

油菜气力滚花滚筒式精量集排器充种性能 仿真分析与试验

李姗姗¹ 廖庆喜^{1,2} 王都¹ 姚露¹ 雷小龙¹ 王磊¹ 邢鹤琛¹

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128

摘要 为提高油菜气力滚筒式精量集排器的充种性能, 设计1种滚花排种滚筒, 确定了滚花排种滚筒的结构参数, 构建了充种区强制带动层种子的力学模型。EDEM 仿真分析滚花结构、排种滚筒转速和充填高度对种群充填角、拖带角和动力学特性的影响。结果表明: 滚花排种滚筒拖带角随排种滚筒转速增大而增大, 且大于无滚花排种滚筒; 种群充填角随排种滚筒与种群间的摩擦力增加而增加。同时, 随排种滚筒转速的增加, 种群所受合力、法向力和切向力以及种群速度线性增加; 随充填高度的增加, 种群所受合力和种群速度线性增加, 且排种滚筒转速或充填高度一定时, 滚花排种滚筒的种群动力学特性优于无滚花排种滚筒。台架试验表明: 当排种器负压为-2 500 Pa、正压为500 Pa、充填高度为-5 mm、排种滚筒转速为30 r/min时, 合格指数90.10%, 漏播指数1.56%; 当排种滚筒转速在15~50 r/min范围内时, 各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数分别低于5.5%和2.0%, 种子破损率低于0.2%。田间试验结果表明, 以滚花排种滚筒为关键部件的集排器能满足油菜播种机技术要求。

关键词 气力式精量集排器; 滚花排种滚筒; EDEM 仿真分析; 充种性能; 种群充填角; 油菜

中图分类号 S 223.2⁺3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)05-0099-09

气力滚筒式精量集排器结构紧凑, 可实现“一器多行”, 保证田间植株的数量、株距和行距, 作业效率高, 便于实现高速、高效、宽幅作业^[1]。但其田间播种性能受机具振动、地表不平等因数的影响较大, 特别是高速作业时不稳定。提高排种器充种性能是提高田间播种速度、降低田间漏播率、提高播种质量的有效方法^[2]。国内外专家学者对此开展了广泛研究, 如 Maleki 等^[3]设计了一种螺旋搅种装置; 史智兴等^[4]在排种圆管表面加工出凹陷的沟槽或凸起的棱带; 张国忠等^[5]提出了一种导向搅种齿的吸种盘; 祁兵等^[6]在充种室增加了正压气流对种群进行扰动; 赵湛等^[7]给种盘增加了振动装置, 使种群处于“沸腾”状态, 从而提高充种性能。

离散元分析法被广泛应用于研究农业机械物料分布和流动问题, 为机具结构和工作参数优化提供依据^[8-9]。Van 等^[10]应用离散元法分析了颗粒肥料在离心式排肥器中的运动过程及运动轨迹; Landry 等^[11]采用 DEM 法模拟了肥料在螺旋式排肥器内的

运动过程; 雷小龙等^[12]应用 EDEM 软件仿真分析了种层厚度对种群压力、种群与供种机构切向力和充种性能的影响; 刘月琴等^[13]对排种器吸种过程进行了仿真, 得到了搅种轮转速、振动频率、振幅和容种量等吸种效果最佳的排种器工作参数范围。

但是, 现有研究难以满足小粒径油菜种子的充种性能提高的要求。为提高气力滚筒式精量集排器的充种性能, 本研究提出了一种滚花排种滚筒, 应用 EDEM 软件^[14], 对油菜气力滚筒式精量集排器充种过程进行仿真分析, 研究滚花排种滚筒对集排器充种性能的影响; 应用 JPS-12 型排种器性能检测试验台, 开展滚花排种滚筒集排器排种性能试验, 验证其充种性能, 为气力滚筒式油菜精量集排器结构优化和排种性能提升提供参考。

1 集排器的结构与充种过程分析

1.1 集排器结构及工作原理

如图 1 所示, 排种滚筒内部被气室隔板划分为

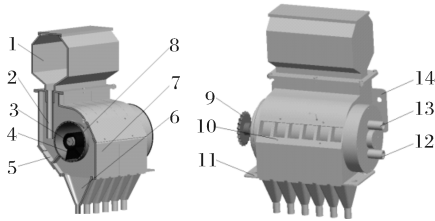
收稿日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575218, 51405180); 国家油菜产业体系专项(CARS-13); 农业科研杰出人才及其创新团队; 湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)

李姗姗, 硕士研究生, 研究方向: 现代农业装备设计与测控. E-mail: lishanshan19911219@163.com

通信作者: 廖庆喜, 教授, 研究方向: 油菜机械化生产技术与装备. E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

