

文章编号: 1001-4888(2017)06-0827-06

再生冷却结构超高温加热模拟试验研究^{*}

张婕, 王琦, 张佳斌

(中航工业飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 再生冷却结构是超燃冲压发动机热防护的主要形式, 具有重要的应用前景。本文根据超燃冲压发动机热防护技术需求, 建立了再生冷却结构超高温加热模拟试验系统, 解决了再生冷却结构在内部冷却液流动情况下单面承受高温高热流加热模拟问题。本文研制的集分水器, 实现了再生冷却结构各流道流量的精确控制。利用该试验系统, 顺利完成了再生冷却平板结构 1500℃瞬态热试验。试验结果表明, 该系统运行稳定可靠, 试验结果可以作为再生冷却平板结构防热性能评定的依据。

关键词: 再生冷却; 防热性能; 辐射加热; 温度; 流量; 超燃冲压发动机

中图分类号: V216.4

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-185

0 引言

再生冷却结构是通过结构中流道内冷却剂的流动而冷却结构壁面的主动热防护形式。当高超声速飞行器以马赫数 4~12 飞行时, 超燃冲压发动机燃烧室最高温度可达 3227℃, 峰值热流可达 7~8MW/m², 热环境非常恶劣, 因此采用再生冷却结构对超燃冲压发动机进行热防护具有重要的应用前景。当发动机工作时, 燃料作为冷却剂流经再生冷却结构的冷却通道, 对结构内壁进行对流冷却, 燃料自身受热升温后流出冷却通道, 经喷注器进入燃烧室, 使通过内壁传出的热能又回到做功循环中, 燃料通过冷却通道进行有效预热, 提高了燃烧性能^[1,2]。

国外很早就开展了再生冷却结构的研究。Clement 等人^[3]分别采用分析和试验的方法评估了轻质带冷却通道的 C/SiC 再生冷却结构。Edward 等人^[4]研制了冷却陶瓷基复合材料流道部件, 对带有冷却通道的发动机组件以及带流道 CMC 冷却面板部件开展了多项分析与试验研究。Melis 等人^[5]利用多物理场软件 Spectrum 分析了氢冷却前缘结构的流固热耦合问题。Buursink 等人^[6]针对增强辐射冷却系统开展了一系列的试验研究, 测定了冷却系统的性能以及多项参数。近年来, 随着高超声速飞行器的发展, 国内的研究机构也对再生冷却结构进行了大量的研究。中科院力学所仲峰泉^[7]根据冲压发动机主动冷却研究的需要, 研制了辐射加热装置和测温装置, 并通过试验对所研制的装置进行了验证。彭丽娜等人^[8]针对陶瓷基耐高温复合材料的主动冷却模式开展了试验和数值研究, 建立了主动冷却试验装置。王永鹏等^[9]采用辐射加热系统对航空煤油在三维冷却结构中的对流传热特性进行了试验研究。

超燃冲压发动机再生冷却结构涉及流、固、热耦合问题, 在进行再生冷却结构初步设计时, 结构尺寸、构型以及材料的选择等都必须通过试验为结构设计提供依据。国内虽然针对再生冷却结构开展了分析和试验研究, 但是暂未见有关再生冷却结构超高温模拟试验研究报道。由于超燃冲压发动机工作环境恶劣, 而再生冷却结构作为其热防护结构, 必然承受超高温热载荷, 鉴于此, 本文以再生冷却平板结构为研究对象, 开展极端高温载荷下的防热性能试验研究。

^{*} 收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2016-11-07

通讯作者: 张婕(1980—), 女, 高级工程师, 主要从事飞机结构热强度研究。Email: 150122413@qq.com

1 试验方案及试验装置

1.1 试验方案

为了验证再生冷却结构的防热性能,本文建立了再生冷却结构防热性能试验模拟系统,利用该试验系统,在保证试验件内冷却介质均匀稳定流动的情况下,按照给定的温度载荷曲线对试验件热面进行加热,测试试验件冷面的温度分布以及出口冷却介质的温度。图 1 给出了试验方案示意图。通过泵将冷却介质升至一定压力,流经管道,进入集分水器,分流至试验件各个流道,再进入回收装置。由于石英灯辐射加热器热惯性小,便于电控,并且体积小,功率大,试验采用石英灯辐射加热器加热。为了保证金属流道与复合材料平板之间的良好接触以及试验件流道不受热辐射的影响,采用从下往上的加热方式对试验件加热。

