

黏重土壤精旋起垄一体机设计与试验

张涛¹,李英¹,张晓春²,魏灵²,
庞有伦¹,李平¹,唐兴隆¹,周玉华¹

(1. 重庆市农业科学院农业机械研究所,重庆 401329;2. 重庆市农业科学院特色作物研究所,重庆 402160)

摘要:针对西南丘陵山区土壤黏重、耕作与起垄阻力大的问题,为改善表层土壤结构,设计了一款精旋起垄一体机,主要由深旋装置、碎土装置、成垄部件等组成,可实现旋耕、碎土、起垄等联合作业。深旋装置采用双螺旋线方式交替安装旋耕刀,间隔为60 mm,旋耕刀轴转速为 $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$;碎土装置中以刀盘为中心对称安装,每侧安装3把碎土刀,刀尖间隙为32 mm,碎土刀轴转速为 $430 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,并建立了作业过程中土壤断面模型和碎土刀运动轨迹;依据农艺要求将成垄部件设计成前宽后窄、上窄下宽的梯形箱体结构,分析确定成垄单体长度为300 mm。田间试验结果表明,在前茬作物为水稻或油菜条件下,垄宽、垄高、沟面宽稳定性系数平均值分别为96.26%、93.34%、89.09%,垄型饱满,无高低、宽窄垄现象,地表平整度、碎土率、植被覆盖率分别为2.06 cm、92.32%、85.32%,各项指标均符合行业标准 and 设计要求。作业后土壤容重和含水率分别降低了14.31%和11.25%,对土壤结构和通透性有一定改善。

关键词:精旋起垄一体机;黏重土壤;垄作;旋耕;碎土;田间试验

中图分类号:S222.4 **文献标志码:**A

Design and test of precision rotary-ridging machine for sticky soil

ZHANG Tao¹, LI Ying¹, ZHANG Xiaochun², WEI Ling², PANG Youlun¹,
LI Ping¹, TANG Xinglong¹, ZHOU Yuhua¹

(1. Institute of Agricultural Machinery Research, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China;
2. Institute of Characteristic Crops Research, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: To improve the topsoil structure and address the problem with heavily consolidated and highly tillage and ridging resistance in southwest China hilly area, the precision rotary-ridging machine was developed. It was mainly composed of deep rotation device, soil crushing device and ridge forming parts, which could realize combined operations such as rotary tillage, soil crushing and ridge raising. The deep rotating device adopted the double helix method to install the rotary blade alternately. The rotary blade interval was 60 mm and rotating speed was $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. In the soil crushing device, the earth cutter was installed symmetrically with the cutter plate as the center. Three pieces of each side were obtained through analysis. The clearance of the cutter tip was 32 mm, and the rotating speed of the earth cutter was $430 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. The model of soil cross section and the path of soil cutter movement in the process of operation were established. According to agronomic requirements, the ridge components were designed into trapezoidal box structure with front width and back narrow, upper narrow and below width, and the ridge cover length was determined to be 300 mm by analysis. The results of field tests showed that the average stability coefficients of ridge width, ridge height and furrow width were 96.26%, 93.34% and 89.09%, respectively, under the condition that the previous crop was rice or rapeseed and the ridges were full without high or low ridge, wide or narrow ridge. The surface flatness, soil fragmentation rate and vegetation coverage rate were 2.06

收稿日期:2021-06-21

修回日期:2021-12-23

基金项目:重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2019jxj100002);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jsex-gksbX0108);重庆市市级良种创新项目(NKY-2020AB014)

作者简介:张涛(1989-),男,甘肃庆阳人,博士,助理研究员,主要从事农业机械设计及理论研究。E-mail:zt861205zt@163.com

通信作者:李英(1970-),女,重庆江津人,高级农艺师,主要从事农业工程技术与应用推广研究。E-mail:168175998@qq.com

cm, 92.32% and 85.32%, respectively. All indexes were in line with industry standards and design requirements. After operation, soil bulk density and water content decreased by 14.31% and 11.25%, respectively, which improved soil structure and permeability.

Keywords: precision rotary-ridging machine; sticky soil; ridge planting; rotary tillage; broken soil; field test

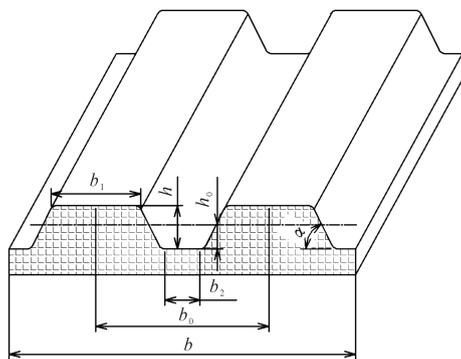
垄作栽培是通过开沟或起垄等整地技术,使土壤剖面呈波浪型,具有集雨、保墒,改善作物通风、透光,增产等优点,在玉米、小麦等作物种植上广泛应用^[1-2]。近年来重庆市农业科学院开展的稻田垄作栽培技术取得了重要成果,相比传统平作极大地提高了稻田受光面积和复种指数,同时有利于稻田排水、根系生长及改良土壤生态环境^[3-4]。为了更好地在西南丘陵山区推广垄作栽培模式、改良稻田土壤表层结构,高碎土率和低阻力的黏重土壤旋耕起垄机械研究迫在眉睫。

目前,针对旋耕、起垄等整地机械的研究成果众多,并且技术成熟、应用广泛^[5-6]。包攀峰等^[7]针对南方稻田开发了一款犁旋组合式油菜播种开沟起垄机,并得到了最优结构及工作参数;赵艳忠等^[8]研制了一款带状深松灭茬机,并对深松、垄台成型部件进行了优化改进;史增录等^[9]针对全膜双垄沟种植农艺要求研制的起垄施肥铺膜一体机,功能多元、作业性能稳定;郭丽君等^[10]在保护性耕作基础上设计的垄上深松灭茬起垄机,降低了动土量和土壤扰动;LARSON等^[11]利用电位差原理对深松机进行降阻设计;郑侃等^[12]研究了作业次序对整地质量和功耗的影响规律;WEISE等^[13]系统研究耕、整地机械能量消耗规律,建立了机具前进速度与能量消耗之间的数学模型;秦宽等^[14]根据稻麦轮作农艺要求,设计了一款犁翻旋耕复式作业整地机,并借助 EDEM 软件对作业过程进行虚拟仿真,耕作性能指标均达到 90% 以上;林静等^[15]针对辽西地区耕层土壤板结、保墒能力低等问题,设计了 1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机,通过试验得到了最佳作业参数。耕整地技术对土壤结构具有重要影响^[16-19],西南丘陵山区土壤含水率大且黏重板结,耕作时与触土部件粘性较强,耕作阻力大,一般需进行 2 次以上整地作业,才能达到待播条件^[20]。由于作业环境和农艺要求的差异性,使得现有旋耕起垄联合作业机的作业性能并不能完全适应于西南稻田垄作栽培技术要求。为此,在融合稻田垄作栽培技术、高碎土率和植被覆盖率等工作性能基础上,本文设计了一款黏重土壤精旋起垄一体机,重点对深旋装置、碎土装置、成垄部件进行了结构与理论分析,并进行了田间性能试验,以期为该

种植模式推广起支撑作用。

1 农艺要求及设计思路

稻田垄作栽培模式具体如图 1 所示,起垄要求为每个垄厢平均宽度 $b_0 = 1150$ mm,其中垄顶宽度 $b_1 = 750 \sim 800$ mm,沟面宽度 $b_2 = 150$ mm,垄高 $h = 250 \sim 280$ mm。该栽培模式主要思路为水稻收获后通过灭茬机将稻秆粉碎还田,并旋耕起垄,用于种植秋冬季作物,作物收获后,直接免耕早直播水稻,利用旱播水管的方式进行水稻生产,从而提高耕地复种指数和降低作业成本。因此,根据该种植模式及西南黏重土壤特性,本研究设计的精旋起垄一体机作业效果需满足以下基本要求:1) 植被覆盖率达到 80% 以上,便于稻秆更好地腐熟分解;2) 垄面土壤破碎率达到 75% 以上;3) 垄面土壤平整度小于 3 cm。



注: b 为工作幅宽,2 300 mm; b_0 为垄中心距,1 150 mm; b_1 为垄面宽度,750~800 mm; b_2 为沟面宽度,150 mm; h 为垄高,250~280 mm; h_0 为开沟深度; α 为垄壁倾角,70°。

Note: b represents the working width, 2 300 mm; b_0 represents ridge center distance, 1 150 mm; b_1 represents the ridge surface width, 750~800 mm; b_2 represents the groove surface width, 150 mm; h represents ridge height, 250~280 mm; h_0 represents the ditching depth; α represents the ridge wall dip angle, 70°.

图 1 稻田垄作栽培模式

Fig.1 Ridge cultivation mode of paddy fields

2 整机结构及工作原理

2.1 整机结构及装配关系

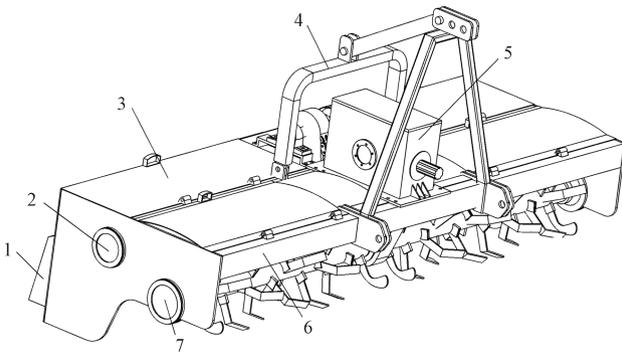
黏重土壤精旋起垄一体机总体结构如图 2 所示。作业时该机悬挂于拖拉机后方,可一次完成旋耕、碎土、起垄等工序。机具主要包括机架、悬挂装

置、深旋装置、碎土装置、起垄装置和传动系统。机架是所有部件的安装载体,上方安装有变速箱和悬挂装置;两侧通过定位圆孔安装有深旋装置和碎土装置,且碎土装置安装位置在旋耕装置的后上方;后方设计有两个对称起垄装置,主要由碎土装置两侧的成垄犁和后方的成垄部件构成。

各装置及部件在整机中装配关系如图 3 所示。深旋装置与碎土装置轴心水平距离为 340 mm,高度差为 120 mm,回转半径分别为 280、140 mm,深旋装置端板高度为 320 mm,碎土装置端侧板高度为 480 mm,机架中深旋和碎土装置大梁分别采用 100 mm×100 mm 方管 and 100 mm×60 mm 矩管,机架总跨度为 740 mm,整机中无干涉,结构紧凑合理。

2.2 工作原理

先将精旋起垄一体机通过三点悬挂安装在拖拉机尾部,拖拉机动力输出轴通过万向节将动力传至变速箱,变速箱下方两侧有输出轴带动深旋装置



1. 成垄部件;2. 碎土装置;3. 盖板;4. 悬挂装置;
5. 变速箱;6. 机架;7. 深旋装置

1. Ridging parts; 2. Broken soil device; 3. Cover plate; 4. Suspension;
5. Transmission; 6. Rack; 7. Deep spiral device

图 2 黏重土壤精旋起垄一体机结构示意图

Fig.2 Structure diagram of precision rotary-ridging machine for sticky soil

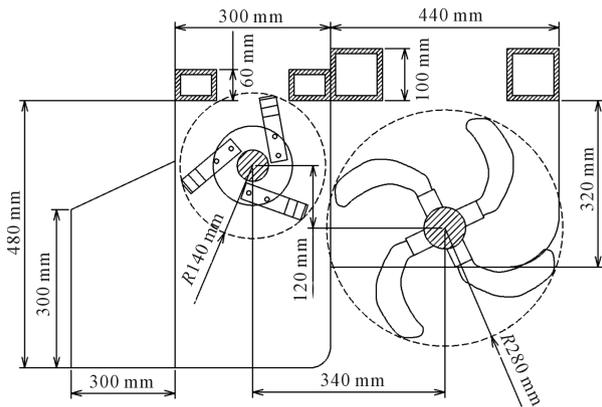


图 3 整机装配关系示意图

Fig.3 Assembly relation diagram of whole machine

工作,同时在上部接出输出轴,通过链条、链轮、过桥轴等部件带动碎土装置工作。作业时,随着机具前进,深旋装置将土壤翻起破碎,起垄装置两侧的起垄犁将土壤向中间翻垡,形成垄沟和垡面,同时后方碎土装置将表层土壤进行二次破碎,避免黏重稻田土壤板结,在成垄部件的作用下形成平整及有利于播种和作物生长的垡面。该机有效幅宽为 2 300 mm,配套动力在 68.76 kW 以上,其他具体技术参数如表 1 所示。

3 关键部件设计

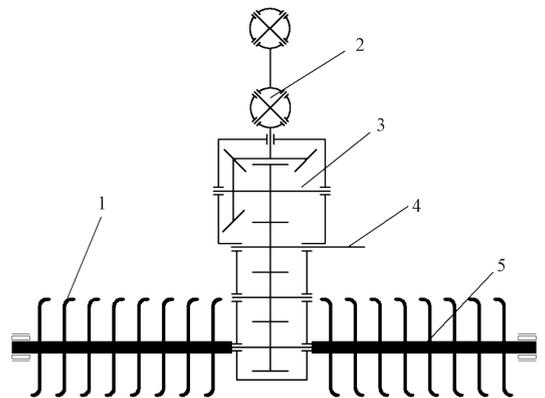
3.1 深旋装置

3.1.1 结构组成 深旋装置主要起打破土壤耕作层,将秸秆深埋还田、破碎土壤和平整土地的作用。该装置结构及传动简图如图 4 所示,主要由变速箱、刀轴、旋耕刀等部件组成,其中刀轴为直径 80 mm 空心管,在刀轴上焊接有刀座,便于旋耕刀安装与更换。

表 1 黏重土壤精旋起垄一体机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of precision rotary-ridging machine for sticky soil

参数 Parameter	数值 Value
外形尺寸 Overall dimension/(mm×mm×mm)	2540×1360×1350
作业幅宽 Working/mm	2300
作业速度 Working speed/(km·h ⁻¹)	2.02~4.58
起垄行数 Ridging rows	2
垄间距 Ridge distance/mm	1150
配套动力 Marched power/kW	≥68.76
旋耕深度 Rotary tillage depth/mm	100~210
碎土深度 Broken soil depth/mm	60
旋耕转速 Rotary tillage rotate speed/(r·min ⁻¹)	260
碎土转速 Broken soil rotate speed/(r·min ⁻¹)	430



1. 旋耕刀;2. 万向节;3. 变速箱;4. 动力输出轴;5. 深旋刀轴
1. Rotary knife; 2. Universal joint; 3. Transmission;
4. Power output shaft; 5. Deep screw knife shaft.

图 4 深旋装置结构及传动简图

Fig.4 Kinematic diagram of deep rotary structure and drive

为提高传动和刀轴受力稳定性,该装置采用中央变速箱传动,拖拉机通过万向节将动力传至变速箱,经过90°变向和多级减速后,深旋耕刀轴转速为 $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3.1.2 旋耕刀排布 深旋装置旋耕刀在刀辊上的排布如图5所示(见256页)。为避免漏耕和壅土,提高碎土率和地表平整度,采用双螺旋线交替排列方式安装旋耕刀,同一平面有左和右旋耕刀,其相位角差值为 120° ,保证旋耕刀交替入土。以变速箱为中心对称分布,刀辊总长为 $2\ 280 \text{ mm}$,每隔 60 mm 安装一对旋耕刀,总共安装有33对。

3.1.3 旋耕刀选择 受复杂作业环境影响,旋耕刀需有高耐磨性和抗折强度,本研究选用旋耕刀结构和参数如图6所示。旋耕刀回转半径 $R=280 \text{ mm}$,正切面高度 $h_1=60 \text{ mm}$,耕作幅宽 $b_3=60 \text{ mm}$,采用65Mn钢锻造和热处理,保证硬度为 $50\sim 55 \text{ HRC}$ 。工作时切削刃和正切面先后切入土壤中,进行切削、挤压、抛甩等过程^[21]。

3.2 碎土装置

3.2.1 结构组成及土壤运动过程 由于双行起垄,碎土装置设计为对称式结构,主要由起垄犁、机架、刀盘、碎土刀、碎土刀轴组成,具体如图7所示。刀轴为中间空心、两端焊接实心台阶轴的设计方式,空心轴为外径 60 mm 、内径 48 mm 的Q235热轧无缝钢管;刀盘焊接在中间空心刀轴上,直径为 185 mm ,刀盘间距 180 mm 。由于标准要求碎土作业后土块长度小于 40 mm ,因此两个刀尖之间的间隙为 32 mm ,碎土刀用螺栓固定,其回转半径为 140 mm 。起垄犁主要是借助犁铧的翻转和开沟原理,使土壤从沟底倾斜提升翻压,堆积形成垄状,保证土壤不滑落至沟底。深旋与翻垡作业时土壤会产生一定的蓬松,因此起垄犁高度需高于垄体高度,其值设计为 480 mm ,起垄犁末端结构为圆弧状,在后接成垄部件的作用下形成梯形垄,整体采用加强筋和螺栓与机架固定,保证结构强度和便于维修。

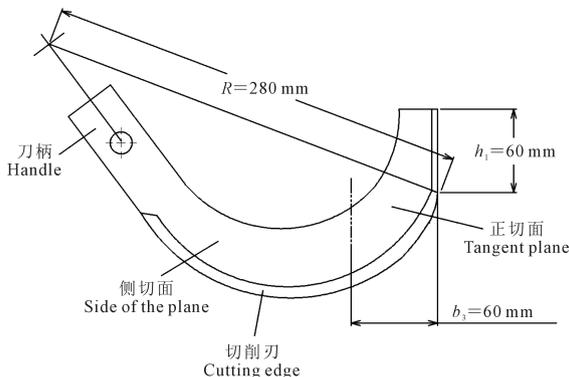


图6 旋耕刀结构及参数

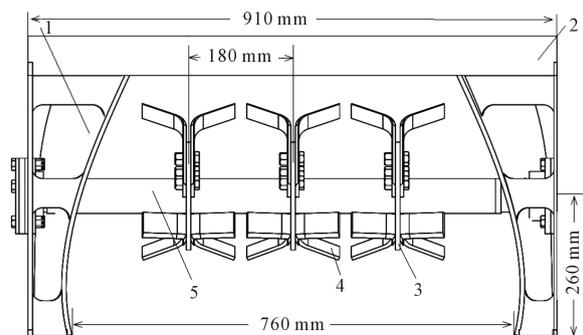
Fig.6 Structure and parameters of rotary blades

前置深旋装置对深层土壤连续剪切、撞击、撕裂、抛掷等作用后,土壤变得细碎和蓬松,土壤抬升;后接碎土装置对土壤进行翻垡、挤压、抬升、破碎等作用后,两侧土壤紧实,可避免垡体土壤回落,同时垡体上播种区域更加细碎,便于作物生根发芽,作业后土壤断面如图8所示。

由图8可得,经深旋、碎土、翻垡作业后单垄土壤断面面积为:

$$S_1 \approx \frac{1}{2}(l_2 + l_1 - d)h_1 \quad (1)$$

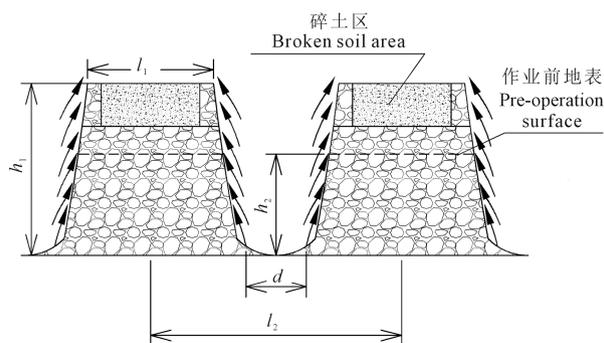
式中, S_1 为单垄断面面积(cm^2); l_1 为深旋、碎土、翻垡作业后垡顶宽(cm); l_2 为深旋、碎土、翻垡作业后垡底宽(cm); d 为沟面宽(cm); h_1 为深旋、碎土、翻垡作业后垡高(cm)。



1. 起垄犁;2. 机架;3. 刀盘;4. 碎土刀;5. 碎土刀轴
1. Ridging plough; 2. Rack; 3. Knife dish;
4. Broken soil knife; 5. Broken knife shaft

图7 碎土装置结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of the broken soil device



注: h_1 为深旋、碎土、翻垡作业后垡高; h_2 为深旋深度; d 为沟面宽; l_1 为深旋、碎土、翻垡作业后垡顶宽; l_2 为深旋、碎土、翻垡作业后垡底宽。

Note: h_1 represents ridge height after deep rotation, soil crushing, and digging; h_2 represents the deep rotation depth; d represents the groove surface width; l_1 represents ridge top width after deep rotation, soil crushing, and digging; l_2 represents ridge bottom width after deep rotation, soil crushing, and digging.

图8 作业后土壤断面图

Fig.8 Post-operation soil sectional view

形成单垄前土壤断面面积为:

$$S_2 = l_2 \times h_2 \quad (2)$$

式中, S_2 为工作部件作业的土壤断面面积 (cm^2); h_2 为深旋深度 (cm)。

理论分析, 作业前后土壤体积应不变, S_1 与 S_2 相等, 但由于翻垡、碎土后土壤密度减小, 土壤疏松, 则土壤蓬松系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{S_1}{S_2} \quad (3)$$

根据设计, l_1 、 l_2 、 h_1 、 h_2 、 d 分别取值 75、115、36、14、15 cm, 则计算得到土壤蓬松系数等于 1.957。

3.2.2 碎土装置运动分析 碎土装置工作时, 碎土刀运动由直线和匀速圆周运动合成, 其运动轨迹如图 9 所示。

以初始状态下刀轴轴心为坐标原点, 则碎土刀刃点 $N(x, y)$ 的实时运动方程为:

$$\begin{cases} x = v_m t + r \cos(\omega t) \\ y = -r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为时间 (s); v_m 为机具前进速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); r 为碎土刀回转半径 (m); ω 为碎土装置刀轴角速度 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)。

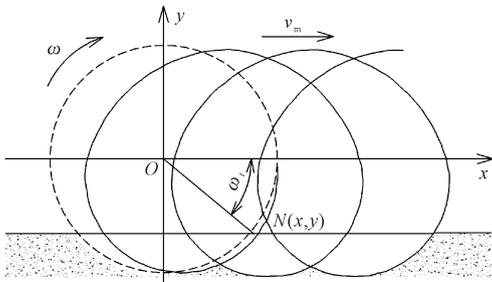
以时间 t 为变量对式 (4) 求导, 得到刀刃点 N 在 x 方向和 y 方向的实时速度为:

$$\begin{cases} v_x = v_m - r\omega \sin(\omega t) \\ v_y = -r\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

则碎土刀刃上点 N 实时绝对速度为:

$$v_N = \sqrt{v_m^2 + (r\omega)^2 - 2v_m r\omega \sin(\omega t)} \quad (6)$$

式中, v_N 为碎土刀刃点 N 的实时绝对速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。



注: ω 为碎土刀轴角速度; v_m 为机具前进速度; $N(x, y)$ 为碎土刀刃点实时位置; ω_t 为碎土刀刃点在时间 t 时与水平面的夹角。

Note: ω represents angular velocity of earth-shattering knife; v_m represents machine forward speed; $N(x, y)$ represents real-time position of earth-shattering knife edge point; ω_t represents an angle between earth-shattering knife edge point at t time and horizontal plane.

图 9 碎土刀运动轨迹

Fig.9 The track of the earth-shattering knife

碎土装置入土过程如图 10 所示, 则其入土角为:

$$\theta = \omega t_0 = \arcsin \frac{r - H}{r} \quad (7)$$

式中, θ 为碎土刀入土角 (rad); t_0 为入土时间 (s); H 为入土深度 (mm)。

将公式 (7) 代入公式 (5) 中, 可得:

$$\omega \geq \frac{v_m - v_0}{r - H} \quad (8)$$

式中, v_0 为入土时 x 方向的速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

将公式 (8) 中角速度用转速进行代换, 得到:

$$n \geq 30 \frac{v_m - v_0}{\pi(r - H)} \quad (9)$$

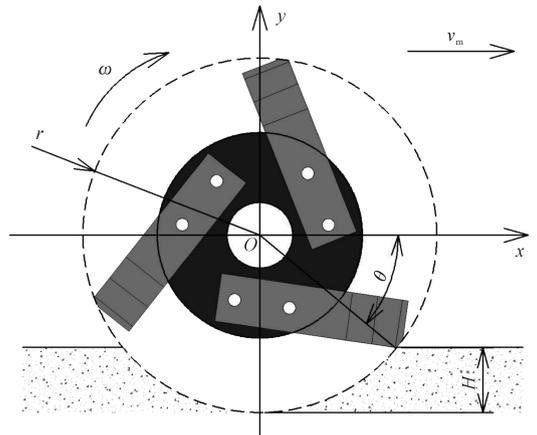
式中, n 为刀轴转速 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

由公式 (9) 可得转速与碎土刀回转半径成反比, 入土时, 碎土刀刃 x 方向速度 v_0 应为零, 碎土装置回转半径 140 mm, 入土深度 60 mm, 计算得到该装置转速 n 最小为 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 本设计为提高碎土质量, 碎土装置转速设为 $430 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 满足理论分析要求。

3.2.3 切土节距和切削面刀片数 切土节距是影响土壤颗粒粒径大小的重要指标。土壤颗粒越细碎, 越有利于作物生长, 同时小颗粒土壤之间填充紧密, 易形成稳定土壤团粒结构, 保证成垄时垄形整齐统一。切土节距与同一旋转切削面刀具数量满足^[22]:

$$S = \frac{60v_m}{Z \times n} \quad (10)$$

式中, S 为切土节距 (mm); Z 为每盘刀具数。



注: r 为碎土刀回转半径; θ 为碎土刀入土角; H 为入土深度。

Note: r represents turning radius of earth-shattering knife; θ represents penetrating angle of earth-shattering knife; H represents depth of the grave.

图 10 碎土刀入土过程

Fig.10 Earth-shattering knife into the soil

由上式可得作业速度越低、刀片数和刀轴转速越大,则切土节距越小,碎土效果越好。根据农艺要求,设定切土节距 $S = 40 \text{ mm}$, $v_m = 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $n = 430 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,代入式(10)得刀片数 $Z = 2.79 \approx 3$,因此,在刀盘两侧对称安装碎土刀,每侧安装3把。

3.2.4 碎土刀结构 根据碎土深度及整机尺寸允许值对碎土刀进行结构设计,该结构采用L型,其竖向总长度为170 mm,折弯角度为 110° ,横向总长度即幅宽为70 mm,刀片宽度与厚度分别为45 mm和6 mm,具体如图11所示。为减小刀具入土冲击和磨损,提高切碎质量和刚度,选用65Mn钢进行磨刃口、锻压、钻孔、淬火和回火等处理,成型后刃口厚度为0.8 mm,刀片表面硬度为53 HRC,满足高强度高耐磨要求。

3.3 成垄部件

成垄部件总体结构如图12所示。

主要由梯形成垄罩、加强筋、连接板等组成。通过对10 mm钢板进行剪裁、折弯、焊接等工艺加工而成,为了保证成垄罩结构强度,在两侧焊接有三

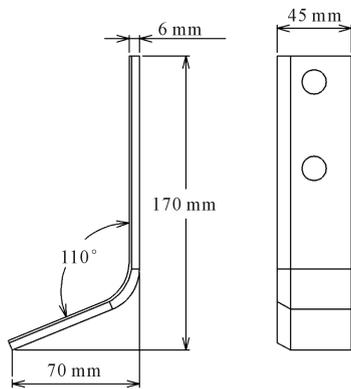
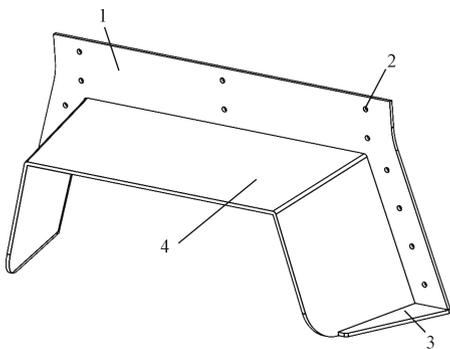


