

## 竹材的微观结构及其与力学性能的关系\*

冼杏娟

冼定国

(中国科学院力学研究所)

(香港理工学院应用物理系)

### 摘 要

采用宏观与微观相结合的方法,研究了不同种类不同部位的沿壁厚分层竹材的力学性能与生物组织微结构的关系。在扫描电镜内进行试验动态测试,并分析其形态。竹材主要由承力的纤维厚壁细胞和起速接作用并传递载荷的薄壁细胞基体所组成。竹材具有良好的比强度,比刚度,是其厚壁细胞竹纤维排列整齐的结果。在宏观力学性能方面,毛竹高于蒿竹,靠上部大于基部,竹壁外层优于内层,这都是与纤维组织细密、纤维层厚、纤维密度大等因素有关。对竹材生物组织微观结构合理分布和独特优越性的了解,不仅对竹材细胞组织的真实形态有进一步的科学认识,而且对研制竹/塑及其它复合材料增强的有效性和纤维铺层设计都有实际意义,并有助于对不同部位竹材的充分利用。

**关键词** 竹材; 微观结构; 力学性质

### 前 言

竹材是植物中能作为结构材料重要的原材料,它具有排列整齐的生物细胞和管壁的几何形状,强度高、弹性好、性能稳定,而且比重小(0.6~1.2)。它的比强度、比刚度高于木材和普通钢铁,因而能广泛应用于建筑工程。例如用作建筑的棚架,其抗飓风的能力比钢架强。竹材的成长期为2~4年,比木材短几倍,盛产于东亚、东南亚,中国年收购量在18亿根以上。

对竹材的力学性能, Lakkard S. C<sup>[1]</sup> 和 Jindal V. C<sup>[2]</sup> 作过整体宏观的研究。作者在<sup>[3]</sup>中沿竹壁厚分层研究其力学行为并指出竹材符合复合材

本文于1989年11月收到。

\*本工作得到中国自然科学基金项目1860360和香港理工学院研究委员会的资助。张瑞玲和绳刚参加了实验工作,在此表示感谢。

料的叠层原理, 也曾用显微镜观测竹材细胞的组成。但更微观高层次在扫描电镜上直接动态测试原本形貌、系统分析竹材微观结构与力学性能关系的工作尚未见发表。

本工作选择了两种性能好而又盛产于中国的竹子——毛竹和蒿竹, 研究其不同部位的宏观力学性能, 以及小尺度试样在扫描电镜(SEM)加载台上进行动态试验及观测, 系统地分析竹材各部位不同组成生物组织的微观结构特征, 以及它们和力学性能的关系, 使能充分发挥竹材的优越性能, 吸取生物材料结构合理, 独突的优越性应用于发展新型的竹/塑及其它复合材料。

### 试件材料与实验方法

竹子的种类有二百多种, 选择了性能好而产量较大的毛竹(*Phyllostachys Pubescens*) 和蒿竹(*Bambusa pervariabilis*) 两种。毛竹产量占竹材总产量的一半, 长10至25米, 径10至20厘米, 表面较光洁, 材质坚韧, 用途很广, 多用于建筑工程。蒿竹长7至8米, 径4至5.5厘米, 秆直刚性好, 用于农具和生活用具等。竹材经自然干燥, 取两种竹材的上部和靠根部, 上部是取离根部约3米处的部位(不是竹梢部)。先沿横断面锯取竹子两竹节间的一段, 按一般试验标准长度和适用于SEM加载台试样的长度, 然后沿纵向按所需尺寸, 径向破开, 取下整片竹壁的试件, 再沿弦向分取外层、中层及内层(3~6层片状)试件, 粗糙面先用砂纸打光, 厚度的量度取3~6个值的平均值。在SEM内进行试验的小尺度试样, 根据标准按比例缩小, 短样剪切的垮高比 $\approx 5$ , 压缩试件保证不先失稳。

