

赵萍, 张红印, 李本帅, 等. 甘薯块根物理机械特性试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 545-551.

ZHAO Ping, ZHANG Hongyin, LI Benshuai, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of sweet potato root[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 545-551.

甘薯块根物理机械特性试验研究

赵萍¹, 张红印¹, 李本帅², 徐庆炳¹, 唐晓明¹

(1. 沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁省农业发展服务中心, 沈阳 110034)

摘要: 甘薯机械化生产机具大多数参考马铃薯生产机具研制, 缺乏理论设计和分析依据。为了给甘薯收获、运输、分选机械的设计和 optimization 提供相关理论参数及分析依据, 探究成熟期甘薯块根不同方向、不同部位的压缩物理机械特性, 为高性能机具研制奠定基础。以辽宁地区广泛种植的烟薯 25 品种为研究对象, 测定成熟期块根含水率及密度, 确定试验块根的基本物理参数; 利用 INSTORN5944 型电子万能试验机进行块根轴向、径向以及不同部位压缩力学特性试验, 得出破裂力随加载速度变化趋势, 分析不同压缩方向和不同部位薯块的弹性模量、泊松比以及剪切模量, 确定甘薯材料特性。结果表明: 成熟期烟薯 25 含水率为 79.64%, 密度为 $1\ 028\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 不同压缩方向上薯块的弹性模量、泊松比及剪切模量差异不显著, 甘薯为各向同性材料; 不同部位薯块弹性模量、泊松比及剪切模量差异不显著, 甘薯为均质材料; 甘薯弹性模量为 3.22~4.19 MPa, 泊松比为 0.28~0.40, 剪切模量为 1.26~1.50 MPa。研究结果对甘薯生产机械化机具设计及后续仿真分析模型的建立具有重要意义。

关键词: 甘薯; 物理机械特性; 压缩力学特性

中图分类号: S531

文章编号: 1000-1700(2024)05-0545-07

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study on Physical and Mechanical Characteristics of Sweet Potato Root

ZHAO Ping¹, ZHANG Hongyin¹, LI Benshuai², XU Qingbing¹, TANG Xiaoming¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Liaoning Agricultural Development Service Center, Shenyang 110043, China)

Abstract: Most of the mechanical equipment for sweet potato production is based on that for potato production, lacking theoretical design and analysis basis. In order to provide relevant theoretical parameters and analysis basis for the design and optimization of sweet potato harvesting, transportation, and sorting machinery, this study explores the physical and mechanical properties of mature sweet potato tubers in different directions and positions, to lay a foundation for the development of high-performance machinery. Taking the widely planted Yanshu 25 variety in Liaoning Province as the research object, the water content and density of mature tubers were obtained, and the basic physical parameters of the tested tubers were determined. The mechanical compression properties of the tubers in the axial, radial, and some other directions were tested using the INSTRON 5944 electronic universal testing machine, and the trend of the breaking force with the loading speed was obtained. The elastic modulus, Poisson's ratio, and shear modulus of the potato pieces in different compression directions and positions were analyzed, and the material properties of sweet potato were determined. The results show that the water content of mature Yanshu 25 sweet potato is 79.64%, and the density is $1\ 028\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. The

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 辽宁省教育厅项目(LJKMZ20220999)

第一作者: 赵萍(1976-), 女, 博士, 教授, 从事蔬菜生产机械化技术与装备研究, E-mail: zhaopingxdg@syau.edu.cn

elastic modulus, Poisson's ratio, and shear modulus of potato pieces in different compression directions are not significantly different, indicating that sweet potato is an isotropic material. The elastic modulus, Poisson's ratio, and shear modulus of potato pieces in different positions are not significantly different, indicating that sweet potato is a homogeneous material. The elastic modulus of sweet potato is 3.22 to 4.19 MPa, the Poisson's ratio is 0.28 to 0.40, and the shear modulus is 1.26 to 1.50 MPa. The research findings may provide foundation for the design of mechanized equipment for sweet potato production and the establishment of subsequent simulation models.

