doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.029

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机设计与试验

史增录[1,2]　姚洁婷[1]　张学军[1,2]　刘小鹏[1]　杨龙飞[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责任公司,阿克苏 843000)

摘要:针对现有残膜作业机性能不稳定、回收混合物含杂高、打包装置复杂等问题,本文提出柔性钉齿捡拾、输送、分离残膜及横向排杂的捡拾分离方法,利用 V 形带式残膜滚搓成捆原理,设计了一种柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机。研究柔性钉齿式捡拾机构、脱膜装置、V 形打包装置等关键部件运动学和动力学特性,分析关键部件结构尺寸、排布和工作参数,获得起膜装置转速为 218.2 r/min,连续捡膜钉齿齿尖线速度为 1.93 ~ 2.33 m/s,分析脱膜过程受力情况,得到有效脱膜转速为 96 ~ 116 r/min,分析计算打包受力及运动参数,得到打包带线速度为 1.38 ~ 2.00 m/s。基于 ANSYS 和 SPH(Smoothed particle hydrodynamics)耦合的方法,构建了钉齿捡膜模拟计算模型,获得捡膜过程中残膜应力变化,其平均峰值应力为 0.213 3 MPa,对比覆盖 180 d 的当季表层残膜抗拉强度,验证捡拾机构设计合理性。样机试验结果表明,当机具前进速度为 6 km/h、钉齿线速度为 2.33 m/s、打包带线速度为 1.62 m/s 时,连续作业 5 hm^2 的平均残膜拾净率为 89.7%,回收混合物含杂率为 28.6%,膜包成型率为 100%,平均膜包密度为 90.2 kg/m^3,试验结果满足国家与行业标准性能要求,为残膜回收打包机研发提供技术参考。

关键词:残膜作业机;残膜捡拾打包;柔性钉齿式

中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0308-12　　**OSID**:

Design and Test of Flexible Nail Teeth Type Residual Film Picking and Strapping Machine

SHI Zenglu[1,2]　YAO Jieting[1]　ZHANG Xuejun[1,2]　LIU Xiaopeng[1]　YANG Longfei[1]　ZHANG Chaoshu[3]　LIU Lei[3]

(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 to solve some problems of existing residual film operation machinery, such as unstable operation performance, high impurity content of recycling mixture and complex structure of packaging device, a method of picking up, transporting, separating residual film and removing impurities by flexible nail teeth was proposed. Based on the principle of rolling and rubbing the V type belt residual film into bundles, a flexible nail teeth type of residual film picking and strapping machine was designed. The kinematics and dynamics characteristics of essential components such as flexible nail teeth picking mechanism, stripping device, and strapping device were researched. The structure size, arrangement, and working parameters of essential components were analyzed. The rotation speed of the film lifting device was 218.2 r/min. The critical range of tooth tip linear velocity of continuous film picking was 1.93 ~ 2.33 m/s. The force of the stripping process was analyzed, and the effective stripping speed was 96 ~ 116 r/min. The force and motion parameters of strapping were analyzed and calculated, and the suitable strapping linear velocity was 1.38 ~ 2.00 m/s. Using the coupling method of ANSYS and smoothed particle hydrodynamics (SPH) to construct the simulation calculation model of the tooth-picking film, the stress change and average peak stress of the residual film was obtained, and compared with the tensile strength of the surface residual film covering 180 days in the current season to verify the design rationality of the picking mechanism. The prototype verification test showed that when the forward speed of the machine was 6 km/h, the linear speed of the pick-up tooth was 2.33 m/s and the linear speed of

收稿日期:2024-07-27　修回日期:2024-09-25

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02011-2)和新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2020Q015)

作者简介:史增录(1986—),男,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:shizlfd@163.com

the strapping belt was 1.62 m/s. The average residual film pick-up rate of 5 hectares of continuous operation was 89.7%, the impurity rate of the recycled mixture was 28.6%, the film package forming rate was 100%, and the film package density was 90.2 kg/m^3. The test results accorded with the performance requirements of national and industry standards and provided technical references for the research and development of residual film recycling packers.

Key words: residual film operation machine; residual film picking and strapping; flexible nail teeth type

0　引言

覆膜栽培具有使土壤增温保湿、抑制杂草生长、防病虫害等优点，已成为新疆、甘肃、内蒙古等农业地区重要作物增产技术之一[1-4]。随着地膜用量和使用年限的增加，农田残膜污染问题日益严峻，影响了土壤生态环境和绿色农业的建设发展[5-10]。机械化回收是目前主流的治理手段，推动研发高性能稳定的残膜回收机具对治理残膜污染、修复土壤生态具有重要意义。

目前我国有多所农机生产企业、高校、科研院所研发残膜回收机。按照回收作业期不同，可分为苗期、秋后和播前残膜回收机，代表机型有东北农业大学研发的 MS-2 型玉米苗期收膜中耕联合作业机、新疆农业科学院农业机械化研究所研制的 MSM-3 型苗期残膜回收机、沈阳农业大学和新疆农垦科学院联合研发的 4JSM-2000 型棉秆粉碎和残膜回收联合作业机等[11-13]；根据关键作业部件原理不同，可分为弹齿式、滚筒式、搂耙式、链齿式、夹指链式、铲筛式、气吹式等类型，代表机型有中国农业大学研制的 4SJ 型偏心滚筒式残膜回收机、石河子大学研发的夹指链式残膜回收秸秆粉碎还田一体机和搂膜弹齿残膜回收机、新疆农垦科学院研发的 4JMS-2.0 型链齿式残膜回收与秸秆还田联合作业机、新疆生产建设兵团研发的气吹式秋后残膜回收机等[14-19]；根据回收思路不同，可分为压秆后回收、秸秆粉碎后回收、拔秆后回收、打秆集条后回收等[20-23]。

虽然现有残膜回收机具拾净率可达 85% ~ 90%，但达到这一作业质量需要在特定的农田环境下实现，在农田环境稍差甚至普通的农田环境下，其作业性能不稳定，尤其在玉米根茬地进行残膜作业时，回收混合物含杂率高且打包装置结构复杂，导致残膜回收机具作业性能不稳定。为此，本文设计一款适用于秋后棉田和玉米根茬地的残膜捡拾打包作业机。设计柔性钉齿式捡拾机构配合横向排杂装置作业，同时将钉齿安装在柔性带上，当遇到障碍物或较大冲击时，可起到缓冲作用避免机具本身损坏，保障稳定的作业性能和较低的故障发生率。应用 ANSYS 和 SPH 耦合仿真模型，对钉齿捡膜过程中残膜应力变化进行分析，并通过田间试验验证柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机作业性能，以期为农田残膜污染治理提供解决方法和参考。

1　整机结构与工作原理

1.1　结构组成

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机结构如图 1 所示，主要由机架、行走轮、起膜装置、柔性钉齿式捡拾机构、脱膜装置、横向排杂装置和 V 形打包装置等组成，在机具前方配合秸秆粉碎装置，整机通过牵引架挂接在拖拉机后方，用于秋后棉田和玉米根茬地残膜回收作业。

