

DOI:10.3724/SPJ.1238.2011.00681

芒草茎秆弯曲特性试验

姚珺¹, 李明^{1,2*}, 汤楚宙¹, 刘逸帆¹

(1.湖南农业大学 工学院,湖南 长沙 410128 ;2.国家植物功能成分利用工程技术研究中心,湖南 长沙 410128)

摘 要:以湘杂芒 2 号、芒/南荻杂交种、2 年生南荻无性繁殖苗和 3 年生南荻种子苗为试验对象,测量、计算芒草不同节间含水率、外径、原始截面面积、茎秆截面惯性矩、最大荷载、弹性模量、抗弯刚度等,研究芒草茎秆的弯曲特性。结果表明,湘杂芒 2 号、芒/南荻杂交种、2 年生南荻无性繁殖苗和 3 年生南荻种子苗的茎秆最大弹性模量分别为 6 377.07、5 162.36、1 694.72 和 1 364.92 MPa,最大应力分别为 88.37、103.48、39.07 和 38.25 MPa。4 种芒草的弯曲性能差异大,在设计切割、粉碎、夹持机构时,需根据最大值来确定设计参数;芒/南荻杂交种第 8 茎秆部位的应力 103.48 MPa 可取为粉碎设计参数。

关 键 词:芒草;茎秆;弯曲;力学性质

中图分类号:Q369;S12 文献标志码:A 文章编号:1007-1032(2011)06-0681-05

Study on bending properties of *Miscanthus*

YAO Jun¹, LI Ming^{1,2*}, TANG Chu-zhou¹, LIU Yi-fan¹

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.National Research Center of Engineering Technology for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha 410128, China)

Abstract: Bending properties of miscanthus was investigated by *Measuring* and analyzing internode moisture content, outside diameter, original cross-sectional area, cross sectional moment of inertia, peak load, elastic modulus and bending rigidity. The results showed big differences in the bending properties among different varieties of miscanthus, and for hybrid miscanthus variety Xiangzamang No.2, hybrid variety between *Miscanthus* and *Triarrhena lutarioriparia*, biennial *Triarrhena lutarioriparia* apogamic seedling and triennial *Triarrhena lutarioriparia*, the averages of tensile strength were 6 377.07, 5 162.36, 1 694.72 and 1 364.92 MPa, respectively, whose maximum stress were 88.37, 103.48, 39.07 and 38.25 MPa respectively. As the design of cutting, crushing and holding mechanism must be based on the maximum value, the greatest stress presented on the 8th stem of the hybrid variety between *Miscanthus* and *Triarrhena lutarioriparia*, which was 103.48 MPa could be considered for crushing machine design.

Key words: *Miscanthus*; stalk; bending; mechanical properties

芒草(*Miscanthus*)系禾本科黍亚科多年生高大草本植物^[1],长期以来仅用作饲料或观赏^[2]。芒草生物质产量高^[2]、适应性强^[3]、水分含量低利于燃烧^[4]、纤维素含量高且木质素和灰分含量低,非常适于生产清洁生物质能源^[5],但由于芒草收割仍然停留在传

统的人工砍割阶段,无法达到生物能源工厂化对原料的要求,因此开发芒草收割和粉碎机械的任务非常紧迫。已有的针对小麦、水稻、甘蔗、油菜^[6-18]等系列农作物茎秆的力学特性的研究,推动了相关作物栽培和收获机械的参数设置。笔者以 4 种芒草

收稿日期:2011-07-06

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留[2011]1139号);中国博士后基金项目(20110491246)

