doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.009

制种玉米与剥皮机构互作过程仿真与试验

陈俊志　史瑞杰　戴　飞　赵武云　赵一鸣　辛尚龙

（甘肃农业大学机电工程学院，兰州 730070）

摘要：针对制种玉米利用大田玉米剥皮机作业籽粒损失大等现象，本文对剥皮过程中制种玉米果穗与剥皮机构间的碰撞和摩擦进行理论分析，得到了影响剥皮效果的主要因素，建立了玉米果穗-剥皮机构系统的离散元与多体动力学柔性模型，利用 DEM－MBD 联合仿真技术对制种玉米与剥皮机构互作过程进行模拟研究，采用 Box－Behnken 试验设计原理，以压送器与剥皮辊间距、剥皮辊转速和剥皮辊间隙为试验因素，以果穗平均前进速度和最大受力为试验指标，进行三因素三水平试验，最后进行台架试验和田间试验。理论分析结果表明：玉米果穗沿剥皮辊轴线方向的前进速度和剥皮过程中所受的作用力能够分别表征苞叶剥净率与籽粒损失率；试验结果表明，制种玉米剥皮机构最佳工作参数组合：压送器与剥皮辊间距为 32 mm、剥皮辊转速为 430 r/min、剥皮辊间隙为 －0.3 mm，此时玉米果穗苞叶剥净率为 93.33%，籽粒脱落率为 1.802%，籽粒破损率为 1.203%，机具田间试验与台架试验结果误差小于 3%。试验所用剥皮辊满足制种玉米剥皮的性能要求，所用方法能够为制种玉米剥皮机构的改进提供参考。

关键词：制种玉米；剥皮机构；DEM－MBD 联合仿真；柔性模型；互作过程

中图分类号：S226.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)04-0091-10　　**OSID**：

Simulation and Experiment on Interaction Process between Seed Corn and Corn Husking Mechanism

CHEN Junzhi　SHI Ruijie　DAI Fei　ZHAO Wuyun　ZHAO Yiming　XIN Shanglong

(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: In view of the phenomenon of large grain loss in corn production using field corn husker, the collision and friction between corn ear and husker mechanism in the process of husking was theoretically analyzed, the main factors affecting the husker effect was obtained, and the discrete element and multi-body dynamic flexible model of corn ear－husker mechanism system was established. DEM－MBD co-simulation technology was used to simulate the interaction process between seed making corn and husking mechanism. Box－Behnken test design principle was adopted, with the distance between the press-feed device and the husking roller, the speed of the husking roller and the gap between the husking roller as test factors, and the average forward speed and maximum force of the fruit ear as test indexes, three-factor and three-level tests were carried out. Finally, bench test and field test were carried out. The results of theoretical analysis showed that the advance speed of corn ears along the peeling roller line and the applied force during the peeling process could represent the stripping rate of bracts and grain loss rate respectively. The test results showed that the optimum working parameter combination of corn husking mechanism was as follows: the distance between the press feeder and the peeling roller was 32 mm, the rotating speed of the peeling roller was 430 r/min, and the gap between the peeling roller was －0.3 mm. In this case, the husk stripping rate was 93.33%, the kernel shedding rate was 1.802%, and the kernel breakage rate was 1.203%. The error between the field test and bench test results was less than 3%. The roller used in the experiment can meet the performance requirements of corn husking, and the method used can provide some reference for the improvement of corn husking mechanism.

Key words: seed corn; husking mechanism; DEM－MBD co-simulation; flexible model; interaction process

收稿日期：2023－11－30　修回日期：2024－01－09

基金项目：甘肃省农业农村厅农机装备补短板项目（njyf2022－02、njyf2023－02）、甘肃省科技重大专项（21ZD10NF003－4－01、23ZDNA008）、中央引导地方科技发展资金项目（23ZYQF305－1）和财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目（CARS－14－1－28）

作者简介：陈俊志（1998—），男，硕士生，主要从事农业工程技术与装备研究，E-mail：chenjunzhi98@163.com

通信作者：赵武云（1966—），男，教授，博士生导师，主要从事北方旱区作物生产装备工程研究，E-mail：zhaowy@gsau.edu.cn

0 引言

在机械化收获的过程中,由于制种玉米的物理性状与大田玉米有较大差异,若使用大田玉米剥皮装置进行作业会造成籽粒损伤大等现象,严重影响玉米种子活力和发芽率[1-4]。受材料、花纹、直径和转速等因素的影响,剥皮机构与玉米果穗间有着极其复杂的运动和接触力学关系,目前国内对该方面的研究还比较薄弱,需要通过模拟仿真来研究其互作过程[5-7]。

近年来,朱忠祥等[8]应用 ANSYS/LS-DYNA 建立了玉米果穗与剥皮机构相互作用有限元仿真模型,获取了剥皮辊不同转速下玉米果穗在剥皮机构中的运动速度、绕自身轴线的角速度和受力情况;刘磊等[9]基于 DEM 建立了种子玉米果穗与剥皮机构相互作用的离散元仿真模型,通过对玉米果穗籽粒损伤及脱落分析,确定了剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆摆幅的较优工作范围;陈舜等[10]运用 ANSYS Workbench/LS-DYDA 模块对剥皮机构进行了运动仿真,建立了鲜食玉米果穗剥皮过程的有限元仿真模型,分析了不同工作参数对果穗剥皮的影响。上述研究为玉米果穗与剥皮机构互作过程的仿真提供了参考,但建模方法较为单一,存在着一定的局限性,无法较好地模拟剥皮过程中柔性体与刚体、柔性体与柔性体间复杂的运动和弹性形变。

本文依据制种玉米结构尺寸和材料参数,建立制种玉米果穗和剥皮机构的离散元与多体动力学柔性模型,采用 DEM-MBD[11-14]联合仿真技术对制种玉米与剥皮机构互作过程进行模拟研究。并在仿真模拟的基础上,研究剥皮机构不同工作参数对制种玉米果穗的作用规律,开展多因素正交试验[15],以期得到制种玉米剥皮机构的最优工作参数组合。

1 制种玉米-剥皮机构互作过程

1.1 制种玉米物理特性

如图 1 所示,相比于大田玉米,制种玉米果穗长度较短,直径也较小;制种玉米籽粒形状和排列不规则,密度和硬度也更高,使得剥皮过程中籽粒破损率增加,提高了作业难度;制种玉米苞叶层数比大田玉米少得多,而苞叶层数越少,所需的剥离力也越小;收获期间,制种玉米籽粒与玉米芯之间的粘结力相比大田玉米更低,增大了剥皮时籽粒损失率[16]。

