



刘 涛, 何瑞银, 陆 静, 等. 基于 EDEM 的窝眼轮式油菜排种器排种性能仿真与试验[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 126-132.

基于 EDEM 的窝眼轮式油菜排种器 排种性能仿真与试验

刘 涛, 何瑞银, 陆 静, 邹 翌, 赵明明

(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】研究不同型孔结构对窝眼轮式油菜排种器种子群扰动及排种性能的影响。【方法】借助离散元分析软件 EDEM 对 3 种不同型孔结构的窝眼轮式油菜排种器进行仿真分析, 并进行试验验证。【结果】型孔结构对种子群扰动影响明显, 种子群扰动量越大充种性能越好; 转速在 $10 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 种子群扰动最大的 30° 倒角窝眼轮合格指数为 $86.6\% \sim 95.8\%$, 明显优于不倒角窝眼轮的 $67.5\% \sim 90.6\%$ 和半径 1.25 mm 倒圆角窝眼轮的 $79.2\% \sim 93.5\%$ 。各轮对比试验发现, 相同转速下, 种子群扰动量越大漏播指数越小, 型孔囊种空间大小因倒角方式而不同, 且囊种空间越大, 重播指数和变异系数也越大。【结论】影响各轮排种性能的主要因素是工作转速; 由于重播指数较小, 故合格指数主要受漏播指数影响; 仿真与试验的结果有偏差, 但变化趋势及其相互之间关系基本一致, 用 EDEM 对排种器进行仿真分析具有一定可行性。

关键词: EDEM; 排种器; 种子群扰动; 排种性能; 仿真; 验证试验

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2016)03-0126-07

Simulation and verification on seeding performance of nest hole wheel seed-metering device based on EDEM

LIU Tao, HE Ruiyin, LU Jing, ZOU Yi, ZHAO Mingming

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract:【Objective】To study the influence of different types of hole structures on the seeds interference intensity and seeding performance of nest hole wheel metering device for rapeseeds. 【Method】The EDEM software was used to simulate the nest hole wheel with three different types of hole structures. Tests were also done to verify the simulation results. 【Result】Seeds interference intensity was affected by the hole structures evidently, and higher seeds interference intensity led to better seed-filling performance. In aspect of qualified rate, the 30° chamfering nest hole wheel ($86.6\% \sim 95.8\%$) which had the largest seeds interference intensity performed much better than the nest hole wheel without chamfering ($67.5\% \sim 90.6\%$) and the 1.25 mm rounded nest hole wheel ($79.2\% \sim 93.5\%$) at $10 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ rotational speed. For different wheels at the same rotational speed, higher seeds interference intensity caused lower miss-seeding rate. The space of the type hole had a different size in each chamfering, and bigger space of the type hole caused higher miss-seeding rate and variable coefficient. 【Conclusion】The main factor affecting seeding performance of each wheel is rotational speed. Since the redundant-seeding rate is low, the qualified rate is mainly affected by the miss-seeding rate. The fluctuation trends and the

收稿日期: 2015-09-11 优先出版时间: 2016-04-15

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20160415.1554.006.html>

作者简介: 刘 涛 (1990—), 男, 硕士研究生, E-mail: fromliutao@126.com; 通信作者: 何瑞银 (1964—) 男, 教授, 博士, E-mail: ryhe@njau.edu.cn

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203059); 苏北科技专项 (BN2016042)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

relationship among data are consistent in both simulation and test results, which proves the feasibility of the numerical simulation method based on EDEM.

Key words: EDEM; seed-metering device; seeds interference; seeding-performance; simulation; verification test

精密播种可实现 1 穴 1 粒和固定株距,从而减少用种量、降低劳动强度、节本增效。排种器作为播种机的核心部件直接决定播种精度^[1-2]。油菜种子粒径小,其精密排种器设计难度大^[3]。气力式排种器适用于高速作业,生产效率高,对种子适应性强、损伤轻,但结构复杂、加工成本高,且风机动力消耗大、性能不稳定^[4];窝眼轮式精密排种器属机械式,对不同粒径种子通用性差,但结构简单、加工成本低、性能可靠,在我国精密播种机上应用广泛^[5-6]。

