doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.009

玉米收获机低损变径脱粒滚筒设计与试验

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: 针对华北地区玉米收获时籽粒含水率较高、籽粒直收破碎率较高的问题,设计了一种变径脱粒滚筒。滚筒前端直径渐变增大直至与脱粒分离段等径,通过提高滚筒变径段果穗容纳能力,增强果穗之间柔性接触,有效"松散"籽粒之间及籽粒-芯轴之间作用力,使果穗更易于脱粒,从而实现籽粒与芯轴的快速分离,有效提高了脱粒速度,降低了籽粒破碎率。对果穗与脱粒元件受力进行分析,研究变径段锥度对果穗受力的影响。基于动力学仿真试验,分析了果穗与脱粒元件之间的接触力以及果穗-果穗和果穗-脱粒装置之间的接触频次,结果表明,变径滚筒提高了果穗之间的接触频次,降低了脱粒元件与果穗的直接接触,即变径滚筒中果穗之间接触揉搓作用更强。以滚筒转速、凹板间隙及籽粒含水率为试验因素进行了三因素四水平正交试验,确定最优组合为籽粒含水率 26%、滚筒转速 350 r/min、凹板间隙 50 mm,此时籽粒破碎率为 4.13%、籽粒未脱净率为 0.34%。在籽粒含水率为 27% 时与等径滚筒进行了对比脱粒试验,按籽粒的完整性将破损籽粒分为全碎籽粒、裂纹籽粒、破皮籽粒及顶部破碎籽粒,结果表明,变径滚筒的籽粒总破碎率为 4.64%,比等径滚筒的总破碎率降低 19.16%,破损籽粒中全碎籽粒、裂纹籽粒及破碎籽粒所占比例均明显降低;变径滚筒未脱净率为 0.42%,比等径滚筒的未脱净率降低 51.72%,证明变径滚筒能够有效降低籽粒破碎率及未脱净率。

关键词: 玉米收获机; 脱粒装置; 变径滚筒
中图分类号: S225.5+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)08-0098-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Low Damage Corn Threshing Drum with Gradually Changing Diameter

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: In order to solve the problem of high broken grains caused by high moisture content in corn harvest in North China, a drum with gradually changing diameter was designed. The diameter in the front of the drum was gradually increased until it was the same diameter as the threshing separation section. By improving the ear holding capacity of the drum in the front section, the flexible contact between the ears was enhanced, which effectively lossening the connection between the kernels and the connection between the kernels and cob. The ears were easily threshed, and the separation of the grains and materials other than grain was realized quickly. The threshing speed was effectively improved, and the grain breakage rate was reduced. The stress between ears and threshing element were analyzed, and the influence of taper on the stress of ears ware determined. Based on the dynamic simulation, the contact force between the ears and the threshing elements, the contact frequency between the ears and the contact frequency between the ears and the threshing device were analyzed. The results showed that the drum with gradually changing diameter can increase the contact frequency between the ears and reduce the direct contact between the ears and the threshing element, that was, the contact and rubbing action between the ears in the drum with gradually changing diameter was stronge. The orthogonal test was carried out with roller speed, concave clearance, and grain moisture content as experimental factors. The optimal combination

收稿日期: 2021-04-06　修回日期: 2021-05-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300302、2016YFD0700302)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

was determined as follows: grain moisture content was 26%, roller speed was 350 r/min, concave clearance was 50 mm. At this time, the grain breakage rate was 4.13%, and the percentage of unthreshed grains was 0.34%. When the grain moisture content was 27%, a comparative threshing test was carried out with the equal diameter drum. According to the integrity of the grain, the damaged grain was divided into completely broken grain, crack grain, skin damage grain, and broken grain. The total broken rate of the grain was 4.64%, which was 19.16% lower than the 5.74% of the equal diameter drum. The proportion of completely broken grain, crack grain, and broken grain in damaged grain was decreased significantly. The percentage of unthreshed grains was 0.42%, which was 51.72% lower than the 0.87% of the equal diameter drum. It was proved that the drum with gradually changing diameter can effectively reduce the rates of broken grains and the rates of unthreshed grains.

Key words: corn harvester; threshing unit; drum with gradually changing diameter

0　引言

玉米不仅是一种重要的粮食作物,在化工、饲料、能源等领域也有重要的应用价值[1-2]。随着人工成本的增加以及我国农村劳动力的转移,实现玉米机械化籽粒直收成为节本增效的重要途径[3-4]。我国华北地区玉米收获时籽粒含水率较高,玉米籽粒直收时存在破碎率较高的问题[5],严重制约着玉米联合收获机向高性能方向的发展。因此,降低高含水率玉米籽粒直收时的破碎率已成为提高玉米籽粒直收水平的技术难点[6-9]。

