

侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验

颜利民^{1,2} 吴涛¹ 蒋德莉¹ 缙海啸^{1,2} 付宣赫¹ 张金昊¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 针对目前棉秆粉碎还田装置作业过程存在棉秆粉碎长度合格率较低、抛撒还田后碎秆易成行堆积、分布不均等问题,设计了一种安装于残膜回收机上的侧抛式棉秆粉碎还田装置。阐述了装置结构及工作原理,对棉秆粉碎装置、侧向输送装置、碎秆抛撒装置等关键部件进行了结构设计与作业性能分析,初步确定了关键部件结构与作业参数。对碎秆抛撒装置进行离散元仿真研究,验证其可提高碎秆还田效果。设计了侧抛式棉秆粉碎还田装置,并安装至残膜回收机上进行三因素三水平二次回归正交田间试验,结果表明最优参数为:机具作业速度 8 km/h、粉碎刀轴转速 2 000 r/min、螺旋输送机转速 1 200 r/min。此时,棉秆粉碎长度合格率为 93.96%,抛撒均匀度为 86.98%,平均棉秆粉碎长度为 116.9 mm,平均留茬高度为 71.4 mm,研究结果为棉秆粉碎还田装置优化设计提供了理论基础和支撑。

关键词: 棉花秸秆; 侧向输送; 抛撒还田; 参数优化

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0216-11

OSID:



Design and Experiment of Side-throwing Cotton Stalk Crushing and Returning Device

YAN Limin^{1,2} WU Tao¹ JIANG Deli¹ GOU Haixiao^{1,2} FU Xuanhe¹ ZHANG Jinhao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

Abstract: Aiming at the problems of low qualified rate of cotton stalk crushing length after operation of cotton stalk crushing and returning device, easy accumulation and uneven distribution of broken stalks after throwing and returning to the field, a side throwing cotton stalk crushing and returning device which can be installed on the residual film recycling machine was designed. The structure and working principle of the device were expounded. The structure design and operation performance analysis of key components such as cotton stalk crushing device, lateral conveying device and broken stalk throwing device were carried out, and the structure and operation parameters of key components were preliminarily determined. The discrete element simulation analysis and experimental design of the straw scattering device were carried out. According to the design scheme, a type of side throwing cotton stalk crushing and returning device was developed and installed on the residual film recycling machine for three-factor and three-level quadratic regression orthogonal field experiment. The results showed that when the forward speed of the machine was 8 km/h, the rotation speed of the crushing knife shaft was 2 000 r/min, and the rotation speed of the screw conveyor was 1 200 r/min, the qualified rate of cotton stalk crushing length was 93.96%, the throwing uniformity was 86.98%, the average cotton stalk crushing length was 116.9 mm, and the average stubble height was 71.4 mm. The machine had the best field operation effect under this parameter combination. The test indexes of the device can meet the design and agronomic requirements, which provided a theoretical basis and support for the structural optimization design of the cotton stalk crushing and returning device.

Key words: cotton stalk; lateral transport; scattering back to the field; parameter optimization

收稿日期: 2024-09-24 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002403)和兵团财政科技计划项目(2023AB014)

作者简介: 颜利民(1981—),男,教授,主要从事残膜回收机设计与优化研究,E-mail: yanlm@shzu.edu.cn

0 引言

新疆是中国主要棉花生产区域和优质棉生产基地,棉花播种面积、产量、单产等指标连续多年居全国第一。根据《国家统计局关于2023年棉花产量的公告》,其中播种面积从2011年的 $1.7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增长到2023年的 $2.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全国比例从38.7%上升至84.98%;2023年新疆棉花产量为 $5.112 \times 10^6 \text{ t}$,占全国总产量的90%以上^[1]。随着棉花大量种植,棉花秸秆(以下简称棉秆)产量也逐年增加,目前,新疆棉秆年产量已超过 $2.3 \times 10^7 \text{ t}$,中国棉秆存储量第一。棉秆作为棉花主要副产品,含有大量的有机质、氮、磷、钾和多种微量元素,是可再生有机资源^[2]。但由于棉秆结构特殊,相较于其他农作物如水稻、油菜等,棉秆综合利用发展较为滞后。棉秆主要利用方式包括粉碎还田、焚烧或废弃、离田回收再加工3种,其中粉碎还田是秸秆利用最重要、最有效的手段,也符合保护性耕作要求^[3-6]。

棉秆粉碎还田装置是棉秆现场直接粉碎还田的重要农业机械,它不仅可有效地解决田间棉秆过剩的问题,还可以提高土壤肥力。目前,国内外企业、高校、科研院所等研制了多种类型的秸秆粉碎还田机械^[7-9]。意大利 MASCHIOGASPARDO SPA 公司研制的 GEMELLA620 型秸秆粉碎还田机采用8排64片锤刀螺旋排布设计,为了应对不平整的地面状况,该机型可选装4个后限深轮,设置机体浮动状态,两侧机体呈一定角度进行工作,但秸秆粉碎长度合格率较低^[10]。田辛亮等^[11]设计的4JSM-2000A型棉秆粉碎及搂膜联合作业机,采用侧向输送式粉碎还田原理,粉碎后的棉秆通过螺旋输送机输送至地面;李亚萍等^[12]设计的4JH-220型秸秆粉碎还田机,增设了自适应摆动尾轮,改善了机具对农田复杂地表状况的适应性;史建新等^[13]设计的抛送式棉秆粉碎还田机,增设了碎秆输送筒,利用甩刀的高速旋转将棉秆进行切碎并将其通过输送筒向整机后方抛送至地面;卢勇涛等^[14]设计的双侧输出式秸秆粉碎还田机,设计了Y形双线双螺旋粉碎装置和可双侧输出碎秆的螺旋输送机,采用双侧相互独立的传动配置分别进行驱动。上述装置主要根据经验数据进行设计或改制,在作业后常出现棉秆抛撒不均匀等问题。

为解决目前棉秆粉碎还田装置作业后棉秆粉碎效果差、易堆积、分布不均等问题,结合新疆地区棉花生产农艺要求,以提高棉秆粉碎长度合格率与抛撒均匀度为目标,本文设计一种与残膜回收机配套使用的侧抛式棉秆粉碎还田装置,对粉碎刀具进行

优化设计,并设计棉秆抛撒装置;通过离散元软件 EDEM 验证抛撒轮结构可行性,分析抛撒轮转速与抛撒叶片数量对碎秆抛撒还田效果的影响,对设计的侧抛式棉秆粉碎还田装置进行田间试验,以机具作业速度、粉碎刀轴转速、螺旋输送机转速为试验因素,棉秆粉碎长度合格率和抛撒均匀度为评价指标对侧抛式棉秆粉碎还田装置进行田间试验,得出机具最优作业参数组合,以期为棉秆粉碎还田装置的设计与改进提供理论指导。