正压区和负压区,风机产生的正压和负压气流通过正压进气管和负压进气管进入排种滚筒。集排器工作时,链轮带动排种轴和排种滚筒转动,种箱中的油菜籽通过进种管进入充种室,在负压作用下被型孔吸附,并随排种滚筒匀速转动。当油菜籽随排种滚筒转动到正压区时,油菜籽在正压气流和自身重力



1.种箱 Seed box; 2.进种管 Feeding tube; 3.排种轴 Seed metering shaft; 4.气室隔板 Air chamber separator; 5.卸种口 Discharge outlet; 6.投种口 Seed charge outlet; 7.集排器壳体 Metering device case; 8.排种滚筒 Knurled cylinder; 9.链轮 Sprocket; 10.探视窗口 Visiting window; 11.支座 Bearing; 12.正压进气管 Positive pressure air inlet pipe; 13.负压进气管 Negative pressure air inlet pipe; 14.侧支撑板 Side support plate.

图1 油菜气力滚筒式精量集排器结构

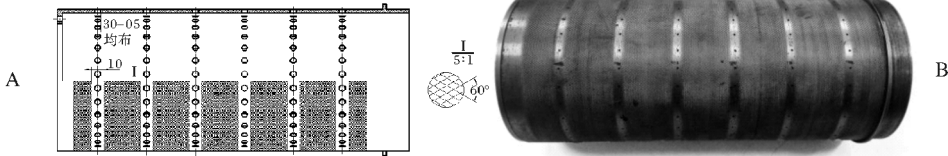
Fig.1 Structure of pneumatic cylinder-type centralized precision metering device

的作用下,脱离排种滚筒,通过投种口实现投种。

1.2 滚花式排种滚筒结构

排种滚筒是精量集排器的关键部件,排种滚筒的选型决定了集排器整体尺寸、型孔数量和排种滚筒转速等参数^[15]。国内外滚筒式排种器直径一般为80~260 mm,综合考虑播种机的田间工作效率和排种性能,选用排种滚筒外径为120 mm,排种滚筒表面轴向共6排型孔,间距40 mm,周向每排30个型孔,型孔直径1.2 mm(图2)。

由于油菜籽具有粒径小、易破损、含油量高等特点,排种滚筒转动时易引起油菜籽破损,堵塞型孔,影响集排器的排种性能。油菜籽直径范围 $d = 1.5 \sim 2.5$ mm。为适应不同直径的油菜籽,应满足条件: $0 < p \leq d_{\min}$,式中, p 为滚花节距,mm; d_{\min} 为油菜籽最小直径,在此取 $d_{\min} = 1.5$ mm。滚花参数如图3和表1所示,排种滚筒表面动摩擦系数随滚花模数的增大而增大,排种滚筒对油菜籽的扰动和损伤也随之增大。综合考虑选用模数 $m = 0.3$ 的滚花,此时滚花节距 $p = 0.942$ mm。为保证型孔表面光滑、油菜籽便于吸附,型孔中心两侧各5 mm内不加工滚花。



A:滚花排种滚筒结构示意图 Schematic diagram of knurled cylinder; B:滚花排种滚筒实物图 Physical map of knurled cylinder.

图2 滚花排种滚筒结构

Fig.2 Structure of knurled cylinder

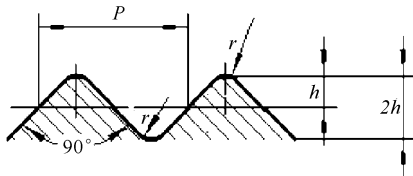


图3 滚花结构示意图

Fig.3 Sketch of knurling structure

1.3 充种过程运动学分析

当排种滚筒匀速转动时,充种室内靠近排种滚筒的油菜籽运动速度和位移较大,称为强制带动层;距离排种滚筒最远的油菜籽运动相对停滞,称为相对停滞层;在两个区域间的为摩擦带动层^[16]。滚花

表1 滚花参数

Table 1 Knurling parameter

模数 m	Modulu	节距 p /mm	Pitch	h /mm	r /mm
0.2		0.628		0.132	0.06
0.3		0.942		0.198	0.09
0.4		1.257		0.264	0.12
0.5		1.571		0.326	0.16

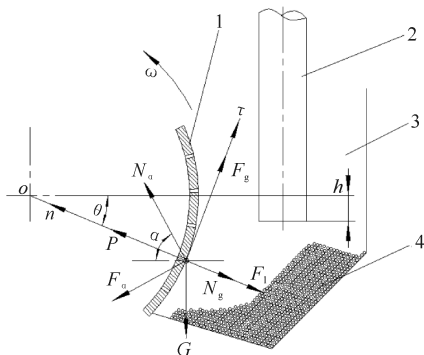
注:摘自国标 GB/T 6403.3—2008。Note: From the national standard GB/T 6403.3—2008.