为降低籽粒破碎率,国内外学者进行了大量的研究。PUZAUSKAS 等[10]研究发现,凹板结构是影响谷粒分离速率的重要因素,同时影响谷粒的破碎率及损失率。PETKEVIČHIUS 等[11]研究了滚筒转速、凹板间隙对籽粒损失及破碎的影响,发现与增加滚筒转速相比,减小凹板间隙对籽粒损失及破碎的影响更为显著,为提高脱粒质量应适当增加凹板间隙。FU 等[12]对东北地区冷冻后玉米籽粒直收进行研究,发现滚筒转速对玉米脱粒质量的影响最大。崔中凯等[13-14]、LI 等[15]、ZHU 等[16]研究证明,滚筒转速、喂入量及凹板间隙等影响籽粒破碎率及未脱净率。赵武云等[17]建立了籽粒破碎率与喂入量、滚筒转速等参数的数学模型,对脱粒过程进行优化,在最优参数下破碎率较未优化前降低 0.084% ~ 0.274%。屈哲等[18-19]设计了圆头钉齿与圆管凹板相配合的脱粒系统,研究了滚筒转速及凹板间隙对籽粒破碎率及含杂率的影响规律,将破碎率由传统脱粒装置的 13% 降低至 8%。苏媛等[20]、李义博等[21]通过改进钉齿结构与材料实现了果穗与脱粒元件的柔性接触,显著降低了籽粒破碎率。

目前,相关研究主要围绕滚筒工作参数对脱粒效果的影响,对滚筒结构的研究相对较少。本文结合滚筒转速及凹板间隙对脱粒性能的影响规律,基于籽粒先松散后脱粒的方案,设计一种变径脱粒滚筒,通过增强果穗之间柔性接触、降低脱粒强度,使籽粒松散、籽粒与芯轴更易于脱离,减少籽粒与脱粒元件的接触,从而降低籽粒破碎率。通过仿真分析确定变径滚筒的最佳结构参数,通过正交试验探究滚筒工作参数对脱粒性能的影响,并确定较优工作参数。

1　结构与工作原理

1.1　变径滚筒结构设计

目前主流脱粒滚筒多为等径滚筒,工作段直径一致。本文设计的变径脱粒滚筒结构如图 1 所示。主脱粒段滚筒为锥形结构,沿滚筒轴向向后延伸,主脱粒段半径逐渐增大,直至与脱粒分离段等径。通过提高主脱粒段果穗容纳能力,增强凹板-果穗-滚筒间的交互作用,使籽粒松散,降低脱粒需求,在脱粒元件的冲击、搓擦作用下更易于脱粒,从而减少籽粒与脱粒元件的接触,达到降低破碎率的目的。

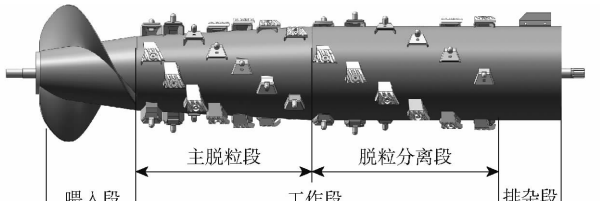


图 1　变径脱粒滚筒结构示意图

Fig. 1　Threshing drum with gradually changing diameter

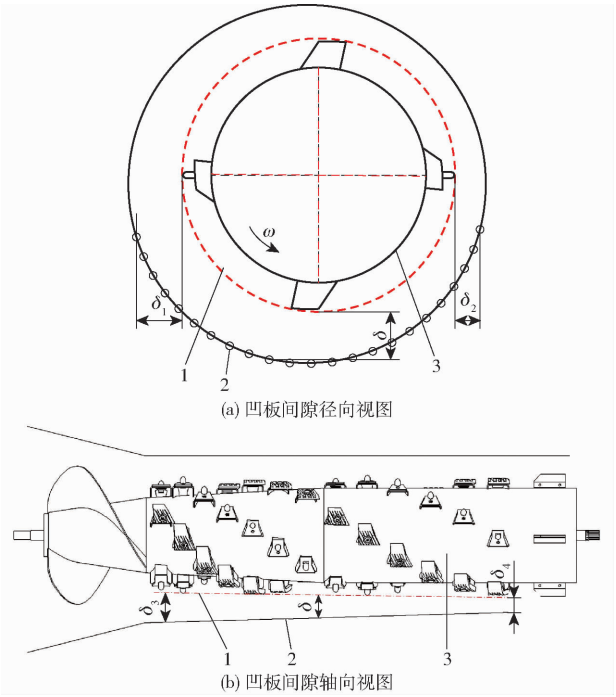
根据脱粒物料的不同选择合适的脱粒元件,能够有效提高脱粒速率和脱粒质量。纹杆式脱粒元件与果穗接触时,脱粒作用面积较大,与果穗接触更为柔和,籽粒破碎率相对较低;钉齿式脱粒元件通过击打脱粒,脱粒过程中搅动物料,使脱粒过程更为彻底[22]。为提高脱粒质量及脱粒效率,脱粒元件采用纹杆式及钉齿式元件,交错安装于变径滚筒表面。

