doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.035

基于 SPH – FEM 耦合的残膜–根茬–弹齿互作规律研究

张学军[1,2]　史阳阳[1]　鄢金山[1,2]　史增录[1,2]　马　旭[1,2]　侯召全[1]　李华智[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:针对新疆棉田现有的残膜回收技术主要侧重于机械性能,忽略收膜过程中根茬对残膜的拖拽作用,导致残膜容易挂在根茬上的问题,本文通过对捡拾弹齿在含有根茬回收残膜时理论及仿真分析,确定了弹齿工作参数。使用有限元法(FEM)与光滑粒子流体动力学(SPH)相耦合算法,将弹齿、根茬、残膜构建为 FEM 网格,土壤构建为 SPH 颗粒,对残膜所受到的剪切应变、峰值应力、拾取高度及受到根茬的拉扯应力进行模拟。模拟含有棉秆根茬时的残膜回收情况,分析回收效果。田间试验结果表明,当根茬高度为 5 ~ 9 cm 时,残膜平均回收率为 91.25%,根茬上残膜残留率为 4.30%。当根茬高度为 10 ~ 12 cm 时,残膜平均回收率为 82.66%,根茬上残膜残留率为 12.55%。根茬高度为 5 ~ 9 cm 的地块比根茬高度为 10 ~ 12 cm 的地块回收率提高 8.59 个百分点,根茬上的残膜残留率降低 8.25 个百分点。根茬高度 5 ~ 9 cm 的地块中,根茬上残膜残留量占未回收残膜总量比根茬高 10 ~ 12 cm 地块低 45.34%。研究结果为根茬与残膜相关性以及残膜回收率提升提供了理论支持。

关键词:弹齿;残膜回收;SPH – FEM;棉秆根茬;残留率
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0386-11　　**OSID**:

Residual Film – Root Stubble-elastic Tooth Interactions Based on SPH – FEM Coupling

ZHANG Xuejun[1,2]　SHI Yangyang[1]　YAN Jinshan[1,2]　SHI Zenglu[1,2]　MA Xu[1,2]　HOU Zhaoquan[1]　LI Huazhi[1]
(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: The existing residual plastic film recovery techniques in Xinjiang's cotton fields primarily focus on mechanical properties, neglecting the dragging effect of root stubble on the film during collection. This results in residual film readily becoming entangled in the root stubble. It confirmed the operational parameters of the pick-up teeth by analyzing the recovery of residual film when picking up teeth in conditions containing root stubble. Employing a coupled finite element method (FEM) and smooth particle hydrodynamics (SPH) algorithm, the tines, stubble, and residual film were modeled as FEM meshes, while the soil was represented as SPH particles. This enabled simulation of the shear strain, peak stress, pick-up height, and tensile stress exerted by root stubble on the residual film. The recovery of residual plastic film in the presence of cotton root stubble was simulated and the recovery efficiency was analyzed. Field trial results indicated that when root stubble height ranged from 5 cm to 9 cm, the average recovery rate of residual film reached 91.25%, with a residual film retention rate on root stubble of 4.30%. When root stubble height was 10 ~ 12 cm, the average residual film recovery rate across plots was 82.66%, with 12.55% of residual film remaining on the root stubble. Plots with root stubble heights of 5 ~ 9 cm exhibited an 8.59 percentage point increase in recovery rates compared with plots with root stubble heights of 10 ~ 12 cm, alongside an 8.25 percentage point reduction in residual plastic film on stubble. In trial plots with root stubble heights of 5 ~ 9 cm, the residual film retention rate on root stubble was 45.34% lower than in plots with root stubble heights of 10 ~ 12 cm. The research findings can provide theoretical support for the correlation between root stubble and plastic film remnants, as well as for enhancing the recovery rate of plastic film remnants.

Key words: stubble-elastic tooth; film recovery; SPH – FEM; cotton stalk stubble; residual rate

收稿日期:2025 – 06 – 28　修回日期:2025 – 07 – 21
基金项目:自治区重点研发计划项目(2022B02038)
作者简介:张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:zhxjau@sina.com
通信作者:鄢金山(1986—),男,副教授,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:jshan.yan@xjau.edu.cn

0　引言

地膜铺设可很好地锁住土壤水分，同时具有增温保墒、改善土壤结构、防治病虫害等功能。地膜材料通常使用聚乙烯，厚度一般为 0.008 ~ 0.01 mm。地膜材料耐腐蚀性强，能满足棉花生长周期的时间要求，并可回收利用[1-2]。但由于地膜长期残留在土地上风吹日晒，会导致其机械性能下降，使其很难被回收利用[3-4]。目前，我国常用的残膜回收机械设备主要有齿链式、伸缩杆式和导向链耙式[5-6]，其中齿链式通过旋转钉齿钩膜，结构简单、成本低、作业速度快，但作业深度浅，一般小于 5 cm，含杂率极高、易缠绕，回收膜破损严重。伸缩杆式模仿人工捡拾，杆件深插土壤 5 ~ 10 cm 掘膜，回收深度大、膜体较完整、含杂率低，但结构复杂、成本高、功耗大、作业效率低。导向链耙式结合链耙与振动脱土，含杂率较低、作业速度快、稳定性较好，但回收深度有限，易受秸秆和湿土影响，而降低了残膜回收率。在残膜回收装备研究中，主要集中在机械和性能两方面研究，也有少数结合残膜和土壤特性的研究。但根茬对残膜回收时的影响却被忽视。由于残膜在回收时拉伸性能急剧下降，残膜与根茬之间有着相互牵制关系，收膜时极易造成残膜再次撕裂而挂在根茬上，增加了回收难度，导致残膜回收效果并不理想。

目前关于土壤建模和棉秆立柱与地膜之间的动态相互作用有各种建模方式。ANSYS 中 LS－DYNA 模块已成为三维动态建模土壤的首选[7]。杨望等[8]在 LS－DYNA 中使用 SPH 构建土壤模型，并与 FEM 耦合建立了挖掘铲、根和土壤可视化动态模型，研究挖掘土壤时松动机理与土壤变形以及根部应力变化过程。康建明等[9]使用 ANSYS 建立了挖沟刀盘，仿真切割过程，得出了挖沟刀盘在切割过程中的损耗和功耗变化规律。马明瑞等[10]提出一种自适应生成的多分辨率 SPH－FEM 耦合方法，更加精准地模拟了航空发动机叶片抗鸟撞击设计。HUO 等[11]针对液体与固体相互作用，提出了 FEM－SPH 和 SPH－SPH 两种数值模型来模拟液滴撞击船舶弹性梁的问题，并证明了数值模拟的准确性。张仕林等[12]使用 Abaqus 建立了压实轮与土壤相互作用的仿真模型，模拟了压实过程中接触部件与土壤之间的相互作用过程。

本文构建未被铲除的棉秆根部与土壤、残膜和弹齿有限元模型。使用 SPH－FEM 耦合方法，将土壤构建为 SPH 粒子形式，残膜构建为壳体，将棉秆与弹齿划分为 FEM 网格格式。模拟表层残膜回收时弹齿在钩膜过程中，残膜与根茬之间的撕扯情景。结合实际试验验证，优化弹齿运动参数以提高残膜回收率，以期为提高残膜回收效率提供参考。

1　关键部件设计

1.1　捡膜弹齿受力分析

弹齿接触土壤过程中，运动速度与圆周速度一致。弹齿在工作区域时，其运动轨迹可近似看作机身和弹齿之间的平移、旋转组合轨迹。弹齿进入工作区域时，齿尖将残膜穿透，带动残膜与弹齿一起平移、转动。以残膜作为研究对象，对其与弹齿之间进行相互受力分析[13]。如图 1 所示，当弹齿轴线与残膜重力之间夹角 γ 越小时，残膜所受到弹齿接触摩擦力越大，越不容易发生残膜滑落现象。由图 1 可得

$$\begin{cases} F+f=F_n+F_r\cos\eta \\ F_r\sin\eta=g\sin\gamma+f_r \\ F_r=(G+g)v^2/R \\ v=2\pi R\omega_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中　g——残膜自身重力，N

G——土壤重力，N

F_n——弹齿齿尖对残膜的力，N

F——附在残膜周围土壤对残膜造成的压力，N

F_r——弹齿工作时对残膜造成的力，N

f——残膜自身对弹齿形成的摩擦阻力，N

f_r——土壤对残膜形成的摩擦力，N

η——弹齿轴线与弹齿对残膜造成的力之间夹角，(°)

v——弹齿前进速度，m/s

ω_1、ω_2——整体转动角速度与弹齿转动角速度，rad/s

R——齿尖到转动中心半径，mm

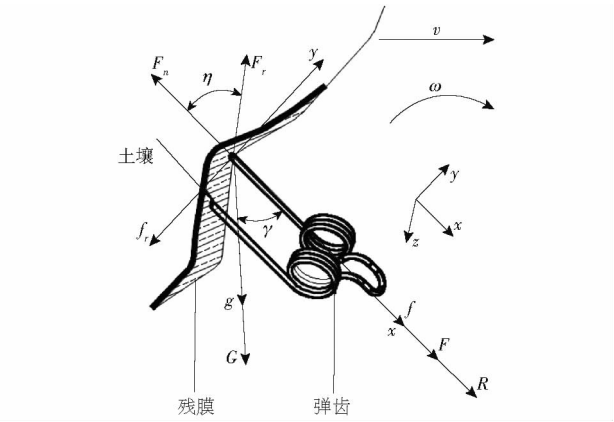


图 1　残膜与弹齿受力分析

Fig. 1　Stress analysis of residual film and spring teeth

由于残膜轻薄，做功微小，所以忽略不计。参照

文献[14]可得弹齿旋转一周做功为

$$P=\frac{2\pi G_0+0.1F_1ze}{zeHb} \tag{2}$$

其中 $$G_0=F_nR$$

式中 P——弹齿做功,J

F_1——残膜回收机牵引力,N

z——弹齿齿数

e——齿间间距,mm

H——弹齿入土深度,mm

G_0——转矩,N·m

b——齿横截面直径,mm

结合式(1)、(2)可得

$$P=\frac{2\pi[4\pi^2R^2\omega_2^2G_0(\sin\eta+\cos\eta)-(G\cos\gamma-f-f_r)R]+0.1zeF_1}{zeHb} \tag{3}$$

由式(3)可得,弹齿转动做功与齿数、齿间距、入土深度、弹齿旋转半径与速度、弹齿齿截面直径有关。当弹齿齿数、齿间距、入土深度、弹齿齿截面直径越大,弹齿做功越小。而弹齿旋转角速度和旋转半径越大,其做功越大。

1.2 弹齿运动参数

由图 2 可知,在弹齿转动轨迹里部分土壤隆起,经试验验证及文献[15]得出该部分土壤隆起较高时,起抛土壤较多,使残膜被挑起时二次撕裂可能性较大,并且加大弹齿转动功耗。新疆棉花播种深度为 20 ~ 40 mm,弹齿有效工作深度 h 为 150 mm,则该部分隆起土壤高度为

$$h-h_0\leqslant 150\ \text{mm} \tag{4}$$

式中 h_0——土壤隆起高度,mm

弹齿初始位置坐标方程为

$$\begin{cases}x=v_t+R\cos\alpha\\ y=R\sin\alpha\end{cases} \tag{5}$$

式中 v_t——弹齿前进方向位移,mm

对式(5)求导可得弹齿运动速度方程为

$$\begin{cases}v_x=x_t'=v-\omega_2R\sin\alpha\\ v_y=y_t'=\omega_2R\cos\alpha\end{cases} \tag{6}$$

式中 α——弹齿入土角,(°)

为考虑残膜回收质量与效率,根据前期试验,设弹齿残膜回收机前进速度 v 为 3 ~ 6 km/h,链轮转速为 80 ~ 150 r/min,链轮角速度 ω 为 8 ~ 16 rad/s,弹齿入土角为 20° ~ 40°。

2 仿真模型参数确定

通过理论分析发现,残膜回收时,残膜和秸秆根茬之间有密切关系。在土壤含有根茬的情况下,机械作业时,对宽 38 cm、长 50 cm 的大面积残膜进行仿真优化试验。

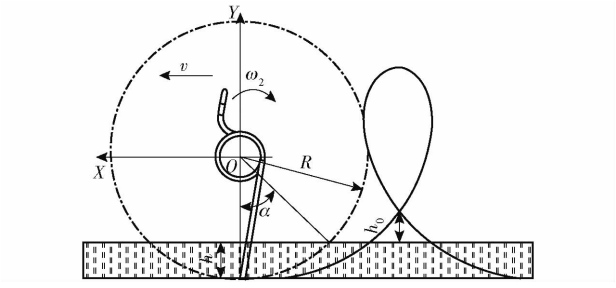


图 2 弹齿运动分析

Fig. 2 Motion analysis diagram of spring teeth

2.1 基于 SPH 建立土壤的基本原理

光滑粒子流体动力学(SPH)是用来跟踪离散粒子元素模拟流体和固体的计算方法[16],可以较为直观地观测到材料模拟大变形,覆盖了流体和固体力学中的广泛问题[17-18]。

SPH 技术可将模拟区域离散化粒子单元进行集合,每个粒子都有独立的实时变量,如质量和速度。该方法运用核近似技术求解控制偏微分方程(PDE)的形式,便于计算数量较多的变量形式[19]。计算式为

$$f(x_i)=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}f(x_j)W(x_i-x_j,h) \tag{7}$$

式中 $f(x_i)$——土壤粒子积分

$W(x_i-x_j,\ h)$——光滑核函数

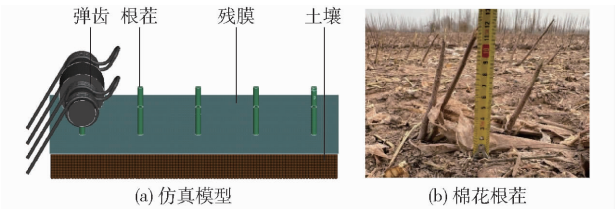
m_j——土壤颗粒 j 质量

p_j——土壤颗粒 j 密度

权重光滑核函数可优先考虑内核中心附近粒子的贡献,减少以该点为中心,远离该点粒子的影响,并将采样区域以外的粒子排除在计算之外。该特征满足本文使用的土壤模型需求,使用节点无网格方法将土壤构建为光滑颗粒模型[20]。

2.2 模型边界条件设置

如图 3a 所示,建立仿真可视化模型。设置齿间距为 8 cm,齿尖到旋转中心距离为 25 cm,可实现捡拾深度超过 12 cm。设置根茬行间距 10 cm,列间距 10 cm。如图 3b 所示,目前位于新疆大部分棉田根茬高度为 7 ~ 12 cm,在收膜过程中,残膜大部分会挂在根茬处,导致收膜率下降,地中残余膜较多。仿真试验设置 10 根秸秆根茬,根茬高度为 10 cm。土



(a) 仿真模型 (b) 棉花根茬

图 3 仿真设置结构示意图

Fig. 3 Schematic structure of simulation setup

壤使用 5 mm 的 SPH 颗粒，生成 215 002 颗粒子，颗粒间实现有效接触[21-22]。残膜设置为壳单元，选择面，生成网格为 15 675 个 2 mm 的单元格，设为可塑性变形结构[23]。弹齿和秸秆以及秸秆根茬设置为 solid，分别生成 1.5 mm 的网格单元。设置弹齿为钢性材料，各材料参数如表 1 所示[24-25]。

表 1　模拟材料参数

Tab. 1　Analogue material parameters

结构	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/Pa	泊松比
残膜	1 030	6.6×10^{5}	0.34
土壤	1 660	7.2×10^{6}	0.38
根茬	1 250	1.2×10^{3}	0.34
弹齿	7 850	2.1×10^{11}	0.30

根据前期研究，当机器前进速度为 3～6 km/h 时，设置弹齿围绕 z 轴转动角速度 1.8 rad/s 和 x 轴平动速度 1.3 m/s，入土角为 30°。为保证计算速度，将拾取机构去掉输送链、旋转轴、链轮等部件，对模型进行简化。将模型 k 文件导入 Ls－Prepost，设置弹齿与残膜和弹齿之间为自动面面接触。土壤和其他设置为自动点面接触。残膜和秸秆根茬设置为附带侵蚀的面面接触[26-27]。低值应变设为 0.5，当接触时侵蚀达 0.5 时，残膜将发生破裂，能够更贴合实际模拟残膜回收。为更好地分析残膜受力，将控制函数设置为罚函数(SFS)。罚函数可控制接触间穿透的允许量，当罚函数(SFS)刚度在 0.1～1.0 区间逐步增大时，接触模型穿透量会逐步减小，但计算时长会逐渐变大[28]。为了保证仿真参数准确性的同时尽可能降低计算时长，将罚函数值设为 0.7，总运行时长为 0.5 s。

3　残膜动态特性

3.1　不同根茬高度对残膜回收的影响

3.1.1　根茬高度 10 cm

图 4a 为起膜过程在 0.1 s 时剪切应变。可以看到残膜被根茬拖拽严重，此时剪切应变集中在第 1 排根茬处，最大为 2 701.3，残膜已经产生撕裂，土壤伴随着弹齿滑动轨迹解裂出 4 道深沟。图 4b 为起膜过程在 0.2 s 时剪切应变情况，土壤进一步解裂，此时残膜受到第 2 排根茬拖拽，剪切应变最大为 2 732.8，残膜发生撕裂。图 4c 为起膜过程在 0.4 s 时，可以看到残膜还未与第 2 排根茬脱离，产生了明显拖扯，并且撕裂进一步加大，此时残膜剪切应变为 2 742.1。图 4d 为起膜过程在 0.5 s 时，可以看出，土壤被划开 4 道深沟，同时残膜被根茬撕扯出一个比较大的裂口，整张残膜被撕裂，此时剪切应变为 2 742.3。残膜在瞬间剪切应变达到 2 000 时，会发生撕裂。对于土壤与弹齿之间相互接触时，仿真并不影响弹齿实时转速与前进速度。由此可见，在收膜过程中，根茬对残膜回收影响较大。

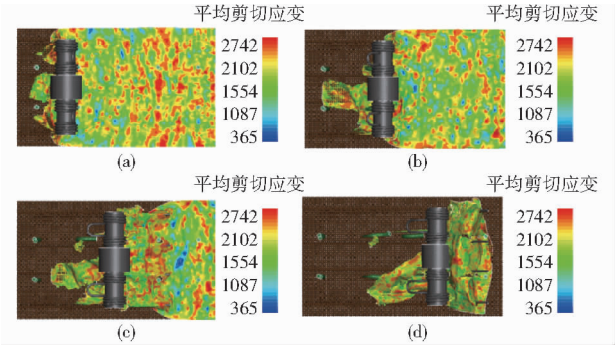


图 4　残膜平均剪切应变

Fig. 4　Plot of average shear strain of residual film

图 5a 为起膜过程在 0.1 s 时残膜平均峰值应力。可以看到残膜在根茬处应力颜色变化较大，最大峰值应力为 3.5 MPa，在残膜与根插交汇处已经发生撕裂。图 5b 为起膜过程在 0.2 s 时残膜平均峰值应力，此时残膜受到第 2 排根茬拖拽，平均峰值应力为 7.8 MPa，残膜在根茬处发生撕裂。图 5c 为起膜过程在 0.4 s 时残膜平均峰值应力，可以看到此时残膜还未与第 2 排根茬脱离，并且撕裂进一步加大，此时残膜平均峰值应力为 9.2 MPa。图 5d 为起膜过程在 0.5 s 时，可以看出，残膜被根茬撕扯出一个更大的裂口，整张残膜被撕裂，此时平均峰值应力为 9.7 MPa。由图 5 可知，残膜所受平均峰值应力可很好地反映出被捡拾所受影响，整张膜未被成功完全捡拾，在前半段中，残膜有部分撕裂并挂在根茬处。

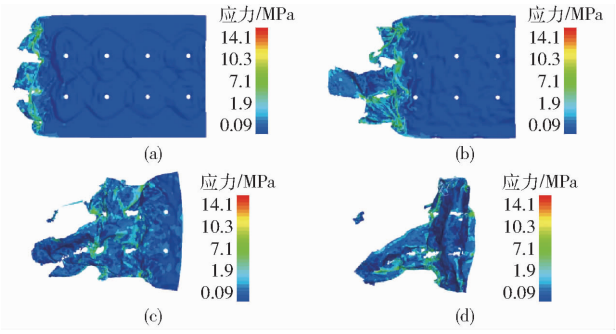


图 5　残膜平均峰值应力

Fig. 5　Residual film average peak stress map

如图 6a 所示，在 0.1 s 时，弹齿刚接触残膜，此时残膜出现褶皱。如图 6b 所示，在 0.2 s 时，残膜被弹齿的横向力向前推进，此时残膜被第 1 排根茬拖拽，残膜向上位移并没有有效升高，并且出现撕裂情况。如图 6c 所示，在 0.4 s 时，弹齿破土而出，但残膜在第 1 排和第 2 排根茬处还未完全分离，此时残膜上升高度为 26 cm，但最低高度依然为 2 cm，表示

有部分残膜未被有效捡拾。如图 6d 所示,在 0.5 s 时,可看出残膜被进一步撕裂,残留在根茬上,但后半部分残膜拾取高度上升至 39.6 cm,整张膜在高破损情况下被捡拾。由残膜捡拾位移可较好地看出残膜捡拾情况,从而更好地进行优化试验。

