

## 油莎豆的剪切力学特性

贾会杰, 李晓丹, 王文丹, 张振山

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

**摘要:**为选择适宜的油莎豆破碎设备, 探究了脱皮前后油莎豆剪切力学特性变化。以油莎豆为试验原料, 利用物性分析仪, 在初步考察脱皮对油莎豆剪切特性影响基础上, 分别探讨了水分含量、加载速率、加载方位和粒径等级对未脱皮和脱皮油莎豆破坏力、硬度和破坏能的影响。结果表明: 脱皮对油莎豆的剪切特性存在影响; 水分含量、加载速率、加载方位和粒径等级均对未脱皮和脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能具有显著影响。未脱皮和脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能随油莎豆水分含量增大以及粒径的减小而降低, 随加载速率增加呈先增大后降低的趋势, 并在加载速率为 0.3 mm/s 时获得较大值。在抗剪切能力上脱皮油莎豆 X 轴最大, Z 轴次之, Y 轴最小, 未脱皮油莎豆 Z 轴最大, X 轴次之, Y 轴最小。此外, 在相同的剪切条件下, 脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能均远低于未脱皮油莎豆的。研究结果可为油莎豆加工机械改进和工艺条件制订提供必要的理论依据。

**关键词:**油莎豆; 脱皮; 剪切试验; 破坏力; 硬度; 破坏能

**中图分类号:** TS222+.1; TS224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2023)02-0133-05

### Shearing mechanical properties of *Cyperus esculentus*

JIA Huijie, LI Xiaodan, WANG Wendan, ZHANG Zhenshan

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to select suitable crushing equipment, the changes of shearing mechanical properties of *Cyperus esculentus* before and after peeling were investigated. Based on the preliminary investigation of the effect of peeling on the shearing properties of *Cyperus esculentus*, the effects of moisture content, loading rate, loading orientation and particle size on the breaking force, hardness and breaking energy of unpeeled and peeled *Cyperus esculentus* were investigated by using the physical property analyzer. The results showed that there was an effect of peeling on the shearing properties of *Cyperus esculentus*. The moisture content, loading rate, loading orientation and particle size all had significant effects on the breaking force, hardness and breaking energy of unpeeled and peeled *Cyperus esculentus*. The breaking force, hardness and breaking energy of unpeeled and peeled *Cyperus esculentus* decreased with the increasing of moisture content and the decreasing of particle size, while tended to increase and then decrease with the increasing of loading rate, and a larger value obtained at a loading rate of 0.3 mm/s. The shear resistance was the greatest in the X-axis, followed by the Z-axis and the least in the Y-axis for peeled *Cyperus esculentus*, and it was the greatest in the Z-axis, followed by the X-axis and the least in the Y-axis for unpeeled *Cyperus esculentus*. In addition, under the same shearing conditions, the breaking force, hardness and breaking energy of peeled *Cyperus esculentus* were much lower than those of

unpeeled *Cyperus esculentus*. The results of the study can provide the necessary theoretical basis for the improvement of processing machinery and the setting of process conditions for *Cyperus esculentus*.

**Key words:** *Cyperus esculentus*; peeling; shearing test; breaking force; hardness; breaking energy

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2022-02-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002605); 国家自然科学基金(32172261); 河南省重大科技专项课题(211100110100-3)

作者简介: 贾会杰(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂加工理论与技术(E-mail)jhjie668@163.com。

通信作者: 张振山, 副教授(E-mail)zzsan010@126.com。

油莎豆(*Cyperus esculents* L.),属莎草科多年生草本植物,原产于非洲,于20世纪50年代传入我国<sup>[1]</sup>。油莎豆生长期为90~110 d,产量(干豆)可达15 000 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。油莎豆营养丰富,粗脂肪含量为18%~33%。油莎豆油富含油酸和亚油酸,对降低人体血脂水平和防止机体代谢紊乱具有一定作用<sup>[3]</sup>。此外,油莎豆的淀粉含量为30%~40%,可用于制作糕点、提糖、酿酒等。油莎豆作为一种新的食品资源具有广阔的发展前景。

