doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.036

棉秆粉碎与残膜回收打包一体机设计与试验

史明伟[1]　王明刚[1]　王　伟[2]　李智国[1]　王　雷[2]　张海娟[3]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.西安宇恒禾悦农业机械设备有限公司,西安 710065;
3.西安市农机监理与推广总站,西安 710065)

摘要:针对现有滚筒式棉秆粉碎与残膜回收联合作业机残膜回收率低、残膜含杂率高及揉搓式残膜打包机构容易丢膜且打包带容易变形等问题,设计了棉秆粉碎与残膜回收打包一体机。通过原理分析与计算确定了锤片式秸秆粉碎机构与螺旋输送机构的关键参数;改进了残膜捡拾机构与地轮驱动机构,确定了拾膜滚筒的尺寸及临界转速、地轮与拾膜滚筒之间的传动比、捡膜齿尺寸与捡膜齿间距等参数;通过理论分析,确定了螺旋排杂机构与脱膜机构的结构参数及工作参数;通过分析残膜打包过程,确定了打包带与水平面之间的夹角、打包带线速度以及支撑辊数量与间距等参数。田间试验表明,机具前进速度为 10 km/h、捡膜齿深度为 25 mm、留茬高度为 10 cm 时,作业效果最佳,验证试验表明,在上述最佳工作参数下,机具的残膜回收率为 89.78%,残膜含杂率为 11.15%,粉秆合格率为 94.79%,各项性能指标均满足设计要求。

关键词:塑料地膜;棉秆粉碎;残膜回收;残膜打包;优化设计

中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0397-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Integrated Machine for Cotton Stalk Crushing and Residual Film Recycling and Baling

SHI Mingwei[1]　WANG Minggang[1]　WANG Wei[2]　LI Zhiguo[1]　WANG Lei[2]　ZHANG Haijuan[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Xi'an Yuhengheyue Agricultural Machinery Equipment Co., Ltd., Xi'an* 710065, *China*
3. *Xi'an Agricultural Machinery Supervision and Extension General Station, Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: In recent years, film mulching technology has been widely used in agriculture. After cotton harvest, large amounts of residual film need to be recycled, simultaneously, cotton stalks crushing needs to be carried out, in Xinjiang, China. The existing integrated machine for straw crushing and residual film recycling in China can be mainly divided into drum-type and chain teeth type. Considering the current drum-type integrated machine, which has a low residual film recovery rate, and high impurity content in the residual film, the rubbing-type residual film baling mechanism was prone to throw out the residual film and was easy to deform the baling belt and other problems, an integrated machine for straw crushing and residual film recycling and baling was developed. Through principle analysis and calculation, the key parameters of the hammer blade straw crushing mechanism and the screw conveying mechanism were determined; the residual film picking mechanism and the wheel drive mechanism were improved, and the dimensions and rotation speed of the film pick-up drum, the transmission ratio between the wheel and the film pick-up drum, the dimensions of the film pick-up teeth and the space between adjacent film pick-up teeth were determined; through theoretical analysis, the structural parameters and operating parameters of the screw impurity removal mechanism and the film removal mechanism were determined; by analyzing the process of residual film baling, the parameters such as the angle between the baling belt and the horizontal plane, the linear speed of the baling belt, and the number and space of the support rollers were determined. The field test demonstrated that the optimal

收稿日期:2024-08-22　修回日期:2024-09-25

基金项目:杨凌示范区种子孵化项目(2022-JSCY-05)

作者简介:史明伟(2000—),男,硕士生,主要从事残膜回收机研究,E-mail:mingw183262@163.com

通信作者:李智国(1984—),男,教授,博士生导师,主要从事小型实用农机研发与改良研究,E-mail:lizhiguo0821@163.com

operating parameters of the machine were as follows: the machine's advancing velocity was 10 km/h, the depth of the film-picking teeth was 25 mm, and the height of the stubble was 10 cm. Validation test results demonstrated that under the aforementioned optimal operating parameters, the film pickup rate was 89.78%, the soil content was 11.15%, and the pass rate of crushed straw was 94.79%.

Key words: plastic film; cotton stalk crushing; residual film recycling; residual film baling; optimal design

0 引言

地膜覆盖种植具有保温保墒、抑制杂草、促进作物早熟、防虫害等作用,被广泛应用于棉花、玉米等农作物[1-2]。由于田间残膜不断增多,造成环境污染、农作物减产、农机具无法顺利运行等问题[3],人工捡拾残膜费时费力,可降解膜降解效果不稳定,机械捡拾残膜工作效率高,成本低[4]。我国残膜回收机主要型式有滚筒伸缩杆齿式、链齿式、弹齿式、气吸式等。

新疆为我国棉花主产地,棉花收获后有大量残膜亟待回收,且通常需要进行棉秆粉碎还田。按照残膜捡拾机构形式不同,我国棉秆粉碎与残膜回收联合作业机主要分为滚筒式和链齿式,链齿式残膜回收机残膜回收率较高,膜杂分离效果好[5-6],滚筒式残膜回收机还存在一些缺陷。由佳翰等[7]设计的 4JSM-2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机,采用滚筒伸缩杆齿式残膜捡拾机构,改进了气力式卸膜机构,增加了集膜箱容积与脱膜率,但拾膜时残膜易滑落;刘颖灿等[8]设计的秸秆还田残膜回收一体机,在拾膜滚筒上增设了防缠绕部件,采用脱膜机构除杂,但拾膜部件易变形,残膜含杂率高;新疆农业科学院研制的 4JSM-2100 型棉秆粉碎还田残膜回收联合作业机,采用滚筒弧形齿式残膜捡拾机构,作业效率高,回收的残膜含杂少,但残膜回收率较低。现有的残膜打包机构多为揉搓式、圆辊式和压块式[9-10]。以上残膜回收联合作业机仍存在残膜回收率低、残膜含杂率高等问题,而揉搓式打包机构存在打包带容易变形及容易丢膜等问题。

为了解决上述问题,结合新疆一膜六行的棉花种植模式与棉秆粉碎要求,设计 11JCM-200FK 型棉秆粉碎与残膜回收打包一体机。采用地轮驱动残膜捡拾机构,并改进拾膜滚筒与拾膜部件;增设螺旋排杂机构,改进脱膜叶片的结构;增设支撑辊并优化残膜打包机构的结构参数,提升揉搓式残膜打包机构的可靠性。本文通过对机具的工作原理与工作过程进行分析,确定关键机构的结构参数与工作参数。通过田间试验确定机具的最优工作参数组合。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

