

# 卷辊式耕层残膜回收机卸膜装置的设计与试验

刘小鹏<sup>1</sup>, 史增录<sup>1,2</sup>, 姚洁婷<sup>1</sup>, 张学军<sup>1,2</sup>,  
鄯金山<sup>1,2</sup>, 张朝书<sup>3</sup>, 刘 蕾<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052;  
3. 阿克苏天地机械制造有限公司, 新疆 阿克苏 843000)

**摘要:**针对卷辊式耕层残膜回收机卸膜装置存在卸膜性能不可靠的问题,设计了一种卷辊反转松膜及卸膜辊强制卸膜装置。卸膜装置主要由正反转机构和卸膜辊组成,可有效实现卸膜功能。对关键工作部件进行了分析和参数计算,并确定有效卸膜条件:卸膜辊转速为 $167.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,卷辊反转转速为 $43 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。以机具前进速度、卸膜辊转速及卷辊反转转速为试验因素,以卸膜率与回收混合物含土率为评价指标,设计了三因素三水平正交试验。运用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行分析,得到各因素与评价指标之间的交互作用,分析得出各试验因素对卸膜率的影响程度大小依次为卷辊反转转速、卸膜辊转速、机具前进速度;对残膜回收混合物含土率的影响程度大小依次为卸膜辊转速、机具前进速度、卷辊反转转速。通过对回归模型的优化,得到适合该卸膜装置作业最优参数组合为:机具前进速度为 $4.37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,卷辊反转转速为 $184.70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,卸膜辊转速为 $61.95 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。以最优参数组合进行了田间试验,结果表明该装置的卸膜率为73.21%,回收混合物含土率为16.20%,与理论优化值相对误差均不超过1%,能满足作业的需要。

**关键词:**残膜回收机;卸膜装置;卷辊式;设计;试验

中图分类号:S223.5 文献标志码:A

## Design and experiment of film unloading device for roller-type residual film recycling machine

LIU Xiaopeng<sup>1</sup>, SHI Zenglu<sup>1,2</sup>, YAO Jieting<sup>1</sup>, ZHANG Xuejun<sup>1,2</sup>,  
YAN Jinshan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chaoshu<sup>3</sup>, LIU Lei<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;  
2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi, Xinjiang 830052, China;  
3. Aksu Tiandi Machinery Manufacturing Co. Ltd., Aksu, Xinjiang 843000, China)

**Abstract:** To solve the problem of unreliable performance of the film unwinding device in the film recovery machine for the plow layer, a device for loosening the film by reversing the roller and forcibly unwinding the film from the unwinding roller was designed. The film unwinding device mainly consists of a forward and reverse mechanism and an unwinding roller, effectively achieving the film unwinding function. Analysis and parameter calculations were conducted for key working components, and effect of film unwinding conditions were determined. The experiment set the unwinding roller speed set at  $167.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and the roller reversal speed at  $43 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ . Using the forward speed of the implement, the unwinding roller speed, and the roller reversal speed as experimental factors, and using the film unwinding rate and the soil content in the recovered mixture as evaluation indicators, a three-factor, three-level orthogonal experiment was used. The experimental results were analyzed using Design-Expert 13.0 software to obtain the interaction effects between each factor and the evaluation indicators. It was found

收稿日期:2024-01-10

修回日期:2024-03-27

基金项目:国家自然科学基金(52105278);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);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02038)

作者简介:刘小鹏(1994-),男,山西朔州人,硕士研究生,研究方向为农田残膜污染治理技术与装备。E-mail:1711315255@qq.com

通信作者:史增录(1986-),男,甘肃甘谷人,高级实验师,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究。E-mail:shizfld@qq.com

that the factors affecting the film unwinding rate (in decreasing order of impact) were the roller reversal speed, the unwinding roller speed, and the implement's forward speed. For the soil content in the recovered mixture, the influencing factors (in decreasing order of impact) were the unwinding roller speed, the implement's forward speed, and the roller reversal speed. By optimizing the regression model, the most suitable parameter combination for the operation of the film unwinding device was determined to be an implement forward speed of  $4.37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , a roller reversal speed of  $184.70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , and an unwinding roller speed of  $61.95 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ . Field tests were conducted using this optimal parameter combination. The results demonstrated that the film unwinding rate of the device was 73.21%, and the soil content in the recovered mixture was 16.20%. The relative errors compared to the theoretically optimized values did not exceed 1%, meeting the design requirements.

**Keywords:** residual film recycling machine; film unloading device; roller-type; design; experiment

地膜覆盖具有增温保墒、抑制杂草生长、促进植物根系发育及提高农作物抗旱性的作用<sup>[1-4]</sup>,对农业生产具有重要意义。我国于 20 世纪 70 年代引入地膜覆盖技术并广泛应用<sup>[5-7]</sup>,地膜的使用量逐年递增,但由于没有完善配套的回收机械,大量残膜无法得到有效回收,经耕、整地后被翻盖到土壤下面,导致土壤中的残膜数量逐年累积,严重影响了土壤质地,农作物生长环境受到破坏<sup>[8-11]</sup>,使农作物质量和产量下降<sup>[12-13]</sup>。新疆农田耕层残膜污染问题尤其突出,通过数据统计分析,农田平均地膜残留量约为  $206.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,部分污染严重区域残膜残留量均值超过  $275.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,已经远远超过了农田地膜残留量  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的限值标准<sup>[14]</sup>。因此,耕层残膜的污染治理迫在眉睫。

耕层残膜多呈碎片化分布在土壤层中,通常与土壤、根茬混合,增加了其回收的难度,为此国内学者研究了一系列机型。其中卸膜装置是卷辊式耕层残膜回收机的核心工作部件,也是卷辊式耕层残膜回收机主要的技术难点<sup>[15]</sup>。现阶段的卸膜装置主要有气动式<sup>[16]</sup>、伸缩杆齿式<sup>[17]</sup>和叶片式<sup>[18]</sup>。气动卸膜装置结构比较简单,主要工作部件是风机,运行时依靠气流对残膜的作用力卸膜,卸膜效果不佳<sup>[19]</sup>;伸缩杆齿卸膜装置主要依靠偏心辊上弹齿的伸缩来拾取和自动卸膜,开发成本高,可靠性低<sup>[20]</sup>;叶片式卸膜装置主要依靠叶片旋转方向与捡膜装置旋转方向相反的作用模式,卸膜率不高,叶片上易产生包膜现象<sup>[16]</sup>。

卷辊式耕层残膜回收机利用卷辊对残膜的钩、卷作用,实现了对残膜碎片的有效拾拾。但钩卷在弹齿上的残膜,依靠卸膜装置单一的机械作用卸膜时存在卸膜效率低、挂膜等现象,卸膜装置连续卸膜作业时易造成卸膜性能不可靠的问题。本研究拟设计一种卷辊反转松膜及卸膜辊强制卸膜的装置,通过理论分析,对关键工作部件进行设计,得到

影响卸膜的关键因素,并进行性能试验,以最优参数进行田间验证,为卷辊式耕层残膜回收机卸膜装置的研究提供参考。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

卷辊式耕层残膜回收机主要由集膜箱、卸膜辊、正转传动链条、捡膜滚筒、正反转机构、反转传动链条、卷辊、护罩、链条 I、起膜装置、变速箱 I、变速箱 II、链条 II、牵引机架、动力输入轴、液压马达组成。在捡膜滚筒圆周方向,按作业区域可以划分为捡膜区、卸膜区。其详细结构如图 1 所示。

