

引文格式: 魏俊飞, 杨成鹏, 贾斐, 等. 预制体构型对C/SiC复合材料舵片结构强度的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(8): 113–120.  
WEI Junfei, YANG Chengpeng, JIA Fei, et al. Influence of fiber preforms on structural strength of C/SiC composite rudder fins[J].  
Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(8): 113–120.

## 预制体构型对C/SiC复合材料舵片结构强度的影响\*

魏俊飞<sup>1</sup>, 杨成鹏<sup>1</sup>, 贾斐<sup>2</sup>, 矫桂琼<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072;

2. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

[摘要] 为了揭示三向正交C/SiC复合材料(3D-C/SiC)和碳布缝合复合材料(2D-C/SiC)两种舵片与金属螺钉组合结构的不同破坏机制, 从已失效舵片的低应力区取样, 开展两种复合材料的层间剪切试验和弯-扭组合加载试验, 研究纤维预制体构型对C/SiC复合材料层间剪切性能和弯扭耦合力学性能的影响规律。结果表明, 与3D-C/SiC相比, 2D-C/SiC的综合强度性能较低, 而刚度性能较高。将材料试验结果与其舵片结构的测试结果进行对比, 分析了三向2D-C/SiC舵片结构强度较低的原因。研究表明, 舵片结构在危险截面上的外加载荷由舵轴和螺钉共同承担, 根据组合结构中载荷按照刚度比例进行分配的基本原理, 密度和刚度较低的3D-C/SiC舵轴所承担的载荷必然较低, 螺钉因承担相对更高的载荷而提前发生屈服破坏, 从而降低了舵片结构的承载强度。

关键词: 陶瓷基复合材料; 纤维预制体; 失效机制; 刚度不匹配; 空气舵

### Influence of Fiber Preforms on Structural Strength of C/SiC Composite Rudder Fins

WEI Junfei<sup>1</sup>, YANG Chengpeng<sup>1</sup>, JIA Fei<sup>2</sup>, JIAO Guiqiong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University,

Xi'an 710072, China;

2. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

[ABSTRACT] In order to reveal the different damage mechanisms of the 3D-orthogonal C/SiC composite (3D-C/SiC) rudder fins and metal bolt combined structure, and of the carbon cloth stitching C/SiC composite (2D-C/SiC) rudder fins and metal bolt combined structure, interlaminar shear tests and combined bending-torsion loading tests were conducted to investigate the influence of fiber preform configuration on the interlaminar shear and bending-torsion coupled mechanical properties of the 2D-C/SiC composites cut from the low stress area of the corresponding failed rudder fins. The results show that the 2D-C/SiC composites have lower strength property while higher stiffness property compared with the 3D-C/SiC composites. The material test results were compared with the test results of its rudder fins structure, and the reason for the very low strength of the combined 3D-C/SiC composite fins and bolt structure were analyzed. It is show that the applied load on dangerous section of the rudder fins structure is shared by the rudder shaft and the bolt. According to the basic principle in combined structure that the load is distributed based on the stiffness ratio of the components, the load borne by 3D-C/SiC composite rudder shaft with lower density and stiffness is inevitably lower, and the bolt yields early due to its relatively higher load, thus reducing the load-bearing strength of the combined structure.

**Keywords:** Ceramic matrix composites; Fiber preform; Failure mechanism; Stiffness mismatch; Air rudder

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2025.08.113

\* 基金项目: 国家自然科学基金(12072274); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-123)。

目前,各类战略战术导弹的精确制导主要通过弹头的空气舵提供气动力矩来实现,但是导弹在大气层中以高超音速飞行的过程中,弹体受“气动加热”影响会使其温度急剧升高,同时空气舵在偏转过程中还会因受到巨大的气动载荷而发生弯扭组合变形甚至破坏,因此恶劣的服役环境使得材料的选择变得尤为重要<sup>[1-6]</sup>。C/SiC 复合材料因其优良的高温比刚度、强韧性以及抵抗高温烧蚀的性能,成为高超音速飞行器热防护材料领域的重要研究对象。

大量试验研究表明,纤维预制体构型对织物增强复合材料的致密化、物理及力学性能起着决定性作用。李艳等<sup>[7]</sup>研究表明,预制体结构对复合材料密度分布均匀性影响较大。一些文献的研究则表明,不同纤维预制体结构对陶瓷基复合材料和 C/C 复合材料的基础力学性能、疲劳性能均有显著的影响<sup>[8-12]</sup>。除了材料性能, Li 等<sup>[13]</sup>研究了不同纤维预制体结构 C/SiC 螺母的抗剪性能,以及 C/SiC 螺钉的抗拉性能和抗剪性能,并指出用于制备复合材料螺钉的纤维预制体构型需要根据性能要求进行选择。但总体上,预制体构型对 C/SiC 复合材料典型结构件力学性能的影响研究较少。

此外,与三向正交 C/C 相比,三向正交 C/SiC 和碳布缝合 C/SiC 复合材料力学性能的研究也较少。王刚等<sup>[14]</sup>通过单胞模型和均匀化方法分析预测了三向正交 C/C 材料的弹性性能。邓奇林等<sup>[15]</sup>通过试验和模型研究了预制体织造参数对三向正交 C/C 材料弯曲性能的影响。Kumar 等<sup>[16]</sup>研究了三向正交 C/SiC 材料的热膨胀、热传导以及热震性能。对于碳布缝合 C/SiC 材料,大量研究集中在 2D 和 3D 针刺 C/SiC 材料的物理和机械性能的分析预测。刘宇峰等<sup>[17]</sup>对碳布缝合 C/C 复合材料的气相致密化特征、微观结构与力学性能进行了分析测试,发现碳布规格和缝合间距对致密化程度及力学性能均有影响。

