

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.021

自走式棉秆收获打捆机动定刀式粉碎装置设计与试验

张佳喜^{1,2} 李兵飞¹ 王晓暄^{1,2} 王毅超^{1,2} 高泽斌^{1,2}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农机装备工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对棉秆收获机粉碎装置粉碎效果差、棉秆损失率高的问题, 本文设计了一种自走式棉秆收获打捆机动定刀组合式粉碎装置。通过对旋转刀辊、甩刀以及螺旋输送器等关键部件进行理论分析, 确定了相关设计和工作参数; 运用 EDEM 软件进行棉秆粉碎抛送的离散元模拟仿真试验, 分析得到刀辊转速较优参考值, 然后通过田间试验对装置进行验证。以棉秆粉碎合格率和棉秆损失率为评价指标, 以刀辊转速、刀具离地高度、前进速度为试验因素, 进行单因素试验确定三因素合理参数范围, 再运用 Design-Expert 13.0 软件进行三因素三水平 Box - Benhnken 试验, 获得较优工作参数: 刀辊转速 2 100 r/min、刀具离地高度 80 mm、前进速度 8.5 km/h。在此参数组合下进行 3 次田间验证试验, 棉秆平均粉碎合格率为 96.82%、棉秆平均损失率为 3.64%, 与理论优化值误差均小于 5%, 结果符合作业标准, 可为后续机型开发提供理论参考。

关键词: 棉秆收获打捆机; 粉碎装置; 动定刀组合式

中图分类号: S225.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0226-13 OSID: 

Design and Experiment of Moving and Fixed Knife Type Crushing Device for Self-propelled Cotton Stalk Harvesting and Baling Machine

Zhang Jiayi^{1,2} Li Bingfei¹ Wang Xiaoxuan^{1,2} Wang Yichao^{1,2} Gao Zebin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China
2. Xinjiang Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering and Technology Research Center, Urumqi 830052, China)

Abstract: In response to the problems of poor crushing effect and high loss rate of cotton stalks in the mechanical crushing device for harvesting, a combined moving and fixed knife crushing device for a self-propelled cotton stalk harvesting and baling machine was designed. Through theoretical analysis of key components such as the rotating knife roller, the swinging knife, and the screw conveyor auger, relevant design and working parameters were determined; a discrete element simulation experiment for the device's crushing and throwing of cotton stalks was conducted by using the EDEM software, and the optimal reference value for the rotational speed of the knife roller was obtained. Then the device was verified through field trials. The field trials used the cotton stalk crushing qualification rate and the cotton stalk loss rate as evaluation indicators, and the knife roller rotational speed, height of knife above the ground, and forward speed as the three factors of experiment. Firstly, single-factor experiments were conducted to determine the reasonable parameter ranges of the three factors, and then a three-factor three-level Box - Benhnken experiment was carried out by using the Design-Expert 13.0 software; the optimal working parameters were obtained: the knife roller rotational speed was 2 100 r/min, height of knife above the ground was 80 mm, and forward speed was 8.5 km/h. Three field verification experiments were conducted under this parameter combination, and the average cotton stalk crushing qualification rate was 96.82%, and the average cotton stalk loss rate was 3.64%. The results were within 5% of the theoretical optimization values, and the results were in line with the operation standards, providing theoretical references for the subsequent model development.

Key words: cotton stalk harvesting and baling machine; crushing device; combined moving and fixed knife

收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-04-19
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-2)、国家自然科学基金项目(52365038)和新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目(XJJBGS-MG202403)
作者简介: 张佳喜(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail: 563810112@qq.com

0 引言

中国每年棉花产量约占全球产量的 25%,是世界上最大的棉花生产国^[1]。棉花收获后会留存大量废弃物,如棉秆、棉花叶和棉花壳,仅剩余棉秆量每年就超 $4.0 \times 10^7 \text{ t}$ ^[2]。进行棉秆资源化循环利用,不仅可以带来较好的经济价值,还能起到改善环境的作用。通过棉秆机械化收获,可对棉秆高效且经济地收集,有效解决制约棉秆实现规模化工业应用的瓶颈问题^[3]。

目前棉秆离田综合利用率仅为 10%,主要原因是缺乏高效的棉秆收获机械^[4]。棉秆收获打捆机可实现对棉秆的粉碎、输送、打捆联合作业,而粉碎装置是其重要组成部件,高效的粉碎装置可提高整机对棉秆的回收利用率。近年来随着国内棉秆收获机械化发展,不同种类和结构的棉秆粉碎装置也相继被研发:SMS-1500 型秸秆粉碎机^[5]在切割秸秆时采用往复式切割器,收割后的秸秆根茬整齐且高度低,具有平稳切割和抛撒秸秆的特点。刘旋峰等^[6]设计一种新型滚刀式秸秆粉碎装置,根据有支撑切割原理,采用与拖拉机行走轮旋转方向相同的滚刀和与地面平行的定刀进行有支撑切割,并利用风机叶片对秸秆进行二次切割,此机构工作后地表残留物少、功耗小且工作效率高。尹建军等^[7]进行棉秆仿形收获装置研究,设计一种应用于粉碎装置的弹簧力平衡式自动仿形机构,通过控制仿形误差提高收获效率并降低装置故障率。张喜瑞等^[8]设计一种具有仿生锯齿粉碎尖刀的秸秆粉碎装置,通过仿蓝鲨牙齿锯齿轮廓设计一款仿生锯齿粉碎尖刀,并仿真验证锯齿尖刀切割能力,以此提升装置的粉碎性能。由于目前大多棉秆粉碎收获装置因结构和性能原因仍存在粉碎效果不好、收获效率低的问题,因此设计高性能及工作可靠的粉碎装置具有重要意义。

为满足棉秆高效粉碎和收获的生产需求,本文设计一种自走式棉秆收获打捆机动定刀组合式粉碎装置,通过动定刀结合二次粉碎后可实现棉秆高效粉碎和收集,有利于后续输送、打捆工序。首先通过理论分析确定粉碎装置关键部件的设计和工作参数;对装置进行 EDEM 仿真分析确定影响因素的参数范围;然后运用 Design-Expert 13.0 软件进行三因素三水平 Box-Behnken 试验,经优化后得出较优工作参数,通过田间试验对整机性能进行检验。以期对棉秆收获机粉碎装置的研制和优化提供参考。

1 总体结构

1.1 整机结构及技术参数

自走式棉秆收获打捆机主要由粉碎装置、传送装置、输送装置、打捆装置、机架总成和柴油发动系统组成。可实现对棉秆的切割粉碎、输送、打捆一次性作业。整机结构如图 1 所示,技术参数如表 1 所示。

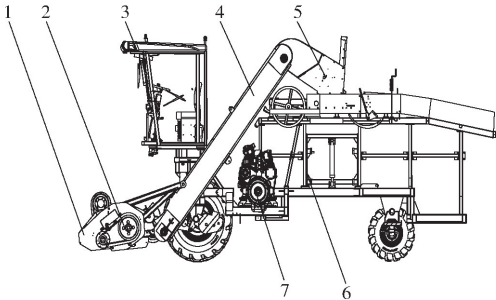


图 1 自走式棉秆收获打捆机总体结构
Fig.1 Overall structure of self-propelled cotton stalk harvesting and baling machine

1. 粉碎装置 2. 传送装置 3. 驾驶室 4. 输送装置 5. 打捆装置 6. 机架总成 7. 柴油发动系统

表 1 棉秆收获打捆机主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of cotton stalk harvesting and baling harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 450×3 060×3 600
配套功率/kW	80~100
作业速度/(km·h ⁻¹)	7~9
工作幅宽/m	2
刀辊转速/(r·min ⁻¹)	1 800~2 200
棉秆粉碎合格率/%	≥95
棉秆损失率/%	≤5

1.2 粉碎装置结构及工作原理

棉秆收获打捆机粉碎装置主要由粉碎刀辊、定刀、螺旋输送器、壳体等组成。本机型采用 Y 型粉碎甩刀,收获能力强,对棉秆粉碎效率高^[9]。Y 型甩刀由 2 片 L 型甩刀通过螺栓固定连接,通过销轴装配在甩刀固定座上,甩刀固定座在粉碎刀辊轴圆周表面螺旋焊接,在壳体内侧顶部位置利用螺栓固定 2 排定刀座,T 型二次粉碎定刀焊于定刀座上^[10-11];螺旋输送器则位于壳体内部后侧位置,通过螺旋输送器轴和螺栓联接进行固定。粉碎装置结构如图 2 所示。

