文章编号:1000-7601(2024)03-0287-12

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2024.03.30

# 轴流弓齿式食葵脱粒装置设计与试验

杨星宇<sup>1,2</sup>,李 斌<sup>1</sup>,王士国<sup>1</sup>,刘 洋<sup>1</sup>,董云成<sup>1</sup>,刘向新<sup>1</sup> (1.新疆农垦科学院机械装备研究所,新疆石河子 832000; 2.石河子大学机械电气工程学院,新疆石河子 832000)

摘 要:针对现今食葵脱粒过程中普遍存在的脱粒不完全和籽粒易受损等问题,设计一种针对食葵收获机脱粒的轴流弓齿式食葵脱粒装置,并对葵盘在脱粒装置中的受力情况进行分析。借助离散元仿真软件 EDEM 对食葵盘 在滚筒内部的轴向速度、轴向位移以及运动路径进行分析。通过单因素试验获得了含水率、滚筒转速以及喂入量等 因素对籽粒破损率及未脱净率的影响规律。根据单因素试验结果,以含水率、滚筒转速以及喂入量作为试验因素, 以食葵未脱净率和破损率作为评价指标进行正交试验,利用 Design expert 对试验结果进行了方差分析,建立了影响 因素与评价指标的回归模型,明确了各因素对滚筒实际工作效果的影响程度。基于响应曲面法,以低破损率和未脱 净率为目标,对含水率、滚筒转速以及喂入量进行多目标寻优求解,得到最佳作业参数组合,即含水率 22%、喂入量 1.45 kg·s<sup>-1</sup>、滚筒转速 318 r·min<sup>-1</sup>。为了确保参数组合的可靠性,对最佳参数组合进行验证试验,结果显示,籽粒 未脱净率 0.51%、破损率 0.67%,满足我国机械行业标准。

关键词:食葵;脱粒滚筒;弓齿;参数优化 中图分类号:S226.1 文献标志码:A

# Design and trial of axial bow-tooth sunflower threshing device

YANG Xingyu<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, WANG Shiguo<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, DONG Yuncheng<sup>1</sup>, LIU Xiangxin<sup>1</sup>

Institute of Mechanical Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
 School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract**: To resolve problems of inadequate threshing of anemone, easy breakage of seeds of threshing drum, a bow-tooth axial flow threshing anemone harvester threshing device for anemone threshing was designed. The dynamic analysis of the force on the sunflower disc in the threshing drum was carried out. The discrete element simulation software EDEM was used to analyze the speed and displacement of the axial movement of the sunflower disc as well as the trajectory of the movement. The effects of water content, drum speed and feeding amount on the seed breakage rate and the unthreshed rate were obtained through a one-factor test. Based on the results of the single-factor test, an orthogonal test was carried out with water content, drum speed and feeding amount as test factors, and the undetached rate and breakage rate of anemone as evaluation indexes. The results were analyzed by analysis of variance with the help of Design expert to establish the regression model of the influencing factors and the evaluation indexes. Based on the response surface method, the multi-objective optimization of water content, drum speed and feeding volume was carried out with low breakage rate and uncleaned rate as the target. The optimal combination of operating parameters was obtained with water content of 22%, feeding volume of 1.45 kg  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, and drum speed of 318 r  $\cdot$  min<sup>-1</sup>. Validation tests were carried out with the optimized combination of parameters. The results showed that the seed was cleaned up to 0.51%, and the breakage rate was 0.67%, meeting the requirements of China's mechanical engineering industry.

Keywords: sunflower; threshing drum; bow-tooth; parameter optimization

作者简介:杨星宇(2000-),男,重庆大足人,硕士研究生,研究方向为农机装备工程。E-mail:1424167802@qq.com

通信作者:李斌(1983-),男,河南光山人,研究员,主要从事农业机械设计研究。E-mail:bin175337620@ sina.com

收稿日期:2023-12-17 修回日期:2024-02-26

基金项目:新疆维吾尔自治区兵团重点领域科技攻关项目(2021AB001)

向日葵具有较高的观赏价值和实用价值,在全球 70多个国家得到种植<sup>[1]</sup>。截止到 2018年,我国向日葵葵籽播种面积达到了约 92.1万 hm<sup>2[2]</sup>,广泛种植于新疆、内蒙古、东北、河北、山西、吉林、甘肃等地,这些产地每年向日葵的生产量总和面积占到全国的 96% 以上,食用向日葵的种植面积高达 70%<sup>[3]</sup>。因此食用向日葵产业在我国北方的经济发展中发挥着重要作用。

脱粒过程是农业生产的重要组成部分和关 键<sup>[4-6]</sup>,葵盘的脱粒效果将直接影响最终收益。完整 的食葵籽粒与破损的食葵籽粒之间存在较大的价格 差异,使用传统的脱粒装置对食葵进行脱粒会造成食 葵葵脱粒不充分,破损籽粒过多,导致食葵经济效益 下降。因此,研制满足食葵脱粒要求的脱粒装置是提 高农民收益、促进食葵产业发展的关键。

目前,国内外已有专家学者对向日葵的脱粒进 行了研究。Sudajan 等<sup>[7]</sup>对不同形式钉齿以及螺纹 杆式脱粒滚筒的各项性能进行了比较分析,明确了 各因素对脱粒效果以及比能耗的影响程度: Ali 等<sup>[8]</sup>研制了一款新型的齿型脱粒滚筒,并依据 Buckingham's  $\pi$  理论建立了脱粒效率的数学计算 模型;Kazi 等<sup>[9]</sup>通过对适合脱粒的材料和构件类型 进行了定性研究,利用不同形态的钉齿滚筒探究了 脱粒元件结构对向日葵脱粒性能的影响。 Chavoshgoli 等<sup>[10]</sup>研究了不同转速、含水率以及不同 喂入速率对脱粒效率、分离效率、籽粒损失率和籽 粒破损率的影响,对可食用向日葵脱粒装置进行了 设计、制造和评价:张学军等[11]利用正多边形不稳 定、容易变形的特点,设计了一款通过液压机构驱 动改变脱粒间隙的脱粒装置:韩长杰等[12]模仿传统 人为持棍击葵盘的方式,设计了一款仿人工食葵脱 粒装置;王云德等[13]通过对已有油葵脱粒装置进行 优化改进,设计了一款纹杆与螺旋杆组合式葵花脱 籽机:连国党等<sup>[14]</sup>解决传统食葵脱粒装置易导致食 葵籽粒表皮被划伤、未脱净率高等问题设计了一种 新型的轴流螺旋滚筒式食葵脱粒装置;刘希光等[15] 结合钉齿和弓齿两种脱粒元件的优点设计了一款 组合轴流式油葵脱粒装置;李茜等[16]为了提升油葵 脱粒装置的脱籽效率、降低脱粒过程中籽粒受到的 损伤,对钉齿型、纹杆型、弓齿型以及组合型脱粒滚 筒的脱粒性能进行了对比分析。综上所述,目前研 究主要是针对于油葵,而油葵籽粒主要是用于榨取 油分,并不直接食用,因此与带壳食用的食葵籽粒 相比,对籽粒的完整程度要求较低,将其用于食葵 的脱粒易造成食葵籽粒出现较多破损,大幅降低食 葵的经济价值。现有的食葵脱粒装置会出现破损 率低而未脱净率高或者未脱净率低而破损率较高 等问题,在未脱净率与破损率上未能达到较好的 平衡。