1.2 剥皮过程受力分析

玉米果穗通过进料口进入剥皮装置后,受到多个力的作用。剥皮辊具有一定的水平倾角,果穗在自身重力和辊的轴向摩擦力作用下沿着通道进行轴向运动。由于两根剥皮辊的表面花纹不同,对果穗所产生的切向摩擦力会有差别,使得果穗绕自身轴线进行圆周运动。此外果穗还可能会受到压送装置以及前进惯性的影响。

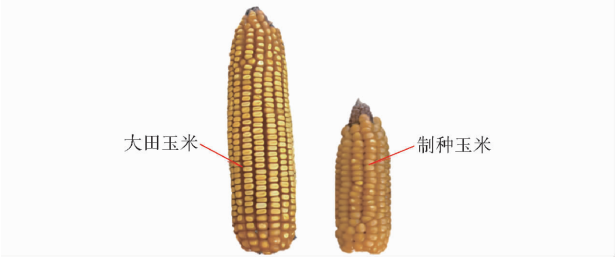


图 1 大田玉米与制种玉米果穗示意图

Fig. 1 Schematic of field corn and seed corn ears

目前玉米剥皮装置结构形式主要为高低辊组合式和平辊组合式,前者剥皮强度大、效率高,容易对玉米籽粒造成较大的损伤,适用于青湿难剥皮的场合;后者剥皮力度较为柔和,掉籽率也相对较低,适用于较干易剥皮的场合[17]。制种玉米的收获一般应在完熟期的较短时间内完成,此时玉米苞叶与果穗、籽粒与玉米芯间的粘结力较小,宜采用平辊组合式结构进行剥皮,玉米果穗受力示意如图 2 所示。

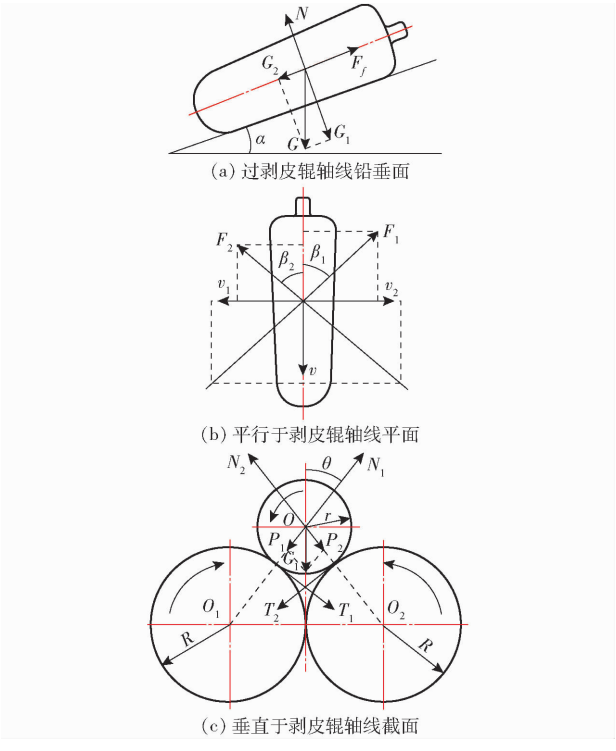


图 2 玉米果穗剥皮过程力学分析

Fig. 2 Mechanical analysis of corn ear peeling process

1.3 玉米果穗下滑分析

由图 2a 可知,玉米果穗沿剥皮辊轴线向下滑动条件为

$$G\sin\alpha > F_f \tag{1}$$

式中 G——玉米果穗重力,N

F_f——剥皮辊对果穗的摩擦力，N

α——剥皮辊倾角，(°)

在剥皮过程中，玉米果穗所受摩擦力方向与绝对速度方向有关，其关系如图 2b 所示，由此可得果穗所受摩擦力计算式为

$$F_f = F_1\cos\beta_1 + F_2\cos\beta_2 \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = \mu_1 N_1 \\ F_2 = \mu_2 N_2 \\ \beta_1 = \arctan\dfrac{v_1}{v} \\ \beta_2 = \arctan\dfrac{v_2}{v} \end{cases} \tag{3}$$

式中　F_1、F_2——左、右剥皮辊作用在玉米果穗上的摩擦阻力，N

β_1、β_2——左、右剥皮辊作用在果穗上的摩擦阻力与剥皮辊轴线间的夹角，(°)

μ_1、μ_2——左、右剥皮辊与玉米果穗之间的动摩擦因数

N_1、N_2——左、右剥皮辊对玉米果穗的支撑力，N

v_1、v_2——玉米果穗相对于左、右剥皮辊周向线速度，m/s

v——玉米果穗相对于剥皮辊轴向线速度，m/s

由图 2c 可知，剥皮辊对玉米果穗支撑力计算式为

$$N_1 = N_2 = \frac{G_1}{2\cos\theta} \tag{4}$$

将 $\sin\theta = \dfrac{R}{R+r}$、$G_1 = G\cos\alpha$ 代入式(4)得

$$N_1 = N_2 = \frac{G\cos\alpha(R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} \tag{5}$$

式中　R——剥皮辊半径，mm

r——玉米果穗半径，mm

结合式(2)、(3)、(5)可得

$$F_f = \frac{G\cos\alpha(R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}}(\mu_1\cos\beta_1 + \mu_2\cos\beta_2) \tag{6}$$

将式(6)代入式(1)得

$$\tan\alpha > \frac{R+r}{2\sqrt{r^2+2Rr}}(\mu_1\cos\beta_1 + \mu_2\cos\beta_2) \tag{7}$$