Key words: sweet potato; physical and mechanical characteristics; compressive mechanical properties

甘薯是一种高产、适应性强且营养价值高^[1-2]的粮食作物,块根除作主粮外,也是食品加工、淀粉及酒精的重要原料,根、茎、叶又是优良的饲料^[3-5]。我国是甘薯种植大国^[6-7],据联合国粮农组织FAO统计数据显示,2022年我国甘薯种植总面积为21 572.92 km²,占世界种植面积的33.6%,总产量占世界54.9%^[8],但目前机械化生产水平低,严重制约了产业的发展。究其原因是因为甘薯机械化生产设备绝大多数是参考马铃薯生产设备进行设计,缺乏精确的理论指导和分析,使得机具的适应性差,导致机械化作业损伤严重,而甘薯块根的物理机械特性参数是相关机具设计的重要理论依据,也是采用数值模拟的方法研究甘薯与土壤以及机具的互动机制时,模型建立的必需参数。因此,研究甘薯块根的物理机械特性对甘薯机械化收获、加工等装备的设计及数值分析具有一定理论意义,为高性能甘薯收获机具的研制奠定基础。

目前,国内研究马铃薯及甘薯等块根茎类作物物理机械特性时,取样大部分都是在内部,并未对具体取样部位进行说明^[9-18]。申海洋等^[19]以苏薯16为研究对象,研究了块根的弹性模量、泊松比、剪切模量等物理机械特性,得出甘薯块根为各向同性材料。刘春香等^[20]通过分析不同品种马铃薯从表层到内芯泊松比的变化,得出马铃薯内部不同部位的泊松比是变化的,所以不同部位取样块根的物理机械特性可能存在差异。而对于不同研究目标可能需要综合考虑不同部位物理机械特性的差异性,例如收获机械、运输机械及分级分选机械设计更多的是关注表层物理机械特性;仿真分析作为重要的研究手段,建模时则需要物料从表层到内部精确的物理机械特性,从而建立更为符合实际的仿真模型^[21]。因此,探究甘薯块根是否是各向同性材料和均质材料显得尤为重要。

基于以上问题,本研究以成熟期“烟薯25”甘薯品种为研究对象,测定了甘薯块根含水率、密度,通过分析甘薯压力与位移间关系,从而得出不同压缩方向、不同部位薯块相关物理机械特性,为以后甘薯建模仿真及收获等机械设计提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究以“烟薯25”为试验对象,样本选自辽西、辽中地区的甘薯种植试验基地,该品种甘薯成熟后薯皮褚红色,薯肉橘黄色,薯型纺锤型,结薯集中,单株结薯2~3个,平均单株重0.6~0.8 kg,具体外形如图1。

1.2 仪器

本研究所使用的试验仪器主要有101型电热鼓风干燥箱(温度0~300°,电压220 V)、电子天平(量程500 g,精度0.001 g)、INSTORN5944型电子万能试验机、量筒(量程500 mL,精度5 mL)、胶头滴管、电子游标卡尺(量程150 mm,精度0.01 mm)、美工刀等。

1.3 方法

1.3.1 甘薯块根含水率测定 取不同形状甘薯块根,用美工刀将甘薯块根去皮后整根切块并分组,利用电子天平将每组薯块分别称重并记录,放入烘干盒后再放入101型电热鼓风干燥箱(图2),温度设置

