

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.013

玉米联合收获机纹杆式脱粒元件设计与试验

王镇东^{1,2} 崔涛^{1,2} 张东兴^{1,2} 杨丽^{1,2} 和贤桃^{1,2} 张泽鹏^{1,2}

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

摘要: 我国华北地区玉米收获时籽粒含水率较高,采用钉齿式及杆齿式脱粒元件进行籽粒直收时,籽粒破碎率较高,为降低脱粒过程中籽粒破碎率,设计了一种纹杆式脱粒元件,分析其前倾角变化对果穗受力的影响规律,以籽粒破碎时压缩量为依据,对纹杆块顶端弧面形状进行设计。基于 EDEM 研究纹杆元件顶端参数对果穗受力的影响,采用拟水平法设计四因素四水平正交试验,试验结果表明:较优纹杆参数组合为前倾角 75°、凸棱倾角 25°、凸棱宽度 6 mm、凸棱高度 10 mm;通过台架试验探究滚筒转速、凹板间隙等工作参数对纹杆式滚筒脱粒效果的影响规律,当籽粒含水率为 28.5% 时,最优滚筒转速为 300 r/min,凹板间隙为 50 mm,此时籽粒破碎率为 5.34%。在最优工作参数下,对比不同脱粒元件脱粒效果,发现籽粒破碎率分别由杆齿式元件的 9.91%、钉齿式元件的 7.83% 下降至纹杆式脱粒元件的 5.34%,证明所设计的纹杆式脱粒元件能够有效降低脱粒过程中籽粒破碎率。

关键词: 玉米联合收获机; 籽粒直收; 脱粒元件; 纹杆式

中图分类号: S225.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0115-09 OSID: 

Design and Experiment of Rasp Bar Threshing Element of Corn Combine Harvester

WANG Zhendong^{1,2} CUI Tao^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} YANG Li^{1,2} HE Xiantao^{1,2} ZHANG Zepeng^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: The grain moisture content is high when corn is harvested in North China, and there is a problem of high broken rate of grain when using nail-toothed and pole-toothed threshing elements. In order to reduce the rate of broken grain during the threshing process, a rasp bar threshing element was designed. The influence of the forward inclination angle of the rasp bar on the force of the ear was analyzed and the top arc shape of the rasp bar was designed based on the size of the compression when the grain was broken. Based on EDEM the primary and secondary relationship between the rasp bar top parameters and the force of the ears was researched, and the four-factor four-level orthogonal test was designed by using the quasi-level method. The results showed that the better parameter combination of the rasp bar was forward; inclination angle was 75°, top rib inclination was 25°, top rib width was 6 mm, and top rib height was 10 mm. Through the bench test, the law of influence of the working parameters such as the rotor speed and the cylinder-concave clearance on the threshing effect of the drum was explored, it was found that when the moisture content of maize was 28.5%, the rotor speed was 300 r/min, the cylinder-concave clearance was 50 mm, at that time, the rates of broken grains was 5.34%. Comparing the threshing effect of different threshing elements under the optimal working parameters, it was found that the rates of broken grains were decreased from 9.91% of the pole-toothed element and 7.83% of the pin-toothed element to 5.34% of the rasp-bar element. It was proved that the rasp bar threshing element can effectively reduce the rates of broken grains.

Key words: corn combine harvester; grain harvest; threshing element; rasp bar

收稿日期: 2021-01-25 修回日期: 2021-02-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300300)和财政部和农业农村部:国家现代玉米产业技术体系项目
作者简介: 王镇东(1994—),男,博士生,主要从事农业装备与计算机测控研究,E-mail: tzywzd@163.com
通信作者: 崔涛(1985—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备与计算机测控研究,E-mail: cuitao850919@163.com

0 引言

目前,常用的玉米收获方式有摘穗收获及籽粒直收两种^[1-2]。相较于摘穗收获,籽粒直收可以一次完成摘穗、脱粒、清选等工作,具有省时省力等优点,是国外玉米收获主流方式,也是我国玉米收获技术的发展方向^[3]。由于我国华北地区玉米收获时籽粒含水率较高^[4],采用钉齿式或杆齿式脱粒滚筒进行收获存在籽粒破碎率较高的问题,破碎籽粒易造成霉变,降低粮食品质,影响农民收益。因此,降低高含水率玉米籽粒直收时的破碎率成为提高籽粒直收机械水平的重要途径。

为降低籽粒脱粒时的破碎率,国内外学者对脱粒机构及其工作参数进行了大量的研究^[5-20]。研究成果对降低籽粒直收时的破碎率具有重要意义,为低损籽粒直收最佳工作参数的确定提供了重要参考。但通过考察脱粒元件结构参数,实现降低脱粒过程中籽粒破碎率的研究鲜见报道。

本文对纹杆式脱粒元件结构参数进行研究,采用静力学分析与动力学分析相结合的方式,明确果穗与纹杆式元件接触时,其结构属性对果穗接触力的影响,并得到最优结构参数,通过台架试验优化工作参数,同时对比不同脱粒元件的脱粒效果,确定纹杆式脱粒元件有效降低籽粒破碎率的性能,为高含水率下玉米低损籽粒直收装置的研制提供依据。

1 纹杆式脱粒元件结构与工作原理

1.1 纹杆式脱粒元件结构

以谷物脱粒中使用的D型纹杆为参考^[21-22],设计玉米纹杆式脱粒元件。D型纹杆为长条形设计且两端面平行,谷物脱粒时,茎秆与籽粒同时进入脱粒系统,脱粒阻力较大,长条形纹杆在揉搓谷物的同时使茎秆层产生径向高频振动^[23-24],有利于谷物脱粒及籽粒分离。玉米脱粒时,只有果穗及少量杂质进入脱粒系统,脱粒阻力相对较小,且果穗直径较大,纹杆过长不利于果穗在滚筒内的轴向移动,因此设计为短纹杆。为防止堵塞,增强果穗沿滚筒轴向向后运动趋势,纹杆元件远离喂入端采用斜面设计,当果穗与纹杆块斜面撞击时,其受力分量使果穗向滚筒后方移动。