宏观尺度试件的拉伸、压缩、弯曲性能在Instron 1195万能试验机上进行, 中层拉伸试件贴应变片测量泊桑比。弯曲试验分别取试件硬质面向上和向下两种加载方式进行, 视其影响。小尺度试样在HITACHI S570扫描电镜SEM上进行。拉伸试样加工成哑铃形, 采用原设备的拉伸夹头。压缩夹具和短梁剪切夹具均是自行设计加工, 从实验结果看, 这两套夹具是适用的。在SEM内进行实验时, 动态观测竹材在不同加载条件下的破坏过程与形貌。观测竹材各部位组成细胞加载前的微观结构, 以及破坏后的断口形貌。因为试件观测面不需磨平处理, 比光学显微镜得到直接的、保留原面目的微观层次高的图象。并采用GUANTIMET520图象分析仪分辨不同竹层竹纤维的含量及有关参数。

### 力学性能测试结果

力学性能测试结果见表1。

表1 不同种类、不同部位

Table 1 result of the physical properties of

试 件 Trial sample		宏 观 力 Macrocosmic physical			
竹 种 Species of bamboo	部 位 Positions	拉 伸 性 能 Drawn properties			
		$\sigma_T$ (MPa)	$E_T$ (GPa)	$\gamma$	
毛 竹	上部 upper position	外层 outer layer	339	18.1	0.35
		中层 Middle layer	186	13.1	
		内层 inner layer	70.4	4.5	
		整片 whole sheet	142	17.7	
	下部 lower position	外层 outer layer	293		0.34
		中层 Middle layer	125	9.0	
		内层 inner layer	52.4		
		整片 whole sheet	121		
蒿 竹	上部 upper position	外层 outer layer	329	10.6	0.21
		中层 Middle layer	126	9.9	
		内层 inner layer	91	2.8	
		整片 whole sheet	129	12.8	
	下部 lower position	外层 outer layer	183		0.21
		中层 Middle layer	88	8.7	
		内层 inner layer	65		
		整片 whole sheet	80		

## 竹材力学性能测试结果

bamboos in different species and positions

学 性 能 Properties			在SEM内的试验结果 Trial results in SEM					
压缩性能 Compressed Properties	弯 曲 性 能 Bending Properties		拉伸性能 Drawn Properties	压缩性能 Compressed Properties	短梁剪切性能 Shearing Property			
$\sigma_C$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$E_B$ (GPa)	$\sigma_T$ (MPa)	$\sigma_C$ (MPa)	$\tau_B$ (MPa)			
75.2	硬面在上(1)420 硬面在下(2)230	328	38.2 24.8	110	119	49.4		
	202	21.3	4.7 3.9		65.9	20.1		
	(1)111 (2)54.7	82.9	4.3		51.4	17.6		
	74	(1)148 (2)156	152	9.9 13.9	100	83.7	21.6	
		(1)338 (2)220	279	36.9 16.7				76.9
	73	(1)124 (2)105	118	7.38 7.24	90.3	57.4	12.4	
(1)83.3 (2)48.2		65.7	3.16 3.53	40		11.5		
(1)120 (2)142		126	9.35 14.3	70.6		44.1	12.3	
(1)376 (2)278		327	36.6 28.2		112			25.1
197		19.6	6.02 4.27		51.8			13.7
72.6		(1)106 (2)71.6	88.8	12.4 8.01	70.6	42.6	11.1	
	(1)148 (2)101	125	37.8 21.9	78.6		22.2		
	(1)363 (2)255	309	7.15	44.1		12.3		
	(1)69.6 (2)57.1	63.4	4.34 2.74	41.2	5.6			
	72.6	(1)124 (2)101	113	10.6 7.66	70.6	44.1	12.3	
				9.13				

