doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.006

小麦小区育种脱粒装置优化设计与试验

陈黎卿[1,2]　朱俊文[1]　刘　策[1,2]　张春岭[1,2]　张浩天[1]　蔡增宾[1]

(1.安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2.智能绿色农业装备安徽省联合共建学科重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 针对现有小麦小区育种脱粒机在多穗脱粒作业工况下籽粒破碎率与未脱净率高等问题,基于纹齿-刀齿组合式脱粒元件小区育种脱粒系统,本文开展脱粒元件结构设计与小麦脱粒分离接触力学分析。构建小麦柔性空心茎秆离散元模型,以籽粒未脱净率和破碎率为评价指标,探究脱粒元件前倾角、凸棱宽度和凸棱高度对小麦育种脱粒性能的影响。采用 Box-Behnken 分析方法构建小麦脱粒损失回归模型,确定纹齿-刀齿组合式脱粒元件最优结构参数为前斜角 56°、凸棱宽度 13.9 mm 和凸棱高度 3.4 mm。样机试验结果表明,当滚筒转速 800 r/min、喂入量 15 穗/次时,小麦籽粒未脱净率为 0.71%,破碎率为 0.14%,验证了设计的纹齿-刀齿组合式脱粒系统在小麦多穗育种脱粒作业工况下的有效性与优越性。

关键词: 小麦; 小区育种; 脱粒装置

中图分类号: S225.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0072-10　　**OSID**:

Optimal Design and Test of Wheat Plot Breeding Threshing Device

CHEN Liqing[1,2]　ZHU Junwen[1]　LIU Ce[1,2]　ZHANG Chunling[1,2]　ZHANG Haotian[1]　CAI Zengbin[1]

(1. *College of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*

2. *Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent Green Agricultural Equipment*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of high grain breakage rate and unthreshed grain rate of the existing wheat plot breeding threshing machine under the condition of multi-panicle threshing, a plot breeding and threshing system based on grain-tooth combined threshing element was proposed. Combined with the structure and working principle of the breeding threshing system, the contact mechanical analysis of wheat threshing separation and the structural design of threshing components were carried out. A discrete element model of flexible hollow stems of wheat was constructed, and the effects of the forward inclination angle, ridge width and ridge height of threshing component on the threshing performance of wheat breeding were explored by taking the unthreshed rate and breakage rate of grains as evaluation indexes. The Box-Behnken analysis method was used to construct a regression model of wheat threshing loss, and the optimal structural parameters of the grain-tooth combined threshing component were determined, with front bevel angle of 56°, ridge width of 13.9 mm and ridge height of 3.4 mm. The prototype trial production and test verification showed that when the drum speed was 800 r/min and the feeding amount was 15 ears/time, the unthreshed grain rate of wheat grains was 0.71% and grain breakage rate was 0.14%. The effectiveness and superiority of the grain-tooth combined threshing system designed in wheat multi-panicle breeding and threshing operation were verified.

Key words: wheat; plot breeding; threshing device

0　引言

育种脱粒作为小区育种工作的一个关键环节[1],其脱粒质量直接影响种子品质和种植成活率。为了提升小麦育种脱粒工作效率,育种工作者大多都对多穗小麦同时脱粒,然而,现有小麦小区育种脱粒机在多穗同时脱粒作业时存在籽粒滞留率、破碎率与未脱净率较高问题,制约了育种效率和种

收稿日期: 2025-03-18　修回日期: 2025-04-10

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03-44)

作者简介: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

通信作者: 刘策(1991—),男,讲师,主要从事智能农机装备、结构振动与噪声控制研究,E-mail: liuce@ahau.edu.cn

子质量提升。

国内外学者对小区育种脱粒系统开展了研究。HUSSAIN 等[2]分析小麦育种脱粒滞种问题，设计了籽粒自清洁的脱粒装置；王万章等[3]设计了一种单穗育种电动脱粒机，采用脱粒板实现小麦育种脱粒；戴飞等[4]为提高小麦小区育种脱粒机清机效果，设计了一种纵轴流锥型滚筒脱粒装置；上述研究通过对脱粒装置结构进行优化设计，有效地缓解了小区育种脱粒籽粒滞留问题，然而，对于多穗育种脱粒作业工况下籽粒破碎率和未脱净率的较高问题并未得到有效改善。

为了降低脱粒环节籽粒破碎率与未脱净率，文献[5－7]设计了一种变径脱粒滚筒，通过监测喂入量，采用液压缸对脱粒滚筒直径进行实时调整；LI 等[8]设计了一种纵轴流交错柔性脱粒滚筒，并与旋转圆管式凹板筛协同作用，有效抑制了刚性脱粒元件冲击造成的籽粒破碎问题，实现谷物柔性脱粒；王占滨等[9]设计一种纵轴流柔性锤爪式脱粒滚筒，并配合分段组合式圆凹板，实现对玉米果穗柔性脱粒。上述研究通过对脱粒装置结构优化设计，提升了小麦等作物脱粒性能。众多学者研究脱粒作业参数对脱粒性能的影响，ESMAEIL 等[10]研究了不同转速、含水率以及喂入量对脱粒效率、籽粒损失率和破损率的影响；赵武云等[11]利用响应面分析了喂入量、转速、板齿螺旋角和排芯口压板压力对籽粒破碎率的影响。近年来，随着智能化收获减损技术发展，FAN 等[12－13]设计了脱粒间隙和导叶角的自适应控制算法；OMID 等[14]设计了针对滚筒转速、凹版间隙、风扇转速和收获机行进速度的模糊控制算法。现有研究对于提高作物脱粒性能，降低籽粒破碎率与未脱净率具有指导意义。然而，对于小麦多穗育种脱粒籽粒破碎和未脱净较高问题，研究较少。

本文以降低小麦小区多穗育种脱粒环节籽粒破碎率和未脱净率为目标，构建一种基于纹齿-刀齿组合式脱粒的脱粒装置。通过分析小麦育种脱粒过程力学特性，开展纹齿-刀齿组合式脱粒元件结构参数设计，通过 Hertz－Mindlin with Bonding 黏结接触模型，构建柔性小麦空心茎秆离散元模型，开展小麦多穗育种脱粒离散元仿真，确定脱粒元件最优结构参数，以期提升小麦小区育种脱粒质量与效率。