纹杆式脱粒元件结构如图1所示,其参数主要包括顶部参数及前倾斜面角度 θ 。顶部参数有顶部凸棱宽度 W 、顶部凸棱高点高度 h 、凸棱倾角 β 以及顶部弧面形状。与果穗接触时,前倾斜面可以“铲起”玉米果穗,使果穗与脱粒元件的接触更柔和。顶部凸棱所在面与凹板共同作用,对果穗“揉搓”实

现脱粒,弧面形状影响揉搓强度;凸棱高点高度及凸棱宽度决定果穗接触面积,影响籽粒的压强从而影响破碎率;凸棱倾角使果穗产生不同的运动趋势,影响果穗运动进程,从而影响脱粒效果。

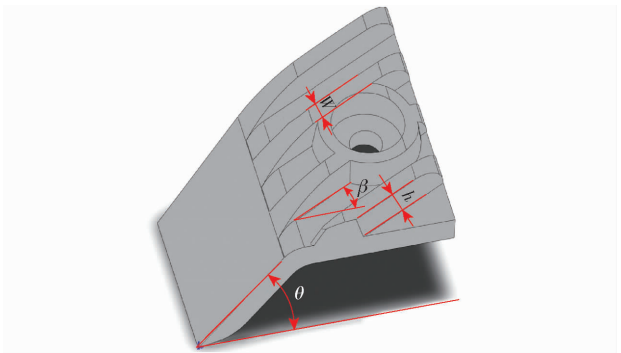


图1 纹杆式脱粒元件结构示意图

Fig.1 Rasp-bar type threshing element

1.2 纹杆式脱粒元件工作原理

纹杆式脱粒元件工作过程主要包括前倾斜面对果穗的击打和脱粒元件顶部与凹板共同作用对果穗的揉搓。如图2所示,其中I为纹杆元件前倾角撞击果穗阶段,II为过渡状态,III为纹杆顶部与凹板共同作用揉搓果穗阶段。

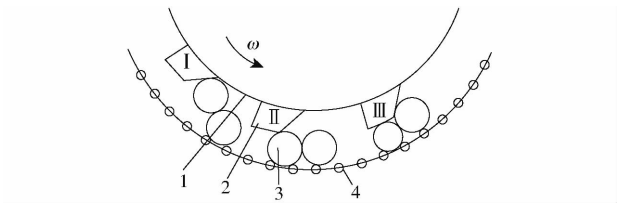


图2 纹杆块与果穗接触示意图

Fig.2 Schematic of contact between rasp-bar and ear

1. 脱粒滚筒 2. 纹杆式元件 3. 果穗 4. 凹板

纹杆前倾角与果穗接触时对果穗撞击,同时果穗沿前倾斜面向纹杆顶部移动,在此过程中,部分籽粒实现脱粒;当果穗运动至图中III所示位置时,在脱粒元件与凹板共同作用下,果穗受到揉搓,籽粒与芯轴的连接变“松散”,实现部分脱粒;经揉搓后的果穗与脱粒元件连续接触,最终实现完全脱粒。

与钉齿式及杆齿式脱粒元件击打脱粒相比,纹杆式脱粒元件与果穗接触更柔和,且经过揉搓后,籽粒变松散,更易于脱粒,有利于降低籽粒破碎率。

2 受力分析与参数设计

2.1 果穗与纹杆前倾角接触受力分析

纹杆式脱粒元件顶部与果穗接触时,主要通过凹板配合,对果穗进行揉搓,使果穗中籽粒“松散”达到脱粒的目的,采用静力学分析不易于体现该过程,因此采用动力学仿真的方式动态分析该过程;纹杆式脱粒元件前倾角与果穗接触时,

主要通过果穗撞击使籽粒与芯轴分离,通过分析果穗所受合力以得到倾角对果穗击打强度的影响。不考虑接触过程中果穗弹塑性形变及脱粒对果穗中未脱籽粒受力的影响,对果穗与纹杆式元件前倾角碰撞时果穗受力情况进行分析。果穗受力分析如图 3 所示。

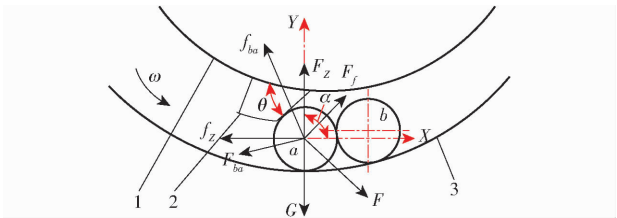


图 3 脱粒元件撞击玉米果穗受力分析
Fig.3 Stress analysis of corn ear impacted by rasp bar
1. 滚筒 2. 纹杆式脱粒元件 3. 脱粒凹板