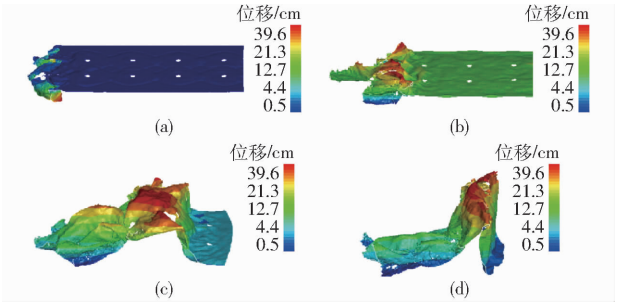


图 6 残膜拾取高度

Fig. 6 Height map for residual film pick-up

如图 7 所示。在残膜与根插交汇处,给出 5 个点,在捡膜过程中,可以看出在交汇处残膜所受根茬的拉扯应力。

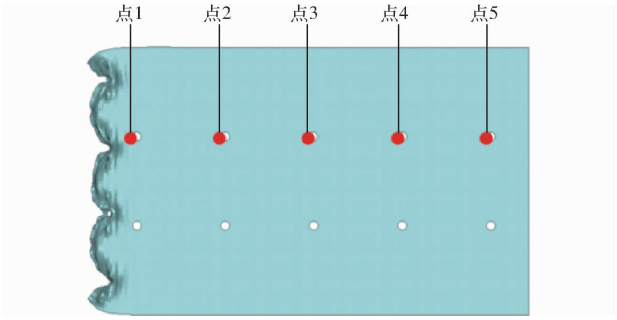


图 7 设置点位

Fig. 7 Setting points

由图 8 可知,在 0 ~ 0.35 s 时,残膜受到根茬拉扯应力变化较大,在点 1 和点 2 最大应力达到 13 MPa,出现严重撕裂,现实中已经无法有效回收。在 0.35 ~ 0.5 s 时,残膜也受到不同程度拉扯,当残膜应力超过 4 MPa 时,就会出现撕裂,逐渐加大导致无法回收。由此可见,根茬过高时,对残膜回收率影响较大。

3.1.2 根茬高度 5 cm

如图 9 所示,为更好地比对根茬对残膜回收的影响,将根茬降低至 5 cm。图 9a 为起膜过程在 0.1 s 时剪切应变情况,可以看到残膜与第 1 排根茬还存在着拉扯,此时剪切应变集中在第 1 排根茬处,最大为 2 006.1,残膜产生轻微撕裂。图 9b 为起膜过程在 0.2 s 时剪切应变情况,弹齿继续转动推进,残膜已经与第 1 排根茬完全脱离并且撕裂较小,平均剪切应变为 1 678.9。图 9c 为起膜过程在 0.4 s 时,可以看到残膜已经脱离第 2 排根茬,并覆盖根茬之上,没有明显拖扯,残膜剪切应变为 1 706.6,并未发生大规模撕裂。图 9d 为起膜过程在 0.5 s 时,可以看

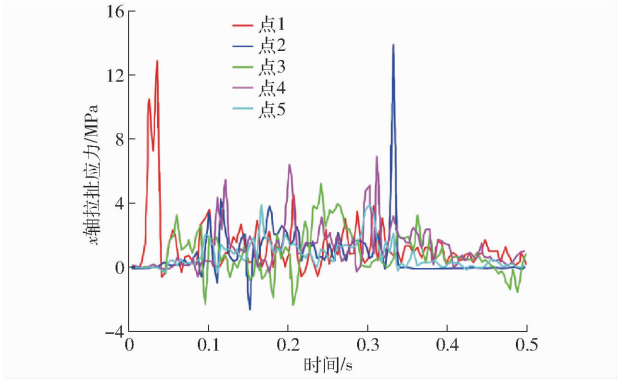


图 8 根茬高度 10 cm 时残膜受到拉扯应力曲线

Fig. 8 Tensile stress curves of residual film at 10 cm root stubble height

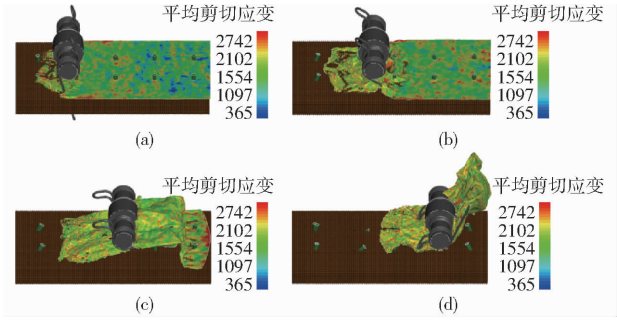


图 9 根茬高度 5 cm 时残膜平均剪切应变

Fig. 9 Plots of average shear strain of residual film at 5 cm root stubble height

出,残膜在比较完整的情况下被有效收起,整张残膜有较小撕裂,此时剪切应变为 1 769.4。与根茬高度为 10 cm 时的收膜相比,整张膜以较为完整的姿态被收起,表明根茬高度为 5 cm 时可有效提高残膜回收率。

图 10a 为起膜过程在 0.1 s 时残膜平均峰值应力,可以看到残膜在与弹齿接触地方峰值应力最大,最大峰值应力为 2.3 MPa,在残膜与根茬交汇处已经发生撕裂。图 10b 为起膜过程在 0.2 s 时残膜平均峰值应力情况,残膜受到第 2 排根茬拖拽,而与第 1 排根茬已经完全脱离,发生撕裂,但未有残留在地中膜,平均峰值应力为 2.7 MPa,残膜在根茬处发生轻微撕裂。图 10c 为起膜过程在 0.4 s 时残膜平均峰值应力,可看到残膜已经脱离第 2 排根茬,并且未与第 2 排根茬产生过多撕裂,残膜平均峰值应力为 3.1 MPa。图 10d 为起膜过程在 0.5 s 时,可以看出,残膜除了在第 1 排根茬处留下较为明显撕裂之后并没有较大撕裂,此时平均峰值应力为 3.3 MPa,整张残膜以完整的形态被捡拾。由图 10 可知,根茬高度为 5 cm 的残膜所受平均峰值应力与根茬高度为 10 cm 的残膜所受平均峰值应力相比,整张膜被成功捡拾,并且未发生大的裂口,未出现残留在地中的残膜。

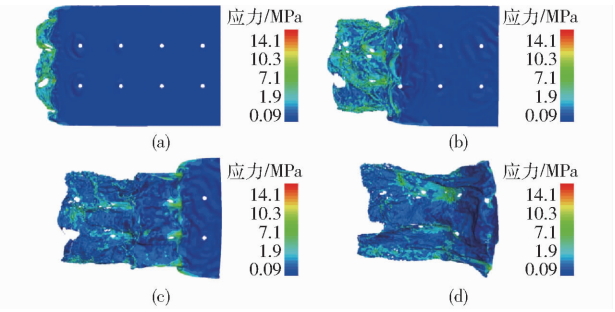


图 10　根茬高度 5 cm 时残膜平均峰值应力

Fig. 10　Average peak stress map of residual film at 5 cm root stubble height

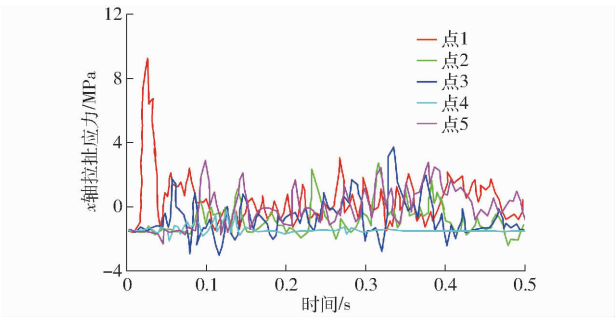


图 12　根茬高度 5 cm 时残膜受到拉扯应力曲线

Fig. 12　Tensile stress curves of residual film at 5 cm root stubble height

如图 11a 所示，在 0.1 s 时，弹齿刚接触残膜，此时残膜出现褶皱，在第 1 排根茬交汇处，残膜已经出现向上位移姿态，残膜被根茬拖挂但不足以加大撕裂。如图 11b 所示，在 0.2 s 时，残膜被弹齿拖拽向前推进，此时残膜呈现出前半段完全上升姿态，向上位移有效升高，没有出现被根茬拖拽而未有效上升的情况。如图 11c 所示，在 0.4 s 时，弹齿破土而出，但是残膜在第 1 排和第 2 排根插处完全分离，残膜上升高度为 37.2 cm，最低高度为 8.3 cm，表示被有效捡拾。如图 11d 所示，在 0.5 s 时，可以看出整张残膜被完全捡拾，后半部分残膜拾取高度上升至 46.1 cm，整张膜在较低破损情况下被捡拾。

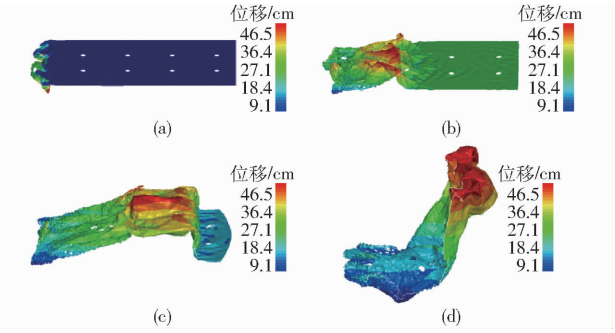


图 11　根茬高度 5 cm 时残膜拾取高度

Fig. 11　Height of residual film pick-up at 5 cm root stubble height

由图 12 可看出，点 1 所受到应力为 9.7 MPa，是因为在起膜阶段，膜与根茬未能在第一时间分离而导致的。随着弹齿继续转动，在 0.05 ~ 5 s 区间，残膜所受 x 轴方向横向拉扯应力不断减小，趋近于稳定状态，最大应力为 3.7 MPa。由上述分析可看出，根茬高度 5 cm 时，残膜所受到根茬拖拽情况相比于根茬高度 10 cm 大幅度减小，从而提高了残膜回收率。

3.2　根茬高度对残膜动态特性影响

通过试验可以看出，当根茬高度越低时，对残膜拖拽影响越小，残膜回收越完整，回收率越高。为找到合适的根茬高度区间，分别对根茬高度为 5、6、7、8、9、10、11、12 cm 展开残膜回收仿真。

图 13a 为残膜在不同根茬高度下的剪切应变。可以看出，收膜作业时，残膜随着根茬高度的不断增加而增加，整体呈线性上升趋势。在 0.1 s 时，根茬高度为 5 ~ 8 cm 时残膜剪切应变都在 0.1 ~ 0.5 s 时达到最大值，是因为弹齿将残膜推进至第 1 排根茬处，残膜在第一时间并不能很好地与根茬分离，而导致剪切应变过大，虽有撕裂，但不足以出现挂在根茬上无法回收的情况。随着时间变化，残膜剪切应逐渐趋近于平衡，有不同程度损伤，但整张膜可被成功收起。当根茬高度为 9 ~ 12 cm 时，残膜受到剪切应变整体都在 2 000 以上，瞬时变形量大，残膜撕裂会随之增大，特别在 0.1 ~ 0.3 s 时，剪切应变会出现不同程度的最大值，是因为收膜时随着根茬的不断增高，残膜很难与根茬有效分离从而加大剪切应变，直至残膜撕裂。当根茬高度为 9 cm 时，剪切应变为 2 199.6 ~ 2 396.3，仿真发现，残膜虽整体撕裂较大但是也被完全收起。当根茬高度为 10 ~ 12 cm 时，残膜均有残留在根茬上未被成功收起的情况出现。

图 13b 为不同根茬高度时残膜平均峰值应力。可以看出残膜平均峰值应力随根茬高度增加而增加，整体呈线性上升趋势。其中根茬高度为 5 ~ 9 cm 时，残膜平均峰值应力最大为 6.9 MPa，其中均值最大为 5.1 MPa，残膜整体有不同程度损伤，多数集中在弹齿和根茬接触的地方。根茬高度超过 9 cm 后，残膜应力出现跳跃式增加，最大平均峰值应力从 6.9 MPa 增加到 9.7 MPa。可以发现，根茬在 9 cm 到 10 cm 时仅为 1 cm 的增加，残膜被根茬拖拽严重，这也导致了平均应力峰值整体跳跃大。随后继续增加根茬高度，平均峰值应力上升浮动逐渐减小，是因为残膜已经撕裂较大并且没有办法被完全拾取。

图 13c 为仿真收膜在不同根茬高度时残膜位移，可以看出残膜整体上升高度随着根茬高度的上升而减小。根据弹齿收膜正常高度，在 0.5 s 时，应

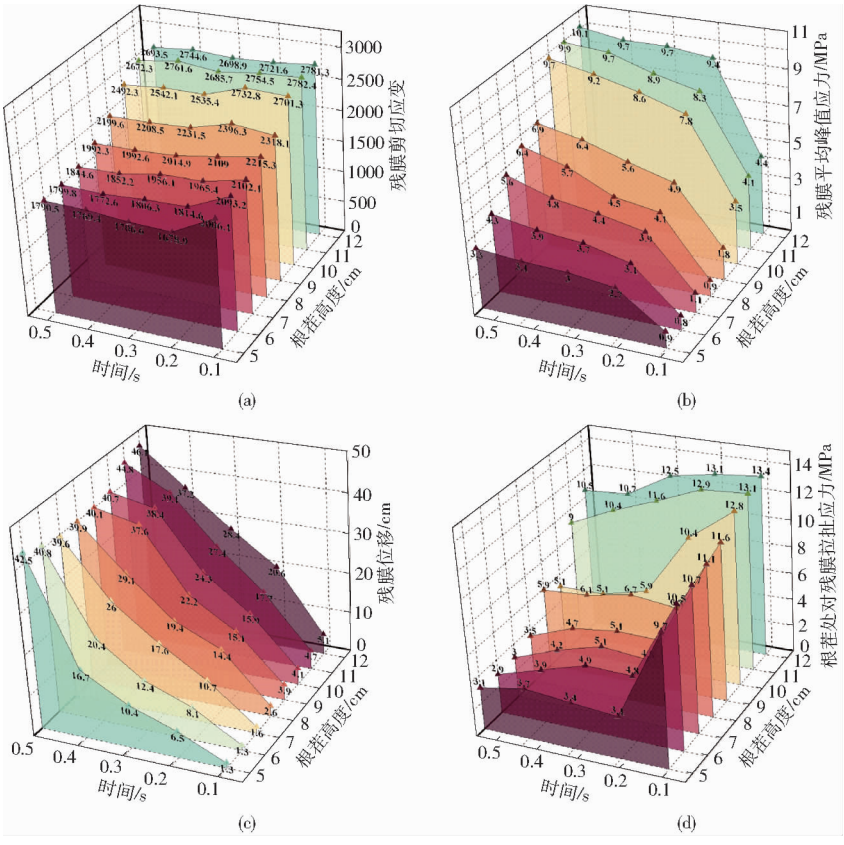


图 13 不同高度根茬对残膜回收时不同参数的影响

Fig. 13 Effects of different heights of root stubble on different parameters during residual film recycling

