

# 预氧丝网胎体积分数对针刺 C/C 复合材料力学性能的影响

高晶 房学良 许正辉 王俊山 赵高文  
(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

**文 摘** 以预氧丝网胎体积分数为 35%、40% 和 45% 针刺织物为坯体,经数次沥青浸渍/炭化、高温石墨化处理后制备 C/C 复合材料,测定并分析这三种材料的拉伸、压缩、弯曲和剪切强度;采用扫描电子显微镜对其断口形貌进行观察,研究预氧丝网胎体积分数对 C/C 复合材料力学性能的影响。结果表明:材料的  $z$  向力学性能(除了压缩强度)随着预氧丝网胎体积分数的增加呈单调递增关系,材料的  $xy$  向力学性能受预氧丝网胎体积分数影响较小。扫描电镜观察显示:材料  $z$  向强度主要与针刺形成的轴向纤维束多少、分布等有关。

**关键词** 针刺, C/C 复合材料, 预氧丝网胎体积分数, 力学性能

## Effect of Volume Fraction of Preoxidized Fiber Web on Mechanical Performance of C/C Composites Reinforced by Needle-Punched Fabric

Gao Jing Fang Xueliang Xu Zhenghui Wang Junshan Zhao Gaowen  
(National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials Technology, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Carbon/carbon composites were prepared by densifying through pregation-carbonization and graphitization technology. The effect of volume fraction of pre-oxidized fiber web on the mechanical performance of carbon/carbon composites was studied by means of measuring the tensile strength, compression strength, flexural strength, shear strength, and fracture morphology of sample was observed by using scanning electron microscope. The results show that the mechanical performance in  $z$  direction (except compression strength) is increasing monotonously with increase of volume fraction of pre-oxidized fiber web, and the mechanical performance in  $xy$ -direction is little influenced by volume fraction of pre-oxidized fiber web. It is also found that the mechanical performance in  $z$  direction is closely related to the amount and distribution of the fiber in  $z$  direction.

**Key words** Needle puncture, C/C composites, Volume fraction of pre-oxidized fiber web, Mechanical performance

### 1 引言

C/C 复合材料以其优异的高温力学性能、高温耐摩擦、耐烧蚀及密度低等优点,广泛应用于航天领域<sup>[1]</sup>。目前 C/C 复合材料主要以碳纤维编织体为骨架,采用不同的致密化工艺使材料增密,最终满足不同环境的使用要求。但这种方法获得的 C/C 复合材料价格昂贵,对大多数民用领域来说仍然是一种奢侈品。近些年来,以整体毡、预氧丝等成本较低的原材料作为 C/C 复合材料增强体的研究较多<sup>[2-4]</sup>,取得了一些研究成果。

目前针刺 C/C 复合材料存在层间方向( $z$  向)力学性能较低的问题,而材料  $z$  向力学性能的增强主要是通过针刺预氧丝留下的  $z$  向纤维来实现的。实际上影响针刺 C/C 复合材料的力学性能因素较多,诸如:针刺密度、针刺深度、复合工艺等。目前,研究不同纤维体积分数对 C/C 复合材料力学性能影响的报道很少。为此,本文研究在其他影响因素一致的情况下,考察不同预氧丝网胎和单向无纬布的不同纤维体积分数对最终材料力学性能的影响规律。

