

# 复合材料炭化速率实验研究

刘德英 涂建强 陈海群 陈连忠

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

**文 摘** 为了解炭化材料内部的炭化过程,用四种配方的复合材料,采用石英灯组辐射加热的方法,在材料不同厚度位置敷设测温热电偶,根据测量的材料不同厚度位置的背面温度以及已确定的炭化速率求解公式算出材料的炭化速率,给出四种不同材料的炭化速率沿厚度方向的变化曲线,初步反映材料内部的炭化过程。

**关键词** 长时间加热,炭化速率,辐射加热

## Carbonization Rate of Composite Material

Liu Deying Tu Jianqiang Chen Haiqun Chen Lianzhong

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

**Abstract** Four kinds of composite materials with different prescriptions and the method of radiation heating with quartz lamps were adopted in order to find out the carbonization course within the composite material. The thermocouples located in different thicknesses of the materials were used to measure the back-surface temperatures. The carbonization rates were calculated according to the back-surface temperatures and the carbonization rate expressions. So the curves between carbonization rate and thickness can be found out. It elementarily reflects the carbonization course within the composite material.

**Key words** Long-time heating, Carbonization rate, Radiation heating

### 1 引言

烧蚀材料通常可以分为三类<sup>[1]</sup>:即升华材料(碳基复合材料)、熔化和挥发材料(硅基复合材料)以及炭化材料。典型的炭化型烧蚀材料是按具体性能要求由树脂黏合剂和耐火的增强物合成的复合材料。就损失的单位材料的吸热量而言,此类材料要高出非炭化型材料许多倍<sup>[1]</sup>,这对于防热设计人员就最小结构质量来优化热防护系统有重要意义。所以国内外气动防热专家对再入飞行器热防护系统的防热材料基本都采用具有酚醛树脂的炭化型烧蚀防热材料(目前正在研制非烧蚀或者微烧蚀热防护材料),尤其是导弹热防护系统使用的这些防热材料。根据不同的使用环境,材料采用了不同的配方与工艺,因此它的炭化温度也不相同。根据材料的特性,可以确定材料可能的炭化温度。

炭化材料在烧蚀机理上(图1)主要是考虑三层:烧蚀层、炭化层和热解层<sup>[2]</sup>,其烧蚀性能的评估主要依据材料的质量烧蚀率和线烧蚀率,一般很少考虑材料的炭化速率,即对材料的炭化过程进行评估,这主要是由于对材料炭化的判断依据难把握。

少量考虑炭化速率的文献<sup>[3]</sup>主要是采用与材料的线烧蚀率类似的方法处理,即:炭化速率=(原始厚度-除去碳层的残余厚度)/烧蚀时间。如此得到的炭化速率是整个烧蚀时间内材料的平均炭化速率,不能反映出材料内部的炭化过程。

本文根据材料研制部门的需求,在石英灯组辐射加热设备上,以材料的炭化温度作为材料炭化的依据,对四种均含酚醛树脂的复合材料的炭化速率进行实验研究。在材料不同厚度位置敷设测温热电偶,根据测量的背面温度计算出材料的炭化速率,给出了相应的试验结果。

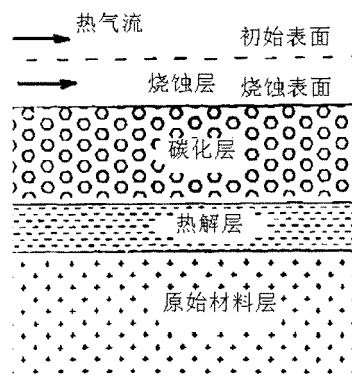


图1 炭化材料烧蚀机理示意图

Fig.1 Ablation mechanism sketch map of carbonized composition

### 2 试验模型及设备参数

试验模型的尺度为 100 mm × 100 mm × 12 mm。为了增加模型表面的辐射吸收系数,在材料受热表面涂有石墨粉。材料背面的热电偶安装位置分别为距受热表面 2、4、6 和 9 mm 四个不同深度。采用  $\pi$  形热电偶安装方式<sup>[4~5]</sup>,增大了热电偶与受热面的接触