### 1.2 工作原理

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。同时,动力输入轴的动力由链条 II 经变速箱 II 换向由链条 I 为捡膜滚筒提供动力;液压马达为卸膜辊提供动力。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的特性,实现卷辊对残膜的钩、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,将拾取的残膜反转松膜后在卸膜辊的作用下实现强制卸膜,最终将残膜收集到集膜箱内,完成一次起膜、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。

### 1.3 传动系统设计

该卷辊式耕层残膜回收机由拖拉机动力输出轴提供动力,输出轴经变速箱为起膜装置提供动力。同时,动力输入轴的动力由链传动 I 经变速箱

II 换向,转由链传动 II 为捡膜滚筒提供动力;液压马达为卸膜辊提供动力,卸膜辊将动力经正转传动链条作用于捡膜区,使卷辊在该区域正转捡膜;捡膜滚筒将动力经反转传动链条作用于卸膜区,使卷辊反转松膜,以便卸膜,其动力传动系统如图 2 所示。

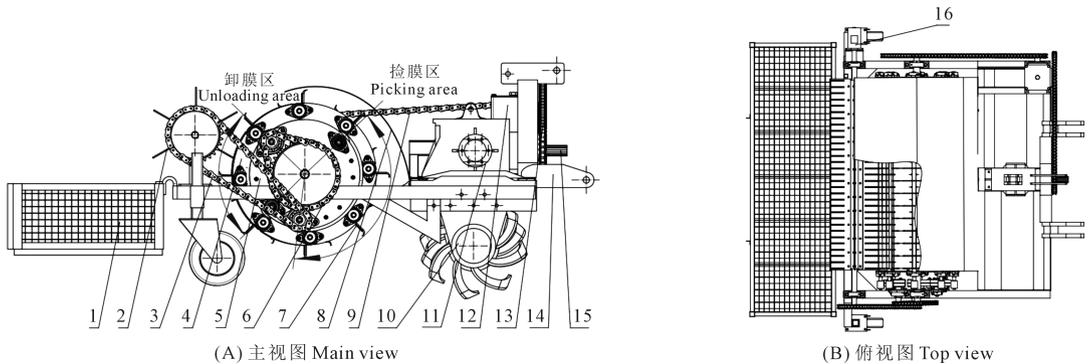
## 2 关键部件的设计与分析

### 2.1 正反转机构设计

正反转机构作为卷辊式耕层残膜回收机的核心部件,在卷辊捡膜区正转捡膜,在卸膜区反转松膜中起重要作用,其作业的可靠性直接影响到卸膜

装置的可靠性以及卸膜率。其结构如图 3 所示,主要由正转双排链、支撑圆辊、幅板、正转从动链轮、反转主动链轮、菱形轴承座 I、反转动力输入轴、反转双排链、菱形轴承座 II、正转动力输入轴等组成。按作业区域可将其划分为捡膜区、输膜区、卸膜区、捡膜准备区。

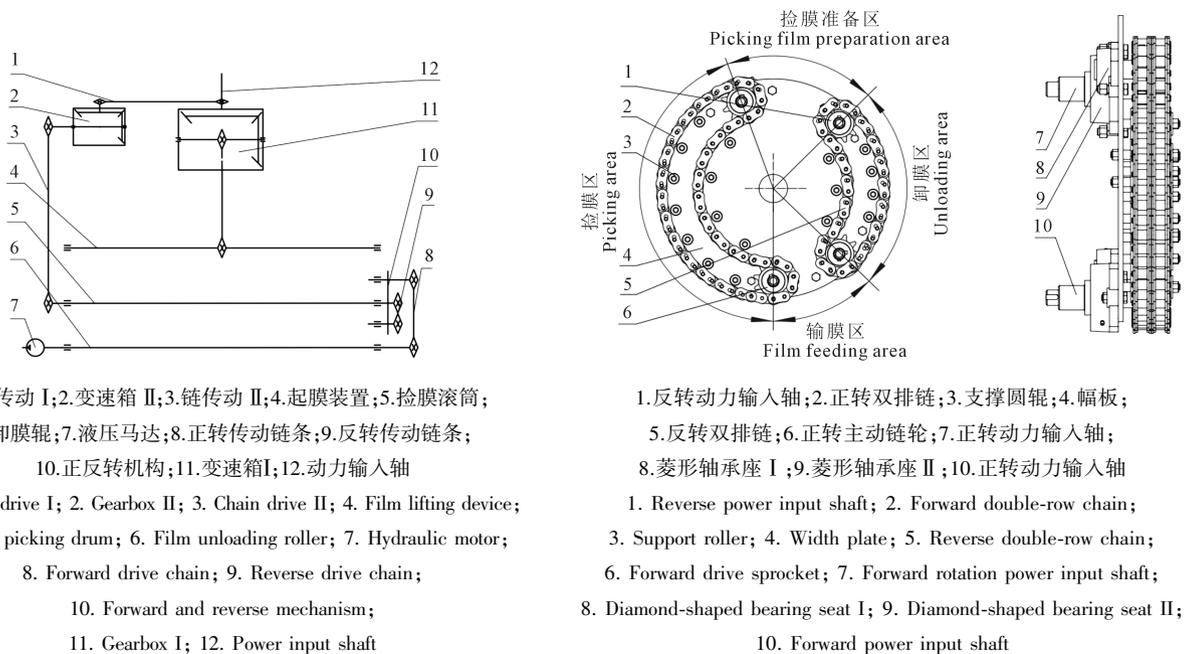
正转双排链与正转主动链轮、正转从动链轮啮合,双排链内侧由 7 个支撑圆辊弓起一个圆弧,外侧设置 4 个支撑圆辊用于张紧正转双排链。支撑圆辊用于保证正转双排链分别与正转主动链轮和正转从动链轮充分啮合,避免了正转双排链传动的滞后



1.集膜箱;2.卸膜辊;3.正转传动链条;4.捡膜滚筒;5.正反转机构;6.反转传动链条;7.卷辊;8.护罩;  
9.链条 I;10.起膜装置;11.变速箱 I;12.变速箱 II;13.链条 II;14.牵引机架;15.动力输入轴;16.液压马达  
1. Film collecting box; 2. Film unwinding roller; 3. Forward transmission chain; 4. Film picking roller; 5. Forward and reverse mechanism;  
6. Reverse transmission chain; 7. Winding roller; 8. Guard; 9. Chain I; 10. Film lifting device; 11. Gearbox I;  
12. Gearbox II; 13. Chain II; 14. Traction frame; 15. Power input shaft; 16. Hydraulic motor

图 1 整机结构图

Fig.1 Overall machine structure



1.链传动 I;2.变速箱 II;3.链传动 II;4.起膜装置;5.捡膜滚筒;  
6.卸膜辊;7.液压马达;8.正转传动链条;9.反转传动链条;  
10.正反转机构;11.变速箱 I;12.动力输入轴  
1. Chain drive I; 2. Gearbox II; 3. Chain drive II; 4. Film lifting device;  
5. Film picking drum; 6. Film unloading roller; 7. Hydraulic motor;  
8. Forward drive chain; 9. Reverse drive chain;  
10. Forward and reverse mechanism;  
11. Gearbox I; 12. Power input shaft