滚筒主要影响强制带动层油菜籽的动力学特性,在此对强制带动层的油菜籽进行受力分析。如图4所示,以贴近排种滚筒的油菜籽 Q 为研究对象,以油菜籽绝对运动方向为 τ 方向,建立 τ - n 坐标系,建立

油菜籽的受力方程：

$$\begin{cases} \tau : F_g + N_a \sin(\theta + \alpha) - F_a \cos(\theta + \alpha) \\ -mg \cos\theta = 0 \\ n : P + F_a \sin(\theta + \alpha) + mg \sin\theta + \\ N_a \cos(\theta + \alpha) - N_g - F_1 = 0 \quad (1) \\ F_1 = m\omega^2 R \\ F_a = N_a f_2 \\ F_g = N_g f_1 \end{cases}$$

式(1)中, F_g 为排种滚筒对油菜籽的摩擦力, N; N_a 为油菜籽群对油菜籽的支持力, N; θ 为充填角, 气流对油菜籽的吸附力与水平方向的夹角, ($^\circ$); α 为 N_a 与水平方向的夹角, ($^\circ$); F_a 为油菜籽群对油菜籽的摩擦力, N; g 为重力加速度, m/s^2 ; P 为气流对油菜籽的吸附力, N; N_g 为排种滚筒对油菜籽的支持力, N; F_1 为油菜籽所受离心力, N; ω 为排种滚筒的角速度, rad/s ; R 为排种滚筒半径, m; f_2 为油菜籽群和油菜籽接触的动摩擦系数; f_1 为排种滚筒和油菜籽接触的动摩擦系数。



1.排种滚筒 Knurled cylinder; 2.进种管 Feeding tube; 3.充种室 Seed filling chamber; 4.油菜籽 Rapeseed.

图 4 充种区强制带动层油菜籽受力分析

Fig.4 Force analysis of single seed on compulsory driving layer in the filling area of internal seed chamber

当充种室内种群最高点的油菜籽即将被吸附并即将随排种滚筒转动时,种群充填角最大,此时油菜籽即将脱离油菜籽群,忽略种群间的相互作用,由(1)可得：

$$\theta = \arcsin \frac{f_1(P + m\omega^2 R)}{mg \sqrt{f_1^2 + 1}} + \varphi \quad (2)$$

式(2)中, φ 为辅助角, $\tan\varphi = f_1^{-1}$ 。由公式(2)可知,当排种器结构确定时,充种角 θ 与排种滚筒的角速度 ω 、气流的吸附力 P 和排种滚筒与油菜籽间的动摩擦系数 f_1 有关;由于在一定范围内,充种角越大,油菜籽被吸附的概率越大,即排种器的充种性

能越好^[17-19]。因此,适当增大排种滚筒与种群间的摩擦力,可以增大充填角,提高充种性能。

2 EDEM 仿真分析

2.1 EDEM 仿真模型与仿真参数

本研究的油菜气力滚筒式精量集排器,可以同时实现“一器六行”播种,为简化 EDEM 仿真模型,选取集排器单行开展研究。油菜籽为类球形颗粒,且颗粒大小较均匀,油菜籽的仿真模型为直径 2 mm 的球形,如图 5 所示。由于油菜籽表面光滑、无粘附力,故选用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型^[20-21]。油菜籽和排种滚筒的仿真力学特性参数见表 2。

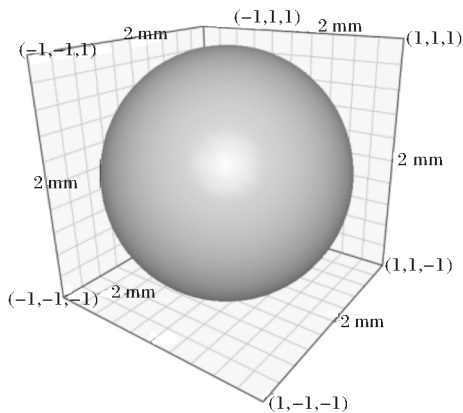


图 5 油菜籽颗粒模型

Fig.5 The model of rapeseed particle

2.2 试验方法

每组仿真时长共 9 s,颗粒工厂种子产生速率 8 500 粒/s,共产生 25 000 粒^[22]。排种滚筒第 3 s 末开始转动。记第 3 s 末时,种群最高点与排种滚筒中心平面的夹角为初始充填角;第 9 s 末时,种群最高点与排种滚筒中心水平面的夹角为充填角 θ ;充填角与初始充填角之差为拖带角。种群面(进种管最低面)和排种滚筒中心水平面之间的距离 h 为充填高度^[23],若种群面低于排种滚筒中心水平面,则 h 为负值。

