

薏苡压缩力学特性试验及响应面优化

秦代林¹, 蒋小霞¹, 蔡金雄¹, 苟康林¹, 周树峰², 张黎骅^{1*}

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

摘要: 为研究薏苡力学特性, 提高机械脱壳方式下的薏苡脱壳质量。以破壳力和破仁力为试验指标进行了薏苡的压缩力学特性试验。采用单因素试验分析施压方向、施压速度和干基含水率对薏苡破壳力和破仁力的影响, 通过 Box-Behnken 中心组合试验设计建立了破壳力、破仁力与试验因素的数学回归模型, 并利用响应面法以薏苡可承受的破壳力最小、破仁力最大为优化目标得到薏苡脱壳的最佳组合参数为: 施压方向为正向施压, 施压速度 7.598 mm·min⁻¹, 干基含水率 7.048%, 此时的薏苡可承受的破壳力为 22.067 N, 破仁力为 86.016 N。经平行试验验证得到的破壳力为 21.1 N, 破仁力为 82.6 N。验证结果与优化结果误差均小于 5.0%, 优化结果具有较高的可信度。研究结论可为薏苡脱壳加工装备的研究与优化提供理论依据与技术参考。

关键词: 薏苡; 力学特性; 响应面优化; 脱壳条件

中图分类号: S519.09; S372

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0680-08

Test on the compressive mechanical properties of *Coix* and optimization of response surface methodology

QIN Dailin¹, JIANG Xiaoxia¹, CAI Jinxiong¹, GOU Kanglin¹, ZHOU Shufeng², ZHANG Lihua¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014;

2. Maize Research Institute, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to study the mechanical properties of *Coix* and improve the quality of shelling in the way of mechanical method. Taking the shell breaking force and kernel breaking force as the experimental index, the experiment of the compressive mechanical properties of *Coix* were tested. The influence of pressure direction, pressure speed, and dry basis moisture content on the *Coix* shell breaking force and kernel breaking force were analyzed by single factor experiment. The mathematical regression model of shell breaking force, breaking kernel force and test factors were designed and established by the Box-Behnken central composite design. Using the response surface method and targeting the minimum breaking force and the maximum breaking force for optimization, The best combination parameters of *Coix* shelling as follows: the pressure direction was positive direction pressure, the pressure speed was 7.598 mm·min⁻¹, and the dry basis moisture content was 7.048%. The Shell breaking force of *Coix* was 22.067 N and the kernel breaking force of *Coix* was 86.016 N. Parallel experiments verified that the *Coix* shell breaking force was 21.1 N, the kernel breaking force was 82.6 N. The error between the verification result and the optimization result was less than 5.0%, which shows that the optimization result had high reliability. This conclusion can provide a theoretical basis and technical reference for the research and optimization of *Coix* dehulling processing equipment.

Key words: *Coix*; mechanical properties; response surface optimization; shell breaking conditions

薏苡又名薏仁米、六谷子和珍珠米等, 其含有丰富的营养价值和人体所需的多种微量元素, 是一种药食同源的小杂粮^[1-4]。在薏苡脱壳加工中, 由于

薏仁外形独特, 壳体组织结构复杂^[5-6], 存在脱壳率较低和破仁率较高等问题, 这样不仅直接造成产量上的损失, 而且还会导致薏仁断口氧化发生霉变,

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(31971753)和国家玉米产业技术体系专项项目(CARS-02)共同资助。

作者简介: 秦代林, 硕士研究生。E-mail: 643326067@qq.com

* 通信作者: 张黎骅, 博士, 教授。E-mail: zhanglihua69@126.com

降低薏仁品质^[7-9]。近年来,许多学者开展了对核桃、花生和杏仁等物料脱壳的力学特性研究,大量研究表明,力学特性的研究对于加工机械的设计与优化有着十分重要的意义^[10]。Altuntas 等^[11]和 Vursavuş 等^[12]通过压缩力学试验,分析出核桃与核桃仁的破碎性能,阐述了不同因素对核桃破壳的影响程度。Kurt 等^[13]、张黎骅等^[14]、吕小荣等^[15]、王京等^[16]和杨亚洲等^[17]通过力学试验分析了花生脱壳和花生籽粒的力学特性,提出了花生破壳的最佳试验参数,并为花生脱壳机械工艺参数优化提供了理论依据。Aydin^[18]和张黎骅^[19]通过压缩力学试验,研究了杏仁坚果和银杏果的物理特性,分析了银杏果破壳的基本规律与最佳破壳条件,提出了银杏果脱壳工艺路线。目前对薏苡的力学特性研究甚少。施丽莉等^[20]和王建楠等^[21]在薏苡脱壳试验中发现,薏苡在脱壳阶段主要受到脱壳部件的撞击和挤压等作用实现破壳,少许脱壳后的薏仁由于不能及时排出,在脱壳空间内继续受到脱壳部件的挤压作用产生破碎,因此,为提高薏苡脱壳质量,保证薏仁的完整率,薏苡受压破壳力与破仁力的力学特性是薏苡脱壳机械设计与优化的重要依据。

