

竹纤维增强复合材料力学性能 及微观结构分析

洗杏娟 洗定国* 郑维平 李端义

(中国科学院力学研究所) (*香港理工学院)

摘 要

天然竹子纤维增强树脂复合材料是利用自然资源,采用先进复合材料的层压工艺制成,是一种性能良好的,可应用的结构材料,已发表的研究竹/树脂的工作很少。

本工作从宏观和微观实验两方面研究竹/环氧单向不同层数复合材料层板的拉伸、压缩、弯曲,层间剪切等力学性能,确定了各项力学参数,并对竹纤维与囊素以及树脂基体在不同载荷条件下的微观结构进行了观察与分析。结果表明竹/环氧复合材料的比强度、比刚度很好。比强度为低碳钢的3—4倍,力学性能与普通玻璃纤维增强复合材料相当。采用声发射技术和扫描电镜动态加载试验,监测竹子/环氧复合材料的损伤破坏。破坏型式随加载条件而不同,竹纤维增强复合材料的力学行为破坏机理与玻璃纤维,碳纤维增强复合材料相近。从竹子的微观结构看到它是有规则的很合理的一种天然复合材料,加上树脂基体提高了力学性能并能解决了纯竹的干裂,虫蛀等问题,而且竹/树脂可压制加工成不同厚度和形状的层合板,适应不同的结构使用,因而具有广阔的应用前景。

一、前 言

我国有丰富的竹子资源,以往一般仅应用于普通的生活器具和农村建房等,没能充分发挥其作为结构材料的作用。以竹纤维增强树脂压制而成的复合材料层板,既保持了天然竹子的合理的生物结构又能解决园竹竿状使用的局限性,层合板可加工成型为应用要求的构件,同时防止了竹子的干裂和虫蛀等问题,可望成为一种价廉的应用于民用的结构材料。近二十年来,对玻璃纤维,碳纤维等增强复合材料及其力学问题作了广泛深入的研究,发表了许多著作^[1-2],这些复合材料确实有许多优越性,但由于价格较高,加工过程复杂,一般应用于工业领域。对木纤维,麻纤维增强水泥等天然纤维复合材料,近几年来有所研究^[3-5]。

87年12月1日收到

Lahkad S.C. et al^[6]和Jindal U.C.^[7]研究了竹子的力学性能,我国有些单位及Pakot-
iprapha B. et. al^[8]曾研究竹子纤维增强水泥复合材料。然而对竹纤维增强树脂材料在不同
载荷条件下的力学行为及其破坏机理研究少,尤其是在扫描电镜上进行动态试验较系统地观
测分析竹纤维、囊素,树脂及其结合界面状态的研究工作未见发表。

本文研究了不同层数的单向竹纤维增强环氧复合材料的宏观拉伸、压缩、弯曲、层间性
能,并在扫描电镜上进行拉伸、压缩试验,动态观测竹纤维、囊素、树脂基体及其结合界面
的损伤破坏,分析不同载荷条件下的横截面、侧向断裂面及断裂表面的微观断面形貌。实验
结果表明:竹纤维增强环氧复合材料的力学性能良好,与普通玻璃纤维增强塑料相近,比强
度高於低碳钢的3—4倍。声发射技术可望预测损伤的产生及临界损伤,预告破坏。由微结
构损伤及破坏形式讨论了竹/环氧的破坏机理。竹/树脂材料重量轻,价格便宜,适用于一般
要求的应用。例如用作建筑、车辆等的结构材料。

二、试件与试验装置

试验材料是产于中国的蒿竹(Bambusa Pervariabili)沿纵向取竹节间材料,经干
燥压成片状,然后逐层铺在模子中,层间加环氧树脂热压成多层板,竹纤维含量约为80%
(因环氧比竹贵,足够的环氧即可),具体工艺过程见(9),然后加工成长矩形条状试样。
本试验采用三层(A_3)、五层(A_5)、七层(A_7)的单向 0° 铺层竹纤维增强树脂的试件(图1),
每层厚度约1mm。拉伸、压缩、弯曲和层间剪切四种宏观力学性能试件的尺寸和试验结果见
表1。

宏观力学性能试验在INSTRON 1195万能试验机上进行,按GB3354, 3356, 3357, 3358
-82试验标准,加载速度为1mm/min,自动记录载荷-位移曲线,纵向、横向应变片测量泊

