

基于离散元法的残膜伸缩齿式滚筒捡拾装置设计与试验

胡国玉¹ 赵艺涵¹ 李昆² 章明星¹ 王海宁¹ 张伟杰¹

(1. 新疆大学智能制造现代产业学院, 乌鲁木齐 830049; 2. 新疆理工学院机电工程学院, 阿克苏 843100)

摘要: 针对当前残膜回收机存在表层拾净率低、脱膜困难等问题, 本文对现有的一款残膜捡拾打包机捡拾装置进行改进, 设计了凸轮控制伸缩齿式滚筒捡拾装置。阐述了伸缩齿式滚筒捡拾装置整体结构和工作原理, 通过对残膜捡拾过程进行受力分析, 确定了伸缩齿弯曲角、转速以及排列, 分析了凸轮轮廓曲线方程, 并通过反转法得到实际凸轮轮廓曲线。采用离散元法建立膜土秆多相离散元模型, 以滚筒转速、前进速度和作业深度为试验因素, 以残膜表层拾净率为试验指标, 进行二次回归正交旋转组合试验, 分析了各试验因素对残膜表层拾净率的影响规律, 确定了捡拾装置最优参数组合为滚筒转速 57 r/min、前进速度 7 km/h、作业深度 47 mm, 此时残膜表层拾净率达 90.8%。对比田间验证试验结果表明, 残膜表层拾净率为 87.78%, 相对误差为 3.33%, 且改进后设备表层拾净率提升 16.02 个百分点, 满足作业标准要求。研究结果可为残膜回收机设计提供理论依据, 对农田“白色污染”治理具有应用价值。

关键词: 残膜回收机; 捡拾装置; 离散元法

中图分类号: S223.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)02-0081-09

OSID:



Design and Test of Residual Film Telescopic Tooth Roller Pick-up Device Based on Discrete Element Method

HU Guoyu¹ ZHAO Yihan¹ LI Kun² ZHANG Mingxing¹ WANG Haining¹ ZHANG Weijie¹

(1. College of Intelligent Manufacturing Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830049, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

Abstract: Aiming to address the current issues of low surface film collection efficiency and difficult film removal in residual film recovery machines, an improvement to the collection mechanism of an existing residual film pick-up and baling machine was proposed. A cam-controlled telescopic-tooth drum collection device was designed. The overall structure and operating principle of the telescopic-tooth roller pick-up device were elucidated. Through force analysis of the residual film collection process, the bending angle, rotational speed, and arrangement of the telescopic teeth were determined. The profile curve equation of the cam disc was analyzed, and the actual cam profile curve was obtained via the inversion method. A multi-phase discrete element model of film-soil-straw interaction was established. Using roller rotational speed, forward speed, and working depth as experimental factors, and residual film surface collection rate as the evaluation metric, a quadratic regression orthogonal rotational combination test was conducted. The influence patterns of each factor on the residual film surface collection rate were analyzed, determining the optimal parameter combination for the collection device: roller rotational speed of 57 r/min, forward speed of 7 km/h, and working depth of 47 mm, achieving a residual film surface collection rate of 90.8%. Field validation tests yielded a surface collection rate of 87.78%, with a relative error of 3.33%. The improved equipment demonstrated a 16.02 percentage points increase in surface collection rate, meeting operational standards. These research findings can provide theoretical foundations for residual film recovery machine design and hold practical value for addressing ‘white pollution’ in agricultural fields.

Key words: residual film recycler; pick-up device; discrete element method

收稿日期: 2025-07-16 修回日期: 2025-08-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2024A02007)

作者简介: 胡国玉(1977—),女,教授,博士,主要从事农牧高端装备及特种机器人研究,E-mail: xjhguoyu@xju.edu.cn

0 引言

农用地膜覆盖技术在提高作物产量、调节土壤温度、含水率等方面发挥了重要作用^[1-3]。但随着农用地膜的广泛应用,残膜在土壤中的累积量逐年增加,导致土壤结构破坏、水分渗透受阻及微生物活性降低^[4],抑制植株根系发育与水分利用效率,造成作物减产和土地污染^[5-6]。为了解决“白色污染”问题,众多科研工作者对残膜回收技术展开了大量研究,研发了多种针对不同时期不同作物的残膜回收机。根据捡拾机构类型,主要分为钉齿或弹齿滚筒式^[7]、链齿或齿带式^[8-10]、链耙式^[11-12]以及气吸式^[13-15]等,钉齿或弹齿滚筒式残膜回收机主要工作部件为钉齿或者弹齿,具有结构简单、故障少、技术成熟等特点,但挑膜过程易使残膜进一步破碎,致使回收难度增大,回收率降低;齿带式残膜回收机作业时收膜带易磨损失效,适合松软土地;链耙式残膜回收机脱膜困难,残膜易与回收部件缠绕,长时间作业易发生故障;气吸式残膜回收机利用负压气流吸附残膜,清洁率高,尤其适合破碎地膜回收,但能耗高,对土壤含水率和地形敏感。

