doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.004

切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验

张仕林[1]　黄玉祥[1,2]　赵宏波[1]　付作立[1]　刘正道[1]　史江涛[3]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100;
3. 西安亚澳农机股份有限公司, 西安 710300)

摘要: 针对西北地区玉米秸茬覆盖地小麦免少耕宽幅沟播时,由于玉米根茬阻碍秸秆流动导致的秸茬聚集壅堵、土壤扰动大、种带清洁率低、播种质量差等问题,提出先被动切割、后主动抛撒的种带清理方法。设计了一种切抛组合式破茬清秸防堵装置,通过纵向布置的倾斜缺口圆盘与旋抛装置配合作业对种带残茬与秸秆进行清理。适配防堵装置设计了分流式开沟器,实现行距稳定的一沟两行播种。分析确定了缺口圆盘倾角与偏角参数;依据滑切理论设计计算了平直旋刀与侧倾旋刀刃线结构参数;建立 MBD-DEM 联合仿真平台并采用正交旋转组合试验方法,以种带清洁率、秸茬粘结键破碎率与土壤扰动宽度为指标进行旋抛装置关键参数优化仿真试验。基于仿真结果建立各指标回归模型并通过响应面分析与多目标优化得出,当侧倾旋刀倾角为 20°、回转速度为 310 r/min 时,防堵装置种带清洁率达到 96.9%,秸茬粘结键破碎率为 26.9%,土壤扰动宽度为 139 mm。在玉米秸茬覆盖地进行小麦播种试验,结果表明切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置通过性良好,种床清洁率为 90.1%,破茬率为 96.2%,土壤扰动宽度为 127 mm,土壤扰动量为 6.9%,整机作业质量稳定且播种后小麦出苗均匀,满足宽幅沟播小麦免耕播种农艺要求。

关键词: 免耕播种; 小麦宽幅沟播; 防堵装置; 离散元法

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)05-0040-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Cutting and Throwing Combined Anti-blocking Device for Wide-seedbed Seeding of Wheat

ZHANG Shilin[1]　HUANG Yuxiang[1,2]　ZHAO Hongbo[1]　FU Zuoli[1]　LIU Zhengdao[1]　SHI Jiangtao[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *Xi'an Yaao Agricultural Machinery Co., Ltd., Xi'an* 710300, *China*)

Abstract: To address the issues of residue accumulation and blockage, significant soil disturbance, low cleanliness of seedbed, and poor seeding quality caused by maize stubble and straw residues during no-tillage wide-row wheat sowing in maize residue-covered fields, a seedbed cleaning method combining passive cutting and subsequent active throwing was proposed. A cutting and spreading combined residue-breaking and residue-preventing device was designed, which utilized longitudinally arranged inclined notched discs and rotating spreading devices to clean seedbed residues and straw. A diversion-type furrow opener was designed to stabilize row spacing and achieve one furrow seeding two rows. The tilt angle and skew angle parameters of the notched discs were determined based on force and kinematic analyses of straw residues during device operation. The straight and inclined rotary blade parameters were designed and calculated based on the sliding-cutting theory. Using the orthogonal rotation combination experimental method, key parameters of the spreading device were optimized through simulation experiments on the established MBD-DEM combined simulation platform, with seedbed cleanliness rate, residue breaking rate, and soil disturbance as indicators. Based on simulation results, regression models for each indicator were established and response surface analysis and multi-objective optimization were conducted. The optimal parameters were determined to be as tilt angle of 20° and rotation speed of 310 r/min, resulting in

收稿日期: 2024-02-19　修回日期: 2024-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)和国家自然科学基金项目(32101630)

作者简介: 张仕林(1995—),男,博士生,主要从事现代农业装备研究,E-mail: shilinzhang@nwafu.edu.cn

通信作者: 黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤-机器系统研究,E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

seedbed cleanliness rate of 96.9%, residue bonds breaking rate of 26.9%, and soil disturbance width of 139 mm. Wheat seeding experiments in maize residue-covered fields showed that the sowing machine equipped with the cutting and spreading combined anti-breaking and residue-preventing device had good pass ability, with seedbed cleanliness rate of 90.1%, residue-breaking rate of 96.2%, soil disturbance width of 127 mm, soil disturbance rate of 6.9%, stable overall operation quality, and uniform wheat emergence after seeding, meeting the agronomic requirements for wide-seedbed seeding of wheat.

Key words: no-tillage planter; wide-seedbed seeding of wheat; anti-blocking device; DEM

0　引言

西北玉麦轮作一年两熟区多数采用宽幅沟播方式播种冬小麦，由于前茬玉米根系粗壮、秸秆覆盖量大，降低了秸茬残留在播种装置间的流动性，秸秆易缠绕或挂接在开沟器等触土部件上造成堵塞，同时由于秸茬回流种床导致晾籽架种现象，严重影响机具通过性、作业质量与出苗效果[1-4]。因此，解决秸茬壅堵和构建洁净种床是提高免少耕宽幅沟播作业质量的关键。

目前，国内外防堵技术根据动力来源可分为被动式与主动式两种形式[4-5]。被动式防堵技术主要以破茬圆盘及拨草轮为核心部件，依靠自身重力与土壤摩擦力产生转动来切割秸茬与清理种带，具有结构简单、低功耗、土壤扰动小等优点[6-8]。侯守印等[9]针对东北地区重度秸茬覆盖条件设计了一种侧向加速推送式防堵清秸装置，利用助推轮将秸秆有效清理出种带；VAITAUSKIEN 等[10]发现高速条件下利用拨草轮组错位倾斜布置的方式可以将秸秆残留清运至种带侧后方；曹鑫鹏等[11]设计了一种侧置切刀与拨茬齿盘组合式清秸装置，以解决风力作用下秸秆回垄的问题；林静等[12]通过阿基米德螺线锯齿形缺口圆盘与星型清垄轮组合作业完成根茬切割并将秸秆侧推至垄沟，完成垄台清秸作业。由于被动式切割作业过程中防堵部件转速较低，难以将秸茬有效运移至种沟两侧，加之被动式防堵装置有限的土壤切削能力，无法满足小麦宽幅沟播的种带宽度和种床土壤需求。主动式防堵工作原理是利用拖拉机提供动力，驱动各式刀具对秸秆残茬进行粉碎、抛撒等以实现防堵[13-15]。赵宏波等[16]设计了一种旋切后抛式防堵装置，借助仿真模拟试验优化其关键参数；CHEN 等[17]结合弹齿与立式旋耕刀提出一种垂直作业秸茬方法，并通过轨迹分析确定最佳作业参数；朱惠斌等[18]研制了一种双轴破茬免耕装置，并通过 EDEM - ADAMS 耦合仿真分析刀片排布方式、刀轴转速与刀片结构对秸秆切断率的影响；王加一等[19]结合理论分析与离散元仿真设计了一种驱动式破茬刀，并优化刀片刃口曲线与刀轴参数。上述装置主要通过对秸秆的切割、粉碎、抛掷实现种床清洁，但忽略了作物根茬对秸秆清理与土壤扰动的影响。西北玉麦轮作区玉米种植密度大，根系土壤复合体抗剪强度高，残留秸秆长度不均匀[20]，采用传统单一旋耕方式完成种带清整时存在土壤扰动大、地表平整度差、作业功耗高等问题，影响播种质量与作物出苗。

基于上述研究现状，结合玉米秸茬覆盖量与小麦宽幅沟播需求，本文提出先被动切割、后主动抛撒的种带清理方法，设计一种缺口圆盘与旋刀同步作业的切抛组合式破茬清秸防堵装置。结合理论分析与 MBD - DEM 联合仿真试验确定影响装置工作性能的最优参数组合，并开展小麦播种田间试验，以验证仿真优化结果。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置整机结构如图 1 所示，主要由机架、变速箱、破茬装置、旋抛装置、刀轴、限深轮等组成。破茬装置安装在整机前梁上，包括角度调节装置与缺口圆盘；旋抛装置主要部件为左、右侧倾旋刀与平直旋刀，并通过圆盘刀座对称安装于刀轴上，整机参数如表 1 所示。

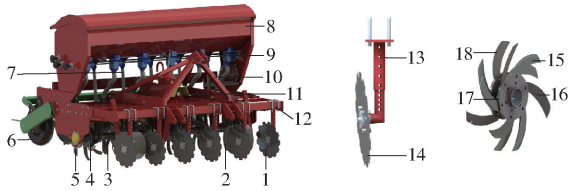


图 1　切抛组合式破茬清秸防堵装置结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of cutting and throwing combined anti-blocking device for stubble-breaking and straws-cleaning

1. 破茬装置　2. 限深轮　3. 刀轴　4. 旋抛装置　5. 开沟装置　6. 镇压装置　7. 排种装置　8. 种肥箱　9. 排肥装置　10. 三点悬挂　11. 变速箱　12. 机架　13. 角度调节装置　14. 缺口圆盘　15. 平直旋刀　16. 左侧倾旋刀　17. 右侧倾旋刀　18. 圆盘刀座

1.2　工作原理

传统小麦等行距免耕播种作业过程中，由于玉米立茬分布密集以及行间距小等原因，容易引起开沟器前端堵塞。小麦宽幅沟播技术强调在玉米秸茬覆盖地采用宽窄行免耕播种方式，因此提出“先切

表 1 整机参数

Tab. 1 Whole machine parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 050×2 300×1 600
工作幅宽/m	2
作业行数	6
行距/mm	360
苗带宽度/mm	120
配套功率/kW	90~110
作业速度/(km·h^{-1})	3~6

后抛”的秸茬清理思路,通过前置破茬装置与旋抛装置在窄行内构建清洁种床[21-22]。

图 2 为单侧切抛组合式破茬清秸防堵装置残茬清理工作过程示意图,L 为破茬装置与刀轴回转中心沿作业方向的纵向间距。工作时,缺口圆盘随整机前进正向转动,采用被动切茬方式将种带中的根茬与长秸秆切断。通过角度调节装置使缺口圆盘与地表在前进方向呈一定偏角,以清理出预设宽度为 L_2 的肥沟。旋抛装置由拖拉机 PTO 提供动力,经变速箱驱动平直旋刀与侧倾旋刀高速旋转,完成对秸茬与土壤的二次切削。相邻平直旋刀间距与肥沟宽度一致,少量碎茬断秆由于质量较轻被后抛至肥沟,完成部分秸茬-土壤混合的同时也避免了秸茬残留种沟导致的晾籽架种现象。相邻圆盘刀座上左、右侧倾旋刀有效作业宽度为 L_4,即播种窄行宽度。由破茬装置清理至肥沟两侧的碎茬断秆在侧倾刀作用下被进一步切割并通过倾斜刀身抛送至种带两侧的宽行区域。最终单侧破茬清秸防堵装置清理出 3 条宽度分别为 L_4 与 L_1 的清洁种带与秸秆覆盖带,形成宽窄行播种区。开沟装置安装间距为 L_3,为秸秆纵向流动提供足够运移空间,有助于防止秸茬堆积与壅堵,形成种沟内无残茬、种沟间秸茬覆盖的良好种床环境,以保证分流式开沟器、镇压装置等触土部件顺利通过,进而提高小麦宽窄行播种作业质量。

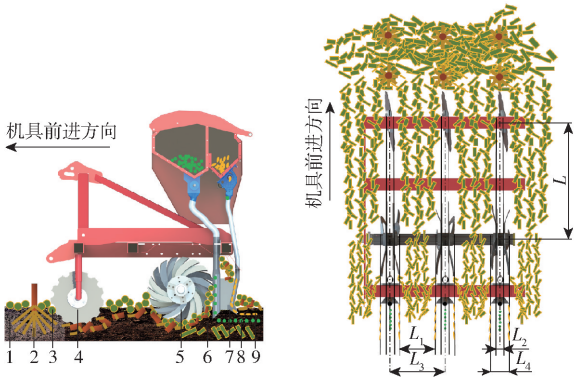


图 2 单侧切抛组合式破茬清秸防堵装置残茬清理工作过程示意图

Fig. 2 Stubble clearing process for single-sided cutting and throwing combined anti-blocking device for stubble-breaking and straws-cleaning

1. 未耕地表 2. 玉米根茬 3. 玉米秸秆 4. 破茬装置 5. 旋抛装置 6. 已耕地表 7. 分流式开沟器 8. 肥料 9. 小麦种粒

2 关键部件设计与分析

2.1 缺口圆盘秸茬切割运动学分析

通过调整缺口圆盘与前进方向的水平夹角(偏角)与竖直夹角(倾角)能够提高灭茬效率并降低切割阻力[6]。如图 3 所示,将田间地表残留的根茬秸秆视为散粒体并进行受力分析,其主要受到沿接触点切线方向的刀盘滑切力 F_t 以及与切线垂直方向的刀盘砍切力 F_r,同时还包括地面与圆盘对秸茬的摩擦力 f_1 与 f_2。假设圆盘在切割过程中的旋转与前进为匀速运动且保持稳定的入土深度,以缺口圆盘回转中心为原点建立空间直角坐标系,其中 X 轴为机具前进方向,Z 轴为竖直方向,Y 轴为水平面内与 Z 轴的垂直方向。借助二次投影法将秸茬受力沿 X、Y、Z 方向进行分解,结合 XZ 与 XY 平面中的受力分析得出秸茬颗粒沿坐标轴方向的运动微分方程为

$$\begin{cases} f_1\cos\alpha+(\sqrt{f_2^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)}-\sqrt{F_t^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)})\cos(\delta-\tau)-\sqrt{F_r^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)}\sin(\delta-\tau)=m\dfrac{\mathrm{d}^2X}{\mathrm{d}t^2}\\ (\sqrt{f_2^2(\cos^2\alpha+\sin^2\beta)}-\sqrt{F_t^2(\cos^2\alpha+\sin^2\beta)})\sin(\delta-\tau)+f_1\sin\alpha-\sqrt{F_r^2(\cos^2\alpha+\sin^2\beta)}\cos(\delta-\tau)=m\dfrac{\mathrm{d}^2Y}{\mathrm{d}t^2}\\ N+(\sqrt{F_t^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)}-\sqrt{f_2^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)})\sin(\delta-\tau)-\sqrt{F_r^2(\cos^2\alpha+\cos^2\beta)}\cos(\delta-\tau)-mg=m\dfrac{\mathrm{d}^2Z}{\mathrm{d}t^2} \end{cases} \tag{1}$$

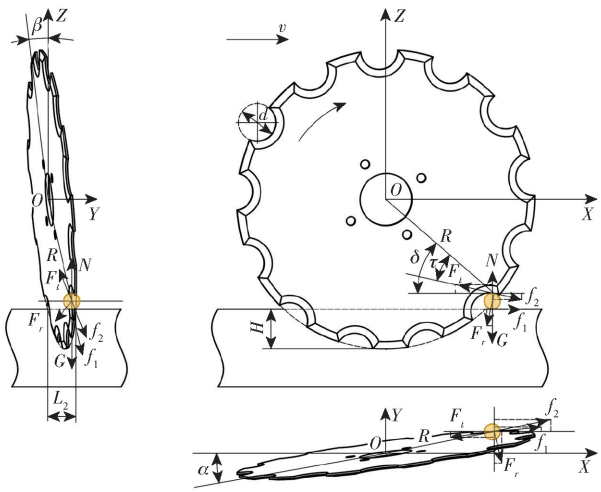


图 3 缺口圆盘刀切割秸茬起始点受力分析

Fig. 3 Analysis of force on starting point of notched disc blade cutting residue

其中
$$f_1 = N\tan\varphi_1 \tag{2}$$
$$f_2 = N\cos(\beta-\tau)\tan\varphi_2 \tag{3}$$
$$F_t = F_r\tan\varphi_2 \tag{4}$$

式中　m——秸秆根茬散粒体质量，kg
g——重力加速度，m/s^2
t——缺口圆盘切割秸茬时间，s
α——缺口圆盘作业偏角，(°)
β——缺口圆盘作业倾角，(°)
δ——缺口圆盘刀回转中心–秸茬接触点连线与机具前进方向夹角，(°)
τ——缺口圆盘刀回转中心–秸秆起始接触点连线与滑切力夹角，(°)
N——地面对秸茬的支持力，N
φ_1——秸秆与地表间摩擦角，(°)
φ_2——秸秆与缺口圆盘材料间摩擦角，(°)