通过实际测量,单个果穗平均质量为 350 g 左右,其所受重力为 3.5 N。查阅资料^[13]发现,果穗受到脱粒元件击打力大于 114.35 N,远大于果穗重力。果穗 *b* 对果穗 *a* 的支持力 F_{ba} 为重力的分力,在量级上远小于脱粒元件对 *a* 的击打力,因此受力分析时忽略果穗 *b* 对果穗 *a* 的支持力及摩擦力。建立图 3 所示坐标系,对果穗 *a* 受力进行分析,在水平及竖直方向对各力进行分解,分解式为

$$F_x = F \sin \theta + F_f \cos \theta - f_z \tag{1}$$

$$F_y = -F \cos \theta + F_f \sin \theta + F_z - G \tag{2}$$

式中 F ——脱粒元件对果穗 *a* 击打力, N
 F_f ——果穗 *a* 所受脱粒元件摩擦力, N
 F_z ——凹板对果穗 *a* 支持力, N
 f_z ——果穗 *a* 受凹板摩擦力, N
 G ——果穗 *a* 所受重力, N
 θ ——脱粒元件前倾角, $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$

整理可得果穗 *a* 所受合力 F_T 为
$$F_T = [F^2 + F_f^2 + f_z^2 + (F_z - G)^2 - 2f_z(F \sin \theta + F_f \cos \theta) + 2(F_z - G)(-F \cos \theta + F_f \sin \theta)]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

其中 $f_z = \mu F_z \tag{4}$
 $F_f = \mu F \tag{5}$

式中 μ ——籽粒与铁板摩擦因数
令 $N = -f_z(F \sin \theta + F_f \cos \theta) \tag{6}$
 $M = (F_z - G)(-F \cos \theta + F_f \sin \theta) \tag{7}$
将式(4)、(5)代入式(6)、(7),对 N 及 M 分别求二阶导数及三阶导数,得

$$N(\theta)' = Ff_z(-\cos \theta + \mu \sin \theta) \tag{8}$$

$$N(\theta)'' = Ff_z(\sin \theta + \mu \cos \theta) \tag{9}$$

$$M(\theta)' = F(F_z - G)(\sin \theta + \mu \cos \theta) \tag{10}$$

$$M(\theta)'' = F(F_z - G)(\cos \theta - \mu \sin \theta) \tag{11}$$

$$M(\theta)''' = F(F_z - G)(-\sin \theta - \mu \cos \theta) \tag{12}$$

由式(9)可知,式(8)为增函数,且 $N'(0) < 0$, $N'(90) > 0$;由式(12)可知,式(11)为减函数,且 $M'(0) > 0$, $M'(90) < 0$,同时由于 $F_z - G > 0$,因此式(10)在角度 θ 区间范围内为先增后减的大于 0 的函数。为确定 $N + M$ 的增减性,求解 $N + M$ 在端点处一阶导数

$$N'(0) + M'(0) = -F_f G \tag{13}$$

$$N'(90) + M'(90) = f_z F_f + F(F_z - G) \tag{14}$$

即 $N + M$ 在角度取值范围内变化趋势为先减后增,存在最优角度使合力最小。

2.2 纹杆元件顶端弧面设计

纹杆元件顶端弧面与凹板共同作用对果穗进行揉搓,假定该过程果穗为纯滚动,当顶端弧长过小时,在与果穗接触的过程中,无法达到整圈籽粒揉搓松散的目标,不利于果穗与纹杆元件下一次接触时脱粒;顶端弧长过长时,随着揉搓时果穗的运动,凹板间隙逐渐减小,对果穗的挤压增强,籽粒容易受挤压造成顶端破碎。因此,为使纹杆元件与凹板共同作用对果穗充分揉搓,松散籽粒,同时又不致于过度揉搓,造成籽粒受挤压后破碎,设计纹杆元件顶端与凹板对果穗均揉搓半圈,以此为依据确定纹杆元件顶端弧长,计算式为

$$L = \frac{\pi d}{2} \tag{15}$$

式中 L ——纹杆元件顶端弧长, mm
 d ——果穗直径, mm

查阅资料^[25]可知,籽粒含水率为 17.1% 时,当压缩量大于 1.7 mm 籽粒发生破碎。随籽粒含水率增高,发生破碎时所对应的应力降低,同时由于籽粒韧性增强,其应变会增大^[26],即较高籽粒含水率下发生破碎时所能承受的最大压缩量增大。为使纹杆元件顶端弧面形状满足不同含水率下脱粒需求,以籽粒含水率较小时所能承受的最大应变量为依据,对纹杆元件弧面进行设计计算。以滚筒轴心为坐标原点,建立图 4 所示纹杆式元件顶端与果穗接触时的关系图。

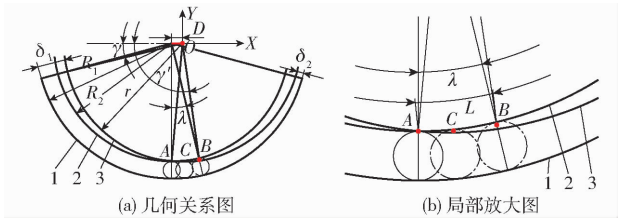


图 4 纹杆式元件顶端与果穗接触关系图
Fig.4 Contact relationship between top of rasp bar element and ear
1. 凹板圆弧 2. 果穗沿凹板运动顶点圆弧 3. 凹板间隙圆弧

通过几何关系易知,凹板间隙 δ 与角度 γ 关系为

$$\delta = R_1 - \sqrt{r^2 + D^2 - 2rD\cos\gamma}$$

(16)

式中 R_1 ——凹板弧面半径,mm
 r ——滚筒顶点旋转半径,mm
 D ——凹板圆心与滚筒圆心偏心距,mm
 γ ——脱粒元件与果穗接触点和坐标原点连线与负 X 方向夹角, (°)

当果穗不受压缩沿凹板运动时,果穗最高点运动方程为

$$(x + D)^2 + y^2 = R_2^2$$

(17)

其中

$$R_2 = R_1 - d$$

(18)