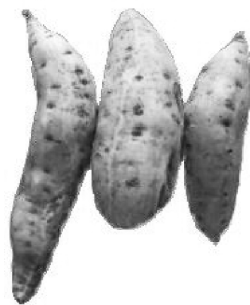


图1 烟薯25

Figure 1 Tobacco potato 25

为 120° ,每隔2 h进行1次记录称重,直到质量不再变化时结束试验,将得到的数据进行计算后取平均值。甘薯块根含水率计算公式为:

$$w(\%) = \frac{m - m_s}{m} \times 100 \quad (1)$$

式中: w 为甘薯块根含水率(%); m 为试验薯块烘干前质量(g); m_s 为试验薯块烘干后质量(g)。

1.3.2 甘薯块根密度测定 取若干个不同的甘薯块根,利用美工刀将块根切成不同的小块并分成10组,利用电子天平测量出每一组甘薯小块的质量,记为 M 。向量筒中注入一定量的水,使水位保持在刻度线附近,再利用胶头滴管将水位补至与刻度线齐平,记录此时水的体积为 V ,缓慢将测量好的薯块放入水中,尽量避免水花溅到内壁,待水面稳定后记录水的体积为 V_1 (图3),记录后将水倒出,重新将水补至刻度线,重复10组试验,结果计算后取平均值。



图2 甘薯烘干试验

Figure 2 Sweet potato drying test

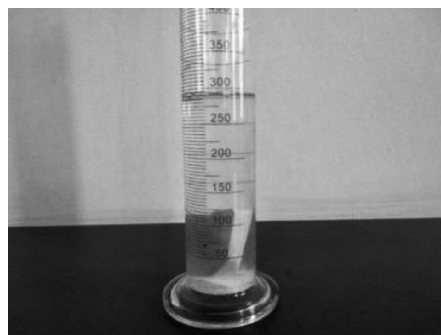


图3 甘薯薯块密度试验

Figure 3 Experiment on density of sweet potato chunks

甘薯块根密度的计算公式:

$$\rho = \frac{M}{V_1 - V} \quad (2)$$

式中: ρ 为甘薯块根密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); M 为试验薯块质量(g); V 为初始水的体积(cm^3); V_1 为放入薯块后水的体积(cm^3)。

1.3.3 甘薯块根压缩试验方法 先取若干个不同形状甘薯块根,将甘薯块根长轴方向设定为轴向,短轴方向设定为径向。利用美工刀从块根轴向和径向两个方向取样(图4),切成近似 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方体薯块,将切割好的薯块分成两组,分别以 $10, 20, 30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加载速度进行轴向压缩和径向压缩,每个加载速度进行5组重复试验,结果计算后取平均值。

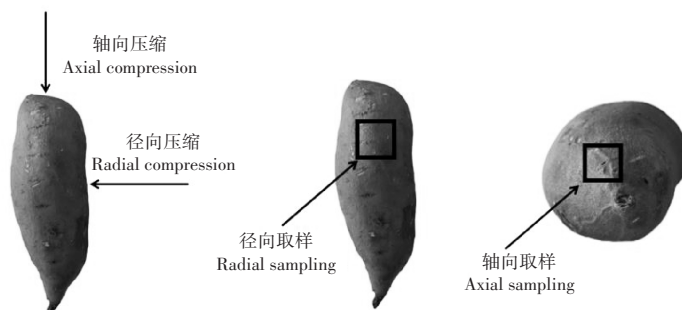


图4 轴、径向压缩取样

Figure 4 Axial and radial compression sampling

再取若干个不同形状甘薯块根,分别从表层、中心及表层到中心整个部位进行取样,具体做法:将块根对半分,利用美工刀将靠近表层的薯肉部分与靠近中心的薯肉部分切下,将切下来的甘薯薯块利用美工刀切割成近似 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方体薯块。将较小的甘薯块根,利用美工刀将块根

整体切割成近似圆柱体的薯块,将切割下来的3种薯块按照种类分别在密封袋中封装(图5),防止水分流失。试验前,利用电子游标卡尺记录薯块的横向长度和纵向长度,使载荷施加在同轴方向,每种薯块分别以10,20,30 mm·min⁻¹的加载速度进行压缩(图6),每个加载速度进行5组重复试验,结果计算后取平均值。