整机结构如图 1 所示,主要由牵引机构、棉秆粉碎还田装置、螺旋排杂机构、残膜捡拾机构、脱膜机构、残膜打包机构、地轮、传动系统、液压系统、机架等部分组成。该机根据捡拾表层残膜(0~100 mm)的原则进行设计,主要技术指标如表 1 所示。

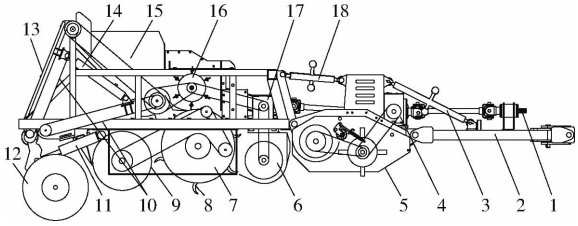


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

1. 整机动力输入轴 2. 牵引机构 3. 下拉杆 4. 前变速箱 5. 棉秆粉碎还田装置 6. 螺旋排杂机构 7. 残膜捡拾机构 8. 捡膜齿 9. 地轮 10. 打包带 11. 下液压杆 12. 行走轮 13. 残膜打包机构 14. 上液压杆 15. 打包仓 16. 脱膜机构 17. 后变速箱 18. 上拉杆

表 1 机具主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 500×3 040×1 900
作业幅宽/mm	2 000
配套功率/kW	88.2~132.3
作业速度/(km·h^{-1})	8~12
结构质量/kg	4 000

1.2 工作原理

该机挂接方式为牵引式,拖拉机输出轴的动力通过整机动力输入轴传递到前变速箱,前变速箱输出的动力一部分传递给秸秆粉碎还田装置,另一部分通过后变速箱传递给螺旋排杂机构与脱膜机构,脱膜机构将动力传递给残膜打包机构。机具前进时,秸秆粉碎还田装置会粉碎还田棉秆,地轮驱动残膜捡拾机构,使捡膜齿入土拾膜,螺旋排杂机构将膜面落下的杂质排出至机具一侧,脱膜机构将相应位置的残膜带至后方的残膜打包仓内。残膜打包机构可以将残膜揉搓成包,卸膜时,上液压杆撑起后方打包带,残膜被抛出至田间。下液压杆撑起行走轮,使

机具在路面上行走。调节上拉杆调整捡膜齿深度，调节下拉杆来调整留茬高度。

2　整机关键部件设计与分析

2.1　秸秆粉碎还田装置

该装置包括秸秆粉碎机构与秸秆还田机构。该机采用横轴锤片式秸秆粉碎机构，并使用 Y 型刀片作为动刀[6]，如图 2a 所示，动刀采用双螺旋线排列方式。图 2b 为动刀末端点的运动轨迹，在点 A 可得[11]

$$\begin{cases} v_n = v_r + v_m \\ v_r = R\omega = \dfrac{n\pi R}{30} \end{cases} \tag{1}$$

式中　v_n——动刀末端点绝对速度，m/s

v_r——动刀末端点线速度，m/s

v_m——机具前进速度，m/s

ω——粉碎刀轴转动角速度，rad/s

n——粉碎刀轴转速，r/min

R——动刀末端点回转半径，取 270 mm

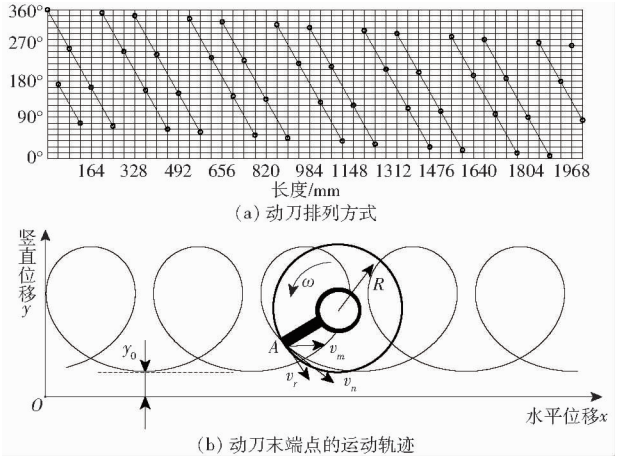


图 2　动刀排列方式及其末端点的运动轨迹

Fig. 2　Arrangement of knives and trajectory of their end points

图 2b 中 y_0 为留茬高度，作业时可调节。无支撑切割的条件为 $v_n \geqslant 48$ m/s[11]，根据式(1)可得到 $n \geqslant (-30v_m + 1\,440)/(\pi R)$，取 v_m 为 3.33 m/s，可以算得粉碎刀轴转速至少为 1 620 r/min，考虑到运行阻力，将粉碎刀轴转速增至 2 100 r/min。为了减少外界环境的影响，该机采用螺旋式秸秆还田机构，根据 JB/T 7679—2008《螺旋输送器》，中型螺旋输送器公称直径 D 为 250 ~ 400 mm，螺距 P 为(0.5 ~ 2.2)D，为保证输送效率与可靠性，D 取 320 mm，P 取 320 mm，螺旋输送器叶片厚度取 6 mm。根据螺旋输送器转速计算公式[12]，并考虑到运行阻力，取螺旋输送器转速为 800 r/min。

2.2　残膜捡拾机构

残膜捡拾机构(图 3)主要由防缠护板、拾膜滚筒、滚筒中心轴、圆槽轨道、捡膜齿组件、轴承座等组成，滚筒中心轴与拾膜滚筒固定在一起，捡膜齿组件通过轴承座与拾膜滚筒转动安装，圆槽轨道固定在机架上，防缠护板可以防止残膜缠绕，拾膜滚筒稳定性好，工作可靠。