由式(7)可知，玉米果穗沿剥皮辊轴线的滑动与剥皮辊倾角 α、剥皮辊半径 R、玉米果穗半径 r、动摩擦因数 μ、绝对速度方向与剥皮辊轴线夹角 β 有关。

1.4　玉米苞叶剥离分析

将玉米苞叶从果穗上撕拽剥离下来主要依靠剥皮辊作用于玉米果穗上的切向摩擦力，由于主、从动剥皮辊表面花纹不同，产生的切向摩擦力也不一样，由图 2c 可知

$$\begin{cases} T_1 = f_1 N_1 \\ T_2 = f_2 N_2 \end{cases} \tag{8}$$

式中　T_1、T_2——左、右剥皮辊作用在玉米果穗上的切向摩擦力，N

f_1、f_2——左、右剥皮辊与玉米果穗之间的切向动摩擦因数

当剥皮辊作用的切向摩擦力大于苞叶与苞叶、苞叶与籽粒间的粘结力时，苞叶就会被剥皮辊从玉米果穗表面剥离开来。玉米苞叶由叶片和叶鞘组成，剥皮作业时断裂位置主要发生在叶鞘处。研究表明，叶鞘拉伸性能取决于拉力与苞片自然生长方向之间的夹角，会随着拉力角的增大而逐渐降低[18]。因此，剥皮辊表面花纹螺旋角越小，摩擦力所形成的拉力角则越大，可以降低剥离功耗，提高剥离效率和质量，还可以提高叶鞘根部苞叶断裂的概率，有利于减少剥完果穗上的苞片残留。

此外，制种玉米果穗直径更小，质量更轻，若使用大田玉米的剥皮装置对制种玉米进行剥皮，剥皮辊对玉米果穗的支撑力会减小，所产生的摩擦力也会减小，导致苞叶难以剥离或剥不干净。对此需要采用直径更大或长度更长的剥皮辊对制种玉米进行剥皮，以满足剥净率的要求。

1.5　玉米籽粒损失分析

大田玉米剥皮装置通常采用铸铁-橡胶辊的组合来进行剥皮作业，其对苞叶具有较强的剥离能力，但铸铁的硬度容易对籽粒造成损伤，不能满足制种玉米剥皮破损率和掉落率要求。将剥皮辊与玉米果穗的接触过程视为两个圆柱体间的接触，彼此形成一个弹性半空间，接触载荷表达式[19]为

$$P^* = \frac{bE^*}{2R^*} \tag{9}$$

式中　P^*——弹性半空间的接触载荷，MPa

b——接触区域的一半宽度，mm

E^*——两个圆柱体的等效弹性模量，Pa

R^*——两个圆柱体等效半径，mm

从式(9)可以看出，剥皮辊与玉米果穗接触时受到的力与接触区域宽度、剥皮辊和果穗弹性模量、剥皮辊和果穗直径有关。因此，可以选择弹性模量相对较高的全橡胶辊组合进行剥皮，不仅能增大剥皮辊与玉米果穗间的摩擦力，提高对苞叶的抓取能力，还能在保证剥净率的同时减少玉米籽粒损失。

根据上述理论分析可知，随着剥皮辊转速的增大，玉米苞叶与剥皮辊间的摩擦变大，使得苞叶剥净

率增加,但转速过大会导致籽粒损失率增大;玉米果穗沿剥皮辊轴线方向的前进速度越小,则果穗在剥皮辊上停留的时间越长,与剥皮机构接触的次数越多,相应的苞叶剥净率越高;玉米果穗在剥皮过程中所受的作用力越大,则越容易造成籽粒脱落和破损的现象,相应的籽粒损失率越高。因此,本文以玉米果穗在剥皮机构前进速度和受力作为评价剥皮机构剥皮性能的因素。

2 基于 DEM - MBD 联合仿真

2.1 多体动力学模型建立

目前对于制种玉米的机械化收获,我国多采用玉米联合收获机,一次完成摘穗、剥皮、茎秆放铺或切碎抛撒还田等项作业[20]。制种玉米剥皮机装在联合收获机上配套使用,在剥皮过程中,制种玉米果穗主要受剥皮辊和压送器的直接接触作用,为了便于观察和减少计算,选取一对橡胶剥皮辊和 4 个压送器来建立剥皮机构的仿真模型。参考现有的平辊式玉米剥皮机,对剥皮辊与压送器的主要结构参数以及装配参数进行测量,结果如表 1 所示。

表 1 剥皮辊和压送器主要结构参数和装配参数

Tab. 1 Structural parameters and assembly parameters of husking roller and delivery device

项目	参数	数值/型式
剥皮辊	直径/mm	72
	长度/mm	1 100
	表面花纹类型	斜条状、组合式
压送器	叶片个数	12
	叶片排列方式	双螺旋等距分布
	宽度/mm	38
	旋转直径/mm	268
装配关系	剥皮辊排列方式	平辊式
	压送器轴线间距/mm	206
	剥皮辊与压送器转速比	1∶0.18

根据所述参数,在 Solidworks 软件中创建三维模型,并将完成后的装配体保存为 x_t 格式文件,然后将该文件导入 RecurDyn 软件,调整好空间位置,材料属性设置为 Rubber,接着为剥皮辊和压送器添加相应的旋转副和驱动。为了模拟真实玉米剥皮过程的工况,需对模型进行柔性化处理,完成后的剥皮机构多体动力学模型如图 3 所示。最后,将剥皮辊和压送器全部以 Wall 文件导出,以满足后面与 EDEM 软件联合仿真要求。

2.2 离散元模型建立

采用的制种玉米品种为“郑单 958”,于 2023 年 9 月在甘肃省张掖市(38°93′N,100°45′E)收获。随机选取 100 个制种玉米果穗作为试验样本,分别测

