doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.021

基于离散元法的谷子脱粒机理与多品种脱粒参数测试

邱述金[1,2]　张慧骏[1,2]　吴乐琴[1,2]　张燕青[1,2]　徐　兵[1,2]　刘　芸[1,2]
崔清亮[1,2]　原向阳[3]
(1. 山西农业大学农业工程学院, 晋中 030801; 2. 农业机械关键技术与装备山西省重点实验室, 晋中 030801;
3. 山西农业大学农学院, 晋中 030801)

摘要: 针对谷子籽粒细小、穗部结构复杂所导致的脱净率低、籽粒损伤大、功耗高等问题,本文提出一种基于骆驼口腔角质化乳突挤搓机理的低损脱粒方法,设计多乳突阵列仿生脱粒元件,搭建纵轴流谷子脱粒试验装置。建立了谷穗与仿生元件碰撞接触力学模型和基于离散元法的柔性谷穗模型,并仿真模拟了不同齿型脱粒过程。探究了脱粒元件、滚筒转速和脱粒间隙对不同品种谷穗脱净率、破碎率、损失率及单穗脱粒功耗的影响规律。结果表明,脱粒元件对脱粒性能影响显著,滚筒转速主要影响破碎率和单穗脱粒功耗,脱粒间隙对响应面各指标均有显著影响,交互作用对破碎率影响显著。最佳组合为仿生元件、滚筒转速 701.512 r/min、脱粒间隙 6.081 mm,此时脱净率、破碎率、损失率和单穗脱粒功耗分别为 96.397%、0.767%、1.629% 和 69.649 W。构建的响应面回归预测模型对多品种脱净率、破碎率、损失率预测相对误差不超过 1.58%、7.82%、2.82%,单穗脱粒功耗相对误差不超过 10.67%,对脱粒质量具有较好的预测精度。研究结果为谷子低损脱粒装置设计与多品种脱粒参数优化提供参考。

关键词: 谷穗; 仿生脱粒元件; 脱粒装置; 离散元; 单穗脱粒功耗
中图分类号: S225.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0247-15　　**OSID**:

Threshing Mechanism and Multi-variety Threshing Parameter Testing of Foxtail Millet Based on Discrete Element Method

Qiu Shujin[1,2]　Zhang Huijun[1,2]　Wu Leqin[1,2]　Zhang Yanqing[1,2]　Xu Bing[1,2]
Liu Yun[1,2]　Cui Qingliang[1,2]　Yuan Xiangyang[3]
(1. *College of Agricultural Engineering*, *Shanxi Agricultural University*, *Jinzhong* 030801, *China*
2. *Shanxi Key Laboratory of Key Technologies and Equipment for Agricultural Machinery*, *Jinzhong* 030801, *China*
3. *College of Agriculture*, *Shanxi Agricultural University*, *Jinzhong* 030801, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of low threshing completeness, high grain damage, and high power consumption caused by the small grain size and complex panicle structure of foxtail millet, a low-damage threshing method based on the rubbing and kneading mechanism of keratinized papillae in the camel oral cavity was proposed. A bionic threshing element with a multi-papilla array was designed, and a longitudinal axial-flow foxtail millet threshing test device was developed. Based on Hertzian contact theory a collision contact mechanics model between foxtail millet panicles and the bionic threshing element was established, and a flexible foxtail millet panicle model based on the discrete element method was constructed. Mechanical calibration and validation were carried out, and comparative simulations of the threshing processes with different tooth types were conducted. Jingu 21, Zhangza 16, and Tonggu 58 were used as test materials to investigate the effects of threshing element type, cylinder rotational speed, and threshing clearance on threshing completeness rate, grain breakage rate, grain loss rate, and power consumption per panicle, so as to determine the optimal tooth type and parameter combination. The results showed that the threshing element type had a significant effect on threshing performance, cylinder rotational speed mainly affected grain breakage rate and power consumption per panicle, and threshing clearance had significant effects on all-response variables. The interaction between cylinder rotational

收稿日期: 2026-07-06　修回日期: 2026-07-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(52305268)、山西省基础研究计划项目(20210302124374)和山西省谷子产业技术体系项目(2026CYJSTX04-21)
作者简介: 邱述金(1988—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: sxauqsj@sina.com

speed and threshing clearance had a significant effect on grain breakage rate. The optimal tooth type was determined to be the bionic tooth type. When the cylinder rotational speed was 701.512 r/min and the threshing clearance was 6.081 mm, the threshing completeness rate, grain breakage rate, grain loss rate, and power consumption per panicle were 96.397%, 0.767%, 1.629%, and 69.649 W, respectively. The relative errors of threshing completeness rate, grain breakage rate, and grain loss rate for different varieties did not exceed 1.58%, 7.82%, and 2.82%, respectively, and the relative error of power consumption per panicle did not exceed 10.67%. The model showed good prediction accuracy for threshing quality indicators. The research result can provide a reference for the design of low-damage foxtail millet threshing devices and the optimization of threshing parameters for different varieties.

Key words: foxtail millet panicle; bionic threshing element; threshing device; discrete element method; power consumption per panicle

0 引言

国家统计局数据显示,谷子(粟)种植面积由 2013 年 $7.207\ 2\times10^5$ hm^2 增至 2022 年 $8.397\ 6\times10^5$ hm^2[1-2]。近些年种植面积虽有所波动,但因其突出的营养、饲用及农艺价值仍受关注[3-4]。据《2024 年全国农业机械化发展统计公报》,我国谷物联合收获机保有量达到 1.745×10^6 台;其中,小麦、水稻和玉米耕种收综合机械化率分别达 98.00%、89.18% 和 92.23%。谷子机械化收获水平偏低,部分产区仍依赖人工脱粒,劳动强度大、效率低,制约产业化发展。现有稻麦联合收获机直接用于谷子脱粒时损失率高、脱净率低、适用性差[5-6]。因此,研制谷子专用高效低损脱粒装置需求十分迫切。

国外学者在脱粒技术领域的研究聚焦于作物力学特性、滚筒结构优化。Kruszeihnicka 等[7]通过反复压载试验分析了不同含水率和粒厚玉米粒的断裂行为及衰弱机制,揭示裂纹起始、发展规律及载荷循环下断裂模式。Looh 等[8]基于接触理论、断裂力学以及 DEM 与 FEA 建模,分析谷物特性与机械参数耦合作用对籽粒损伤敏感性的影响。Khawaja 等[9]提出压缩-振荡式脱粒新技术,利用 DEM 仿真小麦麦穗和籽粒特性,并通过台架试验获得最佳参数组合。Hussain 等[10]面向易缠绕作物设计了多级剪切滚筒,经有限元与模态分析优化,台架试验结果表明可有效缓解堵塞。Abdeen 等[11]在不同转速和喂入量下分析锥形与滚筒脱粒体对脱粒效果的影响,得出滚筒脱粒体效率更高,损失更小。Powar 等[12]研制了脱粒兼碾米机,1 次作业完成脱粒、碾米和清选 3 道工序,通过性能测试,有效解决了脱粒、碾米和清选操作效率低、耗时长、劳动强度大等问题。

国内学者在脱粒损伤机理与装置优化方面也取得阶段性进展[13-16]。Tang 等[17]得出水稻叶片拉伸强度从叶鞘到叶尖呈先降后升再降趋势,抗拉断裂能力随温度升高而减弱且受含水率影响较小。江涛等[18]采用螺旋交错排布滚筒并优化齿杆结构,减轻了物料冲击与细碎。文献[19-20]设计了前后两段转速差可调的组合式脱粒滚筒,并研究了转速差及转速对豆荚籽粒能量及形变的影响,可解决大豆脱粒清选质量差、功耗大等问题。李心平等[21]设计了纵轴流双柔性碾搓式脱粒装置,采用柔性橡胶辊实现柔性碾搓,有效降低了未脱净率与籽粒破损率。现有仿生脱粒研究主要改变脱粒元件轮廓形态及接触方式,实现籽粒离散、梳刷或柔性碾搓。基于鸡喙离散籽粒的仿生机理与裸手差速脱粒原理,李心平等[22]研制了玉米种子仿生脱粒机,仿生离散辊离散率达 67.5%,损伤率仅 0.16%。文献[23-24]受牛舌尖丝状乳突启发,设计了仿生脱粒齿形与凹面仿生梳齿,前者小麦脱净率达 97.5% ~99.5%,后者落地及未梳脱损失率均优于平面梳齿。

综上,国内外学者在作物脱粒分离机理、脱粒装置结构优化、仿生脱粒部件设计及 DEM 仿真分析等方面取得了较多成果,但多集中于玉米、小麦、水稻等作物。相比之下,谷子籽粒细小、穗部结构复杂,且成熟期含水率较高,导致在脱粒过程易出现未脱净率高、籽粒损伤大及功耗偏高等问题。为改善谷子脱粒作业质量,借鉴骆驼口腔中舌头与乳突协同摄食的挤搓机制,提取其关键结构特征,设计仿生脱粒元件。构建可柔性脱粒谷穗模型,结合 DEM 仿真与台架试验,验证仿生元件脱粒效果并获取最优参数组合,以期为谷子高效、低损机械化收获提供理论依据与技术参考。

1 材料和方法

1.1 谷子特性

以代表性谷子品种晋谷 21 为对象,测定谷穗、谷码及籽粒力学特性和接触参数。利用 CMT-6104 型万能试验机对谷码-穗轴连接部位进行轴向拉伸试验,在加载速度 20 mm/min 下记录分离最大

载荷，并结合试样尺寸及载荷–位移曲线计算谷码枝梗、穗轴和枝柄等部位的弹性模量。谷子籽粒压缩特性由 TA. XT. Plus 型物性分析仪配合 R36 圆柱形压头测定，加载速度设为 1（前期）、0.5（中期）、10 mm/min（后期），保持时间为 1 s，沿籽粒短轴方向施压，获得刚度及压缩弹性模量。籽粒、穗轴与 Q235 钢、PLA（Polylactic acid）间的摩擦特性由斜面仪测定，Q235 钢对应脱粒装置金属工作部件，PLA 对应脱粒元件材料；通过跌落试验获取各材料间碰撞恢复系数。谷穗本征参数见表 1。

