

压秆式棉田地膜回收机的设计与试验

谢建华^{1,2}, 张雁鸿¹, 曹肆林¹, 张毅^{1,2}, 周金豹¹, 孟庆河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: 针对棉秆回收需求和现有滚筒式地膜捡拾机构可靠性差、缠膜严重、回收地膜含膜率低等问题, 该研究设计了一种压秆式棉田地膜回收机, 可一次性完成拾膜、脱膜以及除杂作业。结合相关作业性能要求, 通过运动学和动力学分析确定了束秆盒、拾膜滚筒和脱膜机构的结构参数, 并完成了关键部件的工作参数分析。为验证机具捡拾除杂作业性能, 以机具前进速度、钩齿入土深度、拾膜滚筒转速为试验因素, 拾膜率、含膜率为试验指标, 进行了三因素三水平响应面试验, 得到各因素的响应面模型, 分析了各因素对作业效果的影响, 并对各因素进行优化。试验结果表明, 当拾膜滚筒转速为 65 r/min, 机具前进速度为 5 km/h, 钩齿入土深度为 50 mm 时作业效果最佳, 以优化后的结果进行验证试验, 结果表明, 平均拾膜率为 86.8%, 平均含膜率为 14.9%, 研究结果可为后续留秆收膜机具的设计提供参考。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 压秆; 滚筒; 导向; 地膜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304048

中图分类号: S223.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-18-0051-13

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304048 <http://www.tcsae.org>

XIE Jianhua, ZHANG Yanhong, CAO Silin, et al. Design and experiment of stalk pressing type cotton field mulch film collectors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(18): 51-63. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304048 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

地膜覆盖具有增温、保墒和抗旱等作用, 可以缩短作物的生长期并提高作物生产产量, 已广泛运用在玉米、棉花等多种大田作物种植过程中^[1-4]。随着地膜覆盖面积和年限的增长, 田间残存的地膜量不断增加, 影响作物的出苗、根系生长和作物产量^[5-6], 不利于农田的机械化作业, 制约农田生态环境和农业持续发展^[7-9]。而棉秆是农业生产的重要资源, 在农畜业、能源、环保工业等方面开发价值高, 随着国家能源发展以及碳排放的要求, 目前棉秆收获需求越来越大, 且采用收完地膜再收棉秆作业方式, 能有效降低地膜含杂率和棉秆含膜率, 有利于地膜和棉秆后期资源化利用。

棉田膜面上覆有碎秸秆、落地棉等杂质以及存在边膜覆土, 尤其是采用耧、耙方式进行地膜回收, 地膜与秸秆、土块等杂质混合在一起, 难以分离^[10-12]。孙兴冻等^[13]通过四杆机构的复合运动, 解决了机具留秆收膜作业时对行、仿形能力差和边膜回收难的问题; 任萍等^[14]设计的 1MSF-2 型立秆式残膜回收机, 利用棉秆与仿形护板相互作用产生的力带动耧膜部件对准每行地膜, 然后通过耧膜部件将行间地膜耧起, 但耧膜齿在作业时易出现弹跳难于入土, 作业适应性较差; 鲁兵等^[15]采用耧膜原理设计研发了立秆式耧膜机, 对其关键部件耧膜齿

进行了相关的理论计算和有限元分析, 但作业后缠膜严重且拾残膜含杂率高; 由佳翰等^[16-17]设计的棉秆粉碎与残膜回收联合作业机, 将棉秆直接粉碎还田再进行残膜回收, 但机具结构相对复杂, 拾残膜含杂率高; 而先拔棉秆后收膜的作业方式起拔根茎带出大量的土壤落在未拾过的地膜上, 且根茬挂膜问题严重, 使后续作业更加困难。综上所述, 目前的地膜回收机一般与秸秆还田装置联合作业, 存在缠膜严重、回收地膜含膜率低等缺点。

针对上述问题, 同时为满足棉秆资源化利用需求, 结合新疆一膜六行机采棉种植模式, 在现有滚筒式地膜捡拾机构的基础上设计压秆式棉田地膜回收机, 增设束秆盒, 改进设计了具有防缠绕和清杂功能的导向式地膜捡拾滚筒, 增加气力式脱膜机构辅助卸膜。通过对机具的工作机理和动力学分析, 确定机具实现地膜捡拾、输送、脱卸以及膜杂分离的条件; 明确机具关键部件的设计参数和工作参数; 制作样机并进行了田间试验, 拟为留秆收膜机具的设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

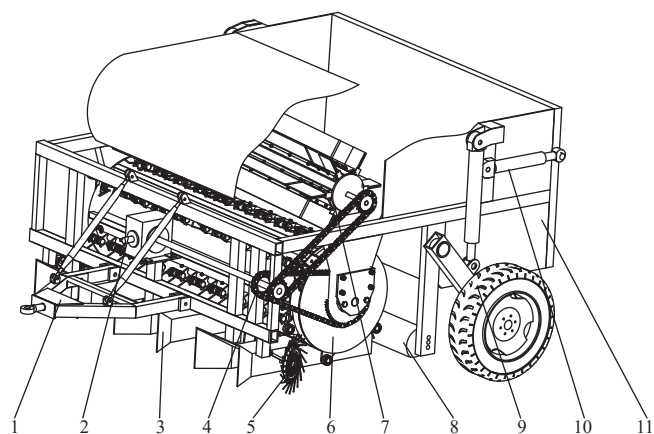
压秆式棉田地膜回收机主要由牵引架、减速箱、束秆盒、链传动系统、边膜起出机构、导向式地膜捡拾滚筒、气力式脱膜机构、限深辊、行走轮、液压油缸以及集膜箱等组成, 结构如图 1 所示。其中边膜起出机构位于拾膜滚筒的前方, 安装在机架两端, 滚筒通过 U 型螺栓固定在机架上, 气力式脱膜机构位于拾膜滚筒的上方。

收稿日期: 2023-04-08 修订日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51965058)

作者简介: 谢建华, 教授, 博士, 研究方向为农业机械设计。

Email: xjh199032@163.com



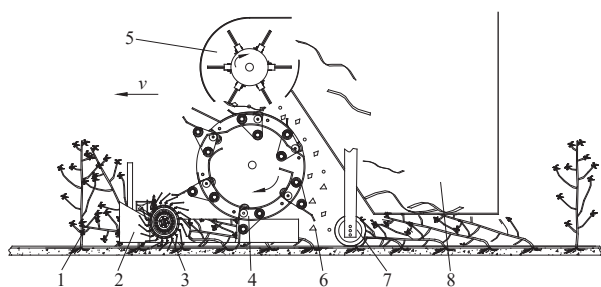
1.牵引架 2.减速箱 3.束秆盒 4.链传动系统 5.边膜起出机构 6.导向式地膜拾滚筒 7.气力式脱膜机构 8.限深辊 9.行走轮 10.液压油缸 11.集膜箱
1.Traction frame 2.Reducer casing 3.Binding stalk box 4.Chain transmission system 5.Edge film lifting mechanism 6.Guided mulch film picking roller 7.Pneumatic film removal mechanism 8.Depth limiting roller 9.Walking wheel 10. Hydraulic cylinder 11. Film collecting box

图 1 压秆式棉田地膜回收机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of stalk pressing type cotton field mulch film collector

1.2 工作原理

机具在田间作业时，拖拉机后输出轴的动力传递到减速箱，经链传动带动拾膜滚筒和脱膜机构转动。束秆盒将棉秆聚拢后沿机具前进方向压倒，同时边膜起出机构将地膜两边的板结覆膜土破碎，并将边膜沿指盘旋转方向起出向中间集拢。随着拾膜滚筒转动，拾膜钩齿运动至滚筒下方时将地表膜挑起沿滚筒轴旋转的同时向后输送；当被拾的地膜随钩齿运动至滚筒上方时，在脱膜机构产生的风场作用下，从脱膜机构罩壳后部开口吹出落入集膜箱，秸秆等质量大的杂质落到拾膜滚筒的承杂凹板上，随着滚筒转动回落到田间，机具工作原理如图 2 所示。



1.棉秆 2.束秆盒 3.边膜起出机构 4.拾膜滚筒 5.脱膜机构 6.杂质 7.限深辊 8.集膜箱

1.Cotton stalk 2.Binding stalk box 3.Edge film lifting mechanism 4.Film picking roller 5.Film removing mechanism 6.Impurity 7.Depth limiting roller 8.Film collecting box

注：v 为机具前进速度，m·s⁻¹。

Note: v is the machine advance velocity, m·s⁻¹.

