湖南农业大学学报(自然科学版)　2021，47(6)：712–719. DOI：10.13331/j.cnki.jhau.2021.06.016
Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)

引用格式：
秦代林，蒋小霞，李振荡，蔡金雄，周树峰，张黎骅. 压力磨盘式薏苡脱壳装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2021，47(6)：712–719.
QIN D L，JIANG X X，LI Z D，CAI J X，ZHOU S F，ZHANG L H. Design and experiment of pressure-grinding disc type *Coix* shelling device[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)，2021，47(6)：712–719.
投稿网址：http://xb.hunau.edu.cn

压力磨盘式薏苡脱壳装置的设计与试验

秦代林[1]，蒋小霞[1]，李振荡[1]，蔡金雄[1]，周树峰[2]，张黎骅[1*]

(1.四川农业大学机电学院，四川 雅安 625014；2.四川农业大学玉米研究所，四川 成都 611130)

摘　要：为提高薏苡脱壳质量，运用柔性剪切揉搓脱壳原理，设计了一种压力磨盘式薏苡脱壳装置。装置主要由进料搅龙、动磨盘、压力磨盘和压力调节装置等部件组成。工作时，薏苡随进料搅龙进入脱壳空间，依靠两磨盘之间的压力和摩擦力对薏苡进行揉搓脱壳，当压力磨盘受力大于薏仁破碎力时被顶起，以增大脱壳间隙，保护薏仁。对薏苡在导流区、破壳区和分离区的受力进行分析，确定影响薏苡脱壳质量的主要因素为薏苡含水率、脱壳转速、脱壳间隙和预紧力。以脱净率、破损率为试验指标，通过单因素试验确定薏苡脱壳装置的最佳参数范围；基于单因素试验结果，选取含水率为7%的薏苡，以脱壳装置的转速、脱壳间隙和预紧力为试验因素，脱净率和破损率为响应指标，进行三因素二次回归正交旋转组合试验，结果影响薏苡脱净率的主次因素依次为预紧力、脱壳间隙、脱壳转速，影响薏苡破损率的主次因素依次为脱壳间隙、预紧力、脱壳转速；基于响应曲面法对回归模型进行多目标优化，优选出脱壳装置的最佳作业参数组合为脱壳转速 513.625 r/min、脱壳间隙 2.061 mm、预紧力 119.628 N，薏苡脱净率为 91.731%、破损率为 9.612%。将优化参数圆整，对薏苡进行连续脱壳作业，测得薏苡脱净率为 91.12%，破损率为 8.93%，可满足实际生产要求。

关　键　词：薏苡；压力磨盘式脱壳装置；响应曲面法；优化

中图分类号：S226.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007–1032(2021)06–0712–08

Design and experiment of pressure-grinding disc type *Coix* shelling device

QIN Dailin[1]，JIANG Xiaoxia[1]，LI Zhendang[1]，CAI Jinxiong[1]，ZHOU Shufeng[2]，ZHANG Lihua[1*]

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sicuan 625014, China; 2.Maize Research Institute, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: In order to improve the quality of *Coix* shelling, a pressure-mill-type *Coix* shelling device was designed based on the principle of flexible shearing and kneading. The device is mainly composed of feeding device, moving mill, pressure mill and pressure adjusting device. During the work process, *Coix* entered the hulling space with the feeding device, and was rustled and hulled by the pressure and friction force between the two mills. When the pressure mill was larger than the crushing force of *Coix*, it was jacked up to increase the hulling gap to protect *Coix*. Through the mechanical analysis of the *Coix* in the diversion area, the broken shell area and the separation area, the main factors affecting the quality of the *Coix* shelling were determined to be moisture content, shelling speed, shelling clearance and pre-tightening force. The optimum parameter range of *Coix* shelling device was determined by single factor test with the threshing rate and damage rate as the test indexes. Based on the single-factor test results, the *Coix* with moisture content of 7% was selected, and three factors quadratic regression orthogonal rotation combination test was conducted by the hulling device speed, the hulling clearance and the pre-tightening force as the test factors, and the net rate and the damage

收稿日期：2021–01–15　　**修回日期**：2021–08–07

基金项目：国家自然科学基金项目(31971753)；成都市科学技术局项目(2019–YF05–01005–SN)

作者简介：秦代林(1996—)，男，四川达州人，硕士研究生，主要从事农产品收获与加工装备研究，643326067@qq.com；*通信作者，张黎骅，博士，教授，主要从事丘陵山地农业机械化技术与装备研究，zhanglihua69@126.com

rate as response index. The test results showed that the main factors affecting the threshing rate of the *Coix* shelling device were: pre-tightening force, shelling clearance, speed, and the main factors affecting the damage rate of the *Coix* shelling device were: shelling clearance, pre-tightening force, speed. Based on the response surface method, the regression model was optimized with multiple objectives, and the optimal operation level combination of the shelling device was obtained as follows: speed of 513.625 r/min, shelling clearance of 2.061 mm, and pre-tightening of 119.628 N. At this time, the threshing rate of *Coix* was 91.731% and the damage rate was 9.612%. The optimized parameters were rounded and continuous hulling was carried out in *Coix*. The net removal rate was 91.12% and the breakage rate was 8.93%, which could meet the practical production requirements.

