

# 高温热管与高导热石墨烧蚀传热性能

欧东斌 陈连忠 陈海群 俞继军 陈思员

(中国航空空气动力技术研究院,北京 100074)

**文 摘** 利用石英灯辐射加热器和电弧风洞耦合加热模拟高超声速飞行器驻点高温区的加热环境,对一种内部为高温热管和一种内部为高导热石墨的简单球柱形套装样件进行了加热试验。利用非接触红外测温装置对样件表面的温度进行了测量,通过与内部为 C/C 材料制成的对比样件的试验结果分析,发现高温热管和高导热石墨均能够有效地将样件驻点高温区热量传导到柱身低温区,其中高温热管样件驻点温度降低 9.5%,柱身温度升高 14.6%;高导热石墨驻点温度降低 14.4%,柱身温度升高 11.4%,显示两种材料均具有良好的热疏导效果。

**关键词** 高温热管,高导热石墨,疏导式热防护,电弧风洞

中图分类号:V45

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.02.011

## Ablation and Heat Transfer Properties of High Temperature Heat-Pipe and High Thermal Conductivity Graphite

OU Dongbin CHEN Lianzhong CHEN Haiqun YU Jijun CHEN Siyuan

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

**Abstract** With the quartz lamps and arc-heated wind tunnel, the high temperature supersonic flowfield was built. A principle thermal protection specimen with a high temperature heat-pipe and high thermal conductivity graphite was heated in this flowfield, the surface temperature distribution was measured by infrared temperature instruments. Compared with contrastive carbon/carbon composite material specimen, the stagnation point temperature of high temperature heat-pipe was decreased 9.5% as well as the cylinder surface temperature is increased 14.6%, the stagnation point temperature of high thermal conductivity graphite is decreased 14.4% as well as the cylinder surface temperature is increased 11.4%, both of the two specimens can transfer the heat load effectively from the high heatflux field to the lower one.

**Key words** High temperature heat-pipe, High thermal conductivity graphite, Leading thermal protection, Arc-Heated wind tunnel

### 0 引言

疏导式热防护是一种新概念的热防护机制,与传统的烧蚀热防护机制不同,它是采用防热层材料的传热、隔热和辐射散热的物理机制将高热流区热量快速传递到低热流区,以降低高热流区的表面温度,从而实现非烧蚀,其原理见图 1。高温热管和高导热固体介质(高导热石墨)对飞行器前缘高热流区的冷却是未来先进热防护的两个主要途径。早在 1970 年,NASA 兰利研究中心就进行了针对高超声速飞行器翼前缘

和驻点区域的热管冷却可行性试验<sup>[1]</sup>;1972 年麦道航空公司评估过四种航天飞机翼前缘防热设计,认为热管冷却设计是切实可行并可重复使用的方案<sup>[2-3]</sup>;文献[4]比较了 3:1、4:1 和 5:1 平纹编织尖前缘 C/C 复合材料电弧加热试验,随着导热率增加,5:1 编织结构比 3:1 结构能从前缘转移走更多的热量,保证前缘的结构完整性。国外研究表明,利用高温热管或高导热固体介质的高导热特性,将其应用于高超声速飞行器的高温区热防护系统,将起到良好的防热效果。

修回日期:2014-02-12

作者简介:欧东斌,1979 年出生,高级工程师。主要研究气动热和热防护设计及试验。E-mail:oudongbin@sina.com

本文针对高超声速器飞行热防护需求,分别制作了高温热管和高导热石墨套装样件,验证了疏导式热防护的基本原理,即利用高温热管和石墨的高导热特性,对高超声速飞行器表面热量进行调节,降低驻点高温区的温度,减轻该部位耐热材料的压力,将热量传到低温区,再通过辐射散热等方式将热量释放出去。探索高温热管和高导热石墨在高超声速飞行器热防护中应用的可行性及有效性。

