

组合式大蒜柔性去皮装置设计与试验

李心平¹ 孙臣臣¹ 张万通¹ 王升升¹ 高连兴²

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 吉林农业大学信息农业研究院, 长春 130118)

摘要: 为解决去皮率低、蒜仁易损伤等问题,设计了一款组合式大蒜柔性去皮装置。通过浮动搓擦单元分离蒜皮,振动机构完成输送,蒜瓣经过浮动搓擦、振动梳刷及气吹等组合作用完成柔性去皮。结合大蒜的物理机械特性,设计了搓擦机构、振动机构、梳刷机构、气吹机构等关键部件;通过对蒜瓣在浮动搓擦单元和振动筛内的动力学分析,确定了影响去皮性能试验的主要因素和取值范围。以搓擦筒轴转速、梳刷间距和曲柄转速为试验因素,以去皮率和损伤率为试验指标,进行三因素三水平响应面试验,求得搓擦筒轴转速、梳刷间距和曲柄转速的最优参数组合并进行了试验验证。试验结果表明最优参数组合为:搓擦辊轴转速 70.73 r/min、振动频率 6.68 Hz、梳刷间隙 18.00 mm;最优参数组合下,蒜瓣去皮率为 93.68%、损伤率 4.40%,试验验证结果与优化结果相对误差均小于 5%,满足大蒜去皮要求。

关键词: 大蒜去皮装置;浮动搓擦;振动;梳刷

中图分类号: S226.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0132-10 OSID: 

Design and Test of Combined Garlic Flexible Peeling Device

LI Xinping¹ SUN Chenchen¹ ZHANG Wantong¹ WANG Shengsheng¹ GAO Lianxing²

(1. College of Agricultural Equipment Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Institute of Intelligent Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to solve the problems of low peeling rate and easy damage of garlic kernel, a combined garlic flexible peeling device was designed. The garlic peel was separated by the floating rubbing unit, and the vibration mechanism completed the transportation. The garlic peel was flexible peeled by the combined action of floating rubbing, vibrating brush and air blowing. According to the physical and mechanical characteristics of garlic, the key components such as rubbing mechanism, vibration mechanism, brushing mechanism, air blowing mechanism were designed. Through the dynamic analysis of garlic cloves in the floating rubbing unit and the vibrating screen, the main factors and value range that affected the peeling performance test were determined. Taking the rotational speed of the rubbing cylinder shaft, the comb brush spacing and the crank rotational speed as the test factors, and the peeling rate and the breakage rate as the test indexes, the three-factor three-level response surface test was carried out to obtain the optimal parameter combination of the rubbing cylinder shaft rotational speed, the comb brush spacing and the crank rotational speed, and the test verification was carried out. The test results showed that the optimal parameter combination was the rotation speed of rubbing roller shaft of 70.73 r/min, vibration frequency of 6.68 Hz, comb brush clearance of 18.00 mm. Under the optimal parameter combination, the peeling rate of garlic cloves was 93.68% and the damage rate was 4.40%. The relative error between the test verification results and the optimization results was less than 5%, which met the requirements of garlic peeling.

Key words: garlic peeled device; floating rubbing; vibration; comb brush

收稿日期: 2022-08-15 修回日期: 2022-09-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(52005163)
作者简介: 李心平(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail: aalxp@126.com
通信作者: 高连兴(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail: lianxin_gao@126.com

0 引言

大蒜去皮是大蒜深加工产业中基础和核心环节,由于蒜皮厚度较小,脆性大,使得蒜皮不易连续剥离,且去皮过程中蒜仁易受损伤,增大了大蒜去皮机械设计难度。近年来,针对大蒜的力学特性开展了研究分析,贾生涛等^[1]进行了大蒜物料力学特性的研究,得出含水率和加载速度对大蒜压碎力有显著性影响;徐陶^[2]对大蒜种子的物理特性进行研究,得出蒜瓣弧面在受同等压力作用下更容易受到损伤;BAYAT 等^[3]研究了含水率对大蒜表皮力学特性的影响,得出大蒜表皮断裂时的应力和应变;MANINDER 等^[4]通过对去皮和未去皮的大蒜进行摩擦性能试验,得出大蒜在胶合板和镀锌铁板两种材料上的休止角和摩擦因数,上述研究为降低大蒜去皮时的破损率提供了设计依据。结合大蒜的物理特性,国内外学者^[5-9]进行了大蒜去皮机的设计与分析,均未能彻底解决去皮率低和蒜仁易损伤等问题。本文设计一种组合式大蒜柔性去皮装置,采用浮动搓擦、振动梳刷和气吹去皮等结构相组合的方式实现蒜皮柔性去皮,为大蒜去皮机械的设计和结构优化提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

大蒜柔性去皮装置如图 1 所示,主要由机架、搓擦机构、振动机构、梳刷机构、气吹机构和传动机构组成。其中,搓擦机构中的浮动搓擦单元是由浮动搓擦辊和扇形搓擦面组成,空心辊和扇形面表层由柔性材料高耐磨橡胶制成,以减少对蒜仁的损伤;振动机构中的偏心振动单元由偏心轴承和轴承座组成,传动轴 I 带动偏心轴承使振动筛实现平面振动,仿蒜弧形摩擦块安装在振动筛内,与待去皮蒜瓣进

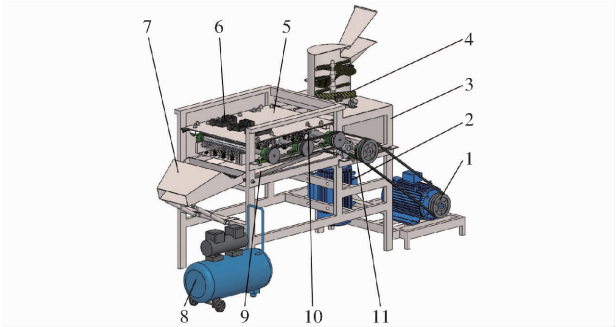


图 1 大蒜柔性去皮装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of garlic flexible peeling device

1. 电动机 1 2. 电动机 2 3. 机架 4. 浮动搓擦机构 5. 固定板
6. 微型夹具 7. 排料口 8. 空压机 9. 废料收集槽 10. 梳刷机构
11. 振动机构

行碰撞和摩擦以增强去皮效果;梳刷机构中的毛刷辊通过轴承座安装在固定板下方,对蒜瓣起到梳刷和输送的作用;气吹机构由空压机、气体分流器和微型夹具组成,微型夹具安装在固定板上方,使气管口垂直于振动筛中的物料;传动机构由传动轴 I、传动轴 II、传动轴 III、传动轴 IV、传动轴 V 和电动机 1、电动机 2 组成,通过传动带传动和联轴器联接。

1.2 工作原理

蒜瓣首先经过喂入口落入搓擦筒内的浮动搓擦单元上,通过传动轴 I 带动浮动摩擦辊组对扇形摩擦面上的蒜瓣进行搓擦,3 组摩擦辊与扇形摩擦面之间的间隙递减,且随蒜瓣的尺寸进行浮动调节,以保证尺寸不一的蒜瓣均能受到搓擦作用而使得蒜皮开裂。搓擦后的蒜瓣通过下料板进入振动筛内,受到振动筛振动和毛刷辊梳刷作用向排料口运动,蒜瓣在振动筛内与仿蒜弧形摩擦块进行摩擦与碰撞,先后受到筛面振动、毛刷辊梳刷、气吹等作用力,使得蒜皮在振动筛内逐渐脱落。去皮过程中,废料由振动筛面上的筛孔落入到废料收集槽内排出,去皮后的蒜仁通过排料口排出,完成蒜瓣去皮过程。

2 关键部件设计

2.1 搓擦机构

搓擦机构主要包括喂入口、搓擦筒、浮动搓擦单元、下料板和推力球轴承座等,其结构如图 2 所示。

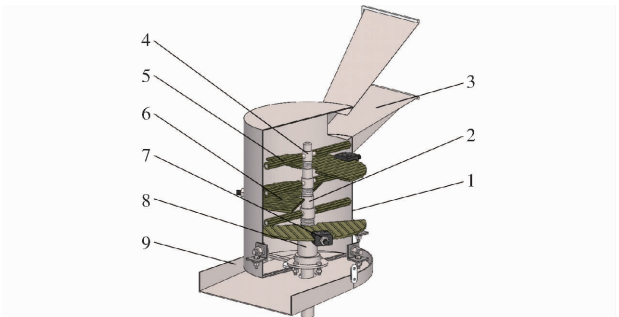


图 2 浮动搓擦机构示意图

Fig. 2 Schematic of floating rubbing mechanism

1. 搓擦筒 2. 传动轴 I 3. 喂入口 4. 空心圆柱 5. 搓擦辊
6. 扇形搓擦面 7. 固定夹头 8. 推力球轴承座 9. 下料板

浮动搓擦辊和扇形搓擦面形成的浮动搓擦单元是搓擦机构的关键部件。搓擦辊由空心橡胶辊和钢条紧密配合组成,再将直径为 10 mm 的钢条通过焊接固定到空心圆柱上,空心圆柱通过弹簧张力及自身重力在传动轴 I 上实现上下浮动,即搓擦辊可浮动调节以适应不同尺寸的蒜瓣,共安装 3 组;扇形搓擦面是由耐磨橡胶层和扇形钢板构成。每组搓擦辊轴线均与扇形搓擦面平行,形成搓擦单元,使得蒜瓣

蒜皮在喂入过程中受到搓擦作用而产生裂缝;空心橡胶辊和扇形面表层由柔性材料制成,表面有波浪线凸起,可增大蒜瓣在搓擦过程中受到的摩擦力,有利于蒜皮产生裂缝^[10]。

浮动搓擦单元间隙因蒜瓣外形尺寸而定,以山东金乡大蒜为测量对象,随机挑选 200 粒饱满的蒜瓣进行三维尺寸测量,对测量结果进行概率统计,可知蒜瓣长、宽和厚尺寸频率均符合正态分布,以此作为去皮性能试验依据。

蒜瓣在平面上多呈现卧姿,参考大蒜的三维尺寸参数,设定浮动搓擦辊和扇形搓擦面间的间隙依次为 20、14、8 mm,以此保证蒜瓣在搓擦单元间受到足够的搓擦作用。结合以上设计和物料喂入量,拟设计搓擦筒的直径为 250 mm,长度为 300 mm。

当蒜瓣在理想状态下进行搓擦时,对其搓擦过程进行受力分析,如图 3 所示。当蒜瓣与浮动搓擦单元接触时,蒜瓣受力有自身重力、浮动搓擦辊对其的搓擦力、弹簧对其的压力、阻碍其运动的摩擦力和扇形搓擦面对其的支撑力。在搓擦过程中,当搓擦力大于蒜皮之间的分离力时^[11],蒜瓣上的蒜皮会产生裂缝,即达到搓擦效果。

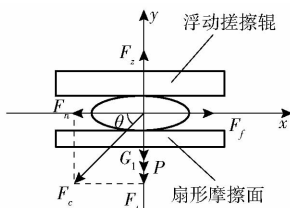


图 3 蒜瓣在浮动搓擦单元间受力分析

Fig. 3 Force analysis of garlic clove between floating rubbing units

为保证搓擦力大于蒜皮之间的分离力,须建立搓擦过程的动力学模型。在搓擦过程中,可将外形不规则蒜瓣看作椭圆形物体,其满足关系

$$\begin{cases} F_n \geq F_f + F \\ F_z = F_t + P + G_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_n ——法向搓擦力, N

F_t ——切向搓擦力, N

F_f ——阻碍蒜瓣运动的摩擦力, N

F_z ——蒜瓣支撑力, N

G_1 ——蒜瓣自身重力, N

P ——弹簧对蒜瓣的压力, N

F ——蒜皮间分离力, N

根据 F_n 、 F_t 和 F_c 的关系可得

$$\begin{cases} F_n = F_c \sin \theta \\ F_t = F_c \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中 θ ——搓擦力与法向搓擦力间夹角, ($^\circ$)

F_c ——搓擦力, N

将式(2)代入式(1)得

$$F_c \geq \frac{F}{\sin \theta - \mu \cos \theta} \quad (3)$$

式中 μ ——蒜瓣与扇形摩擦面的动摩擦因数^[12], 取 0.214

为满足搓擦力 F_c 必须大于分离力 F , 需对蒜皮间的分离力 F 进行测量^[13]。如图 4 所示, 采用 TA.XTC-16 型质构仪(上海保圣实业发展有限公司)测量蒜皮间的分离力 F , 试验对象为山东金乡大蒜。由大蒜的生物特性可知, 蒜瓣形状不规则, 无法直接对蒜皮进行夹持, 故选择用强力胶水将 T 形硬纸板粘到蒜皮非弧面, 通过夹头夹持 T 形硬纸板实现对蒜皮的分离试验, 拉伸速度为 0.1 mm/s^[14-15]。由试验结果可知, 蒜皮分离力呈正态分布, 最大分离力 F 为 13.89 N。

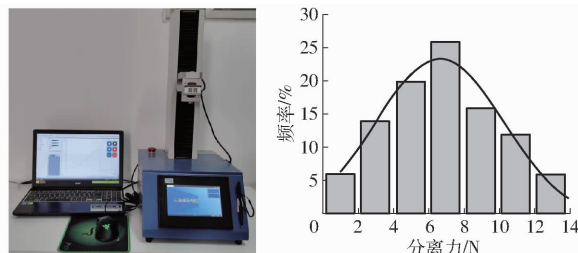


图 4 蒜皮分离力正态分布图

Fig. 4 Normal distribution of garlic peel separating force

将 $F_n = m_1 \omega_1^2 r_1$ 代入式(2)得

$$F_c = \frac{m_1 n_1^2 \pi^2 r_1}{900 \sin \theta} \quad (4)$$

$$\omega_1 = \frac{n_1 \pi}{30} \quad (5)$$

式中 m_1 ——单个蒜瓣质量, g

ω_1 ——搓擦辊转动角速度, rad/s

n_1 ——搓擦辊转速, r/min

r_1 ——搓擦辊圆周运动半径, mm

由式(4)可知, 搓擦力的大小与浮动搓擦辊的转速 n_1 有关, 转速过小则导致搓擦力不够, 转速过大易导致蒜瓣损伤。由式(3)、(4)可得浮动搓擦辊转速为

$$n_1 = \sqrt{\frac{900 F \sin \theta}{(\sin \theta - \mu \cos \theta) m_1 \pi^2 r_1}} \quad (6)$$

搓擦辊圆周运动半径 r_1 最大取 120 mm; 蒜瓣平均单个质量 m_1 为 4 g, 对搓擦力影响较小, 计算时可忽略不计; θ 可取 45° 。将以上参数代入式(6), 求得搓擦辊最小转速为 115.88 r/min, 最大转速为 227.22 r/min^[2]。经预试验确定浮动搓擦辊转速范围为 $120 \text{ r/min} \leq n_1 \leq 200 \text{ r/min}$, 因搓擦辊在轴上是成对安装, 故搓擦辊轴转速范围为 $60 \text{ r/min} \leq n_1 \leq$

100 r/min。

2.2 振动机构

振动机构由振动筛、仿蒜弧形摩擦块、偏心振动单元和可调摇杆组成,其结构如图 5 所示。其中振动筛内安装一层聚氨酯糙面垫,减少去皮过程中蒜瓣受到的刚性冲击;仿蒜弧形摩擦块固定在糙面垫上;偏心轴承安装在轴承座内,通过螺栓组固定到振动筛,传动轴 II 通过平键带动偏心轴承;可调摇杆安装在振动筛的两侧,可通过调节摇杆长度来调节振动筛倾斜角度。

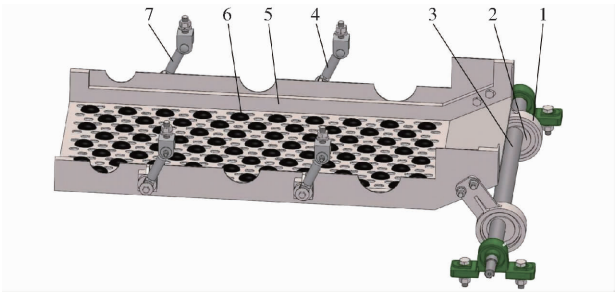


图 5 振动机构示意图

Fig.5 Schematic of vibration mechanism

1. 偏心轴承座 2. 偏心轴承 3. 传动轴 II 4. 可调长摇杆 5. 振动筛 6. 仿蒜弧形摩擦块 7. 可调短摇杆

2.2.1 振动筛及筛面设计

振动筛是整个振动机构的主体,蒜仁蒜皮混合物在筛面上做滚动和翻转运动。在去皮过程中,体积较大的蒜仁克服筛面上的摩擦力逐渐运动到排料口,体积较小的蒜皮碎屑会透过筛面落到废料收集槽内,为使蒜皮碎屑等废料能够顺利下落到废料收集槽内,且避免蒜仁因翻转掉入,故选用长方形筛孔,按照棋形布置^[16]。由蒜瓣的物理特性可知,筛孔的宽度必须大于蒜瓣的厚度,筛孔长度小于蒜瓣长度,故确定长方形筛孔尺寸为 20 mm × 8 mm。参考谷物清选装置中结构参数的确定方法^[17-18],筛面需保证对蒜瓣有足够的去皮时间,筛面长 710 mm,宽 320 mm,如图 6 所示。

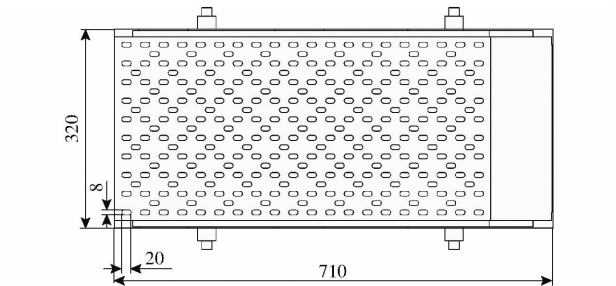


图 6 振动筛尺寸图

Fig.6 Dimension drawing of vibrating screen

2.2.2 仿蒜弧形摩擦块设计

为提高去皮效果,在振动筛面上安装仿蒜弧形摩擦块,使蒜瓣在筛内增大碰撞和摩擦面积的同时

增大蒜瓣受到的摩擦力。参考大蒜蒜瓣弧形面形状,随机挑选 100 瓣,采用二值化提取蒜瓣弧形面轮廓^[19],如图 7 所示。



图 7 蒜瓣轮廓二值化提取

Fig.7 Binary extraction of garlic clove contour

由图 7 可知,蒜瓣弧形面形状可看作抛物线,选取 100 瓣弧形面轮廓曲线最集中的一条曲线作为抛物线设计依据,通过对抛物线进行求解,得到蒜瓣弧形轮廓的抛物线方程。

由图 8 可知,ab 为过目标曲线的一条切线,切点为 $m(x_0, y_0)$,则由抛物线方程可得

$$\begin{cases} x^2 = -2py \\ y = kx + c \end{cases} \tag{7}$$

式中 p ——抛物线焦点到准线的距离,mm
 k ——切线斜率
 c —— y 轴截距,mm

由 $k = \tan 49^\circ$ 、 $c = 8.5 \text{ mm}$ 求得抛物线方程为 $x^2 = 25.76y$ (8)

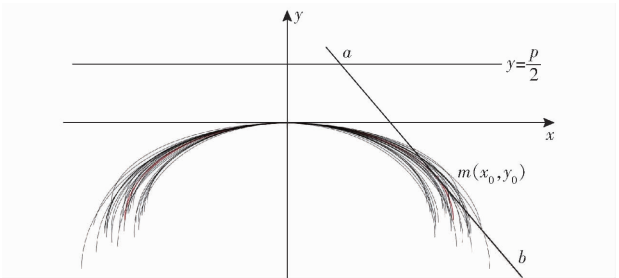
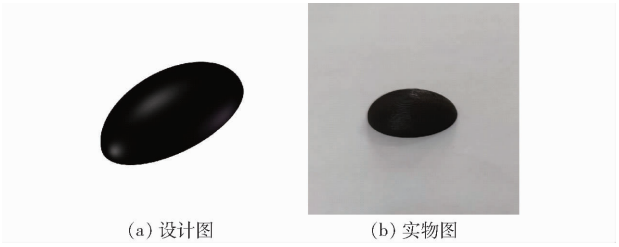


图 8 蒜瓣弧形面轮廓曲线

Fig.8 Contour curves of garlic clove curved surface

基于抛物线方程制造仿蒜弧形摩擦块,采用 3D 打印,材质为 PLA,与筛面上的筛孔交错布置,仿蒜弧形摩擦块设计与实物如图 9 所示。



(a) 设计图 (b) 实物图

图 9 仿蒜弧形摩擦块

Fig.9 Imitation garlic arc friction block

2.3 梳刷机构

梳刷机构由 3 组毛刷辊及传动轴组成,如图 10 所示。由蒜瓣三维尺寸可知,蒜瓣在卧姿状态下其高度(即厚度)为 0~26 mm,为保证梳刷效果,毛刷辊转动时刷毛需梳刷所有蒜瓣。适当的梳刷间隙有利于提高去皮效果,梳刷间隙过小,蒜瓣不易向后输送;梳刷间隙过大,对蒜瓣的梳刷作用力过小,影响去皮效果,故选择第 1 组毛刷辊与振动筛的梳刷间隙为试验因素。

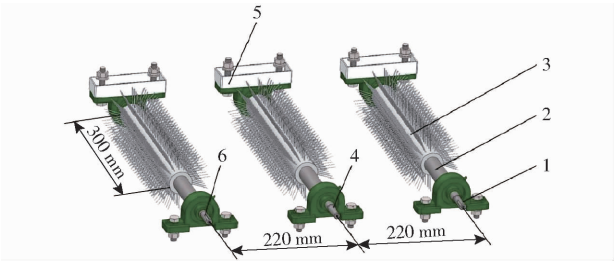


图 10 梳刷机构示意图

Fig. 10 Schematic of comb and brush mechanism
1. 传动轴Ⅲ 2. 轴承 3. 毛刷辊 4. 传动轴Ⅳ 5. 垫块 6. 传动轴Ⅴ

根据振动筛的宽度和长度确定毛刷辊的长度为 300 mm,两两辊组的间距为 220 mm。如图 11 所示,毛刷辊半径为 r_2 ,转动角速度为 ω_2 ,刷毛长度为 30 mm,材质为尼龙,可降低梳刷过程中对蒜瓣的损伤。

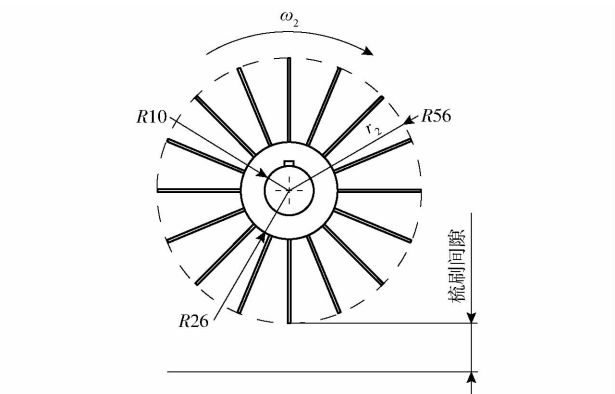


图 11 毛刷辊尺寸示意图

Fig. 11 Size diagram of brush roller

毛刷辊轴两端通过轴承座固定,通过调节轴承座的高度来控制毛刷辊与筛面的间距,当第 1 组毛刷辊梳刷间隙为 22 mm 时,第 2、3 组间隙调整为 16、10 mm;当第 1 组毛刷辊梳刷间隙为 20 mm 时,第 2、3 组间隙调整为 14、8 mm;当第 1 组毛刷辊梳刷间隙为 18 mm 时,第 2、3 组间隙调整为 12、6 mm。

2.4 气吹机构

气吹机构安装在轴Ⅳ和轴Ⅴ中间,是将筛内未被梳刷掉或未被梳刷干净的蒜瓣进行气吹去皮。通过空压机输出一定气压的气体,经过气体分流器均

分到气管内的气体通过气嘴吹入到振动筛内,筛内的蒜瓣蒜皮由于在搓擦筒内受到搓擦作用而开裂,故气体可通过蒜皮裂缝吹入,在风压的作用下蒜皮被吹落,以达到去皮效果。为保证筛内的蒜瓣均可被气体吹到,由筛面宽度和气体射流动力学原理^[20]可知,气管通过微型夹具固定在固定板上的排列间距为 100 mm,共需排列 3 根。由蒜皮分离力学特性可知,要保证气吹脱皮效果,气力需要大于蒜皮间的分离力^[11],为方便计算,设气体在射流区域内压强一样大^[21],故

$$F_q = p_q S \tag{9}$$

式中 F_q ——吹开蒜皮所需气力, N
 p_q ——空压机输出气体压强, Pa
 S ——蒜瓣表面所受气体面积, mm²

采用 Matlab 软件对蒜瓣所受风力表面积进行测量,得出蒜瓣最小受风力面积为 519 mm² (图 12),当蒜皮最大分离力为 13.89 N 即所需气力时,求得空压机出口压强 p_q 最小为 0.27 MPa。而气嘴距离筛面内物料大约 100 mm,据预试验得到,当蒜瓣蒜皮含水率为 10.3% 左右时,空压机出口压强为 0.50 MPa 时蒜瓣去皮效果较好。

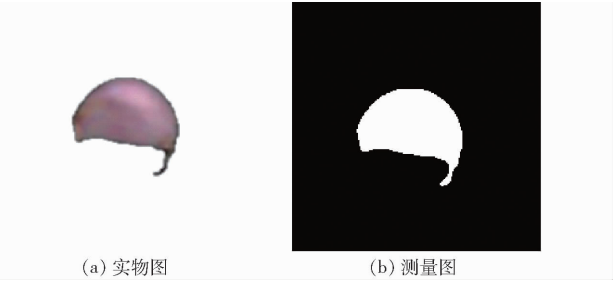


图 12 蒜瓣所受气吹表面积测量

Fig. 12 Measurement of air blown surface area of garlic cloves

2.5 物料在振动筛内的动力学分析

去皮装置振动机构可视为曲柄摇杆机构,由传动轴与偏心轴承配合驱动,可视为曲柄,偏心轴承座可视为连杆,摇杆的长度大于筛子的摆幅,故筛体运动可看作简谐运动^[22-23]。曲柄转速会对振动筛中物料运动产生影响,故对位于振动筛内的物料进行受力分析,如图 13 所示。

设 OA 为筛体运动正方向,物料沿筛面向上的相对运动为正方向,则筛面上存在关系

$$\begin{cases} s_1 = -r_3 \cos(\omega_3 t) \\ v_1 = \frac{ds_1}{dt} = \omega_3 r_3 \sin(\omega_3 t) \\ a_1 = \frac{dv_1}{dt} = \omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) \end{cases} \tag{10}$$

式中 s_1 ——筛体位移, mm

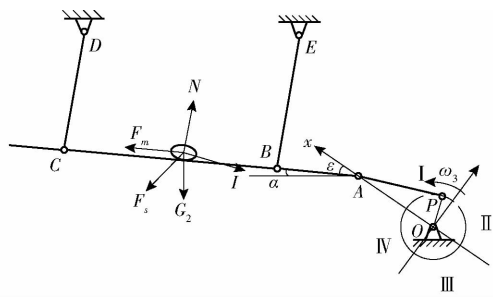


图 13 筛上物料受力示意图

Fig. 13 Schematic of material stress on screen

v_1 ——筛体速度, mm/s

a_1 ——筛体加速度, mm/s²

r_3 ——曲柄半径, 取 15 mm

ω_3 ——曲柄旋转角速度, rad/s

t ——时间, s

由于物料在去皮过程中毛刷辊在做匀速圆周运动, 梳刷时存在关系^[24]

$$\begin{cases} s_2 = \omega_2 r_2 t \\ v_2 = \omega_2 r_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 s_2 ——梳刷位移, mm

v_2 ——梳刷速度, mm/s

因此, 物料在去皮过程中受到振动和梳刷作用时, 其接触点的动力学方程为

$$\begin{cases} s_3 = \omega_2 r_2 t - r_3 \cos(\omega_3 t) \\ v_3 = \omega_2 r_2 + \omega_3 r_3 \sin(\omega_3 t) \\ a_2 = \omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) \end{cases} \quad (12)$$

式中 s_3 ——去皮机输出位移, mm

v_3 ——去皮机输出速度, mm/s

a_2 ——去皮机输出加速度, mm/s²

物料随筛面一起运动, 当 $\omega_3 t$ 在 $0 \sim \pi/2$ 和 $3\pi/2 \sim 2\pi$ 时, 惯性力 I 为正值, 物料有沿着筛面向上滑动的趋势; 当 $\omega_3 t$ 在 $\pi/2 \sim 3\pi/2$ 时, 惯性力 I 为负值, 物料有沿着筛面向下滑动的趋势。

设曲柄位于 II、III 象限时加速度为正, 方向向左, 物料处于毛刷辊与振动筛的梳刷间隙内, 此时物料受力有重力 G_2 、筛面法向反力 N 、惯性力 I 、摩擦力 F_m 和梳刷力 F_s 。因毛刷辊上的刷毛为尼龙束, 变形量较小, 为方便计算忽略刷毛的变形量, 则

$$\begin{cases} N = I \sin(\varepsilon + \alpha) + G_2 \cos \alpha + F_s \cos \beta \\ I = m_2 \omega_3 r_3 \cos(\omega_3 t) \\ F_m = N \tan \varphi \\ F_s = m_2 \omega_2 r_2 \\ G_2 = m_2 g \end{cases} \quad (13)$$

式中 m_2 ——物料质量, g

ε ——筛体振动方向角, 取 5°

α ——筛面与水平面倾角, 取 2°

β ——梳刷力与筛面垂直方向夹角, ($^\circ$)

φ ——物料与筛面的摩擦角, 取 31.6° ^[2]

当物料沿筛面上滑时, 其加速度为 a_3 , 则

$$m_2 a_3 = I \cos(\varepsilon + \alpha) + G_2 \sin \alpha - F_s \sin \beta - F_m \quad (14)$$

将 I 、 F_f 、 F_s 和 G 值代入式 (14) 化简得

$$\frac{\cos \varphi}{\cos(\varepsilon + \alpha + \varphi)} a_3 = \omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) - \frac{\omega_2 r_2 \sin(\beta + \varphi) + g \sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\varepsilon + \alpha + \varphi)} \quad (15)$$

由于加速度 a_3 为正, 则物料沿筛面上滑的条件为

$$\omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) > \frac{\omega_2 r_2 \sin(\beta + \varphi) + g \sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\varepsilon + \alpha + \varphi)} \quad (16)$$

物料沿筛面上滑时不被抛离筛面的条件为 $N > 0$, 即

$$\omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) \sin(\varepsilon + \alpha) + g \cos \alpha + \omega_2 r_2 \cos \beta > 0 \quad (17)$$

同理可得, 当曲柄位于 I、IV 象限时, 加速度为 a_4 , 方向向左, 物料沿筛面下滑的条件为

$$\omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) > \frac{g \sin(\alpha + \varphi) - \omega_2 r_2 \sin(\beta + \varphi)}{\cos(\varepsilon + \alpha - \varphi)} \quad (18)$$

物料沿筛面下滑时不被抛离筛面的条件为 $N > 0$, 即

$$g \cos \alpha - \omega_3^2 r_3 \cos(\omega_3 t) \sin(\varepsilon + \alpha) + \omega_2 r_2 \cos \beta > 0 \quad (19)$$

当 $\cos(\omega_3 t) = 1$, 得到物料只受筛面作用力时在筛面上滑的极限角速度为

$$\frac{\omega_3^2 r_3}{g} > \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\varepsilon + \alpha + \varphi)} \quad (20)$$

可得物料沿筛面上滑的最小曲柄转速为^[25]

$$n_2 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin(\varphi - \alpha)}{r_3 \cos(\varepsilon + \alpha + \varphi)}} \quad (21)$$

同理可得, 物料沿筛面下滑极限角速度为

$$\frac{\omega_3^2 r_3}{g} > \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos(\varepsilon + \alpha - \varphi)} \quad (22)$$

可得物料沿筛面下滑的最小曲柄转速为

$$n_3 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin(\alpha + \varphi)}{r_3 \cos(\varepsilon + \alpha - \varphi)}} \quad (23)$$

综合上述分析, 将所需相关数据代入式 (21)、(23), 求得物料沿筛面上滑的最小曲柄转速 n_2 为 196.02 r/min, 物料沿筛面下滑的最小曲柄转速 n_3 为 192.36 r/min。由于在筛面上安装仿蒜弧形摩擦块, 使得物料在筛内所受摩擦力 F 增大, 经预试验观察, 曲柄转速小于 360 r/min 时, 物料堆积在第 1 组毛刷辊前, 筛上物料无法正常向排料口输送; 当曲

柄转速大于 480 r/min 时,曲柄转速过快导致去皮装置振动加剧,长时间运转会使装置零件加速损坏。故确定曲柄转速为 360 ~ 480 r/min,即振动频率为 6 ~ 8 Hz。

3 去皮性能试验

3.1 试验材料与设备

试验品种选择山东金乡大蒜,单个蒜头有 6 ~ 8 瓣,单层排列,试验时选用直径为 50 ~ 60 mm 且表面无破损的大蒜头进行试验,其结构如图 14 所示。随机挑选 200 粒饱满的蒜瓣进行外形尺寸测量,测量结果如表 1 所示。

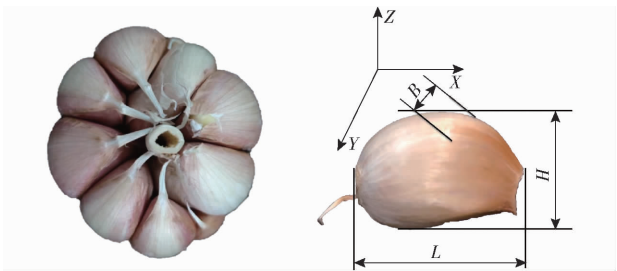


图 14 金乡大蒜实物和蒜瓣外形尺寸图
Fig. 14 Outline dimension drawing of Jinxiang garlic and garlic cloves

表 1 蒜瓣外形尺寸参数

Tab.1 Dimension parameters of garlic clove

参数	长/mm	宽/mm	厚/mm
最大值	38.54	27.22	26.00
最小值	24.55	12.76	10.27
平均值	31.59	19.24	16.60
变异系数/%	9.91	17.00	20.66

装置实物图如 15 所示,试验前,对自然条件下存放的蒜瓣蒜皮含水率进行随机抽取检测,测得蒜皮含水率在 10.3% 左右,蒜仁含水率在 58.5% 左右。



图 15 大蒜去皮装置实物图
Fig. 15 Actual picture of garlic peeling device

3.2 试验方法与因素

大蒜去皮装置应满足蒜瓣完全去皮和去皮后蒜仁无损伤^[26]。根据理论分析和预试验,选择 Box - Behnken 试验设计方法,以搓擦筒轴转速、振动频率、梳刷间隙为试验因素,因素编码如表 2 所示。选

取去皮率 y_1 和损伤率 y_2 为试验指标,共进行 17 组试验,每次试验重复 3 次,结果取其平均值,结果如表 3 所示(x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值)。

表 2 因素编码

Tab.2 Factors and coding

编码	因素		
	搓擦筒轴转速/ (r·min ⁻¹)	振动频率/Hz	梳刷间隙/mm
-1	60	6	18
0	80	7	20
1	100	8	22

表 3 试验方案和结果

Tab.3 Test protocols and results

编号	因素			y_1 /%	y_2 /%
	x_1	x_2	x_3		
1	1	1	0	88.84	8.88
2	0	0	0	93.15	5.06
3	0	-1	1	87.21	4.07
4	-1	0	-1	92.12	4.01
5	0	0	0	92.64	4.85
6	-1	1	0	91.98	4.99
7	-1	-1	0	89.01	4.34
8	0	-1	-1	93.14	4.68
9	0	0	0	93.33	4.69
10	1	0	-1	88.71	8.55
11	1	-1	0	85.97	7.04
12	0	1	-1	94.42	7.46
13	1	0	1	83.76	6.52
14	0	0	0	93.63	4.84
15	0	1	1	92.77	6.25
16	-1	0	1	90.79	3.98
17	0	0	0	92.12	5.47

在去皮性能试验中,通过变频器 I 控制搓擦筒轴转速;通过变频器 II 控制振动频率;通过空压机输出所需压强。

3.3 试验结果分析

利用 Design-Expert 10.0.7 软件对表 3 中试验数据进行分析,得到试验因素搓擦辊轴转速、振动频率和梳刷间隙与去皮率、损伤率之间的回归方程为

$$y_1 = 92.97 - 2.08x_1 + 1.58x_2 - 1.73x_3 - 0.025x_1x_2 - 0.90x_1x_3 + 1.07x_2x_3 - 3.53x_1^2 - 0.49x_2^2 - 0.60x_3^2 \quad (24)$$

$$y_2 = 4.98 + 1.71x_1 + 0.93x_2 - 0.49x_3 + 0.30x_1x_2 - 0.50x_1x_3 - 0.15x_2x_3 + 0.74x_1^2 + 0.59x_2^2 + 0.043x_3^2 \quad (25)$$

对去皮率进行方差分析,结果如表 4 所示,可知模型 P 为 0.000 1,表明试验模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,表明失拟项不显著,模型决定系数 R^2 为

0.972 7,拟合精度较高,表明该模型能够比较准确地对试验指标进行预测。

对损伤率进行方差分析,方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知,二次回归模型的 P 为 0.000 2,表明试验模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,表明失拟项不显著,模型决定系数 R^2 为 0.969 9,拟合精度较高,表明该模型能够比较准确地对试验指标进行预测。

表 4 去皮率方差分析

Tab.4 Analysis of variance of peeling rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	143.81	9	15.98	27.73	0.000 1
x_1	34.53	1	34.53	59.92	0.000 1
x_2	20.10	1	20.10	34.88	0.000 6
x_3	24.01	1	24.01	41.67	0.000 3
x_1x_2	2.5×10^{-3}	1	2.5×10^{-3}	4.34×10^{-3}	0.949 3
x_1x_3	3.28	1	3.28	5.69	0.048 6
x_2x_3	4.58	1	4.58	7.95	0.025 8
x_1^2	52.53	1	52.53	91.16	$<0.000 1$
x_2^2	1.02	1	1.02	1.77	0.225 2
x_3^2	1.50	1	1.50	2.60	0.150 6
失拟项	2.60	3	0.87	2.43	0.205 3
纯误差	1.43	4	0.36		
总和	147.85	16			

表 5 损伤率方差分析

Tab.5 Analysis of variance of damage rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	37.66	9	4.18	25.10	0.000 2
x_1	23.36	1	23.36	140.12	$<0.000 1$
x_2	6.94	1	6.94	41.62	0.000 3
x_3	1.88	1	1.88	11.29	0.012 1
x_1x_2	0.35	1	0.35	2.12	0.188 4
x_1x_3	1.00	1	1.00	6.00	0.044 2
x_2x_3	0.090	1	0.090	0.54	0.486 4
x_1^2	2.31	1	2.31	13.84	0.007 5
x_2^2	1.47	1	1.47	8.80	0.020 9
x_3^2	7.70×10^{-3}	1	7.70×10^{-3}	0.046	0.836 0
失拟项	0.80	3	0.27	2.91	0.164 8
纯误差	0.37	4	0.092		
总和	38.83	16			

由表 4 可知,对于去皮率,因素 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1^2 对模型影响极显著,因素 x_1x_3 、 x_2x_3 对模型影响显著,其他因素不显著。各因素对去皮率影响的主次顺序为搓擦辊转速、梳刷间隙、振动频率。对于损伤率,因素 x_1 、 x_2 、 x_1^2 对模型影响极显著,因素 x_3 、 x_1x_3 、 x_2^2 对模型影响显著,其他因素不显著。各因素对损伤率影响的主次顺序为搓擦辊转速、振动频率、梳刷间隙。

3.3.1 交互作用对去皮率的影响

图 16a 为振动频率处于中心水平时,搓擦辊轴转速和梳刷间隙交互作用对去皮率影响的响应曲面。当搓擦辊轴转速一定时,去皮率随梳刷间隙减小呈现出逐渐增大的趋势。随着梳刷间隙减小,位于振动筛内的蒜瓣受到梳刷作用力就越强,蒜皮更容易分离,故去皮率增大。

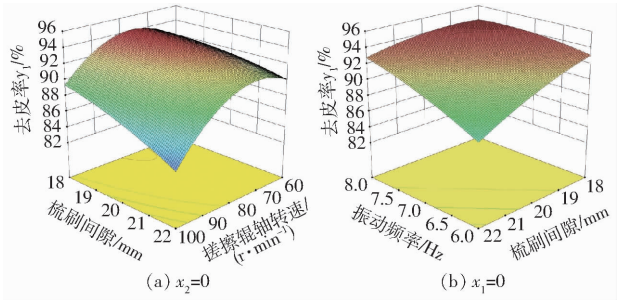


图 16 各因素对去皮率影响的响应曲面

Fig.16 Response surfaces of each factor to influence of peeling rate

图 16b 为搓擦辊轴转速处于中心水平时,振动频率和梳刷间隙交互作用对去皮率影响的响应曲面。当梳刷间隙一定时,去皮率随振动频率的增大呈现出逐渐增大的趋势。随着振动频率的增大,蒜瓣在振动筛内翻转和碰撞的频率增大,与筛内仿蒜弧形摩擦块不断摩擦,使得蒜皮更易脱落,去皮效果更好。

3.3.2 交互作用对损伤率的影响

由图 17 可知,振动频率处于中心水平时随着梳刷间隙从 18 mm 增大 22 mm,损伤率逐渐降低,这是因为随着梳刷间隙增大,位于梳刷间隙的蒜瓣受到的梳刷力减小,蒜瓣在梳刷时与筛面的碰撞减弱,使得损伤率减小。

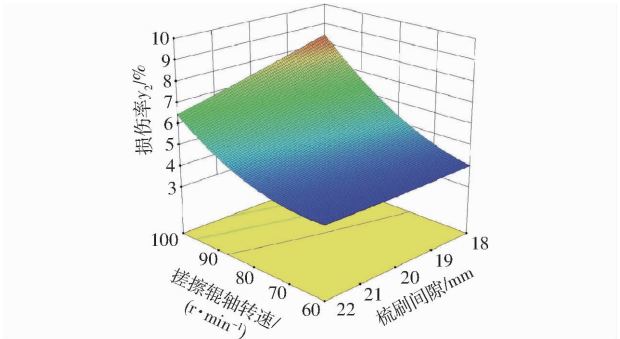


图 17 各因素对损伤率影响的响应曲面

Fig.17 Response surfaces of each factor's influence on damage rate

3.4 参数优化

为得到去皮性能试验中各因素最优组合,以去皮率最大和损伤率最小为评价指标,其中去皮率和破损率的权重为 0.6 和 0.4。采用 Design-Expert 10.0.7 软件进行优化求解,设置约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

优化后得到最优组合:搓擦辊轴转速为 70.73 r/min、振动频率为 6.68 Hz、梳刷间隙为 18.00 mm,此参数组合下去皮率为 93.68%、损伤率为 4.40%。

4 验证试验

根据优化所得的参数组合进行验证试验,为方便操作,试验时将参数圆整为:搓擦辊轴转速 70 r/min、振动频率为 6.7 Hz、梳刷间隙为 18 mm,每组试验重复 3 次,取其平均值,验证试验结果如表 6 所示。试验验证结果去皮率为 93.74%,损伤率为 4.28%,与优化结果相对误差均小于 5%,表明参数优化后模型可靠性较高。