Keywords: *Coix*; pressure grinding disc shelling device; response surface method; optimization

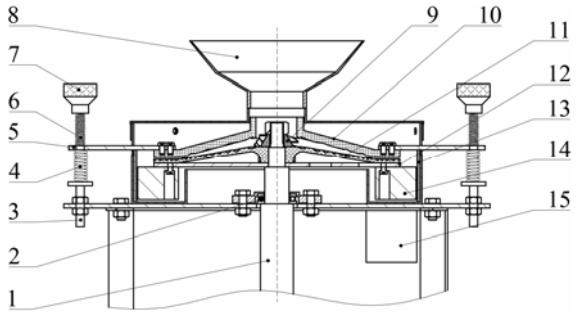
脱壳是薏苡加工和制种中必不可少的环节。脱壳装备应保证薏苡有较高脱净率的同时，尽量降低薏仁的破损率[1–2]，以保证薏仁质量。早期薏苡脱壳加工常采用荞麦、谷子、小麦等的通用脱壳装置[3–5]，运用挤压式、揉搓式、冲击式方法[6–8]脱壳，但由于薏仁、薏苡壳均具有独特的外形和力学特性[9–10]，导致加工薏苡时脱净率较低，破损率较高。近年来薏苡脱壳装备得以改进，其总体结构主要以动、静固定式磨盘为主，采用摩擦挤压的脱壳原理[11–12]。由于固定不变的脱壳间隙和脱壳挤压力，使得脱壳装置对薏苡颗粒几何尺寸的要求较高，几何尺寸大于脱壳间隙的薏仁容易被挤压破碎，损失大；反之，几何尺寸小于脱壳间隙的薏苡因受挤压力不够而无法脱壳，造成脱壳效率偏低。

笔者运用柔性剪切揉搓脱壳原理，设计了一种压力磨盘式薏苡脱壳装置，依靠动磨盘与压力磨盘之间的摩擦力和挤压力对薏苡进行揉搓脱壳，压力磨盘随薏仁受力大小实现间隙自由调节，从而实时调节脱壳挤压力，减轻薏苡脱壳损伤，实现低损、高效的薏苡脱壳。通过台架试验验证了该装置的脱壳性能，并通过响应面优化试验得到该装置的最佳作业参数，以期为薏苡脱壳装置的设计与优化提供参考。

1　压力磨盘式薏苡脱壳装置的结构与工作原理

1.1　结构

压力磨盘式薏苡脱壳装置主要由脱壳装置、调节装置、动力装置以及机架等构成，如图 1 所示。脱壳装置主要由进料搅龙、动磨盘和压力磨盘组成；调节装置主要由调节丝杆、支撑弹簧、支撑板、压力弹簧和调节螺母等组成。压力磨盘与调节装置通过螺钉连接，动磨盘由转轴驱动旋转，压力磨盘内表面有逆时针凹陷螺旋纹路，动磨盘外表面有顺时针凸起螺旋纹路，脱壳间隙自上而下逐渐变小。



1　转轴；2　UCF 轴承座；3　调节丝杆；4　支撑弹簧；5　支撑板；6　压力弹簧；7　调节螺母；8　料斗；9　进料绞龙；10　压力磨盘；11　动磨盘；12　动磨盘底板；13　缓冲垫；14　毛刷；15　出料口。

图 1　压力磨盘式薏苡脱壳装置的结构

Fig.1　The structure of the pressure grinding disc-type *Coix* shelling device

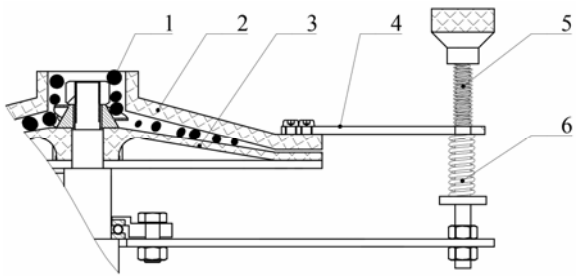
1.2　工作原理

装置启动前需根据薏苡仁、薏苡壳的物料特性调节压力弹簧，以调节磨盘预紧力，通过调节丝杆调节脱壳间隙。启动后转轴带动动磨盘和进料搅龙作圆周运动，薏苡随进料搅龙匀速喂入至脱壳空间，在动磨盘的导流作用下，薏苡被均分在磨盘间隙内，在两磨盘的共同摩擦力和离心力的作用下，向下滑动，依靠两磨盘间的挤压力和摩擦力对薏苡进行破壳、脱壳，当压力磨盘所受压力大于薏苡破仁力时，压力磨盘被顶起，完成脱壳。