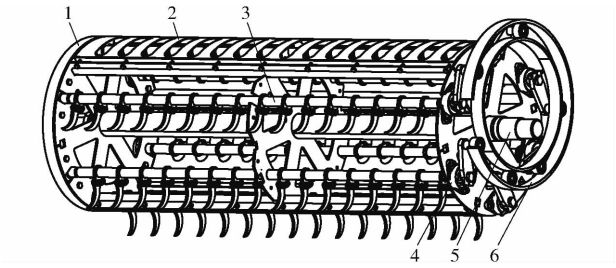


图 3　残膜捡拾机构结构图

Fig. 3　Structural diagram of residual film picking mechanism

1. 防缠护板　2. 拾膜滚筒　3. 捡膜齿组件　4. 轴承座　5. 滚筒中心轴　6. 圆槽轨道

2.2.1　捡膜齿组件及捡膜齿排布方式

图 4a 为捡膜齿组件结构图，主要由捡膜齿轴、齿座、捡膜齿、摇臂、定向轮等组成，捡膜齿与齿座通过螺栓连接，便于维修和更换，摇臂与捡膜齿轴右端固定。

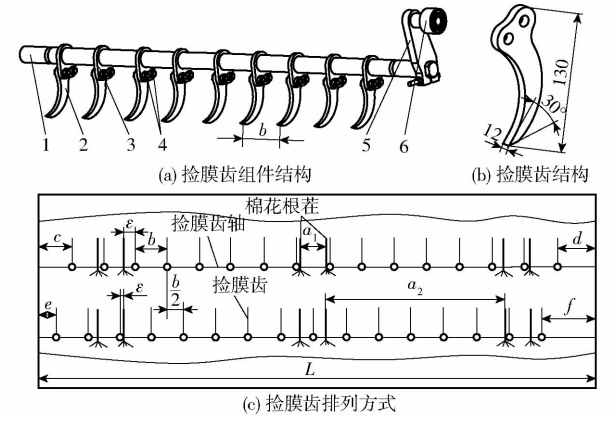


图 4　捡膜齿组件结构与捡膜齿排列方式示意图

Fig. 4　Schematics of structure of film picking teeth assembly and arrangement of film pick-up teeth

1. 捡膜齿轴　2. 捡膜齿　3. 齿座　4. 螺纹紧固件　5. 摇臂　6. 定向轮

图 4b 为捡膜齿结构图，长度为 130 mm，厚度为 12 mm，齿身由两段不同心的圆弧围成，强度和刚度比弹齿更高，工作时不易变形[13]，为减小入土阻力，捡膜齿末端的角度取 30°。如图 4c 所示，捡膜齿排列方式为交错排列[7]，同排相邻捡膜齿的距离为 b，交错排相邻捡膜齿的距离为 $b/2$，棉花窄行种植距离 a_1 为 100 mm，宽行种植距离 a_2 为 660 mm，为避开棉花根茬，使棉茬与捡膜齿之间的最小偏移量 $\varepsilon \geqslant$

10 mm。拾膜滚筒长度 $L=2\,000$ mm,捡膜齿间距越小,残膜含杂率较高,捡膜齿间距越大,漏膜率越高[11],为使残膜含杂率与漏膜率尽可能低,取 $b=120$ mm,两端捡膜齿与拾膜滚筒边缘的距离 a、b、c、d 分别为 131、69、72、128 mm。

2.2.2 残膜捡拾机构原理分析与运动分析

如图 5a 所示,工作时拾膜滚筒带动摇臂运动,摇臂带动定向轮在圆槽轨道内运动,从而使捡膜齿的姿态变化。捡膜齿的运动过程分为入土挑膜、升举残膜、脱膜、空回 4 个阶段[14],对应的相位角 $\Phi_1=67°$、$\Phi_2=127°$、$\Phi_3=53°$、$\Phi_4=113°$。为了避免残膜被带入拾膜滚筒内,捡膜齿完全缩回时其末端点与滚筒外表面重合。以拾膜滚筒中心点 O_1 为原点,建立直角坐标系 xO_1y,设点 O_1 与圆槽轨道中心点 O_2 之间的距离为 k,主动曲柄 O_1C 的长度为 m,连杆(摇臂)CD 与从动曲柄 O_2D 长度分别为 s 和 l。根据机构极限位置时的图形关系[15]可以求得 $m=308$ mm,$k=105$ mm,$s=135$ mm,$l=306$ mm。图 5b 为捡膜齿末端点的运动轨迹,入土挑膜与升举残膜阶段轨迹曲线较平缓,不仅减小了捡膜齿入土时的冲击力,而且能够防止残膜从捡膜齿上滑落,脱膜阶段为捡膜齿速度方向变化阶段,空回阶段曲线斜率变化较快,可达到快速空回效果。拾膜过程中,经历时间 t 后,捡膜齿轴中心点 E 的运动方程为

$$\begin{cases} x_E = v_m t + m\cos(\omega_0 t) \\ y_E = m\sin(\omega_0 t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 (x_E, y_E)——点 E 坐标

ω_0——拾膜滚筒转动角速度,rad/s

捡膜齿末端点 P 至点 O_1 的距离 r,与点 E 至点 P 的距离 q 在拾膜过程中保持不变,设图中位置为起始时刻,可得捡膜齿末端点 P 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_P = v_m t + \sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta}\sin(\beta-\omega_0 t) \\ y_P = \sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta}\cos(\beta-\omega_0 t) \end{cases} \tag{3}$$

式中 ζ——捡膜齿入土拾膜时 EP 与 O_1E 之间的夹角,(°)

(x_P, y_P)——点 P 坐标

β——入土拾膜时对应的相位角,(°)

式(3)对 t 求导可得捡膜齿末端点线速度 v_t 的分速度 v_x、v_y 为

$$\begin{cases} v_x = v_m - \omega_0\sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta}\cos(\beta-\omega_0 t) \\ v_y = \omega_0\sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta}\sin(\beta-\omega_0 t) \end{cases} \tag{4}$$

则捡膜齿末端的线速度 v_t 为

$$v_t = \sqrt{v_m^2 + (m^2+q^2-2mq\cos\zeta)\left(\omega_0^2 - \frac{2v_m\omega_0\cos(\beta-\omega_0 t)}{\sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta}}\right)} \tag{5}$$

由图 5b 可知 $\beta=\arccos(1-d_1/r)$,捡膜齿的最大入土深度 $d_1\leqslant 100$ mm,$r=0.42$ m,计算可得 $\beta=31°$,又可知