为解决食葵脱粒时,容易出现脱粒不彻底、籽 粒破损多、划伤数量大等问题,拟设计一款弓齿式 轴流食葵脱粒滚筒。利用 EDEM 对葵盘在滚筒内 的运动过程进行仿真分析,确定装置设计的合理 性。基于单因素试验与正交试验,检验装置的工作 能力,并确定其最优工作参数,以期改善食用型葵 花的机械化脱粒现状。

# 1 整体结构与工作原理

### 1.1 脱粒装置整体结构

脱粒装置的整体结构如图1所示。整个机身主要 由脱粒滚筒、凹板筛、滚筒顶盖组成。整个滚筒分为喂 入段、脱粒段以及排出段三个部分。靠近出口处安装 有可伸缩挡板,滚筒顶盖上设计有可调导流机构,导流 机构会限制葵盘在一定轨迹范围内进行运动。



1.进葵口;2.导流机构;3.可视窗口拉板;4.凹板筛;5.防溅挡板;
 6.脱粒弓齿;7.出葵口活动挡板;8.出葵口;9.安装轴头

1. Sunflower entrance; 2. Diversion mechanism; 3. Window pull plate;

4. Concave board screen; 5. Splash baffle; 6. Threshing bow teeth;

7. Exit movable baffle; 8. Sunflower outlet; 9. Install the shaft head 图 1 脱粒装置结构图

图 1 航恒浓重编码图 Fig.1 Structural diagram of the threshing device

### 1.2 工作原理

工作时,由驱动电机带动脱粒滚筒旋转,葵盘 以一定的速度从进料口喂入,整个过程采用径向喂 入、径向抛出的方式。葵盘先落在螺旋输送轴套 上,通过螺旋叶片的逆时针转动,输送至滚筒脱粒 段。脱粒元件按螺旋线排布,具有向出口输送葵盘 的能力。葵盘进入脱粒段后,会受到脱粒弓齿的反 复击打以及脱粒元件与凹板筛共同作用下的多次 揉搓,葵盘在这一过程中,籽粒与葵盘的连接逐渐 松散,直至籽粒与葵盘实现彻底的分离。脱出后的 籽粒以及较小的杂质会从凹板筛的缝隙间掉落,脱 籽后的葵盘则被拨杂板从滚筒出口排出。脱粒装 置结构参数如表1所示。

#### 289

# 2 脱粒装置关键部件的设计与分析

## 2.1 脱粒滚筒的设计

脱粒滚筒是整个脱粒装置中最为核心的部件。 设计合适的脱粒滚筒能有效地提高脱粒工作的质 量和效率。现有的轴流式脱粒滚筒按照形状可分 为圆锥形和圆柱形两种,目前市面上最常见的是圆 柱形滚筒<sup>[17]</sup>。圆柱形滚筒相比于圆锥形滚筒结构 简单,制造方便,可利用空间大。因此在滚筒整体 外形的选择上,采用圆柱形滚筒的设计,并在输入 与排出形式上采用结构简单、制造成本较低的径向 喂入与径向排出的形式<sup>[18]</sup>。

2.1.1 滚筒尺寸参数的设计 葵花盘相对于其他 需进行脱粒的作物,体型较大。若脱粒滚筒外壳直 径过小,会导致葵盘在滚筒中堵塞,造成滚筒动力 的损耗以及脱粒效率的下降;若脱粒滚筒外壳直径 过大,脱粒元件的长度也会随之增大,在相同的滚 筒转速下,脱粒元件的线速度会随着直径的增大而 增大,元件的冲量增加,造成籽粒与葵盘破碎。为 了避免葵盘在滚筒内发生堵塞,减少葵籽与葵盘的 破碎,根据田间测量获得的食葵葵盘尺寸参数,将 滚筒外壳直径定为520 mm。

轴流式脱粒滚筒的工作性能也受滚筒长度的 影响,滚筒长度过短,葵盘在无法受到充分的击打 和揉搓的情况下被排出,浪费严重;滚筒长度过长, 葵盘由于受到过度的击打,破碎严重,脱出物中含 有的杂质增多,增加了后续清选的压力。由《农业 机械设计手册》<sup>[19]</sup>可知,弓齿式脱粒滚筒的长度可 通过喂入量,以及葵盘中葵籽所占葵盘整体的质量 来计算。具体如公式(1)所示。

$$L = \frac{q^2 \cdot \beta^2}{22500} \tag{1}$$

式中,L为滚筒长度(cm);q为喂人量(kg·h<sup>-1</sup>),取 q=7200 kg·h<sup>-1</sup>; $\beta$ 为谷草比,即葵花籽粒的质量在 奏盘整体质量中的比值,取 $\beta$ =0.3。最终可得滚筒 长度*L*=2 074 mm。与为了便于制造,最终确定滚 筒长度为 2 100 mm。该滚筒长度与常用的联合收 获机长度较为一致<sup>[20]</sup>。

2.1.2 脱粒元件的设计与布置 脱粒装置的机理 是将收获物置于凹板筛和脱粒滚筒之间,通过相对 运动产生搓擦、碾压等作用使籽粒与葵盘分离<sup>[21]</sup>。 弓齿式脱粒元件脱粒的葵盘籽粒破损较少<sup>[16]</sup>,且弓 齿脱粒元件、占用滚筒内部的空间较小,葵盘在滚筒 内部可通过空间大,不易在工作时发生严重堵塞。

本研究设计了一款新型的弓齿式脱粒滚筒,通 过将传统弓齿两端扭转一定角度,使得弓齿两端短 杆存在角度差,使得弓齿两端分别向两侧形成一个 凸角,并通过在转轴的每一段布置两个中心对称的 脱粒元件,使得在脱粒时,葵盘在同一段脱粒滚筒 上能够多次被脱粒元件抛起并反复击打,弥补了传 统弓齿脱粒能力不足的缺陷。脱粒滚筒的结构与 布置如图2所示。

### 表 1 脱粒装置结构及性能参数

 
 Table 1
 Structure and performance parameters of the threshing device

参数 Parameter	数值/名称 Value/name
结构尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) Structure size (L×W×H)	2300×600×1850
脱粒滚筒长度/mm Threshing drum length	2100
滚筒直径 Drum diameter/mm	520
电机功率 Motor power/kW	1.5
脱粒滚筒形式	轴流式
Type of threshing drum	Axia-flow type
脱粒元件类型	弓齿式
Type of threshing element	Bow-tooth type
凹板筛形式	栅格式
Concave plate sieve form	Gaster type
凹板筛长度 Concave plate sievelength/mm	1660
未脱净率 Un-threshing rate/%	≤1.0
破损率 Breaking rate/%	≤1.2



1.前轴头;2.螺旋叶片;3.脱粒弓齿;4.拨杂板;5.安装轴头
 1. Front shaft head; 2. Spiral blades; 3. Threshing bow teeth; 4. Debris removal plate; 5. Mounting shaft head
 图 2 弓齿式脱粒滚筒结构简图

Fig.2 Structural diagram of bow-tooth type threshing drum

转轴的直径为75 mm,包括喂入段、脱粒段和排 杂段。根据新食葵6号的葵盘尺寸,为了确保了食葵 葵盘能顺利地被送至脱粒段,设计喂入段螺旋输送叶 片的外径  $d_i$ 为 310 mm,螺距  $S_i$ 为 218 mm,喂入段的 长度为440 mm。排杂段与脱粒段的末尾部分重合。 这一段重合部分使得葵盘能在正式被排出前能够一 直受到脱粒元件的作用,保证葵盘能够被充分脱粒。

为了使得脱粒后的葵盘能够顺利排出,6对弓 齿在转轴上螺旋排布,螺距为310mm。脱粒元件的 具体结构如图 3 所示。脱粒元件中端的长杆长度 1, 为 260 mm, 两端短杆长度 l, 为 140 mm, 两短杆间的 夹角为 $\delta_1$ 。长杆与转轴中心线的夹角为 $\delta_2$ 。两端短 杆与中端长杆间是角度为 $\delta_3$ ,半径为20 mm的圆角, 其中δ<sub>3</sub>取110°,保障脱粒元件与转轴之间有足够的空 间,避免由于葵盘卡在脱粒元件与转轴导致的堵塞。 b 为脱粒元件杆的截面直径,取值为 15 mm。

### 2.2 脱粒凹板筛设计

葵盘在脱粒元件的带动下,会与凹板筛发生摩 擦,通过击打与摩擦的配合,使得葵盘脱粒更充分。 凹板筛从孔的形式上来分可分为栅格式和冲孔式。 葵盘上生长的籽粒不规则,如果选用冲孔式的凹板 筛, 将粒容易堆积在凹板筛上, 并堵塞筛孔。因此, 选用通过空间更大,葵籽不易堵塞的筛格式凹板 筛。凹板筛的结构如图4所示。



(a) 侧视图 Lateral view

(b) 俯视图 Vertical view

脱粒元件结构图 图 3 Fig.3 Structural diagram of threshing elements



1. Left side mounting flat iron; 2. Concave panel grille; 3. Right side mounting flat iron

#### 图 4 凹板筛结构简图

Fig.4 Brief diagram of concave plate sieve

凹板筛应当覆盖脱粒滚筒脱粒段全部分,根据 滚筒的总长以及喂入段的长度,凹板筛的长度设计 为1660 mm。凹板筛相邻栅条间的栅孔宽度为22 mm,凹板的栅条采用直径为10 mm,长度为786 mm 的圆钢,通过压弯机将其压为半圆弧形,并通过焊 接安装在左右两侧扁铁上,其包角为180°。凹板筛 与脱粒元件间的间隙为40 mm。该凹板筛对于食葵 而言,通过性好,摩擦阻力小,对籽粒表皮的磨损程 度低,并目能阻碍体积较大的破碎葵盘的掉落,减 轻了后续清诜的负担。

## 2.3 脱粒过程动力学分析

为了确定 $\delta_1$ 与 $\delta_2$ 的取值,并探究葵盘进入脱粒 滚筒后的受力情况,选择与滚筒脱粒元件任一位置 接触时的葵盘,在其重心处建立平面直角坐标系, 进行分析受力分析,受力分析图如图 5。

对葵盘此时受到的力进行分解,分析公式如式  $(2)_{0}$ 

$$\begin{cases} F_x = F_1 \cos\gamma - F_2 \cos\theta - f_1 \sin\theta + f_2 \sin\gamma \\ F_y = F_1 \sin\gamma + F_2 \sin\theta - f_1 \cos\theta - f_2 \cos\gamma - G \end{cases}$$
(2)

式中,  $F_x$ 、 $F_y$ 分别为此时 x 轴与 y 轴方向上的合 力,F<sub>1</sub>为脱粒元件对葵盘的作用力,F<sub>2</sub>为凹板筛对 葵盘一侧的支持力, f1 为葵盘与凹板筛之间的摩擦 力, f, 为葵盘与脱粒弓齿之间的摩擦力, G 为葵盘自 身的重力,  $\gamma$  为脱粒元件对葵盘的作用力与 x 轴的 夹角, $\theta$ 为凹板筛对葵盘的支持力与x轴的夹角。

通过力的三角形准则可求得该位置是葵盘所 受到的合力 F。如式(3) 所示。

 $F_0 = \left[ \left( F_1 \cos \gamma - F_2 \cos \theta - f_1 \sin \theta + f_2 \sin \gamma \right)^2 + \right]$ 

 $(F_1 \sin \gamma + F_2 \sin \theta - f_1 \cos \theta - f_2 \cos \gamma - G)^2 ]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$ 

由于该位置脱粒弓齿和葵盘相接触的长杆与 脱粒滚筒中心轴线间存在一个夹角 $\delta_2$ ,此时的 x 轴 垂直于弓齿中部的长杆,因此 x 轴上的合力 F, 则同 样垂直于该弓齿中部的长杆。此时葵盘受到的轴 向力 F<sub>x</sub>如式(4) 所示。



图 5 葵盘受力分析图 Fig.5 Force analysis of shade disk

$$F_z = F_x \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_2\right) \tag{4}$$

结合公式(3)、(4)分析可知,葵盘受到的脱粒 弓齿击打的合力以及轴向力都与 $\gamma$ 和 $\theta$ 有关,脱粒 弓齿与葵盘的接触位置不同,葵盘所受到力的状态 都会发生改变。葵盘所受到的轴向力还会受到角  $\delta_2$ 的影响, $\delta_2$ 的取值范围为 0°~90°,既不能过大,也 不能过小,当 $\delta_2$ 趋于 90°时,脱粒弓齿中端的长杆与 转轴中心线的角度趋于垂直,此时只有弓齿两端的 竖直短杆能对葵盘进行击打,极其不利于葵盘的脱 粒与运输,当 $\delta_2$ 趋于 0°时,轴向力则趋近于 0,葵盘会 在滚筒中受到过多的击打且难以向出口运输。因此 为了使得脱粒弓齿既能有向出口运输葵盘的能力,又 能保证葵盘不会由于受到过大的轴向力导致未被充 分脱粒而被快速排出,取 $\delta_2$ 为 30°。此时为了便于弓 齿在转轴上安装, $\delta_1$ 应满足 $\delta_1<\delta_2$ ,故取 $\delta_1=28°$ 。

#### 2.4 物料运动仿真分析

离散元软件 EDEM 为研究农业物料在农业机 械设备中各类相互作用及物料运动等问题的研究 提供了新手段<sup>[22]</sup>。为了直观地观察葵盘在脱粒滚 筒内部的工作状态以及葵盘的运动轨迹,研究滚筒 中葵盘的轴向速度以及轴向位移变化情况。采用 EDEM 对葵盘在滚筒中的运动进行模拟。

2.4.1 仿真模型建立 为了得到建立葵花盘离散 元模型以及装置所需要的材料参数,利用石河子大 学机械电气工程学院的提供的 TA.XT-plus 质构仪 对葵盘的弹性模量以及剪切模量进行测定;利用斜 面法对静摩擦系数进行测定<sup>[23]</sup>,使用摩擦系数仪测 定葵盘与装置、葵盘与葵盘间的摩擦系数;通过浸 液法得到葵盘的密度<sup>[24]</sup>;采用自由跌落试验<sup>[25]</sup>测 得葵盘与葵盘、葵盘与脱粒装置间的碰撞恢复系 数。由于物料表面没有沾附力,仿真模型选用无滑 动接触模型<sup>[26]</sup>,仿真参数如表 2 所示。

仿真参数

表 2

r	Table 2   Simulation parameters	
材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
	泊松比 Poisson's ratio	0.31
Q235 钢 Q235 steel	弹性模量/Pa Modulus of elasticity	210×10 <sup>9</sup>
	密度/(kg・m <sup>-3</sup> ) Density	7850
	泊松比 Poisson's ratio	0.33
葵盘 Sunflower disk	弹性模量/Pa Modulus of elasticity	78.9×10 <sup>6</sup>
	密度/(kg・m <sup>-3</sup> ) Density	556.6
葵盘-葵盘	碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient	0.39
Sunflower disk with sunflower	静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.71
disk	动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.01
	碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient	0.31
癸盘-装置 Sunflower disk with device	静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.55
with device	动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.01



葵盘的最大位移为2048 mm,葵盘在滚筒中的 正向的最大速度为1.86 m·s<sup>-1</sup>,反向的最大速度为 1.34 m·s<sup>-1</sup>。葵盘轴向速度为正时,表明葵盘的轴 向速度方向指向出口方向,速度为负时,表明葵盘 的轴向速度指向葵盘入口方向。结合轴向位移曲 线变化情况可知,葵盘在速度变为负值时轴向位移 会减小,即葵盘会出现短暂向入口方向移动的情 况,但是葵盘整体趋势仍是向滚筒出口运动,最终 会从出口排出。葵盘短暂向葵盘入口移动的现象, 增加了葵盘与脱粒元件发生相互作用的次数,使得 葵盘脱粒更彻底,该现象符合设计预想,表明该脱 粒装置结构设计合理。

# 3 台架试验

### 3.1 试验材料与设备

为验证新型弓齿式轴流食葵收获机脱粒装置 的工作效果,试制脱粒装置台架(如图 10),并进行 台架试验。

试验对象选用新疆农垦科学院试验田种植的 新食葵6号,播种时间为2023年4月3日,成熟期 为2023年7月12日。采用人工割盘的方式收集葵 盘,收获时葵盘直径160~240 mm,单个葵盘质量 400~700g,葵盘平均含水率为59%,籽粒平均含水 率为39%,葵盘厚度为30~50 mm,共收集葵盘约 600 kg。试验前对葵盘进行分时段晾晒处理,从而 获得试验所需的不同含水率的葵盘。

试验所用到的设备有自制的新型弓齿式食葵 脱粒装置试验台、电子天平 ACS-30A(量程 200~ 30000 g,精度1g)、圆筛、塑料袋、尼龙袋、记号笔、转 速测试仪(量程 10~99999 r·min<sup>-1</sup>)、扫把、家用电子 秤(量程 0.01~500 g,精度 0.1 g)、电热鼓风干燥箱。

# 3.2 试验方法

依据 GB/T5982—2017《脱粒机试验方法》<sup>[27]</sup>,



脱粒装置 Threshing device

图 6 仿真模型 Fig.6 Simulation model



葵盘 Sunflower disk

选择喂入量、滚筒转速与含水率作为试验因素,选 用未脱净率与破损率作为装置工作能力评价指标, 开展单因素试验以及三因素三水平二次回归正交 试验。正式开始试验前,使用天平对需喂入的葵盘 进行称重。每次试验前可通过转动电机上的转速 调节阀调整电机转速,从而改变滚筒转速。试验 时,将称量好的葵盘按批次连续喂入滚筒中。试验 完成后,对脱出的籽粒进行收集与处理,并按式 (5)、(6)计算未脱净率以及破损率。

$$y_1 = \frac{m_w}{m} \times 100\% \tag{5}$$

$$y_2 = \frac{m_p}{m} \times 100\% \tag{6}$$

式中,  $m_w$  为葵盘中未脱出的籽粒的质量(g);  $m_p$  为 破损的籽粒重量(g); m 为葵盘脱出籽粒的总质量 (g);  $y_1$  为籽粒未脱净率(%);  $y_2$  为籽粒破损 率(%)。

### 3.3 单因素试验

为了保证正交试验所选因素水平的合理性,以 脱粒籽粒破损率与籽粒未脱净率为评价指标,对影 响两个指标的滚筒转速、喂入量及含水率这三个因 素进行单因素试验,通过多次试验获得合适的因素 水平范围。



图 7 仿真效果图 Fig.7 Diagram of simulation rendering



图 8 葵盘运动轨迹图 Fig.8 Movement trajectory diagram of a sunflower disk



图 10 脱粒装置试验台 Fig.10 Threshing device test bench

3.3.1 含水率单因素试验 含水率的变化会导致 籽粒与葵盘间的连接力的变化以及籽粒的体积的 变化,从而影响脱粒元件对葵盘的脱粒效果。在滚 筒转速为 200 r · min<sup>-1</sup>、喂入量为 1.2 kg · s<sup>-1</sup>的条件 下,对经过不同时长晾晒得到的不同含水率的葵盘 进行 5 组单因素试验,每组试验进行三次,结果取平 均值。试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知,当食葵的整体含水率发生变化 时,食葵的未脱净率以及破损率会随之发生改变。 随着含水率的增加,食葵的未脱净率整体上呈现逐 渐上升的趋势,未脱净率最低为 0.63%,最高为 1.3%。曲线开端所呈现的下降趋势是由于葵盘过 于干燥,葵盘表面籽粒的种室收缩,种室壁硬度提 高,将一部分籽粒紧紧地固定在葵盘上,使得这部 分籽粒在脱粒滚筒中未被脱出。在试验所选的含 水率范围内,随着含水率的增加,籽粒的破损率逐 渐增大。之所以出现该现象是由于籽粒含水率的 增加使得籽粒表皮硬度降低、外壳软化、抗击打能 力下降,受到滚筒脱粒元件击打时籽粒更容易发生 破裂、籽粒表皮也更容易出现划伤。

3.3.2 滚筒转速单因素试验 脱粒滚筒旋转速度 的变化,会引起其脱粒元件线速度的改变,从而改 变脱粒元件与食葵葵盘接触时的作用力。为研究 滚筒转速变化对脱粒效果的影响,选取含水率相同 的葵盘,在喂入量为 1.2 kg · s<sup>-1</sup>的条件下改变滚筒 转速进行单因素试验。试验结果如图 12 所示。

由图 12 可知,随着滚筒转速的提高,食葵葵盘 的未脱净率和籽粒的破损率呈现出两种不同趋势 的变化。当滚筒转速加快时,脱粒元件的冲量变 大、动量也变大,产生的冲击力也就越大,葵盘被击 落的籽粒数量就会增加,未脱净率就会下降,当滚 筒转速达到最大时,未脱净率达到最低,最小未脱 净率为0.5%。但随着滚筒转速增加,不仅冲击力会 增加,也会使得籽粒受到脱粒元件的击打次数和时 间增加,以至于籽粒出现破损的概率增加,最终呈 现出的结果就是籽粒破损率的提高。

3.3.3 喂入量单因素试验 食葵收获机上的脱粒 装置,在作业时需进行连续工作,若喂入量过小,会 造成极大的能量损耗;若喂入量过大,则会造成脱 粒滚筒因堵塞而无法正常工作。为研究滚筒喂入 量变化对脱粒效果的影响,选取含水率相同的葵 盘,在滚筒转速为 200 r · min<sup>-1</sup>的条件下改变喂入 量进行单因素试验。试验结果如图 13 所示。

由图 13 可知,随着喂入量的增加,籽粒的破损 率表现为逐渐上升的趋势,未脱净率则整体上呈现 线性下降的趋势,即喂入量越大,未脱净率越低,葵 盘脱出籽粒的破损率越高。当喂入量在一定范围 内增加,葵盘与葵盘、葵盘与脱粒元件、籽粒与脱粒 元件之间的挤压、碰撞、摩擦变得更加频繁,籽粒受 到损伤的概率增加、籽粒被成功脱出的可能性变 大。而在喂入量为1.6 kg·s<sup>-1</sup>时,未脱净率突然上 升,造成这个现象的原因是当喂入量增加到一定程 度时,滚筒内的葵盘堆叠较多,少数葵盘被其余葵 盘遮盖,脱粒元件不能有效地对其进行击打脱粒。



Fig.11 Single factor test curve of moisture content







### 3.4 正交试验

为了明确不同因素对脱粒效果的影响程度,并 得到最优工作参数组合,基于 Box-Behnken 试验原 理设计三因素三水平二次回归正交旋转组合试 验<sup>[28]</sup>,并通过 Design expert 软件中的 Box-Behnken 模块进行试验设计与数据分析。在试验中,根据单 因素试验中较低的籽粒破损率与较低的未脱净率 所对应的因素值,选取各因素的取值范围。试验因 素水平表如表 3 所示。

### 3.5 试验结果与方差分析

3.5.1 试验方案与结果 根据 Design expert 所设计的试验表进行二次回归正交旋转组合试验,得到的试验结果如表4所示。

	表 3	因素水平表	
	Table 3	Test factor level	
水巫	含水率 x <sub>1</sub>	滚筒转速 $x_2$	喂入量 x3
// Tevel	Moisture	Drum speed	Feeding rate
Lever	content/%	$/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	$/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
-1	22	225	1.2
0	30	275	1.4
1	38	325	1.6

序号	含水率 x <sub>1</sub>	滚筒转速 x <sub>2</sub>	喂入量 x3	未脱净率 $y_1$	破损率 y2
No.	Moisture content/%	Drum speed/( $r \cdot min^{-1}$ )	Feeding rate/(kg $\cdot$ s <sup>-1</sup> )	Un-threshingrate/%	Breaking rate/%
1	22	225	1.4	0.74	0.52
2	38	225	1.4	0.87	0.69
3	22	325	1.4	0.49	0.63
4	38	325	1.4	0.76	0.86
5	22	275	1.2	0.77	0.57
6	38	275	1.2	0.91	0.67
7	22	275	1.6	0.62	0.60
8	38	275	1.6	0.88	0.82
9	30	225	1.2	0.84	0.56
10	30	325	1.2	0.72	0.66
11	30	225	1.6	0.85	0.62
12	30	325	1.6	0.56	0.80
13	30	275	1.4	0.75	0.65
14	30	275	1.4	0.77	0.61
15	30	275	1.4	0.81	0.64
16	30	275	1.4	0.73	0.63
17	30	275	1.4	0.71	0.59

