

气力集排式油菜精量排种器的排种过程分析

张猛 余佳佳 刘晓辉 廖庆喜

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 为探明气力集排式油菜精量排种器的排种过程,分析了排种过程中充种、护种、投种等各阶段种子的运动规律,以不同阶段中吸附力的变化为基础,观察了排种器的结构参数和工作参数对排种过程的影响,进而建立了排种器各参数与吸附力之间的关系式以及种子的运动学模型。

关键词 排种器; 油菜; 充种; 投种; 运动学模型

中图分类号 S 223.2⁺5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2012)01-0116-05

精密播种机的核心部件是排种器,排种器作业质量直接影响播种机的排种性能^[1-2]。排种器一般分为2类:机械式排种器和气力式排种器^[3-6]。目前排种器的工作过程一般分为充种、清种、护种和投种过程,其中任一环节的故障势必影响排种器的作业效果。不同类型的排种器,工作过程不尽相同,工作环节较少的排种器在提高排种器作业效果方面具有明显的优势。相较于其他类型排种器,气力式排种器不仅对种子形状和尺寸要求不严,对种子损伤小,同时工作环节也较少,已达到精量播种的要求,在农作物精量播种中应用广泛^[7-9]。

受油菜籽粒小、质量轻、易破损等因素的制约,适用于油菜籽等小粒径种子的排种器鲜见报道。笔者以自行开发研制的气力集排式油菜精量排种器为对象,通过对其排种过程进行理论分析,确定影响充种、投种等过程的各项参数,旨在为相关的气力式排种器的设计提供科学依据。

1 结构与工作原理

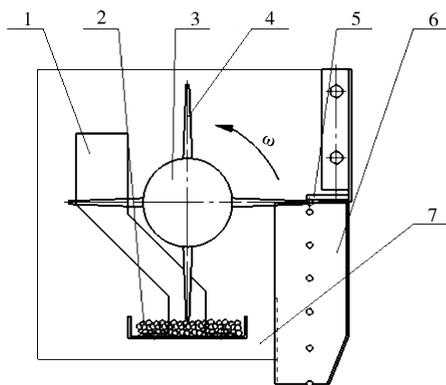
1.1 排种器组成

气力集排式油菜精量排种器主要由副种箱、滚筒、吸嘴、种箱、刮种装置、导种装置、侧板等组成,其结构简图如图1。

1.2 工作原理

排种器工作时,副种箱内的种子由于重力和种子间的相互作用通过限位口充入种箱内,使种箱内

种子处于一定的液面高度。风泵对滚筒进行抽气时,滚筒与吸嘴腔内为真空状态,此时滚筒带动吸嘴逆时针转动,吸嘴转过种箱处,将种子吸附到吸嘴顶端,完成充种过程;离开种群后,吸嘴吸附住种子保持其不脱落,完成护种;当吸嘴转动到刮种装置时,刮种装置将吸附在吸嘴处的种子强制刮落,排种过程结束;种子经导种装置投出,完成整个播种过程;吸嘴型孔尺寸与种子直径相适应,以保证吸嘴绕过种子箱时每次只吸附1~2颗种子,达到精量播种的效果。



1. 副种箱 Vice seed-box; 2. 种箱 Seed-box; 3. 滚筒 Rotational cylinder; 4. 吸嘴 Nozzle; 5. 刮种装置 Seed releasing equipment; 6. 导种装置 Seed transmitting equipment; 7. 侧板 Side plate.

