

少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究

赵宏波¹ 何进² 郑智旗¹ 张振国^{2,3} 刘文政²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对我国华北平原一年两熟区玉米秸秆覆盖地小麦少免耕播种机作业时存在易堵塞、种床清洁率低等问题, 设计了一种条带型行间侧抛清秸防堵装置。对清秸防堵装置工作时秸秆抛撒特性进行理论分析, 明确影响清秸效果的关键因素为侧倾刀弯折角、弯折线夹角和回转半径。以作业扭矩、抛土量和种床清洁率为指标, 通过离散元仿真并结合旋转正交回归试验, 确定了清秸防堵装置较优参数组合为侧倾刀弯折角 25°、弯折线夹角 30°、回转半径 250 mm, 此时种床清洁率为 80.5%、作业扭矩为 47.2 N·m、抛土率为 15.8%。配合清秸防堵装置, 分别设计了一沟双行种肥分施开沟器、V 型土壤导流板等部件。其中种肥分施开沟器前方装有定刀, 可与防堵装置形成动定刀切割, 提高了防堵性能; V 型土壤导流板夹角为 130°, 可将抛起的土壤颗粒反弹回种床, 增加了回土量。田间播种试验表明, 所设计的行间侧抛清秸防堵装置未发生堵塞和缠草现象, 种床清洁率为 82.7%, 作业扭矩为 298.2 N·m, 作业质量稳定, 满足少免耕播种作业国标和农艺要求。

关键词: 少免耕播种机; 侧倾刀; 行间侧抛; 清秸防堵装置

中图分类号: S222.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0024-11

OSID:



Strip Tillage Inter-row Residue Side-throwing Device of No/minimum-till Seeder for Anti-blocking and Seedbed-cleaning

ZHAO Hongbo¹ HE Jin² ZHENG Zhiqi¹ ZHANG Zhenguo^{2,3} LIU Wenzheng²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: According to the existing problems of no/minimum-till wheat seeding in maize straw covered field in double-cropping system area in the North-China Plain, such as residue blockage, low cleanness of seedbed, a strip tillage inter-row residue side-throwing device for anti-blocking and seedbed-cleaning was developed. The blade tilt angle, tilt line angle and rotary radius were identified as the key parameters influencing seedbed cleaning in the straw throwing process during seeding operation. Through Box-Behnken central composite rotatable design experiment conducted by discrete element method (DEM) simulation, the optimal parameter of blade tilt angle was 25°, and tilt line angle was 30°, rotary radius was 250 mm, when torque requirement was 47.2 N·m, seedbed cleaning index was 80.5%, and soil throwing index was 15.8%. An seeding and fertilizing opener was designed with a fixed blade in the front which could coordinate with the rotating blade to re-cut residues for anti-blocking; a V-type board for soil guidance was designed with the angle of 130° which could rebound soil return to seedbed; and an anti-twinning board was designed which could increase rotor radius for anti-residue twinning. Field experiments showed that the seedbed-cleaning and anti-blocking device had a good anti-blocking performance, its seedbed cleaning rate was 82.7%, and torque requirement was 298.2 N·m. The seeding and fertilizing quality satisfied the national and standard agronomy requirement.

Key words: no/minimum-till seeder; tilt blade; inter-row residue side-throwing; device for anti-blocking and seedbed-cleaning

收稿日期: 2020-03-18 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452016079)

作者简介: 赵宏波(1990—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作研究,E-mail: zhaohb@nwafu.edu.cn

通信作者: 何进(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

0 引言

保护性耕作包含少耕免耕、秸秆覆盖和轮作,是一项降低土壤水蚀风蚀、改良土壤结构、蓄水保墒、节本增效的可持续农业生产技术^[1-3]。在华北平原一年两熟区玉米秸秆覆盖地少免耕播种小麦时,由于前茬玉米秸秆量大,秸秆极易缠绕在开沟器等土壤耕作部件上,造成堵塞,影响播种质量,降低作业效率;且种床混有秸秆,导致种子无法与土壤充分接触,降低了小麦出苗率。因此,解决堵塞和种床清理问题是进行少免耕播种的关键^[4-5]。

根据动力来源,清秸防堵技术及机具可分为被动式和主动式两类:被动式种床清理防堵机具采用圆盘、星型除草轮等部件,在地表摩擦力作用下转动,通过将秸秆切断及拨向两侧的方法防止堵塞,其结构简单、能耗小,但清秸防堵能力有限^[6-7];主动式清秸防堵机具主要利用粉碎、切、抛等方法,将秸秆高速切断粉碎或抛到开沟器两侧及后方,阻断秸秆积聚过程,从而避免其缠绕堵塞^[8-9]。国内外学者对少免耕播种清秸防堵装置进行了一系列研究^[10]。条带旋耕防堵装置在华北一年两熟区及某些以小地块为主的东南亚国家应用较为广泛^[11-12],该装置利用旋耕刀的旋转将秸秆切断并向后抛起,从而防止堵塞,其通过性较好,但由于将土壤秸秆混埋在一起,导致种床清洁率较低,且土壤扰动量大、能耗较高^[13]。为进一步提高秸秆清理效果,王汉羊等^[14]研究了侧抛清秸,顾峰玮等^[15]提出了粉碎后抛洁区播种,均为种床清理提供了一定指导。但按上述方案作业后部分秸秆覆盖在种床上,若秸秆量过大,则会影响作物出苗和生长。

本文以提升防堵性能、提高种床清洁率为目标,基于秸秆行间侧抛,通过理论分析与离散元仿真设计一种适用于华北一年两熟区玉米秸秆覆盖条件下少免耕播种小麦的条带型行间侧抛清秸防堵装置,并对其防堵及种床清理性能进行试验,为华北一年两熟区小麦少免耕播种清秸防堵提供可行性技术方案。

1 整体结构与工作原理

1.1 清秸防堵装置结构

条带型行间侧抛清秸防堵装置主要由侧倾刀、刀盘、刀轴等部件组成(图1)。开沟器是少免耕播种机最容易堵塞的部件之一^[16],为减少其缠草堵塞,每个开沟器前方对应一组条带型行间侧抛清秸防堵装置,与开沟器、V型土壤导流板等部件共同组成防堵开沟单体。该防堵装置可与少免耕播种机镇

