

# SiCF-CF、BF-CF 混杂复合材料的弯曲、压缩性能探索研究

肇 研 史卫华 张佐光

(北京航空航天大学 104 教研室 100083)

**摘要** 本文对碳化硅-碳(SiCF-CF)/环氧和硼-碳(BF-CF)/环氧两种不等径纤维混杂复合材料进行了初步研究,首先分析了材料制备压力对混杂纤维排布和纤维体积含量的影响,在此基础上,采用小型单向复合材料试样,进一步研究了材料压缩和弯曲性能中的混杂效应表现以及组分纤维对材料压缩和弯曲性能的贡献。

**关键词** 混杂纤维复合材料, 混杂效应, 力学性能

**中图分类号** V 258.3, V 258.5

一般混杂纤维增强复合材料还仅限于直径相差不大的纤维。而近年来,一些国家开始研制不同直径纤维混杂,作为复合材料的增强纤维。美国 Textron 特种材料公司两年前开始研究由大直径的硼纤维与小直径的碳纤维混杂的复合材料,称为 Hy-Bor。该公司声称这种材料优于所有的人工材料,可作为下一代复合材料。Hy-Bor 的性能值见表 1。

表 1 Hy-Bor 的力学性能值

Table 1 The mechanical properties of hybrid fibers (carbon and boron fiber)

硼纤维直径 / $\mu\text{m}$	102	102	76	102	76
石墨纤维类型	IM-7	T-300	T-300	T-650	T-650
树脂体系	3501-6	SG100	SG100	SG100	SG100
拉伸强度 / MPa	2207	1793	2275	2000	2414
拉伸模量 / GPa	269	234	228	255	248
弯曲强度 / MPa	2966	2414	2828	2690	3103
弯曲模量 / GPa	255	228	221	248	241
压缩强度 / MPa *	3448	3034	3793	3241	4138
压缩模量 / GPa *	269	234	228	255	248
LSS / MPa	117	94	95	94	93
纤维体积含量 / % **	77	77	73	75	72

\* 压缩性能为估算值, \*\* 试样制作过程中无流胶现象

Bell Helicopter 公司正在试验用这种材料作为旋翼飞机机身的加强杆。此外, Boeing 和 Mc Douglas 国际财团的高速民用运输机也正在考虑采用这种材料, 美国的有关隐身战斗机也

收修改稿 初稿日期: 1997-07-18

对这种材料抱有极大兴趣。目前国内尚未开展这方面的研究。

所谓不等径纤维复合材料(简称 Hy-ddf)是指较小直径(通常是几微米或十几微米)纤维与较大直径(通常几十微米或上百微米)纤维进行混杂而构成的复合材料。这种新型的复合材料与一般的混杂纤维复合材料相比,不仅具有一般混杂复合材料的特点,而更重要的是它有几个其它复合材料所不可比拟的特点。

(1) 纤维体积含量非常高,可达 70~80%。目前实际应用的复合材料及一般混杂纤维复合材料的纤维体积含量多为 60% 左右,难以高于 70%。这种高纤维体积含量,对于主要依赖于纤维承力的复合材料来说,无疑会大大改善材料的力学性能。

(2) 突出的抗压、弯性能。不等径纤维混杂大大增加了混杂界面面积,由于裂纹穿过混杂界面时会形成界面开裂,形成粗糙的韧性断口,因而可同时提高材料的强度和韧性。同时,大直径纤维与小直径纤维之间靠界面结合,使材料成为一个稳定的整体,当受压、弯载荷时,支撑力强,不易塌落,而一般的复合材料,由于纤维间直径差别不大,因而纤维与纤维之间基体含量相对较大,当受压缩应力作用时容易失稳破坏。

(3) 优良的电磁波特性。复合材料的电磁波性能一方面取决于纤维和基体本身对电磁波的贡献,另一方面取决于纤维在基体中的排布方式。因此,除选用合适的纤维与基体材料外,纤维直径的不同,可以有效地降低雷达散射截面。

综上所述,不等径纤维混杂复合材料特别适用于梁、杆等承力构件,可用于制造飞机、宇宙飞船和潜水艇等高强、轻质主要承力构件。此外,不等径纤维复合材料还是吸波-结构承力于一体的理想材料。

