

# 高温环境下烧蚀热防护结构隔热性能测试方法

张婕, 吴敬涛\*, 刘宁夫, 陈宏, 李昕昕, 高哲

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 建立高精度的烧蚀热防护结构隔热性能测试方法。**方法** 分析烧蚀热防护结构地面热试验特点, 设计烧蚀热防护结构隔热性能试验方案, 提出考虑地面热损失的高精度热载荷模拟方法。采用自研模块化石英灯加热器作为加热装置, 设计可重复使用夹具封装试验件和热流计, 建立烧蚀热防护结构隔热性能测试装置。**结果** 成功完成了典型烧蚀热防护结构隔热性能考核试验, 获得了结构在瞬态和稳态热流条件下的背温数据, 试验装置运行稳定可靠, 可有效消除热边界效应, 保证热流长时测控。试验结果验证了试验边界条件模拟的可重复性、热场均匀性以及良好的控制精度。**结论** 有效解决了烧蚀热防护结构受热后产生明火、浓烟而导致的高温环境模拟难题, 为烧蚀热防护结构材料筛选及结构定尺寸设计提供了高精度测试方法。

**关键词:** 高超声速飞行器; 烧蚀热防护; 隔热性能; 辐射加热; 温度; 热流

中图分类号: V216.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)10-0062-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.008

## Test Method of Thermal Insulation Performance for Ablative Thermal Protection Structure under High Temperature Environment

ZHANG Jie, WU Jingtao\*, LIU Ningfu, CHEN Hong, LI Xinxin, GAO Zhe

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a high-precision test method for evaluating the thermal insulation performance of the ablative thermal protection structure. The characteristics of ground thermal test for ablative thermal protection were analyzed. The test program for the thermal insulation performance of the ablative thermal protection was designed and the high-precision thermal load simulation method considering heat loss in the ground test was proposed. The test device of ablative thermal protection structure was established in which quartz lamp radiation heater was used to simulate thermal environment and a reusable packaging fixture was used to install test piece and heat flux gage. Thermal protection performance tests for typical ablative structures were successfully completed. The backside temperature was obtained at steady state and transient state. The test device ran stably and reliably which could effectively eliminate thermal boundary effect and ensure heat flux measuring and controlling for long time. The simulation repeatability and thermal field uniformity and control precision were verified by the test re-

收稿日期: 2024-04-10; 修订日期: 2024-08-27

Received: 2024-04-10; Revised: 2024-08-27

基金项目: 国家自然科学基金 (12090034)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12090034)

引文格式: 张婕, 吴敬涛, 刘宁夫, 等. 高温环境下烧蚀热防护结构隔热性能测试方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 62-69.

ZHANG Jie, WU Jingtao, LIU Ningfu, et al. Test Method of Thermal Insulation Performance for Ablative Thermal Protection Structure under High Temperature Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 62-69.

\*通信作者 (Corresponding author)

sults. The simulation problem caused by fire and smoke when heating ablative thermal protection structures is solved, which provides high-precision test method for material screening and structural sizing of ablative thermal protection structures.

**KEY WORDS:** hypersonic vehicle; ablative thermal protection; thermal insulation performance; radiation heating; temperature; flux

高超声速飞行器在飞行过程中承受了极高的热载荷, 热防护系统是其安全飞行的关键结构<sup>[1-3]</sup>。烧蚀热防护系统对流场变化适应能力强、隔热效率高、制备工艺简单, 是当前应用成功的隔热系统之一<sup>[4-5]</sup>, 广泛应用于再入弹头、飞船返回舱以及高超声速飞行器大面积防热区域<sup>[6]</sup>。

隔热性能是评价和衡量热防护系统的重要指标, 是热防护系统设计的关键参数<sup>[7]</sup>。不同材料组合或相同材料组合而不同厚度结构的隔热性能差异很大<sup>[8]</sup>。由于高超声速飞行器对热防护系统的质量和厚度有严格的限定<sup>[9]</sup>, 因此需要在热防护系统设计初期, 对其隔热性能进行综合评价<sup>[10-15]</sup>。

烧蚀材料作为特殊的固体材料, 在热流作用下, 表面烧蚀后退, 材料出现热解, 热解气体在炭化层内流动, 通过材料表面质量消耗而带走大量热能, 从而达到阻止热流传入飞行器内部环境的目的<sup>[16-18]</sup>。烧蚀热防护结构热问题非常复杂, 涉及热化学反应、流动与传热、流场与烧蚀耦合、烧蚀与传热耦合等<sup>[19-23]</sup>, 很难建立准确有效的计算模型模拟烧蚀热响应, 这就导致采用分析手段评价其隔热性能存在风险。

