第3卷 第4期 复合材料学报 Vol. 3 No. 4
1986年12月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA December 1986

碳纤维/玻璃纤维混织布及其环氧复合材料

沈碧霞 黄凤来*
(上海玻璃钢研究所)

摘 要

碳纤维和玻璃纤维混合增强树脂基复合材料目前都用单丝铺放工艺。为了改善单向预浸料的工艺性能，开发了碳纤维和玻璃纤维混织布。用它制备复合材料，操作方便，可用手糊或模压工艺。根据設計需要，可調整混織布的經緯比例和布的构造，以获最佳性能/价格比。

本文通过六种混織布/环氧复合材料的力学性能测定和估算，表明其拉伸和弯曲的強度和弹性模量符合"混合律"。在碳纤维占总纤维的体积分量为26%时出现最低的复合材料強度，而碳纤维的体积分量超过53%时才对复合材料的強度和弹性模量都有提高。

一、前 言

碳纤维和玻璃纤维混合增强树脂基复合材料是目前研究混合增强复合材料的重点[1,2]，虽有几种混杂方式，但都是单丝铺放工艺。为了扩大混杂复合材料的应用范围，除了考虑材料的特性外，工艺上的方便性也很重要。为此，我们开发了经线为碳纤维和玻璃纤维，纬线为少量玻璃纤维组成的单向布。由于单向混织布成型的方便性，又可不必做成预浸料，因此树脂选择范围较广。本文采用硅烷前处理的玻璃纤维和中强型碳纤维编织的混织布，配以液体环氧树脂，通过扫描电鏡对试样的剪切破坏断面分析，表明所选树脂对两种纤维都能较好粘结，通过混织布/环氧复合材料的拉伸、弯曲、层间剪切和冲击性能试验，初步探讨了碳纤维的体积含量对其环氧复合材料力学性能的影响。

---

* 参加工作的还有陈学雯同志

本文1986年7月14日收到

二、材　料

1. 基　体

采用液体环氧及混合型固化剂，其浇铸体性能见表1。

表1　环氧浇铸体性能

拉伸			压缩		弯曲		比重	HDT	其它
强度，公斤/厘米²	模量，10^4公斤/厘米²	最大应变值%	强度，公斤/厘米²	模量，10^4公斤/厘米²	强度，公斤/厘米²	模量，10^4公斤/厘米²		℃	收缩率%
670	3.0	3.7	1100	4.0	1340	2.9	1.25	130	3.0~3.5

2. 碳纤维

国产中强型。性能见表2。

表2　碳纤维性能

拉伸强度，公斤/毫米²	拉伸模量，吨/毫米²	单丝直径，微米	断裂伸长率，%	比重
210	20	7	1.0	1.75

3. 玻璃纤维

国产E玻璃纤维经KH-560前处理。性能见表3。

表3　玻璃纤维的性能

品种	断裂强度，公斤/毫米²	拉伸模量，吨/毫米²	单丝直径，微米	断裂伸长率，%	比重	其它
无碱纱40 1/1	130	7	8	2	2.54	无

4. 碳纤维 玻璃纤维混织布

由我所设计、上海碳素厂编织，规格见表4，其中Ⅲ号布，Ⅳ号布分别见图1、图2。

表4　碳纤维/玻纤璃维混织布规格

混织布编号			0	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
丝的品种	经纱	CF	1000f	3000f	1000f	3000f	1000f	3000f	1000f	--
		GF	—	$F61$*	$F62$	$F65$	$F65$	$F62$	$F62$	$F61$
	纬纱	GF	—	$F61$	$F61$	$F61$	$F61$	$F61$	$F61$	—
密度 根/25毫米	经纱	CF	120	40	60	15	20	35	50	—
		GF	—	20	30	30	40	70	50	
	纬纱	GF	—	10	10	20	20	10	10	—

续表 4

混 織 布 編 号		0	I	II	III	IV	V	VI	VII
碳纖維体积分数，V_c %		100	89	70	47	26	42	58	0
經向玻璃纖維体积分数，V_{gL}%		0	7	26	47	67	54	38	100
緯向玻璃纖維体积分数，V_{gT}%		0	4	4	6	7	4	4	0
織物尺寸	宽 厘米	自定	45	45	45	45	45	45	自定
	厚 毫米	0.17	0.37	0.19	0.23	0.25	0.20	0.20	0.22
复合材料的树脂体积含量，V_m %		60.0	58.6	64.5	66.2	66.5	68.3	63.5	45.0

* F61、F62、F64、F65分别表示 F-6 401/1、F-6 401/2、F-6 401/4、F-6 401/5

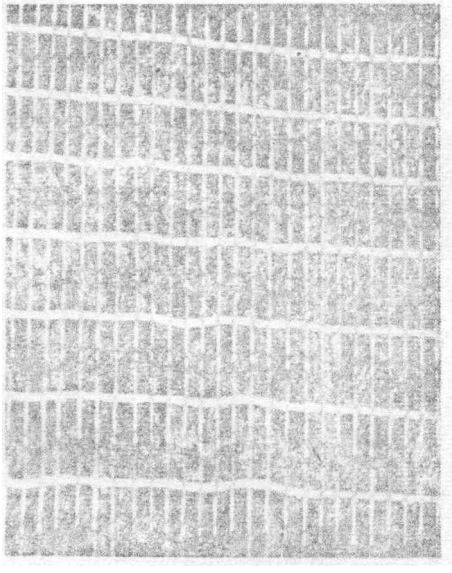


图 1 III号布

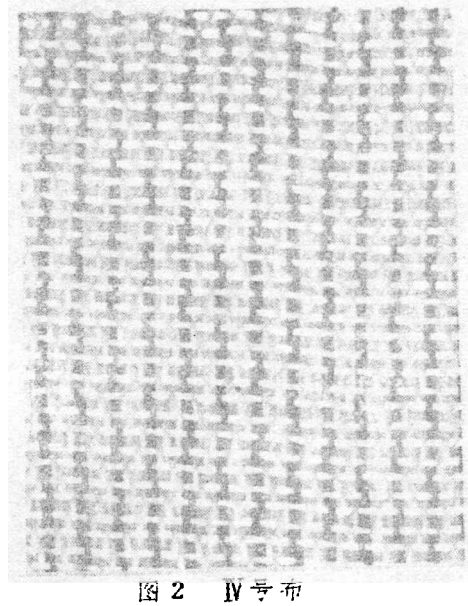


图 2 IV号布

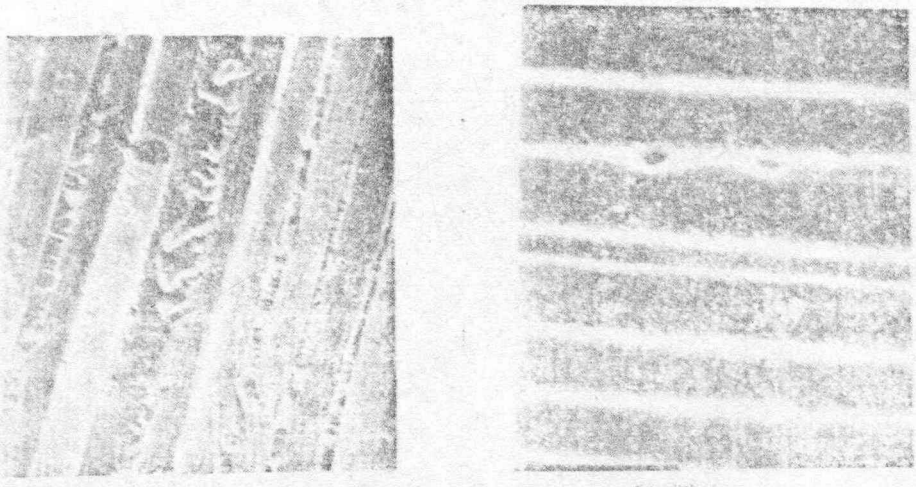
5. 复合材料的制备

将混织布在树脂溶液中浸渍，湿法鋪叠，真空袋压法加热固化。

三、試驗結果和討論

1. 混织布/环氧复合材料的试样剪切破坏断面的SEM图（图3-a、3-b）。

用扫描电鏡(SEM)研究了试样剪切破坏后的断面形态，集中在纵向碳纖維部位和横向玻璃纖維部位的測定。由图 3 可见，复合材料的破坏大都发生在基体树脂区域。由图3—a中可见，断裂后基体树脂仍然牢固地粘结在碳纖維表面上，粘结情况很好。由图3—b可见，断裂后基体树脂在玻璃纖維表面有较多的连接点，粘结情况属于良好。



a) 纵向　　b) 横向

图3　碳纤维/玻璃纤维混编布环氧复合材料剪切断面SEM图（×1000）

2. 拉伸性能

(1) 拉伸模量

复合材料的经向拉伸模量可用"混合律"估算，即

$$E=E_cV_c+E_gV_g+E_mV_m$$

由于树脂的拉伸模量远远低于碳纤维和玻璃纤维的模量，可以略去树脂的贡献，则

$$E=(E_cV_c+E_gV_g)(1-V_m)$$

这里的V_c和V_g是在纤维系统中碳纤维和玻璃纤维各自所占的百分率。

试验结果见图4，由图4可见试验结果和估算值基本吻合。

(2) 拉伸强度

该复合材料中，树脂的固化收缩率为3.0～3.5，残留的延伸率为3.74－1.0～1.4＝2.74～2.34，故拉伸破坏由碳纤维的断裂伸长控制，由碳纤维断裂引起的混杂复合材料的拉伸强度可以表达为：

$$\sigma=(1-V_m)(E_cV_c+E_gV_g)\varepsilon_c+E_mV_m\varepsilon_c$$

由于E_m值远远小于E_c及E_g可以略去树脂的贡献，则

$$\sigma=(1-V_m)(E_cV_c+E_gV_g)\varepsilon_c$$

观察第Ⅳ号织物，碳纤维含量仅占总的纤维含量的26%，玻璃纤维含量V_{gL}达67%，而实测复合材料延伸率已达2%，由表2知碳纤维的延伸率只有1%，这时碳纤维几乎已全部断裂，只有玻璃纤维在承受载荷，可以仅按玻璃纤维估算其极限强度

$$\sigma=0.335\times2\%\times67\%\times7\times10^5=3140(\text{公斤/厘米}^2)$$

这数值与测试值（3460公斤/厘米²）很接近。从这个事实中可见，碳纤维与玻璃纤维交织时应有一个最小碳纤维分量，小于此值时，对极限强度已无贡献，仅对弹性模量有所提高。求这最小碳纤维分量时，可令碳纤维断裂时的强度值等于玻璃纤维的极限强度值，按下式估算

$$(V_cE_c+V_gE_g)\varepsilon_c=V_gE_g\varepsilon_g$$

式中ε_c为碳纤维的极限延伸率，ε_g为玻璃纤维的极限延伸率

$$V_cE_c\varepsilon_c=V_gE_g(\varepsilon_g-\varepsilon_c)$$

其中 $V_g+V_c=1$

$$V_c=1\Big/\left[1+\frac{E_c\varepsilon_c}{E_g(\varepsilon_g-\varepsilon_c)}\right]$$

取$E_c=2\times10^5$公斤/厘米^2，$\varepsilon_c=1\%$，$E_g=7\times10^5$ 公斤/厘米^2，$E_g=2\%$ 则$V_c=25.9\%$，即碳纤维分量为26%得出最低的复合材料强度值。试验结果见图5。由图5可见当碳纤维分量为53%时（即A点）才能达到纯玻璃纤维的复合材料强度值。拉伸强度的试验结果与估算值是吻合的。

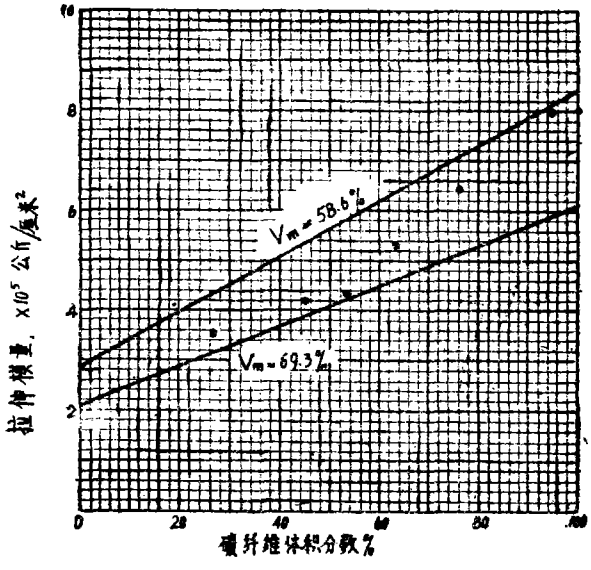


图4 拉伸模量与纤维体积分数的关系

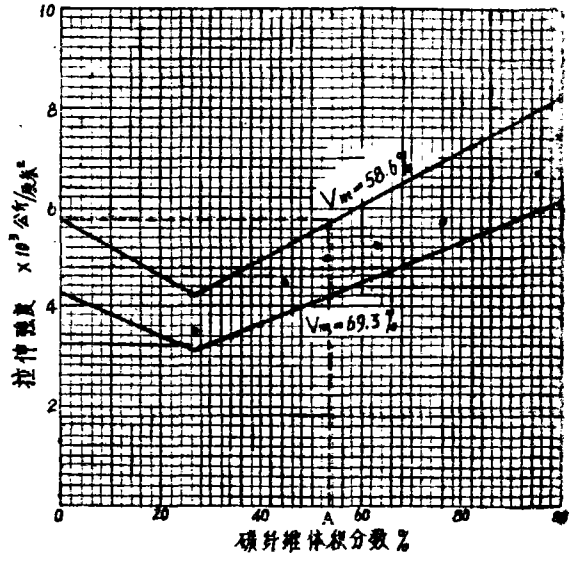


图5 拉伸强度与纤维体积分数的关系

3. 弯曲性能

(1) 弯曲弹性模量

由于复合材料的剪切模量过低，因而剪切对变形的影响不能不计，弯曲弹性模量常用式计算

$$E^*=\frac{PL^3}{48J\delta}$$

此值低于拉（压）的弹性常数，且与试件尺寸有关，为此作了计及剪切时的计算

$$\delta=\frac{PL^3}{48EJ}+\frac{1.2PL}{4GF}=\frac{PL^3}{48EJ}\left(1+\frac{1.2hEh^2}{GL^2}\right)$$

按测试标准$\frac{h}{L}=\frac{1}{16}$所以

$$E^*=E\Big/\left(1+\frac{1.2}{256}\ \frac{E}{G}\right)$$

试验结果见图6，由图6可见弯曲模量随碳纤维的体积分量的增加而增加，且试验结果

与估算值是吻合的（其中$V_c=0$时的$V_m=45$，理论计算值为3.6×10^5公斤/厘米^2）

(2) 弯曲强度

三点弯曲时，最大应力只在很小一个范围（理论上只有一个点）出现，不像拉伸试件有一较大区域出现大应力，因而弯曲强度应比拉伸强度高，可以由下式估算[3]

$$\sigma_{max}=\sigma_0\left[\frac{(1+\beta)l_0}{L}\right]^{1/\beta}\cdot\frac{1+\beta}{\beta}$$