近年来,离散元法因其在多相介质动态相互作用分析中的优势,被广泛应用于农业装备优化设计。GUO等^[16]采用离散元法和 Minkowski Sum 原理以及球-球力-位移本构规则,建立了虚拟地膜模型;文献^[17-19]主要通过物理试验结合 EDEM 标定了棉秸秆和土壤准确的接触参数,为后续离散元研究提供了数据支撑;靳伟等^[20]通过 EDEM-Fluent 耦合仿真模拟残膜与杂质悬浮分离过程,得出了多物质混合物中残膜、土壤和秸秆悬浮速度条件,实现了残膜与土壤、秸秆等杂质分离。然而,现有研究对残膜柔性特征与捡拾装置动态耦合机理解析仍不充分,尤其是残膜捡拾过程中的多参数交互影响规律缺乏系统性研究。

针对现有钉齿/弹齿滚筒式装置在脱膜环节的不足(如固定齿缠绕、脱膜不彻底)导致捡净率低问题,本文提出一种可主动伸缩齿式滚筒捡拾结构。通过凸轮盘精准控制伸缩齿的径向运动轨迹,在特定工作相位伸出滚筒表面进行挑膜捡拾,在相位缩回滚筒内部时实现主动脱膜,并对其关键参数进行优化设计,以实现挑膜效果最大化。

1 伸缩齿式滚筒捡拾装置结构与工作原理

1.1 伸缩齿式滚筒捡拾装置结构

伸缩齿式滚筒捡拾装置是残膜捡拾打包机核心工作部分。捡拾装置由中心轴、凸轮盘、滚筒、固定

架、伸缩齿、伸缩齿固定轴、伸缩齿限位轴和滚动轴承等组成,其装置结构和工作原理如图1所示。

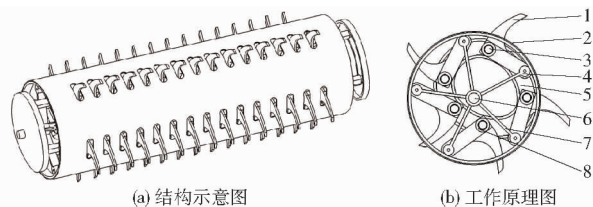


图1 伸缩齿式滚筒捡拾装置结构示意图及工作原理图
Fig.1 Structural schematic and working principle diagram of telescopic toothed drum picking device

1. 伸缩齿 2. 滚筒 3. 伸缩齿限位轴 4. 伸缩齿固定轴 5. 凸轮盘 6. 中心轴 7. 固定架 8. 滚动轴承

1.2 伸缩齿式滚筒捡拾装置工作原理

工作时中心轴转动带动固定架及固连的滚筒转动。伸缩齿固定轴与固定架同轴,凸轮盘固定。伸缩齿限位轴端滚动轴承沿凸轮轨运动,驱动伸缩齿在特定位置伸出挑膜或缩回脱膜。

2 关键部件设计

2.1 伸缩齿设计及受力分析

图2a为弧形伸缩齿,图2b为直立式伸缩齿,弧形齿竖直方向上的分力 F_a 利于挑膜,且比直立式受土壤反作用力小,不易弯折,故采用弧形设计。齿身高度 h^* 为185 mm,材料选用45号钢,图3为齿身弯曲角度示意图。

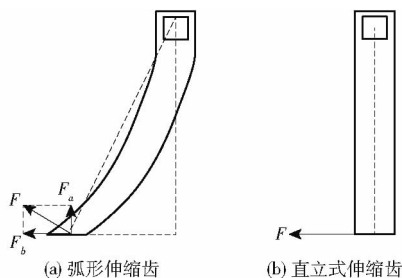


图2 伸缩齿示意图

Fig.2 Schematics of retractable teeth

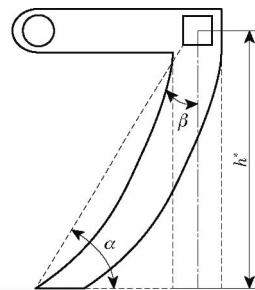


图3 齿身弯曲角度示意图

Fig.3 Schematic of tooth bending angle

伸缩齿在田间工作过程中,齿身会入土一定深度,将集条后的残膜挑起捡拾,完成捡膜作业。针对捡拾齿在土壤中的运动形式,以齿尖 O 为原点建立

直角坐标系 XOY , 并进行受力分析如图 4 所示。

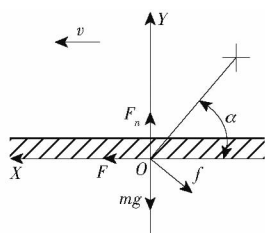


图4 伸缩齿受力分析

Fig. 4 Force analysis of expansion tooth

作业时, 伸缩齿作业深度最大时, 作用在伸缩齿的摩擦力达到最大值, 此时在 OX 方向根据受力平衡方程可得

$$F = f \sin \alpha \quad (1)$$

式中 F ——机具牵引力, N

f ——伸缩齿受土壤的阻力, N

α ——伸缩齿入土角度, ($^\circ$)

