

竹材的断裂特性*

冼杏娟

(中国科学院力学研究所)

冼定国

(香港理工学院)

摘 要 本文研究了常用的毛竹与蒿竹在不同面开缺口的断裂特性。采用常用的和在扫描电镜内的弯曲加载方式,实时观测裂缝动态扩展过程及破坏形式。结果表明:竹材具有良好的断裂性能,断裂韧性 K_{IC} 一般比木材高 30%。裂缝扩展方向随着竹层径向纤维密度变化而呈现的各向异性程度的不同而异,内层近似各向同性,裂缝呈自相似扩展;外层纤维含量大,呈明显的各向异性,裂缝沿纤维界面方向扩展。扩展过程类似复合材料,分弹性、非弹性、稳定与不稳定四个阶段。从微观结构破坏讨论了竹材的断裂机理。

关键词 竹材断裂, 韧性, 微观结构

1 引 言

选择和比较结构材料的标准主要是:材料的资源;生产该材料所需耗的能源;材料的比强度比刚度以及断裂性能(断裂韧性及断裂伸长满足使用要求等)。竹材是天然植物能做结构材料中重要的一种,它具有排列整齐的细胞结构,竹纤维素(厚壁细胞)刚直强劲是主要的承力件,薄壁细胞(木质素)作为基体连接纤维并传递载荷,构成一种天然的复合材料。竹材资源丰富,成材期二至四年,比木材短,生长茂密,盛产于中国和东南亚。竹材的强度高、弹性好、性能稳定、比重小($0.6-1.2\text{g}/\text{cm}^3$),而且竹材的纤维素含量高于木材,细胞排列轴向化强,因此竹材的比强度高于木材和中碳钢的 2-4 倍,与玻璃纤维增强塑料(GFRP)接近,竹材的比刚度高于木材和 GFRP。关于竹材整体宏观的力学性能,曾有人作过研究^(1,2)。笔者在⁽³⁾中研究了竹材沿壁厚分片的拉伸、弯曲性能,表明竹材符合材料的叠层原理;在工作⁽⁴⁾中概述了竹材及竹/塑复合材料力学性能的主要结果并与其它材料作比较,提出了应用范围;在工作⁽⁵⁾中采用宏观与微观相结合的方法,研究了毛竹与蒿竹不同部位竹层的力学性能与微观结构的关系。但是对竹材断裂性能的研究尚未见发表。了解竹材的断裂机理,将能充分发挥其轻质高强的优越性,取得更好的经济效益,并为进一步研究竹/塑复合材料的断裂特性提供依据。

本文研究了毛竹与蒿竹分别在侧面、外表和内层开缺口的断裂特性。采用常规的与在扫描电镜内的三点弯曲加载方式,实时观测裂缝动态扩展过程及破坏形式。结果表明竹材的断裂性能高于木材,以侧面缺口为代表,竹材的断裂韧性 K_{IC} 高于木材的 30%。在不

* 国家自然科学基金资助项目 1860360;1990年8月9日收到初稿。

本文联系人: 冼杏娟, 副研究员, 北京市 100080, 中国科学院力学研究所

同层面的断裂韧性及裂缝扩展有各自的特点,竹材侧面的断裂特性具有代表性;竹材表层具有明显的各向异性;内层呈各向同性表徵。

2 试件材料与测试方法

选用性能良好而产量较大的毛竹(*Phyllostachys*)和蒿竹(*Bambusoides*)做试验材料,截取竹节间段长100mm,毛竹与蒿竹分别取名义尺寸宽度11mm和9.5mm,厚度为7mm和4.7mm。蒿竹试件沿侧面在中部垂直竹纤维切深度为1.9mm的缺口,是B-1类试件,另两类分别沿表皮(B-1)和内层(B-A)切深度为2mm的缺口。毛竹试件沿侧面的切口深度有三种,分别为2.5、2.4、2.1mm(P-I、P-I'、P-I''类),沿表皮的切口深度1.4mm(P-I类)。传统的断裂试验在Instron 1195试验机上进行,采用三点弯曲加载方式,用WILD M₃型长焦距立体显微镜拍照竹试件裂缝扩展情况与断裂破坏形式,记录缺口开始开裂的载荷、各阶段应力水平及断裂载荷。同时在Hitachi S 570扫描电镜(SEM)内进行小尺度试样的断裂试验,微观观测动态断裂过程,分析不同面缺口的断裂特性与微观组织的关系。