我们对于不等径纤维混杂复合材料的研究,增强纤维以 SiCF 和 BF 为大直径纤维,CF 为小直径纤维,基体采用环氧树脂体系,采用非标小型试样,研究材料的压缩和弯曲性能。

## 1 实验

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 增强纤维

本实验所采用的三种纤维的基本性能见表 2。

其中 SiCF 是由石家庄新谋公司提供的碳化硅-钨芯载体纤维,其中钨芯直径为 10 $\mu\text{m}$ ,表面碳层是 1 $\mu\text{m}$  厚,其余均为 SiC。BF 采用美国 Textron 特种材料公司生产的硼-钨芯载体纤维,其中钨芯直径为 12.5 $\mu\text{m}$ 。碳纤维采用日本东丽公司生产的 T300-3000-40B。

#### 1.1.2 树脂基体

实验中采用环氧树脂体系。

### 1.2 SiCF 和 BF 的表面处理

用铬-硫酸化学腐蚀法对 SiCF 进行表面处理。处理条件是 60~70 下处理 60 分钟,然后用蒸馏水清洗纤维表面,80 下烘干。

将 BF 放入甲醇中 100 处理 30 分钟,然后将处理好的 BF 在 80 下烘干。

### 1.3 试样制备

单向硼纤维增强复合材料(BFRP)和单向碳化硅纤维增强复合材料(SICFRP)是由九层纤

表 2 纤维的基本性能

纤维	Table 2 Typical data of fibers used as reinforcements		
	碳纤维 T300-3000-40B	碳化硅纤维 (SiCF)	硼纤维 (BF)
直径/ $\mu\text{m}$	7	109	102
密度/ $10^3\text{kg/m}^3$	1.7	3.4	2.57
拉伸强度/MPa	2950	3200	2812
拉伸模量/GPa	230	-	380
断裂伸长率/%	1.3	0.2	0.7
产地	日本东丽	石家庄	美国

维/树脂铺层叠合热压而成。单向混杂复合材料是由四层BF(SiCF)/环氧树脂铺层与五层CF/环氧树脂铺层交替叠合热压而成。其铺层顺序见图1。

### 1.4 性能测试

1.4.1 采用扫描电子显微镜(JSM 5800 和 580)观察材料中纤维和基体的分布的微观形貌。

### 1.4.2 小型复合材料试样的性能测试

小型复合材料试样压缩和弯曲性能实验在MTS880材料试验机上进行。复合材料的测试采用非标试样的对比试验。压缩试样名义尺寸为 $62 \times 6 \times 1.30\text{mm}^3$ , 工作段长度为8mm。试样被放置在专门的楔型压缩夹具内, 试样两端贴有加强片, 以保证均匀传递载荷。压缩速度为 $2\text{mm}/\text{m in}$ 。弯曲试验采用三点弯曲法, 试样名义尺寸为 $62 \times 6 \times 1.30\text{mm}^3$ , 跨厚比为32:1。加载速度为 $5\text{mm}/\text{m in}$ 。测试温度为20 $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 制备压力对混杂纤维排布和纤维体积含量的影响

根据一般复合材料的制备压力, 由实验确定出两个极限压力值(0.2~0.45MPa)。当制备压力低于下限值时, 混杂试样中出现明显的分层结构。试验讨论三个压力点(0.2MPa, 0.3MPa 和 0.42MPa)下, 混杂纤维排布及纤维含量的变化趋势。

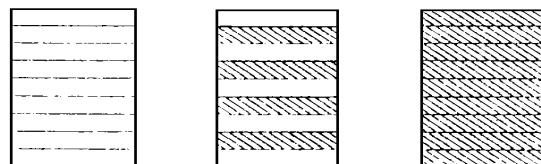


图1 单向复合材料的铺层示意图  
(Laying schematic diagram of unidirectional composite)

图2 三角形与四边形排布的SEM照片(制备压力为0.3MPa)制备压力/MPa

Fig. 2 SEM pictures of triangle and quadrilateral forms (manufacturing pressure: 0.3MPa)

