

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.011

柔性差速带式单株大豆脱粒装置设计与试验

陈海涛 滕宇娇 王业成 史乃煜 王星
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对育种单株大豆脱粒过程中的大豆籽粒混杂和机械损伤等问题,设计了一种柔性差速带式单株大豆脱粒机的脱粒装置。为寻求脱粒装置的结构与工作参数对其性能的影响规律和最优参数组合,采用4因素5水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以脱粒间隙、上下带速度差、下带速度和脱粒行程为影响因素,以大豆籽粒的未脱净率、夹带损失率、破碎率和平均生产率评价指标,对其进行优化试验研究。结果表明:对于籽粒含水率16%~18%的收获期大豆种子,当脱粒间隙7.55~13.00 mm、上下带速度差0.59~0.70 m/s、下带速度0.84 m/s、脱粒行程660 mm时,脱粒装置的未脱净率低于1.2%、夹带损失率低于0.9%、破碎率低于0.8%、平均生产率高于35 kg/h。

关键词: 大豆; 单株; 脱粒装置; 柔性差速带式
中图分类号: S225.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0096-09

Design and Experiment on Single-plant Soybean Threshing Device with Differential Speed Flexible Belts

CHEN Haitao TENG Yujiao WANG Yecheng SHI Naiyu WANG Xing
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problems of soybean grain mixing and mechanical damage caused by single threshing process of soybean. A threshing device was designed for single-plant thresher with differential speed flexible belts. Single threshing was an important part of breeding experiments because it can avoid mixed seeds when there was smaller breeding area, small sample size and precious varieties. Meanwhile, most of the existing threshing devices were roller-type and made by rigid materials, which could cause mechanical damage to the soybean grains easily. However, the new soybean threshing device solved the problem of mechanical damage which would affect the germination and emergence of soybean seeds. And in order to find the optimal combination of the structure and working parameters of the differential flexible belt type soybean thresher, the method of four-factor with five-level quadratic regression orthogonal rotation center combination was employed. The factor of cylinder clearance, top and low section velocity difference, low section velocity, threshing trip were discussed. And the loss of unthreshed grain, loss of entrap grain, cracked grains and average productivity were selected as evaluating indexes. The results showed that the rank of the effect of four factors on loss of unthreshed grain from high to low was as follows: top and low section velocity difference, the cylinder clearance, low section velocity and threshing trip; on loss of entrap grain: low section velocity, the cylinder clearance, threshing trip, top and low section velocity difference; on cracked grains: the cylinder clearance, top and low section velocity difference, threshing trip and low section velocity; on average productivity: threshing trip, low section velocity difference, the cylinder clearance, top and low section velocity difference. In the case of soybean grain with 16% ~ 18% moisture content, the optimum combination region of the cylinder clearance was 7.55 ~ 13.00 mm, the top and low section velocity difference was 0.59 ~ 0.70 m/s, the low section velocity difference was 0.84 m/s, the threshing trip was 660 mm; under this condition, loss of unthreshed grain was less than 1.2%, loss of entrap grain was less than 0.9%, cracked grains were less than 0.8%, average productivity was more than 35 kg/h. The results laid a theoretical foundation for the development of single-plant thresher with differential speed flexible belts.

Key words: soybean; single plant; threshing device; differential speed flexible belt

0 引言

单株大豆种子脱粒是大豆育种的重要环节,不同于商品大豆脱粒,其育种小区面积小,种植试验大豆品种珍贵繁多、样本量小,脱粒时既要求提高脱粒效率,又要保证各品种之间无混杂。目前科研脱粒工作中,单株脱粒以人工脱粒和普通脱粒机脱粒方式为主,人工脱粒收获周期长、浪费劳动力;普通脱粒机籽粒的破碎率高、机器内部无法快速清理、易造成不同品种籽粒混杂^[1-2]。机械脱粒是提高工作效率的重要手段与必然趋势,可减轻劳动强度、降低人工成本、提高工作效率^[3-4],但也是造成育种大豆机械损伤的重要因素,影响种子的发芽、出苗,对大豆的育种工作带来潜在危害,对精量播种技术影响更加显著^[5-6]。

随着我国农业产业体系的发展,用于科研工作的专用大豆脱粒设备已有相关研究。侯守印等^[7-8]研究的立式轴流大豆种子专用脱粒机,通过开闭透明的组合外罩,对机体内的残留物进行快速清理,但钉齿对大豆籽粒的打击,易对籽粒造成破碎和机械损伤;高连兴等^[9]设计喂入辊轴流滚筒组合式大豆种子脱粒机,滚筒上排布钉齿、弓齿和板齿3种脱粒元件,机体内部复杂,不能快速清理,易造成种子混杂;范传辉等^[10]设计的新型小区脱粒机,将板式滚筒的横截面改为三角样式的支撑,克服易堵塞、脱不净的脱粒问题,但三角区域空白大,刚性脱粒材料使籽粒破碎率升高,造成籽粒的机械损伤;郝玉伟等^[11]设计室内大豆单株脱粒机,采用复式滚筒结构,先由圆纹杆进行捶打碾压,后由弓齿结构进行梳刷脱粒,脱粒过程长,籽粒破碎率高,且不能对机体内部及时清理,易混种。目前的脱粒装置多数为滚筒式,通过纹杆、钉齿等脱粒元件的打击、梳刷、碾压等机械作用进行脱粒,具有脱粒可靠、脱净率高等特点,但由于滚筒与脱粒元件为刚性材料,对大豆种子产生籽粒破碎和机械损伤,影响育种工作^[12-13]。综上所述,目前研制的专用脱粒机普遍存在易混杂、籽粒破碎率高、机械损伤等问题。