工作时,棉秆以倾斜状态进入粉碎装置,经粉碎刀辊上 Y 型甩刀击打后粉碎,经甩刀作用力及其高速旋转产生的负压作用下被带到粉碎壳体上部,经排列固定的 T 型定刀二次粉碎,并在作用力下被抛

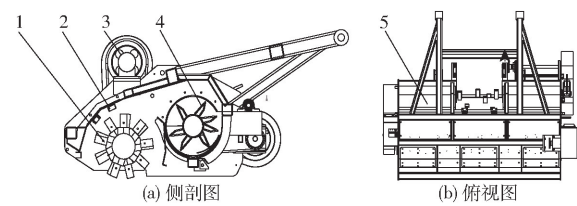


图2 粉碎装置结构

Fig. 2 Structure of crushing device

1. 粉碎刀辊 2. 定刀 3. 传送带轮 4. 螺旋输送机 5. 壳体

送到螺旋输送装置,粉碎棉秆经螺旋输送装置双向聚拢至中间位置,进行下阶段升运输送工作。整个装置完成棉秆粉碎、抛送和收集聚拢。

合理的动力传动系统布局有利于装置结构设计以及部件安装。粉碎装置运行动力由柴油发动机提供,发动机将动力传递给液压马达输出轴经变速箱输出,通过带轮传动传递给粉碎装置刀辊,再由输出主动轴的皮带轮传送至螺旋输送机。此装置传动效率高且能耗低,可满足棉秆粉碎和输送需求^[12]。传动系统如图3所示。

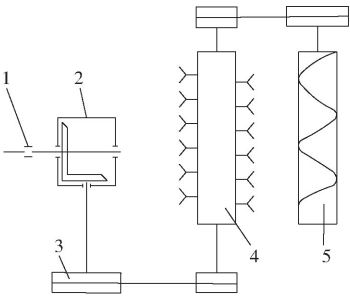


图3 装置传动系统示意图

Fig. 3 Device transmission system diagram

1. 传动轴 2. 变速箱 3. 带传动机构 4. 粉碎装置刀辊 5. 螺旋输送机

2 关键部件设计

2.1 粉碎刀辊设计

2.1.1 粉碎刀辊参数设计

合理的甩刀排列能有效提升棉秆粉碎质量,降低棉秆掉落率和减少功耗,因此需优化设计甩刀数量和排列方式。粉碎刀辊 Y 型甩刀采用双螺旋排列方式,可实现棉秆高效稳定粉碎^[13-15],结构如图4所示。

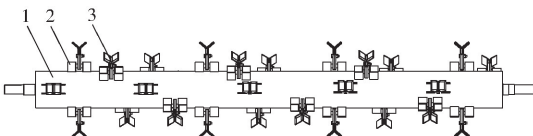


图4 粉碎刀辊结构

Fig. 4 Grinding cutter roller structure

1. 旋转辊轴 2. 甩刀固定座 3. Y 型甩刀

甩刀数量^[16]计算式为

$$N = CL \tag{1}$$

式中 N ——甩刀总数,把

C ——甩刀密度,把/mm

L ——辊轴上甩刀分布长度,mm

Y 型甩刀一般取 $C = 0.02 \sim 0.04$ 把/mm^[17],为减小刀刃切削力以延长刀具使用寿命,本文取较小值; C 为 0.02 把/mm;甩刀分布长度 L 为 2 000 mm,计算可得 Y 型甩刀总数为 40 把。甩刀排列要求相邻 2 组甩刀角度应不小于 50°^[18]。甩刀排列示意图如图5所示,图中标点表示甩刀位置。

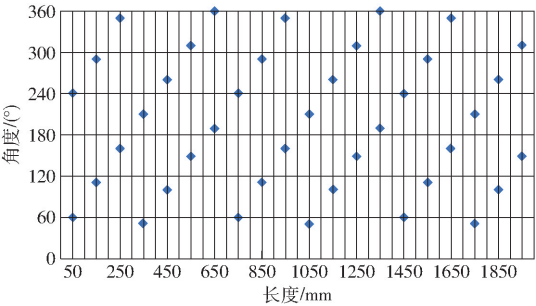


图5 Y 型甩刀排列示意图

Fig. 5 Y-type swinging knife arrangement diagram

2.1.2 刀轴动平衡分析

为更好满足粉碎装置机构稳定性和平衡性要求,可对粉碎刀辊排列进行动平衡校核,以保证刀辊受力均匀并减少振动^[19]。由于粉碎刀辊中各部位所受切割力和振动不同,因此可将 Y 型甩刀及其刀辊轴看作一个刚体进行分析。为使其实现动平衡状态,则两校正面 A、B 上各分力合力需分别为零,且 2 个面上每个分力大小相等,但方向各异。将分力 F_{1a} 方向设定为 X 轴正方向, F_{1a} 逆时针旋转 90°方向确定为 Y 轴正方向,将各分力分别向 X、Y 轴进行分解,得到 A 面上 2 个合力 F_{ax} 、 F_{ay} 以及 B 面上 2 个合力 F_{bx} 、 F_{by} 。离心力分解示意图如图6所示。

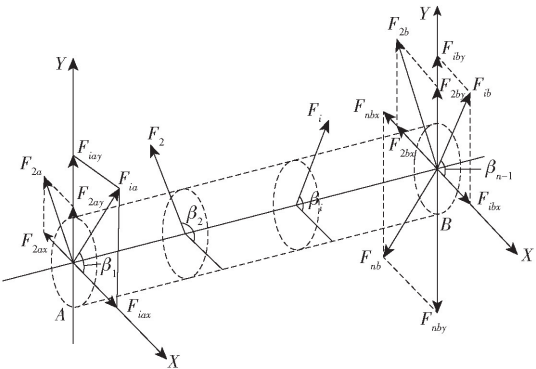


图6 刀辊离心力分解示意图

Fig. 6 Diagram of knife shaft centrifugal force decomposition

由图6可得 A、B 两平面上平衡方程为

$$\begin{cases} F_{ax} = F_{1a} \cos \beta_1 + F_{2a} \cos \beta_2 + \cdots + F_{na} \cos \beta_n \\ F_{ay} = F_{1a} \sin \beta_1 + F_{2a} \sin \beta_2 + \cdots + F_{na} \sin \beta_n \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} F_{bx} = F_{1b} \cos \beta_1 + F_{2b} \cos \beta_2 + \cdots + F_{nb} \cos \beta_n \\ F_{by} = F_{1b} \sin \beta_1 + F_{2b} \sin \beta_2 + \cdots + F_{nb} \sin \beta_n \end{cases} \quad (3)$$

式中 β ——刀片周向角度, ($^{\circ}$)
 n ——刀位数, 把
 F_{na} 、 F_{nb} ——刀片离心力, N
当满足条件

$$\begin{cases} F_{ax} = 0 \\ F_{ay} = 0 \\ F_{bx} = 0 \\ F_{by} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

时, 刀轴可实现空转完全平衡。

粉碎刀辊动平衡后对棉秆切割粉碎更为充分, 刀片动态平衡也可减少振动和磨损。

2.2 甩刀受力及运动学分析

2.2.1 Y 型甩刀受力分析

粉碎装置作业时, Y 型甩刀在辊轴带动下高速旋转, 其运动由机具水平方向前进运动和甩刀绕辊轴中心旋转运动共同作用而成。为防止甩刀根部应力过大, 减少对粉碎辊轴的冲击振动, 甩刀通过销轴与固定座连接; 工作时甩刀高速旋转, 受到棉秆摩擦力和切割阻力向后微摆, 此时甩刀受力和磨损相应减小, 受力分析如图 7 所示。

