

纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验

屈哲¹ 张东兴^{1,2} 杨丽¹ 张天亮¹ 王镇东¹ 崔涛¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在玉米籽粒直收过程中,脱粒滚筒转速与联合收获机的额定喂入量相匹配才能发挥出最佳的作业效果。为了获得不同喂入量时玉米联合收获机最优的滚筒转速范围,设计了一种零部件可更换、结构参数和工作参数均可调的纵轴流玉米脱粒分离装置,并在自主研制的试验台上以脱粒滚筒转速、喂入量为影响因素,以籽粒破碎率、未脱净率为性能指标进行玉米脱粒试验。通过台架试验、回归分析和单变量求解,最终确定了不同喂入量的最优滚筒转速范围:喂入量为 8 kg/s 时,最优的滚筒转速为 254 ~ 486 r/min;喂入量为 10 kg/s 时,最优的滚筒转速为 278 ~ 466 r/min;喂入量为 12 kg/s 时,最优的滚筒转速为 313 ~ 445 r/min。在以上条件下籽粒破碎率均小于 5%,未脱净率小于 2%,达到了国家和相关标准的要求。

关键词: 纵轴流; 玉米; 脱粒分离; 喂入量; 滚筒转速

中图分类号: S225.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)02-0058-08

Experiment on Feed Rate and Cylinder Speed of Longitudinal Axial Flow Threshing and Separating Device for Maize

QU Zhe¹ ZHANG Dongxing^{1,2} YANG Li¹ ZHANG Tianliang¹ WANG Zhendong¹ CUI Tao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of maize grain direct harvest, the threshing cylinder speed should be matched with the feed rate of combine harvester, so that the best effect of the operation can be achieved. In order to obtain the optimal ranges of the threshing cylinder speed of maize combine harvester at different feed rates, a longitudinal axial flow maize threshing and separating device was designed and developed, whose components and parts can be changed easily. It was also convenient to adjust the structure parameters and working parameters. The threshing cylinder speed and the feed rate were selected as the influence factors, and the maize kernel damaged rate and un-threshed rate were selected as the performance indexes in the experiments. The test results showed that with the increase of threshing cylinder speed, the maize kernel damaged rate was increased and the un-threshed rate was decreased. At the same threshing cylinder speed, with the increase of the feed rate, the maize kernel damaged rate and the un-threshed rate were increased slightly. Through the bench tests, regression analysis and single variable solution, the optimal ranges of the cylinder speed at different feed rates of the threshing and separating device were determined. The optimal range of cylinder speed was 254 ~ 486 r/min at the feed rate of 8 kg/s. The optimal range of cylinder speed was 278 ~ 466 r/min at the feed rate of 10 kg/s. The optimal range of cylinder speed was 313 ~ 445 r/min at the feed rate of 12 kg/s. Under all the conditions above, the maize kernel damaged rate was less than 5%, and the un-threshed rate was less than 2%, which reached the requirements of the national standards. The research result of the threshing and separating device provided reference for design of maize grain harvester, and the research on adaptive model of the feed rate and threshing cylinder speed.

Key words: longitudinal axial flow; maize; threshing and separating; feed rate; cylinder speed

收稿日期: 2017-06-27 修回日期: 2017-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300302、2016YFD0700302)、国家自然科学基金项目(51405495)和国家现代玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介: 屈哲(1988—),男,博士生,主要从事农业装备及其自动化研究,E-mail: 458365685@qq.com

通信作者: 崔涛(1985—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与计算机测控研究,E-mail: cuitao850919@163.com

0 引言

玉米籽粒直收,可减少粮食损失、降低劳动强度、提高生产效率,实现节本增效^[1-2];同时实现玉米不落地收获,通过干燥设备干燥后直接入仓,提高粮食品级,减少粮食污染。因此,玉米籽粒直收将成为我国玉米收获的发展方向^[3-4]。

脱粒分离装置作为玉米籽粒收获机的核心部件^[5-7],其工作性能直接决定收获作业质量^[8-9]。纵轴流脱粒分离装置的主要特点在于物料进行脱粒的同时可以把籽粒和杂余有效分离^[10-12],且具有脱粒时间长、脱粒过程柔和、脱净率高和破碎率低等优点^[13-15]。因此,对玉米、大豆、水稻、小麦等多种作物都具有很强的适应性^[16]。

喂入量和脱粒滚筒转速不仅是脱粒装置关键工作参数,也是决定玉米籽粒收获机田间作业质量的重要因素,对破碎率、未脱净率等有重要影响^[17]。玉米联合收获机在其额定喂入量下进行田间作业时,有一个最优的脱粒滚筒转速范围与之相匹配,以确保收获机最佳的作业质量和脱粒效果^[18-19]。但是,我国不同喂入量的玉米籽粒收获机所对应的最优脱粒滚筒转速范围并不明确,收获时滚筒转速的调节以经验为主,常造成籽粒破碎率高、脱净率低和损失严重等问题。