2.3 排种滚筒转速对种群动力学特性的影响

充种高度为 $h = -5$ mm,排种滚筒转速为 15、20、25、30、35、40 r/min 时,种群的充填角和拖带角,如表 3 所示。由于油菜籽下落时与排种滚筒碰撞,油菜籽的位置不断变化、随机性高,导致种群初始充填角和充填角波动变化。对于滚花排种滚筒和无滚花排种滚筒,种群拖带角随排种滚筒转速的增大而增大,且滚花排种滚筒拖带角大于无滚花排种

表 2 油菜籽与排种滚筒材料机械物理特性参数

Table 2 Mechanical and physical properties of rapeseed and cylinder used in the simulations

参数 Parameter	仿真参数 Simulation parameters	数值 Value
油菜籽机械物理特性 The mechanical and physical properties of rapeseed	直径/mm Diameter	2
	泊松比 Poisson's ratio	0.25
	剪切模量/Pa Shear modulus	1.1×10^7
	密度/(kg/m ³) Density	680
排种滚筒机械物理特性 The mechanical and physical properties of cylinder	泊松比 Poisson's ratio	0.30
	剪切模量/Pa Shear modulus	8.4×10^{10}
	密度/(kg/m ³) Density	7 890
油菜籽间接接触特性 The contact characteristics between the rapeseed	颗粒间恢复系数 Coefficient of restitution between rapeseed	0.60
	颗粒间静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.50
	颗粒间动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.01
油菜籽与排种滚筒间接接触特性 The contact characteristics between the rapeseed and cylinder	颗粒与排种滚筒间恢复系数 Coefficient of restitution between rapeseed and cylinder	0.60
	颗粒与排种滚筒间静摩擦系数 Coefficient of static friction between rapeseed and cylinder	0.30
	颗粒与排种滚筒间动摩擦系数 Coefficient of static friction between rapeseed and cylinder	0.01

表 3 排种滚筒转速对充种性能的影响

Table 3 Effects of cylinder speed on seed filling performance

滚花形式 Knurling form	排种滚筒转速/(r/min) Rotational speed	初始充填角/(°) Initial filling angle	充填角/(°) Filling angle	拖带角/(°) Towing angle
有滚花 Knurled cylinder	15	-2.09	0.90	2.99
	20	-2.03	1.19	3.22
	25	-1.97	1.79	3.76
	30	-2.13	2.00	4.13
	35	-2.05	2.32	4.37
	40	-1.93	2.76	4.69
无滚花 No-knurled cylinder	15	-1.04	-0.05	0.99
	20	-1.49	0.05	1.54
	25	-1.31	0.90	2.21
	30	-2.26	0.08	2.34
	35	-2.23	0.12	2.35
	40	-2.27	0.10	2.37

滚筒,说明滚花排种滚筒增加了油菜籽被吸附的概率,有利于提高集排器充种性能。

排种滚筒转速对种群动力学特性的影响如图 6 所示。对于滚花排种滚筒和无滚花排种滚筒,随着排种滚筒转速的增加,排种滚筒对种群作用的法向力和切向力以及种群所受合力、速度线性增加,且线性拟合度较好,说明排种滚筒转速通过影响油菜籽的受力、速度来影响集排器的排种性能。排种滚筒转速一定时,滚花排种滚筒的种群动力学特性优于无滚花排种滚筒,说明滚花排种滚筒可以增大对种

群的扰动,使油菜籽便于被吸附,提高集排器充种性能,降低漏播率。

2.4 充填高度对种群动力学特性的影响

排种滚筒转速为 20 r/min、充种高度 h 分别为 -15、-10、-5、0、5、10 mm 时,滚花排种滚筒和无滚花排种滚筒的充种性能随充填高度的变化情况如表 4 所示。对于滚花排种滚筒和无滚花排种滚筒,充填高度增加,充种室内油菜籽的数量显著增加,种群初始充填角、充填角随之增加。拖带角随充填高度增加总体呈增加趋势,且滚花排种滚筒和无滚花

