

# 弯曲纤维对 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料拉伸强度的影响

张敬义 范锦鹏 杜雪菲 赵建设 张大海

(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** 以  $\text{SiO}_{2f}$  织物作为增强相,采用循环浸渍固化工艺,制备了  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  复合材料。在制备过程中,通过对  $\text{SiO}_{2f}$  织物进行模压处理,使  $\text{SiO}_{2f}$  呈现出不同程度的弯曲,测定了纤维弯曲后复合材料的拉伸强度,研究了纤维弯曲时复合材料的断裂过程。结果表明:弯曲纤维将导致复合材料的拉伸强度下降,最低拉伸强度仅为 5.5 MPa,纤维弯曲时复合材料的断裂过程为逐层断裂,断裂应变增加,最大断裂应变达到 1.19%。

**关键词**  $\text{SiO}_{2f}$ , 弯曲纤维, 复合材料, 拉伸强度

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.04.010

## Effect of Bending Fiber on Tensile Strength of $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ Composites

ZHANG Jingyi FAN Jinpeng DU Xuefei ZHAO Jianshe ZHANG Dahai

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

**Abstract**  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  composites were prepared through repeated infiltration and solidification process, using quartz fabric. Quartz fiber waviness was generated by molding. The tensile strength of  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  composites with bending fibers were tested. The fracture process was studied. The results showed that bending fiber will lead to the decrease of tensile strength. The minimum tensile strength was 5.5 MPa. The composites with curved fibers fractured layer by layer. The bending fiber will lead to the increase of fracture strain, the maximum fracture strain was 1.19%.

**Key words** Quartz fiber, Bending fiber, Composite, Tensile strength

### 0 引言

以  $\text{SiO}_{2f}$  作为增强相、无定形  $\text{SiO}_2$  为基体<sup>[1-3]</sup> 的  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  复合材料,既具有石英优异的介电性能,同时具备良好的结构可靠性和抗热冲击性能<sup>[4-5]</sup>,是高温透波复合材料领域的研究重点,目前已在高温透波领域获得了工程应用<sup>[6-8]</sup>。在复合材料构件成型过程中, $\text{SiO}_{2f}$  会出现弯曲现象,对材料的力学性能造成影响。本文对纤维弯曲状态下复合材料的拉伸强度和断裂过程进行了研究。

### 1 实验

#### 1.1 复合材料的制备

将  $\text{SiO}_{2f}$  织物放入具有一定弧形结构的模具中进行模压,如图 1 所示,使纤维发生弯曲,之后通过循环浸渍固化工艺,制备出纤维处于弯曲状态的复合材料。通过改变模具的弧度,得到纤维弯曲程度不同的复合材料。

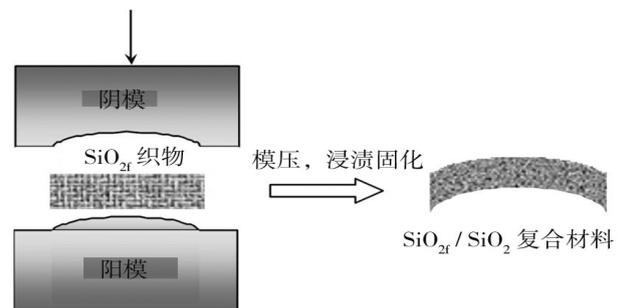


图 1 复合材料的制备工艺过程

Fig.1 Process of the composites with bending fiber

#### 1.2 性能测试

对试样的拉伸强度和断裂应变进行了测试(DqES396—2002)。将被测试样加工成直条体,长度 150 mm,截面尺寸为 16 mm×16 mm,在试样两端夹持段粘接加强片,加强片用 1~2 mm 厚的硬铝,加强片尺寸为 16 mm×50 mm。选用的胶黏剂和胶接工艺不改变被测材料的性能,试验过程中胶接面不脱粘。试

样施加轴向拉伸载荷,直至试样破坏。根据最大载荷计算拉伸强度;根据载荷纵向应变曲线上初始直线段的载荷与变形增量计算拉伸模量,由曲线上最大载荷对应的总变形量计算断裂应变。拉伸强度按公式(1)计算,拉伸模量按公式(2)计算,断裂应变按公式(3)计算。

$$\sigma_1 = \frac{F}{b\delta} \quad (1)$$

式中, $\sigma_1$ 为拉伸强度, $F$ 为试样破坏时的最大载荷, $b$ 为试样工作段宽度, $\delta$ 为试样工作段厚度。

$$E_1 = \frac{\Delta FL_0}{b\delta\Delta L} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, $E_1$ 为弹性模量, $\Delta F$ 为载荷纵向变形曲线上初始直线段的载荷增量, $L_0$ 为引伸计标距, $\Delta L$ 为载荷纵向变形曲线上与 $\Delta F$ 相对应的纵向变形增量。

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_1$ 为断裂应变, $\Delta L_1$ 为载荷纵向变形曲线上与最

大载荷相对应的总变形量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 弯曲纤维对 SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 拉伸强度的影响

图 2 为不同弯曲程度的纤维拉伸试样的断裂情况,虚线标记了纤维的弯曲程度。可以看出,随着纤维弯曲程度的增加,断口变得不平整,同时断口方向不再与试样长度方向垂直。表 1 为纤维不同弯曲程度试样的拉伸强度,试样 a 中纤维未出现明显弯曲,拉伸强度为 75.3 MPa,试样 b 中纤维呈现出一定程度的弯曲,拉伸强度为 50.7 MPa,试样 c 中纤维的弯曲程度相对试样 b 更加严重,拉伸强度下降到 18.2 MPa,同时断口方向不再与试样长度方向垂直,试样 d 纤维的弯曲程度最严重,拉伸强度仅有 5.5 MPa,同时断口方向也不与试样长度方向垂直。根据上述分析可知,纤维的弯曲程度越大,试样的拉伸强度越低,从断口形貌和断裂应变来看,纤维的弯曲引起了试样断裂模式的变化。



