doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.006

秸秆分拨引导式玉米免耕防堵机构设计与试验

牛萌萌¹ 方会敏¹ CHANDIO F A² 史 嵩¹ 薛艳芳³ 刘 虎¹ (1.山东省农业机械科学研究院,济南 250100; 2.信德农业大学农业工程学院,坦杜阿拉亚 70060; 3.山东省农业科学院玉米研究所,济南 250100)

摘要:为解决免耕播种机麦茬地作业的拥堵问题,在拨抛式防堵装置的基础上提出秸秆分拨引导的防堵设计思路, 设计了阿基米德螺线型防堵机构。该装置可引导秸秆攀升,实现层叠堆积,缓解秸秆平行拨离苗带时造成的秸秆 局部集中,从而实现有效防堵。运用离散元分析软件 EDEM 2.7,建立了秸秆-土壤-防堵机构相互作用的仿真模 型,分别对单个目标秸秆和秸秆群体进行运动追踪,验证了分拨引导和层叠堆积理念。对试验样机进行了田间性 能试验和作业参数优选试验,结果表明:在播种过程中,阿基米德螺线型防堵机构作业顺畅,未发生中、重度堵塞及 晾籽;防堵机构最佳工作参数为前进速度7 km/h、转速 600 r/min,此时秸秆清除率最高,为 92.6%。本文设计的防 堵机构性能优于前期课题组设计的防堵机构和某商品化防堵机构。

关键词:玉米;免耕播种机;防堵机构;分拨引导;阿基米德螺线

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)08-0052-07

Design and Experiment of Separating-guiding Anti-blocking Mechanism for No-tillage Maize Planter

NIU Mengmeng¹ FANG Huimin¹ CHANDIO F A² SHI Song¹ XUE Yanfang³ LIU Hu¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji' nan 250100, China

2. Faculty of Agricultural Engineering, Sindh Agriculture University, Tandojam 70060, Pakistan

3. Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Science, Ji' nan 250100, China)

Abstract: The "separating-guiding" thought which utilize the anti-blocking mechanism to guide the straw to ascend and move along the rotating wheel was proposed. Based on this thought, a cleaning mechanism on account of Archimedes spiral was designed and tested. In theoretical analysis, it was found that the Archimedes spiral could guide the straw to move up along with the outline under all the forces from mechanism and other straw at the beginning of contact, later the straw obtained speed and was thrown away because of the increased centrifugal force and decreased holding force from straw. All the straw was moved in the same way and formed straw group flow, accordingly accomplished the straw shinnying and stacking. Besides, the moving behavior of straw individual and straw group were also investigated via DEM simulation. The field experiment was also done to investigate the performance of no-tillage maize planter and confirm the optimal working parameter of the Archimedes spiral anti-blocking mechanism. The experimental results showed that there were no blockage and exposed seeds. It can be inferred that the optimal working parameter of Archimedes spiral mechanism was 7 km/h of forward speed and 600 r/min of rotational speed. The mechanism designed can provide reference for the design and optimization of the anti-blocking mechanism of no-tillage maize planter.

Key words: maize; no-tillage planter; anti-blocking mechanism; separating-guiding; Archimedes spiral

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-06-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301005)、山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE021)和山东省重点研发计划项目 (2017GNC11110)

作者简介:牛萌萌(1988—),男,工程师,主要从事免耕播种技术与机具研究,E-mail: 979379855@ qq. com

通信作者:方会敏(1989—),女,工程师,博士,主要从事保护性耕作技术研究,E-mail: hdldl@126.com

0 引言

小麦收获后直接免耕播种玉米利于培肥地力、 蓄水保墒、改善环境等^[1],但大量存在的麦秸秆给 玉米播种作业带来了困难。播种机在麦茬地作业时 极易堵塞,从而直接导致播种不均匀、晾籽等问题, 进而影响出苗和产量^[2]。小麦秸秆堵塞已成为阻 碍玉米免耕播种质量提高的关键制约因素之一。