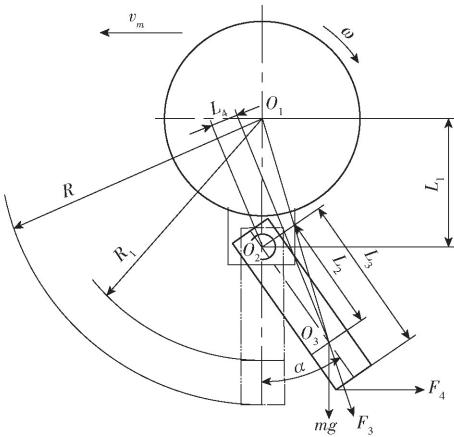


图 7 甩刀受力分析
Fig. 7 Swinging knife force analysis

在不考虑摩擦力矩情况下, 可得

$$F_4 L_3 \cos \alpha = mg L_2 \sin \alpha + m \omega^2 R L_4 \quad (5)$$

式中 L_2 ——销轴中心到甩刀重心距离, mm
 L_3 ——销轴中心到甩刀顶端距离, mm
 L_4 ——销轴中心与甩刀受力后中心偏移距离, mm
 m ——甩刀质量, kg
 ω ——甩刀角速度, rad/s
 g ——重力加速度, m/s^2
 R ——甩刀回转半径, mm
 α ——甩刀工作偏角, ($^{\circ}$)

F_4 ——甩刀切割阻力, N
由于 $\frac{R}{L_1} = \frac{L_3 \sin \alpha}{L_4}$, 则有

$$F_4 L_3 \cos \alpha = mg L_2 \sin \alpha + m \omega^2 L_1 L_3 \sin \alpha \quad (6)$$

式中 L_1 ——刀轴中心到销轴中心距离, mm
整理得

$$\tan \alpha = \frac{F_4}{m \frac{L_2}{L_3} (g + \omega^2 L_1)} \quad (7)$$

甩刀工作时, 偏角 α 过大不利于棉秆切割粉碎。由式(7)可知, 当甩刀外形和安装尺寸一定时, 增大 L_2/L_3 , α 将变小, 即甩刀质心向刀端移动, Y 型刀片外形特点符合要求, 可设计 $L_2 = 100 \text{ mm}$, $L_3 = 140 \text{ mm}$ 。增加甩刀角速度 ω 和甩刀回转半径 R , α 也将变小, 但 ω 和 R 增大会增加机具尺寸和功率损耗, 可设计 $L_1 = 130 \text{ mm}$ 。其次 Y 型甩刀开口角度对甩刀作用效果也有一定影响, 一般为 $90^{\circ} \sim 150^{\circ}$, 经设计取 130° 。

粉碎刀辊转速会直接影响棉秆切割粉碎性能, 可作为粉碎装置的重要设计参数。由文献[20 - 21]可知有一定刚度的秸秆无支撑切割抛送临界速度 v_c 约为 48 m/s 。经前文设计参数可知甩刀回转半径 R 为 0.27 m 。 v_c 和 R 关系式为

$$n_0 = \frac{30(v_c + v_m)}{\pi R} \quad (8)$$

式中 v_m ——前进速度, m/s
 n_0 ——刀辊转速, r/min

根据机具性能以较小作业速度 1.94 m/s 代入式(8)计算, 可得刀辊转速 $n_0 = 1\,766.2 \text{ r/min}$ 。为实现棉秆高效粉碎需求, 刀辊转速应满足 $n_0 \geq 1\,766.2 \text{ r/min}$; 据试验当刀辊转速 $n_0 < 1\,800 \text{ r/min}$ 时, 棉秆粉碎效果不理想; 而当转速过高时会出现功耗增加和机具振动情况。因此选取刀辊转速为 $1\,800 \sim 2\,200 \text{ r/min}$ 。

2.2.2 Y 型甩刀运动学分析

Y 型甩刀主要参与棉秆粉碎及抛送过程, 通过对其运动轨迹分析可直观了解甩刀对棉秆的作用效果。运动轨迹主要由机具水平前进运动和甩刀绕辊轴中心的旋转运动共同构成, 可确定甩刀工作速度为两者的合成运动, 且运动轨迹为均匀连续摆线。根据速度矢量叠加原理, 可得

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_m + \boldsymbol{v}_r \quad (9)$$

其中 $\boldsymbol{v}_r = \omega \boldsymbol{R}$
式中 $\boldsymbol{v}_r$ ——刀刃回转线速度, m/s
 $\boldsymbol{v}$ ——刀刃绝对速度, m/s
 R 为甩刀回转半径, 设置原点 O 为刀辊几何中

心,分别以机具前进方向、竖直向上为 X 轴、 Y 轴正方向建立平面直角坐标系;机具前进速度为 v_m ,则甩刀刀尖轨迹参数方程为

$$\begin{cases} x=R\cos(\omega t)+v_mt \\ y=R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可绘制甩刀轨迹,如图 8 所示。

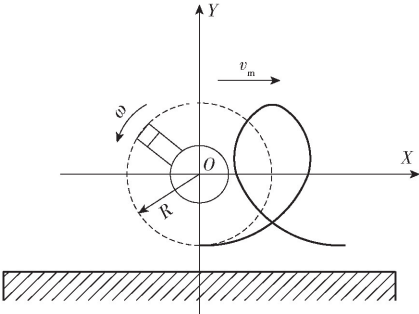


图 8 甩刀运动轨迹

Fig. 8 Motion trajectory of swinging knife

通过轨迹图并结合上文理论计算也可判断甩刀作业过程是否存在棉秆漏割情况。通过判断可知在机具前进速度最快且刀辊转速最慢条件下,刀具顶端旋转 1 周时前进距离最大,因此根据本机性能选取前进速度 9 km/h 和刀辊转速 1 800 r/min 进行检验。当刀辊转速为 1 800 r/min 时,每转 1 周所用时间为 0.03 s,以前进速度 9 km/h 计算,并转换为前进速度 2.5 m/s,计算可知刀辊旋转 1 周机具前进 75 mm,由于试验地棉秆株距大多在 100 ~ 200 mm 之间,因此甩刀作业过程不会发生棉秆漏割情况。

2.3 棉秆粉碎收获过程

机具前行时粉碎装置前围板将棉秆以倾斜状态喂入装置内部,经甩刀高速旋转将棉秆切割并击打成碎秆状态,同时将根茬留在地里,粉碎棉秆在甩刀作用力及负压作用下被输送到壳体上部,经定刀二次粉碎后抛送到螺旋输送机内,工作原理如图 9 所示。

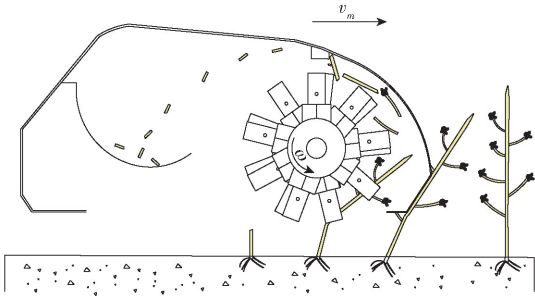


图 9 棉秆切割粉碎原理图

Fig. 9 Schematic of cotton stalk cutting and crushing

2.3.1 棉秆压弯及喂入过程

粉碎装置切割棉秆过程中,前端倾斜前围板在行进过程会将棉秆倾斜压入装置下端,进行下一步的粉碎过程,棉秆压弯受力分析如图 10 所示。

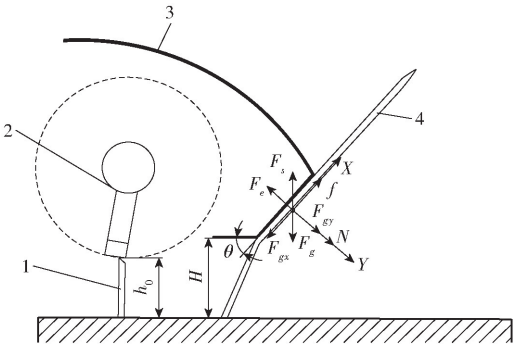


图 10 棉秆压弯受力分析

Fig. 10 Analysis of force on bent cotton stalks

1. 棉秆根茬 2. Y 型甩刀 3. 前围板 4. 压弯棉秆

设前围板倾斜角度为 θ (与水平面夹角)。沿前围板表面方向为 X 轴,垂直于表面方向为 Y 轴。棉秆所受重力 F_g 可分解为沿前围板表面方向分量 F_{gx} 和垂直于表面方向分量 F_{gy} 。关系式为

$$\begin{cases} F_{gx}=m_s g \sin \theta \\ F_{gy}=m_s g \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

式中 m_s ——压弯棉秆质量,kg

对棉秆压弯过程进行受力分析,可得作用关系式为

$$\begin{cases} F_{gx}-f-F_s \sin \theta=0 \\ N_1+F_{gy}-F_s \cos \theta-F_e=0 \\ f=\mu N_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中 f ——棉秆与围板之间摩擦力,N

