

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007

全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验

施印炎 罗伟文 胡志超 吴峰 顾峰玮 陈有庆
(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 为全面实现秸秆禁烧还田资源化利用, 针对长江中下游稻麦轮作区秸秆量大、传统秸秆粉碎还田机后茬作物播种难、缠秸增阻、功耗高等问题, 结合江苏地区稻茬地小麦播种农艺要求, 利用动刀高速反转捡拾粉碎功能形成秸秆流充斥型腔, 设计了一种全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置, 可一次完成秸秆粉碎、行间覆秸、种带清秸以及配套后续种床整理、施肥播种、覆土镇压等复式作业工序。对秸秆捡拾粉碎装置、分流调控装置、传动系统等关键部件进行理论分析, 确定相关结构和位置参数, 以旋转刀轴转速 n 、导流板径向距离 τ 、整机行走速度 v 为性能试验影响因素, 选取碎秸合格率 ε_1 和种带清秸率 ε_2 为评价指标, 设计三因素三水平正交试验。结果表明: 影响评价指标 ε_1 、 ε_2 显著性的主次因素分别为 n 、 v 、 τ 和 τ 、 v 、 n , 综合分析选择较优的因素水平组合为 $n = 2\,000\text{ r/min}$ 、 $\tau = 20\text{ mm}$ 、 $v = 1.0\text{ m/s}$, 此时 $\varepsilon_1 = 93.42\%$ 、 $\varepsilon_2 = 92.71\%$, 能够发挥整机最佳工作性能; 田间验证试验结果表明: 较优的因素水平组合下 ε_1 均值为 91.25% 、 ε_2 均值为 90.54% , 符合相关行业技术标准和农艺要求。

关键词: 秸秆粉碎还田; 种带清秸; 行间覆秸

中图分类号: S224.29 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)04-0058-10

Design and Test of Equipment for Straw Crushing with Strip-laying and Seed-belt Classification with Cleaning under Full Straw Mulching

SHI Yinyan LUO Weiwen HU Zhichao WU Feng GU Fengwei CHEN Youqing
(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Crop straw non-burning and returning has become one of the most important moves for comprehensive realization of straw resource utilization. Aimed at problems of large quantity of straw stalks, difficult sowing of later crops, wrapped straw and high-power consumption by using traditional straw crushing-returning machine for rice and wheat rotation region in the middle and lower reaches of the Yangtze river, straw crushing and seed-belt classification machine under full straw mulching was developed in combination with the agronomic requirements of wheat seeding in rice-stubble field in Jiangsu Province. One trip to the field, it can complete the multiple operation processes of straw-stubble crushing, row-spacing stacking, seed-belt cleaning, and the follow-up seed bed treating, fertilizer sowing, soil covering and suppressing, etc. Key components such as straw pickup-chopping device, guide-adjusting device and transmission route system were designed and analyzed theoretically to determine the relevant structure and position parameters. Three-factor and three-level orthogonal performance test was carried out with setting rotation spindle speed $n(A)$, guider radial distance $\tau(B)$ and machine ground speed $v(C)$ as the influence factors, straw crushed rate ε_1 and stubble cleaned rate ε_2 as the evaluation indexes. It can be known from the orthogonal test that the importance order of the factors which affecting ε_1 was A , C and B , and that affecting ε_2 was B , C and A , the comprehensive choice optimum combination of working parameters was $A_2B_2C_2$, that was $n = 2\,000\text{ r/min}$, $\tau = 20\text{ mm}$, $v = 1.0\text{ m/s}$, and $\varepsilon_1 = 93.42\%$, $\varepsilon_2 = 92.71\%$, the machine reached the best working performance. Field validation tests under optimum parameter combination showed that the average ε_1 and ε_2 were 91.25% and 90.54% , respectively, which satisfied the technical standards and agronomy requirements. The research results can provide technical and equipment support for the realization of straw non-burning and fertilization utilization, which had considerable production and application prospects.

Key words: straw chopping and returning; seed-belt cleaning; row-spacing stacking

收稿日期: 2018-10-30 修回日期: 2018-11-26
基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)1002)
作者简介: 施印炎(1990—),男,助理研究员,博士,主要从事农业机械化及其自动化研究,E-mail: shiyinyan89@163.com
通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

0 引言

江苏省是长江中下游粮食主要产区之一,大规模的稻麦轮作种植在保障全省粮食生产安全的同时,也产生了大量需要处理的秸秆,这在很大程度上制约了稻作生产全程机械化的发展^[1-3]。合理的机械化粉碎还田技术作为秸秆处理最有效的方式之一,不仅能改良土壤有机质结构,改善农业生态效益,起到增肥、增产、增效的作用,更是践行保护性耕作理念的一个重要环节,相应的秸秆粉碎还田机械化作业装备也相继涌现^[4-5]。

目前,国际上机械化秸秆还田关键技术已经取得一定的研究进展^[6-26],主要集中在对秸秆粉碎入土深埋、后抛覆秸、侧边集秸等不同形式还田装备的研制。这些均需配备相应的深耕埋覆装置、后抛输送装置、侧边传递装置等额外的动力输出,使得整机结构相对复杂,能耗相对增加,降低了作业通过性。而对全幅秸秆粉碎条铺还田和种带分型作业方式工作机理少有研究,对于在作业幅宽内对秸秆进行整体粉碎,同时将碎秸有序规整铺放于播种带之间(覆秸区),形成无秸秆障碍的播种带的相关研究尚未见报道,也缺乏相应的作业装备关键部件组配工作参数对作业效果的影响研究。

因此,本文结合课题组研制的全量秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机的工作机理^[27-28],针对长江中下游稻麦轮作区稻茬秸秆量大、功耗高、经济性差等问题,设计一种可一次完成全量秸秆粉碎条铺、行间集覆、种带分型清秸的复式作业装置,既为全量秸秆地实现高质顺畅免耕播种创造无秸秆障碍播种条件,又实现秸秆覆盖地表,覆秸保温保墒、封闭杂草,具有对前茬秸秆适应性强、作业集成度高、组配精简、能耗低等优点,满足多样化播种需求。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置整体结构如图 1 所示,主要由机架、悬挂装置、秸秆粉碎装置(护秸帘、粉碎动刀、定刀、型腔)、碎秸导流装置(种带分型装置)、传动系统等部件组成,主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置为后三点悬挂式牵引,拖拉机 PTO 输出经由减速机构为整机提供驱动力,通过齿轮传动与二级楔带传动分别连接秸秆粉碎刀轴和带状旋耕刀轴。机具前进作业时,前压秸辊先对工作幅宽内前茬水稻机收后的地

