

犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验

魏国梁^{1,2} 张青松^{1,2} 刘立超^{1,2} 肖文立^{1,2} 孙文成^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游稻油轮作区油菜直播作业时,因前茬水稻留茬高、秸秆量大而导致旋耕部件作业耕深浅、秸秆埋覆率低的问题,结合油菜根系生长对直播的农艺要求,提出犁耕与旋耕组合的联合耕整方案,设计一种与油菜直播机配合,通过先抬、后扣的作业方式,实现高茬粘重土壤有序翻埋的扣垡装置,并集成了犁旋组合式油菜直播机。分析阐述了扣垡犁曲面形成原理,确定了其关键影响因素导线、元线角、母线的数学模型,构建了土垡与扣垡犁力学模型,阐明了犁体曲面扣垡过程。为验证扣垡装置功能,在高茬秸秆工况下开展扣垡犁单体试验,试验结果表明,扣垡犁平均扣垡率为93.41%,具有较好的扣垡埋茬功能。以设计的犁旋组合式油菜直播机与仅有旋耕装置的油菜直播机分别在秸秆留茬高度为338、452 mm 工况下进行了田间对比试验,2种工况下,犁旋组合式直播机相对仅有旋耕装置的油菜直播机的耕深分别提高了137、110 mm,秸秆埋覆率分别提高了33.94、28.36个百分点,种床耕整效果优于仅有旋耕装置的油菜直播机,作业质量满足油菜播种要求。该研究可为犁旋组合式耕整机和犁体曲面优化设计提供参考。

关键词: 油菜; 犁旋; 扣垡装置; 犁体曲面; 设计; 试验

中图分类号: S222.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0038-09

OSID:



Design and Experiment of Plowing and Rotary Tillage Buckle Device for Rapeseed Direct Seeder

WEI Guoliang^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} LIU Lichao^{1,2} XIAO Wenli^{1,2} SUN Wencheng^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: To overcome the defects like shallow plough layer and low stubble burying rate caused by the high stubble and large amount of straw after rice harvesting when the rapeseed direct seeder works in the rice-oil rotation area of the middle and lower reaches of the Yangtze River, a tillage scheme that combined plowing and rotary (P&R) tillage was put forward based on the agronomic requirements of rape plants. A type of buckle device that could lift and then buckle the soil was designed for the rapeseed direct seeder to realize the orderly burying of high stubble and sticky soil. In addition, the rapeseed direct seeder integrated with plowing and rotary tillage was developed. The formation principle of buckled plow surface was expounded. The mathematical models of guiding curve, element angle and generatrix were determined. The mechanical models of the soil ridge and buckling plow were constructed. The buckling process of the plow body surface was clarified. In order to validate the function of buckle device, the test of single plow was carried out under the condition of high stubble. The results showed that the average buckling success rate of the plow was 93.41%, which achieved the desired performance. Field contrast experiments, under the condition that the stubble height were 338 mm and 452 mm, respectively, were carried out between the seeder with P&R tillage and the seeder with rotary tillage only. Under the two conditions, the plowing depth of the seeder with P&R tillage was increased by 137 mm and 110 mm, respectively, and the stubble burying rate was increased by 33.94 percentage points and 28.36 percentage points, respectively. The seed-bed performance of the seeder with P&R tillage whose operation quality met the requirements of rape sowing was better than that of the seeder with rotary tillage only. The research result provided reference for the design of combined tillage machine and plow surface.

Key words: rapeseed; plowing and rotary tillage; buckle device; plow surface; design; experiment

收稿日期: 2020-01-19 修回日期: 2020-03-06

基金项目: 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)、湖北省农业科技创新行动项目和湖北省自然科学基金项目(2019CFB153)

作者简介: 魏国梁(1993—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: 1142673534@qq.com

通信作者: 张青松(1987—),男,讲师,博士,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

0 引言

油菜是重要的油料作物,我国油菜种植区域可分为冬油菜和春油菜两大产区^[1],其中冬油菜占总种植面积 90% 以上。长江中下游地区是我国冬油菜的主产区,该区域种植模式以稻-油水旱轮作为主^[2]。

长期以来,油菜播种受前茬水稻收获后留茬高、秸秆量大等影响,传统旋耕易出现作业耕深浅、秸秆埋覆率低等问题,油菜直播种床耕整作业难度大^[3]。在实际生产中,长江中下游稻油轮作区多采用先铧式犁深翻、后旋耕的耕整方式,能解决传统旋耕机耕深浅等问题,但其工序复杂,不利于抢农时,且对土壤产生二次碾压^[4-5]。

针对传统耕整方式的不足,秦宽等^[6]设计了犁翻旋耕复试作业耕整机,研究了作业过程中犁耕与旋耕的交互作用;刘晓鹏等^[7]为解决油菜种植时因秸秆量大而导致机具易缠草、堵塞的问题,设计了驱动圆盘犁对置组合式耕整机,一次作业能完成种床耕整;王金武等^[8]为解决水稻秸秆还田机传统旋耕部件耕深较浅、秸秆还田深度不足等问题,研制了水稻秸秆整秆深埋还田装置,作业效果良好;MATIN 等^[9]研究了带状旋耕中 3 种不同刀片在不同作业参数下的扭矩变化规律;WEISE^[10]研究了联合耕整机作业功耗与前进速度的关系。国内外学者在复式耕整机^[11-15]和旋耕优化研究^[16-19]上取得了较多成果,但对扣垡作业研究较少。本文针对长江中下游稻油轮作区油菜直播作业时,因前茬水稻留茬高、秸秆量大而导致旋耕部件作业耕深浅、埋茬率低的问题,设计一种与油菜直播机配合,通过先抬、后扣的作业方式,实现高茬粘重土壤有序翻埋的扣垡装置,并集成犁旋组合式油菜直播机,以期一次作业可完成秸秆翻埋、碎土平整、开畦沟、施肥、播种等作业工序。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

犁旋组合式油菜直播机主要由扣垡装置、旋耕装置、开畦沟装置、排种装置和排肥装置组成,如图 1 所示。扣垡装置包括呈对称布置的 2 组扣垡犁和安装于中间位置的对称翻垡犁,开畦沟装置包括呈对称布置的前后组合式铧式犁,排种装置选用离心式油菜精量排种器^[20]。整机种床耕整主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作过程

犁旋组合式油菜直播机由轮式拖拉机提供动

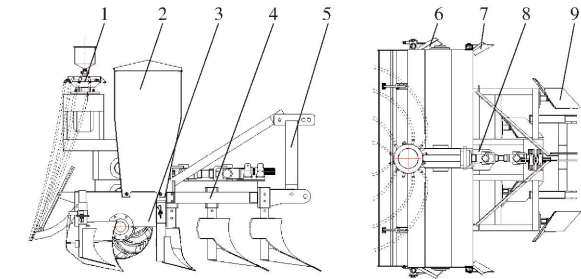


图 1 犁旋组合式油菜直播机结构示意图

Fig. 1 Schematic of plowing-rotating combined rapeseed direct seeding machine

1. 排种装置 2. 排肥装置 3. 旋耕装置 4. 主机架 5. 三点悬挂 6. 开畦沟后犁 7. 开畦沟前犁 8. 对称翻垡犁 9. 扣垡犁

表 1 犁旋组合式油菜直播机种床耕整主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of seedbed tillage of plowing-rotating combined rapeseed direct seeding machine

参数	数值/类型
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 860×2 300×1 610
挂接方式	三点悬挂
配套动力/kW	≥60
工作幅宽/mm	2300
扣垡装置幅宽/mm	1 540
扣垡装置作业深度/mm	180~200
扣垡犁耕宽/mm	300
对称翻垡犁耕宽/mm	340
旋耕幅宽/mm	2000
旋耕深度/mm	90~110
开畦沟宽度/mm	300~350
开畦沟深度/mm	180~200
作业速度/(km·h ⁻¹)	2~4

力,作业时,扣垡装置通过呈对称布置的 2 组扣垡犁和对称翻垡犁完成横向 1 540 mm 厢面土壤的翻埋、侧边扣垡、埋茬作业;旋耕装置由 PTO 输出动力,完成碎土、土壤侧向输送和平整厢面作业;由对称布置在旋耕装置两侧的开畦沟前犁完成两侧深耕和深耕盲区底层土壤的扰动,即减小深耕盲区作业和破土作业,开畦沟后犁作业形成完整畦沟;同步的排肥装置排出肥料,完成施肥作业;排种装置排出油菜种子,经导种管投放至作业形成的种床。

2 关键部件设计与分析

2.1 扣垡犁

2.1.1 扣垡犁曲面形成原理

铧式犁翻垡过程大致分为滚垡和窜垡两种形式,滚垡过程分为切土、抬垡和翻垡 3 个阶段,但在高茬水稻秸秆工况下,其翻垡阶段由于高茬水稻形成较强支撑,易造成回垡或立垡,难以完成土垡翻埋;窜垡方式作业时,土垡沿犁体曲面上窜到一定高度后悬空扣翻,高茬水稻秸秆工况下能实现土垡翻

埋,但不规则土堡翻埋不利于下一步耕整作业^[21]。基于土堡宽深比达到翻转后能处于稳定状态的要求,参考滚堡有序翻埋和窜堡高空扣翻的优点,提出土堡先抬后扣的侧边扣堡工艺方案,设计一种能实现高茬水稻秸秆工况下侧边扣堡功能扣堡犁。

根据直纹曲面形成原理,扣堡犁犁体曲面如图2所示。一空间母线AE沿着导线A-B-C-D,并按照单位向量变化规律(即与x轴夹角 θ 变化规律),自下而上平行移动,形成犁体曲面。主要包括犁铧、犁胸和犁翼3部分,犁铧完成破土、抬堡功能,犁胸使土堡向斜上方初步翻转和迁移,犁翼使土堡进一步翻转和下落,最终完成土堡侧边扣堡作业。

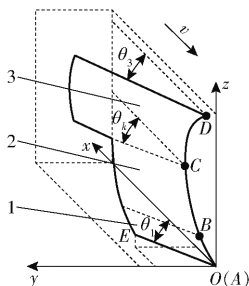


图2 扣堡犁犁体曲面形成原理图

Fig. 2 Schematic of surface formation of bucking plow body

1. 犁铧 2. 犁胸 3. 犁翼

2.1.2 扣堡犁曲面参数分析与建模

扣堡犁犁体曲面的工作性能主要由导线、母线和单位向量变化规律决定。建立导线数学模型,如图3所示。第1段AB选取直线,对应犁铧部分;第2段BC选取抛物线,其斜率逐渐变大,易于翻堡,对应犁胸部分;第3段CD选取圆弧,其斜率增长较快,易于翻扣,对应犁翼部分。取各段端点A(0,0)、B(x_1, z_1)、C(x_2, z_2)、D(x_3, z_3),为使导曲线各段之间平滑过渡,过渡点斜率应相同,取点B、C斜率为 $\tan\alpha$ 、 $\tan\beta$ 。

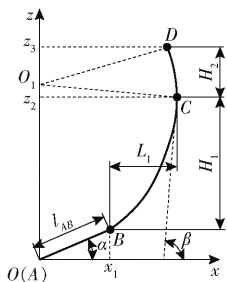


图3 导线形状与参数

Fig. 3 Guiding curve shape and parameters

导线参数方程为

$$z = \begin{cases} kx & (AB \text{ 段}) \\ bx^2 + cx + d & (BC \text{ 段}) \\ \sqrt{R^2 - x^2} + h & (CD \text{ 段}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k, b, c, d, h ——常数

R ——圆弧半径, cm

由图3几何关系可得

$$\begin{cases} \tan\alpha = k = 2b + c \\ \tan\beta = 2bx_2 + c = \frac{-x_2}{\sqrt{R^2 - x_2^2}} \\ l_{AB} = \frac{x_1}{\cos\alpha} \\ H_1 = z_2 - z_1 \\ L_1 = x_2 - x_1 \\ H_2 = z_3 - z_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 l_{AB} ——线段I长度, cm

H_1 ——曲线II高度, cm

L_1 ——曲线II开度, cm

H_2 ——曲线III高度, cm

联立方程(1)、(2)可得

$$\begin{cases} k = \tan\alpha \\ b = \frac{H_1 - L_1 \tan\alpha}{(x_2 + x_1 - 2)L_1} \\ c = \tan\alpha - \frac{2(H_1 - L_1 \tan\alpha)}{(x_2 + x_1 - 2)L_1} \\ d = z_2 - (bx_2^2 + cx_2) \\ h = z_2 - \frac{x_2}{2bx_2 + c} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,导曲线参数方程由线段I斜率 $\tan\alpha$ 和长度 l_{AB} 、曲线II的高度 H_1 和开度 L_1 、曲线III的高度 H_2 决定。参考农机设计手册犁体曲面导曲线设计方法^[22],取入土角 α 为 25° , l_{AB} 影响土堡提升高度,取15 cm,曲线II开度 L_1 取13.4 cm、高度 H_1 取25.7 cm,曲线III高度 H_2 取10 cm, R 取27.2 cm,代入式(3)求出常数 k 为0.47, b 为 3.75×10^{-2} , c 为0.40, d 为6.14, h 为20.87,得出导线参数方程。

扣堡犁用于油菜直播作业前的土壤翻埋,作业时不需形成完整的沟壁,通过土壤之间的相互撕扯形成不规则的矩形截面土堡,故扣堡犁设计宽度应小于实际作业幅宽。 E 点坐标为($l_0 \tan\theta_0 \cos\alpha_1, l_0, l_0 \tan\theta_0 \sin\alpha_1$),其中 l_0 为扣堡犁宽度, θ_0 为AE与AB夹角,结合实际田间试验,取 l_0 为20 cm,满足横向30 cm土堡扣堡作业,为提高犁铧入土性能, θ_0 取 45° ,则 θ_1 为 50° 。

为使土堡能较完全地扣堡,取 θ 角变化规律为逐渐减小,且犁胸位置减小较慢尾翼位置减小较快,如图4所示, $z_0 \sim z_1$ 段选取直线, $z_1 \sim z_3$ 段选取抛物线,参数方程可表示为

$$\theta = \begin{cases} \theta_1 & (0 < z \leq z_1) \\ a_0(z - z_1)^2 + \theta_1 & (z_1 < z \leq z_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中 a_0 ——常数

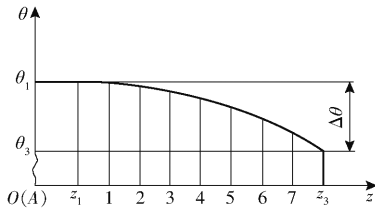


图4 夹角变化曲线

Fig. 4 Curve of angle change

已知 θ_1 为 50° , z_1 为 $l_{AB} \sin \alpha_1$, z_3 为 42 cm, 参考农机设计手册犁体曲面元线角设计方法, 取 $\Delta \theta$ 为 10° , 因此 θ_3 为 40° , 代入式(4)得 a_0 为 -7.9×10^{-3} , 故夹角 θ 在 $z_1 \sim z_3$ 段抛物线开口向下, 形成犁胸至尾翼这部分空间曲面时, 空间母线与犁体前进方向相反方向的夹角逐渐变小, 且犁胸位置减小较慢, 尾翼位置减小较快。

根据扣垡犁导线、母线和单位向量变化规律, 制作犁体曲面样件, 加工试制扣垡犁。

2.1.3 犁体曲面扣垡过程分析

土垡在犁体曲面上的运动过程十分复杂, 为分析其翻垡过程, 取连续垡条中一段开展研究, 作如下假设: ①把所取某阶段土垡视做刚体, 不考虑其内力和变形。②土垡在犁体曲面上运动时紧贴曲面。③土垡截面近似视作矩形。

扣垡犁作业时, 犁铧破土形成矩形截面的土垡, 经犁铧抬升后在犁胸位置初步翻转和进一步抬升, 最后经尾翼翻扣, 直至与犁体曲面脱离接触, 运动轨迹简图如图5所示。当土垡在犁铧上运动时, 不发生翻转, 土垡受力可合成至质心位置, 建立动力学方程

$$\begin{cases} ma_x = N \sin \alpha + F_l \cos \alpha + f \cos \alpha - F_s \cos \alpha \\ ma_y = 0 \\ ma_z = F_l \sin \alpha + N \cos \alpha - G - F_s \sin \alpha - f \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

式中 m ——土垡质量, kg

a_x ——土垡 x 轴方向加速度, m/s^2

a_y ——土垡 y 轴方向加速度, m/s^2

a_z ——土垡 z 轴方向加速度, m/s^2

N ——犁铧对土垡支持力, N

G ——土垡自身重力, N

F_l ——下方土垡对其挤压力, N

F_s ——上方土垡对其反作用力, N

f ——犁铧对土垡的摩擦阻力, N

由式(5)可知, 土垡在犁铧上运动时, 土垡 y 轴方向加速度为 0, 因此可得土垡受合力为

$$F = \sqrt{(ma_x)^2 + (ma_z)^2} \quad (6)$$

故土垡在犁铧上运动时, 所受合力与 xz 平面平

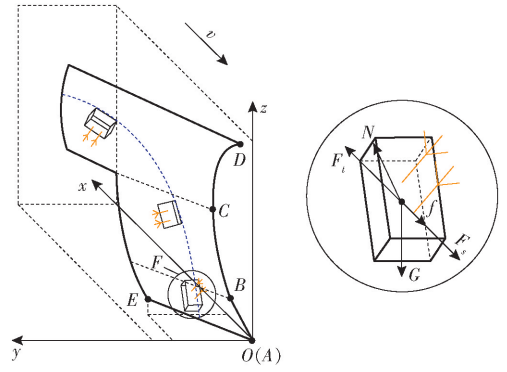


图5 土垡运动轨迹与犁铧位置受力简图

Fig. 5 Schematic of track of motion of furrow slice and force of plowshare position

行。土垡沿犁铧以夹角 α 向水平面斜上方运动至犁胸位置, 完成土垡上抬作业。

当土垡运动至犁胸位置, 所受作用力为空间任意力系, 不仅在外力作用下沿着犁胸向斜上方运动, 同时会发生翻转, 其受力分析如图6所示, 并建立动力学方程

$$\begin{cases} ma_x = N_{xz} \sin \delta + F_{lxz} \cos \delta + f_{xz} \cos \delta - F_{sxz} \cos \delta \\ ma_z = F_{lxz} \sin \delta + N_{xz} \cos \delta - G - F_{sxz} \sin \delta - f_{xz} \sin \delta \\ M_y = N_{xz} l_a + F_{sxz} l_b - f_{xz} l_c - F_{lxz} l_d \end{cases} \quad (7)$$

式中 N_{xz} ——犁铧对土垡支持力在 xz 面分力, N
 F_{lxz} ——下方土垡对其挤压力在 xz 面分力, N
 F_{sxz} ——上方土垡对其反作用力在 xz 面分力, N

f_{xz} ——犁铧对土垡摩擦阻力在 xz 面分力, N

δ ——土垡位置切线与 x 轴夹角, $(^\circ)$

M_y ——土垡绕 y 轴转动的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

l_a, l_b, l_c, l_d ——各受力相对质心的力臂, m

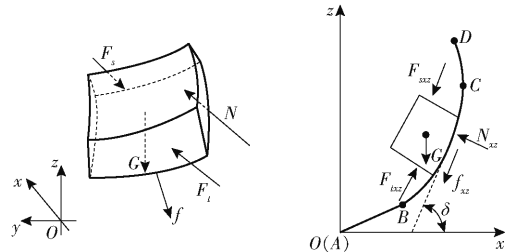


图6 土垡犁胸位置受力简图

Fig. 6 Schematic of force of furrow slice at position of plow chest

土垡在犁胸位置运动时, 由于犁体曲面对土垡作用力合力方向不经过质心, 土垡会产生翻转。由图6和式(7)可知, 土垡所受作用力在 xz 平面上合力使土垡运动在 xz 平面分量表现为向斜上方运动, 且产生绕 y 轴转动动力偶。由导线和单位向量与 x 轴夹角 θ 变化规律几何关系可知, 土垡在犁胸位置主要为沿犁胸向斜上方迁移和绕 y 轴转动; 由于土垡

所受空间力系不平衡,土堡同时沿 x 、 z 轴产生一定翻转。

当土堡运动至犁翼位置,犁面对土堡作用力方向改变,使土堡向下翻扣,其受力分析如图 7 所示。

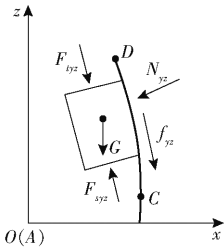


图 7 土堡犁翼位置受力简图

Fig. 7 Schematic of force of furrow slice at position of plow blade

土堡在犁翼位置运动时,由导线几何性质和单位向量与 x 轴夹角 θ 变化规律可知,导线为圆弧,且单位向量与 x 轴夹角 θ 减小逐渐加快,土堡运动主要为沿 x 轴转动,直至与犁体曲面脱离接触。

综上可知,土堡在犁体曲面上的运动过程为先沿犁铧以夹角 α 沿水平面斜上方运动至犁胸位置;然后土堡主要沿犁胸向斜上方迁移并绕 y 轴转动,同时在 x 、 z 轴方向产生一定翻转;土堡在犁翼位置主要表现为沿着 x 轴转动,直至与犁体曲面脱离接触,在自身重力作用下落地,完成翻转作业,故设计的直纹曲面能实现土堡先上抬后翻扣的功能。

2.2 扣堡装置

扣堡犁宽度为 200 mm,耕作宽度为 300 mm,对称翻堡犁宽度为 250 mm,耕作宽度为 340 mm;扣堡装置由对称布置的 2 组扣堡犁和安装于中间位置的对称翻堡犁组成,相邻的 2 个扣堡犁横向中心安装间距为 300 mm,相邻的扣堡犁和对称翻堡犁横向中心安装间距为 320 mm,而单个扣堡犁由于作业时两侧土壤撕扯,平均耕宽应在 300 mm 以上,能避免漏耕,扣堡装置理论作业幅宽为 1 540 mm。作业时,安装于前端的扣堡犁先将土堡翻埋至未耕地表,位于后侧的扣堡犁将紧挨的土堡翻埋至前一犁体作业形成的槽沟,对称翻堡犁将厢面中间未耕土堡对称切割,并通过两侧犁体曲面将切割后两土堡翻转。扣堡犁结构示意图如图 8a 所示,对称翻堡犁结构示意图如图 8b 所示。

对称翻堡犁作业时,土堡沿犁铧向上运动,同时破土刃完成土堡对称切割,减小土堡断裂处土壤撕扯,避免因两侧土壤不均匀造成堵土;为避免夹土和秸秆拖拽,破土刃口垂直于水平面。对称翻堡犁曲面由 2 个对称的翻堡犁体曲面焊合脰刃线形成,单侧犁体曲面设计采用水平直线条法,为使其具有较好的翻堡效果,犁体曲面设计为半螺旋型。

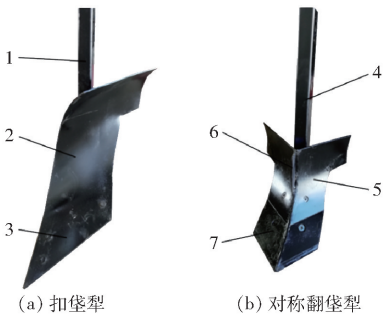


图 8 扣堡犁和对称翻堡犁结构示意图

Fig. 8 Structural diagrams of symmetrical buckle plow

1. 扣堡犁犁柱 2. 扣堡犁犁体曲面 3. 扣堡犁犁铧 4. 对称翻堡犁犁柱 5. 对称翻堡犁犁体曲面 6. 对称翻堡犁破土刃 7. 对称翻堡犁犁铧

2.3 旋耕装置与开畦沟装置

扣堡装置作业后厢面土壤呈对称分布,且外侧多中间少,旋耕装置完成碎土作业的同时,需同步实现土壤向厢面内侧迁移的功能,达到厢面平整的目的。旋耕装置作业时,单个旋耕刀片做余摆线运动,切削形成的堡块向斜后方抛撒。旋耕刀辊采用双头螺旋排布方式,为实现旋耕刀辊使土壤向厢面内侧迁移的功能,提出一种同一回转平面内“倒 U”形安装方式,左刀辊安装右弯刀,作业时切削堡块向右后方抛撒,右刀辊安装左弯刀,作业时切削堡块向左后方抛撒,达到土壤向中间输送的目的。

旋耕装置左右刀辊均为 26 把,同一回转平面两刀夹角取 180° ,旋耕刀采用双头螺旋排列方式,其中同一螺旋线轴向相邻两刀夹角为 70° ,刀座间距为 70 mm;为减小深耕盲区对种床影响,同时提高土壤向内侧输送能力,适当增大深耕盲区旋耕耕深,参考 GB/T 5669—2017《旋耕机械 刀和刀座》^[23],内侧刀片选取 II T245 旋耕刀,外侧刀片选取 II T260 旋耕刀。犁旋组合式油菜直播机旋耕装置刀片排布如图 9 所示。

选取前后组合式开畦沟装置^[24],主要由铧式前犁和铧式后犁组成。扣堡装置作业后,铧式前犁完

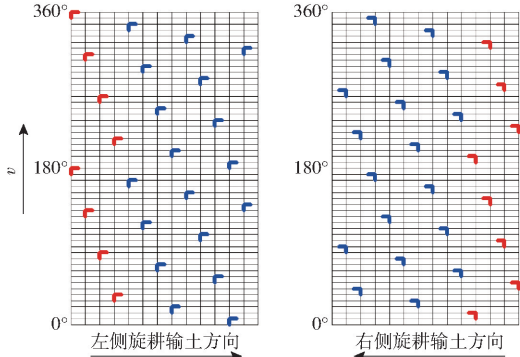


图 9 犁旋组合式油菜直播机旋耕装置刀片排布示意图
Fig. 9 Schematic of blade arrangement of rotary tillage device of plowing and rotary tillage combined rape seed direct seeder

成畦沟破土、外侧土垡翻垡和扰动,将外侧土垡输送至旋耕刀辊,同时减小种床未深耕盲区,旋耕装置完成土壤细碎、平整和内侧输送,铧式后犁完成畦沟整形,形成适宜油菜播种的种床。

3 田间试验

3.1 试验条件与设备

为验证设计的扣垡装置功能和犁旋组合式油菜

直播机作业性能,于2019年9月在华中农业大学现代农业科学试验基地开展扣垡犁单体试验,于2019年10月在湖北省监利县华中农业大学稻-油轮作全程机械化生产示范基地开展犁旋组合式油菜直播机作业性能试验,以成熟应用的且仅有旋耕装置的2BFQ-8型油菜直播机^[25](以下简称旋耕式油菜直播机)为对照。试验田块均常年采用稻-油轮作模式,土壤为偏黏性土,试验前各田块工况如表2所示。

表2 试验田块工况参数
Tab.2 Working condition parameters of test field

工况	试验类型	平均土壤	平均土壤	平均留茬	秸秆(干质量)	秸秆含
		含水率/%	坚实度/kPa	高度/mm	覆盖量/(g·m ⁻²)	水率/%
1	扣垡装置功能	28.32	1 624	382	1 135	51.27
2	犁旋组合式油菜直播机作业性能	26.82	1 058	338	1 024	38.73
3	犁旋组合式油菜直播机作业性能	30.16	1 146	452	998	32.36

扣垡装置功能性试验和犁旋组合式油菜直播机作业性能试验配套动力分别为东方红954型和东风井关954型轮式拖拉机,试验器材包括:直尺(500 mm)、卷尺(5 m)、磁性水平尺(三箭工具有限公司,精度0.002 9°)、土壤坚实度仪(浙江托普仪器有限公司,TJSD-750 II型,±0.5%)、土壤取样环刀、干燥箱等。

3.2 试验方法

扣垡装置功能性试验为扣垡犁单体在长江中下游高茬粘重地表扣垡效果的验证,其中左侧扣垡犁与右侧扣垡犁呈对称布置,中间保持合适安装距离,避免左右两扣垡犁作业时产生干涉,通过安装于机架两侧限深轮控制扣垡犁作业深度。试验前调节限深轮高度,使犁耕深度为180~200 mm;通过调节拖拉机挡位和手油门位置,使试验台架平均作业速度为2.5 km/h。试验机组沿直线方向作业距离为40 m,取中间行程30 m为测量区域,每组试验重复3次,参考GB/T 14225.3—93《铧式犁试验方法》,确定试验以扣垡率为评价指标,土垡在翻转后其残茬表面与水平面夹角小于90°为扣垡,扣垡犁单体作业后扣垡率为

$$r = \frac{L_2}{L} \times 100\% \tag{8}$$

式中 r ——扣垡率,%
 L_2 ——扣垡长度,m
 L ——测量区域长度,m

犁旋组合式油菜直播机作业性能试验为对比研究犁旋组合式油菜直播机和旋耕式油菜直播机在长江中下游高茬水稻秸秆工况下种床耕整效果,犁旋组合式油菜直播机如图10所示。犁旋组合式油菜直播机旋耕额定转速为240 r/min,试验前通过调节拖拉机上拉杆高度和液压手柄位置保证犁耕作业深

度为180~200 mm,旋耕深度为90~110 mm,调节拖拉机挡位和手油门位置保证整机平均作业速度为2.5 km/h;旋耕式油菜直播机旋耕额定转速为270 r/min,耕深为80~120 mm,试验前调节拖拉机挡位和手油门位置保证平均作业速度为2.5 km/h。试验机组沿直线方向作业距离为40 m,取中间行程30 m为测量区域,每组试验重复3次。参考NY/T 499—2013《旋耕机 作业质量》、GB/T 5668—2008《旋耕机》和NT/Y 2709—2015《油菜播种机 作业质量》,结合油菜种植农艺要求,确定试验以耕深及其稳定性系数、厢面平整度、碎土率和秸秆埋覆率为评价指标。



图10 试验机具实物
Fig.10 Physical map of test machine

3.3 试验结果与分析

3.3.1 扣垡犁单体田间功能性试验

扣垡犁在高茬水稻秸秆工况下具有较好的扣垡效果,由表3可知,扣垡犁作业平均耕深在182~191 mm之间,平均扣垡率为93.41%,耕深稳定性系数高于92%,能较好地实现高茬水稻秸秆扣垡功能;平均耕宽在300 mm以上,满足扣垡犁耕宽设计要求,耕宽稳定性系数在73.26%~81.65%之间,分析认为扣垡犁破土抬垡作业时通过土壤之间相互撕扯,不形成完整沟壁,实际耕宽大于扣垡犁设计幅宽,耕宽稳定性系数较低是合理的。

表 3 扣垡犁田间试验结果

Tab.3 Field test results of buckle plow		
试验指标	试验组号	数值
平均耕深/mm	1	182
	2	191
	3	186
耕深稳定性系数/%	1	92.49
	2	93.16
	3	92.88
平均耕宽/mm	1	313
	2	302
	3	306
耕宽稳定性系数/%	1	73.26
	2	81.65
	3	76.42
扣垡率/%	1	93.46
	2	92.54
	3	94.23

扣垡犁单体能较好地实现扣垡功能,故扣垡装置具有较好的作业性能。

3.3.2 整机田间对比试验

犁旋组合式油菜直播机在高茬水稻秸秆工况下具有较好的种床耕整效果,田间作业效果如图 11 所示;犁旋组合式油菜直播机和旋耕式油菜直播机耕

深及其稳定性系数、厢面平整度和碎土率均满足油菜播种要求,作业后各评价指标见表 4。

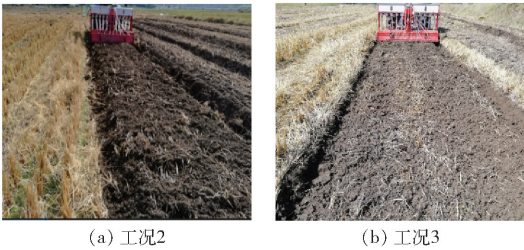


图 11 整机田间作业
Fig.11 Field test of complete machine

由表 4 可知,在工况 2、3 下,犁旋组合式油菜直播机平均耕深分别为 249、231 mm,相对旋耕式油菜直播机平均耕深分别提高了 137、110 mm;秸秆埋覆率分别为 90.35%、91.24%,相对旋耕式油菜直播机秸秆埋覆率分别提高了 33.94、28.36 个百分点。

在高茬水稻秸秆的工况下,旋耕式油菜直播机作业时旋耕刀先与地表秸秆接触,由于水稻秸秆韧性强,旋耕刀无法有效切断秸秆,影响其切削土壤能力,导致整机耕深和秸秆埋覆率较低。而犁旋组合式油菜直播机作业时,通过扣垡装置埋覆秸秆,旋耕装置细碎平整土壤,从而整机具有较好的作业深度和秸秆埋覆率。

表 4 田间对比试验结果
Tab.4 Field comparison test results

试验机具	工况	平均耕深/mm	耕深稳定性系数/%	厢面平整度/mm	秸秆埋覆率/%	碎土率/%
犁旋组合式油菜直播机	2	249	92.16	21.42	90.35	91.25
	3	231	90.35	14.67	91.24	93.15
旋耕式油菜直播机	2	112	91.88	23.15	56.41	90.26
	3	121	92.36	17.23	62.88	91.35