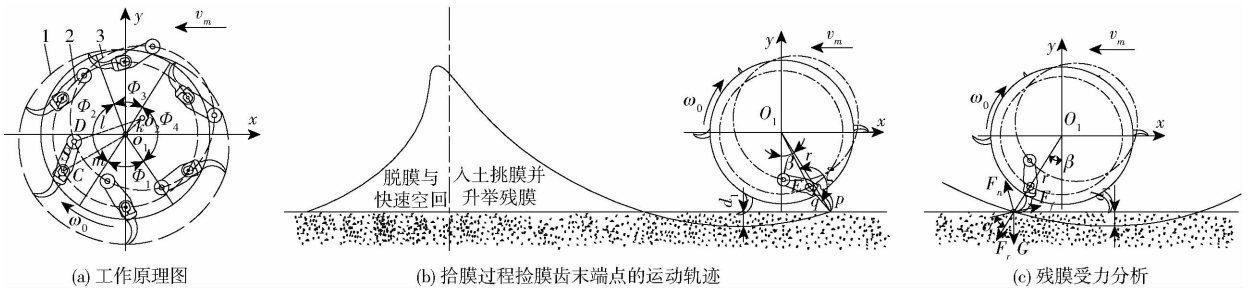
$$\begin{cases} v_m/\sqrt{m^2+q^2-2mq\cos\zeta} < \omega_0 \\ \cos(\beta-\omega_0 t)\approx 0.5 \end{cases} \tag{6}$$

由式(5)与式(6)可知 $v_t\geqslant v_m$,且 v_t 随着 v_m 的增大而增大,满足不漏捡残膜的要求,但 v_t 过大时,机具噪声增大,捡膜齿出土挑膜时不易将残膜挑起[11,16]。由于 v_t 与拾膜滚筒转速 n_0 相关,故残膜能否被捡膜齿挑起与拾膜滚筒的转速有关,因此需确定拾膜滚筒的临界转速,故在出土挑膜时刻对残膜进行受力分析。

如图 5c 所示,残膜块受到的力有自身重力 G、残膜块与捡膜齿之间的摩擦力 F_f、捡膜齿对残膜块的支持力 F_n、离心力 F_r,离心力 F_r 与摩擦力 F_f 间的夹角为 α,其中,$G=m_0g$,$F_r=m_0r\omega_0^2$,$F_f=\delta F_n$,m_0 为残膜块的质量,δ 为残膜块与捡膜齿之间的静摩擦因数,取 0.5[11],g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2。

根据平衡条件,捡膜齿能够顺利挑起残膜的条件为 $F_f\geqslant F_r\cos\alpha+G\cos(\alpha+\beta)$,根据上述条件以及 $n_0=30\omega_0/\pi$[15]可以求得拾膜滚筒转速 n_0 需满足

$$n_0\leqslant\frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{\delta g\sin(\alpha+\beta)-g\cos(\alpha+\beta)}{r(\cos\alpha-\delta\sin\alpha)}} \tag{7}$$



(a) 工作原理图 (b) 拾膜过程捡膜齿末端点的运动轨迹 (c) 残膜受力分析

图 5 残膜捡拾机构运动分析

Fig. 5 Motion analysis of residual film picking mechanism

1. 捡膜齿末端点相对运动轨迹 2. 捡膜齿轴中心点相对运动轨迹 3. 定向轮中心点相对运动轨迹

只有当 $\delta\sin(\alpha+\beta)>\cos(\alpha+\beta)$ 且 $\cos\alpha>\delta\sin\alpha$ 时式(7)才成立，取 $\alpha=52°$，根据式(7)计算可知拾膜滚筒转速 $n_0\leqslant 59.94$ r/min。

2.2.3　拾膜滚筒与地轮之间传动比计算

图 6a 所示为地轮驱动机构，地轮通过链条驱动残膜捡拾机构，利用张紧轮与惰轮改变拾膜滚筒的转动方向。如图 6b 所示，U 形板与挡板固定在机架上，夹板可以转动，张紧杆穿过夹板中心，能够摆动及上下移动，从而使张紧架转动，弹簧与螺母用来固定张紧架的位置，进而达到张紧链条的目的。地轮半径 R_f 过小时滚动性能差，半径过大时不能满足转速要求，拾膜滚筒半径 R_0 越大，残膜含杂率越低，因此取 R_0 为 370 mm，R_f 为 300 mm。机具前进时地轮上每一点线速度 v_f 为 2.22 ~ 3.33 m/s，地轮转速 n_f 与线速度 v_f 的关系式[17]为

$$n_f=\frac{30v_f}{\pi R_f} \tag{8}$$

由式(8)可以计算出地轮的转速 n_f 为 70.66 ~ 105.99 r/min，若拾膜滚筒边缘的线速度 v_s 大小与 v_m 一致，根据式(8)可以算出拾膜滚筒的转速 n_0 为 57.30 ~ 85.94 r/min，此时捡膜齿末端点的线速度 v_t 大于 v_m，拾膜滚筒转速越低，运行越稳定[11]，因此，使 v_m = 2.22 m/s，n_0 选取 43、50、57 r/min，利用 Solidworks motion 对捡膜齿末端点的运动轨迹进行仿真。

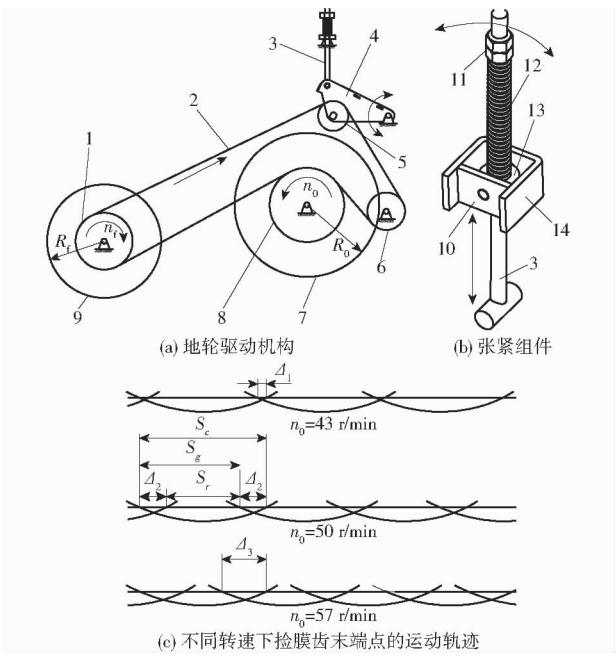


图 6　地轮驱动机构及捡膜齿末端点运动轨迹

Fig. 6　Wheel drive mechanism and trajectories of end of film pick-up teeth

1. 主动链轮　2. 链条　3. 张紧杆　4. 张紧架　5. 张紧轮　6. 惰轮　7. 拾膜滚筒　8. 从动链轮　9. 地轮　10. 挡板　11. 螺母　12. 弹簧　13. 夹板　14. U 形板