将式(1)对时间 t 求积分可得秸茬在 X、Y、Z 方向的分速度为

$$\begin{cases} v_X = \dfrac{t}{m}\Big[f_1\cos\alpha + \Big(f_2\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta} - F_t\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta}\Big)\cos(\delta-\tau) - F_r\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta}\sin(\delta-\tau)\Big] \\ v_Y = \dfrac{t}{m}\Big[\Big(f_2\sqrt{\cos^2\alpha+\sin^2\beta} - F_t\sqrt{\cos^2\alpha+\sin^2\beta}\Big)\sin(\delta-\tau) - F_r\sqrt{\cos^2\alpha+\sin^2\beta}\cos(\delta-\tau) - f_1\sin\alpha\Big] \\ v_Z = \dfrac{t}{m}\Big[N + \Big(F_t\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta} - f_2\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta}\Big)\sin(\delta-\tau) - F_r\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\beta}\cos(\delta-\tau) - mg\Big] \end{cases} \tag{5}$$

根据缺口圆盘结构与作业位置关系可得
$$\delta = \arcsin\frac{R-H-d_m}{R-\dfrac{d}{2}} \tag{6}$$

式中　R——缺口圆盘回转半径，取 200 mm
H——入土深度，mm
d_m——玉米秸茬散粒直径，mm
d——圆盘缺口直径，(°)

由式(5)、(6)可得影响秸茬运移速度的因素包括缺口圆盘作业偏角 α、倾角 β 与入土深度 H。通过对西北地区一年两熟区免耕播种田间作业条件的调查统计，得到玉米根土复合体横向幅宽为 200 ~ 300 mm，纵向深度为 200 ~ 250 mm；其中深度 60 ~ 120 mm 范围内根系分布密集且该处根土复合体抗剪强度较大，切割深度大于 80 mm 时能有效切分根茬，因此设计缺口圆盘入土深度 H = 130 mm[23]。

具有作业偏角的圆盘刀在切茬过程中较垂直作业具有更强的滑切性能，从而降低切割阻力的同时在地表开出一定宽度的肥沟，但过大的偏角导致圆盘与土壤间的有效接触面积扩大，造成牵引阻力与土壤扰动显著上升，而适当增大圆盘倾角可改善这一情况[6,24]。结合课题组前期研究及小麦宽幅沟播相关农艺要求，设计缺口圆盘作业偏角 α 和倾角 β 分别为 7.5°和 5°[20]。此时，缺口圆盘作业幅宽即肥沟宽度为
$$L_2 = R\sin\alpha\cos\beta \tag{7}$$

2.2　旋抛装置

由于被动式缺口圆盘抛撒能力有限，导致部分经切割后的玉米根茬与秸秆残余仍旧保留在播种带内，因此采用旋抛装置完成对秸茬的进一步破碎与清理。传统旋耕刀结构一般包括正切刃与侧切刃，为降低旋切过程中的土壤扰动与作业阻力，本研究设计了只包含侧切刃的平面与侧倾旋刀，其中侧倾旋刀刃线与种带分别沿左、右方向呈一定夹角，以对碎茬断秆产生侧向抛送效果并将其清理至秸秆覆盖带[25-26]。

2.2.1　旋刀刃线设计

对秸秆根茬残留进行受力分析如图 4 所示，假设秸茬经缺口圆盘切割后平铺于地表，其在平直旋刀接触点 m 处受到旋刀沿刃线切线方向的摩擦力 f_T、沿刃口法向的切割力 F_c 以及土壤法向反力 N_c，其中 $F_c = N_c$。将 F_c 沿秸茬运动轨迹 $n-n'$ 与刃口曲线的切线方向分解为 F_p 与 F_T。秸茬受力方程为
$$\begin{cases} F_T = F_c\tan\tau_c \\ f_T = F_c\tan\varphi_3 \end{cases} \tag{8}$$

式中　τ_c——刃线作用点处动态滑切角，(°)
φ_3——秸茬与旋刀材料间的摩擦角，(°)

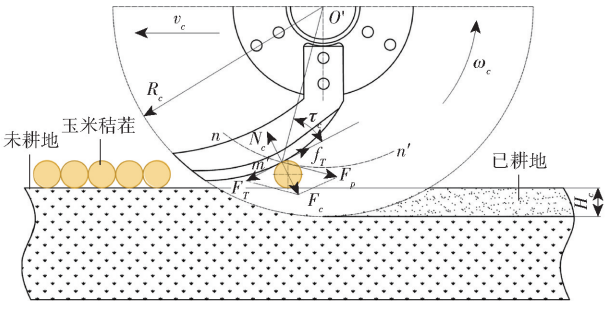


图 4　平直旋刀切割秸茬受力分析

Fig. 4　Stress analysis of residue during plain-straight rotary blade cutting

当 $F_T > f_T$ 时，刀刃对秸茬产生滑切作用并使其沿刃口曲线移动直至脱离旋刀。本文设计平直旋刀回转半径 R_c = 245 mm，刃线起点与回转中心间距离

$r_0=125$ mm，耕深 H_c 等于秸茬直径与设计入土深度之和，根据玉米根系地下分布特点，取 $H_c=105$ mm。当旋耕速比 λ 与切割时刃线某点与耕底的距离 H_c' 一定时，动态滑切角变化量 $\Delta\tau$ 随刃口极径 r 的增大而减小，即该点处动态滑切角 τ_c 逐渐增大，其计算公式为[27]

$$\tau_c=\tau_s-\Delta\tau \tag{9}$$

其中

$$\Delta\tau=\arctan\frac{\sqrt{r^2-(R_c-H_c')^2}}{\frac{\lambda}{R_c}r^2-(R_c-H_c')} \tag{10}$$

式中 τ_s——刃线起点处的静态滑切角，(°)

测量玉米根系及秸秆与旋刀材料摩擦因数分别为 0.36～0.40 与 0.31～0.37，得出秸茬与锰钢间的摩擦角为 17.2°～21.8°。为防止旋刀在切抛过程中发生秸茬缠绕堵塞，作用点处刃线动态滑切角应大于秸茬与旋刀间的摩擦角。根据式(10)计算刃线起始处 $\Delta\tau=7°$，则 τ_s 最小值为 28.8°。增大滑切角能够提高刀刃对土壤、残留物的滑切作用，有助于减小刀片切割阻力，但过大的滑切角导致刀刃长度增加，从而增大土壤摩擦阻力，综合推荐刃线起始处静态滑切角范围为 $28.8°<\tau_s<61.2°$。结合现有文献与前期研究基础[25-27]，取刃线起始点处的静态滑切角 $\tau_s=55°$，刃口曲线类型为阿基米德螺线，其参数方程为

$$r=r_0+K_a\theta_a \tag{11}$$

式中 r_0——刃线起点处极径，mm

K_a——刃线极径在增加单位极角时的增量，取 2.75 mm

θ_a——刃线上任意点处极角，rad

2.2.2 种床清理宽度

旋抛装置结构如图 5 所示。点 B 与点 B' 分别为平直旋刀刃线与耕底接触点，点 A 与点 A' 分别为左、右侧倾旋刀刃线与耕底接触点，则 $l_{AA'}$ 为单组旋抛装置作业时的理论种床清理宽度，即 L_4。根据已确定的平面旋刀耕深与回转半径，可得

$$\begin{cases}L_4=2l_{AB}+l_{BB'}\\ l_{BB'}=W_H+T\\ l_{AB}=(R_c-r_0-H_c+H_d)\tan\theta+W_G\\ H_d=(R_c-r_0)(\cos^2\theta-1)+H_c\end{cases} \tag{12}$$

式中 $l_{BB'}$——单组平直旋刀作业时的理论种床清理宽度，mm

W_H——相邻刀盘安装距离，取 35 mm

T——旋刀厚度，取 5 mm

H_d——侧倾旋刀耕深，mm

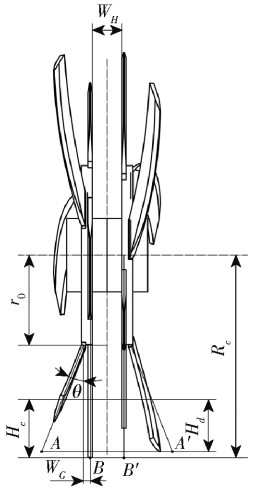


图 5 旋抛装置结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of rotary throwing device

