

# 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

肖文芳 舒彩霞 廖庆喜 廖宜涛 张青松 肖文立 付云开

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 针对长江中下游地区稻茬田土壤黏重板结、地表秸秆量大且禁止焚烧导致油菜直播时机具易堵塞缠绕的难题,设计了一种犁翻埋茬、旋耕碎土、侧边作畦开沟的油菜直播种床整理机。该机主要由犁翻部件、旋耕部件及开畦沟部件组成,可实现秸秆全量还田、碎土平整及开畦沟功能;基于土垡运动规律确定了扣垡犁导曲线、直元线角及犁体尾翼长度等关键犁体曲面参数和犁体数量及距离等布局结构参数。田间试验显示:当机组前进速度由3.3 km/h增加至4.2 km/h时,整机牵引阻力增加了23.7%,功耗增加了57.2%。在旋耕深度相同作业条件下,当机组前进速度分别为3.3、4.2 km/h时,由于增加了犁翻部件,整机总功耗相比于单个旋耕机独立作业分别增加12.3%、20.7%,但有效提高了机组的通过性和整地的作业质量。与单个旋耕机相比,在2种工况下,整机的平均碎土率为92.8%,提高了2.6%,耕后地表平整度平均为11 mm,提高了39.0%,秸秆平均埋覆率为92.9%,提高了22.2%。试验表明,设计的整理机各项性能参数均满足油菜种植农艺要求。

**关键词** 种床整理; 秸秆还田; 犁旋组合; 犁翻; 旋耕; 扣垡; 油菜直播; 稻油轮作; 联合耕作机

**中图分类号** S 222.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)06-0139-08

耕整地是农业生产的首要环节,长江中下游地区种植模式为稻油水旱轮作。该地区土壤黏重板结,前茬水稻秸秆残余量大且禁止焚烧,冬播油菜时,机具作业易缠绕堵塞<sup>[1-3]</sup>。目前长江中下游地区耕整地以犁翻与旋耕为主,旋耕具有较强的灭茬与碎土功能,但在秸秆量大的地表作业时刀辊易缠草,且耕深较浅,影响油菜根系生长<sup>[4-6]</sup>,犁翻作业翻垡埋茬性能较好且耕深大,但需要机具多次下田作业,进行碎土与平整地表<sup>[7-9]</sup>。

秸秆还田既能增强土壤肥力,又能避免因焚烧引起的环境污染问题。研究表明,当秸秆还田深度超过15 cm时,可提高深层土壤有机质含量<sup>[10-15]</sup>。针对秸秆量大易堵塞缠绕作业机具的难题,诸多学者对秸秆还田方式及相关机具进行了研究。秦宽等<sup>[16-17]</sup>设计了犁翻旋耕复式作业耕整机,并对耕作稳定性的影响因素进行了分析。沈丹波等<sup>[18]</sup>设计的稻麦秸秆犁翻旋耕复式作业耕整机,可一次性完成秸秆粉碎还田及旋耕等多道作业工序。张秀梅等<sup>[19]</sup>设计的水旱两用秸秆还田耕整机,可同时针对

水田和旱地进行作业。万国伟等<sup>[20]</sup>设计了一种液压驱动式圆盘耙组,可实现秸秆翻埋与耕整地功能。王金武等<sup>[21]</sup>设计的秸秆还田装置,可实现水稻秸秆整秆深埋还田,在提高秸秆覆盖深度的同时,改善旋耕部件缠草问题。周华等<sup>[22]</sup>研制了深松旋埋联合整地机,可一次性完成土壤深松、秸秆旋埋及平地等作业。郑智旗等<sup>[23]</sup>设计的秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机,通过开沟掩埋技术实现秸秆还田。林静等<sup>[24-25]</sup>设计的秸秆深埋还田机,可实现秸秆粉碎与深埋功能,并研制了一种仿生开沟装置,以实现秸秆深埋还田。长江中下游水旱轮作区,冬播油菜时,需要进行秸秆全量还田、碎土平整及开畦沟作业相应的油菜直播种床整理机。

长江中下游地区由于存在茬口矛盾,水稻收获后需尽快进行油菜直播作业,土壤黏重板结且秸秆量大易造成油菜直播机堵塞缠绕,针对此作业难题,结合油菜种植农艺要求,本研究设计一种犁翻埋茬、旋耕碎土、侧边作畦开沟的油菜直播种床整理机,可以实现秸秆全量还田、碎土平整及开畦沟功能。通

收稿日期: 2019-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200901); 农业部公益性行业科研专项(201503118-06); 湖北省农业科技创新行动项目; 国家油菜产业体系专项(CARS-12)

肖文芳, 硕士研究生, 研究方向: 现代农业装备设计与测控. E-mail: xwfyfd@163.com

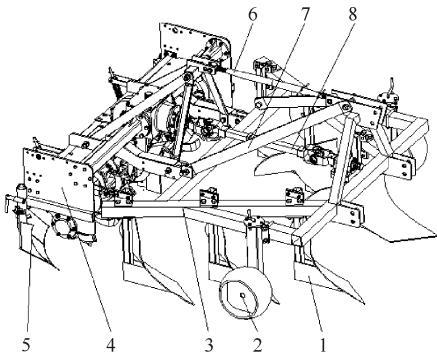
通信作者: 舒彩霞, 硕士, 副教授. 研究方向: 油菜机械化生产技术与装备. E-mail: shucaixia@mail.hzau.edu.cn

通过分析土垡运动规律,确定扣垡犁导曲线、直元线角及犁体尾翼长度等关键犁体曲面参数和犁体数量及距离等犁体布局结构参数,并开展相应的田间试验测试其作业性能,为长江中下游地区冬播油菜种植床整理机的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 结构与工作原理

1) 整机结构。犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机主要由犁翻部件、旋耕部件及开畦沟部件组成,可实现稻茬全量还田、碎土平整及开畦沟功能,整机结构如图 1 所示。犁翻部件翻埋土壤秸秆,实现秸秆全量还田,其主要包括扣垡犁、安装犁体的机架及限深轮三部分,其中 6 个扣垡犁对称等距排布于机架上,限深轮置于机架两侧。旋耕部件置于犁翻部件后方,旋耕碎土,平整厢面。开畦沟部件置于旋耕部件后端两侧,安装位置上下可调,调节畦沟作业深度。犁翻部件与旋耕部件采用模块化连接,便于拆卸、挂接,及实现犁翻部件和旋耕部件作业深度差调节。拖拉机动力输出轴通过万向节连接中间过渡轴,将动力传输至旋耕部件。整机工作幅宽为 2 100 mm,单犁幅宽为 220 mm,犁翻深度为 200 mm,旋耕深度为 120 mm。



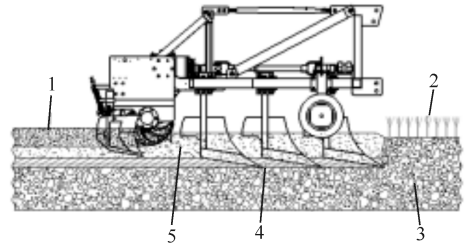
1.扣垡犁 Buckle plow; 2.限深轮 Depth-limited wheel; 3.机架 Frame; 4.旋耕部件 Rotary tiller; 5.开畦沟部件 Ditched parts; 6.上拉杆 Upper lever; 7.悬挂架 Rack for suspension; 8.万向传动轴 Universal drive shaft.

图 1 整机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the machine

2) 工作原理。整机通过三点悬挂装置与拖拉机挂接,动力由拖拉机动力输出轴通过万向节连接中间过渡轴传输至旋耕部件。工作时,扣垡犁铧尖首先入土完成破土作业,随着机组前进,铧刃切土形成条状土垡,土垡沿犁体曲面上升,发生弯曲与扭转变形,最后在重力作用下掉落完成扣垡,实现秸秆翻埋

作业。旋耕部件对犁耕翻埋区域上层土壤进行疏松与碎土,旋耕部件前端小前犁将中间区域土壤向两侧挤压,使其进入两侧旋耕区域,避免机具作业时,中间区域壅土,同时扰动中间土壤,旋耕部件后拖板则对耕后地表进行平整。由于犁翻部件与旋耕部件作业设计存在一定深度差,使得被犁翻部件埋覆的秸秆不被旋耕部件作业扰动重新回到地表。安装于旋耕部件两侧的开畦沟部件收土整形,完成开畦沟作业。机具一次性作业,完成秸秆全量还田、细碎土壤、平整地表、开沟作畦等工序,完成油菜直播种床整备工作,整机耕作原理如图 2 所示。



1.旋耕碎土区 Working area by rotary tillage; 2.地表秸秆 Straw on the surface; 3.未耕区 Uncultivated area; 4.被埋覆秸秆 Buried straw; 5.犁耕翻埋区 Plough working area.

图 2 整机耕作原理图

Fig.2 Working schematic of the machine

3) 整机受力分析。犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机在作业过程中受机具重力、拖拉机牵引力与土壤作用力,主要受力部件为扣垡犁、限深轮、旋耕刀辊、后拖板和开畦沟部件等。由于各犁体所受土壤阻力状态相同,假设所有犁体所受合力作用在中间犁体上,以中间犁体为研究对象进行受力分析<sup>[26]</sup>。由于犁翻部件为左右对称结构,当机组正常作业时,左边限深轮侧向力和扣垡犁侧向力与右边对称部分侧向力相同,机架左右两边所受侧向力相互抵消,避免拖拉机受力不均而走偏。当机组作匀速直线运动时,以机组前进方向为  $x$  轴,犁柱方向为  $y$  轴建立直角坐标系,各部件受力如图 3 所示。

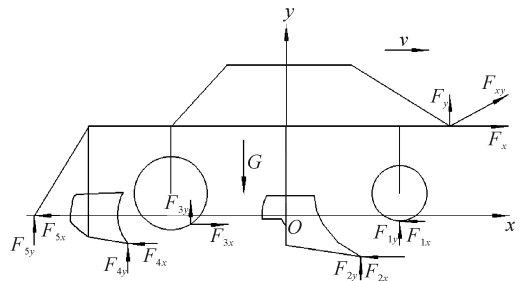


图 3 整机受力简图

Fig.3 Force diagram of the machine

结合图 3 建立拖拉机牵引力方程:

$$\begin{cases} F_x = F_{1x} + F_{2x} - F_{3x} + F_{4x} + F_{5x} \\ F_y = -F_{1y} - F_{2y} - F_{3y} - F_{4y} - F_{5y} + G \\ F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $F_x$  为拖拉机水平牵引力, N;  $F_y$  为拖拉机垂直牵引力, N;  $F_{xy}$  为拖拉机牵引合力, N;  $F_{1x}$  为限深轮的滚动阻力, N;  $F_{1y}$  为土壤对限深轮支持力, N;  $F_{2x}$  为土壤对犁体作用力的水平分力, N;  $F_{2y}$  为土壤对犁体作用力的垂直分力, N;  $F_{3x}$  为土壤对刀辊阻力沿水平方向分力, N;  $F_{3y}$  为土壤对刀辊阻力沿垂直方向分力, N;  $F_{4x}$  为土壤对开畦沟部件摩擦阻力, N;  $F_{4y}$  为土壤对开畦沟部件支持力, N;  $F_{5x}$  为土壤对拖板的摩擦阻力, N;  $F_{5y}$  为土壤对拖板的支持力, N。

与扣袋犁、旋耕刀辊和开畦沟部件相比, 限深轮与拖板受土壤作用力较小, 可忽略不计。刀辊旋转过程中, 土壤对刀辊阻力沿水平方向的分力与机组前进方向一致, 该力可抵消整机作业的部分牵引阻力, 从而减小拖拉机水平牵引力。拖拉机牵引合力如公式(2)所示, 表明增加扣袋犁部分后, 整机牵引阻力增大, 整机中旋耕部件相对于旋耕机独立作业, 牵引阻力减少。

$$F_{xy} = \sqrt{(F_{2x} - F_{3x} + F_{4x})^2 + (-F_{2y} - F_{3y} - F_{4y} + G)^2} \quad (2)$$

### 1.2 扣袋犁犁体曲面设计与分析

犁体曲面是扣袋犁的主要工作部件, 由切土曲面、翻土曲面与扣袋曲面三部分组成, 切土曲面用于切削土壤形成土堡, 翻土曲面与扣袋曲面依次使土堡发生弯曲与扭转变形, 其结构如图 4 所示。根据油菜种植农艺要求, 犁体耕作深度设计为 200 mm, 为保证扣袋效果, 犁体曲面宽深比设计为 1.1<sup>[27]</sup>, 对应耕宽为 220 mm。

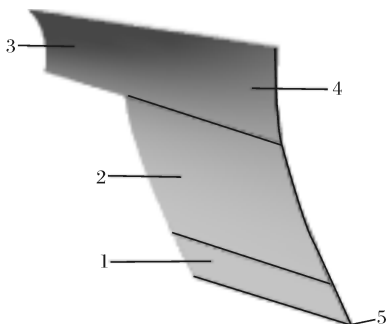


图 4 扣袋犁犁体曲面

Fig.4 Plough surface of buckle plough

1) 导曲线设计。导曲线是控制水平直元线的指导线, 其形状对犁体曲面作业性能有直接影响。为保证犁体扣袋效果, 使地表秸秆充分翻埋, 本研究采用圆弧形导曲线, 建立直角坐标系如图 5 所示。图 5 中, 圆弧圆心为  $O_1$ , 半径为  $R$ , 导曲线由始端直线  $OA$ 、翻土曲线  $AB$ 、扣袋曲线  $BC$  组成, 点  $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$  分别为导曲线上过渡连接点, 点  $C(x_3, y_3)$  为导曲线终点。由图 5 中几何关系可知:

$$\begin{cases} x_{O_1} = L_1 - R \\ y_{O_1} = H_1 \\ x_1 = S \cos \epsilon \\ y_1 = S \sin \epsilon \\ x_2 = L_1 \\ y_2 = y_{O_1} = H_1 \\ x_3 = L \\ y_3 = H_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega = \pi/2 + \epsilon - \lambda \quad (4)$$

式(3)~(4)中,  $x_{O_1}$  为圆心横坐标, mm;  $y_{O_1}$  为圆心纵坐标, mm;  $R$  为圆弧半径, mm;  $L$  为扣袋曲线开度, mm;  $H_{\max}$  为扣袋曲线高度, mm;  $L_1$  为翻土曲线开度, mm;  $H_1$  为翻土曲线高度, mm;  $S$  为始端直线长度, mm;  $\epsilon$  为犁刃起土角, ( $^\circ$ );  $\lambda$  为导曲线上部倾角, ( $^\circ$ );  $\omega$  为切线夹角, ( $^\circ$ )。

