文章编号:1000-7601(2025)03-0299-16

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.03.30

基于 EDEM 仿真的不同驱动式 圆盘刀作业性能对比与分析

朱惠斌,秦 晋,白丽珍,钱 诚,王明鹏,李镕东

(昆明理工大学现代农业工程学院,云南昆明 650500)

摘 要:为研究不同驱动式圆盘刀在我国西南地区秸秆覆盖量大以及秸秆整杆覆盖条件下免耕作业时作业性能的差异,以仿生圆盘刀、缺口圆盘刀、波纹圆盘刀为研究对象,确定圆盘刀切割秸秆时的受力状态;以正转圆盘刀 类型、正反转圆盘刀类型、机具前进速度、圆盘刀转速为试验因素,(粘结键断裂数量)秸秆切断率、土壤扰动量、机具 通过性为评价指标,在自行研制的防堵装置上进行了单因素 EDEM 离散元仿真和三因素三水平田间正交对比试验。 仿真试验结果表明:在相同条件下,圆盘刀作用下的粘结键断裂数量、机具通过性的效果均表现为正转仿生圆盘刀> 正转缺口圆盘刀>正转波纹圆盘刀,正反转仿生圆盘刀>正反转缺口圆盘刀>正反转波纹圆盘刀,土壤扰动量与之相 反。田间试验结果表明:当秸秆覆盖量为1.432 kg·m⁻²时,圆盘刀类型对秸秆切断率的影响最显著,在不同转速和 机具前进速度下,作业效果与仿真试验相吻合。综上,在大量秸秆覆盖和整杆覆盖条件下,除土壤扰动量外,仿生圆 盘刀的作业性能优于传统圆盘刀,仅有正反转仿生圆盘刀满足作业要求且作业效果较优。本研究可为秸秆覆盖量

关键词:圆盘刀;驱动式;EDEM 仿真;防堵装置;秸秆切断率

中图分类号:S223.2 文献标志码:A

Comparison and analysis of the operating performance of different drive-type disc cutters based on EDEM simulation

ZHU Huibin, QIN Jin, BAI Lizhen, QIAN Cheng, WANG Mingpeng, LI Rongdong

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: To investigate the differences in the operational performance of various driven disc knives during notillage operations under conditions of heavy straw mulching and full straw coverage in Southwest China, this study focused on bionic disc knives, notched disc knives, and corrugated disc knives, analyzing their force states during straw cutting. Single-factor EDEM discrete element simulations and three-factor, three-level orthogonal field comparison tests were conducted on a self-developed anti-clogging device, with the following experimental factors: types of forward-rotating disc knives, types of forward-and-reverse-rotating disc knives, forward speed of the machine, and rotational speed of the disc knives. Evaluation indicators included the number of broken bonding keys (indicating straw cutting rate), soil disturbance, and machine passage ability. Simulation test results indicated that, under identical conditions, the number of broken bonding keys and machine passage ability were superior in the order of forward-rotating bionic disc knives > forward-rotating notched disc knives > forward-rotating corrugated disc knives, and similarly for forward-and-reverse-rotating disc knives. Soil disturbance showed an opposite trend. Field test results showed that when the straw coverage was $1.432 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, the type of disc knife had the most significant impact on the straw cutting rate. Operational effectiveness aligned with simulation test results across various rotational and forward speeds of the machine. Under conditions of heavy straw mulching and full straw coverage, bionic disc knives outperformed traditional disc knives in all aspects except soil disturbance. Only the forward-and-reverse-rota-

基金项目:国家自然科学基金(52265033,51865022);云南省重点基金(202401AS070115)

通信作者:白丽珍(1975-),女,山西五台人,高级实验师,主要从事智能农业装备测控技术研究。E-mail:lzhbai@163.com

收稿日期:2024-09-10 修回日期:2025-01-01

作者简介:朱惠斌(1974-),男,山西五台人,教授,主要从事丘陵山区保护性耕作技术研究。E-mail:hbzhu113@163.com

ting bionic disc knife met operational requirements and demonstrated superior performance. This study provides a theoretical foundation for the rational design and applicability analysis of stubble-cutting and trenching components in no-tillage seeders under heavy straw mulching and full straw coverage conditions.

Keywords: disc knife; driven; EDEM simulation; anti-blocking device; straw cutting rate

保护性耕作是对农田实行免耕、少耕,用作物 秸秆残茬覆盖地表,是一种可以减少风蚀、水蚀和 提高土壤有机质含量的先进农业耕作技术[1]。西 南地区是我国第三大玉米主产区^[2].2022年统计年 鉴数据显示,该地区的玉米种植面积占全国 10.91%^[3],种植模式和种植方式主要以传统农业耕 作以及粗放经济模式为主,这种种植模式会使土壤 肥力下降,加剧水土流失,不利于粮食生产安全和 农业可持续发展^[4-5],在西南地区实行保护性耕作 技术成为当务之需。西南地区玉米收获主要以人 工收获方式为主,由于缺少专门的粉碎机器,玉米 收获后秸秆整杆覆盖地表,秸秆覆盖量大,在进行 免耕播种作业时容易造成堵塞,影响机具通过性和 播种质量。破茬防堵装置作为免耕播种机的主要 工作部件,分为清秸式和切茬式两种形式^[6-7],清秸 式防堵装置通过将粉碎后的秸秆拨到播种带两侧 实现种带清洁,分为主动式清秸防堵装置和被动式 清秸防堵装置,如主动秸秆移位式、侧置拨草轮 式[8-9],由于西南地区秸秆覆盖量大,秸秆整杆覆 盖,故清洁式防堵装置不适用于西南地区。切茬式 防堵装置是将秸秆切断以防止开沟器堵塞,分为主 动切茬式和被动切茬式,被动式切茬防堵装置是在 机具重力的作用下依靠圆盘刀锋利的刀刃将秸秆 和残茬切断防止堵塞,如缺口圆盘刀和波纹圆盘刀 等[10-11],西南地区免耕播种机体型小、重量轻,在机 具重力的作用下圆盘刀不足以将秸秆切断:主动切 茬式防堵装置是由动力传动轴驱动圆盘刀切割土 壤表层秸秆和根茬,如仿生圆盘刀、缺口圆盘刀和 破茬刀等[12-14]。目前对免耕播种机圆盘刀作业性 能的研究主要集中在单圆盘刀上,对传统圆盘刀、 仿生圆盘刀和正反转组合圆盘刀在秸秆覆盖量大、 秸秆整杆覆盖条件下作业性能的差异研究较少。 本文以缺口圆盘刀、波纹圆盘刀和仿生圆盘刀为研 究对象,将这三种正转、三种正反转圆盘刀在切割 秸秆时的作业性能进行仿真对比和田间对比试验, 以评估这三种圆盘刀的正转和正反转组合在秸秆 覆盖量大和整杆覆盖条件下作业性能的差异,旨为 免耕播种机防堵装置的合理设计及选择提供依据。

1 防堵装置结构与工作原理

1.1 防堵装置结构

试验所用的防堵装置如图 1(见 306 页)所示,防 堵装置主要由限深轮、正转轴I、正转圆盘刀、反转圆 盘刀、传动轴、反转轴、T 系列变速箱和正转轴II组成。 防堵装置固定参数为:T8 螺旋锥齿轮变速箱传动比 为1:1,链轮1 和链轮2 的齿数为 19,链轮7 的齿数 为33,链轮3 的齿数为38,链轮4 与链轮5 齿数为19, 链轮6 与链轮8 的齿数为34,正反转刀盘间距为60。