图 2 工作原理示意图

Fig.2 Diagram of working principle

1.3 主要技术参数

新疆机采棉田宽窄行种植模式宽行行距为 660 mm，窄行行距为 100 mm^[18]。为了满足先收地膜再棉秆整株拔取的作业要求，设计的压秆式棉田地膜回收机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 机具主要参数

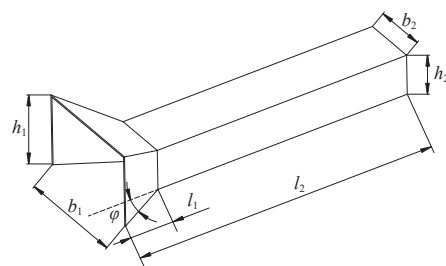
Table 1 Main parameters of device

参数 Parameters	值 Value
机具尺寸 Complete machine size/(mm×mm×mm)	3 730×3 230×1 725
配套动力 Matched power/kW	60~95
工作幅宽 Working width/mm	2 150
作业深度 Working depth/mm	10~80
机具前进速度 Machine forward speed/(km·h ⁻¹)	3~8
连接方式 Connection method	牵引式

2 机具关键部件设计

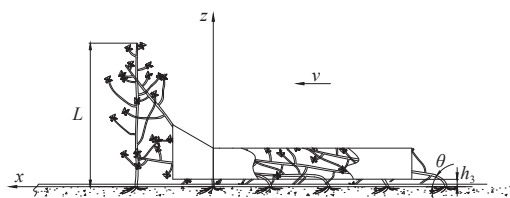
2.1 束秆盒

为实现机采棉种植模式下的秋后立秆（先收膜后进行棉秆整秆拔除）作业，机具作业时棉秆压倒同时钩齿进行拾膜作业，束秆盒结构如图 3a 所示。束秆盒前端对错行及倒伏棉秆起到扶正和聚拢作用，棉秆整株被推压后从束秆机构后端矩形管通过，束秆盒设计分析如图 3 所示。



a. 结构示意图

a. Structure diagram



b. 工作过程示意图

b. Diagram of working process

注：φ 为束秆盒前端倾角，(°)；h₁ 为束秆盒前端高度，mm；h₂ 为束秆盒后端矩形管高度，mm；b₁ 为束秆盒前端宽度，mm；b₂ 为束秆盒后端矩形管宽度，mm；l₁ 为束秆盒前端长度，mm；l₂ 为束秆盒整体长度，mm。L 为棉秆整株长度，mm；h₃ 为束秆盒下端距离地面高度，mm；θ 为棉秆变形倾角，(°)。

Note: φ is the front angle of the binding stalk box, (°); h₁ is the front height of the binding stalk box, mm; h₂ is the height of the rectangular tube at the back end of the binding stalk box, mm; b₁ is the front width of the binding stalk box, mm; b₂ is the width of the rectangular tube at the back end of the binding stalk box, mm; l₁ is the length of the front end of the binding stalk box, mm; l₂ is the overall length of the binding stalk box, mm. L is the whole plant length of cotton stalk, mm; h₃ is the height from the lower end of the binding stalk box to the ground, mm; θ is the deformation angle of cotton stalk, (°).

图 3 束秆盒设计分析

Fig.3 Design analysis of binding stalk box

由图 3 几何关系可知

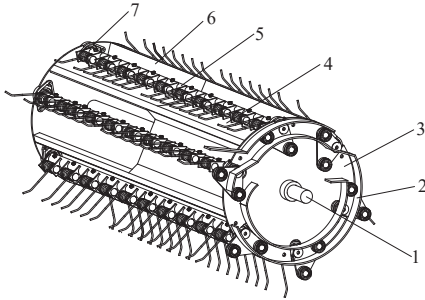
$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{b_1 - b_2}{2l_1} \\ \theta = \arcsin \frac{h_2 + h_3}{L} \end{cases} \quad (1)$$

束秆盒前端倾角 φ 过小，不利于对错行及倒伏棉秆起到扶正和聚拢作用；束秆盒前端倾角 φ 过大，会增大

束秆盒与棉秆的正向接触面积造成堵塞,不利于棉秆进入束秆盒^[19],故选取束秆盒前端倾角 φ 为 30° 。通过田间测量统计得窄行棉花棉秆枝节间平均宽度范围为 $370\sim 410\text{ mm}$,考虑3%的拖拉机行走误差,故设计束秆盒前端宽度 b_1 为 425 mm 。依据棉田窄行行距为 100 mm ,考虑机采棉秆主茎平均值为 $8\sim 9\text{ mm}$ 及拖拉机牵引行走误差,取束秆盒后端矩形管宽度 b_2 为 120 mm ,根据式(1)求得束秆盒前端 l_1 为 260 mm 。由文献[20]可知,棉秆平均株高 L 为 700 mm ,棉秆的最小倾角 $\theta_{\min}$ 为 24.4° ,将 θ 代入式(1)得束秆盒矩形管上端离地高度为 190 mm ,根据地况,束秆盒下端离地高度 h_3 取 40 mm ,得束秆盒后端矩形管高度 h_2 为 150 mm ;由于棉秆侧枝发达,作业时束秆盒应该与棉秆第一侧枝以下的部位接触,选取束秆盒与棉秆初始接触位置距离地面高度为 290 mm ,束秆盒下端离地高度 h_3 取 40 mm ,则束秆盒前端高度 h_1 为 250 mm 。在前期预试验的基础上,充分考虑拥堵性、机具前进阻力大小及安装位置要求,选取束秆盒整体长度 l_2 为 1440 mm 。束秆盒矩形管末端刚好通过拾膜滚筒下方后固定在机架横梁上,机具结构更加紧凑合理。

2.2 导向式残膜拾拾滚筒

导向式地膜拾拾滚筒的结构如图4所示,主要由滚筒主轴、滑道、轴侧板、承杂凹板、导向钩齿总成、纵向支撑板、带座轴承等组成。其中轴侧板固定在滚筒主轴的两端,滚筒周向均布的钩齿总成通过带座轴承安装在轴侧板上的,滑道位于轴侧板的外侧并固定在机架上。承杂凹板沿轴向放置的两端焊接在纵向支撑板上,加强滚筒结构的稳定性。



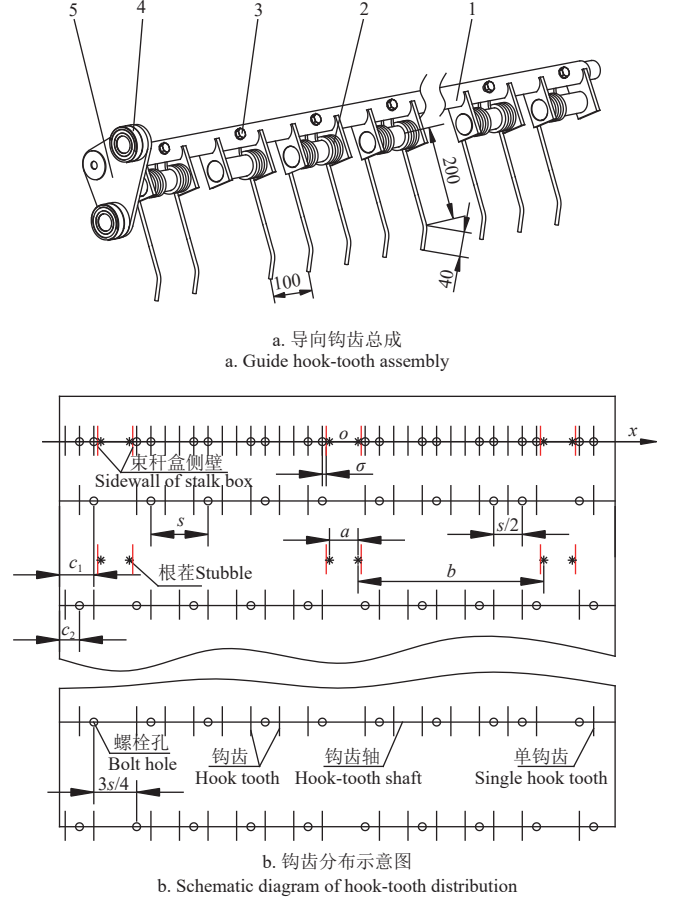
1. 滚筒主轴 2. 滑道 3. 轴侧板 4. 承杂凹板 5. 导向钩齿总成 6. 纵向支撑板 7. 带座轴承
1. Roller spindle 2. Slide 3. Shaft side plate 4. Bearing concave plate 5. Guide hook-tooth assembly 6. Longitudinal support plate 7. Insert ball bearing

图4 导向式地膜拾拾滚筒结构示意图

Fig.4 Structure diagram of guided mulch film pickup roller

2.2.1 导向钩齿总成

导向钩齿总成由钩齿、钩齿安装轴、滚子、导向板等组成,如图5a所示。滚子和导向板组成导向机构,通过滚子在滑道内运动带动钩齿位姿的变化。考虑钩齿结构稳定性及安装拆卸方便,采用对称单螺旋环接齿结构,通过螺栓固定在钩齿轴上,材质选用弹簧钢。依据滚筒主轴安装高度以及残膜在耕层内的空间分布特点^[21],取钩齿直杆长度取 200 mm ,弯折长度为 40 mm ,以满足钩齿入土深度 $10\sim 80\text{ mm}$ 要求^[22-23];查阅农业机械设计手册可知钩齿式拾拾装置的钩齿间距的参考范围为 $63\sim 120\text{ mm}$ ^[24],设计钩齿齿间间距为 100 mm 。



1. 导向板 2. 滚子 3. 螺纹紧固件 4. 钩齿 5. 钩齿安装轴

1. Guide plate 2. Roller 3. Threaded fastener 4. Hook tooth 5. Hook-tooth shaft

注： s 为同排齿齿间中心距，mm； σ 为拾膜钩齿和与束秆盒侧壁间的距离，mm； a 为棉花种植窄行间距，mm； b 为棉花种植宽行间距，mm； c_1 、 c_2 为钩齿安装孔与滚筒边缘的距离，mm。

Note: s is the center distance between teeth in the same row, mm; σ is the distance between the pick-up hook teeth and the side wall of the stalk box, mm; a is cotton planting narrow spacing, mm; b is cotton planting wide spacing, mm; c_1 , c_2 are the distance between the hook-tooth mounting hole and the edge of the cylinder, mm.

图5 导向钩齿总成结构及分布示意图

Fig.5 Structure and distribution diagram of guide hook-tooth assembly

依据机采棉种植模式($660\text{ mm}+100\text{ mm}$)和机具作业幅宽要求,机构采用图5b所示的错位配齿法。同排齿齿间中心距为 s ,单钩齿与相邻钩齿中心距为 $s/2$,相邻排齿齿间中心距为 $3s/4$,为避免钩齿在拾拾过程中触碰压杆机构侧壁产生变形,拾膜钩齿和束秆盒侧壁间应留有一定余量 $\sigma(\sigma>0)$ 。以钩齿轴上中间拾膜钩齿所在位置为原点 O ,在此轴线上建立数轴,则钩齿和束秆盒侧壁在数轴上投影点的坐标需满足式(2)。

$$\begin{cases} x_k - \sigma \leq x_n \leq x_k + \sigma \\ x_n = \pm \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{s - 100}{2} \\ x_k = \pm \left[\frac{a}{2}, \frac{a}{2} + b, \frac{a}{2} + b + a\right] \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_n 为钩齿在数轴上投影点的坐标； x_k 为束秆盒侧壁在数轴上投影点的坐标；由机具作业幅宽选取 n 的取值

范围为 $1 \leq n \leq 19$ ^[25], n 为正整数, 取 n 为 16, 则每根钩齿轴安装钩齿为 6 组+4 单钩齿 (16 齿), 相邻钩齿轴上交错安装。

拾膜钩齿与束秆盒侧壁间的距离 σ 过大时易漏捡地膜, 距离 σ 过小时钩齿易触侧壁发生形变。当 σ 取 10 mm 时, 代入式 (2) 计算得同排齿齿间中心距 s 为 200 mm, 钩齿对膜的作用间距将是实际齿间距的一半, 在减少漏捡的同时钩齿不碰触束秆盒侧壁。取钩齿安装孔与滚筒边缘的距离 $c_1=120$ mm, $c_2=75$ mm。

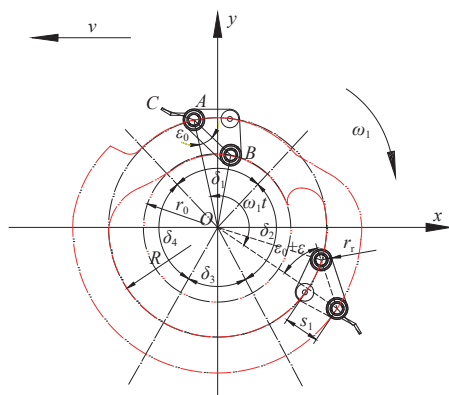
2.2.2 滑道

滑道是拾膜滚筒完成地膜捡拾作业的关键部件, 其轮廓曲线的参数设计直接影响地膜捡拾效果。结合当前钩齿滚筒捡拾机构特点^[26], 以及每个工位钩齿运动位姿与摆动规律, 以滚子中心的运动轨迹为研究对象, 建立滑道轮廓曲线的数学模型。

如图 6 所示建立 xOy 坐标系, 滚子中心 A 点和 B 点的轨迹为滑道的中心线, r_0 为基圆半径, 在 $\triangle OAB$ 中:

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = \arccos \frac{l_{OA}^2 + l_{AB}^2 - r_0^2}{2l_{OA}l_{AB}} \\ l_{OA} = R + s_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 ε_0 为滑道初始摆角, ($^\circ$); l_{AB} 为导向板上滚子中心 A 点和 B 点之间的距离, mm; R 为钩齿轴回转半径, mm; s_1 为滚子中心 A 的位移量, mm。



注: A 、 B 为滚子中心点; C 为钩齿末端点; O 为钩齿回转运动中心点; ω_1 为拾膜滚筒旋转角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; ε_0 为滑道初始摆角, ($^\circ$); R 为钩齿轴回转半径, mm; $\omega_1 t$ 为拾膜滚筒旋转弧度, rad; ε 为滑道摆角增加量, ($^\circ$); s_1 为滚子中心 A 的位移量, mm; r_0 为基圆半径, mm; r_r 为滚子半径, mm; δ_1 卸膜工位角, ($^\circ$); δ_2 回程工位角, ($^\circ$); δ_3 拾膜工位角, ($^\circ$); δ_4 输送工位角, ($^\circ$)。

Note: A , B is the center point of the roller; C is the end point of the hook-tooth; O is the center point of the rotary motion of the hook-tooth; ω_1 is the rotation angular velocity of the film pickup roller, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; ε_0 is the initial swing angle of the slide, ($^\circ$); R is the rotation radius of hook-tooth shaft, mm; $\omega_1 t$ is the arc of rotation of the pickup roller, rad; ε is the increase in the swing angle of the slide, ($^\circ$); s_1 is the displacement of roller center A , mm; r_0 is the base circle radius, mm; r_r is the roller radius, mm; δ_1 is unloading angle, ($^\circ$); δ_2 is return station angle, ($^\circ$); δ_3 is film picking station angle, ($^\circ$); δ_4 is conveying position angle, ($^\circ$).

图 6 滚子中心运动轨迹

Fig.6 Movement path of roller center

在图 6 所示的坐标系下, 滚子中心 A 点、 B 点以及钩齿末端 C 点运动方程分别为

$$\begin{cases} x_A = (R + s_1) \cos \omega_1 t \\ y_A = (R + s_1) \sin \omega_1 t \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_B = l_{OA} \cos \omega t - l_{AB} \cos(\omega t + \varepsilon_0 + \varepsilon) \\ y_B = l_{OA} \sin \omega t - l_{AB} \sin(\omega t + \varepsilon_0 + \varepsilon) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_C = l_{OA} \cos \omega_1 t - l_{AB} \cos(\omega_1 t + \varepsilon_0 + \varepsilon) + l_{AC} \sin(\omega_1 t + \varepsilon_0 + \varepsilon) \\ y_C = l_{OA} \sin \omega_1 t - l_{AB} \sin(\omega_1 t + \varepsilon_0 + \varepsilon) + l_{AC} \cos(\omega_1 t + \varepsilon_0 + \varepsilon) \end{cases} \quad (6)$$

滑道轮廓曲线上任一点沿法向与滚子中心 A 和 B 轨迹的距离始终等于滚子半径 r_r , 则由式 (4) 可得卸膜阶段滑道轮廓曲线方程为

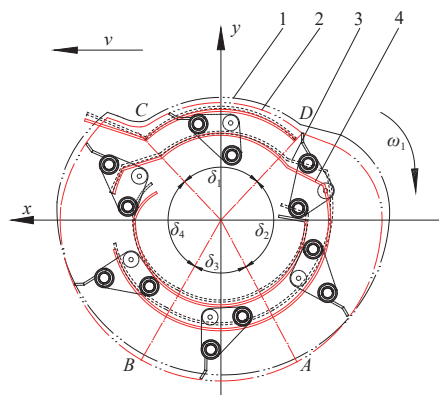
$$\begin{cases} x_{\delta_1} = x_A \pm r_r (dy_A/d\delta_1) \sqrt{(dx_A/d\delta_1)^2 + (dy_A/d\delta_1)^2} \\ y_{\delta_1} = y_A \pm r_r (dx_A/d\delta_1) \sqrt{(dx_A/d\delta_1)^2 + (dy_A/d\delta_1)^2} \end{cases} \quad (7)$$

由式 (5) 可得拾膜阶段滑道轮廓曲线方程为

$$\begin{cases} x_{\delta_3} = x_B \pm r_r (dy_B/d\delta_3) \sqrt{(dx_B/d\delta_3)^2 + (dy_B/d\delta_3)^2} \\ y_{\delta_3} = y_B \pm r_r (dx_B/d\delta_3) \sqrt{(dx_B/d\delta_3)^2 + (dy_B/d\delta_3)^2} \end{cases} \quad (8)$$

同理由式 (4)、(5) 可得输送以及回程阶段的滑道轮廓曲线方程。将相应滚子中心位移 s_1 和旋转弧度 $\omega_1 t$ 代入, 可得滑道轮廓曲线每个点的坐标值。

为避免滑道轮廓曲线曲率变化过大, 导致拾膜滚筒在工作中出现卡顿或震动过大的现象。采用样条插值法修正坐标值、舍弃不合理点, 得到优化后的钩齿末端运动轨迹及滑道轮廓线如图 7 所示。



1.原钩齿末端运动轨迹 2.优化后钩齿末端运动轨迹 3.原滑道轮廓 4.优化后滑道轮廓

1.End motion trajectory of original hook-tooth 2.Optimized trajectory of the end of the hook-tooth 3.Original slide contour 4. Optimized slide contour