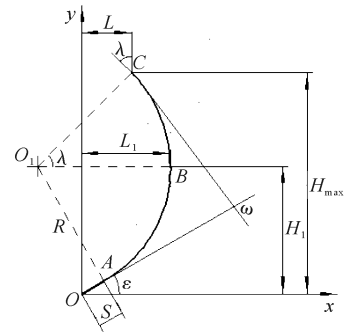


图 5 导曲线

Fig.5 Guide curve

由式(3)得:

$$R = \frac{L_2 + L_1^2 + H_1^2 + H_{\max}^2 - 2LL_1 - 2H_1H_{\max}}{2(L_1 - L)} \quad (5)$$

$$\epsilon = \arcsin \frac{S^2 + H_1^2 + L_1^2 - 2RL_1}{2S \sqrt{H_1^2 + (L_1 - R)^2}} - \arctan \frac{L_1 - R}{H_1} \quad (6)$$

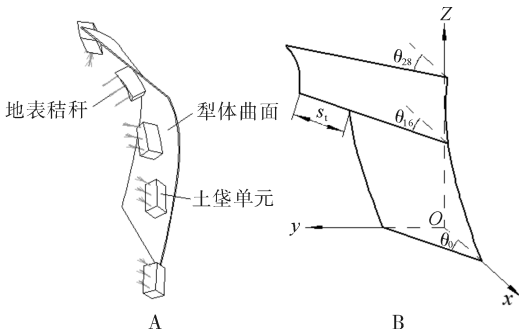
曲线高度一定时, 开度  $L$  越大, 对应曲面的翻土性能越好且阻力较小, 但碎土能力较差。为使土堡在翻土曲面平缓上升, 取翻土曲线高度与开度比  $H_1/L_1$  为 1.2; 为使土堡在扣袋曲面有一定碎土能力, 以减小后续旋耕作业工作阻力, 取扣袋曲线高度与开度比  $H_{\max}/L$  为 3.7。当翻土曲线高度  $H_1$  过大

时,土堡因翻土曲面运动距离较长而增大能量消耗, $H_1$ 过小时会导致土堡因运动空间有限而影响弯曲变形过程,取 $H_1$ 为160 mm;为保证土堡在扣堡曲面顺利完成扭转变形,扣堡曲线高度 $H_{\max}$ 需大于犁体耕深,当扣堡曲线高度 $H_{\max}$ 过大时,犁体扣堡率高,但犁翼部分会产生较大扭转变形,土堡与犁面摩擦加剧,使得犁体尾翼磨损较严重。综合考虑,取扣堡曲线高度 $H_{\max}$ 为280 mm。结合公式(3)与公式(5)可得,翻土曲线开度 $L_1$ 为133.3 mm,扣堡曲线开度 $L$ 为75.7 mm,圆弧半径 $R$ 为153.7 mm。

当两曲线的高度和开度一定时,铧刃起土角 $\epsilon$ 与始端直线长度 $S$ 相关, $S$ 一般为30~60 mm<sup>[26]</sup>,将 $S$ 取值为40 mm,则由公式(6)可得,铧刃起土角 $\epsilon$ 为25.3°。由式(4)可以看出,当铧刃起土角 $\epsilon$ 一定时,导曲线两端切线夹角 $\omega$ 与导曲线上部倾角 $\lambda$ 呈正相关,导曲线上部倾角 $\lambda$ 越大,土堡扭曲程度越大,但犁翻阻力对应增加,导曲线上部倾角 $\lambda$ 较小时,会导致土堡在犁翼翻转不彻底,影响扣堡效果,综合考虑,设计导曲线上部倾角 $\lambda$ 为45°,对应的导曲线两端切线夹角 $\omega$ 为70.3°。

2)土堡运动轨迹分析。土堡在扣堡曲面进行扭转变形直至完成扣堡,该过程是土堡与犁体曲面接触的最后一个环节。完成扣堡的土堡最终在重力作用下断裂成块并落下,覆盖在前一行程犁沟中,完成秸秆的翻埋覆盖。土堡运动轨迹如图6A所示。犁体曲面由水平直元线法设计而成,土堡扭转变形程度主要由扣堡曲面直元线角与犁体尾翼长度决定,犁体曲面结构如图6B所示。土堡相关扭转变形公式如下:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \frac{TI}{KI_1} = \theta_{28} - \theta_{16} \\ I_t = \beta a^3 b \end{cases} \quad (7)$$



A: 土堡运动轨迹 Bandit movement track; B: 犁体曲面结构 Plough surface structure.