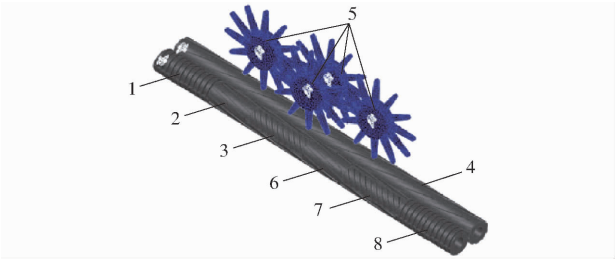


图 3 剥皮机构多体动力学模型

Fig. 3 Multibody dynamic model of peeling mechanism

1、8. 减速橡胶辊 2、6. 快速破皮橡胶辊 3、7. 内层揉搓橡胶辊 4. 输送橡胶辊 5. 压送器

量果穗大端直径和长度,得到分布图如图 4 所示。根据正态分布曲线,确定制种玉米果穗模型大端直径为 50 mm,总长度为 150 mm。

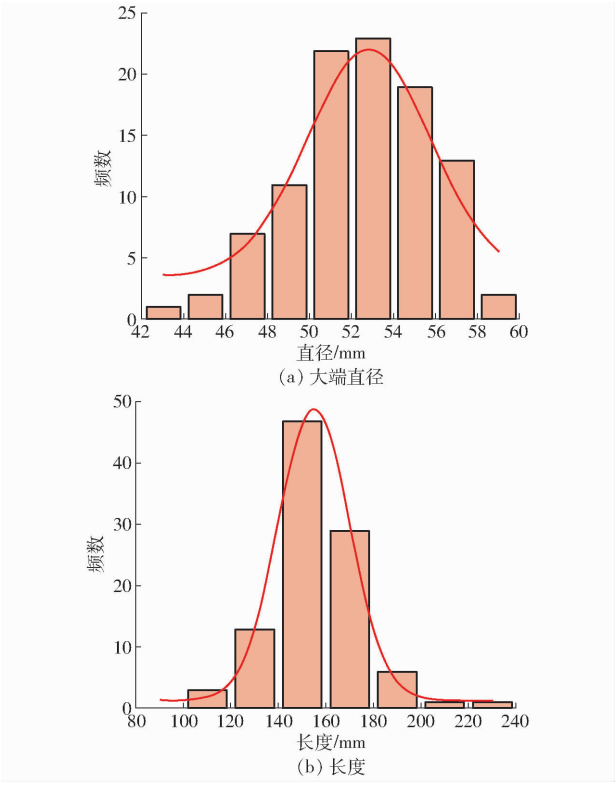
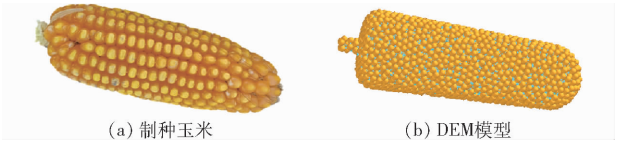


图 4 制种玉米果穗尺寸分布

Fig. 4 Size distributions of seed corn-ear

为了提高仿真模型与真实玉米果穗的相似度,通过 EDEM 软件使用颗粒填充法建立制种玉米果穗的离散元仿真模型,具体过程如下:根据如图 5a 所示制种玉米果穗的外形尺寸采用 Solidworks 软件建立三维模型,并将其保存为 step 格式文件。通过 ANSYS 软件对果穗模型进行网格划分,使用四面体网格划分方法和 patch conforming 算法,设置网格大小为 2 mm,导出为 msh 格式文件。在 EDEM 软件中建立半径为 2 mm 的单球颗粒和相应的接触材料,将玉米果穗 msh 文件和剥皮机构 Wall 文件导入,并调整好果穗的空间位置。接着创建一个能将果穗模型包围的长方体 Box,并为其添加一个颗粒工厂,将

玉米果穗轮廓的属性设置为 Virtual，而 Box 的属性设置为 Physical，使生成的颗粒能够完全覆盖果穗模型。颗粒生成后，交换玉米果穗轮廓和 Box 的属性设置，并结合 Hertz－Mindlin bonding 模型重新进行运算。随着时间的推移，果穗轮廓内的颗粒会被保留下来，其他颗粒会在重力的作用下逐渐移动到计算域外消失，最后得到如图 5b 的 DEM 模型。



(a) 制种玉米　　(b) DEM模型

图 5　玉米果穗离散元模型

Fig. 5　Corn-ear discrete element models

为了增加仿真结果的真实性和可靠性，参照文献[21－24]并根据仿真效果不断修改模型参数，最终确定离散元模型主要参数如表 2 所示。

表 2　离散元模型主要参数

Tab. 2　Main parameters of discrete element model

项目	参数	数值
玉米	泊松比	0.4
	密度/(kg·m^{-3})	1 350
	剪切模量/Pa	1.37×10^{8}
橡胶	泊松比	0.47
	密度/(kg·m^{-3})	1 310
	剪切模量/Pa	2.65×10^{6}
Hertz－Mindlin bonding	单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	6×10^{7}
	单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	5×10^{6}
	临界法向应力/Pa	5×10^{6}
	临界剪切应力/Pa	4×10^{6}
	粘结半径/mm	5
玉米-橡胶接触	碰撞恢复系数	0.182
	静摩擦因数	0.350
	滚动摩擦因数	0.198

2.3　仿真试验设计

结合理论分析、前期试验结果和文献[25－27]可知，影响玉米果穗剥皮效果的可调工作参数主要是压送器与剥皮辊间距、剥皮辊转速和剥皮辊间隙。压送器与剥皮辊间距过大，则作用于果穗的力较小，使得苞叶剥净率较低，若两者间距过小，作用于果穗的力较大，果穗与剥皮机构的接触频率较高，相应的苞叶剥净率变高，但籽粒脱落率和破损率也会增加；剥皮辊转速过高，果穗会出现跳动现象，导致苞叶剥净率降低，影响剥皮效果，若转速过低，果穗在剥皮辊上停留时间长，生产效率低，不能满足实际作业需求；剥皮辊间隙过大，会导致剥皮不彻底，苞叶剥净率降低，若间隙过小，容易造成堵塞现象，籽粒破损率也会相应提高。

根据前期试验结果选定压送器与剥皮辊间距为 25～35 mm、剥皮辊转速为 400～500 r/min、剥皮辊间隙为－1～1 mm(负值表示橡胶剥皮辊相互挤压减少的距离)。并以这 3 个工作参数为试验因素，以果穗平均前进速度 R_1 和最大受力 R_2 作为评价指标，进行三因素三水平试验，试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Coding of experimental factors

编码	因素		
	压送器与剥皮辊间距/mm	剥皮辊转速/(r·min^{-1})	剥皮辊间隙/mm
－1	25	400	－1
0	30	450	0
1	35	500	1

2.4　试验结果与分析

为了更直观地显示玉米果穗在剥皮辊上的运动和受力情况，以工况(压送器与剥皮辊间距 30 mm、剥皮辊转速 450 r/min、剥皮辊间隙 0 mm)为例，使用 EDEM 的 Analyst 功能提取玉米果穗受力及速度变化曲线(图 6)以及果穗在剥皮辊上运动的受力云图(图 7)。