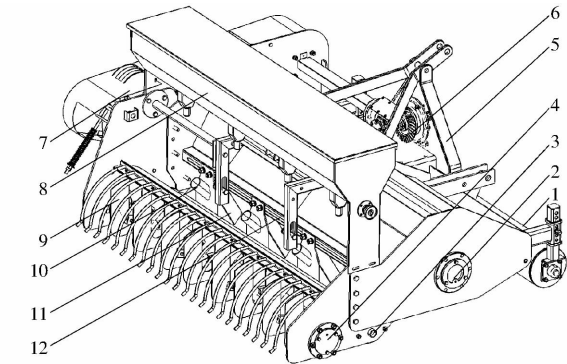


图 1 全量秸秆粉碎与种带分型清秸装置结构简图
Fig.1 Structural diagram of equipment for straw crushing and seed-belt classification

1. 前压秸辊 2. 粉碎刀轴 3. 后压秸辊 4. 旋耕刀轴 5. 三点悬挂系统 6. 变速机构 7. 传动系统 8. 施肥播种装置 9. 阻隔板 10. 落肥管 11. 碎秸导流装置 12. 机架

表 1 主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of equipment

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 400×1 500×1 200
配套动力/kW	≥65
工作幅宽/cm	240
刀轴转速/(r·min ⁻¹)	1 600~2 400
条铺行数	5
覆秸宽度/mm	320
种带行数	4
种带宽度/mm	240
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.8~1.6
整机质量/kg	940

表全量覆盖秸秆进行镇压,便于后续秸秆捡拾、喂入,并兼具一定的仿形功能;螺旋甩刀组在经过变速传动机构增速变向后反向旋转,借助高速气流将进入护秸帘的秸秆捡拾、配合型腔内壁的定刀粉碎秸秆;型腔内粉碎后向后喷射的秸秆在导流装置导流板的调控下自行向两侧分开并滑落地表,形成无秸秆障碍的播种带和相邻导流装置间的覆秸区;后压秸辊对行间覆秸区的碎秸进行镇压,减小后续带状旋耕以及种床整理的干扰,创造更佳(高质顺畅)的施肥播种条件。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 秸秆捡拾粉碎装置设计

捡拾粉碎装置主要由护秸帘、粉碎刀轴、螺旋刀组(动刀)、定刀组、型腔等部分组成,将前茬水稻机收后全量秸秆覆盖地工作幅宽内秸秆进行喂入捡拾与二次粉碎处理,其结构如图 2 所示。

2.1.1 粉碎刀具选型与参数设计

参考文献[4,16]可知,常用的秸秆粉碎灭茬刀

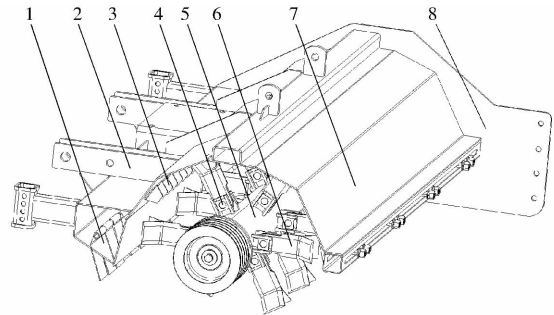


图2 捡拾粉碎装置结构简图

Fig.2 Structural diagram of straw pickup-chopping device

1. 护秸帘 2. 悬挂支架 3. 定刀 4. 动刀座 5. 粉碎刀轴
6. 甩刀组 7. 型腔罩壳 8. 侧板

具类型主要分为锤爪型、直刀型和 L 型及其改进型(甩刀型)3 种,根据各自作业特点,结合课题组研制的麦茬地花生免耕播种机秸秆粉碎装置结构,选用切碎性能较好的直型刀具配捡拾能力佳的 L 型刀具(图 3),设计尺寸(长×宽×厚)为 170 mm×60 mm×5 mm,刀口角为 30°,折弯角为 135°,材料为 65Mn 钢,以改善其强度、硬度和一定的弹性,并采用动刀切割、定刀支撑滑切粉碎方式,以提高秸秆粉碎质量、降低作业功耗。

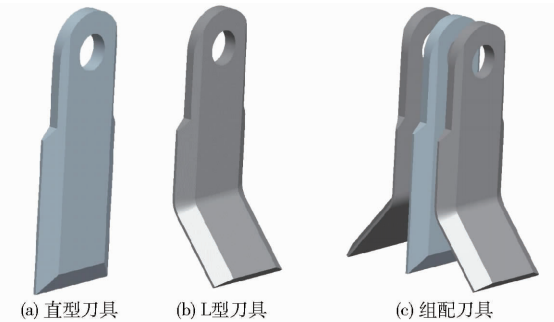


图3 甩刀组结构图

Fig.3 Structural diagrams of combined blades

组配的秸秆粉碎刀具有类似于 Y 型甩刀的几何对称性,能够更好地克服刀组不平衡量、降低机体振动,在相同转速下增加转动惯量、改善切碎效果。而定刀滑切角作为影响刀组切碎特性和防堵效果主要结构参数之一,需要通过设计分析确定合理有效的取值。图 4 为秸秆 P 在动、定刀支撑滑切粉碎过程中的受力分析,图中 MM' 为刀刃线, NN' 为刀刃法线, GG' 为秸秆 P 的运动轨迹线, SS' 为轨迹切线,粉碎瞬间秸秆 P 所受的切割力 F 为定刀刃口摩擦力 F_f 和法向支撑反力 F_N 的合力,法向支撑反力 F_N 与切割力 F 之间的夹角为摩擦角 γ ,轨迹切线 SS' 与刀刃法线 NN' 之间的夹角为滑切角 δ 。

