

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.12.005

青菜头缩短茎物理力学特性的试验研究^①

郝林杰¹, 叶进¹, 岳高峰²,
龚境一¹, 李明生¹, 曾百功¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业机械鉴定站, 重庆 永川 402160

摘要:以“涪杂 2 号”青菜头为试验材料, 采用 WDW3100 型微机控制电子式万能试验机对青菜头缩短茎径向和轴向的抗压强度、屈服强度、弹性模量等力学特性进行了试验研究, 并基于斜面法采用高速摄像测定了青菜头缩短茎的动摩擦系数和静摩擦系数, 研究可为青菜头收获和加工机器系统的研发提供基础理论依据。

关键词:青菜头; 缩短茎; 物理力学特性; 压缩试验; 摩擦系数测定

中图分类号: S-3; S121; S225.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2018)12-0030-07

青菜头腌制后是人们熟知的榨菜。榨菜味道鲜美, 是出口创汇的重要农产品^[1], 余姚榨菜与涪陵榨菜更是一张城市名片^[2-3]。随着城镇化的推进和人民生活水平的提高, 从事农业体力劳动的人越来越少, 劳动成本越来越高, 与此同时, 人工收获青菜头存在工作环境差、劳动强度大、收获效率低等问题, 制约了青菜头产业的可持续发展。吴渭尧设计出了针对平原地区的大型青菜头收获机械^[4-6], 龚境一、王留步等人针对丘陵山区土壤含水率高, 粘度大, 种植地块小等情况进行了青菜头收获装备的相关研发^[3,7]。通过在重庆市涪陵区青菜头种植基地田间试验发现, 采用先切缩短茎后拾取的收获方案可减少青菜头收割机整机尺寸, 更适合丘陵山区小田块作业。

了解青菜头缩短茎的物理力学特性对于提高切割质量有至关重要的作用。目前, 薛元鹏等人对青菜头的外形参数、拔取力和根茎剪切力等物理力学特性已经进行了相关研究^[8]。但这些研究成果还不足以以为青菜头收获机械的研发提供充分的基础理论依据。参照木材、荔枝树枝等作物物理力学特性的研究方法^[9-15], 根据仿真需求并结合实际试验条件, 开展对青菜头缩短茎其他物理力学特性参数的研究, 获得弹性模量、抗压强度、摩擦系数等物理力学特性参数, 为青菜头收获机械仿真优化提供数据支撑, 从而优化青菜头收获机械装备, 以期提高收获质量。

1 压缩性能试验

1.1 材料与方法

1.1.1 试样准备

作者于 2018 年 1 月 3 日在重庆市涪陵区渝东南农业科学研究院“涪杂 2 号”试验田中, 采用 5 点取样法统一选取 9 月上旬播种育苗、生态健康、外观无损伤、无病害的 20 颗青菜头制作压缩试件, 其中 10 颗进行

① 收稿日期: 2018-06-12
基金项目: 重庆市科委基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0311); 横向项目“丘陵山区青菜头收获机关键共性技术研究”。
作者简介: 郝林杰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事现代农业装备与设施的研究。
通信作者: 叶进, 教授, 硕士研究生导师。

轴向压缩试验, 另外 10 颗进行径向压缩试验。

参照木材抗压强度试验方法, 结合青菜头实际尺寸, 将试件制成长、宽、高都为 10 mm 的正方体, 试件尺寸公差为 ± 0.5 mm. 试件如图 1 所示。

1.1.2 试验仪器及方法

本试验采用 WDW3100 型微机控制电子式万能试验机, 由于农业物料具有粘弹性和小力大变形的特点, 因此必须采用连续加载将力和变形真实地记录下来, 该万能试验机配备全数字测量控制系统, 作业时能够实现计算机自动控制和数据自动采集^[15]。

