

雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验

杜文斌¹ 杨春雷² 杨锦鹏² 张青松^{1,3} 余君² 廖庆喜^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030;

3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对我国雪茄烟叶种植苗床整理阶段工序繁琐、农艺要求高、工作量大、效率低且缺乏专用机具, 现有其他作物的苗床整理机具主要适用沙壤土的作业环境且多采用被动起垄, 在我国雪茄烟叶种植区域偏黏性土质工况下起垄效果差的问题, 结合雪茄烟叶根系生长特点与苗床农艺要求, 设计了雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机, 可实现旋耕、深施肥、起垄、铺膜和膜边覆土的一体化作业。根据起垄成形原理及垄形要求, 确定了旋耕集土作业参数, 对整形镇压辊进行了结构设计及力学分析, 阐述了苗床高度调节原理, 匹配了机具前进速度、旋耕集土起垄装置转速与整形镇压辊转速之间的速度关系, 并结合地膜破损条件和膜边覆土影响因素, 分析确定了压边轮和覆土圆盘的结构及工作参数。田间试验表明, 作业后垄体的平均垄高为 277.4 mm、垄基宽为 701.8 mm、垄距为 1 230.2 mm、垄沟宽为 514.4 mm, 垄高、垄基宽、垄距及垄沟宽的稳定性系数均大于 94%; 两种工况下的平均膜边覆土宽度分别为 71.7、75.6 mm, 稳定性系数分别为 88.87%、87.00%, 各项试验指标均满足雪茄烟叶种植要求。

关键词: 雪茄烟叶; 可调式; 苗床整备; 起垄铺膜覆土机

中图分类号: S222.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)01-0116-11

OSID:



Design and Experiment of Cigar Tobacco Adjustable Seed-plot
Ridging and Film Spreading Machine

DU Wenbin¹ YANG Chunlei² YANG Jinpeng² ZHANG Qingsong^{1,3} YU Jun² LIAO Qingxi^{1,3}

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

2. Tobacco Research Institute of Hubei Province, Wuhan 430030, China

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

Abstract: In view of the cumbersome procedures, high agronomic requirements, high workload, low efficiency and lack of special machines in the seed-plot preparation stage of cigar tobacco planting in China, the existing seed-plot preparation machines for other crops were mainly designed for sandy loam soil and mostly used passive ridging, which had poor ridging effect under clay soil conditions in the cigar tobacco growing areas of China. Combining the root growth characteristics of cigar tobacco with the agronomic requirements of the seed-plot, the cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine was designed, which can realize the integrated operation of rotary tillage, deep fertilization, ridging, film spreading and film edge mulching. According to the principle of ridging forming and ridging shape requirements, the operating parameters of rotary tillage were determined, the structural design and mechanical analysis of the shaping roller were made, the principle of seed-plot height adjustment was explained, the speed relationship between the speed of the machine, rotary tillage device and shaping roller was matched, and the structure and operating parameters of the edge pressing wheel and the mulching disc were analyzed and determined by combining the conditions of film breakage and the factors affecting the film edge mulching. The field experiment showed that the average ridge height, bottom width, ridge distance and furrow width were 277.4 mm, 701.8 mm, 1 230.2 mm and 514.4 mm, respectively, and the stability coefficients of ridge height, bottom width, ridge distance and furrow width were more than 94%; the average film edge mulching widths were 71.7 mm and 75.6 mm under two

收稿日期: 2022-03-19 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 湖北省农业科技创新行动项目(20180109)、中国烟草总公司重大专项(110202101059(XJ-08))和湖北省烟草公司科技项目(027Y2021-006)

作者简介: 杜文斌(1996—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: duwenbin0413@163.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

working conditions, and the stability coefficients were 88.87% and 87.00%. All the experimental indicators met the requirements of cigar tobacco growing.

Key words: cigar tobacco; adjustable; seed-plot preparation; ridging and film spreading machine

0 引言

雪茄烟叶主要分布于湖北、四川、海南等地。作为一种特殊的经济作物,其生产环节较多,需前期苗床整备,之后人工移栽。目前生产中雪茄烟叶的苗床整备作业专用农机具缺乏,以人工作业为主,主要包括画线施肥(在预计起垄位置上画线并沿线施肥)、旋耕碎土、沿线起垄、铺膜覆土等多道作业工序,其过程复杂,劳动强度大,作业效率低,且垄形不稳定、垄体易松垮倒塌、铺膜覆土不均匀。同时由于各地土壤环境不同,对垄体高度与垄体坚实度要求也存在较大的差异。人工起垄的局限性与垄体差异性要求制约了雪茄烟叶的产业发展,需要研制一种可实现联合作业的雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜装备。

国内外对苗床整备联合作业进行了大量研究,戴飞等^[1-3]针对中国西北旱地的全膜双垄沟播种植方式研制了横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机,可以一次性完成起垄、施肥、喷药、覆膜和膜上覆土带的纵向及横向铺设;林静等^[4]设计的 1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机可完成深松、灭茬、旋耕、培垄和镇压等多项联合作业,同时实现垄沟和垄台的互换;孙伟等^[5]研制的马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖覆土一体机采用跨越式膜上覆土装置将土壤铲起并越过覆膜机构实现膜上覆土作业,机组一趟作业形成中间一个小垄和两侧半个大垄;付乾坤等^[6]设计的玉米灭茬施肥起垄机采用复式起垄方式,实现灭茬和定向抛土,进一步通过覆土器和铧式培土器起垄作业,镇压辊垄顶镇压形成梯形垄;无锡悦田农业机械有限公司研制的 YTLM 系列起垄铺膜机起垄高度为 10~20 cm;美国 Kennoco 制造公司研制的草莓高垄耕整机械和高垄覆膜机械通过起垄塑性板被动挤压起垄,在壤土工况下效果良好;日本久保田农机公司研制的 RT-112 系列起垄覆膜机单垄作业,结构较为紧凑。目前,国内外对苗床整备联合作业机的研究主要针对土质为沙壤土的作业环境,垄高不可调且起垄方式多为被动起垄,对偏黏性土工况下的联合作业机具研究较少。

本文针对我国雪茄烟叶种植苗床整理阶段工序繁琐、农艺要求高、工作量大、效率低且专用机具缺乏,现有苗床整理机具在我国雪茄烟叶种植区域土质为偏黏性土工况下起垄作业效果差的问题,设计

一种集旋耕施肥、主动起垄、铺膜覆土等功能于一体的雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机,以满足我国雪茄烟叶产区对垄高的不同要求。

1 雪茄烟叶苗床整备农艺要求

雪茄烟叶根系发达,为满足根系的生长空间需求,种植中常采用起垄的作业方式来为其提供松软的土壤环境。根据农艺要求,垄形为拱形,以满足后期田间管理中的培土作业。

为获取适宜于雪茄烟叶生长的拱形垄尺寸,在人工起垄种植的雪茄烟叶产区中随机选取 10 株长势相同的成熟期雪茄烟叶,垂直于垄的方向挖出垄体断面,在断面上建立坐标系并对根系外轮廓进行坐标点采集,如图 1 所示。将采集到的坐标点进行外轮廓曲线拟合,得出雪茄烟叶根系上部外形轮廓近似于抛物线形。通过对根系测量发现,雪茄烟叶根系有 70%~80% 密集于地表下 300 mm 的土层内,密集宽度范围为 250~700 mm,如图 2 所示。



图 1 雪茄烟叶根系坐标点采集

Fig. 1 Cigar tobacco root coordinate point collection

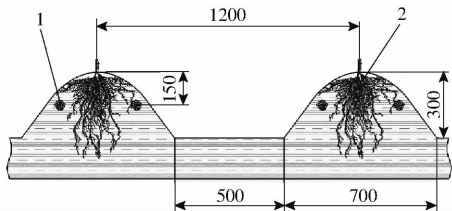


图 2 垄形及雪茄烟叶根系分布示意图

Fig. 2 Distribution schematic of ridge shape and cigar root

1. 肥料 2. 雪茄烟叶根系

垄高和垄宽对雪茄烟叶根系生长有较大影响,通过查阅相关文献及对我国雪茄烟叶产区垄体参数测量分析得出我国雪茄烟叶种植的适宜垄高在 300 mm 左右^[7-8],垄基宽度在 700 mm 左右。雪茄烟叶成熟期叶片长约 450 mm,宽约 350 mm,为避免生长期因叶片互相遮挡影响吸光均匀性,要求雪茄烟叶种植垄间距为 1 200 mm。由于我国不同雪茄烟

叶产区的降雨量、土壤类型及耕层深度差异较大,垄高及垄体坚实度常根据实际种植状况进行相应调整,如在降雨较多的丘陵地区,为防止雨水冲刷垄体^[9],会压低垄体,提高垄体坚实度;在耕层较浅的区域为满足起垄土量要求,会降低垄体高度,因此垄体高度需适时调整。

雪茄烟叶生长需要持续供应养分,在湖北省兴山和保康地区的试验结果表明,从烟叶长势和经济性来看,底肥双侧深施优于底肥环施和底肥单侧深施^[10]。根据雪茄烟叶根系分布及农艺要求,双侧肥料在垄体内的施入位置以雪茄烟叶茎秆为中心对称分布,施入位置距离垄顶约 150 mm,如图 2 所示。地膜覆盖有利于保温保墒,促进土壤中有机物释放与根系生长^[11-12]。根据农艺要求,地膜需均匀铺至垄上,膜边覆土紧实稳定,避免划膜、扯膜、漏覆等情况造成后期大风揭膜的问题。因此同时满足起垄、深施肥、覆膜等功能,且实现垄高可调,以满足雪茄烟叶不同产区对垄高的差异化要求是雪茄烟叶苗床机械化整备作业的根本要求。

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机主要由主机架、三点悬挂装置、刮土板、液压装置、旋耕集土起垄装置、深施肥装置、整形镇压装置、铺膜覆土装置等组成,结构如图 3 所示。其中,旋耕集土起垄装置由收土圆盘、旋耕刀组、起垄成形板组成;深施肥装置由肥箱、排肥管、电动排肥器及深施肥铲构成;整形镇压装置由整形镇压辊、可调式传动结构组成;铺膜覆土装置由划土铲、挂膜架、展膜辊、弧形压边轮、覆土圆盘等组成。该机主要结构参数如表 1 所示,其中旋耕集土起垄装置可满足起垄作业要求,整形镇

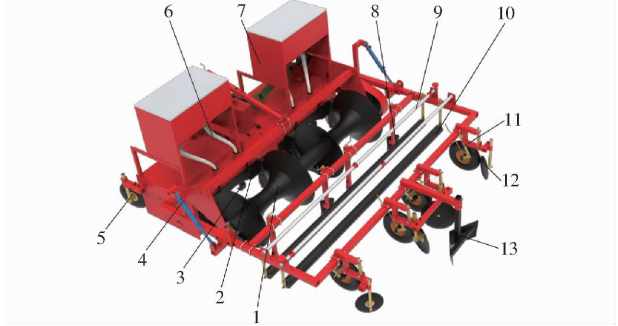


图 3 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机结构示意图
Fig.3 Structure schematic of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine

1. 整形镇压辊 2. 起垄成形板 3. 深施肥铲 4. 液压装置 5. 收土圆盘 6. 排肥管 7. 肥箱 8. 划土铲 9. 挂膜架 10. 展膜辊
11. 弧形压边轮 12. 覆土圆盘 13. 刮土板

压辊与垄形及垄体质量有密切联系,可调式传动结构是实现垄高可调的关键,铺膜覆土装置保证了垄上铺膜作业质量。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 920×2 950×1 400
整机质量/kg	1 088
配套功率/kW	≥60
作业速度/(km·h ⁻¹)	3
作业幅宽/mm	2 300
旋耕转速/(r·min ⁻¹)	355
整形镇压辊转速/(r·min ⁻¹)	180
旋耕深度/mm	115~150
膜边覆土宽度/mm	70~80
起垄高度/mm	270~330
垄基宽度/mm	700
垄沟宽度/mm	500
垄间距/mm	1 200

2.2 工作原理

雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机由轮式拖拉机的动力输出轴(PTO)提供动力,一次作业起 2 条垄。作业时,机具两侧的土壤在两个收土圆盘作用下向机具中间聚拢;旋耕刀切土并向后抛出;电动排肥器同步排肥,肥料经排肥管、深施肥铲条施于规定深度的土层中;耕后土壤在起垄成形板刮压作用下覆盖肥沟并形成初步垄体;拖拉机 PTO 动力通过可调式传动结构传递至整形镇压辊,主动旋转镇压初步垄体获得具有合适平整度和坚实度的垄体;两侧垄底位置上的土在划土铲作用下被推移至外侧,为后续膜边覆土做土量储备;挂膜架上的地膜被动扯出,经由展膜辊、弧形压边轮和覆土圆盘,实现地膜压边和膜边覆土,最终完成地膜垄上铺设,如图 4 所示。

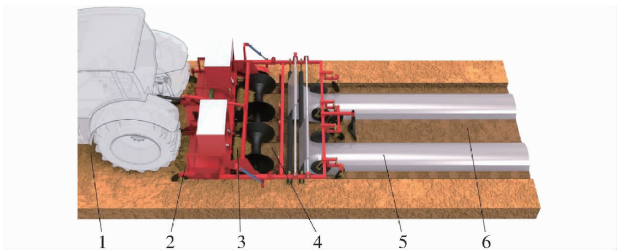


图 4 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机工作原理图
Fig.4 Working principle for cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine

1. 未耕地表 2. 已耕地表 3. 初步垄形 4. 镇压后垄形 5. 带膜垄体 6. 垄沟

3 关键装置设计与参数分析

3.1 旋耕集土起垄装置

旋耕集土起垄装置是可调式苗床起垄铺膜机的

核心工作部件,可为苗床整备提供所需的土量并形成初步垄体。根据雪茄烟叶拱形垄农艺要求,结合雪茄烟叶根系上部外形轮廓为抛物线形,设计垄体断面形状为直线-抛物线-直线形,如图 5 所示。图中 H_1 为镇压后垄体高度, H_2 为农艺中墒面高度(距离垄底 $2/3$ 垄高), a 为墒面宽度, b 为垄基宽度, S_1 为镇压后垄体断面下部梯形面积, S_2 为镇压后垄体断面上部抛物线区域面积。

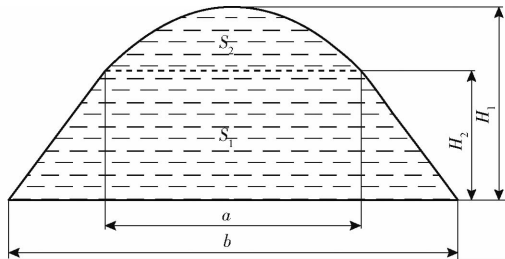


图 5 垄体断面示意图
Fig. 5 Schematic of ridge section

旋耕深度是影响垄高及垄形稳定性的主要因素,旋耕刀切土节距对碎土率及垄体质量有直接影响^[13],旋耕刀的排列方式不仅可以实现土壤定向抛撒,满足成垄需求,还能保持机组作业平衡。

3.1.1 旋耕集土作业参数分析

旋耕深度决定了取土量,由于旋耕作业对土壤进行了疏松,起垄成形板及整形镇压辊对土壤又进行了压实,结合作业前后土壤坚实度差异性,得出旋耕取土体积应小于等于镇压后垄体体积。在理论分析中以旋耕取土及镇压后垄体断面面积进行分析计算。由图 5 可得镇压后垄体断面面积 S 为

$$S = S_1 + S_2 \tag{1}$$

其中 $S_1 = \frac{(a + b)H_2}{2} \tag{2}$

$$S_2 = \frac{2a(H_1 - H_2)}{3} \tag{3}$$

旋耕取土断面面积为

$$S' = ch \tag{4}$$

式中 c ——旋耕幅宽,mm

h ——旋耕深度,mm

当旋耕取土量满足起垄土量要求时,镇压后垄体断面面积与旋耕取土断面面积关系为^[14-16]

$$2S = k_a k_b S' \tag{5}$$

式中 k_a ——土壤孔隙度相关系数

k_b ——土壤坚实度相关系数

将式(1)~(5)合并整理,可得旋耕深度 h 应满足

$$h = \frac{4aH_1 + (3b - a)H_2}{3k_a k_b c} \tag{6}$$

将镇压后垄体相关参数代入式(6)中,其中土

壤孔隙度系数 k_a 与旋耕作业前后土壤容重有关,常取 $1.2 \sim 1.3$ ^[17],土壤坚实度系数 k_b 常取 $0.8 \sim 1$ ^[18],根据农艺要求,取镇压后垄体高度 H_1 为 300 mm,墒面高度 H_2 为 200 mm,墒面宽度 a 为 400 mm,垄基宽度 b 为 700 mm,旋耕幅宽 c 为 2 300 mm,最终求得旋耕深度 h 为 115 ~ 150 mm。

机具作业时,旋耕刀运动为机具前进和自身旋转的复合运动,其轨迹为余摆线。同一回转平面内的旋耕刀切削土壤时入土点的距离为切土节距 l_s ^[19],其计算公式为

$$l_s = \frac{60v}{Zn} \tag{7}$$

式中 n ——刀轴转速,r/min

v ——机组前进速度,m/s

Z ——同一回转平面内刀片数量,把

农艺要求中,针对不同土壤类型与含水率的工况会选择不同的切土节距,如中等黏性土壤的麦田,切土节距在 100 mm 左右;耕后直播水稻或含水率超过 35% 的中等黏土稻田,切土节距为 60 ~ 90 mm^[20]。雪茄烟叶苗床整备对碎土率要求较高,取切土节距 l_s 为 50 ~ 70 mm。

当切土节距一定时,根据式(7)可得旋耕刀组转速与机具前进速度关系为

$$\frac{n}{v} = \frac{60}{l_s Z} \tag{8}$$

式(8)可为后续机具各部件的运行参数匹配提供参考。

3.1.2 旋耕刀片排列方式

旋耕集土起垄作业性能与旋耕刀片排列方式密切相关^[21]。本设计中旋耕刀组采用中间传动作业方式,分左右旋耕刀组,为避免装配干涉,左右旋耕刀组均采用双头螺旋排列。为保证土壤向垄中心线方向迁移,调整左右旋耕刀组两端各 2 排旋耕刀片旋向指向垄中心线方向,作业时可将两侧土壤侧抛至垄中心区域;中间 10 排旋耕刀片采用传统左右旋安装方式,将土壤向正后方抛撒,刀片排布图如图 6 所示。

左右旋耕刀组刀片数量均为 28 把,同一回转平面内两把刀夹角取 180° ,同一螺旋线轴向相邻两刀片夹角为 65° ,间距为 75 mm。为提高起垄作业性能,结合旋耕深度,参考 GB/T 5669—2017《旋耕机械 刀和刀座》,选用 II T245 型旋耕刀。

3.2 整形镇压辊设计

旋耕集土起垄装置作业后仅靠起垄成形板刮压耕后聚集的土壤形成的初步垄体稳定性较差,垄体土壤易流下且垄面不平整。整形镇压辊可对初步垄

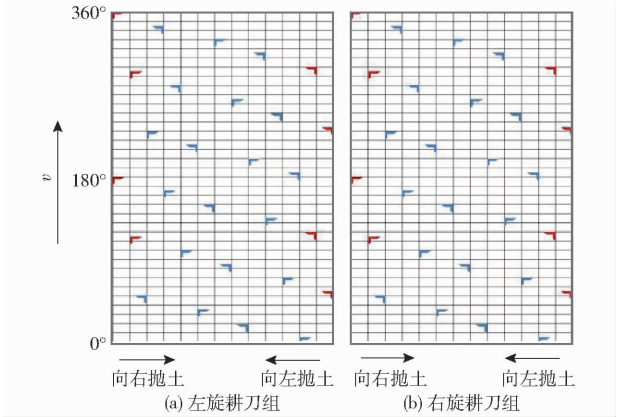


图 6 旋耕刀组刀片排布示意图

Fig.6 Structure rotary tillage blade set blade layout

体镇压整形,获得坚实度合理、垄形稳定、垄面平整的垄体。整形镇压辊的运动状态为随机具前进和自身旋转的合成运动,其整体结构为回转结构,由两端镇压圆盘和中间镇压弧形辊组成,如图 7a 所示。

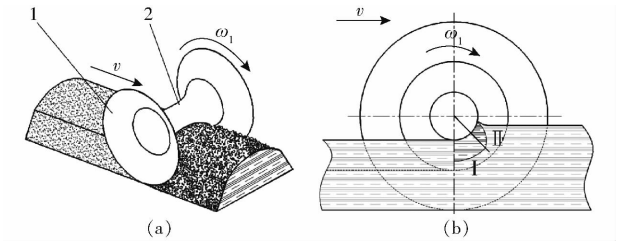


图 7 整形镇压辊作业示意图

Fig.7 Compacting ridging schematics of shaping roller

1. 镇压圆盘 2. 中间弧形镇压辊

整形镇压辊作业过程中不考虑滑动的情况下,其与土壤接触的位置可分为两个区域,如图 7b 所示。区域 I 的土壤颗粒在整形镇压辊的摩擦力和向下的压力作用下按照图中顺时针方向下移,进而引起垄体下陷;区域 II 的土壤颗粒由于靠近表层,所受整形镇压辊的压力较小,摩擦力相对较小,同时土壤颗粒间发生相互挤压,引起该区域的土壤颗粒按照逆时针方向移动,导致土壤向前拱起,当土壤颗粒拱起角度大于土壤休止角时开始下滑,此时整形镇压辊在向前滚动的同时将下滑的土壤颗粒镇压,以此形成较为稳定的垄形。在整形镇压过程中,垄体下陷量越大,区域 II 的范围越大^[22],拱土现象越严重,垄体稳定性变差,因此整形镇压辊作业前后高度差对垄体稳定性有重要影响,同时整形镇压辊的外形曲线决定了垄体形状,其回转半径也是影响整形镇压作业质量的重要因素。

3.2.1 外形曲线设计

整形镇压辊与垄体接触的曲线为整形镇压辊外形曲线,同时也是垄体断面曲线。根据上述垄体断面曲线形状,设计整形镇压辊外形曲线为直线-抛物线-直线三段式曲线,建立如图 8 所示的直角坐标系

xOz 。第 1 段 $A'B'$ 选取直线,对应左镇压圆盘;第 2 段 $B'C'D'$ 选取抛物线,对应中间镇压弧形辊;第 3 段 $D'E'$ 选取直线,对应右镇压圆盘。取各段端点坐标为 $A'(x_1, 0)$ 、 $B'(x_2, z_2)$ 、 $C'(0, z_3)$ 、 $D'(x_4, z_2)$ 、 $E'(x_5, 0)$ 。

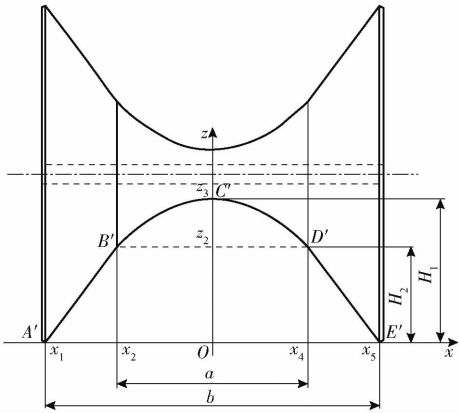


图 8 整形镇压辊曲线形状与参数

Fig.8 Curve shape and parameters of shaping roller

曲线方程为

$$z = \begin{cases} k_1x + c_1 & (A'B' \text{段}) \\ px^2 + q & (B'C'D' \text{段}) \\ k_2x + c_2 & (D'E' \text{段}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 k_1, c_1, p, q, k_2, c_2 ——常数

综合图 5 与图 8 可得

$$\begin{cases} b = x_5 - x_1 \\ a = x_4 - x_2 \\ H_1 = z_3 \\ H_2 = z_2 \end{cases} \quad (10)$$

联立方程(9)、(10)可得

$$\begin{cases} k_1 = \frac{2H_2}{b-a} \\ c_1 = c_2 = \frac{bH_2}{b-a} \\ p = \frac{4(H_2 - H_1)}{a^2} \\ q = H_1 \\ k_2 = \frac{2H_2}{a-b} \end{cases} \quad (11)$$

将雪茄烟叶苗床农艺参数代入式(11)中,求出常数 $k_1 = 1.33, c_1 = c_2 = 466.67, p = -2.5 \times 10^{-3}, q = 300, k_2 = -1.33$,得到整形镇压辊外形曲线方程。该方程可为整形镇压辊的加工制造提供理论基础,对于有特殊农艺要求的垄形可根据垄高、垄底宽等相关参数进行调整,以满足实际需求。

3.2.2 回转半径设计

整形镇压辊回转半径对整机质量、其所受的摩

擦力及驱动力矩有重要影响。为确定整形镇压辊回转半径,对其进行动力学分析。以整形镇压辊中心为坐标原点,建立空间直角坐标系,设定整形镇压辊匀速稳定作业,其简化模型如图 9 所示。整形镇压辊受力主要包括中间镇压弧形辊重力 G_1 、镇压圆盘重力 G_2 、垄体顶部对中间镇压弧形辊的接触摩擦力 F_{f1} 、垄体侧面对镇压圆盘的接触摩擦力 F_{f2} 、机具驱动作用力 F 、垄体顶部对中间镇压弧形辊的支持力 $\int p_{N1} dS_3$ 和垄体侧面对镇压圆盘的支持力 $\int p_{N2} dS_4$, 并产生相应力矩。其中为避免拱土严重,垄体过度压实,设定整形镇压辊作业前后高度差较小,此时垄体顶部对中间镇压弧形辊的支持力 $\int p_{N1} dS_3$ 和垄体侧面对镇压圆盘的支持力 $\int p_{N2} dS_4$ 主要为 z 轴方向上的支持力,如图 9a 所示。

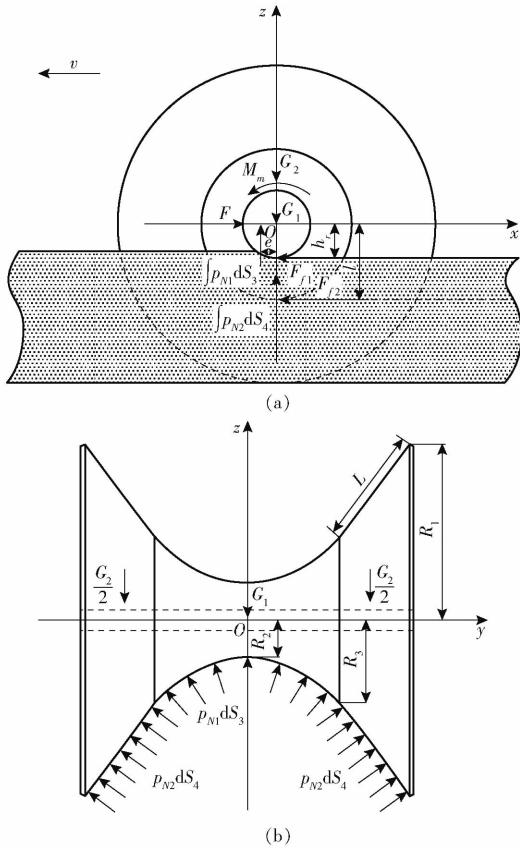


图 9 整形镇压作业受力分析

Fig. 9 Force analyses of compacting ridging assembly

简化力学模型,其平衡关系应满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F - F_{f1} - F_{f2} = 0 \\ \sum F_z = \int p_{N1} dS_3 + \int p_{N2} dS_4 - G_1 - G_2 = 0 \\ \sum M_{xOz} = M_m - h_r F_{f1} - l F_{f2} - e \int p_{N1} dS_3 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $F_{f1} = \mu \int p_{N1} dS_3$ $F_{f2} = \mu \int p_{N2} dS_4$
式中 F_x ——整形镇压辊沿 x 轴方向所受力, N
 F_z ——整形镇压辊沿 z 轴方向所受力, N
 M_{xOz} ——整形镇压辊在 xOz 平面所受力矩, N·m
 p_{N1} ——中间镇压弧形辊对垄体顶部压力, kPa
 p_{N2} ——镇压圆盘对垄体侧面压力, kPa
 S_3 ——中间镇压弧形辊与垄体顶部作用面积, mm²
 S_4 ——镇压圆盘与垄体侧面作用面积, mm²
 M_m ——整形镇压辊主动力矩, N·m
 h_r —— F_{f1} 到 x 轴距离, mm
 l —— F_{f2} 到 x 轴距离, mm
 e —— $\int p_{N1} dS_3$ 到 z 轴距离, mm
 μ ——整形镇压辊与土壤间摩擦因数

整形镇压辊的转动取决于主动力矩 M_m 。在镇压整形过程中,整形镇压辊应持续向前滚动,其所受支持力与摩擦力较为恒定,对其力矩进行分析,其关系应满足条件

$$M_m \geq e \int p_{N1} dS_3 + h_r F_{f1} + l F_{f2} \quad (13)$$

选取整形镇压辊极限摩擦力来求解系统主动力矩,假设

$$\begin{cases} \int p_{N1} dS_3 = G_1 \\ \int p_{N2} dS_4 = G_2 \\ h_{r\max} = R_3 \\ l_{\max} = R_1 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} G_1 = 2\pi\delta g\rho \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} z(y) \sqrt{1 + (z'(y))^2} dy \\ G_2 = 2\pi\delta g\rho [R_3^2 + (R_1 + R_3)L] \\ z(y) = \frac{16(R_3 - R_2)}{a^2} y^2 + R_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中 R_1 ——镇压圆盘最大回转半径, mm
 R_2 ——中间镇压弧形辊最小回转半径, mm
 R_3 ——中间镇压弧形辊最大回转半径, mm
 δ ——中间镇压弧形辊及镇压圆盘厚度, mm
 ρ ——整形镇压辊材料密度, kg/m³
 L ——镇压圆盘母线长度, mm
 g ——重力加速度, m/s²
 $z(y)$ ——中间镇压弧形辊在图 9b 坐标系下的曲线方程
 $z'(y)$ ——中间镇压弧形辊曲线方程的导数
将式(13)~(15)整理可得

$$M_m \geq 2(e + R_3\mu) \pi \delta g \rho \cdot$$

$$\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left[\frac{16(R_3 - R_2)}{a^2} y^2 + R_2 \right] \sqrt{1 + \left[\frac{32(R_3 - R_2)}{a^2} y \right]^2} dy + 2R_1\mu\pi\delta g\rho [R_3^2 + (R_1 + R_3)L] \quad (16)$$

由式(16)可知,整形镇压辊的主动动力矩与材料密度 ρ 、材料厚度 δ 、整形镇压辊-土壤间摩擦因数 μ 、整形镇压辊的最小回转半径 R_2 有关。由于整形镇压辊选用材料厚度 δ 为3 mm,材料密度 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,摩擦因数 μ 为0.4^[17],因此整形镇压辊的主动动力矩与最小回转半径 R_2 呈正相关关系。

整形镇压辊的回转半径不仅与主动动力矩有关系,还对垄体质量有重要影响,半径过小,与垄体接触时间过短,镇压不充分,垄体质量较差;半径过大,所需主动动力矩增大,且整形镇压辊结构及质量过大,导致整机重心后移。为保证整形镇压辊与垄体充分接触,结合整机结构尺寸,选取整形镇压辊最小回转半径 $R_2 = 80 \text{ mm}$, $e = 30 \text{ mm}$,根据其外形曲线参数可得 $R_3 = 180 \text{ mm}$, $R_1 = 380 \text{ mm}$, $L = 250 \text{ mm}$ 。

3.3 传动装置设计

3.3.1 可调式传动装置结构及垄高调节原理

为满足雪茄烟叶不同产区对垄高及垄体坚实度的不同要求,本文以苗床高度可调为目标,设计了可调式传动结构。该结构由包络式护土板、螺旋调节杆、调节横梁、传动系统、旋转轴和左右侧传动板构成。其中,包络式护土板通过螺栓固定在旋耕集土起垄装置的出土口位置处,螺旋调节杆一端通过销轴固定于三点悬挂上,另一端与调节横梁连接;调节横梁固定于两块侧传动板之间;左右侧传动板安装于主机架两侧并可绕旋转轴转动;传动系统由万向联轴器、中间传动轴和链条传动单元组成,通过将其固装于右侧传动板上,使传动系统可随侧传动板绕旋转轴同步转动。如图10a所示。

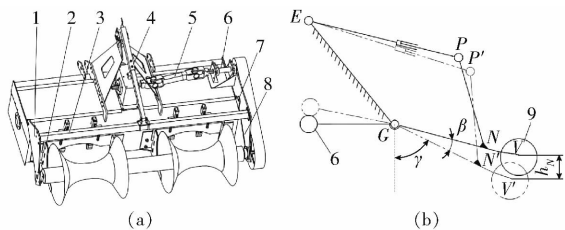


图10 整形镇压装置可调式传动装置结构与运动简图

Fig. 10 Structure and movement sketches of adjustable drive for shaping device

1. 左侧传动板 2. 包络式护土板 3. 调节横梁 4. 螺旋调节杆
5. 万向联轴器 6. 中间传动轴 7. 旋转轴 8. 右侧传动板
9. 整形镇压辊

整形镇压辊作业高度通过调节螺旋调节杆长

度,控制调节横梁与左右侧传动板绕旋转轴转动,安装于左右侧传动板之间的整形镇压辊同步以旋转轴为轴线进行转动,进而实现上下调节。将可调式传动结构进行简化分析,如图10b所示,实线为可调式传动结构原状态,双点画线为调节至最低点时的状态; EP 、 EP' 为调节前后螺旋调节杆; PN 、 $P'N'$ 为调节前后侧传动板; EG 为主机架; G 为旋转轴铰接点; β 为整形镇压辊调节前后对应圆心角; γ 为整形镇压辊调节至最低点时 GV' 与竖直方向间的夹角; h_N 为整形镇压辊调节高度。调节过程中,将三点悬挂装置及主机架简化为固定件,螺旋调节杆长度通过自身螺旋副来改变,但其仅在同一平面内实现伸缩运动,因此可将其简化为移动副。该系统中活动杆件数量为3,4个铰接点均为低副连接,通过分析计算机构整体自由度为1,满足机械运动要求。

整形镇压辊调节高度与旋转轴铰接点至整形镇压辊中心距离 l_{GV} 、整形镇压辊调节至最低点时 GV' 与竖直方向间夹角 γ 、整形镇压辊调节前后对应圆心角 β 有关,根据图10b关系可得,整形镇压辊调节高度 h_N 为

$$h_N = l_{GV}(\cos\gamma - \cos(\gamma + \beta)) \quad (17)$$

结合整机结构尺寸及可调式传动装置调节整形镇压辊作业高度范围,设计垄体最低垄高为270 mm,确定 $l_{GV} = 550 \text{ mm}$ 、 $\gamma = 62^\circ$ 、 $\beta = 7^\circ$,得整形镇压辊调节高度 h_N 为60 mm,故垄高范围为270 ~ 330 mm。

3.3.2 转速关系确定及传动比设计

机具前进速度、旋耕集土起垄作业转速和整形镇压辊转速的速度匹配是影响垄体质量的重要因素。镇压整形作业中,若整形镇压辊在向前滚动的同时出现相对滑动,则土壤也会被整形镇压辊向前拱动,导致整形后垄体凹凸不平,为保证垄形稳定,对整形镇压辊进行运动学分析。整形镇压辊要持续向前滚动而无相对滑动,应满足条件

$$\omega_1 R \geq v \quad (18)$$

式中 ω_1 ——整形镇压辊旋转角速度,rad/s

R ——整形镇压辊回转半径,mm

由于整形镇压辊具有不同回转半径,与垄体接触位置处的线速度不同,其中中间位置处对应的线速度最小。为保证整形镇压辊持续滚动,则中间位置处的线速度应不小于机具前进速度,将其半径 R_2 代入式(18)中,可得

$$\frac{n_1}{v} \geq \frac{60}{2\pi R_2} \quad (19)$$

式中 n_1 ——整形镇压辊转速,r/min

由式(19)可得,在整形镇压辊保持滚动的情况

下,整形镇压辊转速与机具前进速度成正比。由于雪茄烟叶苗床整备作业对垄体质量要求较高,需保证整形镇压辊与垄体充分接触,为满足该要求,同时考虑整形镇压辊转速范围,取整形镇压辊转速与机具前进速度的比值为

$$\frac{n_1}{v} = \frac{60}{\pi R_2} \tag{20}$$

为保证起垄质量,对旋耕刀组及整形镇压辊的转速进行匹配。由于 3.1.1 节中旋耕刀组转速与机具前进速度的比值为 $\frac{n}{v} = \frac{60}{l_s Z}$,而整形镇压辊转速与机具前进速度比值为 $\frac{n_1}{v} = \frac{60}{\pi R_2}$,根据上述关系,可建立整形镇压辊转速与旋耕刀组转速的比值为

$$\frac{n_1}{n} = \frac{l_s Z}{\pi R_2} \tag{21}$$

将相关数据代入式(21)中,可得整形镇压辊转速与旋耕刀组转速比约为 1:2。

雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机总体传动路线如图 11 所示。整机动力由拖拉机 PTO 输入,经万向联轴器与中央齿轮箱连接,通过锥齿轮变向分两条传动路线,一条传至中央齿轮箱下方,带动旋耕刀组转动,实现旋耕集土起垄作业;另外一条由中央齿轮箱侧面输出,通过万向联轴器传递至中间传动轴,再经链条传动单元传递至整形镇压辊进行镇压作业。

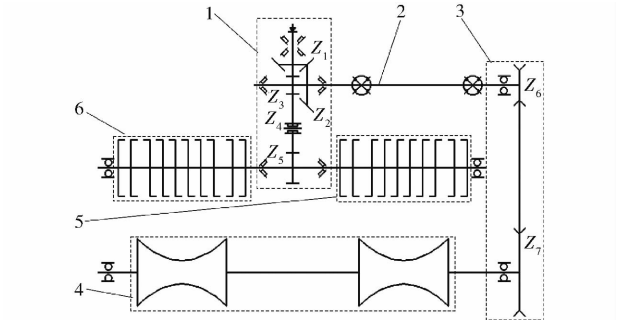


图 11 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机传动示意图
Fig. 11 Transmission scheme of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine

1. 中央齿轮箱 2. 万向联轴器 3. 链条传动单元 4. 整形镇压辊 5. 右旋耕刀组 6. 左旋耕刀组

动力输入端与旋耕刀组传动比为

$$i_1 = \frac{Z_2 Z_4 Z_5}{Z_1 Z_3 Z_4} \tag{22}$$

动力输入端与整形镇压辊传动比为

$$i_2 = \frac{Z_2 Z_7}{Z_1 Z_6} \tag{23}$$

整理式(22)和式(23),可得旋耕刀组与整形镇压辊作业转速比为

$$i_3 = \frac{Z_3 Z_7}{Z_5 Z_6} \tag{24}$$

式中 $Z_1 \sim Z_5$ ——中央齿轮箱各齿轮齿数
 $Z_6、Z_7$ ——链条传动单元中链轮齿数

由整形镇压辊与旋耕刀组转速匹配关系为 1:2 对传动比进行分析设计,结合中央齿轮箱标准要求,选配中央齿轮箱各齿轮齿数为 $Z_1 = 14、Z_2 = 24、Z_3 = 13、Z_4 = 35、Z_5 = 17$,链条传动单元中链轮齿数分别为 $Z_6 = 14、Z_7 = 36$ 。

3.4 铺膜覆土装置

地膜在挂膜架上被动扯出并在展膜辊作用下覆于垄体上,两边缘被弧形压边轮压至垄底位置,向两侧张紧;覆土圆盘被被动旋转作业,将垄沟中的土壤积聚,抬升再翻转至地膜边缘完成膜边覆土,其作业示意图如图 12 所示。

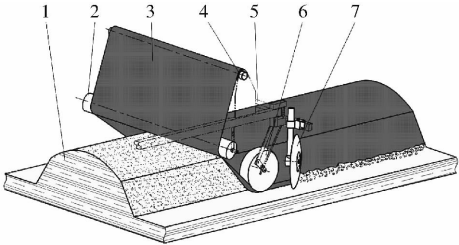


图 12 铺膜覆土装置作业示意图

Fig. 12 Diagram of operation of film mulching device

1. 垄体 2. 展膜辊 3. 地膜 4. 挂膜架 5. 机架 6. 弧形压边轮 7. 覆土圆盘

3.4.1 弧形压边轮设计

地膜面内刚度大,承受剪切形变容易引起破损,为避免压边作业中压边轮对地膜造成剪切形变,将压边轮设计为弧形压边轮,减小膜边 C 处的分布载荷,如图 13a 所示。

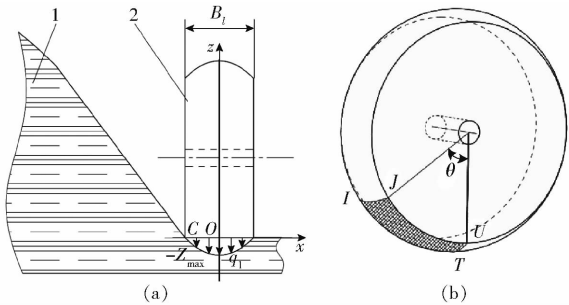


图 13 弧形压边轮

Fig. 13 Curved blank holder wheel

1. 带膜垄体 2. 弧形压边轮

弧形压边轮的作业效果由截面曲线形状与压力共同决定。将弧形压边轮截面曲线形状设计为抛物线形,如图 13a 所示,其曲线方程与最大下陷量 Z_{max} 、压边宽度 B_y 有关。结合雪茄烟叶种植农艺要求、垄形特点及地膜宽度,地膜的最大压边宽度 $B_y = 60 \text{ mm}$ 。压边轮宽度 B_l 应不小于地膜压边宽度

B_y , 取 $B_l = 60$ mm。由于弧形压边轮作用于耕后土壤, 土质较为松软, 取最大下陷量 $Z_{\max} = 10$ mm。以弧形压边轮截面弧线段两端点连线的中心为坐标原点建立直角坐标系, 其抛物线段方程为

$$f(x) = \frac{4Z_{\max}}{B_l^2}x^2 - Z_{\max} \quad (25)$$

将弧形压边轮参数 $B_l = 60$ mm、 $Z_{\max} = 10$ mm 代入式(25)中, 得弧形压边轮截面曲线方程为 $f(x) = \frac{1}{90}x^2 - 10$, 该方程可为后续膜边载荷计算提供参考。

3.4.2 弧形压边轮总载荷分析

通过积分计算可得弧形压边轮的总载荷 Q 为

$$Q = \frac{2}{3}q_1B_l \quad (26)$$

式中 q_1 ——弧形压边轮最大分布载荷, N/m

当弧形压边轮引起下陷量较小时, 其下陷量计算公式为^[23]

$$Z_{\max} = \frac{9Q}{5KB_l\sqrt{D}} \quad (27)$$

其中 $K = \alpha(1 + 0.27B_l)$

式中 D ——压边轮直径, cm

K ——土壤特性系数

α ——与土壤特性相关的系数

压边轮直径过小会导致压边不充分等问题, 其合理直径在 200 ~ 500 mm 中选取^[24]。结合整机结构尺寸与农艺要求, 在确保工作稳定性和作业性能前提下选取弧形压边轮直径 D 为 225 mm。耕后土壤特性相关系数 $\alpha = 1.01$, 将弧形压边轮各结构及工作参数代入式(27)得总载荷 $Q = 41.84$ N。

弧形压边轮与地膜的接触区域仅为弧形压边轮上的一段, 其接触情况如图 13b 所示。将其接触面的展开平面近似看作矩形, 面积 S_c 计算式为

$$S_c = l_{IJ}l_{IT} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} l_{IJ} = 2 \int_0^{\frac{B_l}{2}} \sqrt{1 + f'^2(x)} dx \\ l_{IT} = \frac{D}{2}\theta \\ \theta = \arccos\left(1 - \frac{2Z_{\max}}{D}\right) \end{cases} \quad (29)$$

式中 l_{IJ} ——展开面宽, cm

l_{IT} ——展开面长, cm

$f'(x)$ ——弧形压边轮截面曲线方程的导数

θ ——弧形压边轮与地膜接触区域对应接触角, rad

将式(29)代入式(28)可得

$$S_c = D \arccos\left(1 - \frac{2Z_{\max}}{D}\right) \int_0^{\frac{B_l}{2}} \sqrt{1 + f'^2(x)} dx \quad (30)$$

将弧形压边轮直径 $D = 225$ mm、最大下陷量 $Z_{\max} = 10$ mm、压边轮宽度 $B_l = 60$ mm 代入式(30)中, 计算可得弧形压边轮与地膜的接触面积为 $S_c = 34.64$ cm²。