1. 宏观和小尺度试件的各项力学性能,毛竹一般高于蒿竹。拉伸强度 $\sigma_T$ 高10~30%;压缩强度 $\sigma_C$ 高3~20%;弯曲强度 $\sigma_B$ 约高10%;层间剪切强度 $\tau_{13}$ 平均约高30%。少量蒿竹内层试件的性能略高于毛竹的。

2. 竹材上部(指在80%竹高范围内)的力学性能高于靠根部的性能。如毛竹的拉伸强度上部的 $\sigma_{T_{ut}}$ 约比下部的 $\sigma_{T_{dt}}$ 高15%;压缩强度 $\sigma_{C_{ut}}$ 比 $\sigma_{C_{dt}}$ 大2%;弯曲强度 $\sigma_{B_{ut}}$ 约比 $\sigma_{B_{dt}}$ 高17%,弯曲模量 $E_{B_{ut}}$ 比 $E_{B_{dt}}$ 大4%。

3. 竹材沿壁厚径向外层的强度模量最高,内层最低,中层的强度与整片的相近。如毛竹下部中层的抗拉强度 $\sigma_{T_{dm}}$ 为125 MPa,整片的 $\sigma_{T_{dt}}$ 为121 MPa,蒿竹上部中层的 $\sigma_{T_{dm}}$ 为126 MPa,整片的 $\sigma_{nt}$ 为129 MPa。毛竹外层的抗拉强度 $\sigma_T$ 。比内层的 $\sigma_{Ti}$ 约大5倍;而蒿竹的 $\sigma_T$ 。比 $\sigma_{Ti}$ 只大3倍。这是由于蒿竹的直径比毛竹直径小3倍多,内层与外层性能的差别也小些。

4. 为了判别受弯时不同承载面的影响,对整片竹壁及外、中、内三层分别进行了硬质面向上和硬质面向下的三点弯曲测试,例如竹表层向上或内层向上,对整片蒿竹和两种竹的外、中、内三层片试件都是硬质面向上的弯曲性能比硬质面向下的约高1.2~2.2倍。这是由于弯曲时上表面中部直接承受加载头的挤压,硬质面抗挤压能力强,但对较厚的(6—8 mm)毛竹整片试件,硬质面向上的,弯曲性能低于硬质面向下的约5~15%。因为竹材承力纤维表面沿径向逐次减少,中性面不在中间而偏向表面<sup>[4]</sup>。试件厚了这种影响大于抗挤压的效果,所以结果与一般厚度试件的不同。浸水只对内层向上受压的试件稍有减弱的影响,而对表面向上的弯曲性能没有影响。竹材外层的弯曲强度 $\sigma_{Bo}$ 比内层的 $\sigma_{Bi}$ 高约2~4倍。竹材弯曲性能与沿竹表层径向距离的关系和作者工作<sup>[3]</sup>符合。

5. 在扫描电镜内进行小尺度的试验,压缩破坏前没有失稳现象,是真实的压缩强度,断裂在中部。短梁剪切实验结果是层间剪切破坏,数据较集中,外层片的压缩强度 $\sigma_{oo}$ ,层间剪切强度 $\tau_{130}$ 比内层的约大2倍多。

## 不同竹材组织的微观结构与力学性能的关系

竹材主要的组成,是作为承力元件的维管束厚壁细胞和起连接作用作为传递载荷的薄壁细胞。维管束在结构上可分为纤维、木质化的导管、筛管和细胞腔等,纤维厚壁细胞沿轴向排列整齐,对竹材的力学性能贡献最大,使竹材具有高的强度和刚度。薄壁细胞有包围着纤维网状薄壁细胞和多角形薄壁细胞。竹纤维含量自内层(竹黄)至表皮(竹青)沿径向逐渐增大,因此强度也随之逐次提高。图1 a. b. c是竹壁横断面内、中、外层的显微形貌,显示

