

基于高温热管的超燃燃烧室热防护结构

韩海涛, 陈智, 胡龙飞, 陈思员, 艾邦成, 俞继军, 曲伟

(中国航天科技集团公司 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘 要: 提出了基于先进热管理思想的燃烧室热防护结构. 面板采用腔体式平板高温热管, 实现面板等温化, 降低局部高温区的温度; 在热管腔体内部设计燃油冷却通道, 实现对超燃燃烧室面板的燃油主动冷却. 对其各项性能进行了数值分析, 给出了设计参数对系统性能的影响规律, 并完成了结构样件研制及石英灯试验考核. 典型设计状态下, 其单位面积质量为无氧铜面板的 35.4%, 高温合金面板的 38.2%. 石英灯局部加热条件下, 面板最高温度为 1123 K 时最大温差为 80 K. 相比于传统燃油冷却方式, 该型防热结构能够有效提高超燃发动机燃烧室热防护的整体性能, 是超燃发动机热防护的一种重要概念.

关键词: 热管; 超燃; 燃烧室; 热防护; 燃油管

中图分类号: V235

文献标志码: A

High temperature heat pipe enhanced thermal protection structure for scramjet combustion chamber

HAN Hai-tao, CHEN Zhi, HU Long-fei, CHEN Si-yuan,

AI Bang-cheng, YU Ji-jun, QU Wei

(China Academy of Aerospace Aerodynamics,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on advanced thermal management method, a novel thermal protection structure was proposed for scramjet combustion chamber. High temperature heat pipe panels were used to decrease the local high temperature by achieving isotherm. Simultaneously, fuel pipes were embedded to achieve active cooling. The performance was analyzed by numerical simulation, and the influences of the design parameters were evaluated. A sample panel was prepared and evaluated by quartz lamp heating test. In typical circumstance, its unit area mass was 35.4% and 38.2% of oxygen-free copper panel and high temperature super alloy panel, respectively. The maximum temperature difference was less than 80 K when the maximum temperature was 1123 K in the local heating test. As a proposed thermal protection method, the structure can improve the scramjet thermal protection performance compared with the traditional fuel cooling method.

Key words: heat pipe; scramjet; combustion chamber; thermal protection; fuel pipe

超燃冲压发动机燃烧室内燃气温度高、气流冲刷显著、环境呈氧化特性, 燃烧室承受长时间的

强加热, 热环境恶劣, 部分位置由于燃烧放热或波系干扰导致热环境尤其恶劣(局部热点). 这些热

收稿日期: 2015-08-23

作者简介: 韩海涛(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为热防护结构分析技术.

通讯作者: 陈智(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为气动热环境及数值模拟技术. E-mail: chen_zhi@live.cn

引用格式: 韩海涛, 陈智, 胡龙飞, 等. 基于高温热管的超燃燃烧室热防护结构[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1043-1050. HAN Haitao, CHEN Zhi, HU Longfei, et al. High temperature heat pipe enhanced thermal protection structure for scramjet combustion chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1043-1050.

环境特性对热防护系统研制提出了很高要求,超燃燃烧室的热防护是超燃冲压发动机研制的一项关键技术。

超燃燃烧室的热防护目前主要有被动式的复合材料热防护方案和基于燃油主动冷却的主动热防护方案。被动式热防护方案主要依靠具有耐高温抗氧化特性的复合材料结构实现燃烧室的非烧蚀热防护^[1],在进气道来流马赫数较高时面临极大的困难。目前,主动冷却热防护结构分为金属主动冷却热防护结构和复合材料主动冷却热防护结构,前者以美国空军的镍基合金燃烧室为代表^[2],后者则以法国目前正在研制的带有主动冷却流道的碳/碳化硅复合材料燃烧室^[3]为代表。我国的研究主要集中于金属主动冷却热防护结构,多年来开展了从基本燃油物性^[4-6]、热结构分析手段^[7-9]、结构优化设计^[10]到热防护试验考核^[11]的系统性研究。

文献[12-13]基于高温热管技术提出了疏导式热防护方案,实现了前缘部位的非烧蚀。超燃冲压发动机的热环境特点与尖前缘类似,均呈现局部峰值热流高,分布极不均匀的特点。本文基于这种认识,提出了一种基于高温热管技术的再生冷却燃烧室结构,可有效提升发动机的热管理水平。具体而言,该结构可以降低燃烧室局部热流峰值部位的温度,使燃烧室等温化,降低结构温度梯度,提高发动机抗氧化以及抗应力破坏的能力,并最终提高发动机的安全性。文中给出其结构设计方案,并对其防热性能进行分析评估,系统研究燃油流量、管路间距等设计参数对防热性能的影响规律。在此基础上,制备了高温热管面板样件并开展了石英灯试验考核,初步验证了该结构的可行性。