表 4 正交试验结果 Table 4 Results of the orthogonal test

3.5.2 回归模型建立与方差分析 根据单因素试 验,已知三个试验因素都会对脱粒滚筒的脱粒效果 造成一定的影响,但是对于不同因素对未脱净率和 破损率影响程度的大小未知,因此利用数据分析软 件 Design expert 对表 4 中获得的试验数据结果进行 方差分析,并检验各因素对试验结果影响的显著 性。通过该软件获得含水率、滚筒转速、喂入量、未 脱净率以及破损率之间的二次多项式回归模型。 回归方程如式(7)、(8)所示。

$$y_{1} = 0.754 + 0.1x_{1} - 0.0963x_{2} - 0.0413x_{3} + 0.035x_{1}x_{2} + 0.03x_{1}x_{3} - 0.0425x_{2}x_{3} + 0.0067x_{12} - 0.0458x_{22} + 0.0343x_{32}$$
(7)  

$$y_{2} = 0.624 + 0.09x_{1} + 0.07x_{2} + 0.0475x_{3} + 0.015x_{1}x_{2} + 0.03x_{1}x_{3} + 0.02x_{2}x_{3} + 0.015x_{1}x_{2} + 0.03x_{1}x_{3} + 0.02x_{2}x_{3} + 0.000x_{1}x_{3} + 0.000x_{1}x_{1}x_{2} + 0.000x_{1}x_{3} + 0.000x_{1}x_{3} + 0.000x_{1}x_{1}x_{2} + 0.000x_{1}x_{1} + 0.000x_{1}x_{1} + 0.000x_{1}x_{1$$

$$0.028x_{12} + 0.023x_{22} + 0.013x_{32} \tag{8}$$

式中, $y_1$ 为未脱净率; $y_2$ 为破损率率; $x_1$ 为含水率; $x_2$ 为滚筒转速; $x_3$ 为喂人量。

食葵籽粒破损率与未脱净率的回归模型方差 分析结果如表 5 所示。通过方差分析表可知,未脱 净率与破损率的回归模型 P 值都小于 0.001,模型 表现为极显著,两个模型中,失拟项的 P 值均大于 0.05,不存在失拟因素,且两个模型决定系数 R<sup>2</sup>分别 为 0.9688 和 0.9771,都接近于 1,表明预测模型合理 且具有较高的可靠性。根据两个回归模型中三个 回归项的 F 值可知,三个影响因素对未脱净率和破 损率的影响程度均为含水率 x<sub>1</sub>>滚筒转速 x<sub>2</sub>>喂入 量 x<sub>3</sub>。

利用 Design expert 获取各因素对未脱净率影响 的响应曲面图(图 14)与各因素对破损率影响的响 应曲面图(图 15)。

### 表 5 回归方程方差分析

Table 5 Analysis of variance for regression equations

		未脱净率 Ur	n-threshing rate	е		破损率 B	reaking rate	
来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F值 F value	P值 P value	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F值 F value	P值 P value
模型 Model	0.1967	9	24.11	0.0002 * * *	0.1350	9	33.13	< 0.0001 * * *
$x_1$	0.0800	1	88.26	< 0.0001 * * *	0.0648	1	143.09	< 0.0001 * * *
$x_2$	0.0741	1	81.76	< 0.0001 * * *	0.0392	1	86.56	< 0.0001 * * *
<i>x</i> <sub>3</sub>	0.0136	1	15.02	0.0061 * *	0.0180	1	39.86	0.0004 * * *
$x_1 x_2$	0.0049	1	5.41	0.0530	0.0009	1	1.99	0.2015
$x_1 x_3$	0.0036	1	3.97	0.0865	0.0036	1	7.95	0.0258 *
$x_{2}x_{3}$	0.0072	1	7.97	0.0257 *	0.0016	1	3.53	0.1022
$x_1^2$	0.0002	1	0.2116	0.6594	0.0033	1	7.29	0.0306 *
$x_2^2$	0.0088	1	9.72	0.0169 *	0.0022	1	4.92	0.0621
$x_{3}^{2}$	0.0049	1	5.45	0.0523	0.0007	1	1.57	0.2503
残差 Residual	0.0063	7			0.0032	7		
失拟项 Lack of Fit	0.0004	3	0.0957	0.9584	0.0009	3	0.4885	0.7087
误差 Pure Error	0.0059	4			0.0023	4		
合计 Total	0.2030	16			0.1382	16		

注:\*显著(P<0.05);\*\*非常显著(P<0.01);\*\*\*极显著(P<0.001)。

Note: \* significant (P<0.05); \* \* very significant (P<0.01); \* \* \* extremely significant (P<0.001).











Fig.15 Response surface diagram of breaking rate

由图 14a 可知,在喂入量为 1.4 kg · s<sup>-1</sup>时,在滚 筒转速为 325 r · min<sup>-1</sup>、葵盘整体含水率为 22%时, 未脱净率最小,最小值为 0.49%。在含水率达到 38%、滚筒转速为 225 r · min<sup>-1</sup>时,未脱净率为 0.91%。未脱净率随着含水率的增加而逐渐增大, 随着滚筒转速的增加而减小。从斜率上来看,未脱

净率随含水率的改变而发生变化的程度要高于滚筒转速改变带来的影响。由图 14b 可知,维持滚筒转速为 275 r·min<sup>-1</sup>,葵盘的未脱净率与含水率之间的关系为正相关,未脱净率与喂人量之间的关系为负相关。当喂人量为 1.6 kg·s<sup>-1</sup>、含水率为 22%时,最大未脱净率为 0.88%。由图 14c 可知,当食葵整体含水率为 30%时,随着喂人量与转速的变化,未脱净率的最小值为 0.56%,最大值为 0.84%。滚筒转速以及喂人量与未脱净率之间的数量关系皆为负相关,但滚筒转速变化导致的未脱净率的改变相较于喂人量带来的未脱净率的改变

由图 15a 可知,在喂入量为 1.4 kg · s<sup>-1</sup>时,随着 含水率和滚筒转速的增大,由于籽粒表皮的软化与 籽粒受击打的次数增加,籽粒的破损率均呈现上升 的趋势,破损率最小时为 0.52%,最大时达到 0.86%。受含水率变化影响时,籽粒破损率变化幅 度要大于受滚筒转速变化的影响。由图 15b 可知, 当滚筒转速维持 275 r · min<sup>-1</sup>时,含水率的改变对 破损率的影响十分明显,随着含水率的升高,破损 率呈现一种较为剧烈的递增趋势。随着喂入量的 增加,籽粒的破损率变化呈现平稳递增的趋势。当 含水率为38%、喂入量为1.6 kg · s<sup>-1</sup>时,破损率达到 最大,其值为0.82%。当含水率为22%、喂入量为 1.2 kg · s<sup>-1</sup>时,破损率最小,其值为 0.57%。由图 15c可知,当含水率保持在30%时,滚筒转速、喂入 量与破损率之间的数量关系为正相关,滚筒转速对 破损率的影响要强于喂入量对破损率的影响。

