

王洪昌, 夏经久, 董昭, 等. 茭白压缩力学特性试验研究[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 280-287.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.027

茭白压缩力学特性试验研究

王洪昌^{1,2}, 夏经久^{1,2}, 董昭¹, 刘李乐¹, 王涛³, 张国忠^{1,2}

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 浙江省金华市农业科学研究院, 金华 321051

摘要 针对茭白(*Zizania latifolia*)加工、收获等机械装备设计与仿真分析时缺乏理论依据的问题, 对茭白物料特性开展研究。利用质构仪对茭白进行静载压缩试验, 获得不同压缩方向、压缩速率下茭白刚度、破损强度和弹性模量, 利用扫描电子显微镜(SEM)获得茭白微结构, 分析不同压缩方向下茭白力学特性差异性的内在机制。结果显示: 茭白为各向异性材料, 茭白X、Y、Z轴方向上的平均刚度分别为37.88、36.66、50.82 N/mm; 平均破损强度分别为0.74、0.72、0.88 MPa; 平均弹性模量分别为1.73、1.61、2.33 MPa; 压缩方向对茭白刚度、弹性模量和破损强度的影响极显著($P < 0.001$), 在30~70 mm/min压缩速率范围内压缩速率对刚度、弹性模量和破损强度的影响不显著($P > 0.05$); 其X和Y轴方向的微结构特征相似且与Z轴方向差异较大, 沿X和Y轴方向分布有孔隙, 是导致这两个方向上压缩力学特性参数值偏小的原因。

关键词 茭白; 弹性模量; 破损强度; 压缩方向; 压缩速率

中图分类号 S225.92; S645.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0280-08

茭白(*Zizania latifolia*)又称菰首、茭笋, 为禾本科宿根性多年水生草本植物, 是继莲藕之后的第二大水生蔬菜^[1]。茭白主要栽种于我国长江中下游的浙江、江苏、安徽等地, 日本、越南和美国有少量种植。茭白色泽洁白, 肉质细腻脆嫩、营养丰富(含磷、铁、钙、维生素C、粗蛋白等)、味道鲜美, 同时具有止渴、开胃、除目黄、利大小便、预防高血压、动脉硬化和肠道疾病等功效, 在市场上深受消费者青睐, 具有良好的经济效益和社会效益^[2-3]。茭白以嫩茎为食用器官, 其采收和上市期在低海拔地区多集中在5至6月以及8至11月, 高山地区则主要集中在7至9月^[4]。茭白含水率高, 肉质脆嫩, 常温下不耐储存, 仅可保存2~3 d, 采收后易失水萎蔫, 出现茭壳变黄、肉质木纤维化、霉变、软化等问题, 从而失去商品性及食用价值, 为提高其附加值, 当前加工成鲜切产品的需求量旺盛^[5-7]。由于茭白脆嫩, 在机械化收获、包装、贮藏和加工等环节易受到外力作用而产生损伤, 从而影响茭白商品品质和贮藏时间, 因此, 研究茭白力学特性以减少机械化作业中的受力损伤十分必要。

为减少农产品的机械受力损伤, 国内外学者对

多种农产品的力学特性进行了研究。丁为民等^[8]测定了不同成熟度茭实的力学性能, 分析了茭实成熟度和施力方向对其力学性能的影响。彭飞等^[9]对大麦籽粒进行压缩试验, 基于三维扫描方法对其建模并进行仿真分析, 获得大麦籽粒的弹性模量和屈服强度。彭俊等^[10]对冬枣果实进行压缩试验和仿真, 分析了成熟度和压缩方向对冬枣弹性模量和接触应力的影响。马秋成等^[11-12]用压缩试验方法对莲力学参数进行了试验研究, 并用有限元法建立了莲的压缩力学模型, 分析了莲整体受压时的应力分布。目前国内外对茭白的研究主要集中在茭白的营养成分分析、保鲜技术等方面, 而对茭白力学特性鲜有研究。

本研究以茭白为研究对象, 利用质构仪对其不同压缩方向和压缩速率下的物料特性进行测试, 利用扫描电子显微镜(SEM)获得茭白内部微观结构特征, 以期阐明茭白不同条件下的压缩力学特性和影响机制, 为茭白收获、包装、贮藏、加工等机械装备的研究提供理论参考。

收稿日期: 2024-09-04

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201934)

王洪昌, E-mail: wanghc84@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用茭白为产自浙江台州的“浙茭6号”,选取其中无损伤、无病虫害且大小接近的样本进行试验,茭白实物如图1所示。由于试验持续时间较长,为避免样品因存放时间长以及呼吸作用发生变质、营养和水分流失等导致样品物料特性发生改变而影响试验结果,将茭白用保鲜袋密封并存放至冰箱4℃保鲜室。



