

卷辊式耕层残膜回收机设计与试验

史增录^{1,2} 张学军^{1,2} 刘小鹏¹ 郭磊¹ 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. 阿克苏天地机械制造有限公司, 阿克苏 843000)

摘要: 针对耕层残膜老化严重、力学性能差,残膜与土壤混合造成耕层残膜回收拾净率低、含土量高等问题,提出了一种旋耕起抛膜土混合物、弹齿顺向旋转捡膜、逆向旋转卸膜的主动回收方法。设计了卷辊式耕层残膜回收机的整体方案,实现了起膜、卷辊正转捡膜、反转卸膜、集膜的功能。对起膜装置、捡膜装置、正反转机构及卸膜装置等关键作业部件进行设计与参数计算,获得在弹齿机械力作用下,将混合物内的残膜有效钩、挑分离出来的临界条件。运用 ANSYS 和 SPH (Smoothed particle hydrodynamics) 耦合方法,构建弹齿捡拾残膜过程的数值模拟计算模型,获得捡膜过程中残膜所受的最大应力及变形,分析了弹齿捡拾残膜的有效性。样机验证试验表明,当起膜刀转速为 213.75 r/min、捡拾滚筒转速为 43.75 r/min、卷辊正转捡膜转速为 131.27 r/min、卷辊反转卸膜转速为 167.86 r/min、卸膜轮转速为 43 r/min 时,卷辊式耕层残膜回收机表层拾净率为 82.6%,深层拾净率为 71.1%,试验结果符合国家与行业标准的要求,能够从膜土混合物中有效回收耕层残膜。

关键词: 耕层残膜; 卷辊式; 残膜回收机

中图分类号: S223.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0128-10

OSID:



Design and Test of Roll-type Tillage Layer Residual Film Recovery Machine

SHI Zenglu^{1,2} ZHANG Xuejun^{1,2} LIU Xiaopeng¹ GUO Lei¹ 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 City Tiandi Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Aksu 843000, China)

Abstract: Aiming at the problems of serious differentiation of residual film in the tillage layer, poor mechanical properties, low pick-up rate of deep residual film, and high soil content caused by the mixing of residual film and soil, an active recovery method of rotary tillage and throwing soil mixture, picking up spring tooth to forward rotate and pick up the film, and reversely rotate and unload film was proposed. The overall solution of the roll-type tillage layer residual film recovery machine was designed, and its structural composition and working principle were expounded. Design and parameter calculation of key operating components such as film picking device, film picking device, forward and reverse mechanism and film unloading device were carried out to obtain the critical conditions for the effective hook and picking out of the residual film in the mixture under the mechanical force of the spring-tooth. By using the coupling method of ANSYS and SPH (Smoothed particle hydrodynamics), the numerical simulation model of the spring tooth picking up the residual film process was constructed, and the maximum stress and deformation of the residual film in the process of picking up the residual film were obtained. The effectiveness of picking up the residual film with the spring-tooth hook was analyzed. The verification test of the prototype showed that when the rotation speed of the taking-film was 213.75 r/min, the rotation speed of the picking drum was 43.75 r/min, the rotation speed of the roll forward rotation was 131.27 r/min, the rotation speed of the roll reverse unloading film was 167.86 r/min, and the rotation speed of the unloading film wheel was 43 r/min. The surface pick-up rate of the roll-type topsoil residual film

收稿日期: 2023-07-01 修回日期: 2023-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105278)、新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2020Q015)和新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-10)

作者简介: 史增录(1986—),男,高级实验师,博士生,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究,E-mail: shizlfd@163.com

通信作者: 张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究,E-mail: tuec@163.com

recycling machine was 82.6% , and the deep pick-up rate was 71.1% . The test results met the design requirements and realized the mechanized recovery of topsoil residual film from the film-soil mixture. It provided a method and theoretical basis for the research of tillage layer residual film recovery mechanism.

Key words: tillage layer residual film; roll-type; residual film recovery machine

0 引言

地膜覆盖种植技术因其增温、保墒、抑制杂草生长等作用,在干旱半干旱地区作物种植上广泛应用^[1-2]。我国地膜覆盖种植面积超过 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,地膜年使用量超过 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$,占世界年使用地膜总量的 90% 左右^[3]。我国广泛使用的农用地膜是聚乙烯类有机高分子化合物^[4],在自然条件下极难降解,可在土壤中存在 200 ~ 400 年,残留在农田土壤的地膜易造成农田白色污染,严重影响了农作物产量和农业可持续发展^[5-8],残膜污染已经成为制约农业绿色可持续发展的突出问题。

针对农田残膜污染问题,科研工作者开展了大量研究。按照残膜回收机原理,可分为弹齿式^[9-12]、钉齿式^[13-16]、齿链式^[17-21]、搂耙式^[22]、气力式^[23-26]、旋耕钉齿式^[27]等残膜回收机械。现有的残膜回收机主要针对秋收后表层残膜的机械化回收作业,拾净率可达 80% 以上。但仍有近 20% 的地膜残留在农田,再加上覆膜种植 30 多年累积在农田的残膜,造成耕层残膜污染的问题越来越突出。新疆等地的耕层残膜污染问题尤其严重,据统计,农田平均地膜残留量约为 206.46 kg/hm^2 ,部分污染严重区域残膜残留量均值超过 275.63 kg/hm^2 ,已经远远超过了农田地膜残留量限值 75 kg/hm^2 的标准^[3]。美国、日本等国家覆膜种植使用的地膜厚度大于等于 0.02 mm ,地膜抗拉强度较高,机械回收方便,回收率较高^[28-30],耕层残膜污染问题不严重。

由于耕层残膜风化严重,其力学性能较差,且残膜在耕层内与土壤、根茬等混合、板结、缠绕在一起,增大了机械化回收难度。目前用于耕层残膜回收的机具主要以钉齿、杆齿等捡拾部件直接入土捡拾残膜,及以链齿机构输送分离膜土混合物的同时捡拾残膜,这种被动捡拾残膜的方法,未能解决由于耕层残膜力学性能差,残膜与土壤等混合捡拾阻力大等造成的回收拾净率低、含杂量高等问题。有效减小捡拾残膜时土壤等混合物对残膜捡拾的反向阻力,是克服残膜力学性能差,提高残膜拾净率的关键。因此,本文提出一种以钩卷为原理的耕层残膜捡拾方法,通过旋耕起抛膜土混合物,在膜土混合物下落过程中弹齿沿下落方向顺向主动钩挑残膜,以减少土壤对残膜的反向阻力,极大地减少土块进入卸膜