为了促使秸秆 P 沿刀刃线产生有利于秸秆粉碎的滑切运动,防止缠绕,切割力 F 分解在刀刃线 MM' 上的分力 F_t 必须大于刀刃摩擦力 F_f (滑切与分

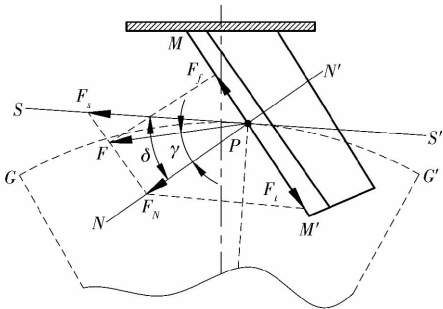


图4 秸秆粉碎受力分析

Fig.4 Mechanical analysis of straw crushing

解在轨迹切线 SS' 上的分力 F_s 无关), $F_t > F_f$, 即存在滑切作用。根据图 3 中的分析,则有

$$\begin{cases} F_t > F_f \\ F_t = F_N \tan \delta \\ F_f = F_N \tan \gamma \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,秸秆切割粉碎过程产生滑切作用的必要条件为 $\delta > \gamma$ 。通常一般农作物秸秆与刀具的摩擦角 γ 范围在 $20^\circ \sim 35^\circ$,结合滑切原理以及文献[23],本文设计的滑切角 $\delta = 45^\circ$ 。

2.1.2 粉碎刀轴设计与刀具排列

粉碎刀轴作为秸秆粉碎装置的核心部件之一,刀轴回转半径直接关系到动刀刀尖线速度,而刀尖线速度是影响秸秆粉碎效果的关键因素,为达到理想的秸秆粉碎效果,动定刀支撑粉碎时刀尖线速度应大于等于 30 m/s [24]。刀轴转速一定,回转半径越大,刀尖线速度越大,但刀轴转动不平衡量也随之增大、易振动,参考现有同类秸秆粉碎还田机刀辊参数设计 [16],要求刀轴回转半径满足 $240 \text{ mm} \leq r_f \leq 350 \text{ mm}$ 。为了降低甩刀对后续种床的扰动、减小额外的动力消耗和不平衡因素,本文选取刀轴回转半径 $r_f = 250 \text{ mm}$,结合设计的甩刀结构参数,确定刀轴直径为 150 mm ,由厚度 5 mm 的无缝钢管制成,以使整机轻量化。

刀尖线速度不仅与刀轴回转半径有关,更取决于刀轴转速。作为秸秆粉碎装置的主要设计参数之一,刀轴转速小,无法达到预期的粉碎效果;转速大,功耗变大、平稳性变差。因此,需要在满足秸秆粉碎效果的前提下,尽量减小刀轴转速,以保证整机的动量平衡。通常,刀轴转速范围可通过经验公式计算确定 [25]。

$$n \geq \frac{30(v_g - v)}{\pi(r_f - h_i)} \quad (2)$$

- 式中 n ——粉碎刀轴转速, r/min
 v_g ——动刀刀尖线速度, m/s
 v ——机具作业速度, m/s
 h_i ——甩刀回转刀尖离地高度, m

正常作业状态下,一般机具前进速度 $v=0.8\text{ m/s}$;刀尖线速度选取满足粉碎效果极限值 $v_g=30\text{ m/s}$;根据机具限深装置作用,确定甩刀回转刀尖离地高度 $h_t=11\text{ cm}$;结合刀轴回转半径 r_f ,代入式(2)推算出刀轴转速 $n\geq 1\,992.72\text{ r/min}$,取 $n=2\,000\text{ r/min}$ 。

合理的动刀数量和排列方式有助于改善秸秆粉碎效果、减少工作阻力与功耗、降低作业振动、避免秸秆缠绕壅堵等。根据农业机械设计手册,参考类似 Y 型甩刀及 L 型改进刀具,其安装密度为 $0.13\sim 0.4\text{ 个/cm}$,作业幅宽内合理安装个数一般为 $28\sim 48\text{ 个}$,理论计算公式为

$$N=BC\tag{3}$$

式中 N ——动刀组数量,个
 B ——整机单行作业幅宽,cm
 C ——刀具安装密度,个/cm

此处,选取刀具安装密度 $C=0.15\text{ 个/cm}$,结合机具实际作业幅宽 $B=2.4\text{ m}$,代入式(3)可以计算得到动刀组数量 $N=36$ 。

采用常见的双螺旋交错对称方式排列动刀,按照轴向等距、周向等角均布(同一螺旋线上相邻刀组轴向间距 140 mm 、周向间隔 72° ,保证适量重叠),以提高刀轴动平衡性能,且具有防漏、避堵、减振的优点,其安装排列方式分布展开如图 5 所示。刀组通过销轴链接在刀座上,与刀座间留有 1 mm 间隙、各刀片之间以套筒相隔,在保证刀组能够自由转动的同时,减小轴向晃动、互相之间不存在干涉现象,且刀座焊接于刀辊上。定刀周向以 150 mm 间距阵列、双排错列布置,直接焊接在型腔顶部内壁,同时刀组与定刀周向上重叠一定量,形成瞬时支撑切割,以避免秸秆漏检,提高粉碎质量。

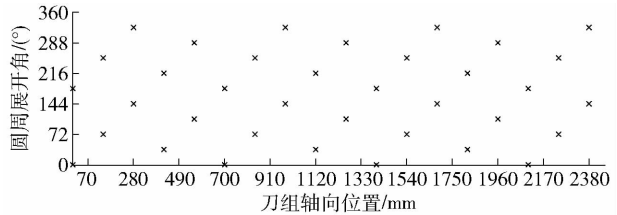


图 5 动刀刀轴排列展开图

Fig. 5 Expansion drawing of chopping blade arrangement

2.1.3 甩刀粉碎作业运动与受力分析

为更好地发挥秸秆粉碎装置的捡拾性能,设计刀轴为反向旋转(逆切式,即与拖拉机前进旋向相反)。作业过程中,秸秆粉碎刀组在竖直平面内运动速度为刀轴绕其轴心反向旋转速度与装备整机前进速度的复合运动,以刀轴回转中心为原点 O ,以整机作业前进方向为 x 轴正方向、以垂直地面向上为

y 轴正方向,建立如图 6 所示的平面直角坐标系,则 t 时间内甩刀刀尖点任意位置 $C(x,y)$ 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x=vt+r_f\cos(\omega t) \\ y=r_f\sin(\omega t) \end{cases}\tag{4}$$