### 2 实验

## 2.1 原材料

炭布为日本东丽进口 12K-PAN 碳纤维 (T300) 单向无纬布,网胎为日本东丽进口 12K-PAN 预氧纤维编织而成。

## 2.2 针刺织物及 C/C 复合材料制备

将炭布、网胎以  $0^\circ/90^\circ$  铺设叠层,  $z$  向逐层针刺,依

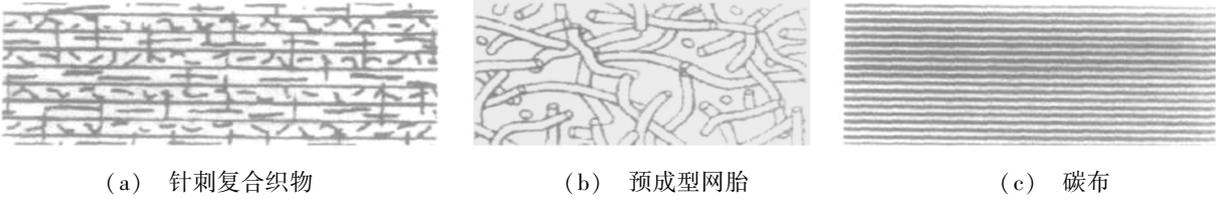


图 1 针刺复合织物结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of needle-punched composite fabric

表 1 三类织物的炭布、网胎体积分数配比表

Tab. 1 Volume fraction of carbon-cloth and fiber web for three kinds of fabric

织物	碳布体积 分数/%	网胎体积 分数/%	预制体体积 密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
A	65	35	0.62
B	60	40	0.63
C	55	45	0.66

上述三种织物以沥青为碳源,经低压复合、高压复合、高温石墨化等多道工序,最终制成密度约 1.98

靠倒向钩刺把网胎中的部分水平纤维携带到  $z$  向,产生垂直于碳布方向 ( $xy$  向) 的纤维簇,使炭布、网胎相互缠结,相互约束,形成准三维网状结构增强预制体,复合织物结构示意图<sup>[5]</sup>如图 1 所示。分别编织了三种不同预氧丝网胎体积分数的织物,编号分别为 A、B、C。这三种织物的碳布、网胎的体积分数配比情况见表 1。

$\text{g}/\text{cm}^3$  的 C/C 复合材料。

## 2.3 力学性能测试与微观结构分析

分别按 QJ2305—92、JB/T8133. 8—1999、QJ2099—91、QJ2691—94 测定材料的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度、剪切强度;采用 S—250 型扫描电镜对三类 C/C 复合材料拉伸断口进行了观察分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 材料力学性能