作者简介:姚珺(1986—),男,湖南长沙人,硕士研究生;*通信作者,liming@hunau.net

材料为研究对象,研究芒草茎秆的力学特性,以期
为芒草收割机、粉碎机设计合理的切割方式和切割
刀具提供基本技术参数。

1 材料与方 法

1.1 材 料

于 2011 年 2 月芒草收获期在湖南农业大学芒
属植物种质资源圃中采样,湘杂芒 2 号(2007 年 6
月 23 日种植)、芒/南荻杂交种(2011 年申请品种登
记的苗头组合)和南荻腋芽繁殖苗(均于 2009 年 8 月
25 日种植)、3 年生南荻种子苗(2008 年 8 月 13 日
种植),依次编号 A、B、C、D。在距芒草茎秆离地
60~80 mm 处开始取样,从切割端开始,以节部为
中心,取长 80 mm 的茎秆为 1 个样品,1 根茎秆截
取 13 个样品,依次编号 1~13。每个芒草材料取 5
根茎秆,共得 65 个试样。

1.2 方 法

1.2.1 芒草茎秆含水率的测定

采用烘干法(JG/T 199—2007)测定。

1.2.2 芒草茎秆截面面积的测定

测量芒草每节两端和靠近节部两个方向的 4 个
外径值,在每节两端截面各取 4 个对称的位置测量
壁厚,以两节上的 8 个外径和 8 个壁厚的平均值作
为试样的平均外径和平均壁厚,计算横截面积。

1.2.3 芒草茎秆弯曲性能的测定

将芒草茎秆试样置于微机控制电子万能试验
机(SANS-CMT6104,深圳市新三思材料检测有限
公司出品)支座上,支撑架跨度为 70 mm,采用三点
弯曲法加载,以 20 mm/min 的速度加载,直至茎秆
断裂。为减少加载过程中芒草茎秆受压产生局部压
入变形,上压头接触位置选择在芒草茎秆的节部;
同时,在茎秆外皮与支撑块接触处涂抹一层石蜡减
小摩擦阻力。

因芒草茎秆属于纤维层增强型复合型材料,其
截面近似圆形,若将其按各向异性材料力学模型处
理会非常复杂,所以将其按各向同性材料处理,整
体受力时材料常数处理为当量弹性模量,计算茎秆
截面惯性矩和抗弯弹性模量^[19]。

2 结果与分析

2.1 芒草茎秆的弯曲过程

图 1 是湘杂芒 2 号茎秆相应于不同茎秆部位的
弯曲力—位移曲线。芒草茎秆的弯曲首先是压紧阶
段,经过线性范围变化区,随后荷载加载至最大荷
载时,茎秆被压溃至压密阶段,直至茎秆壁破裂。
压载过程中,当荷载超过芒草最大荷载时,芒草茎
秆出现瞬间折断,有很明显的脆断性。

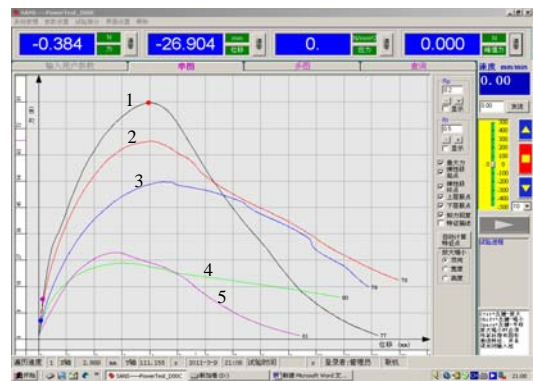


图 1 芒草不同茎秆部位弯曲力—位移变化曲线

Fig.1 Bending Force - displacement of samples from different positions of the stalk under ben

靠近基部的试样在弯曲荷载作用下,其线性变
化范围较大,靠近中部的试样线性范围很小,非线
性范围增加。可能是由中部茎秆组织到基部茎秆组
织,木质化程度和纤维含量增加,抗倒力增强,使
基部茎秆组织具有较高的抵抗变形的能力和较好的
线弹性^[9]。