混杂复合材料中纤维排布主要呈三角形和四边形排布, 如图2所示。混杂复合材料中纤维排布与制备压力的关系统计图见图3。由图中可以看到, 在制备压力范围内, 随压力值的增大, 纤维排列趋于有序和紧密, 三角形排布和四边形排布的数量增大, 但四边形排布较三角形排布的上升速度缓慢, 当达到某一压力值时, 四边形排布的数量分布略有下降。这是因为制备压力较小时, 纤维排列主要呈三角形排布, 四边形排布以及少量疏松结构, 当压力值增至某一临界点时, 材料结构中的松散区域几乎减少为零, 压力值再增加, 超过某一临界点后, 四边形排布向更为紧密且稳定的三角形排布转化。

由混杂纤维排布和纤维体积含量的分析可以推出, 在所讨论的压力范围内, 随着压力的增

大, 混杂体系的纤维含量具有上升的趋势。

## 2.2 压缩性能

本试验所制备的小型 CFRP, BFRP、SiCFRP 及其层间混杂复合材料的压缩性能值见表 3。

可以看出, CFRP 的压缩强度较低, 为 BFRP 的 80%, 与 BF 混杂后, 混杂复合材料的压缩强度比 CFRP 提高了 33%, 同时比 BFRP 提高了 10%, 图 4 所示是小型 BF-CF 混杂复合材料压缩强度中混杂效应的表现。由于一般复合材料的纤维含量均在 60% 左右, 所以基体的微屈服、屈曲以及部分脱粘将先于纤维的微屈曲, 而对于 BF-CF 不等径纤维混杂复合材料, 由于小直径 CF 填塞于大直径 BF 的间隙中, 构成三角形和四边形混合阵列, 因此大大提高了其纤维含量(在 76% 以上), 增加了混杂界面面积, 同时减少了纤维屈曲及基体剪切屈曲等发生的几率。另外, BFRP 与 CFRP 的模量及强度基本匹配, 在混杂材料中, 两种纤维能较好地协调作用, 共同承载, 产生协同效应。因此, BF-CF 混杂复合材料的压缩强度优于 BFRP 和 CFRP, 存在正的混杂效应。

表 3 小型复合材料试样的压缩强度测量数据

Table 3 Measured value of little composite samples on compression strength

试样类型	CFRP	BFRP	SiCFRP	BF-CFRP	SiCF-CFRP
压缩强度 / MPa	557	680	991	742	806
纤维体积含量 / %	53	50	51	76.5 (CF: 40.5)	77.0 (CF: 40.8)

从表 3 中可以看出, SiCFRP 的压缩强度远远高于 CFRP, 大约是 CFRP 的 2 倍。与 CF 混杂后, 复合材料的压缩强度比 SiCFRP 降低了 20%, 比 CFRP 的提高了 50%。

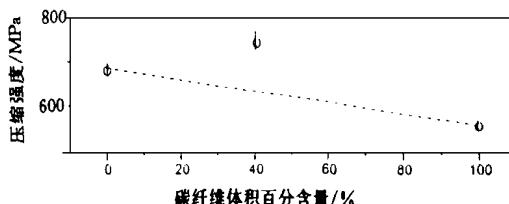


图 4 小型 BF-CF/环氧树脂复合材料的压缩强度混杂效应的程度表现

Fig. 4 Hybrid effect of BF-CF/epoxy composite on compression strength

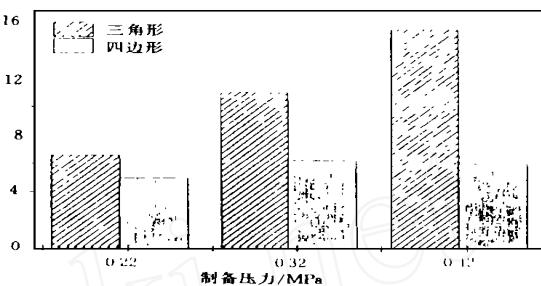


图 3 SiCF-CF 混杂复合材料中的三角形和四边形混杂纤维布排布与制备压力的关系

Fig. 3 Relations between distribution forms and manufacturing pressure

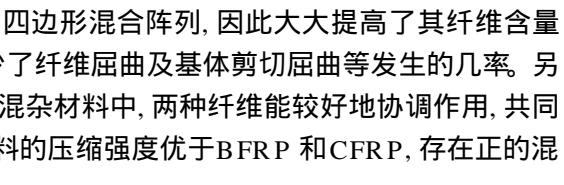


图 5 小型 SiCF-CF/环氧树脂复合材料的压缩强度中混杂效应的程度表现

Fig. 5 Hybrid effect of SiCF-CF/epoxy composite on compression strength

图 5 所示是小型 SiCF-CF 混杂复合材料压缩强度中混杂效应的表现。由图 5 可以看出, SiCF-CF 混杂体系的压缩强度符合混合定律。这主要是因为虽然 CF 的加入能够提高纤维含

量, 增加混杂界面数等, 对混杂复合材料的压缩强度有一定增强作用。但是, SiCF 和 CF 的强度和模量差异较大, 材料承载时, 载荷按模量分配, 因此 SiCF 所承受的载荷要比 CF 大得多, 在压缩破坏中起主要作用。在材料铺层相同的情况下, SiCF-CF 混杂体系的主承力单元数较少 SiCFRP 相对减少, 同时大的模量差异使得两种纤维在外加载荷作用下难以协同, 界面处剪应力作用显著, 这种削弱作用占据主导地位, 使得混杂体系的压缩强度低于 SiCFRP。

因为复合材料的压缩强度受混杂比、界面性能、铺层和试样尺寸等多种因素影响, 所以分析方法及其破坏机理都比较复杂, 还有待于进一步研究。

### 2.3 弯曲性能

#### 2.3.1 BFRP, CFRP 及其层间混杂复合材料的弯曲性能

三种小型复合材料试样的弯曲性能列于表 4。由表中可以看出, CFRP 的弯曲强度和模量相对较低(这与所选基体略有关系), 与 BF 混杂后, 材料的弯曲强度提高了 60%, 模量提高了 40%。

表 4 小型复合材料试样的弯曲性能测量数据

Table 4 Measured value of little composite samples on bending strength

图 6 所示为 BF-CF 混杂复合材料的弯曲强度中混杂效应的表现。可以看出, 该体系的弯曲强度偏离了混合定律估算值, 存在正的混杂效应。出现这种效应的原因可能是小直径 CF 混杂于大直径 BF 的间隙中, 增大了混杂界面面积, 由于裂纹在扩展过程中能量流散, 减缓

了裂纹的扩展速度, 再有能量消耗于界面的脱粘, 从而分散了裂纹峰上的能量集中, 提高了材料强度, 同时 BFRP 和 CFRP 的强度差别不悬殊, 两种纤维产生协同效应, 使材料能够表现出比两种单一纤维增强复合材料还要好的弯曲强度, 表现出正的混杂效应。

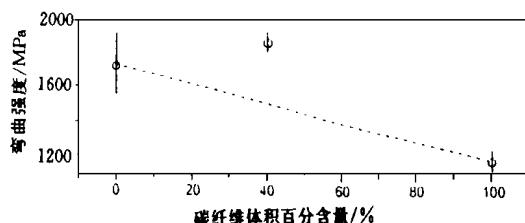


图 6 小型 BF-CF/环氧树脂复合材料的弯曲强度  
混杂效应的程度表现

Fig. 6 Hybrid effect of BF-CF/epoxy composite on bending strength

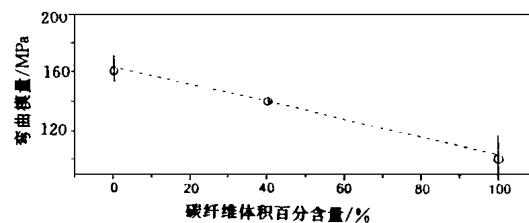


图 7 小型 BF-CF/环氧树脂复合材料的弯曲模量  
混杂效应的程度表现

Fig. 7 Hybrid effect of BF-CF/epoxy composite on bending modulus

图 7 给出 BF-CF 混杂复合材料的弯曲模量混杂效应的表现, 可以看出, 其弯曲模量服从混合定律。这是因为弯曲模量是从载荷—位移曲线的弹性段得到的, 在此阶段, 材料并未发生破坏, 弯曲模量值是其各组分模量值的线性加合。

#### 2.3.2 SiCFRP 与 CFRP 及其层间混杂复合材料的弯曲性能

小型试样弯曲性能值列于表 4。由表 4 可以看出, CF 和 SiCF 混杂后, 混杂复合材料的弯曲强度和模量均比 CFRP 提高了 60%, 介于 SiCFRP 和 CFRP 的强度和模量之间。

由图 8 可以看出, 该体系未表现出明显的正混杂效应, 这可能还是因为组成混杂复合材料的两种纤维模量差别大, 匹配不好。当材料的应变量超过 SiCF 的断裂应变时, 拉伸侧的 SiCF

首先达到它的断裂伸长并开始断裂。对于混杂复合材料, 则发生第一次断裂, 且由 CF 承受 SiCF 断裂后的大载荷。CF 的强度远不如 SiCF, 所以混杂复合材料的弯曲强度低于 SiCFRP, 而高于 CFRP。当然 SiCF 与 CF 混杂, 混杂界面及混杂阵列的增加均对材料的强度有一定提高, 但这种作用远不如由于模量和强度差异而产生的负效应。

从图 9 可以看出, 其弯曲模量服从混合定律。

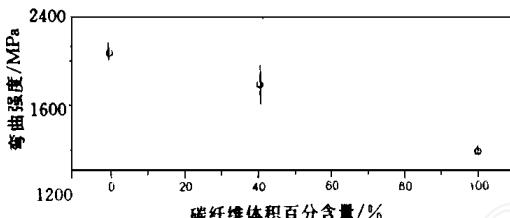


图 8 小型 SiCF-CF/环氧树脂复合材料的弯曲强度  
混杂效应的程度表现

Fig. 8 Hybrid effect of SiCF-CF/epoxy composite  
on bending strength

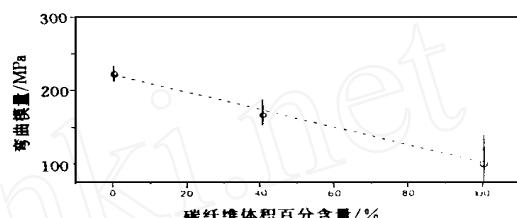


图 9 小型 SiCF-CF/环氧树脂复合材料的弯曲模量  
混杂效应的程度表现

Fig. 9 Hybrid effect of SiCF-CF/epoxy composite  
on bending modulus

### 3 结 论

- (1) 不等径纤维混杂复合材料的纤维体积含量可达 76% 以上, 而单一纤维增强和一般混杂纤维增强复合材料的纤维体积含量多为 60% 左右, 难以高于 70%。
- (2) SiCF-CF 混杂复合材料的压缩和弯曲强度介于 SiCFRP 和 CFRP 之间, 未表现出明显的正混杂效应, 其弯曲模量符合混合定律。
- (3) BF-CF 混杂复合材料的压缩和弯曲强度优于 BFRP 和 CFRP, 存在正的混杂效应, 其弯曲模量符合混合定律。
- (4) 随着制备压力的增加, 混杂体系的纤维排布趋向密集, 纤维含量具有上升的趋势。

### 参 考 文 献

- 1 Boron, Graphite join forces in one composite material Advanced Composites, 1993, 4: 45
- 2 张佐光, 史卫华 新一代混杂复合材料的原理研究 中国学术期刊文摘, 1996, (3): 36~ 37
- 3 张佐光 混杂复合材料的新发展 北航研究报告, 1994, 12

## RESEARCH OF COMPRESSION AND BENDING PROPERTIES OF HYBRID COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH SiCF-CF, BF-CF

Zhao Yan Shi Weihua Zhang Zuoguang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** Mainly explored were two kinds of hybrid composites with different diameter fibers — SiCF-CF/epoxy and BF-CF/epoxy composites. First, analysed was the influence that preparing pressure acted on range and volume content of hybrid fibers. Then, further studied were the hybrid effect of compression and bending properties by using unidirectional small-size composites and the contribution that fibers affected the compression and bending properties of materials.

**Key words** hybrid composite, hybrid effect, mechanical properties