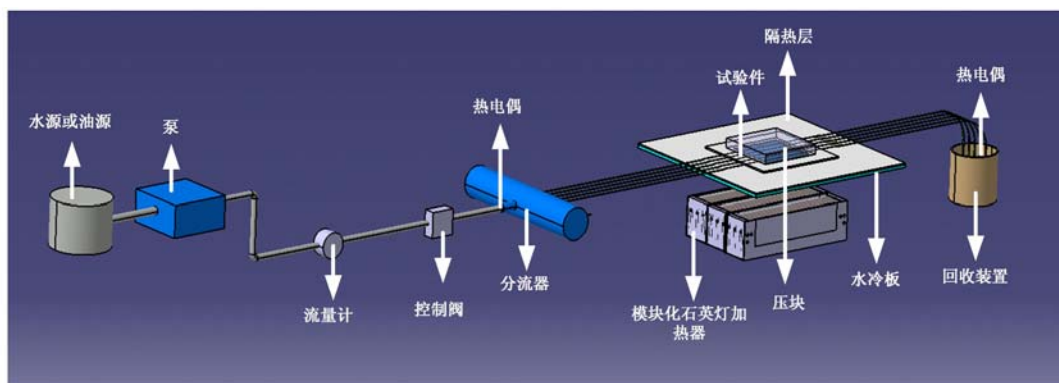


图 1 试验方案示意图

Fig. 1 Sketch of test scheme

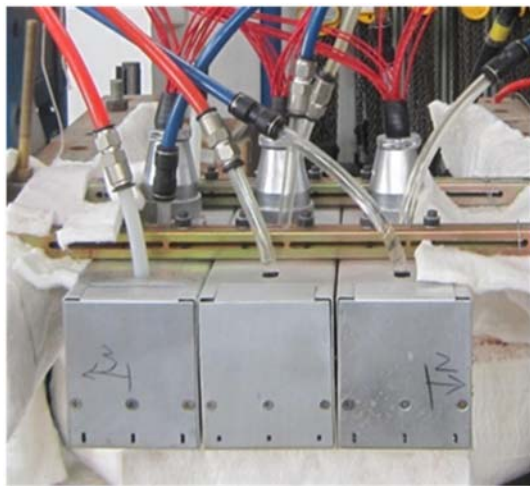


图 2 模块化石英灯加热器

Fig. 2 Modular quartz lamp heater

1.2 试验装置

试验装置主要包括加热装置、支持装置、集分水器。

加热装置采用自研的模块化石英灯辐射加热器组装而成(如图 2 所示),模块化石英灯加热器引入了主动水冷和气冷机制,通过水流冷却加热器,气流冷却石英灯管和灯头,从而实现高温升率和高温度峰值的加热能力。模块化石英灯加热器能够实现试验件表面温度 1500°C 加热要求,而普通石英灯加热器最高温度只能达到 1200°C 。该加热装置额定功率可达 64.8kW ,辐射热流覆盖面积可达 $410\text{mm} \times 306\text{mm}$,考虑到边界效应的影响,试验可测试的试件最大尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。

支持装置(如图 3 所示)采用可调钢结构支架,支架上方放置水冷板作为支撑平台,水冷板中心位置

开 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 方孔,为了防止水冷板对试验件冷却,在水冷板上放置隔热板,隔热板采用中心开 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 方孔的耐高温气凝胶材料,试验件放置在隔热板上,试验件热面朝下。加热器位于水冷板正下方。试验件冷面使用耐高温陶瓷纤维隔热毡覆盖,形成试验件侧面及冷面绝热环境。为保证不锈钢管与 CMC 平板的凹槽接触良好,在试验件上方放置一个压块将其压紧。



图 3 试验件支持装置

Fig. 3 Supporting device for specimen

设计了集分水器(如图 4 所示),根据再生冷却结构流道直径以及流道个数,通过计算确定集分水器进水口管径以及各出水口管径。集分水器由铝合金焊接而成,对其内部进行了防腐处理,每个出水口安装速度控制阀控制出水流量,保证了试验件内冷却介质流动的均匀性。