1.2　工作原理

为实现先离散后脱粒的目的,滚筒主脱粒段采用变径设计,适当减小该段脱粒元件安装底座基圆直径,相较脱粒分离段,增加了果穗容纳量,同时脱

粒元件以较小线速度对果穗进行充分揉搓、搅动,达到“松散”籽粒的效果,在脱粒元件的螺旋输送作用下,籽粒松散及部分脱粒的果穗向脱粒分离段移动,在纹杆的揉搓及钉齿的击打作用下完成脱粒,自由籽粒通过分离凹板进入清选系统,芯轴、苞叶等杂质继续向滚筒后方传送,经排杂段排出脱粒系统。

纵轴流玉米脱粒系统中,凹板一端采用悬挂连接,一端与间隙调节机构固接,为实现脱粒元件对果穗的“抓取”与“加速”,凹板轴线与滚筒轴线采用偏心且不平行设计[23-24]。如图 2a 所示,果穗由盖板区进入凹板区的间隙 δ_1 大于排出凹板区间隙 δ_2。如图 2b 所示,为便于果穗进入脱粒系统,脱粒元件与凹板间隙 δ_3 较大,随着籽粒从果穗上脱离,果穗直径减小,适当降低凹板间隙 δ_4 有利于降低籽粒未脱净率。为方便描述凹板间隙大小,定义图 2b 中滚筒中间位置脱粒元件所在脱粒圆最下端至凹板的距离 δ 为凹板间隙。



(a) 凹板间隙径向视图

(b) 凹板间隙轴向视图

图 2 变径滚筒与凹板结构图

Fig. 2 Structural diagrams of drum and concave

1. 脱粒元件基圆 2. 脱粒凹板 3. 脱粒滚筒

2 变径系统内果穗受力分析与参数设计

2.1 果穗受力分析

在脱粒系统中,果穗的接触主要包括果穗-果穗、果穗-滚筒、果穗-凹板等 3 种形式。不考虑脱粒过程中果穗形变及空气阻力作用,对变径段果穗进行受力分析,建立如图 3a 所示的坐标系,其中,X 轴平行于滚筒轴向并指向排杂段,Y 轴垂直于滚筒轴向竖直向上,Z 轴垂直于 XY 平面。

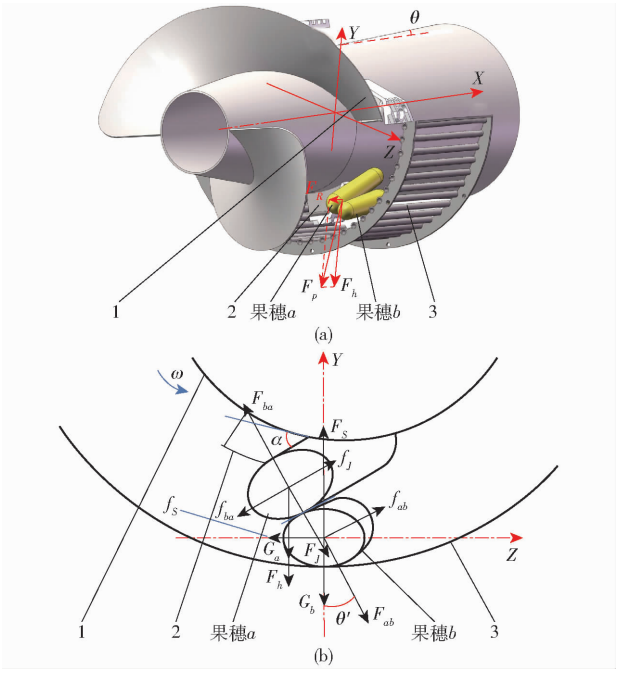


图 3 变径滚筒中果穗受力分析

Fig. 3 Analysis of force on ear in drum with gradual change of diameter

1. 脱粒滚筒变径段 2. 纹杆块 3. 凹板

如图 3a 所示,在变径段与滚筒接触的果穗受到垂直于变径段的压力 F_p,压力 F_p 可分解为与果穗沿滚筒轴向运动趋势相反的水平分力 F_R 及竖直向下的压力 F_h。在 XY 平面内,F_h、F_R 与压力 F_p 的关系表示为

$$F_h = F_p\cos\theta \tag{1}$$

$$F_R = F_p\sin\theta \tag{2}$$

式中 θ——变径段滚筒锥度

由于果穗连续喂入脱粒系统,而滚筒对果穗压力在水平方向分量 F_R 与果穗沿滚筒轴向运动方向相反,有减缓果穗向滚筒排杂段运动的作用,有利于增强果穗之间的揉搓接触。在脱粒元件的揉搓搅动及螺旋输送作用下,果穗最终完成脱粒作业。

