doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.015

双圆台锥式蓖麻脱壳清选机设计与试验

侯俊铭　白晶波　何　涛　杨　勇　李金澎　姚恩超
(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 为提高蓖麻脱壳效率,确定了滚搓式的脱壳方法,设计了双圆台结构的脱壳装置以及振动筛选与气吸相结合的清选机构。根据蓖麻蒴果的物理机械特性,设计脱壳装置的内层壳体为不对称双圆台结构。确定锥角并设计脱壳滚筒间隙与脱壳滚筒外层壳体,建立不同阶段脱壳滚筒位置与脱壳间隙的数学模型,为脱壳装置动力学模拟提供理论依据。利用 ADAMS 对蓖麻蒴果不同脱壳阶段进行运动学仿真,分析物料在压裂阶段与脱壳阶段的位移、速度变化规律,并分析不同脱壳滚筒出料口间隙对各阶段的影响。仿真结果表明:压裂阶段,随着上脱壳滚筒出料口间隙的增加,蓖麻蒴果到达特定压裂位置的时间延后、位移增加、运动速度在 0.56 s 时达到最大。脱壳阶段,随着下脱壳滚筒出料口间隙的增加,蓖麻籽到达特定脱壳位置的时间延后;蓖麻籽到达破壳条件时的位移增加,运动速度先增大后减小。根据仿真结果,选取可调式蓖麻脱壳清选一体装置合理的工作参数区间,以脱壳滚筒转速、上脱壳滚筒出料口间隙、下脱壳滚筒出料口间隙为因素,以脱净率、破损率为指标,利用响应面分析法,对脱壳装置进行试验研究。经双目标优化,取滚筒转速为 270 r/min、上脱壳滚筒出料口间隙为 13.54 mm、下脱壳滚筒出料口间隙为 5 mm;经试验验证,此时脱壳装置工作性能最佳,脱净率为 92.03%,破损率为 3.1%。

关键词: 蓖麻; 脱壳; 清选; 圆锥台
中图分类号: S226.1+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0132-09

Design and Experiment of Castor Dehulling and Cleaning Device with Double Curved Table

HOU Junming　BAI Jingbo　HE Tao　YANG Yong　LI Jinpeng　YAO Enchao
(*College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: In order to improve the efficiency of castor shelling, the method of tumbling shelling was determined, and the shelling device with double curved table structure was designed. The cleaning mechanism combined vibration screening and air suction was designed. Depending on the physical and mechanical properties of the castor fruit, the asymmetrical double circular table structure of the inner shell of husking device was designed. The taper angle was determined and the outer shell of the shelling drum was designed, the mathematical model of the position of the shelling drum and the shelling gap at different stages was established, and a theoretical basis was provided for the dynamic simulation of the shelling device; the ADAMS was used to extract the nettle. The kinematics simulation was carried out in different shelling stages to analyze the variation of the displacement and velocity of the material in the fracturing stage and the shelling stage, and analyze the influence of gap of discharge port of different unloading drums on each stage. The simulation results showed that in the fracturing stage, with the increase of gap of discharge port of upper shelling drum, the time after castor fruit reached the specific fracturing position was delayed, the displacement was increased, the speed of movement reached the maximum at 0.56 s. In the shelling stage, with the increase of gap of discharge port of lower shelling drum, the time when the castor seed reached the specific shelling position was delayed; when the castor seed reached the shell breaking condition, the displacement was increased, and the moving speed was firstly increased and then decreased. According to the ADAMS simulation results, the reasonable working parameter interval of the adjustable castor shelling and clearing device was selected, taking the speed of the shelling drum, the gap of the upper shelling drum outlet and the gap of the lower shelling drum outlet

收稿日期: 2018-08-01　修回日期: 2018-09-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51475312)
作者简介: 侯俊铭(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与制造研究,E-mail: junming_hou@163.com

as the factors. The response surface analysis method was used to test the sealing device. After double target optimization, the rotation speed of the drum was 270 r/min, the gap of discharge port of upper shelling drum was 13.54 mm, and the gap of outlet of lower shelling drum was 5 mm. The test result showed that the performance of the sealing device was the best. The removal rate was 92.03% and the breakage rate was 3.1%.

Key words: castor; shelling; filter; frustum

0　引言

蓖麻脱壳是蓖麻产业加工过程中极其重要的一环，随着蓖麻产量的增加，蓖麻脱壳机械发挥的作用越来越大。国内现有蓖麻脱壳机械脱净率低、破损率高，难以保证质量要求[1-2]。因此，开发高效的蓖麻脱壳设备将有利于推动蓖麻产业的发展。

目前，较为成熟的脱壳装置多为机械脱壳形式，包括旋转筛网式、挤压式、揉搓式、仿生式、滚筒刮板式、冲击式、碾压式等。如洪都拉斯已应用旋转筛网式脱壳装置对蓖麻籽进行脱壳处理。LIM 等[3-5]设计了一种挤压式蓖麻籽脱壳机，采用 4 对辊挤压的方式对蓖麻蒴果进行脱壳处理，此装置能使蓖麻充分脱壳，但结构较为复杂，维修困难。ROMULI 等[6-7]使用改良式磨盘机，利用响应面法分析其对脱壳率以及能耗的影响，此方法可以对蓖麻籽进行预分组，显著提高了脱净率。曹玉华等[8-9]利用蓖麻蒴果现有物理及机械特性，对蓖麻蒴果脱壳关键部件进行了优化，将挤压式对辊的梳刷改进为螺旋槽。曹成茂等[10]采用柔性揉搓板与柔性栅栏相配合的方式，设计了一种柔性揉搓式板栗剥苞机。挤压和揉搓的方式能大大提高蓖麻脱净率。但因蓖麻蒴果大小不均，其在脱壳间隙内更加容易损伤。李心平等[11-12]模拟鸡喙，根据玉米种子抗压特性设计了一种玉米种子仿生脱粒机，试验结果表明，该种脱粒方式能显著减小对玉米籽粒的损伤。刘明政等[13]设计了柔性带剪切挤压式核桃破壳取仁分离装置。高连兴等[14-15]先后采用双滚筒气力循环式和三滚式设计对花生进行脱壳处理。张黎骅等[16]设计了滚筒栅条式银杏果脱壳机，这种打击揉搓脱壳方式适应性强，且柔性栅条能对物料起到一定的保护作用。姜楠等[17]利用钉齿的冲击作用对谷穗实现了脱壳处理。郑甲红等[18]通过偏心辊打击作用实现了核桃破壳，该种冲击脱壳方式对不同种物料适应性较强。李军[19]采用碾压辊与振动台相结合方式设计了碾压式谷子脱粒机。王升升等[20]设计了一种半喂入式谷子脱粒装置，由于物料进给不均匀，碾压式脱粒机在运行过程中易造成阻塞，脱粒效率有待提高。

国内大部分蓖麻种植地区依然采用手工方式脱壳，劳动量巨大。为增加蓖麻利用率，提高蓖麻脱壳效率，本文在滚搓式脱壳原理基础上，设计一种可调式蓖麻脱壳清选一体装置。该装置采用滚搓式脱壳机理与振动吸风清选相结合，脱壳装置采用立锥分段式设计，以保证脱壳室内蓖麻能充分脱壳。

1　整体结构设计与原理

1.1　整体结构设计

设计的蓖麻脱壳清选一体装置由传动系统、脱壳机构、清选机构、机架等组成。整机采用卧式布局，可增大与地面接触面积，降低整机的振动幅度；蓖麻蒴果在整机构内由上至下、由左至右运动，在运动过程中始终受到重力作用，运动平稳顺畅；电机转速、脱壳滚筒出料口间隙、振动筛倾角、振动筛特征值等可调，对不同品种的蓖麻蒴果适应性高，如图 1 所示。

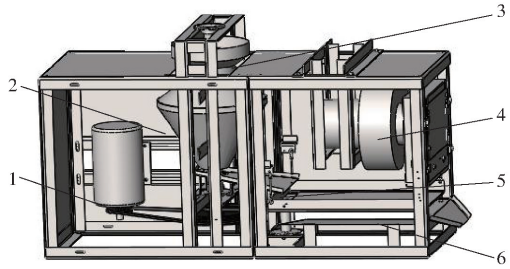


图 1　蓖麻脱壳清选一体装置结构简图

Fig. 1　Structural diagram of castor shelling and clearing device

1. 电机　2. 脱壳装置　3. 进料口　4. 吸风机　5. 出料口　6. 振动筛

1.2　工作原理

蓖麻蒴果经喂料口进入脱壳室，上脱壳滚筒内层壳体有转速差，蓖麻蒴果在滚筒间隙内不断受到挤压与滚搓双重作用，对蓖麻蒴果进行预脱壳。达到上脱壳滚筒底部直径最大处后，落入下脱壳滚筒内外层壳体组成的脱壳机构中进行脱壳处理。脱壳后的蓖麻籽及其外皮碎屑经排料口至接料板，在重力作用下，通过圆形冲孔筛。尺寸小于圆孔的碎屑被筛至碎屑板，其余脱出物继续沿筛面下滑，达到吸风箱时，较大的碎屑及干瘪蓖麻籽由高压离心风机吸出，排出装置外；剩余脱壳质量良好的蓖麻籽经由出料口排出装置外，可进行采集包装等后续处理。

2 关键部件设计

2.1 脱壳装置整体结构

该脱壳装置采用双圆台结构作为脱壳滚筒的内层壳体,同时在其外部机架装配有两个锥形脱壳滚筒,与之配合形成间隙逐渐变小的脱壳工作区间。上脱壳滚筒对蓖麻蒴果进行压裂,下脱壳滚筒实现蓖麻蒴果脱壳。两个阶段工作部件串联在同一轴上,采用立式布局,如图 2 所示。

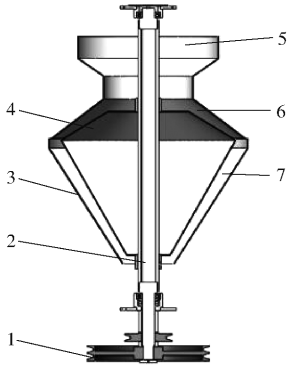


图 2 脱壳装置结构原理图

Fig. 2 Shelling device schematic

1. 带轮 2. 主轴 3. 外层滚筒 4. 内层滚筒 5. 喂料口 6. 上脱壳滚筒间隙 7. 下脱壳滚筒间隙

2.2 脱壳装置设计

2.2.1 上脱壳滚筒内层壳体锥角

脱壳滚筒锥角的大小,直接关系到蓖麻蒴果能否顺利进入到脱壳滚筒内外层间隙,同时也是影响脱壳滚筒直径、整机大小的重要参数。蓖麻蒴果进入脱壳滚筒时的临界状态如图 3 所示。