W_G——相邻平直旋刀与侧倾旋刀安装槽水平距离，取 8 mm

θ——侧倾旋刀刃线与竖直平面夹角，即刀片折弯角，(°)

将各参数值代入式(12)可得种床清理宽度为

$$L_4=120\sin(2\theta)+56 \tag{13}$$

由式(12)、(13)可得，旋抛装置种床清理宽度 L_4 以及侧倾旋刀耕深 H_d 均与 θ 有关。西北地区小麦宽窄行种植要求种沟窄行宽度一般为 120 mm，沟距 240 mm，结合有利于根茬清除，推荐耕深 80 mm，得出侧倾旋刀折弯角为 16°～32.5°。

2.2.3 旋刀秸茬抛撒运动学分析

旋抛装置通过平直旋刀高速旋转对秸茬进行二次切割、碎断并借助侧倾旋刀将种带秸茬后抛向种沟两侧，以创造洁净松软的播种土壤环境。为探明秸茬旋抛规律，对单侧侧倾旋刀抛撒秸茬的瞬时运动状态进行分析。假设秸茬为刚性质点，侧倾旋刀为匀速运动，忽略秸茬间相互碰撞与空气阻力影响，侧倾旋刀秸茬抛撒过程如图 6 所示。

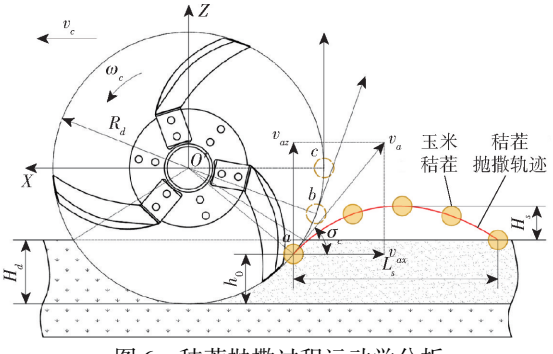


图 6 秸茬抛撒过程运动学分析

Fig. 6 Kinematics analysis of residues throwing process

秸茬脱离刀刃约束临界点设为点 a，秸茬随刀片从点 a 运动至点 c 的过程中沿刀刃向后滑移，其

在点 a 处瞬时绝对速度 v_a 为

$$v_a = R_d\omega_c \tag{14}$$

其中

$$R_d = R_c - H_c + H_d \tag{15}$$

式中　R_d——侧倾旋刀回转半径，mm

ω_c——旋抛装置角速度，rad/s

由旋抛装置的结构及其工作参数可得 v_a 沿前进方向与竖直方向的分速度为

$$\begin{cases} v_{ax} = v_a\cos\sigma_c = \omega_c(R_d - h_0) \\ v_{az} = v_a\sin\sigma_c = \omega_c\sqrt{h_0(2R_d - h_0)} \end{cases} \tag{16}$$

式中　σ_c——玉米秸茬瞬时抛射角，(°)

h_0——玉米秸茬抛撒起始点与沟底的垂直距离，mm

由于刀片折弯角产生的侧向推力，秸秆及根茬残留在脱离刀刃后向侧后方做抛物线运动，其轨迹方程为

$$\begin{cases} X_a = -\sqrt{h_0(2R_d - h_0)} - (R_d - h_0)\omega_c t\sin\theta \\ Y_a = R_d\omega_c t\sin\theta \\ Z_a = h_0 - R_d + \sqrt{h_0(2R_d - h_0)}\omega_c t - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{17}$$

式中　X_a——玉米秸茬在 X 轴方向抛出距离，mm

Y_a——玉米秸茬在 Y 轴方向抛出距离，mm

Z_a——玉米秸茬在 Z 轴方向抛出距离，mm

由式(17)可得秸茬颗粒在水平向后(L_s)、竖直向上(H_s)及侧向(L_Y)的最大抛撒距离为

$$\begin{cases} L_s = \dfrac{2v_a^2\sin\sigma_c\cos\sigma_c}{g}\cos\theta = \dfrac{2\omega_c^2(R_d - h_0)\sqrt{h_0(2R_d - h_0)}}{g}\cos\theta \\ H_s = \dfrac{\omega_c^2 h_0(2R_d - h_0)}{2g} \\ L_Y = \dfrac{2\omega_c^2(R_d - h_0)\sqrt{h_0(2R_d - h_0)}}{g}\sin\theta \end{cases} \tag{18}$$

由式(18)可知，当旋抛装置结构参数一定时，秸茬水平向后最大抛撒距离随侧倾刀与竖直平面夹角 θ 的增大而减小，当 $\sigma_c = 45°$ 时，水平抛撒距离最大。秸茬侧向最大抛撒距离随 θ 的增大而增加，侧向抛撒距离过小时，无法有效将秸茬清理出种沟，当秸茬量较大时容易发生堵塞与架种现象。但过大的 θ 导致平直旋刀与侧倾旋刀有效切割区域的横向间距增大，不利于破碎种床土壤。

2.2.4　刀具排布

旋刀排布方式对机具功耗、平稳性以及作业质量有重要影响，合理的旋刀排布方式可以确保土壤得到均匀的翻耕和疏松，以提高整机耕作效率。本研究旋抛装置采用左、右刀轴对称结构。为消除作业时产生的轴向作用力，单侧刀轴上的旋刀采用多头螺线排列方式排列，左右刀轴螺旋线升角相同、旋向相反[15]。由于整机采用 6 行 12 苗带的播种方式，因此每行对应一对圆盘刀座，每个刀座上固定安装有平直旋刀与侧倾旋刀各 3 把(图 1)，即单行种沟通过 12 把旋刀完成土壤切削与秸茬清理。旋抛装置旋刀排列示意图如图 7 所示，相邻侧倾旋刀与平直旋刀间安装夹角为 60°；同组圆盘刀座上左右旋刀间安装夹角为 20°；单侧刀轴两组同类旋刀间安装夹角为 10°。作业时每次切割均发生于对称位置处的旋刀，并向种带侧后方抛掷秸茬，实现宽窄行清洁种床构建。

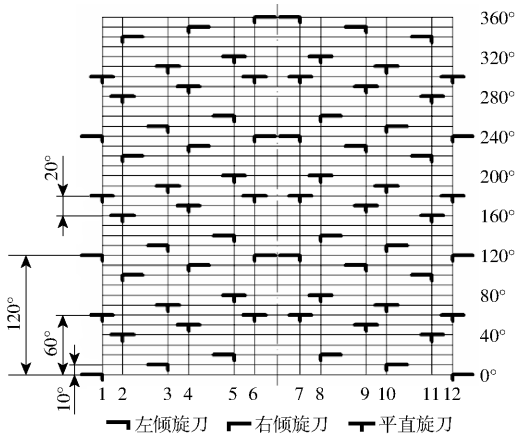


图 7　旋刀排列示意图

Fig. 7　Arrangement diagram of rotary blade

2.3　开沟装置

根据小麦宽窄行播种作业要求，通过在窄行内实施一沟双行播种以满足设计行距。如图 8 所示，采用分流式开沟装置，其中施肥深度 h_1 为 70 ~ 90 mm，播种深度 h_2 为 30 ~ 50 mm。为实现流畅排种与有效分种，开沟器底板采用弧形设计，其侧边与水平面间夹角为下种角度 γ。当下种角度大于小麦种粒自然休止角时，种子能够凭借自身重力顺利排

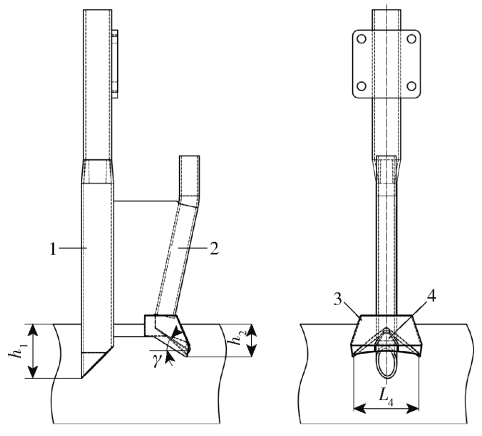


图 8　分流式开沟装置结构示意图

Fig. 8　Structure diagram of division-type furrow opener

1. 肥管　2. 种管　3. 开沟器　4. 分流器

出,通过测量小麦休止角确定为 35°。开沟器两侧出种口间距为 L_4,并通过分流器进一步约束种粒使其沿弧形底板按 120 mm 间距排至种沟。

3 MBD - DEM 联合仿真优化试验

为分析切抛组合式破茬清秸防堵装置与土壤、秸秆及根茬间的相互作用机理,提高装置防堵性能、减少土壤扰动,基于 MBD - DEM 耦合方法进行秸茬清理仿真试验。以种带清秸率、秸茬粘结键破碎率与土壤扰动宽度为评价指标,结合正交旋转组合试验与回归分析寻求旋抛装置最优结构参数与工作参数,为田间试验提供参数依据。

