

莲藕力学特性的试验研究

肖科星 夏俊芳 陈子林 劳山峰 祝英豪 周 华 鲁梦琴

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 以藕身含水率82.78%~86.69%的“鄂莲5号”为研究对象,采用TMS-Pro质构仪和RGM-3005微机控制全数字化电子式万能材料试验机对其藕身果肉部分、藕段截面及单节藕段进行压缩试验,对藕节进行弯曲和拉伸试验。结果表明:藕身果肉部分的抗压强度为0.908~1.750 MPa,弹性模量为0.451~2.529 MPa,同一藕段藕身果肉靠近表层部分相同方向的抗压强度和弹性模量均大于心部,同一藕段藕身果肉的轴向弹性模量大于径向,藕身果肉部分存在各向异性特性;藕节平均抗弯强度从藕节I至藕节III分别为1.337、1.227、1.153 MPa;藕节平均拉伸强度从藕节I至藕节III分别为0.546、0.560、0.551 MPa,藕节抗弯强度和拉伸强度均与直径正相关。

关键词 莲藕; 压缩特性; 弹性模量; 弯曲强度; 拉伸强度; 生物力学

中图分类号 S 645.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)05-0125-06

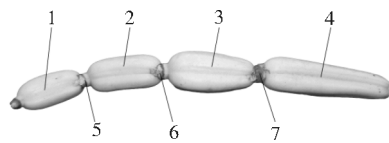
莲藕作为一种水生蔬菜,具有较高的食用和药用价值,莲藕种植面积大,仅湖北地区就有6.31万 hm^2 以上^[1]。然而莲藕采挖难度大,采挖方式主要有机械式和水力式,其中机械式主要使用铁锹采挖;水力式是指利用高压水冲击泥土,当莲藕上方和周围泥土被冲碎甚至变为泥浆不再对莲藕有粘结作用的时候,由于莲藕本身密度比水的密度小,会自动漂浮起来,如此视为采收成功。采挖过程中,由于水流压力过大以及机械作用等原因,均可能使莲藕破损及藕节断裂,影响莲藕品质和价格。农产品力学特性直接影响农产品的采摘、储运、加工,部分农产品力学特性已有相关报道^[2-8]。国内学者从不同角度对莲藕的力学特性进行研究,如郭洋民等^[9]用不同的压缩速率对其表面进行压缩实验,得到压缩速率对莲藕屈服极限和破裂极限的影响。毕伟等^[10]对藕身的抗压、抗弯、剪切强度及藕片的抗压强度进行了测试,为莲藕切片设计提供理论依据。袁巧霞等^[11]探究了莲藕成熟度、切割速率、刀片刃角对切割阻力的影响。目前,对莲藕压缩特性没有进行系统性的研究,对莲藕果肉及藕节拉伸特性研究较少。研究莲藕抗压及抗弯等力学特性可为优化莲藕采挖装备参数,降低采挖中莲藕受损程度提供重要指导。本研究分别对莲藕藕身切块、切段及整藕进行压缩

试验,得出藕身压缩特性,对藕节进行弯曲试验和拉伸试验,得出藕节抗弯特性和抗拉特性,旨在为莲藕力学结构仿真建模及挖藕装备关键部件设计及参数选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和设备

1)材料。试验莲藕品种为“鄂莲5号”,于2015年10月下旬在武汉市江夏区某藕塘选取,藕样选取时要求每支长度粗细相差不大,且壮实、无破损,试验前将整藕洗净、去除根须。取得的典型莲藕试样结构及各部位名称定义如图1所示,单节藕身外观及剖面如图2所示,莲藕藕身平均尺寸及含水率如表1所示。



1~4:第1~4节藕身 The 1-4 section of lotus rhizome; 5~7:藕节I~III Joints of lotus root I-III.