图 7 钩齿末端运动轨迹及滑道轮廓线

Fig.7 Hook-tooth end movement trajectory and slide contour line

在图 7 所示的钩齿末端运动轨迹中, 与原钩齿末端的运动轨迹相比, 优化后的钩齿运动轨迹在 $\widehat{AB}$ 拾膜段曲率保持不变, 拾膜钩齿在滑道内运动平缓, 以便减少钩齿对地膜的打击, 同时增大捡拾区域, 取拾膜工位角 δ_3 为 56° ; 钩齿输送地膜的 $\widehat{BC}$ 段曲率逐渐缩小, 钩齿在该段向上升运地膜的同时, 逐步向芯轴偏转, 输送工位角 δ_4 为 108° ; 钩齿脱膜的 $\widehat{CD}$ 段缩短, 为了保证可靠脱膜, 钩齿延长线的方向与承杂板、地膜所在平面基本保持水平, 地膜处于平展状态, 卸膜工位角 δ_1 为 88° ; $\widehat{DA}$ 段为钩齿回程阶段, 整个回程段的运动轨迹更加平滑, 回程速度更快, 同时减少滚轮对滑道的冲击, 回程工位角 δ_2

为 108° 。

2.3 气力式脱膜机构

气力式脱膜机构主要包括脱膜罩壳、安装盘、脱膜芯轴和叶片，结构如图 8 所示。脱膜芯轴和叶片组成脱膜叶轮，利用脱膜叶轮高速旋转，在脱膜罩壳内形成负压气流场，结合地膜和秸秆等杂质在空气中的比重特性、悬浮速度和流动特性等方面的差异，将残膜片抛出脱膜罩壳进入集膜箱，而秸秆等杂质会掉落在滚筒承杂板上回落到农田里。

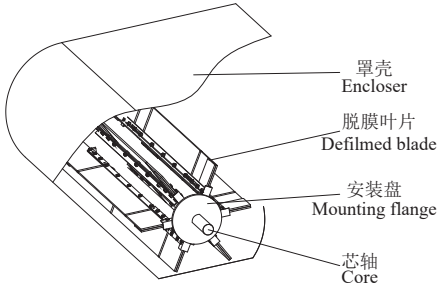
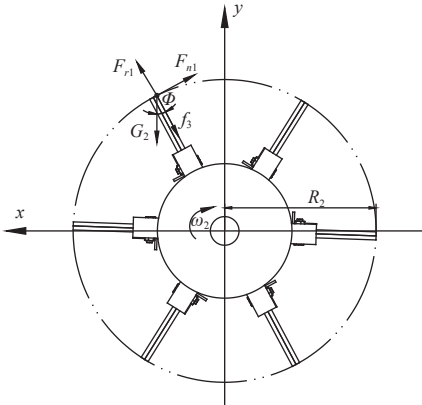


图 8 气力式脱膜机构
Fig.8 Pneumatic film removal mechanism

2.3.1 脱膜叶轮回转半径

为使脱下的地膜顺利输送至集膜箱，需保证地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]。当地膜即将运动至脱膜叶片端部时进行受力分析，如图 9 所示。



注：\$\omega_2\$ 为脱膜叶轮旋转角速度，\$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\$；\$F_{r1}\$ 为地膜受到的离心力，N；\$F_{n1}\$ 为脱膜叶片对地膜的支持力，N；\$G_2\$ 为地膜物料受到的重力，N；\$\Phi\$ 为脱膜叶片与地膜重力 \$G_2\$ 方向的夹角，\$(^\circ)\$；\$R_2\$ 为脱膜叶轮的回转半径，mm；\$f_3\$ 为脱膜叶片对地膜的摩擦力，N。

Note: \$\omega_2\$ is the rotation angular velocity of the defilmed impeller, \$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\$; \$F_{r1}\$ is the centrifugal force on the mulch film, N; \$F_{n1}\$ is the support force of the defilmed blade to the mulch film, N; \$G_2\$ is the gravity of mulch film material, N; \$\Phi\$ is the angle between the defilmed blade and the mulch film gravity in the \$G_2\$ direction, \$(^\circ)\$; \$R_2\$ is the radius of gyration of the defilmed impeller, mm; \$f_3\$ is the friction of defilmed blade to mulch film, N.

图 9 脱膜叶片上地膜受力分析

Fig.9 Force analysis of mulch film on defilmed blade

由图 9 可知，地膜脱离叶片的条件为

$$F_{r1} > f_3 + G_2 \cos \Phi \quad (9)$$

式中 \$F_{r1} = mv_2^2/R_2\$；\$f_3 = \mu mg \sin \Phi\$；\$G_2 = mg\$，则

$$\frac{mv_2^2}{R_2} > \mu mg \sin \Phi + mg \cos \Phi \quad (10)$$

将 \$v_2 = 2\pi R_2 n_2 / 60\$ 带入式 (10)，整理得脱膜叶轮的回转半径 \$R_2\$ 为

$$R_2 > \frac{\mu g \sin \Phi + g \cos \Phi}{4\pi^2 n_2^2} \times 3600 \quad (11)$$

式中 \$m\$ 为单个叶片上的地膜质量，kg；\$\mu\$ 为叶片的静摩擦系数，取 0.6^[11]；\$v_2\$ 脱膜叶片端部的线速度，m/s；\$n_2\$ 为脱膜叶轮转速，r/min。

根据文献 [10]，脱膜叶轮转速较低时，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；叶轮转速过大，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。故初步设定脱膜叶轮转速 \$n_2\$ 为 600~1200 r/min，代入式 (11) 得脱膜叶轮的回转半径 \$R_2\$ 应不小于 260 mm，本文取脱膜叶轮的回转半径为 300 mm。

2.3.2 脱膜叶轮旋转速度

脱膜叶轮转速不同时，脱膜罩壳内气流流速也会不同，因物料悬浮特性存在差异其运动轨迹不同，秸秆等杂质落在滚筒承杂板上，地膜片被吹出落入集膜箱。因此，脱膜罩壳内气流流速应大于地膜的悬浮速度且小于秸秆和土壤的悬浮速度最小值，才能有效分离膜杂。地膜悬浮状态下的浮重与空气阻力的力学平衡式为

$$\frac{1}{2} C_q \rho_q S v_f^2 = S H g (\rho_m - \rho_q) \quad (12)$$

整理得地膜悬浮速度表达式为

$$v_f = \sqrt{\frac{2 \times 10^6 \times H g (\rho_m - \rho_q)}{C_q \rho_q}} \quad (13)$$

式中 \$v_f\$ 为地膜悬浮速度，m/s；\$g\$ 为重力加速度，\$\text{m/s}^2\$；\$C_q\$ 为阻力系数，取值 0.75^[28]；\$\rho_q\$ 为空气密度，取 \$1.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3\$；\$\rho_m\$ 为地膜密度，取 \$1.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3\$；\$S\$ 为地膜展开面积，取 \$4 \times 10^{-4} \sim 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2\$；\$H\$ 为地膜厚度，取 \$1 \times 10^{-5} \text{ m}\$。代入式 (13) 中得地膜悬浮速度为 4.87 m/s。由参考文献 [28] 可知常见秸秆和土壤的平均悬浮速度分别为 9.06~10.47 m/s 和 12.43~15.50 m/s，则为满足地膜混合物料悬浮分离的条件，脱膜罩壳内的气流速度取值范围为 4.87~9.06 m/s。

脱膜叶轮转速在罩壳结构确定的前提下对气流流速有显著影响，其数值由脱膜机构工作全压决定，工作全压为

$$P = P_s + P_d \quad (14)$$

罩壳出口处全压由静压和动压^[29] 决定，其中：

$$\begin{cases} P_d = \frac{\rho v^2}{2g} \\ P_s = \frac{2\xi l \rho v^2}{dg} + \frac{\eta \rho v^2}{2g} + \frac{\tau \rho v^2}{2g} \end{cases} \quad (15)$$

式中 \$P\$ 为脱膜机构工作全压，Pa；\$P_s\$ 为工作静压，克服脱膜罩壳内流动阻力，Pa；\$P_d\$ 为工作动压，改变气体流速，与气流动能成正比，Pa；\$\xi\$ 为气流摩擦因数；\$l\$ 为气流通道长度，mm；\$\rho\$ 为大气密度，取 \$1.293 \text{ kg/m}^3\$；\$d\$ 为当量直径，mm；\$\eta\$ 为气流阻力系数；\$\tau\$ 为罩壳进口处气流阻力系数。

则有脱膜叶轮转速为

$$n_2 = \frac{30}{\pi D/10^3} \sqrt{\frac{Pg}{\varepsilon_2 \rho}} \quad (16)$$

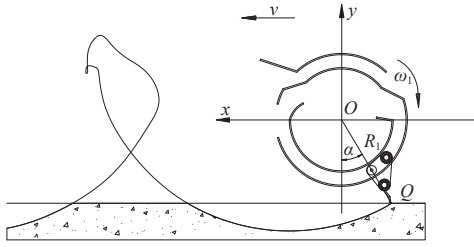
式中 D 为脱膜叶轮直径, mm; n_2 为脱膜叶轮转速, r/min; ε 为修正系数, 取值 0.4^[29]。

