

绿豆干法脱皮设备关键参数优化与试验

王建楠^{1,2}, 刘敏基¹, 胡志超¹, 魏海¹, 谢焕雄^{1*}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学, 南京 210031)

摘要: 绿豆干法脱皮设备脱皮合格率低、出米率低, 关键参数研究缺乏的现状已成为制约产业健康发展的问题之一。针对这些问题, 该文结合绿豆物理特性研究, 采用二次正交旋转组合设计试验及响应曲面分析方法, 开展绿豆干法脱皮设备关键参数中脱皮滚筒转速、砂辊转速、脱皮时间优化与试验, 利用 Design-Expert 对数据进行了分析并探讨了各参数及其交互作用对脱皮合格率、整米率的影响, 并利用该软件进行了多目标优化。试验结果表明: 影响脱皮合格率的因素依次为: 脱皮滚筒转速>作业时间>砂辊转速; 影响出米率的因素依次为: 作业时间>脱皮滚筒转速>砂辊转速; 脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对脱皮合格率影响极显著 ($P<0.01$), 其余参数交互作用影响不显著; 脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对出米率影响极显著 ($P<0.01$), 脱皮滚筒转速与砂辊转速交互作用对出米率影响不显著。多目标优化结果表明: 绿豆干法脱皮设备作业关键参数的最优参数组合为脱皮滚筒转速 25.20 r/min、砂辊转速 1 642.61 r/min、脱皮时间 108.8 min。此时, 脱皮合格率、出米率均达最大值, 分别为 99.72%、86.57%。将最优组合参数应用在设备上并开展累计 20 批次绿豆脱皮加工作业, 得到脱皮合格率、出米率的均值分别为 99.3%、85.6%, 脱皮质量大幅提升, 有效降低了脱皮损失。该研究为绿豆脱皮机作业质量改善提供参考。

关键词: 农作物; 脱皮机; 优化; 绿豆; 作业参数; 物料特性; 关键部件

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.038

中图分类号: S226

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0312-07

王建楠, 刘敏基, 胡志超, 魏海, 谢焕雄. 绿豆干法脱皮设备关键参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 312—318. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.038 http://www.tcsae.org

Wang Jiannan, Liu Minji, Hu Zhichao, Wei Hai, Xie Huanxiong. Optimization and experiment on key parameters of dehuller for dried mung beans[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 312—318. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.038 http://www.tcsae.org

0 引言

绿豆 (*Vigna radiata* L.) 属于豆科豇豆属植物, 是温带、亚热带地区广泛种植的豆类之一, 在中国有两千多年栽培历史, 是中国主要的食用豆类品种^[1-2]。绿豆富含蛋白质、维生素、膳食纤维、多种矿物质元素及 20 多种活性物质, 具有解毒、改善肠道菌群、降血脂、抗氧化等多种功效, 是重要的药、食兼用农作物^[3-5], 在中国种植面积、总产量和出口量居世界首位, 是中国重要的出口创汇农产品^[6]。

豆类脱皮可有效提高食用豆中豆粕蛋白含量、提高经济效益^[7], 是绿豆、大豆等豆类加工的常见工序, 也是绿豆制粉加工的关键环节^[8-10]。与大豆脱皮加工类似, 绿豆常用的脱皮加工方法有湿 (水) 法脱皮、干法脱皮 2 种^[11]: 湿法脱皮需要用大量的水浸泡绿豆, 经湿法脱皮设备进行脱皮, 其加工浸泡时间长、耗水量大、水温控制要求高, 脱皮后须进行豆仁干燥、且浸泡后的污水对

环境污染大^[12-14]; 干法脱皮可在绿豆正常贮藏含水率条件下, 通过绿豆干法脱皮设备对其直接脱皮, 脱皮工序简单、效率高且脱皮后无需对豆仁干燥, 因此在生产中应用较为普遍。但干法脱皮设备尚存在因设备运动参数、作业工艺参数不合理导致的脱皮合格率低 (约 85%)、出米率低 (70%) 的问题, 致使实际生产中加工成品损耗大、品质差。长期以来, 受农业发展重点方向及科研经费投入的制约, 绿豆等小宗作物初加工技术装备未引起足够关注和重视, 国外相关研究主要集中在绿豆营养成分分析、功能成分提取、抗病虫害等方面^[15-17], 国内在该领域研究报道亦较少见, 左青、代运斌、罗勤良、魏骞对大豆脱皮工艺进行了研究^[18-21], 未见研究人员对绿豆脱皮工艺及装备进行研究与探讨, 致使绿豆干法脱皮工艺参数及设备作业质量长期未能得到有效提升, 作业质量一直处在低水平状态, 成为制约产业健康发展的主要技术瓶颈问题之一。