上升至 35 cm。在 0.5 s 时同时超过标准值。在 0.1 ~0.3 s 时,根茬高度 9 ~12 cm 时残膜最大向上位移为 19.4 cm,是因为残膜被根茬过度拉扯撕裂导致未能有效上升,但根茬高度 9 cm 在强烈拉扯时虽有破裂,最终还是可与根茬完全脱节,这并不影响残膜回收率。在 0.1 ~0.3 s 时,根茬高度 5 ~8 cm 时残膜最大向上位移为 22.2 ~28.4 cm,轻度拖拽并没有影响到残膜回收,以正常速度上升。

图 13d 为根茬对残膜的拉扯应力。当根茬高度为 5 ~8 cm 时,根茬对残膜拉扯应力呈现出缓慢上升趋势,最大应力为 11.1 MPa,是集中在 0.1 s 时第 1 排根茬上,因为起膜阶段与第 1 排根茬通常是难以分离的状态。最小应力为 2.9 MPa,其余地方的应力都不足以使残膜挂在根茬上,回收效果比较好。当根茬高度为 9 ~12 cm 时,最小应力达到 5.9 MPa,最大应力为 13.4 MPa,残膜撕裂不断增大,在根茬高度增加到 10 cm 后,每次都会有残膜挂在根茬上,不能成功回收。当根茬高度为 9 cm 时,虽然残膜也出现挂在根茬上,并被撕裂,但在 0.3 s 时显示其可以与根茬分离开,最后可以成功回收,提高了回收率。

分析可得,当根茬高度为 5 ~9 cm 时,残膜虽有不同程度撕裂,但都会被完整地捡拾。当根茬超过 9 cm 时,残膜部分挂在根茬上无法捡拾。因此,选择根茬高度 5 ~9 cm 进行弹齿速度配合及入土角优化试验。当根茬越高时,残膜回收难度越大,所以选取高度根茬 9 cm 为试验优化目标,以最大程度减小残膜拖挂情况,提高残膜回收率。

4 仿真优化试验

4.1 试验方案

为获得弹齿最佳工作参数,采用二次正交组合设计。以弹齿前进速度 X_1、转动角速度 X_2和入土角 X_3为试验因素。以残膜拾取高度 Y_1、根茬对残膜拉扯平均应力 Y_2为试验指标,进行仿真试验。试验因素如表 2 所示。

表 2 仿真试验因素编码

Tab. 2 Simulation test factors and codes

编码	因素		
	前进速度/(m·s^{-1})	转动角速度/(rad·s^{-1})	入土角/(°)
-1.682	0.6	1.1	25
-1	0.9	1.8	27
0	1.3	2.9	30
1	1.7	4.0	33
1.682	2.1	4.7	35

4.2 仿真结果分析

仿真试验,每组试验重复 5 组,分别取残膜最大

剪切应变、残膜拾取高度和平均应力峰值平均值。结果如表 3 所示。

表 3　仿真试验设计与结果

Tab. 3　Simulation test design and results

序号	因素			拾取高度 Y_1/cm	根茬对残膜拉扯平均应力 Y_2/MPa
	前进速度 X_1	转动角速度 X_2	入土角 X_3		
1	－1	－1	－1	39.1	5.4
2	1	－1	－1	39.9	4.3
3	－1	1	－1	38.9	6.6
4	1	1	－1	38.1	6.5
5	－1	－1	1	39.6	6.1
6	1	－1	1	37.9	4.6
7	－1	1	1	38.6	6.7
8	1	1	1	37.6	6.1
9	－1.682	0	0	37.9	7.2
10	1.682	0	0	38.3	5.3
11	0	－1.682	0	37.2	5.4
12	0	1.682	0	37.4	7.1
13	0	0	－1.682	40.8	4.1
14	0	0	1.682	39.5	4.3
15	0	0	0	41.3	3.6
16	0	0	0	41.1	3.7
17	0	0	0	41.2	3.7
18	0	0	0	42.2	3.8
19	0	0	0	42.1	3.8
20	0	0	0	41.0	3.9

由表 4 可知，各因素对 Y_1 影响从大到小为：X_2^2、X_1^2、X_2、X_1X_2、X_3^2、X_2X_3、X_3、X_1、X_1X_3。其中 X_1^2 和 X_2^2 影响极显著，X_2 影响显著，其余不显著。对 Y_2 影响从大到小为：X_1^2、X_2^2、X_2、X_1、X_3^2、X_1X_2、X_2X_3、X_1X_3、X_3。其中 X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_1、X_2、X_1X_2 影响极显著，X_2X_3 影响显著，其余不显著。

表 4　方差分析

Tab. 4　Variance analysis

来源	自由度	Y_1			Y_2		
		平方和	F	P	平方和	F	P
模型	9	55.02	20.09	<0.000 1 **	30.63	119.53	<0.000 1 **
X_1	1	0.01	0.04	0.838 2	3.09	108.49	<0.000 1 **
X_2	1	1.53	5.01	0.049 1 *	5.12	179.68	<0.000 1 **
X_3	1	0.01	0.05	0.834 8	0.08	2.76	0.127 5
X_1X_2	1	0.78	2.57	0.1401	0.45	15.85	0.002 6 **
X_1X_3	1	0.01	0.04	0.8514	0.10	3.56	0.088 7
X_2X_3	1	0.36	1.19	0.3014	0.21	7.42	0.021 4 *
X_1^2	1	22.91	75.31	<0.000 1 **	11.86	416.56	<0.000 1 **
X_2^2	1	34.35	112.88	<0.000 1 **	11.86	416.56	<0.000 1 **
X_3^2	1	0.39	1.29	0.282 9	0.48	16.85	0.002 1 **
残差	10	3.04			0.28		
失拟项	5	1.88	1.62	0.304	0.23	4.18	0.071 4
误差	5	1.16			0.055		
总和	19	58.07			30.92		

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

关于弹齿前进速度 X_1、角速度 X_2、入土角 X_3 对残膜拾取高度 Y_1、根茬对残膜拉扯的平均应力 Y_2 回归方程数学模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 41.79 - 0.33X_2 - 1.26X_1^2 - 1.54X_2^2 \\ Y_2 = 3.75 - 0.48X_1 + 0.61X_2 + 0.24X_1X_2 - \\ \qquad 0.16X_2X_3 + 0.91X_1^2 + 0.91X_2^2 + 0.18X_3^2 \end{cases} \tag{8}$$

由表 4 可知，该模型 $P<0.000\,1$，失拟项 P 分别为 0.304、0.071 4。决定系数 R^2 分别为 0.95、0.99，均接近 1，表明该回归方程拟合率高。校正决定系数 R^2_{Adj} 与预测决定系数 R^2_{Pre} 差值均小于 0.2，表明该模型误差小、拟合完好。变异系数分别为 1.39%、3.30%，表明试验结果可靠性较高。

4.3　响应曲面

通过 Design-Expert 12.0 软件绘制弹齿前进速度、转动角速度、入土角对残膜拾取高度和根茬对残膜拉扯平均应力的响应曲面。由分析得到，对于残膜拾取高度，弹齿前进速度与入土角影响不显著，相互交互作用均不显著，但弹齿旋转角速度对残膜拾取高度影响显著，是决定拾取高度的关键因素。而对于残膜受到根茬拖拽产生的拉扯应力，弹齿前进速度与转动角速度产生的交互影响最显著，其次是转动角速度与入土角产生的交互作用，在这两组交互作用下对残膜受到的拉扯应力影响较大。