针对以上问题,本文设计一种零部件可更换,结构参数、工作参数调节方便的纵轴流玉米脱粒分离装置。该装置不仅可以用于台架试验,也可用于玉米籽粒收获机上。结合玉米脱粒台架试验,研究分析滚筒转速、喂入量对籽粒破碎率、未脱净率的影响。通过回归分析、单变量求解,建立不同喂入量下滚筒转速与破碎率、未脱净率的回归方程,确定不同喂入量的最优滚筒转速范围。为我国玉米籽粒收获机脱粒分离装置的设计以及喂入量与滚筒转速自适应模型的研究提供参考。

1 试验装置设计

1.1 纵轴流玉米脱粒分离试验台

在自主研制的纵轴流玉米脱粒分离试验台上进行试验。该试验台主要由机械系统和控制系统组成,机械系统由输送装置、喂入装置、纵轴流脱粒分

离装置和接料装置等部分组成。控制系统由控制柜、变频器、变频电动机组成。变频器控制变频电动机的启动、转速调节与停止,电动机驱动输送装置、喂入装置和纵轴流脱粒分离装置。试验台主要参数如表 1 所示。

表 1 试验台主要参数
Tab.1 Main parameters of test bench

参数	数值
输送装置长度/m	15
输送速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0~2(可调)
螺旋推运器转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~300(可调)
输送器转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~800(可调)
滚筒转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~1 200(可调)
滚筒长度/mm	2 700
滚筒直径/mm	580
脱粒间隙/mm	20~70(可调)
凹板包角/($^{\circ}$)	163
总配套动力/kW	155.5

纵轴流玉米脱粒分离试验台三维图如图 1 所示。

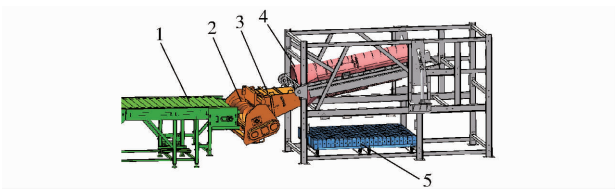


图 1 纵轴流玉米脱粒分离试验台
Fig.1 Longitudinal axial flow threshing and separating test bench for maize

1. 输送装置 2. 螺旋推运器 3. 输送器 4. 纵轴流脱粒分离装置 5. 接料装置

1.2 纵轴流脱粒分离装置

纵轴流脱粒分离装置作为试验台的核心部分,采用结构参数、工作参数均可调的设计思路。该装置可更换不同类型(梯形杆齿、圆头钉齿、短纹杆齿等)、材料(钢、橡胶、尼龙等)的脱粒元件,其齿间距、安装位置、排列方式均可调;且方便更换不同类型的凹板。为不同参数下玉米脱粒试验提供条件。为便于对物料的运动状态进行观察、分析,试验台架采用 5 mm 厚的透明亚克力板进行密封,且起到了良好的防尘作用。纵轴流玉米脱粒分离装置与试验台架如图 2 所示。

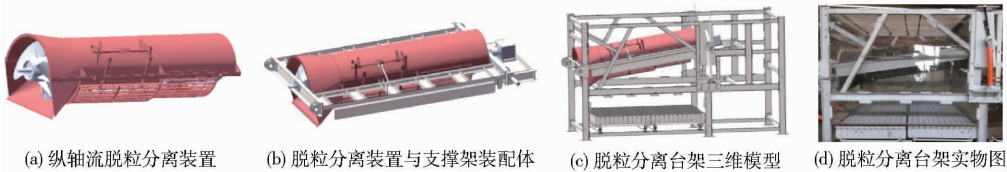


图 2 纵轴流玉米脱粒分离装置

Fig.2 Longitudinal axial flow threshing and separating device for maize

1.2.1 螺旋喂入头设计

螺旋喂入头将输送器输送过来的玉米果穗顺利喂入到脱粒滚筒中进行脱粒,为确保物料喂入流畅、避免堵塞,对螺旋喂入头上任一点 O 处的输送物料即玉米果穗进行受力分析,如图 3 所示。

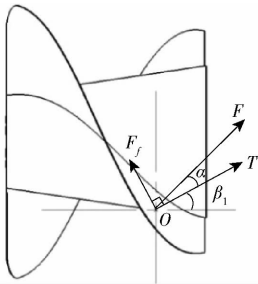


图 3 物料受力分析
Fig.3 Force analysis of material

由图 3 可知,螺旋叶片与玉米间存在摩擦力 F_f 和螺旋叶片对玉米的法向推力 T ,二者的合力 F 与法向推力 T 偏离一个角度 α ,为玉米与螺旋叶片的摩擦角。为保证玉米顺利完成轴向输送,需满足轴向输送力大于轴向阻力的条件^[20],即

$$T\cos\beta_1 > F_f\sin\beta_1 \tag{1}$$

其中 $F_f = T\tan\alpha$ (2)