参考风筛式清选装置中风机静压 P_s 取值范围 196~247 Pa^[29], 取 200 Pa; 脱膜罩壳内气流流速应大于地膜的悬浮速度且小于秸秆、土壤的悬浮速度最小值, 脱膜罩壳内的气流速度取值范围为 4.87~9.06 m/s, 将数值代入式 (15) 得罩壳出口处动压 P_{dmax} 为 6.59 Pa, 将相关参数代入式 (16), 得脱膜叶轮转速为 980 r/min, 为脱膜机构工作参数的选取提供参考。

3 拾膜工作过程分析

3.1 拾膜过程运动分析

以拾膜滚筒某一钩齿齿端 Q 为研究对象, 入土时钩齿回转中心 O 为坐标原点, 机具沿 x 轴正方向以速度 v 匀速前进, y 轴方向为竖直向上, 拾膜滚筒以角速度 ω_1 匀速转动, 钩齿齿端运动轨迹如图 10 所示。



注: ω_1 为拾膜滚筒旋转角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; O 为钩齿入土时的回转中心; R_1 为拾拾阶段钩齿齿端回转半径, mm; α 为拾膜钩齿入土初始相位角, ($^\circ$)。Note: ω_1 is the rotation angular velocity of the film pickup roller, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; O is the rotation center when hook-tooth is buried; R_1 is the rotation radius of hook-tooth end in picking stage, mm; α is the initial phase angle of the pickup hook-tooth into the soil, ($^\circ$)。

图 10 钩齿齿端运动轨迹

Fig.10 Motion trajectory of hook tooth end

入土拾膜阶段机具作业 t 时, 拾膜滚筒运动位移为 vt , 钩齿齿端 Q 运动轨迹方程为

$$S_Q = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vt \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \sin(\alpha_1 - \omega_1 t) \\ R_1 \cos(\alpha_1 - \omega_1 t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

对时间 t 进行一阶导得到钩齿末端的速度方程为

$$\frac{dS_Q}{dt} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - R_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 - \omega_1 t) \\ R_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 - \omega_1 t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式 (18) 可知, 钩齿向后水平速度分量由 v_x 的大小决定, 向后水平速度分量有利于钩齿输送地膜。

当 $v_x = 0$ 时, $v - R_1 \omega_1 \cos(\alpha - \omega_1 t) = 0$, 有

$$v = R_1 \omega_1 \cos(\alpha - \omega_1 t) \quad (19)$$

$$v_1 = \omega_1 R_1 \quad (20)$$

令拾膜钩齿末端线速度 v_1 与机具前进速度 v 比值为 λ , 则有

$$\lambda = \frac{v_1}{v} \quad (21)$$

当 $\lambda < 1$ 时, 脱膜行程短影响脱膜效果; 当 $\lambda > 1$ 时,

钩齿转动的同时相对于地面有向后的速度分量, 地膜被拾拾并随钩齿向上运动, 便于地膜脱离钩齿进入脱膜机构。因此, 考虑残地膜延伸率及工作效率要求选取 $\lambda > 1$ ^[17, 22]。根据课题组前期关于齿链复合式残膜回收机及导向链耙式残膜回收机的试验^[30, 31], 试验机具前进速度一般取 3~8 km/h (即 0.83~2.22 m/s), 则有

$$\omega_1 R_1 > 2.22 \quad (22)$$

由此有

$$n_1 > \frac{30\omega_1}{\pi} \quad (23)$$

式中 n_1 为拾膜滚筒转速, r/min。

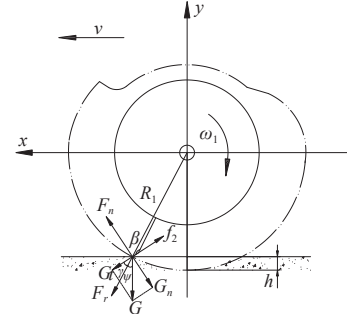
滚筒拾拾阶段钩齿齿端回转半径 R_1 为 520 mm, 将其代入式 (23), 可得拾膜滚筒转速 $n_1 > 41$ r/min。

3.2 拾膜过程受力分析

由于地膜尺寸相对于钩齿的回转半径小, 可将其简化为一个质点进行分析, 由钩齿运动轨迹可知当钩齿拾拾起地膜上升时地膜最容易脱落, 此时地膜受力情况如图 11 所示。地膜被拾膜钩齿挑起时, 受力平衡条件为

$$\begin{cases} F_n = F_r \sin \gamma + G_n \\ f_2 = G_t + F_r \cos \gamma \end{cases} \quad (24)$$

其中 $f_2 = \mu F_n$; $G_n = G \sin(\psi + \gamma)$; $G_t = G \cos(\psi + \gamma)$; $F_r = ma = m\omega_1^2$ 。



注: G 为地膜重力, N; G_n 为地膜重力在钩齿方向的法向分力, N; G_t 为地膜重力在钩齿方向的切向分力, N; F_n 为拾膜钩齿对地膜的支持力, N; F_r 为地膜受到的离心力, N; f_2 为钩齿对地膜的摩擦力, N; β 为拾膜钩齿折弯角, ($^\circ$); ψ 为地膜受到的离心力 F_r 与重力 G 之间的夹角, ($^\circ$); γ 为地膜受到的离心力 F_r 与 G_t 之间的夹角, ($^\circ$); h 为拾膜钩齿入土深度, mm。

Note: G is mulch film gravity, N; G_n is the normal component of the mulch film gravity in the direction of the hook-tooth, N; G_t is the tangential component of the mulch film gravity in the direction of the hook-tooth, N; F_n is the supporting force of spring-tooth to mulch film, N; F_r is the centrifugal force on the mulch film, N; f_2 is the friction force of hook tooth to mulch film, N; β is the bending angle of pickup hook-tooth, ($^\circ$); ψ is the angle between the centrifugal force F_r on the mulch film and the gravity G , ($^\circ$); γ is the angle between the centrifugal force F_r and G_t on the mulch film, ($^\circ$); h is the depth of pickup hook-tooth, mm。

图 11 地膜受力分析示意图

Fig.11 Force analysis diagram of mulch film

为避免地膜在输送过程中脱落, 拾膜钩齿对地膜的摩擦力需不小于地膜重力在沿钩齿方向的切向分力和地膜所受离心力的合力, 即地膜被拾起时的必要条件为

$$f_2 \geq G_t + F_r \cos \gamma \quad (25)$$

$$\mu \omega_1^2 R_1 \sin \gamma + \mu g \sin(\psi + \gamma) \geq g \cos(\psi + \gamma) + \omega_1^2 R_1 \cos \gamma \quad (26)$$

整理计算求得钩齿瞬时角速度的取值范围为

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} \leq \sqrt{\frac{g}{R_1} \times \frac{\mu_1 \sin(\psi + \gamma) - \cos(\psi + \gamma)}{\cos \gamma - \mu_1 \sin \gamma}} \quad (27)$$

式中 μ 为出土时钩齿与膜杂混合物的摩擦因数，取 0.5。当 $\mu \sin(\psi + \gamma) - \cos(\psi + \gamma) > 0$ 和 $\cos \gamma - \mu \sin \gamma > 0$ 时，上式才有意义。

根据几何关系有

$$\gamma = \pi - \beta \quad (28)$$

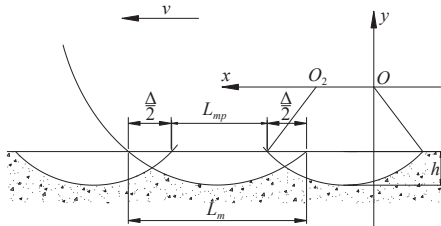
将式 (28) 代入计算得钩齿折弯角 β 的取值范围为 $128.7^\circ < \beta < 156.7^\circ$ 。根据前期预试验效果，得出拾膜钩齿折弯角 β 取 150° 时拾膜效果最好，地膜在输膜过程中回转半径 $R_1 = 520$ mm，求得 $\gamma = 30^\circ$ ， $\psi = 28^\circ$ 。将所述参数代入式 (27)，计算得 $\omega_1 < 7.12$ rad/s，即在满足输膜过程地膜不脱落条件下拾膜滚筒转速 $n_1 < 68$ r/min。为了实现地膜的有效捡拾，初步确定拾膜滚筒转速 n_1 的取值范围为 $41 \sim 68$ r/min。

3.3 连续拾膜条件

钩齿齿端相对于拾膜滚筒的运动轨迹为回转运动，随着机具的前进，滚筒周向每排钩齿末端的运动轨迹相互交错，形成了重叠区，如图 12 所示。重叠区的大小主要由机具前进速度、拾膜滚筒转速、钩齿入土深度以及捡拾钩齿排数决定^[32]。在入土深度 h 一定的前提下，由钩齿齿端运动轨迹得钩齿划土长度 L_m 为

$$L_m = B + vt_1 \quad (29)$$

式中 B 为钩齿入土深 h 时的相对划土长度，mm； t_1 为钩齿相对划土长度 B 所经历的时间，s； v 为机具前进速度，m/s。



注： Δ 为相邻钩齿绝对轨迹曲线的重叠量，mm； L_{mp} 为钩齿的有效划土长度，mm； L_m 为钩齿划土长度，mm。
Note: Δ is the overlap of absolute trajectory curves of adjacent hook-tooth, mm; L_{mp} is the effective cutting length of hook-tooth, mm; L_m is the cutting length of the hook-tooth, mm.