区,克服耕层残膜与土壤粘结且易断裂等问题,以提高拾净率,减少含土量。由于弹齿捡膜的过程是弹齿撞击膜土混合物,在短时间内膜土混合物所受载荷、形态等发生快速变化,是典型的非线性接触问题,运用 ANSYS LS - DYNA 和 SPH (Smoothed particle hydrodynamics) 耦合的分析方法是研究弹齿捡膜过程的有效方法。通过研究获得弹齿捡膜时残膜的应力及变形,并通过试验验证卷辊式耕层残膜回收机性能,为耕层残膜污染治理提供技术与方法。

1 总体结构与工作原理

1.1 整机结构

卷辊式耕层残膜回收机主要由悬挂机构、变速箱、起膜装置、捡拾滚筒、卷辊、卸膜辊、液压马达、正反转机构、机架、集膜箱等部分组成,其结构如图 1 所示。在捡拾滚筒圆周方向上,按照作业区域可划分为正转捡膜区和反转卸膜区。卷辊安装在捡拾滚筒上,液压马达驱动捡拾滚筒转动,带动卷辊绕捡拾滚筒转动,正反转机构带动卷辊在捡膜区域正转捡膜,在卸膜区反转卸膜。

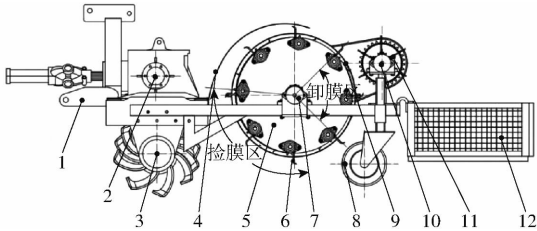


图 1 卷辊式耕层残膜回收机结构图

Fig. 1 Structure diagram of roll-type tillage layer residual film recovery machine

1. 悬挂机构 2. 变速箱 3. 起膜装置 4. 护罩 5. 捡拾滚筒
6. 卷辊 7. 液压马达 1 8. 支撑轮 9. 正反转机构 10. 液压马达 2 11. 卸膜辊 12. 集膜箱

1.2 工作原理

卷辊式耕层残膜回收机采用三点悬挂的连接方式由拖拉机牵引驱动。工作时,拖拉机牵引整机前进,同时动力输出轴的动力经变速箱传动到起膜装置,将土层深度 150 mm 的残膜、土壤、根茬混合物抛送至捡拾滚筒。液压马达 1 驱动捡拾滚筒转动,带动卷辊绕捡拾滚筒随动,卷辊在捡膜区时,在正反转机构作用下正转,将起膜装置抛送起来的残膜、土壤、根茬混合物进行捡拾作业,此时卷辊上弹齿的运动方向与混合物下落的方向相同,但弹齿线速度大

于混合物下落速度,以减小弹齿捡膜过程中土壤对残膜的阻力;液压马达 2 驱动卸膜辊转动,卷辊在卸膜区时,在正反转机构作用下反转,钩挑在弹齿上的残膜随卷辊反转时,弹齿对残膜的钩卷作用减小,在卸膜辊联合作用下,实现残膜顺利卸膜,并将残膜收集到集膜箱内,完成起膜、正转捡膜、反转卸膜、集膜的工作流程,随着机具持续移动,实现耕层残膜连续回收作业。

1.3 动力传动系统

卷辊式耕层残膜回收机由拖拉机动力输出轴及其液压输出装置提供动力,输出轴将动力输入变速箱为起膜装置提供动力。同时,拖拉机液压系统驱动液压马达 1 和液压马达 2 转动,分别通过联轴器直接驱动捡拾滚筒、卸膜辊转动。捡拾滚筒将动力通过链传动输入反转轴,带动卸膜区域的卷辊逆向转动;卸膜辊将动力通过链传动输入正转轴,带动捡膜区域的卷辊顺向转动,其动力传动系统如图 2 所示。

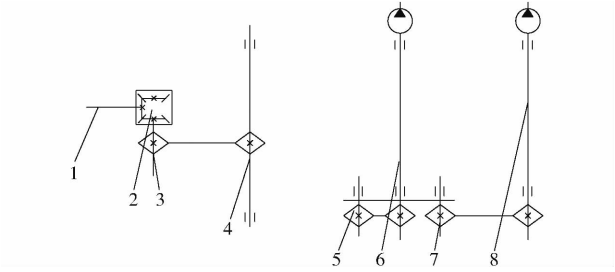


图 2 卷辊式残膜回收机动力传动系统原理图
Fig. 2 Power train system of roll-type tillage layer residual film recovery machine
1. 动力输入轴 2. 变速箱 3. 中间轴 4. 起膜轴 5. 反转轴
6. 捡拾滚筒轴 7. 正转轴 8. 卸膜轴

2 关键部件结构设计

2.1 起膜装置

起膜装置结构如图 3 所示,主要由悬挂机构、起膜刀、变速箱、起膜轴、机架等组成。工作时,由拖拉机后输出轴将动力传递至变速箱带动起膜轴转动,起膜轴带动起膜刀转动,完成膜土混合物的起抛。起膜装置有效工作幅宽为 1 600 mm,在同一平面内均布安装 2 把刀片,每把刀半径为 225 mm,起膜轴上刀座最外圈形成的最大圆直径为 120 mm,因此起膜刀最大作业深度为 165 mm,可满足作业深度 150 mm 的作业性能要求。

设计的起膜装置要求具有碎土及抛土的能力,可将混合物破碎,降低土壤与残膜的粘接,提高膜土分离效率,同时起膜装置可将膜土混合物向后上方抛送至捡拾滚筒,混合物在其重力作用下下落时,捡

拾滚筒上的卷辊对残膜进行钩卷捡拾作业,完成残膜与土壤、根茬等混合物的彻底分离与回收。

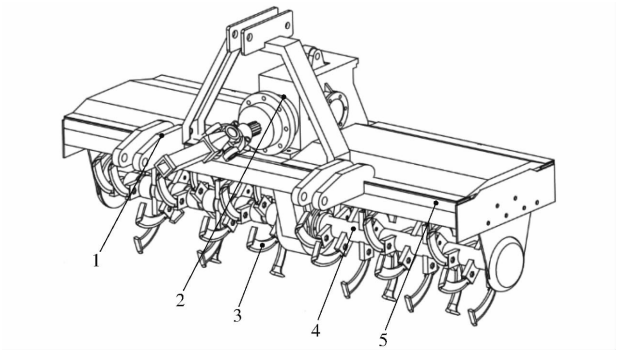


图 3 起膜装置结构示意图
Fig. 3 Structure diagram of film-lifting device
1. 悬挂机架 2. 变速箱 3. 起膜刀 4. 起膜轴 5. 机架

为在起膜过程中不引起刀背推土,要求起膜刀向后抛送膜土混合物的条件是起膜刀片绝对运动轨迹上任意一点绝对速度的水平分速小于零,经计算分析,起膜刀向后抛起耕层膜土混合物的临界转速 n_0 不低于 87.89 r/min,根据对起膜碎土、功率消耗等影响因素的分析,结合传动系统的设计计算,获得起膜刀转速 n 为 213.75 r/min。

2.2 捡膜装置

2.2.1 捡拾滚筒

捡拾滚筒是捡膜装置的重要组成部分,是卷辊式耕层残膜回收机的关键部件,对残膜回收过程中的可靠性及作业效果有直接影响,其结构如图 4 所示。捡拾滚筒由滚筒轴、滚筒盘、小链轮、菱形轴承座、卷辊等组成。卷辊通过菱形轴承座固定在滚筒盘上,且绕着滚筒轴轴线均匀排布 8 根卷辊,卷辊端部的小链轮可与正反转机构的双排链啮合,以改变卷辊的转动,实现卷辊捡膜、卸膜作业时的正、反转作业。

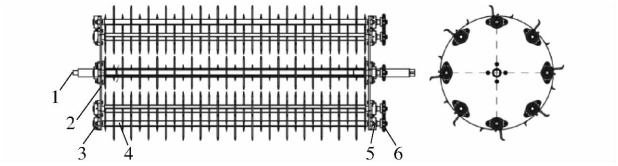


图 4 捡拾滚筒结构示意图
Fig. 4 Structure diagram of film picking drum
1. 滚筒轴 2. 滚筒盘 3. 菱形轴承座 4. 卷辊 5. 捡膜辊 6. 小链轮

卷辊是捡拾滚筒的关键作业部件,其结构如图 5 所示。弹齿焊接在 30 mm × 30 mm 方钢管上,方钢管相邻表面上弹齿的轴向尺寸为 50 mm;方钢管同一表面上相邻弹齿之间的距离为 100 mm,每根卷辊的轴向有效捡拾长度为 1 600 mm,轴向共有 17 根弹齿,弹齿直径为 6 mm。弹齿在方钢管相邻面上

的布置紧凑,增加了捡膜区域的捡膜概率,有利于提高残膜回收拾净率。

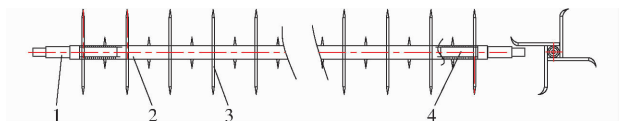


图 5 卷辊结构图

Fig. 5 Structure drawing of roller

1. 卷辊主动轴头 2. 方钢管 3. 弹齿 4. 卷辊传动轴头

2.2.2 捡拾作业参数确定

捡拾滚筒的作用是带动卷辊绕捡拾滚筒公转,将起膜装置抛送过来的膜土混合物进行连续捡拾作业。因此,捡拾滚筒的运动取决于机具前进速度 V_m 和起膜深度 h 。前进速度 V_m 越大捡拾滚筒转速越高,反之越低。起膜深度 h 越大则单位时间进入捡拾滚筒的膜土混合量增加,则捡拾滚筒转速相应增大,以提高残膜拾净率。当捡拾滚筒外圆的线速度等于前进速度时,为捡拾滚筒转速的最小临界值,即

$$n_1 = \frac{V_m}{\pi D_1} \quad (1)$$

式中 D_1 ——撿拾滾筒直徑, m

 n_1 ——捡拾滚筒转速, r/min

前进速度 V_m 以 $2.5 \sim 5 \text{ km/h}$ 计算时, 捡拾滚筒转速 n_1 为 $21.87 \sim 43.75 \text{ r/min}$ 。前进速度 V_m 直接影响进入捡膜区域膜土混合物的量, 速度越大进入捡膜区域的膜土混合物越多, 反之越少。为提高残膜捡拾率, 以进入捡膜区域膜土混合物量最大计算捡拾滚筒转速, 取 n_1 为 43.75 r/min 。

为增加卷辊有效捡膜区域,降低土壤对残膜的反向阻力,提高残膜拾净率,卷辊捡膜的作用区域为正转捡膜区呈 120° 的范围,正转捡膜区剖面线部分为有效捡膜区域,如图 6 所示。

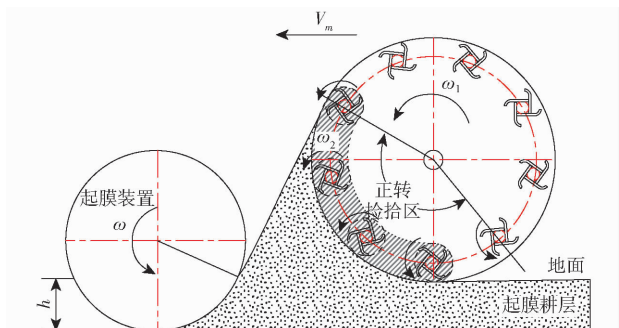


图 6 捡膜过程分析

Fig. 6 Analysis of film collecting process

当捡拾滚筒以转速 n_1 运动时,捡拾滚筒转一圈时间为 t_1 ,此时卷辊进入正转捡膜区的时间为 $t_1/3$,根据卷辊设计结构,卷辊上单个弹齿在时间 $t_1/3$ 内正好旋转 1 圈,则卷辊正转转速 n_2 为 131.27 r/min。

2.2.3 捡膜过程

捡膜机构是残膜回收机的核心,其性能直接影响残膜回收机拾净率。作业时,起膜装置将耕层膜土混合物抛起进入正转捡膜区域后,在卷辊的转动作用下,混合物内的残膜承受弹齿的钩、挑作用,将残膜从土壤中分离出来。弹齿对残膜的机械作用力主要有两种,一种是弹齿对残膜的挑膜作用,另一种是弹齿齿尖对残膜的钩膜作用。弹齿捡拾残膜的过程中,除残膜重力、弹齿对残膜的摩擦力以及运动时离心力外,还有土壤、根茬对残膜的作用力和风的阻力等。由于土壤、根茬对残膜的作用力和风的阻力是随机力,因此在弹齿捡膜过程的受力分析中未考虑土壤、根茬对残膜的作用力和风的阻力。