目前, 采用地面热试验评价烧蚀热防护结构隔热性能是最有效可靠的方法<sup>[24-30]</sup>。钱蕴等<sup>[27]</sup>采用电弧风洞试验考核了新型耐烧蚀涂层在短时间高热流条件下的隔热性能。秦岩等<sup>[28]</sup>采用马弗炉测试了低密度酚醛复合材料的静态隔热性能。靳亮等<sup>[29]</sup>将等离子热流烧蚀法与高温炉烧蚀法结合, 对烧蚀防护材料性能进行了考核。王振亚等<sup>[30]</sup>提出了基于石英灯辐射加热的烧蚀热结构热试验技术, 形成了一套全尺寸结构试验方法。高贺等<sup>[31]</sup>采用高焓加热器研究了轻质防热材料在高焓条件下的隔热性能。胡兆财<sup>[32]</sup>采用利用氧乙炔烧蚀和电弧风洞烧蚀研究了不同烧蚀环境下连续梯度结构烧蚀及防隔热性能。从当前的研究现状来看, 烧蚀热防护结构隔热性能试验主要有 2 种方式, 即电弧风洞加热和辐射加热。电弧加热试验运行成本较高, 不易控制, 稳态长时加热困难, 相对而言, 辐射加热试验运行成本低, 易实施, 控制精度高, 能够实现稳态长时热考核, 且更易实现试验边界条件的重复性, 在材料筛选及结构定尺寸设计阶段更实用。

本文考虑烧蚀热防护结构受热后出现浓烟、明火等对辐射加热的影响, 提出了烧蚀热防护结构隔热性能试验方案, 设计试验装置, 基于辐射加热特性, 提出了计入热损失的热载荷模拟方法。选取典型热防护结构, 开展了隔热性能试验, 实现了烧蚀热防护结构

热载荷高精度模拟, 解决了烧蚀热防护结构高温环境模拟难题, 为高超声速飞行器烧蚀热防护系统隔热性能评定提供了准确可靠的试验方法。

## 1 试验

### 1.1 特点

与非烧蚀类热防护结构相比, 烧蚀热防护结构地面热试验具有以下几个特点: 烧蚀热试验过程中出现明火和浓烟, 大大降低了辐射加热效率; 烧蚀热防护结构受热后, 表面形成热解层和炭化层, 其受热面无法安装热电偶, 因此不能通过控制其热面温度开展试验; 准确模拟壁面温度边界条件; 烧蚀热防护结构受热后材料发生不可逆化学变化, 结构热试验不具备可重复性。

### 1.2 方案

为了避免烧蚀热防护结构因烧蚀产生的明火和烟雾对辐射热产生的影响, 应该沿水平方向加热。将辐射加热器和平板烧蚀热防护结构竖直置于如图 1 所示的半封闭腔体内, 结构正面(热面)水平朝向辐射加热器辐射面, 结构背面(冷面)朝向空腔, 受热气流上升, 迅速将结构表面产生的烟尘颗粒带走, 结构热面吸收的热量沿着厚度方向向背面(冷面)传递, 并与腔内空气发生对流换热, 用结构背面温升表征其隔热性能。在相同受热状态下, 背面温升越小, 其隔热性能越好。

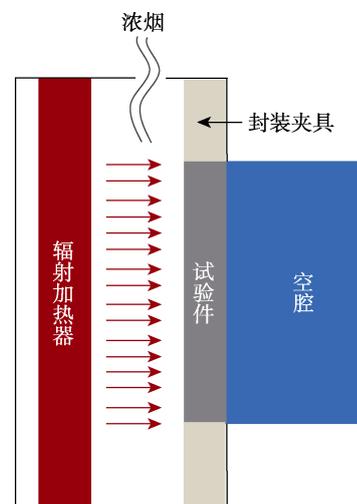


图 1 烧蚀热防护结构隔热性能测试  
Fig.1 Thermal insulation performance test for ablative thermal protection structure

### 1.3 热载荷模拟方法

热载荷模拟方式主要有温度边界模拟和热流边界模拟。对于烧蚀热防护结构，由于其热面无法粘贴热电偶，因此只能采取热流控方式，通过模拟其表面热流边界条件开展隔热性能考核。

辐射热流到达结构表面，一部分被结构吸收，一部分被结构表面辐射，还有一部分在结构表面与外界空气发生了对流换热。即：

$$q_{lamp} = q_{ab} + q_r + q_c \tag{1}$$

式中： $q_{lamp}$  为辐射加热器辐射到结构表面的热流； $q_{ab}$  为从结构表面传入结构内部的净吸收热流； $q_r$  为结构表面对外辐射热流； $q_c$  为结构表面对流换热热流。