2.2 芒草茎秆的弯曲性能

4 种芒草茎秆的弯曲性能测试结果列于表 1。

表 1 芒草茎秆的物理特性和弯曲性能
Table 1 Test results of different *Miscanthus* varieties

芒草	茎秆部 位置	含水率 /%	外径 /mm	壁厚 /mm	原始横截 面积/mm ²	茎秆截面 惯性矩 /mm ⁴	最大载荷 /N	挠度 /mm	弯矩 /(N·mm)	最大应力 /MPa	弹性模量 /MPa	抗弯刚度 /GPa
A	1	38.69	7.18	1.81	28.00	118.72	126.40	3.20	2 212.07	72.96	2 693.15	288.86
	2	31.13	6.90	2.06	27.34	99.75	88.47	2.53	1 548.24	43.41	2 966.95	287.19
	3	20.53	6.55	1.88	23.62	78.18	87.40	2.25	1 529.58	42.82	6 377.07	493.36
	4	16.24	6.25	2.65	27.31	71.98	125.54	2.66	2 196.93	79.61	5 049.46	349.22
	5	13.90	6.00	2.77	27.63	65.87	83.50	2.21	1 461.26	62.57	6 106.11	360.86
	6	13.62	5.93	2.66	26.51	64.65	98.78	2.70	1 728.63	88.37	5 271.24	288.56
	7	13.94	5.81	2.60	25.41	59.53	64.25	2.44	1 124.37	61.94	4 435.83	241.56
	8	14.16	5.78	2.67	25.83	59.05	62.07	1.88	1 086.19	42.53	4 494.14	216.50
	9	13.29	5.74	2.57	24.61	54.75	59.36	2.13	1 039.23	51.55	3 487.02	172.52
	10	14.46	5.74	2.59	24.98	54.41	67.32	2.60	1 178.10	56.63	3 085.67	174.97
	11	12.12	5.54	2.77	24.43	50.16	70.49	2.61	1 233.63	59.75	3 136.27	174.25
	12	13.78	5.96	2.98	27.92	62.52	72.24	2.22	1 264.25	46.25	3 702.56	229.16
	13	13.67	6.22	3.11	28.93	74.96	58.39	2.33	1 021.81	37.45	2 530.37	181.54
B	1	22.74	7.79	1.73	33.01	167.05	130.36	4.15	2 281.31	56.88	1 360.69	228.38
	2	16.20	7.35	1.59	28.85	131.00	131.91	3.48	2 308.45	64.71	2 114.06	276.06
	3	13.75	6.89	1.46	24.97	101.06	91.82	2.06	1 606.76	37.03	3 618.07	377.86
	4	13.07	6.41	1.35	21.54	75.74	111.75	2.36	1 955.70	60.29	4 540.81	344.88
	5	12.76	6.01	2.50	25.27	62.93	98.05	2.55	1 715.92	70.53	4 453.61	280.22
	6	12.87	5.67	2.83	25.36	52.23	69.64	1.95	1 218.69	45.87	5 162.36	268.37
	7	13.18	5.47	2.74	23.59	44.80	70.33	2.72	1 230.69	73.94	4 087.86	184.53
	8	12.12	5.27	2.64	21.87	38.46	70.34	3.16	1 230.89	103.48	3 986.94	154.45
	9	13.15	5.10	2.55	20.47	33.56	45.24	2.23	791.70	58.14	4 222.19	144.86
	10	12.36	5.05	2.53	20.05	32.16	46.19	2.30	808.33	56.83	4 403.49	144.47
	11	12.64	5.05	2.53	20.09	32.49	36.49	2.28	638.58	46.02	3 461.51	112.66
	12	12.60	4.96	2.48	19.33	29.85	30.95	2.16	541.71	39.03	3 365.65	101.56