弹齿挑膜是卷辊回收残膜的关键动作,其运动参数决定捡膜性能。为进一步明晰弹齿挑膜的过程,进行弹齿挑膜受力分析,如图7所示。

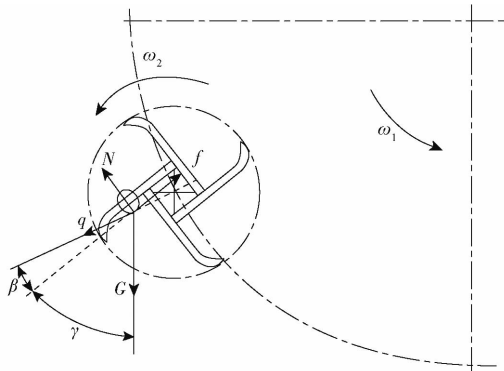


图 7 弹齿挑膜时残膜受力图

Fig. 7 Force diagram of residual film when picking film by spring tooth

根据图 7 可得

$$f = q \cos \beta + G \cos \gamma \quad (2)$$

$$N + q \sin \beta = G \sin \gamma \quad (3)$$

其中

$$q = m\omega_2^2 R_1 \quad (4)$$

$$f = \mu N \quad (5)$$

式中 R_1 ——卷辊旋转轴向至残膜的半径, mm

 μ ——残膜和弹齿间摩擦因数

β ——离心力与弹齿轴线夹角,rad

 γ ——弹齿轴线和重力方向夹角,rad

q ——离心力, N f ——摩擦力, N

N ——残膜法向力, N

 G ——残膜重力, N m ——残膜质量, g ω_2 ——卷辊角速度, rad/s

根据公式(2)、(3)可得,弹齿捡拾残膜不滑落的条件为

$$f \geq q \cos \beta + G \cos \gamma \quad (6)$$

可得
$$\omega_2 \leq \sqrt{\frac{g(\mu \sin \gamma - \cos \gamma)}{R_1 (\cos \beta + \mu \sin \beta)}} \quad (7)$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2

根据公式(7),当 γ 为 90° 时,弹齿处于水平位置,此时为弹齿挑膜的临界状态。由于 β 是由卷辊的结构决定的, β 取 9.59° , μ 取 0.6 时,经计算此时卷辊正转的转速 n_2 为 84.94 r/min,卷辊设计转速为 131.27 r/min,不小于临界挑膜转速,可满足捡膜要求。

为分析弹齿齿尖对残膜的机械作用力,分析齿尖对残膜的钩膜效果,进行弹齿齿尖钩膜过程分析,如图 8 所示。弹齿能否有效钩卷残膜主要取决于弹齿齿尖钩卷力能否克服残膜重力、弹齿对残膜的离心力及摩擦力等。

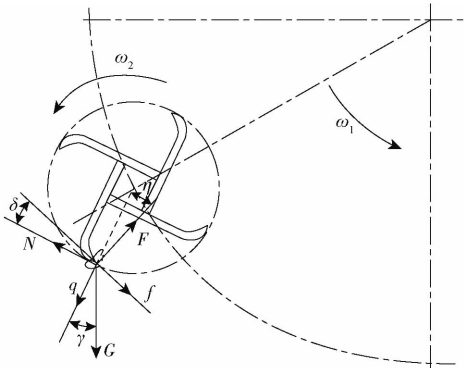


图 8 弹齿齿尖钩膜时残膜受力图

Fig.8 Force diagram of residual film when hooking film by spring tooth tip

根据图 8 可得

$$N = G \sin \gamma + f \cos \delta + F \sin \eta \quad (8)$$

$$q + G \cos \gamma + f \sin \delta = F \cos \eta \quad (9)$$

式中 η ——离心力与弹齿轴向法线的夹角,rad

δ ——残膜法向力和弹齿轴线的夹角,rad

F ——齿尖钩卷力,N

根据公式(8)、(9)可得,弹齿齿尖钩膜不掉落的条件为

$$F \geq q / \cos \eta + G \cos \gamma / \cos \eta + f \tan \eta \quad (10)$$

当 γ 为 0° 时,离心力 q 和残膜重力 G 重合且方向垂直向下,弹齿钩起残膜的作用力最大,为弹齿齿尖钩膜的临界状态,则有

$$F \geq G \left[\frac{1}{\cos \eta} + \frac{\mu \tan^2 \eta}{1 - \mu (\cos \eta + \tan \eta \sin \eta)} \right] + q \left[\frac{1}{\cos \eta} + \frac{\tan^3 \eta}{1 - \mu (\cos \eta + \tan \eta \sin \eta)} \right] \quad (11)$$

由于离心力 q 不受角度 η 的影响,因此,可对公式(11)求最大值,变换为

$$f(\eta)_{\min} = 1 - \mu (\cos \eta + \tan \eta \sin \eta) \quad \left(\eta \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (12)$$

经简化可得

$$f(\eta)_{\min} = 1 - \frac{\mu}{\cos \eta} \quad (13)$$

由此可得, η 为 90° 时,弹齿齿尖钩卷力 F 达到最大值。

2.3 正反转机构

正反转机构是实现卷辊在捡膜区正转捡膜、在卸膜区反转卸膜的核心机构,其作业可靠性决定了卷辊式残膜回收机的性能和可靠性。正反转机构结构如图 9 所示,主要由传动盘、正转双排链、正转主动轴、正转从动轴、反转双排链、反转主动轴、反转从动轴、支撑辊等构成。正转主动轴和正转从动轴之间安装有正转双排链,通过 7 个支撑辊将正转双排链支撑呈圆弧状,形成捡膜区。反转主动轴和反转从动轴之间安装有反转双排链,通过 4 个支撑辊将反转双排链支撑呈圆弧状,形成卸膜区。