图11 碎土刀结构示意图

Fig.11 Schematic diagram of earth cutter structure



1. 连接板; 2. 螺栓孔; 3. 加强筋; 4. 梯形成垄罩

1. Connection plate; 2. Bolt hole;

3. Reinforcing rib; 4. Ladder type ridge cover.

图12 成垄部件结构示意图

Fig.12 Schematic diagram of ridge component structure

角形加强筋,整体通过螺栓与机架进行固定。根据垄形参数及与土壤作用过程,将成垄罩设计成前宽后窄、上窄下宽的梯形箱体结构,前端部梯形上边长900 mm,下边长1160 mm,高400 mm,后端部梯形上边长800 mm,下边长1000 mm,高300 mm,罩体长度为300 mm,为减少罩体后端部与土壤摩擦及影响成垄效果,在其底端进行半径60 mm的圆弧处理。成垄部件是起垄效果的重要因素,具有保证垄形整齐统一和防止土壤回落沟底的作用。成垄罩体的长度与机具前进速度、垄高有重要关系,土壤在旋耕起垄时从最高到最低点运动轨迹满足式^[23]:

$$\begin{cases} l = (\sqrt{v_h^2 + 4gh} - v_m)v_m^2/g \\ h = \frac{1}{2}gt^2 \\ v_h = gt \end{cases} \quad (11)$$

式中, l 为成垄罩最小长度(m); v_h 为土壤颗粒下降速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h 为土壤下降高度(m); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

其中机具前进速度 $v_m = 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垄高 $h = 280 \text{ mm}$,通过公式(11)计算得到成垄罩体最小长度 $l = 210 \text{ mm}$,本设计取值为300 mm,满足理论分析要求。

4 田间试验

4.1 试验材料与条件

为验证黏重土壤精旋起垄一体机的作业质量,于2020年9月在重庆市九龙坡区白市驿镇西南丘陵山区现代农业装备创新中心试验基地($106^\circ 20' \text{E}$, $29^\circ 19' \text{N}$,海拔300 m)进行了整机田间试验,如图13所示。试验地总面积为 0.53 hm^2 ,分为两个试验区,前茬作物分别为水稻和油菜,试验前进行了一道灭茬作业。试验地为黄壤土,0~15 cm土壤含水率平均为17.16%,土壤坚实度为845.93 kPa,田面较为平整,表层有0.5~3.5 cm粉碎秸秆覆盖,秸秆长约1.0~6.0 cm。选用久保田LD954K1-QS型拖拉机对该机进行挂接,总动力为70.8 kW,机具工作期间平均气温为 26.0°C ,作业前进行半小时高低转速空载测试,整机无异响、打齿、晃动等现象,运行平稳。作业时机具前进速度为 $0.6 \sim 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,样机田间作业过程如图13a所示。

4.2 试验指标与方法

针对西南丘陵山区黏重土壤特性,设计的精旋起垄一体机主要功能是疏松土壤、增强土壤通透性、破碎根土结合体、形成垄体。依据JB/T8401.2-2007《旋耕联合作业机械旋耕深松灭茬起垄机》和

JB/T10295-2014《深松整地联合作业机》标准要求^[24-25],选取耕作性能、起垄性能、土壤性质指标评价作业效果。其中耕作性能中土壤蓬松度测定方法为耕前在地表最高点以上取一水平基准线,并测量作业前后水平基准线至地表的距离,计算公式为:

$$p_t = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (12)$$

式中, p_t 为土壤蓬松度(%); d_1 为作业前水平基准线至地表的距离(mm); d_0 为作业后水平基准线至地表的距离(mm)。



(a)田间作业 Field work



(b)作业质量 Working quality

图 13 样机田间试验

Fig.13 Field test of prototype

地表平整度测定方法为耕后将某一行程分成 10 等分,测量各等点至水平基准线的距离,并以标准差表示;碎土率主要针对垄面而言,因此选取垄面 0.25 m² 面积内 10 cm 深的土块,以最长边小于 40 mm 土块质量占总质量百分比表示,计算公式为:

$$S_t = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \times 100\% \quad (13)$$

式中, S_t 为碎土率(%); m_1 为测区土壤总质量(g); m_0 为测区最长边大于 40 mm 土块质量(g)。

耕深稳定性测定方法为在垄面上每隔 2 m 为 1 个测点,共选取 10 个点,采用耕深尺测定旋耕深度,并以变异系数表示;植被覆盖率测定方法为作业前后在 1 m² 面积中紧贴地面剪下露出地表的植被,称其质量,计算公式为:

$$F_t = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\% \quad (14)$$

式中, F_t 为植被覆盖率(%); m_2 为作业前植被质量(g); m_3 为作业后植被质量(g)。

成垄性能测定随机选取 10 个点,直接测量垄体顶宽、高、沟面宽,并用变异系数表示垄顶宽稳定系数、垄高稳定系数、沟面宽稳定系数。土壤性质评价用环刀和烘干法测定作业前后土壤容重和

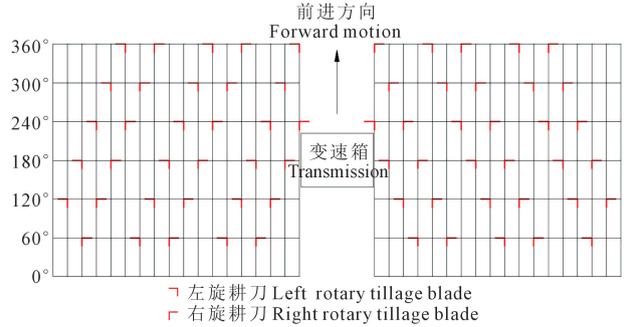


图 5 旋耕刀排布图

Fig.5 Arrangement of rotary blades

含水率。试验时,每个试验区长 50 m,两端各 10 m 为提速和减速区,中间 30 m 为数据采集区。

4.3 试验结果分析

4.3.1 成垄性能 精旋起垄一体机起垄性能如表 2 所示。前茬作物为油菜和水稻的垄顶宽稳定性系数平均值分别为 96.87% 和 95.64%,垄高稳定性系数平均值分别为 95.43% 和 91.24%,沟面宽稳定性系数平均值分别为 90.32% 和 87.86%,除沟面宽稳定性系数较低以外,其他各项成垄性能指标优良,主要是由于拖拉机在行进中轮胎具有一定滑移,造成沟面宽统一性较低。由于垄两侧受起垄犁堆压和黏重土壤影响,因此起垄后土壤回落量少,整体上垄型饱满、平整,无高低、宽窄垄现象,作业后起垄及耕作质量如图 13b 所示。

