



刘小鹏,史增录,姚洁婷,张学军,鄢金山,张朝书,刘蕾.卷辊式耕层残膜回收机起膜装置的设计与试验研究[J].中国农业大学学报,2024,29(11):196-208.
LIU Xiaopeng,SHI Zenglu,YAO Jieting,ZHANG Xuejun,YAN Jinshan,ZHANG Chaoshu,LIU Lei.Design and experimental study of film lifting device of roll
type surface residual film recovery machine[J].*Journal of China Agricultural University*,2024,29(11):196-208.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.20

卷辊式耕层残膜回收机起膜装置的设计与试验研究

刘小鹏¹ 史增录^{1,2*} 姚洁婷¹ 张学军^{1,2} 鄢金山^{1,2} 张朝书³ 刘蕾³

(1. 新疆农业大学 机电工程学院,乌鲁木齐 830052;

2. 新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052;

3. 新疆阿克苏天地机械制造有限公司,新疆 阿克苏 843000)

摘 要 针对新疆棉田耕层残膜与土壤及根茬混合粘结,造成耕层残膜回收拾净率低的问题,提出一种旋耕起抛膜土混合物,弹齿顺向旋转捡膜,逆向旋转卸膜的耕层残膜回收方法。对起膜装置关键作业部件进行设计与参数计算;开展起膜装置起抛性能试验,分析起膜装置对不同土层深度残膜的起抛性能;以机具前进速度和刀轴转速为试验因素,残膜起膜率与破碎度为评价指标,进行2因素3水平正交试验,运用Design-Expert 13.0软件对试验结果进行分析获得起膜装置的最佳工作参数组合,并进行田间验证试验。结果表明:基于滑切原理,起膜刀正切刃的磨刃角为25°,折弯角为73°,折弯半径为30 mm,侧切刀刃刀终点滑切角为58°;起膜装置对不同土层深度的残膜起抛高度不同,且能可靠地将其抛起到捡膜高度,对土层0~150 mm深度残膜的起膜率为92.3%;当机具前进速度为4.5 km/h,刀轴转速为213.75 r/min时,残膜起膜率为90.21%,残膜破碎度为6.03 mg/块,与理论优化值误差分别不超过1个百分点和1 mg/块。起膜装置对土层0~150 mm深度的残膜起膜效果明显,且破碎度在可进行机械化捡拾作业的范围内,满足作业要求。

关键词 耕层残膜;起膜装置;残膜回收机;性能试验

中图分类号 S223.5

文章编号 1007-4333(2024)11-0196-13

文献标志码 A

Design and experimental study of film lifting device of roll type surface residual film recovery machine

LIU Xiaopeng¹, SHI Zenglu^{1,2*}, YAO Jieting¹, ZHANG Xuejun^{1,2}, YAN Jinshan^{1,2},
ZHANG Chaoshu³, LIU Lei³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China;

3. Aksu Tiandi Machinery Manufacturing Co., Ltd., Aksu 843000, China)

Abstract Aiming at the problem that the residual film on the tillage layer of cotton fields in Xinjiang is mixed and bonded with the soil and root stubble, resulting in a low recovery rate of the residual film on the tillage layer, a rotary tillage film-throwing soil mixture is proposed in this study. The elastic teeth of the new device rotate in the forward direction to pick up the film and rotates in the opposite direction to recover film residue from the plow layer after unloading. Parameter calculation of the key operating components of the film lifting device was performed. and a lifting and throwing performance test of the film lifting device was conducted to analyze the lifting and throwing performance of the film lifting device for residual film at different soil

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105278);新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-10);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02038)

第一作者: 刘小鹏(ORCID:0009-0003-7013-8937),硕士研究生,E-mail:1711315255@qq.com

通讯作者: 史增录(ORCID:0009-0007-2708-8937),高级实验师,博士,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究,E-mail:shizlf@qq.com

depths. The forward speed of the machine tool and rotation speed of the cutter shaft were taken as test factors. The film forming rate and breakage of the residual film were used as evaluation indicators. A 2-factor and 3-level orthogonal test was conducted. Design-Expert 13.0 software was used to analyze the test results to obtain the optimal working parameter combination of the film forming device, and a field verification test was conducted. The results show that: Based on the sliding cutting principle, the sharpening angle of the front cutting edge of film forming knife is 25° , the bending angle is 73° , the bending radius is 30 mm, and the end sliding cutting angle of the side cutting edge is 58° . The lifting height of the residual film in different soil depths is different, and it can be reliably thrown to the film picking height. The film lifting rate for the residual film in the soil layer 0-150 mm depth is 92.3%. When the forward speed of the machine is 4.5 km/h, the cutter shaft speed is 213.75 r/min, the residual film forming rate is 90.21%, and the residual film fragmentation is 6.03 mg per block. The error from the theoretical optimal value does not exceed 1 percentage point and 1 mg per block, respectively. The film forming device has an obvious film forming effect on the residual film in the soil layer with the depth of 0-150 mm and the degree of fragmentation is within this range can be used for mechanized picking operations, which meets the operation requirements.

Keywords residual film of tillage layer; film raising device; residual film recovery machine; performance test

地膜覆盖具有增温保墒、抑制杂草生长等作用,对农业生产具有重要意义^[1-3]。但耕层中残留的地膜严重影响了土壤的土质及农作物的生长环境^[4-6],造成农作物质量和产量下降^[7-8]。新疆部分地区地膜残留量平均超过了 275.63 kg/hm^2 ,远远超过了农田地膜残留量标准规定的 75 kg/hm^2 限值^[9],严重制约了绿色农业的可持续发展。

目前,国外技术发达国家普遍使用的地膜力学性能较好,抗拉强度较高,易于机械化回收^[10]。国内使用的地膜厚度较薄,其抗拉强度较低,造成当年地膜回收不彻底,且国内前期对地膜回收不彻底,造成大量地膜被埋在土壤耕层中,因此,治理耕层残膜污染问题亟需解决。基于耕层残膜污染问题的迫切需要,需加强对耕层残膜的回收工作并研发相应的起膜装置。

耕层残膜回收机按起膜原理分类,可划分为起膜铲式^[11-12]、滚刀式^[13-15]、旋耕起膜式^[16-17]耕层残膜回收机机型。郭文松等^[18]设计的梳齿式起膜气力脱膜式耕层残膜回收机,其起膜装置破碎结土能力有限,收集到的残膜含秸秆、土块等量大,拾净率平均值为 55.04%;王旭峰等^[19]设计的梳齿式耕层残膜回收机,是由拾拾部件直接入土将残膜从土壤中拾拾分离出来,但是在土壤等反向阻力作用下掉落到地表的残膜量较大,导致残膜拾净率降低,拾净率平均值为 73%。采用这种被动拾拾残膜的方法,未能解决由于耕层残膜力学性能差,残膜与土壤等混合拾拾阻力大等造成的回收拾净率低,含杂量高