2　关键部件的设计及基本参数的确定

脱壳装置的关键部件为动磨盘和压力磨盘，结构如图 2 所示。将脱壳区域分为导流区、破壳区和分离区。对脱壳模型进行简化并作以下假设：①薏

苡在脱壳过程中所受的力均作用于薏苡质心；②脱壳空气阻力忽略不计。



1 薏苡；2 压力磨盘；3 动磨盘；4 连接杆；5 压力弹簧；6 支撑弹簧。

图 2 脱壳部件的结构

Fig.2 The structure of the shelling parts

导流区为动磨盘锥面与压力磨盘锥面的间隙大于薏苡最大几何尺寸的区域。这一区域主要对薏苡进行稳定输送及均匀分布。薏苡在导流区时，脱壳间隙较大，薏苡落在动磨盘上，受到动磨盘的摩擦力 f_1、动磨盘对薏苡的支持力 F_1、动磨盘转动的离心力 F_2、科式惯性力 Q_1 以及薏苡自身重力 G 的作用，受力如图 3 所示。

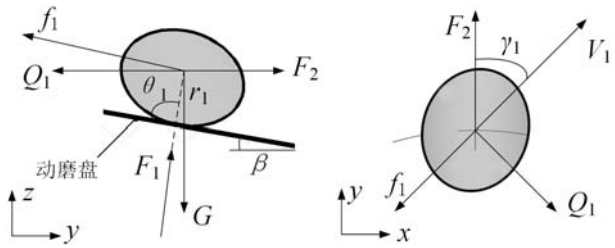


图 3 薏苡在导流区的受力

Fig.3 The force of *Coix* in the diversion area

薏苡在导流区的受力平衡方程为：

$$\begin{cases}\sum x = Q_1\cos\gamma_1 - F_1\sin\gamma_1\\ \sum y = F_2 + F_1\cos(\theta_1+\beta) - Q_1\sin\gamma_1\cos\beta - f_1\cos\gamma_1\cos\beta\\ \sum z = F_1\sin(\theta_1+\beta) + f_1\cos\gamma_1\sin\beta - G\end{cases} \quad (1)$$

$G=mg$；$F_2=m\omega^2 r_1$；$\omega=\dfrac{2\omega n}{60}$；$f_1=\mu_1 F_2$；$Q_1=2m\omega V_1$。

式中：m 为薏苡质量；g 为重力加速度；ω 为动磨盘角速度；n 为动磨盘转速；μ_1 为导流区薏苡与动磨盘的摩擦因数；γ_1 为薏苡在导流区所受离心力方向与动磨盘相对速度方向之间的夹角；V_1 为薏苡在导流区相对动磨盘运动的相对速度；r_1 为薏苡在导流区与动磨盘的接触半径。

由式(1)可知，薏苡在导流区的受力主要与动磨盘的转速 n、半径 r_1、摩擦因数 μ_1 以及锥角角度 β 等有关。薏苡因只与动磨盘接触，主要受动磨盘的摩擦力 f_1 与离心力 f_2 的作用，因此，为保证薏苡在无外力作用下仍可继续向下滑移，薏苡在动磨盘上向下运动的分力应大于磨盘面的摩擦力，即满足 $mg\sin\beta > \mu_2 mg\cos\beta$，亦即 $\tan\beta > \mu_2$。为减小脱壳部件刚度，动磨盘选用聚酰胺(PA)材料，摩擦因数 μ_2 取 0.15，求解得 $\beta > 8.513°$，取转动磨盘锥角 β=10°。

破壳区为薏苡在脱壳空间内、动磨盘锥面与压力磨盘锥面的间隙小于薏苡最大几何尺寸的锥面区域，薏苡主要在这一区域被破壳，是脱壳装置中最重要的区域。在破壳区，薏苡受到动磨盘的摩擦力 f_2、压力磨盘的摩擦力 f_3、动磨盘对薏苡的支持力 F_3、压力磨盘对薏苡的压力 F_4、动磨盘转动的离心力 F_5、科式惯性力 Q_2 以及薏苡自身重力 G 的共同作用，受力如图 4 所示。

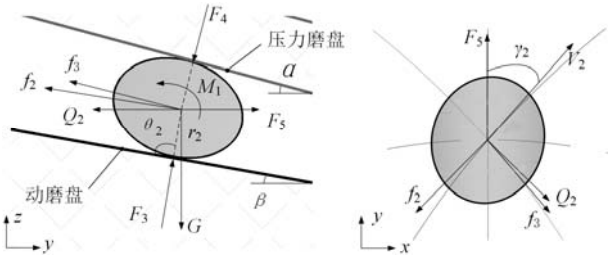


图 4 薏苡在破壳区的受力

Fig.4 The force of *Coix* in the shell-brokening area

薏苡在破壳区的受力平衡方程为：

$$\begin{cases}\sum x = f_3\sin\gamma_2 - f_2\sin\gamma_2 + Q_2\cos\gamma_2\\ \sum y = F_5 - Q_2\sin\gamma_2\\ \sum z = f_3\cos\gamma_2\sin\alpha + f_2\cos\gamma_2\sin\beta - G\\ \sum M = M_1 + \left[(Q_2\sin\gamma_2 - F_5) + (f_2+f_3)\cos\gamma_2\right]r_2\cdot\\ \qquad \sin\theta_2 + 2F_3 r_2\cos\theta_2\end{cases} \quad (2)$$