1 基于高温热管的超燃燃烧室热防护概念

燃烧室的典型超燃燃烧室环境分布(流动方向)如图 1 所示,图中 q 表示加热热流, x 表示位置坐标,局部热点处峰值热流为 4 MW/m^2 ,大部分区域的热流在 1 MW/m^2 左右。

高温热管是本文提出的热防护结构中的关键结构件。高温热管是一种具有极强传热能力的热疏导介质,通过壳体内部工质蒸汽流动及工质在高温区的汽化吸热和低温区的液化放热实现热量的高速传输,其工作原理如图 2 所示。热管通常由壳体、毛细芯、工作介质 3 个部分组成。按工作特性,可分为蒸发段(区域)、绝热段(区域)和冷凝段(区域)。当蒸发段受热时,毛细管中的液体介质

迅速蒸发,吸收热量,蒸汽在微小的压力差下流向另外一端,重新凝结成液体,释放出热量,液体在毛细力的作用下沿多孔材流回蒸发段。研究表明,高温热管具有优异的传热性能,其等效导热能力超过任何现有金属,在稳态运行状态下整个热管接近一个等温体^[14-16]。

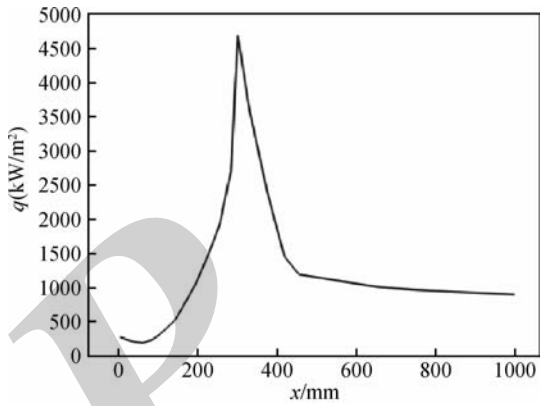


图 1 典型超燃燃烧室的热流分布
Fig. 1 Typical heat flux distribution of scramjet combustion chamber

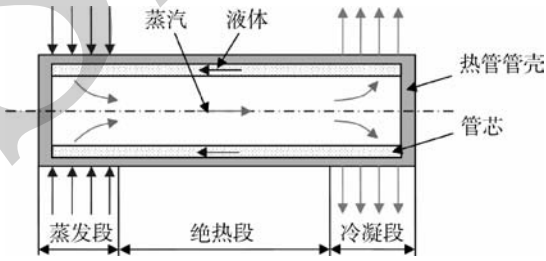


图 2 热管工作原理示意图
Fig. 2 Diagram of working principle of heat pipe

本文提出地基于高温热管技术的超燃冲压发动机燃烧室热防护结构,如图 3 所示。燃烧室防热面板为腔体热管,由内外壁板及侧壁板组成,内部为热管腔体,内部靠近燃气壁一侧设计了燃油冷却通道。燃油管路为圆形截面,与靠近燃烧室的内侧壁板焊接。热管壳体采用镍基高温合金,选取钠为热管工质,燃油冷却管采用镍基高温合金材料。工作状态下,燃烧室防热面板内侧壁板受热,热量传导至热管腔体内部,热管工质蒸发并逐渐启动开始工作,局部受热高的部位为蒸发部位,局部受热较低的部位为冷凝部位,实现热管腔体的稳定工作,腔体内蒸汽通过对流及相变传热将局部高热流部位的热量传输至局部低热流部位,使得整个防热面板等温化。燃油冷却通道的燃油实现对燃烧室防热面板的整体冷却。基于高温热管技术的腔体式热防护面板可以降低局部高热流部位的

温度,减轻了整个燃烧室面板的热防护压力,降低了燃油冷却所需的燃油量,提升了热防护性能。

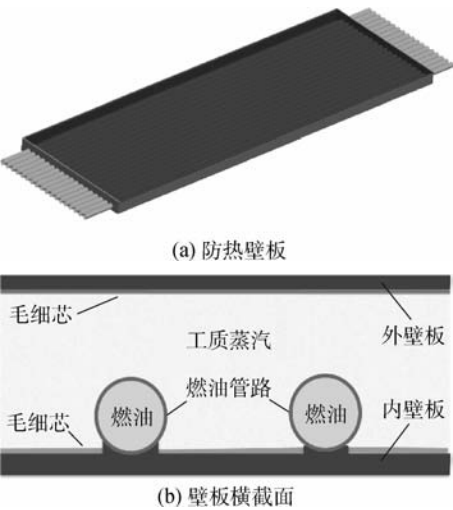


图 3 基于高温热管的超燃燃烧室热防护结构
Fig.3 Thermal protection structure of scramjet combustion chamber based on high temperature heat pipe

2 基于高温热管的热防护结构性能评估

2.1 计算模型

为了评估基于高温热管的热防护结构的防热性能,建立了燃烧室面板的热力学计算模型.考虑到直管展向排布较密且具有周期性,选取一个管单元进行计算,模型截面尺寸及计算网格如图 4 所示,图中 d 表示直径.面板长度为 1 000 mm.侧面为周期性边界条件.