表 1　谷穗本征参数

Tab. 1　Intrinsic parameters of foxtail millet panicles

类别	参数	数值	类别	参数	数值
籽粒	泊松比	0.35	籽粒–穗轴	碰撞恢复系数	0.375
	密度/(kg·m^{-3})	1 204		静摩擦因数	0.477
	剪切模量/Pa	3.62×10^{7}		滚动摩擦因数	0.002
穗轴	泊松比	0.43	籽粒–钢	碰撞恢复系数	0.524
	密度/(kg·m^{-3})	1 200		静摩擦因数	0.229
	剪切模量/Pa	1.08×10^{9}		滚动摩擦因数	0.002
枝柄	泊松比	0.43	穗轴–钢	碰撞恢复系数	0.429
	密度/(kg·m^{-3})	1 200		静摩擦因数	0.298
	剪切模量/Pa	4.48×10^{8}		滚动摩擦因数	0.003
籽粒–籽粒	碰撞恢复系数	0.321	PLA –籽粒	碰撞恢复系数	0.422
	静摩擦因数	0.591		静摩擦因数	0.366
	滚动摩擦因数	0.005		滚动摩擦因数	0.003
穗轴–穗轴	碰撞恢复系数	0.108	PLA –穗轴	碰撞恢复系数	0.246
	静摩擦因数	0.606		静摩擦因数	0.349
	滚动摩擦因数	0.003		滚动摩擦因数	0.003

1.2　脱粒元件

1.2.1　仿生元件设计

常用脱粒元件为钉齿和纹杆。钉齿通过冲击、拨动与梳刷分离籽粒，纹杆则依靠表面凸棱产生的挤压、揉搓和摩擦作用完成脱粒。仿生元件借鉴骆驼采食带刺灌木时口腔乳突的挤搓机制，提取关键几何特征和力学作用特点进行设计。

骆驼口腔角质化乳突多呈圆锥状、刺状或钝锥状，基部较宽、顶端略钝，并向咽部方向倾斜[25-26]。乳突能够增加食物与口腔内壁之间的摩擦力，辅助夹持草茎和枝叶，防止在口腔内滑脱。向咽部方向倾斜，可在舌、颊黏膜和硬腭配合作用下，将食物逐步引导至臼齿咀嚼区，使其完成咬断、揉搓和破碎。

骆驼口腔乳突几何结构特征为，基部直径 X_d 为 10.94 mm，顶部直径 X_u 为 4.43 mm，乳突高度 h_0 约为 23.60 mm、齿之间横向间距 s 为 13.29 mm，纵向间距 w 为 17.21 mm、倾角 θ 为 36°，且大都指向咽部，如图 1 所示。

基于脱粒功能需求，谷穗在脱粒过程受到脱粒元件有效机械作用力，以实现籽粒与穗轴分离。仿生元件结构以谷穗籽粒最大长度和穗轴最小宽度为设计依据，对相关功能部位按比例放大，建立仿生元件模型，仿生元件结构参数如表 2 所示。

1.2.2　仿生元件接触力学分析

假设仿生元件与谷穗弹性碰撞接触点邻域内籽粒集合等效为局部连续介质，且为均匀、各向同性弹性体，谷码与仿生元件在初始接触区域较小、变形量远小于谷码特征尺寸；碰撞初期忽略切向摩擦，仅考虑法向碰撞载荷两接触表面满足二阶连续条件，接触区域近似为椭圆，a 为长轴长度，b 为短轴长度，且碰撞发生于谷码中央，谷码高度方向垂直于接触表面[27]。

谷穗与仿生元件单个乳突碰撞接触以及建立的坐标系如图 2 所示，图中 P 为谷码与仿生乳突之间的压力，N；r 为仿生乳突近似半径，m；δ 为谷穗与仿生乳突碰撞压缩量，m；H 为谷码等效球体直径，m。

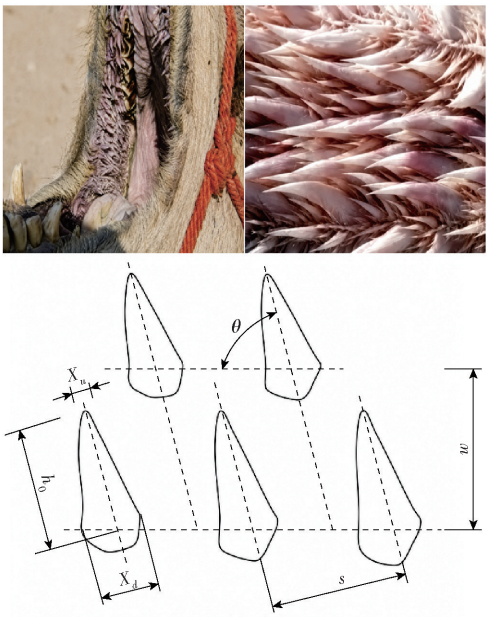
根据 Hertz 理论，一般外形的 2 个物体接触时，接触区尺寸 c、压缩量 δ 和接触面上最大压力 p_0 分别为

$$\begin{cases} c=\sqrt{ab}=\left(\dfrac{3PR_e}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}} \\ \delta=\left(\dfrac{9P^2}{16E^{*2}R_e}\right)^{\frac{1}{3}}F_2(e) \\ p_0=\dfrac{3P}{2\pi ab}=\left(\dfrac{6PE^{*2}}{\pi^3R_e^2}\right)^{\frac{1}{3}}(F_2(e))^{-\frac{2}{3}} \end{cases} \tag{1}$$

式中　R_e——等效相对曲率半径，m

E^*——等效弹性模量

$F_2(e)$——椭圆接触修正系数



(a) 原理图

(b) 实物

图 1 仿生元件构建原理及其实物图

Fig. 1 Construction principle and physical prototype of bionic threshing element

表 2 仿生元件参数

Tab. 2 Structural parameters of bionic threshing element

参数	数值
下直径 X_d/mm	10.94
上直径 X_u/mm	4.43
高度 h/mm	8.25
横向间距 s/mm	13.29
纵向间距 w/mm	17.21
倾角 θ/(°)	36

注:高度 h 为 h_0 的 35%。

仿生元件与谷码在接触区任意法向平面最大、最小曲率半径 R_1'、R_1''和 R_2'、R_2'',计算接触区任意法向平面等效曲率半径 R'和 R''为

$$\begin{cases} R_e = (R'R'')^{\frac{1}{2}} \\ \dfrac{1}{R'} = \dfrac{1}{R_1'} + \dfrac{1}{R_2'} \\ \dfrac{1}{R''} = \dfrac{1}{R_1''} + \dfrac{1}{R_2''} \\ \dfrac{1}{E^*} = \dfrac{1-\upsilon_t^2}{E_t} + \dfrac{1-\upsilon_g^2}{E_g} \end{cases} \tag{2}$$

式中 E_t——仿生元件材料弹性模量,Pa

υ_t——仿生元件材料泊松比

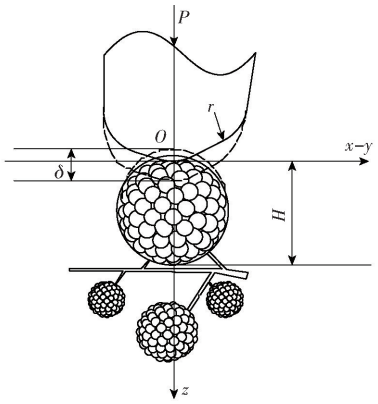


图 2 谷穗与仿生元件碰撞接触示意图

Fig. 2 Schematic of collision contact between a foxtail millet panicle and bionic element

E_g——谷穗等效弹性模量,Pa

υ_g——谷穗等效泊松比

谷码与仿生元件之间压力 P 为

$$P = K_H \delta^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

其中 $$K_H = \frac{4E^* R_e^{\frac{1}{2}}}{3(F_2(e))^{\frac{3}{2}}}$$

式中 K_H——谷码与乳突之间法向接触刚度系数

仿生元件与谷码在接触法线方向上速度分别为 v_1、v_2,则法向相对压缩速度 δ'以及法向相对压缩加速度 δ''为

$$\begin{cases} \delta' = v_1 - v_2 \\ \delta'' = \dfrac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} - \dfrac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{4}$$

谷码等效质量 m_g,仿生元件参与碰撞的等效质量为 m_t,则碰撞系统等效质量 m^* 为

$$m^* = \frac{m_t m_g}{m_t + m_g} \tag{5}$$

仿生元件与谷码碰撞压缩阶段的非线性动力学方程为

$$m^* \delta'' + K_H \delta^{\frac{3}{2}} = 0 \tag{6}$$

碰撞开始时法向相对速度为 v,并对式(6)积分,可得碰撞压缩过程能量关系为

$$\frac{1}{2} m^* \delta'^2 + \frac{2}{5} K_H \delta^{\frac{5}{2}} = \frac{1}{2} m^* v^2 \tag{7}$$

仿生元件与谷码之间压缩量达最大值时,二者法向相对速度降为 0,可求出碰撞过程最大压缩量及接触任一点最大接触压力为

$$\begin{cases} \delta_{\max} = \left(\dfrac{5m^* v^2}{4K_H}\right)^{\frac{2}{5}} \\ P_{\max} = K_H^{\frac{2}{5}} \left(\dfrac{5m^* v^2}{4}\right)^{\frac{3}{5}} \end{cases} \tag{8}$$

结合式(1)可得脱粒部件与谷穗接触区域表面

某点的接触压力为

$$p_0 = K_H^{\frac{2}{15}} \left(\frac{6E^{*2}}{\pi^3 R_e^2}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{5m_t m_g v^2}{4(m_t + m_g)} (F_2(e))^{\frac{2}{3}} \tag{9}$$

由单个阵列乳突可知，仿生元件与谷粒碰撞过程最大接触力与变形量相关，二者受脱粒部件质量、谷穗质量、接触面积及碰撞速度等因素的共同影响。适当增大脱粒部件与谷穗的接触面积并降低碰撞速度，可减轻应力集中，进而降低籽粒破碎。