试样 A、B、C 的力学性能比较见图 2。

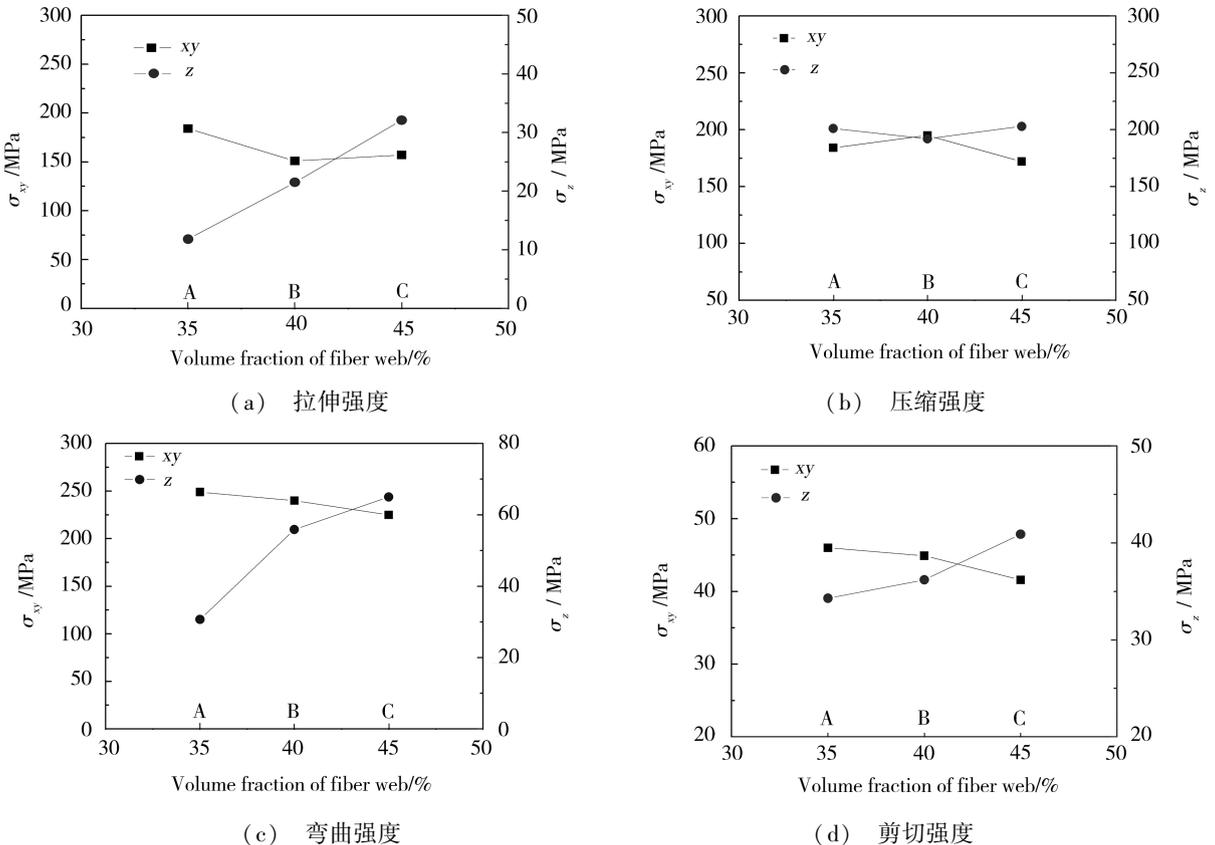


图 2 力学性能与网胎体积分数的关系曲线

Fig. 2 Curves of mechanical performance vs volume fraction of fiber web

从图 2(a) 可以看出:试样  $z$  向的拉伸强度随预氧丝网胎体积分数的增加而显著增加,预制体中预氧丝网胎的体积分数每增加 5%,试样的  $z$  向拉伸强度值依次增加 82.2%、49.3%。

试样 A、B、C 的  $xy$  向拉伸强度值均大于 150 MPa, $xy$  向拉伸强度随预氧丝网胎体积分数的增加、碳布体积分数的减少而有所损失,对于针刺结构的 C/C 复合材料,平面内碳布结构以及针刺过程将主要对材料的平面内力学性能产生影响,因为刺针钩齿在抓取、携带平面纤维的过程中存在对碳布纤维的损伤<sup>[6]</sup>。由图 2(a) 看出:可以通过提高织物预制体中预氧丝网胎的体积分数来提高试样的  $z$  向拉伸强度,而试样的  $xy$  向拉伸强度会有所下降,但综合分析,材料的拉伸性能有所提高。

从图 2(b) 可以看出:试样 A、B、C 的  $z$  向压缩强度均在 200 MPa 左右,三种试样的  $xy$  向压缩强度均在 180 MPa 左右,说明针刺 C/C 复合材料的压缩性能受预制体中预氧丝网胎的体积分数的影响不大,研

究发现:C/C 复合材料的压缩性能受密度影响较大<sup>[7]</sup>。

从图 2(c) 可以看出:试样  $z$  向的弯曲强度随预氧丝网胎的体积分数增加而显著增加, $xy$  向弯曲强度随预氧丝网胎的体积分数增加而缓慢降低。预制体中预氧丝网胎体积分数每增加 5%,试样的  $z$  向弯曲强度值依次增加 82.1%、16.3%,增长幅度较大。 $xy$  向弯曲强度值依次下降 3.6%、6.3%,下降幅度很小,三种材料的  $xy$  向弯曲强度均在 220 MPa 以上。这也说明通过调节织物预制体中预氧丝网胎体积分数可以显著提高试样的  $z$  向弯曲强度。

在图 2(d) 中:试样的剪切强度与预氧丝网胎的体积分数的关系和试样的弯曲强度与预氧丝网胎的体积分数的关系表现一致。同样说明通过调节织物预制体中预氧丝网胎的体积分数可以提高试样的  $z$  向剪切强度。