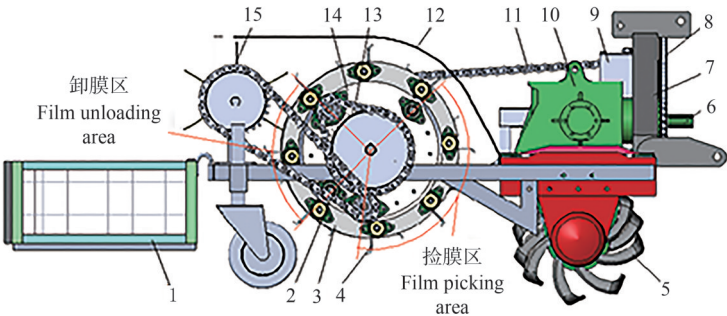
等问题。

本研究拟采用分离抛送膜土混合物的起膜方法,设计研制卷辊式耕层残膜回收机的起膜装置,以期解决传统起膜作业起膜效果差的问题,为耕层残膜回收提供理论参考。

1 整机结构与工作原理

本课题组设计的卷辊式耕层残膜回收机主要由起膜装置、卷辊捡膜机构、正反转机构、卸膜机构等组成(图 1),机具总体尺寸为 $2\ 805 \text{ mm} \times 2\ 309 \text{ mm} \times 1\ 065 \text{ mm}$;配套动力为 66.2 kW。

卷辊式耕层残膜回收机由拖拉机动力输出轴将动力经变速箱为起膜装置提供动力。作业时,起膜装置将残膜、土壤、根茬混合物抛送至捡膜区,当卷辊随捡膜滚筒运动到该区域时,在正反转机构的作用下使卷辊正转与膜土混合物下落的方向一致,且弹齿齿尖的线速度大于膜土混合物下落的速度,以减小土壤对残膜的拾拾阻力,同时利用残膜易缠绕特性^[20],实现卷辊对残膜钩、卷作用,提高了拾净率,减少了含杂量;当卷辊随捡膜滚筒运动到卸膜区时,在正反转机构的作用下,实现卷辊反转,将拾取的残膜松动后在卸膜辊的作用下实现卸膜,最终将残膜收集到集膜箱内,完成起膜、正转捡膜、反转卸膜、残膜收集的工作流程,随着机具的持续移动,可实现残膜拾拾分离的连续作业过程。



1. 集膜箱;2. 链条I;3. 捡膜滚筒;4. 卷辊;5. 起膜装置;6. 动力输入轴;7. 悬挂机架;8. 链条IV;9. 换向装置;10. 变速箱;11. 链条III;12. 护罩;13. 链条II;14. 正反转机构;15. 卸膜辊。

1. Film collection box; 2. Chain; 3. Film picking roller; 4. Roller; 5. Film lifting device; 6. Power input shaft; 7. Suspension frame; 8. Chain IV ; 9. Reversing device; 10. Gearbox; 11. Chain III ; 12. Guard; 13. Chain II ; 14. Forward and reverse mechanism; 15. Film unwinding roller.

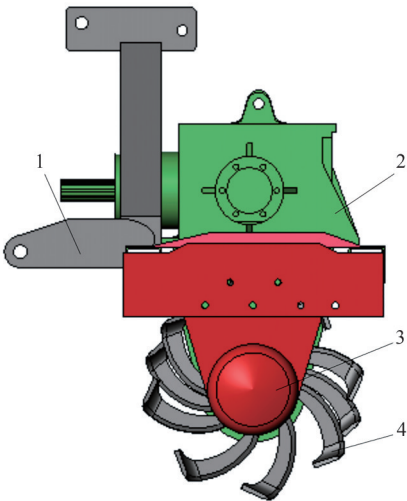
图1 卷辊式耕层残膜回收机的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of rotary pickup roller type residual film recovery machine

2 起膜装置关键部件设计与参数确定

2.1 起膜装置设计

起膜装置是将耕层膜土混合物起抛、破结碎土的装置。本研究设计的起膜装置主要由牵引机架、变速箱、起膜刀轴、起膜刀等组成(图2)。依据卷辊式耕层残膜回收机的捡膜滚筒作业幅宽设计起膜装置的作业幅宽为1 600 mm;依据《农业机械设计手册》^[21],起膜装置采用中间传动方式。



1. 牵引机架;2. 变速箱;3. 起膜刀轴;4. 起膜刀。

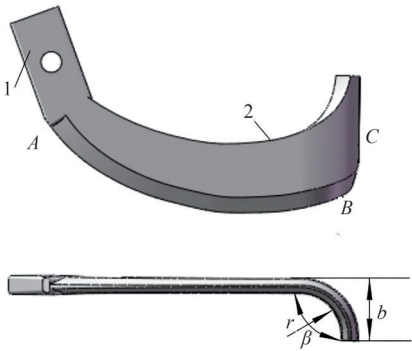
1. Traction frame; 2. Gearbox; 3. Film lifting knife shaft; 4. Film lifting knife.

图2 起膜装置结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of membrane lifting device structure

2.2 起膜刀设计

为增加起膜装置的起膜率,降低残膜的破碎度设计了起膜刀。起膜刀主要由刀柄和刀刃及刀背后缘组成^[22]。本研究对起膜刀的侧切刃AB与正切刃BC进行设计(图3),侧切刃设计为阿基米德螺线,以实现土壤的切削功能;正切刃设计为空间曲线,以实现抛土功能。



1. 刀柄;2. 刀背后缘

1. Blade handle; 2. Back edge

AB为起膜刀侧切刃;BC为起膜刀正切刃; b 为起膜刀正切刃工作幅; β 为折弯角; r 为折弯半径。

AB is ide cutting edge. BC is Straight cutting edge. b represents the working width of the tangent edge of the film lifting knife. β is the bending angle. r is the bending radius.

