

# 薇菜类蔬菜生物力学性质试验研究

马洪顺<sup>1</sup>, 张忠君<sup>2</sup>, 曹龙奎<sup>3</sup>

(1. 吉林大学南岭校区工程力学系, 长春 130022; 2 长春飞行学院力学教研室, 长春 130022; 3 吉林省农业科学院, 公主岭市 136100)

**摘要:** 通过研究野生富硒植物薇菜的粘弹性力学性质等为食品物性学研究提供生物力学参数。选用吉林省汪清县山区野生薇菜为研究对象, 对野生薇菜茎进行拉伸、压缩、弯曲、冲击、应力松弛、蠕变试验。得出了薇菜拉伸最大载荷、应力、应变、弹性模量、弯曲弯矩、弯曲应力, 得出了薇菜冲击功、冲击韧性; 还得了薇菜茎应力松弛、蠕变试验数据和曲线, 用三参数模型对应力松弛、蠕变数据进行拟合, 得出了应力松弛方程、蠕变方程, 得出了薇菜应力、应变随时间的变化规律。薇菜具有良好的生物力学性能, 属于粘弹性材料。

**关键词:** 薇菜; 生物力学; 拉伸; 压缩; 弯曲; 冲击; 粘弹性

**中图分类号:** R 318 01; O 348

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)05-0074-04

## 0 引言

薇菜, 又名“野豌豆”是一种多年生蕨类草本植物, 根茎粗状, 多生长于阴暗湿润的荒坡野岭, 其茎色鲜美, 营养丰富, 含有丰富的蛋白质、多种维生素、糖类及钙、铁、磷等人体必需的矿物质元素, 具有多种保健功能, 是名贵的野菜<sup>[1]</sup>。

食品物性学最早起源于对食品粘弹性的研究, 在食品物性学中, 发展最早的是食品力学方面的研究, 食品力学的中心是食品流变学, 食品流变学的基础是流体力学和粘弹性理论<sup>[1]</sup>。

食品物性学是关于研究食品物理性质的一门科学, 在国外, 食品物性学和食品化学、营养生理学这几门学问被称为是食品科学与食品工程研究领域极为重要的基础学科, 随着农业生产和食品工业的发展, 无论是从加工、流通领域, 还是从人们的消费倾向来看, 对食品及其原料品质的评价, 不仅仅是营养成分和卫生要求, 而且对其物理性质的研究和控制日显重要。力学性质是物理性质中十分重要的内容, 它包括食品在力的作用下产生变形、振动、流动、破断等的规律, 以及其感观评价的关系等, 它与食品工程的关系十分密切, 关于食品的力学性质国内外学者做了一定的研究<sup>[2-11]</sup>。1982 年王岳等对稻麦作物的振动力学特性做了研究<sup>[4]</sup>; 马小愚、雷得天等 1988 年、1991 年、1999 年分别对大豆、小麦籽粒与马铃薯的力学性能做了研究<sup>[5-7]</sup>; 王俊等 1994 年对桃子的冲击力学特性做了试验研究<sup>[8]</sup>; 2002 年王剑平等对黄花梨的冲击力学特性做了试验研究<sup>[9]</sup>; 徐树来等 2002 年对高压处理后蒜薹的力学性能做了研究<sup>[10]</sup>; 高梦祥等 2003 年对玉米秸秆的茎叶连接力、叶鞘的抗拉特性和茎秆、叶鞘的抗冲击特性进行了测试研究<sup>[11]</sup>。关于薇菜类蔬菜力学性质研究, 国内未见报道, 薇菜深加工非常有必要了解薇菜的力学性质, 鉴于此, 作者对野生薇菜进行拉伸、压缩、弯曲、冲击、应力松弛、蠕变力学

性质试验研究。得出拉伸、压缩最大载荷, 最大应力, 最大应变, 弹性模量; 弯曲最大载荷、弯矩、最大应力。冲击功、冲击韧性。应力松弛, 蠕变试验数据和曲线, 以三参数模型对试验数据进行拟合得出了应力松弛、蠕变方程, 得出子薇菜应力、应变随时间的变化规律, 对试验结果进行分析讨论。