1.2 防堵装置工作原理

如图 1(见 306 页)所示,T 系列变速箱的两个 输出轴通过链传动分别与反转轴和传动轴连接,传 动轴将动力传递给正转轴 I 和正转轴 II,正转圆盘 刀分别固定在正转轴 I 和正转轴 II一端,反转圆盘 刀固定在反转轴的两端。试验时防堵装置通过三 点悬挂与拖拉机连接,由万向节将拖拉机输出轴的 动力传递给 T 系列变速箱,传动系统将动力传递给 正转圆盘刀和反转圆盘刀,将路径上的秸秆和根茬 切断,防止堵塞。限深轮安装在机架两侧,以控制 圆盘刀入土深度。

2 受力分析

对仿生圆盘刀(基于云斑天牛口器设计^[15])、 缺口圆盘刀和波纹圆盘刀进行受力分析,所用的三 种圆盘刀如图2(见306页)所示,刀盘直径均为480 mm,材料和刃口厚度均相同。

仿生圆盘刀内刀刃曲线为 $y_1 = -504.22 + 0.30x - 6.94 \times 10^{-4} x^2$,外刀刃曲线为 $y_2 = -839.91 + 1.60x - 8.90 \times 10^{-4} x^2$,缺口数量为 9,缺口深度为 70 mm;缺口圆盘刀缺口宽度为 60 mm,深度为 30 mm,缺口数量为 13;波纹圆盘刀边缘形状为过渡圆弧。

2.1 正转圆盘刀切割秸秆受力分析

正转单圆盘刀切割秸秆时,秸秆能相对地面移动,属于无支撑切割,根据圆盘刀对秸秆的切断方 式分为砍切和滑切。根据圆盘刀在不同位置切割 秸秆对仿生圆盘刀、缺口圆盘刀、波纹圆盘刀切割 秸秆进行受力分析(为便于分析引入平面圆盘刀), 如图 3 所示。



图 3 不同类型圆盘刀切茬受力示意图

Fig.3 Schematic diagram of stubble cutting force of different types of disc knives

平面圆盘刀切茬时,根据静力平衡得

$$\begin{cases} F_i \cos \alpha = F_r \sin \alpha + F_f \\ F_r \cos \alpha + F_i \sin \alpha = F_n \end{cases}$$
(1)

式中, F_r 为圆盘刀对秸秆的滑切力(N); F_f 为地面与 秸秆之间的摩擦力(N); F_n 为地面对秸秆的支持力 (N); F_i 为圆盘刀对秸秆的砍切力(N); α 为砍切力与 地表的夹角(°); β 为砍切力与圆盘刀平面的夹角(°)。

设圆盘刀与秸秆的摩擦系数为 μ_1 ,地表与秸秆的摩擦系数为 μ_2 ,则

$$\begin{cases} F_f = \mu_2 F_n \\ F_r = \mu_1 F_r \end{cases}$$
(2)

根据式(1)和式(2),当秸秆被切断后,秸秆相 对地表静止且不随圆盘刀向前运动和堵塞需要满 足条件:

$$F_{t}\cos\alpha \leq F_{f} + F_{r}\sin\alpha$$
(3)
将式(1)、(2)代人式(3)得:

$$\alpha \leq \arctan \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \tag{4}$$

平面圆盘刀切割秸秆时,α始终保持不变。

对仿生圆盘刀受力分析,当缺口部分切割秸秆时,根据竖直和水平方向上受力平衡可得:

$$\begin{cases} F_{t}\sin\alpha - F_{r}\cos\alpha = F_{n} \\ F_{t}\cos\alpha + F_{r}\sin\alpha \leqslant F_{f} \end{cases}$$
(5)

秸秆相对地表静止且不随圆盘刀向前运动和 堵塞需要满足条件:

$$F_i \cos \alpha + F_r \sin \alpha \leqslant F_f \tag{6}$$

整理得:

$$\alpha \leq \arctan \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \tag{7}$$

由于仿生圆盘刀的非缺口刃口位于刃尖部位, 非缺口刃口太小,此处受力忽略不计。

对于缺口圆盘刀,当缺口部分切割秸秆时,同 理得秸秆相对地表静止且不随圆盘刀向前运动和 堵塞需要满足条件:

$$F_t \cos \alpha + F_r \sin \alpha \leqslant F_f \tag{8}$$

整理得:

$$\alpha \leq \arctan \frac{1 + \mu_1 \mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \tag{9}$$

缺口圆盘刀非缺口部分切割秸秆时与平面圆 盘刀受力分析一致,α始终保持不变。

对于波纹圆盘刀,同理得秸秆相对地表静止且 不随圆盘刀向前运动和堵塞需要满足条件:

 $F_{f}\cos\beta \geq F_{\iota}\cos\alpha\cos\beta + F_{r}\sin\alpha\cos\beta \quad (10)$ 整理得:

$$\alpha \leq \arctan \frac{1 - \mu_1 \mu_2 \cos\beta}{\mu_1 + \mu_2 \cos\beta} \tag{11}$$

从图 3 可以看出,三种圆盘刀切割秸秆时都存 在砍切和滑切作用,其中缺口圆盘刀的砍切力与地 表的夹角 α 最大,仿生圆盘刀次之,波纹圆盘刀最 小,所以缺口圆盘刀的砍切作用最强,仿生圆盘刀 次之,波纹圆盘刀最小;由于波纹圆盘刀的α较小, 滑切作用较强,且滑切作用优于平面圆盘刀,因此 在单刀正转作业的情况下,仿生圆盘刀与缺口圆盘 刀以砍切为主,波纹圆盘刀以滑切为主。 比较式(4)、(7)、(9)、(11),在同一条件下,平 面圆盘刀切割秸秆时秸秆与地表最容易发生相对 滑移,仿生圆盘刀和缺口圆盘刀下在缺口部分切割 秸秆时最不容易发生相对滑移,但缺口圆盘刀也存 在非缺口的刃口,非缺口的刃口作用秸秆时容易发 生相对滑移。

从图 3 可以看出,由于缺口相邻齿的支撑会形 成内部中空的结构,作用于秸秆的砍切力会减弱, 当缺口垂直作用秸秆时,砍切力达到最小,且会造 成漏切,通过受力分析可知缺口圆盘刀最容易造成 漏切,仿生圆盘刀与缺口圆盘刀相比不容易造成漏 切,由于波纹圆盘刀为过渡圆弧,漏切情况相对更 少,综上两个原因可能导致缺口圆盘刀的切茬效果 不理想。

2.2 正反转圆盘刀切割秸秆受力分析

正反转刀盘作业过程中,如果正、反转圆盘刀 都有缺口,正常情况下能形成一种反转圆盘刀将秸 秆挑起,正转圆盘刀将秸秆切断的支撑切割方式。 现将三种正反转圆盘刀在相同作业深度且在挑起 和切割秸秆的临界时刻进行受力分析,如图4所示, 秸秆所受合力如图5所示,正反转圆盘刀作用秸秆 的剪切面面积如图6所示。



(A) 正反转仍至圆盈刀 Forward and reverse bionic disc knife (B) 正反转缺口圆盘刀 Forward and reverse notched disc knife

Forward and reverse corrugated disc knife

图 4 三种正反转圆盘刀切茬受力示意图

Fig.4 Three kinds of positive and negative rotation disc knife stubble cutting force schematic diagram



