

双滚筒式收后地表残膜回收机设计与试验

张学军^{1,2}, 康梦晨¹, 史增录^{1,2}, 鄢金山^{1,2}, 刘小鹏¹, 郭磊¹, 王美静¹

(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)

摘要: 针对残膜回收机存在的拾净率低、含杂率高等问题, 该研究设计了一种双滚筒式残膜回收机, 适用于秋收后地表残膜回收, 采用机械拾膜、气力与机械协同脱膜方式完成作业过程。对捡膜和脱膜过程进行动力学分析, 确定捡膜装置和脱膜装置的关键结构参数以及工作参数范围, 根据滚轮中心运动轨迹设计并优化正反向凸轮轨道, 得到凸轮结构参数, 获得捡膜装置不漏捡的条件。运用气流特性分析软件模拟脱膜装置内部流场, 分析得出气流运动形成的“O”形旋流利于残膜与杂质的分离。以机具前进速度、捡膜滚筒转速和脱膜滚筒转速为试验因素, 残膜拾净率及回收混合物含杂率为试验指标, 进行单因素试验, 得到响应面试验水平的较优区间, 并进行响应面试验, 得出较优工作参数为机具前进速度 6.72 km/h, 捡膜滚筒转速 56.70 r/min, 脱膜滚筒转速 569.78 r/min。田间试验结果表明, 机具前进速度 6.7 km/h、捡膜滚筒转速 57 r/min、脱膜滚筒转速 570 r/min 时, 平均残膜拾净率为 86.1%, 平均回收混合物含杂率为 39.2%; 相较于已有回收机的残膜拾净率 (85.03%) 提高了 1.07 个百分点, 各项指标满足收后地表残膜回收要求。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 双滚筒; 残膜回收

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401037

中图分类号: S223.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-14-0001-13

张学军, 康梦晨, 史增录, 等. 双滚筒式收后地表残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(14): 1-13. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401037 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Xuejun, KANG Mengchen, SHI Zenglu, et al. Design and experiments of a double drum surface residual film recycling machine after harvest[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(14): 1-13. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401037 <http://www.tcsae.org>

0 引言

地膜覆盖种植技术具有增温保墒、抑制杂草、防虫防病等优势, 已广泛应用于新疆等西北干旱区的农作物种植^[1-3]。据国家统计局农村社会经济调查司统计, 国内地膜覆盖面积达到 173 万 hm^2 , 总使用量为 132 万 t, 虽然近些年呈现不断减少的态势, 但是地膜覆盖面积和使用量依旧巨大。国内覆盖地膜主要成分是聚乙烯、聚氯乙烯, 在使用过程中由于风化、日照作用导致力学性能下降, 且与作物根茬、土壤混合, 机械回收困难, 影响农田土壤的品质, 造成农田“白色污染”^[4-7]。大量地膜残留对作物生长发育、品质、产量等负效益显著, 已成为制约农业可持续发展的重要因素^[8-10]。机械化回收残膜是解决地膜残留问题的发展趋势。王毅超等^[11-12]研发的棉秸秆还田及残膜回收联合作业机, 可防止出料腔堵塞, 降低了秸秆掉落率, 但其分离膜杂混合物能力不强, 含杂率较高; 刘旋峰等^[13-14]设计的 11SM-1.5 型滚筒式残膜回收机, 设计了往复式挑膜装置, 提出了影响机具残膜拾净率的关键因素; 张新超等^[15]提出了钉齿滚筒式残膜回收机, 优化了收膜机构的排布, 但钉齿上易堆积

残膜, 卸膜效果不理想; ROCCA 等^[16]设计了一种卷膜辊式地膜回收机, 可有效清除膜面杂质并进行卷收; KIMBALL 等^[17]设计了一种联合地膜回收机, 采用滚筒式拾膜机构将地膜从地表拉起, 可有效提高拾膜质量。国外的地膜厚度大于等于 0.02 mm, 地膜的抗拉强度较高, 受限于国内外农作物种植规模及经济环境的差异以及采用的地膜的标准不同, 国外的残膜回收机械在国内不具备适用性^[18-20]。为解决残膜回收过程中存在含杂率高、可靠性差等问题, 本文提出一种双滚筒式收后地表残膜回收机, 以双滚筒式回收机构作为核心部件, 设计了具有防缠绕功能的轨道引导式捡膜滚筒, 具有气力式脱膜功能的组合式脱膜滚筒, 通过对机具的工作原理和动力学分析, 确定机具残膜拾净、输送、脱卸以及膜杂分离的条件; 使用气流特性分析软件模拟脱膜装置内气流的运动, 分析流场对残膜脱离、输送的影响, 确定机具关键部件的较优参数, 制作样机并进行验证试验, 期为农田残膜污染的有效治理提供技术与装备。

1 双滚筒式残膜回收机主要结构与工作原理

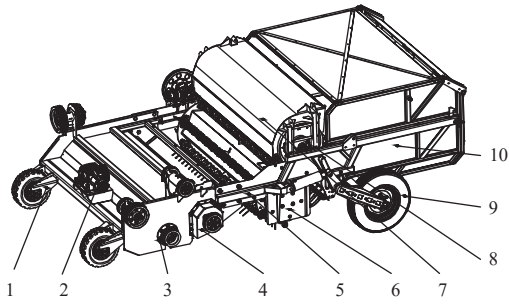
1.1 主要结构

双滚筒式残膜回收机主要结构如图 1 所示, 主要由限深轮、分动箱、秸秆粉碎装置、螺旋输送装置、机架、密封罩、捡膜装置、脱膜装置、行走轮、集膜箱等组成。

收稿日期: 2024-01-06 修订日期: 2024-06-18

基金项目: 新疆农机研发制造推广应用一体化项目 (YTHSD2022-10); 自治区重点研发计划项目 (2022B02038)

作者简介: 张学军, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化装备研究。
E-mail: tucc@163.com



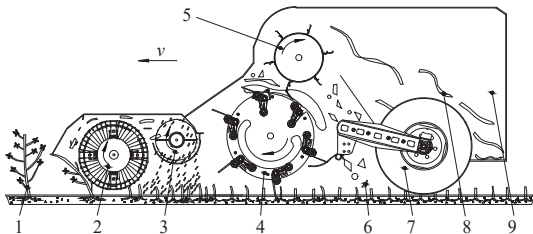
1.限深轮 2.分动箱 3.秸秆粉碎装置 4.螺旋输送装置 5.机架 6.密封罩 7.捡膜装置 8.脱膜装置 9.行走轮 10.集膜箱
1.Depth limiting wheel 2.Transfer case 3.Straw smashing device 4.Spiral conveying device 5.Frame 6.Sealed cowling 7.Film picking device 8.Film unloading device 9.Walking wheel 10.Film collection box

图1 双滚筒式收后地表残膜回收机结构简图

Fig.1 Structural diagram of surface residual film recycling machine after harvest

1.2 工作原理

作业时，动力通过拖拉机后输出轴驱动分动箱转动，并传递至秸秆粉碎装置和螺旋输送装置，驱动秸秆粉碎装置顺时针转动，将地面秸秆粉碎并抛送至螺旋输送装置，螺旋输送装置将棉秆打碎并输送至已回收残膜一侧的农田，实现秸秆粉碎还田。分动箱将动力传递至捡膜装置，随着捡膜装置的转动，捡膜齿运动至滚筒下方时将地表膜挑起并随着滚筒的旋转向后输送至滚筒上方时，在脱膜装置的气力作用下，残膜被吹入集膜箱内，秸秆等质量大的杂质则受自身重力作用掉落至田间，机具工作原理图如图2所示。



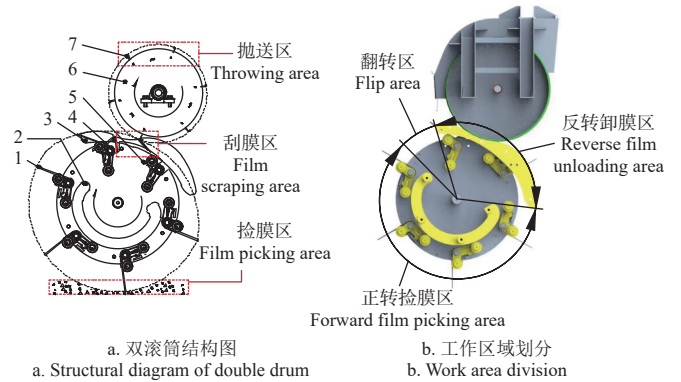
1.棉秆 2.秸秆粉碎装置 3.螺旋输送装置 4.捡膜装置 5.脱膜装置 6.杂质 7.行走轮 8.残膜 9.集膜箱
1.Cotton straw 2.Straw smashing device 3.Spiral conveying device 4.Film picking device 5.Film unloading device 6.Impurity 7.Walking wheel 8.Residual film 9.Film collection box
注: v 为机具前进速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
Note: v is the machine forward speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

图2 工作原理示意图

Fig.2 Diagram of working principle

双滚筒结构如图3所示。传动装置驱动捡膜滚筒顺时针转动，脱膜滚筒顺时针转动，当捡膜弹齿进入正转捡膜区时，双拐臂在正向凸轮轨道的支持下，沿固定轨迹匀速旋转，将地表100 mm深度内的残膜挑起，当捡膜弹齿进入翻转区时，双拐臂失去正向凸轮轨道的支撑，依靠自身重力实现捡膜弹齿的翻转。当捡膜弹齿进入反转卸膜区时，双拐臂在反向凸轮轨道的支持下，沿固定轨迹匀速旋转，与脱膜滚筒协同卸膜，在刮膜板的作用下进一步提高卸膜能力。随后刮膜板随脱膜滚筒高速转动，利用密闭空间内产生的气流和刮膜板转动产生的离