3.1 秸茬覆盖土壤 DEM 模型建立

针对西北一年两熟区冬小麦播种田间实际作业工况,借助 EDEM 软件构建秸茬覆盖土壤离散元模型。分别构建玉米根茬、长秸秆、短秸秆模型,并整合土壤模型建立尺寸(长 × 宽 × 高)为 850 mm × 360 mm × 180 mm 的虚拟土槽。为准确反映作业过程中秸茬出现的弯曲与断裂,选择 Hertz - Mindlin with bonding 模型作为玉米根茬与长秸秆颗粒间的接触模型[28]。采用 JKR 模型模拟玉米根系-土壤、秸秆-土壤及土壤颗粒之间的粘附作用,以提高模型准确度,其余颗粒间力学关系采用 Hertz - Mindlin no slip 模型进行表征。

为保证仿真精度与计算效率,参考田间实际秸茬覆盖情况,在土槽中设置相邻间距为 200 mm 的玉米根茬模型、9 根长秸秆模型以及 95 根短秸秆模型,总颗粒数为 31 582。基于前期对玉米根系结构及分布特点的测量,根系呈伞状向土层深处生长且单根直径为 2.0 ~ 5.5 mm,考虑取样时造成的根系末端损伤,选择直径 1、3、5 mm 的球形颗粒组成不同尺寸玉米根系,并采用 API 方法开发相应的颗粒工厂生成符合实际形态的玉米根茬模型[29]。长秸秆模型采用直径为 8 mm 呈圆形分布的球形颗粒组成长度为 240 mm 的长秸秆模型,相邻长秸秆模型平均间距为 95 mm。为避免分布角度变化而导致的秸茬粘结键破碎率误差,长秸秆分布方式均与机具前进方向垂直。短秸秆模型由直径为 24 mm 的球形颗粒拼接而成,长度为 96 mm。为描述不同深度处根系土壤复合体力学特性差异,采用分层构建方法生成土壤模型,其粒径符合平均值为 16 mm 的正态分布。在作业初始位置设置一段长 100 mm 的缓冲区,以消除土槽边界影响。根据文献[29]选取各材料本征参数与相互间接触参数,秸茬覆盖土壤 DEM 模型如图 9 所示。

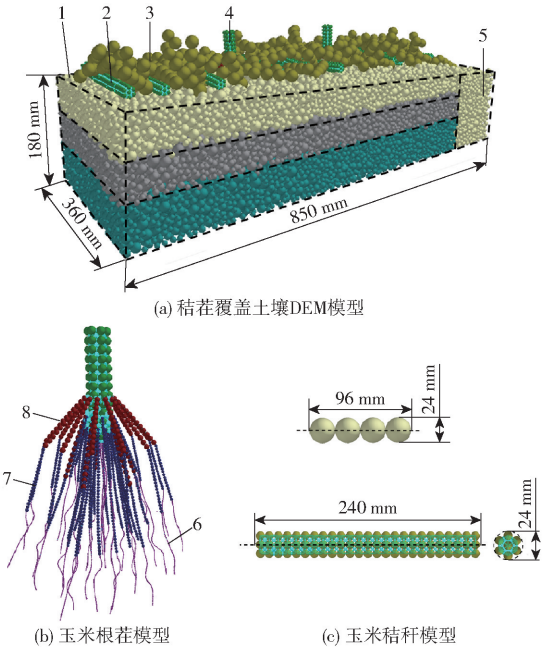


图 9 秸茬覆盖土壤 DEM 模型

Fig. 9 DEM model of soil covered with stubbles and straws

1. 土壤 2. 长秸秆 3. 短秸秆 4. 玉米根茬 5. 缓冲区 6. 1 mm 直径根系 7. 3 mm 直径根系 8. 5 mm 直径根系

3.2 MBD 仿真平台构建

切抛组合式破茬清秸防堵装置工作时包括缺口圆盘对根茬秸秆的被动切割以及旋抛装置对碎秸断秆的主动抛撒两种作业方式,其中缺口圆盘通过其与土壤及秸茬间的摩擦力发生转动以完成切割动作,该过程无法在 EDEM 中准确模拟[11]。因此,运用 Recurdyn 软件构建 MBD 仿真平台来实现被动切割作业仿真。为提升计算效率,对装置三维模型进行简化,保留缺口圆盘及旋抛装置等关键部件。利用 Recurdyn 对上述部件设置约束,具体包括缺口圆盘与旋抛装置沿作业路径的移动副以及围绕刀轴的转动副。根据小麦免耕播种技术要求设置前进速度为 1 m/s,缺口圆盘转动速度由土壤及秸茬摩擦力决定,旋抛装置转动速度根据试验设计方案确定。所有约束及驱动均设置在各部件质心处,MBD 仿真模型如图 10 所示。

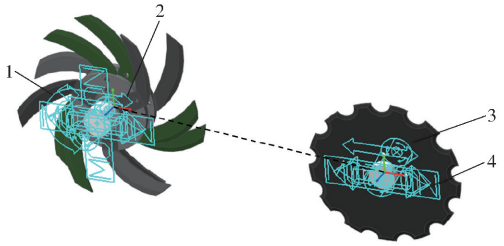


图 10 防堵装置运动仿真模型

Fig. 10 Motion simulation model of anti-blocking device

1. 旋抛装置与刀轴间转动副 2. 旋抛装置与地面间移动副 3. 缺口圆盘与安装轴间转动副 4. 缺口圆盘与地面间移动副

3.3　仿真试验方案

基于所构建的 MBD 与 DEM 仿真平台，利用 Recurdyn 与 EDEM 耦合配置文件完成 MBD－DEM 联合仿真，仿真时间步长设置为 200 ms，总时长为 2 s。以侧倾旋刀倾角、旋抛装置回转速度为试验因素，种带清洁率、秸茬粘结键破碎率和土壤扰动宽度为性能指标开展两因素三水平正交旋转组合试验。结合理论分析结果与变速箱实际调节范围，确定各因素编码如表 2 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Test factors and codes

编码	因素	
	旋刀倾角 X_1/(°)	回转速度 X_2/(r·min^{-1})
－1	20	270
0	25	310
1	30	350

3.4　性能评价指标

种带清洁率为作业前后清理幅宽内剩余秸茬量与原始量之比，根据 EDEM 后处理中的 Bin group 模块统计作业前后种带（宽 120 mm，长 800 mm）内根系、长秸秆、短秸秆颗粒质量，清秸率计算公式为

$$P=\frac{M_a-M_b}{M_a}\times 100\% \tag{19}$$

式中　P——仿真试验种带清洁率，%

M_a——作业前种带秸茬颗粒质量，kg

M_b——作业后种带秸茬颗粒质量，kg

秸茬粘结键破碎率指清理机具作业后玉米根茬与秸秆的碎断情况，当根系与秸秆受切割断裂时，根茬从直立姿态转变为平躺姿态，并且消除根系与土壤间粘附作用，同时长秸秆被切分为短秸秆颗粒团，随后碎茬断秆被旋抛装置抛离种带，从而降低秸茬壅堵概率。由于根系与长秸秆模型均通过粘结键表征变形及断裂状态，因此采用作业后模型断裂粘结键数量与作业前生成的有效粘结键数量之比作为秸茬粘结键破碎率 Q，即

