

基于EDEM的窝眼轮小麦精量排种器的设计和优化探讨

覃怀贤, 杨柳鹏, 冯彩丽

广西师范大学职业技术师范学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年1月20日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月28日

摘 要

排种器的型孔、导种装置及转速是制约小麦播种效率的关键。该研究针对传统的排种器缺少导种过程以及存在机械化程度不高、播种精度低、工作效率低、型孔样式单一等缺陷, 达不到精密播种的问题。设计了一款窝眼轮小麦精量排种器, 阐述了排种器的基本原理, 对关键零部件进行设计, 通过离散元仿真分析方法, 分析得出最佳型孔样式、导种装置的可行性、扰种环倾角角度, 得出最优参数为型孔样式为椭球形, 导种装置有利于排种运动, 扰种环倾斜角度为 45° 。

关键词

离散元, 排种器, 窝眼轮

Exploration on the Design and Optimization of Precision Wheat Metering Device with Concave Wheel Based on EDEM

Huaxian Qin, Liupeng Yang, Caili Feng

Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Received: Jan. 20th, 2025; accepted: Feb. 20th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

The holes, guiding devices, and rotational speed of the seeder are key factors that restrict the efficiency of wheat sowing. This study aims to address the shortcomings of traditional seeders, such as the lack of seeding process, low mechanization level, low seeding accuracy, low work efficiency, and single-hole style, which cannot achieve precision seeding. A concave wheel wheat precision seeder was designed, and the basic principle of the seeder was explained. The key components were designed,

文章引用: 覃怀贤, 杨柳鹏, 冯彩丽. 基于 EDEM 的窝眼轮小麦精量排种器的设计和优化探讨[J]. 农业科学, 2025, 15(2): 188-199. DOI: 10.12677/hjas.2025.152023

and the optimal hole style, feasibility of the seeding device, and inclination angle of the disturbance ring were analyzed through discrete element simulation analysis. The optimal parameters were determined to be an elliptical hole style, a seeding device that facilitates seeding motion, and a disturbance ring inclination angle of 45° .

Keywords

Discrete Element Method, Seed Metering Device, Concave Wheel

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

小麦是我国传统的主要粮食作物之一，也是我国人口众多的北方地区的主食，其消费量占全国粮食消费总量的一半以上。然而，传统的排种器依旧存在许多问题，漏播、少播、生产效率低，因此，推广小麦高精度机械化排种，对提高小麦播种生产率具有重要意义。小麦种粒的形状复杂、尺寸差距过大，使用传统排种器进行大规模种植时会造成堵孔、塞孔的情况[1]。该研究针对传统的排种器播种精度低、工作效率低、型孔样式单一等问题进行研究，设计并优化了一种窝眼轮小麦精量排种器，以期解决传统排种器存在的问题。针对小麦种粒形状不规则、尺寸不一导致播种精度低的问题，本文提出一种窝眼轮小麦精量排种器，通过设计动力系统和运用 EDEM 离散元进行仿真分析，研究不同形状的小麦种粒在排种过程中的影响因素，确定最佳精量排种参数。

2. 整机结构与工作原理

2.1. 取种装置结构

排种器装置的三维模型图如图 1 所示，窝眼轮小麦精量排种器主要由前壳体、后壳体、清种毛刷、导种装置、主动轴、从动轴、链轮组等组成，窝眼式排种轮固定在主动轴上，中心孔与主动轴配合，从动轴与清种毛刷中心的孔配合，主动轮与从动轮通过链轮组连接。前后的壳体通过螺栓连接。护种板起到保护种子的作用，种子从固定在排种器右上端的充种口进入开始排种运动。

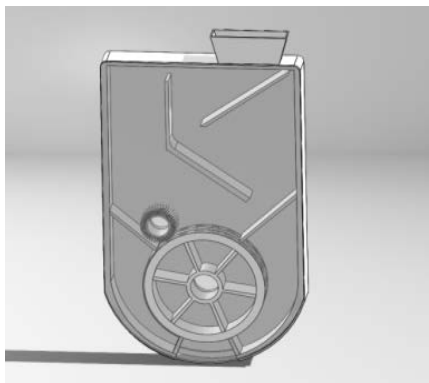
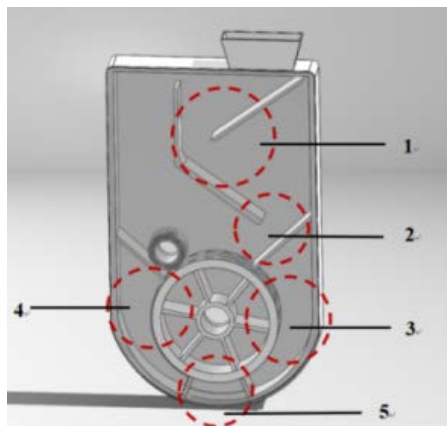


Figure 1. Schematic diagram of the structure

图 1. 结构示意图

2.2. 工作原理

排种器的工作过程见图2。装置的动力由电机提供，排种器工作时，动力由电机输入到主动轴，带动排种轮进行转动，主动轴经链轮组将动力传递给从动轴，带动清种毛刷转动。种子在进入导种区后经过三层导种板装置，随即进入充种区，窝眼轮的转动以及扰种环扰动小麦种子，种子在重力与种间作用力的共同作用下充入型孔，清种毛刷凭借与排种轮的速度差将型孔周围的种子清除；进入型孔内的种子在护种板的保护下经过携种区到达排种点，种子在重力的作用下下落；排种轮继续转动，空程区的型孔进入充种区完成下一次充种，整个排种过程完成。



注：1：导种区；2：充种区；3：携种区；4：落种区；5：空程区。

Figure 2. The working process of the seed sorter

图2. 排种器的工作过程

3. 关键零部件设计

3.1. 导种装置的设计

针对传统机械式小麦排种器存在种群堆积、充种不均匀的问题，本研究在种箱内加装导种板，导种板结构为交叉导流式。在播种作业时，小麦种子在重力作用下落入导种区域，先后经过输入导种板和匀种导种板，在种室内以“Z”形流动，最终经过填充导种板成功填充入型孔内。输入导种板将大量随机分布的种子平铺在输入导种板的末端；匀种导种板将输入导种板落下的小麦种层薄化；充填导种板使小麦种子的流动更稳定并在充填区形成均匀种层[2]。由于种箱内设置了多层交叉导种板，可有效地控制种箱内的种子流动，种子流从上到下，由厚变薄，排种量得到有效控制。

其中，导种板的设计参数会对小麦种子在种箱中的流动产生影响，这进一步会对种子在排种轮中的填充过程造成影响，在设计阶段，如果导种板之间的距离设置得过宽，可能会导致大量种子在充种区内累积；当间距过于狭窄时，可能会导致结拱和堵塞的情况发生[3]。

当导种板间隙过小时，小麦种子易在流出口出现结拱堵塞。即：导种板间距 L 达特定临界点，种子的板间流动受干扰，出现结拱断流，影响充种区种子的供应。当板间距 L 太宽时，因无阻碍，种子会迅速流向充种区，并在此处积累大量的种子。在这种情况下，累积的种子可能会互相挤压和摩擦，从而导致种子受损[4]。

因此，在设计种箱的整体尺寸时，必须充分考虑到这一因素所带来的影响，导种板临界间距，可由散体力学和无限长缝隙型孔成拱理论[5]展开近似推导，导种板间隙临界结拱情况如图3。

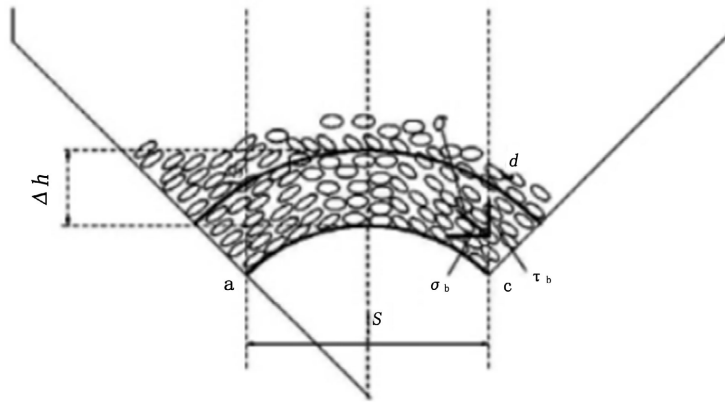


Figure 3. Critical arching situation
图 3. 临界结拱情况

在结拱颗粒层,以竖直平面ab和cd与主应力轨迹线构成的表面ac和bd取单元体abdc, cd面合应力 σ ,可分解为正应力 σ_b 和切应力 τ_b 。设孔面积为 A , 周长为 L , 切应力沿孔周长近似为常数, 一个稳定拱的力平衡方程为:

$$A\Delta h\rho g = L\Delta h\tau_b \quad (1)$$

式中: Δh ——单元体高, m; ρ ——颗粒容积密度, kg/m^3 ; g ——自由落体加速度, m/s^2 。

设孔边缘所有点均在临界平衡状态, 由莫尔应力圆法, 有:

$$\tau_b = \tau_0(1 + \sin \varphi) \quad (2)$$

式中: τ_0 ——颗粒初始剪应力, P_a ; φ ——颗粒内摩擦角。

流出口为矩形, 设流出口间隙宽为 s , 长为 L , 由公式(1)和(2)得:

$$s = \frac{2\tau_0 l(1 + \sin \varphi)}{l\rho g - 2\tau_0(1 + \sin \varphi)} \quad (3)$$

