

# 陶瓷防热瓦用应变隔离垫的制备及性能

周洁洁 孙陈诚 陈育阳 徐云辉 胡子君

(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

**文 摘** 通过 SEM 等手段对以芳纶纤维为原料,采用针刺工艺制备的应变隔离垫的微观结构、力学、粘接和耐温性能进行表征与分析。结果表明:当针刺密度为 35 针/cm<sup>2</sup>、材料密度为 0.18 g/cm<sup>3</sup>时,材料具有很好的应变协调能力和力学性能,经 200℃ 以下温度热处理,材料无明显变化,强度仍可达 0.9 MPa。在风洞考核环境下,陶瓷瓦热防护组件最高表面温度 1 500℃,风洞考核后,组件无开裂、松动现象,验证了应变隔离垫用于陶瓷瓦粘接的可靠性。

**关键词** 应变隔离垫,芳纶纤维毡,应变协调

中图分类号:V475.2

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.03.014

## Preparation and Properties of Strain Isolation Pad for Ceramic Insulating Tile

ZHOU Jiejie SUN Chencheng CHEN Yuyang XU Yunhui HU Zijun

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The microstructure, tensile strength, bonding properties, high temperature resistance of strain isolation pad, which was prepared by needle process with aramid fibers as material are investigated. The results show that strain isolation pad has good coordinate deformation capacity and tensile strength when the punch density is 35 punches/cm<sup>2</sup> and the material density is 0.18 g/cm<sup>3</sup>. When the heating temperature is lower than 200℃, there is no significant change of structures and intensity. At the wind tunnel environment, maximum surface temperature is 1500℃, the appearance of the thermal protection system is complete with no cracks and no looseness after the wind tunnel test, the test results validate the reliability of strain isolation pad.

**Key words** Strain isolation pad, Aramid fiber felt, Coordinate deformation

### 0 引言

可重复使用高超声速飞行器是 21 世纪航空航天事业发展的重要方向,其热防护系统是重复使用运载器的关键技术之一。陶瓷瓦作为高超声速飞行器的一种典型热防护系统,已经在美国航天飞机和 X-37B 等飞行器上得到大面积应用。

应变隔离垫是陶瓷瓦热防护体系中不可或缺的一部分,通过室温固化硅胶将陶瓷瓦与冷结构粘接在一起。由于陶瓷瓦和铝合金或复合材料结构的线胀系数差别很大,再入时两者有数百甚至上千度的温差,所以连接层需要具有较大的弹性变形以协调陶瓷瓦与结构间的变形。此外,机身结构受力学载荷发生应变时不允许陶瓷瓦来承受变形,同样需要通过应变

隔离垫来协调,有效地防止结构因热、力而产生的变形传递给陶瓷瓦造成破坏<sup>[1]</sup>。本文选择具有耐热和阻燃性能的间位芳纶纤维长丝,通过针刺工艺制备的芳纶纤维毡作为应变隔离垫使用。从微观结构、力学、粘接及耐高温性能对芳纶纤维毡进行研究,考核其作为应变隔离垫的可靠性,为陶瓷瓦热防护系统提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 原材料

应变隔离垫为芳纶纤维长丝以气相分散法制备薄网胎,网胎铺层叠加到一定面密度,通过针刺工艺制成具有平面结构的织物,织物密度 0.12~0.18 g/cm<sup>3</sup>,幅宽 1 m;泰美达芳纶纤维由烟台泰和新材料股

收稿日期:2016-08-09;修回日期:2017-02-23

第一作者简介:周洁洁,1984 年出生,硕士,研究方向:高效隔热材料。E-mail:zhoujiejie0420@163.com

份有限公司生产;GXJ-63-1 胶黏剂,自制;其余辅料均为市售。

## 1.2 仪器设备

电子万能试验机(Alliance\_RF/100),美国;SEM(LEICA-S440),英国;EKO 热导率测试仪(HC-74-300),日本。

## 1.3 试样制备

### 1.3.1 胶渗透试样制备

裁切 60 mm×60 mm 大小的应变隔离垫,两面均匀涂覆胶黏剂,采用真空加压的方式加压,压力 60 kPa,室温固化,固化时间 2 d。

### 1.3.2 热处理试样制备

裁切 4 块 100 mm×100 mm 大小的应变隔离垫,分别在 -120、200、250、300℃ 下进行热处理,保温时间 30 min。

### 1.3.3 风洞考核试样制备

风洞考核试样是陶瓷瓦、应变隔离垫和铝板的粘

接件,为 2×2 阵列,试样尺寸 400 mm×400 mm。陶瓷瓦厚度 40 mm,应变隔离垫厚度 2 mm,铝板厚度 3 mm。胶黏剂采用真空加压的方式固化,压力 60 kPa,室温固化,固化时间 7 d。