图1 气力集排式油菜精量排种器结构简图

Fig. 1 Structure of rape pneumatic centralized metering device

收稿日期: 2011-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875104)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090146110016)

张猛, 硕士研究生, 研究方向: 农业装备与测控. E-mail: zhangmeng@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 廖庆喜, 博士, 教授, 研究方向: 机械化生产技术与装备. E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

2 排种过程分析

2.1 充种过程分析

1) 充种形式。排种器匀速转动时,吸嘴绕经种箱,种子在吸嘴从进入到离开种子箱的过程中被吸附到吸嘴顶端。此过程中,种子被吸附有 4 种可能的形式:Ⅰ.吸嘴吸住种子后,顺利携带被吸附的种子离开种箱;Ⅱ.吸嘴先吸附住种子,在吸嘴离开种子箱的过程中,由于无法克服种子间的相互作用力,被吸附的种子再次脱离吸嘴,此形式可能多次重复出现;Ⅲ.种子先被吸附后脱落,吸嘴仍能顺利携带被吸附的种子离开种箱;Ⅳ.吸嘴由于吸附力过小,导致种子无法被吸附。以上 4 种形式的充种过程,仅有Ⅰ和Ⅲ 2 种形式能实现顺利充种,而形式Ⅲ的稳定性较低,经常与形式Ⅱ现象交替出现,对投排种效果影响较大。为保证排种器的充种效果稳定可靠,需选择形式Ⅰ的充种过程。

2) 充种过程受力。为提高排种器的排种效果,对充种过程进行动力学分析,研究影响充种形式的各项参数。图 2 所示是被吸附种子的受力分析图。为便于对种子进行受力分析,沿吸嘴的法向和切向建立辅助坐标系,本试验其他受力图坐标系均参照此标准建立。

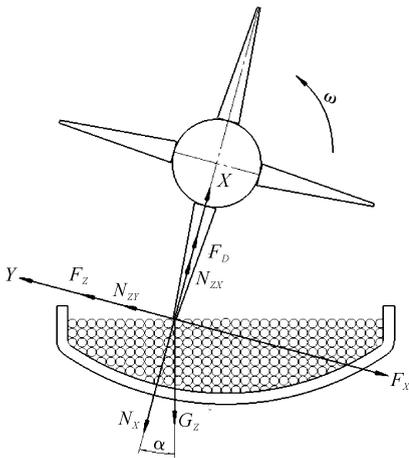


图 2 吸嘴吸附种子的受力分析

Fig. 2 Force diagram of seed in being absorbed

充种过程包括 2 个阶段:Ⅰ.吸嘴将种子由静止吸附到其顶端;Ⅱ.吸嘴同被吸附的种子一起在种群内转动,直至离开种群。通过前面的受力分析可知,种子在这 2 个阶段的运动需要满足如下力学条件。

第 1 阶段种子仅被吸附住,在此瞬时种子尚未

随吸嘴一起转动,无惯性力,需满足条件^[10]:

$$\begin{cases} F_D + N_{ZX} = N_X + G_Z \cos \alpha & \sum F_X = 0 \\ F_Z + N_{ZY} = F_X + G_Z \sin \alpha & \sum F_Y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_Z = N_{ZX} \tan \varphi_z \\ F_X = N_X \tan \varphi_x \end{cases} \quad (2)$$

式中 G_Z 为种子重力(N); N_X 为吸嘴对种子的法向压力(N); N_{ZX} 为其余种子对被吸附种子的合力在 X 轴的分量(N); N_{ZY} 为其余种子对被吸附种子的合力在 Y 轴的分量(N); F_X 为吸嘴对种子的切向摩擦力(N); F_Z 为其余种子对被吸附种子的切向摩擦力(N); F_D 为吸嘴两侧的压差形成的吸附力(N); φ_z 为种子间的摩擦角(rad); φ_x 为吸嘴与种子间的摩擦角(rad)。

将(2)式代人(1)式,可得:

$$F_D = \frac{N_{ZX} \tan \varphi_z + N_{ZY} - G_Z \sin \alpha}{\tan \varphi_x} + G_Z \cos \alpha - N_{ZX} \quad (3)$$

第 2 阶段被吸附的种子随吸嘴一起转动,存在惯性力,需满足条件:

$$\begin{cases} F_D + N_{ZX} = N_X + G_Z \cos \alpha + m \omega R^2 & \sum F_X = 0 \\ F_Z + N_{ZY} = F_X + G_Z \sin \alpha & \sum F_Y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_Z = N_{ZX} \tan \varphi_z \\ F_X = N_X \tan \varphi_x \end{cases} \quad (5)$$