3 竹材的断裂韧性

用边缺口以三点弯曲加载方式进行断裂试验,加载至缺口顶端裂缝出现,此时临界载荷为 P_c 。继续加载,分级拍照裂缝扩展长度 Δa 及损伤形式,直至最后破坏,断裂载荷为 P_{max} 。

确定临界断裂韧性 K_{Ic} 的关系⁽⁶⁾:

$$K_{Ic} = \left(\frac{P_c S}{t w^2} \right) y \left(\frac{a}{w} \right) \quad (1)$$

式中 S —跨距, t —厚度, w —宽度, a —缺口长度, $y\left(\frac{a}{w}\right)$ —修正系数。

对于三点弯曲,修正系数为⁽⁷⁾:

$$y\left(\frac{a}{w}\right) = 1.09 - 1.73\left(\frac{a}{w}\right) + 8.2\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 14.2\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 14.6\left(\frac{a}{w}\right)^4$$

由实验确定的不同竹材和不同面缺口试件的断裂韧性见表1。

由实验结果看,竹材的断裂韧性相当高,侧面切口的断裂韧性 K_{Ic}^f 的平均值:毛竹为 $3278\text{kPa}\sqrt{\text{m}}$,蒿竹为 $3802\text{kPa}\sqrt{\text{m}}$ 。所有 K_{Ic} 的平均值,蒿竹比毛竹的高2.6%。由于缺口长度变化不大,而且缝长与宽度比 $\frac{a}{w}$ 变化不大,因此对 K_{Ic} 影响很小。在SEM内,小尺度试件测试结果与传统方法实验值差异在-6.3—+0.3%范围内,相当接近。切口在外层的,由于切断了竹纤维密度高的部位,因此,断裂韧性 K_{Ic}^o 低些,如毛竹外层切口的 K_{Ic}^o 为 $2760\text{kPa}\sqrt{\text{m}}$,比侧面切口的 K_{Ic}^f 低16.4%。切口在内层的因切断部位囊素细胞多,竹纤维密度低,所以断裂韧性 K_{Ic}^i 高些,如蒿竹内层切口的 K_{Ic}^i 为 $3900\text{kPa}\sqrt{\text{m}}$,比侧面切口的 K_{Ic}^f 高2.6%。

从载荷—位移曲线(图1)看,一般在45—60% P_{max} (破坏载荷)前呈线性,没有裂缝

出现(阶段 I), 载荷再增加一点, 达 55-77% P_{max} 时, 即在斜率改变时, 缺口顶端裂缝开始出现, 即达临界载荷 P_c (A 处), 然后载荷缓慢增加, 裂缝稳定扩展(阶段 II), 达 P_{max} (B 处) 后载荷再缓慢下降, 位移迅速增大, 裂缝不稳定扩展(阶段 III), 呈良好韧性。

表 1 竹材断裂性能测试结果

Table 1 Fracture toughness of bamboo

species	notch position	a, mm	a/w	σ_B , MPa	E_B , GPa	P_c/P_{max}	K_{Ic} , kPa \sqrt{m}
Phyllostachy	flank unnotch	—	—	142	14.2	—	—
	flank notch	2.5	0.225	—	—	0.55	3145
		2.4	0.204	—	—	0.48	3259
		2.1	0.201	—	—	0.55	3354
		1.0	0.20	—	—	0.65	3354
	outwards unnotch	—	—	120	11.8	—	—
		1.4	0.201	—	—	0.73	2760
Bambusoides	flank unnotch	—	—	125	10.2	—	—
	flank notch	1.9	0.20	—	—	0.55	4047
		0.9	0.30	—	—	0.77	3531
	outwards unnotch	—	—	101	7.66	—	—
	outwards notch	2	0.43	—	—	0.52	1186
	inner unnotch	—	—	124	10.6	—	—
	inner notch	2	0.43	—	—	0.88	3900

a: crack length, w: width, σ_B : flexural strength, E_B : flexural modulus, P_c : critical loading, P_{max} : ult loading,