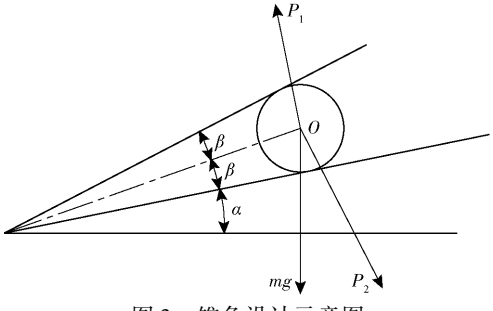


图 3 锥角设计示意图

Fig. 3 Taper angle design diagram

蓖麻蒴果处于临界状态时,受到重力 mg、上脱壳滚筒内层对其的反作用力 P_1 及上脱壳滚筒外层对其的反作用力 P_2,此时

$$mg\cos\alpha = P_1 + P_2\cos(2\beta-\alpha) \quad (1)$$

$$mg\sin\alpha = P_2\sin(2\beta-\alpha) \quad (2)$$

式中 α——上脱壳滚筒锥角,(°)

β——蓖麻蒴果球心与上脱壳滚筒内层外表面夹角,(°)

要实现蓖麻蒴果顺利进入上脱壳滚筒内外层间隙,则

$$mg\sin\alpha > P_1\sin\alpha\tan\varphi + P_2\sin(2\beta-\alpha) + P_2\cos(2\beta-\alpha)\tan\varphi \quad (3)$$

式中 φ——蓖麻蒴果与铁质材料摩擦角,(°)

化简得 $\alpha > \varphi$

即若实现蓖麻蒴果顺利进入上脱壳滚筒内外层间隙,应使得上脱壳滚筒锥角大于蓖麻蒴果与铁质材料的摩擦角。

2.2.2 脱壳滚筒位置与脱壳间隙关系

分析研究脱壳机构中任意位置间隙,有利于求解蓖麻蒴果及蓖麻籽在脱壳机构中的受力及变形。以上脱壳滚筒内层壳体锥角顶点为原点 O,以上脱壳滚筒内层壳体最大直径方向为 x 轴,建立直角坐标系,如图 4 所示。

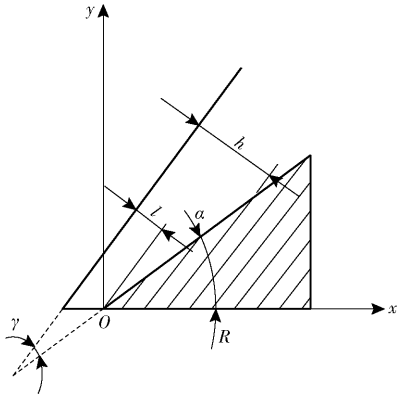


图 4 上滚筒间隙分析

Fig. 4 Upper roller gap analysis

由几何关系可知

$$h = \frac{x\tan\varphi + \dfrac{l\sin\alpha}{\sin\gamma}}{R + \dfrac{l\sin\alpha}{\sin\gamma}}\left(1 + \frac{R\sin\gamma}{l\cos\alpha}\right)l \quad (4)$$

式中 h——上脱壳滚筒内层壳体任意点到上脱壳滚筒外层壳体距离,mm

x——蓖麻蒴果在上脱壳滚筒 x 方向投影长度,mm

R——上脱壳滚筒内层壳体最大直径,mm

l——上脱壳滚筒出料口最小间隙,mm

γ——上脱壳滚筒外层壳体锥角,(°)

由式(4)可知,脱壳机构间隙随着蓖麻蒴果在脱壳机构中的位置而不断变化,脱壳机构间隙逐渐减小,使得蓖麻蒴果在脱壳过程中所受的挤压与滚搓作用逐渐增大。同时在设计内层壳体时,其表面覆有一层具有缓冲作用的柳叶纹橡胶皮垫,在压裂蓖麻蒴果的同时对蓖麻籽起到一定的保护作用,避免产生隐性内部损伤。

2.3 清选机构设计

该脱壳装置清选机构采用振动筛选与气吸相结

合的结构方式，包括振动筛、连杆、振动筛动力发生装置、吸风箱、风机等，振动筛如图 5 所示。振动筛两侧分别通过连杆与机架相连，构成具有双摇杆的平行四杆机构，相对于地面有一定倾角；振动筛的动力由偏心轮的回转运动提供，偏心轮带有凸台结构，凸台结构与振动筛之间具有移动副，带动振动筛做简谐运动；吸风箱由调整箱嵌入固定箱内，便于调整吸风口与振动筛的相对位置。

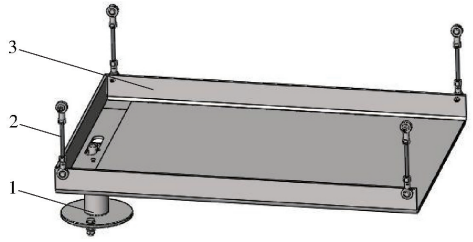


图 5　振动筛结构示意图

Fig. 5　Schematic of upper and outer shelling drum

1. 偏心轮结构　2. 连杆　3. 振动筛

2.4　传动系统设计

该脱壳清选一体装置传动系统设计应满足传动平稳、结构简单、动力分配合理的原则。不仅使机器各个部分获得适宜的工作速度，还需保证各部件安装位置协调，满足蓖麻脱壳要求。样机传动示意图如图 6 所示。

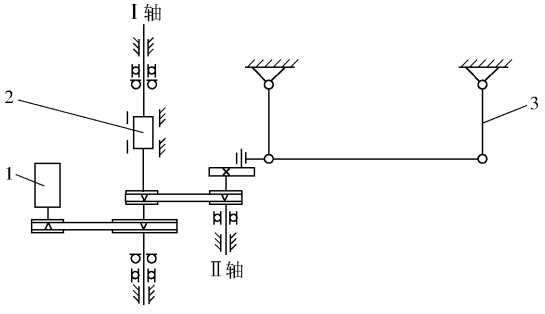


图 6　蓖麻脱壳清选一体装置传动系统示意图

Fig. 6　Schematic of transmission system of ramie shelling and cleaning device

1. 电机　2. 脱壳装置　3. 振动筛

传动系统由电机将动力传入Ⅰ轴并通过带轮进行减速，Ⅰ轴带动上、下脱壳滚筒内层壳体转动，与脱壳滚筒外层壳体具有差速，实现脱壳；同时，Ⅰ轴上安装有清选主动轮，通过带传动将动力传至Ⅱ轴，带动清选从动轮转动，清选从动轮为偏心轮结构，与振动筛之间由转动副连接，带动振动筛做简谐运动。

