

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.013

# 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置设计与试验

王占滨<sup>1</sup> 王振伟<sup>2</sup> 张银平<sup>1,3</sup> 闫文玺<sup>1</sup> 迟岩杰<sup>1</sup> 刘成强<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014;  
3. 山东时风(集团)有限公司, 聊城 252800)

**摘要:** 针对两熟区玉米籽粒直收过程中籽粒破碎严重、未脱净率高的问题,设计了一种纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置。该脱粒装置采用纵轴流脱粒滚筒,脱粒滚筒上安装脱粒锤爪,脱粒前段和脱粒后段可更换不同型式的脱粒锤爪,脱粒锤爪与脱粒滚筒柔性连接,以降低籽粒破碎率,实现玉米的柔性低损伤脱粒。脱粒凹板采用分段组合式,便于脱粒段、排杂段的调整,凹板圆柱钢上设计半球形凸起,以增加摩擦力,提高脱净率。选取喂入量、滚筒转速、脱粒锤爪型式作为试验因素进行了正交试验,确定了在不同含水率下,喂入量、滚筒转速和脱粒锤爪的最佳参数组合,结果表明:含水率为25.12%时,最佳参数组合为滚筒转速500 r/min,喂入量8 kg/s,起脱段为扁头脱粒锤爪,平脱段和强脱段为圆头脱粒锤爪,此时籽粒破碎率为3.73%,未脱净率为0.69%;含水率为32.83%时,最佳参数组合为滚筒转速450 r/min,喂入量8 kg/s,起脱段、平脱段和强脱段均为圆头脱粒锤爪,此时籽粒破碎率为4.36%,未脱净率为0.70%。

**关键词:** 玉米脱粒装置;纵轴流;柔性;脱粒锤爪

**中图分类号:** S226.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0109-09

## Design and Test of Longitudinal Axial Flexible Hammer-claw Corn Thresher

WANG Zhanbin<sup>1</sup> WANG Zhenwei<sup>2</sup> ZHANG Yinping<sup>1,3</sup> YAN Wenxi<sup>1</sup> CHI Yanjie<sup>1</sup> LIU Chengqiang<sup>3</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

3. Shandong Shifeng (Group) Co., Ltd., Liaocheng 252800, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of serious grain breakage and high unstripping rate in the direct harvest of corn in double-cropping area, a longitudinal axial flexible hammer-claw corn threshing device was designed. The threshing device adopted the longitudinal axial flow threshing drum, and the threshing hammer-claw was installed on the threshing drum. Different types of threshing hammer-claw can be replaced in the front and back sections of threshing, and the threshing hammer-claw can be flexibly connected with the threshing drum to reduce the grain crushing rate and realize the flexible and low-damage threshing of corn. The threshing concave plate adopted a segmented combination type, which was convenient for the adjustment of the threshing section and the separation section. The concave plate cylindrical steel was designed with a semi-spherical protrusion to increase the rubbing force and improve the removed rate. The feeding amount and drum rotational speed, threshing hammer-claw type were taken as test factors, the orthogonal experiment under different moisture contents was confirmed, roller speed and the best parameter combination of threshing hammer-claw results showed that under the condition of moisture content of 25.12%, the best parameter combination for the drum rotating speed was 500 r/min, feeding amount was 8 kg/s, the take-off section was a flat head threshing hammer, and the flat and strong release sections were round head threshing hammer-claw, the grain crushing rate was 3.73%, unstripping rate was 0.69%. Under the condition of water content of 32.83%, the optimal parameter combination was the drum speed of 450 r/min, the feeding amount of 8 kg/s, the take-off section, the

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-22

**基金项目:** 中国博士后基金项目(2018M642685)、国家重点研发计划项目(2018YFD03006)和山东省现代农业产业体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目

**作者简介:** 王占滨(1996—),男,硕士生,主要从事玉米籽粒直收技术与装备研究,E-mail: 724090343@qq.com

**通信作者:** 张银平(1989—),女,讲师,主要从事旱作农业机械化体系及装备研究,E-mail: zhangyinping929@163.com

flat and strong release sections were all round head threshing hammer-claws, and the grain crushing rate and unstripping rate were 4.36% and 0.70%, respectively.

**Key words:** corn threshing device; longitudinal axial flow; flexibility; threshing claw

## 0 引言

玉米机械化收获是实现玉米生产全程机械化的重要环节,玉米机械化收获有果穗收获和籽粒收获2种方式。果穗收获属于玉米机械化收获的初级阶段,果穗收获技术基本趋于成熟。随着农业的规模化生产,玉米籽粒收获能够减少作业环节,节约劳动力,成为玉米收获技术的发展方向<sup>[1]</sup>。近年来,我国的玉米生产实现了十二连增,其中玉米总产量从 $1.5 \times 10^8$  t提升到 $2.6 \times 10^8$  t,成为我国的第一大粮食作物,种植面积也实现了很大的提升,由原来的 $1.8210 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>增加到 $2.5495 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>,由此可见,我国玉米产业正在蓬勃发展。其中,黄淮海地区是我国的粮食主产区之一,受气候的影响,采用冬小麦-夏玉米一年两季的种植模式,受到冬小麦播种节气的限制,玉米只是进入蜡熟后期或是完熟早期,并没有进入完熟后期,故玉米在进行收获时籽粒含水率一般都在30%以上。含水率较高,籽粒的横向、纵向间隙较小,籽粒间接触紧密、相互作用力大,不易脱落,给机械化收获造成了阻碍<sup>[2]</sup>。籽粒收获过程中,玉米的脱粒过程是冲击、揉搓、压缩、梳理、蓬松、再冲击、再揉搓的循环过程。在脱粒过程中,玉米在脱粒元件高速刚性冲击的作用下,籽粒极易产生破碎、破皮或裂纹等问题。夏季气温高,气候干燥,水分蒸发快,破碎籽粒会加重玉米的水分损耗。反之,在冬季,湿度大,破碎籽粒容易吸水,会增加霉变风险,且破碎之后,脂肪暴露,遇到高温很容易产生大量的游离酸,脂肪酸氧化成醛、酮,使粮食加快腐败<sup>[3]</sup>。给玉米籽粒的贮存品质和粮食安全造成了很大威胁。因此,设计一种低破碎率和高脱净率的柔性脱粒装置是实现玉米生产全程机械化的重中之重。