图 2 动力传动系统

Fig.2 Power transmission system

1.反转动力输入轴;2.正转双排链;3.支撑圆辊;4.幅板;  
5.反转双排链;6.正转主动链轮;7.正转动力输入轴;  
8.菱形轴承座 I;9.菱形轴承座 II;10.正转动力输入轴  
1. Reverse power input shaft; 2. Forward double-row chain;  
3. Support roller; 4. Width plate; 5. Reverse double-row chain;  
6. Forward drive sprocket; 7. Forward rotation power input shaft;  
8. Diamond-shaped bearing seat I; 9. Diamond-shaped bearing seat II;  
10. Forward power input shaft

图 3 正反转机构结构图

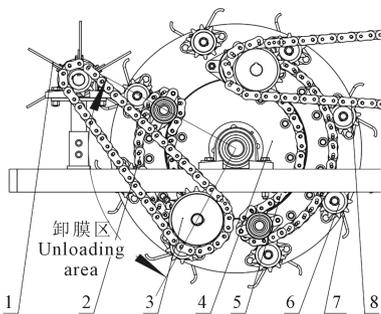
Fig.3 Forward and reverse rotation mechanism structure diagram

性;反转双排链与反转主动链轮、反转从动链轮相啮合。在幅板的卸膜区设置有反转双排链,双排链内侧由 4 个支撑圆辊弓起一个圆弧,外侧设置 3 个支撑圆辊进行张紧。正反机构利用双排链条传动,提升了动力传动的柔性,降低了经过捡膜区、卸膜区域的卷辊链轮与双排链之间开始啮合和退出啮合过程中的冲击力,进一步提高了整机工作的稳定性。

正反转机构工作时,经链传动将变速箱右侧输出的动力输入到正反转机构,带动正转主动轴转动,进而驱动正转双排链运动,当卷辊随捡膜滚筒转动经过捡膜区时,卷辊上的链轮与正转双排链啮合,带动卷辊正转捡膜;卸膜辊的动力经反转传动组件输入到正反转机构,带动正反转动力输入轴转动,进而带动反转双排链转动,当卷辊随捡膜滚筒转动经过卸膜区时,卷辊上的链轮与反转双排链啮合,驱动卷辊反转松膜。

## 2.2 卸膜装置设计

卸膜装置作为卷辊式耕层残膜回收机的核心部件,可将卷辊上的残膜强制卸膜并抛送到集膜箱。如图 4 所示,卸膜装置主要由卸膜叶片、反转双排链、反转传动组件、捡膜滚筒、正转双排链、卷辊链轮、卷辊、正转传动组件等组成。其中卸膜叶片是卸膜装置的关键工作部件,工作时需频繁与弹齿接触,因此卸膜叶片材料的选择直接影响到卸膜装置工作的可靠性。



1.卸膜叶片;2.反转双排链;3.反转传动组件;4.捡膜滚筒;  
5.正转双排链;6.卷辊链轮;7.卷辊;8.正转传动组件

1. Film unloading blade; 2. Reverse double-row chain;  
3. Reverse drive assembly; 4. Film picking drum;  
5. Forward double-row chain; 6. Roller chain sprocket;  
7. Rolle; 8. Forward drive assembly

图 4 反转卸膜示意图

Fig.4 Reverse film unloading schematic diagram

根据捡膜滚筒的结构参数,设计卸膜装置卸膜幅宽为 1 540 mm,根据卷辊弹齿的参数,设计了长方形缺口卸膜叶片,其中长方形的长为 90 mm,宽为 5 mm,结合文献[21],选用厚度为 5 mm 的橡胶皮带,共 6 片叶,每片叶上共 31 个缺口。卸膜辊的结构如图 5 所示。

当卷辊在捡膜区域捡上残膜后,随滚筒运动到卸膜区域与反转双排链啮合,此时,卸膜辊将转动动力矩通过反转传动组件传递至反转双排链继而带动卷辊反转,释放缠绕在卷辊组件上的残膜。被释放的残膜最终在卸膜叶片刮、拍打的作用下被收集到集膜箱中,降低了残膜与捡膜辊组件之间分离的难度,进一步提高残膜的回收效率。

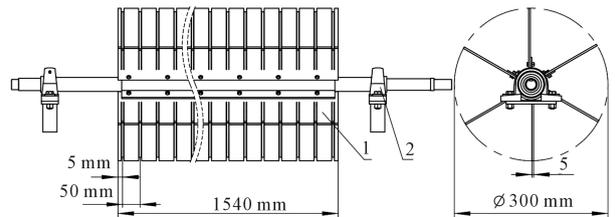
为使卸膜叶片卸下的残膜顺利落到集膜箱中,要求残膜在卸膜叶片上的离心力大于残膜与卸膜叶片间的吸附力<sup>[22]</sup>。对即将脱离卸膜叶片的残膜进行受力分析,如图 6 所示。

由图 6 可知,残膜脱离卸膜叶片的条件为:

$$F_a f_1 + G \cos \tau \quad (1)$$

公式(1)中残膜受到的摩擦力与离心力分别为:

$$\begin{cases} F_a = \frac{mv_3^2}{R_3} \\ v_3 = \omega_3 R_3 = 2\pi n_3 R_3 / 60 \\ f_1 = \mu F_N \\ F_N = G \sin \tau \end{cases} \quad (2)$$



1.卸膜叶片;2.反转双排链

1. Film unloading blade; 2. Reverse double-row chain

图 5 卸膜辊示意图

Fig.5 Schematic diagram of the film unwinding roller

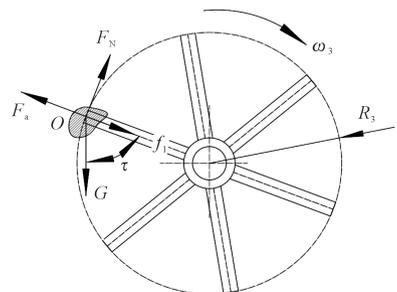


图 6 卸膜叶片上的残膜受力分析图

Fig.6 Force analysis of residual film on film unloading blade

联立式(1)、(2)可得:

$$R_3 > 3600 \times \frac{\mu g \sin \tau + g \cos \tau}{4 \pi^2 n_3^2} \quad (3)$$

式中,  $F_a$  为卸膜叶片对残膜的离心力(N);  $F_N$  为卸膜叶片对残膜的支持力(N);  $G$  为残膜自身重力(N);  $f_1$  为残膜受到的摩擦力(N);  $\tau$  为残膜重力与残膜受到的摩擦力夹角( $^\circ$ );  $\mu$  为卸膜叶片与残膜之间的摩擦系数,取 0.62;  $v_3$  为卸膜叶片端部位置的线速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $R_3$  为卸膜装置的回转半径(mm);  $n_3$  为卸膜装置的转速( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ );

结合预试验可知,卸膜辊转速  $n_3$  较低时,单位时间内卸膜叶片与弹齿接触的次数减少,不利于卸膜;卸膜辊转速  $n_3$  较大时,卸膜叶片与弹齿之间的碰撞加剧,弹齿寿命降低。故初步设计卸膜辊的转速  $n_3$  为  $40 \sim 90 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,当  $\tau$  为  $90^\circ$  时,由式(3)可得卸膜辊回转半径  $R_3$  取值范围为  $70 \sim 353 \text{ mm}$ ,本文取卸膜辊的回转半径为  $150 \text{ mm}$ 。

