

## 苕麻成熟期底部茎秆的机械物理特性参数研究

刘兆朋, 谢方平\*, 吴明亮, 魏宵, 刘剑锋

(湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 为了给苕麻切割器的设计及切割动力学分析提供茎秆的力学性能参数, 以苕麻成熟期底部茎秆为材料, 对茎秆及其木质部进行了弯曲和扭转试验, 得到其弯剪模量分别为 155.7、252.9 MPa, 剪切模量分别为 42.1、44.8 MPa; 对木质部和韧皮部进行了拉伸和压缩试验, 得到其拉伸弹性模量分别为 1 876、481 MPa, 压缩弹性模量分别为 154.2、50.9 MPa。运用复合材料的微观力学研究方法, 确定了茎秆的拉伸弹性模量为 1 552 MPa、压缩弹性模量为 102.4 MPa、同性面泊松比 0.22 及异性面泊松比为小于 0.099; 木质部的同性面泊松比为 0.72、异性面泊松比为小于 0.068; 韧皮层弯剪模量为 72.3 MPa, 剪切模量为 24.2 MPa, 同性面泊松比为 0.05 及异性面泊松比为小于 0.335。

**关 键 词:** 苕麻; 底部茎秆; 力学特性; 弹性参数

中图分类号: S225.91+3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)03-0329-04

## Study of mechanical property parameters of ramie bottom stalk in harvesting period

LIU Zhao-peng, XIE Fang-ping\*, WU Ming-liang, WEI Xiao, LIU Jian-feng

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** In order to provide parameters of mechanical properties for designing Ramie cutter and for analyzing of kinetics of shearing process, this paper investigated the mechanical properties of the ramie bottom stalk in harvesting period. Bending and twisting tests showed bend shear modulus were 155.7 MPa and 252.9 MPa and shearing modulus were 42.1 MPa and 44.8 MPa for stem and xylem respectively. The tensile elastic modulus were 1 876 MPa and 481 MPa and the compression modulus were 154.2 MPa and 50.9 MPa for Xylem and elongated layer respectively according to stretching and compression test. Then micro mechanics research methods of composite materials was applied to the stalk and determined the following parameters: the tensile elastic modulus, compression modulus of elasticity, PRXY and NUXY was 1 552 MPa, 102.4 MPa, 0.22, less than 0.099 for the stem respectively; and for the xylem, PRXY was 0.72 and NUXY less than 0.068; bend shear modulus, shear modulus, PRXY and NUXY of elongated layer was 72.3 MPa and 24.2 MPa, 0.05 and less than 0.335 respectively.

**Key words:** ramie; bottom stalk; mechanical properties; elasticity parameter

近年来苕麻种植面积锐减, 2005 年苕麻种植面积约  $1.27 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 到 2010 年已缩减至  $2.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。苕麻收获期作业效率低, 收割成本逐年增高, 已成为苕麻生产发展的一大限制因素, 而发展苕麻收获机械是解决这一问题的根本途径<sup>[1-2]</sup>。切割器作为苕麻收获机械的关键部件, 其切割质量和切割效率

直接影响作业效果。同甘蔗、高粱、芦竹、玉米及芦苇等粗茎秆作物一样, 苕麻茎秆的力学性能参数是研制高效、低耗苕麻茎秆切割器的重要参数依据<sup>[3-6]</sup>。苕麻茎秆的横断面由外向内为韧皮层、木质部及髓部。苏工兵等<sup>[7]</sup>认为, 可以忽略髓部, 将苕麻茎秆简化为由韧皮层和木质部分组成的空

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2010B283)

作者简介: 刘兆朋(1984—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事农业机械设计研究, lzp841108@163.com; \*通信作者, hunanxie2002@163.com

