

1.MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆 粉碎联合作业机设计与试验

营雨琨¹, 霍 尚^{1,2}, 王 敏¹, 刘佩丰^{1,2},
何玉泽¹, 唐志坤^{1,2}, 卢勇涛¹

(1.新疆农垦科学院机械装备研究所,新疆 石河子 832000; 2.石河子大学机械电气工程学院,新疆 石河子 832000)

摘 要:针对残膜机械化回收过程中残膜回收率低、回收的残膜成捆质量差、膜捆遍地卸及作业油耗高等问题,设计了一种残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机。介绍了残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机的结构组成及工作过程,重点对残膜捡拾装置、打捆装置进行设计,并对残膜捡拾、打捆作业过程进行运动学和动力学分析。为验证残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机作业性能,进行了以收膜链耙转速、机具前进速度、收膜弹齿入土深度为试验因素,以残膜捡拾率、残膜含杂率、机具耗油量为响应值的田间试验,建立回归模型,并进行参数优化与试验验证。试验结果表明:影响残膜捡拾率的因素由强到弱依次为机具行驶速度、收膜链耙转速、弹齿入土深度;影响残膜含杂率的因素由强到弱依次为机具行驶速度、弹齿入土深度、收膜链耙转速;影响机具耗油量的因素由强到弱依次为机具行驶速度、弹齿入土深度、收膜链耙转速。理论最优的作业参数为链耙转速 $119.06 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、机组前进速度 $6.319 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、弹齿入土深度 63.29 mm 。田间验证试验表明:在圆整后的最佳工作参数条件下,残膜捡拾率均值为93.88%、残膜含杂率均值为79.76%、机具油耗量均值为 $14.85 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词:残膜回收;残膜打捆;秸秆粉碎;联合作业机;Box-Behnken

中图分类号:S224.4 **文献标志码:**A

Design and experiment of 1.MSF-2.0 plastic film recycling, bundling and straw crushing joint operation machine

YING Yukun¹, HUO Shang^{1,2}, WANG Min¹, LIU Peifeng^{1,2},
HE Yuze¹, TANG Zhikun^{1,2}, LU Yongtao¹

(1. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: A combined machine for residual film recycling, bundling, boxing, and straw crushing was designed to address the issues of low residual film recovery rate, poor bundling quality, widespread unloading of film bundles, and high fuel consumption during the mechanized recycling process. This study introduced the structural composition and working process of a combined machine for residual film recycling, bundling, and straw crushing, with a focus on optimizing the design of the plastic film picking device, bundling device, and straw crushing device. Through kinematic and dynamic analysis of the process of picking and bundling plastic film, the structural and working parameters of each functional component were determined. To verify the operational performance and fuel consumption of the combined machine for residual film recycling, bundling, and straw crushing, a three factor three-level quadratic regression experiment was conducted with the speed of the film harvesting chain rake, the forward speed of the machine, and the depth of the film harvesting bullet teeth entering the soil as experimental factors. The response values were film picking rate, film impurity rate, and unit fuel consumption. A regression model

收稿日期:2024-06-21

修回日期:2024-08-03

基金项目:新疆农垦科学院院级项目(2022YJ005);新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目(2022AB020);新疆生产建设兵团科技成果转化引导计划项目(2023BA004);"兵团英才"青年项目培养人选(王敏,2023-2025)

作者简介:营雨琨(1988-),男,新疆博乐人,助理研究员,主要从事农田残膜污染治理装备研发与应用研究。E-mail:406948543@qq.com

通信作者:王敏(1984-),女,甘肃天水人,研究员,主要从事农田残膜污染治理装备研发与应用研究。E-mail:275596114@qq.com

卢勇涛(1983-),男,河南鄢陵人,研究员,主要从事农田残膜污染治理装备研发与应用研究。E-mail:nkylt@163.com

was established to examine the effects of each factor on film picking rate, film impurity rate, and unit fuel consumption, and parameter optimization and experimental verification were carried out. The experimental results showed that the factors affecting the recovery rate of plastic film, from large to small, were as follows: machine driving speed>film harvesting chain rake speed>depth of tooth penetration into the soil. The factors influencing the impurity content of plastic film were ranked as follows: machine driving speed > depth of tooth penetration into the soil > speed of the film harvesting chain rake. Similarly, the factors affecting the implement's fuel consumption are ranked as follows: travel speed of the implement > depth of tooth penetration into the soil > speed of the film harvesting chain rake. The theoretically optimal operating parameters include a chain rake speed of $119.06\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, a unit forward speed of $6.319\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, a tooth penetration depth of 63.29 mm. Field validation experiments demonstrated that under the optimal working parameters (rounded values), the average plastic film recovery rate was 93.88%, the average impurity content of recycled plastic film was 79.76%, and the average of implement's oil consumption was $14.85\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: residual film recovery; plastic film bundling; straw crushing; joint operation machina; Box-Be-hnken

地膜覆盖技术具有增温保湿、抑制杂草等功能,在我国干旱半干旱农业区广泛应用^[1]。中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所通过整合分析我国 1979 年以来田间试验大数据发现,地膜覆盖技术可使 51 种作物产量平均提高 45.5%,水分利用效率平均提高 58.0%^[2]。2022 年,新疆农田地膜覆盖面积达到 $3.61\times 10^6\text{ hm}^2$,使用总量为 $2.41\times 10^5\text{ t}$,分别占全国农田地膜总面积的 21.44%和总使用量的 19.48%,在全国范围内居首^[3-4]。随着地膜覆盖使用量的逐年增加,农田中地膜大量残留并不断累积,导致严重的地膜污染,影响水肥迁移和土壤微生物活性,造成土壤板结,对作物生长与产量产生极大影响^[5-6]。

目前,机械化回收作为解决残膜污染问题的主要手段^[7-8],残膜回收机械性能直接关系作业效果、作业效率和效益,主流的残膜回收机根据收膜部件工作原理主要分为弹齿链耙结构、轨道滚筒结构、伸缩滚筒结构和齿带式 4 种类型^[9-11],如王吉奎等^[12]研制的 SMS-1500 型棉秆粉碎与残膜回收机,赵岩等^[13]设计的 CMJY-1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机,王文丽等^[14]设计的 1.MSD-1.1 残膜回收机,杨豫新^[15]设计的导向链耙式残膜回收机,田绍华等^[16]研制的气吸式残膜回收机等。尽管残膜回收机械化技术已取得显著进展,但仍存在一些问题。

本文针对现有残膜机械化回收过程中存在的残膜捡拾率低、回收的残膜成捆质量差、膜捆遍地卸及作业油耗高等问题,优化设计出可实现膜捆装箱的残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机。通过对残膜捡拾、打捆作业过程进行运动学和动力学分

析,确定各功能部件的结构参数和工作参数,进行整机关键结构设计,分析作业参数对残膜捡拾率、残膜含杂率及机具油耗量的影响,在棉田验证最优参数组合条件下的作业性能,旨在为农田残膜机械化高效回收技术与装备研发提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机及主要参数

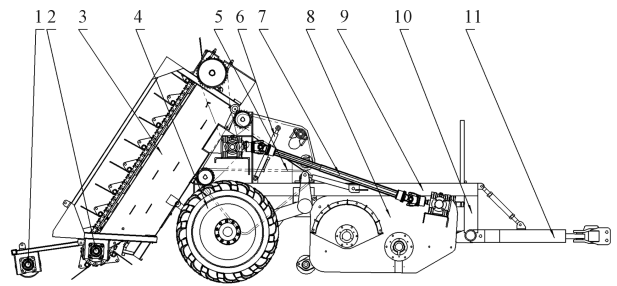
1.MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机结构如图 1 所示,主要由牵引架、机架、传动系统、膜捆箱、秸秆粉碎还田装置、打捆装置、残膜捡拾装置、地轮、地轮液压缸、地轮支撑臂等组成;其主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

1MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机采用半悬挂式的连接方式,由拖拉机牵引驱动。工作时,拖拉机动力输出轴将动力传递至齿轮箱,齿轮箱分别将动力分配至粉碎装置、打包装置及捡拾链耙;机组前行过程中,秸秆粉碎装置将秸秆粉碎,粉碎后的秸秆被均匀抛洒在机组一侧;弹齿杆上设置的弹齿在随弹齿杆转动过程中,将残膜捡拾挑起,沿输膜导轨运动,此时大量杂质在输送过程中掉落,当残膜运动至脱膜位置时,弹齿转向,在脱膜装置的作用下,残膜掉落在打捆腔内,在上下打捆皮带的“揉搓”作用下,残膜形成膜捆;当膜捆的直径达到预设尺寸时,打开打捆装置,膜捆自动进入膜捆箱内,机组继续作业;膜捆箱装载膜捆达到预定值(3~5 捆)时,在地头,将装在膜捆箱内的膜捆卸下,完成一个收膜周期。

1.3 传动线路

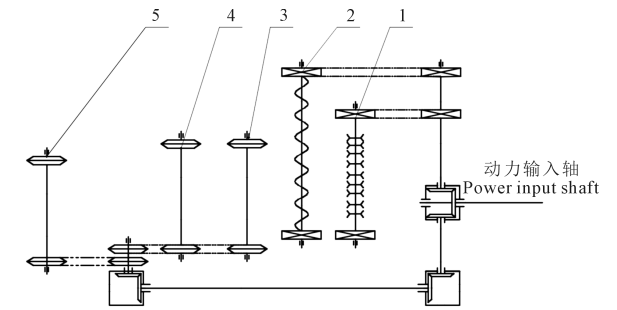
如图 2 所示,拖拉机动 力输出轴的动力通过齿 轮箱转换后,一路经过皮 带传动加速传递给秸秆粉 碎装置的刀轴,并减速传 递给搅龙;另一路则通过 传动轴和链轮传动分别传 递至残膜打捆装置和残 膜捡拾装置。



1.限深轮;2.链耙架;3.残膜捡拾装置;4.地轮;5.下打捆装置;
6.液压缸;7.传动轴;8.秸秆粉碎还田装置;
9.膜捆箱;10.机架;11.牵引架
1. Depth limiting wheel; 2. Chain rake frame; 3. Film picking device;
4. Ground wheel; 5. Lower bundling device; 6. Hydraulic cylinder;
7. Transmission shaft; 8. Straw crushing and returning device;
9. Film bundling box; 10. Frame; 11. Traction frame

图 1 1.MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机
Fig.1 1.MSF-2.0 plastic film recycling, bundling and straw crushing joint operation machine

表 1 主要工作参数			
Table 1 Main working parameters			
参数 Parameter	单位 Unit	数值 Value	
配套动力 Machine power	Hp	≥130	
整机尺寸 Overall size	mm×mm×mm	6400×2800×2900	
膜捆直径 Diameter of film bundle	mm	≤400	
膜捆箱装容量 Membrane bundle box capacity	捆 Bunch	3~5	
工作幅宽 Working width	mm	2200	



1.秸秆粉碎装置刀轴;2.绞龙轴;3.下打包装置主动支撑辊;
4.上打包装置主动支撑辊;5.残膜捡拾装置驱动辊
1. Straw crushing device blade shaft; 2. Twister shaft;
3. Active support roller of lower packaging device;
4. Active support roller of upper packaging device;
5. Drive roller of plastic film picking device

图 2 传动线路图
Fig 2 Transmission circuit diagram

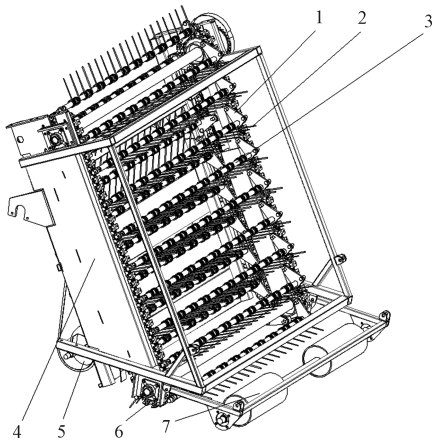
2 关键部件设计

2.1 残膜捡拾装置设计

残膜捡拾装置联合作业机核心功能部件,主要由链耙架、链轮、弹齿、弹齿装配轴、链条、输膜导轨、限深轮等部件组成,如图 3 所示。

如图 4 所示,采用直齿型弹齿,由螺栓固定在弹齿杆上,材料选用 65Mn 弹簧钢。根据新疆地区棉花采用 66 cm+10 cm 的机采棉种植模式^[17]及收膜要求,确定弹齿杆长度为 1 850 mm,每个弹齿杆上装有 10 个弹齿,相邻两弹齿杆上的弹齿交错安装,以在降低作业阻力的条件下达到更好的残膜捡拾效果。弹齿直径为 $D=8$ mm,装在弹齿杆上的螺旋部分长度为 $L_1=100$ mm。

2.1.1 弹齿的运动分析 残膜回收作业过程中,弹齿做复合运动:在随弹齿杆转动过程中随机组前进。其运动过程如图 5 所示,图 5 中 A 点为弹齿入



1.换向挡板;2.弹齿;3.弹齿装配轴;4.链耙架;
5.排杂蛟龙;6.下链轮;7.限深轮
1. Reversing baffle; 2. Teeth; 3. Teeth assembly shaft;
4. Chain rake frame; 5. Trash removal dragon;
6. Lower sprocket; 7. Depth limiting wheel

图 3 捡拾装置
Fig.3 Pickup device

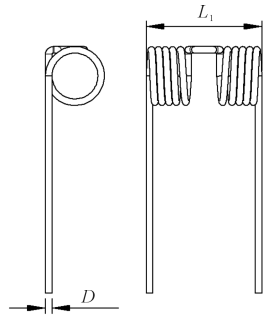


图 4 弹齿结构图
Fig.4 Structural diagram of spring teeth

土起始位置,B 点为弹齿入土最深位置,C 点为弹齿从土壤中升起的出土位置;机具前进速度为 V_1 ,方向沿 x 轴正方向;链轮角速度为 ω ,沿逆时针方向。

$\widehat{AB}$ 为入土过程运动轨迹 ($\theta = 0 \sim \frac{\pi}{2}$):

$$\begin{cases} v_{x_{AB}} = v_1 - (R + L) \omega \sin \theta \\ v_{y_{AB}} = - (R + L) \omega \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_1 为机具前进速度 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$); $v_{x_{AB}}$ 为 AB 段水平分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $v_{y_{AB}}$ 为 AB 段垂直分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); R 为弹齿轴回转半径 (mm); L 为弹齿伸出的长度 (mm); ω 为链轮的角速度 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); θ 为弹齿与水平方向的夹角 ($^\circ$)。

$\widehat{BC}$ 为出土过程运动轨迹 (θ 为 $\frac{\pi}{2}$ 到 π):

$$\begin{cases} v_{x_{BC}} = v_1 + (R + L) \omega \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \\ v_{y_{BC}} = - (R + L) \omega \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $v_{x_{BC}}$ 为 BC 段水平分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $v_{y_{BC}}$ 为 BC 段垂直分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

根据式(1)和式(2)可以推出:机具前进速度与 $\widehat{AB}$ 与 $\widehat{BC}$ 段的水平分速度比值对残膜回收效率影响显著,如图 6 所示。

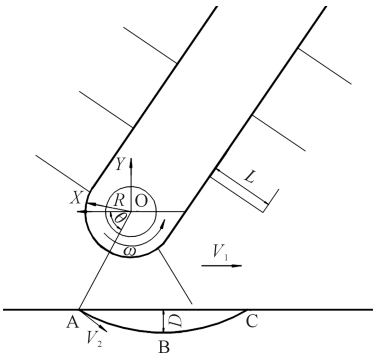


图 5 弹齿入土和出土运动分析

Fig.5 Analysis of tooth insertion and extraction movements

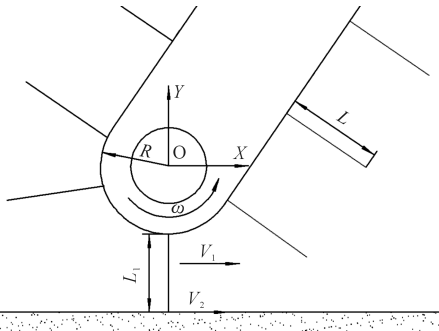


图 6 入土端弹齿速度与机具前进速度分析图

Fig.6 Analysis of the tooth velocity at the soil entry end and the forward speed of the machinery