K_{Ic} : fracture toughness

4 裂缝扩展

竹材裂缝扩展一般沿竹纤维与囊素基体的界面方向, 图 2 是毛竹侧面切口试件在 SEM 内受弯曲载荷动态观察形貌, 裂缝自缺口顶端沿细胞壁界面扩展, 主裂缝方向与缺口长度方向一致, 成自相似扩展, 这是从内层面观察到的。图 3 是内层面裂缝动态扩展过程, 图 3(a) 表示, 当加载到临界载荷 P_c 时, 裂缝开始在缺口顶端出现的情况(相当图 1 中 A 处), 主裂缝先沿与缺口长度方向成一小角度稳定扩展, 当载荷增至一定值时, 产生多根裂缝沿垂直切口的竹纤维界面方向扩展(图 3b 相当阶段 II), 然后形成非稳定扩展(阶段 III), 在囊素细胞层类似各向同类材料, 裂缝自相似扩展; 中间是厚细胞纤维层, 裂缝

沿纤维界面扩展。普通试件侧面带缺口，在试验机进行断裂试验中，内层面基本沿裂缝长度方向伸展，类似各向同性材料，因内层囊素细胞多，厚壁细胞纤维少。

外层面竹纤维密度大，缺口顶端裂缝不沿缺口长度方向扩展，而是沿纤维(宏观界面)方向扩展，直至破坏。图 4(a)(b)是传统断裂试验的竹外表面层裂缝扩展过程。

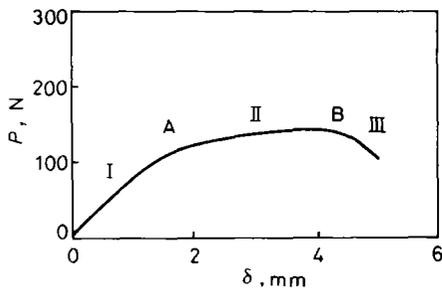


图 1 竹材弯曲断裂载荷 P —位移 δ 曲线

Fig.1 Load (P) vs deformation (δ) of bending fracture on bamboo

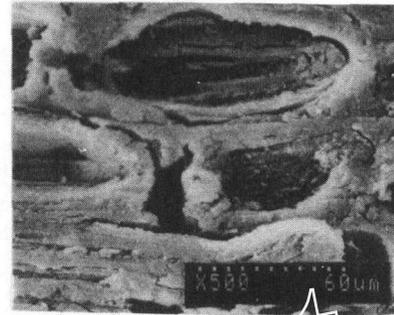


图 2 裂缝沿界面扩展(SEM)

Fig.2 Crack propagation along interface (in situ SEM)

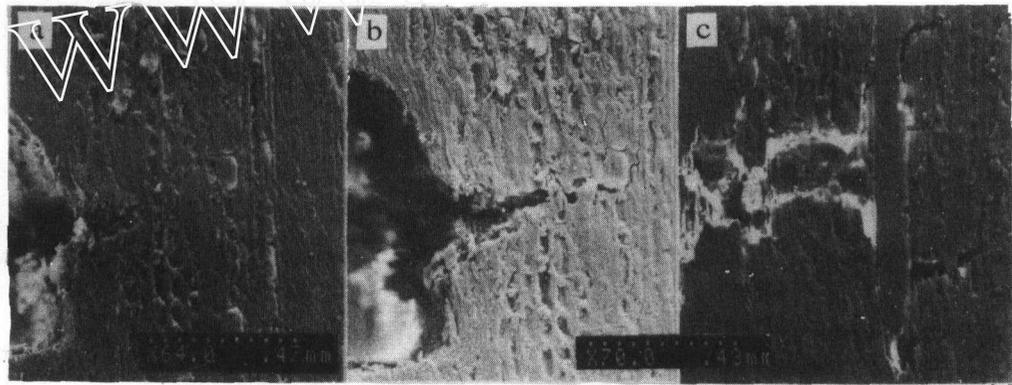


图 3 竹内层裂缝扩展(SEM)

Fig.3 Crack propagation on inner of bamboo (in situ SEM)

图 5 是在 SEM 内蒿竹外层断裂破坏过程，展示裂缝沿纵向稳定扩展，呈明显的各向异性。

图 6 是毛竹外层 SEM 断裂破坏。由断裂形貌可看到蒿竹纤维韧性较好，因此其断裂韧性 K_{Ic} 比毛竹大。而蒿竹的强度、刚度稍低于毛竹，符合一股材料韧性与强度的关系。蒿竹弯曲强度比毛竹的低 12%，而蒿竹断裂韧性比毛竹高 17%，强度损失不大，表明竹材的强度与韧度匹配较好。毛竹强度稍高是因纤维较强⁽⁵⁾。