在散体力学和其他相关领域的研究中, 通常关注的是粉尘状或微小的粒子, 不考虑它们的体积[6]。但考虑到本研究中小麦种子的颗粒体积相对较大, 因此其体积因素应被纳入考虑, 故临界结拱间隙应为:

$$s = \frac{2\tau_0 l(1 + \sin \varphi)}{l\rho g - 2\tau_0(1 + \sin \varphi) + w} \quad (4)$$

式中: w ——物料颗粒最大尺寸, mm。

因此, 在处理长方形的出流口时, 我们只需要确定长度 l , 然后通过式(4)的计算来确定最大的结拱距离 s 。因此, 在进行导种板设计的过程中, 板间的极限结拱的间距 L 应当被设定为:

$$L = \frac{\tau_0(l - 4 - 2w)(1 + \sin \varphi) + l\rho g(2 + w)}{\sin 45^\circ [2l\rho g - 4\tau_0(1 + \sin \varphi)]} \quad (5)$$

从公式(4)中我们可以观察到, 在确定颗粒特性的情况下, φ 、 τ_0 、 ρ 以及 w 的数值都是可以确定的, 但 s 仅与矩形流出口的长度有关。

由公式(5)计算和实际尺寸范围可近似确定 10~50 mm 的范围, 当粒子为小麦种子, 矩形孔长 l 与极限间距 s 之间存在一个反比关系。导种装置设计情况最终如图 4 所示。

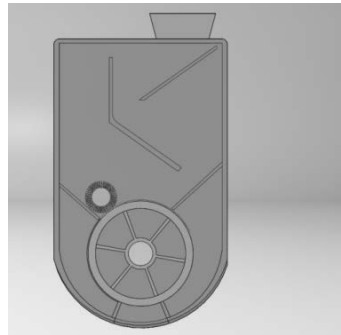


Figure 4. Design of seed guide device
图 4. 导种装置设计情况

3.2. 扰种环的设计

在种籽进入型孔的阶段，种籽的移动性质和行进路线是一个关键因素[7]。在小麦的型孔轮之间添加搅种环能够增强种群的干扰，并为种子的行动提供方向性指导，从而助力种子更好地进入型孔中。

考虑到排种器的完整设计，已经决定将搅种环的底部宽度设为 10 mm。为了能够有效地搅动种群，搅种环的斜面长度应该超过小麦种子长度的最大界限，同时种子与搅种环之间的摩擦角度 θ_h ，应该比种子与型孔轮之间的静摩擦角 φ 更为明显。所以，我们遵循的搅种环的尺寸对应的公式是这样的：

$$\begin{cases} \theta_h < \varphi \\ \frac{d_w}{2 \cos \theta_h} \geq L_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中： d_w ——搅种环截面底宽，mm； θ_h ——搅种环倾角，°。

通过公式(6)我们可以得知，在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内， $\cos \theta_h$ 呈单调递减趋势，因此摩擦角 θ_h 应当低于 48° 。在确保种子导种效果并增强种子流动性的基础上，设计搅种环的倾斜角度应在 30° 至 48° 之间。考虑到型孔的轴向间隔和小麦的最大长度，本研究为搅种环的斜面设计了 45° 的倾角。为了减少种子受损的几率，我们对搅种环的截面顶点进行了圆角加工。

4. 基于离散元的取种装置模拟取种性能参数仿真

4.1. 小麦种子离散元模型的建立

EDEM 是一个专门用于离散元分析(DEM)的软件工具，它采用离散元技术来模拟和研究颗粒材料以及颗粒系统的各种行为模式。能模拟颗粒各种物理行为，有助于优化颗粒系统的行为模式[8]。

种子自身的物理特性是排种器设计的重要参考依据[9]。由于小麦种子尺寸是不规则的，且个体尺寸差异大，因此将小麦简化为类似椭球的几何体，选取济麦 22 为研究对象，经测量所得的小麦种子尺寸参数见表 1。