	13	13.02	4.83	2.41	18.35	27.20	22.48	2.03	393.47	29.27	2 940.92	78.22
C	1	11.25	14.53	2.19	84.67	1 678.05	166.02	3.16	2 905.37	5.79	241.00	383.02
	2	9.72	14.63	2.00	79.40	1 638.84	153.93	3.32	2 693.79	5.49	208.80	331.11
	3	9.42	14.42	1.89	74.16	1 500.16	122.96	2.96	2 151.75	4.57	203.60	293.84
	4	9.13	14.00	1.90	72.28	1 367.69	125.77	3.51	2 200.96	5.92	190.54	256.92
	5	9.42	13.45	1.72	63.26	1 113.08	102.50	2.83	1 793.76	5.02	234.96	261.40
	6	9.25	12.64	1.69	57.90	888.93	130.26	3.96	2 279.63	10.48	268.38	235.50
	7	9.34	12.03	1.59	51.98	726.03	126.95	4.53	2 221.57	14.51	282.96	200.97
	8	9.09	11.39	1.66	50.43	614.28	117.27	2.97	2 052.26	10.70	467.44	278.54
	9	9.03	10.52	1.70	47.19	480.41	133.67	4.09	2 339.15	21.80	504.63	232.40
	10	8.92	9.91	1.72	44.10	390.68	143.06	3.43	2 503.62	23.97	841.66	320.19
	11	9.03	9.30	1.75	41.34	314.12	146.85	3.17	2 569.89	29.17	1 217.99	348.51
	12	9.31	8.68	3.68	53.74	272.17	138.02	2.61	2 415.30	24.68	1 628.97	446.13
	13	8.94	8.20	4.10	52.86	224.47	160.14	3.11	2 802.53	39.07	1 694.72	371.56
D	1	42.70	16.87	2.55	114.44	3 114.04	222.32	5.26	3 890.59	8.23	104.71	313.14
	2	16.39	16.47	2.40	106.13	2 765.87	169.81	4.29	2 971.64	4.98	115.32	293.21
	3	14.30	15.91	2.14	92.86	2 281.42	166.89	3.69	2 920.65	5.71	152.43	341.10
	4	14.36	15.36	2.15	89.09	2 004.61	153.67	3.50	2 689.15	4.98	166.70	339.55
	5	14.63	14.77	2.09	83.19	1 725.03	150.88	3.49	2 640.35	5.43	188.19	325.31
	6	14.61	14.44	2.07	80.19	1 593.28	159.39	3.62	2 789.28	6.57	219.48	343.29
	7	14.37	13.38	1.96	70.44	1 191.94	147.62	3.12	2 583.35	6.85	298.90	360.48
	8	14.29	12.45	1.86	61.86	901.33	152.50	2.79	2 668.82	8.20	449.36	406.95
	9	14.09	11.58	1.89	57.67	708.06	154.48	2.69	2 703.46	10.94	749.08	562.94
	10	14.04	10.91	1.81	51.88	566.02	156.12	1.91	2 732.06	10.36	1 127.23	650.00
	11	13.90	10.34	3.38	64.04	502.83	161.31	2.25	2 822.87	12.50	1 049.20	545.09
	12	13.73	9.88	3.20	57.79	414.94	170.32	2.49	2 980.68	18.82	1 268.62	536.28
	13	13.79	9.25	3.81	58.96	340.49	214.69	3.44	3 757.04	38.25	1 364.92	444.82