## 1 试验材料与方法

试验用野生植物薇菜(3 年生)取自吉林省汪清县山区。由吉林省农业科学院食品加工中心提供。取薇菜拳卷幼叶在室内通风自然干燥的薇菜茎秆为标本。

### 1.1 拉伸试验与方法

本试验为使拉伸试验得以实现, 采取了将拉伸试样两端部以牙托粉固定, 即自制直径为 10 mm, 深度为 12 mm 的模具, 将试样两端置入模具内, 用以牙托水稀释的牙托粉向模具内浇涛, 使试样固定于牙托粉内, 干燥 24 h 后脱模, 试样两端由牙托粉牢固的固定住。

拉伸试验设备为日本岛津 AG-10TA 自动控制电子万能试验机, 载荷由载荷传感器传递, 传感器最大量程 200 N, 使用量程为 200 N。位移通过光电编码器传递, 应变通过机器的应变单元传递。以游标卡尺测量试样的原始尺寸, 试样长 29.6~30.4 mm, 宽 1.98~2.70 mm, 厚为 1.32~2.00 mm。将试样的原始尺寸输入得控制机器的计算机内。将试样两端装夹到机器的上、下夹头内。本试验以 2 mm/min 的试验速度对试样施加拉应力, 试验结束后计算机自动输出载荷, 应力, 应变等试验数据经统计分析见表 1。

### 1.2 压缩试验与方法

压缩试验设备, 试样加工方法等, 试样测量等同拉伸试验。试样高为 3.98~4.40 mm, 宽为 1.96~2.26 mm, 厚为 1.32~1.64 mm 将试样置于试验机的工作台上, 将试样的原始尺寸输入给控制机器的计算机。以 2 mm/min 的试验速度对试样施加压应力, 试样破坏后, 计算机自动输出最大载荷、应力, 应变等数据。薇菜压缩试验结果经统计分析  $\bar{x} + sD$  结果见表 2。

收稿日期: 2003-06-09 修订日期: 2004-06-18

作者简介: 马洪顺(1949-), 男, 吉林长春人, 高级工程师, 主要从事生物力学研究。长春 吉林大学南岭校区工程力学系, 130022

表 1 薇菜拉伸试验结果

Table 1 Pull test results of *osunda cinnamomea*

样号	最大载荷 /N	应力 /MPa	应变 /%	弹性模量 /MPa	试样截面积 /mm <sup>2</sup>
1	32.23	9.04	2.265	887.4	3.564
2	14.15	2.92	3.950	968.9	4.840
3	102.75	38.43	2.490	716.5	2.673
4	87.30	32.09	1.049	1026.9	2.720
5	91.40	33.45	0.806	695.7	2.730
6	100.32	35.06	2.017	896.8	2.861
7	67.96	26.54	0.508	996.1	2.560
8	51.79	20.36	0.812	762.8	2.560
9	67.90	24.87	0.508	874.6	2.730
10	83.30	30.29	0.540	917.2	2.750
11	107.60	37.26	0.789	892.4	2.880
12	133.40	40.37	1.147	1029.3	3.304
13	97.36	32.75	0.512	986.4	2.972
14	79.64	27.53	0.781	796.2	2.892
15	103.66	33.06	0.647	986.5	3.135
$\bar{x} \pm \sigma$	81.38±30.79	28.26±10.53	1.254±0.993	895.6±109.4	3.011±0.575

表 2 薇菜压缩试验结果

Table 2 Compression test results of *osunda cinnamomea*

样号	最大载荷 /N	应力 /MPa	应变 /%	试样截面积 /mm <sup>2</sup>
1	120.6	35.89	2.50	3.36
2	68.0	25.75	2.45	2.64
3	136.0	38.21	1.81	3.56
4	132.0	37.07	2.0	3.26
5	100.4	34.75	2.54	2.89
6	99.4	35.75	2.50	2.78
7	116.0	41.72	2.10	2.78
8	121.0	42.60	2.07	3.84
9	122.6	32.99	2.34	3.71
10	109.0	38.79	2.21	2.81
11	86.0	31.52	2.53	2.76
12	122.6	44.42	2.41	2.98
13	138.4	43.79	2.42	3.16
14	117.8	38.24	1.95	3.08
15	120.3	41.62	1.73	2.89
$\bar{x} \pm \sigma$	114.0±18.9	37.54±5.06	2.23±0.27	3.10±0.37