图6 犁体曲面工作原理图

Fig.6 Working principle of plough surface

式(7)中, $\Delta\theta$ 为土堡扭转角,(°); $T$ 为扭矩, $N \cdot m$ ;  $l$ 为扣堡曲面上条状土堡长度,mm; $I_t$ 为横截面对土堡中心线的极惯性矩, $m^4$ ;  $K$ 为土壤剪切模量,Pa; $\theta_k$ 为犁体导曲线上高度 $k$ ( $0 \leq k \leq 28$ )点处对应的直元线角,(°); $a$ 为犁体耕深,mm; $b$ 为犁体耕宽,mm; $\beta$ 为扭转因数,其值与截面宽深比 $b/a$ 相关。

由公式(7)可得,扭矩 $T$ 为:

$$T = \frac{K\beta a^3 b \Delta\theta}{l} \quad (8)$$

式(7)表明,土堡扭转角 $\Delta\theta$ 由扣堡曲面起始直元线角 $\theta_{16}$ 与最终直元线角 $\theta_{28}$ 两者决定。式(8)表明,当犁体在同一土壤条件下工作时,若犁体耕宽 $b$ 与耕深 $a$ 为定值,扭矩 $T$ 与 $\Delta\theta$ 呈正相关,当 $\Delta\theta$ 增大时,土堡扭转变形产生的扭矩 $T$ 相应变大。为保证犁体作业效果,将直元线角变化规律设计为半螺旋型<sup>[26]</sup>,犁体起始直元线角 $\theta_0$ 取值为40°,中间最小直元线角 $\theta_4$ 取值为38°,顶部最大直元线角 $\theta_{28}$ 与起始直元线角 $\theta_0$ 的差值一般在7°~15°,将该差值取为10°,故 $\theta_{16}$ 与 $\theta_{28}$ 分别为41°与50°,土堡扭转角 $\Delta\theta$ 为9°。

当犁体尾翼长度 $S_t$ 增加时,土堡有足够长距离进行扭转变形完成扣堡,提高秸秆埋覆率。但 $S_t$ 过大时,将导致土堡运动距离较远,超过前一行程犁沟,造成土堡覆盖不均匀而增大旋耕部件作业功耗。当犁体尾翼长度 $S_t$ 过小时,会导致土堡提前断裂掉落,使得土堡扭转变形不充分而无法完成扣堡过程,从而降低秸秆埋覆率。综上,为保证土堡在均匀分布的同时提高秸秆埋覆率,本研究采用加长尾翼犁体,且犁体尾翼延伸至上一行程犁沟中点,对应的犁体尾翼长度 $S_t$ 为262.8 mm。

### 1.3 犁体布局分析

各犁体之间相互位置关系如图7所示。为保证整机通过性及结构合理性,需对犁体数量、机架上相邻两犁体间的横向距离与纵向距离进行分析确定,各参数相互关系如下:

$$\begin{cases} L_x = b + \Delta b \\ L_{x1} = L_0 - (n-2)L_x \\ L_y = L_x / \tan\beta_0 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, $L_x$ 为机架同侧相邻两犁体间的横向距离,mm; $L_{x1}$ 为整机中心线左右两侧相邻犁体间的横向距离,mm; $L_y$ 为机架同侧相邻两犁体间的纵向距离,mm; $L_0$ 为整机工作幅宽,mm; $\Delta b$ 为土壤撕

扯宽度, mm;  $n$  为犁体数量;  $\beta_0$  为犁梁配置斜角, ( $^\circ$ )。由于长江中下游地区土壤黏重, 犁体在实际作业过程中存在犁耕土壤与未耕土壤相互撕扯现象, 根据田间作业情况, 撕扯宽度  $\Delta b$  一般为 30~70 mm, 结合犁体耕宽  $b$  设计值 220 mm, 将机架同侧相邻两犁体之间的横向距离  $L_x$  设计为 270 mm。为避免中间区域出现壅土与漏耕现象, 将犁体数量  $n$  选取为 6 个, 由式(9)得, 整机中心线左右两侧相邻犁体间的横向距离  $L_{x1}$  为 1 020 mm。根据文献[26], 将  $\beta_0$  确定为  $27^\circ$ , 对应机架同侧相邻两犁体间的纵向距离  $L_y$  为 529.9 mm。

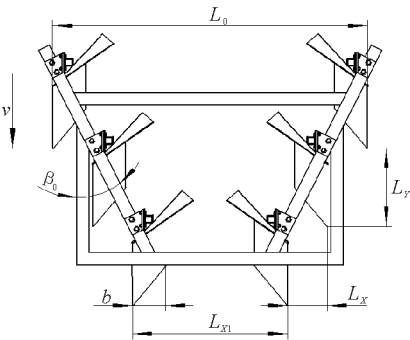


图 7 犁体布局图

Fig.7 Layout of plough

### 1.4 旋耕部件设计

旋耕部件耕作深度设计为 120 mm, 综合考虑, 本研究选用 IT245 型旋耕刀。为保证整机配置合理性, 对旋耕刀排列方式进行设计, 刀片排列如图 8 所示。