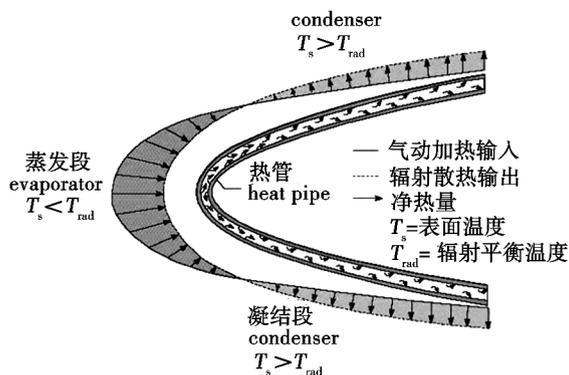


图1 疏导式热防护系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of leading TPS

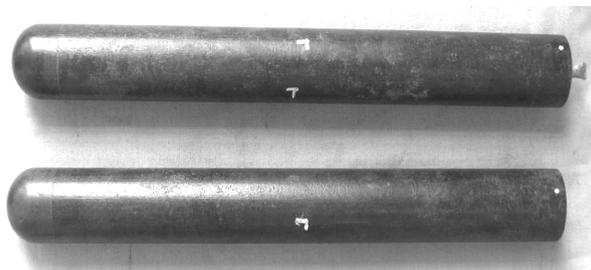
## 1 高温热管和高导热石墨试验样件

热管是20世纪60年代发展起来的具有特别高的导热性能的传热元件<sup>[5]</sup>,其导热能力是铜的数千倍,可以实现几乎没有温差的导热。高温热管是指工质工作温度 $>750\text{ K}$ 的热管。本文所用高温热管外壳为镍基合金,内部工质为碱金属钠,其他高温热管工质也可采用钾、锂及铯等,工质的工作温度范围为 $600\sim 1\,800\text{ K}$ 。由于碱金属在常温下为固态,适当条件下(如石英灯辐射加热)的正常启动是保证热管安全工作的前提。

高导热石墨是碳质元素结晶矿物,具有耐高温、良好的化学稳定性和抗抗震性等优异特性,其层向水平热导率高达 $600\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。同时石墨与C/C材料热胀系数相近,所制作的套装样件结构相容性较好。

套装试验样件分两类。一类为高温热管及对比样件[图2(a)],外壳为抗氧C/C材料,内芯分别嵌入 $\Phi 24.8\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 高温热管和同尺寸C/C,样件外部直径 $\Phi 34\text{ mm}$ ,总长约 $330\text{ mm}$ ;第二类为高导热石墨及对比样件[图2(b)],外壳为抗氧化C/C材料,内芯分别嵌入 $\Phi 26\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 高导热石墨和同尺寸C/C,样件外部直径 $\Phi 34\text{ mm}$ ,总长约 $180\text{ mm}$ 。样件制作过程采用了分段加工和安装,局部间隙采用浸脂炭化工艺进行填充,以减少界面接触热阻。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第2期



(a) 高温热管及其对比样件



(b) 高导热石墨及其对比样件

图2 试验样件照片

Fig.2 Photograph of the test specimens

## 2 试验方法及设备

电弧风洞试验在中国航天空气动力技术研究院FD04高超声速电弧风洞中进行,该风洞主要由电弧加热器、混合稳压室、拉瓦尔喷管、试验段、扩压段、冷却器及其后的真空系统组成。

高温热管的工质钠需要在较低加热条件下进行启动,本文建立了电弧风洞对流与石英灯辐射耦合加热的气动热环境模拟方法,即先利用石英灯辐射加热装置对高温热管样件进行预加热,依据先前已经进行的高温热管启动特性试验结果,以热管尾部端面测温数据大于 $250^\circ\text{C}$ 时刻为热管正常启动时间,约 $1\,200\text{ s}$ 之后将样件送入电弧风洞的高温高速流场进行烧蚀传热性能试验。表1为电弧加热试验状态。图3为试验设备及样件安装示意图。

表1 电弧加热试验状态

Tab.1 Test condition of arc heating experiment

状态	总焓/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	驻点热流/ $\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$	驻点压力/ $\text{kPa}$
I	10.0	2.9	8.2
II	11.0	4.0	14