结构热试验中采用的热流计为戈登式热流计，它能够实现长时稳态/瞬态热流测量，其测得的热流值为到达结构表面的热流，即  $q_{lamp}$ 。通常结构外壁边界给定热流值为热壁热流，即从结构表面传入结构内部净吸收热流  $q_{ab}$ 。因此，在热载荷控制方程中，需要增加结构辐射热流  $q_r$  和对流热流  $q_c$ ，即：

$$q_{con} = q_{ab} + q_r + q_c \tag{2}$$

式中： $q_{con}$  为热载荷控制值， $q_r$  与  $q_c$  之和称为热损失，通过标定试验获得。通过气动热结构耦合分析获得内部净吸收热流  $q_{ab}$ ，它是试验控制方程中的已知值。

热损失标定试验通常采用稳态法。选取与正式试验件外形、尺寸相同的，表面发射率相同的金属模拟件，保持与正式试验完全相同的安装状态。按照  $1\text{ }^\circ\text{C/s}$  升温率，将模拟件热面升温至固定温度后保温。当热面温度值稳定后，测试得到的热流值即为该温度对应的热损失值。

## 2 试验装置

考核烧蚀热防护结构的隔热性能，综合考虑边界效应、试验实施可行性、经济成本等因素，通常设计平面尺寸为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  的平板结构作为研究对象。试验装置示意图如图 2 所示，试验装置主要包括支持平台、加热装置、封装夹具、空腔、排烟装置等。辐射加热器辐射面中心、空腔开口面中心、封装夹具中心同心。支持平台为自主研发装置，可将加热装置、封装夹具、空腔等集成安装到该平台，能实现水平方向加热。平台顶部设计了抽气排烟装置，可快速将烧蚀烟尘颗粒排出，并能自动调节试验件与加热器之间的相对位置。

加热装置采用 4 个自主研发的模块化石英灯辐射加热器组装而成，该装置热惯性小，可控性好，具备高温升率和高温度峰值加热能力。加热区域有效面积为  $407\text{ mm}\times 376\text{ mm}$ ，远大于试验件平面尺寸。为

了确保辐射热流满足热载荷施加条件，采用有限元软件模拟了石英灯辐射热流分布，图 3 给出了到达结构表面热流分布图。从图 3 中可以看出，到达结构表面的热流密度最高可达  $703\text{ kW/m}^2$ ，热流密度大于  $600\text{ kW/m}^2$  的区域面积可达  $350\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ ，完全覆盖试件，且满足加热均匀性要求。

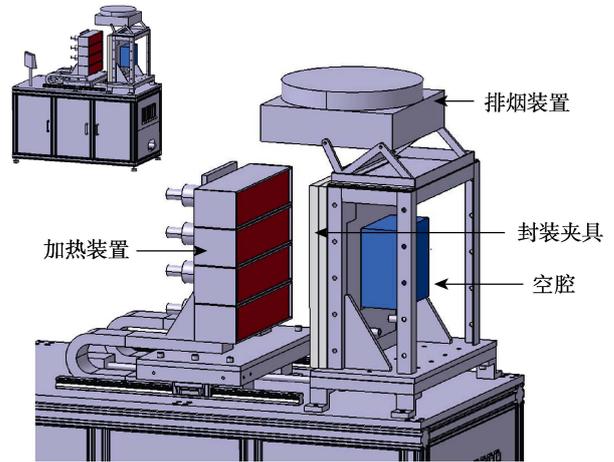


图 2 试验装置  
Fig.2 Test device

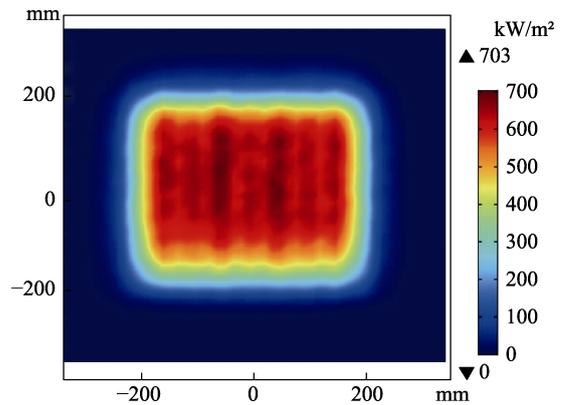


图 3 到达试验件表面热流分布  
Fig.3 Distribution of heat flux on test piece surface

封装夹具由 2 块定制的耐高温气凝胶复合材料平板组成，如图 4 所示。其材料具有非常好的耐高温能力，热传导系数远低于烧蚀热防护材料，不会向试验件侧面传热，长时间在高温环境中，不易发生收缩、变形，确保材料筛选试验的可重复性试验条件。封装夹具四周开孔，以便固定在支持平台上。夹具中心开孔，试验件封装在孔中，并采用耐高温纤维隔热材料填充缝隙，实现加热过程中热流沿试验件厚度方向一维传递。夹具下方开槽，封装戈登式热流计，防止热流计水冷管受热，并保证热流计受热面与试验件热面在同一平面。戈登式热流计测量面均匀涂黑，同时，试验件热面也被处理为黑色，以最大程度提高其热吸收能力，确保到达热流计表面的热流与到达试验件表面的热流一致。

