

组合式橡胶籽脱壳机构设计与试验

Design and test of combined rubber seed shelling machine

赵乐然 王涛

ZHAO Le-ran WANG Tao

(海南大学机电工程学院, 海南 海口 570228)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

摘要:目的:解决现有的橡胶籽脱壳装置脱壳率、整仁率低,不足以满足不同条件下橡胶籽脱壳需求的问题。方法:设计了一种组合式橡胶籽脱壳机构,通过橡胶籽在凹槽板与旋转刀片的剪切以及对转叶片辊筒挤压、碰撞的组合作用下实现脱壳。运用 EDEM 离散元软件建立橡胶籽与脱壳机构的离散元模型,并对其脱壳过程进行模拟。采用响应面法分析剪切挤压间隙、叶片辊筒转速、叶片辊筒安装相位对橡胶籽脱壳率、整仁率的影响规律,优化获得最佳工作参数从而进行台架验证试验。结果:所设计的组合式橡胶籽脱壳机,最佳工作参数组合为剪切挤压间隙 12.6 mm、叶片辊筒转速 300 r/min、叶片辊筒安装相位 40.5°。此时,橡胶籽脱壳率为 94.09%,整仁率为 96.47%。根据最佳参数组合进行台架验证试验,橡胶籽脱壳率为 89.67%、整仁率为 91.33%。结论:在橡胶籽脱壳装置设计过程中,离散元法可有效分析不同结构参数对性能指标的影响。

关键词:橡胶籽;脱壳机;离散元法;脱壳过程;性能试验

Abstract: **Objective:** In view of the existing rubber seed shelling machine, which have poor shelling and whole-kernel rate, is not enough to meet the needs of rubber seed shelling under different condition, a combined rubber seed shelling machine was designed. Through the combination of cutting and shearing of rubber seeds between the groove plate and the rotary blade, as well as extrusion and collision of the rotary blade roller, the shell is removed. **Methods:** The discrete element software EDEM was used to establish the discrete element model of rubber seed and shelling machine, and to simulate the separation process. Response surface method (RSM) was used to analyze the influence of shear extrusion clearance, blade roller speed and blade-roller installation phase on rubber seed shelling and whole-kernel rate.

The best working parameters were optimized and verified by experiment. **Results:** The designed combined rubber seed sheller can achieve better shell kernel separation and obtain a higher kernel rate. When the shear extrusion clearance was 12.6 mm, the blade-roller speed was 300 r/min, and the blade-roller installation phase was 40.5°, the shelling rate and whole-kernel rate of rubber seed were 94.09% and 96.47%. According to the best parameter combination, the shelling rate and whole-kernel rate of rubber seed were 89.67% and 91.33%. **Conclusion:** In the design process of rubber seed shelling, the discrete element method can be effectively used to analyze the influence of different structural parameters on the performance indicators.

Keywords: rubber seed; shelling machine; discrete element method; shelling process; performance test

海南省是中国主要的天然橡胶种植生产基地,橡胶籽作为天然植胶业副产品,在工业方面、食用和医用方面、饲用方面和能源方面都具有很高的开发利用价值^[1]。目前,对于橡胶籽深加工的开发利用尚处于初始研究阶段,其中壳仁分离系统是橡胶籽脱壳机械的关键部件。

目前国内的坚果脱壳机械普遍存在破碎率、脱净率、整仁率低,破损率高的问题,主要是由于缺乏对橡胶籽脱壳过程中物料间及物料与脱壳机构之间力学特性的研究^[2-3]。程鑫鑫^[4]设计的蓖麻脱壳设备,将两锥形滚筒与地面形成一定角度,筒间间隙从进料口开始逐渐减小,蓖麻蒴果在重力和滚筒压条滚搓的双组合作用下,实现脱壳;郑甲红等^[5]对设计的核桃脱壳设备进行了参数优化,该设备利用带有击打装置偏心辊与筒壁相配合的形式,核桃进入间隙逐渐减小的脱壳区后,受偏心辊的击打和挤压组合作用实现脱壳;陆荣等^[6]设计的脱壳装置由锥滚筒和锥凹板组合构成,全封闭结构能较好地改善脱壳作业条件,提高脱壳率。

离散单元法(DEM)是研究复杂离散系统动力学问题的一种新型数值方法^[7],离散单元法以及 EDEM 软件的应用,能够有效模拟研究农业散体物料与脱壳脱粒机械

基金项目:海南省自然科学基金(编号:520RC537)