(a) 秸秆法线方向所受合力 The resultant force in the normal direction of the straw



(b) 秸秆水平方向所受合力 The resultant force in the horizontal

图 5 正反转圆盘刀切割秸秆所受合力示意图

Fig.5 Schematic diagram of the combined force exerted on the forward and reverse rotating disc knives for cutting straws



1.正反转仿生圆盘刀作用秸秆剪切面面积; 2.正反转缺口圆盘刀作用秸秆剪切面面积; 3.正反转波纹圆盘刀作用秸秆剪切面面积

1. Forward and reverse bionic disc knife action straw shear surface area; 2. Forward and reverse notch disc knife action straw shear surface area;

3. Forward and reverse corrugated disc knife action straw shear surface area

图 6 不同类型圆盘刀作用秸秆的剪切面面积(阴影部分)

Fig.6 Shear surface area of straw acting on different types of disc knives (shaded part)

图 4、图 5 中, f_j 为秸秆与地面的摩擦力(N); N_j 为地面对秸秆的支持力(N); G_j 为秸秆的重力(N); P_j 为机具对秸秆的推力(N); F_{k_1} 为正转圆盘刀刀刃 与秸秆之间的作用力(N); f_{k_2} 为反转圆盘刀刀刃与秸秆之间的作用力(N); f_{k_2} 为反转圆盘刀刀刃与秸秆之间的摩擦力(N); f_{k_2} 为反转圆盘刀刀刃与秸秆 之间的摩擦力(N); F_a 为秸秆在法线方向上因正转 圆盘刀作用受到的合力(N); F_b 为秸秆在法线方向 上因反转圆盘刀作用受到的合力(N); F_c 为秸秆在 水平方向上因正转圆盘刀作用受到的合力(N); F_d 为秸秆在水平方向上因反转圆盘刀作用受到的合 力(N);L 为正反转圆盘刀切割秸秆剪力的力臂 (mm);X 为 f_{k_1} 与法线方向的夹角(°); φ 为 f_{k_2} 与法 线方向的夹角(°); γ 为 F_{k_1} 与法线方向的夹角(°)。

根据静力平衡可得:

$$\begin{cases} F_a + G_j - N_j - F_b = 0\\ F_c + f_j - F_d - P_j = 0 \end{cases}$$
(12)

2.2.1 正反转仿生圆盘刀切割秸秆受力分析 根据图 4 可知秸秆在正反转仿生圆盘刀作用下受到的外力为:

$$\begin{cases} F_{a} = \cos\gamma F_{k_{1}} - \cos\lambda f_{k_{1}} \\ F_{b} = \cos\gamma F_{k_{2}} - \cos\varphi f_{k_{2}} \\ F_{c} = \sin\gamma F_{k_{1}} + \sin\lambda f_{k_{1}} \\ F_{d} = \sin\gamma F_{k_{2}} - \sin\varphi f_{k_{2}} \end{cases}$$
(13)

在理想状态下,玉米秸秆因防堵装置有支撑切 割产生剪切破坏,当玉米秸秆在法线方向和水平方 向受到两个的剪应力大于秸秆的许用应力时,秸秆 被切断。根据式(12)、(13)可求得玉米秸秆在法线 方向和水平方向受到的剪应力表达式分别为:

$$\tau_1 = \frac{1}{A} (F_a + G_j) = \frac{1}{A} (N_j + F_b) \qquad (14)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{A} (F_c + f_j) = \frac{1}{A} (F_d + P_j) \qquad (15)$$

式中,A为秸秆剪切面的面积(m²)。

2.2.2 正反转缺口圆盘刀切割秸秆受力分析 根据图4可知秸秆在正反转缺口圆盘刀作用下受到的外力为:

$$\begin{cases} F_{a} = \cos\gamma F_{k_{1}} - \cos\chi f_{k_{1}} \\ F_{b} = \cos\gamma F_{k_{2}} + \cos\varphi f_{k_{2}} \\ F_{c} = \sin\gamma F_{k_{1}} + \sin\chi f_{k_{1}} \\ F_{d} = \sin\gamma F_{k_{2}} - \sin\varphi f_{k_{2}} \end{cases}$$
(16)

玉米秸秆在法线方向和水平方向受到的剪应 力表达式与式(14)、(15)相同。 2.2.3 正反转波纹圆盘刀切割秸秆受力分析 根据图4可知秸秆在正反转波纹圆盘刀作用下受到的外力为:

$$\begin{cases} F_a = \cos\gamma F_{k_1} - \cos(\pi - \chi)f_{k_1} \\ F_b = \cos\varphi f_{k_2} \\ F_c = \sin(\chi - \pi/2)f_{k_1} \\ F_d = F_{k_2} + \sin\varphi f_{k_2} \end{cases}$$
(17)

玉米秸秆在法线方向和水平方向受到的剪应 力表达式与式(14)、(15)相同。

从图 4 和图 6 可以看出,正反转仿生圆盘刀的 刃口能作用于秸秆的整个剪切面进行切割,正反转 缺口圆盘刀的刃口能作用于秸秆大部分剪切面进 行切割,正反转波纹圆盘刀无法作用于秸秆的剪切 面切割。

从图 4 的受力示意图可以看出,秸秆能被反转圆盘刀挑起需要满足的条件为 F_{k_2} (反转圆盘刀作用于秸秆的力)与水平面的夹角大于 0,且与水平面的夹角越大,秸秆越容易被挑起。记 90- $\gamma = \alpha$,可以发现三种正反转圆盘刀作业条件下,三种反转圆盘刀的 F_{k_2} 与水平面的夹角大小分别为 $\alpha_A > \alpha_B > \alpha_c$,因此反转仿生圆盘刀挑起秸秆的能力最强,反转缺口圆盘刀次之,反转波纹圆盘刀 F_{k_2} 与水平面的夹角接近于零,秸秆在反转圆盘刀的作用下只会将秸秆抛向机具正前方而不会被挑起,这会影响正反转波纹圆盘刀的剪切效果,当秸秆被反转刀盘抛向机具前方后,正转刀盘切割不了秸秆,这可能导致正反转波纹圆盘刀的切茬性能比单波纹圆盘刀切茬性能差。

3 试验设计

本次试验先进行仿真试验,再进行田间试验。 影响圆盘刀作业性能的因素主要有圆盘刀类型、刀 盘间距、人土深度、机具前进速度、圆盘刀转速 等^[15-17],由于人土深度只要满足开沟深度要求即 可,且试验所用的防堵装置的正反转刀盘间距和机 具配重是固定不变的,因此本次试验将圆盘刀类 型、机具前进速度、圆盘刀转速作为性能影响因素。

3.1 仿真试验设计

3.1.1 仿真试验因素与水平的确定 以往的研究 通过二次回归正交组合试验及响应曲面分析法得 到了正反转动力切茬式防堵装置的最优参数为:机 具前进速度 0.98 m·s⁻¹,正转刀轴转速 150 r· min⁻¹,反转刀轴转速 313 r·min⁻¹,刀盘间距 60 mm^[18]。由于本文研究的只是不同类型圆盘刀作业 性能的差异以及仿真试验只为田间试验做准备,因 此仿真试验只进行一组同一条件下的对比试验,根据 以往的研究选取试验因素与水平如表1、2所示。

