

王君, 孙建超, 季明仁, 等. 纵式轴流油莎豆脱粒分离装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 195–206.

WANG Jun, SUN Jianchao, JI Mingren, et al. Design and testing of a longitudinal axial flow cyperus esculentus threshing and separating device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 195–206.

纵式轴流油莎豆脱粒分离装置设计与试验

王君, 孙建超, 季明仁, 丁尘磊, 陈天增, 陈晓明

(吉林农业大学 工程技术学院, 长春 130118)

摘要:为了解决油莎豆收获过程中破损率高、脱净率低等问题,结合现有的农作物脱粒分离装置的特点,设计了一款纵式轴流油莎豆脱粒分离装置。对该装置的脱粒滚筒、螺旋喂入头、凹版筛等关键部件进行了设计。对脱粒滚筒进行应力和模态分析,确定设计的合理性,并通过试验确定了影响脱粒性能的主要因素,利用搭建的纵式轴流油莎豆脱粒分离试验台进行单因素试验,得到了脱粒分离性能较好的滚筒转速及脱粒间隙的变化范围。以滚筒转速、脱粒间隙和脱粒元件材料为试验因素,以籽粒破损率、未脱净率为指标进行三因素三水平正交试验。结果表明:对籽粒破损率和未脱净率影响由大到小均为滚筒转速、脱粒间隙、脱粒元件材料;最优工作参数组合为转速 $367.55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、脱粒间隙 4.18 mm ,脱粒元件为聚氨酯橡胶,此时的未脱净率为 0.751% ,破损率为 0.906% 。对该组合进行试验验证,各指标符合国家相关标准要求。

关键词:油莎豆;脱粒分离装置;破损率;脱净率

中图分类号:S225

文章编号:1000-1700(2024)02-0195-12

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Experimental Study on Longitudinal Axial Flow Threshing and Separating Device for *Cyperus esculentus*

WANG Jun, SUN Jianchao, JI Mingren, DING Chenlei, CHEN Tianzeng, CHEN Xiaoming

(College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to solve the problems of high damage rate and low underthreshing rate during the harvesting process of oil *Cyperus esculentus*, a threshing and separating device for *Cyperus esculentus* was designed. The key components of the device, such as the threshing drum, the feeding auger, the concave, etc., were designed. Stress and modal analysis were conducted on the threshing drum to determine the rationality of the design. The main factors affecting the threshing performance were determined through experiments. The single-factor test was carried out using the *Cyperus esculentus* threshing and separation test bed constructed to obtain the variation range of drum rotational speed and threshing gap with better threshing and separation performance. A three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted with drum speed, threshing gap and threshing element material as experimental factors, and seed damage rate and underthreshing rate as indicators. The results show that the greatest to least influence of the factors on the seed damage rate and the underthreshing rate of uncleaned are drum speed, threshing gap, threshing element material; the optimal parameter combination is rotational speed of $367.55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, threshing gap of 4.18 mm , and the material of threshing element is polyurethane rubber, then the underthreshing rate is 0.751% , and the damage rate is 0.906% . The combination was tested and verified, and the indicators met the requirements of the relevant standards.

Key words: *Cyperus esculentus*; threshing and separating device; damage rate; underthreshing rate

收稿日期:2023-10-30

基金项目:吉林省教育厅“十四五”科学研究项目(JJKH20230388KJ)

第一作者:王君(1980-),女,博士,讲师,从事智能农业装备研究,E-mail:wangjun2019@jlau.edu.cn

通信作者:陈晓明(1985-),男,硕士,副教授,从事智能农业装备研究,E-mail:xiaomingc@jlau.edu.cn

油莎豆是原产于非洲及地中海沿岸国家的一种草本植物^[1],是集油、粮、牧、饲、绿化观赏于一体的新型经济作物,我国华南、东北、西北等地区都有大面积推广种植^[2-3]。油莎豆块茎中含油量为20%~36%^[4-5],每公顷油莎豆可产1.2~1.8 t油脂,其单位面积油脂产量是大豆的4倍,油菜的2倍,花生的1.5倍,是重要的油料经济作物^[6-12]。2021年我国压榨油共计 3.708×10^7 t,其中高达70%的植物油需要进口,要想攥紧“油瓶子”,进一步提高我国食用油的自给率,大力发展油莎豆产业是重要举措。

机械化收获是油莎豆产业大规模发展的基础。国外对于油莎豆的种植较早,油莎豆的收获机械主要以单滚筒或双滚筒的牵引式油莎豆收获机为主,这种类型的收获机在收获时将油莎豆、土、根茎的混合物输送到收获机的后端进行脱粒分离、清选、输送等步骤^[13-14],收获的含杂率比较高,且设计机体庞大,不适合小块的田间作业。相对于国外,我国的油莎豆收获机械研制起步较晚,大都处于试验研究阶段,并没有大规模投入生产。目前,我国的油莎豆收获机都是在马铃薯、花生、中药材等块茎类收获机的基础上改进而来^[15-18],导致油莎豆收获过程中存在破损率大、收获效率低等问题。

为解决我国油莎豆收获设备落后、油莎豆在收获过程的破损率高、脱净率低的问题,本研究设计一种纵式轴流油莎豆脱粒分离装置,通过仿真软件分析证明脱粒滚筒在工作过程中的可靠性与稳定性,并通过单因素试验与正交试验,获得各影响因素与脱粒性能的变化规律,得出脱粒装置最优工作参数。该装置可实现对收获期油莎豆植株全喂入时的豆粒脱粒处理,脱粒的破损率低,脱净率高,为后续油莎豆联合收获机研发奠定基础。

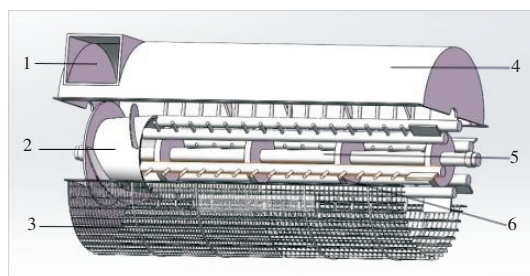
1 脱粒装置结构和工作原理

1.1 脱粒装置结构

纵式轴流油莎豆脱粒分离装置由上盖板、导流板、螺旋喂入头、脱粒滚筒、凹板筛等组成,整体结构如图1。

1.2 工作原理

工作时,滚筒做高速运动,油莎豆、油莎草、沙土混合物由喂料口喂入,经螺旋喂入头进入脱粒滚筒内,在螺旋滚筒及钉齿的作用下进行分离并轴向运动。豆、草、土混合物通过钉齿与凹板筛之间揉搓、冲击、挤压作用下进行分离,被分离的土由细凹板筛筛出,油莎草经过排草板排出滚筒,油莎豆则经过粗凹板筛的筛分被收集。