针对以上问题,本文研究一种柔性差速带式单株大豆脱粒装置,改变传统的脱粒滚筒与凹板配合的脱粒方式,通过同向差速的脱粒带,利用搓擦脱粒原理脱粒,避免大豆育种单株脱粒过程中籽粒混杂、破碎率高和机械损伤等问题,探寻该单株脱粒装置的结构与作业参数的优化组合,为柔性差速带式单株大豆脱粒整机的开发提供理论依据。

1 试验装置结构与工作原理

1.1 试验装置结构

柔性差速带式单株大豆脱粒试验装置如图1所示。主要由机架、传动系统、脱粒装置和脱粒带张紧机构组成。传动系统由驱动电动机和传动带组成。脱粒装置由主动滚筒、从动滚筒、上脱粒带、下脱粒带等组成。上、下脱粒带均为通用橡胶材料,脱粒带张紧机构由脱粒带托辊、侧板和弹簧组成,弹簧两端拉钩与侧板和托辊连接,提供脱粒带的张紧力,张紧力的大小改变差速脱粒带对大豆植株作用的剪切力^[14]。

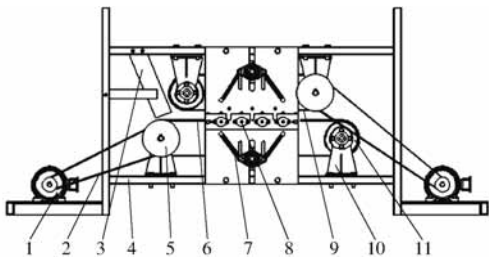


图1 柔性差速带式单株大豆脱粒试验装置结构图

Fig.1 Structure diagram of single-plant soybean threshing device with differential speed flexible belts

1. 调速电动机 2. 传动带 3. 喂入口 4. 机架 5. 主动滚筒
6. 下脱粒带 7. 脱粒带张紧机构 8. 脱粒带托辊 9. 上脱粒带
10. 滚筒支架 11. 从动滚筒

1.2 工作原理

调速电动机的动力输出轴经传动带与上下脱粒滚筒配合传递动力。上、下脱粒带分别由上下的主动滚筒提供动力,上、下脱粒带的摩擦力带动从动滚筒转动。

单株大豆由装置上方的喂入口进入,首先随脱粒带运动,之后同时受上、下脱粒带的摩擦力作用而进入脱粒区间。由于上下脱粒带同向差速运动,单株大豆受到揉搓和挤压作用,对大豆豆荚进行脱粒。在脱粒区间内,上下脱粒带未对大豆植株的主茎秆造成破坏,完成脱粒后,主茎秆在下脱粒带的运移作用下,排出脱粒区间,整个脱粒过程的杂余只有颖壳,易于分离除杂^[15]。在脱粒区间内,下脱粒带周期性运动,单株的大豆主茎秆、籽粒、颖壳一次性排出脱粒区间,避免了与其他种类大豆籽粒的混杂。

2 脱粒装置关键参数设计

2.1 脱粒间隙分析

脱粒间隙指上、下脱粒带间的垂直距离,是决定脱粒质量关键结构参数之一。脱粒间隙过大导致柔性脱粒带无法与豆荚接触,造成未脱净率增加,过小则会增大其对大豆籽粒挤压力,易导致籽粒破损。

以大豆豆荚为例,对一粒荚的脱粒过程进行受力分析,如图 2 所示。

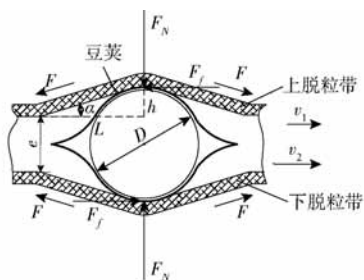


图 2 脱粒区间豆荚受力分析

Fig. 2 Diagram of soybean pod stress analysis in threshing zone

由于大豆豆荚的支撑,上下脱粒带会产生一定的变形,根据胡克定律计算脱粒带产生的附加张力

$$F = EA \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

式中 F ——脱粒带附加张力, N

E ——脱粒带弹性模量, MPa

A ——脱粒带横截面积, mm^2

ΔL ——脱粒带附加伸长量, mm

L ——脱粒带最高点与未发生形变处水平距离, mm

其中影响脱粒带附加张力的相关参数为

$$\begin{cases} \Delta L = \frac{h}{\sin \alpha} - \frac{h}{\tan \alpha} \\ L = \frac{h}{\tan \alpha} \\ h = \frac{D - e}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 h ——脱粒带最高点与未发生形变处垂直距离, mm

α ——脱粒带变形与水平方向夹角, ($^\circ$)

D ——豆荚直径, mm

e ——脱粒间隙, mm

忽略豆荚重力,柔性脱粒带对豆荚正压力与摩擦力为

$$\begin{cases} F_N = 2F \sin \alpha \\ F_f \leq \mu F_N \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_N ——脱粒带对豆荚正压力, N

F_f ——脱粒带对豆荚摩擦力, N

μ ——脱粒带与豆荚间摩擦因数

为保证脱粒质量,脱粒带与豆荚作用力满足条件

$$\begin{cases} F_N \leq F_{N_{\min}} \\ F_f \geq F_{\tau_{\max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $F_{N_{\min}}$ ——大豆籽粒破碎压力, N