式中 β_1 ——螺旋叶片的螺旋角, ($^\circ$)
 α ——玉米与螺旋叶片摩擦角,取 17° ^[21]

由式(1)、(2)可得,玉米沿螺旋喂入头顺利输送的条件为: $\beta_1 < 90^\circ - \alpha = 73^\circ$,选取螺旋叶片的螺旋角 β_1 为 30° 。

螺旋喂入头长度 l_1 ^[22] 为

$$l_1 = \frac{S}{K} \tag{3}$$

式中 S ——螺旋导程,为 1 000 mm

K ——螺旋头数,为 2

由式(3)可得,螺旋喂入头长度 $l_1 = 500$ mm。

本文设计的螺旋喂入头为锥台结构,锥角 β_2 为 17° ,喂入头前端直径 D_1 为 230 mm,后端直径 D_2 为 380 mm,如图 4 所示。

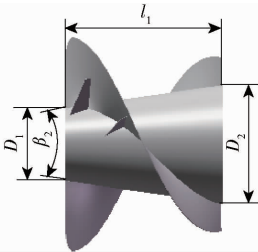


图 4 螺旋喂入头结构示意图
Fig.4 Main view of helical feed head

1.2.2 脱粒滚筒与凹板的设计

脱粒对象为玉米,设计为封闭式脱粒滚筒,脱粒元件为梯形杆齿,可提高喂入量,降低破碎率、提高

脱净率。

滚筒脱粒段长度 l_2 为

$$l_2 = (z_1 - 1)d_1 \tag{4}$$

式中 z_1 ——单条螺旋线上脱粒段的齿数,为 13
 d_1 ——脱粒段齿间距,为 100 mm

滚筒分离段长度 l_3 为

$$l_3 = z_2d_2 \tag{5}$$

式中 z_2 ——单条螺旋线上分离段的齿数,为 6
 d_2 ——分离段齿间距,为 150 mm

滚筒总长度 L 为

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \tag{6}$$

式中 l_4 ——滚筒排杂段长度,为 100 mm
由式(3)~(6)可得,脱粒滚筒总长度 $L = 2\,700$ mm。

脱粒滚筒直径 D_3 (齿顶圆直径)^[20] 为

$$D_3 = D_4 + 2h \tag{7}$$

式中 D_4 ——滚筒齿根圆直径,为 380 mm
 h ——脱粒齿高度,为 100 mm

由式(7)可得,滚筒直径 $D_3 = 580$ mm。

脱粒滚筒转速 n ^[20] 为

$$n = 60 \frac{v}{\pi D_3} \tag{8}$$

式中 v ——滚筒齿顶圆线速度,轴流滚筒玉米脱粒线速度一般为 $7 \sim 20$ m/s^[20,23-24]

由式(8)可得, n 的范围为 $231 \text{ r/min} \leq n \leq 658 \text{ r/min}$ 。

因此,设计滚筒总长度 L 为 2 700 mm,滚筒直径 D_3 为 580 mm(齿顶圆直径),三维图如图 5 所示。脱粒元件为梯形杆齿,高度 h 为 100 mm,上底宽 b_1 为 20 mm,下底宽 b_2 为 30 mm,厚度 d_3 为 12 mm,采用 4 头螺旋排列,脱粒元件与连接座双螺栓连接,可更换不同类型、材料的脱粒元件,如图 6 所示。针对高含水率玉米,脱粒凹板设计为细圆管型玉米专用凹板,单个凹板长度为 366 mm,凹板包角 β_3 为 163° ,细圆管直径为 18 mm,相邻两圆管中心距为 38 mm,可有效降低籽粒破碎率,如图 7 所示。