图3 起膜刀结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of film cutter

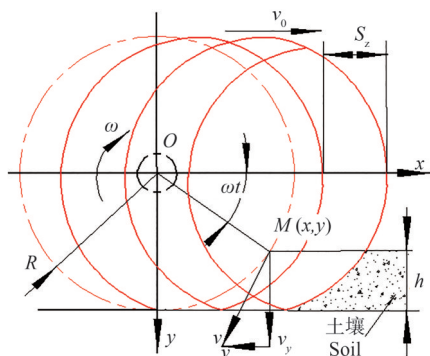
2.2.1 起膜刀作业参数分析

以起膜刀轴中心为坐标圆心 O ,机具前进方向为 x 轴正方向, y 轴垂直地面向下,建立 xOy 直角坐

标系(图4),则任意起膜刀端点 $M(x,y)$ 的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = v_0 t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) = R - h \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_0 为机具前进速度,m/s; t 为起膜刀转动时间,s; R 为起膜刀回转半径,mm; ω 为起膜刀回转角速度,rad/s; h 为起膜深度,mm。



v_0 为机具前进速度; ω 为起膜刀回转角速度; R 为起膜刀回转半径; ωt 为起膜刀转角; h 为起膜深度; S_z 为切土节距。下图同。

v_0 is the forward speed of the unit. ω is the rotation angular speed of the film-forming knife. R is the rotation radius of the film-forming knife. ωt is the film-forming knife rotation angle. h is the film-forming depth. S_z is the soil cutting pitch. Same as the picture below.

图4 起膜刀运动轨迹图

Fig. 4 Motion trajectory of film cutter

为确保起膜装置正常工作,需使起膜刀向后抛土,当 $v_x > 0$ 时,起膜刀刀背推土,起膜装置无法向后抛土,不满足设计要求,因此需保证起膜刀端点 $M(x,y)$ 的 v_x 速度不能为正值,满足公式:

$$v_x = v_0 - R \sin(\omega t) < 0 \quad (2)$$

为使起膜刀能有效地起膜、碎土、抛土,起膜速比 $\lambda > 1$,在起膜刀回转的同一纵向平面内,前后两相邻起膜刀的切土间距为起膜装置的切土节距(S_z),即^[21]:

$$S_z = \frac{60v_0}{Zn} \quad (3)$$

式中: n 为起膜刀转速,r/min; Z 为同一平面内安装的起膜刀数。

联立式(2)和(3)得起膜刀转速(n)为:

$$n = \frac{60v_0}{ZS_z} = 30 \frac{v_0 - v_x}{\pi(R - h)} \quad (4)$$

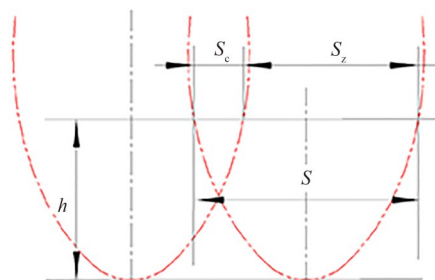
由式(3)可知,改变机具前进速度、同一回转平面内的起膜刀数量、起膜刀的转速都可以改变其切

土节距。但同一平面内的起膜刀不宜过多,刀片越多,起膜装置切土节距越小,容易造成堵塞;另一方面切土节距变大,切下的土块厚度就变大,将导致碎土情况差,膜土不易分离。

由式(4)可知,除切土节距 S_z ,以及同一平面内安装的起膜刀数 Z 、起膜深度 h 外,起膜装置的主要运动参数为机具前进速度 v_0 与起膜刀转速 n 。根据GB/T 2541—2021《残地膜回收机》^[23]作业性能的指标要求,当起膜深度 $h=150$ mm,拖拉机前进速度取2.5 km/h时,经计算,起膜刀切土节距 $S_z=97$ mm,起膜速比 $\lambda > 3$,满足起膜、碎土、抛土的作用,结合传动系统设计起膜刀转速 $n=213.75$ r/min。

2.2.2 起膜刀切土宽度、切土节距及重叠量

起膜装置作业时,排列在圆周上的起膜刀依次入土切削土壤,当一把起膜刀沿余摆线入土切削土壤后,相邻的另一把起膜刀也沿相同的余摆线运动,进行入土切削作业。相邻起膜刀的运动轨迹相同,只是沿水平方向平移 S_z 位移,即切土节距;而相邻起膜刀的轨迹在地表重叠的长度为 S_c ,即重叠量;起膜刀运动时余摆线在地表上的长度 S ,即切土宽度(图5)。重叠量和切土节距对起膜装置的碎土性能有重要影响,随着重叠量的增大,切土节距的减小均能提升碎土性能。



S 为切土宽度; S_c 为重叠量; S_z 为切土节距。下图同。

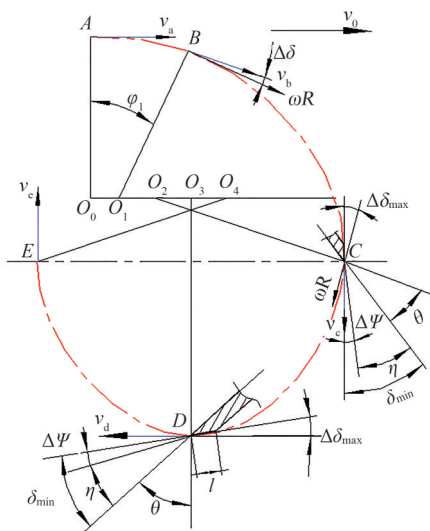
S is the soil cutting width. S_c is the amount of overlap. S_z is the soil cutting pitch. Same as the picture below.

图5 起膜刀切土宽度、切土节距及重叠量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of soil cutting width, soil cutting pitch and overlap amount with film cutter

1) 切土宽度 S 。

为分析起膜刀的切土宽度,以起膜刀轴中心为坐标圆心 O ,机具前进方向为 x 轴正方向, y 轴垂直地面向下,建立 xOy 直角坐标系,起膜刀端点和地表面交点坐标为 $M_0(x_0, y_0)$ 和 $M_2(x_2, y_2)$,和作业耕深处的平面交点坐标为 $M_1(x_1, y_1)$ (图6)。



A、B、C、D、E 点为起膜刀端点所处位置; φ_1 为起膜刀转到 B 点时与初始位置之间的夹角; v_a, v_b, v_c, v_d, v_e 为对应点处的绝对速度; $\Delta\delta$ 为点 B 的圆周速度与绝对速度的夹角; $\Delta\delta_{\max}$ 起膜刀端点绝对速度与圆周速度的夹角存在最大值; $\delta_{\min}$ 各点处存在切削角; η 为起膜刀正切刃磨刃角; $\Delta\psi$ 为隙角; θ 为磨刃面正面与起膜刀回转半径 R 之间的夹角; $O_0, O_1, \dots, O_4$ 为刀轴所处位置; l 为起膜刀刃口宽度。

A, B, C, D, E points are the positions where the endpoints of the film lifting knife are located. φ_1 is the angle between the film forming knife and the initial position when it rotates to point B. v_a, v_b, v_c, v_d, v_e are the absolute velocities at the corresponding points. $\Delta\delta$ is the angle between the circumferential velocity and the absolute velocity at point B. $\Delta\delta_{\max}$ is the maximum angle between the absolute velocity of the film lifting knife tip and the circumferential velocity. $\delta_{\min}$ is the cutting angle at each point. η is the grinding angle of the tangent edge of the film lifting knife. $\Delta\psi$ is the clearance angle. θ is the angle between the grinding surface and the rotating radius R of the film lifting knife. $O_0, O_1, \dots, O_4$ are the positions where the knife axis is located. l is the width of the film lifting knife blade.