式中 R_2 ——果穗最高点运动弧面半径,mm

凹板与纹杆对果穗共同作用时,假设凹板侧籽粒及纹杆侧籽粒压缩量变化相同。果穗在凹板最低位置开始与纹杆元件顶端接触,在运动中果穗压缩量均匀增大,纹杆顶端与果穗脱离接触时,籽粒压缩量达到最大值。果穗与纹杆弧面开始接触时,通过几何关系可求得接触点 A 坐标值。

果穗沿凹板滚动 1/2 圈时,即果穗顶点圆对应弧长为 L ,绕果穗顶点圆旋转角 λ 计算式为

$$\lambda = \frac{180L}{\pi r}$$

(19)

通过三角函数计算此时脱粒元件与果穗接触点和坐标原点连线与负 X 方向夹角 γ' 为

$$\gamma' = 180 - \arctan \frac{r\sin(90 - \lambda)}{rcos(90 - \lambda) - D}$$

(20)

此时凹板间隙 δ 可由式(16)求得,果穗压缩量达到破碎临界值 3.4 mm(凹板侧及纹杆顶端各压缩 1.7 mm)。计算纹杆与果穗作用点 B 与果穗顶点圆圆心距离为

$$l = r + (d - \delta - 3.4)$$

(21)

点 B 在水平及竖直方向的坐标为

$$x = l\sin\lambda - D$$

(22)

$$y = l\cos\lambda$$

(23)

同理可以计算出果穗滚动 1/4 圈,果穗压缩量为 1.7 mm(凹板侧及纹杆顶端各压缩 0.85 mm)时,纹杆与果穗接触点 C 的坐标。

设计凹板与滚筒轴向偏心距为 25 mm,凹板半径为 345 mm。为使果穗充分揉搓,以果穗平均直径为参考,求得接触点 A 、 B 、 C 坐标,得到脱粒元件弧面圆表达式为

$$(x + 16.61)^2 + (y - 0.15)^2 = 305.26^2$$

(24)

以接触点为起点,逆时针方向截取弧长为 L 的弧线,即为纹杆元件截面的顶端弧线。

3 仿真试验

果穗在脱粒滚筒内的受力情况较复杂,静力学

分析难以表示纹杆顶部凸棱倾角和凸棱宽度对果穗受力以及果穗运动情况的影响。因此,通过离散元仿真软件 EDEM,动态分析果穗在滚筒内的运动及受力过程;为确定纹杆块最优结构参数,设计四因素四水平正交试验,探究纹杆块参数对果穗脱粒性能的影响主次顺序,并确定较优参数组合。

3.1 玉米果穗建模

以华北地区种植面积较大的郑单 958 玉米品种为研究对象,随机选取 100 个果穗,使用游标卡尺分别对果穗大端直径、小端直径及果穗长度进行测量,取其平均值如表 1 所示。以此为依据在仿真软件 EDEM 中建立玉米果穗模型,如图 5 所示。

表 1 玉米果穗尺寸参数

Tab.1 Ear size parameters		mm	
参数	最大值	最小值	平均值
大端直径	53.87	39.75	49.24
小端直径	38.63	20.78	32.66
果穗长度	205.46	136.25	178.33



图 5 玉米果穗实体及模型

Fig.5 Model and entity of ear

3.2 参数设置

在 EDEM 中选取 Hertz - Mindlin (no - slip) 无滑动模型。根据华北地区玉米籽粒收获机的实际作业工况,设定滚筒转速为 300 r/min,凹板间隙为 50 mm。查阅相关资料^[10],设定材料物理属性及材料之间接触属性参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters	
参数	数值
泊松比	0.4
剪切模量/MPa	1.37 × 10 ⁸
玉米籽粒密度/(g·cm ⁻³)	1.197
玉米籽粒间碰撞恢复系数	0.182
玉米籽粒与钢板碰撞恢复系数	0.709
玉米籽粒与钢板静摩擦因数	0.351
玉米籽粒间静摩擦因数	0.431
玉米籽粒与钢板动摩擦因数	0.053 1
玉米籽粒与玉米动摩擦因数	0.078 2

3.3 脱粒滚筒建模

使用三维制图软件 SolidWorks 对脱粒滚筒进行

建模,并对不影响脱粒性能的结构进行简化,滚筒仿真模型如图 6 所示。按表 2 所示仿真参数进行设定,以 8 kg/s 的喂入量连续喂入果穗 3 s。

3.4 纹杆元件顶端参数仿真试验

设计不同顶部参数纹杆元件,通过仿真分析,提取果穗在不同顶部参数纹杆元件与凹板共同作用时,果穗与纹杆元件顶端接触前后能量变化,确定最优顶端参数组合。由于仿真时变量仅为纹杆元件顶端参数,因此造成果穗能量变化的原因即为纹杆元

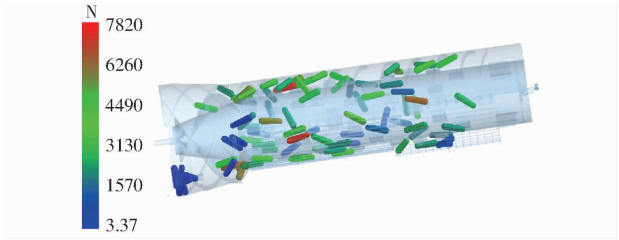


图 6 脱粒滚筒仿真模型

Fig. 6 Simulation model of threshing drum

件顶端参数。仿真结果如表 3 ~ 5 所示。

表 3 不同凸棱倾角时接触前后果穗能量

Tab.3 Effect of top rib inclination on ear energy change before and after contactJ								
参数	顶部凸棱倾角/(°)							
	25		45		65		85	
	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后
总能量	20.88	33.95	23.69	38.95	25.16	40.91	24.61	38.28
动能	19.02	32.05	21.02	32.83	21.37	27.43	19.21	30.15
转动动能	1.41	2.09	1.98	5.09	3.28	8.81	4.35	7.89

