

收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究

廖宜涛, 廖庆喜*, 田波平, 舒彩霞, 王 静, 马爱丽

(华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070)

摘 要: 试验研究芦竹底部茎秆的机械物理特性, 以获得其最大破坏应力、弹性模量等机械物理特性参数, 并分析芦竹切割过程中应力、应变分布状态, 能为芦竹切割刀具和切割方式的设计提供理论依据和基础技术参数, 对低能耗、高效率的芦竹切割器的设计具有重要的指导意义。该文利用微机控制电子万能材料试验机对收割期的芦竹底部的茎秆进行了顺纹拉伸、压缩、弯曲试验, 获得试验条件下顺纹拉伸、压缩、弯曲的应力-应变曲线, 并进行了分析。试验测得芦竹底部茎秆顺纹拉伸最大抗拉强度平均值为 123 MPa, 弹性模量值为 1260 MPa; 顺纹压缩最大抗压强度平均值为 52 MPa, 弹性模量值为 595 MPa; 顺纹弯曲最大抗弯强度平均值为 125 MPa, 弹性模量值为 1715 MPa。结果表明, 芦竹破坏应力参数接近毛竹, 远大于玉米、小麦等茎秆的破坏应力参数, 芦竹的机械化收割不宜采用传统的切割器。

关键词: 芦竹茎秆; 弹性模量; 破坏应力; 切割

中图分类号: S795.8

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2007)4-0124-06

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.
Liao Yitao, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 124-129. (in Chinese with English abstract)

0 引言

芦竹系多年生粗壮草本植物, 属被子植物门, 单子叶植物纲, 其外观似芦苇, 性状似竹子, 分布于热带和温带, 繁殖栽培十分容易, 既耐旱涝, 又耐热寒, 在沼泽地、河滩地、河岸、沙荒、甚至盐碱地都能生长, 不用施肥和防治病虫害, 且可以改善地貌, 降低废水污染^[1]。芦竹产量高, 收获期短, 富含纤维, 每公顷可收获制造 20 t 浆的绝干纤维原料; 纤维长度约为 1 mm, 宽度约 0.012 mm, 长宽比为 86 左右, 滤水性好、碱回收率高, 各种成纸指标理想^[2], 早为欧洲人用于纸浆造纸, 英国采用较多, 日本也曾用于制造人造丝。自 20 世纪 80 年代起, 由于中国纸消费的大幅度增长和森林资源保护这一矛盾日益突出, 这种产量、出浆量均高于竹、木以及稻草、麦秸和芦苇等的优质造纸原料, 受到造纸业的重视。近年来, 中国已将芦竹代替木材造纸, 在国内很多地方, 特别是在黄河三角洲一带, 进行了大量的种植。

芦竹茎秆高约 3~6 m、茎秆直径 10~30 mm, 外形特征明显高、粗, 底部茎秆硬度和刚度大。目前, 芦竹的收割基本上是采用手工收割, 条件艰苦, 收割难度大, 劳

动强度高, 效率低, 往往造成芦竹无法及时全面收获^[3]。实施芦竹机械化收割, 对提高劳动生产率、降低生产成本、保证造纸业的原料供应、提高资源的利用率具有直接的推动作用。国内外对芦竹的研究主要集中在芦竹解剖学特征^[4]、化学成分^[5]及纤维形态特性^[6]的研究上; 在芦竹机械物理特性方面, O. Speck 针对芦竹防风护堤抗倒伏的生长特性研究了芦竹根茎的机械物理特性^[7], 对其茎秆特性的研究还未见相关报导。芦竹解剖学结构特征与竹类材料类似^[8], 力学性能上呈现各向异性、非均质、非线性^[9], 在切割过程中, 芦竹茎秆在刀具刃口附近会产生复杂的应力和应变, 直接影响芦竹收割机的切割质量、切割效率及切割能耗。开展芦竹茎秆的机械物理特性参数试验研究, 获得其最大破坏应力、弹性模量等机械物理特性参数, 为分析芦竹切割过程中应力、应变分布状态, 确定芦竹切割力和芦竹切割刀具、切割方式等提供理论依据和基础技术参数, 对低能耗高效率的切割器设计具有重要的指导意义。本文测定了收获期芦竹底部茎秆顺纹拉伸、压缩、弯曲的破坏应力和弹性模量, 并进行了相应的分析。