试验机最大测试力有 1,10,100 kN 自选, 有效测力范围: 0.4%~100%(F.S)(内外不分档), 力分辨率: 1/240 000(全程分辨力不变), 力示值相对误差为 $\pm 0.5\%$, 试验速度范围为 0.005~500 mm/min(无级调速, 任意设置), 速度示值相对误差为 $\pm 0.5\%$, 可依据应力、应变、位移 3 种闭环控制方式求出最大力、抗拉压强度、剪切强度及弹性模量等参数。

如图 2 所示, 将试件放置在压缩工作台中心, 操作控制手柄将移动横梁移动到距试件顶端约 5 mm 处, 选择 1 kN 测力传感器、压缩速度 1 mm/min、断裂百分比 10%、采样频率 20 点/s 后开始压缩。由于本次试验仅需要得到试件的最大抗压强度及弹性模量, 故当力-位移曲线出现急速上升趋势时即试件被压实后, 手动停止试验并输出试验结果, 缩短单次试验时间。

由图 3 所示, 压缩试件发生劈裂, 与木材抗压试验中最常见的试件破坏形状相似^[16], 结合力-位移输出曲线分析可知, 加工的青菜头压缩试件在压缩试验中表现良好, 达到压缩破坏标准, 实现预期试验目标。

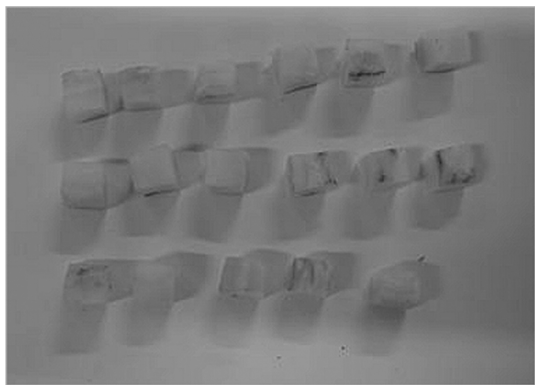


图 1 压缩试件

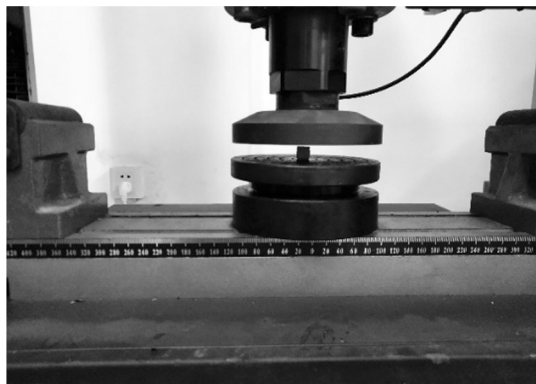


图 2 试件摆放示意图



图 3 试件破坏形状

1.2 结果与分析

1.2.1 压缩试验力—位移曲线分析

如图 4 所示为压缩试验曲线, 曲线表明压缩试验中试件经过了 4 个阶段:

第一阶段为万能试验机压头靠近试件阶段(0~1.3 mm), 为了便于试件摆放在球面滑动支座及出于保护机器考虑, 将压头调节至试件上方一定高度后进行试验. 故从图中可以看到, 0~1.3 mm 阶段的力为试验机压头与机器内部作用力, 呈非线性趋势。

第二阶段为试件弹性变形阶段(1.3~2.4 mm), 随着压缩力的增加, 从图中弹性段起点至弹性段终点区间内, 青菜头试件的压缩力与位移呈现出近似线性变化的关系, 表明青菜头试件弹性变形阶段符合胡克定理。

第三阶段为试件粘弹性变形阶段(2.4~3.5 mm), 青菜头与金属的性质不同, 不仅表现为各向异性,

而且具有粘弹性. 一定温度下, 大分子变形要达到与外力相适应的平衡状态, 中间有一个松弛过程, 由于松弛过程的存在, 使青菜头试件的变形往往要落后于应力的变化, 产生滞后效应, 此阶段压缩力的增长速度比位移增长速度快.

