

# 甩盘滚筒式花生种子机械化包衣工艺参数优化

王建楠, 谢焕雄\*, 胡志超, 胡良龙, 彭宝良, 刘敏基

(农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 针对花生种子机械化包衣工艺参数研究严重缺失, 包衣合格率差、破损率高的问题, 该文利用甩盘滚筒式包衣试验台, 运用单因素和中心组合试验设计理论开展种药比、种衣剂稀释比(稀释用水与药质量之比)、包衣滚筒转速对包衣合格率及破损率的影响规律研究及工艺参数优化。首先开展单因素试验确定各影响因素对包衣合格率及破损率的影响规律及各因素二次回归试验编码 0 水平值, 随后采用二次正交旋转组合试验方法设计试验并用 Design-Expert 进行数据处理, 建立包衣合格率、破损率回归数学模型并进行方差分析。分析得出对影响包衣合格率的主次因素依次为: 种药比>包衣滚筒转速>种衣剂稀释比; 影响破损率的主次因素依次为: 包衣滚筒转速>种衣剂稀释比>种药比。通过响应曲面方法分析各因素交互作用对包衣合格率、破损率的影响, 并对回归模型进行多目标优化, 得出甩盘滚筒式包衣试验台最佳工艺参数组合为: 种药比 31.73 g/mL, 种衣剂稀释比 4.76, 包衣滚筒转速 18.32 r/min。此时, 包衣合格率最高、破损率最低, 其值分别为 97.35%、0.37%。将优化参数在 5BY-500-J 型包衣设备上开展生产验证, 包衣合格率达 97.05%、破损率 0.40%, 达到了较为理想的效果。该研究可为甩盘式花生种子包衣机工艺参数优化提供参考。

**关键词:** 机械化; 优化; 农作物; 甩盘滚筒式; 花生种子; 机械化包衣; 响应曲面法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.006

中图分类号: S226

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0043-08

王建楠, 谢焕雄, 胡志超, 胡良龙, 彭宝良, 刘敏基. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.006 http://www.tcsae.org

Wang Jiannan, Xie Huanxiong, Hu Zhichao, Hu Lianglong, Peng Baoliang, Liu Minji. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.006 http://www.tcsae.org

## 0 引言

花生是重要的油料作物和优质蛋白资源, 是中国极具国际竞争力的重要经济作物之一<sup>[1-3]</sup>。中国花生种植面积世界第二, 产量世界第一<sup>[4-6]</sup>, 常年种植面积约 467 万  $\text{hm}^2$ 。花生种植用种量大, 约占总产 8%~10%。种子加工是花生生产必不可少的重要环节, 包衣是花生种子加工的关键工序, 也是实现播前植保、提高产量的重要手段<sup>[7-8]</sup>。

包衣是种子加工流程的末端工序, 其作业质量是影响种子质量的关键。现有大型包衣加工设备(以小麦计, 生产率 5 t/h 以上)多为甩盘滚筒式或甩盘搅龙式结构, 其工艺参数主要针对水稻、小麦、玉米等种子设计, 工艺参数相对成熟, 在包衣作业时根据不同作物或同一作物不同品种适当调整作业参数即能满足工厂化生产要求<sup>[9]</sup>。而与水稻、小麦、玉米种子相比, 花生种子物理特性差异悬

殊, 种皮(红衣)与胚(籽仁)结合力受水分影响较大, 当水分达到某一值结合力降至最低<sup>[10]</sup>, 并易于破碎, 致使现有水稻、小麦、玉米大型甩盘滚筒式包衣设备工艺参数难以满足花生种子包衣加工需求, 大型工厂化花生种子包衣参数研究空白, 已成为花生种子包衣加工技术瓶颈之一, 严重制约花生种业发展。近年, 国内外研究人员对花生包衣防治病虫害、增产效果研究较多<sup>[11-13]</sup>, 而对种皮特性特殊的花生种子大型机械化包衣设备工艺研究未见报道。胡良龙等<sup>[14-19]</sup>开展了包衣设备性能研究, 但未针对特定物料开展相关工艺参数研究。

针对上述问题, 本文利用包衣试验台, 采用二次正交旋转组合设计试验及响应曲面分析法, 开展花生种子机械化包衣工艺研究及参数优化, 探明大型甩盘滚筒式花生种子机械化包衣最佳参数, 以期提高包衣质量, 为破解大型花生种子机械化包衣难题提供参考。

## 1 包衣试验台工作原理

### 1.1 工作原理

甩盘式包衣试验台结构简图如图 1 所示, 包衣过程简述如下: 花生种子由振动給料装置 1 进入料斗 18, 种子下落到旋转的光滑料盘 17 上后下落形成料帘, 料盘 17 与雾化甩盘 6 在甩盘电机 4 带动下旋转, 药液通过计量泵 10 经药管 15 供向雾化甩盘 6, 在雾化甩盘高速旋转下使药液雾化, 种子和雾化药液在种药混配室 7 初次混配,

收稿日期: 2016-09-26 修订日期: 2017-03-08

基金项目: 国家花生产业技术体系产后加工机械岗位(CARS14); 中国农科院创新工程农产品分级贮藏团队。

作者简介: 王建楠, 男, 河南潢川人, 副研究员, 主要从事农产品加工技术装备研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。