本试验以薏苡为研究对象,以施压方向、施压速度和干基含水率为试验因子,采用三因素二次正交旋转组合设计试验及响应曲面分析方法,进行各试验因素显著性分析,并以破壳力最小且破仁力最大为优化目标,找到薏苡的最佳脱壳条件,为研发和改进薏苡脱壳装备提供基础理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

1.1.1 试验材料 供试材料为浙江康莱特公司的生产用种。

1.1.2 试验设备 试验采用济南恒思盛大仪器有限公司生产的 WDW-05 型微机控制电子万能试验机,该机最大载荷 0.5 kN,试验力示值相对误差±1%,横梁位移示值相对误差±1%。试验过程中可动态显示试验力、载荷速度和力-位移变化试验曲线;上海齐欣科学仪器有限公司生产的 DHG-9035A 型电热恒温鼓风干燥箱,控温范围为 Rt+10~300 °C,温度分辨率 0.1 °C;德国赛多利斯 BSA423S-CW 型电子天平秤(精度:0.1 mg)等。

1.2 数据采集与测量方法

1.2.1 定义施压方向 施压方向包括正放(Z方向)、侧放(Y方向)和立放(X方向)3种方式,如图1所示,正放施压(Z方向)的受力面为薏苡

腹沟面与背面,侧放施压(Y方向)的受力面为薏苡侧边两面,立放施压(X方向)的受力面为薏苡上下两面。

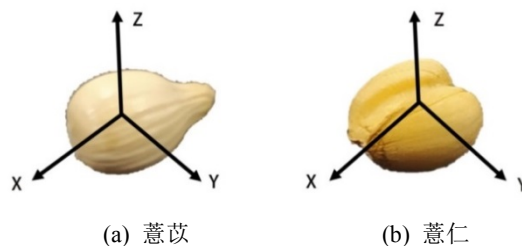


图1 施压方向

Figure 1 Direction of pressure

1.2.2 破碎最大值的采集 当上压缩板接触到薏苡时,计算机开始读取试验数据,当带壳薏苡或薏仁随压力的增加而破碎时,压缩曲线随位移发生骤减,然后停止施压,此时计算机所读得的最大试验值,记作最大破碎值 F_{max} 。

1.2.3 破碎变形量的测量 从上压缩板接触颗粒时计算机开始读数的位移点 S_0 ,到颗粒发生破碎时最大值位移点 S_1 的这段位移量差值,记作破碎变形量 S 。其破碎变形量 S 的计算式为:

$$S = S_1 - S_0 \quad (1)$$

1.2.4 干基含水率的测量 按照谷物及谷物制品水分的测定常规法 GB/T21305-2007^[22]进行干基含水率的测定。干基含水率 M_t 的计算^[23]公式如下:

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_t 为试样 t 时刻干基含水率,%; m_t 为 t 时刻试样质量, g; m_0 为试样绝干时质量, g。

1.2.5 薏苡壳仁间隙的测量 测定同一方向上,带壳薏苡与薏仁的尺寸差。

1.2.6 数据采集方法 为保证数据的准确性,试验选取饱满完整的薏苡和薏苡仁,每组试验重复5次取平均值,测得薏苡在各个因素各个水平上的破壳力与破仁力。

1.3 试验方案与设计

薏苡的破碎力学特性是指通过施压使薏苡产生裂纹而实现破壳的受力过程,是研究薏苡脱壳的重要指标^[10]。本试验选用破壳力和破仁力为试验指标,以施压方向、施压速度和含水率为主要试验因素,并根据试验因素水平设计要求,使用 WDW-05 微机控制电子万能试验机,控制施压速度和施压方向,采用准静态压缩方式,分别对薏苡仁与带壳薏苡进行压缩力学特性试验。

1.3.1 单因素试验设计 (1) 施压方向: 薏苡壳体

为长卵形，腹部扁平；薏仁呈椭球形，腹部有腹沟。各方向上薏苡与薏仁的纤维束结构和物理特性存在差异^[6]；为深入探究薏苡壳和仁不同方向上的力学特性，试验选取干基含水率为 7% 的薏苡，以 10 mm·min⁻¹ 的加载速度，分别对 X（立放）、Y（侧放）和 Z（正放）3 个方向进行不同方向的压缩试验。