1 棉秆粉碎还田装置结构与工作原理

1.1 整体结构

新疆地区种植区域分布较广,棉花种类较多,为适应采棉机结构尺寸,新疆地区棉花普遍采用宽窄行密植模式,如图1所示^[15]。设计的棉秆粉碎还田装置为与残膜回收机配套使用的卧式粉碎还田机,置于残膜回收机最前端,整机结构如图2所示,主要由棉秆粉碎装置、限深辊、传动系统、侧向输送装置、碎秆抛撒装置等部分组成。棉秆粉碎还田装置主要技术参数如表1所示。

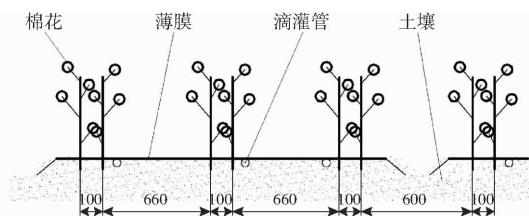


图1 棉花宽窄行密植模式

Fig. 1 Wide-narrow row and close planting pattern of cotton

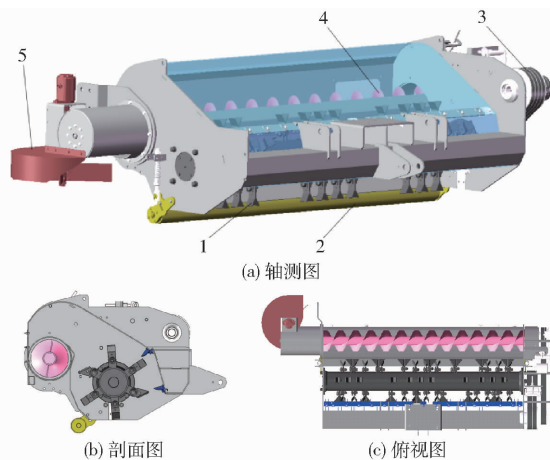


图2 棉秆粉碎还田装置结构图

Fig. 2 Whole structure diagrams of cotton stalk crushing and returning device

1. 棉秆粉碎装置
2. 限深辊
3. 传动系统
4. 侧向输送装置
5. 碎秆抛撒装置

1.2 工作原理

整机采用三点悬挂装置与拖拉机相连,通过限深辊张紧机构能够精确地调整机具高度,进而有效

表1 棉秆粉碎还田装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of cotton stalk crushing and returning device

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 907×1 744×886
作业幅宽/mm	2 100
甩刀数量	14(风刀)+78(粉碎甩刀)
定刀数量	33
刀具末端回转半径/mm	250
前进速度/(km·h ⁻¹)	7~9
粉碎刀轴转速/(r·min ⁻¹)	1 600~1 800
侧向输送轴转速/(r·min ⁻¹)	1 000
抛撒轮转速/(r·min ⁻¹)	300~500
配套动力/kW	117.6~132.3
棉秆粉碎长度合格率/%	≥90
抛撒均匀度/%	≥80

地控制棉秆留茬高度。作业时拖拉机动力输出轴传递动力至齿轮箱,通过齿轮箱变速将动力传递给带轮,从而驱动粉碎刀轴和侧向输送装置旋转。机具前进时棉秆被喂入口前挡板以一定的角度压弯,经过高速旋转的粉碎甩刀切割,被切断后的断秆进入粉碎室,在粉碎室内受到固定在内部的定刀和Y形粉碎甩刀的重叠击打、砍切、揉搓,粉碎成长度适宜的碎秆,后在甩刀抛送和气流场双重作用下被抛送至侧向输送装置处;同时由于粉碎刀轴高速旋转使气体流速增加,压力降低,且装置壳体内相对外部环境是一个相对封闭的空间,因此在粉碎室入口处会形成负压区,导致起膜面上一部分较轻的杂质一同被吸入后抛送至侧向输送装置,碎秆和部分杂质经由侧向输送装置横向输送,在出口处排出后被旋转的抛撒轮以一定的幅度抛撒至机具前进方向右侧棉田中,完成棉秆切割、粉碎、抛撒作业,再由限深辊碾压使得地表平整,为后续残膜回收作业创造了有利条件。

2 关键部件设计

2.1 棉秆粉碎装置设计

棉秆粉碎装置主要由粉碎刀辊、甩刀、定刀、机壳以及侧板等零部件组成,如图3所示,其中由粉碎刀辊和甩刀组成的粉碎刀轴总成是棉秆粉碎装置的核心部件,通过分析新疆地区棉秆物理特性和不同甩刀结构特点^[10,16],粉碎装置棉秆粉碎甩刀主要采用组合Y形甩刀设计,还对其刃线进行改良,增加了甩刀与棉秆之间的切割次数,提升了甩刀切割与抛送效果;为了提升粉碎室内气流抛送功能,以提高棉秆流动性,WU等^[17]基于流体仿真软件对秸秆粉碎装置进行了设计与优化,设计了风刀,与Y形甩刀搭配安装使用,根据新疆地区棉田采用的宽窄行种植模式,刀具排列如图4所示。

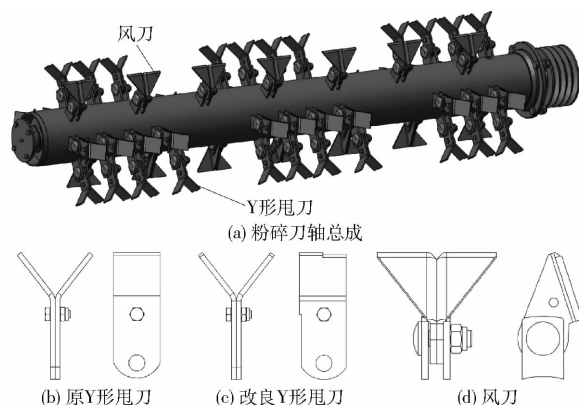


图3 粉碎刀轴总成与刀具结构示意图

Fig.3 Grinding tool shaft assembly and tool schematics

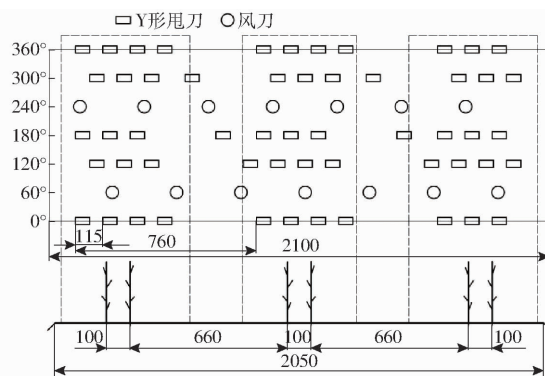


图4 甩刀排列模式及与棉秆对应关系

Fig.4 Blade arrangement pattern and its corresponding relationship with cotton stalk

切割速度理论上越快则切割效果越好,但需考虑机具功耗、震动和零部件寿命等问题,并且根据前期研究,当转速提高到一定数值后,提高转速对棉秆切割与粉碎效果提升并不显著,同时根据过往机具试验,在铺有残膜的地面上使用过高转速进行作业会产生碎膜现象,提高了棉秆中夹带残膜含量和残膜回收作业难度;切割速度过低则会影响切割、棉秆捡拾和抛送质量,增加了棉秆掉落率。因此根据文献^[16-17]确定刀轴转速为1 800~2 200 r/min。

