

丘陵山区轻筒型油菜种-肥同播同施集排装置设计与试验

王磊^{1,2} 周国威^{1,3} 张青松^{1,3} 廖庆喜^{1,3} 廖宜涛^{1,3} 牛莉¹ 夏立波^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310021; 3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对丘陵山区等小田块油菜种植区域缺乏轻筒集成的油菜播种机排种与排肥装置问题, 设计了一种油菜种-肥同播同施集排装置。阐明了集排装置工作过程, 确定了排种滚筒与排肥滚筒主要结构参数, 分析了肥层控制板位置对排种量与排肥量匹配性的影响。应用 EDEM 仿真开展了油菜种-肥同播同施集排装置排种与排肥性能试验, 建立了肥层控制板位置与排肥量的关系模型, 试验结果表明: 集成式种肥滚筒转速为 20 ~ 50 r/min 时, 集成式种肥滚筒转速与排种速率、排肥速率均为线性关系, 肥层控制板与竖直方向间夹角在 22° ~ 38° 内增大时, 排肥速率在 1 709.63 ~ 2 484.31 g/min 内逐渐增加; 应用 DEM-CFD 耦合仿真分析了辅助输送气流对导种管内种子速度和受力的影响, 结果表明: 导种管与竖直面间倾斜角为 10° ~ 70° 时, 采用辅助输送气流可实现种子加速经导种管排出, 避免种子滞留。台架验证试验结果表明: 集成式种肥滚筒转速为 20 ~ 50 r/min 时, 总排种量稳定性变异系数不高于 0.92%、各行排种量一致性变异系数不高于 3.64%、种子破损率不高于 0.04%、总排肥量稳定性变异系数不高于 1.21%、各行排肥量一致性变异系数不高于 4.41%, 可实现油菜排量一定时, 通过调节肥层控制板与竖直方向间夹角, 满足不同排肥量需求。田间试验结果表明: 油菜各行株数一致性变异系数为 9.25%、总株数稳定性变异系数为 7.16%, 满足油菜精量播种要求。

关键词: 油菜; 同播同施; 排种装置; 排肥装置; 集成式种肥滚筒; 丘陵山区

中图分类号: S223.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)09-0089-13

OSID:



Design and Experiment of Lightweight and Simple Centralized Seeding – Fertilizing Device for Rapeseed in Hilly and Mountainous Areas

WANG Lei^{1,2} ZHOU Guowei^{1,3} ZHANG Qingsong^{1,3} LIAO Qingxi^{1,3} LIAO Yitao^{1,3} NIU Li¹ XIA Libo^{1,3}

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

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In response to the practical problem of the lack of light and simple integrated planter's seeding device and fertilizing device for rapeseed in small fields such as hilly and mountainous areas, a centralized seeding – fertilizing device for rapeseed was developed. The working process of the centralized seeding – fertilizing device for rapeseed was clarified. The main structural parameters of the seeding cylinder and fertilizing cylinder were determined. The influence of the fertilizer layer control board position on the matching of seeding and fertilizing quantity was analyzed. An experiment was conducted using EDEM simulation to investigate the seeding and fertilizing performance of the centralized seeding – fertilizing device for rapeseed. A model was established to determine the relationship between the

收稿日期: 2023-11-25 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600503)、国家自然科学基金项目(32001427)、湖北省自然科学基金项目(2023AFB557)、农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)开放项目(QSKF2023001)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)

作者简介: 王磊(1988—),男,讲师,博士,主要从事油菜耕播技术与装备研究,E-mail: wangchong12356@126.com

通信作者: 张青松(1987—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

fertilizer layer control board position and the fertilizing quantity. The experimental results showed that when the seed – fertilizer cylinder rotating speed was 20 ~ 50 r/min, the seed – fertilizer cylinder rotating speed was linearly related to the seeding quantity and fertilizing quantity. When the angle between the fertilizer layer control board and the vertical direction increased within 22° ~ 38°, the fertilizing rate was gradually increased between 1 709. 63 g/min and 2 484. 31 g/min. The DEM – CFD coupling simulation was applied to analyze the influence of auxiliary conveying airflow on the seed velocity and force inside the seed guiding tube. The results indicated that when the inclination angle between the seed guiding tube and the vertical plane was 10° ~ 70°, the auxiliary conveying airflow could achieve accelerated seed discharge through the seed guiding tube and avoid seed retention. The results of the bench validation test showed that when the seed – fertilizer cylinder rotating speed was 20 ~ 50 r/min, the stability variation coefficient of the total seeding quantity was not higher than 0. 92% , the consistency variation coefficient of each row of seeding quantity was not higher than 3. 64% , the seed damage rate was not higher than 0. 04% , the stability variation coefficient of the total fertilizing quantity was not higher than 1. 21% , and the consistency variation coefficient of each row of fertilizing was not higher than 4. 41% . As the seeding rapeseed was fixed, the angle between the fertilizer layer control board and the vertical direction could be adjusted to meet different fertilizing requirements. The field test results indicated that the variation coefficient for the consistency of the number of plants in each row of rapeseed was 9. 25% , and the variation coefficient for the stability of the total number of plants was 7. 16% , which met the requirements for precision seeding for rapeseed.

Key words: rapeseed; seeding – fertilizing; seeding device; fertilizing device; seed – fertilizer cylinder; hilly and mountainous areas

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,其种植区域分布广泛,主要分为春油菜和冬油菜^[1-2]。春油菜种植主要分布在我国西北高原各省,冬油菜主要集中在长江流域各省^[3-4]。冬油菜集中连片的规模化种植较少,以丘陵山区等小田块种植居多,该区域油菜机械化播种水平较低,轻简实用的播种装备及其关键部件需求迫切^[5-6]。基于丘陵山区播种作业特点^[7-9],提高机具通过性与适应性,合理布局排种器与排肥器位置,开发匹配中小型动力机械,满足小规模、不规则田块分散经营需求的轻量化排种器与排肥器^[10-11],是扩充丘陵山区油菜种植面积与提高机械化播种水平的关键。

在油菜排种器研究方面,主要通过优化排种器结构提高排种性能。姚露等^[12]为提高油菜各行排量一致性,设计了基于 Bezier 曲线导叶的旋转盘,并确定了导叶较优参数组合;张青松等^[13]为提高油菜穴播质量,设计了带缺口矩形勺式型孔精量取种勺式精量排种器,确定了较优结构与运行参数组合;曹秀英等^[14]针对播种机作业时存在倾斜、颠簸等丘陵山区工况影响油菜离心式精量集排器各行排量一致性的问题,设计了枝状阀式多阶分-合分流装置,确定了1阶分流单元和2阶分流单元的较优参数组合;LEI等^[15]分析了导种管类型、投种高度及作业速度对适应于小田块的机械式槽轮集排器排种性能的影响;HU等^[16]利用 DEM – CFD 耦合仿真分析了

分配装置结构和气流速度对油菜各行排量一致性的影响,并确定了分配装置较优结构参数。在排肥器研究方面,肖文立等^[17]设计了四头螺旋双行排肥器,利用 EDEM 仿真确定了排肥器较优的螺旋头数及螺距;刘晓东等^[18]为提高螺旋锥体离心式排肥器性能,建立了颗粒肥料在排肥器内的运动模型,优化了排肥器参数;SUGIRBAY等^[19]为分析外槽轮排肥器槽轮参数对高速排肥稳定性的影响,设计了25种槽轮结构,并开展台架试验确定较优参数及转速范围。综上,目前针对提升适应油菜播种的排种装置与排肥装置性能已开展深入研究,而丘陵山区田块分散且规模小,地表复杂作业工况下通过性困难,种子易在导种管中滞留,缺乏适宜于丘陵山区小田块轻简排种及排肥装置的开发与参数匹配,以及总体布局形式的相关研究,制约了丘陵山区排种与排肥装置的发展与应用。