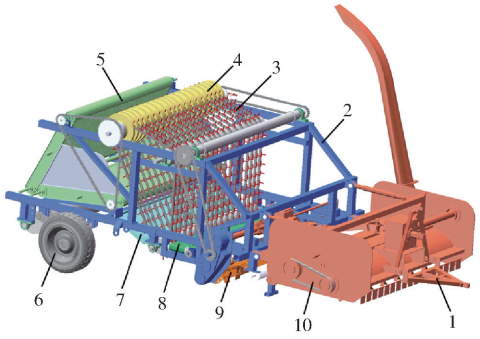

图 1　柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机结构图

Fig. 1　Structure map of flexible nail teeth type residual film picking and strapping machine

1. 牵引架　2. 机架　3. 柔性钉齿式捡拾机构　4. 脱膜装置　5. V 形打包装置　6. 行走轮　7. 杂质刮板　8. 横向排杂装置　9. 起膜装置　10. 秸秆粉碎装置

1.2　作业工况

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机适宜于新疆地区采收后棉田和玉米根茬地秋收后残膜回收作业，地膜宽度为 2 050 mm，玉米残茬高度为 150 mm，棉花种植模式为一膜六行，行距为 100 mm + 660 mm 模式；玉米种植模式为一膜四行，行距为 400 mm + 600 mm 模式。膜边覆土宽度为 50 ~ 80 mm，机具作业工况如图 2 所示。

1.3　工作原理

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机属牵引型农机具，由拖拉机后输出轴提供动力。机具工作时，前方秸秆粉碎装置打碎作物秸秆，由螺旋输送装置运输至已作业侧。传动系统将动力传至起膜装置，起膜刀入土切削表层土壤并破坏残膜-土壤（简称膜土）

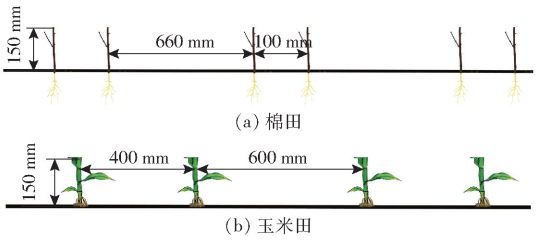

图 2 机具作业工况

Fig. 2 Diagram of machine working condition

混合物之间的粘结作用力,并粉碎板结土壤,达到残膜轻覆在松软土壤表面的状态,有效减少钉齿入土捡膜时的冲击力。柔性钉齿式捡拾机构上的钉齿入土捡膜,地膜附着在钉齿上,随柔性带转动垂直升运至上齿辊,重力较大的土壤和杂质掉落到横向排杂装置上,排运到已作业侧,膜杂分离后的残膜继续向后升运至脱膜装置,脱膜辊上的脱模盘外径高于齿尖且快速旋转,对残膜起支撑和向后输送作用,残膜落至打包室内。打包室呈 V 形,进入的残膜随打包带转动被越"搓"越紧呈圆捆状。膜包达到一定直径,膜卷碰触安装在打包室侧板的行程开关触头,行程开关内部触点接通回路发出警报,驾驶员驱动液压系统卸掉膜捆,完成作业。

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机技术参数

Tab. 1 Technical parameters of flexible nail teeth type residual film picking and strapping machine

参数	数值
整机尺寸/(mm × mm × mm)	5 300 × 3 100 × 1 600
工作速度/(km·h^{-1})	5 ~ 6
作业幅宽/mm	2 100
捡拾深度/mm	30 ~ 60
配套功率/kW	≥55

2 关键部件参数设计

2.1 起膜装置

起膜是残膜回收过程中的关键环节,该环节作业效果是影响残膜拾净率的重要因素。在板结土壤的应用中旋转起膜方式具有效率高、不易雍土、功率消耗少等优点[24-27]。结合柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机设计要求和工况需要,确定起膜装置结构。

起膜装置采用旋转起膜方式,主要由起膜刀轴、起膜刀、加强肋板、起膜辊等组成,结构如图 3 所示。起膜刀入土将深度 0 ~ 60 mm 的残膜和边膜翻出,方便后续捡拾。每把起膜刀片上设计有 30 mm 的避茬豁口,在达到疏松土壤和破坏膜土粘结作用的基础上,减少起土量,避免起膜刀与作物秸秆碰撞和摩擦,从而保护起膜装置。

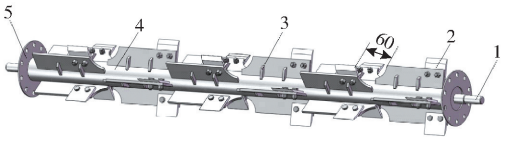

图 3 起膜装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of film lifting device

1. 起膜刀轴 2. 起膜刀 3. 加强肋板 4. 起膜辊 5. 连接法兰

起膜装置需要有足够的转速才能疏松土壤,同时破坏膜土混合物粘结力,但转速过大,残膜破碎度增加,回收难度增加。根据前期预试验,发现当起膜刀转速为 150 ~ 250 r/min 时,能够达到预期起膜效果,经机具配套牵引动力和传动系统设计计算,起膜装置转速为 218.2 r/min。

2.2 柔性钉齿式捡拾机构

柔性钉齿式捡拾机构是机具核心部件之一,主要由钉齿、柔性带、脱膜辊(主动辊)、上下齿辊(被动辊)等组成,如图 4 所示。通过在柔性带上装配钉齿,利用齿辊张紧柔性带使其按照一定的轨迹完成捡膜、膜杂分离和残膜升运。在工作过程中,柔性钉齿式捡拾机构按图中 v_0 方向运动,脱膜辊在传动系统驱动下顺时针旋转,装配在其上的柔性带随之运动,柔性带上的钉齿绕下齿辊中心作圆周运动捡膜,地膜随柔性带竖直升运,膜面上的杂质掉落在横向排杂装置上输送至已作业侧。该捡拾机构采用柔性带传动,具有良好的弹性和柔韧性,当遇到较硬的障碍物或受到冲击时,能有效吸收冲击,提升捡拾作业稳定性。

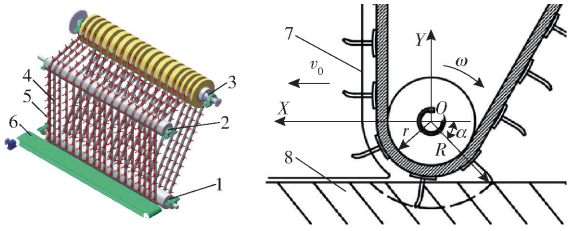

图 4 捡拾机构示意图

Fig. 4 Schematic of flexible nail teeth type picking mechanism

1. 下齿辊 2. 上齿辊 3. 脱膜辊 4. 柔性带 5. 钉齿 6. 排杂装置 7. 残膜 8. 土壤

2.2.1 钉齿外形尺寸及排布

设定钉齿直径为 10 mm,长度 L_M 为 60 mm,材料选择耐磨、抗氧化的 60Si$_2$Mn,钉齿齿柱下方焊接厚度 L_N 为 7 mm 弧形片,铁片上有螺纹孔方便钉齿与柔性带进行螺栓连接。柔性带选用平带基准长度 L_d 为 3 150 mm,宽度为(30 ± 2) mm,厚度 L_h 为 25 mm。在齿辊上分布多个柔性带,柔性带间隔宽窄影响残膜捡拾与排杂效果。2023 年秋季通过田间测试柔性带间距与捡膜作业效果之间的关系,结果表明当