国外对玉米收获脱粒过程中遭受机械损伤与破碎的研究较多,DUANE等<sup>[4]</sup>分析了脱粒速度、含水率等因素对籽粒损失的影响;PETKEVICHIUS等<sup>[5]</sup>对玉米果穗喂入方向、含水率、凹板间隙等因素对脱粒损失的影响做了研究;WACKER<sup>[6]</sup>通过研究指出轴流式脱粒系统脱粒效果要优于切流式脱粒系统,轴流式脱粒系统对果穗损伤更小;MIODRAGOVIC等<sup>[7]</sup>研究发现当脱粒装置的工作间隙增大,有助于降低籽粒破碎率,而且会提高脱粒质量;SRIVASTAVA等<sup>[8]</sup>通过试验发现玉米籽粒剪切强度随冲击速度增加而升高,随

籽粒含水率升高而降低。

国内对玉米籽粒收获技术的研究起步较晚,周旭等<sup>[9]</sup>对圆柱和圆锥两种脱粒滚筒进行了对比试验,分析了影响玉米损伤的因素;李心平等<sup>[10-12]</sup>依据鸡喙离散玉米籽粒的过程和裸手脱玉米籽粒过程的先离散后脱粒原理,针对玉米籽粒的含水率、冲击部位和冲击方向对其在冲击过程所遭受的损伤进行了试验,设计了玉米仿生脱粒机;倪志伟等<sup>[13]</sup>针对现有机械存在的含杂率高、破碎率高等问题,设计了一种双滚筒式玉米种子脱粒装置,在一定程度上降低了含杂率和破碎率;樊晨龙等<sup>[14]</sup>设计了等高排布的圆头钉齿结合圆管右向+直圆管(前疏后密型)组合式凹板方式进行玉米果穗脱粒,满足高含水率玉米脱粒要求;柳建安等<sup>[15]</sup>设计了一种借助玉米果穗与螺旋滚筒之间以及玉米果穗与锥形外壳之间的摩擦作用,在推动玉米果穗向前移动的同时完成脱粒的螺旋挤搓式玉米脱粒机;赵武云等<sup>[16]</sup>设计了变径变间距螺旋板齿式玉米脱粒机;耿端阳等<sup>[17]</sup>设计了一种柔性钉齿与弹性短纹杆相结合的玉米脱粒装置;邸志峰等<sup>[18]</sup>设计了组合式轴流玉米脱粒滚筒,分别进行了滚筒转速、滚筒倾角和凹板间隙对破碎率与未脱净率影响关系的试验研究。

目前,国内外对玉米籽粒低损脱粒技术与装置的研究较多,但对脱粒元件基本型式进行创新研究的较少。本文从改变脱粒元件型式的角度考虑,设计不同类型的锤爪式脱粒元件,柔性安装在脱粒滚筒上,并结合分段式柔性凸起凹版,设计纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置。在设计的试验装置上进行不同含水率、不同类型锤爪的正交试验,总结不同含水率条件下最优的锤爪组合,降低籽粒的破碎率,提高脱净率,以期在两熟地区的玉米籽粒收获机械的研发提供参考。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整机结构

纵轴流式玉米柔性脱粒装置整体结构如图1所示,由电机、传动装置、喂入口、顶盖、脱粒滚筒、凹板、箱体、机架、籽粒落口组成。其中脱粒滚筒上按螺旋线型式安装有脱粒锤爪,脱粒锤爪与脱粒滚筒柔性连接,以降低籽粒破碎率;脱粒锤爪可按照不同含水率要求更换不同的型式,以达到最好的脱粒效果。为配合脱粒滚筒使果穗轴向输送,在顶盖上安

装有螺旋导流板。脱粒凹板采用分段组合式,可进行脱粒段、分离段间隙的调整,凹板上设计圆球形凸起,以增加摩擦力提高脱净率。在籽粒落口下方放置籽粒回收箱以回收脱粒后的籽粒,进行试验分析。

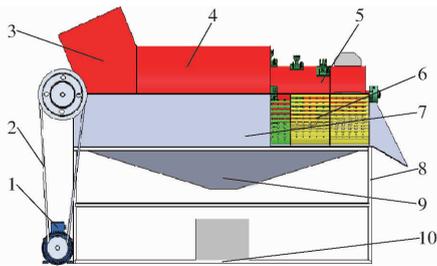


图1 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置整体结构示意图

Fig.1 Schematic of overall structure of longitudinal axial flow flexible hammer-type corn threshing device

1.电机 2.传动装置 3.喂入口 4.顶盖 5.脱粒滚筒 6.凹板 7.箱体 8.机架 9.籽粒落口 10.籽粒回收箱

## 1.2 工作原理

纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置在工作时,通过电机驱动脱粒滚筒,玉米果穗在喂入口被连续喂入,在脱粒滚筒前端锥形螺旋的作用下,被强制推送到脱粒部分,在脱粒部分玉米果穗受到脱粒锤爪的打击、脱粒锤爪与脱粒凹板之间的挤搓和摩擦以及玉米果穗之间的冲击,完成脱粒过程。其中脱粒滚筒分为起脱段、平脱段和强脱段,脱粒锤爪柔性安装在脱粒滚筒上,锤爪型式可更换。脱下的籽粒透过凹板缝隙落入脱粒装置底部的籽粒回收箱中,脱粒后的玉米芯在排杂板的作用下被排出装置外。