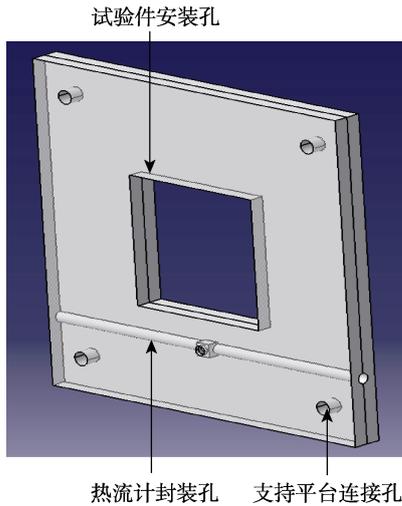


图 4 封装夹具  
Fig.4 Packaging fixture

空腔为一面 (200 mm×200 mm) 开口, 其余面封闭, 深度为 100 mm 的金属空腔。试验件背面与开口面相对, 模拟试验件背面对流环境条件, 空腔机械固定在支持平台上。排烟装置包含风扇及烟道。温度测量传感器安装在试验件背面, 与测量系统连接实时测量试验件背面温度。当背面为金属材质时, 通过焊接方式固定热电偶; 当背面为非金属材质, 采用高温陶瓷胶固定热电偶。热电偶安装示意图如图 5 所示。

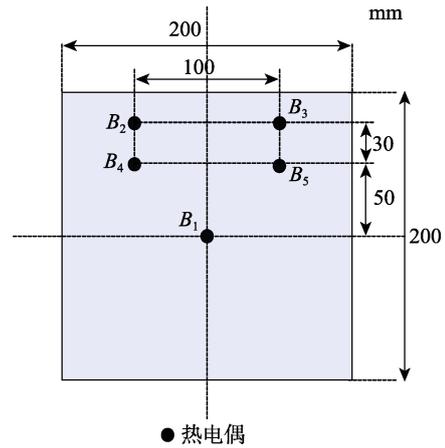


图 5 试验件背面热电偶布置图  
Fig.5 Backside thermocouples for test piece

### 3 试验研究

选取典型烧蚀热防护结构开展隔热性能考核试验。试件包括 2 类结构, 即烧蚀涂层+铝合金基板组合结构 (TPS-1, 厚度为 12.5 mm) 和高硅氧材料+氧化铝气凝胶+不锈钢复合结构 (TPS-2, 厚度为 30 mm)。其中, TPS-1 包含 3 个厚度和材料组分完全相同的试件 (编号分别为 TPS-1-1、TPS-1-2、TPS-1-3), 照片如图 6 所示。