图1 鄂莲5号典型莲藕结构及各部位名称

Fig.1 Structure and name of each site of typical lotus, Elian No.5

收稿日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275196)

肖科星,硕士研究生,研究方向:现代农业装备设计与测控. E-mail: 1002325185@qq.com

通信作者: 夏俊芳,博士,教授,研究方向:现代农业装备设计. E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

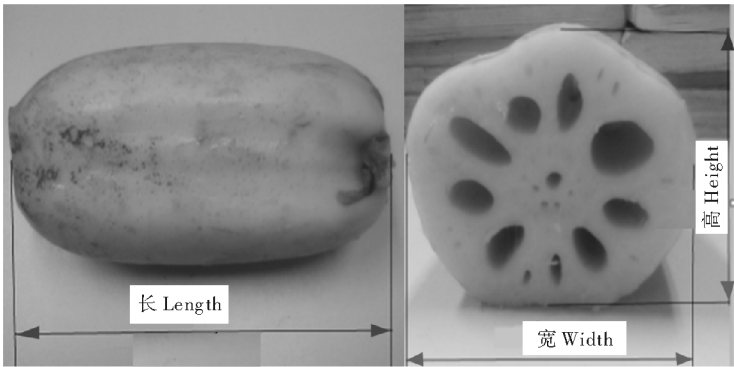


图 2 鄂莲 5 号单节藕身外观及剖面

Fig.2 Appearance and profile of single-level lotus rhizome, Elian No.5

表 1 藕身平均尺寸及含水率

Table 1 Average size and moisture content of lotus rhizome

藕身位置 Position of lotus rhizome	长/mm Length	宽/mm Width	高/mm Height	平均含水率/% Average moisture
第 1 节 Section one	123.47	73.44	63.61	86.69
第 2 节 Section two	156.17	83.37	71.80	84.88
第 3 节 Section three	172.82	92.60	75.20	83.23
第 4 节 Section four	215.61	79.92	68.38	82.78

2) 主要设备。TMS-Pro 质构仪, 量程 0~1 000 N, 美国 FTC 公司; RGM-3005 微机控制全数字化电子万能材料试验机, 量程 0~10 000 N, 深圳市瑞格尔仪器有限公司; HN101-2A 数显电热鼓风干燥箱; 酷贝 I-2000 电子秤, 量程 0~500 g, 精度 0.01 g, 深圳市俊仁科技有限公司; 数显游标卡尺, 量程 0~150 mm, 精度 0.01 mm, 成都成量工具集团有限公司; 卷尺、菜刀以及自制拉伸夹具。

1.2 试验方法

1) 藕身果肉压缩试验。随机选取 10 支具有 4 节藕身的莲藕, 用刀在每节藕身如图 3 所示位置各取样 2 块, 分别命名为外部(不含表皮)试样和心部试样, 这样获得外部、心部试样各 80 个, 各试样均呈长方体状, 其长、宽、高分别为 6.14~14.15、5.18~11.06、5.95~11.30 mm。试验在质构仪上进行, 所用压头为直径 20 mm 的平顶圆柱压头, 加载速率为 10 mm/min^[12], 加载位移为 4 mm, 分别对底部和心部块状莲藕沿轴向和径向进行压缩。抗压强度按公式(1)计算:

$$\sigma_y = F_y / A \tag{1}$$

弹性模量按公式(2)计算:

$$E = \sigma / \varepsilon = (F / A) / (\Delta L / L) \tag{2}$$

式(1)和(2)中, E 为果肉弹性模量; F 为压力, N; ΔL 为压缩量, mm; $F / \Delta L$ 值是压缩曲线起始段直线的斜率。 L 为试样高度, mm; A 为试样与压头接触面积, mm²。

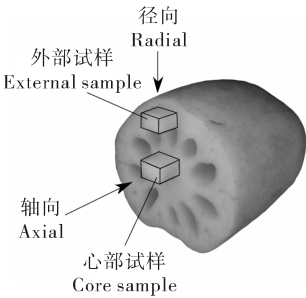


图 3 藕身果肉试样取样位置示意

Fig.3 Sampling positions hints of lotus rhizome pulp

2) 藕段压缩试验。随机选取 5 支具有 4 节藕身的莲藕, 在每节藕身上选取横截面积变化不大的部分用刀切成轴向长度为 50 mm 圆柱状藕段, 获得 20 个试样。试验在万能材料试验机上进行, 用直径 100 mm 的平顶圆柱压头, 以 10 mm/min 的加载速度沿试样轴向压缩, 加载至力与位移的曲线出现突降时试验停止。抗压强度按公式(1)计算。由于藕身截面不规则, 因此按如下方法计算试样横截面积 A : 首先在红色 A4 纸上打印边长为 150 mm 的方框, 将纸平铺在桌上, 把藕段竖直放在方框内, 沿与纸面垂直方向拍照, 随后利用图像处理软件计算出莲藕横截面积。

3) 藕身压溃试验。随机选取不同莲藕上的第 1 节藕身, 削去尖端和藕节, 使其两端截面相互平行, 将尺寸和质量接近的 3 节藕身作为 1 组, 共取 9 组试样。试验在万能材料试验机上进行, 所用压头为