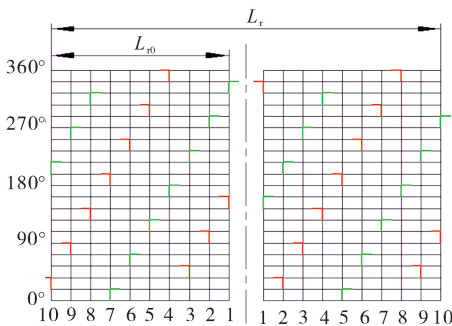


图 8 旋耕刀片排列示意图

Fig.8 Schematic diagram of rotary tiller blade arrangement

整机各部件相关参数满足:

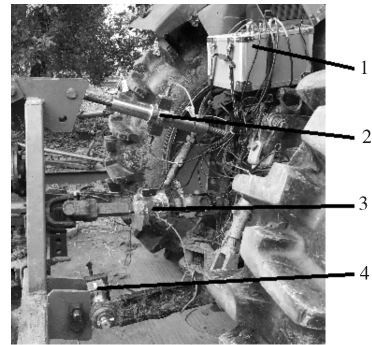
$$\begin{cases} L_p = L_r + L_g \\ L_r = 2L_{r0} + 200 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,  $L_p$  为犁翻部件工作幅宽, 与整机工作幅宽相同,  $L_p = 2\ 100$  mm;  $L_r$  为旋耕部件工作幅

宽, mm;  $L_g$  为畦沟宽度,  $L_g = 300$  mm;  $L_{r0}$  为左、右刀辊工作幅宽, mm。由式(10)可得, 旋耕部件工作幅宽  $L_r$  为 1 800 mm, 其中左、右刀辊工作幅宽  $L_{r0}$  均为 800 mm。旋耕部件每个切土小区上安装 2 把方向相反的旋耕刀, 为避免漏耕或秸秆与土壤混合堵塞现象, 相邻切土小区的距离设计为 80 mm, 综合分析, 旋耕刀数量设计为 40 把, 即左右刀辊上各安装 20 把旋耕刀, 其中左旋与右旋各 10 把。

### 1.5 田间试验

1) 试验条件与设备。试验于 2018 年 12 月在华中农业大学现代农业科技试验基地完成, 前茬为水稻秸秆, 地表秸秆量为  $2.1\text{ kg/m}^2$ , 秸秆密度为  $443\text{ 株/m}^2$ , 秸秆平均高度为 402 mm, 土壤干基含水率为 21.9%, 土壤坚实度为 2 867.4 kPa, 容重为  $1.6\text{ g/cm}^3$ 。试验机具为犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机。测试设备包括 TZS-2X 型土壤水分记录仪(浙江托普云农科技股份有限公司, 精度  $\pm 2\%$ )、TJSD-750 型数显土壤坚实度测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司, 精度  $\pm 0.005\%$  FS)、BK-5 型牵引力负荷传感器(中国航天空气动力技术研究院, 测量范围  $0\sim 30\text{ kN}$ , 精度等级 0.3)、CKY-810 型扭矩传感器(北京中航科仪测控技术有限公司, 测量范围  $0\sim \pm 3\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$ , 精度 0.5%)、数据采集器及笔记本电脑等。功耗测试系统如图 9 所示。



1. 数据采集器 Data collector; 2. BK-5 型上拉杆牵引力负荷传感器 BK-5 type pull rod traction load sensor; 3. CKY-810 型扭矩传感器 CKY-810 torque sensor; 4. BK-5 型下拉杆牵引力负荷传感器 BK-5 type pull rod traction load sensor.

图 9 功耗测试系统

Fig.9 System for testing power consumption

2) 试验方法。本研究设计的犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机为模块化组合, 可拆分为扣垡犁与旋耕机分别独立作业。因此, 分别对整机与旋耕机的性能参数进行测试与分析, 性能参数主要包括牵引阻力、作业功耗、耕深、耕宽、碎土率、

耕后地表平整度和秸秆埋覆率等。试验主要分两个部分进行,首先为整机作业,犁体耕深调整为 200 mm,对应的旋耕深度为 120 mm,旋耕刀辊转速 360 r/min,机组前进速度分别设为 3.3、4.2 km/h(分别对应工况 1、2);其次为旋耕机独立作业,旋耕深度调整为 120 mm,刀辊转速 360 r/min,机组不同前进速度分别设为 3.3、4.2 km/h(分别对应工况 1、2)。试验前对拖拉机档位和手油门进行标定,以保证机组实际前进速度及转速与设计值吻合,并对犁翻深度、限深深度及拖拉机液压调节手柄的升降程度三者间的关系通过预试验进行测定,以保证实际耕深与设计值吻合。田间试验作业长度为 60 m,取行程中间 30 m 为测试区域,机具在每种工况下均重复 3 个行程,取其平均值作为该工况下的试验结果,其中作业质量指标为 2 种工况下试验结果的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 作业功耗

犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机田间作业效果如图 10 所示,牵引阻力与功耗测试结果如表 1 所示。



A: 耕前地表 Surface before work; B: 整机田间试验效果 Field test results.

