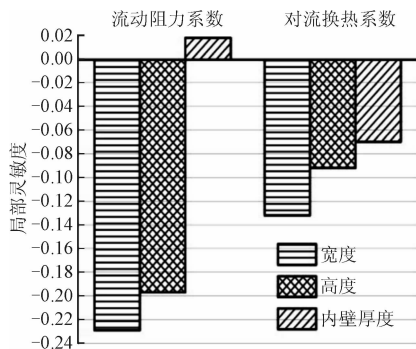


图 10 初始设计点局部敏感度

Fig. 10 Local sensitivity of initial design point

3.2 结果校验

优化结构参数见表 1,同时也列出第 2 节中给出的几组结构进行对比。与初始结构相比,优化结构的内壁较薄,通道宽度减小,高度增大。

表 1 优化结构与其它结构参数

Tab. 1 The parameters of optimized structure and others

结构	内壁厚/mm	通道宽/mm	通道高/mm	肋片厚/mm
0	2	4	4	2
1	1	4	4	2
2	2	3	4	3
3	2	4	3	2
优化结构	1.14	3.18	4.72	2.82

图 11 给出了优化结构与其它 4 种结构最高壁温与压力损失的比较。可以看出,优化结构相比其它几种结构,最高壁温最低;流动压力损失比 0、1 结构的略大,但远低于 2、3 结构,说明优化结构在损失较小的压降时换取了对流换热能力的较大增强,因此,综合考虑,认为优化结构满足设计目标。

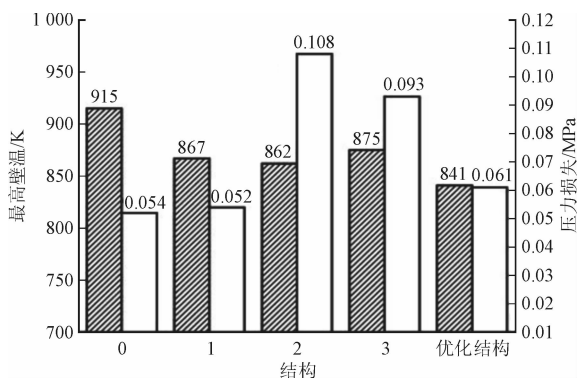


图 11 优化结构与其它结构最高壁温与流动压力损失的比较

Fig. 11 Comparison of the maximum wall temperature and pressure loss between different aspect ratios

4 结论

通过研究内壁厚度、肋片厚度、通道高度对冷却换热效果及流动压力损失的影响效果及作用机理,得出如下结论:

1)3 种结构参数的改变对油温几乎没有影响。

2)随着内壁厚度减小,通道壁温下降,冷却效果改善,流动压力损失基本不受影响。

3)在冷却通道总数一定的情况下,随着肋片厚度的增大,冷却效果改善,但流动压力损失急剧增大。

4)随着通道高度的增大,流动压力损失急剧减小,但冷却效果恶化。

基于以上结论,为得到一种冷却效果较好、流动

压力损失较小的冷却通道结构,利用 Workbench 平台的目标驱动优化工具,以平均对流换热系数最大和平均流动阻力系数最小为优化目标,对冷却通道的结构参数进行多目标优化设计,通过灵敏度分析认为在初始设计点附近通道宽度对流动换热的影响程度最大,然后经过验证,认为优化后的结构满足设计目标。

参考文献(References):

- [1] YU F, HONG Y H, TAO L, et al. Flow Field and Heat Transfer Analysis of Local Structure for Regenerative Cooling Panel [J]. *Journal of Thermal Science*, 2012, 21(2): 172-178.
- [2] ZHANG S L, YU F, ZHANG D. Parametric Numerical Analysis of Regenerative Cooling in Hydrogen Fueled Scramjet Engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(20): 10942-10960.
- [3] BAO W, QIN J, ZHOU W X, et al. Effect of Cooling Channel Geometry on Re-Cooled Cycle Performance for Hydrogen Fueled Scramjet [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 7002-7011.
- [4] 刘志琦. 超燃冲压发动机再生冷却技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
LIU Z Q. Investigation of Technique on Regenerative Cooled Scramjet [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 蒋劲. 超燃冲压发动机燃烧室再生冷却研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
JIANG J. Study on Regenerative Cooled Scramjet [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [6] 王厚庆, 何国强, 刘佩进, 等. 超燃冲压发动机燃烧室新型热结构的优化设计 [J]. *推进技术*, 2009, 30(3): 263-267.
WANG H Q, HE G Q, LIU P J, et al. Optimized Design on A New Type Thermal Structure of Scramjet Combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(3): 263-267. (in Chinese)
- [7] 鲍文, 周伟星, 周有新. 超燃冲压发动机再生冷却结构的强化换热优化研究 [J]. *宇航学报*, 2008, 29(1): 246-251.
BAO W, ZHOU W X, ZHOU Y X, et al. Active Cooling Design on Heat Transfer Enhancement for Scramjet Engines Using Optimization Methods [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 246-251. (in Chinese)
- [8] FAN X J, YU G, LI J G, et al. Combustion and Ignition of Thermal Cracked Kerosene in Supersonic Model Combustors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(2): 317-324.
- [9] HANG H, SPADACCINI L J, SOBEL D R. Fuel-cooled Thermal Management for Advanced Aero-engines [J]. *Eng Gas Turb Power*, 2004, 126: 284-293.
- [10] 郑力铭, 孙冰. 超燃冲压发动机二维热环境数值模拟 [J]. *航空动力学报*, 2007, 22(5): 823-828.
ZHENG L M, SUN B. 2D Thermal Environment Numerical Simulation of Scramjets [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(5): 823-828. (in Chinese)
- [11] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer* 2009, 23(3): 543-550.
- [12] ELY J F, HUBER M L. NIST Standard Reference Database 4-Nist Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures [M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards, 1990.
- [13] KIM S H, KIM Y I, BAE Y Y, et al. Numerical Simulation of the Vertical Upward Flow of Water in A Heated Tube at Supercritical Pressure [C]// *Proceedings of Icapp*. Pittsburgh, PA, 2004.
- [14] 李中洲, 朱惠人, 张霞. 微小圆管内煤油流动研究 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(8): 1728-1732.
LI Z Z, ZHU H R, ZHANG X. Study on the Flow of the Kerosene in Micro Tube [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(8): 1728-1732. (in Chinese)
- [15] QI X D, SHEN X L. Multidisciplinary Design Optimization of Turbine Disks Based on ANSYS Workbench Platforms [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99(8), 1275-1283.
- [16] 夏春杰, 王定标, 董永申, 等. 基于遗传算法的蜂窝板换热器多目标优化 [J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(5): 1201-1206.
XIA C J, WANG D B, DONG Y S, et al. Multi-Objective Optimization of Honeycomb Plate Heat Transfer Exchangers Using A Genetic Algorithm Method [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, 29(5): 1201-1206. (in Chinese)
- [17] 申昊, 蔡万宠, 郁鼎文, 等. 两级阶梯形变幅杆设计及优化 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(20): 104-108.
SHEN H, CAI W C, YU D W, et al. Design and Optimization of Two-Section Ultrasonic Stepped Horn [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(20): 104-108. (in Chinese)
- [18] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
XU J J. ANSYS 13.0 Workbench Numerical Simulation Technology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese)