

秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验

郑智旗^{1,2} 何进^{1,2} 王庆杰^{1,2} 李洪文^{1,2} 李问盈^{1,2} 陈婉芝^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 江苏省现代农业装备与技术协同创新中心, 镇江 212013)

摘要: 针对黄淮海地区存在玉米秸秆量大、后续播种难度大等问题,设计了一种秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机,能一次完成秸秆捡拾、粉碎、输送和开沟掩埋等作业。应用典型弹齿滚筒式捡拾装置工作原理,通过弹齿捡拾秸秆过程的分析,确定了弹齿滚筒式捡拾装置的导轨中心线轨迹和捡拾相位,并对弹齿进行了基于实际作业情况的运动学分析,其运动轨迹与速度变化规律能够满足捡拾秸秆的需求。采用动定刀支撑切割方式粉碎秸秆,并利用粉碎腔体内的高速气流和置于腔体后侧的挡草板,实现秸秆掩埋还田比例调节和部分秸秆抛撒还田。开沟装置、秸秆输送导向装置出草口和圆盘覆土装置从前向后依次布置,顺序完成开沟、秸秆入沟和覆土掩埋工序。田间试验表明,当作业速度为3 km/h时,秸秆捡拾率为93.5%,粉碎长度合格率为92.6%,开沟深度稳定性系数为95.0%,秸秆入沟率与预先设定的掩埋比例基本一致,各项技术指标满足技术要求。

关键词: 秸秆还田; 粉碎; 掩埋; 设计; 试验

中图分类号: S224.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0087-10

Design and Experiment on Straw Pickup-chopping and Ditch-burying Integrated Machine

ZHENG Zhiqi^{1,2} HE Jin^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LI Hongwen^{1,2} LI Wenyong^{1,2} CHEN Wanzhi^{1,2}

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

2. Jiangsu Province Synergistic Innovation Center of Modern Agricultural Equipment and Technology, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In Huang – Huai – Hai area, the large amount of maize straw cover resulted in increasing difficulties in winter wheat sowing, and an integrated machine was developed to pick up, crush and bury the corn straw at single operation to cope with this problem. The trace and phase position of the guideway centerline of spring-finger cylinder pickup device were determined based on the working principle and working process analysis of the typical spring-finger cylinder pickup device. A kinematic analysis on spring-finger was carried out under practical condition, and changes in both movement trajectory and speed were able to meet the requirements. Straw was chopped with a fixed knife and a high-speed rotating knife, while the high-speed air flow within the crushing chamber that formed by the rotation of the chopping roller, as well as the baffle plates placed in the back of the crushing chamber, were used to adjust the proportion of the straw to be buried and scatter the partial straw from the places without baffle plates to the surface of ground. Ditching device, the outlet of straw guided-conveying device and the disc covering device were arranged from front to back, so as to sequentially complete ditching, straw-disposing and soil-covering. As indicated in the field experiment, the straw picking up rate was 93.5%, the qualification rate of straw chopping length was 92.6%, the trench depth stability ratio was 95.0% when at a operation speed of 3 km/h, the proportion of straw that had been buried into the ditch was in accordance with the pre-set proportion, which showed that the proportion of the buried straw can be adjusted successfully through different widths of the baffle plates. As a consequence, all the technical indicators of this machine succeeded in meeting the technical requirements.

Key words: straw returning; chopping; burying; design; experiment

收稿日期: 2016 – 10 – 21 修回日期: 2017 – 01 – 05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)、教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)和江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(NZXT02201601)

作者简介: 郑智旗(1985—),男,博士生,主要从事作物秸秆还田技术装备研究,E-mail: zhiqizheng@163.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技术研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

引言

秸秆还田技术具有改良土壤理化性质、促进微生物生长、改善农业生态环境等特点,已成为我国主要的秸秆处理方式之一^[1-2]。黄淮海地区是我国重要的粮食主产区,主要采用冬小麦—夏玉米轮作种植模式,每年农作物秸秆资源量约为 2.4 亿 t,其中玉米秸秆量约为 0.89 亿 t,占总量的 37%^[3]。目前主要采用玉米联合收获机(大部分配套秸秆粉碎装置)进行收获,随后进行旋耕混埋还田(秸秆主要分布在表层 0~15 cm 内),在改善土壤结构,减少水分蒸发,增加土壤持水性和通透性等方面具有显著效果^[2]。但玉米秸秆还田量大,表层秸秆含量过多,存在影响后续播种、出苗和易发病虫害等问题^[4-8]。而采用部分秸秆深埋还田(土层 15 cm 以下),能够降低表层土壤秸秆含量,提高深层土壤有机质含量,有利于后续播种和作物生长^[9-13]。目前相关机具研究在单项作业方面主要有秸秆直接粉碎、机械化开沟、秸秆深施装置等^[2,9,14],在联合作业方面主要有粉碎旋耕混埋还田、联合收获开沟除草等^[15-17],在稻麦区的应用情况较好,而适用于黄淮海地区麦玉轮作种植模式的秸秆粉碎掩埋复式还田机的研究还未见报道。

本文针对黄淮海麦玉轮作区存在的玉米秸秆量大的问题,结合区域农艺要求,以提高秸秆还田质量、改善全耕层土壤有机质状况出发,采用部分秸秆掩埋还田方式,设计一种秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机,为实现全耕层秸秆还田机械化作业提供参考。

1 总体方案

1.1 设计方案

现有研究显示 60%~68% 秸秆还田量在改善农田土壤物理性状、提高土壤酶活性与增加作物产量方面效果显著^[4,7]。结合黄淮海麦玉轮作区的农艺要求,玉米秸秆深埋还田的比例设计为 20%~50%。

黄淮海麦玉轮作区玉米秸秆量在 5.86~7.22 t/hm² 范围内^[18]。参照 GB/T 21962—2008《玉米收获机械 技术条件》中对秸秆粉碎长度的要求(小于等于 10 cm),综合考虑实际作业中存在的驾驶员操作熟练程度、对行适应性差、粉碎刀具磨损较快、刀具更换不及时等导致粉碎质量不高的因素^[19],为有效降低长秸秆(大于 10 cm)对后续播种等作业的影响,在玉米秸秆掩埋之前,对联合收获后的秸秆进行二次捡拾粉碎作业。