心力，将残膜送入集膜箱内，完成一个工作周期。



1.捡膜弹齿 2.正向凸轮轨道 3.反向凸轮轨道 4.双拐臂 5.捡膜滚筒 6.脱膜滚筒 7.刮膜板
1.Film picking spring-tooth 2.Forward cam track 3.Reverse cam track 4.Double crutch-arm 5.Film picking roller 6.Film unloading drum 7.Film unloading plate

图3 双滚筒结构图及工作区域划分

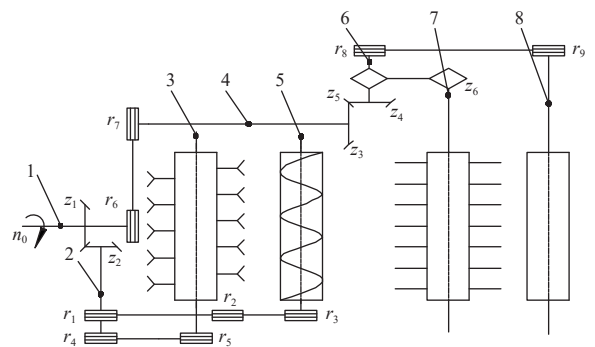
Fig.3 Structural diagram of double drum device and work area division

1.3 传动系统

双滚筒式残膜回收机的动力传动系统如图4所示。整机采用三点悬挂方式与拖拉机联接，通过控制行走轮上的液压油缸预伸缩量调节捡膜弹齿的入土深度。拖拉机动力通过动力输入轴传递给分动箱，分动箱将动力传递至打杆刀轴和螺旋输送轴，另一端通过带传动驱动中间轴转动，并通过锥齿箱轴将动力传递至捡膜滚筒轴和脱膜滚筒轴。

系统各级传动比分别为 $\frac{z_2}{z_1} = \frac{32}{14}$, $\frac{r_5}{r_4} = \frac{200}{200}$, $\frac{r_2}{r_1} = \frac{200}{200}$, $\frac{r_3}{r_2} = \frac{200}{350}$, $\frac{r_7}{r_6} = \frac{200}{300}$, $\frac{z_4}{z_3} = \frac{11}{33}$, $\frac{z_6}{z_5} = \frac{11}{45}$, $\frac{r_9}{r_8} = \frac{320}{125}$, 由此可得捡膜装置滚筒传动比 i_1 和脱膜装置滚筒传动比 i_2 。

$$i_1 = \frac{r_7 \cdot z_6}{r_6 \cdot z_3} \quad (1)$$



1.动力输入轴 2.动力输出轴 3.打杆刀轴 4.中间轴 5.螺旋输送轴 6.锥齿箱轴 7.捡膜滚筒轴 8.脱膜滚筒轴
1.Power input shaft 2.Power output shaft 3.Rod cutter shaft 4.Intermediate shaft 5.Screw conveying shaft 6.Cone gear box shaft 7.Film picking drum shaft 8.Film unloading drum shaft

注: n_0 为拖拉机输出轴转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; $z_1\sim z_6$ 为齿轮齿数; $r_1\sim r_9$ 为各传动带轮直径, mm 。
Note: n_0 is the tractor output shaft speed, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; $z_1\sim z_6$ is the number of gears teeth; $r_1\sim r_9$ is the diameter of each transmission, mm .

图4 传动系统原理图

Fig.4 Schematic of transmission system

$$i_2 = \frac{r_7 \cdot z_4 \cdot r_9}{r_6 \cdot z_3 \cdot r_8} \quad (2)$$

结合课题组前期研究，选用拖拉机动力输出轴转速 1 000 r/min，则捡膜装置滚筒转速为 54.3 r/min，脱膜装置滚筒转速为 586.7 r/min。

1.4 主要技术参数

新疆机械化种植棉田采用宽窄行种植模式，宽行间距为 660 mm，窄行间距为 100 mm。为满足收后地表残膜回收的作业要求，确定该机主要技术参数如表 1 所示。

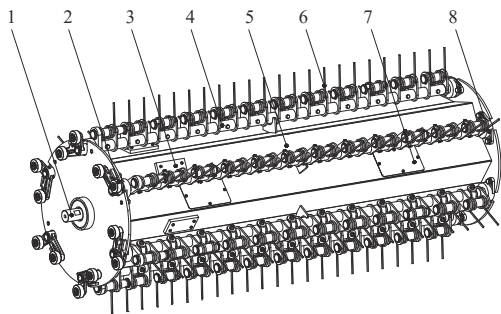
表 1 机具主要参数
Table 1 Main parameters of device

参数 Parameters	数值 Value
机具尺寸 Complete machine size/(mm×mm×mm)	4 200×2 870×1 710
机具前进速度 Machine forward speed/(km·h ⁻¹)	3~7
作业幅宽 Working width/mm	2 100
作业深度 Working depth/mm	0~100
集膜箱容积 Capsule volume/m ³	1.9
配套动力 Matched power/kW	66~96
连接方式 Connection method	牵引式

2 关键部件设计

2.1 捡膜装置

捡膜装置由捡膜滚筒轴、双拐臂、减震块、捡膜弹齿轴、捡膜滚筒、捡膜弹齿等组成，如图 5 所示。捡膜弹齿固接在捡膜弹齿轴上，捡膜弹齿轴用轴承固接在两侧边板上，弹齿轴与双拐臂采用花键连接，双拐臂用滚轮与正向、反向凸轮轨道滚动接触，并随捡膜滚筒的转动改变转动方向，设置减震块和观察窗。

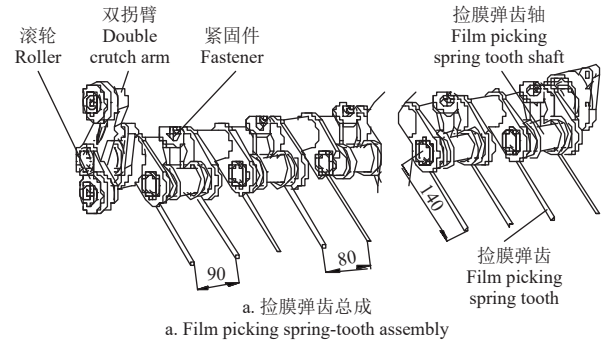


1. 捡膜滚筒轴 2. 双拐臂 3. 减震块 4. 捡膜弹齿轴 5. 捡膜滚筒 6. 捡膜弹齿 7. 观察窗 8. 弹齿轴轴承
1. Film picking drum shaft 2. Double crutch arm 3. Damping block 4. Film picking spring tooth shaft 5. Film picking drum 6. Film picking spring tooth 7. Sight window 8. Spring gear shaft bearing

图 5 捡膜装置结构图
Fig.5 Structural diagram of film picking device

2.1.1 捡膜装置

双滚筒残膜回收机主要针对收后地表残膜回收，此时作物根茬未腐烂，捡膜弹齿易将作物根茬挑起，堵塞在相邻两捡膜弹齿之间导致含杂率高，影响作业性能，因此捡膜弹齿分布密度和数量是影响捡拾过程中残膜捡拾效率的重要因素。捡膜弹齿排列过密会增加功率损耗，捡起过多杂质使含杂率升高，排列过于稀疏导致残膜漏捡，捡膜弹齿总成结构及捡膜弹齿分布如图 6 所示。



a. 捡膜弹齿总成
a. Film picking spring-tooth assembly
b. 捡膜弹齿分布示意图
b. Schematic diagram of film picking springteeth distribution

注：s 为齿间中心距，mm；a 为棉花窄行间距，mm；b 为棉花宽行间距，mm；c 为弹齿安装孔与滚筒边缘距离，mm。
Note: s is the center distance between the teeth, mm; a is the narrow row spacing distance, mm; b is the wide row spacing distance, mm; c is the distance between the mounting hole of the spring tooth and the edge of the cylinder, mm.

图 6 捡膜弹齿总成及捡膜弹齿分布示意图

Fig.6 Schematic of film picking spring tooth and diatribution of film picking assembly

捡膜弹齿的周向数目与弹齿长度、入土深度、捡膜滚筒转动角速度的关系^[21]为

$$\frac{\sqrt{h(2r-h)}}{\pi z^2 - z\phi_1} = \frac{v}{z\omega_1} \quad (3)$$

式中 ω_1 为捡膜滚筒转动角速度，rad/s；r 为捡膜弹齿长度，mm；h 为捡膜弹齿入土深度，mm；z 为捡膜弹齿在圆周方向个数； ϕ_1 为初始相位角，(°)。

结合棉花机械化种植方式（宽行 660 mm+窄行 100 mm），采用图 6b 所示分布方式设计。为避免捡拾过程中拾起多余根茬，捡膜弹齿和根茬间应留有一定距离 e。以弹齿轴上中间弹齿所在位置为原点 0，在此轴线上建立数轴，则弹齿和根茬在数轴上的投影点的坐标需满足式（4）。

$$\begin{cases} 3a + 2b \leq 2c + 12s \leq d + 100 \\ x_k - e \leq x_p \leq x_k + e \\ x_k = \pm \left[\frac{a}{2}, \frac{a}{2} + b, \frac{a}{2} + b + a \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_p 为弹齿在数轴上投影点的坐标； x_k 为秸秆根茬在数轴上投影点的坐标，根据机具作业幅宽，p 的取值范围为 [1,27]^[22]，本文取 p=24，则每根弹齿安装轴安装弹齿为 12 组（24 齿）。