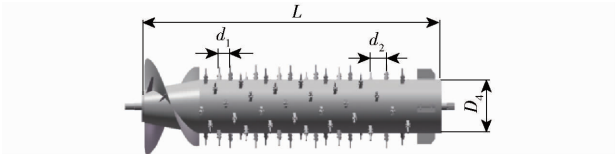


图 5 脱粒滚筒结构三维图
Fig.5 Three dimensional diagram of threshing cylinder

2 玉米脱粒试验

2.1 试验目的与材料

为找到不同喂入量时滚筒转速对破碎率、未脱净率的影响规律,以及最优的滚筒转速范围,以喂入

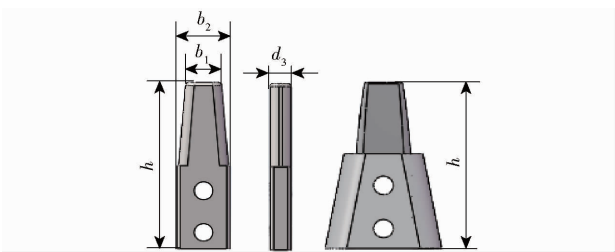


图 6 梯形杆齿
Fig. 6 Trapezoidal bar tooth

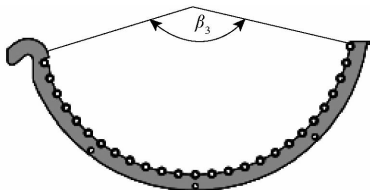


图 7 脱粒凹板
Fig. 7 Threshing concave

量、滚筒转速为影响因素,以破碎率、未脱净率为指标进行试验。由式(8)可知脱粒滚筒理论转速为 $231\text{ r/min}\leq n\leq 658\text{ r/min}$,试验时玉米籽粒含水率为 GB/T 21962—2008《玉米收获机技术条件》规定适宜

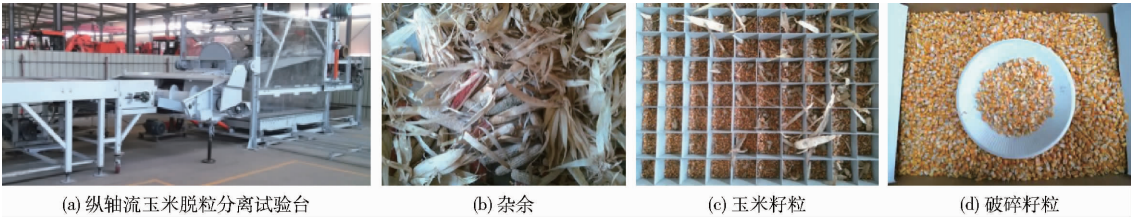


图 8 试验现场图
Fig. 8 Test scene photos

2.3 试验结果与分析

按照以上试验方法进行玉米脱粒试验,并对试验结果进行处理。

按照 GB/T 21961—2008 和 GB/T 5982—2005 进行测定,籽粒破碎率计算公式为

$$Z_s = \frac{W_s}{W_i} \times 100\% \tag{9}$$

式中 W_s ——样品中破碎籽粒质量,g

W_i ——取样籽粒质量,g

未脱净率计算公式为

$$S_w = \frac{W_w}{W_z} \times 100\% \tag{10}$$

式中 W_w ——未脱净籽粒质量,g

W_z ——全部籽粒质量,g

不同喂入量下脱粒试验结果如表 2 所示。

对表 2 试验结果进行处理,分别得到不同喂入量、滚筒转速与籽粒破碎率、未脱净率的关系曲线,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在不同喂入量条件下,随着滚筒转速的增加,籽粒破碎率均增大,未脱净率均减

籽粒直收的临界含水率 25%。前期试验表明滚筒转速超过 500 r/min 时,籽粒破碎严重,破碎率大于 5%。为减小破碎率,需适当降低滚筒转速。试验选择滚筒转速为 200、250、300、350、400、450、500 r/min。根据市场上的玉米籽粒收获机性能选择喂入量为 8、10、12 kg/s。

试验玉米品种为郑单 958,采用人工摘穗,避免机械损伤,含水率为 25%,玉米果穗大端平均直径为 51 mm,果穗平均长度为 185 mm。

2.2 试验方法

试验开始前把玉米果穗(带苞叶)均匀有序的铺放在输送装置的一端,留出 5 m 长的加速区;调整脱粒滚筒、螺旋推运器、输送机转速至要求数值;待脱粒滚筒、螺旋推运器、输送机运转稳定后,启动输送装置,完成输送、喂入、脱粒分离和接料过程。

根据试验用玉米果穗大端直径为 51 mm,设定脱粒间隙为 55 mm。每组试验重复 3 次取平均值,得到不同喂入量下滚筒转速对籽粒破碎率、未脱净率的影响关系,试验如图 8 所示。

表 2 不同喂入量下试验结果
Tab. 2 Test results at different feed rates

滚筒转速/ (r·min ⁻¹)	喂入量/(kg·s ⁻¹)					
	8		10		12	
	破碎 率/%	未脱净 率/%	破碎 率/%	未脱净 率/%	破碎 率/%	未脱净 率/%
200	1.14	2.67	1.32	2.98	1.68	3.47
250	1.35	2.19	1.67	2.53	1.97	2.78
300	1.67	1.53	2.07	1.89	2.39	2.26
350	2.04	0.92	2.73	1.14	3.08	1.47
400	2.96	0.78	3.36	0.97	3.89	1.18
450	4.05	0.64	4.69	0.81	5.16	1.09
500	5.27	0.59	5.84	0.75	6.57	0.97

