doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.026

搓压式蓖麻脱壳机脱壳过程运动分析与试验

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

摘要:为优化蓖麻蒴果柔性脱壳装置的脱壳过程参数,基于离散元粘结接触理论,构建蓖麻蒴果脱壳过程仿真模型,对物料在脱壳室内运动过程进行分析。结果表明,当滚筒转速为 250 r/min、脱壳间隙为 7 mm、填充率为 40%时,脱壳率最高。滚筒转速对颗粒受到的最大压力和最大速度影响显著,随着转速的增加,颗粒间最大挤压力从 68.78 N 减小到 68.10 N,颗粒最大速度从 8.92 m/s 增加到 12.99 m/s,脱壳率从 91.23% 增加到 91.28%,然后下降到 88.89%。脱壳间隙对颗粒的最大压力和最大速度有显著影响,随着脱壳间隙增加,颗粒最大压力从 76.93 N 下降到 58.69 N,颗粒最大速度先由 12.14 m/s 增加至 12.99 m/s,后减小至 10.05 m/s;脱壳率先由 92.50% 减小至 89.59%,后增加至 91.41%。蓖麻蒴果在脱壳过程中,颗粒在 X 轴方向运动的平均速度从 4.17 m/s 减小到 3.26 m/s;颗粒在 Y 轴方向运动的平均速度从 8.26 m/s 减小到 7.59 m/s;颗粒在 Z 轴方向运动的平均速度从 6.58 m/s 减小到 6.24 m/s。开始脱壳阶段,蓖麻蒴果集中分布在脱壳室中部,部分呈堆积现象,其运动轨迹为接触内滚筒后弹起一定高度后下落并随内滚筒转动,向出料口方向运动;稳定脱壳阶段,蓖麻蒴果集中均匀分布在脱壳室出料口附近,并随着内滚筒一起转动;脱壳结束阶段,物料集中分布在脱壳室出料口底部位置,并不断向底部位置移动,大部分蓖麻从脱壳室右侧排出。通过仿真得到脱壳过程最优参数组合为:转速 350 r/min、脱壳间隙 5 mm、填充率 40%。试验结果为:转速 350 r/min、脱壳间隙 5 mm、填充率 30%,因 3 个因素中转速和脱壳间隙为极显著因素,填充率为显著因素,故差异在合理范围内。

关键词:蓖麻蒴果;离散元法;运动仿真;脱壳过程;试验
中图分类号:S565.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S2-0220-13

Motion Analysis and Experiment on Shelling Process of Kneading and Pressing Castor Shelling Machine

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

Abstract: The motion law of castor capsule during shelling process is of great significance to the study of shelling damage. Based on the theory of bonding contact, a simulation model of castor shelling process was established to simulate the movement of castor capsule in the shelling drum. The results showed that in the process of castor shell peeling simulation, when the speed reached 8.50 m/s, the capsule of castor just broke after collision with Q235 steel, and the inner seed was not damaged. Therefore, the speed at 8.50 m/s was set as the target value. When the rotation speed was 250 r/min, the shelling gap was 7 mm, and the filling rate was 40%. In the single factor analysis, the influence of drum revolution on the maximum pressure and velocity of particles were significant. With the increase of revolution, the maximum pressure between particles was decreased from 68.78 N to 68.10 N. The maximum velocity of particles was increased from 8.92 m/s to 12.99 m/s, and the shelling rate was increased from 91.23% to 91.28%, and then it was decreased to 88.89%. The influence of shelling clearance on the maximum pressure and velocity of particles was followed: with the increase of shelling clearance, the maximum pressure between particles was decreased from 76.93 N to 58.69 N, the maximum velocity of particles was increased from 12.14 m/s to 12.99 m/s, and then decreased to 10.05 m/s. Furthermore, the shelling rate was firstly decreased from 92.50% to 89.59%, and then increased to 91.41%. In the process of shelling, the average velocity of particles in X-axis direction was decreased from 4.17 m/s to 3.26 m/s; the average velocity of particles in Y-axis direction was decreased from 8.26 m/s to 7.59 m/s; and the average velocity of particles in Z-axis direction was decreased from 6.58 m/s to 6.24 m/s. In the

收稿日期:2020-08-12　修回日期:2020-09-13
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

stage of initial shelling, the particles were concentrated in the middle of the shelling drum, and some castor seeds were accumulated. The castor capsules bounced up after touching the inner drum, fell down and rotated with the inner drum, and then moved toward the outlet. During the stable shelling stage, the castor was concentrated and evenly distributed near the outlet of the shelling drum, and rotated with the inner drum. At the end of the shelling stage, the particles were concentrated at the bottom of the shelling drum, and then moved to the bottom continuously. Most of the castor was discharged from the right side of the shelling chamber. Through simulation, the optimal parameter combination of the shelling process was obtained as follows: rotation speed was 350 r/min, shelling clearance was 5 mm, and the filling rate was 40%. The test results were as follows: rotation speed was 350 r/min, shelling clearance was 5 mm, and the filling rate was 30%. Since among the three factors, the rotation speed and shelling clearance were extremely significant factors, and the filling rate was significant factor, the difference was within a reasonable range. The study provided theoretical support for the design of castor shelling machine and its related components.

Key words: castor capsule; discrete element method; motion simulation; shelling process; experiment

0　引言

蓖麻是十大油料作物之一，蓖麻籽含油量较高，其用途非常广泛，蓖麻可以榨油，是重要的润滑油材料，可生产尼龙等[1-3]。现有的蓖麻脱壳机脱壳效率低、损伤率高，主要原因是蓖麻脱壳机设计缺少必要的理论指导，尤其是缺乏脱壳过程中物料间及物料与脱壳部件的速度变化对脱壳率和脱壳效果影响的研究[4]。国内外许多学者对农业物料离散元运动过程进行了研究。张盼盼等[5]借助离散元分析软件 EDEM，分析影响物料平均推进速度和筛分效率的因素，以获得最佳运动参数。文献[6-7]运用离散元法分析软件 EDEM 对碾米机碾白室内物料运动过程进行仿真模拟。方会敏等[8]建立基于离散元方法的旋耕工作模型，利用试验和仿真数据对土壤位移和运动机理进行分析。李艳洁等[9]为预测土壤颗粒在圆锥指数仪贯入沙土过程中的运动特性，建立一个三维长方体料床模型，采用离散元法模拟了圆锥贯入沙土的全过程。史嵩等[10]采用 EDEM 软件对 4 种不同型孔结构排种盘的种群运动进行了仿真分析。任明磊等[11]根据水稻种子的外形尺寸及充种状态概率，设计 5 种规格的 U 型充种型孔，并借助 EDEM 离散元法对其进行运动模拟仿真。张涛等[12]基于离散元法模拟了在田间作业振动条件下玉米种群运动规律。袁全春等[13]提出一种通过仿真试验建立回归模型并结合物理试验寻优的方法，对有机肥离散元模型参数进行标定。刘文政等[14]将试验模型对各因素所测定的值作为仿真目标值代入拟合方程，得到微型薯离散元仿真参数，并进行了仿真试验验证。洪俊等[15]提出了一种基于离散元法的精细化弹簧-四面体单元破碎模型。PASHA 等[16]构建了两种不同的玉米模型，运用离散元仿真对玉米机器内部的运动及混合进行分析。HASSANPOUR 等[17]利用离散元对搅拌桨式搅拌器内粉末的流动进行了模拟。COETZEE 等[18]利用手动添加及优化添加两种方式建立了碎石颗粒，并与休止角校准结果进行对比。KORNEL 等[19]对农业物料筛选进行离散元仿真，得到了调整前摆杆的转角有利于颗粒在变幅筛分过程中的快速膨胀。

综上可知，相关研究主要集中在使用离散元方法对排种器排种过程分析及颗粒接触模型选择等方面，而对物料脱壳中的运动参数分析较少，尤其对物料脱壳过程中运动规律等方面研究更少。本文基于离散元法对设计的一种双滚筒柔性蓖麻蒴果脱壳机脱壳过程进行分析，研究蓖麻蒴果在脱壳室内群体运动规律，为相关参数优化及脱壳损伤原理研究提供理论依据。