3　蓖麻脱壳过程仿真分析

蓖麻蒴果在脱壳室内运动规律复杂。为了研究蓖麻蒴果在脱壳过程中位移、速度随时间变化规律，利用 ADAMS 对蓖麻蒴果在脱壳室内的运动进行仿真分析。

3.1　几何模型建立

图 7 为通蓖 5 号、通蓖 6 号、通蓖 7 号蓖麻蒴果球度分布曲线。仿真试验以通蓖 7 号蓖麻蒴果为研究对象，取通蓖 7 号蓖麻蒴果球度为 0.95。

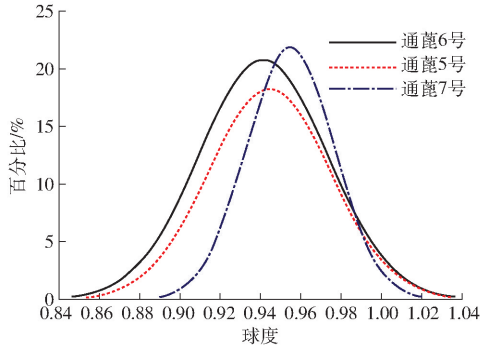


图 7　球度分布曲线

Fig. 7　Spheroidal distribution curve

通蓖 7 号蓖麻蒴果三轴尺寸如图 8 所示。

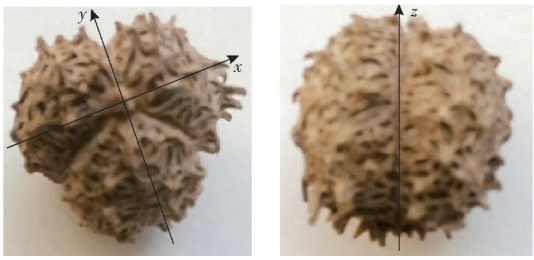


图 8　通蓖 7 号蓖麻蒴果三轴尺寸

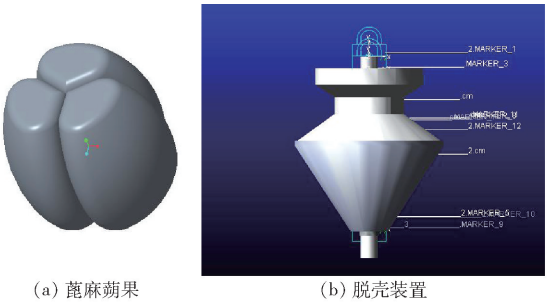
Fig. 8　TongBi No. 7 castor three-week size

前期试验测得 500 个通蓖 7 号蓖麻蒴果三轴尺寸结果，x 方向最大直径 16.96 mm，y 方向最大直径 15.91 mm，z 方向最大直径 17.01 mm。根据球度及三轴尺寸测量结果，建立蓖麻蒴果仿真模型如图 9a 所示。根据已设计好的参数建立脱壳装置仿真模型，如图 9b 所示。

为降低计算量，便于对蓖麻蒴果进行动力学模拟，脱壳装置仿真模型建立过程中需进行相关简化，仅保留关键部件。包括：空心轴，上、下脱壳滚筒内层壳体，柳叶橡胶涂层，上、下脱壳滚筒外层壳体，将模型导入 ADAMS 中。

3.2　边界条件及材料参数设置

蓖麻蒴果脱壳分为压裂阶段与脱壳阶段，因此



(a) 蓖麻蒴果　　(b) 脱壳装置

图 9　动力学仿真模型

Fig. 9　Simulation model of shelling institutions

对两种情况分别进行动力学仿真分析。压裂阶段采用蓖麻蒴果模型进行模拟,将其分别与上脱壳滚筒内、外层壳体及柳叶橡胶建立接触力。脱壳阶段采用蓖麻籽模型,将其分别与下脱壳滚筒内、外层壳体及柳叶橡胶建立接触力。空心轴、脱壳滚筒外层壳体与地设置为固定连接。脱壳滚筒内层壳体与空心轴建立旋转副并添加动力。柳叶橡胶随脱壳滚筒内层壳体转动,两者采用固定连接。以此对脱壳机构的工作状况进行模拟。材料参数设置如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameter

参数	蓖麻蒴果	蓖麻籽	柳叶橡胶
密度/(kg·m^{-3})	463	470	1 800
弹性模量/MPa	153	153	7.84
泊松比	0.3	0.3	0.47

3.3 压裂阶段仿真分析

3.3.1 压裂阶段运动学分析

传感器在 0.56 s 时终止了仿真进程,此时蓖麻蒴果受到 47 N 的接触力,达到破裂条件。由图 10 可得,蓖麻蒴果首先在上脱壳滚筒内层壳体凸台的带动下做螺旋线运动,运动平稳,速度逐渐增加并逐渐向脱壳滚筒间隙运动;在 0.42 s 时,蓖麻蒴果铅垂方向的位移曲线斜率增加,表明其进入脱壳滚筒内,由于其与橡胶的摩擦因数大于与铁质材料的摩擦因数,蓖麻蒴果进入滚筒后速度大幅增加;至蓖麻蒴果压裂为止,其总位移为 103.41 mm,沿铅垂方向向下运动了 44.57 mm,速度达到 1 014.07 mm/s。

3.3.2 间隙对压裂阶段的影响

保持脱壳滚筒转速为 300 r/min,采用 10、11、12、13、14 mm 间隙进行仿真模拟,分别在 0.54、0.55、0.56、0.57、0.58 s 时终止仿真进程,表明蓖麻蒴果达到所需破壳力为 47 N;随着间隙的增加,蓖麻蒴果到达特定压裂位置的时间延后。由图 11 可知,在间隙 10、11、12、13、14 mm 下,蓖麻蒴果在铅锤方向的位移分别 37.10、40.82、44.57、48.31、51.16 mm,总位移分别为 90.90、94.37、97.09、120.26、99.59 mm;随着滚筒间隙的增加,蓖麻蒴果到达破壳条件时的位移增加。

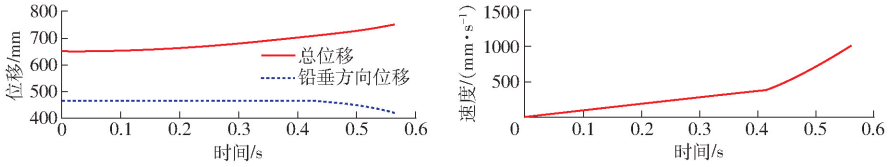


图 10 压裂阶段仿真结果

Fig. 10 Simulation results of cracking phase

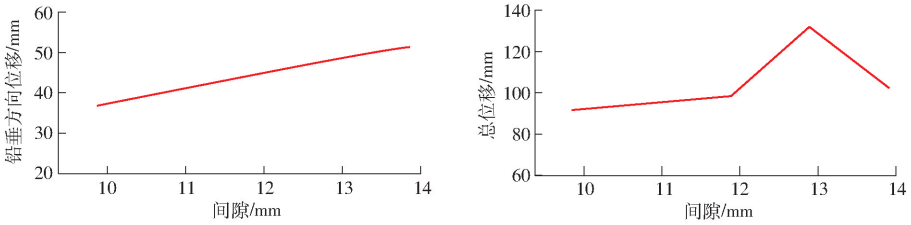


图 11 压裂阶段不同间隙仿真结果

Fig. 11 Simulation results of cracking phase with different clearances

3.4 脱壳阶段仿真分析

3.4.1 脱壳阶段运动学分析

根据图 12,蓖麻籽在重力及下脱壳滚筒内层壳体摩擦力作用下,沿下脱壳滚筒外层壳体向下做螺旋线运动,运动平稳,速度逐渐增加并逐渐向脱壳滚筒间隙运动;其总位移为121.22 mm,沿铅垂方向运动 250.37 mm,速度达到 1 358.62 mm/s。

3.4.2 间隙对脱壳阶段的影响

保持脱壳滚筒转速为 300 r/min,采用 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 mm 间隙进行仿真模拟,分别在 0.24、0.24、0.25、0.25、0.26 s 时终止了仿真进程,表明蓖麻籽达到所需破壳力为 40 N;随着间隙的增加,蓖

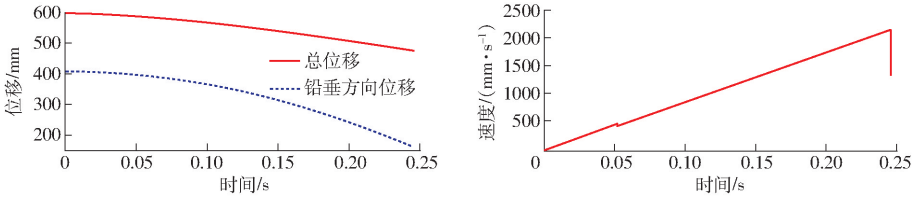


图 12 脱壳阶段仿真结果

Fig. 12 Simulation results of shelling phase

麻籽到达特定脱壳位置的时间延后。由图 13a、13b 可知，在间隙 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 mm 下，蓖麻蒴果在铅垂方向的位移分别为 220.59、226.36、250.37、264.41、289.84 mm，总位移分别为 96.19、114.64、121.22、124.52、128.96 mm；随着滚筒间隙的增加，蓖麻籽到达破壳条件时的位移增加。由图 13c 可知，在间隙 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 mm 下，蓖麻蒴果运动速度分别为 1 082.87、1 172.25、1 358.62、1 399.46、1 131.65 mm/s；在下脱壳滚筒间隙小于6.5 mm 时，蓖麻籽的运动速度主要受重力影响，随着间隙的增大，蓖麻籽达到特定脱壳间隙时间延后，导致其速度增大，在下脱壳滚筒间隙大于 6.5 mm 时，其受到下脱壳滚筒最大转速限制，速度略有下降。