式中 ω ——粉碎刀轴旋转角速度,rad/s

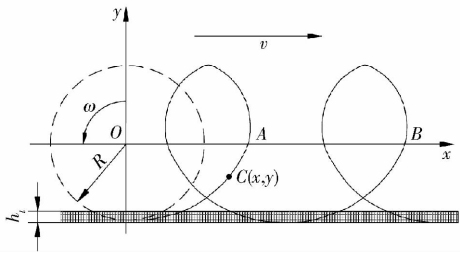


图 6 粉碎动刀运动轨迹图

Fig. 6 Motion trail of chopping blade

图 6 中, A 点为粉碎刀轴回转时某个刀组第 1 次切割点, B 点为该刀组回转第 2 次切割点,两点之间的距离 S 决定秸秆粉碎长度,而进距 S 与刀轴回转时间 t 内的整机前进距离有关。参考旋耕理论知识^[24, 27],为保证刀尖绝对运动轨迹为余摆线以提高秸秆粉碎效果,定义粉碎速比 λ 为甩刀刀尖回转线速度与整机前进速度之比,应使 $\lambda\geq 1$,存在部分重叠切割,以避免发生推搓秸秆堵塞现象,有利于整机秸秆粉碎过程。

$$\begin{cases} S=vt=\frac{2\pi v}{z\omega}=\frac{60v}{zn} \\ \lambda=\frac{v_g}{v}=\frac{r_f\omega}{v} \end{cases}\tag{5}$$

式中 S ——秸秆粉碎进距,cm,对应于秸秆有效粉碎长度,一般规定,小于 10 cm 为合格
 z ——单位时间内切割次数,本文设计的双螺旋线排列刀组单一回转面甩刀数为 2

由于甩刀与刀轴采用销轴铰接,作业过程中,动刀在刀轴高速旋转的离心力作用下呈径向状态,同时受到秸秆切割阻力 F 的作用消耗部分动能,形成一偏转角度 θ ,以刀轴回转中心 O 为原点建立如图 7 所示直角坐标系,对动刀作业过程进行受力分析。以旋转甩刀为研究对象,动刀主要受力有离心惯性力 F_{ce} 、自身重力 G 、切割阻力 F_T 、销轴孔壁摩擦力 F_{f1} 以及正压力 F_{n1} ,相对于销轴中心 O_1 产生力矩的作用力臂分别为 L_2 、 h_1 、 h 、 r ,销轴孔壁对动刀的正压力 F_{n1} 穿过销轴中心 O_1 ,故作用力臂为零。根据理论力学相关知识^[15],甩刀切割过程中,相对于销轴稳定静止时,所受合力矩为零,即

$$\sum M=0\tag{6}$$

根据图 7 甩刀切割过程受力分析可得出各力矩

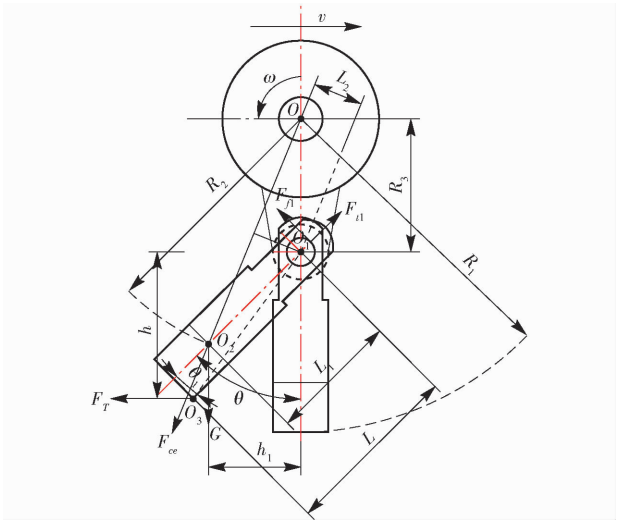


图 7 甩刀受力分析图

Fig. 7 Stress analysis diagram of motion blade

$$\begin{cases} M_1 = F_\tau h \\ M_2 = Gh_1 = mgh_1 \\ M_3 = F_{ce} L_2 = m\omega^2 R_2 L_2 \\ M_4 = F_{f1} r = fF_{n1} r \end{cases} \quad (7)$$

式中 M_1 ——甩刀相对销轴中心切割阻力矩, $N \cdot m$
 M_2 ——甩刀重力矩, $N \cdot m$
 M_3 ——甩刀离心力矩, $N \cdot m$
 M_4 ——销轴对甩刀的摩擦力矩, $N \cdot m$
 m ——甩刀质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 f ——销轴内壁与甩刀的滑动摩擦因数, 根据材料属性选取 0.12
 r ——销轴半径, m

根据图 7 中几何关系可以得出

$$\begin{cases} h = L \cos(\theta - \theta_1) \\ h_1 = L_1 \sin \theta \\ R_2/h_1 = R_3/L_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 L ——甩刀长度, m
 L_1 ——销轴中心 O_1 到甩刀质心 O_2 的距离, m
 R_3 ——销轴回转半径(刀轴回转中心 O 到销轴中心 O_1 的距离), m
 θ_1 ——销轴中心 O_1 与甩刀质心 O_2 及切割阻力作用点 O_3 连线的夹角, $(^\circ)$

将式(7)、(8)代入式(6)得合力矩方程为

$$F_\tau L \cos(\theta - \theta_1) = mL_1 \sin \theta (g + \omega^2 R_3) + fF_{n1} r \quad (9)$$