小。随着滚筒转速的增加,脱粒元件线速度增大,脱粒元件、凹板对玉米的击打、揉搓力度增大,同时玉米果穗间的作用力也增大;而且滚筒转速的增加,提高了对玉米的击打频率。击打力度和击打频率的增加,导致破碎率增大,未脱净率降低。

由图 9a 可知,在相同滚筒转速下,随着喂入量的增加,籽粒破碎率增大。随着喂入量的增加,果穗间相互支撑作用增强,脱粒元件、凹板对玉米的击

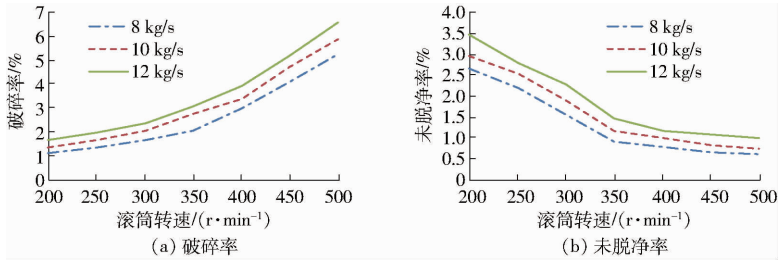


图 9 破碎率、未脱净率变化曲线

Fig. 9 Variation curves of damaged rate and un-threshed rate

打、揉搓力度相对增大,导致籽粒破碎数量增多,破碎率增大。

由图 9b 可知,在同一滚筒转速下,未脱净率随喂入量的增加而增大。主要是由于随着喂入量的增加,物料密度增大,由果穗间作用力完成的脱粒比重上升,而果穗间作用力比脱粒元件、凹板对果穗的击打、揉搓作用力小,脱粒作用力弱,未脱净率增大。

为验证在相同滚筒转速下,随着喂入量增加,籽粒破碎率增大的试验结果,对不同喂入量下玉米果穗进行受力分析和基于 EDEM (E-discrete element method) 的运动仿真,计算、提取脱粒元件对果穗的击打力、接触力,比较果穗的受力变化情况。

图 10 给出了在相同滚筒转速、不同喂入量下玉

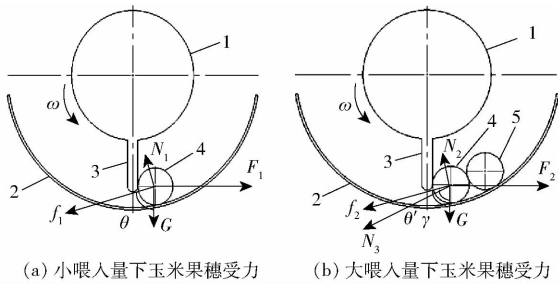


图 10 玉米果穗受力分析

Fig. 10 Force analysis of corn ear

1. 脱粒滚筒 2. 凹板 3. 脱粒元件 4. 果穗 A 5. 果穗 B

米果穗受力分析。图 10a 中果穗 A 受到的合力在水平和竖直方向的分力为

$$F_{x1} = F_1 - f_1 \sin \theta - N_1 \cos \theta \quad (11)$$

$$F_{y1} = N_1 \sin \theta - f_1 \cos \theta - G \quad (12)$$

其中
$$f_1 = \mu N_1 \quad (13)$$

式中 F_1 ——脱粒元件对果穗 A 的击打力, N
 f_1 ——凹板对果穗 A 的摩擦力, N
 θ ——摩擦力 f_1 与竖直方向的夹角, $0^\circ < \theta < 90^\circ$

N_1 ——凹板对果穗 A 的支撑力, N

G ——果穗 A 的重力, N

μ ——果穗与凹板间摩擦因数, $\mu = 0.01$ [21]

图 10b 中果穗 A 受到的合力在水平和竖直方向的分力为

$$F_{x2} = F_2 - f_2 \sin \theta' - N_2 \cos \theta' - N_3 \sin \gamma \quad (14)$$

$$F_{y2} = N_2 \sin \theta' - f_2 \cos \theta' - N_3 \cos \gamma - G \quad (15)$$

其中
$$f_2 = \mu N_2 \quad (16)$$

式中 F_2 ——脱粒元件对果穗 A 的击打力, N
 f_2 ——凹板对果穗 A 的摩擦力, N
 θ' ——摩擦力 f_2 与竖直方向的夹角, $0^\circ < \theta' < 90^\circ$, $\theta' = \theta$
 N_2 ——凹板对果穗 A 的支撑力, N
 N_3 ——果穗 B 对果穗 A 的压力, N
 γ ——果穗 B 对果穗 A 的压力 N_3 与竖直方向的夹角, $0^\circ < \gamma < 90^\circ$