伸缩齿在土壤中受土壤摩擦、土壤形变和前进阻力等主要 3 项组成的阻力, 可得伸缩齿所受的土壤阻力 f 为

$$f = \mu_0 mg + KHB + \varepsilon HBv^2 \quad (2)$$

式中 μ_0 ——综合摩擦因数, 取 0.3 ~ 0.5

K ——与土壤变形、切割阻力有关的系数, 取 2 ~ 4 N/cm²

ε ——与作业深度和实际工作幅宽有关的系数, 取 4 000 N·s²/m⁴

H ——作业深度, m

B ——实际工作幅宽, m

v ——机具前进速度, m/s

m ——伸缩齿质量, kg

配套机具牵引力与其伸缩齿实际工作幅宽有关, 即

$$F = \frac{F'B}{\eta_0} \quad (3)$$

式中 F' ——伸缩齿工作幅宽所受阻力的系数, 取 800 ~ 2 100 N/m

η_0 ——利用系数, 取 0.85 ~ 0.95

联立式(1) ~ (3)可得伸缩齿入土角为

$$\alpha = \arcsin \frac{F'}{f} \quad (4)$$

将以上各参数代入式(4)可得 α 为 22.62° ~ 36.86°, 弯曲角 β 为 53.14° ~ 67.38°。

2.2 伸缩齿排列设计

伸缩齿排列方式直接影响捡拾效果与装置性能。轴向间距过密会增加装置成本与维护难度, 且易卡塞秸秆-土壤混合物, 影响作业; 间距过宽则显著降低捡拾效率。周向齿数不足将无法有效完成捡拾任务, 或需提高转速导致能耗增加、装置振动加剧

及残膜二次破损。

基于新疆棉花“一膜六行”种植模式及残膜集条特征(目标捡拾宽度 1 500 mm), 确定伸缩齿布局为轴向布置 15 个, 周向均布 5 个。伸缩齿焊接固定在伸缩齿固定轴和限位轴上, 通过固定轴与固定架同心配合, 以及限位轴末端轴承沿固定凸轮盘轨迹运动, 实现齿的径向伸缩动作。

2.3 装置转速

在伸缩齿进入土壤并将残膜搂起过程中, 可近似视为伸缩齿伸长长度恒定, 取该过程进行运动轨迹分析, 如图 5 所示。

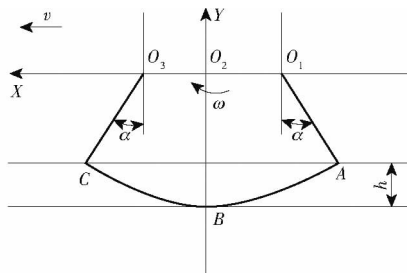


图5 运动轨迹分析

Fig. 5 Motion trajectory analysis

图 5 中, 从 O_1 至 O_2 为伸缩齿入土过程, O_2 至 O_3 为伸缩齿出土过程。X 轴正方向为机具前进方向, Y 轴正方向竖直向上, 伸缩齿尖从点 A 运动到点 C 既以角速度 ω 旋转又以水平速度 v 向 X 轴正方向前进的复合运动过程, 得齿尖末端运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = vt + L \sin(\omega t) \\ y = L \cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 L ——伸缩齿末端到滚筒中心的距离, mm

t ——运动时间, s

对式(5)进行一阶求导可得弧形扎齿齿尖速度, 即

$$\begin{cases} v_x = v + L\omega \cos(\omega t) \\ v_y = -L\omega \sin(\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

当 $v_x = 0$ 时, 得

$$\frac{L\omega}{v} = \left| \frac{-1}{\cos(\omega t)} \right|$$

伸缩齿末端线速度 $v' = L\omega$, 定义伸缩齿末端线速度 v' 与机具行进速度 v 比值为 λ , 即

$$\lambda = \frac{v'}{v}$$

由文献[21]可知, 当 $\lambda < 1$ 时, 残膜捡拾装置具有较好的捡拾效果, 设计的机具作业速度 v 为 6 ~ 9 km/h, 伸缩齿长度 185 mm, 凸轮盘远端轨迹距离中心 190 mm, 初步确定滚筒转速为 43 ~ 64 r/min。集条后残膜厚度均值为 43.5 mm, 伸缩齿有效长度为 110 mm, 因此伸缩齿作业深度小于 66.5 mm。

