

玉米果穗碎块低损振动脱粒装置设计与试验

周德义^{1,2} 黄泽社¹ 付君¹ 侯鹏飞¹ 刘大欣^{1,2} 于春生^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林省智慧农业装备与技术重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对当前玉米籽粒直收采用回转式滚筒脱粒装置进行脱粒时,籽粒因受到脱粒元件高频强烈冲击作用导致损伤严重的问题,提出了先将完整果穗胀裂为碎块以松散籽粒,再将果穗碎块置于上下脱粒板之间,通过往复式揉搓,避免籽粒受刚性冲击的脱粒方案,进而实现低损脱粒。基于此方案,设计了玉米果穗碎块低损振动脱粒装置。通过理论分析确定了该装置的主要结构参数与工作参数,并建立了脱粒装置-玉米碎块互作的振动动力学模型。以出口板间距、上脱粒板频率、下脱粒板频率为试验因素,以籽粒脱净率与破损率为试验指标,依据 Box - Behnken 试验原理开展三因素三水平试验。对试验结果进行方差分析后,利用回归模型进行参数优化,确定了出口板间距为 13.6 mm、上脱粒板频率为 12.9 Hz、下脱粒板频率为 37.6 Hz。在此参数组合下脱粒验证试验结果为:平均脱净率 97.66%,平均破损率 1.96%,与回归模型寻优结果基本一致,能够满足玉米低损脱粒需求。

关键词: 玉米果穗碎块; 低损脱粒; 往复式脱粒; 柔性冲击; 振动脱粒装置

中图分类号: S225 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)05-0271-11

OSID:



Design and Experiment of Low-damage Vibrational Threshing Device for Fragmented Corn Ears

ZHOU Deyi^{1,2} HUANG Zeshe¹ FU Jun¹ HOU Pengfei¹ LIU Daxin^{1,2} YU Chunsheng^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Smart Agriculture Equipment and Technology Key Laboratory of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming to address the problem of severe kernel damage caused by high-frequency, intense impacts from threshing elements during corn grain direct harvesting using conventional rotary drum threshing devices, a low-damage threshing strategy was proposed. The strategy involved first pre-fragmenting intact ears into segments to loosen the kernels, then placing these ear segments between upper and lower threshing boards. Threshing was achieved through reciprocating flexible rubbing, avoiding rigid impact on the kernels. Based on this approach, a low-damage vibrational threshing device for fragmented corn ears was designed where ear fragment were processed between reciprocating boards equipped with flexible polyurethane and reinforced nylon elements to minimize impact stress. Through theoretical analysis, the main structural and operational parameters of the device were determined, and a vibration dynamic model for the interaction between the threshing device and corn fragments was established. Using the exit board spacing, upper board frequency, and lower board frequency as experimental factors, and threshing efficiency and damage rate as evaluation indicators, a three-factor, three-level Box - Behnken experimental design was implemented. Variance analysis of the results was performed, and regression models were used for parameter optimization. The optimal parameters were determined as follows: exit board spacing of 13.6 mm, upper board frequency of 12.9 Hz, and lower board frequency of 37.6 Hz. Verification tests under this parameter combination yielded an average threshing efficiency of 97.66% and an average damage rate of 1.96%. These results were largely consistent with the regression model optimization results and met the requirements for low-damage corn threshing.

Key words: corn ear fragments; low-damage threshing; reciprocating threshing; flexible impact; vibrational threshing device

收稿日期: 2025-07-21 修回日期: 2025-10-17

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20250150BS)和国家重点研发计划项目(2016YFD070190103)

作者简介: 周德义(1969—),男,教授,博士,主要从事玉米低损脱粒技术及装备、盐碱地改良装备研究,E-mail: zhoudy@jlu.edu.cn

通信作者: 于春生(1969—),男,高级工程师,主要从事玉米收获装备研究,E-mail: yucs@jlu.edu.cn

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物^[1],2024年我国玉米播种面积为 $4.474 \times 10^7 \text{ hm}^2$,产量达到 $2.9492 \times 10^8 \text{ t}$,对保障我国粮食安全和实现农业提质增效具有重要意义^[2-4]。然而,玉米收获^[5]、干燥、运输过程中综合损伤率高达9.0%,其中脱粒过程中的机械损伤最为严重^[6-8],不仅影响外观品质,降低商品等级^[9-11],而且易发生霉变、产生黄曲霉素等^[12-14],增加了粮食安全隐患^[15],影响后续生产过程。尽管2024年我国玉米机械化机收率高达90%,但其中籽粒直收占比仍不足5%,现有脱粒装置多依赖回转滚筒对果穗施加高强度冲击,导致籽粒损伤严重^[16-18]。

目前滚筒式玉米脱粒机构依然占据主流地位,其脱粒原理均是通过钉齿或纹杆等对玉米果穗施加冲击、挤压与搓擦,破坏籽粒排列结构以实现脱粒^[19]。该过程在初始阶段冲击强烈,籽粒损伤显著^[20-24]。随着部分籽粒脱落和果穗逐渐碎裂,籽粒结构变得松散,削弱了碎块上剩余籽粒之间的相互支撑力,使得籽粒更易于在揉搓作用下脱落,籽粒损伤显著降低^[25-27]。近年来研究^[28-31]聚焦于脱粒元件结构创新,然而,这些改进仍难以避免对整棒果穗的初始高强度冲击,且未解决籽粒间支撑力传导引起的内部损伤问题。

为解决回转式滚筒脱粒装置高频冲击导致的玉米籽粒损伤大的难题,本研究提出一种“先裂解、后揉搓”的低损脱粒策略:首先通过芯轴胀裂将完整果穗分解为碎块,松散籽粒结构^[32];进而将碎块置于上、下脱粒板之间,通过往复柔性揉搓替代刚性冲击,使籽粒在损伤阈值内从根部剥离,从而在保证脱净率的同时,最大限度控制籽粒损伤。基于该原理,设计一种玉米果穗碎块低损振动脱粒装置,通过理论分析与试验优化,验证其可行性与优化参数组合,以期为玉米低损脱粒提供新的技术路径和装置原型,推动我国玉米脱粒技术的革新。

1 总体结构和工作原理

1.1 总体结构组成

玉米果穗碎块振动脱粒装置如图1所示,包括曲柄滑块机构、下脱粒板、异步电机、下柔性脱粒元件、上脱粒板、机架、上柔性脱粒元件、激振电机、控制箱、落料箱等。曲柄滑块机构安装在机架内侧,其安装有下脱粒板。上脱粒板由4个弹簧悬挂在下脱粒板上方,且上脱粒板上方安装有激振电机。上、下脱粒板均布满柔性脱粒元件。装置尾部放置落料箱