压单元组、种肥箱、传动系统等共同组成适于华北一年两熟区玉米秸秆覆盖地的小麦少免耕播种机。

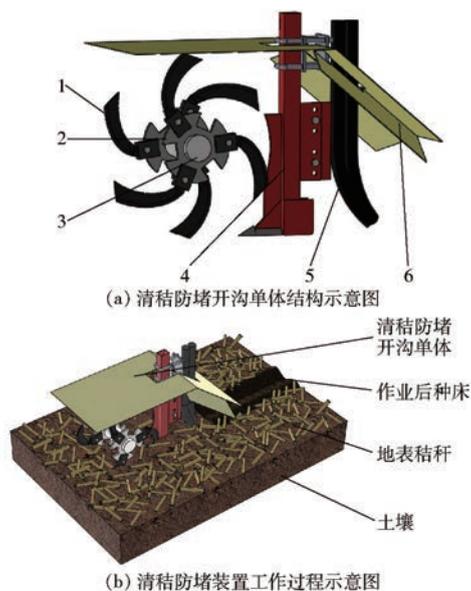


图1 条带型行间侧抛清秸装置结构与作业原理图

Fig.1 Structure and operation principle of strip tillage inter-row residue side-throwing device for anti-blocking seedbed-cleaning and furrow opening

1. 侧倾刀 2. 刀盘 3. 刀轴 4. 开沟器 5. 排种管 6. V型土壤导流板

1.2 工作原理

播种机作业时,拖拉机动力通过变速箱经由传动装置传递给刀轴,刀轴以一定转速带动行间侧抛清秸防堵装置转动,切割地表秸秆并抛向侧后方进行清秸防堵,由于侧倾刀刀身与前进方向呈一定夹角,因此可将秸秆抛向种床两侧的行间;此外,侧倾刀回转圆周与开沟器前方上弧形定刀部分重合,形成动定刀切割,二次切割部分长秸秆,增强防堵性能。与此同时侧倾刀旋松种床,尖角式开沟器开沟施肥播种。清秸防堵开沟单体后方设计有V型土壤导流板,可将防堵装置抛起的土壤反弹回种床,增加种床回土量。

2 关键部件设计

2.1 防堵装置

2.1.1 结构参数设计

为使侧倾刀与前进方向呈一定夹角,产生侧向抛秸效果,将平面旋切刀^[16]沿弯折线以一定角度弯折,即可得到所设计侧倾刀。如图2所示,弯折线与刀端平面呈夹角 β ,沿此弯折线将旋刀弯折角 α 弯折后,刀身与水平面呈 θ 夹角,从而使清秸防堵装置工作时(图3),侧倾刀刀身对所接触的秸秆产生侧向推力,将秸秆抛向种床两侧的行间。侧倾刀侧切刃刃线采用正弦指数曲线,其防缠效果好,且作业功

耗较小^[17]。适当增大滑切角可降低作业阻力^[18-19],因此刃线端点滑切角设计为 60° 。

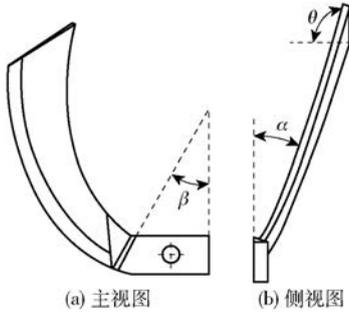


图2 侧倾刀弯折示意图

Fig.2 Bending of tilt blade

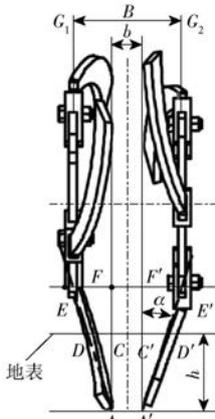


图3 条带型行间侧抛清秸防堵装置结构简图
Fig.3 Structure of strip tillage inter-row residue side-throwing device

条带型行间侧抛清秸防堵装置结构如图3所示。假设刀身上点 D 和点 D' 分别为轴向相邻两把侧倾刀与土壤表面接触点,则图中 DD' 连线所在位置为作业前地表平面, DD' 为播种机作业时理论种床清理宽度,则

$$\begin{cases} l_{DD'} = l_{DC} + l_{D'C'} + l_{CC'} \\ l_{DC} = l_{D'C'} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $l_{CC'} = l_{AA'}$,为两把侧倾刀内侧间距,其宽度记为 b 。根据相似三角形原理,可得

$$\frac{l_{DC}}{l_{EF}} = \frac{l_{AC}}{l_{AF}} \quad (2)$$

式中, $l_{AC} = h$,为装置入土深度,且

$$l_{EF} = \frac{1}{2}(l_{EE'} - l_{FF'}) = \frac{1}{2}(B - b) \quad (3)$$

式中 B ——刀盘间距

根据图3所示位置关系,侧倾刀与前进方向夹角 α 余弦函数为

$$\cos\alpha = \frac{l_{AF}}{l_{AE}} = \frac{l_{A'F'}}{l_{A'E'}} \quad (4)$$

联立式(1)~(4),可得种床清理宽度

$$l_{DD'} = \frac{h(B - b)}{l_{AE}\cos\alpha} + b \quad (5)$$

由式(5)可看出,种床清理宽度 $l_{DD'}$ 与侧倾刀斜置角度 α 、入土深度 h 、刀盘间距 B 、侧倾刀刀身长度 l_{AE} (即回转半径 R)有关。一沟双行播种在我国华北平原一年两熟区应用较为广泛,其沟距一般为12 cm,行距28 cm,利于清秸防堵作业,因此将种床清理宽度设计为12 cm^[17]。