### 2.3 卸膜装置作业参数确定

卸膜装置是卷辊式耕层残膜回收机的主要工作部件之一,其作业的优劣性直接关系到整机作业是否连续有效。为了保证起膜装置、捡膜装置、卸膜装置的可靠性,设计了卷辊反转松膜、卸膜装置协同卸膜的方法,卷辊在卸膜区反转使钩、挑在弹齿上的残膜松动,卸膜辊反转将弹齿上的残膜顺利脱离,并抛送到集膜箱,完成卸膜。以膜块为研究对象,在卸膜叶片作用下其受力分析如图 7 所示。残膜在此过程中受力平衡为:

$$\begin{cases} F_t = G \sin \eta + f \cos(\frac{\pi}{2} - \delta) \\ F_a \sin \delta = G \cos \eta + f \sin(\frac{\pi}{2} - \delta) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\eta$  为残膜重力与卸膜叶片之间的夹角(rad);  $f$  为弹齿对残膜的摩擦力(N);  $\delta$  为卸膜辊对残膜的离心力与卸膜辊对残膜的推力的夹角补角(rad);  $F_t$  为卸膜辊对残膜的推力(N)。

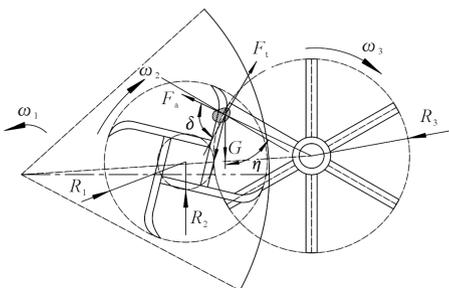


图 7 卸膜过程受力分析

Fig.7 Force analysis during film unloading process

为保证残膜与卸膜装置有效分离,即残膜在卸膜叶片端部的离心力大于两者之间作用力。故残膜脱离卸膜叶片的条件为:

$$F_a \sin \delta G \cos \eta - f \cos \delta \quad (5)$$

由式(5)可知,当  $\delta$  为  $90^\circ$  时,卸膜叶片对残膜的离心力以及推力二者之间成直角,此时卸膜叶片对残膜的离心力  $F_a$  最小为:

$$F_a \geq G \cos \eta \quad (6)$$

式(6)中  $F_a = m v_3^2 / R_3$ ,  $v_3 = 2 \pi n_3 R_3 / 60$ ,  $G = m g$ , 则:

$$n_3 \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \cos \eta}{R_3}} \quad (7)$$

经计算得到卸膜辊的最小转速  $n_3$  为  $43 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,为保证卷辊反转卸膜时的可靠性,要求卷辊卸膜反转转速  $n_2$  与卸膜辊转速  $n_3$  在如图 7 所示的  $R_2$  和  $R_3$  的切点处速度相等,则得到卷辊卸膜反转转速  $n_2$  为  $167.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 2.4 一次膜杂分离分析

在卸膜区,残膜在卷辊与卸膜辊协同作用下从弹齿上卸下来,因该过程是卷辊高速转动松膜与卸膜辊自转卸膜的过程,残膜从弹齿齿尖上卸下来的初速度大小关系到残膜是否可以顺利进入集膜箱,当残膜被卸下来的初速度太大,即离心力增大,远远大于弹齿、卸膜叶片对其提供的平衡力时,残膜直接脱离卸膜叶片,不利于残膜回收,降低了残膜回收率。其作业受力分析如图 8 所示。

残膜在此过程中受力平衡为:

$$\begin{cases} F_d + F'_N = G \sin \beta \\ f'_3 + G \cos \beta = F_c \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} f'_3 = \mu_1 F'_N \\ F'_d = \frac{m V_2^2}{R_2} \end{cases} \quad (9)$$

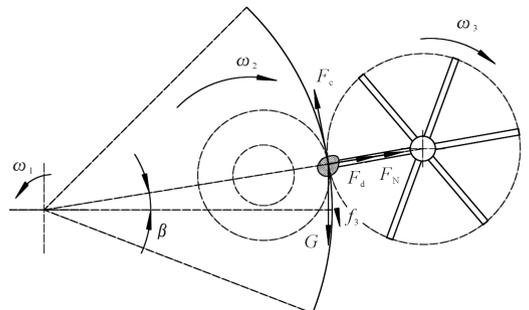


图 8 刮膜过程残膜受力分析图

Fig.8 Force analysis of residual film during film scraping process

式中,  $F'_N$  为弹齿对残膜的支持力(N);  $F_d$  为卷辊在卸膜区反转产生的离心力(N);  $F_c$  为卸膜叶片对残膜的摩擦力(N);  $f_3$  为弹齿对残膜的摩擦力(N);  $\beta$  为卸膜叶片安装倾角( $^\circ$ );  $\mu_1$  为弹齿与残膜之间的摩擦系数;  $V'_2$  为弹齿上残膜所在位置线速度( $m \cdot s^{-1}$ )。

联立式(8)、(9)可得:

$$F_c = \mu_1 \left( G \sin \beta - \frac{mV_2'^2}{R_2} \right) + G \cos \beta \quad (10)$$

卸膜过程中卸膜叶片与残膜之间的相互作用发生在瞬间。由动量定理可知:

$$F_c t = m v_4 \quad (11)$$

式中,  $t$  为卸膜叶片与残膜之间的作用时间(s);  $v_4$  为残膜被卸下时的初速度( $m \cdot s^{-1}$ )。

联立式(10)、(11)可得残膜被卸下时的初速度为:

$$v_4 = \left[ \mu_1 \left( g \sin \beta - \frac{V_2'^2}{R_2} \right) + g \cos \beta \right] t \quad (12)$$

参考文献[23],  $\mu_1$  弹齿与残膜之间的摩擦系数为 0.5, 取瞬时卸膜时间为 0.25 s, 当  $\beta$  为  $0^\circ$  时, 经计算, 残膜初速度  $v_4$  为  $0.31 m \cdot s^{-1}$ , 且卸膜叶片端部线速度  $v_3$  为  $0.68 m \cdot s^{-1}$ ,  $v_4 < v_3$ , 残膜从弹齿齿尖脱落下来, 会随着卸膜辊转动一定的角度, 被抛送到集膜箱。

### 2.5 二次膜杂分离分析

膜杂混合物在捡膜区被卷辊捡拾, 经输膜区后进入卸膜区, 在卸膜区卷辊在正反转机构的作用下反转松膜, 卸膜叶片将膜杂混合物从弹齿上刮下, 在自身重力的作用下, 膜杂混合物沿某种轨迹向集膜箱降落, 进而完成残膜回收。膜杂混合物在脱离卸膜叶片后, 可认为其做斜抛运动, 因此, 以膜杂混合物为研究对象, 对其进行运动分析, 如图 9 所示。

以膜杂脱离卸膜叶片抛出点  $O$  为坐标原点, 以机具前进速度方向的反方向为  $x$  轴, 垂直于地面向上为  $y$  方向, 建立  $xoy$  直角坐标系。图 9B 为杂质混合物脱离卸膜辊抛出去的示意图。因为杂质质量较大, 故忽略空气阻力对杂质的影响, 即杂质的运动方程为:

$$\begin{cases} m_z \frac{dv_{zx}}{dt_z} = 0 \\ m_z \frac{dv_{zy}}{dt_z} = -m_z g \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $m_z$  为杂质的质量(kg);  $v_{zx}$  为杂质返回抛出点高度处速度的水平分速度( $m \cdot s^{-1}$ );  $v_{zy}$  为杂质返回抛出点高度处速度的竖直分速度( $m \cdot s^{-1}$ );  $t_z$  为杂质进行斜抛运动的时间(s)。