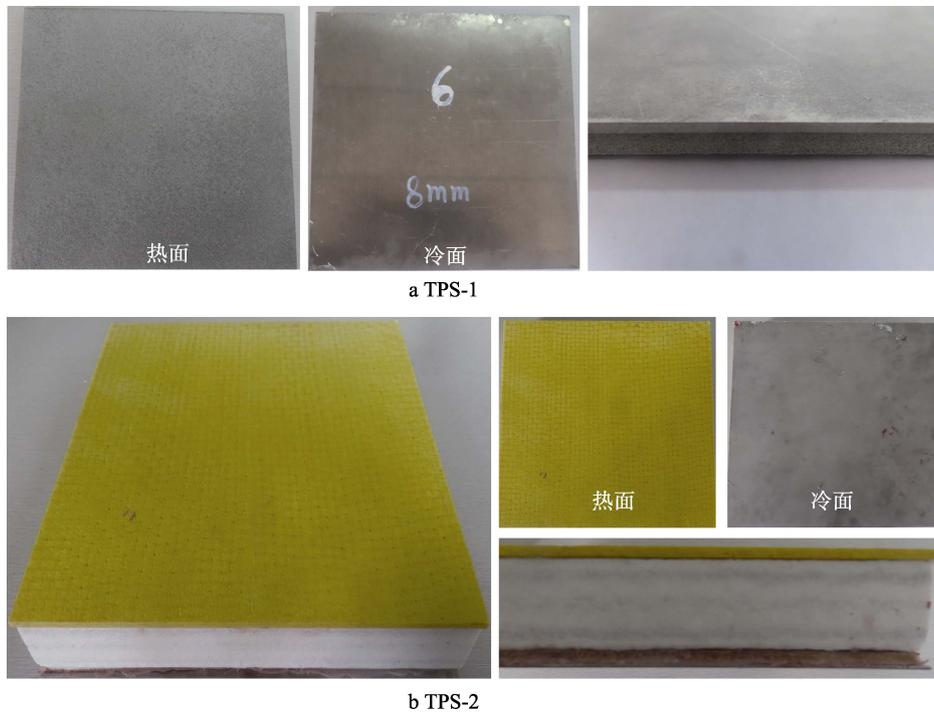


图 6 试验件照片  
Fig.6 Photos of test piece

正式试验前, 首先获得了热损失数据。针对 2 类试验件, 分别给定热壁热流值, 则控制热流载荷为热壁热流与热损失之和。对于 TPS-1, 施加随时间变化

的热流载荷, 试验加热时长为 200 s, 最大热流密度为 480 kW/m<sup>2</sup>。对于 TPS-2, 施加恒定热流载荷, 试验时长为 3660 s, 最大热流密度为 300 kW/m<sup>2</sup>。试验

中试验系统运行正常。试验运行 10 s 左右,出现明火,浓烟逐渐增多。到 160 s 左右,明火消失,烟逐渐减少。试验完成后,封装夹具与试件贴合良好,封装夹具未出现收缩变形。试验过程照片如图 7 所示。



图 7 试验过程照片  
Fig.7 Photos of test process

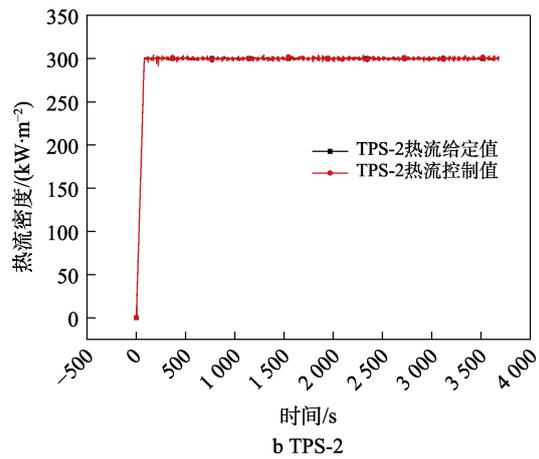
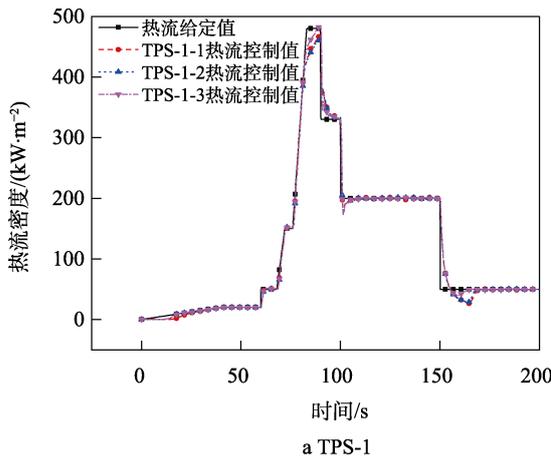


图 8 试件热流控制曲线  
Fig.8 Heat flux control curve of test piece

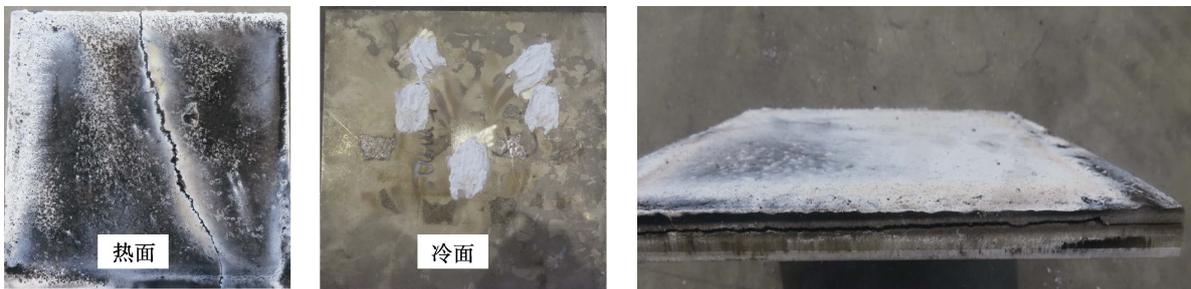


图 9 烧蚀后 TPS-1-1 表面形貌  
Fig.9 Photos of TPS-1-1 after radiation heating test

试件的背温-时间曲线如图 10 所示。以图 10 a 测点 B4 为例,随着加热时间增加,试件背温迅速上升。在 200 s 停止加热后,背温继续上升。在 329.2 s,背温达到最大值 201.5 °C,之后背温开始下降,试验后结构出现剥蚀现象。