2.1.2 秸秆受力分析

参考文献[20-21]对秸秆拨抛过程的研究,将地表秸秆视为散粒体进行受力分析,如图4所示。

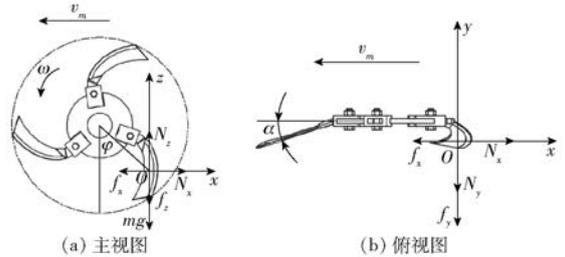


图4 秸秆受力分析图

Fig.4 Mechanical analysis of straw throwing

以秸秆为中心建立空间坐标系, x 轴负方向表示防堵装置前进方向, y 轴为水平面内与 x 轴垂直方向, z 轴为竖直方向。对秸秆与侧倾刀接触时进行受力分析,其受到侧倾刀支持力 N 、摩擦力 f 以及自身重力 mg ,其中秸秆所受支持力 N 方向与刀身垂直。分别将侧倾刀对秸秆的支持力 N 和摩擦力 f 沿 x 、 y 、 z 轴进行分解,则可得到秸秆运动学微分方程

$$\begin{cases} N\sin\alpha\sin\varphi - f\cos\alpha\cos\varphi = m \frac{d^2x}{dt^2} \\ N\cos\theta\sin\alpha + f\cos\theta\sin\alpha\sin\varphi = m \frac{d^2y}{dt^2} \\ N\sin\alpha\cos\varphi - f\cos\alpha - mg = m \frac{d^2z}{dt^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\cos\varphi = \frac{R - h}{R} = 1 - \frac{h}{R} \quad (7)$$

式中 m ——秸秆质量

g ——重力加速度

φ ——防堵装置回转中心和秸秆连线与竖直方向夹角

式(6)对时间 t 进行二次积分,可得到秸秆在 x 、 y 、 z 轴方向上的位移 S_x 、 S_y 、 S_z 分别为

$$\begin{cases} S_x = \frac{1}{2} \frac{Nt^2}{m} (\sin\alpha\sin\varphi - f\cos\alpha\cos\varphi) \\ S_y = \frac{1}{2} \frac{Nt^2}{m} (\cos\theta\sin\alpha + f\cos\theta\sin\alpha\sin\varphi) \\ S_z = \frac{1}{2} \frac{Nt^2}{m} (\sin\alpha\cos\varphi - f\cos\alpha - mg) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,秸秆位移主要受防堵装置回转

半径 R 以及 α 、 θ 的影响, 而 θ 又由弯折角 α 和弯折线夹角 β 决定, 因此对 R 、 α 、 β 这 3 个因素进行分析。

2.1.3 转速设计

侧倾刀运动过程中, 刀刃曲线上任意一点做余摆线运动, 其在竖直平面内的运动方程为

$$\begin{cases} x = v_m + R\cos(\omega t) \\ z = R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中 v_m ——装置前进速度

ω ——刀轴角速度

对时间 t 求导, 可得侧倾刀任意点上绝对线速度

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{v_m^2 + R^2\omega^2 - 2v_mR\omega\sin(\omega t)} \quad (10)$$

其中

$$v_x = v_m - R\omega\sin(\omega t)$$

$$v_z = R\omega\cos(\omega t)$$

马洪亮等^[22]室内秸秆切断试验表明, 地表在有支撑切割秸秆且线速度大于 7.4 m/s 的情况下, 秸秆根茬切断率大于 97%。由于小麦少免耕播种地表覆盖的玉米秸秆量较大, 为避免堵塞, 前进速度 v_m 取 1 m/s^[23-24], 将前进速度和线速度 7.4 m/s 代入式(10), 可得刀轴转速范围为 197 ~ 321 r/min, 为保证机具作业性能, 参考卢彩云等^[24]研究结果, 将刀轴转速设计为 320 r/min。

2.1.4 参数优化仿真试验

为确定清秸防堵装置最优结构参数, 以种床清洁率、作业扭矩、抛土率为评价指标, 对不同结构参数下的防堵装置进行 Box - Behnken 旋转回归仿真试验, 综合选出最优参数组合。设置的仿真试验因素及编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of experimental factors

编码	因素		
	弯折线夹角 $\beta/(\circ)$	回转半径 R/mm	弯折角 $\alpha/(\circ)$
-1	30	225	10
0	60	245	20
1	90	265	30

参考孔令德等^[25]斜置旋耕研究成果, 为使侧倾刀产生侧抛效果的同时保证加工工艺, 将侧倾刀弯折角 α 范围设定为 $10^\circ \sim 30^\circ$, 弯折线夹角 β 取值范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$; 为在保证防堵效果的前提下减小作业功耗, 防堵装置回转半径范围为 225 ~ 265 mm^[26]。所建立的土壤-秸秆-防堵装置离散元模型如图 5 所示, 模型参数参考文献^[27]选取。其中作业扭矩利用离散元软件命令记录; 种床清洁率旨在衡量清秸防堵装置种床清理效果, 计算式为

$$\eta_s = \left(1 - \frac{X_1}{X}\right) \times 100\% \quad (11)$$

式中 η_s ——仿真测得的种床清洁率, %

X ——作业前种床秸秆数量

X_1 ——作业后种床秸秆数量

抛土率 δ 为被抛离种床的土壤颗粒与作业前种床土壤颗粒数量的比值, 其影响播种机回土与覆土性能, 从而影响播种深度。计算式为

$$\delta = \left(1 - \frac{Y_1}{Y}\right) \times 100\% \quad (12)$$

式中 δ ——抛土率, %

Y ——作业前种床土壤颗粒数量

Y_1 ——作业后种床土壤颗粒数量

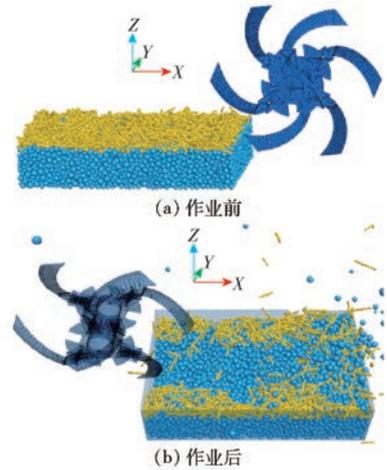


图 5 作业前后秸秆侧抛种床清理效果图

Fig. 5 Seedbed straw cleaning before and after operation

Box - Behnken 旋转回归试验结果如表 2 所示, A 、 B 、 C 为因素编码值, 分别为弯折线夹角、回转半径和弯折角。通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行回归分析和方差分析, 从而得出作业扭矩 y_1 、种床清洁率 y_2 、抛土率 y_3 的回归方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = 46.45 + 5.45A + 14.41B - 1.85C + \\ \quad 10.81B^2 + 8.36C^2 \\ y_2 = 79.62 + 1.36A + 6.22B + 0.88C \\ y_3 = 16.06 + 0.36A + 1.83B - 0.48C + 2.97B^2 \end{cases} \quad (13)$$