1. 喂入口;2. 螺旋喂入头;3. 凹板筛;4. 上盖板;5. 螺旋滚筒;6. 钉齿
1. Feed inlet; 2. Feeding auger; 3. Concave;
4. Top cover; 5. Spiral drum; 6. Spike

图1 纵式轴流油莎豆脱粒分离装置结构简图
Figure 1 Structure diagram of longitudinal axial flow threshing and separating device for *Cyperus esculentus*

2 关键部件设计

2.1 脱粒滚筒的设计

脱粒滚筒是脱粒装置的关键部件,起到主要的脱粒作用,其作业的效果直接决定装置脱粒性能的好坏。为了防止滚筒缠草,滚筒的齿根圆直径最低要求是齿根圆的周长应比平均草茎长度值大,即:

$$\pi D_{\text{根}} \geq L_{\text{株}} \quad (1)$$

式中: $D_{\text{根}}$ 为齿根圆直径(mm);收获机中通常取值200~400 mm; $L_{\text{株}}$ 为平均草茎长度(mm)。

脱粒滚筒的齿顶圆直径计算:

$$D_{\text{顶}} = D_{\text{根}} + 2h_{\text{齿}} \quad (2)$$

式中: $D_{\text{顶}}$ 为齿顶圆直径(mm); $h_{\text{齿}}$ 为脱粒齿高度,取75 mm。

脱粒滚筒的长度对于作物的脱净率与破损率也至关重要,滚筒长度过长,脱净率高,但破损率也会随之增加,综合考虑脱粒滚筒的长度。其计算公式为:

$$L \geq \frac{q_0}{q_{01}} \quad (3)$$

式中: L 为脱粒滚筒长度(mm); q_0 为喂入量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); q_{01} 为单位长度允许承担的喂入量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。

其中油莎草加上根系平均高度取 300 mm,并且参考谷物联合收获机的脱粒滚筒的通常取值范围齿根圆直径 $D_{根}$ 为 320 mm,将脱粒齿高度带入式(3)中,可得齿顶圆直径 $D_{顶}$ 为 470 mm。油莎豆脱粒需要将油莎草、沙土一同放入脱粒滚筒内,其喂入量 q_0 可达到 $6\sim 8\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,单位长度允许承担的喂入量 q_{01} 为 $5\sim 6\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,可得脱粒滚筒长度为 1 200~1 350 mm,综合考虑脱粒滚筒长度取 1 350 mm。

脱粒齿杆的数量 N 与滚筒直径 D 有关,当 $D\leq 450\text{ mm}$ 时, $N=6$; $D=500\sim 550\text{ mm}$ 时, $N=8$; $D\geq 600\text{ mm}$ 时, $N=10$,根据本研究的滚筒直径,取 $N=6$ 。脱粒滚筒整体结构如图 2。

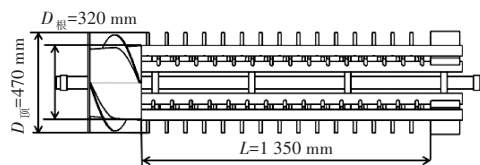


图 2 脱粒滚筒结构图

Figure 2 Threshing drum structure diagram

2.2 上盖板与导流板的设计

导流板对脱粒分离的作物起到导向输送的作用,其螺旋升角的大小会直接影响作物沿轴向的流动速度,从而影响脱粒分离的效率。当导流板的螺旋升角较大时,作物沿轴向的流动速度也越快,作物的脱粒分离时间较短,脱粒速度会提升,但脱粒时间不充分,脱净率低。当导流板的螺旋升角比较小时,作物沿轴向的流动速度慢,作物脱粒分离时间长,脱净率高,但会使破损率增加,并且会增加一定的能耗。根据文献查得上盖板的第一块导流板需高过整个喂入口^[19],由于本滚筒头部设计有螺旋喂入头起到推进作用故无需经过喂料口,根据计算导流板螺旋升角 β ,可由式(4)得出。

$$\beta = \arctan \left[\frac{A}{(\theta/360^\circ)\pi D} \right] \quad (4)$$

式中: β 为导流板螺旋升角($^\circ$); A 为喂料口宽度(mm); θ 为导流板对应滚筒的圆周角($^\circ$); D 为滚筒直径(mm)。

其中,喂入口宽度 A 为了防止油莎豆、油莎草、沙土等在此处堵塞,喂入口的宽度至少大于油莎草长度,故 A 取值 300 mm,导流板对应圆周角 θ 取 180° ,根据式(4)计算可得出 β 约为 22.2° ,导流板高度设置为 40 mm。上盖板结构如图 3。

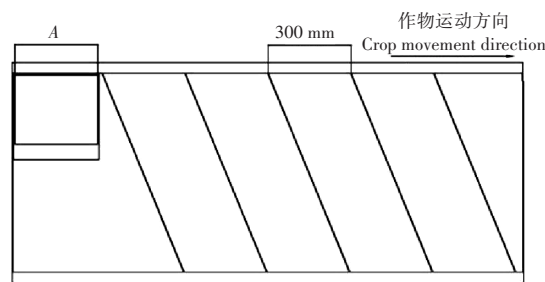


图 3 上盖板结构图

Figure 3 Structure diagram of top cover

2.3 螺旋喂入头的设计

螺旋喂入装置主要由锥台滚筒和螺旋叶片组成,螺旋喂入头结构如图 4,螺旋叶片的展开图如图 5。在设计螺旋喂入头的参数时,考虑避免油莎草缠绕在螺旋叶片上,喂入的圆台周长大于作物的