型孔是窝眼轮式精密排种器结构组成的重要部分,其形状及参数直接影响排种器的工作性能。Garcia^[7]研究发现型孔的形状、尺寸对排种精度有着重要的影响;Wang^[8]根据种子尺寸对排种器型孔参数进行了优化设计;吴兆迁等^[9]设计了针对不同粒径种子孔深可调的窝眼轮排种器,解决了播量调节不便的问题;宋井玲等^[10]设计了 1 种利用凸轮活销机构实现工作过程中孔深可变的型孔轮式排种器,适用于玉米、大豆等大粒种子。而油菜种子粒径小、流动性强,对窝眼轮型孔结构要求更高,但是目前国内对于窝眼轮式油菜精密排种器型孔结构的研究甚少,使得适用于油菜等小籽粒种子的窝眼轮排种器设计理论不足。

传统的试验周期长、成本高,随着计算机技术的发展,计算机辅助分析方法在排种器研究领域的应用日渐增多。Zhang 等^[11]采用离散元法研究了大豆在斜槽中的流动过程;石林榕等^[6]借助 EDEM 软件对水平圆盘式精量排种器排种进行了仿真试验。本文利用离散单元颗粒分析软件 EDEM,对不同型孔结构的窝眼轮式油菜精密排种器工作机理进行仿真分析和验证试验,探寻不同型孔结构对窝眼轮排种器种子群扰动及工作性能的影响,为窝眼轮式油菜精密排种器的设计工作提供理论依据。

1 种子群扰动机理分析

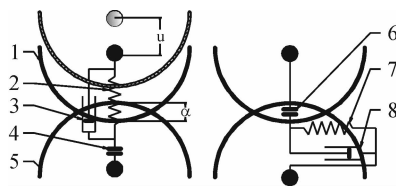
1.1 接触模型的建立

排种器工作时,种箱中的油菜种子在窝眼轮转动作用下发生扰动,引起种子间的碰撞产生接触力^[12-13]。离散元分析方法中将接触模型分为软颗粒接触和硬颗粒接触,其中软颗粒接触模型可以允许

碰撞持续一定的时间,并同时考虑多个颗粒的碰撞,根据颗粒碰撞重叠量和切向位移来计算接触力^[14],种子群扰动与该接触力紧密相关。考虑到油菜种子无表面粘附力,故选择 Hertz-Mindlin (no slip) 软颗粒接触模型^[15-16]。将该模型的接触简化为有耦合器和滑动器的弹簧振子阻尼振动,如图 1 所示,其运动微分方程为:

$$m d^2 u / dt^2 + c du / dt + K u = 0,$$

式中, m 为模型粒子质量; u 为偏离平衡位置位移; c 为接触阻尼系数; K 为弹簧弹性系数。



1:颗粒 i;2:弹簧;3:阻尼器;4:耦合器;5:颗粒 j;6:滑动器;7:弹簧;8:阻尼器。

图 1 软颗粒接触模型

Fig. 1 Model of soft-kernel contact

1.2 接触力分析

软接触颗粒碰撞模型中接触力可分解为法向力和切向力,其中法向力是模型中弹性力和阻尼力的合力。对于油菜籽的三维球形颗粒,由 Hertz 接触理论,法向力 F_n 以及切向力 F_t 可分别表示为:

$$F_n = (-k_n \alpha^{\frac{3}{2}} - c_n v_{ij} n) n,$$

$$F_t = -k_t \delta - c_t v_{ct},$$

式中 k_n 、 k_t 分别为法向及切向弹力系数; c_n 、 c_t 分别为法向和切向阻尼系数; α 为法向重叠量; v_{ij} 为颗粒 i 与 j 的相对速度; v_{ct} 为接触点滑移速度; δ 为切向位移; n 为颗粒 i 与颗粒 j 接触面的法向单位矢量。

