

条带式旋切后抛防堵装置设计与试验

赵宏波¹ 何进¹ 李洪文¹ 刘春鸽² 郑侃¹ 章志强¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

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易堵塞、动力防堵装置功耗大等问题,设计了一种条带式旋切后抛防堵装置。结合防堵装置工作原理,从秸秆流动、抛撒、防堵装置受力角度分析确定影响防堵性能和功耗的关键因素为:防堵装置与开沟器间距、旋切刀滑切角、刀轴转速;通过离散元模拟仿真与正交试验有限元仿真结合,以秸秆拥堵量和作业功耗为性能评价指标,对防堵单体和开沟器的组合装置进行参数优化,仿真结果表明,旋切刀滑切角为 50°、刀轴转速为 320 r/min、间距为 100 mm 时综合作业质量较优,防堵单体及开沟器功耗为 2.8 kW,秸秆拥堵量为 43 根/dm,通过性能良好;对优选方案旋切刀进行有限元校核,其最大应力为 1.387 × 10⁸ Pa,满足强度要求。在玉米秸秆覆盖地进行了小麦播种田间试验,结果表明,条带式旋切后抛防堵装置在 3 种秸秆覆盖量 0.8、1.6、2.4 kg/m² 和 3 种前进速度 1、1.25、1.5 m/s 作业条件下,通过性能均满足免耕施肥播种机国标要求,所设计旋切刀与传统旋耕刀相比,在通过性能基本一致的情况下,功耗减小 13.83%,土壤扰动量减小 37.5 个百分点,沟深稳定性系数提高 8.2 个百分点。

关键词: 小麦; 少免耕播种机; 旋切刀; 后抛; 离散元; 防堵性能

中图分类号: S222.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0065-11

Design and Experiment of Strip Rotary-cut-throw Anti-blocking Implement

ZHAO Hongbo¹ HE Jin¹ LI Hongwen¹ LIU Chungu² ZHENG Kan¹ ZHANG Zhiqiang¹

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the existing problems of no and minimum-till wheat seeding in maize straw covered field in double-cropping system area in North-China Plain, such as residue blockage, high power consumption, a strip rotary-cut-throw anti-blocking implement was developed. Integrated with the principle of anti-blocking implement, the distance L between opener and the anti-blocking implement, sliding-cutting angle τ of the plane-straight blade and rotary speed n were found to be the key parameters which affected anti-blocking performance and power consumption through analysis in terms of residue flow/throwing and mechanical analysis of the implement. Orthogonal experiment was conducted by DEM simulation to optimize the parameters of the implement and analyze the key parameters' effect on residue blockage and power consumption, the result showed that when the distance was 100 mm, cutting edge was 50°, rotate speed was 320 r/min, which were optimum parameters set among the trail points, power consumption of the strip rotary-cut-throw anti-blocking implement and the opener was 2.8 kW, blocked straw number was 43 in one dm and it could not cause blockage, and then strength check was conducted for this optimum blade by using finite element method and the maximum stress was 1.387 × 10⁸ Pa of which was safe. Field experiment of wheat seeding was conducted on a no-till maize straw covered field, the result showed that strip cut-throw plane-straight blade anti-blocking implement could effectively solve the problem of blockage almost as good as traditional rotary blade under straw coverage of 0.8 kg/m², 1.6 kg/m² and 2.4 kg/m² at travel speed of 1 m/s, 1.25 m/s and 1.5 m/s, which satisfied the requirements of national standard of no-till fertilization seeder. Compared with strip-rotary implement, power consumption was reduced by 13.83%, soil disturbance was reduced by 37.5 percent points and

收稿日期: 2017-07-31 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-03)、公益性行业(农业)科研专项(201503136)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 赵宏波(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: zhaohongbo2014@126.com

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

furrow depth stability was improved by 8.2 percent points. The error of DEM simulation to field experiment in furrow width and depth was 14% and 1.3% , which was tolerable, and the simulation could be referenced to the optimization of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement.

Key words: wheat; no and minimum-till seeder; plane-straight blade; rotary-cut-throw; DEM; anti-blocking performance

0 引言

少免耕播种机是指能够在未耕作物秸秆覆盖地上直接进行播种作业的机具,是实施保护性耕作的關鍵机具^[1-2]。在华北平原一年两熟保护性耕作区少免耕播种小麦时,由于前茬玉米秸秆量大,极易缠绕在开沟器等土壤耕作部件上或者相邻部件之间造成堵塞,影响播种质量,增加功耗,降低机具工作性能,因此解决堵塞问题是进行少免耕播种的关键^[3]。

根据动力来源,当前国内外少免耕播种防堵机具主要分为被动式和主动式两类:被动式防堵机具多采用多梁结构、提高地隙等方法增加秸秆流动空间,或利用锋利的圆盘刀转动切断秸秆,其结构简单、能耗小但防堵能力有限^[4];主动式防堵机具主要通过切、抛等方式,将秸秆粉碎或抛到开沟器两侧及后方,避免其缠绕在开沟器上^[5-8],其中条带旋耕防堵装置在华北一年两熟区应用较为广泛,其利用拖拉机动力驱动刀轴转动,带动旋耕刀旋转将秸秆切断并向后抛起,与土壤混埋在一起,从而防止堵塞,该装置通过性良好^[9],播深稳定,耕作后将秸秆和土壤混埋在一起,有利于秸秆腐烂,可以改良土壤肥力,促进作物种子出苗和根系发育^[10-11],但存在土壤扰动量大、能耗高等问题^[12-13]。MATIN等^[14-15]对旋切刀、半宽刀、旋耕刀进行了土槽对比试验,结果表明:旋切刀比旋耕刀抛土少,在一定转速范围内功耗有所减小。但鲜有将旋切刀应用在少免耕播种机防堵装置上的研究。

本文针对上述问题,以保证防堵性能、减小作业功耗为目标,通过离散元仿真模拟,基于旋切刀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式旋切后抛防堵装置,并对其防堵性能进行测定。

1 结构与工作原理

1.1 防堵装置结构

该防堵装置单体由旋切刀、刀轴、刀座等组成。与开沟器、机架、罩壳、传动装置等部件共同组成条带式旋切后抛防堵装置,主要适用于华北一年两熟区玉米秸秆覆盖地的小麦少免耕播种机,以 6 行播

种机为例,有 6 组旋切后抛防堵装置单体,行距 200 mm,幅宽 1 300 mm,如图 1 所示。

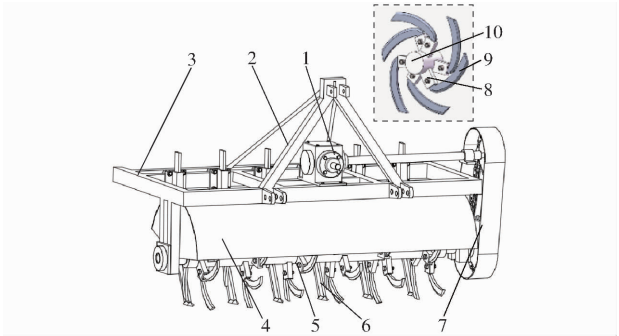


图 1 条带式旋切后抛防堵装置示意图
Fig.1 Structure diagram of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement

1. 变速箱 2. 三点悬挂装置 3. 机架 4. 罩壳 5. 旋切后抛防堵单体 6. 尖角式开沟器 7. 传动装置 8. 刀座 9. 旋切刀 10. 刀轴

1.2 工作原理

旋切后抛防堵装置通过刀轴固定在机架上,每个开沟器对应一组条带式旋切后抛防堵单体。作业时,拖拉机动力通过变速箱经传动装置传递给刀轴,刀轴以一定转速带动旋切后抛防堵装置转动,旋切刀回转圆周覆盖开沟器绝大部分,且与开沟器轴向间距仅为 10 mm,可将开沟器两侧玉米秸秆压在地表形成有支撑切割并将其切断,秸秆被切断的同时受到旋切刀摩擦力被向后抛起,然后在惯性作用下越过开沟器,减少了秸秆在开沟器上或开沟器之间的积聚,从而达到防堵目的,与此同时旋切刀旋松种床,开出 50 mm 宽、80 mm 深的沟槽用以施肥播种,随后尖角式开沟器二次开沟施肥。

2 关键部件设计

2.1 开沟器设计

开沟器是播种机中最易发生缠草、堵塞的部件之一,防堵装置与开沟器的交互作用影响整机工作的作业功耗、防堵性能。前期试验发现,在华北一年两熟区玉米秸秆覆盖地进行少免耕播种作业时,秸秆杂草极易缠绕在播种机入土部件上或者两部件之间,随着播种机前进逐渐积聚,直至造成堵塞,开沟器和防堵装置相对位置影响防堵装置秸秆后抛效果及秸秆通过空间,因此有必要对开沟器及其与防堵

装置的相对位置进行设计。

尖角式开沟器主要用于少免耕播种机,其结构简单,入土阻力小、土壤扰动小,且和带状旋耕防堵装置组合使用时有很强的排堵能力^[16],因此本文选用该型开沟器铲尖,焊接在开沟器铲柄底部,作为施肥开沟器(图 2)。开沟器入土角 α 影响开沟器与防堵装置的相对位置,从而影响抛秸秆效果。如图 2a 所示,入土角过小时,开沟器和防堵装置会形成三角形“盲区”,秸秆极易聚集在这一区域,无法被旋切刀抛出,从而形成堵塞;当开沟器入土角过大时(图 2b),防堵装置回转区域无法覆盖开沟器下部,易缠绕秸秆,且开沟器入土阻力较大,因此设计入土角为 60° (图 2c),此时防堵装置回转区域可覆盖开沟器绝大部分面积,易抛出开沟器两侧秸秆,从而减轻堵塞。开沟器入土隙角会影响开沟阻力,根据姚

宗路等^[17]的研究,取入土隙角 $\beta = 5^\circ$,此时开沟器前进阻力相对较低。

为避免秸秆在开沟器上积聚造成堵塞,在开沟器两侧各安排一把旋切刀。旋切刀与铲柄侧面间距为 10 mm,可保证开沟器与旋切刀不发生干涉,随着刀轴转动旋切刀旋转,可以将开沟器上秸秆打落并抛撒出去,从而使开沟器始终短暂接触秸秆,无法完成积聚。两把旋切刀外侧面间距为 50 mm,可开出 50 mm 宽的种沟,有利于施肥播种开沟器通过,并创造疏松的种床。 L 为开沟器铲尖与防堵装置中心前后间距,距离太近,向后抛起的土壤秸秆会对开沟器造成一定的冲击,增加前进阻力从而导致功耗增加,距离太远时旋切刀回转圆周对开沟器覆盖面积减小,无法抛出未覆盖部分开沟器所挂秸秆,从而降低防堵装置抛撒效果,因此设计间距 L 取值范围为 0 ~ 100 mm。

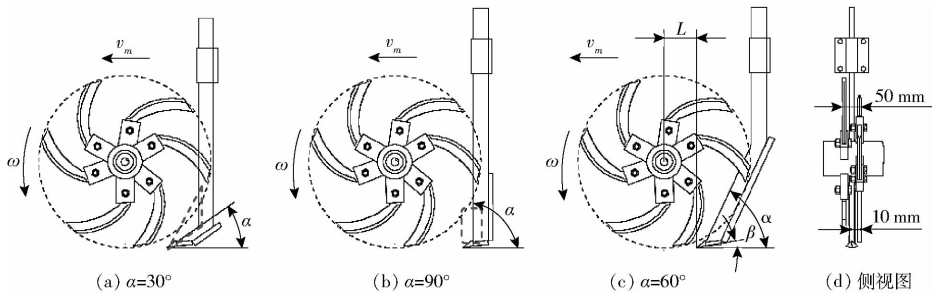


图 2 开沟器与防堵装置相对位置示意图

Fig. 2 Relative distance diagrams between opener and anti-blocking implement

2.2 旋切刀结构设计

传统旋耕刀一般由侧切刀、正切刀组成,本文为减少土壤扰动和作业功耗,设计了一种只有侧切刀的旋切刀。侧切刀曲线由刃线类型、滑切角和回转半径确定,起到切抛土壤和秸秆开沟防堵的作用。目前常用刀刃曲线有阿基米德螺线、对数螺线和正弦指数曲线^[18],GUPTA 等^[19]对这 3 种刃线的旋耕刀试验表明阿基米德螺线型刀综合性能最好,且制造简单,所以选阿基米德螺线为侧切刀曲线,其滑切角逐渐增大,刃线方程为

$$r = r_0 + K\theta \tag{1}$$

式中 r ——任意点的旋转半径,mm

r_0 ——刃线起始半径,mm

K ——比例系数,螺线极角增加 1° 时,极径的增量,mm/($^\circ$)

θ ——螺旋线上任意点的极角,($^\circ$)

2.2.1 侧切刀曲线设计

防堵装置工作时,旋切刀在刀轴驱动下顺时针旋转,可将秸秆压在地表后对秸秆形成支撑切割,切断秸秆,有利于开沟器顺利通过减轻堵塞。如图 3,对秸秆进行受力分析,将秸秆视为质点 m ,其受到旋切刀沿刃线切线 $A - A'$ 方向摩擦力 F_f 和刀片刃口法