第四阶段为试件屈服阶段(3.5~5.3 mm), 此时压缩力保持在一定范围内波动, 位移迅速增加. 当位移到达完全压实点后, 由于试件被完全破坏, 压缩力在短时间内迅速增大.

青菜头缩短茎压缩试验中的表现与金属材料压缩试验表现不同, 说明了青菜头缩短茎这一材料具有一定的特殊性.

1.2.2 径向及轴向压缩试验力学参数统计分析

通过青菜头缩短茎的压缩试验, 可以得到在缩短茎切割部位轴向、径向方向的一系列力学参数, 如抗压强度、屈服强度、弹性模量等, 为切割青菜头的数值模拟分析提供支撑数据. 作者对青菜头缩短茎切割部位轴向、径向各做 10 组试验, 得到了两个方向上的抗压强度、屈服强度、弹性模量, 如表 1 所示.

表 1 压缩力学参数

径向压缩力学参数				轴向压缩力学参数			
试验序号	抗压强度/	屈服强度/	弹性模量/	试验序号	抗压强度/	屈服强度/	弹性模量/
	MPa	MPa	MPa		MPa	MPa	MPa
1	2.31	0.52	5.43	1	1.44	0.35	3.18
2	1.75	0.44	5.45	2	1.85	0.48	8.95
3	1.76	0.44	5.89	3	2.34	0.57	3.98
4	1.99	0.50	5.56	4	2.01	0.49	4.73
5	1.81	0.46	4.73	5	1.09	0.27	4.46
6	1.79	0.44	3.87	6	1.68	0.42	4.02
7	1.71	0.43	4.25	7	1.30	0.33	3.62
8	1.97	0.48	4.99	8	1.49	0.36	4.19
9	2.17	0.55	4.46	9	1.89	0.43	4.52
10	2.23	0.55	4.44	10	1.41	0.39	4.76

弹性模量是材料重要的力学性能参数. 在压缩试验力一位移曲线中, 可以根据公式

$$E = F / A l \tag{1}$$

求解材料的弹性模量, 其中 E 为材料弹性模量, F 为试件受到的压力, A 为试件的截面积, l 为试件被压缩长度, 万能试验机根据以上 3 个参数, 自动输出材料的弹性模量.

分析可得(表 2), 径向抗压强度最大值为 2.31 MPa, 最小值为 1.71 MPa, 平均值为 1.95 MPa, 标准差为 0.22, 变异系数为 11%. 径向弹性模量最大值为 5.89 MPa, 最小值为 3.87 MPa, 平均值为 4.91 MPa, 标准差为 0.66, 变异系数为 13%.

轴向抗压强度最大值为 2.34 MPa, 最小值为 1.09 MPa, 平均值为 1.65 MPa, 标准差为 0.38, 变异系数为 23%, 轴向弹性模量最大值为 8.95 MPa, 最小值为 3.18 MPa, 标准差为 1.59, 变异系数为 34%.

对比轴向、径向得到的力学参数可知, 轴向与径向通过压缩试验得到的弹性模量有差异, 这是由于青菜头缩短茎自身的材料结构特点决定的. 观察发现青菜头缩短茎外圈存在纤维, 纤维本身的数量、强度以及连接形式等要素决定了青菜头缩短茎轴向、径向方向的力学性质差异.