式中σ_{max}为弯曲强度，σ_0为拉伸强度，l_0为拉伸试件标距，L为弯曲试件跨距，β为按韦伯分布的形状参数。弯曲强度应比拉伸强度高1.3～1.5倍（$\beta=7\sim16$）。试验结果及理论估算见图7，二者是吻合的（其中$V_c=0$时的$V_m=45\%$，理论估算值为8600公斤/厘米^2）。

4. 层间剪切性能（短梁弯曲）

试验结果见图8，由图8可见在碳纤维体积分量小于60%时，层间剪切强度与V_c关系不明显，而当$V_c>60\%$时，层间剪切强度有明显的下降。

5. 冲击韧性

试验结果见图9，由图9可见，随着碳纤维体积分量的增加，复合材料的冲击韧性下降，而当$V_c>60\%$时，冲击韧性几乎与碳纤维的体积分量无关。

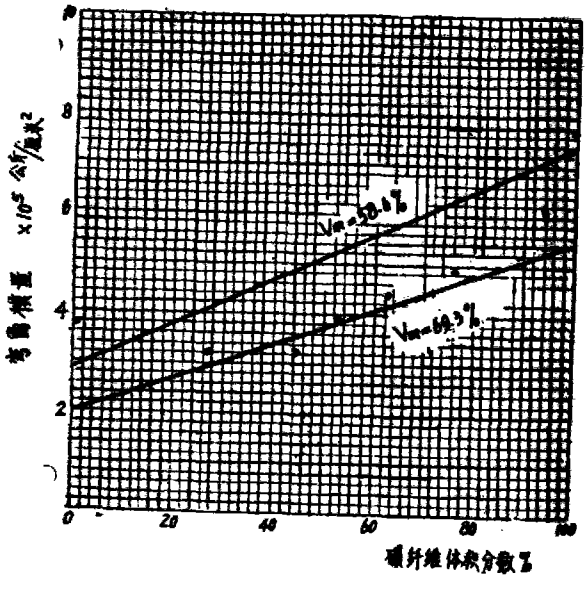


图6 弯曲模量与纤维体积的关系

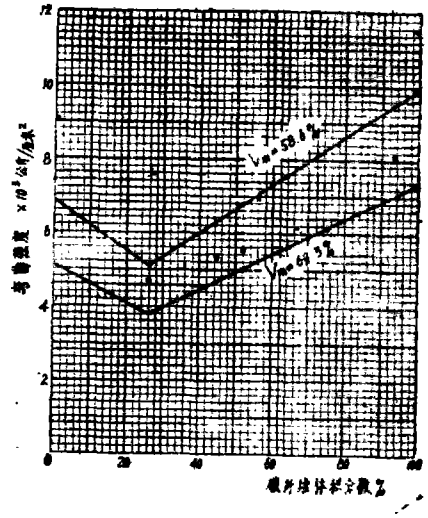


图7 弯曲强度与纤维体积分数的关系

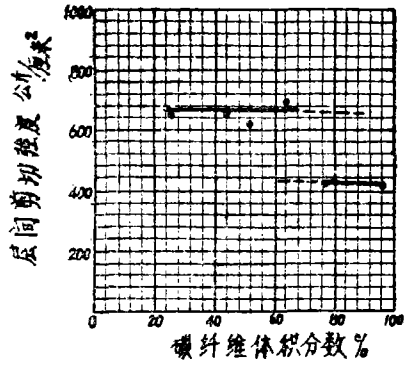


图 8　层間剪切強度与纤维体积分数关系

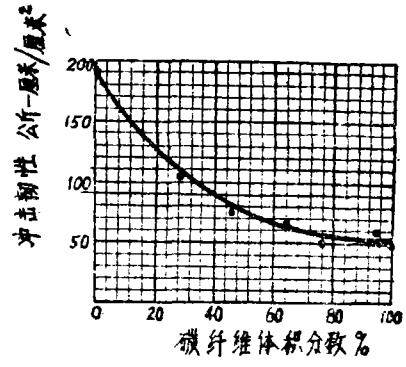


图 9　冲击韧性与纤维体积分数关系

四、結　　論

1. 碳纤维/玻璃纤维混织布的开发为混杂复合材料提供了一个新的品种，与目前常用的单絲预浸料相比有下列优点：

(1) 形状稳定，便于使用，尤其适用于制造大型、异型制品。

(2) 使用混织布后可以用手糊工艺，不存在预浸料树脂的寿命问题，树脂选择范围较广。

(3) 可按制品性能要求调节两种纤维比例，以获最佳性能/价格比。

2. 碳纤维/玻璃纤维混织布环氧复合材料的拉伸模量、拉伸强度、弯曲模量、弯曲强度符合“混合律”。

3. 碳纤维/玻璃纤维混织布环氧复合材料的碳纤维体积分量＞60%时其层间剪切强度出现明显下降，而冲击韧性已不再下降，几乎接近纯碳纤维的冲击强度。

4. 在碳纤维含量为26%时出现最低的复合材料强度，所以，使用碳纤维/玻璃纤维混织物时应避免这一低谷区。

5. 碳纤维含量为53%时才能达到纯玻璃纤维的复合材料强度值，除有必要外，碳纤维含量都应在53%以上，以期弹性模量及强度都有提高。当碳纤维含量小于53%时，只弹性模量有提高。

致谢：许守勃同志参加本文力学测试工作，在此特致谢意。

参 考 文 献

[1] Shore, D., and Summerscales J., “Hybrids——A Review”, Composites, Vol.10(1979), P.215.

[2] Kliger, H.H. “Ultra High Modulus Graphite Hybrids”, 31st Technical Conference of SPI, RP/C Intstitute 12A (1976).

[3] 朱頭龄，“复合材料的概率結构設計”，《复合材料学报》，第2卷，第1期，1985。

NONLINEAR CONSTITUTIVE RELATION OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITE LAMINAE

Xia Yuanming, Yang Baochang and Xu Zhen

Department of Morden Mechanics
University of Science and Technology of China, Hefei, China

(Received January 21, 1986)

ABSTRACT