捡膜弹齿和根茬间的距离 e 过大时易漏捡残膜，距离 e 过小时弹齿易触碰根茬发生形变。当 e=5 mm 时，代入式（4）计算得到同排齿齿间中心距 s=170 mm，弹齿不会碰到根茬。取弹齿安装孔与滚筒边缘的距离 c=100 mm。捡膜滚筒的工作幅宽设为 2 100 mm、入土深度设为 100 mm、捡膜弹齿长度为 140 mm，一组 12 个捡膜弹齿，周向布置 6 组，捡膜弹齿间隔宽度设为 90 mm、

相邻捡膜弹齿间隔设为 80 mm，直径设为 6 mm。

2.1.2 凸轮轨道设计

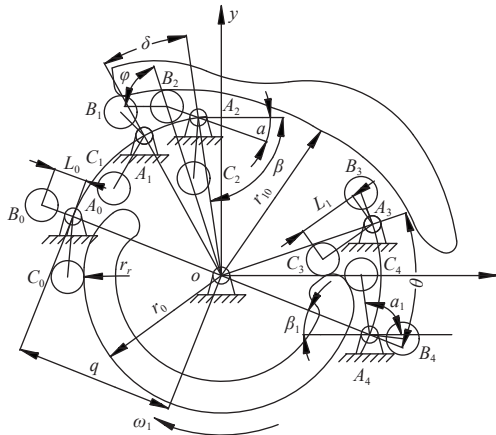
凸轮轨道是控制捡膜装置的捡膜弹齿伸出、反转的关键部件。以捡膜滚筒中心为 o 点，建立 xoy 坐标系，以双拐臂上滚轮中心为研究对象，分析正、反转过程滚轮中心的位置变化，建立数学模型，设计的凸轮轮廓线如图 7 所示。在捡膜弹齿反转运动中，滚轮从 $A_1B_1C_1$ 沿轨道滚动到 $A_2B_2C_2$ ，当捡膜滚筒转过 δ 时， B_2 点的坐标如式 (5) 所示，带入不同的转动角度可以得到反向凸轮轨道理论轮廓线坐标，式 (5) 是反向凸轮轨道的理论轮廓线坐标。在捡膜弹齿伸出运动中，滚轮从 $A_3B_3C_3$ 位置沿轨道滚动到 $A_4B_4C_4$ 位置，当捡膜滚筒转过 θ 时， C_4 点的坐标如式 (6) 所示，带入不同的转动角度可以得到正向凸轮轨道理论轮廓线坐标。

$$\begin{cases} x_0 = L_0 \cos \alpha - a \cos \beta \\ y_0 = L_0 \sin \alpha + a \sin \beta \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_1 = L_1 \cos \alpha_1 - a \cos \beta_1 \\ y_1 = L_1 \sin \alpha_1 + a \sin \beta_1 \end{cases} \quad (6)$$

凸轮的工作轮廓线方程如式 (7)。

$$\begin{cases} x' = x + r_r \cos \varphi \\ y' = y + r_r \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$



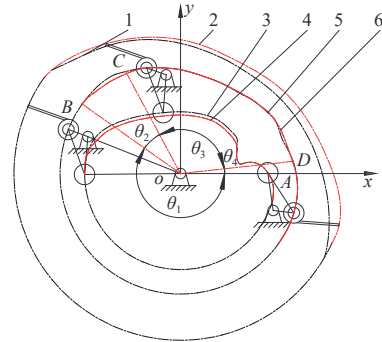
注： ω_1 为捡膜滚筒转动角速度， $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ； δ 为反转运动时捡膜滚筒转角， $(^\circ)$ ； α 为连杆在 $A_2B_2C_2$ 位置时角位移， $(^\circ)$ ； β 为连杆位置角， $(^\circ)$ ； q 为连杆距回转中心长度， mm ； L_0 为短连杆 A_0B_0 长度， mm ； φ 为理论轮廓线法线和水平线夹角， $(^\circ)$ ； r_{10} 为反向凸轮理论轮廓线最小半径， mm ； θ 为正转运动时捡膜滚筒转角， $(^\circ)$ ； α_1 为连杆在 $A_4B_4C_4$ 位置时角位移， $(^\circ)$ ； β_1 为连杆位置角， $(^\circ)$ ； L_1 为长连杆 A_3C_3 长度， mm ； r_0 为正向凸轮理论轮廓线最小半径， mm ； r_r 为滚子半径， mm 。
Note: ω_1 is the rotation angular speed of film picking roller, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; δ is the rotation angle of the film picking roller in reverse motion, $(^\circ)$; α is the angular displacement of the connecting rod at the position $A_2B_2C_2$, $(^\circ)$; β is the position angle of the connecting rod, $(^\circ)$; q is the length of the connecting rod from the center of rotation, mm ; L_0 is the length of short connecting rod A_0B_0 , mm ; φ is the angle between the normal of the theoretical contour and the horizontal line, $(^\circ)$; r_{10} is the minimum radius of the theoretical contour of the reverse cam, mm ; θ is the angle of the film picking roller during the reverse movement, $(^\circ)$; α_1 is the angular displacement of the connecting rod at $A_4B_4C_4$ position, $(^\circ)$; β_1 is the position angle of the connecting rod, $(^\circ)$; L_1 is the length of the long connecting rod A_3C_3 , mm ; r_0 is the minimum radius of the theoretical contour of the forward cam, mm ; r_r is the radius of the roller, mm .

图 7 凸轮轮廓设计图

Fig.7 Contour design diagram of cam

为了避免因凸轮轨道的轮廓曲线曲率发生太大的变化，

在工作中产生过大的震动，采用样条插值法对散列的坐标点进行调整并拟合出一条光滑的曲线，在 Matlab 软件中选用 polyfit 函数得到优化后滑道轮廓曲线，如图 8 所示。



1. 原弹齿末端运动轨迹 2. 优化后弹齿末端运动轨迹 3. 原内凸轮轮廓 4. 优化后内凸轮轮廓 5. 原外凸轮轮廓 6. 优化后外凸轮轮廓
1. Original spring-tooth end motion trajectory 2. Optimized spring-tooth end motion trajectory 3. Original inner cam outline 4. Optimized inner cam outline 5. Original outer cam outline 6. Optimized outer cam outline

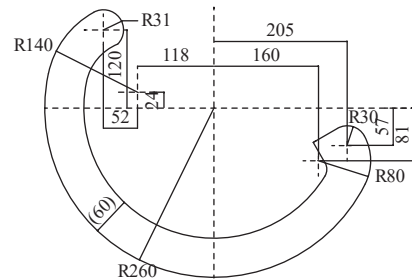
注： A 为双拐臂反转位置； B 为双拐臂反转完成位置； C 为双拐臂正转位置； D 为双拐臂正转完成位置； θ_1 为捡膜工位角， $(^\circ)$ ； θ_2 为反转工位角， $(^\circ)$ ； θ_3 为脱膜工位角， $(^\circ)$ ； θ_4 为正转工位角， $(^\circ)$ 。

Note: A is the reverse position of the double crutch arm; B is the complete position of double crutch arm reversal; C is the reverse rotation position of the double crutch arm; D is the complete position of forward rotation of the double crutch arm; θ_1 is the film picking station angle, $(^\circ)$; θ_2 is the reverse station angle, $(^\circ)$; θ_3 is the film removal station angle, $(^\circ)$; θ_4 is the reverse rotating station angle, $(^\circ)$.

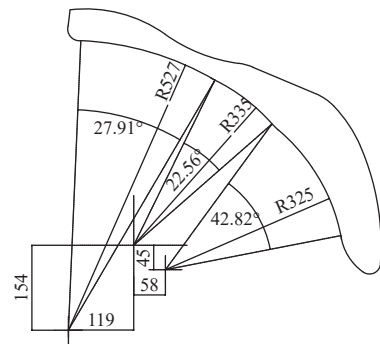
图 8 弹齿末端运动轨迹及凸轮轮廓线

Fig.8 Tooth end movement trajectory and cam contour line

为确保双拐臂能按照设计要求进行正反转，对优化后的凸轮轨迹进行分解，设计了正向、反向凸轮轨道结构，如图 9 所示。



a. 正向凸轮轨道
a. Forward cam track



b. 反向凸轮轨道
b. Reverse cam track

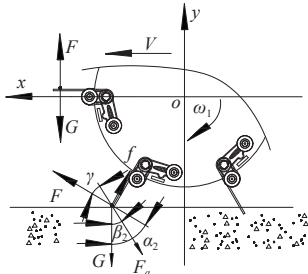
图 9 凸轮结构示意图

Fig.9 Structural diagram of cam

2.1.3 捡膜过程受力分析

为使捡膜弹齿上的残膜在捡膜过程中不脱落、在卸

膜过程中能够顺利脱下，以捡膜弹齿上挑起的残膜为对象，将其简化为一个质点进行分析，合力作用于质心，且每个弹齿受力相同。以捡膜滚筒中心为原点，机具前进方向为 x 方向，重力反方向为 y 方向建立坐标系，如图 10 所示。



注：G 为膜杂混合物所受重力，N；f 为膜杂混合物与弹齿的摩擦力，N；F 为膜杂混合物受到的支持力，N；Fa 为土壤粘结力，N； α_2 为捡膜弹齿法向与 G 的夹角，(°)； β_2 为 Fa 与 G 的夹角，(°)； γ 为捡膜弹齿法向与 Fa 的夹角，(°)。
 Note: G is the gravity on the film mixture, N; f is the friction force between the film mixture and the spring teeth, N; F is the supporting force of the film mixture, N; Fa is soil bonding force, N; α_2 is the angle between the normal direction of the film picking spring tooth and G, (°); β_2 is the angle between Fa and G, (°); γ is the angle between the normal direction of the film picking spring teeth and Fa, (°).