表 1 试验因素与水平
Table 1 Test factors and levels

试验编码	施压方向(A)	施压速度(B)/ (mm·min ⁻¹)	干基含水率 (C)%
-1	Y (侧放)	5	7
0	X (立放)	10	9
1	Z (正放)	15	11

(2) 施压速度：施压速度参照农产品压缩试验方法^[24]，因薏苡壳与薏苡仁均属硬质物料，试验选取干基含水率为 7% 的薏苡和薏苡仁，分别以 5 mm·min⁻¹、10 mm·min⁻¹、15 mm·min⁻¹ 和 20 mm·min⁻¹ 的加载速度，沿 Z（正放）方向施压。

(3) 干基含水率：以薏苡的最佳储藏含水率为最高试验水平，通过单因素预试验，含水率与破壳力和破仁力呈正相关关系，当薏苡含水率低于 5%，破壳力和破仁力差异不显著，同时，将含水率降低到更低时需要消耗更多的能量和时间，综合考虑薏苡种子的生长活性与储藏性，试验分别选取干基含水率为 5%（40 °C 真空干燥 9.2 h）、7%（40 °C 真空干燥 6 h）、9%（40 °C 真空干燥 2.8 h）和 11%（未进行干燥）的薏苡和薏仁，以 10 mm·min⁻¹ 的加载速度，沿 Z（正放）方向施压。

1.3.2 响应面试验设计 根据单因素试验的结果，确定响应面的因素和水平，运用 Design-Expert 软件进行 Box-Behnken 响应面设计。试验因素编码如表 1 所示。

2 结果与分析

2.1 薏苡压缩曲线分析

薏苡在不同方向受压时，力-位移的压缩曲线图如图 2 所示，各施压方向下的破壳力和破仁力压缩曲线趋势相似，无显著生物屈服点。薏仁侧放（Y）受压时，薏仁所受压力与变形量之间呈线性增长，变形量随压力的增加而增加，表明薏仁在受压时发生了弹性变形，当压力达到一定值时发生破碎，压缩曲线骤降；薏仁正放（Z）受压时，在 0~2.8 N 间变形量随所受压力的增大而增大，薏仁所受压力与变形量之间呈线性增长，薏仁发生弹性变形，随着

压力的不断增加，薏仁的变形量变化变缓，当压力达到一定值时发生破碎；薏仁立放（X）受压时，在 0~11.5 N 间变形量随所受压力的增大而增大发生弹性变形，随着压力的不断增加，薏仁的变形量变化缓慢，在 72.3~79.2 N 间薏仁同时发生弹性变形与塑性变形，表明薏仁表面产生细小裂纹，裂纹随压力的增加而扩张，当所受压力达到一定值时，薏仁发生破碎。薏苡在立放（X）、侧放（Y）和正放（Z）条件下，其变形量与破壳力均近似呈线性关系上升，变形量均随压力的增加而增加，当所受压力达到一定值时，薏苡壳发生破裂，压缩曲线骤降。

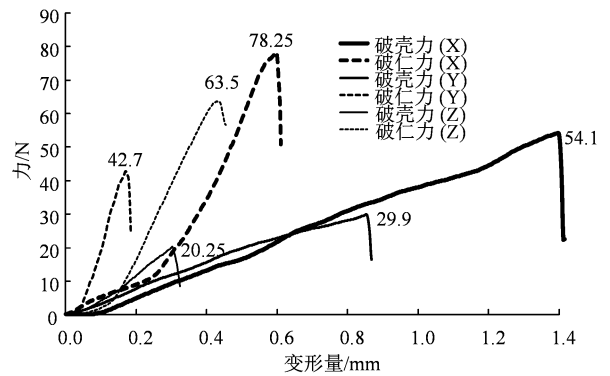


图 2 薏苡压缩力-变形曲线图

Figure 2 Compression force-deformation curve of Coix

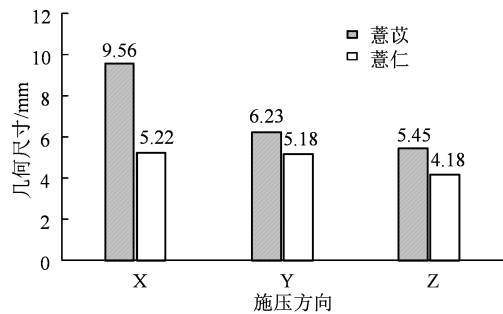


图 3 薏苡的几何尺寸

Figure 3 Coix's geometric dimensions

由图 3 可知，薏苡不同方向的壳仁间隙也不相同，立放（X）间隙最大为 4.34 mm，侧放（Y）间隙最小 1.05 mm。结合图 2 破壳变形量可知，3 个施压方向的壳仁间隙均大于破壳变形量，因此，在保证薏苡脱壳质量的前提下，可采用挤压揉搓的方式，对薏苡进行仁壳分离。