$F_5=m\omega^2 r_2$；$f_2=\mu_3 F_3$；$f_3=\mu_4 F_4$；$Q_2=2m\omega V_2$；$F_3=F_4$。

式中：M_1 为薏苡在破壳区所有合力作用下产生的转矩；μ_3 为破壳区薏苡与动磨盘的摩擦因数；μ_4 为破壳区薏苡与压力磨盘的摩擦因数；γ_2 为薏苡在破壳区所受离心力方向与动磨盘相对速度方向之间的夹角；V_2 为薏苡在破壳区相对动磨盘运动的相对速度；r_2 为薏苡在破壳区与动磨盘的接触半径。

由式(2)可知，薏苡在破壳区的受力不但与动磨盘的转速 n、半径 r_2、摩擦因数 μ_3 以及锥角角度 β 有关，还与压力磨盘锥角角度 α、压力磨盘对薏苡的压力 F_4、摩擦因数 μ_4 有关。薏苡初入破壳区时，脱壳间隙较大，线速度较小，所受的压力 F_4 和摩擦

力 f_2、f_3 都较小；随着动磨盘的转动，薏苡逐渐向下运动，脱壳间隙逐渐减小，回转半径逐渐增大，薏苡所受的压力 F_4 和离心力 F_5 逐渐增大，所受挤压揉搓的作用也逐渐增大；因此，磨盘直径的大小、动磨盘转速以及压力磨盘对薏苡的压力 F_4 对脱壳质量均有直接影响。如磨盘直径过小，脱壳作业时间不足，会导致薏苡脱壳率低；磨盘直径过大，脱壳时间过长，会导致已脱壳薏苡在脱壳空间内过度摩擦，产生破损。借鉴已有的研究结果，设计薏苡脱壳磨盘直径为 300 mm，其中分离区设为宽 20 mm 的平面。由于动磨盘转速 n 越大，薏苡所受摩擦力 f_2、f_3 和科式惯性力 Q_2 也越大，过大的摩擦力使得薏苡过度磨损，损伤几率增大；因此，初步选取转速 n 为 300~700 r/min。

为保证薏苡顺利通过导流区，进入破壳区的脱壳空间内并获得较长的脱壳时间，需满足入料口的最小间隙大于薏苡的最大几何尺寸 b。经试验随机选取 50 粒薏苡样本进行测量，结果薏苡的最大平均尺寸为 8.74 mm，因此 b 取 9 mm。考虑到最小脱壳间隙情况，令脱壳间隙为 0，即：

$$\tan\alpha > \tan\beta + \frac{b}{l} \tag{3}$$

式中，l 为压力磨盘锥面的水平尺寸。

求解，得压力磨盘锥角角度 $\alpha > 14.91°$，取压力磨盘锥角角度 α=15°。

分离区为薏苡仁从破壳区到脱离脱壳空间的区域。在这一区域，主要对未完全脱壳的薏苡进行壳、仁的分离。在分离区，薏苡在脱壳间隙平面之间，受到动磨盘与压力磨盘摩擦力 f_4 和 f_5、科式惯性力 Q_3、动磨盘对薏苡的支持力 F_6、压力磨盘对薏苡的压力 F_7、动磨盘转动的离心力 F_8 以及薏苡自身重力 G 的共同作用，受力如图 5 所示。

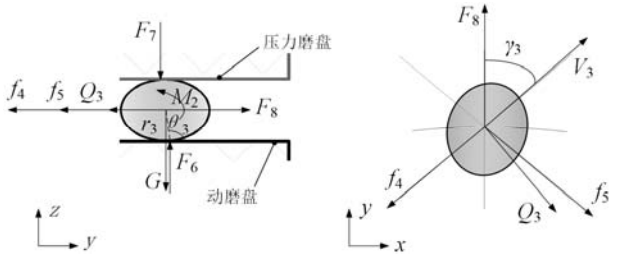


图 5　薏苡在分离区的受力

Fig.5　The force of *Coix* in the separation area

薏苡的受力平衡方程为：

$$\begin{cases} \sum x = (f_5 - f_4)\sin\gamma_3 + Q_3\cos\gamma_3 \\ \sum y = F_8 - (f_5 + f_4)\cos\gamma_3 - Q_3\sin\gamma_3 \\ \sum z = -G \\ \sum M = M_2 + \left[(f_4 + f_5)\cos\gamma_3 + Q_3\sin\gamma_3 - F_8\right] r_3 \cdot \sin\theta_3 \end{cases} \tag{4}$$