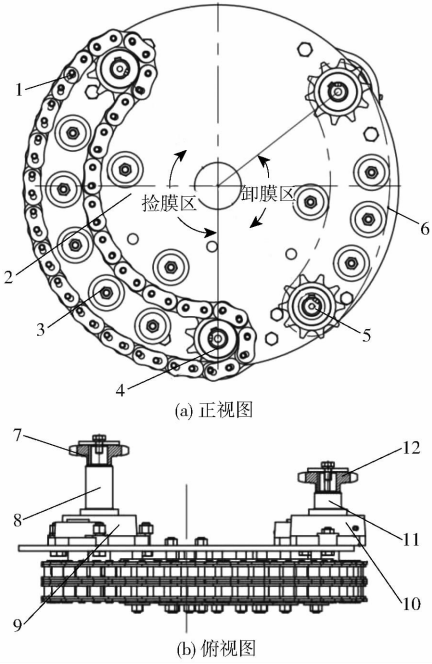


图 9 正反转机构结构图

Fig.9 Structure diagrams of reverse rotating device

- 1. 正转双排链 2. 传动盘 3. 支撑辊 4. 正转从动轴 5. 反转从动轴 6. 反转双排链 7. 正转传动链轮 8. 正转主动轴 9. 轴承 I 10. 轴承 II 11. 反转主动轴 12. 反转传动链轮

正反转机构工作时,卸膜辊动力经链传动输入到正反转机构,带动正转主动轴转动,正转主动轴带动正转双排链运动,当卷辊随捡拾滚筒转动经过捡膜区时,卷辊上链轮与正转双排链啮合,带动卷辊正转捡膜;经链传动将捡拾滚筒的动力输入到正反转机构,带动反转主动轴转动,反转主动轴带动反转双排链运动,当卷辊随捡拾滚筒转动经过卸膜区时,卷辊上的链轮与反转双排链啮合,带动卷辊反转卸膜,其运动分析如图 10 所示。

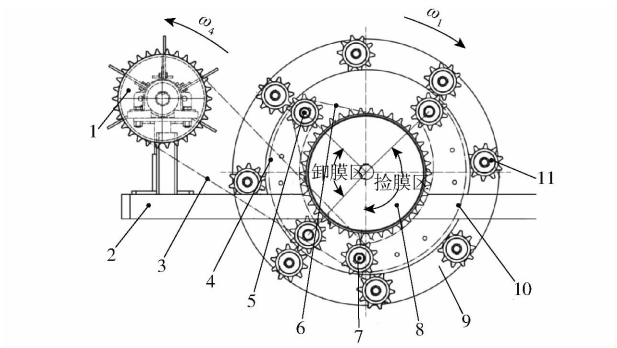


图 10 正反转机构运动分析

Fig. 10 Motion diagram of reverse rotating device

1. 卸膜辊 2. 机架 3. 链传动 I 4. 反转双排链 5. 反转主动轴 6. 链传动 II 7. 反转主动轴 8. 滚筒链轮 9. 捡拾滚筒 10. 正转双排链 11. 卷辊

2.4 卸膜装置

2.4.1 卸膜装置结构

卸膜装置是将卷辊上的残膜顺利脱掉并抛进集膜箱的执行部件,其结构如图 11 所示,主要由卸膜辊、刷膜片、液压马达、机架等组成。当卷辊在正转捡膜区正转捡拾上残膜后,卷辊随捡拾滚筒运动到反转卸膜区时,在正反转机构的作用下卷辊反转,钩挑在弹齿上的残膜被卷辊的反转运动释放,同时液压马达驱动卸膜辊转动,在刷膜片与卷辊反转的联合作用下残膜逐步疏松、脱落,并抛送到集膜箱中,降低了残膜与弹齿组件之间分离的难度,提高残膜的回收效率。

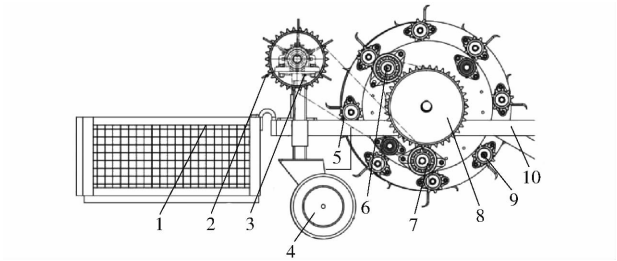


图 11 反转卸膜装置结构图

Fig. 11 Structure diagram of reverse unloading device

1. 集膜箱 2. 刷膜片 3. 卸膜辊 4. 支撑轮滚筒 5. 传动链 6. 反转主动轴 7. 正转主动轴 8. 正反转机构 9. 卷辊 10. 机架

2.4.2 卸膜过程分析

卸膜机构是残膜回收机的关键机构之一,其作业效果影响整机的作业性能。为实现将耕层膜土混合物中残膜连续捡拾,需将钩、挑在弹齿上的残膜及时卸掉。因此,设计了卷辊反向旋转与卸膜轮共同作用的卸膜方法,在卸膜区卷辊的反向转动将钩挑在弹齿上的残膜,在卸膜轮的反向作用下,脱离弹齿并被抛送到集膜箱。卸膜过程的受力分析如图 12 所示。

残膜从弹齿上被脱下的临界条件为:残膜受到

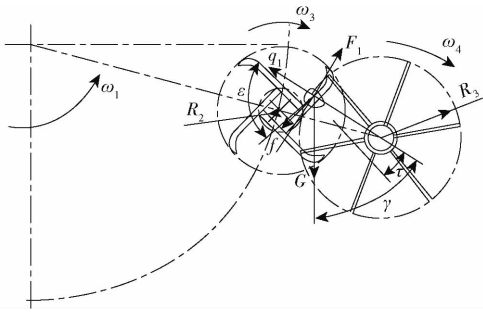


图 12 卸膜过程受力分析

Fig. 12 Force analysis of film-unloading process

卸膜轮切向作用力、残膜所受离心力分别与残膜重力、残膜与弹齿摩擦力在对应力方向的分力之和相等,即

$$F_1 = G \sin \gamma + f \sin \varepsilon \tag{14}$$

$$q_1 + f \cos \varepsilon = G \cos \gamma \tag{15}$$

$$\varepsilon + \tau = 90^\circ \tag{16}$$

式中 τ ——卸膜轮对残膜离心力与弹齿轴线法向的夹角, ($^\circ$)