2.2 单因素试验分析

2.2.1 施压方向对破壳力与破仁力的影响 按照单因素试验设计（1）实施静态压缩力学试验，测得薏苡的破壳力与破仁力与施压方向的关系如图 4 所示。由统计分析可知，含水率与施压速度固定不变时，薏苡在 X、Y 和 Z 3 个施压方向上，Z 方向上

的破壳力最小, X 方向的破壳力最大。这是由于薏苡种壳维管束(主要成分为纤维素)延 X 方向平行排列^[6], 当向 X 方向施压时, 纤维受压径向屈服, 导致破壳变形量大且破壳力大; 而向 Y 方向施压时, 薏苡与压盘接触面积变小, 所受应力变大, 薏苡种壳受压膨胀, 纤维之间产生撕裂而破碎, 所以破壳力变小; Z 方向受压时, 由于薏苡腹沟的存在, 使得薏苡种壳与薏苡仁之间存在间隙, 加之维管束间隙的种壳部分较薄, 可在很小的作用力下产生较大的变形量, 使得所需破壳力要求更小。

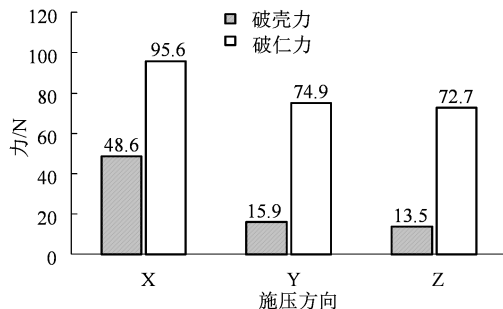


图 4 施压方向对破壳力与破仁力的影响

Figure 4 The influence of pressure direction on the shell breaking force and the kernel breaking force

由图 4 可知, 其他因素保持不变, 薏苡仁在 3 个施压方向上的破壳力与破仁力由大到小为 X>Y>Z。这是由于向薏苡仁 Y 方向施压时, 压力直接作用在薏苡半仁上, 作用面积最小, 加之薏苡仁腹沟的存在, 引起应力集中, 导致薏苡仁破碎; X 方向施压时, 压力作用在薏苡仁两端, 受力面积最大, 且薏苡仁自上而下横截面积变化不大, 减少了应力集中等现象而破碎, 使得薏苡仁破碎力要求更大。各施压方向上的破仁力均大于破壳力, 即薏苡仁的强度大于薏苡壳。且向 Z (正向) 方向施压更易使薏苡破壳。

2.2.2 施压速度对破壳力与破仁力的影响 按照单因素试验设计(2)实施静态压缩力学试验, 测得薏苡的破壳力与破仁力与施压速度的关系如图 5 所示。由统计分析可知, 含水率与施压方向固定不变时, 破壳力随施压速度的增加而降低, 但 15~20 mm·min⁻¹ 范围内降幅变量极小(降幅 4.3%)。主要原因是因为随着加载速度的提高, 压盘对薏苡的冲击力变大, 薏苡壳在短时间内的变形量变大, 使得薏苡壳体快速破裂, 降低破壳力。

由图 5 可知施压速度为 5~15 mm·min⁻¹ 范围内, 破仁力随施压速度的增加而降低; 15~20 mm·min⁻¹ 范围内, 破仁力随施压速度的增加而增加, 但增幅极小(增幅 1.1%)。主要原因是随着加

载速度的提高, 压盘对薏苡仁的冲击力变大, 而薏苡仁壳属脆性物料, 破碎变形量随施压速度的影响极小, 使得薏苡仁破碎力随冲击力的增大而增大。

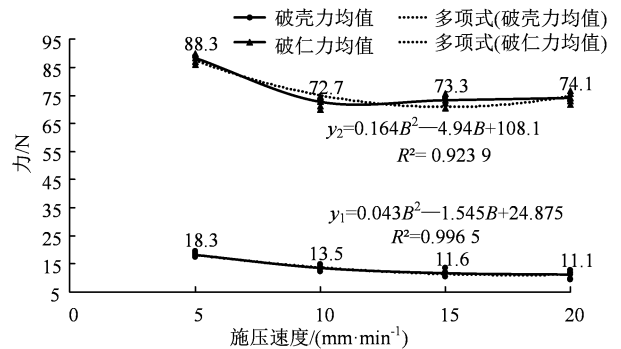


图 5 施压速度-破壳力与破仁力拟合曲线

Figure 5 The influence of pressure speed on the shell breaking force and the kernel breaking force