图 10 捡膜过程残膜受力分析

Fig.10 Force analysis of residual film during film picking process

捡膜过程中，膜杂混合物依次经过起膜和托膜，此过程中残膜在捡膜弹齿上主要受重力、土壤粘结力、捡膜弹齿摩擦力及支持力的作用。为防止残膜在作业中滑落，捡膜弹齿运动产生的向心力应大于膜土混合物运动产生的离心力^[23]，即：

$$\begin{cases} f \geq G \sin \alpha_2 + F_a \sin \gamma \\ F = G \cos \alpha_2 + F_a \cos \gamma \\ f = F \cdot \mu \\ \alpha_2 = \beta_2 + \gamma \end{cases} \quad (8)$$

式中 μ 为捡膜弹齿与膜杂混合物间的摩擦因数。

由式 (8) 可得：

$$F_a \geq G \cdot \frac{(\sin \alpha_2 - \mu \cos \alpha_2)}{(\mu \cos \gamma - \sin \gamma)} \quad (9)$$

式中 G、 μ 、 α_2 和 γ 为定值，增大 Fa 可增大捡膜弹齿与残膜间的摩擦力，有效避免残膜相对捡膜弹齿滑落^[24]。在捡膜装置结构参数固定的前提下，捡膜滚筒角速度越大，捡膜弹齿末端速度越快，破坏土壤粘结力的能力越强，越容易发生滑落。因此对捡膜滚筒转速进行合理控制可有效提升残膜的输送、分离能力。

2.1.4 捡膜过程运动分析

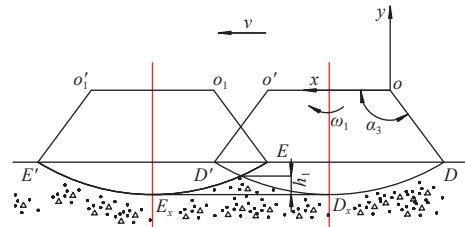
为使捡膜装置连续作业且不发生漏捡，对捡膜区域内弹齿进行运动分析。捡膜弹齿挑起膜杂混合物的过程可视为匀速圆周运动，捡膜过程运动分析如图 11 所示。

以 o 为坐标原点（即捡膜滚筒旋转中心），y 轴正方向竖直向上，x 轴为拖拉机前进方向。由于秋后残膜完整性较好，易于捡拾，一次捡拾过程中，只需一组捡膜弹齿在捡膜区域内工作即可。为使捡膜装置不漏捡，

两相邻捡膜弹齿组运动区域应存在重叠^[25]，则有：

$$\begin{cases} h_1 \leq R - R \sin(\pi - \alpha_3) \\ L_{o'o_1} = 2R \cos(\pi - \alpha_3) \\ v(t_2 - t_1) \leq 2R \cos(\pi - \alpha_3) \end{cases} \quad (10)$$

式中 R 为捡膜弹齿末端回转半径，mm； $L_{o'o_1}$ 为相邻捡膜弹齿水平移动位移，mm； t_1 为捡膜滚筒中心 o 运动至 o_1 的时间，s； t_2 为捡膜滚筒中心 o 运动至 o_1 的时间，s。



注：D 为捡膜弹齿入土点；E 为后一组捡膜弹齿入土点；D_x 为最大捡拾深度位置点；E_x 为后一组最大捡拾深度位置点；D' 为捡膜弹齿出土点；E' 为后一组捡膜弹齿出土点； h_1 为相邻捡膜弹齿运动轨迹重叠点与捡膜弹齿最大入土深度的竖直距离，mm； α_3 为初始相位角，(°)。
 Note: D is the landing point of the film picking spring tooth. E is the landing point of film picking spring teeth in the latter group. D_x is the position point of maximum pick up depth; E_x is the position point of maximum pick up depth in the latter group; D' is the unearthed point of film picking spring teeth; E' is the unearthed point of film picking spring teeth in the latter group; h_1 is the vertical distance between the overlap point of the motion trajectory of the adjacent film picking teeth and the maximum depth of the film picking teeth, mm; α_3 is the initial phase angle, (°).

图 11 捡膜过程示意图

Fig.11 Diagram of film picking process

t_1 时间捡膜弹齿转过的角度为 $2\alpha - \pi$ 。相邻两捡膜弹齿之间的夹角为 $\pi/3$ ，后一个捡膜弹齿到前一个捡膜弹齿位置所用的时间是 t_2 ，即：

$$\begin{cases} t_1 = (2\alpha_3 - \pi) / \omega_1 \\ t_2 = \pi / 3\omega_1 \end{cases} \quad (11)$$

带入式 (10) 求解得：

$$2R \cos(\pi - \alpha_3) \geq v \left(\frac{\pi}{3\omega_1} - \frac{2\alpha_3 - \pi}{\omega_1} \right) \quad (12)$$

整理得：

$$\begin{cases} \alpha_3 \leq \arcsin \frac{R - h_1}{R} \\ \omega_1 \leq \frac{v(3\alpha_3 - 2\pi)}{3R \cos \alpha_3} \\ \frac{n_1}{60} = \frac{v_1}{2\pi R} \end{cases} \quad (13)$$

式中 v_1 为捡膜齿齿尖线速度，m/s。

经计算，捡膜齿在捡膜区域内的的回转半径为 600 mm，捡膜齿齿尖线速度 3.41 m/s，捡膜滚筒轴转速 $n \geq 44.32$ r/min，会导致残膜在输送过程中掉落，输膜率降低，影响拾净率，为防止输膜过程残膜掉落，设定捡膜滚筒轴转速为 45~65 r/min。

2.2 脱膜装置设计与分析

如图 12 所示，脱膜装置主要由脱膜滚筒轴、脱膜滚筒、刮膜板等部件组成。

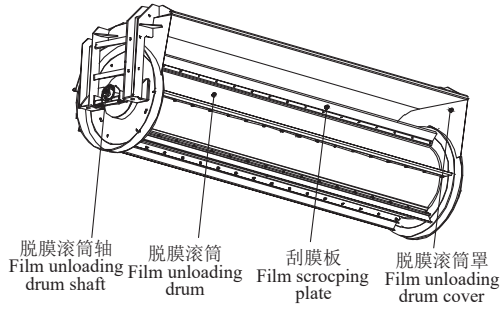


图 12 脱膜装置结构图

Fig.12 Structural diagram of film unloading device

如图 13 所示, 组合式脱膜装置的脱膜过程由脱膜滚筒的主动捋膜及捡膜滚筒的主动脱膜共同作用完成, 其中脱膜滚筒与捡膜滚筒在空间中采用倾斜方式分布, 两滚筒圆心连线与地面夹角为 70° ^[26], 当捡膜弹齿将残膜输送至刮膜区时, 捡膜弹齿组件沿着凸轮轨道改变方向, 相对于捡膜滚筒运动方向发生逆向转动, 即捡膜弹齿组件向内缩回形成主动卸膜动作, 由于刮膜板最末端运动轨迹与捡膜弹齿组件齿尖轨迹在卸膜区域内相切, 刮膜板在卸膜过程中的运动规律不发生改变, 实现捡膜弹齿与刮膜板之间的相对运动, 完成卸膜过程。与此同时, 位于脱膜滚筒上的刮膜板在脱膜区域内使残膜水平向后做平抛运动, 完成主动脱膜动作。

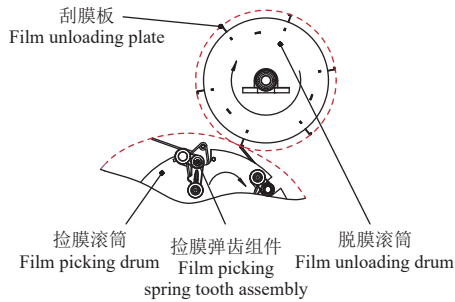
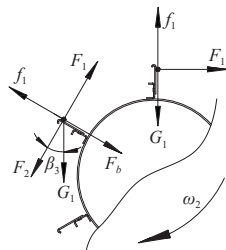


图 13 组合式脱膜装置结构图

Fig.13 Structural diagram of combined film unloading device

为使脱下的残膜顺利输送至集膜箱, 需保证残膜在脱膜叶片端部受到的离心力大于与脱膜叶片间的吸附力^[27]。对即将运动至脱膜叶片端部的残膜进行受力分析, 如图 14 所示。



注: G_1 为残膜重力, N; F_1 为刮膜板对残膜支持力, N; F_2 为残膜间张弛力, N; F_b 为残膜向心力, N; f_1 为残膜与刮膜板间摩擦力, N; β_3 为 G_1 与 F_1 的夹角, $(^\circ)$; ω_2 为脱膜滚筒轴转动角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
Note: G_1 is residual membrane gravity, N; F_1 is supporting force of scraping plate on residual film, N; F_2 is relaxation force between residual membranes, N; F_b is residual membrane centripetal force, N; f_1 is friction between residual film and film scraping plate, N; β_3 is the angle between G_1 and F_1 , $(^\circ)$; ω_2 is the rotational angular speed of the drum shaft, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