2 试验件及试验载荷

试验件采用 C/SiC 复合材料平板与不锈钢金属管组合结构,如图 5 所示,在 C/SiC 复合材料平板与金属管之间没有采用机械连接或者胶接方式,而是将不锈钢管放置在带有凹槽的 C/SiC 复合材料平板上形成再生冷却结构。试验温度载荷曲线如图 6 所示。

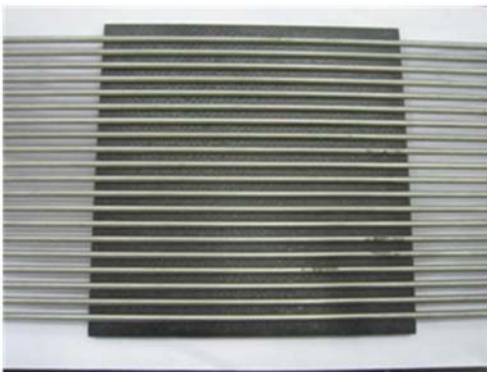


图 5 再生冷却结构

Fig. 5 Regenerated cooling structure

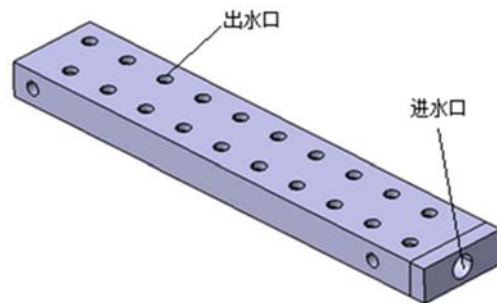


图 4 集分水器三维示意图

Fig. 4 Three-dimensional schetch of set watre segregator

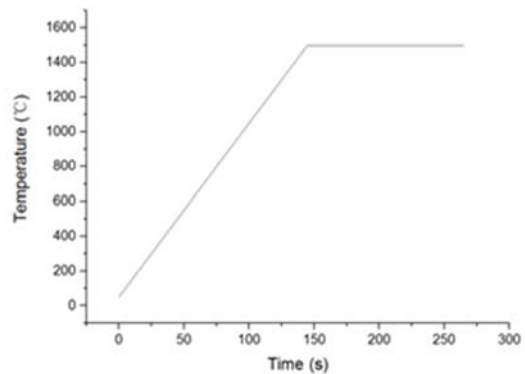


图 6 试验温度载荷曲线

Fig. 6 Temperature load curve for test

3 试验控制与测量

根据试验给定的温度曲线,计算温度变化率,生成数据文件,包括时间、变化率和目标温度,作为控

制程序的输入。试验中通过热电偶测量试验件温度,由 PID 算法不断地将设定值与真实温度值进行对比计算误差项,得到输出给可控硅的控制电压。在试验中,加热器功率线上的大电流和辐射都会给测量信号带来干扰,现场需要进行相应的屏蔽措施外,还必须在程序中滤波。石英灯管在冷态转换到热态情况时,有一定的滞后效应,在刚开始工作时对加热的影响较大,所以为了提高灯管的响应速度和试验的可控性,在开始加热时,要进行预热。试验件流道中的水流量通过比例阀控制。

试验测量入口水温、出口水温、试验件热面温度、冷面温度以及流体总质量流量。入口水温和出口水温测点分别位于冷却水入口和冷却水出口。试验件热面温度高达 1500°C ,必须采用铂铑-铂热电偶测量,试验件冷面温度采用镍铬-镍硅热电偶进行测量,冷却液入口温度和出口温度分别采用 T 型热电偶进行测量。冷却液出口温度测点位于冷却液汇集点,为了防止散热,在出口流道管壁包裹柔性隔热材料。冷却液流量采用流量计测量。图 7 和图 8 分别给出了热面和冷面测点示意图。

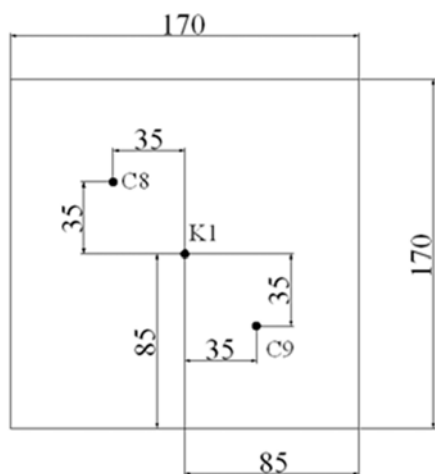


图 7 热面温度测点示意图(单位:mm)
Fig. 7 Temperature measuring point
of hot surface(unit: mm)

