

基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验

刘磊^{1,2} 杜岳峰^{1,2} 栗晓宇^{1,2} 刘理汉^{1,2} 张延安^{1,2} 杨帆^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 种子玉米在剥皮过程中存在大量的籽粒破碎、脱落等损失问题,严重影响种子玉米的单产与经济效益。因此,本研究采用理论分析、离散元仿真与正交试验相结合的方法,探究种子玉米果穗与剥皮机构的互作机理,确定剥皮机构的最优工作参数组合以优化种子玉米剥皮过程。首先,对种子玉米果穗在剥皮机构中的受力及运动进行了理论分析,探究了在剥皮过程中剥皮机构-种子玉米的相互作用关系,并确定了影响剥皮性能的主要因素。其次,基于 DEM 建立种子玉米果穗-剥皮机构相互作用仿真模型,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。最后,根据 Box - Behnken 设计方法,设计了三因素三水平的正交试验,通过方差分析和响应面分析,筛选出种子玉米剥皮机构的最佳工作参数组合:剥皮辊转速为 300 r/min,剥皮辊倾角为 10°,摆杆摆动幅度为 5°,此时苞叶剥离率为 94.13%,籽粒脱落率为 1.564%,籽粒破碎率为 1.292%。试验获得的剥皮装置的最优工作参数组合,明显提高了种子玉米的剥皮效果。

关键词: 种子玉米; 剥皮机构; 籽粒损失; 离散元; 正交试验

中图分类号: S233.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0028-11

Analysis and Experiment on Kernel Loss of Seed Corn during Peeling Based on DEM

LIU Lei^{1,2} DU Yuefeng^{1,2} LI Xiaoyu^{1,2} LIU Lihan^{1,2} ZHANG Yan'an^{1,2} YANG Fan^{1,2}

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

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Seed corn has much seed crushing and shedding losses during the peeling process, which seriously affects seed corn's yield and economic efficiency. Therefore, a combination of theoretical analysis, discrete element simulation, and orthogonal tests was used to investigate the interaction between the seed corn ears and the peeling mechanism. The optimal combination of peeling parameters was determined to optimize the peeling process of seed corn. Firstly, a theoretical analysis of the force and motion of the seed corn ear in the peeling mechanism was conducted to investigate the peeling mechanism-seed corn interaction during the peeling process and identify the main factors affecting the peeling performance. Secondly, a simulation model of seed corn ear-peeling mechanism interaction was established based on DEM. The better working range of peeling roller speed, peeling roller inclination angle, and pendulum swing were determined by analyzing the seed damage and shedding. Finally, according to the Box - Behnken design method, a three-factor, three-level orthogonal test was designed. The best combination of operating parameters for the seed corn peeling mechanism was screened by ANOVA and response surface analysis as follows: peeling roller speed of 300 r/min, peeling roller inclination angle of 10°, and pendulum swing amplitude of 5°, at which the bract stripping rate was 94.13%, the grain falling rate was 1.564%, and the grain crushing rate was 1.292%. The optimal combination of operating parameters of the peeling mechanism obtained from the experiment significantly improved the peeling effect of seed corn. The research results can provide a reference for the optimal design of the seed corn peeling mechanism to enhance the peeling efficiency of seed corn and reduce the grain crushing rate and the grain falling rate during the peeling operation.

Key words: seed corn; peeling mechanism; grain loss; DEM; orthogonal experiment

收稿日期: 2022-06-28 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175258)

作者简介: 刘磊(1997—),男,博士生,主要从事机器学习、机械设计和自动控制研究,E-mail: sdaujxdy201511@163.com

通信作者: 杜岳峰(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备数字化设计和数字孪生研究,E-mail: dyf@cau.edu.cn

0 引言

种子玉米是玉米种植和生产的基础,其产量远低于大田玉米,具有极高的交易价值。在收获期内的种子玉米,其籽粒含水率为 20% ~ 45%,一般采用分段收获法^[1],即通过人工或收获机收获玉米果穗,经晾晒后使用固定式剥皮机构剥离果穗苞叶,最后使用脱粒机构进行脱粒^[2]。然而,在剥皮、脱粒等机械化收获环节中极易产生籽粒破碎、脱落等浪费问题,严重影响了种子玉米的生产率水平。种子玉米机械化收获程度已经成为制约玉米种业发展的主要因素之一^[3]。

目前,种子玉米剥皮机均采用辊式结构^[4],即依靠相向旋转的剥皮辊与苞叶相互作用产生摩擦力,将苞叶攫取、拉拽、分离,实现剥皮作业过程。如美国 Ten Square 公司设计的 A&K 剥皮装置,该装置配有玉米果穗自动输送系统、16 辊自动剥皮结构和玉米果穗清洗系统。YANG 等^[5]也研制出了多通道种子玉米剥皮装置,采用组合型剥皮辊结构提高了种子玉米剥皮效率。上述种子玉米剥皮机构重点解决了种子玉米果穗苞叶剥净率问题,然而种子玉米的物理特性与大田玉米显著不同,易受外力损伤,因此机械化作业对种子玉米籽粒破碎率和脱落率要求应优先于苞叶剥净率。在果穗剥皮的除杂导流阶段,剥皮机构产生的接触力直接作用于光果穗表面,造成籽粒脱落、破碎等问题^[6-7]。对于保持高苞叶剥净率,同时降低籽粒损失率和脱落率这一问题一直未能得到很好的解决,其中主要原因在于剥皮机构与果穗之间存在着复杂的动力学和运动学关系,很多不易观测但又影响剥皮质量的内在规律至今还没有充分掌握,亟需从力学分析、动态仿真等方面对果穗与剥皮机构的互作机理开展研究。

离散元法 (DEM) 通过建立固体颗粒体系的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析,在农业领域的应用逐渐成熟,并在土壤耕作、农作物收获等领域取得了很多成果^[8-11]。前人的研究成果为本文构建种子玉米果穗离散元模型,并探究果穗-剥皮机构的相互作用机理提供了有价值的参考。此外,很多研究学者在玉米脱粒、籽粒干燥等领域应用离散元法 (DEM) 构建玉米果穗的仿真模型,进行玉米脱粒、干燥等相关研究^[12-13]。但之前研究中的玉米果穗模型均是基于大田玉米物料特性构建的,不能用作种子玉米果穗的剥皮仿真试验,本文将依据种子玉米果穗物料特性,构建种子玉米果穗的多尺度内聚颗粒模型,开展种子玉米-剥皮机构相互作用仿真试验。

此外,许多研究者采用多因素正交试验研究剥皮机构的最优工作参数组合及影响因素的显著性水平^[14-15]。由于种子玉米与大田玉米的物料特性及形状尺寸均存在一定差异,大田玉米的最优工作参数组合不适应于种子玉米剥皮工作。因此,为了降低种子玉米果穗剥皮过程中的籽粒破碎率和脱落率,本研究以种子玉米光果穗与剥皮辊之间接触碰撞作用系统为研究对象,重点关注剥皮辊的工作参数对光果穗的作用规律,并以降低籽粒破碎、脱落为目标,开展正交试验确定最优工作参数组合。