为了对比研究热管式热防护结构的性能,建立了热沉式无氧铜面板、辐射式高温合金面板和

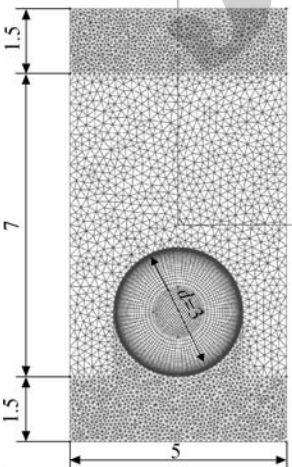


图 4 模型截面计算网格(单位:mm)
Fig.4 Calculational meshes of the model section
(unit:mm)

本文提出的热管式高温合金面板 3 种对比模型,内部燃油冷却系统相同.无氧铜和高温合金面板由整体面板及内部加工的燃油通道组成,高温热管式面板由四周壁板及内部燃油管路组成.热管稳定工作时,通过钠工质的相变、传输实现热管内部的快速传热,宏观上表现为热管的均温特性.因此,为了对稳定状态下热管与燃油冷却协同工作时的热防护性能进行分析,本文不考虑热管工质相变及输运的内部物理过程,将稳定工作时的热管内部工质蒸汽简化为热的超导体。

2.2 热物性参数

无氧铜与高温合金比定压热容 c_p 与导热系数 κ 随温度的变化如下图 5 所示.无氧铜的熔点为 1358 K,服役温度按其熔点 70% 折算为 950.6 K;高温合金熔点约为 1500 K,服役温度按其熔点 70% 折算为 1050 K.

冷却用燃油选用 RP-3,并设定其工作压力为处于临界压力区间的 4MPa.此压力下 RP-3 燃油的热物性参数通过对文献[5]中 3MPa 和 5MPa 下的燃油物性进行线性插值得到(图 6,图中 p 表示压力).

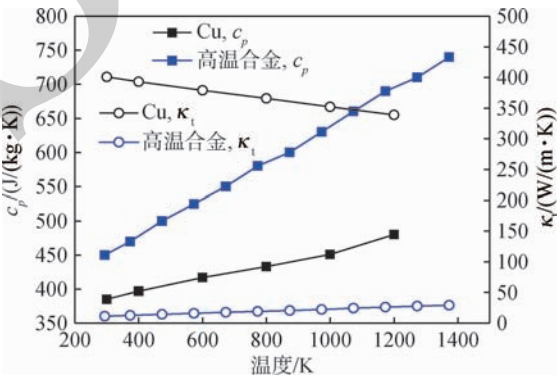
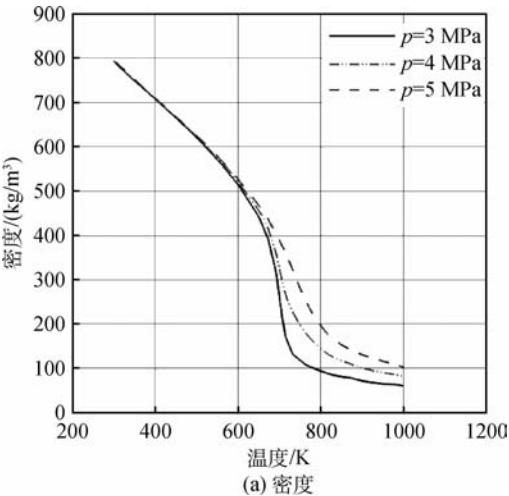


图 5 高温合金比热容及导热系数随温度的变化
Fig.5 Variation of specific heat and thermal conductivity of the superalloy with temperature