Complementary elastic energy density is used to derive a general nonlinear constitutive relation of unidirectional composite laminae under plane stress. Absence of the nonlinear coupling between longitudinal and transverse stresses for unidirectional composite laminae is shown by uniaxial tension tests (in longitudinal direction and transverse) and biaxial tension tests, and a simplified and practical constitutive relation is obtained. An off-axial tension test is used to prove the present theory valid.

CARBON/GLASS FIBER CLOTH AND ITS REINFORCED EPOXY COMPOSITES

Shen Bixia and Huang Fenglai

Shanghai GRP Research Institute, Shanghai, China

(Received July 10, 1986)

ABSTRACT

Carbon/glass fiber hybrid woven cloth with a combination of carbon and glass fiber yarns was developed for fiber reinforced resin composites instead of unidirectional prepreg. The cloth was used for manufacturing of composite laminates by means of hand lay-up and press molding techniques. Carbon content, yarn type and warp/weft ratio could be varied to meet users' requirements and required properties of the composites and to gain a favorable cost/performance ratio.

The experiments of mechanical properties for a range of composites made from six kinds of carbon/glass fiber hybrid woven clothes reinforced epoxy resin showed that tensile and flexural properties of the composites corresponded with the "rule of mixture". Carbon fiber volume fraction of the carbon/glass fiber hybrid woven cloth had a significant effect on the strength of the composites. There was a minimum strength for the composite when the carbon fiber volume fration was about 26%. The strength as well as stiffness for the composite could be improved when the fraction was more than 53%.