1 种子玉米苞叶剥离机理分析

1.1 剥皮过程分析

玉米果穗主要由籽粒、苞叶和果柄组成。玉米剥皮机构工作时,当剥皮辊运转稳定后,果穗由喂料端投入,剥皮辊设有一定倾斜角度,在辊子的转动下,玉米果穗受到剥皮辊产生的法向摩擦力,并在摩擦力矩作用下产生自转;又在自身重力及辊的切向摩擦力的双重作用下,玉米完成轴向运动,苞叶表面与辊子表面接触,期间果穗主要受到 2 个外力作用:采用的槽型剥皮装置,上低位辊的轴心存在高度差,辊子对果穗产生不同大小的摩擦力矩,使得果穗在下滑的同时产生沿自身轴线旋转的力矩;果穗苞叶在剥皮辊对果穗整体的摩擦力和旋转力矩作用下发生“抓取”动作,当苞叶所受辊子作用力大于苞叶与根部的连接力时,苞叶剥离,采用揉搓、摩擦作用实现玉米剥皮。玉米果穗在剥皮辊上受力如图 1 所示。

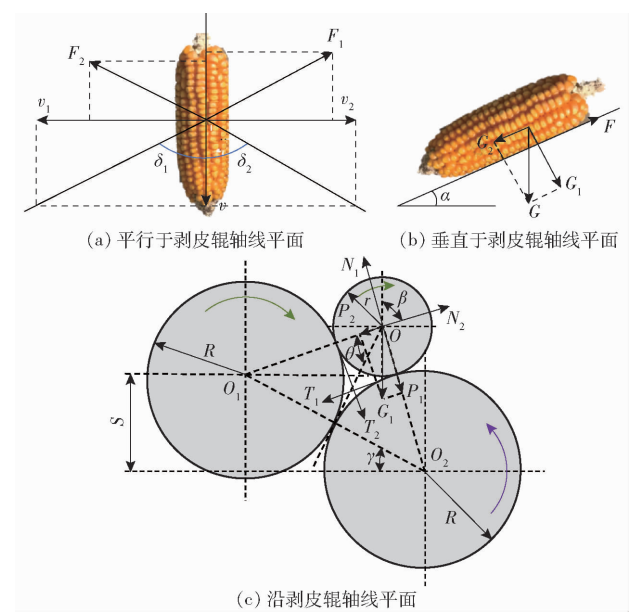


图 1 剥皮过程中果穗受力分析
Fig. 1 Stress analysis of ear in peeling process

当剥皮辊静止时,玉米果穗只能沿辊子轴线移动,所受摩擦力方向与果穗运动方向相反;当剥皮辊

运转时,果穗的绝对速度方向不平行于剥皮辊的轴线,并与剥皮辊轴线呈一定角度 (δ_1,δ_2) ,切向与轴线方向的分速度决定了该角度。由于摩擦力会阻碍相对运动,绝对速度方向实时改变,导致摩擦力方向也不断改变。在剥皮辊组上玉米果穗所受的摩擦力方向与绝对速度方向如图 1a 所示。

1.2 玉米果穗沿辊下滑条件

由图 1b 可知,玉米果穗沿剥皮辊下滑的条件为

$$G\sin\alpha\geq F \tag{1}$$

式中 G ——果穗自身重力,N
 F ——剥皮辊对果穗支撑力,N
 α ——剥皮辊对果穗支撑力 F 方向与剥皮辊倾斜方向夹角, $(^\circ)$

剥皮辊对果穗摩擦力计算式为

$$F=F_1\cos\delta_1+F_2\cos\delta_2=\frac{1}{f_1}\mu_1P_1\cos\delta_1+\frac{1}{f_2}\mu_2P_2\cos\delta_2 \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} \delta_1=\arctan\frac{v_1}{v} \\ \delta_2=\arctan\frac{v_2}{v} \end{cases} \tag{3}$$

式中 $P_1、P_2$ ——玉米果穗对低位辊和高位辊压力,N
 $\mu_1、\mu_2$ ——低位辊和高位辊与果穗间的摩擦因数
 $v_1、v_2$ ——玉米果穗相对于低位辊、高位辊切向速度,m/s
 v ——玉米果穗整体速度,m/s
 $F_1、F_2$ ——低位辊、高位辊作用于玉米果穗的摩擦力,N
 $\delta_1、\delta_2$ ——低位辊、高位辊作用于果穗的摩擦力与辊轴方向的夹角, $(^\circ)$
 θ ——果穗中心和辊子连线中心间的连线与果穗和辊子中心连线的夹角, $(^\circ)$
 $f_1、f_2$ ——低位辊、高位辊与玉米果穗间的切向摩擦因数
 $N_1、N_2、G_1$ 之间存在关系

$$\frac{N_1}{\sin(\gamma+\theta)}=\frac{N_2}{\sin(\theta-\gamma)}=\frac{G_1}{\sin(180-2\theta)} \tag{4}$$

式中 $N_1、N_2$ ——低位辊和高位辊对玉米果穗的支持力,N

其中, $\sin\gamma=\frac{S}{2R},\sin\theta=\frac{R}{R+r}$,代入式(4)得到

$$\begin{cases} N_1=\frac{G\cos\alpha(R+r)(R\sqrt{4R^2-S^2}+S\sqrt{r^2+2Rr})}{4R^2\sqrt{r^2+2Rr}} \\ N_2=\frac{G\cos\alpha(R+r)(R\sqrt{4R^2-S^2}-S\sqrt{r^2+2Rr})}{4R^2\sqrt{r^2+2Rr}} \end{cases} \tag{5}$$

式中 S ——高低位辊高度差,mm
 R ——剥皮辊半径,mm
 r ——玉米果穗半径,mm

由公式(5)可知,果穗在辊子上的支撑力与剥皮辊倾斜角度 α 、剥皮辊半径 R 、高低位辊高度差 S 、玉米果穗半径 r 有关。

结合公式(2)、(4),得到

$$F=\frac{G\cos\alpha(R+r)}{4R}\left[\frac{\sqrt{4R^2-S^2}}{\sqrt{r^2+2Rr}}(\mu_1\cos\delta_1+\mu_2\cos\delta_2)+\frac{S}{R}(\mu_1\cos\delta_1-\mu_2\cos\delta_2)\right] \tag{6}$$

将公式(6)代回公式(2),可以得到玉米沿辊下滑的条件,经整理得

$$\tan\alpha>\frac{R+r}{4R}\left[\frac{\sqrt{4R^2-S^2}}{\sqrt{r^2+2Rr}}(\mu_1\cos\delta_1+\mu_2\cos\delta_2)+\frac{S}{R}(\mu_1\cos\delta_1-\mu_2\cos\delta_2)\right] \tag{7}$$

由公式(7)可得玉米沿剥皮辊正常滑动的条件,果穗沿剥皮辊轴的滑移与摩擦因数 μ 、剥皮辊倾角 α 、玉米果穗半径 r 、剥皮辊半径 R 、高低位辊轴心高度差 S 以及果穗的绝对速度方向角 δ 有关。

1.3 种子玉米苞叶的剥离条件

剥除种子玉米苞叶主要是依靠苞叶与剥皮辊间的切向摩擦力,切向摩擦力需大于苞叶-苞叶与苞叶-籽粒之间的摩擦力,使剥皮辊能摄取苞叶并将其拉拽掉。为此需要满足

$$\begin{cases} \sigma>\sigma_1 \\ \sigma>\sigma_2 \\ F_N>P_{n\max} \end{cases} \tag{8}$$