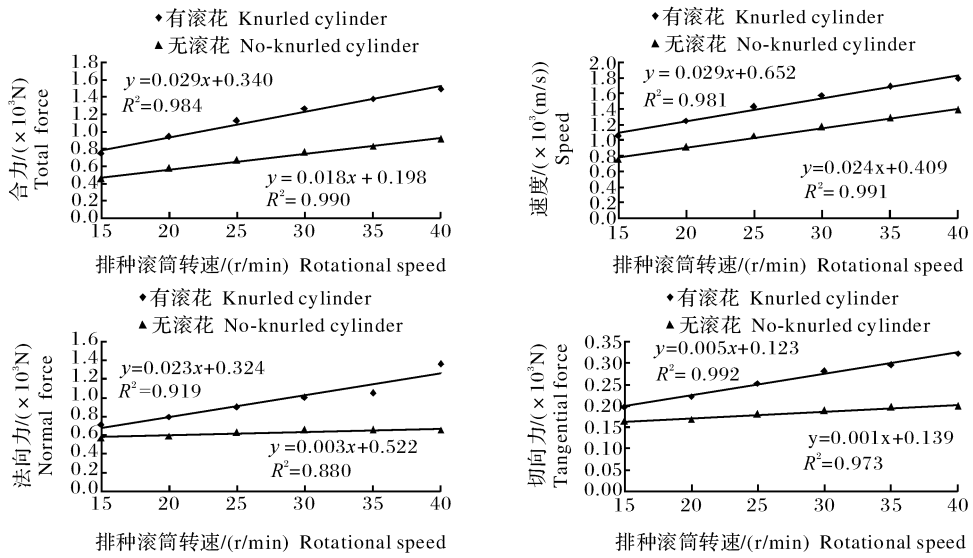


图 6 排种滚筒转速对种群动力学特性的影响

Fig.6 Effects of cylinder rotational speed on seed dynamic characteristics

表 4 充填高度对充种性能的影响

Table 4 Effects of seed filling height on seed filling performance

滚花形式 Knurling form	充填高度/mm Filling height	初始充填角/(°) Initial filling angle	充填角/(°) Filling angle	拖带角/(°) Towing angle
有滚花 Knurled cylinder	-15	-12.09	-10.10	1.99
	-10	-5.79	-4.01	1.78
	-5	-2.03	1.19	3.22
	0	2.83	5.63	2.80
	5	7.72	11.36	3.64
	10	11.95	18.37	6.42
无滚花 No-knurled cylinder	-15	-12.25	-11.11	1.14
	-10	-6.00	-5.17	0.83
	-5	-1.49	0.05	1.54
	0	1.62	4.60	2.98
	5	7.32	11.53	4.21
	10	12.23	18.35	6.12

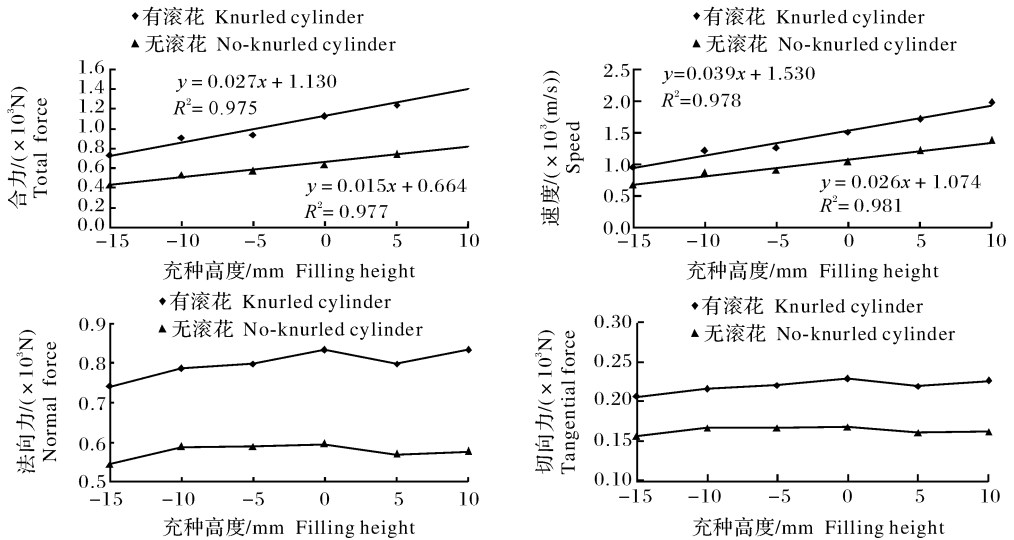


图 7 充填高度对种群动力学特性的影响

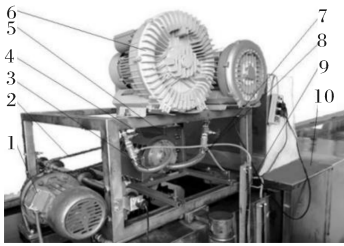
Fig.7 Effects of filling height on seed dynamic characteristics

排种滚筒的拖带角数值差异较小。充填高度对种群动力学特性的影响如图 7 所示。随充填高度的增加,种群所受合力和速度线性增加,排种滚筒对种群作用的法向力和切向力波动较小,且滚花排种滚筒大于无滚花排种滚筒。滚花排种滚筒与种群间的摩擦力高于无滚花排种滚筒,可以增大对种群的扰动,油菜籽被型孔吸附的概率增大,保证了较高的合格指数。