2.2 侧向输送装置设计

侧向输送装置是将从粉碎装置内抛出的棉秆横向输送至机具侧方,避免其掉落至未收膜的棉田里,故该装置应设置于棉秆粉碎装置后方^[18]。侧向输送装置主要由输送轴、螺旋叶片以及壳体等部件组成,如图5所示,其中输送轴安置于壳体的中心位置,螺旋叶片选用不易堵塞的双叶螺旋叶片,焊接于输送轴上。

为了避免发生缠绕、堵塞等情况,设计的侧向输送装置输送量应大于喂入量。由田间试验结果可知新疆地区平均棉秆粉碎量为4.5 t/hm²,按照机具工作幅宽2.1 m,机具作业速度9 km/h,则喂入量为8.5 t/h。输送量、喂入量与螺旋叶片直径、螺距、转

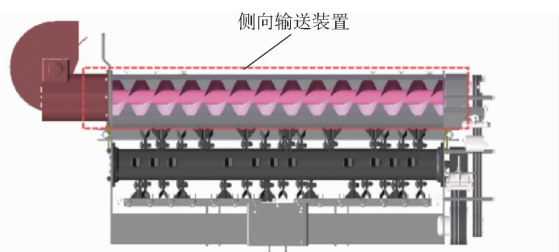


图 5 侧向输送装置位置示意图

Fig. 5 Position structure diagram of lateral conveying device

速等参数关系式为

$$Q = 47D^2\rho_t\varphi sn \geq q \quad (1)$$

式中 Q ——输送量, t/h

D ——螺旋叶片外直径, m

ρ_t ——堆积密度, t/m³

φ ——填充系数 s ——螺距, m

n ——输送轴转速, r/min

q ——喂入量, t/h

由此可得输送轴转速为

$$n \geq \frac{q}{47D^2\rho_t\varphi s} \quad (2)$$

粉碎后棉秆为散状物料, 堆积密度为 0.05 t/m³, 填充系数 φ 取决于棉秆物料摩擦性、粘附性、螺距和输送机轴线倾角, 因此填充系数为 0.41, 本装置设计螺旋叶片外直径为 310 mm, 轴径为 90 mm, 叶片与底壳间隙为 16 mm, 螺距为 310 mm, 计算可得输送轴转速最小值为 296 r/min 时, 输送棉秆时基本不发生缠绕或堵塞^[13]。

2.3 碎秆抛撒装置设计

目前已生产应用的侧抛式棉秆粉碎还田装置中侧向输送及抛撒还田的过程均是通过螺旋叶片旋转和推力共同作用, 导致碎秆抛撒不均匀, 为了减少棉秆成行堆积、扩大抛撒幅宽、提高抛撒均匀度等抛撒效果, 在侧向输送装置出口下方设计一种碎秆抛撒装置^[19-20], 安装位置与结构如图 6 所示。碎秆抛撒装置主要由齿轮马达、抛撒叶片和罩壳组成, 其中抛撒叶片是核心部件, 为此选用耐磨、不易变形、抗击打的橡胶材料。

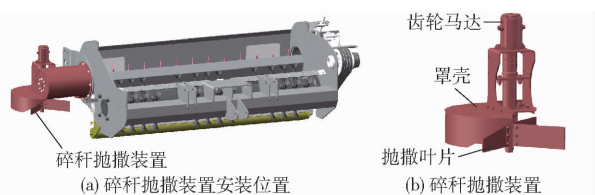


图 6 碎秆抛撒装置安装位置与结构图

Fig. 6 Installation position and structure diagrams of broken stalk throwing device

2.3.1 碎秆在抛撒轮内运动分析

在侧向抛撒过程中, 设定抛撒轮旋转角速度 ω

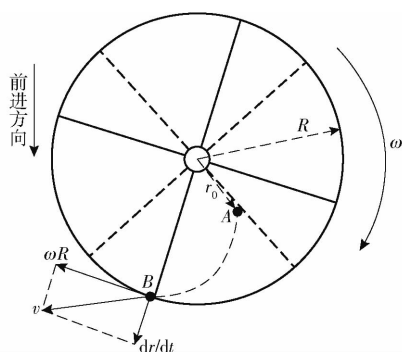


图 7 碎秆在抛撒轮内运动分析

Fig. 7 Motion analysis of broken stalk in throwing wheel

恒定, 忽略碎秆间的相互作用, 在抛撒轮中的碎秆仅受重力、离心力、科氏力(由抛撒轮旋转产生)及摩擦力作用^[20-21]。如图 7 所示, 抛撒叶片均匀分布, 以一个碎秆为研究对象, 设其质量为 m , 在离心力和抛撒叶片作用下, 碎秆由点 A 被抛撒叶片旋转推送并沿抛撒叶片运动至抛撒轮边缘点 B, 进而以一定速度抛出。

设 t 时刻碎秆运动距离为 dr , 运动时间为 dt , 则其平衡方程式为

$$m r \omega^2 - \mu m g - 2 \mu m \omega v' = m a \quad (3)$$

式中 r ——碎秆运动距离

μ ——摩擦因数

v' ——碎秆离开抛撒轮时线速度

a ——碎秆运动加速度

简化后得

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = r \omega^2 - \mu g - 2 \mu \omega \frac{dr}{dt} \quad (4)$$

将其初始条件设为 $r = r_0, \frac{dr}{dt} = 0$, 对式(4)进行求解。当 $r = R - r_0$ 时, 碎秆离开抛撒轮, 碎秆离开抛撒轮时速度满足

$$v^2 = \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + (\omega R)^2 \quad (5)$$

由此可知, 碎秆离开抛撒轮时速度仅与抛撒轮转速和抛撒轮直径有关。根据设计经验结果, 抛撒轮转速 300 ~ 500 r/min 为宜, 考虑到机架质量和新疆地区棉秆粉碎还田装置作业宽幅, 取圆盘直径为 280 mm。

2.3.2 碎秆在空气中运动分析

碎秆离开抛撒轮时, 由于碎秆为不规则圆柱体, 由抛射理论可知^[21], 碎秆会以初速度 v 做斜抛或平抛运动, 抛射距离与初速度 v 呈正相关。以抛撒轮中心为坐标原点, 建立空间直角坐标系 $OXYZ$, 碎秆在空气中的运动及受力如图 8 所示。