由于同一果穗 A 在相同滚筒转速、不同喂入量下受到的合力相等,且合力在水平和竖直方向的分力也相等,即 $F_{x1} = F_{x2}$, $F_{y1} = F_{y2}$, 由式 (11) ~ (16) 可得

$$F_2 - F_1 = \frac{N_3 \cos \gamma (\mu \sin \theta + \cos \theta)}{\sin \theta - \mu \cos \theta} + N_3 \sin \gamma > 0 \quad (17)$$

由式 (17) 可以得出 $F_2 > F_1$, 即在相同滚筒转速下,随着喂入量的增大,脱粒元件对玉米果穗的击打力增大。

为了找到相同滚筒转速、不同喂入量下,脱粒元件与果穗间接触力变化趋势,基于 EDEM 仿真软件,选取滚筒转速 200、350、500 r/min,进行不同喂入量下玉米果穗运动仿真,结果如图 11 所示。通过仿真分析、提取和计算脱粒元件与果穗间平均接触力,结果如表 3 所示。

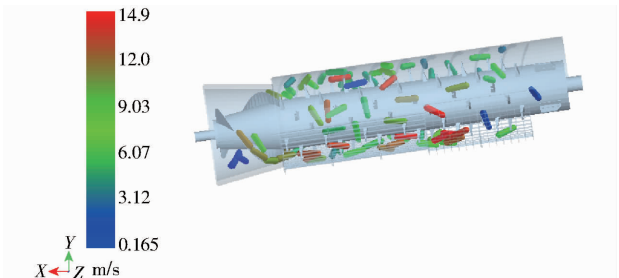


图 11 玉米果穗运动仿真

Fig. 11 Dynamic simulation of corn ear

表 3 脱粒元件与玉米果穗接触力

Tab.3 Contact force between threshing components and corn ear				N
转速/ (r·min ⁻¹)	喂入量/(kg·s ⁻¹)			
	8	10	12	
200	188.38	212.57	227.60	
350	266.37	288.19	314.35	
500	349.16	381.77	404.37	

对表 3 进行处理,得到不同滚筒转速、喂入量下脱粒元件与玉米果穗接触力的变化曲线,如图 12 所示。

由图 12 可以看出,在相同滚筒转速下,随着喂入量的增加,脱粒元件对玉米果穗的接触力也在增大。

以上计算分析、仿真结果均表明,在相同滚筒

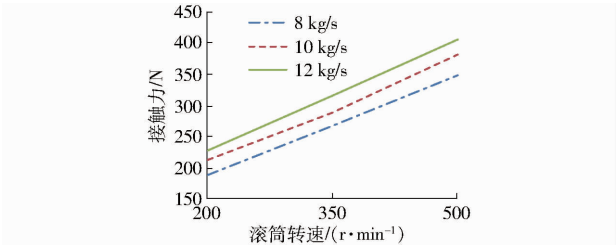


图 12 接触力变化曲线

Fig. 12 Variation curves of contact force

转速下,随着喂入量的增加,脱粒元件对玉米果穗的击打力、接触力增大,可以验证籽粒破碎数量增多,破碎率增大的试验结果。

为明确不同喂入量条件下,脱粒滚筒转速对破碎率、未脱净率影响是否显著,对破碎率、未脱净率进行单因素方差分析,结果如表 4 所示。

表 4 不同喂入量下方差分析

Tab.4 Variance analysis at different feed rates							
喂入量/ (kg·s ⁻¹)	指标	变异来源					
		平方和	自由度	均方	F	P	显著性
8	破碎率	492 320.62	13	422 306.39	72.38	1.99 × 10 ⁻⁶	*
	未脱净率	495 498.30	13	425 494.20	72.94	1.91 × 10 ⁻⁶	*
10	破碎率	491 212.10	13	421 195.60	72.19	2.02 × 10 ⁻⁶	*
	未脱净率	494 889.10	13	424 884.30	72.83	1.93 × 10 ⁻⁶	*
12	破碎率	490 154.10	13	420 134.70	72.00	2.05 × 10 ⁻⁶	*
	未脱净率	494 141.10	13	424 135.50	72.70	1.95 × 10 ⁻⁶	*

注: $P < 0.05$, 影响显著, 用 * 表示。

由方差分析表 4 可知,在不同喂入量下,滚筒转速对籽粒破碎率、未脱净率均有显著性影响。运用 DPS (Data processing system) 数据处理系统的一元非线性回归数学模型进行分析,建立不同喂入量下滚筒转速与籽粒破碎率、未脱净率的回归方程。各回归方程的检验指标如表 5 所示。

喂入量为 8 kg/s 时,破碎率、未脱净率回归方程为

$$Y_1 = 0.000\,048X^2 - 0.019\,705X + 3.227\,143$$

(18)

$$Y_2 = 0.000\,027X^2 - 0.026\,174X + 6.902\,143$$

(19)