1　小麦小区育种脱粒机结构与工作原理

小麦小区育种脱粒机结构示意图如图 1 所示，主要由进料口、脱粒滚筒、脱粒元件、凹板筛、风扇、电机、出粮口、出风口及机架构成。其中，脱粒滚筒由钢板制成的中空圆柱形结构，通过两端轴承安放在机架上，其表面装配用于抓取和打击麦穗的脱粒元件，电机通过脱粒滚筒轴承、风扇轴承和电机轴承实现动力传输。

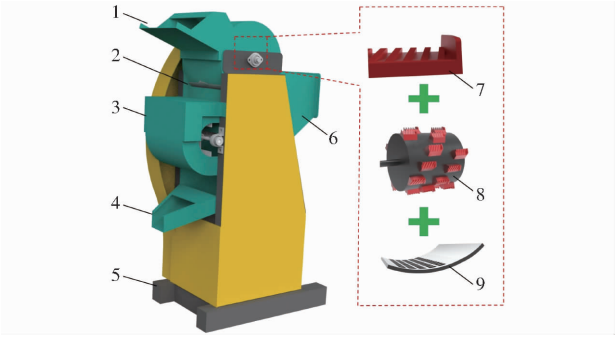

图 1　电动脱粒机整机结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of whole thresher

1. 进料口　2. 外壳　3. 风扇　4. 出粮口　5. 支架　6. 出风口　7. 脱粒元件　8. 脱粒滚筒　9. 凹板筛

小麦小区育种脱粒过程如图 2 所示，小麦植株从物料导入区进入脱粒装置内部，在脱粒分离区受脱粒元件与凹板筛击打、揉搓等作用，产生振动与惯性力，使籽粒与穗秆分离，实现脱粒。脱粒后混合物（包括籽粒、杂质和断穗秆），在离心力作用下从凹板筛落入清选输出区，轻质杂质和断穗秆在风扇作用下从出风口排出，而较重的籽粒则通过出粮口流出，完成小麦脱粒和清选。

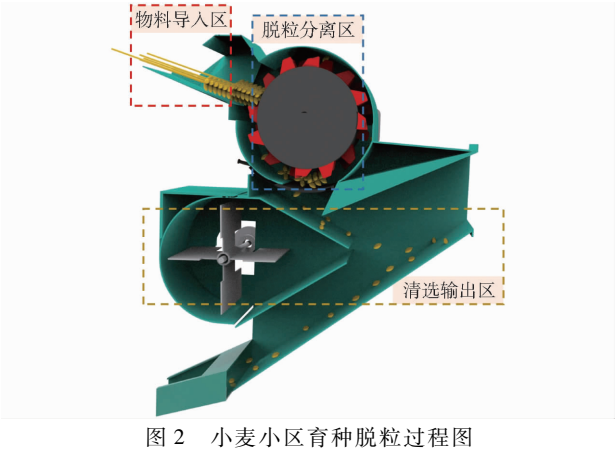

图 2　小麦小区育种脱粒过程图

Fig. 2　Diagram of threshing process in wheat plot

2　关键部件设计

2.1　小麦育种脱粒元件

常用的小麦小区育种脱粒元件有纹齿式和刀齿式两种。考虑到纹齿式脱粒元件具有较大的接触面积，能够有效降低籽粒破碎率，但易缠绕穗秆，导致脱粒不完全，降低脱净率；刀齿式脱粒元件对麦穗的抓取力和冲击力强，籽粒脱净率较高，但易造成籽粒破碎。本文结合纹齿式脱粒元件破碎率低和刀齿式脱粒元件脱净率高优点，参考 A 型纹齿[15]，设计一种纹齿-刀齿组合式脱粒元件，其结构如图 3 所示。

图中 β 为纹齿-刀齿前斜角，M 为凸棱宽度，h 为凸棱高度。

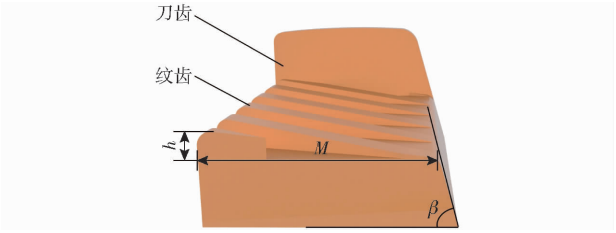

图 3 纹齿-刀齿组合式脱粒元件结构

Fig. 3 Grain - tooth combined threshing element structure

为探究小麦育种脱粒过程中籽粒分离机制，对麦穗和脱粒装置进行简化建模，忽略接触过程中籽粒弹性变形受力，开展籽粒碰撞瞬时受力分析，如图 4 所示。

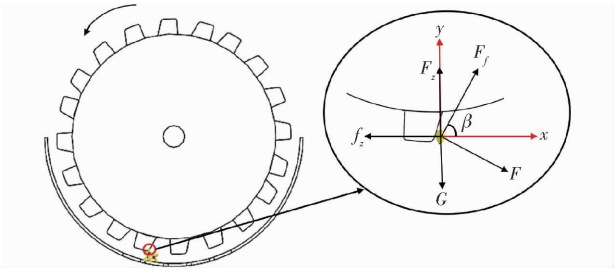

图 4 籽粒碰撞瞬时受力分析

Fig. 4 Instantaneous force analysis of grain collision

在水平及竖直方向对各力进行分解，可得

$$F_x = F\sin\beta + F_f\cos\beta - f_z \tag{1}$$

$$F_y = -F\cos\beta + F_f\sin\beta + F_z - G \tag{2}$$

式中 F——脱粒元件对籽粒击打力，N

F_f——籽粒所受脱粒元件摩擦力，N

F_z——凹板筛对籽粒支持力，N

f_z——籽粒所受凹板筛摩擦力，N

G——籽粒所受重力，N

F_x——籽粒在水平方向上所受的合力

F_y——籽粒在竖直方向上所受的合力

整理可得籽粒所受合力 F_T 为

$$F_T = [F^2 + F_f^2 + f_z^2 + (F_z - G)^2 - 2f_z(F\sin\beta + F_f\cos\beta) + 2(F_z - G)(-F\cos\beta + F_f\sin\beta)]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