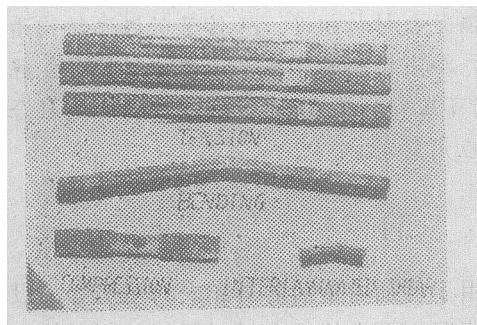


图1 竹/树脂复合材料试件

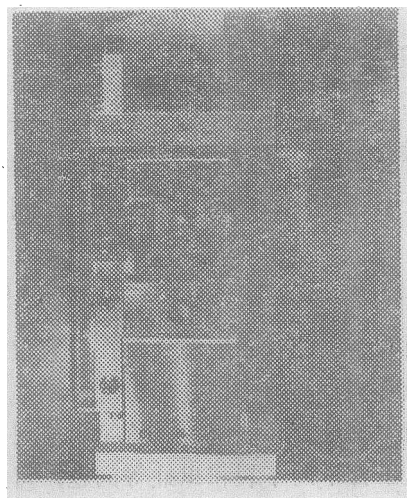


图2 细观(SEM)加载装置

桑比 γ 。采用SFS-4声发射仪器监测试件承受载荷时的损伤破坏过程。并在HITACHIS570
扫描电镜上进行了拉伸和压缩性能实验(图2),拍摄了动态SEM照片,对断裂形貌进行了
分析。

表1 竹/树脂复合材料试件尺寸及力学性能实验结果

层数	尺寸 w×t mm ²	拉 伸			压 缩			弯 曲		层间剪切	
		σ_t (Mpa)	E_t (Gpa)	γ	σ_c (Mpa)	E_c (Gpa)	γ	σ_b (Mpa)	E_b (Gpa)	τ_{13} (Mpa)	G_{13} (Mpa)
三层A ₃	12.6×3	243	45	0.30	129	24.9	0.375	255	24.9	10.5	610
五层A ₅	12.6×5	189	76	1.37	59	25.4	/	208	19.3	12.4	768
七层A ₇	12.6×7	178	63	0.48	90	33.4	/	245	16.4	16.8	877
平均值	63	203	61	0.38	93	27.9	0.375	235	20.2	13.2	752

试件长度l: 拉伸, 弯曲200mm; 薄板压缩100mm。试件宽度w:
直接压缩25mm; 层间剪切40mm。试件厚度t:

三、竹/环氧复合材料的宏观力学性能

1. 拉伸性能

竹/环氧的拉伸应力应变关系基本是线性的, 呈脆性破坏, 一般随载荷增大, 变形成正比增大, 达极限载荷后, 竹纤维逐次断裂, $\sigma \sim \epsilon$ 曲线呈锯齿形下降 (图3)。少数试件加载至85% σ_u (极限应力) 时, 局部损伤导致载荷稍有变动, 也正是最大声发射信号出现之处 (图7)。单向竹纤维增强树脂复合材料的拉伸强度 σ_t 和模量E, 相当好, 三种层厚试件平均的 σ_t 为203Mpa, E_t 为61Gpa, 泊桑比 γ 为0.38, 三种不同层数试件的性能结果, 详见表1。随着竹纤维层的增加, 拉伸强度有所下降, 这是由于层数增加厚度增加, 层间空隙增多