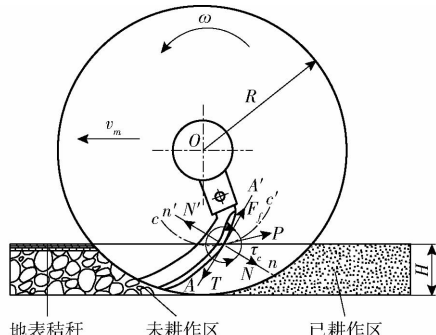


图 3 秸秆受力分析

Fig. 3 Mechanical analysis of maize straw

向反力 N ,将 N 沿刃口切线方向和运动轨迹切线方向分解为 T 和 P ,则刀刃滑切作用取决于力 T 的大小,当 $T > F_f$ 时,旋切刀对秸秆产生滑切^[20]。其中 $N = N'$, N' 为土壤的法向反力。秸秆受力方程为

$$\begin{cases} T = N \tan \tau_c \\ F_f = \mu N \\ \mu = \tan \varphi \end{cases} \tag{2}$$

式中 T ——切向力,N

N ——刃口法向反力,N

F_f ——刃口切线方向摩擦力,N

τ_c ——作用点动态滑切角,($^\circ$)

φ ——钢板与玉米秸秆之间摩擦角, ($^{\circ}$)
 μ ——钢板与玉米秸秆之间摩擦因数
若 $T > F_f$, 则 $\tau_c > \varphi$, 即接触点动态滑切角大于秸秆和刀片的摩擦角时, 旋切刀对秸秆产生滑切作用。文献[21-22]中测得玉米秸秆和钢板的摩擦角为 $23^{\circ} \sim 33^{\circ}$, 因此动态滑切角 $\tau_c > 33^{\circ}$; 为避免缠草减轻堵塞^[18], 又有 $\tau_c < 90^{\circ} - \varphi$, 所以 $\tau_c < 57^{\circ}$, 则动态滑切角满足 $33^{\circ} < \tau_c < 57^{\circ}$ 。假设秸秆均匀铺放在地表, 可知刃线上每一点都在地表位置时 ($H' = 0$) 与秸秆作用, 此时刃线上每一点的动态滑切角 τ_c 都有 $33^{\circ} < \tau_c < 57^{\circ}$ 。动态滑切角 τ_c 为静态滑切角 τ 和由于机具前进造成的 $\Delta\tau$ 之差, $\Delta\tau$ 计算公式为^[23]

$$\Delta\tau = \arctan \frac{\sqrt{r^2 - (R - H')^2}}{\frac{\lambda}{R} r^2 - (R - H')} \quad (3)$$

式中 λ ——旋耕速比
 R ——防堵装置回转半径, mm
刀刃回转半径 R 为驱动轴半径 (45 mm)、刀轴与地面的距离 (100 mm)、旋切刀入土深度 (80 mm) 之和, 即 $R = 225$ mm, r_0 按照 GB/T 5669—2008《旋耕机械刀和刀座》中 IT225 型旋耕刀标准, 取 $r_0 = 125$ mm。将旋切刀刃线上各点 r 代入式 (3), 求得刃线上各点在 $H' = 0$ 处 $\Delta\tau$ 为 $0^{\circ} \sim 8^{\circ}$, 所以静态滑切角在 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 之间。滑切角大时对土壤、秸秆滑切作用更明显, 有利于切断秸秆, 但如果太大, 刀刃长度也随之变长, 有增加耕耘阻力的趋势^[24-25]。因此设计端点静态滑切角为 40° 、 50° 、 60° 进行试验分析。当端点静态滑切角为 40° 、 50° 、 60° 时, 可求得极角 θ 分别为 21.37° 、 30.33° 、 44.08° , K 值分别为 4.7、3.3、2.3 mm/($^{\circ}$)。将 K 值和极角 θ 代入阿基米德螺线方程, 得到 3 组阿基米德侧切刃曲线。

2.2.2 入土隙角 δ

连接回转中心 O 和刀刃端点, 过端点做一条垂线, 入土隙角为旋切刀端面 (图 4 中红色实线) 和这条垂线夹角 δ 。若 δ 过小, 会造成无刃部分切土, 增加入土阻力, 降低沟底平整度^[26]。参考文献[27-28] δ 选取 0° 、 10° 、 20° 进行分析, 取前进速度为 1 m/s, 刀轴转速为 320 r/min。通过 CAXA2013 绘制出旋切刀运动轨迹 (图 4), 可知当 δ 为 0° 或 10° 时, 无刃部分轨迹线靠左, 将先于有刃部分切土, 20° 时无刃部分轨迹线靠后, 可以避免这个情况的发生, 减小入土阻力, 从而降低防堵装置功耗, 因此选择入土隙角为 20° 。

2.3 刀轴转速

防堵装置和开沟器工作时在拖拉机牵引力作用下前进, 与地表发生相对运动。将防堵装置作为参

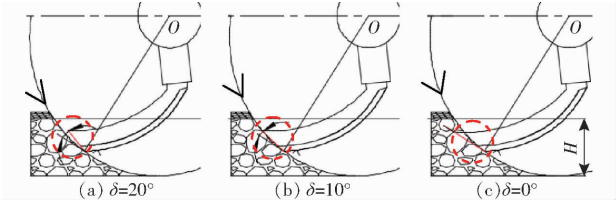


图 4 入土隙角分析

Fig. 4 Analysis of clearance angel

照物, 工作过程可以看作地表秸秆持续流入防堵装置和开沟器之间, 又不断被排出的过程。机具幅宽一定, 单位时间秸秆喂入量 m_1 和机具前进速度、地表秸秆覆盖量有关。秸秆排出有两种方式: 一是秸秆自然流动排出, 随机具前进, 开沟器对周围地表秸秆产生向前的作用力, 两侧秸秆又对附近秸秆产生摩擦力, 秸秆量不大时, 此摩擦力小于秸秆和土壤表面的静摩擦力, 因此秸秆静止在原地, 随着机具前进可以自然流过; 二是在防堵装置后抛作用下被排出, 随着机具前进防堵装置逆时针旋转, 将秸秆切断的同时对秸秆产生向斜后方的摩擦力, 此摩擦力明显大于秸秆之间的摩擦力以及秸秆自身重力, 因此秸秆被抛起, 并在惯性作用下越过开沟器从而达到防堵目的。自然流动排出秸秆量 m_0 、秸秆喂入量 m_1 、防堵装置排出量 m_2 计算公式为

$$\begin{cases} m_0 = hD'L'\eta \\ m_1 = D'v_mC \\ m_2 = 6n\pi RS'C \end{cases} \quad (4)$$

式中 n ——刀轴转速, r/min
 S' ——防堵装置有效工作宽度, mm
 C ——单位面积秸秆覆盖量, kg/m²
 v_m ——机具前进速度, m/s
 L' ——播种行间宽度, mm
 D' ——机具幅宽, mm
 h ——机架距地面高度, mm
 η ——单位空间可自然流过的秸秆量, 取 10 kg/m³