收稿日期:2008-12-16;修回日期:2009-03-31

作者简介:刘德英,1951年出生,研究员,主要从事气动热实验技术研究。E-mail:liu\_deying@263.net

面积。

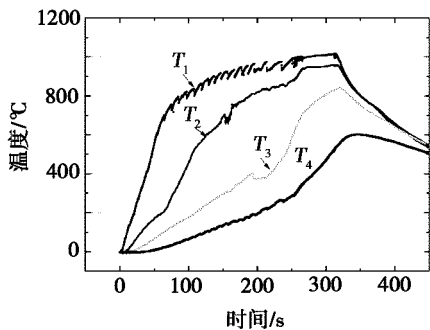
实验采用石英灯组辐射设备。石英灯组尺度为400 mm × 400 mm, 功率为0 ~ 150 kW。中间两排石英灯的前、后由两块夹层水冷反射壁面将热量汇聚, 使中心形成面积至少150 mm × 150 mm的热流均匀区。试验时, 输入给石英灯组的试验电流为250 A, 电压为201 V, 测量的辐射热流密度为130 kW/m<sup>2</sup>。

根据材料的烧蚀和热物理性能, 将四种材料PGE、HSi、PQ和HSi-36的试验模型的炭化时间初步确定为: 350、450、300、250 s。炭化温度初步确定为400 ~ 500℃。试验时, 石英灯辐射加热材料的表面温度为1 100℃左右。当距受热表面最远的热电偶测量温度达到500℃时停车。此时, 模型的加热时间分别为310、427、300和270 s。

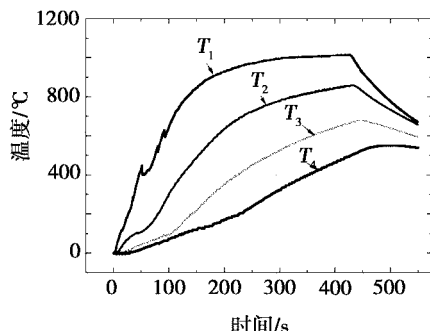
### 3 结果及讨论

#### 3.1 温度变化曲线

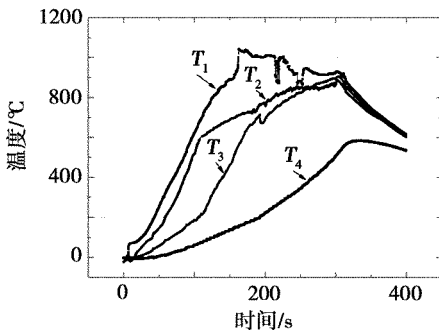
四种材料的不同厚度位置的温度变化曲线见图2。其中, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>分别对应距材料受热表面2、4、6和9 mm的四个位置的温度测量值。从图2可以看出, 当试验停止时, 距受热表面最近的热电偶的测量温度分别达到1 008、1 012、1 038和1 100℃。



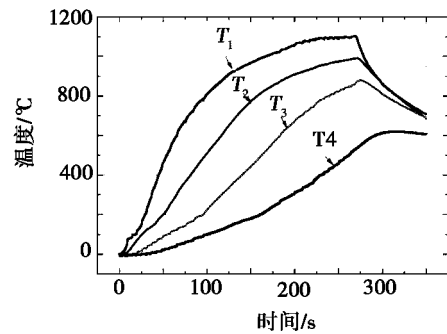
(a) PGE



(b) HSi



(c) PQ



(d) HSi-36

图2 四种材料的内部温度变化曲线

Fig. 2 Temperature curves of materials

#### 3.2 炭化速率

将材料炭化速率定义为:

$$v = \Delta L / t \quad (1)$$

式中,  $v$  为材料的炭化速率,  $\Delta L$  是炭化厚度,  $t$  是达到规定的炭化温度所需的炭化时间。

根据四种材料的热物理性能确定的炭化温度大约在400 ~ 500℃, 选用400、450、480和500℃作为材料的炭化温度。利用图2的温度曲线判读达到上述温度所需的加热时间, 然后根据公式(1)计算材料的炭化速率, 以此作为判定四种材料炭化与否的依据。