图1 茭白

Fig.1 *Zizania latifolia*

1.2 试验方法

1) 含水率测定。茭白含水率测试仪器为浙江德赛仪器设备有限公司生产的SDH-1202型快速卤素水分测定仪,精度为0.002 g/0.01%^[13]。选取长势良好、无病虫害的茭白,垂直其轴向截取中部茎块,每个茎块样本质量约30 g,5个样本为1组进行含水率测定,快速卤素水分测定仪温度设定为103℃,当样品质量不再发生变化时认为干燥结束。此时仪器上显示的为所测样品的含水率。试验重复5次,取平均值。

2) 压缩力学特性测定。压缩试验中一般将试样制成标准压缩材料进行试验,为控制变量,将茭白样本制成边长为20 mm的立方体进行不同方向的压缩试验。所用试验仪器为美国Food Technology Corporation公司生产的TMS-PRO质构仪,最大负荷为1 000 N,检测精度为±1.5%,压缩速率为0.1~500 mm/min^[14-16]。

由茭白生长特点和外观特征可知茭白为圆锥形的宝塔形,整体细长,推测其力学特性可能存在差异,因此定义茭白结构三轴坐标系如图2所示,将茭白最长轴方向定义为Z轴方向;茭白横截面近似于椭圆形,可划分为长轴和短轴2个方向,将横截面长轴定义为X轴方向,横截面短轴定义为Y轴方向。

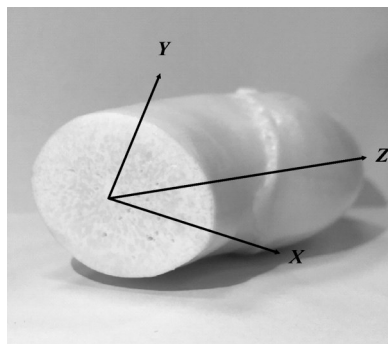
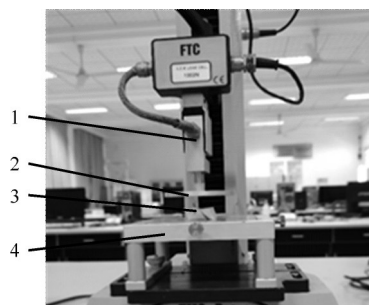


图2 茭白三轴坐标系

Fig.2 *Zizania latifolia* triaxial coordinate system

①不同压缩方向刚度、破损强度和弹性模量测定。根据文献[17-19]可知,农产品压缩试验压缩速率一般为10~75 mm/min。选用直径为60 mm的平板压头,60 mm/min的压缩速率进行,试验装置如图3所示。



1. 力和位移传感器 Force and displacement sensor; 2. 圆盘压头 Disc indenter; 3. 试验样本 Experimental sample; 4. 试验台 Test bench.

图3 压缩试验装置图

Fig.3 Compression test device diagram

随机选取长势良好、大小均一的茭白15株,按照X、Y、Z轴受压方向随机分为3组,并制成标准压缩试样。将试样放置在质构仪试验台上,设置位移触发起点的压缩力 $F=0.1$ N,在压缩过程中,当压缩力出现断崖式下降,试样受压破裂时,停止加载,记录最大加载力、最大加载力对应的位移和载荷深度曲线数据,每组试验重复5次,取平均值。

茭白的刚度可用载荷-深度曲线线性段的斜率表示;破损强度是指茭白在挤压破裂时达到最高屈服强度,即茭白在压缩试验中的抗挤压强度,利用公式(1)计算。

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

式(1)中: σ 为茭白破损强度,MPa; F_N 为最大压缩力,N; A 为压缩面积,mm²。

因极限压缩试验时,茭白极限载荷对应的位移

均大于6 mm,故弹性模量测定试验中加载位移设定为6 mm。随机选取长势良好、大小均一的茭白15株,按压缩方向随机分为3组,并制成标准压缩试样。将试样放置于质构仪试验台上,分别沿茭白三轴方向进行压缩,当加载位移达6 mm时,停止试验并记录此时的加载力,每组重复5次,计算出茭白各方向的弹性模量并取平均值。

