

导向链耙式地表残膜回收机设计与试验

谢建华¹, 杨豫新¹, 曹肆林^{1,2}, 张毅¹, 周亚宾¹, 马卫彬¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对耙齿式残膜回收机工作过程中存在漏捡、脱膜不彻底、耙齿回带残膜等问题, 该研究设计了导向链耙式地表残膜回收机。设计了导向链耙式拾膜机构以及耙齿总成与输送链的连接结构, 以解决现有链齿式拾膜装置需要输送链弯折实现脱膜的问题; 确定了耙齿结构和耙齿的排布; 采用旋转式脱膜装置配合导向耙齿提升脱膜效果; 在膜箱后部设计了推膜机构以提高装载量; 应用机械加液压的组合方式实现拾膜、脱膜与推膜的传动需求; 通过运动分析确定了各主要运动部件的结构参数。为了验证机具关键部件的可靠性与作业效果, 以机具前进速度、耙齿入土深度、链耙输入转速为试验因素, 以拾膜率与缠膜率为指标, 进行了拟水平正交试验。试验结果表明: 影响拾膜率的主次因素为链耙输入转速、机具行进速度、耙齿入土深度; 影响缠膜率的主次因素为链耙输入转速、耙齿入土深度、机具行进速度。以拾膜率为主要指标, 利用综合平衡法确定较优的作业参数组合为机具行进速度 8 km/h、耙齿入土深度 30 mm、链耙输入转速 143 r/min。利用较优参数组合进行田间验证试验, 拾膜率为 88.73%, 缠膜率为 1.91%, 研究结果可为残膜回收机的优化提供参考。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 残膜回收; 导向链耙; 拾膜装置; 脱膜装置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.009

中图分类号: S223.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-22-0076-11

谢建华, 杨豫新, 曹肆林, 等. 导向链耙式地表残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 76-86.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.009 <http://www.tcsae.org>

Xie Jianhua, Yang Yuxin, Cao Silin, et al. Design and experiments of rake type surface residual film recycling machine with guide chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 76-86. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.009 <http://www.tcsae.org>

0 引言

覆膜栽培具有保质增产的作用, 自 20 世纪 70 年代引入中国以来, 已广泛应用于农业生产当中^[1-4]; 地膜使用量持续增长, 覆盖作物从蔬菜扩展至大面积与多种类的粮食作物, 目前中国已成为地膜覆盖面积最大的国家^[5-7]。长期超薄地膜的铺放带来了严重的地膜残留, 以聚乙烯为基材的地膜自然环境下难以降解, 地膜残留积聚造成土壤中的微生物难以存活、土壤团聚结构被破坏、水分流通受阻、土壤盐碱化及土壤板结等问题^[8-12]。地膜残留对作物生长、发育负效应显著, 已成为制约农业可持续发展的重要因素^[13-15]。

为遏制残膜增量, 国内外研究人员进行了大量研究, 现阶段国外以卷收为主; 中国受成本与种植模式等影响, 已研制出多种类型残膜回收机, 目前常用的收膜方式为搂集、扎膜、筛分等, 各类收膜机均取得了较好的试验结果^[16-19]。其中, 耙齿式捡拾装置集合了搂集和扎膜的优点, 具有较强的适应能力, 回收率与工作效率高^[20-21]。郭文松等^[22]设计了 4CML-1000 型链耙式残膜回收机, 利用抖动轮的自激振动降低含土量, 残膜回收率较高, 但工

作速度偏低。闫盼盼等^[23]设计的链耙式拾膜装置借助内外张紧轮改变了耙齿在脱膜作业时的角度, 解决了脱膜技术难题。赵攸乐等^[24]设计的链齿耙式残膜回收机捡膜率较高, 但起膜和输送过程中功耗较大。康建明等^[25]为解决拾膜弹齿与地面接触不充分的问题, 在改进拾膜机构的基础上增加了起边膜部件, 构建了该机具关于拾膜率的二次回归模型并进行了响应面寻优, 优化后作业参数有效提高了拾膜率。此外, 现有机具脱膜作业多使用固定刮膜板, 在地膜重力与刮膜板产生刮蹭效果下进行脱膜, 采用卷膜与输送方式进行集膜, 有利于提高机具装载量和工作效率, 但多用于联合作业机。本文结合新疆棉花的窄行种植模式和现有链齿收膜机特点, 设计了导向链耙式地表残膜回收机, 导向链耙配合链耙架实现耙齿的位姿控制, 克服现有链齿式拾膜装置脱膜需要输送链弯折的问题, 确定了机具的工作参数及传动系统结构, 制作样机并进行了田间试验, 为进一步优化残膜回收机的设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构与主要技术参数

导向链耙式地表残膜回收机主要由牵引架、拉杆、过载保护器、卸膜油缸、脱膜装置、行走轮、推膜机构、单轴排杂装置、链耙架、导向链耙、限深轮、链传动系统、集膜箱等组成, 总体结构如图 1 所示。其中拾膜装置主要由链耙架与导向链耙组成, 链耙架支撑导向链耙

收稿日期: 2020-07-30 修订日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51965058); 新疆自治区区域协同创新项目(2019E0202); 自治区创新环境(人才、基地)建设专项(2019Q020)

作者简介: 谢建华, 副教授, 博士, 主要从事农业机械设计与研究。

Email: xjh199032@163.com

实现耙齿的位姿控制。

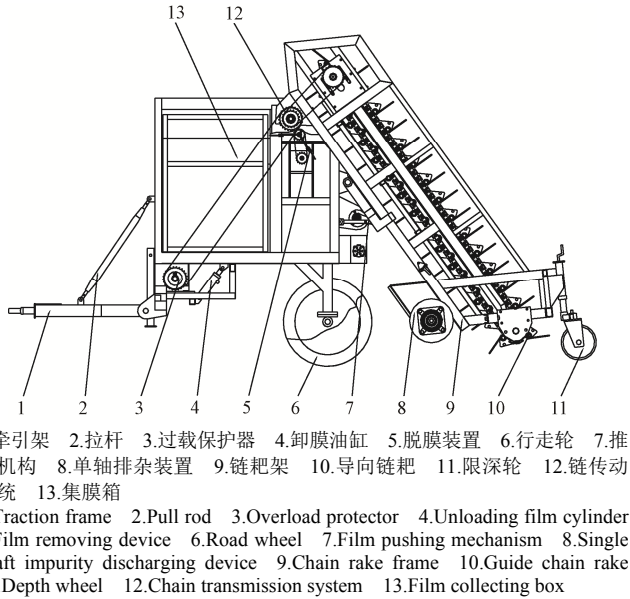
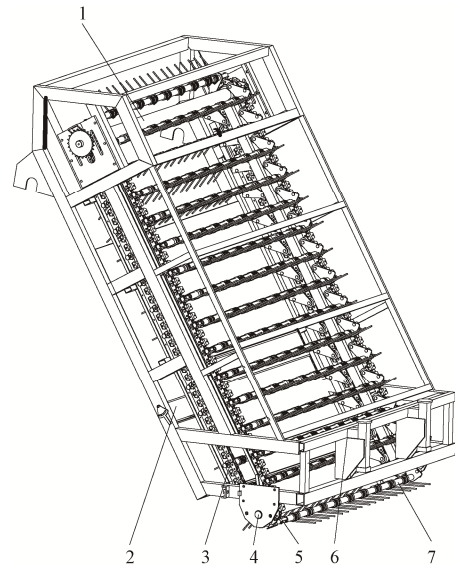


图 1 导向链耙式地表残膜回收机

1.牵引架 2.拉杆 3.过载保护器 4.卸膜油缸 5.脱膜装置 6.行走轮 7.推膜机构 8.单轴排杂装置 9.链耙架 10.导向链耙 11.限深轮 12.链传动系统 13.集膜箱

1.Traction frame 2.Pull rod 3.Overload protector 4.Unloading film cylinder 5.Film removing device 6.Road wheel 7.Film pushing mechanism 8.Single shaft impurity discharging device 9.Chain rake frame 10.Guide chain rake 11.Depth wheel 12.Chain transmission system 13.Film collecting box

拾膜装置的连接方式不同，该拾膜装置的耙齿总成与输送链间采用铰接，其中，铰接短轴从两端插入导向耙齿总成的耙齿安装轴两端，通过螺纹紧固件固定在弯边输送链上。



1.链耙上轴总成 2.排杂翻板 3.弯边输送链条 4.链耙下轴总成 5.铰接短轴 6.链耙架 7.导向耙齿总成

1.Upper shaft assembly of chain rake 2.Flap of impurity discharging 3.Conveyor chain with curved edges 4.Lower shaft assembly of chain rake 5.Articulated short shaft 6.Chain rake frame 7.Guide rake teeth assembly

图 2 导向链耙式拾膜装置

Fig.1 Rake type surface film recycling machine with guide chain

导向链耙式地表残膜回收机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 导向链耙式地表残膜回收机技术参数

Table 1 Technical parameters of rake type surface film recycling machine with guide chain

参数 Parameters	值 Values
总体尺寸 Overall size/(mm×mm×mm)	5 020×2 770×2 885
配套动力 Matched power/kW	48
工作幅宽 Working width/mm	2 000
工作速度 Working speed/(km·h ⁻¹)	4~9

1.2 工作原理

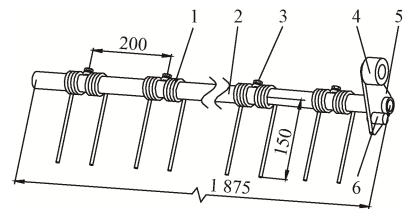
如图 1 所示，拖拉机牵引机具前行，动力由后输出轴经换向器减速后驱动链传动系统带动拾膜装置运转，在链耙架及导向链耙配合下导向耙齿沿固定轨迹运动。机具工作过程中导向链耙将表层地膜呈“倒扣”状挑起并沿链耙架倾斜方向向膜箱输送，输送过程中地膜表面的杂质依靠传动过程中产生的震动从地膜表面脱落，杂质在重力作用下落入下方单轴排杂装置收集并送至机具两侧。当导向耙齿运动至膜箱上部区域，导向耙齿绕链耙两端铰接短轴轴心转动，地膜在自重和脱膜装置的作用下脱落至膜箱后部，推膜机构将落至膜箱后部的地膜推至膜箱前部完成地膜压缩。当机具运动至地头后，膜箱底部卸膜油缸推动膜箱的底板顺时针旋转，将地膜从膜箱排出。

2 关键部件设计

2.1 拾膜装置

弯折结构的链齿式拾膜装置可减少脱膜阻力^[22]，但整体结构较长，输送链易产生损伤。导向链耙式拾膜装置是该收膜机的核心部件之一，主要由链耙上轴总成、弯边输送链条、链耙下轴总成、铰接短轴、导向耙齿总成、链耙架与排杂翻板等组成，如图 2 所示。与链齿式

拾膜装置由侧导向板、滚轮、短轴、耙齿、耙齿安装轴等组成，如图 3 所示。



1.耙齿 2.耙齿安装轴 3.固定螺栓 4.滚轮 5.侧导向板 6.短轴

1.Rake tooth 2.Rake tooth installation shaft 3.Fixing bolt 4.Roller 5.Side guiding board 6.Short shaft

图 3 导向耙齿总成

Fig.3 Guide rake tooth assembly

链齿输膜倾角范围为 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ^[23-25]，本文输膜倾角计为 60° ，根据新疆地区宽窄行种植模式，确定耙齿安装轴长度计为 1 875 mm；耙齿杆直径 6 mm，耙齿轴心距齿端距离（耙齿杆长度）150 mm，耙齿间距 200 mm，导向耙齿安装耙齿为 9 组（18 齿）或 9 组+半耙齿（19 齿）交错排布。链耙上下轴选用 20A 的 16 齿链轮，每 6 个链节布置一个导向耙齿总成。

拾膜过程如图 4a 所示，弯边输送链带动导向耙齿总成完成入土挑膜、输送排杂和变向转动。拾膜装置工作时，为满足耙齿总成在拾膜、输送与脱膜处位姿控制需求，在链耙架沿前进方向右侧设置限位支架和变向滑道，利用限位支架和变向滑道配合导向耙齿总成右侧固定的侧导向板、短轴和滚轮控制耙齿总成的转动。拾膜和输送时，导向耙齿总成右侧的滚轮卡在弯边链节和限位支

架内,当导向耙齿总成运动至脱膜区域时,变向滑道顶起侧导向板连接的短轴,滚轮进入限位支架避让空间内,耙齿随安装轴绕两端铰接短轴轴心旋转至垂直方向且末端向下,辅助脱膜。

将拾膜齿的运动过程简化为图4b,以链耙下轴为坐标原点 O ,竖直向上为 y 轴正方向,沿机具前进方向为 x 轴方向,耙齿齿端在 A 点入土, A_x 为齿端达到最大入土深度时的位置,出土点为 A' 。机具以速度 v 匀速沿 x 轴正方向前进,链耙下轴以角速度 ω 匀速转动。

则耙齿齿端的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = vt + L_{OA} \cos \omega t \\ y = L_{OA} \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_{OA} 为耙齿入土点距链耙下轴中心的距离, m。

将式(1)对时间 t 求导可得耙齿齿端速度方程为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v - \omega L_{OA} \sin \omega t \\ v_y = \frac{dy}{dt} = \omega L_{OA} \cos \omega t \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_x 、 v_y 为耙齿端部在 x 、 y 方向的速度, m/s。

由式(2)可得耙齿入土拾膜时齿端速度 v_n 为

$$\begin{aligned} v_n &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ &= \sqrt{v^2 + 2v\omega L_{OA} \sin \omega t + \omega^2 L_{OA}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

为实现地表膜及浅层地膜的连续捡拾,要求相邻耙齿入土时前一拾膜耙齿未离开土壤,即二者存在重合区。设导向耙齿到达入土点为 t_0 时刻,此时 L_{OA} 与水平方向的夹角(初始相位角)为 α ,链耙下轴中心运动至 O' 经过时间为 t_1 ,链耙下轴中心从 O 运动至 O_1 时间为 t_2 ,根据图4c可得:

$$h \leq L_{OA} - L_{OA} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (4)$$

式中 h 为两相邻耙齿在土壤中运动轨迹交点距耙齿入土最深点的距离, m。

当 A' 与 B 重合时,达到临界状态,可得其临界条件为

$$L_{O'O_1} = 2L_{OA} \cos \alpha \quad (5)$$

式中 $L_{O'O_1}$ 为前一耙齿离开土壤至后一耙齿刚好进入土壤链耙下轴移动的水平距离, m。

因此,实现连续拾膜的条件为

$$v(t_2 - t_1) < 2L_{OA} \cos \alpha \quad (6)$$

从入土到出土耙齿 L_{OA} 转过的角度为 $(\pi - 2\alpha)$,则 $t_1 = (\pi - 2\alpha) / \omega$;由链耙下轴链轮16齿和6个链节布置总成可求得耙齿转动过程中间隔角度为 $3\pi/4$,则前一耙齿接触土壤直至下一耙齿进入土壤时间 t_2 为 $3\pi/4\omega$,由此可得

$$v < \frac{8\omega L_{OA} \cos \alpha}{8\alpha - \pi} \quad (7)$$

因侧导向板和滚轮等存在,耙齿绕下轴旋转时其安装的耙齿齿杆的反向延长线不经过链耙下轴轴心,在耙齿入土深度达到最大时,耙齿杆与竖直方向存在夹角 λ ,则有:

$$\cos \lambda = \frac{L^2 + L_{OA}^2 - \left(\frac{D}{2} + E\right)^2}{2L \cdot L_{OA}} \quad (8)$$