ε ——卸膜轮对残膜离心力与弹齿轴线的夹角, ($^\circ$)

q_1 ——卸膜轮对残膜的离心力, N

F_1 ——卸膜轮对残膜的切向作用力, N

如图 12 所示,卸膜时卷辊反向转动,弹齿与卸膜轮接触时,残膜所受卸膜轮的切向作用力将其沿切向抛出,残膜受到的卸膜轮离心力是将残膜与卸膜轮分离的关键。因此,将残膜从弹齿卸落并抛向后抛送的条件为

$$q_1 \geq G \cos \gamma - f \cos \varepsilon \tag{17}$$

根据公式(14)、(15)可得,当 ε 为 90° 时,残膜所受离心力与弹齿对其的摩擦力垂直,此时卸膜轮甩出残膜所需的离心力 q_1 最小,即

$$q_1 \geq G \cos \gamma \tag{18}$$

经变换可得

$$\omega_4 \geq \sqrt{\frac{g \cos \gamma}{R_3}} \tag{19}$$

式中 R_3 ——卸膜轮半径, mm

ω_4 ——卸膜轮角速度, rad/s

经计算得到卸膜轮最小转速 n_4 为 43 r/min, 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_3 与卸膜轮转速 n_4 在如图 12 所示的 R_2 和 R_3 的切点处相等,则得到卷辊卸膜反转转速 n_3 为 167.86 r/min。

3 捡膜过程仿真分析

3.1 仿真模型建立

卷辊式耕层残膜回收机弹齿的运动直接影响弹

齿、残膜、土壤之间的接触关系,对耕层残膜的捡拾性能有重要影响。在起膜装置将耕层膜土混合起抛至捡膜区域后,在重力作用下下落时开始捡膜作业,运动的弹齿破土并与残膜接触,残膜被钩卷在弹齿上随其运动并破土而出,完成残膜捡拾分离作业。弹齿捡膜的过程是弹齿撞击膜土混合物,在短时间内膜土混合物所载荷、形态等发生快速变化是典型的非线性接触问题。因此,弹齿捡膜的过程是高度非线性的动力学分析过程,ANSYS LS-DYNA 和 SPH 耦合的方法是有效分析弹齿捡膜过程的手段。通过建立卷辊弹齿、土壤的有限元复合模型,观测弹齿对残膜和土壤的作用,分析弹齿、土壤对残膜的应力及变形,获得弹齿捡膜过程的受力状况,以指导捡膜机构的设计。

为提高计算精度,便于分析,设定起膜装置起抛的膜土混合物为蓬松状态,土壤充分包裹在残膜周围,残膜呈自由展平状态且处于立方块中间,残膜与土壤相对静止,生成的土壤 SPH 粒子也呈规则分布,建立的有限元模型如图 13 所示。为提高计算精度,节约求解时间,建模时应保证土壤层和残膜有足够的接触,构建的膜土混合物上、下层土壤模型尺寸均为 40 mm × 30 mm × 5 mm,残膜模型尺寸为 60 mm × 30 mm,厚度为 0.008 mm。

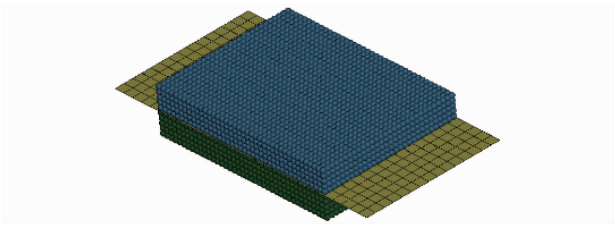


图 13 膜土混合物起抛状态的有限元模型
Fig. 13 Finite element model of take-off state of membrane soil mixture

在起膜装置作用下膜土混合抛至捡膜区,弹齿随捡拾滚筒的转动,将残膜从土壤中钩挑出来,捡膜过程运动模型如图 14 所示。膜土混合物抛离地面时以一定速度抛向捡膜区,在自重作用下下落。由于膜土混合物运动的速度较快,而运动空间位移量较小,因此在有限元模拟分析时,设定膜土混合物以水平速度进入捡膜区,在捡膜区以自由落体运动的方式下落。根据起膜装置的作业参数及能力守恒定理,可计算得膜土混合物抛至捡膜区最高点时速度 v_x 为 2.07 m/s,膜土混合物自由落体运动到捡膜区最外缘时速度 v_y 为 1.93 m/s。捡膜时弹齿随捡拾滚筒以 ω_1 转动的同时,自身也以 ω_2 转动,弹齿捡膜的合速度是 ω_1 和 ω_2 一起运动的结果。为方便分析,构建捡膜过程的有限元模型时,根据捡膜机构的结构

参数,获得弹齿运动合速度 v'_2 为 3.22 m/s,经过数据转化,对应卷辊转速 n'_2 为 298.66 r/min。

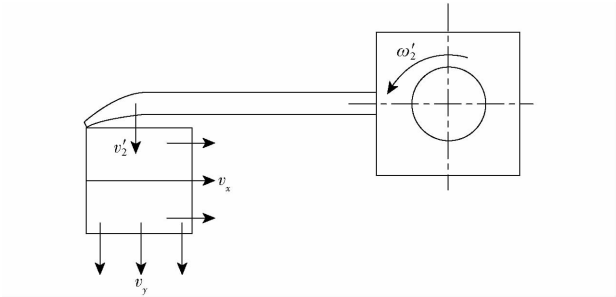


图 14 捡膜过程的运动模型
Fig. 14 Motion model of film collecting process

运用三维软件建立弹齿、土壤、残膜的模型,将模型以 .x_t 的格式输出,导入到 ANSYS 中,建立残膜、土壤和弹齿的有限元模型。模型中土壤材料参数取值^[31-32]:土壤密度为 1 880 kg/m³、内摩擦角为 10.03°、黏聚力为 3 × 10³ Pa、含水率为 15%、体积模量为 1 756 Pa、剪切模量为 5 858 Pa、泊松比为 0.38。残膜材料参数^[10]:密度为 920 kg/m³、弹性模量为 6.0 × 10⁵ Pa、泊松比为 0.34。弹齿材料参数^[10]:密度为 7 850 kg/m³、弹性模量为 2.1 × 10¹¹ Pa、泊松比为 0.31。

3.2 网格划分及参数设置

模拟模型网格质量直接影响模拟计算精度和效率,网格划分尺寸越小,仿真计算精度高,但求解计算时间长。综合考虑取土壤 SPH 粒子尺寸为 1 mm;残膜网格边长为 1 mm;弹齿网格尺寸为 9.2 mm,完成的有限元模型如图 15 所示。根据弹齿捡膜的过程,残膜与土壤之间是点面接触,由关键字 Contact_Automatic_Nodes_To_Surface 控制,弹齿与土壤、残膜之间是面面接触,由关键字 Contact_Automatic_Surface_To_Surface 控制,弹齿捡膜过程数值模拟仿真截图如图 16 所示。