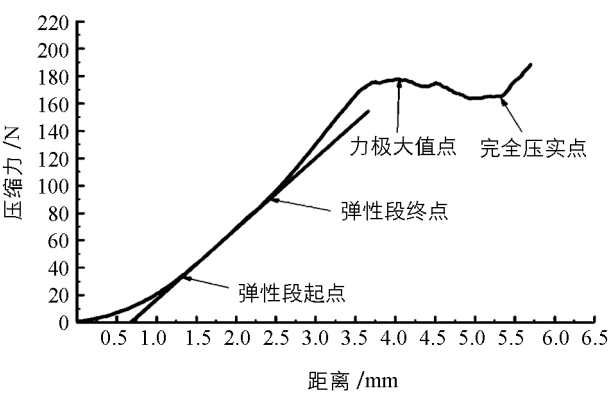


图 4 压缩试验曲线

表 2 压缩试验数据分析结果

特性参数	径向抗压强度 /	径向屈服强度 /	径向弹性模量 /	轴向抗压强度 /	轴向屈服强度 /	轴向弹性模量 /
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
最大值	2.31	0.55	5.89	2.34	0.57	8.95
最小值	1.71	0.43	3.87	1.09	0.27	3.18
平均值	1.95	0.48	4.91	1.65	0.41	4.64
方差	0.21	0.04	0.63	0.36	0.08	1.15
标准差	0.22	0.05	0.66	0.38	0.09	1.59
变异系数	0.11	0.10	0.13	0.23	0.22	0.34

2 基于高速摄像的摩擦系数测定

2.1 静摩擦系数测定试验

本文采用斜面法测定青菜头缩短茎相对 65 Mn 弹簧钢的静摩擦系数^[17]。由图 5 所示,当 θ 由 0 缓慢增加到一定值时,试件在斜面上开始匀速滑动,此时的试件受力如公式(2)所示,合外力为 0,化简得到静摩擦系数 μ_s 关于倾角 θ 的表达式,即倾角的正切值,由公式(3)所示。

$$mg \sin \theta - \mu_s mg \cos \theta = 0 \tag{2}$$

$$\mu_s = \tan \theta \tag{3}$$

根据斜面法测定静摩擦系数的原理,作者设计了一个摩擦系数测定斜面板,如图 6 所示。它主要由合页、限位螺钉、标尺、PP 塑料板、丝杆、加厚螺母组成。试验时,如图 7 所示,将 65 Mn 弹簧钢板固定在斜面 PP 塑料板上,青菜头缩短茎放在钢板上,通过旋转丝杆让斜面慢慢抬高,直至试件发生滑动时,使用手机自带角度测量软件,测量斜面倾角 θ 值即可。

本文测定了“涪杂 2 号”青菜头缩短茎对于 65 Mn 弹簧钢的静摩擦系数,共准备了 5 个生长情况相同的缩短茎试件,为了减小随机误差,每个试件测试 3 次,然后求其平均值,静摩擦系数测量平均值为 0.58。