若下式成立:

$$|F_t| \geq \mu_s |F_n|,$$

则颗粒 i 与颗粒 j 发生相对滑动,此时有:

$$F_t = -\mu_s |F_n| \cdot n_t,$$

式中 μ_s 为静摩擦因数,由油菜种子的物理特性确定,为定值; n_t 为切向单位向量。由公式可知,种子之间的内摩擦力即上述接触模型中的切向力是由法向力确定的,也是产生种子群扰动的主要因素^[17-18]。因此以法向接触力 F_n 为内摩擦力的监测值分析不同

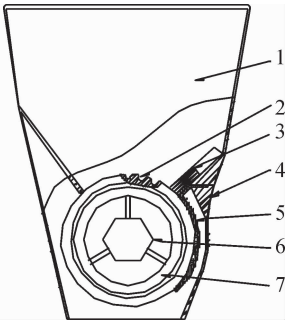
型孔结构各轮种子群扰动强度,探寻型孔结构对窝眼轮式油菜精密排种器排种性能的影响。

2 仿真分析

2.1 窝眼轮式排种器结构及工作原理

窝眼轮式油菜精密排种器由窝眼轮、外壳、清种刷、护种板、排种轴等组成,如图 2 所示。排种器充种角度为 90° ,护种区包角为 120° 。窝眼轮直径、厚度分别为 60、20 mm。为减少漏播,型孔底部窝眼直径 D 应不小于种子最大尺寸,小于 2 粒种子的最小尺寸和,孔深 H 应等于或略大于种子的最大尺寸^[9,19],根据试验所用种子的物理特性,设计 D 、 H 分别为 2.5、2.3 mm。按型孔倒角不同,结合窝眼轮材料特性及油菜种子的三维尺寸、摩擦角等物理特性,根据不同倒角参数仿真结果,设计了 30° 倒角(A 轮)、不倒角(B 轮)以及半径 1.25 mm 倒圆角(C 轮)3 种窝眼轮。为确保型孔完整的同时尽可能多地布置型孔以提高充种能力和工作效率,根据窝眼轮直径和型孔尺寸,确定窝眼轮圆周面均布型孔数目为 30 个。A、B、C 3 种窝眼轮结构如图 3 所示。

工作时,排种轴带动窝眼轮匀速转动,油菜种子



1: 种箱; 2: 型孔; 3: 清种刷; 4: 外壳; 5: 护种板; 6: 排种轴; 7: 窝眼轮。

图 2 窝眼轮式油菜精密排种器结构示意图

Fig. 2 Diagram of nest hole wheel precision rapeseed-metering device

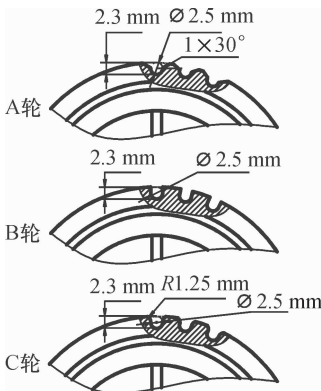


图 3 3 种窝眼轮型孔结构简图

Fig. 3 Diagram of nest hole wheels with three kinds of type hole structures

在重力及种间接触力的作用下由种箱进入型孔完成充种过程,经过清种刷后随着窝眼轮进入护种区,转出护种区后,靠重力作用落下,进入种沟,完成排种过程。

2.2 模型建立及仿真

借助 Pro-E 软件建立排种器模型,定义清种刷为尼龙材料、其余部件为有机玻璃;建立输送带模型,并定义种子与输送带为完全非弹性碰撞。模型导入 EDEM 软件后网格显示如图 4 所示。

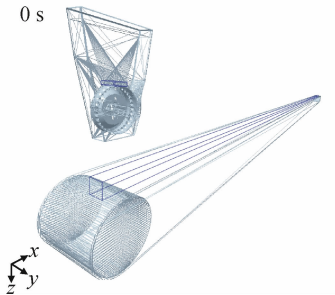


图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

种子与种子、种子与排种器之间选用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型,种子与输送带之间选择 Moving Plan 接触模型;导入模型并按表 1、2 设置材料特性及材料间接触参数^[13,20-21]。设置颗粒产生方式为静态填充,颗粒半径 1 mm 并服从正态分布;设置仿真时间步长比例为 20%,总时间 6 s(第 1 秒生成颗粒,2~6 s 排种),网格尺寸为最小颗粒半径的 2 倍。