## 2 关键部件设计

### 2.1 脱粒滚筒结构设计

脱粒滚筒结构如图2所示,分为喂入段、脱粒段、排杂段3部分,喂入段采用正锥形螺旋输送装置,将喂入的玉米果穗输送到脱粒段,脱粒段又分为起脱段、平脱段和强脱段。

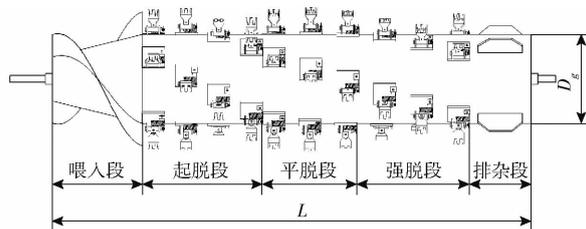


图2 脱粒滚筒结构简图

Fig.2 Structure diagram of threshing roller

脱粒滚筒的脱粒、分离能力与滚筒的长度有着密切关系,脱粒滚筒的长度越大,则所允许的最大玉米喂入量越大,但滚筒过长玉米果穗在滚筒中与脱粒元件和自身的冲击、挤搓和摩擦过多,容易对籽粒造成损伤,增加破碎率,同时也会增加玉米芯和玉米

苞叶的破碎量,使含杂率增大,因此要设计合理的滚筒长度。纵轴流脱粒滚筒的长度模型<sup>[14]</sup>为

$$L \geq q/q_0 \quad (1)$$

式中  $L$ ——脱粒滚筒长度,m

$q$ ——脱粒装置喂入量,kg/s

$q_0$ ——脱粒滚筒单位长度允许的喂入量,经试验测定为  $4 \sim 5 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$

现有玉米籽粒收获机的喂入量一般为  $8 \sim 10 \text{ kg/s}$ ,本设计中脱粒装置的喂入量按  $10 \text{ kg/s}$  计算,由式(1)计算可得,纵轴流脱粒滚筒的长度  $L$  取值范围在  $2.0 \sim 2.5 \text{ m}$  之间,考虑到本试验装置的设计要求以及玉米收获机尺寸要求,脱粒滚筒的长度取  $2.15 \text{ m}$ 。

纵轴流脱粒滚筒直径  $D_z$  满足

$$D_z \geq D_g + 2h_z \quad (2)$$

式中  $D_g$ ——脱粒元件处直径,mm

$h_z$ ——脱粒元件高度,mm

如果脱粒滚筒直径太小容易出现缠绕作物、堵塞等问题,严重影响脱粒效果;直径太大,脱粒功率消耗会增大。因此  $D_g$  一般大于  $300 \text{ mm}$ <sup>[19-20]</sup>。结合考虑本试验装置的动力要求和结构限制,最终确定为  $470 \text{ mm}$ ,脱粒锤爪高度设计为  $90 \text{ mm}$ ,故滚筒的直径为  $650 \text{ mm}$ 。

### 2.2 脱粒锤爪结构参数设计

#### 2.2.1 脱粒元件设计

脱粒元件是脱粒的重要部件,其结构也是影响籽粒破损率和脱净率的重要因素。本研究设计一种柔性脱粒元件,如图3所示。主要由底座、脱粒锤爪、压板 I、压板 II、扭簧、销轴等组成。脱粒锤爪通过销轴安装在底座上,扭簧一端通过压板 II 固定在锤爪的背部,扭簧的另一端通过压板 I 固定在底座上,底座焊接在滚筒表面。

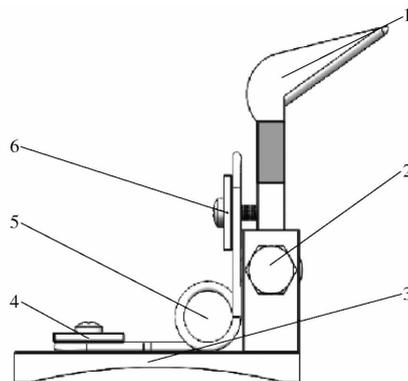


图3 柔性脱粒锤爪安装简图

Fig.3 Install structure of flexible hammer

1.脱粒锤爪 2.销轴 3.底座 4.压板 I 5.扭簧 6.压板 II

为降低玉米籽粒的破碎率,本试验装置的脱粒锤爪采用韧性树脂材料通过 3D 打印制作而成,且

在脱粒滚筒上柔性安装,从而最大程度上降低籽粒的破碎率。设计的脱粒锤爪根据齿形的不同分为3种类型:①扁头锤爪,如图4a所示,扁头锤爪的脱粒齿边缘相对锋利,具有较强的抓取切力,能够破坏玉米的循环力圈<sup>[21]</sup>,方便后续脱粒,该类型的脱粒锤爪安装在脱粒滚筒的起脱段。②半圆头锤爪,如图4b所示,半圆头锤爪的脱粒齿边缘较扁头锤爪圆滑,其作用是强化脱粒过程的揉搓效果,减少对籽粒的打击力,降低玉米籽粒的破碎率,该类型的脱粒锤爪安装在脱粒滚筒的平脱段。③圆头锤爪,如图4c所示,圆头锤爪的脱粒齿边为圆滑的半球形,经过试验该型式的锤爪结构在进行含水率较高的玉米果穗脱粒作业时,能够明显降低玉米籽粒的破碎率,该类型的脱粒锤爪在脱高含水率玉米时安装在脱粒滚筒的平脱段和强脱段。

脱粒锤爪在脱粒滚筒上按螺旋线排列<sup>[22]</sup>,脱粒时,玉米果穗在螺旋安装的脱粒锤爪和带有螺旋输送导流板的顶盖的作用下向尾部输送,为防止一部分果穗运动到脱粒锤爪背部而无法输送,在脱粒锤爪的背部设计倾斜的螺旋凸起,如图4d所示,螺旋凸起对玉米果穗有输送作用,将玉米果穗按照螺旋方向向后输送,同时又有一定的梳刷作用,进一步降低玉米果穗的未脱净率。