记 λ 为拾膜弹齿尖端圆周线速度 V_2 与机具前进速度 V_1 的比值,则:

$$\lambda = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

$$V_2 = \omega \times L \quad (4)$$

由式(3)可知,当 $\lambda < 1$ 时,拾膜弹齿在进行复合运动时,其相对于机具前进方向的滑移特性^[18]导致实际拾膜过程中,弹齿尖端未能充分跟随机具行进速度同步向前推进。尽管弹齿通过圆周运动实现对地表残膜的接触与勾起,但由于单位时间内弹齿尖端行走弧长小于机具前进距离,使得部分残膜未能得到有效捡拾,增加漏捡残膜概率,影响残膜回收效果。

当 $\lambda = 1$ 时,此状态下弹齿以无相对滑移的圆周运动实现与机具前进速度同步拾取自然伸直状态下的残膜,但在实际农田复杂环境中,由于农田地面不平、土壤阻力、残膜紧贴程度以及作物残留物等因素的影响,在实际作业情境下,难以时刻保证这种工作状态。

当 $\lambda > 1$ 时,残膜回收过程中,弹齿尖端单位时间内行走的弧长在作业方向长度大于机具前进距离时,残膜受到拉伸而保持紧绷状态,利于减少杂质附着,且残膜与弹齿间摩擦力增加,提高残膜捡拾率。同时拾膜弹齿在工作区域相对地面产生与作业方向相反的分速度,此分速度有助于克服土壤对残膜的吸附力,使残膜被挑起并沿输膜导轨方向上升。随着 λ 值增大,理论上弹齿对残膜的摩擦力也随之增大,有助于提高残膜回收率。但 λ 值过大导致过度拉伸残膜,特别是在土壤阻力较大或者残膜粘附性强的情况下, λ 值过大可能会使弹齿在完成捡拾残膜后脱膜困难,反而将其沿原路径向后拖拽,导致残膜“回带”现象,加剧机械部件的磨损及残膜的缠绕问题。根据前期试验^[19]得出,当 λ 为 2.8~3.4 时收膜效果较好,且回收的残膜能被有效脱掉。 $R=200\text{ mm}$, $L=170\text{ mm}$,机具行驶速度 V_1 设定为 $5\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,带到公式(1)中,初步确定链轮角速度为 $87.21 \sim 231.32\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为验证不同 λ 的作业轨迹和效果,用 SOLIDWORKS MOTION 对弹齿运动轨迹进行多体运动学仿真分析,如图 7 所示,弹齿齿尖运动轨迹为余摆线。为验证不同的速比(拾膜弹齿尖端圆周线速度与机具前进速度之比)对收膜效果的影响,在同一链耙转速下,使用轮式 1354 拖拉机,分别在 B2、B3、C1 档进行试验。如图 8 (见 291 页)所示, $\lambda < 1$ 作业质量差, $\lambda = 1$ 作业质量较好但在实际作业中难以长时间维持, $\lambda > 1$ 回收效果好。根据作业质量的不同可以看出,弹齿入土深

度固定时,速比增大会使划痕更连续,收膜距离延长,从而提高收膜质量。

2.1.2 弹齿的力学分析 弹齿链耙的工作过程分为 3 个阶段:捡拾阶段、残膜上升运输阶段和残膜脱膜阶段。在残膜上升运输阶段,为确保残膜能够有效地从捡拾位置转移至脱膜装置,必须保证作用于残膜上的摩擦力大于其因旋转产生的离心力,从而实现稳定输送。

残膜回收过程中,当残膜被弹齿捡拾后,将随着弹齿的转动而沿弹齿链耙架进行向上运动,残膜所受到来自弹齿的作用力如图 9 所示。

残膜上升运输阶段,受力平衡条件需满足以下要求:

$$\begin{cases} F_f = F_n + G\cos\alpha \\ F_N = G\sin\alpha + F_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_f 为弹齿对残膜的摩擦力(N); F_n 为残膜跟随弹齿作圆周运动所需要的向心力(N); G 为残膜和残膜上杂质所受的重力(N); F_N 为残膜受到弹齿的支持力(N); α 为弹齿与竖直方向的夹角($^\circ$); F_1 为残膜受到的弹力(N)。

$$F_n = m \frac{v^2}{r} = mw^2r \quad (6)$$

残膜在上升输送过程中最容易脱落,上升运输阶段能满足残膜受到弹齿给的摩擦力大于残膜跟弹齿一起转动时所需的向心力,残膜才能稳定地在弹齿上不脱落。只要在上升阶段不脱落,其他 2 个阶段都能满足不脱落的条件。即:

$$\begin{cases} F_n = F_f - G\cos\alpha \\ \mu G\sin\alpha + F_1 \geq \frac{Gw^2r}{g} + G\cos\alpha \end{cases} \quad (7)$$

$$w \leq \sqrt{\frac{\mu g\sin\alpha + \frac{F_1g}{G} - g\cos\alpha}{r}} \quad (8)$$

经过测试残膜间的弹力取残膜所受最大拉力的一半 0.8 N,残膜和杂质重力为 1.6 N,与竖直方向夹角测量得 30° , g 取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,得出 $\omega \leq 2.832 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$,换算单位后得 $\omega \leq 169.92 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.1.3 弹齿不漏捡的条件 残膜回收作业时,弹齿杆上设置的拾膜弹齿对残膜进行挑拾,弹齿杆上相邻两排拾膜弹齿的运动轨迹如图 10 所示。相邻弹齿杆上的弹齿 1 和 2 入土后运动轨迹分别是 $\widehat{AA'}$ 和 $\widehat{BB'}$,拾膜弹齿伸入起膜杆齿上膜杂混合物中的深度为 H 。A 为弹齿 1 的入土位置, A' 为弹齿 1 的出土位置。B 为弹齿 2 的入土位置, B' 为弹齿 2 的出

土位置,如图 10 所示。为实现残膜回收而不遗漏,相邻 2 排拾膜弹齿在工作过程中的运动轨迹需存在一定程度的重叠区域。由此可得残膜不漏挑的条件^[20-21]:

$$S_1 = S_2 \geq S_0 \quad (9)$$

式中, S_0 为相邻两弹齿的入土点距离(mm); S_1 为弹齿 1 入土工作过程中的水平距离(mm); S_2 为弹齿 2 入土工作过程中的水平距离(mm)。

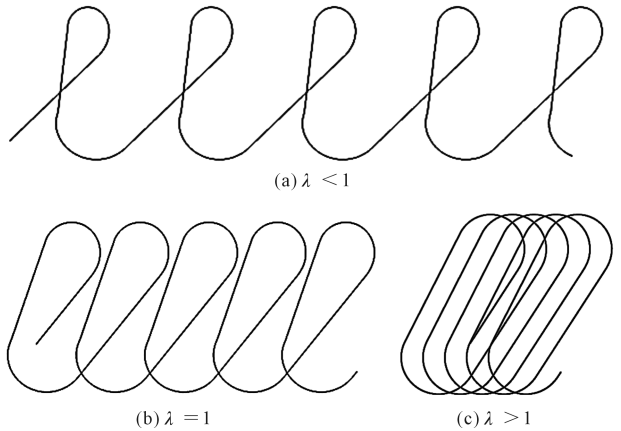
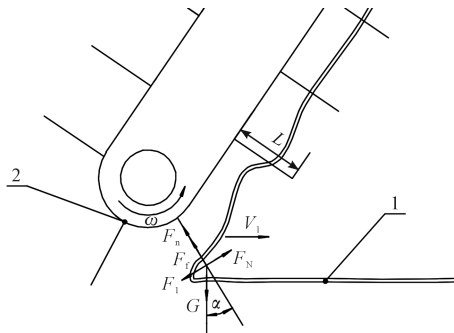