F_8=$m\omega^2 r_3$；f_4=$\mu_5 F_6$；f_5=$\mu_6 F_7$；Q_3=$2m\omega V_3$；F_6=F_7。

式中：M_2 为薏苡在分离区所有合力作用下产生的转矩；μ_5 为分离区薏苡与动磨盘的摩擦因数；μ_6 为分离区薏苡与压力磨盘的摩擦因数；γ_3 为薏苡在分离区所受离心力方向与动磨盘相对速度方向之间的夹角；V_3 为薏苡在分离区相对动磨盘运动的相对速度；r_3 为薏苡在分离区与动磨盘的接触半径。

由式(4)可知，薏苡在分离区的受力与动磨盘的转速 n、半径 r_3、摩擦因数 μ_5 以及压力磨盘对薏苡的压力 F_7 和摩擦因数 μ_6 有关。薏苡进入分离区后，主要受到压力磨盘对薏苡的压力 F_7 和两磨盘的摩擦力 f_4、f_5，而 F_7 和 f_4、f_5 主要随脱壳间隙的变化而变化。当压力磨盘预紧力不变，脱壳间隙变小，压力弹簧被压缩的行程变大，所受最大压力和摩擦力变大；反之，脱壳间隙变大，压力弹簧被压缩的行程变小，所受最大压力和摩擦力变小。根据薏苡压缩破壳试验数据，初步选取磨盘预紧力为 100~140 N。结合预紧力，初步设定脱壳间隙为 1.0~2.5 mm。

3　脱壳性能优化试验

试验于 2020 年 8 月在四川农业大学雅安校区进行。选用浙江康莱特公司的薏苡生产用种。

自制压力磨盘式薏苡脱壳装置样机，在 WDW–05 微机控制电子万能试验机(济南科盛试验机设备有限公司生产)上进行试验。

以薏苡脱净率和破损率为试验指标，采用控制变量法分别对薏苡干基含水率(5%、7%、9%、11%)、动磨盘转速(300、400、500、600、700 r/min)、脱壳间隙(1.0、1.5、2.0、2.5 mm)以及压力磨盘预紧力(100、110、120、130 N)进行单因素试验，每组试验控制其他 3 个因素水平，干基含水量 7%，动磨盘转速 500 r/min，脱壳间隙 2 mm，压力磨盘预紧力 120 N。参照 GB/T 21305—2007[13]测定薏苡干基含水率。每组试验在脱壳装置连续作业下重复试验 3 次。每次取样 100 g(薏苡样本平均千粒质量 113 g)，按式(5)和式(6)计算脱净率 y_1、破损率 y_2。

$$y_1=\frac{z-z_1}{z} \quad (5)$$

$$y_2=\frac{z-z_1-z_2}{z} \quad (6)$$

式中：z 为样本粒数；z_1 为未脱净且完整粒数；z_2 为脱净且完整粒数。

单因素试验结果(表 1)表明，随着薏苡含水率的降低，薏苡脱净率逐渐提高；薏仁破损率逐渐降低，在含水率低于 7%以后变化变缓。为获得最佳脱壳质量，薏苡脱壳以含水率 7%为宜。

表 1 单因素试验薏苡的脱净率和破损率

Table 1 The threshing rate and damaging rate of *Coix* in the single factor test

含水率/%	脱净率/%	破损率/%	磨盘转速/(r·min^{-1})	脱净率/%	破损率/%
11	62.64	18.72	300	81.48	17.78
9	78.19	14.99	400	85.37	16.85
7	91.85	9.63	500	91.85	9.63
5	94.53	10.09	600	92.41	21.48
			700	95.93	39.26
脱壳间隙/mm	脱净率/%	破损率/%	预紧力/N	脱净率/%	破损率/%
1.0	95.37	90.00	100	99.44	55.74
1.5	93.52	42.59	110	91.30	32.41
2.0	91.85	9.63	120	91.85	9.63
2.5	75.00	9.44	130	96.30	37.96

随着动磨盘转速的增加脱净率上升，当动磨盘转速高于 600 r/min 后，薏仁破损率明显增大，脱壳的动磨盘转速以 400~600 r/min 为宜。

随着脱壳间隙的增加，薏苡脱净率、破损率均呈递减趋势，但脱壳间隙低于 2 mm 时，破损率呈骤升趋势。脱壳的最佳间隙范围为 1.5~2.5 mm。

当压力磨盘预紧力为 100 N 时，其脱净率可达 99%以上，但破损率也达 55%以上，并不能满足低损脱壳要求，因此选择薏苡脱壳的预紧力为 110~130 N。

为优化脱壳装置的作业参数，结合单因素试验分析结果，选择薏苡含水率 7%，以脱壳装置的转速、脱壳间隙和预紧力作为试验因素，基于响应面设计，利用 Design–Expert 中的 Box–Behnken Design 进行三因素三水平二次回归正交旋转组合设计试验，结果列于表 2。