为分析各因素对评价指标的影响, 通过 Design-Expert 8.0.6 软件绘制响应曲面(图 6)。如图 6a 所示, 固定弯折角, 当弯折线夹角一定时, 随着回转半径的增加, 作业扭矩逐渐增加; 当回转半径一定时, 随着弯折线夹角的增大, 作业扭矩逐渐增加。固定回转半径, 作业扭矩随弯折角的增大先减小后增大。其中回转半径影响更大。如图 6b, 固定弯折角, 当弯折线夹角一定时, 种床清洁率随回转半径增大而增大, 当回转半径一定时, 种床清洁率随弯折线夹角

表2 Box - Behnken 旋转回归试验结果

Tab.2 Simulation results of Box - Behnken central composite rotatable design

试验 序号	试验因素			试验指标		
	A	B	C	作业扭矩	种床清	抛土率
				$y_1 /$ (N·m)	洁率 $y_2 / %$	$y_3 /$ %
1	0	0	0	45.3	76.5	17.5
2	0	0	0	44.6	78.7	16.5
3	-1	1	0	65.5	84.1	18.4
4	1	0	-1	59.3	77.6	15.5
5	-1	-1	0	38.2	76.7	15.3
6	-1	0	1	46.6	79.0	16.8
7	0	0	0	43.9	83.1	17.3
8	0	0	0	43.0	77.1	14.7
9	1	1	0	71.8	89.5	21.1
10	1	0	1	69.1	82.0	14.5
11	0	1	1	68.2	85.1	17.6
12	1	-1	0	44.1	76.6	16.3
13	0	-1	-1	60.0	76.1	18.4
14	-1	0	-1	50.4	75.0	14.2
15	0	-1	1	41.8	72.6	16.0
16	0	0	0	49.4	80.9	17.7
17	0	1	-1	70.8	83.0	20.6

的增大而增大,但不存在交互作用。固定回转半径,当弯折角一定时,种床清洁率随弯折线夹角的增大而增大。固定弯折角,当弯折线夹角一定时,种床清洁率随回转半径增大而增大,当回转半径一定时,种床清洁率随弯折线夹角的增大而增大,但不存在交互作用。如图6c所示,固定弯折角,当回转半径一定时,抛土率随弯折线夹角的增大而增大;固定弯折线夹角,抛土率随弯折角增大而增大,但变化趋势不明显。

增大防堵装置回转半径,侧倾刀与秸秆接触机会增加,增大了防堵装置对秸秆的侧抛作用,从而使种床清洁率增加;同时,入土深度增加,侧倾刀与土壤接触增多,因此抛土率上升,且作业扭矩也增大。增大弯折角,作业扭矩先减小后增大,可能是由于开始时,由于弯折角增加,侧倾刀对土壤拉、切作用增大,因此阻力下降,但随着弯折角进一步增大,侧倾刀推土现象增加,因此作业扭矩增大。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件优化模块,对种床清理防堵装置回归模型进行有约束的目标优化求解,以获取工作性能较优的作业参数组合,即实现较低的作业扭矩、抛土率,且确保较高的种床清洁率,需满足目标

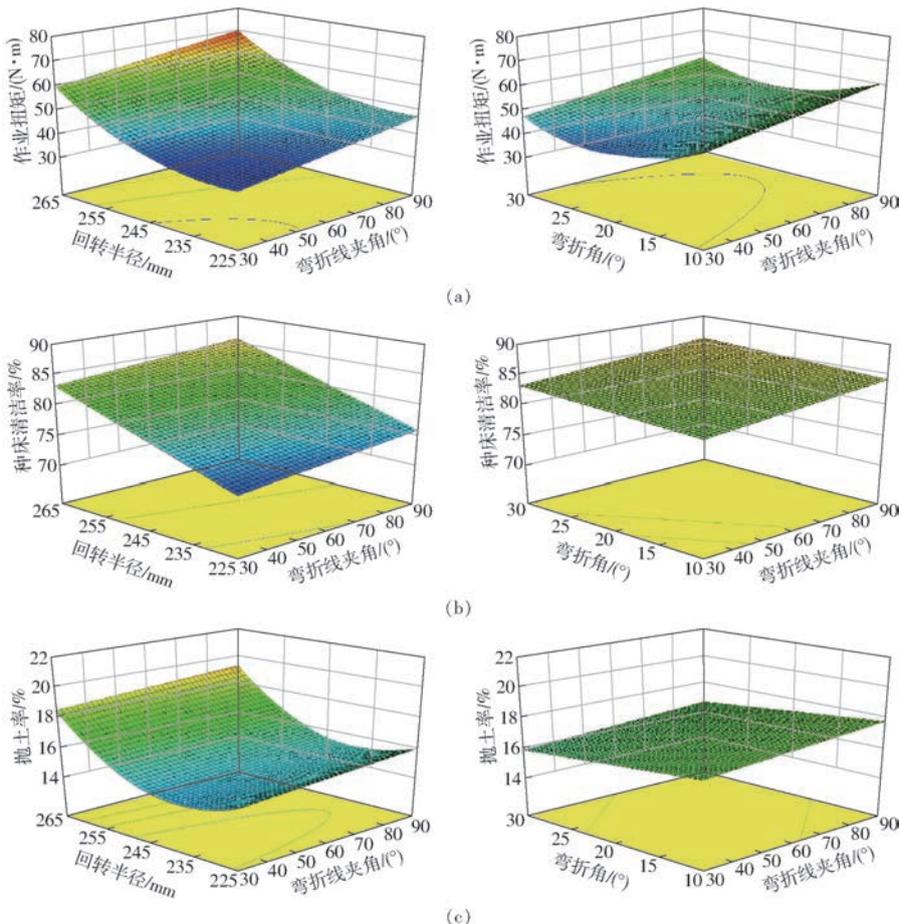
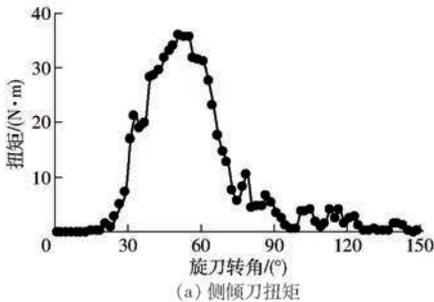