秸秆粉碎作业高速旋转过程中,能够保证摩擦阻力矩 $fF_{n1} r > mgh$, 越过销轴摆动激励条件, 消除稳态振动响应, 甩刀相对销轴静止。因此, 可忽略刀宽以及销轴摩擦力矩的影响, 有 $\theta_1 = 0, M_4 = 0$, 则方程(9)可简化为

$$\tan \theta = \frac{F_\tau L}{mL_1 (\omega^2 R_3 + g)} \quad (10)$$

作为甩刀粉碎秸秆作业的重要参数, 偏转角 θ 越大, 捡拾不彻底、切割粉碎效果越差。根据式(10)以及上述确定的粉碎刀结构尺寸, 可通过增加甩刀质量 m 、提高刀轴转速(角速度 ω)来减小偏转角 θ , 提高作业质量。而刀轴旋转角速度 ω 不宜过大, ω 越大, 离心惯性力越大, 易引起振动与噪声, 整机平稳性降低, 无法保证安全可靠; 甩刀质量 m 亦不宜过大, m 越大, 整机工作载荷越大, 功耗增大。因此, 需要合理选择甩刀质量 m 和刀轴旋转角速度 ω , 综合前文对动刀结构设计以及刀轴转速运动分析, 确定 $m = 3.5 \text{ kg}$ 、 $\omega = 251.3 \text{ rad/s}$ 。

2.2 碎秸导流装置设计

碎秸导流装置(分流调控装置)作为实现种带清秸、行间覆秸作业过程重要部件, 空间布置如图 1 所示, 4 组碎秸导流装置固定于横梁支架上, 沿作业幅宽方向间隔 320 mm 等距分布(间距可根据实际作业要求调节)。其结构设计的合理性将直接影响垄型效果和种带质量, 主要包括导流板、侧边定型板、固定板、种肥口等零部件, 如图 8 所示。

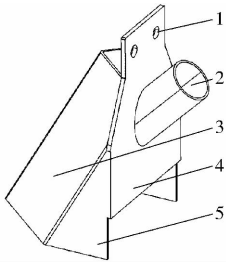


图 8 碎秸导流装置结构图

Fig. 8 Structural diagram of crushed-straw guiding device
1. 安装孔 2. 种肥口 3. 导流板 4. 固定板 5. 侧边定型板

为了防止一字型直板刮草壅堵, 设计导流板竖直方向呈 V 字型外扩分流, 将粉碎型腔内喷射的碎秸阻隔形成一定宽度的施肥播种区, 相邻洁区之间秸秆堆积规整成垄。整机作业前进过程中, 碎秸沿导流板两侧向后运动集覆于行间, 若离散化碎秸为单个颗粒, 任取导流装置垂直方向一截面为研究域, 在碎秸条铺某一时刻 t 对秸秆进行动力学分析, 并建立如图 9 所示坐标系。从图中的秸秆受力分析可以看出, 秸秆所受的综合作用力 F_1 为导流板支持反力 F_n 与导流板侧面摩擦力 F_{f2} 的合力, 即为秸秆的绝对运动方向(利于秸秆行间集覆), 而导流板对秸秆的支持反力 F_n 是前进方向分力 F_{n1} 与秸秆沿导流板流向分力 F_{n2} 的合力, 以此建立秸秆的瞬时运动微分方程

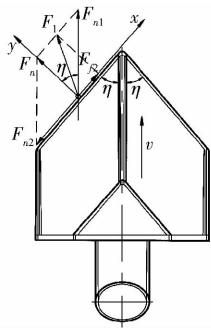


图 9 秸秆分流受力分析图

Fig. 9 Mechanical analysis diagram when straw was guided

$$\begin{cases} F_n (\tan \eta - \tan \varphi) = m \frac{d^2 x}{dt^2} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \\ F_n = \frac{mg}{2 \tan \phi} \end{cases} \quad (11)$$

结合理论力学知识,根据式(11)可推算出秸秆在导流板的位移与速度方程

$$\begin{cases} x = \frac{gt^2}{4} \frac{\tan \eta - \tan \varphi}{\tan \phi} \\ v_x = \frac{gt}{2} \frac{\tan \eta - \tan \varphi}{\tan \phi} \end{cases} \quad (12)$$

式中 η ——整机前进方向与导流板法线方向夹角,即导流板外扩半角, ($^\circ$)
 φ ——秸秆与导流板之间的摩擦角,导流板材质确定, φ 为一定值, ($^\circ$)
 ϕ ——秸秆自然休止角, ($^\circ$)

根据式(12)可以看出,秸秆导流过程中的位移和速度与导流板装置的外扩半角 η 直接相关,为获得有利于秸秆向两侧集覆的趋势,本文设计导流板外扩角 $2\eta = 90^\circ$,则外扩半角 $\eta = 45^\circ$,能够在保证洁区有效宽度的同时减小碎秸摩擦力、降低堆堵概率,满足机具的通过性要求;根据试验地小麦生产农艺要求,设计导流板宽度 $W = 240 \text{ mm}$ (两侧板间距),即在洁区宽度为 240 mm 的种带进行后续的旋耕、施肥、播种作业,以减少不必要的动力消耗;导流装置通过螺栓固接在罩壳支撑梁上,圆弧形导流刃线与粉碎甩刀回转面径向距离 τ 决定了行间覆秸区垄型质量,结合前期实际试验工况,一般取 $10 \text{ mm} \leq \tau \leq 30 \text{ mm}$,径向距离 τ 大,高速喷射的碎秸进入种带,降低洁区清秸率,径向距离 τ 小,碎秸在有限的时间内无法分流至导流板两侧,易出现秸秆聚集、挤压,破坏覆秸垄型。因此需要设计导流板合理的安装位置,以提高种带清秸率和覆秸区垄型质量,后文通过性能试验选取最佳的径向距离 τ 。

2.3 传动系统设计

传动系统主要由齿轮传动系统和多楔带传动系

统组成。整体驱动力由牵引拖拉机 PTO 以万向节输出单路传动,输出动力经过锥齿轮变速传动箱、多楔带传动分别实现 2 次加速,将动力传输给高速旋转的粉碎刀轴以及后续联合作业的带状旋耕刀轴等,传动路线如图 10 所示。