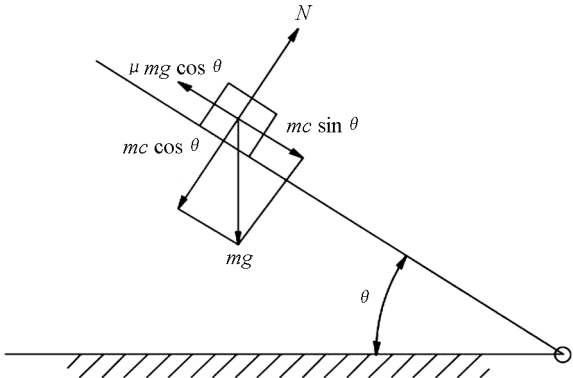


图 5 斜面法示意图

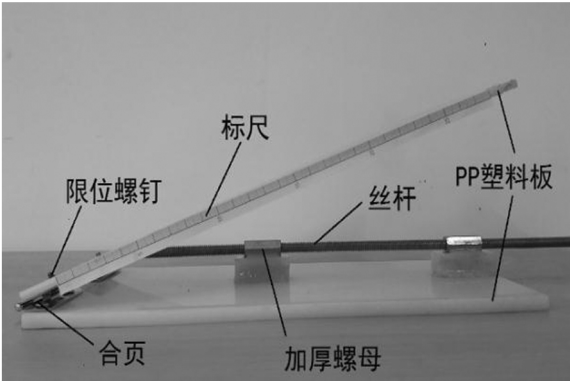


图 6 摩擦系数测定斜面板示意图

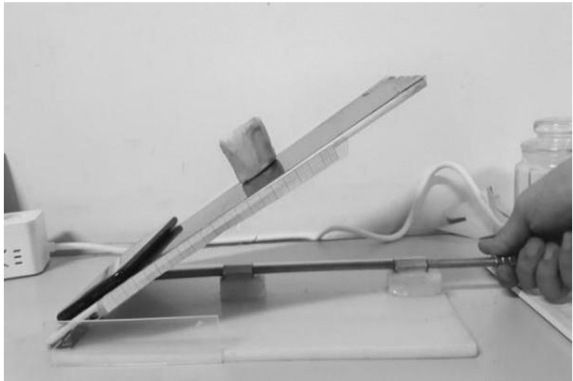


图 7 测定静摩擦系数工作图

2.2 动摩擦系数测定试验

2.2.1 材料与方法

本文中动摩擦系数测试平台分为两部分(图 8),一部分为摩擦系数测定斜面板,另一部分为高速摄像分析系统,摩擦系数测定斜面板已在前文中详细介绍。

由图 8 所示,高速摄像分析系统硬件由高速摄像机、LED 补光灯、移动工作站构成,软件由高速摄像

机控制软件界面 (phantom camera control, 简称 PCC) 构成, 该软件具有设置拍摄分辨率、拍摄速率、触发位置等参数的功能, 同时也能对拍摄图像处理 and 存储。作者将使用该软件拍摄试件在摩擦系数测定斜面上滑动的过程, 分析计算试件在 65 Mn 弹簧钢板上的动摩擦系数。

2.2.2 试验原理

动摩擦系数测定采用与静摩擦系数测定方法相同的斜面法, 通过高速摄像计算出试件在摩擦系数测定斜面上滑动的距离和时间, 进而计算出试件滑动的加速度, 根据斜面上试件受力平衡方程可计算出试件在 65 Mn 弹簧钢板上的动摩擦系数, 具体原理如下:

如图 9 所示, 在高速摄像机控制软件界面设定拍摄频率为每秒 1 000 张图片, 故每一帧画面试件滑动时间为 1 ms, 通过计算出起始位置与终止位置之间帧数差值, 可以得到试件滑动的时间, 同时通过坐标纸读出试件滑动的距离。由公式(4)及公式(5)可以计算出试件在斜面上的加速度。

$$S = \frac{1}{2}at^2 \tag{4}$$

$$a = \frac{2S}{t^2} \tag{5}$$

S 为试件滑动的距离, 单位 m; t 为试件滑动的时间, 单位 s; a 为试件在斜面上的加速度, 单位 m/s^2 。

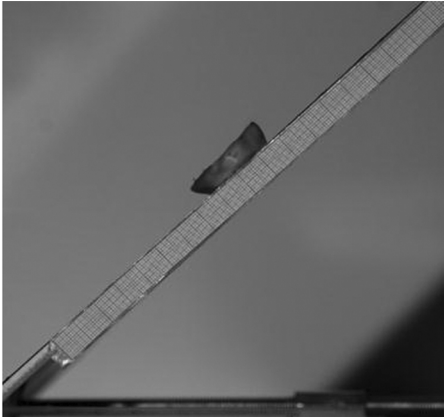
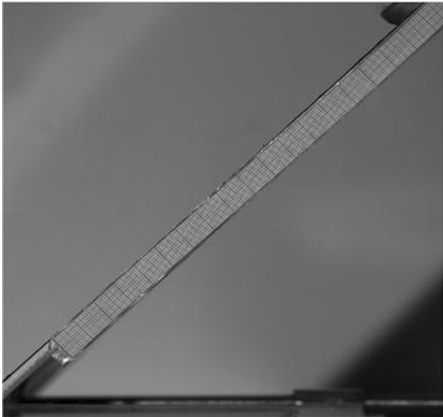