茭白各方向的弹性模量 E 由公式(2)计算:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (2)$$

式(2)中: E 为茭白弹性模量,MPa; F 为加载力,N; L 为试样有效长度,mm; A 为试样有效截面积,mm²; ΔL 为变量,mm。

②不同压缩速率刚度、破损强度和弹性模量测定。茭白不同压缩速率下刚度和破损强度的测定试验条件与上述极限压缩试验条件一致,压缩方向选定为 X 轴方向,压缩速率为30、40、50、60、70 mm/min。随机选取长势良好、大小均一的茭白25个,随机分为5组,并制成标准压缩试样。将试样放置于质构仪试验台上,沿茭白 X 轴方向进行压缩,设置位移触发起点的压缩力 $F=0.1$ N,在压缩过程中,当压缩力出现断崖式下降,试样受压破裂时,停止加载,记录最大加载力和载荷深度曲线数据,每组试验重复5次,取平均值。利用载荷深度曲线线性段斜率可求得茭白刚度,利用公式(1)可求得茭白破损强度。

茭白不同压缩速率下弹性模量的测定试验条件与上述不同受压方向的弹性模量试验条件一致,加载位移设定为6 mm。随机选取长势良好、大小均一的茭白25个,按压缩速率随机分为5组,并制成标准压缩试样。将试样放置于质构仪试验台上,分别以不同速率沿茭白 X 轴方向进行压缩,当加载位移达到6 mm时,停止试验并记录此时的加载力,每组重复5次,计算出茭白各压缩速率下的弹性模量并求平均值。

3)微观结构观察。为了解茭白力学特性差异性的内在机制,利用扫描电子显微镜(SEM)对茭白内部微结构特征进行观察。试验所用仪器为日本NTC公司生产的JSM-6390LV型生物扫描电子显微镜,分辨率可达3.0 nm^[20]。进行SEM扫描前,将茭白制成长宽均为3 mm,厚度为0.5 mm的切片,将切片浸泡在固定液中,固定茭白的细胞结构,待细胞结构固定好后进行临界点干燥,将干燥好的试样放置在扫描平台上并做喷金处理,完成电镜扫描前的预处理工作。

2 结果与分析

2.1 含水率

选取5个样本采用干燥法进行含水率测试,测得茭白含水率平均值为93.16%,由测试结果可知茭白的含水率较高。

2.2 不同压缩方向极限载荷与位移

试验对茭白 X 、 Y 、 Z 轴3个不同方向分别进行极限载荷与其对应位移的测定,测定结果如表1所示。由表1可知,茭白的极限载荷与其受压方向有关, X 轴方向的极限载荷为283.2~301.8 N,位移为7.71~9.93 mm,平均极限载荷及位移分别为286.4 N、8.24 mm; Y 轴方向的极限载荷为278.5~304.8 N,位移为7.58~8.45 mm,平均极限载荷及位移分别为289.2 N、8.45 mm; Z 轴方向的极限载荷为340.3~370.6 N,位移为6.95~8.11 mm,平均极限载荷及位移分别为351.4 N、7.30 mm。

由试验结果可知,茭白 X 和 Y 轴方向的极限载荷接近,且明显小于 Z 轴方向,极限载荷受长轴和短轴尺寸的影响较小;茭白 X 和 Y 轴方向极限载荷对应的位移同样接近,且大于 Z 轴方向,表明茭白 Z 轴方向比 X 和 Y 轴2个方向有着更高的承载能力和强度上限。

表1 茭白三轴极限载荷与位移

Table 1 *Zizania latifolia* triaxial ultimate load and displacement

编号 Number	X轴方向 X-axis		Y轴方向 Y-axis		Z轴方向 Z-axis	
	极限载荷/N Ultimate load	位移/mm Displacement	极限载荷/N Ultimate load	位移/mm Displacement	极限载荷/N Ultimate load	位移/mm Displacement
1	286.7	9.93	280.8	7.58	345.3	7.06
2	260.7	7.93	278.5	8.45	359.5	6.95
3	301.8	7.79	304.8	8.45	340.3	7.11
4	299.6	7.86	288.9	8.72	370.6	8.11
5	283.2	7.71	292.9	9.05	341.2	7.27
平均值 Average	286.4	8.24	289.2	8.45	351.4	7.30

2.3 不同压缩方向刚度、破损强度和弹性模量

刚度为材料抵抗变形的能力,茭白 X、Y、Z 轴 3 个方向的刚度范围为 32.04~56.82 N/mm,平均值为 41.79 N/mm,X、Y、Z 轴方向平均刚度分别为 37.88、36.66、50.82 N/mm(表 2),即 Z 轴方向的平均刚度最大,X 轴和 Y 轴方向的平均刚度基本相等,刚度属于材料本身属性,通过不同方向测定说明茭白 Z 轴方向上的结构及材料与 X 轴和 Y 轴方向差异较大,X 轴和 Y 轴方向的结构及材料较为接近,因此不能用某个方向的刚度测定值代表茭白的整体刚度。