由于 C/SiC 复合材料适用于耐高温结构,因此其典型结构件的性能研究也非常重要。He<sup>[18]</sup>和杨成鹏<sup>[19]</sup>等研究了 2D-C/SiC 复合材料悬臂槽形梁的静力响应与破坏行为,发现 C/SiC 复合材料的非线性力学特征对梁整体的静态响应有显著影响,梁最终以拉剪破坏为主。高魁垠等<sup>[20]</sup>建立损伤模型对 2D-C/SiC 复合材料螺栓连接结构进行了强度和可靠性分析,发现面内剪切强度对结构可靠性的影响较大。张利鹏<sup>[21]</sup>和崔世程<sup>[22]</sup>等分别研究了大尺寸整体 C/SiC 复合材料蒙皮骨架松动问题和 C/SiC 大口径空间望远镜次镜承力筒的应用问题。

研究表明,目前对平纹碳布缝合 C/SiC 复合材料(2D-C/SiC)与三向正交 C/SiC 复合材料(3D-C/SiC)

的研究较少,而这两类材料在热结构中同样具有应用潜力。此外,对陶瓷基复合材料与金属元件组合结构的整体承载性能及失效机制的研究还远远不够。基础性能数据显示,3D-C/SiC 的综合强度性能优于 2D-C/SiC(表 1),但采用两种材料分别制成空气舵舵片,将连接舵片的舵轴和两个增强金属钉子同时插入舵机形成组合连接结构时,其整体强度测试结果表明,由 3D-C/SiC 复合材料制成的舵片,其组合结构的承载能力反而很低,其原因需要深入分析研究。

鉴于此,本文针对空气舵舵片的受载工况及其失效模式,开展层间剪切试验和弯-扭组合加载试验,分析 2D-C/SiC 与 3D-C/SiC 复合材料的层间剪切强度与弯扭复合加载性能参数,结合舵片组合结构的力-变形关系,阐明了结构的失效模式和失效机制,揭示 2D-C/SiC 复合材料舵片整体结构破坏载荷较高的原因,为空气舵舵片结构设计和应用提供参考。

## 1 材料与试验

### 1.1 试样制备

试验用 2D-C/SiC 与 3D-C/SiC 两种复合材料均由湖北某机械工程公司提供,试样从已发生静力破坏的两种舵片的低应力区裁剪而来,其承载能力可反映舵片材料的真实原位性能。其中,2D-C/SiC 复合材料是采用缝合工艺将 T300 级碳纤维 1K 纱线平纹编织布沿厚度方向缝合形成预制体<sup>[22]</sup>,然后采用化学气相渗透工艺沉积碳化硅基体制备而成,碳纤维缝合底线的引入使其层间结合性能有所提高。而 3D-C/SiC 复合材料采用的是 T300 级碳纤维 1K 纱线三向正交纤维的方式形成的预制体结构,其目的是均衡材料沿各个方向的力学性能。与 2D-C/SiC 复合材料相比,其面内纱线不受机织过程的损坏,具有较高的层间剪切强度和层间断裂韧性<sup>[23-26]</sup>。本研究中,3D-C/SiC 在经向和纬向上的纤维束排布可能略有差异,从而表现出面内各向异性,因此,在材料的两个主方向上分别进行了取样。两种材料的密度、弯曲强度及模量、拉伸强度及模量如表 1 所示。

考虑到舵片在服役过程中主要承受弯曲载荷和扭转载荷,且材料的层间性能可能对弯扭刚度和强度有重要影响,因此制备了两类试件,即层间剪切试件和弯扭

表 1 两种 C/SiC 材料的基础性能  
Table 1 Basic properties of two kinds of C/SiC materials

材料	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	抗弯强度/ MPa	弯曲模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	拉伸模量/ GPa
3D-C/SiC	1.61	425	55.4	220	75.0
2D-C/SiC	1.86	256	76.0	180	95.0

组合加载试件。3D-C/SiC 材料制备经向层剪试件 3 件 (编号 J<sub>1</sub>~J<sub>3</sub>)、纬向层剪试件 3 件 (W<sub>1</sub>~W<sub>3</sub>)、组合加载取样梁 2 件 (3D-B-1 和 3D-B-2); 2D-C/SiC 材料制备层剪试件 5 件 (F<sub>1</sub>~F<sub>5</sub>)、组合加载取样梁 2 件 (2D-B-1 和 2D-B-2)。两类试件的形状和基本尺寸如图 1 所示。

### 1.2 试验方法

层间剪切试验按照 ASTM 剪切试验标准 C1292-00 进行,加载过程采用位移控制方式,加载速率为 0.3 mm/min,加载时记录载荷-位移曲线。

针对两类材料,分别进行两个组别的弯-扭组合加载试验,即以弯曲为主的长梁弯扭试验和以扭转为主的短梁弯扭试验,加载方式如图 2 所示,真实加载配套装置如图 3 所示。在试样加载端表面粘贴加强片,防止试件局部压溃并保证整体变形;下表面粘贴变形测试辅助铝片,铝片两端下方各安装一个数字千分表 (A 和 B),用于测定梁的弯曲挠度和扭转角,如图 3 所示。弯曲为主的弯扭试验中,在梁约束端部既定截面的 4 个位置各粘贴 1 个应变花 (BE120-3CA) (图 2 (a)),实时监测取样梁的弯曲正应变和扭转剪应变。扭转为主的测试中,梁端部没有空间粘贴应变计 (图 2 (b)),因此,只测量弯曲挠度和扭转角。该试验在 Instron1196 电子万能试验机上进行,加载方式和加载速率与层剪试验相同。