小麦秸秆是各向异性、非均质和非线性的柔性体。秸秆个体在外部作用力下会发生弯曲,但小麦秸秆具有良好的弹性恢复能力,当秸秆悬臂弯曲时,将有平均70%的变形可恢复^[3]。而对于秸秆群体而言,在压缩时小麦秸秆群体的成型性较玉米秸秆和棉花秸秆差^[4];要达到相同的压缩密度,小麦秸秆发生的应变比水稻秸秆和玉米秸秆大^[5]。所以,麦秸秆在受外力作用后发生变形、且易回弹,麦秸秆在被机构水平拨离苗带后就会发生一定程度的回填。

目前免耕防堵形式一般分为切茬防堵和拨抛防 堵。切茬防堵技术主要利用圆盘开沟器实现滚动切 茬,在国外免耕播种机上使用较多[6-11]。拨抛防堵 技术是在开沟器前部或侧部增设防堵机构等实现秸 秆的移位[12-14]。采取拨抛方式的秸秆处理方法,能 在一定程度上缓解玉米免耕播种机堵塞问题。王韦 韦等^[13]设计的主动式秸秆移位装置,张喜瑞等^[15] 设计的水平拨草轮,王庆杰等^[16]设计的伸缩拨杆, 高娜娜等[17]设计的驱动分禾杆与被动分禾栅板组 合装置,都是将苗带内秸秆平行拨/挤至机具一侧或 两侧。而苗带内秸秆向苗带外的平行运动会加剧原 有苗带外秸秆的密集程度,出现秸秆回填阻碍播种 的情况。姚宗路等^[18]借助 Carr 指数法得出,麦秸的 压缩率大,属于难流动物料。基于此,可通过设计某 种机构使其引导部分秸秆攀升至其他秸秆之上,形 成层叠式堆积,从而缓解秸秆单纯水平流动时对原 位置秸秆的挤压,减少秸秆回填。

本文提出秸秆分拨引导的防堵思路,在拨抛式 防堵装置的基础上,通过引导秸秆攀升、实现上升层 叠的方式,充分利用苗带两侧的垂直空间,缓解秸秆 平行拨离苗带时造成的秸秆局部集中,从而实现有 效防堵。设计阿基米德螺线型防堵机构,并将其安 装在玉米免耕播种机上,通过秸秆的运动行为验证 本文思路,并以机具通过性、晾籽率和秸秆清除率为 指标,进行田间作业性能试验。

1 工作原理与结构设计

1.1 结构

阿基米德螺线型液力主动防缠开沟施肥装置主

要由动力输出部件、防缠拨草部件和开沟施肥部件 3部分组成,如图1所示。动力输出部件为液压马 达,防缠拨草部件的拨草轮呈螺旋圆锥状,开沟施肥 部件则是刀刃型开沟铲。



 Fig. 1 No-till maize planter

 1. 三点悬挂部件 2. 机架 3. 液力主动防缠开沟施肥部件 4. 四

1. 三点总挂邮件 2. 祝朱 3. 祝万至幼的强升沟池北邮件 4. 卤
 杆浮动部件 5. 开沟播种部件 6. 播种器 7. 驱动轮 8. 种箱
 9. 肥箱 10. 液压马达 11. 联轴器 12. 立式轴承座 13. 拨草
 轮 14. 卧式轴承座 15. 开沟铲 16. 施肥管 17. 铲柄 18. 安
 装板

每组阿基米德螺线型液力主动防缠开沟施肥装 置通过其上的安装板用U型螺栓固定在机架上,液 压马达的动力由牵引拖拉机提供。装置中拨草轮的 上下两端分别通过上端的立式轴承座和下端的卧式 轴承座安装在铲柄和开沟铲上,通过联轴器将拨草 轮上端与液压马达下端输出轴相连。螺旋圆锥状拨 草轮包含4个拨草曲面体,每个曲面体的竖直投影 外轮廓线为阿基米德螺线(图2),4个拨草曲面体 均布地焊接在安装轴上。拨草曲面体下端的旋转空 间能将卧式轴承座完全包裹,有效避免拨草轮下端 的缠草壅土问题。





图 2 阿基米德螺线型拨草轮 Fig. 2 Archimedes spiral clearing wheel 1. 安装轴 2. 拨草曲面体

(2)