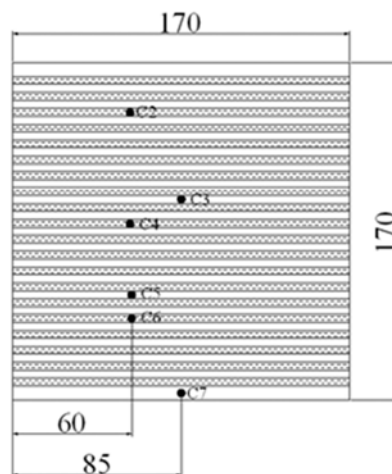


图 8 冷面温度测点示意图(单位:mm)
Fig. 8 Temperature measuring point
of cold surface(unit: mm)

4 试验结果

试验过程中通过冷却通道的水流量稳定、均匀,整个试验系统运行正常。图 9 和图 10 分别给出了 1500°C 瞬态热试验温度测点时间历程曲线。从图中可以看出,由于 C2 和 C6 点位于冷面金属流道上,试验过程中水的不断流动导致其温度值较低,C2 的最高温度为 79.5°C ,C6 的最高温度为 111.8°C ,而由于 C3、C5 和 C7 位于 C/SiC 复合材料平板背面,因此到了保温段,这三个点的温度值较高,C3 的最高温度为 931.2°C ,C5 的最高温度为 834.3°C ,C7 的最高温度为 714.3°C 。从图中可以看出,C7 的温度最低,C5 次之,C3 温度最高,这是因为再生冷却结构本身是非均匀材料,而且每个不锈钢管与 C/SiC 复合材料板的接触热阻不一致,导致试验件冷面的温度都不相同。试验结果表明 C/SiC 复合材料平板再生冷却结构具有很好的防热性能。

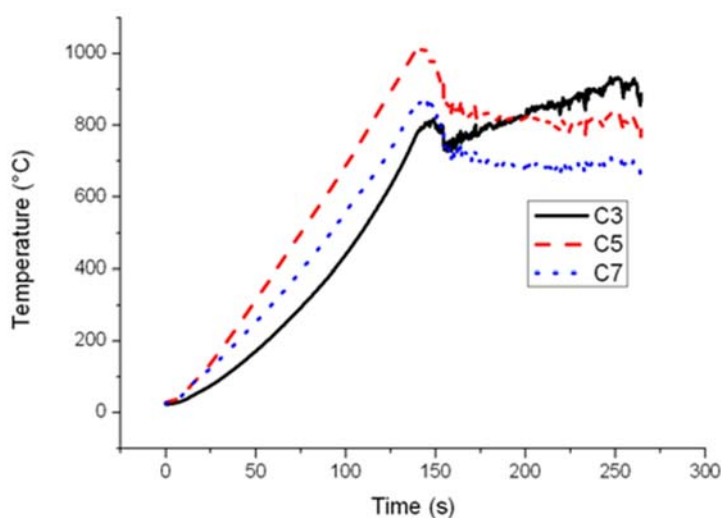


图9 1500℃瞬态热试验温度测点时间历程曲线一

Fig. 9 Time history curve for temperature measuring point of transient heating test

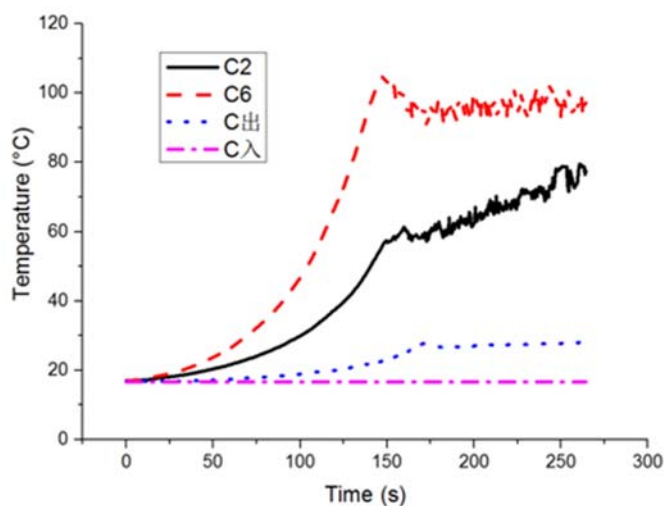


图10 1500℃瞬态热试验温度测点时间历程曲线二

Fig. 10 Time history curve for temperature measuring point of transient heating test