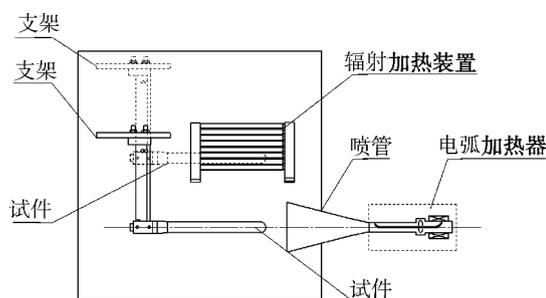


图3 试验设备及样件安装示意图

Fig.3 Sketch of the specimen and experimental facility

### 3 表面温度测量

试验中主要由样件表面温度变化考核样件的传热特性,表面温度测点分布见图4。

样件前端温度两个位置(驻点温度  $t_1$ 、球头与柱身相切区域表面温度  $t_2$ )的温度采用双色集成式红外测温仪测量,其测量范围为  $1\ 000 \sim 3\ 000\ ^\circ\text{C}$ ,响应时间为  $10\ \text{ms}$ ,精度为  $\pm 0.75\% \text{ F.S.}$ ,在使用时,双色探测器测定两个红外光谱的能量,由其比值确定目标温度。此测试方法不依赖绝对能量的测量,是一种高精度、高重复性的非接触温度测量方法。样件柱身表面温度  $t_3$ (距驻点距离  $X = 130\ \text{mm}$ )采用单色集成式红外测温仪测得,其测量范围为  $350 \sim 2\ 000\ ^\circ\text{C}$ ,响应时间为  $10\ \text{ms}$ ,精度为  $\pm 0.3\% \text{ F.S.}$ ,材料表面辐射系数设为  $0.9$ 。整个样件表面温度分布采用高性能红外热像仪测量,测量范围为  $-40 \sim 1\ 200\ ^\circ\text{C}$ ,通过对获得的红外图像分析,可得到样件表面温度分布及其随时间变化历程。

正式测量之前,对上述3种温度测量方式进行了现场校验,在试验条件下测量误差在  $5\%$  以内。

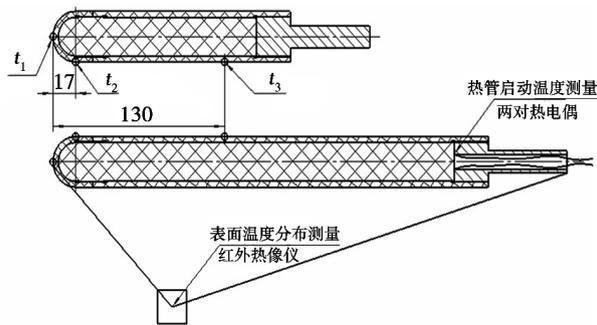


图4 样件表面温度测点位置分布

Fig. 4 Distribution of the surface temperature measurement

## 4 结果与分析

### 4.1 高温热管

状态 I 下高温热管及其 C/C 对比样件试验温度曲线见图5,取表面温度基本恒定时即电弧加热时间  $t = 300\ \text{s}$  时温度数据见表2。

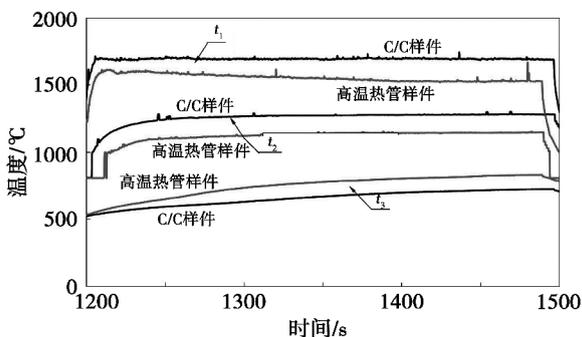


图5 高温热管与 C/C 样件温度变化曲线

Fig. 5 Temperature-time curve of high temperature heat-pipe and contrastive specimen

图6为两种样件在电弧加热时间  $t = 300\ \text{s}$  时由红外热像仪测得的沿子午线的温度分布曲线,图中离散点为上述红外测温仪测量值。可以看出高温热管样件距驻点距离  $X = 80\ \text{mm}$  后的柱面低温区温度明显高于普通 C/C 样件,且高温热管样件表面等温性较好。