μ ——棉秆与围板摩擦因数

N_1 ——前围板对棉秆支持力,N

F_e ——棉秆弹性恢复力,N

F_s ——土壤对棉秆支撑力,N

将式(11)代入式(12),化简可得

$$m_s g \sin \theta-\mu\left(F_s \cos \theta-F_e-m_s g \cos \theta\right)=0 \quad (13)$$

当 $\tan \theta=\mu$ 时,棉秆将匀速运动;为保证压入棉秆的受力均匀,可令前围板倾斜角度 θ 为 45° 。

棉秆被压弯后,会喂入粉碎装置下端经甩刀切割,同时将根茬留在地里。根茬高度 h_0 和喂入口高度 H 会对棉秆切割和喂入产生影响。影响根茬高度的主要因素为机具静态下甩刀离地最小距离 h_1 ^[22];根据作业标准要求,根茬高度 h_0 应大于 60 mm,为保证留茬高度以及棉秆整株的充分切割,可令甩刀离地高度为 60 ~ 100 mm;根据

$$\frac{D}{4}+h_0-50 \leq H \leq \frac{D}{4}+h_0+50 \quad (14)$$

计算,并代入甩刀直径 $D=540$ mm,得棉秆喂入口高度为 145 ~ 245 mm。

2.3.2 棉秆粉碎及抛送过程

棉秆粉碎过程由动定刀配合完成,并被抛送到

螺旋输送机收料斗内,受力及抛送运动分析如图 11 所示。由于动定刀对棉秆进行切断的瞬时处于力矩平衡状态,相关作用关系式为

$$\begin{cases} F+f_2=f_1+m_0g\cos\gamma \\ F_{N1}=F_{N2}+m_0g\sin\gamma \\ F=m_0\omega^2l \end{cases} \quad (15)$$

式中 F ——棉秆击打力,N
 f_1 ——甩刀与棉秆摩擦力,N
 f_2 ——定刀与棉秆摩擦力,N
 γ ——棉秆自身重力与甩刀平面夹角,(°)
 F_{N1} ——甩刀对棉秆支持力,N
 F_{N2} ——定刀对棉秆支持力,N
 l ——棉秆到甩刀旋转中心距离,mm
 m_0 ——粉碎棉秆质量,kg

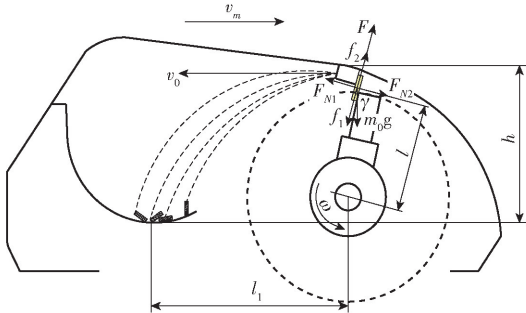


图 11 棉秆受力及抛送运动分析

Fig. 11 Analysis of cotton straw force and throwing motion

根据滑动摩擦力公式,可得

$$\begin{cases} f_1=\mu_1F_{N1} \\ f_2=\mu_2F_{N2} \end{cases} \quad (16)$$

式中 μ_1 μ_2 ——甩刀、定刀与棉秆摩擦因数
将式(16)代入式(15)整理可得

$$\begin{cases} F_{N1}=\frac{m_0g(\cos\gamma+\mu_2\sin\gamma)-m_0\omega^2l}{\mu_2-\mu_1} \\ F_{N2}=\frac{m_0g(\mu_1\sin\gamma-\cos\gamma)-m_0\omega^2l}{\mu_1-\mu_2} \end{cases} \quad (17)$$

棉秆所受支持力 F_{N1} 、 F_{N2} 可反映甩刀对棉秆粉碎效果,且支持力越大粉碎效果越好^[23]。由式(17)可知棉秆支持力与夹角 γ 、棉秆到甩刀旋转中心距离 l 以及甩刀角速度 ω 有关,其中 μ_1 、 μ_2 为定值,甩刀角速度 ω 由刀辊转速决定;刀辊转速可影响动定刀对棉秆的作用效果。

棉秆被定刀进一步切割粉碎后,在惯性力作用下产生一定的初速度,并沿壳体顶部做平抛运动^[24];运动过程可由动量定理得作用关系式为

$$\begin{cases} Ft=m_0v_1-m_0v_2 \\ t_2=\frac{s}{v}=\frac{s}{2\pi n_0R} \end{cases} \quad (18)$$

式中 s ——定刀宽度,mm

t_2 ——定刀作用于棉秆时间,s
 v_1 ——棉秆接触定刀前速度,m/s
 v_2 ——棉秆经定刀切断后速度,m/s
其中 $v_0=v_1$,定刀宽度经设计定为 50 mm;令 $l=R$ 并代入最低转速 1 800 r/min,计算可得 $v_0=0.4$ m/s。由平抛运动得

$$\begin{cases} h=\frac{gt_1^2}{2} \\ l_1=(v_0+v_m)t_1 \end{cases} \quad (19)$$

式中 h ——棉秆下落高度,mm
 v_0 ——棉秆抛送初速度,m/s
 l_1 ——螺旋输送机中心到刀辊中心距离,mm
 t_1 ——棉秆抛送掉落时间,s

其中高度 h 设计为 350 mm, v_m 较小速度为 1.94 m/s。将相关数据代入式(19)可得, $l_1=622$ mm;此距离可保证棉秆抛送至收料斗中,不会落到地面上。

2.4 螺旋输送机设计

棉秆输送装置采用双向聚拢,可将粉碎后的棉秆双向聚拢到螺旋输送机中间位置,借助拨轮旋转将粉碎棉秆喂入输送装置下端,此装置对粉碎棉秆运输起着关键作用,装置示意图如图 12 所示。其中 S 为螺旋叶片螺距,mm; D_1 为螺旋叶片直径,mm; L_0 为输送机总长,m。

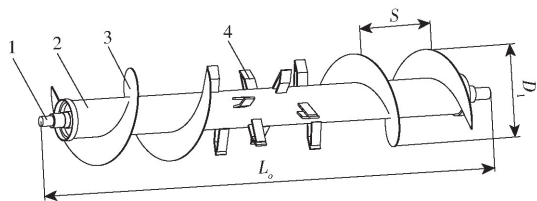


图 12 螺旋输送机示意图

Fig. 12 Schematic of spiral conveyor

1. 轴 2. 轴管 3. 螺旋叶片 4. 拨轮

螺旋输送机关键技术参数有:螺旋输送轴转速和轴径,螺旋叶片外径和螺距^[25];根据公式可计算螺旋叶片外径 D_1 和螺距 S 。由于收集的粉碎棉秆对螺旋输送器的碰撞力较小,可令收料斗直径为甩刀直径的 1/2,即 $D_1=270$ mm;为配合粉碎刀辊作业,取螺旋输送机总长为粉碎刀辊的作业幅宽,即 $L_0=2$ m;结合田间测验选取粉碎棉秆综合特性系数为 $70(\text{r}\cdot\text{mm}/\text{min})^{1/2}$ 。则最大螺距为

$$S_{\max}=(0.5\sim2.2)D_1 \quad (20)$$

式中 $S_{\max}$ ——最大螺距,mm

螺旋轴轴径为

$$d=(0.2\sim0.35)D_1 \quad (21)$$

式中 d ——螺旋轴轴径,mm

螺旋轴转速为

$$n_1 = \frac{A}{\sqrt{D_1}}$$

(22)

式中 A ——粉碎棉秆综合特性系数, $(\text{r} \cdot \text{mm}/\text{min})^{1/2}$

n_1 ——螺旋轴转速, r/min

棉秆理论输送量为

$$Q = 15\pi D_1^2 \psi S n_1 \lambda \varepsilon$$

(23)

式中 Q ——理论输送量, t/h

ψ ——物料填充系数

λ ——物料堆积密度, kg/m^3

ε ——倾斜输送修正系数

参考《农业机械设计手册》,物料填充系数 ψ 取 0.3;物料堆积密度 λ 取 $80 \text{ kg}/\text{m}^3$;螺旋输送装置为水平放置, ε 取 1。

根据式(20)~(22)计算螺旋叶片最大螺距为 135~594 mm,取中间值并圆整后为 365 mm;螺旋轴轴径为 54~94.5 mm,取中间值并圆整后为 74 mm;结合装置结构最终确定双向螺旋输送机各参数 D_1 为 270 mm, S 为 365 mm, d 为 74 mm, n_1 为 122 r/min , Q 为 3.7 t/h 。