1 材料与方法

1.1 试验材料采集

试验材料取山东省东营市金润农业发展有限责任公司芦竹种植基地生长的芦竹, 选取生长良好、直径 10~30 mm 范围内的芦竹。试样直径按每间隔 5 mm 分组, 每组选 5 株。图 1 为芦竹收割切割部位示意图, 芦竹

收稿日期: 2006-04-21 修订日期: 2006-09-28

基金项目: 湖北省重点科技攻关项目(2005AA201B06)

作者简介: 廖宜涛(1982-), 男, 湖北人。武汉华中农业大学工程技术学院, 430070。Email: liaoyitao@yahoo.com.cn

*通讯作者: 廖庆喜(1968-), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 从事农业机械化工程的教学与研究。武汉华中农业大学工程技术学院, 430070。Email: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

收割后留茬高度约为 70~100 mm, 采集底部茎秆样品是截取离地约 80 mm 以上的一整节芦竹(如图 2), 试样采回后去包叶、外部擦拭干净。试样要求通直, 无明显缺陷及表皮损伤。



图1 芦竹切割部位示意图

Fig. 1 Sketch of *Arundo donax* L. cutting area

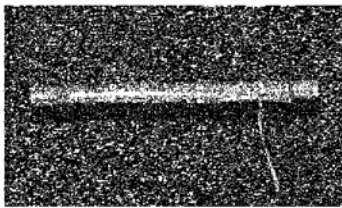


图2 芦竹试样

Fig. 2 *Arundo donax* L. sample

1.2 试验材料制作

锯掉采集试件的结隔并编号, 测量芦竹茎秆内外直径, 参照木材^[10]和竹材物理力学性质试验方法^[11]制作试验试样。拉伸试样如图 3 所示, 规格 $160.0 \times 10.0 \times t$ (长 \times 宽 \times 芦竹壁厚, 单位 mm), 试样中间试验有效部分规格 $60.0 \times 2.0 \times t$, 与两端夹持部分圆弧平滑过渡; 压缩试样如图 4 所示, 规格 $20.0 \times d \times t$ (高 \times 芦竹外径 \times 芦竹壁厚); 弯曲试样如图 5 所示, 规格(长 \times 宽 \times 芦竹壁厚) $160.0 \times 10.0 \times t$ 。拉伸试样和弯曲试样夹持部位均匀涂抹一层石蜡, 防止试验过程中夹持试件滑动, 压缩试样两端用砂纸打磨水平。经测定, 所选芦竹试样的密度为 $5.5 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$, 含水率 11.4%~17.8%, 试验环境温度 15℃、空气湿度 47%。