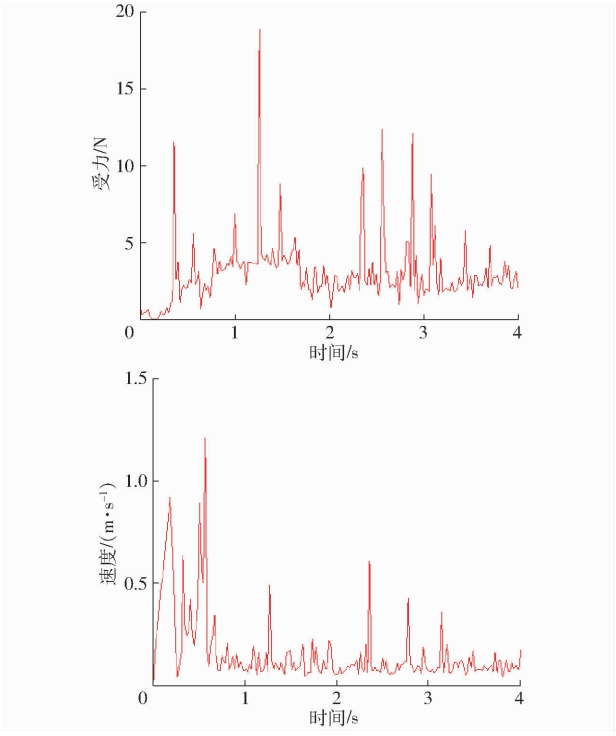


图 6　果穗受力及速度变化曲线

Fig. 6　Ear spike force and velocity change curves

剥皮辊表面花纹不同，其对玉米果穗的作用效果也不相同。左侧剥皮辊全部为大螺距条状辊，主要起输送果穗作用，右侧剥皮辊由 3 种不同辊型组合而成，依次起到减速、破皮、揉搓、再破皮、再揉搓和减速的作用。根据组合式剥皮辊所用辊型，整个互作过程大致可以分为减速、外层破皮和内层揉搓

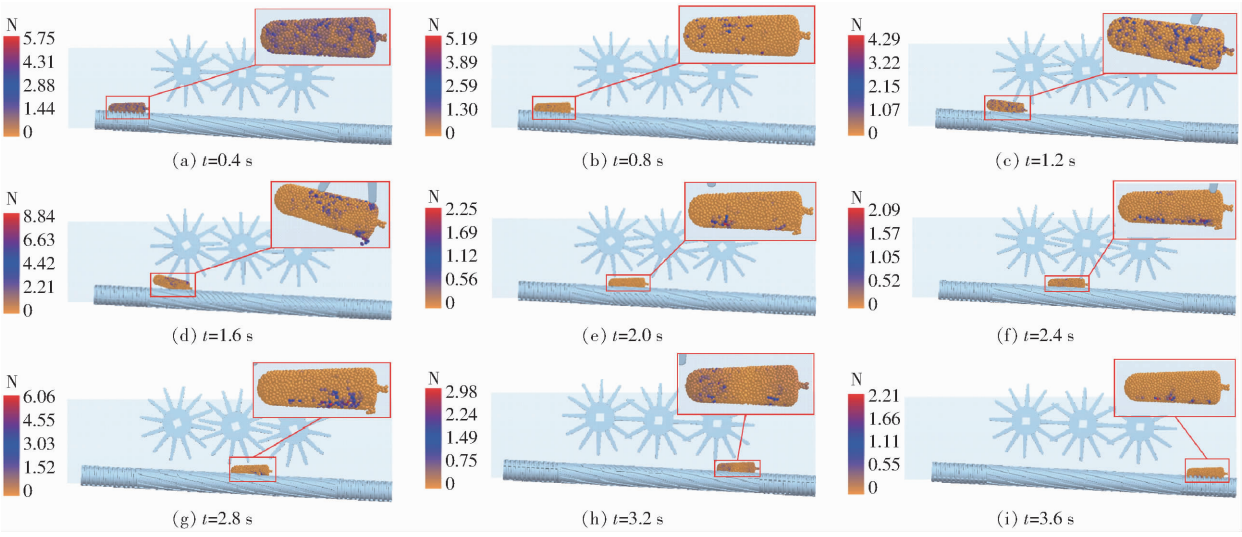


图 7 果穗受力云图

Fig. 7 Stress nephograms of ear

3 个阶段。

当玉米果穗落到减速辊上时,速度比较快,与减速辊接触瞬间会产生一个较大的力,同时在减速辊的作用下速度也会大幅降低;当玉米果穗运动到快速破皮辊上时,会间断性地受到一个较大的撕扯力,与压送器配合能够快速将果穗最外层苞叶破开,但此时果穗受到的作用力最大,速度波动也比较大,容易造成籽粒损伤;当玉米果穗移动到内层揉搓辊上时,果穗受力及速度较为平稳,通过对破开表皮的玉米果穗反复揉搓,从而将玉米苞叶剥离;接着是重复排列的快速破皮辊和内层揉搓辊,所起作用与前面一致,主要是确保苞叶能够完全剥离,提高苞叶剥净率;最后通过减速辊降低玉米果穗的输出速度,以降低光果穗与粮仓的碰撞力,从而减少玉米籽粒损失。综上所述,各阶段玉米果穗的运动和受力情况满足预期要求,证明仿真模型的可靠性。

基于 Design-Expert 软件中的 Box - Behnken 中心组合法进行试验,试验结果如表 4 所示,其中 A、B、C 为编码值。

表 4 试验结果

Tab. 4 Test results

试验序号	因素 A	因素 B	因素 C	R_1/(m·s^{-1})	R_2/N
1	0	0	0	0.217	15.449
2	0	-1	1	0.253	18.110
3	1	-1	0	0.241	17.880
4	0	0	0	0.237	14.524
5	0	0	0	0.212	14.987
6	0	0	0	0.220	12.556
7	1	1	0	0.307	16.723
8	-1	0	1	0.279	22.046
9	0	0	0	0.213	13.945
10	-1	1	0	0.275	23.204
11	0	1	-1	0.279	20.773
12	1	0	-1	0.227	17.417
13	0	-1	-1	0.230	16.548
14	-1	-1	0	0.285	21.236
15	-1	0	-1	0.288	21.468
16	0	1	1	0.289	21.352
17	1	0	1	0.264	20.194

2.4.1 方差分析

根据试验结果进行回归拟合分析,果穗平均前进速度 R_1 的方差分析结果如表 5 所示,回归模型的 $P=0.0024<0.01$,表明模型极显著,能够描述各因素与响应值之间的关系;失拟项的 F 检验结果不显著($P=0.2605>0.05$),表明试验因素与试验指标之间存在显著的二次关系,R_1 的回归方程与试验数据的拟合程度较高。回归项 B、A^2、B^2 对 R_1 均有极显著影响($P<0.01$);回归项 A、AB、C^2 对 R_1 均有显著性影响($0.01\leqslant P<0.05$);回归项 C、AC、BC 对 R_1 均无显著影响($P\geqslant 0.05$)。影响果穗平均前进速度 R_1 的试验因素的主次顺序为:剥皮辊转速 B、压送器与剥皮辊间距 A、剥皮辊间隙 C。去除无显著影响的交互项,果穗平均前进速度 R_1 的回归方程为

$$R_1=0.2200-0.0111A+0.0176B+0.0079C+0.0189AB+0.0295A^2+0.0278B^2+0.0149C^2 \tag{10}$$