3.1.2 仿真试验评价指标的确定及测定方法 基于 EDEM 离散元法建立数值模拟模型,模型主要包括防堵装置、玉米秸秆和土壤。玉米秸秆离散元模型采用粘结键将颗粒粘结,当防堵装置切割秸秆时,玉米秸秆离散元模型的粘结键会因力而断裂,可以用粘结键断裂数量来衡量防堵装置的切茬效果,故以粘结键断裂数量为评价指标^[15]。Hertz-Mindlin with JKR 模型主要用于模拟湿颗粒,而土壤本身含有一定水分,故采用其作为土壤颗粒的接触模型^[19-20]。防堵装置破茬开沟达到理想的开沟深度后,土壤扰动量越小越好,故将土壤扰动量作为评价指标。圆盘刀切割秸秆时,秸秆如果没有被切断或切割不彻底则会影响机具通过性,故将机具通过性,为评价指标。粘结键断裂数量可以通过

表1 仿真试验正转圆盘刀试验因素与水平表

Table 1 Factors and levels for the positive rotary disc cutter in simulated tests

水平 Level	因素 Factor	正转圆盘刀转速 B Positive rotary disk cutter speed B /(r・min ⁻¹)	前进速度 C Forward speed C/(m・s ⁻¹)
1	正转仿生圆盘刀 Forward-rotating bionic disc knife		
2	正转缺口圆盘刀 Forward-turning notched disc knife	150	0.98
3	正转波纹圆盘刀 Forward-rotation corrugated disc knife		

表 2 仿真试验正反转圆盘刀试验因素与水平表

Table 2 Factors and levels for forward and

reverse rotary disc cutter in simulated tests

水平 Level	因素 Factor	正、反转圆盘刀 组合转速 B Combined speed of forward and reverse rotary disk cutter B /(r・min ⁻¹)	前进速度 C Forward speed C/(m・s ⁻¹)
1	正反转仿生圆盘刀 Forward and reverse bionic disc knife		
2	正反转缺口圆盘刀 Forward and reverse notched disc knife	(150,313)	0.98
3	正反转波纹圆盘刀 Forward and reverse corrugated disc knife		

EDEM 后处理导出;土壤扰动量测试方法采用文 献^[21]中的方法进行;机具通过性可以通过直观分析 观察仿真过程中秸秆是否被切断以及秸秆拥堵 情况。

3.2 田间试验设计

3.2.1 田间试验因素与水平的确定 西南地区地 块面积较小,机具前进速度不宜太大,根据相关标 准^[22],取前进速度范围为0.56~1.39 m·s⁻¹,因此 取机具三个前进速度分别为0.56、0.77、0.98 m· s⁻¹,正、反转圆盘刀的三个转速根据拖拉机动力输 出轴转速和防堵装置传动比计算^[15],正转转速分别 为150、175、200 r·min⁻¹,反转转速分别为313、 365、417 r·min⁻¹。以秸秆切断率、土壤扰动量、机 具通过性为评价指标,进行三因素三水平正交试 验,其中一组转速和机具前进速度与仿真试验一 致,最终的因素与水平如表3、4 所示。

表 3 田间试验正转圆盘刀试验因素与水平表

Table 3 Factors and levels for positive

rotary disc cutter in field tests

		因素 Factor	
水平 Level	圆盘刀类型 A Disc cutter type A	正转圆盘刀转速 B Positive rotary disk cutter speed B /(r・min ⁻¹)	前进速度 C Forward speed C/(m・s ⁻¹)
1	正转波纹圆盘刀 Forward-rotation corrugated disc knife	150	0.56
2	正转缺口圆盘刀 Forward-turning notched disc knife	175	0.77
3	正转仿生圆盘刀 Forward-rotating bionic disc knife	200	0.98

表 4 田间试验正反转圆盘刀试验因素与水平表

Table 4 Factors and levels for forward and

reverse rotary disc cutter in field tests

		因素 Factor	
水平 Level	圆盘刀类型 A Disc cutter type A	正、反转圆盘刀 组合转速 B Combined speed of forward and reverse rotary disk cutter B /(r・min ⁻¹)	前进速度 C Forward speed C/(m・s ⁻¹)
1	正反转缺口圆盘刀 Forward and reverse notched disc knife	(150,313)	0.56
2	正反转波纹圆盘刀 Forward and reverse corrugated disc knife	(175,365)	0.77
3	正反转仿生圆盘刀 Forward and reverse bionic disc knife	(200,417)	0.98

3.2.2 田间试验评价指标的确定及测试方法 参考相关文献^[23-24]以及前文仿真试验设计,将仿真试验中的粘结键断裂数量换为秸秆切断率,其余评价指标与仿真试验相同,各项指标测定方法根据国家标准《GB/T20865-2017 免(少)耕施肥播种机》^[25]和《NY/T1768-2009 免耕播种机质量评价技术规范》^[26]中的方法进行。

4 仿真试验

4.1 防堵装置-秸秆-土壤离散元模型

查阅相关文献^[27-28],设置圆盘刀的材料为 65Mn,建立防堵装置-秸秆-土壤离散元模型,相关 仿真参数如表5所示。

土壤的接触模型设置为 Hertz-Mindlin with JKR 模型,颗粒半径为4 mm,接触半径为4.5 mm,表面 能为12.73 J·m⁻²;玉米秸秆的接触半径1.2 mm、单 位面积法向刚度 9.361×10⁷ N·m⁻³、单位面积切向 刚度 9.845×107 N·m⁻³,临界切向应力 1×10⁸ Pa,粘 结键半径 2 mm。土槽尺寸为 1400 mm×550 mm× 300 mm, 土壤颗粒直径为4 mm, 采用颗粒床的方式 快速生成土槽。土槽生成后,以颗粒工厂 API 形式 生成玉米秸秆,设置颗粒粘结时间为 0.02 s。测得 西南地区玉米秸秆直径范围约为 20~30 mm,为模 拟秸秆覆盖量大条件取玉米秸秆直径 30 mm。玉米 秸秆离散元模型之间应有一定间距,防止生成秸秆 瞬间发生破碎,因此取秸秆间距为60mm,为了减少 仿真时间,模拟秸秆整杆覆盖条件,设置秸秆数量 为10,秸秆长度为300 mm。根据相关标准,圆盘刀 开沟深度为 80~100 mm^[25],因此设置防堵装置的 开沟深度为80mm,设置总仿真时间为1.5s,离散 元模型如图7所示。

4.2 仿真试验结果与分析

4.2.1 粘结键断裂数量

(1)正转圆盘刀粘结键断裂数量。当正转圆盘 刀转速为150 r·min⁻¹、机具前进速度为0.98 m· s⁻¹时,仿真试验结果如表6所示。由此看出,三种 正转圆盘刀粘结键断裂数量从大到小依次为正转 仿生圆盘刀、正转缺口圆盘刀、正转波纹圆盘刀,正 转仿生圆盘刀的粘结键断裂数量比正转缺口圆盘 刀和正转波纹圆盘刀分别提高6.64%和13.20%。

(2) 正反转圆盘刀粘结键断裂数量。当正转圆 盘刀转速为 150 r · min⁻¹,反转圆盘刀转速为 313 r · min⁻¹、机具前进速度为 0.98 m · s⁻¹时,仿真试验 结果如表 7 所示。由此看出,三种正反转圆盘刀粘 结键断裂数量从大到小依次为正反转仿生圆盘刀、