阿基米德螺线型液力主动防缠开沟施肥装置集 成安装在玉米免耕播种机上,整机技术参数见表1。

表1 玉米免耕播种机主要技术参数

 Tab. 1
 Main parameters of no-till maize planter

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 550 ×1 670 ×980
机具质量/kg	250
配套动力/kW	≥18.38
播种行数	3
行距/mm	600 ~ 800
开沟深度/mm	60 ~ 80
施肥深度/mm	60 ~ 80
播种深度/mm	30 ~ 50
最大施肥量/(kg·hm ⁻²)	750
播种量/(kg·hm ⁻²)	22. 5 ~ 37. 5
液压系统额定压力/MPa	20
液压泵额定转速/ $(r \cdot min^{-1})$	2 000

1.2 工作原理

引导秸秆攀升实现上升层叠的分拨引导防堵作 业思路是指:待播区地表上的秸秆在防堵机构旋转 扰动下,沿着逆时针方向向苗带一侧运动;运动过程 中秸秆在拨爪阿基米德螺线的引导作用和周围秸秆 的挤压作用下,实现沿拨爪上升并旋转的复合运动; 之后沿拨草轮旋转方向被抛出。实现充分利用苗带 两侧的垂直空间,缓解秸秆平行拨离苗带时造成的 秸秆局部集中。通过拨爪分拨与阿基米德螺线引导 的双重作用,实现秸秆远离苗带并减少回填。

1.3 拨草轮设计

拨草轮作业运动示意图如图 3 所示。设计时选 择拨草轮的最大旋转半径 r_o(最低作用点的旋转半 径)为 60 mm,此时拨草轮下端外轮廓恰与开沟铲座 边缘对齐,以消除其入土时对土壤造成的过多扰动。 进一步考虑加工工艺和难度,选定最小旋转半径 r_s (最高作用点的旋转半径)为 20 mm,安装轴半径 r_z 为 10 mm。



Fig. 3 Schematics of motion of cleaning wheel

拨草轮的最佳旋转速度应满足拨草轮旋转作用 空间与前进作业速度下产生的待作用空间实现等量 交换。参照螺旋输送生产率计算公式^[19],拨草轮在 单位时间内的拨草作业空间应满足:抵消免耕播种 机以某前进速度在单位时间内沿前进方向产生的播 种苗带上的待拨草体积,即

$$2nt_0 zr_a r_o = a\lambda v_s t_0 B \tag{1}$$

λ——作业空间重叠系数,拨草轮实际工作 时需满足 λ≥1

v_s——作业前进速度,km/h

 t_0 ——单位工作时间,s

B----播种苗带宽度,mm

式(1)中苗带宽度 *B*等于拨草轮直径 2 r_o ,即 式(1)化简后为: $nz(r_o - r_z) = a\lambda v_s$,取 $v_s = 7$ km/h, 则拨草轮需要的工作转速 $n \ge 584$ r/min。

2 秸秆运动定性分析

2.1 秸秆物理及力学性质

在 Instron5943 型电子万能试验机上对秸秆进 行剪切和弯曲性能试验;同时使用游标卡尺和直尺, 对小麦秸秆的厚度、直径等参数进行测量,秸秆的物 理及力学性质参数见表2。

表 2 小麦秸秆主要物理和力学性质参数

Tab. 2 Main physical and mechanical parameters of wheat straw

参数	数值
平均厚度/mm	0.31
平均直径/mm	3.15
抗剪强度/MPa	3.01
抗弯强度/MPa	6.97

秸秆受力发生变形,形变达到一定程度后不可恢复。秸秆受力发生弯曲,秸秆的变形随着施加作用力的增加而增加。悬臂弯曲时,秸秆发生不可恢复永久变形时的作用力为0.84 N,此时秸秆变形挠度为39 mm;简支弯曲时,秸秆发生永久不可恢复变形时的作用力为25.94 N,此时秸秆变形挠度为12 mm。

无论秸秆以悬臂或者简支方式受力,若施加力 未达到一定值时,秸秆的变形都可以恢复,秸秆的这 种弹性恢复能力导致防堵机构将秸秆水平拨离苗带 后秸秆群体的短时间急剧压缩极易回填苗带阻碍播 种。基于秸秆的此力学性质,设计阿基米德螺线型 拨草轮,利用曲线引导秸秆克服压缩移出苗带,实现 秸秆群体的层叠式堆积,缓解水平压缩,减少秸秆 回填。