图 14 脱膜过程残膜受力分析

Fig.14 Force analysis of residual film during film unloading process

脱膜时残膜主要受到刮膜板支持力、重力及离心力的作用, 为使残膜能从刮膜板上甩落至膜箱内, 则其受力应满足:

$$G_1 \sin \beta_3 \geq \mu_1 \cdot (F_1 + F_2) \quad (14)$$

由于此时膜杂为捡起后状态, 因此忽略残膜间张弛力 F_2 影响^[28], 则式 (14) 可转化为

$$\begin{cases} F_b = m_1 \omega_2^2 R_1 \\ F_1 = G_1 \cos \beta_3 \\ G_1 = m_1 g \\ \omega_2 > \sqrt{\frac{g \sin \beta_3 - \mu \cdot g \cos \beta_3}{R_1}} \\ \omega_2 = 2\pi n_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中 m_1 为膜杂混合物质量, kg; n_2 为脱膜滚筒转速, r/min; R_1 为脱膜装置的回转半径, mm; μ_1 为残膜和刮膜板间的摩擦系数。

由式 (14) ~ (15) 可知, 脱膜滚筒旋转轴转速与脱膜装置的回转半径对脱膜过程有重要影响。刮膜板转速较低时, 叶片不能充分发挥气动特性, 造成叶形阻力大, 风机效率较低; 转速过大, 由壁面损失、涡流损失引起的内部流场的扰动加剧增加, 使得脱膜机构整体性能下降^[29]。故初步设定脱膜滚筒转速 n_2 为 400~650 r/min, 代入式 (15) 得脱膜装置的回转半径 R_1 为 280 mm。刮膜板末端线速度为 16.01 m/s, 脱膜滚筒轴转速 $n_2 \geq 506.34$ r/min, 取脱膜滚筒轴转速 510~650 r/min。

3 脱膜装置气流速度特性仿真与分析

为验证脱膜装置内部气流速度特性, 检验脱膜装置内气流是否符合设计要求, 对脱膜装置进行气流速度特性仿真, 在三维软件中进行等比例建模, 对不影响仿真结果的结构进行简化, 将其保存为 .step 格式文件。

将简化后的模型导入 ANSYS-Fluent 2022R1 求解器中, 为了获得精确的计算结果, 分别对静止域和旋转域的网格进行细化, 以确保流场预测的准确性, 图 15 为边界条件设置。

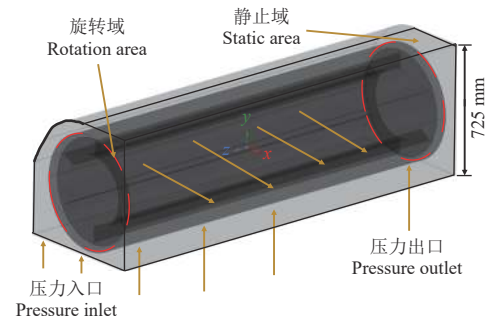


图 15 脱膜装置边界条件设置

Fig.15 Boundary condition setting of film unloading device

将简化后的气力式脱膜装置三维模型导入 Ansys 软件 mesh 模块中进行网格划分, 本文采用结构化网格进行网格划分, 如图 16 所示。气力式脱膜装置网格数量中整

体网格 1 728 847 个，旋转域网格 1 077 963 个，静止域网格 650 884 个。

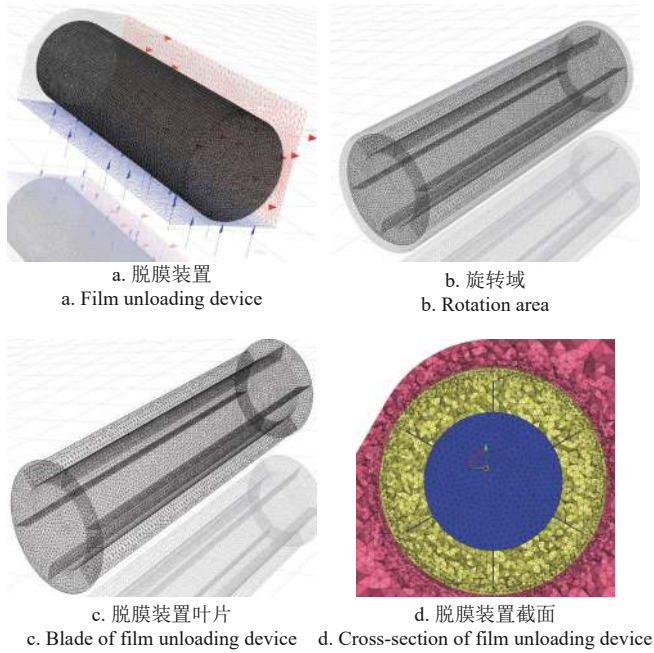
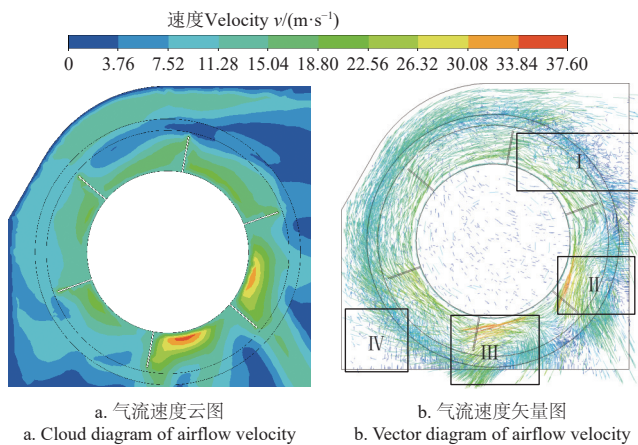


图 16 结构化网格划分结果
Fig.16 Results of structural meshing

对脱膜装置内流场进行稳态仿真分析^[30]，以探明脱膜装置内流场运动特性。由于空气属于不可压缩流体，采用 SST k-omega 模型，流体密度设置为 1.225 kg/m^3 ，黏度设置为 $1.789 4 \times 10^{-5} \text{ kg}(\text{m} \cdot \text{s})$ ，脱膜滚筒转速设置为 570 r/min，结果如图 17 所示。



注：I 为脱膜区，II、III 为二次清选区，IV 为沉降区。
Note: I is the film unloading area, II、III is the secondary clearing area, IV is the settling area.

图 17 脱膜装置内气流运动特性仿真结果

Fig.17 Simulation results of airflow motion characteristics inside film unloading system

由图 17a 可知，气流沿脱膜滚筒叶片周围流速较快，在壁面附近流速逐渐降低，利于残膜随着脱膜滚筒叶片的转动。气力式脱膜装置的出口位置气流速度较快，易于由气压推动的残膜从出口抛出。与其他位置的气流速度对比，气流速度最大位置出现在捡膜装置与脱膜装置

相连接的部位，气流最大速度为 37.6 m/s，利于物理悬浮特性不同的残膜与杂质，在悬浮速度下分离，且利于残膜从捡膜装置上卸下。气流速度最小位置出现在脱膜装置的右下侧，气流最小速度为 1.76 m/s，利于被筛选出的杂质通过此处落入地面。

由图 17b 可知，在脱膜装置气流区域内，气流在绕脱膜滚筒内为顺时针旋流，其轨迹方向在 IV 区发生变化，可有效引导杂质沉降；气流在 I 区出现汇集，利于气流携带残膜进入集膜箱内；少量未卸下残膜被携带至气流速度和方向都变化大的 II 区内，并随着脱膜滚筒的旋转进入 III 区，进入新一轮的气流循环，此过程中，残膜、杂质在比重差异的作用下形成分离，残膜和杂质随着 II 区旋流进入 III 区实现二次清选；气流运动形成的“O”形旋流利于残膜-杂质的分离，流场仿真分析结果表明脱膜装置内流体运动特性符合预期效果。

4 参数优化试验

4.1 试验条件

双滚筒残膜回收机的工作性能受多个因素影响^[31]，为验证各因素对残膜回收效率的影响，得到较优的残膜回收作业效果，2023 年 11 月，在新疆阿克苏地区沙雅县红旗镇包尔海一小队 ($82^{\circ}77'05''\text{E}$, $41^{\circ}39'54''\text{N}$) 进行田间试验。如图 18 所示，试验地土质为砂性土壤且棉秆未粉碎，秸秆未倒伏、地势平坦、滴灌带已回收，已进行棉花采收，残膜厚度为 0.01 mm，捡拾 0~100 mm 土壤深度内残膜，土壤平均含水率为 16.85%，测试环境温度为 $-5 \sim 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，土壤紧实度为 27.818 kg/cm^2 。选用动力为东方红 LX1504 型拖拉机，考虑到驾驶员的熟练程度对机具的捡膜效果也有一定的影响，试验人员对驾驶员进行相关培训，使拖拉机驾驶员熟练掌握残膜回收机的使用技术规范。试验时配有皮尺、土壤紧实度测试仪、天平、转速测量仪、秒表等试验仪器。

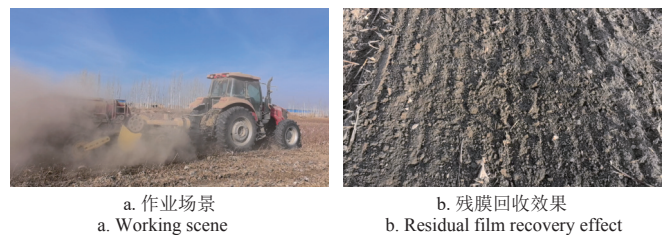


图 18 田间试验
Fig.18 Field test

4.2 试验方法

依据 GB/T 25412-2021 及 NY/T 1227-2019 对双滚筒残膜回收机进行田间试验，以表层（地表及土层深度 0~100 mm）的残膜捡净率、回收混合物含杂率作为质量评价指标。试验采用五点法取样，选取测区中的 4 个测点以及对角线的交点作为机具作业前的 5 个测点，然后从作业前的 5 个测点附近但不重叠的区域选择另外 5 个测点，作为作业后的 5 个测量点。每个采样区域取一个长 1 m、宽 1 m、深 100 mm 的立方体区域，人工捡拾