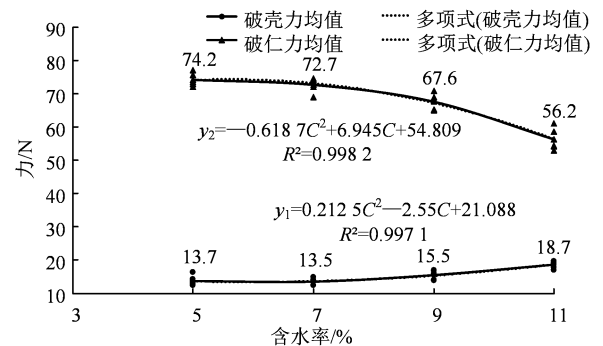


图 6 干基含水率含水率-破壳力与破仁力拟合曲线

Figure 6 The influence of dry basis moisture content on the shell breaking force and kernel breaking force

为进一步探究施压速度与试验指标的影响, 建立施压速度与试验指标一元二次线性回归模型, 得破壳力 y_1 , 破仁力 y_2 与施压速度的回归关系为:

$$y_1=0.043B^2-1.545B+24.875 \quad (R^2=0.9965) \quad (3)$$

$$y_2=0.164B^2-4.94B+108.1 \quad (R^2=0.9239) \quad (4)$$

式中: y_1 为破壳力 (N); y_2 为破仁力 (N); B 为施压速度 (mm·min⁻¹)。

2.2.3 干基含水率对破壳力与破仁力的影响 按照单因素试验设计(3)实施静态压缩力学试验, 测得薏苡的破壳力和破仁力与干基含水率的关系如图 6 所示。由统计分析可知, 施压方向与施压速度固定不变时, 破壳力随干基含水率的增加而增加, 破仁力随干基含水率的增加而降低。干基含水率在 5%~7% 范围内, 破壳力与破仁力均变化极小(破壳力和破仁力变化值均 ≤ 2%)。这是由于薏苡含水率越低, 薏苡种壳纤维脆性越大且韧性越小, 薏苡壳体破碎变形量变小, 使得薏苡更容易破壳; 薏苡仁含水率越低, 薏苡仁组织收缩得更紧凑, 薏苡仁硬度变强, 使

得破仁力变大;当薏苡干基含水率低于一定值时,薏苡壳体组织与薏仁硬度变化几乎不明显。

为进一步探究含水率与试验指标的影响,建立含水率与试验指标一元二次线性回归模型,得破壳力 y_1 ,破仁力 y_2 与干基含水率的回归关系为:

$$y_1=0.2125C^2-2.55C+21.088(R^2=0.9971) \quad (5)$$

$$y_2=-0.6187C^2+6.945C+54.809(R^2=0.9982) \quad (6)$$

式中: y_1 为破壳力(N); y_2 为破仁力(N); C 为干基含水率(%)。

2.3 响应面试验结果及显著性分析

为提高薏苡脱壳时脱净率与完整率,优选出薏苡脱壳的最优方案,使薏苡壳体更脆,薏仁更坚硬,即优选出薏苡可承受的破壳力(y_1)最小、破仁力(y_2)最大时的最优脱壳方案。试验使用Design-Expert 11数据统计软件,结合响应面分析法(RSM)进行试验设计与结果分析。根据Box Behnken Design(BBD)的中心组合试验设计的试验方案与结果见表2。

表2 试验设计与结果

Table 2 Experimental design and results

序号	施压方向(A)	施压速度(B)/(mm·min ⁻¹)	干基含水率(C)/%	破壳力(y_1)/N	破仁力(y_2)/N
1	0(X)	1(15)	-1(7)	30.4	90.6
2	1(Z)	1	0(9)	12.5	71.3
3	-1(Y)	0(10)	1(11)	62.3	52.3
4	-1	1	0	29.1	66.5
5	1	-1(5)	0	22.8	78.0
6	0	0	0	50.6	87.5
7	0	0	0	53.2	88.0
8	0	0	0	46.6	88.9
9	0	-1	-1	58.7	108.5
10	-1	-1	0	43.0	63.3
11	0	1	1	57.7	67.7
12	0	0	0	47.3	80.2
13	1	0	1	18.7	56.2
14	-1	0	-1	15.9	74.9
15	0	0	0	57.8	93.4
16	0	-1	1	68.5	46.7
17	1	0	-1	13.5	72.7

表3 破壳力方差分析

Table 3 Variance analysis of shell breaking force

类别	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型 Model	5 526.97	9	614.11	28.910 0	<0.001	++
A	856.36	1	856.36	40.320 0	<0.001	++
B	500.86	1	500.86	23.580 0	0.001 8	++
C	982.80	1	982.80	46.270 0	<0.001	++
AB	3.24	1	3.24	0.152 5	0.707 7	
AC	424.98	1	424.98	20.010 0	0.002 9	++
BC	76.56	1	76.56	3.600 0	0.099 4	
A ²	2 681.02	1	2 681.02	126.230 0	<0.001	++
B ²	4.07	1	4.07	0.191 9	0.674 6	
C ²	12.77	1	12.77	0.601 1	0.463 6	
残差	148.67	7	21.24			
失拟项	64.43	3	21.48	1.020 0	0.472 2	Not Significance
纯误差	84.24	4	21.06			
总值	5 675.65	16				
R ²	0.973 8					
R ² (adj)	0.940 1					