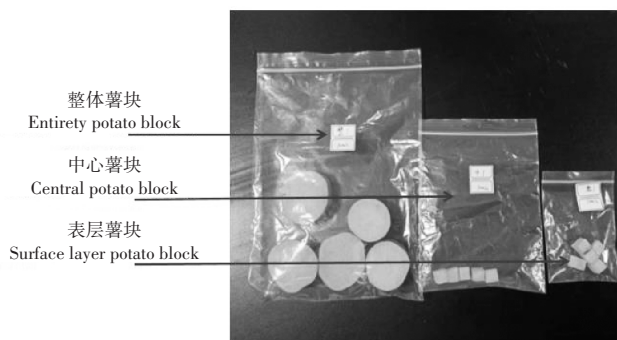


图5 压缩试验薯块

Figure 5 Compression test potato pieces



图6 薯块压缩试验

Figure 6 Potato piece compression test

通过压缩力学特性试验,计算弹性模量、泊松比及剪切模量。

甘薯块根弹性模量的计算公式:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_2} = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta l} \quad (3)$$

式中: σ 为样本所受应力(MPa); ε_2 为纵向应变; F 为破裂力(N); S 为样本横截面积(mm²); l 为样本原始高度(mm); Δl 为样本压缩后高度变化量(mm)。

泊松比的计算公式:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right| = \frac{\Delta d \cdot l}{\Delta l \cdot d_0} \quad (4)$$

式中: ε_1 为横向应变; Δd 为样本压缩后横向变化量(mm); d_0 为样本横向原始长度(mm)。

剪切模量的计算公式:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (5)$$

式中: G 为剪切模量(MPa); E 为弹性模量(MPa); μ 为泊松比。

2 结果与分析

2.1 甘薯块根含水率及密度结果

根据试验结果分析,10组甘薯薯块在120 °的温度条件下经过12 h烘干后质量达到稳定,经过计算可知成熟期烟薯25的含水率为79.64%;利用排水法对甘薯薯块的密度进行测定,试验后取平均值,经过计算得出成熟期烟薯25的密度为1 028 kg·m⁻³。

2.2 甘薯块根压缩试验结果与分析

2.2.1 轴向和径向压缩试验结果与分析 由图7可知,轴向压缩在10 mm·min⁻¹的加载速度下薯块破裂力最大,最大值为180 N,在30 mm·min⁻¹的加载速度下薯块破裂力最小,最小值为152.6 N;径向压缩在10 mm·min⁻¹的加载速度下薯块破裂力最大,最大值为185.4 N,在30 mm·min⁻¹的加载速度下薯块破裂力最小,最小值为149.1 N。

轴向压缩薯块和径向压缩薯块在相同加载速度下破裂力存在差异,而造成这一差异性的主要原因可能是在甘薯内部取样时,取样部位不同导致的,破裂力较大的试验薯块包含表层部位较多,破裂力较小的试验薯块包含中心部位较多。

随着加载速度的增加,轴向压缩薯块的破裂力从180 N下降到152.6 N,径向压缩薯块的破裂力从

185.4 N 下降到 149.1 N。二者破裂力的变化趋势均呈下降趋势,即:随着加载速度的增大,甘薯破裂所需要的力减小,这就会导致甘薯更容易损伤。因此,甘薯机械化收获、分选、储藏运输等环节要避免或者减少高速冲击或挤压,这样能在一定程度上减少甘薯的损伤。

由表 1 可知,轴向压缩薯块弹性模量为 3.92 MPa,剪切模量为 1.41 MPa,泊松比为 0.39;径向压缩薯块弹性模量为 3.98 MPa,剪切模量为 1.43 MPa,泊松比为 0.39。两者弹性模量、剪切模量、泊松比的标准差均较小,说明数据离散程度低。而随着加载速度的增加,两者的弹性模量、泊松比、剪切模量都呈增长趋势。