4.3.2 耕作性能 精旋起垄一体机耕作性能如表 3 所示。前茬作物为油菜和水稻的土壤蓬松度平均值分别为 22.39% 和 18.84%,满足行业标准应小于 40% 的要求,能有效疏松土壤和蓄水保墒;地表平整度平均值分别为 1.85 cm 和 2.27 cm,碎土率平均值分别为 93.35% 和 91.28%,对于黏重土壤而言,表层土壤越细,越有利于作物根系生长和降低土壤板结问题,田地越平整越可有效减少地表径流;

表2 精旋起垄一体机田间起垄性能

Table 2 Field ridging performance of well rotary-ridging machine

前茬作物 Preceding crop	行程 Route	C_w /%	C_h /%	C_g /%
油菜 Rapeseed	1	97.19	97.32	90.08
	2	95.39	94.62	92.37
	3	98.03	94.35	88.51
	平均值 Average	96.87	95.43	90.32
水稻 Paddy	1	97.14	89.87	84.19
	2	96.21	91.47	90.04
	3	93.57	92.38	89.35
	平均值 Average	95.64	91.24	87.86
行业标准 Industry standard		≥ 90	≥ 90	≥ 90

注: C_w 为垄顶宽稳定性系数; C_h 为垄高稳定性系数; C_g 为沟面宽稳定性系数。

Note: C_w represents stability coefficient of ridge top width; C_h represents stability coefficient of ridge height; C_g represents stability coefficient of groove width.

表3 精旋起垄一体机田间耕作性能

Table 3 Field tillage performance of well rotary-ridging machine

前茬作物 Preceding crop	行程 Route	土壤蓬松度 Looseness of soil/%	地表平整度 Surface flatness/cm	植被覆盖率 Vegetation coverage/%	碎土率 Broken rate of soil/%	耕深稳定性 Stability of tillage depth/%	纯工作效率 Purework efficiency /($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
油菜 Rapeseed	1	23.31	1.92	84.26	90.04	90.13	0.42
	2	22.32	1.84	85.34	95.34	87.10	
	3	21.54	1.78	91.29	94.67	85.69	
	平均值 Average	22.39	1.85	86.96	93.35	87.64	
水稻 Paddy	1	17.58	2.31	83.35	91.35	83.99	0.38
	2	19.62	2.15	82.29	92.14	80.24	
	3	19.31	2.35	85.37	90.35	86.51	
	平均值 Average	18.84	2.27	83.67	91.28	83.58	
行业标准 Industry standard		≤ 40	≤ 4	≥ 80	≥ 85	≥ 80	

表4 作业前后0~15 cm 土层土壤含水率和容重

Table 4 Soil moisture content and bulk density of 0~15 cm soil layer before and after operation

前茬作物 Preceding crop	土壤含水率/% Soil moisture content		土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) Soil bulk density	
	作业前 Pre-work	作业后 After work	作业前 Pre-work	作业后 After work
	油菜 Rapeseed	16.94±0.48	14.65±0.92	1.43±0.03
水稻 Paddy	17.38±0.64	15.82±0.73	1.52±0.05	1.34±0.03

13.52%和8.98%;同时作业前土壤容重分别为 $1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 作业后其值分别为 $1.19 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 分别降低了16.78%和11.84%, 分析其原因可能是精旋起垄一体机作业后对表层土壤扰动较大, 使其土壤细碎更易跑墒, 但对于黏重土壤水分和容重的降低, 更有助于土壤颗粒疏散, 提高土壤通透性。

5 结论

1) 针对西南黏重土壤稻田垄作种植模式要求, 研制了一款精旋起垄一体机, 一次实现旋耕、碎土、起垄等作业, 该机能较好解决黏重土壤碎土率和植

植被覆盖率平均值为86.96%和83.67%, 说明能够充分将杂草和秸秆翻入土壤中, 有利于提高土壤有机质和作物机械化播种; 耕深稳定性平均值为87.64%和83.58%, 纯工作效率分别为 $0.42 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.38 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 。综上, 该机在两种前茬作物条件下耕作性能稳定, 前茬作物水稻地的碎土率和植被覆盖率均低于油菜, 主要是由于水稻地块板结严重, 而且收获时为半喂入方式, 残留秸秆较多, 但整体上均满足行业标准要求, 而且有助于改良黏重土壤物理结构。

4.3.3 土壤含水率和容重 土壤含水率和容重测定结果如表4所示。作业前, 前茬作物为油菜和水稻的0~15 cm 土层土壤含水率分别为16.94%和17.38%; 作业后, 其值分别为14.65%和15.82%, 分别降低了

被覆盖率低、成垄效果差等作业难题。

2) 该机主要由深旋装置、碎土装置、成垄部件等组成, 设计时重点考虑各装置之间装配关系、结构及工作参数, 分析确定深旋和碎土装置轴心水平距离为340 cm, 高度差为120 cm, 转速分别为 260 、 $430 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 成垄部件长度为300 mm, 并建立了作业过程土壤断面模型和碎土刀运动轨迹。

