doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.012

自走式残膜回收机钉齿带收膜系统设计与试验

刘旋峰[1,2]　张学军[1]　周　欣[2]　曲　衡[1]　荆耀洋[1]　蒋永新[2]　张海春[2]
(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所,乌鲁木齐 830091)

摘要:针对现有牵引式残膜回收机存在作业效率低、残膜回收率不足,以及收膜系统功能分散导致的膜杂分离效果差、田间复杂工况适应性弱等问题,设计了一种自走式残膜回收机,重点设计了集成“收膜—膜杂分离—输膜—脱膜”功能于一体的钉齿带收膜系统。结合新疆棉田的农艺要求与残膜抓持力学特性分析,确定了收膜钉齿的错位排列参数及主脱膜驱动辊的关键结构尺寸;基于 ADAMS 软件构建了收膜皮带-辊轴系统的动力学模型,分析了系统在 118 ~ 158 r/min 转速范围内的带节横向偏移与张紧力波动特性。仿真结果表明:在该转速区间内,带节横向偏移量在 4 mm 以内,张紧力波动幅度控制在 ±15% 范围内,验证了传动系统的动态稳定性。以机具前进速度、收膜地辊转速和皮带安装倾角为试验因素,采用 Box - Benhnken 试验设计方法开展田间试验,运用响应面法优化得到最优作业参数组合:机具前进速度 8 km/h、收膜地辊转速 138 r/min、皮带安装倾角 89°。验证试验结果表明,在该参数条件下残膜回收率达到 91.17%。本研究为自走式残膜回收装备收膜系统的优化设计及规模化高效作业提供了理论依据与技术支撑。

关键词:自走式残膜回收机;钉齿带式收膜机构;动力学仿真;参数优化;田间试验
中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0133-11　　**OSID**:

Design and Test of Self-propelled Residual Film Recycling Machine with Spike-tooth Belt Film Collection System

LIU Xuanfeng[1,2]　ZHANG Xuejun[1]　ZHOU Xin[2]　QU Heng[1]　JING Yaoyang[1]　JIANG Yongxin[2]　ZHANG Haichun[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Agricultural Equipment Research Institute*, *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*, *Urumqi* 830091, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low operating efficiency and insufficient residual film recovery rate of the existing traction residual film recycler, as well as the poor separation effect of membrane impurities due to the dispersed function of the film collecting system and the weak adaptability to the complex working conditions in the field, a self-propelled residual film recycler was developed, focusing on the design of the integrated film collecting-membrane impurity separation. A self-propelled film recycling machine was developed, focusing on the design of the integrated “film collection - film separation - film transport - film removal” function in one of the spiked belt film collection system. Combined with the agronomic requirements of Xinjiang cotton fields and the analysis of mechanical characteristics of residual film gripping, the staggered arrangement parameters of the film harvesting spike teeth and the key structural dimensions of the main stripping drive roller were determined; the dynamic model of the film-collecting belt system was constructed based on the ADAMS software, and the transverse deviation of the belt joints and fluctuating characteristics of the tension were analyzed within the range of the system's rotation speed of 118 ~ 158 r/min. The simulation results showed that in this speed range, the lateral offset of the belt segments was no more than 4 mm, and the fluctuation of tension force was controlled

收稿日期:2026 - 01 - 07　修回日期:2026 - 01 - 11
基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022 - 3)、新疆农业科学院农业科技创新稳定支持专项课题(xinkywdzc - 2024001 - 05)、农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金项目(XBLZ - 20242)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS - 03)、新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目和自治区公益性项目(KY2022018)
作者简介:刘旋峰(1981—),男,副研究员,博士生,主要从事农业智能装备工程技术研究,E-mail:52695694@qq.com
通信作者:张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:tuec@163.com

within ±15%, which verified the dynamic stability of the transmission system. Taking the forward speed of the implement, the speed of the film-retracting roller and the inclination angle of the belt as the test factors, the Box - Benhnken experimental design method was used to carry out the field test, and the optimal combination of operating parameters was obtained by using the response surface method of optimization: the forward speed was 8 km/h, the speed of the film-retracting roller was 138 r/min, and the inclination angle of the belt was 89°. The results of the validation test showed that the residual film recovery rate reached 91.17% under the parameter conditions. The research result can provide a theoretical basis and technical support for the optimal design of the film collection system of self-propelled residual film recycling equipment and the efficient operation on a large scale.

Key words: self-propelled residual film recycling machine; spike-tooth belt film collecting mechanism; dynamic simulation; parameter optimization; field test

0 引言

地膜覆盖技术在我国广泛应用,提升农业经济效益的同时造成了白色污染,残留在土壤中的地膜影响农作物生长[1-4]。机械化回收残膜是治理残膜污染的重要途径,目前我国科研人员已经研制了多种残膜回收机具,但捡拾效率仍有待提高[5-7]。由于田间作业环境复杂,拖拉机多次进出棉田造成地表不平整,捡拾装置在回收残膜过程中容易漏捡,影响残膜回收作业效率。

文献[8]针对耕层残膜回收难题,设计了链式残膜回收机及其逆向膜土分离装置,通过优化角速度与分离角度,有效提升了膜土分离能力。文献[9]针对起膜与收膜分步作业导致的回收率低、含杂率高问题,提出了铲齿组合式同步作业策略,显著提高了作业协同性。文献[10]聚焦于弹齿式捡拾装置与地面接触不充分导致的漏膜问题,通过增设起膜部件和重置换膜弹齿排布,改善了残膜拾取效果,但其收膜弹齿对残膜完整性保护不足,易导致膜体破碎,且装置对秸秆覆盖量较大的地块适应性较差。文献[11]基于传统横向链式装置易撕膜、含杂率高的问题,设计了纵向布置的摩擦型钉齿链式捡拾装置,实现了低损伤整膜捡拾和有效膜杂分离,但其结构仍较复杂,制造和维护成本较高,且牵引阻力偏大,对拖拉机动力要求较高。

文献[12]设计了随动式钉齿-链板结构捡拾装置,通过优化钉齿运动轨迹与排列方式,解决了传统钉齿式机构残膜易撕裂、回收不连续的问题,然而,该装置对地膜强度要求较高,在应对破损严重的薄型地膜时回收效果显著下降,且清杂系统对秸秆残留较多地块的适应性仍显不足。文献[13]研发了伸缩钉齿式捡拾装置,通过凸轮控制系统实现钉齿的伸缩运动,有效降低了收膜过程中的土壤带入量。文献[14]研制出秸秆还田与残膜回收联合作业机,实现了秸秆粉碎与残膜回收的一体化作业,显著提高了作业效率。文献[15]设计了夹指链式收膜装置,通过切膜圆盘与夹指链的配合实现了带状残膜的有序回收,作业含杂率低且无缠绕现象,但该装置对地膜完整性要求较高,当地膜破损率较高时回收效果下降明显,且作业速度受限,难以适应大规模高效作业要求。国内研究在捡拾装置结构创新与作业参数优化方面已取得显著进展,但仍普遍存在残膜回收率与含杂率之间的矛盾、装置对复杂田间工况适应性差、能耗较高以及关键部件可靠性不足等问题。