将(4)式代人(5)式可得:

$$F_D = \frac{N_{ZX} \tan \varphi_z + N_{ZY} - G_Z \sin \alpha}{\tan \varphi_x} + G_Z \cos \alpha - N_{ZX} m \omega R^2 \quad (6)$$

吸嘴两侧压差形成的吸附力,需满足条件^[11]:

$$F_D = k \Delta P S \quad (7)$$

式中 k 为各种因素的比例系数; ΔP 为内外压差(Pa); S 为吸嘴型孔截面积(m^2); R 为吸嘴圆周半径(m); r 为吸嘴型孔半径(m)。

从上述推导可以得到满足 2 个条件的最小吸附力为:

$$F_{D \min} = k \Delta P \pi r^2 = \frac{N_{ZX} \tan \varphi_z + N_{ZY} - G_Z \sin \alpha}{\tan \varphi_x} + G_Z \cos \alpha - N_{ZX} m \omega^2 R \quad (8)$$

上式确定了充种过程中,最小吸附力与真空度、吸嘴形状、转速、种子的物理—机械特性等参数间的关系。滚筒转速 ω 越大,需要的吸附力越大,不利于种子被吸附,适当增加吸嘴与种子间的摩擦角、真空度和吸嘴型孔尺寸,可以提高吸附力,利于种子被吸附。

2.2 护种过程分析

吸嘴完成充种过程后,携带被吸附的种子继续转动,种子被刮种装置强制刮落前,吸嘴需要以转速 ω 从离开种群运动到刮种装置这一区间,此阶段一般称为护种过程。针对此排种器而言,整个过程中只需要提供足够的吸附力 F_D 保证种子不脱落即可满足护种要求,而不需要任何的护种装置。护种装置从排种器中的剔除弱化了护种过程,使排种器的作业环节得到简化,提高了排种器的作业稳定性。

护种过程中种子仅受自身重力 G_Z 、吸嘴对种子的法向压力 N_X 、吸嘴对种子的切向摩擦力 F_X 和吸附力 F_D 。图3所示为护种过程中被吸附的种子受力分析图。

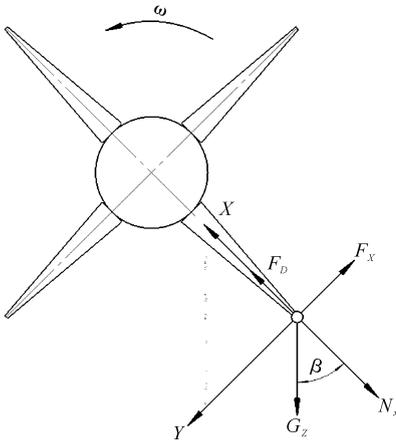


图3 护种过程种子的受力分析

Fig. 3 Force diagram of seed in protecting process

护种过程中种子一直被吸附在吸嘴顶端,随吸嘴一起转动而不脱落,需满足条件:

$$\begin{cases} F_D - N_X - G_Z \cos\beta = m\omega^2 R & \sum F_X = 0 \\ F_X - G_Z \sin\beta = 0 & \sum F_Y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$F_X = N_X \tan\varphi_x \quad (10)$$

将(10)代入(9)式可得

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{G_Z \sin\beta}{\tan\varphi_x} + G_Z \cos\beta + m\omega^2 R \\ &= G_Z \left[\frac{\sin(\beta + \varphi_x)}{\sin\varphi_x} + \frac{\omega^2 R}{g} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

又

$$F_D = k\Delta P\pi r^2 \quad (12)$$

在此过程中,即吸嘴与刮种装置接触前,满足条件的最小吸附力为:

$$F_{D\min} = k\Delta P\pi r^2 = G_Z \left[\frac{\sin(\beta + \varphi_x)}{\sin\varphi_x} + \frac{\omega^2 R}{g} \right] \quad (13)$$