在实际脱粒过程中，物料在间隙内受挤搓复合作用，谷穗与仿生元件为主要受力部件，同时伴随籽粒与凹板筛条、籽粒与谷穗的多重碰撞与摩擦。基于 Hertz 理论与运动学分析，总法向载荷 N 及其总切向力 T 为

$$\begin{cases} N = \sum_{i=1}^{n_c} P_i = \sum_{i=1}^{n_c} K_{H,i}\delta_i^{\frac{3}{2}} \\ T \approx \sum_{i=1}^{n_c} P_i(\sin\theta + \mu_i\cos\theta) \end{cases} \tag{10}$$

其中　$P_i = K_{H,i}\delta_i^{\frac{3}{2}}$　　$K_{H,i} = \dfrac{4E^*\sqrt{R_i^*}}{3(F_{2,i}(e))^{\frac{3}{2}}}$

式中　i——仿生元件第 i 个乳突

n_c——瞬时有效接触乳突数

P_i——第 i 个乳突法向力

R_i^*——第 i 个乳突接触点等效曲率半径，m

$F_{2,i}(e)$——第 i 个乳突椭圆接触修正系数

δ_i——第 i 个乳突碰撞压缩量，m

μ_i——第 i 个乳突动摩擦因数

$K_{H,i}$——第 i 个谷码与乳突之间法向接触刚度系数

由式(10)可知，增大乳突倾角或摩擦因数，总切向力相应增大，表明仿生元件对谷码-穗轴连接的切向剥离作用增强。增加乳突有效接触数量、优化乳突顶端曲率并降低法向碰撞速度，在保证剥离作用基础上扩大有效接触区域，分散单点局部载荷，减弱应力集中，降低谷子籽粒破碎风险。

2　脱粒装置整体结构及工作原理

2.1　整体结构

纵轴流滚筒通过轴向螺旋运动延长脱粒路径，以冲击、揉搓与挤压实现渐进式脱粒，停留时间由转速、间隙及导向参数调节，品种适应性好。与切流相比，作用时间较长、瞬时强度较低；与切纵流相比，省去前置切流滚筒，减少了预脱粒干扰及控制变量，更准确评价脱粒元件自身性能。

谷子脱粒装置整体结构如图 3 所示。主要由支撑架、脱粒滚筒、传动系统等组成。传动系统包括电机带轮、皮带、滚筒带轮、传动轴、联轴器及动态扭矩传感器等部件。脱粒滚筒内设固定板，可更换不同类型脱粒元件以适应不同作物。外部设有渐增导流角的导流盖，并与 U 形大包角凹板筛配合，形成完整且均匀的脱粒分离区域，提高谷粒透筛率，减少夹带损失。工作时，电机通过带传动驱动脱粒滚筒旋转，脱粒元件对谷穗进行冲击、揉搓，并在导流盖引导下使物料轴向运动，实现谷粒分离。

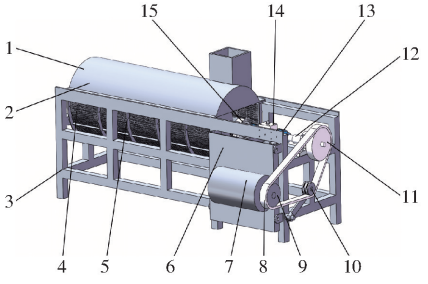


图 3　谷子脱粒装置结构示意图

Fig. 3　Structural schematic of foxtail millet threshing device

1. 导流盖　2. 脱粒滚筒　3. 支撑架　4. 凹板筛　5. 凹筛架　6. 电机架　7. 电机　8. 皮带　9. 电机带轮　10. 张紧轮　11. 滚筒带轮　12. 传动轴　13. 联轴器　14. 动态扭矩传感器　15. 轴承座

2.2　工作原理

脱粒装置工作时，由变频器调节电机转速，动力经电机-带轮，带动传动轴与联轴器，驱动脱粒滚筒连续运转。谷穗由喂料口进入滚筒脱粒区，在导流盖与脱粒元件的协同作用下沿轴向螺旋前进。脱粒元件对谷穗施加持续揉搓与冲击作用，促使籽粒逐步从谷穗上脱落；籽粒在离心力与导流作用下穿过凹板筛孔，落入下方收集装置。未脱净穗头及断秆则在导流板引导下向排草口方向运动，最终经排草段排出机体。

传动轴系集成 JNDN150N. M 型动态转矩传感器，采样频率 20 Hz，精度 0.3%。通过联轴器与驱动端和主轴相连接，脱粒过程中，传感器同步记录转矩、转速及功耗等动态响应数据。脱粒装置作业参数见表 3。

表 3　整机性能作业参数

Tab. 3　Operating parameters of foxtail millet threshing device

参数	数值
配套功率(电机)/kW	2.2
籽粒破碎率/%	≤3
总损失率/%	≤4
脱粒滚筒转速/(r·min^{-1})	0～1 000
凹板筛脱粒间隙/mm	4～8

2.3　纵轴流脱粒滚筒

脱粒滚筒主要由滚筒主轴、固定板、脱粒元件、

辅盘和排杂板组成,如图 4 所示。其核心工作区域包括强脱段、复脱段与排杂段。各段根据需要可安装不同类型脱粒元件。滚筒内设有 6 组沿周向 60°分布的脱粒元件,通过冲击与摩擦协同作用,谷穗与凹版筛发生高速碰撞,实现穗轴与籽粒间初步断裂。复脱段对未完全脱落的残余籽粒施加低冲击能量的二次剥离,避免局部过载导致籽粒损伤。排杂段形成定向导流与排出通道,将穗轴、秸秆及轻质杂质从工作区域有序分流排出。

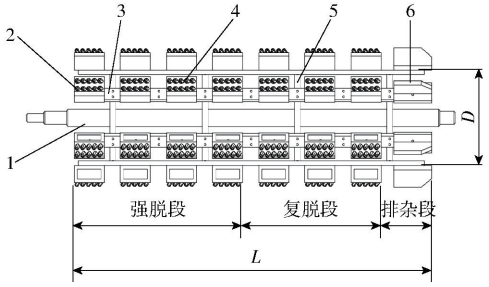


图 4 脱粒滚筒结构示意图

Fig. 4 Schematic of threshing drum structure

1. 滚筒主轴 2. 滚筒主体 3. 固定板 4. 脱粒元件 5. 辅盘 6. 排杂板

脱粒滚筒过长会延长谷子脱粒时间,虽有利脱粒,但会显著提高籽粒及茎秆破碎率。破碎后茎秆易穿过凹板筛混入籽粒中,导致杂余率上升。谷子籽粒小而轻,与杂余分离困难,杂余率增高将明显加大清选负荷。滚筒长度[28]为

$$L \geqslant \frac{q}{q_0} \tag{11}$$

式中 q——喂入量,kg/s

q_0——滚筒单位长度允许喂入量,kg/(s·m)

设计的小型脱粒装置按喂入量 1 kg/s 计算,当 q_0为 0.6 ~ 1 kg/(s·m)时,由式(11)可得纵轴流脱粒滚筒长度为 1 ~ 1.67 m。考虑脱粒时间要求及与喂入量适配性,确定 L = 1.05 m。

纵轴流脱粒滚筒直径 D_1为

$$D_1 \geqslant D + 2h \tag{12}$$

式中 D——齿根圆直径,mm

滚筒直径过小易导致谷子穗头在脱粒室内积聚,引发脱粒不净、夹带损失增加乃至堵塞风险;而适当增大滚筒直径,则可有效提升喂入能力与脱粒效能,并改善物料沿轴向的流动特性。综合考虑装置动力性能与结构约束,确定滚筒齿根圆直径 D = 300 mm、D_1 = 400 mm。

3 脱粒过程仿真建模与验证

采用 EDEM 建立并校准谷穗离散元模型,仿真不同脱粒元件脱粒过程,通过对比接触力、速度等指标验证装置性能,并为台架试验参数优化提供依据。

3.1 谷穗模型

基于谷穗结构特征,采用颗粒填充与坐标装配方法构建谷穗几何模型,构建过程如图 5 所示。

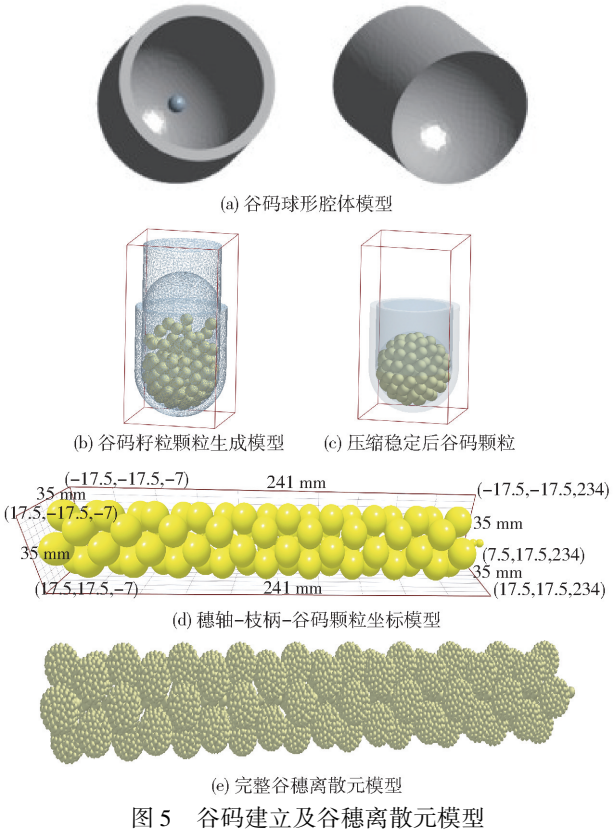


图 5 谷码建立及谷穗离散元模型

Fig. 5 Establishment of millet spikelets and discrete element model of millet panicles

谷穗结构分为穗轴、谷码、枝柄、籽粒 4 个部分。单个谷码上设置籽粒数量 126 个,每个谷穗由 85 个谷码组成,计算得谷穗总籽粒数 10 710 个。谷码直径 11.65 mm,籽粒球体直径 1.91 mm。

在 Solidworks 中建立圆柱体外壳模型,形成半径 5.825 mm 球形腔体,分上、下半球。下半球中心设置直径 1.5 mm 枝柄颗粒生成球体,添加半径 0.75 mm 籽粒颗粒;基于籽粒本征参数进行标定,生成指定数量籽粒颗粒。随后上腔体按设定运动压缩,直至颗粒完全静止,导出所有籽粒球心坐标。