在 YZ 平面内对脱粒滚筒-果穗-凹板间的接触进行受力分析,如图 3b 所示,其中角度 θ' 为果穗之间作用力方向与竖直方向的夹角 ($0° < \theta' < 90°$)。对果穗 b 受力进行分析,在 Y 轴及 Z 轴方向果穗 b 所受各力的合力可表示为

$$F_Y = f_{ab}\sin\theta' - F_{ab}\cos\theta' + F_S - G_b \tag{3}$$

$$F_Z = F_{ab}\sin\theta' + f_{ab}\cos\theta' - f_S \tag{4}$$

式中 F_{ab}——果穗 a 对果穗 b 压力

f_{ab}——果穗 b 受到果穗 a 的摩擦力

F_S——果穗 b 受到凹板的支持力

f_S——果穗 b 受到凹板的摩擦力

G_b——果穗 b 所受重力

由于 $f_{ab} = \mu F_{ab}$,$f_S = \mu F_S$,其中 μ 为果穗与铁板

摩擦因数，代入式(3)、(4)可得

$$F_Y = F_{ab}(\mu\sin\theta' - \cos\theta') + F_S - G_b \tag{5}$$

$$F_Z = F_{ab}(\sin\theta' + \mu\cos\theta') - \mu F_S \tag{6}$$

果穗 b 所受到的合力为 F_T，合力大小为

$$F_T = \sqrt{F_Z^2 + F_Y^2} = [(1+\mu^2)F_{ab}^2 + \mu^2 F_S^2 + (F_S - G_b)^2 - 2\mu F_{ab} F_S(\sin\theta' + \mu\cos\theta') + 2(F_S - G_b)F_{ab}(\mu\sin\theta' - \cos\theta')]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

令

$$N_{\theta'} = -2\mu F_{ab} F_S(\sin\theta' + \mu\cos\theta') \tag{8}$$

$$M_{\theta'} = 2(F_S - G_b)F_{ab}(\mu\sin\theta' - \cos\theta') \tag{9}$$

对式(8)、(9)分别求二阶导数及三阶导数

$$N'_{\theta'} = -2\mu F_{ab} F_S(\cos\theta' - \mu\sin\theta') \tag{10}$$

$$N''_{\theta'} = 2\mu F_{ab} F_S(\sin\theta' + \mu\cos\theta') \tag{11}$$

$$M'_{\theta'} = 2(F_S - G_b)F_{ab}(\mu\cos\theta' + \sin\theta') \tag{12}$$

$$M''_{\theta'} = 2(F_S - G_b)F_{ab}(-\mu\sin\theta' + \cos\theta') \tag{13}$$

$$M'''_{\theta'} = 2(F_S - G_b)F_{ab}(-\mu\cos\theta' - \sin\theta') \tag{14}$$

由式(11)可知，式(10)为增函数，且 $N'_0 < 0$，$N'_{90} > 0$；由式(14)可知，式(13)为减函数，且 $M''_0 > 0$，$M''_{90} < 0$，同时由于 $F_S - G_b > 0$，因此式(12)为先增后减且大于 0 的函数。为确定 $M'_{\theta'} + N'_{\theta'}$ 的增减性，求解其端点处一阶导数为

$$N'_0 + M'_0 = -2f_{ab}G_b \tag{15}$$

$$N'_{90} + M'_{90} = 2f_{ab}f + 2F_{ab}(F_S - G_b) \tag{16}$$

即 $M'_{\theta'} + N'_{\theta'}$ 在角度取值范围内呈先减后增趋势，存在最优角度 θ' 使合力最小。在变径段长度一致时，随主脱粒区锥度 θ 的增大，图 3b 中所示同一位置变径段直径减小，果穗 a 有上移趋势，果穗 b 为保证对果穗 a 的支撑有左移趋势，此时，果穗 a 与果穗 b 之间作用力的方向与竖直方向的夹角 θ' 减小。因此存在最佳变径段锥度 θ 使得此时果穗受力最小。

果穗在脱粒系统内的运动较为复杂，静力学分析无法准确描述果穗在脱粒系统内的受力及运动情况，因此，基于 EDEM 提取果穗受力、果穗接触次数等数据，动态分析果穗在脱粒系统内的运动情况。

2.2　变径滚筒参数设计

脱粒系统包括变径脱粒滚筒、脱粒凹板、上盖板等部件，其结构如图 4 所示。由于主脱粒区末端直径 D 为定值，因此影响变径段锥度的因素主要为：导入锥末端直径 d 和变径段长度 L。为使果穗顺利进入滚筒，导入锥的锥度需大于滚筒变径段锥度，据此设计 9 种不同参数脱粒滚筒，如表 1 所示。