弯扭试验中,通过千分表 A 和 B 测得挠度值  $a$  和  $b$ ,假设  $a > b$ ,则弯曲挠度  $\delta = (a + b) / 2$ ,扭转角  $\theta = (a - b) / c$  ( $c$  为 A 和 B 探头之间的距离)。而最大弯曲正应力  $\sigma_M$  的计算表达式为

$$\sigma_M = \frac{M}{W} = \frac{6Fl}{\omega h^2} \quad (1)$$

式中,  $M$  为最大弯矩;  $W$  为抗弯截面系数;  $F$  为最大载荷;  $l$  为弯曲线臂;  $\omega$  和  $h$  分别为矩形截面的宽度和高度。而最大扭转剪应力  $\tau_T$  的计算式为

$$\tau_T = \frac{T}{M_t} = \frac{F}{2\alpha h^2} \quad (2)$$

式中,  $T$  为最大扭矩;  $M_t$  为抗扭截面系数;  $\alpha$  为扭转系数。对于宽高比为 2 的矩形截面而言,根据矩形截面梁的扭转理论,其扭转系数  $\alpha$  的值为 0.246。此外,取样梁的扭转剪应变  $\gamma$  可通过 (0°/45°/90°) 应变花的应变响应计算得到,表达式为

$$\gamma = \varepsilon_0 + \varepsilon_{90} - 2\varepsilon_{45} \quad (3)$$

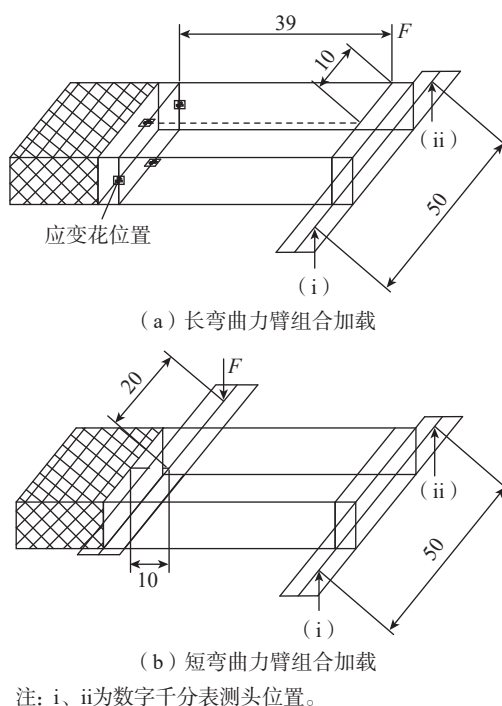


图 2 弯扭组合加载试验方法示意图 (mm)  
Fig.2 Schematic of test method of bending-torsion combined loading (mm)

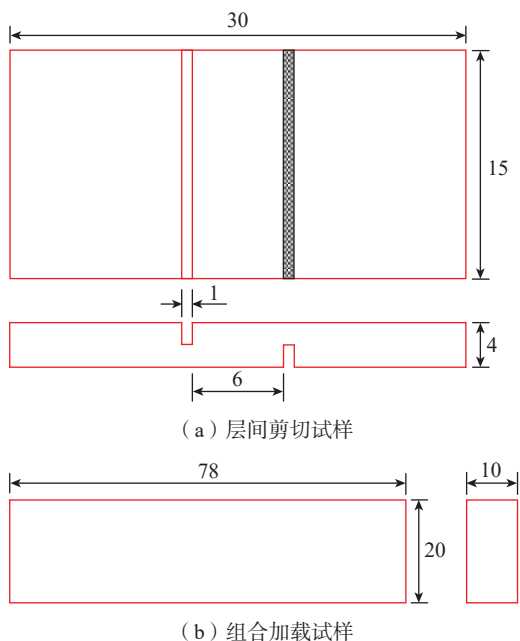


图 1 试件形状及尺寸 (mm)  
Fig.1 Shape and size of specimens (mm)

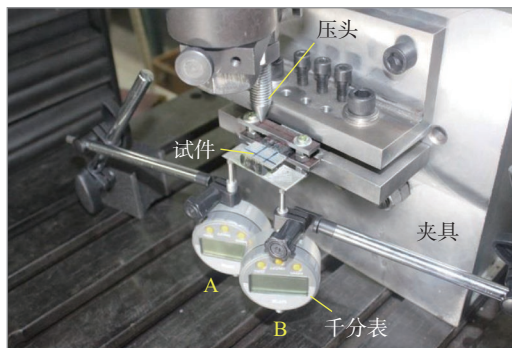


图 3 组合加载试验装置  
Fig.3 Experimental apparatus for combined loading

式中,  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{90}$  和  $\epsilon_{45}$  分别为应变花  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3 个方向的应变测试值,其中  $0^\circ$  方向与梁的轴向一致。

## 2 结果与讨论

### 2.1 层间剪切试验结果分析

表 2 为两种材料的层间剪切强度试验值。试样  $W_2$  的面外纤维束发生了灾难性的剪切断裂,其层间剪切强度低至 28.60 MPa; 试样  $W_1$  和  $W_3$  的断裂模式与  $W_2$  不同,其纬向纤维束发生了剥离屈曲,起到了抗剪作用。从表 2 可以看出,对于 3D-C/SiC 材料,其经向和纬向的层剪强度平均值分别为 40.42 MPa 和 65.5 MPa,均明显高于 2D-C/SiC 材料的平均值 25.12 MPa,原因是 3D-C/SiC 材料中有较多垂向纤维承担了层间剪切载荷。但 3D-C/SiC 经向层剪强度明显低于纬向,表明材料沿经、纬纱方向的剪切破坏过程和失效模式并不相同,下文将通过断面形貌观测进行详细分析论述。此外,2D-C/SiC 材料的层间剪切强度平均值与诸多文献中平纹编织 C/SiC 复合材料的试验结果基本一致。