利用式 (3) 计算了 TPS-2 背温的均匀性<sup>[33]</sup>:

试验热流给定值与控制值随时间的变化曲线如图 8 所示。从图 8a 可以看出,除热流转折点外,热流控制值与给定值吻合良好,在热流转折点处未完全重合,升温段转折点的差值主要是由于试件烧蚀产生明火和浓烟后对加热产生的干扰导致的,下降段转折点的差值可能与瞬态热试验导致的热流量计测量热滞效应有关。在 100~150 s,热流恒定为 200 kW/m<sup>2</sup>,3 个试件热流控制偏差分别为 1.38%、1.49%、1.43%。3 个试件的热流控制值基本一致,这反映了边界条件可重复性模拟能力良好、热流控制精度高。图 8b 中,热流控制值与给定值整体吻合良好,试验件在恒热流状态下受热 1 h,其热流平均控制偏差仅为 0.65%,进一步验证了试验装置和热流测量的稳定性以及热流控制的高精度。

烧蚀后 TPS-1-1 的表面形貌如图 9 所示。烧蚀后结构表面涂层发生显著炭化和热解,金属基板与炭化层剥离,试件表面开裂,背面金属颜色发生变化。

$$e = 1 - \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (3)$$

式中:  $e$  表示试验件表面温度的均匀度;  $T_{\max}$  为试验件表面温度测量最大值;  $T_{\min}$  为试验件表面温度测量最小值。

TPS-2 背温均匀度分布如图 11 所示。可以看出,

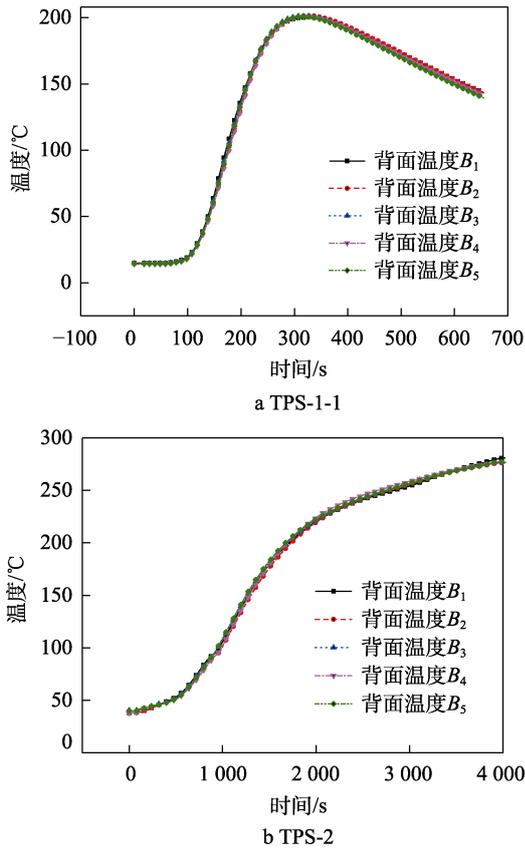


图 10 背温-时间曲线

Fig.10 Backside temperature vs. time curves

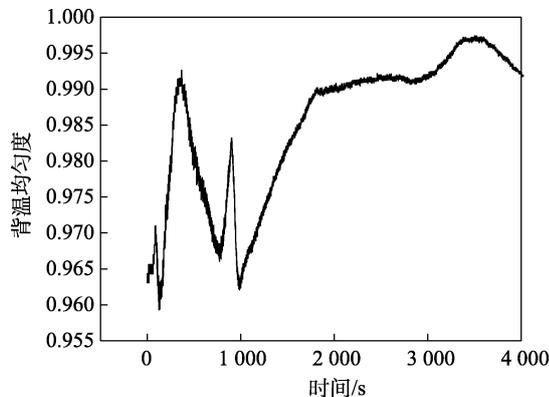


图 11 TPS-2 背温均匀度-时间曲线

Fig.11 Backside temperature uniformity vs. time curves of TPS-2

TPS-2 背温最低均匀度为 0.96, 可见背温均匀性良好, 这反映了试验装置能够提供均匀性良好的高品质热场。

## 4 结论

针对烧蚀热防护结构, 建立了隔热性能考核试验装置, 分别对 2 类烧蚀热防护结构开展了隔热性能试验研究, 得出以下结论:

1) 试验装置能够真实模拟烧蚀热防护结构的服役环境, 考核烧蚀热防护结构在稳态和瞬态加热条件

的隔热性能, 稳定性好, 控制精度高, 能够实现试验条件可重复性模拟和热流长时测控要求。

2) 考虑地面热损失的热载荷模拟方法的提出使得隔热性能考核的条件更加严苛, 进一步保证了试验精度。稳态热试验背温均匀度反映了热场的均匀性。

3) 本文提出的烧蚀热防护结构隔热性能试验方法, 为该类结构的研究应用提供了重要技术支撑, 后续将进一步研究结构厚度、基层材料等对烧蚀形貌、烧蚀率、背温的影响。

## 参考文献:

- [1] 范绪箕. 高速飞行器热结构分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
FAN X J. Thermal Structures Analysis and Applications of High speed Vehicles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [2] DAVID E G, MERSKI N R. Airframe Research and Technology for Hypersonic Air Breathing Vehicles[C]// AIAA/AAAF 11th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Orleans: AIAA, 2002.
- [3] 梁波, 易建政, 周志强, 等. 飞行器防热研究概况及其发展趋势[J]. 装备环境工程, 2008, 5(4): 41-44.  
LIANG B, YI J Z, ZHOU Z Q, et al. General Situation and Development Trend of Aircraft Thermal Protection Research[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(4): 41-44.
- [4] 周印佳, 张志贤, 付新卫, 等. 再入飞行器烧蚀热防护一体化计算方法[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 124520.  
ZHOU Y J, ZHANG Z X, FU X W, et al. Integrated Computing Method for Ablative Thermal Protection System of Reentry Vehicles[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 124520.
- [5] 陈亚西. ZrB<sub>2</sub> 对轻质碳/酚醛复合材料烧蚀、隔热及力学性能影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
CHEN Y X. The Influence of ZrB<sub>2</sub> on the Ablation, Insulation and Mechanical Properties of Lightweight Carbon/Phenolic composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [6] 张睿, 祝文祥, 张澳, 等. 烧蚀型热防护系统概率设计与可靠性评估方法研究[J/OL]. 计算力学学报, 2023: 1-8. [2023-08-29]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1373.O3.20230828.1819.018>.  
ZHANG R, ZHU W X, ZHANG A, et al. Probabilistic Design and Reliability Assessment Methods for Ablative Thermal Protection Systems[J/OL]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023: 1-8. [2023-08-29]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1373.O3.20230828.1819.018>.
- [7] 肖永栋. 提高硅基烧蚀材料隔热性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.  
XIAO Y D. Study on the Heat-Insulation Properties of Si-Ablative Material[D]. Wuhan: Wuhan University of