为破解制约绿豆干法脱皮技术难题, 本文从绿豆物理特性研究入手, 开展绿豆干法脱皮设备关键参数试验与优化研究, 以获取最佳关键作业参数, 为提升设备作业质量提供参考。

1 绿豆干法脱皮设备工作原理

1.1 工作原理

绿豆脱皮机主要由机架、脱皮滚筒、脱皮砂辊、振

收稿日期: 2019-05-15 修订日期: 2019-10-29

基金项目: 中国农科院创新工程农产品分级与贮藏团队、公益性行业 (农业) 科研专项经费 (201303069) 联合支持。

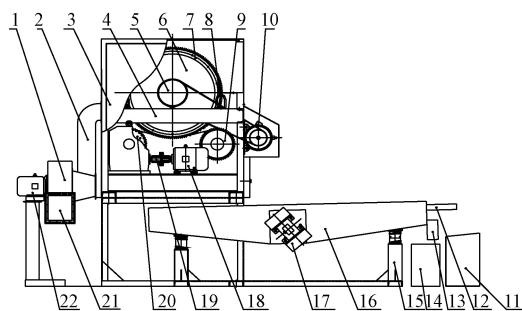
作者简介: 王建楠, 副研究员, 主要从事农产品加工技术装备研究。

Email: wjnsunrise@126.com

*通信作者: 谢焕雄, 研究员。主要从事农产品加工技术与装备的研究。

Email: nfzhongzi@163.com。中国农业工程学会高级会员: 谢焕雄 (E041200496S)。

动筛等部件组成,其结构如图 1 所示。脱皮作业过程如下:绿豆由提升装置进入旋转的脱皮滚筒,脱皮滚筒的圆柱表面为圆孔筛,其断面通过法兰安装滚筒链轮。脱皮滚筒经主动链轮在电机的带动下低速转动,脱皮滚筒内的绿豆与高速旋转的圆柱体砂辊接触摩擦实现脱皮。脱皮作业过程中绿豆随脱皮滚筒离心运动并被脱皮滚筒频繁带动至滚筒高处后下落,从而实现脱皮过程中绿豆的翻动,以满足绿豆不同表面与圆柱体砂辊的均匀接触条件,从而实现绿豆表面各个方向的均匀脱皮作业。脱皮作业过程中,绿豆皮被圆柱体砂辊磨成细小的粉末,在除尘风机的负压作用下经脱皮滚筒的筛孔排出并通过风管经风机出口进入除尘装置。作业一段时间后,开机取样以查看绿豆脱皮作业效果,待脱皮达到加工要求时出料,脱皮后的绿豆经振动筛进行筛分,整粒绿豆通过出料口进入集料斗,半粒绿豆通过出料口进入集料斗,从而实现整粒脱皮绿豆与半粒脱皮绿豆分离,整个绿豆脱皮作业过程完成。



1.除尘风机 2.风管 3.护罩 4.机架 5.砂辊 6.脱皮滚筒 7.滚筒链轮 8.皮带 9.从动链轮 10.砂辊电机 11.整粒集料斗 12.整粒绿豆出料口 13.半粒绿豆出料口 14.半粒集料斗 15.振动筛支承 16.振动筛 17.振动电机 18.脱皮滚筒电机 19.联轴器 20.主动链轮 21.风机出口 22.风机电机
1.Dust-removing blower 2.Air duct 3.Hood 4.Frame 5.Sand drum 6.De hulling roller 7.Sprocket of the roller 8.Belt 9. Driven sprocket 10.Engine of the sand drum 11.Hopper of whole mung beans 12.Outlet of whole mung beans 13.Outlet of half mung beans 14.Hopper of half mung beans 15.Support of the vibration screen 16.Vibration screen 17.Vibration motor 18.Engine of the dehulling roller 19.Coupling 20.Driving sprocket 21.Outlet of dedusting fan 22.Engine of dedusting fan