式中 σ ——苞叶与辊间的摩擦因数
 σ_1 ——苞叶间的摩擦因数
 σ_2 ——苞叶与玉米籽粒间的摩擦因数
 F_N ——剥皮辊对苞叶的切向摩擦力,N
 $P_{n\max}$ ——苞叶与果穗根部的最大连接力,N

1.4 玉米果穗产生损伤的临界条件

由图 1c 分析可知,当果穗在两辊中心连线的法向上不受力时,种子玉米果穗才不会被两辊啃食,即

$$(T_1+T_2)\cos\beta=(N_1+N_2)\sin\beta \tag{9}$$

式中 β ——剥皮辊的抓取角, $(^\circ)$
 $T_1、T_2$ ——低位辊和高位辊对果穗切向摩擦力,N

其中

$$\begin{cases} N_1=P_1 \\ N_2=P_2 \\ T_1=f_1P_1 \\ T_2=f_2P_2 \end{cases} \tag{10}$$

假设 $f=f_1=f_2$, 则有

$$f(P_1+P_2)\cos\beta=(P_1+P_2)\sin\beta \tag{11}$$
$$f=\tan\beta \tag{12}$$

式中 f ——剥皮辊与种子玉米之间的摩擦因数

由公式(12)可知,当剥皮辊的抓取角 β 的正切值大于剥皮辊与种子玉米之间的摩擦因数时,果穗就不会被拉入到两辊之间。

由于 $\cos\beta=\frac{R}{R+r}=\frac{D}{D+d}$, 结合公式(6)、(12)可知,随着 β 增大, $\tan\beta$ 也逐渐增大,苞叶剥离能力下降,剥皮辊对果穗的抓取力减弱;当 β 减小时,剥皮辊抓取苞叶能力增强,但同时增强了剥皮辊对光果穗的损伤,所以设计剥皮辊的直径时应优先考虑尺寸较小的果穗,即

$$R=\frac{\cos\beta}{1-\cos\beta}r_{\min} \tag{13}$$

式中 $r_{\min}$ ——果穗最小半径,mm

由式(10)可知, N_1 始终大于 N_2 , 通过改进剥皮辊结构形式或合理选择剥皮辊材料,使低位辊与玉米果穗间的切向摩擦因数 f_1 大于高位辊与玉米果穗间的切向摩擦因数 f_2 , 低位辊对玉米果穗的切向摩擦力 T_1 必然大于高位辊对玉米果穗的切向摩擦力 T_2 , 上低位辊作用于玉米果穗切向摩擦力的差增大,玉米果穗将易于绕自身轴线旋转。

根据上述理论分析,随着剥皮辊转速的增大,与之关联的摆杆摆幅也增大,导致低位辊对玉米果穗的支撑力明显增大,苞叶与剥皮辊的摩擦加大,玉米果穗绕自身轴线旋转加快,苞叶剥净率增加;玉米果穗沿剥皮辊轴方向的运动速度能够正确表征剥皮机构的剥皮效率;玉米果穗与各工作部件的作用力能够表征玉米籽粒的损伤情况。影响种子玉米剥皮质量的主要因素包括玉米物料参数、剥皮机构的结构参数、剥皮机构的工作参数。其中玉米物料参数与剥皮机构的结构参数属于固定参数,无法在实际剥皮工作中进行调整,而剥皮机构工作参数属于可调参数,可通过进一步仿真试验与台架试验确定最优工作参数组合,以提高种子玉米剥皮机构的剥皮性能。

2 基于 DEM 的种子玉米运动过程仿真

2.1 种子玉米果穗离散元仿真模型的建立

本文所使用的种子玉米为“伟科 702”,于 2020 年 12 月在甘肃省酒泉市(39°24'N,98°36'E)收获。如图 2a 所示,玉米种子穗具有典型的圆柱形轮廓,其上、中、下 3 段的径向尺寸相对均匀,然后随机选取 200 个玉米种子果穗作为试验样本,并使用游标

卡尺测量得到该品种的平均长度为 144.5 mm,平均直径为 48.72 mm。

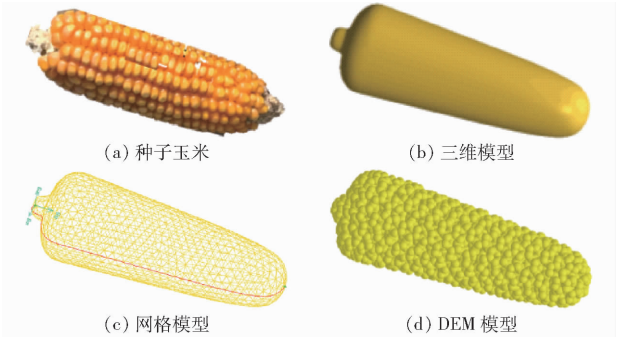


图 2 种子玉米果穗模型

Fig.2 Seed corn ear model

综合种子玉米果穗剥皮预试验,初步获得了影响剥皮作业性能关键因素的影响规律,发现籽粒破碎率受各项参数的影响最为显著,本节以种子玉米光果穗与剥皮辊之间接触碰撞作用系统为研究对象,重点关注剥皮辊的结构和工作参数对光果穗的作用规律。玉米果穗具有复杂的结构和生物力学特性,因此建立与真实种子玉米果穗相近的离散元仿真模型,以提高仿真结果的精确性和可靠性。为此,本文基于 EDEM 软件的 meta-particle 功能来建立玉米果穗的仿真模型,具体操作步骤如下:

- (1)按照种子玉米果穗三维尺寸和物料参数利用 Creo 软件建立三维模型,结果如图 2b 所示,并将其转换成 STL 格式。
- (2)将果穗模型导入 Gambit 中进行网格划分,采用四面体网格,网格大小设置为 10 mm,网格划分结果如图 2c 所示,并导出 mesh 文件。
- (3)结合 Fluent 软件和 UDF 技术,读取 mesh 文件中每个网格的三维坐标,并在 EDEM 中将颗粒的坐标属性,包括序号、类型、坐标数值、旋转角度等信息全部导入 meta-particle 面板中,形成完整的模型。

本文基于离散元法构建种子玉米果穗的多尺度内聚颗粒模型如图 2d 所示,果穗模型的参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab.1 Parameters of materials

特性参数	玉米	50Mn 钢	橡胶
泊松比	0.4	0.28	0.47
剪切模量/MPa	137	3.50×10^4	0.65
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 123	7 850	1 310

2.2 仿真模型的建立

玉米果穗的剥皮性能主要受剥皮辊和摆杆等部件直接接触作用,为了更加直观地观测玉米果

穗的运动状态,节省计算机算力,利用 Creo 将简化后的剥皮机构三维模型生成 STL 格式,并导入到 EDEM 的 Geomagic 面板中,设置单位为 mm, Y 轴负向设置为重力加速度方向,数值为 9.81 m/s^2 ,玉米果穗与剥皮辊之间的接触特性参数如表 2 所示,调节剥皮辊排布方式及其与摆杆之间的相对空间位置,在不妨碍剥皮辊正常工作的前提下生成玉米果穗。