图 7 起膜刀正切刃切削土壤过程

Fig. 7 Process of cutting soil with the tangent edge of the film cutter

延长线的交点, 此刻起膜刀的线速度与绝对速度之间的夹角最大, 假设其最大值为 $\Delta\delta_{\max}$, 且绝对速度与大地垂直, 则有:

$$\begin{cases} \Delta\delta_{\max} = \arcsin \frac{v_0}{\omega R} \\ v_c = \omega R \cos \Delta\delta_{\max} \end{cases}$$

起膜刀的安装角 θ 为:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \delta_{\min} - \Delta\delta_{\max} \quad (8)$$

起膜刀的刀背面安装角临界值 θ_0 的计算式为:

$$\theta_0 = \arcsin \left\{ \frac{\sqrt{I}}{I} \cdot \sin \left[\arcsin (1 - K) - \arcsin \frac{1 - K}{\sqrt{L}} + \lambda \sqrt{2K - (K)^2} - \lambda \sqrt{1 + (I)^2} - 2I \cos \theta_0 - (1 - K)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $I = l/R$; $K = h/R$; $L = 1 + (I)^2 - 2I \cos \theta_0$; θ_0 为起膜刀刀背面临界安装角, ($^\circ$); l 为起膜刀刃口宽度, mm。

计算得 $\theta_0 = 73.43^\circ$, 且刀背面安装角应该满足式(10)的关系, 其选取原则应遵循刀背面安装角 θ_a 不大于临界安装角 θ , 即:

$$\theta_a = \theta_0 + \eta \quad (10)$$

式中: θ_a 为刀背面安装角, ($^\circ$); η 为磨刃角, ($^\circ$)。

设计时应保证最小切削角尽可能小, 但磨刃角 η 不宜过小^[24], 其目的在于防止起膜刀正切刃与未作业的膜土混合物接触, 且能降低起膜刀刃口的破损。起膜速比 $\lambda > 3$ 时, 由式(8)可得起膜刀隙角 $> 1^\circ$, 结合《农业机械设计手册》^[21]可知设计符合要求, 且设计磨刃角 $\eta = 25^\circ$, 起膜刀安装角 $\theta = 53^\circ$ 。

设计的起膜刀不仅要保证其具有破结碎土、抛起膜土混合物的性能, 且使其工作阻力足够小。在保证起膜刀滑切性能的同时, 使起膜刀正切刃与侧切刃过度平缓, 故选择起膜刀正切刃曲线为阿基米德螺线。作业时, 起膜刀的侧切刃与侧切部先进入土壤, 正切刃、正切部后进入土壤, 有利于减少刀刃上缠膜、挂茬。设计起膜刀正切刃工作幅 $b = 53 \text{ mm}$ 、折弯角 $\beta = 73^\circ$ 、折弯半径 $r = 30 \text{ mm}$ 。

2.2.4 起膜刀侧切刃曲线设计

为使起膜刀侧切刃能有效的抛起膜土混合物, 且降低残膜、根茬缠绕刀具, 降低作业阻力^[23], 满足设计方案的作业耕深, 故选择起膜刀侧切刃曲线为阿基米德螺线。 θ_n 为侧切刃终点处的极角:

$$\theta_n = \frac{\rho_n - \rho}{\rho} \tan \tau_n$$

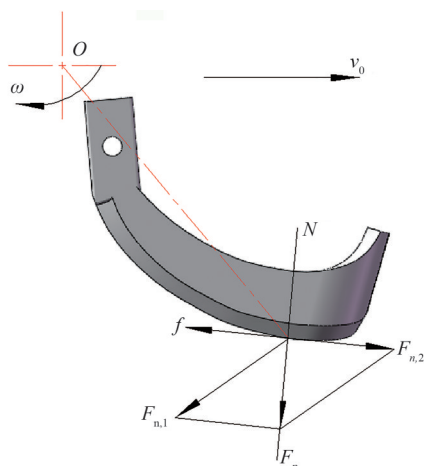
式中: ρ_n 为侧切刃终点处的极径, mm; ρ 为侧切刃上某一点的极径, mm; τ_n 为刀刃终点处滑切角, rad。

起膜刀侧切刃作业受力分析见图 8, 残膜受到侧切刃的法向反力 F_n , F_n 与该点处的摩擦力 f 垂直, 且与法线 N 平行; 其中法向反力 F_n 可分解为与摩擦力反向共线的力 $F_{n,2}$ 及矢量 $F_{n,1}$, 由受力分析知, 当 $F_{n,2}$ 大于该点处的摩擦力 f 时, 起膜刀侧切刃刃口曲

线将不会缠绕残膜,且在作业过程中阻力小,即:

$$\begin{cases} F_{n,2} = F_n \tan \tau_c \\ f = \mu F_n \\ \mu = \tan \phi \end{cases}$$

式中: $F_{n,2}$ 为 F_n 的切向分力, N; F_n 为侧切刃法向力, N; f 为侧切刃切线方向摩擦力, N; τ_c 为侧切刃的动态滑切角($^\circ$); ϕ 为 $F_{n,1}$ 与 F_n 之间的夹角($^\circ$); μ 为残膜与起膜刀侧切刃之间的摩擦因数。



$F_{n,2}$ 为刃口切向力; F_n 为刃口法向反力; f 为刃口切线方向摩擦力; $F_{n,1}$ 为 F_n 与 $F_{n,2}$ 之间的合力; N 为刃口曲线法线。

$F_{n,2}$ is the tangential force at the blade edge. F_n is the normal reaction force at the blade edge. f is the frictional force in the tangential direction of the blade edge. $F_{n,1}$ is the resultant force between F_n and $F_{n,2}$. N is the normal to the blade edge curve.