试验所测得的 3 个方向破损强度变化规律与刚度变化规律基本一致(表 2),X、Y、Z 轴方向的平均破损强度分别为 0.74、0.72、0.88 MPa,即 Z 轴方向的平均破损强度明显大于 X 和 Y 轴方向,X 轴方向和 Y 轴方向的平均破损强度基本相等,其值分布范围为 0.65~0.93 MPa,平均值为 0.78 MPa,说明不同方向

茭白所能承受的极限压强有所不同,不能将单一方向的极限压强代表整体。

弹性模量是材料重要的力学特性参数,不仅可以用来评价材料抵抗弹性变形能力的大小,而且侧面反映构成物质的原子、离子或分子之间结合键强度^[21-22]。茭白属于弹塑性材料,在受到压缩时具有一定的弹性变形,但主要以塑性为主,茭白的弹性模量相对弹性材料较小(表 2),其值分布范围为 1.44~2.45 MPa,平均值为 1.89 MPa;X、Y、Z 轴方向平均弹性模量分别为 1.73、1.61、2.33 MPa。茭白弹性模量分布规律为 Z 轴方向最大,Y 轴方向最小,但 Y 轴方向与 X 轴方向接近,其分布规律与刚度和破损强度分布规律基本一致。因此,在诸如茭白切片等加工处理过程中,应尽量选择 Y 轴方向作为进刀方向,以便提高效率,降低能耗。

表 2 茭白不同压缩方向的刚度、破损强度和弹性模量

Table 2 Stiffness, failure strength, and elastic modulus with different compression directions

编号 Number	刚度/(N/mm) Stiffness			破损强度/MPa Failure strength			弹性模量/MPa Elastic modulus		
	X 轴方向 X-axis	Y 轴方向 Y-axis	Z 轴方向 Z-axis	X 轴方向 X-axis	Y 轴方向 Y-axis	Z 轴方向 Z-axis	X 轴方向 X-axis	Y 轴方向 Y-axis	Z 轴方向 Z-axis
1	32.04	37.43	50.58	0.72	0.70	0.86	1.44	1.69	2.28
2	34.20	36.40	50.50	0.65	0.70	0.90	1.57	1.59	2.37
3	39.93	41.09	56.82	0.75	0.76	0.85	1.79	1.73	2.45
4	44.23	35.79	50.17	0.87	0.72	0.93	2.06	1.60	2.39
5	39.01	32.58	46.03	0.71	0.73	0.85	1.79	1.44	2.16
平均值 Average	37.88	36.66	50.82	0.74	0.72	0.88	1.73	1.61	2.33

由表 3 可知,压缩方向对刚度、破损强度和弹性模量均有极显著性影响($P<0.001$),说明茭白具有各向异性的特性,在茭白加工、储存及运输时要充分利用不同方向的刚度、破损强度差异,以降低功耗或损失。

2.4 不同压缩速率刚度、破损强度和弹性模量

压缩速率对茭白的压缩力学特性的影响规律对于茭白加工机械的设计等具有重要的参考价值。测定茭白 X 轴方向压缩速率分别为 30、40、50、60、70 mm/min 时的刚度、破损强度和弹性模量,结果如图 4 所示。由图 4A 可知,茭白刚度随着压缩速率的增大先增加后降低,其值范围为 25.68~44.40 N/mm,平均值为 34.33 N/mm,其中压缩速率为 70 mm/min 时平均刚度最小,刚度值为 32.92 N/mm,压缩速率为 60 mm/min 时平均刚度达到最大,刚度值为 35.09 N/mm。

由图 4B 可知,不同压缩速率下茭白的破损强度也存在差异,刚度随着压缩速率的增大先减小后增大,其值范围为 0.50~0.77 MPa,平均值为 0.66 MPa;压缩速率为 50 mm/min 时,破损强度最小,破损强度值为 0.63 MPa,压缩速率为 30 mm/min 时,破损强度最大,破损强度值为 0.67 MPa。