平均株高,所得式(5),且螺旋喂入头的长度应占整个滚筒长度的 $\frac{1}{7} - \frac{1}{5}$ 。

$$\pi D_{圆台} \geq L_{株} \quad (5)$$

式中: $D_{圆台}$ 为螺旋喂入头圆台直径(mm); $L_{株}$ 为作物平均株高(mm)。

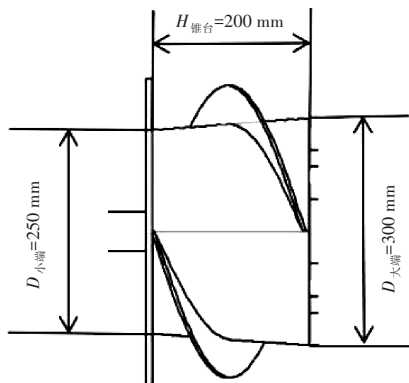


图 4 螺旋喂入头结构图

Figure 4 Structure diagram of feeding auger

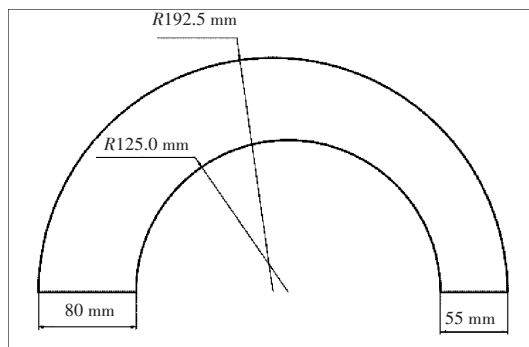


图 5 螺旋叶片展开图

Figure 5 Unfolded view of spiral vane

油莎豆的平均株高大概在300 mm,所以 $D_{\text{圆台}} \geq 95.54$ mm;锥台大端直径为300 mm,小端直径为250 mm,锥台高度为200 mm,计算后螺旋叶片的螺距为466 mm。

2.4 脱粒齿的设计

由于油莎豆、油莎草、沙土抱团的因素,脱粒齿选择具有较好的梳刷和抓取能力的钉齿,钉齿的排列方式是以螺旋线排布,以达到更好的轴流效果,其排布展开如图6。根据文献^[20],脱粒滚筒长度与脱粒齿数 n 存在以下关系。

$$n = \frac{K(L - L_1)}{\mu} \quad (6)$$

式中: n 为脱粒齿数量; K 为螺旋头数; L 为滚筒长度(mm); L_1 为端部杆齿距幅盘端部的距离,本脱粒装置中取75 mm; μ 为齿迹距(cm)。

一般杆齿式脱粒滚筒 K 值取2~5之间,其 K 值越大滚筒的脱粒能力越强。综合分析本研究取 K 值为2,式中的 μ 一般取值范围为25~50 cm,滚筒长度已知,通过式(6)计算脱粒齿数量 $n=82$ 。

2.5 凹板筛的结构与参数

凹板筛是脱粒装置内分离作物、草茎、沙土的重要部件,当油莎豆经过滚筒脱粒分离时,油莎豆根茎土混合物首先经过细凹板筛将沙土分离开,油莎豆则在脱粒滚筒后半段进行筛分,最后油莎草由排草口排出。目前凹板筛的形式有很多种:冲孔式凹板筛、栅格式凹板筛、编织式凹板筛等^[21-22]。其中,冲孔式凹板筛结构简单,耐磨损,但漏筛率较低。栅格式凹板筛强度高,刚性好,分离效果显著。编织式凹板筛漏筛率最好,但强度低,易磨损,易变形。因此,本设计选择栅格式凹板筛。

一般凹板筛的筛分效果与筛分面积有关,筛分面积越大,分离效果越好。包角越大筛分面积就越大,但包角越大,安装越困难,其次当包角超过 180° 时其分离增益效果不明显,所以将凹板筛的包角控制在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间。为了扩大脱粒间隙调节范围将凹板筛包角设定为 170° ,凹板筛的筛长为1400 mm,筛孔规格为 $30 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ (图7)。

钉齿顶部与凹板筛之间的间隙对脱粒效率与脱净率有决定性影响。本装置设计了专用的螺栓连接调节钉齿顶部与凹板筛之间的间隙。由螺栓连接凹板筛和上盖板,调节螺母上旋、下旋即可调节脱粒间隙,其实物结构如图8。由于油莎豆为新型农作物,结合油莎豆大小和小麦、玉米等作物的脱粒间隙,将对油莎豆的脱粒间隙调整为20~50 mm。

3 脱粒滚筒的有限元分析

为了验证脱粒滚筒在工作过程中的可靠性与稳定性,利用SOLIDWORKS软件建立了脱粒滚筒的三维模型,并利用ANSYS软件对脱粒滚筒的应力和模态进行了分析。

3.1 脱粒滚筒的应力分析

脱粒滚筒的材料是45#钢,其材料配置如表1,应力分析结果如图9。由图9可知,油莎豆脱粒滚筒在工作过程中,主要变形发生在滚筒中间部位,平均变形尺寸为 1.9592×10^{-5} mm,变形最大的是在滚筒中间部位的钉齿端和齿杆与幅盘的连接位置,其最大变形尺寸为 3.5909×10^{-5} mm。在外部载荷作

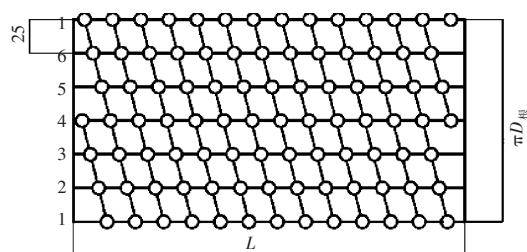


图6 钉齿双螺旋排布展开图

Figure 6 Unfolded view of double spiral arrangement of spikes

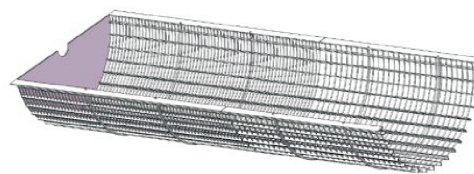


图7 凹板筛结构设计图

Figure 7 Structure design of concave sieve



图8 脱粒间隙调节机构

Figure 8 Threshing gap adjustment mechanism

用下,脱粒滚筒其平均受力大小为 0.95 MPa,受力最大的是在齿杆与幅盘的连接位置,最大受力为 14.653 MPa。最大变形尺寸与应力大小都是在脱粒滚筒最大载荷下得出,最大变形为 0.000 019 5 mm,变形量非常小,不影响脱粒滚筒的正常工作。滚筒所受的最大应力为 14.65 MPa,处在脱粒齿杆与幅盘的连接处,这正是主要工作部件力传递的薄弱连接部位。选用的材料 45 钢其屈服强度与抗拉强度可达到大于等于 355 MPa 和 600 MPa,远远满足使用要求。