为了解决收后地表残膜回收问题,根据目前研究的残膜回收机[16-22]的特点,结合地膜回收农艺要求,本文研发自走式残膜回收机,重点设计钉齿带收膜系统,实现“收膜—膜杂分离—输膜—脱膜”一体化作业。研究通过理论分析确定钉齿排布与脱膜机构关键参数,基于 ADAMS 构建收膜皮带-辊轴系统动力学模型验证传动稳定性,结合田间试验优化作业参数,旨在突破牵引式机型的效率瓶颈,为自走式残膜回收装备的产业化应用提供理论与技术支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

自走式齿带残膜回收机主要由自走式底盘、秸秆粉碎装置、秸秆输送部件、秸秆打捆装置、钉齿带收膜系统、气吹式辅助脱膜装置、残膜打包装置等组成,整机结构如图 1 所示。

根据 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》国家标准,针对新疆棉花种植模式,自走式齿带残膜回收机的主要技术参数如表 1 所示。

1.2 钉齿带收膜系统总体结构

钉齿带收膜系统是残膜回收机的重要组成部分,基于上述技术参数确定了该系统的设计方案,该装置位于秸秆粉碎装置与残膜打包装置中间,主要由收膜钉齿、收膜皮带、主脱膜驱动辊、除杂张紧辊、机架、收膜地辊、后置张紧辊和限位装置等组成。其

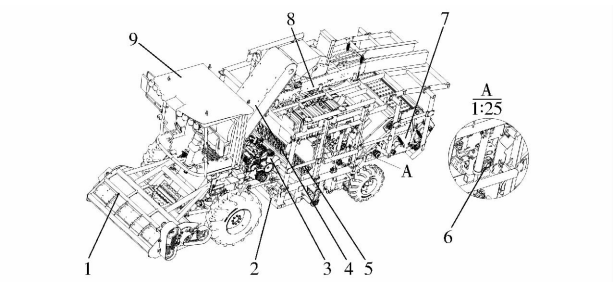


图 1　自走式钉齿带残膜回收机整体结构图

Fig. 1　General structure diagram of self-propelled spike-tooth belt residual film recycling machine

1. 秸秆粉碎装置　2. 自走式底盘　3. 动力驱动系统　4. 秸秆输送部件　5. 钉齿带收膜系统　6. 风吹式辅助脱膜装置　7. 残膜打包装置　8. 秸秆打捆装置　9. 驾驶控制室

表 1　齿带残膜回收机残膜拾捡装置主要参数

Tab. 1　Main parameters of pick-up device of spiked-tooth belt-type residual film recycling machine

参数	数值/型式
动力驱动型式	自走式
捡拾装置外形尺寸/(mm × mm × mm)	2 560 × 1 350 × 1 600
捡拾装置作业幅宽/mm	2 100
捡拾装置作业深度/mm	35
整机配套动力输出功率/kW	≥40
机具前进速度/(km·h^{-1})	5 ~ 9
残膜回收率/%	≥85

工作主要完成收膜、膜杂分离、输膜、脱膜 4 个阶段，结构如图 2 所示。

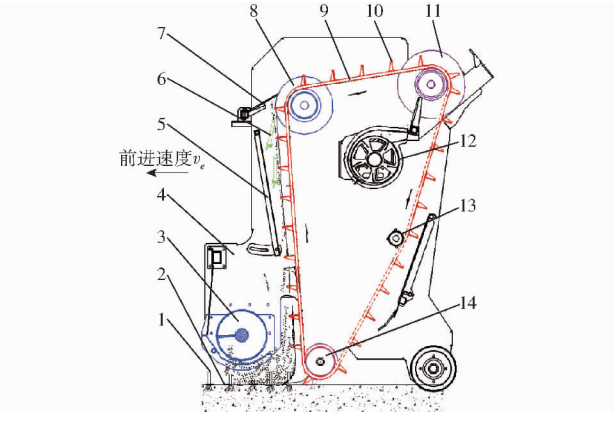


图 2　钉齿带收膜装置结构图

Fig. 2　Structure diagram of spike-tooth belt film collecting device

1. 秸秆根茬　2. 地膜　3. 辅助排杂螺旋输送装置　4. 机架　5. 导流板　6. 杂质　7. 防缠绕疏杂齿　8. 除杂张紧辊　9. 收膜皮带　10. 收膜钉齿　11. 主脱膜驱动辊　12. 风吹式脱膜装置　13. 后置张紧辊　14. 收膜地辊

1.3　钉齿带收膜系统工作原理

自走式钉齿带式残膜回收机由自带发动机驱动液压泵组，为各工作部件提供动力，实现了秸秆粉碎回收与残膜捡拾打包的协同作业。该机具的多个关键动作由独立的液压执行元件分别驱动。作业时，前置的秸秆粉碎装置将秸秆粉碎后通过打捆装置压缩成型。

对于残膜回收作业，核心的钉齿带收膜系统则由专门的液压马达驱动主脱膜驱动辊，通过自带的传动系统带动钉齿带逆时针转动，收膜地辊可通过深度调节装置设定钉齿入土深度，入土的钉齿将地表残膜挑起，在多组钉齿的协同作用下，呈大片块状的地膜，随钉齿皮带向上运动至除杂张紧辊，此时捡拾起的各类杂质排除，残膜继续向后方行进，直至主脱膜驱动辊在风吹式脱膜装置的气流辅助以及高度差作用下，将残膜脱下。

脱下的残膜进入二次输送除杂装置，输送中利用振动实现进一步除杂后进入残膜打包装置。最终，残膜在液压系统控制的打包室内缠绕成卷后卸膜。

2　关键部件设计优化

2.1　钉齿带式拾捡装置布局与关键参数设计

钉齿带式拾捡装置由入土挑膜、膜杂分离、输送残膜及脱膜 4 个工作区段构成。挑膜钉齿皮带安装示意图如图 3 所示，其中 o_1 为收膜地辊，o_2 为除杂张紧辊，o_3 为主脱膜驱动辊，o_4 为后置张紧辊。

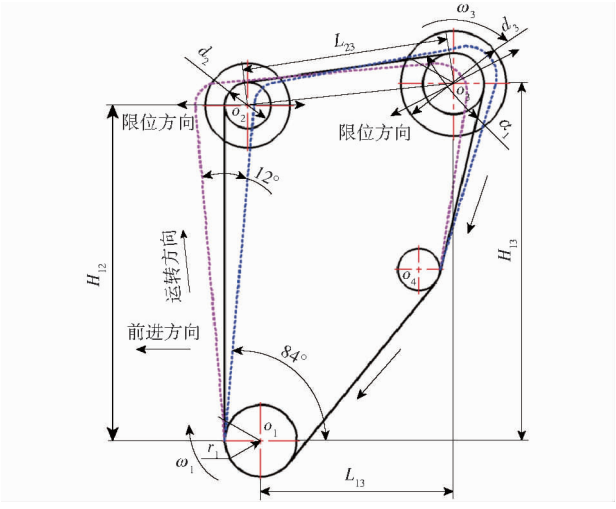


图 3　钉齿带式拾捡装置布局示意图

Fig. 3　Layout schematic of spike-tooth belt picking device

基于后抛式粉碎还田装置与残膜打包装置的空间布局，确定主脱膜驱动辊(o_3)与收膜地辊(o_1)的中心距为：横向 L_{13} = 650 mm，纵向 H_{13} = 1 215 mm。鉴于该中心距跨度较大，增设除杂张紧辊(o_2)与后置张紧辊(o_4)以优化皮带包角，从而抑制皮带振动、增强传动平稳性。

为提升膜杂分离效果，需尽可能延长膜杂分离区段(o_1o_2)的输送距离。当钉齿带垂直安装时，设定除杂张紧辊与收膜地辊的垂直间距 H_{12} =

920 mm,据此由几何关系计算式

$$L_{23}=\sqrt{(H_{13}-H_{12})^2+(L_{13}+r_1-d_2/2)^2} \quad (1)$$

式中 d_2——除杂辊内槽直径,mm

r_1——收膜地辊半径

计算得出其水平间距 $L_{23}=760$ mm。为确保可靠传动,主脱膜驱动辊上的皮带包角 α_1需大于 120°;适当减小该包角可缩短接触弧长,有助于减少摩擦损耗并延长皮带使用寿命。

钉齿带采用四边形布局,其安装倾角直接影响膜杂分离区段的残膜输送稳定性与分离效率。在总带长不变的前提下,膜杂分离区段可配置为前倾、垂直或后仰 3 种模式。倾角过大易导致残膜脱落,过小则削弱杂质的清除效果。经文献查阅与试验验证[23],最佳安装倾角范围为 84°~96°。主脱膜驱动辊、除杂张紧辊及收膜地辊均设有限位机构,通过双螺母与机架滑槽固定,并利用滑槽拉耳处的螺栓实现皮带倾角的精确调节。

针对新疆棉田窄行密植的农艺特点,为避开棉花根茬并延长钉齿带使用寿命,设定捡拾装置有效工作宽度为 2 100 mm(对应地膜总宽 2 050 mm,两侧掩埋各 100 mm)。结合农艺要求与避茬需要,将钉齿带宽间距 x_1 设为 101 mm,窄间距 x_2 设为 85 mm,整机共布置 24 根收膜皮带。皮带根数计算公式为

$$z=\frac{P_d}{P_0K_\alpha K_L} \quad (2)$$

其中

$$P_d=PK_A \quad (3)$$

式中 z——皮带数量,根

P_d——设计功率,kW

P——传递功率,kW

P_0——单根皮带在特定条件下的额定功率,取 4.0 kW[24]

K_A——工况系数,取 1.3~1.5

K_α——包角修正系数,取 0.85

K_L——带长修正系数,取 1.15

经计算,该配置下传递功率 P 达 61.1 kW,满足捡拾作业动力需求。为进一步提升收膜稳定性,采用错位配齿法对钉齿进行优化排列[25],以增大钉齿-残膜接触面积,实现多齿协同作业。钉齿排列示意图如图 4 所示。

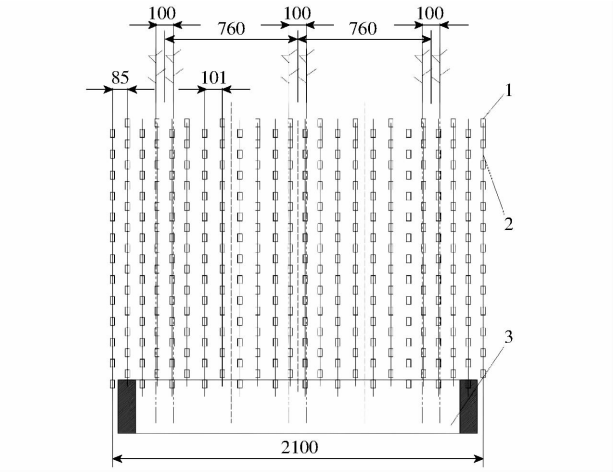


图 4 钉齿带田间作业排列示意图

Fig. 4 Field operation arrangement schematic of spike-tooth belt

1. 钉齿 2. 收膜皮带 3. 地膜铺放

2.2 基于力学模型的脱膜机构参数确定

残膜与收膜钉齿的相互作用关系如图 5 所示。残膜脱离钉齿需满足两个几何与力学条件:钉齿齿端与主脱膜驱动辊间存在高度差 Δh,主脱膜驱动辊对残膜的作用力需克服钉齿对残膜的摩擦力。其力学平衡关系满足

$$\begin{cases} d_3/2<R_d \\ 2F_T\cos\gamma\geqslant F_f+G_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 d_3——主脱膜驱动辊直径,mm

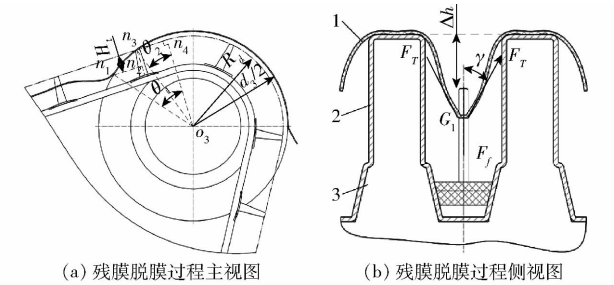
R_d——收膜钉齿距主脱膜驱动辊槽轮轴心间距,mm

F_T——残膜所受拉力,N

F_f——收膜钉齿摩擦力,N

γ——残膜受到脱膜辊拉力与收膜钉齿方向夹角,(°)

G_1——残膜受到的重力,N



(a) 残膜脱膜过程主视图 (b) 残膜脱膜过程侧视图

图 5 地膜与收膜钉齿脱膜过程分析

Fig. 5 Analysis of separation process between agricultural mulch film and film-collecting spike-teeth

1. 地膜 2. 主脱膜驱动辊 3. 钉齿

残膜自齿身 n_1 移至齿端 n_3 完成脱膜,如图 5b 所示,脱膜时残膜所受重力 G_1 在钉齿法线方向的分力大小为 $G_1\cos\gamma$。在最高点处,角度 γ 最小,因此该分力达到最大值,薄膜与钉齿间的压紧力最大,导致脱膜需要克服的潜在粘附力也最大。由此可见,最高点是整个过程中脱膜最困难的位置。其沿弧线轨迹长度 l_5 与钉齿直线轨迹长度 l_4 存在几何关系,公式为

$$\begin{cases} l_4 = v_1 t_3 \\ l_5 = \dfrac{d_3}{2}(\theta_1 - \theta_2)\dfrac{\pi}{180} \end{cases} \tag{5}$$

其中 $$v_1 t_3 = \omega_o R_d t_3 = R_d(\theta_1 - \theta_2)\frac{\pi}{180} \tag{6}$$

式中 θ_1——收膜钉齿从 n_1 运动至 n_4 对应的圆心角，(°)

θ_2——收膜钉齿从 n_3 运动至 n_4 对应的圆心角，(°)

v_1——钉齿齿端线速度，m/s

ω_o——主脱膜驱动辊角速度，rad/s

t_3——收膜钉齿从 n_1 运动至 n_2 所需时间，s

则残膜变形量 Δl 为

$$\Delta l = l_5 - l_4 = \frac{\pi}{180}(\theta_1 - \theta_2)\left(\frac{d_3}{2} - R_d\right) \tag{7}$$

根据图 5 几何关系分析可知

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\dfrac{2(R_d - H_t)}{d_3} \\ \theta_2 = \arccos\dfrac{2R_d}{d_3} \\ \Delta h = \dfrac{d_3}{2} - R_d \end{cases} \tag{8}$$

式中 Δh——主脱膜驱动辊与收膜钉齿的高度差，mm

H_t——收膜钉齿齿端与齿身处残膜间距，mm

由此推导出残膜变形量 Δl 的表达式为

$$\Delta l = \left(\arccos\frac{R_d - H_t}{\Delta h + R_d} - \arccos\frac{R_d}{\Delta h + R_d}\right)\frac{\pi}{180}\Delta h \tag{9}$$

由式(9)分析表明，随着齿端与齿身残膜间距 H_t 减小，变形量 Δl 及残膜内应力均下降，脱膜拉力竖直分量亦减小。对脱膜瞬间进行受力分析，可得临界条件式

$$F_T \geqslant \frac{F_f + G_1}{2\cos\gamma} \tag{10}$$

其中 $$\begin{cases} \cos\gamma = \dfrac{H_t + \Delta h}{\sqrt{(H_t + \Delta h)^2 + \left(\dfrac{1}{2}b_1\right)^2}} \\ F_f = \mu(F_c + G_1) \end{cases} \tag{11}$$

式中 b_1——收膜皮带厚度，mm

F_c——残膜弹力，N

μ——残膜与收膜钉齿间摩擦因数

联立后得到关键方程

$$F_T \geqslant \frac{\mu(F_c + G) + G}{2}\frac{\sqrt{(H_t + \Delta h)^2 + \left(\dfrac{1}{2}b_1\right)^2}}{H_t + \Delta h} \tag{12}$$

脱膜效果关键取决于高度差 Δh。计算表明，增大 Δh 可降低所需拉力 F_1。当 H_t 处于 10 ~ 25 mm 区间，在给定参数($\mu = 0.6$，$R_d = 200$ mm)下，$\Delta h = 8$ mm 时测得 $\Delta l = 2.04$ mm，拉伸试验证实此工况下残膜应力未超限，满足脱膜要求。为避免主脱膜驱动辊直径 d_3 过大从而加重主脱膜驱动辊负荷，最终优化确定 $\Delta h = 10$ mm，并据此设计主脱膜驱动辊外径 $d_3 = 20$ mm。

2.3　捡拾装置收膜过程分析

2.3.1　捡拾装置运动学分析与转速参数确定

主脱膜驱动辊转速是决定捡拾装置作业性能的关键参数。转速过高将增大收膜钉齿线速度，易导致残膜撕裂并引发机具振动；转速过低则会造成残膜捡拾不净与土壤堆积。为此，需通过运动学分析确定其最佳工作范围。

残膜回收作业时，机具匀速前进，秸秆粉碎装置完成粉碎过程，收膜地辊匀速旋转，使收膜钉齿在土壤中的运动轨迹呈螺旋线(图 6)。以收膜地辊圆心 o_1 为原点建立坐标系(x 轴正向为前进方向，y 轴垂直向上)，当钉齿运动至出土位置时，与 y 轴夹角为 α。基于速度矢量叠加原理，钉齿的绝对速度 v_a 为机具前进速度 v_0 与钉齿线速度 v_t 的矢量和，即

$$\boldsymbol{v}_a = \boldsymbol{v}_0 + \boldsymbol{v}_t \tag{13}$$

其中 $$v_t = \omega_0 R_d$$

式中 ω_0——收膜地辊旋转角速度，rad/s

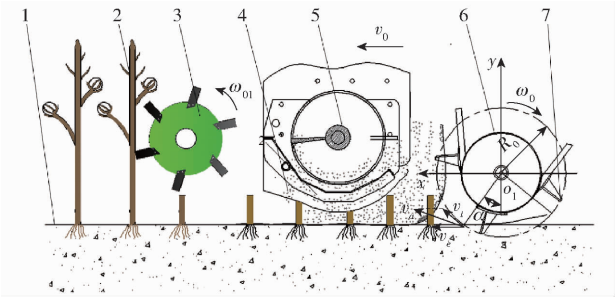


图 6　钉齿捡拾装置运动分析

Fig. 6　Kinematic analysis of spike-tooth picking device

1. 地膜　2. 秸秆　3. 秸秆粉碎刀辊　4. 杂质　5. 排杂装置　6. 收膜地辊　7. 收膜钉齿

根据收膜钉齿从入土到出土挑膜作业过程，得出收膜钉齿运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t + R_d\cos(\omega_0 t) \\ y = R_d\sin(\omega_0 t) \end{cases} \tag{14}$$

可得其速度方程与加速度方程

$$\begin{cases} v_x = v_0 - R_d\omega_0\sin(\omega_0 t) \\ v_y = R_d\omega_0\cos(\omega_0 t) \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} a_x = -\omega_0^2 R_d\cos(\omega_0 t) \\ a_y = -\omega_0^2 R_d\sin(\omega_0 t) \end{cases} \tag{16}$$

进而得到钉齿齿端的绝对速度 v_a 及其加速度 a

的表达式

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{v_0^2 - 2v_0 R_d \omega_0 \sin\omega_0 t + \omega_0^2 R_d^2} \\ a = \omega_0^2 R_d \end{cases} \tag{17}$$

分析式(17)表明,ω_0 是影响 v_a 和 a 的主要因素。当水平分速度 $v_x = 0$ 时,由式(17)可推导出此时钉齿的线速度表达式

$$\frac{v_0}{R_d \omega_0} = \sin(\omega_0 t) \tag{18}$$

此时收膜钉齿齿端的线速度为

$$v_a = R_d \omega_0 \tag{19}$$

定义参数 λ 为钉齿齿端绝对速度与机具前进速度的比值,该参数直接决定捡拾性能[26-28],公式为

$$\lambda = v_a / v_0 \tag{20}$$

若 $\lambda < 1$,钉齿水平分速度不足,即捡拾残膜长度大于输送残膜长度,易造成残膜脱落,导致捡拾不彻底;若 $\lambda > 1$,残膜捡拾长度小于输送残膜长度,则能对残膜产生适度拉伸,有利于清除膜面杂质并增强钉齿抓持力。为提高作业质量,λ 值应大于 1。由公式