表 5 仿真参数

Table 5 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
Parameter	Value	Parameter	Value
圆盘刀泊松比 Disc knife Poisson's ratio	0.30	秸秆-刀静摩擦因数 Straw-knife static friction factor	0.23
圆盘刀密度/(kg・m ⁻³) Disc knife density	7800	秸秆-刀动摩擦因数 Straw-knife friction factor	0.12
圆盘刀剪切模量/Pa Disc knife shear modulus	8.0×10 ¹⁰	秸秆-刀恢复系数 Straw-knife recovery coefficient	0.66
秸秆泊松比 Straw Poisson's ratio	0.40	土壤-刀静摩擦因数 Soil-knife static friction factor	0.60
秸秆密度/(kg・m ⁻³) Straw density	470	土壤-刀动摩擦因数 Soil-knife friction factor	0.10
秸秆剪切模量/Pa Straw shear modulus	1.7×10 ⁻⁶	土壤-刀恢复系数 Soil-knife recovery coefficient	0.30
土壤泊松比 Soil Poisson's ratio	0.38	土壤-土壤静摩擦因数 Soil-soil static friction factor	0.84
土壤密度/(kg・m ⁻³) Soil density	2680	土壤-土壤动摩擦因数 Soil-soil dynamic friction factor	0.10
土壤剪切模量/Pa Soil shear modulus	1.2×10 ¹⁶	土壤-土壤恢复系数 Soil-soil recovery coefficient	0.55

表 6 正转圆盘刀仿真试验结果

Table 6 Positive rotation disc cutter simulation test results

圆盘刀类型 Disccutter type	正转圆盘 刀转速 Positive rotary dis cutter speed /(r・min ⁻¹)	前进速度 Forward k speed /(m・s ⁻¹)	粘结键断裂数量 Number of bond breaks
正转仿生圆盘刀 Forward-rotating bionic disc knife			35968
正转缺口圆盘刀 Forward-turning notched disc knife	150	0.98	33579
正转波纹圆盘刀 Forward-rotation corrugated disc knife			31221

正反转缺口圆盘刀、正反转波纹圆盘刀,正反转仿 生圆盘刀的粘结键断裂数量比正反转缺口圆盘刀 和正反转波纹圆盘刀分别提高46.18%和67.51%。 4.2.2 土壤扰动量 对三种圆盘刀切茬效果最好 的转速与前进速度条件下的开沟轮廓坐标进行提 取后,不同类型的圆盘刀开沟轮廓如图8、9所示,计 算土壤扰动量并取5次平均值,得正转仿生圆盘刀 的平均土壤扰动量为13.224 mm²,正转缺口圆盘刀 的平均土壤扰动量为 12.357 mm²,正转波纹圆盘刀 平均土壤扰动量为 11.748 mm²。图 8 中 D 为作业 宽度(mm); d 为划分的等量长度,取 20mm; D_3 为正 转仿生圆盘刀土表开沟宽度(mm); D_2 为正转缺口 圆盘刀土表开沟宽度(mm); D_1 为正转波纹圆盘刀 土表开沟宽度(mm)。

同理计算得正反转仿生圆盘刀的平均土壤扰

动量为 14.031 mm²,正反转缺口圆盘刀的平均土壤 扰动量为 10.953 mm²,正反转波纹圆盘刀平均土壤 扰动量为 9.381 mm²。图 9 中 D 为作业宽度(mm); d 为划分的等量长度,取 20 mm; D_1 为正反转仿生圆 盘刀土表开沟宽度(mm); D_2 为正反转缺口圆盘刀 土表开沟宽度(mm); D_3 为正反转波纹圆盘刀土表 开沟宽度(mm)。



I.限深轮; 2.机架; 3.正转轴 I; 4.正转圆盘刀; 5.反转圆盘刀; 6.反转轴; 7.变速箱; 8.固定侧板; 9.传动轴; 10.正转轴 II
 I. Depth limit wheel; 2. Frame; 3. Forward rotating shaft I; 4. Forward rotating disc cutter; 5. Reversing disc cutter; 6. Reversing shaft;
 7. Gearbox; 8. Fixing side plate; 9. Transmission shaft; 10. Positive rotating shaft II

图 1 防堵装置结构示意图





(a) 仿生圆盘刀 Bionic disc knife



(b) 缺口圆盘刀 Notched disc knife

图 2 三种不同类型的圆盘刀

Fig.2 Three different types of disc cutters



(c) 波纹圆盘刀 Corrugated disc knife



图 7 防堵装置-秸秆-土壤离散元模型

Fig.7 Anti-blocking device-straw-soil discrete element modeling

表 7 正反转圆盘刀仿真试验结果

 Table 7
 Simulation test results of forward and reverse rotary disk cutter

	5		
圆盘刀类型 Disccutter type	正、反转圆盘 刀组合转速 Combined speed of forward and reverse rotary disk cutter /(r・min ⁻¹)	前进速度 Forward speed /(m・s ⁻¹)	粘结键断 裂数量 Number of bond break
正反转仿生圆盘刀 Forward and reverse bionic disc knife			42248
正反转缺口圆盘刀 Forward and reverse notched disc knife	(150,313)	0.98	22736
正反转波纹圆盘刀 Forward and reverse corrugated disc knife			13728

秸秆拥堵情况 在同一条件下,不同类型圆 4.2.3 盘刀作业后秸秆分布情况如图 10、11 所示。从图 10 可以看出,仿真过程中三种正转圆盘刀都能将秸 秆切断目三个图中秸秆并未发生明显的位移情况, 原因是秸秆铺放规则且秸秆数量较少,从当前仿真 试验中不能看出正转圆盘刀的秸秆堵塞情况,但可 以根据粘结键断裂数量侧面评估秸秆堵塞的情况。 从图 11 可以看出,三种正反转圆盘刀切割秸秆时秸 秆发生了很明显的位移情况,有的秸秆在切割过程 中被挑起,原因是反转刀盘转速大于正转刀盘转 速;正反转仿生圆盘刀挑起秸秆的能力强且作用于 秸秆的剪切面大,能够将挑起的秸秆切断。正反转 缺口圆盘刀也能将挑起的秸秆切断,但圆盘刀前的 秸秆与正反转仿生圆盘刀相比较多,原因是正反转 缺口圆盘刀挑起秸秆的能力和作用于秸秆的剪切 面比正反转仿生圆盘刀小。正反转波纹圆盘刀切割 秸秆时大量的秸秆堆积在圆盘刀前,原因是正反转波 纹圆盘刀的刃口为过渡的圆弧面,无法将秸秆挑起且 秸秆被反转圆盘刀推向机具正前方造成堵塞。

5 田间试验

5.1 试验点条件及设备

试验在云南省昆明市呈贡区昆明理工大学保 护性耕作试验田(24°51′N,102°52′E,海拔1945 m) 进行,大气压为80400 Pa,平均气温为26℃,天晴, 最大风速7 m・s⁻¹,平均风速5.4 m・s⁻¹,相对湿度 31%;采用环刀取土并进行烘干后测得试验田0~15 cm 土层的平均土壤含水率为21.58%,平均土壤容 重为1.25 g・cm⁻³,平均土壤坚实度为1105 kPa;所 用的试验材料为玉米秸秆,测得秸秆含水率为 10.81%,玉米秸秆整杆覆盖,秸秆覆盖率为82%,覆 盖量为1.43 kg・m⁻²。

本次试验采用的设备主要包括三种不同类型的圆盘刀、SC900数字式土壤坚实度仪、正反转动力 切茬式防堵装置、东方红 504 拖拉机、米尺、钢尺、环 刀、小铲、环刀托、电子天平、电子秤和 Kestrel3500 手持式气象站等。田间试验如图 12 所示。