1　蓖麻蒴果模型建立

1.1　Hertz-Mindlin 粘结接触模型

蓖麻蒴果接触模型选定为颗粒之间存在粘结作用的 Hertz-Mindlin 粘结接触模型，由文献[20-21]可知，该模型可以表达蓖麻蒴果粘结处的破碎过程，也能真实模拟相关力学变化过程。当达到最大法向和切向应力时，粘结被破坏，两颗粒被视为硬球对彼此产生作用，法向粘结力 F_n、法向力矩 T_n、切向粘结力 F_t 和切向力矩 T_t 均随时间步长从 0 开始进行计算。计算式为

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta_t \\ \delta T_n = -\omega_n S_t J \delta_t \\ \delta T_t = -\omega_t S_n \dfrac{J}{2} \delta_t \end{cases} \tag{1}$$

其中　　$A = \pi R_B^2$　　$J = \frac{1}{2}\pi R_B^4$

式中　v_n、v_t——蓖麻颗粒法向和切向线速度，m/s

S_n、S_t——颗粒法向和切向刚度，N/m

δ_t——时间步长

T_n、T_t——蓖麻颗粒受到法向和切向力矩,N·m

ω_n、ω_t——蓖麻颗粒法向和切向角速度,rad/s

A——接触部分的面积,mm^2

R_B——粘结键半径,mm

J——蓖麻颗粒惯性矩,mm^4

当某一时刻蓖麻颗粒间粘结所承受的法向和切向应力达到一定临界值时,粘结破裂,其条件为

$$\begin{cases} \sigma_{max} < -\dfrac{F_n}{A} + \dfrac{2T_t}{J}R_B \\ \tau_{max} < -\dfrac{F_t}{A} + \dfrac{T_n}{J}R_B \end{cases} \tag{2}$$

式中 σ_{max}、τ_{max}——蓖麻颗粒间粘结所能承受的最大法向应力和切向应力,Pa

1.2 蓖麻蒴果破碎模型参数设置

对蓖麻蒴果各参数进行设置。表 1 为蓖麻蒴果离散元参数。

表 1 蓖麻蒴果离散元参数

Tab. 1 Parameter of castor of DEM

参数	数值
蓖麻泊松比	0.3
蓖麻剪切模量/MPa	1.7×10^4
蓖麻密度	1 000
蓖麻-蓖麻碰撞恢复系数	0.15
蓖麻-蓖麻静摩擦因数	0.6
蓖麻-蓖麻动摩擦因数	0.05
Q235 钢泊松比	0.3
Q235 钢剪切模量/MPa	7.9×10^4
Q235 钢密度/(kg·m^{-3})	7 800
蓖麻- Q235 钢碰撞恢复系数	0.44
蓖麻- Q235 钢静摩擦因数	0.4
蓖麻- Q235 钢动摩擦因数	0.01
橡胶泊松比	0.45
橡胶剪切模量/MPa	1×10^3
橡胶密度/(kg·m^{-3})	9 100
蓖麻-橡胶碰撞恢复系数	0.37
蓖麻-橡胶静摩擦因数	0.7
蓖麻-橡胶动摩擦因数	0.05

其中,粘结参数中的最大法向力及最大切向力由有限元分析[22]得到,表 2 为粘结参数。

表 2 粘结参数

Tab. 2 Bond parameter

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2.1×10^9
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1.4×10^9
最大法向应力/Pa	2.1×10^6
最大切向应力/Pa	1.5×10^6
粘结板半径/mm	1.6

1.3 蓖麻蒴果破碎模型建立

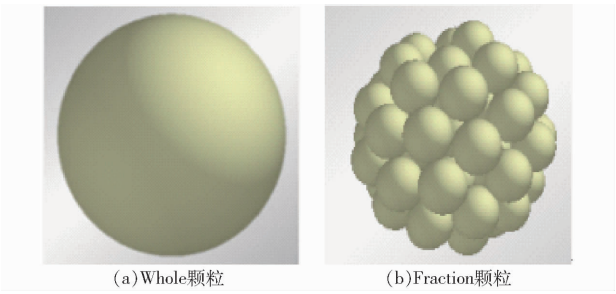
蓖麻蒴果实物图如图 1 所示。蓖麻蒴果为一个整体,其在脱壳过程中,经过脱壳室挤压碰撞后分解,从出料口排出。



图 1 蓖麻蒴果实物图

Fig. 1 Real capsule of castor bean

蓖麻蒴果外圆直径为 14.43 mm,高为 15.56 mm,外种皮厚 0.2 mm[22]。蓖麻蒴果每室占角 120°。建立蓖麻蒴果离散元模型时,接触模型选择为 Hertz - Mindlin 粘结接触模型,将替换前的颗粒命名为 Whole,替换后小颗粒命名为 Fraction,一个 Whole 颗粒由 58 个 Fraction 颗粒通过粘结键组合在一起,构成单个蓖麻蒴果,图 2 为蓖麻蒴果离散元模型替换效果。



(a)Whole颗粒 (b)Fraction颗粒

图 2 蓖麻蒴果离散元模型替换效果

Fig. 2 Replacement effect of castor discrete element model

1.4 蓖麻蒴果脱壳模型参数设置

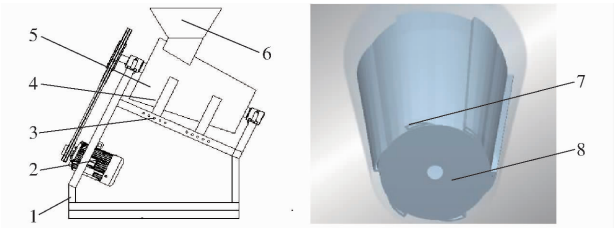
蓖麻蒴果破裂脱壳过程为三室先分离,然后单室蒴果破裂脱壳。搓压式脱壳原理为物料与脱壳部件内壁碰撞后三室分离,再进入搓压区域进行脱壳。模型参数如表 3 所示。

表 3 脱壳模型参数

Tab. 3 Parameters of sheller

参数	数值
内滚筒最小半径/mm	137
外滚筒最小半径/mm	158
内滚筒长度/mm	600
外滚筒长度/mm	700
滚筒倾角/(°)	25
压片出料口端弧长/mm	79
内滚筒锥角/(°)	4
外滚筒锥角/(°)	5.5
进料口长度/mm	300
进料口宽度/mm	200
压片高度/mm	12
压片大端弧长/mm	100

设计了一种动定锥筒式搓压蓖麻蒴果脱壳机，外滚筒为定锥筒，内滚筒为动锥筒，脱粒滚筒内部焊接有均布在滚筒的 6 个压片，压片上包有橡胶。其整机及内滚筒模型示意图如图 3 所示。



(a) 整机结构示意图　　(b) 内滚筒模型示意图

图 3　整机与内滚筒示意图

Fig. 3　Schematic of whole machine and inner drum

1. 机架　2. 电机　3. 间隙调节孔　4. 调节臂　5. 外滚筒　6. 进料斗　7. 压片　8. 内滚筒

2　蓖麻蒴果脱壳仿真分析

2.1　颗粒最大速度分析

2.1.1　方差分析与最优组合

采用方差分析法，获得在最大速度下转速、脱壳间隙及填充量的最优组合。表 4 为颗粒最大速度方差分析，变异系数 C_V 为 6.70%，证明试验具有较高的可信度；Adep 可信度值（测量信噪比）为 12.84，证明本模型精确度较高。失拟项 $P>0.05$，说明二次多项式方程拟合程度较高；决定系数 R^2 为 0.943 7，调整决定系数 R_1^2 为 0.871 3，表明拟合方程可靠性强。回归方程中各变量对指标影响的显著性由 F 检验判定，全部因素对最大速度的二次多项式方程为

$$Y=-33.74-0.03A+13.33B+0.47C-0.01AB+0.21BC-2.05\times10^{-3}AC+3.77\times10^{-4}A^2-1.41B^2-0.02C^2 \quad (3)$$

式中　A——转速，r/min

B——脱壳间隙，mm

C——填充率，%

基于 Box－Benhnken 试验方案得出，最大速度和转速、脱壳间隙及填充率的三元二次响应模型的显著性水平 $P<0.01$，故设计试验因素对最大速度有显著影响；A、B、C 3 个因素的 $P<0.05$，说明转速、脱壳间隙及填充率对颗粒最大速度有显著影响。其中，转速影响最显著、填充率次之、脱壳间隙最小；交互作用中，BC 的 $P<0.05$，故可知脱壳间隙与填充率的交互作用对颗粒最大速度有显著影响。二次项因素中，B^2 的 $P<0.01$，故认为脱壳间隙的二次项对颗粒最大速度有显著影响。