表 3 薇菜弯曲试验结果

Table 3 Bend test results of *osunda cinnamomea*

样号	最大载荷 /N	弯矩 /N·mm	应力 /MPa	挠度 /mm
1	26.0	130.0	97.52	1.8
2	11.6	58.0	181.25	1.7
3	11.2	56.0	52.53	1.5
4	16.2	81.0	28.12	1.0
5	14.3	71.5	98.62	1.4
6	16.4	82.0	71.18	1.9
7	22.6	113.0	142.31	2.0
8	15.4	77.0	37.00	1.0
9	18.6	93.0	38.35	2.0
10	15.2	76.0	36.31	1.5
11	20.2	101.0	138.54	0.9
12	12.8	64.0	59.25	0.8
13	14.2	71.0	62.66	1.2
14	12.5	62.5	31.75	1.4
15	19.6	98.0	21.43	1.8
16	7.8	39.0	73.17	1.1
17	9.4	47.0	96.70	1.4
18	9.8	49.0	91.24	2.0
19	15.6	78.0	39.87	1.8
20	17.2	86.0	136.07	1.6
$\bar{x} \pm \sigma$	15.3±4.5	76±22	76.69±45.13	1.5±0.4

表 4 薇菜冲击试验结果

Table 4 Impact test results of *osunda cinnamomea*

样号	试样截面积 /mm <sup>2</sup>	冲击功 /N·cm	冲击韧性 /N·cm·mm <sup>-2</sup>
1	2.374	9.80	4.128
2	3.520	9.80	2.784
3	2.028	7.84	3.865
4	4.896	11.76	2.401
5	3.130	13.72	4.380
6	2.484	11.76	4.734
7	2.741	10.74	4.647
8	2.217	10.78	4.862
9	2.464	12.74	5.170
10	2.226	8.82	3.962
11	3.408	11.76	3.408
12	3.538	12.74	3.538
13	3.951	14.70	3.951
14	4.637	12.74	4.637
15	4.253	9.80	4.253
$\bar{x} \pm \sigma$	3.191±0.930	11.30±1.88	4.04±0.76

1.3 弯曲试验与方法

薇菜弯曲试验设备试样测量等同前。试样的原始尺寸, 试样长为 50~ 52 mm, 宽为 1.4~ 3.26 mm, 厚为 0.8~ 2.0 mm。将试样置于试验机的弯曲支座上, 支座跨距 20 mm, 本试验以 2 mm/min 的试验速度对试样施加的弯矩, 直到试样破坏, 计算机自动输出最大载荷, 弯矩, 应力等数据。薇菜 3 点弯曲试验结果经统计分析  $\bar{x} \pm \sigma$  结果见表 3。

1.4 冲击试验与方法

薇菜冲击试验在前民主德国莱比锡试验机厂生产的小型冲击试验机上进行试验, 首先测量试样的原始尺寸, 试样长 40 mm, 宽为 1.82~ 2.50 mm, 厚为 1.02~ 1.82 mm, 将试样置于试验机的支座上, 将试验机摆锤摆起一定高度后冲断试样, 通过机器的测功度盘读出冲击功, 根据材料力学公式计算每个试样的冲击韧性, 冲击试验结果经统计分析  $\bar{x} \pm \sigma$  结果见表 4。

