

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.002

秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验

陈桂斌^{1,2} 卢彩云^{1,2} 何进^{1,2} 王超^{1,2} 王秀红^{1,2} 王庆杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对东北黑土区保护性耕作秸秆还田条件下, 地表秸秆量大导致免耕播种过程易雍堵、播种后地温提升慢等问题, 提出了一种秸秆条带捡拾粉碎深埋方式, 通过捡拾粉碎机构将地表部分秸秆捡拾粉碎, 由罩壳处筛孔完成土秆筛分, 集秆螺旋器进行秸秆的定向集运, 最后经运秸风机实现秸秆输送深埋。本文对粉碎刀结构、排列方式和转速等关键参数进行确定, 对粉碎刀轴的秸秆漏捡区域面积展开分析, 通过理论分析和离散元单因素仿真试验明确了集秆螺旋器转速与其所受扭矩和秸秆运动速度之间的关系, 初步确定了螺旋器转速为 900 ~ 1 100 r/min, 设计了开沟铲的结构参数, 并利用离散元全因素仿真试验模拟了作业速度与开沟深度两因素间与表层土壤颗粒运动及开沟铲受力之间的关系, 以作业速度、开沟深度和螺旋器转速为因素, 秸秆深埋合格率为试验指标进行 Box - Behnken 试验。田间试验结果表明, 当前进速度为 3 km/h、开沟深度为 290 mm、螺旋器转速为 1 000 r/min 时, 其秸秆掩埋合格率为 64.2%, 其预测值约为 67.4%, 误差小于 5%, 满足设计需求。研究成果为东北黑土地保护性耕作推广提供了新的方案和技术支撑。

关键词: 条带耕作; 秸秆; 粉碎深埋装置; 离散元仿真

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)10-0016-12

OSID:



Design and Experiment of Straw Pickup - Crushed and Deep Buried Device under Strip-tillage

CHEN Guibin^{1,2} LU Caiyun^{1,2} HE Jin^{1,2} WANG Chao^{1,2} WANG Xiuhong^{1,2} WANG Qingjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The large amount of surface straws in the no-tillage planting process results in dragging and piling and the ground temperature rises slowly after planting under the conditions of conservation tillage and straw returning to the field in the black soil area of Northeast China. Aiming at the problems, a method that the straw was crushed and deep buried in the strip was proposed, that was, the surface straw was picked up and crushed by the picking and crushing mechanism, the soil and straw screening was completed by the sieve holes at the cover, the stalk collecting spiral performed the directional collection and transportation of the straw, and finally the straw was transported and buried deeply by the straw conveying fan. The key parameters such as the structure, arrangement and speed of the crushing knife were designed, and the straw leakage area of the crushing knife shaft was analyzed. Through theoretical analysis and discrete element single factor simulation experiments, the relationship between the speed of the stalk screw and the torque and the speed of the stalk movement was clarified, and the speed range of the stalk screw was preliminarily determined to be 900 ~ 1 100 r/min and the structural parameters of the ditching shovel were designed. And the discrete element full factor simulation test was used to simulate the relationship between the operating speed and ditching depth and the movement of surface soil particles and the force of the ditching shovel, taking the operating speed, ditching depth and stalk collecting spiral speed as factors, the Box - Behnken test was carried out with the qualified rate of straw buried deep as the test index. The field test results showed that when the device's forward speed was 3 km/h, the

收稿日期: 2021-08-12 修回日期: 2021-08-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700301)

作者简介: 陈桂斌(1997—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: 1510202878@qq.com

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备研究, E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

trenching depth was 290 mm, and the spiral speed was 1 000 r/min, the straw burial pass rate was 64.2%, and its predicted value was about 67.4% under the similar parameters. The error was less than 5%, which met the design requirements of the device. The method results can provide a scheme and technical support for the promotion of conservation tillage in the black soil area of Northeast China.

Key words: strip tillage; straw; crushing and deep burying; discrete element simulation

0 引言

东北黑土区对维护国家粮食安全具有重要意义,长期以来对黑土地的重用轻养、无节度开发利用使黑土层不断变薄、变瘦、变硬^[1-3]。近年来随着国家对于东北黑土地保护的不断重视,应用保护性耕作技术,实施作物秸秆还田已成为提升黑土地质量的关键技术之一。

秸秆还田具有补充土壤有机质含量,减少化肥用量,提升土壤蓄水保墒能力等优势^[4-5]。在实施作物秸秆还田过程中,当地表大量秸秆覆盖时,容易造成免耕播种机“拖堆”,导致播种质量差,此外地表秸秆腐烂周期长,残存在地表会导致病虫害增加。目前常见的秸秆还田有粉碎翻埋、浅耕混拌、秸秆深埋、覆盖还田等方式。其中秸秆深埋能够增加土壤孔隙度,提高土壤导水导气,改善耕作层的土壤物理性质,减少地表秸秆覆盖量,从而提高播种地温^[6-7]。国内已有部分学者对秸秆深埋作业模式和机具开展相关研究,田阳等^[8]为构建合理耕层,设计了气力式秸秆深埋还田机输送装置,通过田间试验得到该装置深埋质量满足设计要求。王金武团队^[9-10]针对东北地区秸秆特点提出反旋秸秆深埋还田技术,较好地解决了秸秆还田深度不足,旋耕部件易铲草的问题。高文英等^[11]结合秸秆深埋还田的技术要求,设计了螺旋开沟装置,并对螺旋叶片表面进行仿生优化设计,有效地降低粘土堵塞问题。窦森^[12-13]提出一种秸秆“富集深还”的技术模式,在条带轮耕深松土壤的同时将秸秆富集深埋于条带土壤亚表层。上述研究为秸秆深埋提供了一定的理论和技术支撑。

为解决地表秸秆量大,导致免耕播种质量差,秸秆全量深埋动力消耗大等问题,结合条带耕作模式,本文设计一种秸秆粉碎深埋装置,将地表播种条带内的秸秆捡拾粉碎的同时深埋于地下,降低播种条带内的秸秆量。通过对关键部件理论和仿真分析,得到其关键参数和影响规律;通过田间试验,对装置不同作业参数组合的试验结果进行分析,从而得出秸秆条带捡拾粉碎深埋装置的较优参数组合,以为秸秆深埋还田的研究和发展提供参考。

1 条带秸秆深埋装置结构与工作原理

1.1 整体结构

秸秆条带捡拾粉碎深埋装置主要针对保护性耕作地表秸秆量大,影响免耕播种质量等问题进行设计。该装置的安装位置如图 1a 所示,其主要结构如图 1b 所示,主要有捡拾粉碎机构、集秆螺旋器、运秸风机、输秸软管、开沟铲、压秸轮、回土挡板和开沟仿形机构组成。

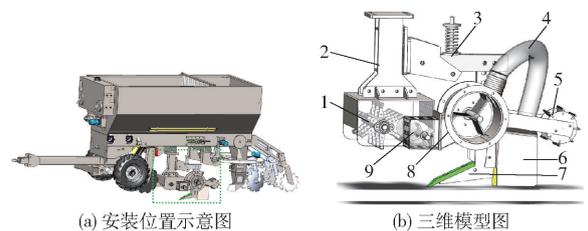


图 1 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置

Fig. 1 Straw pickup - crushed and deep buried device under strip-tillage

1. 捡拾粉碎机构 2. 连接架 3. 开沟仿形机构 4. 输秸软管
5. 压秸轮 6. 回土挡板 7. 开沟铲 8. 运秸风机 9. 集秆螺旋器

1.2 工作原理

如图 2 所示,秸秆条带捡拾粉碎深埋装置作业时,秸秆捡拾粉碎机构的粉碎刀轴做高速回转运动将地表秸秆和残茬进行粉碎处理,并把秸秆向后抛送至后罩壳挡板处,此过程中秸秆与少量表土形成土秆混合物经由后罩壳挡板处筛孔进行筛分,完成土秆分离,筛分后的秸秆依靠自重落入到集秆螺旋器中,集秆螺旋器产生的推运作用将秸秆沿指定方向输送至运秸风机内,运秸风机叶片高速旋转,对秸秆产生抛送作用,此外运秸风机叶片在抛送秸秆的同时所产生的正压气流同样能在秸秆运动过程中起

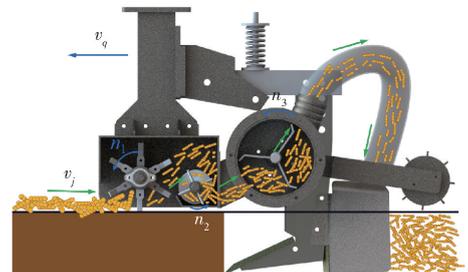


图 2 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置作业原理图

Fig. 2 Schematic of straw pickup - crushed and deep buried device

到一定的吹送作用, 秸秆被运秸风机抛出后通过输秸软管进入到开沟铲所开的秸秆掩埋沟中, 开沟铲上回土挡板可以减缓回土时间, 利于秸秆顺利进入沟底以达到更好的掩埋效果, 开沟仿形机构能较好地保证开沟深度的一致性, 压秸轮被动旋转能将输入到沟中的秸秆层压实, 同时能在形成秸秆层后对回落沟中土壤起到向下压实的作用, 能在一定程度上增强回土效果。

2 关键部件设计

2.1 捡拾粉碎机构

秸秆捡拾粉碎机构主要将地表的玉米秸秆进行捡拾粉碎, 通过动刀的回转运动完成秸秆粉碎捡拾功能。为实现较好的秸秆粉碎质量和捡拾效果, 需对该机构的粉碎刀及粉碎刀辊进行结构、作业参数的确定。

2.1.1 粉碎刀设计

秸秆捡拾粉碎刀主要由 2 把 L 形粉碎刀组成, L 形粉碎刀的侧切刃能显著影响秸秆的粉碎效果, 其刃角越小, 刀片越薄, 秸秆粉碎效果越好, 但其使用寿命会降低^[14-16], 考虑到田间作业环境复杂, 有石块等坚硬异物存在, 为保证刀片使用过程中的耐久度, 设计刃角为 45° , 刀片厚度为 5 mm, 粉碎刀弯折角为 135° , 材料为结构钢, 其他结构参数如图 3 所示。

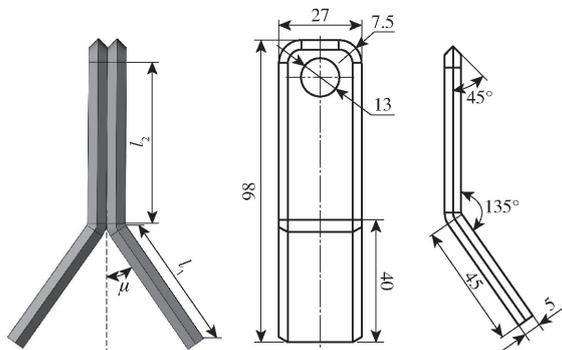


图 3 L 形粉碎刀示意图

Fig. 3 L-type crushing knife

2.1.2 粉碎刀辊排列

合理的刀辊排列顺序不仅能提升秸秆粉碎质量, 还能减小刀辊振动使其负荷均匀, 保持动平衡, 降低功耗^[17]。如图 4 所示, 本文设计粉碎刀数量为 21 组, 粉碎刀的安装顺序为 3 条螺旋线排列, 此排列方式能保证刀辊转动时仅有 3 把刀具处于工作状态, 粉碎刀排列展开图如图 5 所示, 考虑到条带作业秸秆粉碎捡拾需求, 选取粉碎刀回转直径为 255 mm, 粉碎刀轴作业幅宽为 300 mm, 相邻的两组刀轴间轴向距离相等, 为 50 mm, 径向夹角为 60° 。为提高刀

片的使用寿命, 减少磨损和断裂, 粉碎刀离地高度设计为 15 mm。

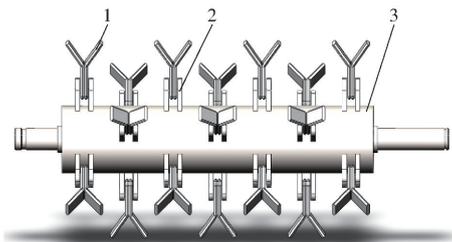


图 4 刀辊装配示意图

Fig. 4 Schematic of fertilizer crushing with differential speed roller

1. 粉碎刀 2. 刀座 3. 粉碎刀辊

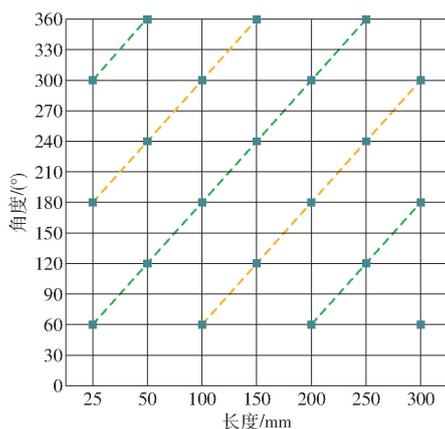


图 5 粉碎刀排列示意图

Fig. 5 Schematic of crushing knife arrangement

2.1.3 粉碎刀辊漏捡区域分析

为提高秸秆粉碎捡拾效率, 图 6 中漏捡区 ABC 的面积应尽量小, 通过理论分析可得, 漏捡高度 h 、漏捡距离 d 与捡拾粉碎刀角速度 ω_L 、刀片数量 Z_L 的关系为

$$\begin{cases} h = R_L \left[1 - \cos \frac{30\pi v}{Z_L (\pi R_L n_L + 30v)} \right] \\ d = \frac{2\pi v}{Z_L \omega_L} = \frac{60v}{Z_L n_L} \end{cases} \quad (1)$$

式中 n_L ——粉碎刀辊转速, r/min

R_L ——粉碎刀辊回转半径, mm

v ——作业速度

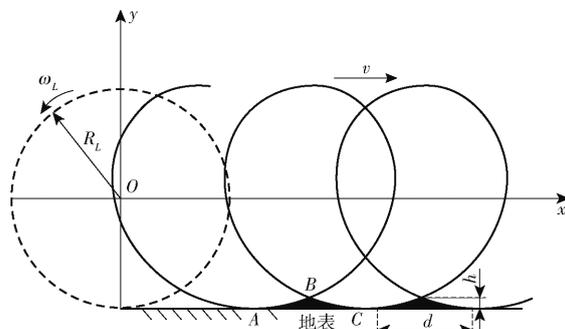


图 6 粉碎刀运动分析

Fig. 6 Motion analysis diagram of crushing knife

可将漏捡区域 ABC 近似为三角形, 因此有

$$\begin{cases} S_{\triangle ABC} = \frac{hd}{2} = \frac{30R_L v}{Z_L n_L} \left[1 - \cos \frac{30\pi v}{Z_L (\pi R_L n_L + 30v)} \right] \\ R_L = r_L + l_2 + l_1 \cos \mu \end{cases} \quad (2)$$

式中 r_L ——刀座回转半径, mm
 l_1 ——粉碎刀弯折处长度, mm
 l_2 ——粉碎刀直边长度, mm
 μ ——粉碎刀弯折角

由式(2)可知, 捡拾粉碎刀的转速与图示秸秆漏捡区域面积成反比, 秸秆漏捡区域面积随秸秆捡拾刀转速的增加而减小, 随机具前进速度的增加而增大; 随着 L 形粉碎刀弯折角增大, 秸秆漏捡区域面积增大, 不利于提升秸秆捡拾效率; 捡拾粉碎刀转速对秸秆漏捡面积的影响大于刃口长度和弯折角对秸秆漏捡面积的影响。

2.1.4 粉碎刀辊转速

图 6 为粉碎刀辊作业时捡拾粉碎刀端点的运动轨迹图, 假设端点运动轨迹上任意一点坐标为 (x, y) , 以此建立其运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = vt + R_L \cos(\omega_L t) \\ y = R_L \sin(\omega_L t) \\ R_L = r_L + l_2 + l_1 \cos \mu \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)进行微分, 得到捡拾粉碎刀端点速度与时间的运动方程为

$$v_m = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v^2 + R_L^2 \omega_L^2 - 2R_L \omega_L v \sin(\omega_L t)} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_x = v - R_L \omega_L \sin(\omega_L t) \\ v_y = R_L \omega_L \cos(\omega_L t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 v_x ——捡拾粉碎刀在 x 方向的水平分速度
 v_y ——捡拾粉碎刀在 y 方向的竖直分速度

当 $\omega_L t = \frac{\pi}{2} + 2\pi n$ ($n \in \mathbf{N}$) 时, 捡拾粉碎刀线速度方向与机器前进速度方向相反, 此时绝对速度 v_m 取最小值, 为 $R_L \omega_L - v$ 。动刀端点线速度大于 30 m/s 时, 可以得到较好的秸秆粉碎效果, 文中粉碎刀辊的回转直径为 255 mm, 设置机具前进速度为 4 km/h, 因此捡拾粉碎刀转速 n_L 最小值为 1 165.6 r/min。目前国内无支撑切割的秸秆粉碎还田机刀轴转速多采用 1 600 ~ 2 500 r/min^[17-19], 由于捡拾粉碎机构内部可装配定刀以实现有支撑切割, 文中粉碎刀轴转速低于无支撑切割的转速, 当粉碎刀轴转速为 1 500 r/min 时, 能够满足秸秆粉碎捡拾需求。

2.2 集秆螺旋器

集秆螺旋器作业时先由罩壳将粉碎刀轴抛送出

的秸秆挡下, 再由集秆螺旋器推送并将秸秆收集输送至运秸风机中, 实现输送秸秆的目的。

2.2.1 集秆螺旋器转速

集秆螺旋输送机构为秸秆粉碎深埋装置重要组成部分, 集秆螺旋器转速对秸秆输送量和秸秆运动速度具有直接影响, 为确保其具有良好的作业性能, 其秸秆输送量应大于或等于粉碎刀辊所产生的喂入量, 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置的实际作业参数为作业幅宽 30 cm, 前进速度 3 ~ 5 km/h, 作业地表秸秆覆盖量 1.2 kg/m², 则可得集秆螺旋器的输送量为

$$Q = S n \rho \psi k \frac{60\pi [(D + 2\lambda)^2 - d^2]}{4} \quad (6)$$

故集秆螺旋器转速 n_g 应满足

$$n_g \geq \frac{Q}{15 S \rho \psi k \pi [(D + 2\lambda)^2 - d^2]} \quad (7)$$

式中 D ——螺旋大径, mm

d ——螺旋小径, mm

S ——螺距

λ ——外径与罩壳内表面间隙, mm

ρ ——秸秆密度, kg/m³

ψ ——螺旋填充系数, 取 0.32

k ——秸秆输送修正系数, 取 1.21

已知螺旋大径为 165 mm, 小径为 60 mm, 螺距为 90 mm, 间隙为 6 mm, 秸秆密度为 350 kg/m³, 取前进速度为 4 km/h。计算得集秆螺旋器转速最小值为 896 r/min。

2.2.2 秸秆运动速度

当集秆螺旋器以转速 n_g 转动时, 秸秆运动速度分析如图 7 所示, 在点 O 处的秸秆运动速度主要由牵连速度 v_a 和相对速度 v_b 矢量合成速度 v_c , 受秸秆与螺旋叶片间摩擦力的存在, 合成速度偏转一定的摩擦角 α , 实际为 v_f , 将绝对速度 v_f 分解为 v_x, v_y , 集秆螺旋器中秸秆运动的轴向速度为

$$v_x = v_f \cos(\alpha + \theta) \quad (8)$$

$$\text{其中 } v_f = \frac{v_c}{\cos \alpha} \quad v_c = v_a \sin \theta$$

式中 θ ——螺旋升角

故秸秆运动的轴向速度为

$$v_x = \frac{v_a \sin \theta \cos(\alpha + \theta)}{\cos \alpha} \quad (9)$$

又因为

$$v_a = \frac{n_g \pi S}{30 \cdot 2\pi \tan \theta} = \frac{S n_g}{60 \tan \theta} \quad (10)$$

所以有

$$v_x = \frac{S n_g}{60} \cos^2 \theta (1 - \tan \alpha \tan \theta) \quad (11)$$

由式(11)可知, 当 $1 - \tan \alpha \tan \theta \leq 0$ 时, 秸秆将不能轴向运动, 对 v_x 进行求导, 并令 $dv_x/d\alpha = 0$, 则

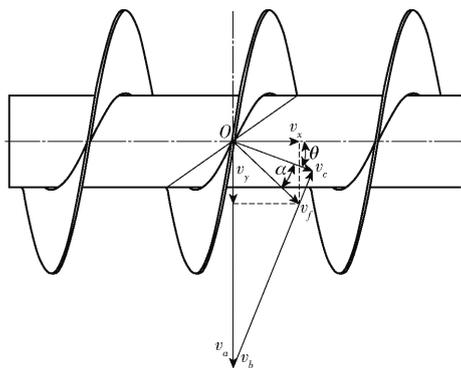


图7 集秆螺旋器运送秸秆速度分析

Fig.7 Analysis of screw conveying straw speed

秸秆运动的最大轴向速度所对应的螺旋角 θ_{\max} 为 $\pi/4 - \theta/2$ 。当螺距不变时,集秆螺旋器半径 r 增大,螺旋角 θ 减小,此时秸秆输送量增大,但秸秆运动的轴向速度 v_x 会减小;当 r 不变时, S 与 α 成正比,当 S 、 α 增大时 v_x 也相应增大。

2.2.3 离散元模型

为获取集秆螺旋器在输送秸秆时的最佳转速范围,明确集秆螺旋器转速与螺旋所受扭矩和离开排秸口处秸秆运动速度之间的关系,本文建立粉碎刀轴抛送、集秆螺旋器推运的工作部件与秸秆颗粒离散元互作模型。

被粉碎后的秸秆形状复杂,主要由碎秆和叶片组成,且秸秆还田机作业后秸秆长度集中分布在 $5 \sim 10 \text{ cm}$ ^[20],为更加准确地模拟秸秆运动过程,模型中对碎秆做均匀化处理近似为圆柱体,其半径为 2.2 mm ,长度为 6 cm ,叶片长度 5 cm ,由 51 个半径为 1.7 mm 的球体组成,秸秆颗粒工厂尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,所建立的秸秆模型如图 8 所示,相关离散元仿真参数^[20]如表 1 所示。



图8 秸秆模型

Fig.8 Straw discrete element models

根据前述作业条件,在离散元前处理面板的秸秆颗粒工厂中设置秸秆生成质量为 720 g ,秸秆的生成方式为静态生成,仿真时间为 2 s ,仿真模型如图 9 所示。

由前述理论计算可知,为满足秸秆量输送要求,集秆螺旋器的最小转速为 896 r/min ,为探究集秆螺旋器转速与秸秆离开排秸口的速度关系以及与螺旋所受扭矩关系,分别设置螺旋器转速为 900 、 1000 、 1100 、 1200 r/min 4 个水平进行模拟,在离散元后处理面板中的 Setup Selections 模块中设置秸秆颗粒速度传感器对秸秆离开排秸口的平均运动速度进行监

表1 仿真相关离散元参数

Tab.1 Simulation related discrete element parameters

参数	数值
秸秆泊松比	0.35
秸秆剪切模量/Pa	1×10^6
秸秆间恢复系数	0.3
土壤颗粒间动摩擦因数	0.06
土壤颗粒间静摩擦因数	0.63
45号钢泊松比	0.3
45号钢剪切模量/Pa	1×10^{10}
秸秆与45号钢间恢复系数	0.3
秸秆与45号钢间滚动摩擦因数	0.01
秸秆与45号钢间静摩擦因数	0.45

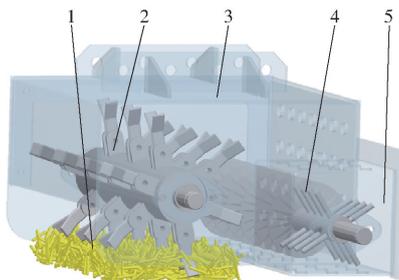


图9 整体仿真模型图

Fig.9 Simulation model diagram

1. 秸秆 2. 粉碎刀轴 3. 罩壳 4. 集秆螺旋器 5. 排秸口

测,并在后处理面板中导出集秆螺旋器所受扭矩平均值。

运秸螺旋器在不同时刻输送秸秆运动状态如图 10 所示。图中 $0.002 \sim 0.2 \text{ s}$ 过程中地表秸秆被捡拾起抛送到罩壳的后挡板处, $0.2 \sim 0.3 \text{ s}$ 时被后罩壳挡下的秸秆落入到集秆螺旋器中并随螺旋器产生定向运移, $0.4 \sim 0.6 \text{ s}$ 达到输送稳定状态。

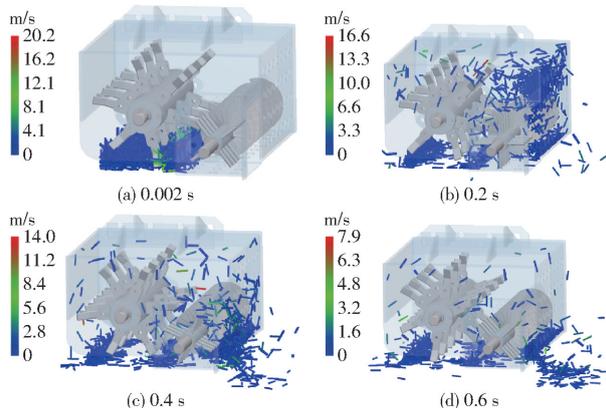


图10 不同时刻输送秸秆运动状态

Fig.10 Simulation process diagrams at different times

如图 11 所示,在 $0 \sim 0.2 \text{ s}$ 中,秸秆颗粒运动速度波动较大,主要与经过排秸口处的秸秆数量较少有关,其中转速 1200 r/min 条件下,秸秆的运动速度最大,达 7.5 m/s ;在 $0.2 \sim 0.4 \text{ s}$ 中,螺旋器转速对秸秆运动速度影响不显著,但也呈现出随着螺旋器

转速增加秸秆运动速度增加的趋势,其中,转速 1 100、1 200 r/min 条件下,秸秆运动速度变化起伏大,转速 900 r/min 条件下秸秆运动速度变化较为平稳,趋近于 1.6 m/s;在 0.4~0.6 s 中,秸秆运动速度达到稳定状态,随着转速增加秸秆运动速度呈现增加趋势,其中转速 1 200 r/min 相较于转速 1 100 r/min 条件,秸秆运动速度增加不明显,均趋近于 2 m/s,而在 900、1 000、1 100 r/min 3 个水平下,随着转速的增加秸秆运动速度有较为明显的阶段性增加,因此在转速 900~1 100 r/min 范围内可通过提高集秆螺旋器转速提高排秸口处秸秆的运动速度。

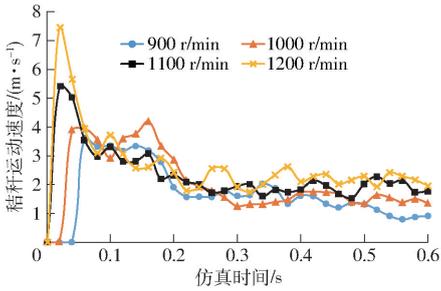


图 11 不同转速下秸秆运动速度变化曲线

Fig. 11 Speed of straw movement

如图 12 所示,在 0~0.2 s 中,由于多数秸秆被粉碎刀轴捡拾抛起到后罩壳挡板上,仅有少数秸秆落入到集秆螺旋器中,因此在此阶段所受扭矩较小,螺旋转速变化对其所受扭矩影响较小;在 0.2~0.4 s 中,螺旋所受扭矩呈明显的增加趋势,其中,1 200 r/min 转速条件下扭矩增加趋势大于其他 3 个水平,在 0.4 s 时螺旋所受扭矩为 12 N·m,远超其他转速;在 0.4~0.6 s 中,集秆螺旋器所受扭矩趋于平稳,其中,在 1 200 r/min 转速条件下,扭矩仍存在变大趋势,在 0.6 s 时刻,螺旋所受扭矩为 19.2 N·m,远大于其他转速条件,在 900、1 000、1 100 r/min 3 个水平下扭矩趋于平稳状态,并呈现随转速增加扭矩变大的趋势。

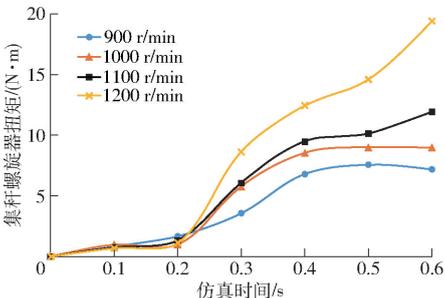


图 12 不同转速下集秆螺旋器扭矩变化曲线

Fig. 12 Torque of screw at different speeds

通过上述对不同转速条件下集秆螺旋器所受扭矩和排秸口处秸秆运动平均速度的分析,集秆螺旋

器的转速在 900~1 100 r/min 较为合理。

2.3 运秸风机

运秸风机输送秸秆的基本原理为利用风机的叶片将粉碎后的秸秆进行抛送,使其具有足够的速度能够沿输秸软管运动,并输送到开沟铲所开沟中,运秸风机叶片在做回转运动时也会形成正压气流,气流能够在秸秆运动速度减小的过程中起到一定的吹送作用,同时能够降低秸秆在运动过程中所受的空气阻力。

当运秸风机叶片绕轴线做高速旋转运动时,叶片将粉碎的秸秆进行抛掷,对秸秆抛掷过程进行分析可知,秸秆跟随叶片转动使其获得一定的初速度,当风机叶片运动到风机排秸口处时,秸秆的运动分析如图 13 所示,其初速度为 v_d ,根据速度的矢量合成关系可分解为沿风机叶片的切向运动速度 v_t 和垂直于风机叶片的速度 v_n 。

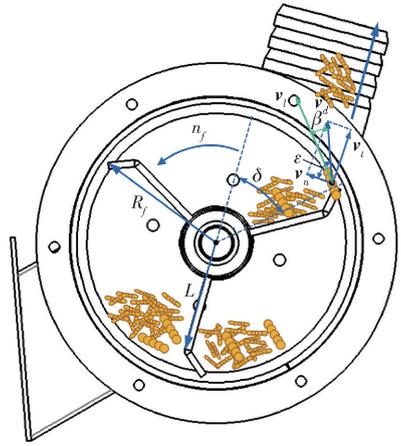


图 13 风机中秸秆抛送分析

Fig. 13 Analysis of straw throwing in fan

秸秆在垂直升运过程中,被风机叶片以初速度 v_d 抛出,为使粉碎秸秆顺利离开管道,其抛出速度 v_e 应该为 4~5 m/s^[21],根据动能定理可得

$$\frac{1}{2}mv_d^2 = mg(1 + \tau)H_1 + \frac{1}{2}mv_e^2 \quad (12)$$

式中 τ ——秸秆在抛送过程中与管壁碰撞及摩擦的能量损失系数,为 0.82

H_1 ——秸秆抛送的最大高度,mm

推导得秸秆被抛送的初始速度 v_d 为

$$v_d = \sqrt{2H_1g(1 + \tau) + v_e^2} \quad (13)$$

由于理论初始线速度 v_t 与实际线速度 v_d 存在夹角 β ,因此引入速度修正系数 ξ ,为 3.2。假设秸秆被抛出的初始线速度与风机叶片转速 n_f 的关系为

$$n_f = \frac{30v_d\xi}{\pi R_f} = \frac{30}{\pi R_f}\xi \sqrt{2H_1g(1 + \tau) + v_e^2} \quad (14)$$

由于风机在抛送秸秆的过程中,秸秆并非平行于运秸风机端口处抛出,而是存在夹角 $\pi/2 - \varepsilon$,因

此有

$$v_d = \frac{v_i}{\sin \varepsilon} \quad (15)$$

因此为保证风机将秸秆能充分地输送到开沟铲所开沟中,已知秸秆抛送高度为 50 cm,半径为 186 mm, ε 为 50° ,则风机转速为

$$n_f = \frac{30}{\pi R_f \sin \varepsilon} \xi \sqrt{2H_1 g(1 + \tau) + v_e^2} \quad (16)$$

求得风机叶片转速 n_f 为 1 402 r/min。

2.4 开沟铲设计与离散元仿真

2.4.1 开沟铲设计

开沟铲作为秸秆条带拾捡粉碎深埋装置的关键零部件之一,开沟作业效果直接影响秸秆深埋质量。如图 14 所示,铲柄长度 h_3 为 655 mm,铲柄厚度 a_2 为 30 mm,破土刃长度 h_2 为 280 mm,铲尖长度 S_2 为 255 mm,铲尖入土角 φ 为 7° ,为增加开沟铲开沟宽度并防止开沟铲开沟过程中回土过快、影响秸秆深埋效果,故在开沟铲后设计回土板保持开沟沟型延迟回土时间,确保开沟质量,回土板高度 h_4 为 300 mm,回土板宽度 e 为 200 mm,回土板挡土夹角 λ 为 26° 。

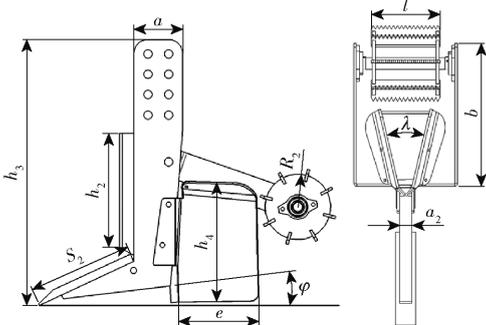


图 14 开沟铲结构参数示意图

Fig. 14 Structural parameters of trenching shovel

由于玉米秸秆具有松散、体积大、密度低等特性,在深埋过程中需对沟中秸秆进行压实处理,所设计的压秸轮依靠自重采用被动旋转的方式对秸秆进行压实,便于后续覆土处理,提升秸秆掩埋效果。压秸轮直径 R_2 为 160 mm,压秸轮支臂 b 为 355 mm,压秸轮幅宽 l 为 170 mm。

2.4.2 离散元仿真

利用离散元仿真模拟确定作业速度与开沟深度两因素与表层土壤颗粒运动状态及开沟铲受力之间的关系。结合秸秆深埋的实际作业需求,选取装置作业速度为 2、3、4 km/h,开沟深度为 200、250、300 mm 进行两因素的完全试验,共计 9 组试验。

在 EDEM 软件中建立土槽,尺寸(长×宽×高)为 2 000 mm × 600 mm × 400 mm,并选择 Hertz - Mindlin with no slip 作为土壤颗粒间接触模型,其中土壤颗粒由半径为 5 mm 的球体组成,土层深度为

400 mm,土壤密度为 $1\ 346\ \text{kg}/\text{m}^3$,开沟铲材料属性为 65Mn 钢,密度为 $7\ 830\ \text{kg}/\text{m}^3$,土壤与开沟铲的本征参数和接触参数^[22-24]如表 2 所示。

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation parameter

参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.4
土壤颗粒剪切模量/Pa	1×10^6
土壤颗粒间恢复系数	0.2
土壤颗粒间动摩擦因数	0.3
土壤颗粒间静摩擦因数	0.4
65Mn 钢泊松比	0.35
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
颗粒与 65Mn 钢间恢复系数	0.3
颗粒与 65Mn 钢间滚动摩擦因数	0.05
颗粒与 65Mn 钢间静摩擦因数	0.5

为提高仿真的计算效率,对开沟铲模型进行简化,将不影响计算结果的结构去除,并将三维软件 SolidWorks 中的模型保存为 x-t 格式,导入到 EDEM 软件中,在前处理面板中调节好开沟铲与土槽间的相对位置,为开沟铲添加前进速度,同时为压秸轮添加绕中心轴线旋转的角速度和前进速度,仿真时间为 5 s。图 15 为开沟铲作业过程的整体仿真模型。

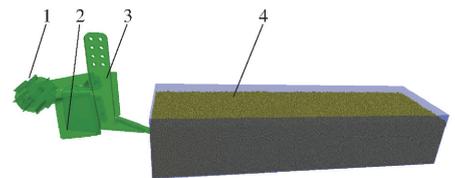


图 15 整体仿真模型

Fig. 15 Simulation model diagram

1. 压秸轮 2. 回土板 3. 铲柄 4. 土槽

2.4.2.1 开沟铲土壤运动状态分析

传统的试验方式很难对开沟过程的土壤运动状态进行分析,为明确开沟铲作业速度和开沟深度对土壤运动的影响,利用离散元法对不同作业条件下土壤颗粒的运动情况进行分析,当开沟铲处于土槽中段稳定开沟阶段时,土壤颗粒运动速度俯视图如图 16 所示。

由图 16 可知,在图 16f、16h、16i 3 组仿真试验中,开沟铲开沟过程中,开沟铲周围土壤表层颗粒运动速度远大于其他条件下颗粒的运动速度,表明该试验条件下开沟铲对表层土壤的扰动较大;图 16c、16e 2 组仿真试验较图 16a、16b、16d、16g 4 组仿真试验开沟铲周围土壤颗粒运动速度大,图 16a 中开沟铲周围土壤颗粒运动速度最小,图 16a ~ 16c、图 16d ~ 16f、图 16g ~ 16i 3 组对比试验可知,当开沟深度一致时,随作业速度的增加土壤表层颗粒运动速度增加,土壤扰动范围变大,当作业速度相同时,

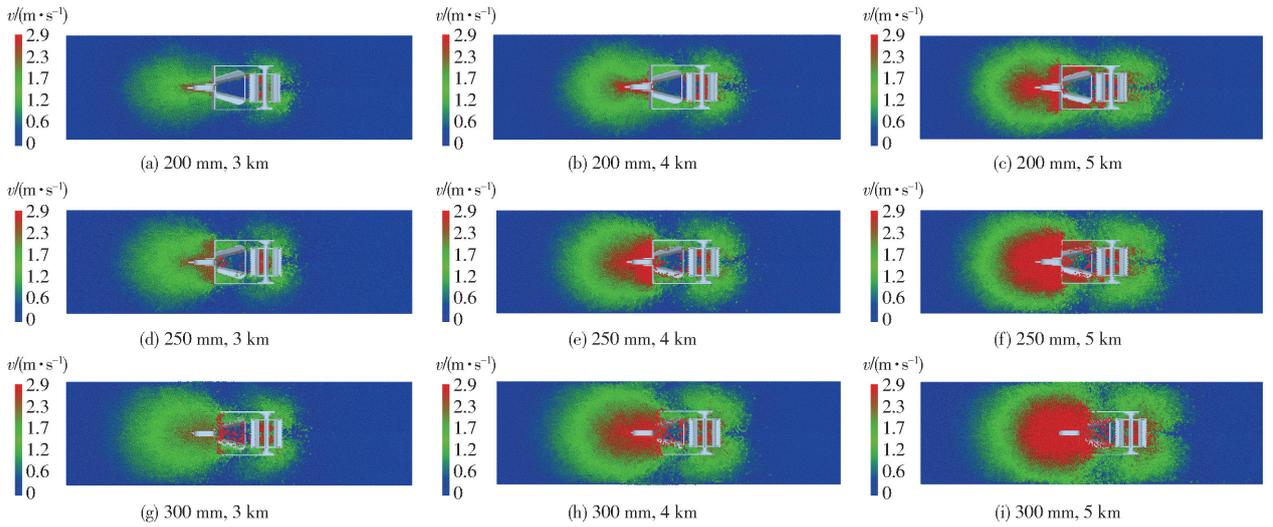


图 16 土壤表层颗粒运动速度示意图

Fig. 16 Schematics of soil particle velocity

图 16a、16d、16g,图 16b、16e、16h,图 16c、16f、16i 3 组对比试验可得,土壤颗粒运动速度与开沟深度成正相关,随着开沟深度的增加土壤表层颗粒运动速度增加,对土壤表层的扰动越大。在实际开沟过程中开沟铲对土壤表层的扰动大,会增加土壤水分蒸发量不利于保护土壤墒情,因此需要降低开沟铲对于土壤表层的扰动。

为考察开沟铲在开沟过程中,开沟铲位置对于土壤颗粒整体运动情况的影响,选取开沟深度为 250 mm、作业速度为 4 km/h 的仿真试验条件进行分析,分别截取铲尖入土时刻(0.1 s)、开沟铲完全入土时刻(0.5 s)和稳定开沟时刻(1.3 s) 3 个代表性阶段,对不同阶段土壤颗粒运动速度进行分析。

由图 17a、17d 可知,在开沟铲铲尖入土时刻,开沟底层处的土壤颗粒在铲尖的作用下产生了垂直于铲尖平面向上的速度,土壤颗粒有被向上翻升的趋势。如图 17b、17e 所示,当开沟铲完全入土时,在开沟深度范围内,靠近开沟铲铲柄位置处土壤颗粒速度较大,在铲柄运动方向前侧区域内土壤颗粒产生

了运动速度,距离铲柄相对位置越远其运动速度越小,此时土壤颗粒沿垂直于铲尖平面和铲柄平面向前、向上运动,并在回土板的作用下向开沟铲前进方向的两侧运动,在开沟深度内的土壤颗粒主要受到铲柄和铲尖的挤压和切削作用。

当开沟铲处于稳定开沟时刻时,如图 17c、17f 所示,垂直于铲尖平面和铲柄前方处土壤颗粒运动速度最大,随着开沟铲的前进,土壤颗粒经过挡土板后回落到沟中,铲柄后侧的压秸轮被动旋转使土壤颗粒产生向下运动的趋势,能够增强回土效果。

2.4.2.2 开沟铲受力分析

开沟铲在开沟过程中,铲尖与铲柄对土槽内土壤颗粒进行挤压和剪切作用,土壤颗粒沿垂直于铲尖平面及铲柄的破土刃方向被向上和向前抬升,开沟铲后侧后方的土壤颗粒在自身重力和压秸轮被动旋转压实过程中,回落沟中。为进一步明确开沟铲在开沟过程中受到土壤颗粒的作用力,对不同作业速度和开沟深度下开沟铲前进方向所受的作用力进行分析,如图 18 所示。

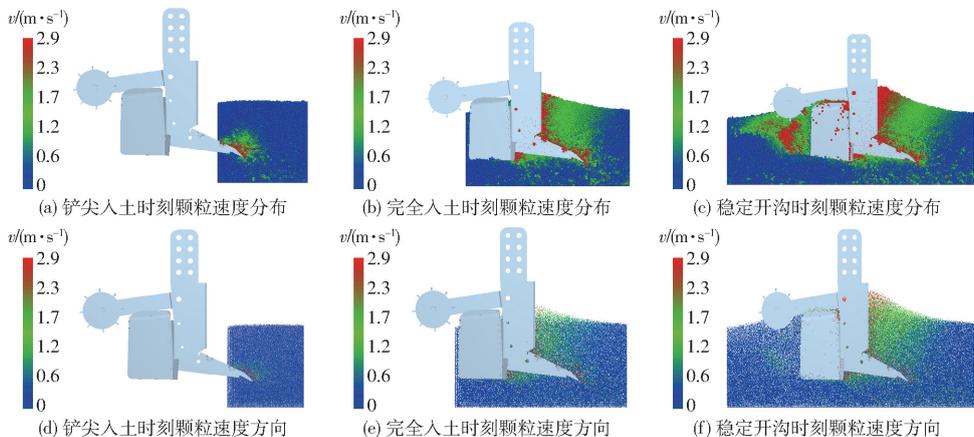


图 17 土壤颗粒扰动情况示意图

Fig. 17 Schematics of soil particle disturbance

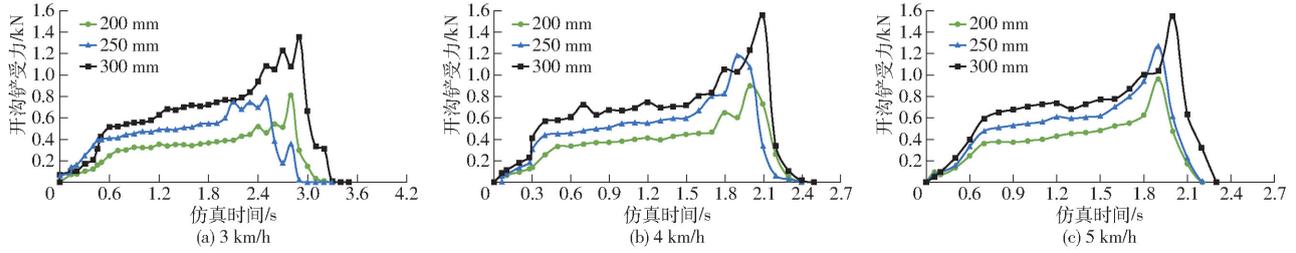


图 18 开沟铲前进方向受力变化曲线

Fig. 18 Force variation diagrams of trenching shovel in forward direction

图 18a 中,在 0~0.6 s 时刻开沟铲处于入土状态,其受到土壤的作用力逐渐变大,在 0.6~2.4 s 开沟铲在前进方向上受力趋于稳定,其稳定状态下开沟深度为 200、250、300 mm 时的开沟铲受力的均值分别为 358.56、540.65、681.01 N,在 2.4~3.5 s 开沟铲离开土槽时,在土槽边缘会出现雍土现象,因此在此时间段内开沟铲的受力先急剧增加后迅速减小;图 18b 中 0.5~1.7 s 开沟铲受力达到稳定状态,其稳定状态下作业速度开沟深度为 200、250、300 mm 时的开沟铲受力的均值分别为 411.37、576.73、721.83 N;图 18c 中 0.6~1.5 s 开沟铲受力达到稳定状态下,开沟深度为 200、250、300 mm 时的开沟铲受力的均值分别为 471.75、653.12、769.41 N;由上述分析可知,当开沟深度相同时开沟铲的受力随作业速度的增加而增大,作业速度相同时开沟铲的受力随开沟深度的增加而增大。

3 田间试验

3.1 试验条件

为测试所设计的秸秆粉碎深埋装置的田间作业性能,2021 年 8 月于山东省天盛机械有限公司开展田间试验,如图 19 所示,试验地人为设置秸秆覆盖量为 1.2 kg/m^2 ,土壤类型为壤土,土层 0~300 mm 内其他土壤特性参数如表 3 所示,秸秆平均含水率为 31.4%。主要试验仪器有东方红 1304 型拖拉机、SC900 型 Cone-index 土壤紧实度仪、30 cm×30 cm 框架、 $\phi 50.46 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 取土环刀等。

3.2 试验方法与评价指标

基于前述理论分析与仿真分析,该装置集秆螺



图 19 田间试验

Fig. 19 Field test

表 3 土壤特性参数

Tab. 3 Soil characteristic parameters

深度/mm	容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	紧实度/kPa	含水率/%
0~100	1.21	622	26.3
100~200	1.43	1438	22.6
200~300	1.75	2603	18.5

旋器转速、作业速度和开沟深度对秸秆输送、粉碎捡拾质量和开沟质量有较大影响,进而进一步影响秸秆掩埋质量,选取集秆螺旋器转速、机具前进速度、开沟深度为试验因素进行 Box-Behnken 试验,因素编码如表 4 所示,试验结果如表 5 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值)。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Coding of test factors

编码	因素		
	机具前进速度 $x_1/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	开沟深度 x_2/mm	集秆螺旋器转速 $x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	5	300	1100
0	4	250	1000
-1	3	200	900

表 5 试验方案及试验结果

Tab. 5 Test scheme and test results

序号	因素			掩埋合格率 $Y_1/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	64.3
2	1	-1	0	39.5
3	-1	1	0	67.2
4	1	1	0	48.6
5	-1	0	-1	59.4
6	1	0	-1	42.6
7	0	0	-1	63.3
8	1	0	1	45.3
9	0	-1	-1	47.6
10	0	1	-1	55.2
11	0	-1	1	52.4
12	0	1	1	58.3
13	0	0	0	50.3
14	0	0	0	52.4
15	0	0	0	49.2
16	0	0	0	51.2
17	0	0	0	49.8

在每个试验行程中随机选取 3 个测试点,以该点为中心使用 30 cm × 30 cm 框架进行试验数据采集。为确定秸秆深埋质量,采用秸秆掩埋合格率为主要指标进行评价,其计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \quad (17)$$

式中 Y_1 ——秸秆掩埋合格率, %

M_1 ——掩埋深度大于 150 mm 秸秆质量, kg

M_2 ——试验前条带内秸秆质量, kg

3.3 结果分析与回归模型建立

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到以秸秆掩埋合格率 Y_1 为试验指标的回归方程,并检验其显著性。

由表 6 可知,试验模型极显著 ($P < 0.01$)。主因素中前进速度和开沟深度对指标影响为极显著,螺旋转速为显著,交互项中前进速度和开沟深度对指标影响为较显著,且各主因素对掩埋合格率的影响由大到小为 x_1 、 x_2 、 x_3 。二次主效应项中前进速度与开沟深度均为显著,将不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差项,剔除不显著因素,进行方差分析,得到各因素与掩埋合格率的回归方程为

$$Y_1 = 179.14 - 32.02x_1 - 0.57x_2 + 0.02x_3 + 0.032x_1x_2 + 1.81x_1^2 + 1.01 \times 10^{-4}x_2^2 \quad (18)$$

对上述回归性方程进行失拟性检验,如表 6 所示,失拟项 $P = 0.2476 > 0.1$,不显著,证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

表 6 掩埋合格率方差分析

Tab.6 Variance analysis of burial rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	926.3	9	102.92	44.96	<0.0001***
x_1	764.40	1	764.40	333.90	<0.0001***
x_2	81.28	1	81.28	35.50	0.0006***
x_3	26.28	1	26.28	11.48	0.0116**
x_1x_2	9.61	1	9.61	4.20	0.0797*
x_1x_3	0.36	1	0.36	0.16	0.7035
x_2x_3	0.72	1	0.72	0.32	0.5918
x_1^2	13.60	1	13.60	5.94	0.0449**
x_2^2	26.79	1	26.79	11.70	0.0111**
x_3^2	0.31	1	0.31	0.14	0.7226
失拟项	9.74	3	3.25	2.06	0.2476
误差	16.03	7	2.29		
总和	942.32	16			

注:***表示差异极显著($P < 0.01$);**表示差异显著($0.01 \leq P \leq 0.05$);*表示差异较显著($0.05 < P < 0.1$)。

3.4 响应曲面分析

通过 Design-Expert 软件对数据进行处理,得出

因素间的显著和较显著交互作用对掩埋合格率影响的响应曲面。

前进速度与开沟深度交互作用如图 20 所示。当机具前进速度一定时,掩埋合格率随开沟深度的增加而增大,主要因为当开沟深度增加时秸秆掩埋深度更容易达到 150 mm,但随着开沟深度的增加开沟阻力也会显著提升;开沟深度最优范围为 260 ~ 300 mm,当开沟深度一定时,掩埋合格率随机具前进速度的增加而减小,主要因为当前进速度增加时,秸秆粉碎捡拾质量下降明显,前进速度最优范围为 3 ~ 3.5 km/h。

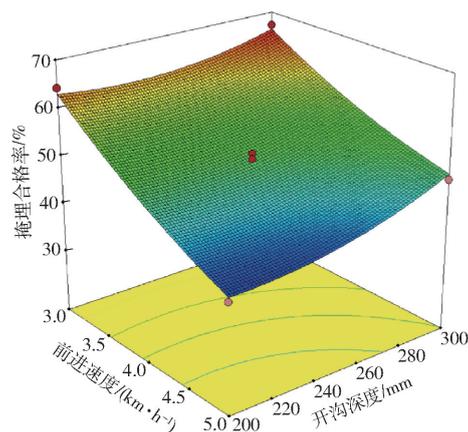


图 20 双因素响应面分析

Fig.20 Analysis of double factors interaction

3.5 参数优化与试验验证

为获得秸秆条带捡拾粉碎深埋装置最优工作参数,利用 Design-Expert 软件的优化模块,对试验因素参数进行优选,遵循提高掩埋合格率的原则,根据装置的试验条件和工作要求,选择目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 3 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 5 \text{ km/h} \\ 200 \text{ mm} \leq x_2 \leq 300 \text{ mm} \\ 900 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 1100 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

得到最优参数组合为前进速度 3 ~ 3.07 km/h、开沟深度 286 ~ 300 mm、螺旋器转速 967 ~ 1100 r/min,优化所得秸秆掩埋合格率为 62.4% ~ 69.5%。

为验证优化结果可靠性,取前进速度为 3 km/h、开沟深度为 290 mm、螺旋器转速为 1000 r/min,进行试验验证,其秸秆掩埋合格率为 64.2%,在相近参数条件下其预测值约为 67.4%,误差小于 5%,与优化结果基本一致。

4 结论

(1) 设计了秸秆条带捡拾粉碎深埋装置并阐述该装置的工作原理,确定了粉碎刀结构、排列方式和

转速等关键参数,对粉碎刀轴的秸秆捡拾过程进行分析,通过理论分析确定了集秆螺旋器和运秸风机的最小转速分别为 896、1 402 r/min,并对秸秆在集秆螺旋器中的运移过程进行分析。

(2)利用离散元单因素仿真试验,明确了集秆螺旋器转速与其所受扭矩和秸秆运动速度之间的关系,并初步确定了集秆螺旋器转速为 900 ~ 1 000 r/min。对开沟铲的开沟过程进行全因素模拟分析,明晰了作业速度与开沟深度两因素与表层土

壤颗粒运动及开沟铲受力之间的关系。

(3)根据实际作业条件和要求对装置工作参数范围进行选取,以秸秆掩埋合格率为试验指标,遵循获得较高秸秆掩埋合格率的原则,对目标函数进行优化,得到各最优参数组合范围,选取前进速度为 3 km/h、开沟深度为 290 mm、螺旋器转速为 1 000 r/min,进行试验验证,其秸秆掩埋合格率为 64.2%,在相近参数条件下其预测值约为 67.4%,误差小于 5%,满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 韩晓增,邹文秀.我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu. Achievements and suggestions on black land protection and fertility improvement in Northeast China[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 206-212. (in Chinese)
- [2] 李然嫣.我国东北黑土区耕地利用与保护对策研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
LI Ranyan. Research on policy options in utilizing and protecting farmland in black soil region of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [3] 汪景宽,徐香菇,裴久渤,等.东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J].土壤通报,2021,52(3):695-701.
WANG Jingkuan, XU Xiangru, PEI Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701. (in Chinese)
- [4] 李荣,侯贤清,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J/OL].农业机械学报,2019,50(8):289-298.
LI Rong, HOU Xianqing, WU Pengnian, et al. Effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 289-298. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190832&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.032. (in Chinese)
- [5] YEBOAH S, LAMPTEY S, ZHANG R, et al. Conservation tillage practices optimizes root distribution and straw yield of spring wheat and field pea in dry areas[J]. Journal of Agricultural Science, 2017, 9(6): 37-48.
- [6] 杨庆璐,陈桂斌,谢立娟,等.伸缩指杆式玉米秸秆旋耕埋机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(12):35-45.
YANG Qinglu, CHEN Guibin, XIE Lijuan, et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 35-45. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.004. (in Chinese)
- [7] AL KAISI M M, YIN X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(2): 437-445.
- [8] 田阳,林静,李宝筏.气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):36-44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 36-44. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181205&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
- [9] 王金武,王奇,唐汉,等.水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):112-117.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112-117. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)
- [10] 王金峰,陈博闻,姜岩,等.水稻秸秆全量深埋还田机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(1):84-93.
WANG Jinfeng, CHEN Bowen, JIANG Yan, et al. Design and experiment on machine for rice straw full quantity deep buried into field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 84-93. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.009. (in Chinese)
- [11] 高文英,林静,李宝筏,等.玉米秸秆深埋还田机螺旋开沟装置参数优化与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):45-54.
GAO Wenyong, LIN Jing, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment for spiral type opener device of maize straw

- deep bury and returning machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 45 – 54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180905&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.005. (in Chinese)
- [12] 窦森. 秸秆“富集深还”新模式及工程技术[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 553 – 560.
DOU Sen. New model of “straw enrichment and deep incorporation” and engineering[J]. Journal of Soil, 2019, 56(3): 553 – 560. (in Chinese)
- [13] 窦森. 玉米秸秆“富集深还”与土壤亚表层培肥[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1670 – 1675.
DOU Sen. Improving subsoil fertility through a new technology of continuous in belt and deep incorporation of corn stover[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1670 – 1675. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 等. V-L型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28 – 33.
JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28 – 33. (in Chinese)
- [15] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [16] 王庆杰, 刘正道, 何进, 等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 10 – 17.
WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping type maize straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 10 – 17. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267 – 276.
SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 267 – 276. (in Chinese)
- [19] 张佳喜, 王学农, 陈发, 等. 秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 82 – 85, 37.
ZHANG Jiayi, WANG Xuenong, CHEN Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 82 – 85, 37. (in Chinese)
- [20] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHENG Zhiqi. Study on corn straw pickup-chopping and ditch-burying returning field machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 辛青青. 基于 Fluent-EDEM 的马铃薯秧粉碎抛送装置仿真与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
XIN Qingqing. Simulation and test of potato seedling crushing and throwing device based on Fluent-EDEM [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [22] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 – 88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 – 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160712&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [23] 李博. 基于离散元法的深松铲减阻及耕作效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
LI Bo. Reducing force and tillage performance of a subsoiler based on the discrete element method (DEM) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [24] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.