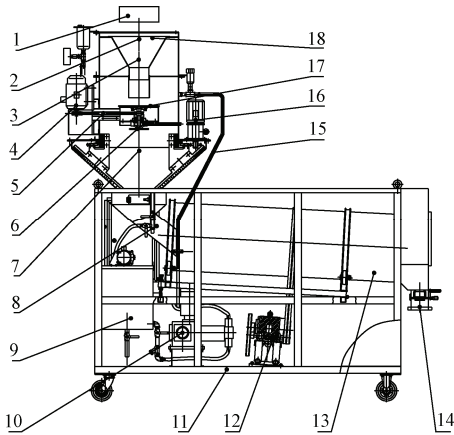
Email: wjnsunrise@126.com

\*通信作者: 谢焕雄, 男, 广西浦北人, 研究员, 国家花生产业技术体系产后加工机械岗位专家, 主要从事花生产后加工技术装备研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。Email: nfzhongzi@163.com

表面被不均匀的包覆上药液,完成初次包衣。初次包衣的花生种子外表药液包覆均匀性较差,随后种子经导料口 8 进入包衣滚筒 13,包衣滚筒 13 在滚筒电机 12 带动下旋转,种子在包衣滚筒 13 带动下相对运动摩擦,外表不均匀的药液通过相互摩擦而进一步均匀,包衣后种子经出料口 14 出料,完成整个包衣过程。

1.2 包衣质量影响因素

包衣合格率、破损率是种子包衣质量的主要衡量指标。由甩盘式包衣试验台工作原理、花生种子物理特性分析可知,花生种子包衣质量主要影响因素有:种药比(种子质量与药比,g/mL)、种衣剂稀释比(稀释用水与药质量之比)、包衣滚筒转速(r/min)。种药比、种衣剂稀释比、包衣滚筒转速参数选择不当,可造成花生种子包衣不均匀、种衣过于潮湿、种皮脱落、胚破损等问题,严重影响包衣质量。因此,需通过试验研究并优化包衣工艺参数,提高包衣质量。



1.振动给料装置 2.上料位传感器 3.下料位传感器 4.甩盘电机 5.同步带 6.雾化甩盘 7.种药混配室 8.导料口 9.药箱 10.计量泵 11.机架 12.滚筒电机 13.包衣滚筒 14.出料口 15.药管 16.清理电机 17.料盘 18.料斗  
1.Vibration feeding device 2.Upper limit sensor of material 3.Lower limit sensor of material 4.Dump motor 5.Synchronous belt 6.Atomizing disc 7.Chamber of medicine and seeds mixing 8.Seeds feeding 9.Medicine chest 10.Controlled volume pump 11.Frame of test bench 12.Drum motor 13.Coating drum 14.Outlet port 15.Drug piping 16.Motor of cleaning unit 17.Seeds plate 18.Hopper

图 1 甩盘式包衣试验台简图  
Fig.1 Sketch map of rotary table-roller coating test rig

2 材料与方法

2.1 试验仪器设备

利用自主研发包衣试验台开展试验。试验所需主要其他仪器设备主要有电子天平(测量精度 1 g)、1 台优利德 UT371/372 转速表、1 台施耐德 ATV12H075M2 变频器以及用于种衣剂稀释的烧杯、玻璃棒等。

2.2 试验材料

根腐病、蛴螬是花生生长期间常见病害及虫害,如得不到有效防控将严重影响花生生长及产量。适乐时、吡虫啉可有效防止花生根腐病及蛴螬,故本试验采用二者 1:1 混合液为包衣药剂防治花生病虫害<sup>[20-21]</sup>,二者混合液为鲜红色。供试花生种子品种为花育 33,含水率在

11.6%,花生种子形状为椭圆形,花生的长度、宽度及厚度尺寸分布主要集中在 16.22~19.16、8.06~10.36、7.16~8.36 mm,千粒质量为 812.1 g,流动性较好<sup>[22-23]</sup>。

2.3 试验响应参数

以花生种子包衣合格率  $J_i$ 、破损率  $P_j$  为花生包衣作业质量考核指标,按中华人民共和国行业标准种子包衣机试验方法(JB/T 7730-2011)开展花生种子包衣试验及工艺参数优化。

$$J_i = \frac{Z_d}{Z_x + Z_d} \times 100\% \tag{1}$$

$$P_j = \frac{G_{hp}}{G_{hz}} \times 100\% - P_u \tag{2}$$

式中  $J_i$  为包衣合格率,%;  $Z_d$  为种衣剂包覆种子面积大于或等于 80% 的种子粒数,粒;  $Z_x$  为种衣剂包覆种子面积小于 80% 的种子粒数,粒;  $P_u$  为原始物料破损率,%;  $P_j$  为包衣破损率,%,指破碎率、损伤率(其判定方法参照标准 NY/T 994-2006)总和,破损花生易受病菌侵扰,严重影响田间发芽率;  $G_{hp}$  为经包衣机样品中的破损种子质量,g;  $G_{hz}$  为经包衣机样品总质量,g。

为便于试验数据整理记录,试验前人工挑出试验样品中破损及不合格的种子,避免物料原始破损,即使式(1)中  $P_u$  为 0,每次试验重复 3 次,取平均值。

2.4 单因素和二次正交旋转组合试验设计

在 Design-Expert 中,按照中心组合响应曲面设计(Central composite design, CCD)试验方案,试验结果见表 2。对表 2 结果进行分析并分别建立包衣合格率  $J_i$ 、破损率  $P_j$  与各因素之间关系的数学模型,同时采用响应面分析法,考察两因素间交互作用效应。