表 2 材料互作参数

Tab.2 Parameters of mutual materials

参数	玉米-橡胶	玉米-50Mn 钢
恢复系数	0.182	0.60
静摩擦因数	0.034	0.30
动摩擦因数	0.002	0.01

根据剥皮过程运动条件分析以及相关文献可知,影响剥皮机工作性能的主要可调工作参数是剥皮辊转速、压送器转速和剥皮辊倾角。在剥皮过程中,传统压送器导致玉米果穗与剥皮辊发生强行接触,增大了籽粒破碎率和脱落率,不适应于种子玉米剥皮工作。本研究选用的种子玉米剥皮机构采用摆杆代替压送器,摆杆安装到剥皮辊两侧,通过左右摆动,防止玉米果穗“弹出”,因此摆杆摆幅成为影响工作性能的主要因素之一。剥皮辊的最佳工作参数与剥皮机构的形式、果穗的力学特性等密切相关,以剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆的摆动幅度为试验因素,以果穗受力、速度、磨损程度、籽粒脱落质量为评价指标开展玉米果穗仿真试验,来获得各个影响因素的合理工作范围。参考大田玉米剥皮工作参数范围设计 5 组对照试验,并扩大参数范围,设定剥皮辊转速为 $200\sim 400\text{ r/min}$,递增区间设置为 50 r/min ;剥皮辊倾角为 $6^\circ\sim 14^\circ$,递增区间为 2° ;摆杆摆幅的调节范围为 $1.5^\circ\sim 9.5^\circ$,递增区间为 2° ,玉米果穗剥皮仿真试验方案如表 3 所示。

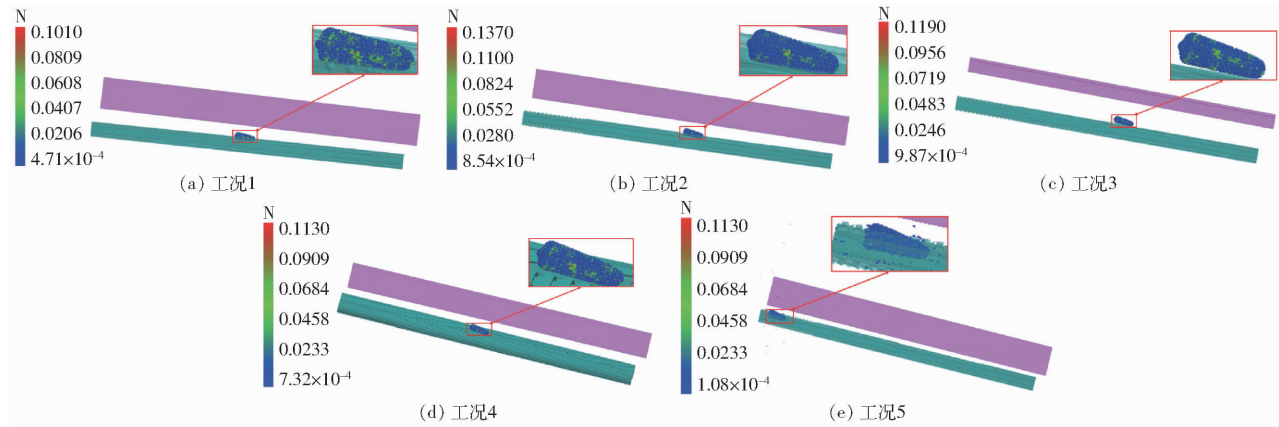


图 3 玉米果穗在 5 种工况下的受力云图

Fig.3 Stress nephogram of corn ear under five conditions

表 3 仿真试验方案

Tab.3 Parameters of simulation experiment

试验序号	剥皮辊转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	剥皮辊倾角/ ($^\circ$)	摆杆摆幅/ ($^\circ$)
1	200	6	1.5
2	250	8	3.5
3	300	10	5.5
4	350	12	7.5
5	400	14	9.5

2.3 种子玉米果穗损伤分析

果穗剥皮过程可分为 4 个阶段:苞叶攫取、苞叶撕拽、去除杂余及导流输送,籽粒损伤、脱落主要发生在剥皮辊的中后段,即去除杂余及导流输送阶段,光果穗与剥皮辊直接接触,剥皮辊对果穗产生的作用力会直接作用到玉米籽粒上,导致籽粒破碎和脱落^[16-17]。因此,本文主要以果穗在剥皮辊的中后段上运动过程为研究目标。对表 3 中 5 组对照试验的仿真结果进行分析,其玉米仿真结果如图 3 所示。

使用 EDEM 的 analyst 功能提取玉米果穗在剥皮辊上运动时的受力-时间曲线如图 4a 所示,光果穗在剥皮辊上运动的受力云图(图 3),1~5 组试验的最大受力分别为 13.16、14.83、16.28、17.84、41.85 N,光果穗上籽粒的受力不均匀,接触剥皮辊的部位籽粒受力较大;此外,光果穗受到剥皮辊的作用力是非连续性的。随着工作参数的增大,果穗受到的作用力随之增大,会增大籽粒的破碎损伤和脱落的可能性,严重影响果穗的剥皮效果。特别是当转速增大到 400 r/min 时,果穗的内部组织结构无法承担剥皮辊施加的负载而导致模型严重破损的现象;相反,当转速最低为 200 r/min 时,虽然果穗受力整体较小,但单颗果穗在剥皮辊上运动的时间超过 12 s,果穗在运动过程中“弹跳”现象明显增多,造成工作效率低的同时也增大了籽粒损伤率及脱落率,无法满足剥皮辊的实际应用要求。

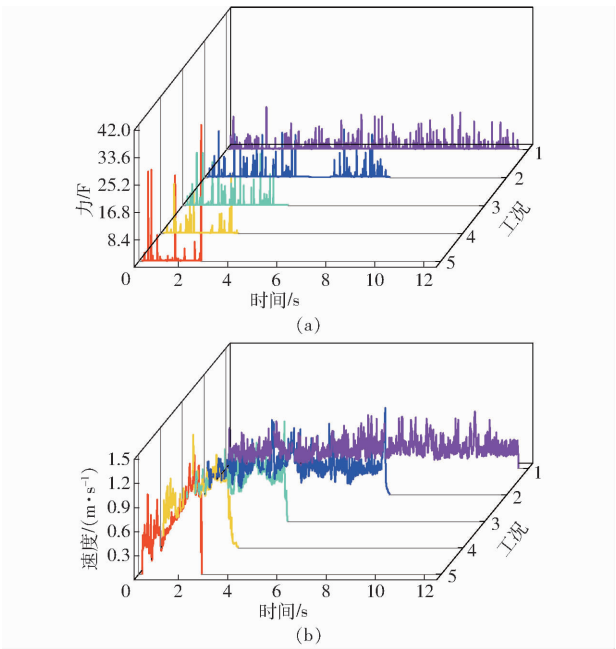


图 4 果穗受力及速度变化曲线

Fig. 4 Ear spike force and velocity change curves

种子玉米果穗沿剥皮辊轴线方向运动的速度-时间曲线如图 4b 所示,5 种工况下玉米果穗的平均运动速度为 0.127、0.202、0.361、0.495、0.625 m/s。随着工作参数的增大,果穗沿辊轴方向的平均速度逐渐变大,且速度波动也变大,果穗在剥皮辊上运动的时间也越短,与剥皮辊接触的次数也越少,籽粒损伤率和脱落率也相对越低。