图4 锤爪类型

Fig.4 Type of hammer-claw

### 2.2.2 脱粒锤爪受力分析

脱粒锤爪的受力如图5所示,假设玉米果穗在与脱粒锤爪击打的过程中,脱粒锤爪受到玉米果穗

的击打力  $F_g$ ,在击打力的作用下,脱粒锤爪以销轴为圆心,向后位移。此时,扭簧对锤爪的作用力  $F_n$  与水平方向的夹角  $\alpha$  以及销轴对锤爪的支撑力  $F_n$  与水平方向的夹角  $\gamma$  都会增大,而  $F_g$  与水平方向的夹角  $\beta$  不变。此时脱粒锤爪受到玉米果穗的击打力  $F_g$  会增大,由于力的作用是相互的,则此时脱粒锤爪对果穗的脱落力也会增大,这样玉米籽粒更容易在果穗上脱落,以降低玉米籽粒的未脱净率。在玉米果穗以较大的冲击速度接触脱粒锤爪时,由于锤爪是柔性安装在脱粒滚筒上的,故与玉米果穗接触瞬间扭簧被压缩,起到缓冲作用,以减小对玉米果穗的冲击,从而降低玉米籽粒的破碎率。

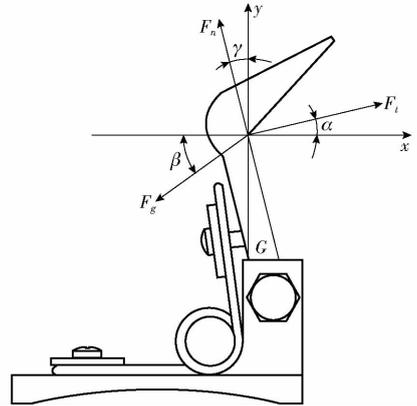


图5 脱粒锤爪的受力分析

Fig.5 Stress analysis of flexible hammer

通过试验可知,玉米果穗受压过程中,当受到的作用力超过一定强度时,会出现籽粒破碎和玉米芯断裂的情况,根据文献[23-24],针对在试验过程中籽粒脱落的现象,对玉米施加的载荷小于610 N时不仅可以防止果穗断裂而且能够有利于脱粒,所以脱粒元件对玉米果穗施加的作用力不超过610 N。

果穗在与脱粒锤爪接触时,在  $F_n$  方向上的受力模型为

$$F_n = G \cos \gamma + F_g \cos(90^\circ + \gamma - \beta) \quad (3)$$

式中  $G$ ——重力, N

由式(3)可得

$$F_g = \frac{F_n - G \cos \gamma}{\sin(\beta - \gamma)} \quad (4)$$

### 2.2.3 扭簧受力分析

图6为柔性脱粒装置锤爪受力后的位置变化,工作时,设锤爪与玉米果穗的接触点为  $O$ ,此时玉米果穗对锤爪的作用力  $F_g$  与扭簧旋转中心的距离为  $h_n$ ,则此时扭簧的初始扭矩  $T_1 = F_g h_n$ ,当果穗对锤爪的作用力  $F_g$  大于籽粒脱落力而小于果穗断裂力时,扭簧发生形变,以此缓解锤爪对玉米果穗的刚性冲击。根据设计要求,  $h_n$  为25 mm,根据文献[23-24],当  $F_g$  为24 N时,  $T_1$  为600 N·mm,即可满足果穗

不断裂且有利于脱粒的条件。

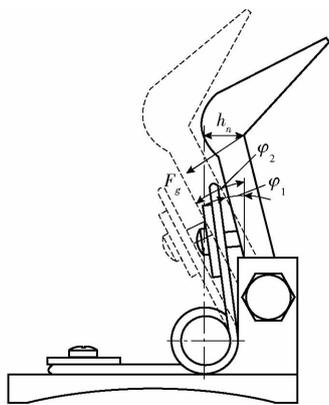


图 6 锤爪受力时位置变化示意图

Fig. 6 Schematic of position change of hammer-claw

根据设计要求, 扭簧的初始转角  $\varphi_1 = 15^\circ$ , 根据滚筒转动的方向和脱粒元件安装的方式保证其上限位, 因此, 锤爪只能向后扭转, 经过试验测得扭簧的最大转角  $\varphi_2 = 27^\circ$ , 因此可以计算出扭簧的有效圈数  $N$  为

$$N = \frac{ED^4\varphi_2}{3670D_1T_2} \quad (5)$$

其中

$$T_2 = \frac{T_1\varphi_2}{\varphi_1} \quad (6)$$

式中  $E$ ——弹性模量, 扭簧选择碳素弹簧钢丝, 取  $1.97 \times 10^5$  MPa

$D$ ——扭簧钢丝直径, 碳素钢丝为 4.0 mm

$T_2$ ——扭簧最终扭矩, N·mm

$D_1$ ——扭簧中径, mm

而  $D_1 = PD$  ( $P$  为扭簧旋绕比), 根据机械设计手册<sup>[25]</sup>, 旋绕比一般取 8.5, 由此可得  $N = 10$ 。