由于华北一年两熟区小麦播种前地表玉米秸秆覆盖量远大于免耕施肥播种机国标规定的 0.3 ~ 0.6 kg/m², 为避免喂入过量秸秆造成堵塞, 又保证作业效率, 参考文献[29-31], 设计前进速度为 1 m/s, 当转速大于 200 r/min 时, 旋耕速比大于 4.99, 运动轨迹即为余摆线, 可保证作业时旋切刀有向后的速度, 从而可将秸秆抛向后方, 切土节距小于 94 mm, 具有良好碎土效果, 不漏切地表秸秆根茬, 从而保证通过性能。防堵装置幅宽 D' 为 1 300 mm, 单位面积秸秆覆盖量取试验地平均值 1.6 kg/m²。机架距地面高度为 380 mm, 空间宽度 L' 取 200 mm, 根据经验单位空间可自然流过的秸秆量取 10 kg/m³,

防堵装置有效工作宽度为旋切刀间距 50 mm。综合分析,不产生堵塞的条件为,秸秆排出量大于秸秆喂入量: $m_0 + m_2 \geq m_1$,代入数据可得 $m_1 = 2.08\text{ kg}$, $m_0 = 0.99\text{ kg}$,转速 $n \geq 193\text{ r/min}$,由式(4)可知,转速越高,防堵装置秸秆排出能力越强,田间作业状况复杂,转速应适当提高,但是随着转速增加,功耗有可能增加^[32],因此设计刀轴转速范围为 220 ~ 420 r/min。

3 仿真分析

为提高防堵开沟装置在华北一年两熟区玉米秸秆覆盖地作业时的防堵性能、减少作业功耗,采用离散元分析软件 PFC^{3D} 5.0 (Particle flow code in three dimensions)建立仿真土壤模型,结合正交试验进行模拟仿真,对上文分析确定的防堵装置和开沟器间距 L 、旋切刀滑切角 τ 、刀轴转速 n 3 个试验因素进行参数优化,并分析其对功耗、通过性能的影响,从而优化防堵装置作业性能。

3.1 土壤秸秆模型建立

为真实反映田间土壤,采用离散元法建立土壤模型,并在地表均匀覆盖玉米秸秆。土壤由球形颗粒表示,半径大小为 0.5 ~ 1.0 cm,玉米秸秆由球体颗粒组成的圆柱体表示,半径 0.5 cm,长度和所占比例分别为 2 cm(10%)、4 cm(20%)、6 cm(20%)、8 cm(20%)、10 cm(20%)、12 cm(10%),用以模拟播种前地表覆盖的不同长度玉米秸秆。通过确定仿真接触模型及参数,在不影响装置仿真结果条件下,为减少软件运行时间,建立适用于条带式旋切后抛防堵装置的离散元虚拟土槽(700 mm(长)×420 mm(宽)×150 mm(高)),土壤密度为 2 650 kg/m³,秸秆密度为 243 kg/m³,秸秆覆盖量为 1.6 kg/m²。为模拟秸秆在开沟器上以及两组开沟器之间的堵塞、流动过程,应用 Solidworks 软件创建两组条带式旋切后抛防堵装置及开沟器几何仿真模型,并将几何仿真模型导入 PFC^{3D} 5.0 中,虚拟土槽和几何仿真模型如图 5 所示。旋切后抛防堵装置刀尖距土槽底面 50 mm,刀外侧面距土槽侧壁为 75 mm,可避免距离太近影响仿真结果。通过干筛法测量试验区土壤质地为壤土(粘粒 2.78%),选用 parallel-bond 接触模型作为土壤与土壤、土壤与秸秆、秸秆与秸秆间的接触模型,该模型可以模拟土壤之间黏结力,传递力和扭矩。确定 linear 接触模型为土壤与旋切后抛防堵开沟装置、秸秆与旋切后抛防堵开沟装置间的接触模型;土壤秸秆模型主要包含 11 个参数,相关仿真参数的选取参考文献[33-35],结果如表 1 所示。

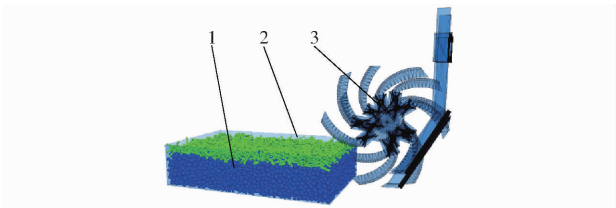


图 5 虚拟土槽和几何模型
Fig. 5 Simulation soil bin and geometric model
1. 土壤 2. 秸秆 3. 旋切后抛防堵装置及开沟器

表 1 轻壤土模型参数

Tab. 1 Key parameters of sandy loam soil model

参数	数值
球体法向刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^3
球体切向刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^3
摩擦因数 μ	0.5
法向临界阻尼系数 β_n	0.5
切向临界阻尼系数 β_s	1
黏结刚度 $\bar{c}/\text{Pa}$	2×10^4
黏结强度 $\bar{\sigma}_c/\text{Pa}$	2×10^4
土壤联结法向刚度 $\bar{k}_{n1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^7
土壤联结切向刚度 $\bar{k}_{s1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^7
玉米秸秆联结法向刚度 $\bar{k}_{n2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^7
玉米秸秆联结切向刚度 $\bar{k}_{s2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^7
联结半径系数	0.5

3.2 仿真试验方法

在保证旋切后抛防堵装置及开沟器作业过程中土壤颗粒运动连续的前提下,总仿真时间为 0.65 s。同时设置旋切后抛防堵装置及开沟器前进速度为 1 m/s,方向沿 x 轴负方向,入土深度为 80 mm。以上文设计的间距 L (0、50、100 mm)、滑切角 τ (40°、50°、60°)、转速 n (227、320、411 r/min)(根据田间试验中测试车可输出转速挡位确定)为影响因子,采用三因素三水平的正交试验方法,以旋切后抛防堵装置和开沟器功耗、秸秆拥堵量为指标,选用 $L_{18}(3^7)$ 正交表进行仿真试验,考察各因子及其交互作用对指标的影响,试验因素水平如表 2 所示。每组试验重复 3 次,每次重复改变模型中的随机因子,以生成 3 个土槽模型,模拟不同田间状况^[36]。

表 2 因素水平

Tab. 2 Factors and levels

水平	因素		
	间距 L/mm	滑切角 $\tau/(\text{°})$	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	0	40	227
2	50	50	320
3	100	60	411