作者简介:赵乐然,男,海南大学在读硕士研究生。

通信作者:王涛(1980—),男,海南大学副教授,硕士。

E-mail: gxdxyjs@163.com

收稿日期:2021-11-16

部件的相互作用过程。郭柄江等^[8]采用离散元法研究谷粒和茎秆分离运动过程中的状态变化;Romuli等^[9]运用离散元法模拟了蓖麻蒴果脱壳机构内物料的运动分布,通过对比试验,对脱壳设备结构参数进行了优化;Bo等^[10]通过设定不同对辊间隙、对辊转速及风选风速,模拟分析得出双辊挤压式蓖麻脱壳设备的最优设计参数;Jafari等^[11]基于离散元法分析不同参数对筛分效率和筛面磨损的影响;王京峥等^[12]依据甘蓝物理特性,利用离散单元法研究甘蓝在翻转卸料装置中不同区域的运动规律,分析得出甘蓝损伤率与果箱不同参数变化趋势。

目前有关部分农业物料的物理性质研究及其生产加工过程中各类机械设备与装置的设计均已采用离散元法,而对橡胶籽脱壳机械的设计还处于单一模式阶段,并且对橡胶籽脱壳过程及运动参数分析和接触模型的选择等方面的研究也较少。研究拟通过设计一种组合式橡胶籽脱壳机,结合 EDEM 离散元软件分析橡胶籽脱壳机脱壳过程,研究橡胶籽在脱壳装置中的运动规律,为确定最佳结构参数优化组合提供依据。

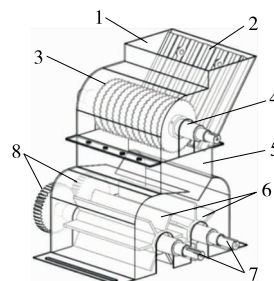
1 脱壳机结构及工作原理

1.1 基本结构

为适应多种橡胶籽脱壳要求,提高脱壳效率,设计了一种组合式橡胶籽脱壳机,如图 1 所示,其主要包括机架、预切割装置、挤压脱壳装置、风选箱等部分。预切割装置和挤压脱壳装置结构图如图 2 所示,橡胶籽通过进料仓进入壳仁分离装置,壳仁分离后的脱出物在重力作用下进入清选系统中。

1.2 工作原理

组合式橡胶籽脱壳机的脱壳过程:橡胶籽由人工喂入进料口后,经凹槽板受到高速旋转锯齿刀片的切割、挤压、剪切作用,部分橡胶籽壳出现裂纹,部分橡胶籽壳出现破损,在旋转锯齿刀片的带动下,具备一定的初速度的橡胶籽沿切线方向撞击脱壳仓中的撞击板,达到预脱壳效果。受损的橡胶籽沿着撞击板进入挤压脱壳装置的叶



1. 进料口 2. 凹槽板 3. 锯齿刀片 4. 刀片安装轴 5. 脱壳仓 6. 叶片辊筒 7. 辊筒轴 8. 齿轮

图 2 预切割装置和挤压脱壳装置结构图

Figure 2 Pre-cracking and extrusion unit of the sheller

片间隙中,在转叶片与辊筒的击打、碰撞、挤压等作用下实现二次破壳过程。脱壳后的籽壳与籽仁混合物落入风选箱中,在风机的作用下,完成壳仁分离,并分别落入收集箱内。

2 仿真模型建立

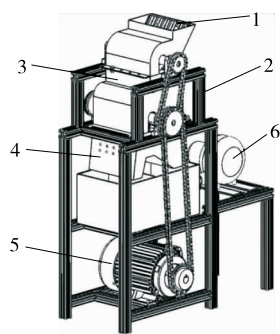
2.1 橡胶籽颗粒模型

为了建立橡胶籽的 3D 模型,以采摘自海南省儋州市的橡胶籽为基础,随机选取 100 颗无损伤颗粒,经游标卡尺测量其横径、纵径、棱径、壳厚^[13],得到其平均三轴尺寸为 $18.68 \text{ mm} \times 22.65 \text{ mm} \times 17.56 \text{ mm}$,平均壳厚为 0.68 mm ,橡胶籽实物如图 3(a)所示。