表1 45钢材料参数

Table 1 Steel material parameters

材料 Material	密度/(kg·m ⁻³) Density	杨氏模量/GPa Young's modulus	泊松比 Poisson ratio	屈服强度/MPa Yield strength	抗拉强度/MPa Tensile strength
45#钢 45# steel	7 890	209 000	0.269	≥355	≥600

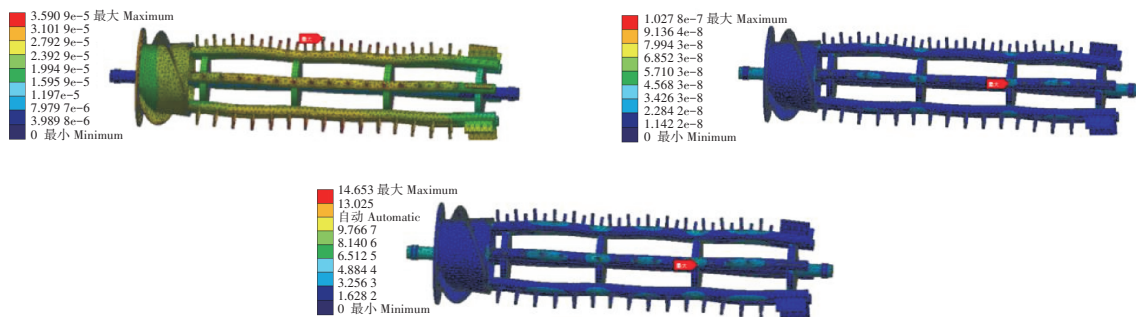


图 9 脱粒滚筒等效应力分析结果

Figure 9 Results of stress analysis of threshing drum

3.2 脱粒滚筒的模态分析

利用 ANSYS 软件对脱粒滚筒的前六阶振型结果进行分析,分析结果如图 10。

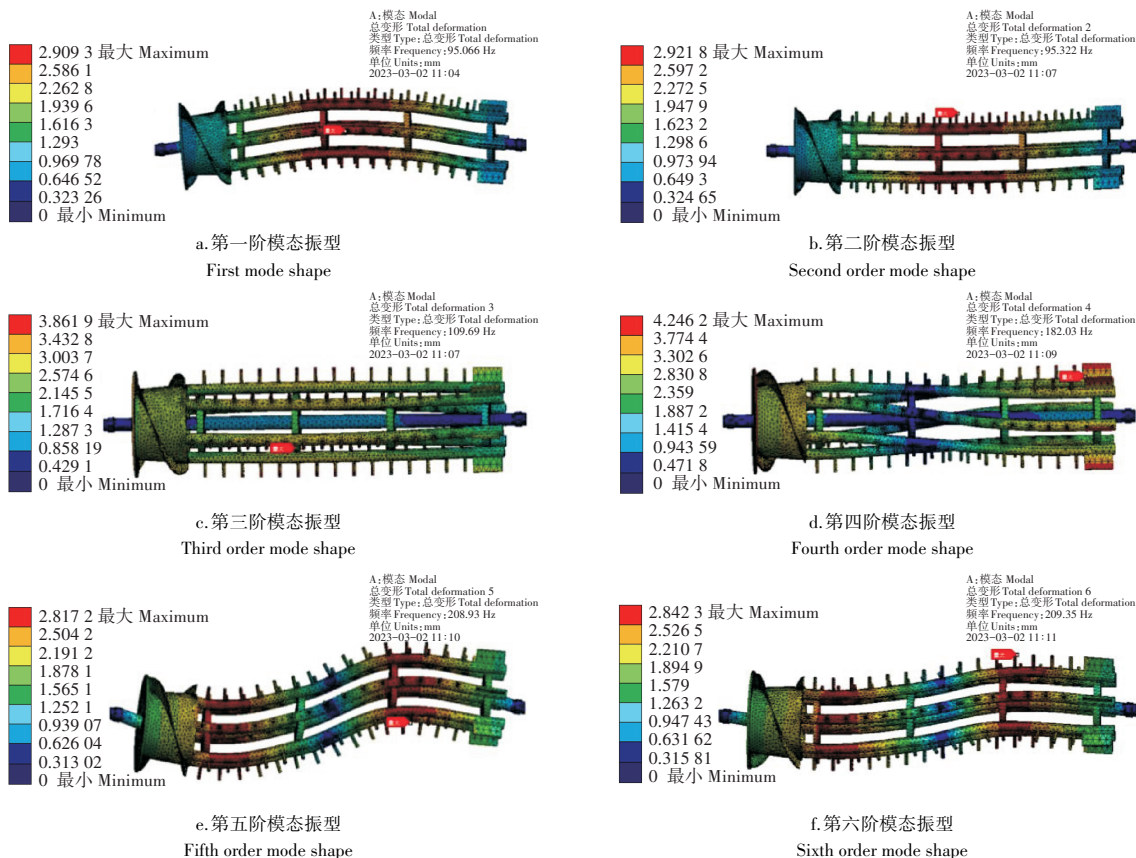


图10 脱粒滚筒模态振型

Figure 10 Modal of threshing drum

由图 10 分析结果得到脱粒滚筒在六阶模态下对应的固有频率和临界转速(表 2)。由表 2 可知,脱离滚筒最小临界转速是在第 1 阶,固有频率为 95.066 Hz 情况下,临界转速为 5 703.96 r·min⁻¹会产生共振。根据脱粒滚筒的工作转速设定为 280~360 r·min⁻¹,其转速值远远小于会产生共振的转速值。所以,即使脱粒滚筒在最大脱粒转速情况下也不会产生共振现象。

4 脱粒滚筒的验证试验

4.1 试验材料

油莎豆品种选用吉林农业大学东山试验田种植的圆粒品种“吉农 3 号”。对试验田的圆粒品种“吉农 3 号”三轴尺寸进行测量,长度主要集中在 14~15 mm,长度平均值为 14.36 mm;宽度主要集中在 13.5~14.5 mm,宽度平均值为 13.85 mm;高度主要集中在 13.5~14.5 mm,高度平均值为 13.77 mm。测量统计其与脱粒性能相关的主要物理特性参数(表 3)。

表 2 固有频率对应临界转速

Table 2 Inherent frequency corresponds to critical speed

阶数 Order	固有频率/Hz Natural frequency	临界转速/(r·min ⁻¹) Critical speed
1	95.066	5 703.96
2	95.322	5 719.32
3	109.69	6 581.4
4	182.03	10 921.8
5	208.93	12 535.8
6	209.35	12 561