2.4 种子玉米籽粒脱落分析

在 EDEM 仿真过程中,种子玉米果穗在剥皮辊和摆杆的作用力,除了会产生籽粒损伤之外,还会导致籽粒脱落现象,图 5 中黑色颗粒为脱落的籽粒。由图 6 中可以看出随着时间的推移,脱落的籽粒质量不断增加,且随因素水平增加,增长幅度也越大。在 5 组对照试验中,脱落籽粒的总质量分别为 27.54、21.89、17.11、16.01、29.67 g,结合果穗在剥皮机构上运动时间与受力情况可以得出,果穗受力越大,运动时间越长,籽粒脱落情况越严重。1 号和 5 号试验中,籽粒脱落的质量明显高于其他对照组。

综合 5 组仿真的种子玉米果穗受力、速度、籽粒脱落质量分析结果,2 号、3 号、4 号对照组的仿真效果明显优于 1 号、5 号,即当剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆摆幅的范围分别为 250 ~ 350 r/min、8° ~ 12°、3.5° ~ 7.5° 时,存在种子玉米最优剥皮效果参数组合。

3 台架试验

搭建种子玉米剥皮机构,如图 7 所示,主要包括底座、倾角调节架、剥皮辊、摆杆、传动机构和剥皮辊

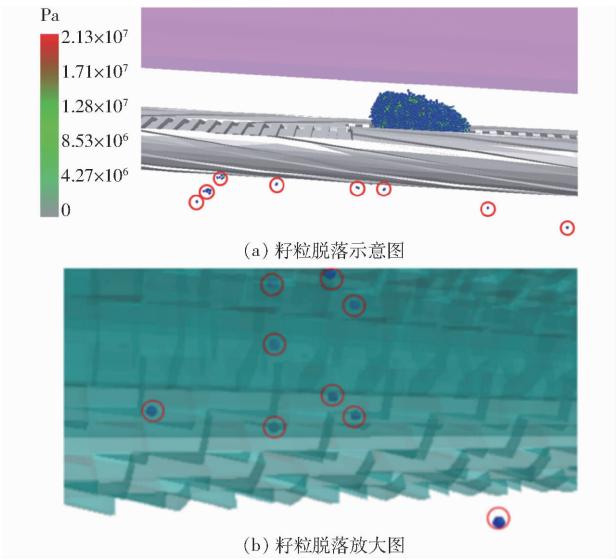


图 5 籽粒脱落情况

Fig. 5 Grain falling situation

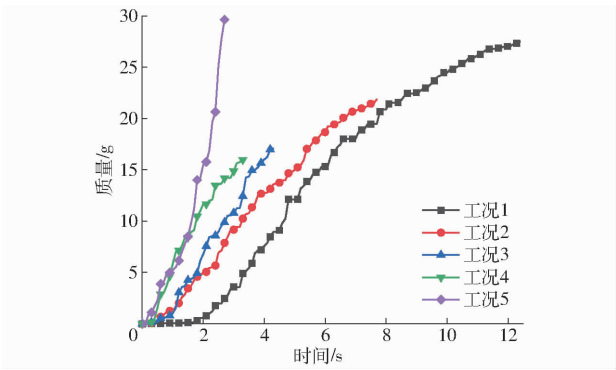


图 6 落粒质量-时间曲线

Fig. 6 Drop grain mass - time curves

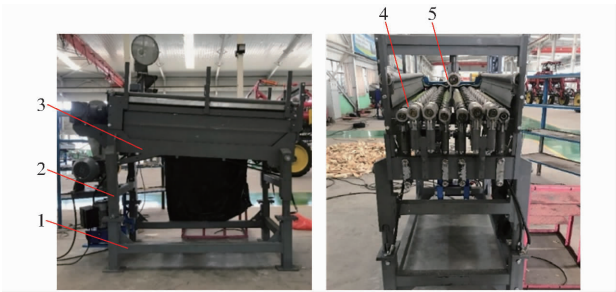


图 7 种子玉米剥皮机构

Fig. 7 Seed corn peeling machine prototype

1. 底座 2. 倾角调节架 3. 剥皮辊安装架 4. 剥皮辊 5. 摆杆

安装架等。在实际应用中,该剥皮机构可以根据玉米果穗的物理特性参数以及剥皮效率需求进行工作参数的调节,若果穗实际尺寸较大,可适当减少摆杆的摆动幅度,若果穗实际尺寸较小,则适当增大偏心轮的偏心距;剥皮辊转速可通过驱动电机实现无级调速。种子玉米剥皮机构作业过程如下:接通电源,电动机工作并通过皮带及齿轮传动将动力传递至各剥皮辊单体,各剥皮辊转动;摆杆电动机运行,偏心轮轴承以偏心轮轴心为中心进行周期性的摆动,摆

杆连接板将摆动传递到与其铰接的右摆杆上,同理,连杆将摆动传递给中间摆杆与左摆杆。在剥皮过程中,玉米果穗位于高、低位辊的夹缝间隙中,在其自身重力及剥皮辊转动摩擦的复合作用下,沿剥皮辊下滑,在剥皮辊切向摩擦力作用下将苞叶剥除。

3.1 试验设计

结合玉米剥皮过程的理论力学分析和仿真试验,选取剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆摆幅 3 个因素开展正交试验。根据 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件确定的一般规定》和 GB 5667—2008《农业机械生产试验方法》,评价指标选取了苞叶剥离率、籽粒脱落率和籽粒破碎率^[18]。每次试验后,计数收集箱中带有苞片的玉米穗的数量,计算苞叶剥离率。收集并称量测量区域中所有下落的籽粒,计算籽粒脱落率。收集掉落的籽粒和光秃玉米果穗中的所有破碎的谷粒并称量,计算籽粒破碎率。利用 Box – Behnken Design 方法设 17 组正交试验,每组试验重复 3 次,单次试验投放 10 颗种子玉米果穗,试验结束后统计苞叶剥离率、籽粒脱落率和籽粒破碎率,分析剥皮辊转速 A 、摆杆摆幅 B 和剥皮辊倾角 C 对苞叶剥离率、籽粒脱落率和籽粒破碎率的影响,以及各因素对评价指标的影响显著性水平,以确定最佳参数组合。

3.2 试验参数选定与结果

根据仿真试验结果分析,当剥皮辊转速 A 、摆杆摆幅 B 和剥皮辊倾角 C 的工作范围分别为 250 ~ 350 r/min、 8° ~ 12° 和 3.5° ~ 7.5° 时,果穗的受力和运动速度相对较好,种子玉米籽粒的磨损量较小,因此正交试验的因素水平如表 4 所示。Design-Expert 统计学软件用于设计试验并分析试验结果,正交试验结果如表 5 所示。苞叶剥离率、籽粒脱落率和籽粒破碎率的范围分别为 81.20% ~ 95.12%、1.488% ~ 2.635% 和 1.23% ~ 2.15%。