表 4　Box－Benhnken 试验模型颗粒最大速度方差分析

Tab. 4　Analysis of variance for maximum velocity of particles in Box－Benhnken experimental model

误差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	47.30	9	5.26	13.03	0.001 4
A	20.13	1	20.13	49.92	0.000 2
B	3.16	1	3.16	7.84	0.026 5
C	3.78	1	3.78	9.38	0.018 3
AB	2.22	1	2.22	5.51	0.051 4
AC	1.05	1	1.05	2.61	0.150 0
BC	4.47	1	4.47	11.09	0.012 6
A^2	3.74	1	3.74	9.28	0.018 7
B^2	8.34	1	8.34	20.69	0.002 6
C^2	0.85	1	0.85	2.11	0.190 0
残差	2.82	7	0.40		
失拟项	1.04	3	0.35	0.78	0.560 0
纯误差	1.78	4	0.44		
总和	50.12	16			

由文献[22]可知，当蓖麻蒴果速度达到 8.5 m/s 时，蓖麻蒴果与 Q235 钢碰撞刚好破裂，内部籽粒并没有损伤，故将 8.5 m/s 设置为目标值，得到最优参数组合为：转速 250 r/min、脱壳间隙 7.0 mm、填充率 40%。

2.1.2　响应面分析

图 4a 为填充率取 40% 时，转速与脱壳间隙的效应分析图，当转速固定时，随着脱壳间隙的增加，颗粒最大速度先增大后减小，在脱壳间隙为 6.0 mm 时达到最大峰值；当脱壳间隙固定时，随着转速的增加，颗粒最大速度不断增大。当脱壳间隙在 5.0～6.0 mm 之间时，随着转速增加，颗粒最大速度增大；当脱壳间隙在 6.0～7.0 mm 之间时，随着转速的增加，颗粒最大速度减小速率加快。

图 4b 为转速为 250 r/min 时，脱壳间隙与填充率的效应分析图，当脱壳间隙固定时，随着填充率的增加，颗粒最大速度不断减小；当填充率固定时，随着脱壳间隙的增加，颗粒最大速度不断减小。当填充率在 30%～40% 之间时，随着脱壳间隙的增加，颗粒最大速度减小速率加快；当填充率在 40%～50% 之间时，随着脱壳间隙的增加，颗粒最大速度减小速率减慢。

2.2　脱壳率分析

2.2.1　方差分析与最优组合

采用方差分析法获得最大脱壳率下转速、脱壳间隙及填充率的最优组合。表 5 为颗粒脱壳率方差分析，变异系数 C_V 为 0.89%，证明试验具有较高的可信度；Adep 可信度值（测量信噪比）为 19.38，证明本模型精确度较高。失拟项 $P>0.05$，说明二次多项式方程拟合程度较高；决定系数 R^2 为 0.966 9，

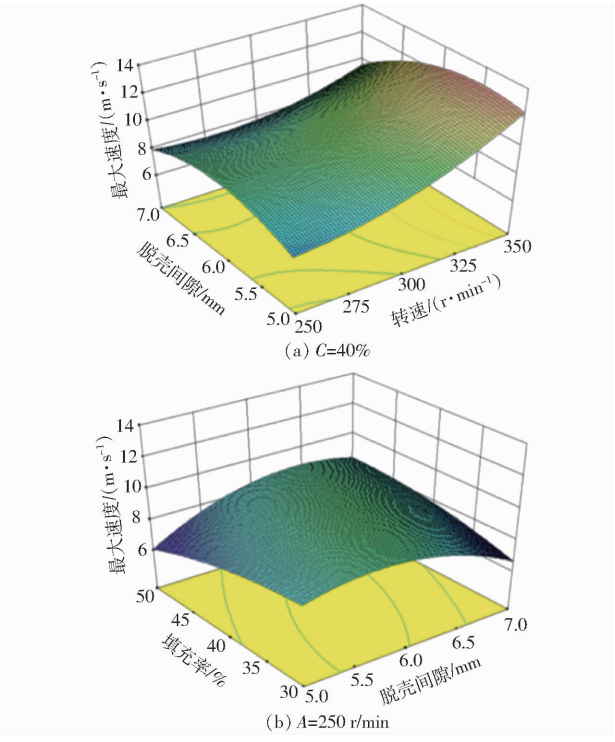


图 4 因素交互作用对最大速度的影响

Fig. 4 Effects of interactive factors on maximum velocity

表 5 Box－Benhnken 试验模型脱壳率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for shelling rate in Box－Benhnken experimental model

误差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*
模型	133.39	9	14.82	22.73	0.000 2
A	11.62	1	11.62	17.82	0.003 9
B	67.57	1	67.57	103.63	<0.000 1
C	5.46	1	5.46	8.38	0.023 2
AB	4.20	1	4.20	6.45	0.038 7
AC	8.41	1	8.41	12.90	0.008 8
BC	12.57	1	12.57	19.27	0.003 2
A^2	2.77	1	2.77	4.25	0.078 2
B^2	0.31	1	0.31	0.48	0.510 0
C^2	19.90	1	19.90	30.51	0.000 9
残差	4.56	7	0.65		
失拟项	1.94	3	0.65	0.98	0.48
纯误差	2.63	4	0.66		
总和	137.95	16			

调整决定系数 R_1^2 为 0.924 4，说明拟合方程可靠性强。全部因素对脱壳率的二次多项式方程为

$$Y = -62.97 + 0.46A + 7.07B + 3.59C - 0.02AB - 2.9\times10^{-3}AC - 0.18BC - 3.25\times10^{-4}A^2 - 0.27B^2 - 0.02C^2 \quad (4)$$

由表 5 可得，脱壳率和转速、脱壳间隙及填充率的三元二次响应模型的显著性水平 $P<0.01$，故设计试验因素对脱壳率有显著影响；*A*、*B*、*C* 3 个因素的 $P<0.05$，说明转速、脱壳间隙及填充率对脱壳率有显著影响，其中脱壳间隙影响最显著，转速次之，填充率最小；交互作用中，*AB*、*AC*、*BC* 的 $P<0.05$，故可知转速与脱壳间隙、转速与填充率、脱壳间隙与填充率的交互作用对脱壳率有显著影响。二次项因素中，C^2 的 $P<0.01$，故认为填充率的二次项对脱壳率有显著影响。

根据蓖麻蒴果力学特性仿真研究中的有限元分析[22]，将脱壳率设置为最大值，得到最优参数组合为：转速 350 r/min、脱壳间隙 5 mm、填充率 40%。

2.2.2 响应面分析

图 5a 为脱壳间隙取 5 mm 时，转速与填充率的响应面图。当转速固定时，随着填充率的增加，脱壳率先增大后减小，在填充率为 40% 时达到峰值；当填充率固定时，随着转速的增加，脱壳率不断增大。当填充率在 30% ~40% 之间时，随着转速的增加，脱壳率增大速率较快；当填充率在 40% ~50% 之间时，随着转速的增加，脱壳率增大速率较慢。

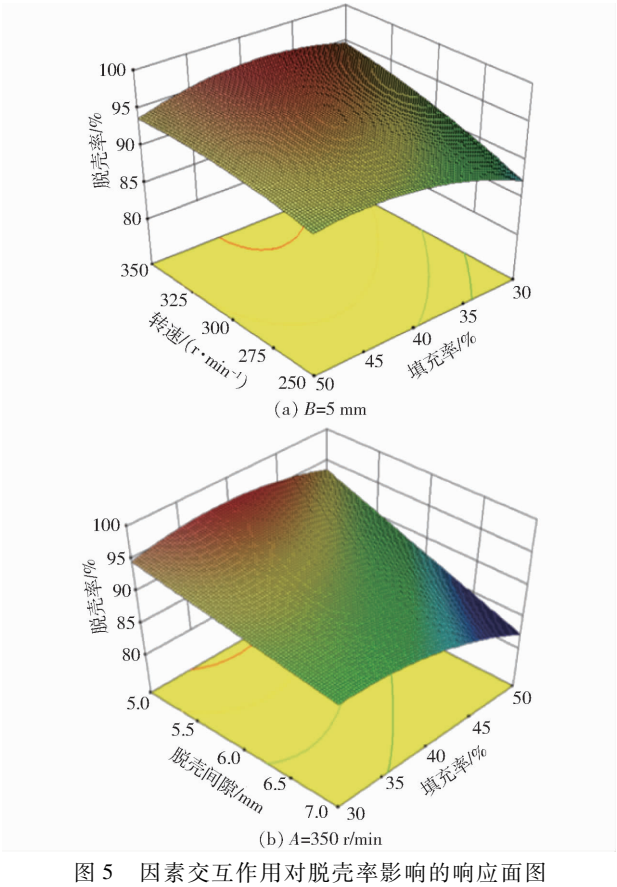


图 5 因素交互作用对脱壳率影响的响应面图

Fig. 5 Effects of interactive factors on shelling rate

图 5b 为滚筒转速为 350 r/min 时，脱壳间隙与填充率的响应面图。当脱壳间隙固定时，随着填充率的增加，脱壳率先增加后减小，在填充率为 40% 时达到峰值；当填充率固定时，随着脱壳间隙的增加，脱壳率不断减小。