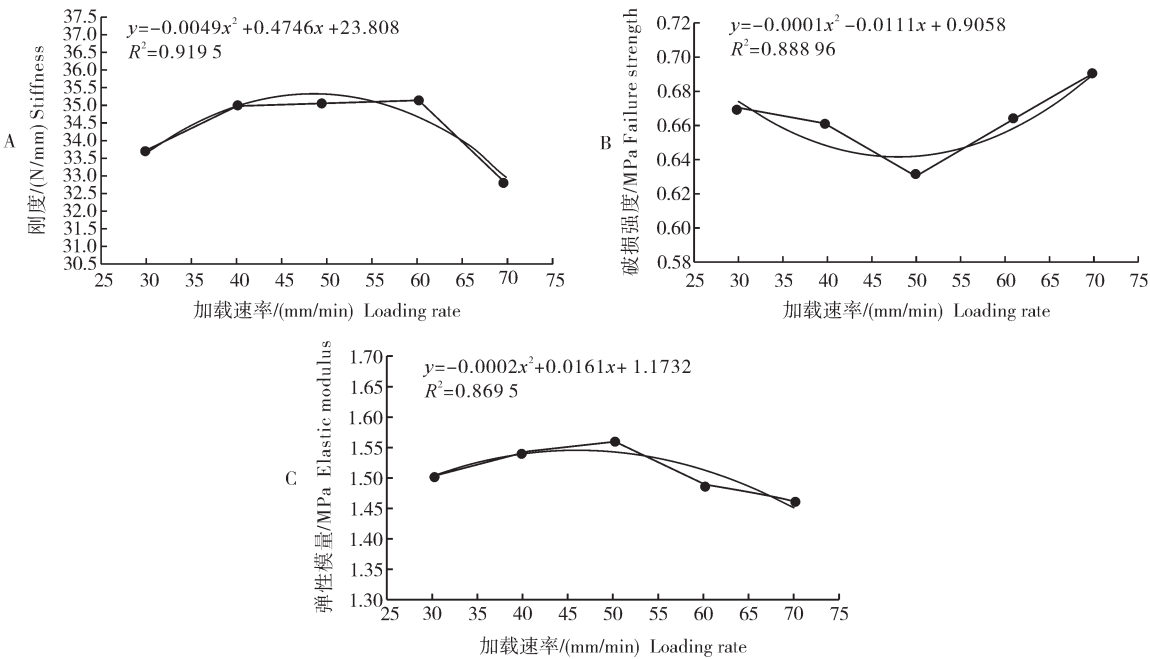
由图 4C 可知,不同压缩速率下茭白的弹性模量也有差异,弹性模量随着压缩速率的增大先增大后减小,其值范围为 1.05~1.93 MPa,平均值为 1.51 MPa,当压缩速率为 30 mm/min 时弹性模量最小,其值为 1.50 MPa,当压缩速率为 50 mm/min 时弹性模量最大,其值为 1.56 MPa,随之则逐渐减小,但整体上变化不大。

由图 4 可知,随压缩速率增大,茭白刚度先增加,当压缩速率达 48.43 mm/min 时,则会缓慢下降;茭白的破损强度随压缩速率的增大先减小,当压缩速率达 55.50 mm/min 后,破损强度会逐渐增大;茭白的弹

表 3 不同压缩方向茭白力学特性方差分析

Table 3 Variance analysis of compression mechanical properties under different compression direction

指标 Index	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
刚度 Stiffness	615.754	2	307.877	19.377	<0.001**
破损强度 Failure strength	0.112	2	0.056	21.568	<0.001**
弹性模量 Elastic modulus	1.488	2	0.744	27.303	<0.001**



A. 刚度 Stiffness; B. 破损强度 Failure strength; C. 弹性模量 Elastic modulus.

图 4 不同压缩速率时茭白的力学特性

Fig. 4 Mechanical properties under different compression rates

性模量也随着压缩速率的增大先缓慢增加,当压缩速率增加到40.25 mm/min后,弹性模量会缓慢下降。由表4可知,压缩速率对刚度、破损强度和弹性

模量的影响均不显著($P>0.05$),因此,在30~70 mm/min压缩速率范围内压缩速率对茭白硬度、破损强度和弹性模量的影响均不显著。

表 4 不同压缩速率下茭白力学特性方差分析

Table 4 Variance analysis of compression mechanical properties under different compression speed

指标 Index	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
刚度 Stiffness	19.327	4	4.832	0.148	0.962
破损强度 Failure strength	0.012	4	0.003	0.728	0.583
弹性模量 Elastic modulus	0.032	4	0.008	0.114	0.976

2.5 内部微观结构特征

由图5A可知,沿X和Y轴方向,茭白微观结构差异较小,有薄壁相围、内部为空心的近似圆形结构均布排列,结构排列无明显方向性且有孔隙,每个圆形结构与其他4个相同结构相连接,在XY平面内组成网状,以增加其强度。部分结构呈现椭圆形,分析认为这是在测试样本制作过程中剪切压缩所造成。