为求杂质在竖直以及水平方向的位移, 对式(13)进行二次积分, 即竖直与水平方向上的位移分别为:

$$\begin{cases} v_{zx} = v_{ox} = v_o \cos \psi \\ v_{zy} = v_{oy} = v_o \sin \psi \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x = v_o t_z \cos \psi \\ y = v_o t_z \sin \psi - \frac{1}{2} g t_z^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $v_o$  为膜杂混合物脱离卸膜辊的初速度( $m \cdot s^{-1}$ );  $\psi$  为膜杂混合物脱离卸膜辊的抛送角( $^\circ$ );  $v_{zx}$  为杂质返回抛出点高度处速度的水平分速度( $m \cdot s^{-1}$ );  $v_{zy}$  为杂质返回抛出点高度处速度的竖直分速度( $m \cdot s^{-1}$ )。

由公式(14)、(15)可得杂质在各阶段的位移:

$$\begin{cases} h_2 = \frac{1}{2g} v_o^2 \sin^2 \psi \\ h_4 = v_o t_4 \sin \psi + \frac{1}{2} g t_4^2 \end{cases} \quad (16)$$

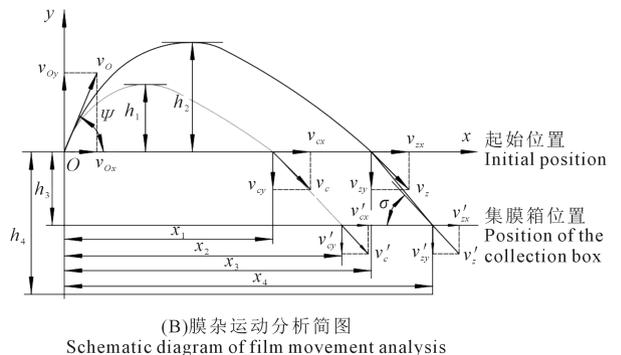
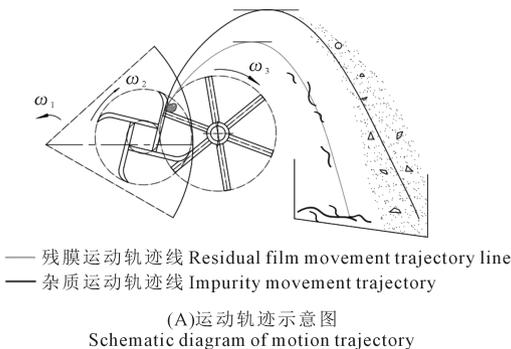


图 9 膜杂运动示意图

Fig.9 Schematic diagram of membrane hybrid motion

$$\begin{cases} t_2 = \frac{v_0 \sin\psi}{g} \\ t'_2 = 2t_2 = \frac{2v_0 \sin\psi}{g} \\ t_4 = \frac{-v_0 \sin\psi + \sqrt{v_0^2 \sin^2\psi + 2gh_4}}{g} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_3 = v_0 t'_2 \cos\psi = \frac{v_0^2 \sin 2\psi}{g} \\ x_4 = x_3 + v_0 t_4 \cos\psi \\ x'_4 = \frac{x_4}{\cos\sigma} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $h_2$  为杂质被抛出后所能达到最大高度 (m);  $h_4$  为杂质从抛出点到集膜箱高度 (m);  $t_2$  为杂质达到最大抛起高度时所用的时间 (s);  $t'_2$  为杂质从抛出高度到再次回到同一高度所用时间 (s);  $t_4$  为杂质返回与抛出点同一高度到残膜箱所用时间 (s);  $x_3$  为杂质抛出点到返回点的水平距离 (m);  $x_4$  为杂质抛出点到集膜箱的水平距离 (m);  $x'_4$  为  $x_4$  在集膜箱装置方向上的距离 (m)。

杂质经卸膜辊抛出后, 抛送到集膜箱, 在杂质接触到集膜箱的时候, 仍然具有一定的初速度, 则杂质在集膜箱中继续运动, 在摩擦力的作用下直至停止。由动能守恒定理可知:

$$m_z g \sin\sigma - \mu_2 m_z g \cos\sigma = m_z a \quad (19)$$

$$\frac{1}{2} m_z v''_{zx}{}^2 - \frac{1}{2} m_z v'_{zx}{}^2 = m_z a x_5 \quad (20)$$

其中,  $v''_{zx} = 0$ ,  $v'_{zx} = v'_z \cos\sigma$ , 代入式(20)可得:

$$-\frac{1}{2} v_z'^2 \cos^2\sigma = a x_5 \quad (21)$$

式中,  $\mu_2$  为杂质与集膜箱之间的摩擦系数;  $a$  为杂质在集膜箱中滑动的加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $v''_{zx}$  为杂质在集膜箱中停下来时的速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $v'_{zx}$  为杂质接触到集膜箱时的速度沿  $x$  轴方向的分速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\sigma$  为杂质接触到集膜箱的速度与集膜箱底面的夹角 ( $^\circ$ );  $x_5$  为杂质在集膜箱内滑动的位移 (m)。

考虑到膜杂密度的差异性, 残膜在抛送过程中受到空气阻力影响, 即:

$$f_3 = -k v_0 \quad (22)$$

式中,  $f_3$  为空气对残膜的阻力 (N);  $k$  为空气阻力系数。

对残膜进行受力分析, 可得:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 v_{cx}}{dt_c^2} = -f_3 \cos\psi \\ m \frac{d^2 v_{cy}}{dt_c^2} = -f_3 \sin\psi - mg \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $t_c$  为  $t$  残膜进行斜抛运动的时间 (s)。

对式(23)积分, 分别得残膜质点速度、位移方程:

$$\begin{cases} v_{cx} = v_0 \cos\psi e^{-\frac{kt}{m}} \\ v_{cy} = (v_0 \sin\psi + \frac{mg}{k}) e^{-\frac{kt}{m}} - \frac{mg}{k} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} x = \frac{m}{k} v_0 \cos\psi (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) \\ y = \frac{m}{k} (v_0 \sin\psi + \frac{mg}{k}) (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) - \frac{mg}{k} t_c \end{cases} \quad (25)$$

由上述分析可知, 杂质滑移的方向与机具前进速度方向相反, 且其被卸膜辊抛到集膜箱中的落点位置远大于残膜的落点位置, 即杂质在水平方向上的位移大于残膜在水平方向上的位移, 并在集膜箱杂质落点位置开若干网孔, 使杂质从网孔落回地面, 进而完成了第二次膜杂分离。根据作业参数分析, 卸膜叶片端部线速度  $v_3$  大于  $0.68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 取  $v_3$  为  $1.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 即  $v_0$  为  $1.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\psi$  的范围为  $30 \sim 90^\circ$ , 当  $\sigma$  为  $15^\circ$  时, 结合式(16)~(18), 可得  $h_4$  为  $0.5 \text{ m}$ ,  $x'_4$  为  $0.391 \text{ m}$ , 故此刻该落点位置距离集膜箱底端的距离为  $0.21 \text{ m}$ ; 当  $\mu_2$  取  $0.5$  时, 由式(19)、(21)可得  $x_5$  为  $0.27 \text{ m}$ , 大于  $0.21 \text{ m}$ , 土块可以重新落回到地面完成膜土分离。