图8 起膜刀侧切刃作业受力分析

Fig. 8 Stress analysis of the side cutting edge of the film forming knife

减小起膜刀侧切刃法向方向的力,增大该点切线方向的力,可有效降低其作业阻力^[25],即满足:

$$\begin{cases} f < F_{n,2} \\ \mu F_n < F_n \tan \tau_c \\ F_n \tan \phi < F_n \tan \tau_c \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得: $\phi < \tau_c$ 。

动态滑切角是在假设机具作业前进速度为零时的滑切角。但在实际作业过程中动态滑切角受机具前进速度影响极显著,所以起膜刀的滑切性能受到动态滑切角 τ_c 影响,假设侧切刃某一点速度 v 的法向分量用 v_n 表示,切向分量用 v_t 表示,即^[21]:

$$\tau_c = \tau - \Delta\tau = \arctan \frac{v_t}{v_n} \quad (12)$$

根据式(12),起膜速比 λ 一定时, $\Delta\tau$ 随着起膜刀逐渐入土而减小,因此, $\Delta\tau$ 存在最大作业值,且最大值仅当在起膜刀侧切刃与地表面接触时取到;残膜与起膜刀的摩擦因数 $\mu = 0.6$ ^[26],摩擦角 $\phi = 36^\circ$,由式(11)可得动态滑切角 $\tau_c > 36^\circ$,取刀刃终点处滑切角 $\tau_n = 58^\circ$,参考《农业机械设计手册》^[21] 刀刃终点处的滑切角常取 $50^\circ \sim 60^\circ$,满足设计要求。

2.3 起膜刀排列设计

起膜刀排列方式会对起膜装置的起膜质量、破结碎土、机具稳定性等指标造成影响。在起膜装置中,左起膜刀轴与右起刀轴为对称布置,刀片在左、右起膜刀轴上分别按照双头螺旋线方式排布,左右起膜刀轴螺旋线旋向相同,升角相同。根据《农业机械设计手册》^[21],起膜装置同一安装平面内刀片数 Z 取2。在起膜刀轴同一安装横截面上,安装一把左弯刀,一把右弯刀,左右弯刀在刀轴上交错对称安装,作业后地面平整,有利于后续播种。

起膜装置刀轴上安装刀片总数计算式为:

$$\begin{cases} U = (1000\sigma Z)/c' \\ c' = c + \Delta c \end{cases}$$

式中: c' 为起膜刀座安装间距, mm; c 为起膜刀工作幅宽, mm; Z 为同一平面内安装的起膜刀数; Δc 为起膜刀工作幅宽与刀座安装间距之差, mm; U 为总计起膜刀数,取偶数; σ 为起膜装置的起膜幅宽, m。

起膜刀的作业幅宽与起膜刀之间的安装距离有关,参考《农业机械设计手册》^[21] 取 Δc 为 15~20 mm,即 U 取 22,则共需要 44 把起膜刀;取刀轴外径 80 mm,内径 60 mm^[27]。由于卷辊式耕层残膜回收机的捡膜滚筒幅宽小于起膜装置的幅宽,为了使得起膜装置有效起膜、捡膜、降低损耗,需要取掉右侧刀轴靠近轴承的 2 把刀片,使得起膜、捡膜幅宽一致。根据《农业机械设计手册》^[21],同一刀轴截面安装的起膜刀夹角取 120° ,左右刀轴起始位置安装角度差 ζ 为:

$$\zeta = \frac{120^\circ}{U}$$

起膜刀排列展开图见图9。

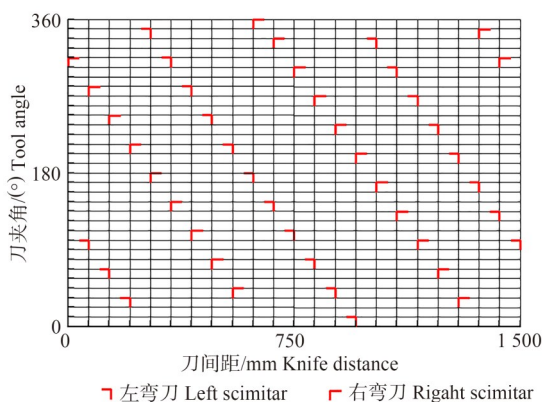


图 9 起膜刀排列展开图

Fig. 9 Expanded view of film-raising knife arrangement

3 起膜装置性能试验

3.1 试验条件

为验证卷辊式耕层残膜回收机起膜装置的起膜率、残膜破碎度及起抛性能,于2023年4月在新疆智能农业装备重点实验室进行试验研究。本次试验通过TCC电力四驱土槽车牵引;通过TCC电力四驱土槽车的变频器控制起膜装置刀轴的转速。为了模拟田间环境,试验前对土槽进行浇水、耕整地等试验前的准备工作。试验土槽土壤紧实度为 41 kg/cm^2 ,含水率为 $16.7\% \sim 22.1\%$ 。试验所需残膜从新疆沙雅县铺膜种植10年以上的棉花农田中采集,按照GB/T 25412—2021《残地膜回收机》^[23]的测点取样方法,在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方内分别采集 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm}$ 土层深度(H)的残膜。

3.2 试验指标

1) 残膜破碎度。残膜破碎度的大小对捡膜滚筒的作业性能有直接影响,破碎度越小机械捡拾难度越高。为保证起膜装置对耕层膜土混合物破结碎土的同时,降低对残膜的机械破碎作用,开展残膜破碎度试验研究。试验前分别清洗 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm}$ 土层深度的残膜,晒干、称重后统计残膜的片数,并计算残膜的破碎度。将不同耕层深度的残膜按倾斜、垂直、水平等不规则状态,按取样顺序分别均匀的预埋在 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm}$ 土层深度的 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 土槽中。试验后分别收集不同耕层深度的残膜,进行清洗、晒干、称重及片数统计,并计算残膜的破碎度。重复3次试验,取平均值。根据DB65/T3837—2015《农田土壤残膜调查技术规范》^[28]要求计算残膜的破碎度,公式为:

$$F = \frac{M}{P}$$

式中: F 为破碎度, mg/块 ; M 为样方内残膜总质量, mg ; P 为样方内残膜总数量,块。

2) 残膜起膜率。卷辊式耕层残膜回收机起膜装置的起膜率计算公式为:

$$J = \frac{W}{M} \times 100\%$$

式中: J 为起膜率, $\%$; W 为起膜装置起出的残膜质量, g 。

3.3 起膜装置起抛性能试验

本研究自行设计了起膜装置的起抛性能试验台,试验时安装在起膜装置后方,依据捡膜滚筒捡膜区域高度将试验台平均划分为3层,每层高度为 175 mm (图10)。

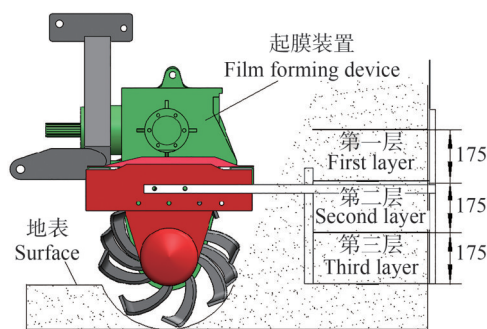


图 10 起膜装置起抛性能试验台

Fig. 10 Film raising device lifting and throwing performance test bench

试验前清洗、晒干残膜并称重,且将 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 土层深度的残膜分别涂为黑色和红色, $100 \sim 150 \text{ mm}$ 土层深度的残膜不涂色(白色)。将涂色处理后的残膜按倾斜、垂直、水平等不规则状态,分别均匀的预埋在 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm}$ 土层深度的 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的土槽内(图11)。