柔性带间隔小于 80 mm 时，回收残膜含杂率大幅提高，当柔性带间距大于 140 mm 时，随柔性带间距的增大残膜拾净率明显降低。结合试验结果和作物种植模式，综合考虑在近株区残膜与根茬粘结力，故设置柔性带间隙为 90 mm，在远株区残膜与根茬粘结力小于近株区，故设置柔性带间隙为 120 mm。

2.2.2　运动分析

对捡拾机构进行运动分析确定工作参数。在不考虑打滑情况下，钉齿入土后沿前进方向作纯滚动。钉齿入土绝对运动由整机匀速直线运动与钉齿相对下齿辊圆周运动合成，因此入土运动轨迹为余摆线。柔性带上相邻钉齿齿尖在某一时间段内轨迹如图 5（$\overset{\frown}{AB}$、$\overset{\frown}{CD}$、$\overset{\frown}{C'D'}$分别为钉齿 1、钉齿 2（无重叠区）、钉齿 2（有重叠区）齿尖运动轨迹。）所示。假设钉齿 1 齿尖运动轨迹从点 A 到点 B，钉齿 2 齿尖运动轨迹从点 C 到点 D，点 O_1、O_2、O_3、O_3'表示不同时刻下齿辊圆心。

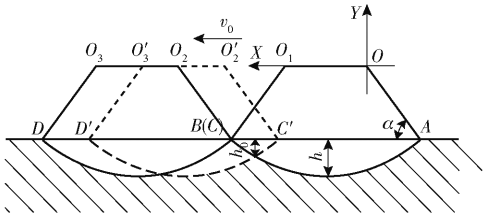

图 5　两相邻钉齿齿尖运动轨迹

Fig. 5　Trajectory of adjacent film pickup tooth tip

钉齿绝对轨迹方程等于整机前进运动位移和钉齿相对下齿辊圆周运动位移在横纵坐标上分量矢量和，以图 4 中 XOY 为坐标系，钉齿齿尖轨迹方程为

$$\begin{cases} x(t) = v_0 t + R\cos\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) \\ y(t) = R\sin\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) \\ R = r + L_h + L_M + L_N \end{cases} \tag{1}$$

式中　$x(t)$——钉齿齿尖水平方向运动位移，m

$y(t)$——钉齿齿尖竖直方向运动位移，m

R——下齿辊中心距钉齿齿尖距离，m

ω——齿辊角速度，rad/s

α——初始相位角，(°)

r——下齿辊半径，m

利用三角形方法，化简式(1)得

$$x(t) = v_0 t + \sqrt{R^2 - y^2(t)} \tag{2}$$

式(1)对时间 t 求导，得到钉齿齿尖绝对速度方程为

$$\begin{cases} v_x(t) = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_0 - \omega R\sin\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) \\ v_y(t) = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \omega R\cos\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中　$v_x(t)$——钉齿齿尖水平方向运动速度，m/s

$v_y(t)$——钉齿齿尖竖直方向运动速度，m/s

则钉齿齿尖运动合速度为

$$v_n(t) = \sqrt{v_0^2(t) + 2v_0(t)\omega R\sin\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) + \omega^2 R^2} \tag{4}$$

残膜连续捡拾临界条件为钉齿圆周运动水平分速度等于机具前进速度，结合式(3)即 $v_x(t) = 0$，可得

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_0(t)} = \frac{1}{\sin\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right)} = \frac{v_c(t)}{v_0(t)} \tag{5}$$

式中　λ——捡膜速比

$v_c(t)$——齿尖相对下齿辊中心线速度，m/s

由式(5)可得，$\omega t + \pi\alpha/180$ 取值范围为(α, π)，当 $\omega t + \pi\alpha/180$ 取 π 时，此时钉齿已经钩挑上残膜向上输送，此时钉齿仅有垂直升运残膜功能，不具备捡膜功能。因此，在分析钉齿有效捡膜条件时，只研究钉齿从入土到出土过程中的角度变换，即 $\omega t + \pi\alpha/180$ 取值范围为$(\pi\alpha/180, \pi - \pi\alpha/180)$，因此，$\lambda$ 临界取值为 $1 \sim 1/\sin\alpha$。

为了降低漏捡可能，要求相邻钉齿在土壤中划过的面积需存在重叠区[28]，即同一时刻在土壤中的钉齿数不小于 2，以保证机具拾净率。由图 5 可知，当点 C、点 B 重合即两相邻钉齿齿间运动轨迹交点距地表的距离 $h_0 = 0$ 时，为不漏捡临界条件，此时相邻钉齿之间间距为以下齿辊为圆心，以齿根到圆心直线距离为半径，在$(\pi\alpha/180, \pi - \pi\alpha/180)$范围内划过弧长，满足

$$\begin{cases} t_{AB} = t_{CD} = \left(\pi - 2\dfrac{\pi}{180}\alpha\right)\Big/\omega \\ I_{\max} = (r + L_h)\left(\pi - 2\dfrac{\pi}{180}\alpha\right) \\ h_0 = R\cos\left(\omega t + \dfrac{\pi}{180}\alpha\right) - R\cos\dfrac{\pi}{180}\alpha \end{cases} \tag{6}$$

式中　t_{AB}——钉齿 1 从入土到出土所用时间，s

t_{CD}——钉齿 2 从入土到出土所用时间，s

$I_{\max}$——两相邻钉齿间隔最大值，mm

齿尖入土深度 h 计算式为

$$h = R - R\sin\frac{\pi}{180}\alpha \tag{7}$$

当齿尖线速度一定时，下齿辊半径越大，角速度越小，钉齿在土壤中钩挑残膜时间越久，因此为增加钉齿捡膜时间并保证捡拾机构入土运行平稳，初步设定下齿辊半径 r 为 125 mm。结合捡拾机构预留位置和整机配重设定上齿辊和脱膜辊半径为 75 mm。钉齿最大入土深度 h 为 60 mm，代入式(7)得初始相位

角需小于 46.34°。为保证有效入土深度留有一定裕量,取 α 为 45°。将 α 代入式(5)得 λ 为 1~1.4。根据前期团队研究,柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机适宜前进速度为 5~6 km/h,代入式(5),得连续捡膜齿尖线速度为 1.93~2.33 m/s。