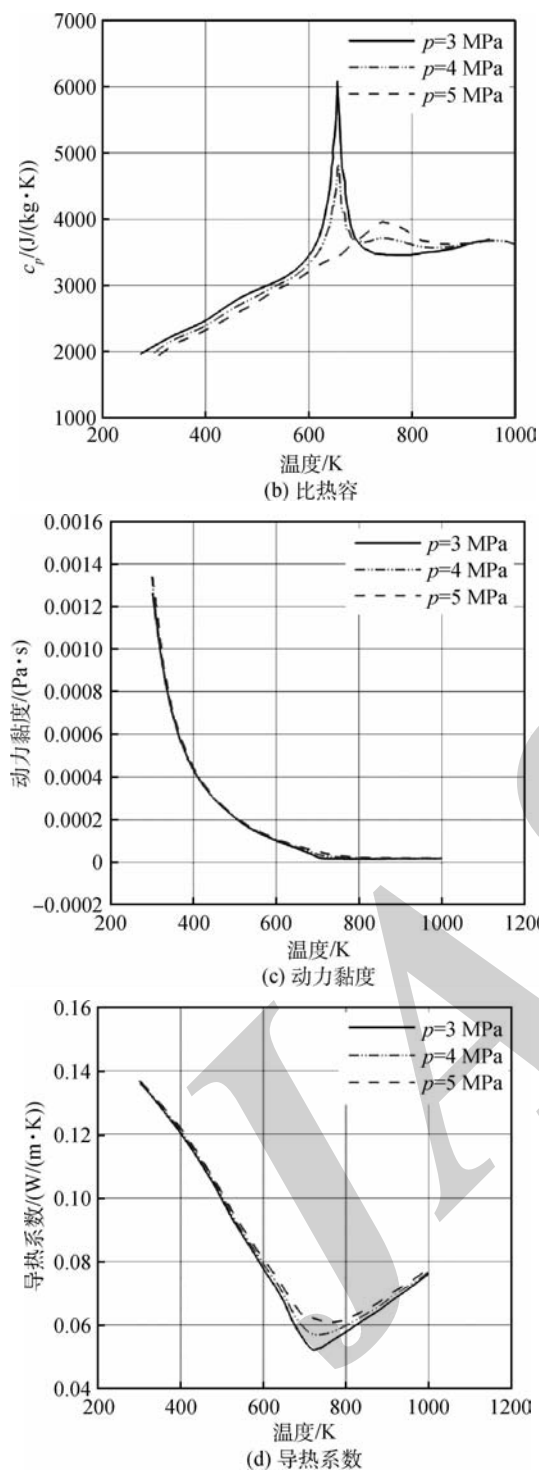


图 6 RP-3 燃油的热物性参数随温度的变化
Fig. 6 Variation of thermal physical parameters of RP-3 fuel with temperature

2.3 结果与分析

以下给出无氧铜面板、高温合金面板及高温热管面板的热防护性能对比。图 7~图 9 为燃油流量为 0.005 kg/s 时 3 种不同面板内表面(加热面)和外表面(散热面)的温度场分布对比。图 10 给出了外表面中心线温度场变化曲线。其中无氧

铜面板外表面的最高温度为 1 340 K,最低温度为 409 K,温差为 931 K;高温合金面板外表面的最高温度为 1342 K,最低温度为 342 K,温差为 1 000 K;高温热管面板外表面的最高温度为 892 K,最低温度为 769 K,温差仅为 123 K。可见相对于无氧铜面板和高温合金面板,由于高温热管的超导作用,显著降低了局部高热流区的温度水平,减小了温度梯度,起到了非常好的均温效果,改善了面板材料的服役条件,提高发动机壁板的热防护能力。