假定忽略风速和碎秆自身的旋转作用, 碎秆在空中运动时, 将受到空气阻力 F 和重力 G 作用, 根

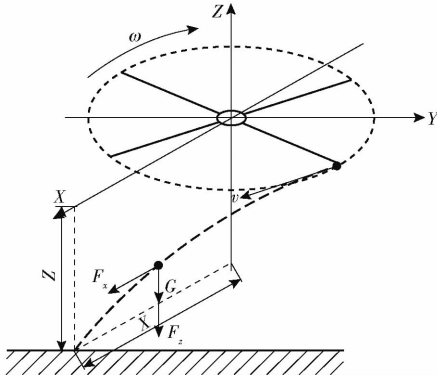


图8 碎秆在空气中运动分析

Fig. 8 Motion analysis of broken stalk in air

据牛顿第二定理可知

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = -F_x \\ m \frac{dv_z}{dt} = -F_z - G \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} F_x = \frac{C_a S_f \rho_d}{2} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_x \\ F_z = \frac{C_a S_f \rho_d}{2} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_z \\ G = mg \end{cases} \quad (7)$$

式中 C_a ——空气阻力系数,取 0.36

S_f ——碎秆迎风面积, m^2

ρ_d ——空气密度, kg/m^3

F_x, F_z ——碎秆在水平和竖直方向所受的空气阻力, N

v_x, v_z ——碎秆运动过程中水平和竖直方向速度, m/s

设碎秆质量为 m , 初速度为 v , 抛射角为 θ , 建立微分方程

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{C_a S_f \rho_d}{2m} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_x \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{C_a S_f \rho_d}{2m} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_z \end{cases} \quad (8)$$

设 $\frac{C_a S_f \rho_d}{2} = k$, k 为比例系数, 由 $v_x = v \cos \theta$, $v_z =$

$v \sin \theta$ 可知

$$\begin{cases} X = \frac{m}{k} \left(\sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_x \cos \theta \right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m} t} \right) \\ Z = \frac{m}{k} \left(\sqrt{v_x^2 + v_z^2} v_x \sin \theta + \frac{mg}{k} \right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m} t} \right) - \frac{mg}{k} t \end{cases} \quad (9)$$

可得碎秆抛撒过程轨迹方程为

$$\begin{aligned} Z &= \left[\tan \theta + \frac{mg}{k(v_x^2 + v_z^2) \cos \theta} \right] X + \\ &\frac{m^2 g}{k^2} \ln \left(1 - \frac{k}{m(v_x^2 + v_z^2) \cos \theta} X \right) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知, 当比例系数 k 一定时, 高度 Z 直接影响碎秆抛撒宽幅 X , 进而影响抛撒均匀度, 结合新疆地区棉花生产农艺要求及相关经验, 抛撒轮离地高度设计为 250 mm。

2.3.3 抛撒轮对抛撒效果的影响

为改善粉碎后棉秆易成行堆积、分布不均等问题, 设计了碎秆抛撒装置。在棉秆粉碎还田装置有无抛撒轮情况下, 对碎秆侧向输送及抛撒还田过程进行了模拟。由于被粉碎后棉秆长短不一, 根据棉秆直径和长度组成的正态分布情况选取棉秆尺寸。通过对颗粒进行排列, 聚合成外形近似为圆柱体棉秆颗粒模型, 棉秆模型直径为 7 mm, 长度为 126 mm, 建立的棉秆模型如图 9 所示, 相关离散元仿真参数如表 2 所示^[21-24]。图 10 为简化后有无抛撒轮结构两种棉秆粉碎还田装置, 在 EDEM 软件中建立棉田模型, 尺寸(长 × 宽 × 高)为 20 000 mm × 2 100 mm × 10 mm, 颗粒工厂位置设置成与粉碎室壳体相切, 并沿切线方向设置棉秆抛送初速度, 再根据棉秆种植模式设置颗粒工厂尺寸(长 × 宽 × 高)为 300 mm × 100 mm × 100 mm, 颗粒工厂数量为 3, 横向等距排列, 如图 11 所示。其余相关仿真参数如表 3 所示, 仿真结果如图 12 所示。

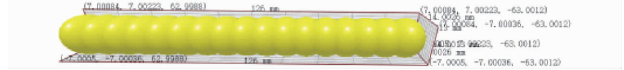


图9 棉秆颗粒模型

Fig. 9 Cotton stalk particle model

表2 相关离散元仿真参数

Tab. 2 Related discrete element simulation parameters

参数	数值
棉秆泊松比	0.35
棉秆剪切模量/GPa	0.69
45号钢泊松比	0.30
45号钢剪切模量/GPa	79.40
棉秆之间碰撞恢复系数	0.45
棉秆与钢之间滚动摩擦因数	0.05
棉秆与钢之间静摩擦因数	0.45
棉秆与钢之间碰撞恢复系数	0.50

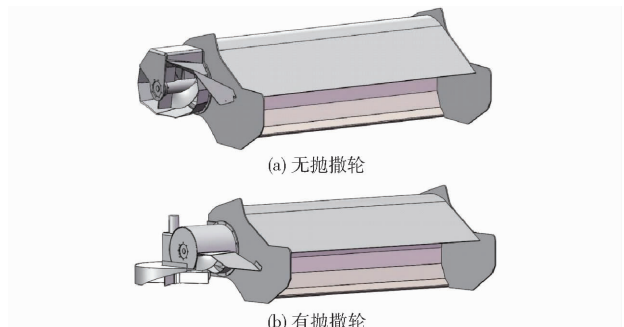


图10 棉秆粉碎还田装置简易结构图

Fig. 10 Simple structure diagrams of cotton stalk crushing and returning device

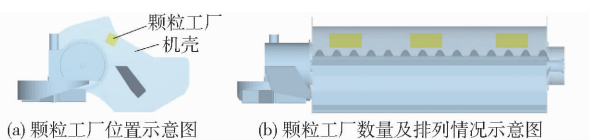


图 11 棉秆颗粒工厂设置

Fig. 11 Cotton stalk particle factory setting

表 3 其他离散元仿真参数

Tab. 3 Related discrete element simulation parameters

参数	数值
土壤泊松比	0.25
土壤剪切模量/GPa	0.001
棉秆与土壤之间碰撞恢复系数	0.2
棉秆与橡胶之间滚动摩擦因数	0.05
棉秆与橡胶之间静摩擦因数	0.5
棉秆与橡胶之间碰撞恢复系数	0.3
前进速度/(m·s ⁻¹)	2.2
螺旋输送机转速/(r·min ⁻¹)	800
抛撒轮转速/(r·min ⁻¹)	400
仿真时间/s	30

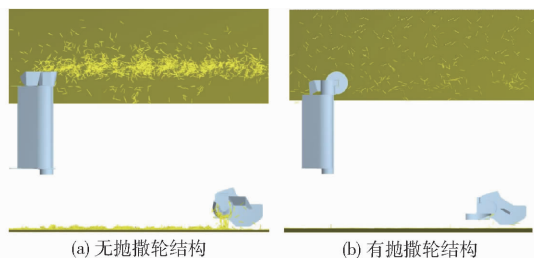


图 12 仿真抛撒还田效果

Fig. 12 Simulation of scattering and field return

由图 12 可知,棉秆粉碎还田装置在有抛撒轮结构情况下,抛撒还田效果得到有效改善,扩大了抛撒幅宽,提高了抛撒均匀度,而且还解决了碎秆成行堆积的难题。验证了碎秆抛撒装置设计的可行性与重要性。