利用数据处理软件对不同加载速度下轴、径向压缩试验数据的弹性模量、泊松比、剪切模量进行方差分析。由表 2 可知,在不同加载速度下,轴、径向压缩薯块组间弹性模量的 p 值为 0.836;剪切模量的 p 值为 0.796;泊松比的 p 值为 0.911。说明不同压缩方向对甘薯块根的物理机械特性无显著性影响 ($p>0.05$),可以得出甘薯为各向同性材料。这一研究结果表明,在后续进行甘薯相关研究时,无需考虑压缩方向对甘薯物理机械特性产生的影响。

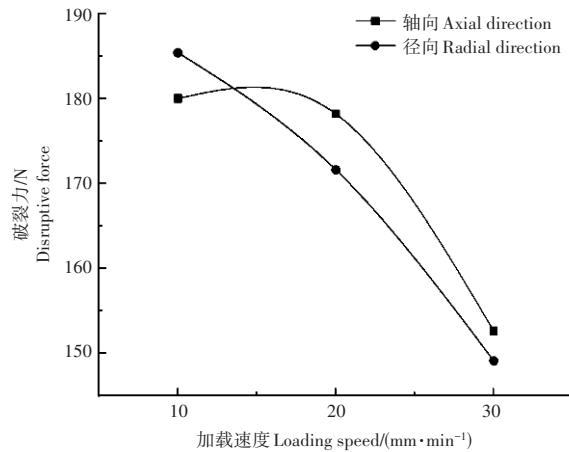


图7 轴向和径向压缩破裂力变化

Figure 7 Variation of axial and radial compression fracture forces

表1 轴向和径向压缩平均值

Table 1 Average values of axial and radial compression

组分 Constituent	加载速度/(mm·min ⁻¹) Loading speed	\bar{E} /MPa	\bar{G} /MPa	$\bar{\mu}$
轴向 Axial direction	10	3.69	1.35	0.37
	20	3.92	1.43	0.37
	30	4.16	1.44	0.44
	\bar{x}	3.92	1.41	0.39
	s	0.19	0.04	0.03
径向 Radial direction	10	3.71	1.36	0.36
	20	3.82	1.36	0.40
	30	4.41	1.56	0.41
	\bar{x}	3.98	1.43	0.39
	s	0.31	0.10	0.02

表2 轴向和径向压缩方差分析

Table 2 Axial and radial compression analysis of variance

试验指标 Test index	差异源 Difference source	SS	df	MS	F	p
E/MPa	组间 Interblock	0.005	1	0.005	0.049	0.836
G/MPa	组间 Interblock	0.001	1	0.001	0.076	0.796
μ	组间 Interblock	0.000	1	0.000	0.014	0.911

2.2.2 不同部位薯块压缩试验结果与分析 由图8可知,表层部位薯块破裂力的最大值为170.3 N,最小值为141.6 N;中心部位薯块破裂力的最大值为165.4 N,最小值为138.5 N;整体薯块破裂力的最大值为492 N,最小值为450.5 N。表层部位、中心部位薯块破裂力随着加载速度的增加而减小,整体薯块破裂力随着加载速度的增加先减少后增加,但三者破裂力整体呈下降趋势,整体薯块的破裂力明显大于表层部位和中心部位的破裂力,原因是整体薯块直径大,刚性就大,破裂力偏大,加载速度为20 mm·min⁻¹时破裂力最小是因为此加载速度下5组样品直径相对较小。在相同加载速度下,表层部位薯块的破裂力比中心部位薯块的破裂力略大,但整体差异性较小,参考其他物料相关力学特性^[22-23]分析其原因,是因为表层部位薯块的纤维含量较中心部位略多,抗压能力较强。因此,在相同加载速度作用下,表层

部位薯块的破裂力>中心部位薯块的破裂力。而在实际甘薯机械化收获过程中,由于中心部位被表层部位包裹导致机械损伤往往出现在甘薯表层,因此降低甘薯表层部位损伤是甘薯机械化低损伤收获的关键。