其中的残膜，并对试验样品进行清洗、晾晒及称量，计算残膜拾净率及含杂率，计算方法为

$$\begin{cases} Y_1 = \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \times 100\% \\ Y_2 = \frac{Z}{Z_0} \times 100\% \end{cases} \quad (16)$$

式中 Y_1 为残膜拾净率，%； Y_2 为含杂率，%； W_0 为作业前表层残膜质量的平均值，g； W 为作业后表层残膜质量的平均值，g； Z_0 为作业后表层回收混合物质量的平均值，g； Z 为回收混合物中秸秆、根茬质量的平均值，g。

4.3 单因素试验及结果分析

根据机具结构特点和工作机理分析，选择机具的前进速度、捡膜滚筒转速和脱膜滚筒转速进行单因素试验，探明各因素水平对拾净率、含杂率的影响规律。每组试验只对单个试验因素进行调整，通过改变拖拉机后输出轴的转速以及更换传动链轮对捡膜滚筒转速进行调整、通过更换拖拉机档位以及观察仪表盘上发动机转速对机具前进速度进行调整、通过更换传动带轮对脱膜滚筒转速进行调整。

单因素试验结果如图 19 所示。由图 19a 可知，捡膜滚筒转速为 55 r/min，脱膜滚筒转速为 570 r/min 时，随机具前进速度增加，拾净率呈先增后减趋势，含杂率呈先减小后增加趋势。机具前进速度增加至 3 km/h 时，相同时间内弹齿拾起的残膜数量增多，拾净率逐渐上升；当平均前进速度超过 7 km/h 时，前进速度过快，不利于弹齿拾起残膜，残膜与杂质堆积，不利于膜杂分离，造成膜箱内碎秸秆等杂质增多，拾净率、含杂率逐渐减少。当机具前进速度为 5 km/h 时，拾净率为 85.36%，含杂率为 46.7%。机具前进速度 3~7 km/h 是满足机具作业性能的较优区间。

由图 19b 可知，前进速度为 5 km/h，脱膜滚筒转速

为 570 r/min 时，拾净率随捡膜滚筒转速的增加呈现出先增后减趋势，随捡膜滚筒转速的增加，含杂率呈先减小后增加趋势：捡膜滚筒转速增加时，残膜被推送至弹齿根部，粘连的泥土使残膜与弹齿之间的摩擦力增加，在输送过程中不易掉落，拾净率增大；当转速为增加至 50 r/min 时，残膜连续性好，在捡膜和输送过程中不易掉落，机具行进速度远小于捡膜齿末端的线速度，弹齿运动轨迹有重合区，拾净率进一步增加；随着捡膜滚筒转速的增加，残膜与杂质在输送过程中易滑落，拾净率和含杂率呈下降趋势。当捡膜滚筒转速超过 60 r/min 时，被挑起的残膜易被撕裂成条状掉落回地里，拾净率下降，残膜和杂质在捡膜滚筒上方滞留时间较短，膜杂分离时间果断，导致含杂率进一步提高；当捡膜滚筒转速达到 55 r/min 时，含杂率为 46.5%，拾净率为 85.61%，捡膜滚筒转速 50~60 r/min 是为双滚筒式棉田残膜回收机较优工作区间。

由图 19c 可知，前进速度为 5 km/h，捡膜滚筒转速为 55 r/min 时，拾净率随脱膜滚筒转速的增大呈现出先增大后减小趋势，含杂率呈现出先减小后增加趋势。当脱膜滚筒转速取值范围为 540~570 r/min 时，此时脱膜滚筒转速产生的悬浮力，足以支持物料特性不同的残膜和杂质进行分离，对残膜的输送与脱膜有一定的帮助，拾净率增加；脱膜滚筒产生的气流场，对残膜与杂质分离作用增强，除杂效果得到明显提高，含杂率下降；当脱膜滚筒转速超过 600 r/min 时，同时随着脱膜滚筒转速的提高，残膜和杂质在滚筒上方滞留时间较短，膜杂分离不充分，含杂率逐渐升高；当脱膜滚筒转速达到 570 r/min 时，含杂率为 46.31%，拾净率为 85.43%，脱膜滚筒转速 540~600 r/min 为双滚筒式棉田残膜回收机较优工作区间。

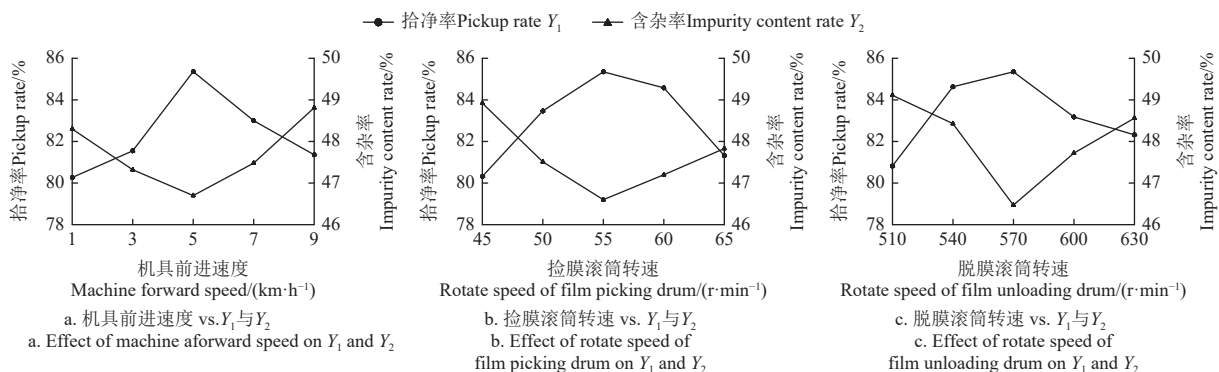


图 19 单因素试验结果

Fig.19 Results of single factor test

4.4 多因素试验方案及结果分析

以残膜回收机前进速度 X_1 、捡膜滚筒转速 X_2 、脱膜滚筒转速 X_3 为试验因素，以残膜拾净率 Y_1 、含杂率 Y_2 为指标进行 Box-Behnken 试验，使用 Box-Behnken 试验设计方法并结合单因素试验结果，试验因素水平编码如表 2 所示。

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析，试验

结果如表 3 所示。双滚筒残膜回收机作业的残膜拾净率平均值为 80.32%，含杂率平均值为 50.16%，对试验结果进行多元回归拟合分析，得出机具前进速度、捡膜滚筒转速、脱膜滚筒转速与拾净率及含杂率的回归模型，对模型进行方差分析，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，拾净率 Y_1 的回归模型显著，其中 x_1 、

x_2 、 x_1x_3 、 x_3^2 对 Y_1 的影响极显著， x_1x_2 、 x_2x_3 对 Y_1 的影响显著；含杂率 Y_2 的回归模型显著，其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_2^2 、 x_3^2 对 Y_2 的影响极显著， x_2x_3 、 x_1^2 对 Y_2 的影响显著。

表 2 试验因素编码

Table 2 Factor and levels of test

编码 Code	机具前进速度 Machine forward speed $X_1/(km \cdot h^{-1})$	捡膜滚筒转速 Rotate speed of film picking drum $X_2/(r \cdot min^{-1})$	脱膜滚筒转速 Rotate speed of film unloading drum $X_3/(r \cdot min^{-1})$
-1	3	50	540
0	5	55	570
1	7	60	600

去除不显著项，得到机具前进速度、捡膜滚筒转速、脱膜滚筒转速对残膜拾净率 Y_1 、含杂率 Y_2 的回归方程为

$$Y_1 = 84.84 + 2.90x_1 - 3.19x_2 + 2.57x_1x_2 - 4.06x_1x_3 + 2.09x_2x_3 - 8.80x_3^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 43.45 - 2.65x_1 - 3.34x_2 - 5.09x_3 - 3.90x_1x_2 - 2.39x_2x_3 + 2.27x_1^2 + 4.29x_2^2 + 7.69x_3^2 \quad (18)$$

双滚筒残膜回收机拾净率的回归模型中， $P < 0.000 1$ ，模型极显著，回归方程的预测值与实际值有较高相关性；

含杂率的回归模型中 $P < 0.000 1$ ，模型极显著，回归方程的预测值与实际值有较高相关性。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

序号 No.	机具前进速度 Machine forward speed x_1	捡膜滚筒转速 Rotate speed of film picking drum x_2	脱膜滚筒转速 Rotate speed of film unloading drum x_3	拾净率 Pick up rate $Y_1/\%$	含杂率 Impurity content rate $Y_2/\%$
1	0	0	0	82.92	42.46
2	0	0	0	84.32	44.47
3	0	-1	-1	82.75	62.52
4	0	1	1	72.62	43.58
5	0	0	0	86.13	42.81
6	1	0	-1	84.35	52.59
7	-1	1	0	76.85	52.46
8	1	0	1	73.96	47.13
9	-1	0	-1	69.29	62.62
10	-1	0	1	75.13	51.3
11	0	0	0	86.07	42.2
12	0	-1	1	76.59	55.31
13	0	0	0	84.76	45.32
14	0	1	-1	70.42	60.33
15	1	-1	0	86.09	55.36
16	-1	-1	0	86.57	51.08
17	1	1	0	86.63	41.14

注： x_1 、 x_2 、 x_3 为试验因素的编码值。

Note: x_1, x_2, x_3 are coded values of test factors.