2.3.4 抛撒还田仿真试验

抛撒轮转速和抛撒叶片数量是影响抛撒效果的主要参数,故以抛撒轮转速和抛撒叶片数量为试验因素,以抛撒幅宽、抛撒均匀度为试验指标。抛撒幅宽和抛撒均匀度的测量方法如图 13 所示,由图 13a 可知,使用二维矩阵法收集棉秆并计算其幅宽,应用 EDEM 后处理 Selection 模块在棉田模型表面处沿抛撒方向(X 方向)设置 Grid Bin Group,每个网格大小为 $25\text{ mm} \times 5\text{ 000 mm}$,共 82 行计算网格,总宽度与单块试验棉田宽度相同。累加单行中的棉秆质量占计算域内棉秆总数的 95% 时,此时该棉秆所在网格的距离即为抛撒幅宽。由图 13b 可知,应用 EDEM 后处理 Selection 模块在棉田模型表面处沿前进方向(Y 方向)设置 Grid Bin Group,每个网格尺寸为 $1\text{ 000 mm} \times 2\text{ 000 mm}$,共 5 个计算网格,统计每个计

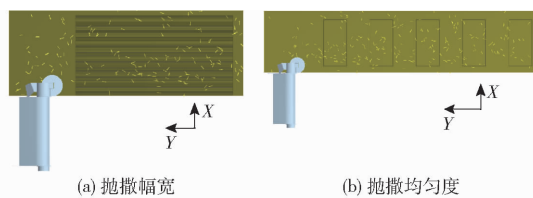


图 13 仿真试验指标测量方法

Fig. 13 Simulation test index measurement methods

算网格中的棉秆质量,棉秆抛撒均匀度计算式为

$$Y_2 = \left(1 - \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^5 (M_{jl} - M)^2}{4}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad M = \sum_{l=1}^5 M_{jl} \quad (12)$$

式中 l ——计算网格位置序号

Y_2 ——棉秆抛撒均匀度, %

M_{jl} ——网格内棉秆总质量, kg

M ——网格内棉秆质量平均值, kg

(1) 抛撒轮转速对抛撒效果的影响

抛撒轮转速是碎秆抛撒装置最关键的作业参数,不同的转速对碎秆抛撒还田效果具有显著的影响,转速过低可能会起不到辅助抛撒的作用,还是会导致碎秆成行堆积,转速过高可能会使碎秆抛撒至未作业棉田,影响后续残膜回收质量。故取抛撒叶片数量为 4 时,利用离散元仿真软件 EDEM 对转速 300、400、500 r/min 的碎秆抛撒装置进行仿真试验,每组 3 次,试验结果取平均值。不同抛撒轮转速下碎秆抛撒效果如图 14 所示,试验结果如表 4、5 所示。

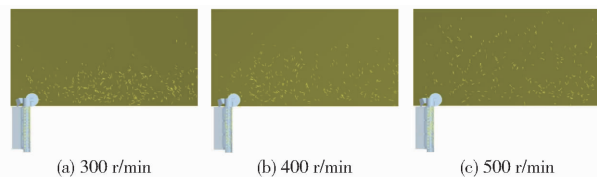


图 14 不同转速下碎秆抛撒效果

Fig. 14 Effects of broken stalk throwing at different rotational speeds

表 4 抛撒幅宽试验结果

Tab. 4 Spreading width test results mm

试验序号	转速/(r·min ⁻¹)		
	300	400	500
1	1 300	1 800	2 550
2	1 350	1 925	2 650
3	1 225	1 900	2 525
均值	1 292	1 875	2 575

由图 14 及表 4、5 可知,随着抛撒轮转速增加,抛撒幅宽逐渐增大,当转速从 300 r/min 增至 500 r/min 时,抛撒幅宽增大 1 283 mm,抛撒均匀度呈先上升后

下降趋势。由于随着转速增加,碎秆被抛撒叶片击中抛出的概率增加以及受力增大,所以抛撒幅宽增大,但转速过大,部分碎秆被抛出的距离太远,所以导致抛撒均匀度呈先上升至后下降趋势。抛撒轮以 400 r/min 工作时抛撒还田作业效果最佳:抛撒幅宽 1 875 mm,抛撒均匀度 88.48%。

表 5 抛撒均匀度试验结果

Tab.5 Test results of dispersion uniformity %

试验序号	转速/(r·min ⁻¹)		
	300	400	500
1	71.58	85.56	80.97
2	69.15	88.23	78.55
3	77.42	91.64	83.29
均值	72.72	88.48	80.94

(2) 抛撒叶片数量对抛撒效果的影响

抛撒叶片数量是碎秆抛撒装置最关键的结构参数,故取抛撒轮转速为 400 r/min 时,利用离散元仿真软件 EDEM 对抛撒叶片数量分别为 2、3、4 的碎秆抛撒装置进行仿真试验,每组 3 次,试验结果取平均值。不同抛撒叶片数量下碎秆抛撒效果如图 15 所示,试验结果如表 6、7 所示。

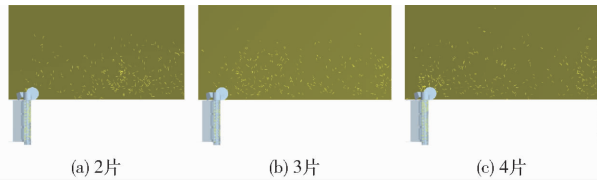


图 15 不同抛撒叶片数量下碎秆抛撒效果

Fig. 15 Effects of broken stalk throwing under different numbers of throwing leaves

表 6 不同抛撒叶片数量下抛撒幅宽试验结果

Tab.6 Spreading width test results mm

试验序号	抛撒叶片数量		
	2	3	4
1	1 725	1 700	2 000
2	1 850	1 925	1 975
3	1 900	1 950	1 825
均值	1 825	1 858	1 933

表 7 不同抛撒叶片数量下抛撒均匀度试验结果

Tab.7 Test results of dispersion uniformity %

试验序号	抛撒叶片数量		
	2	3	4
1	62.74	76.18	83.63
2	75.32	80.24	87.56
3	71.28	85.69	88.27
均值	69.78	80.70	86.49

由图 15 及表 6、7 可知,随着抛撒叶片数量增加,抛撒幅宽逐渐增大,但变化浮动较小,当抛撒叶

片数量从 2 增加到 4 时,抛撒幅宽只增大 108 mm,抛撒均匀度呈上升趋势。由于随着抛撒叶片数量增加,在相同转速下碎秆被抛撒叶片击中抛出的概率增加,但受力不变,所以抛撒幅宽基本保持稳定,抛撒均匀度一直呈上升趋势。抛撒叶片数量为 4 时抛撒还田作业效果最佳:抛撒幅宽 1 933 mm,抛撒均匀度 86.49%。