表 4 试验因素水平
Tab.4 Experiment factors and levels

水平	因素		
	剥皮辊转速 $A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	剥皮辊倾角 $B/(^{\circ})$	摆杆摆幅 $C/(^{\circ})$
1	250	8	3.5
2	300	10	5.5
3	350	12	7.5

3.3 方差分析

根据试验结果进行回归拟合分析,苞叶剥离率方差分析结果如表 6 所示,回归模型的 $P=0.000\,3$,说明模型极显著;失拟项的 F 检验结果不显著($P=0.060\,1>0.05$),证明试验指标回归方程与试验数

表 5 试验设计与结果
Tab.5 Experimental design and results

序号	因素			评价指标		
	$A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$B/(^{\circ})$	$C/(^{\circ})$	苞叶剥离率/%	籽粒脱落率/%	籽粒破碎率/%
1	250	10	7.5	81.79	2.132	1.762
2	300	10	5.5	94.65	1.565	1.293
3	300	10	5.5	92.88	1.556	1.286
4	350	10	7.5	87.03	2.468	2.025
5	300	12	7.5	82.31	2.095	1.732
6	300	10	5.5	95.12	1.624	1.342
7	300	8	3.5	92.54	2.078	1.890
8	250	8	5.5	81.20	1.974	1.635
9	300	10	5.5	93.89	1.488	1.230
10	350	12	5.5	88.89	1.988	1.632
11	300	10	5.5	94.33	1.672	1.382
12	300	12	3.5	85.13	1.845	1.500
13	250	12	5.5	82.13	1.978	1.643
14	350	8	5.5	92.14	2.601	2.150
15	300	8	7.5	86.87	2.635	1.965
16	250	10	3.5	81.53	2.006	1.658
17	350	10	3.5	92.95	2.450	2.040

表 6 苞叶剥离率方差分析
Tab.6 ANOVA of regression equation of bracts stripping rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	439.64	9	21.81	0.000 3 ***
A	147.58	1	65.89	<0.000 1 ***
B	25.53	1	11.40	0.018 0 *
C	25.03	1	11.17	0.012 4 *
AB	4.37	1	1.95	0.205 2
AC	9.55	1	4.26	0.017 8 *
BC	2.03	1	0.91	0.372 7
A^2	84.72	1	37.83	0.000 5 ***
B^2	54.52	1	24.34	0.001 7 **
C^2	62.84	1	28.06	0.001 1 **
残差	15.68	7		
失拟项	12.78	3	5.87	0.060 1
误差	2.90			
总和	455.32	16		

注: * 表示显著($P<0.05$); ** 表示很显著($P<0.01$); *** 表示极显著($P<0.001$)。下同。

据的拟合程度良好。回归项 A 、 B 、 C 、 AC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 有显著性影响。回归项 AB 和 BC 无显著影响。苞叶剥离率的回归模型为

$$Y_1=94.17+4.3A-1.79B-1.77C-1.05AB-1.55AC+0.71BC-4.49A^2-3.60B^2-3.86C^2$$

(14)

对回归模型系数进行检验可得,影响苞叶剥离

率的试验因素的主次顺序为： A 、 B 、 C 。剔除无显著影响的回归项，苞叶剥离率的回归模型为

$$y_1 = 94.17 + 4.3A - 1.79B - 1.77C - 1.55AC - 4.49A^2 - 3.60B^2 - 3.86C^2 \quad (15)$$

为了直观分析各因素与苞叶剥离率之间的交互作用，绘制各因素对苞叶剥离率影响响应面如图 8

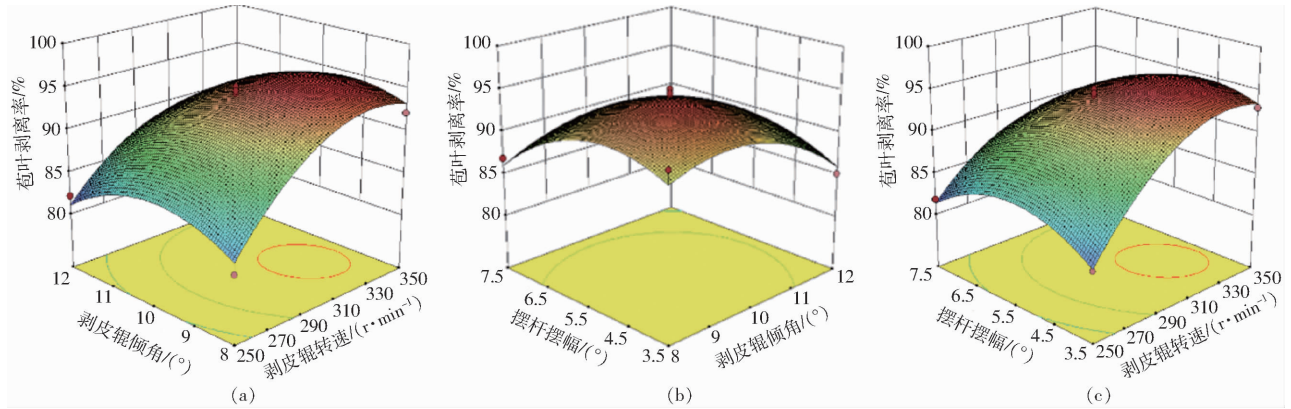


图 8 苞叶剥离率响应曲面
Fig.8 Bracts stripping rate response surfaces

由表 7 可知，籽粒脱落率回归模型 $P < 0.0001$ ，说明模型极显著，失拟项的 F 检验结果不显著，说明苞叶剥离率回归模型与实际剥脱情况拟合程度较高。回归项 A 、 B 、 C 、 AB 、 A^2 、 B^2 、 C^2 有显著性影响。回归项 AC 、 BC 无显著影响。回归模型为

$$Y_2 = 1.58 + 0.18A - 0.14B + 0.085C - 0.15AB - 0.027AC - 0.00925BC + 0.36A^2 + 0.19B^2 + 0.32C^2 \quad (16)$$

表 7 籽粒脱落率方差分析

Tab.7 ANOVA of regression equation of grains falling rate				
方差来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1.83	9	33.13	<0.0001***
<i>A</i>	0.25	1	40.96	0.0004***
<i>B</i>	0.15	1	25.23	0.0015**
<i>C</i>	0.058	1	9.45	0.0179*
<i>AB</i>	0.095	1	15.55	0.0056**
<i>AC</i>	0.0029	1	0.48	0.5126
<i>BC</i>	0.0003	1	0.056	0.8200
<i>A</i> ²	0.55	1	89.64	<0.0001***
<i>B</i> ²	0.16	1	25.59	0.0015**
<i>C</i> ²	0.44	1	71.06	<0.0001***
残差	0.043	7		
失拟项	0.023	3	1.56	0.3269
误差	0.020			
总和	1.87	16		

对回归模型系数进行检验可得，影响籽粒脱落率的试验因素的主次顺序为 A 、 B 、 C 。剔除无显著影响的回归项，籽粒脱落率的回归模型为

所示。由图可知，苞叶剥离率随剥皮辊转速的增加先增大后减小，最大值出现在 340 ~ 360 r/min 之间。苞叶剥离率随剥皮辊倾角的增大先增大后减小，在 9° ~ 11° 范围内达到最大值。苞叶剥离率随摆杆摆动幅度的增大先增大后减小，在 4.5° ~ 5.5° 范围内达到最大值。

$$y_2 = 1.58 + 0.18A - 0.14B + 0.085C - 0.15AB + 0.36A^2 + 0.19B^2 + 0.32C^2 \quad (17)$$