四种材料在四种判定温度依据下的炭化速率值见表1, 炭化速率随厚度的变化规律见图3。

表1 四种材料的炭化速率

Tab. 1 Carbonization rate of materials

材料	离受热面距离 /mm	炭化速率/ $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			
		400℃	450℃	480℃	500℃
PGE	1.96	50.73	45.09	43.12	41.81
	3.96	42.63	39.83	38.29	37.67
	5.96	27.35	26.03	25.25	24.80
	8.96	31.79	30.33	29.61	29.23
HSi	1.91	41.20	27.60	26.08	25.38
	3.91	31.46	28.05	26.45	25.52
	5.91	26.41	23.61	21.96	20.84
	8.91	25.40	22.84	21.63	20.75
PQ	1.96	27.63	25.01	23.67	22.96
	3.96	45.90	42.68	41.53	40.74
	5.96	42.86	40.36	38.95	38.42
	8.96	33.42	31.43	30.58	29.98
HSi-36	2.02	45.05	41.25	38.80	37.32
	4.02	49.38	44.83	42.39	40.88
	6.02	43.17	39.80	38.14	37.21
	9.02	39.30	36.69	35.24	34.48

可以看出: (1) 四种不同配方的材料在同样加热状态下的炭化速率相差很大, 说明材料的配方对其炭化速率影响非常明显; (2) 在不同厚度位置炭化速率不同, 说明材料内部的炭化过程不是匀速的过程; (3) 选用不同的温度作为炭化温度, 得到的炭化速率