$F_{\tau_{\max}}$ ——豆荚破坏剪切力, N

由式(1)~(4)可得到脱粒间隙应满足条件

$$D - \frac{L \sin \alpha (F_{\tau_{\max}} + 2\mu EA)}{\mu EA} \geq e \geq D - \frac{L \sin \alpha (F_{N_{\min}} + 2EA)}{EA} \quad (5)$$

2.2 上、下脱粒带速度差分析

脱粒装置采用脱粒带同向差速脱粒方式,下脱粒带速度高于上脱粒带。大豆豆荚会在脱粒区间内做旋转运动,如图 3 所示。

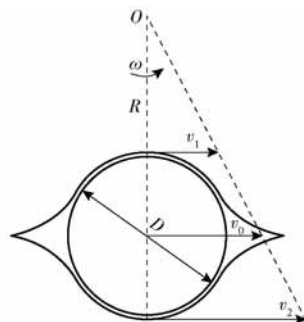


图 3 豆荚速度分析

Fig. 3 Diagram of soybean pod velocity analysis

大豆豆荚绕着虚拟中心 O 做旋转运动,角速度为

$$\omega = \frac{v_1}{R} = \frac{v_2}{R + D} \quad (6)$$

式中 v_1 ——上脱粒带速度, m/s

v_2 ——下脱粒带速度, m/s

ω ——旋转角速度, rad/s

R ——虚拟中心到上脱粒带距离, mm

脱粒行程是指大豆植株进入脱粒区间后有效工作长度

$$S = v_0 t \quad (7)$$

其中

$$v_0 = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

式中 S ——脱粒行程, mm

v_0 ——平均速度, m/s

t ——脱粒时间, s

豆荚旋转角反映脱粒效果,当旋转角较大时,脱粒效果较好。豆荚在脱粒区间内的旋转满足

$$\begin{cases} \varphi = \omega t \\ \Delta v = v_2 - v_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 φ ——旋转角, rad

Δv ——上下脱粒带速度差, m/s

由式(6)~(8)可得,上、下脱粒带速度差与旋转角之间关系为

$$\varphi = \frac{2S}{D} \frac{1}{\frac{2v_2}{\Delta v} - 1} \quad (9)$$

当 Δv 大时, φ 越大,脱粒效果越好;当 Δv 小时, φ 越小,脱粒效果越差。

3 试验材料与方法

3.1 材料与设备

试验选用的大豆品种为向阳农场 2017 年栽培的黑农 48 号,其生长特性与基本参数如表 1 所示。

表 1 物料基本参数
Tab.1 Material basic parameters

参数	数值
茎秆平均长度/cm	80.9
平均结荚数/个	37.6
百粒质量/g	22
大豆植株含水率/%	19~21
籽粒含水率/%	16~18

试验使用主要仪器设备为:三相异步电动机(Y90L-4 型)、变频器(E1000-0015T3 型)、YB502 型电子秤(精度 0.01 g,上海海康电子仪器厂)、测速仪(UT371,精度 ±0.04%)、DGG-9070AD 型电热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司)、秒表和数码摄像机等。参数优化试验的试验装置与脱粒作业效果如图 4 所示。



图 4 参数试验
Fig.4 Parameter experiment

3.2 试验方法

试验于 2017 年 11 月在东北农业大学农业机械实验中心实施。采用 4 因素 5 水平二次回归正交旋转中心组合试验方法。以脱粒间隙(x_1)、上下带速度差(x_2)、下带速度(x_3)、脱粒行程(x_4)为影响因素,以未脱净率(y_1)、夹带损失率(y_2)、破碎率(y_3)、平均生产率(y_4)为评价指标,共实施 36 组试验^[16-20]。数据处理与分析采用 Design-Expert 6.0.10 软件进行,各试验按照标准 GB/T 5982—2005《脱粒机试验方法》实施,分别以 3 次重复的均值为测试结果^[21-23]。各因素水平由预试验确定,因素水平编码表与试验方案如表 2 与表 3 所示。表中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为因素编码值。

试验实施过程中,上下带速度差与下带速度由变频器调节,脱粒间隙由丝杠调节,脱粒行程通过调节脱粒带主动滚筒与从动滚筒之间的距离来改变。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

试验结果如表 3 所示。

表 2 因素编码
Tab.2 Coding of factors

编码	因素			
	脱粒间隙	上下带速度差	下带速度	脱粒行程
	e/mm	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S/mm
2	16	0.70	1.04	900
1	12	0.63	0.94	800
0	8	0.56	0.84	700
-1	4	0.49	0.74	600
-2	0	0.42	0.64	500