表 1 仿真模型材料参数

Tab. 1 Property parameter of material in the simulation model

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
油菜种子	0.28	11.0	1 060
尼龙	0.40	102.0	1 150
有机玻璃	0.50	177.0	1 180
输送带	0.32	7.8	1 240

表 2 仿真模型材料接触参数

Tab. 2 Contact parameter of material in the simulation model

接触参数	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
油菜种子-油菜种子	0.600	0.500	0.010
油菜种子-尼龙	0.600	0.500	0.010
油菜种子-有机玻璃	0.500	0.500	0.010
油菜种子-输送带	0.001	0.999	0.999

综合考虑油菜种植农艺要求、国内油菜播种机的作业速度水平以及试验排种器的结构参数,在 10、20、30、40、50 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下对 A、B、C 3 种不同型孔结构的窝眼轮排种器进行仿真分析。图 5 显示了各轮 30 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 6 s 时的仿真情况,种箱里种子的堆积情况反映出种子群扰动量为:A 轮 > C 轮 > B 轮。

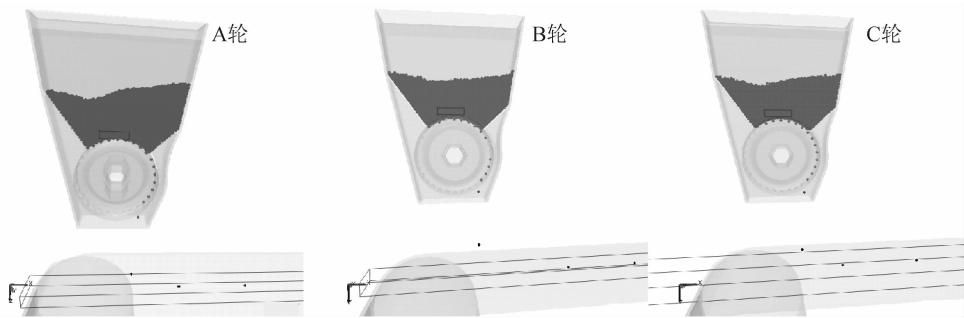


图 5 各窝眼轮排种器仿真情况

Fig. 5 Simulation of different nest hole wheel seed-metering devices

2.3 仿真结果分析

2.3.1 不同型孔结构对种子群扰动的影响

30 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,A、B、C 3 种窝眼轮上方同一位置框选区域中,种子颗粒间接触的平均法向应力以及颗粒的平均速度随时间波动如图 6、7 所示。图 6 显示各轮平均法向应力随时间变化无规律波动,其中 A 轮波动最明显,C 轮其次,B 轮波动最小;A、B、C 3 轮平均法向应力均值并无明显区别。由图 7 可知,

种子颗粒平均速度为:A 轮 > C 轮 > B 轮。图 6 中 B 轮在 5.5 ~ 5.8 s 法向应力波动变小,而图 7 中显示该时段 B 轮种子颗粒的平均速度也显著降低,观察仿真录像发现 B 轮此时段充种情况较差(图 8),可见平均法向应力波动能有效反映种子群扰动,且种子群扰动对充种性能影响显著。种子群扰动量越大,种子运动越剧烈,种子瞬时平均速度也越大,更容易在重力和相互碰撞作用下进入型孔完成充种过程。