以穗轴底部球心为原点建立全局三维坐标系,沿 Z 轴正向依次生成穗轴、枝柄和谷码结构球形颗粒,并确定各颗粒空间坐标。将谷码内部籽粒颗粒坐标单独导入并替换后,与其余颗粒坐标统一装配,即得完整谷穗几何模型。

3.2 粘结参数校准

谷穗模型采用 Bonding V2 模型可模拟穗轴与枝柄的弹性变形及屈服断裂行为,定义籽粒以及籽粒与穗轴之间的黏结作用[29-30]。前期试验获得初始参数(表 1)。对比仿真中穗轴各层级与枝梗物理

及力学特性参数，对参数进行迭代修正，直至仿真结果与物理试验测定值实现定量吻合。谷穗键合参数取值见表 4。

表 4　键合参数

Tab. 4　Bonding parameters

参数	穗轴-穗轴	穗轴-枝柄	枝柄-籽粒
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	4.217×10^{9}	1.038×10^{9}	2.513×10^{7}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1.534×10^{9}	8.410×10^{8}	1.241×10^{7}
法向临界应力/Pa	1.827×10^{7}	1.134×10^{7}	3.012×10^{5}
切向临界应力/Pa	1.462×10^{7}	7.761×10^{6}	1.115×10^{5}
粘结半径/mm	2.40	1.20	1.15

对谷穗模型开展谷码-穗轴拉伸试验以验证建模准确性[28]，设移动夹具以速度 20 mm/min 向上拉伸，仿真时间步长为 1×10^{-6} s，数据保存间隔 0.01 s。谷码-穗轴拉伸试验过程与结果如图 6 所示。

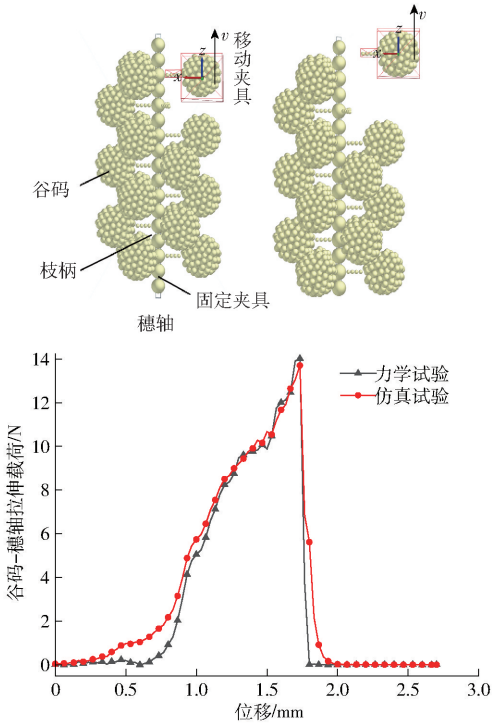


图 6　谷码-穗轴拉伸仿真对比试验

Fig. 6　Simulation-experimental comparison of tensile testing for grain cluster - panicle axis connection

通过加载力-位移曲线可得拉伸仿真峰值载荷为 13.70 N，拉伸试验实测峰值为 14.02 N；仿真与实测力-位移曲线决定系数 R^2 大于 0.96，最大载荷误差小于 5%，验证了谷穗模型有效性。

3.3　脱粒装置仿真模型

基于脱粒装置结构特征与谷穗物料特性，采用 DEM 构建了脱粒仿真模型，用于模拟脱粒元件与谷穗、籽粒之间的相互作用及其运动行为。利用 Solidworks 建立脱粒滚筒、脱粒元件、凹板筛及导流盖的三维模型，完成凹板筛与导流盖虚拟装配。将整体结构划分为喂入区、进料区、脱粒区、排杂区与接料区，如图 7 所示。滚筒主体为 Q235 钢，其弹性模量 216 GPa，泊松比 0.3，密度 7 850 kg/m^3；仿生元件、钉齿等为 PLA 材料，其弹性模量 3.0 GPa，泊松比 0.30，密度为 1 240 kg/m^3。脱粒元件与谷穗接触关键区域，三角形网格尺寸设为 3 mm。经网格独立性验证，划分精度满足仿真要求。

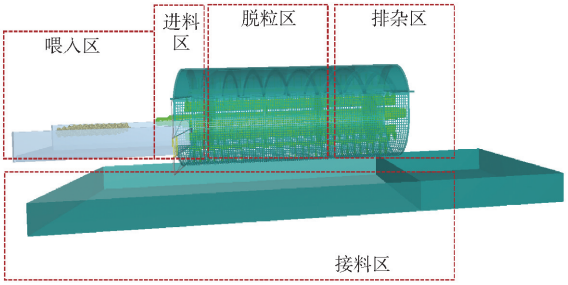


图 7　离散元脱粒模型

Fig. 7　Discrete element threshing model

3.4　仿真试验

在仿生元件、滚筒转速 750 r/min、脱粒间隙 6 mm 条件下，观察单穗籽粒脱落、飞出与反弹过程，确定仿生元件主要脱粒时间，如图 8 所示。

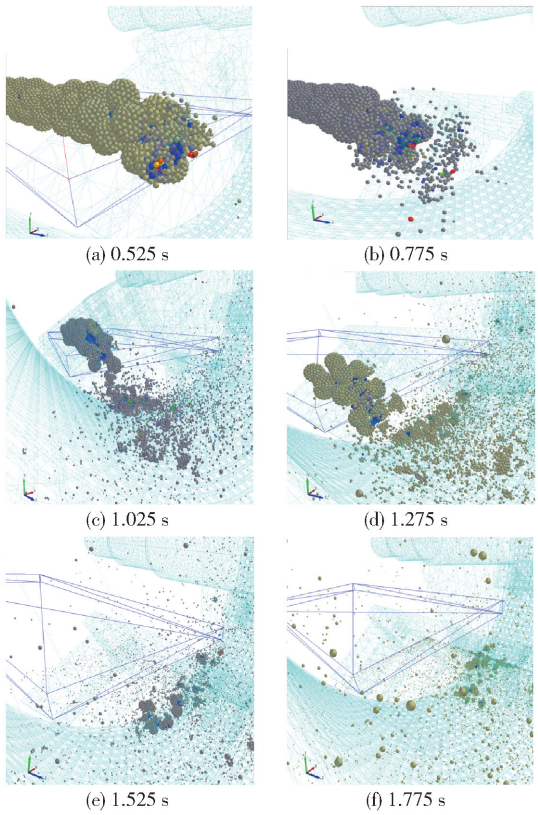


图 8　单穗脱粒受力

Fig. 8　Force variation with time during single-panicle threshing

仿真结果表明，仿生元件对谷穗脱粒作用主要包括冲击脱粒和挤压-剪切脱粒。冲击脱粒多发生在脱粒初期，仿生元件前缘与籽粒直接接触，局部接

触力较大,可使籽粒与谷码、穗轴间连接迅速失效;当接触力超过籽粒临界破裂力时,易引起籽粒破损。挤压-剪切脱粒多发生在脱粒后期,剩余籽粒在仿生齿挤压及齿面相对剪切作用下逐步脱离。

当喂入量为 1 kg/s 时,对比仿生元件、钉齿脱粒仿真效果。仿真总时间为 5 s,时间步长为 1×10^{-8} s,数据保存间隔为 0.01 s,如图 9 所示。

选取接触总力、速度、切向接触力、法向接触力开展对比,结果如图 10 所示。由图 10 可知,钉齿与仿生元件作用下谷穗脱粒过程中的接触总力、碰撞速度、法向力和切向力变化趋势基本一致,整体呈快速升高然后维持波动最后逐渐降低的变化规律。0 ~ 1 s 内,谷穗进入脱粒区域并与脱粒元件发生强接触,各参数迅速增大,其钉齿接触总力峰值为 148.78 N,仿生元件为 119.72 N。1 ~ 3 s 为主要脱粒阶段,籽粒与脱粒元件、凹板及谷穗间持续发生碰撞、挤压和摩擦作用,各参数呈波动变化;3 s 后,随着籽粒逐渐脱落并向排出端运动,接触作用减弱,各参数逐渐下降。

上述趋势说明钉齿主要依靠较强的刚性冲击、挤压和剪切作用实现籽粒剥离,易导致局部载荷过大并增加籽粒破碎风险;而仿生元件可通过曲面接触分散载荷,降低碰撞速度及法向、切向作用强度,使脱粒过程更加平稳。综合表明,仿生元件在保持籽粒剥离能力的同时,可有效减弱瞬时冲击和挤压损伤,有利于降低脱粒破碎率。

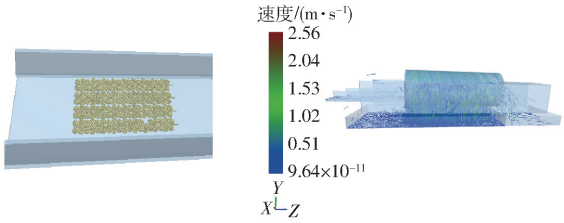


图 9 仿生元件脱粒效果仿真

Fig. 9 Simulation analysis of threshing performance of bionic threshing element

4 台架试验与参数优化

4.1 试验材料与方法

以山西省 3 个谷子品种(晋谷 21、张杂 16、同谷 58)为对象,依据 GB/T 5982—2017《脱粒机试验方法》,采用五点取样法[31]在山西汾阳、忻州、大同谷子种植试验基地采集样本。测定其基本参数,结果取平均值,各指标允许误差为 ±1%,结果如表 5 所示。以脱粒元件类型、滚筒转速、脱粒间隙为自变量,籽粒脱净率 Y_1、破碎率 Y_2、损失率 Y_3[32]、单穗脱粒功耗 Y_4 为评价指标,在山西农业大学农业工程学院自主搭建的台架试验台(图 11)进行脱粒试验。结合谷子收获农艺要求及脱粒过程实际情况,各评价指标每组试验重复 3 次,结果取均值。

单穗脱粒功耗 Y_4 计算式为

$$Y_4=\frac{2\pi}{60Z(t_e-t_s)}\int_{t_s}^{t_e}(M(t)-M_0)n(t)\,\mathrm{d}t \tag{13}$$