直径 100 mm 的平顶圆柱压头,加载速度为 10 mm/min,分别沿长度、宽度、高度方向压缩,直至藕身开裂,试验停止。

4)藕节弯曲试验。随机选取 20 支具有 4 节藕身的莲藕,其中 10 支均沿藕节Ⅱ的横截面断开,获得含藕节Ⅰ和藕节Ⅲ的试样各 10 个,另外 10 支均沿藕节Ⅰ和藕节Ⅲ的横截面断开,获得含藕节Ⅱ的试样 10 个。试验在万能材料试验机上进行,试验时将藕节看作是横截面为圆形的棒材,利用三点弯曲原理,跨距设置为 165 mm 进行弯曲试验^[13]。为了防止藕身因挤压而破坏,藕身部分垫有橡皮垫,并根据藕身直径调整两侧藕身支撑高度以保证藕节轴向水平。所用压头宽 50 mm、厚 10 mm,加载速度为 10 mm/min,试验如图 4 所示,弯曲强度按公式(3)计算^[14]:

$$\sigma_w = 8F_{\max}L/(\pi D^3) \tag{3}$$

抗弯弹性模量按公式(4)计算^[15]:

$$E = F_{\max}L^3/(48Ih) \tag{4}$$

式(3)和(4)中, F_{\max} 为最大载荷,N; L 为跨距,mm; D 为直径,mm; h 为藕节中部挠度,mm; I 为圆形截面惯性矩,mm⁴,按公式(5)计算:

$$I = \pi D^4/64 \tag{5}$$



1.压头 Indenter; 2.莲藕 Lotus root; 3.藕节 Joints of lotus root; 4.支座 Adminiculum.

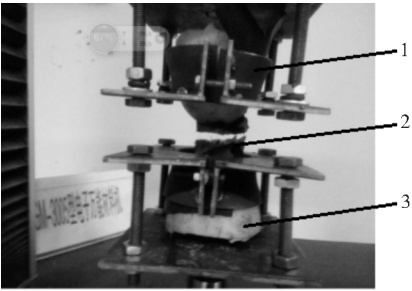
图 4 藕节弯曲试验

Fig.4 Bending test of joints of lotus root

5)藕节拉伸试验。随机选取 10 支具有 4 节藕身的莲藕,以藕节为中心,两侧各保留 100 mm 长藕身,获得含藕节Ⅰ、藕节Ⅱ、藕节Ⅲ的试样各 10 个。在万能材料试验机上进行试验,试验加载速率 10 mm/min,使用自制拉伸夹具,为防止藕身被夹具磨破,用橡皮垫将莲藕与夹具隔开(图 5),抗拉强度按公式(6)计算:

$$\sigma_1 = F_1/A \tag{6}$$

式中, F_1 为拉断力,N; A 为截面积,mm²。



1.夹具 Fixture; 2.藕节 Joints of lotus root; 3.藕身 Lotus rhizome.

图 5 藕节拉伸试验

Fig.5 Stretching test of joints of lotus root

2 结果与分析

2.1 藕身果肉压缩特性

藕身果肉抗压强度和弹性模量测量结果如表 2 所示,结果显示同一藕段藕身外侧果肉试样的抗压强度和弹性模量均比心部试样的大,且轴向弹性模量比径向的大,表明藕身果肉部分存在各向异性特性。结果还显示外侧轴向抗压强度与径向的差别不大,心部试样轴向抗压强度比径向的大,造成这种现象的原因可能是莲藕生长在淤泥中,靠近表皮材料较紧实,含纤维量较多。压缩试验中,随着压缩位移的增大,果肉不断被压出水分,当达到某个值时,果肉沿立方体斜截面破裂,符合脆性材料压缩破坏断面的特点,因此,可以推断鄂莲 5 号藕身为脆性材料。

2.2 藕段轴向受压与藕块轴向受压对比分析

结果显示,藕段压缩力与试样面积呈正相关,藕身轴向抗压强度平均值为 0.681 MPa,标准差为 0.098 MPa。同为平板压缩,外侧和心部藕块的轴向平均抗压强度分别为 1.400、1.293 MPa,比藕身轴向抗压强度显著增大,可见莲藕多孔结构对其轴向抗压特性具有显著性影响。