图 10 田间试验

Fig.10 Field experiment

由表 1 可知,当机组前进速度由 3.3 km/h 增加至 4.2 km/h 时,整机牵引阻力增加了 23.7%,功耗增加了 57.2%,表明速度对整机牵引阻力与功耗影响较大,速度越大,牵引阻力越大,功耗对应增加。与旋耕机独立作业相比,整机在工况 1 时的牵引功率增加了 146.2%,在工况 2 时的牵引功率增加了 185.5%,表明由于增加了犁翻部件,整机作业牵引功耗大于旋耕机独立作业。整机在工况 1 时的旋耕功率为 21.77 kW,比旋耕机独立作业减少了 12.1%;在工况 2 时的旋耕功率为 25.35 kW,比旋耕机独立作业减少了 13.7%,表明通过机具前部犁体的扣垡作业,将秸秆覆盖在旋耕层以下且对板结的土壤进行了一定扰动后,整机旋耕部件作业功耗有所降低。在工况 1 与工况 2 条件下,整机的总功耗相比于旋耕机独立作业分别增加了 12.3% 与 20.7%,表明由于增加了犁翻部件,整机作业的总功耗大于旋耕机独立作业功耗,但提高了机组的通过性和整地的作业质量。

### 2.2 作业质量

整机与旋耕机的碎土率、耕后地表平整度、秸秆埋覆率对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知,整机在 2 种工况下的碎土率平均为 92.8%,比旋耕机独立作业提高了 2.6%,耕后地表平整度平均为 11 mm,比旋耕机独立作业提高了 39.0%,秸秆埋覆率平均为 92.9%,比旋耕机独立作业提高了 22.2%,即犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机作业质量相较于旋耕机独立作业,可以提高秸秆埋覆率、厢面平整度和碎土率。由于目前没有与犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机相对应的性能评价指标,本研究采用 NY/T 1228—2006《耕整机质量评价技术规范》与 NY/T 499—2013《旋耕机作业质量》综合评定,将整机的

表 1 各工况下牵引阻力与功率消耗

Table 1 Traction resistance and power consumed under various conditions

项目 Item	旋耕作业 Rotary tillage		犁翻-旋耕组合作业 Ploughing-rotating combination operation	
	1	2	1	2
牵引阻力/N Traction resistance	4 920.46	5 236.54	12 096.11	14 960.84
牵引功率/kW Traction power	4.52	6.13	11.13	17.50
旋耕功率/kW Rotary tillage power	24.76	29.36	21.77	25.35
总功率/kW Total power	29.28	35.49	32.90	42.85

表2 作业性能参数  
Table 2 Operating performance parameters

测试指标 Test index	旋耕作业 Rotary tillage	犁翻-旋耕组合作业 Ploughing-rotating combination operation
碎土率/% Ground rate	90.5	92.8
耕后地表平整度/mm Surface flatness after tillage	18	11
秸秆埋覆率/% Straw embedding rate	76.1	92.9

平均耕深、平均耕宽、碎土率、耕后地表平整度和秸秆埋覆率分别与评价指标对比,可得整机各项作业性能参数均满足要求,表明了犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机有较好的田间作业效果。

### 3 讨论

本研究设计了一种犁翻埋茬、旋耕碎土、侧边作畦开沟的油菜直播种床整理机。该机主要由犁翻部件、旋耕部件及开畦沟部件组成,可实现秸秆全量还田、碎土平整及开畦沟功能。基于土垡运动规律确定了导曲线中翻土曲线高度与开度分别为 160 mm 和 133.3 mm,导曲线中扣垡曲线高度与开度分别为 280 mm 和 75.7 mm。通过分析土垡运动轨迹,确定了扣垡曲面起始直元线角与最终直元线角分别为 41°和 50°、犁体尾翼长度为 262.8 mm 等犁体曲面参数。确定了犁体总体数量为 6 个,机架同侧相邻两犁体之间的横向距离为 270 mm、犁梁配置斜角为 27°等犁体布局结构参数。田间试验表明:当机组前进速度由 3.3 km/h 增加至 4.2 km/h 时,整机牵引阻力增加了 23.7%,功耗增加了 57.2%。在旋耕深度相同作业条件下,当机组前进速度分别为 3.3、4.2 km/h 时,整机总功耗相较于旋耕机独立作业分别增加了 12.3%与 20.7%,有效提高了机组的通过性和整地的作业质量。与旋耕机独立作业相比,整机的碎土率平均为 92.8%,提高了 2.6%,耕后地表平整度平均为 11 mm,提高了 39.0%,秸秆埋覆率平均为 92.9%,提高了 22.2%,各项性能参数均满足油菜种植农艺要求。本研究设计的犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机相对于传统犁旋一体机的作业效果与减阻效果还有待于进一步研究。同时,扣垡犁作业功耗较大,后续可对犁体结构参数与工作参数进行优化,在改善其作业性能的同时降低功耗并提高机组的适应性。

### 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] 张青松,肖文立,廖庆喜,等.油菜直播机深浅旋组合式种床准备装置的设计与试验[J].华中农业大学学报,2016,35(4):121-128.