式中 $M(t)$——脱粒过程中脱粒轴实时转矩,N·m

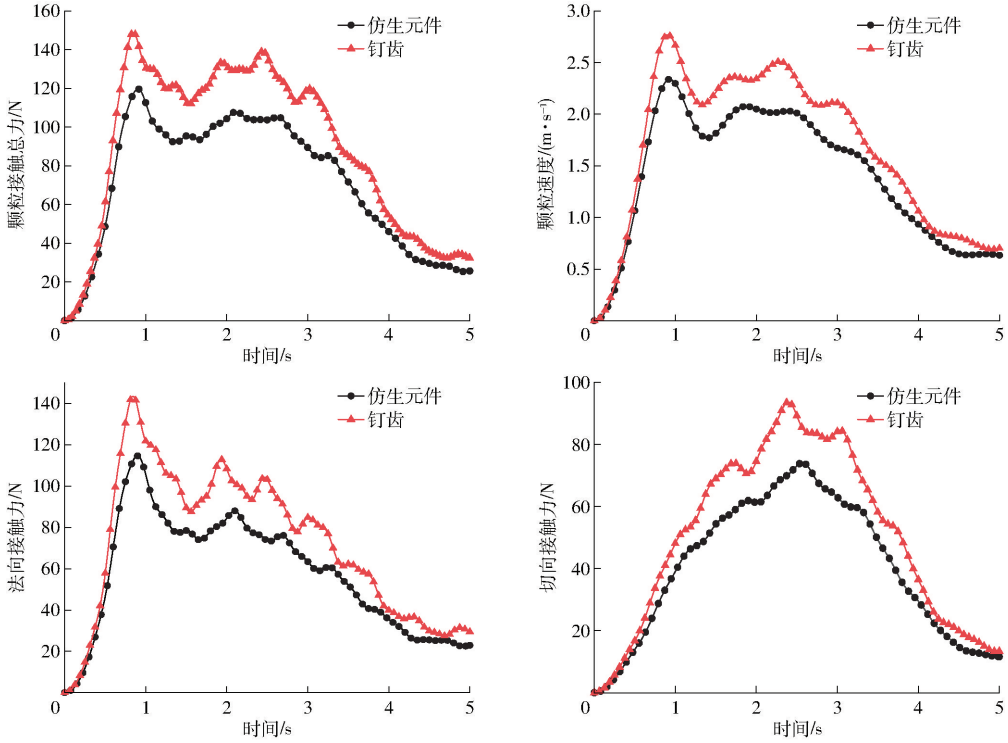


图 10 2 种齿仿真结果

Fig. 10 Simulation results between two types of teeth

表 5　试验谷子基本参数

Tab. 5　Basic parameters of foxtail millet used in experiment

参数	晋谷 21	张杂 16	同谷 58
平均穗长/mm	265	274	259
平均大段穗径/mm	31.6	30.8	32.4
平均大段穗轴直径/mm	3.84	4.44	3.67
籽粒含水率/%	13.20	18.98	15.16

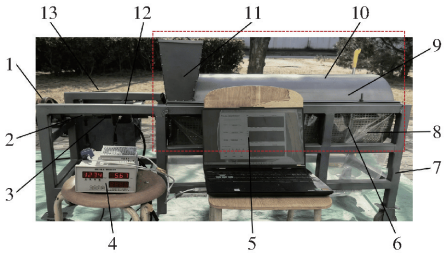


图 11　脱粒滚筒结构示意图

Fig. 11　Schematic of threshing drum structure

1. 传动带轮　2. 传动轴　3. 联轴器　4. MCK－DN 型动扭测控仪　5. 动扭监控程序　6. 凹筛架　7. 支撑机架　8. 凹板筛　9. 脱粒滚筒　10. 导流盖　11. 入料口　12. 动态扭矩传感器　13. 电机

M_0——空载转矩，N·m

$n(t)$——脱粒轴实时转速，r/min

t_s——谷穗开始脱粒时刻，s

t_e——谷穗完成脱粒时刻，s

Z——脱粒谷子株数，株

4.2　单因素试验

谷子脱粒过程中应充分脱粒并保持试验工况稳定，确定凹板筛孔尺寸为 6 mm×6 mm，采用人工连续喂入，进料速度为 1 kg/s。试验以脱粒元件类型、滚筒转速、脱粒间隙为考察因素，分析对谷子脱粒性能的影响。单因素试验方案如表 6 所示。

表 6　单因素试验方案

Tab. 6　Single-factor experimental design

试验因素	因素水平及其类型	梯度
脱粒齿型	仿生元件、纹杆-仿生、纹杆-钉齿、纹杆、钉齿	
滚筒转速/(r·min^{-1})	550～950	50
脱粒间隙/mm	4～8	0.5

图 12 中，不同大写字母表示同一品种下不同脱粒齿型间差异显著，不同小写字母表示同一脱粒齿型下不同品种间差异显著($P<0.05$)，含有相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。

不同齿型对 3 种谷子脱粒效果的影响规律基本一致。当脱粒元件依次采用仿生元件、纹杆-仿生、纹杆、纹杆-钉齿和钉齿时，脱净率整体呈下降趋势，破碎率和损失率整体呈上升趋势，单穗脱粒功耗则逐渐降低。仿生元件脱净率最高，破碎率、损失率最低。较大有效接触面积和较缓和挤搓、剥离作用能够提高脱离充分性，减小局部损伤。纹杆-仿生组合次之，表明仿生结构与传统元件协同作用仍具有较好的低损脱粒效果。钉齿主要依靠局部集中冲击进行脱粒，虽单穗脱粒功耗最低，

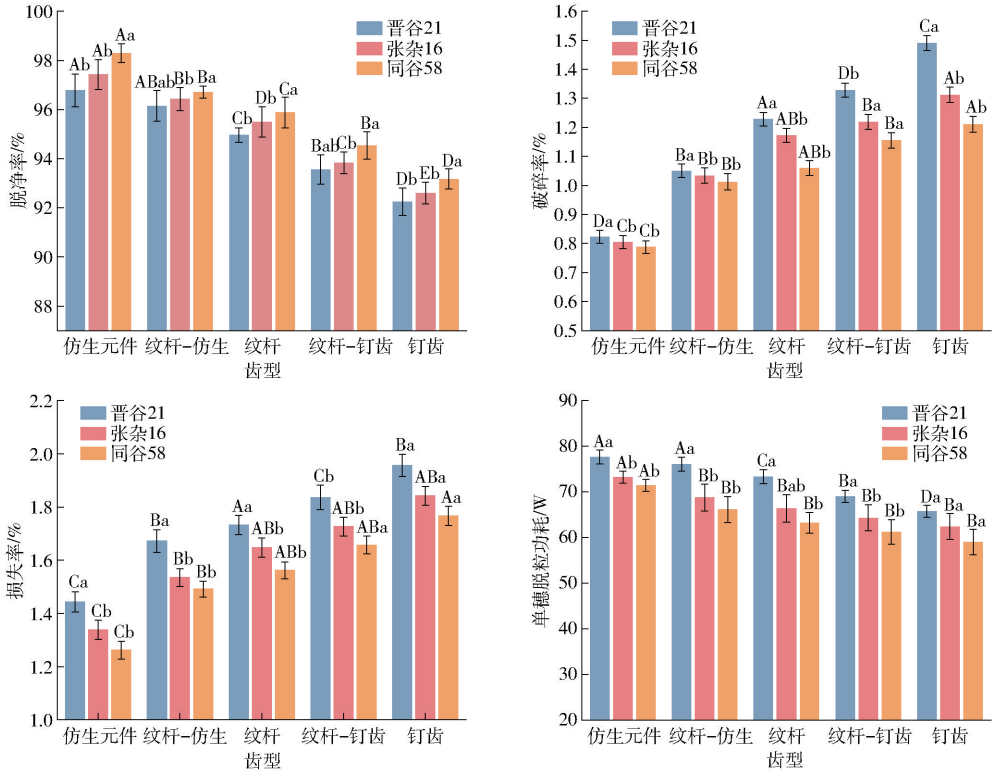


图 12　脱粒元件类型对脱粒效果的影响

Fig. 12　Effects of different threshing element types on threshing performance

但脱净率较低,破碎率和损失率较高,综合脱粒质量较差。

从 3 个品种间表现看,同谷 58 脱净率整体较高,破碎率、损失率和功耗相对较低,表现出较好的脱粒适应性;晋谷 21 破碎率、损失率和功耗整体较高,说明其脱粒阻力相对较大,籽粒在脱粒过程中更易受到损伤。

不同品种含水状态存在差异,在一定程度上影响了籽粒脱粒效果。晋谷 21、张杂 16 和同谷 58 采集时期均为成熟期,含水率分别为 13.20%、18.98% 和 15.16%。试验中,含水率适中的同谷 58 整体表现出较高的脱净率以及较低的破碎率、损失率和单穗脱粒功耗;含水率较低的晋谷 21 脱粒表现相对较高;含水率较高的张杂 16 各项指标总体介于二者之间。

在前期齿型对比试验结果基础上,选取晋谷 21 及仿生元件、纹杆–仿生和纹杆 3 种构型开展后续单因素试验。晋谷 21 在各齿型下破碎率、损失率及单穗脱粒功耗相对较高,可表示较高脱粒阻力工况;仿生元件综合脱粒效果较优,纹杆–仿生组合齿兼具 2 类齿形结构特征,纹杆为常用脱粒元件,可作为对照构型,3 种齿型可较完整地表征不同作用方式下脱粒响应差异。

由图 13 可知,仿生元件、纹杆–仿生组合及纹杆的脱粒规律大致一致。随着滚筒转速增加,脱净率呈先升后降趋势,在 750 r/min 时达到较高水平;破碎率逐渐上升;损失率呈先降低后略有回升趋势,900 r/min 时降至最低;单穗脱粒功耗持续上升。滚筒转速较低时,脱粒元件线速度较小,对谷穗打击、揉搓和剥离作用不足,导致籽粒脱离不充分脱净率较低、损失率较高。随着转速增加,谷穗受到的冲击动能和揉搓作用增强,脱净率提高且损失率降低,但籽粒所受碰撞、摩擦和挤压作用增强,破碎率逐渐升高。