两类材料的层间剪切典型载荷-位移曲线如图 4 所示。可以看出,加载初始阶段试样与夹具之间存在间隙致使载荷上升缓慢,当间隙消失后载荷迅速线性上升。相较于 2D-C/SiC 材料,3D-C/SiC 纬向剪切载荷-位移曲线通常表现出更好的线性特征,且试样在失效、载荷大幅跌落后仍然具有较高承载能力,这表明不止面外纤维束,纬向纤维束也起到了显著的抗剪作用。

试样断面形貌如图 5 所示,可以看出,3D-C/SiC 复合材料表面和断面上含有大量孔洞,与 2D-C/SiC 材料有显著差别,表明其基体含量较低,这与表 1 中的密度

值相符。但 3D-C/SiC 材料的层间剪切强度仍然较高,印证了面外纤维含量的增强效应。比较图 5(a) 和 (b) 可知,纬向剪切断面粗糙且参差不齐,同时有纬向纤维束被剥离、屈曲、劈裂的痕迹,表明其损伤形式和破坏机制更为复杂,面外纤维和纬向纤维同时抗剪使 3D-C/SiC 材料纬向层剪强度显著提高。

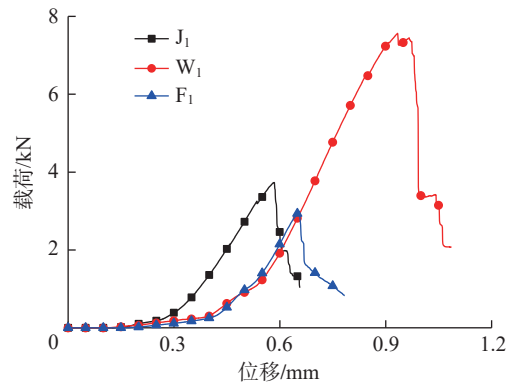
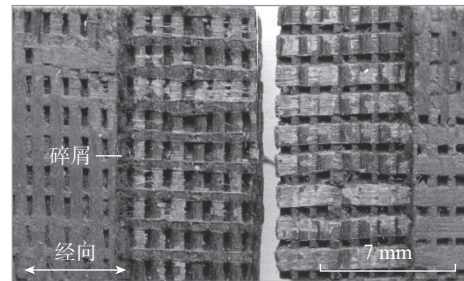
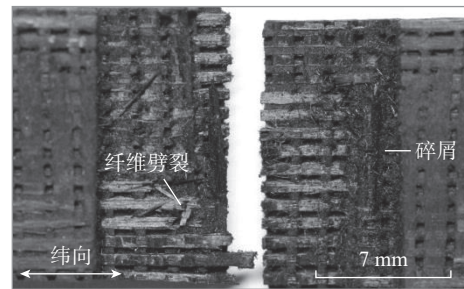


图 4 层间剪切载荷-位移曲线

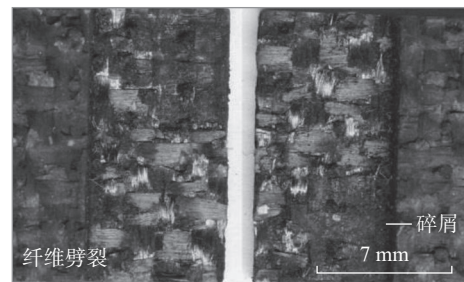
Fig.4 Load-displacement curves of interlayer shear



(a) 3D-C/SiC 材料经向



(b) 3D-C/SiC 材料纬向



(c) 2D-C/SiC 材料

图 5 层间剪切破坏断面形貌

Fig.5 Morphology of failure surface under interlaminar shear

表 2 层间剪切强度数据

Table 2 Interlaminar shear strength data

材料	试样编号	剪切强度/MPa	平均值/MPa
3D-C/SiC	J <sub>1</sub>	41.19	40.42 ± 4.01
	J <sub>2</sub>	36.08	
	J <sub>3</sub>	43.99	
	W <sub>1</sub>	84.07	65.57 ± 32.02
	W <sub>2</sub>	28.60	
	W <sub>3</sub>	84.04	
2D-C/SiC	F <sub>1</sub>	32.85	25.12 ± 5.87
	F <sub>2</sub>	19.06	
	F <sub>3</sub>	29.04	
	F <sub>4</sub>	24.56	
	F <sub>5</sub>	20.07	

从图 5 (c) 可以看出, 2D-C/SiC 材料的断面上只有少量缝纫纤维被剪断, 还有部分纤维被劈裂或撕裂。同时, 其断面上几乎观察不到宏观孔隙, 表明此类材料的基体比较密实, 基体含量明显高于 3D-C/SiC 材料, 因而得出 2D-C/SiC 材料的层间剪切破坏受基体控制; 而 3D-C/SiC 材料的剪切破坏则由纤维和基体共同控制。两类材料破坏模式的不同是导致其层间剪切强度差异较大的原因。

## 2.2 弯扭组合试验结果分析

第 1 组别试验以抗弯测试为主, 扭转力矩 (扭矩) 与弯曲力矩 (弯矩) 之比为 1 : 4, 这与 C/SiC 舵片在结构测试中的弯扭载荷比例相当。第 2 组别试验以抗扭测试为主, 扭矩与弯矩之比调整为 4 : 1。两组试验的载荷参数与强度数据见表 3。