表 3 试验设计方案与结果
Tab.3 Experimental design layout and results

编号	脱粒间隙 x_1	上下带速度差 x_2	下带速度 x_3	脱粒行程 x_4	未脱净率 $y_1/\%$	夹带损失率 $y_2/\%$	破碎率 $y_3/\%$	平均生产率 $y_4/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$
1	-1	-1	-1	-1	2.24	0.58	1.18	35.94
2	1	-1	-1	-1	2.81	0.62	0.38	36.22
3	-1	1	-1	-1	0.70	0.52	1.59	37.09
4	1	1	-1	-1	0.58	0.55	0.46	37.88
5	-1	-1	1	-1	2.56	1.35	1.14	34.25
6	1	-1	1	-1	2.77	1.85	0.35	35.62
7	-1	1	1	-1	0.95	1.30	1.38	37.20
8	1	1	1	-1	0.80	1.71	0.40	38.12
9	-1	-1	-1	1	2.28	0.57	1.30	24.52
10	1	-1	-1	1	2.69	0.54	0.44	25.88
11	-1	1	-1	1	0.64	0.55	1.66	26.56
12	1	1	-1	1	0.55	0.60	0.52	27.68
13	-1	-1	1	1	2.35	1.28	1.22	25.06
14	1	-1	1	1	2.84	1.52	0.42	28.13
15	-1	1	1	1	0.76	1.10	1.55	29.10
16	1	1	1	1	0.65	1.38	0.50	30.24
17	-2	0	0	0	1.00	0.70	1.77	31.48
18	2	0	0	0	2.25	1.20	0.32	33.02
19	0	-2	0	0	3.32	0.98	0.60	31.26
20	0	2	0	0	0.30	0.69	1.05	33.65
21	0	0	-2	0	0.69	0.47	0.95	31.55
22	0	0	2	0	1.74	2.50	0.62	33.69
23	0	0	0	-2	1.80	0.98	0.61	39.88
24	0	0	0	2	0.70	0.95	1.10	22.12
25	0	0	0	0	1.40	0.70	0.50	32.79
26	0	0	0	0	0.90	1.00	0.70	32.95
27	0	0	0	0	1.35	0.86	0.65	32.29
28	0	0	0	0	1.50	0.82	0.68	33.12
29	0	0	0	0	1.28	0.87	0.72	32.58
30	0	0	0	0	1.10	0.84	0.61	33.05
31	0	0	0	0	1.45	0.79	0.69	32.57
32	0	0	0	0	1.12	0.90	0.70	32.46
33	0	0	0	0	1.46	0.86	0.65	32.36
34	0	0	0	0	1.47	0.78	0.74	33.28
35	0	0	0	0	1.00	0.95	0.61	31.98
36	0	0	0	0	1.06	0.90	0.65	32.18

4.2 回归方程

对试验结果进行分析,未脱净率 y_1 、夹带损失率 y_2 、破碎率 y_3 、平均生产率 y_4 二次项模型(2FI)有意义($P < 0.0001$),在置信度 $\alpha = 0.05$ 下,进行 F

检验,将不显著项剔除后得到简化回归方程

$$y_1 = 1.27 + 0.12x_1 - 0.87x_2 + 0.14x_3 - 0.12x_4 - 0.13x_1x_2 + 0.16x_1^2 + 0.16x_2^2 \quad (10)$$

$$y_2 = 0.87 + 0.1x_1 - 0.049x_2 + 0.46x_3 - 0.042x_4 + 0.084x_1x_3 - 0.057x_3x_4 + 0.15x_3^2 \quad (11)$$

$$y_3 = 0.66 - 0.44x_1 + 0.11x_2 - 0.051x_3 + 0.071x_4 - 0.066x_1x_2 + 0.1x_1^2 + 0.046x_2^2 + 0.036x_3^2 + 0.054x_4^2 \quad (12)$$

$$y_4 = 32.46 + 0.55x_1 + 0.96x_2 + 0.43x_3 - 4.61x_4 + 0.31x_2x_3 + 0.61x_3x_4 - 0.45x_4^2 \quad (13)$$

4.3 回归模型方差分析

对式(10)~(13)进行方差分析,结果如表4所示。由表可知,模型拟合效果好,回归方程 $P > 0.0001$,说明回归方程极显著。

表4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
y_1	回归	21.33	7	3.05	62.6
	剩余	1.36	28	0.049	
	拟合	0.87	17	0.051	1.16
	误差	0.49	11	0.044	0.4114
	总和	22.69	35		
y_2	回归	6.36	8	0.79	102.93
	剩余	0.21	27	0.0078	
	拟合	0.014	16	0.0087	1.37
	误差	0.07	11	0.0063	0.3028
	总和	6.57	35		
y_3	回归	5.6	9	0.62	93.36
	剩余	0.17	26	0.0067	
	拟合	0.13	15	0.0084	2.07
	误差	0.045	11	0.0041	0.1138
	总和	5.78	35		
y_4	回归	557.97	7	79.71	283.01
	剩余	7.89	28	0.28	
	拟合	6.07	17	0.36	2.16
	误差	1.82	11	0.17	0.0977
	总和	565.86	35		

4.4 各试验因素对试验指标影响分析

参照关于多元二次回归中各因素重要性的计算方法,经分析计算,各因素对各项性能指标的贡献率如表5所示^[24-25]。

表5 各因素对性能指标的贡献率
Tab.5 Contribution ratio of each factor to performance index

因素	性能参数			
	未脱净率	夹带损失率	破碎率	平均生产率
脱粒间隙	2.13	1.69	2.42	2.16
上下带速度差	2.31	1.03	2.30	1.45
下带速度	0.86	3.04	1.69	2.11
脱粒行程	0.81	1.63	1.84	2.76

结果表明,各因素对未脱净率 y_1 的贡献率由大到小依次为:上下带速度差、脱粒间隙、下带速度、脱粒行程;各因素对夹带损失率 y_2 的贡献率由大到小依次为:下带速度、脱粒间隙、脱粒行程、上下带速度差;各因素对破碎率 y_3 的贡献率由大到小依次为:脱粒间隙、上下带速度差、脱粒行程、下带速度;各因素对平均生产率 y_4 的贡献率由大到小依次为:脱粒行程、脱粒间隙、下带速度、上下带速度差。