图 1 绿豆干法脱皮机结构图

Fig.1 Sketch map of dehuller for dried mung beans

1.2 作业质量影响参数

出米率、脱皮合格率是绿豆脱皮设备作业质量的主要考核指标。由上述工作原理可知,绿豆脱皮作业质量主要影响参数有:脱皮滚筒转速、砂辊转速、作业时间。其中脱皮滚筒转速、砂辊转速为设备运行参数,作业时间为关键工艺参数,最优参数组合是绿豆脱皮出米率、脱皮合格率达到最佳的关键。因此,本文运用二次正交旋转组合设计试验并结合响应曲面分析方法开展关键参数试验与优化研究,以提高绿豆脱皮设备作业质量。

2 材料与方法

2.1 试验仪器与设备

为实现绿豆脱皮设备作业参数连续可调,本试验采用变频器对砂辊电机、脱皮滚筒电机进行转速调整,并

通过定时控制电路控制作业时间以备取样。

本研究采用主要仪器设备如下:ATV12H075M2 型施耐德变频器 2 台、930 型福禄克转速表 1 台、UTM6503 型电子万能试验机(精度等级 0.5,含夹具若干)1 台、202-2 型恒温干燥箱、TGT-100 台秤(量程 200 kg)、游标卡尺(精度 0.1 mm)、电子天平(测量精度 1 g)、秒表、自制休止角测定仪等。

2.2 试验材料物理特性

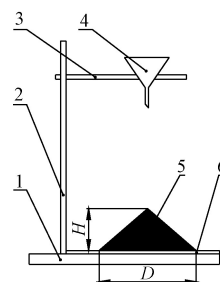
以江苏泰州种植的中绿 5 号为研究对象,如图 2 所示。该品种表皮呈暗绿色,绿豆基本物理特性中,由于物理尺寸、含水率、挤压破碎力与其脱皮作业质量密切相关,随机选取绿豆试验样本物理特性进行相关测试并统计分析,样本个数为 200 粒^[22-24]。参照 GB5009.3-2016 规定^[25],测定绿豆含水率为 9.20%;其粒长均值为 5.70 mm,粒宽均值为 4.18 mm,粒厚均值为 4.33 mm;绿豆挤压破碎力在 30~40 N 之间,以 (36±1) N 左右分布最为集中(约占 60%);据谷物与豆类千粒重的测定标准(GB/T 5519-2008)测定绿豆千粒质量为 63.5 g;测定皮、仁质量所占的比例为 1.0:9.2。



图 2 供试绿豆

Fig.2 Tested mung beans

休止角是反映物料内部摩擦特性及散落特性的重要指标,休止角越大种子内摩擦力越大,散落性能越小,本试验采用注入法测定休止角,所用休止角测试仪如图 3 所示。



1.底座 2.支撑架 3.漏斗支承 4.漏斗 5.绿豆料堆 6.刻度尺
1. Base 2. Support frame 3. Support of hopper 4. Hopper 5. Stockpile of mung beans 6. Ruler

注: H 为绿豆的堆料高度, mm; D 为种子堆底面直径, mm。

Note: H is height of stockpile of mung beans, mm; D is diameter of stockpile of mung beans, mm.

图 3 休止角测定仪示意图

Fig.3 Sketch map of repose angle test instrument

绿豆自漏斗自然下落成堆,试验重复 10 次,绿豆休止角 θ 计算见式(1)。经试验计算的绿豆休止角的均值为 23.71°

$$\theta = \arctan\left(\frac{2H}{D}\right) \quad (1)$$

2.3 试验响应参数

以绿豆脱皮出米率 P 、脱皮合格率 Q 为绿豆脱皮作业质量考核指标。试验进行时,待设备运行平稳(作业时间不小于 15min)进行取样,每次取样 500 g,从中随机取 100 粒整粒绿豆进行脱皮合格率判定。目前,绿豆专用脱皮合格率判定方法及标准空白,由于其脱皮后颜色差异悬殊,脱皮前后的绿豆外观与种子包衣前后相似,故参照种子包衣机试验方法(JB/T 7730-2011)中包衣合格率的测定方法进行判定^[26]。判定方法:试样以粒为单位在 5 倍放大镜下进行观察,将其分为脱皮面积大于或等于 80%的籽粒和小于 80%的籽粒 2 类,并根据以下公式计算脱皮合格率

$$Q = \frac{Z_d}{Z_x + Z_d} \times 100\%$$
 (2)

式中 Q 为脱皮合格率,%; Z_d 为脱皮面积大于或等于 80% 的籽粒数; Z_x 为脱皮面积小于 80% 的粒数。

由于目前绿豆脱皮设备作业质量相关标准空白,其作业质量评定参照中华人民共和国行业标准胶辊磨谷机(JB/T 10267-2013)开展绿豆干法脱皮机脱皮试验及工艺参数优化^[27]。试验进行时,作业一定时间进行查样,每次试验重复 3 次,取平均值。

$$P = \frac{W_w + W_h}{W_o} \times 100\%$$
 (3)