油莎豆在收获、清理和运输中受剪切力作用破损,使其耐储性和商品价值大大降低。此外,油莎豆在脱皮、破碎、压榨制油等加工过程中受剪切力作用,会影响机器性能和油莎豆的加工效果。因此,对油莎豆剪切力学特性进行研究有助于改进加工机械性能和保持油莎豆产品品质。

目前,国内外对油莎豆的研究主要集中于脱皮<sup>[4-6]</sup>、压榨制油条件<sup>[7]</sup>以及加工利用<sup>[8-10]</sup>等方面。关于油莎豆力学特性研究还处于初始阶段<sup>[11]</sup>,而有关油莎豆脱皮前后力学特性的研究则鲜有报道。本文以未脱皮和脱皮油莎豆为研究对象,在不同水分含量、加载速率、加载方位、粒径等级下进行油莎豆单轴剪切试验,通过物性分析仪测得油莎豆剪切过程中的剪切力-位移曲线,分析不同条件对油莎豆破坏力、硬度、破坏能的影响,以期对油莎豆的脱皮、破碎、压榨制油设备的设计提供必要的基础参数和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

油莎豆,长度介于10.55~13.29 mm之间,宽度介于10.36~13.26 mm之间,高度介于8.80~11.46 mm之间,水分含量9.80%,购于河南商丘市蓝翔新能源科技有限公司。试验时选用颗粒形态完整、无损伤、无霉变、大小均匀的油莎豆。

TA.XT.Plus型物性分析仪,英国Stable Micro Systems公司;202-2AB型电热恒温干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;AL-204型分析天平,上海梅特勒-托利多仪器有限公司;FW-100型高速万能粉碎机,北京市永光明医疗仪器有限公司;6FT-B7型豆类整粒脱皮机,菏泽工科机械制造有限公司;MNT-150型游标卡尺,上海美奈特实业有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 不同粒径等级脱皮油莎豆的制备

利用圆孔筛将油莎豆按粒径( $D$ )筛分为A( $D \geq 12$  mm)、B( $11$  mm  $\leq D < 12$  mm)和C( $D < 11$  mm)3

个等级。利用脱皮机对分级的油莎豆进行脱皮,脱皮后的油莎豆按粒径分为A( $D \geq 10$  mm)、B( $9$  mm  $\leq D < 10$  mm)和C( $D < 9$  mm)3个等级。所有样品用自封袋密封后,在4℃冰箱中存储,备用。

#### 1.2.2 油莎豆水分含量的调整

水分含量的调整参照杨作梅等<sup>[12]</sup>的方法。称取一定质量的油莎豆(质量记为 $W_i$ ),采用喷雾方式加入一定量的水[加水量按公式(1)计算],将喷雾加水后的样品密封到双层聚乙烯袋中,在 $(5 \pm 2)$ ℃条件下平衡48 h,以保证水分在油莎豆中的均匀分布,得到不同水分含量的油莎豆。

$$Q = \frac{W_i(m_f - m_i)}{1 - m_i} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为加水量; $m_i$ 为初始水分含量; $m_f$ 为目标水分含量。

#### 1.2.3 油莎豆加载方位的确定

将油莎豆样品放在三维坐标系中,定义油莎豆的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴方向。根据油莎豆的形状,将平行于芽眼连线方向作为长度,定为 $X$ 向,宽度定为 $Y$ 向,厚度定为 $Z$ 向<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.4 油莎豆剪切特性测定

利用物性分析仪测定油莎豆破坏力、硬度和破坏能。测定参数:测试前速度2.00 mm/s,测试后速度5.00 mm/s,剪切刀片为A/ECB,剪切平台为HDP/90,触发模式为Auto,触发力5.0 g。具体操作:将油莎豆颗粒固定到平台中心进行单轴剪切,剪切刀片与样品呈90°,且每次都放在平台的同一个位置,使剪切刀片作用在样品中间部位,调整测试中速度进行剪切,获取剪切力-位移曲线。利用物性分析软件(Exponent Version 6.1.16.0)对油莎豆剪切力-位移曲线进行分析,获取破坏力、硬度和破坏能数据<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.5 数据统计分析