将 r、L_h、α 代入式(6),计算得钉齿间距上限值 I_{max} 为 235 mm,因此实际钉齿间距 I 需小于 235 mm。但当钉齿间距 I 越小,h_0 越大,表示重合区域越多,捡膜充分程度越高,残膜也越容易破碎。为平衡捡膜充分程度和残膜破碎程度,取钉齿排布间距最大值的 60% 作为实际钉齿间距 I,其值为 141 mm,代入

$$z = \frac{L_d}{I} \tag{8}$$

计算得到每根柔性带上的钉齿数量 z 为 22.34,取整 23。

2.3 脱膜装置

脱膜装置主要分为机械结构脱膜装置和气力式脱膜装置,气力式脱膜装置功率消耗大,易发生堵塞,因此不适合表层残膜回收。机械结构脱膜装置分为毛刷式、脱模板式、伸缩杆齿式等,其中毛刷式和脱膜板式易发生缠绕,伸缩杆齿式可靠性较差。结合柔性钉齿式捡拾机构特点设计一款圆盘式脱膜装置。如图 6 所示,该装置主要由脱膜圆盘、中心辊、带轮等组成。

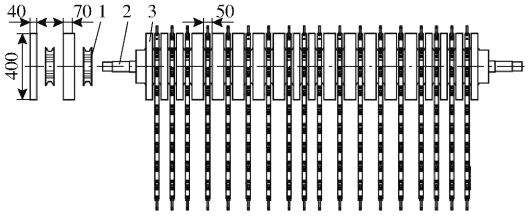

图 6 脱膜装置示意图

Fig. 6 Schematic of film stripping device

1. 带轮 2. 中心辊 3. 脱膜圆盘

2.3.1 脱膜装置结构

脱膜圆盘与带轮相互间隔,焊接在中心辊上。脱膜圆盘宽度影响脱膜效果,脱膜圆盘宽度越大,相邻间隙越小,残膜与脱膜圆盘充分接触,脱膜效果好;脱膜圆盘宽度越小,相邻间隙越大,越不容易脱干净。结合 2.2.1 节柔性带疏密排布设置窄行近株区脱膜圆盘宽度为 40 mm,宽行远株区脱膜圆盘宽度为 70 mm,相邻脱膜圆盘间距为 50 mm。选用带轮直径(200±2) mm,轮宽(50±2) mm,轮冠高度 0.6 mm,与柔性带配合传动入土捡膜,结构如图 6 所示。

2.3.2 脱膜运动轨迹

残膜大致附着在钉齿中部位置,如图 7 所示,在接近点 Q 过程中,脱膜圆盘逐渐接触残膜并以 ω' 方向旋转,残膜受到脱膜圆盘支撑力和两侧残膜横拉力,残膜发生形变。当横拉力产生的内应力在竖直方向分力和大于钉齿和残膜之间的摩擦力时,残膜由钉齿中部向齿尖移动,并逐渐脱下,脱膜轨迹和受力情况如图 7 所示。

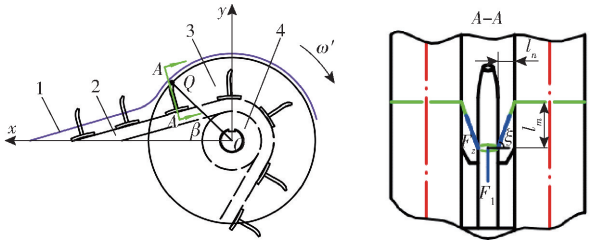

图 7 脱膜运动轨迹及受力分析图

Fig. 7 Trajectory and force analysis diagram during process of film stripping

1. 残膜 2. 柔性带 3. 脱膜圆盘 4. 带轮

分析可得保证残膜能被顺利脱下的临界条件为

$$\begin{cases} 2F_2\sin\xi = F_1 \\ \xi = \arctan\dfrac{l_n}{l_m} \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$F_1 = \mu_c F_N \tag{10}$$

式中 F_2——残膜所受横拉力,N

ξ——残膜所受横拉力与水平方向夹角,(°)

F_1——钉齿与残膜之间摩擦力,N

l_m——钉齿中部距脱膜圆盘外缘距离,mm

l_n——钉齿与脱膜圆盘之间空隙,mm

μ_c——残膜与钉齿之间摩擦因数,取 0.4

F_N——钉齿外表面一圈对残膜的支持力,N

F_N 方向由圆周指向圆外,其反向延长线交于圆心,大小与残膜抵御变形弹力相等。

根据前期对覆膜时间为 180 d 厚度 0.01 mm 残膜力学性能试验,横向拉伸力为 1~1.4 N,代入式(10)得 F_1 为 0.4~0.56 N。

l_n = 1 mm,l_m 取 0~3 mm,将 l_n、l_m 代入式(9)得 ξ 为 18.44°~90°,当 ξ 取 18.44°,F_1 取 0.56 N 时,F_2 达到最大值,为 0.88 N,小于残膜弹力 1~1.4 N,因此残膜能被顺利脱下并且不会被拉断。

2.3.3 脱膜圆盘转速

脱膜圆盘以一定的间隔排布,主要起到支撑和运输残膜作用。脱膜圆盘半径直接影响残膜从钉齿上脱离的难易程度。半径越大,β 越大,残膜由直线运动向圆周运动过渡难度越大;半径越小,β 越小,脱膜有效行程越小。结合带轮直径和机架空间初步设定脱膜圆盘半径 R_1 为 200 mm。

当钉齿齿尖与脱膜圆盘外缘重合时,残膜在点 Q 脱离钉齿随脱膜圆盘向后传输,残膜向后传送所

需的离心力主要由脱膜圆盘提供的支撑力和两者之间摩擦力提供，其受力分析如图 8 所示。

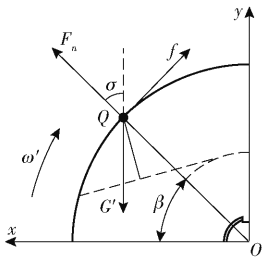

图 8　输膜受力分析图

Fig. 8　Force analysis diagram in process of conveying residual film

由达朗贝尔原理可得，此时残膜受到的主动力（重力）、约束力（支持力、摩擦力）、惯性力（离心力）在形式上组成平衡力系，满足

$$\begin{cases} \sum F_T = G'\cos\sigma - F_n + m\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = 0 \\ \sum F_R = G'\sin\sigma - f + \dfrac{m}{R_1}\left(\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2 = 0 \\ f = \mu_Q F_n \\ G' = mg \end{cases} \tag{11}$$

式中　F_T——切向合力，N

F_R——径向合力，N

F_n——脱膜圆盘外缘对残膜的支持力，N

f——残膜与脱膜圆盘之间的摩擦力，N

G'——残膜重力，N

m——残膜质量，kg

x——残膜绕脱膜圆盘外圆运动位移，m

σ——F_n 与竖直方向夹角，rad

μ_Q——残膜与脱膜圆盘之间摩擦因数

求解式(11)得

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{\mu_Q g R_1\cos\sigma - g R_1\sin\sigma}{\mu_Q}} \tag{12}$$

由式(12)可知，σ 越小，脱膜圆盘外缘线速度越大，最大值为 1.4 m/s。为实现残膜随脱膜圆盘外缘向后输送，脱膜圆盘外缘线速度需大于 1.4 m/s。根据齿尖回转半径和脱膜圆盘半径之比可得，齿尖线速度需大于 1.344 m/s。综合 2.2 节结果可得，钉齿齿尖线速度为 1.93 ~ 2.33 m/s，即脱膜辊临界转速为 96 ~ 116 r/min。