2.2 秸秆动力学分析

如图 4(图中 v 为秸秆的合速度,m/s)所示,螺 旋拨草轮工作时,位于拨草轮前方的目标秸秆个体 在初始阶段受到来自周围秸秆的挤压力、拨草轮摩 擦力等作用,在各作用力作用下沿着拨草轮的螺旋 外轮廓线向上滑移并随拨草轮旋转运动;在此过程 中,目标秸秆运动速度逐渐增加。目标秸秆在拨草 轮作用下运动至拨草轮侧方后,周围秸秆对目标秸 秆的作用力变小,目标秸秆在渐大的离心力和渐小 的秸秆挤压力等作用下,沿斜上方被向外抛出。每 个秸秆个体皆以类似运动方式运动,秸秆群体的运 动形式呈流动状。在阿基米德螺线型拨草轮作用 下,秸秆群体不断地向苗带侧呈分层式集堆,有效清 除了播种时苗带内的秸秆。



Fig. 4 Force analysis and motion analysis of straw

如图 4a 所示,目标秸秆受到来自周围秸秆的作 用力,其沿拨草曲面切线和法线方向的合力分别为

$$\begin{cases} F_{sn} = F_{s3} \cos\alpha_n - F_{s2} \sin\alpha_n \\ F_{s1} = F_{s3} \sin\alpha_n + F_{s2} \cos\alpha_n \end{cases}$$
(3)

- 式中 F_{sn}——周围秸秆对目标秸秆沿拨草曲面切 线方向的合力,N
 - F_{st}——周围秸秆对目标秸秆沿拨草曲面法 线方向的合力,N

 α_n ——拨草曲面的螺旋升角,(°)

而目标秸秆受到来自拨草轮曲面的沿曲面切线 和法线方向的力分别为

$$\begin{cases} F_{m3} = (F_{s3}\sin\alpha_n + F_{s2}\cos\alpha_n)\mu\\ F_{m1} = -F_{s3}\sin\alpha_n - F_{s2}\cos\alpha_n + K \end{cases}$$
(4)

其

- 式中 F_{m3}——拨草轮曲面对目标秸秆沿拨草曲面 切线方向的摩擦力,N
 - F_{m1}——拨草轮曲面对目标秸秆沿拨草曲面

法线方向的作用力,N μ-----秸秆与拨草轮之间的摩擦因数 K-----目标秸秆受到的科氏力,N

- s-----目标秸秆质点动坐标值,m
- *t*——时间,s
- *m*——目标秸秆的质量,g

ω——拨草轮的旋转角速度, rad/s

在拨草轮曲面和周围秸秆共同作用下,目标秸 秆沿螺旋拨草曲面向上滑移,结合式(3)和式(4)可 得目标秸秆沿拨草曲面切线方向运动的微分方程为

$$m \frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}^2 t} = F_{s3} \cos \alpha_n - F_{s2} \sin \alpha_n - F_{s2} \sin \alpha_n - F_{s3} \sin$$

$$(F_{s3}\sin\alpha_n + F_{s2}\cos\alpha_n)\mu \tag{6}$$

在目标秸秆与拨草轮曲面接触初期,前方秸秆 对目标秸秆向后的推力 *F*_{s1}和拨草轮对目标秸秆沿 前进方向的推力 *F*_{m2}基本为一对平衡力。但当目标 秸秆在拨草轮作用下运动至拨草轮侧方以后,周围 秸秆对目标秸秆的作用力变小,目标秸秆在离心力 *F*_a 的作用下,沿斜上方被向外抛出,离心力为

$$F_a = mr_a \omega^2 \tag{7}$$

式中 r____不同高度作用点的旋转半径,mm

拨草曲面体的竖直投影外轮廓线为阿基米德螺线,其极坐标方程为

$$r_n = r_o - (r_o - r_s) \frac{\theta_n}{\pi} \quad (0 \leq \theta_n \leq \pi) \tag{8}$$