3 排种性能试验

3.1 试验材料与方法

如图 8 所示,试验以 JPS-12 型排种器性能检测试验台为平台,以华油杂 62 为试验材料,以“JB/T10293—2001 单粒(精密)播种机技术条件”和国家标准“GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法”为依据,开展不同排种滚筒转速、充填高度对合格指数、重播指数、漏播指数和株距变异系数等排



1.驱动电机 Driving motor; 2.链条 Chain; 3.负压管道 Negative pressure pipe; 4.气压调节阀 Air pressure regulating valve; 5.油菜气力滚筒式精密集排器 Pneumatic knurled cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed; 6.风机 Fan; 7.测压管 Pressure measuring tube; 8.正压管道 Positive pressure pipe; 9.U型测压计 U type pressure gauge; 10.JPS-12 排种器性能检测试验台 JPS-12 experimental platform of metering device.

图 8 油菜气力滚筒式精密集排器试验装置

Fig.8 Bench test equipment of pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed

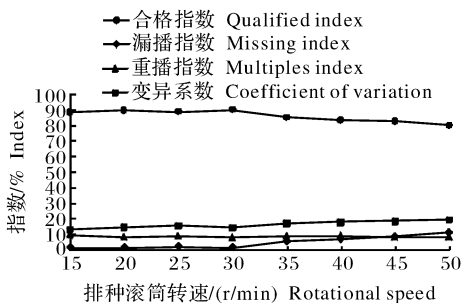


图 9 排种滚筒转速对排种性能的影响

Fig.9 Effects of cylinder rotational speed on seeding performance for rapeseed

种性能指标影响的试验。收集每个排种口排出的油菜籽,称其质量,采集时间为 1 min,重复 5 次,计算不同处理下的各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数和种子破损率。集排器工作时,负压为 $-2\ 500\ \text{Pa}$,正压为 $500\ \text{Pa}$,设排种滚筒转速分别为 15、20、25、30、35、40、45 和 50 r/min,共 8 个水平,设充填高度分别为 -15 、 -10 、 -5 、0 和 5 mm,共 5 个水平,重复 5 次。

3.2 排种滚筒转速对排种性能的影响

当充填高度 $h = -5\ \text{mm}$ 时,排种滚筒转速在 15~50 r/min 范围内的集排器排种性能如图 9 所示。合格指数与排种滚筒转速的拟合方程为 $y = -0.227x^2 + 0.689x + 88.97$,相关系数 R 为 0.908;漏播指数与滚筒转速的拟合方程为 $y = 0.217x^2 - 0.502x + 1.558$,相关系数 R 为 0.963。两方程拟合度较好。当排种滚筒转速为 30 r/min 时,合格指数最优,为 90.10%,此时漏播指数为 1.56%。当排种滚筒转速低于 30 r/min 时,合格指数和漏播指数较稳定;当排种滚筒转速高于 30 r/min 时,合格指数随排种滚筒转速增加而降低,重播指数基本保持稳定,由于滚花排种滚筒对种群的拖带和扰动作用,型孔可以吸附充足油菜籽。各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数随排种滚筒转速增加而增加,当排种滚筒转速为 15~50 r/min 时,各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数和种子破损率分别低于 5.5%、2.0% 和 0.2%。

3.3 充填高度对排种性能的影响

当排种滚筒转速为 20 r/min 时,充填高度在 $-15 \sim 5\ \text{mm}$ 范围内的排种性能如图 10 所示。合格指数随充填高度的增加先增大后减小,重播指数随之增大,漏播指数先减小后增大。当充填高度较低时,由于滚花排种滚筒对种群的扰动作用,油菜籽被型孔吸附的概率增大;当充填高度较高时,型孔可