2.4 凸轮轮廓设计

凸轮盘作为伸缩齿式滚筒捡拾装置重要组成部分,是保证伸缩齿能实现伸出捡拾和缩回脱膜的关键。采用反转法^[22]求解摆动滚子从动件凸轮轮廓,分析过程如图6所示。

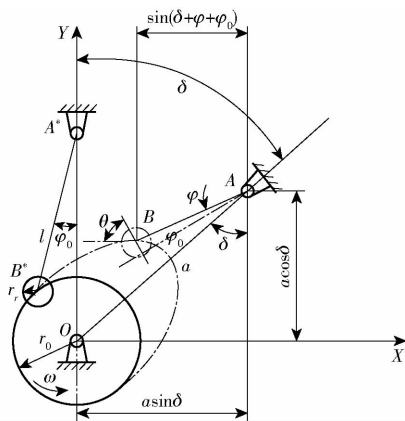


图6 凸轮运动分析

Fig.6 Cam motion analysis

图6中,设摆动从动件回转中心为 A^* ,以凸轮基圆圆心 O 与 A^* 之间的连线为 Y 轴建立笛卡尔坐标系,在反转过程中,当推杆相对于凸轮转过 δ 时,摆动推杆位于 AB 位置,其角位移为 φ ,则凸轮理论轮廓曲线方程为

$$\begin{cases} x = a\sin\delta - l\sin(\delta + \varphi + \varphi_0) \\ y = a\cos\delta - l\cos(\delta + \varphi + \varphi_0) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\varphi_0 = \arccos \frac{a^2 + l^2 - r_0^2}{2al}$$

式中 φ_0 ——推杆初始位置角

a ——推杆固定端与基圆中心距离

l ——推杆长度

r_0 ——基圆半径

理论轮廓曲线在点 B 处法线斜率为

$$\tan\theta = \frac{dx}{dy} = \frac{dx/d\delta}{-dy/d\delta} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

其中

$$\begin{aligned} \sin\theta &= \frac{dx/d\delta}{\sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2}} \\ \cos\theta &= \frac{-(dy/d\delta)}{\sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2}} \end{aligned}$$

在此,采用摆动滚子从动件,通过联立理论轮廓曲线与滚子直径可得到实际工作轮廓曲线方程,即

$$\begin{cases} x' = x \pm r_r \frac{\frac{dy}{d\delta}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{d\delta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\delta}\right)^2}} \\ y' = y \mp r_r \frac{\frac{dx}{d\delta}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{d\delta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\delta}\right)^2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中 r_r ——滚子半径

凸轮基圆半径140 mm、滚子半径25 mm,推程角、远休止角、回程角以及近休止角分别为 100° 、 25° 、 100° 和 135° ,升程为50 mm。在Matlab软件中对凸轮由反转法得到的方程式及相应参数进行编程,可得凸轮轮廓曲线如图7所示。

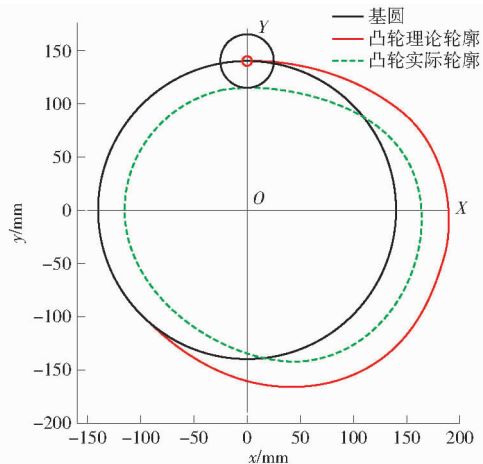


图7 凸轮轮廓曲线

Fig.7 Cam profile curves

3 残膜捡拾仿真试验

3.1 残膜分布统计

前期在试验田中利用卷尺随机选择5个长度为1 m的残膜集条区域进行数据采集,集条残膜宽度均值为610.2 mm,残膜厚度均值为43.5 mm,对残膜、棉秸秆和土壤等杂质进行统计,残膜面积主要集中在 $200 \sim 300 \text{ cm}^2$ 内,秸秆直径为8 mm,长度主要分布 $110 \sim 130 \text{ mm}$,用力辰FA1204型电子称测得测点内平均残膜质量、平均秸秆质量和土壤质量分别为31.95、143.63、467.53 g。

3.2 残膜柔性特征模型描述

为了实现残膜柔性特征,在EDEM中使用Hertz-Mindlin with bonding^[23]接触模型使多个球形颗粒单元相互粘结,粘结参数如表1所示^[24]。Hertz-Mindlin基础模型能够描述颗粒间接触的弹性变形和切向摩擦滑动,适用于残膜在受力时的弹性响应

表1 基于Hertz-Mindlin with Bonding模型的残膜颗粒粘结参数

Tab.1 Residual film particle bonding parameters based on Hertz-Mindlin with Bonding model

参数	数值
单位面积法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	3.12×10^7
单位面积切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	3.12×10^7
临界法向应力/MPa	7.25
临界切向应力/MPa	7.25
粘结半径/mm	1

(如弯曲、拉伸) 和非线性接触行为, 在其基础上添加 Bonding 模型则是通过颗粒间形成的“虚拟键”表征薄膜拉伸、剪切强度以及断裂过程, 有助于分析残膜捡拾过程中的破碎问题。Hertz - Mindlin 结构示意图如图 8a 所示。