图 9 高速摄像工作图

通过对斜面滑动的试件进行受力分析得到方程(6), 化简得到关于试件加速度、摩擦系数测定斜面仪倾角的动摩擦系数公式(7), 将相关参数代入后可得试件在 65 Mn 弹簧钢板上的动摩擦系数 μ_k 。

$$mg \sin\theta - \mu_k mg \cos\theta = ma \tag{6}$$

$$\mu_k = \tan\theta - \frac{a}{g \cos\theta} \tag{7}$$

公式中 m 为试件质量, 单位 g; θ 为摩擦系数测定斜面仪倾角; μ_k 为试件动摩擦系数; g 为重力加速度, 单位 m/s^2 。

2.2.3 结果与分析

由静摩擦系数的测定可知, 试件在斜面上滑动的临界角度大约为 30° , 故将制作好的试件放在摩擦系数测定仪斜面, 以 40° 、 45° 、 50° 倾角测定其动摩擦系数, 本次试验共测定 5 个试件。



1. 移动工作站; 2. 摩擦系数测定斜面仪;
3. LED 补光灯; 4. 高速摄像机。

图 8 动摩擦系数测试平台

表 3 动摩擦系数测定

角度(θ)/ °	试验 序号	$\tan\theta$	开始 帧数	截止 帧数	帧数	时间/ s	停止 位置/m	开始 位置/m	行程/ m	$a /$ ($9.8 * \cos\theta$)	动摩擦 系数 μ_k
40	1	0.84	1 196	1 152	44	0.04	0.150	0.153	0.003 0	0.41	0.426 3
	2	0.84	1 368	1 326	42	0.04	0.150	0.153	0.002 5	0.38	0.461 5
	3	0.84	1 129	1 059	70	0.07	0.165	0.172	0.006 5	0.35	0.485 7
	4	0.84	1 243	1 196	47	0.05	0.152	0.155	0.003 0	0.36	0.477 3
	5	0.84	1 187	1 136	51	0.05	0.158	0.162	0.004 0	0.41	0.429 4
45	1	1.00	1 486	1 442	44	0.04	0.168	0.172	0.003 5	0.52	0.478 2
	2	1.00	1 290	1 220	70	0.07	0.160	0.169	0.009 0	0.53	0.469 9
	3	1.00	1 034	996	38	0.04	0.167	0.170	0.002 5	0.50	0.500 3
	4	1.00	1 373	1 321	52	0.05	0.166	0.171	0.005 0	0.53	0.466 3
	5	1.00	1 099	1 030	69	0.07	0.140	0.149	0.009 0	0.55	0.454 4
50	1	1.19	1 280	1 228	52	0.05	0.150	0.156	0.006 0	0.70	0.487 3
	2	1.19	1 442	1 410	32	0.03	0.151	0.153	0.002 2	0.68	0.509 6
	3	1.19	1 265	1 200	65	0.07	0.145	0.155	0.010 0	0.75	0.440 3
	4	1.19	1 253	1 210	43	0.04	0.160	0.164	0.004 0	0.69	0.504 9
	5	1.19	1 554	1 504	50	0.05	0.165	0.171	0.006 0	0.76	0.429 8

为了避免 65 Mn 弹簧钢板表面污渍对测试结果的影响, 试验时应将试件放在相对光泽、干净的位置, 对于试件滑动影像后处理阶段, 尽量选择短行程来分析计算, 避免钢板表面粗糙度不同对试验结果造成影响。

将表 3 中相关参数代入公式(7)中, 计算出青菜头缩短茎在 65 Mn 弹簧钢板上的动摩擦系数。

自制试验平台测定的动摩擦系数最大值为 0.509 6, 最小值为 0.426 3, 平均值为 0.468 1, 标准差为 0.027 7, 变异系数为 5.9%。试验结果看出, 动摩擦系数变异系数较低, 试验结果离散程度较低, 根据材料摩擦性质可知, 材料的动摩擦系数与材料质量、接触面积、斜面角度等因素无关, 验证了基于高速摄像测定青菜头动摩擦系数方法的可行性。