表 3 试验材料参数

Table 3 Test material parameters

品种 Variety	平均高度/mm Average height	油莎豆 含水率/% <i>Cyperus</i> <i>esculentus</i> moisture content	油莎豆、草与 土壤比例 <i>Cyperus</i> <i>esculentus</i> to grass to soil ratio	土壤类型 Soil type	土壤含水率/% Soil moisture content	环境湿度/% Environment humidity	环境温度/°C Ambient temperature	油莎豆平均密 度/(g·cm ⁻³) Average density of <i>Cyperus</i> <i>esculentus</i>
吉农 3 号 Jinong 3	300	40	6.86:93.14	沙土 Sand	10.62	26	23	1.361

为了验证脱粒分离装置的使用性能,并且进行各项工作参数的优化,设计制造了纵式轴流油莎豆脱粒分离装置试验台(图 11、图 12)。该装置采用额定功率 3 kW,额定转速 1 870 r·min⁻¹型号为 Y100L-2 的三相异步电机通过皮带传动到皮带轮上,从而带动脱粒滚筒工作,试验过程如图 13 和图 14。



图 11 油莎豆脱粒分离装置内部结构图

Figure 11 Internal structure diagram of threshing and separating device for *Cyperus esculentus*



图 12 油莎豆脱粒分离装置整体图

Figure 12 Picture of threshing and separating device for *Cyperus esculentus*



图 13 三相异步电机驱动

Figure 13 Three-phase asynchronous motor drive



图 14 物料收集

Figure 14 Material collection

4.2 试验方法

纵式轴流油莎豆脱粒分离装置试验台目的在于考察脱粒性能,根据行业的评定标准规定^[21],衡量脱粒装置工作性能好坏的评价指标有脱净率、含杂率、破损率、断穗率等。选择籽粒破损率 Z 和未脱净率 S 为试验评价指标,未脱净率是脱出油莎草茎中未脱净的油莎豆的质量占未脱粒前油莎豆总质量的比值,破损率是指脱出油莎豆发生表皮擦伤、裂纹、变形、破碎的质量占未脱粒前油莎豆总质量的比值,其计算公式如下。

未脱净率计算公式:

$$Z_T(\%) = \frac{W_S}{W} \quad (7)$$

式中: Z_T 为籽粒未脱净率(%); W_S 为未脱出籽粒重量(g); W 为全部籽粒重量(g)。

破损率计算公式:

$$Z_P(\%) = \frac{W_P}{W} \quad (8)$$

式中: Z_P 为籽粒破损率(%); W_P 为破损籽粒重量(g)。

破碎的油莎豆会在油莎豆在存储的过程中发生变质,籽粒极易导致霉变、腐烂等危害现象的发生,严重影响了油莎豆籽粒的品质。图15为油莎豆籽粒的破碎情况。

4.3 试验因素

脱粒过程中影响油莎豆籽粒破碎的因素有籽粒含水率、滚筒转速、脱粒元件类型、脱粒间隙和喂入量等,选择收获期刚出土状态下含水率在35%~45%的油莎豆进行脱粒试验。根据试验地区脱粒作业的实际情况,确定试验台的喂入量为 $6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。选择脱粒滚筒、脱粒间隙与脱粒元件类型为试验因素。

脱粒滚筒是脱粒装置的主要工作部件,滚筒转速大小对脱粒质量的影响非常重要,滚筒转速较大,对作物的击打、梳刷能力强,脱净率与脱粒效率会得到大大提高,但同时,过大的冲击力与摩擦力会对作物籽粒产生损伤,破损率就会随之提高。当滚筒转速较小时,破损率会得到一定的保证,但会出现脱粒脱不干净及脱粒效率低的表现,甚至可能出现滚筒堵塞,损坏发动机的情况,所以适当的转速可以平衡脱净率、脱离效率与破损率之间的关系。

脱粒间隙是指脱粒元件顶部与凹板筛之间的间隙,在此间隙中物料会受到脱粒元件与凹板筛之间的挤压、摩擦等作用力,使作物籽粒与秸秆等杂物进行分离。当脱粒间隙较小时,脱粒元件与凹板筛之间的挤压空间小,作物会受到充分的挤压、搓擦作用,极大地提高了脱净率。但是由于脱粒空间小,作物受到的挤压力过大,破损率会大大提高,并且会有堵塞的情况发生。当脱粒间隙较大时,作物受到的挤压力小,脱粒元件与凹板筛之间甚至起不到挤压、搓擦的作用,只有脱粒元件对作物进行击打、梳刷,脱净率会大大降低。

4.4 单因素试验

图16为滚筒转速与脱粒间隙对脱粒性能的影响。由图16a和图16b可知,未脱净率随滚筒转速的增大而逐渐减小,破损率随着滚筒转速的增大而增大。未脱净率在滚筒转速为 $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时最大,为1.38%。当转速为 $260 \sim 320 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 区间下降趋势明显, $320 \sim 380 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 区间下降平缓。破损率在滚筒转速为 $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时最小,为0.67%。随着滚筒转速的增加,破损率也平缓增加,当转速超过 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,破损率曲线上升趋势明显。为了保证脱粒机有较低的破损率,同时还要有较好的脱净率,综合分



a.局部破损; b.轻度断裂; c.完全断裂; d.完全破碎
a.Partially damaged; b.Mild break; c.Completely break; d.Completely crushing

图15 油莎豆籽粒破碎情况

Figure 15 Darnage of *Cyperus esculentus* kernels

析当滚筒转速在 $350 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时有较好的工作性能。

由图 16c 和图 16d 可知,未脱净率随脱粒间隙的增大而上升,破损率随着脱粒间隙的增大而降低。未脱净率在脱粒间隙为 15 mm 时最小,为 0.58。当脱粒间隙在 15~25 mm 和 45~55 mm 区间内上升趋势明显,在 25~45 mm 区间内上升趋势平缓。破损率在脱粒间隙为 15 mm 时最大,为 1.62%。当脱粒间隙在 15~25 mm 和 45~55 mm 区间内破损率下降趋势平缓,在 25~45 mm 区间内的下降趋势较为显著。为了保证较低的破损率与较好的脱净率,将脱粒间隙控制在 40 mm 脱粒机会有较好的工作性能。

