

# 低密度烧蚀材料高温气动剪切试验研究

张友华 陈连忠 曲德军 张敏莉 欧东斌

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

**文 摘** 利用超声速平板试验技术,对两种低密度烧蚀材料在高焓、低热流(气流剪切力  $70 \text{ N/m}^2$ ,冷壁热流密度  $200 \text{ kW/m}^2$ ,气流总焓  $12 \text{ MJ/kg}$ ,压力  $1 \text{ kPa}$ ,试验时间  $300 \text{ s}$ )条件下进行了高温气动剪切试验。试验中通过试验件的不同安装方式,综合考核了材料的性能及工艺。结果表明:两种低密度烧蚀材料试验过程中无明显剥蚀,表面碳层完整,材料的抗剪切性能较好,两种材料表面烧蚀较为均匀,材料间的粘接缝没有明显的开裂,也没有出现冲刷凹槽,材料的热匹配性能较好;材料与底板之间没有脱落现象,粘接工艺较好。

**关键词** 低密度烧蚀材料,长时间气动加热,热匹配性能,抗剪切性能,粘接工艺

## Aerodynamic Shear Tests on Low Density Ablation Materials Under High Temperature

Zhang Youhua Chen Lianzhong Qu Dejun Zhang Minli Ou Dongbin

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

**Abstract** Shear tests on low density ablation materials were carried out by using the flat panel models on supersonic arc jet stream. The surface shear stresses, the cold wall heat flux, the total enthalpy, the surface pressure and the test time were  $70 \text{ N/m}^2$ ,  $200 \text{ kW/m}^2$ ,  $12 \text{ MJ/kg}$ ,  $1 \text{ kPa}$  and  $300 \text{ s}$  respectively. The performances and technology of two kinds of low density ablation materials were checked by different installation of models in test. The materials have no erosion and the char remained intact. The surface recessions are almost the same and the filled gap between materials are well. The materials are not separated from the back plate. The results show that materials possess good performances of anti-shear, thermal matching and good sticking.

**Key words** Low density ablation material, Long duration aero-heating, Thermal matching performances, Anti-shear performances, Sticking technology

### 1 引言

对于低密度烧蚀材料(密度一般低于  $1.0 \text{ g/cm}^3$ )的使用条件则侧重于高焓、低热流、长时间气动加热,广泛应用于再入航天器的防热。由于其使用时气动加热时间较长,需经受长时间的气动热及气动力载荷,因此,评价其性能更需要兼顾防热隔热性能以及抗剪切性能、粘接工艺、热匹配性能等因素<sup>[1]</sup>,为了考核火星探测器拟采用的 SLA-561V 低密度防热材料的抗剪切性能、缝隙效应、修补工艺及粘接工艺,美国 NASA 的 AMES 研究中心 1994 年 3 月在 Jet Propulsion Laboratory (JPL) 试验室用电弧加热器结合  $2 \text{ inch} \times 9 \text{ inch}$  的湍流导管对 SLA-561V 材料进行了高温气动剪切试验,主要模拟火星探测器从行星轨道再入火星大气层过程中所经受的高温热环境,最大剪切力为  $390 \text{ N/m}^2$ ,冷壁热流密度在  $220 \sim 510 \text{ kW/m}^2$  之间<sup>[2]</sup>。

本文利用超声速平板试验技术,在电弧风洞中对两种新型低密度烧蚀材料组成的  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  平板模型进行了高温气动剪切试验,通过模型相对来流的不同安装方式,综合考核了两种材料在高焓、低热流、长时间使用环境下的抗剪切性能、热匹配性能及粘接工艺。

### 2 试验

#### 2.1 设备

本试验研究在中国航天空气动力技术研究院高温空气动力试验室的超声速电弧风洞进行,试验设备主要由电弧加热器、矩形超声速喷管、试验段及真空系统等组成。

试验采用管状电弧加热器,该加热器已成功应用于大尺度球锥涂层模型试验<sup>[3]</sup>及大尺度空气舵烧蚀热结构试验<sup>[4]</sup>,试验能力为:弧室压力  $p \leq 4.0 \text{ MPa}$ ,