在图 9b 中，籽粒脱落率随着剥皮辊转速的增加先减小后增大，最小值出现在 290 ~ 310 r/min 范围内达到。籽粒脱落率随剥皮辊倾角的增大先减小后增大，在 9° ~ 11° 范围内达到最小值；籽粒脱落率随摆杆摆动幅度的增大先减小后增大，在 4.5° ~ 6.5° 范围内达到最小值。

由表 8 可知，剥皮机的籽粒破碎率回归模型 $P < 0.0001$ 有极显著影响；失拟项 $P = 0.4803$ 无显著影响，说明籽粒破碎率回归模型与实际剥脱情况拟合程度较高。回归项 A 、 B 、 C 、 AB 、 A^2 、 B^2 、 C^2 有显著性影响。回归项 AC 、 BC 无显著影响。回归模型为

$$Y_3 = 1.31 + 0.14A - 0.14B + 0.05C - 0.13AB - 0.03AC + 0.039BC + 0.28A^2 + 0.18B^2 + 0.29C^2 \quad (18)$$

对回归模型系数进行检验可得，影响籽粒破碎率的试验因素主次顺序为 A 、 B 、 C 。剔除无显著影响的回归项，籽粒破碎率的回归模型为

$$y_3 = 1.31 + 0.14A - 0.14B + 0.05C - 0.13AB + 0.28A^2 + 0.18B^2 + 0.29C^2 \quad (19)$$

由图 10 可知，随着剥皮辊转速的增加，籽粒破碎率先减小后增大，在 280 ~ 310 r/min 范围内达到最小值。籽粒破碎率随剥皮辊倾角的增大先减小后增大，在 6.5° ~ 7° 范围内达到最小值。随着摆杆摆动幅度的增大，籽粒破碎率先减小后增大，在 4.5° ~ 6.5° 范围内达到最小值。

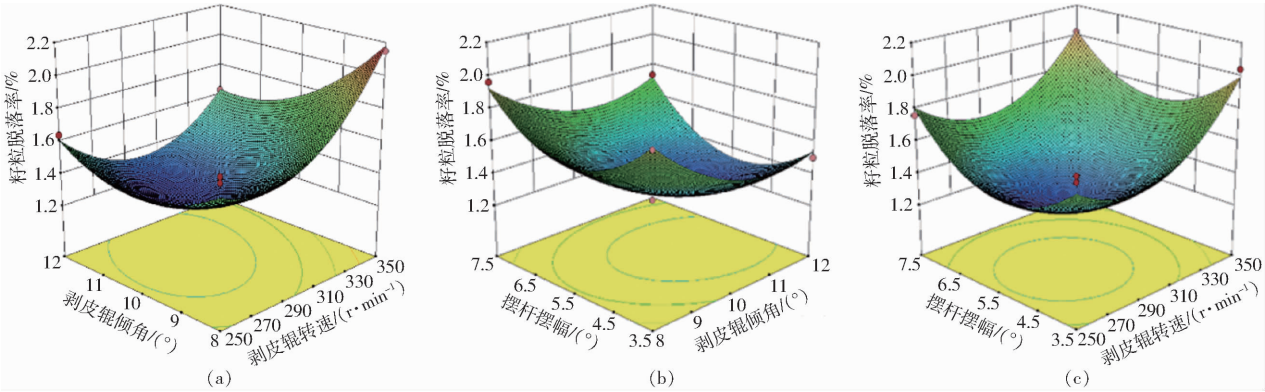


图 9 籽粒脱落率响应曲面
Fig.9 Grains falling rate response surfaces

表 8 籽粒破碎率方差分析

Tab.8 ANOVA of regression equation of grains crushing rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	1.32	9	43.83	<0.000 1 ***
A	0.17	1	49.29	0.000 2 ***
B	0.16	1	47.93	0.000 2 ***
C	0.020	1	5.85	0.046 1 *
AB	0.069	1	20.66	0.002 7 **
AC	0.003	1	1.06	0.388 0
BC	0.006	1	1.84	0.217 0
A ²	0.33	1	97.86	<0.000 1 ***
B ²	0.14	1	40.50	0.000 4 ***
C ²	0.34	1	102.65	<0.000 1 ***
残差	0.023	7		
失拟项	0.010	3	1.00	0.480 3
误差	0.013			
总和	1.34	16		

3.4 最优参数组合和验证

采用多目标的非线性优化理论和方法,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。目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ 250\text{ r/min} \leq A \leq 350\text{ r/min} \\ 8^\circ \leq B \leq 12^\circ \\ 3.5^\circ \leq C \leq 7.5^\circ \end{cases} \quad (20)$$

种子玉米脱皮机参数优化的最佳组合为:脱皮辊转速为 300 r/min,脱皮辊倾角为 10°,摆杆摆幅为 5°。苞叶剥离率、籽粒脱落率、籽粒破碎率预测值分别为 94.13%、1.564%、1.292%。

基于上述分析结果,为验证预测结果的准确性

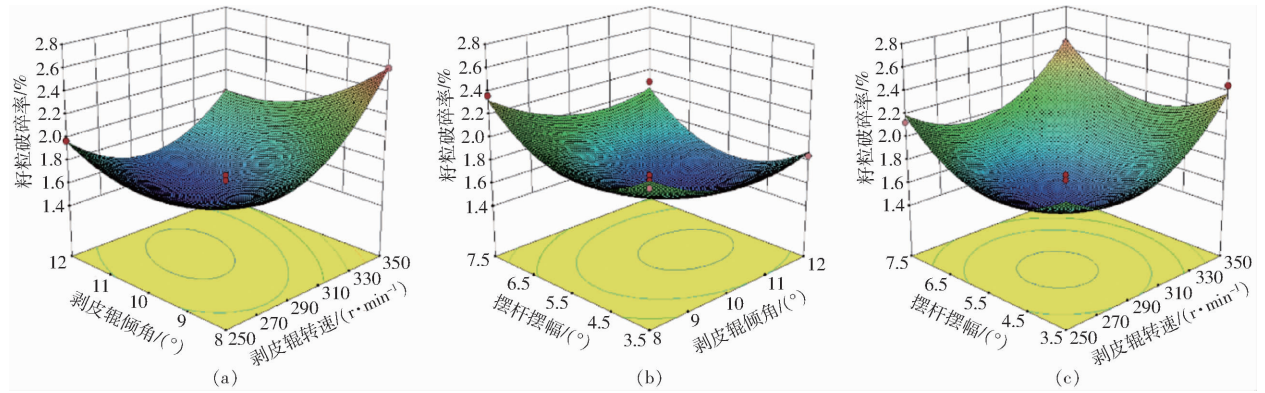


图 10 籽粒破碎率响应曲面
Fig.10 Grains crushing rate response surfaces

和有效性,于 2021 年 10 月在种子玉米剥皮机构上进行了验证试验。将剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆摆幅分别设置为 300 r/min、10°和 5°,进行 10 次重复试验求取平均值,取其平均值作为试验结果,结果如表 9 所示。试验所得苞叶剥离率平均值为 93.49%,比优化值低 0.64 个百分点;籽粒脱落率平均值为 1.509%,比优化值低 0.055 个百分点。籽

