

④  
18-25  
黄麻纤维/环氧复合材料及其性能分析郑融<sup>(1)</sup> 洗杏娟<sup>(2)</sup> 叶颖薇<sup>(3,4)</sup> 冼定国<sup>(1,4)</sup>

(1)香港理工大学,应用物理系;(2)中国科学院,力学研究所;

(3)香港理工大学,应用生物及化学工程系;(4)香港理工大学,材料研究中心

**A 摘要** 本文研究了黄麻单向纤维和随机分布短纤维增强环氧树脂复合材料的制作和拉伸、压缩、弯曲、层间剪切以及冲击性能,并讨论了它的破坏机理与微观形貌。黄麻纤维本身性能优异,并且具有优于其它天然植物纤维的可纺性。黄麻纤维复合材料的优异性能具有进一步研究开发的潜力。

**关键词** 线状单向黄麻纤维/环氧复合材料,随机分布短纤维黄麻/环氧复合材料,力学性能

TB332

## 1 前言

现代复合材料的优异特性,已成功地应用于航空航天工业以及其他工业部门。然而其较高的生产成本和复杂的技术设备,影响了它在民用以及建筑业中的广泛用途。天然纤维以其低廉的价格和可再生性,在复合材料中可部分取代玻璃等合成纤维。特别是在民用方面,天然纤维复合材料作为结构材料和非结构材料已占有一定的地位,并且还将有广泛的发展前景<sup>[1]</sup>。

性能好的天然纤维都可用来制作复合材料。木质微粒板和刨花板是最早广泛使用的天然纤维复合材料,至今为止在应用和科研方面都是相当成功的。然而,环境生态平衡要求较高的森林覆盖率,而人们的日常生活需要大量的木材,迫使森林面积逐年减少,原木紧缺成了世界性问题。随之而来的便是木材价格不断上涨,严重地影响了木材的使用。专家们不得不寻找原木的代用品。俗话说:“十年成树,百年成林”。用生长期短的植物纤维作为木质纤维的替代品制作复合材料,已受到一定的重视。

黄麻是一种一年生的草本植物,是亚热带和热带作物,最早产于印度,后来引种到整个亚洲和欧美等地。最初黄麻主要用于做绳索,也用来织布。19世纪初期,开始有人用黄麻织地毯。黄麻纤维既有象棉花那样的可纺性,又有其独特的高强度特点,所以有人称黄麻为最好的天然纤维之一,是有其道理的<sup>[2]</sup>。

迄今为止已经有一些科学家在黄麻纤维复合材料的研究方面作了一些工作,但还未见有关应用方面的报导。印度在这方面仍然走在前列,绝大部分工作是将黄麻与橡胶复合<sup>[3,4]</sup>,或者以黄麻作为填充物<sup>[5,6]</sup>。有直接用黄麻增强复合材料的是使用原始纤维<sup>[7]</sup>。中国也是黄麻的产国之一,但在黄麻复合材料的研究和开发方面还未见报导。

本文以研究开发成本低、制作工艺简单的黄麻纤维复合材料为前提,讨论了线状单向黄麻纤维/环氧(LJE)和随机分布短纤维黄麻/环氧(SJE)两种复合材料的力学性能和微观结构。并

根据以往的经验与竹/环氧复合材料进行了比较。

## 2 材料制备

线状长纤维使用香港市场上销售的细黄麻绳(已纺成线状),短纤维是将黄麻线剪成 2~3 cm 长,经水洗搅拌,使之松散,凉干后使用。

基体使用热固性塑料环氧树脂(phenolic epoxy araldite GY257),固化剂为 hardener HY1958,树脂与固化剂的比例为 8:1(重量比)。

单向黄麻长纤维复合材料是将黄麻线在空心长方形模具上分别缠绕 2、4、6、8 层,将环氧树脂浸入其中,并使其均匀,热压成型后复合材料板(LJE)。随机分布短纤维黄麻复合材料是将凉干的黄麻短纤维与环氧树脂混合并使其均匀,放在长方形槽状模具中热压后成型(SJE)。