在 10, 20, 30 mm·min⁻¹ 的加载速度下,表层部位薯块、中心部位薯块及整体薯块的压缩物理机械特性试验结果如表 3。表层部位薯块、中心部位薯块及整体薯块的弹性模量、泊松比、剪切模量随着加载速度的增加而增大,结合破裂力随加载速度的变化趋势分析可知,随着加载速度的增加,薯块内部易产生应力集中,导致薯块的脆性增加,薯块抵抗变形的能力增强,薯块破裂所需的力减小。因此,在进行甘薯机械化收获、储藏运输时要尽可能减少应力集中,从而降低甘薯的损伤。

由表 3 可知,表层部位薯块弹性模量为 4.19 MPa、剪切模量为 1.50 MPa、泊松比为 0.40;中心部位薯块弹性模量为 3.22 MPa、剪切模量为 1.26 MPa、泊松比为 0.28;整体薯块弹性模量为 3.65 MPa、剪切模量为 1.41 MPa、泊松比为 0.29,3 组的各项标准差值均较小,说明数据离散程度低,数据可靠。

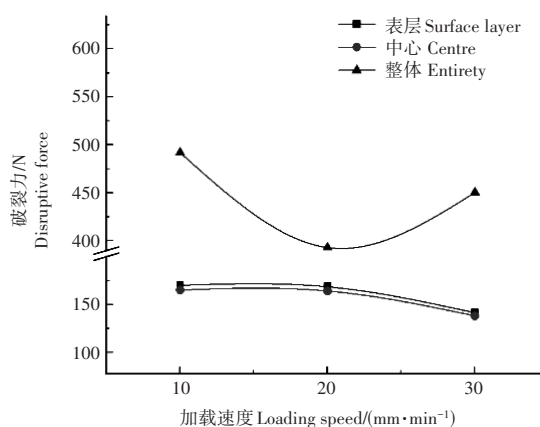


图8 不同部位薯块破裂力变化
Figure 8 Breaking force of potato block in different parts

表3 不同部位薯块压缩试验平均值

Table 3 Average value of compression test of different parts of potato block

组分 Constituent	加载速度/(mm·min ⁻¹) Loading speed	\bar{E} /MPa	\bar{G} /MPa	$\bar{\mu}$
表层 Surface layer	10	3.69	1.37	0.35
	20	4.33	1.53	0.41
	30	4.55	1.59	0.43
	\bar{x}	4.19	1.50	0.40
	s	0.36	0.09	0.03
中心 Centre	10	2.86	1.16	0.23
	20	3.18	1.25	0.27
	30	3.62	1.36	0.33
	\bar{x}	3.22	1.26	0.28
	s	0.31	0.08	0.04
整体 Entirety	10	3.34	1.35	0.24
	20	3.52	1.41	0.25
	30	4.09	1.47	0.39
	\bar{x}	3.65	1.41	0.29
	s	0.32	0.05	0.07

由表 4 可知,表层部位薯块、中心部位薯块、整体薯块方差分析后三者弹性模量的 p 值为 0.070;剪切模量的 p 值为 0.053;泊松比的 p 值为 0.105,说明不同部位薯块的物理机械特性无显著性差异 ($p > 0.05$),因此甘薯可以在一定程度上看作均质材料。这一研究结果表明,在后续进行甘薯相关研究时,无需考虑取样部位对甘薯物理机械特性的影响。

3 讨论与结论

本研究结果表明,在收获期烟薯 25 含水率为 79.64%、密度为 1 028 kg·m⁻³ 的条件下,压缩方向对甘薯块根弹性模量、泊松比和剪切模量物理机械特性影响不显著 ($p > 0.05$),甘薯为各向同性材料。这与申海洋等^[19]针对苏薯 16 研究的结果是一致的,充分说明甘薯为各向同性材料,这一结果对后续仿真

表4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

试验指标 Test index	差异源 Difference source	SS	df	MS	F	p
E/MPa	组间 Interblock	1.417	2	0.709	4.264	0.070
G/MPa	组间 Interblock	0.089	2	0.044	5.004	0.053
μ	组间 Interblock	0.025	2	0.013	3.366	0.105