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} \tag{21}$$

式中 n_0——收膜地辊转速,r/min

得出

$$n_0 > v_0 \frac{30}{\pi R_d} \tag{22}$$

为确保残膜在输送过程中保持张紧状态,输送装置线速度需大于机具前进速度,结合残膜延伸特性与作业效率要求,经式(22)计算,当机具前进速度 v_0 为 5 ~ 9 km/h 时,收膜地辊转速 n_0 应不低于 138 r/min,相应的主脱膜驱动辊转速需高于 118 r/min。

2.3.2 残膜抓持力学分析与转速范围确定

为确保收膜钉齿在挑膜作业中能稳定抓持残膜而不发生脱落,需对挑膜瞬间残膜的受力状态进行分析。如图 7 所示,残膜不发生脱落的关键力学条件为其所受离心力需小于向心方向的合力。根据受力平衡方程得

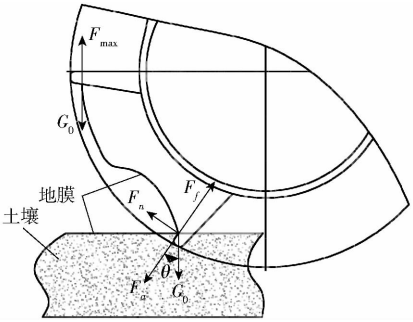


图 7 地膜受力分析图

Fig. 7 Residual membrane force analysis diagram

$$F_a < F_f - G_1 \cos\theta \tag{23}$$

其中

$$\begin{cases} F_a = mR_d \omega_0^2 \\ F_f = \mu F_n = \mu(mg\sin\theta + F_c) \end{cases} \tag{24}$$

式中 m——残膜和膜面杂质总质量,g

F_a——残膜受到的离心力,N

F_n——残膜受到钉齿的拉力,N

θ——收膜钉齿齿面与竖直方向的夹角,(°)

对式(24)整理得弹力

$$F_c > \frac{mR_d \dfrac{\pi n^2}{30} + mg\cos\theta}{\mu} - mg\sin\theta \tag{25}$$

由式(25)分析表明,收膜地辊转速 n_0 是影响残膜受力的主要因素。随着 n_0 增大,残膜所受弹力 F_c 相应增强,弹性变形程度增大,有利于提升疏膜与膜杂分离效果。

当钉齿带离开收膜地辊进入排杂区段时,残膜在垂直布置状态下所受拉力最大。为保障残膜在输送中不发生断裂,需满足其最大受力小于自身纵向拉断力,即

$$G_1 + F_c < F_n \tag{26}$$

参考国家标准及相关文献对残膜抗拉特性进行测量,其纵向拉断力平均值约为 2.1 N[29-30]。考虑到作业中杂质载荷约为 1.2 N,因此 F_c 需控制在 0.9 N 以下。在该拉力下,残膜弹性变形量为 17 mm,断裂标称应变 ε_{tb} 为 60%。根据残膜断裂标称应变 ε_{tb} 定义可知

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\omega_0 R_d t - v_0 t}{v_0 t} \times 100\% \leqslant 34\% \tag{27}$$

代入参数可得 $n_0 < 186$ r/min。综合挑膜稳定性与抗拉强度要求,最终确定收膜地辊转速范围为 138 ~ 186 r/min,对应主脱膜驱动辊输入转速 n_1 为 118 ~ 158 r/min,该范围可确保残膜被持续、稳定捡拾。

3 基于 ADAMS 的收膜皮带传动动力学特性研究

为评估钉齿带收膜装置的动态工作性能,本研究基于 ADAMS 软件建立了其传动系统动力学模型,重点分析了收膜皮带在不同转速下的横向偏移与张紧力波动特性,以验证其传动稳定性。

3.1 仿真模型建立与验证

考虑到收膜皮带的超弹非线性特性,采用离散化方法将其建模为 259 个刚性带节,各带节间通过具备三向平动与扭转刚度的衬套单元连接,以模拟

实际带体的拉压与弯扭特性(图 8)[31]。

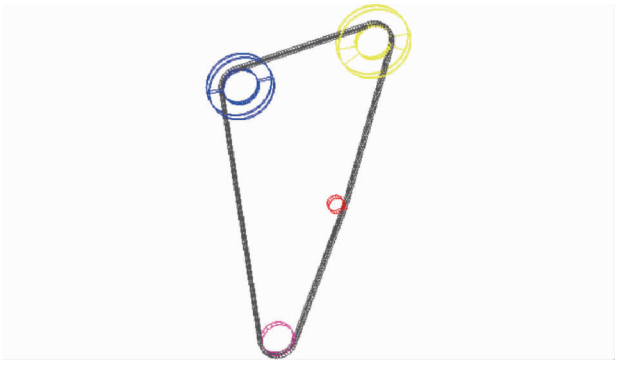


图 8　收膜皮带离散化结果

Fig. 8　Discretization of film-collecting belt

具体接触参数参照 ADAMS 推荐值(见表 2)。模型共设置 1 036 组接触对,以模拟收膜皮带与各辊轴(主脱膜驱动辊、张紧辊等)的相互作用。为准确模拟工作状态,通过一个可移动的连杆机构对收膜皮带施加初始预紧力(图 9)。该模型有效简化了材料非线性问题,在保证精度的同时显著提升了计算效率。

表 2　材料接触参数

Tab. 2　Material contact parameters

参数	铸铁	橡胶
刚度/(N·mm^{-1})	1×10^{5}	2×10^{3}
力指数	1.4	3
阻尼系数/(N·s·mm^{-1})	100	1
穿透深度/mm	0.01	0.01

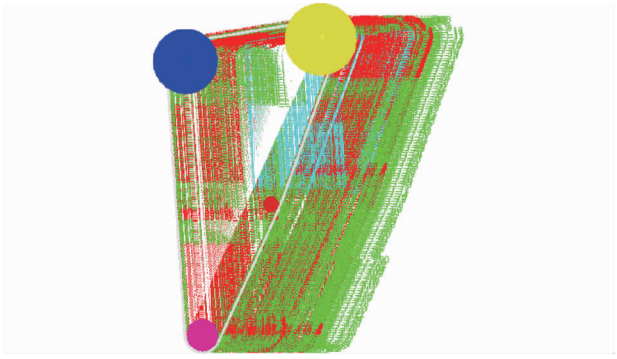


图 9　收膜皮带及辊轴仿真模型建立

Fig. 9　Establishment of simulation model for film-collecting belt and roller

3.2　传动稳定性分析与讨论

基于前期对主脱膜驱动辊转速的力学分析结果,本研究选定 118 ~ 158 r/min 作为仿真分析的工作转速范围,以考察收膜皮带在该区间的运动特性。为真实模拟实际工况中转速的平稳变化,仿真过程中采用 STEP 函数控制驱动输入,以避免速度阶跃引起的计算失真。为全面表征收膜皮带在不同区段的动态响应,在模型中沿带体长度方向选取 4 个代表性带节作为监测点(图 10),其位置分布如下:带节Ⅰ(编号 1)邻近主脱膜驱动辊;带节Ⅱ(编号 41)位于主脱膜驱动辊与后置张紧辊中间;带节Ⅲ(编号 87)处于后置张紧辊与收膜地辊之间;带节Ⅳ(编号 165)分布在收膜地辊与除杂张紧辊中部。