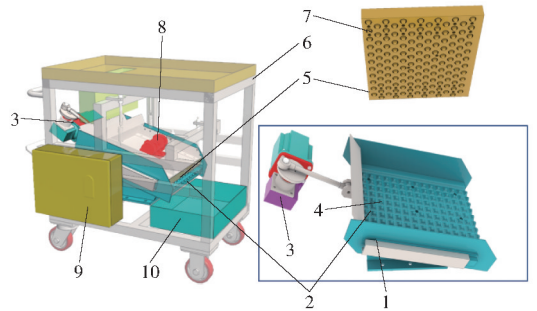


图1 振动脱粒装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of vibrational threshing device

1. 曲柄滑块机构 2. 下脱粒板 3. 异步电机 4. 下柔性脱粒元件
5. 上脱粒板 6. 机架 7. 上柔性脱粒元件 8. 激振电机
9. 控制箱 10. 落料箱

以承接脱下的玉米籽粒和玉米芯。

1.2 工作原理

装置的工作原理如图2所示。玉米果穗经过芯轴胀裂形成果穗碎块后,从顶部的喂入料斗喂入,经过挡板进入下脱粒板和上脱粒板之间的脱粒区域。果穗碎块在下脱粒板往复运动下向前运动,该过程玉米果穗碎块上的籽粒与上、下脱粒板上的柔性脱粒元件挤压揉搓,实现玉米籽粒与玉米芯分离。脱粒后的玉米籽粒及玉米芯经下脱粒板导流后从出料口落入落料箱内。在脱粒过程中下脱粒板的往复运动通过电机驱动曲柄滑块机构实现,上脱粒板安装有激振电机,带动上脱粒板上的柔性脱粒元件往复运动。两个电机转速均通过控制箱内的变频器实现控制,从而调整上、下脱粒板的振动频率。

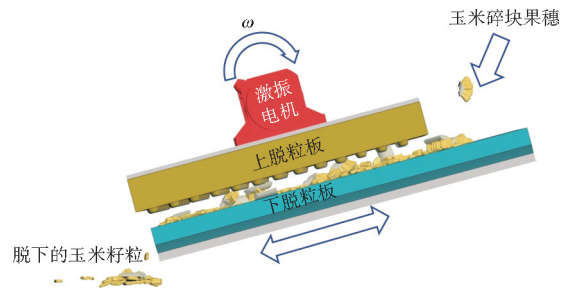


图2 装置脱粒示意图

Fig. 2 Schematic of threshing process

2 关键部件设计

2.1 下脱粒板设计

2.1.1 材质选择与结构设计

在脱粒过程中,玉米果穗碎块从喂入料斗进入脱粒区域后,玉米籽粒密度较大,果穗芯密度较小,籽粒通常头部向下与下脱粒板接触。由于籽粒头部受力破碎阈值最高,本装置中,下脱粒板通过往复运动对籽粒头部施加压力,通过揉搓作用将籽粒控制在破损阈值范围内,从而实现低损脱粒。下脱粒板

采用增强尼龙板加工而成,该材质具有高耐磨性、低摩擦因数和优异的抗冲击性能,可有效减少玉米碎块输送过程中的机械损伤,同时耐受长期往复运动的疲劳应力。尼龙板的弹性模量可缓冲玉米碎块的载荷,结合动力学模型,确保碎块在加速度阈值内无相对滑动,减少籽粒破损。为了兼顾玉米果穗碎块在下脱粒板脱粒以及顺利导流,下脱粒板与玉米果穗碎块接触面采用下柔性脱粒元件阵列式设计。试验用果穗籽粒区的直径为 (55 ± 5) mm,根据胀裂装置胀裂的玉米果穗碎块大小,如图1所示,将下柔性脱粒元件阵列行列间距均设计为20 mm,阵列总共10列15行,工作面宽为352 mm,长为450 mm。为了能最大限度提高下脱粒元件与籽粒的接触面积,避免应力集中,如图3所示,将下柔性脱粒元件截面圆角半径设计为5 mm,即下柔性脱粒元件总高度为10 mm。下柔性脱粒元件结构可增加玉米碎块与板面的摩擦力,防止相对滑动,同时形成导流通道,促进脱粒后籽粒与碎芯分离。

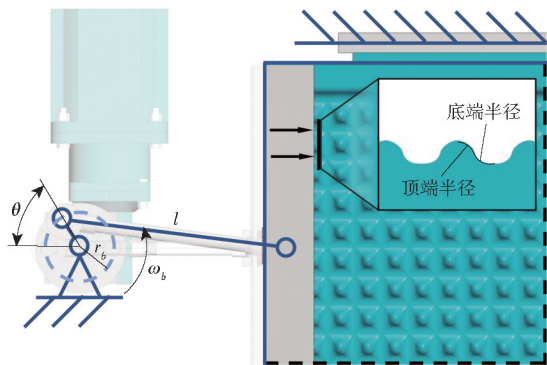


图3 曲柄滑块机构及下脱粒板结构

Fig.3 Crank-slider mechanism and structure of lower threshing board

2.1.2 运动机构设计

为了使玉米籽粒和玉米碎芯从下脱粒板导流至落料箱,设计曲柄滑块机构驱动下脱粒板沿着玉米导流方向往复运动。曲柄滑块机构采用对心方式安装,根据图3几何关系,将下脱粒板视为滑块,其位移为

$$x_b = r_b \cos\theta + \sqrt{l^2 - r_b^2 \sin^2\theta} \quad (1)$$

式中 x_b ——下脱粒板位移,mm

r_b ——曲柄半径,mm

l ——连杆长度,mm

θ ——曲柄转角,rad

对位移进行求导可得速度和加速度关系,即

$$v = -r_b \omega_b \left(\sin\theta + \frac{r_b \sin(2\theta)}{2 \sqrt{l^2 - r_b^2 \sin^2\theta}} \right) \quad (2)$$

$$a_{bo} = \frac{dv}{d\theta} \quad (3)$$

式中 v ——下脱粒板导流方向的速度,mm/s

a_{bo} ——下脱粒板导流方向的加速度,mm/s²

ω_b ——曲柄角速度,rad/s

得到的加速度 a_{bo} 可以用于后续力学模型分析,判断碎块发生相对滑动的临界值。为了确保上柔性脱粒元件和下脱粒板下柔性脱粒元件获得足够的相对位移,即滑块的位移距离能够大于或等于上柔性脱粒元件行间距,滑块总位移设计为 $2r_b = 50$ mm,根据装配情况,选取的连杆长度为 $l = 180$ mm。

2.1.3 下脱粒板力学模型

对单个玉米果穗碎块在下脱粒板运动下的运动与动力学进行分析。假设下脱粒板运动方向与水平面夹角为 α ,如图4所示,在下脱粒板垂直运动方向上有

$$N = m_{s0} g \cos\alpha - m_{s0} a_{bo}(t) \sin\alpha \quad (4)$$

式中 N ——垂直运动方向上的平衡重力分量和惯性力分量, μ N

m_{s0} ——单个玉米果穗碎块质量,g

g ——重力加速度,mm/s²

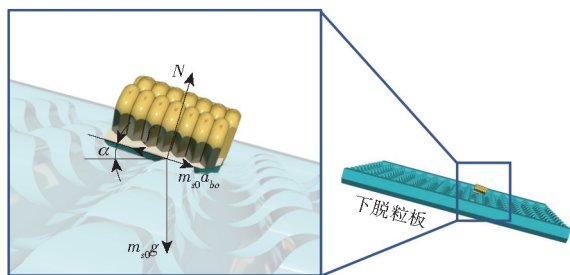


图4 玉米果穗碎块受力

Fig.4 Force on broken corn ear segments

沿下脱粒板运动方向上有

$$m_{s0} a_{rel} = m_{s0} g \sin\alpha + m_{s0} a_{bo} - f \quad (5)$$

式中 a_{rel} ——果穗碎块相对加速度,mm/s²

f ——果穗碎块受到的摩擦力, μ N

假设动摩擦和静摩擦因数均为 μ ,果穗无相对滑动时,即 $a_{rel} = 0$ 时, $f = m_{si}(a_{bo} + g \sin\alpha)$, m_{si} 为玉米果穗碎块质量,此时满足条件

$$|g \sin\alpha + a_{bo}| \leq \mu(g \cos\alpha - a_{bo} \sin\alpha) \quad (6)$$

果穗发生滑动时,满足

$$a_{rel} = g \sin\alpha - \mu(g \cos\alpha - a_{bo} \sin\alpha) - a_{bo} \quad (7)$$

根据式(6),玉米果穗碎块与下脱粒板产生相对滑动时,需要满足

$$a_{bo} > a_{bo,max} = \frac{\mu g \cos\alpha - g \sin\alpha}{1 + \mu \sin\alpha} \quad (8)$$

式中 $a_{bo,max}$ ——导流方向最大加速度,mm/s²

当实际加速度低于阈值时,碎块与板面保持静摩擦状态,可避免滑动摩擦导致的籽粒表皮损伤。基于玉米碎块动摩擦因数及倾角,式(8)可用于验证增强尼龙板防滑可靠性,从力学层面保障脱粒过

程的低损伤特性。结合前期的预试验,下脱粒板运动方向与水平面夹角 α 设计为 $\pi/6$ 。

2.2 上脱粒板设计

2.2.1 材质选择与结构设计

上脱粒板选用尼龙板材料制造而成,其高刚性和低密度特性可降低振动系统惯性负载,提升振动响应效率。如图 1 所示,为使上脱粒板与下脱粒板配合,将上脱粒板整体设计为宽度 395 mm、长度 350 mm。考虑到果穗碎块的大小分布,上脱粒板行间交错布满上柔性脱粒元件,为了防止玉米籽粒或玉米果穗碎块卡在上脱粒板并能够起到良好的脱粒效果,如图 1 所示,将上柔性脱粒元件行间距设计为 25 mm,列间距设计为 35 mm。为达到上柔性脱粒元件与下脱粒板良好配合脱粒,避免干涉,结合前期测试,顶端半径设计为 7 mm,底端半径为 10 mm,高度为 6 mm。上柔性脱粒元件采用聚氨酯弹性体,其弹性模量显著低于金属,在力的作用下可发生弹性形变,延长籽粒受力时间,避免应力集中导致的破损^[19]。兼具高弹性与耐磨性,可缓冲脱粒压力,降低籽粒表面损伤。

2.2.2 力学与动力学模型

为使上脱粒板能够振动,在上脱粒板上方质心位置安装有激振电机,且振动板四角安装有弹簧,上脱粒板与激振电机视为振动机械,在激振电机振动下按照一定的轨迹循环振动。如图 5 所示,将振动机械视为刚体,静止状态下刚体的质心位置 O 为空间直角坐标系的原点,竖直方向为 z 轴,与水平面平行且沿上脱粒板导流方向视为 x 轴,与水平面平行且垂直于上脱粒板导流方向视为 y 轴,每个弹簧在 3 个方向都有刚度和阻尼。

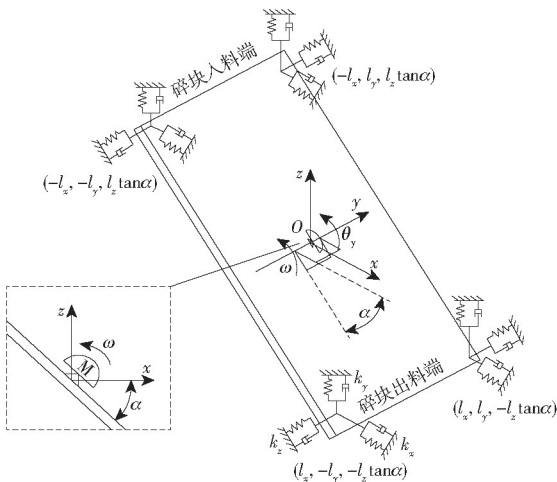


图 5 上脱粒板动力学模型

Fig. 5 Dynamic model of upper threshing board

振动机械在激振电机作用下在 x 轴和 z 轴方向移动,并且可绕 y 轴方向转动,此时振动系统有 3 个自由度,对应的位移向量 \mathbf{q} 表示为

$$\mathbf{q} = \text{diag}(x, z, \theta_y) \quad (9)$$

该振动系统的振动微分方程^[33]为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (10)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M} = \text{diag}(m, m, I_y) \quad (11)$$

式中 \mathbf{F} ——激振向量 \mathbf{C} ——阻尼矩阵

\mathbf{K} ——刚度矩阵

m ——上脱粒板与电机质量和, kg

I_y ——振动机械绕 y 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

假设 4 个弹簧的阻尼和刚度相等,由于弹簧在上脱粒板四角对称布置,阻尼矩阵 \mathbf{C} 和刚度矩阵 \mathbf{K} 可以表示为

$$\mathbf{C} = \text{diag}(4c_x, 4c_z, 4I_x^2(c_x \tan^2 \alpha + c_z)) \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \text{diag}(4k_x, 4k_z, 4I_x^2(k_x \tan^2 \alpha + k_z)) \quad (13)$$

式中 c_x —— x 轴方向上的弹簧阻尼, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

c_z —— z 轴方向上的弹簧阻尼, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

k_x —— x 轴方向上的弹性系数, N/m

k_z —— z 轴方向上的弹性系数, N/m

l_x —— x 轴方向上弹簧和原点安装距离, m

当激振电机安装位置与上脱粒板静止状态下质心重合时,由于激振电机旋转平面在初始状态下与上脱粒板平行,所以激振力向量 \mathbf{F} 可表示为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} m_e r \omega^2 \cos(\omega t) \cos \alpha \\ m_e r \omega^2 \sin(\omega t) \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 m_e ——电机偏心质量, kg

r ——偏心距, m t ——时间, s

ω ——角速度, rad/s

根据式(9)~(14)得出该振动系统的振动微分方程组

$$\begin{cases} m\ddot{x} + 4c_x\dot{x} + 4k_x x = m_e r \omega^2 \cos(\omega t) \\ m\ddot{z} + 4c_z\dot{z} + 4k_z z = m_e r \omega^2 \sin(\omega t) \\ I_y \ddot{\theta}_y + 4I_x^2(c_x \tan^2 \alpha + c_z) \dot{\theta}_y + \\ 4I_x^2(k_x \tan^2 \alpha + k_z) \theta_y = 0 \end{cases} \quad (15)$$

振动方程组的稳态解为

$$\begin{cases} x = A_x \cos(\omega t - \phi_x) \\ y = A_z \sin(\omega t - \phi_z) \\ A_x = \frac{m_e r \omega^2 \cos \alpha}{\sqrt{(4k_x - m\omega^2)^2 + (4c_x \omega)^2}} \\ A_z = \frac{m_e r \omega^2 \sin \alpha}{\sqrt{(4k_z - m\omega^2)^2 + (4c_z \omega)^2}} \\ \phi_x = \arctan \frac{c_x \omega}{k_x - m\omega^2} \\ \phi_z = \arctan \frac{c_z \omega}{k_z - m\omega^2} \\ \theta_y = 0 (t \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (16)$$

式中 A_x ——上脱粒板在 x 轴方向上的振幅, m
 A_z ——上脱粒板在 z 轴方向上的振幅, m
 ϕ_x ——上脱粒板在 x 轴方向上的相位差, rad
 ϕ_z ——上脱粒板在 z 轴方向上的相位差, rad
 结合上述公式可以得到 A_x 与 A_z 的合振幅 A 为

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} \quad (17)$$

可以看出合振幅 A 与激振电机的角速度呈现非线性关系, 在对装置设计以及试验变量的范围选取中需要综合考虑。

上振动板在脱离过程中与玉米果穗碎块相互作用, 产生瞬态的扭转振动, 在此过程中会产生一定的转角, 此时 θ_y 会有过程过渡解, 即

$$\begin{cases} \theta(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (\theta_0 \cos(\omega_d t) + \dot{\theta}_0 \sin(\omega_d t)) \\ \omega_n = \sqrt{\frac{\kappa}{I_y}} \\ \zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{2\kappa I_y}} \\ \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \\ \gamma = 4l_x^2 (c_x \tan^2 \alpha + c_z) \\ \kappa = 4l_x^2 (k_x \tan^2 \alpha + k_z) \end{cases} \quad (18)$$

式中 θ_0 ——上脱粒板 y 轴受扰动初始旋转位移, rad
 ω_n 、 ω_d ——无、有阻尼固有角速度, rad/s
 κ ——等效扭转刚度, N·m
 ζ ——阻尼比
 γ ——等效扭转阻尼系数, N·m·s
 $\dot{\theta}_0$ ——上脱粒板 y 轴受扰动初始旋转角速度, rad/s

如图 6 所示, 考虑到使用强度和耐磨性问题^[34], 上柔性脱粒元件外形近似为圆台形, 根据几何关系, 圆台斜角 β_1 为

$$\beta_1 = \arctan \frac{h}{r_2 - r_1} \quad (19)$$

式中 r_1 ——圆台顶端半径, m
 r_2 ——圆台底端半径, m
 h ——圆台高度, m

当上柔性脱粒元件在距离上脱粒板 h_0 处与玉米果穗碎块挤压时, 上柔性脱粒元件工作面受到的力 F 为^[35]

$$F = m_{si} \omega^2 A \quad (20)$$

整理可得

$$F = m_{si} \omega^2 \cdot$$

$$\sqrt{\frac{m_e r \omega^2 \cos \alpha}{\sqrt{(4k_x - m \omega^2)^2 + (4c_x \omega)^2}} + \frac{m_e r \omega^2 \sin \alpha}{\sqrt{(4k_z - m \omega^2)^2 + (4c_z \omega)^2}}} \quad (21)$$

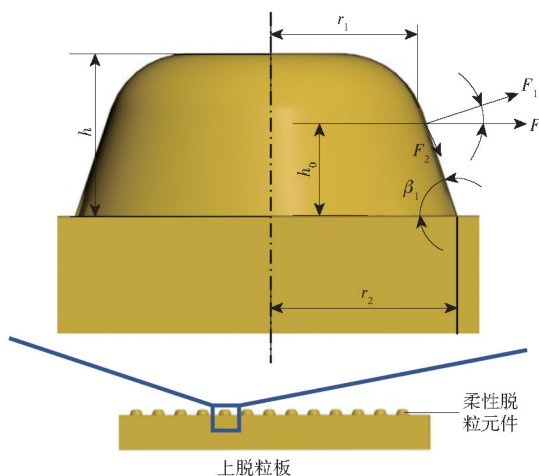


图 6 上柔性脱粒元件受力分析

Fig. 6 Force analysis on upper flexible threshing elements

其分力 F_1 、 F_2 为

$$F_1 = F \sin \beta_1 \quad (22)$$

$$F_2 = F \cos \beta_1 \quad (23)$$

上柔性脱粒元件与玉米籽粒间接触, 在接触点对籽粒施加接触力 F , 使得玉米籽粒根部产生一个弯矩。当施加的接触力 F 超过玉米籽粒根部屈服极限和相邻籽粒间的支撑力时, 将破坏籽粒根部连接强度, 在往复振动作用下籽粒根部与果穗芯发生断裂, 实现玉米脱粒。根据动力学模型, 由于玉米碎块较轻, 脱粒装置质量和导流板倾角固定, 接触力 F 与电机的角速度 ω 有关。当其它因素不变时, 电机的角速度与接触力 F 成正比, 角速度越大, 接触力 F 越大。但当接触力过大时, 可能会破坏玉米籽粒接触位置, 造成玉米籽粒损伤, 增加脱粒的破损率。但是上述分析均是在保证玉米籽粒能够保持与上柔性脱粒元件接触受力下才能成立。如果上脱粒板和下脱粒板之间的板间距过大, 会导致上柔性脱粒元件难以与玉米籽粒接触, 造成玉米脱粒失效。而如果板间距过小, 会导致玉米果穗碎块受到挤压, 导致玉米籽粒破损。同时上脱粒板的振幅会动态影响上脱粒板和下脱粒板的板间距, 使得激振电机的振幅不仅会影响接触力 F 的大小, 还会影响装置玉米脱粒是否生效, 是否会过度挤压玉米果穗碎块。

2.3 控制系统设计

振动脱粒试验装置的控制系統由激振变频器、异步变频器、激振电机、异步电机和电源开关组成。其中激振变频器和异步变频器均采用台达 ME300 型变频器, 激振电机采用鞍山市安达电机有限公司生产的 YJZ-2-4 型激振三相异步电动机, 异步电机采用方力控股有限公司生产的 Y2-71M3-4 型三相异步电机, 电源开关采用正泰生产的 NXBLE-32 型开关。

按下电源开关,装置接通电源,通过调节两个变频器上的旋钮从而分别调节两个电机的转速。当激振变频器频率为 0 Hz 时,激振电机转速为 0 r/min。当激振变频器的频率调节为 50 Hz 时,激振电机处于额定转速 1 500 r/min 的工作状态。激振变频器频率与激振电机转速关系为

$$n_{ex} = k_1 f_1 \quad (24)$$

式中 f_1 ——激振变频器调节的频率,Hz

n_{ex} ——激振电机转速,r/min

k_1 ——激振变频转换系数,取 50 r/(min·Hz)