2.4　V 形打包装置

打包机构按打包形状分为圆捆和方捆，由于表层残膜连续性好，所以采用圆捆更适合[29]。V 形打包装置是柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机的核心部件，主要由上打包带、下打包带、液压缸、打包室侧板和传动装置等组成，结构如图 9 所示。进入打包室的残膜在 2 个打包带摩擦力作用下形成圆包，便于后续规范处理。

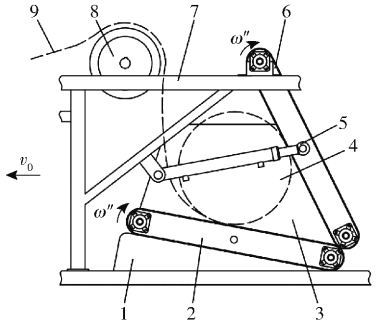

图 9　V 形打包装置结构示意图

Fig. 9　Schematic of V type strapping device structure

1. 下支撑板　2. 下打包带　3. 打包室侧板　4. 膜包　5. 液压缸　6. 上打包带　7. 机架　8. 脱膜装置　9. 残膜

2.4.1　打包室结构参数确定

打包室是使松散残膜形成紧实膜包的室腔。由于残膜具有吸附缠绕等物理特性，残膜进入打包室后，在打包带摩擦力作用下旋转形成包芯，后续进入残膜卷绕黏附在包芯，随着进入打包室的残膜越来越多，膜包直径越来越大，最终形成紧实的膜包。打包带对残膜的摩擦力影响包芯紧实程度[30-32]，摩擦力与打包带表面形态和对残膜压力有关，选择有横向凹凸条纹的打包带，增大摩擦因数，同时对残膜包芯进行受力分析来确定打包室结构参数，保证膜包成型率。

膜包在成型过程中，主要受到膜包自身重力 G、上下打包带压力 N_1、N_2、上下打包带的摩擦力 f_1、f_2 5 个力的作用，如图 10 所示，其受力满足

$$\begin{cases} N_2\sin\psi + N_1\sin\varphi + f_1\cos\varphi + f_2\cos\psi = 0 \\ N_2\cos\psi + N_1\cos\varphi + f_1\sin\varphi + f_2\sin\psi + G = 0 \\ f_1 = \mu_\kappa N_1 \\ f_2 = \mu_\kappa N_2 \\ \gamma = \psi - \varphi \end{cases} \tag{13}$$

式中　μ_κ——残膜与打包带之间的滑动摩擦因数

φ——下打包带方位角，取 0° ~ 90°

ψ——上打包带方位角，取 0° ~ 90°

γ——打包室夹角，取 0° ~ 90°

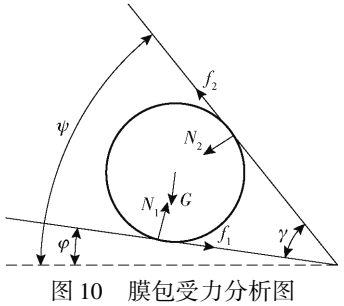

图 10　膜包受力分析图

Fig. 10　Force analysis diagram of residual film core

由式(13)可得

$$\begin{cases} N_1 = \dfrac{\mu_\kappa G\cos\psi + G\sin\psi}{(\mu_\kappa^2 - 1)\sin\gamma} \\ N_2 = -\dfrac{\mu_\kappa G\cos\varphi + G\sin\varphi}{(\mu_\kappa^2 - 1)\sin\gamma} \end{cases} \tag{14}$$

残膜包芯通过转动不断黏附新进入打包室的残膜,利用转动力矩度量膜包的转动效应,膜包受到的转矩 M 为

$$M = f_1 r' + f_2 r' \tag{15}$$

式中 r'——残膜包芯至打包带的距离,m

将式(14)代入式(15)得

$$M = k_1 \frac{r' G\mu_\kappa}{\mu_\kappa^2 - 1} + k_2 \frac{r' G}{\mu_\kappa^2 - 1} \tag{16}$$

其中 $k_1 = \dfrac{\cos(\varphi+\gamma) - \cos\varphi}{\sin\gamma}$ $k_2 = \dfrac{\sin(\varphi+\gamma) - \sin\varphi}{\sin\gamma}$

当 M 越大时,残膜在打包室转动越容易形成膜芯。由式(16)可知,残膜在打包室受到的转矩与打包带方位角、打包室夹角及打包带表面形态有关。结合新疆铺设地膜宽度和机具长度设定打包带长度为 2.1 m,宽度为 1 m,膜包直径 0.5 m,圆膜包是 2 个打包带形成的三角形内切圆,利用绘图法得两打包带之间夹角为 43.14°。残膜紧实度与打包带对残膜包压力有关,由式(14)可知,打包带对残膜的压力随打包室夹角减小而增大,因此为适当增大膜包紧实度,取打包室夹角为 43°。由式(16)中 k_1、k_2 函数图可知,当 γ =43°时,k_1 在[0,π/2]区间内随 φ 的增大先减小后增大,最大值对应的 φ 为 0°;k_2 在[0,π/2]区间内随 φ 的增大而减小,最大值对应的 φ 为 0°,综上,取下打包带方位角 φ 为 0°,打包室夹角 γ 为 43°,上打包带方位角 ψ 为 43°。

2.4.2 打包带转速确定

为增大膜包密度,卷膜过程中,需要残膜有一定张力,当打包带线速度大于机具前进速度时,残膜从脱膜装置落下后,打包带对其施加滑动摩擦力,残膜发生弹性变形,能紧紧黏附在残膜包芯上。当打包带线速度过大时,打包带施加的摩擦力大于残膜的断裂伸长率,残膜被撕碎不容易黏附在包芯上,可能随膜包转动被甩出打包室,造成丢膜。根据前期拉伸试验发现,在弹性变形范围内残膜的断裂伸长率在 20% 以内。综上,在打包进程中,膜包上残膜伸长率 ε 应在 20% 以内,伸长率计算式为

$$\varepsilon = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \tag{17}$$

式中 X——相同时间内卷膜长度,mm

X_0——相同时间内捡膜长度,mm

膜卷芯轴做圆周运动,残膜断裂伸长率随时间变化,即

$$\begin{cases} \varepsilon = \dfrac{18(\omega''(t)r - v_0(t))}{5v_0(t)} = \dfrac{18}{5}\left(\dfrac{\omega''(t)r}{v_0(t)} - 1\right) \\ v_s(t) = \omega''(t)r(t) \end{cases} \tag{18}$$

式中 ω''——卷膜芯轴角速度,rad/s

v_s——打包带线速度,m/s

柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机作业速度为 5~6 km/h,代入式(18)得打包带线速度为 1.38~2.00 m/s。