### 2.2.1 第 1 组别试验

当扭矩与弯矩之比为 1 : 4 时, 测得试件 2D-B-1 和 3D-B-1 的最大弯曲正应力与轴向应变的关系曲线如图 6 所示, 可以看出, 尽管 3D-C/SiC 材料的弯曲强度较高, 但其弯曲刚度明显低于 2D-C/SiC 复合材料。在应力达到 150 MPa 之前, 两种材料的应力-应变曲线近似为线性, 计算得到 3D-C/SiC 和 2D-C/SiC 取样梁的弯曲模量分别约为 35.7 GPa 和 68.2 GPa, 该数值均低于两种材料的基础数据 (表 1), 且 3D-C/SiC 取样梁的模量偏低更严重。当应力-应变曲线进入非线性阶段后, 3D-C/SiC 取样梁的弯曲应变和内部损伤增长很快, 有利的方面是材料的刚度退化耗散了较多应变能, 从而延缓了断裂进程。

此外, 两种材料的扭转剪应力-应变曲线如图 7 所示。可以看出, 不止弯曲刚度, 3D-C/SiC 材料的扭转刚度也低于 2D-C/SiC 材料。当扭转剪应力为 20 MPa 时, 3D-C/SiC 材料的扭转切应变约为 0.31%, 相应名义剪切模量仅为 6.45 GPa; 而 2D-C/SiC 材料的扭转切应变约为 0.1%, 相应名义剪切模量为 20 GPa, 二者的剪切模量之比接近 1 : 3。

综合第 1 组别的组合加载测试结果 (表 3) 可知, 同等载荷水平下, 3D-C/SiC 材料的弯曲变形和扭转变形

都比较大, 刚度性能显著低于 2D-C/SiC 材料。两种材料发生弯曲失效后, 并没有彻底断裂, 仍具有一定承载能力, 载荷逐步降低。观察试样 2D-B-1 和 3D-B-1 的表面, 均没有发现明显的分层现象, 表明层间强度足够。但是, 两类取样梁最终均发生的是弯曲破坏, 并没有再现舵片试验中舵轴所发生的剪切破坏。

### 2.2.2 第 2 组别试验

当扭矩与弯矩之比为 4 : 1 时, 试验测得两种材料的扭转剪应力与扭转角之间的关系曲线如图 8 所示, 可以看出, 当扭转剪应力高于 40 MPa 后, 2D-C/SiC 取样梁的抗扭刚度明显高于 3D-C/SiC 取样梁, 且后者的扭转变形非常大, 在破坏时其扭转角几乎是 2D-C/SiC 取样梁的 2 倍。此外, 两种材料的弯曲挠度与扭转角的关系曲线如图 9 所示, 显然, 弯曲挠度相同时, 3D-C/SiC 取样梁的扭转角较大。因此, 图 8 和 9 均表明 3D-C/SiC 复合材料的抗扭刚度明显低于 2D-C/SiC 复合材料。

同时, 由表 3 数据可知, 当加载扭矩与弯矩之比为 1 : 4 时, 2D-C/SiC 取样梁的破坏应力相对略高; 而当加载扭矩与弯矩之比为 4 : 1 时, 3D-C/SiC 取样梁的破坏应力相对略低。这是因为 3D-C/SiC 材料的密度小、模量低, 其与金属夹具的局部挤压损伤影响了最终强度。整体上, 两种材料取样梁的强度性能相似, 没有显著差别。观察试件 2D-B-2 和 3D-B-2 的破坏断口形貌图发现 (图 10), 试样发生失效的位置几乎位于同一扭转截面内, 部分纤维束的位形发生了明显偏转, 是典型的扭转剪切型断口, 与舵片结构试验时舵轴的破坏模式一致。

试验证明, 虽然两个测试组别的性能表征参数不同, 但是结论是完全一致的, 即 3D-C/SiC 复合材料的刚度性能偏低。

## 3 舵片结构测试结果分析

本研究涉及的舵片为某型号空气舵, 其几何结构与破坏形貌本文不予具体展示。在 2D-C/SiC 和 3D-C/SiC 两种舵片开展的弯扭组合加载测试结果中, 扭矩与弯矩之比约为 1 : 4。从舵片结构及其与舵机的装配结构看, 舵翼部分的刚度很高, 危险部位位于舵轴, 如图 11

表 3 弯扭组合试验数据

Table 3 Test data of combined bending-torsion

试样	试验组别	最大载荷/N	弯矩/(N·m)	扭矩/(N·m)	最大弯曲应力/MPa	最大扭转剪应力/MPa
2D-B-1	1	1681.5	65.6	16.8	197.8	30.0
3D-B-1	1	1952.5	76.1	19.5	221.6	32.7
2D-B-2	2	3009.3	15.0	60.2	72.4	122.6
3D-B-2	2	2804.3	14.0	56.1	65.3	110.6

所示。舵片和舵机的连接除了舵轴还有两个 M5 紧固螺钉,因此舵片的弯扭载荷以及剪切载荷由复合材料舵轴和两个金属螺钉共同承担。试验结果显示,舵轴抗弯性能较高而抗扭性能较差,最终发生了剪切型破坏。

基础性能的测试和研究结果表明,与 2D-C/SiC 材料相比,3D-C/SiC 材料的强度性能偏低,而刚度性能较高。为了进一步阐明两种材料舵片连接部位的失效机制,在舵片边缘选取两个测点,即  $D_3$  测点和  $D_5$  测点,并