图 12 相邻拾膜钩齿齿端运动轨迹

Fig.12 Motion trajectory of adjacent pick-up hook-tooth end

由式 (17) 求得相对划土长度 B 和所经历时间 t_1 ，

$$\begin{cases} B = 2x_0 = 2R_1 \sin(\alpha - \omega_1 t) \\ y_{\max} - h = R_1 \cos(\alpha - \omega_1 t) \\ t_1 = \frac{2\alpha}{\omega_1} \end{cases} \quad (30)$$

由图 10 可得初始相位角 α 为

$$\alpha = \arccos \frac{R_1 - h}{R_1} = 28^\circ \quad (31)$$

将式 (22)、(30) 和 (31) 代入式 (29) 整理计

算得 $L_m = 730$ mm。

为使滚筒具有连续拾膜的功能，相邻拾膜钩齿的绝对运动轨迹需具有重合量 Δ ，则钩齿的有效划土长度 $L_m = L_m - \Delta$ 。依据连续拾膜的临界条件^[32]，拾膜滚筒旋转一周的拾膜长度应等于机具的前进距离，设机具前进距离为 L_0 ，有 $L_0 = 2\pi R_1$ 。则滚筒周向排齿量 z 为

$$z = \frac{L_0}{L_m} = \frac{2\pi R_1}{L_m - \Delta} \quad (32)$$

根据前期预试验及田间作业实际需求，取重叠量 $\Delta = 140$ mm 时，将 L_m 和 R_1 代入式 (32) 得 $z = 5.6$ ，取整得滚筒周向排齿量为 6。则为保证捡拾地膜的连续性，拾膜滚筒周向均匀布置六组钩齿总成，相邻两组之间的夹角为 60° 。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证压秆式棉田地膜回收机具作业性能，明确最优工作参数组合，于 2023 年 3 月在新疆石河子市北泉镇中国农业科学院棉花研究所试验地开展田间试验，如图 13 所示。试验地地膜厚度为 0.01 mm，铺膜宽度为 2 050 mm。试验地块长约 750 m，宽约 100 m，测得 0~60 mm 土壤紧实度为 2 765.28 kPa，土壤含水率为 19.42%。试验配套动力选用科尔 704B 型拖拉机，主要试验设备有 HZ-C5033 型电子天平、卷尺（量程 100 m）、AR926 型光电转速表、土壤紧实度测定仪（TJSD-750-2）、土壤含水率测定仪（TZS-1K-G）和标签纸等。

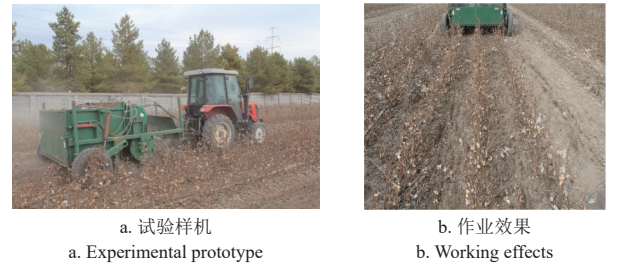


图 13 田间试验

Fig.13 Field experiment

4.2 试验因素与评价指标

参照 GB/T 25412-2021 和 NY/T 1227-2019，对压秆式棉田地膜回收机进行田间试验，以表层（地表及土层深度 0~100 mm）拾膜率 Y_1 、膜箱含膜率 Y_2 作为质量评价指标。试验选用五点法，从测区的 4 个地角沿对角线 1/8~1/4 长度范围选取 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中选择 5 个测点，作为机具作业后的 5 个测量点。在每个测点挖取一个长 5 m、宽 2.05 m，深 100 mm 的立方体区域，将其中的地膜进行捡拾，洗净、晾干并称量。拾膜率 Y_1 和含膜率 Y_2 计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \\ Y_2 = \frac{M_2}{M_3} \times 100\% \end{cases} \quad (33)$$

式中 M_0 、 M_1 分别为作业前、后测点内的地膜质量, g; M_2 、 M_3 分别为测点内集膜箱中地膜、膜杂总质量, g。

依据前期预试验并结合农民的生产需求选取机具前进速度为 3~7 km/h; 根据 2.2.1 节导向钩齿总成的设计分析并考虑钩齿入土变形情况选取钩齿入土深度为 10~70 mm; 依据 3.1 节拾膜过程运动分析和 3.2 节拾膜过程受力分析并结合农民的生产需求选取拾膜滚筒转速为 30~90 r/min。进行单因素试验确定各因素在不同水平下对拾膜率、含膜率的影响, 每组试验仅调整单个试验因素, 通过控制拖拉机油门和档位调整机具前进速度、通过液压油缸和限深辊调整钩齿入土深度、通过更换链轮调整拾膜滚筒转速。

4.3 单因素试验结果

单因素试验结果如图 14 所示。

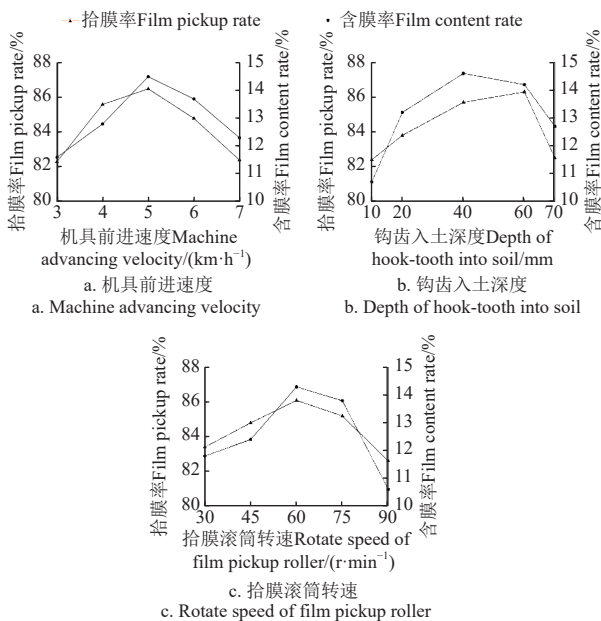


图 14 单因素试验结果

Fig.14 Single factor experiment results

图 14a 为机具前进速度对作业性能的影响, 钩齿入土深度为 40 mm, 拾膜滚筒转速为 60 r/min, 机具前进速度在 3~7 km/h 的范围内调整。拾膜率和含膜率随机具前进速度的增大都呈现出先增大后减小的趋势。机具前进速度位于 3~5 km/h 时, 单位时间内钩齿抬起的地膜区域面积变大, 拾膜率和含膜率呈现上升趋势; 当平均前进速度从 5 km/h 持续增加时, 钩齿来不及捡拾地膜, 拾膜率逐渐减少, 而且地膜与膜上杂质成卷, 不利于膜杂分离, 造成膜箱内碎秸秆等杂质增多, 含膜率急剧下降; 当机具前进速度为 6 km/h 时, 拾膜率为 84.8%, 含膜率为 13.7%。平均前进速度 4~6 km/h 是满足机具作业要求的较优区间。

图 14b 为钩齿入土深度对清选性能的影响, 机具前进速度为 5 km/h, 拾膜滚筒转速为 60 r/min, 钩齿入土深度在 10~70 mm 的范围内选取 5 个入土深度对机具作业性能进行评价。由图可知拾膜率和含膜率均随钩齿入土深度的增大呈现出先增大后减小趋势, 产生这种变化趋势的原因是: 钩齿入土深度增加时, 钩齿将耕地地膜进行捡拾, 且在土壤的粘附下地膜输送过程中不易掉落

使拾膜率和含膜率增加; 当钩齿入土深度达到 60 mm 时, 拾膜率为 86.3%, 含膜率为 14.2%, 随着钩齿入土深度增大, 钩齿受力变形严重, 导致地膜在捡拾、输送过程中易滑落, 拾膜率和含膜率呈下降趋势。钩齿入土深度 20~60 mm 为机具较优工作区间。

图 14c 为拾膜滚筒转速对作业性能的影响, 拾膜滚筒转速在 30~90 r/min 区间调节进行试验。由图可知拾膜率随拾膜滚筒转速的增大呈现出先增大后减小趋势, 含膜率呈现出先增大后减小趋势。拾膜滚筒转速取值范围为 35~60 r/min 时, 地膜连续性良好, 在拾膜和输送过程中不易掉落, 且相邻钩齿拾膜运动轨迹存在重合区, 故拾膜率增大; 脱膜机构产生的气流场, 对地膜与杂质分离作用增强, 除杂效果得到明显提高, 膜箱含膜率上升; 当拾膜滚筒转速超过 75 r/min 时, 被挑起的地膜易被撕裂成条状掉落回地里, 拾膜率下降; 同时随着拾膜滚筒转速的提高, 地膜和杂质在滚筒上方滞留时间较短, 膜杂分离不充分, 含膜率进一步降低。拾膜滚筒转速 45~75 r/min 为机具较优工作区间。

4.4 多因素试验方案及结果

考虑各因素对试验指标的结果有影响且是非线性的, 为探究各因素与试验指标之间的交互作用, 得到机具较优工作参数组合, 以机具前进速度 x_1 、钩齿入土深度 x_2 、拾膜滚筒转速 x_3 为试验因素, 拾膜率 Y_1 、含膜率 Y_2 为试验指标, 开展响应面正交试验。选择 Box-Behnken 试验设计方法, 因素水平编码如表 2 所示, 试验方案及结果如表 3 所示。