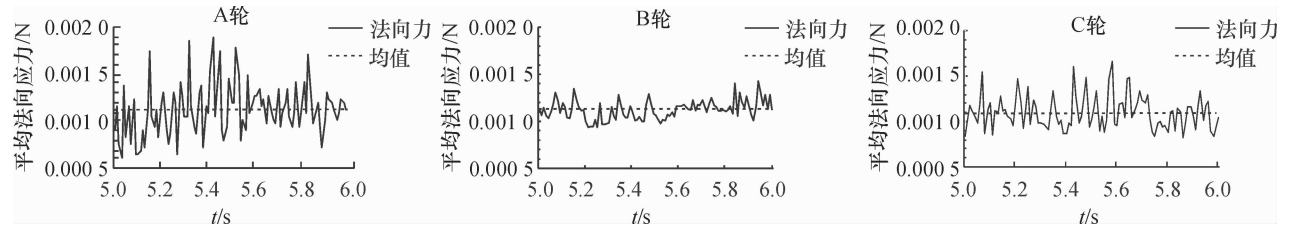


图 6 各轮平均法向应力随时间波动情况

Fig. 6 Change of average normal stress through time

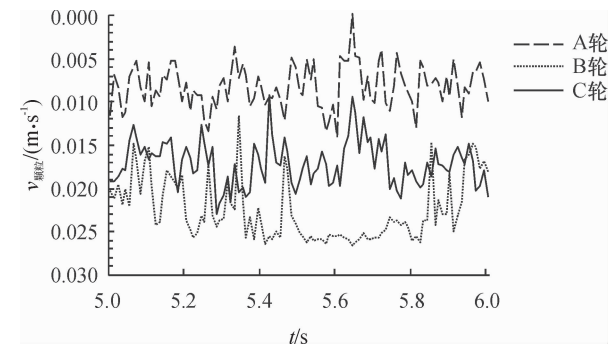


图 7 各轮颗粒平均速度随时间波动情况

Fig. 7 Change of average particle velocity through time

图 9 反映了各轮上方框选区域中种间平均法向应力的均值和方差随转速提高的变化情况。图 9a 显示,各轮的法向应力均值均随转速提高先增大后趋于平缓,此过程中 B、C 轮比 A 轮先达到拐点;10 ~

30 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下,三轮的法向应力均值出现交叉,转速超过 30 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,各轮法向应力均值差异逐渐明显。由图 9b 可知,A、B、C 轮法向应力方差随转速提高而增大,B 轮增幅明显小于 A、C 轮,此过程中

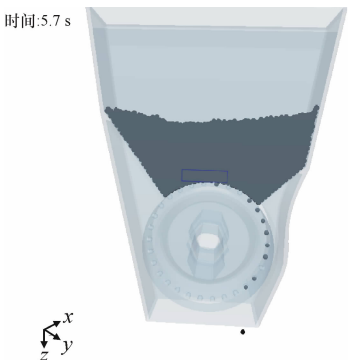


图 8 B 轮在 5.7 s 时充种情况

Fig. 8 Seed-filling performance of wheel B at 5.7 s

<http://xuebao.scau.edu.cn>

,A、B、C 轮方差排序为:A 轮 > C 轮 > B 轮。结合前文所述法向应力、种子群扰动及充种性能的关系可

知,相同转速下,各轮的种子群扰动量关系为:A 轮 > C 轮 > B 轮,且 A 轮充种性能最好。

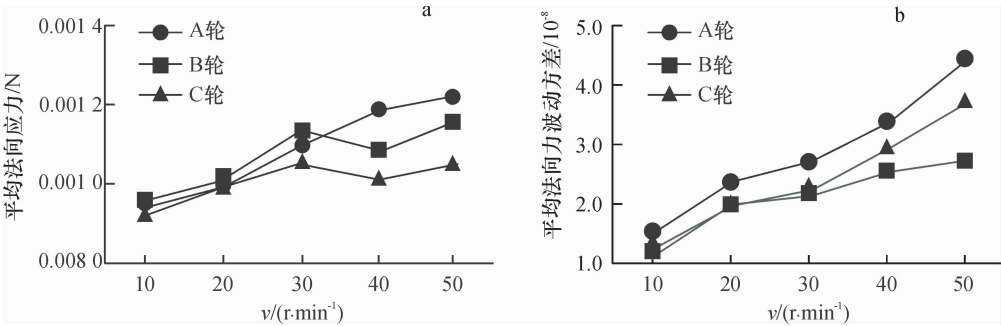


图 9 平均法向应力均值和方差随转速变化情况

Fig.9 Changes of average and variance of normal stress as rotational speed increases

2.3.2 不同型孔结构对排种器各工作指标的影响
每次仿真完成后,输出输送带上表面框选区域中油菜种子 x 坐标值以获取粒距样本,按文献[22]