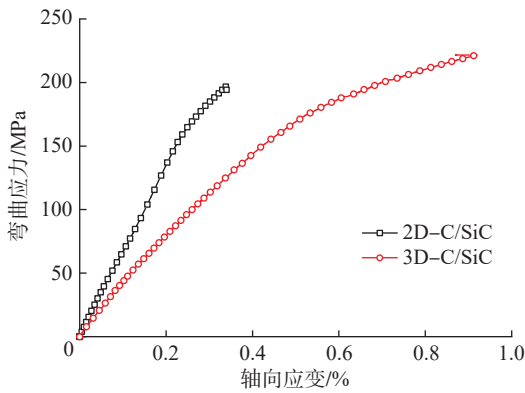


图 6 两种材料的弯曲应力-应变曲线  
Fig.6 Bending stress-strain curves of two materials

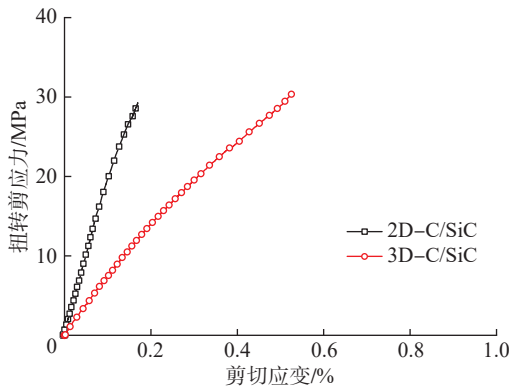


图 7 两种材料的扭转剪应力-应变曲线  
Fig.7 Torsional shear stress-strain curves of two materials

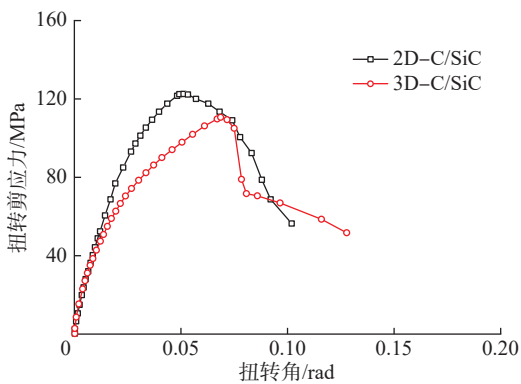


图 8 扭转剪应力与扭转角的关系曲线  
Fig.8 Relation between torsional shear stress and torsion angle

提取它们的位移数据,其中  $D_3$  测点的位移主要反映了舵片的弯曲变形;而  $D_5$  测点的位移则主要反映了舵片的扭转变形。两种舵片选定测点的载荷-位移对应关

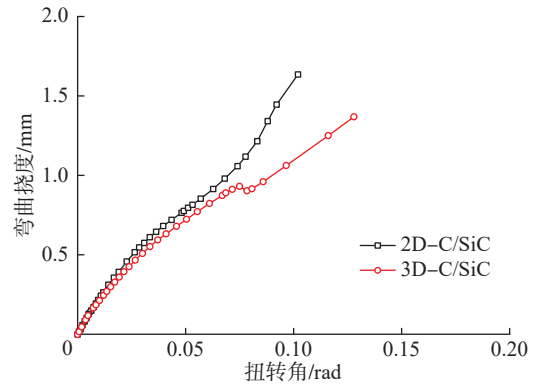
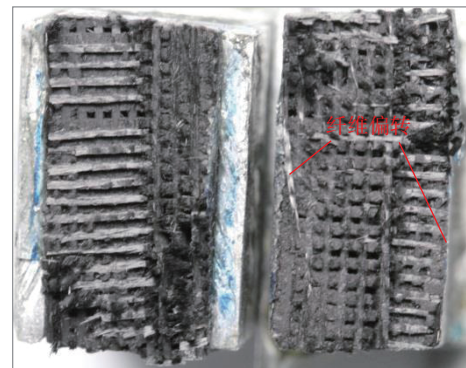
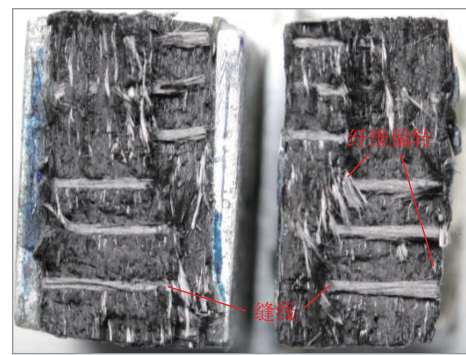


图 9 弯曲挠度与扭转角之间的关系曲线  
Fig.9 Relation between flexural deflection and torsion angle



(a) 3D-C/SiC



(b) 2D-C/SiC

图 10 两个试件的宏观断口形貌  
Fig.10 Macroscopic morphology of fracture surfaces of two specimens

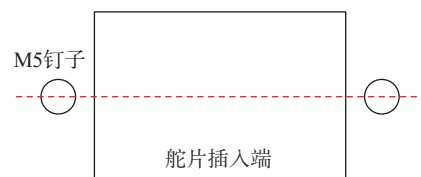


图 11 舵轴的危险受载截面示意图  
Fig.11 Schematic of the hazardous cross section of loaded rudder shaft

系如图 12 所示,可以看出,3D-C/SiC 复合材料舵片和金属螺钉的组合结构的弯曲刚度以及扭转刚度均较低,这与本文 2.2 节中弯扭组合加载的试验结果相一致。

舵片的危险截面如图 11 所示,复合材料舵轴外加两个 M5 金属螺钉形成了一个典型的组合承载结构,弯矩、扭矩以及剪切载荷作用在该截面上,避于复杂应力状态。由于舵翼部分的刚度很高,因此变形和损伤主要发生在舵轴及螺钉连接部位。根据载荷的分担原理,根据舵轴和螺钉的刚度大小分配两者所承担的载荷大小,刚度越高的结构部件所承担的载荷比例也将越高。