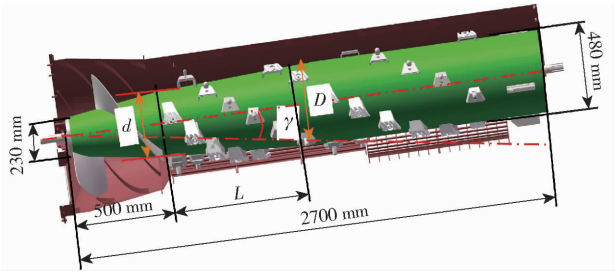


图 4　脱粒系统模型

Fig. 4　Model of thresher system

表 1　变径滚筒参数

Tab. 1　Parameters of drum with gradually changing diameter

滚筒序号	导入锥末端直径 d/mm	主脱粒区长度 L/mm	变径段锥度/(°)
1	340	900	4.45
2	360	900	3.81
3	380	900	3.18
4	400	900	2.54
5	420	900	1.91
6	380	650	4.45
7	380	750	3.81
8	380	1 125	2.54
9	380	1 500	1.91

3　变径段参数仿真试验

3.1　玉米果穗模型

随机选取 100 个玉米果穗，使用游标卡尺分别测量其直径、长度等物理尺寸，结果如表 2 所示，以此为依据在离散元软件 EDEM 中建立果穗模型，玉米果穗实体及模型如图 5 所示。

表 2　玉米果穗尺寸参数

Tab. 2　Ear size parameters　　mm

果穗参数	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　仿真参数设置

通过查阅文献[23]，对仿真参数进行设定(表 3)。在 EDEM 中材料接触模型选用 Hertz－Mindlin (no－slip)无滑动模型，根据国内华北地区主流籽粒直收机械实际工况需求，设定滚筒转速为 350 r/min，果穗喂入量为 8 kg/s。

表 3 仿真参数

Tab. 3 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
玉米籽粒间动摩擦因数	0.078 2

3.3 仿真试验设计与分析

为探究导入锥末端直径变化及变径区长度变化造成的变径段锥度变化对脱粒系统内果穗受力的影响,在同一凹板间隙下对所设计的 9 种脱粒滚筒分别进行仿真分析。以果穗受脱粒元件作用力的均值、果穗之间及果穗与脱粒元件之间接触次数为指标,确定变径滚筒的最佳结构参数。每组试验选取 10 个玉米果穗进行数据提取,果穗受力均值如图 6 所示,果穗与脱粒元件及果穗之间平均接触次数如图 7 所示。

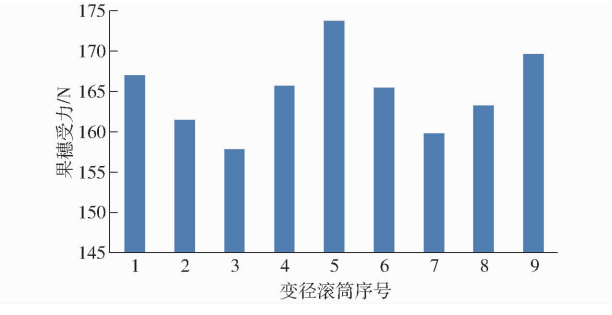


图 6 不同变径参数滚筒中果穗受力

Fig. 6 Force of ears in different drum parameters with gradually changing diameter

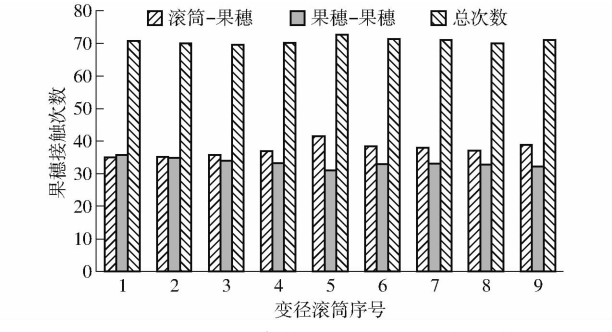


图 7 不同变径参数滚筒中果穗接触次数

Fig. 7 Contact frequency of ears in different drum parameters with gradually changing diameter

由图 6 可知,随滚筒变径段锥度减小,果穗受力先减小后增大,滚筒 3 果穗平均受力最小,为 157.82 N。对不同参数变径滚筒中果穗接触次数进行分析,发现锥度变化对果穗总体接触次数影响不大,但对果穗之间及果穗与脱粒元件之间的接触次数有影响。分析可知,在变径段长度一致时,随变径段锥度增大,果穗容纳度增高,果穗之间接触更强;在变径段前端直径一致时,滚筒 3 中果穗之间接触次数最多,果穗与脱粒元件接触次数最少,同时果穗总接触次数最少。

查阅文献[24-25]发现,籽粒发生破碎时破坏力的范围为 124.33~347 N,籽粒由果柄脱下的受力范围为 1.97~11.93 N。在脱出物分布中,有 60% 左右的脱出物分布在滚筒长度的前 40% 处,85% 的物料在滚筒长度的前 55% 区域已完成脱粒[16]。表 1 所示滚筒 3 变径段长度占滚筒长度的 40%,且该参数变径滚筒中果穗受力最小,果穗之间接触次数及果穗与脱粒元件接触次数均较适中。因此确定表 1 中滚筒 3 为较优结构方案,并进行滚筒加工试制。