图 2 弯曲纤维试样照片

Fig.2 Picture for samples with bending fiber

表 1 弯曲纤维试样的拉伸强度

Tab.1 Tensile strength of samples with bending fiber

试样	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂应变/%
a	75.3	14.7	0.79
b	50.7	15.8	0.92
c	18.2	22.6	1.19
d	5.5	13.8	0.46

### 2.2 弯曲纤维试样断裂模式

对于弯曲纤维的 SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 复合材料试样,在加工过程中会造成试样表面纤维的断裂,使部分纤维不连续,如图 3 所示。试样 a 中纤维未出现明显弯曲,在整个试样厚度方向纤维都是连续的,试样 d 中纤维出现严重弯曲,在试样厚度方向接近二分之一的纤维处于不连续状态。

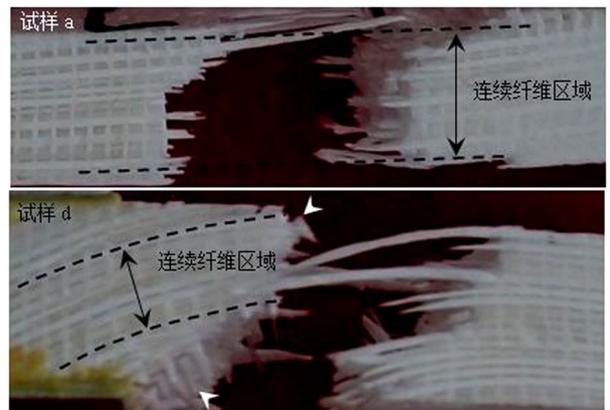


图 3 试样断口照片

Fig.3 Picture of sample fracture surface

对于连续纤维增强复合材料,纤维是主要的受力载体,不连续的纤维无法有效地传递载荷,反而成为

材料缺陷,在测试过程中,试样破坏始于边缘部位不连续纤维层,如图3中箭头所示,之后裂纹沿试样厚度方向向内逐渐扩展,当裂纹扩展至连续纤维层处时,测试应力达到最大,连续纤维层破坏之后裂纹继续扩展至对侧不连续纤维层处,测试应力逐渐减小。所以,对于纤维弯曲的复合材料而言,试样中连续纤维层数越多,试样的拉伸强度越高。上述断裂过程从图4可以清晰的反应出来。

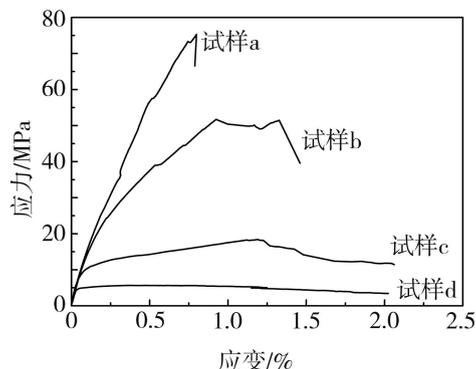


图4 应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves

试样 a 的应力-应变曲线为典型的脆性断裂,断裂过程中各层纤维同时断裂,试样的位移较小,断裂应变为 0.79%;试样 b 中由于纤维弯曲在试样表面产生了少量的不连续纤维层,成为试样破坏的起始位置,不连续纤维层破坏过程中会产生一定的位移,之后载荷施加于连续纤维层上直至破坏,因此,试样 b 整个破坏过程的位移量相对试样 a 有所增加,断裂应变达到 0.92%;同理,试样 c 由于纤维弯曲程度的增加导致不连续纤维层数增加,相应的断裂过程产生了更多的位移,断裂应变达到 1.19%;对于试样 d,由于纤维弯曲最为严重,连续纤维层数较少,在不连续纤维层破坏过程中,试样由于部分断裂而偏离拉力方

向,纤维层的受力由拉应力转变为剪应力,导致连续纤维层出现逐层断裂现象,试样的拉伸强度仅为 5.5 MPa,断裂应变为 0.46%。

### 3 结论

(1)纤维的弯曲将导致  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$  复合材料拉伸强度的下降,纤维的弯曲程度越大,复合材料的拉伸强度越低,最低仅为 5.5 MPa。

(2)纤维的弯曲造成复合材料中产生不连续纤维层,断裂过程以此为起始点逐层断裂,导致复合材料断裂应变增加,最大断裂应变达到 1.19%。

### 参考文献

- [1] 韩爽,蒋凯辉,唐军务,等. 2.5D  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$  复合材料制备工艺及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 458.
- [2] 李端,张长瑞,李斌,等.  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ -BN 复合材料的制备及其性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 63.
- [3] 鲁芹,胡龙飞,罗晓光,等. 高超声速飞行器陶瓷复合材料与热结构技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 251.
- [4] 张大海,黎义,高文,等. 高温天线罩材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 1.
- [5] 于佩志,张涛,王晓薇. 2.5D 石英纤维织物增强二氧化硅基复合材料弯曲性能测试研究[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(5): 58.
- [6] 张大海,李仲平,范锦鹏. 热透波材料技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(8): 1.
- [7] CHEN H, ZHANG L M, JIA G Y, et al. The preparation and characterization of 3D-fiber reinforced silica composites[J]. Key. Eng. Mater., 2003, 249: 159.
- [8] MANOCHA L M, PANCHAL C N, MANOCHA S. Silica/silica composites through electrophoretic infiltration[J]. Ceram. Eng. Sci. Proceed., 2002, 23: 655.