注: ++ 表示影响极显著 ($P<0.01$); +表示影响显著 ($P<0.05$), ($P>0.05$) 表示影响不显著。下同。

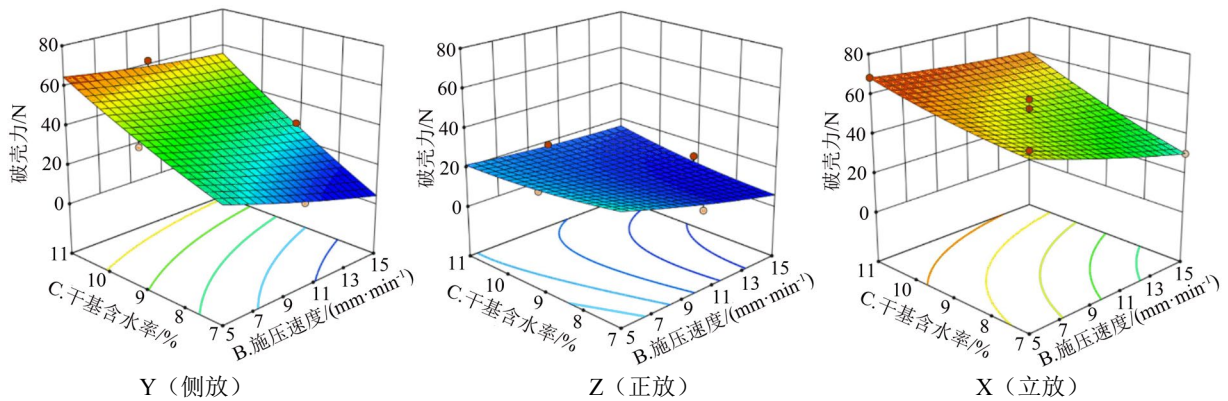


图 7 不同施压方向上干基含水率与施压速度交互作用对破壳力的影响

Figure 7 The influence of the interaction between the dry basis moisture content and the pressure speed on the shell breaking force in different pressure directions

表 4 破仁力方差分析

Table 4 Variance analysis of the kernel breaking force

类别	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型 Model	3 806.43	9	422.94	7.490 0	0.007 3	++
A	56.18	1	56.18	0.995 0	0.351 7	
B	0.02	1	0.02	0.000 4	0.985 5	
C	1 915.80	1	1 915.80	33.930 0	<0.001	++
AB	24.50	1	24.50	0.434 0	0.531 1	
AC	9.30	1	9.30	0.164 8	0.696 9	
BC	378.30	1	378.30	6.700 0	0.036 0	+
A ²	1 089.72	1	1 089.72	19.300 0	0.003 2	++
B ²	12.71	1	12.71	0.225 1	0.649 6	
C ²	236.05	1	236.05	4.180 0	0.080 2	
残差	395.23	7	56.46			
失拟项	304.97	3	101.66	4.510 0	0.090 0	Not Significance
纯误差	90.26	4	22.57			
总值	4 201.66	16				
R ²	0.9059					
R ² (adj)	0.7850					

2.3.1 破壳力影响因素分析 由破壳力方差分析表 3 可知, 破壳力模型显著性水平 $P < 0.001$, 表明各因素与脱壳力的回归方程的关系为极显著; 失拟项不显著, 模型决定系数 $R^2 = 0.973 8$, 表明回归数学模型与实际结果拟合精度高。影响因素 A(施压方向)、B(施压速度)、C(干基含水率)、AC(施压方向与含水率的交互项)和 A^2 (施压方向的平方项)对脱壳力影响均为极显著; AB、BC、 B^2 和 C^2 对破壳力的影响均不显著。单因素 A、B、C 的 F 值分别为 40.32、23.58 和 40.27, 由此可知对破壳力的影响由大到小依次为 A(施压方向) > C(干基含水率) > B(施压速度)。根据响应面分析结果, 固定因素 A 的变量值为 -1(Y 方向)、0(X 方向)、1(Z 方向), 绘制出不同施压方向上含水率与施压速度交

互作用对破壳力影响的响应面图如图 3 所示, 可以直观的反应出各个变量对破壳力的影响以及因素之间的交互作用。

运用 Design-Exert 软件进行拟合, 破壳力与试验因素的回归关系为:

$$y_1 = 51.1 - 10.35A - 7.91B + 11.08C + 0.9AB - 10.31AC + 4.38BC - 25.23A^2 + 0.9838B^2 + 1.74C^2 \quad (7)$$