- Technology, 2002.
- [8] 吴大方, 王峰, 任浩源, 等. 航天器热防护材料不同边界条件下的隔热性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 315-322.  
WU D F, WANG F, REN H Y, et al. Experimental Research of Thermal Insulation Performance of Thermal Protection Materials for Spacecraft under Different Boundary Conditions[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 315-322.
- [9] 谢永旺, 夏雨, 许学伟, 等. 航天飞行器热防护系统研究概况及其发展趋势[J]. 空天技术, 2022(4): 73-86.  
XIE Y W, XIA Y, XU X W, et al. Research Status of Thermal Protection System for Spacecraft and Its Development Trend[J]. Aerospace Technology, 2022(4): 73-86.
- [10] 王宏越. 再入飞行器防隔热方案综合评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
WANG H Y. Comprehensive Evaluation on Thermal Protection System of Re-Entry Vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [11] 赵亚飞, 王旭东, 李炎军, 等. 气凝胶隔热层隔热性能计算与试验验证[J]. 风机技术, 2022, 64(4): 48-52.  
ZHAO Y F, WANG X D, LI Y J, et al. Performance Calculation and Test Verification of the Heat Insulation Layer Made in Aerogel[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(4): 48-52.
- [12] 郭建业, 王冬, 苏力军, 等. 气凝胶掺杂对玻璃纤维毡隔热性能的影响[J]. 无机盐工业, 2023, 55(11): 53-57.  
GUO J Y, WANG D, SU L J, et al. Effect of Aerogel Doping on Thermal Insulation Performance of Glass Fiber Felt[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(11): 53-57.
- [13] 王玲玲, 朱鑫, 刘天蛟. 膨胀型钢结构防火涂层隔热性能的研究进展[J]. 涂料工业, 2024, 54(3): 86-92.  
WANG L L, ZHU X, LIU T J. Research Progress on Thermal Insulation Properties of Intumescent Fire Retardant Coating for Steel Structure[J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54(3): 86-92.
- [14] 陈思安, 李海玉, 迟蓬涛, 等. 耐 1200℃陶瓷瓦重复使用性能[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(4): 69-75.  
CHEN S A, LI H Y, CHI P T, et al. High-Temperature Reusability of Ceramics Tile Resistant to 1 200 °C[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(4): 69-75.
- [15] 邓婉, 朱尚龙, 周文勇, 等. 复合材料气瓶热防护材料隔热性能试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(6): 54-58.  
DENG W, ZHU S L, ZHOU W Y, et al. Experimental Study on the Heat Insulation Performance of Thermal Protection Materials Used for the Composite Materials Gas Cylinder[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(6): 54-58.
- [16] 黄海明, 杜善义, 吴林志, 等. C/C 复合材料烧蚀性能分析[J]. 复合材料学报, 2001, 18(3): 76-80.  
HUANG H M, DU S Y, WU L Z, et al. Analysis of the Ablation of C/C Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(3): 76-80.
- [17] 程功, 肖军. 高超音速飞行器热防护材料技术分析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(S2): 43-45.  
CHENG G, XIAO J. Analysis of Thermal Protection Materials for Hypersonic Aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S2): 43-45.
- [18] 邹杰. 富氧环境下 C/SiC 复合材料的非稳态烧蚀研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.  
ZOU J. Transient Ablation Investigation of C/SiC Composite Material in Oxygen-Rich Environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [19] 王建. 超燃冲压发动机 C/SiC 复合材料烧蚀研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.  
WANG J. Ablation Investigation of C/SiC Composite Material in Scramjet[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [20] 王俊. 高超声速飞行器气动热烧蚀预测与控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
WANG J. Research on Aerodynamic Thermal Ablation Prediction and Control for Hypersonic Vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [21] 徐晓亮. 热防护机理与烧蚀钝体绕流的涡方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
XU X L. Study on Thermal Protection Mechanism and Vortex Method for Flow Past Ablation Blunt[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [22] 时圣波, 张云天, 胡励, 等. 硅橡胶基防热涂层烧蚀机理及热解/传导耦合模型[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2049-2061.  
SHI S B, ZHANG Y T, HU L, et al. Ablation Mechanism and Coupling Pyrolysis/Conduction Model of a Silicone Rubber Matrix Thermal Protection Coating[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2049-2061.
- [23] 刘骁. 烧蚀热防护系统三维热响应有限元计算方法研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2016.  
LIU X. Study on Three-Dimensional Finite Element Thermal Response Calculation Method Applied to Ablative Thermal Protection System[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center Graduate School, 2016.
- [24] 王亚军, 刘树仁, 吴义田, 等. 运载火箭柔性防热材料隔热性能的试验研究[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(1): 56-60.  
WANG Y J, LIU S R, WU Y T, et al. Experimental Study of Thermal Insulation of Flexible Heat-Proof Materials Used in the Aft Cabin of Second-Stage Rocket[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(1): 56-60.
- [25] DEL PAPA S V, MILHOAN J D, REMARK B J, et al. Thermal Testing of Ablators in the NASA Johnson Space Center Radiant Heat Test Facility[C]// 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Virginia: AIAA, 2016.
- [26] ZIEMKE R A. Infrared Heater Used in Qualification

- Testing of International Space Station Radiators[R]. Washington: NASA, 2004.
- [27] 钱蕴, 张利军, 李兴刚, 等. 新型耐烧蚀涂层防隔热性能[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(3): 69-72.  
QIAN Y, ZHANG L J, LI X G, et al. Thermal Protection Properties of an Innovative Ablation-Resistant Coating[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(3): 69-72.
- [28] 秦岩, 饶志龙, 刘慧娟, 等. 可瓷化酚醛复合材料烧蚀隔热性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(S1):52-55.  
QIN Y, RAO Z L, LIU H J, et al. The Studying of Ablation and Heat Insulation Properties of Ceramifiable Phenolic Composite[J]. Composites Science and Engineering, 2012(S1): 52-55.
- [29] 靳亮, 王德, 王耀辉, 等. 热防护材料烧蚀性能测试方法研究[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2): 245-250.  
JIN L, WANG D, WANG Y H, et al. Research on Test Method for Ablation Properties of Ablative Materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(2): 245-250.
- [30] 王振亚, 魏广平. 烧蚀防热结构热模拟试验技术研究[J]. 工程与试验, 2017, 57(1): 58-61.  
WANG Z Y, WEI G P. Research on Thermal Simulation Test Technology for Ablative Thermal Protection Structure[J]. Engineering & Test, 2017, 57(1): 58-61.
- [31] 高贺, 陈连忠, 欧东斌, 等. 轻质防热材料高焓烧蚀试验[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(2): 49-53.  
GAO H, CHEN L Z, OU D B, et al. Ablation Test of Light Weight Charring Ablators in High Enthalpy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(2): 49-53.
- [32] 胡兆财. 陶瓷-聚合物连续梯度热防护结构及高温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
HU Z C. Ceramic-Polymer Continuous Gradient Thermal Protection Structure and High Temperature Performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [33] 党扬帆. 石英灯管辐射加热特性研究[J]. 科学技术创新, 2022(3):156-159.  
DANG Y F. Study of Quartz Lamp Radiation Heating Performance[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(3): 156-159.