2.3 蓖麻蒴果脱壳运动仿真单因素分析

为确定滚筒转速、脱壳间隙及填充率对最大压

力、最大速度及脱壳率的影响，对蓖麻蒴果脱壳运动仿真进行单因素分析，为后续脱壳阶段划分及过程提供参考。

2.3.1　滚筒转速对性能的影响

根据蓖麻蒴果受力仿真分析获得转速与最大压力、最大速度及脱壳率的关系如表 6 所示。随着转速的增加，颗粒间最大压力由 68.78 N 下降至 68.10 N；颗粒的最大速度由 8.92 m/s 增加至 12.99 m/s；脱壳率先由 91.23% 增加至 91.28%，后减小至 88.89%。

表 6　转速对各参数的影响

Tab.6　Influence of rotational speed on various parameters

转速/(r·min^{-1})	最大压力/N	最大速度/(m·s^{-1})	脱壳率/%
250	68.78	8.92	91.23
300	68.67	10.89	91.28
350	68.10	12.99	88.89

2.3.2　脱壳间隙对性能的影响

表 7 为脱壳间隙与最大压力、最大速度及脱壳率的关系。随着脱壳间隙的增加，颗粒间最大压力由 76.93 N 减小至 58.69 N；颗粒最大速度先由 12.14 m/s 增加至 12.99 m/s，后减小至 10.05 m/s；脱壳率先由 92.50% 减小至 89.59%，后增加至 91.41%。

表 7　脱壳间隙对各参数的影响

Tab.7　Influence of peeling clearance on parameters

脱壳间隙/mm	最大压力/N	最大速度/(m·s^{-1})	脱壳率/%
5	76.93	12.14	92.50
6	68.78	12.99	89.59
7	58.69	10.05	91.41

3　蓖麻蒴果脱壳运动过程分析

在脱壳离散元模型设置中，在 0.395 s 时，Whole 颗粒由 58 颗 Fraction 颗粒替换并产生粘结键，1.5 s 时颗粒落入脱壳模型内部并开始脱壳，故仅对仿真运行 1.5 s 后的颗粒状态进行分析。图 6 为脱壳率变化曲线。

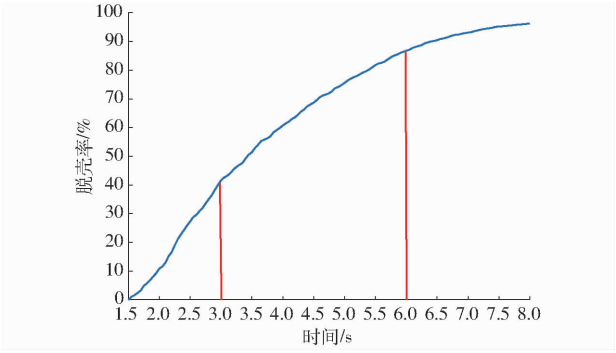


图 6　脱壳率变化曲线

Fig.6　Change curve of peeling rate

3.1　脱壳阶段划分

本文通过对脱壳过程的离散元仿真结果分析及图 6 对蓖麻蒴果脱壳阶段的划分可知，1.5 ~ 3.0 s 时曲线上升较快，3.0 ~ 6.0 s 之间曲线上升较为稳定，6.0 ~ 8.0 s 曲线较为平缓，故将脱壳过程以 3.0、6.0 s 分为 3 个阶段，分别定义为开始脱壳阶段、稳定脱壳阶段及结束脱壳阶段。表 8 是脱壳阶段划分规则。

表 8　脱壳阶段划分规则

Tab.8　Rules for division of shelling stage

脱壳阶段	投料	开始脱壳	稳定脱壳	结束脱壳
时间/s	0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 6.0	6.0 ~ 8.0

3 个阶段曲线拟合方程及相关系数如表 9 所示。可知，随脱壳过程的进行，拟合方程斜率不断下降，故脱壳效率呈下降趋势，两组拟合方程相关系数均接近 1，拟合关系良好。

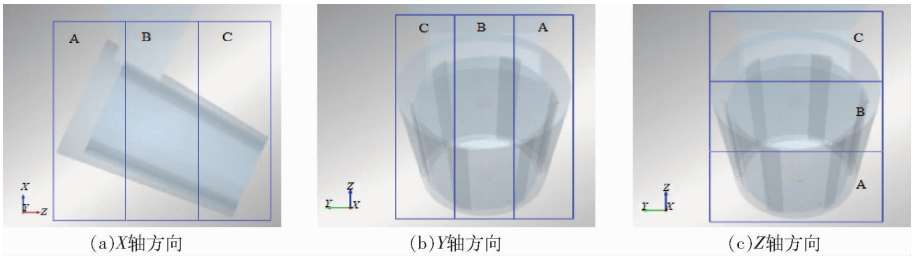
表 9　三阶段拟合方程

Tab.9　Regression equation of undamaged bond

脱壳过程	拟合方程	相关系数
开始脱壳	$Y = 1.44X - 3.86$	0.993 9
稳定脱壳	$Y = 0.75X + 43.66$	0.987 8
结束脱壳	$Y = 0.23X + 87.78$	0.963 0

3.2　蓖麻蒴果脱壳过程分析及运动分析

为表明颗粒分布情况，对离散元模型进行三轴方向网格划分，图 7 为网格划分图。在 1.5 s 时颗粒落入脱壳模型内部并开始脱壳，因此以 1.5 s



(a)X轴方向　(b)Y轴方向　(c)Z轴方向

图 7　网格划分

Fig.7　Grid division

时颗粒中心点为原点、滚筒轴线方向为 X 轴、内滚筒转动方向为 Y 轴、竖直方向为 Z 轴建立坐标系，分别对脱壳过程中 3 轴方向数量分布进行分析，由此判断任意时刻颗粒在模型内的分布情况，并对颗粒位移及轨迹进行分析。其中，区域划分为：X 轴正方向依次为区域 A、B、C，Y 轴正方向依次为区域 C、B、A，Z 轴正方向依次为区域 A、B、C。

3.2.1 开始脱壳阶段

图 8 为脱壳过程中颗粒 3 轴方向分布规律，表 10 为颗粒分布拟合方程，图 9 为开始脱壳阶段结束时刻颗粒分布情况。由图 8a 可知，开始脱壳阶段由于进料口位置接近脱壳室中部，故此时在区域 B 颗粒较多，该区域颗粒分布占总颗粒的 93.04%，少量颗粒由于颗粒间碰撞分布于区域 A，占总颗粒的 6.69%，区域 C 无颗粒分布，区域 A 分布呈增长趋势，区域 B 分布呈减少趋势，区域 C 仅在该阶段最后 0.25 s 存在颗粒分布，最后时刻区域 A、B、C 颗粒数量分布为 39.58%、56.69% 及 3.74%。故此阶段中，物料集中分布在脱壳室中部，脱壳室内部存在部分物料堆积，极少部分物料从出料口排出。