4 台架试验

4.1 试验材料与方法

以华北地区种植面积较广的郑单 958 为试验对象,设计三因素四水平正交试验,对影响籽粒破碎率、未脱净率的滚筒转速、凹板间隙及籽粒含水率进行显著性分析,确定最优工作参数组合。在最优工作参数下,对比变径滚筒与等径滚筒脱粒质量,验证所设计变径滚筒降低籽粒破碎率的效果。

脱粒台架如图 8 所示,变径脱粒滚筒实物如图 9 所示。按照田间玉米植株株距,在输送链板上均匀铺放 200 个玉米果穗,以喂入量 8 kg/s 设定链板前进速度。脱粒完成后,对接料盒内的物料称量并取样。

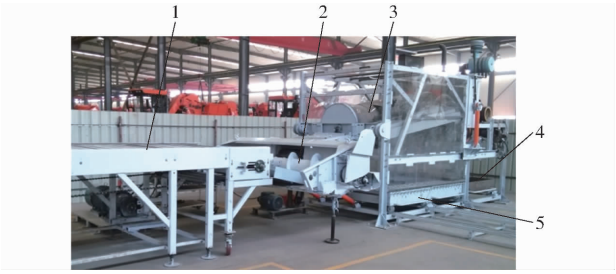


图 8 脱粒试验台

Fig. 8 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. 接杂装置 5. 接料装置

4.2 试验指标检测方法

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,对试验样品进行称量处理,以籽粒破碎率及未脱净率衡量滚筒脱粒性能。



图 9　变径脱粒滚筒

Fig. 9　Threshing drum with gradually changing diameter

4.3　试验结果分析

4.3.1　正交试验结果分析

设计三因素四水平正交试验，探究籽粒含水率、滚筒转速及凹板间隙对籽粒破碎率及未脱净率影响的主次关系，并确定各因素的较优组合。各因素水平如表 4 所示，试验结果如表 5 所示。A、B、C 为因素水平值。

表 4　试验因素水平

Tab. 4　Test factors and levels

水平	因素		
	转速/(r·min^{-1})	凹板间隙/mm	籽粒含水率/%
1	300	40	32
2	350	45	30
3	400	50	28
4	450	55	26

表 5　试验设计与结果

Tab. 5　Test scheme and result

序号	A	B	C	籽粒破碎率/%	未脱净率/%
1	1	1	1	9. 27	0. 49
2	1	2	2	7. 75	0. 39
3	1	3	3	5. 96	0. 38
4	1	4	4	4. 51	0. 35
5	2	1	2	7. 38	0. 36
6	2	2	1	8. 68	0. 41
7	2	3	4	4. 13	0. 34
8	2	4	3	5. 62	0. 27
9	3	1	3	6. 04	0. 16
10	3	2	4	4. 37	0. 12
11	3	3	1	8. 72	0. 31
12	3	4	2	7. 58	0. 17
13	4	1	4	4. 97	0. 13
14	4	2	3	6. 15	0. 23
15	4	3	2	7. 56	0. 15
16	4	4	1	9. 21	0. 47

4.3.2　极差分析

对试验结果进行极差分析，如表 6 所示。滚筒转速、凹板间隙、籽粒含水率各水平对脱粒性能影响规律如图 10 所示。由极差分析可以看出，籽粒含水率对破碎率影响最大，其次为滚筒转速，最小为凹板间隙；对籽粒未脱净率影响最大的因素为滚筒转速，其次为含水率，最小为凹板间隙。

表 6　各指标极差分析

Tab. 6　Analysis of range of each indicator

试验指标		因素		
		A	B	C
籽粒破碎率	k_1	6. 87	6. 92	8. 97
	k_2	6. 45	6. 74	7. 57
	k_3	6. 68	6. 59	5. 94
	k_4	6. 97	6. 73	4. 50
	R_j	0. 52	0. 33	4. 47
未脱净率	k_1	0. 40	0. 29	0. 42
	k_2	0. 35	0. 29	0. 27
	k_3	0. 19	0. 30	0. 26
	k_4	0. 25	0. 32	0. 24
	R_j	0. 21	0. 03	0. 18

4.3.3　方差分析

方差分析结果如表 7 所示。滚筒转速、籽粒含水率对脱粒过程中籽粒破碎率有显著性影响，凹板间隙对未脱净率影响显著性不大。

由方差分析和极差分析可知，3 个因素对籽粒破碎率的影响由大到小依次为 C、A、B，对未脱净率的影响由大到小依次为 A、C、B。综合正交试验中方差分析及极差分析，同时考虑国标要求，最终确定较优组合为 $A_2B_3C_4$，即滚筒转速为 350 r/min，凹板间隙为 50 mm，籽粒含水率为 26% 时脱粒效果较优。

4.3.4　对比试验

在最优工作参数下，对等径滚筒及变径滚筒进行脱粒对比试验，考察不同脱粒滚筒对籽粒破碎率、未脱净率及脱出物分布的影响。对比试验时籽粒含水率为 27%。根据籽粒形态的完整性将破损籽粒分为两大类，即籽粒形态不完整的破碎籽粒(全碎及顶部破碎)和形态较完整的机械损伤籽粒(裂纹及破皮)，如图 11 所示。由表 8 可知，变径滚筒中籽粒破碎率较等径滚筒下降了 19. 16%，未脱净率较等径滚筒下降了 51. 72%。

变径滚筒造成的破损籽粒中，全碎籽粒、裂纹籽

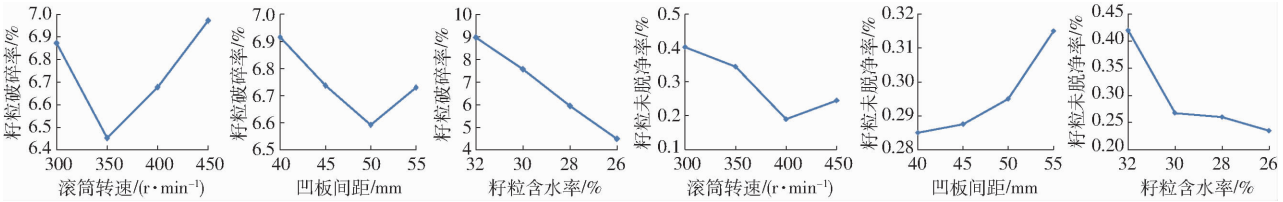


图 10　各因素对籽粒破碎率、未脱净率的影响

Fig. 10　Influence of various factors on rate of broken and unthreshed seeds

表 7 方差分析

Tab. 7 Variance analysis result

试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	F	显著性
籽粒破碎率	A	0.63	3	24.21	**
	B	0.21	3	8.03	*
	C	45.32	3	1 735.29	**
	误差	0.05	6		
未脱净率	A	0.11	3	7.93	*
	B	0.002	3	0.16	
	C	0.08	3	6.09	*
	误差	0.03	6		

注：** 表示因素对试验结果有显著影响，* 表示因素对试验结果有影响。



图 11 不同的籽粒破碎形式

Fig. 11 Different types of broken grains

表 8 籽粒破碎率统计结果

Tab. 8 Statistical result of seed breakage rate %

滚筒类型	不同破碎形式籽粒破碎率				总破碎率	未脱净率
	全碎	裂纹	破皮	顶部破碎		
等径滚筒	1.93	1.50	0.9	1.41	5.74	0.87
变径滚筒	1.37	1.18	0.7	1.39	4.64	0.42

粒及破皮籽粒所占比例明显低于等径滚筒，顶部破碎籽粒所占比例相差不大。由于脱粒元件与果穗直接接触，造成籽粒顶端被“啃伤”，出现顶部破碎；结合仿真试验数据分析，变径滚筒增加了脱粒段果穗容纳度，脱粒元件击打果穗后，果穗之间的接触行为增强，果穗间相互揉搓效果强于等径滚筒，这一过程使得籽粒之间及籽粒与芯轴之间的连接更松散，更易于籽粒与芯轴分离，减小籽粒与脱粒元件的刚性接触，降低全碎籽粒、裂纹籽粒及破碎籽粒数量，从而降低脱粒过程中的破碎率。

为探究脱粒滚筒结构的改变对脱出物分布的影响，对脱粒系统下方区域沿滚筒轴向等间隙划分为 21 个区域并依次编号，试验结束后分别对两种滚筒脱出籽粒按编号称量记录，对数据进行分析后得到图 12 所示脱出籽粒沿滚筒轴向原始质量分布曲线及累积质量分布曲线。

由图 12 可知，变径滚筒脱出物沿滚筒轴向分布

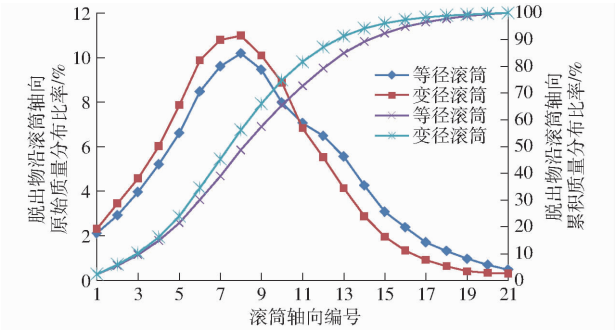


图 12 脱出物沿滚筒轴向质量分布曲线

Fig. 12 Axial mass distribution of grains along roller

趋势与等径滚筒相同，两种滚筒中脱出物峰值出现位置区间相差不大；通过脱出物累积质量分布可知，在滚筒长度的前 30% 区域（轴向编号 1 ~ 6 区域），两种脱粒滚筒的脱出物累积分布区别不大，脱出籽粒质量仅占总质量的 38% 左右。在脱粒滚筒长度的前 60% 区域，即轴向编号 1 ~ 13 区域，变径滚筒有超过 90% 的籽粒已完成脱粒，其中在滚筒长度的 40% ~ 60% 区域，即图中编号 7 ~ 13 段，变径滚筒中果穗脱粒速度明显高于等径滚筒。