为实现秸秆部分掩埋还田,且比例可根据农艺

要求进行调整,主要从以下方面提出设计方案:①秸秆捡拾:采用弹齿捡拾秸秆的方式,漏掉石砾、泥土等,为秸秆粉碎和粉碎后秸秆输送创造有利条件。②秸秆粉碎抛撒和输送:粉碎装置与左右侧板、下壳体组成相对封闭的粉碎腔体,并在腔体后侧设置挡草板,利用腔体内形成的高速气流,使秸秆迅速抛出,部分秸秆被挡草板挡下并通过输送导向装置进入埋草沟内,其余秸秆在气流作业下抛撒至地表覆盖还田;可通过设置不同的挡草板宽度来调控秸秆覆盖还田和掩埋还田比例。③开沟掩埋:开沟装置位于粉碎装置下部,向后依次是秸秆输送导向装置出草口和圆盘覆土装置,顺序完成开沟、秸秆入沟和覆土掩埋等工序。

按最大秸秆量 7.22 t/hm² 进行秸秆掩埋试验,结果表明当开沟沟面宽度 w 为 400 mm,沟底宽度 b 为 100 mm,开沟深度 a 为 250 mm,秸秆掩埋厚度 c 为 100~150 mm,可容纳 2.0 m 割幅玉米秸秆的 40%~60%,满足秸秆深埋还田要求。因此,为保证玉米秸秆能够有效掩埋还田,且机具能达到一定作业效率,设计机具幅宽为 1.85 m、作业速度不小于 0.8 m/s。秸秆开沟掩埋还田示意图如图 1 所示。

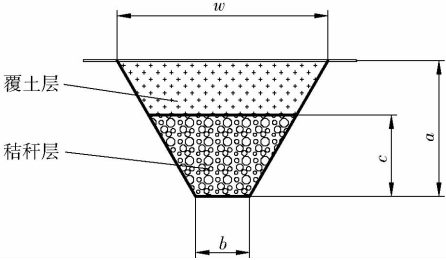


图 1 秸秆掩埋沟形示意图

Fig. 1 Structure sketch of straw ditch-buried

1.2 总体结构与工作原理

秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机整体结构如图 2 所示,主要由三点悬挂装置、弹齿滚筒式捡拾装置、双翼起土开沟装置、动定刀式粉碎装置、螺旋输送导向装置、圆盘覆土装置及传动系统等组成。

机具采用三点悬挂方式,拖拉机动力输出轴与机具的变速箱总成相联,通过圆柱齿轮传动、链传动总成和带传动装置,分别驱动弹齿滚筒式捡拾装置、动定刀粉碎装置和秸秆输送导向装置。作业时,弹齿滚筒式捡拾装置首先将秸秆捡起并推送至粉碎室;高速旋转的粉碎刀辊带动动刀作高速回转运动,在动刀和定刀的共同作用下将秸秆以剪切、撕裂的方式进行粉碎,粉碎后的秸秆在气流的作用下一部分被挡草板挡下并落入秸秆输送导向装置内,其余秸秆抛撒至地表覆盖还田;同时,双翼起土开沟装置开出秸秆掩埋沟;被挡草板挡下的秸秆在螺旋输送

叶片的作用下由两端向中间位置输送,并在抛送叶片的作用下抛送至秸秆掩埋沟内,由覆土圆盘完成覆土作业。根据黄淮海麦玉轮作区的种植模式、作物秸秆量和土壤特点,整机主要技术参数要求如表 1 所示。

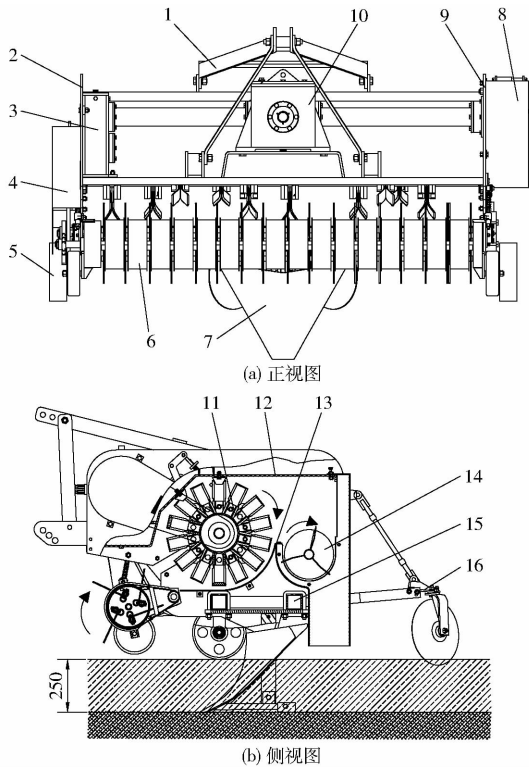


图 2 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机结构示意图

Fig.2 Structure sketches of straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine

1. 三点悬挂装置 2. 左侧板 3. 圆柱齿轮传动装置 4. 链传动总成 5. 地轮 6. 弹齿滚筒式捡拾装置 7. 双翼起土开沟装置 8. 带传动装置 9. 右侧板 10. 变速箱总成 11. 动定刀式粉碎装置 12. 上壳体 13. 输送导向装置 14. 下壳体 15. 开沟装置固定横梁 16. 圆盘覆土装置

表 1 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机主要技术参数
Tab.1 Main parameters of straw pickup-chopping and ditch-burying machine

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 880×2 200×1 350
工作幅宽/mm	1 850
整机质量/kg	850
作业速度/(km·h ⁻¹)	3
秸秆捡拾率/%	≥90
秸秆粉碎长度合格率/%	≥80
秸秆掩埋比例/%	20~50
开沟深度稳定性系数/%	≥80

2 关键部件设计

2.1 弹齿滚筒式捡拾装置

弹齿滚筒式捡拾装置(图 3)主要由弹齿、曲柄、导向滑道、固定外壳、仿形地轮等组成。其中导向滑

道保证弹齿的运动轨迹,使其能够完成捡拾、举升、推送等动作^[19],与典型弹齿滚筒捡拾装置类似^[19-21]。因联合收获后的玉米秸秆散乱地分布在玉米根茬之间,为避免根茬损坏弹齿,捡拾器两端通过摆动轴与机具侧板连接,上方设置悬挂缓冲装置,下方配置仿形地轮,实现捡拾器随地面变化作上下摆动,具备一定的仿形缓冲功能。

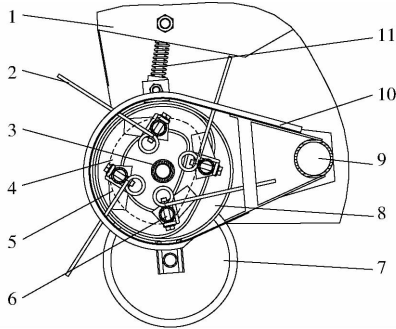


图 3 弹齿滚筒式捡拾装置结构图
Fig.3 Structure sketch of spring-finger cylinder pickup collector

1. 机具侧板 2. 弹齿 3. 捡拾器轴 4. 导向滑道 5. 曲柄
6. 固定弹齿管轴 7. 仿形地轮 8. 固定外壳 9. 摆动轴 10. 滚筒护板 11. 悬挂缓冲装置

2.1.1 导向轨道中心线轨迹与弹齿捡拾相位的确定

从弹齿捡拾装置构成与原理可知^[20-22],弹齿随滚筒沿着半径为 R 的圆周转动,同时受导向轨道控制相对于滚筒有规律地反复摆动,从而使弹齿连续实现捡拾、举升、推送和空回 4 个阶段的变化(图 4)。导向轨道中心线轨迹由圆弧段 AB 和 AC 、直线段 DE 和 EF 以及过渡曲线段 CD 和 FA 等组成,图中外部以虚线绘制的封闭曲线为弹齿齿端的运动轨迹。将弹齿运动过程中的姿态变化所对应的滚筒转动位置关系定义为弹齿捡拾相位,用滚筒转角表示^[21]。

(1) 捡拾段(轨道中心线 AB 、相位角 β_1):弹齿接近于径向,其端部开始向上捡拾秸秆,要求运动平稳,曲线 AB 为圆弧,曲柄运动至 B 时,弹齿接近于水平,确定捡拾相位角 $\beta_1 = 90^\circ$ 。

(2) 举升段(轨道中心线 BC 、相位角 β_2):弹齿平稳上升,与滚筒无相对摆动,齿端速度相对向上,曲线 BC 为与 AB 同心的圆弧,曲柄运动至 C 时,弹齿接近竖直方向,确定举升相位角 $\beta_2 = 90^\circ$ 。

(3) 卸草段(轨道中心线 CE 、相位角 β_3):由过渡曲线段 CD 和直线段 DE 组成,弹齿相对半径方向有较大的后倾,端部速度向下,使秸秆从弹齿上迅速离开,曲柄运动至 B 时,齿端从护板上方缩回到护板内侧,由此确定卸草相位角 $\beta_3 = 112^\circ$ 。

(4) 空行段(轨道中心线 EA 、相位角 β_4):由直

线段 EF 和过渡曲线段 FA 组成,弹齿的相对速度迅速增大,其齿端从护板下方的缝隙中迅速伸出,曲柄运动至 A 时,弹齿接近于径向,确定空行段相位角 $\beta_4 = 68^\circ$ 。

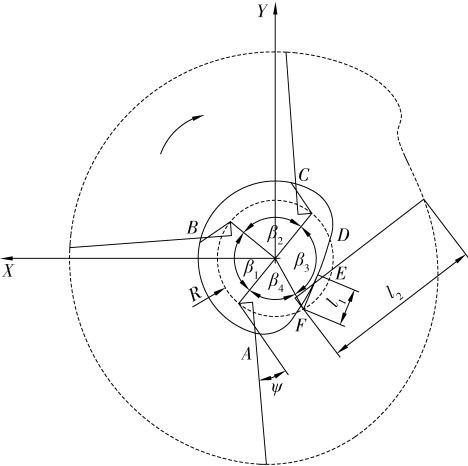


图 4 捡拾装置导向滑道中心线轨迹及弹齿捡拾相位图
Fig.4 Oriented slide centerline of pickup collector and its spring-finger phases diagram

2.1.2 捡拾器滚筒转速

捡拾器弹齿的线速度对捡拾效果影响较大,其值一般大于或等于机具前进速度^[20]。为使秸秆在地面不致堆积、捡拾器不致堵塞,且能够在弹齿推送阶段具备一定的速度以有效推送秸秆,参考当前典型弹齿滚筒捡拾装置的参数设置^[23-24],初步设计捡拾器滚筒转速为 120 r/min。

2.1.3 弹齿运动仿真分析

利用 Pro/E 建立捡拾器三维模型,并利用其对捡拾器进行运动学分析,分析弹齿齿端的运动轨迹和速度是否满足捡拾秸秆的需求^[22]。其滚筒半径 $R = 125\text{ mm}$,曲柄长度 $l_1 = 40\text{ mm}$,弹齿长度 $l_2 = 175\text{ mm}$,弹齿与曲柄夹角 $\psi = 30^\circ$,弹齿杆数 $N = 4$ 。按实际作业情况设置捡拾器前进速度 $v_i = 3\text{ km/h}$,滚筒转速 $n_3 = 120\text{ r/min}$,则 1 个回转周期为 0.5 s,捡拾器前进 0.42 m。

图 5a 为捡拾器在 1 个回转周期内弹齿的运动轨迹。从图中可以看出,捡拾器若按上述给定的结构参数设计,其漏捡区较小,可避免秸秆在地面堆积和漏捡。

图 5b 为捡拾器弹齿齿端在 1 个回转周期内的速度变化规律。从图中可以看出,在 $0 \sim 0.12\text{ s}$ 时,齿端 Y 方向速度逐渐平稳增加, X 方向速度为正,齿端绝对速度方向开始向上,齿端开始向上捡拾秸秆;在 $0.12 \sim 0.24\text{ s}$ 时,齿端绝对速度方向由向上逐渐向后变化,速度大小变化不大,秸秆被平稳举起,并向后过渡;在 $0.24 \sim 0.40\text{ s}$ 时,齿端绝对速度减小,弹齿向后推送物料,并且齿端速度转而向下,使秸秆

能够很好地与弹齿脱离;在 $0.4 \sim 0.5\text{ s}$ 时,齿端绝对速度迅速增大,弹齿迅速缩进护板内,并进入捡拾段相位状态。

因此,弹齿滚筒式捡拾装置采用上述给定的结构参数和运动参数,其弹齿的运动轨迹与速度变化规律能够满足捡拾秸秆的需求。

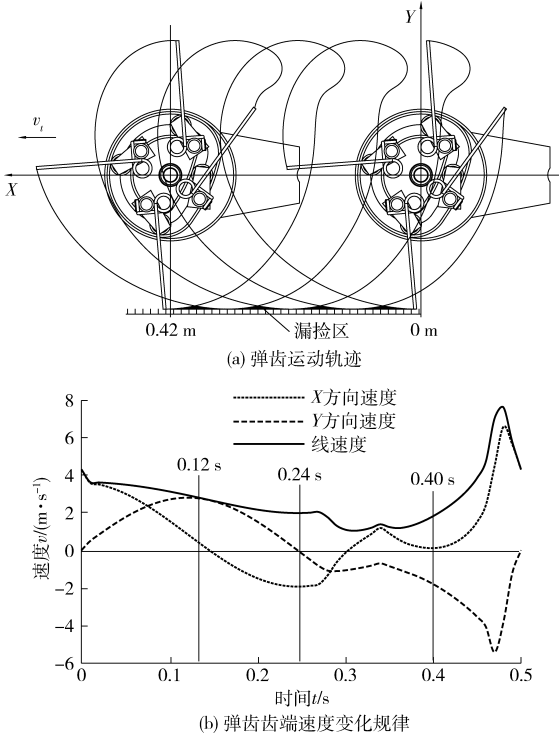


图 5 弹齿运动轨迹与齿端速度变化规律图
Fig.5 Trajectory and velocity change trend of spring-finger

2.2 动定刀式粉碎装置

为达到较好的秸秆粉碎质量和秸秆抛撒效果,采用动定刀支撑切割粉碎方式,并对粉碎装置的关键部件及其参数进行设计。

2.2.1 刀辊转速和动刀回转半径

粉碎刀辊转速和动刀回转半径是秸秆粉碎还田机设计中的主要参数,其大小均会直接影响秸秆粉碎质量、抛撒效果以及机具运行平稳性^[25-27]。刀辊转速与动刀回转半径关系式为

$$v_1 = \frac{\pi n_1 R_1}{30} \tag{1}$$

式中 v_1 ——动刀刀端线速度, m/s
 n_1 ——粉碎刀辊转速, r/min
 R_1 ——动刀回转半径, m

粉碎玉米秸秆时,动刀刀端线速度在 48 m/s 时能达到良好的粉碎效果^[25,27]。目前国内外秸秆粉碎还田机粉碎刀辊转速一般在 $1\,600 \sim 2\,200\text{ r/min}$,动刀回转半径在 $240 \sim 350\text{ mm}$ 范围内。综合考虑玉米秸秆粉碎条件下其动刀刀端线速度、刀辊动平衡、粉碎后秸秆抛撒等因素,设计刀辊转速为

1 900 r/min, 动刀回转半径为 270 mm。代入公式(1)计算可得, 动刀刀端线速度 $v_1 = 53.7$ m/s, 满足玉米秸秆粉碎以及粉碎后秸秆抛送要求。

2.2.2 动定刀组合设计

为提高秸秆粉碎质量, 采用动刀、定刀支撑切割的方式。粉碎动刀选用秸秆抓取能力强且不易被秸秆缠住的 L 改进型刀。每组动刀由 2 片 L 改进型刀片组成, 与固定于上壳体的定刀对中布置, 形成支撑切割, 如图 6 所示。为防止漏捡, 在刀辊轴向方向上, 使每组相邻的动刀粉碎区间能够部分重合。同时, 定刀采用双排交错排列, 可避免或减少因定刀间距过小造成秸秆堵塞。为避免动定刀发生运动干涉, 相邻两组动刀轴向距离 d_1 和相邻两个定刀轴向距离 d_2 的位置关系应满足: $d_2 = 2d_1$ 。

对于 L 改进型刀, 刀片密度的取值范围通常为 23 ~ 40 片/m^[26]。本机具设计幅宽为 1 850 mm, 则 L 改进型刀片数量应为 42 ~ 74, 即 21 ~ 37 组。故设计布置粉碎动刀 28 组; 布置粉碎定刀 28 个, 每排 14 个。

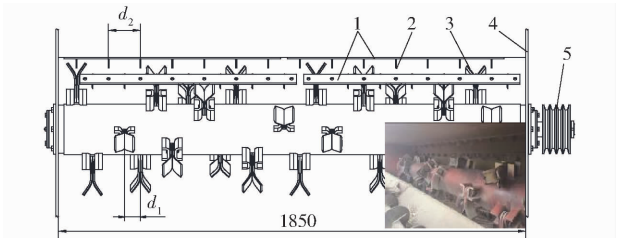


图 6 动定刀式粉碎装置结构图

Fig. 6 Structure sketch of straw device with chopped-fixed knife

1. 定刀焊接板 2. 定刀 3. 动刀 4. 侧板 5. 带轮

2.2.3 粉碎刀辊排列

合理的刀辊排列方式不仅能提高粉碎质量, 还可使机具运转平稳, 因此在设计动刀排列时应尽量做到平衡^[26,28]。参照文献[28]所述排列方法, 采用双螺旋线排列方式, 安排 28 组动刀, 相邻两组动刀轴向距离均相等, 径向夹角分别为 180°或 102.8°, 如图 7 所示。该排列方式每次仅有 2 把动刀同时作业, 能减少工作阻力的波动, 降低振动和两端轴承的受力, 提高机具的使用寿命。

根据设计工作幅宽(1 850 mm), 最终确定动刀与定刀的配合尺寸, 其中相邻两组动刀轴向距离 $d_1 = 64$ mm, 定刀距离 $d_2 = 128$ mm。实际运转表明, 动刀与定刀未发生干涉, 运行平稳。

2.3 秸秆输送导向装置

根据整机工作要求, 所设计的秸秆输送导向装置结构如图 8 所示, 主要由旋转轴、右螺旋叶片、左螺旋叶片、抛送叶片、挡草板、导向壳体等组成。挡

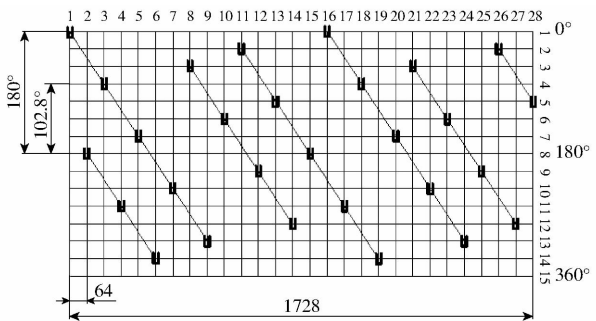


图 7 粉碎动刀在刀辊上的排列图

Fig. 7 Chopping knife arrangement on roller

草板对称布置于导向壳体两侧, 采用可拆卸安装方式, 与导向壳体一起将正前方由粉碎装置抛出的碎秸秆挡下, 并落入螺旋输送装置; 碎秸秆在两个反向螺旋输送叶片的作用下由两侧向中间位置输送, 并在抛送叶片的抛送作用下通过导向壳体(排出口处)导入正下方的秸秆掩埋沟内。其中抛送叶片类似于风机叶片, 增大排草口气流量, 对碎秸秆具有促排的作用。

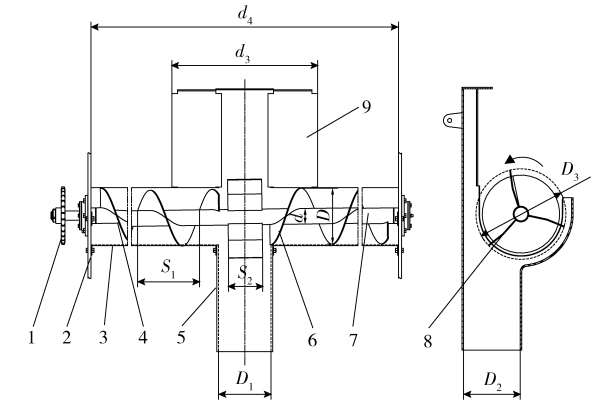


图 8 秸秆输送导向装置结构图

Fig. 8 Structure sketch of straw conveying guide device

1. 链轮 2. 侧板 3. 输送壳体 4. 右螺旋叶片 5. 导向壳体 6. 左螺旋叶片 7. 旋转轴 8. 抛送叶片 9. 挡草板

将挡草板和导向壳体所占宽度 d_3 与工作幅宽 d_4 的百分比称为秸秆掩埋比例 τ , 即

$$\tau = \frac{d_3}{d_4} \times 100\% \tag{2}$$

通过调整宽度 d_3 可调节秸秆掩埋比例。为保证被挡草板挡下的秸秆全部顺利输送并导入掩埋沟, 需按最大秸秆掩埋率为 50% 时的秸秆量对螺旋输送器和排草口进行设计。

2.3.1 螺旋输送装置

螺旋输送装置输送量应大于或等于其最大喂入量。黄淮海麦玉区玉米秸秆量在 5.86 ~ 7.22 t/hm² 范围内^[18], 按工作幅宽 1.85 m、前进速度 3 km/h 计算, 整个机具的秸秆喂入量为 3.24 ~ 3.96 t/h。所设计的秸秆输送导向装置为两侧向中间输送, 且设

计掩埋比例最大为 50%, 其每一侧的螺旋输送装置的秸秆输送量应大于或等于整个装置最大喂入量的 $0.5 \times 50\%$, 即输送装置单侧秸秆的喂入量 $q_1 = 0.5 \times 50\% \times 3.96 \text{ t/h} = 0.99 \text{ t/h}$ 。在设计输送装置的螺旋直径、螺距等主要结构参数时, 应满足^[19]

$$Q = 47D^2 \varphi S_1 n_2 \rho C \geq q_1 \quad (3)$$

式中 Q ——输送量, t/h

D ——螺旋叶片直径, m

φ ——填充系数 S_1 ——螺距, m

n_2 ——旋转轴转速, r/min

ρ ——秸秆堆积密度, t/m^3

C ——倾斜输送修正系数, 这里为水平输送, 其值为 1

2.3.2 排草口

为保证秸秆顺利排出, 在排草口处不发生堵塞, 单位时间内排草口排出秸秆的体积不应小于喂入体积, 则

$$3\ 600v_d S_d \rho \geq 2q_1 \quad (4)$$

其中 $S_d = D_1 D_2$ (5)

式中 v_d ——秸秆的排出速度, m/s

S_d ——排草口截面积, m^2

D_1, D_2 ——排出口截面横向和纵向尺寸, m

抛送叶片在工作时绕旋转轴轴心 O 作匀速圆周运动, 首先使秸秆有一切线方向的速度 v_T , 当叶片转至排出口一侧的水平线开始, 秸秆将有一径向速度 v_R , 如图 9 所示。设 M 点为抛送叶片上的任一点, 则秸秆被抛掷时的初速度 v_d 及其方向为^[19]

$$v_d = \frac{v_T}{\cos\beta} \quad (6)$$

$$\tan\beta = \frac{\sinh\theta}{\cosh\theta} \quad (7)$$

其中 $v_T = \frac{\pi n_2 R_M}{30}$ (8)

式中 R_M ——叶片上 M 点到旋转轴心 O 的距离, m

β ——秸秆排出速度与切向速度夹角, rad

θ ——排料口的出口角, rad

根据要求, 秸秆输送导向装置需要同时满足秸秆输送量和顺利通过排草口的要求。由式(3)~(8)可得

$$\begin{cases} n_2 \geq \frac{q_1}{47D^2 \varphi S_1 \rho C} \\ n_2 \geq \frac{q_1 \cos\beta}{60\pi R_M D_1 D_2 \rho} \end{cases} \quad (9)$$

参照行业标准 JB/T 7679—2008《螺旋输送机》, 设计螺旋叶片直径 D 为 250 mm、旋转轴直径 d 为 50 mm、螺距 S_1 为 200 mm, 螺旋叶片采用厚度

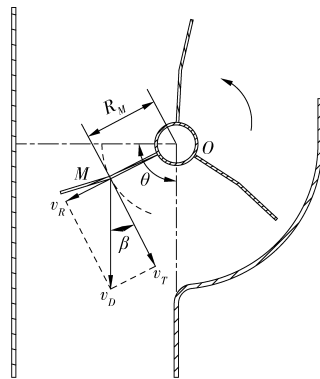


图 9 抛送叶片的抛掷过程分析

Fig. 9 Analysis for throwing process of throwing leaves

3 mm 的碳素结构钢 Q235 加工而成, 螺旋叶片与机壳之间的间隙为 8 mm, 抛送叶片的回转直径 D_3 为 290 mm, 宽度 S_2 为 150 mm, 导向壳体的截面尺寸 D_1 为 220 mm, D_2 为 200 mm。

玉米秸秆为散料, 填充系数 φ 较小, 取值为 0.2, 堆积密度 ρ 为 0.05 t/m^3 ^[20,29]。以抛送叶片中部位置的抛掷速度来计算排草口的通过能力, 此时 $R_M = D_3/2$ 。将秸秆输送导向装置各参数代入式(9)计算可得: $n_2 \geq 168.5 \text{ r/min}$ 。

由式(6)~(8)可得, 当 $n_2 = 180 \text{ r/min}$ 时, 抛送叶片中部位置的抛掷速度 $v_d = 3.7 \text{ m/s}$, 能将粉碎后的秸秆有效抛出。秸秆输送试验也表明, 当旋转轴转速为 180 r/min 时, 秸秆输送通畅, 排草口未发生堵塞现象, 满足设计要求。旋转轴转速 n_2 设计为 180 r/min。