其中

$$F_f = \mu F \tag{4}$$

$$f_z = \mu F_z \tag{5}$$

式中 μ——籽粒与钢材摩擦因数

令

$$N = -f_z(F\sin\beta + F_f\cos\beta) \tag{6}$$

$$M = (F_z - G)(-F\cos\beta + F_f\sin\beta) \tag{7}$$

将式(4)、(5)代入式(6)、(7)，对 N 及 M 分别求 β 一阶导数和二阶导数，得

$$N' = \mu F_z F(\mu\sin\beta - \cos\beta) \tag{8}$$

$$N'' = \mu F_z F(\mu\cos\beta + \sin\beta) \tag{9}$$

$$M' = F(F_z - G)(\sin\beta + \mu\cos\beta) \tag{10}$$

$$M'' = F(F_z - G)(\cos\beta - \mu\sin\beta) \tag{11}$$

由式(9)、(11)可知，N''、M''在 $45° \leqslant \beta \leqslant 90°$都恒大于 0，则 $N' + M'$在 $45° \leqslant \beta \leqslant 90°$为增函数。为确定 $N + M$ 增减性，求解 $N + M$ 在端点处一阶导数，即

$$N'_{(45°)} + M'_{(45°)} = \frac{\sqrt{2}}{2}[f_z(\mu^2 - 1) - G(\mu + 1)] \tag{12}$$

$$N'_{(90°)} + M'_{(90°)} = \mu f_z + F_z - G \tag{13}$$

由于 $F_z - G > 0$，则

$$N'_{(45°)} + M'_{(45°)} < 0 \tag{14}$$

$$N'_{(90°)} + M'_{(90°)} > 0 \tag{15}$$

根据微分中值定理，$N + M$ 在 $45° \leqslant \beta \leqslant 90°$为先减后增。即存在最优角度使籽粒碰撞时所受合力最小。

因此，前倾角是影响籽粒碰撞时所受合力的关键结构参数。

由于小麦籽粒与脱粒元件碰撞产生的变形量远小于小麦籽粒尺寸，在脱粒碰撞过程中籽粒发生弹性变形所受作用力时，可将碰撞时接触点视为小麦籽粒中央。根据 Hertz 理论[16-17]接触压应力分布为

$$P_r = \frac{3P}{2\pi C^2}\sqrt{1 - \left(\frac{r}{C}\right)^2} \tag{16}$$

式中 r——到接触点中心的径向距离，mm

P——籽粒与脱粒元件冲击力，N

C——等效接触半径，mm

当 $r = 0$，脱粒元件与小麦籽粒在接触面上的最大冲击力为

$$P_{\max} = \frac{3P}{2\pi C^2} \tag{17}$$

其中

$$C = \sqrt[3]{\frac{3PR_e}{4E}} \tag{18}$$

式中 R_e——籽粒相对脱粒元件的等效曲率半径，mm

E——当量弹性模量，Pa

联立式(17)、(18)得

$$P_{\max} = \left(\frac{6P^3E^3}{\pi^3 R_e}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{19}$$

其中

$$\begin{cases} R_e = \sqrt{R'R''} \\ \dfrac{1}{E} = \dfrac{1-\mu_3^2}{E_1} + \dfrac{1-\mu_4^2}{E_2} \\ \dfrac{1}{R'} = \dfrac{1}{R'_1} + \dfrac{1}{R'_2} \\ \dfrac{1}{R''} = \dfrac{1}{R''_1} + \dfrac{1}{R''_2} \\ R'_2 = \dfrac{d^2}{2H} \\ R''_2 = \dfrac{e^2}{2H} \end{cases} \tag{20}$$

式中　R'——籽粒相对脱粒元件的最大曲率半径，mm

R''——籽粒相对脱粒元件的最小曲率半径，mm

R_1'——脱粒元件在接触区任意法向平面中最大曲率半径，mm

R_1''——脱粒元件在接触区任意法向平面中最小曲率半径，mm

R_2'——籽粒在接触区任意法向平面中最大曲率半径，mm

R_2''——籽粒在接触区任意法向平面中最小曲率半径，mm

E_1——脱粒元件弹性模量，Pa

E_2——籽粒弹性模量，Pa

μ_3——脱粒元件泊松比

μ_4——小麦籽粒泊松比

d——籽粒长轴长度，mm

e——籽粒短轴长度，mm

H——籽粒厚度，mm

最大冲击力 P_{max} 与当量弹性模量、籽粒相对脱粒元件等效曲率半径有关。

在小麦脱粒过程中，当脱粒元件凸棱碰撞击打籽粒时，脱粒元件在接触区的最大曲率半径计算式为

$$\begin{cases} R_1' = \dfrac{\sqrt{M^2 + h^2}}{2} \\ R_1'' = 2\ \text{mm} \end{cases} \tag{21}$$

最小曲率半径为棱边圆角半径。联立式(19)～(21)得

$$P_{max} = \left(\frac{3P^3 E_1^3 E_2^3 (2d^2 + 2H\sqrt{M^2 + H^2})(e^2 + 4H)}{\pi^3 [E_2(1-\mu_3^2) + E_1(1-\mu_4^2)]^3 d^2 e^2 \sqrt{M^2 + H^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{22}$$

由式(22)可知，凸棱宽度、凸棱高度是影响最大冲击力 P_{max} 关键结构参数。

2.2　脱粒元件数量

脱粒元件数量直接影响小麦脱粒性能和工作效率。当脱粒元件数量不足时，减少单位时间内对麦穗揉搓次数，降低小麦脱粒工作效率与脱净率；相反，脱粒元件数量过多，则导致籽粒破碎率升高。根据文献[15]，脱粒元件数量 n 为

$$n = \frac{q(1 - G_s)}{0.6 q_1} \tag{23}$$

当喂入量 q 为 100 g/s 时，单个脱粒元件所能承受的喂入量 q_1 为 3.15 g/s，谷草比 G_s 取 0.55[18]，可得脱粒元件数量 n 为 24。

2.3　脱粒元件排列方式

为提高小麦育种脱粒效果，脱粒元件采用四头螺旋线排布，其中，螺旋线方式布置满足

$$L = \pi D \tan\varphi \tag{24}$$

式中　L——螺旋线导程

D——滚筒圆直径，取 140 mm

φ——螺旋角，取 45°

脱粒元件排列如图 5 所示。

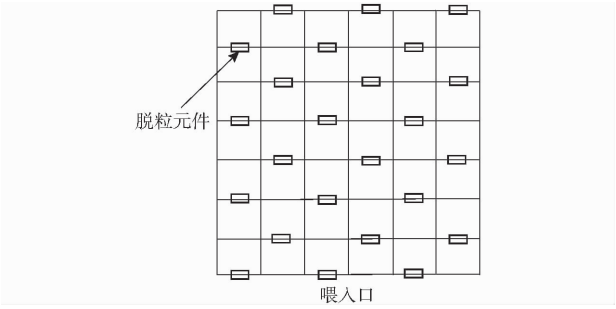

图 5　脱粒元件排布示意图

Fig. 5　Schematic of arrangement of threshing components

2.4　脱粒滚筒结构与参数

为了避免脱粒滚筒发生缠绕，选用闭式脱粒滚筒。滚筒圆直径 D 为[3]

$$D > \frac{360l}{\pi\alpha} \tag{25}$$

式中　l——穗头长度，mm

α——脱粒过程中穗秆所能承受的最大允许包角，取 120°

由于小麦育种脱粒时只需喂入穗头部分，故 l 取 120 mm，根据式(25)计算，D 大于 115 mm，又因小麦育种脱粒采用半喂入方式，喂入量较小，并且物料脱粒时无需沿轴向运动，所以 D 取 140 mm。

2.5　凹板筛结构及参数

在脱粒作业过程中，凹板筛对于提升小麦脱粒性能、降低籽粒破碎率与未脱净率具有重要作用。考虑编织筛既能有效防止籽粒破碎，又能确保良好分离效果与较低的断穗率[15]。选用编织筛脱粒凹板，筛孔尺寸为 11 mm×11 mm。

3　数值模拟

根据上述分析设计，对小麦育种脱粒系统进行三维建模，基于离散元法(Discrete element method，DEM)进行小麦育种脱粒仿真试验，探究纹齿-刀齿组合式脱粒元件最佳结构参数。

3.1　小麦植株模型建立与验证

采用 Solidworks 2022 构建脱粒装置关键部件参数化三维模型，以 step 格式导入 EDEM 软件，设置脱粒滚筒材料属性为钢。由于离散元颗粒模型只能

通过球颗粒聚合的方法生成,并且颗粒模型多球面数量与仿真耗时成正比,因此采用 5 球颗粒构建小麦籽粒多球面聚合离散元模型,穗秆单元球颗粒半径设置为 1.5 mm,接触半径设置为 1.8 mm。采用 Fluent 软件对小麦空心茎秆几何模型进行非结构化网格划分,提取网格节点的三维空间坐标信息;结合局部网格单元特征尺寸,将单元边长值的一半定义为离散颗粒的等效半径,实现颗粒几何参数的定量化映射。随后,将坐标和半径数据集导入 EDEM 软件,通过自定义颗粒生成算法,在对应空间坐标处生成离散元颗粒集合体,最终构建收获期小麦空心茎秆模型。基于小麦植株农学形态学特征,对籽粒、穗秆及茎秆离散元子模块进行三维空间坐标定位,采用 Hertz - Mindlin with Bonding 黏结接触模型[19-20],在茎秆-茎秆、茎秆-穗秆、籽粒-穗秆、穗秆-穗秆之间建立 Bonding 键,构建小麦离散元柔性模型如图 6 所示。

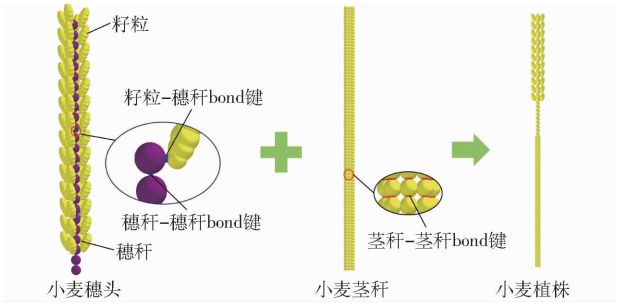

图 6 小麦植株离散元模型

Fig. 6 Discrete element model of wheat plant

基于前期研究并参照文献[3,21-22]确定仿真模型特征参数和黏结参数,如表 1 所示。如图 7 所示,开展堆积角试验[23-24],使用的无底圆筒直径为 70 mm,高为 200 mm。在圆筒底部放置挡板,并使其距离底板 500 mm。在圆筒中放置一定数量的麦穗,移除挡板后,麦穗在重力作用下自由下落,形成堆积。测量麦穗外围轮廓与底板垂直高度,并重复 5 次试验,得到拟合直线斜率平均值为 0.60。根据实际试验条件,在离散元仿真软件中构建几何模型并生成同等数量麦穗,设置重力场和边界条件,模拟麦穗自由下落及堆积过程。通过多次仿真,改变麦穗间摩擦因数,记录堆积轮廓高度并计算拟合直线斜率,得到仿真试验直线斜率平均值为 0.64,仿真试验结果与实际值误差为 5.88%,表明所建立的小麦植株离散元模型可用于后续脱粒仿真试验。

表 1 离散元仿真参数

Tab. 1 Discrete element simulation parameters

材料	参数	数值
钢	泊松比	0.29
	密度/(kg·m^{-3})	7 800
	剪切模量/Pa	7×10^{10}
籽粒	泊松比	0.4
	密度/(kg·m^{-3})	1 210
	剪切模量/Pa	6×10^{7}
穗秆	泊松比	0.25
	密度/(kg·m^{-3})	870
	剪切模量/Pa	4.48×10^{6}
籽粒-穗秆	单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2×10^{10}
	单位面积剪切刚度/(N·m^{-3})	9×10^{9}
	法向临界应力/Pa	2.1×10^{6}
	切向临界应力/Pa	1.9×10^{6}
穗秆-穗秆	单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	1.08×10^{11}
	单位面积剪切刚度/(N·m^{-3})	4.32×10^{10}
	法向临界应力/Pa	5×10^{6}
	切向临界应力/Pa	3.02×10^{6}

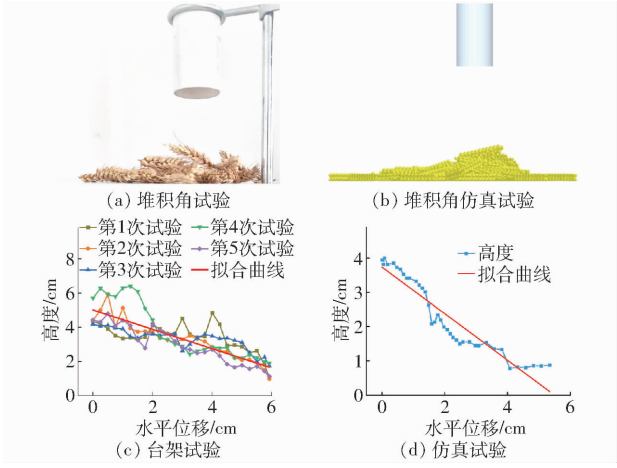

图 7 堆积角图像处理

Fig. 7 Stacked corner image processing

3.2 仿真试验

3.2.1 评价指标

小麦育种脱粒时,当籽粒受到的冲击能量大于最小破碎能时,籽粒发生破碎。为了准确量化籽粒破碎行为,采用 Vogel & Peukert 模型。则小麦单颗籽粒损伤概率模型为[25]

$$S=1-\exp\left(-\left(f_{Mat}K\left(E_i-E_{\min}\right)\right)^{a}\right) \tag{26}$$

式中 f_{Mat}——颗粒材料在外部载荷作用下抗断裂性能参数,取 0.001 46 kg/J[26]

K——对籽粒冲击次数

E_i——籽粒所受冲击能,J/kg

$E_{\min}$——籽粒最小破碎能,取 85.74 J/kg[26]

a——威布尔拟合参数,取 1.62[27]

在小麦脱粒性能评估中,利用损伤概率模型定量分析籽粒损伤风险。结合仿真与试验结果,当小麦籽粒损伤概率等于或超过 88%,即判定该籽粒发生破碎。籽粒未脱净率和籽粒破碎率计算式为

$$Z_1=\frac{m_1}{m_x}\times100\% \tag{27}$$

$$Z_2 = \frac{m_2}{m_x} \times 100\% \tag{28}$$

式中　Z_1——籽粒未脱净率，%

Z_2——籽粒破碎率，%

m_1——未脱净籽粒质量，g

m_2——破碎籽粒质量，g

m_x——籽粒总质量，g

在小麦育种脱粒过程中，籽粒破碎相较于籽粒未脱净所造成的损失更为严重，籽粒破碎直接影响种子质量和小麦后续成活率。因此，根据小麦育种脱粒特性和文献[28－29]，对籽粒未脱净与籽粒破碎重要性进行量化评估，建立小麦小区育种脱粒系统优化目标函数

$$Y = w_1 Z_1 + w_2 Z_2 \tag{29}$$

式中　Y——脱粒损失，%

w_1——籽粒未脱净权重，取 0.3

w_2——籽粒破碎权重，取 0.7

3.2.2　单因素试验

为探究脱粒元件结构参数对小麦育种脱粒性能的影响，结合小麦育种脱粒实际工作情况。当脱粒滚筒转速 900 r/min、凹板间隙 9 mm 和喂入量 15 穗/次时进行单因素试验，以脱粒损失为观测指标，以前斜角(45°～90°)、凸棱宽度(8～17 mm)、凸棱高度(2.0～6.5 mm)为试验因素。

脱粒仿真模型如图 8 所示。仿真时间为 3 s，仿真时间步长为 2×10^{-9} s。脱粒元件结构参数对脱粒损失的影响如图 9 所示。

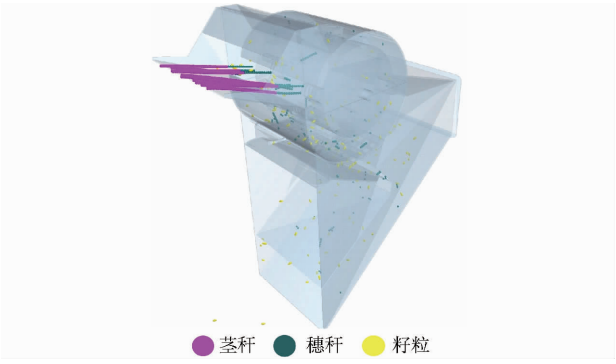

图 8　脱粒仿真模型

Fig. 8　Threshing simulation model

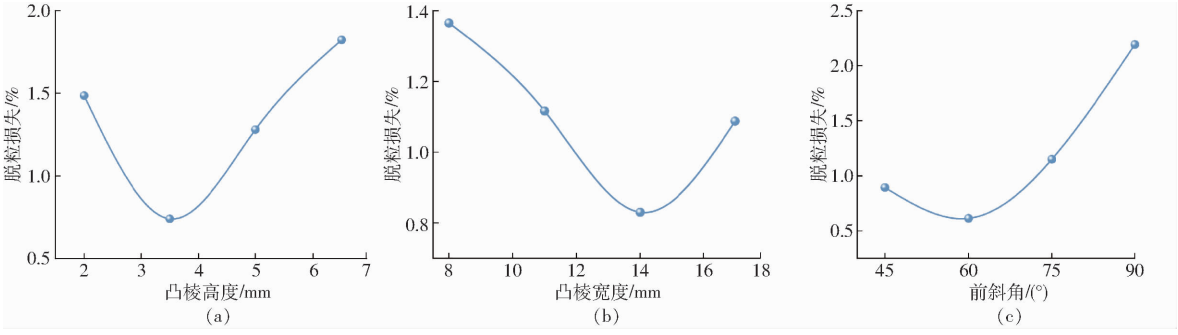

图 9　结构参数对脱粒损失的影响

Fig. 9　Effect of structural parameters on threshing loss

如图 9a 所示，当前斜角为 75°、凸棱宽度为 10 mm 时，随凸棱高度增加，脱粒损失先降低后升高，当凸棱高度增加时，籽粒受到充分挤压和打击，未脱净率减小，脱粒损失降低，随着凸棱高度继续增加，籽粒所受冲击力增加，脱粒损失增大。为此，凸棱高度零水平取 3.5 mm。

如图 9b 所示，当前斜角为 75°、凸棱高度为 3 mm 时，随凸棱宽度增加，脱粒损失先降低后升高，当凸棱宽度增加时，脱粒元件与籽粒的接触面积扩大，籽粒所受冲击力减小，脱粒损失降低；而当凸棱宽度过大时，脱粒元件边缘与籽粒碰撞频率上升，籽粒与脱粒元件有效接触面积减少，籽粒所受冲击力增大，脱粒损失增加。因此，凸棱宽度零水平取 14 mm。

如图 9c 所示，当凸棱宽度为 10 mm、凸棱高度为 3 mm 时，随前斜角增加，脱粒损失先降低后升高，当前斜角增加时，由式(3)可知，籽粒所受合力减小，脱粒损失降低；但当前斜角过大时，为克服滑移，脱粒元件对籽粒的冲击力增大，脱粒损失增加。故前斜角零水平取 60°。

3.2.3　Box－Behnken 响应面试验

根据单因素试验结果，以脱粒元件前斜角、凸棱宽度和凸棱高度为试验因素，以脱粒损失 Y 为评价指标，依据 Box－Behnken 试验原理开展三因素三水平仿真试验[30－31]，试验因素编码如表 2 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Coding of test factors

编码	因素		
	前斜角/(°)	凸棱宽度/mm	凸棱高度/mm
－1	55	12	3.0
0	60	14	3.5
1	65	16	4.0

试验方案设计与结果如表 3 所示，A、B、C 分别为前倾角、凸棱宽度、凸棱高度编码。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test scheme and results

编号	因素			Y/%
	A	B	C	
1	1	-1	0	0.38
2	1	1	0	0.35
3	-1	-1	0	0.31
4	-1	0	-1	0.33
5	1	0	-1	0.36
6	0	-1	1	0.53
7	0	0	0	0.27
8	0	1	-1	0.41
9	1	0	1	0.51
10	0	0	0	0.28
11	-1	1	0	0.27
12	-1	0	1	0.38
13	0	1	1	0.34
14	0	0	0	0.31
15	0	-1	-1	0.31
16	0	0	0	0.28
17	0	0	0	0.30

3.2.4 回归模型建立与方差分析

对上述结果进行方差分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，A、B、C、BC、与 C^2 对脱粒损失影响极显著（$P \leqslant 0.01$），AC、A^2 和 B^2 对脱粒损失影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），一次项对脱粒损失的影响由大到小为 C、A、B。

表 4 回归方程方差分析

Tab. 4 Analysis of variance for regression equations

来源	平方和	自由度	F	P
模型	0.092 4	9	49.39	<0.000 1 **
A	0.012	1	57.79	<0.000 1 **
B	0.003 2	1	15.40	0.005 7 **
C	0.015 3	1	73.67	<0.000 1 **
AB	0	1	0.120 3	0.738 9
AC	0.002 5	1	12.03	0.010 4 *
BC	0.021	1	101.15	<0.000 1 **
A^2	0.001 4	1	6.93	0.033 8 *
B^2	0.001 9	1	8.93	0.020 3 *
C^2	0.033	1	158.66	<0.000 1 **
残差	0.001 5	7		
失拟项	0.000 4	3	0.463	0.723 5
误差	0.001 1	4		
合计	0.093 8	16		

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

利用 Design-Expert 软件开展多元回归拟合分析，剔除不显著项后，建立脱粒损失与各显著因素的回归方程

$$Y = 0.288 + 0.039A - 0.020B + 0.044C + 0.025AC - 0.073BC + 0.019A^2 + 0.021B^2 + 0.089C^2 \quad (30)$$

由表 4 可知，脱粒损失的回归模型极显著（$P \leqslant 0.01$），失拟项不显著（$P > 0.05$），说明所建立的脱粒损失回归方程具有高度可靠性，可用于开展脱粒元件结构参数最优组合匹配设计。

3.2.5 交互作用对试验指标影响

为探究脱粒元件前倾角、凸棱宽度、凸棱高度交互作用对脱粒损失的影响，通过 Design-Expert 软件构建响应面曲面模型，如图 10 所示。由图 10a 可知，当前倾角一定时，凸棱高度增加，籽粒受到的挤压和打击效果增强，未脱净率降低，脱粒损失降低，而随凸棱高度继续增加，籽粒受到过度挤压和打击，脱粒损失增大；当凸棱高度一定时，随前斜角增加，籽粒为克服滑移，受到脱粒元件的冲击力增大，脱粒损失增加。二者交互结果对脱粒损失影响显著且凸棱高度影响更明显。由图 10b 可知，当凸轮高度一定时，增加凸棱宽度会扩大脱粒元件与籽粒的接触面积，降低籽粒所受冲击力，脱粒损失减小，而随凸棱宽度继续增加，脱粒元件边缘对籽粒的撞击频率上升，增加籽粒所受冲击力，脱粒损失增大；当凸棱宽度一定时，随凸棱高度增加脱粒损失先减小后增大。凸棱高度变化引起脱粒损失变化幅度大于凸棱宽度。

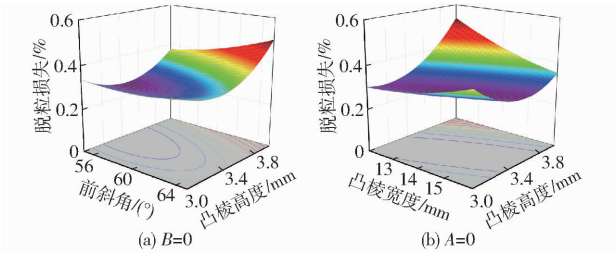

图 10 各因素交互作用对籽粒脱粒损失的影响

Fig. 10 Effect of interaction of various factors on grain threshing loss

3.2.6 脱粒元件结构参数匹配优化设计

根据所构建脱粒损失回归方程，以籽粒脱粒损失最小为优化目标，以脱粒元件前倾角、凸棱宽度、凸棱高度为优化变量，对脱粒元件结构参数进行寻优求解，其目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

利用 Design-Expert 软件对脱粒元件结构参数开展优化设计，得到脱粒元件最优结构参数组合为前斜角 56°、凸棱宽度 13.9 mm 和凸棱高度 3.4 mm，此时籽粒脱粒损失预测值为 0.27%。

4　试验验证

4.1　试验设计

为确定滚筒转速、喂入量等工作参数对所设计的脱粒机脱粒性能的影响，根据脱粒元件最优结构参数，以籽粒破碎率及未脱净率为评价指标，开展小麦育种脱粒试验。

4.2　试验材料与方法

试验于 2024 年 8 月 20 日在安徽农业大学机电园开展，如图 11 所示，所选用小麦品种为中麦 69，参照文献[32]，凹板间隙为 9 mm。将杂余袋套在出风口，在脱粒机运行稳定后将收获期小麦从喂入口放入，脱粒完成后收集集粮盘和杂余袋籽粒，利用电子秤（精度 0.01 g）分别对未脱净籽粒质量、破碎籽粒质量和籽粒总质量进行称量。



图 11　样机试验

Fig. 11　Prototype test

1. 脱粒元件　2. 凹板筛　3. 电子秤　4. 集粮盘　5. 杂余袋　6. 小麦

4.3　试验结果与分析

4.3.1　滚筒转速对脱粒性能的影响

如图 12 所示，当喂入量为 15 穗/次时，随滚筒转速增加籽粒未脱净率逐渐降低，破碎率先减小后增加，当转速为 800 r/min 时，籽粒破碎率最低。随滚筒转速增加，脱粒元件对籽粒击打力增大，籽粒更易与穗秆分离，因此未脱净率降低，同时，过大的击打力会造成破碎率增大。

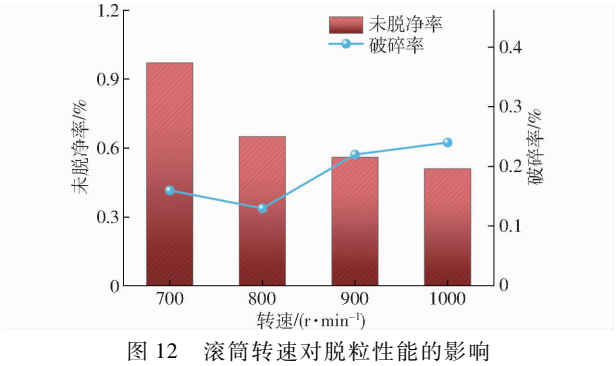

图 12　滚筒转速对脱粒性能的影响

Fig. 12　Effect of drum speed on threshing performance

4.3.2　喂入量对脱粒性能的影响

如图 13 所示。当滚筒转速 800 r/min 时，随喂入量增加籽粒未脱净率逐渐升高，但整体呈极低水平，未脱净率均低于 1%；破碎率的变化相对较小，当 15 穗/次时破碎率最低。当喂入量较大时，脱粒元件与籽粒接触不充分，降低脱粒元件的脱粒强度，未脱净率增加。

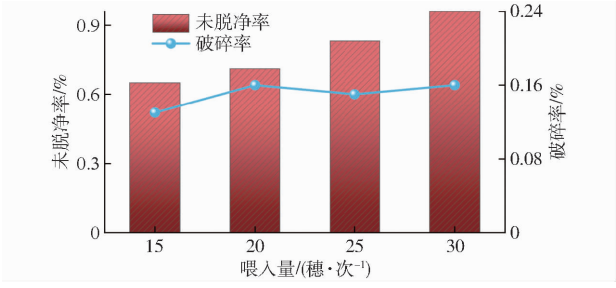

图 13　喂入量对脱粒性能的影响

Fig. 13　Effect of feed rate on threshing performance

4.4　试验结果对比

当滚筒转速 800 r/min、喂入量 15 穗/次时，对纹齿-刀齿组合式小麦小区育种脱粒机进行多穗同时脱粒试验，对比传统刀齿式小麦小区育种脱粒机脱粒性能。籽粒未脱净率及破碎率如表 5 所示，脱粒效果如图 14 所示。

表 5　纹齿-刀齿组合式与传统刀齿式小麦小区育种脱粒机性能对比

Tab. 5　Comparison of performance of grain-tooth combined and traditional knife-tooth wheat plot breeding thresher　%

小麦小区育种脱粒机类型	未脱净率	破碎率
传统刀齿式	3.49	0.37
纹齿-刀齿组合式	0.71	0.14

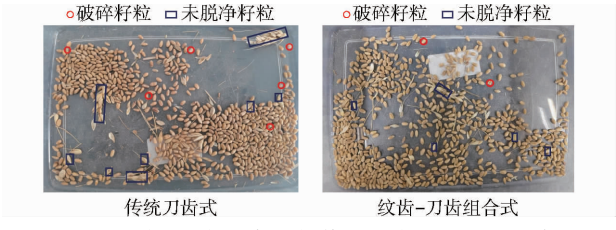

图 14　纹齿-刀齿组合式与传统刀齿式小麦小区育种脱粒机脱粒效果对比

Fig. 14　Comparison of threshing effect of grain-tooth combined and traditional knife-tooth wheat plot breeding thresher

由表 5 可知，纹齿-刀齿组合式小麦小区育种脱粒机相较于传统刀齿式小麦小区育种脱粒机均降低了籽粒未脱净率和破碎率。小麦小区育种脱粒机未脱净率为 0.71%，破碎率为 0.14%，较传统刀齿式小麦小区育种脱粒机未脱净率下降 2.78 百分点，破碎率下降 0.23 百分点，表明纹齿-刀齿组合式脱粒装置具有较低的未脱尽率和破损率，拥有更好的小麦脱粒性能。

5 结论

(1)设计了一种纹齿-刀齿组合式脱粒装置,明确脱粒元件前倾角、凸棱宽度和凸棱高度是影响小麦育种脱粒损失的关键结构参数。

(2)构建了小麦脱粒动力学模型,探究脱粒元件关键结构参数对脱粒性能的影响,采用 Box-Behnken分析方法开展关键影响参数匹配设计,结果表明,当前斜角 56°、凸棱宽度 13.9 mm 和凸棱高度 3.4 mm 时,籽粒脱粒损失预测值为 0.27%。

(3)所设计的纹齿-刀齿组合式小麦小区育种脱粒机,当滚筒转速 800 r/min、喂入量 15 穗/次时,相较于传统刀齿式小麦小区育种脱粒机,小麦籽粒未脱净率下降 2.78 百分点,破碎率下降 0.23 百分点,拥有更好的脱粒性能。

参 考 文 献

[1] 张海军, 韩正晟, 王丽维. 小区种子收获机械的研究现状与发展[J]. 湖南农业科学, 2008(6): 102-104,139.
ZHANG Haijun, HAN Zhengsheng, WANG Liwei. Present researching status and development of pot seed harvesting machinery [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2008(6): 102-104,139. (in Chinese)

[2] 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.

[3] 王万章, 吴淑江, 李从鹏, 等. 小麦育种单穗电动脱粒机设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(2): 259-268.
WANG Wanzhang, WU Shujiang, LI Congpeng, et al. Design and experiment of single ear electric thresher for wheat breeding [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024, 58(2): 259-268. (in Chinese)

[4] 戴飞, 高爱民, 孙伟, 等. 纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 74-78.
DAI Fei, GAO Aimin, SUN Wei, et al. Design and experiment on longitudinal axial conical cylinder threshing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 74-78. (in Chinese)

[5] LIU Y, LI Y, DONG Y, et al. Development of a variable-diameter threshing drum for rice combine harvester using MBD-DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106859.

[6] 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.

[7] SU Z, LI Y, DONG Y, et al. Simulation of rice threshing performance with concentric and non-concentric threshing gaps[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 270-284.

[8] LI X, ZHANG W, WANG W, et al. Design and test of longitudinal axial flow staggered millet flexible threshing device[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1179.

[9] 王占滨, 王振伟, 张银平, 等. 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 109-117.
WANG Zhanbin, WANG Zhenwei, ZHANG Yinping, et al. Design and test of longitudinal axial flexible hammer-claw corn thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 109-117. (in Chinese)

[10] ESMAEIL C, SHMSOLLAH A, HMIDREZA G. Designing, fabrication and evaluation of threshing unit edible sunflower[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2019, 21(2): 52-58.

[11] 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)

[12] FAN C, ZHANG D, YANG L, et al. Power consumption and performance of a maize thresher with automatic gap control based on feed rate monitoring[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 147-164.

[13] FAN C, ZHANG D, YANG L, et al. Development and performance evaluation of a guide vane inclination automatic control system for corn threshing unit based on feed rate monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106745.

[14] OMID M, LASHGARI M, MOBLI H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7080-7085.

[15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上下)(精)[M]. 北京: 农业科技出版社, 2007.

[16] 徐立章, 李耀明, 丁林峰. 水稻谷粒与脱粒元件碰撞过程的接触力学分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 146-149.
XU Lizhang, LI Yaoming, DING Linfeng. Contacting mechanics analysis during impact process between rice and threshing component[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 146-149. (in Chinese)

[17] 何思明, 吴永, 李新坡. 颗粒弹塑性碰撞理论模型[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 19-24.
HE Siming, WU Yong, LI Xinpo. Theoretical model on elastic-plastic granule impact[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 19-24. (in Chinese)

[18] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87.
ZHANG Fuchun, ZHU Zhihui. Harvest index for various crops in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23:(2) 83-

87.（in Chinese）

[19] LI Xiaoyu, DU Yuefeng, LIU Lei, et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106722.

[20] 宋学锋，戴飞，史瑞杰，等. 基于非球形颗粒模型的胡麻脱粒物振动分选仿真与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(10)：39－46.
SONG Xuefeng, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Simulation and experiment of the vibration separation of flax threshing material using non-spherical particles model[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 39－46.（in Chinese）

[21] FAN J, WANG H, SUN K, et al. Experimental verification and simulation analysis of a multi-sphere modelling approach for wheat seed particles based on the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2024, 245: 135－151.

[22] SUN K, YU J, ZHAO J, et al. A DEM-based general modeling method and experimental verification for wheat plants in the mature period[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108283.

[23] 王万章，刘婉茹，袁玲合，等. 基于 EDEM 的收获期小麦植株离散元参数标定[J]. 河南农业大学学报，2021，55(1)：64－72.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Calibration of discrete element parameters of wheat plants at harvest period based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 64－72.（in Chinese）

[24] 谭云峰. 基于 4LZ－1.6Z 型大豆联合收获机脱粒装置的设计与试验[D]. 雅安：四川农业大学，2023.
TAN Yunfeng. Design and experiment of threshing device based on 4LZ－1.6Z soybean combine harvester [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023.（in Chinese）

[25] PAGES C Z, WASSGREN C, AMBROSE R P K. Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels[J]. Biosystems Engineering, 2022, 224: 16－33.

[26] 张超，刘海芃，张野，等. 小麦籽粒 Ab－T10 破碎模型参数标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2024，45(1)：117－123.
ZHANG Chao, LIU Haipeng, ZHANG Ye, et al. Parameter calibration of wheat grain Ab－T10 crushing model[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 117－123.（in Chinese）

[27] VOGEL L, PEUKERT W. Breakage behaviour of different materials—construction of a mastercurve for the breakage probability [J]. Powder Technology, 2003, 129:101－110.

[28] 田锡箴，于美玲. 不同脱粒方式对小麦种子质量的影响[J]. 内蒙古农业科技，1994(3)：7－8.
TIAN Xizhen, YU Meiling. Effect of different threshing methods on wheat seed quality[J]. Journal of Northern Agriculture, 1994(3): 7－8.（in Chinese）

[29] 付君. 小麦机械脱粒降损增效机理及其关键部件仿生研究[D]. 长春：吉林大学，2016.
FU Jun. Bionic research on mechanism of damage reduction and efficiency increase of mechanical threshing of wheat and critical components[D]. Changchun: Jilin University, 2016.（in Chinese）

[30] 王飞，阿力木·买买提吐尔逊，张俊三，等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：135－147.
WANG Fei, ALIMU Maimaitituersun, ZHANG Junsan, et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 135－147.（in Chinese）

[31] 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）

[32] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 脱粒机试验方法：GB/T 5982—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2018.