同样地,异步变频器频率调节为 50 Hz 时,异步电机处于额定转速 1 390 r/min,减速器(HTRV50型变速器)传动比 $i = 20$,则异步电机实际输出转速与异步变频器频率关系为

$$n_{fe} = \frac{k_2}{i} f_2 \quad (25)$$

式中 f_2 ——异步变频器调节的频率,Hz

n_{fe} ——异步电机转速,r/min

k_2 ——异步变频转换系数,取 27.8 r/(min·Hz)

通过调节激振变频器和异步变频器的频率从而能够分别调节上脱粒板和下脱粒板的振动频率两个试验因素。激振电机安装在上脱粒板上方,上脱粒板的振动频率与 f_1 相同。下脱粒板作为曲柄滑块机构上的滑块,往复运动频率与 f_2 相同。

3 影响因素试验优化

3.1 试验材料与方法

研究采用的玉米样本采摘于吉林大学农学实验基地(43°N,125°E)。选取玉米品种为先玉 335,该玉米品种在中国东北地区广泛栽培。为保证试验的准确性并减少对玉米植株的损害,所有用于试验的玉米果穗均于 2024 年 10 月通过手工方式采摘。其籽粒的含水率为 25%~28%,芯轴含水率为 43%~47%(AS-DHS-10A 型电子水分仪测得)。

为获取试验玉米果穗碎块,使用课题组的胀裂方法^[32]将完整玉米果穗从芯部由内而外地胀裂开,最终裂解成玉米果穗碎块。为明确玉米果穗碎块的脱粒特性,本课题组首先依据籽粒在果穗碎块上的所处位置,将其划分为 3 大类:即边缘籽粒(至少一侧不与其他籽粒接触的籽粒)、次边缘籽粒(位于边缘籽粒内侧且与边缘籽粒相邻的籽粒)和内部籽粒(除边缘籽粒和次边缘籽粒之外的其余籽粒)。其中边缘籽粒最易剥落,次边缘籽粒次之,内部籽粒最难剥落。基于上述结论,最终以碎块表面分布的籽粒类型为核心依据,将表面仅分布边缘籽粒的定义为小碎块,表面仅分布边缘

籽粒与次边缘籽粒的定义为中碎块,表面存在内部籽粒(同时包含边缘和次边缘籽粒)的定义为大碎块。为保证试验用的玉米碎块表面分布的籽粒类型均匀性,固定胀裂装置的参数,即选取棱数为 4 的胀裂头,胀裂头的位置(安装间距 1.5 cm)和胀裂气压(0.65 MPa)不变。

按照图 7 的流程进行振动脱粒,脱粒重复 3 次。试验用的振动脱粒装置及脱粒过程如图 8 所示。脱粒结束后分拣出破损籽粒、完好籽粒及穗芯碎块,然后使用电子秤称量,计算出破损率和脱净率。板间距通过螺母调节,上脱粒板频率和下脱粒板频率通过控制箱两个控制器进行调节。根据玉米果穗碎块大小以及前期装置测试,将入口板间距设置为 30 mm。

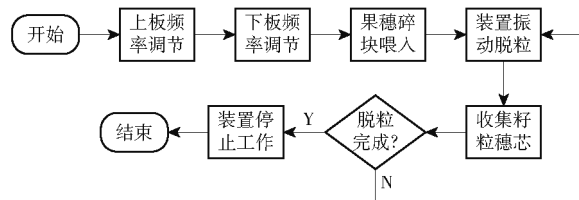


图 7 装置控制流程图

Fig. 7 Control flow diagram of device

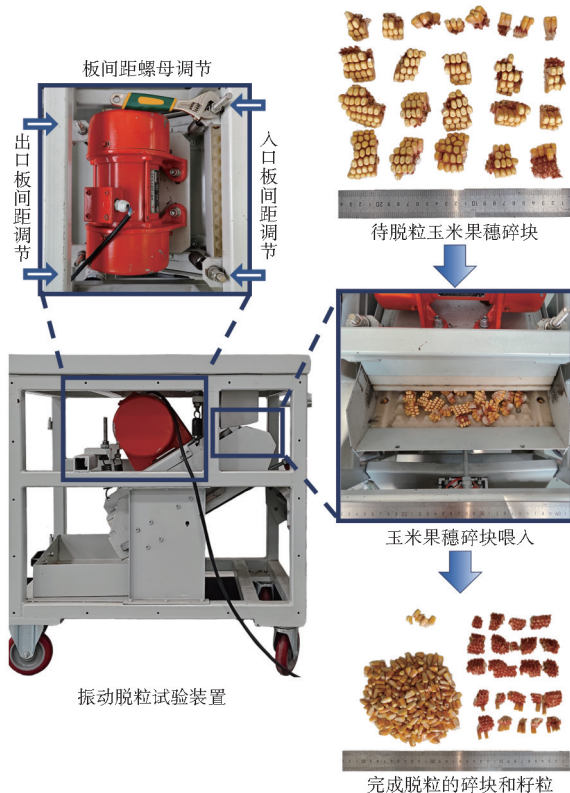


图 8 振动脱粒装置及试验

Fig. 8 Vibrational threshing experiment and device

3.2 试验指标

将玉米碎块脱粒的脱净率和破损率作为试验指标,两者的计算方法依据 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》,计算公式为

$$\varphi_1 = \frac{m_1}{m_3} \times 100\% \quad (26)$$

$$\varphi_2 = \frac{m_2}{m_3} \times 100\% \quad (27)$$

式中 m_1 ——脱下玉米籽粒质量, g
 m_2 ——破损玉米籽粒质量, g
 m_3 ——玉米籽粒总质量, g
 φ_1 ——脱净率, %
 φ_2 ——破损率, %

通过对试验样品的称量处理计算得到玉米碎块脱粒的脱净率和破损率, 以此进行后续的试验及分析。

3.3 单因素试验

根据动力学模型分析可知, 玉米果穗碎块的脱粒试验指标与出口板间距、上脱粒板频率、下脱粒板频率 3 个因素相关性较大。选取该 3 个因素进行单因素试验, 以确定每个因素的取值范围。每个因素分别做 5 组试验, 为减小测量误差, 每组试验进行 3 次取平均值, 每次试验脱粒玉米果穗碎块质量为 (200 ± 10) g。

因素为出口板间距时, 控制上脱粒板频率为 15 Hz, 下脱粒板频率为 40 Hz, 出口板间距取值范围和试验结果如图 9 所示。可以看出随着出口板间距的增加, 玉米果穗碎块脱净率呈先上升后急剧下降的趋势, 破损率呈先下降后上升又下降的趋势。玉米果穗碎块在出口板间距达到 20 mm 时脱净率急剧下降, 同时破损率也随之上升, 是因为出口板间距过大使得玉米籽粒难以与柔性脱粒元件接触, 此时脱净率为 69.48%, 远低于装置设计要求, 因此选取出口板间距响应面范围为 10 ~ 20 mm。

