

4CML-1000型链耙式地膜回收机设计与试验优化

郭文松^{1,2} 简建明¹ 散鋆龙¹ 李刚¹ 高明青¹ 侯书林¹
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为了解决传统搂耙式地膜回收机卸膜和装箱困难、作业连续性差等问题,设计了一种链耙式地膜回收机,可以连续实现搂膜集膜、输膜抖土、卸膜过程。该回收机主要由机架、起膜铲、链耙、集膜箱等部件组成。为了使地膜回收机的性能达到最佳,首先在土槽实验室内对回收机的结构参数和工作参数分别进行了单因素试验和响应曲面优化试验,通过土槽试验得到地膜回收率、脱膜率、夹带土壤质量3个指标的二次回归方程、响应优化曲面及最佳参数组合。最佳参数组合为:耙齿总成间距300 mm,单排耙齿数5个,耙齿入土深度84.41 mm,回收机前进速度2.542 km/h,链耙线速度0.417 m/s。通过大田验证试验,得到优化后的地膜回收机性能指标为:地膜回收率90.2%,脱膜率88.1%,夹带土壤质量0.41 kg/m。大田试验表明,链耙式地膜回收机满足生产要求。

关键词: 地膜回收机;链耙式;结构设计;试验优化

中图分类号: S223.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0066-08

Design and Experimental Optimization of 4CML-1000 Type Chain Rake Film Recycling Machine

GUO Wensong^{1,2} JIAN Jianming¹ SAN Yunlong¹ LI Gang¹ GAO Mingqing¹ HOU Shulin¹
(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: Traditional rake mulching film recycling machine had the problem of difficulty in unloading and packing film, poor continuity of the work. In order to solve such problems, a kind of chain rake type mulching film recycling machine which can realize continuous raking film, collecting film, transporting film, shaking off soil and unloading film was designed. The recycling machine mainly composed of frame, membrane shovel, chain rake, collecting box and so on. In order to optimize the performance of the film recovery machine, first of all, the single factor test and response surface optimization experiment were carried out on structural parameters and working parameters in soil tank laboratory. Through experimental study in soil tank, the quadratic regression equation of mulching film recycling rate, unloading film rate and quality of the soil in the film were obtained. The optimal parameters were as follows: the spacing between rake teeth assembly was 300 mm, the number of rake tooth in single rake was 5, the depth of rake tooth inserting soil was 84.41 mm, film recycling machine forward speed was 2.542 km/h, and the speed of the chain rake was 0.417 m/s. Finally, through field experiments, the performance indicators of this type of mulching film recycling machine were as such: mulching film recycling rate was 90.2%, unloading film rate was 88.1%, and the entrained soil weight was 0.41 kg/m. Field experiments show that the chain rake type mulching film recycling machine can meet production requirements.

Key words: mulching film recycling machine; chain rake; structural design; experimental optimization

0 引言

为了改善作物种植条件,我国引进地膜覆盖种

植技术^[1-2]。然而,随着地膜覆盖技术在国内大范围推广应用,地膜对土壤的污染成为不可忽视的问题。为了减少残留地膜对土壤的污染,国内外很多

收稿日期: 2017-04-18 修回日期: 2017-07-05
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105)、国家重点研发计划项目(2017YFD0701102-1)、国家级星火计划项目(2015GA891005)和中农-新疆农大联合基金项目(15057015)
作者简介: 郭文松(1985—),男,博士生,塔里木大学讲师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 541577947@qq.com
通信作者: 侯书林(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: hsl010@cau.edu.cn

学者对残膜回收问题进行了研究^[3-4]。

国外采用 0.015 ~ 0.025 mm 厚膜种植,可以直接打卷回收^[5-6]。20 世纪末期发达国家开始使用的降解膜也在很大程度上缓解了地膜污染^[7-10]。然而由于国情不同,我国农业仍是以薄膜和超薄膜为主,加之种植农艺的多样性,为机械化回收残膜带来了技术上的困难,残膜回收原理与机构成为主要技术难题^[11-14]。