2.4 开沟装置与覆土装置

开沟埋草需要顺序完成开沟、秸秆入沟和覆土掩埋 3 个工序, 故结构布置从前向后依次是开沟装置、秸秆输送导向装置出草口和圆盘覆土装置, 前后对中布置, 如图 10 所示。

2.4.1 双翼起土开沟装置

秸秆掩埋沟开沟深度大, 因此要求土块沿开沟装置曲面先上升一定高度后再侧移翻转。根据秸秆深埋还田要求, 结合开沟筑埂犁体曲面设计方法^[27], 设计了一种双翼起土开沟装置, 用于开出图 1 所示秸秆掩埋沟, 犁体曲面轮廓如图 10b 所示。

根据土块运动不超过顶边线高度原则, 假设曲面下部起土部分与上部翻土部分的正面轮廓面积相等^[30], 则可建立公式

$$\begin{cases} H = 1.2h \\ L = (b + 2h\cot\delta)\eta \\ (w + b)a = (l + w)(h - a) \\ w = b + 2a\cot\delta \\ l = b + 2h\cot\delta \end{cases} \quad (10)$$

式中 l ——土埂边线距离, mm

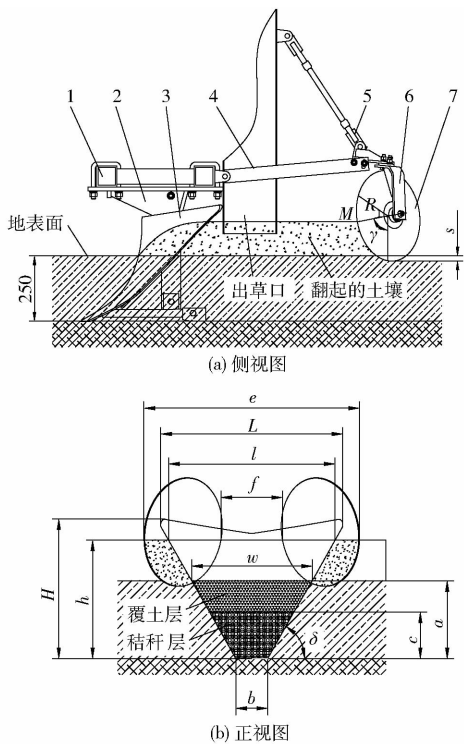


图 10 开沟装置与覆土装置位置关系

Fig. 10 Location relationship between ditching device and soil covering device

1. 固定横梁 2. 犁柱固定板 3. 犁体曲面 4. 下悬挂板 5. 调节丝杠 6. 圆盘固定板 7. 覆土圆盘

h ——土埂顶端与沟底距离, mm
 H ——顶边线高度, mm
 δ ——埋草沟的沟壁角, ($^{\circ}$)
 L ——曲面宽度, mm
 η ——系数, 取 1.1

代入数据, 可得: $H = 495$ mm, $h = 380$ mm, $L = 613$ mm, $l = 557$ mm, $\delta = 59^{\circ}$ 。

2.4.2 圆盘覆土装置

圆盘覆土装置结构如图 10a 所示, 主要由调节丝杠、圆盘固定板和覆土圆盘等组成。使覆土圆盘与地表面(未开沟部分)接触一段距离 s , 使圆盘不易因土壤疏松发生转动不灵和壅土, 可通过丝杠调节距离 s , 取 $s = 20$ mm。

为保证秸秆掩埋效果, 双圆盘覆土量应大于覆盖秸秆层所需的土量, 假设圆盘覆土曲面的正面轮廓面积大于等于覆土层的正面轮廓面积(图 10b), 则覆土作业幅宽 e 近似计算式为

$$(h-a)(2e-l-w) > (a-c)\left(c\frac{w-b}{a}+b+w\right) \quad (11)$$

代入数据可得: $e > 750$ mm。

圆盘覆土装置作业时, 覆土作业幅宽 e 由圆盘半径 R_1 、两圆盘间的夹角 ε 和入土深度 h_1 共同决

定^[26]。其关系式为

$$e = 4\sqrt{R_1^2 - (R_1 - h + a + s)^2} \sin \frac{\varepsilon}{2} + f \quad (12)$$

其中, 圆盘内侧距离 f 过大容易造成覆盖不严, 取 $f = 150$ mm。圆盘半径取值通常为 $150 \sim 190$ mm, 设计取 $R_1 = 175$ mm, 设计圆盘夹角 ε 为 90° 。由式(11)可知, 圆盘覆土作业幅宽 $e = 814.5$ mm > 750 mm, 满足设计要求。

2.5 传动系统

秸秆粉碎掩埋多功能一体机采用分路传动系统, 即捡拾器—输送导向装置传动系统和粉碎装置传动系统, 如图 11 所示。

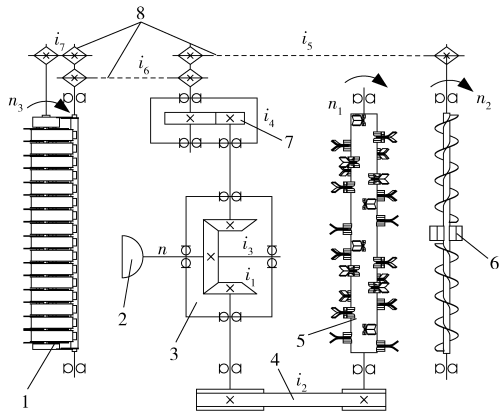


图 11 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机传动系统示意图

Fig. 11 Transmission sketch of straw pickup-chopping and ditch-burying compound operation machine

1. 捡拾器 2. 拖拉机动输出轴 3. 变速箱 4. 带传动 5. 秸秆粉碎装置 6. 秸秆输送导向装置 7. 圆柱齿轮传动 8. 链传动

根据传动比计算公式

$$\begin{cases} i = i_1 i_2 = \frac{n}{n_1} \\ i' = i_3 i_4 i_5 = \frac{n}{n_2} \\ i'' = i_3 i_4 i_6 i_7 = \frac{n}{n_3} \end{cases} \quad (13)$$

式中 i ——秸秆粉碎装置传动系统总传动比

i' ——秸秆输送装置传动系统总传动比

i'' ——捡拾器传动系统总传动比

综合各关键部件速度要求与功率消耗两方面因素, 拖拉机动输出轴转速取标准值 720 r/min 进行计算, 即 $n = 720$ r/min。根据 2.1.2、2.2.1 和 2.3.2 节可知 $n_1 = 1900$ r/min, $n_2 = 180$ r/min, $n_3 = 120$ r/min, 代入式(13)可得: $i = 0.379$ 、 $i' = 4.0$ 、 $i'' = 6.0$ 。