的变化趋势是相同的,炭化速率随着选取的炭化温度的增大而变小。

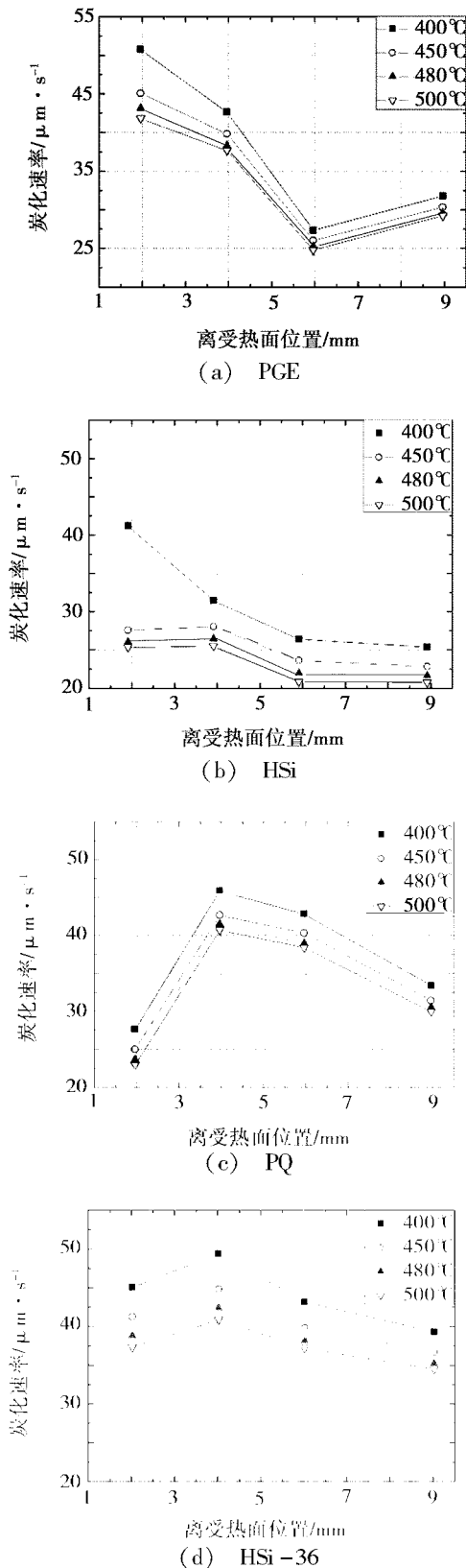


图3 四种材料的炭化速率随厚度位置的变化曲线  
Fig.3 Curves between carbonization rate and thickness

### 3.3 材料的表面状态

从试验后模型受热表面状态(图4)可以看出:四种材料模型试验后的表面状态各不相同。PGE 烧蚀

后表面碳层较结实,PQ 表面碳层结实但是发黄,材料内部的炭化速率与材料的热导率关系很大,所以这两种材料沿厚度方向的炭化速率受材料的热导率影响而波动较大。

HSi 烧蚀后表面的酚醛树脂基本已完全挥发,表面只剩下石英玻璃布,内部结构蓬松,导致离受热面较近的位置的温度在 400 ~ 600°C(图2)存在一定的波动,所以炭化速率由于选取的炭化温度不同而差异较大。HSi-36 表面碳层结实但是显银白色。HSi 的蓬松结构起到了一定的隔热效果,所以导致 HSi 的炭化速率相对于 HSi-36 的小很多,分别大约为 20 ~ 30 和 35 ~ 50  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

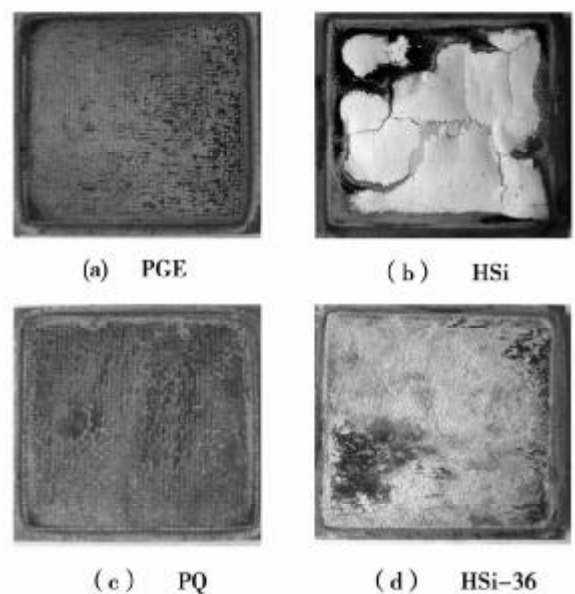


图4 四种材料辐射试验后受热表面的照片

Fig.4 Photos of materials after radiation experiment

### 4 结论

通过石英灯组的辐射加热试验,以炭化温度为材料炭化的判据和表征量,根据测量的不同厚度位置的温度曲线,得出了四种材料炭化速率沿厚度方向的曲线,初步反映了材料内部的炭化过程。

#### 参考文献

- 1 陈春娟. 高温环境中炭化型烧蚀材料的详细响应. 火箭推进, 2003;29(6): 51 ~ 58
- 2 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护. 北京:国防工业出版社,2003: 78 ~ 92
- 3 张劲松,凌玲,何永祝. 抗冲蚀 EPDM 绝热层研究. 见:中国宇航学会固体火箭推进第 22 届年会. 2005: 317 ~ 321
- 4 游伯坤等编. 温度测量与仪表——热电偶和热电阻. 北京:科学技术文献出版社,1990
- 5 硅恩 T J 著,凌善康译,赵琪等译. 温度测量. 北京:中国计量出版社,1986

(编辑 任涛)