式中 θ_n——螺旋线上不同高度作用点相对于最低 作用点的旋转角,rad

如图 4b 所示,阿基米德螺线型拨草轮螺旋线上 各点的水平圆周速度为

$$v_r = \omega r_n \tag{9}$$

拨草轮螺旋线上不同高度作用点,所对应的半 径相同的圆柱面上的螺旋轮廓线切线方向与水平面 之间的夹角 α_n 为

$$\alpha_n = \arccos \frac{\pi r_n}{\sqrt{(\pi r_n)^2 + l^2}}$$
(10)

式中 1----螺旋线旋转 180°的垂直旋升距离, mm

目标秸秆相对于作用点沿螺旋轮廓线切线方向 的相对速度 v_k 沿对应半径的圆柱螺旋线切线方向 的分速度 v_k 为

$$v_{k1} = \omega r_n k \frac{1}{\cos\alpha_n} = \frac{\omega k}{\pi} \sqrt{(\pi r_n)^2 + l^2} \qquad (11)$$

式中 k——滑移系数,k<1

依据合速度与分速度的正交分解关系,可得

$$v_k = \frac{v_{k1}}{\cos\beta} \tag{12}$$

$$v_{k2} = v_{k1} \tan\beta \tag{13}$$

式中 v_{k2} —— v_k 指向旋转中心方向的分速度,m/s β ——分速度 v_{k1} 与速度 v_k 之间的夹角,(°)

图 4b 中,螺旋拨草轮工作时,在秸秆沿着螺旋 外轮廓向上滑移的过程中,秸秆相对于拨草轮的运 动会产生一个向后的分速度,即 v_{k2},此分速度可以 缓解由于机具的作业前进速度 v_s 而引起的向前推 拥秸秆现象。

3 秸秆运动定量分析

运用离散元分析软件 EDEM 2.7 建立秸秆-土 壤-防堵机构相互作用的仿真模型,如图 5 所示。仿 真共生成 60 000 个土壤颗粒和 2 400 个秸秆颗粒 (36、76、116 mm 秸秆颗粒各 800 个)。选用的土壤 颗粒半径为 5 mm,秸秆颗粒半径为 3 mm、球心间隔 为 5 mm;仿真过程中使用的防堵机构及土壤、秸秆 颗粒的材料参数和相互接触参数参照文献[20 -21]。仿真初期,以 H - M bongding 模型生成土壤颗 粒,然后在其表面以自然堆积状态生成秸秆颗粒。



Fig. 5 Simulation model of straw – soil – anti-blocking mechanism interaction

3.1 单个秸秆的运动

选择一秸秆作为秸秆示踪器,追踪其在不同时 刻的运动,见图6。仿真开始时,该秸秆静止位于防 堵机构前方地表;后在防堵机构和周围秸秆群体的 综合作用下,以一定的速度沿着机构旋转方向攀升; 之后,秸秆在渐大的离心力和渐小的秸秆支撑力作 用下被抛出。此秸秆示踪器的运动验证了本文的引 导秸秆攀升的防堵思路。



 (a) 0.12 s
 (b) 0.19 s
 (c) 0.26 s

 图 6
 秸秆在不同时刻的运动位置

Fig. 6 Location of straw particle at different time

3.2 秸秆群体的运动

利用建立的秸秆全覆盖模型,对阿基米德螺线

式防堵机构工作范围内所有秸秆颗粒的运动进行追踪。仿真开始前随机生成的秸秆颗粒位置为秸秆初始位置;仿真结束后记录每个秸秆颗粒的最终位置,即为该秸秆终了位置。仿真开始前,所有秸秆在垂直方向主要分布在130~180 mm范围内,其中36、76、116 mm秸秆在此范围的比例分别为95.5%、95.1%和88.4%。仿真结束后,36、76、116 mm的秸秆在此范围的比例分别降为56.6%、47.4%和39.1%。而31.2%的36 mm、46.8%的76 mm和55.9%的116 mm秸秆最终位置在180 mm以上范围内。

