doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.013

滚筒式斜向捡拾残膜回收装置设计与试验

缑海啸　祝国庆　宋明慧　杨晓龙
（石河子大学机械电气工程学院，石河子 832000）

摘要：针对窄行处因根茬与土壤作用下滚筒式残膜回收机存在残膜漏捡的问题，设计了一种斜向捡拾残膜回收装置。通过优化捡膜齿排列方式和幅宽密度等方法，提高单位面积内的捡拾次数，进而提升残膜拾净率。通过理论分析确定了捡膜齿间距 160 mm，周向捡膜齿数目 8 个，滚筒上双螺旋排布导程 320 mm。通过运动分析确定了装置工作参数范围，机具前进速度为 5 ~ 9 km/h，捡拾滚筒转速为 40 ~ 80 r/min，入土深度为 30 ~ 50 mm。采用 EDEM - Adams 联合仿真进行单因素试验，缩小了工作参数范围，基于单因素试验结果，以机具前进速度、捡拾滚筒转速、入土深度为试验因素，以残膜拾净率为试验指标进行正交组合仿真优化试验，得到最优参数组合为：机具前进速度 6.2 km/h、捡拾装置转速 65 r/min、捡膜齿入土深度 41 mm，此时残膜拾净率为 98.96%。进行田间试验验证，该装置的残膜回收率平均值为 92.96%，残膜回收率得到了提升，显著改善了残膜漏捡问题。

关键词：残膜回收装置；滚筒式；斜向捡拾；DEM - MBD 耦合仿真
中图分类号：S223.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)07-0144-11　　**OSID**：

Design and Experiment of Drum-type Oblique Pick-up Residual Film Recovery Device

GOU Haixiao　ZHU Guoqing　SONG Minghui　YANG Xiaolong
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of missed collection of residual films in narrow rows due to the interaction between root stubble and soil in the drum-type residual film recovery machine, a diagonal residual film collection and recovery device was designed. By optimizing the arrangement of the film-picking teeth and the width and density, the number of pickups per unit area was increased, thereby improving the rate of residual film collection (without edge film). Through theoretical analysis, it was determined that the spacing of the pick-up teeth was 160 mm, the number of circumferential pick-up teeth was 8, and the pitch of the double helix arrangement on the drum was 320 mm. The working parameters of the device were determined through motion analysis. The forward speed of the machine was 5 ~ 9 km/h, the rotation speed of the picking-up drum was 40 ~ 80 r/min, and the depth of soil penetration was 30 ~ 50 mm. A single-factor experiment was conducted by using the EDEM - Adams joint simulation, which narrowed the range of working parameters. Based on the results of the single-factor test, the forward speed of the machinery, the rotational speed of the picking-up drum, and the depth of soil penetration were taken as the test factors, and the residual film pickup rate was taken as the test index for the orthogonal combination simulation optimization test. The optimal parameter combination obtained was as follows: the forward speed of the machinery was 6.2 km/h, the rotational speed of the picking device was 65 r/min, and the depth of the picking teeth into the soil was 41 mm. At this point, the residual film pickup rate was 98.96%. Field trials were conducted to verify that the average residual film recovery rate of this device was 92.96%, improving the residual film recovery rate and significantly addressing the issue of leftover film being missed.

Key words: residual film recovery device; drum-type; pick up obliquely; DEM - MBD coupled simulation

收稿日期：2026 - 01 - 09　修回日期：2026 - 01 - 13
基金项目：新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目
作者简介：缑海啸(1986—)，男，副研究员，博士，主要从事农田残膜回收与再利用研究，E-mail：592200548@qq.com

0　引言

机械化残膜回收是治理残膜污染的重要途径。国外普遍采用厚度规格大于 0.02 mm 的加厚型农用薄膜，力学性能好，机型主要以卷收式残膜回收机为主[1]。我国普遍使用的地膜厚度为 0.01 ~ 0.015 mm，其抗拉强度较低，因此卷收方式不适于国内的残膜回收作业[2-3]。

国内的残膜回收机械主要以滚筒式残膜回收机为主。在残膜回收过程中，由于根茬和土壤的干扰，捡膜齿容易将残膜撕裂成条状，使残膜向两侧移开，导致在此捡膜齿的原运动路径上无法捡拾到残膜，从而出现残膜漏捡现象。刘策等[4]设计了一种滚筒弹齿式起膜机构，通过提升起膜效果来改善漏捡问题。张学军团队[5-6]设计了一种双滚筒式残膜回收机，通过采用机械拾膜、气力与机械协同脱膜的方式来提高残膜拾净率。任伟等[7]针对因捡拾弹齿安装间距、机具前进速度与滚筒转速不匹配所导致的地表残膜漏捡及破裂等问题，对捡拾装置进行了系统优化，进而提高了残膜拾净率。

目前对于漏膜现象的研究，主要针对的是整膜的回收，从捡膜齿排列优化、捡膜齿前进方向运动轨迹重合以及速度匹配等方面进行研究。然而关于解决窄行棉秆与土壤影响下的地膜漏捡研究未见报道。

针对新疆棉花一膜六行（660 mm + 100 mm）种植模式下的窄行区域残膜漏捡问题，本文设计一种滚筒式斜向捡拾残膜回收装置。通过优化捡膜齿在幅宽方向上的分布密度与前进方向上的捡拾次数，提高单位面积内的捡拾次数，从而减少残膜漏捡现象，进而提高残膜拾净率。

1　斜向捡拾装置结构设计

由于残膜在田间为连续物料，其捡拾是对一定作业面积内残膜的有效回收。为了提高单位面积内的捡拾次数，可通过两种途径实现：增加幅宽方向单轴上捡膜齿数量，以提高幅宽方向的捡拾密度，但齿数过多会导致工作阻力与能耗上升，影响作业效率；优化捡膜齿的布置方式，采用斜向错位排列布局，在不增加齿数的前提下，通过捡膜齿在轴向与周向上的相位错位布置，使相邻轴上齿的作业轨迹相互衔接与互补，从而实现单位面积内捡拾次数的增加。本研究选取第 2 种途径，开展滚筒式残膜回收机斜向捡拾装置的设计。

1.1　斜向捡拾装置结构组成与工作原理

捡拾装置主要由凸轮导轨、主轴、捡拾轴、支撑架、旋转滚子、捡膜齿等组成。支撑架维持滚筒稳定，减小变形；凸轮轨道采用多段式设计，易更换，以适应不同土壤条件、残膜状态或作物种植模式，通过螺栓安装在机架上；捡膜齿等间距安装在捡拾轴上；捡拾轴均匀分布在滚筒上，两端使用尼龙圆柱，置于凸轮轨道上，中间机构与滚筒铰链连接，促使捡拾轴摆动。秸秆粉碎后，通过传动系统带动捡拾装置主轴旋转，从而滚筒跟随主轴旋转，捡拾轴在滚筒的带动下沿着凸轮轮廓进行伸缩运动；捡拾轴上的捡膜齿对地膜完成扎和挑的动作，最后将捡膜齿上面的残膜带到脱膜装置入口处。

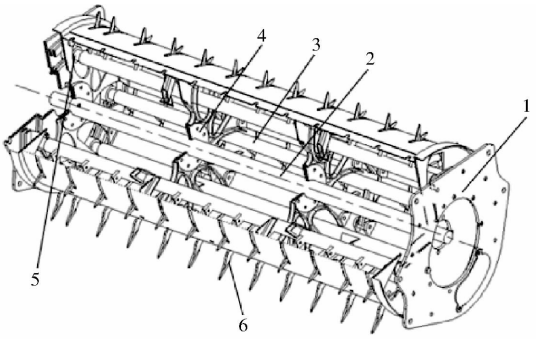


图 1　捡拾装置结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of pickup device

1. 凸轮导轨　2. 主轴　3. 捡拾轴　4. 支撑架　5. 旋转滚子　6. 捡膜齿

1.2　斜向捡拾下捡膜齿排列配置

根据一膜六行“660 mm + 100 mm”的种植模式可知，宽行距离为 660 mm，窄行距离为 100 mm。捡膜齿采用斜向螺旋排列，由于单螺旋排列受到捡膜齿数量和螺旋角的限制，不利于捡拾装置的加工与安装，因此选用双螺旋的排列方式，如图 2 所示。

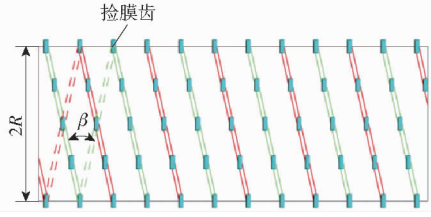


图 2　滚筒上捡膜齿螺旋排列示意图

Fig. 2　Layout diagram of spiral-configured residual film collection teeth on roller

参考旋耕机械运动学原理，建立滚筒捡膜齿螺旋排布空间轨迹方程[8]

$$\begin{cases} x_0 = R\cos\beta \\ y_0 = R\sin\beta \\ z_0 = \dfrac{S}{2\pi}\beta \end{cases} \tag{1}$$

式中　S——螺旋导程，即螺旋起点绕圆柱一周的距离，mm

R——滚筒半径，mm

β——螺旋转角,(°)

其中,定义同一个捡拾轴的捡膜齿间距为 c,则两个周向相邻捡膜齿间距为 $c/(2m)$(m 为捡拾轴数目),螺旋导程 S 为 $2c$。螺旋转角 β 为

$$\tan\beta = \frac{S}{2\pi R} \tag{2}$$

为了降低捡拾过程中的阻力,需要避免捡膜齿触碰棉根,基于此,确定捡膜齿间距。捡膜齿的投影排布如图 3 所示,以左下角为原点建立坐标系。图 3 中,棉秆的投影点 x 坐标为

$$x_{i,j} = k + ia + jb$$
$$((i,j) \in ((0,0),(1,0),(1,1),(2,1),(2,2),(3,2))) \tag{3}$$

式中 a、b——机具工作幅宽内的棉花窄行和宽行之间的距离,mm

k——棉秆到滚筒边缘的距离,mm

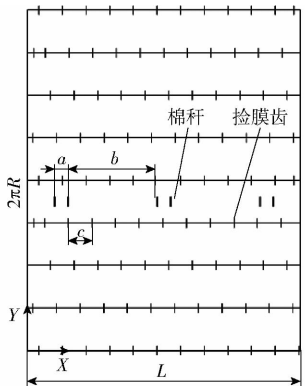


图 3 捡膜齿螺旋排列配置示意图

Fig. 3 Layout schematic of spiral-configured residual film collecting teeth

以原点为起点,第 1 行捡膜齿的坐标为

$$(x_n, 0) = L_1 + (n-1)c \tag{4}$$

式中 L_1——第 1 个捡膜齿到滚筒边缘的距离,mm

n——一条捡拾轴上捡膜齿数目

根据双螺旋结构和周向捡膜齿数目,其余捡膜齿的坐标为

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n - \dfrac{c}{2m}n & (x>0, n \in \mathbf{N}^+) \\ y_m = \dfrac{2\pi R}{m}(m-1) & (m \geqslant 1, m \in \mathbf{N}^+) \end{cases} \tag{5}$$

根据设计要求,捡膜齿与棉秆的空间投影位置应形成非重叠分布模式,并保持安全间距大于 0,同一捡拾轴上两端捡膜齿的间距应大于地膜宽度且小于滚筒宽度。由此可建立

$$\begin{cases} x_{i,j} - \delta \leqslant x_n \leqslant x_{i,j} + \delta \\ 1950 \leqslant nc \leqslant L - 2L_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中 δ——捡膜齿与棉秆空间投影位置的安全间距,mm

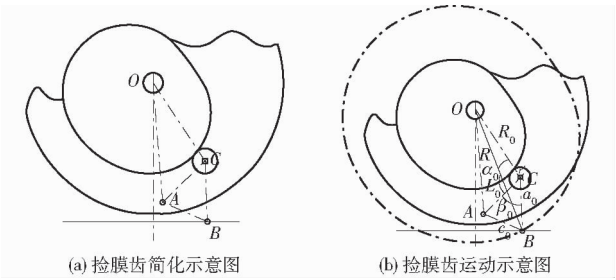
L——滚筒母线长度,mm

设定安全间距 $\delta = 15$ mm,根据安装余量,选取捡膜齿至滚筒边缘为 30 mm。计算求出捡膜齿间距 c 的范围为 145 mm$\leqslant c \leqslant$160 mm,考虑到机具能耗,暂时选定 $c = 160$ mm。

2 主斜向捡拾装置运动学分析

2.1 斜向捡拾装置运动轨迹分析

捡膜齿的排列配置不仅与双螺旋排布结构、捡膜齿间距相关,还与捡拾轴的数目(即周向捡膜齿的数目)有关。确定周向捡膜齿的数目,需先对其单个捡膜齿的运动轨迹进行分析。运动学模型如图 4 所示。设捡拾滚筒作业半径为 R,凸轮的基圆半径为 R_0,滚环半径为 r',行进线速度为 v,其绕凸轮轴心 O 的角速度为 ω。其中,定位节点 A 位于旋转轴上,执行端 B 为齿尖作用点,C 为机构连接点,三点构成运动学链式机构。如图 4b 所示,捡膜齿在地膜上的轨迹为凸轮底部轨迹的“等距曲线”,由于凸轮底部为一个圆形,故将捡膜齿的运动轨迹简化为圆弧进行计算。



(a) 捡膜齿简化示意图 (b) 捡膜齿运动示意图

图 4 捡膜齿运动分析

Fig. 4 Analysis diagrams of film picking teeth motion

根据图中固定的长度可以求出 OB 的长度 L_{OB} 为

$$\begin{cases} L_{OB} = \sqrt{(R_0+r')^2 + a_0 - 2(R_0+r')\arccos(\alpha_0+\beta_0)} \\ \alpha_0 = \arccos\dfrac{(R_0+r')^2 + L_0 - R^2}{2(R_0+r')L_0} \\ \beta_0 = \arccos\dfrac{L_0 + a_0 - c_0}{2L_0 a_0} \end{cases} \tag{7}$$

式中 a_0——捡膜齿齿尖与滚环中心的距离,mm

L_0——滚筒上旋转摆动中心至滚环中心的距离

c_0——捡膜齿齿尖与滚筒上旋转摆动中心的距离,mm

α_0——OC 与 AC 的夹角

β_0——AC 与 BC 的夹角

如图 5 所示,从 O_1 至 O_2 为捡膜齿的作业过程。旋转轴心作为坐标系原点,根据 L_{OB} 建立捡膜齿齿尖端点在作业过程中的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t + L_{OB}\sin(\omega t) \\ y = L_{OB} - L_{OB}\cos(\omega t) \end{cases} \tag{8}$$

式中　v_0——拖拉机前进速度，m/s

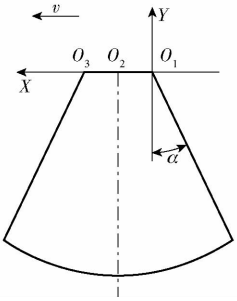


图 5　单个捡膜齿运动过程图

Fig. 5　Single film picking tooth motion process diagram

对式(8)实施时间参数的微分运算，可建立残膜回收装置作业终端的运动学特征数学模型。通过一阶导数运算获得线速度矢量参数，二阶导数运算解析其加速度分布规律，即

$$\begin{cases} v_x = v_0 + L_{OB}\omega\cos(\omega t) \\ v_y = L_{OB}\omega\sin(\omega t) \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} a_x = -L_{OB}\omega^2\sin(\omega t) \\ a_y = L_{OB}\omega^2\cos(\omega t) \end{cases} \tag{10}$$

基于式(9)与式(10)的联立分析，通过数学建模方法可推导出捡膜齿动力学特性的关键参数关系式，即

$$\begin{cases} v = \sqrt{v_0^2 + L_{OB}^2\omega^2 + 2L_{OB}\omega v_0\cos(\omega t)} \\ a_1 = R\omega^2 \end{cases} \tag{11}$$

式中　a_1——捡拾滚筒运动加速度，m^2/s

捡拾滚筒工作时其圆周线速度 v 大于拖拉机前进速度 v_0[9-11]，满足关系

$$\lambda = \frac{v}{v_0} \tag{12}$$

式中　λ——捡拾滚筒圆周线速度与拖拉机前进速度的比值

通过适配性分析确定关键运行参数：装置行进速度 v_0 设定为 5 ~ 9 km/h，参数 λ 取值区间设定为 1.6 ~ 1.7[12]。计算得出装置角速度 ω 的范围为 4.19 ~ 8.37 rad/s。主轴转速 n_1 的理论计算值范围为 40 ~ 80 r/min。

在捡拾过程中，捡膜齿组在地面形成斜向运动轨迹，这是其螺旋排布方式和复合运动特性共同作用的结果。以单个捡膜齿在最低点的位置为基础，捡膜齿组的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_n = v_0\left(t_0 + n\dfrac{n_1}{m}\right) + L_{OB}\sin\left(\alpha\left(t_0 + n\dfrac{n_1}{m}\right)\right) \\ \quad (n \in [0, m-1]) \\ z_n = n\dfrac{S}{m} \end{cases} \tag{13}$$

式中　t_0——机具前进的初始时间，s

2.2　斜向捡拾下残膜不漏捡分析

机具前进方向不漏捡分析及捡膜齿周向数量确定。基于作业连续性要求，相邻捡膜齿的空间轨迹应部分重叠，该重叠参数的确定需通过位移分析实现：首先建立捡膜齿最大位移 y_{max} 与重叠度的数学模型

$$y = h - y_{max} \tag{14}$$

进而推导作业深度 h 对应的地表基准面几何方程。当作业深度达到设定值时，可计算得出两个特征时间参数 t_1 和 t_2，进而确定对应位移 x_1 和 x_2。相邻作业组件运动轨迹重叠度 Δx 的计算模型为

$$\Delta x = |x_1 - x_2| \tag{15}$$

基于机构运动学理论，当捡拾装置的结构参数与运动学参数确定时，周向分布的捡膜齿轨迹重叠度主要受周向分布密度参数调控。在恒定作业深度条件下，相邻作业捡膜齿的轨迹重合度与捡膜齿数量呈正相关，重合量大引起漏捡的可能性小，残膜拾净率高，研究发现，当捡拾轴数量 $m > 3$ 时，运动轨迹重叠度 $\Delta x > 0$[13]。

基于运动学分析模型，周向分布的捡膜齿在时序参数 t 的控制下依次完成入土动作，此时装置行进方向上形成的周期特征距离被定义为入土节距 S_1。该参数的数学表达式为

$$S_1 = v_0 t \tag{16}$$

其中

$$t = \frac{2\pi}{m\omega} \tag{17}$$

则

$$S_1 = \frac{2\pi L_{OB}}{m\lambda} \tag{18}$$

式中　S_1——周向相邻捡膜齿的入土节距，mm

综合考虑，取 $S_1 = 100$ mm，可得捡膜齿周向安装排数 m 为 5.32 ~ 16.7。兼顾加工与经济性，m 选定最小整数值 6。

周向相邻捡膜齿运动轨迹交叉点与最大作业深度的垂直间距(定义为地形凸起参数 h_0)，其数值解析式为

$$h_0 = L_{OA}\left(1 - \cos\frac{\pi}{m(\lambda - 1)}\right) \tag{19}$$

式中　L_{OA}——OA 长度

新疆棉花播种时播种深度为 25 ~ 35 mm，则有

$$h - h_0 < 35 \text{ mm} \tag{20}$$

式中　h——捡膜齿的入土深度，mm

经数值解析得出执行单元的最大作业深度为 $h_{max} = 60$ mm，综合考虑取入土深度 h 为 30 ~ 50 mm。

2.3　机具工作幅宽方向不漏捡分析

对幅宽方向捡膜齿分布密度进行分析，密度分

布图如图 6 所示。

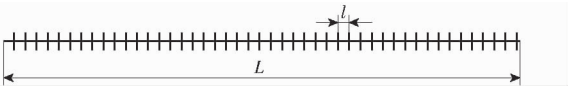


图 6 捡膜齿幅宽方向密度分布图

Fig. 6 Density distribution map in the width direction of film picking teeth

捡膜齿在捡拾残膜的过程中,会对土壤造成扰动,该扰动会让土壤颗粒向两边挤压并形成凸起,利于残膜挑起[14-15],如图 7 所示。因此凸起的宽度影响残膜回收,土壤的宽度与捡膜齿在幅宽密度分布有关,即

$$\left(\frac{l}{L}+1\right)W \geqslant L \tag{21}$$

$$\begin{cases} S' = \int_{a'}^{b'} f(x) + \int_{c'}^{d'} g(x) + eh \\ W = \dfrac{2S'}{h} - l_{b'd'} \end{cases} \tag{22}$$

式中 l——相邻捡膜齿间距,mm

W——捡膜齿作业造成土壤的沟壑宽度,mm

a'、b'——捡膜齿左侧松土区域边界点

$f(x)$——捡膜齿左侧松土区域边界近似函数

c'、d'——捡膜齿右侧松土区域边界点

$g(x)$——捡膜齿右侧松土区域边界近似函数

x——捡膜齿松土区域任意点

e——捡膜齿宽度,mm

S'——地面下的松土面积,mm^2

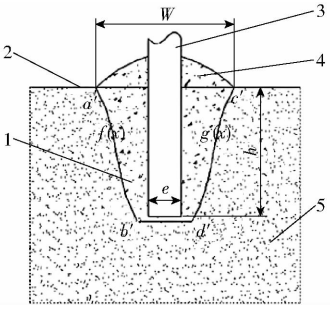


图 7 捡膜齿土壤扰动效果

Fig. 7 Soil disturbance effect of picking up film teeth

1. 扰动下层土壤 2. 地面 3. 捡膜齿 4. 扰动上层土壤 5. 土壤

捡膜齿阻力 R_T 计算公式为

$$R_T = B_T H_T K + M \tag{23}$$

式中 B_T——捡膜齿宽度,每个捡膜齿齿宽为 8 mm

H_T——捡膜齿工作时入土深度,根据设计捡膜齿入土深度为 30 ~ 50 mm,选择工作深度为 40 mm

K——土壤比阻,一般土壤比阻为 2.94 ~ 7.84 × 10^4 N/m^2,计算时取 7.84 × 10^4 N/m^2

M——残膜所承受的最大力,根据前期残膜力学特性测试出的 0.01 mm 残膜最大极限力为 3.52 N

若按照上述捡拾轴上捡膜齿间距 40 mm 排布,捡拾轴的数目将达到 48 个捡膜齿,其阻力为

$$R_{T1} = 0.008 \times 48 \times 0.04 \times 7.84 \times 10^4 + 3.52 \times 48 = 1\,373.2 \text{ N} \tag{24}$$

一条捡拾轴的阻力将会达到 1 373.2 N,因此在满足幅宽密度的情况下,考虑将捡膜齿等间距排列,使其周向相邻捡膜齿的间距满足幅宽密度,即 $l = c/(2m)$,根据分析求得捡膜齿和周向捡膜齿的范围,以及 l 的取值范围为 0 ~ 40 mm,确定 m 为 8 个,c 为 160 mm。此时一条捡拾轴的阻力为

$$R_{T1} = 0.008 \times 12 \times 0.04 \times 7.84 \times 10^4 + 3.52 \times 12 = 343.3 \text{ N} \tag{25}$$

2.4 斜向捡拾装置捡拾频次分析

在不增加捡膜齿数目的前提下,通过轴向错位排列,即在滚筒上螺旋排布的方式,提高残膜捡拾频次,如图 8 所示。

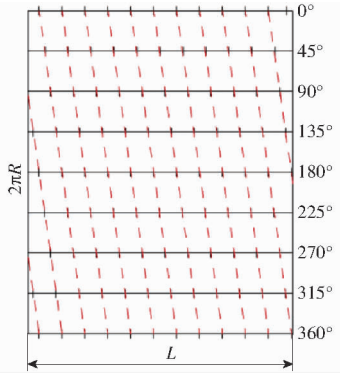


图 8 捡膜齿布置图

Fig. 8 Layout of film picking teeth

在此时的装置参数下撕裂残膜处有 3 个捡拾频次,残膜在根茬与土壤作用下,会出现断裂,并跟随土壤一起抛撒出去,如图 9 所示。

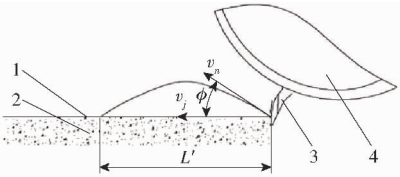


图 9 漏捡残膜抛撒示意图

Fig. 9 Leakage and throwing of residual film

1. 地膜 2. 土壤 3. 捡膜齿 4. 捡拾装置

残膜抛撒的距离 L' 为

$$L' = (v_j + v_n\cos\phi)\frac{2v_n\sin\phi}{g} \tag{26}$$

式中 v_j——机具前进速度,m/s

v_n——捡膜齿此时的线速度,m/s

g——重力加速度，m/s^2

ϕ——速度间夹角，(°)

残膜漏捡后，残膜被抛撒的最短距离所需要的时间设为 t_1，则下一个捡膜齿的入土捡拾时间 t_2 为

$$\begin{cases} t_2 = \dfrac{n'}{m} \leqslant \dfrac{2v_n \sin\phi}{g} = t_1 \\ v_n = 2\pi R \end{cases} \tag{27}$$

式中　n'——捡拾装置转速，r/min

因捡拾装置在机具前进方向的连续性，故此时捡拾装置的第 2 个和第 3 个运动的时间关系为

$$t_2 \leqslant \frac{2v_n \sin\phi}{g} \leqslant \frac{2n'}{m} = t_3 \tag{28}$$

式中　t_3——残膜抛撒后，第 3 个捡膜齿运动的时间，s

此时捡拾装置在该结构参数和工作参数下对漏捡残膜的捡拾频次达到 3 次，增加了漏捡残膜捡拾的概率，从而提高了残膜的拾净率。

3　基于 DEM－MBD 的斜向捡拾装置联合仿真试验

采用离散元法(DEM)与多体动力学(MBD)联合的方法[16]，利用 Adams 软件进行多体动力学仿真，EDEM 软件进行离散元仿真，通过实时动态联合机制，实现机械载荷与离散介质的相互作用。

3.1　仿真模型建立

3.1.1　Adams 模型建立

在 Adams 中构建了捡拾装置的三维模型，将模型部件简化为凸轮结构体、捡拾轴和滚筒架 3 个主体部件。

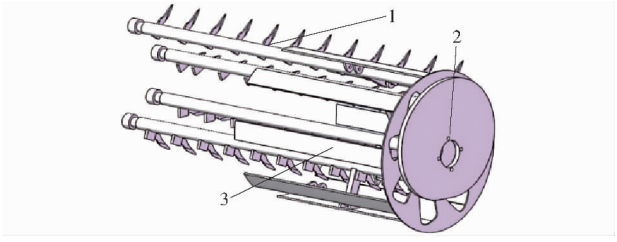


图 10　捡拾装置仿真模型

Fig. 10　Simulation model diagram of picking device

1. 捡拾轴　2. 凸轮结构体　3. 滚筒架

3.1.2　土壤-根茬模型建立

选用土壤颗粒接触模型为 Hertz－Mindlin with JKR 模型[17－18]，选取土壤颗粒尺寸直径 5 mm，土壤工厂尺寸为 500 mm×1 000 mm×100 mm；由于根茬底部在土壤中固定，且根茬的上部在回收过程中不被移动，因此可将根茬简化与土壤一起仿真[19]。本文将颗粒-颗粒和颗粒-几何体的接触模型设定为 Hertz－Mindlin(no-slip)无滑动接触模型[20]。

通过查阅文献[21]和相关材料得知，棉花秸秆、土壤颗粒、钢的本征参数及相互间的接触参数如表 1、2 所示。

表 1　仿真模型材料参数

Tab. 1　Material parameters of oblique picking simulation model

参数	土壤	钢	残膜	根茬
泊松比	0.36	0.35	0.41	0.35
剪切模量/Pa	1.0×10^6	7.27×10^{10}	1.12×10^6	1.0×10^6
密度/(kg·m^{-3})	1 610	7 850	915	120

表 2　仿真模型材料接触参数

Tab. 2　Material contact parameters of oblique picking simulation model

项目	静摩擦因数	滚动摩擦因数	碰撞恢复系数
土壤-土壤	0.74	0.22	0.52
残膜-残膜	0.52	0.40	0.57
土壤-钢	0.50	0.31	0.43
土壤-根茬	0.30	0.50	0.02
土壤-残膜	0.55	0.46	0.50
残膜-钢	0.45	0.40	0.50
残膜-根茬	0.30	0.60	0.15

3.1.3　残膜模型的建立

利用 Bonding V2 模型模拟残膜颗粒间的粘结，根据实际计算要求和拉力要求选择组成残膜的颗粒尺寸为半径 1 mm[22－23]，残膜颗粒如图 11 所示。

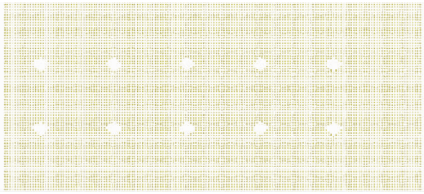


图 11　残膜颗粒示意图

Fig. 11　Diagram of degraded film debris

仿真过程中残膜颗粒间的粘结参数主要有：单位面积法向刚度(K_n，N/m^3)、单位面积剪切刚度(K_s，N/m^3，其值一般等于(1/3～1)K_n[24])、法向强度(σ，Pa)、剪切强度(τ，Pa)、粘结圆盘尺度(其值一般等于 1.1～1.3[25])。由文献[26－27]可知，$K_n = K_s = 1.14\times10^8$ N/m^3；$\sigma = \tau = 3.12\times10^7$ Pa。

3.1.4　仿真参数设置

模拟时，首先建立颗粒床(黄色为土壤颗粒，蓝色为残膜颗粒，红色为残膜上方的载荷颗粒)，如图 12a 所示，从上到下依次为杂质载荷、残膜和土壤。其中，土壤颗粒模型厚度为 550 mm，根茬最高端距离土壤上端为 75 mm；杂质载荷层包括土壤颗

粒、粉碎后的根茬颗粒、棉叶和棉桃等杂质，考虑到这层是为了还原残膜受到的载荷，因此为了简化计算，将杂质载荷转化为土壤颗粒。

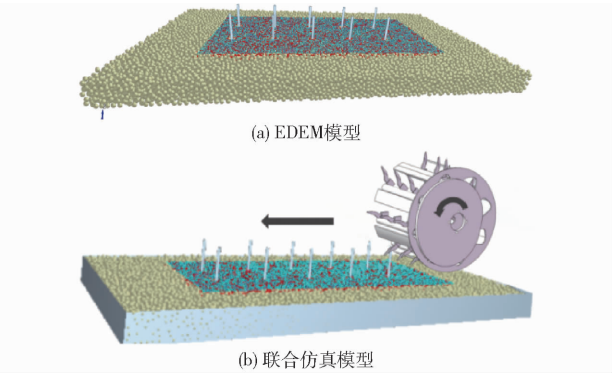


图 12 残膜-根茬-土壤模型

Fig. 12 Residual film - cotton - stem - soil model

在 DEM - MBD 联合仿真中，时间步长 Δt 的设定遵循以下原则：MBD 域的 Δt 设置为 DEM 域的整数倍，且以较小值作为仿真系统的全局步长。本研究考虑到仿真过程中颗粒与刚体间的相对速度较大，较小的 Δt 能有效降低数值误差，提高接触力计算精度。通过预试验采用 Rayleigh 时间 5% 作为 DEM - MBD 联合仿真的时间步长，在保证计算稳定性的同时，保障仿真的效率与精度。

3.1.5 仿真模型验证

为了验证模型的准确性，在相同工作速度和入土深度下，分别通过仿真试验与土槽试验获取捡膜齿受力数据，如图 13 所示。测定捡膜齿力的模拟值和试验值，结果如表 3 所示。从表中可知，土槽试验下测得捡膜齿的受到力的平均值为 31.45 N，仿真试验下捡膜齿受到力的平均值为 30.10 N。两者相对误差为 4.5%，在 5% 以内，表明所构建的模型能够用于捡拾残膜模拟。

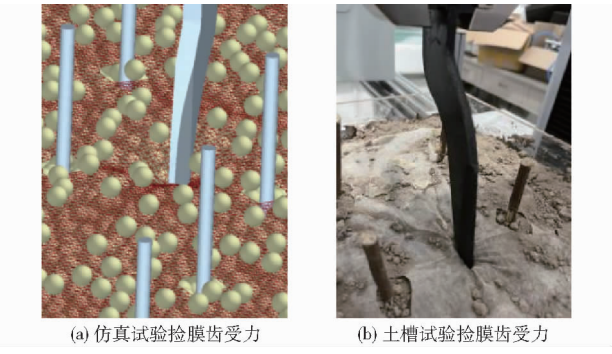


图 13 EDEM 仿真验证对比

Fig. 13 EDEM simulation verification comparison

表 3 捡膜齿力仿真试验与土槽试验结果

Tab. 3 Simulated test and soil tank test results of membrane gear force N

编号	仿真值	试验值
1	31.40	29.95
2	30.95	30.25
3	31.55	29.85
4	31.85	30.55
5	31.50	29.90

3.1.6 斜向捡拾残膜效果分析

在仿真试验中，选取机具前进速度为 7.0 km/h，捡拾滚筒转速为 60.0 r/min，入土深度为 40.0 mm，进行捡拾残膜模拟。

斜向捡拾的工作过程如下：图 14a 为初始工作状态，当开始作业时，第 1 个捡膜齿首先扎入残膜并向前推移（图 14b），在前进过程中，由于根茬与土壤的阻力，残膜主要沿齿前进方向发生撕裂，形成中间段与两侧分离段。中间段残膜随捡膜齿向前推移并逐渐堆积，同时与根茬脱离，两侧残膜则向幅宽方向伸展，部分膜面杂质在此过程中被排开。随后相对错位的第 2 个捡膜齿进入作业区，其主要作用是捡拾前序齿撕裂形成的两侧残膜段，并通过齿的挑取与提升动作，使该部分残膜与土壤分离（图 14c）。该过程实现了对首次捡拾遗漏残膜的补充拾取。后续各捡膜齿依次进入作业区，重复上述过程，最终在斜向连续的捡拾作业轨迹下实现残膜的高效回收（图 14d、14e），随着捡拾滚筒的转动，残膜被挑到大于捡拾装置半径的位置，此时残膜不会在捡膜齿上掉落（图 14f），从而完成窄行处残膜的捡拾过程。斜向捡拾对残膜回收和土壤扰动状况如图 15 所示。

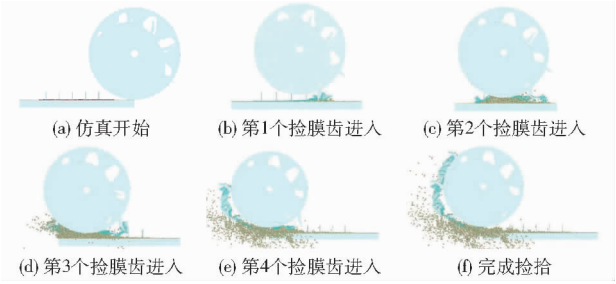


图 14 斜向捡拾过程仿真

Fig. 14 Simulation process diagrams

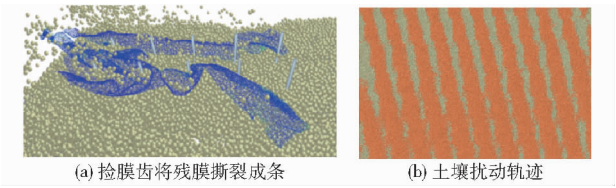


图 15 斜向捡拾装置工作效果

Fig. 15 Working effect of diagonal picking device

图 15a 表示首个捡膜齿作业时，残膜发生撕裂，形成中间段与两侧分离段的状况。中间段向前推移堆积并与根茬脱离，两侧段则向幅宽方向伸展。从图 15b 可以看出捡膜齿作用下土壤形成斜向的轨

迹，土壤的扰动主要表现为土壤的两边挤压和土壤的抛撒。

3.2　仿真试验设计与结果

3.2.1　试验方法

依据 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》和 GB/T 25413—2010《棉田残地膜残留量限值和测定》的技术规范，设计田间试验方案。首先，选取关键作业参数（机具行进速度 v；捡拾装置转速 n_j；捡膜齿入土深度 h）进行单因素试验确定各参数的水平范围。基于单因素仿真试验结果，采用三因素三水平正交试验设计，通过方差分析确定各参数的交互影响；优化参数组合，最终获得最优工作参数组合，使残膜回收率达到最大值。

3.2.2　试验指标

因本仿真研究表层残膜的回收状况（不含边膜），故选用残膜拾净率（无边膜）为目标值。

残膜拾净率公式为

$$Y_1 = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \tag{29}$$

式中　Y_1——残膜拾净率，%

M_0——仿真试验前地膜残留量，g

M_1——仿真试验后地膜残留量，g

3.2.3　试验因素

工作参数的不同会影响残膜捡拾的效果，从而影响残膜拾净率，基于 3.1 节结果设定机具前进速度为 5 ~ 9 km/h，捡拾装置转速为 40 ~ 80 r/min，捡膜齿入土深度为 30 ~ 50 mm。试验因素水平如表 4 所示。

表 4　试验因素水平

Tab. 4　Experimental factors and levels

水平	试验因素		
	机具前进速度/（km·h^{-1}）	捡拾装置转速/（r·min^{-1}）	捡膜齿入土深度/mm
1	5	40	30
2	6	50	35
3	7	60	40
4	8	70	45
5	9	80	50

3.2.4　单因素仿真试验结果与分析

研究机具前进速度对残膜拾净率的影响时，设定机具前进速度范围为 5 ~ 9 km/h，捡拾装置转速为 60 r/min，捡膜齿入土深度为 40 mm。仿真结果如图 16a 所示，残膜拾净率先升后降，在 7 km/h 时达到峰值 98.4%。因此，选取机具前进速度 5.5 ~ 7.5 km/h 为多因素正交试验因素的范围。

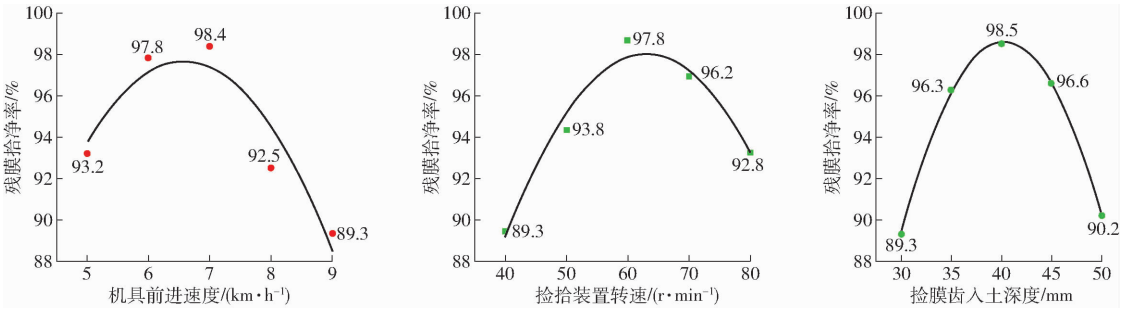


图 16　单因素仿真试验结果

Fig. 16　Simulation test results of single-factor

研究捡拾装置转速对残膜拾净率的影响时，设定机具前进速度为 6.5 km/h，捡膜齿入土深度为 40 mm，捡拾装置转速选取为 40 ~ 80 r/min。残膜拾净率先升后降，在 60 r/min 时达到最高 97.8%。因此，选取捡拾转速 55 ~ 75 r/min 为多因素正交试验因素的范围。

研究捡膜齿入土深度对残膜拾净率影响时，设定入土深度为 30 ~ 50 mm，机具前进速度为 6.5 km/h，捡拾装置转速为 65 r/min。残膜拾净率先升后降，在 40 mm 时达到最高 98.5%。选取入土深度 35 ~ 45 mm 为多因素正交试验因素的范围。

3.2.5　多因素仿真试验结果与分析

基于单因素仿真试验的分析结果，确定了影响回收效率的关键参数——行进速度（v）、捡拾装置转速（n_j）和入土深度（h）的优化区间分别为：$v \in [5.5, 7.5]$ km/h、$n_j \in [55, 75]$ r/min 和 $h \in [35, 45]$ mm。采用三因素三水平正交试验设计，利用 Box－Behnken 响应面法对试验数据进行统计分析。多因素正交试验因素编码如表 5 所示，通过 Design-Expert 软件构建二次回归模型，分析参数间的交互作用及其对残膜拾净率的影响规律，为回收装置的参数优化提供理论指导。

表 5　多因素仿真试验的因素编码

Tab. 5　Factors and codes of multi-factor simulation test

编码	试验因素		
	机具前进速度/（km·h^{-1}）	捡拾装置转速/（r·min^{-1}）	捡膜齿入土深度/mm
-1	5.5	55	35
0	6.5	65	40
1	7.5	75	45

共进行了 17 组试验，每组重复 3 次，通过 Design-Expert 软件构建二次回归模型，分析了参数间的交互作用对残膜拾净率的影响，如表 6 所示。

表 6 试验方案与结果

Tab. 6 Test scheme and results

试验号	试验因素			残膜拾净率 Y_1/%
	机具前进速度/(km·h^{-1})	捡拾装置转速/(r·min^{-1})	捡膜齿入土深度/mm	
1	5.5	55	40	95.80
2	7.5	55	40	96.22
3	5.5	75	40	96.78
4	7.5	75	40	92.54
5	5.5	65	35	91.10
6	7.5	65	35	90.65
7	5.5	65	45	95.77
8	7.5	65	45	92.45
9	6.5	55	35	91.59
10	6.5	75	35	90.46
11	6.5	55	45	94.31
12	6.5	75	45	94.63
13	6.5	65	40	98.25
14	6.5	65	40	98.15
15	6.5	65	40	99.14
16	6.5	65	40	98.39
17	6.5	65	40	99.25

运用 Design-Expert 10 软件对表 6 中统计的试验数据进行拟合和极差分析，得到残膜拾净率 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 98.64 - 0.948\,7X_1 - 0.438\,7X_2 + 1.67X_3 - 1.17X_1X_2 - 0.717\,5X_1X_3 + 0.362\,5X_2X_3 - 1.78X_1^2 - 1.52X_2^2 - 4.37X_3^2 \quad (30)$$

式中 X_1、X_2、X_3——因素编码值

方差分析结果如表 7 所示。通过分析可得对残膜拾净率的影响由大到小为捡膜齿入土深度、机具前进速度、捡拾装置转速。基于上述回归模型与方差分析结果，寻优得到滚筒式斜向残膜回收装置各参数为：机具前进速度为 6.2 km/h、捡拾滚筒转速为 65 r/min、捡膜齿入土深度为 41 mm，此时残膜拾净率最优，为 98.96%。

4 田间试验

4.1 试验条件

田间试验在新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州阜康市三工河哈萨克民族乡进行，地面平整，无明显压痕。采用耐候性地膜，地膜厚度为 0.01 mm。试验机具为滚筒式斜向捡拾残膜回收机，如图 17 所示，整机主要技术参数如表 8 所示。

表 7 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	151.05	9	16.78	76.01	<0.000 1
X_1	7.02	1	7.02	32.61	0.000 7
X_2	1.54	1	1.54	6.97	0.033 4
X_3	22.31	1	22.31	101.05	<0.000 1
X_1X_2	5.43	1	5.43	24.59	0.001 6
X_1X_3	2.06	1	2.06	9.33	0.018 5
X_2X_3	0.525 6	1	0.525 6	2.38	0.166 8
X_1^2	13.31	1	13.31	60.28	0.000 1
X_2^2	9.77	1	9.77	44.23	0.000 3
X_3^2	80.24	1	80.24	363.42	<0.000 1
残差	1.55	7	0.220 8		
失拟项	0.468 9	3	0.156 3	0.580 6	0.658 3
误差	1.08	4	0.269 2		
总和	152.59	16			

注：$P<0.01$ 为影响极显著；$0.01 \leqslant P<0.05$ 为影响显著。



图 17 田间试验机具

Fig. 17 Field experimental equipment

表 8 滚筒式斜向捡拾残膜回收机主要技术参数

Tab. 8 Key specifications of drum-type oblique residual film picking-up reclaimer

参数	数值
功率/kW	88.2～132.3
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 800×2 900×1 800
作业幅宽/mm	2 000

4.2 试验因素

选取机具前进速度 6.2 km/h、捡拾装置转速 65 r/min、捡膜齿入土深度 41 mm，以残膜回收率为评价指标，进行田间试验验证。试验采用随机抽样法，在试验区域设置 5 个采样单元，每个单元沿作业幅宽(5 m)等距布设 5 个采样点。残膜回收率(含边膜)公式为

$$Y = \frac{1}{5}\sum \frac{m' - m_0}{m'} \times 100\% \quad (31)$$

式中 Y——残膜回收率，%

m_0——作业后测点的残膜质量，g

m'——作业前测点的残膜质量，g

4.3 试验结果及分析

5 次田间试验得到的残膜回收率为 93.1%、

93.5%、92.8%、92.2%、93.2%。由此可知，本研究所设计的残膜回收装置对残膜（含边膜）的回收率平均达到 92.96%。其他滚筒式残膜回收机的残膜回收率在 90% 左右[28]，相较而言，本研究装置在残膜回收率方面得到了有效提升。由图 18 可以看到在根茬和土壤作用下漏捡的残膜可以得到有效捡拾。



图 18　田间试验效果

Fig. 18　Field trial diagram

5　结论

（1）针对当前残膜回收机在土壤和根茬干扰下出现的残膜漏捡现象，提出一种提高残膜单位面积捡拾次数的滚筒式斜向捡拾残膜回收装置，确定了捡膜齿间距为 160 mm，滚筒周向捡拾轴的数目为 8 个，捡膜齿在滚筒上的形式为双螺旋排布，导程为 320 mm。

（2）利用 EDEM 软件构建残膜-土壤-根茬离散元模型，在 Adams 中设置捡拾装置的运动参数，使 EDEM－Adams 进行联合仿真，采用单因素水平试验缩小试验因素的范围，采用三因素三水平正交试验，以残膜回收率为评价指标，得到最优参数组合为：机具前进速度 6.2 km/h、捡拾装置转速 65 r/min、捡膜齿入土深度 41 mm，此时残膜拾净率达到最大值。

（3）试制样机进行田间试验。得到残膜回收率（含边膜）平均值为 92.96%，残膜回收率提升，可解决因残膜被撕裂导致的漏捡问题。

参　考　文　献

[1] 杨松梅，陈学庚，颜利民，等. 残膜回收机带式卷膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：135－144.
YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment of belt-type film rolling device for residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 135－144. (in Chinese)

[2] 赵岩，郑炫，陈学庚，等. CMJY－1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(5)：1－9.
ZHAO Yan, ZHENG Xuan, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of CMJY－1500 combined harvester for picking up and packing residual film in farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 1－9. (in Chinese)

[3] 刘进宝，郑炫，赵岩，等. 残膜捡拾压缩车及其作业工艺设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(19)：17－26.
LIU Jinbao, ZHENG Xuan, ZHAO Yan, et al. Design and experiment of residual film picking-up and compressing vehicle and its working process[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 17－26. (in Chinese)

[4] 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 experiment of a residue film recovery machine based on the drum toothed film removal mechanism[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(5): 230－239. (in Chinese)

[5] 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.
ZHANG Xuejun, KANG Mengchen, SHI Zenglu, et al. Design and experiment of a dual-roll type post-harvest surface plastic film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(14): 1－13. (in Chinese)

[6] 康梦晨. 双滚筒式残膜回收机的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2024.
KANG Mengchen. Design and experiment research of dual-drum residual film recovery machine[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[7] 任伟，吴智勋，韩新杰，等. 弹齿式残膜回收机捡拾滚筒的设计与参数优化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(11)：1－12
REN Wei, WU Zhixun, HAN Xinjie, et al. Design and parameter optimization of the picking drum for the toothed-type plastic film recycling machine[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(11): 1－12. (in Chinese)

[8] 胡灿，杜鏊，王旭峰，等. 旋耕刀齿式棉田耕层残膜回收机设计与试验[J]. 中国农业大学学报，2023，28(10)：173－183.
HU Can, DU Ao, WANG Xufeng, et al. Design and testing of a rotary tillage tooth-type residual film recovery machine for cotton fields[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 173－183. (in Chinese)

[9] 缑海啸，温浩军，陈学庚. 二阶钉齿链板式残膜回收装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2024，40(19)：1－11.
GOU Haixiao, WEN Haojun, CHEN Xuegeng. Design and experiment of a second-order toothed chain plate-type plastic film waste recovery device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(19): 1－11. (in Chinese)

[10] 蒋德莉，颜利民，陈学庚，等. 纵向型钉齿链式地膜捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(1)：267－281.
JIANG Deli, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of longitudinal type toothed chain-type mulching film picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 267－281. (in Chinese)

[11] ZHANG Z, CHEN X, WANG X, et al. Design and test of the arc-shaped nail-tooth roller residual film recovery machine from the sowing layer[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 90－98.

[12] 王贤斐,张志元,赵永满,等. 弧形扎膜钉齿设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(12):24 - 29.
WANG Xianfei, ZHANG Zhiyuan, ZHAO Yongman, et al. Design and test of arc-shaped film binding nail teeth[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 24 - 29. (in Chinese)
[13] 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,2006,37(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, 37(6): 36 - 41. (in Chinese)
[14] 陈菁,山弘道,魏传省,等. 基于离散元的仿鲨鱼鳍深松铲耕作行为仿真分析[J]. 中国农机化学报,2024,45(12):15 - 20.
CHEN Jing, SHAN Hongdao, WEI Chuansheng, et al. Simulation analysis of cultivation behavior of shark-fin-like deep pine shovel based on discrete elements[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 15 - 20. (in Chinese)
[15] 蒋永新,曲衡,刘旋峰,等. 残膜回收机铲齿式起膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):282 - 289.
JIANG Yongxin, QU Heng, LIU Xuanfeng, et al. Design and experiment of spade tooth film lifting device for residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 282 - 289. (in Chinese)
[16] 张青松,郑中原,廖庆喜,等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(7):20 - 37,149.
ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Current status and prospects of coupled simulation technology in the field of agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 20 - 37, 149. (in Chinese)
[17] 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)
[18] 张冲,范旭辉,李明森,等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):52 - 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 52 - 59. (in Chinese)
[19] 周华,车海龙,耿端阳,等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(11):49 - 60,113.
ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 49 - 60, 113. (in Chinese)
[20] GAO X, CUI T, ZHOU Z, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device[J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(5): 1438 - 1449.
[21] 李蒙良,王立宗,廖庆喜,等. 油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报,2023,39(20):10 - 19.
LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 10 - 19. (in Chinese)
[22] BARR J B, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 53 - 64.
[23] WANG X, GAO P, YUE B, et al. Optimisation of installation parameters of subsoiler' wing using the discrete element method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 523 - 530.
[24] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):141 - 149.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Calibration of Bonding model parameters for coated fertilizers based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 141 - 149. (in Chinese)
[25] 胡广发,全腊珍,邹运梅,等. 农田残膜机械回收膜土分离模型的建立与仿真试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(3):344 - 350.
HU Guangfa, QUAN Lazhen, ZOU Yunmei, et al. Establishment and simulation experiment of the menbrane-soil separation model for the mechanical recover of residual membrane in farmland [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2021, 47(3): 344 - 350. (in Chinese)
[26] GB/T 1040.3—2006 塑料拉伸性能测定[S]. 2006.
[27] 申世龙,张佳喜,蒋永新,等. 基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究[J]. 农业机械学报,2024,55(7):132 - 141.
SHEN Shilong, ZHANG Jiaxi, JIANG Yongxin, et al. Tensile properties of residual film in tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 132 - 141. (in Chinese)
[28] 史明伟,王明刚,王伟,等. 棉秆粉碎与残膜回收打包一体机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(12):397 - 406.
SHI Mingwei, WANG Minggang, WANG Wei, et al. Design and testing of an integrated machine for cotton stalk shredding and plastic mulch residue recovery and baling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 397 - 406. (in Chinese)