心圆柱体,且茎秆及木质部、韧皮层可抽象为横观各向同性的本构关系。为建立起此本构关系,需要苕麻茎秆的18个力学性能参数,其中的8个可通过试验进行测定,而其他参数如韧皮层的剪切模量、泊松比、茎秆和木质部的泊松比等则需要通过其他方法得出。笔者在试验测得苕麻底部茎秆的弯曲、扭转剪切模量,木质部的拉伸、压缩弹性模量和弯曲、扭转剪切模量及韧皮层的拉伸、压缩弹性模量的基础上,通过复合材料微观力学考察方法获得了苕麻茎秆的其他力学性能参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

湘苕1号三麻,其底部茎秆含水率为75.6%。2010年10月下旬,选取根部直径10.5~14.5 mm、株高1.45~1.85 m的通直无病茎秆,贴地无破茬切割。截取自基部起10 cm的部分为试样,采用同一部位制作试验试件:茎秆木质部、韧皮层的拉伸试件,长100 mm、宽3~5 mm、厚0.7~1 mm,截面为矩形;苕麻茎秆和木质部的弯曲、扭转试件长100 mm,木质部试件由苕麻茎秆剥去韧皮层获得。

### 1.2 试验设备

SNAS-CMT6104 微机控制电子万能材料试验机(力传感器量程为0~5 kN,精度为0.1 N)。利用该设备进行拉伸、压缩和弯曲试验,分别采用井字纹专用夹头和平面专用压头和三点弯曲试验装置。

SNAS-CMT6101 微机控制扭转试验机,扭矩传感器量程为0~50 Nm,精度为0.01 Nm。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 拉伸试验

将井字纹夹头夹紧试件的上下两端,拉伸载荷,加载速度为5 mm/min。试验获得试件拉伸的应力-应变曲线。考察每次试验所得曲线的近似线性部分,择取曲线若干点的坐标值进行线性拟合,得到曲线应力-应变线性关系,获得各试件的弹性模量。

#### 1.3.2 压缩试验

将压缩试件置于平面压头的承载平面,压缩载荷,施加速度为5 mm/min,设置压缩位移为1 mm,试验获得试件的压缩应力-应变曲线。分析应力-应变曲线数据,获得试件的压缩弹性模量。

#### 1.3.3 弯曲试验

按照GB1456—2005对夹层结构材料的剪切刚度与上海玻璃钢研究所对圆管复合材料剪切模量考察方法<sup>[8-9]</sup>,对苕麻茎秆及木质部的弯剪模量进行测定。

将弯曲试验试件置于试验机的3点弯曲试验装置上,测量试件的跨距 $l$ 和外延长度 $a$ 。设定加载位移为2 mm,压头运行速度30 mm/min。试验终止后测定试件的绕度增量 $f_1$ ,试验机记录力-位移曲线,考察曲线的线性部分两端,得到试件在弯剪作用下弹性变形阶段的载荷增量 $\Delta P$ 与跨中绕度增量 $f$ 。通过文献[8]中的方法计算得到试件的剪切刚度 $U$ ,继而根据下式得到试件的弯剪模量。

$$G = \frac{2U}{\pi/4(D^2 - d^2)}。$$

式中: $G$ 为弯剪模量(MPa); $U$ 为试件的剪切刚度(N); $D$ 为试件外径(mm); $d$ 为试件内径(mm)。

#### 1.3.4 扭转试验

将试件置于试验夹具中,两端夹持25 mm左右,夹具头连接试验机紧固测量试件的有效长度 $L$ 。设定转角加载速度为30°/min,扭矩衰减幅度为5%,试验机自动记录转角-扭矩的关系曲线。考察曲线中近似线性部分,以两端的数据的对应差值获得转角 $\varphi$ 、扭矩 $T$ 。根据文献[10]方法得到试件的扭转剪切弹性模量。