根据第 2 节的分析可知,3D-C/SiC 复合材料舵轴的刚度低于 2D-C/SiC 复合材料舵轴,因此其螺钉所承担的载荷比例相对较高,导致连接螺钉较早地进入屈服阶段并发生破坏。而 2D-C/SiC 复合材料的密度大、刚度高,因此,在与螺钉共同承载时,结构整体的弯曲刚度和扭转刚度均较高,在相同的变形条件下,2D-C/SiC 复合材料舵轴可以分担较大比例的载荷,降低了螺钉的应力水平,从而延缓了断裂并提高了结构整体强度。

从图 12 中可以看出,当载荷达到 300% 时,密度和刚度较低的 3D-C/SiC 复合材料舵轴的扭转变形曲线出现突变,表明螺钉可能开始屈服、承载力下降,进而引

发舵轴与舵机的局部挤压,导致舵轴处的载荷突然增大并首先发生局部破坏。此时,大部分载荷都集中到了螺钉上,引发螺钉变形剧增;随后载荷-位移曲线变得平坦,螺钉发生剪切破坏,舵轴断裂。而以上情况并没有发生在 2D-C/SiC 复合材料舵片结构上,其载荷-位移曲线光滑,没有突变点,表明该材料舵片的舵轴和螺钉协同承载,同时发生破坏,因此承载能力更高。

## 4 结论

通过对 2D-C/SiC 和 3D-C/SiC 两种复合材料的基础力学性能及弯扭组合加载的测试与分析,研究了不同纤维预制体构型对 C/SiC 复合材料舵片组合结构承载性能的影响机理,得出如下结论。

(1) 3D-C/SiC 和 2D-C/SiC 的抗弯性能主要由纤维控制,同时,受层间性能影响较大。与纤维波动弯曲且纤维体积含量低 5% 的 2D-C/SiC 复合材料相比,3D-C/SiC 复合材料中的纤维平直,层间强度和拉伸强度均较高,因此其弯曲强度也较高。但在结构测试中,舵轴的破坏模式不是拉伸断裂,而是剪切型破坏。复合材料的剪切破坏通常由基体控制,因此,具有较高拉伸和弯曲强度的 3D-C/SiC 舵轴,其弯扭组合承载能力不一定就高。

(2) 与 2D-C/SiC 复合材料相比,3D-C/SiC 复合材料的密度小、孔隙率高、模量和硬度低,当其与金属部件配合接触承力时,容易产生局部挤压损伤,进而影响整体结构的承载性能。

(3) 3D-C/SiC 复合材料的弯曲刚度和扭转刚度远低于 2D-C/SiC 复合材料,因此在与螺钉共同承载时,该复合材料舵轴承担的载荷比例要低于 2D-C/SiC 复合材料舵轴,螺钉因承担了相对更高的载荷而提前发生屈服破坏,其舵片的承载能力也低于 2D-C/SiC 复合材料舵片结构。因此,在探究复杂组合承载结构的失效机制时,需要从结构整体受力特征、材料强韧性以及各组件的刚度匹配性等方面进行综合分析。

## 参考文献

- [1] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2003, 46(1): 24-32.  
ZHANG Litong, CHENG Laifei, XU Yongdong. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, 46(1): 24-32.
- [2] 陆有军, 王燕民, 吴澜尔. 碳/碳化硅陶瓷基复合材料的研究及应用进展[J]. 材料导报, 2010, 24(21): 14-19.  
LU Youjun, WANG Yanmin, WU Laner. Development and application of carbon/silicon carbide ceramic matrix composite[J]. Materials Review, 2010, 24(21): 14-19.
- [3] DONG S M, WANG Z, ZHOU H J, et al. Research progress in

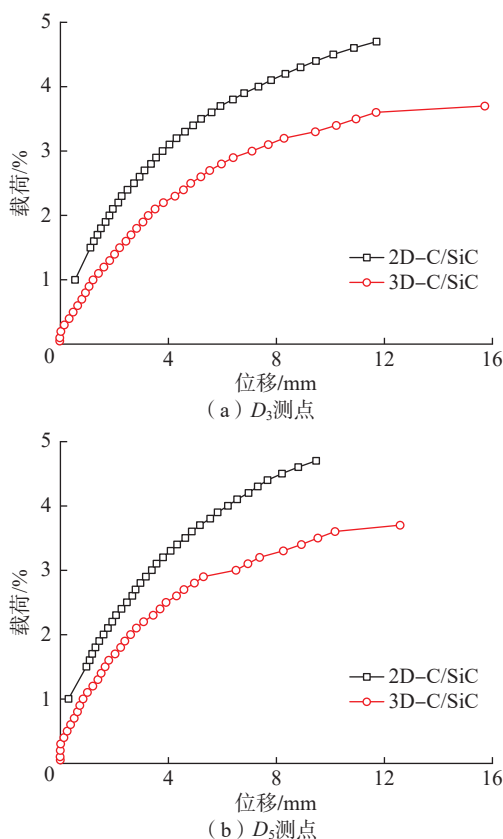


图 12 舵片既定测点的载荷-位移曲线  
Fig.12 Load-displacement curves of selected points on fins

SiC-based ceramic matrix composites[J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2012, 49(4): 295–300.

[4] 李玉龙, 洪智亮. 国外航空发动机火焰筒材料工艺现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 87–94.

LI Yulong, HONG Zhiliang. Current situation and prospect on material and manufacture process of foreign aero-engine combustion liner[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 87–94.

[5] NICOLOSI F, DELLA VECCHIA P, CILIBERTI D. Aerodynamic interference issues in aircraft directional control[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28(1): 4014048.

[6] 王玲玲, 嵇阿琳, 黄寒星, 等. 三维针刺C/C–SiC复合材料的烧蚀性能[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(4): 532–535, 540.

WANG Lingling, JI Alin, HUANG Hanxing, et al. Ablation properties of three dimensional needled C/C–SiC composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(4): 532–535, 540.