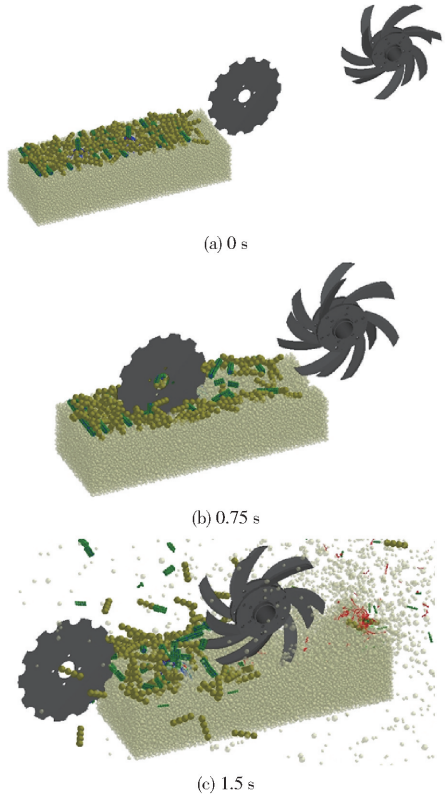
$$Q=\frac{N_B}{N_T}\times 100\% \tag{20}$$

式中　N_B——作业前模型有效粘结键数量

N_T——作业后模型断裂粘结键数量

土壤扰动宽度指防堵装置作业后产生的对表面及耕层土壤受扰动区域的宽度。利用 EDEM 后处理中的 Ruler 工具测量运动速度大于 500 mm/s 的种沟边缘土壤颗粒间的距离，作为土壤扰动宽度。所有仿真试验重复 3 次并取平均值作为最终试验结果。

仿真试验过程如图 11 所示，以侧倾旋刀倾角 20°、回转速度 310 r/min 为例，缺口圆盘随装置前进作业首先切割秸茬，并将长秸秆与根茬整体切分为短秸秆与根茬碎块。由于被动切割下的缺口圆盘转速较低，加之有限的侧向推送能力，导致大部分秸茬碎块依旧残留于种带。旋抛装置开始与土壤接触时，通过平直旋刀与侧倾旋刀共同作用，短秸秆与根茬碎块被二次切割并抛出种带，同时对种床土壤进行切削细碎。



(a) 0 s

(b) 0.75 s

(c) 1.5 s

图 11　MBD－DEM 联合仿真试验过程

Fig. 11　Test process of MBD－DEM coupled simulation

3.5　结果与分析

3.5.1　回归模型与显著性方差分析

试验结果如表 3 所示，共计 13 种因素组合，中心水平组合试验重复 5 次。

借助 Design-Expert 软件对仿真试验结果进行回归分析，建立种带清洁率、秸茬粘结键破碎率与土壤扰动宽度对侧倾旋刀倾角以及旋抛装置转速的二次回归模型，并通过方差分析得出各因素及交互作用对上述指标的显著性检验结果如表 4 所示。

由表 4 可知，种带清洁率、土壤扰动宽度与秸茬粘结键破碎率模型 p 均小于 0.01，表明回归模型极显著。其中转速 X_2 对 3 个指标模型影响均极显著（$p<0.01$）；X_1 对种带清洁率与土壤扰动宽度影响极显著，而对秸茬粘结键破碎率影响显著（$p<0.05$）；交互项 X_1X_2 与 X_2^2 对 3 指标均有显著影响；

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test schematic and results

序号	因素		种带清洁率 Y_1/%	秸茬粘结键破碎率 Y_2/%	土壤扰动宽度 Y_3/mm
	旋刀倾角 X_1/(°)	回转速度 X_2/(r·min^{-1})			
1	20	270	96.1	26.2	129
2	30	270	90.3	26.5	156
3	20	350	95.5	29.7	151
4	30	350	94.5	27.5	162
5	20	310	98.3	26.7	131
6	30	310	91.9	26.2	145
7	25	270	93.8	24.3	144
8	25	350	96.7	27.1	153
9	25	310	95.3	25.2	143
10	25	310	95.5	25.7	142
11	25	310	95.1	24.8	139
12	25	310	94.4	24.9	146
13	25	310	94.8	25.2	145

X_1^2 对秸茬粘结键破碎率影响极显著,而对种带清洁率与土壤扰动宽度无显著性影响;3 个回归模型的失拟项 p 均大于 0.1,表明方程拟合度较高,剔除不显著因素后得到 3 项指标的回归方程为

$$Y_1 = 65.64 - 1.18X_1 + 0.30X_2 + 2.5\times10^{-3}X_1X_2 - 5.51\times10^{-4}X_2^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 78.05 - 2.16X_1 + 0.30X_2 - 3.13\times10^{-3}X_1X_2 + 0.06X_1^2 + 4.84\times10^{-4}X_2^2 \quad (22)$$

$$Y_3 = 351.64 + 7.93X_1 - 2.29X_2 - 0.02X_1X_2 + 4.75\times10^{-3}X_2^2 \quad (23)$$

3.5.2 响应曲面分析

为明确各交互因素对评价指标影响规律,利用 Design-Expert 软件获得各指标的响应曲面如图 12 所示。如图 12a 所示,当侧倾角一定时,种带清洁率随旋抛装置回转速度的增加而增大。这与理论分析结论一致:高转速下刀片赋予秸茬更大的动能,导致

表 4 性能指标方差分析

Tab. 4 ANOVA of performance index

来源	种带清洁率 Y_1				秸茬粘结键破碎率 Y_2				土壤扰动宽度 Y_3			
	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p
模型	31.42	5	37.76	<0.01 **	23.75	5	40.42	<0.01 **	941.43	5	18.44	<0.01 **
X_1	24.00	1	144.20	<0.01 **	0.96	1	8.17	0.02 *	450.67	1	44.12	<0.01 **
X_2	3.53	1	21.19	<0.01 **	8.88	1	75.58	<0.01 **	228.17	1	22.34	<0.01 **
X_1X_2	1.00	1	6.01	0.04 *	1.56	1	13.30	0.01 *	64.00	1	6.27	0.04 *
X_1^2	0.39	1	2.34	0.17	6.42	1	54.60	<0.01 **	12.22	1	1.20	0.31
X_2^2	2.90	1	17.41	<0.01 **	1.66	1	14.09	0.01 *	194.72	1	19.07	<0.01 **
残差	1.17	7			0.82	7			71.49	7		
失拟项	0.37	3	0.61	0.64	0.33	3	0.90	0.52	41.49	3	1.84	0.28
误差	0.80	4			0.49	4			30.00	4		
总和	32.59	12			24.57	12			1012.92	12		

注:* 表示差异显著($p<0.05$);** 表示差异极显著($p<0.01$)。

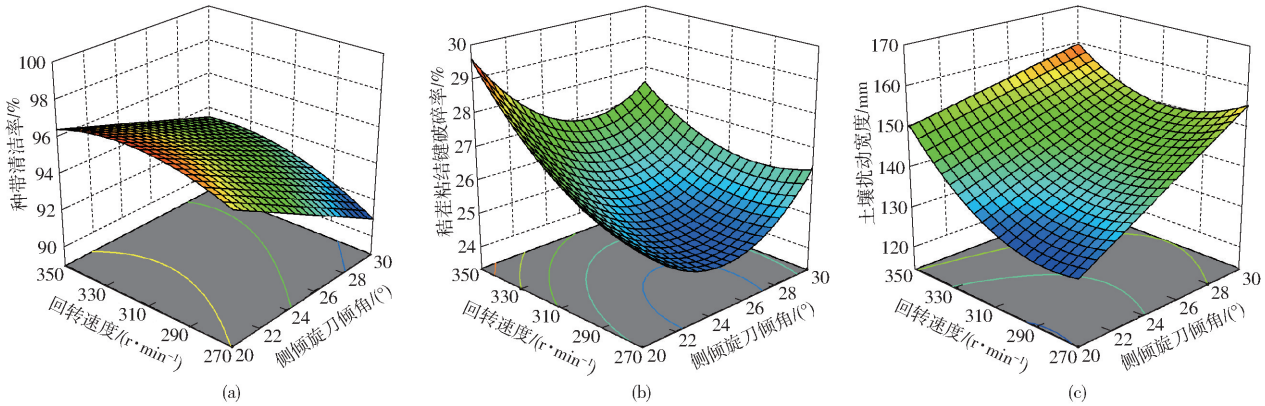


图 12 各因素交互作用对各指标影响的响应曲面

Fig. 12 Response surfaces of interaction of various factors on each indicators

碎茬断秆被抛撒时具有较高的速度与抛撒距离,从而有效清除种带秸茬残留;当回转速度一定时,种带清洁率随侧倾角的增大而减小,原因为侧倾角的增加增大了左、右侧倾旋刀刃线间距,导致部分残留在平直旋刀与侧倾旋刀之间的秸茬无法被有效抛撒。