## 2 结果与分析

### 2.1 苕麻茎秆木质部和韧皮层的拉伸弹性模量

图1为木质部试件的拉伸应力-应变曲线。分析曲线数据,获得木质部试件的轴向拉伸弹性模量 $E_{22}$ 平均值为1876 MPa。

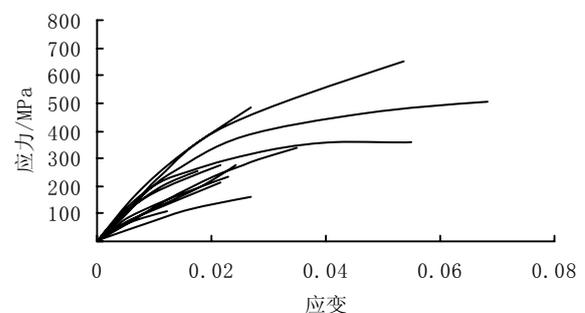


图1 木质部拉伸应力-应变曲线

Fig.1 The tensile stress-strain curve of xylem

图 2 为韧皮层试件的拉伸应力-应变曲线。分析曲线数据，获得韧皮层的拉伸弹性模量  $E_{z3}$  平均值为 481 MPa。

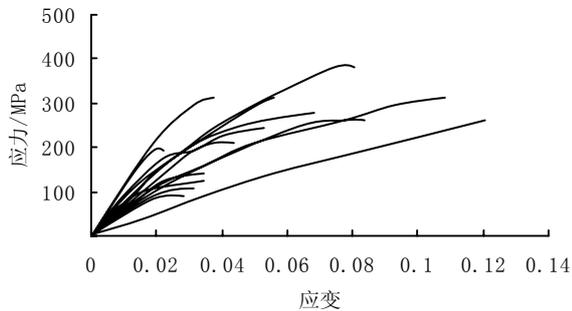


图 2 韧皮层拉伸应力-应变曲线

Fig.2 The tensile stress -strain curve of fibrous lamina

### 2.2 苕麻木质部与韧皮层的径向压缩弹性模量

图 3 为木质部压缩试件应力-应变曲线。分析曲线数据，获得木质部的径向压缩弹性模量  $E_{x2}$  平均值为 154.2 MPa。

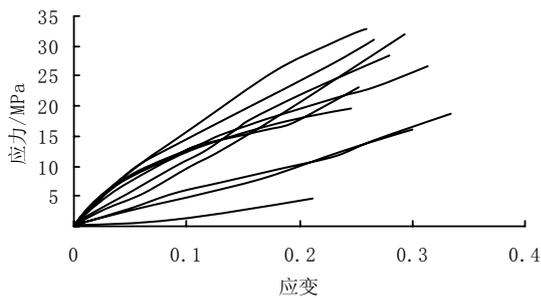


图 3 木质部压缩应力-应变曲线

Fig.3 The compression stress -strain curve of xylem

图 4 为韧皮层压缩试件应力-应变曲线。分析曲线数据，获得韧皮层的径向压缩弹性模量  $E_{x3}$  平均值为 50.9 MPa。

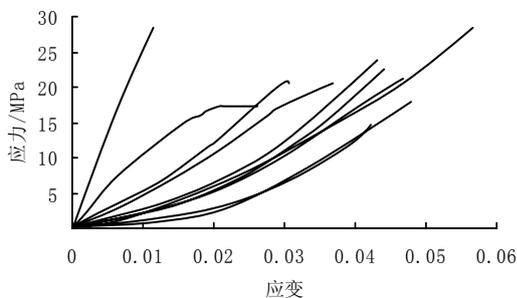


图 4 韧皮层压缩应力-应变曲线

Fig.4 The compression stress -strain curve of fibrous lamina

### 2.3 苕麻茎秆和木质部的弯剪模量

表 1 为苕麻茎秆弯曲试验的数据，通过公式计算

得到茎秆的弯剪模量  $G_{xz1}$  平均值为 155.7 MPa。

表 1 苕麻茎秆弯曲试验结果

Table 1 Bending test results of ramie stalk

序号	D/mm	d/mm	$\Delta P/N$	f/mm	$f_i/mm$	$G_{xz1}/MPa$
1	13.82	8.42	1046	2.3	0.20	157.0
2	11.32	6.26	851	2.1	0.20	192.6
3	13.68	8.48	873	2.3	0.30	143.8
4	13.28	7.80	618	2.0	0.40	128.7
5	13.66	7.28	985	2.2	0.42	162.3
6	12.76	7.40	736	2.7	0.12	102.8
7	12.48	6.58	894	2.0	0.14	164.4
8	13.22	6.82	1110	2.2	0.20	169.3
9	12.52	7.28	703	1.7	0.44	212.4
10	10.72	7.26	420	2.5	0.36	123.2