所有结果为至少3次平行试验的平均值,试验结果用Microsoft Office Excel-2016进行处理,采用Origin-2019b(9.65)软件绘图,采用SPSS Statistics 24.0软件和邓肯检验对数据进行显著性分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 油莎豆剪切特性分析

#### 2.1.1 脱皮对油莎豆剪切特性的影响

在油莎豆的粒径等级为B级、加载速率(测试中速度)为0.1 mm/s、加载方位为 $Z$ 轴、水分含量为10%的条件下,考察脱皮处理对油莎豆剪切特性的影响,结果见图1。

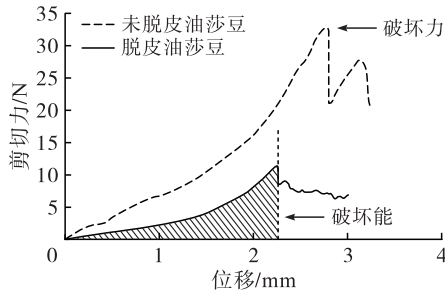


图1 典型的未脱皮和脱皮油莎豆剪切力-位移曲线

由图1可以看出,未脱皮和脱皮油莎豆剪切力与位移之间均呈非线性关系,剪切力随位移呈指数增加,直至破裂。相似的结果也存在于脱绒包衣棉花种子中<sup>[15]</sup>。

相较于脱皮油莎豆,未脱皮油莎豆的剪切力-位移曲线呈现更多的波动,这主要是由油莎豆表皮组织不均匀所致。此外,未脱皮油莎豆的破坏力明显大于脱皮油莎豆的,说明未脱皮油莎豆抵抗剪切的能力高于脱皮油莎豆。因此,在压榨制油前对油莎豆进行脱皮处理,有助于提升加工效率、降低能耗和机械磨损。

### 2.1.2 水分含量对油莎豆剪切特性的影响

在油莎豆的粒径等级为B级、加载速率为0.1 mm/s、加载方位为Z轴的条件下,考察水分含量对油莎豆剪切特性的影响,结果见表1。

表1 不同水分含量下油莎豆的剪切力学特性

原料	水分含量/%	破坏力/N	硬度/(N/mm)	破坏能/mJ
未脱皮油莎豆	10	37.47 ± 3.51 <sup>a</sup>	14.20 ± 2.43 <sup>a</sup>	44.12 ± 2.84 <sup>a</sup>
	15	32.72 ± 0.73 <sup>b</sup>	11.14 ± 1.16 <sup>b</sup>	39.39 ± 3.16 <sup>ab</sup>
	20	28.44 ± 0.10 <sup>c</sup>	9.97 ± 0.45 <sup>b</sup>	31.25 ± 1.36 <sup>c</sup>
	25	26.87 ± 2.70 <sup>c</sup>	9.61 ± 1.06 <sup>b</sup>	28.57 ± 2.03 <sup>c</sup>
脱皮油莎豆	10	11.19 ± 0.40 <sup>a</sup>	4.68 ± 0.19 <sup>a</sup>	11.09 ± 2.79 <sup>a</sup>
	15	9.17 ± 0.82 <sup>b</sup>	4.00 ± 0.47 <sup>b</sup>	6.71 ± 0.96 <sup>b</sup>
	20	8.83 ± 0.69 <sup>b</sup>	3.55 ± 0.49 <sup>b</sup>	6.07 ± 0.50 <sup>bc</sup>
	25	6.18 ± 1.12 <sup>c</sup>	2.76 ± 0.34 <sup>c</sup>	4.03 ± 0.89 <sup>c</sup>

注:同一原料同列数据不同字母表示有显著性差异( $p < 0.05$ )。下同

由表1可知,水分含量对油莎豆破坏力、硬度和破坏能影响显著。在水分含量由10%增加到25%时,油莎豆的破坏力、硬度和破坏能均呈现降低的趋势。这可能与油莎豆的内部组织结构有关,水分含量较低时,细胞的平均空隙面积和最大空隙面积较小,细胞紧密皱缩排列,抗剪切能力提高,硬度较大,破坏力和破坏能较高;水分含量较高时,油莎豆细胞