收稿日期:2009-05-26;修回日期:2009-06-09

作者简介:张友华,1974年出生,高级工程师,主要从事航天飞行器气动热研究工作。E-mail: tujianqiang@gmail.com

气流总焓  $H_0 = 20 \text{ MJ/kg}$

电弧加热器加热后的高温气流经过引出段、过流段,最后进入矩形超声速喷管,在喷管的出口形成试验流场。矩形超声速喷管为水冷夹层结构,喷管的内型面设计采用特征线方法计算。喷管出口尺寸为  $140 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ,  $Ma = 3.9$ 。

超声速喷管的出口与试验段相连,试验段两个侧面分别备有三个观察窗口,根据模型位置可安装石英玻璃以便观察模型烧蚀过程及录像,试验段配有液压传动系统以便于试验前后模型的弹入和弹出。试验过程中高温气流流经模型后由整流罩收集并进入扩压段,在恢复压力的同时,也使超声速气流变为亚声速。之后气流进入冷却器降温,再进入稳压箱,最后进入真空罐组。

## 2.2 模型

试验模型为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$  的平板样件,包含 A、B 两种蜂窝网格结构低密度烧蚀材料及铝合金底板。烧蚀材料厚度为  $22 \text{ mm}$ ,铝合金底板厚度为  $2 \text{ mm}$ ,烧蚀材料之间以及烧蚀材料与铝合金底板之间用硅橡胶粘接。模型结构示意图见图 1。

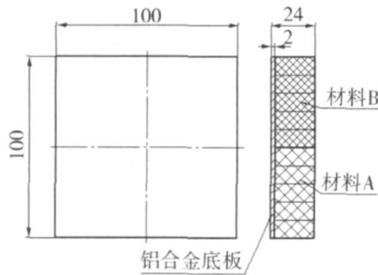


图 1 模型结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of model

## 2.3 流场参数测试

为了确保电弧风洞提供的流场参数符合要求,并有稳定、均匀的分布特性,在模型烧蚀试验前对气流总焓、冷壁热流密度、气流压力及气流剪切力等参数进行了测量。

气流总焓采用平衡声速流公式确定:

$$H_0 = K(p_0 A \cdot C_d / G)^{2.519} \quad (1)$$

式中,  $K$  为常数,  $p_0$  为加热器弧室压力,  $A$  为喷管喉道截面积,  $G$  为气体质量流量,  $C_d$  为流量系数。

设计加工了测试模型测量平板上的冷壁热流密度和气流压力,测试模型上共布置了五个冷壁热流密度测点和一个压力测点,测点分布见图 2(图中 1—5 为冷壁热流密度测点,  $v$  的方向为来流方向),流场测试时测试模型安装照片见图 3。冷壁热流密度采用瞬态热容量量热计测量。该种量热计主体由高导热率的无氧铜圆柱量热塞块和 NiCr - NiSi 热电偶组成, NiCr - NiSi 热电偶焊接在量热塞块的底部,在量热塞块的四周和底部均有绝热套保护。

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2009年 第6期

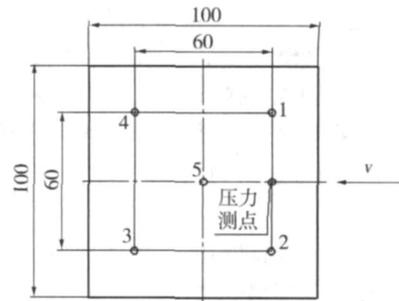


图 2 冷壁热流密度与压力测点分布

Fig 2 Measuring points of cold-wall heat flux and pressure measuring points

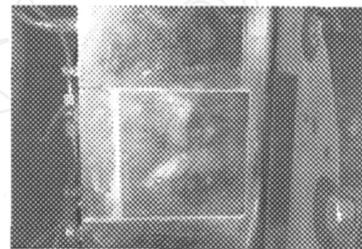


图 3 测试模型安装照片

Fig 3 Photo of measuring model installation

由于量热响应只与量热塞块的几何尺寸和物理特征有关,在保证量热块与相邻绝热套绝缘、隔热,的情况下,忽略热电偶传热和量热塞块背面对流换热,冷壁热流密度表达式可写作:

$$q_{cw} = C_{p,A_v} (m/A) \cdot (dT/dt) \quad (2)$$

式中,  $q_{cw}$  为冷壁热流密度,  $m$  为量热塞块质量,  $A$  为量热塞块受热面积,  $C_{p,A_v}$  为量热塞块平均比热容,  $dT/dt$  为量热塞块背面温升梯度。

压力测点测压孔的孔径为  $1.5 \text{ mm}$ ,在测压孔底部焊接内径为  $2.0 \text{ mm}$  的紫铜测压管,测压管出口连接园柱梁式应变压力传感器,用以测量平板上的气流压力。剪切力大小由以下关系式确定<sup>[5]</sup>:

$$= (Pr_r)^{\frac{2}{3}} q_{cw} u_e / (H_r - H_{cw}) \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为剪切力,  $Pr_r$  为按参考焓  $H_r$  计算的普朗特数,  $q_{cw}$  为冷壁热流密度,  $u_e$  为边界层外缘速度,  $H_r$  为恢复焓,  $H_{cw}$  为冷壁焓。

计算剪切力还需要的其他公式如下:

$$H^* = 0.22H_0 + 0.5H_{cw} + 0.28H_e \quad (4)$$

$$H_r = H_e + (Pr_r)^{\frac{1}{3}} u_e^2 / 2 \quad (5)$$

$$H_e = H_0 - u_e^2 / 2 \quad (6)$$

公式(4)~(6)中,  $H^*$  为参考焓,  $H_0$  为总焓,  $H_{cw}$  为冷壁焓,  $H_e$  为静焓,  $H_r$  为恢复焓,  $Pr_r$  为普朗特数。

试验流场参数:气流剪切力  $70 \text{ N/m}^2$ ;平均冷壁热流密度  $200 \text{ kW/m}^2$ ;气流总焓  $12 \text{ MJ/kg}$ ;气流压力  $1 \text{ kPa}$ 。

## 3 结果及讨论

在试验流场参数下,对两种低密度烧蚀材料组成

的平板模型进行了长时间高温气动剪切试验,试验时间 300 s。试验前模型安装在水冷模型支架上,模型与支架之间进行了密封隔热处理,同流场参数测试一样,模型送进采用弹入式,超声速流场稳定后,利用液压传动系统将模型送入,待试验结束时,将模型及时退出。

为了多角度考核材料的抗剪切性能、热匹配性能及粘接工艺,模型安装位置采用三种方式:(a)粘接缝垂直于来流,材料 A 靠前;(b)粘接缝垂直于来流,材料 B 靠前;(c)粘接缝平行于来流。模型安装示意图见图 4。