1.3 试验设备与方法

试验采用深圳瑞格尔仪器有限公司制造的电脑伺服材料试验系统。型号: RGT-10; 规格: 10KN; 准确度等级: 0.5 级。

该系统由试验机主机、RG 控制器、计算机控制系统三部分组成, 在试验运行过程中能动态显示载荷值、变形值、试台速度和应力-应变曲线等试验状态和试验

结果。

试验方法参照 GB/T 15780-1995 竹材物理力学性质试验方法进行。

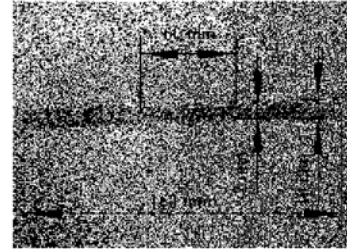


图3 芦竹顺纹拉伸试样

Fig. 3 *Arundo donax* L. along veins stretched sample

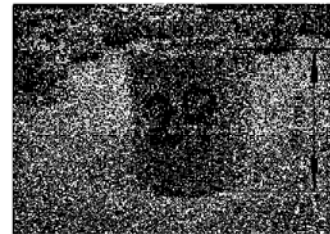


图4 芦竹顺纹压缩试样

Fig. 4 *Arundo donax* L. along veins compressed sample

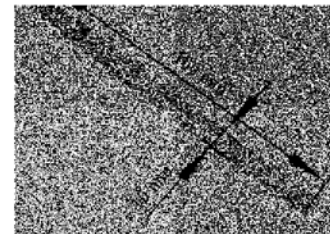


图5 芦竹顺纹弯曲试样

Fig. 5 *Arundo donax* L. along veins bended sample

2 结果与分析

2.1 芦竹顺纹拉伸试验与分析

试验采用锯齿式拉伸夹头, 将芦竹拉伸试件作板材处理, 选用材料拉伸弹性模量试验控制程序, 定义相应的芦竹试件截面积, 预加载荷 10 N, 使夹头与试件充分接触, 拉力加载速度 3 mm/min。

图 6 为计算机控制系统绘制的拉伸试验应力-应变历程曲线。试验过程中会出现夹持部位打滑、夹裂等现象使得计算机绘制拉伸过程的应力-应变历程曲线失真(试验过程中绘制的②⑤⑦⑧号试验曲线失真, 图 6 中只列出②号曲线), 从曲线上可看出失真曲线只在应变方向滑移, 其整体历程趋势及最大破坏应力值无明显

显变异。在图 6 中可以看到, 试验过程中, 拉伸应力达到芦竹顺纹最大抗拉强度后, 芦竹试件被拉断, 应力瞬时急剧下降。

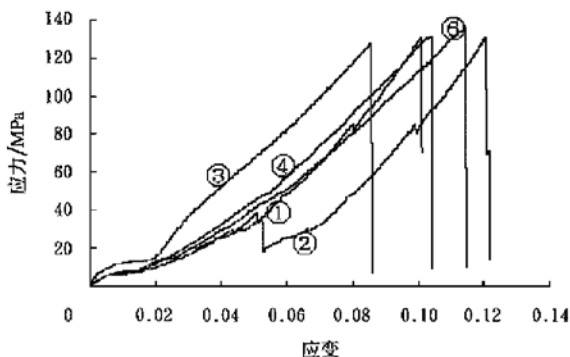


图 6 芦竹顺纹拉伸应力-应变曲线

Fig. 6 *Arundo donax* L. along veins stretched stress-strain curves

表 1 是试验测得芦竹顺纹最大抗拉强度(拉伸破坏应力), 其中最大值为 135.7 MPa, 最小值为 104.8 MPa, 平均值为 122.9 MPa, 标准差为 11.17, 差异系数为 0.09, 试验测得数据离散程度较低, 取其平均值为芦竹的顺纹抗拉强度即 $\sigma_{拉} = 123 \text{ MPa}$ 。

表 1 芦竹顺纹最大抗拉强度

Table 1 *Arundo donax* L. along veins maximum pulling resistant intensity

试验序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	平均值
最大抗拉强度/MPa	119.2	131.3	127.9	130.6	104.8	135.7	108.6	125.8	122.9

表 2 芦竹顺纹拉伸应力-应变多项式拟合曲线各项系数

Table 2 *Arundo donax* L. along veins stretched stress-strain multinomial drafted curve coefficients

试验序号	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
①	- 2E+ 09	5E+ 08	- 5E+ 07	3E+ 06	- 65853	1007.1	1.1268
③	- 1E+ 09	4E+ 08	- 4E+ 07	2E+ 06	- 24818	552.82	2.0769
④	- 9E+ 09	2E+ 09	- 3E+ 08	1E+ 07	- 241091	2305	1.9312
⑥	- 7E+ 08	2E+ 08	- 3E+ 07	1E+ 06	- 21126	517.64	2.1392

2.2 芦竹顺纹压缩试验与分析

试验采用平面压头, 试件置于球面滑动支座中心位置, 将压缩试件作空心管材处理, 选用材料压缩弹性模量试验控制程序, 定义相应的芦竹试样内外直径, 预加载荷 10 N, 保证试验初始阶段压头充分接触试样上下端面, 压力加载速度 3 mm/min。