2 应力松弛试验与方法

应力松弛试验是研究生物材料粘弹性的重要方法。应力松弛即在恒应变作用下, 应力随着时间的改变不断下降, 达到一定的时间后应力松弛曲线达到平衡。取 10 个薇菜试样进行应力松弛试验。试验设备, 试样测量方法同拉伸试验, 试样长为 28.2~ 30.0 mm, 宽为 2.0~ 3.3 mm, 厚为 0.8~ 2.0 mm。将试样的原始尺寸输入到控制机器的计算机内。设定计算机程序, 记录方式为  $X \sim T$ , 其中  $X$  轴为轴向应力,  $T$  轴为时间。本试验以 50% /min 的应变增加速度对试样施加应变。当载荷达到 10 N。应力达到 3.45 MPa, 应变达到 0.652% 时使应变保持恒定, 应力随时间的改变不断下降, 计算机程序设定从时间  $t(0)$  开始 0.6 s 采集 1 个数据, 采集 10 个数据; 之后每 80 s 采集 1 个数据, 采集 90 个数据, 历时

7200 s。试验结束后,计算机自动输出试验结果。

粘弹性力学模型有多种,作者采用了三参数模型,三参数模型图见参考文献[2]。

由三参数模型可导出应力松弛方程为

$$\sigma(t) = \epsilon_0 E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \epsilon_0 E_2 \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——应力;  $\epsilon$ ——应变;  $E_1, E_2$ ——三参数模型中弹簧 1、2 的弹性系数;  $\tau_1$ ——材料的特征时间参数。

$$t = 0, \sigma(0) = \epsilon_0 E_1 + \epsilon_0 E_2 = 3.3775 \text{ MPa}$$

$$t = \infty, \sigma(\infty) = \epsilon_0 E_2 = 2.1045 \text{ MPa}$$

$$\text{求得: } \epsilon_0 E_1 = 1.2730$$

$$\sigma(t) = 1.2730 \epsilon_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + 2.1045$$

$$t = 3600,$$

$$\sigma(3600) = 1.2730 \epsilon_0 e^{-\frac{3600}{\tau_1}} + 2.1045 = 2.1895$$

$$\tau_1 = 1121.8 \text{ s}$$

$$\sigma(t) = 1.2730 \epsilon_0 e^{-\frac{t}{1121.8}} + 2.1045$$

(2) 式即为薇菜的应力松弛方程。

$$\epsilon_0 = 0.632\%$$

$$E_2 = \frac{2.1045}{\epsilon_0} = \frac{2.1045}{0.632\%} = 332.99 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{1.2730}{\epsilon_0} = \frac{1.2730}{0.632\%} = 201.42 \text{ MPa}$$

经计算其误差:  $t = 3600 \text{ s}$  时,为 3%,与理论曲线较接近。由方程(1)拟合的应力松弛曲线见图 1。

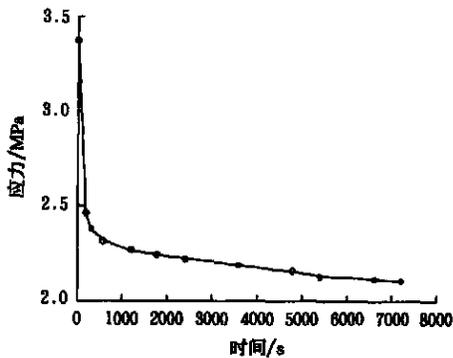


图 1 应力松弛曲线

Fig. 1 Stress relaxation curve

### 3 蠕变试验与方法

蠕变试验也是研究粘弹性质的重要方法,它表示在恒应力  $\sigma_0$  作用下,应变随时间的变化历程。取 10 个薇菜试样进行蠕变试验。试样的测量方法同应力松弛试验,试样长为 29.2~30.8 mm,宽为 2.0~3.3 mm,厚为 0.8~2.0 mm。将试样的原始尺寸输入到控制机器的计算机内。将试样两端装夹到夹具内。设定计算机程序,记录方式为  $X-T$ ,其中  $X$  轴为轴向应度,  $T$  轴为时间。本试验以 0.5 GPa/min 的试验速度对试样施加应力,当载荷到 10 N,应变达到 0.638% 应力达到 3.392 MPa 时使应力保持恒定,应变随着时间的变不断上升,蠕变试验的数据采集与试验时间与应力松弛试验相同。达到设计的时间计算机自动输出试验结果。

