

# 一种耐高温低热流环境隔热材料

李兴刚 张利军 胡润芝 钱 蕴 王兴斌

(西安航天化学动力厂,西安 710025)

**文 摘** 采用模压工艺将耐高温阻燃硅橡胶和隔热填料 RMX 压制成胶结片材,其密度为  $0.56 \text{ g/cm}^3$ ,比热容为  $1.371 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ ,热导率为  $80 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ ,拉伸强度为  $1.87 \text{ MPa}$ ,断裂伸长率为  $25\%$ 。在高焓低热流风洞考核环境下,厚度为  $1 \text{ mm}$  隔热材料试件界面平均温度为  $70.7^\circ\text{C}$ ,试片表现完整、无龟裂。

**关键词** 复合材料壳体,高焓低热流,外隔热材料

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.016

## Insulation in High Enthalpy and Low Heat Flow

LI Xinggang ZHANG Lijun HU Runzhi QIAN Yun WANG Xingbin

(Xi'an Aerospace Chemical Propulsion Factory, Xi'an 710025)

**Abstract** High temperature resistant and rent burning silicone rubber and fillers were pressed into the adhesive sheet using the molding process. The material density is  $0.56 \text{ g/cm}^3$ , specific heat is  $1.371 \text{ J/(g}\cdot\text{k)}$ , thermal conductivity is  $80 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ , tensile strength is  $1.87 \text{ MPa}$ , and the elongation at break is  $25\%$ . At the wind tunnel environment of high enthalpy and low heat flow of certain type solid rocket motor, interface temperature is  $70.7^\circ\text{C}$  for  $1 \text{ mm}$  thick insulation material. And the apparent of specimens is complete with no cracking.

**Key words** Composite case, High enthalpy and low heat flow, Thermal insulation material

### 0 引言

对于固体火箭发动机来说,为了保证发动机在工作过程中壳体不因气动热而失强,甚至导致结构破坏,必须在发动机壳体外涂覆防热材料,防止气动热流向壳体传递<sup>[1]</sup>。

某型号发动机壳体是 T700 碳纤维/BA202 环氧树脂复合材料,其耐温性较差,壳体承受高焓低热流环境。本文针对该型号壳体外防护的技术需求,对外隔热材料开展了力学、热物理及防热性能研究,并研究了该材料与壳体的变形协调性。

### 1 实验

#### 1.1 原料

室温硫化硅橡胶,工业品,四川晨光化工研究院;隔热填料 RMX,工业品,西安恒泰有限公司;填料 A,工业品,中钢集团洛阳耐火材料研究院;填料 B,工业品,天山寒化工有限公司;填料 C,工业级,山东青州化工股份有限公司;填料 D,试剂级,盖州化学工业公司。

#### 1.2 试样制备

##### 1.2.1 耐高温阻燃硅橡胶制备

耐高温阻燃硅橡胶是由室温硫化硅橡胶和填料按如下配方组成:室温硫化硅橡胶,100份;填料 A、B、C、D 和固化剂分别为 4、8、15、5 和 8 份。

##### 1.2.2 风洞试样制备

风洞试样为外隔热材料与 T700 碳纤维/BA202 环氧粘接件,共 5 件,尺寸为:  $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ ,外隔热材料厚度为  $1 \text{ mm}$ ,复合材料板材厚  $9 \text{ mm}$ ,采用平板技术,利用楔形装置在其表面安装平板试件,楔板表面的二维流动用于模拟轨道器大面积流动和控制面区流动。

#### 1.3 外隔热材料制备

##### 1.3.1 填料选择

填料选用 15、24 和 30 目 3 种规格,与硅橡胶混合比例为 1:1,进行筛选,性能见表 1。可见, RMX-1 密度较小,但其断裂伸长率和拉伸强度都较差; RMX-2、RMX-3 密度、断裂伸长率和拉伸强度均能满足

复合材料壳体外防护要求;但 RMX-3 密度稍大;所以选 RMX-2。

表 1 3 种规格隔热材料基本性能

Tab.1 Basic properties of three kind of insulation materials

试样	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	断裂伸长率/%	拉伸强度/MPa
RMX-1	0.49	13	1.55
RMX-2	0.56	25	1.87
RMX-3	0.68	35	2.15
设计要求	$\leq 0.80$	$\geq 20$	$\geq 1.5$