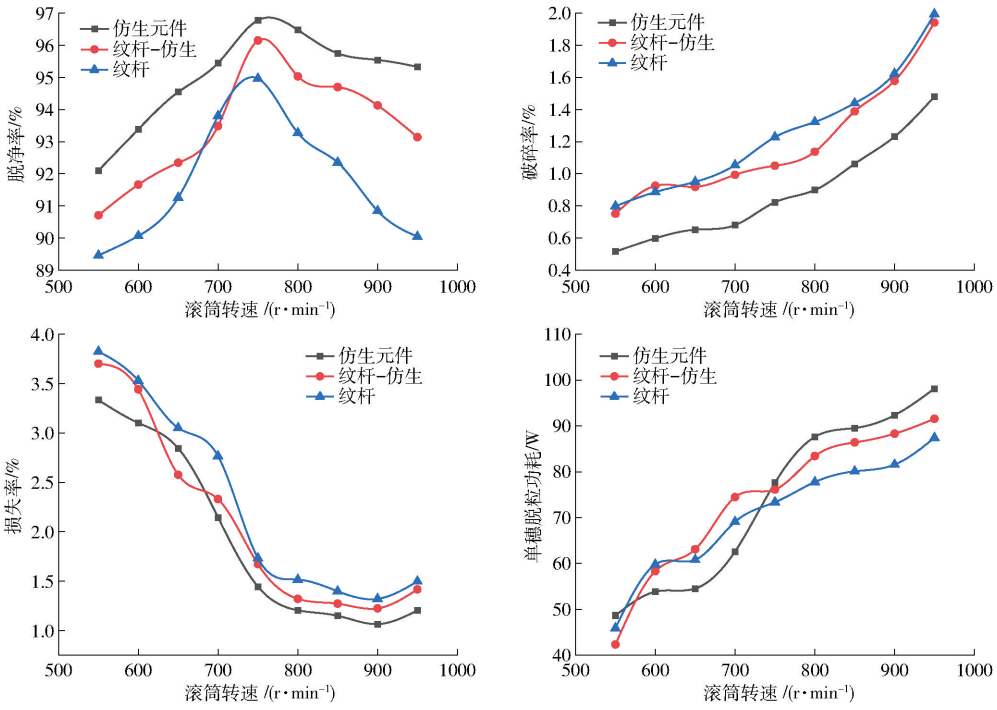


图 13 滚筒转速对脱粒效果的影响

Fig. 13 Effects of threshing drum rotational speed on threshing performance

当转速过大时,谷物流动加快、停留时间缩短,部分籽粒未及分离即被高速抛离或夹带排出,导致脱净率略有下降、损失率回升。籽粒所受打击、摩擦和挤压力进一步增强,破碎率和单穗脱粒功耗持续上升。综合各项指标平衡要求,滚筒转速为 650 ~ 850 r/min 时,综合脱粒性能较优。

由图 14 可知,随着脱粒间隙增大,脱净率整体呈下降趋势,破碎率和单穗脱粒功耗逐渐降低,而损失率逐渐升高。这是因为脱粒间隙较小时,谷穗在脱粒区内受到较强的挤压、打击和揉搓作用,籽粒与穗轴之间的连接更容易被破坏,因此脱净率较高、损失率较低。过强的挤压和摩擦会增大籽粒局部受力,导致破碎率和单穗脱粒功耗升高。

随着脱粒间隙增大,物料在脱粒区内运动空间增加,谷穗约束作用减弱,籽粒与脱粒部件、凹板筛之间接触强度和摩擦阻力降低,因此破碎率和功耗下降但由于有效脱粒作用不足,部分籽粒未能充分脱落或随物料排出,使脱净率降低、损失率增加。综合各项指标变化规律,脱粒间隙以 5 ~ 7 mm 较为适宜。

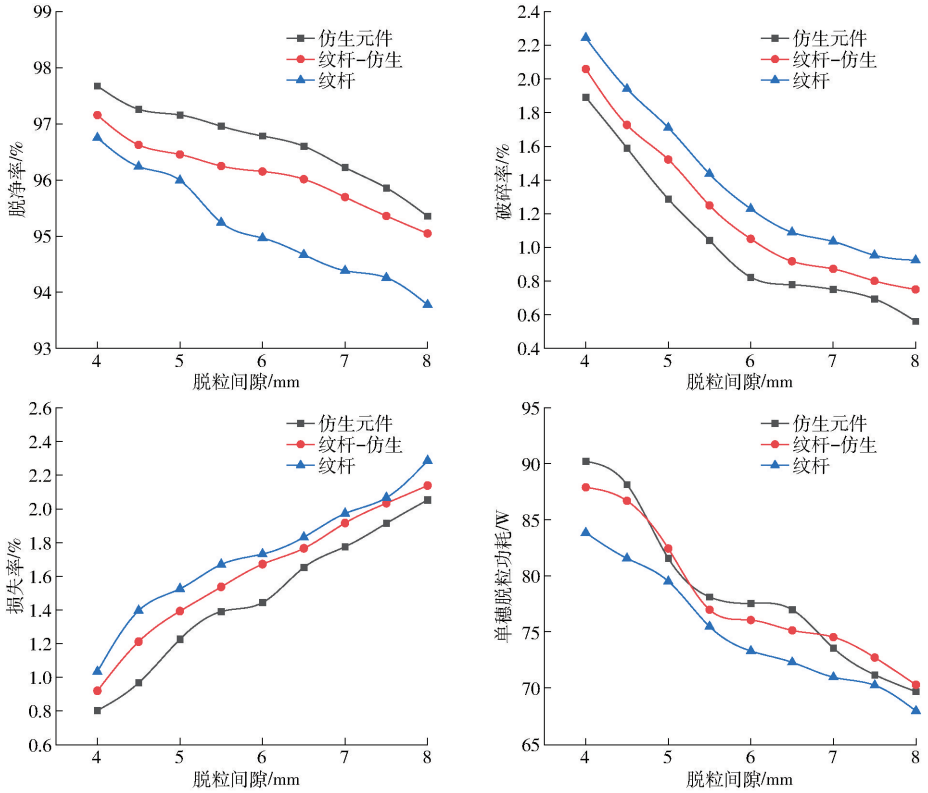


图 14　脱粒间隙对脱粒效果的影响

Fig. 14　Effect of threshing clearance on threshing performance

4.3　正交脱粒试验

为得到最优参数组合，据单因素试验结果，选滚筒转速、脱粒间隙为影响因素，脱净率（Y_1）、破碎率（Y_2）、损失率（Y_3）以及单穗脱粒功耗（Y_4）为评价指标，进行响应面优化试验。采用中心组合试验设计理论进行二因素五水平响应面试验，试验因素编码见表 7。试验方案与结果如表 8 所示。回归方程分别为

$$\begin{cases} Y_1 = -53.903\,99 + 0.331\,928X_1 + 10.006\,58X_2 + \\ \quad 0.002\,915X_1X_2 - 0.000\,236X_1^2 - 1.069\,91X_2^2 \\ Y_2 = 3.264\,37 - 0.003\,936X_1 - 0.373\,937X_2 - \\ \quad 0.000\,615X_1X_2 + 5.956\,25\times10^{-6}X_1^2 + 0.060\,313X_2^2 \\ Y_3 = 56.526\,43 - 0.098\,751X_1 - 6.081\,03X_2 - \\ \quad 0.000\,480X_1X_2 + 0.000\,068X_1^2 + 0.545\,375X_2^2 \\ Y_4 = -326.705\,00 + 0.853\,297X_1 + 16.778\,64X_2 - \\ \quad 0.019\,240X_1X_2 - 0.000\,401X_1^2 - 0.671\,875X_2^2 \end{cases} \tag{14}$$

由表 9 可知，脱净率、破碎率、损失率和单穗脱粒功耗回归模型 P 均小于 0.01，均达极显著，且失拟项 P 均大于 0.05，失拟项均不显著，回归模型拟合效果较好。

脱粒间隙对脱净率、损失率均有显著影响（$P<0.05$），对破碎率和单穗脱粒功耗有极显著影响

表 7　试验因素编码

Tab. 7　Level of test factors

编码	因素	
	滚筒转速 X_1/(r·min^{-1})	脱粒间隙 X_2/mm
-1.414	610	4.5
-1	650	5.0
0	750	6.0
1	850	7.0
1.414	890	7.5

表 8　试验方案与结果

Tab. 8　Experimental plan and results

序号	因素		Y_1/	Y_2/	Y_3/	Y_4/
	X_1/(r·min^{-1})	X_2/mm	%	%	%	W
1	650	5.0	94.379	0.890	2.539	59.850
2	850	5.0	93.289	1.267	2.652	90.750
3	650	7.0	92.176	0.761	2.783	52.800
4	850	7.0	92.252	0.892	2.704	76.000
5	610	6.0	93.433	0.742	2.886	53.200
6	890	6.0	91.332	1.123	2.678	92.100
7	750	4.5	95.650	1.071	2.334	87.800
8	750	7.5	94.286	0.797	2.710	70.850
9	750	6.0	97.409	0.833	1.595	80.250
10	750	6.0	96.172	0.808	1.279	77.750
11	750	6.0	97.590	0.851	1.420	74.500
12	750	6.0	96.519	0.800	1.444	75.500
13	750	6.0	96.221	0.823	1.462	80.000

表 9 仿生齿各评价指标方差分析结果

Tab. 9 Analysis of variance for evaluation indicators of bionic-tooth threshing element