5.2 田间试验结果与分析

5.2.1 秸秆切断率

(1)正转圆盘刀的秸秆切断率。正交试验结果 如表 8 所示,极差分析和方差分析分别如表 9、10 所 示。根据表 8 正交试验结果,运用极差分析法进行 处理,得到极差分析结果如表 9 所示,由此可以看 出,对于秸秆切断率,圆盘刀类型、正转圆盘刀转 速、前进速度的较优水平为 a,b2c2,影响秸秆切断率 的主次因素依次为 a>b>c;在 3 种正转圆盘刀中,仿 生圆盘刀的秸秆切断率最高,比缺口圆盘刀和波纹 圆盘刀分别提高 8.76%和 14.18%,正转仿生圆盘刀 的切茬效果与正转缺口圆盘刀差异不大,正转波纹 圆盘刀切茬效果最弱,这说明在当前条件下,圆盘 刀的砍切效果优于滑切。

表 8 正转圆盘刀正交试验结果

Table 8	Orthogonal	test	results o	f	positively	v rotating	disc	cutter
	• /							

AT */*	因素 Factor						
组叙 - Number of	圆盘刀类型 a	正转圆盘刀转速 b	前进速度 c	空列	秸秆切断率		
groups	Disc cutter	Positive rotary disk cutter	Forward speed	Blank	Straw cutting		
groups	type a	speed b/($\mathbf{r} \cdot \min^{-1}$)	$c/(m \cdot s^{-1})$	column	rate/%		
1	1	1	1	1	53.07		
2	1	2	2	2	56.25		
3	1	3	3	3	54.20		
4	2	1	2	3	52.92		
5	2	2	3	1	53.81		
6	2	3	1	2	50.83		
7	3	1	3	2	64.75		
8	3	2	1	3	65.01		
9	3	3	2	1	64.13		



Altair EDEM (A)正反转仿生圆盘刀 Forward and reverse bionic disc knife

Altair EDEM (B)正反转缺口圆盘刀 (C)正反转波纹圆盘刀 Forward and reverse notched disc knife Forward and reverse corrugated disc knife

图 11 不同正反转圆盘刀作业后秸秆分布情况

Straw distribution after operation of different forward and reverse rotating disc knives Fig.11





Altair EDEM

图 12 田间试验 Fig.12 Field test Range R

3	()	9

表 9 正交试验极差分析 Table 9 Orthogonal test polar analysis							
指标 Index	水平 Level	а	b	с	空列 Blank column		
	K_1	163.52	170.74	168.91	171.01		
	K_2	157.56	175.07	173.30	171.83		
	K_3	193.89	169.16	172.76	172.13		
V	k_1	54.51	56.91	56.30	57.00		
Ŷ	k_2	52.52	58.36	57.77	57.28		
	k_3	64.63	56.39	57.59	57.38		
	极差	12.11	1.97	1.46	0.37		

根据表 8 正交试验结果,运用方差分析法进行 处理,得到方差分析结果如表 10 所示。由此可以看 出,对秸秆切断率影响最显著的因素是圆盘刀类 型,圆盘刀转速影响次之,然后是前进速度,这与极 差分析的主次因素结论一致,因此对于秸秆切断率 而言,圆盘刀类型的选择至关重要。

(2) 正反转圆盘刀的秸秆切断率。根据表 11 正交试验结果,运用极差分析法进行处理,得到极 差分析结果如表 12 所示。由表 12 可以看出,对于

表 10 正交试验方差分析

方差来源 Source of variance	离差平方和 Sum of squared deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	F _a	显著性 Significance
a	253.0754	2	126.5377	1130.8105	$F_{0.01}(2.2) = 99$	* * *
b	6.2409	2	3.1205	27.8865	$F_{0.05}(2.2) = 19$	* *
с	3.8189	2	1.9095	17.0643	$F_{0.1}(2,2) = 9$	*
误差 Error e	0.2237	2	0.1119			

注:***、**、*分别代表极显著、非常显著、显著,下同。

Note: * * * , * * , and * represents extremely significant, very significant, and significant, respectively. The same below.

表 11 正反转圆盘刀正交试验结果

Table 11 Orthogonal test results of forward and reverse rotating disc cutter

	因素 Factor						
组数 Number of groups	圆盘刀类型 A Disc cutter type A	正、反转圆盘 刀组合转速 B Combined speed of forward and reverse rotary disk cutter B/(r・min ⁻¹)	前进速度 C Forward speed C/(m・s ⁻¹)	空列 Blank column	秸秆切断率 Straw cutting rate/%		
1	1	1	1	1	48.76		
2	1	2	2	2	49.00		
3	1	3	3	3	50.30		
4	2	1	2	3	39.24		
5	2	2	3	1	37.58		
6	2	3	1	2	36.38		
7	3	1	3	2	93.81		
8	3	2	1	3	91.58		
9	3	3	2	1	93.65		

秸秆切断率,圆盘刀类型、正反转圆盘刀转速、前进 速度较优水平为A₃B₁C₃,影响秸秆切断率的主次因 素依次为A>B>C,且在机具前进速度为0.98 m· s⁻¹,正、反转刀盘转速分别为150、313 r·min⁻¹时, 三种正反转圆盘刀的作业效果最好,这与朱惠斌 等^[15]的研究结果吻合;在秸秆切断率方面,三种正 反转圆盘刀的切茬效果为正反转仿生圆盘刀>正反 转缺口圆盘刀>正反转波纹圆盘刀,正反转仿生圆 盘刀的秸秆切断率比正反转缺口圆盘刀和正反转 波纹圆盘刀分别提高 45.51%和57.43%。根据表 11 正交试验结果,运用方差分析法进行处理,得到方 差分析结果如表 13 所示。从表 13 可以看出,对秸 秆切断率影响最显著的因素是圆盘刀类型,圆盘刀 转速影响次之,然后是前进速度,这与极差分析的 主次因素结论一致。因此对于秸秆切断率而言,圆 盘刀类型的选择至关重要。

5.2.2 土壤扰动量 对作业后的土壤扰动量进行 测量,圆盘刀土壤扰动量如表 14、15 所示。从表 14

可以看出,在不同条件下,正转仿生圆盘刀的土壤 扰动量最大,缺口圆盘刀次之,波纹圆盘刀最小,且 土壤扰动量与圆盘刀转速的成正比,与机具前进速 度成反比,三种单刀正转圆盘刀的土壤扰动量均小 于 40%。从表 15 可以看出,在不同条件下,正反转 仿生圆盘刀的土壤扰动量最大,正反转缺口次之, 正反转波纹圆盘刀土壤扰动量最小,且土壤扰动量 与圆盘刀转速的成正比,与机具前进速度成反比, 三种正反转圆盘刀的土壤扰动量均小于 40%。

	Table 12 Pol	ar analys	sis of orth	ogonal t	ests
指标 Index	水平 Level	А	В	С	空列 Blank column
	K_1	148.06	181.81	176.72	180.15
	K_2	113.20	178.16	182.05	179.19
	K_3	279.20	181.69	181.69	181.12
Y	k_1	49.35	60.60	58.91	60.05
	k_2	37.73	59.39	60.68	59.73
	k_3	93.07	60.56	60.56	60.37
	极差 Range R	55.33	1.22	1.78	0.64

表 12 正交试验极差分析

表 13 正交试验方差分析

Table 13	Analysis	of v	variance	for	orthogonal	tests
					0-0-0-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-	