响应面图形的倾斜趋势, 可直接反映出因素对指标的影响程度, 图形越陡峭代表影响越大, 反之越小。由图 7 可知, 破壳力随施压速度的增加而降低, 随含水率的增加而增加; 在施压方向固定的情况下, 干基含水率(C)对破壳力的影响最大, 施压速度(B)对破壳力的影响次之, 干基含水率与施压速度(BC)交互作用不显著。这与表 3 的破壳

力方差分析结果一致。

2.3.2 破仁力影响因素分析 由破仁力方差分析表 4 可知,破仁力模型显著性水平 $P=0.0073$,表明各因素与脱壳力的回归方程的关系极显著;失拟项不显著,模型决定系数 $R^2=0.9059$,表明回归数学模型与实际结果拟合精度高。影响因素 C (干基含水率) 和 A^2 (施压方向的平方项) 对破仁力影响极显著; BC (施压速度与干基含水率交互项) 对破仁力影响显著;因素 A (施压方向)、B (施压速度) 以及其他交互项对破壳力的影响均不显著。单因素 A、B、C 的 F 值分别为 0.995、0.0004 和 33.93,由此

可知对破仁力的影响由大到小依次为 C (干基含水率) > A (施压方向) > B (施压速度)。根据响应面分析结果,固定因素 A 的变量值为 -1 (Y 方向)、0 (X 方向)、1 (Z 方向),绘制出不同施压方向上含水率与施压速度交互作用对破仁力影响的响应面图如图 4 所示,可以直观的反应出各个变量对破仁力的影响。

运用 Design-Expert 软件进行拟合,破仁力与试验因素的回归关系为:

$$Y_2=87.6+2.62A - 0.05B - 15.47C - 2.48AB - 1.53AC+9.73BC - 16.09A^2 - 1.74B^2 - 7.49C^2 \quad (8)$$

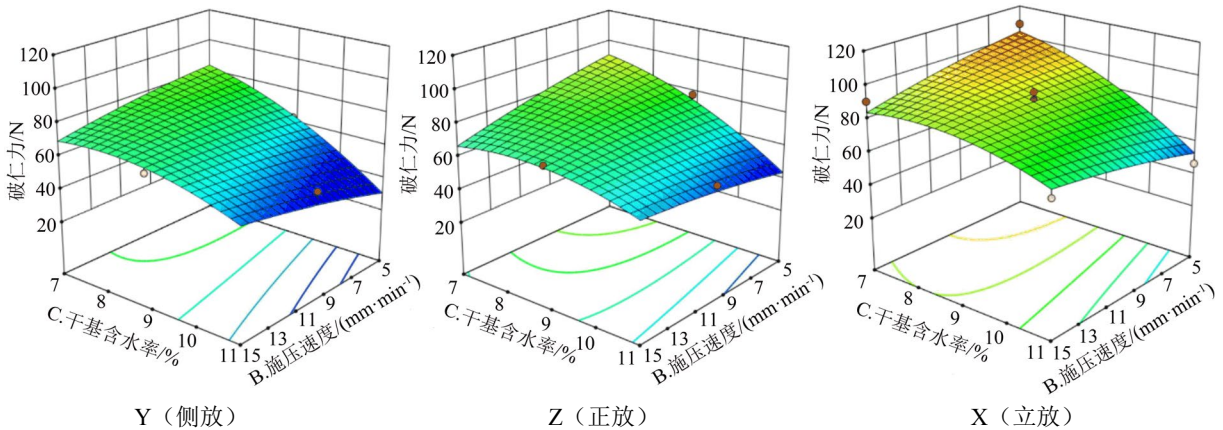


图 8 不同施压方向上干基含水率与施压速度交互作用对破仁力的影响

Figure 8 The effect of the interaction between dry basis moisture content and pressure speed on the kernel breaking force in different pressure directions

由图 8 可知,破仁力随施压速度的增加而增加,随含水率的增加而降低;在施压方向固定的情况下,干基含水率 (C) 对破仁力的影响显著;除 Y 方向外,施压速度 (B) 对破仁力的影响不显著;干基含水率与施压速度 (BC) 交互作用显著。这与表 4 的破仁力方差分析结果一致。

2.4 参数优化及验证结果分析

根据以上试验结果分析,以薏苡可承受的破壳力最小和破仁力最大为优化目标,对脱壳相关参数进行优化,得到薏苡脱壳的最佳参数组合:薏苡脱壳的最佳参数组合为施压方向为 Z (正放) 方向、施压速度为 $7.498 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 且干基含水率为 7.048%,此条件下薏苡的破壳力为 22.067 N,破仁力为 86.016 N。