2.3 藕身压溃受力分析

分别从藕身长度、宽度、高度方向进行压溃试验(图 6),结果表明,随着加载位移的增大,压力刚开始呈线性增加,随着莲藕变形的增大,曲线斜率增大,当力达到某一点时突然下降,之后继续出现增大、突降的曲线波动直至莲藕裂开。

表 2 藕身果肉压缩试验结果

Table 2 Compression test result of lotus rhizome flesh

指标 Index		抗压强度/N Compressive strength		弹性模量/MPa Elastic modulus	
		平均值 Average	标准差 Deviation	平均值 Average	标准差 Deviation
外侧 Edge	轴向 Axial	1.400	0.157	1.339	0.524
	径向 Radial	1.418	0.188	1.104	0.397
心部 Core	轴向 Axial	1.293	0.144	1.109	0.447
	径向 Radial	1.169	0.127	1.040	0.329

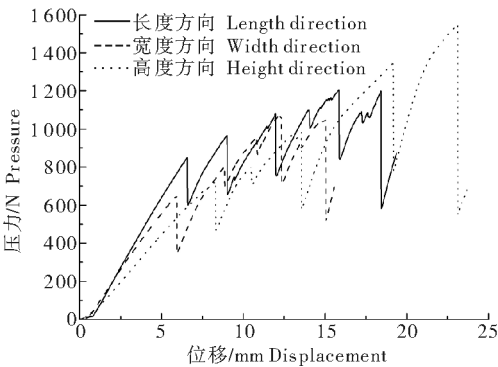


图 6 典型藕身受压载荷的力-位移曲线
Fig.6 Force-deformation curves of lotus rhizome's compression

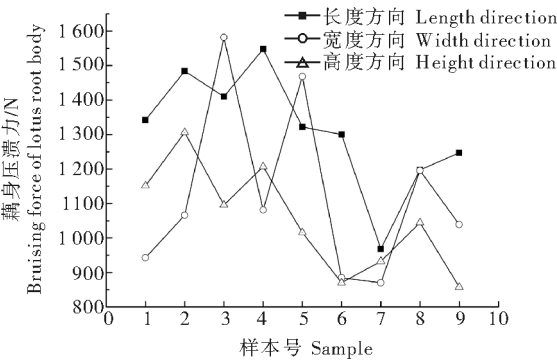
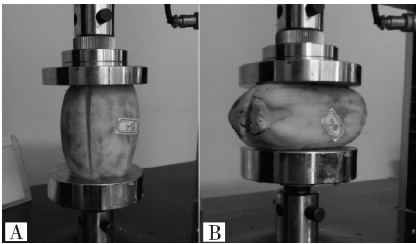


图 7 不同方向压溃力
Fig.7 Bruising force of different direction

各方向压溃力结果如图 7 所示。由图 7 可知,在开始压缩至藕身裂开的过程中,沿藕身长度、宽度、高度均出现一个最大压缩力,但沿长度方向最大。由于莲藕内部孔隙及纤维主要沿藕身长度(轴向)延伸,因此,沿此方向莲藕承压能力最强。但试验中也发现部分样本宽度方向压溃力比长度方向压溃力大,其原因可能在于藕身生长过程中成熟度不一致、内部多孔结构及孔的分布不一致,藕孔形状易产生应力集中等原因造成。藕身压溃后,裂纹均沿藕节长度(轴向)方向延伸(如图 8 所示),表明莲藕主要沿内部孔隙延伸方向开裂。



A:轴向加载 Axial loading; B:径向加载 Radial loading.
图 8 不同加载方向的裂纹形式

Fig.8 Crack with different compression directions

2.4 藕节弯曲特性

藕节最大弯曲力与藕节直径关系如图 9 所示。从藕节 I 至藕节 III,藕节直径的平均值分别为 32.99、37.09、42.38 mm,平均抗弯强度分别为 1.337、1.227、1.153 MPa,平均弹性模量分别为 15.364、15.766、15.738 MPa,从藕节 I 至藕节 III,直径由小到大,抗弯强度由大到小,弹性模量相近。