Table 1. Wheat seed size parameters
表 1. 小麦种子尺寸参数

项目	长(mm)	宽(mm)	厚(mm)
最大值	7.39	4.21	3.59
最小值	5.20	2.52	2.51
平均值	6.19	3.36	3.05

小麦种子颗粒模型采用 5 个球体填充而成，并通过软件计算大蒜种子模型的质心和重量。建立好的小麦种子离散元模型如图 5 所示。

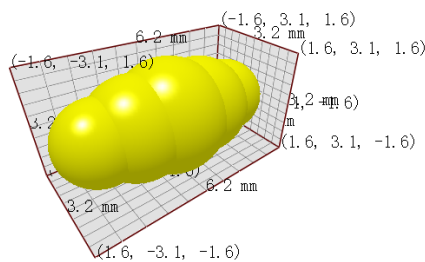


Figure 5. Discrete meta-model of wheat seeds
图 5. 小麦种子离散元模型

4.2. 取种装置离散元模型的建立

在软件前处理界面导入在 SOLIDWORKS 中建模好的窝眼轮排种器模型的 stp 格式文件如图 6 所示。

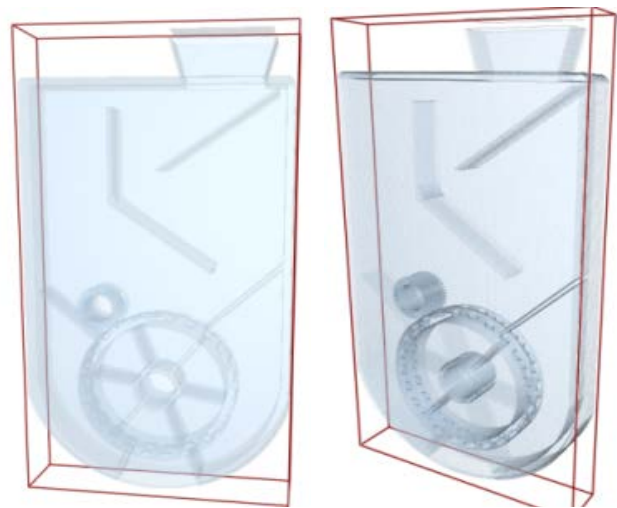


Figure 6. Virtual simulation model of a precision wheat metering device with a concave wheel
图 6. 窝眼轮小麦精量排种器虚拟仿真模型

为了模拟现实情况下的排种器排种运动，对模型中的几何体设置参数，设定后壳体和扭转弹簧材料为钢，前壳体和排种轮材料为丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚物(ABS)，刮种毛刷材料为尼龙 66。仿真模型中材料属性和接触属性设置参考文献[10][11]，材料属性见表 2 和表 3。接触模型选择 Hertz-Mindlin (no slip)。

Table 2. Simulation model material properties
表 2. 仿真模型材料属性

材料	泊松比	剪切模量(MPa)	密度(kg/m ³)
小麦	0.42	501	1350
ABS	0.394	318.9	1020
钢	0.3	7×10^4	7800
尼龙 66	0.2	3.2×10^3	1140

Table 3. Simulation model material contact parameters
表 3. 仿真模型材料接触参数

材料 - 材料	碰撞恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
小麦 - 小麦	0.42	0.53	0.07
小麦-ABS	0.51	0.55	0.05
小麦 - 钢	0.50	0.20	0.01
小麦 - 尼龙 66	0.40	0.50	0.20

4.3. 仿真过程分析

刘涛团队使用 EDEM 软件对三种具有不同孔型结构的窝眼式排种器进行离散元模拟分析和验证，如图。研究结果指出，孔型结构显著影响种子群扰动，扰动越大，充种性能越出色。尤其在转速范围为 10~50 r/min 的情况下，30°倒角窝眼轮合格指数最高[12]。仿真实验主要围绕排种器的型孔形状、导种装置、扰种环对充种性能的影响，采用控制变量法进行仿真。

5. 结果分析

5.1. 型孔形状对充种性能的影响

关于窝眼轮的参数设计，为提升小麦种子的充种率并验证椭球形型孔在充种性能上的优势，选择了圆柱形、圆弧形和椭球形三种不同型孔的排种轮模型进行仿真实验，如图 7 所示。

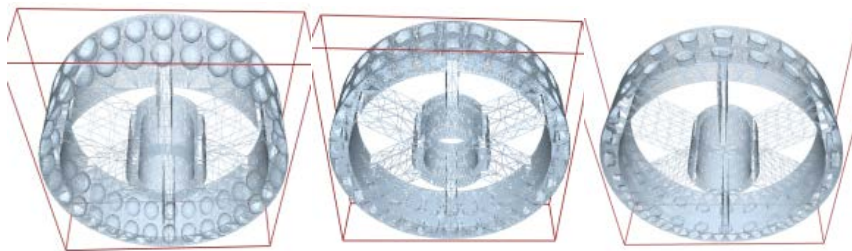


Figure 7. Models of seed wheels under different types of holes
图 7. 不同类型型孔下的排种轮模型

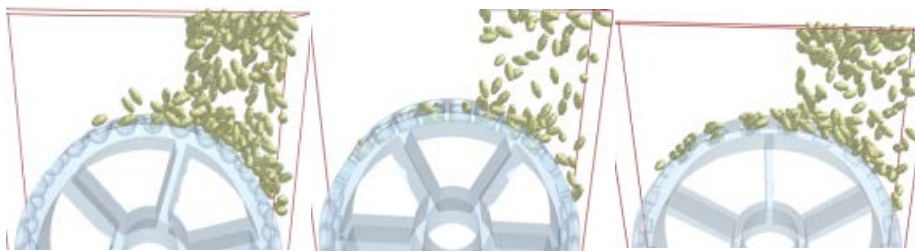


Figure 8. Simulation process of seed wheel filling under different types of holes
图 8. 不同型孔下的排种轮充种模拟过程