通过上式确定了滚筒转速与吸嘴型孔半径、种

子与吸嘴间的内摩擦系数、真空度等参数间的关系。而内摩擦系数属于种子固有的物理机械特性,由此公式可知,滚筒速度随着真空度与吸孔截面半径增大而增大。本设计中型孔的截面半径还与种子自身的几何参数有关,其值略小于种子半径,以保证种子不被吸进滚筒内。

2.3 投种过程分析

从携带种子的吸嘴与刮种装置接触到种子经导种装置顺利投出,种子共经历了2个阶段:Ⅰ.刮种装置给种子一个反方向阻力,种子原来的运动状态结束,种子脱离吸嘴,运动方向发生变化;Ⅱ.随后,种子在自身重力作用下,以重力加速度做自由落体运动。

第1阶段时间很短,刮种装置的核心部件为具有一定韧度与强度的硅胶片,其与种子接触时变形量非常小,可视变形为零,对种子而言,种子位移也为零。在此瞬时,种子脱离吸嘴,速度变向。此阶段种子受力分析如图4所示。

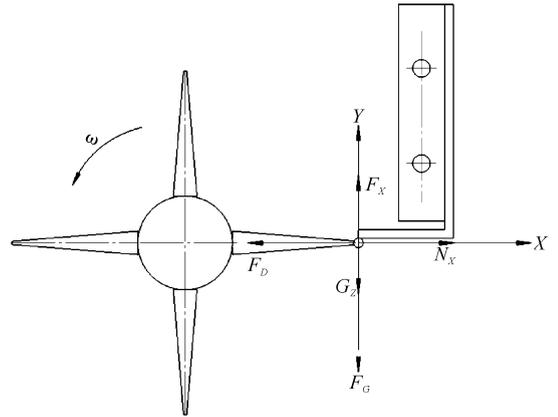


图4 接触瞬时种子的受力分析

Fig. 4 Force diagram of seed in the touching moment

种子各方向受力状态分析如下:

$$\begin{cases} \sum F_X = F_D - N_X = m\omega^2 R \\ \sum F_Y = G_Z + F_G - F \end{cases} \quad (14)$$

而接触前 $\sum F_Y = G_Z - F_X = 0$,即

$$\begin{cases} \sum F_X = m\omega^2 R \\ \sum F_Y = F_G \end{cases} \quad (15)$$

可得种子在接触的瞬时,种子动量方程:

$$\begin{cases} m(V_X - V_{X0}) = \sum F_X \times \Delta t_1 = m\omega^2 R \Delta t_1 \\ m(V_Y - V_{Y0}) = \sum F_Y = F_G \Delta t_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{而} \quad \begin{cases} V_{X0} = V_{\text{机具}} \\ V_{Y0} = -\omega R \end{cases} \quad (17)$$

即有

$$\begin{cases} V_X = V_{\text{机具}} + m\omega^2 R \Delta t_1 \\ V_Y = \frac{F_G \Delta t_1}{m} - \omega R \end{cases} \quad (18)$$

接触瞬时, $\Delta t_1 \rightarrow 0, m\omega^2 R \Delta t_1 = 0, V_X = V_{\text{机具}}$, 而种子在垂直吸嘴方向, 速度反向。此时 $V_Y \geq 0$, 可取 V_Y 为一大于零的某一常数 V_C , 通过前面分析可知种子位移为零。