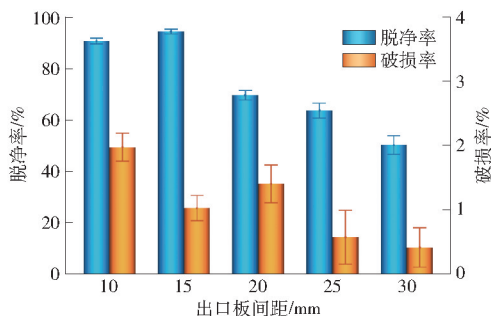


图 9 出口板间距对脱净率和破损率的影响

Fig. 9 Effect of exit board spacing on threshing rate and damage rate

因素为上脱粒板频率时, 控制出口板间距为 15 mm, 下脱粒板频率为 40 Hz, 上脱粒板频率取值范围和试验结果如图 10 所示。可以看出在 9 ~ 15 Hz 区间时随着上脱粒板频率增加, 玉米果穗碎块脱净率和破损率均呈先上升后下降的趋势。这是

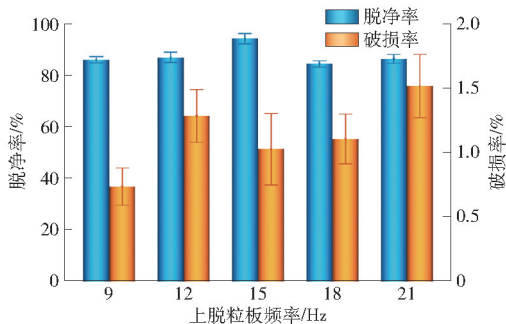


图 10 上脱粒板频率对脱净率和破损率的影响

Fig. 10 Effect of upper threshing board frequency on threshing rate and damage rate

因为上脱粒板频率在小于 15 Hz 的区间时, 频率增加, 玉米籽粒接触力会随之增加。频率在 15 ~ 21 Hz 区间时脱净率和玉米籽粒受到的力会受到振幅影响下的动态板间距和受力频率的耦合影响, 使得玉米果穗碎块的脱净率呈现先下降后上升的趋势。由于脱净率在上脱粒板振动频率在 15 Hz 附近的脱净率最高, 综合考虑选取上脱粒板频率的响应面范围为 12 ~ 18 Hz。

因素为下脱粒板频率时, 控制出口板间距为 15 mm, 上脱粒板频率为 15 Hz, 下脱粒板取值范围和试验结果如图 11 所示。可以看出下脱粒板频率在 10 ~ 30 Hz 区间内脱净率呈现下降的趋势, 这是因为下脱粒板频率增加, 玉米果穗碎块在装置内停留时间变短, 脱粒过程变短, 使得玉米果穗碎块不能充分脱粒, 进而导致脱净率变低。下脱粒板频率在 30 ~ 50 Hz 区间内脱净率呈现先上升后下降的趋势, 这是因为在 40 Hz 附近的下脱粒板工作频率对玉米果穗碎块产生的力的影响超过玉米果穗碎块在装置内部停留的影响。而破损率呈现先下降后上升的趋势, 这是因为随着频率增加, 玉米籽粒在装置内停留时间变短, 脱粒过程变短, 玉米籽粒破损的机会减少。由于玉米籽粒破损需要的应力大于玉米籽粒根部屈服强度, 所以玉米籽粒破损率在 40 Hz 后重新出现上升趋势, 而不是在 40 Hz 附近呈现上升趋势。

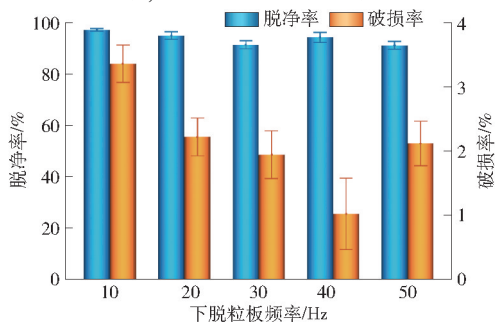


图 11 下脱粒板频率对脱净率和破损率的影响

Fig. 11 Effect of lower threshing board frequency on threshing rate and damage rate

势。综合高脱净率低破损率考虑选取下脱粒板频率的响应面范围为 20 ~ 40 Hz。

3.4 响应面试验方案与结果

为确定各因素优化参数组合,对振动脱粒装置进行三因素三水平 Box - Behnken 玉米碎块脱粒试验,试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of experimental factors

编码	因素		
	出口板间距/ mm	上脱粒板频率/ Hz	下脱粒板频率/ Hz
	1	20	18
0	15	15	30
-1	10	12	20

使用图 8 所示玉米果穗碎块低损振动脱粒试验装置进行玉米果穗碎块试验,采用三因素三水平的 Box - Behnken 试验,总共 17 组试验。为减小测量误差,每组试验进行 3 次取平均值,每次试验脱粒玉米果穗碎块质量为 (200 ± 10) g。试验结果见表 2。表中 X_1 、 X_2 、 X_3 表示出口板间距、上脱粒板频率、下脱粒板频率的编码值。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experimental design and results

试验 序号	因素			脱净率 $\varphi_1/\%$	破损率 $\varphi_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	0	1	1	94.48	0.74
2	0	0	0	96.58	2.33
3	1	0	-1	91.50	1.98
4	1	0	1	77.76	1.32
5	1	-1	0	85.93	1.41
6	0	-1	1	97.45	2.01
7	-1	1	0	87.35	2.12
8	0	0	0	96.07	2.14
9	0	1	-1	93.75	1.53
10	0	0	0	94.90	1.97
11	1	1	0	70.83	0.56
12	0	0	0	90.61	1.58
13	-1	0	1	98.06	2.57
14	-1	-1	0	90.88	2.05
15	0	-1	-1	96.81	2.43
16	-1	0	-1	96.01	4.98
17	0	0	0	97.52	1.95

3.5 响应面试验结果分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对试验所得的数据进行分析处理得到脱粒脱净率 φ_1 回归模型,方差分析见表 3,脱净率 φ_1 的回归模型 $P < 0.005$,表明该模型极显著;模型的决定系数 R^2 为 0.920 4,表明该模型可以解释 92.04% 以上响应值变化,预测值

表 3 脱净率方差分析

Tab.3 ANOVA for threshing rate

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	829.07	9	92.12	8.99	0.004 2 **
X_1	267.73	1	267.73	26.12	0.001 4 **
X_2	76.01	1	76.01	7.42	0.029 6 *
X_3	13.31	1	13.31	1.30	0.291 9
$X_1 X_2$	33.47	1	33.47	3.27	0.113 7
$X_1 X_3$	62.33	1	62.33	6.08	0.043 1 *
$X_2 X_3$	0.002 0	1	0.002 0	0.000 2	0.989 2
X_1^2	275.52	1	275.52	26.88	0.001 3 **
X_2^2	45.83	1	45.83	4.47	0.072 3
X_3^2	60.34	1	60.34	5.89	0.045 7 *
残差	71.74	7	10.25		
失拟	42.56	3	14.19	1.94	0.264 3
误差	29.18	4	7.30		
总和	900.81	16			