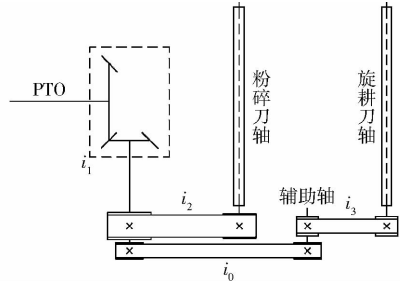


图 10 传动系统示意图

Fig. 10 Schematic of transmission system

由图 10 可以看出,秸秆粉碎刀轴的总传动比 i_f 、种带旋耕刀轴的总传动比 i_x 分别为

$$\begin{cases} i_f = i_1 i_2 \\ i_x = i_1 i_0 i_3 \end{cases} \quad (13)$$

式中 i_1 ——齿轮变速箱传动比,为齿轮齿数反比
 i_2 ——粉碎刀轴一级多楔带传动比,为带轮直径的反比
 i_3 ——旋转刀轴传动比,为带轮直径的反比
 i_0 ——辅助支撑带轮传动比,两带轮直径相等,取 $i_0 = 1$

根据上文分析,粉碎刀轴转速 n 需要达到 2000 r/min ,结合系统转速与功率消耗关系以及常用的牵引拖拉机 PTO 输出转速标准,确定 PTO 转速 $n_{\text{PTO}} = 720 \text{ r/min}$,则合理分配传动比 $i_1 = 2.22$ 、 $i_2 = 1.5$;根据带状旋耕具体作业要求,选取合适的 i_3 。

3 性能试验与分析

为评价全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置的作业效果,设计了秸秆粉碎与种带清秸性能试验,获取最佳的工作参数和作业工况,并进行相应的田间验证试验。

3.1 试验条件

性能试验于 2018 年 7 月在农业农村部南京农业机械化研究所东区试验地进行,以人工铺设秸秆模拟稻作生产机械化收获后的全量秸秆还田。水稻为江苏省农业科学院培育种植的南粳 9108,全喂入联合收获秸秆平均长度大于等于 320 mm ,含水率为 11% ,草谷总质量均值为 2.2 kg/m^2 ,草谷比均值为 1.6 ,均匀铺设密度为 2 kg/m^2 (大于田间秸秆覆盖量),铺设试验地面积 150 m^2 ($50 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),牵引拖拉机型号为常发 1204。测试方法及指标参照国家标准 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械秸秆粉

碎还田机》、农业行业标准 NY/T 500—2002《秸秆还田机作业质量》以及机械行业推荐标准 JB/T 8401.3—2001《根茬粉碎还田机》中规定的作业规范 and 性能要求,图 11 为整机性能试验图。



图 11 性能试验现场

Fig. 11 Scene picture of performance test

3.2 试验设计与方法

在匀铺的模拟试验区域 (50 m × 3 m), 牵引拖拉机通过后三点悬挂全量秸秆粉碎条铺与种带分型清结装备进行性能试验。为保证后续播种施肥环节的作业顺畅性以及作物长势, 实现洁区无障碍播种条件的关键在于机具的秸秆粉碎质量和种带清结效果。因此, 选择影响整机工作性能和作业效果的主要参数: 粉碎刀轴转速 n 、导流板径向距离 τ 、整机行走速度 v 作为试验因素, 以碎秸合格率 ε_1 作为评价指标, 表征秸秆粉碎性能; 以种带清秸率 ε_2 作为评价指标, 表征洁区种带分型、清结效果。根据上述试验设计方案, 参考文献 [17, 21] 中对秸秆粉碎还田机作业性能的研究, 一般保护性耕作机械作业速度 v 范围为 0.6 ~ 1.5 m/s, 粉碎刀轴转速 n 范围为 1 600 ~ 2 400 r/min, 导流板径向距离 τ 为 10 ~ 30 mm, 在前期预试验以及实际作业经验的基础上, 选取合适的因素水平, 设计三因素三水平正交试验 ($L_9(3^4)$), 因素水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	刀轴转速 n / ($r \cdot \min^{-1}$)	径向距离 τ /mm	行进速度 v /($m \cdot s^{-1}$)
1	1 600	15	0.8
2	2 000	20	1.0
3	2 400	25	1.2

试验过程中, 通过调整不同的粉碎刀轴转速、导流板径向距离、整机行进速度, 分别计算各参数组合条件下碎秸合格率 ε_1 和种带清秸率 ε_2 分析评价整机的作业性能, 每组试验重复 3 次取其平均值。试验考核指标以 GB/T 24675.6—2009 作为测试依据, 在试验区域作业后工作幅宽 (2.4 m) 内碎秸集覆区 (5 行) 随机按对角线等间距选取 10 个采集点, 各点测试面积为 200 mm × 200 mm, 收集该区域内粉碎长度大于 10 cm 的秸秆 (不合格的粉碎秸秆) 并称量其

质量 w_i ; 用同样的方法在试验区域作业后种带清秸区 (4 行) 随机选取 10 个采集点, 各点测试面积同样为 200 mm × 200 mm, 收集该区域内的粉碎秸秆并称量其质量 w_j , 则相应的试验指标计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{w_i}{w} \right) \times 100\% \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{w_j}{w} \right) \times 100\% \end{cases} \quad (14)$$

式中 w ——测试点作业前碎秸总质量

3.3 试验结果与分析

根据上述正交性能试验方案测得试验结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 分别为 n 、 τ 、 v 水平值。

表 3 正交试验结果与极差分析

Tab. 3 Results of orthogonal test

试验号	试验因素			碎秸合格 率 ε_1 /%	种带清秸 率 ε_2 /%
	A	B	C		
1	1	1	1	87.23	91.35
2	1	3	2	88.35	87.55
3	1	2	3	91.45	92.76
4	2	2	1	92.36	94.47
5	2	1	2	89.24	93.26
6	2	3	3	94.97	91.82
7	3	3	1	93.66	88.14
8	3	2	2	94.72	90.13
9	3	1	3	96.13	95.82
ε_1	k_1	89.01	90.87	91.08	
	k_2	92.19	92.84	90.77	
	k_3	94.83	92.32	94.18	
	R	5.82	1.97	3.41	
ε_2	k_1	90.55	93.47	91.32	
	k_2	93.18	92.45	90.31	
	k_3	91.36	89.17	93.46	
	R	2.63	4.30	3.15	

根据对表 3 中各因素极差 R 的数值分析可以看出, 对于评价指标 ε_1 , 各因素影响显著性大小顺序为 A 、 C 、 B , 较优的影响因素水平组合为 $A_3B_2C_3$; 对于评价指标 ε_2 , 各因素影响显著性大小顺序为 B 、 C 、 A , 较优的影响因素水平组合为 $A_2B_1C_3$ 。