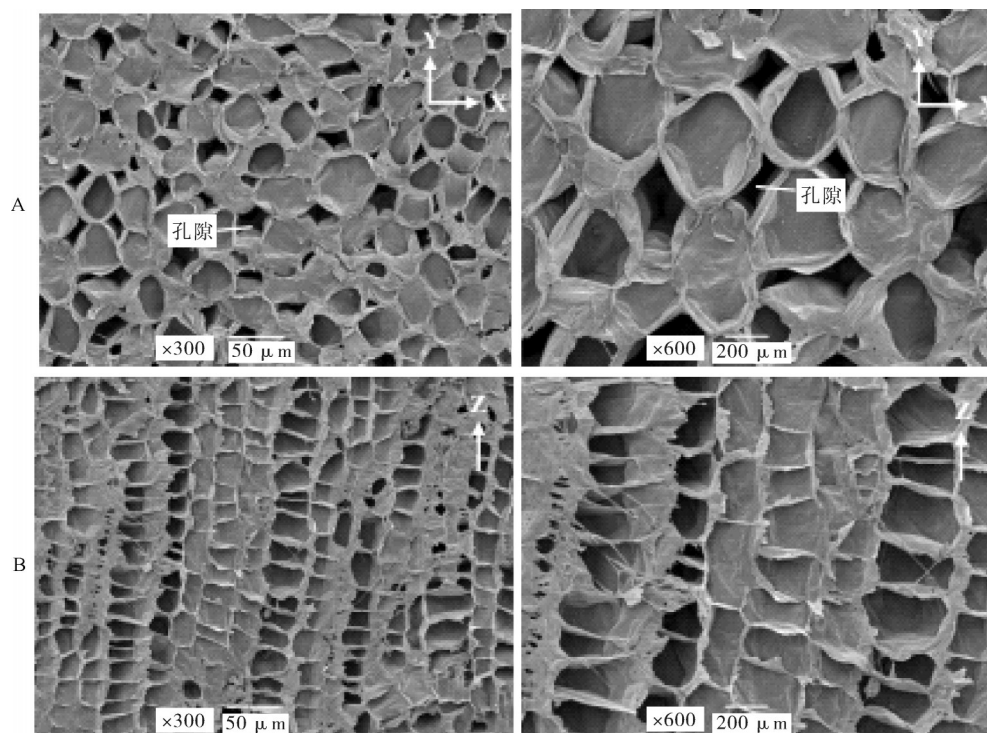
由图5B可知,茭白沿Z轴方向的微观结构与X

和Y轴方向差异明显,沿Z轴方向有长条形薄壁结构,且此结构从左到右均匀分布,结合X和Y轴方向微观结构可知,此长条形薄壁结构由X和Y轴近似圆形结构沿Z轴方向形成,从三维结构看应为圆柱体。而且沿Z轴方向均匀分布着垂直于Z轴的薄壁结构,此结构可对整茭起到“加强筋”的作用^[23]。茭白内部由薄壁组成的小结构单元体紧密排列,内部空心,能够储存大量的水分,分析认为这是茭白含水率高的

主要原因。

茭白的微观结构在各方向上的差异性可以很好的解释茭白不同方向上压缩力学特性的差异,微观结构上X轴方向和Y轴方向结构相似,因此,X轴和Y轴方向的压缩力学特性也相近。由图5可知,X轴

和Y轴方向上分布有孔隙,分析认为这是其压缩力学特性参数值偏小的原因;Z轴方向上微结构排列紧密无孔隙且与X轴和Y轴不同,且有明显的“加强筋”结构,因此X轴和Y轴方向上的压缩力学特性参数值均小于Z轴方向。



A:X和Y轴方向 X-axis and Y-axis direction;B:Z轴方向 Z-axis direction.

图5 茭白不同方向的微观结构

Fig.5 Microstructure of *Zizania latifolia* in different directions

3 讨论

本研究对茭白在不同压缩方向 and 不同压缩速率下的刚度、破损强度和弹性模量,以及微观结构特征进行了试验,结果显示,茭白含水率较高,所测试样本含水率均值为93.16%。茭白X、Y、Z轴方向上的平均刚度值分别为37.88、36.66、50.82 N/mm;平均破损强度分别为0.74、0.72、0.88 MPa;平均弹性模量分别为1.73、1.61、2.33 MPa,这为茭白仿真分析提供了参数设定依据。茭白X和Y轴方向上的压缩力学特性接近且与Z轴方向差异较大,Z轴方向各压缩力学特性参数值均大于X和Y轴方向,在茭白切片等加工处理时,应尽量选择Y轴方向作为进刀方向,可以减少切削力,提高效率;但在包装、去皮等处理时应减少X和Y轴方向受力,以避免损伤茭白。茭白在30~70 mm/min的压缩速率范围内沿X轴方向的刚度、破损强度和弹性模量受压缩速率变化的影响均不显著。茭白为各向异性材料,X和Y轴方向上有