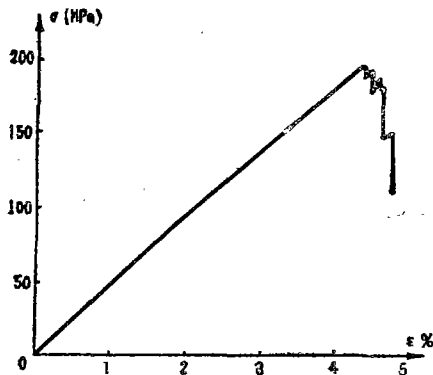


图3 竹/树脂A₅₋₁试件拉伸 σ - ϵ 曲线

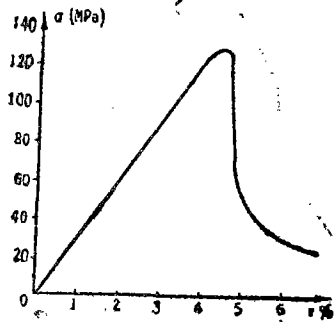


图4 竹/树脂试件压缩 σ - ϵ 曲线

的原因, 而泊桑比 ν 和杨氏模量E, 随层数增多而提高, 五层的E_t最大, 这可能是纵向应变减少的因素大于强度减少影响的缘故。七层试件的 ν 过大 (可能受表层竹纤维偏离0°有关。(图1) 单向竹纤维/树脂的拉伸破坏型式主要是沿竹纤维纵向开裂。

2. 压缩性能

三层试件A₃类进行了薄板压缩实验, 装置是参照 ASTM-D3410 标准改进设计加工而

成,对复合材料薄板试件是合理的实验装置。为保证断裂在试验段内,两端用铝片加强(图1),除了在一边贴纵横一对应变片外,在另一边也贴一纵向应变片,用以测量试件受压的对中性能。调至两边纵向应变一致,没有附加弯曲应变即可。所得到的A₃类试件的压缩强度 σ_c 是最高的(129MPa),压缩模量 E_c 为24.9GPa,比拉伸的小,泊桑比 γ 为0.375。加载至破坏载荷93% P_b 前应力应变关系是线性的,试件失效迅速卸载达2/3行程后,压缩屈曲破坏变形增大,最后完全破坏(图4)。

五层和七层试件较厚,采用以短矩形块试件直接在台面受压的方向进行,破坏形式主要是层裂,也有受压端呈挤压破坏,因此压缩强度较低,两种试件平均 $\bar{\sigma}_c$ 为74.6MPa, \bar{E}_c 为29.4GPa,(详见表1)。应力应变曲线自线性转为非线性的拐点较薄板压缩的结果早些出现,约在60—80% P_b 范围内,是端部局部挤压破坏的影响。

3. 弯曲性能

采用三点弯曲方法测试,竹/环氧试件的荷载-位移曲线在50%破坏荷载前是线性的,然后非线性达极限强度,荷载下降时有所波折,是部分竹层充分发挥作用所致(图5)。平均弯曲强度 $\bar{\sigma}_b$ 为235MPa,弯曲模量 \bar{E}_b 为20.2GPa,(详见表1)。弯曲破坏集中在中间承载荷处受弯破坏,中面层上部受压,下部受拉。

对纯竹试件进行弯曲测试的结果表明其拉、压模量是不相同的,符合叠层复合材料的规律,而且竹子表面受压时(向上与压头接触)与竹材内层受压的拉、压及弯曲模量也是不同的。竹子外面受压时 E^- 为14.2GPa,受拉时的 E^+ 为13.5GPa,整体弯曲模量 E_b 为18.6GPa;竹材内层受压时 E^- 为10.1GPa, E^+ 为10.5GPa,弯曲模量为16.9GPa。说明竹子靠外表的纤维密度大,纤维是主要承力件。竹材的弯曲强度为232MPa。

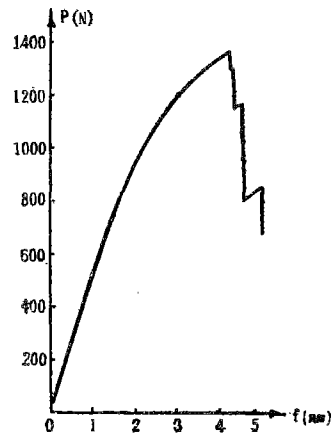


图5 竹/树脂试件弯曲曲线 σ - ϵ

4. 层间剪切性能

采用五点弯曲(即三点弯曲外伸法)测定层间剪切刚度 G_{13} 。

$$G_{13} = \frac{Pa}{2wtf_s}, \quad P \text{—荷载, } a \text{—加载点与支点距离}$$

$$f_s = f_1 - f_2 \quad f_1 \text{—加载点挠度 } f_2 \text{—两端点挠度}$$

用短梁剪切法确定层间剪切强度 τ_{13} 。

$$\tau_{13} = \frac{3}{4} \frac{P}{wt}$$

竹/环氧复合材料的平均层间剪切强度 τ_{13} 为14.6MPa,层间剪切模量 \bar{G}_{13} 为752MPa。层间力学性能低是所有复合材料的薄弱环节,因此提高复合材料的剪切性能是个重要课题。