根据表 4 方差分析结果, 误差项平方和数值远小于各影响因素的平方和, 表明各试验因素间的交互作用对试验考核指标影响不明显。在分析考核指标碎秸合格率 ε_1 时, 由 $F_A > F_C > F_B$ 可以看出试验因素 A 对指标 ε_1 影响极显著, 因素 C 影响显著, 因素 B 影响较小; 分析考核指标种带清秸率 ε_2 时, 由 $F_B > F_C > F_A$ 可以看出试验因素 B 对指标 ε_2 影响极显著, 因素 C 影响显著, 因素 A 影响最小, 与极差分析结果一致。

综合极差分析和方差分析结果可知, 根据不同的评价指标, 各因素影响显著性有所差异, 选择的最佳

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

评价指标	变异来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	显著性
ε_1	校正模型	78.73 ^a	6	13.12	18.46	
	<i>A</i>	51.06	2	25.53	35.87	**
	<i>B</i>	6.30	2	3.15	4.43	
	<i>C</i>	21.36	2	10.68	15.01	*
	误差	0.27	2	0.71		
ε_2	校正模型	58.82 ^b	6	9.47	4.89	
	<i>A</i>	10.88	2	5.44	2.81	
	<i>B</i>	30.37	2	15.18	7.83	**
	<i>C</i>	15.56	2	7.78	4.01	*
	误差	0.87	2	1.94		

注：a： $R^2=0.98$,b： $R^2=0.94$ ；**为极显著($P<0.01$)，*为显著($P<0.05$)。

优因素水平组合也不同。评价指标以碎秸合格率 ε_1 优先时,选取 $A_3B_2C_3$ 组合最优,因素 B 对其影响较小,但是对指标 ε_2 影响极其显著;评价指标以种带清秸率 ε_2 优先时,选取 $A_2B_1C_3$ 组合最优,因素 A 对其影响较小,但是对指标 ε_1 影响极其显著。进一步分析可以看出,指标 ε_1 随着 A 因素的增大而增大,即可通过增大刀轴转速 n 来提高碎秸合格率,改善秸秆粉碎效果,与前文的理论分析结果一致;随着 B 因素的增大 ε_1 呈现先增大后减小的趋势(峰值出现在 B_2),表明增加一定的导流板径向距离 τ 可以提高碎秸合格率,而 τ 超过某一数值时 ε_1 会逐渐减小,这是因为径向间隙过大,型腔内秸秆受高速气流和惯性力的作用容易窜流,导致粉碎不彻底,合格率不高;随着 C 因素的增大 ε_1 呈现先减小后增大的趋势(峰值出现在 C_2),表明行走速度 v 越快,粉碎装置在有限的时间内对秸秆粉碎不完全,降低秸秆粉碎合格率 ε_1 ,当 v 达到某一定值,秸秆在行进过程较小的时间内被一定程度的堆积,更有利于被旋转动刀捡拾并粉碎,从而会提高一定的粉碎合格率 ε_1 。指标 ε_2 随着 A 因素的增大呈现先增大后减小趋势(峰值出现在 A_2),表明刀轴转速 n 越大,碎秸在型腔内气流运动越规整,随着导流板流势铺放在行间,种带清秸率越高,当 n 超过一定值后,秸秆粉碎效果越好,更加细碎的秸秆易穿过导流板间隙进入种带区域,降低种带清秸率 ε_2 ; ε_2 随着 B 因素的增大而减小,表明在试验范围内,随着导流板径向距离 τ 的增大,碎秸流向种带的趋势性越大,种带清秸率 ε_2 越低;随着 C 因素的增大 ε_2 呈现先减小后增大的趋势(峰值出现在 C_2),这是因为在一定范围内,整机行走速度 v 越低,碎秸分流流向性越好(覆秸成型率越好),种带清秸率 ε_2 越高; v 越快,秸秆易出现推堵现象,堆积的秸秆会溢出两侧的种带,导致种带清秸

率 ε_2 的降低,但随着 v 超过一定速度后,碎秸在很短的时间内无法流动进入种带,因而种带清秸率 ε_2 逐渐回升。因此,选择各试验因素出现峰值的相应水平 A_2 、 B_2 、 C_2 组合为相对优水平组合 $A_2B_2C_2$,使得碎秸合格率相对较高、种带清秸率相对较好。由于分析的 3 组最优组合均未出现在正交试验方案中,所以调整 n 、 τ 、 v ,另外增加 3 组试验方案 $A_3B_2C_3$ 、 $A_2B_1C_3$ 、 $A_2B_2C_2$,对评价指标 ε_1 、 ε_2 进行对比验证,每组试验重复 3 次取其均值,对比试验结果如表 5 所示。

表 5 对比试验结果

Tab.5 Comparison test result			%
因素水平组合	碎秸合格率 ε_1	种带清秸率 ε_2	
$A_3B_2C_3$	95.54	90.16	
$A_2B_1C_3$	89.75	94.33	
$A_2B_2C_2$	93.42	92.71	

由表 5 可知,试验方案 $A_2B_2C_2$ 对应的碎秸合格率 $\varepsilon_1=93.42\%$,较 ε_2 优先时最佳方案 $A_2B_1C_3$ (89.75%)高;对应的种带清秸率 $\varepsilon_2=92.71\%$,较 ε_1 优先时最佳方案 $A_3B_2C_3$ (90.16%)高,均可满足相关行业标准对秸秆粉碎还田机的作业要求($\geq 90\%$)。相比于单项作业性能达到最优,选取相对全面更优的因素水平组合 $A_2B_2C_2$,即刀轴转速 $n=2\,000\text{ r/min}$ 、径向距离 $\tau=20\text{ mm}$ 、行走速度 $v=1.0\text{ m/s}$,在能够保证秸秆粉碎质量、种带清秸效果的基础上,避免导流板秸秆堵塞,减少整机功率消耗,发挥全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置最好的工作性能。