式中 P 为出米率,%; W_w 为脱皮后整粒绿豆籽仁质量, g; W_h 为脱皮后半粒绿豆籽仁质量, g; W_o 为进入脱皮滚筒的绿豆原料总质量, g。

2.4 试验设计

为得到绿豆脱皮设备最佳作业参数,根据单因素试验结果,采用二次正交旋转组合试验设计方法开展试验,因素及编码水平如表 1 所示^[28-29]。

表 1 因素和水平编码表
Table 1 Coding of experimental factors and levels

水平 Levels	因素 Factors		
	脱皮滚筒转速 Speed of dehulling roller $A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	砂辊转速 Speed of sand drum $B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	作业时间 Operation time C/min
-1	25	1 400	90
0	30	1 700	100
1	35	2 000	110

应用 Design-Expert 软件,以中心组合响应曲面(central composite design, CCD)方法设计并开展试验研究,试验次数及结果见表 2。对试验结果进行分析得到脱皮合格率 Q 、出米率 P 与脱皮滚筒转速、砂辊转速、作业时间的数学模型,并分析研究其交互作用规律。

3 结果与分析

3.1 脱皮合格率

1) 脱皮合格率的回归结果分析

根据表 2 脱皮合格率的试验结果,应用 Design-Expert 软件计算可得其编码值简化回归数学模型如下

$$Q = 96.19 - 2.54A + 0.97C + 0.35AB + 1.17AC - 0.05BC - 0.49A^2 - 1.26B^2 - 0.69C^2$$
 (4)

为进一步判定模型的拟合精度及各因素对脱皮合格率的影响主次顺序,对表 2 合格率进行方差分析及三元二次回归分析可知,该模型决定系数 R^2 为 0.971 9、且该模型 P 值极显著、失拟项不显著,因此可判断出该模型与实际结果拟合精度高,可用于脱皮合格率的预测和分析,且可据该模型系数绝对值大小判定各因素对脱皮合格率的影响主次顺序为: A 、 C 、 B 。

表 2 试验设计方案及结果
Table 2 Design of tests and results

试验编号 Test No.	A	B	C	合格率 Qualified dehulling rate $Q/\%$	出米率 Dehulled mung bean rate $P/\%$
1	0	-1	-1	93.40	76.20
2	0	1	-1	93.90	80.22
3	1	1	0	92.00	78.29
4	-1	-1	0	97.60	80.71
5	0	0	0	95.90	74.40
6	0	1	1	95.00	82.55
7	-1	0	1	100.00	86.69
8	1	0	-1	92.37	72.01
9	-1	1	0	96.50	82.73
10	0	-1	1	94.70	86.78
11	0	0	0	95.69	74.70
12	1	0	1	92.70	86.69
13	0	0	0	96.58	75.00
14	-1	0	-1	95.00	87.80
15	1	-1	0	91.70	75.27
16	0	0	0	96.71	75.20
17	0	0	0	96.09	74.20

表 3 脱皮合格率方差分析
Table 3 Variance analysis of qualified dehulling rate

来源 Origin	平方和 Square	自由度 df	均方差 Quadratic mean deviation	F	显著性 Significance
模型 Model	75.63	9	8.40	26.89	**
A	51.66	1	51.66	165.34	**
B	0.00	1	0.00	0.00	
C	7.47	1	7.47	23.90	**
AB	0.49	1	0.49	1.57	
AC	5.45	1	5.45	17.45	**
BC	0.01	1	0.01	0.03	
A^2	1.00	1	1.00	3.21	
B^2	6.64	1	6.64	21.25	**
C^2	1.99	1	1.99	6.38	*
残差 Residual	2.19	7	0.31		
失拟项 Loss of fitting	1.42	3	0.47	2.47	
误差 Pure error	0.77	4	0.19		
R^2	0.971 9				
调整 R^2 Adjustment of R^2	0.935 8				

注: *表示显著($P<0.05$), **表示极显著($P<0.01$), 下同。
Note: * means significant($P<0.05$); ** means highly significant ($P<0.01$), the same below.