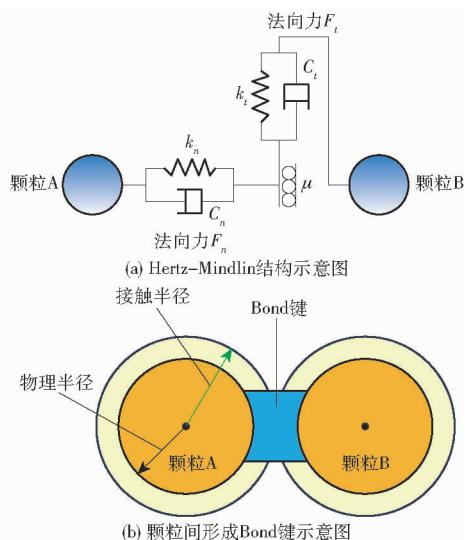


图 8 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型示意图

Fig. 8 Schematics of Hertz - Mindlin with Bonding contact model

当加入粘结 (Bonding) 时, 颗粒间接触示意图如图 8b 所示, 由于引入额外力或力矩模拟颗粒间粘结, 当颗粒之间发生相对运动时, Bond 键承受拉伸、弯曲和剪切作用, 计算式为

$$\delta F_n = -v_n S_n A \delta_t \quad (9)$$

$$\delta F_t = -v_t S_t A \delta_t \quad (10)$$

$$\delta M_n = -\omega_n S_n J \delta_t \quad (11)$$

$$\delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta_t \quad (12)$$

其中 $A = \pi R_B^2$ $J = \frac{1}{2} \pi R_B^4$

式中 v_n ——法向速度, m/s

v_t ——切向速度, m/s

δ_t ——时间步长, s

S_n ——法向粘结刚度, N/m

S_t ——切向粘结刚度, N/m

M_n ——法向力矩, N·m

M_t ——切向力矩, N·m

ω_n ——法相角速度, rad/s

ω_t ——切向角速度, rad/s

A ——颗粒间的接触面积, m^2

J ——颗粒惯性矩, mm^4

R_B ——粘结半径, m

当力和力矩达到极限值或 Fraction 颗粒间距离大于设定接触半径时, Bond 粘结键发生断裂, 法向

及切向剪切力计算式为

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_B \quad (13)$$

$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J} R_B \quad (14)$$

式中 σ_{\max} ——法向剪切力, N

τ_{\max} ——切向剪切力, N

3.3 膜土秆多相离散元模型建立

分别建立颗粒单元半径 1 mm、尺寸为 200 mm × 140 mm 的残膜模型、直径为 8 mm 长度为 120 mm 的秸秆模型和颗粒半径为 8 mm 的土壤颗粒模型, 为确保残膜质量不变, 同比缩小其密度, 同时生成对应质量的残膜、秸秆和土壤。将仿真滚筒捡拾装置简化为 8 齿, 齿间距 90 mm, 边距两端各为 90 mm, 装置总长度 810 mm, 通过 EDEM 界面 Add Motion 功能对滚筒添加前进速度和转速, 通过位置参数调节作业深度, 构建 3 000 mm × 800 mm × 200 mm 的土壤颗粒床。仿真总时长为 2 s, 时间步长为 20%, 计算时间步长为 0.01 s, 仿真完成后采用后处理界面的区域统计功能对滚筒捡拾抛起的残膜质量进行统计, 表层拾净率计算式为

$$C = \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \times 100\% \quad (15)$$

式中 C ——表层拾净率, %

W ——作业后残膜质量, g

W_0 ——作业前残膜质量, g

建立的膜土秆多相离散元模型通过颗粒工厂同时生成残膜、秸秆和土壤, 生成后相互堆积, 基本能反映各物质分布状态, 更复杂的膜秆缠绕暂未考虑。表 2 为仿真试验所需各材料本征参数, 表 3 为各材料间接触参数, 残膜捡拾打包机实物及简化仿真模型如图 9 所示。

表 2 残膜、棉秸秆及土壤材料本征参数

Tab. 2 Material intrinsic parameters for residual film, cotton straw and soil

材料	参数	数值	来源
45 号钢	泊松比	0.30	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	[17]
	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}	
残膜 (聚乙烯)	泊松比	0.38	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	136.14	测定
	剪切模量/Pa	8.54×10^8	
棉秸秆	泊松比	0.35	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 080	[17]
	剪切模量/Pa	6.9×10^8	
土壤	泊松比	0.3	
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600	[18]
	剪切模量/Pa	5.0×10^7	

表3 多材料接触参数

Tab.3 Contact parameters between materials

项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数	来源
45号钢-土壤	0.54	0.31	0.13	[18]
45号钢-棉秸秆	0.5	0.37	0.08	[17]
45号钢-残膜	0.74	0.58	0.22	标定
残膜-土壤	0.52	0.4	0.12	[19]
残膜-棉秸秆	0.86	0.66	0.55	[25]
残膜-残膜	0.86	0.52	0.43	[20]
棉秸秆-土壤	0.19	0.54	0.29	[25]
棉秸秆-棉秸秆	0.5	0.41	0.06	[17]
土壤-土壤	0.21	0.68	0.27	[18]