下标: T 拉伸, C 压缩, B 弯曲; u 上部, d 下部, t 整形, o 外层, m 中层, i 内层

厚壁细胞的逐渐增多。由图象分析竹纤维(厚壁细胞)的面积百分数在：内层(图1. a)中层(图1. b)外层(图1. c)分别为25.3%，43.7%和61.2%，厚壁细胞数依次为20, 34, 35, 其平均等效直径, 外层的比中层大12%，比内层大59%。图 2 展示了蒿竹纤维体积含量  $V_f$  与壁厚位置的关系, 是沿壁厚自

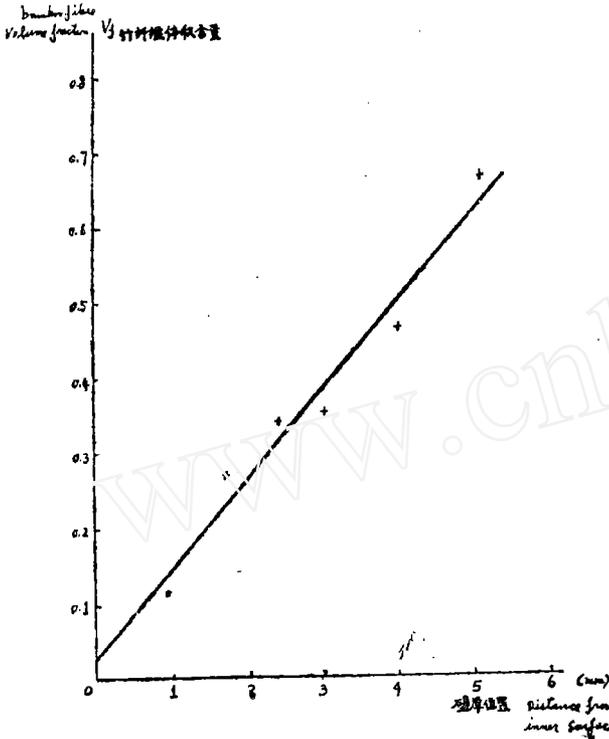


图 2 竹纤维体积含量与壁厚的位置的关系  
Fig. 2 Relationship of bamboo fibre volume fraction and position of bamboo wall thickness

内至外层取 6 片(每片厚约 0.8 mm)的横截面测得  $V_f$ , 由此  $V_f$  值从<sup>[3]</sup>中的  $E_B-V_f$  关系中, 求得的弯曲模量  $E_B$  与本实验测得的相符。图 3 是在扫描电镜 (SEM) 上蒿竹纤维束的形貌, 图 3. a 是竹壁外层, 纤维密集, 3 b 是竹壁中层, 中层纤维不如外层的整齐, 而且囊素细胞多。从一根纤维的横截面看, 竹外层纤维细胞壁厚而且密集(图 4. a), 内层纤维的中心孔腔与轮壁间隙大些(图 4 b)。因此竹内的比重自表皮向内层逐渐降低, 内层的比重约为外层的 60%。强度亦随之变化。

图 5 a 是竹材靠上部纵向截面的 SEM 形貌, 显示一层纤维两层薄壁细胞, 细胞排列整齐, 如复合材料的层状结构。图 5 b 是竹材靠下部的纤维层不如靠上部的厚, 而且囊素细胞积聚多, 不像上部多角形薄壁细胞排列的规则, 因此力学性能低些。从生物的观点, 竹材靠上部(80%竹高范围)已生长成熟, 光合作用养份吸收较丰富, 下部靠根部细胞组织较疏松逐渐老化。图 6 是薄壁细胞的纵向 SEM 形貌。

毛竹的竹壁厚实, 从横截面 SEM 形貌图 7 a 看到毛竹的组织比蒿竹(图 7 b)的致密。从纵截面看毛竹的纤维直径(图 8 a,  $d \approx 21 \mu\text{m}$ )大于蒿竹的(图 8 b,  $d \approx 14 \mu\text{m}$ )。一般毛竹纤维直径  $d$  在  $16.7 \sim 33 \mu\text{m}$  范围, 而蒿竹