喂入量为 10 kg/s 时,破碎率、未脱净率回归方程为

$$Y_3 = 0.000\,041X^2 - 0.013\,712X + 2.476\,429$$

(20)

$$Y_4 = 0.000\,026X^2 - 0.026\,26X + 7.295\,714$$

(21)

喂入量为 12 kg/s 时,破碎率、未脱净率回归方程为

$$Y_5 = 0.000\,048X^2 - 0.017\,526X + 3.302\,143$$

(22)

$$Y_6 = 0.000\,029X^2 - 0.028\,543X + 8.092\,857$$

(23)

表 5 回归方程检验指标

Tab.5 Indexes of regression equation			
喂入量/(kg·s ⁻¹)		指标	
		决定系数 R ²	P
8	Y ₁	0.998 1	0.000 1
	Y ₂	0.990 2	0.000 1
10	Y ₃	0.997 4	0.000 1
	Y ₄	0.988 4	0.000 1
12	Y ₅	0.999 7	0.000 1
	Y ₆	0.992 3	0.000 1

决定系数 R^2 越接近于 1,数学模型越有效;显著性值 $P < 0.05$,数学模型有意义且显著。由表 5 可知,不同喂入量下的各回归数学模型均非常有效、有意义且显著。

根据 GB/T 21962—2008 相关规定,在籽粒含水率 25% 以下进行玉米籽粒直收时,籽粒破碎率 $Z_s < 5\%$,未脱净率 $S_w < 2\%$ [25]。因此,不同喂入量下籽粒破碎率、未脱净率回归方程均需要满足:破碎率小于 5%,且未脱净率小于 2% 的条件。

通过单变量求解得出,喂入量为 8 kg/s 时,最优

的滚筒转速范围为:254 r/min < n < 486 r/min。喂入量为 10 kg/s 时,最优的滚筒转速范围为:278 r/min < n < 466 r/min。喂入量为 12 kg/s 时,最优的滚筒转速范围为:313 r/min < n < 445 r/min。

对计算求解得出的不同喂入量的最优滚筒转速范围进行验证试验,每个喂入量下选取高、中、低 3 个滚筒转速进行试验,结果如表 6 所示。

表 6 验证试验结果
Tab.6 Results of verification tests

喂入量/ (kg·s ⁻¹)	滚筒转速/ (r·min ⁻¹)	破碎率/%	未脱净率/%
8	260	1.37	1.94
	370	2.53	0.94
	480	4.86	0.58
10	280	1.87	1.96
	370	3.11	1.21
	460	4.85	0.73
12	320	2.63	1.93
	380	3.59	1.45
	440	4.91	1.16

由表 6 可知:不同喂入量各滚筒转速下籽粒破碎率小于 5%,未脱净率小于 2%,达到了国家及相关标准要求。进而验证了试验、计算得出的不同喂入量下最优的滚筒转速是满足要求的。

最后,通过脱粒试验、回归分析和单变量求解发现,随着喂入量的增加,最优的滚筒转速范围其最低转速在增大,最高转速在减小。即随着喂入量的增加,最优的滚筒转速范围在缩小,如图 13 所示。

出现上述试验结果的原因在于,通过脱粒试验、受力分析和仿真结果均表明,在同一滚筒转速下,随着喂入量的增加,籽粒破碎率增大,未脱净率增大。因此,随着喂入量的增加,最低转速增大,是为了保

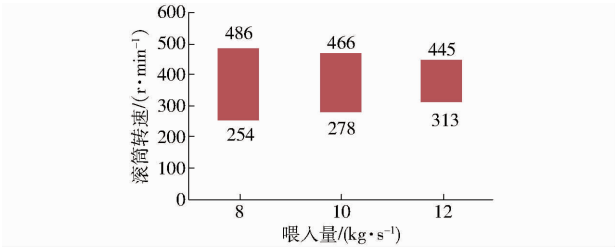


图 13 不同喂入量下最优滚筒转速范围

Fig.13 Optimal ranges of cylinder speed at different feed rates

证破碎率满足规定的条件下,降低未脱净率;而最高转速减小,是为了保证未脱净率满足规定的条件下,降低破碎率。

3 结论

(1)自主研发了纵轴流玉米脱粒分离试验台。设计的脱粒分离装置结构上可更换不同类型、材料的脱粒元件,可更换不同形式的螺旋喂入头、凹板,结构参数、工作参数调节方便。螺旋喂入头的设计确保了物料喂入流畅,细圆管型玉米脱粒凹板的设计降低了籽粒破碎率。

(2)玉米脱粒试验表明:滚筒转速对籽粒破碎率、未脱净率均有显著性影响。且随着滚筒转速的增加,破碎率增大,未脱净率降低。在相同滚筒转速下,随着喂入量的增大,籽粒破碎率、未脱净率均增加。