图 7 拾膜弹齿尖端运动轨迹

Fig.7 Motion trajectory of the tip of the film pickup cartridge

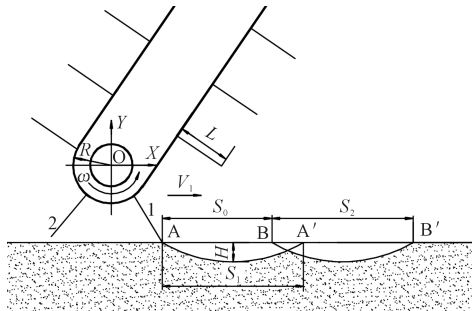


1.残膜;2.弹齿

1. Residual film; 2. Spring teeth

图 9 弹齿受力分析

Fig.9 Analysis of the force on the spring teeth



1.弹齿 1;2.弹齿 2

1.Spring teeth 1; 2. Spring teeth 2

图 10 相邻弹齿运动分析

Fig.10 Analysis of adjacent tooth motion

$$S_1 = v_1(t_2 - t_1) + (R + L) \int_{t_1}^{t_2} \cos(\omega t) dt \quad (10)$$

$$S_0 = v_1(t_1 - t_3) \quad (11)$$

式中, t_1 为 A 点对应弹齿 1 入土点的时间(s); t_2 为 A' 点对应弹齿 1 出土点的时间(s); L 为弹齿伸出的长度(mm); ω 为链轮的转速($r \cdot \min^{-1}$); t_3 为 B 点对应弹齿 2 入土的时间(s)。

根据式(9)(10),可计算出

$$t_2 - t_1 = \frac{2\arccos \frac{R + L - H}{R + L} - \pi}{\omega} \quad (12)$$

上下链轴上安装的链轮齿数都为 24 齿,相邻弹齿杆在切合处相差 8 个链节,可以算出相邻两弹齿杆转动角度差值为 $\frac{2\pi}{3}$,则

$$t_1 - t_3 = \frac{2\pi}{3\omega} \quad (13)$$

式中, t_1 为 A 点对应弹齿 1 的入土时间(s); t_3 为 B 点对应弹齿 2 的入土时间(s)。

根据式(8), $S_1 = S_2 \geq S_0$, 得

$$v_1(t_2 - t_1) + (R + L) \int_{t_1}^{t_2} \cos(\omega t) dt \geq v_1 \frac{2\pi}{3\omega} \quad (14)$$

化简可得:

$$\omega \geq \frac{\left[\arcsin \frac{\frac{2\pi}{3} - v(t_2 - t_1)}{R + L} \right]}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

$$n = \frac{30\omega}{\pi} \quad (16)$$

链条型号 16A, 节距 25.40 mm, 经过查询机械设计手册^[22]得到:

$$d = \frac{P}{\sin \frac{180^\circ}{z}} \quad (17)$$

由公式(17)算出链轮的分度圆直径 $d = 194.60$ mm, $v_1 = 6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 带到公式(15)中, $\omega \geq 98.52 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。由公式(8)得 $\omega \leq 169.92 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

由残膜力学分析和残膜不漏捡的条件,进一步确定链轮转速 n 的范围为 $98.52 \sim 139.92 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 考虑到实际工作条件,将链轮的转速范围调整为 $100 \sim 140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 以保证田间操作的便捷性与稳定性。

2.2 弹齿排布分析

弹齿在弹齿杆上的排列直接影响残膜回收效果,过密的弹齿排列会增加机具的负载,并增加脱膜难度,影响机具稳定性和可靠性。同时,密集的

弹齿会造成回收的残膜含杂率高,不利于残膜的后续加工处理。但是,弹齿的排布密度不能过低。排列过于稀疏,在残膜回收过程中,整排弹齿对残膜的摩擦力将减小,导致无法有效实现残膜的充分拉伸与分离,降低残膜回收的效果及效率。

根据新疆地区的机采种植模式^[23],防止产生排列过密或过疏的问题应遵循以下原则:

(1)均匀收膜与含杂率控制:新疆地区棉田一般采用 2.05 m 的标准残膜,膜边压土后的宽度为 1.90 m。根据作业需求,设定残膜回收宽度为 2 m,弹齿轴长设定为 1.85 m,残膜回收交错宽度为 1.9 m,如图 11 所示, $L_1 = 1\,900$ mm。总共配置了 19 个弹齿杆。每个弹齿杆上均等间隔排列 10 个弹齿,其间距为 150 mm。

(2)应力分布均衡与平衡力矩:为防止设备内部应力集中和不平衡力矩^[24],相邻弹齿杆上的弹齿采取交错排布的方式,确保各部件受力均衡,延长机械使用寿命,如图 12 所示。

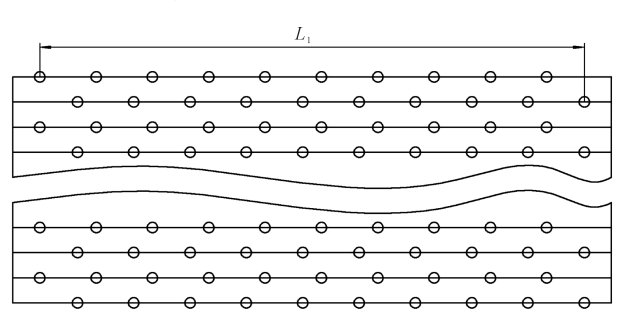
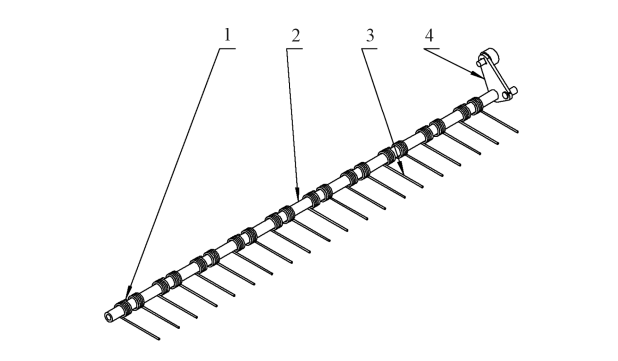


图 11 弹齿分布示意图

Fig.11 Schematic diagram of spring teeth distribution



1. 固定螺栓; 2. 弹齿杆; 3. 弹齿; 4. 换向支座
1. Fixed bolt; 2. Spring teeth bar; 3. Spring teeth; 4. Reversing support

图 12 弹齿轴总装图

Fig.12 Assembly diagram of the toothed shaft

2.3 打捆装置设计

残膜打捆方式主要为皮带打捆和多辊打捆^[25-26]。多辊打捆通过多个钢辊的旋转和压紧作用,将回收后的残膜进行打捆。多辊打捆对于牧草的打包较为成熟,但由于牧草和残膜物料特性差

异,残膜易于缠绕钢辊,易引起机具故障^[27]。皮带打捆通过打包皮带的“揉搓”作用形成膜捆^[28],其结构简单,成本低并且对膜的损伤性低,能有效提升膜捆的质量,减少膜捆的含杂量。

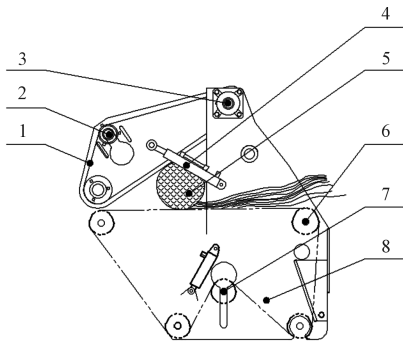
本文采用双皮带“揉搓”打捆的原理对回收的残膜进行打捆,结构如图13所示,主要由上打捆机构、上皮带张紧机构、下打捆机构及相应的支撑辊组成。

残膜打捆过程中,膜捆受到打捆装置的打捆力矩,其力矩对膜捆的形成和紧实度影响较大,故对膜捆在打捆装置中的受力进行分析,其进入打捆装置中的膜捆受力如图14所示。

$$\begin{cases} x: N_1 \sin \alpha + f_1 \cos \alpha - f_2 = 0 \\ y: N_2 + f_1 \sin \alpha - N_1 \cos \alpha - G = 0 \end{cases} \quad (18)$$

得出支持力为:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{\mu_2 G}{\mu_1 \sin \alpha + \sin \alpha - \mu_2 \cos \alpha + \mu_1 \mu_2 \sin \alpha} \\ N_2 = \frac{(\mu_1 \cos \alpha + \sin \alpha) G}{\mu_1 \cos \alpha + \sin \alpha - \mu_2 \cos \alpha + \mu_1 \mu_2 \sin \alpha} \end{cases} \quad (19)$$