图6 各因素对作业性能影响的响应曲面

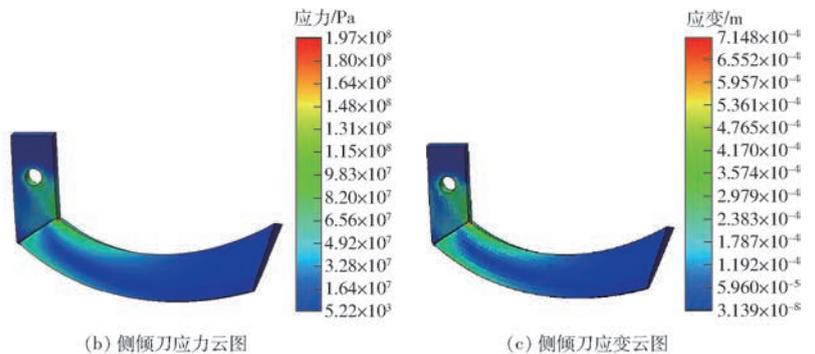
Fig.6 Responding surfaces of experimental factors on working performance

$$F = \begin{cases} \min y_1(A, B, C) \\ \max y_2(A, B, C) \\ \min y_3(A, B, C) \end{cases} \quad (14)$$

同时,在优化模块的条件中设置 3 个评价指标的重要程度,其中种床清洁率设定为“++++”,作业扭矩设定为“++++”,抛土率设定为“+++”。得到优化结果为:当侧倾刀弯折线夹角为 30° ,回转半径为 250 mm,弯折角为 25° 时,防堵装置综合作业性能较优。此时作业扭矩为 $46.0 \text{ N}\cdot\text{m}$,抛土率为 16.0%,种床清洁率为 80.0%。侧倾刀回转直径为 500 mm,种床清理宽度 $l_{DD'}$ 为 120 mm,则可计算出清秸防堵装置 $l_{DC} = 50 \text{ mm}$ 。将上述优化所得的最优参数组合进行仿真模拟验证,得种床清洁率为



(a) 侧倾刀扭矩



(b) 侧倾刀应力云图

(c) 侧倾刀应变云图

图 7 侧倾刀有限元静力学分析

Fig. 7 Finite element method force-analysis on tilt blade

侧倾刀采用 65Mn 钢加工,并进行热处理,硬度为 HRC52;对其进行网格划分,共划分 9 811 个单元,得到 16 923 个节点;由于侧倾刀固定在刀座上,故对其端部添加固定约束,并加载扭矩 $35.6 \text{ N}\cdot\text{m}$,方向垂直于侧倾刀的侧切面、侧切刃上表面。由此可得侧倾刀有限元应力及位移云图,如图 7b、7c 所示。由分析结果可知,侧倾刀最大应力位于与刀身拐角处,为 197 MPa,而 65Mn 钢屈服强度 σ_s 为 785 MPa,安全系数取 2.0~2.5,可知侧倾刀强度满足作业要求。最大应变同样出现在弯折处,为 0.714 8 mm,满足设计要求。

2.2 开沟器

清秸防堵装置工作时与开沟器配合作业,采用窄翼尖角型开沟器(图 8),其土壤扰动小,破土能力强。根据农艺要求,华北一年两熟区小麦播种时基肥施肥深度在 80 mm 左右,因此将开沟器入土深度 h 设计为 80 mm。如果防堵装置与开沟器入土深度一致,则会留下三角形“盲区”,侧倾刀回转面积无法覆盖此部分区域,因此无法将此“盲区”内的秸秆抛走,可能造成秸秆堵塞,因此防堵装置入土深度应略大于开沟器入土深度,设计为 100 mm。

回转中心到开沟器底部竖直距离 $H = 230 \text{ mm}$ 。

80.5%,作业扭矩为 $47.2 \text{ N}\cdot\text{m}$,抛土率为 15.8%,与优化结果基本一致。

2.1.5 侧倾刀有限元静力学分析

为检验所设计侧倾刀是否满足强度要求,运用 SolidWorks 2016 软件中 Simulation 模块进行有限元静力学分析。通过 PFC^{3D}5.0 软件测定防堵装置在较优参数组合下单把侧倾刀扭矩的变化(图 7)。由图 7a 可知,侧倾刀与土壤、秸秆作用时,随着侧倾刀滑切土壤,扭矩逐渐增大,并在 56° 时达到峰值,最大值为 $35.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。之后,随着侧倾刀继续转动,所受扭矩逐渐下降,脱离土壤后变为零。因此,可确定侧倾刀在作业过程中所受最大扭矩为 $35.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

为增强防堵性能,在开沟器前方焊接一弧形板作为定刀,刀轴回转中心与开沟器前端间距为 $L = 230 \text{ mm}$ 。此时,侧倾刀回转面与定刀重叠间距为 $a = 15 \text{ mm}$,侧倾刀回转圆周与此定刀部分重合,可形成动定刀切割,二次切断秸秆,从而提高了防堵性能,减少秸秆堵塞。

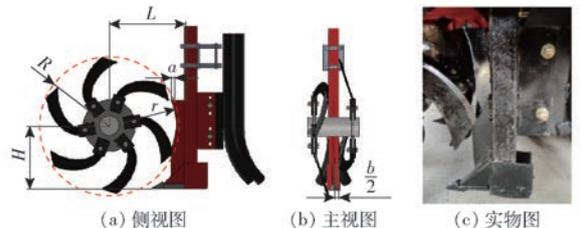


图 8 防堵装置与开沟器动定刀切割配合示意图

Fig. 8 Structure of anti-blocking device and opener

2.3 V 型土壤导流板

作业过程中,由于侧倾刀斜置,不仅会将秸秆抛向种床两侧,也可能将部分土壤抛离种床,减少种沟内回土量,造成覆土困难,影响播深稳定性。为此,设计了一种 V 型土壤导流板(图 9),该板安装于开沟器后上方,机架底部,当防堵装置作业时,侧倾刀抛起的秸秆由于密度小、体积大,空气阻力大,大部分会提前落下^[29-30],而土壤颗粒抛掷距离较远,接