纤维d在10~18 μm范围,而每根纤维都有薄壁细胞包围。因此毛竹的承载元件截面大些,力学性能也高,尤其在拉伸和层间剪切性能的优越更明显。

此外,竹节部分纤维量少,且细胞形状不如竹节间的规则,且呈扭结状,扁状(图9),竹节处的多角形薄壁细胞的空腔也较多较大(图10 a. b)因此力学性能只有竹材的50%。从竹材表皮的SEM图象(图11)看到透气的小孔及腊状层。竹内层竹黄呈杂乱状的网状细胞(图12),强度很低。这两表面层对压制竹/塑复合材料的粘结强度有影响,对制造要求高的产品需作处理。

### 破坏模型

竹材受拉伸载荷时,损伤从试件厚度边缘分层开始。对整片竹壁,自内层(竹黄)先破坏。对竹中层试件,从边缘表面纤维逐次断裂,自基体崩裂,最后完全破坏(图13)。蒿竹的纤维较细,破坏呈刷子状,和复合材料破坏型式相似(图14)。

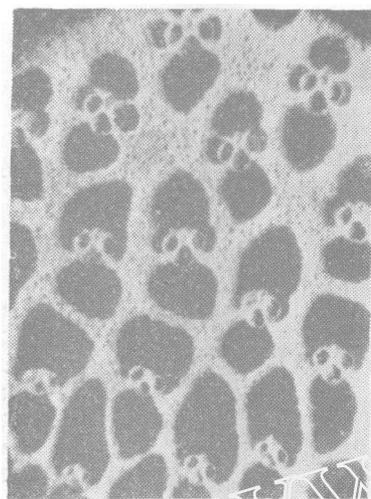
图15是竹壁中层在SEM内受压缩时的破坏情况,破坏自试件厚度边缘开始,纤维与囊素受挤压破坏。图16是压缩断口中一根纤维的破坏形貌,纤维呈脆性断裂,而周围的囊素细胞呈塑性破坏,展示了竹材的粘弹性性质。

竹材中层在SEM进行短梁剪切试验时,纤维逐层剪断,最后试件完全破坏(图17)。从试件两端明显看到试件受剪分层的破坏形式。图18是剪切破坏后一根纤维纵向析断的形貌。

### 结 语

竹材是天然的复合材料,它的微观结构及破坏型式与人工制造的复合材料相似,它也是非均匀各向异性材料,符合叠层板原理。从力学观点竹材主要由承力的纤维厚壁细胞(占50%以上)和起连接作用并传递载荷的薄壁细胞基体组成。而实际上它的生物结构比较复杂,它适应环境而生长完善,需要输送和储存水分、养料的管腔,而且也更合理。竹材在风吹雨打的天然环境中,长成了纤维厚壁细胞含量自外层沿壁厚递减的特性,适应了承受风载弯曲的结构要求。这就启示我们在制造复合材料时可应用仿生原理。例如纤维的铺设密度,纤维的直径可根据受力情况而变化等。

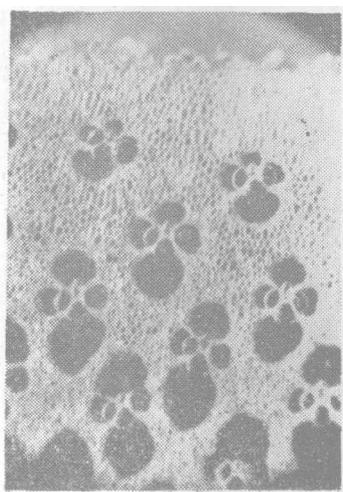
竹材的力学性能相当好,强度比木材高50~100%,比强度比刚度更高。毛竹性能优于蒿竹。在80%全根竹范围内靠上部(不指梢部)性能高于靠根部的竹材。沿竹壁径向自内层向外层力学性能递增。抗拉强度比抗压强度的递增范围大。宏观力学性能的结果是由竹材各部分组成的微观结构所决定的。纤维层宽,纤维密度大,纤维组织致密,厚壁细胞排列规则等是强度高的主要因素。