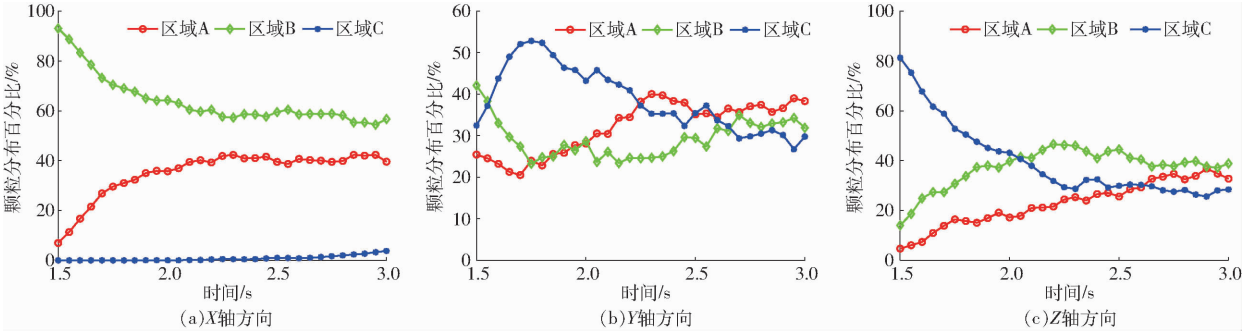


图 8 开始脱壳阶段颗粒群 3 轴方向分布规律

Fig. 8 Three-axis distribution of particle groups in the start shelling stage

表 10 开始脱壳阶段颗粒分布拟合方程

Tab. 10 Particle distribution fitting equation in the start shelling stage

区域	X 轴方向		Y 轴方向		Z 轴方向	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
A	$Y=10.43\ln x+8.91$	0.911 4	$Y=0.59x+22.57$	0.744 4	$Y=0.97x+7.23$	0.956 4
B	$Y=-11.23\ln x+92.32$	0.947 2	$Y=0.05x^2-1.48x+36.59$	0.601 0	$Y=-0.08x^2+3.04x+15.21$	0.900 8
C	$Y=0.01x^2-0.11x+0.37$	0.955 5	$Y=-0.03x^2+0.14x+44.59$	0.670 8	$Y=-17.65\ln x+84.37$	0.971 9

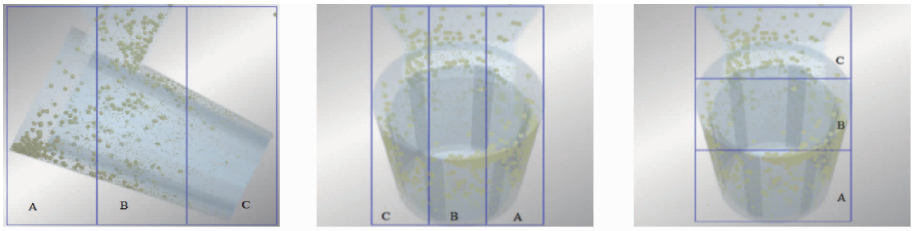


图 9 3 s 时颗粒分布情况

Fig. 9 Particle distribution at 3 s

由图 8b 可知，开始脱壳阶段时，颗粒在 3 个区域均有分布，与内滚筒接触后，颗粒向区域 C 集中分布，在 1.75 s 时达到最大值，为 52.80%，此时在区域 A、B 颗粒分布最少，分别为 23.97%、23.22%；区域 A 分布呈增长趋势，区域 B 分布呈先减小后增加趋势，区域 C 分布呈先增加后减小趋势，三区域颗粒分布趋于相同，最后时刻区域 A、B、C 颗粒分布比例为 38.31%、31.89%、29.80%。此阶段，物料集中分布在脱壳室中，随内滚筒转动方向转动，并均匀分布在脱壳室中。

由图 8c 可知，开始脱壳阶段，由于进料口处于脱壳室顶部，故此时在区域 C 颗粒较多，所占比例为 81.27%，少量颗粒分布于区域 A、B，所占比例为 4.69%、14.03%；区域 A、B 分布呈增长趋势，区域 C 分布呈减小趋势，3 s 时刻区域 A、B、C 颗粒分布比例为 32.76%、38.83% 及 28.41%。此阶段，物料集中分布在脱壳室顶部，随下落过程分散，在内滚筒转动作用下呈均匀分布。

图 10 为颗粒群 3 轴位置图，颗粒群在 X 轴负向的最大位移为 89 mm，颗粒群下落与内滚筒碰撞后沿 X 轴负方向移动一段距离，并在 X 轴负方向堆积。在 Y 轴负方向最大位移为 237 mm，颗粒群与内滚筒碰撞后沿 Y 轴负向移动一段距离，之后随内滚筒转动向 Y 轴正方向移动，颗粒群在 Y 轴正负方向做周期运动；在 Z 轴正方向最大位移为 160 mm。分析可知，颗粒群下落与内滚筒碰撞后向 Z 轴方向弹起一定高度，随后不断下落。此阶段颗粒群的运动为下落后弹起，随内滚筒转动方向转动，在脱壳室中部发生堆积。

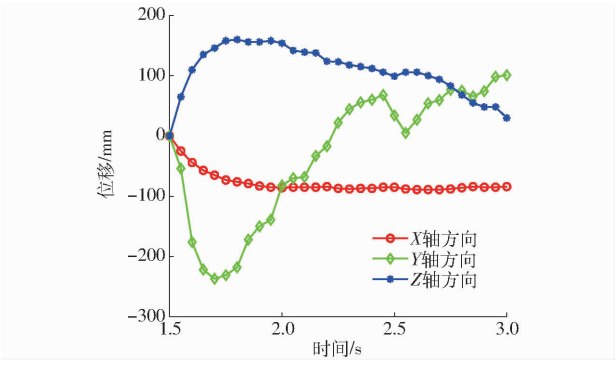


图 10　开始脱壳阶段颗粒群 3 轴位置

Fig. 10　Three-axis position of particle group in the start shelling stage

3.2.2　稳定脱壳阶段

图 11 为颗粒 3 轴方向分布规律，表 11 为颗粒分布拟合方程。图 12 为稳定脱壳阶段结束时刻颗粒分布情况。由图 11a 可知，稳定脱壳阶段区域 A 颗粒数量增加，区域 B 颗粒数量较为稳定，区域 C 颗粒数量增加，区域 A、B 分布百分比均呈下降趋势，区域 C 分布呈增长趋势，最后时刻区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 16.24%、44.37%、39.39%。此阶段，物料集中分布在脱壳室中部，在出料口方向分布增加。

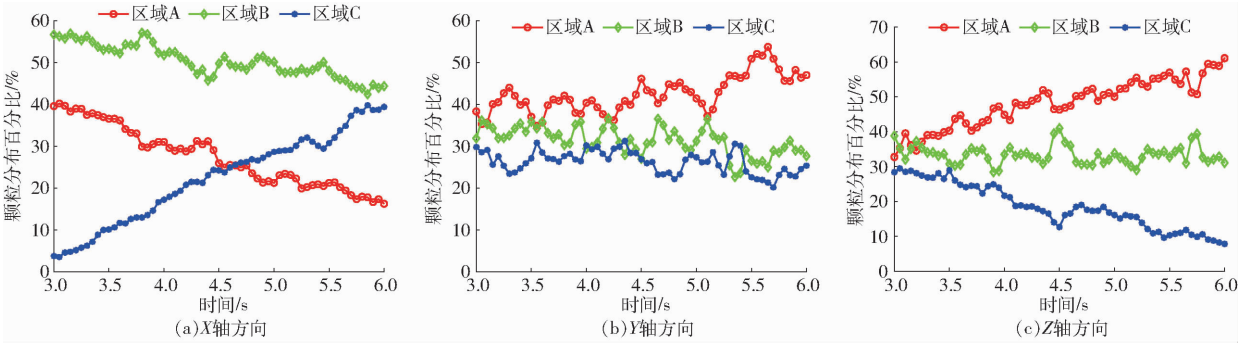


图 11　稳定脱壳阶段颗粒群 3 轴方向分布规律

Fig. 11　Three-axis distribution of particle groups in the stable shelling stage

表 11　稳定脱壳阶段颗粒分布拟合方程

Tab. 11　Particle distribution fitting equation in the stable shelling stage

区域	X 轴方向		Y 轴方向		Z 轴方向	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
A	$Y=-0.40x+59.78$	0.960 2	$Y=0.18x+36.73$	0.536 3	$Y=0.37x+36.72$	0.898 6
B	$Y=-0.20x+56.49$	0.808 1	$Y=-0.11x+22.57$	0.363 1	$Y=-0.015x+33.86$	0.010 5
C	$Y=0.60x+3.73$	0.982 5	$Y=-0.07x+28.41$	0.208 7	$Y=-0.35x+29.42$	0.932 4

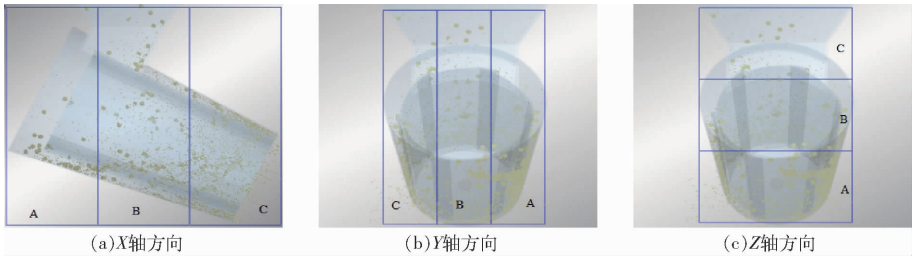


图 12　6 s 时颗粒分布情况

Fig. 12　Particle distribution at 6 s

由图 11b 可知，在稳定脱壳阶段中，颗粒在 3 个区域均有分布且较为稳定，此时区域 A 分布最密集，区域 B、C 颗粒分布相近，区域 A 分布均呈增长趋势，区域 B、C 分布均呈增长趋势。6 s 时刻，区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 47.00%、27.64%、25.36%。此阶段，物料集中分布在脱壳室右侧，剩余物料在脱壳室中部及右侧均匀分布。

由图 11c 可知，在 A、B、C 3 个区域分布均较为

稳定时,区域 A 分布最密集,区域 B 次之,区域 C 分布最少,区域 A、B、C 分布均呈增长趋势,最后时刻区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 61.09%、31.09%、7.82%,故认为此阶段物料集中分布在脱壳室底部,少量物料分布在脱壳室顶部,剩余物料分布在中部,随物料不断从出料口排出。颗粒总数减少,故分布密度增大。

图 13 为颗粒群 3 轴位置图,颗粒群在 X 轴的最大位移为 86 mm,方向为 X 轴正方向,颗粒群位置由负变正。分析可知,颗粒群在堆积后向 X 轴正方向移动,堆积颗粒不断减少,此时由于颗粒群集中在滚筒内部,移动速度稳定;在 Y 轴最大位移为 226 mm,方向为 Y 轴负方向,颗粒群在 Y 轴正负方向做周期运动;在 Z 轴最大位移为 305 mm,方向为 Z 轴负方向,颗粒群呈向 Z 轴负方向移动趋势,此时由于在脱壳机底部与顶部同时存在颗粒,底部颗粒随内滚筒转动向 Z 轴正方向移动,顶端颗粒下落向 Z 轴负方向移动。此阶段颗粒群的运动为不断落入脱壳室,随内滚筒转动做周期运动,堆积的物料不断向出料口方向移动。

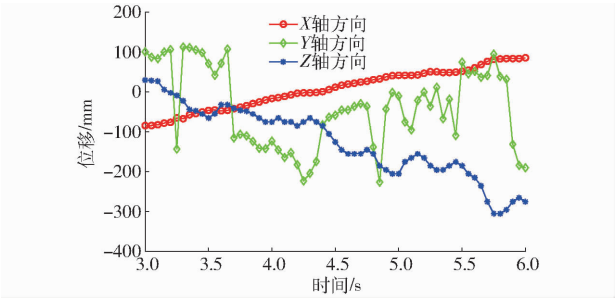


图 13 稳定脱壳阶段颗粒群 3 轴位置

Fig. 13 Three-axis position of particle group in the stable shelling stage

3.2.3 结束脱壳阶段

为了解结束脱壳阶段蓖麻颗粒运动情况,对蓖麻颗粒在脱壳室中的 3 轴分布情况进行分析。图 14 为颗粒 3 轴方向分布规律,表 12 为颗粒分布拟合方程,图 15 为此阶段结束时刻颗粒分布情况。由图 14a 可知,区域 A 颗粒数量降低,区域 B

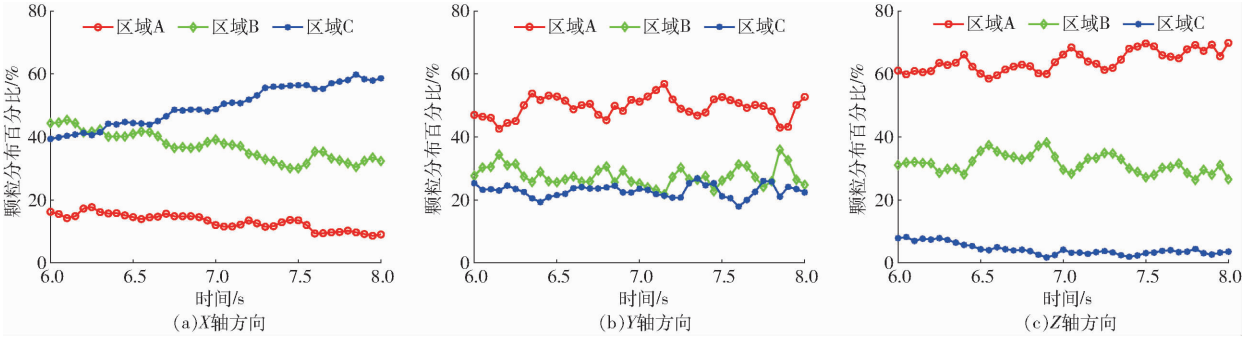


图 14 结束脱壳阶段颗粒群 3 轴方向分布规律

Fig. 14 Three-axis distribution of particle groups at the end of shelling stage

表 12 结束脱壳阶段颗粒分布拟合方程

Tab. 12 Particle distribution fitting equation at the end of shelling stage

区域	X 轴方向		Y 轴方向		Z 轴方向	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
A	$Y=-0.19x+17.04$	0.813 8	$Y=0.04x+48.72$	0.018 4	$Y=0.20x+59.88$	0.550 0
B	$Y=-0.34x+44.19$	0.841 0	$Y=-0.035x+28.37$	0.018 1	$Y=-0.09x+33.46$	0.132 9
C	$Y=0.53x+38.78$	0.969 9	$Y=-0.01x+22.91$	0.001 0	$Y=-0.11x+6.66$	0.567 8

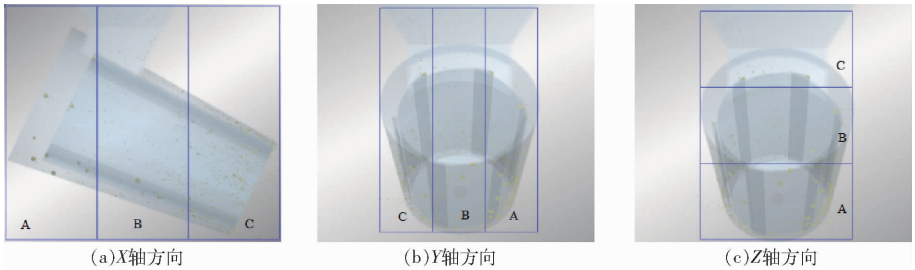


图 15 8 s 时颗粒分布情况

Fig. 15 Particle distribution at 8 s

颗粒数量较为稳定，区域 C 颗粒数量增加，区域 A、B 分布均呈下降趋势，区域 C 分布呈增长趋势，最后时刻区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 9.03%、32.33%、58.64%，此阶段，物料集中分布在脱壳室出料口位置并不断向该方向移动。

由图 14b 可知，区域 A 颗粒分布最密集，区域 B、C 颗粒分布相近，区域 A 分布呈波动趋势，区域 B、C 分布呈波动趋势，3 个区域分布变化较小。最后时刻，区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 52.74%、24.82%、22.45%。此阶段，物料集中分布在脱壳室右侧，剩余物料在脱壳室中部及左侧均匀分布。

由图 14c 可知，本阶段，物料在 A、B、C 3 个区域分布均较稳定，区域 A 分布最为密集，区域 B 次之，区域 C 分布最少。最后时刻，区域 A、B、C 颗粒分布百分比为 69.89%、26.55%、3.56%。此阶段，物料集中分布在脱壳室底部，少量物料分布在脱壳室顶部，剩余物料分布在中部。随着物料不断从出料口排出，颗粒总数减少，故物料在脱壳室内部分布密度增大。

图 16 为颗粒群 3 轴位置图，颗粒群在 X 轴的最大位移为 481 mm，方向为 X 轴正方向，颗粒群满足小于脱壳间隙的条件后由出料口排出，不在脱壳机内稳定移动，故波动较大；Y 轴最大位移为 360 mm，方向为 Y 轴负方向，颗粒群在 Y 轴正负方向进行周期运动；在 Z 轴最大位移为 435 mm，方向为 Z 轴负方向。分析可知，随着颗粒不断由出料口排出，颗粒不断减少，颗粒群沿外滚筒轴线移动，并在出料口处弹出。此阶段颗粒群的运动为下落后弹起，随内滚筒转动方向移动，由出料口不断排出。