通过观察三种不同类型型孔下的排种轮充种运动情况，如图 8 所示。

圆弧形型孔在充种过程中容易造成种子侧躺在型孔内，会有一部分外露在型孔之外，种子不能够完全地进入到所设置的型孔之中，经过清种毛刷时，容易被毛刷清除而导致型孔内无种引发漏播；

圆柱形型孔，在充种过程中由于结构的问题型孔的宽度和深度较大和深，容易导致一个型孔内垂直

进入两枚甚至三枚小麦种子，在经过清种毛刷时，种间的挤压力较大，毛刷清理的作用力下会出现伤种的现象：

椭圆形型孔，在形状上与小麦种粒相近，在充种过程中小麦种粒在重力的作用下可以比较顺利地进入到型孔之中达到平躺和侧躺的姿态。当型孔中已有一枚种子以平躺或侧躺的姿态处于型孔之内，多余的种子不能再进入型孔之中，只能堆积在型孔或旁边的空域，同时也能够达到“一孔一种”的效果。多余的种子在清种毛刷的作用下再次回到充种区，已在型孔内的种子随排种轮的转动进入携种区，最后在排种区落下完成一次排种。

在界面导出三种型孔形状的充种率折线图，如图9，其中在三次充种试验中，椭球形型孔的充种合格率最高、漏充指数和重复充种指数最低。

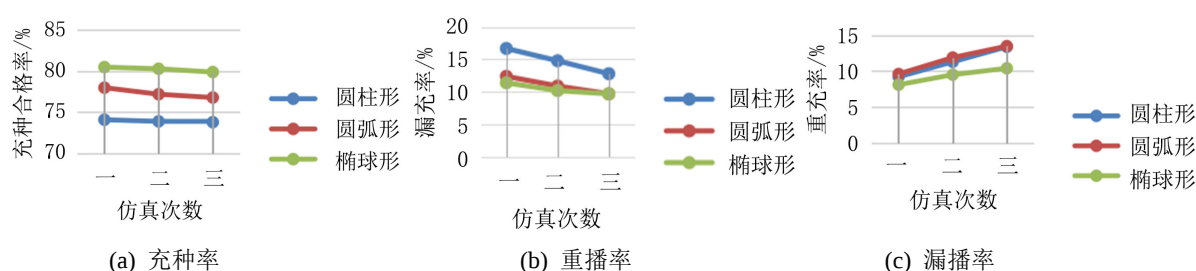


Figure 9. Seeding performance under different types of holes

图9. 不同型孔下的充种性能

综上所述，通过观察三种型孔下的充种仿真运动和后处理中导出的不同型孔的充种性能数据显示，椭圆形型孔的充种性能相较于圆柱形和圆弧形型孔更优，因此本项目最终选用椭球形型孔作为排种轮型孔结构，型孔的长、宽、深分别取7.7 mm、4.5 mm、3.8 mm。

5.2. 导种装置对充种性能的影响

通过调查发现，对于传统的排种器大多数是没有考虑到小麦种子的物理特性问题，缺少设置导种机构，采取直接充种的方式进行，小麦种子在重力的作用下直接垂直降落进入充种区，没有对种子进行引导和调姿动作，这可能会造成在排种过程中充种区堵塞的现象，不利于排种运动的进行。包括本项目组上一代所设计的排种器也是缺少导种装置如图10所示，不仅会影响种子正常进入到型孔之中，同时种子的堆积还会影响清种毛刷的工作。

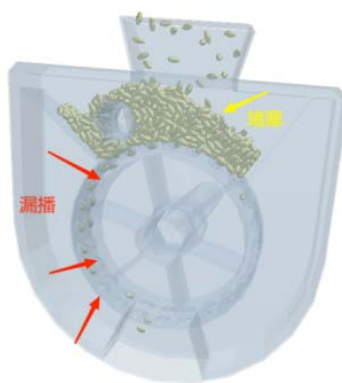


Figure 10. Seed clogging in the filling area

图10. 充种区的种子堵塞现象

为了降低这一现象发生的概率，本项目决定对上一代的排种器进行一次改进优化。主要是在箱体内增加导种装置，避免种子在重力作用下直接进入到充种区，通过加装交叉式的导种板，小麦种子在颗粒工厂形成后垂直降落到导种板，大量的种子在接触到导种板后速度会得到缓冲，随后沿着导种板接触到匀种板，此时大量的小麦种子已经达到分散、分层化，最后沿着匀种板的末端经过填充板进入到充种区开始排种运动，导种板、匀种板和填充板组成一个“Z”形[13]。

在 EDEM 中分别对设置有导种装置的排种器和原始排种器进行仿真如图 11 所示，本次实验采取控制变量法，即小麦种子总数均为 2000，排种轮转速 60 rpm，清种轮与排种轮的传动比为 1:2，窝眼轮倒角设置为 30°，步长保存为 0.01，仿真时间为 5 s。