### 3 田间试验

#### 3.1 试验条件

卷辊式耕层残膜回收机的卸膜装置工作性能受多个因素影响, 为验证样机的理论工作参数是否能达到实际工作性能的要求, 试制了一台卷辊式耕层残膜回收机物理样机, 在阿克苏市 6 团双城镇进行田间试验, 试验田的土壤紧实度为  $31 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 含水率为  $10.7\% \sim 12.1\%$ , 种植年限为连续铺膜种植 10 a 以上, 在当年表层残膜回收后进行作业, 试验情况如图 10 所示。

#### 3.2 试验指标

按照标准 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》<sup>[24]</sup> 和 NY/T 1277—2019《残地膜回收机作业质量》<sup>[25]</sup> 的试验要求进行卷辊式耕层残膜回收机的性能指标测定。每组数据进行 3 次试验, 对试验样品进行清洗、晾晒及称重, 并对残膜卸膜率及回收混合物含土率进行计算。

$$C = \frac{W_a}{W_a + W_b} \times 100\% \quad (26)$$

$$G = \frac{W_c - W_d}{W_c} \times 100\% \quad (27)$$

式中,  $C$  为卸膜率(%);  $G$  为回收混合物含土率(%);  $W_a$  为集膜箱中残膜的质量(g);  $W_b$  为机器上缠绕的残膜质量(g);  $W_c$  为集膜箱中混合物的重量(g);  $W_d$  为集中残膜与秸秆的重量(g)。

### 3.3 试验设计

通过前期单因素试验和理论分析,影响卸膜装置作业质量的主要因素有机具前进速度、卷辊反转转速、卸膜辊转速。以机具前进速度  $X_1$ 、卷辊反转转速  $X_2$ 、卸膜辊转速  $X_3$  为试验因素,以残膜卸膜率  $Y_1$ 、回收混合物含土率  $Y_2$  为指标进行 Box-Behnken 试验,试验因素水平编码如表 1 所示。结合生产需要选择机具前进速度  $X_1$  为  $3.5 \sim 5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 依据 2.3 节及前期预试验选择卷辊反转转速  $X_2$  为  $167.86 \sim 197.30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 卸膜辊转速  $X_3$  为  $53 \sim 73 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。通过控制拖拉机档位和油门来调节机具前进速度,通过调节液压马达来调节卸膜辊转速,通过更换链轮来调节卷辊反转转速;试验前,通过漳州市威华电子有限公司的激光转速表 DT-2234C 对卷辊反转转速与卸膜辊转速进行校验,待实际作业参数与理论参数一致后进行试验,以增强试验的准确性和可靠性。

## 4 结果与分析

### 4.1 试验结果

试验方案及结果如表 2 所示。

### 4.2 数据处理

4.2.1 回归模型显著性分析 经过 Design-Expert 13.0 分析,残膜卸膜率、回收混合物含土率的方差分析如表 3 所示。结果表明,各因素对残膜卸膜率的影响由大到小依次为:卷辊反转转速、卸膜辊转速、机具前进速度;对回收混合物含土率的影响由大到小依次为:卸膜辊转速、机具前进速度、卷辊反转转速。

4.2.2 回归方程确定 残膜卸膜率  $Y_1$  和回收混合物含土率  $Y_2$  分别为:

$$Y_1 = 73.95 - 0.0925X_1 + 1.07X_2 + 0.6837X_3 - 2.36X_1X_2 - 2.05X_1^2 - 2.78X_2^2 - 4.28X_3^2 \quad (28)$$

$$Y_2 = 15.9 + 0.2775X_1 - 0.0462X_2 + 0.6913X_3 - 0.625X_1X_2 + 0.4637X_1^2 + 0.4812X_2^2 + 0.8863X_3^2 \quad (29)$$

### 4.3 各因素对卸膜率和回收混合物含土率的影响

4.3.1 各因素对卸膜率的影响 图 11A 为卸膜辊转速处于中间水平( $63 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )时,机具前进速度与卷辊反转转速交互作用对卸膜率影响的响应面图。机具前进速度固定在高水平( $5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时,卸膜率

表 1 试验因素及水平

Table 1 Test factors and levels

水平 Level	因素 Factor		
	机具前进速度 Tool forward speed $X_1/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	卷辊反转转速 Roll reversal speed $X_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	卸膜辊转速 Speed of unloading roll $X_3/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
	-1	3.5	167.86
0	4.5	182.58	63
1	5.5	197.30	73

表 2 试验方案及结果

Table 2 Test plan and result

试验号 Test No.	试验因素 Test factor			试验指标 Test index	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	卸膜率/% Film unloading rate $Y_1$	回收混合物含土率/% Soil content of recovered mixture $Y_2$
1	-1	-1	0	65.61	16.11
2	1	-1	0	69.52	17.67
3	0	0	0	73.86	15.55
4	0	-1	-1	65.37	16.51
5	0	0	0	74.17	15.71
6	-1	0	1	68.94	17.38
7	0	0	0	73.91	15.98
8	0	1	-1	67.12	16.49
9	0	1	1	67.82	17.95
10	-1	0	-1	65.85	16.32
11	1	0	-1	67.91	16.33
12	0	0	0	73.18	16.24
13	1	1	0	67.93	16.95
14	0	-1	1	67.25	18.12
15	-1	1	0	73.43	17.27
16	1	0	1	67.73	18.35
17	0	0	0	74.62	16.02

随着卷辊反转转速的增大呈现先增大后减小的趋势,这是由于随着卷辊反转转速的增加,弹齿上的残膜与卸膜叶片接触时,残膜还未被卸下卷辊就随着捡膜滚筒公转离开卸膜区,导致卸膜率降低。卷辊反转转速固定在低水平( $167.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )时,卸膜率随着机具前进速度的增大呈现先增大后减小的趋势,这是由于随着机具前进速度的增大,为了满足捡膜滚筒边缘线速度与前进速度之间的关系,捡膜滚筒转速也增加,将导致卷辊在卸膜区与卸膜叶片作用时间变短,导致卸膜率降低。

图 11B 为卷辊反转转速处于中间水平( $182.58 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )时,机具前进速度与卸膜辊转速交互作用对卸膜率影响的响应面图。由图可知,卸膜辊转速比机具前进速度对卸膜率有更加显著的作用。机具前进速度与卸膜辊对卸膜率的影响都呈现出先增大后减小的趋势,这是由于随着卸膜辊转速的增

加,脱膜叶片与弹齿之间的作用力逐渐增大,弹齿上的残膜被拉断而导致卸膜率降低。

图 11C 为机具前进速度处于中间水平 ( $4.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 时,卷辊反转转速与卸膜辊转速交互作用对卸膜率影响的响应面图。由图可知,卷辊反转转速比卸膜辊转速对卸膜率影响作用更显著,这与方差

分析结果一致。卸膜率随着卷辊反转转速、卸膜辊转速增加均呈现先增加后减小的趋势,这是由于当卸膜辊转速和卷辊反转转速同时增加时,弹齿与卸膜叶片之间的作用力不断增大,当作用力达到一定值时,处于卸膜区域的残膜被瞬间扯断,从而导致脱膜率下降。