表 2 为木质部试件弯曲试验的数据，通过计算得到木质部弯剪模量  $G_{xz2}$  平均值为 252.9 MPa。

表 2 苕麻茎秆木质部弯曲试验结果

Table 2 Bending test results of xylem of ramie stalk

序号	D/mm	d/mm	$\Delta P/N$	f/mm	$f_i/mm$	$G_{xz2}/MPa$
1	11.00	6.90	327.2	1.3	0.11	140.2
2	10.44	6.62	427.0	1.0	0.28	350.0
3	12.52	7.32	563.0	1.6	0.20	154.3
4	10.12	6.58	289.0	1.8	0.20	115.1
5	11.24	7.66	693.6	1.5	0.40	358.4
6	10.58	6.06	575.6	1.2	0.34	356.3
7	10.26	7.90	420.0	1.3	0.28	359.0
8	10.04	7.26	260.0	1.6	0.44	190.0

### 2.4 苕麻茎秆和木质部的扭转剪切模量

表 3 为苕麻茎秆试件扭转试验的数据及剪切模量。分析数据得到茎秆剪切弹性模量  $G_{xy1}$  平均值为 42.1 MPa。

表 3 茎秆扭转试验结果

Table 3 Torsion test results of ramie stalk

序号	T/Nm	$\varphi/(^\circ)$	D/mm	d/mm	L/mm	$G_{xy1}/MPa$
1	0.342	6.50	12.5	7.1	49	51.1
2	0.318	6.30	12.8	7.2	54	50.6
3	0.303	7.68	13.2	7.4	51	40.5
4	0.294	7.83	12.2	6.3	50	34.5
5	0.129	7.85	11.8	6.6	50	35.1
6	0.309	7.90	12.1	6.7	60	50.8
7	0.174	7.03	12.3	6.2	57	37.2
8	0.395	7.84	13.4	6.7	50	37.0
9	0.347	7.83	12.6	6.6	50	46.2
10	0.299	7.65	13.6	7.2	50	38.5

表 4 为木质部试件扭转试验的数据及剪切模量。分析数据得到茎秆木质部的剪切弹性模量  $G_{xy2}$  平均值为 44.8 MPa。

表4 茎秆木质部扭转试验结果

序号	T/Nm	$\varphi/(\circ)$	D/mm	d/mm	L/mm	$G_{xy2}/\text{MPa}$
1	0.381	5.67	12.0	6.8	40	62.6
2	0.154	7.85	13.6	8.0	39	23.3
3	0.135	7.83	13.6	8.0	38	39.9
4	0.236	7.85	11.8	7.0	41	46.5
5	0.082	5.50	11.5	7.9	40	40.2
6	0.260	7.83	12.1	6.5	40	62.0
7	0.087	7.67	10.6	6.0	37	34.0
8	0.236	7.82	11.8	6.8	39	52.6
9	0.231	7.83	11.2	6.2	38	42.1

## 2.5 弹性参数的确定

文献[11]指出, 苕麻茎秆的简化组分结构模型与复合材料 Whitney-Riley 模型及单向层板结构相似; 因此, 在通过试验获得部分力学性能数据的基础上, 参照文献[11-12], 并综合 2 种材料模型的力学特性考察方法确定了苕麻茎秆及组分的部分弹性参数。

### 2.5.1 苕麻茎秆各组分体积比

选取苕麻茎秆 90 株, 测定自底部以上 5 cm 处茎秆外径、内径、木质部和韧皮层厚度。苕麻茎秆外径  $D$  为 12.88 mm, 内径  $d$  为 7.16 mm。韧皮层的厚度为 0.604 mm, 体积比  $V_m$  为 0.25; 木质部厚度为 2.23 mm, 体积比  $V_f$  为 0.75。