触到该导流板时,导流板可对抛起的土壤颗粒产生回弹作用,使部分土壤反弹回到苗带,从而增加种床回土量,保证种子均匀覆土。



图9 V型土壤导流板结构图与实物图

Fig. 9 Structure of V-type soil guidance board

由于弯折角 α 设计为 25° ,土壤理论侧向抛射角度应小于等于 25° ,为使土壤颗粒撞击到导流板后被反弹回种床,将V型土壤导流板夹角 σ 设计为 130° 。为验证所设计V型土壤导流板土壤导流效果,将防堵开沟装置与所设计挡板导入离散元土壤-秸秆模型,与普通挡板进行对比模拟,两种挡板与防堵装置和开沟器组成的单体如图10所示。

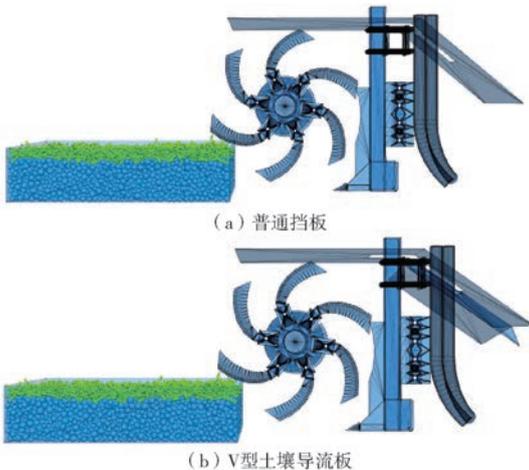


图10 普通挡板和V型土壤导流板仿真对比

Fig. 10 Comparison of traditional and V-type soil guidance board

仿真结果表明:普通挡板种床清洁率为 80.5% ,抛土率为 16.0% ,而设计的V型土壤导流板种床清洁率为 80.3% ,抛土率为 11.3% ,抛土率降低了 4.7 个百分点,而种床清洁率仅降低 0.2 个百分点,无显著性差异。表明所设计的V型土壤导流板可减少抛土,有利于种床回土与种子覆土。

2.4 防缠板

清秸防堵装置刀轴易缠绕杂草,降低防堵装置作业性能。根据郑侃^[31]研究结果,缠草过程受摩擦因数、刀轴半径、秸秆长度等影响,刀轴半径越大,越不易产生缠草现象。因此设计一种防缠板,安装在轴向两个刀盘之间,可以增加刀轴半径,减少刀轴缠草(图11)。

该防缠板安装在轴向相邻刀盘之间,通过螺栓

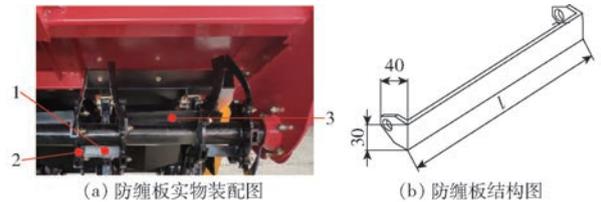


图11 防缠板结构图与装配图

Fig. 11 Anti-twining board structure

1. 短防缠板 2. 刀盘 3. 长防缠板

与刀盘固接。长防缠板固定在两组相邻防堵装置刀盘之间,其长度为 240 mm ;短防缠板固定在同组防堵装置相邻刀盘上,长度为 150 mm 。两种防缠板宽度均为 30 mm ,因此可以将刀轴半径提高 30 mm ,减轻秸秆、杂草缠绕现象。

3 田间试验

3.1 试验地点和条件

田间试验于2018年10月在河南省洛阳市鑫乐机械设备有限公司试验地进行(图12)。试验地土壤质地为壤土, $0\sim 10\text{ cm}$ 深度土壤含水率为 12.3% ,试验地前茬作物为玉米,玉米收获时,秸秆经过联合收获机粉碎、秸秆粉碎还田机粉碎后均匀覆盖于田间地表,秸秆粉碎长度合格率为 86% (长度小于等于 10 cm),平均长度为 9.6 cm ,含水率为 16.3% ,秸秆覆盖量为 1.6 kg/m^2 。为测定所设计行间侧抛清秸装置作业性能,将其安装在自行设计的小麦免耕播种机上进行试验,该播种机幅宽为 2380 mm ,一次作业可播种6行小麦。为验证所设计的侧倾刀作业性能,将其和传统旋耕刀、平面旋切刀分别安装在清秸防堵装置上进行对比试验(图13),传统旋耕刀通常应用在条带旋耕或旋耕播种机上,在华北一年两熟区应用广泛;平面旋切刀去掉了传统旋耕刀的正切刃部分,将其应用在条带型防堵装置上,可降低土壤扰动和作业阻力^[12]。



(a) 播种机作业

(b) 作业后地表

图12 田间试验

Fig. 12 Field experiment

3.2 试验方法与指标

试验按照GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》规定的方法,进行作业质量测试。检测设备包括扭矩转速测试仪、电子秤、小刀、卷尺和铁锹等。试验指标如下:



图 13 分别搭载 3 种旋刀的防堵装置

Fig. 13 Anti-blocking device with three kinds of blades

(1) 通过性

GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》合格标准为“在刚收获的玉米地,植被覆盖量为 0.3 ~ 0.6 kg/m²(秸秆含水率不大于 25%)的条件下,能按使用说明书规定的速度作业,不允许发生重度堵塞”,根据堵塞程度可分为轻度堵塞、中度堵塞和重度堵塞,测试区长度为 60 m。

(2) 作业扭矩

扭矩测试传感仪安装方式及数据采集界面如图 14 所示。进行田间试验测定前,首先将扭矩测试传感仪母端与拖拉机后输出轴连接,然后另外一端连接万向节,万向节挂接播种机。安装时应在机具三点悬挂处提前安装延长板,避免三点悬挂无法与机具正常连接。试验时,首先测定机具空转时扭矩,然后测定 3 种装置正常作业时扭矩,装置实际作业扭矩为两者差值,重复 3 次并取平均值。