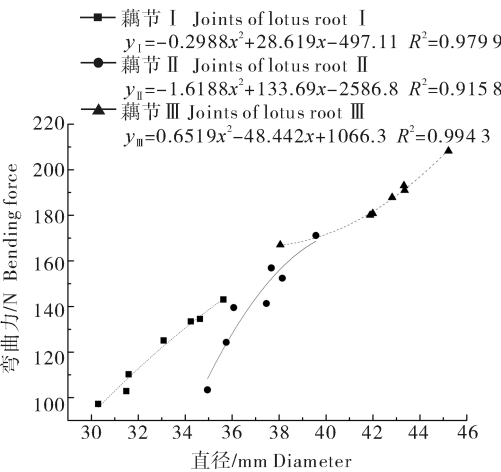


图 9 藕节弯曲力与直径的关系
Fig.9 Relationship between bending force and diameter of joints of lotus root

根据所测藕节 I、藕节 II、藕节 III 弯曲力与直径关系进行二次回归拟合^[15],得到如下拟合方程:

$y_{\text{I}}=-0.2988x^2+28.619x-497.11$; $y_{\text{II}}=-1.6188x^2+133.69x-2586.8$; $y_{\text{III}}=-0.6535x^2-48.648x+1071.9$ 。式中, y 为藕节弯曲试验藕节断裂时的最大弯曲力, N; x 为藕节的直径, mm; 方程的相关系数(R^2)分别为 0.979 9、0.915 8、0.994 3。回归结果显示, 藕节弯曲力与其直径呈二次正相关, 但不同部位的藕节弯曲力与直径函数关系式不同, 这是因为不同部位的藕节直径、成熟度、含水率均有所不同, 因此, 藕节弯曲力不仅与藕节的直径有关, 还与藕节的位置有关。

2.5 藕节拉伸特性

对藕节最大拉力与直径关系进行二次回归拟合, 结果如图 10 所示, 并可建立回归方程: $y=-1.8055x^2+157.2x-2725.1$, 其相关系数 $R^2=0.509 5$ 。回归结果显示, 藕节最大拉力与直径呈二次正相关关系, 且随着直径增大, 抗拉力增加。藕节

平均直径、平均拉断力和平均抗拉强度结果如表 3 所示, 表明藕节直径、部位与抗拉强度关联不显著。

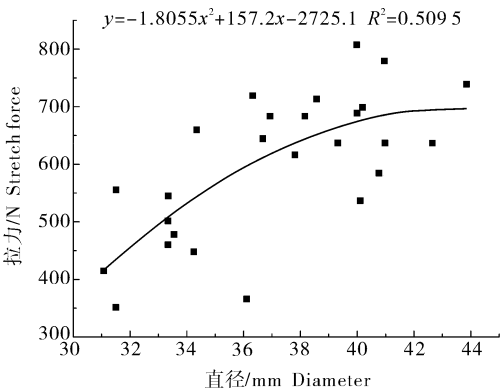


图 10 拉力与藕节直径关系曲线
Fig.10 Relationship between stretch force and diameter of joints of lotus root

表 3 藕节拉伸试验结果
Table 3 Stretch test result of joints of lotus roots

藕身位置 Position of lotus rhizome	平均直径/mm Average diameter	平均拉断力/N Average tension	平均抗拉强度/MPa Average tensile strength
第 1 节 Section one	33.21	470.656	0.546
第 2 节 Section two	38.30	636.252	0.560
第 3 节 Section three	40.13	690.050	0.551

3 讨 论

同一藕段藕身外侧果肉试样的抗压强度和弹性模量均比心部试样的大, 且轴向弹性模量比径向的大, 表明莲藕藕身具有各向异性的特点。藕段的轴向抗压强度比藕块轴向抗压强度小, 是受到莲藕的多孔结构影响的缘故。整藕沿轴向压溃所需压缩力高于径向, 因此, 对于藕身而言, 沿径向易于被损伤。压力与压缩位移关系曲线不断波动, 其原因在于: 起始加载时, 莲藕表面具有一定的抗压强度, 可以承受外部作用力; 但随外部作用力的增加, 莲藕压缩量增大, 莲藕表面遭到破坏, 随着压缩量的继续增大, 莲藕内部结构遭到破坏, 而由于莲藕是多孔的结构, 压缩力才会出现连续增大突降的波动现象, 直至莲藕裂开。藕节 I、藕节 II、藕节 III 平均抗弯强度分别为 1.337、1.227、1.153 MPa, 平均弹性模量分别为 15.364、15.766、15.738 MPa。对于各个位置的藕节而言, 弯曲力均随着直径的增大而增大, 而对于不同位置的藕节, 弯曲力有所不同, 因此, 说明藕节弯曲力不仅与藕节的直径有关, 还与藕节的位置有关。