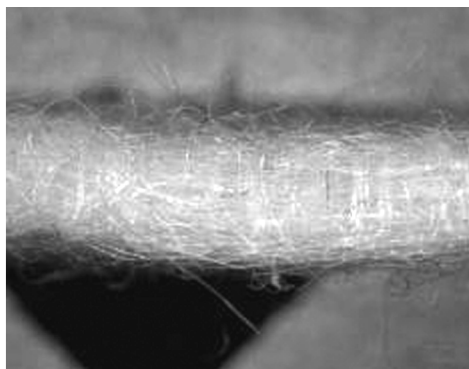
## 1.4 性能测试及表征

材料密度、热导率、拉伸强度的测试分别按 GB/T 17911—2006、GB/T 10295—2008、GB/T 1452—2005 进行。

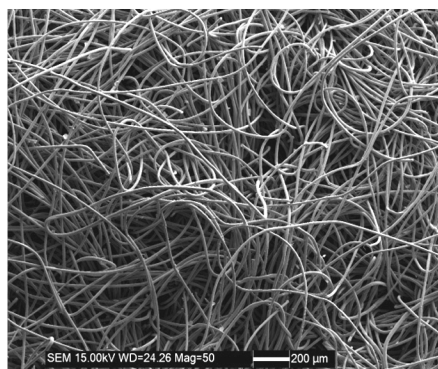
## 2 结果与讨论

### 2.1 材料结构

图 1 为应变隔离垫的针刺结构及 SEM 照片,由直径 15 μm 左右纤维相互缠结,分布均匀,针刺工艺使得部分纤维与织物平面垂直,正是这些垂直的纤维赋予应变隔离垫厚度方向的强度。在不同位置裁取 100 mm×100 mm 芳纶纤维毡,测试材料的密度范围为(0.18±0.01) g/cm<sup>3</sup>,可见材料密度分布均匀。



(a) 针刺方向



(b) 水平方向

图 1 应变隔离层微观结构

Fig.1 Microstructures of strain isolation pad

## 2.2 针刺密度对材料性能的影响

针刺的主要目的是引入连接网胎层与层的纤维束,这些纤维束通过与网胎层的纤维“缠绕”和相互摩擦,形成一种 2.5D 结构的纤维毡。制备针刺密度分别为约 20、35 和 50 针/cm<sup>2</sup> 三种芳纶纤维毡,测试拉伸强度分别在 0.50、0.90 和 1.1 MPa 左右,可见针刺越密,拉伸强度越高。但针刺密度增加,材料柔顺性有所降低,与冷结构的协调变形能力也随之下降,以陶瓷瓦最低拉伸强度 0.7 MPa 为参考,确定针刺密度为 35 针/cm<sup>2</sup>。

## 2.3 密度对材料性能的影响

在材料针刺结构固定的条件下,材料密度将影响材料的隔热性能、渗透性以及固化后回弹特性。本文选用了 0.12、0.15 和 0.18 g/m<sup>3</sup> 三种密度的芳纶纤维毡,其热导率分别为 0.032、0.034 和 0.037 W/(m·K)。以 0.1 g/cm<sup>2</sup> 单面用胶量进行浸透性试验,由于胶黏剂的黏度较低,当芳纶纤维毡密度为 0.12 g/cm<sup>3</sup>

时,胶黏剂会不断向纤维毡内部渗入(图 2),从而失去应变协调作用。表 1 为 3 种密度芳纶纤维应变隔离垫粘接固化前后厚度尺寸。可见密度越低,渗胶层越厚、固化后反弹能力越差。当密度达 0.18 g/cm<sup>3</sup> 时芳纶纤维毡渗胶层最薄,厚度变化最少,具有很好的回弹能力,可满足飞行器装配需求。

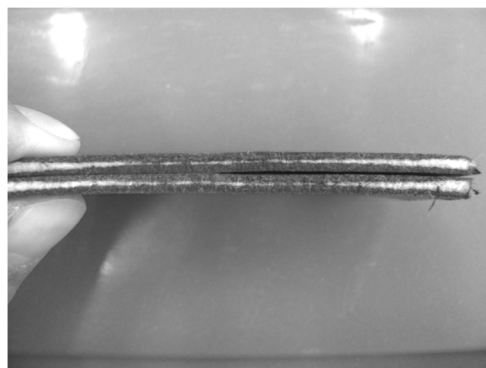


图 2 应变隔离垫胶浸透效果图

Fig.2 Dipped strain isolation pad

表 1 应变隔离垫粘接前后厚度变化

Tab.1 Thickness change of dipped strain isolation pad with different density

密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粘接前厚度/mm	粘接后厚度/mm	厚度变化率/%
0.12	4.2	3.7	11.9
0.15	4.0	3.8	5.0
0.18	4.1	4.0	2.4