[7] 李艳, 崔红, 赵新来, 等. 不同预制体结构C/C复合材料的CVI致密化行为[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(7): 1031–1036.

LI Yan, CUI Hong, ZHAO Xinlai, et al. Densification behavior of C/C composites with different preforms by chemical vapor infiltration[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(7): 1031–1036.

[8] 蒋丽娟, 侯振华, 周寅智. 预制体结构及界面对三维SiC/SiC复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(3): 642–649.

JIANG Lijuan, HOU Zhenhua, ZHOU Yinzhi. Effects of preform structure and interface types on tensile properties of 3D–SiC/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(3): 642–649.

[9] 谭僊, 刘伟, 曹腊梅, 等. 不同纤维预制体结构对SiC<sub>z</sub>/PyC/SiBCN复合材料力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(4): 45–51.

TAN Xi, LIU Wei, CAO Lamei, et al. Effect of fabric preform structure on mechanical properties of SiC<sub>z</sub>/PyC/SiBCN composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(4): 45–51.

[10] 庞生洋, 胡成龙, 杨鸢, 等. 预制体结构对C/C复合材料力学性能、断裂行为以及热物性能的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 97–107.

PANG Shengyang, HU Chenglong, YANG Zhi, et al. Effects of preform structures on the mechanical properties, fracture behaviors and thermophysical properties of C/C composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 97–107.

[11] MEI H, CHENG L F. Comparison of the mechanical hysteresis of carbon/ceramic-matrix composites with different fiber preforms[J]. Carbon, 2009, 47(4): 1034–1042.

[12] LI L B. Cyclic fatigue behavior of carbon fiber-reinforced ceramic-matrix composites at room and elevated temperatures with different fiber preforms[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 368–378.

[13] LI G D, LI Y, YU G Q, et al. Effects of fiber preform structures on the mechanical properties of C/SiC nuts and bolts[J]. Ceramics International, 2016, 42(11): 12901–12906.

[14] 王刚, 矫桂琼, 李俊. 三向正交C/C复合材料弹性性能预测与分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(12): 1807–1811.

WANG Gang, JIAO Guiqiong, LI Jun. The prediction and analysis of elastic properties for the 3D orthogonal C/C composite[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(12): 1807–1811.

[15] 邓奇林, 杨敏, 姚寅敏, 等. 三向正交预制体织造参数对C/C复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2022, 50(5): 139–146.

DENG Qilin, YANG Min, YAO Yumin, et al. Effect of three-directional orthogonal preform weaving parameters on properties of C/C composites[J].

Journal of Materials Engineering, 2022, 50(5): 139–146.

[16] KUMAR S, KUMAR A, DEVI G R, et al. Preparation of 3D orthogonal woven C–SiC composite and its characterization for thermo-mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(19–20): 6210–6216.

[17] 刘宇峰, 李同起, 冯志海, 等. 薄层化碳布缝合碳/碳复合材料制备与性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1210–1222.

LIU Yufeng, LI Tongqi, FENG Zhihai, et al. Preparation and properties of spreading carbon cloth stitched C/C composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(4): 1210–1222.

[18] HE Z B, ZHANG L T, CHEN B, et al. Static response and failure behavior of 2D C/SiC cantilever channel beam[J]. Applied Composite Materials, 2015, 22(5): 525–541.

[19] 杨成鹏, 李俊, 何宗倍, 等. 2D–C/SiC槽型梁承载性能试验研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 14–21.

YANG Chengpeng, LI Jun, HE Zongbei, et al. Experimental study on load-bearing property of 2D–C/SiC U-beams[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(15): 14–21.

[20] 高魁垠, 李海波, 吴建国, 等. 2D–C/SiC复合材料螺栓连接结构可靠性分析[J]. 强度与环境, 2020, 47(1): 33–40.

GAO Kuiyin, LI Haibo, WU Jianguo, et al. Reliability analysis of 2D–C/SiC composite bolted joints[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(1): 33–40.

[21] 张利鹏, 侯保江, 辛克浩, 等. 大尺寸整体C/SiC复合材料蒙皮骨架松动问题分析[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 154–158.

ZHANG Lipeng, HOU Baojiang, XIN Kehao, et al. Analysis on the looseness of the skin and skeleton of large-scale integral carbon/silicon carbide composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(4): 154–158.

[22] 崔世程, 宋志清, 杨居奎. C/SiC在大口径空间望远镜次镜承力筒的应用[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 360–365.

CUI Shicheng, SONG Zhiqing, YANG Jukui. Application of C/SiC to secondary mirror bearing cylinder in large aperture space telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 360–365.

[23] 刘时剑, 邱海鹏, 刘善华, 等. SiC缝合纤维的引入方式对2D SiC/SiC复合材料性能的影响[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(5): 801–806.

LIU Shijian, QIU Haipeng, LIU Shanhua, et al. Effect of the way to introduce SiC sewing fibers on mechanical properties of 2D SiC/SiC composites[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(5): 801–806.

[24] XIE J B, FANG G D, CHEN Z, et al. An anisotropic elastoplastic damage constitutive model for 3D needled C/C–SiC composites[J]. Composite Structures, 2017, 176: 164–177.

[25] CHEN X M, CHEN L, ZHANG C Y, et al. Three-dimensional needle-punching for composites—A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 85: 12–30.

[26] 郭友军, 聂景江, 徐永东, 等. 三维针刺C/SiC复合材料的结构特征和力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(2): 144–149.

GUO Youjun, NIE Jingjiang, XU Yongdong, et al. Microstructure and mechanical properties of three-dimensional needled C/SiC composite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(2): 144–149.

通信作者: 杨成鹏, 副教授, 博士生导师, 研究方向为先进复合材料及其结构的力学行为。

(责编 晓月)