1. 上打捆机构; 2. 上皮带张紧机构; 3. 上主动支撑辊; 4. 液压缸;
5. 膜捆; 6. 下主动支撑辊; 7. 可调张紧装置; 8. 下打捆机构
1. Upper bundling mechanism; 2. Upper belt tensioning mechanism;
3. Upper active support roller; 4. Hydraulic cylinder; 5. Film bundling;
6. Lower active support roller; 7. Adjustable tensioning device;
8. Lower bundling mechanism

图13 打捆装置

Fig.13 Baling device

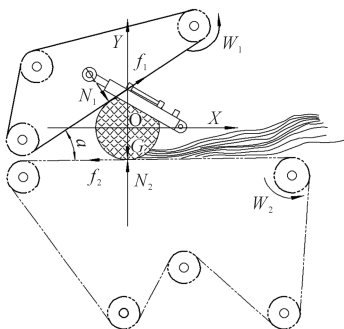


图14 膜捆受力分析

Fig.14 Force analysis of membrane bundle

式中, μ_1 是上打捆皮带的滑动摩擦系数, μ_2 是下打捆皮带的滑动摩擦系数。上、下打捆皮带材料都是PVC且花纹都为波纹带,故二者表面粗糙程度相同, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ 。

上、下打捆皮带与膜捆间存在相互运动,两者间摩擦力定义为滑动摩擦力,则 $f_1 = \mu N_1$, $f_2 = \mu N_2$ 。打捆过程中,上、下打捆皮带施加的力矩作用使得残膜被紧紧压缩,形成一个紧密而坚固的残膜捆。

$$\begin{cases} M = M_{f_1} + M_{f_2} \\ M = \frac{\mu Gr_1 + \mu^3 G \cos \alpha r_2}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} + \frac{\mu Gr_2}{1 + \mu^2} \end{cases} \quad (20)$$

如图15所示,力矩 M 为打捆装置中的打捆力矩($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$); r_1 为残膜捆中心到上打捆皮带的距离(mm); r_2 为残膜捆中心到下打捆皮带的距离(mm); α 为上皮带与下皮带之间的夹角($^\circ$); μ 为上、下打捆皮带的摩擦系数。

打捆过程中,残膜捆可看作一个质地均一的物体,其到上打捆皮带的距离和到下打捆皮带的距离相等, $r_1 = r_2 = r$,简化 M 为:

$$M = \frac{\mu Gr + \mu^3 G \cos \alpha r}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} + \frac{\mu Gr}{1 + \mu^2} \quad (21)$$

对打捆力矩 M 求偏导,可见摩擦因素 μ 、上打捆装置的水平夹角 α 、打捆半径对打捆力矩的影响较大。

根据实际作业情况,结合回收残膜捆清理加工要求和新疆农田特点,夹角 α 为 34° ,打包腔截面为三角形,下打包区域和上打包区域长度分别为120 cm和110 cm。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证1.MSF-2.0残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机的作业性能,2023年10月在新疆维吾尔自

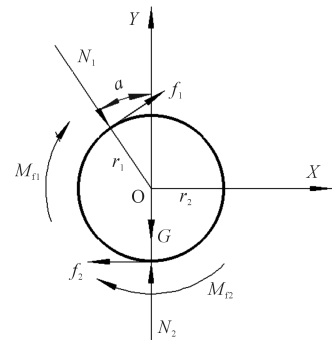


图15 膜捆力矩分析

Fig.15 Analysis of membrane bundling torque

治区商户地乡湖东村棉田开展田间试验,试验条件如表 2。试验田地为棉田,土壤土质偏粘,地势平坦,收膜试验前滴灌带已回收。

3.2 试验方法

依据国家标准《残地膜回收机 GB/T 25412-2021》^[29],对 1.MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机进行试验检测。试验测定长度大于 100 m,宽度为 2.05 m,在试验区域内选择 5 个地点,按照随机分布的分布原则,分别对每个采样点处残留残膜的质量进行精确测量,综合 5 个采样点的数据以估算整个作业区域内的平均残膜残留量及分布状况,将回收的残膜进行清洗处理测定其质量^[30]。残膜回收率、含杂率、机具油耗量性能评价指标的计算公式为:

$$Y_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$
 (21)

$$Y_2 = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\%$$
 (22)

$$Y_3 = \frac{V_1}{S_1}$$
 (23)

式中, m_0 为作业区域铺设残膜总质量(kg); m_1 为作业区域未被回收残膜质量(kg); m_2 为残膜回收膜捆总质量(kg); m_3 为清洗干净后残膜质量(kg); Y_1 为残膜捡拾率(%); Y_2 为残膜含杂率(%); Y_3 为机具耗油量(L·hm⁻²); V_1 为消耗油量体积(L); S_1 为作业面积(hm²)。

3.3 试验设计

根据前期的理论分析和试验研究,选择收膜链耙转速 X_1 ,机具前进速度 X_2 ,捡拾弹齿入土深度 X_3 为试验因素,残膜捡拾率 Y_1 ,残膜含杂率 Y_2 ,机具

耗油量 Y_3 为响应值。多因素试验采用三因素三水平的 Box-Behnken 试验原理进行组合试验^[31]。分析残膜捡拾率 Y_1 ,残膜含杂率 Y_2 ,机具耗油量 Y_3 与试验因素的关系。试验因素编码如表 3 所示,通过理论分析和单因素试验,确定收膜链耙转速范围为 100~140 r·min⁻¹,机具前进速度范围为 6~10 km·h⁻¹,捡拾弹齿入土深度范围为 35~65 mm。确定正交试验方案如表 4 所示,每组试验重复 5 次,取 5 次试验结果的平均值作为试验结果,软件使用 Design Expert 13 进行分析处理。

试验过程中机具正常运行,其残膜捡拾率为 88%~95%,残膜含杂率为 70%~85%,机具耗油量为 13.65~17.70 L·hm⁻²,符合我国现行国家标准《残地膜回收机 GB/T 25412-2021》^[29]。

表 2 试验条件
Table 2 Test conditions

项目 Project	单位 Unit	参数 Parameter
作物类型 Crop type	棉花 Cotton	
土壤坚实度 Soil compaction	MPa	0.45
土壤含水率 Soil moisture content	%	7.98
残膜宽度 Residual film width	mm	2 050
残膜厚度 Residual film thickness	mm	0.01
铺膜时间 Laying time	d	185
棉花种植模式 Cotton planting mode	cm+cm	66+10

表 3 试验因素编码
Table 3 Encoding of experimental factors

水平 Level	收膜链耙转速 Speed of film collecting chain rake/(r·min ⁻¹)	机具行驶速度 Machine travel speed /(km·h ⁻¹)	弹齿入土深度 Depth of tooth insertion into the soil/mm
-1	100	6	35
0	120	8	50
1	140	10	65

表 4 试验方案与结果
Table 4 Experimental plan and results

试验顺序 Sequence	A:收膜链耙转速 A: Speed of film collecting chain rake /(r·min ⁻¹)	B:机具行驶速度 B: Machine travel speed/(km·h ⁻¹)	C:弹齿入土深度 C: Depth of tooth insertion into the soil/mm	残膜捡拾率 Residual film picking rate/%	残膜含杂率 Residual film impurity rate/%	机具油耗量 Tool fuel consumption /(L·hm ⁻²)
1	100	10	50	89.03	84.11	16.65
2	120	6	65	91.43	75.47	14.70
3	120	8	50	95.79	77.49	16.20
4	120	6	35	89.95	72.41	14.10
5	140	6	50	94.86	74.35	14.40
6	120	8	50	95.76	77.25	16.05
7	100	6	50	89.21	73.49	13.95
8	140	8	35	89.21	78.95	15.45
9	120	8	50	95.32	77.02	15.75
10	120	8	50	95.98	77.12	16.05
11	120	10	65	89.64	85.96	17.55
12	120	8	50	95.21	77.37	16.05
13	120	10	35	88.23	82.41	16.20
14	140	10	50	89.73	84.86	16.65
15	140	8	65	93.95	81.27	16.95
16	100	8	65	89.78	81.65	16.35
17	100	8	35	89.85	77.25	15.30