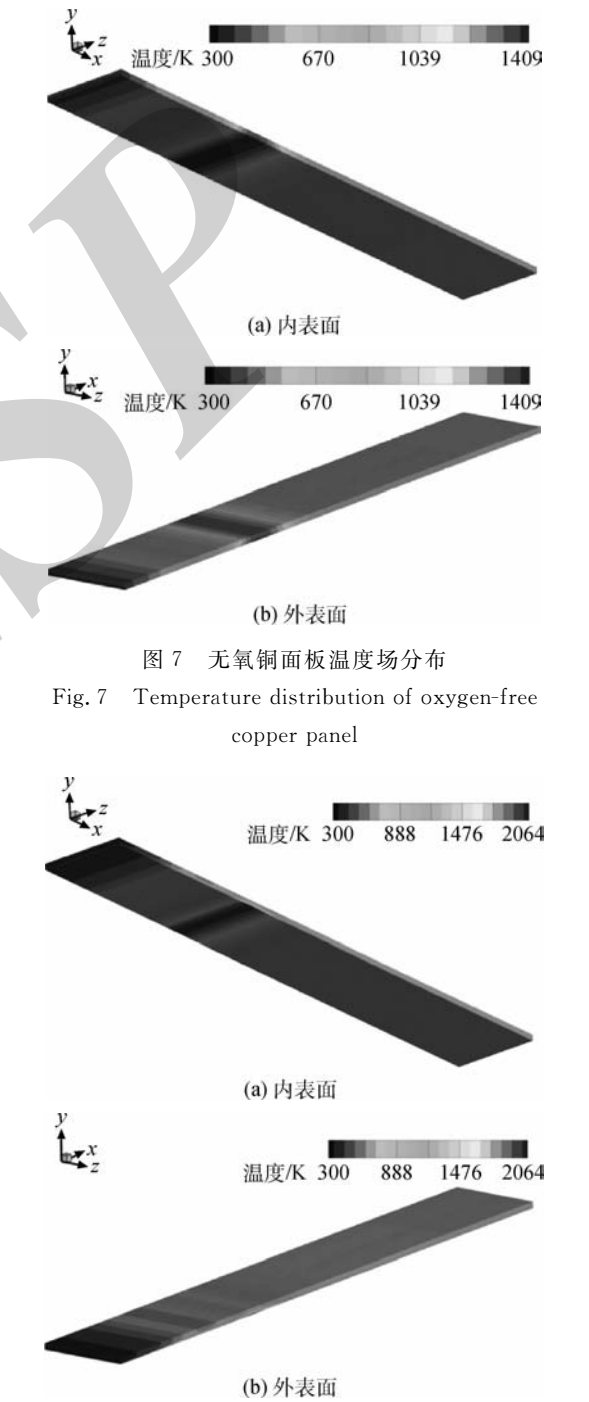


图 7 无氧铜面板温度场分布
Fig. 7 Temperature distribution of oxygen-free copper panel

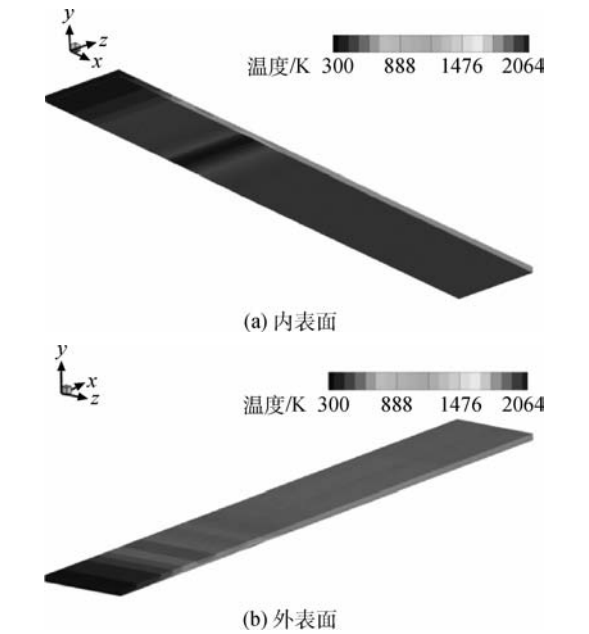


图 8 高温合金面板温度场分布
Fig. 8 Temperature distribution of superalloy panel

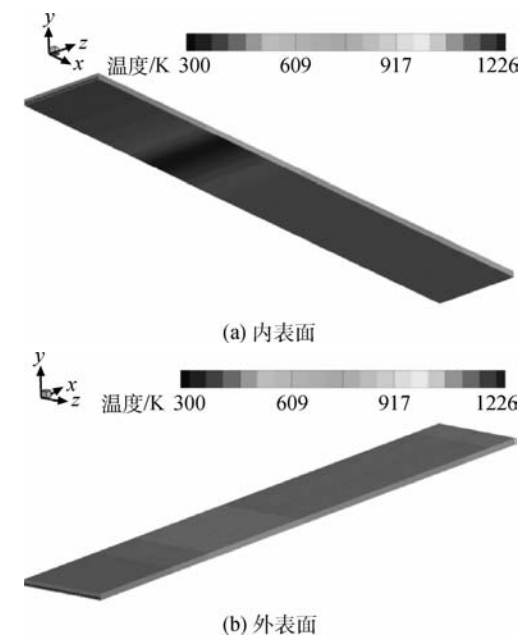


图 9 高温热管面板温度场分布
Fig. 9 Temperature distribution of high temperature heat pipe panel

考虑无氧铜和高温合金的最高服役温度,下表给出了不同面板在最高服役温度下结构温度及冷却燃油需求量的对比,如表 1 所示.高温热管面板的单元辐射散热量为无氧铜面板的 3.4 倍,高温合金面板的 13.1 倍,而高温热管面板冷却燃油需要量为无氧铜面板的 1/2,高温合金面板的 1/3.可见,基于热管的超高导热特性,其均温性增大了外表面的有效辐射面积和内部冷却燃油的有效换热热量,单元辐射散热和出口油温大幅提高,显著增强了