蠕变力学模型仍选用三参数模型,求蠕变方程。由

三参数模型可以导出蠕变方程

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (3)$$

式中  $\tau_1 = \frac{\eta}{E_2}$ , (3) 式即谓蠕变方程的一般表达式。

$$\epsilon(0) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_2} = \frac{\sigma}{E_1} = 0.638\%$$

$$\epsilon(\infty) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} = 0.857\%$$

$$t = 3600,$$

$$\begin{aligned} \epsilon(3600) &= 0.638\% + 0.219\% (1 - e^{-\frac{3600}{\tau_1}}) \\ &= 0.8160\% \end{aligned}$$

$$\tau_1 = 2148.6 \text{ s}$$

$$\epsilon(t) = 0.638\% + 0.219\% (1 - e^{-\frac{t}{2148.6}}) \quad (4)$$

(4) 式即为薇菜蠕变方程表达式

$$\sigma_0 = 3.374 \text{ MPa}$$

$$E_2 = \frac{\sigma}{0.219\%} = 1540.7 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{\sigma}{0.638\%} = 528.8 \text{ MPa}$$

经计算知  $t = 3600 \text{ s}$  时得到的理论值与实际值误差最小。经验算与试验曲线相比误差在 3% 以内,能较好的拟合试验曲线,以(3)式拟合出的蠕变曲线见图 2。

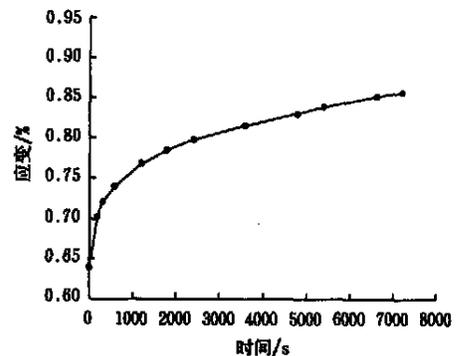


图 2 蠕变曲线

Fig. 2 Creep curve

### 4 结果与讨论

薇菜拉伸试验结果显示,其最大载荷为 14.15~133.40 N,应力为 2.92~40.37 MPa,应变为 0.51%~3.95%,弹性模量为 716.54~1029.30 MPa,试样断口多数为横形,少数为斜形。压缩试验结果显示,其最大载荷为 68.0~138.4 N,应力为 25.75~43.79 MPa,应变为 1.73%~2.53%。多数试样断口为横断口,少数试样为斜断口。

弯曲试验结果显示,最大载荷为 7.8~22.6 N,弯矩为 39~130 N·mm,弯曲应力为 39.87~138.54 MPa,挠度为 0.8~2.0 mm。多数试样为横断口,个别试样为斜断口。

冲击试验结果显示,冲击功为 8.82~14.70 N·cm,冲击韧性为 2.784~5.17 N·cm/mm<sup>2</sup>,多数断口为横断口,少数为斜断口。

应力松弛试验结果显示,最初 1200 s 应力松弛量

较大, 为1.06 MPa, 之后应力缓慢下降, 达到7200 s时应力松弛曲线基本达到平衡7200 s应力松弛量为1.27 MPa, 应力松弛曲线是以对数关系变化的。

蠕变试验结果显示, 最初1200 s蠕变量较大, 为0.13%, 之后应变缓慢上升, 达到7200 s时, 蠕变曲线基本达到平衡, 7200 s蠕变量为0.219%, 蠕变曲线是以指数关系变化的。

薇菜的拉伸、压缩、冲击试验如果不采取将试样两端固定的方法, 试验是很难进行的, 本试验采取将拉伸、压缩、冲击试样两端用牙托粉固定, 是可行的。该方法不仅可以用于薇菜, 也可以用于其它的植物。