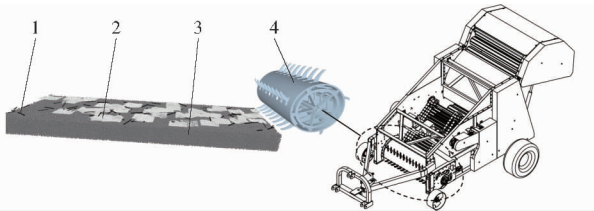


图9 残膜捡拾打包机实物及简化仿真模型

Fig.9 Residual film picking and baling machine and simplified simulation model

1. 棉秸秆 2. 残膜 3. 地垄 4. 伸缩齿式滚筒捡拾装置

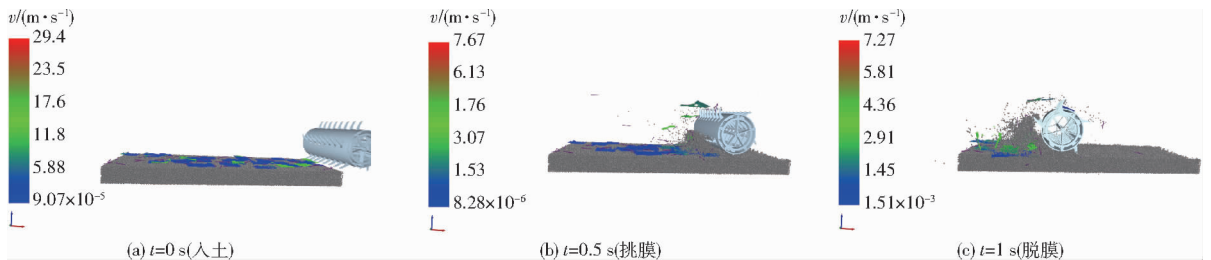


图11 伸缩齿式滚筒捡拾装置残膜捡拾模拟过程

Fig.11 Simulation of residual film pick-up by telescopic teeth drum device

表4 试验因素编码

Tab.4 Experimental factors and codes

编码	因素		
	滚筒转速 x_1 / ($r \cdot \min^{-1}$)	前进速度 x_2 / ($km \cdot h^{-1}$)	作业深度 x_3 / mm
-1	50	6.0	30
0	60	7.5	50
1	70	9.0	70

表5 集条残膜捡拾仿真试验设计与结果

Tab.5 Box - Behnken experimental design matrix and results for pick-up rate

试验序号	因素			$Y_\beta / \%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	85.1
2	1	-1	0	78.6
3	-1	1	0	78.5
4	1	1	0	74.8
5	-1	0	-1	84.7
6	1	0	-1	81.3
7	-1	0	1	83.6
8	1	0	1	75.3
9	0	-1	-1	83.3
10	0	1	-1	77.6
11	0	-1	1	78.3
12	0	1	1	75.4
13	0	0	0	90.2
14	0	0	0	89.7
15	0	0	0	91.1
16	0	0	0	87.6
17	0	0	0	91.3

如图10所示,捡拾装置在工作过程会在滚筒前方形成壅土现象,装置所需功率加大的同时伸缩齿受力将增大,容易出现弯折甚至断裂风险,将极大影响捡拾效率。从伸缩齿挑起的残膜放大图可以看出,残膜此时已经出现二次破损,破碎残膜不利于捡拾的同时,设备后端除杂也容易被振动筛筛回地面,在此过程中,残膜主要受来自滚筒转速和前进速度复合作用的冲击。因此,在残膜捡拾作业过程中,合理的作业深度、前进速度和滚筒转速对残膜表层捡净率来说至关重要。

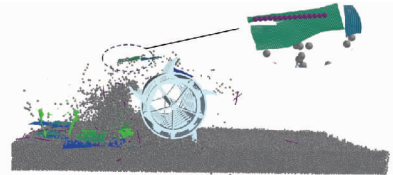


图10 仿真试验

Fig.10 Simulation test

3.4 装置参数优化试验设计

以滚筒转速 x_1 、前进速度 x_2 、作业深度 x_3 作为试验因素,以残膜表层捡净率 Y_β 作为评价指标,分别进行三因素三水平正交回归模拟试验(图11),试验因素编码如表4所示。

4 结果与讨论

4.1 Box - Behnken 试验与回归模型

利用 Design-Expert 13 软件进行 Box - Behnken 试验设计,试验方案见表5, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。方差分析结果见表6。

残膜表层捡净率二次回归方程为

表6 集条残膜表层拾净率回归方程方差分析

Tab.6 ANOVA for Box - Behnken test (pick-up rate)