3 田间试验

3.1 试验条件

按照设计制作侧抛式棉秆粉碎还田装置,并安装至残膜回收机上,如图 16 所示。于 2023 年 10 月在石河子市 145 团进行田间试验,试验地总面积 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,试验行长 600 m,宽 2 m,地形平坦,符合试验地选择要求,试验地棉秆为采棉机收获棉花后留存,部分棉秆由于日照、风干等因素,倒伏于地表,大部分保持直立。其他试验条件如表 8 所示。



图 16 样机实物

Fig. 16 Prototype physical diagram

表 8 试验条件参数

Tab.8 Test conditions

参数	数值
配套动力/kW	117.6 ~ 132.3
棉花种植行距/mm	660 + 100
棉秆株高/mm	755 ~ 832
棉秆主秆直径/mm	7.16 ~ 12.46
棉秆枝秆直径/mm	3.44 ~ 5.10
土壤含水率/%	16.90
棉秆含水率/%	32.65

3.2 试验方法

依据 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》对侧抛式棉秆粉碎还田装置进行田间试验,试验时随机挑选 5 个试验行,在每条试验行作业 100 m;选取机具作业速度 X_1 、粉碎刀轴转速 X_2 、螺旋输送机转速 X_3 作为试验因素,试验因素编码如表 9 所示;选取棉秆粉碎长度合格率与抛撒均匀度作为棉秆粉碎还田的试验评价指标,统计方法如图 17 所示。

(1) 棉秆粉碎长度合格率:沿着机具行程方向,在机具工作行右侧的抛撒行上等距离选取 5 个测点,并在不同的测点随机测定 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (图 17a),随

表9 试验因素编码

Tab.9 Test factors and codes

编码	因素		
	机具作业速度	粉碎刀轴转速	螺旋输送机转速
	$x_1 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$x_2 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$x_3 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
-1	7	1 800	800
0	8	2 000	1 000
1	9	2 200	1 200

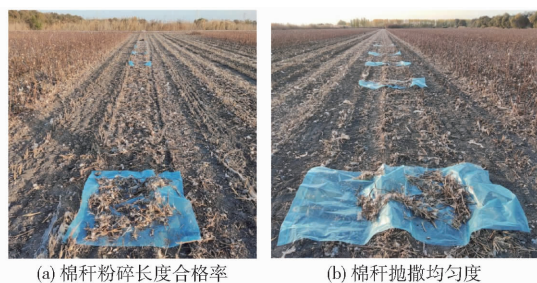


图17 试验指标统计方法

Fig.17 Statistical method of test indexes

后收集测点内被粉碎后的所有棉秆并称量,从中选择粉碎后长度不合格的棉秆(长度大于200 mm)并称量,棉秆粉碎长度合格率计算式为

$$Y_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 \frac{M_{zi} - M_{bi}}{M_{zi}} \times 100\% - F_{ni}}{5} \quad (13)$$

其中 $F_{ni} = \frac{M_{zi} - M_{bi}}{M_{zi}} \times 100\% \quad (14)$

式中 i ——测点位置号

Y_1 ——棉秆粉碎长度合格率, %

F_{ni} ——测点棉秆粉碎长度合格率, %

M_{zi} ——测点棉秆总质量, kg

M_{bi} ——测点不合格棉秆质量, kg

(2) 抛撒均匀度:按照机具行程方向等距离选取5点作为测点,在每个测点地表固定一层1 m × 2 m的塑料薄膜(图17b),待粉碎棉秆抛撒还田后,捡拾每个测点塑料薄膜上的粉秆并称量,计算棉秆抛撒均匀度。

3.3 试验结果与分析

通过 Design-Expert 13 软件设计三因素三水平的二次回归正交组合试验方案,共进行17组试验,每组试验进行3次,取平均值为试验结果,如表10所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

3.3.1 回归模型建立与分析

利用 Design-Expert 13 软件对表10的试验结果进行方差分析,结果如表11所示,可以看出粉碎长度合格率 Y_1 和抛撒均匀度 Y_2 模型显著性检验 P 均小于0.01,模型为极显著,表明该模型具有统计学意义;失拟项 P 均大于0.05,表示模型与试验拟合

表10 试验设计方案与结果

Tab.10 Experimental design and results

试验序号	因素			试验指标	
	机具作业速度 X_1	粉碎刀轴转速 X_2	螺旋输送机转速 X_3	棉秆粉碎长度合格率 $Y_1 / \%$	抛撒均匀度 $Y_2 / \%$
	1	0	0	0	93.21
2	1	0	1	95.75	88.64
3	-1	1	0	88.49	89.97
4	0	-1	1	97.26	85.87
5	-1	0	1	90.72	90.15
6	0	0	0	94.93	89.01
7	1	1	0	89.43	86.30
8	-1	-1	0	91.83	86.93
9	1	-1	0	97.66	84.10
10	1	0	-1	92.07	83.82
11	0	0	0	94.40	88.42
12	0	1	1	90.28	90.48
13	-1	0	-1	89.37	89.76
14	0	-1	-1	94.48	86.60
15	0	0	0	93.54	88.59
16	0	1	-1	87.93	87.73
17	0	0	0	93.98	87.75

表11 回归模型方差分析

Tab.11 Regression model analysis of variance

评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	139.05	9	15.45	44.02	<0.0001**
	X_1	26.28	1	26.28	74.88	<0.0001**
	X_2	78.75	1	78.75	224.37	<0.0001**
	X_3	12.90	1	12.90	36.76	0.0005**
	X_1X_2	5.98	1	5.98	17.03	0.0044**
	X_1X_3	1.36	1	1.36	3.87	0.0900
	X_2X_3	0.0462	1	0.0462	0.1317	0.7274
	X_1^2	7.50	1	7.50	21.37	0.0024**
	X_2^2	2.86	1	2.86	8.16	0.0245*
	X_3^2	2.06	1	2.06	5.87	0.0458*
	残差	2.46	7	0.3510		
	失拟	0.5967	3	0.1989	0.4276	0.7444
	误差	1.86	4	0.4651		
	总和	141.50	16			
R^2	0.9826					
Y_2	模型	59.75	9	6.64	19.27	0.0004**
	X_1	24.33	1	24.33	70.62	<0.0001**
	X_2	15.07	1	15.07	43.75	0.0003**
	X_3	6.53	1	6.53	18.97	0.0033**
	X_1X_2	0.1764	1	0.1764	0.5121	0.4974
	X_1X_3	4.91	1	4.91	14.24	0.0069**
	X_2X_3	3.03	1	3.03	8.79	0.0210*
	X_1^2	1.28	1	1.28	3.71	0.0953
	X_2^2	3.99	1	3.99	11.59	0.0114*
	X_3^2	0.3633	1	0.3633	1.05	0.3386
	残差	2.41	7	0.3444		
	失拟	1.42	3	0.4720	1.90	0.2713
	误差	0.9950	4	0.2488		
	总和	62.16	16			
R^2	0.9612					