水分含量高,籽粒软化,硬度降低,抗剪切能力变弱<sup>[16]</sup>,破坏力和破坏能降低。刘明国等<sup>[17]</sup>研究玉米籽粒的剪切性能时发现的剪切力随水分的变化规律与本文的变化规律一致。

对油莎豆的剪切力学特性与水分含量之间的关系进行拟合,得到的拟合方程及相关系数( $R^2$ )见表2。

表2 剪切力学特性与水分含量之间的拟合方程及相关系数

原料	剪切力学特性	拟合方程	$R^2$	残差平方和
未脱皮油莎豆	破坏力	$y = -0.72x + 44.01$	0.959	2.791
	硬度	$y = -0.30x + 16.47$	0.856	1.883
	破坏能	$y = -1.10x + 55.01$	0.968	4.979
脱皮油莎豆	破坏力	$y = -0.31x + 14.22$	0.929	0.900
	硬度	$y = -0.12x + 5.92$	0.990	0.019
	破坏能	$y = -0.44x + 14.62$	0.899	2.684

由表2可知,所有力学性能指标与水分含量之间的相关系数均大于0.85,表明各回归方程拟合程度良好。剪切力作用下,未脱皮和脱皮油莎豆的力学性能参数(破坏力、硬度和破坏能)均与水分含量呈负线性关系。

### 2.1.3 加载速率对油莎豆剪切特性的影响

在油莎豆的粒径等级为B级、水分含量为10%、加载方位为Z轴的条件下,考察加载速率对油莎豆剪切特性的影响,结果见表3。

表3 不同加载速率下油莎豆的剪切力学特性

原料	加载速率/(mm/s)	破坏力/N	硬度/(N/mm)	破坏能/mJ
未脱皮油莎豆	0.1	37.47 ± 3.51 <sup>b</sup>	14.20 ± 2.43 <sup>b</sup>	44.12 ± 2.84 <sup>b</sup>
	0.3	45.81 ± 5.24 <sup>a</sup>	18.26 ± 2.07 <sup>a</sup>	49.06 ± 2.19 <sup>a</sup>
	0.5	35.10 ± 1.66 <sup>b</sup>	13.83 ± 0.94 <sup>b</sup>	42.07 ± 2.43 <sup>b</sup>
脱皮油莎豆	0.1	11.19 ± 0.40 <sup>a</sup>	4.68 ± 0.19 <sup>a</sup>	11.09 ± 2.79 <sup>a</sup>
	0.3	12.55 ± 3.14 <sup>a</sup>	5.42 ± 2.45 <sup>a</sup>	13.01 ± 2.53 <sup>a</sup>
	0.5	9.60 ± 1.56 <sup>a</sup>	4.56 ± 1.08 <sup>a</sup>	9.31 ± 1.26 <sup>a</sup>

由表3可知,当加载速率从0.1 mm/s增加到0.5 mm/s时,未脱皮和脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能均先增加后减小,但不同加载速率下脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能没有显著差异。在加载速率为0.3 mm/s时,油莎豆的破坏力、硬度和破坏能最大,不易被剪切。张梦月等<sup>[18]</sup>在对整块芋头进行剪切特性分析时发现了相似的变化规律。这可能是由于油莎豆在较低的加载速率下有足够的应力松弛时间,导致籽粒更容易被剪切<sup>[19]</sup>;然而加载速率过大,所具备的动能更大,剪切试验时会有更多

的动能转化为剪切油莎豆所需要的机械能,因此剪切刀片的加载速率越快,籽粒越容易被剪切<sup>[20]</sup>。Zhao等<sup>[19]</sup>研究发现随着加载速率的增加,燕麦仁的硬度变化不显著,与本研究中脱皮油莎豆的硬度变化结果一致。