方差来源 Source of variance	离差平方和 Sum of squared deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	F _a	显著性 Significance
A	5097.2050	2	2548.6025	8173.8374	$F_{0.01}(2,2) = 99$	* * *
В	166.3573	2	83.1787	266.7694	$F_{0.01}(2,2) = 99$	* * *
С	5.7136	2	2.8568	9.1623	$F_{0.1}(2,2) = 9$	*
误差 e Error e	0.6235	2	0.3118			

表 14 正转圆盘刀土壤扰动量

Table 14 Positively rotating disk cutter soil disturbances

圆盘刀类型 Disccutter type	正转圆盘刀转速 Forward rotation disc knife speed/(r・min ⁻¹)	前进速度 Forward speed ノ(m・s ⁻¹)	土壤扰动量 Soil disturbance /%	均值 Mean/%
		0.56	19.75	
	150	0.77	19.27	
		0.98	18.94	
正转仿生圆盘刀		0.56	19.90	_
Forward-rotating	175	0.77	19.88	20.70
bionic disc knife		0.98	19.83	
		0.56	22.61	_
	200	0.77	20.36	
		0.98	20.11	
		0.56	18.08	
	150	0.77	18.05	
		0.98	17.87	
正转缺口圆盘刀		0.56	18.16	_
Forward-turning	175	0.77	18.12	18.07
notched disc knife		0.98	18.13	
		0.56	18.15	_
	200	0.77	18.05	
		0.98	18.03	
		0.56	16.90	
	150	0.77	17.03	
		0.98	17.20	
正转波纹圆盘刀		0.56	17.32	_
Forward-rotation	175	0.77	17.27	17.20
corrugated disc knife		0.98	17.13	
		0.56	17.58	_
	200	0.77	17.24	
		0.98	17.17	

圆盘刀类型 Disccutter type	正、反转圆盘刀组合转速 B Combined speed of forward and reverse rotary disk cutter B/(r・min ⁻¹)	前进速度 Forward speed /(m・s ⁻¹)	土壤扰动量 Soil disturbance /%	均值 Mean/%
		0.56	31.14	_
	(150,313)	0.77	30.69	
		0.98	30.12	
正转仿生圆盘刀		0.56	32.38	
Forward-rotating	(175,365)	0.77	31.59	31.67
bionic disc knife		0.98	31.41	
		0.56	33.08	
	(200,417)	0.77	32.48	
		0.98	32.17	
		0.56	23.29	
	(150,313)	0.77	23.15	
		0.98	23.06	
正反转缺口圆盘刀		0.56	24.14	
Forward and reverse	(175,365)	0.77	24.05	24.06
notched disc knife		0.98	23.63	
		0.56	25.67	
	(200,417)	0.77	25.23	
		0.98	24.35	
		0.56	22.51	_
	(150,313)	0.77	22.29	
		0.98	21.67	
正反转波纹圆盘刀		0.56	22.36	
Forward and reverse	(175,365)	0.77	22.15	22.85
corrugated disc knife		0.98	21.87	
		0.56	24.69	_
	(200,417)	0.77	24.30	
		0.98	23.84	

表 15 正反转圆盘刀土壤扰动量 Table 15 Forward and reverse disk cutter soil disturbances

5.2.3 机具通过性 在正转圆盘刀和正反转圆盘 刀切割秸秆的过程中,分别观察机具的堵塞情况, 不同作业条件下机具堵塞情况如表 16、17 所示。从 表 16 可以看出,单刀正转的三种圆盘刀在不同转速 和机具前进速度下均出现中度堵塞,说明在此秸秆 覆盖情况下机具通过性差,不满足要求,原因是切 茬效果差。从表 17 可以看出,所试验的条件下正反 转缺口圆盘刀中度堵塞,正反转波纹圆盘刀重度堵 塞,均不满足防堵要求,原因是切茬式防堵装置的 防堵性能与圆盘刀的切茬性能有关,切茬效果越 好,机具就越不容易造成堵塞。当正转圆盘刀转速 为150 r · min⁻¹、反转刀盘转速为313 r · min⁻¹、机 具前进速度为0.98 m·s⁻¹时,正反转仿生圆盘刀没 有出现秸秆堵塞的情况,随着转速的升高,机具也 未出现堵塞的情况,但由于转速的增加会增加功率 的消耗,所以在正转刀盘转速为150 r · min⁻¹、反转 刀盘转速为 313 r · min⁻¹、机具前进速度为 0.98 m ·s⁻¹条件下,正反转仿生圆盘刀的切茬和防堵效果 最优。

6 结 论

1) 对三种不同类型的正转圆盘刀和三种不同 类型的正反转圆盘刀切割秸秆进行了受力分析与 理论分析,三种正转圆盘刀在切茬过程中均存在砍 切和滑切作用,仿生圆盘刀和缺口圆盘刀以砍切为 主,波纹圆盘刀以滑切为主;三种正反转圆盘刀在 切割秸秆时均存在剪切作用,剪切效果与圆盘刀刃 口作用于秸秆的剪切面面积大小和圆盘刀的挑起 秸秆的能力有关。

2)建立"防堵装置-秸秆-土壤"离散元模型,通 过仿真试验对比了同一条件下三种正转圆盘刀和 三种正反转圆盘刀的粘结键断裂数量、土壤扰动 量、秸秆拥堵情况;在单刀正转情况下,圆盘刀的粘 结键断裂数量和机具通过性作业效果均为:正转仿 生圆盘刀>正转缺口圆盘刀>正转波纹圆盘刀,正转 仿生圆盘刀的粘结键断裂数量比正转缺口圆盘刀 和正转波纹圆盘刀分别提高 6.64%和 13.20%;在双 刀正反转情况下,圆盘刀的粘结键断裂数量、机具通

表 16 正	转防堵装置机具通过性测定结果

Table 16	ble 16 Positive rotation anti-blocking device machine tool passability measurement results				
	正转圆盘刀转速	前进速度	堵寒情况		
Discutter type	Forward rotation disc	Forward speed	Clogging situation		
	knife speed/($\mathbf{r} \cdot \min^{-1}$)	$/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$			
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	150	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
正转仿生圆盘刀		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
Forward-rotating	175	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
bionic disc knife		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	200	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	150	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
正转缺口圆盘刀		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
Forward-turning	175	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
notched disc knife		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	200	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	150	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
正转波纹圆盘刀		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
Forward-rotation	175	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
corrugated disc knife		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
-		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	200	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
	_ • •	0.98	中度堵塞 Moderate blockage		

表 17 正反转防堵装置机具通过性测定结果

Table 17 F	Forward and reverse anti-blocking device machine tool passability measurement results				
国办刀米刑	正、反转圆盘刀组合转速	前进速度	按 空桂刈		
圆盘刀尖型	Combined speed of forward and reverse	Forward speed	伯盔旧仉		
Disccutter type	rotary disk cutter/(r • min ⁻¹)	$/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	Clogging situation		
		0.56	轻微堵塞 Slight blockage		
	(150,313)	0.77	轻微堵塞 Slight blockage		
		0.98	不堵塞 No clogging		
正反转仿生圆盘刀		0.56	轻微堵塞 Slight blockage		
Forward and reverse	(175,365)	0.77	轻微堵塞 Slight blockage		
bionic disc knife		0.98	不堵塞 No clogging		
		0.56	轻微堵塞 Slight blockage		
	(200,417)	0.77	不堵塞 No clogging		
		0.98	不堵塞 No clogging		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	150,313	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
正反转缺口圆盘刀		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
Forward and reverse	(175,365)	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
notched disc knife		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	中度堵塞 Moderate blockage		
	(200,417)	0.77	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.98	中度堵塞 Moderate blockage		
		0.56	重度堵塞 Severe blockage		
	(150,313)	0.77	重度堵塞 Severe blockage		
		0.98	重度堵塞 Severe blockage		
正反转波纹圆盘刀		0.56	重度堵塞 Severe blockage		
Forward and reverse	(175,365)	0.77	重度堵塞 Severe blockage		
corrugated disc knife		0.98	重度堵塞 Severe blockage		
		0.56	重度堵塞 Severe blockage		
	(200,417)	0.77	重度堵塞 Severe blockage		
		0.98	重度堵塞 Severe blockage		