传动比的合理分配非常重要, 综合考虑传动系统轮廓尺寸、质量以及润滑条件等因素, 本设计取 $i_1 = i_3 = 0.615$ 、 $i_2 = 0.606$ 、 $i_4 = 3.161$ 、 $i_5 = i_6 = 1.933$ 、 $i_7 = 1.533$ 。

3 田间试验

3.1 试验条件与测试指标

田间试验在中国农业大学河北涿州实验站进行,为联合收获后玉米秸秆地,试验地长度为 90 m、宽度为 45 m。玉米秸秆量为 6515 kg/hm²、秸秆含水率 17.97%,土壤类型为轻壤土,在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 深度处土壤含水率分别为 13.63%、13.14% 和 12.64%,土壤紧实度分别为 0.93、4.11、4.87 MPa。

为明确不同秸秆掩埋比例条件下机具的工作性能,设计了秸秆掩埋比例分别为 25%、35% 和 45% 的单因素试验。试验选用拖拉机型号为雷沃 M904,作业速度为 3 km/h,实际作业距离为 30 m,每组分别进行 3 次重复。通过布置不同宽度挡草板来调节秸秆掩埋比例(图 12a),整机实物及作业效果如图 12 所示。



图 12 整机实物及作业效果图

Fig. 12 Photos of machine and its operation effect

试验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》和行业标准 NY/T 740—2003《田间开沟机械 作业质量》及 JB/T 5160—2010《牧草捡拾器》进行,主要测试指标:作业速度、秸秆捡拾率、秸秆粉碎长度合格率、开沟质量、秸秆入沟率和机具通过性等。

(1) 秸秆捡拾率和粉碎长度合格率

捡拾联合收获后的玉米秸秆,选用其中长度大于 10 cm 的秸秆,按秸秆量 6 515 kg/hm²布置 3 个长 5 m、宽 1.85 m 的测试区,并把周围的秸秆清理干净。前进速度为 3 km/h,在粉碎装置后方用帆布收集所有粉碎抛出的玉米秸秆(包括粉碎腔体内部的秸秆等),分别称量收集的秸秆总质量和其中粉碎

不合格(长度 10 cm 以上)的秸秆质量,分别计算秸秆捡拾率和粉碎长度合格率,并求出 3 个小区的平均值,计算式为

$$S_j = \frac{W_1}{W} \times 100\% \tag{14}$$

$$\mu = \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) \times 100\% \tag{15}$$

式中 S_j ——秸秆捡拾率,%
 W ——测试区秸秆总质量,g
 W_1 ——捡拾装置捡拾秸秆质量,g
 μ ——秸秆粉碎长度合格率,%
 W_2 ——测点不合格秸秆质量,g

(2) 开沟质量

在不同作业行程内,选取 3 条不同的秸秆掩埋沟,并在每条掩埋沟等间距选取 5 个点作为测量点,共测点 15 处。测试前先清除沟底及抛落到沟壁上的土块,并用铁锹挖取沟形截面,用卷尺分别测出掩埋沟截面的沟面宽度、沟底宽度和开沟深度,并记录数据。根据测得的数据,分别计算各指标的平均值、标准差及稳定系数,与标准对照,检验开沟质量是否满足标准要求。

(3) 秸秆入沟率

沿机具作业方向上,在每个行程内分别收集 5 m 长度范围内地表覆盖的秸秆和沟内掩埋的秸秆,并分别称量。按沟内掩埋秸秆质量与测定区内秸秆总质量的比值,计算秸秆入沟率^[16]。

(4) 机具工作稳定性

机具按规定的作业速度前进,观察机具在作业过程中各部件能否连续正常作业,记录机具发生堵塞的次数。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 秸秆捡拾率和粉碎长度合格率

由表 2 可知,在 3 次秸秆捡拾粉碎测定中,秸秆捡拾率的平均值为 93.5%,受玉米根茬影响,秸秆捡拾率变化相对较大,但均大于 90%,满足设计要求。秸秆粉碎长度合格率平均值为 92.6%,秸秆粉碎状况较好,满足秸秆粉碎还田标准。

3.2.2 开沟质量

试验完成后,按照所述试验方法分别测量掩埋沟的沟面宽度、沟底宽度和开沟深度,测得的数据如表 3 所示。

由表 3 可看出,开沟装置所开沟面宽度平均为 401 mm,沟底宽度为 99 mm,开沟深度为 263 mm,基本与设计值相符。试验结果显示,开沟深度变异系数平均为 5.0%,开沟深度稳定性系数为 95.0%。

表 2 秸秆捡拾率和粉碎长度合格率试验结果

Tab.2 Testing result of rate of straw collecting and qualified rate of smashing length					
行程序号	秸秆总质量/g	秸秆捡拾量/g	不合格秸秆质量/g	秸秆捡拾率/%	粉碎合格率/%
1	6 026	5 660	421	93.9	92.6
2	6 026	5 462	386	90.6	92.9
3	6 026	5 781	451	95.9	92.2
均值	6 026	5 634	419	93.5	92.6
变异系数/%				2.3	0.3

表 3 掩埋沟截面测量结果

Tab.3 Testing results for cross-section of ditch				
行程序号	沟面宽度/mm	沟底宽度/mm	开沟深度/mm	开沟深度变异系数/%
1	402	99	262	4.7
2	392	100	253	5.6
3	410	99	274	4.7

NY/T 740—2003 标准要求开沟深度稳定性大于等于 80%，沟面宽度和沟底宽度在农艺要求值上下浮动 15 mm。由此可得，开沟深度、沟面宽度和沟底宽度均满足标准要求。

3.2.3 秸秆入沟率

由表 4 可知，在预先设定秸秆掩埋比例为 25%、35% 和 45% 条件下，秸秆平均入沟率分别为 26.2%、34.3% 和 44.8%，其与设置值的误差分别为 0.7%~10.0%、0.6%~4.3% 和 0.8%~5.0%，误差在 10% 范围内，说明通过挡草板调节秸秆掩埋比例基本满足设计要求。同时，秸秆输送装置和导草装置配置合理，满足碎秸秆输送导向要求。