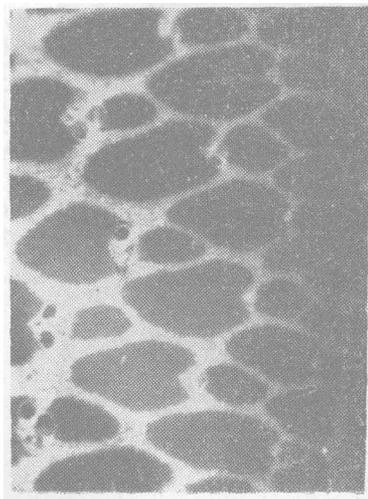
b 中层



图 6 竹材薄壁细胞层纵向形貌



a 内层



c 外层

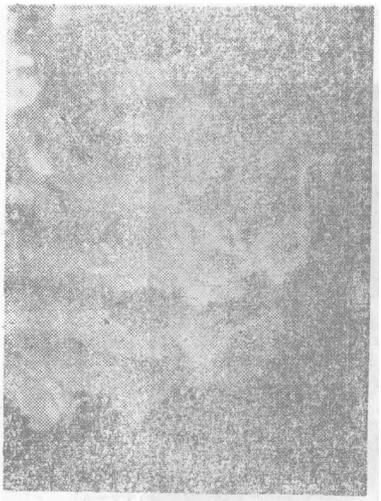
图 1 厚壁细胞(纤维)沿竹壁分布状况(横截面)