2.2.1 芒草茎秆的含水率

测定结果表明,芒草茎秆含水率沿茎秆生长方向逐步减小。

2.2.2 芒草茎秆弯曲性能

在收获期,芒/南荻杂交种、2年生南荻无性繁殖苗和3年生南荻种子苗的茎秆截面惯性矩由低位向高位递减,但对于湘杂芒2号,由高位向低位先递减再递增,呈凹型,在第12茎秆部位置最小。

湘杂芒2号的弹性模量从第1个茎秆部位置到第2个茎秆部位置递增,呈递减趋势;芒/南荻杂交种的弹性模量先由低位向高位递增,从第6个茎秆部位置递减;2年生南荻无性繁殖苗先递减到第4个茎秆部位置开始递增;3年生南荻种子苗是由低位向高位递增。

湘杂芒2号的抗弯刚度是先从第1茎秆部位置向第2茎秆部位置递减后递增,再从第3茎秆部位置递减;芒/南荻杂交种呈先递增到第3茎秆部位置然后递减的趋势;2年生南荻无性繁殖苗随茎秆部位置的增加,抗弯刚度曲线呈凹型,在第7茎秆部位置达到最小;3年生南荻种子苗呈右凸型,在第10茎秆部位置达到最大。

由于芒草不同品种、不同部位之间弯曲性能差异比较大,在设计切割、粉碎机构时,需根据试验结果最大值来确定设计参数。表1结果显示,湘杂芒2号第1茎秆部位置的最大应力平均值达72.96 MPa,是4种芒草材料中茎秆部1到2位置的最大

值,因此应选取此值作为收割机切割器设计参数。芒/南荻杂交种第8茎秆部位置平均应力为103.48 MPa,是4种芒草材料中茎秆弯曲最大应力,设计粉碎加工机械时,为使茎秆所受应力大于茎秆弯曲最大应力,达到粉碎目的,应选取此值为粉碎器参数。湘杂芒2号和芒/南荻杂交种的第1~2茎秆部位置的最大应力高于甘蔗(最大应力为46.5 MPa[11])和苕麻(最大应力为40.77 MPa[16]);2年生南荻无性繁殖苗和3年生南荻种子苗的第1~2茎秆部位置的最大应力略高于扁穗冰草刈割期茎秆(最大应力为4.706 MPa[19]),4种芒草材料的收割均不宜采用传统的切割方式与切割刀具。

为了考察茎秆部位置对4种芒草的茎秆截面惯性矩、最大荷载、弯矩、最大应力、弹性模量和抗弯刚度的影响,利用SPSS软件作方差分析,结果列于表2。4种芒草的茎秆截面惯性矩、最大荷载、弯矩、最大应力、弹性模量和抗弯刚度均方差都很大,说明不同芒草个体之间的差异很大。不同的茎秆部位置对湘杂芒2号的弯曲性能指标没有统计学意义($P>0.005$),这可能与湘杂芒2号内部的组织结构有关。而对芒/南荻杂交种(茎秆截面惯性矩、最大荷载、弯矩、弹性模量和抗弯刚度)、2年生南荻无性繁殖苗(茎秆截面惯性矩、最大应力、弹性模量和抗弯刚度)和3年生南荻种子苗(茎秆截面惯性矩、最大应力和弹性模量)在茎秆部位置间存在显著差异($P<0.05$),可为芒草茎秆的选育、机械收割及粉碎提供参数依据。

表2 芒草茎秆弯曲性能的方差分析

Table 2 Analysis value of different *Miscanthus* varieties

芒草	指标	茎秆截面惯性矩	最大载荷	弯矩	最大应力	弹性模量	抗弯刚度
A	F	2.470	1.170	1.170	0.570	1.010	0.69*
	P	0.014	0.335	0.335	0.855	0.453	0.754*
B	F	13.870	6.130	6.130	1.940	4.330	4.91*
	P	<0.001	<0.001	<0.001	0.061	<0.001	<0.001*
C	F	26.900	1.470	1.470	9.35*	44.94 ^K	3.120
	P	<0.001	0.179	0.179	<0.001*	<0.001 ^K	0.004
D	F	18.290	1.400	1.400	5.16*	35.46*	1.533
	P	<0.001	0.209	0.209	<0.001*	<0.001*	0.154

*数据经过对数转换为正态分布。

参考文献:

- [1] 梁绪振,陈太祥,白史且,等. 芒属(*Miscanthus*)植物种质资源研究进展[J]. 草业与畜牧, 2010(10): 1-5.
- [2] 谢光辉,卓岳,赵亚丽,等. 欧美根茎能源植物研究现状及在我国北方的资源潜力[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 11-18.
- [3] Beale C V, Long S P. Can perennial C4 grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climate[J]. *Plant Cell and Environment*, 1995, 18: 641-650.
- [4] Lewandowski I, Kicherer A, Vonier P. CO₂-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1995, 8(2): 81-90.
- [5] 胡婷春,熊兴耀. 新型能源植物——芒的研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2010(5): 23-26.
- [6] 胡婷,付志一,焦群英. 小麦茎秆抗弯性能研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 31-35.
- [7] 郭翠花,高志强,苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 151-155.
- [8] 段传人,王伯初,王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003, 26(11): 38-40.
- [9] 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.
- [10] 吴明亮,官春云,汤楚宙,等. 油菜茎秆切割力影响因素试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 141-144.
- [11] 李玉道,杜现军,宋占华,等. 棉花秸秆剪切力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 124-128.
- [12] 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.
- [13] 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): 47-49.
- [14] 苏工兵,刘俭英,王树才,等. 苕麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 62-65.
- [15] 李明,汤楚宙,谢方平,等. 毛桃苗力学特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 29-33.
- [16] 李明,汤楚宙,谢方平,等. 苗木嫁接机器人切削机构模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 129-132.
- [17] 赵春花,曹致中. 豆禾牧草刈割期茎秆抗弯特性试验研究[J]. 草原与草坪, 2010, 30(1): 20-23.
- [18] 梁莉,郭玉明. 作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 1-6.
- [19] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.

责任编辑: 罗慧敏

(上接第 673 页)

- [7] Bigda R J. Consider fenton's chemistry for wastewater treatment [J]. *Chem Eng Prog*, 1995, 9(1): 62-66.
- [8] 路璐,康建雄,杨婧,等. Fenton 试剂法氧化处理黄姜皂素废水[J]. 工业用水与废水, 2007, 38(3): 36-39.
- [9] 彭月娥,李季,李华才,等. 纳滤膜分离皂素水解原液的试验研究[J]. 工业水处理, 2006, 26(5): 35-37.
- [10] 杨志华,谢雄,王晖,等. 膜分离技术处理皂素酸性废水的试验研究[J]. 地质科技情报, 2007, 26(1): 91-95.
- [11] 宋凤敏,呼世斌,刘音. 酵母菌处理皂素生产废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(4): 66-69.
- [12] 李庆新,蔡鹤生,张小卉,等. 皂素生产废水处理方法比较研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(3): 61-63.
- [13] 王超,薛安,赵华章,等. 单室型微生物燃料电池处理黄姜废水的性能研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 3093-3098.
- [14] 杨雪芬,罗泽娇,信欣. PVA 固定化厌氧污泥处理皂素废水试验研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(2): 93-96.
- [15] 蒋廷杰,齐增湘,罗军,等. 人工湿地水质净化机理与生态工程研究进展[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2010, 36(3): 356-362.
- [16] Nawamura Y, Nishi T, Chigusa K. Process for high load treatment of wastewater containing fish meal by yeast [J]. *Operation and Installation*, 1992, 11(6): 99-104.
- [17] 赵宗梁,郑江,谭远友,等. 酵母菌处理穿山龙淀粉废水的研究[J]. 化学与生物工程, 2009, 26(2): 54-57.
- [18] 贺应龙,胡秋龙,熊兴耀,等. 一株可发酵木糖产乙醇细菌的筛选[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2011, 37(4): 456-460.
- [19] 刘建党,李军超,呼世斌. EM 菌—好氧污泥联合处理皂素生产废水的研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(4): 329-333.
- [20] Gemeay A H, Gehad R. Kinetics of the oxidative decolorization of reactive blue-19 by acidic bromate in homogeneous and heterogeneous media[J]. *Dyes and Pigments*, 2007, 73 (1): 90-97.
- [21] Wang J P, Chen Y Z, Ge X W, et al. Optimization of coagulation-flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology [J]. *Colloids and Surfaces A: Physico-Chemical and Engineering Aspects*, 2007, 302 (1): 204-210.

责任编辑: 刘目前