#### 2.1.4 加载方位对油莎豆剪切特性的影响

在油莎豆的粒径等级为B级、加载速率为0.1 mm/s、水分含量为10%的条件下,考察加载方位对油莎豆剪切特性的影响,结果见表4。

表4 不同加载方位下油莎豆的剪切力学特性

原料	加载方位	破坏力/N	硬度/(N/mm)	破坏能/mJ
未脱皮油莎豆	X轴	36.38 ± 2.48 <sup>a</sup>	11.71 ± 1.58 <sup>ab</sup>	59.78 ± 2.95 <sup>a</sup>
	Y轴	29.98 ± 2.34 <sup>b</sup>	9.56 ± 1.46 <sup>b</sup>	47.41 ± 3.59 <sup>b</sup>
	Z轴	37.47 ± 3.51 <sup>a</sup>	14.20 ± 2.61 <sup>a</sup>	44.12 ± 2.84 <sup>b</sup>
脱皮油莎豆	X轴	16.41 ± 3.14 <sup>a</sup>	6.45 ± 1.39 <sup>a</sup>	16.67 ± 5.01 <sup>a</sup>
	Y轴	10.89 ± 0.73 <sup>b</sup>	3.72 ± 0.31 <sup>b</sup>	11.93 ± 2.39 <sup>a</sup>
	Z轴	11.19 ± 0.40 <sup>b</sup>	4.68 ± 0.19 <sup>b</sup>	11.09 ± 2.79 <sup>a</sup>

由表4可知,未脱皮油莎豆在各加载方位上所能承受的破坏力均远大于脱皮油莎豆,推测油莎豆表皮可以有效保护油莎豆,减少油莎豆遭受剪切损伤。未脱皮油莎豆的破坏力和硬度均表现为Z轴 > X轴 > Y轴。脱皮油莎豆在X轴方向具有更大的破坏力和硬度,其次是Z轴,最后是Y轴,这可能与油莎豆自身组织结构特点有关。值得注意的是,无论是未脱皮油莎豆还是脱皮油莎豆,加载方位对其破坏能的影响具有相同的规律,即X轴最大,Y轴次之,Z轴最小。

这可能与油莎豆内部组织细胞排列的数量有关,具体原因还需进一步探究。邱述金等<sup>[21]</sup>在对裸燕麦籽粒进行研究时同样发现,物料所表现出的剪切力学性能与加载方位有关。

#### 2.1.5 粒径等级对油莎豆剪切特性的影响

在加载方位为Z轴、水分含量为10%、加载速率为0.1 mm/s的条件下,考察粒径等级对油莎豆剪切特性的影响,结果见表5。

表5 不同粒径等级下油莎豆的剪切力学特性

原料	粒径等级	破坏力/N	硬度/(N/mm)	破坏能/mJ
未脱皮油莎豆	A	41.11 ± 2.52 <sup>a</sup>	16.69 ± 4.24 <sup>a</sup>	58.33 ± 8.44 <sup>a</sup>
	B	37.47 ± 3.51 <sup>a</sup>	14.20 ± 2.43 <sup>bc</sup>	44.12 ± 2.84 <sup>b</sup>
	C	22.67 ± 3.19 <sup>b</sup>	9.99 ± 1.45 <sup>c</sup>	33.27 ± 4.00 <sup>c</sup>
脱皮油莎豆	A	16.18 ± 0.78 <sup>a</sup>	6.29 ± 0.58 <sup>a</sup>	15.44 ± 2.24 <sup>a</sup>
	B	11.19 ± 0.40 <sup>b</sup>	4.68 ± 0.19 <sup>b</sup>	11.09 ± 2.79 <sup>b</sup>
	C	7.74 ± 1.19 <sup>c</sup>	4.10 ± 0.46 <sup>b</sup>	6.68 ± 1.67 <sup>c</sup>

由表5可知,相同粒径等级的未脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能远大于脱皮油莎豆的,说明油莎豆的抗剪切能力是由外部表皮和内部豆仁大小共同决定的。此外,未脱皮和脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能均随油莎豆粒径的减小而降低。这可能是由于油莎豆粒径越小,剪切刀片切割的面积就越小,剪切力就越集中,油莎豆就越容易被剪切<sup>[22]</sup>。

### 3 结论

本研究对未脱皮和脱皮油莎豆进行单轴剪切试验,分析了水分含量、加载方位、加载速率和粒径等级对未脱皮和脱皮油莎豆剪切特性的影响规律。结果表明:水分含量、加载速率、加载方位和粒径等级对未脱皮和脱皮油莎豆破坏力、硬度和破坏能影响显著。水分含量为10%、加载速率为0.3 mm/s时油莎豆不易被剪切,加载方位为X轴的脱皮油莎豆和加载方位为Z轴的未脱皮油莎豆不易被剪切。此外,脱皮油莎豆的破坏力、硬度和破坏能显著低于未脱皮油莎豆的,即脱皮油莎豆的抗剪切能力低于未脱皮油莎豆。研究结果可为油莎豆压榨制油破碎设备及工艺的选择提供参考。