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

与实际值之间具有高度的相关性,试验误差较小。其中上脱粒板频率对脱净率 φ_1 影响显著,出口板间距对脱净率 φ_1 影响极显著,出口板间距和上脱粒板频率对玉米果穗碎块脱净率 φ_1 存在交互影响显著。采用多元回归拟合的方式对试验结果进行处理,以因素和水平进行二次多项式拟合,得出脱净率 φ_1 二元多次回归拟合方程为

$$\varphi_1 = 95.14 - 5.78 X_1 - 3.08 X_2 - 1.29 X_3 - 2.89 X_1 X_2 - 3.95 X_1 X_3 + 0.022 5 X_2 X_3 - 8.09 X_1^2 - 3.30 X_2^2 + 3.79 X_3^2 \quad (28)$$

采用同样的方法对试验所得的数据进行分析处理得到破损率 φ_2 回归模型为

$$\varphi_2 = 1.99 - 0.806 2 X_1 - 0.368 7 X_2 - 0.535 0 X_3 - 0.230 0 X_1 X_2 + 0.437 5 X_1 X_3 - 0.092 5 X_2 X_3 + 0.228 0 X_1^2 - 0.747 0 X_2^2 + 0.430 5 X_3^2 \quad (29)$$

对破损率的拟合回归方程进行方差分析,结果如表 4 所示,模型的 P 值为 0.010 3,回归项显著,说明本模型有效;失拟项 $P > 0.05$,表明该模型自变量与因变量之间的函数关系显著,对当前数据解释充分。模型决定系数 R^2 为 0.895 3,矫正决定系数为 0.760 8,两者差值小于 0.2,说明该模型拟合度良好。

3.6 响应面分析

Design-Expert 13.0 软件分析表明,出口板间距和下脱粒板频率存在交互影响,需要进一步分析各因素对破损率的影响。为了直观了解交互因素对试验指标的影响,通过 Design-Expert 13.0 软件得到交互因素的响应面图,如图 12 所示。

由图 12 可知,上脱粒板频率一定时,脱净率随着下脱粒板频率的增加先减小后增大,同时随着出

表4 破损率方差分析

Tab.4 ANOVA for damage rate

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	12.89	9	1.43	6.65	0.0103*
X_1	5.20	1	5.20	24.15	0.0017**
X_2	1.09	1	1.09	5.05	0.0594
X_3	2.29	1	2.29	10.63	0.0138*
X_1X_2	0.2116	1	0.2116	0.9826	0.3546
X_1X_3	0.7656	1	0.7656	3.56	0.1013
X_2X_3	0.0342	1	0.0342	0.1589	0.7020
X_1^2	0.3492	1	0.3492	1.62	0.2435
X_2^2	2.35	1	2.35	10.91	0.0131*
X_3^2	0.7803	1	0.7803	3.62	0.0987
残差	1.51	7	0.2153		
失拟项	1.20	3	0.3998	5.19	0.0728
误差	0.3081	4	0.0770		
总和	14.40	16			

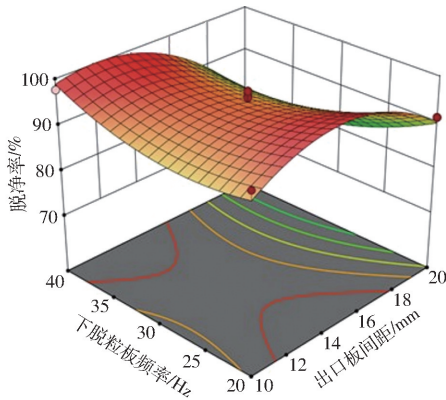


图12 因素间交互作用对脱净率影响的响应曲面

Fig.12 Response surface for effect of factor interactions on evaluation metrics

口板间距的增加先增大后减小。出口板间距减小有助于柔性脱粒元件与玉米籽粒间充分接触,提高脱净率,但过小的出口板间距可能导致脱粒区域空间狭小,使籽粒间较难产生活动空间,从而影响脱净率。

3.7 参数优化和验证

玉米果穗碎块破损率和脱净率是衡量装置作业效果的重要指标,运用 Design-Expert 13 软件中 Optimization 功能,采用多目标变量优化方法,对两个回归模型进行最优求解,建立的参数优化目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

对各参数进行优化得最优组合参数为:出口板间距为 13.6 mm,上脱粒板频率为 12.9 Hz,下脱粒板频率为 37.6 Hz;此时脱净率为 98.12%,破损率为 1.89%。为了验证优化后参数组合的合理性,并根据实际试验环境及设备加工精度要求,进行脱粒试验验证。试验材料与方法和 3.1 节一致,试验重复 5 次,试验结果如表 5 所示,显示两者指标的相对误差小于 5%,表明响应面试验能够有效实现优化。

表5 验证试验结果

Tab.5 Validation test results

试验序号	脱净率	破损率
1	97.77	2.27
2	96.18	1.25
3	98.63	2.23
4	98.25	2.16
5	97.45	1.87
平均值	97.66	1.96

4 结论

(1)为解决回转式滚筒脱粒装置在高频冲击与重复作用下导致玉米籽粒损伤较大的问题,本研究提出先将完整玉米果穗裂解为碎块,再进行往复柔性脱粒的策略。设计了一种玉米果穗碎块低损振动脱粒装置,通过理论分析确定了双板振动结构(下脱粒板往复输送+上脱粒板高频激励)的关键参数。该装置通过往复运动的柔性脱粒元件,使籽粒更易在揉搓作用下脱落,显著降低了籽粒损伤。

(2)以含水率 25%~28%的“先玉 335”玉米为研究对象,先通过胀裂装置将完整玉米果穗胀裂为碎块,再将果穗碎块送入振动脱粒装置,采用三因素三水平 Box-Behnken 试验开展研究。结果显示:出口板间距对脱净率和破损率的影响均极为显著,上脱粒板频率主要显著影响脱净率,而下脱粒板频率对破损率有显著影响。通过建立回归模型优化参数组合,得出最佳参数为:出口板间距 13.6 mm、上脱粒板频率 12.9 Hz、下脱粒板频率 37.6 Hz;在此参数条件下,脱净率可达 98.12%,破损率则降至 1.89%。