[3] 肖文立,肖文芳,廖宜涛,等.油菜直播机犁式正位深施肥装置设计与性能试验[J].华中农业大学学报,2018,37(4):131-137.

[4] 贾洪雷,陈忠亮,郭红,等.旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J].农业机械学报,2000,31(4):29-32.

[5] 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].农业机械学报,2012,43(8):46-49,77.

[6] TAREVRDYAN A P,GRIGORYAN S M,ESOYAN A M.Investigation of the regularity of movement of furrow slice at tillage with a plough with ripping moldboard[J].Annals of agrarian science,2018,16:218-221.

[7] 洪筠,崔占荣,任露泉.仿生犁与普通犁作业综合经济效益的对比分析[J].农业机械学报,2006,37(10):93-96.

[8] 余贵珍,吴成武,丁能根,等.犁体参数化设计系统的研究[J].农业机械学报,2008,39(3):49-51,36.

[9] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等.犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J].农业机械学报,2011,42(10):45-50.

[10] 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.

[11] 张丹,付斌,胡万,等.秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J].农业工程学报,2017,33(9):133-140.

[12] 张维乐,戴志刚,任涛,等.不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J].中国农业科学,2016,49(7):1254-1266.

[13] 刘禹池,曾祥忠,冯文强,等.稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1450-1459.

[14] YANG H S,FENG J X,ZHAI S L,et al.Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J].Soil & tillage research,2016,163:21-31.

[15] WANG X H,YANG H S,LIU J,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.

[16] 秦宽,丁为民,方志超,等.犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):7-16.

[17] 秦宽,丁为民,方志超,等.复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J].农业工程学报,2016,32(9):1-8.

[18] 沈丹波,缪明,丁炜.稻麦秸秆犁翻旋耕复式作业耕整机的研制[J].农业装备技术,2014,40(4):15-16.

[19] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等.水旱两用秸秆还田耕整机关键部

- 件设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(11):10-16.
- [20] 万国伟,舒彩霞,刘晓鹏,等.液压驱动式圆盘耙设计与仿真试验[J].华南农业大学学报,2017,38(5):117-124.
- [21] 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].农业机械学报,2015,46(9):112-117.
- [22] 周华,张居敏,祝英豪,等.秸秆还田深松旋埋联合耕整机设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(22):17-26.
- [23] 郑智旗,何进,王庆杰,等.秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(7):87-96.
- [24] 林静,马铁,李宝筏.1JHL-2型秸秆深埋还田机设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(20):32-40.
- [25] 林静,张桐嘉,田阳,等.秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J].农业机械学报,2018,49(S1):50-59,67.
- [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] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.

## 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

XIAO Wenfang SHU Caixia LIAO Qingxi LIAO Yitao  
ZHANG Qingsong XIAO Wenli FU Yunkai

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/  
Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of  
Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

**Abstract** In the middle and lower reaches of the Yangtze river, the soil is sticky and amount of rice straw is large, which will cause machine to be blocked by soil or entangled by straw. In order to solve this problem, a combined tillage machine composed of buckle plough, rotary tillage and parts for furrowing, which can cover the straw with the plough, break soil up with rotary tillage and ditch furrow with the plough at the back, was designed. According to the law of soil movement, the key parameters of plough surface including guide curve, straight element angle, tail length of plough surface, and the structural parameters including number and distance of plough were determined. Results of field test showed that traction resistance of machine increased by 23.7% and the power consumption increased by 57.2% when the working speed increased from 3.3 km/h to 4.2 km/h. Traction resistance and power consumption increased when speed increased. Due to the addition of plough, the total power consumption of machine increased by 12.3% and 20.7% compared with the rotary tillage when the speed of the machine was 3.3 km/h and 4.2 km/h under the same operating depth of rotary tillage. The machine worked better even though the power consumption was increased. Compared with the rotary tillage, the average soil crushing rate of the combined machine, the average surface flatness after tillage, the average straw coverage rate was 92.8%, 11 mm, and 92.9%, respectively and increased by 2.6%, 39.0%, and 22.2%, respectively. All performance parameters of the machine meet the agronomic requirements of rapeseed sowing.

**Keywords** seedbed preparing; rice straw returning; plough-rotary combination; plough; rotary tillage; buckling soil; rapeseed direct seeding; rice-rapeseed rotation; combined tillage equipment

(责任编辑:陆文昌)