表 4 不同凸棱宽度时接触前后果穗能量

Tab.4 Effect of top rib width on ear energy change before and after contactJ						
参数	凸棱宽度/mm					
	3		6		9	
	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后
总能量	24.79	35.87	22.68	34.62	25.73	37.13
动能	20.62	31.31	19.83	30.71	21.25	32.92
转动动能	1.29	3.91	0.96	3.17	1.38	3.68

表 5 不同凸棱高度时接触前后果穗能量

Tab.5 Effect of top rib height on ear energy change before and after contactJ								
参数	凸棱高度/mm							
	7.5		10.0		12.5		15.0	
	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后	碰撞前	碰撞后
总能量	25.39	35.92	23.28	34.71	24.51	35.07	25.36	36.47
动能	19.93	30.11	19.27	29.47	20.26	29.84	20.48	31.73
转动动能	1.96	3.89	1.73	4.02	2.38	4.16	2.75	4.86

对果穗受到纹杆顶部与凹板共同作用时,果穗与纹杆顶端接触前后能量变化进行分析,随凸棱倾角增大,与脱粒元件碰撞前果穗总能量先增大后减小,碰撞后果穗能量增加量相差不大;凸棱宽度及凸棱高度对碰撞前后果穗能量及增加量影响不大。纹杆元件顶部参数通过与凹板共同作用对果穗脱粒产生影响,纹杆顶部凸棱倾角对果穗产生影响时,其角度的变化会使果穗产生不同的运动趋势,造成果穗动能及转动动能出现较显著的变化;顶部凸棱宽度及凸棱高度主要影响果穗的接触面积,因此对能量变化影响不显著。

3.5 正交试验

以影响果穗受力及运动的纹杆元件前倾角、凸棱倾角、凸棱高度及凸棱宽度为试验因素,以果穗受

到的合力为试验指标,设计四因素四水平正交试验,探究纹杆元件结构参数对果穗受力的影响规律。

3.5.1 正交试验设计与结果

由于水平数量不相等,因此设计混合水平的正交试验。采用拟水平法设计四因素四水平正交试验,确定纹杆元件结构参数对脱粒过程的影响。查阅资料^[24]可知,钉齿式脱粒元件高度范围为 60 ~ 70 mm,设计纹杆式脱粒元件高度为 65 mm,由此确定前倾斜面最小设计角度为 45°,最大角度为 90°;为使纹杆元件顶端与果穗作用时,果穗产生沿滚筒轴向向后运动趋势,凸棱倾角设计角度小于 90°;参考玉米籽粒平均尺寸,对凸棱宽度及高度进行设计。试验因素及结果如表 6、7 所示。表中 A、B、C、D 为因素水平值,C'为因素 C 补齐水平数量后的水平安排。

表 6 试验因素与水平
Tab.6 Experimental factors levels

水平	因素			
	前倾角/	凸棱倾角/	凸棱宽度/	凸棱高度/
	(°)	(°)	mm	mm
1	45	25	3	7.5
2	60	45	6	10.0
3	75	65	9	12.5
4	90	85	6	15.0

表 7 试验方案与结果
Tab.7 Test design scheme and results

序号	因素					果穗 受力/N
	A	B	C	C'	D	
1	1	1	1	1	1	175.23
2	1	2	2	2	2	180.53
3	1	3	3	3	3	184.14
4	1	4	4	2	4	179.69
5	2	1	2	2	3	165.41
6	2	2	1	1	4	182.60
7	2	3	4	2	1	178.85
8	2	4	3	3	2	174.26
9	3	1	3	3	4	167.56
10	3	2	4	2	3	169.98
11	3	3	1	1	2	172.27
12	3	4	2	2	1	172.15
13	4	1	4	2	2	176.45
14	4	2	3	3	1	181.23
15	4	3	2	2	4	185.62
16	4	4	1	1	3	184.32

3.5.2 极差分析

为探究最佳参数组合,对试验结果进行极差分析,结果如表 8 所示。可以看出纹杆元件结构参数对果穗受力影响由大到小依次为前倾角、凸棱倾角、凸棱宽度、凸棱高度。

表 8 各指标极差分析
Tab.8 Analysis of range of each indicator

性能 指标	因素			
	A	B	C	D
k_1	179.90	171.17	178.61	176.86
k_2	175.28	178.58	176.08	175.88
k_3	170.49	180.22	176.80	175.96
k_4	181.91	177.60		178.87
R_j	11.42	9.05	2.53	2.99

3.5.3 方差分析

方差分析如表 9 所示,由方差分析结果可知,纹杆元件前倾角对果穗受力具有显著影响,凸棱倾角、凸棱宽度及凸棱高度对果穗受力影响不显著。

籽粒发生破碎时破坏力范围为 124.33~347 N,籽粒由果柄脱下受力范围为 1.97~11.93 N^[18]。各因素对果穗受力的影响由大到小为 A、B、C、D。最终确

表 9 方差分析
Tab.9 Variance analysis result

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性
A	311.01	3	103.67	10.27	*
B	188.82	3	62.94	6.24	
C	16.99	2	8.49	0.84	
D	23.15	3	7.72	0.76	
误差	40.36	4	10.09		