由图 14a 可知，当弹齿前进速度为 1.3～1.7 m/s、角速度为 2.0～3.1 rad/s 时，残膜受到根茬拖拽产生的拉扯应力为 4.2 MPa，表明残膜虽有撕裂，但并没有挂在根茬上。超过这个范围残膜受到根茬平均拉扯应力变大，残膜挂在根茬难以回收。如图 14b 所示，弹齿转动角速度为 2.0～3.0 rad/s、入土角为 27°～32°时，根茬对残膜拉扯应力最小。随着弹齿转动角速度的不断增大或减小，根茬对残膜拉扯应力也随着增大，最终导致无法有效回收。

4.4　参数优化

使用 Design-Expert 13 中的响应优化功能，通过多元二次回归方程进行优化试验，建立目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \tag{9}$$

通过分析计算，得到最优参数组合为：弹齿前进速度 1.41 m/s、弹齿转动角速度 2.67 rad/s、弹齿入

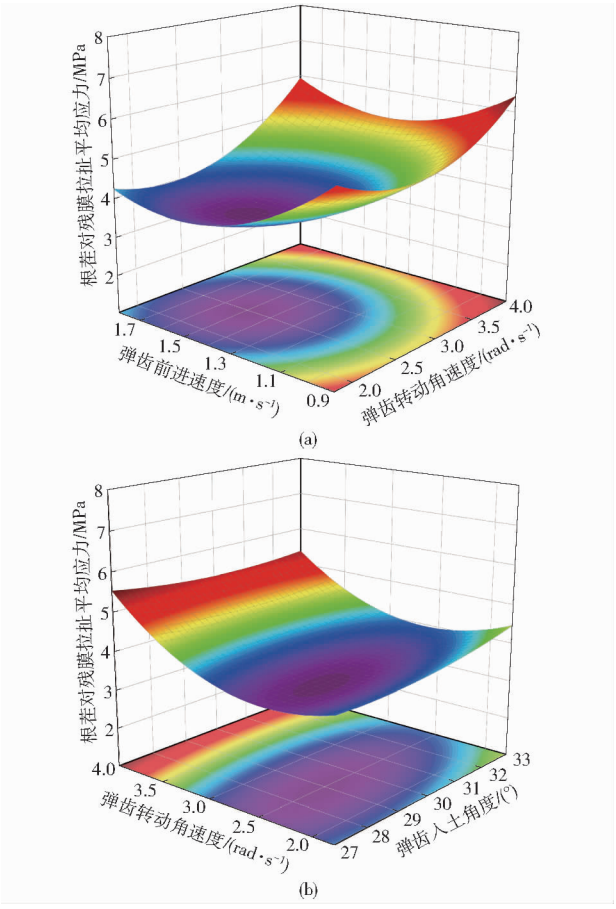


图 14 根茬对残膜拉扯平均应力响应曲面

Fig. 14 Corresponding surfaces on tensile stress produced by root stubble and residual film

土角 29.87°,此时残膜捡拾高度为 41.77 cm,根茬对残膜拉扯平均应力为 3.60 MPa。

5 田间试验

5.1 试验条件

为更好地验证仿真试验所得优化参数的准确性,结合仿真地优化试验结果,展开田间试验,于 2025 年 4 月中旬在新疆阿克苏地区柯坪县吐和高速阿恰立交西北侧一处棉花种植地进行了现场试验。试验场地为采棉后试验田,残膜厚为 0.01 mm,膜宽 2 050 mm。使用土壤密度测试仪测试土壤密度约为 1 691 kg/m^3。采用土壤含水率测定仪测定土壤深度 0 ~ 100 mm 的含水率为 16.56%。试验样机采用拖挂式弹齿残膜回收机,上方挂置弹齿模拟残膜回收,工作幅宽为 2 050 mm,作业深度为 0 ~ 120 mm。设置弹齿前进速度 1.4 m/s、转动角速度 2.7 rad/s,入土角为 30°,如图 15 所示。

通过残膜回收率检验残膜回收机作业效果,其计算式为

$$W = \left(1 - \frac{S}{S_0}\right) \times 100\% \tag{10}$$



图 15 田间试验

Fig. 15 Field trials

式中 W——残膜回收率,%

S——拾取残膜质量,g

S_0——拾取前残膜质量,g

由仿真所得,残膜破损情况大多数出现在残膜与秸秆根茬交汇处。为方便验证和更直观有效地得到作业后残膜与秸秆根茬之间的残留率,定义根茬上残膜剩余量,包含与其连续情况。计算式为

$$W_1 = \frac{S_1}{S_0} \times 100\% \tag{11}$$

式中 W_1——残膜与秸秆根茬交汇处残留率,%

S_1——根茬处未拾取得残膜质量,g

5.2 试验设计与结果分析

根据文献[29 - 30],在试验区域株距方向,将试验田均匀分布 10 个区域,每个区域选取 1 个长、宽各 2 m 的试验区,其中 5 组秸秆根茬高度为 5 ~ 9 cm,5 组秸秆根茬高度为 10 ~ 12 cm,高出 12 cm 的秸秆根茬忽略不计。将残膜除土和风干后,计算残膜质量,取其平均值。如图 16 所示,图 16a ~ 16c 为秸秆根茬高度为 5 ~ 9 cm 时,在该配速下,可以看出残膜回收率较高,残膜与秸秆根茬拖挂极少。图 16d ~ 16f 为秸秆根茬高度为 10 ~ 12 cm,明显看出残膜回收效果不理想,较多残膜拖挂在秸秆根茬处。试验结果如表 5 所示。

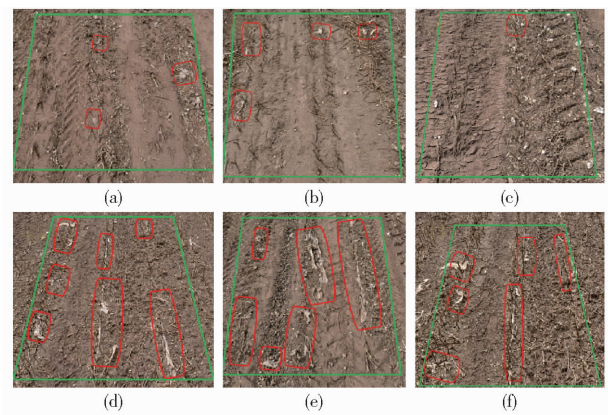


图 16 试验效果

Fig. 16 Test results

表 5　试验结果

Tab.5　Test result data

参数	试验序号					平均值
	1	2	3	4	5	
原残膜质量/g	187.1	177.4	179.7	184.4	179.7	181.7
5～9 cm 剩余膜总质量/g	17.5	15.3	12.9	16.7	17.1	15.9
5～9 cm 根茬缠绕残膜质量/g	8.1	7.7	7.6	6.8	8.9	7.82
10～12 cm 剩余膜总质量/g	32.4	29.4	34.7	32.1	29.0	31.5
10～12 cm 根茬缠绕残膜质量/g	24.8	21.6	27.3	20.3	19.9	22.8

代入式(10)，在根茬高度 5～9 cm 秸秆根茬试验中，平均残膜回收率为 91.25%；在秸秆根茬高度 10～12 cm 试验中，平均残膜回收率为 82.66%。

代入式(11)，在 5～9 cm 根茬地，计算出残膜与根茬交汇处残膜残留率为 4.30%，占总剩余残膜质量 27.04%；在 10～12 cm 根茬地里，计算出残膜与秸秆根茬交汇处残膜残留率为 12.55%，占总残膜质量 72.38%。