橡胶籽形状为椭球体^[14],通过使用高精度的 3D 扫描仪 XCSW-131 对橡胶籽进行 3D 扫描,建立精准的橡胶籽轮廓模型,如图 3(b)所示。

由于橡胶籽包含籽壳和籽仁两个部分,试验过程中为了便于分析脱壳过程中的碰撞接触情况,将橡胶籽籽壳和籽仁作为一个整体进行建模,以简化的橡胶籽模型进行仿真分析。

将橡胶籽 3D 轮廓图导入离散元软件 EDEM 中,采用多球面聚合填充方式^[15]进行离散元建模,填充的球面越多,与橡胶籽的真实轮廓越贴合,如图 4(a)所示,但球面数量越多,分析计算量也越大,且与较少的球面聚合颗粒分析差异不大,故采用半径 $8.1 \sim 8.8 \text{ mm}$ 的 3 个基本球体重叠构成橡胶籽的离散元模型,如图 4(b)所示。橡胶籽表面光滑、流动性好,其材料属性可简化为具有同体性质的均匀线弹性材料,采用 EDEM 模型自动计算颗粒



1. 进料口 2. 机架 3. 脱壳仓 4. 风选仓 5. 电动机 6. 风机

图 1 组合式脱壳机构结构图

Figure 1 Structure diagram of combined shelling machine

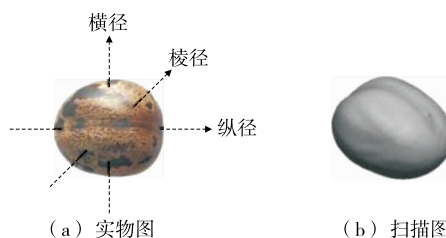


图 3 橡胶籽

Figure 3 Rubber seed

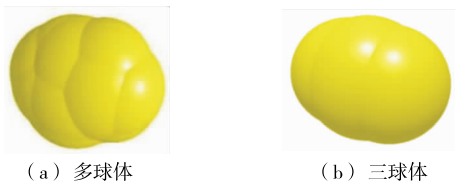


图 4 橡胶籽离散元模型

Figure 4 Discrete element models of rubber seed

模型质量、体积和转动惯量。

2.2 仿真参数设定

由于橡胶籽颗粒近似椭球形,表面光滑无黏附力,为了便于分析,将橡胶籽颗粒假设为刚性体,接触模型选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型,颗粒间的碰撞属于软球模型^[16],各材料特性参数及接触参数设置如表 1、表 2 所示。

表 1 材料特性参数

Table 1 Material characteristic parameter

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
橡胶籽	0.3	10	550
钢	0.3	79 000	7 800

表 2 接触参数

Table 2 Interaction properties

接触形式	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
橡胶籽—橡胶籽	0.3	0.5	0.01
橡胶籽—钢	0.3	0.4	0.01

2.3 组合式脱壳机模型

为研究不同辊筒转速、不同挤压间隙、不同叶片辊筒相位下橡胶籽在脱壳机破碎过程中的受力过程及变化规律,得到组合式脱壳机最优设计参数,在建立脱壳机模型和数值分析的基础上,进行离散元仿真试验。

为了对橡胶籽脱壳过程进行离散元仿真,需简化脱壳机模型,去除预切割装置和挤压脱壳装置与接触模型不相关的零部件,只保留脱壳仓、刀片、挤压板、叶片辊筒等脱壳系统组件,在 Solidworks 中完成简化后的脱壳装置三维模型,并导入 EDEM 软件中,仿真模型如图 5 所示。

3 橡胶籽脱壳过程仿真与分析

3.1 仿真影响因素

橡胶籽脱壳机械的脱壳效果与剪切挤压间隙、叶片辊筒转速、叶片辊筒安装相位等因素有关,为使橡胶籽脱壳机脱壳效果达到最佳,对叶片辊筒和刀片轴的转速、刀片与挤压板的间隙、叶片辊筒安装相位进行离散元仿真。