4.5 各因素对性能指标的影响分析

4.5.1 各因素对未脱净率的影响

各试验因素与未脱净率的关系曲面如图5所示。由图5a可知,随着上下带速度差的增加,未脱净率呈逐渐下降的趋势,这是由于上下脱粒带同向差速运动,差速大时,大豆豆荚所受剪切力和剪切力矩增大,豆荚更容易破开,未脱净率降低。当上下带速度差固定在某一数值时,随着脱粒间隙的增加,未脱净率呈逐渐上升的趋势,这是因为,当脱粒间隙较小时,豆荚所受正压力加大,其与上下脱粒带接触面积大,在摩擦因数一定时,脱离元件提供的剪切力较大,脱离能力增强,反之,脱粒间隙大时,脱粒能力减弱,未脱净率增大。

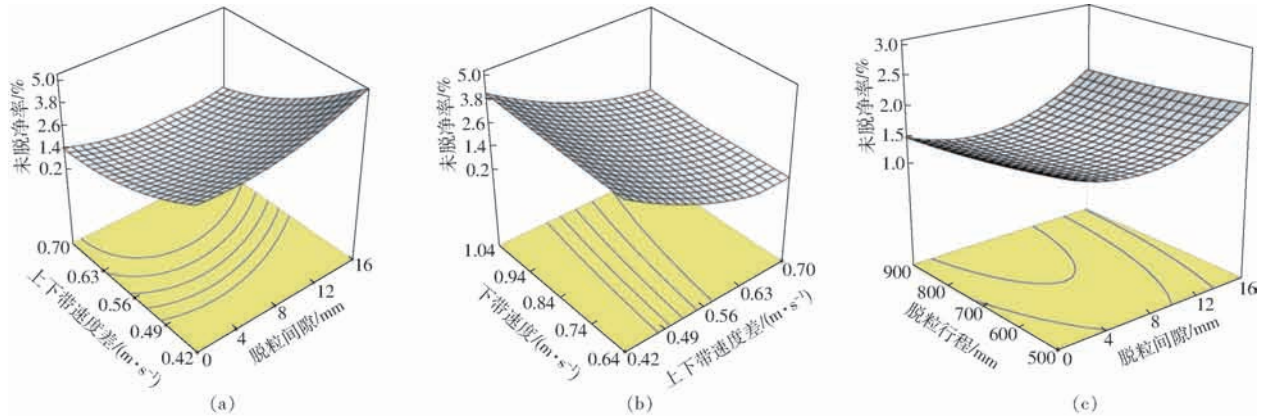


图5 各因素对未脱净率的影响

Fig.5 Response surfaces for effects of factors on loss of unthreshed grain

由图 5b 可知,随着下带速度增大,未脱净率呈逐渐上升的趋势,这是由于上下带速度差一定时,剪切力与剪切力矩一定,下脱粒带起到脱粒和运输的作用,脱粒带速度增大,豆荚在脱粒区间滞留时间短,部分豆荚未破开脱粒,未脱净率高。

由图 5c 可知,随着脱粒行程的增加,未脱净率呈缓慢下降趋势,这是由于脱粒行程增加,豆荚在脱粒区间滞留时间长,上下脱粒带对豆荚的剪切力做功大,从而使大豆籽粒脱粒完全,未脱净率降低。

4.5.2 各因素对夹带损失率的影响

各试验因素与夹带损失率的关系曲面如图 6 所示。由图 6a 可知,随着下带速度的增加夹带损失率呈上升的趋势,这是由于下脱粒带起到运输与脱粒的作用,当下带速度越来越高时,大豆豆荚在初始阶段脱粒,在脱粒行程后期与大豆茎秆分离时间变短,

大豆随同茎秆排出装置,夹带损失升高。当下带速度固定在某一数值时,随着脱粒间隙的增加,夹带损失呈缓慢上升的趋势,这是由于脱粒间隙增大,豆荚所受正压力减小,其与上下脱粒带接触面积变小,脱粒带提供剪切力减小,搓擦脱粒能力减弱,大豆不易与大豆茎秆和豆荚分开,随茎秆共同排出装置外,夹带损失率升高。

由图 6b 可知,随着脱粒行程的增加,夹带损失呈缓慢下降趋势,这是由于脱粒行程增大,单株大豆在脱粒区间滞留时间长,脱粒元件作用时间长,大豆籽粒与茎秆有充足的时间分离,夹带损失率降低。

由图 6c 可知,随着上下带速度差增加夹带损失率呈小幅度降低。这是由于上下带速度差增大,豆荚受到脱粒带的剪切力增大,脱粒装置搓擦脱粒能力强,大豆易与茎秆分离,夹带损失率降低。