当弹齿残膜回收机弹齿仿真参数应用进现场试验速度：前进速度 5.1 km/h、角速度 2.7 rad/s 和入土角 30°。结果表示，根茬高度 5～9 cm 秸秆根茬试验地比根茬高度 10～12 cm 的秸秆根茬试验地回收效果理想，残膜回收率提高 8.59 个百分点，残膜与秸秆根茬残留率降低 8.25%。根茬高度 5～9 cm 地块根茬残膜残留量占未回收残膜总量比茬高 10～12 cm 地块低 45.34%。

该参数配置下，残膜回收干净，对土壤破坏小，减少不必要损耗。弹齿入土角 30°可以有效将残膜挑起并减小与土壤之间得横向摩擦，这有效延长弹齿的使用寿命，提高了残膜回收效率。当弹齿角速度为 2.7 rad/s 时，一方面可以有效延长皮带和弹齿的使用寿命，另一方面在试验过程中发现，该配速下弹齿式残膜回收机残膜回收效率最佳。超过该配速时，弹齿容易产生不可逆变形，并且影响残膜回收效率。

6　结论

(1)为了确定棉茬对残膜回收的影响，通过优化机械参数，减少棉茬对残膜回收的影响，提高回收率。

(2)采用 SPH－FEM 耦合算法，建立了弹齿、残膜、土壤和棉茬的动态相互作用模型。通过精确模拟残膜回收过程中残膜的剪切应变、应力和残膜拾取高度，分析了棉茬对残膜回收的影响。优化弹齿运动参数，当前进速度为 1.41 m/s、角速度为 2.67 rad/s、入土角为 29.87°时，根茬对残膜拉扯平均应力为 3.60 MPa、残膜捡拾高度为 41.77 cm，降低了根茬对残膜回收的影响。

(3)多因素正交试验结果表明，田间最佳作业参数为：前进速度 1.4 km/h、角速度 2.7 rad/s 和入土角 30°。结合田间试验，对比根茬高度 5～9 cm 和 10～12 cm 对残膜回收率的影响。结果表明，在适当的机器操作参数下，可减小棉花根茬对残膜回收率的影响。

参　考　文　献

[1] 梁志宏，王勇. 我国农田地膜残留危害及防治研究综述[J]. 中国棉花，2012，39(1)：3－8.
LIANG Zhihong, WANG Yong. Research summary of damage and control of the remainder of plastic film in farmland in China [J]. China Cotton, 2012, 39(1):3－8. (in Chinese)

[2] 靳伟，张学军，鄢金山，等. 曲轴式棉田地表残膜回收机捡膜特性分析及工作参数优化[J]. 农业工程学报，2018，34(16)：10－18.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, YAN Jinshan, et al. Characteristic analysis and working parameter optimization of crankshaft type cotton field surface residual film collecting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16):10－18. (in Chinese)

[3] 胡灿，王旭峰，陈学庚，等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报，2019，35(24)：223－234.
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24):223－234. (in Chinese)

[4] 赵岩，陈学庚，温浩军，等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2017，48(6)：1－14.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):1－14. (in Chinese)

[5] 唐永飞，赵永满，王吉奎，等. 夹指链式残膜回收机脱膜装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(13)：11－19.
TANG Yongfei, ZHAO Yongman, WANG Jikui, et al. Design and experiment of film removing device for clamping finger-chain type residual film collector[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13):11－19. (in Chinese)

[6] 王旭峰，胡灿，鲁兵，等. 抛膜链齿输送式残膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(3)：122－129.
WANG Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):122－129. (in Chinese)

[7] HALQUIST J. LS - DYNA keyword user's manual (r:13107)[M]. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2020.
[8] 杨望,杨坚,贾丰云,等.种植于红粘土的木薯块根挖掘作业数值模拟[J].机械工程学报,2013,49(9):135 - 143.
YANG Wang, YANG Jian, JIA Fengyun, et al. Numerical simulation of digging operation of cassava root planted in red clay [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9):135 - 143. (in Chinese)
[9] 康建明,李树君,杨学军,等.圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J].农业工程学报,2016,32(13):8 - 15.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Experimental verification and simulation analysis on power consumption of disc type ditcher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):8 - 15. (in Chinese)
[10] 马明瑞,陈福振,严红,等.基于多分辨率 SPH - FEM 耦合方法的鸟撞问题数值模拟[J].航空学报,2024,45(21):251 - 271.
MA Mingrui, CHEN Fuzhen, YAN Hong, et al. Numerical simulation of bird strike based on multi-resolution SPH - FEM coupling method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21):251 - 271. (in Chinese)
[11] HUO Y, ZHONG Y, XIN M, et al. Modeling and simulation of droplet impact on an elastic beam based on FEM - SPH and SPH - SPH FSI methods[J]. Ocean Engineering, 2024, 310: 118730.
[12] 张仕林,赵武云,戴飞,等.全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(1):20 - 30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):20 - 30. (in Chinese)
[13] ZHANG Z, LI J, WANG X, et al. Parameters optimization and test of an arc-shaped nail-tooth roller-type recovery machine for sowing layer residual film[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 660.
[14] 谢建华,唐炜,曹肆林,等.齿链复合式残膜回收机设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(1):11 - 19.
XIE Jianhua, TANG Wei, CAO Silin, et al. Design and experiment of tooth chain compound residual film recovery machinel [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):11 - 19. (in Chinese)
[15] 靳伟,丁幼春,农峰,等.抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):71 - 82.
JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film - soil - straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):71 - 82. (in Chinese)
[16] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. Mon. Not. R. Astron. Soc., 1977, 181: 375 - 389.
[17] 班晓娟,周靖,王笑琨,等.面向光滑粒子流体动力学(SPH)流体的湍流细节模拟[J].北京理工大学学报,2021,41(8):847 - 854.
BAN Xiaojuan, ZHOU Jing, WANG Xiaokun, et al. Turbulence details simulation toward smoothed particle hydrodynamics (SPH) fluid[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(8):847 - 854. (in Chinese)
[18] 金阿芳,买买提明·艾尼.论光滑粒子流体动力学(SPH)方法[J].新疆大学学报(自然科学版),2006,23(2):188 - 193.
JIN Afang, BUYMING AINI. Study on method of smoothed paiticle hydrody namics (SPH)[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2006, 23(2):188 - 193. (in Chinese)
[19] YOSEF T Y, FANG C, FALLER R K, et al. Adaptive coupling of FEM and SPH method for simulating dynamic post-soil interaction under impact loading[J]. Advances in Engineering Software, 2024, 195: 107145.
[20] JIN X, MA F, WANG D, et al. Simulation of mouldboard plough soil cutting based on smooth particle hydrodynamics method and FEM - SPH coupling method[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1847.
[21] LIANG R, CHEN X, JIANG P, et al. Calibration of the simulation parameters of the particulate materials in film mixed materials[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2):29 - 36.
[22] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等.基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J].农业工程学报,2021,37(23):100 - 107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23):100 - 107. (in Chinese)
[23] 朱自强,赵洪志,蔡沅冶,等.冰雹冲击下塑料薄膜的损伤分析[J].农业工程学报,2022,38(17):246 - 253.
ZHU Ziqiang, ZHAO Hongzhi, CAI Yuanye, et al. Damage analysis of plastic film under hail impact[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17):246 - 253. (in Chinese)
[24] 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 residual on double ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 - 56,77. (in Chinese)
[25] YANG Y, WEN B, DING L,et al. Soil particle modeling and parameter calibration for use with discrete element method[J]. Transactions of the ASABE,2021,64(6):2011 - 2023.

(下转第 406 页)

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.