对 180 mm 以上范围的秸秆,以垂直坐标增量为 10 mm 进行秸秆垂直位置的进一步细分,见图 7。3 种 长度的秸秆在垂直方向上的分布相对比较均匀,且 越长的秸秆上升比例越大。图中秸秆群体在垂直方 向的分布证实了防堵机构作用后的秸秆充分利用了 苗带侧的垂直空间,缓解了秸秆的局部集中,验证了 本文的实现秸秆上升层叠的防堵思路。



4 田间试验

4.1 试验条件

试验于2018年7月7日在山东省农业机械科 学研究院章丘试验田进行,该试验田常年作业模式为 小麦玉米一年两熟。试验时秸秆覆盖量1.43 kg/m², 秸秆含水率为19.4%。土壤密度为1.72 g/cm³, 0~5 cm、5~10 cm 土层内土壤平均含水率分别为 11.5%和12.5%,土壤紧实度为1.23 MPa。

4.2 试验方法

防堵作业性能中的机具通过性和晾籽率指标及 测试方法参照文献[22];另外加入了秸秆清除率指 标^[22],考查阿基米德螺线型防堵机构对秸秆的拨撒 清除能力。

4.3 试验结果

阿基米德螺线型防堵机构安装在免耕播种机机 架上的田间作业效果见图 8。

4.3.1 机具通过性与晾籽率

在播种过程中,阿基米德螺线型防堵机构作业 顺畅,未发生中、重度堵塞及晾籽。



图 8 装有防堵机构的玉米免耕播种机作业效果 Fig. 8 Sowing effect of no-till maize planter equipped with Archimedes spiral anti-blocking mechanism

4.3.2 秸秆清除率

防堵机构在不同工作参数下工作时的秸秆清除 率见图 9。不同前进速度下对应秸秆清除效果最优 时的工作转速不同:当机具前进速度较低(2 km/h 或 4 km/h)时,3 种机构转速下的秸秆清除率对比显 示低转速(400 r/min)时的秸秆清除率最高;当机具前 进速度高于 4 km/h 时,防堵机构转速为 600 r/min 与 各前进速度搭配作业的秸秆清除效果最优。旋转部 件转速越高,对周围秸秆的扰动范围越大,因此防堵 机构的最佳工作转速并不是在机构转速最高时。





对于同一转速下的秸秆清除率而言,清除率随 着前进速度的变化无明显趋势。但是相同转速下对 应秸秆清除效果最优的前进速度相同,即防堵机构 转速为400、600、800 r/min时,最大清除率都发生在 前进速度为7 km/h时。

综上所述,防堵机构最佳工作参数为前进速度 7 km/h、转速 600 r/min,这与式(1)的结论相符。

4.3.3 与其他防堵机构对比

与课题组设计的圆辊拨爪式防堵机构及某商品 化防堵机构的作业效果进行对比,2/3 型圆辊拨爪 式防堵机构作业顺畅,未发生中、重度堵塞及晾籽, 秸秆清除率为86.7%,出苗率为98.2%;某商品化 防堵机构发生了1次严重堵塞,晾籽率为1.6%,秸 秆清除率为78.5%,出苗率为78.9%^[23]。

本文设计的防堵机构作业顺畅,未发生中、重度 堵塞及晾籽,秸秆清除率为92.6%,出苗率为 97.4%。

5 结论

(1)提出了分拨引导的防堵思路,通过引导秸 秆攀升、实现上升层叠的方式,充分利用苗带两侧的 垂直空间,实现有效防堵。基于此思路,设计了阿基 米德螺线型防堵机构,并进行了试验。

(2)对秸秆运动的分析表明,阿基米德螺线型 拨草轮能够引导秸秆沿拨爪上升,并随拨草轮旋转, 之后沿拨草轮旋转方向抛出,能够缓解由于机具前 进速度引起的向前堆拥秸秆现象。