表 5 方差分析

Table 5 Analysis of variance

变异来源 Source of variation	残膜捡拾率 Y_1				残膜含杂率 Y_2				机具油耗 Y_3			
	Residual film picking rate Y_1				Residual film impurity rate Y_2				Tool fuel consumption Y_3			
	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F_1	P_1	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F_1	P_1	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F_1	P_1
回归模型 Regression model	9	15.1300	65.3921	<0.0001 **	9	28.6345	977.4325	<0.0001 **	9	0.0081	77.3334	<0.0001 **
X_1	1	10.7424	46.4325	0.0003 **	1	1.0764	36.6453	0.0005 **	1	0.0008	7.6723	0.0277 *
X_2	1	8.4332	36.4534	0.0005 **	1	216.5343	7392.7354	<0.0001 **	1	0.0545	522.1234	<0.0001 **
X_3	1	7.1423	30.8875	0.0009 **	1	22.2134	758.3453	<0.0001 **	1	0.0112	107.8873	<0.0001 **
$X_1 X_2$	1	4.7123	20.3564	0.0028 **	1	0.0034	0.1033	0.7573	1	0.0002	2.1673	0.1853
$X_1 X_3$	1	5.7834	25.0345	0.0016 **	1	1.0854	36.9353	0.0005 **	1	0.0002	2.1673	0.1853
$X_2 X_3$	1	0.0012	0.0053	0.9440	1	0.0643	2.0564	0.1954	1	0.0006	5.9953	0.0442 *
残差 Residual error	7	0.2314			7	0.0293			7	0.0001		
失拟 Lack of fit	3	0.3945	3.6254	0.1230	3	0.0211	0.5945	0.6511	3	0.0001	0.6944	0.6019
误差 Error	4	0.1090			4	0.0355			4	0.0001		

注: ** 表示差异极显著 ($P<0.01$); * 表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: ** means highly significant differences ($P<0.01$); * means significant differences ($P<0.05$).

3.4 试验结果分析

3.4.1 残膜捡拾率影响因素 由表 5 方差分析结果显示,试验因素 X_1 、 X_2 、 X_3 与 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 所建立二次回归模型的 P_1 、 P_2 和 P_3 均小于 0.0001,达极显著水平;失拟项 P_1 、 P_2 和 P_3 均大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,在性能试验中能够有效预测各种试验结果。

由表 5 和图 16 可知,收膜链耙转速、机具前进速度、捡拾弹齿入土深度对残膜捡拾率影响均极显著。

残膜捡拾率随着收膜链耙转速先增加后减小,并且增长趋势是先陡峭后平缓,收膜链耙上弹齿入土端的线速度大于机具前进速度,链耙转速速度增大,相邻弹齿工作区域重合度随之增大,有效收膜距离增加,并且此时残膜被弹齿捡拾后处于拉伸状态,有助于残膜的捡拾和输送;链耙转速过低,有效收膜距离降低,残膜处于松弛状态,残膜在向上运输阶段从弹齿上脱落。然而,在实际作业条件下,收膜链耙架的旋转速度过高,则可能导致残膜在回收过程中承受过度拉伸载荷。残膜所受的瞬时拉力超过残膜材料所能承受的拉伸强度极限值,就会导致残膜发生撕裂破碎的现象,从而影响残膜回收的完整性与回收率。

随着机具的前进速度增加,弹齿入土端的线速度相对于机具前进速度减小,弹齿的有效作业距离减小,相邻弹齿工作区域减小,导致残膜无法被有

效捡起,残膜捡拾率降低。

残膜捡拾率随弹齿入土深度增加而增大,弹齿入土深度增加,其弹齿作业的有效距离增加,并且残膜由于土壤的挤压作用使其处于弹齿较高部位,避免在运输过程中残膜掉落的问题。但是入土深度不宜过大,过大的入土深度可能会导致弹齿受力过大变形,严重影响捡拾效果,并减少弹齿使用寿命。此外,入土深度过大,土壤在挤压作用下可能将残膜推向弹齿根部,进而加大了脱膜难度,对后续残膜的有效捡拾造成不利影响。

3.4.2 残膜含杂率影响因素 由表 5 和图 17 可知,收膜链耙转速、机具前进速度、捡拾弹齿入土深度对残膜含杂率影响均极显著。残膜含杂率随着机具的行驶速度增加先缓慢减小后增加,残膜含杂率先减小是由于链耙转速与机具前进速度趋于合适的速比,此时弹齿入土末端的线速度大于机具前进速度,并且此时残膜回收过程中残膜处于被拉伸状态,杂质在其表面随机具运行过程中的振动掉落。当机具速度继续增大时,此时机具前进速度和链耙转速不是合适速比,机具前进速度过快,杂质来不及经过振动作用排出就被回收到膜包里,造成残膜杂质率增加。同时机具速度继续增加,残膜回收量及杂质回收总量同步呈现出递减趋势,其中残膜回收减少的效果尤为明显,这也导致残膜含杂率提高。收膜链耙转速对于含杂率影响显著,链耙转速增加时残膜的运输阶段时间相应缩短,其在运输过

程中杂质由于机械振动作用掉落的过程就越短,所以残膜的杂质增加。

3.4.3 机具耗油量影响因素 由表 5 和图 17 可知,机具行驶速度和弹齿入土深度对机具耗油量影响极显著。机具行驶速度增加时,单位时间内残膜捡拾量增加,动力输出轴需要的力矩变大,油耗上升。弹齿的入土深度增加,机具所需要的扭矩就会增加,油耗也会增加。收膜链耙转速对机具的油耗影响显著,收膜链耙转速增加,使得机具内部传动系统的负荷增大,从而加大拖拉机的功率输出,间接增加油耗。保障残膜回收作业效率的同时最大限度降低油耗,应合理选择机具行驶速度、弹齿入土深度和收膜链耙转速。选取适宜作业速度,兼顾捡拾效果与节能需求;根据土壤条件与作业环境差异调节弹齿入土深度,确保高效回收且减少能耗。通过试验验证确定机具最佳行驶速度和收膜链耙最优转速,平衡回收率与能耗,寻求作业质量和降低油耗的最优平衡点。

拟合的回归方程如下:

$$Y_1 = 95.43 + 1.35X_1 - 1.29X_2 + 1.01X_3 - 0.87X_1X_2 + 1.33X_1X_3 - 0.0175X_2X_3 - 2.17(X_1)^2 - 2.92(X_2)^2 - 2.70(X_3)^2 \quad (24)$$

$$Y_2 = 77.73 + 0.5587X_1 + 5.20X_2 + 1.47X_3 - 0.0275X_1X_2 - 0.265X_1X_3 + 0.1225X_2X_3 + 0.9655(X_1)^2 + 0.5030(X_2)^2 + 0.8255(X_3)^2 \quad (25)$$

$$Y_3 = 1.07 + 0.0138X_1 + 0.0925X_2 + 0.0312X_3 - 0.0025X_1X_2 - 0.0050X_1X_3 + 0.0025X_2X_3 - 0.0075(X_1)^2 - 0.0300(X_2)^2 + 0.0025(X_3)^2 \quad (26)$$

通过分析结果得到最佳作业参数组合为:收膜链耙转速 119.06 r · min⁻¹,机具前进速度 6.319 km · h⁻¹,捡拾弹齿入土深度 63.29 mm。

4 田间验证

为验证 1.MSF-2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机的最佳作业参数效果,于 2023 年 10—11 月在新疆生产建设兵团第六师芳草湖农场和新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾市四道河子镇两地开展田间验证试验。用 1354 轮式拖拉机牵引作业,选取取整后的最优结果收膜链耙转速 120 r · min⁻¹,机具前进速度 6.3 km · h⁻¹,弹齿入土深度 63 mm 进行田间试验,其结果如表 6 所示:试验序号 1~3 的试验属于 10 月田间试验,试验序号 4~6 的试验属