表 3 方差分析

Table 3 Variance analysis

指标 Index	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
卸膜率 Film unloading rate	模型 Model	178.76	9	19.86	36.86	<0.0001	* *
	$X_1$	0.07	1	0.07	0.13	0.7320	
	$X_2$	9.10	1	9.10	16.88	0.0045	* *
	$X_3$	3.74	1	3.74	6.94	0.0337	*
	$X_1 X_2$	22.23	1	22.23	41.25	0.0004	* *
	$X_1 X_3$	2.71	1	2.71	5.02	0.0600	
	$X_2 X_3$	0.35	1	0.35	0.65	0.4480	
	$X_{12}$	17.76	1	17.76	32.96	0.0007	* *
	$X_{22}$	32.46	1	32.46	60.23	0.0001	* *
	$X_{32}$	77.18	1	77.18	143.23	<0.0001	* *
	残差 Residual	3.77	7	0.54			
	失拟 Lack of fit	2.67	3	0.89	3.24	0.1429	
	纯误差 Pure error	1.10	4	0.28			
总和 Total	182.53	16					
回收混合物 含土率 Soil content of recovered mixture	模型 Model	11.77	9	1.31	19.83	0.0004	* *
	$X_1$	0.62	1	0.62	9.34	0.0184	*
	$X_2$	0.02	1	0.02	0.26	0.6261	
	$X_3$	3.82	1	3.82	57.97	0.0001	* *
	$X_1 X_2$	1.56	1	1.56	23.70	0.0018	* *
	$X_1 X_3$	0.03	1	0.03	0.44	0.5291	
	$X_2 X_3$	0.01	1	0.01	0.09	0.7787	
	$X_{12}$	0.90	1	0.91	13.73	0.0076	* *
	$X_{22}$	0.98	1	0.98	14.79	0.0063	* *
	$X_{32}$	3.31	1	3.31	50.15	0.0002	* *
	残差 Residual	0.46	7	0.07			
	失拟 Lack of fit	0.17	3	0.06	0.75	0.5754	
	纯误差 Pure error	0.30	4	0.07			
总和 Total	12.23	16					

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

Note: \* indicates significant differences ( $P < 0.05$ ); \* \* indicates extremely significant differences ( $P < 0.01$ ).

4.3.2 各因素对回收混合物含土率的影响 回归方程中,系数绝对值大小决定该因素对回收混合物含土率的影响大小<sup>[26]</sup>。由回归方程和表 3 可知,各因素对回收混合物含土率的影响重要性依次为卸膜辊转速  $X_3$ 、机具前进速度  $X_1$ 、卷辊反转转速  $X_2$ 。

图 12A 为卸膜辊转速处于中间水平 ( $63 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 时,机具前进速度与卷辊反转转速交互作用对回收混合物含土率影响的响应面图。当机具前进速度固定在低水平 ( $3.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 时,随着卷辊反转转速的增加,回收混合物含土率呈现先减小后增大的趋势,在卷辊反转转速超过  $182.58 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,卷辊反转转速越快,单位时间内回收的混合物含土

量就越多,回收混合物含土率明显增大;当卷辊反转转速固定在高水平 ( $197.30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 时,随着机具前进速度的增加,回收混合物含土率呈现先减小后增大的趋势,主要原因是机具前进速度增加,单位时间内卷辊捡拾的膜杂混合物增多,集膜箱中的杂质也增加,导致回收混合物含土率降低;但机具前进速度过大会造成残膜捡拾量降低,导致回收混合物含土率变大。

图 12B 为卷辊反转转速处于中间水平 ( $182.58 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 时,机具前进速度与卸膜辊转速交互作用对回收混合物含土率影响的响应面图。机具前进速度、卸膜辊转速的增大均使回收混合物含土率呈

现出先减小后增大的趋势,由图中可知卸膜辊转速比机具前进速度对回收混合物含土率影响更加显著,这与方差分析值、回归方程所反映的结果一致。

图 12C 为机具前进速度处于中间水平( $4.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时,卷辊反转转速与卸膜辊转速交互作用对卸膜率影响的响应面图。卷辊反转转速、卸膜辊转速的增大均使回收混合物含土率呈现出先减小后增大的趋势,由图中可知卸膜辊转速比卷辊反转转速对回收混合物含土率影响更加显著,这与方差分析值、回归方程所反映的结果相符。



图 10 卸膜装置田间试验

Fig.10 Field test of film unloading device

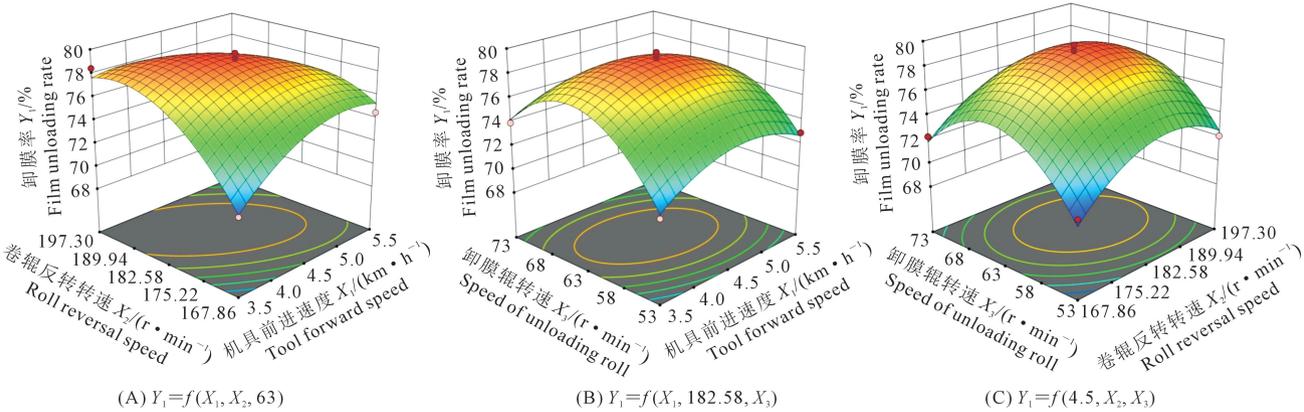


图 11 各因素对卸膜率影响的响应曲面图

Fig.11 Response surface diagram of the influence of various factors on the unloading rate

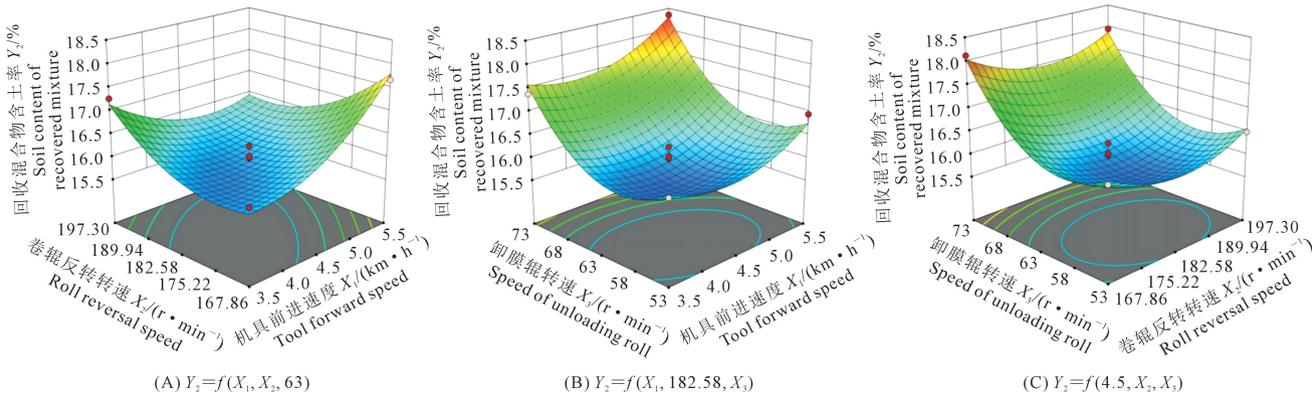


图 12 各因素对回收混合物含土率影响的响应曲面图

Fig.12 Response surface diagram of the influence of various factors on the soil content of the recovered mixture