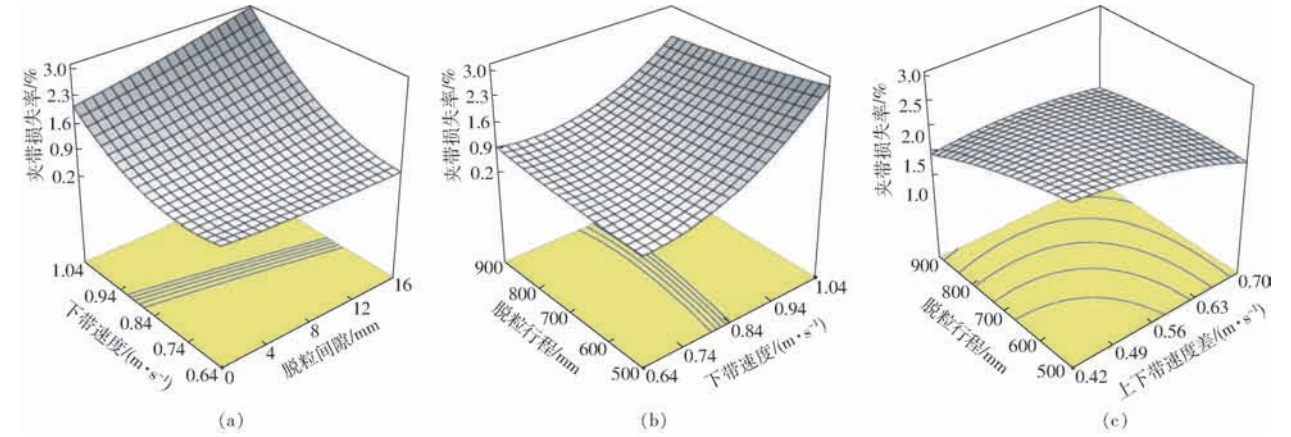


图 6 各因素对夹带损失率的影响
Fig. 6 Response surfaces for effects of factors on loss of entrap grain

4.5.3 各因素对破碎率的影响

各试验因素与破碎率的关系曲面如图 7 所示。由图 7a 可知,随着脱粒间隙的减小,破碎率呈逐渐上升的趋势。这是由于脱粒间隙较小时,豆荚所受正压力增加,脱粒区间的单株大豆受挤压和搓擦作用增强,脱粒大豆未能及时通过秸秆与之分离,在脱

粒区间时间增加,经受上下脱粒带作用时间和几率增加,导致其破碎率逐渐升高。当脱粒间隙固定为某一数值时,随着上下带速度差的增大,破碎率呈缓慢上升的趋势,这是由于上下带速度差增大,脱粒带提供的剪切力增大,搓擦脱粒能力强,大豆籽粒破碎的几率大。

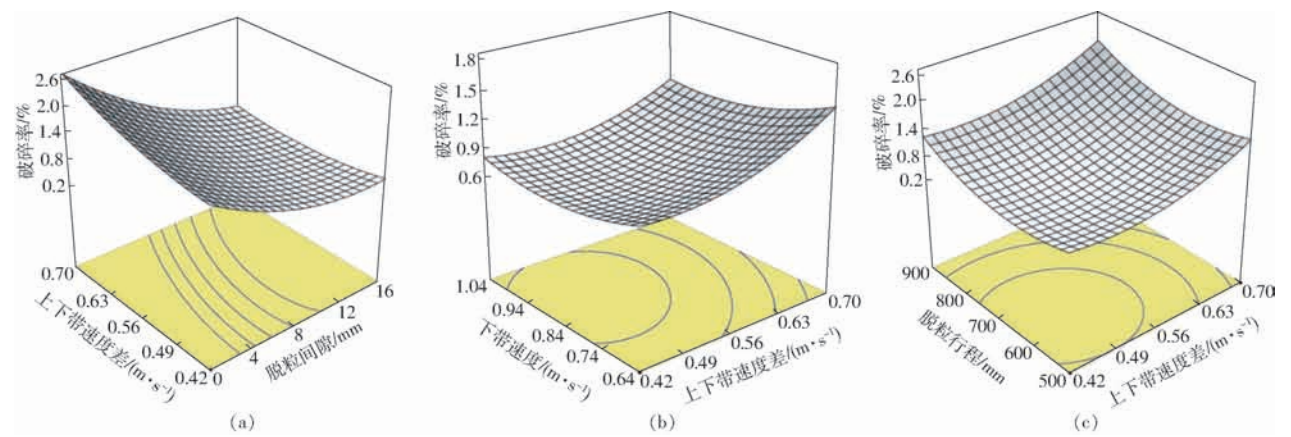


图 7 各因素对破碎率的影响
Fig. 7 Response surfaces for effects of factors on cracked grains

由图 7b 可知,随着下带速度的增加,破碎率呈缓慢下降的趋势,这是由于下脱粒带不仅为大豆脱粒提供剪切力,并起到运输的作用,当下脱粒带速度增高时,脱粒带对大豆籽粒作用时间短,搓擦脱粒效果减小,大豆籽粒破碎率逐渐降低。

由图 7c 可知,随着脱粒行程的增加,破碎率呈缓慢增加的趋势,这是由于大豆籽粒容易与豆荚和茎秆混合,不仅受到上下脱粒带的压力与剪切力,还受到豆荚与茎秆的挤压与搓擦,大豆籽粒的破碎率

升高。

4.5.4 各因素对平均生产率的影响分析

各试验因素与平均生产率的关系曲面如图 8 所示。由图 8a 可知,随着脱粒间隙和上下带速度差的增加,平均生产率呈逐渐上升的趋势,这是由于当脱粒间隙增大,豆荚所受正压力增大,当上下带速度差增大,豆荚所受剪切力增大,脱粒装置搓擦脱粒能力强,单株大豆经过脱粒区间能够很快脱粒,平均生产率升高。