接触瞬时结束后, 第 2 阶段开始, 种子运动脱离吸嘴运动分析如图 5 所示。

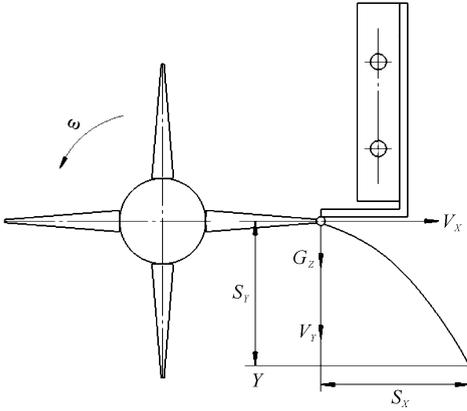


图 5 脱离吸嘴的种子运动分析

Fig. 5 Force diagram of seed without absorption

种子初始相关动力学参数如下：

$$V_X = V_{\text{机具}}, V_Y = V_C, S_X = 0, S_Y = 0$$

第 2 阶段, 种子仅受自身重力, 做自由落体运动, 排种器离地高度为 $H_{\text{地}}$ 。

$$\begin{cases} S_X = V_{\text{机具}} t \\ S_X = V_C t + \frac{1}{2} g t^2 = H_{\text{地}} \end{cases} \quad (19)$$

所以

$$S_X = \frac{-2V_C + \sqrt{4V_C^2 + 4gH_{\text{地}}}}{2g} \times V_{\text{机具}} \quad (20)$$

导种装置对种子脱离吸嘴后的运动过程影响较大, 当 S_X 比导种装置出口尺寸 S_C 小时, 种子在下落时易与导种装置发生碰撞, 干扰种子的正常排种过程。为避免此类现象发生, 需确保导种装置高度 H_C 与出口尺寸 S_C 比例满足式(20), 在导种装置的设计中, 应选择与种子的运动轨迹相适应的导种结构形式、尺寸。

3 排种过程试验

3.1 材料与方法

以华杂 4 号油菜籽为试验对象。供试油菜籽主要机械物理特性: 平均粒径 1.5~2.2 mm, 千粒重

3.96 g, 含水率 7.6%。排种器主要相关结构参数: 吸嘴圆周直径 220 mm, 吸嘴型孔直径 1.0 mm, 型孔倒锥角 90°, 种箱内种子层表面漫过吸嘴 2~3 层种子厚度。

根据前面排种过程理论分析可知, 排种过程主要与滚筒真空度、滚筒转速、吸嘴结构、种子与吸嘴间的内摩擦系数等有关, 在油菜籽自身物理机械特性与排种器相关结构尺寸参数基本确定后, 滚筒真空度与滚筒转速为影响排种性能的主要因素。选择二者为试验因素, 进行单因素组合试验(表 1)。

表 1 试验因素水平

Table 1 Experimental factors and levels

水平 Levels	因素 Factors	
	滚筒转速/(r/min) Rotational speed	滚筒真空度/kPa Rotational vacuity
1	20	0.5
2	25	1.0
3	30	1.5

试验在华中农业大学工学院精密播种试验台上进行, 根据 GB/T6973-2005《单粒(精密)播种机试验方法》确定排种均匀性试验指标为合格指数、重播指数、漏播指数等。各试验指标计算式: 合格指数 $A = (n_1/N') \times 100$; 重播指数 $D = (n_2/N') \times 100$; 漏播指数 $M = (n_0/N') \times 100$ 。式中 n_0 为漏播数; n_1 为合格数; n_2 为重播数; N' 为区间数。