3.2.4 机具工作稳定性

试验结果显示，机具田间试验过程中，秸秆通过

表 4 秸秆入沟率测量结果

Tab.4 Testing result of rate of straw into ditch					
秸秆掩埋比例设置/%	地表秸秆质量/g	沟内秸秆质量/g	秸秆入沟率/%	与设定值的误差/%	入沟率均值/%
	4 480	1 480	24.8	0.7	
25	4 220	1 601	27.5	10.0	26.2
	4 328	1 540	26.2	5.0	
	3 900	2 050	34.5	1.6	
35	3 790	1 910	33.5	4.3	34.3
	3 812	2 034	34.8	0.6	
	3 230	2 412	42.8	5.0	
45	3 015	2 595	46.3	2.8	44.8
	3 192	2 648	45.3	0.8	

性能好，没有发生堵塞现象，各关键部件工作稳定，各项技术指标基本满足技术要求。其中，双圆盘覆土装置受根茬及飘落秸秆的影响，掩埋秸秆的土层较薄，且存在两条沟(图 12c)，后续需要进行灭茬整地作业。

4 结论

(1) 将秸秆覆盖还田和深埋还田有机结合，设计了能够一次性完成秸秆捡拾、粉碎、输送和开沟掩埋等作业的秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机，动作协调、性能稳定，能够有效减少土壤 0~15 cm 土层秸秆含量，有利于后续播种。

(2) 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机的性能试验表明，在作业速度 3 km/h 时，秸秆捡拾率为 93.5%，粉碎长度合格率为 92.6%，开沟深度稳定性系数为 95.0%，秸秆入沟率与设定的掩埋比例基本一致，各项技术指标基本满足技术要求。

参 考 文 献

1 LI Hongwen, GAO Huanwen, WU Hongdan, et al. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(5): 344–350.

2 农业部农业机械化管理司. 中国保护性耕作[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.

3 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228–234. FANG Fang, LI Xiang, SHI Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 228–234. (in Chinese)

4 赵红香, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 科学耕作与留茬改良小麦—玉米两熟农田土壤物理性状及增产效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 113–122. ZHAO Hongxiang, CHI Shuyun, NING Tangyuan, et al. Covering farming pattern to improve soil physical properties and crop yield in wheat-maize cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 113–122. (in Chinese)

5 马书芳, 朱德慧, 曹辉辉, 等. 秸秆全量还田对农作物病虫害的影响及防控对策[J]. 中国植保导刊, 2016(7): 75–77.

6 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463–465, 478. LI Shaokun, WANG Keru, FENG Jukai, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 463–465, 478. (in Chinese)

7 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 等. 免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1127–1132. CAI Lijun, ZHANG Jingtao, GAI Zhijia, et al. Effect of the amount of stalk return to field on soil enzyme activities under no-tillage[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1127–1132. (in Chinese)

8 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1441–1449. ZHAO Shicheng, CAO Caiyun, LI Kejiang, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1441–1449. (in Chinese)

- 9 查良玉,仇忠启,王小华,等. 秸秆机械集中沟埋还田的可行性研究[J]. 浙江农业学报,2013, 25(1): 135-141.
ZHA Liangyu, QIU Zhongqi, WANG Xiaohua, et al. Study on feasibility of straw concentrated ditch-buried returning field using machine[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(1): 135-141. (in Chinese)
- 10 YANG Haishui, FENG Jinxia, ZHAI Silong, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 21-31.
- 11 WANG Xiaohua, YANG Haishui, LIU Jian, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. CATENA, 2015, 127: 56-63.
- 12 张静,温晓霞,廖允成,等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010, 16(3): 612-619.
ZHANG Jing, WEN Xiaoxia, LIAO Yuncheng, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 612-619. (in Chinese)
- 13 郑智旗,何进,张祥彩,等. 秸秆沟埋还田技术的研究现状与展望[J]. 农机化研究,2016(9): 10-16.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, ZHANG Xiangcai, et al. A review on technique for straw ditch-buried returning field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(9): 10-16. (in Chinese)
- 14 孔德刚,张超,张帅,等. 秸秆深施机单体设计及深施装置的试验研究[J]. 东北农业大学学报,2013, 42(2): 115-120.
KONG Degang, ZHANG Chao, ZHANG Shuai, et al. Design of single straw deep application machine and experimental research of deep application device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 42(2): 115-120. (in Chinese)
- 15 毛罕平,陈翠英. 秸秆粉碎掩埋复式作业机的试验研究[J]. 农业机械学报,1996, 27(3): 43-47.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. General design and test of straw chopper combined with burying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(3): 43-47. (in Chinese)
- 16 陈玉仑,丁为民,杨宏图,等. 墒沟集草型稻麦联合收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(增刊): 73-78.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s15&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.015.
CHEN Yulun, DING Weimin, YANG Hongtu, et al. Design and experiment of combine harvester with function of stalk-discharging to ditch[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 73-78. (in Chinese)
- 17 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
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. (in Chinese)
- 18 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- 19 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 20 陈志,郝付平,王锋德,等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(12): 44-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121209&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.009.
CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-50. (in Chinese)
- 21 许涛,沈永哲,高连兴,等. 基于两段收获的弹齿式花生捡拾机构研究[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(3): 90-97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160313&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.013.
XU Tao, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Spring-finger peanut pickup mechanism based on two-stage harvest[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 90-97. (in Chinese)
- 22 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(10): 82-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121015&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.015.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 82-89. (in Chinese)
- 23 杨莉,刘贵林,王振华,等. 自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机设计与试验[J]. 农业机械学报,2011, 42(增刊): 147-151.
YANG Li, LIU Guilin, WANG Zhenhua, et al. Design and experiment of engine-driven constant frequency rectangular pickup baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 147-151. (in Chinese)
- 24 王振华,王德成,刘贵林,等. 方草捆压捆机捡拾器参数设计[J]. 农业机械学报,2010, 41(增刊): 107-109.
WANG Zhenhua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Pickup parameters design of square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 107-109. (in Chinese)
- 25 张佳喜,王学农,陈发,等. 秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J]. 农业机械学报,2008, 39(6): 82-85, 37.
ZHANG Jiayi, WANG Xuenong, CHEN Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 82-85, 37. (in Chinese)
- 26 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: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 27 史建新,陈发,郭俊先,等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2006, 22(3): 68-72.
SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 68-72. (in Chinese)
- 28 曹阳. 一种秸秆粉碎刀的布刀方法[J]. 现代化农业,2014(6): 49-50.
- 29 田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报,2011, 42(9): 124-128, 145.
TIAN Yishui, YAO Zonglu, OUYANG Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 124-128, 145. (in Chinese)
- 30 胡红,李洪文,李传友,等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016, 32(4): 24-32.
HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24-32. (in Chinese)