LJE 的纤维重量含量为 75% 左右,SJE 为 61%。黄麻纤维的平均比重为 1.48<sup>[8]</sup>,所使用的环氧树脂固化后的比重为 1.18,因此可得 LJE 的纤维体积百分比含量大约为 70.5%,SJE 为 56.1%,若考虑在成形过程中纤维变形后体积会减少,则实际纤维体积含量可能小于以上值。

## 3 试验与测量

### 3.1 纤维性能测量

黄麻纤维属于韧皮纤维(茎纤维),其本身平均长度只有 1~4 mm,平均宽度 10~28 $\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。黄麻线由经过脱胶后呈束纤维状的熟麻编捻而成。束纤维的长度大于原纤维的长度,其长度百分比含量是将梳麻后的工艺纤维在 WIRA Fiber Biagram 长度测量机上测得,长度分布如图 1 所示。

黄麻束纤维的拉伸性能在 Instron 电子强力机上进行,夹持长度为 20 cm,相应的线密度(TEX)在 VIBROSCOPE 线密度测量仪上进行,结果如表 1 所示,其中 TEX 为每 1000 米的克数。

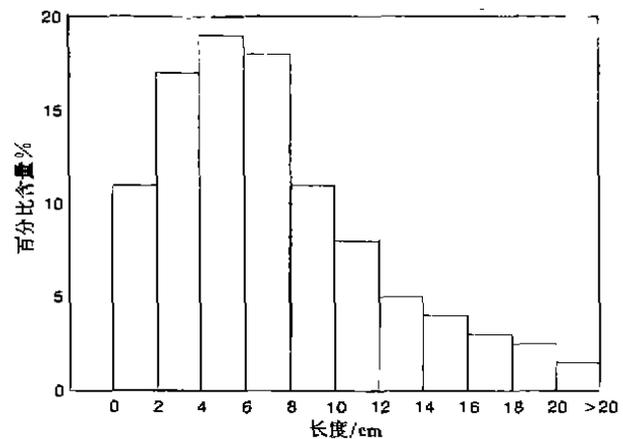


图 1 黄麻纤维长度百分比含量

表 1 黄麻纤维的拉伸强度

试件号 No.	线密度 TEX/g·km <sup>-1</sup>	强力 N(gf)	线密度强度 P <sub>tex</sub> (gf/TEX)	断裂伸长 L <sub>0</sub> /mm	断裂伸长率 (断裂应变 $\epsilon_r$ )	拉伸强度 $\sigma_f$ /MPa	平均模量 $\bar{E}_f$ /GPa
1	1.50	0.682(69.5)	46.3	0.30	1.5%	685.2	45.68
2	0.85	0.2597(26.5)	31.2	0.22	1.1%	461.8	41.98
3	1.14	0.397(40.5)	35.5	0.30	1.5%	525.4	35.03
平均值					557.5	490.8	40.90

表 1 中所列的拉伸强度  $\sigma_{11} = \rho P_{max}$ , 其中  $\rho$  为黄麻纤维的比重。从测量所得的应力-应变曲线图 2, 使用平均模量  $E_{11} = \sigma_{11} / \epsilon_1$  来表征纤维的刚度。

### 3.2 环氧树脂拉伸性能测量

拉伸试验所用的环氧树脂是将加固化剂后的液态环氧放在长方形模具中, 在真空炉中抽真空后加温固化。拉伸试件采用 ASTM(D638) 标准的哑铃形试件。试验在 Instron1175 万能试验机上进行, 应变由贴在试件上的电阻应变片经 MODEL3800 应变仪(美国 Measurements Group, Inc.) 测得, 试验数据由微型计算机记录。

试验结果: 平均拉伸强度为 53.15MPa, 平均拉伸弹性模量为 3.84GPa。

### 3.3 复合材料试验

对于天然纤维复合材料, 目前还没有统一的性能测试标准, 所以在测试其性能时, 采用一般常规力学性能试验或者参照其他复合材料的测试标准。弯曲试验采用常规的三点弯曲法, 跨度为试件厚度的 16 倍。拉伸试验: LJE 沿纤维方向(纵向)加载, 一部分试件使用 ASTM(D638) 标准的哑铃试件; 其余的纵向拉伸试验以及垂直于纤维方向(横向)和 SJE 采用 ASTM(D3410-87) 标准的小板条试件。层间剪切强度采用 ASTM(D2344-84) 标准的短梁剪切试验。

一部分拉伸试验采用电阻应变片测量的方法, 在日本 Shimadzu(岛津) DSS-25<sup>T</sup> 电子万能材料试验机上进行。其他试验均在 Instron1175 万能试验机上进行, 拉伸应变使用应变引伸计测量。

冲击韧性试验使用 Charpy 试验法, 在 FRACTOVIS(意大利, CEAST 公司) 落锤试验机上进行, 由微型计算机控制冲击速度和记录数据。试件采用板条形试样, 宽度为厚度的 2 倍, 跨度为厚度的 16 倍, 冲击形式如图 3 所示<sup>[10]</sup>。

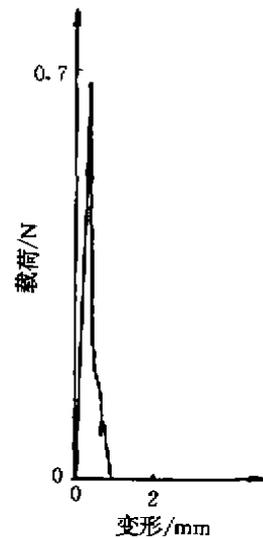


图 2 黄麻束纤维拉伸曲线

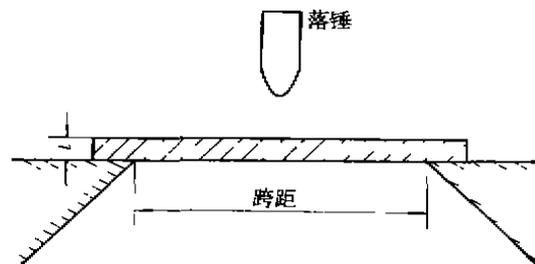


图 3 Charpy 冲击试验

## 4 试验结果与讨论

从测试结果总体看, LJE 纵向性能强, 而横向性能弱。SJE 总的来讲性能比较好。表 2 所列为各种黄麻/环氧的压缩性能, 包括比重  $\rho$ 、弹性模量  $E$  和强度  $\sigma$  的变化范围和平均值, 其中 LJE2、LJE4、LJE6、LJE8 分别为线状黄麻/环氧 2、4、6、8 层板, 其加载方向为沿纤维方向。

LJE2 厚度只有 2 mm 左右, 故其压缩性能测试时难以保证完全沿纤维方向, 所以强度值偏小, 难以得到准确的数据。

LJE4、LJE6、LJE8 性能比较稳定, 模量绝大部分在 2.5~4.5GPa 之间, 强度在 70~100MPa 之间。SJE 的压缩性能是竹碎/环氧的 1.5 倍<sup>[11]</sup>。

表 2 黄麻/环氧压缩性能(最小值~最大值,平均值)

	比重 $\rho$	$E_{C1}/\text{GPa}$	$E_{C1} \cdot \rho^{-1}/\text{GPa}$	$\sigma_{C1}/\text{MPa}$	$\sigma_{C1} \cdot \rho^{-1}/\text{MPa}$
LJE2	1.11	$\frac{4.16 \sim 4.37}{4.28}$	$\frac{3.75 \sim 3.94}{3.86}$	$\frac{34.6 \sim 48.7}{40.4}$	$\frac{31.2 \sim 43.9}{36.4}$
LJE4	1.22	$\frac{2.61 \sim 4.88}{3.22}$	$\frac{2.14 \sim 4.00}{2.64}$	$\frac{89.0 \sim 102.7}{98.8}$	$\frac{73.0 \sim 84.2}{81.0}$
LJE6	1.29	$\frac{3.58 \sim 4.69}{4.23}$	$\frac{2.78 \sim 3.64}{3.28}$	$\frac{100.5 \sim 103.2}{101.7}$	$\frac{77.9 \sim 80.0}{78.8}$
LJE8	1.32	$\frac{1.92 \sim 3.59}{2.85}$	$\frac{1.45 \sim 2.72}{2.16}$	$\frac{62.9 \sim 78.7}{73.2}$	$\frac{47.7 \sim 59.6}{55.5}$
SJE	1.10	$\frac{1.42 \sim 2.50}{2.09}$	$\frac{1.29 \sim 2.27}{1.90}$	$\frac{66.2 \sim 77.8}{71.7}$	$\frac{60.2 \sim 70.7}{65.2}$

表 3 是 SJE 的拉伸性能,其比强度约为铝合金的  $1/2^{[12]}$ ,拉伸强度是短竹/环氧和竹碎/环氧的 2 倍左右,拉伸模量基本相同<sup>[13]</sup>,无论拉伸强度还是压缩强度,SJE 比竹碎/环氧都要高<sup>[1]</sup>。

表 3 随机分布短纤维黄麻/环氧(SJE)拉伸性能(最小值~最大值,平均值)

比重 $\rho$	$E_t/\text{GPa}$	$E_t \cdot \rho^{-1}/\text{GPa}$	$\sigma_t/\text{MPa}$	$\sigma_t \cdot \rho^{-1}/\text{MPa}$	$\nu$
1.21	$\frac{6.68 \sim 8.29}{7.48}$	$\frac{5.52 \sim 6.85}{6.18}$	$\frac{48.2 \sim 75.8}{60.2}$	$\frac{39.8 \sim 62.6}{49.8}$	$\frac{0.27 \sim 0.35}{0.33}$

表 4 是 LJE 的拉伸性能。由于比重较小,所以纵向比强度比铝合金还高  $10\% \sim 20\%$ ,纵向比模量比玻璃/环氧低  $30\%$ ,最大值与之相当<sup>[12]</sup>。纵向的泊松比大于 0.5。

横向拉伸性能与纵向性能相差甚远。其中弹性模量相差  $6 \sim 8$  倍,而强度相差一个数量级。

LJE 的纵向拉伸性能与性能优异的天然纤维复合材料长竹/环氧相比,强度约为其  $4/5$ ,模量大约为它的  $2/5^{[13]}$ 。

表 4 长纤维黄麻/环氧(LJE)拉伸性能

	实验方法	比重 $\rho$	纵 向					横 向					
			$E_{01}/\text{GPa}$	$E_{01} \cdot \rho^{-1}/\text{GPa}$	$\sigma_{01}/\text{MPa}$	$\sigma_{01} \cdot \rho^{-1}/\text{MPa}$	$\nu$	$E_{02}/\text{GPa}$	$E_{02} \cdot \rho^{-1}/\text{GPa}$	$\sigma_{02}/\text{MPa}$	$\sigma_{02} \cdot \rho^{-1}/\text{MPa}$	$\nu$	
LJE4①	Instron 引伸计 哑铃试件	最小值	1.25	15.1	11.7	147.2	114.0						
		最大值	1.29	18.2	14.6	168.0	134.4						
		平均值	1.27	16.7	13.2	157.6	124.2						
LJE4②	DSS-25T 应变片 长条板试件	最小值		19.1	14.8			0.62	2.41	1.87	8.16	6.33	0.15
		最大值		22.2	17.2			0.82	2.66	2.06	9.04	7.01	0.20
		平均值	1.29	20.7	16.0			0.72	2.54	1.97	8.6	6.67	0.16
LJE6①	Instron 引伸计 哑铃试件	最小值	1.25	28.1	21.8	141.4	113.2						
		最大值	1.29	31.2	25.0	198.9	154.2						
		平均值	1.27	29.7	23.4	170.2	133.7						
LJE6②	DSS-25T 应变片 长条板试件	最小值		17.2	12.8			0.57	2.91	2.16	10.42	7.72	0.10
		最大值		20.9	15.5			0.68	3.48	2.58	10.81	8.01	0.13
		平均值	1.35	19.5	14.4			0.63	3.25	2.41	10.62	7.86	0.11

表 5 是 LJE4 的三点弯曲性能,跨度方向为纤维方向。强度为长竹/环氧的 3/5,模量为其 2/5<sup>[11]</sup>。

表 5 长纤维黄麻/环氧(LJE4)的弯曲性能(最小值~最大值,平均值)

比重 $\rho$	$E_{c1}/\text{GPa}$	$E_{c1} \cdot \rho^{-1}/\text{GPa}$	$\sigma_{c1}/\text{MPa}$	$\sigma_{c1} \cdot \rho^{-1}/\text{MPa}$
$\frac{1.25 \sim 1.29}{1.27}$	$\frac{10.44 \sim 15.01}{12.34}$	$\frac{8.22 \sim 11.82}{9.72}$	$\frac{114.0 \sim 161.3}{137.7}$	$\frac{89.8 \sim 127.0}{108.4}$

表 6 所示为各种黄麻/环氧的层间剪切强度和冲击韧性。从层剪结果看,LJE 比长竹/环氧略高<sup>[13]</sup>。冲击韧性 LJE4 与长竹/环氧相当,LJE6 略高一些<sup>[14]</sup>。

表 6 黄麻/环氧层间剪切强度  $\tau_i$  和冲击韧性  $E_i$ (最小值~最大值,平均值)

	$\tau_i/\text{MPa}$	$E_i/10^3\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$		$\tau_i/\text{MPa}$	$E_i/10^3\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$
SJE	$\frac{8.47 \sim 12.79}{10.64}$	$\frac{6.31 \sim 9.47}{7.45}$	LJE4	$\frac{16.19 \sim 21.04}{18.57}$	$\frac{35.15 \sim 51.86}{43.56}$
LJE6	$\frac{12.72 \sim 19.5}{16.52}$	$\frac{56.6 \sim 59.33}{57.78}$	LJE8	$\frac{18.29 \sim 19.27}{18.74}$	

## 5 黄麻/环氧的微观结构

LJE 的横截面利用 Nikon Microphot-FAX 电子显微镜观察。图 4 显示了环氧树脂在黄麻纤维束间浸透的情况,纤维束间隙较大处可被树脂全部浸入,间隙较小处亦有树脂浸入,但不能完全浸透。

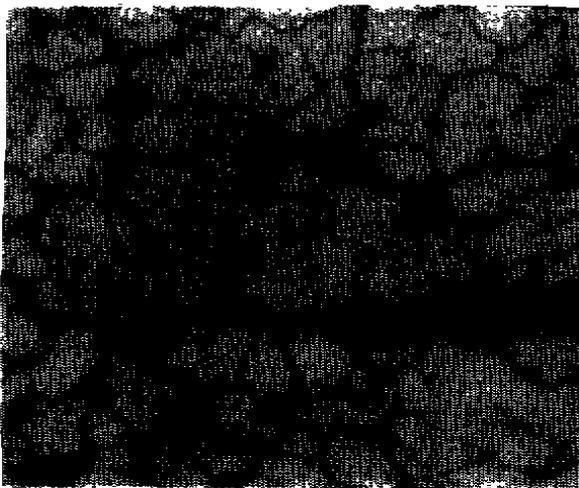


图 4 长纤维黄麻/环氧(LJE)横截面



图 5 长纤维黄麻环氧(LJE)纵向拉伸断口

黄麻/环氧的断口形貌在 SEM 扫描电镜上观察。图 5 是 LJE 的纵向拉伸断口形貌,是一束黄麻纤维被环氧紧紧包住的的情形,黄麻纤维束的外轮廓为不规则的多角形。图 6 为 LJE 的横向拉伸断口形貌,从图中看到除中部偏下方的纤维束上有微小的界面分离现象外,其余绝大部分界面都呈现内聚破坏,证明树脂与纤维之间结合较好,界面性能良好<sup>[15]</sup>。图 7 是 SJE 的

拉伸断面形貌,被拔出拉断的纤维上紧紧裹着树脂。从三张 SEM 照片均可看出黄麻纤维可以和环氧树脂形成良好的界面。

图 8 是 SJE 的 Charpy 冲击断面形貌。SJE 在冲击载荷下的界面损坏明显多于其在静态下的破坏,LJE 亦有同样的现象。



图 6 长纤维黄麻/环氧(LJE)  
横向拉伸断面



图 7 随机分布短纤维黄麻/环氧  
(SJE)拉伸断面



图 8 随机分布短纤维黄麻/环氧(SJE)  
Charpy 冲击断面形貌

## 6 破坏机理分析

对于 LJE 虽然有 2、4、6、8 层排布纤维的方法,但从复合材料的角度来讲,仍然都属于单层复合材料。6 层板的拉压性能略好一些,4、6、8 层板的性能都比较稳定。性能上的差异可以认为是自身材料性能的分散性,或者是层间性能的影响而非层数不同引起。