表 2 响应面试验薏苡的脱净率和破损率

Table 2 The threshing rate and damaging rate of *Coix* in response surface test

序号	转速/(r·min^{-1})	脱壳间隙/ mm	预紧力/ N	脱净率/%	破损率/%
1	600	2.5	120	87.41	11.85
2	500	2.0	120	91.48	10.00
3	600	2.0	110	86.30	13.33
4	500	2.0	120	92.96	10.74
5	500	1.5	130	97.41	31.85
6	500	2.5	110	77.04	13.33
7	500	1.5	110	85.93	21.48
8	500	2.0	120	91.85	9.26
9	600	1.5	120	98.89	24.44
10	500	2.0	120	91.48	9.63
11	400	2.5	120	80.37	8.52
12	400	1.5	120	88.89	16.67
13	400	2.0	130	87.41	15.56
14	400	2.0	110	74.44	10.37
15	500	2.5	130	85.93	19.26
16	500	2.0	120	92.22	10.00
17	600	2.0	130	94.07	25.56

脱净率方差分析结果(表3)表明，模型 P<0.001，失拟项 P=0.846 1，说明响应面回归模型中脱净率与试验因素极显著；R^2=0.997 4，模型矫正系数 R^2_{adj}=0.994 0，说明该模型预测值与实际值的相关性良好，能较好反映各试验因素间的关系。由 P 值可知，转速(x_1)、脱壳间隙(x_2)、预紧力(x_3)、x_1x_3、x_1^2、x_2^2、x_3^2 均对脱净率有极显著影响，存在非线性关系，x_1 x_2、x_2x_3 对薏苡脱净率有显著影响。由 F 值判断影响因素由大到小依次为 x_3、x_2、x_1、x_3^2、x_1^2、x_1x_3、x_2^2、x_1x_2、x_2x_3，并由多元回归分析得到脱净率与试验因素的回归方程为：

$$y_1=92+4.45x_1-5.05x_2+5.14x_3-0.74x_1x_2-1.3x_1x_3-0.647\,5x_2x_3-2.07\,x_1^2-1.04\,x_2^2-4.38\,x_3^2 \quad (7)$$

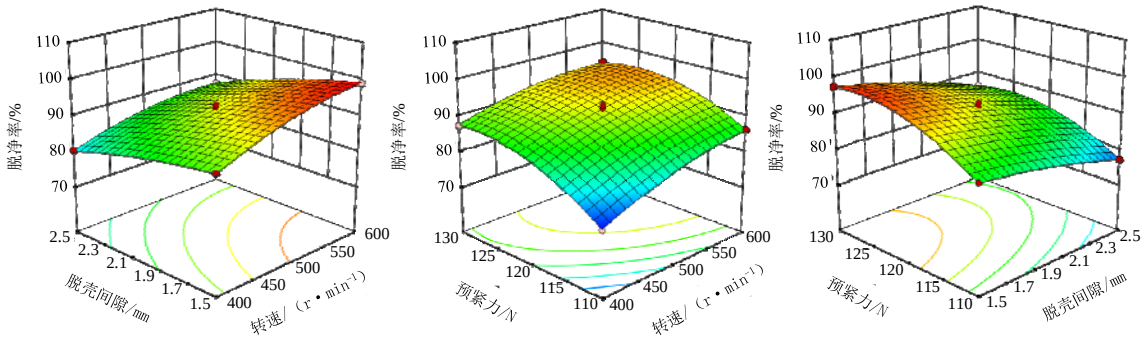
表 3　脱净率和破损率回归方程的方差分析

Table 3　Analysis of variance of the regression equation for the threshing rate and the damaging rate

方差来源	脱净率方差分析						破损率方差分析					
	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	694.92	9	77.21	293.54	<0.001	**	752.10	9	83.57	326.07	< 0.001	**
x_1	158.06	1	158.06	600.91	<0.001	**	72.36	1	72.36	282.35	< 0.001	**
x_2	203.72	1	203.72	774.46	<0.001	**	215.07	1	215.07	839.21	< 0.001	**
x_3	211.25	1	211.25	803.11	<0.001	**	142.13	1	142.13	554.58	< 0.001	**
x_1x_2	2.19	1	2.19	8.33	0.024	*	4.93	1	4.93	19.23	0.003	**
x_1x_3	6.76	1	6.76	25.70	0.001	**	12.39	1	12.39	48.35	< 0.001	**
x_2x_3	1.68	1	1.68	6.38	0.040	*	4.93	1	4.93	19.23	0.003	**
x_1^2	17.96	1	17.96	68.27	<0.001	**	0.03	1	0.03	0.12	0.742	
x_2^2	4.58	1	4.58	17.40	0.004	**	120.94	1	120.94	471.92	< 0.001	**
x_3^2	80.69	1	80.69	306.77	<0.001	**	161.57	1	161.57	630.42	< 0.001	**
残差	1.84	7	0.26				1.79	7	0.26			
失拟项	0.31	3	0.10	0.27	0.85		0.59	3	0.20	0.65	0.622	
纯误差	1.53	4	0.38				1.20	4	0.30			
总值	696.76	16					753.89	16				
R^2	0.997 4						0.997 6					
R^2_{adj}	0.994 0						0.994 6					