近圆形微观形态,与其周围4个类似结构相连,其间有孔隙;沿Z轴方向,有均匀分布的薄壁构造,该结构能增强Z轴方向上稳定性,由茭白微结构可知,X和Y轴方向与Z轴方向结构形式有较大差异,这也是其呈宝塔形,且压缩力学特性有较大差异的原因。

参考文献 References

- [1] 邢阿宝,崔海峰,张雅芬,等. 茭白栽培及其孕茭机制研究现状[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(10): 1616-1621. XING A B, CUI H F, ZHANG Y F, et al. Research status of *Zizania latifolia* cultivation and its pregnancy mechanism [J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2016, 57 (10) : 1616-1621 (in Chinese).
- [2] 王莹莹. 菰(*Zizania latifolia*)主要生物学特性及其农艺性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. WANG Y Y. Analysis of main biological characteristics and agronomic traits of *Zizania latifolia* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李效尊,尹静静,杜绍印,等. 水生蔬菜营养及药用价值研究

- 进展[J].长江蔬菜,2015(22):25-30.LI X Z, YIN J J, DU S Y, et al. Research progress of aquatic vegetable nutrition and medicinal value [J]. Journal of Changjiang vegetables, 2015 (22):25-30(in Chinese with English abstract).
- [4] 马佳,马莹.超大型城市蔬菜价格波动特征研究:基于上海市蔬菜数据的分析[J].价格理论与实践,2021(6):94-97.MA J, MA Y. The fluctuation characteristics of vegetable price in megacities: verification based on Shanghai data [J]. Price: theory & practice, 2021 (6): 94-97 (in Chinese with English abstract).
- [5] 马笑笑,王兵,刘会平,等.响应面法优化茭白多糖硫酸化工艺及其抗氧化活性分析[J].食品工业科技,2024,45(7):25-34.MA X X, WANG B, LIU H P, et al. Optimization of sulfation process of *Zizania latifolia* polysaccharide by response surface and its antioxidant activity analysis [J]. Science and technology of food industry, 2024, 45 (7): 25-34 (in Chinese with English abstract).
- [6] 马绍喆,俞飞飞,邬刚,等.不同品种茭白贮藏期间的品质及外观商品性变化比较[J].安徽农业大学学报,2020,47(3):455-461.MA S J, YU F F, WU G, et al. Comparison of the changes in quality and appearance commodity of different varieties of *Zizania latifolia* during storage [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47 (3): 455-461 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈贵,赵国华,张红梅,等.不同采收期茭白的品质变化特性[J].长江蔬菜,2015(22):78-81.CHEN G, ZHAO G H, ZHANG H M, et al. Characteristics of quality change in *Zizania latifolia* with different harvest time [J]. Journal of Changjiang vegetables, 2015(22):78-81(in Chinese with English abstract).
- [8] 丁为民,邓丽君,李毅念,等.不同成熟度茭实的力学性能试验分析[J].农业工程学报,2012,28(19):241-247.DING W M, DENG L J, LI Y N, et al. Experiment and analysis on mechanical properties of *Gorgon* nuts (*Euryale ferox*) at different maturities [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28 (19): 241-247 (in Chinese with English abstract).
- [9] 彭飞,方芳,王红英.基于三维激光扫描的大麦籽粒力学建模与试验[J].农业机械学报,2018,49(11):342-348.PENG F, FANG F, WANG H Y. Modeling and experiment on mechanical properties of barley grain based on 3D laser scanning [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49 (11): 342-348 (in Chinese with English abstract).
- [10] 彭俊,谢洪起,冯亚利,等.冬枣压缩特性实验与计算仿真研究[J].食品科学,2017,38(17):20-25.PENG J, XIE H Q, FENG Y L, et al. Experimental and simulation studies on mechanical properties of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) [J]. Food science, 2017, 38 (17): 20-25 (in Chinese with English abstract).
- [11] 马秋成,张鑫宇,卢安舸,等.面向鲜莲子去心的莲仁物理与力学特性[J].农业工程学报,2023,39(21):288-296.MA Q C, ZHANG X Y, LU A G, et al. Physical and mechanical properties of lotus kernel for plumule removal of fresh lotus seeds [J]. Transactions of the CSAM, 2023, 39 (21): 288-296 (in Chinese with English abstract).
- [12] 马秋成,邓飞龙,雷林韬,等.莲仁钻削去心过程力学特性及减损工艺参数优化[J].农业工程学报,2019,35(9):291-300.MA Q C, DENG F L, LEI L T, et al. Mechanical properties and optimization of process parameters for loss reduction during removing lotus core by drilling [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (9): 291-300 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张妮.辣椒穴盘苗自动移栽机关键部件设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2023.ZHANG N. Design and experiment of key components of automatic transplanter for chili plug seedlings [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张国忠,陈立明,刘浩蓬,等.荸荠离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2022,38(11):41-50.ZHANG G Z, CHEN L M, LIU H P, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38 (11): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- [15] 涂鸣,曹涛,万志华,等.菱角离散元粘结参数标定与剪切试验[J].华中农业大学学报,2023,42(4):270-278.TU M, CAO T, WAN Z H, et al. Calibration and shear experiments of discrete element bonding parameters for water caltrop [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (4): 270-278 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张国忠,张清洪,焦俊,等.鲜莲籽离散元仿真参数标定[J].华南农业大学学报,2023,44(1):170-178.ZHANG G Z, ZHANG Q H, JIAO J, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for fresh lotus seeds [J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44 (1): 170-178 (in Chinese with English abstract).
- [17] 冯慧敏,郭玉明,武新慧,等.苹果压缩特性的机理分析[J].农产品加工,2015(8):17-19.FENG H M, GUO Y M, WU X H, et al. The compression feature analysis of the mechanism of apple [J]. Farm products processing, 2015 (8): 17-19 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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.WU D G, JIANG X M. Compressive test of agricultural products and its application (I): compressive test method [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1990, 5 (3): 171-176 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孙国辉.特色油桃流变力学特性的研究[D].镇江:江苏大学,2005.SUN G H. Studies on rheological properties of characteristic nectarine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张琦峰.微粉碎油菜秸秆纤维增强摩擦材料摩擦学行为及其