5 结论

(1)设计组合式大蒜柔性去皮装置,通过浮动

表 6 验证试验结果

Tab.6 Verification test results			%
试验序号	y ₁	y ₂	
1	94.22	4.25	
2	93.01	4.14	
3	93.99	4.44	
平均值	93.74	4.28	

搓擦单元完成蒜皮分离,振动机构完成输送,蒜瓣经过浮动搓擦、振动梳刷及气吹等组合作用完成柔性去皮。

(2)各因素对去皮率均影响极显著,影响去皮率的主次顺序为搓擦辊轴转速、梳刷间隙、振动频率;搓擦辊轴转速、振动频率对损伤率具有极显著影响,梳刷间隙对损伤率具有显著影响,影响损伤率的主次顺序为搓擦辊轴转速、振动频率、梳刷间隙。

(3)采用 Box - Behnken 试验设计方法,确定最优参数组合为:搓擦辊轴转速为 70.73 r/min、振动频率为 6.68 Hz、梳刷间隙为 18.00 mm,此参数组合下去皮率为 93.68%、损伤率为 4.40%,验证试验结果与优化结果相对误差均小于 5%。

参 考 文 献

[1] 贾生涛,牛长河,王学农,等. 新疆大蒜物料及力学特性试验研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(5):81-86.
JIA Shengtao, NIU Changhe, WANG Xuenong, et al. Research and experiment of Xinjiang garlic materials and mechanical properties[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 81-86. (in Chinese)

[2] 徐陶. 大蒜种子机械物理特性及其测试方法的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2017.
XU Tao. Study on mechanical properties and testing methods of garlic seeds[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese)

[3] BAYAT F, REZVANI S. Effect of harvesting time and moisture on mechanical properties of garlic (*Allium sativum* L.) skin [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2012, 14(3): 161-167.

[4] MANINDER K, PREETINDER K, AMARJIT K, et al. Gineering properties of peeled and unpeeled garlic cloves [J]. Agricultural Research Journal, 2017, 54(1): 85-89.

[5] 李心平,于亚飞,张玉猛,等. 一种小型家用大蒜剥皮机的设计及试验[J]. 现代化农业,2017(2): 62-63.

[6] 阙志祥,孟宝星,李荣兵,等. 一种小型手动大蒜脱皮机的设计[J]. 农产品加工,2016(1):47-48.
KAN Zhixiang, MENG Baoxing, LI Rongbing, et al. A design of small hand garlic peeling machine [J]. Farm Products Processing, 2016(1): 47-48. (in Chinese)

[7] RAJESH K. Design and fabrication of garlic peeler[J]. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 2018, 5(7): 165-170.

[8] MANJUNATHA M, SAMUEL D V K, ANURAG R K, et al. Development and performance evaluation of a garlic peeler[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3083-3093.

[9] MUDGAL V D, CHAMPAWAT P S. Development of a garlic clove peeler for small scale industry[J]. International Journal of Food Engineering, 2011, 7(3): 1-6.

[10] 李心平,王文哲,赵高源,等. 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):113-123.
LI Xinping, WANG Wenzhe, ZHAO Gaoyuan, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow double flexible rolling and kneading threshing device for millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 113-123. (in Chinese)

[11] 吴昆,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):1-20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1-20. (in Chinese)

[12] 侯加林,王后新,牛子儒,等. 大蒜取种装置取种清种性能离散元模拟与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(24):48-57.
HOU Jialin, WANG Houxin, NIU Ziru, et al. Discrete element simulation and experiment of picking and clearing performance

- of garlic seed-picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 48–57. (in Chinese)
- [13] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 86–92. JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 86–92. (in Chinese)
- [14] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 25–31. CHEN Hong, XU Xiangzhou, YIN Yijun, et al. Experimental study on mechanical properties and peel separation characteristics of citrus reticulate blanco with peel clamped moving[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 25–31. (in Chinese)
- [15] 陈争光, 王德福, 李利桥, 等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 59–65. CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 59–65. (in Chinese)
- [16] 张强, 梁留锁. 农业机械学[M]. 北京: 化工工业出版社, 2016.
- [17] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1–16. XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1–16. (in Chinese)
- [18] 高连兴, 李献奇, 关萌, 等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 110–117. GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 110–117. (in Chinese)
- [19] 谢东波, 张春岭, 吴晓庆, 等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 47–57. XIE Dongbo, ZHANG Chunling, WU Xiaoqing, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 47–57. (in Chinese)
- [20] 李毅念, 易应武, 杜世伟, 等. 小区谷物联合收获机气吹式割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 79–87. LI Yinian, YI Yingwu, DU Shiwei, et al. Design and experiment on air blowing header of plot combine harvester for grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 79–87. (in Chinese)
- [21] 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助匀轮式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66–72. CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66–72. (in Chinese)
- [22] 陶桂香, 张紫恒, 衣淑娟, 等. 板蓝根收获机组筛面摆动式根土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 109–119. TAO Guixiang, ZHANG Ziheng, YI Shujuan, et al. Design and test of combined swing *Radix isatidis* root-soil separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 109–119. (in Chinese)
- [23] 李立君, 胡文字, 高自成, 等. 曲柄摇杆振动破壳油茶果粗选机运动学分析及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 28–35. LI Lijun, HU Wenyu, GAO Zicheng, et al. Kinematics analysis and experiment of crank rocker vibrating coarse sorting machine for unshelled oil-tea fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 28–35. (in Chinese)
- [24] 陈军, 赵健, 陈云, 等. 振刷式枸杞采收机设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 152–161, 95. CHEN Jun, ZHAO Jian, CHEN Yun, et al. Design and experiment on vibrating and comb brushing harvester for *Lycium barbarum*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 152–161, 95. (in Chinese)
- [25] 杨猛, 张延化, 张冲, 等. 先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 112–121. YANG Meng, ZHANG Yanhua, ZHANG Chong, et al. Design and experiment of fan-sieve combined peanut film seedling separating device based on shredding and separating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 112–121. (in Chinese)
- [26] 耿令新, 卢富运, 张利娟, 等. 基于人工抽薹原理的蒜薹采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 115–124. GENG Lingxin, LU Fuyun, ZHANG Lijuan, et al. Design and experiment of garlic bolt picking machine based on artificial extraction principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 115–124. (in Chinese)