过性的作业效果均为正反转仿生圆盘刀>正反转缺 口圆盘刀>正反转波纹圆盘刀,正反转仿生圆盘刀 的粘结键断裂数量比正反转缺口圆盘刀和正反转 波纹圆盘刀分别提高46.18%和67.51%,土壤扰动 量不管是正转还是正反转圆盘刀均与上述关系 相反。

3) 通过田间正交试验得出, 当秸秆覆盖量为 1.43 kg·m⁻²时,影响秸秆切断率的因素主次为圆盘 刀类型>圆盘刀转速>机具前进速度;三种正反转圆 盘刀在机具前进速度为 0.98 m·s⁻¹, 正、反转刀轴 转速分别为150、313 r·min⁻¹的条件下破茬防堵效 果最好,验证了以往研究的正确性;仿生圆盘刀的 切茬性能优于传统圆盘刀,正转仿生圆盘刀的秸秆 切断率比正转缺口圆盘刀和正转波纹圆盘刀分别 高出 8.76% 和 14.18%, 正反转仿生圆盘刀的秸秆切 断率比正反转缺口圆盘刀和正反转波纹圆盘刀分 别高出 45.51% 和 57.43%:在土壤扰动和机具通过 性方面均与仿真试验结果一致,且只有正反转仿生 圆盘刀在秸秆覆盖量大、秸秆整杆覆盖条件下满足 作业要求且作业效果较优,平均秸秆切断率为 93.81%,平均土壤扰动量为31.67%<40%,符合国家 相关标准。

参考文献:

- 朱勇,李建业,张程远,等.长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳 组分的影响[J].农业工程学报,2023,39(10):103-111.
 ZHU Y, LI J Y, ZHANG C Y, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10): 103-111.
- [2] 汤玲, 袁亮, 杨华, 等. 西南地区玉米抗非生物逆境品种选育及其 对策[J]. 分子植物育种, 2017, 15(8): 3183-3190.

TANG L, YUAN L, YANG H, et al. Discuss on abiotic stress tolerance and corresponding strategies for maize breeding in southwest region of China [J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(8): 3183-3190.

- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计 出版社, 1985.
 National Bureau of Statistics of China. China statistical Yearbook[M].
 Beijing: China Statistics Press, 1985.
- [4] RONG L, DUAN X W, ZHANG G L, et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 72-84.
- [5] 闫雷,喇乐鹏,董天浩,等.耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理 性状及根系垂直分布的影响[J].农业工程学报,2021,37(1): 125-132.

YAN L, LA L P, DONG T H, et al. Effects of tillage practices on soil physical properties and vertical distribution of roots in cropland on black soil slopes in Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 125-132.

- [6] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19.
 HE J, LI H W, CHEN H T, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):1-19.
- [7] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 26-34.
 CAO X P, WANG Q J, LI H W, et al. Design and test of an active rotary collector row clearing straw device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 26-34.
- [8] 王韦韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防 堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 10-17.
 WANG W W, ZHU C X, CHEN L Q, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 10-17.
- [9] SIEMENS M C, WILKINS D E, CORREA R F. Development and evaluation of a residue management wheel for hoe-type no-till drills[J]. ASABE Transactions, 2004, 47(2): 397-404.
- [10] 成习军,朱惠斌,白丽珍,等. 微耕机配套的玉米免耕播种机防 堵开沟部件设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2018,39(4): 105-113.
 CHENG X J, ZHU H B, BAI L Z, et al. Design and experiment on anti-blocking and furrowing unit of no-till maize seeder equipped with a micro tillage machine[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(4): 105-113.
- [11] 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等.被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2014,(18):47-54.
 ZHU R X, LI C X, CHENG Y, et al. Working performance of passive disc coulter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, (18):47-54.
- [12] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数 优化与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 118-124.
 LIN J, LI B, LI B F, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118-124.
- [13] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等.免耕播种机动态仿生破茬装置设 计与参数试验优化[J].农业机械学报,2018,49(10):103-114.
 JIA H L, GUO M Z, GUO C J, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):103-114.
- [14] 王加一,赵淑红,杨智杰,等.玉米条带少耕作业驱动式破茬刀 设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(8):51-61.
 WANG J Y, ZHAO S H, YANG Z J, et al. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less tillage operation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 51-61.
- [15] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 正反转动力式玉米切茬防堵装置设

计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 1-11.

ZHU H B, QIAN C, BAI L Z, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (1); 1-11.

- [16] 张喜瑞,何进,李洪文,等.免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的 设计与试验[J].农业工程学报,2009,25(9):117-121.
 ZHANG X R, HE J, LI H W, et al. Design and experiment on the driving disc of anti-blocking unit for no-tillage planter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 117-121.
- [17] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬导草组合式草土 分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):67-78.
 HUANG Y X, GAO P Y, ZHANG Q K, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):67-78.
- [18] ZHU H B, WU X, QIAN C, et al. Design and experimental study of a bi-directional rotating stubble-cutting no-tillage planter [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1637.
- [19] 谢方平,吴正阳,王修善,等.基于无侧限抗压强度试验的土壤 离散元参数标定[J].农业工程学报,2020,36(13):39-47.
 XIE F P, WU Z Y, WANG X S, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13): 39-47.
- [20] 向伟,吴明亮,吕江南,等.基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J].农业工程学报,2019,35(12):116-123.
 XIANG W, WU M L, LV J N, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test [J].
 Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 116-123.
- [21] 刘俊孝, 王浩, 王庆杰, 等. 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, (S1): 132-140.
 LIU J X, WANG H, WANG Q J, et al. Design and experiment of seed belt stubble clearing device for less tillage corn planter [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, (S1): 132-140.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管 理委员会.旋耕机: GB/T5668-2017[S].北京:中国标准出版 社,2018.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rotary tiller: GB/T5668-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

- [23] 陈海涛,侯磊,侯守印,等.大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J].农业机械学报,2018,49(8):59-67.
 CHEN H T, HOU L, HOU S Y, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59-67.
- [24] 赵宏波,何进,郑智旗,等.少免耕播种机条带型行间侧抛清秸 防堵装置研究[J].农业机械学报,2020,51(12):24-34. ZHAO H B, HE J, ZHENG Z Q, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 24-34.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管 理委员会.免(少)耕施肥播种机: GB/T20865-2017[S].北京:中 国标准出版社,2017.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. No or little-tillage fertilizes-seeder: GB/T20865-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.免耕播种机质量评价技术规范:NY/T1768-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specifications of quality evaluation for no-tillage drilling machinery: NY/T1768-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

- [27] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元 仿真标定[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 120-127.
 ZHANG T, LIU F, ZHAO M Q, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120-127.
- [28] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 221-231.

ZHU H B, QIAN C, BAI L Z, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett-Burman design and response surface methodology [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 221-231.