由图 12b 可知,当回转速度一定时,秸茬粘结键

破碎率随侧倾角的增加呈先下降后上升的趋势，并在 24°～25°时出现最低秸茬粘结键破碎率。当侧倾角一定时，秸茬粘结键破碎率随回转速度的增加而增大，特别在 20°～22°时上升速率明显高于较大倾角。这主要是由于，侧倾旋刀对秸茬的抛撒距离随侧倾角的增加而增大，较小侧倾角时侧倾旋刀对作业幅宽内未及时抛出的秸秆根茬进行了二次切割，加之转速增加进一步提高切割频率，导致颗粒间粘结键的断裂数量增大；当侧倾角进一步增加时，左右倾旋刀对两侧土壤的切削造成秸茬向种带中部聚集，秸茬与土壤间无法形成有支撑切割，秸茬切割率降低；当侧倾角大于 25°时，由于旋抛装置有效作业幅宽的增大增加了被切割秸茬数量，提升了粘结键破碎率。

由图 12c 可知，土壤扰动宽度与侧倾角和回转速度的关系均为正相关，侧倾角增大显著提升了侧倾旋刀对土壤的侧推作用，其导致扰动宽度上升速率明显高于回转速度[23]。过大的土壤扰动会增加机具功耗和刀具磨损，同时影响种带宽度的一致性。因此，应保证种带清洁效果的同时尽可能减小土壤扰动。

3.5.3　参数优化

为获得切抛组合式破茬清秸防堵装置最优参数组合，遵循提高种带清洁率以及秸茬粘结键破碎率，同时降低土壤扰动宽度的原则，结合各因素边界条件建立目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2) \\ \max Y_2(X_1, X_2) \\ \min Y_3(X_1, X_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 20° \leqslant X_1 \leqslant 30° \\ 270\ \text{r/min} \leqslant X_2 \leqslant 350\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

利用 Design-Expert 对式(24)进行多目标优化求解，设置 3 个评价指标重要性排序依次为种带清洁率、秸茬粘结键破碎率与土壤扰动宽度。得到最优参数组合为侧倾旋刀倾角 20°、转速 310 r/min，此时装置种带清洁率为 97.1%，秸茬粘结键破碎率为 27.7%，土壤扰动宽度为 137 mm。基于最优参数进行 3 次仿真优化试验并取平均值，最终得到种带清洁率为 96.9%，秸茬粘结键破碎率为 26.9%，土壤扰动宽度为 139 mm，与预测值相对误差小于 3.1%，表明优化结果可靠，仿真优化结果可为后续田间试验提供依据。

4　田间试验

为验证 MBD－DEM 联合仿真试验结果的准确性及切抛组合式破茬清秸防堵装置作业性能，基于 2BMG－12(6)200 型小麦免耕播种机及最优结构参数完成样机加工与装配，于 2023 年冬小麦播种期在陕西省杨凌区西北农林科技大学保护性耕作试验田进行小麦播种田间试验。试验田土壤质地为壤土，玉米根系分布层土壤性质如表 5 所示。前茬玉米秸秆经收获时联合收获机及收获后灭茬机粉碎处理并均匀覆盖于地表，根茬平均残留量为 61 500 株/hm^2，平均留茬高度为 130 mm；秸秆覆盖量为 2.6 kg/m^2、长度为 91～270 mm、平均直径为 22.7 mm、含水率为 21.5%。试验前调整缺口圆盘入土深度为 105 mm，旋抛装置转速为 310 r/min，整机前进速度为 3～4 km/h。田间试验过程如图 13 所示。

表 5　土壤性质

Tab. 5　Soil properties

参数	深度/mm		
	0～60	60～120	120～180
密度/(kg·m^{-3})	1 614	1 678	1 836
含水率/%	17.59	22.98	20.96
抗剪强度/kPa	143.79	119.75	164.07
紧实度/kPa	46.14	157.15	347.11



(a) 播种作业　　(b) 切抛组合式秸茬清理装置

图 13　田间试验

Fig. 13　Field tests

4.1　评价指标测定方法

4.1.1　机具通过性

田间试验根据 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》规定的检测指标及方法，测量区长度设置为 60 m，统计正常速度下单次往返作业过程中发生轻度、中度和重度堵塞次数，无堵塞发生或一次轻度堵塞视为合格，每次测试重复 3 次。

4.1.2　种带清洁率

试验前在作业区内设置间隔为 5 m 的连续测点 10 处，统计各测点单位测试长度内秸秆及根茬质量。作业后收集并称量对应测点种带上残留的秸秆及碎茬，计算得到切抛组合式破茬清秸防堵装置种带清秸率为

$$p = \frac{m_a - m_b}{m_a} \times 100\% \tag{25}$$

式中　p——种带清洁率，%

m_a——作业前种带秸茬质量,kg

m_b——作业后种带秸茬质量,kg

4.1.3 破茬率

统计试验前单组防堵装置作业路径内的玉米根茬数量。试验后,人工检查播种行及秸茬覆盖行内的完整立茬数量,测量点设置与种带清洁率一致。破茬率计算公式为

$$q = \frac{n_a - n_b}{n_a} \times 100\% \tag{26}$$

式中 q——破茬率,%

n_a——作业前完整根茬数量

n_b——作业后完整根茬数量

4.1.4 土壤扰动量

切抛组合式秸茬清理装置完成作业后,在 60 m 作业区内等间距选取 10 个测量点,人工移除受扰动的表层虚土以露出种床,测量土壤扰动宽度并计算土壤扰动量为[25]

$$\eta = \frac{L_d}{L_4} \times 100\% \tag{27}$$

式中 η——土壤扰动量,%

L_d——土壤扰动宽度,mm

4.1.5 出苗率

整机采用 6 行 12 苗带播种方式,监测小麦播种后 30 d 内的出苗情况。利用对角线取样法在播种区取 3 个测点,统计各点播种行长度 10 cm 内的出苗数并结合实际播种量计算出苗率。

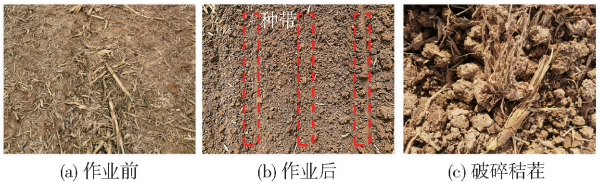
4.2 试验结果

4.2.1 机具通过性

当播种机以前进速度 3 ~ 4 km/h 作业时,测试行程中均未出现任何程度堵塞以及刀轴缠草情况,表明切抛组合式秸茬清理装置能够有效防止玉米根茬及秸秆挂接、堵塞播种设备,同时对根茬的切分处理有助于碎茬断秆纵向流动,保证良好的机具通过性。

4.2.2 种带清洁率与破茬率

作业前后种带秸杆残茬分布情况如图 14 所示。倾斜布置方式提高了缺口圆盘滑切性能,有效破坏根土复合体结构与长秸秆,使种带根茬与土壤分离并平置于地表;优化后的旋刀刃线更易于切削土壤与碎断秸茬,并通过左右侧倾旋刀倾斜刀身将窄行中的根茬秸秆顺利抛送至种沟两侧,提高了种带宽度稳定性。由表 6 可知,切抛组合式破茬清秸防堵装置平均种带清洁率与破茬率分别为 90.1% 和 96.2%,满足免少耕小麦宽幅沟播对种床环境的农艺要求。



(a) 作业前 (b) 作业后 (c) 破碎秸茬

图 14 作业效果

Fig. 14 Work performances

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Field test results %

序号	种带清洁率	破茬率
1	90.3	94.7
2	88.9	95.8
3	91.5	97.2
4	89.7	96.3
5	92.0	97.9
6	88.3	96.1
7	87.8	98.0
8	90.9	94.8
9	92.4	95.4
10	89.1	95.6
平均值	91.31	96.2