(3)通过离散元仿真对秸秆个体和秸秆群体的 运动进行追踪,进一步证实本文设计的机构能够引 导秸秆实现在垂直方向上的运动,充分利用苗带侧 的垂直空间。

(4)田间性能试验及对比试验表明,机具通过 性良好且无晾籽发生,最佳工作参数为前进速度 7 km/h、转速 600 r/min。田间作业性能优于团队前 期设计的圆辊拨爪式防堵机构及某商品化防堵机 构。

```
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? file = 1&file_no = 20180401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn. 1000-1298. 2018. 04. 001. (in Chinese)
- [2] YANG Li, ZHANG Rui, LIU Quanwei, et al. Row cleaner and depth control unit improving sowing performance of maize no-till recession planter [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 18-23.
- [3] 郭维俊.小麦生长的力学特性及其动力学规律研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
 GUO Weijun. A study on mechanical properties and dynamic laws in wheat growth [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [4] 徐广印,沈胜强,胡建军,等. 秸秆冷态压缩成型微观结构变化的实验研究[J]. 太阳能学报, 2010,31(3):273 278.
 XU Guangyin, SHEN Shengqiang, HU Jianjun, et al. Experimental study on the microstructure changes in the process of coil molding with straw[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010,31(3):273 278. (in Chinese)
- [5] 闫翠珍. 秸秆块压缩性能及流变特性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.

YAN Cuizhen. Study on the compression performance and rheological properties of straw bales [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)

- [6] TORBERT H A, INGRAM J T, PRIOR S A. High residue conservation tillage system for cotton production: a farmer's perspective[J]. Agrophysical Journal, 2015,2(1):1-14.
- [7] FALLAHI S, RAOUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil & Tillage Research, 2008,98(1):27-34.
- [8] SIDHU H S, SINGH M, SINGH Y, et al. Development and evaluation of the Turbo Happy Seeder for sowing wheat into heavy rice residues in NW India[J]. Field Crops Research, 2015,184:201-212.
- [9] AHMAD F, DING W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil [J]. PloS One, 2015,10(3):e119648.
- [10] RAOUFAT M H, MATBOOEI A. Row cleaners enhance reduced tillage planting of corn in Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2007,93(1):152-161.
- [11] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(17): 10-19.

LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 10-19. (in Chinese)

- [12] 赵武云,张锋伟,吴劲锋,等.免耕播种机弹齿式防堵装置[J].农业机械学报,2007,38(3):188-190.
- [13] 王韦韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017, 33(24):10-17.

WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10-17. (in Chinese)

- [14] 山东省农业机械科学研究院. 主动差速对旋式免耕防堵装置: 201720554438.3 [P]. 2018-01-02.
- [15] 张喜瑞,何进,李洪文,等.水平拨草轮式玉米免耕播种机设计和试验[J].农业机械学报,2010,41(12):39-43.
 ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on no-till planter in horizontal residue throwing fingerwheel type for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 39 - 43. (in Chinese)
- [16] 王庆杰,何进,李洪文,等. 免耕播种机开沟防堵单元体设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012,28(1):27-31.
 WANG Qingjie, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on furrowing and anti-blocking unit for no-till planter
 [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 27-31. (in Chinese)
- [17] 高娜娜,张东兴,杨丽,等. 驱动分禾杆与被动分禾栅板组合式防堵机构设计[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):85-91, 52.

GAO Nana, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design of anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):85-91, 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file = 1&file_no = 20140614&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298.2014.06.014. (in Chinese)

- [18] 姚宗路,欧阳双平,孟海波,等.颗粒状秸秆物料流动特性试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(7):112-116.
 YAO Zonglu, OUYANG Shuangping, MENG Haibo, et al. Flow characterization of biomass particle straw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):112-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file = 1&file_no = 20120721&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.021. (in Chinese)
- [19] 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,2011:297-300.
- [20] 方会敏, 姬长英, AHMED A T, 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.

FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file = 1&file_no = 20160109&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2016.01.009. (in Chinese)

[21] 方会敏, 姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3):22-28.

FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):22 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file = 1&file_no = 20160304&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)

- [22] 全国农业机械标准化技术委员会. 免耕播种机质量评价技术规范: NY/T 1768—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [23] 方会敏,史嵩,乔璐,等. 圆辊拨爪式防堵机构作业性能的模拟与试验研究[J]. 中国农机化学报,2018,39(12):1-9.
 FANG Huimin, SHI Song, QIAO Lu, et al. Numerical and experimental study of working performance of round roller-claw type anti-blocking mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12):1-9. (in Chinese)