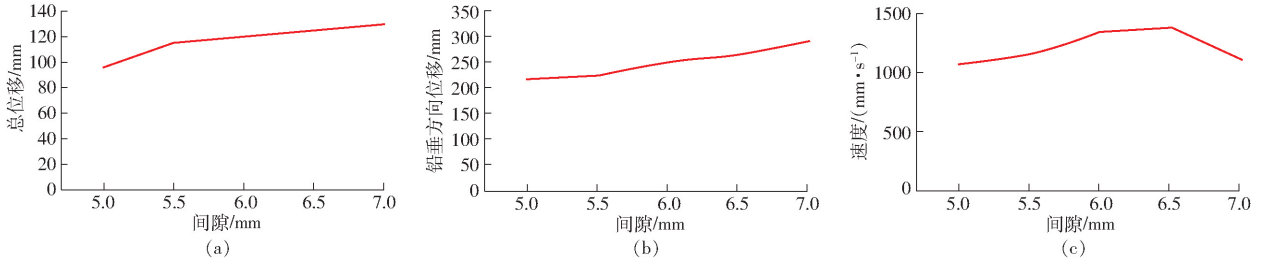


图 13　脱壳阶段不同间隙仿真结果

Fig. 13　Simulation results of shelling phase with different clearances

4　试验

通过转速和出料口间隙的单因素仿真试验可知，滚筒转速和脱壳间隙是影响蓖麻蒴果在脱壳室内运动的重要因素。为提高脱壳效率，得到脱壳装置最佳参数，以滚筒转速、上滚筒出料口间隙、下滚筒出料口间隙为试验因素，脱净率（脱壳后脱净蓖麻占总蓖麻数的百分比）m 和破损率（损伤蓖麻占总蓖麻数百分比）n 为试验指标进行正交试验。

4.1　试验材料与设备

试验在沈阳农业大学工程学院农业物料力学特性实验室进行，如图 14。试验材料为通辽市农业科学院晾晒的通篦 5 号蓖麻蒴果。试验设备包括：可调式蓖麻脱壳清选一体装置；冠亚快速水分测定仪（通用 SFY－20A 型，量程 0.5 ~ 90 g，称量精度 0.001 g）；双杰牌电子秤（TC－60K 型，最大称量 60 kg）。

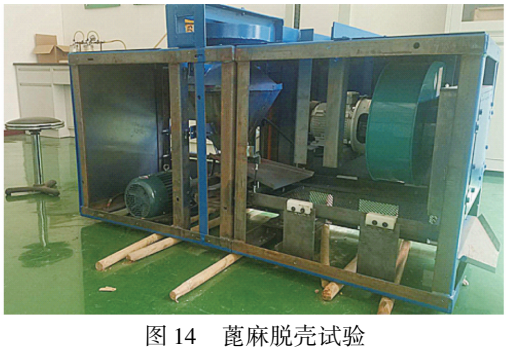


图 14　蓖麻脱壳试验

Fig. 14　Ramie shelling test

4.2　试验结果与分析

根据 Box－Benhnken 试验设计方案，因素编码如表 2 所示。

表 2　因素编码

Tab. 2　Test factors and code

编码	因素		
	滚筒转速/(r·min⁻¹)	上脱壳滚筒出料口间隙/mm	下脱壳滚筒出料口间隙/mm
－1	240	10	5
0	300	12	6
1	360	14	7

表 3 为试验方案和结果，A、B、C 为因素编码值。

表 3　试验设计方案与结果

Tab. 3　Test design and results

编号	A	B	C	m/%	n/%
1	0	1	－1	93.02	3.24
2	1	0	1	86.83	2.88
3	0	－1	1	88.51	3.01
4	－1	0	1	87.57	2.93
5	0	0	0	90.13	3.07
6	0	－1	－1	93.86	3.41
7	1	0	－1	95.89	3.46
8	－1	1	0	87.82	2.93
9	－1	－1	0	86.26	3.24
10	0	0	0	90.44	3.16
11	1	1	0	88.56	3.18
12	1	－1	0	91.93	3.26
13	0	0	0	90.66	3.08
14	0	0	0	89.91	3.11
15	0	1	0	85.74	2.79
16	－1	0	1	91.56	3.21
17	0	0	－1	89.79	3.02

4.2.1 脱净率方差及响应面分析

表 4 为脱净率方差分析结果,由表 4 可知,模型 $P<0.001$,表明脱净率与各因素的回归方程显著,三因素对脱净率的影响为极显著,由均方得其影响程度大小为:C、A、B;滚筒转速与下脱壳滚筒出料口间隙的交互作用、上脱壳滚筒出料口间隙的平方项对脱净率影响极显著,影响程度大小为:AC、B^2;滚筒转速与上脱壳滚筒出料口间隙的交互作用、上脱壳滚筒出料口间隙与下脱壳滚筒出料口间隙的交互作用、滚筒转速的平方项对脱净率影响显著,其影响程度大小为:AB、BC、A^2;其余项对其影响不显著。脱净率与试验因素的回归关系为

$$m=90.19+0.29A+6.49B-2.48C-6.1\times10^{-3}AB-0.02AC-0.24BC-1.2\times10^{-4}A^2-0.15B^2 \quad (5)$$

图 15 为各因素交互作用对脱净率的影响结果。

表 4 脱净率方差分析

Tab. 4 Variance analysis of detachment rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	111.09	9	12.34	135.77	<0.0001	**
A	8.00	1	8.00	87.99	<0.0001	**
B	6.88	1	6.88	75.70	<0.0001	**
C	82.43	1	82.43	906.68	<0.0001	**
AB	2.15	1	2.15	23.61	0.0018	*
AC	6.43	1	6.43	70.68	<0.0001	**
BC	0.93	1	0.93	10.24	0.0151	*
A^2	0.78	1	0.78	8.63	0.0218	*
B^2	1.58	1	1.58	17.33	0.0042	*
C^2	2.11	1	2.11	23.23	0.1919	
残差	0.64	7	0.0091			
失拟项	0.11	3	0.0037	0.28	0.8368	
纯误差	0.53	4	0.13			
总值	111.73	16		0		