5 结论

（1）设计了一种主脱粒区直径递增的变径脱粒滚筒，通过提高滚筒主脱粒区果穗容纳能力、增强果穗之间接触揉搓、降低籽粒之间相互作用，从而使籽粒更易于脱粒，降低了籽粒破碎率。

（2）借助仿真分析提取不同参数变径滚筒中果穗受力及果穗接触频次，结合等径滚筒脱出物分布情况，确定变径段最优结构参数；通过正交试验确定影响脱粒过程中籽粒破碎率的主次顺序为籽粒含水率、滚筒转速、凹板间隙；影响未脱净率的主次顺序为滚筒转速、籽粒含水率、凹板间隙。较优参数组合为籽粒含水率 26%，滚筒转速 350 r/min，凹板间隙 50 mm，此时籽粒破碎率为 4.13%，籽粒未脱净率为 0.34%。

（3）在籽粒含水率为 27% 时，与等径滚筒进行了对比试验，结果表明，两种脱粒滚筒中顶部破碎籽粒所占比例相差不大，变径滚筒破损籽粒中全碎籽粒为 1.37%、裂纹籽粒为 1.18%、破皮籽粒为 0.7%，均明显低于等径滚筒，籽粒总破碎率仅为 4.64%，较等径滚筒降低 19.16%，未脱净率为 0.42%，较等径滚筒降低 51.72%。证明变径滚筒能够有效提高脱粒质量。

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.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)

[2] 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 adaptabllity of corn grain harvesting device[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2014. (in Chinese)
[3] 耿爱军,杨建宁,李汝莘,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, LI Rushen, 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)
[4] 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)
[5] 雷晓鹏.黄淮海地区玉米机械收获籽粒可行性研究[D].保定:河北农业大学,2015.
LEI Xiaopeng. Studies on the feasiblity of maize mechanically harvesting grain in huanghuaihai regions[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[6] 柴宗文,王克如,郭银桥,等.玉米机械籽粒收质量现状及其与含水率的关系[J].中国农业科学, 2017, 50(11): 2036 - 2043.
CHAI Zongwen,WANG Keru,GUO Yinqiao,et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content[J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(11): 2036 - 2043. (in Chinese)
[7] 侯冲,董云雷,刘春鸽,等.我国玉米收获机行业现状及质量分析[J].农业工程,2019,9(6):20 - 25.
HOU Chong, DONG Yunlei, LIU Chunge, et al. Industry status and quality analysis of domestic maize harvester[J]. Agricultural Engineering,2019,9(6):20 - 25. (in Chinese)
[8] 徐立章,李耀明,王显仁,等. 谷物脱粒损伤的研究进展分析[J]. 农业工程学报,2009,25(1): 303 - 307.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Xianren, et al. Research development of grain damage during threshing[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(1): 303 - 307. (in Chinese)
[9] 杨立权,王万章,张红梅,等.切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J].农业工程学报,2018,34(1):35 - 43.
YANG Liquan, WANG Wanzhang, ZHANG Hongmei, et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(1):35 - 43. (in Chinese)
[10] PUZAUSKAS E, STEPONAVICIUS D, JOTAUTIENE E, et al. Substantiation of concave crossbars shape for corn ears threshing[J]. MECHANIKA,2016, 22(6):553 - 561.
[11] PETKEVIČHIUS S, ŠHPOKAS L, KUTZBACH H D. Investigation of the maize ear threshing process[J]. Biosystems Engineering,2008,99(4):532 - 539.
[12] FU Jun, YUAN Haikuo, ZHANG Depeng, et al. Multi-objective optimization of process parameters of longitudinal axial threshing cylinder for frozencorn using RSM and NSGA - II[J]. Applied Sciences,2020,10(5):1646.
[13] 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)
[14] 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)
[15] 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.
[16] 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.
[17] 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.011. (in Chinese)
[18] 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[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)
[19] 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)
[20] 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)
[21] 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)
[22] 卡娜沃依斯基[波兰]. 收获机械[M]. 北京:中国农业机械出版社,1983.
[23] 王云霞,梁志杰,张东兴,等.基于离散云的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J].农业工程学报,2016,32(22):36 - 42.
[24] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[25] 宋建农.农业机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.