3.4 田间试验

为了验证上述正交试验最佳因素水平组合下全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置工作性能,于 2018 年 9 月在江苏省农业科学院种植基地进行田间试验,该试验地为南粳 9108 种稻留茬地,试验面积 1.0 hm^2 ,留茬平均高度为 15 cm ,机收后秸秆平均长度大于 400 mm ,田间秸秆覆盖量约为 1.6 kg/m^2 ,含水率为 35% ,草谷总质量均值为 2.4 kg/m^2 ,草谷比均值为 1.5 ,土壤为壤性土质,含水率约 20% (15 cm 以上),装备后悬挂匹配种带旋耕施肥播种机,试验方法与 3.2 节一致,图 12 所示为田间试验。

田间试验前,调节整机工作参数到最佳水平组合:刀轴转速 $n=2\,000\text{ r/min}$ 、径向距离 $\tau=20\text{ mm}$ 、行走速度 $v=1.0\text{ m/s}$,进行 6 组重复性试验,每组试验作业长度为 100 m ,试验结果如表 6 所示。

表 6 试验结果表明,全量秸秆粉碎条铺与种带



图 12 田间试验与播种效果图

Fig. 12 Field validation test and seeding effect

分型清秸装置田间作业碎秸合格率均值为 91.25%, 秸秆切碎长度在 3 ~ 7 cm 范围, 种带清秸率均值为 90.54%, 种床宽度均值(24 ± 0.5) cm, 覆秸宽度均值(32 ± 0.5) cm, 符合相关农业机械行业技术和标准以及当地农艺生产要求, 能够实现全量秸秆地粉碎条铺还田、种带分型清秸、行间覆秸的作业要求, 有利于储温保墒提质, 为后续种床整理、施肥播种、覆土镇压等高质顺畅的免耕播种复式作业提供无秸秆障碍洁净的种植环境。

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Results of field test %

试验序号	碎秸合格率 ε_1	种带清秸率 ε_2
1	95.64	91.28
2	86.27	94.17
3	91.58	85.52
4	90.62	88.37
5	89.13	91.06
6	94.25	92.84
均值	91.25	90.54

4 结论

- (1) 针对现有秸秆粉碎还田技术装备全量秸秆地易出现缠秸增阻、后茬作物播种难、功耗大、经济性差等问题, 设计了一种秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置, 可实现全量秸秆地粉碎条铺的同时完成种带清秸、行间覆秸等多道作业工序, 为高质顺畅免耕播种创造无秸秆障碍的播种条件。
- (2) 对关键部件进行理论分析, 确定相关结构和位置参数, 通过性能试验选取最优的作业参数组合。试验结果表明: 影响评价指标碎秸合格率 ε_1 、种带清秸率 ε_2 显著性的主次顺序分别为 A、C、B 和 B、C、A, 综合分析选取最佳组合方案为 $A_2B_2C_2$, 即刀轴转速 $n = 2\,000\text{ r/min}$ 、径向距离 $\tau = 20\text{ mm}$ 、行走速度 $v = 1.0\text{ m/s}$ 时, $\varepsilon_1 = 93.42\%$ 、 $\varepsilon_2 = 92.71\%$, 能够发挥整机最佳工作性能。
- (3) 田间试验结果表明: 较优的因素水平组合下碎秸合格率 ε_1 均值为 91.25%、种带清秸率 ε_2 均值为 90.54%, 满足相关技术标准和农艺要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 陈海涛, 侯磊, 侯守印, 等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 59 – 67. CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)

[3] ZENG Z W, CHEN Y. Performance evaluation of fluted coulters and rippled discs for vertical tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 108(6): 93 – 99.

[4] 王庆杰, 刘正道, 何进, 等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 10 – 17. WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 10 – 17. (in Chinese)

[5] 李永磊, 宋建农, 康小军, 等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45 – 49. LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45 – 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.009. (in Chinese)

[6] KHOKAN K S, XU C L, WANG X Y, et al. Band tillage with fertilizer application for unpuddled transplanting rice in northeast of China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 73 – 83.

[7] FLOWERA K C, WARD P R, CORDINGLEY N, et al. Rainfall, rotations and residue level affect no-tillage wheat yield and gross margin in a Mediterranean-type environment [J]. Field Crops Research, 2017, 208(4): 1 – 10.

- [8] SIDAHMED M M, JABER N S. The design and testing of a cutter and feeder mechanism for the mechanical harvesting of lentils [J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(3): 295 – 304.
- [9] ALAN J F, JOHN A S. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 57(7): 62 – 70.
- [10] MATIN M A, DESBIOLLES 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(8): 271 – 279.
- [11] 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.
- [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(1): 329 – 340.
- [13] ELFATHI A, ARIF E M, ATEF A E. Evaluate the modified chopper for rice straw composting [J]. *Journal of Applied Sciences Research*, 2010, 6(8): 1125 – 1131.
- [14] SIAHU 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(7): 201 – 212.
- [15] 张喜瑞, 王自强, 李粤, 等. 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 26 – 34. ZHANG Xirui, WANG Ziqiang, LI Yue, et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(3): 26 – 34. (in Chinese)
- [16] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. ZHENG Zhiqi. Study on corn straw pickup-chopping and ditch-burying returning field machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] JIA H L, WANG L C, LI C S, et al. Combined stalk-stubble breaking and mulching machine [J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 107(2): 42 – 48.
- [19] JIA H L, JIANG X M, YUAN H F, et al. Stalk cutting mechanism of no-tillage planter for wide/narrow row farming mode [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(2): 26 – 35.
- [20] 付乾坤, 荐世春, 贾洪雷, 等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 9 – 16. FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(4): 9 – 16. (in Chinese)
- [21] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 76 – 87. ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 76 – 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)
- [22] ZHANG X C, LI H W, DU R C, et al. Effects of key design parameters of tine furrow opener on soil seedbed properties [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(3): 67 – 80.
- [23] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 108 – 116. ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 108 – 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [24] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式1JH-2型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 10 – 18. TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(14): 10 – 18. (in Chinese)
- [25] 刘艳芬, 林静, 李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 60 – 69. LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 60 – 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.008. (in Chinese)
- [26] 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 112 – 117. WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 112 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 吴峰, 徐弘博, 顾峰玮, 等. 秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置改进[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 18 – 26. WU Feng, XU Hongbo, GU Fengwei, et al. Improvement of straw transport device for straw-smashing back-throwing type multi-function no-tillage planter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(24): 18 – 26. (in Chinese)