为确定参数最佳组合,根据单因素试验结果,采用二次正交旋转组合设计试验方法,开展三因素三水平试验,共计 17 组<sup>[24-26]</sup>,试验因素及编码水平表如表 1 所示。

表 1 因素编码水平表			
Table 1 Coding table of level of experimental factors			
编码 Codes	因素水平 Level of factor		
	种药比 Ratio of seeds weight to seed coating volume/(g·mL <sup>-1</sup> )	种衣剂稀释比 Dilution ratio of seed coating	滚筒转速 Roller speed (r·min <sup>-1</sup> )
-1	20	3	10
0	40	5	20
1	60	7	30

3 试验结果与分析

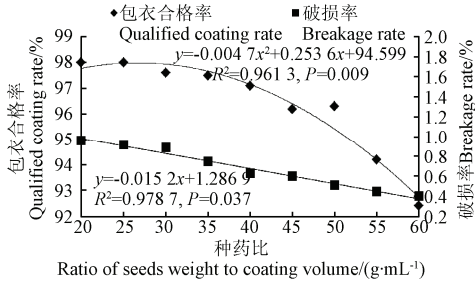
3.1 单因素试验结果

为确定各因素对包衣合格率及破损率影响的最佳区间、显著性,以及二次回归试验编码 0 水平值,首先开展种药比、种衣剂稀释比、包衣滚筒转速单因素试验。综合分析单因素试验结果,选取较优参数为二次回归试验编码 0 水平并进行试验设计。

3.1.1 种药比对包衣质量影响

根据预备试验结果,将种衣剂稀释比为 4 进行稀释,包衣滚筒转速设定在 18 r/min,在种药比 20、25、30、35、

40、45、50、55、60 g/mL 条件下，分别对花生种子进行包衣试验，不同种药比与包衣合格率  $J_i$  及破损率  $P_j$  关系如图 2 所示。结果表明：花生包衣合格率  $J_i$  与种药比呈二次非线性关系，且随种药比增大而逐渐减小，在种药比最小时合格率最大；破损率  $P_j$  随种药比增大变化幅度较小。综合考虑包衣合格率及破损率，选取种药比 40 为 0 水平值。

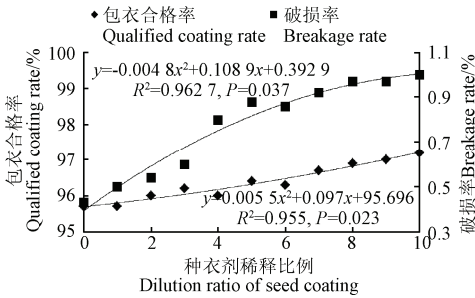


注：包衣滚筒转速为 18 r·min<sup>-1</sup>，种衣剂稀释比为 4。  
Note: Roller speed is 18 r·min<sup>-1</sup>, and dilution ratio of seed coating is 4.

图 2 种药比对包衣质量及破损率的影响  
Fig.2 Effects of ratio of seeds weight to coating volume on coating quality and breakage rate

3.1.2 种衣剂稀释比对包衣质量影响

将包衣滚筒转速设定在 18 r/min，种药比在 50 g/mL 的条件下，种衣剂稀释比为分别在 0（原液）、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 的条件下，对花生种子进行包衣试验，种衣剂稀释比与包衣合格率  $J_i$  及破损率  $P_j$  关系如图 3 所示。结果表明：包衣合格率  $J_i$  随种衣剂稀释比波动较小；破损率  $P_j$  与种衣剂稀释比呈现二次非线性关系，且随稀释比增大逐渐增大。综合考虑包衣合格率及破损率，选取种衣剂稀释比 5 为 0 水平值。

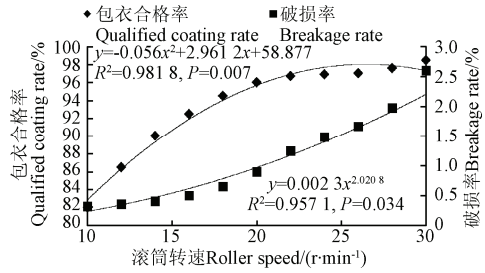


注：包衣滚筒转速为 18 r·min<sup>-1</sup>，种药比为 50 g·mL<sup>-1</sup>。  
Note: Roller speed is 18 r·min<sup>-1</sup>, and ratio of seeds weight to coating volume is 50 g·mL<sup>-1</sup>.

图 3 种衣剂稀释比对包衣质量及破损率的影响  
Fig.3 Effects of dilution ratio of seed coating on qualified coating rate and breakage rate

3.1.3 包衣滚筒转速对包衣质量影响

将包衣种药比设定在 50 g/mL，药液稀释比为 4 的条件下，包衣滚筒转速分别设定为 10、12、14、16、18、20、22、24、26、28、30 r/min 的条件下，对花生种子包衣试验，包衣滚筒转速与包衣合格率  $J_i$  及破损率  $P_j$  关系如图 4 所示。结果表明：包衣滚筒转速与包衣合格率间呈二次非线性关系，滚筒转速越快包衣合格率越高；包衣滚筒转速与破损率呈指数关系，随滚筒转速提高破损率大幅提高。综合考虑包衣合格率及破损率，选取滚筒转速 20 r/min 为 0 水平值。



注：种衣剂稀释比为 4，种药比为 50 g·mL<sup>-1</sup>。  
Note: Dilution ratio of seed coating is 4, and ratio of seeds weight to coating volume is 50 g·mL<sup>-1</sup>.

图 4 包衣滚筒转速对包衣质量及破损率的影响  
Fig.4 Effects of roller speed on coating quality and breakage rate

3.2 二次正交旋转组合试验结果分析

3.2.1 包衣合格率

1) 包衣合格率的回归结果分析

采用逐步回归法对表 2 结果进行包衣合格率的三元二次回归分级及方差分析，结果见表 3。

根据表 2 试验结果得到包衣合格率  $J_i$  的编码值简化回归数学模型为：

$$J_i = 96.66 - 2.22A - 0.012B + 0.71C + 0.22A \cdot B - 0.68A \cdot C - 0.05B \cdot C - 0.96A^2 - 1.23B^2 - 1.18C^2 \quad (3)$$

式中 A、B、C 分别为种药比、种衣剂稀释比和包衣滚筒转速对应的编码值。

由表 3 方差分析可知，模型的  $P$  值极显著、失拟项不显著、模型的调整决定系数  $R^2=0.9558$ ，说明所得回归数学模型与实际结果拟合精度高，可用此模型对包衣合格率进行分析和预测。

回归方程中，系数绝对值大小决定该因素对包衣合格率的影响大小，因此可知各因素对包衣合格率的影响大小次序依次为 A、C、B。

2) 包衣合格率与各参数响应曲面分析

根据表 2 试验数据，各因素对包衣合格率响应曲面如图 5 所示，据此可判定二者交互作用显著性<sup>[27-31]</sup>：种药比与种衣剂稀释比、种药比与包衣滚筒转速交互作用较强，这与表 3 方差分析结果一致。

表 2 试验设计方案及结果

Table 2 Results and design of tests					
试验编号 Test No.	种药比 Ratio of seeds to coating volume A	种衣剂稀释比 Dilution ratio of seed coating B	包衣滚筒转速 Roller speed C	包衣合格率 Qualified coating rate $J_i$ /%	破损率 Breakage rate $P_j$ /%
1	0	-1	-1	93.4	0.4
2	0	0	0	96.5	0.32
3	1	0	1	92.7	0.85
4	-1	0	1	98	1.16
5	-1	1	0	96.5	0.9
6	1	-1	0	92	0.59
7	0	-1	1	94.7	0.96
8	0	1	-1	93.9	0.75
9	-1	-1	0	97.4	0.87
10	0	0	0	96.9	0.37
11	-1	0	-1	95	0.45
12	1	1	0	92	0.96
13	0	0	0	96.4	0.36
14	0	0	0	96.5	0.4
15	1	0	-1	92.4	0.78
16	0	0	0	97	0.35
17	0	1	1	95	1.1

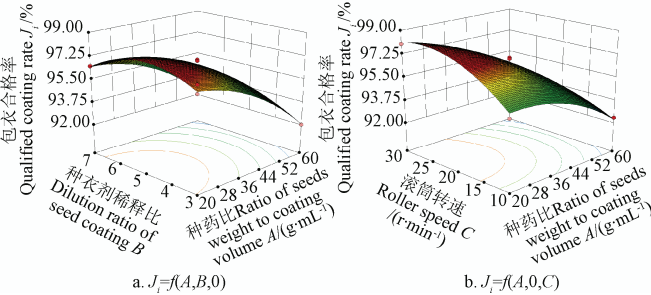


表 3 包衣合格率方差分析  
Table 3 Analysis of variance of qualified coating rate

来源 Origin	平方和 Square	自由度 Freedom	均方差 Quadratic mean deviation	F 值 F value	显著性 Significance
模型 Model	63.64	9	7.07	39.45	**
A	39.6	1	39.6	220.99	**
B	$1.25\times10^{-3}$	1	$1.25\times10^{-3}$	$7.0\times10^{-3}$	
C	4.06	1	4.06	22.66	**
AB	0.20	1	0.20	1.13	*
AC	1.82	1	1.82	10.17	*
BC	$1.0\times10^{-2}$	1	$1.0\times10^{-2}$	0.056	
A <sup>2</sup>	3.84	1	3.84	21.43	**
B <sup>2</sup>	6.37	1	6.37	35.54	**
C <sup>2</sup>	5.86	1	5.86	32.71	**
残差 Residual	1.25	7	0.18		
失拟项 Loss of fitting	0.96	3	0.32	4.39	
纯误差 Pure error	0.29	4	0.073		
R <sup>2</sup>	0.980 7				
调整 R <sup>2</sup> Adjustment of R <sup>2</sup>	0.955 8				

注：\* ( $P<0.05$ ) 为显著，\*\* ( $P<0.01$ ) 为极显著，下同。  
Note: \* ( $P<0.05$ ) means significant, \*\* ( $P<0.01$ ) means highly significant, the same below.

由图 5a 可知,种药比和种衣剂稀释比存在交互作用,当包衣滚筒转速处于 0 水平时,包衣合格率  $J_i$  随种药比增大而逐渐减小,这是因为种药比增大时,混配室内单位质量花生种子与雾化药液均匀接触的概率降低,从而导致包衣合格率降低;包衣合格率  $J_i$  随种衣剂稀释比虽有变化,但波动区间较小,这是因为包衣合格率判断方法是以花生外表面被种衣剂包覆的颜色的面积(大于 80%)评价,稀释比能决定花生包衣后颜色深浅及单位质量花生的包衣药量,但对包衣合格率影响不大。



注：响应面因素和水平见表 1，响应值见表 2，下同。  
Note: Factors and levels of response surface test are shown in Table 1. Response values are shown in Table 2, the same below.

图 5 各因素交互作用对包衣合格率的响应曲面  
Fig.5 Response surfaces of all factors' interaction on qualified coating rate

由图 5b 可知,种药比和包衣滚筒转速存在交互作用,在种衣剂稀释比处于 0 水平时,在种药比处于低水平条件下,包衣合格率  $J_i$  随包衣滚筒转速增大而大幅增加。当种药比处于高水平时,包衣合格率  $J_i$  随包衣滚筒转速波动不大。主要是因为种药比在低水平时,混配室单位质量花生获得包衣药液较多,初次混配即能较为均匀甚至达到合格标准,故而包衣滚筒转速只能使包衣进一步均匀,对合格率判定影响不大;种药比过大时,花生与

药液初次混配不能得到适量药液,此时无论包衣滚筒转速大小,均不能达到合格包覆的要求。由图 4b 亦可看出,种药比越小包衣滚筒转速越快,包衣合格率越高。由表 3 可知,种衣剂稀释比和包衣滚筒转速交互项不显著。

由图 5 响应曲面可以看出,当种药比及包衣滚筒转速变化时,包衣合格率变化区间较大,当种衣剂稀释比变化时,包衣合格率变化区间较小,这说明种药比、包衣滚筒转速对包衣合格率影响较大,是包衣合格率主要影响因素,种衣剂稀释比对包衣合格率影响较弱,这与回归方程分析结果、各单因素影响主次排序结果一致。

3.2.2 破损率

1) 破损率的回归结果分析

同理,根据表 2 结果进行三元二次回归分析及方差分析可得包衣破损率  $P_j$  的回归数学模型为

$$P_j = 0.36 - 0.03A + 0.11B + 0.22C + 0.085A \cdot B - 0.17A \cdot C - 0.052B \cdot C + 0.24A^2 + 0.23B^2 + 0.22C^2 \quad (4)$$

方差分析结果见表 4,分析结果可知,模型的  $P$  值极显著、失拟项不显著、模型的调整系数  $R^2=0.976\ 7$ ,说明所得回归数学模型与实际结果拟合精度高,可用此模型对包衣破损率进行分析和预测。

回归方程中,系数绝对值大小决定该因素对包衣合格率的影响大小,因此可知各因素对包衣合格率的影响大小次序依次为:  $C$ 、 $B$ 、 $A$ 。

2) 破损率与各参数响应曲面分析

根据试验数据,各因素对包衣破损率响应曲面如图 6 所示。据响应曲面图可判断种药比、种衣剂稀释比、包衣滚筒转速任意二者交互作用对破损率影响均较明显,其中种药比与包衣机滚筒转速交互作用影响最为明显,种衣剂稀释比与包衣滚筒转速交互作用相对较弱,这与表 4 方差分析结果一致。

表 4 破损率数学模型方差分析  
Table 4 Analysis of variance of breakage rate

来源 Origin	平方和 Square	自由度 Freedom	均方差 Quadratic mean deviation	F 值 F value	显著性 Significance
模型 Model	1.33	9	0.15	75.54	**
A	$5.0\times10^{-3}$	1	$5.0\times10^{-3}$	2.55	
B	0.099	1	0.099	50.50	**
C	0.36	1	0.36	182.08	**
AB	0.029	1	0.029	14.74	**
AC	0.10	1	0.10	52.23	**
BC	0.011	1	0.011	5.62	*
A <sup>2</sup>	0.24	1	0.24	122.4	**
B <sup>2</sup>	0.23	1	0.23	114.84	**
C <sup>2</sup>	0.19	1	0.19	95.83	**
残差 Residual	0.014	7	$1.96\times10^{-3}$		
失拟项 Loss of fitting	0.010	3	$3.44\times10^{-3}$	4.05	
纯误差 Pure error	$3.4\times10^{-3}$	4	$8.5\times10^{-3}$		
R <sup>2</sup>	0.989 8				
调整 R <sup>2</sup> Adjustment of R <sup>2</sup>	0.976 7				

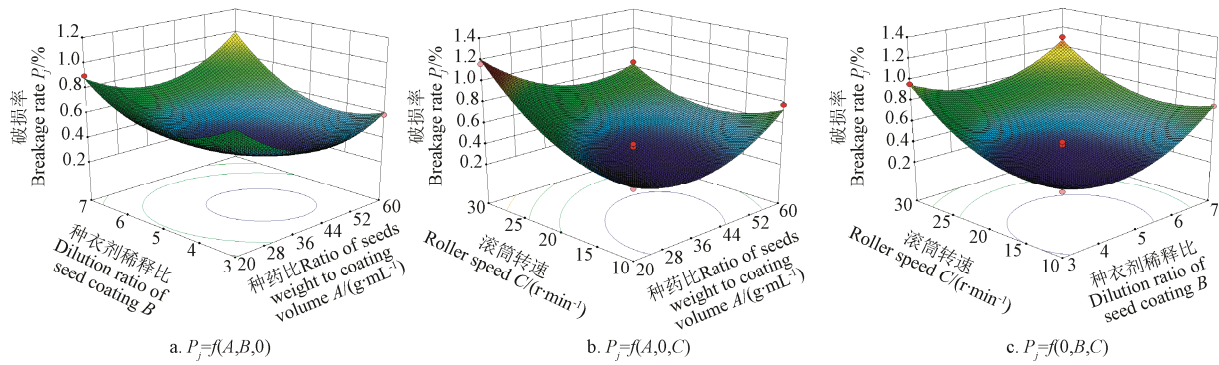


图 6 各因素交互作用对破损率的响应曲面

Fig.6 Response surfaces of all factors' interaction on breakage rate

由图 6a 可知,当包衣滚筒转速处于 0 水平时,破损率随种药比增大先减小后增大,随种衣剂稀释比增大逐渐增大。这与花生种子贮藏安全水分及种皮特性有关,通常花生安全贮藏水分在 8%~9%之间,该水分下花生种皮与胚结合力差,种子间相互摩擦既能使种皮脱落。而在包衣过程中,花生种子随着药液稀释中水分的补充,种皮与胚结合力增加,此时种皮较难脱落并能对胚起保护作用,破损率下降。当种药比增加到一定程度时,种衣能得到药剂中水分适当补充,使得获得适当水分补充的红衣能较安全贮藏水分种子的红衣更能对胚起到保护作用;种药比继续增大时,这种水分补充随之减少,花生种子相互摩擦时红衣较易脱落,严重时胚发生破损。种衣剂稀释比增大时,药剂里含水随之增加,种子在包衣时种皮极易潮湿而致含水率过大,种皮产生皱褶并脱落形成破损。

由图 6b 可知,当种衣剂稀释比处于 0 水平时,破损率随种药比、包衣滚筒转速增加而增大。这主要是因为种药比增加时,花生较小概率得到种衣剂包覆,极为干燥的花生种子红衣难于得到种衣剂及稀释后种衣剂中水分的浸染,致使红衣在花生种子下落及在与输送管道、滚筒的摩擦中产生脱落及破损、破损率增加;包衣滚筒转速增加时,种子种皮间的相互摩擦频率、种子种皮与滚筒壁的摩擦频率增加,种皮在摩擦过程中发生脱落甚至破损,破损率增加。图 6b 亦可看出包衣滚筒转速、种药比均处于低水平时破损率达到最低。

由 6c 可知,当种药比处于 0 水平,种衣剂稀释比处于低水平时,破损率随包衣滚筒转速增加大幅增加;在种衣剂稀释比处于高水平时,破损率随包衣滚筒转速增加变化区间不大。这主要是因为种衣剂稀释比在低水平时药液含水较少,花生种皮包衣过程中种皮较难吸收药液中水分,种皮保持干燥状态与胚结合力较小,此时包衣滚筒转速增加易使种皮脱落而破损。种衣剂稀释比在高水平时,药液中含水较多,种子包衣过程中种皮受潮后与胚结合较紧,此时种皮难以脱落,花生种子破损率随滚筒转速波动不大。图 6c 中当种衣剂稀释比及包衣滚筒转速均在低水平时破损率最低,均在高水平时破损率达到最大。

从图 6 中响应曲面可看出,当包衣滚筒转速变化时,破损率变化区间较大;当种衣剂稀释比变化时,破损率

变化区间相对较小;当种药比变化时,包衣破损率变化最小。这说明包衣滚筒转速是影响花生破损率的主要因素,种药比是破损率影响的次要因素,这与包衣合格率的影响大小次序分析一致。

#### 4 参数优化与验证

综合上述分析,为使包衣机作业质量达到最佳,需使包衣合格率最大、破损率达到最低。为此,建立包衣合格率  $J_i$ 、破损率  $P_j$  双目标函数的数学模型,并进行求解。目标函数如下

$$\begin{cases} \max J_i \\ \min P_j \\ 20 \leq X_1 \leq 60 \\ 3 \leq X_2 \leq 7 \\ 10 \leq X_3 \leq 30 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分别表示种药比(种子质量与药比值, g/mL)、种衣剂稀释比(稀释用水与药质量之比)、包衣滚筒转速(r/min)的实际值。包衣合格率  $J_i$  最大、破损率  $P_j$  最小时最优解为:  $X_1=31.73$  g/mL,  $X_2=4.76$ ,  $X_3=18.32$  r/min。此时,包衣合格率为 97.22%,破损率为 0.36%。2015 年 12 月 28 日,根据优化结果及试验的可操作性,将种药比、种衣剂稀释比、包衣滚筒转速分别控制在 31.7 g/mL、4.76、18.32 r/min 的条件下进行试验验证,此时花生包衣合格率为 97.35%、破损率为 0.37%。验证试验结果与表 2 中 2、10、13、14、16 号试验相比较,在种衣剂稀释比、包衣滚筒转速处于 0 水平时,由于优化结果种药比的变化,包衣合格率大幅提高、且破损率较低,说明优化结果具有较高可信度,本研究模型是可靠的。

为进一步检验上述优化试验结果的实际应用效果,将该试验参数应用在南京农牧机械厂 5BY-500-J 型包衣设备上,该生产设备为甩盘滚筒式结构,其工作原理与试验台相同,生产率约为 5 t/h(以小麦计),该设备固有参数主要适用于小麦、水稻、玉米、大豆等作物包衣作业。按照文中优化所得参数进行种衣剂稀释,并采用变频调节对滚筒调速,通过调节计量泵及喂料量调节种药比。试验前将设备在固定参数下空载运行 10 min 并试

喷药 1~2 次, 每次 1 min, 以查验设备在该参数下运行的稳定性。对待试物料进行严格处理, 人工剔除其中破损及霉变种子, 试验重复 3 次并取平均值, 可得包衣合格率可达 97.05%、破损率 0.40%, 较试验改进前包衣合格率 89.7%、破损率 4.32% 大幅改善。包衣后种子按照 GB/T3543.4-1995 农作物种子检验规程(发芽试验)进行实验室试验及田间种植试验, 其发芽率分别为 99.2%、96.1%, 可满足生产要求。

## 5 结 论

1) 开展单因素试验确定了包衣试验各参数的 0 水平值, 并采用二次正交旋转组合试验设计, 建立了花生包衣合格率、破损率与各因素之间关系的数学模型。分析得出种药比对包衣合格率影响最大, 包衣滚筒转速对包衣破损率影响最大。

2) 采用响应曲面分析法对试验结果进行了分析, 并采用多目标优化分析对各参数进行了优化, 通过优化得到种药比 31.73 g/mL、种衣剂稀释比 4.76、包衣滚筒转速 18.32 r/min 的条件下, 包衣合格率及破损率达到最佳, 分别为 97.35%, 破损率为 0.37%。

3) 验证试验结果与优化结果基本一致, 并将优化后参数应用于 5BY-500-J 型甩盘滚筒式包衣设备上上进行生产实证, 包衣合格率可达 97.05%、破损率 0.40%, 实证结果表明优化参数可满足花生种子工厂化生产要求。

### [参 考 文 献]

- [1] 谢焕雄, 王建楠, 胡志超, 等. 我国种用花生机械化脱壳技术路线[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 356—358.
- [2] 魏海, 谢焕雄, 胡志超, 等. 花生荚果气力输送设备参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 6—12.  
Wei Hai, Xie Huanxiong, Hu Zhichao, et al. Parameter optimization and test of pneumatic conveying equipment for peanut pods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 6—12. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李建东, 尚书旗, 李西振, 等. 我国花生脱壳机械研究应用现状及进展[J]. 花生学报, 2006, 35(4): 23—27.  
Li Jiandong, Shang Shuqi, Li Xizhen, et al. Application situation and developing analysis on peanut shelling machinery[J]. Journal of Peanut Science, 2006, 35(4): 23—27. (in Chinese with English abstract)
- [4] 胡志超. 半喂入花生联合收获机关键技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.  
Hu Zhichao. Study on Key Technologies of Half-feed Peanut Combine Harvester[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高连兴, 张文, 杜鑫, 等. 花生脱壳机脱出物的漂浮系数试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 289—292.  
Gao Lianxing, Zhang Wen, Du Xin, et al. Experiment on aerodynamic characteristics of threshed mixtures of peanut shelling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 289—292. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘明国. 花生脱壳与损伤机理及立锥式脱壳机研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.  
Liu Mingguo. Study on Peanut Shelling Damage Mechanism and Development of the Vertical Cone Type Shelling Machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨玲, 杨明金, 李庆东, 等. 包衣稻种物理特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 7—11.  
Yang Ling, Yang Mingjin, Li Qingdong, et al. Experimental study on physical properties of coated rice seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(9): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [8] 管磊, 郭贝贝, 王晓坤, 等. 苯醚甲环唑和氟啶胺的两种制剂包衣种子对花生土传真菌病害的防治效果[J]. 中国农业科学, 2015, 48(11): 2176—2186.  
Guan Lei, Guo Beibei, Wang Xiaokun, et al. Control efficacies of two preparations of difenoconazole and fluazinam by seed-coating against peanut soil-borne fungal diseases[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(11): 2176—2186. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡良龙, 胡志超, 高刚华, 等. 基于 PLC 的种子包衣机自动控制系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 140—144.  
Hu Lianglong, Hu Zhichao, Gao Ganghua, et al. Design and realization of automatic controlling system for seed coater based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 140—144. (in Chinese with English abstract)
- [10] 易启伟. 大处理量花生脱红衣机脱皮装置的设计[J]. 包装与食品机械, 2010(4): 31—33.
- [11] Guzel E, Akcali I D, Mutlu H, et al. Research on the fatigue behavior for peanut shelling[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67: 373—378.
- [12] 庄伟建, 官德义, 蔡来龙, 等. 促进花生种子在低温胁迫下发芽的种衣剂的筛选研究[J]. 花生学报, 2003, 32 (增刊): 346—351.
- [13] 游春平, 傅莹, 韩静君, 等. 我国花生病害的种类及其防治措施[J]. 江西农业学报, 2010, 22(1): 97—101.  
You Chunping, Fu Ying, Han Jingjun, et al. Occurrence and

- management of main peanut diseases in China[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2010, 22(1): 97—101. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡良龙, 胡志超, 计福来, 等. 新型包衣机种子供给计量误差校正技术研究[实现][J]. *江苏农业科学*, 2010(4): 414—416.
- [15] 胡志超, 计福来, 高刚华, 等. 5B-5 型智能化种子包衣机[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(9): 205—207.
- [16] 魏海, 赵武云, 胡志超, 等. 小型花生种子包衣设备包衣性能影响因素研究[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(3): 193—196.
- Wei Hai, Zhao Wuyun, Hu Zhichao, et al. Studies of factors affecting the peanut-coating performance of a small seed-coating equipment[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(3): 193—196 (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩豹, 申建英, 范伟. 种子包衣机的研制[J]. *农机化研究*, 2003, 6(2): 151—152.
- Han Bao, Shen Jianying, Fan Wei. The development of seed coating machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2003, 6(2): 151—152. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵德春, 赵巍. 5BJZ-3.0 型新型种子包衣机的设计[J]. *农机化研究*, 2006(3): 97—98.
- [19] 胡良龙. 种子包衣机 PLC 控制系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [20] 鞠倩, 李晓, 苏卫华, 等. 不同施药方法对花生田蛴螬的防治效果评价[J]. *花生学报*, 2016, 45(1): 43—47.
- Ju Qian, Li Xiao, Su Weihua, et al. The control effect of different application methods on peanut white grub[J]. *Journal of Peanut Science*, 2016, 45(1): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [21] 管磊. 防治花生土传真菌病害种子处理药剂的筛选[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- Guan Lei. Screening for Controlling Peanut Soilborne Fungal Diseases on Peanut by Seed-coating[D]. Taian: Shandong Agriculture University, 2015.
- [22] 禹山林. 中国花生品种及其系谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
- [23] 吕小莲, 胡志超, 于昭洋, 等. 花生籽粒几何尺寸及物理特性的研究[J]. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2013, 34(3): 61—65.
- Lü Xiaolian, Hu Zhichao, Yu Zhaoyang, et al. Experimental research on the geometric dimensions and physical properties of peanut seeds[J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2013, 34(3): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [25] 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.
- [26] 潘丽军, 陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [27] 胡永光, 杨叶成, 肖宏儒, 等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 77—82.
- Hu Yongguang, Yang Yecheng, Xiao Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 77—82. (in Chinese with English abstract)
- [28] 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志洋, 等. 超级稻摘穗收获机沉降箱性能分析与运行参数优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 46(1): 100—105.
- Jiang Enchen, Sun Zhanfeng, Pan Zhiyang, et al. Performance analysis and operational parameters optimization of deposition chamber to clean super rice in stripper combine harvester[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 100—105. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王军, 王敏, 于智峰. 基于响应曲面法的苦荞麸皮总黄酮提取工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(7): 205—208.
- [30] 王永维, 唐海燕, 王俊, 等. 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 91—99.
- Wang Yongwei, Tang Yanhai, Wang Jun, et al. Parameter optimization for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter in high-speed condition[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王俊, 申立中, 杨永忠, 等. 基于响应曲面法的非道路用高压共轨柴油机设计点优化标定[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 31—39.
- Wang Jun, Shen Lizhong, Yang Yongzhong, et al. Optimizing calibration of design points for non-road high pressure common rail diesel engine base on response surface methodology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(3): 31—39. (in Chinese with English abstract)

## Parameter optimization on mechanical coating processing of rotary table-roller coating machine for peanut seeds

Wang Jiannan, Xie Huanxiong<sup>\*</sup>, Hu Zhichao, Hu Lianglong, Peng Baoliang, Liu Minji

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to improve both poor coating qualified rate and high breakage rate of peanut seeds caused by unreasonable working parameters of rotary table-roller coating equipment, the single factor and central composite experiments were conducted. The effects of the main working parameters, including ratio of seeds weight to coating volume, dilution ratio of seed coating, speed of roller, on coating qualified rate and breakage rate of peanuts coating were analyzed by means of the rotary table-roller coating test rig. The study object was “Huayu 33”, which was 16.22-19.16 mm in length, 8.06-10.36 mm in width, and 7.16-8.36 mm in thickness and whose moisture was 11.6%, and thousand kernel weight was 812.1 g. The single factor experiments were firstly conducted, and the results showed the influence laws of the 3 main working parameters on coating qualified rate and breakage rate, which were necessary to determine zero level of each parameter in the quadratic regression revolution design. And then the composite experiment methods of quadratic orthogonal rotation were adopted, the data were analyzed based on the Design-Expert software, the mathematical regression models of peanuts coating rate and breakage rate were built, and their corresponding variance analysis were conducted too. A regression equation of the relationship between variation coefficient of the 3 main working parameters was obtained. Through the analysis of variance, the results showed that the most influential factor for the coating qualified rate was the ratio of seeds weight to coating volume, and the minimum impact factor was the dilution ratio of seed coating; regarding to the breakage rate, the most influential factor was the speed of roller, and the minimum impact factor was the ratio of seeds weight to coating volume. The response surface method was utilized to analyze the effects of factors’ interaction on the coating qualified rate and breakage rate, and the multi-objective optimizations were conducted for the regression models. The optimal combination working parameters of the drum coating test rig were the roller speed of 18.32 r/min, ratio of seeds weight to coating volume of 31.73 g/mL, and dilution ratio of seed coating of 4.76. All of those were obtained by the optimization solution of all factors with the quadratic regression model equation of performance evaluation indices in the range of experimental parameters constraints. Under the condition of the optimal combination working parameters, the coating qualified rate and the breakage rate were 97.35% and 0.37%, respectively. This coating quality met the need of peanut seeds processing industry. The results of verification test were consistent with those of optimization solution. Production verification test was conducted with the 5BY-500-J coating machine (the productivity was 5 t/h when it was used for corn seeds coating operation) in Nanjing Agricultural Machinery Factory. The coating machine worked the same as the rotary table-roller coating test rig, but the working parameters were not reasonable for peanut coating. In the experiment, the working parameters of 5BY-500-J coating machine were adjusted according the optimization results by variable frequency regulation of the drum and the control of feeding parts of seeds coating. With the optimal parameters applied by the coating machine, the coating quality was improved greatly, and the coating qualified rate and breakage rate were 97.05% and 0.40%, respectively, which were very close to those obtained from the previous model results. The results of verification showed that the coating machine could be used for peanut seeds processing after working parameters optimization. The study provides the scientific basis for the working parameter optimization of rotary table-roller coating machine for peanut seeds.

**Keywords:** mechanization; optimization; crops; rotary table-roller; peanut seeds; mechanical coating; response surface methodology