(3)随着喂入量的增大,最优的滚筒转速范围在缩小。喂入量为 8 kg/s 时,最优的滚筒转速为 254 ~ 486 r/min;喂入量为 10 kg/s 时,最优的滚筒转速为 278 ~ 466 r/min;喂入量为 12 kg/s 时,最优的滚筒转速为 313 ~ 445 r/min。其籽粒破碎率均小于 5%,未脱净率小于 2%,达到了国家及相关标准要求。

参 考 文 献

1 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等.国内外玉米收获机械发展现状及展望[J].农机化研究,2016,38(4):251-257.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 251-257. (in Chinese)

2 张传根.玉米籽粒收获机清选筛体结构的优化研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
ZHANG Chuangen. Structural optimization of the cleaning screen for maize grain harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

3 崔中凯,邸志峰,周进,等.5TYS280 玉米脱粒清选试验台的设计研究[J].农机化研究,2017,39(5):113-117.
CUI Zhongkai, DI Zhifeng, ZHOU Jin, et al. Design and research on 5TYS280 corn threshing and cleaning test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 113-117. (in Chinese)

4 武聪颖.玉米籽粒直收将成未来发展趋势[J].农业机械,2013,43(33):6.

5 宗望远,廖庆喜,黄鹏,等.组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊2):41-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s209&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (Supp. 2): 41-46. (in Chinese)

- 6 徐立章,李耀明,王成红,等.切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J/OL].农业机械学报,2014,45(2):105-108.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140218&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.018.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. A combinational threshing and separating unit of combine harvester with a transverse tangential cylinder and an axial rotor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 105-108. (in Chinese)
- 7 李耀明,王成红,徐立章,等.切纵流联合收获机脱粒分离装置田间试验与参数优化[J/OL].农业机械学报,2014,45(11):111-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141117&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.017.
LI Yaoming, WANG Chenghong, XU Lizhang, et al. Parameter optimization and field test of threshing and separation device in tangential longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 111-116. (in Chinese)
- 8 李海同,万星宇,王华,等.油菜联合收获机集成式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170513&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.013.
LI Haitong, WAN Xingyu, WANG Hua, et al. Design and experiment on integrated longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 108-116. (in Chinese)
- 9 宗望远.油菜联合收获纵轴流脱离系统的研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
ZONG Wangyuan. Research on the longitude axial flow threshing and separating unit of rape combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 10 彭煜星,李旭,刘大为,等.单纵轴流脱粒滚筒的设计与性能试验[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2016,42(5):554-560.
PENG Yuxing, LI Xu, LIU Dawei, et al. Design and performance experiment of a threshing cylinder with longitudinal single axial flow[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2016, 42(5): 554-560. (in Chinese)
- 11 李耀明,李洪昌,徐立章,等.短纹杆板齿式轴流脱粒分离装置性能试验[J].农业机械学报,2009,40(7):88-92.
LI Yaoming, LI Hongchang, XU Lizhang, et al. Performance test of short-rasp-bar of axial flow threshing and separating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 88-92. (in Chinese)
- 12 王成红.切纵流联合收获机脱粒分离装置参数优化与试验研究[D].镇江:江苏大学,2014.
WANG Chenghong. Parameters optimization and experiment of threshing and separation device in tangential-longitudinal combine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 WACKER P. Maize grain damage during harvest[J]. Harvest Technology, 2005, 60(2): 84-85.
- 15 WACKER P. Factors influencing grain damage in axial and tangential threshing units[J]. Landtechnik, 1990, 45(6): 222-224.
- 16 陈志.玉米全价值收获关键技术与装备[M].北京:科学出版社,2014.
- 17 MUAMMER N. Mechanical damage of kernel in shelling of corn ear[J]. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 1990, 21(2): 37-40.
- 18 陈度,王书茂,康峰,等.联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J].农业工程学报,2011,27(9):18-21.
CHEN Du, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 18-21. (in Chinese)
- 19 刘守祥,孙士平,叶爱琼.喂入量对谷物联合收获机作业质量的影响及控制分析[J].长江大学学报(自科版)农学卷,2007,4(3):104-106.
- 20 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- 21 石林榕,吴建民,孙伟,等.基于离散元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J].农业工程学报,2014,30(8):40-48.
SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40-48. (in Chinese)
- 22 许大兴.纵向轴流滚筒的初步分析[J].河南科技大学学报:自然科学版,1980(1):115-131.
- 23 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(下册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 24 KEPNER R A, BAINER R, BARGER E L. Principles of farm machinery[M]. Westport: AVI Publishing Company, 1978.
- 25 相茂国.玉米籽粒直收机械适应性研究[D].淄博:山东理工大学,2014.
XIANG Maoguo. Study on the adaptability of corn grain harvesting device[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese)