

小麦秸秆纤维地膜垄上敷设装置设计与试验

陈海涛 窦玉宽 王 宇 侯守印 冯斌杰 祝祎璠

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对利用现有塑料地膜垄上敷设装置铺设小麦秸秆纤维地膜时易出现地膜断裂和膜边破损等问题,设计了一种小麦秸秆纤维地膜垄上敷设装置。对小麦秸秆纤维地膜覆膜特性进行分析,建立了含有修正系数的垄上覆膜数学模型,探明了地膜产生断裂的主要影响因素;对关键部件进行设计和分析,确定了侧导向辊、压边覆土镇压装置的关键结构及参数范围;采用三因素三水平正交试验法,以展膜辊与压边轮的距离、侧导向辊倾角、工作速度为试验因素,以采光面展平度、采光面机械破损程度为试验指标,进行了参数优化试验和验证试验。结果表明:当展膜辊与压边轮距离 120 cm、侧导向辊倾角 30°、作业速度 3.6 km/h 时,采光面展平度 97.4%、采光面机械破损程度 12.6 mm/m²,设计的小麦秸秆纤维地膜敷设装置满足烟草栽培垄上覆膜机械化作业和农艺要求。

关键词: 秸秆纤维地膜; 烟草; 垄上覆膜; 正交试验

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0117-10 OSID: 

Design and Experiment of Mulching Device on Ridge with Wheat Straw Fiber Film Cultivation

CHEN Haitao DOU Yukuan WANG Yu HOU Shouyin FENG Binjie ZHU Yifan
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Focusing on the problems of tearing and folding, when mulching straw fiber film for tobacco through using plastic-film mulching machines on ridge, a tobacco mulching device on the ridge with wheat straw fiber film cultivation was designed. The mulching straw fiber film process was analyzed to establish the mathematical model of mulching straw fiber film on the ridge with correction coefficient and the main factors affecting tearing of straw fiber film was proposed, when mulching straw fiber film. The structural parameter range of the key components was analyzed and confirmed and the structural parameter ranges were got, aiming at the guide roller of side of film and the device pressing side of film and mulching and pressing soil on the side of film etc. Three factors three levels orthogonal test was used, the distance between the roller of flattening film and the roller pressing side of film, the inclination angle of the guide roller of side of film and working speed were selected as test factors. The outspread degree and rate split by film-covering drill of light-struck film were taken as evaluation indexes. The results showed that the working speed and the distance between the roller of flattening film and the roller pressing side of film had an significant effect on rate split by film-covering drill of light-struck film ($0.01 < P < 0.05$). The effect of the inclination angle of the guide roller of side of film on the outspread degree was extremely significant ($P < 0.01$). The results of verification test were as follows: the working speed was 3.6 km/s, the distance between the roller of flattening film and the roller pressing side of film came to be 120 cm, the inclination angle of guide roller of side of film reached 30°, such outspread degree was 97.4%, and rate split by film-covering drill of light-struck film was 12.6 mm/m². The device mulching wheat straw fiber film can achieve agricultural need and mechanization of film mulching machine on the ridge for tobacco cultivation.

Key words: straw fiber film; tobacco; mulching film on ridge; orthogonal test

收稿日期: 2021-02-25 修回日期: 2021-03-24
基金项目: 黑龙江省自然科学基金面上项目(E2018008)、山东省烟草专卖局(公司)2018年面上科技项目(2018371300270157)、黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSC-T-2018148)和东北农业大学“青年才俊”项目(17QC33)
作者简介: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及生物质材料研究, E-mail: htchen@neau.edu.cn

0 引言

覆膜栽培技术具有提高地温、保水保肥、增产增值的效果^[1-3],已成为烟草等作物的首选栽培模式。近年来,随着覆膜技术的推广和覆膜范围的扩大,塑料地膜的用量和使用面积不断增加,虽然提高了农业经济效益,但塑料地膜残留量的逐年累积^[4-5],导致作物产量降低和土地资源污染等一系列问题^[6-9]。秸秆纤维地膜无污染、无残留、无需回收,在作物生长期可完全降解,并具有抑草效果^[10-12],已成为未来重要发展方向。秸秆纤维地膜的力学特性不同于传统塑料地膜,使用现有覆膜装备进行敷设,容易导致秸秆纤维地膜断裂,覆膜质量较差。为提高作业效率、降低劳动强度、促进农业可持续发展,设计一种适用于秸秆纤维地膜的垄上覆膜机械很有必要。

为实现不同类型地膜的覆膜机械化作业,国内外学者对覆膜机械进行大量研究。在塑料地膜敷设装备方面,针对不同的覆膜栽培作物,设计了可实现起垄、覆膜、膜上播种、膜上移栽等联合作业装备^[13-15]。在可降解地膜敷设装备方面,三菱株式会社^[16]研制的 MKP610 型纸膜覆盖插秧机可实现地膜敷设、插秧、断面功能;张子浩^[17]设计了一种水稻插秧机秸秆纤维地膜敷设装置,实现了水田覆膜和插秧的同步作业;任文涛等^[18]设计了一种水稻纸膜敷设装置,可对地膜进行展平和镇压。塑料地膜力学性能优于秸秆纤维地膜,在采用塑料地膜覆膜机铺设秸秆纤维地膜时,会增加秸秆纤维地膜膜边的机械破损度,导致地膜沿膜边撕裂,降低了覆膜效率。目前,对可降解地膜敷设装备的研究主要针对水田作业环境,关于旱作秸秆纤维地膜垄上敷设装置的相关研究较少。

本文设计一种秸秆纤维地膜垄上敷设装置,建立垄上覆膜数学模型,考虑地膜变形量对覆膜的影

响,通过理论分析确定关键部件结构及参数范围,通过正交试验设计得出较优参数组合,并进行试验验证,以期解决秸秆纤维地膜断裂和膜边破损问题。

1 烟草覆膜栽培要求及覆膜特性

1.1 烟草垄形与覆膜要求

烟草垄形具体参数如图 1 所示^[19]。垄高 H 为 25 ~ 30 cm,垄底宽 J 为 80 ~ 90 cm,垄顶宽 I 为 30 cm,垄距 W 为 110 cm。

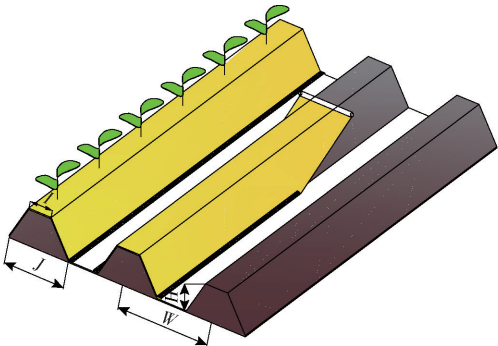


图 1 烟草垄形结构简图

Fig. 1 Ridge ship of structure diagram of tobacco

地膜选用东北农业大学研制的小麦秸秆纤维地膜(简称秸秆纤维地膜),垄形尺寸决定地膜宽度 L_1 为 120 cm。根据覆膜农艺要求,地膜需要均匀铺到垄上,不能有漏覆、断裂等现象。机械化覆膜要平整、严实,秸秆纤维地膜机械破损程度和展平度达到铺膜穴播机作业质量标准。

1.2 覆膜特性

地膜物理特性决定了覆膜装置的设计思路并提供了设计依据。按照 GB/T 24328.3—2009 利用抗张试验仪测定秸秆纤维地膜断裂伸长率及抗张强度;按照 GB/T 1539—2007 利用纸张耐破度测定仪测定秸秆纤维地膜的耐破度;根据文献^[17, 20]确定塑料地膜物理特性参数。秸秆纤维地膜和塑料地膜物理特性参数如表 1 所示。

表 1 地膜物理特性参数

Tab. 1 Mechanical indexes of straw fiber film and plastic-film

类别	厚度/ μm	纵向断裂伸长	横向断裂伸长	耐破度/ kPa	纵向抗张强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	横向抗张强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
		率/%	率/%			
秸秆纤维地膜	10	2.42	3.46	110	2.23	1.58
塑料地膜	8 ~ 10	≥ 200	≥ 200		21	21

根据文献^[21],抗张能量吸收值(Tensile energy absorption, TEA)是负载-伸长曲线的积分,随抗张强度和断裂应变增加而增大,TEA 越大,越利于垄上覆膜。由表 1 可知,塑料地膜为塑性材料,塑料地膜 TEA 远大于秸秆纤维地膜 TEA 且塑料地膜具有屈

服台阶^[22],进行垄上覆膜时塑料地膜在受到不同方向的拉力作用下,会增加自身伸长量使能量消散而不断裂。秸秆纤维地膜属于脆性材料,表现为各向异性。秸秆纤维地膜的纵向断裂伸长率小于横向断裂伸长率,导致在覆膜时主要出现纵向脆性断裂。

已知秸秆纤维地膜抗张强度为定值(负载最大值不变),为避免垄上覆膜时秸秆纤维地膜出现断裂,应增加秸秆纤维地膜变形量,以此增加秸秆纤维地膜垄上覆膜所需 TEA。因此,需研究覆膜栽培作物的垄形尺寸和地膜宽度对秸秆纤维地膜变形量的影响。

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

烟草覆膜机主要由悬挂架、机架、挂膜机构、展膜辊、侧导向辊、压边覆土镇压机构、限深轮组成。悬挂架一端与拖拉机三点悬挂,另一端与机架固连,从左向右展膜辊、侧导向辊、压边覆土镇压装置、限深轮依次挂接在机架上,与机架 U 型螺栓连接,挂膜机构安装在展膜辊和侧导向辊之间与机架固连,秸秆纤维地膜安装到挂膜机构上。整体结构如图 2 所示。

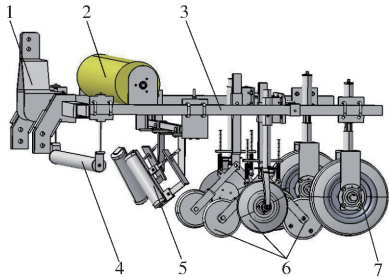


图2 覆膜机三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of film mulching machine

1. 悬挂架 2. 挂膜机构 3. 机架 4. 展膜辊 5. 侧导向辊
6. 压边覆土镇压机构 7. 限深轮

2.2 工作原理

拖拉机匀速平稳前进,秸秆纤维地膜从挂膜机构伸出;经展膜辊筒将秸秆纤维地膜压向垄顶;由侧导向辊筒将秸秆纤维地膜两侧导向垄沟并与垄侧面贴合;经压边轮、覆土盘、镇压轮对垄沟地膜进行压边、覆土、镇压,实现秸秆纤维地膜垄上敷设,如图 3 所示。通过改变限深轮在铅垂方向位置,调节机架与垄的相对高度;调节两组侧导向辊间的距离及两组压边覆土镇压装置间的距离,实现不同垄形的垄上覆膜作业。相比现有覆膜机,本文设计的侧导向辊能实现垄侧仿形且通过调节侧导向辊倾角提高覆膜质量,同时在覆土盘后增设镇压轮,增强膜上土壤抗侵蚀性。

3 关键部件设计及理论分析

3.1 垄上覆膜理论模型建立

为方便垄上覆膜分析与计算,做以下假设:

(1)垄上覆膜时,烟草覆膜机保持匀速作业,且垄形尺寸固定不变,确保每一时刻各工作部件的运

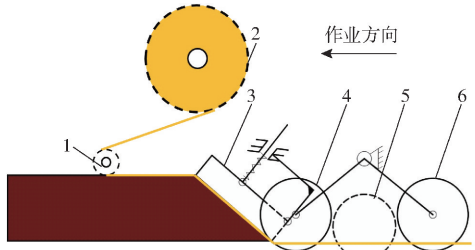


图3 覆膜机工作示意图

Fig. 3 Working schematic of film mulching machine

1. 展膜辊筒 2. 膜卷 3. 侧导向辊筒 4. 压边轮 5. 覆土盘
6. 镇压轮

动状态不发生改变,即侧导向辊、压边覆土镇压装置对地膜的压力和摩擦力不变。

(2)覆膜分析时,将垄上覆膜过程视为某一时刻的地膜静态形变过程。

为避免地膜松弛和褶皱,要求覆膜部件对秸秆纤维地膜施加预张力,如图 4 所示。展膜辊、侧导向辊及压边轮对垄侧地膜施加预张力使地膜表面 AEFO 在不同方向拉伸变形。

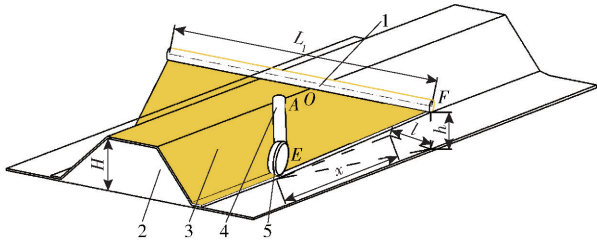


图4 垄上覆膜分析

Fig. 4 Analysis of mulching film on ridge

1. 展膜辊筒 2. 垄 3. 秸秆纤维地膜 4. 侧导向辊 5. 压边轮

垄上覆膜时秸秆纤维地膜受空间力系作用,使地膜表面曲率出现复杂变化且秸秆纤维地膜弹性模量表现各向异性,无法准确计算地膜在各方向的变形量,因此,加入修正系数 k ,模拟地膜最大变形量。秸秆纤维地膜被拉伸的纵向距离为 x ,铺设到垄沟后秸秆纤维地膜的膜边最大长度为 l_{EF} 。避免地膜断裂的条件为地膜理论变形量小于地膜最大变形量,其关系为

$$\sqrt{x^2 + l^2 + h^2} - \sqrt{x^2 + (h - H)^2} \leq k \left(A_1 x + \frac{B_1 L_1}{2} \right) \quad (1)$$

式中 A_1 ——地膜纵向断裂伸长率, %
 B_1 ——地膜横向断裂伸长率, %
 l ——地膜铺设前后的横向差值, cm
 L_1 ——地膜宽度, cm
 h ——展膜辊相对垄沟高度, cm
其中地膜铺设前后的横向差值为

$$l = \sqrt{\left(\frac{J - I}{2} \right)^2 + H^2} + \frac{I - J}{2} \quad (2)$$

修正系数 k 表示实际形变量与理论形变量的比值,计算公式为

$$k = \frac{\sqrt{x_2^2 + l^2 + h^2} - \sqrt{x_2^2 + (h - H)^2}}{A_1 x_1 + \frac{B_1 L_1}{2}} \quad (3)$$

式中 x_1 ——秸秆纤维地膜被拉伸理论纵向距离, cm
 x_2 ——秸秆纤维地膜被拉伸实际纵向距离, cm

当 $l = 30\text{ cm}$ 、 $J = 80\text{ cm}$ 、 $H = 25\text{ cm}$ 、 $L_1 = 120\text{ cm}$ 时,由式(2)可得,地膜铺设前后的横向差值 l 为 10.4 cm 。当无模型修正时,理论计算可得: $x_1 \geq 86.1\text{ cm}$ 时,秸秆纤维地膜膜边不会出现撕裂现象。经预试验验证,当 $x_2 \geq 79.0\text{ cm}$ 时,可避免出现膜边撕裂。将 $x_1 = 86.1\text{ cm}$ 、 $x_2 = 79.0\text{ cm}$ 代入式(3)可得修正系数 $k = 1.07$ 。

由式(1)可知, l 、 H 和 h 决定展膜辊和压边轮的纵向距离,间接影响覆膜机构总的纵向长度。为减小烟草覆膜机的纵向长度,在满足覆膜农艺要求的基础上,应尽量缩小展膜辊相对垄沟高度 h 和地膜铺设前后的横向差值 l 。

为验证垄上覆膜模型可信度,需要计算数学模型的相对误差界。由式(1)可得

$$f(x) = \sqrt{x^2 + l^2 + h^2} - \sqrt{x^2 + (h - H)^2} - k \left(A_1 x + \frac{B_1 L_1}{2} \right) \quad (4)$$

由式(4)可知, $f(x)$ 为一元二阶可导函数,采用 Taylor^[23] 展开方法来估计 $f(x)$ 的相对误差界,计算式为

$$e_r(f(x)) = \left| \frac{f(x) - f(n)}{f(n)} \right| \leq \left| \frac{f'(n)}{f(n)} \right| e_n \quad (5)$$

式中 e_n —— n 误差界
 $e_r(f(x))$ —— $f(x)$ 相对误差界
 $f'(n)$ ——导数值
 n ——试验测量值
其中试验测量值 n 的相对误差界为

$$e_r(n) = \left| \frac{e_n}{n} \right| = \left| \frac{x_\delta - n}{n} \right| \quad (6)$$

式中 x_δ ——模型计算值, cm
 $e_r(n)$ —— n 的相对误差界

为验证模型相对误差界,令 $f(x_\delta) = 0$,求得 $x_\delta = 80.8\text{ cm}$ 。忽略观测误差的影响,经试验测量 $n = 79.0\text{ cm}$ 。将参数代入式(4)~(6)计算秸秆纤维地膜垄上覆膜模型的相对误差界 $e_r(f(x_\delta)) \leq 0.005$,试验测量值的相对误差界 $e_r(n) = 0.023$ 。

3.2 侧导向辊

侧导向辊主要由侧导向辊筒、仿形连接架、仿形杆、移动架构成,结构如图 5 所示。侧导向辊筒可绕轴自转;仿形杆实现压力调节及仿形功能;仿形连接架可绕 z 轴自转完成辊筒角度调节,并可沿 x 轴、 y 轴和 z 轴方向进行位置调节,侧导向辊在垄的两侧呈对称分布。

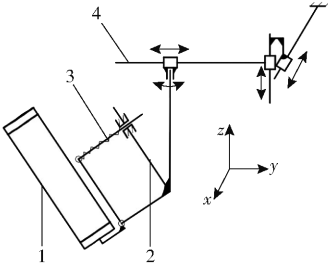


图 5 侧导向辊结构示意图

Fig. 5 Structural schematic of guide roller of side of film
1. 侧导向辊筒 2. 仿形连接架 3. 仿形杆 4. 移动架

3.2.1 侧导向辊倾角

覆膜时地膜出现松弛或褶皱会引起 l 的增大,导致变形量增加,使地膜断裂。为避免出现褶皱单元,侧导向辊需为地膜提供预张力,保证垄上覆膜的展平度。侧导向辊的展膜功能主要由侧导向辊筒与地膜接触形式决定,如图 6 所示。

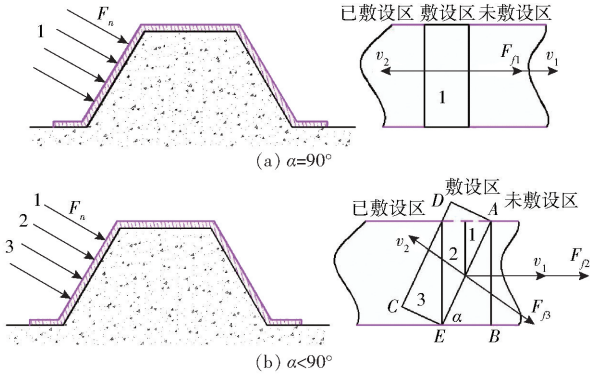


图 6 侧导向辊理论分析

Fig. 6 Theory analysis of guide roller of side of film

当侧导向辊与覆膜机前进速度夹角(简称侧导向辊倾角) α 等于 90° 时,侧导向辊绝对速度可分解为侧导向辊筒线速度 v_2 与机组前进速度 v_1 , 2 种速度相互抵消,使侧导向辊筒做纯滚动,并对地膜施加向前拉伸的滚动摩擦力 F_{f1} (纵向张紧)。垂直地膜的均布力 F_n 在秸秆纤维地膜上形成矩形面 1, 垄侧地膜的上部、中部、底部同时被压向垄沟,不能实现渐近式导膜过程,地膜易出现褶皱。

当侧导向辊倾角 α 小于 90° 时,机组前进速度 v_1 和侧导向辊筒线速度 v_2 不共线,使侧导向辊筒既做滚动,又做滑动。根据摩擦定理可以确定沿着水平方向产生滑动摩擦力 F_{f2} (纵向张紧),沿滚筒切

线方向产生滚动摩擦力 F_{β} (横向和纵向张紧)。把垂直地膜的均布力 F_n 划分成 3 个区域,同一处地膜依次经过区域 1、区域 2 完成渐进式导膜过程,使地膜平整铺设到垄侧面上。区域 3 为保持区,与压边轮配合作业,顺利完成压边工作。当侧导向辊倾角 α 变小,舒展区域(区域 1 和区域 2)增大,增加横向和纵向张紧力作用在垄侧地膜时间,减少褶皱单元。 α 计算公式为

$$\alpha = \arctan \frac{l_{AB}}{l_{BE}} \tag{7}$$

式中 l_{AB} ——垄侧面宽度,cm
 l_{BE} ——侧导向辊纵向投影长度,cm

依据垄形可知, l_{AB} 为固定值 35 cm, l_{BE} 最大值为 120 cm (试验获得);代入式(7)得 α 的最小值为 16.2°,因此 α 取值范围为 16.2°~90.0°。

3.2.2 仿形机构设计

调节侧导向辊倾角 α 时,为使侧导向辊与垄侧地膜贴合需要调节仿形杆件的长度,如图 7 所示。图中实线为 $\alpha = 90^\circ$ 时位置,虚线为 $\alpha < 90^\circ$ 时位置。

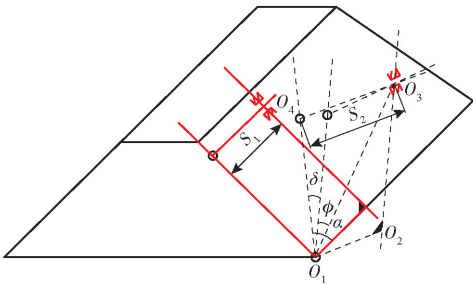


图 7 侧导向辊三维图

Fig. 7 Dimension of guide roller of side of film

仿形连接架为矩形框架,仿形杆的初始长度 $S_1 = 105$ mm,当仿形连接架绕 z 轴顺时针转过相应角度后,仿形杆的长度变为 S_2 ,其计算公式为

$$S_2 = \sqrt{l_{14}^2 + l_{13}^2 - 2l_{14}l_{13}\cos(\delta + \phi)} \tag{8}$$

其中 $l_{13} = \sqrt{S_1^2 + l_{14}^2}$
式中 l_{14} ——点 O_1 与点 O_4 间距离,mm
 l_{13} ——点 O_1 与点 O_3 间距离,mm
 ϕ ——初始角,(°)
 δ ——下降角,(°)

由式(8)可知, S_2 与 S_1 、 l_{14} 、 ϕ 、 δ 取值有关,已知 $S_1 = 105$ mm,取 $l_{14} = 150$ mm,可得 $l_{13} = 183$ mm, $\phi = 35^\circ$ 。按照烟草垄形尺寸确定 δ 范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。 S_2 是关于 δ 的增函数,当 $\delta = 45^\circ$ 时, S_2 最大值为 215.5 mm。

3.2.3 侧导向辊施加压力

根据秸秆纤维地膜物理特性参数确定侧导向辊对地膜施加的压力约束条件为

$$\begin{cases} \mu_2 F_n \cos\alpha \leq F_h \\ \mu_1 F_n + \mu_2 F_n \sin\alpha \leq F_z \end{cases} \tag{9}$$

其中 $\begin{cases} F_h = k_{\sigma 2} l_{AB} \cos\alpha / \sin\alpha \\ F_z = k_{\sigma 1} l_{AB} \end{cases}$
式中 F_z ——秸秆纤维地膜纵向抗张力,N
 F_h ——秸秆纤维地膜横向抗张力,N
 $k_{\sigma 1}$ ——纵向抗张强度,kN/m
 $k_{\sigma 2}$ ——横向抗张强度,kN/m
 μ_1 ——辊筒与秸秆纤维地膜间滑动摩擦因数
 μ_2 ——辊筒与秸秆纤维地膜间滚动摩擦因数
辊筒材质采用橡胶,经测量可知 $\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.1, k_{\sigma 1} = 2.23$ kN/m, $k_{\sigma 2} = 1.58$ kN/m, α 为 $16.2^\circ \sim 90.0^\circ$,将参数代入式(9)得 $F_n \leq 116.8$ N,取 $F_n = 50$ N。

3.3 压边覆土镇压装置

压边覆土镇压装置主要由压边轮、覆土盘、镇压轮、仿形装置构成。压边轮将膜边压入垄沟,由覆土盘完成覆土,镇压轮完成膜上土壤压实,仿形装置实现施加压力调节,如图 8 所示。

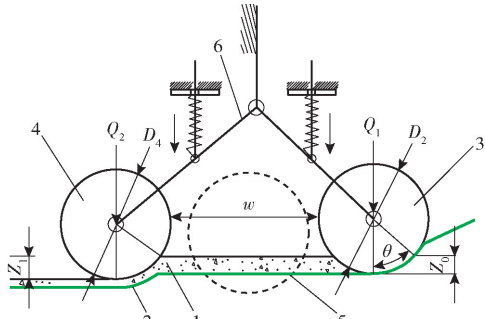


图 8 压边覆土镇压装置结构示意图

Fig. 8 Schematic of pressuring film edge and soil covering and pressing device

1. 土壤 2. 秸秆纤维地膜 3. 压边轮 4. 镇压轮 5. 覆土盘
6. 仿形装置

3.3.1 压边轮设计

膜边受力分析如图 9 所示。采用圆柱形轮进行压边作业时,膜边各处承受相同分布载荷 q_3 ,使膜边 C_A 处出现剪切形变,因秸秆纤维地膜面内刚度大,不宜承受剪切形变,当作业速度和施加压力增加时,增加地膜机械破损程度。为避免膜边出现剪切形变,将压边轮设计成锥度轮,使分布载荷 q_1 在膜边 C_A 处为 0。

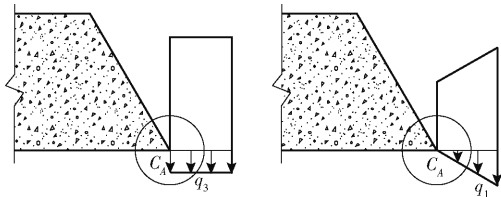


图 9 膜边受力分析

Fig. 9 Force analysis of film edge

当施加在压边轮上的力过小时,使压边轮下陷

量不足,导致地膜与垄侧面会出现空隙 a ,如图10所示;当施加在压边轮上的力过大时, C_4 处下陷产生剪切变形,易造成 C_4 处地膜破损,使覆膜机的敷设质量下降。为避免上述状况,需要计算出合适的施加压力,保证压边轮处于理想位置。锥角 β 与最大下陷量 Z_0 、压边宽度 b 有关。根据烟草种植垄形特点及膜卷宽度要求,地膜最大压边宽度为100 mm。压边轮的宽度应不小于地膜的压边宽度,取 b 为100 mm。压边轮直径过小,压边时间短,拖土现象严重,直径过大,影响机器工作稳定性,压边轮的直径在合理范围(200~500 mm)选取^[24]。取压边轮最小直径 D_1 为200 mm。烟草种植过程需要旋耕和起垄作业,取下陷量 $Z_0 = 8$ mm,经计算压边轮锥角 β 为 85° ,压边轮最大直径 D_2 为216 mm。

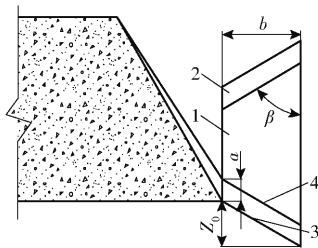


图10 压边轮结构参数示意图

Fig. 10 Structure parameter of wheel pressuring film edge

1. 锥形压边轮理想位置 2. 锥形压边轮未完全下陷位置 3、4. 秸秆纤维地膜

3.3.2 压边轮载荷分析

下陷量相同时,根据力的合成定理得

$$Q_1 = Q_3/2 \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} Q_1 = B_f q_1 \\ Q_3 = B_f q_3 \end{cases}$$

式中 Q_1 ——作用在压边轮上的总载荷,N

Q_3 ——作用在圆柱形轮上的总载荷,N

B_f ——分布载荷宽度,cm

当非刚性路面承受载荷,且圆柱形轮的下陷量不大时,其下陷量计算可简化为^[25]

$$Z = \frac{6Q_3}{5KB_e D^{1/2}} \quad (11)$$

其中

$$K = \alpha_0 (1 + 0.27B_e)$$

式中 Z ——下陷量,cm

D ——圆柱形轮直径,cm

B_e ——圆柱形轮宽度,cm

K ——土壤特性系数

α_0 ——与土壤特性相关参数

由式(11)可知,当 $Z = Z_0$ 、 $D = D_2$ 、 $B_e = b$ 时,锥形压边轮载荷与下陷量关系为

$$Z_0 = \frac{12Q_1}{5KbD_2^{1/2}} \quad (12)$$

式中 D_2 ——压边轮大径,mm

对于刚松过土的壤土,土壤特性相关参数^[25] $\alpha_0 = 1.01$,将压边轮参数代入式(12)得 $Q_1 = 57.9$ N。

压边轮与地膜接触面的展开面类似扇形面,如图11所示。接触面面积 S_a 计算式为

$$S_a = \int_0^\gamma \frac{R_x^2}{2} d\gamma \quad (13)$$

式中 γ ——压边轮与地膜接触面展开角,rad

R_x ——展开面曲率半径,cm

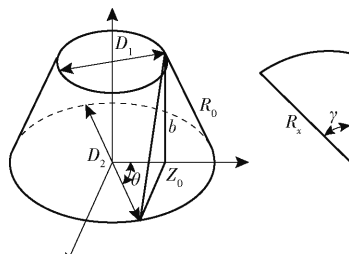


图11 锥度轮与土壤接触面积示意图

Fig. 11 Contacting area between tapered wheel and soil

当下陷量 Z_0 远小于大径 D_2 时, R_x 与压边轮母线长 R_0 近似相等,可把展开面按扇形面计算,其中 γ 计算式为

$$\gamma = \frac{\theta D_2}{2R_0} \quad (14)$$

其中

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{2Z_0}{D_2} \right)$$

式中 θ ——压边轮与地膜接触角,rad

将式(14)代入式(13)可得

$$S_a = \frac{1}{4} \arccos \left(1 - \frac{2Z_0}{D_2} \right) R_0 D_2 \quad (15)$$

经计算 $S_a = 20.6$ cm²。

秸秆纤维地膜不破裂的条件为

$$Y \geq \frac{10Q_1}{S_a} \quad (16)$$

式中 Y ——秸秆纤维耐破度,kPa

经计算压边轮作用在秸秆纤维地膜压强为28.1 kPa,小于秸秆纤维地膜耐破度。

3.3.3 镇压轮设计

根据文献[26]可知,土壤坚实度主要取决于土壤粘结力,土壤粘结力越大,抵抗外力分散的能力越强,土壤抗侵蚀能力越强。通过镇压可提高膜上土壤坚实度,减少膜上土壤损失,提升覆膜种床的抗风能力。根据文献[27]可知,镇压轮对土壤的压力一般为30~50 kPa。镇压轮采用锥形轮,镇压轮宽度 $T = 100$ mm,小径 $D_3 = 200$ mm,由式(12)、(15)可知,压力是关于下陷量的函数,为加大镇压轮接地压力,取下陷量 $Z_1 = 10$ mm,镇压轮大径 $D_4 = 220$ mm。

参照压边轮与地膜接触面积,得镇压轮载荷计

算公式为

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{12Q_2}{5KTD_4} \\ S_b = \frac{1}{4}\arccos\left(1 - \frac{2Z_1}{D_4}\right)R_1D_4 \end{cases} \quad (17)$$

式中 S_b ——镇压轮与土壤接触面积,cm²
 R_1 ——镇压轮母线长,cm

将镇压轮结构参数代入式(17)得,镇压轮载荷 $Q_2 = 73.0\text{ N}$,镇压轮与土壤接触面积 $S_b = 23.2\text{ cm}^2$ 。镇压轮接地压力 ρ 为

$$\rho = \frac{10Q_2}{S_b} \quad (18)$$

计算可得镇压轮接地压力 $\rho = 31.5\text{ kPa}$,满足镇压要求。

3.3.4 弹簧力调节分析

压力调节杆受力分析如图 12 所示。通过理论力学分析可知,滚子滚动时所需的水平牵引力 P 在数值上等于滚动摩擦力,因此,忽略牵引力 P 对弹簧力的影响,对点 O_3 建立力偶方程为

$$Ql_2 - F_1l_1 = 0 \quad (19)$$

式中 F_1 ——弹簧力,N
 l_1 ——弹簧力力臂,mm
 l_2 ——施加载荷力臂,mm
 Q ——施加载荷,N

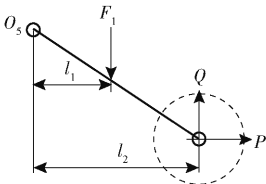


图 12 压力调节杆受力分析

Fig. 12 Force analysis of bar regulating pressure

经推导弹簧力与施加载荷关系为

$$F_1 = \frac{l_2}{l_1}Q \quad (20)$$

设计弹簧安装位置时,令 $l_2/l_1 = 2$,因此在弹簧选型时, $F_1 \geq 146\text{ N}$ 。

4 试验与结果分析

为优化敷装置结构和工作参数,在东北农业大学实验基地实施正交试验。

4.1 试验条件与仪器设备

试验条件:试验实施日期为 2020 年 10 月 6 日,试验地点 0~10 cm 土壤容重为 1.21 g/cm³,土壤平均含水率 16.4%。

试验仪器设备:选用奔野 324 型拖拉机为覆膜机提供配套动力。卷尺(量程 5 m,精度 1 mm);直

尺(量程 20 cm,精度 1 mm);环刀组件(容积 100 cm³);干燥箱;SC-900 型土壤紧实度仪;JD1000-2 型电子秤;数码相机。

4.2 试验方案

4.2.1 试验因素与水平

(1)展膜辊与压边轮距离(简称辊轮距离):对垄上覆膜数学模型分析可知,辊轮距离决定秸秆纤维地膜实际最大变形量,当辊轮距离过小会增加地膜的膜边破损程度,导致地膜断裂,因此辊轮距离是地膜破损程度关键因素。通过式(1)计算可得当辊轮距离大于等于 79 cm 时,避免地膜的膜边破损,取最小辊轮距离为 80 cm;当辊轮距离过大会影响机具的运输和纵向稳定性,取最大值为 120 cm。试验时辊轮距离的选取范围为 80~120 cm。

(2)侧导向辊倾角:是指侧导向辊与覆膜机前进方向的夹角,通过理论分析可得,侧导向辊倾角影响侧导膜辊筒对地膜均布力及摩擦力作用效果,是影响地膜展平度的重要影响因素。由式(7)计算可得侧导向辊倾角取值范围为 16.2°~90.0°。为实现倾角调节避免侧导向辊与展膜辊、压边轮出现干涉,试验时倾角选取范围为 30°~90°。

(3)工作速度:依据生产试验经验,工作速度与机械化覆膜作业质量呈负相关。工作速度过低影响生产效率,根据文献[28],取覆膜机最小工作速度为 3.6 km/h;工作速度过快加剧覆膜装置振动,影响作业可靠性。在保证机械化覆膜作业质量前提下,应尽提高作业速度。经预试验验证,当覆膜机作业速度超过 5.4 km/h 时秸秆纤维地膜破损现象明显增加。因此,确定覆膜机工作速度为 3.6~5.4 km/h。

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法^[29],因素水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	辊轮距离 X_1/cm	侧导向辊倾角 $X_2/(\text{°})$	工作速度 $X_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$
1	80	30	3.6
2	100	60	4.5
3	120	90	5.4

4.2.2 评价指标

参考《铺膜穴播机作业质量》(NY/T 987—2006),选取试验指标如下:

采光面展平度:为覆膜后采光面地膜宽度与褶皱展平后的宽度百分比,即

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n B_{1i}}{\sum_{i=1}^n B_{2i}} \times 100\%$$

(21)

式中 S_c ——采光面展平度, %
 B_{1i} ——采光面第 i 点宽度, mm
 B_{2i} ——采光面地膜展平后第 i 点宽度, mm
采光面机械破损程度: 为采光面上所有机械破
损位置的缝长或边长与测量的单位面积比, 即

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{LU}$$

(22)

式中 S_d ——采光面机械破损程度, mm/m²
 L_i ——测区内第 i 处机械破损部位的边长或
缝长, mm
 L ——测区长度, m
 U ——测区内采光面地膜宽度平均值, m

4.3 田间试验与分析

4.3.1 田间试验

根据正交试验表实施 9 组试验, 每组试验重复
3 次, 并应用 Design-Expert 8.0 软件对试验数据进
行处理分析。试验装置如图 13 所示。

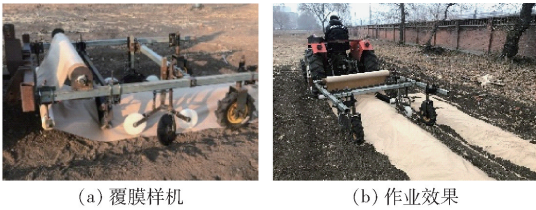


图 13 田间试验

Fig. 13 Field test

4.3.2 极差分析

试验结果与极差分析如表 3 所示。 A 、 B 、 C 分
别为辊轮距离、侧导向辊倾角、工作速度水平值。
对于采光面展平度, 影响主次顺序为 B 、 C 、 A ,
优化组合 $A_3B_1C_2$, 即辊轮距离 120 cm, 侧导向辊
倾角 30°, 工作速度 4.5 km/h; 采光面机械破损
程度影响主次顺序为 C 、 A 、 B , 优化组合 $A_3B_2C_1$,
即辊轮距离 120 cm, 侧导向辊倾角 60°, 工作速度
3.6 km/h。
二者优化结果并不完全相同, 需要进一步优选。
因素 A 的两种优化结果相同, 选择 A_3 为最优水平;
由因素 B 对指标 Y_1 和 Y_2 影响主次顺序, 确定因素 B
最优水平为 B_1 。因素 C 对指标 Y_1 极差为 0.9、对指
标 Y_2 极差为 30.9, 因此由指标 Y_2 确定因素 C 最优
水平为 C_1 。
综上, 通过极差分析得出优化因素组合: 辊轮距
离 120 cm, 侧导向辊倾角 30°, 工作速度 3.6 km/h。

表 3 试验结果与极差分析
Tab. 3 Test result and rang analysis

试验号	因素				指标	
	A	B	C	空列	采光面展平度 Y_1 /%	采光面机械 破损程度 Y_2 / (mm·m ⁻²)
1	1	1	1	1	97.1	39.1
2	1	2	2	2	94.2	52.4
3	1	3	3	3	88.6	70.5
4	2	1	2	3	96.6	42.3
5	2	2	3	1	93.5	56.2
6	2	3	1	2	89.3	31.8
7	3	1	3	2	96.0	50.5
8	3	2	1	3	94.0	13.8
9	3	3	2	1	90.1	28.6
Y_1	k_{11}	93.3	96.6	93.5		
	k_{12}	93.1	93.9	93.6		
	k_{13}	93.4	89.3	92.7		
	R	0.3	7.3	0.9		
	因素主次		B 、 C 、 A			
Y_2	优化组合		$A_3B_1C_2$			
	k_{11}	54.0	44.0	28.2		
	k_{12}	43.4	40.8	41.1		
	k_{13}	31.0	43.6	59.1		
	R	23.0	3.2	30.9		
	因素主次		C 、 A 、 B			
	优化组合		$A_3B_2C_1$			

4.3.3 方差分析

对试验结果进行方差分析, 如表 4 所示。

表 4 正交试验方差分析结果
Tab. 4 Variance analysis of orthogonal test result

指标	来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
采光面展平度	A	0.087	2	0.043	0.21	0.828 9
	B	80.29	2	40.14	191.16	0.005 2
	C	1.49	2	0.74	3.54	0.220 3
	误差	0.42	2	0.21		
	总和	82.28	8			
采光面机械破损程度	A	797.61	2	398.80	37.87	0.025 7
	B	18.17	2	9.08	0.86	0.536 9
	C	1 439.05	2	719.52	68.33	0.014 4
	误差	21.06	2	10.53		
	总和	2 275.88	8			

对于采光面展平度, 侧导向辊倾角对其影响极
显著 ($P < 0.01$), 辊轮距离和工作速度对其影响不
显著 ($P > 0.05$), 这是因为侧导向辊倾角改变侧导
向辊作用在垄侧地膜的时间和力的方向, 倾角越小
导膜时间越长, 因此, 确定因素 B 的最优水平为 B_1 ;
对于采光面机械破损度, 辊轮距离和工作速度对其
影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 侧导向辊倾角对其影
响不显著 ($P > 0.05$), 因为距离增大, 地膜最大变形
量增大, 减少破损度; 工作速度增加, 导致机械振幅

增加,工作稳定性降低,破损度增加,因此,确定因素 A 最优水平为 A_3 ,因素 C 最优水平为 C_1 。

综上,通过方差分析得出优化因素组合:辊轮距离 120 cm,侧导向辊倾角 30° ,工作速度 3.6 km/h。

4.3.4 最优参数组合

通过极差分析和方差分析得到一组优化结果:辊轮距离 120 cm、侧导向辊倾角 30° 、工作速度 3.6 km/s,此时采光面展平度 96.9%、采光面机械破损程度 17.6 mm/m²。

按此优化结果进行验证试验(重复 5 次取平均值),结果显示:采光面展平度 97.4%,采光面机械破损程度 12.6 mm/m²。由验证试验结果可知:在优选后的参数组合下,试验结果与优化结果基本相符,优化结果可信。

5 结论

(1)基于烟草栽培农艺要求,设计了一种小麦秸秆纤维地膜垄上敷设装置。建立了垄上覆膜数学模型,探明了秸秆纤维地膜产生断裂的主要影响因素,对侧向导膜过程进行了力学和运动学分析,确定了参数取值范围,并对侧导向辊和压边覆土镇压装置等关键部件进行了设计。

(2)小麦秸秆纤维地膜烟草栽培垄上敷设装置在旋耕起垄含水率为 16.4% 地况上,当作业参数组合为辊轮距离 120 cm、侧导向辊倾角 30° 、工作速度 3.6 km/h 时,采光面机械破损程度为 12.6 mm/m²,采光面展平度为 97.4%,满足烟草栽培垄上覆膜机械化作业和农艺要求。

参 考 文 献

[1] LIN Yingchao, WEI Kesu, GAO Weichang, et al. Effects of plastic mulching film-induced leaf burning on seedling growth in tobacco cultivation; different findings beyond conservation view [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17 (6): 1327 - 1337.

[2] 徐佳星,封涌涛,叶玉莲,等. 地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (12): 2349 - 2359.

XU Jiaying, FENG Yongtao, YE Yulian, et al. Effects of plastic film mulching on yield and water use of maize in the Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (12): 2349 - 2359. (in Chinese)

[3] 徐云文,王志强,马步洲. 宽幅地膜覆盖对烟叶产量和品质的影响[J]. 山西农业科学, 2008, 36 (6): 66 - 67.

XU Yunwen, WANG Zhiqiang, MA Buzhou. Effect of broad plastic film mulching on yield and quality of tobacco [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008, 36 (6): 66 - 67. (in Chinese)

[4] 何文清,严昌荣,赵彩霞,等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (3): 533 - 538.

HE Wenqing, YAN Changrong, ZHAO Caixia, et al. Study on the pollution by plastic mulch film and its countermeasures in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (3): 533 - 538. (in Chinese)

[5] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48 (6): 1 - 14.

ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J/OL]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (6): 1 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170601&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 06. 001. (in Chinese)

[6] CHEN Ning, LI Xianye, IMNEK J, et al. The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292: 106817.

[7] 张丹,刘宏斌,马忠明,等. 残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50 (2): 310 - 319.

ZHANG Dan, LIU Hongbin, MA Zhongming, et al. Effect of residual plastic film on soil nutrient contents and microbial characteristics in the farmland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (2): 310 - 319. (in Chinese)

[8] 马兆嵘,刘有胜,张芊芊,等. 农用塑料薄膜使用现状与环境污染分析[J]. 生态毒理学报, 2020, 15 (4): 21 - 32.

MA Zhaorong, LIU Yousheng, ZHANG Qianqian, et al. The usage and environmental pollution of agricultural plastic film [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15 (4): 21 - 32. (in Chinese)

[9] ZHANG Dan, NG E L, HU Wanli, et al. Plastic pollution in croplands threatens long-term food security [J]. Global Change Biology, 2020, 26 (6): 3356 - 3367.

[10] 张颖,陈泓睿,顿国强,等. 秸秆纤维地膜覆盖栽培哈椒试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45 (11): 95 - 100.

ZHANG Ying, CHEN Hongrui, DUN Guoqiang, et al. Study on the stalk fiber films mulching cultivation green pepper [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45 (11): 95 - 100. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 韩永俊. 水稻秸秆制造植物纤维功能地膜工艺与性能试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.

- HAN Yongjun. Study on techniques of rice straw fiber membrane production and it's properties [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [13] KHAZIMOV Z M, BORA G C, KHAZIMOV K M, et al. Development of a dual action planting and mulching machine for vegetable seedlings[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(2): 74–78.
- [14] DAI Fei, GUO Wenjuan, SONG Xuefeng, et al. Design and test of crosswise belt type whole plastic-film ridging-mulching corn seeder on double ridges[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2019, 12(4): 88–96.
- [15] 王伯凯, 胡良龙, 王少康, 等. 甘薯双垄旋耕起垄覆膜机的设计及试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(7): 116–125. WANG Bokai, HU Lianglong, WANG Shaokang, et al. Design and experiment of sweet potato transplanting operation machine with rotary tillage, ridging and covering film functions[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 116–125. (in Chinese)
- [16] 日吉健二, 永田雅輝, 梅崎輝尚, 等. 早期水稻のマルチ栽培用田植機に関する基礎研究(第2報): ナイフ式マルチ穴開け機構の理論的解析[J]. 農業機械學會誌, 1998, 60(2): 11–18.
- [17] 张子浩. RGO-6型水稻插秧机秸秆纤维地膜敷装置设计[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)
- [18] 任文涛, 辛明金, 宋玉秋, 等. 水稻纸膜覆盖插秧机覆膜装置: CN202385566U[P]. 2012-08-22.
- [19] 吴睿, 席云廷, 郑俊, 等. 烟草覆膜机作业质量的试验研究与分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 148–152, 156. WU Rui, XI Yunting, ZHENG Jun, et al. Experimental research and analysis on the working quality of tobacco mulching machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 148–152, 156. (in Chinese)
- [20] 许国志. 农用薄膜科技攻关与应用发展方向[J]. 中国塑料, 1998, 12(3): 9–15. XU Guozhi. The tackling key problems, applications and development directions of agricultural film in China [J]. China Plastics, 1998, 12(3): 9–15. (in Chinese)
- [21] KAARLO N. 纸张物理性能[M]. 刘金刚, 苏艳群, 杜艳芬, 等, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- [22] 俞永华, 王剑平, 应义斌. 塑料温室薄膜承载性的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 181–185. YU Yonghua, WANG Jianping, YING Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of the film in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 181–185. (in Chinese)
- [23] 张宏伟. 计算机科学计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [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/OL]. 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/OL]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 82–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170410&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 04. 010. (in Chinese)
- [25] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [26] 黄永昌. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [27] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [28] 戴飞, 赵武云, 马明义, 等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 83–90. DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 83–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160112&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 01. 012. (in Chinese)
- [29] 史乃煜, 陈海涛, 王星, 等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 84–91. SHI Naiyu, CHEN Haitao, WANG Xing, et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 84–91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190410&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 04. 010. (in Chinese)