3) 田间试验结果表明, 在前茬作物为水稻或油菜条件下, 垄宽、垄高、沟面宽稳定性系数平均值分别为96.26%、93.34%、89.09%, 地表平整度、碎土率、植被覆盖率分别为2.06 cm、92.32%、85.32%, 起垄及耕作性能均达到国家标准, 可满足稻田垄作农艺技术要求和待播作业质量; 作业后土壤容重和含水率分别降低了14.31%和11.25%, 对黏重土壤的土层结构和通透性有一定的改善作用。

参考文献:

- [1] 靳乐乐, 乔匀周, 董宝娣, 等. 起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1364-1374.
JIN L L, QIAO Y Z, DONG B D, et al. Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge-furrow cultivation with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agri-

- culture, 2019, 27(9): 1364-1374.
- [2] 马丽,李潮海,付景,等.垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J].生态学报,2011,31(23):156-165.
MA L, LI C H, FU J, et al. Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 156-165.
- [3] 鲁远源,王秋月,尹学伟,等.机械垄作旱直播水稻栽培技术[J].杂交水稻,2020,35(5):49-52.
LU Y Y, WANG Q Y, YIN X W, et al. Rice cultivation techniques of dry direct seeding by mechanical ridge tillage[J]. Hybrid Rice, 2020, 35(5): 49-52.
- [4] 李红宇,张巩亮,郑桂萍,等.寒地水稻垄作双深耕作栽培模式技术效果的评价[J].水土保持研究,2020,27(4):164-170.
LI H Y, ZHANG G L, ZHENG G P, et al. Evaluation on technical effect of double depth ridge cultivation mode of rice in cold region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 164-170.
- [5] JIA H L, MA C L, LI G Y, et al. Combined rototilling-stubble-breaking-planting machine[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 73-82.
- [6] 刘鹏霞,安世才,孟养荣,等.1MLQS-40/70 起垄全铺膜联合作业机性能优化试验[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):285-290.
LIU P X, AN S C, MENG Y R, et al. Optimal experiment of performance for the 1MLQS-40/70 combined machine as ridge forming and paving plastic mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 285-290.
- [7] 包攀峰,吴明亮,官春云,等.犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J].农业工程学报,2017,33(20):23-31.
BAO P F, WU M L, GUAN C Y, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 23-31.
- [8] 赵艳忠,王运兴,刘海涛,等.带状深松灭茬机灭茬部件设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(3):94-103.
ZHAO Y Z, WANG Y X, LIU H T, et al. Design and test of stubble-breaking components on strip subsoiling and stubble-breaking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 94-103.
- [9] 史增录,赵武云,马海军,等.全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机的研制[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):169-174.
SHI Z L, ZHAO W Y, MA H J, et al. Whole plastic-film double furrow sowing cultivation of the design and manufacture of ridge fertilization filming machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 169-174.
- [10] 郭丽君,毕世英,刘爱萍.垄上深松灭茬起垄机的设计与试验[J].农机化研究,2021,43(3):207-214.
GUO L J, BI S Y, LIU A P. Design and experiment of subsoiler-rotary-ridging machine on ridge[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 207-214.
- [11] LARSON D L, CLYMA H E. Electro-osmosis effectiveness in reducing tillage draft force and energy requirements[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(5): 1281-1288.
- [12] 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 K, HE J, LI H W, et al. Influence of working order on working quality and power consumption of subsoiling and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 52-60.
- [13] 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.
- [14] 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.
QIN K, DING W M, FANG Z C, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 7-16.
- [15] 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].农业机械学报,2019,50(2):28-39.
LIN J, ZHANG T J, CHEN B, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28-39.
- [16] 肖文芳.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[D].武汉:华中农业大学,2019.
XIAO W F. Design and experiment on seedbed equipment with Plough and rotary of rape planter[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [17] 赵冀,王维,张鹏,等.轮耕对冬春休闲旱地土壤结构及团聚体稳定性的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):52-58,115.
ZHAO J, WANG W, ZHANG P, et al. Effects of rotation tillage patterns on soil aggregates stability and soil structure of the dry land in winter and spring fallow period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 52-58, 115.
- [18] 罗俊,林兆里,阙友雄,等.不同平整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(6):824-836.
LUO J, LIN Z L, JUE Y X, et al. Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 824-836.
- [19] 王秋菊,刘峰,常本超,等.盐化草甸土春秋整地对土壤性状及水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018,(5):141-146.
WANG Q J, LIU F, CHANG B C, et al. Effect of tillage period on soil characteristic and rice yield in salinization meadow soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018,(5): 141-146.
- [20] 李俊伟,佟金,胡斌,等.不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J].农业工程学报,2019,35(6):130-140.
LI J W, TONG J, HU B, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 130-140.
- [21] 刘德江,龚艳,王果,等.旱塘瓜开沟施肥覆膜覆土复式作业机设计与试验[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):243-251.
LIU D J, GONG Y, WANG G, et al. Design and test of a compound machine for fertilization, mulching and soil covering in ridge-furrow planting of melon[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 243-251.
- [22] 庄维林.行间耕整机通用刀辊设计与试验[D].长春:吉林大学,2011.
ZHUANG W L. Design and experiment of universal blade rotor for inter-row rototilling machine[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [23] 曾山,汤海涛,罗锡文,等.同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(20):12-19.
ZENG S, TANG H T, LUO X W, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 12-19.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 8401.2-2007 旋耕联合作业机械 旋耕深松灭茬起垄机[S].北京:机械工业出版社,2007.
National Development and Reform Commission. JB/T 8401.2-2007 Rototill combine equipment-rototill scarifying-paring-ridging machine[S]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [25] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10295-2014 深松整地联合作业机[S].北京:机械工业出版社,2014.
Ministry of Industry and Information Technology. JB/T 10295-2014 Subsoiling and land preparation combined operation machine[S]. Beijing: China Machine Press, 2014.