注: * 表示因素对试验结果有影响。

定最优结构参数为 $A_3B_1C_2D_2$,即纹杆元件较优参数组合为:前倾角 75°、凸棱倾角 25°、凸棱宽度 6 mm、凸棱高度 10 mm。

4 台架试验

4.1 试验设计

为确定滚筒转速、凹板间隙等工作参数对纹杆式脱粒元件脱粒效果的影响,以仿真分析得到的最优结构参数纹杆元件为试验对象,以籽粒破碎率及未脱净率为指标,设计双因素试验,探究工作参数交互作用对脱粒效果的影响;以最优工作参数分别对杆齿式、钉齿式及纹杆式脱粒元件进行脱粒试验,对比不同脱粒元件脱粒性能。脱粒元件如图 7 所示。

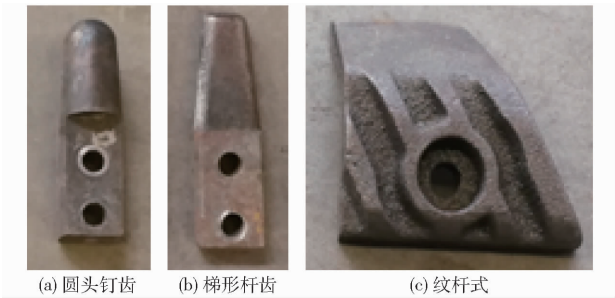


图 7 不同形式脱粒元件

Fig.7 Different types of threshing elements

4.2 试验材料与方法

试验装置采用单纵轴流脱粒滚筒,滚筒中脱粒元件顶端所在圆直径为 600 mm。试验台架如图 8 所示。试验时间为 2019 年 9 月底,平均气温为 29℃,在籽粒含水率为 28.5% 时,每组试验选取人工摘取的郑单 958 玉米果穗 200 穗,平铺于输送链板上,参考华北地区籽粒直收机械工作参数,以喂入量 8 kg/s 将果穗送入试验台架,经脱粒滚筒脱粒后,脱出物落入接粮装置,苞叶、芯轴等落入接杂装置。

4.3 试验指标

根据 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》和 GB/T 5982—2005《脱粒机试验方法》的检验标准,对试验结果进行处理,得到籽粒破碎率及未脱净率。

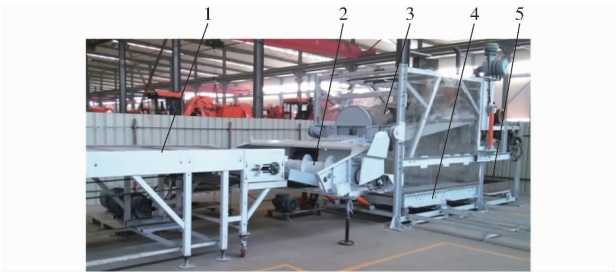


图 8 纵轴流玉米脱粒分离试验台

Fig. 8 Longitudinal axial flow maize threshing and separating test bench

1. 链板式果穗输送装置 2. 螺旋输送器及过桥 3. 纵轴流脱粒分离装置 4. 接料装置 5. 接杂装置

4.4 试验结果及分析

对试验数据处理发现,滚筒转速、凹板间隙及两者的交互作用对脱粒过程中籽粒破碎率及未脱净率均有显著影响。为确定其具体影响规律,以籽粒破碎率最低时滚筒转速及凹板间隙为依据,设计单因素试验,探究滚筒转速、凹板间隙对脱粒性能的影响规律。

4.4.1 滚筒转速对脱粒质量的影响

最优凹板间隙下,籽粒破碎率及未脱净率随滚筒转速变化规律如图 9 所示。可以发现,籽粒未脱净率随滚筒转速增加逐渐降低;在滚筒转速为 200 ~ 300 r/min 时,籽粒破碎率相差不大,滚筒转速继续增加,籽粒破碎率逐渐增大。在转速为 300 r/min 时,籽粒破碎率最低,为 5.34%,且未脱净率低于国标要求。随滚筒转速增加,脱粒元件对果穗击打力增大,籽粒更易于与芯轴分离,因此未脱净率降低,同时,过大的击打力会造成破碎率增大。

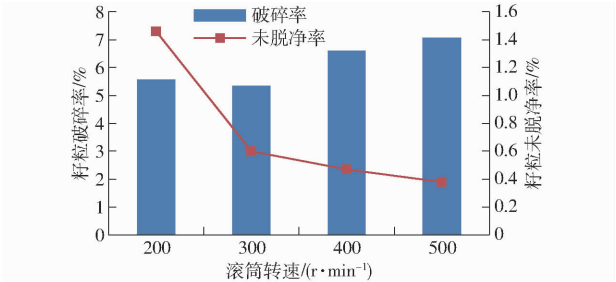


图 9 滚筒转速对脱粒性能的影响

Fig. 9 Effect of rotor speed on threshing performance

对滚筒下方接料装置沿滚筒轴线均匀分为 21 个区间并逐一编号。由图 10 可以发现,随滚筒转速变化,脱出物质量分布及累加质量分布趋势基本相同,质量分布峰值均出现在滚筒长度的 40% 左右位置。