三种不同层数的竹/环氧试件A₃(三层)、A₅(五层)、A₇(七层)的 τ_{13} 依次为10.5MPa, 12.4MPa, 16.8MPa, G₁₃依次为610MPa, 768MPa, 877MPa, 随着厚度的增大层间剪切性能

表2 竹/环氧复合材料与其它材料主要力学性能比较

材 料	比 重	拉伸强度 (kg/cm ²)	比拉伸强度 ×10 ⁵ (cm)	比弹性模量×10 ⁷ (cm ²)	比抗压强度 ×10 ⁵ (cm)	比抗弯强度 ×10 ⁵ (cm)
竹子	0.8	900—1300	11.3—16.3	11.46—19	0.3—1.0	13.8—28.8
环氧	1.25	500—800	4—6.4	1.8—2.9	9.8—16.3	8—12
单向竹/环氧	1.18	1800—3600	15.3—30	38.9—52.7	5.1—11	15—28
单向环氧玻璃钢	2.0	3000—4600	15—23	10.8	7	11.9
中碳钢	7.8	3800—4700	5—6	27.4		
松木	0.55	500	7.7		3.8—5.4	
胶合木板	0.8	100—550	1.5—6.9	0.76—5.9		2.5—5.0

稍有提高, 这是由于跨厚比 l/t 减小所致(跨距没有改变)。层间剪切的载荷-位移曲线一般在60~65%的破坏载荷之前呈线性, 继续加载, 大部分试件因逐层间剪切破坏, 曲线几次波动后才达极限载荷(图6), 这是与弯曲破坏不同的过程, 随着层数增多曲线出现的波折数也多。

竹/环氧的比重小, 而各项力学性能较高, 表2列出竹子、环氧及其复合材料和其它材料主要性能的比较, 可见竹/环氧的比强度、比刚度是相当高的

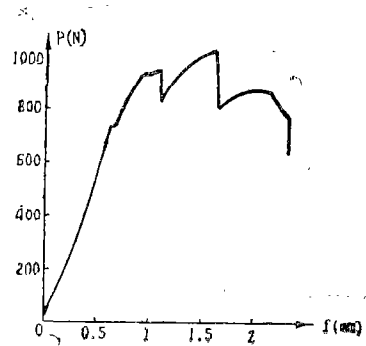


图6 竹/环氧试件层间剪切P-f曲线

四、声发射监测结果

采用声发射技术以加权振铃(以下简称权铃)为表征量, 跟踪监测试件在承载中的破坏过程, 记录竹/环氧试件损伤中能量释放的声发射增量(AE)和累积量(AE_c), 以图7为例, 是A₇₋₁试件在拉伸条件下的AE图象。在应力水平为6.7% σ_{u1} 时(即破坏载荷的6.7%), 树脂基体微裂, 出现小能量的声发射AE信号, 应力水平达24% σ_{u1} 时, 出现较大AE信号, 反映了纵向开裂, 以后有规则地在一定间隔出现大小相近的AE信号, 间隔中仍有基体损伤的小信号。在79% σ_{u1} 时出现突发信号, 有的层开始弯坏。达95% σ_{u1} 时, 最大AE出现, 竹纤维断裂, 信号加强加密, 直至破坏。弯曲情况下, 出现初始和

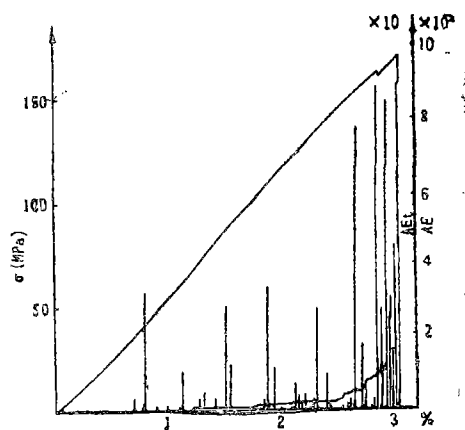


图7 竹/树脂试件拉伸 σ - ϵ , AE- ϵ 关系

突发AE的 σ_{t1} %较拉伸情况的为迟,这是由于弯曲试件最终破坏时位移大,过程长,AE和AE_i比拉伸下的量大。随着试件厚度的增加,出现AE和突发AE的 σ_{t1} %一般有所提前,这是由于层数多层间空隙多起始损伤提前出现而引起。表3列出三种试件在拉伸、弯曲时反映试件损伤情况声发射出现较大、突发和最大AE时对应值和应力水平。AE增量,初始出现值一般在100以内,较大AE在500附近,突发AE上千,最大AE满标至上万。在突发AE信号发生时,是临界损伤,以后损伤迅速扩展,试件破坏。有可能以声发射初始出现的信号来预测树脂基体的起始开裂,以突发声发射信号预测试件损伤临界值,预告破坏将发生。在突发AE前是使用安全区域。

表3 竹/树脂复合材料损伤过程声发射的特征

试件类型	拉 伸				弯 曲			
	初始AE _i 出现	较大AE _i	突发AE _e	最大AE _{max}	AE _i	AE _i	AE _e	AE _{max}
	σ_t % AE量	σ_t % AE	σ_t % AE	σ_t % AE	σ_t % AE	σ_t % AE	σ_t % AE	σ_t % AE
A ₃	20.7 25	35.3 445	96 3667	100 9318	30 196	58 585	79 990	90 满
A ₅	12.6 77	25.8 287	73 1000	100 满	24 34	32 579	82 900	100 满
A ₇	6.7 10	24 31	79 753	95 889	19.1 52	24 364	74 964	98 满

纯竹子试件由于没有树脂基体,直至弯曲载荷为83% σ_{t1} 时才有AE出现,囊层先破坏,紧接着即出现突发AE,竹纤维逐次断裂,信号密集,直至破坏。而竹子复合材料不同层数不同载荷条件下在7~30% σ_{t1} 范围出现基体开裂的AE,在73~96%出现损伤严重的突发AE,竹纤维断裂,中间是有规律的纵向开裂。声发射技术用于复合材料破坏监测比用于单一组分材料(如金属、纯竹)所得到的信息更丰富,因此是一种更适于复合材料的无损检测方法。

五、细观力学性能及微结构破坏分析

在S-570扫描电镜加载台上进行了竹子及竹子复合材料的拉伸和压缩试验,并从断裂截面断裂表面及断裂侧面来观察分析不同载荷条件下的断口形貌。

1. 竹子细观拉伸与压缩试验及其断口形貌

细观拉伸采用哑铃形小试样,两端用铝片加强打孔,机械式加载(图2)。试件分为无缺口与有缺口两种。

图8是带缺口的竹子在扫描电镜上的拉伸试件,破坏是从缺口顶端沿竹子纤维纵向发展与0°铺层的碳/环氧等复合材料相似。因这批试件靠近竹子表皮处,纤维含量高,强度较高,拉伸强度 σ_t 为227MPa,压缩强度为191MPa。竹子的压缩破坏如图9。断口较齐,囊部先屈曲,有压裂缝,竹纤维与囊部分界清楚。从断口可以看到有规律的纤维(维束管为主的厚壁细胞)是主要的承力件,纤维相当完整光滑(图10a),一束含数根纤维(图10b),有竹纤维断裂滑出后的孔洞,每束每根纤维外包壁层,为薄壁囊素基体,连结纤维起传递力

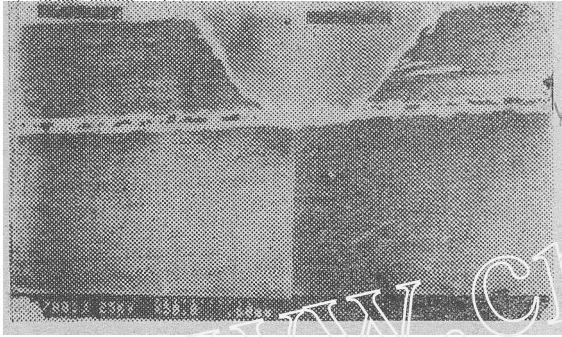


图8 竹子SEM拉伸缺口顶端裂缝扩展

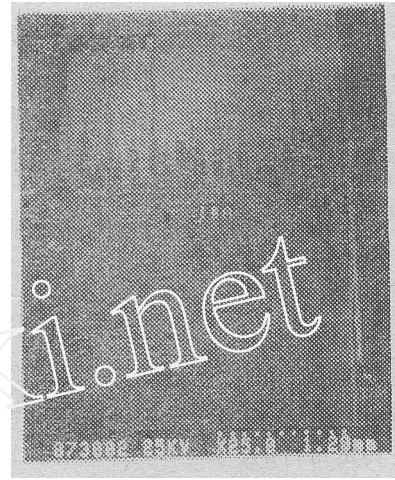
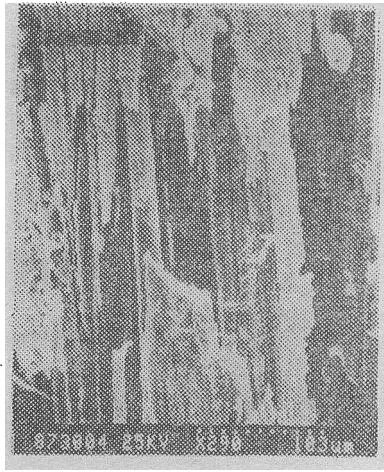
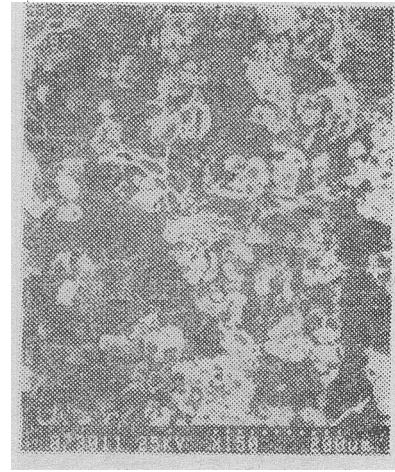


图9 竹子SEM压缩破坏表面



(a)纵向断面



(b)横向断面

图10 竹纤维素SEM形貌



图11 一竹纤维(维管束厚壁细胞)断口

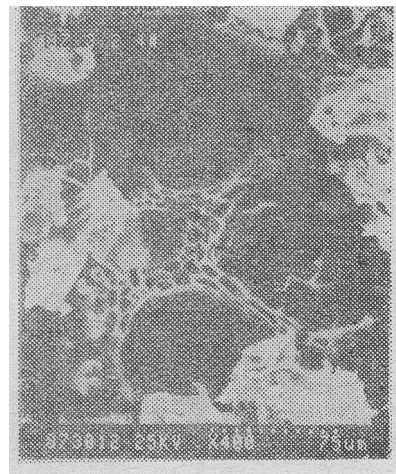


图12 竹子薄壁细胞形貌

的作用。竹纤维的横截面呈轮状(图11)是自然生物结构的特点,纤维直径约为 $22\sim 26\mu\text{m}$,中心孔径约为 $4\mu\text{m}$,是输水导管。辐射轮环分为数块,内层厚约为 $7\mu\text{m}$,外层厚约为 $6\mu\text{m}$ 。靠外层竹纤维密度大,基体主要是薄壁孔状结构(图12),直径为 $3.5\mu\text{m}$ 的网状小孔是吸水导管截面,靠内囊层基体为球状囊素细胞,直径约为 $3.5\mu\text{m}$ (图13)。

2. 竹子/环氧细观拉伸、压缩试验及断口形貌

细观实验的拉伸、压缩强度与宏观试验力学性能比较相差在 $65\sim 106\%$ 范围内,这是由于SEM试件尺寸小(拉伸试件 $25\text{mm}\times 5\text{mm}^2$,压缩试件尺寸为 $20\times 3\times 2\text{mm}$),并与取样位置有关,取在竹纤维多处为高。压缩断裂在中部,呈剪切破坏形式。试件采用短矩形条状,两端圆头加压,试验结果与宏观薄板压缩测试结果一致。表明这种自行设计的SEM的压缩装夹具是可行的。SEM拉伸装置见图2,试件采用了哑铃形,但两端如只靠夹具夹紧承载,有的试件因应力集中,仍断裂在靠端部,拉伸强度仍受影响。拉伸破坏断口裂缝不贯穿,断口