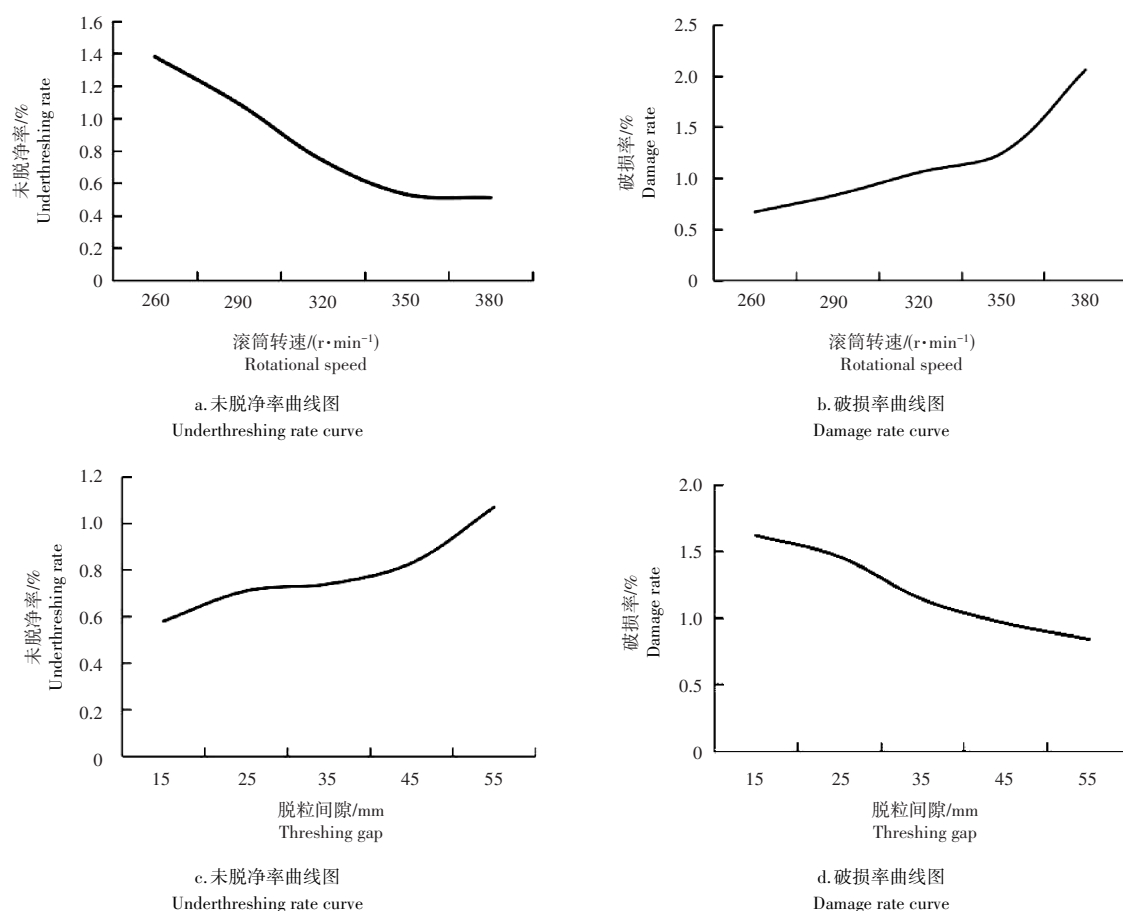


图16 不同因素对脱粒性能的影响

Figure 16 Influence of different factors on threshing performance

4.5 正交试验

通过上文单因素试验已经确定好的滚筒转速与脱粒间隙俩因素取值范围,再加上脱粒元件材料这一因素,以未脱净率与破损率为试验评价指标,进行三因素三水平的正交试验。滚筒转速取值为 330, 350, 370 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,脱粒间隙取值为 30, 40, 50 mm,脱粒元件材料选取为 45#钢、2 mm 聚氨酯橡胶套、2 mm PVC 软塑料套。为方便描述用 A、B、C 分别表示滚筒转速、脱粒间隙、脱粒元件材料三个因素,用 -1, 0, 1 分别表示因素的三个水平。列出正交试验因素水平表如表 4。

表4 正交试验因素水平

Table 4 Factor level table of orthogonal test

水平 Level	因素 Factor		
	滚筒转速 A/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ Drum speed	脱粒间隙 B/mm Threshing gap	脱粒元件材料 C Threshing element material
-1	330	30	45#钢 45#steel
0	350	40	PVC 软塑料 Polyvinyl chloride
1	370	50	聚氨酯橡胶 Polyurethane rubber

因素水平确定后选用合适的正交试验表进行试验,本试验为三因素三水平,利用试验数据处理软件 Design-Expert 13 生成三因素三水平,17次试验的正交试验,试验方案如表5。

表5 正交试验方案

Table 5 Orthogonal experimental plan

试验号 Test number	试验因素 Experimental factors		
	滚筒转速 A/(r·min ⁻¹) Drum speed	脱粒间隙 B/mm Threshing gap	脱粒元件材料 C Threshing element material
	1	0	0
2	0	1	-1
3	0	0	0
4	1	0	-1
5	0	-1	1
6	0	-1	-1
7	1	0	1
8	-1	-1	0
9	0	0	0
10	0	1	1
11	-1	0	1
12	0	0	0
13	0	0	0
14	-1	0	-1
15	1	-1	0
16	1	1	0
17	-1	1	0

4.6 试验结果与分析

方案确认后,根据试验方案的因素水平对照,有序进行试验,试验过程与单因素试验过程一致,并且以未脱净率与破损率两个指标对试验结果进行分析,试验结果如表6。

表6 试验结果

Table 6 Test result

试验号 Test number	试验因素 Experimental factors			试验指标 Test indicators	
	滚筒转速 A/(r·min ⁻¹) Drum speed	脱粒间隙 B/mm Threshing gap	脱粒元件材料 C Threshing element material	未脱净率/% Underthreshing rate	破损率/% Damage rate
	1	0	0	0	0.889
2	0	1	-1	0.863	0.968
3	0	0	0	0.880	0.987
4	1	0	-1	0.880	1.103
5	0	-1	1	0.853	0.928
6	0	-1	-1	0.733	1.074
7	1	0	1	1.026	1.013
8	-1	-1	0	0.711	0.828
9	0	0	0	0.895	0.973
10	0	1	1	0.991	0.868
11	-1	0	1	0.836	0.755
12	0	0	0	0.886	0.967
13	0	0	0	0.890	0.974
14	-1	0	-1	0.733	0.879
15	1	-1	0	0.881	1.108
16	1	1	0	1.039	1.010
17	-1	1	0	0.818	0.768