表2 高温热管对比试验结果

Tab. 2 Results of heat-pipe and contrastive specimen

测点	样件温度/ $^\circ\text{C}$		降温/ $^\circ\text{C}$	降温率/ $\%$
	高温热管	C/C 样件		
$t_1$	1530	1690	160	9.5
$t_2$	1150	1284	134	10.4
$t_3$	832	726	-106	-14.6

从图表中可以看出,相比于 C/C 样件,高温热管样件驻点及样件前部降温区域较大,  $t_1$  由  $1\ 690\ ^\circ\text{C}$  降至  $1\ 530\ ^\circ\text{C}$ ,降温  $9.5\%$ ;  $t_2$  由  $1\ 284\ ^\circ\text{C}$  降至  $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ ,降温  $10.4\%$ ;  $t_3$  由  $726\ ^\circ\text{C}$  升至  $832\ ^\circ\text{C}$ ,升温  $14.6\%$ 。可见正是由于高温热管的高导热特性,样件驻点高热量由热管传递至柱身低温区域,减轻了高热量区域材料的耐温负担,提升了低温大面积区域的辐射散热能力。

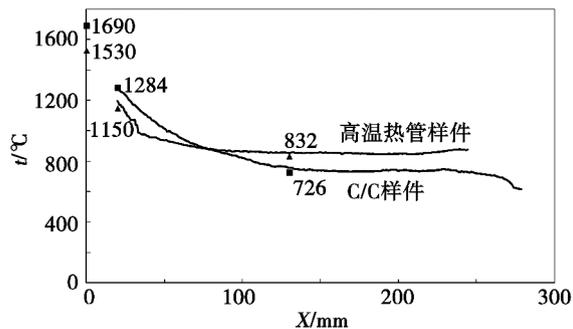


图6 高温热管与 C/C 样件表面温度分布曲线

Fig. 6 Temperature distribution curve of high temperature heat-pipe and contrastive model

### 4.2 高导热石墨

状态 II 下高导热石墨及其 C/C 对比样件试验温度变化曲线见图7,此状态下 C/C 样件表面温度较高 ( $> 1\ 700\ ^\circ\text{C}$ ),在  $175\ \text{s}$  时外壳抗氧化涂层破坏导致表面温度急剧上升至  $2\ 170\ ^\circ\text{C}$ ,试验提前停车,取表面温度基本恒定时即电弧加热时间为  $150\ \text{s}$  时温度数据见表3。从图表中可以看出,高导热石墨样件驻点及样件前部存在明显的降温区域,  $t_1$  由  $1\ 835\ ^\circ\text{C}$  降至  $1\ 570\ ^\circ\text{C}$ ,降温率  $14.4\%$ ;  $t_2$  由  $1\ 253\ ^\circ\text{C}$  降至  $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ ,降温率  $8.5\%$ ;  $t_3$  由  $542\ ^\circ\text{C}$  升至  $604\ ^\circ\text{C}$ ,升温率  $11.4\%$ 。从曲线中也可以看出,随着试验时间延长,  $t_3$  的增温幅度会进一步增加。

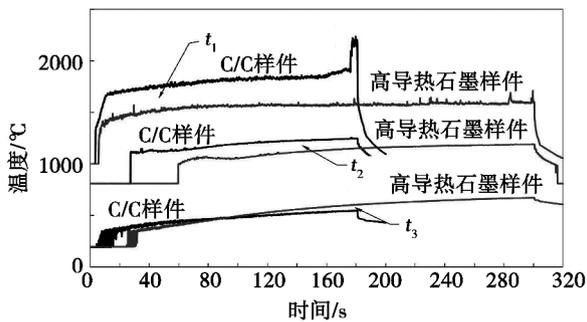


图7 高导热石墨与C/C样品温度变化曲线

Fig. 7 Temperature-time curve of high thermal conductivity graphite and contrastive specimen

图8为两种样品在电弧加热时间为150s时由红外热像仪测得的沿子午线的温度分布曲线,图中离散点为上述红外测温仪测量值。可以看出,高温热管样品距驻点距离 $X=40\sim 80\text{ mm}$ 后的柱面低温区温度明显高于C/C样品,此温度交替区域不如高温热管明显,高导热石墨样品表面等温性比高温热管要差。