图 8 为计算机控制系统绘制的压缩试验应力-应变曲线, 在压缩应力加载至芦竹顺纹最大抗压强度后, 芦竹被压溃至压密阶段, 纤维管束内细胞失去直线平衡能力, 因细胞壁厚度及细胞直径不等, 细胞壁逐渐皱折

选取试验中计算机绘制的无失真的曲线(图 6 中的①③④⑥次试验曲线), 对芦竹破坏过程的应力-应变历程曲线采用 6 次多项式拟合的方法, 以消除不确定因素所导致的测量误差, 拟合曲线形式为

$$S(x) = \alpha_0x^6 + \alpha_1x^5 + \alpha_2x^4 + \alpha_3x^3 + \alpha_4x^2 + \alpha_5x^1 + \alpha_6 \quad (1)$$

式中 S ——应力; α ——拟合多项式系数; x ——各数据点的应变。

图 7 为芦竹顺纹拉伸应力-应变多项式拟合曲线, 拟合多项式系数如表 2 所示。其弹性模量 E 可表示为

$$E(x) = dS/dx \quad (2)$$

即曲线上每一点对应切线斜率为该点的弹性模量值, 在拟合曲线上采样取点, 对各点切线的斜率取平均值, 即为芦竹顺纹抗拉弹性模量 $E_{拉} = 1259.92 \text{ MPa}$, 取 $E_{拉} = 1260 \text{ MPa}$ 。

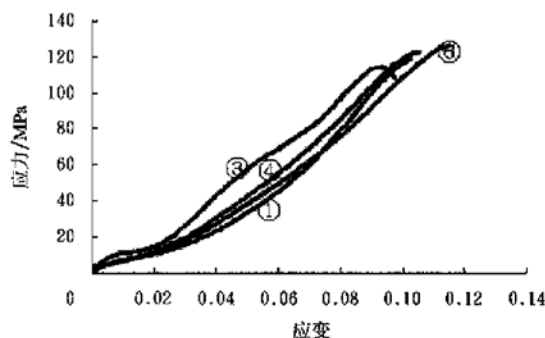


图 7 芦竹顺纹拉伸应力-应变多项式拟合曲线

Fig. 7 *Arundo donax* L. along veins stretched stress-strain multinomial drafted curve pulling intensity

或向腔内塌陷, 并逐渐压溃至压密阶段, 直至芦竹壁破裂。其中⑤⑦号试验曲线应变方向上变异较大, 判断为试验初始阶段试件滑移引起失真, 但其最大破坏应力值有效。

表 3 是试验测得芦竹顺纹最大抗压强度(压缩破坏应力), 其中最大值为 67.31 MPa, 最小值为 43.85 MPa, 平均值为 51.90 MPa, 标准差为 8.56, 差异系数为 0.16, 测得数据离散程度较低, 试验测得的数据平均值即为芦竹最大抗压强度, 取 $\sigma_{压} = 52 \text{ MPa}$ 。

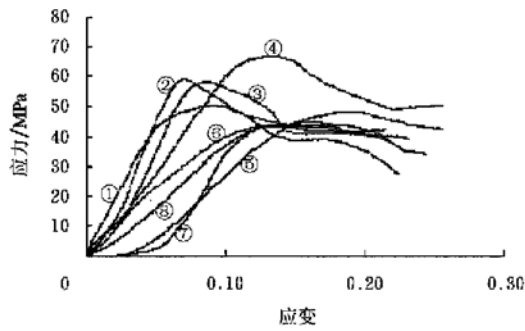


图 8 芦竹顺纹压缩应力-应变曲线

Fig. 8 *Arundo donax* L. along veins compressed stress-strain curve

表 3 芦竹顺纹最大抗压强度

Table 3 *Arundo donax* L. along veins maximum stress intensity resisting

试验序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	平均值
最大抗压强度/MPa	50.26	58.72	57.97	67.31	45.00	43.93	48.17	43.85	51.90