3 捡膜过程仿真

机具作业时,柔性钉齿入土时对残膜作用力在很大程度上影响机具拾净率。作用力随时间快速变化,在实际田间试验过程中难以观测并描述残膜的状态变化。SPH 是一种无网格方法,适用于研究物料在高加载速率下切削和断裂问题[33-34]。采用 ANSYS-DYNA 和 SPH 耦合的方法,通过求解工作部件–土壤–残膜的有限元复合模型,获得钉齿入土捡膜过程中残膜应力情况,验证钉齿结构参数和工作参数设计合理性。

3.1 模型建立

模拟计算模型求解时间和计算精度与网格划分尺寸有关,网格划分尺寸愈小,仿真计算精度越高,求解时间愈长。由于起膜装置已疏松残膜表层土壤且土壤量较少,为有效模拟柔性钉齿捡膜过程兼顾计算效率和模拟精度,模型仅建立一定区域的膜土混合物和单个钉齿,假设土壤残膜两者充分结合,残膜自由展平位于土壤表面并相对土壤静止,在残膜与底层土壤间添加摩擦接触。模拟时土壤、钉齿、残膜三者间添加接触关系,取土壤 SPH 粒子尺寸 5 mm,钉齿和残膜划分为 5 mm 有限元网格,残膜厚度 0.01 mm。当前进速度 6 km/h、齿尖线速度 2.33 m/s 时,使用(*DEFINE_CURVE)关键字定义钉齿前进方向和旋转角速度,添加钉齿沿 X 轴方向速度为 1 666.7 mm/s,为保证简化后钉齿齿尖线速度与分析结果一致,经计算设置钉齿绕 Z 轴方向上刚体旋转角速度为 19.4 rad/s,仿真模型如图 11 所示。

残膜采用弹塑性本构模型,用以描述外部载荷作用下残膜柔软变形和损伤情况。假设钉齿不发生变形,将钉齿设置成刚体,钉齿材料选用(*MAT_RIGID)模型。土壤、残膜及钉齿土壤主要材料参数按参照文献[35-37]选取,如表 2 所示。

3.2 捡膜仿真结果及分析

通过后处理软件得到残膜每段时刻应力分布,

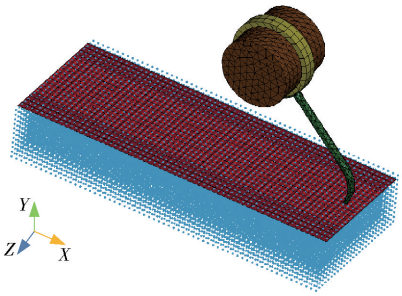

图 11　模拟作业仿真图

Fig. 11　Simulation diagram

表 2　仿真材料参数

Tab. 2　Simulation material parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	泊松比
土壤	950	$7.271\,17\times10^{5}$	$2.611\,9\times10^{5}$	0.34
残膜	1 450	$9.861\,1\times10^{6}$	$2.572\,5\times10^{6}$	0.38
钉齿	7 850	$1.666\,7\times10^{11}$	$7.692\,3\times10^{10}$	0.30

如图 12 所示。由图 12 可得，钉齿齿尖最先与残膜接触，残膜受到齿尖作用力逐步变形，当作用力超过残膜穿刺强度时，残膜被钉齿扎穿，如图 12a 所示；随着接触时间增加，离钉齿较近的残膜包裹在钉齿周围克服与土壤粘结力，逐步与土壤分离，如图 12b 所示；当钉齿由初始相位角划过竖直 π/2 位置后，钉齿对残膜有向上钩力，此时，残膜与土壤分离效果更明显，离钉齿较远的残膜也开始与土壤分离，钉齿后方划过区域的残膜附着在钉齿上随其运动，如图 12c 所示。在扎穿残膜后，如果钉齿对残膜作用力过大，残膜还未受到钉齿向上钩挑力时就严重撕裂，容易漏捡，拾净率降低。依据材料力学第四强度准则(Von Mises 屈服准则)，在材料任意一点，单位体积里各向应力的变化会引起材料畸变能的改变，当达到单向拉伸材料屈服的单位体积畸变能时，材料就会屈服。因此，以捡膜过程中残膜等效应力(Von-mises stress)的峰值(以下简称峰值应力)作为预测残膜损伤(屈服)依据，从而对捡膜过程有效性进行判定。

每段时刻残膜峰值应力二维曲线如图 13 所示。从钉齿与残膜接触开始，残膜峰值应力快速增加，在 3 ms 时出现小峰值，推断 3 ms 等效峰值应力突出与钉齿对残膜作用力达到残膜最大穿刺强度，残膜被扎穿有关。3 ~ 18 ms 残膜峰值应力先快速减小，随后在 0.1 ~ 0.2 MPa 之间小范围波动。18 ~ 39 ms 残膜峰值应力先增大后趋于稳定，最后下降，整体峰值应力较大，出现这种情况的原因是在这段时间内钉齿相位角均靠近 π/2 位置，此时钉齿绝对线速度在水平方向上分量大，在一定范围内，拉伸速度越大，残膜应力越大[38]。39 ~ 60 ms 残膜峰值应力趋于稳定，在 0.1 ~ 0.2 MPa 之间小范围波动。捡膜过程中，残膜峰值应力变化与前文中的捡膜过程分析相互印证，该仿真结果与文献[37,39]相近。在捡膜过程中残膜受到的平均峰值应力为 0.213 3 MPa，前期残膜力学性能试验中，当季表层残膜抗拉强度为 3 ~ 5 MPa，说明在残膜捡拾过程中，残膜受到弹齿和土壤作用力不足以拉断残膜，保证了残膜连续性。

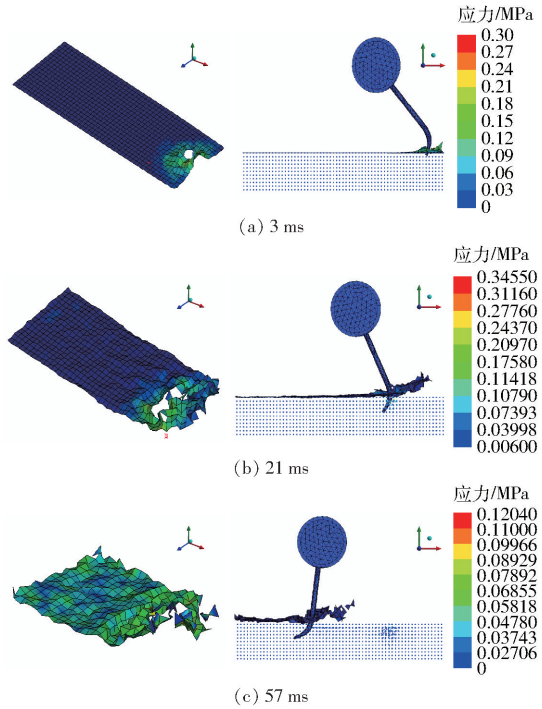

图 12　捡膜过程中残膜应力云图

Fig. 12　Residual film stress nephogram in process of picking up film

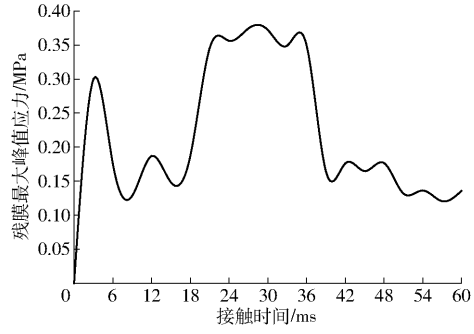

图 13　残膜峰值应力变化曲线

Fig. 13　Peak stress change of residual film

4　田间试验

4.1　测试地点及试验条件

在新疆阿拉尔市双城镇六团，选择青储玉米已收获，滴灌带已回收的农田进行残膜回收试验，种植模式为一膜四行，宽行 600 mm，窄行 400 mm，使用农用地膜幅宽为 2 050 mm，作物残茬不高于 150 mm，田间作物为玉米，秸秆直立、无倒伏，0 ~