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	527.46	9	58.61	43.30	<0.0001**
X_1	59.95	1	59.95	44.29	0.0003**
X_2	45.12	1	45.12	33.34	0.0007**
X_3	25.56	1	25.56	18.88	0.0034**
X_1X_2	1.96	1	1.96	1.45	0.2680
X_1X_3	6.00	1	6.00	4.43	0.0732
X_2X_3	1.96	1	1.96	1.45	0.2680
X_1^2	70.00	1	70.00	51.72	0.0002**
X_2^2	186.34	1	186.34	137.66	<0.0001**
X_3^2	92.12	1	92.12	68.05	<0.0001**
残差	9.48	7	1.35		
失拟	0.6875	3	0.2292	0.1043	0.9533
误差	8.79	4	2.20		
总和	536.94	16			

$R^2 = 0.9824$; $R_{adj}^2 = 0.9597$; $C_V = 1.41\%$; $R_{pred}^2 = 0.9539$; $P_{Adeq} = 16.9695$

注：**表示极显著($P < 0.01$)。

$$Y_\beta = 89.98 - 2.74X_1 - 2.37X_2 - 1.79X_3 + 0.7X_1X_2 - 1.22X_1X_3 + 0.7X_2X_3 - 4.08X_1^2 - 6.65X_2^2 - 4.68X_3^2 \quad (16)$$

由表6可知,模型 $P(<0.0001)$ 小于0.01,表明回归模型极显著;失拟项 P 大于0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映集条残膜表层拾净率 Y_β 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系,其中一次项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对响应值表层拾净率影响达到极显著水平($P < 0.01$),其余各项不显著。回归模型 R^2 、 R_{adj}^2 和 R_{pred}^2 分别为0.9824、0.9597和0.9539。 C_V 为1.41%,说明影响因素 X_1 、 X_2 、 X_3 对评价指标 Y_β 有较高的解释程度; P_{Adeq} 为16.9695,大于4,表明回归模型真实反映试验结果。根据模型各因素回归系数由大到小,可得到各因素对表层拾净率影响主次顺序为: X_1 、 X_2 、 X_3 ,即滚筒转速、前进速度和作业深度。

4.2 验证试验

应用Design-Expert 13软件对建立的二次回归正交试验进行优化设计分析,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_\beta \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

获得残膜捡拾试验最优参数组合为: $x_1 = 56.7$ r/min, $x_2 = 7.2$ km/h, $x_3 = 46.7$ mm。实际中取滚筒转速57 r/min、前进速度7 km/h、作业深度47 mm,此时残膜表层拾净率为90.8%。

为了验证回归模型准确性,同时对改进前、后设备表层拾净率,2025年4月在新疆维吾尔自治区哈密市选取棉花地进行试验,试验田为前一年采用铺膜铺管种植模式的棉田,整体情况良好,土地平整。选取长100 m、宽50 m的测区,测点采用5点法,每个测点1 m × 1 m,分别将测区内作业前、后各5个测点,统计表层残膜。将各测点取出的残膜洗去尘土,晾干后称其质量。计算表层拾净率,取平均值为残膜表层拾净率。

试验仪器为作业幅宽为1.5 m的残膜捡拾打包机、雷沃欧豹TD754型拖拉机,由优利德UT373型高精度数显转速仪测得机具滚筒装置转速为57 r/min,调节后端液压装置控制其伸缩齿作业深度为47 mm,机具前进速度为7 km/h;改进前设备在设计参数下工作。田间试验结果如表7所示,图12为安装有伸缩齿式滚筒捡拾装置的残膜捡拾打包机在田间试验,图13为改进前、后残膜捡拾效果对比。

表7 田间试验结果

Tab.7 Field validation test results before and after parameter optimization

序号	残膜表层拾净率/%	
	改进前	改进后
1	73.32	87.76
2	68.14	86.35
3	69.52	90.31
4	72.88	87.32
5	74.94	87.14
平均值	71.76	87.78



图12 田间试验

Fig. 12 Field experiment



图13 改进前后残膜捡拾效果对比

Fig. 13 Comparison of residual film picking effect before and after improvement

由表7可知,改进后5个测点内残膜表层拾净

率均值为 87.78%,与仿真预测值误差为 3.33%,相比改进前残膜表层拾净率提升 16.02 个百分点,其主要原因是伸缩齿在脱膜段缩回滚筒内部,有效避免了传统固定齿因持续挂膜导致的缠绕问题,显著提高了脱膜彻底性和可靠性,减少了因缠绕造成的残膜遗留。基于理论分析和参数优化确定的滚筒转速与前进速度组合,使得伸缩齿尖在入土拾净段具有更合理的相对速度,有利于降低对残膜冲击破碎,提高挑膜完整性和稳定性。且优化后作业深度结合弧形齿设计,在一定程度上缓解了过深作业带来的壅土现象,降低了土壤阻力对拾净过程的干扰。

然而,试验结果准确性并没有达到预期,主要表现在验证测试和模拟测试结果之间的误差。原因有 3 个:①柔性残膜的粘结参数主要是基于其他学者的研究,与实际存在偏差。②模拟试验和验证试验在计算表层拾净率时存在误差,这可能与模拟的表层拾净率计算和试验方案有关。③试验地牧民有棉