考虑到实际操作情况,将最优方案参数圆整为:施压方向为 Z 方向,施压速度为 $7.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,干基含水率为 7%。并以此参数进行压缩破碎试验。试验方法与上述相同,测得破壳力和破仁力均值分别为 21.1 N (误差: 4.4%) 与 82.6 N (误差: 4.0%)。所测验证试验指标与预测优化值试验指标差异小于

5%,表明优化结果具有较高的可信度。

3 结论

施压方向、施压速度和干基含水率对薏苡的破壳力均有显著影响。立放施压的破壳力要求最大,正放施压要求最小;破壳力均随施压速度的提高而降低,随含水率的降低而降低。

仅有干基含水率对薏苡的破仁力有显著影响,施压方向与施压速度对破仁力无显著影响。立放施压对破仁力的要求最大,侧放施压要求最小;破仁力均随施压速度的提高而提高,随含水率的降低而提高。

各施压方向上薏苡的破仁力平均值均高于薏苡的破壳力平均值,为保证薏苡脱壳质量,提高脱壳效率,可对薏苡进行再采用压缩揉搓的方式,对薏苡进行仁壳分离。

以薏苡可承受的破壳力最小和破仁力最大为优化目标,对破壳压缩相关参数进行优化。经试验验证表明,在施压方向为 Z (正向施压)、施压速度为 $7.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 且干基含水率为 7%时的破壳综合指

标最优, 即破壳力为 21.1 N, 破仁力为 82.6 N, 所测验证试验指标与模型预测优化值试验指标差异小于 5%, 表明回归模型优化得到的薏苡破壳工艺条件参数具有较高可信度。

参考文献:

- [1] 陆雅丽, 王明力, 闫岩. 薏苡仁综合开发利用[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(4): 64-66.
- [2] 罗贞媛. 文山薏苡高产栽培技术[J]. 现代农业, 2017(10): 11.
- [3] 杨志清, 张世鲍, 蒙海铁, 等. 云南文山 10 个薏苡品种光合特性分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(3): 440-444.
- [4] ZHU F. *Coix*: Chemical composition and health effects[J]. Trends Food Sci Technol, 2017, 61: 160-175.
- [5] 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.
- [6] GUO C, WANG Y N, YANG A G, et al. The *Coix* genome provides insights into panicoidae evolution and papyry hull domestication[J]. Mol Plant, 2020, 13(2): 309-320.
- [7] 陈成斌, 覃初贤, 温东强, 等. 提高薏苡发芽率方法研究[J]. 广西农业科学, 1999, 30(5): 230-232.
- [8] 万良钰, 王明力, 罗光琳, 等. 分级脱壳加工对薏米品质及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 33-37.
- [9] FU X J, DANG Y L. The effect of temperature on the lipid oxidation of *Coix* seed[C]//2011 International Conference on New Technology of Agricultural. Zibo: IEEE, 2011: 892-895.
- [10] 吕小莲, 吕小荣, 张孝琼. 坚果剥壳机具的研究现状与分析[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 485-488.
- [11] ALTUNTAS E, ÖZKAN Y. Physical and mechanical properties of some walnut (*Juglans regia* L.) cultivars[J]. Int J Food Eng, 2008, 4(4): 10(1-16).
- [12] VURSAVUŞ K, ÖZGÜVEN F. Mechanical behaviour of apricot pit under compression loading[J]. J Food Eng, 2004, 65(2): 255-261.
- [13] KURT C, ARIOGLU H. Physical and mechanical properties of some peanut varieties grown in Mediterranean environment[J]. Cercetari Agron Moldova, 2018, 51(2): 27-34.
- [14] 张黎骅, 张文, 秦文, 等. 花生脱壳力学特性的实验研究[J]. 食品科学, 2010, 31(13): 52-55.
- [15] 吕小荣, 姚丽娜. 花生籽粒力学特性的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2014, 35(3): 65-68.
- [16] 王京, 高连兴, 刘志侠, 等. 花生荚果力学特性研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 182-186.
- [17] 杨亚洲, 刘姗姗, 杨立权. 花生荚果及花生仁力学特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 108-111.
- [18] AYDIN C. Physical properties of almond nut and kernel[J]. J Food Eng, 2003, 60(3): 315-320.
- [19] 张黎骅. 银杏果粗加工关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 谷物及谷物制品水分的测定常规法: GB/T 21305-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] XU C C, LI Y F, YU H N. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. J Food Eng, 2014, 136: 42-47.
- [24] 吴德光, 蒋小明. 农产品压缩试验研究及其应用(I): 压缩试验方法[J]. 云南农业大学学报, 1990, 5(3): 171-176.