3.2 结果与分析

从图 6 中可以看出, 随着滚筒转速的升高, 合格指数降低, 漏播指数增加; 随着滚筒真空度的增加,

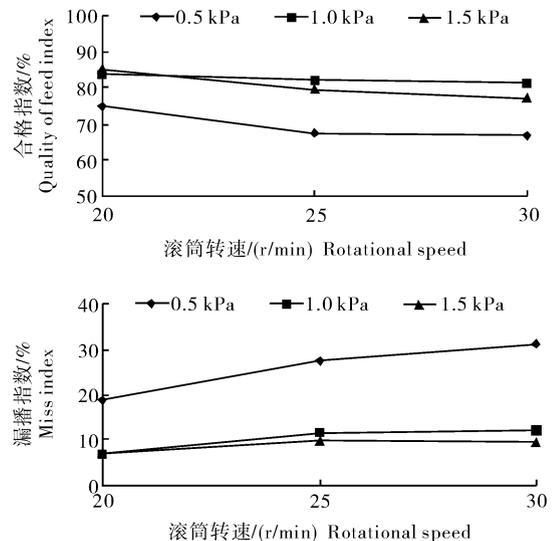


图 6 滚筒真空度和转速对排种性能的影响曲线

Fig. 6 Effect of rotational vacuity and speed on metering performance

合格指数呈先升高后降低的趋势,而漏播指数呈总体上升趋势。

通过前面的排种过程分析可知,随着滚筒转速 ω 增加,保证良好排种性能所需的最小吸附力 $F_{D\min}$ 也相应增加,在其他条件基本确定的情况下 F_D 是一定的,但不能满足 $F_{D\min}$ 的需求相应增加,此时吸附效果降低,造成漏播增加,合格指数降低,故需要对滚筒的最大转速进行限制以获取最佳的排种效果;随着滚筒真空度 ΔP 的增加,吸附力 F_D 增加,而所需的最小吸附力 $F_{D\min}$ 是一定的, F_D 偏大时易多吸,造成重播,合格指数降低; F_D 偏小时不利于充种,造成漏播。因此,为获取合适大小的吸附力 F_D ,以确保排种器优异的排种性能,滚筒真空度需维持在一个合理范围内。试验结果与理论分析结果一致,验证了排种过程理论分析的合理性。

4 讨 论

设计的排种器采用负压吸种机械式刮种的工作原理,实现了油菜的精密播种。沿滚筒轴向均匀分布的几行吸嘴实现集排式播种,具有结构简单、工作效率高的优点。

本试验对排种器吸种过程的 4 种吸附形式、护种过程的极限状态和投种过程中的种子分别进行了分析,建立了各过程中种子的动力学模型,以及排种器主要结构参数、运行参数与吸附力的关系模型,试验结果可为排种器的优化设计提供理论依据。

对排种器性能的验证试验结果表明,其合格指数随转速的提高和真空度的增加而下降,当转速为 30 r/min、真空度为 1.0 kPa 时合格指数趋于稳定。另外,对排种过程的单因素组合试验结果也验证了排种过程理论分析的合理性。

参 考 文 献

- [1] 张秀花,夏玲,马洪亮.精密播种机的可靠性研究[J].农业机械学报,2004,35(2):62-65.
- [2] 王冲,宋建农,王继承.穴孔式水稻排种器投种过程分析[J].农业机械学报,2010,41(8):39-42.
- [3] 陈立东,何堤.气吸式播种机播种质量影响因素分析[J].现代化农业,2005,317(12):37-38.
- [4] 叶新跃.我国播种机械的现状与发展趋势[J].中国农机化,1998,14(6):6-8.
- [5] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:357-358.
- [6] 张波屏.现代种植机械工程[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [7] 张泽平,马成林,左春桂.精播排种器及排种理论研究进展[J].吉林工业大学学报,1995,25(80):112.
- [8] 廖庆喜,李继波,覃国良,等.气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J].农业机械学报,2009,40(7):78-82.
- [9] 廖庆喜,李继波,覃国良,等.气力式油菜精量排种器试验[J].农业机械学报,2009,40(8):44-48.
- [10] 夏红梅,李志伟,牛菊菊,等.气力滚筒式蔬菜穴盘播种机吸排种动力学模型的研究[J].农业工程学报,2007,24(1):141-146.
- [11] 庞昌乐,鄂卓茂,苏聪英,等.气吸式双层滚筒水稻播种器设计与试验研究[J].农业工程学报,2000,16(5):52-55.

Analysis of metering process in pneumatic centralized metering device for rapeseed

ZHANG Meng YU Jia-jia LIU Xiao-hui LIAO Qing-xi

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

Abstract Through analyzing the metering process of pneumatic centralized metering device for rapeseed, the moving laws of seeds were found during the absorbing, protecting and dropping stages. Based on the variations of absorption forces, the effects of the metering devices with structure parameter and operating parameters on the metering process were analyzed; kinematic model of seed and the relationship between the absorption force and the parameters were established. The research provides theoretical evidence for the optimal design of metering device.

Key words metering device; rape; absorbing; dropping; kinematic model