#### 4.4 参数优化与试验验证

为得到影响卷辊式耕层残膜回收机卸膜装置性能的最佳参数组合,以提高卸膜率、降低回收混合物含土率为目标,以残膜回收的机具前进速度、卷辊反转转速、卸膜辊转速为优化对象,应用 Design-Expert13.0 软件中的 Optimization 模块的寻优功能进行多目标寻优,目标及约束条件方程为:

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ 3.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq X_1 \leq 5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \\ 168.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq X_2 \leq 197.30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 53 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq X_3 \leq 73 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \end{cases} \quad (30)$$

通过优化分析,得到最优参数组合为:机具前进速度为  $4.37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、卷辊反转转速  $184.70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜辊转速  $61.95 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,此时残膜卸膜率为  $73.94\%$ ,回收混合物含土率为  $15.83\%$ 。

#### 4.5 田间验证试验

为了验证卷辊式耕层残膜回收机卸膜装置的性能,取较优参数:机具前进速度为  $4.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、卷辊反转转速  $185 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜辊转速  $62 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  进行田间试验验证,试验结果如表4所示,其中残膜卸膜率为  $73.21\%$ ,回收混合物含土率为  $16.20\%$ ,符合设计要求。

表4 验证试验结果/%

Table 4 Validation test results

试验号 Test No.	$Y_1$	$Y_2$
1	73.23	15.96
2	73.43	16.23
3	72.96	16.41
平均值 Average	73.21	16.20

## 5 结论

1)提出了卷辊反转松膜及卸膜辊强制卸膜的工作方式,并介绍了整机结构及工作原理。开展理论分析确定了卷辊式耕层残膜回收机关键结构参数;通过理论分析,确定了关键部件的作业参数,其中卸膜辊的回转半径为  $150 \text{ mm}$ ,卷辊反转转速为  $167.86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,卸膜辊转速为  $43 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,为卷辊式耕层残膜回收机的设计提供理论基础。

2)通过三因素三水平的响应面试验得出各试验因素对卸膜率的影响程度为:卷辊反转转速>卸膜辊转速>机具前进速度;对残膜回收混合物含土率的影响程度为:卸膜辊转速>机具前进速度>卷辊反转转速。对试验指标进行了参数优化,得到较优参数组合为:机具前进速度为  $4.37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、卷辊反转转速为  $184.70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜辊转速为  $61.95 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,此时残膜卸膜率和回收混合物含土率分别为  $73.94\%$  和  $15.83\%$ 。以较优参数组合:机具前进速度为  $4.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、卷辊反转转速  $185 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜辊转速  $62 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  进行田间试验验证,得残膜卸膜率和回收混合物含土率分别为  $73.21\%$  和  $16.20\%$ ,与理论优化值相对误差均不超过  $1\%$ 。

#### 参考文献:

[1] 谢建华,段威林,张凤贤,等.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, et al. Design and high-speed photography test of pole-tooth film-unloading mechanism[J]. Journal of

Machine Design, 2019, 36(5): 60-64.

- [2] 戴飞,郭笑欢,赵武云,等.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, et al. 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.
- [3] 王旭峰,胡灿,鲁兵,等.抛链齿链输送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, et al. Design and test of throwing chain teeth conveying residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 122-129.
- [4] 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.
- [5] 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 W Q, YAN C R, LIU S, 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.
- [6] 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 Y L, LI X L, ZHANG S, et al. Current situation of residual film pollution in Inner Mongolia and countermeasures for residual film recycling[J]. Soil and fertilizer in China, 2015, (6): 139-145.
- [7] 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,(19):6316-6325.  
CHENG H B, CHAI S X, CHEN Y Z, 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, (19): 6316-6325.
- [8] 李挺,闻朝华,马世龙.国内外残膜回收装备的研究现状及发展趋势[J].河北农机,2021,(19):35-36.  
LI T, WEN C H, MA S L. Research status and development trend of residual film recovery equipment at home and abroad[J]. Hebei Farm Machinery, 2021, (19): 35-36.
- [9] 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 J, ZHANG Y T, DONG L M, et al. Domestic residual film recovery machine research status and development trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014, (4): 29-30, 33.
- [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,(5):41-44.  
XIE J H, HOU S L, LIU Y C. Research status and trends of plastic film residue collectors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012, (5): 41-44.
- [11] XIE J H, TANG W, ZHANG X J, et al. Mechanical properties tests and analysis of plastic mulching film residue[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(3): 130-135.
- [12] 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 C R, MEI X R, HE W Q, et al. 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.
- [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.
- XUE W J, WANG C Y, ZHU Z Z, et al. Brief report on research works of three papers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 148-149, 147.
- [14] 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.
- [15] 李天文, 丁双双, 高明勇, 等. 基于 Flow Simulation 的气力脱膜装置流场分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 40-43.
- LI T W, DING S S, GAO M Y, et al. Flow field analysis of wind-driven film Removing device based on flow Simulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 40-43.
- [16] 康晓悦, 陈学庚, 赵岩, 等. 齿带式残膜回收机脱膜装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 161-166, 173.
- KANG X Y, CHEN X G, ZHAO Y, et al. Design and experiment on removing residual film device for nail-teeth belt residual film collector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 161-166, 173.
- [17] 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.
- [18] 明光, 毕新胜, 王晓东, 等. 夹持输送式残膜捡拾机气力脱膜机理研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 1-5.
- MING G, BI X S, WANG X D, et al. Research on mechanism of air force separating residual film for gripping and delivering residual plastic film collector[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 1-5.
- [19] 许宁, 康建明, 张恒, 等. 气吸式残膜回收除杂一体机试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 14-19.
- XU N, KANG J M, ZHANG H, et al. Experimental research on the air suction type residual film recovery and decontamination integrated machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 14-19.
- [20] 李东, 赵武云, 辛尚龙, 等. 农田残膜回收技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 204-209.
- LI D, ZHAO W Y, XIN S L, et al. Current situation and prospect of recycling technology of farmland residual film[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 204-209.
- [21] 张志元. 基于弧形扎齿滚筒的播层残膜捡拾回收机理研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
- ZHANG Z Y. Study on the mechanism of picking up and recovering the residual film of sowing layer based on arc-shaped nail-tooth roller[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [22] 李斌, 王吉奎, 胡凯, 等. 残膜回收机顺向脱膜机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 23-28.
- LI B, WANG J K, HU K, et al. Analysis and experiment on forward defilm mechanism of residual film recycler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 23-28.
- [23] 谢建华, 张雁鸿, 曹肆林, 等. 压杆式棉田地膜回收机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 51-63.
- XIE J H, ZHANG Y H, CAO S L, et al. Design and experiment of stalk pressing type cotton field mulch film collectors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 51-63.
- [24] 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. Farm waste film-pick up machines: GB/T 25412-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [25] 中华人民共和国农业农村部. 残地膜回收机 作业质量: NY/T 1227-2019[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- Ministry of Agriculture of the PRC. Retrieving machines for residual film—operating quality: NY/T 1227-2019[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [26] 王建楠, 刘敏基, 曹明珠, 等. 葱蒜脱壳机关键部件作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 288-295.
- WANG J N, LIU M J, CAO M Z, et al. Working parameter optimization and experiment of key components of coix lacryma-jobi sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 288-295.