表3 高导热石墨对比试验结果

Tab. 3 Results of high thermal conductivity graphite and contrastive specimen

测点	样品温度/°C		降温/°C	降温率/%
	高温热管	C/C样品		
$t_1$	1570	1835	265	14.4
$t_2$	1147	1253	106	8.5
$t_3$	604	542	-62	-11.4

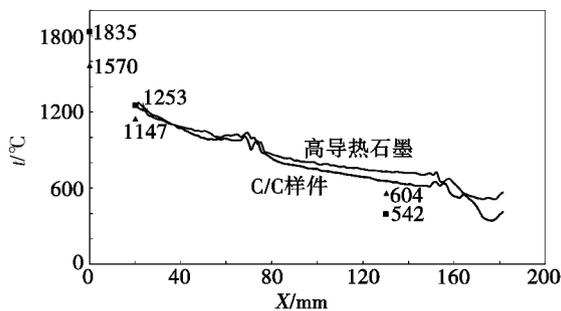


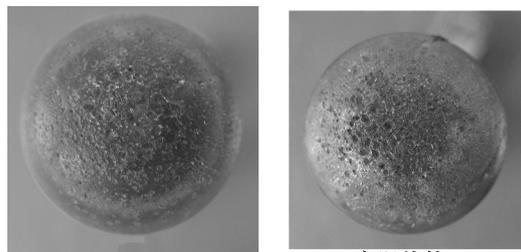
图8 高导热石墨与普通C/C样品表面温度分布曲线

Fig. 8 Temperature distribution curve of high thermal conductivity graphite and contrastive model

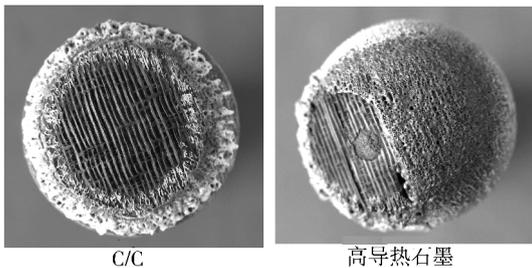
### 4.3 烧蚀形貌分析

图9给出样品烧蚀后照片比较,可以看出在低状态I下,高温热管及其对比样品烧蚀后表面涂层无明显损伤,整体均保持完好;而在高状态II下,高导热石墨样品外壳有一块局部被剥蚀掉,露出高导热石墨内芯,但剩余部分抗氧化层保持完好,而其对比样品的表面抗氧化层全部被烧光,可见四周熔融的涂层裙边和内部碳纤维层,这从另一侧面也反映出高导热石墨对头部区域具有明显的降温效果。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第2期



(a) 状态 I



(b) 状态 II

图9 样品烧蚀后照片

Fig. 9 Photograph of the model after ablation test

## 5 结论

通过电弧风洞对流与石英灯辐射耦合加热的气动热环境模拟方法,对高温热管、高导热石墨样品及其对比C/C样品进行了烧蚀传热性能试验,结果表明:高温热管和高导热石墨相比于C/C样品,其驻点区域温度均呈现下降和柱面低温区温度上升现象,其中高温热管样品驻点温度降低9.5%,柱身温度升高14.6%;高导热石墨驻点温度降低14.4%,柱身温度升高11.4%,表明高温热管及高导热石墨均能将飞行器头部高热流区热量疏导至表面低热流区,从而减轻了驻点高热流区材料与结构承受热载荷的负担,验证了疏导式防热在高超声速飞行器头部热防护中应用机理。

### 参考文献

- [1] Silverstein C C. A feasibility study of heat-pipe-cooled leading edges for hypersonic cruise aircraft[R]. NASA CR 1857, 1971
- [2] Niblock G A, Reeder J C. Four space shuttle wing leading edge concepts[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1974, 11(5): 314~320
- [3] Anon. Study of structural active cooling and heat sink systems for space shuttle[R]. NASA CR 123912, 1972
- [4] Glass D E. Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles[R]. AIAA, 2008-2682
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [6] 姜贵庆, 刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [7] 陈连忠, 欧东斌. 高温热管在热防护中应用初探[J]. 试验流体力学, 2010, 24(1): 51-54

(编辑 吴坚)