### 3.6 参数优化与试验验证

为了寻找脱粒装置的最佳工作参数,提升脱粒 装置的工作效果,将食葵葵盘的未脱净率与破损率 作为评价指标,利用影响因素的边界条件建立参数 优化数学模型,并对该模型进行多目标优化求解。 目标函数与约束条件如下:

 $\begin{cases} \min y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min y_2(x_1, x_2, x_3) \\ 22\% \leq x_1 \leq 38\% \\ 225 \text{ r} \cdot \min^{-1} \leq x_2 \leq 325 \text{ r} \cdot \min^{-1} \\ 1.2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \leq x_3 \leq 1.6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$ 

以未脱净率以及破损率最小为优化目标,利用 Design expert 对数据进行求解。最终求得最佳参数 组合为:含水率为22%,喂入量为1.45 kg·s<sup>-1</sup>,滚筒 转速为318 r·min<sup>-1</sup>。在该参数组合下,未脱净率 为 0.49%, 破损率为 0.64%, 满足 JB/T12824-2016 《葵花籽脱粒机》<sup>[29]</sup>中对脱粒装置的未脱净率以及 破损率的要求。

为验证优化所得最佳参数组合的准确性,利用 脱粒装置试验台进行验证试验。对同品种的葵盘 进行晾晒,得到含水率为22%左右的食葵葵盘,调 整脱粒滚筒的转速为318 r · min<sup>-1</sup>,并以1.45 kg · s<sup>-1</sup>的喂入速度向脱粒滚筒中喂入葵盘。为了消除 试验的随机误差,试验重复三次,取其均值,并将结 果与参数优化结果进行比较,如表6所示。

试验结果表明,验证试验得到的未脱净率以及 破损率与优化值接近,未脱净率和破损率的试验值 与优化值之间的相对误差分别为4.08%、4.69%,试 验结果与优化结果基本吻合,因此参数优化结果具 有可靠性。

表6	试验结果与优化值对比分析

Table 6 Comparison and analysis of test

results a	and	optimized	values
-----------	-----	-----------	--------

名称 Name	未脱净率/% Un-threshing rate	破损率/% Breaking rate
优化值 Optimized value	0.49	0.64
试验值 Experimental value	0.51	0.67
相对误差 Relative error	4.08	4.69

# 4 结 论

1)针对目前食葵脱粒不充分、籽粒易破损等问 题,设计了一种针对食葵收获机脱粒的轴流弓齿式 脱粒装置,脱粒元件为具有一定扭转角度的弓齿, 凹板筛的形式为栅格式凹板筛。装置通过击打与 揉搓实现对食葵葵盘的脱粒。

2)根据物料试验测定的葵盘参数,利用离散元 仿真软件 EDEM 建立葵盘与脱粒装置的离散元模 型,并在脱粒滚筒中对葵盘的运动情况进行模拟。 在软件生成的葵盘中选取其中一个典型的葵盘,对 其轴向运动速度、轴向位移以及运动轨迹进行分 析,判断了装置设计的可靠性。

3)试制了脱粒装置试验台,以滚筒转速、喂入 量以及含水率为试验因素,以食葵未脱净率和破损 率作为评价指标进行了三因素三水平二次回归正 交旋转组合试验。分析试验结果得出各因素对未 脱净率与破损率的影响程度为含水率>滚筒转速> 喂入量,得到最佳作业参数组合为含水率 22%,喂 入量1.45 kg·s<sup>-1</sup>,滚筒转速 318 r·min<sup>-1</sup>,此时未脱 净率为 0.49%, 破损率为 0.64%, 满足向日葵脱籽机 的行业标准。通过验证试验对该参数组合下脱粒 装置的脱粒效果进行验证, 得到未脱净率为 0.51%, 破损率为 0.67%, 该结果与模型预测值的相对误差 小于 5%, 表明优化模型具有较可靠的实际意义。

#### 参考文献:

- PUTT E D. Early history of sunflower [J]. Sunflower Technology and Production, 1997, 35: 1-19.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴(2018) [M]. 北京: 中国统计出版 社, 2018.

National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.

[3] 李一男.向日葵产业现状调查及发展前景预测[J].农业开发与装备,2020,(4):41,44.

LI Y N. Investigation of the current situation and development prospect forecast of sunflower industry [J]. Agricultural Development and Equipments, 2020, (4): 41, 44.

- [4] 王刚,关卓怀,沐森林,等. 油菜联合收获机种子籽粒脱粒装置结构及运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 52-57.
  WANG G, GUAN Z H, MU S L, et al. Optimization of operating parameter and structure for seed thresher device for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 52-57.
- [5] PETKEVICIUS S, SPOKAS L, STEPONAVICIUSD. Substantiation of technological parameters of wet maize ear threshing[J]. Agronomy Research, 2008, 6: 271-280.
- [6] 王成芝, 葛永久. 轴流滚筒的试验研究[J]. 农业机械学报, 1982, (1): 55-72.

WANG C Z, GE Y J. Experimental study of the axial flow roller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1982, (1): 55-72.

- [7] SUDAJAN S, SALOKHE V M, TRIRATANASIRICHAI K. PM-power and machinery: effect of type of drum, drum speed and feed rate on sunflower threshing [J]. Biosystems Engineering, 2002, 83 (4): 413-421.
- [8] ALI K A M, ZONG W Y, MA L, et al. Testing, evaluating and simulate the performance of the newly designed drum for a sunflower threshing machine[J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2022, 60: 29-41.
- [9] KAZI A, SAFIULLA M, MANOHAR N M, et al. Design and fabrication of sunflower seed extracting machine [J]. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science, 2016, 5(6): 90-97.
- [10] CHAVOSHGOLI E, ABDOLLAHPOUR S, GHASEMZADEH H. Designing, fabrication and evaluation of threshing unit edible sunflower
   [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2019, 21 (2): 52-58.
- [11] 张学军,马少腾,朱兴亮,等.正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(4):26-33.
   ZHANG X J, MA S T, ZHU X L, et al. Design and test of oil-sunflower threshing device with variable clearance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 26-33.
- [12] 韩长杰, 刁宏伟, 朱兴亮, 等. 基于人工击打脱粒原理的食葵脱 粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 57-64.