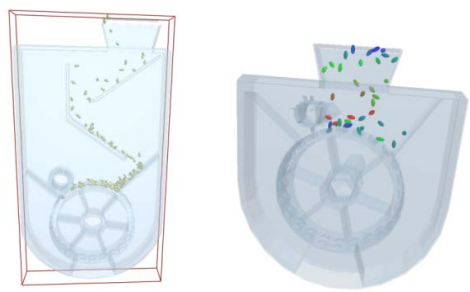


Figure 11. Simulation to verify the feasibility of the seed guiding device
图 11. 验证导种装置的可行性仿真

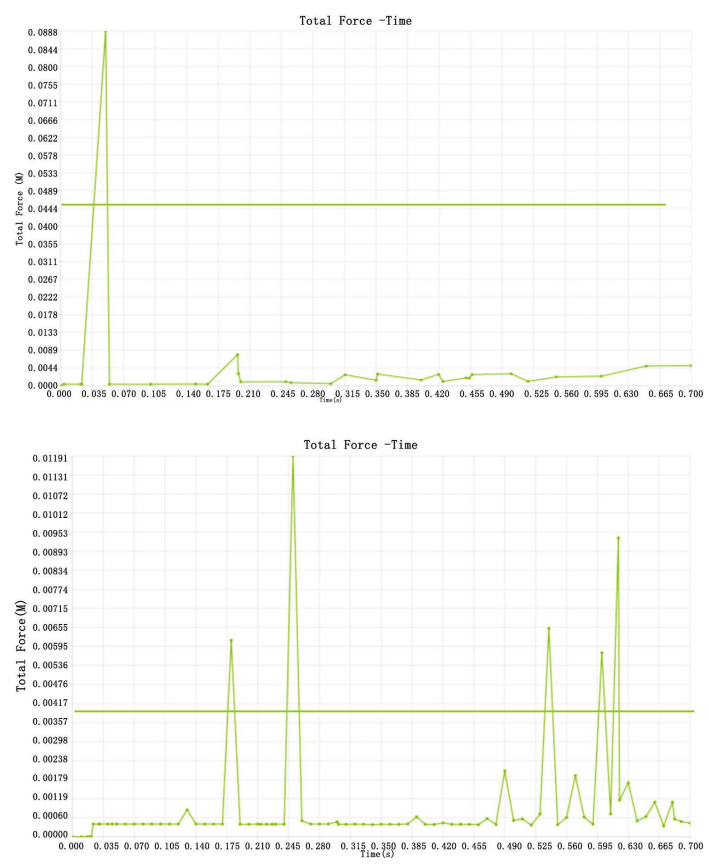


Figure 12. Seed-grain interaction with or without seed guide device
图 12. 有无导种装置的种粒间作用力

在 EDEM 后处理导出粒子间的作用力折线图如图 12 所示,可发现在 0.7 s 内,不设置有导种装置的第一代排种器在仿真过程中的平均种间挤压作用力较大,在 0.037 s 左右大量种子下落到充种区发生碰撞,导致种间挤压力急剧增大,种间挤压作用力达到最大值 0.0888 N,平均值在 0.045 N 左右,种子在充种区形成堆积,种间的流动性较差。

设置有导种装置的排种器仿真过程中,小麦种子沿着导种板下落时,小麦颗粒种间挤压力较小,平均值在 0.004 N 左右,导种相对平稳,种子堆积现象有所改善,充种的效果较好。

综上所述,在排种器中增加导种装置能够改善小麦种子在充种区堆积的现象,可以提高充种的效率。因此,导种装置的增加是可行的。

5.3. 扰种环对充种性能的影响

将加入了扰种环的 step 格式排种器的模型导入 EDEM 中,设置好参数。为了提高仿真速率,降低其他因素的干扰,本次仿真只保留了排种器壳体、排种轮和搅种环模型。在排种轮的斜上方,建立颗粒工厂,从 0 秒开始产出 500 粒小麦种子,总的时间长度被设定为 2 秒。排种轮从 0 秒开始旋转,转速统一为 60 rpm。分别进行扰种环倒角倾斜角为 0°、30°、45°、60°的仿真试验。设置了扰种环的排种轮如图 13 所示。