### 2.5.2 苕麻茎秆轴向拉伸弹性模量

根据茎秆组分弹性模量及组分体积比与茎秆弹性模量的经验公式<sup>[11]</sup>  $E_{z1}=E_{z2}\cdot V_m+E_{z3}\cdot V_f$ , 得到茎秆轴向拉伸弹性模量  $E_{z1}=1\ 552\ \text{MPa}$ 。

### 2.5.3 苕麻茎秆径向压缩弹性模量

根据文献[11]中的经验公式,  $E_{x1}=\frac{E_{x2}\cdot E_{x3}}{E_{x2}\cdot V_f+E_{x3}\cdot V_m}$ , 得到茎秆径向的拉伸弹性模量  $E_{x1}=102.4\ \text{MPa}$ 。

### 2.5.4 苕麻茎秆及组分同性面泊松比 $\mu_{xy}$

根据材料弹性模量、剪切弹性模量及泊松比的关系式  $G_{xy}=\frac{E_x}{2(1+\mu_{xy})}$ , 得到苕麻茎秆和木质部的同性面泊松比  $\mu_{xy1}=0.22$ ,  $\mu_{xy2}=0.72$ 。

根据 Whitney-Riley 模型中考察组分之间同性面泊松比与体积组分的经验公式  $\mu_{xy1}=V_m\mu_{xy2}+V_f\mu_{xy3}$ ,

可以得到韧皮层泊松比  $\mu_{xy3}=0.05$ 。

### 2.5.5 苕麻茎秆各组分异性面泊松比 $\mu_{xz}$

由文献[12]中的正交各项异性材料工程常数关系式, 可以推导出  $\mu_{xz}<\frac{1}{\sqrt{2\mu_{xy}}}\cdot\frac{E_x}{E_z}=a$ , 已知  $\mu_{xy}$ ,  $E_x$ ,  $E_z$ , 可得到苕麻茎秆、木质部和韧皮层异性面泊松比  $\mu_{xz1}<0.099$ 、 $\mu_{xz2}<0.068$ 、 $\mu_{xz3}<0.335$ 。

### 2.5.6 韧皮层剪切弹性模量

根据材料弹性模量、剪切弹性模量及泊松比的关系, 可得到韧皮层同性面剪切弹性模量  $G_{xy3}=24.2\ \text{MPa}$ 。

由公式  $G_{xz3}=\frac{V_m\cdot G_{xz1}\cdot G_{xz2}}{G_{xz2}-G_{xz1}\cdot V_f}$ , 得到韧皮层弯剪模量  $G_{xz3}=72.3\ \text{MPa}$ 。

## 参考文献:

- [1] 成雄伟. 全国苕麻原料发展形势座谈会会议纪要[OL]. <http://www.fibercrops.com/>, 2010-11-21.
- [2] 邓剑锋. 苕麻收获机械化现状及产业需求[J]. 农业装备技术, 2008(8): 6-8.
- [3] 廖庆喜, 舒彩霞, 田波平, 等. 基于高速摄像技术的芦竹切割过程的研究[J]. 华中农业大学学报: 自然科学版, 2007, 26(3): 415-418.
- [4] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124-129.
- [5] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 172-176.
- [6] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47-50.
- [7] 苏工兵, 刘俭英, 程世俊, 等. 苕麻茎秆的力学性能及力学建模方法[J]. 农机化研究, 2007(8): 25-27.
- [8] GB1456—2005, 夹层结构弯曲性能试验方法[S].
- [9] 周祝林. 国家标准 GB1456 扩大应用范围[J]. 玻璃钢/复合材料, 1998(2): 18-20.
- [10] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 85-86.
- [11] 王士杰. 复合材料力学导引[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987: 174-186.
- [12] 张少实, 庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 22-25.

责任编辑: 罗慧敏