表 4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

来源 Source	Y_1					Y_2				
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
模型	599.76	9	66.64	28.88	<0.000 1**	824.18	9	91.58	31.29	<0.000 1**
x_1	67.22	1	67.22	29.13	0.001 0**	56.39	1	56.39	19.27	0.003 2**
x_2	81.15	1	81.15	35.17	0.000 6**	89.51	1	89.51	30.58	0.000 9**
x_3	9.05	1	9.05	3.92	0.088 1	207.47	1	207.47	70.89	<0.000 1**
x_1x_2	26.32	1	26.32	11.40	0.011 8*	60.84	1	60.84	20.79	0.002 6**
x_1x_3	65.85	1	65.85	28.54	0.001 1**	8.58	1	8.58	2.93	0.130 5
x_2x_3	17.47	1	17.47	7.57	0.028 4*	22.75	1	22.75	7.77	0.027 0*
x_1^2	0.541 9	1	0.541 9	0.234 8	0.642 8	21.63	1	21.63	7.39	0.029 8*
x_2^2	0.838 5	1	0.838 5	0.363 3	0.565 7	77.55	1	77.55	26.49	0.001 3**
x_3^2	325.97	1	325.97	141.25	<0.000 1**	249.09	1	249.09	85.11	<0.000 1**
残差	16.15	7	2.31			20.49	7	2.93		
失拟项	9.01	3	3.00	1.68	0.306 8	13.00	3	4.33	2.31	0.217 6
误差	7.14	4	1.79			7.49	4	1.87		
总和	615.91	16				844.67	16			

注： $P < 0.01$ (**极显著)； $0.01 \leq P < 0.05$ (*为显著)。

Note: $P < 0.01$ (**highly significant); $0.01 \leq P < 0.05$ (*significant).

4.5 响应曲面分析

根据方差分析及式 (17) ~ (18) 可得，各因素对拾净率显著性影响顺序依次为机具前进速度、捡膜滚筒转速、脱膜滚筒转速；对含杂率显著性影响顺序依次为机具前进速度、捡膜滚筒转速、脱膜滚筒转速。为直观分析各因素的交互作用对于各项评价指标的影响，通过 Design-Expert 13.0 软件绘制机具前进速度、捡膜滚筒转速、脱膜滚筒转速对拾净率及含杂率的响应曲面，如图 20 所示。

图 20a 为捡膜滚筒转速处于 55 r/min 时，脱膜滚筒转速与机具前进速度交互作用对拾净率的影响。当脱膜滚筒转速固定 540 r/min 时，随着机具前进速度的增加，拾净率呈逐渐增加的趋势，当机具前进速度在增大 5 km/h 后，残膜来不及被捡拾，造成拾净率的急剧下降；当机具前进速度在 7 km/h 时，随着脱膜滚筒转速的增加，残膜拾净率先增大后减小，当脱膜滚筒转速较低时，无

法对回收残膜形成抛送作用，造成残膜堆积，脱膜滚筒转速过大时则会增加轴承负载，使脱膜装置寿命变短、降低机械的可靠性。而随着机具前进速度的增加，残膜拾净率逐步提高。

图 20b 为机具前进速度处于 5 km/h 时，脱膜滚筒转速与捡膜滚筒转速交互作用对拾净率的影响。拾净率随机具的捡膜滚筒转速和脱膜滚筒转速的增加，均呈现先增后减的趋势，并且捡膜滚筒转速和脱膜滚筒转速对拾净率的影响作用相近，与方差分析值反映的结果相符。

图 20c 为脱膜滚筒转速处于 570 r/min 时，当机具前进速度处于 4 km/h 时，随着捡膜滚筒转速增加，含杂率先减小后增加，当捡膜滚筒转速较低时，捡膜弹齿漏捡和未捡面积较大，捡起的残膜较少和秸秆较多，使得含杂率较高，捡膜滚筒转速过大时则会重复捡膜、将多余秸秆捡起，提高含杂率。当捡膜滚筒转速处于 54 r/min

时,随着机具前进速度的增加,含杂率逐渐减小,变化趋势明显。

图 20 d 为机具前进速度处于 5 km/h 时,捡膜滚筒转速与脱膜滚筒转速交互作用对含杂率的影响。当脱膜滚筒转速固定在 600 r/min 时,含杂率随捡膜滚筒转速的增加而呈现先减小再增加的趋势,捡膜滚筒转速越快,相同时间内捡拾的残膜和杂质质量越多,膜杂分离效果就越

不好,造成膜箱中杂质含量的增加,含杂率明显上升;当捡膜滚筒转速固定在 50 r/min 时,随着脱膜滚筒转速的增加,含杂率也呈先减小再增加的趋势,主要原因是脱膜滚筒转速增加,单位时间内脱膜滚筒产生的悬浮力会增加,降低膜杂分离效果,含杂率上升;但脱膜滚筒转速过大会使机械进行过多的振动,影响可靠性,使膜箱中杂质含量逐渐增多,含杂率呈上升趋势。

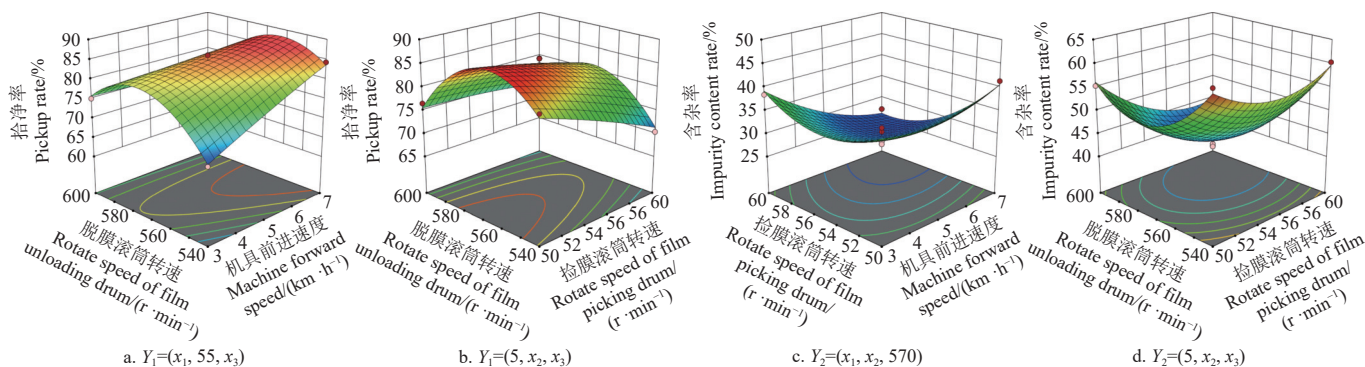


图 20 各因素交互作用对残膜回收性能的相应曲面

Fig.20 Corresponding surface of the interaction of various factors on the performance of residual film recovery

4.6 参数优化

为得到影响双滚筒残膜回收机回收性能的较优参数组合,以提高捡净率、降低含杂率为目标,对残膜回收的机具前进速度、捡膜滚筒转速及脱膜滚筒转速进行多目标优化分析,得到优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ 3 \text{ km/h} \leq X_1 \leq 7 \text{ km/h} \\ 50 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 60 \text{ r/min} \\ 540 \text{ r/min} \leq X_3 \leq 600 \text{ r/min} \end{cases} \quad (19)$$

通过分析计算,得到较优参数组合为:机具前进速度 6.72 km/h、捡膜滚筒转速 56.70 r/min、脱膜滚筒转速 569.78 r/min,此时残膜捡净率为 88.71%,含杂率为 39.13%。

4.7 验证试验

在未进行参数优化前进行试验,试验重复 3 次,得到未优化前捡净率平均值为 80.32%,含杂率平均值为 50.16%。为验证优化后的机具性能,在新疆阿克苏地区沙雅县沙雅钵施然智能农机有限公司试验地进行田间验证试验,考虑到试验参数设置的可行性问题,将较优参数组合圆整为机具前进速度 6.7 km/h、捡膜滚筒转速 57 r/min、脱膜滚筒转速 570 r/min 进行验证试验,试验重复 3 次,在同一地点进行验证试验,依据式 (16) 的计算方法计算捡净率、含杂率并取平均值,试验结果如表 5 所示。

较优参数组合下验证试验得到平均残膜捡净率为 86.1%,含杂率为 39.2%,相较于同类型滚筒式表层残膜回收机^[32](残膜捡净率 85.03%,含杂率 15.88%),残膜捡净率提高 1.07 个百分点,各项指标都满足国家行业作业

标准的要求。

表 5 试验验证结果

Table 5 Test verification results

序号 No.	捡净率 Pick up rate Y_1 /%	含杂率 Impurity content rate Y_2 /%
1	85.9	37.9
2	86.6	39.2
3	85.8	40.5
平均值	86.1	39.2
技术标准值	≥ 85	≤ 45
未优化前平均值	80.32	50.16

5 结论

1) 设计了一种双滚筒残膜回收机,对其捡拾脱膜装置进行重点研究,介绍了其工作原理,对捡拾脱膜装置关键部件进行设计,对捡膜和脱膜过程进行力学和运动学分析,得到了影响残膜回收性能的主要因素。使用气流特性分析软件对脱膜装置内流场进行仿真分析,探明了气流运动形成的“O”形旋流利于残膜-杂质的分离。

2) 单因素试验获得机具前进速度取值范围为 3~7 km/h,捡膜滚筒转速较优取值范围为 50~60 r/min,脱膜滚筒转速较优取值范围为 540~600 r/min。

3) 通过试验验证与响应面分析,得到残膜回收性能的较优工作参数为机具前进速度 6.7 km/h、捡膜滚筒转速 57 r/min、脱膜滚筒转速 570 r/min,较优参数组合下进行验证试验得到,平均残膜捡净率为 86.1%,平均含杂率为 39.2%,较参数优化前有明显提升,作业性能指标满足残膜回收机技术要求。