4.4.2 凹板间隙对脱粒质量的影响

由图 11 可以发现,随着凹板间隙增大,籽粒破碎率先减小后增大,在凹板间隙为 50 mm 时,籽粒

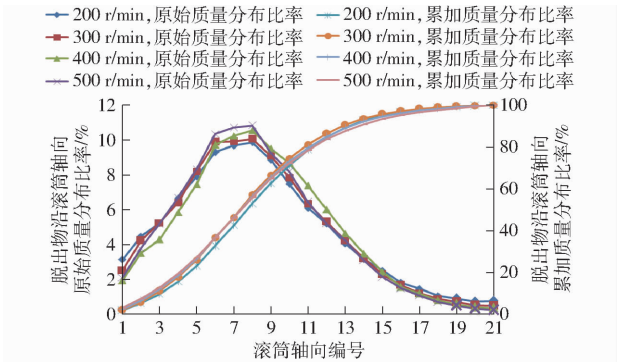


图 10 滚筒转速对脱出物分布的影响

Fig. 10 Effect of rotor speed on distribution of extractives

破碎率最低。凹板间隙过小时,果穗受脱粒元件与凹板的挤压,芯轴及籽粒易发生破碎,造成破碎率及未脱净率较高;随间隙增大,果穗受挤压造成的破碎减少,籽粒及芯轴的破碎降低;当间隙过大时,受脱粒元件击打后果穗与凹板碰撞,造成籽粒破碎率增加,同时该过程不足以使芯轴破碎,因此未脱净率降低。由图 12 发现,凹板间隙对脱出物分布影响不大。

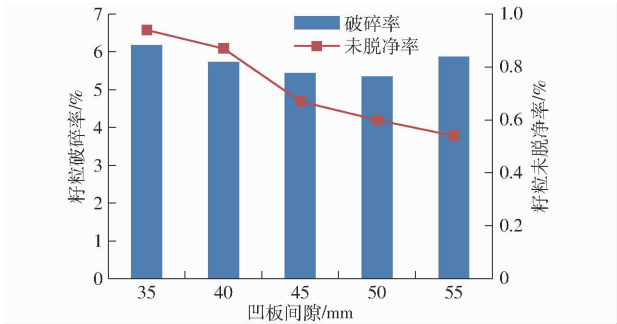


图 11 凹板间隙对脱粒性能的影响

Fig. 11 Effect of cylinder-concave clearance on threshing performance

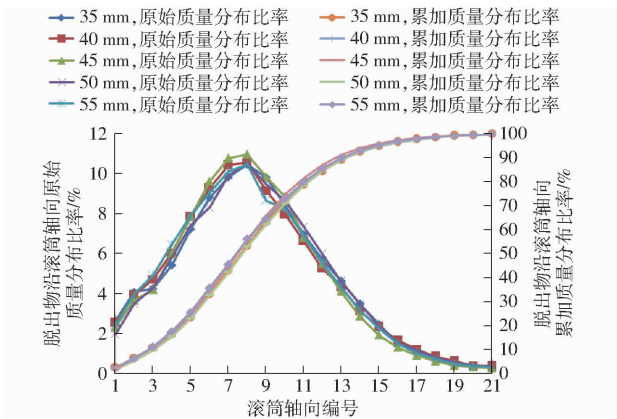


图 12 凹板间隙对脱出物分布的影响

Fig. 12 Effect of cylinder-concave clearance on distribution of extractives

4.5 试验对比结果与分析

在滚筒转速 300 r/min、凹板间隙 50 mm 时,对钉齿式、杆齿式及纹杆式脱粒元件分别进行脱粒试

验,籽粒破碎率及未脱净率如图 13 所示。

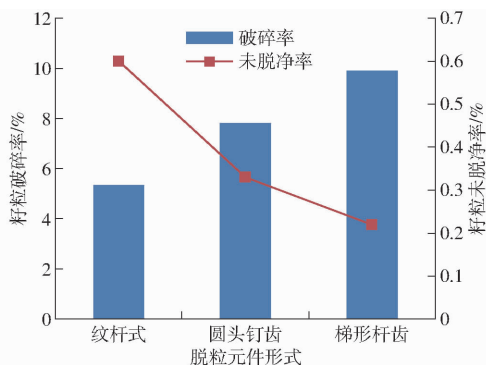


图 13 不同脱粒元件对脱粒性能的影响

Fig. 13 Effect of different threshing elements on threshing performance

由不同脱粒元件对比试验可知,纹杆式脱粒元件籽粒未脱净率高于钉齿式及杆齿式元件,但满足国标要求;杆齿式脱粒元件籽粒破碎率为 9.91%,钉齿式元件籽粒破碎率为 7.83%,纹杆式脱粒元件籽粒破碎率为 5.34%,较钉齿式元件下降了 31.8%,较杆齿式元件下降了 46.12%。

对不同脱粒元件脱出物分布进行统计,结果如图 14 所示。由试验结果可以看出,纹杆式脱粒元件脱出物峰值出现位置较钉齿式及杆齿式更靠近滚筒中间位置,由脱出物质量累加分布可以发现,纹杆式脱粒元件较其他两种元件脱粒速率更平缓。

综合脱粒元件脱粒质量及脱出物分布规律,通过分析可知,钉齿式及杆齿式脱粒元件以击打脱粒为主,脱粒能力强,因此籽粒未脱净率较低,脱粒速率较高,同时由于脱粒元件对果穗直接击打造成籽粒破碎率较高;纹杆式脱粒元件主要通过击打及揉搓实现脱粒,纹杆元件与果穗接触时通过前倾斜面实现较平缓的过渡,对果穗的击打力相对较小,因此果穗脱粒相对较慢,但仍然能够在滚筒长度范围

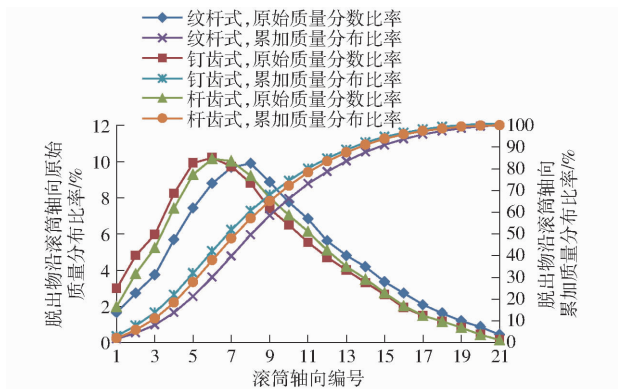


图 14 不同脱粒元件对脱出物分布的影响

Fig. 14 Effect of different threshing elements on distribution of threshing product