- 应用技术[D]. 长春: 吉林大学, 2023. ZHANG Q F. Tribological behaviour and application technology of microcrushed rape straw fiber reinforced friction materials [D]. Changchun: Jilin University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张博凯. 胶体聚合物弹性模量的微观理论: 键长的效应[J]. 物理学报, 2021, 70(12): 322-328. ZHANG B K. Microscopic theory for elastic modulus of colloidal polymers: effect of bond length[J]. Acta physica sinica, 2021, 70(12): 322-328 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张宗华. 轻质吸能材料和结构的耐撞性分析与设计优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. ZHANG Z H. Crashworthiness analysis and design optimization of lightweight materials and structures for energy absorption[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese with English abstract).

Mechanical properties of compression in *Zizania latifolia*

WANG Hongchang^{1,2}, XIA Jingjiu^{1,2}, DONG Zhao¹, LIU Lile¹, WANG Tao³, ZHANG Guozhong^{1,2}

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

3.Jinhua Academy of Agricultural Sciences, Jinhua 321051, China

Abstract The properties of *Zizania latifolia* materials were studied to solve the problems of lacking theoretical basis in the design and simulation analysis of mechanical equipment for processing and harvesting *Zizania latifolia*. A texture analyzer was used to conduct static load compression experiments on *Zizania latifolia* to obtain the stiffness, failure strength, and elastic modulus of *Zizania latifolia* under different directions of compression and compression rates. A scanning electron microscope (SEM) was used to obtain the microstructure of *Zizania latifolia* and analyze the intrinsic mechanism of the differences in the mechanical properties of *Zizania latifolia* under different directions of compression. The results showed that *Zizania latifolia* was anisotropic material, with the average stiffness values in the X, Y and Z axis of 37.88, 36.66 and 50.82 N/mm, respectively. The average failure strength were 0.74 MPa, 0.72 MPa, 0.88 MPa, respectively. The average modulus of elasticity was 1.73 MPa, 1.61 MPa, 2.33 MPa, respectively. The direction of compression had an extremely significant effect on the stiffness, elastic modulus and failure strength of *Zizania latifolia* ($P < 0.001$). The effect of compression rate on stiffness, elastic modulus, and failure strength within the range of 30-70 mm/min was not significant ($P > 0.05$). The microstructural features in the X-axis and Y-axis directions were similar but different from those in the Z-axis direction. The distribution of pores along the X-axis and Y-axis directions resulted in the smaller values of mechanical properties of compression in these two directions. It will provide theoretical reference for the packing, storage and mechanized production of *Zizania latifolia*.

Keywords *Zizania latifolia*; elastic modulus; failure strength; compression direction; compression rate

(责任编辑: 陆文昌)