注:* 表示显著($P<0.05$);** 表示极显著($P<0.0001$)。

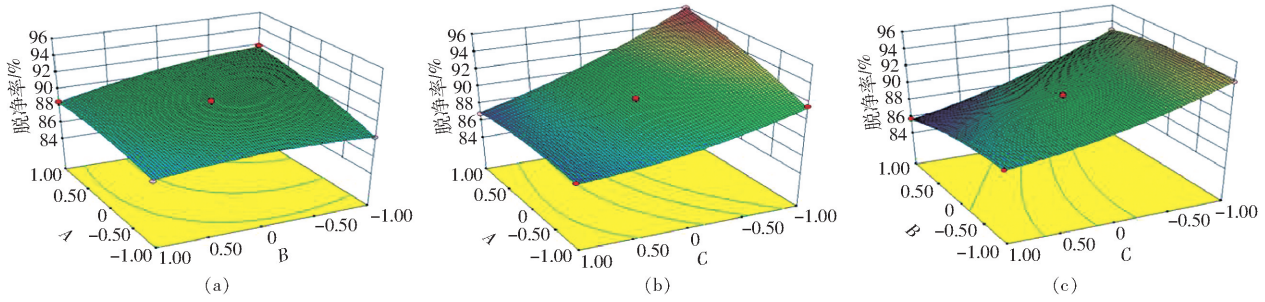


图 15 各因素交互作用对脱净率影响的响应面

Fig. 15 Response surfaces of interaction for various factors on detachment rate

由图 15a 可知,在下脱壳滚筒出料口间隙不变时,脱净率随着滚筒转速的增加及上脱壳滚筒出料口间隙的减小而提高;由图 15b 可知,在上脱壳滚筒出料口间隙不变时,脱净率随着滚筒转速的增加及下脱壳滚筒出料口间隙的减小而提高;由图 15c 可知,在滚筒转速不变时,脱净率随着上、下脱壳滚筒出料口间隙的减小而增加。

根据回归模型对脱净率进行工作参数优化,当转速为 357.99 r/min、上脱壳滚筒出料口间隙为 10.06 mm、下脱壳滚筒出料口间隙为 5.05 mm 时,脱净率最高,为 96.16%。

4.2.2 破损率响应面分析

图 16 为各因素交互作用对破损率的影响结果。

由图 16a 可知,在下脱壳滚筒出料口间隙不变时,破损率随着滚筒转速的增加及上脱壳滚筒出料口间隙的减小而增大;由图 16b 可知,在上脱壳滚筒出料口间隙不变时,破损率随着滚筒转速的增加及下脱壳滚筒出料口间隙的减小而增大。

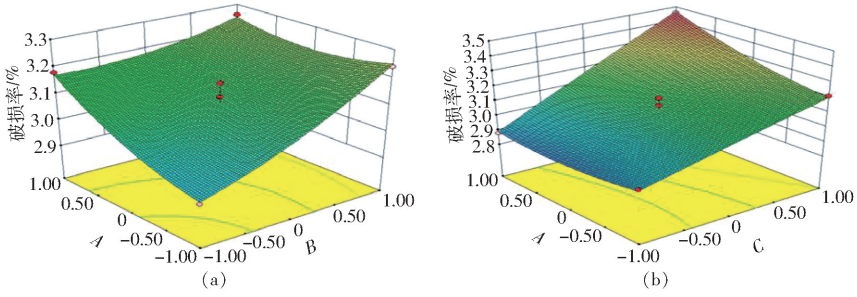


图 16 各因素交互作用对破损率影响的响应面

Fig. 16 Response surfaces of interaction for various factors on damage rate

根据回归模型对破损率进行工作参数优化,得到当转速为 257.68 r/min、上脱壳滚筒出料口间隙为 13.97 mm、下脱壳滚筒出料口间隙为 7.01 mm 时,破损率最低,为 2.78%。

4.2.3 双目标参数优化及试验验证

根据以上试验结果,以脱净率最大、破损率最小

为优化目标，取脱净率加权因子 0.6，破损率加权因子 0.4，对脱壳装置的工作参数进行优化，优化所得参数：滚筒转速为 270 r/min、上脱壳滚筒出料口间隙为 13.54 mm、下脱壳滚筒出料口间隙为 5 mm 时，脱净率为 92.44%，破损率为 2.85%。

根据优化结果，将脱壳机工作参数调整为优化试验得到的最优参数，进行 3 次独立的重复试验，脱净率均值为 92.03%，破损率均值为 3.1%，试验指标均值与优化预测值差异较小，满足工作要求。

5　结论

（1）为提高蓖麻脱壳效率，提出了一种基于滚搓式的脱壳方法。并对脱壳装置、清选装置、传动系统以及不对称双圆台结构的锥角进行了设计，确定了各关键作业部件结构。经试验验证，蓖麻脱壳清选一体装置符合蓖麻脱壳要求。

（2）建立不同阶段脱壳滚筒内任意位置与脱壳间隙的数学模型，利用动力学分析软件 ADAMS，对蓖麻蒴果在脱壳滚筒内的不同阶段进行了动力学仿真，得到了蓖麻蒴果在不同阶段位移、速度的变化规律，并分析不同转速及脱壳出料口间隙对蓖麻蒴果脱壳的影响。

（3）以脱壳滚筒转速、上脱壳滚筒出料口间隙、下脱壳滚筒出料口间隙为因素，以脱净率、破损率为指标，利用响应面法分析各因素对试验指标的影响，并对脱壳装置参数进行优化。结果表明：三因素对脱净率、破损率均为显著性影响；滚筒转速与下脱壳滚筒出料口间隙、滚筒转速与上脱壳滚筒出料口间隙、上脱壳滚筒出料口间隙与下脱壳滚筒出料口间隙的交互作用对脱净率影响显著；滚筒转速与下脱壳滚筒出料口间隙、滚筒转速与上脱壳滚筒出料口间隙的交互作用对破损率影响显著。经双目标优化，取滚筒转速为 270 r/min、上脱壳滚筒出料口间隙为 13.54 mm、下脱壳滚筒出料口间隙为 5 mm，此时脱壳装置工作性能最佳，脱净率为 92.03%，破损率为 3.1%。