100 mm 土壤平均含水率 15.2%,地膜厚度 0.01 mm,耐候期为 180 d。试验配套雷沃欧豹 M754 - D 型拖拉机,样机田间试验如图 14 所示。



(a) 试验中 (b) 作业前 (c) 作业后

图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiments

4.2 试验评价指标及结果

根据 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》、NY/T 1227—2019《残地膜回收机作业质量》,结合柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机的设计要求,选取 3 个持续作业面积不小于 5 hm^2 的测区。设置柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机作业速度为 6 km/h、齿尖线速度为 2.33 m/s、打包带线速度为 1.62 m/s。

(1)拾净率。采用 5 点法选取每个测区作业前 5 个测点和作业后 5 个测点(不重叠区域),平均值作为试验评价值。残膜拾净率计算式为

$$C = \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \times 100\% \tag{19}$$

式中 C——拾净率,%

W——作业后表层残膜质量,g

W_0——作业前表层残膜质量,g

(2)含杂率。回收混合物中秸秆根茬等杂质与回收物质量之比。每个测区随机选取 3 个膜包,含杂率平均值为试验评价值,含杂率计算式为

$$D = \left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right) \times 100\% \tag{20}$$

式中 D——回收混合物含杂率,%

Z——回收混合物中残膜质量,kg

Z_0——回收混和物总质量,kg

(3)膜包成型率。参考 GB/T 14290—2021《圆草捆打捆机》试验标准,将每个测区内膜包作为测试对象,用于计算膜包成型率。计算数据采用各测试区测试值平均值,膜包成型率计算式为

$$E = \left(1 - \frac{X}{X_0}\right) \times 100\% \tag{21}$$

式中 E——膜包成型率,%

X——成型包总数(定义残膜包紧实,抱起膜包不松散即为成型膜包)

X_0——打包总数

(4)膜包密度。膜包密度是评价打包效果的补充指标,膜包密度越大,在转移运输膜包过程中抗造性越好。实际膜包并非标准圆柱形,而是近似楔形,因此本试验分别取膜包直径最大处和最小膜包长度作为密度试验值。计算式为

$$\rho = \frac{4M'}{\pi D^2 l} \tag{22}$$

式中 ρ——膜包密度,kg/m^3

l——膜包长度,m

D——膜包直径,m

M'——膜包质量,kg

田间试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机在较长时间的连续作业下拾净率为 89.7% 和膜包成型率为 100%,同时回收膜包中杂质含量较低,为 28.6%,膜包密度为 90.2 kg/m^3,能够有效解决现有残膜回收机存在的技术问题。

表 3 田间验证试验结果

Tab. 3 Field test results

参数	拾净率/%	含杂率/%	膜包成型率/%	膜包密度/(kg·m^{-3})
数值	89.7	28.6	100	90.2

5 结论

(1)设计了一种柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机,阐述了其结构和工作原理,并对机具关键部件进行了结构和工作参数设计;通过柔性钉齿捡拾、输送、分离残膜及横向排杂的捡拾分离方法,有效降低回收混合物中的杂质并且保障了稳定的作业性能;利用 V 形打包装置将残膜滚搓成捆,解决了打包机构复杂的问题。

(2)通过运动学和动力学对关键部件作业参数进行分析,获得连续捡膜的齿尖线速度为 1.93 ~ 2.33 m/s,分析脱膜过程受力情况,得到有效脱膜转速为 96 ~ 116 r/min,分析计算了打包受力模型及运动参数,得到打包线速度为 1.38 ~ 2.00 m/s,为柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机作业参数提供了理论依据。

(3)基于 ANSYS - DYNA 和 SPH 耦合方法建立捡膜过程仿真模型,得到残膜应力变化,与捡膜过程运动分析相互印证,对比了残膜平均峰值应力与残膜抗拉强度,结果表明残膜在捡拾过程中不会被拉断残膜,验证了捡拾机构有效性和参数设计合理性。样机田间试验结果表明,机具平均拾净率 89.7%,平均含杂率 28.6%,膜包成型率 100%,平均膜包密度 90.2 kg/m^3,机具作业性能表现稳定,满足国家与行业标准性能要求。

参 考 文 献

[1] 周昌明. 地膜覆盖及种植方式对土壤水氮利用及夏玉米生长、产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
ZHOU Changming. Effect of different environmental films mulching and cropping patterns on soil water and nitrogen utilization and summer maize growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[2] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269 - 272.
YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269 - 272 . (in Chinese)

[3] 尹少媛, 赵宝平, 米俊珍, 等. 内蒙古农田耕层土壤地膜残留现状及发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1985 - 1992.
YIN Shaoyuan, ZHAO Baoping, MI Junzhen, et al. Current scenario and future trends of plastic film residue in farmland topsoil in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(9): 1985 - 1992. (in Chinese)

[4] 孙晨, 单娜娜, 杨志莹, 等. 新疆农田地膜残留量影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1627 - 1634.
SUN Chen, SHAN Nana, YANG Zhiying, et al. Analysis of inluencing factors of farmland mulch film residue in Xinjiang[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(5): 1627 - 1634. (in Chinese)

[5] 胡琦,李仙岳,史海滨,等. 残膜污染对滴灌玉米土壤水分和根冠生长的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5944 - 5953.
HU Qi, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film pollution on soil water content and root-shoot growth of maize under drip irrigation condition[J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5944 - 5953. (in Chinese)

[6] 周巧林, 焦加国, 张慧娟, 等. 微塑料对农田土壤碳转化影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2023, 60(10): 234 - 244.
ZHOU Qiaolin, JIAO Jiaguo, ZHANG Huijuan, et al. Research progress on the effects of microplastics on farmland soil carbon conversion[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023, 60(10): 234 - 244. (in Chinese)

[7] 冯裕栋, 杨杰, 涂晨, 等. 土壤中微/纳塑料的生物健康效应和食物链传递风险[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 661 - 674.
FENG Yudong, YANG Jie, TU Chen, et al. Biological health effects and food-chain transfer risks of micro/nano plastics in soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(5): 661 - 674. (in Chinese)

[8] 张丹, 刘宏斌, 马忠明, 等. 残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 310 - 319.
ZHANG Dan, LIU Hongbin, MA Zhongming, et al. Effects of residual plastic film on soil nutrient content and microbial characteristics in the farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 310 - 319. (in Chinese)