由表 6 可知,果穗最大受力 R_2 的回归模型 $P=0.0036<0.01$,说明模型极显著,能够描述各因素与响应值之间的关系;失拟项的 F 检验结果不显著($P=0.2512>0.05$),说明 R_2 回归模型与实际剥皮情况拟合程度较好。回归项 A、A^2、C^2 对 R_2 均有极

表 5　R_1方差分析

Tab. 5　Variance analysis of R_1

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	0.014 6	9	0.001 6	10.88	0.002 4 **
A	0.001	1	0.001 0	6.56	0.037 4 *
B	0.002 5	1	0.002 5	16.51	0.004 8 **
C	0.000 5	1	0.000 5	3.34	0.110 3
AB	0.001 4	1	0.001 4	9.56	0.017 5 *
AC	0.000 5	1	0.000 5	3.49	0.103 8
BC	0	1	0	0.281 7	0.612 0
A^2	0.003 7	1	0.003 7	24.49	0.001 7 **
B^2	0.003 2	1	0.003 2	21.76	0.002 3 **
C^2	0.000 9	1	0.000 9	6.30	0.040 4 *
残差	0.001	7	0.000 1		
失拟项	0.000 6	3	0.000 2	1.97	0.260 5
误差	0.000 4	4	0.000 1		
总和	0.015 7	16			

注：* 表示显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示极显著（$P < 0.01$）。下同。

表 6　R_2方差分析

Tab. 6　Variance analysis of R_2

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	154.53	9	17.17	9.49	0.003 6 **
A	30.97	1	30.97	17.11	0.004 4 **
B	8.56	1	8.56	4.73	0.066 1
C	3.78	1	3.78	2.09	0.191 8
AB	2.44	1	2.44	1.35	0.283 4
AC	1.21	1	1.21	0.667 8	0.440 7
BC	0.241 6	1	0.241 6	0.133 5	0.725 6
A^2	45.21	1	45.21	24.99	0.001 6 **
B^2	20.22	1	20.22	11.17	0.012 4 *
C^2	30.98	1	30.98	17.12	0.004 4 **
残差	12.67	7	1.81		
失拟项	7.66	3	2.55	2.04	0.251 2
误差	5.01	4	1.25		
总和	167.20	16			

显著影响（$P < 0.01$）；回归项 B^2对 R_2有显著性影响（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；其他回归项均 $P \geqslant 0.05$，对结果无显著影响。影响果穗最大受力 R_2的试验因素的主次顺序为：压送器与剥皮辊间距 A、剥皮辊转速 B、剥皮辊间隙 C。去除无显著影响的交互项，果穗最大受力 R_2的回归方程为

$$R_2 = 14.29 - 1.97A + 1.03B + 0.687C + 3.28A^2 + 2.19B^2 + 2.71C^2 \quad (11)$$

2.4.2　响应曲面分析

为了更直观地分析各因素交互作用对果穗平均前进速度的影响，绘制如图 8 所示的响应曲面。由图 8 可知，随着压送器与剥皮辊间距的增大，果穗平均前进速度先减小后增大，最小值在 31 ~ 33 mm 区间内；随着剥皮辊转速的增大，果穗平均前进速度先减小后增大，最小值在 420 ~ 440 r/min 区间内；随着剥皮辊间隙的增大，果穗平均前进速度先减小后增大，最小值在 −0.5 ~ 0 mm 区间内。

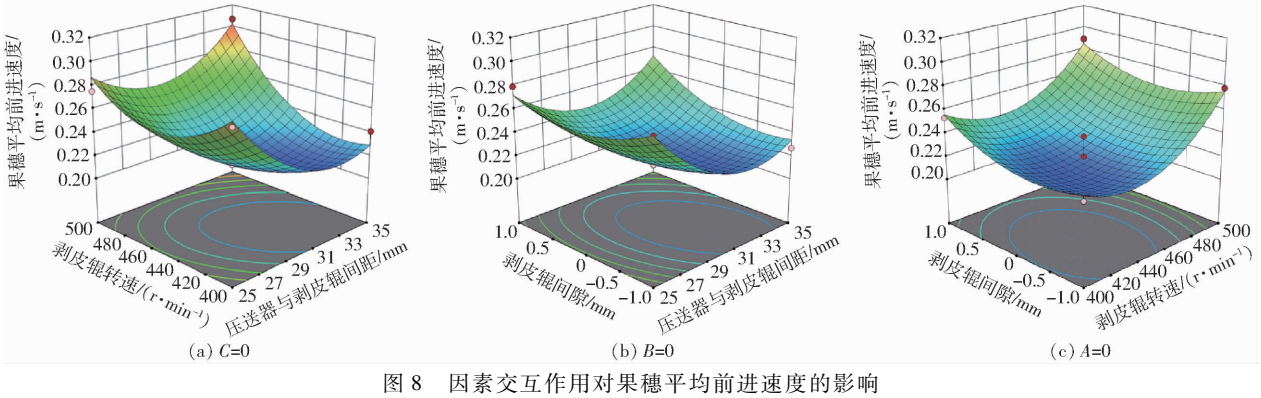
各因素交互作用对果穗最大受力的影响如图 9 所示，随着压送器与剥皮辊间距的增大，果穗最大受力先减小后增大，在压送器与剥皮辊间距 30 ~ 32 mm 内达到最小值；随着剥皮辊转速的增大，果穗最大受力先减小后增大，在剥皮辊转速 420 ~ 440 r/min 范围内达到最小值；随着剥皮辊间隙的增大，果穗最大受力先减小后增大，在剥皮辊间隙 −0.5 ~ 0 mm 范围内达到最小值。

2.5　参数优化

根据制种玉米果穗的剥皮仿真试验结果，以获得最小果穗平均前进速度、最小果穗最大受力为优化目标，结合试验因素的约束条件，对已得出的回归方程进行优化分析，设定优化目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min R_1 \\ \min R_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

利用 Design-Expert 软件对制种玉米剥皮机构的工作参数进行优化，得到最佳参数组合：压送器与剥皮辊间距为 31.558 mm、剥皮辊转速为 433.554 r/min、