于 11 月田间试验。
由上述田间试验得出,田间环境不同对残膜捡拾率、残膜含杂率、机具耗油量有一定影响。

表 6 试验结果
Table 6 Test results

试验序号 Test number	残膜捡拾率 Residual film picking rate	含杂率/% Trash content	机具耗油量 Tool fuel consumption /(L · hm ⁻²)
1	94.56	78.23	14.70
2	94.15	76.51	14.25
3	93.85	82.12	15.15
4	93.54	80.21	15.30
5	92.87	82.34	15.15
6	94.31	79.21	14.70
平均值 Average value	93.88	79.76	14.85

5 结 论

1)通过对弹齿在捡拾过程中的弹齿运动学和力学分析,初步确定收膜链耙转速范围为 100~140 r · min⁻¹,收膜宽度为 2 m。通过对打捆力矩的分析确定上下打捆装置夹角 α 为 34°,下打包区域和上打包区域长度分别为 120 cm 和 110 cm。初步确定影响残膜捡拾率、残膜含杂率和机具油耗量的相关试验因素。

2)结合 Box-Behnken 响应曲面设计,采用三因素三水平响应面分析方法,对设计的残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机进行残膜回收性能试验,通过响应曲面分析得到影响残膜捡拾率的因素由大到小依次为机具行驶速度、收膜链耙转速、弹齿入土深度;影响残膜含杂率的因素由大到小依次为机具行驶速度、弹齿入土深度、收膜链耙转速;影响机具耗油量的因素由大到小依次为机具行驶速度、弹齿入土深度、收膜链耙转速。

3)建立残膜捡拾率和残膜含杂率与机具前进速度、收膜链耙转速、弹齿入土深度二次多项式回归模型。获得残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机最佳工作配合为收膜链耙转速 119.06 r · min⁻¹、机具前进速度 6.319 km · h⁻¹、弹齿入土深度 63.29 mm。田间验证试验表明,在圆整后的最佳工作参数条件下,残膜捡拾率均值为 93.88%、残膜含杂率均值为 79.76%、机具油耗量均值为 14.85 L · hm⁻²。整机性能较优化前有明显提升,各项作业指标均达到国家和行业标准要求。

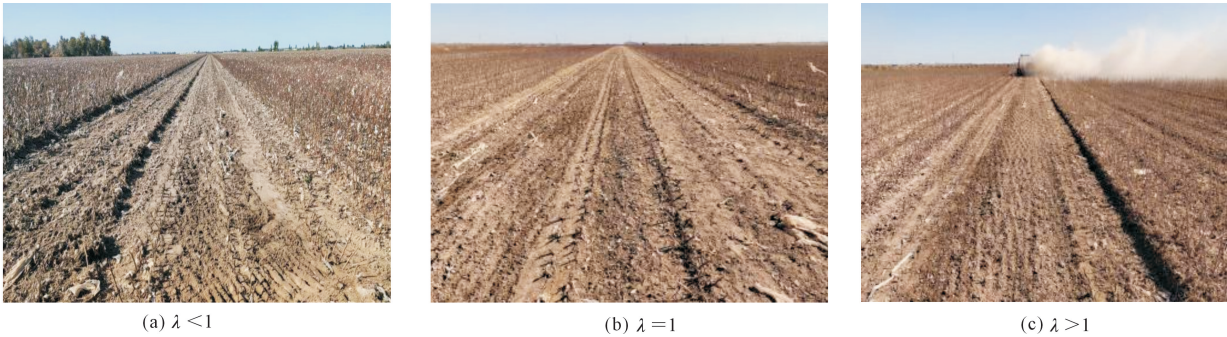


图 8 不同机具行驶速度的作业质量

Fig.8 Work quality of different machine speeds

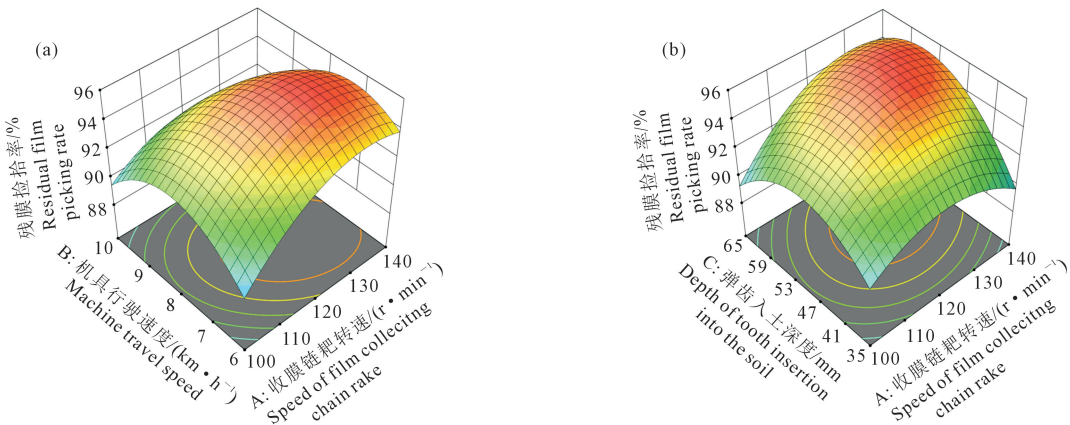


图 16 各因素对残膜捡拾率的影响

Fig.16 Influence of various factors on residual film recovery rate

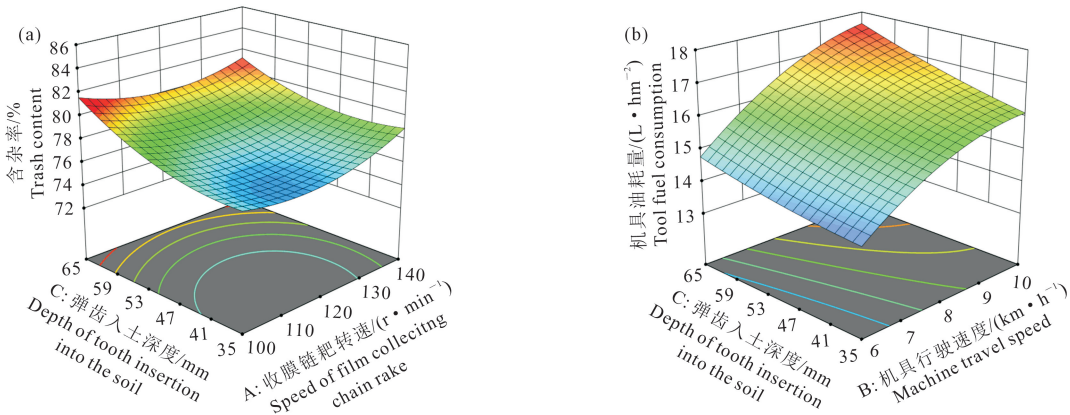


图 17 各因素对含杂率和机具油耗量的影响

Fig.17 Influence of various factors on impurity content and machine fuel consumption

参考文献:

[1] 高海河, 刘宏金, 高维常, 等. 作物地膜覆盖技术适宜性及其在东北春玉米上的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 95-107.
GAO H H, LIU H J, GAO W C, et al. The suitability of crop plastic film mulching technology and its application on spring maize in North-east China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 95-107.

[2] SUN D B, LI H G, WANG E L, et al. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency[J]. National Science Review, 2020, 7(10): 1523-1526.

[3] 曹肆林, 谢建华, 杨豫新, 等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1514-1528.
CAO S L, XIE J H, YANG Y X, et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recovery combined machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514-1528.

[4] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴-2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011: 46.
Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics.China Rural Statistical Yearbook-2011[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011: 46.

[5] 黄璐. 聚乙烯地膜残留对作物产量、土壤质量及土壤微生物多样性的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
HUANG L. Effects of polyethylene film residue on crop yield, soil quality, and soil microbial diversity [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.

[6] 张金瑞, 任思洋, 戴吉照, 等. 地膜对农业生产的影响及其污染控制[J]. 中国农业科学, 2022, 55(20): 3983-3996.
ZHANG J R, REN S Y, DAI J Z, et al. Influence of plastic film on agricultural production and its pollution control[J]. Scientia AgriculturaSinica, 2022, 55(20): 3983-3996.