内完成脱粒作业。

5 结论

(1)设计了一种纹杆式脱粒元件,分析果穗与纹杆元件接触时其受力随倾角变化情况,基于籽粒压缩破碎数据,确定纹杆元件顶端弧面形状。基于离散元仿真设计四因素四水平正交试验,明确了纹杆元件结构参数影响果穗受力的主次因素依次为前倾角、凸棱倾角、凸棱宽度、凸棱高度,最终确定纹杆式脱粒元件较优参数为:前倾角 75°、凸棱倾角 25°、凸棱宽度 6 mm、凸棱高度 10 mm。

(2)通过双因素试验,分析凹板间隙及滚筒转速对纹杆式脱粒元件脱粒质量的影响规律,确定滚筒转速为 300 r/min,凹板间隙为 50 mm 时,籽粒破碎率最低,为 5.34%。以最优工作参数对比不同脱粒元件脱粒效果,籽粒破碎率由钉齿式元件的 7.83% 及杆齿式元件的 9.91% 下降至纹杆元件的 5.34%,分别下降了 31.8% 和 46.12%,证明纹杆式脱粒元件明显提高了脱粒质量。

参 考 文 献

- [1] YANG Li, CUI Tao, QU Zhe, et al. Development and application of mechanized maize harvesters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(3):15-28.
- [2] 陈志,郝付平,王锋德,等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):44-50. CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):44-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.009. (in Chinese)
- [3] 崔涛,张东兴,杨丽,等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):1-13. CUI Tao, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(12):1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191201&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.001. (in Chinese)
- [4] 李淑芳,张春宵,路明,等. 玉米籽粒自然脱水速率研究进展[J]. 分子植物育种,2014,12(4):825-829. LI Shufang, ZHANG Chunxiao, LU Ming, et al. Research development of kernel dehydration rate in maize[J]. Molecular Plant Breeding, 2014,12(4):825-829. (in Chinese)

- [5] MIU P I. Combin harvesters theory, modeling, and design[M]. CRC Press,2016.
- [6] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 60(1):105 – 109.
- [7] MIU P I, KUTZBACH H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,58(2):93 – 99.
- [8] ARNOLD R E. Experiments with rasp bar threshing drums[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1964, 9(2):99 – 131.
- [9] WAELTI H, BUCHELE W F. Factors affecting corn kernel damage combine cylinders[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(1):55 – 59.
- [10] 屈哲. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
QU Zhe. Research on combined maize threshing and separating device with low damage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [11] 屈哲, 张东兴, 杨丽, 等. 纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):58 – 65.
QU Zhe, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Experiment on feed rate and cylinder speed of longitudinal axial flow threshing and separating device for maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):58 – 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180208&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.008. (in Chinese)
- [12] 刘浩. 低破碎率玉米脱粒滚筒关键部件的优化设计与分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
LIU Hao. Optimization design and analysis of key parts of low crushing rate corn threshing drum[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [13] 苏媛, 刘浩, 徐杨, 等. 轴流式玉米脱粒装置钉齿元件优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):258 – 265.
SU Yuan, LIU Hao, XU Yang, et al. Optimization and experiment of spike-tooth elements of axial flow corn threshing device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):258 – 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s034&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.034. (in Chinese)
- [14] 李义博, 姜建军, 徐杨, 等. 高含水率玉米橡胶复合钉齿制备与脱粒性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(11):158 – 167.
LI Yibo, JIANG Jianjun, XU Yang, et al. Preparation and threshing performance tests of rubber composite nail teeth under maize with high moisture content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):158 – 167. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.017. (in Chinese)
- [15] 耿端阳, 何珂, 王骞, 等. 横轴流式玉米柔性脱粒装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3):101 – 108.
GENG Duanyang, HE Ke, WANG Qian, et al. Design and experiment on transverse axial flow flexible threshing device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):101 – 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190310&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.010. (in Chinese)
- [16] 耿端阳, 谭德蕾, 于兴瑞, 等. 玉米柔性脱粒滚筒脱粒元件设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(5):1923 – 1933.
GENG Duanyang, TAN Delei, YU Xingrui, et al. Design and test of corn flexible threshing cylinder element[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5):1923 – 1933. (in Chinese)
- [17] 邸志峰, 崔中凯, 张华, 等. 纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):28 – 34.
DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):28 – 34. (in Chinese)
- [18] 崔中凯, 邸志峰, 张华, 等. 智能玉米籽粒联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9):26 – 30.
CUI Zhongkai, DI Zhifeng, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of intelligent corn grain harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9):26 – 30. (in Chinese)
- [19] LI Xiaoyu, DU Yuefeng, GUO Jinglin, et al. Design, simulation, and test of a new threshing cylinder for high moisture content corn[J]. Applied Sciences, 2020, 10(14):4925.
- [20] ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Experimental study on the key factors of low-loss threshing of high-moisture maize[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5):23 – 31.
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [22] [波兰]卡娜沃依斯基. 收获机械[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- [23] 余友泰, 程万里. 农业机械的构造、原理及计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1959.
- [24] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 张烨, 邹湘军, 方壮东, 等. 玉米籽粒的压缩力学特性研究[J]. 广东农业科学, 2012(20):163 – 165.
- [26] SU Yuan, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Damage resistance and compressive properties of bulk maize kernels at varying pressing factors: experiments and modeling[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(7):e13267.