(a) C=0　　(b) B=0　　(c) A=0

图 8　因素交互作用对果穗平均前进速度的影响

Fig. 8　Effects of factors interaction on average advance speed of ear

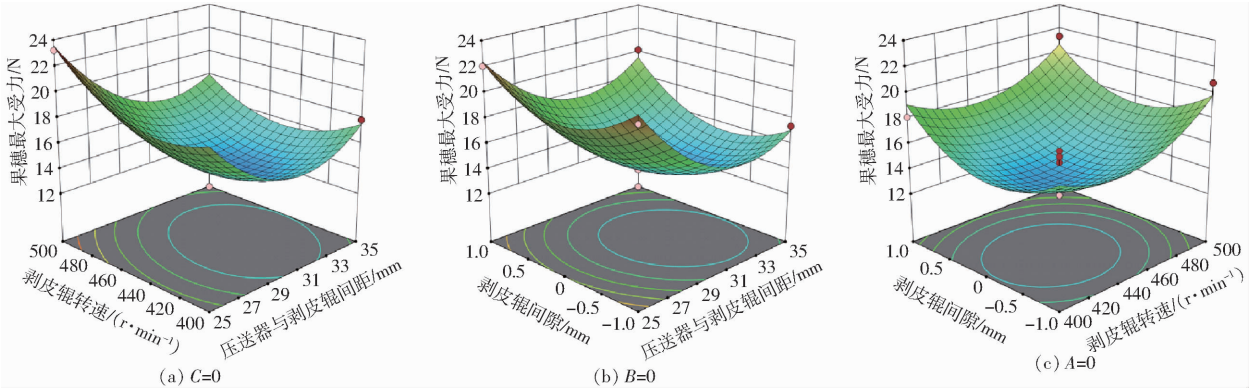


图 9 因素交互作用对果穗最大受力的影响

Fig. 9 Effects of factors interaction on maximum stress of ear

剥皮辊间隙为 -0.260 mm。该条件下果穗平均前进速度和最大受力的预测值分别为 0.212 m/s、13.913 N。

3 试验验证

3.1 试验装置

为验证所建立的制种玉米与剥皮机构互作仿真模型的可靠性和正交试验所得最优参数组合的准确性,搭建了如图 10 所示的制种玉米剥皮台架。主要包括机架、剥皮辊、压送装置、电机、调频器、传动机构和间隙调节装置等。在实际应用中,该台架可以根据试验需求进行相关参数的调节,通过调频器能精确控制电机转速,进而控制剥皮辊转速;通过间隙调节装置可以调整每对剥皮辊之间的距离;压送器高度则通过预留的槽口和紧定螺栓调节。此外,需要使用水分测定仪测量玉米籽粒含水率,高速摄像机录制玉米果穗的剥皮过程,小型电子天平、游标卡尺和卷尺等工具测定质量和距离。

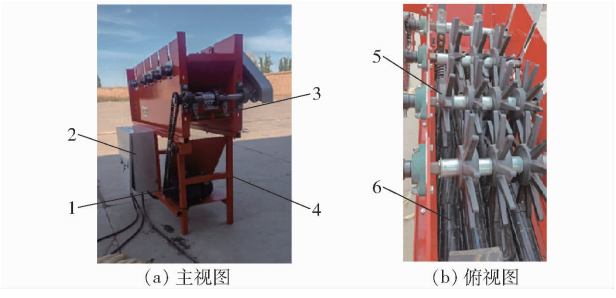


图 10 制种玉米剥皮台架

Fig. 10 Seed corn peeling bench

1. 三相电机 2. 调速箱 3. 间隙调节装置 4. 机架 5. 压送装置 6. 剥皮辊

3.2 试验结果

根据上述仿真试验所得到的最优工作参数组合,并结合实际工况,将压送器与剥皮辊间距设为 32 mm、剥皮辊转速设为 430 r/min、剥皮辊间隙设为 -0.3 mm。为减小其他因素对试验结果的影响,保证试验结果数据的可靠性,选用成熟期含水率为 25% ~30%,与仿真模型尺寸相近的制种玉米果穗进行试验,共进行 3 组重复试验,每组喂入 20 个果穗。试验时,制种玉米果穗需待剥皮台架运转平稳后喂入,并确保喂入的连续性。待一组果穗全部脱离剥皮台架后关闭电源,参照文献[28]中的试验方法,选择苞叶剥净率、籽粒脱落率和籽粒破损率作为评价指标,计算公式为

$$J = \left(1 - \frac{n_b}{n}\right) \times 100\% \tag{13}$$

$$L = \frac{M_L}{M} \times 100\% \tag{14}$$

$$S = \frac{M_S}{M} \times 100\% \tag{15}$$

式中 J——苞叶剥净率,%　　n——果穗总数

n_b——未剥净苞叶果穗数

L——籽粒脱落率,%

M_L——脱落籽粒质量,g

M——籽粒总质量,g

S——籽粒破损率,%

M_S——破损籽粒质量,g

试验结果如表 7 所示,3 组重复试验所得苞叶剥净率平均值为 93.33%,籽粒脱落率平均值为 1.802%,籽粒破损率平均值为 1.203%,满足制种玉米剥皮要求。

表 7 验证试验结果

Tab. 7 Verification experiment results %

序号	苞叶剥净率	籽粒脱落率	籽粒破损率
1	95	1.875	1.232
2	95	1.823	1.215
3	90	1.707	1.162
平均值	93.33	1.802	1.203

将设置成最佳工作参数组合的剥皮机装载到 4YZPS-4B 型制种玉米收获机上,并于 2023 年 9 月

14 日在甘肃省张掖市甘州区进行了田间验证试验，试验过程如图 11 所示，测得苞叶剥净率为 91.33%，籽粒脱落率为 1.853%，籽粒破损率为 1.235%，与台架试验结果误差分别为 2.143%、2.851%、2.679%，误差均小于 3%，验证了台架试验的准确性。

图 11　田间试验

Fig. 11　Field experiment

4　结论

（1）通过对剥皮过程中制种玉米果穗与剥皮机构间的相互作用进行理论分析，得出以玉米果穗沿剥皮辊轴线方向前进速度和剥皮过程中所受的作用力来表征苞叶剥净率和籽粒损失率。