2) 脱皮合格率与各参数响应曲面分析
各影响因素对脱皮合格率响应曲面、等高线如图 4

所示，综合响应曲面和等高线图可判定二者交互效应的强弱及对脱皮合格率的影响规律^[30-32]，可知脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对脱皮合格率影响显著，脱皮滚筒转速与砂辊转速交互作用、砂辊转速与作业时间交互作用对脱皮合格率影响不显著，这与表 3 方差分析结果一致。由图 4 可知，脱皮滚筒转速和作业时间存在交互作用。当砂辊转速处于 0 水平时，脱皮合格率在作业时间处于较高水平时脱皮滚筒转速增加而逐渐降低，这是因为绿豆脱皮需与砂辊保持一定时间的相互接触产生摩擦从而将绿豆皮摩擦脱落，较高的滚筒转速使绿豆频繁的在脱皮滚筒内被翻转抄动，从而减少了与砂辊接触摩擦的时间，致使绿豆脱皮合格率随着脱皮滚筒转速的增加而下降；当作业时间处于高水平，脱皮滚筒转速处于低水平时，脱皮合格率出现极大值，这说明较长的作业时间和较低的脱皮滚筒转速可以有利于绿豆外皮与脱皮砂辊充分接触摩擦，有利于绿豆脱皮。

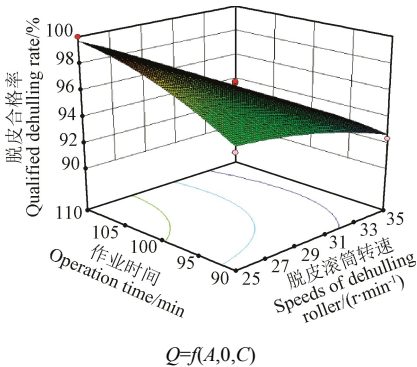


图 4 脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对脱皮合格率的响应曲面

Fig.4 Response surfaces of speed of sand drum and operation time on qualified dehulling rate

3.2 出米率

1) 出米率的回归结果分析

根据表 2 试验结果得到出米率 P 的编码值简化回归数学模型为

$$P = 74.70 - 2.55A + 1.26B + 4.62C + 0.25AB + 2.63AC - 0.75BC + 1.89A^2 + 2.66B^2 + 5.39C^2 \quad (5)$$

对表 2 结果进行出米率的方差分析及三元二次回归分析，结果见表 4，可知模型的决定系数 R^2 为 0.998 2、且该模型 P 值极显著、失拟项不显著，因此可判断出该模型与实际结果拟合精度高，可用于出米率的预测和分析。且可据该模型系数绝对值大小判定各因素对出米率的影响主次顺序为： C 、 A 、 B 。

2) 出米率与各参数响应曲面分析

根据表 4 试验数据，各因素对出米率响应曲面、等高线如图 5 所示，可判断脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对出米率影响显著，砂辊转速与作业时间交互作用次之，脱皮滚筒转速与砂辊转速交互作用对出米率影响不显著，这与表 4 方差分析结果一致。

由图 5a 可知脱皮滚筒转速和作业时间存在交互作用。当砂辊转速处于 0 水平时，出米率 P 随脱皮滚筒转

速增加变化不大，随作业时间变化波动幅度较为明显，在脱皮滚筒转速处于低水平时幅度相对较小，在脱皮滚筒转速处于高水平时变化尤为明显，这是因为当脱皮滚筒转速较高、作业时间较长时，绿豆外皮可以有较充足的时间和较高的频率与砂辊接触摩擦，由于绿豆外表光滑，脱皮后相对粗糙更易于被砂辊磨削而变成绿豆粉，从而导致出米率下降明显。

表 4 出米率方差分析

Table 4 Variance analysis of dehulled mung beans rate					
来源 Origin	平方和 Square	自由度 df	均方差 Quadratic mean deviation	F	显著性 Significance
模型 Model	448.19	9	49.80	441.87	**
A	52.12	1	52.12	462.48	**
B	12.70	1	12.70	112.70	**
C	170.94	1	170.94	1 516.77	**
AB	0.25	1	0.25	2.22	
AC	27.77	1	27.77	246.43	**
BC	2.25	1	2.25	19.96	**
A^2	15.08	1	15.08	133.81	**
B^2	29.74	1	29.74	263.85	**
C^2	122.44	1	122.44	1 086.41	*
残差 Residual	0.79	7	0.11		
失拟项 Loss of fitting	0.11	3	0.04	0.21	
误差 Pure error	0.68	4	0.17		
R^2	0.998 2				
调整 R^2 Adjustment of R^2	0.936 0				