试验时,起膜装置将膜土混合物抛起到试验台的不同高度,通过判定不同高度残膜的颜色,以获得起膜装置的起抛性能。试验后,将相同高度中的残膜分别按颜色收集,再次清洗、晒干并称重。重复3次试验,取平均值。每层中染色残膜的起抛率计算公式为:

$$\gamma = \frac{Q}{M} \times 100\%$$

式中: γ 为起抛率, $\%$; Q 为残膜质量, g 。

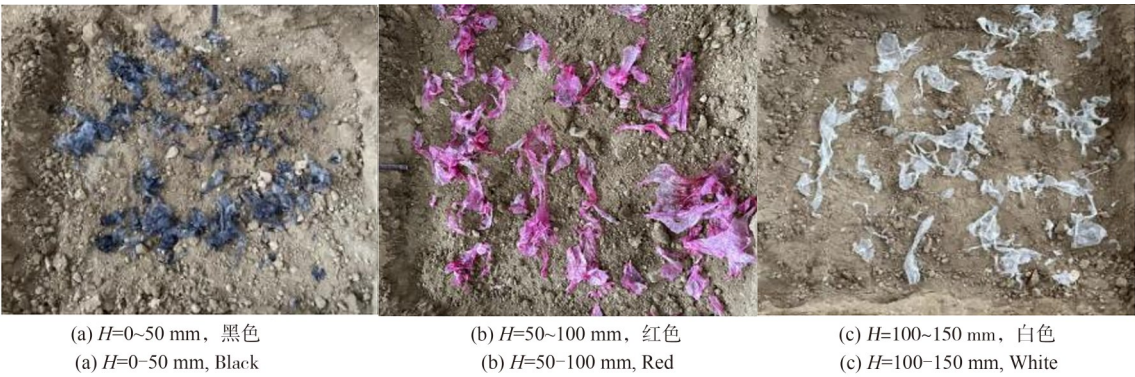


图 11 试验前不同土层深度(H)残膜形态

Fig. 11 Residual film morphology at different soil depths (H) before the test

机具前进速度为 4.5 km/h,刀轴转速 213.75 r/min 时,起膜装置起抛性能试验测试结果见表 1。起膜装置对 0~150 mm 土层深度残膜的总起膜率为 92.3%。其中,对 0~50 mm 土层深度的残膜起膜率为 42.6%,该土层深度 37.9% 的残膜主要抛到试验台第 2 层;起膜装置对 50~100 mm 土层深

度的残膜起膜率为 18.8%,该土层深度 13.6% 的残膜主要抛到试验台第 3 层;起膜装置对 100~150 mm 土层深度的残膜起膜率为 30.9%,该土层深度 22.6% 的残膜抛到试验台的第 1 层。可见起膜装置能可靠地将耕层内的残膜抛起到捡膜高度。

表 1 起膜装置起抛性能试验结果

Table 1 Results of the film removal device's film throwing performance test

起膜深度/mm Mulching depth	残膜颜色 Residual film color	起抛率/% Throwing rate			起膜率/% Total mulching rate
		第 1 层 First layer	第 2 层 Second layer	第 3 层 Third layer	
0~50	黑色 Black	2.0	37.9	2.7	42.6
50~100	红色 Red	1.6	3.6	13.6	18.8
100~150	白色 White	22.6	5.4	2.9	30.9

3.4 试验方案

以机具前进速度 X_1 、刀轴转速 X_2 为影响因素,残膜起膜率 Y_1 和破碎度 Y_2 为评价指标,进行 2 因素 3 水平起膜装置性能试验。结合生产需要选择机具前进速度 X_1 为 2.5~6.5 km/h,根据本文 2.2.1 分析结果,适当调整刀轴转速,即刀轴转速 X_2 为

197.92~229.58 r/min,对应 TCC 电力四驱土槽车的动力输出轴分别为 500、540、580 r/min。试验因素与水平见表 2。

运用 Design-Expert13.0 软件对试验结果进行分析,结果见表 3。可知,残膜起膜率均值为 89.33%,破碎度均值为 5.12 mg/块。

表 2 起膜装置性能试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of performance testing for the film removal device

水平 Level	因素 Factor	
	X_1 , 机具前进速度/(km/h) Implement forward speed	X_2 , 刀轴转速/(r/min) Blade shaft speed
-1	2.5	197.92
0	4.5	213.75
1	6.5	229.58

表 3 起膜装置性能试验结果

Table 3 The performance test results of the film removal device

序号 Number	因素水平 Factor level		起膜率 $Y_1/\%$ Mulching rate	破碎度 $Y_2/(\text{mg}/\text{块})$ Ragmentation degree
	x_1	x_2		
1	−1	−1	87.62	4.34
2	−1	0	93.86	3.52
3	−1	1	94.43	2.25
4	0	−1	84.82	7.14
5	0	0	91.26	5.11
6	0	1	93.21	3.28
7	1	−1	80.67	9.89
8	1	0	87.35	6.50
9	1	1	89.73	3.95

注： x_1 、 x_2 分别为机具前进速度和刀轴转速的水平值。
Note: x_1 、 x_2 are the machine tool forward speed and cutter shaft rotational speed horizontal values respectively.

对试验结果进行多元回归分析,得出机具前进速度、刀轴转速与起膜率及破碎度的回归模型,为评价各因素对试验指标的显著性程度,对模型进行方差分析结果见表4。残膜起膜率 Y_1 的回归模型极显著,机具前进速度 X_1 、刀轴转速 X_2 对起膜率 Y_1 的影响极显著;残膜破碎度 Y_2 的回归模型显著,机具

前进速度 X_1 、刀轴转速 X_2 对破碎度 Y_2 的影响显著。机具前进速度 X_1 、刀轴转速 X_2 对起膜率 Y_1 和破碎度 Y_2 的回归方程为:

$$Y_1 = 89.33 + 3.4089X_1 - 3.13X_2$$
$$Y_2 = 5.11 - 1.6722X_1 + 1.9444X_2$$

机具前进速度和刀轴转速对起膜率影响极显

表 4 起膜装置试验指标方差分析

Table 4 Analysis of variance for the test indicators of the film removal device

指标 Indicator	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
起膜率 Y_1 Mulching rate	模型 Model	166.02	4	41.50	54.85	0.000 2
	X_1	56.31	2	28.15	74.18	0.000 7
	X_2	109.71	2	54.85	144.52	0.000 2
	残差 Residual	1.52	4	0.379 6		
	总和 Total	167.53	8			
破碎度 Y_2 Ragmentation degree	模型 Model	41.04	4	10.26	10.65	0.020 8
	X_1	17.46	2	8.73	9.07	0.032 7
	X_2	23.58	2	11.79	12.24	0.019 7
	残差 Residual	3.85	4	0.963 1		
	总和 Total	44.90	8			

注： $P<0.01$ 和 $0.01<P<0.05$ 分别表示极显著和显著。
Note: $P<0.01$ and $0.01<P<0.05$ indicate extremely significant and significant respectively.