5 结论

本文针对高超声速飞行器超燃冲压发动机热防护发展的需求,建立了再生冷却结构超高温模拟试验系统,该系统利用模块化石英灯辐射加热器对试验件上表面进行加热,能够模拟再生冷却结构在内部冷却液流动过程中单面承受高温高热流载荷条件下的传热过程。研制的可控流量集分水器,能够实现再生冷却结构内部各流道冷却液流量的精确控制。利用典型再生冷却结构试件对该试验系统进行了考核验证,实现了再生冷却结构热面温度 1500℃瞬态热模拟,试验结果可以作为再生冷却平板结构防热性能评定的依据。该试验系统的建立将为再生冷却结构设计和性能考核提供有效的支持。

参考文献:

- [1] 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, 2010:1—55 (LIU Zhiqi. Investigation of technique on regenerative cooled scramjet[D]. National University of Defense Technology, 2010:1—55 (in Chinese))
- [2] 汪新智, 马军军, 彭稳根, 等. 高超声速飞行器主动冷却系统优化设计[J]. 航空学报, 2014, 35(3):624—633

- (WANG Xinzhi, MA Junjun, PENG Wengen, et al. Optimal design for active cooling system of hypersonic vehicle [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3):624—633 (in Chinese))
- [3] Clement B, Brett H, Agnes L B, et al. Ceramic matrix composites cooled panel development for advanced propulsion systems[C]. Reston, AIAA, 2004:1—8.
- [4] Edward Paquette. Cooled CMC structures for scramjet engine flowpath components[C]. Reston, AIAA, 2005:1—8.
- [5] Melis M, Wang W P. Multiphysics simulation of active hypersonic cowl lip cooling[C]. Reston, AIAA, 1999:1—12.
- [6] Buursink J, Sudmeijer K J. Experimental studies of an enhanced radiation cooling system[C]. Reston, AIAA, 2004:1—13.
- [7] 仲峰泉. 应用于燃料主动冷却性能研究的传热装置及若干测量技术[C]. 北京, CSTAM, 1994:123—126 (ZHONG Fengquan. Heat transfer equipment for fuel active cooling performance and several measurement technique[C]. Beijing, CSTAM, 1994:123—126 (in Chinese))
- [8] 彭丽娜, 何国强, 刘佩进, 等. 耐高温复合材料的主动冷却实验和数值计算研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1668—1672 (PENG Lina, HE Guoqiang, LIU Peijin, et al. Experiments and numerical simulation of active cooling ceramic matrix composite[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(5):1668—1672(in Chinese))
- [9] 王永鹏, 范学军, 仲峰泉, 等. 三维冷却结构中航空煤油对流传热特性实验研究[C]. 北京, CSTAM, 2010:1—7 (WANG Yongpeng, FAN Xuejun, ZHONG Fengquan, et al. Experimental study of characteristics of three dimensional active cooling structure[C]. Beijing, CSTAM, 2010:1—7 (in Chinese))

Thermal-insulation Performance Test Technology for Regenerated Cooling Structure

ZHANG Jie, WANG Qi, ZHANG Jia-bin

(AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Regenerative cooling structure is the main form of thermal protection of scramjet engine, which has an important application prospect. According to thermal protection technology requirement of Scramjet engine, a simulation experimental system of super high temperature heating for regenerative cooling structure was established, which has solved the simulation problem in regenerative cooling structure that is internal coolant flow is subjected to high temperature and heat flux on single outside surface. A device which is collecting and separating water was developed in this paper, which realizes accurate control the flux of each flow path in regenerative cooling structure. Based on this experimental system, regenerative cooling 1500℃ plate structure transient thermal experiment was completed successfully. Experimental results show that this experimental system can provide stable and reliable operation; the data obtained from plate structure can be used as evaluation evidence for regenerative cooling.

Keywords: regenerative cooling; thermal protection performance; radiation heating; temperature; flux; scramjet engine