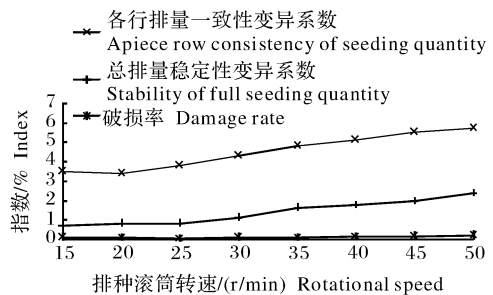


图 9 排种滚筒转速对排种性能的影响

Fig.9 Effects of cylinder rotational speed on seeding performance for rapeseed

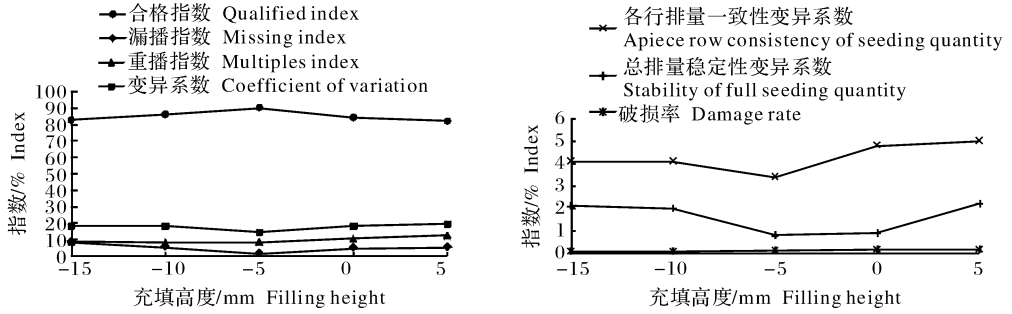


图 10 充填高度对排种性能的影响

Fig.10 Effects of filling height on seeding performance for rapeseed

表 5 拖带角、合力与排种性能的相关系数

Table 5 Coefficients between towing angle, total force and seeding performance

项目 Item	拖带角 Towing angle	合力 Total force	合格指数 Qualified index	漏播指数 Missing index
拖带角 Towing angle	1			
合力 Total force	0.973 **	1		
合格指数 Qualified index	0.875 *	0.888 *	1	
漏播指数 Missing index	-0.828 *	-0.829 *	-0.983 **	1

注：** 表示在 0.01 水平上显著相关；* 表示在 0.05 水平上显著相关。Note: ** represents significantly different at the 0.01 probability levels; * represents significantly different at the 0.05 probability levels.

能同时吸附多粒油菜籽，重播指数增大。各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数随充填高度的增大先增大后减小，当充填高度为 -5 mm 时，各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数最小，最小值分别为 3.4% 和 0.8%。种子破损率随充填高度的增加变化不大，均低于 0.16%。

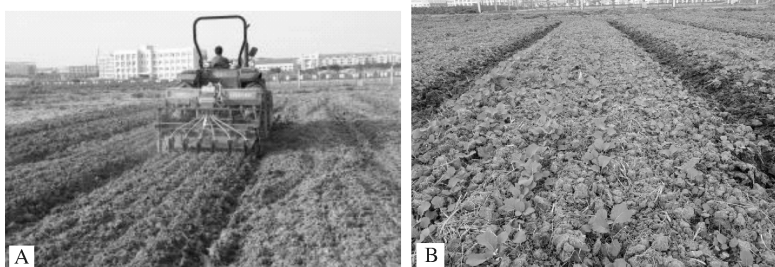
3.4 拖带角、合力与排种性能的相关关系

表 5 表明，拖带角、合力与合格指数均呈显著正相关，与漏播指数均呈显著负相关；拖带角与合力呈极显著正相关，合格指数与漏播指数呈极显著负相关。因此，排种滚筒转速和充填高度在一定范围内，滚花排种滚筒可增加种群拖带角和合力，提高充种

性能，从而提高合格指数，降低漏播指数。

4 田间播种试验

为进一步验证台架试验结果，检验油菜气力滚筒式精量集排器的工作性能，于 2016 年 10 月 7 日和 10 月 9 日在华中农业大学校内现代农业科技园开展了油菜田间播种试验，如图 11A 所示。试验以 2BFQ-6 油菜精量联合直播机为平台，牵引动力为东方红-LX854，机组前进速度为 2.52 km/h，动力输出轴转速 720 r/min，排种滚筒转速 20~30 r/min。排种器工作负压 -4 000 Pa，正压 500 Pa，充填高度 -5 mm。图 11B 为油菜播种 40 d 的出苗效果，该



A: 田间试验 Field experiment; B: 出苗效果 Emergence performance of rapeseed.

图 11 油菜田间试验与出苗效果

Fig.11 Field experiment and emergence performance of rapeseed

集排器直播油菜田间成苗率为70.97%，平均株距为65.62 mm，株距变异系数为14.99%，满足油菜种植农艺要求。

5 讨论

为提高油菜气力滚筒式精量集排器的充种性能，设计了一种滚花排种滚筒。EDEM 仿真试验表明，种群充填角随排种滚筒与种群间的摩擦力增大而增大；种群拖带角随滚筒转速的增大而增大，且滚花排种滚筒拖带角大于无滚花排种滚筒。随排种滚筒转速的增加，排种滚筒对种群作用的合力、法向力和切向力，以及种群的速度线性增加；随充填高度的增加，滚花排种滚筒和无滚花排种滚筒对种群作用的合力和种群的速度线性增加，对种群作用的法向力和切向力波动较小。滚花排种滚筒的种群动力学特性优于无滚花排种滚筒。