3.2 脱壳机离散元仿真试验

根据脱壳辊筒的运动特征,将叶片辊筒设置为线性

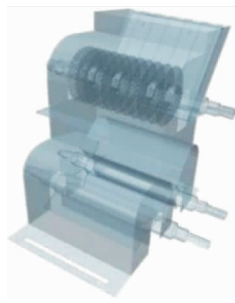


图 5 脱壳机简化仿真模型

Figure 5 Simplified simulation model of shelling machine

旋转运动,转速为 300~600 r/min,锯齿刀片与凹槽板最小间隙设置为 13~17 mm。为便于单位时间内喂入的橡胶籽能够充分受到剪切挤压作用,同时保证喂入速率满足脱壳需求,根据脱壳机脱壳仓设计尺寸及橡胶籽三维尺寸,设定颗粒喂入量为 100 个,颗粒工厂每秒颗粒生成 20 个,仿真总时长为 5 s。颗粒产生于进料口处,自由落下。设定计算时间间隔为 Rayleigh 时间间隔的 10%,输出时间间隔为 0.01 s,仿真网格尺寸设置为最小颗粒尺寸的 2.5 倍。

对设计的组合式橡胶籽脱壳机进行离散元仿真,脱壳过程如图 6 所示。

根据橡胶籽力学特性试验^[13]可知:橡胶籽平均剪切破壳力为 287~398 N,平均挤压破壳力为 548~715 N。因此,在 EDEM 软件后处理中统计脱壳过程中橡胶籽的最大接触力 F ,对橡胶籽的破损情况以接触力的范围进行判定,如表 3 所示。

选取脱壳机的剪切挤压间隙 13 mm、叶片辊筒转速 450 r/min、叶片辊筒安装相位 31.5°为因素中心水平点,橡胶籽脱壳率、整仁率为响应值。采用 Box-Behnken 试验设计方法对试验数据进行处理与分析^[17-18],各试验因

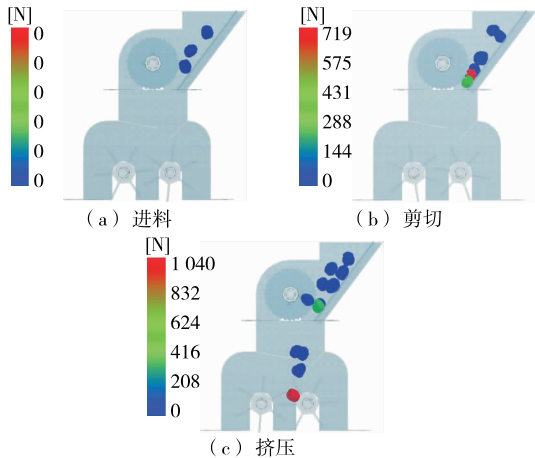


图 6 橡胶籽脱壳过程仿真

Figure 6 Simulation of rubber seed hulling process

素水平编码如表 4 所示。由软件设计试验方案,共对 17 个试验组合进行离散元仿真分析,如表 5 所示,运用响应面分析得到响应值与各因素间的数学模型。

3.3 结果与分析

3.3.1 回归模型建立及检验 采用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 5 中的脱壳率、整仁率分别与各因素进行多元回归拟合^[19],得二次回归模型为

$$R_1 = 88.00 - 4.15A - 2.00B + 4.65C - 0.40AB - 6.35AC - 3.55BC - 13.10A^2 + 0.70B^2 - 6.20C^2, \quad (1)$$
$$R_2 = 89.40 + 5.49A - 1.99B + 0.60C - 0.025AB - 1.80AC - 2.00BC - 0.088A^2 + 0.16B^2 + 2.99C^2. \quad (2)$$

表 3 橡胶籽破损情况判定表
Table 3 Decision of rubber seed damage

接触力/N	判定情况
$F < 250$	未破裂
$250 \leq F < 500$	破裂未脱壳
$500 \leq F < 600$	破裂已脱壳、籽仁未损伤
$600 \leq F$	破裂已脱壳、籽仁已损伤

表 4 因素水平编码表
Table 4 Coding of test factors

编码	A 间隙/mm	B 辊筒转速/(r · min ⁻¹)	C 安装相位/(°)
-1	11	300	22.5
0	13	450	31.5
1	15	600	40.5

表 5 试验设计及结果
Table 5 Experimental design and test results

试验号	A	B	C	R_1 脱壳率/%	R_2 整仁率/%
1	0	0	0	86.10	88.30
2	0	-1	-1	75.40	93.30
3	0	-1	1	90.20	97.70
4	0	0	0	91.00	87.80
5	1	0	1	64.30	98.40
6	0	1	1	82.50	87.80
7	0	0	0	87.30	91.90
8	0	1	-1	81.90	91.40
9	-1	0	1	84.00	88.20
10	-1	1	0	77.10	84.40
11	0	0	0	85.80	88.80
12	-1	-1	0	83.70	86.40
13	1	0	-1	66.10	100.00
14	0	0	0	89.80	90.20
15	1	-1	0	74.90	94.60
16	1	1	0	66.70	92.50
17	-1	0	-1	60.40	82.60