3 粉碎装置 EDEM 仿真分析

以棉秆收获打捆机为研究主体,可知粉碎装置是决定收获性能的核心部件。为确定粉碎装置最佳工作状态,提高整机粉碎收获效果,利用 EDEM 软件进行棉秆粉碎抛送过程的离散元模拟仿真,通过设置棉秆仿真模型和刀辊转速工作参数,进行碎秆收集过程模拟仿真,得到刀辊不同转速下棉秆颗粒数均值、颗粒平均速度与时间的变化关系。

3.1 仿真参数设计与过程

首先,通过 Solidworks 软件设计仿真三维简化模型,如图 13 所示,将其另存为 stl 格式,并通过 EDEM 软件的 Geometry 模块将模型导入,建立颗粒工厂,设置各部件材料及参数,仿真计算时选取 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型^[26]作为颗粒、以及颗粒与几何体之间的接触模型。本研究不考虑粘结键断裂,仿真时棉秆模型由 1 种颗粒单元拼接而成。

建立棉秆颗粒时仿真相关参数参照文献[27 -

29],以棉秆作为试验材料,以仿真时间和拼接球体数量作为棉秆仿真基础进行试验。棉秆仿真模型以单球模型为拼接单元,如图 14a 所示。根据试验地调研和装置前期预试验可知,收集的粉碎棉秆尺寸集中分布为直径均值 10 mm、长度均值 70 mm,进行标准化处理,可取此尺寸作为棉秆仿真参考尺寸。因此可设定直径 10 mm、长度 70 mm 的 18 球模型作为粉碎棉秆仿真试验对象,如图 14b 所示。仿真相关离散元参数见表 2。

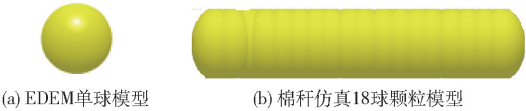


图 14 棉秆离散元模型

Fig. 14 Cotton stalk discrete element models

表 2 仿真相关参数

Tab. 2 Simulation correlation parameters

参数	数值	文献序号
棉秆泊松比	0.35	[27]
钢泊松比	0.30	[27]
棉秆剪切模量/GPa	0.69	[28]
钢剪切模量/GPa	79.4	[27]
棉秆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 080	[27]
钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	[27]
棉秆-棉秆碰撞恢复系数	0.50	[27]
棉秆-钢碰撞恢复系数	0.50	[27]
棉秆-棉秆静摩擦因数	0.41	[29]
棉秆-钢静摩擦因数	0.37	[29]
棉秆-棉秆动摩擦因数	0.06	[27]
棉秆-钢动摩擦因数	0.08	[27]

在 EDEM 中导入简化装置模型和参数后,进行棉秆抛送过程仿真,仿真总时间选取 3 s;颗粒生成面选择甩刀底部位置,颗粒生成面以甩刀作业幅宽为宽度、刀辊总长为长度进行颗粒生成,每秒生成颗粒数为 1 500 个,总数为 4 500 个,主要依据为装置田间实际作业情况,仿真效果如图 15 所示。为呈现直观的仿真效果,将仿真颗粒进行速度颜色标定并将模型设置为 Y 轴面观察,仿真过程如图 16 所示。由图 16 可以看出,0.5~2 s 时,不断产生的棉秆颗粒在甩刀作用力下沿壳体上部运动并被抛送到左侧的螺旋输送机收料斗内,进行粉碎棉秆收集。通过收集斗内的粉碎棉秆数量和颗粒平均速度作为不同

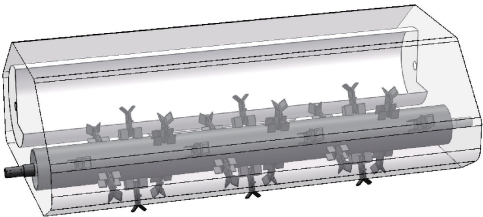


图 13 三维简化模型

Fig. 13 Three-dimensional simplified model

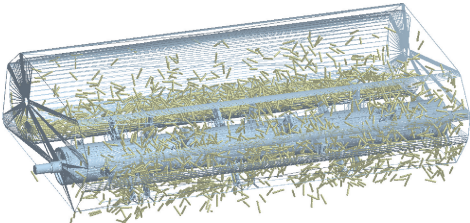


图 15 仿真效果

Fig. 15 Simulation effect

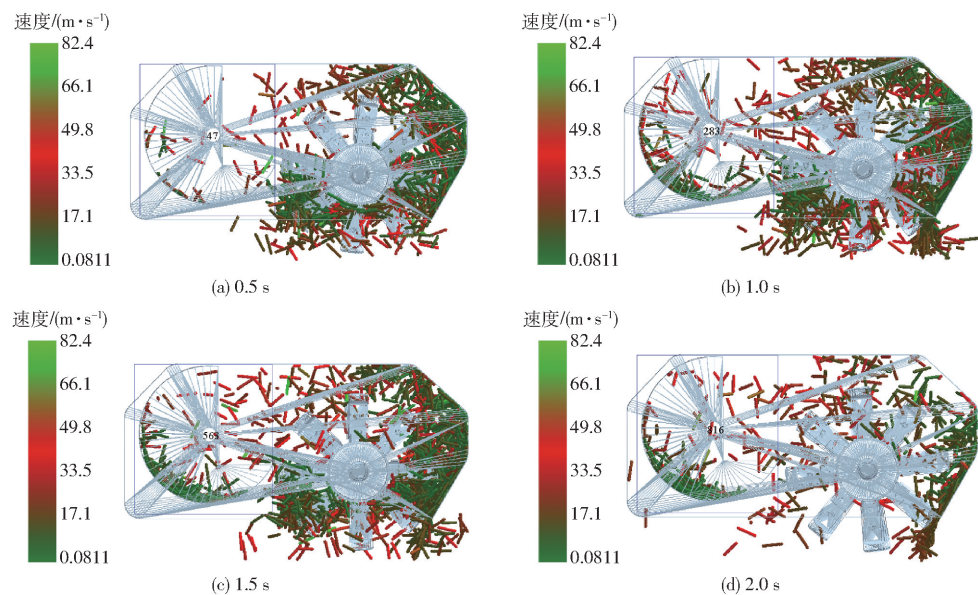


图 16 仿真过程

Fig. 16 Simulation process

刀辊转速下 Y 型甩刀性能的主要评定标准,并判断较优转速。

3.2 EDEM 数据后处理

设置不同刀辊转速进行试验,由前述理论分析可得转速为 1 800 ~ 2 200 r/min,可分别设置转速为 1 800、2 000、2 200 r/min 进行仿真并重复 3 组。仿真结束后利用 EDEM 软件数据后处理功能对结果进行分析,建立螺旋输送机区域的流量查询器对收集棉秆数量进行统计,计算每 0.15 s 通过查询器的棉秆数量并取 3 组平均值,绘制棉秆数量与时间变化曲线,如图 17 所示。图 18 为不同刀辊转速下颗粒平均速度随时间变化曲线,再结合不同刀辊转速下颗粒数均值变化综合判断甩刀粉碎性能。

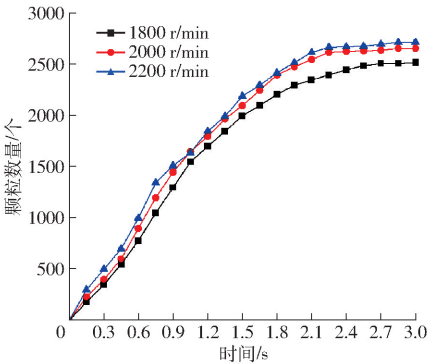


图 17 不同刀辊转速下棉秆颗粒数均值变化曲线

Fig. 17 Curves of mean cotton stalk particle size variation at different rotational speeds

由图 17 可知,0 ~ 1.5 s 时,棉秆数量逐渐递增,仿真过程初期生成数量较少,随着时间增加棉秆数量逐渐增多,2.1 s 时数量趋于稳定,粉碎刀作业性能达到稳定,3 s 时,仿真结束完成收集;分析图 17 可得,当收料斗内颗粒数量稳定后不同刀辊转速下