### 参考文献:

- [1] ADEL A A M, AWAD A M, MOHAMED H H, et al. Chemical composition, physicochemical properties and fatty acid profile of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) seed oil as affected by different preparation methods[J]. *Int Food Res J*, 2015, 22(5): 1931-1938.
- [2] 瞿萍梅,程治英,龙春林,等.油莎豆资源的综合开发利用[J].*中国油脂*,2007,32(9):61-63.
- [3] ELENA S Z, JUANA F L, JOSÉ ANGEL P A. Tiger nut (*Cyperus esculentus*) commercialization: health aspects, composition, properties, and food applications [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2012, 11(4): 366-377.
- [4] 陈鹏泉,郭平平,杨帆,等.不同干燥工艺下脱皮油莎豆干燥特性及品质研究[J].*中国油料作物学报*,2022,44(5):1117-1122.
- [5] 贾会杰,李晓丹,张振山.脱皮对油莎豆压缩特性的影响[J].*中国油脂*,2022,47(10):137-142.
- [6] 连四超,刘玉兰,朱文学,等.油莎豆脱皮和榨油条件对其工艺效果的影响[J].*中国油脂*,2021,46(12):6-10.
- [7] 姚占斌,相海,张晔,等.油莎豆低温压榨单螺杆榨油机的设计与试验研究[J].*中国油脂*,2020,45(5):132-137.
- [8] AGUILAR N, ALBANELL E, MIÑARRO B, et al. Effect of tiger nut - derived products in gluten - free batter and bread [J]. *Food Sci Technol Int*, 2014, 21(5): 323-331.
- [9] OCLOO F C K, OKYERE A A, ASARE I K. Physicochemical, functional and pasting properties of flour produced from gamma irradiated tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) [J]. *Radiat Phys Chem*, 2014, 103: 9-15.
- [10] 王小媛,马宝晨,赵光远,等.油莎豆粉对馒头品质特性的影响[J].*食品工业*,2019,40(7):132-136.
- [11] 何勋,吕严柳,王万章,等.不同含水率对油莎豆物理特性及力学特性的影响[J].*中国农机化学报*,2022,43(1):80-85.
- [12] 杨作梅,孙静鑫,郭玉明.不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J].*农业工程学报*,2015,31(23):253-260.
- [13] PARKER M L, NG A, SMITH A C, et al. Esterified phenolics of the cell walls of Chufa (*Cyperus esculentus* L.) tubers and their role in texture [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(12):6284-6291.
- [14] 潘周光.茶叶梗茎剪切特性与嫩度关系的试验研究[J].*茶叶科学*,2008(6):425-428.
- [15] 胡梦杰,周勇,汤智超,等.脱绒包衣棉花种子的力学特性[J].*安徽农业大学学报*,2018,45(1):175-180.
- [16] 孙志江,衣淑娟,陶桂香,等.马铃薯切块机剪切力学特性试验[J].*农机化研究*,2020,42(5):171-175.
- [17] 刘明国,李心平,张永丽.种子玉米籽粒剪切损伤试验与分析[J].*农业科技与装备*,2013(7):22-25.
- [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] ZHAO N, FU N, LI D, et al. Study on mechanical properties for shearing breakage of oat kernel [J]. *Int J Food Eng*, 2018, 14(2): 1-9.
- [20] 滕悦江,金诚谦,印祥,等.大豆脱粒过程籽粒力学特性试验研究[J].*农机化研究*,2020,42(12):121-128.
- [21] 邱述金,李霖霖,崔清亮,等.裸燕麦籽粒剪切特性研究[J].*中国农机化学报*,2021,42(6):67-71.
- [22] 黄小娜,张卫国,张昆昆,等.荞麦籽粒的压缩和剪切力学特性研究[J].*农机化研究*,2021,43(5):168-177.