所述方法,对排种器的基本性能指标:粒距合格指数、漏播指数、重播指数、变异系数进行计算,排种性能仿真结果见图 10。

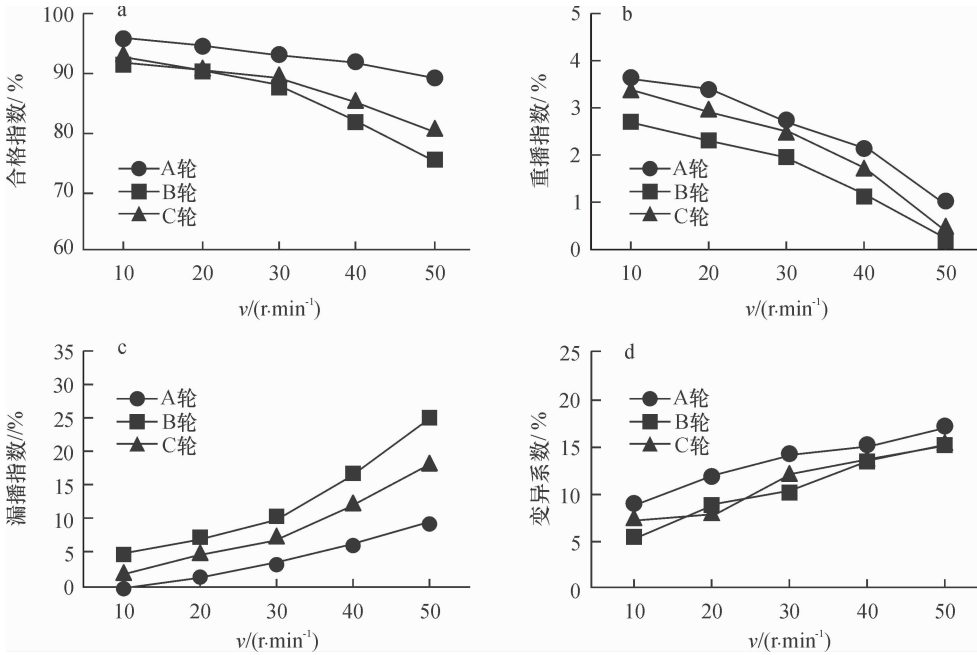


图 10 3 种窝眼轮排种器排种性能仿真结果

Fig.10 Seeding performance results of simulation on three types of nest hole wheel seed-metering devices

图 10a 表明,各轮合格指数均随转速的提高而降低,且 A 轮 > C 轮 > B 轮,且随着转速的提高,各轮合格指数间差值呈增大趋势,型孔结构不同使得各轮的种子群扰动量、充种性能不同。图 10b 表明各轮重播指数均随转速的提高而降低,且 A 轮 > C 轮 > B 轮,观察仿真录像发现,型孔结构差异使得 A 轮型孔的囊种空间大于 B 轮和 C 轮,当 2 粒直径较小的种子同时出现在型孔上方时,A 轮出现重播的可能性比 B、C 轮大。图 10c 表明,各轮漏播指数均随转速提高而增加,且 B 轮 > C 轮 > A 轮,且各轮漏

播指数差值随转速提高逐渐增大,A 轮相比于 B、C 轮漏播指数增速较为平缓;对照图 9 可知,就各轮自身而言,工作转速是影响其漏播的主要因素,平均法向应力的均值和方差对漏播影响不大,而相同转速下,各轮之间对比发现,法向应力方差对漏播影响显著,法向应力方差越大则漏播指数越小,而平均法向应力均值的影响不明显。图 10d 表明,各轮的变异系数均随转速提高而增大,A 轮变异系数最大,B、C 轮变异系数差异不明显,在 20、50 r · min⁻¹时两者出现交叉;在 EDEM 中观察种子运动轨迹发现 A 轮的