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行三因素三水平,二次回归正交分析,建立未脱净率值 Y_1 、破损率值 Y_2 ,对滚筒转速 A、脱粒间隙 B、脱粒元件材料 C 的 3 个自变量回归模型,回归方程为:

$$Y_1=0.89+0.091A+0.067B+0.062C+0.013AB+0.011AC+0.002BC-0.008A^2-0.017B^2-0.011C^2 \quad (9)$$

$$Y_2=0.973+0.126A+0.041B+0.058C+0.010AB+0.008AC+0.011BC-0.033A^2-0.011B^2-0.004C^2 \quad (10)$$

4.6.1 未脱净率方差分析 以未脱净率值 Y_1 为评价指标,以滚筒转速A、脱粒间隙B、脱粒元件材料C为试验因素,对试验结果进行方差分析,方差分析结果如表7。

表7 未脱净率回归方程方差分析结果

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square error	F	P	显著性 Significance
Model	0.136 337	9	0.015 149	218.603 7	<0.000 1	显著 Significantly
A-滚筒转速 Drum speed	0.066 385	1	0.066 385	957.973 5	<0.000 1	
B-脱粒间隙 Threshing gap	0.035 445	1	0.035 445	511.488 2	<0.000 1	
C-脱粒元件材料 Threshing element material	0.031 094	1	0.031 094	448.706 3	<0.000 1	
AB	0.000 657	1	0.000 657	9.475 761	0.017 859	
AC	0.000 452	1	0.000 452	6.516 347	0.037 953	
BC	1.91E-05	1	1.91E-05	0.276 212	0.615 427	
A ²	0.000 295	1	0.000 295	4.261 793	0.077 856	
B ²	0.001 28	1	0.001 28	18.475 29	0.003 574	
C ²	0.000 498	1	0.000 498	7.185 902	0.031 509	
残差 Residual	0.000 485	7	6.93E-05			
失拟项 Lack of fit	0.000 364	3	0.000 121	4.028 497	0.105 835	不显著 Insignificantly
纯误差 Pure error	0.000 121	4	3.02E-05			
总和 Sum	0.136 822	16				

由上述未脱净率回归方程方差分析可知,未脱净率值 Y_1 的模型显著性 $p<0.01$,失拟项 p 值为0.106($p>0.05$),影响不显著,回归模型拟合度高,具有研究意义。分析各因素的一次项、交互项和二次项的 p 值可知,一次项A、B、C的 $p<0.01$,影响显著。交互项AB、AC的 $p<0.05$,影响显著,BC的 $p>0.05$,影响不显著。二次项A²的 $p>0.05$,影响不显著,B²、C²的 $p<0.05$,影响显著。由表中的 F 值可以得出因素影响未脱净率主次顺序为:A>B>C,即:滚筒转速>脱粒元件材料>脱粒间隙。

去除未脱净率回归方程中的不显著项,优化后的回归方程为:

$$Y_2=0.973+0.126A+0.041B+0.058C+0.010AB+0.008AC-0.011B^2-0.004C^2 \quad (11)$$

4.6.2 破损率方差分析 以破损率值 Y_2 为评价指标,以滚筒转速A、脱粒间隙B、脱粒元件材料C为试验因素,对试验结果进行方差分析,方差分析结果如表8。

由上述破损率回归方程方差分析可知,破损率值 Y_2 的模型显著性 $p<0.01$,失拟项 p 值为0.339($p>0.05$),影响不显著,回归模型拟合度高,具有研究意义。分析各因素的一次项、交互项和二次项的 p 值可知,一次项A、B、C的 $p<0.01$,影响显著。交互项AB、AC的 $p>0.05$,影响不显著,BC的 $p<0.05$,影响显著。二次项A²、B²的 $p<0.05$,影响显著,C²的 $p>0.05$,影响不显著。由表中的 F 值可以得出因素影响破损率主次顺序为:A>C>B,即:滚筒转速>脱粒元件材料>脱粒间隙。

去除破损率回归方程中的不显著项,优化后的回归方程为:

$$Y_1=0.89+0.091A+0.067B+0.062C+0.002BC-0.008A^2-0.017B^2 \quad (12)$$

4.7 试验因素对评价指标的影响

脱粒滚筒的转速决定着油莎豆在脱粒过程中受到脱粒齿的打击的次数,脱粒齿对作物击打、梳刷次数多,作物受到的挤压、摩擦等作用力多,脱粒充分,未脱净率下降,破损率提高。脱粒间隙的大小决定凹板筛与脱粒齿之间的空隙的大小,脱粒间隙变大,脱粒齿与凹板筛之间的空隙变大,会使作物

表8 破损率回归方程方差分析结果

Table 8 Analysis of variance table for regression equation of damage rate

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square error	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性 Significance
Model	0.172 206	9	0.019 134	211.151 5	<0.000 1	显著 Significantly
A-滚筒转速 Drum speed	0.125 914	1	0.125 914	1 389.511	<0.000 1	
B-脱粒间隙 Threshing gap	0.013 122	1	0.013 122	144.806 3	<0.000 1	
C-脱粒元件材料 Threshing element material	0.026 479	1	0.026 479	292.203 3	<0.0001	
AB	0.0003 61	1	0.000 361	3.983 774	0.086 134	
AC	0.0002 85	1	0.000 285	3.142 498	0.119 562	
BC	0.0005 29	1	0.000 529	5.837 719	0.046 354	
A ²	0.004 695	1	0.004 695	51.81 485	0.000 178	
B ²	0.000 538	1	0.000 538	5.939 653	0.044 947	
C ²	2.41E-05	1	2.41E-05	0.266 245	0.621 755	
残差 Residual	0.000 634	7	9.06E-05			
失拟项 Lack of fit	0.000 338	3	0.000 113	1.516 276	0.339 442	不显著 Unsignificantly
纯误差 Pure error	0.000 297	4	7.42E-05			
总和 Sum	0.172 841	16				

受到的挤压、揉搓的作用力变小,使作物受到的作用力单一,脱粒不充分,未脱净率提高,破损率降低。脱粒齿的材料决定着脱粒齿与作物之间的摩擦力,当脱粒齿元件从钢到软塑料到橡胶的变化时,破损率会随之降低,未脱净率随之提高。

使用 Design-Expert 软件中的 Numerical 得到最优工作参数。首先,将破损率的重要性设定为“+++++”,目标为最小值。其次,将脱净率的重要性设定为“+++”,考虑作物未脱净可以进行二次脱粒,破损严重将无法修复,所以将破损率认定为重要参数,使破损率尽可能地小。