## 2.4 温度对材料性能的影响

从表 2 可看到,材料经 $-120\sim 200^\circ\text{C}$ 处理,尺寸无明显变化,整个处理过程材料亦无燃烧现象。这是因为间位芳纶纤维的结晶结构为三斜晶系,在其结晶结构中,氢键在晶体的两个平面上存在,以格子状排列,氢键的强烈作用使化学结构非常稳定,使芳纶纤维具有优越的耐热性和阻燃性<sup>[2]</sup>。不同温度热处理后应变隔离垫的拉伸强度如表 2 所示,随着热处理温度的升高,无明显下降,可满足飞行器在轨和再入环境使用。

表 2 不同温度热处理后应变隔离垫水平方向尺寸变化和厚度方向拉伸强度

Tab.2 Hot-shrinkage and tensile strength of strain isolation pad after different temperature treatment

处理/测试条件	收缩率/%	拉伸强度/MPa
$-120^\circ\text{C}/30\text{min}$	无明显变化	1.01
未处理	-	0.98
$100^\circ\text{C}/30\text{min}$	无明显变化	1.28
$150^\circ\text{C}/30\text{min}$	无明显变化	1.16
$200^\circ\text{C}/30\text{min}$	无明显变化	1.19

## 2.5 应变隔离垫变形协调能力验证

为了解应变隔离垫不同温度下的变形协调能力,对经不同温度热处理后的应变隔离垫进行了室温及 $-120^\circ\text{C}$ 环境下的拉伸测试(表 3)。

表 3 不同处理/测试温度下应变隔离垫拉伸位移

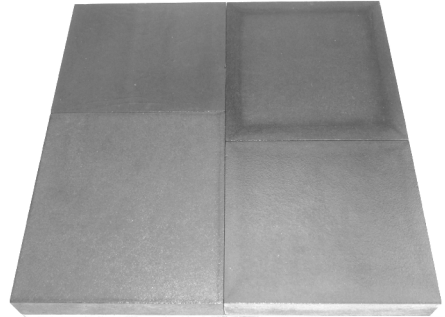
Tab.3 Stretch displacement of strain isolation pad

处理/测试条件	拉伸强度/MPa	位移/mm
$-120^\circ\text{C}$	0.7	0.83
未热处理	0.7	0.78
$100^\circ\text{C}/30\text{min}$	0.7	0.82
$150^\circ\text{C}/30\text{min}$	0.7	0.85
$200^\circ\text{C}/30\text{min}$	0.7	0.76

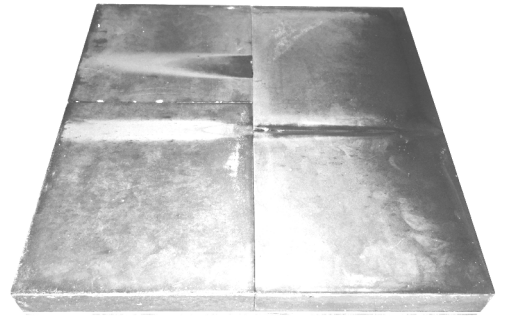
可看到,材料在 $200^\circ\text{C}$ 以下温度热处理后和在 $-120^\circ\text{C}$ 环境下的拉伸位移没有明显变化,具有很好的尺寸稳定性,高温处理后和低温环境下芳纶纤维毡仍具有良好的拉伸延伸性能。

## 2.6 含应变隔离垫组合件考核

铝蒙皮/应变隔离垫/陶瓷瓦通过胶黏剂粘接成阵列组件,进行风洞考核。对 $2\times 2$ 阵列试验件进行最高热流 $405\text{ kW}/\text{m}^2$ 风洞考核,考核结束时( $750\text{ s}$ )样件的背面仍为常温, $2\,000\text{ s}$ 时背温 $75^\circ\text{C}$ ,低于应变隔离垫使用温度( $200^\circ\text{C}$ )。应变隔离垫有效阻止了结构因热而产生的变形传递给陶瓷瓦造成破坏。试验后样件结构完整、不松动,验证了应变隔离垫用于陶瓷瓦粘接的可靠性(图 3)。



(a) 考核前



(b) 考核后

图 3  $2\times 2$ 阵列陶瓷瓦试验件考核前后对比

Fig.3 Samples before and after wind tunnel test

## 3 结论

(1)随着应变隔离垫密度、针刺密度的增加,材料力学性能、应变协调能力增加,其柔顺性下降、随型能力降低,当材料密度为 $0.18\text{ g}/\text{cm}^3$ ,针刺密度为 $35\text{ 针}/\text{cm}^2$ 时,应变隔离垫的综合性能最优;

(2)应变隔离垫具有良好的耐温性,在 $-120^\circ\text{C}$ 或 $200^\circ\text{C}$ 以下温度热处理后,材料的力学性能、应变协调能力都没有发生明显的变化;

(3)风洞考核后,组件结构完整、不松动,验证了应变隔离垫用于陶瓷瓦粘接的可靠性。

### 参考文献

- [1] 吴国庭.哥伦比亚号防热系统概貌[J].国际太空,2003(6):26-28.
- [2] 陈蕾,胡祖明.芳纶 1313 纤维制备技术进展[J].高分子通报,2014(6):1-8.