投种位置变动较大,故其投种时间间隔误差大,粒距变异系数大,这是由于型孔结构导致种子进入 A 轮型孔后活动范围大所致。

3 验证试验与分析

按仿真模型参数定制了 A、B、C 3 种窝眼轮,安装到同一个窝眼轮排种器上,在南京农业大学工学院自制的铺砂式排种性能测试台上进行试验,其工

作原理及参数见文献[23]。以仿真建模所参照的中双 11 号油菜种子为试验材料,测得其平均粒径 1.72 ~ 2.21 mm、千粒质量 4.68 g、密度 1.06 g · cm⁻³、容重 0.67 g · cm⁻³、纯净度 98.5%。

试验选取与仿真相同的 5 种转速,每次试验添加到种箱的种子均为 89 g(与仿真时约 19 060 粒种子质量相同),监测指标及计算方法与仿真分析相同。排种性能试验结果如图 11 所示。

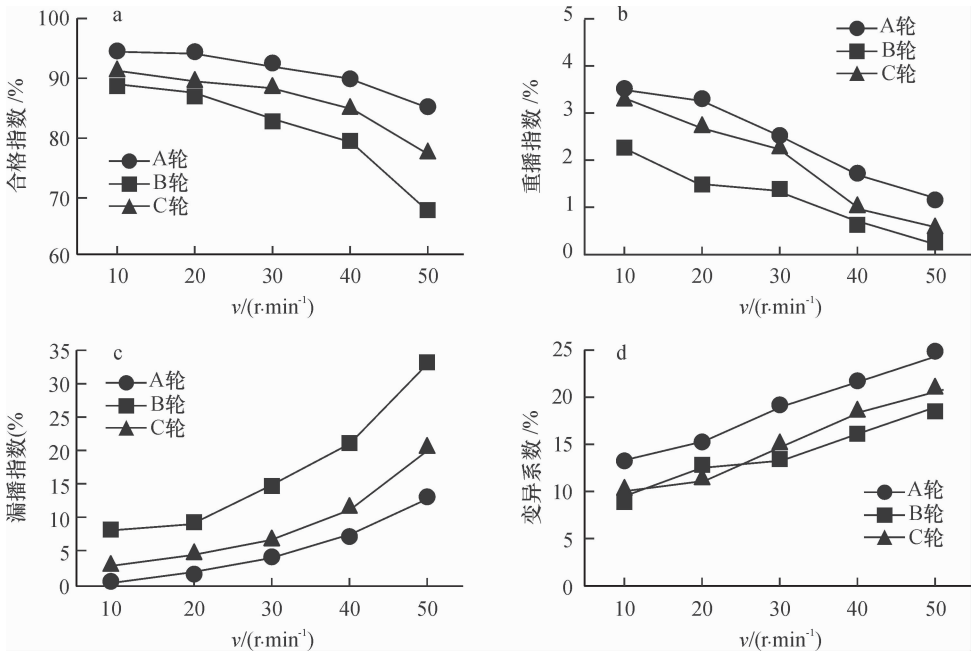


图 11 排种性能台架试验结果

Fig. 11 Seeding performance results of the test-bed experiments

对比图 10、11 发现,试验中各排种性能指标在数值上与仿真结果有一定偏差,但其变化趋势及其相互之间大小关系与仿真结果基本一致。由图 10a、11a 可知,试验中各轮的合格指数随转速提高而下降的速度比仿真中要快,仿真中转速从 10 r · min⁻¹增加到 50 r · min⁻¹时 A、B、C 轮的合格指数分别从 96.1%、93.1%、94.2% 降低到 89.8%、75.9%、81.5%,而试验结果中 A、B、C 轮的合格指数分别从 95.8%、90.6%、93.5% 降低到 86.6%、67.5%、79.2%。B 轮合格指数受转速影响最大、C 轮次之、A 轮最小。由图 10b、11b 可以看出,各轮重播指数在试验与仿真中结果差异不明显。由图 10c、11c 可知,试验中各轮漏播指数均高于相同转速下仿真中漏播指数,且各轮漏播指数受转速的影响在试验结果中比仿真中表现的更为明显,转速为 10 r · min⁻¹时, A、B、C 轮试验和仿真漏播指数分别为:0.7%、7.2%、3.0% 和 0.5%、4.3%、2.4%,当转速增加到 50 r · min⁻¹时, A、B、C 轮试验和仿真漏播指数分别升高到:12.4%、32.3%、20.1% 和 9.3%、23.9%、