“**”表示影响极显著(P<0.01)；“*”表示影响显著 (P<0.05)。

各试验因素交互作用对薏苡脱净率的影响见图 6。转速(x_1)和脱壳间隙(x_2)、转速和预紧力(x_3)、间隙和预紧力的交互作用对薏苡脱净率均有显著影响，转速和预紧力交互曲面变化最快，间隙和预紧力交互曲面变化最为平缓，因此各因素间的交互作用大小依次为 x_1x_3、x_2x_3、x_1x_2，与脱净率的方差分析结果一致。由图 6–a 可知，在同一压力下的薏苡脱净率随间隙的减小和转速的增加而提高，较大的脱壳间隙和提高转速有利于提高薏苡的脱净率。由图 6–b 可知，在间隙一定时，薏苡脱净率与预紧力和转速呈正相关。由图 6–c 可知，在转速一定时，薏苡脱净率随预紧力的增加和间隙的减小而提高。



a：$y_1(x_1, x_2, 120)$　　b：$y_1(x_1, 2, x_3)$　　c：$y_1(500, x_2, x_3)$

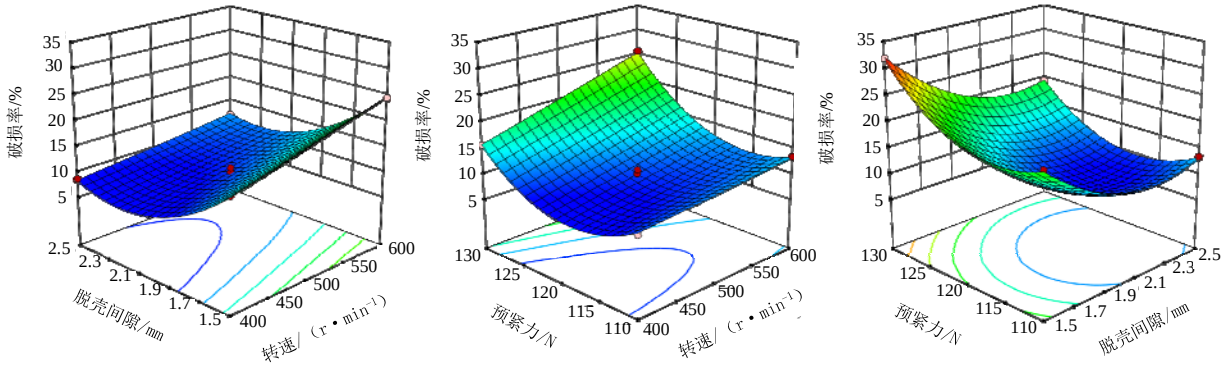
图 6　试验因素交互作用下的薏苡脱净率

Fig.6　The threshing rate of *Coix* under the interaction of various test factors

薏苡破损率方差分析结果(表 3)表明，模型 $P<0.000\ 1$，失拟项 $P=0.622\ 1$，说明响应面回归模型显著；$R^2=0.997\ 6$、模型矫正系数 $R^2_{adj}=0.994\ 6$，说明该模型预测值与实际值的相关性良好，拟合程度良好。由 P 值可知，除 x_1^2 外的其他因素均对破损率有极显著影响；x_1^2 对薏苡破损率无显著影响；二次项显著说明拟合方程存在非线性关系。由 F 值判断影响因素由大到小依次为 x_2、x_3^2、x_3、x_2^2、x_1、x_1x_3、x_1x_2 和 x_2x_3。破损率与试验因素的回归方程为：

$$y_2=9.93+3.01x_1-5.19x_2+4.22x_3-1.11x_1x_2-1.76x_1x_3-1.11x_2x_3+0.0845x_1^2+5.36x_2^2+6.19x_3^2 \quad (8)$$

各试验因素交互作用对薏苡破损率的影响见图 7。转速(x_1)和预紧力(x_3)对薏苡破损率有极显著影响；转速和脱壳间隙(x_2)、间隙和预紧力交互作用对薏苡破损率均有显著影响。转速和预紧力交互曲面变化最快，交互作用最大，与破损率的方差分析结果一致。图 7–a 表明，同一预紧力下的薏苡破损率随脱壳间隙的增大先降低后增加，且随转速的增加薏苡的破损率增加。图 7–b 表明，脱壳间隙一定时，薏苡破损率随转速的增加而增加，随预紧力的升高先降低后增加。图 7–c 表明，转速一定时，薏苡破损率随预紧力的降低和脱壳间隙的增大而减小。



a：y_2 (x_1, x_2, 120)　　b：y_2 (x_1, 2, x_3)　　c：y_2 (500, x_2, x_3)