目前我国应用较为广泛的搂耙式地膜回收机^[15-16]搂膜率高、结构简单、成本低廉、质量可靠,然而其机械化程度低,脱膜和地膜装箱均需要借助于人力完成。

为解决垄作作物的地膜回收问题,本文借鉴搂耙的基本原理,设计一种链耙式地膜回收机,耙齿在链传动的带动下按照设定的轨迹旋转运动,连续完成挑膜、输膜、抖土、卸膜功能。

1 结构设计

1.1 机具结构及工作原理

机具由牵引机架、起膜铲、链耙、输送链、耙齿、地轮、集膜箱等部件组成,如图 1 所示。

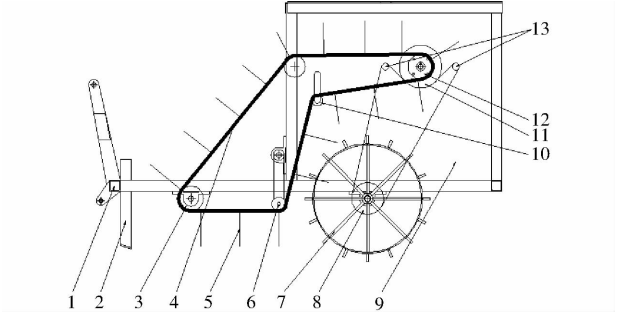


图 1 链耙式地膜回收机结构简图

Fig.1 Chain rake film recycling machine

1. 牵引机架 2. 起膜铲 3. 链耙 4. 输送链 5. 耙齿 6. 张紧轮 7. 驱动地轮 8. 主动链轮 9. 集膜箱 10. 抖动轮 11. 从动链轮 12. 链耙驱动链轮 13. 反向滑轮

该机具为悬挂式结构,由小型拖拉机牵引前进。作业时,首先由起膜铲将埋于地表的地膜与土壤分离,回收机前进时地轮通过链条驱动主动链轮转动,主动链轮带动链耙转动,链耙带动耙齿按照设定的轨迹旋转运动,连续完成挑膜、输膜、抖土、卸膜共 4 个作业过程。

1.2 核心部件设计

1.2.1 链耙

链耙是地膜回收机的核心部件,由耙齿总成和输送链组成。

耙齿总成示意图如图 2 所示,由耙齿和耙齿轴组成,耙齿由平垫和螺母固定在耙齿轴上,每根耙齿

轴上均布有多个耙齿。单根轴上的耙齿数量为影响回收性能的关键结构参数之一。

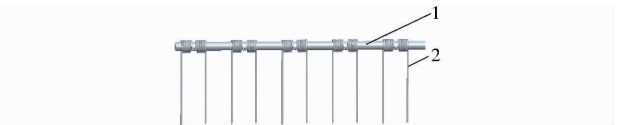


图 2 耙齿总成示意图

Fig.2 Schematic diagram of chain rake assembly

1. 耙齿轴 2. 耙齿

耙齿是回收机的基本部件,耙齿结构图如图 3 所示。在地膜回收过程中,耙齿插入土壤和地膜,完成搂膜挑膜功能,耙齿的入土深度为待优化的关键工作参数之一。耙齿的结构特性和强度直接影响到残膜回收的效果。通过材料力学分析,耙齿参数设计为:有效长度 $L = 160\text{ mm}$,齿杆直径 $D_1 = 6\text{ mm}$,两齿间距 $d = 72\text{ mm}$,材料为 65Mn。

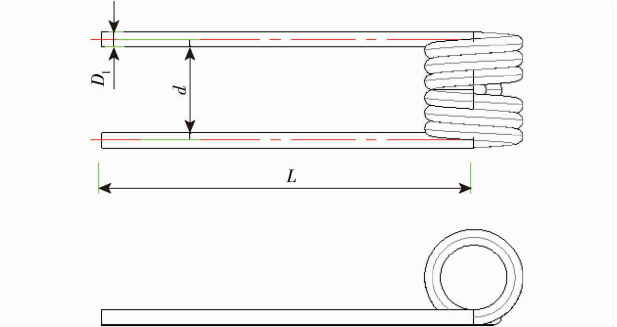


图 3 耙齿结构图

Fig.3 Structure diagram of rake tooth

输送链是耙齿总成的载体,输送链的作用是带动耙齿总成按照设定的轨迹旋转运动,并完成地膜回收过程。本输送链由 4 工作段组成,分别是:集膜搂膜段 AB、输膜脱土段 BC、输膜段 CD、脱膜段 DE,如图 4 所示。本输送链的旋转方向为顺时针方向,图中尺寸 L' 为耙齿总成间距,为待优化的关键结构参数之一。

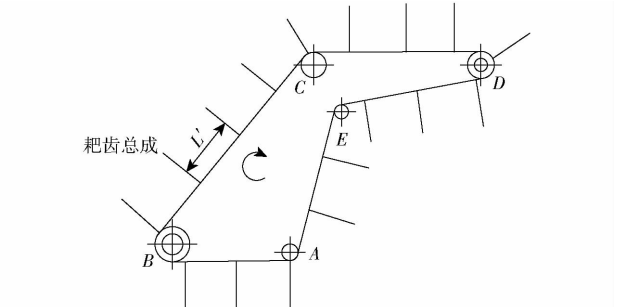


图 4 输送链

Fig.4 Conveyor chain

集膜搂膜段与地表平行,利用耙齿将待回收的地膜收集挑起。输膜脱土段,此工作段作用是输送地膜,由于耙齿总成之间存在间距及回收机的前进过程中的抖动,大部分土壤会被抖落与地膜脱离。

输膜段作用是将回收的地膜输送到脱膜段。脱膜段,由于抖动轮特殊的结构,会使此段的链耙产生自激振动,并在重力作用完成脱膜。

1.2.2 抖动轮

抖动轮的结构如图 5 所示,该抖动轮为橡胶材料三星轮,在输送链的脱膜段 E 点两侧加入一对抖动轮,起到支撑和抖动链耙的作用。

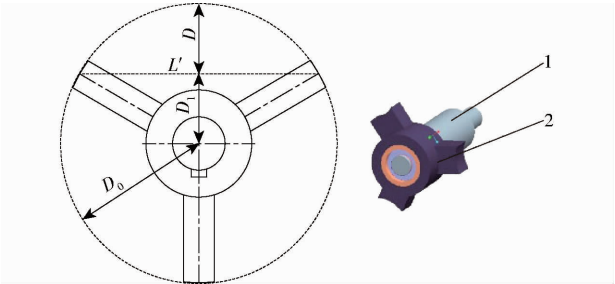


图 5 脱膜抖动轮
Fig. 5 Jitter wheel of stripping mulching film
1. 悬臂轴 2. 橡胶三星轮

由图 5 可知链耙的抖动振幅取决于抖动轮的结构参数。 D_0 为链耙与抖动轮中心的最远距离, D_1 为链耙与抖动轮中心的最近距离, $D = D_0 - D_1$ 为链耙的理论振幅。本设计取 $D_0 = 40\text{ mm}$,经计算 $D_1 = D_0/2 = 20\text{ mm}$,因此振幅 $D = 20\text{ mm}$ 。

链耙的抖动频率取决于链耙的线速度,频率 $f = v_2/(3L')$, v_2 是链耙线速度,是影响回收机工作性能的关键工作参数之一。

1.2.3 起膜铲

起膜铲在机具作业时,其铲部全部深入膜侧土壤,将已经板结的膜上和膜下土壤疏松,并将压在土里的地膜翻出地表,便于回收机可靠捡拾地膜。起膜铲的结构如图 6 所示。根据试验使用情况,以及在本机具上起膜铲的作业负荷的要求,确定起膜铲立柱截面宽 60 mm,厚度为 12 mm,松土铲铲翼与立柱夹角 α 为 105° ,起膜铲铲翼与地表夹角 γ 为 30° 。

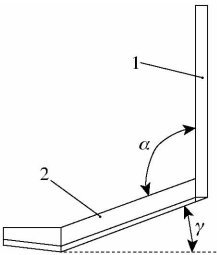


图 6 起膜铲
Fig. 6 Shovel of removing film from soil
1. 铲柄 2. 铲翼

2 参数优化试验

2.1 试验目的及方法

为了优化链耙式地膜回收机的结构参数和工作

参数,获得最佳的回收性能,以地膜回收率、脱膜率、夹带土壤质量共 3 个指标为评价指标,以单排耙齿数量(单个耙齿总成中耙齿数量)、耙齿总成间距(耙齿总成之间的间距)、回收机前进速度、链耙线速度、耙齿入土深度为影响因素对链耙式地膜回收机进行试验研究。

采用土槽单因素试验^[17],研究该地膜回收机的结构参数(单排耙齿数量、耙齿总成间距)对评价指标的影响规律并确定最佳的结构参数;采用土槽响应曲面优化试验,研究地膜回收机的工作参数(回收机前进速度、链耙线速度、耙齿入土深度)对评价指标的影响规律并确定最佳的工作参数组合;采用大田试验最终验证回收机的实际作业性能。

2.2 响应指标

地膜回收率

$$Y_1 = \frac{m_s}{m_z} \times 100\%$$
 (1)

式中 m_s ——已回收的地膜总质量
 m_z ——地膜的总质量

脱膜率

$$Y_2 = \left(1 - \frac{m_w}{m_s}\right) \times 100\%$$
 (2)

式中 m_w ——被回收机回收但缠在耙齿上没有脱落到回收箱里地膜的质量
 m_s ——已回收地膜的质量

回收每米地膜所夹带土壤质量(简称夹带土壤质量)

$$Y_3 = \frac{m_t}{l}$$
 (3)

式中 m_t ——回收的地膜中所夹带的土壤质量
 l ——回收地膜的长度

2.3 试验条件

室内试验部分于 2016 年 7 月 1 日—20 日在新疆阿拉尔市塔里木大学土槽实验室进行,如图 7 所示。该土槽长度 90 m、宽度 5 m,全液压四轮驱动,无级变速,最大行走速度 12 km/h,前后悬挂架升降高度 500 mm,提升 900 kg,土槽车总功率 90 kW。