对模型进行方差分析和回归系数显著性检验,其结果如表 6 所示。

由表 6 可知,脱壳率二次回归模型的 P 值极显著($P < 0.01$)、失拟项不显著($P > 0.05$),说明所得回归数学模型与实际结果拟合精度高,该模型能反映出脱壳率与 A、B、C 之间的关系,可较好地对优化试验中各试验结果进行预测。其中 A、C、AC、 A^2 、 C^2 影响极显著,BC 影响显著,其余均不显著。回归方程中,系数绝对值大小决定该因素对脱壳率的影响大小,可得各影响因素对脱壳率的影响大小顺序依次为叶片辊筒转速、剪切挤压间隙、叶片辊筒安装相位。

由表 7 可知,整仁率的二次回归模型的 P 值极显著($P < 0.01$)、失拟项不显著($P > 0.05$),说明所得回归数学模型与实际结果拟合精度高,该模型能反映出脱壳率与 A、B、C 之间的关系,可较好地对优化试验中各试验结果进行预测。其中 A 影响极显著,B、 C^2 影响显著,其余均不显著。根据各因素回归系数绝对值的大小,可得各影响因素对整仁率的影响大小顺序依次为剪切挤压间隙、叶片辊筒转速、叶片辊筒安装相位。

3.3.2 模型交互项解析 根据建立的回归模型可分别得出各影响因素之间交互作用的响应面图形。

由图 7(a)可知,在叶片辊筒转速固定在某一水平时,随着剪切挤压间隙的增大,橡胶籽脱壳率表现出先增大后减小的趋势;剪切挤压间隙对橡胶籽脱壳率的影响明显高于叶片辊筒转速。由等高线密度与响应曲面形状可看出,两者交互作用对橡胶籽脱壳率有一定影响但不显著。

由图 7(b)可知,随着剪切挤压间隙与叶片辊筒安装

表 6 脱壳率方差分析
Table 6 Variance analysis of shelling rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	1 478.66	9	164.30	21.78	0.000 3
A	137.78	1	137.78	18.27	0.003 7
B	32.00	1	32.00	4.24	0.078 4
C	172.98	1	172.98	22.93	0.002 0
AB	0.64	1	0.64	0.09	0.779 3
AC	161.29	1	161.29	21.38	0.002 4
BC	50.41	1	50.41	6.68	0.036 2
A^2	722.57	1	722.57	95.80	<0.000 1
B^2	2.06	1	2.06	0.27	0.617 1
C^2	161.85	1	161.85	21.46	0.002 4
残差	52.80	7	7.54		
失拟项	31.62	3	10.54	1.99	0.257 7
纯误差	21.18	4	5.29		
总和	1 531.46	16			

表 7 整仁率方差分析

Table 7 Variance analysis of whole-kernel rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	342.39	9	38.04	7.47	0.007 4
A	240.90	1	240.90	47.27	0.000 2
B	31.60	1	31.60	6.20	0.041 6
C	2.88	1	2.88	0.57	0.476 7
AB	2.50E-03	1	2.50E-03	4.91E-04	0.982 9
AC	12.96	1	12.96	2.54	0.154 8
BC	16.00	1	16.00	3.14	0.119 7
A ²	0.03	1	0.03	6.33E-03	0.938 8
B ²	0.11	1	0.11	0.02	0.886 7
C ²	37.58	1	37.58	7.37	0.030 0
残差	35.67	7	5.10		
失拟项	24.65	3	8.22	2.98	0.159 3
纯误差	11.02	4	2.76		
总和	378.06	16			

相位的增大,橡胶籽脱壳率均表现出先增大后减小的趋势。这是因为剪切挤压间隙与橡胶籽尺寸相当时,橡胶籽受到较为理想的剪切挤压力而实现较好的破壳,籽仁能够较好地从籽壳中脱落,随着间隙不断增大,刀片对橡胶籽的有效接触不断降低,致使橡胶籽受到的有效剪切

挤压力减小,脱壳率随之降低。

由图 7(c)可知,随着叶片辊筒安装相位的增大,橡胶籽脱壳率表现出先增大后减小的趋势。主要是因为叶片辊筒安装相位决定了叶片之间挤压间隙,当相位处于低水平时,对辊叶片间隙较大,橡胶籽落入叶片辊筒内的有效挤压作用较低,随着叶片辊筒安装相位的增大,对辊叶片间隙不断减小,有效挤压作用增大,橡胶籽脱壳率升高,当增大至一定值时,有效挤压接触减少,致使脱壳率降低。

由图 8(a)可知,随着剪切挤压间隙的增大和叶片辊筒转速的降低,橡胶籽整仁率不断增大。主要是因为剪切挤压间隙较小,叶片辊筒转速较高的情况下,橡胶籽在刀片和挤压板的间隙中受到较大的摩擦和剪切挤压力,导致整仁率较低。由图 8(b)可知,随着叶片辊筒安装相位的增加,橡胶籽整仁率呈先减小后增大的趋势,这是由于当叶片辊筒安装相位处于低水平或高水平时,叶片之间的挤压间隙与橡胶籽的外尺寸较为贴合,橡胶籽籽仁不易受损,从而得到较高的整仁率。由图 8(c)可知,叶片辊筒安装相位在低水平时,叶片辊筒转速对于橡胶籽整仁率的影响较小,在安装相位处于高水平时,橡胶籽整仁率随叶片辊筒转速的升高而增大。

3.3.3 最优工作参数确定 为提升组合式橡胶籽脱壳机作业性能,根据试验分析结果,将橡胶籽脱壳率和籽仁整仁率取得最大值作为优化指标,建立性能指标全因子二次回归方程,进行目标优化与最优工作参数确定^[20-21]。目标函数:

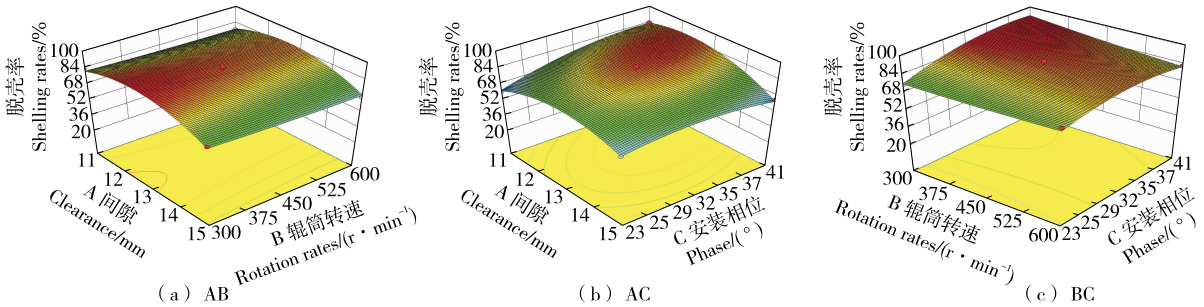


图 7 各因素交互作用对橡胶籽脱壳率影响的响应面

Figure 7 Response surfaces of all factors' interaction on shelling rate

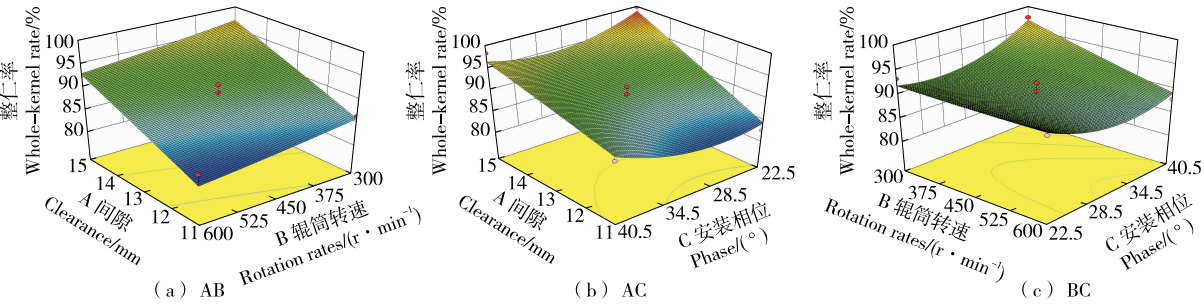


图 8 各因素交互作用对橡胶籽整仁率影响的响应面

Figure 8 Response surfaces of all factors' interaction on whole-kernel rate

$$\begin{cases} \max R_1(A, B, C) (+ + + + +) \\ \max R_2(A, B, C) (+ + +) \\ -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

利用 Design-Expert 软件进行优化分析,得到最优工作参数组合:剪切挤压间隙为 12.6 mm、叶片辊筒转速为 300 r/min、叶片辊筒安装相位为 40.5°。此时,橡胶籽脱壳率为 94.09%,整仁率为 96.47%。

4 橡胶籽脱壳机台架试验

为验证上述分析建立的脱壳率及整仁率回归模型的可靠性,根据得到的最优工作参数组合,开展组合式橡胶籽脱壳机台架试验。

4.1 试验设备与材料

试验样机结构与仿真模型一致,其主要技术参数如表 8 所示。试验对象选用采摘自海南省儋州市种植的橡胶籽,橡胶籽样品为生长状态正常的橡胶树,利用人工方式收集掉落的完整橡胶籽。

表 8 样机主要技术参数

Table 8 Main technical parameters of prototype

项目	单位	参数
脱壳仓尺寸	mm×mm×mm	220×200×325
电动机功率	kW	1.1
电动机电压	V	380
电机频率	Hz	50
变频器电压	V	220
变频器功率	kW	2.2

4.2 试验过程及结果

橡胶籽脱壳验证试验在自制的样机上进行,叶片辊筒转速由变频器调节,刀片轴与叶片辊筒通过链轮链条传动,链条外装有张紧导轨。刀片与凹槽板的间隙通过垫片厚度调节,叶片辊筒相位则由传动齿轮安装相位角调节。电机运行后由变频器调节转速,再将橡胶籽以每次 20 颗的速度喂入脱壳仓,每次试验投喂 5 次。从风选仓出料口收集壳仁混合物,分拣出完整的籽仁、未破碎的橡胶籽。试验重复进行 5 次取结果的平均值,得到橡胶籽的脱壳率均值为 89.67%、整仁率为 91.33%。

5 结论

试验针对自主设计的组合式橡胶籽脱壳机构,运用离散单元法,在 EDEM 仿真软件中建立了脱壳机构模型以及橡胶籽的颗粒模型,分析结果可清晰体现橡胶籽的运动趋势及受力过程。通过对组合式橡胶籽脱壳机构参数与橡胶籽脱壳过程进行数值模拟,建立双目标函数

模型对各个参数进行优化,得到了组合式橡胶籽脱壳机的最优工作参数组合。台架验证试验结果显示,脱壳率实测值与仿真值相差 4.42%,整仁率相差 5.14%,在可接受范围内,进一步说明通过优化工作参数可提高橡胶籽的脱壳率和整仁率,优化结果具有较高的可靠性,组合式橡胶籽脱壳机作业效果较单一分离方式的脱壳机有显著改善,后续可进一步借助离散元仿真软件优化设计切割刀具、挤压辊筒表面齿形等工作参数,以此提高仿真结果的精确性。

参考文献

- [1] 潘晓威, 叶剑芝, 曾绍东, 等. 橡胶籽资源的研究开发现状[J]. 现代农业科技, 2019(24): 131-135.
- [2] 王涛, 李粤, 符志宏, 等. 果壳分离机械研究发展状况综述[J]. 中国农机化, 2012(5): 27-29.
- [3] 侯俊铭, 何涛, 白晶波, 等. 农业物料脱壳脱粒机理及设备现状[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 30-38.
- [4] 程鑫鑫. 蓖麻果实脱壳方法及滚搓式脱壳机的关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 32-34.
- [5] 郑甲红, 赵奎鹏, 王娅妮, 等. 偏心击打式核桃破壳机的参数优化[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(11): 2 905-2 907.
- [6] 陆荣, 杨德旭, 高连兴, 等. 直立锥滚筒式小区花生脱壳机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 114-123.
- [7] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
- [8] 郭柄江, 马学东, 赵磊, 等. 基于 EDEM 的谷物分离模拟与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 100-105.