[9] 刘子涵, 才璐, 赵小丽, 等. 聚乙烯残膜破碎过程对土壤水分入渗的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5768 - 5774.
LIU Zihan, CAI Lu, ZHAO Xiaoli, et al. Effect of decomposition of polyethylene residue film on soil water infiltration[J]. China Environmental Science, 2022,42(12): 5768 - 5774. (in Chinese)

[10] 于永刚, 孙池涛, 程金杰, 等. 残留地膜对粉壤土水盐氮运移与再分布的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 170 - 178.
YU Yonggang, SUN Chitao, CHENG Jinjie, et, al. Effects of residual mulch film on transport and redistribution of water, salt and nitrogen in sit loan soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(2): 170 - 178. (in Chinese)

[11] 吴善华. 玉米苗期收膜机捡拾卸膜机构的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
WU Shanhua. Research and experiment of picking up and unloading membrane institutions of film machine on corn seedling [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[12] 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 Jiahan, CHEN Xuegeng, 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)

[13] 温浩军, 陈学庚, 陈浩, 等. 农田地膜回收机械应用现状与发展[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1271 - 1277.
WEN Haojun, CHEN Xuegeng, CHEN Hao, et al. Application status and development of farmland mulch recycling machinery [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(6): 1271 - 1277. (in Chinese)

[14] 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 等. 抛膜链齿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 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)

[15] 赵岩, 郑炫, 陈学庚, 等. CMJY - 1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 1 - 9.
ZHAO Yan, ZHENG Xuan, CHEN Xuegeng, et al. Design and test of CMJY - 1500 type plastic film residue collecting and

balling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 1 - 9. (in Chinese)
[16] 张学军, 黄爽, 史增录, 等. 残膜捡拾打包机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(4): 1220 - 1230.
ZHANG Xuejun, HUANG Shuang, SHI Zenglu, et al. Design and test of the remaining film picking and baling machine[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023,53(4): 1220 - 1230. (in Chinese)
[17] 周新星, 吴努, 严伟, 等. 耙齿式残膜回收机收膜机构参数优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 90 - 98.
ZHOU Xinxing, WU Nu, YAN Wei, et al. Parameters optimization and experiment for film receiving institutions of rake teeth type residual film recovery machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(5): 90 - 98. (in Chinese)
[18] 施丽莉, 胡志超, 顾峰玮, 等. 耙齿式垄作花生残膜回收机设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 8 - 15.
SHI Lili, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Design and parameter optimization on teeth residue plastic film collector of ridged peanut[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 8 - 15. (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] 于云海, 陈学庚, 温浩军. 秸秆粉碎与残膜集条联合作业机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 1 - 8.
YU Yunhai, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Development and experiment of straw chopping and plastic film strip-collection combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 1 - 8. (in Chinese)
[21] 谢建华, 吴仕花, 曹肆林, 等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 101 - 111.
XIE Jianhua, WU Shihua, CAO Silin, et al. Design and test of clamping-roller cotton stalk pulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):101 - 111. (in Chinese)
[22] 陈明江, 赵维松, 王振伟, 等. 齿盘式多行拔棉秆装置拔秆过程分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 109 - 120.
CHEN Mingjiang, ZHAO Weisong, WANG Zhenwei, et al. Operation process analysis and parameter optimization of dentate disc cotton-stalk uprooting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 109 - 120. (in Chinese)
[23] 张佳喜, 汪珽珏, 陈明江, 等. 齿盘式棉秆收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 1 - 8.
ZHANG Jiaxi, WANG Tingjue, CHEN Mingjiang, et al. Design of toothed disc cotton stalk harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 1 - 8. (in Chinese)
[24] 郭继杰, 温浩军, 侯海啸, 等. 推送式旋齿起膜机构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(4): 40 - 49.
GUO Jijie, WEN Haojun, JI Haixiao, et al. Design and experiment of push-type helical-tooth film-lifting mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 40 - 49. (in Chinese)
[25] 胡灿, 杜鏊, 王旭峰, 等. 旋耕刀齿式棉田耕层残膜回收机设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 173 - 183.
HU Can, DU Ao, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of rotary tillage knife tooth type residual film recovery machine in the plough layer of cotton field[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 173 - 183. (in Chinese)
[26] 王昭宇, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 80 - 90.
WANG Zhaoyu, CHEN Xuegeng, YAN Linmin, et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 80 - 90. (in Chinese)
[27] 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)
[28] 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)
[29] 周金豹, 谢建华, 曹肆林, 等. 辊轴式残膜打包装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(1): 148 - 158.
ZHOU Jinbao, XIE Jianhua, CAO Silin, et al. Design and experiment of roller shaft type residual film packing device[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(1): 148 - 158. (in Chinese)
[30] 王征, 王吉奎, 唐永飞, 等. 带式残膜揉搓打包机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 11 - 18.
WANG Zheng, WANG Jikui, TANG Yongfei, et al. Design and test of the belt-type residual film rubbing and baling machine [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 11 - 18. (in Chinese)
[31] 王学农, 刘杰, 刘旋峰, 等. 无芯卷膜式残膜打包装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 28 - 35.
WANG Xuenong, LIU Jie, LIU Xuanfeng, et al. Design and test of a coreless-roll packing device for residual film[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 28 - 35. (in Chinese)
[32] 杨松梅, 陈学庚, 颜利民, 等. 残膜回收机带式卷膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 135 - 144.

YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on belt-type curl-up film device for residual plastic film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 135 - 144. (in Chinese)

[33] 高建民, 周鹏, 张兵, 等. 基于光滑粒子流体动力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 20 - 26.
GAO Jianmin, ZHOU Peng, ZHANG Bing, et al. Development and test of high speed soil-cutting simulation system based in smooth particle hydrodynamics[J]. Transaction of the CASE, 2007, 23(8): 20 - 26. (in Chinese)

[34] 钟江, 蒋建东, 姜涛, 等. 基于光滑粒子流体动力学仿真的板结土壤深旋耕技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 63 - 69.
ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 63 - 69. (in Chinese)

[35] 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)

[36] 宋少龙, 汤智辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63 - 70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63 - 70. (in Chinese)

[37] 张学军, 郭磊, 史增录, 等. 基于 FEM - SPH 耦合的卷辊式耕层残膜回收部件结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 55 - 65.
ZHANG Xuejun, GUO Lei, SHI Zenglu, et al. Structural optimization and test of the roll type tillage residual film recovery components using FEM - SPH coupling[J]. Transaction of the CSAE, 2024, 40(10):55 - 65. (in Chinese)

[38] 荆双伟, 张富贵, 陈雪, 等. 不同速度下地膜单向拉伸撕裂特性[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 225 - 230.

[39] 朱自强, 赵洪志, 蔡沅冶, 等. 冰雹冲击下塑料薄膜的损伤分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 246 - 253.
ZHU Ziqiang, ZHAO Hongzhi, CAI Yuanye, et al. Damage analysis of plastic film under hail impact[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 246 - 253. (in Chinese)