通过软件分析结果得出纵式轴流油莎豆脱粒装置最佳的因素组合为转速 $367.55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、脱粒间隙 4.18 mm ,脱粒元件为聚氨酯橡胶,此时的未脱净率为 0.751% ,破损率为 0.906% 。为消除误差,将得到的理论值进行试验验证,在相同试验条件下进行5次重复试验,得籽粒破损率平均值为 0.908% ,油莎豆未脱净率平均值为 0.753% 。试验所得最佳工作参数组合结果与优化结果误差在 1% 以内,且满足油莎豆收获作业中油莎豆籽粒破损率小于 4% 、未脱净率小于 2% 的行业规定作业要求。

5 讨论与结论

脱粒装置是收获机的主要工作部件,我国目前对油莎豆收获机械研究较少,已有研究主要集中在对油莎豆收获效率的提高上,对油莎豆破损率的关注较少。刘学敏等^[23]结合现有花生及油莎豆收获机的特点与油莎豆及花生收获的农艺要求与用户需求,基于模块化理念设计了一种性能强、效率高的多功能油莎豆脱粒装置。彭煜星等^[24]设计了一种主要由三头喂入螺旋、脱粒杆齿和排草板组成的单纵流脱粒滚筒,解决了联合收割机脱粒滚筒易堵塞的问题。刘文亮等^[25]设计了一种油莎豆立式轴流油莎豆脱粒分离装置,动力输入在立辊主轴上,从而带动油莎豆混合物一起做回转运动,同时从下方往上方轴流,通过离心作用将油莎豆与杂物分离开来。这些研究提高了油莎豆的收获效率,在一定程度上提高了我国油莎豆收获的机械化水平。

本研究在借鉴了现有脱粒装置设计的基础上^[23-26],设计了一款纵式轴流油莎豆脱粒分离装置,该分离装置具有净脱率高、破损率低的特点。对脱粒滚筒的应力和模态分析证明本脱粒滚筒的强度和工作频率均满足使用要求,脱粒滚筒的单因素与多因素正交试验证明未脱净率受因素的影响顺序为:

滚筒转速>脱粒元件材料>脱粒间隙;因素影响破损率主次顺序为:滚筒转速>脱粒元件材料>脱粒间隙。通过分析得出当转速 $367.55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、脱粒间隙 4.18 mm 、脱粒元件为聚氨酯橡胶时,脱粒滚筒的未脱净率为 0.751% ,破损率为 0.906% ,是最优工作参数。通过重复试验验证结果未脱净率平均值为 0.753% ,破损率平均值为 0.908% ,达到行业相关标准要求。

参考文献:

- [1] 张学昆.我国油莎豆产业研发进展报告[J].中国农村科技,2019(4):67-69.
- [2] 黄明华,王学华,庞震宇.油莎豆的研究现状及展望[J].作物研究,2013,27(3):293-295,301.
- [3] 路战远,刘和,张建中,等.油莎豆产业发展现状、问题与建议[J].现代农业,2019(6):11,13.
- [4] 中国油脂植物编写委员会.中国油脂植物[M].北京:科学出版社,1987:33-35.
- [5] 阳振乐.油莎豆的特性及其研究进展[J].北方园艺,2017(17):192-201.
- [6] 姜春敏,孙艳.特种经济作物油莎豆高产栽培技术[J].特种经济动植物,2021,24(8):56-57.
- [7] 韩丽娟,李峰.油莎豆的特性及其栽培[J].特种经济动植物,2003,6(7):31.
- [8] 田瑜.油莎豆油生产工艺及产品质量研究[D].郑州:河南工业大学2016.
- [9] 赵永国,邹锡玲,张燕,等.油莎豆高油高产品种中油莎1号[J].中国种业,2019(6):96-97.
- [10] WANG L, HU C, GUO W S, et al. The effects of moisture content and loading orientation on some physical and mechanical properties of tiger nut[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2021, 17(1): 109-117.
- [11] 刘玉兰,王小宁,舒垚,等.不同产地虎坚果形状及组成分析研究[J].中国油脂,2020,45(8):125-129.
- [12] 侯朝雷,相海,曾祥菊,等.油莎豆油的脂肪酸组成及其提取工艺研究进展[J].粮油食品科技,2018,26(3):32-35.
- [13] MEHMET EMIN B, ÇUBUKCU P, VURARAK Y. Yerbademini tarımı ve mekanizasyonu -nun değerlendirilmesi[J]. Uluslararası Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi, 2018, 2(1): 22-33.
- [14] ABANO E E, AMOAH K K. Effect of moisture content on the physical properties of tiger nut (*Cyperus esculentus*) [J]. Asian Journal of Agricultural Research, 2010, 5(1): 56-66.
- [15] 张斌,刘晶,范仲学,等.盐碱地油莎豆机械化播种收获技术与装备研究进展[J].山东农业科学,2019,51(4):144-148.
- [16] 李健,刘文亮,张亮,等.油莎豆收获装备设计与试验[J].农业工程,2022,12(4):36-39.
- [17] 何晓宁,张学军,赵壮,等.基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):124-133.
- [18] 李彦彬,张兆国,王圆明,等.马铃薯收获机多级输送分离装置设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2021,52(6):758-768.
- [19] 许大兴,杨健明.卧式轴流脱粒分离装置研究[J].农业机械学报,1984,15(3):57-66.
- [20] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [21] 葛庆遥.联合收割机纵轴流脱粒滚筒装置关键技术设计与研究[J].黑龙江科技信息,2017(8):80-81.
- [22] 李秀杰,孙千涛,刘龙,等.条缝筛式花生果仁分级试验台的设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2022,53(6):701-708.
- [23] 刘学敏,刘志辉,梁燕,等.基于模块化设计理念的多功能收获机开发[J].中国农机化,2012(5):47-50.
- [24] 彭煜星,李旭,刘大为,等.单纵轴流脱粒滚筒的设计与性能试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(5):554-560.
- [25] 刘文亮,胡浩,姜彩宇,等.油莎豆收获机立式轴流脱粒分离装置的研究[J].农业开发与装备,2019(9):103-104.
- [26] 谭云峰,陈霖,胡森,等.南夏豆25收获期植株离散元建模方法与参数标定[J].东北农业大学学报,2023,54(5):77-87.

[责任编辑 亓国]