式中 λ 为耙齿达到最大深度时耙齿杆与竖直方向的夹角, ($^\circ$); L 为耙齿杆长度, mm; D 为链耙下轴链轮分度圆直径, mm; E 为铰接短轴中心距弯边输送链链滚子中心距离, mm。

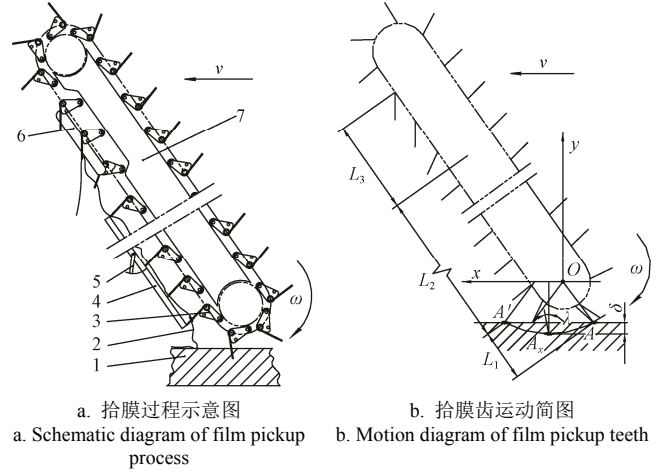


图4 拾膜装置工作过程

1.土壤 2.地膜 3.耙齿 4.链耙架底板 5.排杂翻板 6.变向滑道 7.限位支架

1.Soil 2.Film 3.Rake teeth 4. Base board of chain rake 5. Flap of impurity discharging 6.Slideway with changing direction function 7.Limited position bracket

注: v 为机具行进速度, $m \cdot s^{-1}$; L_1 为拾膜段; L_2 为输送排杂段; L_3 为脱膜段; ω 为链耙下轴转动角速度, $rad \cdot s^{-1}$; α 初始相位角, ($^\circ$); A 、 B 为耙齿齿端入土点; A_x 、 B_x 为耙齿入土最深点, A' 、 B' 为耙齿端部出土点; O 、 O' 、 O_1 、 O_1' 为链耙下轴中心相对位置点; $\overline{AA'}$ 、 $\overline{BB'}$ 为耙齿齿端运动轨迹; λ 为耙齿达到最大入土深度时耙齿杆和竖直方向的夹角, ($^\circ$); δ 为耙齿最大入土深度, mm; h 为两相邻耙齿在土壤中运动轨迹交点距耙齿入土最深点的距离, m。

Note: v is machine advancing velocity, $m \cdot s^{-1}$; L_1 is film pickup section; L_2 is conveying and impurity discharging section; L_3 is film remove section; ω is angular velocity of rotation of chain rake lower shaft, $rad \cdot s^{-1}$; α is preliminary phase angle, ($^\circ$); A 、 B are the points of rake teeth end into soil; A_x 、 B_x are the deepest points of rake teeth into soil; A' 、 B' are the points of rake teeth end out of soil; O 、 O' 、 O_1 、 O_1' are the center points of chain rake lower shaft; $\overline{AA'}$ and $\overline{BB'}$ are the movement track of rake teeth tip; λ is the angle between the rake teeth rod and the vertical direction when the rake teeth reaches the maximum soil depth, ($^\circ$); δ is the deepest depth of the rake teeth into the soil, mm; h is the distance between the intersection point of two adjacent rake teeth in the soil and the deepest point of rake teeth in the soil, m.

图4 拾膜装置工作过程

Fig.4 Working process of film pickup device

由(正弦定理)可得:

$$\frac{L_{OA}}{\sin 90^\circ} = \frac{L_{OA} - \delta}{\sin \alpha} \quad (9)$$

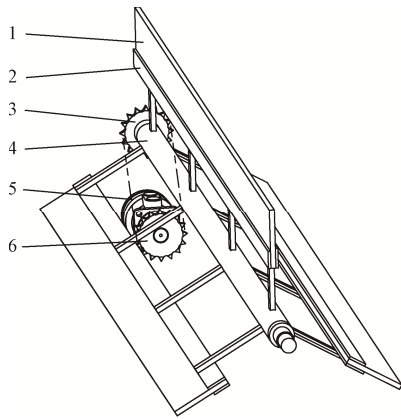
根据前期预试验,耙齿达到最大入土深度时耙齿杆与竖直方向的夹角 λ 需小于 10° ,忽略耙齿变形的影响,取耙齿达到最大入土深度时耙齿杆与竖直方向夹角 λ 为 5° ;根据链轮、弯边链条节距参数与齿数,链轮分度圆直径 D 为 162.75 mm,铰接短轴中心距弯边输送链链滚子中心距离 E

为 40.80 mm，代入式 (8) 可得 L_{O_1A} 为 270.78 mm。取耙齿入土深度 δ 为 60 mm，代入式 (9) 可得初始相位角 α 为 51.12°。

由参数查询与样机运转测试，福田雷沃 754A 额定输出转速有 2 档，分别为 760 和 1 000 r/min，工作中链耙下轴的对应实测转速为 143 和 186 r/min，则耙齿入土点处线速度为 5.09 和 6.62 m/s。结合文献[24-25]和课题组前期关于摆杆驱动式残膜回收机及齿链复合式残膜回收机的试验，试验机前进速度一般为 1.11~2.22 m/s^[26-31]，导向耙齿拾膜过程中耙齿端部线速度大于 2.22 m/s，此时存在重合区，能够实现连续拾膜。

2.2 脱膜装置

常用脱膜装置结构为固定式刮膜板，工作时刮膜板紧密作用于拾膜耙齿中部或端部区域，接触过程中耙齿与脱膜刮板存在弹、塑性变形^[19,32-33]。为提高脱膜作业可靠性，对脱膜装置结构进行设计，结构如图 5 所示，主要包括脱膜橡胶板、固定压板和脱膜转轴。其中，脱膜橡胶板通过螺纹紧固件固定在脱膜转轴上。



1.脱膜橡胶板 2.固定压板 3.从动链轮 4.脱膜转轴 5.液压马达 I 6.主动链轮
1.Film removing rubber plate 2.Fixed pressing plate 3.Driven sprocket 4.Film removing rotation shaft 5.Hydraulic motor I 6.Driving sprocket

图 5 脱膜装置

在脱膜过程中，脱膜橡胶板对导向耙齿总成产生逆向刮、捋或拍打作用，经脱膜作业后地膜从耙齿上刮下并落入膜箱收集。根据拾膜装置结构可知，当导向耙齿总成运动至脱膜区域时，导向耙齿在变向滑道作用下绕铰接短轴轴心产生偏转，此时耙齿趋于竖直向下，挂在耙齿上的地膜松弛，在重力作用下滑落或产生向下滑落的趋势，与此同时脱膜转轴带动脱膜橡胶板作用于耙齿端部区域，将地膜刮落至膜箱。