拉伸试验结果表明: 藕节 I、藕节 II、藕节 III 拉伸力与直径呈二次函数关系, 直径越大, 拉伸力越大, 但藕节直径、部位与抗拉强度关联不显著, 回归系数仅为 0.509 5, 究其原因可能有三点: 一是莲藕藕身形状不规则, 夹具夹好后, 不同样本对应上下两端夹具的距离有一定的差别; 二是拉伸过程中, 虽然夹具内部垫了橡皮垫, 但是拉断藕节所需拉力比较大, 可能超出了藕身的抗压力, 因此, 在拉伸过程中夹具会出现一定程度的滑移现象, 试验过程中, 将滑移出现不明显的数据作为有效数据; 三是藕节断裂处不仅存在于藕节的中间部位, 也存在于靠近藕节与藕身的交界处, 断裂部位不同可能对拉断力有一定的影响。所设计的拉伸夹具可以有效地实现莲藕的夹持, 但仍需根据莲藕的结构及力学特性作进一步改进。

参 考 文 献

[1] 熊桂云, 童军, 刘冬碧, 等. 湖北省莲藕生产与施肥现状调查[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3934-3939.

[2] 陈燕,蔡伟亮,邹湘军,等.荔枝鲜果挤压力学特性[J].农业工程学报,2011,27(8):360-364.

[3] 卿艳梅,曹玉华,李长友,等.龙眼鲜果剥壳力学特性[J].农业工程学报,2010,26(5):122-126.

[4] 付威,何荣,坎杂,等.红枣力学特性的试验研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2013,31(4):518-522.

[5] 王荣,焦群英,魏德强,等.葡萄的力学特性及有限元模拟[J].农业工程学报,2005,21(2):7-10.

[6] 王荣,焦群英,魏德强.葡萄与番茄宏观力学特性参数的确定[J].农业工程学报,2004,20(2):54-57.

[7] 李小昱,王为.苹果压缩特性的研究[J].西北农业大学学报,1998,26(2):107-110.

[8] 王芳,王春光,杨晓清.西瓜的力学特性及其有限元分析[J].农业工程学报,2008,24(11):118-122.

[9] 郭洋民,夏俊芳,肖科星,等.莲藕屈服强度和抗压强度的测定与分析[J].华中农业大学学报,2015,34(1):148-151.

[10] 毕伟.莲藕物料特性及切片技术研究[D].镇江:江苏大学,2006.

[11] 袁巧霞,胡凌.莲藕切割阻力影响因素试验分析[J].农业机械学报,2008,39(2):208-211.

[12] 吴德光,蒋小明.农产品压缩试验研究及其应用(Ⅰ):压缩试验方法[J].云南农业大学学报,1990,5(3):171-176.

[13] 郭洋民.水田莲藕采挖机设计与研究[D].武汉:华中农业大学,2015.

[14] 单辉组.材料力学(Ⅰ)[M].北京:高等教育出版社,2004:144-145,169.

[15] 周祖饬.农业物科学[M].北京:农业出版社,1990.

Biomechanics of lotus root

XIAO Kexing XIA Junfang CHEN Zilin LAO Shanfeng
ZHU Yinghao ZHOU Hua LU Mengqin

College of Engineering ,Huazhong Agricultural University ,Wuhan 430070,China

Abstract In order to reduce mechanical injury during harvesting the lotus roots,Elia No.5 with moisture content of lotus rhizome ranging from 82.78%-86.69% was used.Compression test for lotus rhizome pulp,segments and the whole lotus,bending and stretch test for joints of lotus roots was conducted with the TMS-protexture analyzer and the RGM-3005 accurate micro-controlled electronic universal testing machine.The results showed that the compressive strength of lotus rhizome pulp was 0.908-1.750 MPa.The elastic modulus was 0.451-2.529 MPa.The values of both compressive strength and elastic modulu of pulp closed to edge were bigger than that of core along the same direction.The value of elastic modulu along axial was bigger than that of radial in the same segments,indicating that lotus belongs to anisotropic materials.The average value of joints' bending strength from the first to the second was 1.337,1.227,and 1.153 MPa,respectively.The average value of joints' stretch strength from the first to the second was 0.546,0.560,and 0.551 MPa,respectively.There was a positive correlation between bending force and diameter,stretch force and diameter.It will provide theoretical basis for studying water erosion parameters of lotus root with digging machine.

Keywords lotus root; compression properties; elastic modulus; bending strength; stretch strength; biomechanics

(责任编辑:陆文昌)