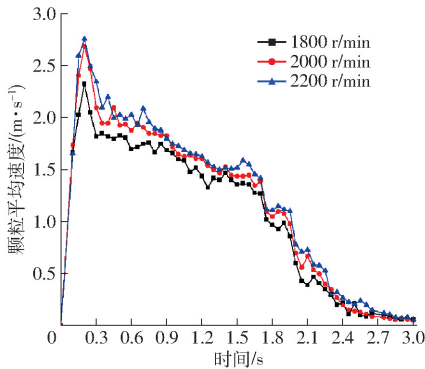


图 18 不同刀辊转速下颗粒平均速度变化曲线

Fig. 18 Curves of average particle velocity variation at different rotational speeds

收料斗内收集数量平均值分别为 2 530、2 654、2 720 个,当刀辊转速为 1 800 ~ 2 000 r/min 时颗粒数量增加较快,2 000 ~ 2 200 r/min 时增速有所减缓;针对棉秆收集效果,不同刀辊转速下甩刀对棉秆收集效率不同,整体呈增加趋势。由图 18 可知,随时间增加,颗粒平均速度呈先升高后降低趋势,这是由于转速增大,颗粒生成初期数量较少初速度较大,随着颗粒数量增加性能趋于稳定,速度逐渐下降至颗粒生产结束。图 18 也可反映不同刀辊转速下甩刀粉碎性能的不同。

综上分析可得,刀辊转速为 2 000、2 200 r/min 时对棉秆粉碎效果较好,由于刀辊转速较高会影响刀具使用寿命,并且两者粉碎性能相差不大,因此可取刀辊转速中间值 2 100 r/min 作为较优参考值。

4 机具田间试验

4.1 试验材料与设备

机具田间试验于 2024 年 10 月在新疆维吾尔自

治区巴音郭楞蒙古自治州尉犁县进行,试验地为砂性土壤。试验地棉花采用一膜四行种植模式,品种为中棉所 60,棉秆种植行距 570 mm,株距 100 ~ 150 mm,株高 900 ~ 1 000 mm,棉秆含水率 33%,棉秆根部直径约为 10 mm。主要设备仪器包括自走式棉秆收获打捆机、土壤含水率测量仪、转速测量仪、电子天平、台秤、卷尺以及秒表等。田间试验如图 19 所示。



图 19 田间试验现场
Fig. 19 Field trial site

4.2 试验指标与方法

参照 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械棉秆粉碎还田机》和 GB/T 34390—2017《自走式棉秆收获方捆压捆机》要求的评定标准,进行自走式棉秆收获打捆机棉秆粉碎长度合格率、损失率田间试验。

棉秆粉碎合格率 Y_1 可反映装置对棉秆的粉碎效果,指在整机作业后打包方捆中,随机抽取方捆内粉碎棉秆 500 g,粉碎长度小于 200 mm 合格棉秆与取样棉秆质量比值。在整机作业完成后随机选取 5 个捆包取样称量并对测试结果取平均值,计算粉碎合格率。粉碎合格率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{m_1}{M_1} \times 100\%$$
 (24)

式中 M_1 ——取样棉秆总质量,g
 m_1 ——取样合格棉秆质量,g

棉秆损失率 Y_2 可反映装置对棉秆收集效果,指所选试验作业区内未粉碎收集棉秆质量与测定作业区棉秆总质量比值。整机作业前选取作业范围中 5 m 区域内棉秆为 1 个作业区,对其总质量进行称量记录;然后收集相同区间机具作业后遗落株长三

分之一以上棉秆,对其质量称量并记录。选取 5 个试验区,重复 5 次试验并对测试结果取平均值,计算棉秆损失率。棉秆损失率 Y_2 计算式为

$$Y_2 = \frac{G_1}{G} \times 100\%$$
 (25)

式中 G_1 ——5 m 区域内未收集棉秆质量,kg
 G ——5 m 区域内棉秆总质量,kg

4.3 单因素试验

机具作业过程,粉碎装置刀辊转速为粉碎作业过程主要影响因素,而刀具离地高度和前进速度也是影响整机作业效果的重要因素^[30]。因此选择刀辊转速、刀具离地高度和前进速度进行单因素试验,并以棉秆粉碎合格率 Y_1 与棉秆损失率 Y_2 作为评价指标,探究各因素对整机作业效果和合理参数范围。单因素试验结果如图 20 所示。

(1) 刀辊转速

由图 20a 可知,当前进速度 8 km/h、离地高度 80 mm 时,棉秆粉碎合格率随刀辊转速增加先升高后降低,损失率则呈先降低后缓慢升高趋势。当刀辊转速小于 2 000 r/min 时,粉碎合格率随转速增大不断升高,当超过该转速时,甩刀高速旋转产生的负压作用和抛送力加大,棉秆与甩刀作用时间减小,粉碎合格率反而下降;随着甩刀作用力不断提高,损失率则呈下降趋势。当刀辊转速达到 2 000 r/min 时,粉碎合格率为 97.7%,损失率为 3.43%,刀辊转速为 1 800 ~ 2 200 r/min,整机作业效果较好。

(2) 刀具离地高度

由图 20b 可知,当前进速度 8 km/h、刀辊转速 2 000 r/min 时,粉碎合格率随刀具离地高度增大呈先升高后缓慢降低趋势,损失率则不断下降。当刀具离地高度小于 80 mm 时,粉碎合格率随离地高度增大而升高;当高度达到 80 mm 时,甩刀与棉秆接触面变小,粉碎合格率呈缓慢下降趋势。当刀具离地高度达到 80 mm 时,棉秆粉碎合格率为 96.4%,损失率为 3.51%,离地高度为 60 ~ 100 mm 时,整机作业效果较好且参数范围符合作业标准要求。

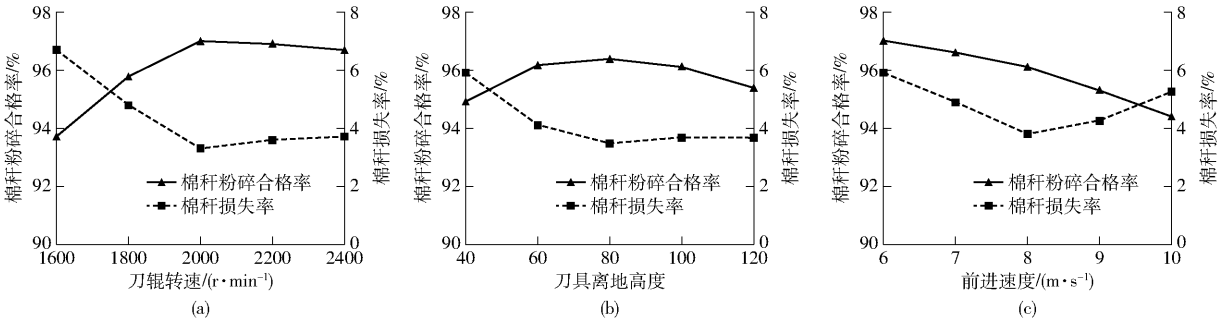


图 20 单因素试验结果
Fig. 20 Single factor test results

(3)前进速度

由图 20c 可知,当刀辊转速 2 000 r/min、刀具离地高度 80 mm 时,随着前进速度增加,棉秆粉碎合格率逐渐下降,损失率呈现先降低后升高趋势。随着前进速度不断增加,甩刀对棉秆重复切割次数变少,单位时间内作用时间变短使得粉碎合格率逐渐下降。速度增加至 8 km/h 时,棉秆粉碎逐渐均匀,残留量少,损失率逐渐降低;当前进速度超过 8 km/h 时,随着速度增加,棉秆因未有效粉碎而被遗漏,棉秆损失率逐渐升高。当前进速度为 8 km/h 时,粉碎合格率为 96.3%,损失率为 3.73%,机具前进速度为 7~9 km/h 时,作业效果较好。

4.4 多因素正交试验

基于对整机粉碎装置作业过程及运动学分析,确定影响棉秆收获效果的主要因素为刀辊转速、刀具离地高度及前进速度。

运用 Box - Benhnken 试验设计方法,采用三因素三水平二次回归正交试验方案,依据前文分析和单因素分析试验结果,试验因素编码如表 3 所示。

4.5 方差分析

运用 Design-Expert 13.0 软件分析试验数据^[31],结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。以棉秆粉碎合格率 Y_1 以及损失率 Y_2 作为评价指标,构建响应面回归模型并进行方差分析,如表 5 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and codes

编码	因素		
	刀辊转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	刀具离地高度/ mm	前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
-1	1 800	60	7
0	2 000	80	8
1	2 200	100	9