表 2 试验因素和水平

Table 2 Test factors and levels

编码 Levels	机具前进速度 Machine advancing velocity x_1 /(km·h ⁻¹)	钩齿入土深度 Depth of hook- tooth into soil x_2 /mm	拾膜滚筒转速 Rotate speed of film pickup roller x_3 /(r·min ⁻¹)
-1	4	20	45
0	5	40	60
1	6	60	75

表 3 试验方案及结果

Table 3 Test plan and result

试验序号 Test No.	X_1	X_2	X_3	拾膜率 Film pickup rate Y_1 /%	含膜率 Film content rate Y_2 /%
1	0	-1	-1	84.0	10.2
2	1	1	0	85.4	13.2
3	1	0	1	84.3	12.8
4	0	0	0	86.2	14.6
5	0	0	0	86.4	14.7
6	1	-1	0	83.9	11.6
7	0	0	0	86.6	14.5
8	1	0	-1	84.1	10.9
9	0	1	-1	84.9	12.9
10	-1	1	0	83.5	12.7
11	0	1	1	85.8	13.4
12	0	0	0	86.1	14.8
13	0	0	0	86.5	14.5
14	0	-1	1	85.3	13.9
15	-1	0	1	84.2	13.1
16	-1	-1	0	83.5	12.4
17	-1	0	-1	82.9	11.5

注: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 的水平值。

Note: X_1 , X_2 and X_3 are the level values of x_1 , x_2 and x_3 .

利用 Design-Expert 10.0.1 软件对试验结果进行多元线性回归拟合分析处理, 并建立拾膜率 Y_1 、含膜率 Y_2 对机具前进速度、钩齿入土深度、拾膜滚筒转速的响应面回归模型, 对其进行方差分析, 结果如表 4 所示。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Regression model analysis of variance							
指标 Index	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 Significant
拾膜率 Film pickup rate <i>Y</i> ₁	模型	22.91	9	2.55	49.56	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁	1.62	1	1.62	31.54	0.000 8	**
	<i>X</i> ₂	1.05	1	1.05	20.47	0.002 7	**
	<i>X</i> ₃	1.71	1	1.71	33.32	0.000 7	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.56	1	0.56	10.95	0.013 0	*
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.30	1	0.30	5.89	0.045 6	*
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.04	1	0.04	0.78	0.406 8	
	<i>X</i> ₁ ²	12.24	1	12.24	238.33	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂ ²	1.42	1	1.42	27.58	0.001 2	**
	<i>X</i> ₃ ²	2.56	1	2.56	49.88	0.000 2	**
	残差	0.36	7	0.051			
	失拟	0.19	3	0.063	1.45	0.353 0	
	误差	0.17	4	0.043			
含膜率 Film content rate <i>Y</i> ₂	模型	30.96	9	3.44	129.79	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁	0.18	1	0.18	6.79	0.035 1	*
	<i>X</i> ₂	2.10	1	2.10	79.29	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₃	7.41	1	7.41	279.67	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.42	1	0.42	15.94	0.005 2	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.023	1	0.023	0.85	0.387 5	
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	2.56	1	2.56	96.60	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁ ²	7.50	1	7.50	283.17	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂ ²	2.76	1	2.76	104.25	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₃ ²	6.16	1	6.16	232.63	<0.000 1	**
	残差	0.19	7	0.027			
	失拟	0.12	3	0.039	2.30	0.218 7	
	误差	0.068	4	0.017			
	总和	31.14	16				

注： *P*<0.05(显著*)； *P*<0.01(极其显著**)。
Note: *P*<0.05(significant, *); *P*<0.01(highly significant, **).

由表 4 可知，拾膜率和膜箱含膜率模型 *P* 值都小于 0.000 1，极其显著，表明回归模型方程拟合较好，可信

度高；失拟项 *P* 值不显著，表明回归模型具有很高的拟合度；相关系数 *R*² 均大于 0.98，表明建立的模型预测值与试验值吻合程度高，故可用此模型对拾膜率和含膜率进行分析和优化。通过对试验结果进行回归分析，得到机具前进速度、钩齿入土深度和拾膜滚筒转速对拾膜率 *Y*₁ 和含膜率 *Y*₂ 的回归方程分别为

$$Y_1 = 86.36 + 0.45X_1 + 0.36X_2 + 0.46X_3 + 0.37X_1X_2 - 0.27X_1X_3 - 0.10X_2X_3 - 1.71X_1^2 - 0.58X_2^2 - 0.78X_3^2$$

(34)

$$Y_2 = 14.62 - 0.15X_1 + 0.51X_2 + 0.96X_3 + 0.32X_1X_2 + 0.075X_1X_3 - 0.80X_2X_3 - 1.34X_1^2 - 0.81X_2^2 - 1.21X_3^2$$

(35)

根据方差分析及式 (34) ~ (35) 可得，各因素对拾膜率显著性影响顺序依次为拾膜滚筒转速、机具前进速度、钩齿入土深度；对含膜率显著性影响顺序依次为拾膜滚筒转速、钩齿入土深度、机具前进速度。为了直观了解各交互因素对试验指标的影响，运用 Design-Expert 软件做出各交互因素对拾膜率和含膜率的响应面分析图，如图 15 所示。

图 15a 为拾膜滚筒转速处于中间水平 (60 r/min) 时，机具前进速度与钩齿入土深度交互作用对拾膜率影响的响应面图。钩齿入土深度固定在低水平 (20 mm) 时，拾膜率随着机具前进速度的增大呈现出先增大后减小的趋势，当增大到一定值以后，机具前进速度越快单位时间内捡拾地膜越少，钩齿在单位长度内越容易撕裂地膜，从而导致拾膜率大幅下降；机具前进速度固定在高水平 (6 km/h) 时，随着钩齿入土深度的增加，含膜率呈现也先增大后减小的趋势，随着入土深度增大，钩齿将耕层内的杂质挑起，膜箱内杂质含量逐渐增多，含膜率下降。

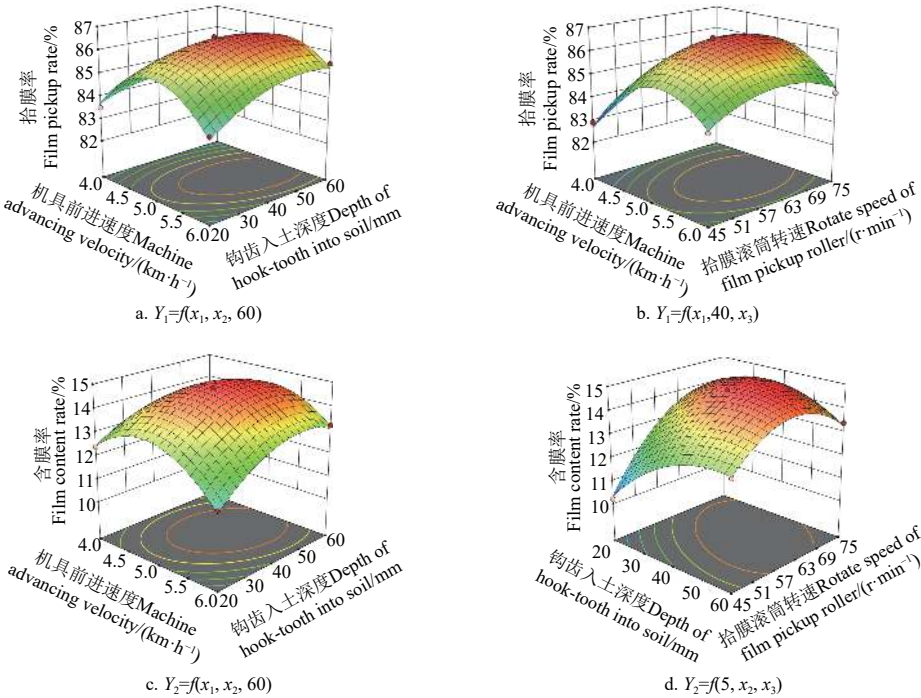


图 15 各因素交互作用对拾膜率、膜箱含膜率的影响
Fig.15 Effect of interaction of various factors on film pickup rate and content rate of mulch film box

图 15b 为钩齿入土深度处于中间水平 (40 mm) 时, 机具前进速度与拾膜滚筒转速交互作用对拾膜率影响的响应面图。拾膜率随着机具前进速度、拾膜滚筒转速的增大均呈现出先增大后减小的趋势, 并且机具前进速度和滚筒转速对拾膜率的影响作用相差不多, 这与方差分析值反映的结果相符。

图 15c 为拾膜滚筒转速处于中间水平 (60 r/min) 时, 钩齿入土深度与机具前进速度交互作用对含膜率的影响。机具的前进速度和钩齿的入土深度对含膜率都呈现出先增加再减小的趋势, 从图中可以得出, 钩齿入土深度比机具前进速度对含膜率有更显著的作用。