指标	来源	平方和	自由度	均方	P
Y_1	模型	48.60	5	9.72	0.000 5 **
	X_1	1.99	1	1.99	0.080 9
	X_2	3.34	1	3.34	0.033 2 *
	X_1X_2	0.339 9	1	0.339 9	0.426 8
	X_1^2	38.83	1	38.83	<0.000 1 **
	X_2^2	7.96	1	7.96	0.004 7 **
	残差	3.34	7	0.477 7	
	失拟项	1.54	3	0.514 0	0.433 8
	误差	1.80	4	0.450 5	
	合计	51.95	12		
	R^2	0.935 6			
Y_2	模型	0.295 7	5	0.059 1	<0.000 1 **
	X_1	0.137 0	1	0.137 0	<0.000 1 **
	X_2	0.099 3	1	0.099 3	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.015 1	1	0.015 1	0.001 5 **
	X_1^2	0.024 7	1	0.024 7	0.000 4 **
	X_2^2	0.025 3	1	0.025 3	0.000 3 **
	残差	0.004 2	7	0.000 6	
	失拟项	0.002 6	3	0.000 9	0.245 4
	误差	0.001 6	4	0.000 4	
	合计	0.299 9	12		
	R^2	0.986 0			
Y_3	模型	4.76	5	0.951 2	<0.000 1 **
	X_1	0.008 5	1	0.008 5	0.394 2
	X_2	0.085 6	1	0.085 6	0.023 4 *
	X_1X_2	0.009 2	1	0.009 2	0.375 0
	X_1^2	3.17	1	3.17	<0.000 1 **
	X_2^2	2.07	1	2.07	<0.000 1 **
	残差	0.071 9	7	0.010 3	
	失拟项	0.021 0	3	0.007 0	0.673 9
	误差	0.050 8	4	0.012 7	
	合计	4.83	12		
	R^2	0.985 1			
Y_4	模型	1 876.88	5	375.38	0.000 2 **
	X_1	1 488.20	1	1 488.20	<0.000 1 **
	X_2	261.87	1	261.87	0.003 9 **
	X_1X_2	14.82	1	14.82	0.348 6
	X_1^2	111.83	1	111.83	0.028 1 *
	X_2^2	3.14	1	3.14	0.657 9
	残差	102.86	7	14.69	
	失拟项	76.03	3	25.34	0.115 8
	误差	26.82	4	6.71	
	合计	1 979.74	12		
	R^2	0.948 0			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

（$P<0.01$）。滚筒转速对破碎率和单穗脱粒功耗均有极显著影响（$P<0.01$），对脱净率和损失率影响不显著（$P>0.05$）。在破碎率模型中，交互项对其有极显著影响（$P<0.01$）。表明在置信区间 99% 范围内，对回归模型的影响极其显著。其余响应指标中，交互项对其影响不显著（$P>0.05$）。

4 个回归模型决定系数 R^2 分别为 0.935 6、0.986 0、0.985 1 和 0.948 0。校正决定系数 R_{Adj}^2 分别为 0.889 6、0.976 0、0.974 5 和 0.910 9，说明模型对试验数据具有较强的解释能力。各模型变异系数分别为 0.730 1%、2.73%、4.62% 和 5.13%，说明试验误差较小，模型拟合精度较高。

交互作用对脱净率、破碎率、损失率和单穗脱粒功耗的影响，如图 15 所示。由图 15 可知，脱净率随滚筒转速和脱粒间隙增大均呈先升高后降低趋势，滚筒转速较低或脱粒间隙较小时，脱粒元件对谷穗的冲击、搓擦和剥离作用不足，籽粒难以充分脱离；随着转速和间隙增大，谷穗与脱粒元件相对运动和有效接触状态得到改善，脱净率升高；但转速和间隙继续增大时，物料运动稳定性下降，有效脱粒作用减弱，导致脱净率降低。

破碎率随脱粒间隙增大总体升高，随滚筒转速变化幅度相对较小，说明脱粒间隙对籽粒破碎影响更明显；当脱粒间隙较大时，谷穗在脱粒区内受约束程度降低，运动范围增大，易产生不稳定碰撞和重复冲击，增加籽粒破碎风险。

损失率随滚筒转速和脱粒间隙增大呈先降低后升高趋势，表明滚筒转速过低或脱粒间隙过小时，脱粒和分离作用不足，籽粒易随杂余排出；而滚筒转速过高或脱粒间隙过大时，物料运动剧烈或有效接触不足，也会造成损失率升高。

单穗脱粒功耗随滚筒转速和脱粒间隙增大总体升高，这是由于滚筒转速升高增强了脱粒元件对谷穗的冲击和搓擦作用，脱粒间隙增大后完成籽粒脱离所需的有效作用过程增加，提高了脱粒能耗。

为获取最优工作参数组合，基于 Design-Expert 软件进行响应面优化。脱净率 Y_1 反映脱粒作业完成程度和收获效率，设其权重 α 为 0.35；破碎率 Y_2 表征脱粒过程中籽粒完整性，设其权重 β 为 0.25；损失率 Y_3 直接影响籽粒回收效果和作业收益，是综合评价与参数优化的核心指标，设其权重 ε 为 0.40；单穗脱粒功耗 Y_4 反映单位谷穗脱粒过程中能量消耗，为基础效率指标，在保证脱净率较高，破碎率、损失率和单穗脱粒功耗较低的前提下，构建脱粒效果综合评价指标 Q，目标函数设为

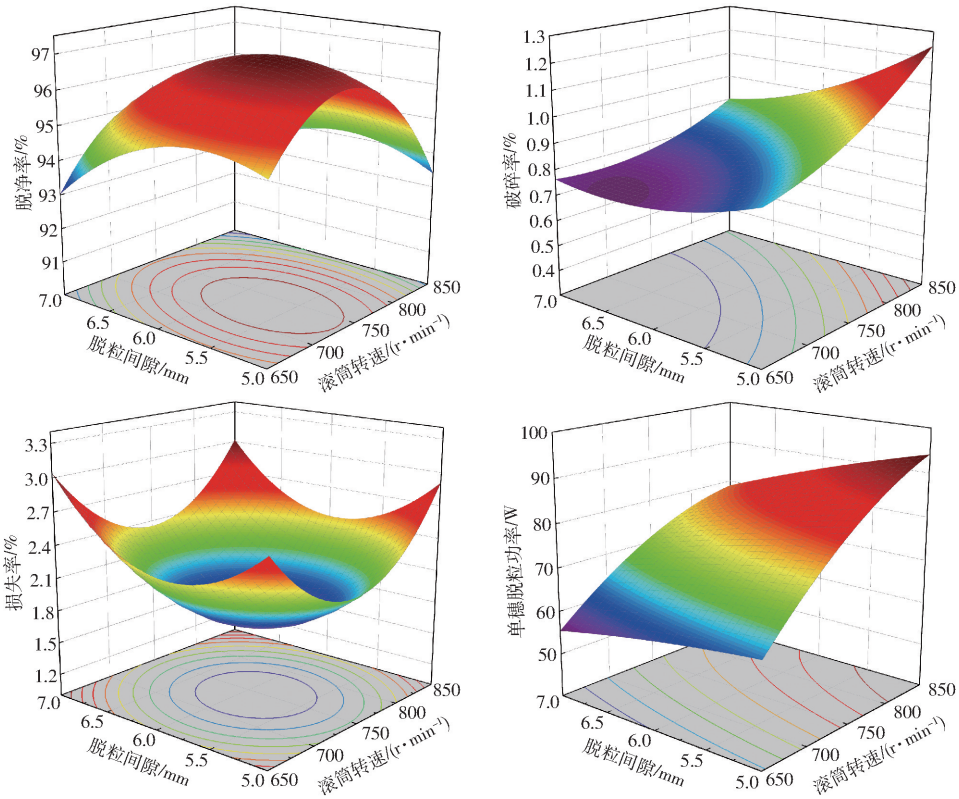


图 15　交互作用对各评价指标影响的响应曲面

Fig. 15　Response surface plots of interaction effects on different evaluation indices

$$\begin{cases} \min Y_4 \\ \max Q \\ Q=\alpha Y_1-\beta Y_2-\varepsilon Y_3 \\ 650\ \text{r/min}\leqslant X_1\leqslant 850\ \text{r/min} \\ 5.0\ \text{mm}\leqslant X_2\leqslant 7.0\ \text{mm} \end{cases} \tag{15}$$

求解得理论最优脱粒装置参数组合为：滚筒转速为 701.512 r/min、脱粒间隙为 6.081 mm，此时，脱净率 Y_1 为 96.397%，破碎率 Y_2 为 0.767%，损失率 Y_3 为 1.629%，单穗脱粒功耗 Y_4 为 69.649 W，综合评价指标 Q 为 32.897 35。各齿型及品种最佳参数组合如表 10 所示。

4.4　验证试验

由于脱粒分离装置工作参数设定精确到小数点后两位难以实现，因此在验证试验中对各品种最优脱粒间隙圆整。验证试验以及评价指标计算方式与试验相同。每种谷子依组合进行 3 次试验，结果如

表 10　各齿型及品种最佳参数组合

Tab. 10　Optimal parameter combinations for different tooth types and varieties

品种	齿型	滚筒转速/(r·min⁻¹)	脱粒间隙/mm	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/W
晋谷 21	仿生元件	701.512	6.081	96.397	0.767	1.629	69.649
	纹杆-仿生	789.870	6.844	95.030	0.902	1.722	67.851
	纹杆	714.412	6.900	93.599	0.689	1.666	64.011
	纹杆-钉齿	712.280	6.838	92.357	0.946	2.128	60.174
	钉齿	713.989	6.903	90.409	0.789	1.916	58.717
张杂 16	仿生元件	714.186	6.893	96.468	0.726	1.568	68.599
	纹杆-仿生	745.581	7.000	94.062	0.733	1.637	66.355
	纹杆	742.947	7.000	93.458	0.736	1.651	65.781
	纹杆-钉齿	745.620	7.000	92.182	0.748	1.670	63.110
	钉齿	745.629	7.000	90.799	0.759	1.795	60.196
同谷 58	仿生元件	713.844	6.877	96.626	0.698	1.552	67.028
	纹杆-仿生	747.954	7.000	94.789	0.730	1.619	65.970
	纹杆	740.970	7.000	94.336	0.727	1.639	62.313
	纹杆-钉齿	743.400	7.000	92.813	0.737	1.657	59.362
	钉齿	742.465	7.000	91.486	0.749	1.686	58.419

表 11 所示。

表 11 仿生元件各品种脱粒效果验证试验

Tab. 11 Verification test of threshing performance of bionic teeth for different varieties