根据纤维试验结果,黄麻纤维以束纤维的形式存在于复合材料中,粗细各不相同。对于 LJE 束纤维的长短相差甚远,最短不足 2 cm,最长可达 20 cm 以上。就其纤维自身的拉伸性能与竹纤维(强度 391~713MPa,模量 18.2~55.2GPa)相当<sup>[16]</sup>。然而 LJE 的性能比长竹/环氧低,而 SJE 比短竹/环氧和竹碎/环氧要好。

如根据公式: $E_c = V_f E_f + V_m E_m$ <sup>[10]</sup>,复合材料 LJE 弹性模量的理论值为 29.97GPa,表 4 所列的实测值基本上小于此值。黄麻线中的纤维以卷曲的形式捻合在一起,靠彼此间的摩擦力来承受载荷。在复合材料 LJE 中承受拉伸载荷时,由于纤维束的卷曲,作用在纤维上的载荷与纤维方向有一个夹角,削弱了复合材料的承载能力。可以认为纤维的卷曲是造成 LJE 性能低于长竹/环氧的原因之一。

LJE 的横向拉伸强度只有 10MPa 左右,远低于环氧本身的强度 53.15MPa。此现象的主要原因是环氧本身粘度较大,在卷曲的纤维束之间未完全浸透(如图 4 所示),使得复合材料中存在较大的弱点。LJE 在承受压缩载荷时发生屈曲破坏(如图 9 所示)正是由此引起。SJE 中纤维的展开程度比竹碎/环氧和短竹/环氧高,所以纤维与树脂的粘接面积大,亦无 LJE 中的弱点,故性能较好。SJE 受压破坏为 45°角的剪切破坏,如图 10 所示。

LJE 中纤维的卷曲性既不同于人工纤维那样有一致的方向,也不同于竹纤维那样有规律,所以使得复合材料内部的应力场比其他材料复杂得多,影响材料性能的因素也多。

黄麻/环氧的界面在静态试验和动态冲击试验中表现出很大的不同,说明其界面对应变率较敏感。从宏观上看,有些试件在冲击试验中完全呈现层间界面的破坏,而短梁层剪强度较好,亦说明界面对应变率敏感。



图 9 长纤维黄麻/环氧(LJE)压缩破坏试件

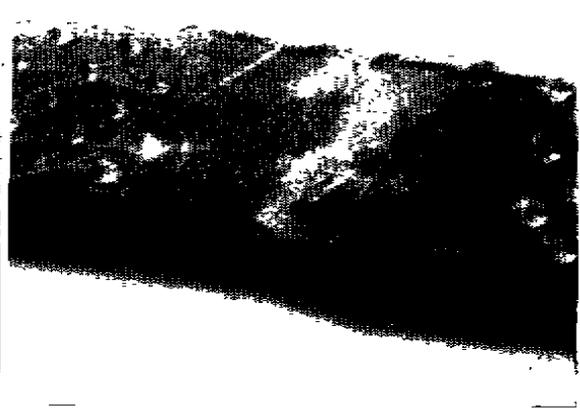


图 10 随机分布短纤维黄麻/环氧(SJE)压缩破坏试件

## 7 结 论

黄麻纤维生长周期短而且价格便宜,是天然纤维中最易编织、最易设计的纤维之一。它可以制成黄麻线和黄麻布,发挥其纺织纤维的特点,这一优势是竹、椰子等许多天然纤维难以达到的。环氧树脂自身性能优良,并且与黄麻纤维之间能够形成良好的界面。使用单向线状纤维作为纺织纤维复合材料的初步设计方式,LJE 中树脂在纤维中浸透不完全造成横向性能差这一弱点,可以通过多向编织纤维和增加树脂渗透等工艺方法改善。用马来酸酐处理黄麻纤维可以进一步改善界面性能,同时提高黄麻/环氧界面的抗冲击性。此项研究工作已在进行。