（2）建立玉米果穗和剥皮机构的离散元与多体动力学柔性模型，利用 DEM－MBD 联合仿真技术对制种玉米与剥皮机构互作过程进行了模拟研究，并使用 Box－Behnken 方法设计了三因素三水平试验，得到了制种玉米剥皮机构最佳工作参数组合：压送器与剥皮辊间距为 32 mm、剥皮辊转速为 430 r/min、剥皮辊间隙为 －0.3 mm。

（3）采用制种玉米剥皮试验台架和机具田间验证试验验证优化结果的准确性，结果表明，试验台架处于最佳工作参数时苞叶剥净率为 93.33%，籽粒脱落率为 1.802%，籽粒破损率为 1.203%，机具田间试验与台架试验结果误差小于 3%，满足制种玉米剥皮要求，验证了台架试验准确性。

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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(12)：44－50.（in Chinese）

[2] 崔涛，樊晨龙，张东兴，等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：1－13.
CUI Tao，FAN Chenlong，ZHANG Dongxing，et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(12)：1－13.（in Chinese）

[3] 唐遵峰，刘淑平，周福君，等. 制种玉米种穗收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(7)：102－112.
TANG Zunfeng，LIU Shuping，ZHOU Fujun，et al. Design and experiment of ear harvester for seed corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(7)：102－112.（in Chinese）

[4] 杨万忠，张吉龙，杨晓明，等. 制种玉米种子机械化收获的实践与思考[J]. 中国种业，2022(2)：70－72.
YANG Wanzhong，ZHANG Jilong，YANG Xiaoming，et al. Practice and thinking on mechanized harvest of maize seeds for seed production[J]. China Seed Industry，2022(2)：70－72.（in Chinese）

[5] 徐丽明，王应彪，张东兴，等. 玉米通用剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2011，42(增刊)：14－20.
XU Liming，WANG Yingbiao，ZHANG Dongxing，et al. Design and experiment of corn universal husker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(Supp.)：14－20.（in Chinese）

[6] 赵玉强，何晓鹏，师建芳，等. 鲜食玉米剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2011，27(2)：114－118.
ZHAO Yuqiang，HE Xiaopeng，SHI Jianfang，et al. Design and experiment of sweet and waxy corn husker[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(2)：114－118.（in Chinese）

[7] 刘磊，刘理汉，杜岳峰，等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：131－141.
LIU Lei，LIU Lihan，DU Yuefeng，et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(9)：131－141.（in Chinese）

[8] 朱忠祥，岳小微，杜岳峰，等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J]. 农业工程学报，2015，31(6)：42－48.
ZHU Zhongxiang，YUE Xiaowei，DU Yuefeng，et al. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn-ear husking[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(6)：42－48.（in Chinese）

[9] 刘磊，杜岳峰，栗晓宇，等. 基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 2)：28－38.
LIU Lei，DU Yuefeng，LI Xiaoyu，et al. Analysis and experiment on kernel loss of seed corn during peeling based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp. 2)：28－38.（in Chinese）

[10] 陈舜，易克传，张新伟，等. 高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 2)：30－42.
CHEN Shun，YI Kechuan，ZHANG Xinwei，et al. Design and test of longitudinal axial flow high and low roller type fresh corn flexible peeling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp. 2)：30－42.（in Chinese）

[11] 毕秋实，王国强，陈立军，等. 基于离散元-多体动力学联合仿真的机械式挖掘机挖掘阻力仿真与试验[J]. 吉林大学

学报(工学版), 2019, 49(1):106 - 116.
BI Qiushi, WANG Guoqiang, CHEN Lijun, et al. Numerical simulation and experiment on excavation resistance of mechanical excavator based on DEM - MBD co-simulation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1):106 - 116. (in Chinese)
[12] 袁军, 于建群. 基于 DEM - MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1):17 - 24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM - MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):17 - 24. (in Chinese)
[13] 董向前, 苏辰, 郑慧娜, 等. 基于 DEM - MBD 耦合算法的振动深松土壤扰动过程分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1):34 - 43.
DONG Xiangqian, SU Chen, ZHENG Huina,et al. Analysis of soil disturbance process by vibrating subsoiling based on DEM - MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1):34 - 43. (in Chinese)
[14] WANG J W, XU Y A, WANG C Y, et al. Design and simulation of a trenching device for rice straw burial and trenching based on MBD - DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207:107722.
[15] 马成成, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7):134 - 143.
MA Chengcheng, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of corn seeds receiving by rotating clamp of belt-type high-speed seed guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7):134 - 143. (in Chinese)
[16] YANG F, DU Y F, FU Q F, et al. Design and testing of seed maize ear peeling roller based on Hertz theory[J]. Biosystems Engineering, 2021, 202:165 - 178.
[17] 李锐敏, 惠兆元, 程克昌, 等. 玉米收获机核心部件剥皮装置的应用与调整[J]. 农业机械, 2019(12):82 - 84.
LI Ruimin, HUI Zhaoyuan, CHENG Kechang, et al. Application and adjustment of peeling device for core components of corn harvester[J]. Agricultural Machinery, 2019(12):82 - 84. (in Chinese)
[18] LI Z, FU J, LUO X W. Tensile properties and fracture mechanisms of corn bract for corn peeling device design[J]. Agriculture, 2021, 11(8):796.
[19] POPOV V L. Contact mechanics and friction[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010:56 - 63.
[20] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 21 - 28.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Development of corn combine harvester reaping both corn ear and stalk for whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):21 - 28. (in Chinese)
[21] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 69 - 77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1):69 - 77. (in Chinese)
[22] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云,等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146 - 155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10):146 - 155. (in Chinese)
[23] LI X Y, DU Y F, LIU L, et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194:106722.
[24] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元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.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):36 - 42. (in Chinese)
[25] 王先霞,倪长安,刘师多,等.玉米果穗剥皮装置影响剥皮性能的试验分析[J].农机化研究,2009,31(2):117 - 120.
WANG Xianxia, NI Chang'an, LIU Shiduo, et al. Parameters study on maize husker of corn combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(2):117 - 120. (in Chinese)
[26] 丁慧玲, 扈伟斌, 王先霞, 等. 玉米果穗剥皮装置的参数研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(5):20 - 23.
DING Huiling, HU Weibin, WANG Xianxia, et al. Parameters study on maize husker[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009(5):20 - 23. (in Chinese)
[27] XIE F, HUO H, HOU X, et al. Experiment on the bract stripping and crushing device of a corn harvester[J]. Plos One, 2022, 17(3): e0265814.
[28] 中华人民共和国机械行业标准. JB/T 11907—2014 玉米剥皮机[S]. 北京:机械工业出版社, 2014.