表 1 不同面板各项性能指标对比

Table 1 Comparison of the performance of various panels

防热形式	单元燃油流量/(kg/s)	加热面最低温度/K	加热面最高温度/K	背面最低温度/K	背面最高温度/K	出口油温/K	单元辐射散热/W	单元再生换热/W
无氧铜	0.010	354	951	351	890	545	35	6160
高温合金	0.015	387	1206	317	560	475	9	6186
高温热管	0.005	768	1226	769	892	711	118	6077

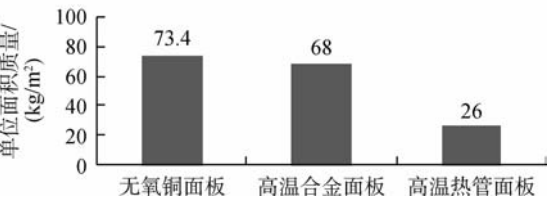


图 11 不同面板单位面积质量对比

Fig. 11 Comparison of unit area mass of various panels

3 热管式燃烧室热防护系统设计

通过对燃油流量、燃油管路间距(即单个单元

面板的辐射散热能力和冷却燃油的冷却效率.同时,由于高温热管内部为空腔结构,大大减小了结构质量,其单位面积质量只有无氧铜面板的 35.4%,高温合金面板的 38.2%,如图 11 所示.

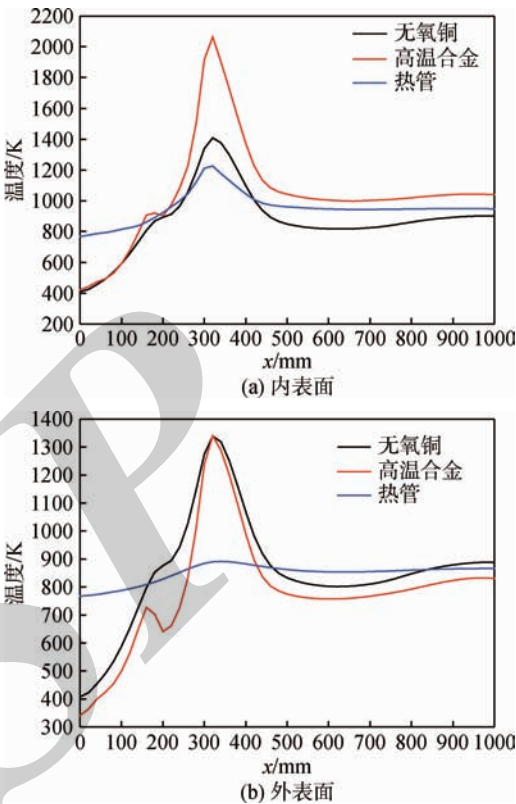


图 10 不同面板内外表面中线温度分布
Fig. 10 Temperature distribution of central line of internal and external face for various panels

宽度)进行参数化分析,给出其对热防护性能的影响规律,从而指导优选出合理的设计方案.

表 2 给出了高温热管面板方案冷却燃油流量变化对热防护系统各项性能的影响.其中燃油管路间距为 5 mm.燃烧室壁板的散热由对外热辐射和燃油再生冷却两部分组成,受到高温合金耐温极限的制约,其最高使用温度决定了壁板辐射散热的最大能力,相对燃油再生冷却来说壁板辐射散热所占比例较小.通过提高冷却燃油流量,可以有效降低壁板温度,但同时发现,出口油温下降明显,再生换热部分功率降低,可见由于流量加大降

低了燃油的冷却效率。

表 3 给出了高温热管面板方案冷却燃油管路间距变化对热防护系统各项性能的影响。其中单元内燃油流量为 0.015 kg/s, 给定管间距分别为 5, 10, 15 mm。可见当单元内燃油流量一定时, 油管间距增大则单位宽度冷却油量减小, 使得出口油温显著增加, 即冷却燃油再生换热效率大幅提高。同时, 加大了辐射热量在热量输出中所占的比

例。油管间距为 15 mm、燃油流量为 0.015 kg/s (表 3 中第 3 行) 与油管间距为 5 mm、燃油流量为 0.005 kg/s 工况 (表 2 中第 3 行) 单位宽度冷却油量一致, 其加热面最高温度分别为 1178 K 与 1226 K, 可见两者冷却效率接近, 表明由于冷却面板热导率较大, 燃油换热比较充分, 燃油冷却效率对油管间距并不敏感。

表 2 燃油流量对高温热管面板热防护性能的影响

Table 2 Influences of oil flow rate to thermal protection properties of high temperature heat pipe panel							
流量/ (kg/s)	加热面最低 温度/K	加热面最高 温度/K	背面最低 温度/K	背面最高 温度/K	出口油温/ K	单个单元背面 辐射热/W	单个单元再生 换热/W
0.005	768	1226	769	892	711	118	6077
0.010	521	1027	510	638	545	29	6166
0.015	453	961	434	556	474	15	6179