如图 6c 所示，当 n_0 为 43、50、57 r/min 时，捡拾深度保持不变，捡膜齿的重复捡拾距离分别为 Δ_1、Δ_2、Δ_3，且 $\Delta_3>\Delta_2>\Delta_1$。当 n_0 = 43 r/min 时，由于阻力作用导致拾膜滚筒转速小于理论转速，作业后可能会遗漏部分残膜；当 n_0 = 57 r/min 时，捡膜齿与土壤作用次数增加，可能导致残膜含杂率较高，且捡膜齿可能会划破残膜；当 n_0 = 50 r/min 时，重复捡拾距离适中，试验发现此时大部分残膜能被捡起，且残膜中所含杂质较少，根据 $i=n_f/n_0$[15]计算出拾膜滚筒与地轮之间的传动比 i 为 1.4，选择链条型号为 24A，主动链轮齿数为 21，从动链轮齿数为 29。

2.2.4　连续拾膜分析

如图 6c 所示，当 n_0 = 50 r/min、v_m = 2.22 m/s 时，设捡膜齿经过一个工作行程 S_c 所花时间为 t_c，相邻捡膜齿的捡拾进距为 S_g，相对划土长度为 S_r，捡膜齿排数为 z，可得[7]

$$\begin{cases} t_c=60\beta/(\pi n_0) \\ S_c-2\Delta_2=S_r \\ S_g=S_r+\Delta_2 \\ S_r=v_m t_c \\ z=2\pi R_0/S_r \\ S_g=60v_m/(zn_0) \end{cases} \tag{9}$$

根据式(9)算得 $z=5.06$，取 z 为 6，相邻两排捡膜齿间隔为 60°，通过式(8)与 $i=n_f/n_0$ 可以得到 $v_m/n_0=\pi iR_f/30$，根据式(9)可得 $S_g=10v_m/n_0$，计算可得 $S_g=\pi iR_f/3$，S_g 大小与 v_m 无关，表明机具前进速度增加时，捡拾进距不变，代入已知数据后得到 S_g = 439.82 mm、S_r = 387.46 mm，根据式(9)可得 S_c = 492.18 mm，$S_c>S_g$，满足连续拾膜条件。

2.3　除杂部件

2.3.1　螺旋排杂机构

如图 7a 所示，螺旋排杂机构能将膜面落下的杂质排出至机具一侧，K 为螺旋排杂机构中心与拾膜滚筒中心的距离，K 过大时，杂质可能在中途掉落至田间；过小时，残膜可能会与螺旋排杂机构发生缠绕。试验发现，湿度较小的颗粒状物料脱离膜面时水平运动距离较远，可增大 K 以避免堵塞；而湿度较大的块状物料由于自身重力较大，易在中途掉落至田间，距离 K 需减小，该机中 K 的连续调节范围为 640 ~ 680 mm，增强了环境适应性。根据 JB/T 7679—2008《螺旋输送器》，选取螺旋叶片公称直径为 300 mm，螺旋叶片螺距为 280 mm，螺旋排杂机构转速为 800 r/min，为了确保螺旋排杂机构能够连续将杂质排出，当 v_m = 3.33 m/s 时，螺旋排杂机构的

质量输送量应大于杂质的喂入量,根据物料特性及经验公式[17],算得螺旋排杂机构的质量输送量为 174.98 t/h,杂质的喂入量为 35.64 t/h,满足要求,可以有效避免拾膜位置壅土,从而降低残膜含杂率。

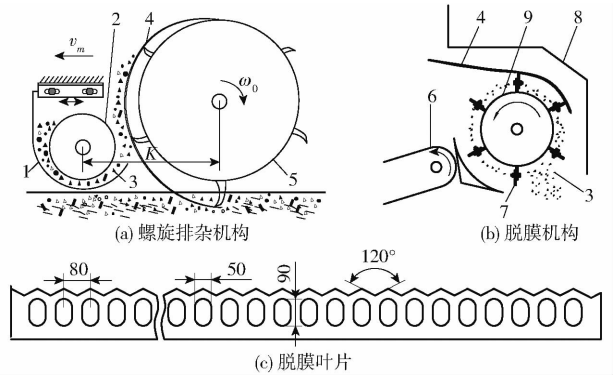


图 7 螺旋排杂机构与脱膜机构结构示意图

Fig. 7 Schematics of structure of screw impurity removal mechanism and film removal mechanism

1. 螺旋输送机构外壳 2. 螺旋叶片 3. 杂质 4. 残膜 5. 拾膜滚筒 6. 打包带 7. 脱膜叶片 8. 护罩 9. 脱膜辊

2.3.2 脱膜机构

如图 7b 所示,脱膜机构主要由脱膜辊、脱膜叶片、护罩等组成,根据脱膜时的受力条件,并考虑到介质阻力[7,18],选择脱膜辊转速为 800 r/min,设置 6 个脱膜叶片。如图 7c 所示,为了进一步降低残膜含杂率,脱膜叶片形状设计为带槽孔的锯齿状,锯齿角度为 120°,间隔距离为 80 mm,槽孔长 90 mm,宽 50 mm。试验发现,脱膜叶片能将拾膜滚筒表面的残膜顺利拾起,且能够过滤掉大部分泥土、短棉秆等杂质,最终将其排出至田间,残膜运动至护罩出口处时会被甩出至打包仓后上方,不会发生残膜回带现象。

2.4 残膜打包机构

如图 8 所示,残膜打包机构主要由打包带、上下主动轴、上下从动轴、支撑辊、液压杆、侧板、调节拉板等组成,从动轴与调节拉板转动连接,调节拉板带动从动轴沿着侧板移动,进而调节打包带张紧程度。

前后打包带与水平面之间的夹角分别为 φ_1、φ_2,线速度大小均为 v_d,打包带表面为粗糙面,与残膜之间的滑动摩擦因数为 μ_1、滚动摩擦因数为 μ_2。

据研究,残膜打包过程分为成芯过程与成包过程,残膜打包过程所受的力有:滑动摩擦力 f_1、f_2,残膜卷自身重力 G_2,打包带对残膜卷的支持力 N_1、N_2、N_3、N_4,滚动摩擦力 f_3、f_4,r_1、r_2 为残膜卷的半径。通过理论计算,可得残膜成芯过程打包力矩 M_a 与成包过程打包力矩 M_b 分别为

$$M_a=\mu_1 r_1 G_2\frac{\sin\varphi_1+\sin\varphi_2+\mu_1(\cos\varphi_1+\cos\varphi_2)}{(1-\mu_1^2)\sin(\varphi_1+\varphi_2)} \tag{10}$$

$$M_b=\frac{[\sin\varphi_1+\sin\varphi_2+\lambda(\cos\varphi_1+\cos\varphi_2)]\lambda r_2 G_2}{(\lambda^2+1)\sin(\varphi_2-\varphi_1)} \tag{11}$$