同顺纹拉伸试验数据处理方法, 对未失真的顺纹压缩应力-应变历程曲线采用多项式拟合, 得到如图 9 所示芦竹顺纹压缩应力-应变多项式拟合曲线图, 拟合多项式系数见表 4 所示。通过求取平均值得芦竹顺纹抗压弹性模量 $E_{压} = 595.61 \text{ MPa}$, 取 $E_{压} = 595 \text{ MPa}$ 。

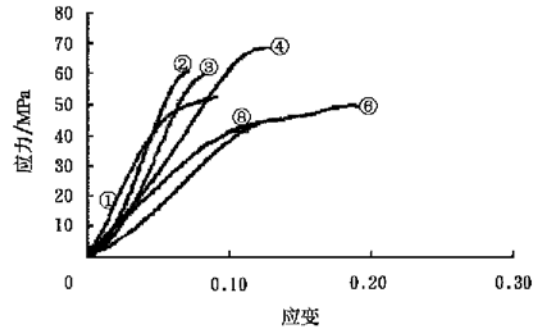


图 9 芦竹顺纹压缩应力-应变多项式拟合曲线

Fig. 9 *Arundo donax* L. along veins compressed stress-strain multinomial drafted curve

表 4 芦竹顺纹压缩应力-应变多项式拟合曲线各项系数

Table 4 *Arundo donax* L. along veins compressed stress-strain multinomial drafted curve coefficients

试验序号	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
①	- 2E+ 09	5E+ 08	- 4E+ 07	2E+ 06	- 17372	423. 46	0. 6251
②	1E+ 09	- 3E+ 08	3E+ 07	- 1E+ 06	29651	25. 094	0. 8171
③	2E+ 07	- 6E+ 06	- 163125	107748	- 6253. 4	665. 37	- 1. 494
④	- 2E+ 07	1E+ 07	- 3E+ 06	246106	- 10067	588. 55	0. 8616
⑥	- 1E+ 09	3E+ 08	- 3E+ 07	1E+ 06	- 21440	997. 33	0. 6279
⑧	3E+ 07	- 1E+ 07	2E+ 06	- 183364	10467	49. 711	0. 4929

2.3 芦竹顺纹弯曲试验与分析

试验采用三支点弯曲法^[12], 将弯曲试件作板材处理, 选用材料弯曲弹性模量试验控制程序, 定义相应的芦竹试样截面积, 弯曲跨度为 80 mm, 预加载荷 10 N (保证压头与试样密切接触), 弯曲压力加载速度 3 mm/min。

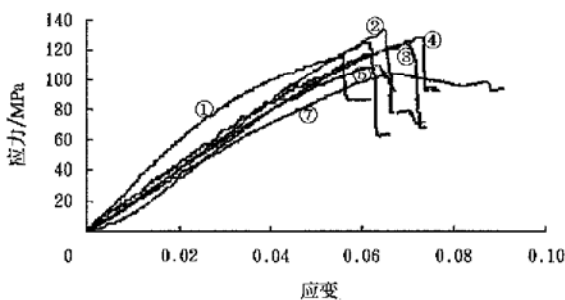


图 10 芦竹顺纹弯曲应力-应变曲线

Fig. 10 *Arundo donax* L. along veins bended stress-strain curve

图 10 为计算机绘制的弯曲应力-应变曲线, 弯曲应力超过最大抗弯强度后芦竹断裂, 应力下降。试验过程中, 试件在弯曲夹具上滑移, 其中④⑥⑧号试验中打滑引起计算机控制程序绘制的曲线振荡幅度大, 图中只列出④号曲线, 但其曲线总体历程趋势以及最大破坏应力无显著变异。

试验测得芦竹顺纹最大抗弯强度(弯曲破坏应力)如表 5 所示, 其最小值为 108.1 MPa, 最大值为 135.6 MPa, 平均值为 125.4 MPa, 标准差为 9.75, 差异系数为 0.08, 取 $\sigma_{弯} = 125 \text{ MPa}$ 为芦竹顺纹最大抗弯强度。