图 7 土槽试验现场
Fig. 7 Experiment site picture in soil tank laboratory

3 结构参数单因素试验

3.1 耙齿总成间距对回收性能的影响

对比试验了耙齿排间距为 300 mm 和 600 mm 时地膜回收机的回收性能。试验结果:耙齿排间距分别为 300 mm 和 600 mm 时,地膜回收率分别为 88% 和 67%,分析其原因:当耙齿排间距为 300 mm 时,链耙的搂膜集膜段有 2~3 排耙齿,当纵向间距 600 mm 时,搂膜集膜段有 1~2 排耙齿。搂膜段耙齿排数多时,更有利于搂膜集膜效果,因此地膜回收率要较高一些;耙齿排间距分别为 300 mm 和 600 mm 时,脱膜率分别为 80.2% 和 88.6%,夹带土壤质量分别为 0.21 kg/m 和 0.13 kg/m。分析其原因:耙齿排列稀疏有利于脱膜和脱土。

综合考虑以上结果,优先考虑回收机的回收率,本耙齿式地膜回收机耙齿纵向间距确定为 300 mm。

3.2 单排耙齿齿数对回收性能的影响

由图 8 可知,随着耙齿数量的增加,地膜回收率逐步升高,分析其原因:集膜搂膜段耙齿密集时,有利于提高搂膜效果。单排耙齿数增加时,脱膜率有一定程度的降低,分析其原因:耙齿数增加,链耙齿对已回收的地膜的牵拉力增加,会在一定程度上影响地膜的脱膜效果。随着耙齿齿数增加,回收地膜时所夹带的土壤质量逐渐增加,分析其原因:耙齿数越多、越密时,更多的土壤夹杂在地膜里一同被输送到地膜回收箱里。

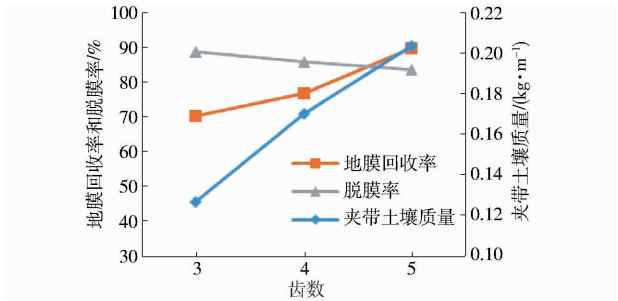


图 8 单排耙齿齿数对回收性能的影响
Fig. 8 Effect of number of rake teeth in single row on recovery performance

综合考虑以上结果,最终确定耙齿式地膜回收机单排耙齿齿数为 5 个。

4 工作参数的响应曲面试验结果

4.1 响应曲面分析方案

根据 Central Composite Design 试验(中心复合试验)设计原理^[18-20],对回收机的前进速度 v_1 、链耙的线速度 v_2 、链耙齿入土深度 h 共 3 个工作参数进行三因素五水平响应曲面试验分析,试验因素编码见表 1。

表 1 试验因素编码			
Tab.1 Test factors and levels coding			
编码	因素		
	$v_1/(km \cdot h^{-1})$	$v_2/(m \cdot s^{-1})$	h/mm
-1.682	1.32	0.132	46.6
-1	2	0.2	60
0	3	0.3	80
1	4	0.4	100
1.682	4.68	0.468	113.6

4.2 试验结果与回归分析

本响应曲面试验,采用 1/2 执行方法,包括 6 次中心点重复,不分区组,试验运行次数为 20 次。每次试验重复 3 次,试验结果取算术平均值,共需 60 次试验,试验结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 响应曲面试验方案与结果						
Tab.2 Test scheme and results of response surface experiment						
试验号	前进速度 X_1	链耙线速度 X_2	入土深度 X_3	地膜回收率 $Y_1/\%$	脱膜率 $Y_2/\%$	夹带土壤质量 $Y_3/(kg \cdot m^{-1})$
1	1	1	-1	85.14	96.15	0.144
2	0	0	0	98.14	80.79	0.142
3	-1.682	0	0	87.64	87.85	0.080
4	-1	1	1	90.42	97.76	0.362
5	-1	1	-1	84.17	94.00	0.130
6	1	-1	-1	81.64	91.60	0.136
7	0	0	0	96.97	81.01	0.140
8	-1	-1	-1	78.17	88.42	0.120
9	0	0	1.682	88.61	82.74	0.434
10	1	-1	1	90.58	91.65	0.344
11	-1	-1	1	83.83	88.92	0.325
12	1.682	0	0	94.27	83.38	0.110
13	0	0	0	97.56	80.90	0.145
14	0	1.682	0	88.06	98.41	0.370
15	1	1	1	90.72	97.34	0.498
16	0	0	0	95.42	80.57	0.146
17	0	0	-1.682	83.72	80.63	0.102
18	0	-1.682	0	80.25	90.72	0.292
19	0	0	0	94.58	81.46	0.147
20	0	0	0	93.64	80.03	0.139

为了获得简化的回归预测模型,本文采用逐步回归的方法保留方程中的高度显著因子项,逐步剔除不显著因子项,建立回归方程。

4.2.1 地膜回收率的回归方程

拟合后的地膜回收率指标 Y_1 的二次回归模型为

$$Y_1 = 96.08 + 1.66X_1 + 2.15X_2 + 2.54X_3 - 2.01X_1^2 - 4.41X_2^2 - 3.70X_3^2 \tag{4}$$

将编码回归方程变换为因素实际值的对应方程为

$$Y_1 = -53.72 + 15.74v_1 + 333.49v_2 + 1.61h - 2.01v_1^2 - 440.96v_2^2 - 0.009h^2 \quad (5)$$

重新拟合后的回归方程决定系数 $R^2 = 0.9348$, 拟合度良好。

4.2.2 脱膜率的回归方程

拟合后的地膜脱膜率指标 Y_2 的二次回归模型为

$$Y_2 = 80.61 + 0.009X_1 + 2.754X_2 + 0.663X_3 + 2.876X_1^2 + 6.040X_2^2 + 1.486X_3^2 \quad (6)$$

将编码回归方程变换为因素实际值的对应方程为

$$Y_2 = 171.06 - 14.17v_1 - 341.18v_2 - 0.59h + 2.88v_1^2 + 603.97v_2^2 + 0.0037h^2 \quad (7)$$

重新拟合后的二次回归方程的决定系数 $R^2 = 0.8515$, 回归方程拟合度较好。

4.2.3 夹带土壤质量的回归方程

重新拟合的地膜回收率指标 Y_3 的二次回归模型为

$$Y_3 = 0.132 + 0.0172X_1 + 0.0249X_2 + 0.114X_3 + 0.072X_2^2 + 0.05X_3^2 + 0.022X_2X_3 \quad (8)$$

将编码回归方程变换为因素实际值的对应方程为

$$Y_3 = 1.435 - 0.0124v_1 - 5.29v_2 - 0.0193h + 7.078v_2^2 + 0.00012h^2 + 0.011v_2h \quad (9)$$

重新拟合后的二次回归方程的决定系数 $R^2 = 0.9609$, 表明回归方程拟合度良好。

4.3 各因素对响应指标的响应曲面分析

4.3.1 地膜回收率响应曲面

由图 9 分析可知, 各因素对地膜回收率的影响均较为明显; 各因素对地膜回收率的影响规律均是随着因素值的增加, 地膜回收率呈现出先增加后降低的规律。

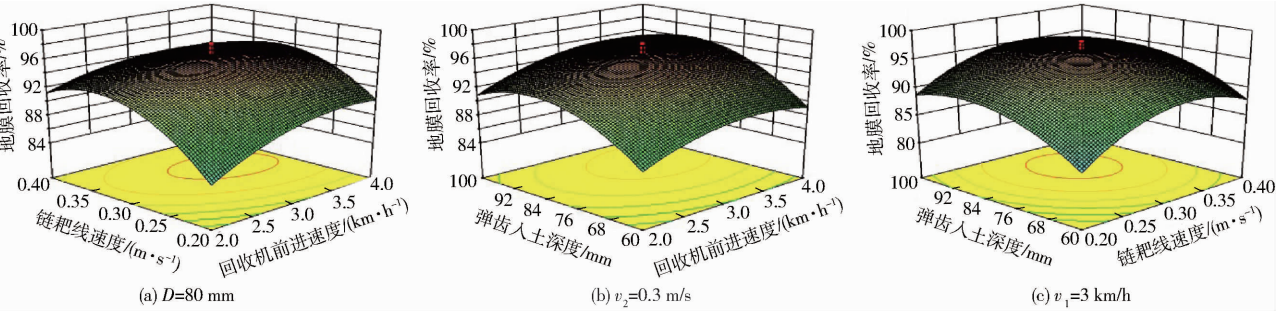


图 9 各因素对地膜回收率影响的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of effect of work factors on mulching film recovery ratio

4.3.2 脱膜率响应曲面

由图 10 分析可知, 各因素在试验范围内变化时, 耙齿入土深度对脱膜率影响程度非常小; 回收机前进速度和链耙线速度值逐渐增加时, 脱膜率呈现

先降低后升高的规律。

4.3.3 夹带土壤质量响应曲面

由图 11 分析可知, 回收机前进速度对夹带土壤质量的影响程度非常小, 链耙线速度和耙齿入土深

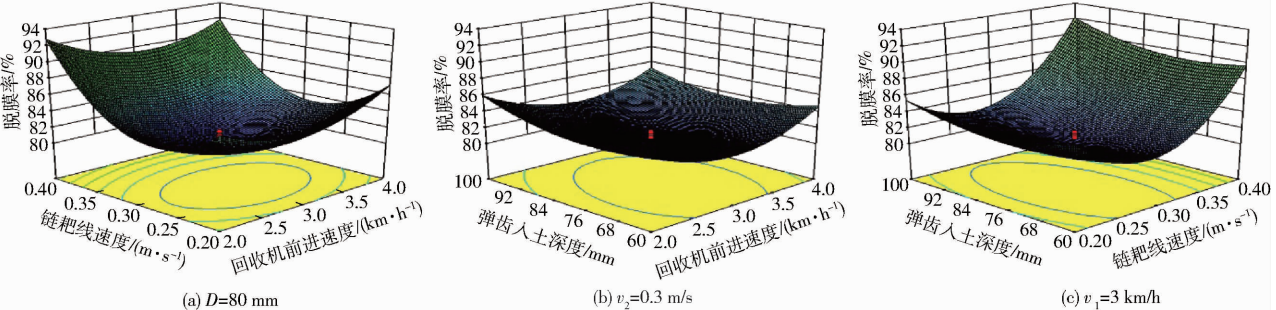


图 10 各因素对脱膜率影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of effect of work factors on mulching film stripping ratio

度对该指标影响程度较为明显; 随着链耙线速度逐渐增加, 夹带土壤质量先降低后增加; 随着耙齿入土深度的逐渐增加, 夹带土壤质量也逐渐增加。

4.4 各影响指标的综合优化求解

借助 Design-Expert 软件的响应优化器, 对建立

的二次回归方程进行优化求解, 优化求解约束条件如下:

目标函数: $\max Y_1(X_1, X_2, X_3); \max Y_2(X_1, X_2, X_3); \min Y_3(X_1, X_2, X_3)$ 。

目标函数 Y_1 优化区间为 90% ~ 100%, Y_1 函数

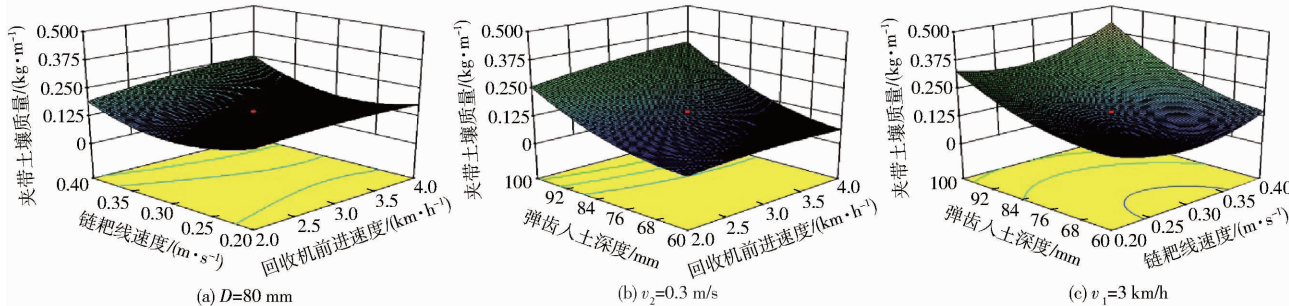


图 11 各因素对夹带土壤质量影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of effect of work factors on weight of soil

的权重系数设定为 2;目标函数 Y_2 优化区间为 90% ~ 100%, Y_2 函数的权重系数设定为 2;目标函数 Y_3 优化区间为 0 ~ 1 kg/m, Y_3 函数的权重系数设定为 1。

编码变量优化范围: $-1.682 \leq X_1 \leq 1.682$; $-1.682 \leq X_2 \leq 1.682$; $-1.682 \leq X_3 \leq 1.682$, 实际变量优化范围: $1.32 \text{ km/h} \leq v_1 \leq 4.68 \text{ km/h}$; $0.132 \text{ m/s} \leq v_2 \leq 0.468 \text{ m/s}$; $46.6 \text{ mm} \leq h \leq 113.6 \text{ mm}$ 。

优化后的最佳工作参数组合为:回收机前进速度为 2.542 km/h,链耙线速度为 0.417 m/s,耙齿入土深度为 84.41 mm。各响应指标的综合优化求解结果如表 3 所示。

表 3 响应指标优化结果

Tab. 3 Optimization results of response indicator				
评价 指标	拟合 值	拟合值标 准误差	95% 置信区间	95% 预测区间
$Y_1/\%$	93.4	1.84	(89.29,97.51)	(84.67,102.12)
$Y_2/\%$	92.2	0.975	(90.06,94.40)	(87.62,96.84)
$Y_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	0.28	0.0132	(0.25,0.312)	(0.219,0.345)

由于优化求解后的最佳工作参数组合并非响应曲面试验中的结果,因此需要进一步通过试验对优化结果进行验证分析,为了获得最为真实、直接的结果,通过大田验证试验的方法来验证优化结果。

4.5 大田验证试验

对完成整机安装调试的链耙式地膜回收机进行整机性能试验。按照 GB/T 25412—2010《残地膜回收机标准》进行试验,试验时间为 2016 年 9 月,选用 18 kW 轮式拖拉机牵引,田间试验地点为河北省廊坊市固安县,试验田为当年收获后的萝卜地,膜厚 0.008 mm。试验地中每隔 20 m 量取 1 m×1 m 的小块地称量残地膜总量,共称取 5 块样本,然后取平均值,试验现场如图 12 所示,试验结果如表 4 所示。

试验结果表明优化后的地膜回收机具有良好的回收性能。由于大田环境比土槽环境恶劣,实际测试的地膜回收率、脱膜率均低于土槽试验所获得的优化拟合值,而且在大田试验中,回收地膜的夹带中不但包括土壤而且包含一定量的杂草、秸秆残枝。



图 12 链耙式地膜回收机大田试验

Fig. 12 Field experiment of chain rake mulching recovery machine

表 4 大田试验结果

Tab. 4 Experimental results of field experiment			
优化评价指标	优化拟合值	大田试验值	偏差
$Y_1/\%$	93.4	90.2	-3.2
$Y_2/\%$	92.2	88.1	-4.1
$Y_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	0.28	0.41	0.13

5 结论

(1)借鉴搂耙式地膜回收机,设计了一种链耙式地膜回收机,主要由机架、起膜铲、耙齿、链耙、抖动轮等机构组成,可连续实现搂膜集膜、输膜抖土、卸膜等作业过程。

(2)采用单因素试验,研究了回收机的结构参数(耙齿总成间距、单排耙齿齿数)对回收性能的影响规律。确定了耙齿总成间距为 300 mm,单排耙齿齿数为 5 个。

(3)采用响应曲面试验,研究了回收机的工作参数(前进速度、链耙线速度、耙齿入土深度)对地膜回收率、脱膜率、夹带土壤质量的影响规律,进行了响应曲面分析,并建立了 3 个指标的二次回归方程,回归方程的决定系数依次为 0.934 8、0.851 5、0.960 9,表明回归方程拟合程度较好。

(4)借助 Design-Expert 软件的响应优化器,对建立的地膜回收率、脱膜率、夹带土壤质量共 3 个回归方程进行优化求解,获得最佳工作参数组合为:回收机

前进速度为 2.542 km/h,链耙线速度为 0.417 m/s,耙齿入土深度为 84.41 mm。

回收率为 90.2%,脱膜率为 88.1%,夹带土壤质量为 0.41 kg/m,试验结果表明,优化后的地膜回收机

(5)对优化后的参数进行大田验证试验,地膜具有较好的回收性能。

参 考 文 献

- 1 严昌荣,刘恩科,舒帆.我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J].农业资源与环境学报,2014,31(2):95-102.
YAN Changrong, LIU Enke, SHU Fan. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014,31(2):95-102. (in Chinese)
- 2 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):1-12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170601&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(6):1-12. (in Chinese)
- 3 李元桥,何文清,严昌荣.残留地膜对棉花和玉米苗期根系形态和生理特性的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(2):108-114.
LI Yuanqiao, HE Wenqing, YAN Changrong. Effects of agricultural plastic residual films on morphologic and physiological characteristics of root system of cotton and maize in seedling stage[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017,34(2):108-114. (in Chinese)
- 4 唐文雪,马忠明,魏焘.多年采用不同捡拾方式对地膜残留系数及玉米产量的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(2):102-107.
TANG Wenxue, MA Zhongming, WEI Tao. Effects of adopting different kinds of collecting method for years on film residual coefficient and maize yields[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017,34(2):102-107. (in Chinese)
- 5 PARISH R L. An automated machine for remove of plastic mulch[J]. Transactions of ASAE, 1998,42(1):49-51.
- 6 吕江南,王朝云,易永健.日本农用地膜生产及应用现状考察报告[J].中国麻业科学,2007(6):358-363.
LÜ Jiangnan, WANG Chaoyun, YI Yongjian. The investigation report of plastics mulching film production and application in Japan[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2007(6):358-363. (in Chinese)
- 7 吴小艳,王书,周惠兴,等.基于 EtherCAT&GPRS 的智能残膜回收装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):50-55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160908&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.008.
WU Xiaoyan, WANG Shu, ZHOU Huixing, et al. Design and test of intelligent residual film recovery device based on Ether CAT&GPRS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):50-55. (in Chinese)
- 8 张木林,王玮.滚轮缠绕式收膜工作部件的研究与设计[J].农业机械学报,1992,23(2):114-116.
ZHANG Mulin, WANG Wei. Research and design of roller winding type collection membrane working parts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1992,23(2):114-116. (in Chinese)
- 9 戴飞,赵武云,孙伟,等.马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(1):64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170109&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1):64-72. (in Chinese)
- 10 张秋芳,张东兴.苗期残膜回收机的起膜轮的设计[J].农机化研究,2007,29(9):84-86.
ZHANG Qiufang, ZHANG Dongxing. Design of film removing wheel for a polythene film collector during seedling period[J]. Agricultural Mechanization Research, 2007,29(9):84-86. (in Chinese)
- 11 裴先平.残膜回收机侧输出集膜机构设计研究[D].北京:中国农业大学,2006:11-19.
PEI Xianping. Plastic film recycling machine side output setmembrane mechanism design study[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006:11-19. (in Chinese)
- 12 侯书林,胡三媛,孔建铭,等.国内残膜回收机研究的现状[J].农业工程学报,2002,18(3):186-190.
HOU Shulin, HU Sanyuan, KONG Jianming, et al. Present situation of research on plastic film residue collector in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(3):186-190. (in Chinese)
- 13 那明君,董欣,侯书林,等.残膜回收机主要工作部件的研究[J].农业工程学报,1999,15(2):112-115.
NA Mingjun, DONG Xin, HOU Shulin, et al. Research on main components of the machine for retrieving the used plastic film after harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 1999,15(2):112-115. (in Chinese)
- 14 张惠友,侯书林,那明君,等.收膜整地多功能作业机的研究[J].农业工程学报,2007,23(8):130-134.
ZHANG Huiyou, HOU Shulin, NA Mingjun, et al. Multifunctional machine for retrieving the used plastic film after harvesting and soil preparation[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(8):130-134. (in Chinese)
- 15 侯书林,孔建铭,张惠友,等.弹齿式收膜机构运动数学模型[J].农业机械学报,2003,34(2):141-142,145.
HOU Shulin, KONG Jianming, ZHANG Huiyou, et al. Motion mathematical models of spring-tooth collecting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(2):141-142,145. (in Chinese)
- 16 谢建华,侯书林,付宇.残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):94-99.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.018.
- XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 94-99. (in Chinese)
- 17 陈发, 史建新, 王学农, 等. 弧型齿残膜捡拾滚筒捡膜的机理[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 36-41.
- CHEN Fa, SHI Jianxin, WANG Xuenong, et al. Study on collecting principle of arc-type tooth roller for collecting plastic residue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 36-41. (in Chinese)
- 18 严伟, 胡志超, 吴努, 等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 17-24.
- YAN Wei, HU Zhichao, WU Nu, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 17-24. (in Chinese)
- 19 康建明, 王士国, 颜利民. 残膜回收机起膜铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 143-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s022&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.022.
- KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 143-148. (in Chinese)
- 20 周新星, 吴努, 严伟. 耙齿式残膜回收机收膜机构参数优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(8): 90-98.
- ZHOU Xinxing, WU Nu, YAN Wei. Parameters optimization and experiment for film receiving institutions of rake teeth type residual film recovery machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(8): 90-98. (in Chinese)
-

(上接第40页)

- 8 王为, 李小昱, 王转卫, 等. 农业土壤抗剪强度的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 125-127.
- WANG Wei, LI Xiaoyu, WANG Zhuanwei, et al. An experimental study on the resistance to shear of agricultural soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 125-127. (in Chinese)
- 9 陈东辉. 典型生物摩擦学结构及仿生[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- CHEN Donghui. Typical bio-tribological structures and their biomimetic applications[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 10 ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 63-69.
- 11 LIU G R, LIU M B, LI Shaofan. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- 12 高建民, 周鹏, 张兵, 等. 基于光滑粒子流体动力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 20-26.
- GAO Jianmin, ZHOU Peng, ZHANG Bing, et al. Development and test of high speed soil-cutting simulation system based on smooth particle hydrodynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 20-26. (in Chinese)
- 13 LIBERSKY L D, PETSCHKE A D. Smoothed particle hydrodynamics with strength of materials[J]. Lecture Notes in Physics, 1990, 395: 248-257.
- 14 BELYTSCHKO T, GU L. Element-free galerkin methods[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37: 229-256.
- 15 NAYROLES B, TOUZOT G, VILLON P. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements[J]. Computational Mechanics, 1992, 10: 307-318.
- 16 ALLEN R, SULSKY D, SCHREYER H L. Fluid-membrane interaction based on the material point method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48: 901-924.
- 17 朱留宪, 杨玲, 杨明金, 等. 基于光滑流体动力学的土壤切削仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(4): 274-277.
- ZHU Liuxian, YANG Ling, YANG Mingjin, et al. Simulation research of soil cutting based on smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(4): 274-277. (in Chinese)
- 18 U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Evaluation of LS-DYNA soil material model147[R]. Volpe National Transportation Systems Center, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-094, 2004.
- 19 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 33-37.
- JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 33-37. (in Chinese)
- 20 RABCZUK T, EIBL J, STEMPNIWESKI L. Simulation of high velocity concrete fragmentation using SPH/MLSPH[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 56(10): 1421-1444.
- 21 武中庆. 勃利县气候条件与水稻产量关系探讨[J]. 现代农业科技, 2014(16): 240, 242.
- WU Zhongqing. A study on the relationship between climate and rice yield in Boli County[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(16): 240, 242. (in Chinese)