[7] 胡灿, 王旭峰, 陈学庚, 等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 213-224.
HU C, WANG X F, CHEN X G, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 213-224.

[8] 李伟, 廖培旺, 于家川, 等. 浅议地膜机械化回收[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(8): 17-22.
LI W, LIAO P W, YU J C, et al. Study on the mechanized recovery of mulch film[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(8): 17-22.

[9] 闫盼盼. 弹齿链耙式播前残膜回收机的设计研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
YAN P P. Design and research of a spring toothed chain rake type pre sowing residual film recycling machine [D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.

[10] 张恒, 康建明, 蒋平, 等. CMJD-1500 型残膜捡拾打包机作业参数优化[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 99-105, 112.
ZHANG H, KANG J M, JIANG P, et al. Optimization of working parameters of CMJD-1500 type plastic film residue collecting and balling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 99-105, 112.

[11] 靳伟, 白圣贺, 张学军, 等. 伸缩钉齿式残膜捡拾机参数优化及试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 162-166.
JIN W, BAI S H, ZHANG X J, et al. Parameter optimization and test of telescopic nail tooth type residual film pick-up machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44 (7): 162-166.

[12] 王吉奎, 付威, 王卫兵, 等. SMS-1500 型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 168-172.
WANG J K, FU W, WANG W B, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (7): 168-172.

[13] 赵岩, 郑炫, 陈学庚, 等. CMJY-1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 1-9.
ZHAO Y, ZHENG X, CHEN X G, et al. Design and test of CMJY-1500 type plastic film residue collecting and bailing machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 1-9.

[14] 王文丽, 毕方淇, 李志, 等. 1MSD-1.1 型残膜回收机关键部件设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8): 40-46.
WANG W L, BI F Q, LI Z, et al. Design and test of key components of 1MSD-1.1 residual plastic film collector[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 40-46.

[15] 杨豫新. 导向链耙式残膜回收机的设计及试验[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
YANG Y X. Design and experiment of a guide chain rake type residual film recycling machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.

[16] 田绍华, 王萍, 康建明, 等. 气吸式残膜回收机集膜装置改进设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(4): 1-6, 95.
TIAN S H, WANG P, KANG J M, et al. Improved design and test of film collecting device of air suction residual film recovery machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 1-6, 95.

[17] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90-99.
NING S R, ZUO Q, SHI J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 90-99.

[18] 张佳喜, 王学农, 张丽, 等. 农田地膜拉伸性能变化对缠绕式回收的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 41-47.
ZHANG J X, WANG X N, ZHANG L, et al. Effects of mechanical tensile properties of plastic film on plastic recycling method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 41-47.

[19] 何玉泽, 卢勇涛, 王敏, 等. 4MKJ 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机的研制与试验[J]. 新疆农机化, 2023, (2): 7-8, 22.
HE Y Z, LU Y T, WANG M, et al. Development and test of 4MKJ residual film recycling and straw crushing integrated machine [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023, (2): 7-8, 22.

[20] 杨松梅. 随动式棉田残膜回收机设计及关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
YANG S M. Design and key technology research of a follow up cotton field residual film recycling machine [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[21] 康建明, 彭强吉, 王士国, 等. 弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 295-303.
KANG J M, PENG Q J, WANG S G, et al. Improvement design and testing of the picking device for the spring toothed residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 295-303.

[22] 成大先. 机械设计手册: 单行本. 机械传动[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 15-35.
CHENG D X. Mechanical transmission [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 15-35.

[23] 刘玲, 陈玉兰. 新疆农用地膜使用现状问题及防治对策[J]. 河北农业科学, 2023, 27(4): 102-104.
LIU L, CHEN Y L. Current situation, problems and control measures of agricultural mulch film use in Xinjiang[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(4): 102-104.

[24] 陆仲达, 王丽婧, 张金凤, 等. 基于重复控制的多轴旋转机械动不平衡问题研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2015(2): 86-89.
LU Z D, WANG L J, ZHANG J F, et al. Research of dynamic unbalance of multiple spindle rotating mechanical based on repetitive control[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2015(2): 86-89.

[25] 韩正晟, 王松林, 高爱民, 等. 全膜双垄沟钢辊皮带式残膜回收

打捆机: CN201420488981.4[P]. 2014-08-28.

HAN Z M, WANG S L, GAO A M, et al. Full film double ridge groove steel roller belt type residual film recycling and bundling machine: CN201420488981.4[P]. 2014-08-28.

- [26] 王学农, 刘杰, 刘旋峰, 等. 无芯卷膜式残膜打包装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 28-35.
WANG X N, LIU J, LIU X F, et al. Design and test of a coreless-roll packing device for residual film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 28-35.
- [27] 黄爽. 残膜捡拾打包机的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
HUANG S. Design and experimental research on residual film picking and packaging machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [28] 王征, 王吉奎, 唐永飞, 等. 带式残膜揉搓打包机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 11-18.
WANG Z, WANG J K, TANG Y F, et al. Design and test of the belt-

type residual film rubbing and baling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 11-18.

- [29] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 残地膜回收机: GB/T 25412-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China, SAC. Farm wastefilm-pickup machines: GB/T 25412-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [30] 杜子芳. 抽样技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 78-97.
- DU Z F. Sampling techniques and practices[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 78-97.
- [31] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 87-109.
- XU X H, HE M Z. Experimental design and design expert, SPSS application[M]. Beijing: Science Press, 2010: 87-109.

(上接第 280 页)

- [18] 闫妍, 史海滨, 苗庆丰, 等. 基于旱排控盐模型的沿黄灌区不同盐类间水盐运移与平衡分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 346-359.
YAN Y, SHI H B, MIAO Q F, et al. Water and salt transport pattern and balance analysis among different land classes in Yellow River irrigation area based on dry drainage salt control model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 346-359.
 - [19] REN D Y, XU X, HAO Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin; application to maize, sunflower and watermelon[J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122-139.
 - [20] 张文聪. 河套灌区典型斗渠灌排单元农业水文过程与干排盐系统优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
ZHANG W C. Research on agricultural hydrological process and optimal allocation of dry drainage system in a typical irrigation and drainage unit of Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
 - [21] 陈小兵, 杨劲松, 杨朝晖, 等. 渭干河灌区灌排管理与水盐平衡研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 59-65.
CHEN X B, YANG J S, YANG C H, et al. Irrigation-drainage management and hydro-salinity balance in Weigan River Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 59-65.
 - [22] ZHAO Y, SHI H B, MIAO Q F, et al. Analysis of spatial and temporal variability and coupling relationship of soil water and salt in cultivated and wasteland at branch canal scale in the Hetao Irrigation District[J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2367.
 - [23] 童文杰, 陈中督, 陈阜, 等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 131-137.
TONG W J, CHEN Z D, CHEN F, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 131-137.
 - [24] ALLEN R, CLEMMENS A, BURT C, et al. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 24-36.
 - [25] 戴佳信, 史海滨, 田德龙, 等. 内蒙古河套灌区主要粮油作物系数的确定[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 23-27.
DAI J X, SHI H B, TIAN D L, et al. Determined of crop coefficients of main grain and oil crops in Inner Mongolia Hetao Irrigated Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 23-27.
 - [26] 阮本清, 张仁铎, 李会安. 河套灌区水平衡机制及耗水量研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 70-88.
RUAN B Q, ZHANG R D, LI H A. Research on water balance mechanism and water consumption in Hetao Irrigation District[M]. Beijing: Science Press, 2008: 70-88.
 - [27] 韦芳良, 沈灿, 刘洁颖, 等. 基于数值模拟的干排水控盐效果影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (5): 85-90.
WEI F L, SHEN C, LIU J Y, et al. Analysis based on numerical simulation on the influencing factors of salinity control effect of Dry Drainage[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (5): 85-90.
 - [28] HUANG Y J, MA Y B, ZHANG S W, et al. Optimum allocation of salt discharge areas in land consolidation for irrigation districts by SaphysMod[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107060.
 - [29] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255-269.
WANG G S, SHI H B, LI X Y, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different land types in Hetao Irrigation Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 255-269.
 - [30] WU J W, ZHAO L R, HUANG J S, et al. On the effectiveness of dry drainage in soil salinity control[J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, 52(11): 3328-3334.