a 外层

b 内层

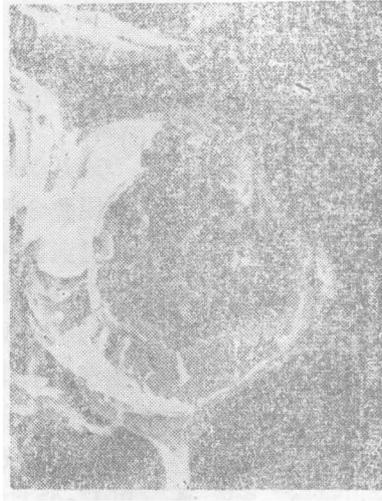
图3 竹纤维密度分布纵向形貌

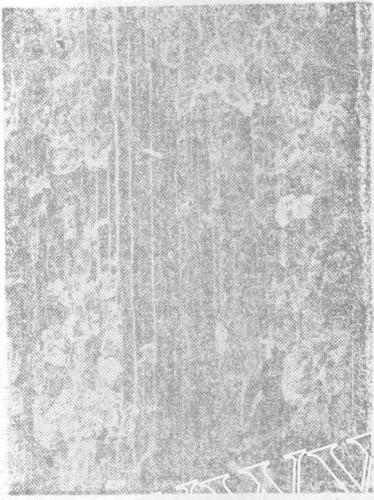


a 外层疏松

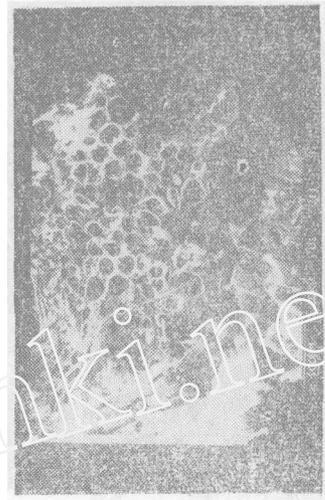
b 内层致密

图4 单根竹纤维在壁厚不同位置的微结构形貌

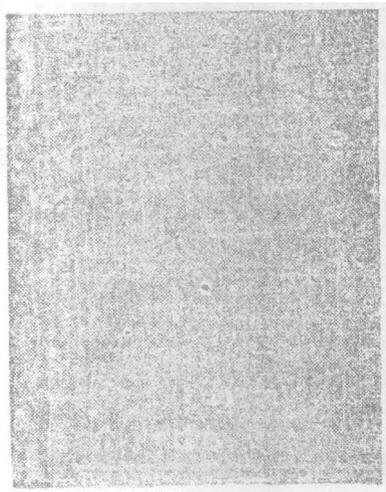




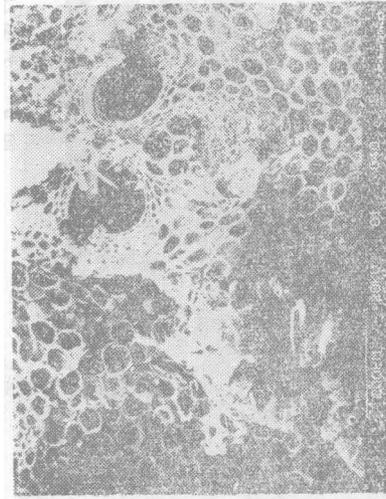
a 内层纤维层薄



b 笋竹



a 外层纤维层厚



a 毛竹

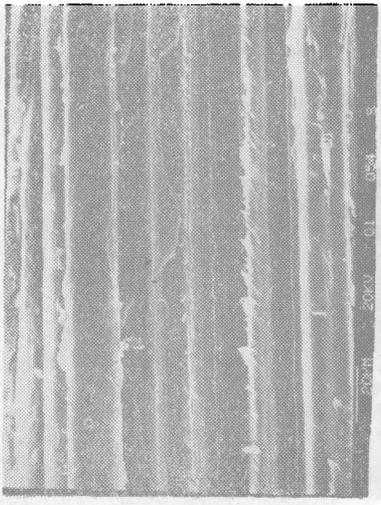
图 5 竹材纵向层状(基体—纤维—基体)结构在不同壁厚下的形貌

图 7 不同竹种横截面表观

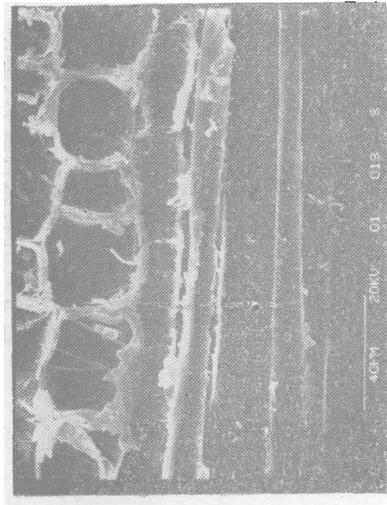


a 毛竹

图 8 不同竹种纤维纵向截面形貌



b 篙竹



a 竹节



b 竹节间

图 10 竹节及节间多角形薄壁细胞分布



图11 竹材外表面腊状层及透气孔

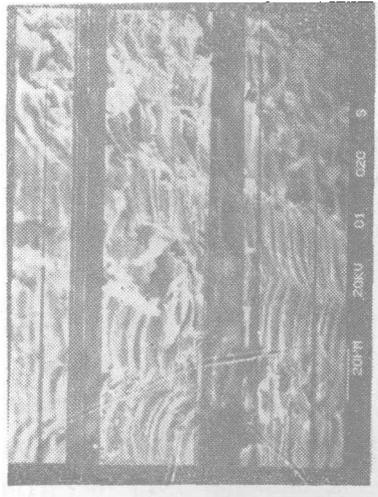


图9 竹节的扁状细胞

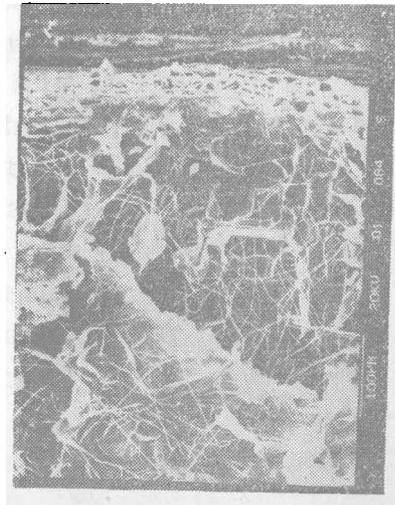


图12 竹材内层表面囊状细胞



图13 毛竹宏观破坏型式

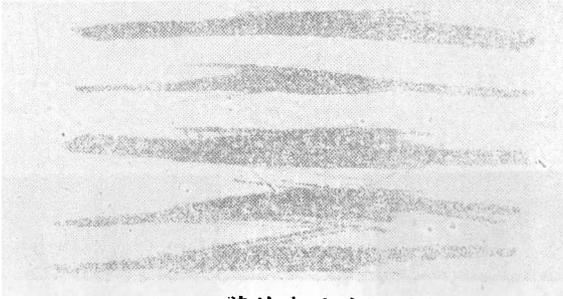


图14 蒿竹宏观破坏型式

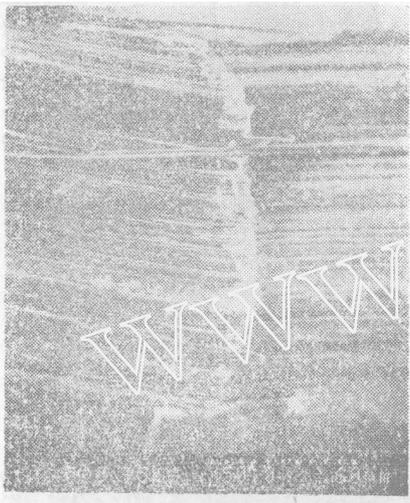


图15 在SEM内动态压缩破坏



图16 一根竹纤维压坏后的断裂形貌



图17 在SEM内短梁剪切破坏



图18 在SEM内一根竹纤维剪断形貌

对竹材各组分微观结构的了解, 除了对细胞组织的科学认识, 还将有组于充分利用不同竹材不同部位竹材的力学性能, 应用于不同的要求。同时对研制竹/塑复合材料中如何有效的增强使性能提高具有实际意义。

### 参 考 文 献

- [1] S. C. Lakkard, J. M. Patel 1981 *Fiber Sei, Technol.* 14. 519
- [2] U. C. Jindal 1985 *Indian For.* 110, 381
- [3] 关锡鸿, 沈定国、叶颖薇 1981 *复合材料学报*
- [4] 洗杏娟、沈定国、郑维平、李端义 1988 *复合材料学报* 5(3)1

## THE RELATIONSHIP OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO

Xian Xingjuan

(*Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences*)

Xian Dongguo

(*Department of Applied Physics Hong Kong Polytechnic*)

### Abstract

Macroscopic and Microscopic methods were used to investigate the relationship of microstructure and mechanical properties of different species and position of bamboo. Comparative tests of tension, compression, flexural and interlaminar shear were carried out for conventional specimen and small scale specimen in SEM. The vascular bundles and fibres is to strengthen, while the parenchyma form the matrix and to transmit stress. Because of the thickwalled fibrous cells are in order array axially, bamboo possess reasonably good specific strength and specific modulus. As a result of dense fibre tissue, thicker fibrous layer and larger density of fibre, the mechanical properties of phyllostochys bamboo, strips of upper position and walled layer are better than those of Bambusoides, strips of near root and inner layer respectively. The mechanism is explained by fractograph and dynamic failure process. These natural distribution and design may have implication in the development of man-made fibre reinforced composite materials.

Key words: Bamboo; Microstructure; Mechanical properties