### 2.3 分段组合式脱粒凹板

凹板是脱粒系统的重要组成部分, 配合脱粒滚筒完成玉米果穗的脱粒以及玉米籽粒与玉米芯的分离工作, 如图 7 所示。在脱粒过程中, 果穗与凹板横格板顶端棱角的碰撞是籽粒破碎率较高的主要原因之一, 阻滞作物周向移动并出现玉米苞叶堵塞凹板等问题<sup>[14]</sup>, 且栅格式凹板的分离筛孔尺寸较小, 喂入量大时不利于脱出物的下落。针对目前现有的常规栅格式凹板的横板格存在的问题, 设计了分段组合式脱粒凹板, 采用圆柱钢凹板筛, 圆柱钢外径为 10 mm, 相比于常规的栅格式凹板筛, 圆柱钢凹板筛减少了圆柱钢的数目, 从而减少了玉米果穗与圆柱钢之间的碰撞次数, 从而降低了玉米籽粒的破碎率。由于圆柱钢数目的减少, 相邻两圆柱钢之间的间隙增大, 这使得混合物能够顺利落下, 避免造成凹板筛的阻塞问题。在起脱段, 圆柱钢右向倾斜, 玉米果穗开始脱粒, 通过圆柱钢倾斜减小与

玉米果穗接触的面积, 来降低玉米籽粒的破碎率, 但未开始脱粒的果穗脱粒相对困难, 因此在起脱段的圆柱钢上设计半球型的凸起, 以增加与脱粒锤爪直接的摩擦力, 从而更好地完成初步脱粒; 在平脱段, 圆柱钢水平安装, 玉米果穗经过起脱段后, 部分玉米籽粒被脱下, 通过圆柱钢水平放置来增加与玉米果穗的接触面积, 使得剩余的玉米籽粒顺利脱下; 在强脱段, 圆柱钢水平安装, 增加圆柱钢的安装密度, 玉米果穗经过起脱段和平脱段后, 绝大部分的玉米籽粒被脱下, 残余的玉米籽粒籽粒间的连接力较大, 通过增加圆柱钢安装密度, 进一步增加了与玉米果穗的接触面积和碰撞次数, 将残余的玉米籽粒全部脱下。同时在圆柱钢上设计较起脱段高的半球型凸起, 以增加脱粒锤爪与凹板之间的摩擦力, 对未脱净的玉米果穗进行强制脱粒, 从而提高脱净率。

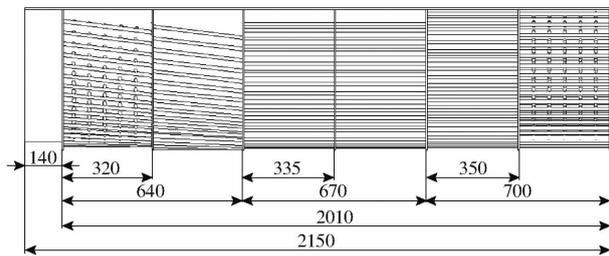


图 7 分段组合式脱粒凹板结构示意简图

Fig. 7 Schematic of sectional combined threshing concave plate structure

为了适应不同品种、果穗直径、喂入量和不同含水率的玉米果穗的脱粒, 凹板设计了间隙调节机构, 如图 8 所示, 间隙调节角铁 1 焊接在箱体上, 凹板上有相对应的间隙调节角铁 2, 在间隙调节角铁 1 和间隙调节角铁 2 上都焊有螺母, 间隙调节角铁 1 和间隙调节角铁 2 之间通过长螺栓连接, 可以通过调节螺栓长度调节脱粒滚筒和凹板之间的间隙, 可调整范围为 30 ~ 50 mm。

分段组合式脱粒凹板与脱粒滚筒为偏心装配, 脱粒滚筒的入口间隙大于出口间隙, 玉米果穗在起脱段时, 凹板与滚筒之间的间隙较大, 随着玉米果穗向后输送, 间隙逐渐减小, 在强脱段时, 间隙达到最小值, 这样使得玉米果穗受到的挤搓和摩擦作用逐渐增强, 从而降低玉米果穗的未脱净率, 达到更好的脱粒效果, 如图 9 所示。

凹板直径  $D_2$  的计算公式为

$$D_2 = D_z + 2\delta \quad (7)$$

式中  $\delta$ ——凹板与滚筒的间隙, mm

根据文献[26], 脱粒滚筒的入口间隙应大于果穗的大端直径, 且柔性连接方式脱粒过程中锤爪的回转半径会发生变化, 故取凹板与滚筒的最大可调

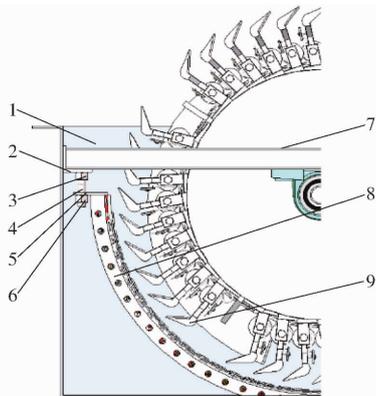


图8 间隙调节结构图

Fig. 8 Schematic of gap adjustment

1. 箱体 2. 间隙调节角铁 3. 螺母 4. 长螺栓 5. 间隙调节角铁 6. 螺母 7. 脱粒滚筒 8. 凹板筛 9. 柔性锤爪

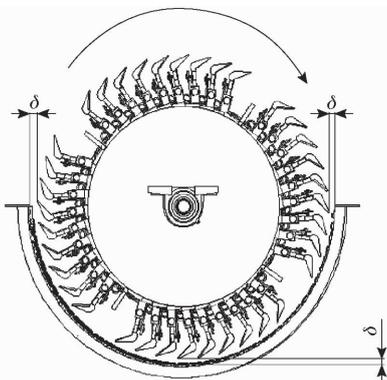


图9 凹板与脱粒滚筒配置示意简图

Fig. 9 Schematic of relationship between concave sieve and roller

整间隙  $\delta$  为 50 mm, 因此凹板的直径为 750 mm。

### 2.4 脱粒工艺确定

根据文献[27], 轴流式脱粒滚筒按照玉米果穗在滚筒内运动流程分为 4 种形式, 分别是径向喂入径向排出、径向喂入轴向排出、轴向喂入径向排出和轴向喂入轴向排出。结合目前联合收获机和设计需求, 本装置采用了轴向喂入和轴向排出的脱粒工艺, 如图 10 所示。轴向喂入时, 玉米果穗分布均匀, 在喂入时, 玉米果穗在螺旋输送装置的作用下, 均匀平缓地输送至脱粒段, 因输送平稳均匀, 能够有效提升脱粒品质, 降低破碎率; 而径向喂入, 玉米果穗在喂入口拥堵, 造成脱粒不均匀, 不利于提升脱粒品质。