3.2.1 秸秆拥堵量测定

通过测定开沟器后端部向前到防堵装置回转中心测定区域内的秸秆数量(图 6 红色区域),然后比

上测定区域长度,求得单位长度内的秸秆数量,测定区域(图6)宽为两个开沟器铲柄外侧面间距,高为防堵装置回转中心水平面到开沟器底部的距离,长为3种间距对应下从开沟器铲柄后端部向前到防堵装置回转中心竖直平面间距,稳定阶段测定3次取平均值。

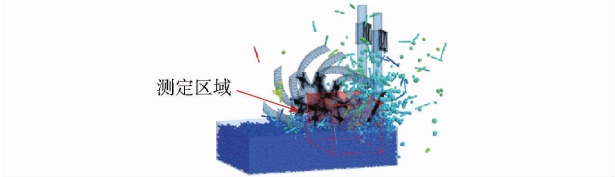


图6 秸秆拥堵量测定

Fig.6 Determining of blocked straw number

3.2.2 功耗测定

根据理论力学原理可知,在旋切后抛防堵装置和开沟器工作过程中,总功耗为旋切后抛防堵装置转动扭矩所产生的功耗以及整个装置所受前进阻力产生的功耗之和,其计算公式为

$$P = \frac{nM}{9\,550} + Fv_m \tag{5}$$

式中 P ——作业功耗,kW
 M ——刀轴扭矩,N·m
 F ——防堵开沟装置前进阻力,N

3.3 仿真结果及分析

条带式旋切后抛防堵装置正交试验结果见表3(A 、 B 、 C 为因素水平值),应用SPSS 20.0软件进行数据处理和统计分析,方差分析结果见表4和表5。表3中极差分析表明:各因素对秸秆拥堵量的影响由大到小依次为:转速、间距、滑切角,其中转速和间距影响显著,滑切角与转速的交互作用影响显著,较优参数组合方案为 $A_3B_2C_3$;各因素对功耗的影响由大到小依次为:转速、滑切角、间距,其中转速和滑切角影响显著,间距和转速的交互作用以及滑切角和转速的交互作用影响显著,较优组合方案为 $A_2B_1C_1$ 。

间距 L 对秸秆拥堵量影响显著,间距 L 过小时,旋切后抛防堵装置和开沟器之间的空间较为狭小,不利于秸秆顺利排出,造成单位长度秸秆拥堵量大,间距 L 对功耗影响不显著,且防堵性能为优先考虑指标,因此选择 L_3 为间距 L 较优水平。滑切角 τ 对功耗影响显著,功耗随滑切角的增大而增大,在 $\tau = 40^\circ$ 时最小,但秸秆拥堵量在 $\tau = 50^\circ$ 时最小,由于防堵性能为优先考虑指标,综合选择 $\tau = 50^\circ$ 为较优水平。转速对两个指标均影响显著,秸秆拥堵量随转速增大而减小,功耗随转速增大而增加,由于

表3 试验方案及结果

Tab.3 Experiment scheme and results

序号	间距 A	滑切角 B	$A \times B$	转速 C	$A \times C$	$B \times C$	秸秆拥堵量/ (根·dm ⁻¹)	功耗 P /kW
1	1	1	1	1	1	1	68	2.51
2	1	2	2	2	2	2	53	4.55
3	1	3	3	3	3	3	40	7.31
4	2	1	1	2	2	3	46	3.35
5	2	2	2	3	3	1	42	5.02
6	2	3	3	1	1	2	59	2.57
7	3	1	2	1	3	2	57	2.61
8	3	2	3	2	1	3	43	2.80
9	3	3	1	3	2	1	37	5.33
10	1	1	3	3	2	2	37	4.04
11	1	2	1	1	3	3	59	2.46
12	1	3	2	2	1	1	50	3.50
13	2	1	2	3	1	3	36	4.89
14	2	2	3	1	2	1	57	2.38
15	2	3	1	2	3	2	44	4.05
16	3	1	3	2	3	1	44	3.10
17	3	2	1	3	1	2	31	5.57
18	3	3	2	1	2	3	51	3.94
秸秆拥堵量	k_1	51.11	47.89	58.57				
	k_2	47.33	46.94	46.22				
	k_3	43.44	47.06	37.27				
	极差	7.67	0.83	11.3				
功耗	k_1	4.06	3.42	2.74				
	k_2	3.71	3.79	3.56				
	k_3	3.89	4.45	5.36				
	极差	0.35	1.03	2.62				

表 4 试验因子对秸秆拥堵量影响方差分析
Tab.4 Variance analysis of factors' effect

on straw blockage					
源	III 型平方和	自由度	均方	F	Sig. 值
A	540. 704	2	270. 352	9. 819	0. 000
B	26. 704	2	13. 352	0. 485	0. 620
C	2 843. 593	2	1 421. 796	51. 639	0. 000
A × B	34. 704	2	17. 352	0. 630	0. 538
A × C	84. 481	2	42. 241	1. 534	0. 229
B × C	231. 259	2	115. 630	4. 200	0. 023
误差	1 018. 741	37	27. 534		
总计	127 530. 000	54			

表 5 试验因子对功耗影响方差分析
Tab.5 Variance analysis of factors' effect

on power consumption					
源	III 型平方和	自由度	均方	F	Sig. 值
A	1. 555	2	0. 777	2. 136	0. 133
B	7. 350	2	3. 675	10. 094	0. 000
C	49. 465	2	24. 732	67. 935	0. 000
A × B	1. 222	2	0. 611	1. 678	0. 201
A × C	2. 888	2	1. 444	3. 967	0. 027
B × C	4. 076	2	2. 038	5. 598	0. 008
误差	13. 470	37	0. 364		
总计	915. 993	54			

在 $n = 320 \text{ r/min}$ 时并未发生堵塞,所以选择 320 r/min 为较优水平,综合以上分析选取较优试验方案为 $A_3B_2C_2$ 。

为了确保优化结果可靠性,测量旋切后抛防堵装置及开沟器作业后的沟宽、沟深,与田间实际作业情况进行对比,选取上述较优参数组合进行试验验证,沟型测量方法如图 7,较优参数组合方案仿真工作过程如图 8 所示。为消除随机误差,采用上述试验方法重复试验 3 次。仿真结果如表 6 所示,较优参数组合方案平均功耗为 2.8 kW ,秸秆拥堵量为 43 根/dm ,未发生堵塞。

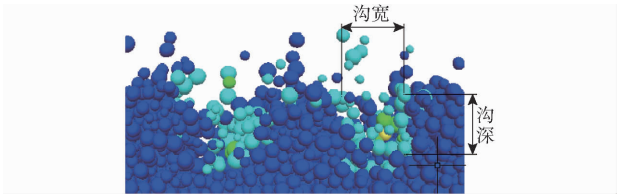


图 7 沟宽、沟深测量

Fig. 7 Determining of furrow width and depth

结合图 8 可知,0.35 s 防堵装置和开沟器进入虚拟土槽,土槽后部土壤和秸秆在防堵装置剪切、挤压作用下被剪切、撕裂后抛起,由图中颜色可以看出,此时秸秆运动速度较大,最高可达 10 m/s 。随着