注: **表示极显著($P < 0.01$), *表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

程度较好,无失拟因素存在;决定系数 R^2 为 0.982 6 和 0.961 2,说明模型具有良好的拟合优度,由此可以用该回归方程对棉秆粉碎长度合格率和抛撒均匀度进行分析,剔除不显著交互项和平方项后,试验指标与因素之间的回归模型为

$$Y_1 = 94.01 + 1.81X_1 - 3.14X_2 + 1.27X_3 - 1.22X_1X_2 - 1.33X_1^2 - 0.8248X_2^2 - 0.6998X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 88.35 - 1.74X_1 + 1.37X_2 + 0.9037X_3 + 1.11X_1X_3 + 0.87X_2X_3 - 0.9738X_2^2 \quad (16)$$

3.3.2 响应面分析

(1) 试验因素对棉秆粉碎长度合格率的影响

回归方程中系数绝对值与该因素对试验指标影响程度呈正相关,由式(15)可知,对棉秆粉碎长度合格率影响由大到小为: X_2 、 X_1 、 X_3 ;而且 X_1X_2 交互作用对 Y_1 有极显著影响,当螺旋输送机转速为 1 000 r/min 时, X_1 和 X_2 的交互作用对 Y_1 影响的响应面如图 18 所示。

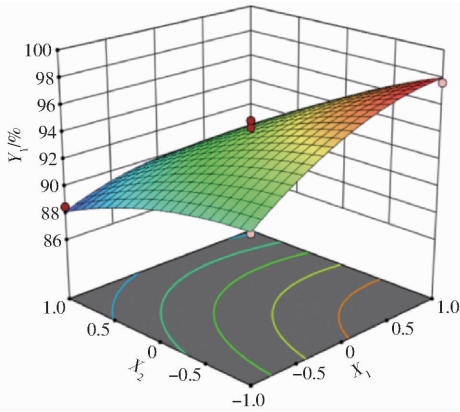


图 18 机具作业速度与刀轴转速交互作用对棉秆粉碎长度合格率的影响 ($X_3 = 0$)

Fig. 18 Influence of interaction between forward speed of machine and rotation speed of cutter shaft on qualified rate of crushing length of cotton stalk ($X_3 = 0$)

由图 18 可知,当机具作业速度一定时, Y_1 随着刀轴转速增加呈先逐渐提升后逐渐平缓趋势。由于粉碎刀轴转速增加时,对棉秆重复粉碎次数增加,棉秆粉碎效果随之提升,但是增加到一定数值后,提高转速对棉秆粉碎效果的提升不再显著。当粉碎刀轴转速一定时, Y_1 随着机具作业速度的增加而降低,且降低幅度逐渐加剧,这是由于机具作业速度的增加导致棉秆喂入量增加,喂入量过大使得在刀轴转速不变的情况下棉秆粉碎并不充分,故而前进速度越快,棉秆粉碎效果越差。

(2) 试验因素对抛撒均匀度的影响

由式(16)可知,对抛撒均匀度影响由大到小为: X_1 、 X_2 、 X_3 ;而且 X_1X_3 的交互作用对抛撒均匀度 Y_2 有极显著影响,当粉碎刀轴转速 2 000 r/min 时,

X_1 和 X_3 的交互作用对 Y_2 影响的响应面如图 19 所示。由图 19 可知,当机具作业速度一定时, Y_2 随着螺旋输送机转速增加呈先逐渐提升后逐渐平缓的趋势。由于在相同喂入量前提下,螺旋输送机转速增加随之加快了棉秆在输送机中的输送,避免了在输送装置中的堵塞堆积,进而影响抛撒效果。当螺旋输送机转速一定时, Y_2 随着机具作业速度增加呈先平缓后逐渐降低趋势,由于机具作业速度的增加导致棉秆喂入量的增加,喂入量越大,使得棉秆在侧向输送装置中发生堵塞的几率越大,进而影响棉秆抛撒效果。

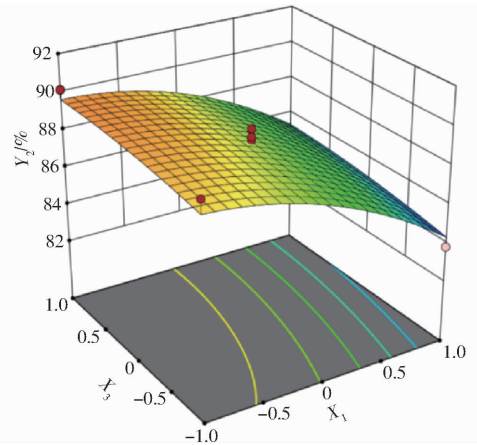


图 19 机具作业速度与螺旋输送机转速交互作用对抛撒均匀度的影响 ($X_2 = 0$)

Fig. 19 Influence of interaction between forward speed of machine and rotational speed of screw conveyor on throwing uniformity ($X_2 = 0$)

3.4 参数优化及验证试验

采用 Design-Expert 13 软件优化求解功能对多因素试验参数进行优化处理。设定棉秆粉碎长度合格率 Y_1 与抛撒均匀度 Y_2 均为最大值,并据此构建数学模型,即

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

结合上述目标函数和约束条件,对各试验因素与 Y_1 、 Y_2 的回归方程进行最优化求解,得出参数优化结果为:机具作业速度 7.9 km/h、粉碎刀轴转速 1 988.4 r/min、螺旋输送机转速 1 171.9 r/min,此时,棉秆粉碎长度合格率为 94.5%,抛撒均匀度为 88.6%。工作参数经优化后,结合实际情况取机具作业速度 8 km/h、粉碎刀轴转速 2 000 r/min、螺旋输送机转速 1 200 r/min 进行试验验证,在相同试验条件下进行 5 次重复试验,结果取平均值,试验结果

如表12所示,平均棉秆粉碎长度为116.9 mm,平均留茬高度为71.4 mm,得到棉秆粉碎长度合格率为93.96%,抛撒均匀度为86.98%,与优化模型结果基本一致,证明该优化模型可靠性强,表明该棉秆粉碎还田装置作业质量符合国家标准。

表12 验证试验结果
Tab.12 Verification test results %

试验指标	试验序号					均值
	1	2	3	4	5	
棉秆粉碎长度合格率	93.6	92.9	95.4	91.7	96.2	93.96
抛撒均匀度	88.1	86.7	85.9	89.4	84.8	86.98

4 结论

(1)对棉秆粉碎还田装置中的棉秆粉碎装置、

侧向输送装置、碎秆抛撒装置等关键部件进行设计与分析,确定了其结构参数与作业参数;在侧向输送装置出口下方设计了一种新型的碎秆抛撒装置,通过离散元仿真模拟碎秆抛撒过程,确定抛撒轮转速为400 r/min,抛撒叶片数量为4;仿真结果表明碎秆抛撒装置可扩大抛撒幅宽,提高抛撒均匀度,提升碎秆还田效果。