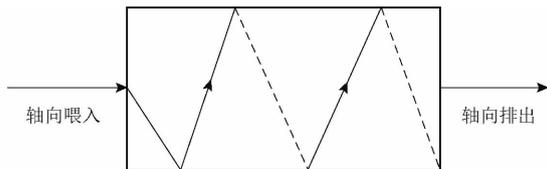


图10 纵轴流滚筒脱粒工艺形式

Fig. 10 Threshing technology of longitudinal axial flow cylinder

## 3 试验

### 3.1 试验材料

黄淮海地区夏玉米收获时玉米籽粒的含水率一般为 30%<sup>[28]</sup> 以上, 以籽粒的破碎率和未脱净率为评价指标, 分别以低于和高于 30% 含水率的玉米果穗进行脱粒锤爪类型组合、脱粒装置参数配置试验。试验于 2019 年 10 月在山东理工大学农机性能实验室使用自主研制的纵轴流柔性锤爪式试验台进行, 采取连续喂入方式, 通过调节输送带电机转速来控制玉米果穗的喂入量, 如图 11 所示。试验玉米品种为“迪卡 517”, 其果穗(不含苞叶)的参数如表 1 所示, 试验时鲜玉米含水率为 32.83%, 晾晒后的玉米含水率为 25.12%。

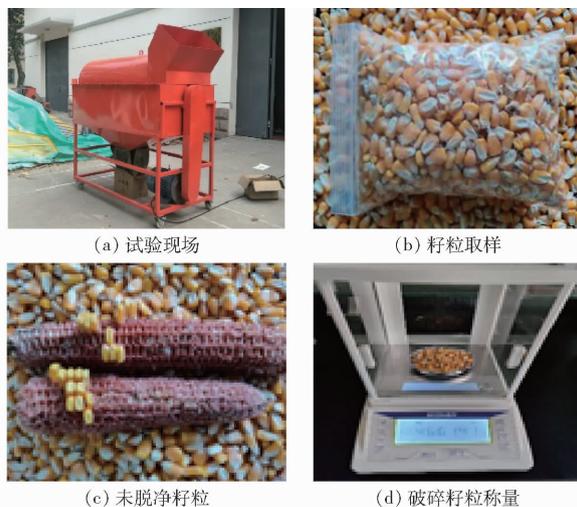


图11 试验现场

Fig. 11 Testing site

表1 玉米果穗参数

Tab. 1 Parameters of corn ear

参数	最大值	最小值	平均值
长度/mm	205	162	178
直径/mm	51	40	48
硬度/N	79	65	70

### 3.2 试验方法

选取对脱粒品质影响较大的滚筒转速  $n$  (r/min)、喂入量  $a$  (kg/s)、锤爪类型  $b$  作为试验因素, 试验因素水平见表 2。锤爪类型  $b$ , 水平 1“扁头+半圆头”表示起脱段安装扁头锤爪, 平、强脱段安装半圆头锤爪; 水平 2“扁头+圆头”表示起脱段安装扁头锤爪, 平、强脱段安装圆头锤爪; 水平 3“圆头”表示脱粒段均安装圆头锤爪。按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械 试验方法》和 GB/T 5982—2017《脱粒机 试验方法》确定评价指标, 包括籽粒破碎率和未脱净率, 其中籽粒破碎率  $Y_1$  计算式为

$$Y_1 = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $W_1$ ——样品中破碎籽粒质量, g

$W_2$ ——取样籽粒总质量, g

未脱净率  $Y_2$  计算式为

$$Y_2 = \frac{W_3}{W_4} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $W_3$ ——未脱净籽粒质量, g

$W_4$ ——全部籽粒质量, g

对试验结果分别进行取样称量, 试验结果见表 3、4, A、B、C 分别表示滚筒转速  $n$ 、喂入量  $a$ 、锤爪类型  $b$  的因素水平值。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	滚筒转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	喂入量 $a/(kg \cdot s^{-1})$	锤爪类型 $b$
1	400	6	扁头 + 半圆头
2	450	8	扁头 + 圆头
3	500	10	圆头

表 3 含水率 25.12% 正交试验结果和极差分析

Tab. 3 Results of orthogonal test and range analysis as water content was 25.12%

水平	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	A	B	C		
1	1	1	1	4.32	0.89
2	1	2	2	4.06	1.07
3	1	3	3	4.43	1.84
4	2	1	2	3.84	1.03
5	2	2	3	3.76	0.71
6	2	3	1	4.35	1.53
7	3	1	3	4.52	0.96
8	3	2	1	4.71	0.80
9	3	3	2	4.08	0.93
$k_1$	12.81	12.68	13.38		
$k_2$	11.95	12.53	11.98		
$k_3$	13.31	12.86	12.71		
$Y_1$	R	1.36	0.33	1.40	
	较优水平	$A_2$	$B_2$	$C_2$	
	主次因素	$C_2A_2B_2$			
$k_1$	3.80	2.88	3.22		
$k_2$	3.27	2.58	3.03		
$k_3$	2.69	4.30	3.35		
$Y_2$	R	1.11	1.72	0.32	
	较优水平	$A_3$	$B_2$	$C_2$	
	主次因素	$B_2A_3C_2$			

由上述结果可知, 试验因素 A、B、C 对玉米果穗的籽粒破碎率和未脱净率的影响各不相同, 利用 SPSS 25.0 进行方差分析, 结果如表 5、6 所示。

表 4 含水率 32.83% 正交试验结果和极差分析  
Tab. 4 Results of orthogonal test and range analysis as water content was 32.83%