图 7　试验因素交互作用下的薏苡破损率

Fig.7　The damage rate of *Coix* under the interaction of various test factors

以脱净率最大、破损率最小、优先保证破损率为优化目标，对薏苡脱壳样机进行参数优化，并建立 y_1、y_2 双目标函数数学模型，将破损率重要性设置为 4 个“+”，脱净率次之设置为 3 个“+”，3 个因素的目标设置在优化范围内，结果，转速为 513.625 r/min、脱壳间隙为 2.061 mm、预紧力为 119.628 N 时，薏苡脱净率为 91.731%、破损率为 9.612%，此为薏苡的最佳脱壳参数。

根据试验优化结果，将薏苡样机参数圆整为转速 515 r/min、脱壳间隙 2 mm、预紧力 120 N，对薏苡脱壳装置进行验证试验，测得薏苡脱净率为 90.08%、破损率为 9.01%，验证结果与模型优化结果差异较小，表明优化结果具有较高的可信度。

为进一步验证上述优化结果的实际应用效果，将脱壳装置参数固定为优化值，对 3 kg 的薏苡样品进行连续脱壳，间隔取样 5 次，检验脱壳装置的作业质量，测得薏苡脱净率为 91.12%，破损率为 8.93%，该装置可满足实际生产要求。

参考文献：

[1] 邓伟，李松克，岑爱华，等. 不同处理方法对白壳薏苡种子发芽特性的影响[J]. 种子，2016，35(4)：100–102.
DENG W，LI S K，CEN A H，et al. Effect of different treatments on white shell *Coix* seed germination characteristics[J]. Seed，2016，35(4)：100–102.

[2] GUO C，WANG Y N，YANG A G，et al. The *Coix* genome provides insights into panicoideae evolution and papery hull domestication[J]. Molecular Plant，2020，13(2)：309–320.

[3] 施丽莉，胡志超，江家伍，等. 动静磨盘式薏苡脱壳试验台设计与试验[J]. 中国农机化学报，2015，36(2)：88–91.
SHI L L，HU Z C，JIANG J W，et al. Design and experiment of the test bench for the dynamic disk type coix shelling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2015，36(2)：88–91.

[4] 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 J N，LIU M J，CAO M Z，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.

[5] 施丽莉. 动静磨盘式薏苡脱壳机构优化试验研究[D]. 合肥：安徽农业大学，2015.
SHI L L. The optimization and experimental research of test bench on *Coix lachryma-jobi* L sheller of dynamic and static grinding disc[D]. Hefei：Anhui Agricultural University，2015.

[6] 侯俊铭，白晶波，何涛，等. 双圆台锥式蓖麻脱壳清选机设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(11)：132–140.
HOU J M，BAI J B，HE T，et al. Design and experiment of castor dehulling and cleaning device with double curved table[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(11)：132–140.

[7] 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.
LU R，YANG D X，GAO L X，et al. Design and test on plot peanut sheller with vertical tapered drum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(5)：114–123.

[8] 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 L X，DU X，ZHANG W，et al. Double-roller peanut sheller with pneumatic circulating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(10)：68–73.

[9] 金关荣，奚秀洁，程舟，等. 薏苡种子形态性状多样性评价[J]. 植物遗传资源学报，2017，18(3)：421–428.
JIN G R，XI X J，CHENG Z，et al. Evaluation of seed morphological characteristics diversity of Job's tears (*Coix lacryma-jobi*) germplasm[J]. Journal of Plant Genetic Resources，2017，18(3)：421–428.

[10] 施丽莉，胡志超，谢焕雄，等. 动静磨盘式薏苡脱壳机构性能参数试验研究[J]. 江苏农业科学，2016，44(9)：357–359.
SHI L L，HU Z C，XIE H X，et al. Experimental study on performance parameters of dynamic and static grinding disc-type coix dehulling mechanism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2016，44(9)：357–359.

[11] 朱会霞，李彤煜，王吉权，等. 薏苡脱壳机关键部件作业参数优化[J]. 机械设计与研究，2019，35(6)：192–196.
ZHU H X，LI T Y，WANG J Q，et al. Operating parameter optimization of key components of *Coix lacryma-jobi* sheller[J]. Machine Design & Research，2019，35(6)：192–196.

[12] 陈万程. 砂盘式薏仁脱壳机设计研究[D]. 武汉：武汉轻工大学，2016.
CHEN W C. Research and design of *Coix* seed huller featured of abrasive and rubber discs[D]. Wuhan：Wuhan Polytechnic University，2016.

[13] GB/T 21305—2007　谷物及谷物制品水分的测定　常规法[S].
GB/T 21305—2007　Cereals and cereal products-determination of moisture content-routine reference method[S].

责任编辑：罗慧敏
英文编辑：吴志立