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental scheme and results

序号	因素			棉秆粉碎合 格率 $Y_1/\%$	棉秆损失 率 $Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	97.75	3.78
2	0	1	-1	94.93	6.29
3	-1	0	1	87.15	9.02
4	1	0	1	94.06	6.13
5	-1	0	-1	89.54	13.13
6	0	0	0	97.02	3.49
7	0	1	1	88.31	5.08
8	0	-1	-1	86.28	10.95
9	0	0	0	96.00	3.27
10	0	0	-1	97.34	2.10
11	1	1	0	96.03	2.93
12	1	1	-1	91.15	6.93
13	-1	-1	0	91.58	9.72
14	0	0	0	96.81	3.93
15	-1	1	0	94.11	6.82
16	0	-1	1	93.56	7.31
17	1	-1	0	95.43	5.91

表 5 方差分析

Tab.5 Analysis of variance

来源	棉秆粉碎合格率 Y_1					棉秆损失率 Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	216.52	9	24.06	63.07	<0.000 1 **	146.29	9	16.25	46.01	<0.000 1 **
X_1	25.53	1	25.53	66.92	<0.000 1 **	35.24	1	35.24	99.75	<0.000 1 **
X_2	5.33	1	5.33	13.97	0.007 3 **	20.38	1	20.38	57.70	0.000 1 **
X_3	0.174 0	1	0.174 0	0.456 3	0.521 1	11.91	1	11.91	33.71	0.000 7 **
X_1X_2	0.931 2	1	0.931 2	2.44	0.162 2	0.001 6	1	0.001 6	0.004 5	0.948 2
X_1X_3	7.02	1	7.02	18.41	0.003 6 **	2.74	1	2.74	7.75	0.027 1 *
X_2X_3	48.30	1	48.30	126.63	<0.000 1 **	1.48	1	1.48	4.18	0.080 2
X_1^2	9.42	1	9.42	24.70	0.001 6 **	20.62	1	20.62	58.37	0.000 1 **
X_2^2	6.07	1	6.07	15.91	0.005 3 **	2.82	1	2.82	7.98	0.025 6 *
X_3^2	105.82	1	105.82	277.42	<0.000 1 **	45.17	1	45.17	127.88	<0.000 1 **
残差	2.67	7	0.381 5			2.47	7	0.353 3		
失拟	0.956 9	3	0.319 0	0.744 7	0.579 0	0.369 5	3	0.123 2	0.234 2	0.868 6
误差	1.71	4	0.428 3			2.10	4	0.525 8		
总和	219.19	16				148.76	16			

注: * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

通过分析试验数据,去除不显著项,得到刀辊转速、刀具离地高度和前进速度对棉秆粉碎合格率 Y_1 和棉秆损失率 Y_2 的回归方程分别为

$$Y_1 = 96.98 + 1.79X_1 + 0.82X_2 + 0.15X_3 + 1.32X_1X_3 - 3.48X_2X_3 - 1.50X_1^2 - 1.20X_2^2 - 5.01X_3^2 \quad (26)$$
$$Y_2 = 3.31 - 2.10X_1 - 1.60X_2 - 1.22X_3 + 0.83X_1X_3 + 2.21X_1^2 + 0.82X_2^2 + 3.28X_3^2 \quad (27)$$

由表 5 可得,影响棉秆粉碎合格率因素主次顺序为刀辊转速、刀具离地高度、前进速度,其中刀辊转速与刀具离地高度对棉秆粉碎合格率影响为极显

著;影响棉秆损失率因素主次顺序为刀辊转速、刀具离地高度和前进速度,三者影响均为极显著。回归模型中棉秆粉碎合格率和损失率 P 值均小于 0.000 1,均为极显著,说明回归方程预测值与实际值有较高相关性。

4.6 交互作用响应面分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行分析处理,根据建立的回归模型,得到刀辊转速、刀具离地高度、前进速度间交互作用对棉秆粉碎合格率和损失率影响的响应曲面,如图 21、22 所示。

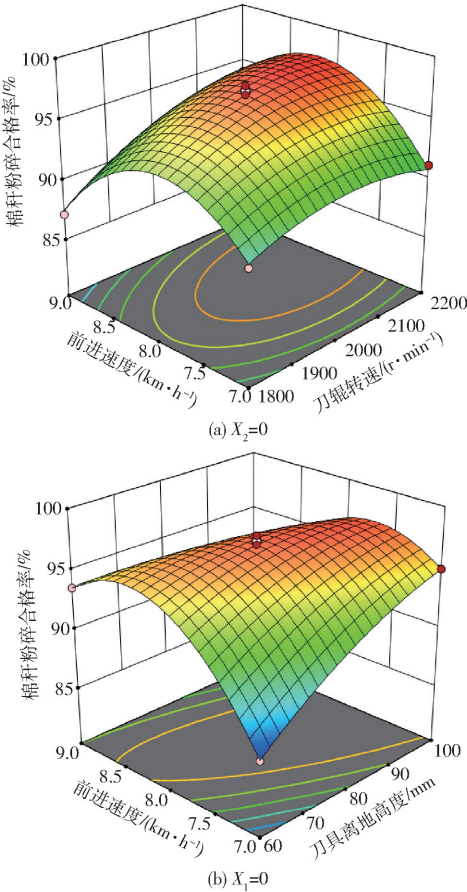


图 21 试验因素交互对棉秆粉碎合格率的影响
Fig. 21 Effect of interaction of experimental factors on qualified rate of cotton stalk crushing

图 21a 为刀具离地高度为 80 mm 时,刀辊转速与前进速度交互作用对棉秆粉碎合格率的影响。当前进速度固定为 8 km/h 时,随着刀辊转速增加,粉碎合格率呈先升高后缓慢降低趋势。随着刀辊转速增加,单位时间内棉秆被甩刀切断的次数增加,甩刀对棉秆的重复作用力加大导致粉碎合格率升高;当转速增加到 2 100 r/min 后,随着转速增大粉碎合格率趋于稳定且略有降低,这是由于甩刀高速运转作用下气压增大,少量棉秆来不及充分粉碎便进入螺旋输送机收料斗内,导致粉碎质量降低,合格率略有降低。

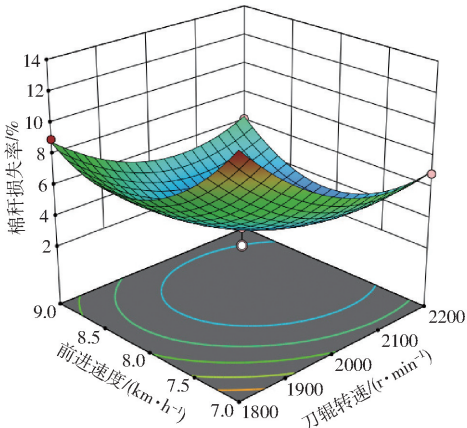


图 22 试验因素交互对棉秆损失率的影响 ($X_3=0$)
Fig. 22 Effect of interaction of experimental factors on cotton stalk loss rate

图 21b 为刀辊转速为 2 000 r/min 时,刀具离地高度与前进速度交互作用对棉秆损失率的影响。当刀具离地高度固定为 80 mm 时,随着前进速度增加,棉秆粉碎合格率呈先升高后降低趋势。当保持刀辊转速不变且离地高度一定时,随着前进速度增加,棉秆喂入量满足甩刀粉碎的要求,装置工作效率提升,棉秆粉碎合格率升高;当前进速度增加到 8 km/h 后,由于前进速度过快棉秆未能被充分击打而导致合格率降低,因此出现棉秆粉碎合格率先升高后降低趋势。

图 22 为刀具离地高度为 80 mm 时,刀辊转速与前进速度交互作用对棉秆损失率的影响。当前进速度固定为 8 km/h 时,随着刀辊转速增加,棉秆损失率呈先降低后缓慢升高趋势。刀辊转速增加,单位时间内棉秆被甩刀切断的次数增加,甩刀高速作用下的气压将更多的粉碎棉秆带入到螺旋输送机收料斗内,导致棉秆损失率降低;当转速增加到 2 100 r/min 后,随着转速继续增大损失率缓慢升高,这是由于甩刀高速作用下气压较大导致少量棉秆未能充分粉碎便进入收料斗,使得粉碎损失率略有升高。