表 3 高温热管面板油管间距变化对热防护性能的影响

Table 3 Influences of oil pipe distance to thermal protection properties of high temperature heat pipe panel								
油管间距/ mm	单位宽度冷却油 量/(kg/(s·mm))	加热面最低 温度/K	加热面最高 温度/K	背面最低 温度/K	背面最高 温度/K	出口油温/ K	单个单元背面 辐射热/W	单个单元再生 换热/W
5	0.0030	453	961	434	556	474	15	6179
10	0.0015	587	1060	591	724	609	98	12291
15	0.0010	718	1178	741	912	710	387	18197

4 高温热管面板样件研制及考核

为对热管应用于燃烧室壁板的可行性进行验证, 首先开展了高温热管面板样件的制备。试件由上下壁板、侧板、毛细芯及充装尾管组成。采用电子束焊接将毛细芯紧密焊接在上下壁板, 并通过组合焊与侧壁板以及尾管焊接。图 12 为焊接好毛

细芯的上下壁板及焊接完成的高温热管面板样件。可以看出电子束焊接的毛细芯平整、整洁, 贴合良好。

通过 U 型灯管加热器对高温热管面板头部进行局部加热, 模拟气动加热的不均匀热载荷工况。试验加热方案如图 13 所示, 其中测点 1~测点 8 为温度测点, 位于高温热管面板中轴线上。试验测得不同测点温度随时间变化曲线如下图 14 所示, 从中可以看出热管由前到后逐渐达到均温的启动过程。由于石英灯加热器加热功率较小, 因此启动时间较长。可以看到稳定后各测点温差小于 80 K, 均温性良好, 初步验证了将其应用于超燃冲压发动机燃烧室的可行性。

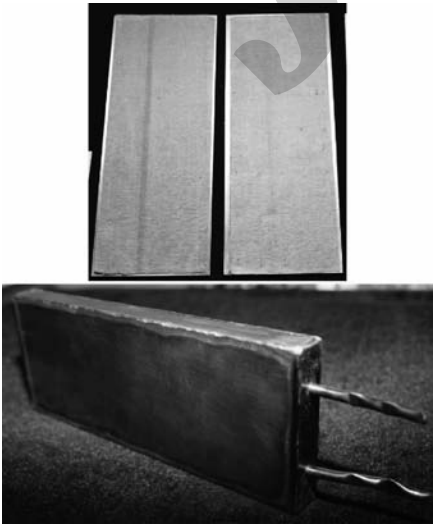


图 12 高温热管面板样件

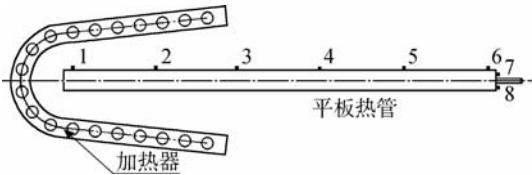


图 13 高温热管面板加热方案

Fig. 13 Heating scheme of high temperature heat pipe panels

Fig. 12 Sample of high temperature heat pipe panel

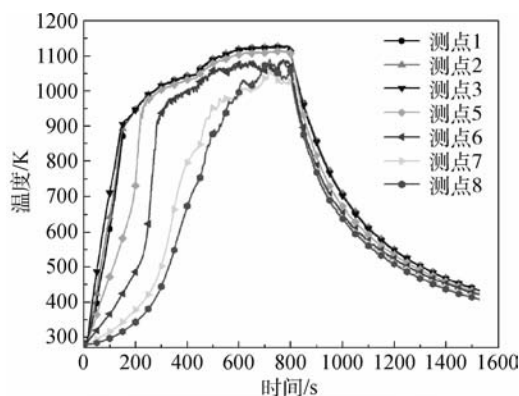


图14 高温热管面板测点温度曲线

Fig. 14 Temperature curve of the high temperature heat pipe panel measuring points

5 结 论

基于高温热管技术及燃料再生冷却技术,针对超燃冲压发动机热环境分布的局部集中特性,本文提出了一种热管式超燃燃烧室热防护结构,并给出了其设计方案,对其防热性能及影响因素进行了系统的分析。计算分析结果表明,本文提出的燃烧室热防护系统综合热量疏导与燃油冷却机制,具有以下几个优点:

1) 显著降低了燃烧室局部热流峰值部位的温度,改善了局部受热的恶劣条件,能够提高超燃燃烧室在局部高热流条件下的服役能力。

2) 同等加热条件下壁板良好的等温性,增大了辐射散热的有效面积和冷却燃油的换热量,大幅降低冷却燃油用量,显著提高了热防护系统的散热效率。

3) 高温热管的空腔式结构,降低了结构质量。

4) 出口油温显著提高,增强了对冷却燃料的预加热能力,减少了对其加热所需附带燃料量。

5) 高温热管面板内采用管状油路方案,燃油冷却管为锻造挤出的标准件,工艺要求及加工成本较低。

本文提出的高温热管式超燃燃烧室热防护结构有机地结合了高温热管和燃油再生冷却技术的优点,有效地提升了燃烧室的热防护能力,提高了超燃冲压发动机燃烧室结构的可靠性,因此具有非常好的应用前景。下一步的工作中配合燃油冷却,将开展该型热防护结构性能的试验研究,并开展结构的进一步优化设计。

参考文献:

[1] Uhrig G, Bouquet C, Larrieu J M, et al. Composite technol-

ogies development status for scramjet applications[R]. Norfolk, Virginia: 12th AIAA Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2003.

[2] Wishart D P, Fortin T B, Guinan D, et al. Design, fabrication and testing of an actively cooled scramjet propulsion system[R]. AIAA-2003-0015, 2003.

[3] Zander F, Morgan R. Composite scramjet combustor[R]. AIAA-2009-7354, 2009.

[4] 范学军, 俞刚, 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 187-192.

FAN Xuejun, YU Gang. Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192. (in Chinese)

[5] Zhong F, Fan X, Yu G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.

[6] 张春本, 邓宏武, 徐国强, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量及换热研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 331-335.

ZHANG Chunben, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at super critical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 331-335. (in Chinese)

[7] 蒋劲, 张若凌, 乐嘉陵. 超燃冲压发动机再生冷却热结构设计的计算工具[J]. 实验流体力学, 2006, 20(3): 1-7.

JIANG Jin, ZHANG Ruoling, LE Jialing. The calculational tool of thermal structure design for regeneratively cooled scramjet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(3): 1-7. (in Chinese)

[8] 夏新林, 艾青. 一种再生冷却面板的温度控制热设计方法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 1-5.

XIA Xinlin, AI Qing. Thermal design method of temperature control for regenerative cooling panel[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 1-5. (in Chinese)

[9] 蒋劲, 张若凌, 乐嘉陵. 再生冷却超燃冲压发动机整机稳态热分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2649-2654.

JIANG Jin, ZHANG Ruoling, LE Jialing. Steady thermal analysis of regeneratively cooled scramjet[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12): 2649-2654. (in Chinese)

[10] 鲍文, 周伟星, 周有新, 等. 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, 310.

BAO Wen, ZHOU Weixing, ZHOU Youxin, et al. Active cooling design on heat transfer enhancement for scramjet engines using optimization methods[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 246-251, 310. (in Chinese)

[11] 蒋劲, 张若凌, 杨样, 等. 超燃冲压发动机典型部件热防护[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 1921-1926.

JIANG Jin, ZHANG Ruoling, YANG Yang, et al. Thermal protection of scramjet typical components[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 1921-1926. (in Chinese)

[12] 姜贵庆, 艾邦成, 俞继军. 疏导热防护的固体传导的性能表征与传导特性分析[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(1): 44-50.

JIANG Guiqing, AI Bangcheng, YU Jijun. The property expression and conduction analysis of solid medium for Shu-Dao thermal protection[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(1): 44-50. (in Chinese)

[13] 李锋, 艾邦成, 姜贵庆, 等. 高超声速飞行器疏导式热防护研究进展[J]. 气体物理-理论与应用, 2010, 5(2): 95-104.

LI Feng, AI Bangcheng, JIANG Guiqing, et al. Advances in research of hypersonic vehicle leading thermal protection [J]. Physics of Gases-Theory and Applications, 2010, 5 (2): 95-104. (in Chinese)

[14] 韩海涛, 邓代英, 陈思员, 等. 尖前缘一体化高温热管结构设计与分析[J]. 机械强度, 2013, 35(1): 48-52.

HAN Haitao, DENG Daiying, CHEN Siyuan, et al. Design and structural analysis of sharp leading edge integrated with heat pipe[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(1): 48-52. (in Chinese)

[15] 赵蔚琳, 刘宗明, 李树人. 高温热管的研究与发展[J]. 石油化工设备, 2005, 34(4): 40-44.

ZHAO Weilin, LIU Zongming, LI Shuren. Research and development of the high temperature heat pipe[J]. Petro-Chemical Equipment, 2005, 34(4): 40-44. (in Chinese)

[16] 黄生云, 郭航, 叶芳. 热管启动性能研究进展[J]. 现代化工, 2009(7): 27-30.

HUANG Shengyun, GUO Hang, YE Fang. Advances in study of start-up performance of heat pipes[J]. Modern Chemical Industry, 2009(7): 27-30. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)