保证地膜不破裂的条件为

$$Y \geq \frac{10Q}{S_c} \quad (31)$$

式中 Y ——地膜耐破度, kPa

通过计算, 弧形压边轮作用在地膜上的压力为 12.08 kPa, 远小于地膜的耐破度^[25-27]。

3.4.3 覆土圆盘设计

覆土圆盘在机具牵引作用下积聚垄沟土壤并完成土壤侧翻, 实现膜边覆土。覆土质量与圆盘偏角 φ 、圆盘倾角 ξ 、圆盘直径 D_y 有密切关系, 如图 14 所示。圆盘偏角 φ 是指覆土圆盘与前进方向之间的夹角, 圆盘偏角越大, 翻土、碎土能力越强, 但牵引阻力也就越大, 其值范围为 40° ~ 45°^[20]。结合前期划土铲将部分土壤刮至垄沟用作覆土土量储备, 覆土圆盘对垄沟土壤切土, 碎土要求质量不高, 选取覆土圆盘偏角为 $\varphi = 40^\circ$ 。圆盘倾角 ξ 是指覆土圆盘与铅垂面之间的夹角, 倾角越大, 越有利于土堡的窜动, 膜边覆土能力越强。其值范围为 15° ~ 25°, 由于垄沟土壤较为松软, 切土抬升所需阻力不大, 设计圆盘倾角为 $\xi = 15^\circ$ 。

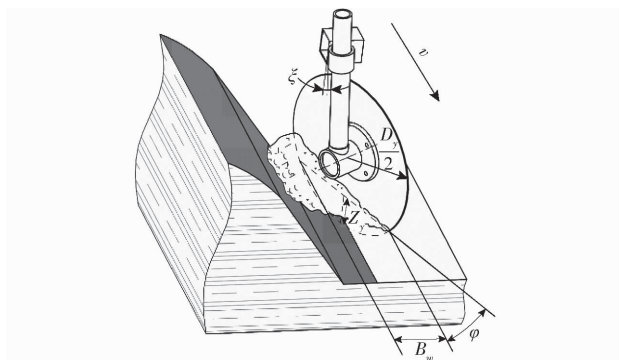


图 14 覆土圆盘工作示意图

Fig. 14 Schematic of structural angle of soil covered disc

覆土圆盘直径 D_y 与入土深度 Z_y 及膜边覆土宽度 B_m 有关。为保证膜边覆土质量, 防止因覆土不严造成大风揭膜的情况, 要求覆土圆盘的作业幅宽 B_w 不小于覆土宽度 B_m 。由几何关系可知, 覆土圆盘的作业幅宽为

$$B_w = 2 \sqrt{\left(\frac{D_y}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_y}{2} - \frac{Z_y}{\cos \xi}\right)^2} \sin \varphi \quad (32)$$

根据农艺及地膜宽度要求, 覆土宽度 $B_m =$

60 mm,本设计中为保证膜边覆土质量,将覆土圆盘作业幅宽 B_w 设计为 70 ~ 80 mm,入土深度 $Z_y = 15$ mm。代入式(32)中,可计算得出覆土圆盘直径 D_y 为 206 ~ 265 mm,根据覆土圆盘安装参数要求,取 $D_y = 250$ mm。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证可调式苗床起垄铺膜机作业性能,于 2021 年 5 月 25 日在湖北省丹江口市习家店镇五龙池村长城雪茄“醇甜香”品类原料基地(工况 1),2021 年 6 月 1 日在华中农业大学现代农业科学试验基地(工况 2)开展雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机田间试验。其中工况 1 试验田块常年种植雪茄烟叶,工况 2 试验田块常年种植冬油菜,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	平均土壤含水率/%	平均土壤容重/(g·cm ⁻³)	平均土壤坚实度/kPa
1	18.28	1.33	1 452.78
2	23.42	1.31	1 817.03

根据湖北省丹江口雪茄烟叶产区农艺指导要求,工况 1 的起垄高度需调整至 280 mm,由于工况 2 与工况 1 土壤墒情及气候等条件较为一致,设定两种工况下的田间试验起垄高度为 280 mm。试验前对可调式苗床起垄铺膜机进行调试,在肥箱中加入固体颗粒复合肥,在挂膜架上安装地膜(膜宽 1.1 m,厚度 0.01 mm),并牵拉至展膜辊下,贴地展平覆土。可调式苗床起垄铺膜机配套动力分别为常发农装 CFF1204 型和东方红 954 型轮式拖拉机,通过调节拖拉机挡位和手油门位置,使拖拉机速度维持在 3.0 km/h。

试验按照 YC/T 569—2018《烟草田间作业机械选型测试规程》标准要求,机组直线行走 40 m,如图 15 所示,取中间行程 30 m 作为稳定测量区,沿测区一侧选取测点并测量记录相关试验数据。试验指标有:垄高、垄基宽、垄距、垄沟宽及膜边覆土宽度,



图 15 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机田间试验效果

Fig. 15 Field experimental results of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine

同时考察可调式苗床起垄铺膜机旋耕集土起垄装置、深施肥装置和铺膜覆土装置的工作运转情况。

4.2 试验结果与分析

雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机田间试验结果如表 3 所示。试验结果表明:旋耕集土起垄装置与整形镇压装置配合作业形成的垄体平均垄高为 277.4 mm、垄基宽为 701.8 mm、垄距为 1 230.2 mm、垄沟宽为 514.4 mm,各参数的稳定性系数均高于 94%;膜边覆土稳定均匀,两种工况下膜边覆土宽度分别为 71.7、75.6 mm,稳定性系数分别为 88.87%、87.00%。试验指标均满足国家及行业相关标准要求。该机具实现了一次作业完成多道工序,同时还满足了雪茄烟叶产区对不同起垄高度的要求,其作业形成的苗床可满足雪茄烟叶种植。30 d 的雪茄烟叶苗期及成熟期长势如图 16 所示。

表 3 田间试验结果

Tab.3 Result of field experiment

参数		工况 1	工况 2
垄高	均值/mm	270.8	284.0
	稳定性系数/%	94.59	95.15
垄基宽	均值/mm	702.5	701.0
	稳定性系数/%	97.23	98.04
垄距	均值/mm	1 237.0	1 223.3
	稳定性系数/%	98.21	99.18
垄沟宽	均值/mm	513.1	515.6
	稳定性系数/%	96.83	98.89
膜边覆土宽度	均值/mm	71.7	75.6
	稳定性系数/%	88.87	87.00



图 16 不同时期雪茄烟叶长势

Fig. 16 Cigar tobacco growth diagrams at different periods

试验过程中发现,当机具沿直线匀速稳定前进时,样机各关键装置性能稳定,运行平稳。当土壤含水率较大时,覆土圆盘因粘土较多,翻土覆膜能力降低,这也是导致膜边覆土稳定性相对较低的主要因素之一。

5 结论

(1)在融合雪茄烟叶苗床整备工艺流程及农艺要求的基础上,研制了雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机。整机由旋耕集土起垄装置、深施肥装置、铺膜覆土装置等组成,可实现旋耕、深施肥、起垄、铺膜及

膜边覆土的一体化作业,同时还满足雪茄烟叶产区对起垄高度及垄体坚实度的差异性要求。

(2)根据作业要求,计算得出了机具耕深为115~160 mm,分析了雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机旋耕切土节距,确定了旋耕刀的排布方式;针对垄形要求,设计整形镇压辊外形曲线为“直线-抛物线-直线”形,并通过力学分析确定了整形镇压辊回转半径;为满足雪茄烟叶产区对垄高及垄体坚实度可调的要求,提出了可调式传动结构,阐述了调节原理,匹配了机具前进速度、旋耕集土起垄作业转速及整形镇压辊转速间的关系,并进一步分析设计了传动系统及传动比;通过对地膜破裂影响因素的分析,确