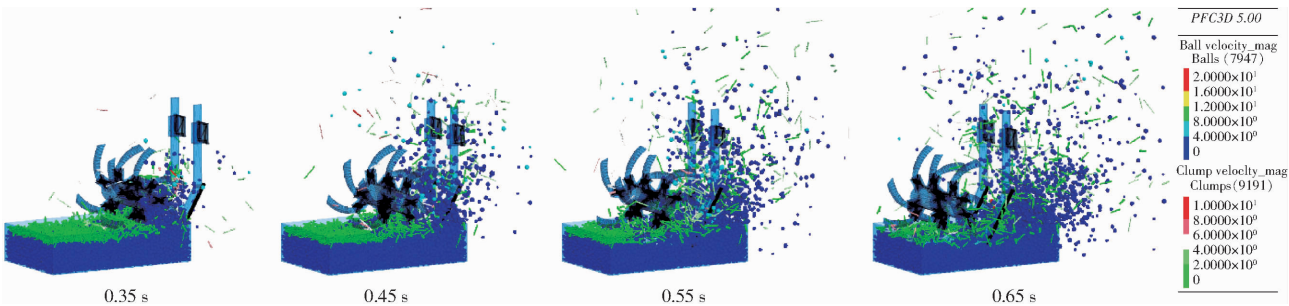


图 8 较优参数组合方案仿真作业过程

Fig. 8 Working process simulation of optimum parameters

表 6 优化方案验证结果

Tab.6 Verification result of optimized design

试验 序号	秸秆拥堵量/ (根·dm ⁻¹)	功耗/kW	沟深/cm	沟宽/cm
1	42	2.6	7.5	5.5
2	43	3.1	8.1	5.9
3	43	2.7	7.6	5.6
均值	43	2.8	7.7	5.7

防堵装置和开沟器继续前进,土壤和开沟器在惯性力作用下做后抛运动,在 0.45 s 和 0.55 s 时刻逐渐向各方向运动,越来越多的土壤、秸秆被抛出土槽,速度也逐渐减小。0.65 s 时刻防堵装置停止工作,大量土壤秸秆被抛出,部分秸秆和土壤混埋在一起。由图 8 可以看出整个工作过程未发生秸秆堵塞现象,通过性能良好。

3.4 基于离散元仿真旋切刀有限元静力学分析

为检验所设计优化方案中旋切刀是否满足强度要求,利用 Solidworks 软件中 Simulation 模块进行有限元静力学分析。运用 PFC^{3D}5.0 测量在防堵装置采用较优参数组合下,旋切刀作业过程中扭矩的变化(图 9a)。由图 9a 可知,旋切刀对土壤、秸秆作用时,随着旋切刀逐渐滑切土壤,旋切刀扭矩逐渐增大,并在 50°时达到峰值,最大值为 $35 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。旋切刀继续转动,所受阻力逐渐下降,脱离土壤后变为零。因此确定作业过程中旋切刀所受最大扭矩为 $35 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

旋切刀采用 65Mn 钢加工,并进行热处理,硬度为 HRC52;对旋切刀进行网格划分,共划分 7 200 个单元,得到 12 680 个节点,由于旋切刀固定在刀座上,所以对旋切刀端部添加约束固定,同时对旋切刀

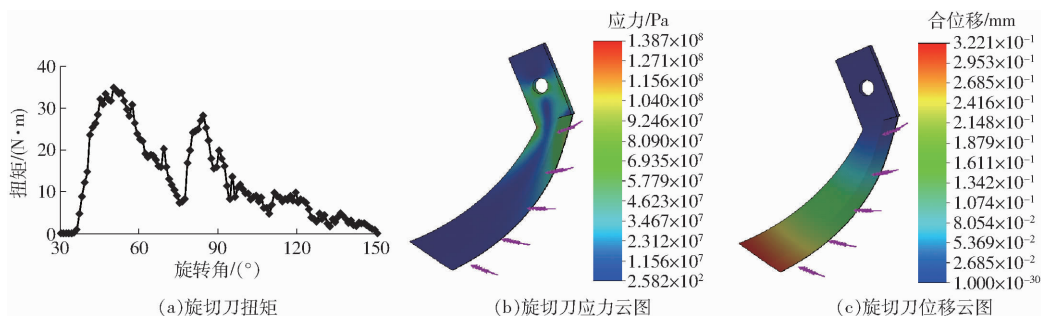


图9 旋切刀有限元静力学分析

Fig.9 Finite element statics analysis of rotary-cut blade

加载 $35 \text{ N} \cdot \text{m}$ 扭矩,方向垂直旋切刀侧切面、侧切刀上表面。旋切刀有限元应力、位移云图如图 9b、9c 所示。由分析结果可知,旋切刀最大应力位于刀身拐角处,为 $1.387 \times 10^8 \text{ Pa}$ (图 9b),低于 65Mn 钢的许用应力 $[\sigma]$ ($150 \sim 286 \text{ MPa}$),因此旋切刀强度满足作业要求。最大位移出现在刀尖处,为 0.322 mm ,满足设计要求。

4 田间试验与结果分析

4.1 试验条件

为了验证上述设计及离散元仿真结果的准确性,并测定条带式旋切后抛防堵装置工作性能,于 2016 年 10 月在河北省涿州市东城坊镇 ($115^\circ 56' \text{E}$ 、 $39^\circ 28' \text{N}$) 中国农业大学河北北部耕地保育科学观测实验站进行田间试验。试验地土壤质地为轻壤土, $0 \sim 10 \text{ cm}$ 深度土壤含水率为 11.6% ,土壤紧实度为 0.93 MPa 。试验地前茬作物为玉米,秸秆收获时经过联合收获机粉碎、秸秆粉碎机粉碎一遍后覆盖均匀,秸秆粉碎长度合格率为 84% (长度小于等于 10 cm),平均长度为 9.6 cm ,秸秆密度为 243 kg/m^3 ,含水率为 17% ,平均直径为 0.8 cm 。为测定防堵装置在不同秸秆量下通过性能,人工设置 3 种秸秆覆盖量,分别为 0.8 、 1.6 、 2.4 kg/m^2 。播种前在地表均匀喷撒除草剂和杀虫剂,并于 12 月下旬进行漫灌灌溉。