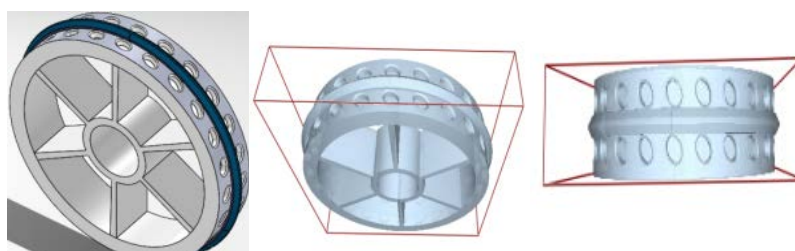
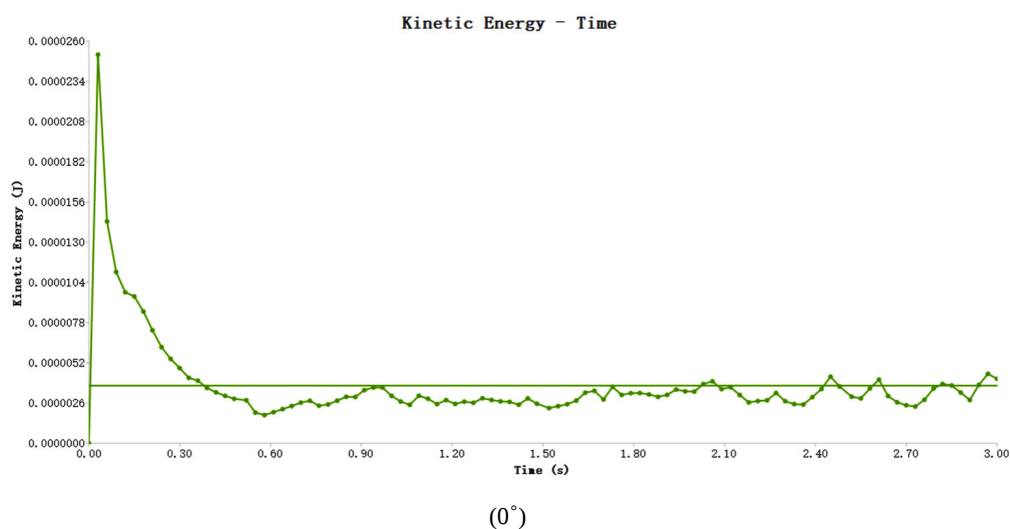


Figure 13. Setting up a seed wheel model for seed scrambling rings

图 13. 设置扰种环的排种轮模型

EDEM 仿真结束后,在后处理界面处分别导出扰种环倒角倾斜角 0°、30°、45°、60°四种情况的小麦种粒种群的平均动能(Kinetic Energy)的折线图,图 14,根据图表趋势走向,分析扰种环倾角的改变对小麦种粒种群动能的影响。