参　考　文　献

1　李晓霞，郭玉明. 带壳物料脱壳方法及脱壳装备现状与分析[J]. 农产品加工(学刊)，2007(4)：83－86.
LI Xiaoxia，GUO Yuming. Actuality of the decladding method and sheller of shell fruit[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing，2007(4)：83－86.（in Chinese）

2　张研，乔金友. 浅析中国蓖麻产业化发展前景[J]. 中国农学通报，2009，25(16)：316－319.
ZHANG Yan，QIAO Jinyou. Analysis on development prospects of castor industrialization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2009，25(16)：316－319.（in Chinese）

3　LIM Y，SHAMSUDIN R，YUNUS R. Development and testing of a *Jatropha* fruit shelling process for shell-free kernel recovery in biodiesel production[J]. Biosystems Engineering，2014，121：46－55.

4　LIM Y，SHAMSUDIN R，BAHARUDIN H，et al. A review of processing and machinery for *Jatropha curcas* L. fruit sand seeds in biodiesel production：harvesting，shelling，pretreatment and storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2015，52：991－1002.

5　LIM Y，SHAMSUDIN R，BAHARUDIN H，et al. Performance evaluation and CFD multiphase modeling for multistage *Jatropha* fruit shelling machine[J]. Industrial Crops and Products，2016，85：125－138.

6　ROMULI S，KARAJ S，MüLLER J. Discrete element method simulation of the hulling process of *Jatropha curcas* L. fruits[J]. Biosystems Engineering，2017，155：55－67.

7　ROMULI S，KARAJ S，MüLLER J. Influence of physical properties of *Jatropha curcas* L. seeds on shelling performance using a modified disc mill[J]. Industrial Crops and Products，2015，77：1053－1062.

8　曹玉华，李长友，张增学，等. 蓖麻蒴果剥壳装置关键部件改进设计与试验[J]. 农业工程学报，2012，28(18)：16－24.
CAO Yuhua，LI Changyou，ZHANG Zengxue，et al. Improvement design and test to key components of castor capsule hulling device[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(18)：16－24.（in Chinese）

9　曹玉华，李长友，卿艳梅，等. 蓖麻蒴果力学特性的有限元分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版)，2010，31(4)：383－387.
CAO Yuhua，LI Changyou，QING Yanmei，et al. Finite element analysis on mechanical properties of castor-capsule[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)，2010，31(4)：383－387.（in Chinese）

10　曹成茂，周敏，毕海军，等. 柔性揉搓式板栗剥苞机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(9)：118－121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150917&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.017.
CAO Chengmao，ZHOU Min，BI Haijun，et al. Design and experiment of flexible rubbing type chestnut husker[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(9)：118－121.（in Chinese）

11　李心平，马义东，金鑫，等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(7)：97－101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015.
LI Xinping，MA Yidong，JIN Xin，et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J/OL]. Transactions of the Chinese Society

for Agricultural Machinery, 2015,46(7):97 - 101. (in Chinese)

12 李心平,李玉柱,马福丽,等. 玉米种子抗压特性及裂纹生成规律[J]. 农业机械学报,2011,42(8):94 - 98.
LI Xinping, LI Yuzhu, MA Fuli, et al. Anti-pressing properties and crack formation law of corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8):94 - 98. (in Chinese)

13 刘明政,李长河,张彦斌,等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):267 - 273. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160737&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.037.
LIU Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):267 - 273. (in Chinese)

14 高连兴,回子健,董华山,等. 三滚式小区育种花生脱壳机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):159 - 165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160722&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.022.
GAO Lianxing, HUI Zijian, DONG Huashan, et al. Design and experiment of peanut sheller with three drums for plot breeding[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):159 - 165. (in Chinese)

15 高连兴,杜鑫,张文,等. 双滚筒气力循环式花生脱壳机设计[J]. 农业机械学报,2011,42(10):68 - 73.
GAO Lianxing, DU Xin, ZHANG Wen, et al. Double-roller peanut sheller with pneumatic circulating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):68 - 73. (in Chinese)

16 张黎骅,徐中明,苟文,等. 滚筒-栅条式银杏脱壳机结构参数的优化[J]. 农业工程学报,2012,28(10):39 - 45.
ZHANG Lihua, XU Zhongming, GOU Wen, et al. Optimization of structure parameters of cylinder-bar type shelling device for *Ginkgo biloba*[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(10):39 - 45. (in Chinese)

17 姜楠, 衣淑娟, 张延河. 钉齿式轴流装置脱粒过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 52 - 56.
JIANG Nan, YI Shujuan, ZHANG Yanhe. High-speed photography analysis of threshing process on axial flow device with nails teeth [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 52 - 56. (in Chinese)

18 郑甲红, 赵奎鹏, 王亚妮, 等. 偏心击打式核桃破壳机的参数优化[J]. 湖北农业科学, 2016(11): 2905 - 2907.
ZHENG Jiahong, ZHAO Kuipeng, WANG Yani, et al. The optimization on parameters of walnut shell breaking machine with eccentric impact mode [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016(11): 2905 - 2907. (in Chinese)

19 李军. 谷子脱粒装置的设计与研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2005.
LI Jun. Design and study of millet threshing mechanism [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2005. (in Chinese)

20 王升升, 师清翔, 耿令新, 等. 谷子半喂入脱粒装置试验台设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 27 - 30.
WANG Shengsheng, SHI Qingxiang, GENG Lingxin, et al. Development of test-bed of semi-feeding millet threshing mechanism [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 27 - 30. (in Chinese)