表 5 芦竹顺纹最大抗压强度

Table 5 *Arundo donax* L. along veins maximum bending-resisting intensity

试验序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	平均值
最大抗拉强度/MPa	123.3	135.6	131.4	132.7	113.6	128.3	108.1	129.9	125.4

同 2.1 节试验数据处理方法,对图 10 中①②③⑤⑦号曲线对应力-应变有效区间曲线采用多项式拟合,得到如图 11 所示芦竹顺纹弯曲应力-应变多项式拟合曲线图,拟合函数系数见表 6 所示。通过求取平均值得芦竹顺纹抗弯弹性模量 $E_{弯} = 1714.82 \text{ MPa}$,取 $E_{弯} = 1715 \text{ MPa}$ 。

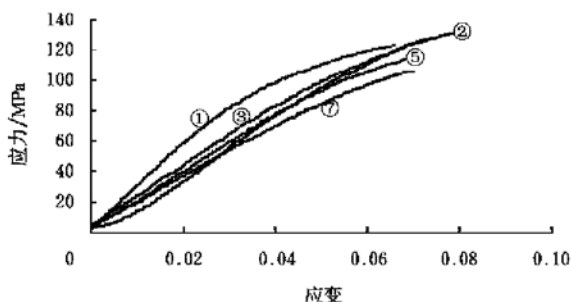


图 11 芦竹顺纹弯曲应力-应变多项式拟合曲线

Fig. 11 *Arundo donax* L. along veins bend stress-strain multinomial drafted curve

表 6 芦竹顺纹压缩应力-应变多项式拟合曲线各项系数

Table 6 *Arundo donax* L. along veins bended stress-strain multinomial drafted curve coefficients

试验序号	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
①	-8E+07	1E+08	2E+07	2E+06	39628	2595.4	2.7236
②	-6E+08	2E+08	2E+07	492717	4603.9	2016.6	4.0696
③	3E+08	1E+08	3E+07	2E+06	101042	243.16	3.2232
④	3E+09	7E+08	5E+07	2E+06	54314	1325.6	3.8601
⑤	3E+09	6E+08	5E+07	2E+06	55721	1159.4	4.6789

3 结论

1) 试验测得芦竹物理机械特性参数:收割期芦竹底部茎秆顺纹拉伸最大抗拉强度为 123 MPa,抗拉弹性模量为 1260 MPa;顺纹压缩最大抗压强度为 52 MPa,抗拉弹性模量为 595 MPa;顺纹弯曲最大抗弯强度为 125 MPa,抗拉弹性模量为 1715 MPa。

2) 试验的拉伸、压缩、弯曲应力-应变曲线均显现出一定的非线性特征。拉伸和弯曲试验中,载荷超过芦竹最大破坏应力时,芦竹瞬间被破坏(拉断、弯曲折断),呈现很明显的脆断性,压缩试验中,载荷超过芦竹最大抗压应力后,芦竹试样进入紧密压缩阶段,应力趋于定值,直至芦竹试样压裂。

3) 芦竹的物理机械特性与毛竹接近(毛竹顺纹抗拉强度为 153.1 MPa,顺纹抗压强度为 66.3 MPa,顺纹抗弯强度 152 MPa^[13]);远大于玉米(外皮纵向抗拉强

度 90 MPa^[14])、小麦(顺纹拉伸强度为 21.2~31.2 MPa^[15])等茎秆的物理机械特性参数。因此芦竹的机械化收割不宜采用传统的切割方式与切割刀具,需要开发研制适合芦竹自身物料特性的切割器。

[参考文献]