针对丘陵山区等小田块油菜种植区域缺乏轻简集成的油菜播种机排种与排肥装置的现实问题,设计一种油菜种-肥同播同施集排装置。确定排种滚筒与排肥滚筒的主要结构参数,分析肥层控制板位置对排种量与排肥量匹配性的影响。应用 EDEM 仿真开展油菜种-肥同播同施集排装置排种与排肥性能试验,建立肥层控制板位置与排肥量的关系模型,应用 DEM – CFD 耦合仿真分析辅助输送气流对导种管内种子速度和受力的影响,并通过台架和田间试验验证油菜种-肥同播同施集排装置排种与排肥性能,以期为油菜种-肥同播同施集排装置的结构改进提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

油菜种-肥同播同施集排装置主要由集成式种-肥箱、肥层控制板、步进电机、壳体、搅肥装置、风机、种层控制板、种气混合管、落种口、落肥口、集成式种

肥滚筒等组成,结构如图 1 所示,其中集成式种肥滚筒为油菜种-肥同播同施集排装置稳定排种与排肥的关键部件,主要由排种滚筒与排肥滚筒组成,排种滚筒及排肥滚筒分别由 4 个排种轮及 4 个排肥轮构成,排种轮及排肥轮安装在同一转轴上,同步转动完成排种及排肥。

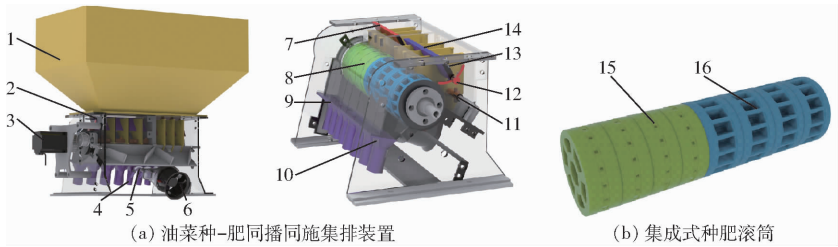


图 1 油菜种-肥同播同施集排装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of centralized seeding - fertilizing device for rapeseed

1. 集成式种-肥箱 2. 壳体 3. 步进电机 4. 种气混合管 5. 进气管 6. 风机 7. 种层控制板 8. 集成式种肥滚筒
9. 落种口 10. 落肥口 11. 搅肥装置 12. 调节螺栓 13. 转轴 14. 肥层控制板 15. 排种滚筒 16. 排肥滚筒

1.2 工作过程

为满足丘陵山区等小田块对机具适应性及通过性要求,以微耕机为动力平台,机组工作过程如图 2 所示。安装油菜种-肥同播同施集排装置机组播种作业过程中,集成式种-肥箱中的种子及颗粒肥料依靠重力进入充种室及充肥室,在种层控制板、肥层控制板、排种滚筒、排肥滚筒共同作用下,形成一定厚度种层及颗粒肥料层,充肥室内搅肥装置转动增加颗粒肥料流动性,种子及颗粒肥料分别充入排种滚筒及排肥滚筒型孔内,完成充种及充肥环节;排种型孔囊取种子及排肥型孔囊取的颗粒肥料在脱离种层及颗粒肥料层最高点时进入携种区及携肥区,随集成式种肥滚筒转动,完成携种及携肥环节;在导种肥区,种子及肥料颗粒脱离型孔,进入落种口及落种肥口内,完成投种及投肥环节;肥料颗粒依靠自身重力及机具振动经导肥管落至土壤表面,基于微耕机的空间布局及操作便捷性,开种沟装置位于旋耕部件后方,导种管倾斜角较大且油菜种子运移路径较长,需通过辅助输送气流将种子吹送至种沟内,避免种子在导种管内滞留,完成导种及导肥环节。根据种植农艺要求需要不同排肥量时,将调节螺栓拧松,肥层控制板绕转轴转动,当肥层控制板调节到所需位置时,拧紧调节螺栓,固定肥层控制板。

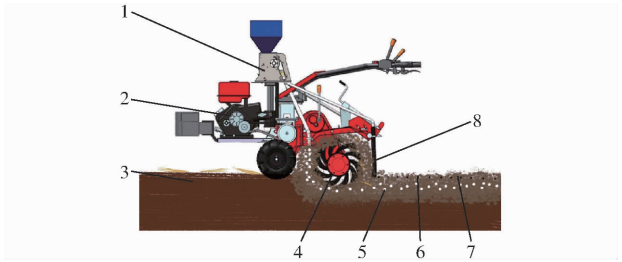


图 2 油菜种-肥同播同施机组工作示意图

Fig. 2 Working schematic of centralized seeding - fertilizing plant unit for rapeseed

1. 油菜种-肥同播同施集排装置 2. 微耕机 3. 未播地表 4. 旋耕部件 5. 颗粒肥料 6. 油菜种子 7. 已播地表 8. 开种沟装置

直径相同,为满足排种、排肥量要求,并兼顾集排装置轻量化设计原则,确定排种滚筒直径为 80 mm。

以微耕机为动力平台的油菜种-肥同播同施集排装置单次播种 4 行,为增加种子流动性,并提高排种稳定性,排种型孔由排种型孔主体与排种环槽组成。排种型孔主体为前后斜壁弧形结构,排种型孔主体截面由线段 AB、圆弧 BC、线段 CD 组成,两端线段均与圆弧相切;周向排布排种型孔的排种轮径向截面为多段等长圆弧组成,在排种型孔外端四周形成排种环槽,增加对种群的扰动,并有利于引导种子充入型孔,排种轮结构如图 3 所示。

排种型孔主体截面线段 AB、圆弧 BC、线段 CD 组成的排种型孔主体方程为

$$y = \begin{cases} \frac{r^2 - e_c x}{k_c} & (e_d \leq x < e_c) \\ - (r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} & (e_c \leq x \leq e_b) \\ \frac{r^2 - e_b x}{k_b} & (e_b < x \leq e_a) \end{cases} \quad (1)$$

2 关键部件设计

2.1 排种滚筒设计

排种滚筒直径影响油菜种-肥同播同施集排装置总体尺寸、排种滚筒转速、排种型孔与种群作用时间及型孔充种量。现有排种滚筒直径一般为 80 ~ 200 mm^[20],且集成式种肥滚筒排种滚筒与排肥滚筒

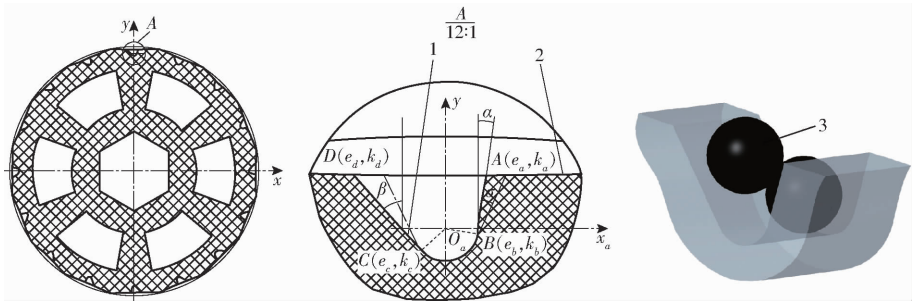


图 3 排种轮结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of seeding wheel

1. 排种型孔主体 2. 排种环槽 3. 油菜种子

式中 r ——圆弧 BC 半径, mm

e_a ——线段 AB 起点 x 轴坐标

e_b ——线段 AB 与圆弧 BC 切点 x 轴坐标

k_b ——线段 AB 与圆弧 BC 切点 y 轴坐标

e_c ——线段 CD 与圆弧 BC 切点 x 轴坐标

k_c ——线段 CD 与圆弧 BC 切点 y 轴坐标

e_d ——线段 CD 起点 x 轴坐标

根据机组作业速度和油菜播量要求, 确定排种型孔主体容积在满足容纳两粒种子要求下有一定冗余空间。油菜种子直径与排种型孔尺寸关系式为

$$\begin{cases} 2d_{\min} < L_r < 2d_{\max} \\ d_{\min} < H_r \leq \frac{3d_{\min}}{2} \\ 2d_{\min} < (L_r^2 + W_r^2)^{\frac{1}{2}} < 2d_{\max} \\ 2d_{\max} < (L_r^2 + W_r^2 + H_r^2)^{\frac{1}{2}} \\ 2r \geq d_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_r ——排种型孔主体长度, mm

W_r ——排种型孔主体宽度, mm

H_r ——排种型孔主体高度, mm

$d_{\min}$ ——油菜种子最小直径, mm

$d_{\max}$ ——油菜种子最大直径, mm

油菜种子直径为 1.6 ~ 2.4 mm, 结合式(1)、(2)可知, 为避免排种型孔卡种, 圆弧 BC 所处圆的半径应不小于油菜种子最小半径, 且圆弧 BC 长度应小于所处圆周长的一半, 同时为避免两粒油菜种子均接触圆弧 BC 底部, 确定圆弧 BC 所处圆半径为 0.8 mm、圆弧 BC 弧长为 1.81 mm。根据油菜种子粒径范围, 结合式(2)可知, 当排种型孔主体长度、宽度、高度分别为 3.3、2.9、2.1 mm 时, 可满足排种型孔稳定充种 2 粒种子要求。

由图 3 可知, 排种型孔主体是由以 O_a 为圆心的圆弧 BC 及其两条切线绕 O_a 转动角 σ 形成, 油菜种子滑动摩擦角为 22.7° , 转动角 σ 应小于油菜种子滑动摩擦角, 且为增加排种型孔对种群的扰动, 确定转动角 σ 为 17° 。排种型孔主体截面线段 AB 与 y

轴夹角为前倾角 α , 该夹角应满足在开始充种位置上线段 AB 所形成的起始充填角大于种子滑动摩擦角, 根据前倾角 α 与转动角 σ 的关系, 可确定前倾角 α 为 8° 。线段 CD 与 y 轴夹角为后倾角 β , 后倾角 β 可增加排种型孔主体的总体空间, 有利于增加充种量并稳定投种, 同时可避免排种型孔堵塞, 基于后倾角 β 与转动角 σ 的关系, 可确定后倾角 β 为 42.5° 。

单位时间内油菜种-肥同播同施集排装置排种量应与机组工作时播量要求一致, 建立排种量与播量关系方程

$$\begin{cases} Q_s = \frac{B_e v_m}{a_e b_e} \\ Q_m = \frac{qZNn}{60} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Q_s ——机组播量, 粒/s

B_e ——机组作业幅宽, m

v_m ——机组作业速度, m/s

a_e ——平均粒距, m

b_e ——行距, m

Q_m ——排种量, 粒/s

q ——单个排种型孔充入种子数量, 粒

Z ——单个排种轮径向型孔数

N ——排种轮数量

n ——集成式种肥滚筒转速, r/min

机组播量和排种量相同时, 由式(3)可得单个排种轮径向型孔数为

$$Z = \frac{60B_e v_m}{a_e b_e q N n} \quad (4)$$

由式(4)可知, 单个排种轮径向型孔数与机组作业幅宽、作业速度成正比, 与平均粒距、行距、单个型孔充入种子数量、排种轮数量、排种轮转速成反比。根据微耕机实际行驶速度, 确定机组播种作业速度为 1.5 ~ 2.2 km/h, 油菜播量为 3.75 ~ 5.25 kg/hm², 机组作业幅宽为 0.8 m, 一次播种 4 行, 行距为 0.2 m, 平均理论粒距为 30 mm, 单个排种型孔充种粒数为

2,单行对应排种轮数量为1,集成式种肥滚筒转速为20~50 r/min,代入式(4)计算得单个排种轮径向型孔孔数为8~30。为保证排种型孔与充种区种群有充足的接触时间,同时实现排种环槽对种子的导向作用,单个排种轮径向型孔孔数不宜较多,结合单个排种轮径向型孔孔数范围,确定单个排种轮径向型孔孔数为16。

排种型孔主体外端四周排种环槽的圆弧长度与排种型孔直径、排种型孔径向型孔数量及排种环槽圆弧所处圆的半径相关,排种环槽所处圆结构如图4所示。排种环槽圆弧所处圆的半径偏小时,充种及携种环节会有种子滞留在排种环槽内,降低排种稳定性,排种环槽圆弧所处圆的半径偏大时,排种环槽圆弧曲率较小,难以有效引导种子,一般排种环槽圆弧所处圆的半径为排种滚筒半径的3~4倍,则可确定排种环槽所处圆半径为150 mm。

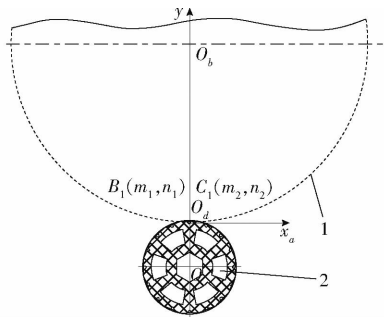


图4 排种环槽所处圆结构示意图

Fig.4 Structure diagram of circle where seeding ring groove was located

1. 排种环槽 2. 排种环槽所处的圆弧

根据排种型孔长度、宽度、高度,结合排种轮直径、圆弧BC所处圆半径、转动角 σ 、单个排种轮径向型孔孔数及排种环槽所处圆半径间的几何关系,可确定排种型孔主体截面线段AB、圆弧BC、线段CD组成的排种型孔主体方程为

$$y = \begin{cases} \frac{-64 - 229x}{54} & (-2.29 \text{ mm} \leq x < -0.59 \text{ mm}) \\ -(0.64 - x^2)^{\frac{1}{2}} & (-0.59 \text{ mm} \leq x \leq 0.79 \text{ mm}) \\ \frac{-64 + 79x}{11} & (0.79 \text{ mm} < x \leq 0.99 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可确定排种型孔主体形状,结合排种环槽所处圆半径,排种环槽与排种轮相交两点坐标 $B_1(m_1, n_1)$ 、 $C_1(m_2, n_2)$,排种环槽所处圆的圆心 O_b

至排种型孔主体圆弧BC所处圆的圆心 O_a 间的距离,可得到排种环槽圆弧方程为

$$y = 151.3 - (22500 - x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (-7.8 \text{ mm} \leq x \leq 7.8 \text{ mm}) \quad (6)$$

结合式(5)、(6)可确定排种型孔总体结构尺寸及分布形式。

2.2 排肥滚筒设计

机组施肥量和油菜种-肥同播同施集排装置排肥量相同时,单个排肥轮型孔充肥质量 q_f 为

$$q_f = \frac{3B_e v_m Q_f}{500nZ_f N_f} \quad (7)$$

式中 Z_f ——单个排肥轮径向型孔数

Q_f ——每公顷施肥量, kg/hm²

N_f ——型孔轮数量

油菜播种施肥量为450~600 kg/hm²、施肥行数为4,为满足充肥量及充肥时间要求,确定单个排肥轮径向型孔数为15,集成式种肥滚筒转速为20~50 r/min时,根据式(7)计算得单个排肥轮型孔充肥质量为0.30~1.47 g。

排肥轮排肥型孔采用与排种轮相同结构型式的前后斜壁弧形结构主体与排肥环槽组成,结构如图5所示。排肥型孔主体是以 O_i 为圆心的圆弧TU及其两条切线ST、UV绕 O_i 转动角 τ 形成, τ 为6°;排肥型孔主体截面线段ST与y轴夹角为排肥前倾角 α_i ,取6°;线段UV与y轴夹角为排肥后倾角 β_i ,取18°;取圆弧TU所处圆半径为9 mm,排肥环槽所处圆半径为150 mm,结合式(1)可确定排肥型孔主体截面线段ST、圆弧TU、线段UV组成的方程。

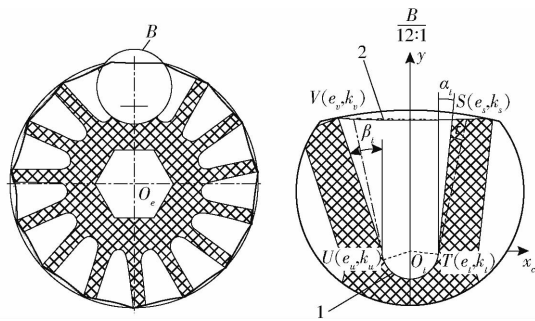


图5 排肥轮结构示意图

Fig.5 Structure diagram of fertilizing wheel

1. 排肥型孔主体 2. 排肥环槽

根据排肥型孔主体截面线段ST、圆弧TU、线段UV组成的方程,可得单个排肥型孔最大充肥质量为

$$q_f = \lambda \gamma W_f \left\{ \frac{e_v k_u - e_u k_v + e_u k_t - e_t k_u + e_t k_s - e_s k_t + e_s k_v - e_v k_s}{2} + \frac{\pi r_f^2}{180^\circ} \arcsin \frac{[(k_t^2 - k_u^2)^2 + (e_t^2 - e_u^2)^2]^{\frac{1}{2}}}{2r_f} - \frac{[(k_t^2 - k_u^2)^2 + (e_t^2 - e_u^2)^2]^{\frac{1}{2}} \left[r_f^2 - \frac{(k_t^2 - k_u^2)^2 + (e_t^2 - e_u^2)^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \right\} \quad (8)$$

式中 γ ——颗粒肥料容重, kg/m^3
 W_f ——排肥型孔主体宽度, m
 λ ——排肥型孔肥料填充系数, 取 0.55
 r_f ——圆弧 TU 半径, mm
 e_s ——线段 ST 起点 x 轴坐标
 e_t ——线段 ST 与圆弧 TU 切点 x 轴坐标
 e_u ——线段 UV 与圆弧 TU 切点 x 轴坐标
 e_v ——线段 UV 起点 x 轴坐标
 k_s ——线段 ST 起点 y 轴坐标
 k_t ——线段 ST 与圆弧 TU 切点 y 轴坐标
 k_u ——线段 UV 与圆弧 TU 切点 y 轴坐标
 k_v ——线段 UV 起点 y 轴坐标

为满足种肥同播同施条件下排肥量要求, 单个排肥型孔充肥质量应满足最大排肥量时的充肥量要求。当颗粒肥料容重为 $950\text{ kg}/\text{m}^3$ 时, 取排肥型孔宽度为 20 mm 。据排肥轮直径、圆弧 TU 所处圆半径、 UV 绕 O_i 转动角、排肥前倾角、排肥后倾角、单个排肥轮径向型孔孔数及排肥环槽所处圆半径间的几何关系, 可确定排肥型孔主体截面线段 ST 、圆弧 TU 、线段 UV 组成的排肥型孔主体方程为

$$y = \begin{cases} \frac{-900 - 285x}{94} & (-7.82\text{ mm} \leq x < -2.85\text{ mm}) \\ -(9 - x^2)^{\frac{1}{2}} & (-2.85\text{ mm} \leq x \leq 2.98\text{ mm}) \\ \frac{-900 + 298x}{35} & (2.98\text{ mm} < x \leq 4.65\text{ mm}) \end{cases}$$

(9)

根据式(9)可确定排肥型孔主体长度、宽度为 12.27 、 17.12 mm , 圆弧 TU 所处圆半径为 3 mm 。将式(9)中排肥型孔主体截面线段 ST 、圆弧 TU 、线段 UV 的坐标点、圆弧 TU 所处圆半径代入式(8), 计算得单个排肥型孔最大充肥质量为 1.5 g , 满足种肥同播同施排肥量要求。

由式(9)可确定排肥型孔主体形状, 结合排肥环槽所处圆半径及排肥型孔主体与排肥环槽所处圆的相对位置关系, 可得到排肥环槽圆弧方程为

$$y = 164 - (22\,500 - x^2)^{\frac{1}{2}}$$

$(-8.32\text{ mm} \leq x \leq 8.32\text{ mm})$ (10)

结合式(9)、(10)可确定排肥型孔总体结构尺寸及分布形式。

2.3 种气输送部件设计

为实现以微耕机为动力平台的播种机满足施肥、旋耕、播种要求, 导种管采用倾斜布局且导种路径较长, 导致导种管倾斜角度小于油菜种子滑动摩擦角, 油菜种子难以在自身重力及机组振动共同作用下稳定进入开种沟装置, 存在油菜种子滞留导种管中的问题。采用气流辅助输送方式可实现平稳导

种, 种气输送部件主要由落种口、种气混合管、导种管、进气管组成, 结构如图 6 所示。

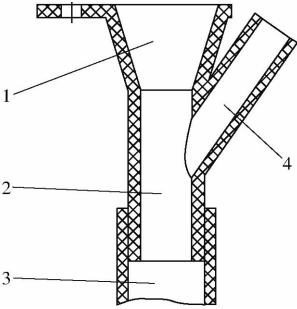


图 6 种气输送部件结构示意图

Fig.6 Structural diagram of conveying seed and airflow component

1. 落种口 2. 种气混合管 3. 导种管 4. 进气管

种子经落种口在种气混合管与由进气管输送的辅助输送气流混合后通过导种管排出, 导种管入口风速 v_a 计算式为

$$v_a = k_p \sqrt{\frac{\rho_p}{1\,000}} + k_m l$$

(11)

式中 k_p ——种子粒度系数
 ρ_p ——种子密度, kg/m^3
 k_m ——种子特性系数
 l ——导种管长度, m

由于导种管排布为向下倾斜, 不涉及垂直向上输送, 无需增加冗余辅助输送气流, 当种子粒径在 $1 \sim 10\text{ mm}$ 时, k_p 取 $14 \sim 18$, 由于油菜粒径小于 3 mm , k_p 取 14 。油菜种子密度为 $1\,060\text{ kg}/\text{m}^3$, 导种管长度小于 2 m 时, 可忽略种子特性系数对辅助输送气流速度的影响。根据式(11)计算可得导种管入口风速为 $14.41\text{ m}/\text{s}$ 。

导种管内种子浓度影响种子在种气混合管及导种管内分布, 种子浓度 μ 计算式为

$$\mu = \frac{4q_s}{\pi d_p^2 \rho v_s}$$

(12)

式中 q_s ——单位时间内导种管内排种量, kg/s
 v_s ——导种管内辅助输送气流速度, m/s
 d_p ——导种管内径, m
 ρ ——输送气流密度, 取 $1.29\text{ kg}/\text{m}^3$

当机组播种作业速度为 $1.5 \sim 2.2\text{ km}/\text{h}$ 、油菜播量为 $3.75 \sim 5.25\text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 单位时间内导种管内最大排种量为 $6.42 \times 10^{-5}\text{ kg}/\text{s}$, 为满足低压稀向输送要求, 种子浓度应低于 $0.02^{[21]}$, 根据式(12)可得导种管内径应大于 14.83 mm 。考虑实际常用油菜排种器导种管及匹配种气混合管尺寸, 确定导种管内径为 19 mm 。根据种气混合管与导种管的安装关系, 种气混合管采用 3D 打印加工, 壁厚 2 mm , 可确

定种气混合管内径为 15 mm。

为避免进气管内辅助输送气流进入种气混合管后形成紊流,导致种子在种气混合管内滞留,种气混合管内辅助输送气流速度应小于进气管内辅助输送气流速度,则可得种气混合管内径应大于进气管内径。根据进气管倾斜结构形式及进气管入口风速,确定种气混合管内径为进气管内径的 1.2 倍,可得进气管内径为 12.5 mm。

根据导种管内径及辅助输送气流速度,可得风机风量应不小于 $14.71 \text{ m}^3/\text{h}$ 。选用大暴风 EDF70mm pro 型 12 叶涵道风机,最大风量为 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ 、最大气流速度为 16 m/s ,满足输送气流辅助导种要求。

2.4 种肥排量匹配关系

油菜种-肥同播同施集排装置采用集成式种肥滚筒,可简化传动系统、缩小整体尺寸,更利于机组总体布局。由于排种滚筒与排肥滚筒转速相同,在不改变油菜种子及颗粒肥料种类,且集成式种肥滚筒转速一定时,排种量与排肥量为定值,而实际油菜播种作业中,油菜播量及作业速度一定时,不同种植区域及土壤工况施肥量具有较大差异,因此需要在

不改变集成式种肥滚筒转速条件下,实现排肥量可调。

肥层控制板位置是控制充肥环节肥层高度与厚度的关键因素。为满足机组轻量化设计要求,如图 7 所示,通过调整肥层控制板与竖直方向间夹角 θ 以控制肥层高度 h 与肥层厚度 t 。实际播种作业中,初始肥层控制板为状态 II,在不改变播种量条件下需减少施肥量时,将肥层控制板向状态 I 调整;在不改变播种量条件下需增加施肥量时,将肥层控制板向状态 III 调整。根据控制肥层高度 h 、肥层厚度 t 及肥层控制板与竖直方向间夹角 θ 间几何关系可得

$$t = h \tan \theta \quad (13)$$

由式(13)可知,增加肥层控制板与竖直方向间夹角 θ 可增大肥层高度与肥层厚度,有利于增加充种量。状态 I ~ III 中肥层控制板与竖直方向间夹角 θ 的余角均应大于颗粒肥料与肥层控制板间滑动摩擦角,结合文献[22],确定初始状态 II 时肥层控制板与竖直方向间夹角为 30° 。状态 II 向状态 I、状态 III 调整的最大角度均为 8° ,可得状态 I 中肥层控制板与竖直方向间夹角为 22° 、状态 III 中肥层控制板与竖直方向间夹角为 38° 。

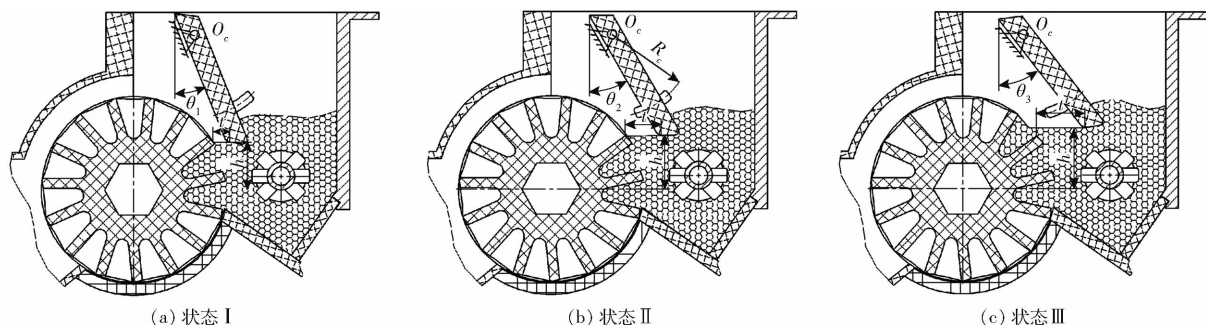


图 7 肥层控制板位置对充种性能的影响

Fig. 7 Effects of fertilizer layer control plate position on fertilizer filling performance

根据种-肥同播同施集排装置总体尺寸及肥层控制板与排肥滚筒间的相对位置关系,确定肥层控制板由状态 II 调整至状态 I、状态 III 过程中转动半径 R_c 为 35.5 mm,根据几何关系可得肥层控制板水平方向上的最大调整距离为

$$t_{\max} = R_c (\sin \theta_3 - \sin \theta_1) \quad (14)$$

式中 θ_1 ——状态 I 中肥层控制板与竖直方向间夹角, $(^\circ)$

θ_3 ——状态 III 中肥层控制板与竖直方向间夹角, $(^\circ)$

肥层控制板竖直方向上最大调整距离为

$$h_{\max} = R_c (\cos \theta_1 - \cos \theta_3) \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得肥层控制板水平方向上的最大调整距离为 8.56 mm、竖直方向上的最大调整距离为 4.94 mm。通过种层高度及厚度变化,可实

现集成式种肥滚筒转速不变条件下调整排肥量,以满足不同种植农艺条件下的施肥量要求。

3 仿真试验

为探究油菜种-肥同播同施集排装置排种量与排肥量的匹配关系,运用 EDEM 软件仿真分析集成式种肥滚筒不同转速下的排种量与排肥量,并明确肥层控制板位置对排肥量的影响;为探明导种管内种子运动状态,利用 DEM-CFD 耦合仿真分析导种管不同倾斜角对种子速度、受力的影响。

3.1 仿真模型建立

为提高仿真效率,将仿真模型简化,仅保留壳体、落种口、落肥口、集成式种肥滚筒、种层控制板、肥层控制板、搅肥装置等关键部件,将简化后的模型导入 EDEM 2018 前处理模块中,于充种室、充肥室

上方建立种子颗粒工厂、肥料颗粒工厂,使种子、颗粒肥料自由下落至充种室、充肥室内。

油菜种子、颗粒肥料均为类球形颗粒,其球形度在 90% 以上,仿真模型中以球体代替油菜种子及颗粒肥料,油菜种子模型、颗粒肥料模型设置平均直径分别为 2、3.5 mm,模型直径正态分布,标准差设置为 0.05 mm,仿真参数参照文献[23~24]。

基于机组的导种管布局,设置导种管与竖直方向不同的倾斜角,采用 EDEM 2018 和 ANSYS Fluent 17.0 软件开展 DEM - CFD 气固耦合仿真,导种管入口设为辅助输送气流与种子入口,导种管出口设为辅助输送气流与种子出口,仿真参数参照文献[25]。仿真模型如图 8 所示。

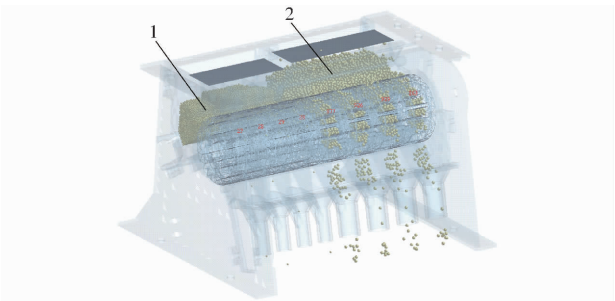


图 8 仿真模型
Fig. 8 Simulation model
1. 油菜种子 2. 颗粒肥料

3.2 仿真试验方法

排种量与排肥量匹配试验中,肥层控制板与竖直方向间夹角为 30°,总仿真时间为 10 s,0~1 s 为种子生产阶段,在充种室上方生成油菜种子 4×10^5 粒;第 1 秒在充肥室上方生成颗粒肥料 1×10^5 粒,第 1~10 秒每秒生成颗粒肥料 1 000 粒。第 1 秒集成式种肥滚筒开始转动,设置集成式种肥滚筒转速为 20~50 r/min,每间隔 10 r/min 为一个水平,仿真完成后应用 EDEM 后处理模块统计仿真时间 5~10 s 内集成式种肥滚筒不同转速下每个排种轮、排肥轮内油菜种子、颗粒肥料数量,分析计算 60 s 内的排种速率、排肥速率、各行排种量一致性变异系数、各行排肥量一致性变异系数。

肥层控制板位置对排肥量影响试验中,设置排肥滚筒转速为 30 r/min,肥层控制板与竖直方向间夹角为 22°~38°,每间隔 2°为一个水平,统计仿真时间 5~10 s 内肥层控制板与竖直方向不同夹角下各排肥轮内总的颗粒肥料质量,并分析计算 60 s 内的排肥速率、各行排肥量一致性变异系数。

辅助输送气流对导种性能影响试验,设置导种管与竖直方向倾斜角分别为 10°、30°、50°、70°,导种管长度为 1.95 m、内径为 19 mm,根据导种管内油菜种子排种量,确定导种管入口每秒生成油菜种子 14

粒;根据集成式种肥滚筒转速,设置油菜种子入口速度为 0.11 m/s;设置辅助输送气流速度为 14.41 m/s,仿真时间为 10 s。观测导种管内有无种子滞留,并导出 5~10 s 内各时刻种子最大速度及受力,并统计分析种子从导种管中排出时间间隔稳定性变异系数,用以表征导种管对种子输送均匀性的影响。

3.3 仿真试验结果

图 9 为集成式种肥滚筒不同转速下的排种性能变化曲线。由图 9 可知,油菜种-肥同播同施集排装置排种速率与集成式种肥滚筒转速具有较好的线性度,集成式种肥滚筒转速与排种速率曲线关系式为 $y_r = 0.3917x_r + 1.7428$ ($20 \text{ r/min} \leq x_r \leq 50 \text{ r/min}$),决定系数为 0.996 3。随集成式种肥滚筒转速在 20~50 r/min 内增加,排种速率在 9.3~21.07 g/min 内逐渐增加,各行排种量一致性变异系数不高于 3.64%。

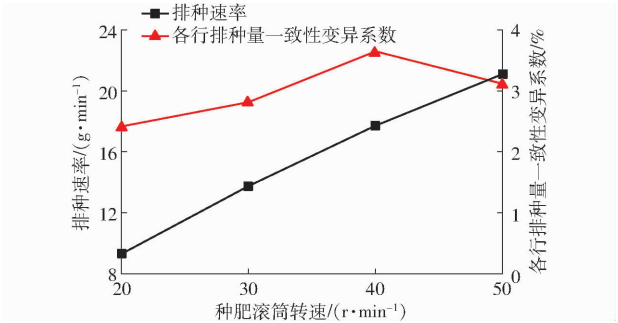


图 9 集成式种肥滚筒不同转速下的排种性能变化曲线
Fig. 9 Variation curves of seeding performance at different rotating speeds of seed - fertilizer cylinder

图 10 为集成式种肥滚筒不同转速下的排肥性能变化曲线。由图 10 可知,油菜种-肥同播同施集排装置排肥速率与集成式种肥滚筒转速具有较好的线性度,集成式种肥滚筒转速与排肥速率关系式为

$$y_f = 16.615x_f + 1636.1 \quad (20 \text{ r/min} \leq x_f \leq 50 \text{ r/min})$$

(16)

式中 x_f ——集成式种肥滚筒转速, r/min
 y_f ——排肥速率, g/min

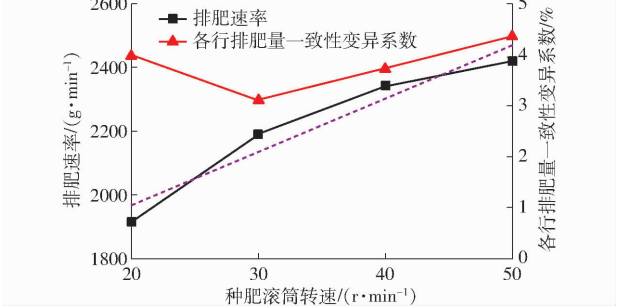


图 10 集成式种肥滚筒不同转速下的排肥性能变化曲线
Fig. 10 Variation curves of fertilizing performance at different rotating speeds of seed - fertilizer cylinder

式(16)决定系数为 0.934 6。随集成式种肥滚筒转速在 20 ~ 50 r/min 内增加,排肥速率在 1 916.82 ~ 2 421.08 g/min 内逐渐增加,各行排肥量一致性变异系数不高于 4.37%。

图 11 为肥层控制板不同位置时的排肥性能变化曲线,图 12 为肥层控制板不同位置时的充肥状态。由图 11、12 可知,集成式种肥滚筒转速为 30 r/min 时,随肥层控制板与竖直方向间夹角在 22° ~ 38°内增加,排肥速率在 1 709.63 ~ 2 484.31 g/min 内逐渐增加,各行排肥量一致性变异系数不高于 4.48%。

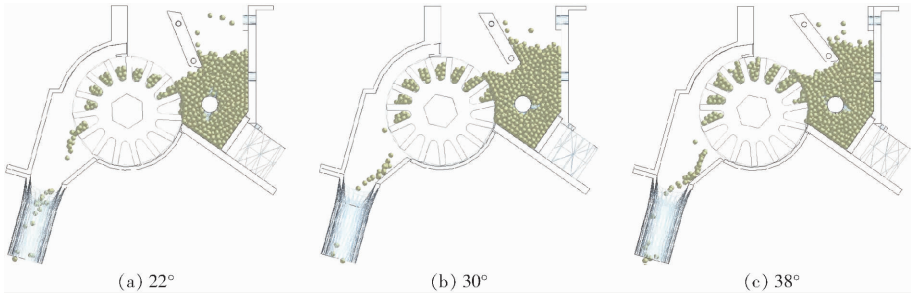


图 12 肥层控制板不同位置时的充肥状态

Fig.12 Filling fertilizer state at different fertilizer layer control board positions

集成式种肥滚筒转速为 30 r/min 时,肥层控制板与竖直方向间夹角和排肥速率的关系式为

$$y_t = \begin{cases} 59.095x_t + 412.18 & (22^\circ \leq x_t \leq 32^\circ) \\ 31.317x_t + 1\,295.2 & (32^\circ < x_t \leq 38^\circ) \end{cases} \quad (17)$$

式中 x_t ——肥层控制板与竖直方向间夹角, (°)
 y_t ——肥层控制板与竖直方向间不同夹角的排肥速率,g/min

根据图 9 ~ 12,并结合式(17)可知,集成式种肥滚筒转速一定时,可通过调节肥层控制板与竖直方向间夹角改变排肥量,并根据集成式种肥滚筒不同转速时排肥速率的比例关系,确定集成式种肥滚筒转速为 20 ~ 50 r/min、肥层控制板与竖直方向间夹角为 22° ~ 38°时,排肥速率、集成式种肥滚筒转速、肥层控制板与竖直方向间夹角的关系,以满足油菜种-肥同播同施作业油菜播量一定时,对不同施肥量的要求。

导种管与竖直方向不同倾斜角时,种子速度 v_i 、

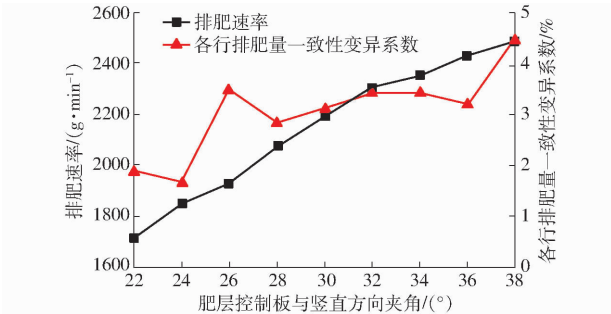


图 11 肥层控制板不同位置时的排肥性能变化曲线

Fig.11 Variation curves of fertilizing performance at different fertilizer layer control board positions

x 轴方向分速度 v_x 、 y 轴方向分速度 v_y 、 z 轴方向分速度 v_z ,种子所受合力 F_t 、 x 轴方向分力 F_x 、 y 轴方向分力 F_y 、 z 轴方向分力 F_z ,如表 1 所示,种子速度分布如图 13 所示。由表 1 可知,种子在落种口处受重力作用自由下落,进入种气混合管时,种子在辅助输送气流吹送作用下,在导种管内速度增加。导种管与竖直方向间的倾斜角越大,种子速度越小,是由于导种管与竖直方向间倾斜角越大,沿导种管方向种子的加速度越小。随导种管与竖直方向间倾斜角增加,种子与导种管间的碰撞概率增加,种子所受合力 F_t 及 z 轴方向分力 F_z 增大, y 轴方向分速度 v_y 减小,会增加种子在导种管内的运动时间。结合表 1 与图 13 可知,采用辅助输送气流可实现导种管与竖直面间倾斜角为 10° ~ 70°范围内,种子加速经导种管排出,避免因导种管倾斜角较大且种子运移路径较长时,种子滞留在导种管内;导种管与竖直面间倾斜角度为 50°时,种子从导种管中排出时间间隔稳定性变异系数较小,种子输送均匀性较优,是由于导种

表 1 导种管与竖直方向间不同倾斜角时种子速度与受力

Tab.1 Seed velocity and force at different tilt angles between seed guiding tube and vertical direction

导种管倾斜角/(°)	$v_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_z/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	F_t/N	F_x/N	F_y/N	F_z/N	排出时间间隔稳定性变异系数/%
10	5.75	0.903	5.51	0.166	2.54×10^{-5}	2.49×10^{-6}	2.06×10^{-5}	8.64×10^{-6}	8.61
30	5.03	2.46	4.35	0.183	2.82×10^{-5}	3.73×10^{-6}	2.71×10^{-5}	9.31×10^{-6}	7.23
50	4.23	3.25	2.69	0.191	7.98×10^{-5}	5.40×10^{-6}	7.09×10^{-5}	3.63×10^{-5}	5.03
70	3.46	3.02	1.62	0.249	1.645×10^{-4}	6.27×10^{-6}	1.36×10^{-4}	9.17×10^{-5}	8.95

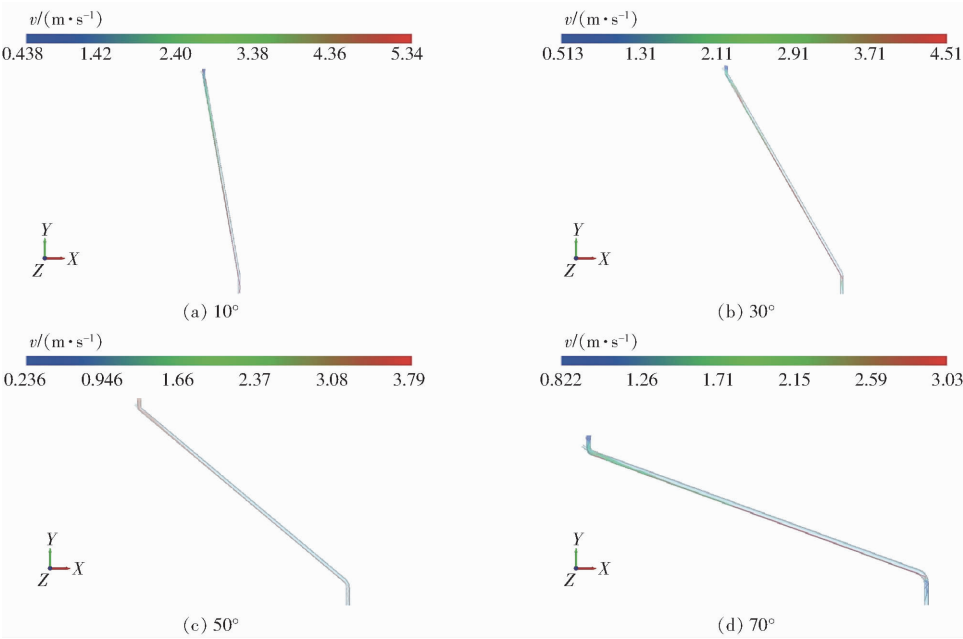


图 13 导种管与竖直方向间不同倾斜角时种子速度分布

Fig. 13 Seed velocity distribution at different tilt angles between seed guiding tube and vertical direction

管与竖直面间倾斜角为 10° 和 30° 时,导种管内种子速度较高,种子在导种圆弧过渡连接处碰撞速度较大,增加了种子运移无序性,导种管与竖直面间倾斜角为 70° 时,种子在导种管内运移时间较长,增加了种子与导种管内壁碰撞概率。

4 验证试验

4.1 试验设备

为验证仿真试验合理性,并探明肥层控制板与竖直方向间夹角、集成式种肥滚筒转速间的关系,将油菜种-肥同播同施集排装置安装于自制的排种性能检测试验台,采用调速器调节步进电机转速,步进电机提供集成式种肥滚筒转速驱动力,试验装置如图 14 所示。

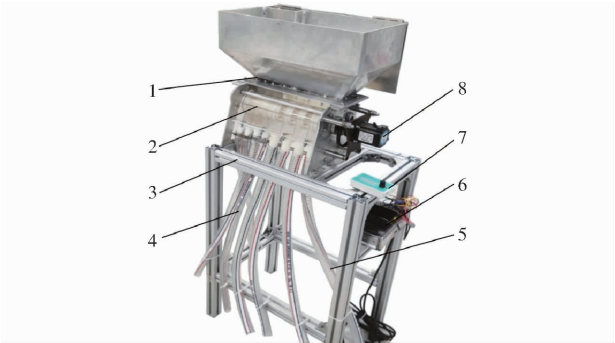


图 14 试验装置

Fig. 14 Test device

1. 集成式种-肥箱 2. 油菜种-肥同播同施集排装置 3. 试验台架 4. 导种管 5. 导肥管 6. 变压器 7. 调速仪 8. 步进电机

4.2 试验方案

试验选取油菜品种为华油杂 62,千粒质量为

4.67 g;颗粒肥料为芭田复合肥,千粒质量为 33.14 g。试验过程中集成式种-肥箱内装入油菜种子 2 kg、颗粒肥料 5 kg。

排种量与排肥量匹配验证试验中,设置肥层控制板与竖直方向间夹角为 30° ,集成式种肥滚筒转速为 20 ~ 50 r/min,每间隔 10 r/min 为一个水平,试验重复 5 次,统计 60 s 内导种管、导肥管排出种子、颗粒肥料质量,计算排种速率、排肥速率、总排种量稳定性变异系数、总排肥量稳定性变异系数、各行排种量一致性变异系数、各行排肥量一致性变异系数、种子破损率。

肥层控制板位置对排肥量影响验证试验中,设置肥层控制板与竖直方向间夹角为 $22^{\circ} \sim 38^{\circ}$,集成式种肥滚筒转速为 30、50 r/min,试验肥层控制板与竖直方向间不同夹角和集成式种肥滚筒转速组合条件下的排肥性能,试验重复 5 次,统计 60 s 内排肥速率,计算总排肥量稳定性变异系数、各行排肥量一致性变异系数。

4.3 试验结果与分析

表 2 为集成式种肥滚筒不同转速时的排种与排肥性能。由表 2 可知,集成式种肥滚筒转速为 20 ~ 50 r/min 时,总排种量稳定性变异系数不高于 0.92%、各行排种量一致性变异系数不高于 3.64%、种子破损率不高于 0.04%,总排肥量稳定性变异系数不高于 1.21%、各行排肥量一致性变异系数不高于 4.41%。排种量与排肥量匹配验证试验中排种速率与仿真试验排种速率偏差低于 4.88%、排肥速率与仿真试验排肥速率偏差低于

表 2 油菜种-肥同播同施集排装置排种与排肥性能台架试验结果

Tab.2 Seeding performance and fertilizing performance of bench testing results of centralized seeding – fertilizing device for rapeseed

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	排种速率/ ($g \cdot \min^{-1}$)	总排种量稳定 性变异系数/%	各行排种量一致 性变异系数/%	种子破损 率/%	排肥速率/ ($g \cdot \min^{-1}$)	总排肥量稳定性 变异系数/%	各行排肥量一致 性变异系数/%
20	9.58	0.81	2.75	0.02	2 021.94	1.05	3.95
30	13.84	0.76	2.92	0.03	2 186.28	1.21	4.12
40	17.34	0.92	3.64	0.03	2 305.16	1.11	4.26
50	22.10	0.86	3.51	0.04	2 493.08	1.17	4.41

5.48%，表明仿真试验合理可信。

表 3 为肥层控制板与竖直方向间不同夹角和集成式种肥滚筒转速组合时的排肥性能。由表 3 可知,集成式种肥滚筒转速为 30 r/min 时,台架试验确定的排肥速率与仿真试验中式(17)确定的排肥速率偏差低于 3.01%;集成式种肥滚筒转速为 50 r/min 时,根据式(16)中集成式种肥滚筒不同转速时的排肥速率关系、肥层控制板与竖直方向间夹角和排肥速率的关系式(17)计算的排肥速率与台架试验确定的排种速率偏差低于 4.52%。

表 3 肥层控制板不同位置和集成式种肥滚筒转速组合时的排肥性能台架试验结果

Tab.3 Fertilizing performance of bench testing results at different fertilizer layer control board positions and seed – fertilizer cylinder rotating speeds

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	肥层控制板 与竖直方向 间夹角/($^{\circ}$)	排肥速率/ ($g \cdot \min^{-1}$)	总排肥量 稳定性变 异系数/%	各行排肥量 一致性变 异系数/%
30	22	1 752.14	1.29	4.12
	24	1 820.26	0.98	3.78
	26	2 001.08	1.17	3.94
	28	2 095.62	1.15	3.56
	30	2 186.28	1.21	4.12
	32	2 236.58	1.14	4.45
	34	2 315.82	1.06	4.13
	36	2 495.62	1.01	3.98
	38	2 554.92	1.32	4.51
	50	2 493.08	1.17	4.41
50	22	1 970.16	1.14	3.98
	24	2 195.62	1.28	4.12
	26	2 262.32	1.35	4.23
	28	2 391.58	1.21	4.95
	30	2 493.08	1.17	4.41
	32	2 698.18	1.22	4.71
	34	2 794.14	1.38	4.35
	36	2 853.18	1.25	4.66
	38	3 002.08	1.11	4.53
	50	2 493.08	1.17	4.41

结合表 2、3 可知,油菜种-肥同播同施集排装置排种与排肥性能满足油菜精量播种要求,并可实现油菜排量一定时,通过调节肥层控制板与竖直方向间夹角,满足不同排肥量需求。

5 田间试验

为检验油菜种-肥同播同施集排装置的排种与排肥性能,将油菜种-肥同播同施集排装置搭载于微耕机为平台的播种机组,于华中农业大学现代农业科技示范园开展导种管性能验证试验及油菜播种试验。设置导种管与竖直面间倾斜角为 50°,倾斜状态 I 为导种管主要为凹圆弧倾斜布局,倾斜状态 II 为导种管主要为倾斜直线,倾斜状态 III 为导种管主要为凸圆弧倾斜布局,观测播种过程中导种管内有无种子滞留,如图 15 所示。油菜播种试验机组前进速度为 2 km/h,播种行数为 4,行距为 200 mm,播种量为 3.9 kg/hm²;施肥行数为 4,施肥量为 480 kg/hm²,肥料混施,幅宽 800 m,作业如图 16 所示。出苗 12 d 后测定出苗率,试验重复 5 次;出苗 35 d 后测定 1 m 长度内 4 行油菜苗数量,试验重复 5 次,统计单位面积内 4 行油菜苗株数、各行株数分布一致性变异系数、总株数稳定性变异系数。

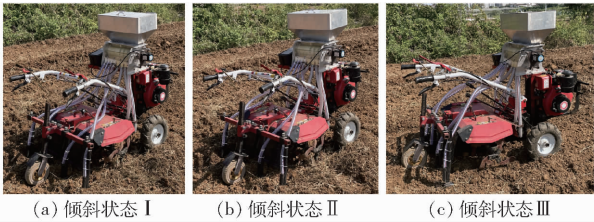


图 15 导种管不同倾斜角时播种性能验证试验

Fig. 15 Experimental verification of seeding performance with different tilt angles of seed guiding tubes



图 16 田间试验及出苗效果

Fig. 16 Field experiment and emergence effect

3 种导种管不同倾斜状态下,导种管内均无种子滞留现象,表明采用辅助输送气流可满足油菜种-肥同播同施、导种管倾斜角较大且油菜种子运移路

径较长时的播种要求。

田间试验结果表明,油菜出苗率为 82.14%,出苗 35 d 后 1 m 内各行油菜平均株数为 12、各行株数一致性变异系数为 9.25%、总株数稳定性变异系数为 7.16%,油菜出苗效果良好,满足油菜种植农艺要求。

6 结 论

(1)设计了一种油菜种-肥同播同施集排装置,分析了种肥排量的匹配关系,确定排种型孔主体与排肥型孔主体均为两端线段与圆弧相切的前后斜壁弧形结构,分析确定单个排种轮径向型孔孔数为 16,单个排肥轮径向型孔数为 15。

(2)运用 EDEM 软件仿真分析了集成式种肥滚筒不同转速下的排种量与排肥量,并明确了肥层控制板位置对排肥量的影响,结果表明:集成式种肥滚筒转速与排种速率、排肥速率均为线性关系,随集成式种肥滚筒转速在 20~50 r/min 内增加,排种速率在 9.30~21.07 g/min 内逐渐增加,排肥速率在

1 916.82~2 421.08 g/min 内逐渐增加;排肥速率随肥层控制板与竖直方向间夹角在 22°~38°内增大而在 1 709.63~2 484.31 g/min 内逐渐增加。利用 DEM-CFD 耦合仿真分析了导种管不同倾斜角度对种子速度与受力的影响,结果表明:采用辅助输送气流可实现导种管与竖直面间倾斜角为 10°~70°范围内种子加速经导种管排出,避免种子滞留。

(3)油菜种-肥同播同施集排装置的排种与排肥性能验证试验结果表明:集成式种肥滚筒转速为 20~50 r/min 时,总排种量稳定性变异系数不高于 0.92%、各行排种量一致性变异系数不高于 3.64%、种子破损率不高于 0.04%,总排肥量稳定性变异系数不高于 1.21%、各行排肥量一致性变异系数不高于 4.41%;可实现油菜排量一定时,通过调节肥层控制板与竖直方向间夹角,满足不同排肥量需求。田间试验结果表明:1 m 内各行油菜平均株数为 12、各行株数一致性变异系数为 9.25%、总株数稳定性变异系数为 7.16%,油菜出苗效果良好。

参 考 文 献

[1] 王磊,廖宜涛,万星宇,等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):68-79,97. WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)

[2] YUAN Jiacheng, WAN Xingyu, LIAO Qingxi, et al. Mechanical compression characteristics of rapeseed based on continuous damage theory[J]. Biosystems Engineering, 2022, 224: 301-312.

[3] 刘成,冯中朝,肖唐华,等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485-489. LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485-489. (in Chinese)

[4] 康艳,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜宽幅折叠式浅旋精量联合直播机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):42-52,109. KANG Yan, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Design and experiment of rapeseed wide-width folding shallow-rotation combined precision direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 42-52, 109. (in Chinese)

[5] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等. 基于高质高效的西南丘陵山区机械化生产模式评价[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):140-149. LIU Pengwei, YANG Minli, ZHANG Xiaojun, et al. Evaluation of mechanized production model based on high quality and high efficiency in southwest hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 140-149. (in Chinese)

[6] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(12):105-114. ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105-114. (in Chinese)

[7] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(5):1-18. SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18. (in Chinese)

[8] 刘平义,王春燕,李海涛,等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):74-81. LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 74-81. (in Chinese)

- [9] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油菜集排器供种装置侧向倾斜排种性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2020,36(19):1-10.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Experiments and analysis on seeding performance of seed feeding device of rapeseed centralized metering device under lateral tilt[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 1-10. (in Chinese)
- [10] 贾洪雷,张胜伟,陈天佑,等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):51-60.
JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 51-60. (in Chinese)
- [11] 王磊,廖宜涛,廖庆喜,等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):75-85.
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75-85. (in Chinese)
- [12] 姚露,廖庆喜,沈文惠,等. 基于Bezier曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):56-66,83.
YAO Lu, LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, et al. Design and experiment of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed based on Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 56-66, 83. (in Chinese)
- [13] 张青松,余琦,王磊,等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):47-54,64.
ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 47-54, 64. (in Chinese)
- [14] 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.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77-84. (in Chinese)
- [15] LEI Xiaolong, HU Hongji, WU Wencheng, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 22-33.
- [16] HU Hongji, ZHOU Zhonglin, WU Wencheng, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246-259.
- [17] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):68-77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68-77. (in Chinese)
- [18] 刘晓东,胡瑞,王登辉,等. 基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):85-95.
LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based on granular fertilizer movement model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 85-95. (in Chinese)
- [19] SUGIRBAY A M, ZHAO J, NUKESHEV S O, et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2020, 179(12): 1-11.
- [20] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10-18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10-18. (in Chinese)
- [21] 李诗久. 气力输送理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [22] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):11-19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11-19. (in Chinese)
- [23] 王磊,廖宜涛,万星宇,等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):43-53.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43-53. (in Chinese)
- [24] 王磊,廖庆喜,廖宜涛,等. 气送式排肥系统分配装置结构型式对排肥性能的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(7):24-34.
WANG Lei, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Effects of distributor types on fertilizing performance in an air-assisted applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 24-34. (in Chinese)
- [25] WANG Lei, LIAO Yitao, LI Mengliang, et al. Motion characteristics of rapeseeds and wheat seeds within mixing components of air-assisted centralized metering device based on DEM-CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108986.