品种	序号	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/W
晋谷 21	1	97.702	0.833	1.711	78.250
	2	96.819	0.840	1.645	76.500
	3	97.890	0.808	1.668	76.500
	平均值	97.470	0.827	1.675	77.083
	标准差	0.572	0.017	0.034	1.010
	相对误差/%	1.11	7.82	2.82	10.67
张杂 16	1	97.984	0.754	1.638	73.750
	2	97.234	0.735	1.598	72.250
	3	98.165	0.763	1.576	75.250
	平均值	97.794	0.751	1.604	73.750
	标准差	0.494	0.014	0.031	1.500
	相对误差/%	1.37	3.49	2.30	7.51
同谷 58	1	97.815	0.740	1.594	71.250
	2	98.401	0.722	1.579	72.000
	3	98.245	0.752	1.570	70.250
	平均值	98.154	0.738	1.581	71.167
	标准差	0.303	0.014	0.012	1.010
	相对误差/%	1.58	5.73	1.87	6.17

由表 11 可知，以晋谷 21 为试验材料时，在最佳参数组合下仿生齿脱净率为 97.470% ±0.572%，破碎率为 0.827% ±0.017%，损失率为 1.675% ±0.034%，单穗脱粒功耗为(77.083 ±1.010) W。与模型预测值相比，脱净率、破碎率、损失率和单穗脱粒功耗相对误差分别为 1.11%、7.82%、2.82% 和 10.67%。张杂 16 和同谷 58 验证试验结果表明，实测值与预测值变化趋势基本一致，3 个品种脱净率相对误差均不超过 1.58%，破碎率和损失率相对误差分别不超过 7.82% 和 2.82%。

模型对脱粒质量指标具有较好的预测精度；单穗脱粒功耗相对误差不超过 10.67%，误差相对较大，主要与谷穗个体差异、喂入状态波动及试验台架传动阻力有关。总体来看，实测结果与理论优化值吻合较好，验证了各品种最佳参数组合及响应面优化模型的可靠性。

5 结论

(1)借鉴骆驼口腔角质化乳突挤搓作用机理，设计仿生元件。确定仿生元件主要结构参数为：下直径 10.94 mm、上直径 4.43 mm、高度 8.25 mm、横向间距 13.29 mm、纵向间距 17.21 mm、倾角 36°。

(2)基于离散元法建立了由穗轴、谷码、枝柄和籽粒组成的柔性谷穗模型，利用颗粒填充与坐标装配法构建谷码内部籽粒空间构型，并完成穗轴-穗轴、穗轴-枝柄和枝柄-籽粒的粘结参数标定。可模拟脱粒过程中籽粒的脱落、飞出与反弹，以及穗轴、枝柄弹性变形和粘结断裂行为。选取脱粒元件类型、滚筒转速和脱粒间隙进行单因素试验，结果表明，仿生元件综合脱粒效果较优，并确定后续响应面优化试验：滚筒转速为 650 ~850 r/min，脱粒间隙为 5 ~7 mm。

(3)响应面试验结果表明，滚筒转速和脱粒间隙对谷子脱粒性能具有显著影响。最佳齿型为仿生元件，最优参数组合为：滚筒转速 701.512 r/min、脱粒间隙 6.081 mm。此时脱净率、破碎率、损失率和单穗脱粒功耗分别为 96.397%、0.767%、1.629% 和 69.649 W。台架试验结果表明，晋谷 21、张杂 16 和同谷 58 实测值与预测值变化趋势基本一致，脱净率、破碎率和损失率相对误差均不超过 1.58%、7.82% 和 2.82%，说明模型对脱粒质量指标具有较好的预测精度；单穗脱粒功耗相对误差不超过 10.67%。

参 考 文 献

[1] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459 -470.
Li Shunguo, Liu Fei, Liu Meng, et al. Development status and future prospects of foxtail millet industry and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459 -470. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社, 2023.

[3] Anitha S, Kane-Potaka J, Botha R, et al. Millets can have a major impact on improving iron status, hemoglobin level, and in reducing iron deficiency anemia: a systematic review and meta-analysis[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 725529.

[4] Bandyopadhyay T, Singh R K, Ramesh P, et al. The promise of millets in the twenty-first century: emphasis on breeding, nutrition, food security and sustainability[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(1): 628 -637.

[5] 钟挺, 胡志超, 顾峰玮, 等. 4LZ -1.0 Q 型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76 -81.
Zhong Ting, Hu Zhichao, Gu Fengwei, et al. Experiment and optimization of threshing and cleaning components of 4LZ -1.0 Q rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76 -81. (in Chinese)

[6] 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)

[7] Kruszelnicka W, Leda P, Tomporowski A, et al. Breakage behavior of corn kernels subjected to repeated loadings[J]. Powder Technology, 2024, 435: 119372.

[8] Looh G A, Xie F, Wang X, et al. Grain kernel damage during threshing: a comprehensive review of theories and models[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2025, 56(1): 1674.
[9] Khawaja A N, Khan Z M. DEM study on threshing performance of "compression-oscillation" thresher[J]. Computational Particle Mechanics, 2022, 9(6): 1233 - 1248.
[10] Hussain S, Lei X, Wu H, et al. Optimizing the design of a multi-stage tangential roller threshing unit using CFD modeling and experimental studies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109400.
[11] Abdeen M A, Wu W, Salem A E, et al. The impact of threshing unit structure and parameters on enhancing rice threshing performance[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 6250.
[12] Powar R V, Aware V V, Patil S B, et al. Development and evaluation of finger millet thresher-cum-pearler[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2019, 44(4): 194 - 206.
[13] Zhao J, Zhao H, Tang H, 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.
[14] 刘策,张浩天,朱俊文,等. 独立电驱清选的高湿小麦脱粒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 82 - 93.
Liu Ce, Zhang Haotian, Zhu Junwen, et al. Design and test of isolated-motor-driven cleaning system for high moisture wheat thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):82 - 93. (in Chinese)
[15] 陈黎卿,朱俊文,刘策,等. 小麦小区育种脱粒装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):72 - 81.
Chen Liqing, Zhu Junwen, Liu Ce, et al. Optimal design and test of wheat plot breeding threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):72 - 81. (in Chinese)
[16] 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(S2):145 - 156. (in Chinese)
[17] Tang Z, Li Y, Zhang B, et al. Controlling rice leaf breaking force by temperature and moisture content to reduce breakage [J]. Agronomy, 2020, 10(5): 628.
[18] 江涛, 李海同, 黄鸣辉, 等. 联合收获机螺旋交错排布式脱粒滚筒设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 314 - 324.
Jiang Tao, Li Haitong, Huang Minghui, et al. Design and experiment of spiral interlaced threshing cylinder for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):314 - 324. (in Chinese)
[19] 康家鑫,王修善,谢方平,等. 大豆联合收获机对称可调式凹板筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 11 - 22.
Kang Jiaxin, Wang Xiushan, Xie Fangping, et al. Design and experiment of symmetrical adjustable concave for soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(2): 11 - 22. (in Chinese)
[20] 刘安稳,谢方平,朱立学,等. 大豆联合收获机脱粒间隙自适应装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 322 - 330,342.
Liu Anwen, Xie Fangping, Zhu Lixue, et al. Design and experiment of adaptive threshing gap device for soybean combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 322 - 330, 342. (in Chinese)
[21] 李心平, 王文哲, 赵高源, 等. 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 113 - 123.
Li Xinping, Wang Wenzhe, Zhao Gaoyuan, et al. Design and experiment of longitudinal axial-flow double flexible rubbing millet threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):113 - 123. (in Chinese)
[22] 李心平, 马磊, 耿令新, 等. 玉米种子仿生脱粒机性能试验与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 62 - 69.
Li Xinping, Ma Lei, Geng Lingxin, et al. Performance test and parameter optimization of bionic threshing machine for corn seeds[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(5):62 - 69. (in Chinese)
[23] 付君, 张屹晨, 陈志, 等. 基于黄牛舌尖丝状乳突结构的仿生脱粒齿形设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 167 - 176.
Fu Jun, Zhang Yichen, Chen Zhi, et al. Design and experiment of bionic threshing tooth shape based on filiform papillae structure of cattle tongue tip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):167 - 176. (in Chinese)
[24] Wang J, Xu C, Guo F, et al. Stripping mechanism and Gaussian distribution model of a concave bionic comb for stripping prior to cutting[J]. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162216.
[25] Thanvi P K, Joshi S, Dangi A, et al. Histomorphological peculiarities of the tongue of Indian dromedary camel (*Camelus dromedarius*)[J]. Journal of Camel Practice and Research, 2024, 31(3): 291 - 300.
[26] Moselhy A A, Ei-Ghazali H M. Gross, histological and electron microscopical features of the hard palate mucosa in the one-humped camel (*Camelus dromedarius*)[J]. Iraqi Journal of Veterinary Sciences, 2023, 37(3): 651 - 657.
[27] 张静, 胡经营, 周正, 等. 高含水率玉米纵轴流脱粒装置刚柔耦合结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2026, 42(1): 58 - 70.
Zhang Jing, Hu Jingying, Zhou Zheng, et al. Design and experiment of rigid-flexible coupling structure of longitudinal axial-flow threshing device for high-moisture corn[J]. Transactions of the CSAE,2026,42(1):58 - 70. (in Chinese)
[28] 滕悦江, 金诚谦, 陈艳普, 等. 稻麦联合收获机分段式脱粒装置设计与优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 1 - 12.
Teng Yuejiang, Jin Chengqian, Chen Yanpu, et al. Design and optimization of segmented threshing device for rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(12):1 - 12. (in Chinese)
[29] Zhou H, Tan H, Shen C, et al. Vibratory threshing mechanism and multi-species threshing parameter testing of wine grapes based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110955.
[30] Liu Y, Li Y, Zhang T, et al. Effect of concentric and non-concentric threshing gaps on damage of rice straw during threshing for combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2022, 219: 1 - 10.
[31] 崔涛,荆茂盛,张东兴,等. 玉米果穗离散元模型构建与脱粒仿真验证[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 33 - 46.
Cui Tao, Jing Maosheng, Zhang Dongxing, et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 33 - 46. (in Chinese)
[32] 方会敏, 牛萌萌, 史嵩, 等. 机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 11 - 18.
Fang Huimin, Niu Mengmeng, Shi Song, et al. Effects of mechanical harvesting methods and grain moisture content on corn harvest quality[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(18):11 - 18. (in Chinese)