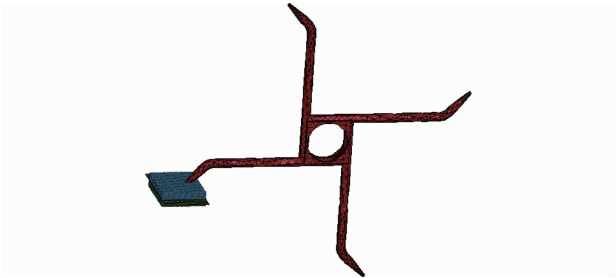


图 15 弹齿、残膜、土壤有限元模型
Fig. 15 Finite element model of spring tooth, residual film and soil

3.3 仿真结果及分析

通过 ANSYS Workbench 和 SPH 耦合的分析方法,弹齿捡拾残膜过程中残膜的变形和应力情况如

图 17 所示。

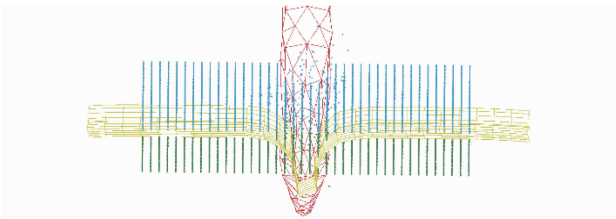


图 16 弹齿捡膜过程的数值模拟仿真截图
Fig. 16 Numerical simulation screenshot of film collecting process of spring tooth

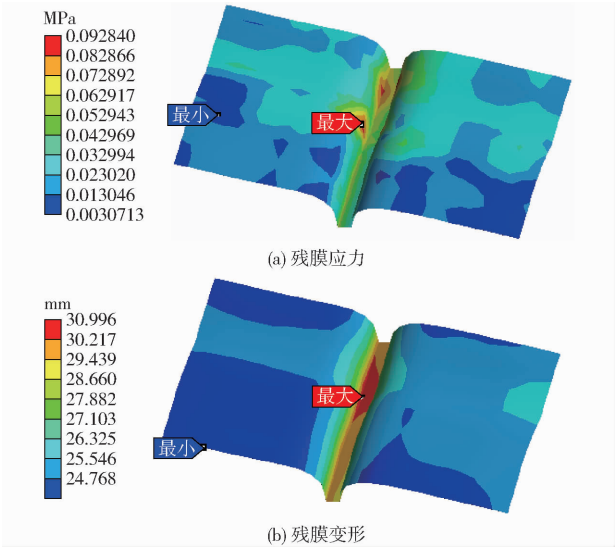


图 17 残膜应力、变形分析

Fig. 17 Stress and deformation analysis of residual film

膜土混合物在弹齿的碰撞剪切作用下,土壤被破坏,弹齿再与残膜接触,将其顺向挑出土壤,实现膜土混合物的捡拾分离。在弹齿破土挑膜过程中,残膜与弹齿齿尖接触部分变形最大,最大变形量为 30.996 mm,弹齿弧面与残膜接触变形量 27.103 mm;弹齿带动残膜与土壤最早分离处应力最大,最大应力为 0.092 84 MPa,弹齿弧面与残膜接触处应力为 0.042 969 MPa。

弹齿捡膜过程中,弹齿齿尖最先接触残膜,随着弹齿运动,弹齿弧面逐渐再和残膜接触,残膜包裹在弹齿接触面上,随弹齿一起顺向运动,导致残膜在弹齿齿尖部位发生较大变形,且残膜应变也出现最大值。由于土壤和残膜粘结作用,在弹齿入土拾膜时弹齿要克服膜土混合物的阻力,造成弹齿捡膜阻力出现一定波动,导致残膜应力扰动较大。

根据前期耕层残膜的拉伸力学特性试验,得到耕层残膜拉伸力为 2 ~ 2.6 N,结合模拟分析应力的结果,计算得到残膜受到弹齿齿尖和弹齿弧面的作用力分别为 4.14 N 和 1.94 N,表明弹齿捡拾耕层残膜时,弹齿齿尖可有效钩挑上残膜,而弹

齿弧面对残膜的机械作用力可保证不破坏残膜的结构。

4 验证试验

为了验证卷辊式耕层残膜回收机的作业性能,试制了整机物理样机。2023 年 6 月,在新疆阿克苏六团进行了残膜回收性能试验。试验地是种植棉花 10 年以上的农田,试验前进行了耕整地作业,试验地土壤紧实度为 41 kg/cm²,含水率为 10.7% ~ 12.1%,用雷沃欧豹 M904 型拖拉机牵引作业。样机田间试验如图 18 所示。



图 18 残膜回收机田间试验

Fig. 18 Field experiment of residual film recovery machine

按照标准 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》和 NY/T 1277—2019《残地膜回收机作业质量》的试验要求,进行卷辊式耕层残膜回收机性能指标的测定。试验时,按照五点取样法在试验地选取 1 m × 1 m 的正方形,挖取土层深度 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm 和 100 ~ 150 mm 的残膜,去除尘土和水分后称其质量,计算残膜回收拾净率,计算式为

$$J = \left(1 - \frac{W}{W_0} \right) \times 100\% \tag{20}$$

式中 J——拾净率,%
W——作业后表层或深层残膜质量,g
W₀——作业前表层或深层残膜质量,g
表层残膜是土层深度 0 ~ 100 mm 的残膜,深层残膜是土层深度 100 ~ 150 mm 的残膜。试验测试结果如表 1 所示。

表 1 卷辊式耕层残膜回收机田间试验结果
Tab.1 Performance of roll-type tillage layer residual film recovery machine

参数	试验值	技术要求
深层拾净率/%	71.1	≥70
表层拾净率/%	82.6	≥80
拾净深度/mm	150	100 ~ 150

通过田间试验,卷辊式耕层残膜回收机作业耕层深度达 150 mm,深层拾净率为 71.1%,表层拾净率为 82.6%。试验指标均符合国家与行业相关标准要求,试验结果满足设计要求。

5 结论

(1)设计了一种卷辊式耕层残膜回收机,阐述了其结构、工作原理及动力传动系统,并对残膜回收机主要工作部件进行设计;通过旋耕起抛膜土混合物,在膜土混合物下落时弹齿沿下落方向顺向主动钩挑残膜的方法,可减小对残膜的反向阻力,减少进入卸膜区的土块,以解决耕层残膜因力学性能差,残膜与土壤等混合机械捡拾阻力大造成拾净率低、含杂量高等问题。