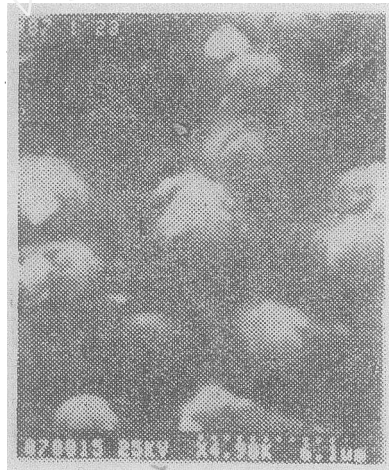


图13 竹圆形囊素基体SEM图



图14 一束竹纤维及周围树脂拉伸横断面



图15 竹/树脂SEM拉伸破坏数根纤维束管断口



图16 竹纤维与树脂的粘结

不齐。从横断面看到一束竹纤维外包片状的树脂基体（图14），与图9(b)纯竹比较人工基体和天然囊壁的不同。

图15是竹/树脂细观拉伸破坏6根维束管的断口，薄壁孔洞及周围填满树脂，因压制成型，与原竹相比，纤维有变形。图16所示竹纤维外粘附一层树脂基体，界面粘结强度好。（图10(a)）纯竹纤维是光滑的。受压的竹纤维呈微屈状（图17），并看到界面及树脂积聚区，图18是一根竹纤维附有树脂的纵向形貌，从竹纤维横截面断口看，因受压制过，直径比原竹小些（ d 为 $11\mu\text{m}$ ），表面附有树脂。压缩断口较齐，并有层间主裂缝贯穿全试件，横断面有损伤源，裂缝发散扩展（图19）。

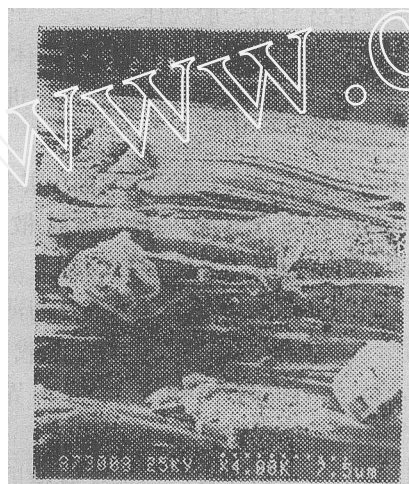


图17 竹/树脂SEM压缩竹纤维的微屈曲



图18 竹/树脂中一根竹纤维的纵向形貌

3. 弯曲及层间剪切的细观断口形貌

弯曲破坏侧向断裂面看到中性面，上面受拉，下面受压（图20）。

层间剪切破坏中面有一主裂缝，层间有次裂缝，受拉区竹纤维承载，受压区树脂挤出树脂碎片（图21）

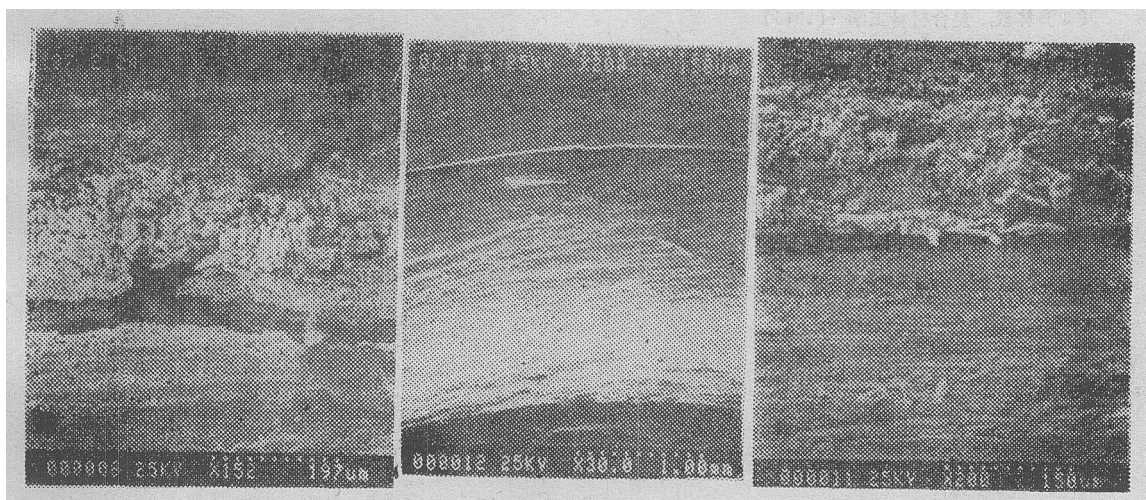


图19 竹/树脂压缩破坏损伤源及裂纹扩展 图20 竹/树脂弯曲破坏拉压面(30X) 图21 竹/树脂层间剪切破坏形貌

六、结 论

1. 竹子是一种天然复合材料,以竹纤维增强环氧的复合材料具有比强度、比刚度高的良好力学性能(高于一般玻璃纤维增强复合材料),比强度为低碳钢的3—4倍。它的拉伸、压缩、弯曲性能都好(表1,2),可应用于建筑、汽车货运装置等结构材料。