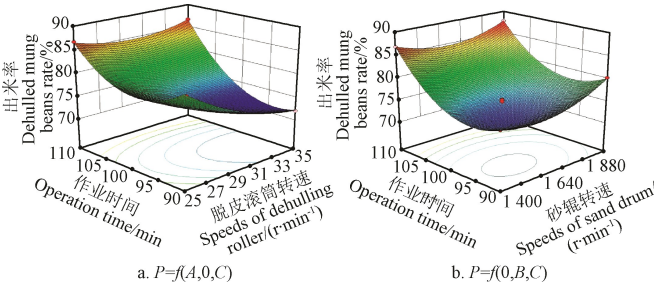


图 5 各因素交互作用对出米率的响应曲面

Fig.5 Response surfaces of factors' interaction on dehulled mung beans rate

由图 5b 可知砂辊转速和作业时间存在交互作用。当脱皮滚筒转速 A 处于 0 水平时，出米率 P 随作业时间减少呈减小趋势，但在砂辊转速处于高水平时出米率略微增加，这是因为在砂辊转速较高、作业时间相对较长时，单粒绿豆外皮与砂辊接触摩擦的几率相对较为均匀，从而可有效提升未脱皮绿豆的脱皮质量，降低脱皮好的绿豆被过度摩擦脱皮的几率，从而使得脱皮出米率相对较高。作业时间越短，单粒绿豆与砂辊接触摩擦越不均匀，致使部分与砂辊接触的绿豆被快速脱皮，脱皮好的绿豆仍与砂辊产生过度摩擦脱皮，而脱皮的绿豆其外表较为粗糙，更易与砂辊摩擦脱落，瞬间的摩擦产生大量的绿豆粉在较高砂辊转速下易产生高温，致使绿豆粉与绿豆颗粒混合成团，更难以使未脱绿豆与砂辊均匀接触，已脱皮的绿豆被过度摩擦成粉造成出米率大幅下降。

4 参数优化

根据实际生产需求, 为了提高脱皮绿豆加工收益, 应在保证脱皮合格率最优的同时, 出米率达到最大值。为此建立合格率 Q 、出米率 P 双目标函数的数学模型, 并将优化求解方程中合格率 Q 的权重设置大于出米率 P 的权重, 在以上情况下进行求解。目标函数及边界条件如下

$$\begin{cases} \max Q \\ \max P \\ -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

求解可得合格率 Q 、 P 最大时的最优解为: $A=25.20$ r/min, $B=1642.61$ r/min, $C=108.80$ min。此时, 合格率 Q 为 99.72%, 出米率 P 为 86.57%。根据优化结果将设备作业参数调整至最优解进行试验验证, 验证试验重复 3 次, 得到合格率、出米率均值分别为 99.10%、85.87%, 与最优解误差较小, 说明优化结果具有较高可信度, 本研究模型可靠。

2017 年 11 月 13 日至 18 日, 为进一步验证最优参数实际生产效果, 将优化后参数应用于绿豆脱皮设备并在山西六味斋食品有限公司开展批量脱皮加工试验, 累计加工 20 批次, 各批次脱皮合格率、出米率如表 5 所示, 其均值分别为 99.32%、85.63%, 作业质量较改进前大幅提高, 可较好应用于实际生产。

表 5 各批次加工作业质量
Table 5 Operation quality of each batch

批次编号 Batch No.	$Q/\%$	$P/\%$
1	100.00	85.31
2	99.12	85.90
3	99.33	85.01
4	100.00	86.31
5	99.42	85.24
6	99.38	85.91
7	99.27	85.23
8	99.16	87.22
9	99.37	85.95
10	99.29	86.24
11	99.21	86.23
12	99.12	86.91
13	98.90	85.70
14	100.00	84.71
15	98.95	85.21
16	99.16	84.34
17	100.00	86.42
18	98.62	84.12
19	98.91	85.81
20	99.09	84.32
均值 Average	99.32	85.63

5 结 论

1) 绿豆干法脱皮试验方差分析结果表明, 影响脱皮合格率的因素依次为: 脱皮滚筒转速 > 作业时间 > 砂辊转速; 影响出米率的因素依次为: 作业时间 > 脱皮滚筒转速 > 砂辊转速。结合响应曲面分析可得出, 脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对脱皮合格率影响极显著 ($P < 0.01$), 其余参数交互作用影响不显著; 脱皮滚筒转速与作业时间交互作用对出米率影响极显著 ($P < 0.01$), 脱皮滚筒转速与砂辊转速交互作用对出米率影响不显著。

2) 应用 Design-Expert 软件, 以中心组合响应曲面方法设计并开展试验研究及各参数的多目标优化, 得到脱皮合格率、出米率达最大值的最优解为: 脱皮滚筒转速 25.20 r/min、砂辊转速 1 642.61 r/min、脱皮时间 108.8 min。在此最优解条件下脱皮合格率为 99.72%, 出米率 P 为 86.57%。

3) 验证试验结果与优化结果基本一致, 将优化后参数应用于山西太原六味斋食品有限公司开展批量脱皮加工试验, 累计加工 20 批次, 记录每批次绿豆脱皮合格率及出米率并求平均值, 得到脱皮合格率为 99.30%、出米率为 85.60%, 作业质量较改进前大幅改善, 进一步表明优化参数可满足绿豆脱皮作业实际生产要求。

[参 考 文 献]

- [1] 滕聪, 么杨, 任贵兴. 绿豆功能活性及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(13): 3286—3291.
Teng Cong, Yao Yang, Ren Guixing. Research progress on functional activity and application of mung bean[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(13): 3286—3291. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王丽侠, 程须珍, 王素华. 绿豆种质资源、育种及遗传研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1519—1527.
Wang Lixia, Chen Xuzhen, Wang Suhua. Advances in research on genetic resources, breeding and genetics of mungbean (*Vigna radiata* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1519—1527. (in Chinese with English abstract)
- [3] Coffmann C W, Garcia J V V. Functional properties and amino acid content of a protein isolate from mung bean flour[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 12(5): 473—484.
- [4] 邓志汇, 王娟. 绿豆皮与绿豆仁的营养成分分析及对比[J]. 现代食品科技, 2010, 26(6): 656—659.
Deng Zhihui, Wang Juan. Comparison of nutrient components of mung bean hull and peeled mung bean[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(6): 656—659. (in Chinese with English abstract)
- [5] Somashekaraiah B V, Padmaja K, Prasad A R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 85(1): 85—89.

- [6] Eladawy T A. Functional properties and nutritional quality of acetylated and succinylated mung bean protein isolate[J]. Food Chemistry, 2000, 70(1): 83—91.
- [7] Song Qianqian, Jiang Lian, Yang Xinquan, et al. Physicochemical and functional properties of a water-soluble polysaccharide extracted from mung bean (*Vigna radiata* L.) and its antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138(5): 874—880.
- [8] Wahid A, Ghani A, Javed F. Effect of cadmium on photosynthesis, nutrition and growth of mung bean[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(2): 273—280.
- [9] Rafique E, Mahmoodulhassan M, Sarwar S, et al. Plant analysis diagnostic indices for boron nutrition of mung bean (*Vigna radiata* L.) cultivars grown in a rainfed calcareous soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(1): 27—34.
- [10] 吴卫华. 美国大豆加工应用新技术[J]. 粮食与油脂, 2002(4): 45.
- [11] Singh K N, Singh B. Effect of crop and machine parameters on threshing effectiveness and seed quality of soybean[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(4): 349—355.
- [12] Dahiya P K, Linnemann A R, Van Boekel M A J S, et al. Mung bean: Technological and nutritional potential[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(5): 670—688.
- [13] 董吉林, 李林, 张文杰, 等. 谷物脱皮加工技术的研究现状[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 12(11): 1—4.
Dong Jilin, Li Lin, Zhang Wenjie, et al. Research progress on cereal dehulling[J]. Cereal and Feed industry, 2014, 12(11): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [14] 魏骞, 宋大海, 林凤岩. 润湿对提高大豆脱皮率的影响[J]. 中国油脂, 2008(5): 68—69.
- [15] Thompson L U. Preparation and evaluation of mung bean protein isolates[J]. Journal of Food Science, 1977, 42(1): 202—206.
- [16] Dahiya P K, Linnemann A R, Van Boekel M A J S, et al. Mung bean: Technological and nutritional potential[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(5): 670—688.
- [17] Raghuvanshi R S, Singh S, Bisht K, et al. Processing of mungbean products and its nutritional and organoleptic evaluation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(7): 1378—1387.
- [18] 左青, 郭华, 王宏平, 等. 大豆热脱皮工艺及设备[J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 6—9.
- [19] 左青. 关于大豆脱皮工艺中几个问题的讨论[J]. 中国油脂, 2007, 32(7): 15—16.
- [20] 代运斌, 李普选. 大豆脱皮工艺在生产中的应用[J]. 中国油脂, 2005, 30(2): 31—32.
- [21] 罗勤良, 朱龙滔, 罗天发. 大豆加热器在热脱皮工艺中的作用[J]. 中国油脂, 2008, 33(1): 57—58.
- [22] Zhou B, Ileleji K E, Ejeta G. Physical property relationships of bulk corn stover particles[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2): 581—590.
- [23] Deshpande S D, Bal S, Ojha T P. Physical properties of soybean[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(2): 89—98.
- [24] Izli N. Effect of moisture on the physical properties of three varieties of kenaf seeds[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(6): 1—10.
- [25] 食品中水分测定: GB5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2017-03-01.
- [26] 种子包衣机: JB/T 7730-2011[S]. 北京: 机械工业出版社, 2011-07-02.
- [27] 胶辊砻谷机: JB/T 10267-2013[S].
- [28] 茆诗松, 吕晓玲. 数理统计学(第2版)[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2016.
- [29] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [30] 马秋成, 郭耿君, 马婕, 等. 莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 263—271.
Ma Qiucheng, Guo Gengjun, Ma Jie, et al. Determination of mechanical characteristic parameters and extrusion crushing characteristics test for lotus seed kernel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 263—271. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王建楠, 谢焕雄, 胡志超, 等. 甩盘滚筒式花生种子机械化包衣工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 43—50.
Wang Jiannan, Xie Huanxiong, Hu Zhichao, et al. Parameter optimization on mechanical coating processing of rotary table-roller coating machine for peanut seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 43—50. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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 Jiannan, Liu Minji, Cao Mingzhu, et al. Working parameter optimization and experiment of key components of *coix lacryma-jobi* sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 288—295. (in Chinese with English abstract)

Optimization and experiment on key parameters of dehuller for dried mung beans

Wang Jiannan^{1,2}, Liu Minji¹, Hu Zhichao¹, Wei Hai¹, Xie Huanxiong¹

(1. *Nanjing Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China;*

2. *Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China*)

Abstract: Mung bean is one of the widely cultivated crops in China, and its yield and exports account were the first in the world. However dehulling technology and operation quality of mung bean have not been significantly improved over the long term due to insufficient attention. The poor qualified dehulling rate and dehulled mung beans rate restricted the development of mung bean industry. The unreasonable working parameters (speed of dehulling roller, speed of sand drum, operation time) of the dehuller were the main reason of this problem, which had a negative impact on operation quality. In this experiment, quadratic orthogonal rotation and response surface method were used to obtain the best operation quality, and key working parameters were optimized using Design-Expert. The properties of tested mung beans were analyzed, and the results showed that the color of the mung beans was dark green. With the moisture content of the mung bean at 9.2%, the thousand seeds weight was 63.5 g, and the length, width, thickness were about 5.70, 4.18, 4.33 mm respectively, the repose angle of mung beans was 23.71°, the crushing force of 60% mung beans was about 36 N. The data analysis of the dehulling experiment showed that primary and secondary factors for qualified dehulling rate was speed of dehulling roller > operation time > speeds of sand drum. Regarding to the dehulled mung beans rate, the order was: operation time > speed of dehulling roller > speeds of sand drum. The result of interaction analysis showed that the interaction between speed of dehulling roller and operation time had a significant impact on the qualified dehulling rate, while the interactions between other parameters were not significant. The interaction between speed of dehulling roller and operation time had a significant effect on dehulled mung beans rate, and the interaction between the speed of the sand drum and operation time also had a significant effect on dehulled mung beans rate. The optimal working parameters of dehuller for dried mung beans were speed of dehulling roller of 25.20 r/min, speed of sand drum of 1642.61 r/min, and operation time of 108.8 min. With the optimal working parameters, qualified dehulling rate and dehulled mung beans rate of the dehuller were 99.72% and 86.57%, respectively. The results of verification test and optimization result were highly consistent. Production tests were carried out 20 times in the factory according to the optimization results. With the optimal parameters applied by dehuller for dried mung beans, qualified dehulling rate and dehulled mung beans rate were 99.3% and 85.6%, respectively. The results of the production verifications were very close to the results got from the previous model results, and the quality of the dehuller improved greatly. This study is helpful for the improvement of the dehuller for dried mung beans.

Keywords: crops; dehuller; optimization; mung beans; working parameters; physical properties; key components