表 9 验证试验结果

Tab.9 Verification experiment results

指标	试验序号			平均值
	1	2	3	
苞叶剥离率	92.75	94.13	93.59	93.49
籽粒脱落率	1.511	1.486	1.530	1.509
籽粒破碎率	1.345	1.378	1.307	1.343

粒破碎率均值为 1.343%,比优化值高 0.051 个百

分点。验证试验结果表明,优化结果可信。

4 结论

(1)从种子玉米果穗的理论分析入手,探究了在剥皮过程中剥皮机构与种子玉米的相互作用机理,确定了影响种子玉米剥皮质量的主要因素为玉米物料参数、剥皮机构的结构参数、剥皮机构的工作参数。

(2)利用离散元法(DEM)构建种子玉米果穗与剥皮机构的相互作用模型,获取了在不同工况下光果穗在剥皮机构上的损伤和落粒情况。仿真结果表明,在一定范围内,随着工作参数的增大,果穗的受力及平均速度随之增大,果穗在剥皮辊上运动的时

间也越短,与剥皮辊接触的次数也越少,籽粒损伤率和脱落率也随之降低。剥皮辊转速、剥皮辊倾角和摆杆摆幅的较优工作范围分别为 250 ~ 350 r/min、8° ~ 12°、3.5° ~ 7.5°。

(3)使用 Box – Behnken Design 方法设计了三因素三水平的正交试验,并通过 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,利用响应面法对回归方程进行多目标优化,确定了最优工作参数为剥皮辊转速为 300 r/min,剥皮辊倾角为 10°,摆杆摆动幅度为 5°。台架验证试验所得苞叶剥离率平均值为 93.49%,籽粒脱落率平均值为 1.509%,籽粒破碎率均值为 1.343%,台架试验结果与理论分析结果基本相符,表明仿真试验具有良好的可靠性。

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] 杜岳峰,毛恩荣,宋正河,等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊 1): 106 – 111.
DU Yuefeng, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp. 1): 106 – 111. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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 peeling[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 42 – 48. (in Chinese)
- [5] YANG Fan, DU Yuefeng, FU Qiufeng, et al. Design and testing of seed maize ear peeling roller based on Hertz theory[J]. Biosystems Engineering, 2021, 202: 165 – 178.
- [6] 杜岳峰,朱忠祥,宋正河,等. 小型玉米收获机分禾与摘穗装置性能仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊 1): 100 – 105.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Simulation of divider and snapping roll for small-scale corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp. 1): 100 – 105. (in Chinese)
- [7] 杜岳峰,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊 1): 1 – 5.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp. 1): 1 – 5. (in Chinese)
- [8] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1 – 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 – 20. (in Chinese)
- [9] 方会敏,姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22 – 28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 – 28. (in Chinese)
- [10] 孙景彬,刘琪,杨福增,等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 63 – 73.
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63 – 73. (in Chinese)
- [11] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 124 – 133.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and test of resistance-reducing excavation device of cyperusedulis based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 124 – 133. (in Chinese)
- [12] LI X, DU Y, 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.
- [13] YU Y, FU H, YU J. DEM-based simulation of the corn threshing process[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(5):

1400–1409.

- [14] 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1):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.1): 14–20. (in Chinese)
- [15] 耿爱军,杨建宁,张姬,等.玉米摘穗收获机械损伤影响因素分析[J].农业工程学报,2016,32(22):56–62.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Ji, et al. Influence factor analysis of mechanical damage on corn ear picking[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 56–62. (in Chinese)
- [16] 李国和,王敏杰,段春争.基于ANSYS/LS-DYNA的金属切削过程有限元模拟[J].农业机械学报,2007,38(12):173–176.
LI Guohe, WANG Minjie, DUAN Chunzheng. Finite element simulation of the process of orthogonal metal cutting based on the ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 173–176. (in Chinese)
- [17] 夏俊芳,贺小伟,余永生,等.基于ANSYS/LS-DYNA的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J].农业工程学报,2013,29(10):34–41.
XIA Junfang, HE Xiaowei, YU Yongsheng, et al. Finite element simulation of soil cutting with rotary knife roller based on ANSYS/LS-DYNA software[J]. Transactions of CSAE, 2013, 29(10): 34–41. (in Chinese)
- [18] 潘海兵,王振亚,陈红,等.宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(12):239–245.
PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for satsuma mandarin[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 239–245. (in Chinese)

(上接第19页)

- [13] 金诚谦,吴崇友,金梅,等.4SY-2型油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(10):76–79.
JIN Chengqian, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Design and test of 4SY-2 rape mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76–79. (in Chinese)
- [14] 金诚谦,尹文庆,吴崇友.油菜割晒机拨指输送链式输送装置研制与试验[J].农业工程学报,2013,29(21):11–18.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Development and test of rape mower finger conveyor chain conveyor[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 11–18. (in Chinese)
- [15] 李平,廖庆喜,李磊,等.4SY-1.8改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(1):53–58.
LI Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, et al. Design and test of main devices of 4SY-1.8 improved rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 53–58. (in Chinese)
- [16] 关卓怀,江涛,李海同,等.倾斜输送式油菜割晒机铺放质量分析与试验[J].农业工程学报,2021,37(4):59–68.
GUAN Zhuohuai, JIANG Tao, LI Haitong, et al. Analysis and test of laying quality of inclined conveying rape mower[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 59–68. (in Chinese)
- [17] 李海同,吴崇友,沐森林,等.基于ANSYS-ADAMS的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J].农业工程学报,2020,36(14):96–105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape mower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96–105. (in Chinese)
- [18] 金诚谦,尹文庆,吴崇友.4SY-2型油菜割晒机铺放质量数学模型与影响因素分析[J].农业工程学报,2012,28(2):45–48.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Mathematical model and influencing factors analysis of laying quality of 4SY-2 rape mower[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 45–48. (in Chinese)
- [19] 李平,廖庆喜,舒彩霞,等.油菜割晒机茎秆铺放质量的故障成因分析与参数匹配研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):197–209.
LI Ping, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Fault cause analysis and parameter matching research on stalk laying quality of rape mower[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2016, 24(1): 197–209. (in Chinese)
- [20] 林景尧,郑文华.割晒机放铺质量的研究[J].农业机械学报,1983,14(2):66–73.
LIN Jingyao, ZHENG Wenhua. Study on laying quality of windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(2): 66–73. (in Chinese)
- [21] 蒋亚军,廖宜涛,秦川,等.4SY-2.9型油菜割晒机机架振动分析及改进[J].农业工程学报,2017,33(9):53–60.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement of 4SY-2.9 rape windrower frame[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53–60. (in Chinese)
- [22] 舒彩霞,李磊,严磊,等.4SY-1.8型自走式油菜割晒机机架振动特性的分析[J].华中农业大学学报,2015,34(6):119–124.
SHU Caixia, LI Lei, YAN Lei, et al. Analysis of frame vibration characteristics of 4SY-1.8 self-propelled rape mower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(6): 119–124. (in Chinese)