2. 单向竹/环氧复合材料受弯时拉、压模量不等,层间剪切性能低,力学性能与层数有关以及计算模型、破坏型式等特点符合一般叠层复合材料的一般规律。

3. 竹/树脂的破坏过程可采用声发射技术监测,起始声发射的出现可预测基体裂缝的产生,突发声发射表明竹/树脂试件的损伤已达临界值程度,其后较快出现破坏,进一步作试验研究,有可能预报破坏。

4. 本工作在扫描电镜上进行细观压缩试验的自行设计的装夹具是合理的(实验结果离散系数为4.2%),拉伸试件采用哑铃形两端铝片加强打孔的方法也还可以(离散系数为8.2%),而夹紧两端的小试件拉伸方案往往断在根部,结果偏低,需要加以改进。

5. 竹子的微观结构既复杂又合理,主要是承力纤维束管的竹纤维及传递力的薄壁囊素基体。竹子经压制与树脂复合,树脂填充了囊素孔洞,材料致密了,增强了传递载荷的能力,因此竹/树脂的宏观拉伸,压缩和弯曲性能都比纯竹稍有提高,同时提高对外界条件的抵抗能力,减少受干裂、受潮变形、虫蛀等降低力学性能的影响。

竹纤维增强树脂复合材料是一种能充分利用我国资源,价格便宜,性能良好适用于一般要求的,有发展前途的结构材料。

参 考 文 献

- (1) Jones.R.M Mechanics of composite Material. (1975)
- (2) Tsai.S.W.Introduction of composites (1984)
- (3) 林毅 复合材料工学 (1975)
- (4) Mock.John.A, Mater, Eng.3(1979), pp.60—63
- (5) Mansur, M.A.and,Aziz.M.A, Int.J.Cem.comp 2(1982), pp.75—82
- (6) Lakkod,S.C.and Patel.J.M.Fibre.Sci.Techand 14(1981),P.319
- (7) Jindal.U.C.Indian.For.4(1984),pp.381—395
- (8) Pakotiprapha.B.et.al.Int.J.Hous.Sci.Appl 3(1979),pp.167—190
- (9) Ginsburg.K.M.and F.G.Shin《High modulus Polymers and composites》1984 p.433.

THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICRO- STRUCTURAL ANALYSES OF BAMBOO /EPOXY COMPOSITES

Xian Xingjuan, Zheng Weiping and Li Duanyi

Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing

F. G. Shin

Hong Kong Polytechnic, Hong Kong

(Received December 1st, 1987)

ABSTRACT

Bamboo reinforced epoxy possesses reasonably good properties to warrant its use as a structural material, and is fabricated by utilizing bamboo, an abundant natural resource, in the technology of fibre composites. Literature on bamboo/plastics composites is rare.

This work is an experimental study of unidirectional bamboo/epoxy laminates of varying laminae number, in which tensile, compressive, flexural and interlaminar shear properties are evaluated. Further, the disposition of bamboo fibre, the parenchymatous tissue, and the resin matrix under different loading conditions are examined. Our results show that the specific strength and specific modulus of bamboo/epoxy laminates are adequate, the former being 3-4 times higher than that of mild steel. Its mechanical properties are generally comparable to those of ordinary fibreglass composites. The fracture behaviour of bamboo/epoxy under different loading conditions were observed using both acoustic emission techniques and scanning electron microscopy. The fracture mode varied with load, the fracture mechanism being similar to fibreglass and carbon reinforced composites. Microstructural analyses revealed that natural bamboo is eligible a fibre composite in itself; its inclusion in a plastic matrix helps solve the problems of cracking due to desiccation and bioerosion caused by insect pests. Furthermore, the thickness and shape of the composite can be tailored during fabrication to meet specific requirements, thereby enabling a wide spectrum of applications.