在脱膜过程中，地膜受力如图 6 所示，由于地膜与脱膜橡胶板的静电吸附力很小，忽略其影响。

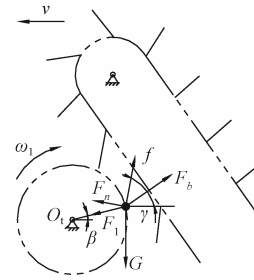
弯边输送链带动导向耙齿总成倾斜输送时旋转半径趋于无穷大，故 F_b 趋于 0；脱膜过程中，脱膜装置与导向耙齿总成相对运动时，地膜受力脱落的条件为

$$\begin{cases} F_1 \cos \beta + F_n \sin \gamma > f \cos \gamma \\ F_n \cos \gamma + f \sin \gamma < F_1 \sin \beta + G \end{cases} \quad (10)$$

式中 $G=m_1g$ ， m_1 为耙齿携带的地膜质量， g ； g 为重力加速度，m/s²； $F_1=m_1\omega_1^2r_1$ ， r_1 为脱膜装置回转半径，m。

整理得

$$\begin{cases} m_1\omega_1^2r_1 \cos \beta + m_1g \cos \gamma \sin \gamma > \mu m_1g \cos^2 \gamma \\ m_1g \cos^2 \gamma + \mu m_1g \cos \gamma \sin \gamma < m_1\omega_1^2r_1 \sin \beta + m_1g \end{cases} \quad (11)$$



注： ω_1 为脱膜转轴转动角速度，rad·s⁻¹； f 为地膜与耙齿间的摩擦力，N； F_1 为脱膜装置对地膜的作用力，N； G 为地膜重力，N； F_b 为耙齿输送过程中对地膜产生的向心力，N； F_n 为耙齿对地膜的支持力，N； β 为脱膜转轴中心和耙齿作用点连线与水平方向的夹角，(°)； γ 为脱膜作业时耙齿杆与竖直方向的夹角，(°)； O_1 为脱膜转轴轴心。
Note: ω_1 is angular velocity of film removing rotation shaft, rad·s⁻¹; f is friction between film and rake teeth, N; F_1 is the force of film removing device on film, N; G is the gravity of film, N; F_b is the centripetal force generated on film during rake teeth convey, N; F_n is the supporting force of rake teeth on film, N; β is the angle between the center of film removing rotation shaft and the action point of the rake teeth and the horizontal direction, (°); γ is the angle between rake tooth bar and the vertical direction during the process of removing plastic film, (°); O_1 is the center of film removing rotation shaft.

图 6 脱膜过程中残膜受力分析

Fig.6 Force analysis of residual film during the process of film removing

在进行脱膜作业时，耙齿杆趋于竖直，耙齿杆与竖直方向的夹角 γ 接近 90°，此时地膜所受合力沿前进方向斜向下，为避免脱膜装置缠绕地膜，需要控制脱膜转轴速度，取两相邻导向耙齿经过脱膜区域时脱膜橡胶板作用一次，考虑接触与磨损的影响，脱膜装置回转半径设计为 300 mm。

2.3 推膜机构

地膜从耙齿脱落后，易在膜箱后部堆积，需要增加推膜机构实现地膜推送与压缩，提升机具装载量、避免耙齿回带地膜。推膜机构采用曲柄摇杆机构，将驱动转轴的圆周运动转变为往复运动，其结构如图 7 所示，主要由推膜板、驱动马达、联轴器、传动链、牙嵌式离合器、曲柄和球头连杆等组成。推膜机构采用液压马达驱动，液压马达 II 产生的动力传递至旋转轴，旋转轴带动两侧堆成布置的曲柄和球头连杆，球头连杆将推力作用于推膜板使其绕上方铰接轴循环摆动。

为确定推膜机构结构参数，将推膜机构简化，如图 8 所示，推膜板与铰接轴连接处记为铰点 M ，旋转轴轴心记为铰点 N ，球头连杆与曲柄连接点记为点 P ，将连接销中心点与推膜板铰接点记为 Q ， L_{MQ} 为连接销中心点摆动半径，以 L_{MQ} 为半径作 $\widehat{QQ'}$ ，设球头连杆 PQ 、曲柄 NP 的长度分别为 L_{PQ} 、 L_{NP} 。

根据曲柄摇杆机构的急回运动特性有：

$$\theta = 180^\circ \frac{K-1}{K+1} \quad (12)$$

式中 θ 为曲柄极位夹角，(°)； K 为行程速比系数。

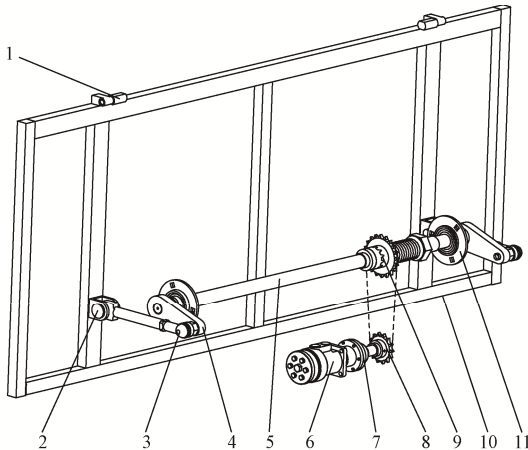
根据图 8 推膜机构在极限位置的几何关系有：

$$\begin{cases} L_{QQ'}^2 = (L_{NP} + L_{PQ})^2 + (L_{PQ} - L_{NP})^2 \\ \quad - 2(L_{NP} + L_{PQ})(L_{PQ} - L_{NP})\cos\theta \\ L_{QQ'} = 2L_{MQ}\sin\frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $L_{QQ'}$ 为连接销轴心相对运动位置点 Q 、 Q' 间距离, mm。

整理得:

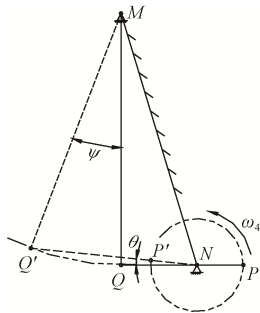
$$L_{NP}^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} + L_{PQ}^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = L_{MP}^2 \sin^2 \frac{\psi}{2} \quad (14)$$



1. 铰接轴 2. 连接销 3. 球头连杆 4. 曲柄 5. 推膜转轴 6. 液压马达 II 7. 联轴器 8. 链轮 9. 牙嵌式离合器 10. 推膜板总成 11. 带座轴承
1. Articulated shaft 2. Connecting pin 3. Ball-end connecting rod 4. Crank 5. Film pushing rotation shaft 6. Hydraulic motor II 7. Coupling 8. Sprocket 9. Jaw clutch 10. Film pushing board assembly 11. Insert ball bearing

图7 推膜机构

Fig.7 Film pushing mechanism



注: ψ 为推膜板摆角, ($^\circ$); θ 为曲柄极位夹角, ($^\circ$); M 为推膜板上铰接点; N 为推膜转轴中心; P 、 P' 为曲柄与球头连杆连接处相对运动位置点; Q 、 Q' 为连接销轴心相对运动位置点; ω_4 为脱膜转轴角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
Note: ψ is swing angle of film push board, ($^\circ$); θ is crank extreme position included angle; M is upper hinge point of film pushing board; N is film pushing rotation shaft center; P 、 P' are the relative movement position of the connection between the crank and the ball-end connecting rod; Q 、 Q' are relative movement position of connecting pin; ω_4 is angular velocity of film pushing rotation shaft, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图8 推膜机构结构参数分析

Fig.8 Analysis of structure parameters of film pushing mechanism

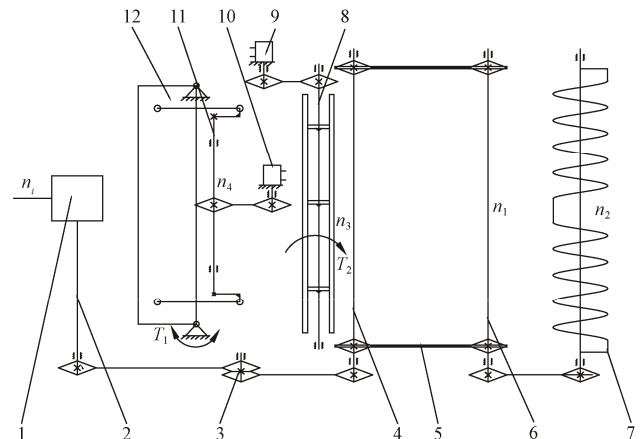
一般机械中 $1 \leq K \leq 2$, K 越大急回特性越明显^[34], 本文取行程速比系数 K 为 1.7, 代入式(12)计算得 θ 为 46.7° 。推膜板摆角较大时, 作业过程中推膜板与膜箱底板间隙过大, 地膜容易从二者产生的缝隙穿过, 推膜板回程时反刮至推膜板后侧, 使推膜机构再动作产生问题; 摆角过小推膜效率不高, 脱落的地膜仍在膜箱后侧堆积, 影响膜箱利用率; 结合链齿输膜角范围, ψ 小于 25° 时地膜

向下滑落, 取推膜板摆角为 $23^\circ \sim 25^\circ$ 。根据膜箱结构参数, 取 $L_{MQ} = 800 \text{ mm}$ 、曲柄长度 $L_{NP} = 150 \text{ mm}$, 将上述参数代入式(14)求得球头连杆 PQ 长度为 $203 \sim 265 \text{ mm}$ 。

2.4 传动系统设计

残膜具有吸附与缠绕等特性^[28-29], 链传动在长距离传动过程中易产生地膜缠绕的现象, 加之机械传动负荷重、振动大, 为使整机结构紧凑, 可在部分区域使用液压传动, 传动系统采用机械与液压搭配的工作方式。

整机传动系统如图 9 所示。拾膜装置和单轴螺旋清杂器由后输出轴提供动力, 脱膜装置和推膜机构由液压马达提供动力。作业时, 拖拉机牵引收膜机前行, 动力经过拖拉机输出轴传递至收膜机换向器, 改变动力方向并实现减速, 进而带动链传动系统, 链传动系统将动力传输至链耙上轴, 链耙上轴通过弯边输送双链带动链耙下轴旋转, 弯边输送链过程中拖动导向耙齿完成拾膜作业; 与此同时, 链耙下轴通过链传动连接于单轴排杂装置, 单轴排杂装置旋转将承接的杂质排出机具外。液压马达 I 将动力输送至脱膜装置, 使脱膜装置按图示 T_2 方向旋转。液压马达 II 将动力输送至推膜机构转轴, 通过联轴器、传动链及牙嵌式离合器等驱动推膜机构转轴旋转, 推膜机构转轴使推膜板绕铰接点按图示 T_1 方向周期性摆动。



1. 换向器 2. 动力输出轴 3. 过桥链轮 4. 链耙上轴 5. 弯边输送链 6. 链耙下轴 7. 单轴排杂装置 8. 脱膜转轴 9. 液压马达 I 10. 液压马达 II 11. 推膜机构转轴 12. 推膜板

1. Commutator 2. Power take-off shaft 3. Gap bridge sprocket 4. Chain rake upper shaft 5. Flanging conveyor chain 6. Chain rake lower shaft 7. Single shaft impurity discharge device 8. Film removing rotation shaft 9. Hydraulic motor I 10. Hydraulic motor II 11. Film pushing mechanism shaft 12. Film pushing plate
注: n_i 为输入转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_1 为链耙下轴转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_2 为单轴排杂装置转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_3 为脱膜转轴转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_4 为推膜机构转轴转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; T_1 为推膜板摆动方向; T_2 为脱膜转轴旋转方向。

Note: n_i is the input speed, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_1 is the speed of chain rake lower shaft, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_2 is the speed of single shaft impurity discharge device; n_3 is the speed of film removing rotation shaft, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; n_4 is the speed of push film mechanism shaft, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; T_1 is swing direction of film pushing board; T_2 is rotation direction of removing film rotation shaft.

图9 传动系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of transmission system

在传动过程中, 链耙上下轴转速与单轴螺旋清杂装置的动力由拖拉机输出轴控制其转速及切断, 脱膜装置转速及推膜机构运转频率由液压马达转速决定。

拖拉机额定输出轴转速 760 r/min , 换向器传动比为 $1:3$, 根据各传动链轮齿数计算可得: 链耙下轴额定转

速 n_1 为 198 r/min, 单轴排杂装置额定转速 n_2 为 198 r/min, 脱膜转轴实际转速 n_3 为 38 r/min, 推膜机构转轴实际转速 n_4 为 25 r/min。

3 田间试验

为验证导向链耙式地表残膜回收机各部件工作的可靠性与作业效果, 确定最优工作参数, 于 2019 年 10 月在新疆生产建设兵团第八师石总场三分场三连进行田间试验, 样机田间试验如图 10 所示。

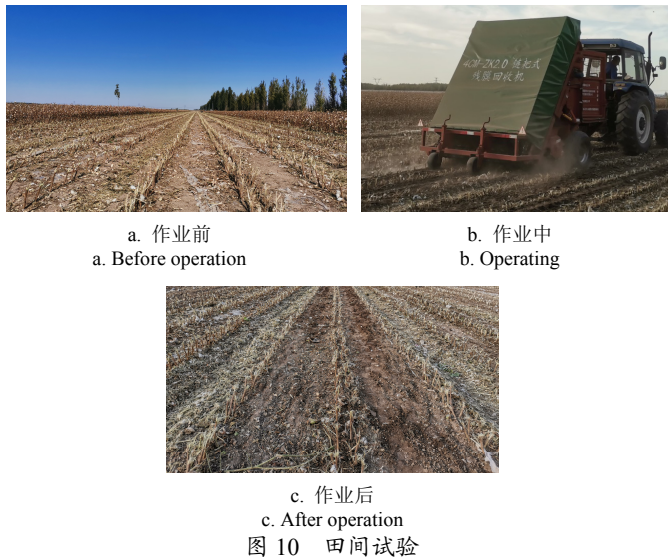


图 10 田间试验

Fig.10 Field experiment

3.1 试验条件

导向链耙式地表残膜回收机样机由福田雷沃拖拉机牵引(拖拉机型号为福田雷沃 754A, 额定功率 55 kW), 试验仪器有电子天平(型号: YP2002 型电子天平, 量程: 0~500 g, 精度 0.001 g)、皮尺(量程 50 m)、托普云土壤水分测试仪(型号: TZS-1K-G), 托普云土壤紧实度测定仪(型号: TJSJ-750-2)、保鲜袋、标签纸等。

试验田为棉花地, 铺膜厚度为 0.01 mm, 铺膜宽度 2 050 mm, 采用一膜两管的宽窄行(10+66+10+66+10, cm)种植模式, 纵向铺膜长度约 340 m, 覆膜时间为 2019 年 4 月-2019 年 10 月。试验田土地平整, 收膜前已完成棉花采收, 滴灌水带与膜管已回收。收膜前进行秸秆粉碎还田, 利用钢板尺实测留茬高度平均值为 12.30 cm。托普云土壤水分测试仪测得土壤湿度平均值为 19.29%, 土壤紧实度平均值为 5 182.32 kPa。

3.2 试验因素

由 2.1 与 2.4 节分析可知, 机具工作时, 拖拉机后输出轴驱动拾膜装置在捡拾表层地膜后, 地膜表面杂质由排杂装置排出, 拾起的地膜收集在膜箱内。拾膜率与机具前进速度、耙齿入土深度及链耙输入转速相关。为减小试验误差, 试验中保持拖拉机转速恒定, 通过项目组前期对耙齿式拾膜装置的研究, 依据链耙式残膜回收机的工作原理, 选取影响残膜回收率的 3 个主要因素为机具行进速度 A 、耙齿入土深度 B 、链耙

输入转速 C 。

文献[27-30]机具作业速度范围为 4~8 km/h, 根据试验配套使用福田雷沃 754A 作业参数与田间作业环境, 由驾驶员调节拖拉机档位控制速度, 试验取机具作业速度分别为 4、6 和 8 km/h。

耙齿入土深度通过机具尾部对称布置限深轮的伸缩实现, 考虑地面凹坑和起伏的影响, 耙齿入土深度下限值取 30 mm, 调节机具尾部限深轮使耙齿达到最大入土深度为 92 mm, 等差取整设置耙齿入土深度水平为 30、60、90 mm; 试验前在待测试区域驱动链耙旋转, 检测耙齿达到相应深度后固定限深轮调节手柄保持耙齿入土深度稳定。

试验中保持发动机转速恒定, 根据拖拉机实际输出转速, 实测链耙输入转速分别为 143 和 186 r/min, 受拖拉机输出转速限制, 链耙输入转速缺少第三水平, 且正交表的拟水平设计不改变正交表的列间交互作用关系, 故链耙输入转速的第三水平采用拟水平; 由 2.1 节分析, 链耙下轴实际转速为 143 r/min 时存在重合区能够实现连续拾膜, 为避地膜撕裂拟水平选取为 143 r/min。

试验因素和水平如表 2 所示。

表 2 试验因素和水平
Table 2 Test factors and levels

水平 Levels	机具行进速度 Machine advancing velocity A /(km·h ⁻¹)	耙齿入土深度 Depth of rake teeth into soil B /mm	链耙输入转速 Chain rake input speed C /(r·min ⁻¹)
1	4	30	143
2	6	60	186
3	8	90	(143)

3.3 试验指标

结合 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》规定的试验内容进行导向链耙式地表残膜回收机的作业性能进行田间试验。试验在相同或是相邻膜幅上进行, 每组试验重复 3 次, 每次试验长度为 100 m, 试验结果取 3 次平均值。试验前于试验地块选取长度为 100 m 宽度为一个膜幅(地膜幅宽 2 050 mm)的采样区, 对当年铺设地膜进行采集, 将采集地膜洗净、晾干并称质量记为 M_0 根据试验需求选取拾膜率 Y_1 与缠膜率 Y_2 为指标, 计算方式如下:

$$Y_1 = (1 - \frac{M_1}{M_0}) \times 100\% \quad (15)$$

$$Y_2 = \frac{M_2}{M_2 + M_3} \times 100\% \quad (16)$$

式中 M 为作业前当年铺设地膜质量, g; M_1 为机具作业后地表漏拾的地膜质量, g; M_2 为缠绕在机具上的地膜质量, g; M_3 为收集到膜箱的地膜质量, g。

3.4 试验方案与结果分析

试验采用 $L_9(3^4)$, 共进行 9 组试验, 收集缠绕于拾膜装置与脱膜装置上的地膜以及集膜箱地膜, 将地膜装袋并标记, 洗净、晾干后利用电子天平称质量, 根据式(15)与(16)计算拾膜率和缠膜率, 试验结果见表 3。

表3 试验方案与结果
Table 3 Test plans and results

试验序号 Test No.	机具行进速度 Machine advancing velocity $A/(km \cdot h^{-1})$	耙齿入土深度 Depth of rake teeth into soil B/mm	链耙输入转速 Chain rake input speed $C/(r \cdot min^{-1})$	空列 Empty row	拾膜率 Film pickup rate $Y_1/\%$	缠膜率 Film wrapping rate $Y_2/\%$
1	4	30	143	1	91.191	1.959
2	4	60	186	2	80.050	0.952
3	4	90	(143)	3	88.956	1.883
4	6	30	186	3	85.547	1.596
5	6	60	(143)	1	85.285	0.624
6	6	90	143	2	86.642	4.759
7	8	30	(143)	2	95.751	0.505
8	8	60	143	3	92.112	2.449
9	8	90	186	1	86.036	3.251
$(K_1)_1$	260.167	272.498	269.945	262.512		
$(K_1)_2$	257.474	257.447	251.633	262.443		
$(K_1)_3$	273.899	261.634	269.992	266.615		
$(k_1)_1$	86.732	90.830	89.982	87.504		
$(k_1)_2$	85.825	85.861	83.878	87.481		
$(k_1)_3$	91.300	87.211	89.997	88.872		
R_1	5.475	5.014	6.119	1.391		
主次因素顺序: C、A、B						
$(K_2)_1$	4.794	4.060	9.167	5.834		
$(K_2)_2$	6.979	4.025	5.799	6.216		
$(K_2)_3$	6.205	9.893	3.012	5.928		
$(k_2)_1$	1.598	1.353	3.056	1.945		
$(k_2)_2$	2.326	1.324	1.933	2.072		
$(k_2)_3$	2.068	3.298	1.004	1.976		
R_2	0.728	1.956	2.052	0.127		
主次因素顺序: C、B、A						

由表3试验结果可知,拾膜率为80.050%~95.751%,缠膜率为0.050%~4.759%。各因素对拾膜率的优水平为 $A_3B_1C_3$,既行进速度为8 km/h,耙齿入土深度为30 mm,链耙输入转速为143 r/min;各因素对缠膜率的优水平为: $A_1B_2C_3$,既行进速度为4 km/h,耙齿入土深度为60 mm,链耙输入转速为143 r/min。

为判断各试验因素对试验指标的显著性影响,对试验结果进行方差分析,结果如表4所示。

表4 方差分析
Table 4 Variance analysis

指标 Indexes	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	显著性 Significant
拾膜率 Film pickup rate Y_1	A	51.660	2	25.830	20.363	**
	B	40.180	2	20.090	15.838	**
	C	74.709	1	74.709	58.898	***
	误差	3.810	3	1.060		
	总和	170.359	8			
缠膜率 Film wrapping rate Y_2	A	0.818	2	0.409	0.194	
	B	7.607	2	3.803	1.800	
	C	0.019	1	0.019	0.009	
	误差	0.030	3	2.113		
	总和	8.474	8			

注:***表示极显著; **表示显著。

Note: *** means highly significant; ** means significant.

由方差分析可知,机具行进速度、耙齿入土深度对拾膜率影响显著,链耙输入转速对拾膜率影响均极显著。这是由于田间地膜主要分布在地表,而耙齿端部线速度远大于机具行进速度,拾膜作业中存在重合区,而地膜被耙齿挑起后处于高度拉伸状态,耙齿作用地膜后产生穿孔,地膜与耙齿约束力强,有助于地膜的拾取与输送,故拾膜率增大;反之,地膜与耙齿约束力减弱,拾膜率减小。当耙齿入土深度增加时,在土壤的反作用力下,地膜被推送至耙齿杆根部,耙齿出土后齿杆粘连的土壤颗粒使地膜与齿杆摩擦力增大,输送过程中不易掉落使拾膜率增加,但入土深度过大时挑膜吃力耙齿变形严重;反之,地膜在捡拾、输送过程中易滑落,拾膜率降低。当链耙输入转速增加时,耙齿运动过程中瞬时速度较大,但入土时间短,导向耙齿作业过程中重合度过高,耙齿容易变形和划破地膜,地膜破损严重时造成漏拾或掉落,拾膜率降低;反之,链耙输入转速降低时,地膜连续性良好,拾膜和输送中不易掉落,拾膜率较高。

机具行进速度、耙齿入土深度和链耙输入转速对缠膜率影响不显著,这是因为脱膜装置结构决定了其脱膜方式。由于脱膜轴旋转中心靠近拾膜装置传动部分的过桥链轮,脱膜装置采用液压驱动,脱膜转轴在牵引机发动机转速确定情况下转速趋于恒定,脱膜装置结构确定和转速固定的情况下机具行进速度、耙齿入土深度和链耙输入转速对缠膜率不会造成显著影响。试验过程中发现脱膜转轴转速增大时,较长的残膜会缠绕在脱膜转轴上,此外,受试验期间风向及刮板摩擦后钩带的影响,存在少量长度较大的残地膜缠绕在脱膜装置上的情况。

3.5 试验验证

根据综合平衡法,由于机具行进速度、耙齿入土深度和链耙输入转速对缠膜率影响不显著,在保证拾膜率,兼顾生产效率的条件下,取较优参数组合为机具行进速度8 km/h,耙齿入土深度30 mm,链耙输入转速143 r/min,利用较优参数组合进行重复试验验证,试验结果如表5所示。

表5 试验验证结果
Table 5 Experiment verification results

试验号 Test No.	拾膜率 Film pickup rate $Y_1/\%$	缠膜率 Film wrapping rate $Y_2/\%$
1	90.56	1.82
2	87.47	1.79
3	88.15	2.13
平均值 Average values	88.73	1.91

在较优参数组合下,平均拾膜率为88.73%,平均缠膜率为1.91%。参照GB/T 25412—2010《残地膜回收机》中作业性能指标,机具工作性能满足拾膜率和缠膜率要求。相比于链齿式拾膜机构,导向链耙拾膜率提升了1.5%^[31],耙齿变向后脱膜对地膜的钩带减少。

由表3试验结果可知,各试验因素优水平偏向于边缘值,造成该结果的原因主要是受装置的动力条件限制,链耙的输入转速水平数不足,拟水平正交试验虽不影响各因素交互关系,但影响试验优水平选取。为验证

上述因素与田间作业环境等对试验结果的影响,于 2020 年 9 月在新疆生产建设兵团第八师 145 团三分场进行补充试验,试验前测得平均留茬高度 12.13 cm,土壤湿度平均值为 14.30%,土壤紧实度平均值为 3 883.43 kPa。按 3.3 节方法,以 3.5 节获得的较优参数组合机具行进速度 8 km/h,耙齿入土深度 30 mm,链耙输入转速 143 r/min,作为对照组进行试验,补充试验参数为机具行进速度 6 km/h,耙齿入土深度 60 mm,测试调整机具工作参数以转速表测得链耙输入转速为 165 r/min,2 组试验各重复 3 次。

表 6 试验结果
Table 6 Test results

组别 Groups	试验号 Test No.	拾膜率 Film pickup rate $Y_1/\%$	缠膜率 Film wrapping rate $Y_2/\%$
对照组 Reference group	1	87.22	1.95
	2	86.74	1.77
	3	87.61	1.87
补充组 Supplementary group	4	88.02	2.11
	5	88.72	1.89
	6	88.61	1.93

由表 6 试验结果可知,田间环境发生变化情形下,试验指标将出现波动;对照组拾膜率为 86.74%~87.61%,缠膜率为 1.87%~1.95%;补充组拾膜率 88.02%~88.72%,缠膜率为 1.89%~2.11%。补充组的拾膜率波动小且略高于对照组,补充组与对照组作业参数对试验指标影响接近,说明较优参数组合相对合理。

4 结 论

1) 设计了导向链耙式地表残膜回收机,介绍了主要零部件结构与工作原理,对导向链耙式地表残膜回收机各工作部件进行了分析,确定了传动结构、拾膜装置、脱膜装置与推膜机构的结构参数。

2) 制作了导向链耙式地表残膜回收机,以机具行进速度、耙齿入土深度与链耙输入转速为影响因素,以拾膜率与缠膜率为试验指标,进行了田间试验。试验结果表明,拾膜率优水平的作业参数为行进速度 8 km/h,耙齿入土深度 30 mm,链耙输入转速 143 r/min;缠膜率优水平的作业参数为行进速度 4 km/h,耙齿入土深度 60 mm,链耙输入转速 143 r/min。机具行进速度、耙齿入土深度对拾膜率影响显著,链耙输入转速对拾膜率影响极显著;机具行进速度、耙齿入土深度和链耙输入转速对缠膜率的影响不显著。

3) 以拾膜率为主要考虑指标,结合田间作业环境,利用综合平衡法确定较优作业参数组合为机具行进速度 8 km/h,耙入土深度 30 mm,链耙输入转速 143 r/min。利用较优参数组合进行田间验证试验,试验结果为平均拾膜率 88.73%,平均缠膜率 1.91%。

[参 考 文 献]

[1] 毕继业,王秀芬,朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 172-175.
Bi Jiye, Wang Xiufen, Zhu Daolin. Effect of plastic-film

mulch on crop yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 172-175. (in Chinese with English abstract)

[2] 何文清,严昌荣,刘爽,等. 典型棉区地膜应用及污染现状的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1618-1622.
He Wenqing, Yan Changrong, Liu Shuang, et al. The use of plastic mulch film in typical cotton planting regions and the associated environmental pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(8): 1618-1622. (in Chinese with English abstract)

[3] 白云龙,李晓龙,张胜,等. 内蒙古地膜残留污染现状及残膜回收利用对策研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 139-145.
Bai Yunlong, Li Xiaolong, Zhang Sheng, et al. Study on the current situation of plastic film residue pollution and the countermeasures for the recovery and utilization of residual film in Inner Mongolia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6): 139-145. (in Chinese with English abstract)

[4] 程宏波,柴守玺,陈玉章,等. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6316-6325.
Cheng Hongbo, Chai Shouxi, Chen Yuzhang, et al. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6316-6325. (in Chinese with English abstract)

[5] 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 Songrui, Zuo Qiang, Shi Jianchu, 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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 90-99. (in Chinese with English abstract)

[6] 严昌荣,刘恩科,舒帆,等. 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, et al. 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 with English abstract)

[7] 邹小阳,牛文全,刘晶晶,等. 残膜对土壤和作物的潜在风险研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 47-54.
Zou Xiaoyang, Niu Wenquan, Liu Jingjing, et al. Potential risks of plastic film residuals on soils and crops: A review[J].

- Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 47-54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吕江南, 王朝云, 易永健. 农用薄膜应用现状及可降解农膜研究进展[J]. 中国麻业科学, 2007, 29(3): 150-157.
Lü Jiangnan, Wang Chaoyun, Yi Yongjian. The development status of agricultural plastics mulching film and progress on degradable mulching films[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2007, 29(3): 150-157. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 133-142, 112.
Zhou Changming, Li Yuannong, Gu Xiaobo, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 133-142, 112. (in Chinese with English abstract)
- [10] Xie Jianhua, Tang Wei, Zhang Xuejun, et al. Mechanical properties tests and analysis of plastic mulching film residue[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(4), 130-135.
- [11] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272.
Yan Changrong, Mei Xurong, He Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨丽, 刘佳, 张东兴, 等. 棉花苗期地膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(S1): 73-77.
Yang li, Liu Jia, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of plastic film collector for cotton fields during seedling period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(S1): 73-77. (in Chinese with English abstract)
- [13] 薛文瑾, 王春耀, 朱振中, 等. 卷膜式棉花苗期残膜回收机的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 148-149, 147.
- [14] 段文献, 王吉奎, 李阳, 等. 夹指链式残膜回收装置的设计及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 35-42.
Duan Wenxian, Wang Jikui, Li Yang, et al. Design and test of clamping finger-chain type device for recycling agricultural plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 35-42. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张佳, 张宇涛, 董黎明, 等. 国内残膜回收机械研究现状及发展趋势[J]. 农业科技与装备, 2014(4): 29-30, 33.
Zhang Jia, Zhang Yutao, Dong Liming, et al. Domestic residual film recovery machine research status and development trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(4): 29-30, 33. (in Chinese with English abstract)
- [16] Rocca A R. Plastic mulch retriever: US8302699[P]. Tolga, AU, 2012.
- [17] 罗凯, 袁盼盼, 靳伟, 等. 链筛式耕层残膜回收机设计与工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 19-27.
Luo Kai, Yuan Panpan, Jin Wei, et al. Design of chain-sieve type residual film recovery machine in plough layer and optimization of its working parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 19-27. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谢建华, 张凤贤, 陈学庚, 等. 弧形齿滚扎式残膜回收机的设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 26-37.
Xie Jianhua, Zhang Fengxian, Chen Xuegeng, et al. Design and parameter optimization of arc tooth and rolling bundle type plastic film residue collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 26-37. (in Chinese with English abstract)
- [20] 施丽莉, 胡志超, 顾峰玮, 等. 耙齿式耨作花生残膜回收机设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 8-15.
Shi Lili, Hu Zhichao, Gu Fengwei, et al. Design and parameter optimization on teeth residue plastic film collector of ridged peanut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [21] 于福锋, 李平, 张凤奎, 等. 链耙式棉田耕层残膜回收机设计[J]. 农业工程, 2019, 9(10): 100-104.
Yu Fufeng, Li Ping, Zhang Fengkui, et al. Design of chain-type cotton field plough layer residual film recovery machine[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(10): 100-104. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭文松, 简建明, 散鳌龙, 等. 4CML-1000 型链耙式地膜回收机设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2):

- 66-73.
- Guo Wensong, Jian Jianming, San Yunlong, et al. Design and experimental optimization of 4CML-1000 type chain harrow film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 66-73. (in Chinese with English abstract)
- [23] 闫盼盼, 曹肆林, 罗昕, 等. 弹齿链耙式播前残膜回收机的设计研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 137-142.
- Yan Panpan, Cao Silin, Luo Xin, et al. Research on the spring-tooth-chain-harrow incomplete plastic film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(6): 137-142. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵攸乐, 张学军, 靳伟, 等. 链齿耙式耕层残膜回收机捡拾机构的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 119-122, 127.
- Zhao Youle, Zhang Xuejun, Jin Wei, et al. Design of pick-up mechanism for the chain-teeth-harrow topsoil incomplete plastic film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 119-122, 127. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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(S1): 295-303.
- Kang Jianming, Peng Qiangji, Wang Shiguo, et al. Improved design and experiment on pickup unit of spring-tooth residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 295-303. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孙超伟. 杆齿式残膜回收机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- Sun Chaowei. Design and Experiment Study of Pole-tooth Mulching Plastic Film Collector[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [27] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 311-319.
- Xin Shanglong, Zhao Wuyun, Dai Fei, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 311-319. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张慧明, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式秸秆还田与残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 11-19.
- Zhang Huiming, Chen Xuegeng, Yan Limin, et al. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [29] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收机清杂系统作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 1-10.
- Jiang Deli, Chen Xuegeng, Yan Limin, et al. Optimization of working parameters of cleaning system for master-slave residual plastic film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [30] 谢建华, 唐炜, 张学军, 等. 摆杆驱动式残膜回收机的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 56-63.
- Xie Jianhua, Tang Wei, Zhang Xuejun, et al. Design and parameter optimization of swing rod driven residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 56-63. (in Chinese with English abstract)
- [31] 谢建华, 唐炜, 曹肆林, 等. 齿链复合式残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 11-19.
- Xie Jianhua, Tang Wei, Cao Silin, et al. Design and experiment of tooth chain compound type residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(1): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [32] 施丽莉, 胡志超, 顾峰玮, 等. 耙齿式残膜回收机自动脱膜机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 11-18.
- Shi Lili, Hu Zhichao, Gu Fengwei, et al. Design on automatic unloading mechanism for teeth type residue plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 11-18. (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨松梅, 颜利民, 莫毅松, 等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 109-115, 164.
- Yang Songmei, Yan Limin, Mo Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 109-115, 164. (in Chinese with English abstract)
- [34] 程友联, 吴晓红. 曲柄摇杆机构的参数设计法[J]. 机械设计, 2010, 27(9): 60-62, 96.
- Cheng Youlian, Wu Xiaohong. Parameter design method of crank-rocker mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9): 60-62, 96. (in Chinese with English abstract)

Design and experiments of rake type surface residual film recycling machine with guide chain

Xie Jianhua¹, Yang Yuxin¹, Cao Silin^{1,2}, Zhang Yi¹, Zhou Yabin¹, Ma Weibin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: The usage of film mulch cultivation technology is ever increasing in China, particularly ranging from fruits and vegetables to a variety of food crops in a large area. Ultra-thin plastic film is commonly used as a soil surface mulch. The long-term laying of plastic film has brought serious mulch residues, due to its polyethylene film is difficult to be degraded in the natural environment. The accumulation of plastic film residues has caused serious negative effects on the crop growth, such as microorganisms in the soil difficult to survive, damage of soil agglomeration structure, obstruction of moisture circulation, soil salinization and compaction. As such, various machines were developed for residual film recovery, with strong adaptability, high recovery rate, and high work efficiency, particularly on the residual film pickup device in tooth-chain type for gathering and tying the film. However, the complicated structure of mechanism limited the application of residual film pickup device. At present, a bent conveyor chain is often used, in order to improve the efficiency of removed film. If the length beyond the critical after the conveyor chain bending, the film pickup teeth are easy to be deformed after impact, resulting in leakage pickup phenomenon, and the incompletely removed film, easy to wind, and low loading. This study aims at the problems of missing inspection, incomplete stripping, and winding of rake type residual plastic film collector during the working process, thereby to design a guiding chain harrow type residual plastic film collector on the surface soil. The main content included the design of guide chain harrow type picking-up film mechanism, and the connection structure between the rake assembly and the transport chain, with emphasis on the transport chain for the removal of film. Specifically, the structure of rake teeth and the arrangement of rake teeth were determined, the rotary film removal device with guide rake to improve the effect of removing film, and a pushing film mechanism was designed at the rear of film collecting box for increasing the loading capacity. A combined method of mechanical and hydraulic pressure was applied to realize the transmission requirements of picking up, removing, and pushing film. A motion analysis and pretests were conducted to optimize the structural parameters of main moving parts. A quasi-horizontal orthogonal test was carried out to verify the reliability of key parts in the machine and the operation performance. The test factors were selected, including the machine advancing velocity, the depth of rake into soil, and the chain rake input speed, and the indexes were the film pickup rate and film winding rate. The results show that the primary and secondary factors that affected the film pickup rate were the chain harrow input speed, the machine advancing velocity, and the depth of rake into soil, whereas, the primary and secondary factors that affected the film winding rate were the chain rake input speed, the depth of rake into soil, and the machine advancing velocity. Taking the film pickup rate as the main index, the integrated balance method was used to determine the optimal operating parameters, where the machine advancing velocity was 8 km/h, depth of rake into soil was 30 mm, and the chain rake input speed was 143 r/min. A field validation test was performed on the better parameter combination, where the film pickup rate was 88.73%, and the film wrapping rate was 1.91%. The findings can provide a sound reference to optimize the design of residual plastic film collector, and further to improve the operation performance.

Keywords: agricultural machinery; design; experiment; residual film recovery; rake with guide chain; film pickup device; film removing device