式中 $\lambda=\mu_1-\mu_2>0$,由于 $1-\mu_1^2>0$,故 $M_a>0$,又 $\varphi_2-\varphi_1>0$,故 $M_b>0$,因此该装置能将残膜打包成形,且打包力矩与 φ_1、φ_2 有关,φ_1、φ_2 的范围一般在 0°~90°[19],为了确保打包力矩与工作容积较大,取 $\varphi_1=11°$,$\varphi_2=70°$。

由于打包过程中残膜卷的半径和自身重力会不断增大,支撑辊可以防止残膜卷将打包带挤压变形,减少了打包带的磨损,增强了可靠性,减小了故障率,进而可以提升打包带的线速度,4 个支撑辊与打包带内侧相切,直径为 50 mm,间距为 200 mm,液压杆直径为 35 mm。卸膜时前后打包带之间的角度为 9°,保证卸膜过程稳定且顺畅。试验测得田间单位长度残膜质量 Q 为 0.032 9 kg/m,而残膜打包效率 $\eta=Qv_d$,可知 η 与 v_d 成正比。下主动轴与脱膜机构之间的传动比为 1.8,可计算出下主动轴转速为

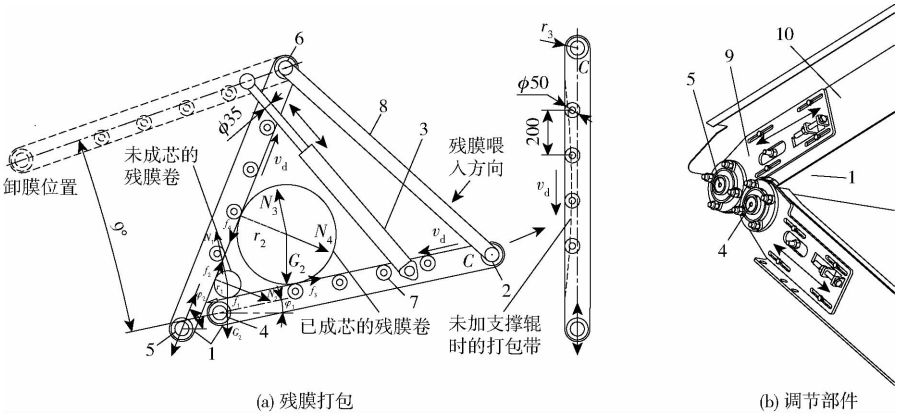


图 8 残膜打包机构结构与工作过程分析

Fig. 8 Structure of residual film baling mechanism and analysis of its operating process

1. 打包带 2. 下主动轴 3. 上液压杆 4. 下从动轴 5. 上从动轴 6. 上主动轴 7. 支撑辊 8. 链传动系统 9. 调节拉板 10. 侧板

445 r/min，下主动轴中间部分的半径 r_3 为 0.055 m，根据式(8)可以计算出打包带的线速度为 2.46 m/s，由于该机构的后打包带倾斜向上布置，该速度下残膜不会从机具后方抛出，解决了容易丢膜的问题。

3　田间试验

3.1　试验条件

为验证 11JCM－200FK 型棉秆粉碎与残膜回收打包一体机的作业效果，于 2024 年 3 月在新疆维吾尔自治区阿拉尔市 9 团 18 连进行田间试验。如图 9 所示，试验地棉花种植方式为 1 膜 6 行，地膜宽度为 2 050 mm，厚度为 0.15 mm，铺膜时间约为 273 d，田地长度为 500 m，宽度为 300 m，地势平坦，土壤类型为砂土，土壤含水率为 17.34%，地表有土壤以及棉花茎叶等杂质，滴灌带已回收，田间温度约为 13.24℃，空气相对湿度约为 25.56%，棉秆平均含水率为 15.74%，0～50 mm 土壤容重为 1.43 g/cm^3。试验时采用华夏 HX2104－M(G4)型拖拉机作为配套动力，主要试验设备有皮尺、温湿度计、环刀、小铲、自封袋、电子秤、秒表等。



(a) 机具作业现场　(b) 机具作业效果　(c) 机具卸下的残膜包

图 9　田间试验

Fig. 9　Field experiment

3.2　试验因素与评价指标

参照 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》与 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械》，以残膜回收率、残膜含杂率、粉秆合格率作为性能指标。测定残膜回收率时，试验后从试验区内随机选取 5 个测点，收集地下 0～100 mm 的残膜，洗净晾干后称量；测定残膜含杂率时，收集机具卸下的残膜，分别称量其总质量与残膜的质量；测量粉秆合格率时，在试验区内随机选取 5 个测点，收集测点内的棉秆，分别称量其总质量与长度大于 200 mm 的棉秆质量。机具田间工作时发现：捡膜齿深度较大或较小时，作业后田间还留有较多的残膜；机具前进速度较大时，收集的残膜所含杂质较多；留茬高度变化时，棉秆粉碎长度也会变化，留茬高度过低时，作业后田间存在少量碎膜。因此，选择机具前进速度、捡膜齿深度与留茬高度为试验因素[6]。各性能指标计算公式为

$$X = \left(1 - \frac{W_1}{W_0}\right) \times 100\% \tag{12}$$

$$Y = \left(1 - \frac{G_1}{G_0}\right) \times 100\% \tag{13}$$

$$Z = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \tag{14}$$

式中　X——残膜回收率，%

W_0——作业前测点表层残膜质量，g

W_1——作业后测点表层残膜质量，g

Y——残膜含杂率，%

G_0——残膜与杂质混合物质量，g

G_1——残膜质量，g

Z——粉秆合格率，%

M_0——测点内棉秆总质量，g

M_1——测点内粉碎长度不合格棉秆质量，g

3.3　试验方案

根据农户实际使用情况，设置机具作业速度范围为 8～12 km/h，通过调节挡位使拖拉机按规定速度匀速运动；根据捡膜齿设计尺寸与前期试验时的壅土情况，设置捡膜齿入土深度为 15～35 mm；机具作业后发现田间秸秆留茬高度多在 10 cm 左右，为了防止动刀触碰地面，并探究留茬高度对残膜回收率和棉秆粉碎长度的影响，设置留茬高度为 6～10 cm，试验因素与水平如表 2 所示。为减小工作量，采用三因素三水平正交试验，以探究各因素对各指标的影响，并寻求最佳工作参数，试验方案与结果如表 3 所示，A、B、C 为机具前进速度、捡膜齿深度、留茬高度水平值。