### 3.2 微观结构分析

图 3 为试样的  $z$  向拉伸断口的 SEM 低倍照片。

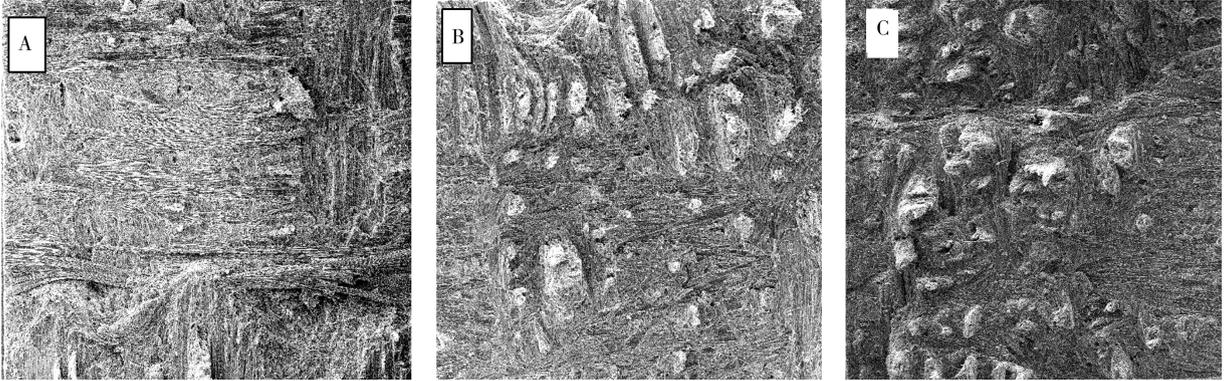


图 3  $z$  向拉伸试样的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology of sample in axial direction 15 $\times$

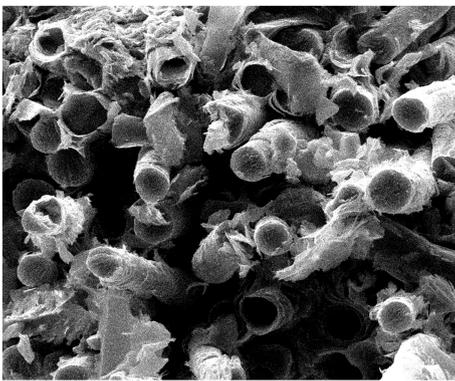


图 4  $z$  向拉伸试样的断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of sample in axial direction 1 000 $\times$

由图 3 可见:针刺作用引入的  $z$  向纤维并不是单根的独立纤维束,而是由于针刺倒钩的带动作用,由平面纤维沿  $z$  向转移形成的垂直或一定角度的纤维簇。且试样的断口比较平,断口基本在同一层面,且从图 3 可以明显看出:试样 A、B、C 的  $z$  向断裂丝束依次增加,而试样的  $z$  向力学性能主要依赖于  $z$  向丝

束的多少及分布。这也从微观结构上验证了三种试样的  $z$  向力学性能随着预氧丝网胎体积分数增加而依次增加的现象。

通过高倍放大可以观察到  $z$  向纤维束,如图 4 所示,存在部分单丝被拔出,留下基体炭的鞘壳,大部分单丝均已断裂,说明  $z$  向纤维的增强作用得到很大发挥。

### 4 结论

(1) 针刺材料  $z$  向拉伸强度随着预氧丝网胎体积分数的增加而增加,预制体中预氧丝网胎的体积分数从 35% 增加至 40%、45%,每增加 5%,试样的  $z$  向拉伸强度值依次增加 82.2%、49.3%。而试样的  $xy$  向拉伸强度会有所下降,但综合分析,针刺材料的拉伸性能有所提高。

(2) 针刺 C/C 复合材料的压缩性能受预制体中预氧丝网胎的体积分数的影响不大。

(下转第 64 页)