(2)田间试验结果表明,当机具作业速度8 km/h、粉碎刀轴转速2000 r/min、螺旋输送机转速1200 r/min时,棉秆粉碎长度合格率为93.96%,抛撒均匀度为86.98%,平均棉秆粉碎长度为116.9 mm,平均留茬高度为71.4 mm,本机具在此参数组合下田间作业效果最佳,且试验中机具各项指标达到设计要求,且满足农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局关于2023年棉花产量的公告[J]. 中国棉花加工,2023(6):15,20.
- [2] 靳海洋,闫雅倩,张德奇,等. 秸秆还田下不同追氮量对麦田土壤真菌群落结构和生态网络的影响[J]. 环境科学,2023,44(2):1085-1094.
JIN Haiyang, YAN Yaqian, ZHANG Deqi, et al. Effects of different topdressing nitrogen rates on soil fungal community structure and ecological network in wheat field under crop residueretention[J]. Environmental Science, 2023,44(2):1085-1094. (in Chinese)
- [3] 谢婉莹,马少辉,赵丽. 秸秆粉碎设备的研究现状与技术分析[J]. 新疆农机化,2023(5):14-17,24.
XIE Wanying, MA Shaohui, ZHAO Li. Research status and technical analysis of straw crushing equipment[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2023(5):14-17,24. (in Chinese)
- [4] 宋国平. 农作物秸秆综合利用的实施对策[J]. 湖北理工学院学报,2022,38(4):9-12.
SONG Guoping. Countermeasures for comprehensive utilization of crop straw[J]. Journal of Hubei Polytechnic University,2022,38(4):9-12. (in Chinese)
- [5] 秦猛,董全中,薛红,等. 我国保护性耕作的研究进展[J]. 河南农业科学,2023,52(7):1-11.
QIN Meng, DONG Quanzhong, XUE Hong, et al. Research progress of conservation tillage in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2023,52(7):1-11. (in Chinese)
- [6] 卢彩云,罗锡文,李洪文,等. 我国保护性耕作的发展与政策建议[J]. 中国工程科学,2024,26(2):103-112.
LU Caiyun, LUO Xiwen, LI Hongwen, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(2):103-112. (in Chinese)
- [7] 路海洋,陈伟明,王方永,等. 棉花秸秆还田现状及其对棉花生长和土壤理化性状影响研究进展[J]. 中国棉花,2025,52(1):8-12.
LU Haiyang, CHEN Weiming, WANG Fangyong, et al. A review:current situation of cotton straw returning and its influence on cotton growth and soil physical and chemical properties[J]. China Cotton,2025,52(1):8-12. (in Chinese)
- [8] 王海礁,谢洪昌,王晨平,等. 秸秆粉碎还田机工作原理与功能优化方向[J]. 农机使用与维修,2024(8):86-88.
- [9] 张青松,齐涛,燕桓,等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):186-196.
ZHANG Qingsong, QI Tao, YAN Huan, et al. Design and experiment of rape direct seeding straw mulching returning device in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):186-196. (in Chinese)
- [10] 杨佳承. 随动式残膜回收机秸秆粉碎装置的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
YANG Jiacheng. Design and research of the straw crushing device for a follow-type residual film recovery machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)
- [11] 田辛亮,赵岩,陈学庚,等. 棉秆粉碎与搂膜联合作业机关键部件设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):190-198.
TIAN Xinliang, ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4):190-198. (in Chinese)
- [12] 李亚萍,蒙贺伟,贾健,等. 4JH-220型秸秆粉碎还田机的研制[J]. 农机化研究,2015,37(7):143-146.
LI Yaping, MENG Hewei, JIA Jian, et al. Development of 4JH-220 shattering and returning machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(7):143-146. (in Chinese)
- [13] 史建新,陈发,郭俊先,等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2006,22(3):68-72.

- SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 68 – 72. (in Chinese)
- [14] 卢勇涛, 王吉亮, 曹肆林, 等. 双侧输出式秸秆粉碎还田机设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 13 – 18.
LU Yongtao, WANG Jiliang, CAO Silin, et al. Design of bilateral output type straw chopper[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 13 – 18. (in Chinese)
- [15] 蒋德莉. 随动式残膜回收机清杂系统研究与试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
JIANG Deli. Research and experiment on the impurity cleaning system of a follow-type residual film recovery machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)
- [16] 吴子岳, 高焕文, 陈君达. 秸秆切碎灭茬机的模型研究与参数优化[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 44 – 46.
WU Ziyue, GAO Huanwen, CHEN Junda. Modeling and optimization of a stalk and stubble chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 44 – 46. (in Chinese)
- [17] 吴涛, 陈学耿, 颜林敏, 等. 基于计算流体力学的棉花秸秆粉碎装置优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 14: 533.
- [18] 曹肆林, 谢建华, 杨豫新, 等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1514 – 1528.
CAO Silin, XIE Jianhua, YANG Yuxin, et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recovery combined machine[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514 – 1528. (in Chinese)
- [19] 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32 – 39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 – 39. (in Chinese)
- [20] 胡永光, 杨叶成, 肖宏儒, 等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 77 – 82.
HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77 – 82. (in Chinese)
- [21] 苟于江, 李华英, 王大明, 等. 基于 EDEM 的小型变量撒肥机设计与仿真优化[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 65 – 71, 76.
GOU Yujiang, LI Huaying, WANG Daming, et al. Design and simulation parameter optimization of small intelligent variable fertilizer spreader based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 65 – 71, 76. (in Chinese)
- [22] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76 – 84, 108.
ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76 – 84, 108. (in Chinese)
- [23] 张喜瑞, 倪世雷, 刘俊孝, 等. 香蕉秸秆粉碎抛撒还田机仿生刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 138 – 151.
ZHANG Xirui, NI Shilei, LIU Junxiao, et al. Design and flow field analysis of bionic blade of banana straw crushing and throwing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 138 – 151. (in Chinese)
- [24] 袁兴茂, 李霄鹤, 焦海涛, 等. 秸秆粉碎集中全量深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 27 – 35.
YUAN Xingmao, LI Xiaohu, JIAO Haitao, et al. Design and experiment of straw chopping centralized full depth and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 27 – 35. (in Chinese)

(上接第 215 页)

- [22] 孟月波, 张子炜, 吴磊, 等. 目标区域引导的 RRT* 机械臂路径规划算法[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(9): 2407 – 2421.
MENG Yuebo, ZHANG Ziwei, WU Lei, et al. Target area guided manipulator path planning of RRT* [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2024, 18(9): 2407 – 2421. (in Chinese)
- [23] WANG Y, JIANG W S, LUO Z, et al. Path planning of a 6-DOF measuring robot with a direction guidance RRT method[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122057.
- [24] 刘小松, 康磊, 单泽彪, 等. 基于双向目标偏置 APF - informed - RRT 算法的机械臂路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 75 – 83.
LIU Xiaosong, KANG Lei, SHAN Zebiao, et al. Robotic arm path planning based on two-way target bias APF - informed - RRT algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 75 – 83. (in Chinese)
- [25] KIM J J, LEE J J. Trajectory optimization with particle swarm optimization for manipulator motion planning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 620 – 631.
- [26] LI X, LV H, ZENG D T, et al. An improved multi-objective trajectory planning algorithm for kiwifruit harvesting manipulator[J]. IEEE Access, 2023, 11: 65689 – 65699.