水平	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	A	B	C		
1	1	1	1	6.89	1.27
2	1	2	2	6.14	1.13
3	1	3	3	5.83	1.56
4	2	1	2	5.48	1.19
5	2	2	3	4.36	0.70
6	2	3	1	6.08	1.16
7	3	1	3	5.64	0.93
8	3	2	1	7.38	1.03
9	3	3	2	7.16	1.12
$k_1$	18.86	18.01	20.35		
$k_2$	15.92	17.88	18.78		
$k_3$	20.18	19.07	15.83		
$Y_1$	R	4.26	1.19	4.52	
	较优水平	$A_2$	$B_2$	$C_3$	
	主次因素	$C_3A_2B_2$			
$k_1$	3.96	3.39	3.46		
$k_2$	3.05	2.86	3.44		
$k_3$	3.08	3.84	3.19		
$Y_2$	R	0.91	0.98	0.27	
	较优水平	$A_2$	$B_2$	$C_3$	
	主次因素	$B_2A_2C_3$			

表 5 含水率 25.12% 方差分析

Tab. 5 Variance analysis result as water content was 25.12%

指标	方差源	平方和	自由度	F	显著性
$Y_1$	A	0.315	2	2.239	*
	B	0.018	2	0.129	
	C	0.163	2	2.320	**
	误差	0.141	2		
$Y_2$	A	0.205	2	0.779	*
	B	0.563	2	2.135	**
	C	0.039	2	0.148	
	误差	0.264	2		

注: \*\*表示因素对试验有显著影响, \*表示因素对试验有影响, 下同。

表 6 含水率 32.83% 方差分析

Tab. 6 Variance analysis result as water content was 32.83%

指标	方差源	平方和	自由度	F	显著性
$Y_1$	A	3.170	2	26.672	*
	B	0.284	2	2.390	
	C	3.511	2	29.536	**
	误差	0.119	2		
$Y_2$	A	0.178	2	1.988	**
	B	0.160	2	1.790	*
	C	0.015	2	0.168	
	误差	0.090	2		

综合极差和方差分析可知,在含水率为25.12%时,柔性脱粒滚筒的籽粒破碎率和未脱净率的最佳组合为 $A_2B_2C_2$ 和 $A_3B_2C_2$ ,即在喂入量为8 kg/s,起脱段脱粒锤爪为扁头,平、强脱段为圆头,滚筒转速分别为450 r/min和500 r/min时,其籽粒破碎率和未脱净率可以控制在较优的范围内。在含水率为32.83%,柔性脱粒滚筒的籽粒破碎率和未脱净率的最佳组合为 $A_2B_2C_3$ ,即喂入量为8 kg/s,整个脱粒滚筒上的脱粒锤爪均为圆头,滚筒转速为450 r/min时,其籽粒破碎率和未脱净率可以控制在较优的范围内。

对滚筒转速进行分析可知,当滚筒转速较高时,脱粒元件的线速度较高,增加脱粒锤爪与玉米果穗之间的碰撞次数,增大锤爪与玉米果穗之间的碰撞力,增加破碎率,降低未脱净率。由于含水率越低籽粒越不易破碎,因此在含水率为25.12%时,选择 $A_3$ 作为最优水平,在含水率为32.83%时,选择 $A_2$ 作为最优水平。

对喂入量进行分析可知,喂入量较大时,脱粒滚筒与脱粒凹板间隙内的果穗较多,导致部分的玉米果穗会在锤爪的背部堆积,脱粒锤爪的弹簧不能很好地发挥缓冲作用,导致破碎率增加,过多的果穗堆积也导致脱粒锤爪不能充分与玉米果穗进行接触,降低脱粒元件的脱粒强度,提高未脱净率。但喂入量较小时,果穗又会受到脱粒锤爪的多次冲击,同样造成破碎率的增加。由表3、4可知,喂入量对于籽粒破碎率和未脱净率的最优水平为 $B_2$ ,即喂入量为8 kg/s。

对脱粒锤爪类型进行分析可知,玉米果穗含水率为25.12%时,脱粒元件对于籽粒破碎率和未脱

净率的最优水平为 $C_2$ ,即脱粒滚筒起脱段为扁头锤爪,主要是完成破坏循环力圈作业,能够快速地将籽粒脱落,由于此时含水率较低,扁头锤爪对玉米籽粒的损害较小,所以能够将籽粒破碎率控制在一个较优的范围内,平脱段和强脱段为圆头锤爪,模仿人手揉搓玉米果穗,能够最大程度上降低破碎率和未脱净率;在含水率为32.83%时,扁头锤爪对籽粒的破坏力增大,因此脱粒滚筒全部为圆头锤爪,即脱粒元件的最优水平为 $C_3$ 。

通过以上分析,在玉米果穗含水率为25.12%时,确定 $A_3B_2C_2$ 为该脱粒滚筒的较优参数组合,此时籽粒破碎率为3.73%,未脱净率为0.69%;在玉米果穗含水率为32.83%时,确定 $A_2B_2C_3$ 为该脱粒滚筒的较优参数组合,此时籽粒破碎率为4.36%,未脱净率为0.70%。

## 4 结论

(1)针对现有籽粒收获脱粒装置在收获籽粒含水率较高时破碎严重的问题,设计了纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置试验台,并对脱粒系统的主要结构和关键部件进行了研究。

(2)设计了扁头、半圆头和圆头3种不同类型的柔性脱粒锤爪,并进行了试验,确定了在不同含水率下的最佳组合。含水率为25.12%时,滚筒转速为500 r/min,喂入量为8 kg/s,脱粒锤爪为扁头锤爪与圆头锤爪组合,此时籽粒破碎率为3.73%,未脱净率为0.69%;在含水率为32.83%时,滚筒转速为450 r/min,喂入量为8 kg/s,脱粒锤爪为圆头锤爪,此时籽粒破碎率为4.36%,未脱净率为0.70%。2种条件下的脱粒结果均符合国家标准要求。