5 参数优化与试验验证

5.1 参数优化

为寻求较优参数组合以实现整机棉秆粉碎合格率最高、棉秆损失率最低,对刀辊转速、刀具离地高度和前进速度进行多目标优化分析,结合试验因素边界条件,定义优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

通过分析计算,得到较优参数组合为:刀辊转速 2 109.81 r/min、刀具离地高度 80.887 3 mm、前进速度 8.498 9 km/h,此时棉秆粉碎合格率 96.647 8%,棉秆损失率 3.205 85%;其中刀辊转速理论值与 EDEM 仿真参考值接近。

5.2 验证试验

为检验优化结果准确性,确定较优参数组合合理性,进行田间试验验证。考虑实际试验的可行性,将各因素优化数据进行圆整,调整为刀辊转速 2 100 r/min、刀具离地高度 80 mm、前进速度 8.5 km/h,在新疆尉犁县试验棉田进行 3 次重复试验,对试验数据取平均值,结果如表 6 所示。

表 6 验证试验结果
Tab.6 Verification test results %

试验号	Y_1	Y_2
1	97.28	4.35
2	95.81	3.61
3	97.57	2.96
平均值	96.82	3.64

由表 6 可知,当刀辊转速为 2 100 r/min、刀具离地高度为 80 mm、前进速度为 8.5 km/h 时,棉秆平

均粉碎合格率为 96.82%,平均损失率为 3.64%,与优化结果较为接近,相对误差均小于 5%。

6 结论

(1)针对棉秆收获机粉碎装置粉碎效果差、棉秆损失率高的问题,设计一种自走式棉秆收获打捆机动定刀组合式粉碎装置,通过关键部件理论分析确定了相应的设计和工作参数。

(2)采用 EDEM 离散元仿真方法,建立装置-棉秆作用模型模拟粉碎棉秆抛送过程。通过收料斗内棉秆收集颗粒平均数以及颗粒平均速度判断不同刀辊转速下甩刀粉碎效果,并确定较优刀辊转速参考值为 2 100 r/min。

(3)通过单因素试验确定各参数合理作业范围,采用三因素三水平正交试验并运用 Design-Expert 13.0 软件对所得数据进行分析及优化,获得装置较优工作参数为:刀辊转速 2 100 r/min、刀具离地高度 80 mm、前进速度 8.5 km/h,在此参数组合下进行 3 次验证试验,此时棉秆平均粉碎合格率为 96.82%,平均损失率为 3.64%,试验值与优化值相对误差均小于 5%,表明样机设计合理。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[M]. 北京:中国统计出版社,2024.

[2] 张含. 棉花秸秆预处理及厌氧消化产甲烷研究[D]. 北京:北京化工大学,2018.
Zhang Han. Research on pretreatment and methane production for cotton stalk during anaerobic digestion process[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2018. (in Chinese)

[3] 袁丽. 中国农机院举办棉花秸秆收获新技术推广演示会[J]. 农业机械,2009(1):21.

[4] 廖培旺,王仁兵,宫建勋,等. 中国棉秆压捆收获技术与装备现状[J]. 湖北农业科学,2022,61(7):119-124.
Liao Peiwang, Wang Renbing, Gong Jianxun, et al. Cotton stalk baled harvest technology and equipment status in China[J]. Hubei Agricultural Sciences,2022,61(7):119-124. (in Chinese)

[5] 王吉奎,付威,王卫兵,等. SMS-1500 型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. 农业工程学报,2011,27(7):168-172.
Wang Jikui, Fu Wei, Wang Weibing, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):168-172. (in Chinese)

[6] 刘旋峰,牛长河,郭兆峰,等. 新型滚刀式秸秆粉碎装置的试验研究[J]. 新疆农机化,2010(2):8-9.

[7] 尹建军,刘丹萍,李耀明. 方捆机捡拾器高度自动仿形装置参数分析与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):86-92.
Yin Jianjun, Liu Danping, Li Yaoming. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrate-bale baler pickup[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):86-92. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 付雪高,李明,卢敬铭,等. 秸秆粉碎还田机甩刀的研究进展[J]. 中国农机化,2011(1):83-87.
Fu Xuegao, Li Ming, Lu Jingming, et al. Research on the cutter of straw crushing machine to field[J]. Chinese Agricultural Mechanization,2011(1):83-87. (in Chinese)

[10] 林静,马铁,李宝筏. 1JHL-2 型棉秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(20):32-40.
Lin Jing, Ma Tie, Li Baofa. Design and test of 1JHL-2 type straw deep burying and returning machine[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(20):32-40. (in Chinese)

[11] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊 1):108-116.
Zheng Zhiqi, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(S1):108-116. (in Chinese)

[12] 田辛亮. 棉秆粉碎及搂膜联合作业机的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2019.

- Tian Xinliang. Design and research of cotton stalk crushing and film casting combined working machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)
- [13] 薄鸿明,林静. 玉米秸秆还田机的设计与参数研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 99–103.
Bo Hongming, Lin Jing. The design and simulation analysis of maize field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 99–103. (in Chinese)
- [14] Sidhu H, Singh M, Singh Y, et al. Development and evaluation of the turbo happy seeder for sowing wheat into heavy riceresidues in NW India[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 201–212.
- [15] 陈松涛,周学建,师清翔,等. 小麦秸秆还田机粉碎装置性能影响因素试验与优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 67–70.
Chen Songtao, Zhou Xuejian, Shi Qingxiang, et al. Experiment and optimization on factors affecting the performance of wheat stalk macerator smashing devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 67–70. (in Chinese)
- [16] 冯佐龙. 4QZ-12 型青饲料收获机关键部件的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
Feng Zuolong. Study on key parts of 4QZ-12 forage harvester[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008. (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: 294–297.
- [18] 潘佛雏,康建明,颜利民. Y 型甩刀式秸秆粉碎还田机关键部件的设计与性能试验[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(5): 912–915.
Pan Fochu, Kang Jianming, Yan Limin. Design and experiment to key components of Y type cutting device of smashed straw machine[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(5): 912–915. (in Chinese)
- [19] 涂建平,徐雪红,夏忠义. 秸秆还田机刀片及刀片优化排列的研究[J]. 农机化研究, 2003, 25(2): 102–104.
Tu Jianping, Xu Xuehong, Xia Zhongyi. The study of the cutting-blade and the optimum of the knife-array of field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003, 25(2): 102–104. (in Chinese)
- [20] 秦宽,曹成茂,廖移山,等. 秸秆还田施肥点播机粉碎抛撒装置结构与优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 1–10.
Qin Kuan, Cao Chengmao, Liao Yishan, et al. Design and optimization of crushing and throwing device for straw returning to field and fertilizing hill-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 1–10. (in Chinese)
- [21] 毛罕平,陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62–66.
Mao Hanping, Chen Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 62–66. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 牛国梁,李斌,刘洋,等. 立式棉秆粉碎还田机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 255–263, 274.
Niu Guoliang, Li Bin, Liu Yang, et al. Design and test of vertical cotton stalk crushing and returning to the field machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 255–263, 274. (in Chinese)
- [24] 胡凯. 锤片式棉秸秆粉碎还田与膜秆分离机理的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
Hu Kai. Research on hammer mill cotton pulverization returning field and the separation film from rod mechanism[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- [25] 孙洁,尹忠俊,陈兵. 开式螺旋输送原理分析与参数设计[J]. 起重运输机械, 2010(5): 11–16.
Sun Jie, Yin Zhongjun, Chen Bing. Analysis of the working principle and parameter design of open screw conveyor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2010(5): 11–16. (in Chinese)
- [26] 王佳旭. 秸秆打捆机捡拾机构仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Wang Jiaxu. Simulation analysis and experimental research on the pick-up mechanism of stalk baler[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [27] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉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)
- [28] 李玉道,杜现军,宋占华,等. 棉花秸秆剪切力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 124–128.
Li Yudao, Du Xianjun, Song Zhanhua, et al. Test of shear mechanical properties of cotton stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 124–128. (in Chinese)
- [29] 霍丽丽,孟海波,田宜水,等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189–195.
Huo Lili, Meng Haibo, Tian Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 189–195. (in Chinese)
- [30] 张佳喜,陈发,王学农. 秸秆粉碎还田回收机性能优化试验[J]. 中国农机化, 2007(6): 76–78.
Zhang Jiayi, Chen Fa, Wang Xuenong. Performance optimization experiments of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2007(6): 76–78. (in Chinese)
- [31] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 146–157.