- [1] 张自敏,李群,谭国民,等.芦竹造纸的发展[J].天津造纸,2004,(3):16-20.
- [2] 薛国新,范荣春.芦竹 APKPAP_AQKP_AQ 法制可漂化学浆蒸煮特性[J].中华纸业,2003,1:38-40.
- [3] 廖庆喜,舒彩霞,田波平.芦苇/芦竹机械化收获及加工作业基地化集成研究[J].农机化研究,2005,(5):62-63.
- [4] Peter Kolesik, Alan Mills, Margaret Sedgley. Anatomical characteristics affecting the musical performance of clarinet reeds made from *Arundo donax* L. (*Gramineae*) [J]. Annals of Botany, 1998, 81: 151-155.
- [5] Vernersson T, Bonelli P R, Cerrella E G, et al. *Arundo donax* cane as a precursor for activated carbons phosphoric acid activation[J]. Bioresource Technology, 2002, 83: 95-104.
- [6] Anatoly A. Shatalov, Helena Pereira. Influence of stem morphology on pulp and paper properties of *Arundo donax* L. reed[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15: 77-83.
- [7] Speck O. Mechanical properties of the rhizome of arundo donax L. [J]. Plant Biology, 2003, 5(6): 661-669.
- [8] 于文吉,江泽慧,叶克林.竹材特性研究及其进展[J].世界林业研究,2002,15(2):50-55.
- [9] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.农作物茎秆力学研究[A].中国农业工程学会 2005 年学术年会论文集[C]. 2005, 5(1): 441-446.
- [10] GB/1927-1943-91,中华人民共和国国家标准:国家木材物理力学性质试验方法[S].
- [11] GB/T 15780-1995,中华人民共和国国家标准:国家竹材物理力学性质试验方法[S].
- [12] 刘庆庭,区颖刚,袁纳新.甘蔗茎在弯曲荷载下的破坏[J].农业工程学报,2004,20(3):6-9.
- [13] 赵仁杰,喻云水.竹材人造板工艺学[M].北京:中国林业出版社,2002.
- [14] 杨中平,杨林青,郭康权,等.玉米秸外皮碎料板制板工艺的初步研究[J].西北林学院学报,1995,10(3):67-72.
- [15] Dogherty O M J. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw [J]. Agric Engng Res, 1995, 62: 133-142.

Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period

Liao Yitao, Liao Qingxi^{*}, Tian Boping, Shu Caixia, Wang Jing, Ma Aili

(College of Engineering and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Obtaining parameters of mechanical physical characteristics of the *Arundo donax* L. stalk such as the maximum breaking stress, modulus of elasticity, etc. through the experimental study, and offering theoretical foundation and basic technical parameters for the study of cutting and cutter for the *Arundo donax* L., play a significant role in designing high-efficiency cutting device with low energy consumption and realizing the *Arundo donax* L. harvesting mechanization. Just like bamboo, timber, etc, the *Arundo donax* L. is anisotropic, non-homogenized, non-linear biomaterial, but no quantitative study has been reported on the mechanical physical characteristics of the *Arundo donax* L. stalk. Using the computer-controlled electronic universal testing machine to do stretching test, compressing test and bending test, along veins on the bottom stalk of *Arundo donax* L., the stress-strain curves under certain experimental conditions were acquired and analyzed. The tests show that the average maximum of pulling resistance intensity along veins is 123 MPa, the modulus of elasticity is 1260 MPa; the average maximum of stress resistance intensity along veins is 52 MPa, modulus of elasticity is 595 MPa; the average maximum of bend resistance intensity along veins is 125 MPa, and modulus of elasticity is 1715 MPa. And the results indicated that the breaking stress parameters of the *Arundo donax* L. is similar to the *Phyllostachys pubescens*, but is far greater than the breaking stress parameters of stem stalks such as the maize, wheat, etc. So the traditional cutters are unsuitable to be adopted in the mechanization harvest of the *Arundo donax* L..

Key words: *Arundo donax* L. stalk; modulu of elasticity; breaking stress; cutting

更正启示

本刊2007年第3期发表的署名为“周中仁,王效华,陈群,陈淑峰,吴文良”、题为“北方农村小康家庭能源消费结构演变研究”的论文,因编辑工作疏

忽,误将题名中的“小康农村家庭”刊为“农村小康家庭”,特此更正,并向作者及读者致以深深的歉意。

(本刊)