HAN C J, DIAO H W, ZHU X L, et al. Design and experiment of the edible sunflower threshing device based on manual threshing principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12): 57-64.

- [13] 王云德. 5TK-1200-320 型葵花脱籽机设计与分析[D]. 兰州:甘肃 农业大学, 2018.
   WANG Y D. Design and analysis of 5TK-1200-320[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [14] 连国党,魏鑫鑫,马丽娜,等. 轴流螺旋滚筒式食用向日葵脱粒 装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 42-51.
  LIAN G D, WEI X X, MA L N, et al. Design and experiments of the axial-flow spiral drum threshing device for the edible sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(17): 42-51.
- [15] 刘希光,韩长杰, 葛鹏, 等. 组合式轴流油葵脱粒装置的设计与 试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 69-73.
  LIU X G, HAN C J, GE P, et al. Design and experiment of combined axial-flow oil sunflower threshing unit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 69-73.
- [16] 李茜,张学军,朱兴亮. 油葵联合收获机脱粒装置设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 6-12, 25.
  LI Q, ZHANG X J, ZHU X L. Design and experimental study on threshing device of oil sunflower combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 6-12, 25.
- [17] 邸志峰,崔中凯,张华,等.纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒 滚筒的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(1):28-34.
  DI Z F, CUI Z K, ZHANG H, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J].
  Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1):28-34.
- [18] 北京农业机械化学院.农业机械学(上册)[M].北京:农业出版 社,1981.
   Beijing Agricultural Mechanization College. Agricultural Mechanics
- (volume 1) [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1981.
  [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册) [M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
  China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual (below) [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [20] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
   LI B F. Agricultural machines [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [21] 李耀明,陈洋,徐立章,等. 斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置结构参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 56-61.
  LI Y M, CHEN Y, XU L Z, et al. Optimization of structural parameters for threshing and separating device in oblique tangential-longitudinal combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 56-61.
- [22] 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(5):1-6.
  YU J Q, FU H, LI H, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 1-6.
- [23] 吴孟宸,丛锦玲,闫琴,等.花生种子颗粒离散元仿真参数标定
   与试验[J].农业工程学报,2020,36(23):30-38.
   WU M C, CONG J L, YAN Q, et al. Simulation parameter

calibration and test of the discrete element of peanut seed particles [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(23); 30-38.

- [24] 马云海. 农业物料学[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.
   MA Y H. Agricultural materials science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [25] 石林榕,马周泰,赵武云,等.胡麻籽粒离散元仿真参数标定与 排种试验验证[J].农业工程学报,2019,35(20):25-33.
   SHI L R, MA Z T, ZHAO W Y, et al. Calibration of simulation parameters and seed extraction test[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):25-33.
- [26] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种 性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114. LIAO Q X, ZHANG P L, LIAO Y T, et al. Numerical simulation of seed arrangement performance of centrifugal seed arrangement device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管

理委员会. 脱粒机: 试验方法: GB/T 5982-2017[S]. 北京: 中国标 准出版社, 2018.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Thresher: testing method: GB/T 5982-2017 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018.

- [28] 曹卫彬,连国党,牛驰,等. 梳夹式红花丝采摘头等高采收性能 试验与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 36-44. CAO W B, LIAN G D, NIU C, et al. Harvest performance test and parameter optimization of comb-type safflower-filaments picking head at same height[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 36-44.
- [29] 中华人民共和国工业和信息化部. 葵花籽脱粒机:JB/T 12824-2016[S].北京: 机械工业出版社, 2016.
   Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Sunflower seed aspirator: JB/T 12824-2016[S]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.

## (上接第286页)

- [20] 李建平,赵匀. 物料在振动筛面上抛起的计算机模拟和实验研究
  [J]. 农业工程学报, 1997, (4): 51-53.
  LI J P, ZHAO Y. Experiment and computer simulation of tossing motion of agricultural materials on oscillating sieve [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 1997, (4): 51-53.
- [21] 陆金新, 刘初升, 聂金柱, 等. 振动筛分过程中单颗粒的运动特性 分析[J]. 煤矿机械, 2007, 28(11): 66-68.
  LU J X, LIU C S, NIE J Z, et al. Kinetic characteristic analysis of single particle during process of screening of vibration screen [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(11): 66-68.
- [22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 963-966. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 963-966.
- [23] LI Z F, TONG X. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(4): 299-305.
- [24] LI Y J, ZHAO P, MO L, et al. Numerical simulation of particle screening efficiency of large multi-layer vibrating screen based on discrete element method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2022, 236(2): 565-574.
- [25] 石林榕,马周泰,赵武云,等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33.
  SHI L R, MA Z T, ZHAO W Y, et al. Validation of discrete meta-simulation parameter calibration and seed-rowing test for jute seed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 25-33.
- [26] 马学杰, 刘敏, 侯占峰, 等. 小粒牧草种子丸粒化包衣数值模拟与 试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 43-52.

MA X J, LIU M, HOU Z F, et al. Numerical simulation and experiment on pelletised coating of small grains of forage seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 43-52.

- [27] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20(3): 327-344.
- [28] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe [J]. Powder Technology, 1992, 71(3): 239-250.
- [29] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [30] 侯俊铭,任兆坦,朱红杰.双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(S2):39-51.
  HOU J M, REN Z T, ZHU H J. Design and test of double-decked inclined vibrating wind screen type castor clearing device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022, 53(S2):39-51.
- [31] 王立军,武振超,冯鑫,等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 90-101.
   WANG L J, WU Z C, FENG X, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 90-101.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.中国沙棘果实质量等级:GB/T 23234-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
  General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fruit grades of hippophae rhamnoides L.subsp.sinensis Rousi.; GB/T 23234-2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [33] 国家机械工业局. 振动筛设计规范: JB/T 9022-1999[S]. 北京: 机械 工业部机械标准化研究所, 1999.

State Administration of Machinery Industry. Vibrating screen design specifications: JB/T 9022-1999[S]. Beijing: Research Institute of Machinery Standardization Ministry of Machinery Industry, 1999.

[34] ZHAO L L, ZHAO Y M, BAO C Y, et al. Laboratory-scale validation of a DEM model of screening processes with circular vibration[J]. Powder Technology, 2016, 303: 269-277.