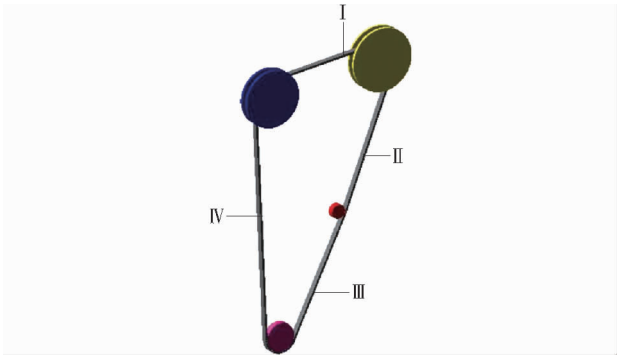


图 10　带节Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ分布示意图

Fig. 10　Schematic distribution of belt segments Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ

通过提取上述带节在运动过程中的横向偏移量,可系统评估收膜皮带传动的稳定性。

3.2.1　横向偏移分析

图 11 结果显示,在转速 118 r/min 下,分布于不同位置的 4 个带节的横向偏移量虽呈现非线性变化,但最大值均未超过 4 mm 的设计允许间隙,表明收膜皮带运行平稳,带节在除杂辊处偏移量最大,向主脱膜驱动辊移动时逐渐减小,到达主脱膜驱动辊槽轮时偏移量最小。在转速 118 r/min 下,收膜皮带运动状态正常,所有偏移量均在允许范围内。

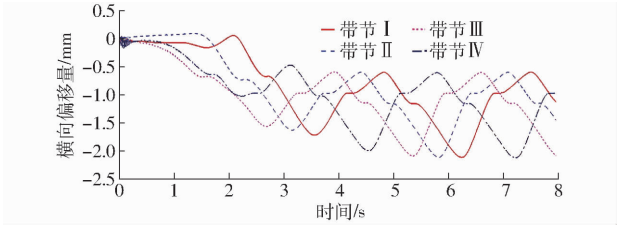


图 11　4 个带节转动过程中轴向偏移量(118 r/min)

Fig. 11　Axial offset during rotation of four belt segments (118 r/min)

进一步对比转速 118、138、158 r/min 下带节Ⅰ的偏移曲线(图 12)发现,随着转速提高,带节的最大横向偏移量略有减小,且运行稳定性提高。在整个工况范围内,收膜皮带横向偏移均得到有效控制,验证了传动布局的合理性。

因此,在 118 ~ 158 r/min 转速区间内,带节最大偏移量始终控制在 4 mm 以下,表明带传动系统工作状态良好。

3.2.2　张紧力波动分析

图 13 展示了带节Ⅰ张紧力随时间的变化曲线。分析表明,收膜皮带在经过辊轴时因摩擦力与惯性

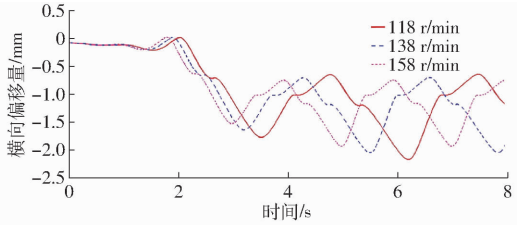
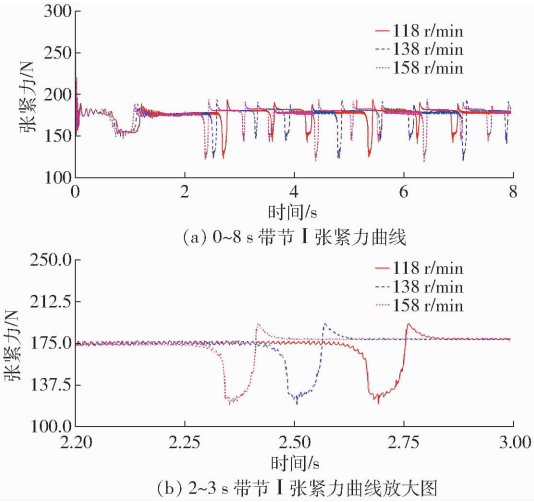


图 12 带节Ⅰ轴向偏移曲线(118 ~ 158 r/min)

Fig. 12 Belt segments Ⅰ axial offset curve of shaft with sections(118 ~ 158 r/min)

力耦合作用,会出现规律的张紧力突变,其稳定值约为 180 N。在 2 ~ 3 s 的稳定运行区间内放大后分析,转速降低会延长张紧力突变的持续时间,而适当提高转速则有利于提升传动平稳性。



(a) 0~8 s 带节Ⅰ张紧力曲线

(b) 2~3 s 带节Ⅰ张紧力曲线放大图

图 13 Ⅰ带节张紧力曲线(118 ~ 158 r/min)

Fig. 13 Belt segments Ⅰ tension curves (118 ~ 158 r/min)

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证自走式残膜回收机钉齿带收膜系统工作可靠性与作业效果,确定田间最优工作参数,于 2025 年 3 月在山东省滨州市杨柳雪红色基因棉花科技示范基地试验田进行田间试验。

试验田采用一膜六行棉花种植模式,已移除滴灌带,地膜为 0.01 mm 的耐候地膜,膜上残留有棉花茎秆、铃壳等杂质,膜面完整性较好,土壤类型为砂土。试验设备包括:自走式钉齿带式残膜回收机、皮尺(量程 50 m)、卷尺(量程 10 m)、测速仪、秒表、电子秤、土壤水分仪和土壤坚实度仪,其中,土壤水分仪(型号 TZS - 1)测得土壤含水率为 18.2%、土壤紧实度仪(型号 TJSD - 750 - 2)测得土壤紧实度为 4 821.37 kPa。试验实况见图 14。

4.2 试验因素与指标

基于前期分析,选取机具前进速度、收膜地辊转速和皮带安装倾角为试验因素,各因素编码见表 3。



(a) 钉齿带式残膜回收机

(b) 作业后地表

(c) 回收的膜捆

图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiments

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors coding

编码	因素		
	机具前进速度/($km \cdot h^{-1}$)	收膜地辊转速/($r \cdot min^{-1}$)	皮带安装倾角/(°)
-1	7	118	87
0	8	128	90
1	9	138	93

以残膜回收率 Y 为评价指标,参照 GB/T 25412—2021《残膜回收机》和 NY/T 1277—2019《残地膜回收机作业质量》标准,随机选取试验田内棉花种植区域,选取未工作区域长度为 5 m,宽度为一个膜幅进行地膜采集,将采集的地膜进行清洗、晒干、称量并作为作业前表层残膜质量,机具作业后选取试验长度为 5 m,宽度为一个膜幅进行残膜采集,每组试验重复 3 次,试验结果取 3 次的平均值,残膜回收率计算公式为

$$Y = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \tag{28}$$

式中 Y——残膜回收率,%

M_0——作业前表层残膜质量,g

M_1——作业后表层残膜质量,g

4.3 试验方案与结果分析

采用 Box - Benhnken 设计 17 组试验,结果见表 4,表中 X_1、X_2、X_3 分别表示机具前进速度、收膜地辊转速、皮带安装倾角编码值。

通过方差分析和显著性检验评估试验结果,具体数据见表 5。分析表明,模型极显著($P < 0.000\,1$),失拟项不显著($P = 0.582\,1$),决定系数($R^2 > 90\%$),模型拟合效果良好,回归方程与试验数据吻合,可以用于后续分析。各因素对回收率影响的显著性顺序从小到大依次为:皮带安装倾角、收膜地辊转速、机