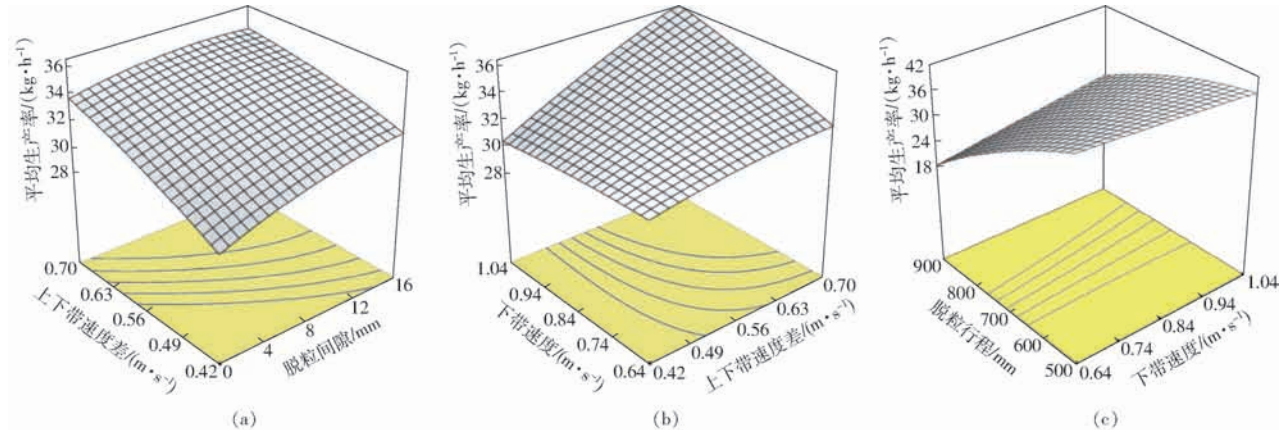


图 8 各因素对平均生产率的影响

Fig. 8 Response surfaces for effects of factors on average productivity

由图 8b 所示,随着上下带速度差和下带速度的增加,平均生产率呈逐渐上升的趋势。这是由于上下带速度差增大,豆荚所受剪切力增大,脱粒装置搓擦脱粒能力增强,下带速度增大,单株大豆通过脱粒区间的时间变短,平均生产率升高。

由图 8c 可知,随着脱粒行程的增加,平均生产率呈下降的趋势,这是由于脱粒装置的脱粒能力一定时,单株大豆经过的脱粒行程越大,使得脱粒带作用时间增长,平均生产效率降低。

4.5.5 优化分析

按照低未脱净率、低夹带损失率、低破碎率和高平均生产率的优化原则,以各因素水平区间为约束条件^[26],优化结果如图 9 所示。当参数组合为:脱

粒间隙 7.55 ~ 13.00 mm,上下带速度差 0.59 ~ 0.70 m/s,下带速度 0.84 m/s,脱粒行程 660 mm,未脱净率低于 1.2%,夹带损失率低于 0.9%,破碎率低于 0.8%,平均生产率高于 35 kg/h。

在优化的最佳结构及工作参数范围内选取脱粒间隙 9 mm,下带速度 0.84 m/s,上下带速度差 0.63 m/s,脱粒行程 660 mm 进行验证试验。结果为:未脱净率为 0.6%,夹带损失率为 0.84%,破碎率为 0.67%,平均生产率 35.32 kg/h。验证试验的结果在优化性能指标区间内,表明优化结果可信。

5 结论

(1)针对育种用单株大豆的脱粒需求,在理论分析的基础上,设计一种柔性差速带式单株大豆脱粒装置。区别于传统的刚性脱粒滚筒,采用同向差速运动的橡胶带作为脱粒元件,利用搓擦脱粒原理,可实现脱粒过程大豆种子低损伤,无混杂。

(2)影响未脱净率的各因素主次顺序为:上下带速度差、脱粒间隙、下带速度、脱粒行程;影响夹带损失率的各因素主次顺序为:下带速度、脱粒间隙、脱粒行程、上下带速度差;影响破碎率的各因素主次顺序为:脱粒间隙、上下带速度差、脱粒行程、下带速度;影响平均生产率的各因素主次顺序为:脱粒行程、脱粒间隙、下带速度、上下带速度差。

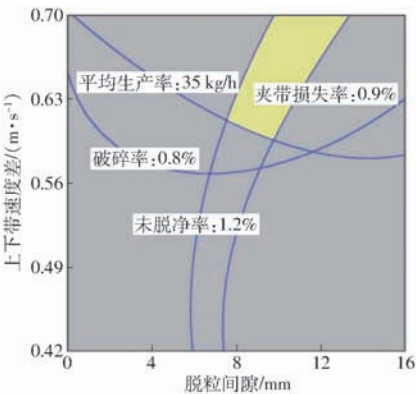


图 9 参数优化分析

Fig. 9 Parameters optimum analysis

(3)对于籽粒含水率在16%~18%范围内的大豆植株,柔性差速带式单株大豆脱粒装置的最佳结构和工作参数组合为:脱粒间隙7.55~13.00 mm,上下带速度差0.59~0.70 m/s,下带速度0.84 m/s,脱粒行程660 mm,此时未脱净率低于1.2%,夹带损失率低于0.9%,破碎率低于0.8%,平均生产率高于35 kg/h。

参 考 文 献

- 1 王长春. 田间育种试验机械化的发展[J]. 世界农业,2001(4):43-44.
WANG Changchun. The development of the breeding experiment mechanization[J]. World Agriculture, 2001(4): 43-44. (in Chinese)
- 2 郭佩玉,汪裕安. 努力建成中国的育种机械化体系[J]. 农业工程学报,1999,15(增刊):52-55.
GUO Peiyu, WANG Yu'an. Strive to build China's breeding mechanization system[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(Supp.):52-55. (in Chinese)
- 3 张海军,韩正晟,王丽维. 小区种子收获机械的研究现状与发展[J]. 湖南农业科学,2008(6):102-104.
ZHANG Haijun, HAN Zhengsheng, WANG Liwei. Present researching status and development of pot seed harvesting machinery[J]. Hunan Agricultural Sciences,2008(6):102-104. (in Chinese)
- 4 郭佩玉,尚书旗,汪裕安. 普及和提高田间育种机械化水平[J]. 农业工程学报,2003,19(增刊1):53-55.
GUO Peiyu, SHANG Shuqi, WANG Yu'an. Popularizing and increasing the level of mechanization filed breeding equipment[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(Supp.1):53-55. (in Chinese)
- 5 高连兴,李晓峰,接鑫,等. 大豆机械脱粒损伤特征及损伤率研究[J]. 沈阳农业大学学报,2010,41(1):55-58.
GAO Lianxing, LI Xiaofeng, JIE Xin, et al. Investigation on characteristics and ratio of soybean kernel mechanical damage[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(1):55-58. (in Chinese)
- 6 高连兴,李晓峰,接鑫,等. 大豆内部机械损伤对发芽的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(10):63-66.
GAO Lianxing, LI Xiaofeng, JIE Xin, et al. Inner mechanical damage impact to germination of soybean kernels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):63-66. (in Chinese)
- 7 侯守印. 立式轴流式大豆种子专用脱粒机的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
HOU Shouyin. Research on the vertical axial flow thresher for soybean breeding[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 8 侯守印,陈海涛. 立式轴流大豆种子脱粒机参数优化[J]. 农业工程学报,2012,28(5):19-25.
HOU Shouyin, CHEN Haitao. Parameters optimization of vertical axial flow thresher for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(5):19-25. (in Chinese)
- 9 高连兴,郑世妍,陈瑞祥,等. 喂入辊轴流滚筒组合式大豆种子脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):112-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.017.
GAO Lianxing, ZHENG Shiyan, CHEN Ruixiang, et al. Design and experiment on soybean breeding thresher of double feeding roller and combined threshing cylinder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):112-118. (in Chinese)
- 10 范传辉,连瑞瑞,余永昌,等. 新型小区大豆脱粒机的设计[J]. 大豆科学,2017,36(1):138-142.
FAN Chuanhui, LIAN Ruirui, YU Yongchang, et al. Optimization design of a soybean thresher[J]. Soybean Science, 2017, 36(1):138-142. (in Chinese)
- 11 郝玉伟,段斌,余永昌. 室内大豆单株种子脱粒机设计[J]. 农业工程,2014,4(1):94-97.
HAO Yuwei, DUAN Bin, YU Yongchang. Design of indoor thresher for soybean sheller[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(1):94-97. (in Chinese)
- 12 王显仁,李耀明,徐立章. 水稻脱粒破碎率与脱粒元件速度关系研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):16-19.
WANG Xianren, LI Yaoming, XU Lizhang. Relationship between thresher velocities and rice grain broken rate[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(8):16-19. (in Chinese)
- 13 张成堂,商立今. 脱粒机[M]. 北京:中国农业机械出版社,1987.
- 14 刘明政,李长河,张彦彬,等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):266-273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160737&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.037.
LIU Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):266-273. (in Chinese)
- 15 UKATU A C. A modified threshing unit for soya beans[J]. Biosystems Engineering,2006,95(3):371-377.
- 16 高连兴,赵学观,杨德旭,等. 大豆脱粒机气力清选循环装置研制与性能试验[J]. 农业工程学报,2012,28(24):22-27.
GAO Lianxing, ZHAO Xueguan, YANG Dexu, et al. Development and performance test on pneumatic cleaning-circulatory device

- of soybean thresher[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(24):22–27. (in Chinese)
- 17 戴飞,高爱民,孙伟,等. 纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(1):74–78.
DAI Fei, GAO Aimin, SUN Wei, et al. Design and experiment on longitudinal axial conical cylinder threshing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):74–78. (in Chinese)
- 18 李耀明,陈洋,徐立章,等. 斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):56–61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.009.
LI Yaoming, CHEN Yang, XU Lizhang, et al. Optimization of structural parameters for threshing and separating device in oblique tangential-longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):56–61. (in Chinese)
- 19 李耀明,周伟,徐立章,等. 单切双横流脱粒分离装置参数试验与优化[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):62–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.010.
LI Yaoming, ZHOU Wei, XU Lizhang, et al. Parameter test and optimization of tangential-horizontal-horizontal threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):62–67. (in Chinese)
- 20 康建明,陈学庚,温浩军,等. 基于响应面法的梳齿式采棉机采收台优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):57–61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.012.
KANG Jianming, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Optimization of comb-type cotton picker device based on response surface methodology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.2):57–61. (in Chinese)
- 21 万霖,衣淑娟,马永财. 纵置单轴流滚筒脱粒与分离装置功耗性能试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2005,17(2):56–58.
WAN Lin, YI Shujuan, MA Yongcai. Study on power consumption of single axial flow threshing and separating unit of paddy[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University,2005,17(2):56–58. (in Chinese)
- 22 GB/T 5982—2005 脱粒机试验方法[S]. 2005.
- 23 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- 24 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- 25 杨德旭,姜德龙,沈永哲,等. 切轴流式双滚筒大豆种子脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):102–110. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170913&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.013.
YANG Dexu, JIANG Delong, SHEN Yongzhe, et al. Design and test on soybean seed thresher with tangential-axial flow double-roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9):102–110. (in Chinese)
- 26 NY/T1014—2006 脱粒机作业性能标准[S]. 2006.