著,对破碎度影响显著。当机具前进速度一定时,增大刀轴转速,则会增加单位面积起膜刀的起膜次数,提高了起膜率,加重了残膜破碎程度,增加了机械捡拾的难度;反之,适当减小刀轴转速,起膜刀在土壤中滞留时间延长,水平起膜运动位移也相应增加,导致起膜率降低,残膜破碎程度减小;当刀轴转速一定时,机具前进速度对起膜率影响极显著,对破碎度影响显著。

为得到起膜装置作业最优参数组合,以提高残膜起膜率、破碎度为目标,对起膜装置的前进速度、刀轴转速进行优化求解,确定约束条件如下:

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2) \\ \max Y_2(X_1, X_2) \\ 2.5 \text{ km/h} \leq X_1 \leq 6.5 \text{ km/h} \\ 197.92 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 229.58 \text{ r/min} \end{cases}$$

通过软件 Design-Expert13.0 进行寻优,得到较优参数组合:机具前进速度为 4.5 km/h、刀轴转速 213.75 r/min,此时残膜起膜率为 91.37%,破碎度为 5.11 mg/块。

在较优作业参数(机具前进速度为 4.5 km/h,刀轴转速 213.75 r/min)下进行田间验证试验。试验前,按照 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》^[23]的测点取样方法,选择 1 m×1 m 的样方,采取 0~50、50~100、100~150 mm 土层深度残膜,清洗、晾干、称重,分别计算残膜的破碎度,重复 3 组取平均值;试验时,在试验前挑选的 3 个侧点附近但不重叠的区域再选择 3 个测点进行试验,试验后分别收集这 3 个测点 0~50、50~100、100~150 mm 土层深度的残膜,清洗、晾干、称重,分别计算残膜的破碎度,取平均值。结果表明:平均起膜率为 90.21%,平均破碎度为 6.03 mg/块。表明起膜装置具有良好的起膜率,且破碎度在可进行机械化捡拾作业范围内,符合设计要求。

4 结 论

本研究针对耕层残膜回收机传统起膜铲式、滚刀式、旋耕起膜式破碎结土能力有限、起膜效果差等问题,设计了一种起膜装置,提出了分离抛送膜土混合物的起膜方法,并对起膜装置的关键部件进行了设计。

1)对起膜刀进行分析,得到了影响切土宽度、切土节距、重叠量的关键因素;基于滑切原理设计

了起膜刀关键部件参数,其中起膜刀正切刃的磨刃角 $\eta=25^\circ$,安装角 $\theta=53^\circ$,工作幅宽 $b=53 \text{ mm}$,折弯角 $\beta=73^\circ$,折弯半径 $r=30 \text{ mm}$;侧切刃刀刃终点处滑切角 $\tau_n=58^\circ$ 。

2)起膜装置起抛试验结果表明,起膜装置对 0~150 mm 土层深度残膜总起膜率为 92.3%。其中起膜装置可将 0~50 mm 土层深度 37.9% 的残膜抛起到试验台的第 2 层;50~100 mm 土层深度 13.6% 的残膜抛起到试验台的第 3 层,100~150 mm 土层深度 13.6% 的残膜抛起到试验台的第 1 层,表明起膜装置能将土层内的残膜起抛到捡拾高度。

3)以残膜起膜率、破碎度为试验指标,机具前进速度、刀轴转速为试验因素开展起膜装置性能正交试验,得到起膜装置较优参数组合:机具前进速度为 4.5 km/h,刀轴转速 213.75 r/min,此时残膜起膜率为 91.37%,破碎度为 5.11 mg/块;以较优工作参数进行田间验证试验,残膜起膜率为 90.21%,破碎度为 6.03 mg/块。

参考文献 References

- [1] 谢建华,段威林,张凤贤,唐炜.杆齿式卸膜机构的设计及高速摄像试验[J].机械设计,2019,36(5):60-64
Xie J H, Duan W L, Zhang F X, Tang W. Design and high-speed photography test of pole-tooth film-unloading mechanism[J]. *Journal of Machine Design*, 2019, 36(5): 60-64 (in Chinese)
- [2] 戴飞,郭笑欢,赵武云,辛尚龙,刘小龙,吴正文.帆布带式马铃薯挖掘:残膜回收联合作业机设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(3):104-113
Dai F, Guo X H, Zhao W Y, Xin S L, Liu X L, Wu Z W. Design and experiment of canvas belt combined operation machine for potato digging and plastic film collecting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 104-113 (in Chinese)
- [3] 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 J Y, Wang X F, Zhu D L. Effect of plastic-film mulch on crop yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 172-175 (in Chinese)
- [4] 何文清,严昌荣,刘爽,常蕊芹,王序俭,曹肆林,刘勤.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 W Q, Yan C R, Liu S, Chang R Q, Wang X J, Cao S L, Liu Q. 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)
- [5] 白云龙,李晓龙,张胜,包丽华,刘莉平,林利龙,郑海春.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 Y L, Li X L, Zhang S, Bao L H, Liu L P, Lin L L, Zheng H C.