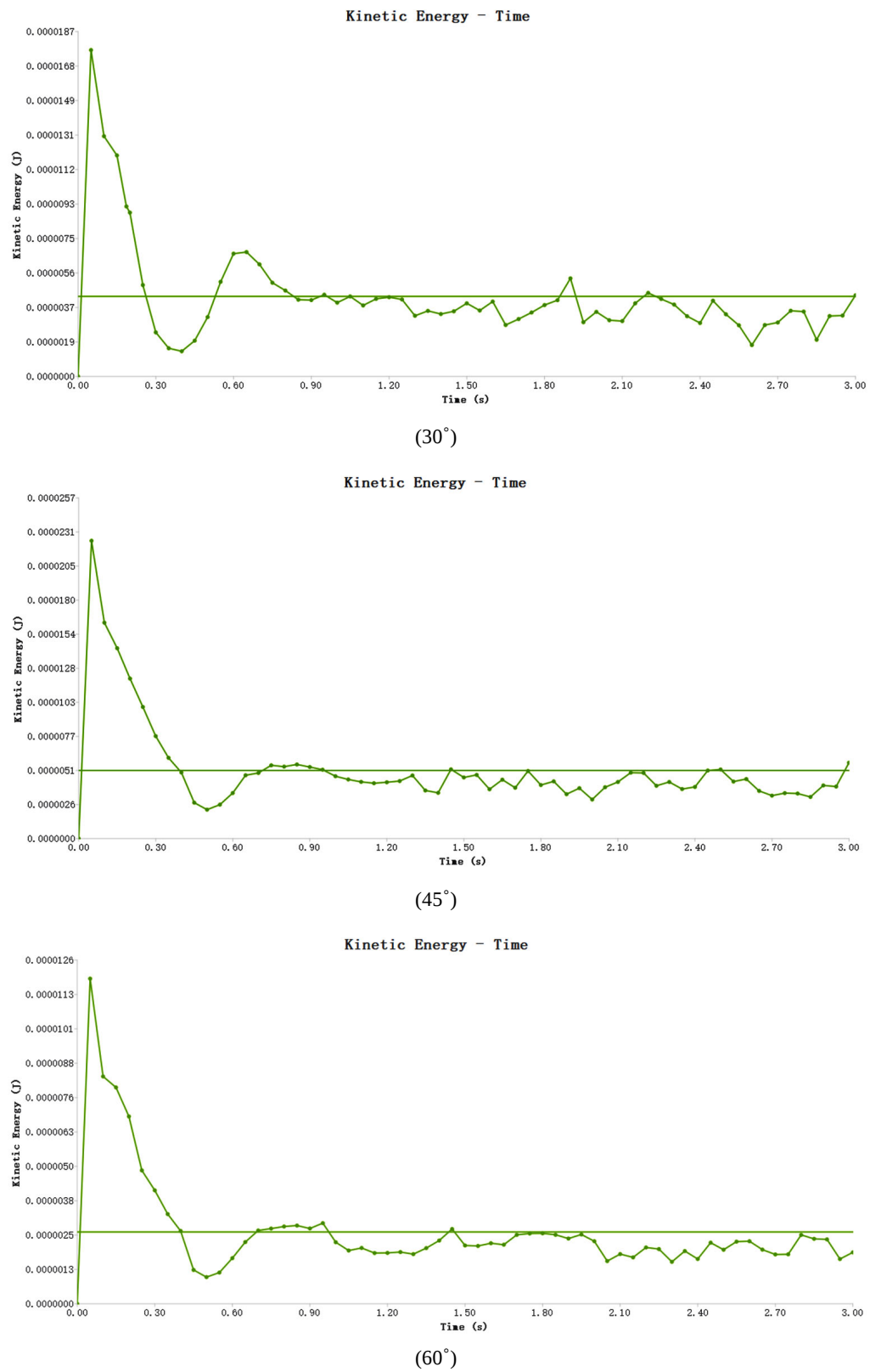


Figure 14. Average kinetic energy of populations disturbed by seed rings at different dip angles
图 14. 不同倾角扰种环的种群平均动能

通过观察图表可知, 本次实验设置扰种环的倾角依次是 0° 、 30° 、 45° 、 60° , 种群的平均动能呈现先升高后降低的趋势, 扰种种群的频率增加。当扰种环倾角为 0° 时, 种群的平均动能均值为 3.9×10^{-5} J; 当扰种环倾角为 30° 时, 种群的平均动能均值为 4.3×10^{-5} J; 当扰种环倾角为 45° 时, 种群的平均动能均值为 5.1×10^{-5} J; 当扰种环倾角为 60° 时, 种群的平均动能均值为 2.76×10^{-5} J。

当扰种环倾角为 30° 、 45° 、 60° 时, 种群的平均动能均值比无扰种环(倾角 0°) 时分别高 10.25%、30.77%、-29.23%。

综上, 在排种轮上增加扰种环能够提高种群的平均动能, 让小麦种粒在进入充种区后的流动性更强。且当扰种环倾角为 45° 时, 种群流动性最高, 种子易脱离种群, 充种效果最佳。

6. 结论

该研究设计了窝眼轮小麦精量排种器, 并利用 EDEM 软件对排种器进行离散元仿真分析。仿真分析结果表明, 影响窝眼轮式小麦精量排种器排种性能的主要因素还有型孔形状、导种装置、扰种环的倾角, 当窝眼轮小麦精量排种器的型孔为椭球形、并设置有导种装置、扰种环的倾角为 45° 时排种性能最优。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(S202310602024)。

参考文献

- [1] 张春岭, 刘涛, 郑子浩, 等. 交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 47-59.
- [2] 曾令超, 马旭, 陈林涛, 等. 基于离散元的交叉导流式穴播装置仿真与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 20-24, 179.
- [3] 玉大略, 马旭, 周海波, 等. 振动流动式水稻秧盘育秧播种器的试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 137-139.
- [4] 邓伟健, 李志伟, 邱秀丽, 等. 基于交叉导流式种箱的稻种流动性及结拱研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 145-149, 154.
- [5] 刘彩玲, 都鑫, 张福印, 等. 锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 56-65.
- [6] 李兆东, 王晴晴, 张亚兰, 等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 116-124.
- [7] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜, 等. 油菜籽漏播螺旋式补种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 16-24.
- [8] 田雨琪, 付亚萍, 牛佩海, 等. 离散元法在农业机械中应用的研究现状和发展趋势[J]. 农业技术与装备, 2023(11): 110-111, 114.
- [9] 张燕青, 崔清亮, 王丰, 等. 小籽粒种子排种物理机械特性参数的测量[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(3): 224-228.
- [10] 王勇, 李建东, 杨薇, 等. 小麦种子物理特性参数测定及在播种机排种器设计中的应用[J]. 农业工程, 2021, 11(6): 109-114.
- [11] 张民, 姚珺, 李明. 种子休止角与静滑动摩擦系数测量仪[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(11): 42-45.
- [12] 袁天怡, 叶玉婷, 金亦富, 等. 小麦精量排种器研究现状及展望[J]. 农业装备技术, 2018, 44(6): 6-10, 14.
- [13] 李慧琴, 赵戡, 刘恩光, 等. 基于 EDEM 的窝眼轮小麦精量排种器排种仿真试验[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(10): 188-193.