薇菜主要由纤维和基质组成, 其基质为水、蛋白质及胶原组成。薇菜的力学性质随其液体含量而变化。蛋白质的亲水性很强, 其分子在液体中能进行可逆的压缩。对维持薇菜的粘弹性及对抗外力起着重要作用。纤维最重要的力学性质是其拉伸强度及拉伸刚度。薇菜茎的亲水作用非常强。作者作了这样的试验, 对薇菜茎试样以自来水浸温后进行应力松弛, 蠕变试验, 发现7200 s其应力松弛, 蠕变量均大于干试样, 应力松弛量大0.31 MPa, 蠕变量大0.082%, 预试验结果还表明, 对试样施加的恒应力越大, 其蠕变量越大, 恒定应变越大, 其应力松弛量越大, 但不成正比关系。食品加工中许多操作都直接与力学性质有关, 如混合、搅拌、筛分、压榨、过滤、分离、粉碎、整形、搬运、输送、成型、喷雾等都是给食品材料施加某种力, 而使其达到所需的形态, 因此研究和掌握加工对象的力学性质, 就成了这方面工程设计和单元操作的基础<sup>[2]</sup>。本试验为薇菜类蔬菜加工提供了力学性质参数。本试验方法也适用于其它类蔬菜。

## 5 结论

1) 薇菜拉伸试验试样断口多数为横断口, 少数试样为斜断口。

2) 薇菜弯曲试验多数试样为横断口, 个别试样为斜断口。

3) 薇菜弯曲试验多数断口为横断口, 少数为斜断口。

4) 薇菜应力松弛曲线是以对数关系变化的。

5) 薇菜蠕变曲线是以指数关系变化的。

6) 薇菜和其它植物一样, 具有粘弹性力学性质。

## [参 考 文 献]

- [1] 刘江燕, 吕银华, 胡艳军. 稀土对薇菜生长过程中营养物质及几种重要同工酶的影响研究[J]. 湖北师范学院学报, 2001, 21(4): 49- 52
- [2] 李里特著. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001, 1- 2
- [3] Micha Peleg, Edward Bagley. Physical Properties of Food [M]. AVIPublishing Company. NC, 1983
- [4] 王 岳, 吴叙田. 关于稻麦作物振动物理机械特性的研究[J]. 农业机械学报, 1982, 13(3): 29- 41
- [5] 马小愚, 雷得天. 大豆籽粒力学性质的试验研究[J]. 农业机械学报, 1988, 19(3): 69- 75
- [6] 雷得天, 马小愚. 马铃薯组织破坏时的力学性能及其流变学模型[J]. 农业机械学报, 1991, 22(2): 63- 67
- [7] 马小愚, 雷得天, 赵淑红, 等. 东北地区大豆与小麦籽粒的力学一流变学性质研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 70- 75
- [8] 王 俊, 许乃章, 胥 芳, 等. 桃子冲击力学特性及其桃子硬度的数学模型[J]. 农业机械学报, 1994, 25(4): 58- 62
- [9] 王剑平, 王 俊, 陈善锋, 等. 黄花梨的撞击力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 32- 35
- [10] 徐树来, 张守勤. 高压处理蒜薹力学特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 202- 205
- [11] 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, 52

## Experimental study on the biomechanical properties of *osmunda cinnamomea* like vegetables

Ma Hongshun<sup>1</sup>, Zhang Zhongjun<sup>2</sup>, Cao Longkui<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Mechanical Teaching and Research Group, Flying College of Changchun, Changchun 130022, China;

3. Agriculture Science Academy of Jilin Province, Gongzhuling, Jilin 136100, China)

**Abstract** In order to provide the biomechanical parameters, research on the *osmunda cinnamomea* which is a kind of plant full of Sewas was conducted. Sampling the wild *osmunda cinnamomea* at Wangqing county mountainous area of Jilin Province, the pull, compression, impact, stress relaxation and creep tests on the samples were done respectively. The maximum pulling load, stress, strain, modulus of elastics, bending moment, stress, impacting work, tenacity, the stress relaxation and creep data and curves were obtained. With triparameter model fitting the experimental data of the stress relaxation and creep formulas were obtained. *Osmunda cinnamomea* is of good biomechanical properties and is a kind of viscoelastic material.

**Key words:** *osmunda cinnamomea*; biomechanics; pull; compression; bend; impact; viscoelastic properties