## 参 考 文 献

- [1] 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.jcsam.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)
- [2] 王永刚,张国海,张恒,等.黄淮海地区夏玉米收获现状分析[J].中国农机化学报,2018,39(11):112-115. WANG Yonggang,ZHANG Guohai,ZHANG Heng,et al. Analysis on current status of summer maize harvest in Huang-Huai-Hai area[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2018,39(11):112-115. (in Chinese)
- [3] 尹玉港,谭会泽,刘松柏,等.玉米破碎形成原因及对营养价值的影响[J].饲料博览,2014(1):13-15. YIN Yugang,TAN Huize,LIU Songbai,et al. Analysis on the broken corn and effects on the nutritional value[J]. Feed Review,2014(1):13-15. (in Chinese)
- [4] DUANE L,HARRY H,TED H,et al. Corn kernel damage due to high velocity impact[J]. Transactions of the ASAE,1972,12(1):330-331.
- [5] PETKEVICIUS S,SHPOKAS L,KUTZBACH H D. Investigation of the maize ear threshing process[J]. Biosystems Engineering,2008,9(4):532-539.
- [6] WACKER P. Maize grain damage during harvest[J]. Harvest Technology,2005,60(2):84-85.
- [7] MIODRAGOVIC R,DJEVIC M. Contemporary combine harvesters in corn harvesting[J]. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara,2006,4(3):199-206.

- [8] SRIVASTAVA A K, HERUM F L, STEVENS K K. Impact parameters related to physical damage to corn kernel[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(8): 1147 - 1151.
- [9] 周旭,李心平,高连兴,等.两种脱粒滚筒的玉米籽粒损伤试验研究[J].沈阳农业大学学报,2005(6):756 - 758.  
ZHOU Xu, LI Xinping, GAO Lianxing, et al. Comparison of corn kernel damage using two types of threshing cylinders[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005(6):756 - 758. (in Chinese)
- [10] 李心平,高连兴,马福丽,等.玉米种子籽粒冲击损伤的试验[J].沈阳农业大学学报,2007(1):89 - 93.  
LI Xinping, GAO Lianxing, MA Fuli, et al. Experimental research of corn seed kernel on the impacting damage[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007(1):89 - 93. (in Chinese)
- [11] 李心平,李玉柱,高吭,等.种子玉米籽粒仿生脱粒机理分析[J].农业机械学报,2011,42(2):99 - 103.  
LI Xinping, LI Yuzhu, GAO Hang, et al. Bionic threshing process analysis of seed corn kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):99 - 103. (in Chinese)
- [12] 李心平,马义东,金鑫,等.玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):97 - 101.  
LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 97 - 101. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150715&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015. (in Chinese)
- [13] 倪志伟,杨然兵,刘阳,等.双滚筒式玉米种子脱粒装置设计与试验[J].农机化研究,2020,42(5):150 - 154.  
NI Zhiwei, YANG Ranbing, LIU Yang, et al. Design and test of double drum corn seed threshing device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5):150 - 154. (in Chinese)
- [14] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等.低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):113 - 123.  
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):113 - 123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190413&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190413&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.013. (in Chinese)
- [15] 柳建安,李伟杰.螺旋挤搓式玉米脱粒机的设计[J].农机化研究,2010,32(8):82 - 85.  
LIU Jian'an, LI Weijie. The design of spiral corn sheller by extruding and rubbing method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8):82 - 85. (in Chinese)
- [16] 赵武云,郭康权.组合式螺旋板齿种子玉米脱粒机工作参数优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(12):56 - 61.  
ZHAO Wuyun, GUO Kangquan. Parameters optimization of combined spiral bar tooth thresher for maize seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):56 - 61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.011. (in Chinese)
- [17] 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](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)
- [18] 邸志峰,崔中凯,张华,等.纹杆杖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)
- [19] 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.
- [20] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [21] 李心平,刘赢,马义东,等.玉米果穗籽粒间隙缝走向对其循环力衰败的影响[J].农机化研究,2015,37(1):183 - 187.  
LI Xinping, LIU Ying, MA Yidong, et al. Effect of gap direction among corn ear kernels on the circulating dint decline[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1):183 - 187. (in Chinese)
- [22] 耿端阳.新编农业机械学[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [23] 李心平,熊师,耿令新,等.含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(2):25 - 31.  
LI Xinping, XIONG Shi, GENG Lingxin, et al. Influence of water content on anti-pressing properties of corn ear[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2):25 - 31. (in Chinese)
- [24] 蔡超杰,陈志,韩增德,等.种子玉米生物力学特性与脱粒性能的关系研究[J].农机化研究,2017,39(4):192 - 196.  
CAI Chaojie, CHEN Zhi, HAN Zengde, et al. Study on relationship of biomechanical characteristics of corn seed and threshing performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4):192 - 196. (in Chinese)
- [25] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [26] PETKEVICIUS S, SPLKAS L, STEPONAVICIOUS D. Substantiation of technological parameters of wet maize ear threshing[J]. Agronomy Research, 2008, 6(Special Issue): 271 - 280.
- [27] PETRE I M, HEINZ-DIETER K. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 93 - 99.
- [28] 李璐璐,明博,谢瑞芝,等.黄淮海夏玉米品种脱水类型与机械粒收时间的确立[J].作物学报,2018,44(12):1764 - 1773.  
LI Lulu, MING Bo, XIE Ruizhi, et al. Grain dehydration types and establishment of mechanical grain harvesting time for summer maize in the Yellow - Huai - Hai Rivers Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12):1764 - 1773. (in Chinese)