3 结 论

选取重庆地区青菜头主要种植品种“涪杂 2 号”为研究对象, 通过试验测定青菜头缩短茎的抗压强度、弹性模量、动摩擦系数、静摩擦系数等基础物理力学参数, 为青菜头收获机械仿真优化提供数据支撑, 为青菜头收获和加工机器系统的研发提供基础理论依据。

1) 青菜头缩短茎径向抗压强度在 2.31~1.71 MPa 范围内, 径向弹性模量在 5.89~3.87 MPa 范围内; 轴向抗压强度在 2.34~1.09 MPa 范围内, 轴向弹性模量在 8.95~3.18 MPa 范围内。

2) 基于斜面法采用高速摄像测定青菜头缩短茎对于 65 Mn 钢的动摩擦系数平均值为 0.468 1, 同时测定其静摩擦系数平均值为 0.577 4。

参考文献:

[1] 王文明. 榨菜套种模式 [J]. 吉林蔬菜, 2018(4): 15—16.
[2] 马子文. 余姚榨菜出口的现状和对策研究 [J]. 商场现代化, 2013(22): 64—65.
[3] 龚境一, 叶 进, 杨 仕, 等. 榨菜收获机的设计研究 [J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 120—124.
[4] 吴渭尧. 一种榨菜收割机: 中国, 201410218522. 9[P]. 2014—05—22.
[5] 吴渭尧. 榨菜收割机: 中国, 201310720088. X[P]. 2013—12—23.

[6] 吴渭尧. 一种榨菜收割及清理收集装置: 中国, 201320856687. X[P]. 2013—12—23.

[7] 王留步, 叶 进, 杨 仕, 等. 榨菜收获机拔取输送机构的设计与试验 [J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 138—141+246.

[8] 薛元鹏, 陈俊杰, 叶 进, 等. 青菜头物理力学特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 147—152.

[9] 吴良军, 杨 洲, 洪添胜, 等 荔枝树枝力学特性的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 68—73.

[10] 姚 珺. 芒草茎秆切割性能试验研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 木材顺纹抗压强度试验方法: GB/T1935-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 木材横纹抗压试验方法: GB/T 1939-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[13] 闫以勋, 赵淑红, 杨悦乾, 等. 成熟期大豆茎秆力学特性研究 [J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(5): 46—49.

[14] 李艳聪, 宋 欣, 杨 磊. 苹果树枝力学特性试验研究 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 720—725, 745.

[15] 孙占峰, 蒋恩臣. 稻草秸秆力学特性研究 [J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 660—664.

[16] 渡边治人. 木材应用基础 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.

[17] 余友泰, 蒋建鹏. 土壤、作物种实和各种脱出物对钢板、铸铁、和木板等的摩擦系数的测定 [J]. 东北农业大学学报, 1957(1): 1—11.

A Study of the Physical and Mechanical Properties of the Shortened Stem of Tumorous Stem Mustard

HAO Lin-jie¹, YE Jin¹, YUE Gao-feng²,
GONG Jing-yi¹, LI Ming-sheng¹, ZENG Bai-gong¹

1. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Identification Station of Agricultural Machinery, Yongchuan Chongqing 402160, China

Abstract: In order to provide a theoretical support to the research and development of harvesting and processing machine systems for tumorous stem mustard, an experiment was made with the tumorous stem mustard cv. “Fuza 2” as the research object. With the model of WDW3100 universal testing machine (computer controlled), the main mechanical properties of its shortened stem, such as the radial and axial compression strength, yield strength and elastic modulus, were tested. Based on the inclined plane method, high-speed photography was used to determine the dynamic friction coefficient and static friction coefficient of the shortened stem.

Key words: tumorous stem mustard; shortened stem; physical and mechanical properties; compression test; friction factor test

责任编辑 汤振金