[参考文献]

- [1] 梁荣庆,陈学庚,张炳成,等.新疆棉田残膜回收方式及资源化再利用现状问题与对策[J].农业工程学报,2019,

- 35(16): 1-13.
LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Problems and countermeasures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(16): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张俊鹏, 冯棣, 曹彩云, 等. 咸水灌溉对棉花耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 107-112.
ZHANG Junpeng, FENG Di, CAO Caiyun, et al. Effects of saline water irrigation on water consumption characteristics and water use efficiency of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- [3] 国家统计局农村社会经济调查司. 2022 年中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022 年.
- [4] 王龙, 贺小伟, 胡灿, 等. 生物降解地膜降解性能对新疆土壤温湿度及棉花产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(4): 64-70, 79.
WANG Long, HE Xiaowei, HU Can, et al. Effects of degradation properties of biodegradable plastic mulches on soil temperature, humidity and cotton yield in Southern Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4): 64-70, 79. (in Chinese with English abstract)
- [5] 丁宏伟, 王振华, 李文昊, 等. 极端干旱区降解膜对棉田耗水、籽棉产量及水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 41-48.
DING Hongwei, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. Effects of degradation film on water consumption, cotton yield and water utilization of cotton field in extreme arid areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [6] 姜晓旭, 封雪, 周笑白, 等. 土壤中微塑料污染现状与检测技术研究进展[J]. *环境化学*, 2023, 42(1): 163-175.
JIANG Xiaoxu, FENG Xue, ZHOU Xiaobai, et al. Research progress on pollution status and analysis method for microplastics in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(1): 163-175. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张金瑞, 任思洋, 戴吉照, 等. 地膜对农业生产的影响及其污染控制[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(20): 3983-3996.
ZHANG Jinrui, REN Siyang, DAI Jizhao, et al. Influence of Plastic Film on Agricultural Production and Its Pollution Control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(20): 3983-3996. (in Chinese with English abstract)
- [8] 祁虹, 赵贵元, 王燕, 等. 我国棉田残膜污染危害与治理措施研究进展[J]. *棉花学报*, 2021, 33(2): 169-179.
QI Hong, ZHAO Guiyuan, WANG Yan, et al. Research progress on pollution hazards and prevention measures of residual film in cotton field in China[J]. *Cotton Science*, 2021, 33(2): 169-179. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李昊, 李世平, 南灵, 等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的 Meta 分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 228-235.
LI Hao, LI Shiping, NAN Ling, et al. Meta-analysis of effect of plastic film mulching on cotton yield in china[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 228-235. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 王毅超, 蒋永新, 张佳喜, 等. 二次抛送式棉秸秆粉碎还田机的设计与试验研究[J]. *农机化研究*, 2021, 43(11): 78-82.
WANG Yichao, JIANG Yongxin, ZHANG Jiayi, et al. Design and experimental study of the secondary toss cotton straw pulverizing and returning machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(11): 78-82. (in Chinese with English abstract)
- [12] 董秋鹏, 蒋永新, 王毅超, 等. 滚筒式残膜回收机机架强度分析与试验[J]. *农机化研究*, 2021, 43(9): 22-28.
DONG Qiupeng, JIANG Yongxin, WANG Yichao, et al. Strength analysis and test of roller type residual film recovery machine frame[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(9): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘旋峰, 石鑫, 郭兆峰, 等. 滚筒式残膜回收机的性能试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 26-31.
LIU Xuanfeng, SHI Xin, GUO Zhaofeng, et al. Performance test on roller type residual film recycling machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(16): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张佳喜, 刘旋峰, 牛长河, 等. 新型滚刀式棉秸秆粉碎回收机的研制[J]. *农机化研究*, 2012, 34(1): 95-98.
ZHANG Jiayi, LIU Xuefeng, NIU Changhe, et al. Design of cotton stalk of crushing and reclaiming machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(1): 95-98. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张新超, 毕新胜, 王志欢, 等. 钉齿滚筒式残膜回收机关键部件的设计与研究[J]. *农机化研究*, 2017, 39(10): 72-76.
ZHANG Xinchao, BI Xinsheng, WANG Zhihuan, et al. The design and research of key-parts of spiked tooth plastic film residue recovery[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(10): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [16] ROCCA A R. Plastic mulch retriever: US8302699[P]. 2012-11-06.
- [17] KIMBALL J. Agricultural implement for recovery of plastic mulch and processing of the same: US10285330[P]. 2019-05-14.
- [18] 谢文宝, 刘国勇. 农地流转背景下新疆农户残膜回收机械化技术采纳分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(4): 90-98.

- XIE Wenbao, LIU Guoyong. Study on farmers's technology adoption of mechanical residual film recycling under farmland circulation in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(4): 90-98. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 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. Study on damage of corn kernel and cob in corn kernel harvesting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 203-207, 212. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈发, 史建新, 王学农, 等. 弧型齿残膜捡拾滚筒捡膜的机理[J]. 农业机械学报, 2006(6): 36-41. CHEN Fa, SHI Jianxin, WANG Xuenong, et al. Study on collecting principle of arc-type tooth roller for collecting plastic residue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006(6): 36-41. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵海军. 残膜捡拾滚筒的运动学和动力学研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005. ZHAO Haijun. Study on Kinematics and Dynamics of Roller for Collecting Plastic Film Residue[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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(S1): 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(S1): 304-310. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 the Portable Cotton Field Residual Film Recycling Machine[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘策, 胡斌, 罗昕, 等. 基于滚筒弹齿式起膜机构的残膜回收机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(5): 230-239. LIU Ce, HU Bin, LUO Xin, et al. Design and test of residual film recovery machine based on drum elastic tooth film lifting mechanism[J]. Journal of gansu agricultural university, 2022, 57(5): 230-239. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 collectors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(18): 51-63. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李斌, 王吉奎, 胡凯, 等. 残膜回收机顺向脱膜机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 23-28. LI Bin, WANG Jikui, HU Kai, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, (Transactions of the CSAE) 2012, 28(21): 23-28. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 with English abstract)
- [29] 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 Jiahuan, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 10-16. (in Chinese with English abstract)
- [30] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69-77. WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69-77. (in Chinese with English abstract)
- [31] 郁志宏, 淮守成, 王文明. 基于弹齿轨迹的滚筒式牧草捡拾器遗漏率及工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 37-43. YU Zhihong, HUAI Shoucheng, WANG Wenming. Leakage rate and optimization of working parameters for cylinder pickup collector based on spring-finger trajectory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(4): 37-43. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘颖灿, 魏远俊, 钱兴桂, 等. 秸秆还田残膜回收一体机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 263-271. LIU Yingcan, WEI Yuanjun, QIAN Xingguo, et al. Design and test of integrated machine for straw returning to field and residue film recovery[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 263-271. (in Chinese with English abstract)

Design and experiments of a double drum surface residual film recycling machine after harvest

ZHANG Xuejun^{1,2}, KANG Mengchen¹, SHI Zenglu^{1,2}, YAN Jinshan^{1,2},
LIU Xiaopeng¹, GUO Lei¹, WANG Meijing¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China)

Abstract: Residual film recycling machines cannot fully meet the requirements of large-scale production of residual film. Serious film entanglement and winding can often occur in the bearing part. The cotton straw cannot be completely broken, thus leading to the low film content of the recovered film. It is very necessary to improve the pick-up rate with less straw content from the recycling mixture in the residual film recycling machine. In this study, the double-roller residual-film recycling machine was designed suitable for surface residual film recycling after the autumn harvest. The pneumatic and mechanical collaborative film was unloaded to realize the operation using mechanical film picking. The key components were determined to better design the film recycling machine. The kinetic analysis of film picking and unloading was carried out to match the range of working speed, in order to overcome the interference among the machinery. The key structural parameters were determined for the film-picking and unloading device. The center motion trajectory of the roller and the forward and reverse cam orbits were optimized to determine the cam structure parameters. Mathematical and graphical analysis was used to obtain the conditions of no missing in the film-picking device. The film unload device was simplified in the software to divide the grid. The data was then imported into the flow analysis software. The flow field was simulated inside the film unloading device. A systematic investigation was implemented to explore the influence of the flow field on the transport of the residual film. The results show that the "O" shape rotation formed by the airflow was a benefit to the separation of residual film and impurities. Single-factor test was carried out with the rotating speed of the film picking and unloading roller as the test factors, according to the forward speed of the machine. The operating parameters of the machine were obtained, including the optimal operating range of the forward speed, the rotating speeds of the film picking and removing roller. The response surface test was then designed to verify the effectiveness of the machine, with the forward speed of the machine, the rotating speed of the film picking and unloading roller as the test factors, and the pick-up rate of the residual film and the straw content rate of the recovered mixture as the test indexes. The analysis of variance was performed after the test. The regression equations were obtained for the pick-up rate and straw content rate. The optimal working parameters were obtained to optimize the factors. The test results show that the operation performance was better, when the forward speed of the machine was 6.7 km/h, the rotating speed of the film-picking roller was 57 r/min, and the rotating speed of the film-removing roller was 570 r/min. A field verification test was carried out under the optimal combination of parameters, the results showed that the mean value of residual film pick-up rate was 86.1% and the straw content rate of the recycling mixture was 39.2%, compared with the existing film recycling machine, the residual film pick up rate is increase 1.07 percentage points, and all indicators meet the requirements of the surface residual film recycling machine after harvest.

Keywords: agricultural machinery; design; test; double drum type; residual film recycling