18.1%,可见 B 轮漏播指数受转速变化的影响最大, A 轮最小,这与前文所述不同型孔结构对种子群扰动量及囊种空间大小的影响一致。观察图 10d、11d 发现,变异系数随转速提高而上升,但试验中各轮变异系数均比相同转速下仿真中变异系数大,这与种子落到输送带时弹跳、粒距测量精度、输送带速度均匀性、排种器工作转速稳定性等因素有关。

通过仿真及试验发现, A 轮在重播指数和变异系数略高于 B、C 轮的同时,其漏播指数和合格指数明显优于 B 轮和 C 轮,对高速作业具有更强的适应性。

4 结论

1) 借助离散元分析软件 EDEM,以接触平均法向应力均值和方差为监测值研究了型孔结构对窝眼轮排种器种子群扰动的影响,发现相同转速下 A 轮种子群扰动量最大、C 轮次之、B 轮最小,且种子群扰动量越大充种性能越好。

2) 按仿真建模参数加工了 3 种窝眼轮,并进行

了排种性能验证试验。综合考虑仿真和试验结果,对各轮自身而言,影响其排种性能的主要因素是工作转速,随工作转速提高各轮的合格指数、重播指数均减小,漏播指数、变异系数增大;各轮之间对比发现,相同转速下,种子群扰动量越大漏播指数越小,型孔囊种空间因倒角方式而不同,且囊种空间越大,重播指数、变异系数越大;由于重播指数较小,故合格指数主要受漏播指数影响。试验结果显示,转速在 $10 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,种子群扰动最大的 A 轮合格指数为 86.6% ~ 95.8%,明显优于 B 轮的 67.5% ~ 90.6% 和 C 轮的 79.2% ~ 93.5%。

3) 仿真与试验的结果在数值上有偏差,但其变化趋势及相互之间大小关系基本一致,用 EDEM 对排种器进行仿真分析具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 30-39.
- [2] 郑丁科,李志伟,区颖刚. 电磁振动组合式毯状秧苗播种装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2004, 25(1): 103-106.
- [3] 张宇文,张文超,李冬肖. 中心传动强推式精密排种器设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 78-81.
- [4] 夏红梅,李志伟,汪刘一. 气力板式蔬菜排种器吸排种动力学模型研究[J]. 华南农业大学学报, 2011, 32(1): 112-116.
- [5] 崔清亮,秦刚,王明富. 几种典型精密排种器的对比分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 69-71.
- [6] 石林榕,吴建民,孙伟,等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.
- [7] GARCIA P P. Participatory development of a corn seeder [D]. Philippines: Philippines University, 1993: 119.
- [8] WANG H. Drum type seed metering device: A study of optimum parameters of precision seeding [D]. Philippines: Philippines University, 1991: 104.
- [9] 宋井玲,杨自栋,杨善东,等. 一种型孔深度可变的排种器[J]. 农机化研究, 2012, 33(12): 103-105, 120.
- [10] 吴兆迁,才丽华. 可调式窝眼轮排种器的设计[J]. 林业机械与木工设备, 2000, 28(2): 9-10.
- [11] ZHANG X, VU-QUOC L. Simulation of chute flow of soybeans using an improved tangential force-displacement model[J]. Mech Mater, 2000, 32(2): 115-129.
- [12] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
- [13] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
- [14] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 16-26.
- [15] SHIMIZU Y, CUNDALL P. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors[J]. J Eng Mech-Asce, 2001, 127(9): 864-872.
- [16] VAN HEEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technol, 2009, 190(3): 348-360.
- [17] 滕云楠,曾庆辉,姚红良,等. 振动摩擦机理及其非线性动力学特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 197-202.
- [18] 孔维姝,胡林,杜学能,等. 用探测棒研究颗粒堆中的最大静摩擦力[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2318-2322.
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 289-291.
- [20] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62-69.
- [21] BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201-1216.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 10-24.
- [23] 李询,赵建,施龙,等. 铺砂式排种性能试验台的设计[J]. 农业开发与装备, 2014, 19(11): 52-54.

【责任编辑 霍 欢】