(3)在最优参数组合下进行的 5 组验证试验中,平均脱净率达 97.66%,平均破损率为 1.96%,与模型预测的脱净率、破损率相比,误差均小于 5%,验证了模型的可靠性与参数优化的合理性。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于2024年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2024-12-13)[2025-03-04]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213_1957744.html.
- [2] 国家统计局. 国家统计局农村司副司长魏锋华解读粮食生产情况[EB/OL]. (2024-12-13)[2025-03-03]. https://www.stats.gov.cn/sj/sjld/202412/t20241213_1957743.html.
- [3] 刘海启. 我国玉米制种产业发展现状及战略选择[J]. 中国农业资源与区划,2015(1): 9-14.
LIU Haiqi. Current situation of the development of maize seed industry in China and the strategic choice[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2015(1): 9-14. (in Chinese)
- [4] XIE Ruizhi, MING Bo, GAO Shang, et al. Current state and suggestions for mechanical harvesting of corn in China[J]. Journal of Integrative Agriculture,2022,21(3): 892-897.
- [5] 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)
- [6] 高利伟, 许世卫, 李哲敏, 等. 中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究[J]. 农业工程学报,2016,32(23): 1-11.
GAO Liwei, XU Shiwei, LI Zhemin, et al. Main grain crop postharvest losses and its reducing potential in China[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(23): 1-11. (in Chinese)
- [7] WAELTI H, BUCHELE W F. Factors affecting corn kernel damage in combine cylinders[J]. Transactions of the ASAE,1969,12(1): 55-59.
- [8] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2): 58-65. (in Chinese)
- [9] WANG Xiaoyue, WU Xiaopeng, HUA Yongzhi, et al. Optimizing maize production in the Guanzhong Region: an evaluation of density tolerance, yield, and mechanical harvesting characteristics in different maize varieties[J]. European Journal of Agronomy,2025,164:127500.
- [10] DINOLFO M I, MARTÍNEZ M, CASTAÑARES E, et al. Fusarium in maize during harvest and storage: a review of species involved, mycotoxins, and management strategies to reduce contamination[J]. European Journal of Plant Pathology,2022,164(2): 151-166.
- [11] 李晓峰, 接鑫, 张永丽, 等. 玉米种子内部机械裂纹检测与机理研究[J]. 农业机械学报,2010,41(12): 143-147.
LI Xiaofeng, JIE Xin, ZHANG Yongli, et al. Detecting and research on characteristics and mechanism of inner mechanical cracks of seed kernels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12): 143-147. (in Chinese)
- [12] MAIORANO A, FANCHINI D, DONATELLI M. MIMYCS. Moisture, a process-based model of moisture content in developing maize kernels[J]. European Journal of Agronomy,2014,59: 86-95.
- [13] TAO Feifei, YAO Haibo, HRUSKA Z, et al. A novel hyperspectral-based approach for identification of maize kernels infected with diverse *Aspergillus flavus* fungi[J]. Biosystems Engineering,2020,200: 415-430.
- [14] WANG Wenchao, HUANG Wenqian, YU Huishan, et al. Identification of maize with different moldy levels based on catalase activity and data fusion of hyperspectral images[J]. Foods,2022,11(12): 1217.
- [15] STOEVS D. Foodborne diseases due to underestimated hazard of joint mycotoxin exposure at low levels and possible risk assessment[J]. Toxins,2023,15(7): 464.
- [16] 欧阳安, 樊晨龙, 赵慧慧, 等. 玉米全程机械化现状与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2022,43(6): 207-214.
OUYANG An, FAN Chenlong, ZHAO Huihui, et al. Present status and equipment research progress of maize full-mechanized production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(6): 207-214. (in Chinese)
- [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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(12): 56-61. (in Chinese)
- [18] 高朋飞, 张新伟, 姜春霞, 等. 轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊2): 145-156.
GAO Pengfei, ZHANG Xinwei, JIANG Chunxia, et al. Optimized design and test of axial roller fresh corn threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2): 145-156. (in Chinese)
- [19] 高连兴, 李心平. 玉米种子脱粒损伤机理与脱粒设备研究[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.
- [20] 王镇东, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米联合收获机纹杆式脱粒元件设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9): 115-123.
WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of rasp bar threshing element of corn combine

- harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9): 115–123. (in Chinese)
- [21] 李心平,刘赢,杜哲,等.玉米果穗籽粒组砌规律对其离散效果的影响[J].农机化研究,2014,36(10): 186–191.
LI Xinp ing, LIU Ying, DU Zhe, et al. Effect of corn ear kernels arrangement pattern on their discrete performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(10): 186–191. (in Chinese)
- [22] 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 Xinp ing, 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)
- [23] CHEN Zhengpu, WASSGREN C, KINGSLEY A R P. Measured damage resistance of corn and wheat kernels to compression, friction, and repeated impacts[J]. Powder Technology,2021,380: 638–648.
- [24] TANG Han, ZHU Guixuan, WANG Ziheng, et al. Prediction method for maize kernel impact breakage based on high-speed camera and FEM[J]. Powder Technology,2024,444: 120002.
- [25] CHEN Zhengpu, WASSGREN C, KINGSLEY A R P. Development and validation of a DEM model for predicting compression damage of maize kernels[J]. Biosystems Engineering,2023,230: 480–496.
- [26] YANG Liquan, WANG Wanzhang, WANG Meimei, et al. Structural dynamics of corn threshing drum based on computer simulation technology[J]. Wireless Personal Communications,2017,102(2): 701–711.
- [27] LOOH A G, XIE Fangping, WANG Xiushan, et al. Grain kernel damage during threshing: a comprehensive review of theories and models[J]. Journal of Agricultural Engineering,2025,56(1): 1674.
- [28] 耿端阳,谭德蕾,于兴瑞,等.玉米柔性脱粒滚筒脱粒元件设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(5): 1923–1933.
GENG Duanyang, TAN Delei, YU Xingrui, et al. Design and test of corn flexible threshing cylinder element[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2020,50(5): 1923–1933. (in Chinese)
- [29] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11): 158–167. (in Chinese)
- [30] 张莉,林诚育,侯国珍,等.高含水率玉米仿生脱粒元件设计与试验[J].农机化研究,2021,43(2): 126–131.
ZHANG Li, LIN Chengyu, HOU Guozhen, et al. Design and experimental study of bionic threshing elements for high-moisture corn[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(2): 126–131. (in Chinese)
- [31] ZHAO Jiale, ZHAO Hainan, TANG Han, et al. Bionic threshing component optimized based on MBD–DEM coupling simulation significantly improves corn kernel harvesting rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,212: 108075.
- [32] ZHOU Deyi, HOU Pengfei, ZHANG Jinsong, et al. Mechanism of low damage rate maize ear pre-threshing based on cob internal expansion cracking[J]. Biosystems Engineering,2025,255: 104157.
- [33] YANG Xiaodong, WU Jida, JIANG Haishen, et al. Dynamic modeling and parameters optimization of large vibrating screen with full degree of freedom[J]. Shock and Vibration,2019,2019(1): 1–12.
- [34] 杨立权.切流横轴流玉米脱粒系统设计及试验研究[D].郑州:河南农业大学,2018.
YANG Liquan. Design and experiment research based on tangential flow transverse axial flow corn threshing system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [35] 李元超.不同板齿玉米脱粒装置脱粒性能试验研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2024.
LI Yuanchao. Experimental study on threshing performance of different plate teeth corn threshing device[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2024. (in Chinese)