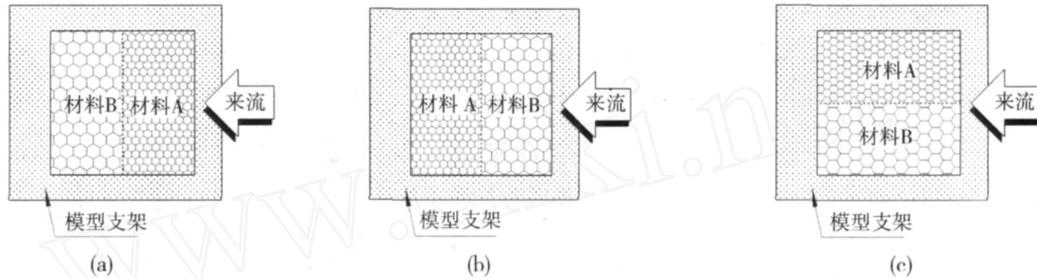


图 4 模型安装示意图

Fig 4 Schematic diagram of model installation

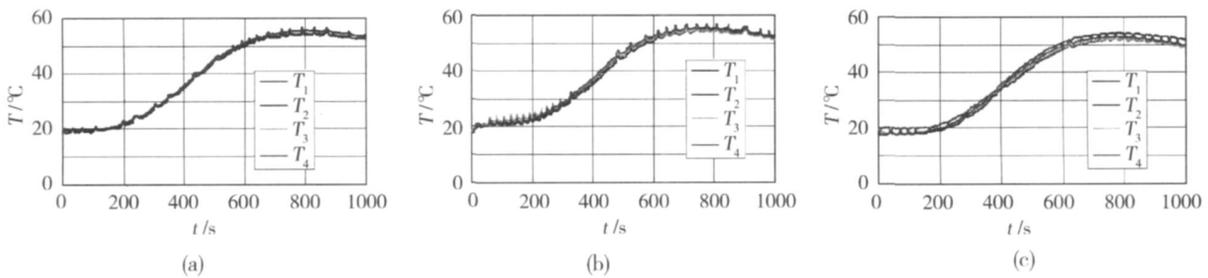


图 5 模型背面温度曲线

Fig 5 Temperature curves of model back surface

从试验录像可以清楚地看到:无论哪一种安装方式,低密度烧蚀材料 A 和 B 在热气流加热下表面烧蚀比较均匀,试验过程中两种材料表面均有细小的裂纹出现,两种材料的热匹配性能较好,材料间的粘接缝没有明显的裂开或冲刷凹槽,试验过程中没有出现明显的剥蚀现象。

从试验后模型烧蚀情况分析,无论哪一种安装方式,两种低密度烧蚀材料表面均略微膨胀,线烧蚀率为负值。试验后两种低密度烧蚀材料表面碳层完整,相邻蜂窝单元结构间有细小裂纹,两种材料间的粘接缝没有明显的裂开或冲刷凹槽,材料与底板之间没有脱落现象,粘接工艺较好。

#### 4 结论

(1)在超声速电弧风洞中利用超声速平板试验技术对两种新型低密度烧蚀材料进行了长时间高温气动剪切试验,录像记录了试验过程。

(2)两种低密度烧蚀材料试验后表面均略微膨胀,线烧蚀率为负值。

材料 B 靠前;(c)粘接缝平行于来流。模型安装示意图见图 4。

试验过程中利用四对 NiCr - NiSi 热电偶测量铝合金底板背面温度,其中两对热电偶布置于材料 A 的背部区域,另两对热电偶布置于材料 B 的背部区域,从测温结果来看,三种安装方式下模型的背面温度响应差别不大,试验开始时温度约 20,试验结束时(300 s)温度约 27,最高背面温度约 55。模型背面温度曲线见图 5。

(3)在相同试验条件、不同安装方式下,试验模型的背面温度响应相差不大,两种低密度烧蚀材料都具有较好的抗剪切性能,两种材料的热匹配性能较好,试验后材料表面碳层完整,材料之间的粘接缝没有明显的裂开,也没有出现冲刷凹槽,材料的整体粘接性能较好。

#### 参考文献

- 1 赵梦熊. 载人飞船空气动力学. 北京:国防工业出版社, 2000: 97 ~ 110
- 2 Tauber Michael, Tran Huy Ames research center shear tests of SLA - 561V heat shield material for mars-pathfinder NASA - TM - 110402, 1996
- 3 张友华,刘德英,杨汝森等. 涂层材料长时间气动加热实验研究. 宇航材料工艺, 2007; 37(4): 70 ~ 71
- 4 张友华,董永晖,陈连忠等. 大尺度空气舵超声速烧蚀热结构试验. 宇航材料工艺, 2008; 38(5): 78 ~ 79
- 5 张志成. 高超声速气动热和热防护. 北京:国防工业出版社, 2003: 278 ~ 281

(编辑 李洪泉)