台架试验表明，当排种器负压为-2 500 Pa、正压500 Pa、充填高度为-5 mm、排种滚筒转速为30 r/min 时，排种性能较好，合格指数90.10%，漏播指数1.56%，各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数和种子破损率分别低于4.3%、1.1%和0.1%。田间播种试验表明，当排种器工作负压为-4 000 Pa、正压500 Pa、充填高度-5 mm、排种滚筒转速在20~30 r/min 范围内时，该集排器直播油菜田间成苗率为70.97%，平均株距为65.62 mm，株距变异系数为14.99%，满足油菜种植农艺要求。本研究 EDEM 仿真试验未考虑正、负气压的影响，后期可考虑利用气固耦合方法研究正、负气压和滚花结构对集排器充种性能的综合影响。

参 考 文 献

- [1] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68-73.
- [2] 王在满, 罗锡文, 黄世醒, 等. 型孔式水稻排种轮充种过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 56-61.
- [3] MALEKI M R, MOUAZEN A M. A new index for seed distribution uniformity evaluation of grain drills[J]. Biosystems engineering, 2006, 94(3): 471-475.
- [4] 史智兴, 张晋国, 王沛沛. 圆管气吸排种器的搅种装置: CN201365408[P]. 2009-12-23.
- [5] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1-8.
- [6] 祁兵, 张东兴, 崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 8-15.
- [7] 赵湛, 李耀明, 陈进, 等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 112-116.
- [8] 于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6.
- [9] 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.
- [10] VAN-HEDEKERKE P, TIJSEKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technol., 2009, 190(3): 348-360.
- [11] LANDRY H, THIRION F. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment[J]. Computers and electronics in agriculture, 2006, 51(1): 35-53.
- [12] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 种层厚度对油菜兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 47(6): 11-19.
- [13] 刘月琴, 赵满, 全刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65-73.
- [14] 潘海兵, 王延延, 黄小毛, 等. 油菜籽粒在割台纵向正压气流场中漂移运动的数值模拟[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 117-123.
- [15] ORTH R J, MARION S R, GRANGER S, et al. Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds[J]. Aquatic botany, 2009, 90: 204-208.
- [16] 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.
- [17] 中国农业机械科学研究所. 农业机械手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2007.
- [18] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [19] RAJI A O, FAVIER J F. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. I: Theory, model development and validation[J]. Journal of food engineering, 2004, 64(3): 359-371.
- [20] 曹秀英, 廖庆喜, 丛锦玲, 等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 40-46.
- [21] 曹秀英, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77-84.
- [22] 胡国明. 颗粒系统的离散元法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [23] 李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 17-25.

Simulation analyses and experiments of seed filling performance of pneumatic knurled cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed

LI Shanshan¹ LIAO Qingxi^{1,2} WANG Du¹ YAO Lu¹
LEI Xiaolong¹ WANG Lei¹ XING Hechen¹

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Collaborative Innovation Center for Oil Crops in South China, Changsha 410128, China

Abstract A knurled cylinder for pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed was developed. The mechanical model of the single rapeseed on the compulsive driving layer in the filling area was established via analyzing the motion trajectory of each single seed. The EDEM simulation was conducted to study the effects of the knurled structure, cylinder rotational speed and seed filling height on the dynamic characteristics of seed. The results showed that the seed filling angle and filling performance increased with the increase of the friction between the cylinder and rapeseed. The cylinder rotational speed and seeding filling height affected the angle of seed filling and towing. With the increase of the cylinder rotational speed, the normal force and tangential force between cylinder and rapeseed, the total force and velocity of the rapeseed increased linearly. With the increase of the seed filling height, the total force and velocity of rapeseed increased linearly. The dynamics characteristics of rapeseed with knurled cylinder was better than that of the normal cylinder. The results of bench experiments showed that the positive pressure was 500 Pa, the seed filling height was -5 mm, and the cylinder rotational speed was 30 r/min with good seedling performance when the negative pressure was about 2 500 Pa. When the quality index was 90.10%, the loss index was 1.56%. When the cylinder rotational speed was between 15 r/min and 50 r/min, the variation coefficient of the consistency of each line displacement, stability of the total displacement and rapeseed damage rate were less than 5.5%, 2.0% and 0.2%, respectively. The results of the field experiments showed that the pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed oil satisfied the technical requirements of rapeseed planter with which the knurled cylinder was the key part. It will provide a reference for optimizing the structure of centralized precision metering device and improving seedling performance.

Keywords pneumatic cylinder-type centralized precision metering device; the knurled cylinder; EDEM simulation; seed filling performance; the seed filling angle; rape

(责任编辑:陆文昌)