表 2　试验因素水平

Tab. 2　Experimental factors and levels

水平	试验因素		
	机具前进速度/(m·s^{-1})	捡膜齿深度/mm	留茬高度/cm
1	8	15	6
2	10	25	8
3	12	35	10

3.4　结果与讨论

表 4 为方差分析结果，通过分析表 3 与表 4 可知，试验因素 A 对残膜回收率无显著影响，这表明拾膜滚筒转速与整机前进速度相匹配；试验因素 B 对残膜回收率有显著影响，由于捡膜齿深度较小时，只能拾起部分表层残膜，当捡膜齿深度增大时，能够将大部分表层残膜拾起，但捡膜齿深度过大时，拾膜位置会发生壅土，导致残膜不能被顺利揭起，可以看出当捡膜齿深度为 25 mm 时，残膜回收率较大。试验因素 C 对残膜回收率无显著影响，可能有以下原因：由于春季时地表残膜已经被棉秆与土壤所覆盖，暴露在地表的残膜较少，因此，当留茬高度较低时，大部分残膜不会被动刀粉碎；本文设置的留茬高度不足以使粉碎刀触碰到表层残膜。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experimental plan and results

序号	试验因素			残膜回收率/%	残膜含杂率/%	粉秆合格率/%
	A	B	C			
1	1	1	1	85.85	13.88	92.49
2	1	2	2	89.12	10.12	95.53
3	1	3	3	87.81	12.04	97.15
4	2	1	2	85.17	14.29	93.01
5	2	2	3	90.13	10.35	95.24
6	2	3	1	88.46	12.17	91.12
7	3	1	3	87.31	16.03	93.98
8	3	2	1	90.54	11.20	90.26
9	3	3	2	88.23	13.21	92.05
X	k_{11}	87.593	86.110	88.283		
	k_{12}	87.920	89.930	87.507		
	k_{13}	88.693	88.167	88.417		
	R_1	1.1	3.82	0.91		
Y	k_{21}	12.013	14.733	12.417		
	k_{22}	12.270	10.557	12.540		
	k_{23}	13.480	12.473	12.807		
	R_2	1.467	4.176	0.39		
Z	k_{31}	95.057	93.160	91.290		
	k_{32}	93.123	93.677	93.530		
	k_{33}	92.097	93.440	95.457		
	R_3	2.96	0.517	4.167		

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of variance

性能指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
残膜回收率	A	1.915	2	0.957	6.121	0.140
	B	21.932	2	10.966	70.109	0.014
	C	1.449	2	0.725	4.632	0.178
	e	0.313	2	0.156		
	总和	25.608	8			
残膜含杂率	A	3.681	2	1.841	23.553	0.041
	B	26.226	2	13.113	167.803	0.006
	C	0.238	2	0.119	1.526	0.396
	e	0.156	2	0.078		
	总和	30.302	8			
粉秆合格率	A	13.553	2	6.777	103.708	0.010
	B	0.401	2	0.201	3.071	0.246
	C	26.091	2	13.045	199.640	0.005
	e	0.131	2	0.065		
	总和	40.176	8			

注:$0.01 \leqslant P < 0.05$ 表示影响显著,$P \leqslant 0.01$ 表示影响极显著。

试验因素 A 与 B 对残膜含杂率有显著影响,且影响程度 B 大于 A,这是由于捡膜齿深度较小时,收集的残膜较少,而土壤相对较多,当捡膜齿深度增加时,捡膜齿能够拾起大部分表层残膜,但深度过大时,拾膜位置会壅土,回收的土壤会增多。机具前进速度较小时,拾膜滚筒转速较小,残膜挑送时间较长,大部分的泥土会从膜面脱落,当机具前进速度增加时,捡膜齿与地表的作用次数增加,回收的土壤增多。

试验因素 A 与 C 对粉秆合格率有显著影响,且影响程度 C 大于 A,因为当机具前进速度较小时,单位时间内动刀打击棉秆的次数较多,当机具前进速度增大时,打击棉秆的次数变少,粉秆合格率会降低;当留茬高度较小时,棉秆喂入量与棉秆直径增大,动刀切割阻力增大,从而不能完全粉碎棉秆,当留茬高度增加时,棉秆喂入量与棉秆直径减小,有利于棉秆粉碎。

试验结果与分析表明,机具前进速度越大,残膜含杂率越高,粉秆合格率越低;捡膜齿深度较小或较大时,残膜含杂率较高,残膜回收率较低;留茬高度越大,粉秆合格率越高,为了使残膜回收率与粉秆合格率最大,残膜含杂率最低,选择最优参数组合为 $A_2B_2C_3$,即机具前进速度、捡膜齿深度、留茬高度分别为 10 km/h、25 mm、10 cm,根据该参数组合进行验证试验。

3.5 验证试验

田间验证试验在新疆维吾尔自治区阿拉尔市 8 团六园镇进行,试验条件与正交试验基本一致,设定机具前进速度为 10 km/h,捡膜齿入土深度为 25 mm,留茬高度为 10 cm,重复 3 次试验后采集残膜样本与被粉碎的棉秆样本,洗净晾干残膜后称量,依据式(12)~(14)计算残膜回收率、残膜含杂率、粉秆合格率。试验结果如表 5 所示,最佳工作参数组合下的平均残膜回收率为 89.78%、平均残膜含杂率为 11.15%、平均粉秆合格率为 94.79%。工作时整机运行平稳,棉秆能够被有效粉碎,未出现漏膜与壅土现象,图 9c 为机具卸下的残膜包,残膜包密度合适,残膜包中所含土壤与棉秆较少,田间作业时残膜打包机构的残膜成包率为 95%,由于春季时土质松散且干燥,膜土分离难度较小,螺旋排杂机构与脱膜机构充分发挥了膜杂分离作用,使残膜含杂率变的更低,机具作业效果满足棉秆粉碎还田与残膜回收打包作业要求。