黄麻/环氧的力学性能(除 LJE 的横向性能外)比常用的木碎板(拉伸强度 15~18MPa,拉伸模量 1.0~2.4GPa)要好得多。另外,黄麻/环氧机械加工性能良好,进一步表明它具有应用前景。

**致谢** 香港理工大学制衣系的苗孟河博士和中科院力学所的李端义先生在试验方面给予了帮助,谨表感谢!

## 参 考 文 献

- 1 邹惟前,刘方龙. 植物纤维复合材料的原理与特性. 复合材料学报, 1987, 4(1)
- 2 OAKLEY F I. Long vegetable fibers. Ernest Benn, London, 1928
- 3 Coran A Y, Boustany K and Hamed P. J Appl Polym Sci, 1971; 15: 2471
- 4 Campbell J M. Prog. Rubber Technol, 1978; 41: 43
- 5 Phani K K and Bose N R. J Mater Sci, 1987; 22: 1929
- 6 Roe P J and Ansell M P. J Mater Sci, 1985; 20: 4015
- 7 Ghosh A K and Dey S S. Proceedings of the ICCM-9. 2, Madrid, 1993; 813
- 8 吴义政. 纺织材料学. 台湾: 五洲出版社, 1973
- 9 朱红. 纺织材料学. 纺织工业出版社, 1987

- 10 Agarwal B D and Broutman L J. Analysis and performance of fiber composites. John Wiley & Sons, Inc, 1980
- 11 Xian X J, Yipp M W and Shin F G. Mechanical behavior and microstructure of natural plant fiber reinforced composite materials. Proceedings of the ICCM-9, Madrid, 1993; 858
- 12 沈观林. 复合材料力学. 清华大学工程力学系, 1987
- 13 Shin F G, Xian X J, Zheng W P and Yipp M W. J Mater Sci, 1989; 24: 3483
- 14 Jain S, Kumar R and Jindal U C. J Mater Sci, 1992; 27: 4598
- 15 洗杏娟, 李端义. 复合材料破坏分析及微观图谱. 科学出版社, 1993
- 16 David H S Hon. Polymer News, U S A: Gordon and Breach Science Publishers, 1988; 13(5)

## ANALYSIS AND PROPERTIES OF JUTE/EPOXY COMPOSITES

Zheng Rong<sup>(1)</sup> Xian Xingjuan<sup>(1)(2)</sup> Yipp W M<sup>(3)(4)</sup> Shin F G<sup>(1)(4)</sup>

(1) Dept. of Applied Physics, The Hong Kong Polytechnic University;

(2) Inst. of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080;

(3) Dept. Of ABCT, The Hong Kong Polytechnic University;

(4) Materials Research Center, The Hong Kong Polytechnic University

**Abstract** This paper reports on the fabrication of long-fiber jute/epoxy and random short-fiber jute/epoxy composites, as well as their mechanical properties under tensile, compressive, flexural, interlaminar shear and impact stresses. Microstructural aspects of these composite materials were investigated by using Scanning Electronic Microscopy. Apart from the good tensile strength of the raw jute fiber, composites fabricated in this study give good overall mechanical performance and indicate a far-reaching potential for development into useful products.

**Key words** long-fiber jute/epoxy composite, random short-fiber jute/epoxy composite, mechanical properties

(上接第 10 页)

## 征 文 范 围

- 一、树脂基体(热固性、热塑性)
- 二、增强体(纤维及纤维织物等)
- 三、复合材料(树脂基、金属基、陶瓷基、C/C、混杂、编织、隐身、功能、智能复合材料等)
- 四、复合材料成型工艺及设备(含工艺辅助材料)
- 五、复合材料质量控制与无损检测
- 六、复合材料性能与测试
- 七、复合材料基础研究(界面工程、工艺理论、增韧理论等)
- 八、复合材料力学与结构设计及分析
- 九、复合材料应用研究
- 十、复合材料在新技术领域中的应用

(下转第 37 页)