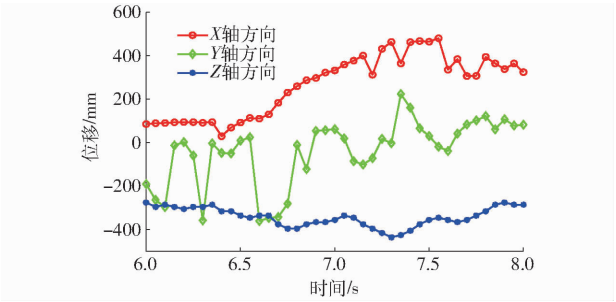


图 16　结束脱壳阶段颗粒群 3 轴位置

Fig. 16　Three-axis position of particle group at the end of shelling stage

3.2.4　物料运动速度分析

图 17 为在不同时间颗粒最大速度。开始脱壳阶段，颗粒 Y 轴方向运动速度最大，平均为 8.26 m/s，Z 轴方向运动速度次之，平均为 6.58 m/s，X 轴方向运动速度最小，平均为 4.17 m/s；X 轴方向速度在 2.20 s 达到最大值，为 5.64 m/s，Y 轴方向速度在 1.90 s 达到最大值，为 9.82 m/s，Z 轴方向速度在 2.75 s 达到最大值，为 8.05 m/s；最大速度在 3 轴方向随时间变化稳定。颗粒从进料口落入脱壳室中与内滚筒接触，由于内滚筒的转动使其在 Y 轴方向速度变快，Z 轴方向存在重力加速度，故 3 轴方向速度差异明显。

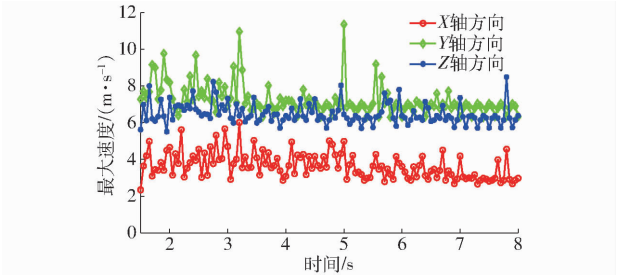


图 17　颗粒最大速度变化曲线

Fig. 17　Maximum particle velocity change curves

在稳定脱壳阶段，颗粒在 Y 轴方向运动的速度最大，平均为 8.16 m/s，Z 轴方向的运动速度次之，平均为 6.73 m/s；在 X 轴方向运动速度最小，平均为 4.32 m/s；X 轴方向速度在 3.20 s 达到最大值，为 6.03 m/s，Y 轴方向速度在 3.20 s 达到最大值，为 10.89 m/s，Z 轴方向速度在 4.96 s 达到最大值，为 8.24 m/s；3 轴方向最大速度随时间变化较为稳定。颗粒在脱壳室中运动时，由于内滚筒与外滚筒间隙较小，随内滚筒运动达到最大速度后被甩出并与外滚筒内壁碰撞，随后继续随内滚筒运动，故 Y 轴方向速度与 Z 轴方向速度差异较小。

结束脱壳阶段，颗粒在 Y 轴方向运动速度最大，平均为 7.59 m/s，Z 轴方向运动速度次之，平均为 6.24 m/s，在 X 轴方向运动速度最小，平均为 3.26 m/s；X 轴方向速度在 6.70 s 达到最大值，为 4.26 m/s，Y 轴方向速度在 5.50 s 达到最大值，为 9.78 m/s，Z 轴方向速度在 7.85 s 达到最大值，为 8.42 m/s；三轴方向最大速度随时间变化较稳定。颗粒在脱壳室中运动时，由于内滚筒与外滚筒间隙较小，随内滚筒运动达到最大速度后，被甩出并与外滚筒内壁碰撞，随后继续随内滚筒运动，故 Y 轴方向速度与 Z 轴方向速度差异较小。

4　蓖麻蒴果脱壳机试验

4.1　试验样机与仪器

该脱壳机主要由电机、机架、内外滚筒、调节装置及进料斗组成。其中除调节装置外，其余部分与脱壳仿真模型一致。图 18 为蓖麻蒴果脱壳试验样机。图 19 为内滚筒实物图。

为验证脱壳过程中物料的分布情况，外滚筒设有观察窗。试验材料为内蒙古通辽市农业科学院种植的典型品种“通蓖 7 号”蓖麻蒴果。试验设备包



图 18 蓖麻蒴果脱壳试验台

Fig. 18 Castor shelling test bench

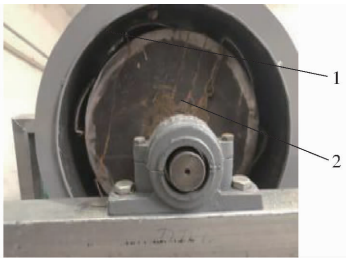


图 19 内滚筒实物图

Fig. 19 Real drawing of inner drum

1. 压片 2. 内滚筒

括蓖麻蒴果脱壳试验台;双杰牌电子秤(TC - 60K 型),最大称量 60 kg,精度 10 g。

4.2 试验过程

在沈阳农业大学工程学院自制的蓖麻蒴果脱壳试验台上进行了脱壳过程物料分布情况的验证试验,内滚筒转速由 XSY - AT1 型变频器(0.04 kW,苏州盾隆机电有限公司)调节,脱壳间隙由滚筒沿轴向前后移动控制,填充率由投入的蓖麻蒴果质量决定。首先通过调节变频器调整电机转速,然后将一定质量的蓖麻蒴果从进料斗放入,最后利用高速摄影从观察窗拍摄滚筒内部蓖麻蒴果脱壳过程的颗粒分布并与仿真结果进行比较分析。

图 20 为高速摄影截取的第 3、6、8 秒时的图像,红色标注为试验与仿真状态对比下的蓖麻蒴果。试验与仿真结果相似,运动趋势相同,故仿真结果可信。造成部分差异的原因为观察窗处有机玻璃板固定在外滚筒上,该位置内外滚筒间隙比正常间隙略大,造成部分物料堆积。

4.3 脱壳效果对比

转速及脱壳间隙对脱壳率的影响均大于填充率对脱壳率的影响,故需要满足转速、脱壳间隙相同。表 13 为脱壳率仿真与试验结果对比,其中试验台测试的 6、8、9 号试验与仿真分析中的 8、3、15 号试验条件完全相同。仿真得到的脱壳率与测量结果差异较小,误差不大于 8.73%。仿真得到的各因素显著性由大到小依次为脱壳间隙、转速、填充率,试验得到的各因素显著性由大到小依次为脱壳间隙、转速、填充率,顺序相同;仿真得到最优组合为转速 350 r/min、脱壳间隙 5 mm、填充率 40%,试验得到的最优组合为转速 350 r/min、脱壳间隙 5 mm、填充率 30%,因 3 个因素中转速、脱壳间隙为极显著因素,填充率为显著因素,故差异在合理范围内。

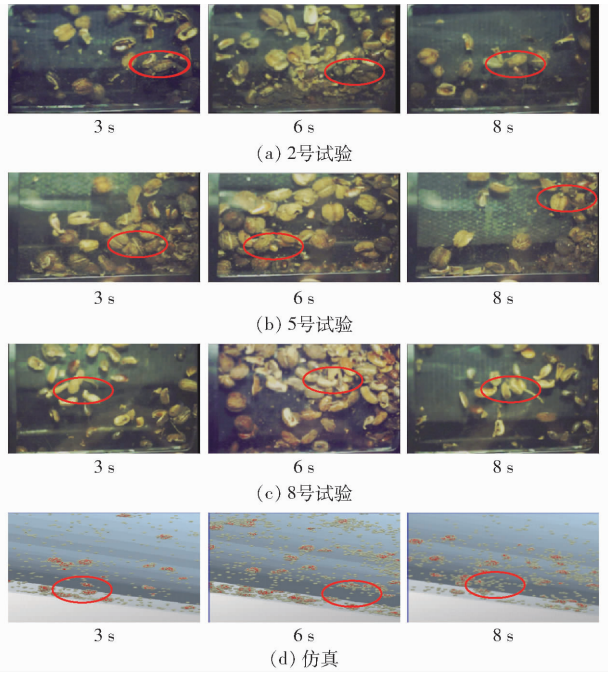


图 20 试验与仿真状态对比

Fig. 20 Comparison of test and simulation states

表 13 脱壳率仿真与试验结果对比

Tab. 13 Comparison between results of simulation and experiment of shelling rate

试验号	脱壳率/%		仿真与试验相对误差/%
	仿真	试验	
1	93.29	90.56	3.01
2	91.36	86.72	5.35
3	93.17	85.69	8.73
4	96.24	90.51	6.33
5	94.23	90.68	3.91
6	89.47	88.21	1.43
7	87.96	91.82	4.20
8	88.32	94.25	6.29
9	93.17	87.28	6.75

5 结论

(1)随着滚筒转速的增加,颗粒间最大挤压力由 68.78 N 下降至 68.10 N。随着转速的增加,颗粒最大速度由 8.92 m/s 增加至 12.99 m/s。随着脱壳间隙的增加,颗粒间最大压力由 76.93 N 减小至 58.69 N;颗粒最大速度先由 12.14 m/s 增加至 12.99 m/s,后减小至 10.05 m/s。

（2）在脱壳过程中，蓖麻蒴果颗粒在 X 轴方向运动的平均速度从 4.17 m/s 减小到 3.26 m/s；颗粒在 Y 轴方向运动的平均速度从 8.26 m/s 减小到 7.59 m/s；颗粒在 Z 轴方向运动的平均速度从 6.58 m/s 减小到 6.24 m/s。蓖麻蒴果开始脱壳阶段，蓖麻蒴果集中分布在脱壳室中部，部分蓖麻呈堆积现象，其运动轨迹为接触内滚筒后弹起一定高度后下落并随内滚筒转动，向出料口方向运动；稳定脱壳阶段，蓖麻集中均匀分布在脱壳室出料口附近，并随着内滚筒一起转动；结束脱壳阶段，物料集中分布在脱壳室出料口底部位置，并不断向底部位置移动，大部分蓖麻从脱壳室右侧排出。

（3）根据柔性脱壳原理设计了脱壳试验样机，进行脱壳试验，调整试验台工作参数进行试验。仿真得到的各因素显著性由大到小依次为脱壳间隙、转速、填充率，试验得到的各因素显著性由大到小依次为脱壳间隙、转速、填充率，顺序相同。通过高速摄影得到物料总体运动趋势与离散元分析结果相似。

参 考 文 献

[1] 孙振钧，吕丽媛，伍玉鹏. 蓖麻产业发展：从种植到利用[J]. 中国农业大学学报，2012，17(6)：204－214.
SUN Zhenjun，LÜ Liyuan，WU Yupeng. Castor industry development：from cultivation to product exploitation [J]. Journal of China Agricultural University，2012，17(6)：204－214.(in Chinese)

[2] 李金琴，朱国立，吴国林，等. 蓖麻种子含油量与主要数量性状的相关及通径分析[J]. 中国油料作物学报，2004，26(2)：44－47.
LI Jinqin，ZHU Guoli，WU Guolin，et al. Correlation and path analysis beteween seed oil content and major quantitative characters in castor [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2004，26(2)：44－47.(in Chinese)

[3] MANI R，HELENA F. Influence of metal resistant-plant growth-promoting bacteria on the growth of ricinus communis in soil contaminated with heavy metals[J]. Chemosphere，2008，71(5)：834－842.

[4] 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)

[5] 张盼盼，阮竞兰，王豪东，等. 基于离散元法回转清理筛运动参数对筛分过程的影响分析[J]. 粮油食品科技，2018，26(5)：17－23.
ZHANG Panpan，RUAN Jinglan，WANG Haodong，et al. The influence analysis of movement parameters of rotary cleaning screen on screening process based on discrete element method[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2008，26(5)：17－23.(in Chinese)

[6] 伍毅，白晓丽，张双，等. 基于离散元 EDEM 的碾米机内物料运动离散元分析研究[J]. 粮食加工，2018，43(2)：52－55.
WU Yi，BAI Xiaoli，ZHANG Shuang，et al. Discrete element analysis of material movement in a rice milling machine based on discrete element EDEM [J]. Grain Processing，2008，43(2)：52－55.(in Chinese)

[7] 庞晓霞，阮竞兰. 基于离散元法砂辊碾米机碾白室内物料运动仿真[J]. 食品与机械，2016，32(4)：106－108.
PANG Xiaoxia，RUAN Jinglan. Motion simulation on materials inside whitening chamber of sand-roller rice machine based on discrete element method[J]. Food & Machinery，2016，32(4)：106－108.(in Chinese)

[8] 方会敏，姬长英，FARMAN A C，等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报，2016，47(3)：22－28.
FANG Huimin，JI Changying，FARMAN A C，et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on sistinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(3)：22－28.(in Chinese)

[9] 李艳洁，吴腾，林剑辉，等. 基于离散元法的贯入圆锥对沙土颗粒运动特性分析[J]. 农业工程学报，2012，28(24)：55－61，359.
LI Yanjie，WU Teng，LIN Jianhui，et al. Influence of penetrating cone on motion characteristics of sandy soil particle using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(24)：55－61，359.(in Chinese)

[10] 史嵩，张东兴，杨丽，等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报，2015，31(3)：62－69.
SHI Song，ZHANG Dongxing，YANG Li，et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(3)：62－69.(in Chinese)

[11] 任明磊，樊敞洲. 水稻往复拨叉式排种器设计及其运动过程的离散元法仿真分析[J]. 河南农业科学，2016，45(11)：139－144.
REN Minglei，FAN Qizhou. Design of rice reciprocating fork type metering device and its motion process simulation analysis by discrete element method[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2016，45(11)：139－144.(in Chinese)

[12] 张涛，刘飞，赵满全，等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J]. 农业工程学报，2016，32(22)：27－35.
ZHANG Tao，LIU Fei，ZHAO Manquan，et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based

on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(22):27 - 35. (in Chinese)
[13] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2018,34(18):21 - 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(18):21 - 27. (in Chinese)
[14] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(5):125 - 135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):125 - 135,142. (in Chinese)
[15] 洪俊, 李建兴, 沈月, 等. 颗粒破碎过程的离散元精细化建模[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(12):1253 - 1259.
HONG Jun, LI Jianxing, SHEN Yue, et al. Particle fracture model based on the discrete element method[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2018,51(12):1253 - 1259. (in Chinese)
[16] PASHA M, HARE C, GHADIRI M, et al. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater[J]. Powder Technology, 2016, 296:29 - 36.
[17] HASSANPOUR A, TAN H, BAYLY A, et al. Analysis of particle motion in a paddle mixer using discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2011, 206(1):189 - 194.
[18] COETZEE C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape[J]. Powder Technology, 2016, 297:50 - 70.
[19] KORNEL T, ISTVAN J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134(8):223 - 231.
[20] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):113 - 121.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE,2018, 34(18):113 - 121. (in Chinese)
[21] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):38 - 48. (in Chinese)
[22] 侯俊铭, 李金澎, 何涛, 等. 蓖麻蒴果力学特性试验及仿真研究[J]. 沈阳农业大学学报,2018,49(5):574 - 583.
HOU Junming, LI Jinpeng, HE Tao, et al. Experimental and finite wlement analysis of mechanical properties of castor fruit [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018,49(5):574 - 583. (in Chinese)
[23] 李长河. 农副产品加工机械使用技术问答北京[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
[24] 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79 - 83.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):79 - 83. (in Chinese)
[25] 李心平, 熊师, 耿令新, 等. 含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(2):25 - 31.
LI Xinping, XIONG Shi, GENG Lingxin, et al. Influence of water content on anti-pressing properties of corn ear[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(2):25 - 31. (in Chinese)
[26] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报,2019,35(1):1 - 11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE,2019, 35(1):1 - 11. (in Chinese)
[27] LU G,THRID J R,MULLER C R. Discrete element models for non-spherical particle systems:from theoretical developments to applications[J]. Chemical Engineering Science,2015,127:425 - 465.
[28] 洪俊, 张镇, 刘俊, 等. 梯形载荷下伴随破碎的散粒体系统动力学分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(4):787 - 791.
HONG Jun, ZHANG Zhen, LIU Jun,et al. Dynamic analysis of granular system with fracture under ladder load[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2015,45(4):787 - 791. (in Chinese)
[29] 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报,2012,28(11):274 - 278.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the CSAE,2012, 28(11): 274 - 278. (in Chinese)
[30] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报,2016,47(9): 62 - 72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62 - 72. (in Chinese)