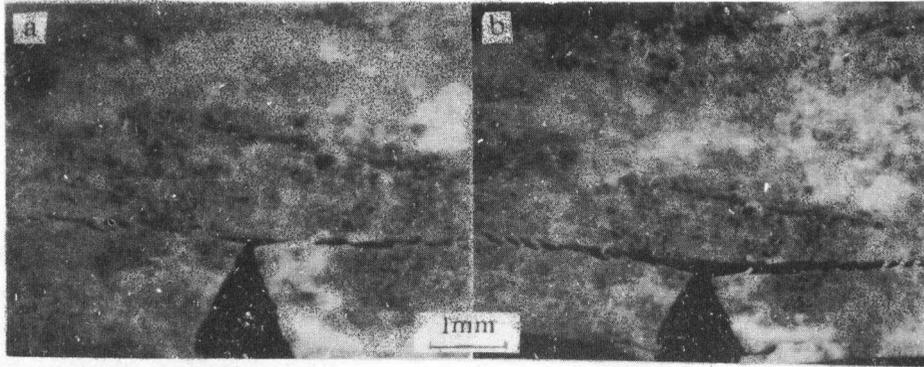


图 4 竹表面层裂缝扩展过程

Fig.4 Crack propagation on surface of bamboo

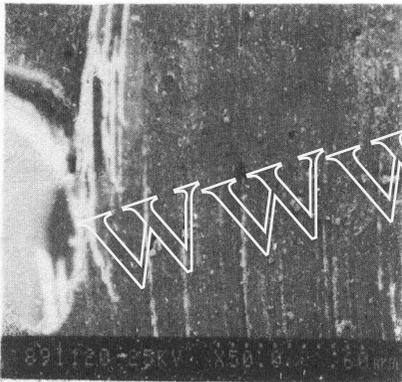


图 5 蒿竹外层断裂破坏(SEM)

Fig.5 Fracture process on outwards of Bambusoides (SEM)



图 6 毛竹外层断裂(SEM)

Fig.6 Fracture on outwards of Phyllostachys (SEM)

5 结 语

1. 竹材的断裂韧性 K_{Ic} 相当好，一般以侧面垂直纤维方向开缺口为代表， K_{Ic} 在 $3000-4000\text{kPa}\sqrt{m}$ 范围内，比一般木材大 30%，仅次于杉木。竹材的断裂性能良好，可做结构材料使用。而且竹材的韧性与强度匹配较好。

2. 竹材断裂时的裂缝扩展特性与复合材料相似，呈各向异性的特征，自竹表面径向至内层随着竹纤维含量的减少而减弱，在大部分厚度范围内，裂缝沿纤维界面方向扩展，具有各向异性特征。在内层以囊素细胞为主，裂缝沿本身长度方向扩展，呈各向同性。

3. 由于竹材韧性较好，裂缝扩展过程较缓慢，经历弹性、非弹性、稳定扩展和不稳定扩展等阶段，不会突然破坏，它的损伤容限较好。

感谢李端义、李传鼎和绳刚同志参加了实验工作。

参 考 文 献

- 1 Lakkad S C, Patel M. *Fiber Sci Technol*. 1981; 14 :319
- 2 Jindal U C. *Indian For*, 1984; 4: 381
- 3 关锡鸿, 洗定国, 叶颖薇. *复合材料学报*, 1987;4(14):79
- 4 洗杏娟, 洗定国. *力学进展*, 1989;19(4):515
- 5 洗杏娟, 洗定国. *竹子研究汇编*, 1990;3(9):10
- 6 Brack D. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, III edition, The Hague Martinus Nijkoff Publishers 1982
- 7 XIAN Dingguo, XIAN X J. *J Materials Science* 1989; 24: 3483

FRACTURE BEHAVIOUR OF BAMBOO

XIAN Xingjuan

XIAN Dingguo

(Institute of Mechanics, Academia Sinica) (Hong Kong Polytechnic Institute)

ABSTRACT Bamboo is a species of abundant natural plant materials with high specific-strength and high specific-modulus. This paper is concerned with fracture behaviour of *Phyllostachys* and *Bambusoides* with notch at different face. Bending fracture tests were carried out for conventional specimen and small scale specimen in SEM. The crack dynamic propagation and failure mode are characterized by using SEM. The results show bamboo possess reasonably good fracture properties. The fracture toughness K_{Ic} is 30% higher than that of wood in general. Crack propogating direction varies with different degree of anisotropy along radial. Microstructure failure and fracture mechanism of bamboo are discussed.

KEY WORDS bamboo fracture, toughness, microstructure

Correspondent: XIAN Xingjuan, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080