表 4　试验方案及结果

Tab. 4　Experimental program and results

试验序号	因素			Y/%
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	88.72
2	1	-1	0	85.34
3	-1	1	0	89.84
4	1	1	0	90.15
5	-1	0	-1	92.32
6	1	0	-1	90.72
7	-1	0	1	88.55
8	1	0	1	85.24
9	0	-1	-1	88.69
10	0	1	-1	94.09
11	0	-1	1	86.74
12	0	1	1	87.34
13	0	0	0	92.55
14	0	0	0	92.69
15	0	0	0	91.73
16	0	0	0	91.84
17	0	0	0	92.13

表 5　方差分析

Tab. 5　Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	114.22	9	12.69	68.55	<0.0001	**
X_1	7.96	1	7.96	43.00	0.0003	**
X_2	17.79	1	17.79	96.10	<0.0001	**
X_3	40.28	1	40.28	217.55	<0.0001	**
X_1X_2	3.40	1	3.40	18.39	0.0036	**
X_1X_3	0.7310	1	0.7310	3.95	0.0873	
X_2X_3	5.76	1	5.76	31.11	0.0008	**
X_1^2	14.50	1	14.50	78.30	<0.0001	**
X_2^2	14.38	1	14.38	77.67	<0.0001	**
X_3^2	5.60	1	5.60	30.23	0.0009	**
残差	1.30	7	0.1851			
失拟项	0.4616	3	0.1539	0.7377	0.5821	
误差	0.8343	4	0.2086			
总和	115.52	16				

注：** 表示极显著（$P \leqslant 0.01$）。

具前进速度。

4.4　交互因素对性能影响效应分析

响应面分析结果（图 15）揭示，机具前进速度、收膜地辊转速与皮带安装倾角对残膜回收率存在显著的交互影响，是主导作业效果的关键耦合因素。

当皮带安装倾角为 90°时，较低的前进速度与适中的收膜地辊转速组合有利于提高回收率。速度过高会降低钉齿与残膜间摩擦力，导致残膜易脱落。

当机具速度为 8 km/h 时，收膜地辊转速与皮带倾角交互作用显著。提高转速可增加残膜拉伸量，

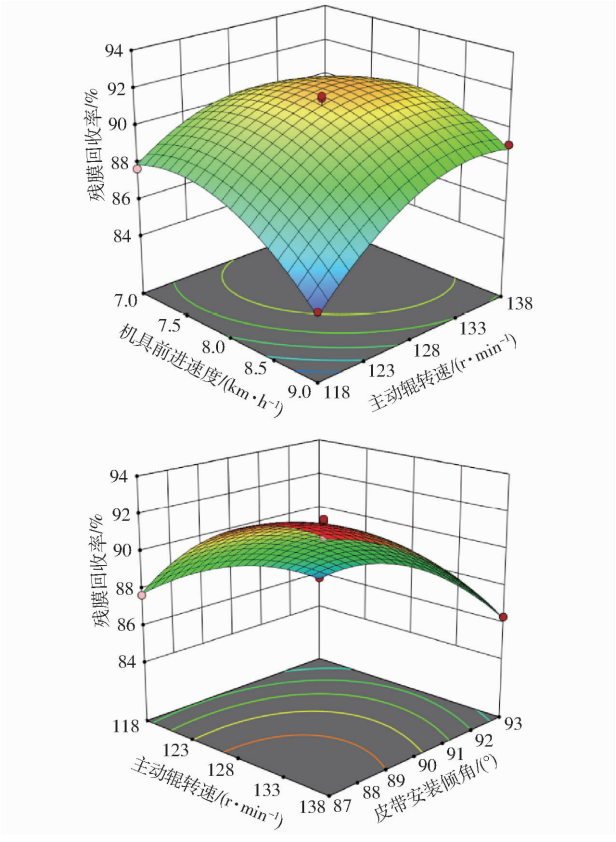


图 15　因素交互作用对性能指标的影响

Fig. 15　Effect of factor interactions on performance indicators

但过大的倾角会因振动和重力作用导致残膜脱落。

4.5　参数优化与验证

为优化钉齿带式残膜回收机捡拾装置的工作性能，采用 Design-Expert 软件对回归模型实施约束条件下的目标优化，从而获得较优的运动参数和结构参数组合，目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

以残膜回收率最大化为目标，对参数进行优化，得到最优组合为：前进速度 8.05 km/h、收膜地辊转速 136.28 r/min、皮带安装倾角 89.15°，此时预测回收率为 92.21%。

为检验钉齿带式残膜回收机捡拾装置的工作效果，采用优化后的参数开展田间试验，将参数圆整为：作业速度 8 km/h、收膜辊转速 138 r/min、皮带安装倾角 89°。试验过程中，每个参数组合选取 5 个采样点进行数据采集，并依据式（28）计算残膜回收率，最终以各测点结果的平均值作为试验数据。验证试验结果显示，平均残膜回收率为 91.17%，与预测值相对误差为 1.04%，表明优化参数可靠，作业

效果符合标准。

5 结论

(1)研制了一种自走式钉齿带式残膜回收机,阐明其工作原理,确定主脱膜驱动辊直径 420 mm、脱膜高度差 $\Delta h = 10$ mm 等关键部件参数,通过运动学分析明确影响作业效果的主要因素。

(2)基于 ADAMS 建立收膜皮带-辊轴系统动力学模型,仿真验证表明:118 ~ 158 r/min 转速区间内,带节横向偏移量在 4 mm 以内、张紧力波动在 ± 15% 范围内,传动系统运行稳定。

(3)以机具前进速度、收膜地辊转速及皮带安装倾角为变量,残膜回收率为评价指标开展响应面试验,优化获得最佳参数组合(前进速度 8 km/h、收膜地辊转速 138 r/min、皮带安装倾角 89°)。验证试验残膜回收率达 91.17%。

参 考 文 献

[1] 张加凡,梁静,罗守杨,等. 农田残膜污染现状及其治理对策[J]. 土壤与作物,2022,11(4):385 - 397.
ZHANG Jiafan, LIANG Jing, LUO Shouyang, et al. Current situation and countermeasures of residual plastic film pollution in farmland[J]. Soils and Crops, 2022,11(4):385 - 397. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 王海基,王敏,王吉亮,等. 新疆农田残膜污染治理技术与防控策略[J]. 中国农机化学报,2022,43(4):166 - 174.
WANG Haiji, WANG Min, WANG Jiliang, et al. Control technology and control strategy of residual film pollution in Xinjiang farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(4):166 - 174. (in Chinese)

[4] WANG Lin, LI Xiaogang, LU Jieting, et al. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China[J]. Soil & Tillage Research,2017,167:46 - 53.

[5] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等. 农田残膜资源化利用技术与装备研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(1):179 - 190.
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Research on technology and equipment for utilization of residual film in farmland [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(1):179 - 190. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 邢剑飞,王旭峰,王龙. 残膜回收机在新疆地区的应用现状研究[J]. 塔里木大学学报,2019,31(3):76 - 82.
XING Jianfei, WANG Xufeng, WANG Long. Research on the application status of residual plastic film recycling machine in Xinjiang[J]. Journal of Tarim University, 2019,31(3): 76 - 82. (in Chinese)

[8] 张学军,刘家强,史增录,等 残膜回收机逆向膜土分离装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(4):46 - 55.
ZHANG Xuejun, LIU Jiaqiang, SHI Zenglu, et al. Design and parameter optimization of reverse membrane and soil separation device for residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 46 - 55. (in Chinese)

[9] 由佳翰,张本华,温浩军,等. 铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2017,48(11):97 - 104.
YOU Jiahan, ZHANG Benhua, WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):97 - 104. (in Chinese)

[10] 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 1):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. 1):295 - 303. (in Chinese)

[11] 蒋德莉,颜利民,陈学庚,等. 钉齿链式地膜捡拾装置改进与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):267 - 281.
JIANG Deli, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Improved design and test of nail-tooth-chain plastic film pickup device[J] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):267 - 281. (in Chinese)

[12] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):109 - 115,164.
YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):109 - 115,164. (in Chinese)

[13] 吾斯曼·吾木尔,沙塔尔·司马义,克然木·热合木吐力,等. 伸缩钉齿式残膜回收机捡拾装置节本增效设计与优化[J]. 农机化研究,2025,47(5):75 - 81,87.
WUSIMAN Wumuer, SHATAER Simayi, KEREMU Rehemutuli, et al. Cost saving and efficiency improvement design and optimization of telescopic spike-tooth type residual film recovery pick-up device[J] Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(5):75 - 81,87. (in Chinese)

[14] 张慧明,陈学庚,颜利民,等. 随动式秸秆还田与残膜回收联合作业机设计与试验[J]农业工程学报,2019,35(19):

11 – 19.
ZHANG Huiming, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J] Transactions of the CSAE, 2019, 35(19):11 – 19. (in Chinese)
[15] 段文献,王吉奎,李阳,等.夹指链式残膜回收装置的设计及试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(19):35 – 42.
DUAN Wenxian, WANG Jikui, LI Yang, et al. Design and test of clamping finger-chain type device for recycling agricultural plastic film[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 35 – 42. (in Chinese)
[16] 坎杂,郭文松,张若宇,等.网状滚筒式机采籽棉残膜分离机的设计[J]. 农业工程学报,2011,27(6):95 – 99,401.
KAN Za, GUO Wensong, ZHANG Ruoyu, et al. Design of a mesh drum machine for picking cotton residue film separator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 95 – 99, 401. (in Chinese)
[17] 马少辉,张学军. 风–筛式土壤残膜分离装置内气流场试验与分析[J]. 农机化研究,2014,36(7):199 – 203.
MA Shaohui, ZHANG Xuejun. Test and analysis of the air flow field in the wind-screen soil residue separation unit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 199 – 203. (in Chinese)
[18] 张若宇,坎杂,郭文松,等.机采籽棉残膜分离机籽棉带出机理仿真[J]. 农业工程学报,2012,28(1):17 – 21.
ZHANG Ruoyu, KAN Za, GUO Wensong, et al. Simulation of mechanism of seed cotton belt removal by machine picking seed-cotton residue separator[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 17 – 21. (in Chinese)
[19] 郭文松,张若宇,坎杂,等.网状滚筒式籽棉残膜分离机分离效果研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(36):22845 – 22847.
GUO Wensong, ZHANG Ruoyu, KAN Za, et al. Study on separation effect of reticulated roller type seed cotton residue separator[J]. Anhui Agricultural Science, 2011, 39(36): 22845 – 22847. (in Chinese)
[20] 谢建华,侯书林,付宇,等.残膜回收机弹齿式收膜机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊 1):94 – 99.
XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and test of spring-tooth film picking mechanism of residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 94 – 99. (in Chinese)
[21] 郭文松,坎杂,张若宇,等.网状滚筒式籽棉残膜分离机物料特性分析[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 2): 1 – 5.
GUO Wensong, KAN Za, ZHANG Ruoyu, et al. Analysis of material characteristics of reticulated roller type seed cotton residue separator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2): 1 – 5. (in Chinese)
[22] 吕钊钦,张磊,张广玲,等.链条导轨式地膜回收机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):48 – 54.
LÜ Zhaoqin, ZHANG Lei, ZHANG Guangling, et al. Design and test of chain guide-rail film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 48 – 54. (in Chinese)
[23] 史增录,张学军,程金鹏,等.垂直双排链式残膜回收机输膜卸膜装置设计与试验[J].干旱地区农业研究,2023,41(3):257 – 265.
SHI Zenglu, ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, et al. Design and test of film transfer and unloading device of vertical double-row chain residual film recycling machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3):257 – 265. (in Chinese)
[24] 机械设计手册编委会.机械设计手册(第三卷)[M].北京:机械工业出版社,2004:123 – 125.
[25] 张雁鸿.基于膜土结合力分析的压杆式棉田残膜回收机的设计与试验[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.
ZHANG Yanhong. Design and experiment of stalk pressing type cotton field residual film collector based on film-soil binding force analysis[J]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[26] 王明恩,颜利民,陈学庚,等.链排式残膜回收机收膜清杂装置设计与试验[J].农机化研究,2022,44(2):208 – 213,218.
WANG Mingen, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of film picking and cleaning device for chain row type residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(2):208 – 213,218. (in Chinese)
[27] 杨松梅.随动式棉田残膜回收机设计及关键技术研究[D].长春:吉林大学,2020.
YANG Songmei. Design and key technology research of passive cotton field residual plastic film recycling machine[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
[28] 谢建华,张雁鸿,曹肆林,等.压秆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 Jianhua, ZHANG Yanhong, CAO Silin, et al. Design and experiment of stalk pressing type cotton field mulch film collectors[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18):51 – 63. (in Chinese)
[29] GB/T1040.3—2006　塑料拉伸特性性能测定第 3 部分:薄膜和薄片的试验条件[S].
[30] 方旭,靳伟,张学军,等.农用地膜力学性能试验与分析[J].农机化研究,2019,41(10):203 – 207,212.
FANG Xu, JIN Wei, ZHANG Xuejun, et al. Testing and analysis of mechanical properties of agricultural ground membrane[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 203 – 207, 212. (in Chinese)
[31] 张顺.基于 ADAMS 带式输送机的跑偏研究[D].西安:西安科技大学,2019.
ZHANG Shun. Research on the deviation of belt conveyor based on ADAMS[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)