分析模型处理具有重要意义。但是甘薯块根不同部位物理机械特性是否存在差异,即甘薯是否为均质材料,对于甘薯收获机械、运输机械及分级分选机械设计及其仿真分析精确模型的建立尤为重要,需要进一步研究。

本研究通过对甘薯表层部位薯块、中心部位薯块、整体薯块物理机械特性的研究,表明加载速度相同的情况下,整体薯块的破裂力>表层部位薯块的破裂力>中心部位薯块的破裂力。在不同加载速度下,甘薯块根破裂力随着加载速度增加而减小,因此在对甘薯进行机械化收获、储藏运输时,要尽量减少高速冲击或挤压使甘薯块根内部产生应力集中,从而有效减少甘薯的损伤。在不同加载速度下,分析表层部位薯块、中心部位薯块、整体薯块物理机械特性,得出表层部位薯块的弹性模量、泊松比及剪切模量>整体薯块的弹性模量、泊松比及剪切模量>中心薯块的弹性模量、泊松比及剪切模量,但差异不显著($p>0.05$),甘薯一定程度上可以看作均质材料,在后续对甘薯进行相关研究时,无需考虑压缩方向和部位对甘薯物理机械特性的影响。

参考文献:

- [1] BOVELL-BENJAMIN A C. Sweet potato: A review of its past, present, and future role in human nutrition[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2007, 52: 1-59.
- [2] ALAM M K. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam): Revisiting the associated health benefits[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 115: 512-529.
- [3] 林国钊, 李平, 朱晓萍, 等. 甘薯产品营养价值及其在畜禽生产中的应用[J]. *中国饲料*, 2022(23): 128-134.
- [4] 徐文艺, 张华, 马继春, 等. 山东省甘薯生产机械现状及发展建议[J]. *农业装备与车辆工程*, 2015, 53(1): 10-13.
- [5] 马标, 胡良龙, 许良元, 等. 国内甘薯种植及其生产机械[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(1): 42-46.
- [6] 马代夫, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(5): 969-973.
- [7] 王欣, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 483-492.
- [8] 联合国粮农组织(FAO)数据库[EB/OL]. (2023-02-10)[2023-12-27]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL.html>.
- [9] 高国华, 谢海峰. 基于EDEM的薯土分离机构数值分析与模拟[J]. *农机化研究*, 2019, 41(1): 15-21.
- [10] 邓伟刚. 马铃薯块茎碰撞损伤特性与表皮摩擦损伤机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [11] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 35-42.
- [12] 余参参, 段宏兵, 蔡兴奎, 等. 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(1): 210-217.
- [13] 员贝贝, 瞿江飞, 郑红斌, 等. 西北旱区马铃薯压缩力学特性研究[J]. *中国农机化学报*, 2017, 38(11): 57-62.
- [14] 王希英. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [15] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 34-42.
- [16] 刘兴. 马铃薯输送分级装置设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [17] 刘承龙. 甘薯联合收获输送分离装置设计及损伤规律研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [18] 张梦月, 周勇, 张国忠, 等. 芋头压缩和剪切特性试验研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(3): 206-212.
- [19] 申海洋, 纪龙龙, 胡良龙, 等. 甘薯收获期薯块物理机械特性参数研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(12): 55-61.
- [20] 刘春香, 马小愚, 雷浦. 马铃薯块茎组织泊松比的试验研究[J]. *农机化研究*, 2007(3): 101-103.
- [21] 刘禹辰, 张锋伟, 宋学锋, 等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(1): 45-54.
- [22] 刘志侠, 吴国振, 于永强, 等. 花生荚果生物力学特性研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2023, 54(6): 732-740.
- [23] 李雪. 竹原纤维增强复合材料拉伸破坏行为的表征和模拟[D]. 重庆: 西南大学, 2017.