4.2 试验内容与方法

为将本文设计的旋切刀与传统旋耕刀作业效果进行对比,将优化方案旋切刀与 IT225 传统旋耕刀分别安装在旋切后抛防堵装置上进行试验,两种刀型回转半径、刀片厚度一致,按 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》规定的方法,将旋切后抛防堵装置安装在小麦少免耕播种机上进行作业质量测试。小麦少免耕播种机播种 6 行小麦,幅宽 1.3 m ,由防堵装置和尖角施肥开沟器、双圆盘播种开沟器、双肋式镇压轮、地轮等组成,施肥开沟器开沟深度为 80 mm 。检测设备包括田间综合测试车、电子秤、小

刀、取土钻、土壤紧实度仪、卷尺和铁锹等。试验指标有通过性、土壤扰动量、沟型尺寸、扭矩。除通过性能外,其他指标作业测试条件均为秸秆覆盖量 1.6 kg/m^2 ,前进速度 1 m/s 。田间试验作业情况如图 10 所示。



图10 田间试验

Fig.10 Filed experiment

4.2.1 通过性

GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》中通过性合格标准为“在刚收获的玉米地,植被覆盖量为 $0.3 \sim 0.6 \text{ kg/m}^2$ (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”。测试区长度选为 60 m [30]。为验证防堵装置在不同玉米秸秆量下和前进速度下通过性能,设置 3 种秸秆覆盖量 (0.8 、 1.6 、 2.4 kg/m^2);由于秸秆覆盖量高于国标规定的 $0.3 \sim 0.6 \text{ kg/m}^2$,因此适当降低播种机前进速度,参考文献 [30—32],设置 1 、 1.25 、 1.5 m/s 3 种作业速度进行测试。

4.2.2 沟型尺寸及土壤扰动量

以正常速度播种后,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 [13]。土壤扰动量计算公式为

$$\eta = \frac{D}{S} \times 100\% \quad (6)$$

式中 D ——实际开沟宽度, mm

S ——播种行距, mm

4.2.3 功耗

利用田间综合测试车对扭矩、牵引力进行测量,取作业稳定区连续的 100 次计数点,根据式 (5) 求

出实时功耗,共测量 3 个行程。

4.2.4 小麦出苗及生长情况

小麦播种后 10 天内测出苗数,采用对角线取样法,两种处理各取 3 个点,每个点数出播种行 10 cm 内出苗数,小麦返青时(3 月 20 日),挖取小麦耕层(0~20 cm)的根系,用清水冲洗后数出小麦的次生根数和分蘖数。

4.3 试验结果及分析

4.3.1 通过性

防堵装置田间对比试验结果(表 7)表明:条带式旋切后抛防堵装置应用旋切刀和传统旋耕刀通过性能基本一致,均满足国标“0.3~0.6 kg/m²下不允许发生重度堵塞”的要求。观测试验过程发现,随前进速度增加,秸秆覆盖量增加,通过性能变差,在 0.8 kg/m² 秸秆覆盖量下,两种装置在 3 种前进速度下均未发生堵塞,旋切后抛防堵装置能顺利将秸秆和土壤抛起,使开沟器通过,不发生缠草;在 1.6 kg/m² 时,装传统旋耕刀的防堵装置在 1.5 m/s 发生 1 次轻度堵塞,装旋切刀的防堵装置未发生堵塞;当秸秆覆盖量增加为 2.4 kg/m² 时,装旋耕刀的防堵装置在 3 种作业速度下均发生轻度堵塞,装旋切刀的防堵装置在 1.0 m/s 和 1.25 m/s 下造成了轻度堵塞,在 1.5 m/s 下发生中度堵塞,但随着机具继续前进,所缠秸秆仍可被旋切刀抛出,不影响作业质量。试验表明防堵装置防堵性能良好,上述仿真设计合理,在大秸秆覆盖量下依然有较强的防堵能力。

表 7 防堵性能田间试验结果

Tab.7 Field experiment result of anti-blocking performance

刀片类别	前进速度/ (m·s ⁻¹)	秸秆覆盖量/(kg·m ⁻²)		
		0.8	1.6	2.4
旋切刀	1	无堵塞	无堵塞	1 次轻度堵塞
	1.25	无堵塞	无堵塞	1 次轻度堵塞
	1.5	无堵塞	无堵塞	1 次中度堵塞
传统旋耕刀	1	无堵塞	无堵塞	1 次轻度堵塞
	1.25	无堵塞	无堵塞	1 次轻度堵塞
	1.5	无堵塞	1 次轻度堵塞	1 次轻度堵塞

4.3.2 沟型尺寸、土壤扰动量及功耗

如表 8 所示,旋切后抛防堵装置开沟深度为 76 mm,沟深稳定性系数为 92.3%,比传统旋耕刀的 84.1% 高出 8.2 个百分点;旋切后抛防堵装置开沟宽度为 50 mm,土壤扰动量 25.0%,相比传统旋耕刀土壤扰动量 62.5% 降低 37.5 个百分点,这是由于旋切刀相比传统旋耕刀轴向尺寸减小,从而有效降低了开沟宽度。沟深与离散元仿真值 77 mm 误差为 1.3%,沟宽与离散元仿真平均值 5.7 cm 误差为

14%;沟深、沟宽与仿真误差均小于 20%,表明了其准确性和可行性。旋切刀和传统旋耕刀两种刀型防堵装置功耗如图 11 所示,旋切刀式防堵装置平均功耗 12.08 kW,比传统旋耕刀平均功耗 14.83 kW 减小了 13.83%。这是因为土壤扰动减小,抛土量大减小,表明条带式旋切后抛防堵装置具有良好的降耗效果,上述仿真设计合理。作业过程中,由于田间土壤中混有砂石,功耗出现了一定范围的上下波动,但整体趋于稳定。

表 8 沟型田间试验测定结果

Tab.8 Field experiment result of field shape

刀片类别	沟宽/ mm	土壤扰 动量/%	沟深/ mm	沟深稳定 性系数/%
旋切刀	125	62.5	76	92.3
传统旋耕刀	50	25.0	78	84.1

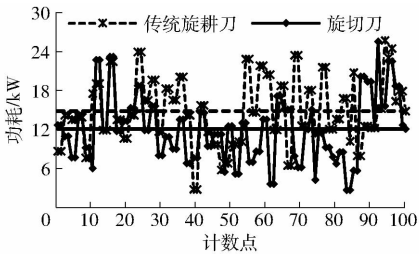


图 11 功耗测试对比

Fig.11 Comparison of power consumption

4.3.3 小麦出苗及生长情况

如表 9 所示,旋切刀平均出苗数为 51 株,显著高于传统旋耕刀的 42 株,但次生根数和分蘖数差异不显著。原因可能是播种后连续干旱,且出现有风天气,采用旋切刀防堵装置开出的种床,相比传统旋耕刀对土壤扰动小,因此水分散失较少,能在植株出苗前提供更多的水分^[37]。而随着植株出苗以后,两种刀型创造的疏松种床均能提供植株根系发展所需环境,所以两者次生根数和分蘖数基本一致。