- 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)
- [6] 程宏波, 柴守玺, 陈玉章, 范颖丹, 黄彩霞, 常磊, 杨长刚. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温和和产量效应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6316-6325
- Cheng H B, Chai S X, Chen Y Z, Fan Y D, Huang C X, Chang L, Yang C G. 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)
- [7] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 郑盛华. 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 C R, Mei X R, He W Q, Zheng S H. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 269-272 (in Chinese)
- [8] 薛文瑾, 王春耀, 朱振中, 王晓冬. 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
- Xue W J, Wang C Y, Zhu Z Z, Wang X D. Design of film-rolling cotton seedling residual film recycling machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(3): 148-149, 147 (in Chinese)
- [9] GB/T 25413—2010 农田地膜残留量限值及测定标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010
- GB/T 25413-2010 Farmland mulching film residue limits and measurement standards[S]. Beijing: China Standards Press, 2010 (in Chinese)
- [10] 谢建华, 侯书林, 刘英超. 残膜清理回收机具的研究现状及存在的问题[J]. 中国农机化, 2012, 33(5): 41-44
- Xie J H, Hou S L, Liu Y C. Research status and trends of plastic film residue collectors [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012, 33(5): 41-44 (in Chinese)
- [11] 罗凯, 袁盼盼, 靳伟, 鄢金山, 白圣贺, 张朝书, 张学军. 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 K, Yuan P P, Jin W, Yan J S, Bai S H, Zhang C S, Zhang X J. 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*, 2018, 34(19): 19-27 (in Chinese)
- [12] 严伟, 胡志超, 吴努, 徐弘博, 游兆延, 周新星. 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 W, Hu Z C, Wu N, Xu H B, You Z Y, Zhou X X. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 17-24 (in Chinese)
- [13] 于福锋, 李平, 张凤奎, 张宏, 兰海鹏, 廖结安. 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 F F, Li P, Zhang F K, Zhang H, Lan H P, Liao J A. Design of chain-type cotton field plough layer residual film recovery machine [J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(10): 100-104 (in Chinese)
- [14] 靳伟, 张学军, 张朝书, 史增录, 鄢金山, 王海新, 舒冬梅. 自动卸膜式残膜回收机捡拾齿和滚筒的优化[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 96-103
- Jin W, Zhang X J, Zhang C S, Shi Z L, Yan J S, Wang H X, Shu D M. Optimization of pick-up teeth and roller for automatic unloading film recycling machine[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(3): 96-103 (in Chinese)
- [15] 史增录, 唐学鹏, 甄军, 鄢金山, 张学军, 靳伟. 钉齿式残膜捡拾机构运动仿真分析及性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 64-71
- Shi Z L, Tang X P, Zhen J, Yan J S, Zhang X J, Jin W. Performance test and motion simulation analysis of nail tooth type mechanism for collecting plastic residue [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(4): 64-71 (in Chinese)
- [16] 张攀峰. 旋耕钉齿式耕层残膜回收机的设计与试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2018
- Zhang P F. Design and test research of rotary tillage nail tooth plastic film recycling machine[D]. Alaer: Tarim University, 2018 (in Chinese)
- [17] 张振慧. 风选式耕层残膜回收机的设计研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020
- Zhang Z H. Design and research of the air separation type reclaimer for the residual film of plough layer [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [18] 郭文松, 贺小伟, 王龙, 赵鹏飞, 胡灿, 侯书林, 王旭峰. 梳齿起膜气力脱膜式耕层残膜回收机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 1-10
- Guo W S, He X W, Wang L, Zhao P F, Hu C, Hou S L, Wang X F. Development of a comb tooth loosening and pneumatic stripping plough layer residual film recovery machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18): 1-10 (in Chinese)
- [19] 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 弋晓康, 侯书林. 抛膜链齿输送带式残膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 122-129
- Wang X F, Hu C, Lu B, Yi X K, Hou S L. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 122-129 (in Chinese)
- [20] 谢建华, 曹晓冉, 巩怀仁, 杨业龙, 孙超伟, 刘鸿智. 圆盘碎土起膜装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 5-8
- Xie J H, Cao X R, Gong H R, Yang Y L, Sun C W, Liu H Z. Simulation analysis and experiment of disc crushing soil and curl-up film device[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(8): 5-8 (in Chinese)
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007
- China Agricultural Mechanization Scientific Research Institute. *Agricultural Machinery Design Manual (Part 1)* [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press, 2007 (in Chinese)
- [22] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 张季钦, 敖倩, 王磊. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99-110, 195
- Liao Q X, Xie H M, Zhang Q S, Zhang J Q, Ao Q, Wang L. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 99-110, 195 (in Chinese)
- [23] GB/T 25413—2021 残地膜回收机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- GB/T 25413—2021 Residual film recycling machine [S]. Beijing: China Standard Press, 2021 (in Chinese)
- [24] 赵铁军, 王金武. 水稻秸秆整株还田埋草弯刀滑切角与安装角分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(11): 58-60, 63
- Zhao T J, Wang J W. Analysis and research of grass removing angle and setting angle of straw-mulching bent blade of straw-returned-native-field

- [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007, 29(11): 58-60, 63 (in Chinese)
- [25] 王加一, 赵淑红, 杨智杰, 高连龙, 杨悦乾. 玉米条带少耕作业驱动式破茬刀设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 51-61
- Wang J Y, Zhao S H, Yang Z J, Gao L L, Yang Y Q. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less tillage operation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 51-61 (in Chinese)
- [26] 孙文峰, 付天鹏, 何跃, 卢佳琪, 常晋恺, 王吉权. 水田带状复式整地机关键部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 50-62
- Sun W F, Fu T P, He Y, Lu J Q, Chang J K, Wang J Q. Design and test on key components of strip compound ground preparation machine in paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 50-62 (in Chinese)
- [27] 王彪. 油菜直播机旋耕深施肥部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022
- Wang B. Design and experiment of components for rotary tillage and deep fertilization of rapeseed direct seeding machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [28] DB65/T 3837—2015 农田土壤残膜调查技术规范[S]. 新疆维吾尔自治区: 新疆维吾尔自治区质量技术监督区, 2015
- DB65/T 3837—2015 Technical Specification for soil residual film investigation in farmland [S]. Xinjiang Uygur Autonomous Region: Xinjiang Uygur Autonomous Region Quality and technical supervision Zone, 2015 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 刘小鹏, 硕士研究生, 2021年9月—2024年6月就读于新疆农业大学机电工程学院。参与国家自然科学基金项目(52105278)和新疆维吾尔自治区农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-10)的研究。2022年获得新疆农业大学学校奖学金, 2023年获得新疆维吾尔自治区奖学金。



通讯作者简介: 史增录, 博士, 高级实验师, 就职于新疆农业大学机电工程学院。现主要从事农田残膜回收及特色农作物铺膜播种技术与智能装备的研究。主持国家自然科学基金项目、自治区天山青年人才项目、自治区科技援疆项目等8项。公开出版学术专著1部, “十四五”规划教材1部, 发表论文20余篇, 其中5篇SCI/EI收录, 获国家专利10余项, 发明专利3项。主持校级教研教改课题7项, 指导大学生创新创业项目7项, 其中国家级2项评定为优秀。指导学生参加“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛获自治区二等奖1项, 获优秀指导教师荣誉称号、课堂优秀教师、大学生创新创业项目优秀指导教师、校先进工作者称号等各类获奖多项。