### 1.3.2 外隔热材料配方

将硅橡胶、RMX-2 及固化剂通过高速搅拌机搅拌均匀后,压制成片材,厚度为 1 mm。其配方为:TI551 硅橡胶,50 ~ 150 份;RMX-2,50 ~ 75 份;自制固化剂,3 ~ 10 份。

### 1.3.3 外隔热材料配方调适

将硅橡胶、RMX-2 混合(固化剂用量均不变),模压成型后,进行力学性能测试(表 2)。

表 2 外隔热材料力学性能

Tab.2 Mechanical properties of external thermal insulation material

填料与硅橡胶配比	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
1:1(1#)	1.87	25
1:2(2#)	2.01	28
1:3(3#)	2.28	44
设计要求	$\geq 1.5$	$\geq 20$

从表 2 可看出,3 种试片力学性能均满足设计要求;选择密度较小的 1# 配方。

### 1.4 性能测试

密度、热导率、比热容、拉伸强度、断裂伸长率及粘接强度的测试分别按 QJ990.13—86、GB10295—88、GJB330A—2000、GB528—2009 及 Q/J173—2008 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 外隔热材料热性能

1# 配方材料的热性能见表 3。从表 3 可见,该外隔热材料的热性能满足设计要求。

表 3 1# 配方材料热性能

Tab.3 Test data of the sample 1#

试样	比热容/ $\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	热导率/ $\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
1#	1.371	80
设计要求	$\geq 1.2$	$\leq 200$

### 2.2 风洞试验

风洞试验条件见表 4。试件在风洞试验考核后,外观均完整,无龟裂,界面温度平均为 70.7℃(设计要求为  $\leq 100^\circ\text{C}$ ),隔热效果良好,满足设计要求。

表 4 电弧风洞试验条件

Tab.4 Wind tunnel test conditions

台阶编号	时间/s	冷壁热流/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	恢复焓/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	台阶加热量/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$
一	24	17	0.8	0.408
二	20	33	0.8	0.66
三	88	15	4	1.32
四	18	38	4	0.684

### 2.3 外隔热材料与外防护涂层性能对比

对厚度为 2.5 和 3.0 mm(4G-2.5 和 4G-3.0)的外防护涂层(硅橡胶基体)进行对比风洞考核试验,结果见表 5。

表 5 外防护涂层风洞考核结果

Tab.5 Wind tunnel test results of external protection coating

试件编号	界面温度/ $^\circ\text{C}$	质量变化/g	厚度变化/mm
4G-2.5	102.4	0.3	0
4G-3.0	86.5	0.06	0.04

从表 5 可知,3 mm 厚的涂层试件考核结果与 1 mm 的结果较接近,但其密度为  $0.73 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,所以 1 mm 该外隔热材料的研制可以大幅度减轻发动机消极质量。

### 3 外隔热材料与碳纤维复合材料壳体的变形协调性

通过在  $\Phi 480$  T700 碳纤维/BA202 环氧树脂复合材料壳体上粘贴该外隔热材料片材,进行水压试验,并与同基体外隔热涂层进行对比。以验证外隔热材料与碳纤维复合材料壳体的变形协调性。水压检验程序为:3.0 MPa $\rightarrow$ 6.0 MPa(稳压 10 s) $\rightarrow$ 8.0 MPa(稳压 10 s) $\rightarrow$ 10.0 MPa(稳压 10 s) $\rightarrow$ 12.0 MPa(稳压 10 s) $\rightarrow$ 14.0 MPa(稳压 10 s),最后卸载至零,测出残余应变,试验数据见表 6。

表 6 壳体在各级压力下的应变

Tab.6 Casing at all levels of pressure strain

部位	应变片	6MPa	8MPa	10MPa	12MPa	14MPa	0
前封头	1	3827	4922	5969	7036	8074	219
	2	4069	5241	6362	7490	8597	163
	3	4235	5505	6716	7920	9094	93
前筒段	5	3057	4038	5007	5990	6933	66
	6	4675	6080	7435	8775	10094	91
后筒段	7	2860	3833	4788	5720	6708	66
	8	4481	5853	7186	8520	9822	76
后封头	9	2452	3247	4039	4873	5711	154
	10	3338	4321	5266	6222	7171	279
	11	4219	5416	6548	7650	8711	87

(下转第 66 页)