(2)通过理论分析的方法对关键部件作业参数进行了分析,对捡膜过程进行了受力分析,获得起膜

刀转速为 213.75 r/min,滚筒转速为 43.75 r/min,卷辊顺向捡膜转速为 131.27 r/min,逆向卸膜转速为 167.86 r/min,刷膜辊转速为 43 r/min,为卷辊式耕层残膜回收机作业参数的设计提供了理论依据。

(3)运用 ANSYS LS-DYNA 和 SPH 耦合的方法研究卷辊捡膜的过程,获得弹齿捡膜过程中残膜所受的最大应力及变形,通过分析,表明了弹齿齿尖可有效钩挑残膜,弹齿弧面对残膜的作用力可保证残膜不被拉断;通过试验验证,卷辊式耕层残膜回收机作业耕层深度为 150 mm,深层拾净率为 71.1%,表层拾净率为 82.6%。试验指标均符合国家与行业标准的要求。

参 考 文 献

- [1] 陈勤平,吴昌湛,陈国泽,等.不同覆盖物对春花生生长及产量的影响[J].广西农学报,2013,28(2):28-30.
CHEN Qiping, WU Changzhan, CHEN Guoze, et al. The effect of the different overlay on growth and yield of spring peanut[J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2013, 28(2): 28-30. (in Chinese)
- [2] 谢建华,陈学庚,孙超伟.杆齿式残膜回收机卸膜过程分析及高速摄像试验[J].农业工程学报,2017,33(10):17-24.
XIE Jianhua, CHEN Xuegeng, SUN Chaowei. Unloading film process analysis and high-speed photography experiment of pole-tooth residual plastic film collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 17-24. (in Chinese)
- [3] 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):223-234.
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 223-234. (in Chinese)
- [4] 国家市场监督管理总局.聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜:GB/T 13735—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [5] 孙岳,简建明,田玉泰,等.残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验[J].农业机械学报,2018,49(增刊):304-310.
SUN Yue, JIAN Jianming, TIAN Yutai, et al. Analysis and experiment of filming mechanism of rotary film-lifting device of residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 304-310. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王海敏.全降解聚乙烯地膜的制备与性能研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
WANG Haimin. Preparation and performance study of the full-degradable polythene films[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 严伟,胡志超,吴努,等.铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):17-24.
YAN Wei, HU Zhichao, WU Nu, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 17-24. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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 CSAE, 2019, 35(11): 26-37. (in Chinese)
- [11] 康建明,彭强吉,王士国,等.弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(增刊):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(Supp.): 295-303. (in Chinese)
- [12] 李姝卓.挑膜分杂式地膜回收机关键部件的设计与研究[D].石河子:石河子大学,2020.
LI Shuzhuo. Design and research on key components of film picking and separating film recycling machine [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)
- [13] ZHANG P F, HU C, WANG X F, et al. Design and test of rotary tillage nail tooth residual film recycling machine[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(4): 96-105.
- [14] 史增录,唐学鹏,甄军,等.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 Zenglu, TANG Xuepeng, ZHEN Jun, et al. Performance test and motion simulation analysis of nail tooth type mechanism for collecting plastic residue[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 64-71. (in Chinese)

- [15] 由佳翰,陈学庚,张本华,等. 4JSM-2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):10-16.
YOU Jiahao, CHEN Xuegang, ZHANG Benhua, et al. Design and experiment of 4JSM-2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10):10-16. (in Chinese)
- [16] 由佳翰. 4JSM-2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2019.
YOU Jiahao. Design and test of 4JSM-2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and plastic film recovery[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [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 CSAE, 2018, 34(19):19-27. (in Chinese)
- [18] 王旭峰,胡灿,鲁兵,等. 抛膜链齿输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 Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. 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)
- [19] 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 residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):11-19. (in Chinese)
- [20] 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.
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. (in Chinese)
- [21] 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.
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 CSAE, 2020, 36(22):76-86. (in Chinese)
- [22] 王学农,史建新,郭俊先,等. 悬挂式棉秆粉碎还田搂膜机搂膜机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2008,24(1):135-140.
WANG Xuenong, SHI Jianxin, GUO Junxian, et al. Experimental study and design on film raking mechanism of hanging film raker with cotton-stalk crushing and returning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):135-140. (in Chinese)
- [23] 康建明,解臣硕,王小瑜,等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):91-98.
KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):91-98. (in Chinese)
- [24] 彭强吉,李成松,康建明,等. 气力式圆筒筛膜杂分离机改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):126-135.
PENG Qiangji, LI Chengsong, KANG Jianming, et al. Improved design and test on pneumatic cylinder sieve film hybrid separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):126-135. (in Chinese)
- [25] 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 Zhenhui. Design and research of the air separation type reclaimer for the residual film of plough layer[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [26] 郭文松,贺小伟,王龙,等. 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 Wensong, HE Xiaowei, WANG Long, et al. Development of a comb tooth loosening and pneumatic stripping plough layer residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18):1-10. (in Chinese)
- [27] 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 Panfeng. Design and test research of rotary tillage nail tooth plastic film recycling machine[D]. Alar: Tarim University, 2018. (in Chinese)
- [28] 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]. 中国农机化学报,2012,33(5):41-44.
XIE Jianhua, HOU Shulin, LIU Yingchao. Research status and trends of plastic film residue collectors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(5):41-44. (in Chinese)
- [29] ANIKWEA M A N, MBAHB C N, EZEAKUC P I, et al. Tillage and plastic mulch effects on soil properties and growth and yield of cocoyam (*Colocasia esculenta*) on an ultisol in southeastern Nigeria[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 93(2):264-272.
- [30] TUNA E. Producing biodegradable plastics using activated-sludge polyhydroxyalkanoates in mixed composition[D]. California: University of California, 2012.
- [31] 杨望,李晓月,王蓉蓉,等. 木薯块根拔起的最大应力数值模拟及试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):58-64.
YANG Wang, LI Xiaoyue, WANG Rongrong, et al. Numerical simulation test of maximum stress of tuber in cassava lifting[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6):58-64. (in Chinese)
- [32] 潘琴. 木薯块根拔起收获质量影响因素的仿真试验研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
PAN Qin. The simulation study of influencing factors of the harvesting quality of cassava roots uprooted[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)