- GUO Bing-jiang, MA Xue-dong, ZHAO Lei, et al. Simulation and experimental research of grain separation based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40 (12): 100-105.
- [9] 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.
- [10] BO Y L, SHAMSUDIN R, BAHARUDIN B T H T, et al. Performance evaluation and CFD multiphase modeling for multistage jatropha fruit shelling machine[J]. Industrial Crops & Products, 2016, 85: 125-138.
- [11] JAFARI A, NEZHADV S. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear[J]. Powder Technology, 2016, 297: 126-143.
- [12] 王京峥, 崔功佩, 郑昕萌, 等. 基于 EDEM 的甘蓝翻转卸料过程运动与损伤分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 16-22, 77.
- WANG Jing-zheng, CUI Gong-pei, ZHENG Xin-meng, et al. Experiment and analysis on discharging of cabbage reversed discharge device based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2): 16-22, 77.
- [13] 王远荣, 王涛, 聂俊峰. 橡胶果破壳力学特性试验与分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 124-129.
- WANG Yuan-rong, WANG Tao, NIE Jun-feng. Test and analysis of mechanical properties of rubber fruit shell breaking[J]. Food & Machinery, 2019, 35(1): 124-129.
- [14] 陈忠, 王涛, 赵乐然, 等. 橡胶籽脱壳试验机工作参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 68-74.
- CHEN Zhong, WANG Tao, ZHAO Le-ran, et al. Optimization and test of working parameters of rubber seed shelling tester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41 (12): 68-74.
- [15] 于亚军, 周海玲, 付宏, 等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167-174.
- YU Ya-jun, ZHOU Hai-ling, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (8): 167-174.
- [16] 王国强, 郝万年, 王继. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 16.
- WANG Guo-qiang, HAO Wan-nian, WANG Ji. Discrete element method and its practice in EDEM[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 16.
- [17] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社责任有限公司, 2016: 147-149.
- XU Xiang-hong, HE Ming-zhu. Experimental design and application of Design-Expert SPSS [M]. Beijing: Science Press, 2016: 147-149.
- [18] 韩长杰. 农机试验设计[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018: 95-99.
- HAN Chang-jie. Experimental design of agricultural machinery[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 2018: 95-99.
- [19] 杨亚洲, 顾炳龙, 兰孝峰, 等. 基于 Design-Expert 的花生脱净率及破损率试验测试及分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(5): 32-35.
- YANG Ya-zhou, GU Bing-long, LAN Xiao-feng, et al. Test and analysis of peanut threshing rate and damage rate based on Design-Expert[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38 (5): 32-35.
- [20] 王建楠, 刘敏基, 曹明珠, 等. 薏苡脱壳机关键部件作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 288-295.
- WANG Jian-nan, LIU Min-ji, CAO Ming-zhu, et al. Working parameter optimization and experiment of key components of Coix lacryma-jobi sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 288-295.
- [21] 薛党勤, 张朝阳, 王凤磊, 等. 基于响应曲面法的带齿式马铃薯残膜回收装置参数优化及试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(8): 20-26.
- XUE Dang-qin, ZHANG Chao-yang, WANG Feng-lei, et al. Experimental study and parameter optimization of belt-tooth type collector for potato film residues based on response surface methodology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(8): 20-26.
- (上接第 34 页)
- [27] 陈帅, 许程剑, 李应彪, 等. 阿魏菇多糖的结构分析[J]. 现代食品科技, 2015, 31(3): 29-37.
- CHEN Shuai, XU Cheng-jian, LI Ying-biao, et al. Structural analysis of *Pleurotus ostreatus* polysaccharide[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(3): 29-37.
- [28] BELLICH B, DISTEFANO M, SYRGIANNIS Z, et al. The polysaccharide extracted from the biofilm of *Burkholderia multivorans* strain C1576 binds hydrophobic species and exhibits a compact 3D-structure[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 1 008-1 018.
- [29] QIAN Jian-ya, CHEN Wei, ZHANG Wei-ming, et al. Adulteration identification of some fungal polysaccharides with SEM, XRD, IR and optical rotation: A primary approach [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 620-625.
- [30] 宋见喜, 任婷, 满枋霖, 等. 柴胡多糖硫酸化修饰条件的优化及其修饰前后抗氧化能力比较[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(6): 1 165-1 170.
- SONG Jian-xi, REN Ting, MAN Fang-lin, et al. Optimization of sulfation modification conditions of *bupleurum bupleurum* polysaccharide and comparison of antioxidant ability before and after modification[J]. Journal of Jilin University (Medical Edition), 2017, 43(6): 1 165-1 170.
- [31] 申进文, 冯雅岚, 余海尤, 等. 硫酸化分级香菇多糖抗氧化活性研究[J]. 菌物学报, 2010, 29(3): 449-453.
- SHEN Jin-wen, FENG Ya-lan, YU Hai-you, et al. Antioxidant activity of sulfated graded *lentianan*[J]. Acta Mycology, 2010, 29(3): 449-453.