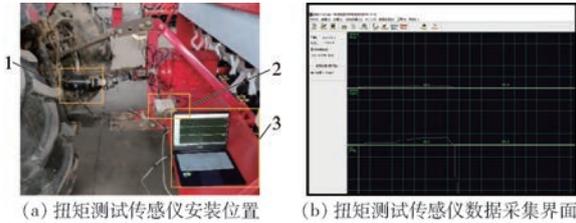


图 14 作业扭矩测定

Fig. 14 Determining of torque requirement

1. 扭矩测试传感仪 2. 蓄电池 3. 便携式计算机

(3) 种床清洁率

播种作业前,对地表每平方米秸秆量 w_1 称量,测定秸秆覆盖量。作业后,称取种床 20 cm 长度内秸秆量,并换算为每平方米秸秆量 w_2 ,每种处理测定 10 个点求取平均值。种床清洁率 η_i 为

$$\eta_i = \left(1 - \frac{w_1 - w_2}{w_1}\right) \times 100\% \quad (15)$$

(4) 沟型尺寸、土壤扰动量及回土量

待播种机以正常速度作业后,随机取 2 行,每行在 50 m 内随机取 10 个点,人工扒开土层测量沟宽、沟深等沟型尺寸。土壤扰动量 η 表示为

$$\eta = \frac{D}{S} \times 100\% \quad (16)$$

式中 D ——实际开沟宽度,mm

S ——播种行距,mm

在作业稳定区内选取 5 个点,称取种沟 20 cm 长度范围内松土土块总质量 m 为回土量。

(5) 播种质量

播种机作业后,扒开种床测定播种、施肥深度及种肥间距,每个行程随机选取 10 个点进行测定,取平均值并计算其稳定性系数,计算式为

$$U = \left(1 - \frac{K}{\bar{h}}\right) \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{其中 } \bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad (18)$$

$$K = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}{N - 1}} \quad (19)$$

式中 \bar{h} ——平均开沟深度,mm

h_i ——第 i 点开沟深度,mm

N ——测定点数

K ——沟深标准差,mm

U ——沟深稳定性系数,%

(6) 小麦出苗率

于小麦播种两周后对出苗率进行测定,记录小麦出苗数并根据播种量计算出苗率。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 通过性

播种机通过性能测试结果如表 3 所示,观测试验过程发现,搭载 3 种旋刀的清秸防堵装置播种机均未发生中度及以上堵塞,通过性能良好,符合国标要求。其中侧倾刀和传统旋耕刀均未发生任何堵塞,且没有出现刀轴缠草现象,仅有平面旋切刀由于挂住地表未完全粉碎的长秸秆发生了一次轻度堵塞,但随着机具继续前进,所缠秸秆可被平面旋切刀抛出,不影响作业质量。试验表明所设计清秸防堵装置通过性能良好。

3.3.2 种床清洁率和作业扭矩

如表 4 所示,3 种刀片类型中,侧倾刀种床清洁

表3 播种机通过性能测定结果

Tab.3 Anti-blocking performance results

刀片类型	行程1	行程2	行程3
侧倾刀	无堵塞	无堵塞	无堵塞
传统旋耕刀	无堵塞	无堵塞	无堵塞
平面旋切刀	无堵塞	轻度堵塞	无堵塞

表4 播种机作业扭矩和种床清洁率测定结果

Tab.4 Torque requirement and seedbed cleaning index of anti-blocking device

指标	刀片类型		
	侧倾刀	传统旋耕刀	平面旋切刀
作业扭矩/(N·m)	298.2 ^b	378.9 ^b	308.4 ^a
种床清洁率/%	82.7 ^a	60.0 ^b	56.6 ^b

注:表中同行数据不同字母表示差异显著。

率最高,为82.7%,相较于传统旋耕刀和平面旋切刀分别提高22.7、26.1个百分点,可为小麦种子提供较为清洁的种床。田间试验测得的种床清洁率高于离散元仿真的80.5%,分析其原因可能在于仿真中秸秆模型为刚体,分散地放置于地表,而田间秸秆杂乱无章地缠绕在一起呈团状,防堵装置侧抛秸秆时秸秆团被连带一起抛起,故种床清洁率更高。

侧倾刀清秸防堵装置作业扭矩为298.2 N·m,相比传统旋耕刀和平面旋切刀分别减小了21.3%和3.3%。这是因为侧倾刀抛土量相对传统旋耕刀较小,且旋刀与前进方程呈一定夹角,作业时可降低作业扭矩^[25]。离散元仿真所得单组扭矩为47.2 N·m,真实试验单组当量扭矩为49.7 N·m,与真实试验误差为5.3%,表明离散元仿真的真实性和可行性,行间侧抛防堵装置具有良好的减阻效果。

3.3.3 土壤扰动量及播种质量

土壤扰动量及播种质量测试结果如表5所示,其中侧倾刀土壤扰动量最小,为31.25%,显著低于传统旋耕刀和平面旋切刀。这是由于搭载其他两种旋刀的防堵装置开出的沟为矩形,而侧倾刀由于向

表5 土壤扰动量及播种质量测定结果

Tab.5 Results of soil disturbance and seeding quality

测定项目	刀片类型		
	侧倾刀	传统旋耕刀	平面旋切刀
沟宽/cm	12.5 ^b	16.3 ^a	18.3 ^a
土壤扰动量/%	31.25 ^b	40.75 ^a	45.75 ^a
回土量/g	723 ^{ab}	596 ^b	775 ^a
种深/cm	3.60	4.05	4.06
种深稳定性系数/%	93.60	92.90	91.50
肥深/cm	9.10	9.35	8.86
肥深稳定性系数/%	95.50	89.10	89.10
种肥间距/cm	5.5	5.3	4.8
间距稳定性系数/%	93.60	82.30	79.30

注:表中同行数据不同字母表示差异显著。

内侧倾斜,因此开出的沟为梯形,这有助于减小土壤扰动和作业功耗。

3种旋刀中平面旋切刀回土量最大,为775 g,侧倾刀次之,为723 g,传统旋耕刀最小,为596 g,传统旋耕刀回土量显著小于平面旋切刀,侧倾刀与其他相比均无显著差异。而播种质量测定结果表明,侧倾刀型行间侧抛清秸防堵装置少免耕播种平均播种深度为3.6 cm,施肥深度为9.1 cm,种肥间距为5.5 cm,且深度稳定性系数均大于90%,表明侧倾刀防堵装置覆土效果良好,满足国标和当地农艺要求。

3.3.4 小麦出苗率

3种旋刀防堵装置作业后小麦出苗率如图15a(图中不同小写字母表示处理间差异显著)所示,侧倾刀出苗率最高,为89.5%,平面旋切刀次之,为79.7%,传统旋耕刀出苗率最低,为75.2%,侧倾刀相较于平面旋切刀和传统旋耕刀,出苗率分别提高了9.8、14.3个百分点,表明此作业方式有利于小麦出苗。田间出苗情况如图15b所示,侧倾刀出苗较为均匀,而传统旋耕刀出现了缺苗断垄现象,且由于种床秸秆量较高,发现部分麦苗颜色发黄,不利于后期生长^[32]。