表 9 小麦出苗及生长情况

Tab.9 Emergence rate and growing performance of wheat

刀片类别	出苗数/株	次生根数/ (条·棵 ⁻¹)	分蘖数/ (株·棵 ⁻¹)
传统旋耕刀	42 ^a	6.3 ^a	2.87 ^a
旋切刀	51 ^b	6.1 ^a	2.84 ^a

注:不同字母表示传统旋耕刀与旋切刀对指标的影响差异显著($p < 0.05$)。

5 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式旋切后抛防堵装置,确定了旋切刀和开沟器等关键结构和作业参数,可在保证防堵性能的同时降低作业功耗。

(2)田间试验结果表明,条带式旋切后抛防堵装置在0.8、1.6、2.4 kg/m²秸秆覆盖量和1、1.25、

1.5 m/s前进速度作业条件下,通过性能均满足免耕施肥播种机国标要求。与传统旋耕刀相比,所设计旋切刀土壤扰动量减少37.5个百分点,沟深稳定性系数提高8.2个百分点,功耗减小13.83%。

参 考 文 献

- 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001.
- 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. (in Chinese)
- HE Jin, ZHANG Zhiqiang, LI Hongwen, et al. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(4):1-12.
- 卢彩云. 免耕播种机滑板压秆旋切式防堵技术与装置研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- LU Caiyun. Study on anti-blocking technology and device of rotary cutting with slide plate pressing straw for no-till seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 高娜娜. 一年两熟地区拔草与分草组合式玉米免耕播种防堵技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- GAO Nana. Study on anti-blocking technology of pushing and separating approaches for maize no-till planting in two-crops-a-year areas [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- BAKER C J, SAXTON K E, RITCHIE W R, et al. No-tillage seeding in conservation agriculture[M]. 2nd ed. Oxford: CAB International, 2006.
- 卢彩云,赵春江,孟志军,等. 斜置驱动拨草轮免耕防堵装置:ZL201410856945.3[P]. 2015-05-13.
- 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. http://www.j-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.
- 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. (in Chinese)
- 曹向红. 2BDMF-7型试验用固定道小麦免耕播种机改进研究[D]. 北京:中国农业大学,2008.
- CAO Xianghong. Research on the improvement of 2BDMF-7 controlled traffic no-tillage wheat planter for experimental use[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 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)
- 陈青春,石勇,丁启朔,等. 正反旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报,2015,31(9):13-18.
- CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):13-18. (in Chinese)
- BAKER C J, SAXTON K E, RITCHIE W R. No-tillage seeding: science and practice[M]. Oxford: CAB International, 1996.
- 廖庆喜,高焕文,舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报,2004,20(1):108-112.
- LIAO Qingxi, GAO Huanwen, SHU Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):108-112. (in Chinese)
- 张喜瑞. 我国北方一年两熟区小麦免耕播种机防堵装置研究[D]. 北京:中国农业大学,2010.
- ZHANG Xirui. Study on anti-blocking mechanism for wheat no-till planter in annual two crops region of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 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, 129:329-340.
- 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(1):7-15.
- 张玉贤,周桂霞. 免耕播种机破茬器与开沟器的研究[J]. 农机使用与维修,2015(3):25-26.
- 姚宗路,高焕文,李洪文,等. 不同结构免耕开沟器对土壤阻力的影响[J]. 农机化研究,2009,31(7):30-34.
- YAO Zonglu, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Effect of different structural no-till openers on soil resistant force[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7):30-34. (in Chinese)
- 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- GUPTA J P, PANDEY K P. Performance of rotary tiller tynes under wet land condition[J]. AMA Agricultural Mechanization in Asia Africa & Latin America, 1996, 27(1):16-20.

- 20 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨[J]. 江西农业大学学报, 1991(1): 64 – 68.
YAN Linyuan. An approach to the sliding cutting angle of the working parts of agricultural machinery[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1991(1): 64 – 68. (in Chinese)
- 21 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38 – 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 02. 008.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38 – 42. (in Chinese)
- 22 卢彩云, 赵春江, 孟志军, 等. 基于滑板压秆旋切式防堵装置的秸秆摩擦特性研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 83 – 89.
LU Caiyun, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Straw friction characteristic based on rotary cutting anti-blocking device with slide plate pressing straw[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 83 – 89. (in Chinese)
- 23 梁方, 王德成, 尤泳, 等. 草地破土切根刀具的刃口曲线设计与优化[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(6): 100 – 107.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and optimization of the edge curve of rotary-cutting blade in grassland[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(6): 100 – 107. (in Chinese)
- 24 寻怀义. 滑切理论探讨[J]. 农业机械学报, 1979, 10(4): 110 – 114.
- 25 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选择[J]. 华中农学院学报, 1982(2): 64 – 69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1982(2): 64 – 69. (in Chinese)
- 26 HENDRICK J G, GILL W R. Rotary tiller design parameters part IV-blade clearance angle[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(1): 4 – 7.
- 27 LEE K S, PARK S H, PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 71(1): 25 – 32.
- 28 MATIN M A, DESBIOLES J M A, FIELKE J M. Strip-tillage using rotating straight blades: effect of cutting edge geometry on furrow parameters[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 271 – 279.
- 29 陈海涛, 查韶辉, 顿国强, 等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 96 – 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160714&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 07. 014.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 96 – 102. (in Chinese)
- 30 何进, 李洪文, 王庆杰, 等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 51 – 55.
HE Jin, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Powered hammering blade no-till wheat seeder for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 51 – 55. (in Chinese)
- 31 林静, 钱巍, 李宝筏, 等. 2BG – 2 型玉米垄作免耕播种机播种深度数学模型的仿真与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 19 – 24.
LIN Jing, QIAN Wei, LI Baofa, et al. Simulation and validation of seeding depth mathematical model of 2BG – 2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 19 – 24. (in Chinese)
- 32 陈翠英. 旋耕机速度参数的合理选择[J]. 农业机械学报, 1985, 16(2): 30 – 37.
CHEN Cuiying. Reasonable choice of speed parameters of tractor and rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1985, 16(2): 30 – 37. (in Chinese)
- 33 ZHOU Haibo, CHEN Ying, MOHAMMAD A. Modelling of soil seed contact using the discrete element method (DEM) [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 56 – 66.
- 34 MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118: 117 – 122.
- 35 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 01. 009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw – soil – rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 – 67. (in Chinese)
- 36 Itasca. User's manual for PFC3D version PFC5.0 [M]. Minneapolis: Itasca consulting Group, Inc, 2017.
- 37 CHOUDHARY M A. Interrelationships between performance of direct drilled seeds, soil micro-environment and drilling equipment [D]. Auckland: Massey University, 1979.