综上分析,在长江中下游稻油轮作高茬水稻秸秆工况下,犁旋组合式油菜直播机作业后耕深和秸秆埋覆率明显优于旋耕式油菜直播机,提高了作业功效和油菜种床耕整质量,达到了油菜种床耕整要求^[26]。

4 结论

(1)为提高油菜直播时的作业耕深和秸秆埋覆率,设计了一种通过先抬、后扣的作业方式,实现高茬粘重土壤有序翻埋的扣垡犁,并集成了与油菜直播机配合作业的扣垡装置,研发了犁翻旋耕组合式油菜直播机。分析阐述了扣垡犁曲面形成原理,确定了其关键影响因素导线、元线角、母线的数学模型,构建了土垡与扣垡犁力学模型,阐明了犁体曲面

扣垡过程。
(2)扣垡犁单体田间功能性试验表明:在高茬秸秆工况下,扣垡犁平均耕宽在 300 mm 以上,满足扣垡犁耕宽设计要求;扣垡犁作业平均耕深在 182 ~ 191 mm 之间,平均扣垡率为 93.41%,耕深稳定性系数高于 92%,能较好地实现高茬水稻秸秆的扣垡功能,扣垡装置作业性能较好。
(3)在 2 种不同水稻秸秆工况下,两机具作业质量均满足油菜播种要求;犁旋组合式油菜直播机平均耕深分别为 249、231 mm,相对旋耕式油菜直播机平均耕深分别提高了 137、110 mm;秸秆埋覆率分别为 90.35%、91.24%,相对旋耕式油菜直播机秸秆埋覆率分别提高了 33.94、28.36 个百分点,耕整效果优于仅有旋耕装置的油菜直播机。

参 考 文 献

- [1] 吴崇友. 稻油(麦)轮作机械化技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [2] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2017.09.001. (in Chinese)
- [3] ZHOU Hua, ZHANG Chunling, ZHANG Wenliang, et al. Evaluation of straw spatial distribution after straw incorporation into soil for different tillage tools[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104440.
- [4] 肖文芳, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(6): 139-146. XIAO Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139-146. (in Chinese)
- [5] 周华, 张居敏, 祝英豪, 等. 秸秆还田深松旋犁联合耕整机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 17-26. ZHOU Hua, ZHANG Jumin, ZHU Yinghao, et al. Design and experiment of combined tillage machine for subsoiling and rotary burying of straw incorporated into soil[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 17-26. (in Chinese)
- [6] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复试作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7-16. QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7-16. (in Chinese)
- [7] 刘晓鹏, 张青松, 肖文立, 等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 33-41. LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 33-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171204&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2017.12.004. (in Chinese)
- [8] 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?file_no=20150916&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2015.09.016. (in Chinese)
- [9] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three design of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329-340.
- [10] WEISE G. Active and passive elements of a combined tillage machine: interaction, draught requirement and energy consumption[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(4): 287-299.
- [11] TAO Zhiqiang, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al. Subsoiling and ridge tillage alleviate the high temperature stress in spring maize in the North China plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(12): 2179-2188.
- [12] MICHELE M, MASSIMILIANO V, GIOVANNI M, et al. Influence of the speed on soil-pressure over a plough[J]. Biosystems Engineering, 2017, 156: 136-147.
- [13] 赵建国, 王安, 马跃进, 等. 深松旋耕碎土联合整地机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 46-54. ZHAO Jianguo, WANG An, MA Yuejin, et al. Design and test of soil preparation machine combined subsoiling, rotary tillage and soil breaking[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 46-54. (in Chinese)
- [14] 林静, 张桐嘉, 陈彬, 等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 28-39. LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190204&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2019.02.004. (in Chinese)
- [15] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 作业次序对深松旋耕联合作业机作业质量及功耗的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 52-60. ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Influence of working order on working quality and power consumption of subsoiling and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 52-60. (in Chinese)
- [16] 周勇, 余水生, 夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 46-49. ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 46-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120809&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2012.08.

009. (in Chinese)
- [17] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160109&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [18] 郭俊,姬长英,CHAUDHRY Arslan,等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):11-18.
GUO Jun, JI Changying, CHAUDHRY Arslan, et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 11-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.002. (in Chinese)
- [19] 张春岭,夏俊芳,张居敏,等. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):25-34.
ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190303&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003. (in Chinese)
- [20] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):109-114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)
- [21] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业机械出版社,2007.
- [23] GB/T 5669—2017 旋耕机械 刀和刀座[S]. 2017.
- [24] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):130-135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022. (in Chinese)
- [25] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):79-87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010. (in Chinese)
- [26] NT/Y 2709—2015 油菜播种机作业质量[S]. 2015.