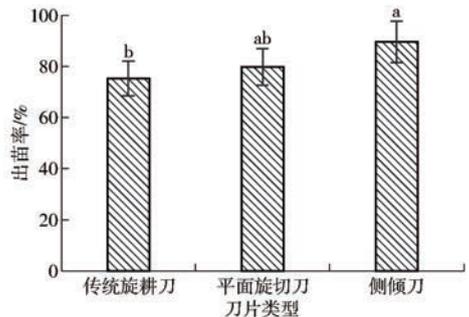


图15 田间试验小麦出苗情况

Fig.15 Wheat emergence of field experiment

4 结论

(1)设计了一种适用于华北一年两熟区玉米秸秆覆盖地少免耕播种小麦的条带型行间侧抛清秸防堵装置,通过理论分析和正交旋转回归仿真试验,确定防堵装置较优参数组合为:侧倾刀弯折线夹角

30°、弯折角 25°、回转半径 250 mm。

(2)配合种床清理防堵装置,分别设计了一沟双行种肥分施开沟器、V型土壤导流板与防缠板。其中,种肥分施开沟器前方装有定刀,可与防堵装置形成动定刀切割,提高了防堵性能;V型土壤导流板夹角为 130°,可将抛起的土壤颗粒反弹回种床,增

加了回土量;防缠板宽度为 30 mm,可使刀轴半径增加 30 mm,减少了刀轴缠草。

(3)玉米秸秆覆盖地小麦播种试验表明,所设计的条带型行间侧抛清秸防堵装置未发生堵塞和缠草现象,种床清洁率为 82.7%,作业扭矩为 298.2 N·m,作业质量稳定,满足少免耕播种国标和农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [2] PITTELKO W, CAMERON M, LINQUIS T, et al. When does no-till yield more? A global meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2015, 183(11): 156-168.
- [3] ARIANE C, JEAN P S. Conservation agriculture as a promising trade-off between conventional and organic agriculture in bundling ecosystem services[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292(4): 1-14.
- [4] 赵宏波,何进,李洪文,等.秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):60-67.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Effect of straw returning manners on seedbed soil physical properties and winter wheat growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s009&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.009. (in Chinese)
- [5] 侯守印,陈海涛,邹霖,等.原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):41-51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41-51, 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190605&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)
- [6] 高焕文,李洪文,姚宗路.我国轻型免耕播种机研究[J].农业机械学报,2008,39(4):78-82.
GAO Huanwen, LI Hongwen, YAO Zonglu. Study on the Chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78-82. (in Chinese)
- [7] 万其号,布库,李岩,等.大型免耕播种机开沟器结构研究[J].农机化研究,2012,34(3):45-48.
WAN Qihao, BU Ku, LI Yan, et al. Structure analysis of the large no-till seeder openers[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3): 45-48. (in Chinese)
- [8] 张晋国.带状粉碎免耕播种机的试验研究[D].北京:中国农业大学,2001.
ZHANG Jinguo. Study on the strip chopping anti-blocking no-till planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [9] 施印炎,罗伟文,胡志超,等.全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):58-67.
SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 58-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190407&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)
- [10] 刘正道.小麦免耕播种关键技术研究及装备研发[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
LIU Zhengdao. Research and development of key technology and equipment for wheat no-tillage drill[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [11] VAITAUSKIENE K, ŠARAUSKIS E, ROMANECKAS K, et al. Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 174(12): 139-146.
- [12] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(4): 329-340.
- [13] CELIK A, ALTIKAT S, WAY R T. Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 131(7): 20-27.
- [14] 王汉羊,陈海涛,纪文义.2BMFJ-3型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL].农业机械学报,2013,44(4):64-70.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ-3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 64-70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130404&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.004. (in Chinese)

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130412&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 04. 012. (in Chinese)
- [15] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆, 等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 15-23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15-23. (in Chinese)
- [16] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 正弦指数曲线型开沟刀片结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 91-99, 17.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Structure parameters optimization of sine exponential curve type ditching blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 91-99, 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161112&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 012. (in Chinese)
- [17] 农业部小麦专家指导组. 全国小麦高产创建技术读本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [18] 赵宏波. 小麦少耕播种机主动式行间侧抛清秸防堵装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
ZHAO Hongbo. Study on driven seedbed-cleaning and anti-blocking device of residue inter-row side-throwing for minimum till wheat seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [19] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118(2): 7-15.
- [20] 王奇, 贾洪雷, 朱龙图, 等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 68-77.
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190208&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 02. 008. (in Chinese)
- [21] LIU Peng, ZHANG Zhiqiang, HE Jin, et al. Kinematic analysis and experiment of corn straw spreading process[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2019, 58(2): 83-92.
- [22] 马洪亮, 高焕文, 李洪文, 等. 驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 47-50, 54.
MA Hongliang, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on corn stalk and rootstalk cutting by driven disc [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 47-50, 54. (in Chinese)
- [23] 刘宏新, 苏航, 李金龙, 等. 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 58-68.
LIU Hongxin, SU Hang, LI Jinlong, et al. Interactive optimal design system of drum-type no-till planter mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 58-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190306&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 03. 006. (in Chinese)
- [24] 卢彩云, 李洪文, 何进, 等. 小麦免耕播种机浮动支撑式防堵装置[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 52-55, 153.
LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Floated support anti-blocking device of wheat no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 52-55, 153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131209&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 12. 009. (in Chinese)
- [25] 孔令德, 桑正中, 王国林. 斜置旋耕试验研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 30-34.
KONG Lingde, SANG Zhengzhong, WANG Guolin. Experimental study on oblique rotary tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 30-34. (in Chinese)
- [26] 耿端阳, 张道林, 王相友, 等. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [27] MILKEVYCH V, LARS J M, CHEN Ying, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 183(11): 60-71.
- [28] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [29] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52-59.
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171107&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 11. 007. (in Chinese)
- [30] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [31] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHENG Kan. Study on subsoiling and rotary tillage operation adjustable combine machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [32] 朱衣成, 李文仓. 小麦苗期发黄的原因及对策[J]. 现代农业科技, 2006(9): 13.