表 5 验证试验结果

Tab. 5 Validation test results %

试验编号	残膜回收率	残膜含杂率	粉秆合格率
1	89.34	11.31	94.62
2	89.86	10.65	94.50
3	90.13	11.49	95.24
平均值	89.78	11.15	94.79

4 结论

(1)针对滚筒式棉秆粉碎与残膜回收联合作业

机现存问题以及新疆棉田残膜回收要求，通过结构设计与理论分析确定了关键部件的结构参数与作业参数。田间试验表明，采用新型弧形捡膜齿且地轮驱动机构传动比为 1.4 时，整机残膜捡拾率提高；带有槽孔的锯齿状脱膜叶片配合距离可调的螺旋排杂机构能够增强膜杂分离效果；残膜打包机构打包带线速度为 2.46 m/s 时，故障率减小，无丢膜现象，卸膜过程顺畅，残膜成包率为 95%，成包密度合适。

（2）以残膜回收率、残膜含杂率、粉秆合格率为性能指标，通过正交试验以及方差分析确定了捡膜齿深度对残膜回收率有显著影响；机具前进速度与捡膜齿深度对残膜含杂率有显著影响，且捡膜齿深度对残膜含杂率的影响大于机具前进速度对残膜含杂率的影响；机具前进速度与留茬高度对于粉秆合格率有显著影响，且留茬高度对粉秆合格率的影响大于机具前进速度对粉秆合格率的影响，通过综合分析得到了最佳参数组合：机具前进速度为 10 km/h、捡膜齿深度为 25 mm、留茬高度为 10 cm。

（3）经过田间验证试验得到了最佳作业参数下机具的平均残膜回收率为 89.78%、平均残膜含杂率为 11.15%、平均粉秆合格率为 94.79%。结果表明本研究中整机设计合理，且工作性能与理论预期基本一致，相较于现有的滚筒式残膜回收机，本设计提高了残膜捡拾率与膜杂分离效果，有助于提升残膜回收的综合效率与经济效益。

参　考　文　献

[1] 严昌荣，刘恩科，舒帆，等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报，2014，31(2)：95－102.
YAN Changrong，LIU Enke，SHU Fan，et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2014，31(2)：95－102.（in Chinese）

[2] BRIASSOULIS D，GIANNOULIS A. Evaluation of the functionality of bio-based plastic mulching films[J]. Polymer Testing，2018，67：99－109.

[3] LIANG R，ZHANG B，ZHOU P，et al. Cotton length distribution characteristics in the shredded mixture of mechanically recovered residual films and impurities[J]. Industrial Crops and Products，2022，182：114917.

[4] JIN W，LIU J，XU C，et al. Design，simulation and experimentation of a polythene film debris recovery machine in soil[J]. Applied Sciences，2022，12(3)：1366.

[5] 曹肆林，谢建华，杨豫新，等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版)，2023，53(5)：1514－1528.
CAO Silin，XIE Jianhua，YANG Yuxin，et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recovery combined machine[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)，2023，53(5)：1514－1528.（in Chinese）

[6] 王昭宇，陈学庚，颜利民，等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：80－90.
WANG Zhaoyu，CHEN Xuegeng，YAN Limin，et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(4)：80－90.（in Chinese）

[7] 由佳翰，陈学庚，张本华，等. 4JSM－2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(10)：10－16.
YOU Jiahan，CHEN Xuegeng，ZHANG Benhua，et al. Design and experiment of 4JSM－2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(10)：10－16.（in Chinese）

[8] 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 Xinggui，et al. Design and test of an integrated machine for straw returning to field and residual film recycling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2023，41(1)：263－271.（in Chinese）

[9] 周金豹，谢建华，曹肆林，等. 辊轴式残膜打包装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报，2024，45(1)：148－158.
ZHOU Jinbao，XIE Jianhua，CAO Silin，et al. Design and experiment of roll-shaft-type packing device for residual film[J]. Journal of South China Agricultural University，2024，45(1)：148－158.（in Chinese）

[10] 刘佩丰，卢勇涛，王敏，等. 残膜回收机集膜装置研究现状[J]. 中国农机化学报，2025，46(10)：292－297.
LIU Peifeng，LU Yongtao，WANG Min，et al. Research status of film collection devices of residual film recycling machines[J]. Journal of Chinese Agricultural Machinery，2025，46(10)：292－297.（in Chinese）

[11] 王吉奎. 农田残膜回收技术[M]. 杨凌：西北农林科技大学出版社，2012：46－94.

[12] 樊志鹏. 基于 EDEM 的揉碎玉米秸秆螺旋输送装置输送机理研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2023.
FAN Zhipeng. EDEM-based screw delivery mechanism for crushed maize straw[D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2023.（in Chinese）

[13] SU Z，LI J，ZHANG Z，et al. Analysis of the mechanical properties and wear characteristics of nail teeth based on sowing layer residual film recovery machine[J]. Engineering Failure Analysis，2023，143：106869.

[14] 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)

[15] 孙恒. 机械原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013: 336.

[16] 王久鑫, 赵武云, 刘小龙, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 119 – 128.
WANG Jiuxin, ZHAO Wuyun, LIU Xiaolong, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 119 – 128. (in Chinese)

[17] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收机清杂系统作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 1 – 10.
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Optimization of working parameters of cleaning system for master-slave residual plastic film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 1 – 10. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 李涛, 张海春, 王小瑜, 等. 自走式棉秆打捆残膜打包联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 424 – 433.
LI Tao, ZHANG Haichun, WANG Xiaoyu, et al. Development of self-propelled combined operationmachine for cotton stalk baling and residual film packing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 424 – 433. (in Chinese)

(上接第 396 页)

[26] 毛雷, 王鹏飞, 杨欣, 等. 振动式果树根系断切装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 281 – 291.
MAO Lei, WANG Pengfei, YANG Xin, et al. Design and experiment of a vibration type root cutting device for fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 281 – 291. (in Chinese)

[27] 陈黎卿, 梁修天, 曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 106 – 111.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and power consumption testing of straw returning machine based on multibody dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 106 – 111. (in Chinese)

[28] YANG W, XIAO X, PAN R, et al. Numerical simulation of spiral cutter-soil interaction in deep vertical rotary tillage[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1850.

[29] GB/T 25412—2010 地膜回收机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[30] GB/T 14290—2021 圆捆打捆机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.