田放牧的习惯,田间牲畜活动加剧残膜碎片化,导致模型与实际尺寸分布差异增大。

5 结论

(1)设计了一种凸轮控制的伸缩齿式滚筒拾净装置,结合残膜拾净过程理论分析确定了主要结构参数为弯曲角 $53.14^\circ \sim 67.38^\circ$ 、滚筒转速 $43 \sim 64 \text{ r/min}$ 、轴向 15 齿/周向 5 齿以及凸轮轮廓曲线。

(2)基于离散元法构建膜土秆多相离散元模型,揭示了滚筒转速、前进速度及作业深度对残膜表层拾净率的非线性影响规律。响应面优化结果表明,最优参数组合为滚筒转速 57 r/min 、前进速度 7 km/h 、作业深度 47 mm ,此时,模拟表层拾净率达 90.8%。

(3)田间试验验证显示实际表层拾净率为 87.78%,与模拟结果误差为 3.33%,模型可靠性较高,且改进后设备残膜表层拾净率提升 16.02 个百分点,满足作业标准要求。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 姚洁婷,张学军,史增录,等.耕层残膜回收机研究现状及发展趋势[J].中国农机化学报,2024,45(8):290-295.
YAO Jieting, ZHANG Xuejun, SHI Zenglu, et al. Research status and development trend of tillage layer residual film recycling machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 290-295. (in Chinese)
- [4] LIU E K, HE W Q, YAN C R. White revolution to white pollution-agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001.
- [5] HU Can, WANG Xufeng, WANG Shiguo, et al. Impact of agricultural residual plastic film on the growth and yield of drip-irrigated cotton in arid region of Xinjiang, China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 160-169.
- [6] HE Huaijie, WANG Zhenhua, GUO Li, et al. Distribution characteristics of residual film over a cotton field under long-term film mulching and drip irrigation in an oasis agroecosystem[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 180: 194-203.
- [7] 张学军,黄爽,史增录,等.残膜拾打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)
- [8] 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)
- [9] 蒋德莉,颜利民,陈学庚,等.纵向型钉齿链式地膜拾净装置设计与试验[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 longitudinal nail-tooth-chain plastic film pickup device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 267-281. (in Chinese)
- [10] 寇嘉乐,王吉奎,王磊,等.夹指链式棉田残膜回收秸秆粉碎还田一体机设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(23):14-22.
KOU Jiale, WANG Jikui, WANG Lei, et al. Integrating clamping finger-chain residual film recycling and straw crushing return to cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 14-22. (in Chinese)
- [11] 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)

- [12] 周鑫城. 链齿耙式残膜回收机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
ZHOU Xincheng. Design and experiment test of chain-rake type residual film recycling machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [13] 洪斌. 气吸式耕层残膜回收机关键部件设计[D]. 银川:宁夏大学,2023.
HONG Bin. Design of key components of air-suction tillage layer residual film recovery machine [D]. Yinchuan: Ningxia University,2023. (in Chinese)
- [14] 田绍华, 王萍, 康建明, 等. 气吸式残膜回收机集膜装置改进设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(4): 1-6.
TIAN Shaohua, WANG Ping, KANG Jianming, et al. Improved design and test of film collecting device of air suction residual film recovery machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 1-6. (in Chinese)
- [15] 周令阳. 齿链气吸式残膜回收机的设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
ZHOU Lingyang. Design and experimental study of tooth chain composite pickup pneumatic film collection residual film recovery machine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2022. (in Chinese)
- [16] GUO Songsong, HU Can, HE Xiaowei, et al. Construction of virtual mulch film model based on discrete element method and simulation of its physical mechanical properties[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4):211-218.
- [17] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):76-84,108.
ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):76-84,108. (in Chinese)
- [18] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报,2019,50(2):49-56,77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(2):49-56,77. (in Chinese)
- [19] LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, JIANG Peng, et al. Calibration of the simulation parameters of the particulate materials in film mixed materials[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(4):29-36.
- [20] 靳伟, 张学军, 丁幼春, 等. 基于 EDEM-Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4): 89-98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):89-98. (in Chinese)
- [21] 谢建华, 张凤贤, 陈学庚, 等. 弧形齿滚扎式残膜回收机的设计与参数优化[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)
- [22] 杨可桢, 程光蕴, 李仲生, 等. 机械设计基础[M]. 7 版. 北京:高等教育出版社, 2020.
- [23] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(8): 1329-1364.
- [24] WANG Feng, DAI Fei, ZHANG Fengwei, et al. Simulation analysis and test on the effect of picking up the residual film of typical film lifting parts[J]. Agronomy-Basel, 2023,13(2): 488.
- [25] 解臣硕, 康建明, 彭强吉, 等. 滚筒筛式膜杂分离装置数值模拟与参数优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 1-11.
XIE Chenshuo, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Numerical simulation and parameter optimization of trommel screen type membrane and impurity separation device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 1-11. (in Chinese)