定了弧形压边轮直径为225 mm,宽度为60 mm,结合膜边覆土影响因素的研究,确定了覆土圆盘偏角为40°、圆盘倾角为15°、圆盘直径为250 mm。

(3)田间试验表明,雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机的旋耕集土起垄装置与整形镇压装置配合作业形成的垄体平均垄高为277.4 mm、垄基宽为701.8 mm、垄距为1230.2 mm、垄沟宽为514.4 mm,各参数的稳定性系数均高于94%;膜边覆土稳定均匀,两种工况下的平均膜边覆土宽度分别为71.7、75.6 mm,稳定性系数分别为88.87%、87.00%。试验指标均满足国家及行业相关标准要求,苗床质量达到雪茄烟叶种植要求。

参 考 文 献

- [1] 戴飞,赵武云,张锋伟,等.西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(5):1-16.
DAI Fei,ZHAO Wuyun,ZHANG Fengwei,et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):1-16. (in Chinese)
- [2] 戴飞,赵武云,史瑞杰,等.横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(6):130-139.
DAI Fei,ZHAO Wuyun,SHI Ruijie,et al. Design and experiment of operation machine for filming and girdle covering on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):130-139. (in Chinese)
- [3] 戴飞,张仕林,宋学锋,等.全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(5):108-117.
DAI Fei,ZHANG Shilin,SONG Xuefeng,et al. Design and test of combined operation machine for double width filming and covering soil on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):108-117. (in Chinese)
- [4] 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 Jing,ZHANG Tongjia,CHEN Bin,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. (in Chinese)
- [5] 孙伟,刘小龙,张华,等.马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J].农业工程学报,2017,33(20):14-22.
SUN Wei,LIU Xiaolong,ZHANG Hua,et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing,ridging,complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(20):14-22. (in Chinese)
- [6] 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等.玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(4):9-16.
FU Qiankun,JIAN Shichun,JIA Honglei,et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(4):9-16. (in Chinese)
- [7] 中国农业科学院烟草研究所.中国烟草栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,2005.
- [8] 胡裕森.不同起垄方式及垄高对烤烟生长和产质量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2009.
HU Yusen. Effects of different ridging and ridge height on growth,yield and quality of flue-cured tobacco[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2009. (in Chinese)
- [9] WANG L,ZHENG F,ZHANG X J,et al. Discrimination of soil losses between ridge and furrow in longitudinal ridge-tillage under simulated upslope inflow and rainfall[J]. Soil and Tillage Research,2020,198:104541.
- [10] 陈江华,刘建利,李志宏,等.中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 廖庆喜,王迪,姚露,等.油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):62-72.
LIAO Qingxi,WANG Di,YAO Lu,et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):62-72. (in Chinese)
- [12] 王彦亭,王树声,刘好宝.中国烟草地膜覆盖栽培技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2005.
- [13] 贾洪雷.东北垄作蓄水保墒耕作技术及其配套的联合少耕机具研究[D].长春:吉林大学,2005.
JIA Honglei. Study on ridge cultivation and matching combined minimum tillage implements for soil water storage and preservation in northeastern China[D]. Changchun:Jilin University,2005. (in Chinese)
- [14] 熊梓沁,荆永锋,贺非,等.粉垄深度对稻作烟区土壤理化特性及作物周年产量的影响[J].中国烟草学报,2021,27(3):46-55.
XIONG Ziqin,JING Yongfeng,HE Fei,et al. Effect of ridge depth on soil physicochemical and annual crop yield in rice growing tobacco area[J]. Acta Tabacaria Sinica,2021,27(3):46-55. (in Chinese)

[26] BOGARDI J J, FEKETE B M, VOROSMARTY C J. Planetary boundaries revisited: a view through the ‘water lens’[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 581–589.

[27] 张玲玲,车力,王宗志,等. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究[J]. *水利水电技术*, 2021, 52(12): 47–59.

ZHANG Lingling, CHE Li, WANG Zongzhi, et al. Study on evolution and driving factors of relationship between water pollution and economic decoupling in Yangtze River Economic Zone[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2021, 52(12): 47–59. (in Chinese)

[28] 阮仁良. 上海市水资源和水环境的可持续发展[J]. *水资源保护*, 2003, 19(1): 21–24.

RUAN Renliang. Sustainable development of water resources and water environment in Shanghai City[J]. *Water Resources Protection*, 2003, 19(1): 21–24. (in Chinese)

[29] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 22–27.

WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 22–27. (in Chinese)

[30] 王玉宝,刘显,史利洁,等. 西北地区水资源与粮食安全可持续发展研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(5): 38–44.

WANG Yubao, LIU Xian, SHI Lijie, et al. Sustainable development of water resources and food security in Northwest China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 38–44. (in Chinese)

[31] 张家欣,邓铭江,李鹏,等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. *中国工程科学*, 2022,24(1): 131–140.

ZHANG Jiaxin, DENG Mingjiang, LI Peng,et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in Northwest China from the perspective of virtual water flow[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022,24(1):131–140. (in Chinese)

(上接第 126 页)

[15] 罗锡文,李就好,朱余清,等. 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[J]. *农业机械学报*,2006,37(12):62–66.

LUO Xiwen,LI Jiuhao,ZHU Yuqing,et al. Effect of tillage methods on soil physical properties and moisture content of latosol [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2006,37(12):62–66. (in Chinese)

[16] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2010.

[17] 吕金庆,刘齐卉,杨德秋,等. 砂壤土条件下马铃薯中耕机关键部件设计与试验[J]. *农业机械学报*,2021,52(8):27–39.

LÜ Jinqing,LIU Qihui,YANG Deqiu,et al. Design and test of key components of ploughshare potato field cultivator in sandy loam[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(8):27–39. (in Chinese)

[18] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋镇压驳岸型种床起垄装置研究[J]. *农业机械学报*,2021,52(11): 40–48,77.

LIU Hai,ZHANG Qingsong,LIAO Yitao,et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis* [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021, 52(11):40–48,77. (in Chinese)

[19] 孙文峰,付天鹏,何跃,等. 水田带状复式整地机关键部件设计与试验[J]. *农业机械学报*,2022,53(1):50–62.

SUN Wenfeng,FU Tianpeng,HE Yue,et al. Design and test on key components of strip compound ground preparation machine in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2022,53(1):50–62. (in Chinese)

[20] 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.

[21] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣垄装置设计与试验[J]. *农业机械学报*,2020,51(6):38–46.

WEI Guoliang,ZHANG Qingsong,LIU Lichao,et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(6):38–46. (in Chinese)

[22] 徐源. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计及其防粘技术研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.

XU Yuan. Three-directional adjustable V-type soil-covered roller design and research on anti-sticky technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2018. (in Chinese)

[23] 贾洪雷,王文君,庄健,等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J]. *农业机械学报*,2015,46(6):28–34,83.

JIA Honglei,WANG Wenjun,ZHUANG Jian,et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(6):28–34,83. (in Chinese)

[24] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 丘陵地区双向仿形镇压装置设计与试验[J]. *农业机械学报*,2017,48(4):82–89.

ZHAO Shuhong,LIU Hongjun,TAN Hewen,et al. Design and experiment of bidirectional profiling press device for hilly area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(4):82–89. (in Chinese)

[25] 明向兰,陈海涛,魏志鹏. 低定量环保型水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. *农业工程学报*,2019,35(19):259–266.

MING Xianglan, CHEN Haitao, WEI Zhipeng. Optimization of technical parameters for making light-basis-weight and environment-friendly rice straw fiber film[J]. *Transactions of the CSAE*,2019,35(19):259–266. (in Chinese)

[26] 张子浩. RGO-6 型水稻插秧机秸秆纤维地膜敷设装置设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.

ZHANG Zihao. Design of straw fiber mulching device on the RGO-6 type rice transplanter[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2014. (in Chinese)

[27] GB 13735—2017 聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜[S]. 2017.