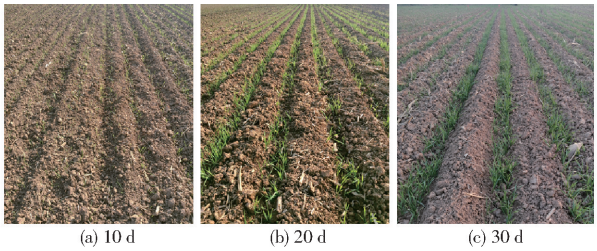
4.2.3 土壤扰动量与出苗率

切抛组合式秸茬清理装置作业后平均土壤扰动宽度为 127 mm,平均土壤扰动量为 6.9%(表 7)。小麦出苗效果如图 15 所示,播种后 10、20、30 d 内的出苗率分别为 89.25%、91.33% 和 92.57%。表明最优参数下秸茬清理装置能够为种子发芽和根系生长提供洁净、疏松的种床环境,且小麦出苗均匀整齐,满足小麦宽窄行播种要求。

表 7 土壤扰动测定结果

Tab. 7 Results of soild isturbance

序号	土壤扰动宽度/mm	土壤扰动量/%
1	127	5.83
2	115	4.17
3	125	4.17
4	135	12.50
5	134	11.67
6	130	8.33
7	131	9.17
8	124	3.33
9	117	2.50
10	129	7.50
平均值	127	6.9



(a) 10 d (b) 20 d (c) 30 d

图 15 田间试验小麦出苗情况

Fig. 15 Wheat emergence of field experiment

对比 MBD－DEM 联合仿真试验结果可知，田间试验种带清洁率与土壤扰动量均略低于仿真结果，原因为仿真土壤表面较实际环境更为平整，且秸秆根茬分布更加均匀，而田间土壤地表起伏较大，且秸秆含水率、长度与覆盖量有一定差异，从而降低了种带清洁率。此外，仿真土壤颗粒间的间隙导致其无法如实际土壤接触紧密，造成了仿真土壤扰动宽度增大[25]。

5　结论

（1）提出了先被动切割、后主动抛撒的小麦宽幅沟播种带清理方法；设计了一种适用于西北地区玉米秸茬覆盖地冬小麦免耕播种的切抛组合式破茬清秸防堵装置，通过纵向布置倾斜缺口圆盘与旋抛装置同步作业完成种带秸茬的破碎与清理，避免了玉米秸茬聚集堵塞开沟播种装置。适配防堵装置设计了分流式开沟器，实现符合预定行距的宽窄行播种农艺需求。

（2）结合力学和运动学理论分析确定了缺口圆盘倾角与偏角参数；根据滑切理论设计了平直旋刀与侧倾旋刀刃线结构；运用 EDEM 与 Recurdyn 软件建立 MBD－DEM 联合仿真平台，以种带清洁率、秸茬粘结键破碎率与土壤扰动宽度为指标开展旋抛装置关键参数优化仿真试验。通过对各指标回归模型进行多目标优化得出最优参数组合为侧倾旋刀倾角 20°、回转速度 310 r/min。仿真试验结果表明，优化后防堵装置种带清洁率为 96.9%，秸茬粘结键破碎率为 26.9%，土壤扰动宽度为 139 mm。

（3）玉米秸茬覆盖地小麦播种试验表明，装配有切抛组合式破茬清秸防堵装置的播种机未发生秸茬堵塞现象，种床清洁率与破茬率分别达到 90.1% 和 96.2%，土壤扰动宽度与扰动量分别为 127 mm 和 6.9%，整机播种后小麦出苗均匀且作业性能稳定，各项指标均满足宽幅沟播小麦免耕播种农艺要求。

参　考　文　献

[1] 陈智，麻硕士，赵永来，等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报，2010，26(1)：118－22.
CHEN Zhi, MA Shuoshi, ZHAO Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 118－122. (in Chinese)

[2] 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 Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1－19. (in Chinese)

[3] 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 Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, 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. (in Chinese)

[4] 王庆杰，曹鑫鹏，王超，等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：1－15.
WANG Qingjie, CAO Xingpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 1－15. (in Chinese)

[5] 袁盼盼，李洪文，蒋贵菊，等. 滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(6)：43－52.
YUAN Panpan, LI Hongwen, JIANG Guiju, et al. Design and experiment of straw cleaning device for wide narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 43－52. (in Chinese)

[6] MALASLI M Z, CELIK A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener[J]. Soil Tillage Research, 2019, 194: 104304.

[7] ZENG Z W, THOMS D, CHEN Y, et al. Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1－20.

[8] 郭笑，王首驿，袁天怡，等. 小麦免耕播种机研究现状及展望[J]. 作物杂志，2019(2)：39－45.
GUO Xiao, WANG Shouyi, YUAN Tianyi, et al. Research status and prospects on wheat no-tillage seeder[J]. Crops, 2019(2): 39－45. (in Chinese)

[9] 侯守印，纪张驰，薛东辉，等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(7)：111－122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111－122. (in Chinese)

[10] VAITAUSKIENĖ K, ŠARAUSKIS E, ROMANECKAS K, et al. Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 139－146.

[11] 曹鑫鹏，王庆杰，李洪文，等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：36－44.
CAO Xingpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of

corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):36 - 44. (in Chinese)
[12] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6):19 - 27,37.
LIN Jing,LÜ Zhouyi,LI Hongzhe,et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(6):19 - 27,37. (in Chinese)
[13] SHI Y Y,SUN X,WANG X C,et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,166:105021.
[14] 段益平,吴明亮,吕江南,等. 免耕播种防堵技术研究现状及发展建议[J]. 中国农业科技导报,2022,24(2):124 - 135.
DUAN Yiping,WU Mingliang,LÜ Jiangnan,et al. Research status and development suggestions of no-tillage seeding anti-blocking technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2022,24(2):124 - 135. (in Chinese)
[15] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):99 - 110,95.
LIAO Qingxi,XIE Haoming,ZHANG Qingsong,et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):99 - 110,95. (in Chinese)
[16] 赵宏波,何进,李洪文,等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):65 - 75.
ZHAO Hongbo,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):65 - 75. (in Chinese)
[17] CHEN G,WANG Q,LI H,et al. Experimental research on vertical straw cleaning and soil tillage device based on Soil - Straw composite model[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,216:108510.
[18] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 基于 EDEM - ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报,2022,38(19):10 - 22.
ZHU Huibin,WU Xian,BAI Lizhen,et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM - ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(19):10 - 22. (in Chinese)
[19] 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 Jiayi,ZHAO Shuhong,YANG Zhijie,et al. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip less tillage operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):51 - 61. (in Chinese)
[20] ZHANG S L,JIA X,DONG J X,et al. Optimization of operating angles of disc coulters for maize residue management using discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,218:108619.
[21] 陕西省市场监督管理局. 小麦机械化宽幅沟播技术规范:DB61/T 1652—2023[S]. 2023.
[22] 褚春年,魏礼,王耀凤,等. 陕西关中地区小麦宽幅沟播机械化技术规程[J]. 现代化农业,2022(11):82 - 84.
[23] 蒋金琳,龚丽农,王东伟,等. 免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(21):17 - 22.
JIANG Jinlin,GONG Linong,WANG Dongwei,et al. Development and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(21):17 - 22. (in Chinese)
[24] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等. 免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):42 - 52.
YAO Wenyan,ZHAO Dianbao,MIAO Hequan,et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):42 - 52. (in Chinese)
[25] 赵宏波,何进,郑智旗,等. 少免耕播种机条带型行间旋抛清秸防堵装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(12):24 - 34.
ZHAO Hongbo,HE Jin,ZHENG Zhiqi,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. (in Chinese)
[26] 彭嵩植,吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(二)[J]. 江苏工学院学报,1983(1):41 - 56.
[27] 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 root-cutting blade in grassland[J]. Journal of China Agricultural University,2016,21(6):100 - 107. (in Chinese)
[28] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报,2021,37(20):53 - 62.
ZHAO Shuhong,GAO Lianlong,YUAN Yiwen,et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(20):53 - 62. (in Chinese)
[29] LIU F Y,ZHANG J,CHEN J. Modeling of flexible wheat straw by discrete element method and its parameters calibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2018,11(3):42 - 46.
[30] ZHANG S L,ZHAO H B,WANG X Z,et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,204:107519.