图 15d 为机具前进速度处于中间水平 (5 km/h) 时, 拾膜滚筒转速与钩齿入土深度交互作用对含膜率影响的响应面图。钩齿入土深度固定在高水平 (60 mm) 时, 随着拾膜滚筒转速的增快, 含膜率随拾膜滚筒转速的增加而呈现先增加再减小的趋势, 在拾膜滚筒转速超过 65 r/min 时, 滚筒转速越快单位时间内捡拾的地膜和杂质越多, 膜杂分离效果就越不好, 造成膜箱中杂质含量的增加, 含膜率明显下降; 当拾膜滚筒转速固定在较低的水平 (45 r/min) 时, 随着钩齿入土深度的增加, 含膜率也呈先增加再减小的趋势, 主要原因是钩齿入土深度增加, 单位时间内滚筒捡拾的地膜会增加, 含膜率上升; 但钩齿入土深度过大将耕作层中的杂质进行捡拾, 膜箱中杂质含量也会逐渐增多, 含膜率逐渐下降。

以拾膜率最大值、含膜率最大值为优化目标, 以机具前进速度、钩齿入土深度和拾膜滚筒转速为优化对象, 应用 Design-Expert 软件的寻优功能进行寻优, 目标及约束条件方程为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{st.} \begin{cases} 4 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 6 \text{ km/h} \\ 20 \text{ mm} \leq x_2 \leq 60 \text{ mm} \\ 45 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 75 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (36)$$

得到机具较优工作参数组合为: 机具前进速度 5.1 km/h、钩齿入土深度 45.3 mm、拾膜滚筒转速 64.3 r/min, 此时拾膜率为 86.5%, 含膜率为 14.8%。

4.5 试验验证

为验证优化后的试验效果, 在新疆石河子市北泉镇中国农业科学院棉花研究所试验地进行田间验证试验, 考虑试验的可行性将优化数据进行圆整, 即机具前进速度 5 km/h, 钩齿入土深度 50 mm, 拾膜滚筒转速 65 r/min, 试验重复 3 次, 依据式 (33) 的计算方法计算拾膜率、含膜率并取平均值, 试验结果见表 5。

表 5 试验验证结果

Table 5 Experiment verification results

试验序号 Test No.	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	86.7	14.6
2	86.9	15.1
3	86.8	14.9
平均值 Average value	86.8	14.9

分析田间验证试验的结果, 当压秆式棉田地膜回收机具以最优参数组合作业时, 平均拾膜率为 86.8%, 平均含膜率为 14.9%, 机具作业性能满足要求。

5 结 论

1) 针对棉秆回收需求和现有滚筒式地膜捡拾机构可靠性差、夹膜严重、回收混合物含膜率低等问题, 在现有滚筒式地膜捡拾机构的基础上设计压秆式棉田地膜回收机, 增设束秆盒, 改进设计了具有防缠绕和清杂功能的导向式地膜捡拾滚筒, 增加气力式脱膜机构辅助卸膜。对束秆盒、导向式地膜捡拾滚筒以及气力式脱膜机构等主要工作部件进行了分析, 得到影响作业质量主要结构和工作参数。

2) 单因素试验获得弹齿入土深度较优取值范围为 20~60 mm, 机具前进速度较优取值范围为 4~6 km/h, 拾膜滚筒转速较优取值范围为 45~75 r/min。

3) 通过优化分析与试验验证, 得最佳参数组合为拾膜滚筒转速 65 r/min、机具前进速度 5 km/h, 钩齿入土深度 50 mm, 试验结果为平均拾膜率为 86.8%、平均含膜率为 14.9%。

【参 考 文 献】

- [1] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(24): 223-234. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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 with English abstract)
- [3] 白云龙, 李晓龙, 张胜, 等. 内蒙古地膜残留污染现状及残膜回收利用对策研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 139-145.
BAI Yunlong, LI Xiaolong, ZHANG Sheng, et al. Study on the current situation of plastic film residue pollution and the countermeasures for the recovery and utilization of residual film in Inner Mongolia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [4] 梁荣庆, 陈学庚, 张炳成, 等. 新疆棉田地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)
- [5] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 269-272.
- YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese with English abstract)
- [6] XIE J H, TANG W, ZHANG X J, et al. Mechanical properties tests and analysis of plastic mulching film residue[J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2018, 27(4): 130-135.
- [7] 刘艳霞. 中国农村地膜残留污染现状及治理对策思考[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014, 43.
- LIU Yanxia. Reflections on the Pollution Status and Control Countermeasures of Plastic Film Residuals in Chinese Rural Areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014, 43. (in Chinese with English abstract)
- [8] 段文献, 王吉奎, 李阳, 等. 夹指链式残膜回收装置的设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 35-42.
- DUAN Wenxian, WANG Jikui, LI Yang, et al. Design and test of clamping finger-chain type device for recycling agricultural plastic film[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(19): 35-42. (in Chinese with English abstract)
- [9] 木拉提·马吾开, 郭瑞. 中国机械化残膜回收存在问题及发展对策[J]. *儋州: 世界热带农业信息*, 2021(3): 43.
- [10] 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)
- [11] 谢建华, 侯书林, 付宇, 等. 残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(S1): 94-99.
- XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S1): 94-99. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 with English abstract)
- [13] 孙兴冻, 陈玉龙, 罗昕, 等. 针对秋后立秆模式的残膜回收机的设计[J]. *农机化研究*, 2015, 37(9): 73-76.
- SUN Xingdong, CHEN Yulong, LUO Xin, et al. Design and research of plastic film residue collector used on vertical stem after autumn[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(9): 73-76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 任萍, 胡斌, 罗昕. IMSF-2 型立秆式地膜回收机的研制[J]. *农机化研究*, 2016, 38(9): 136-140.
- REN Ping, HU Bin, LUO Xin, et al. Research on manufacturing the IMSF-2 plastic film recycling machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(9): 136-140. (in Chinese with English abstract)
- [15] 鲁兵, 王旭峰, 胡灿, 等. 立秆式搂膜机搂膜齿的设计与有限元分析[J]. *农机化研究*, 2017, 39(10): 63-66, 71.
- LU Bing, WANG Xufeng, HU Can, et al. Design and finite element analysis of cuddle plastic film tooth for plastic film residue collector used on vertical cotton stem[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(10): 63-66, 71. (in Chinese with English abstract)
- [16] 由佳翰, 张本华, 温浩军, 等. 铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 97-104.
- YOU Jiahuan, ZHANG Benhua, WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 97-104. (in Chinese with English abstract)
- [17] 田辛亮, 赵岩, 陈学庚, 等. 4JSM-2000A 型棉秆粉碎及搂膜联合作业机的研制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 25-35.
- TIAN Xinliang, ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, et al. Development of 4JSM-2000A 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)*, 2018, 34(10): 25-35. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张恒恒, 王香茹, 胡莉婷, 等. 不同机采棉种植模式和种植密度对棉田土壤水热效应及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(23): 39-47.

- ZHANG Hengheng, WANG Xiangru, HU Liting, et al. Effects of different machine-harvested cotton planting patterns and planting densities on soil hydrothermal conditions and cotton yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨明韶, 杜健民. 草业工程机械学: 草业工程机械学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013, 386.
- [20] 张佳喜, 郜周明, 蔡佳麟, 等. 横轴对辊式棉秆起拔装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 43-52.
- ZHANG Jiayi, GAO Zhouming, CAI Jialin, et al. Design and experiments of cotton stalk pulling machine with horizontal-counter rollers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 43-52. (in Chinese with English abstract)
- [21] 温浩军, 牛琪, 纪超. 地膜机械化技术现状及分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(3): 145-153.
- WEN Haojun, NIU Qi, JI Chao. Current status of and analysis on the mechanical technology of plastic film[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 145-153. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-14
- CAO Silin, XIE Jianhua, YANG Yuxin, et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recovery combined machine [J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition): 1-14. [2022-11-13] (in Chinese with English abstract)
- [23] 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)
- [24] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册. [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007, 1885.
- [25] 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, 70.
- ZHAO Haijun. Study on Kinematics and Dynamics of Roller for Collecting Plastic Film Residue[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015, 70. (in Chinese with English abstract)
- [26] 许涛, 沈永哲, 高连兴, 等. 基于两段收获的弹齿式花生
- 捡拾机构研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 90-97,111.
- XU Tao, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Spring-finger peanut pickup mechanism based on two-stage harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 90-97,111. (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] 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 with English abstract)
- [29] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006, 416.
- [30] 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 type residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(1): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [31] 谢建华, 杨豫新, 曹肆林, 等. 导向链耙式地表残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 76-86.
- XIE Jianhua, YANG Yuxin, CAO Silin, et al. Design and experiments of rake type surface residual film recycling machine with guide chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 76-86. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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)

Design and experiment of stalk pressing type cotton field mulch film collectors

XIE Jianhua^{1,2}, ZHANG Yanhong¹, CAO Silin¹, ZHANG Yi^{1,2}, ZHOU Jinbao¹, MENG Qinghe¹

(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: A mulch film collector is one type of picking mechanism in the recycling of mulch film at present. However, the conventional configuration cannot fully meet large-scale production, such as severe film clamping, the requirement for cotton stalks crushing, and low film content. The existing drum-type pickup mechanism of mulch film has also serious film entwining and a low film content rate of recovered mulch film. In this study, a mulch film recycling machine was developed with the stalk pressing type in the cotton field. The mulch film pickup mechanism with drum type was selected along with the one-film and six-row machine cotton harvesting and planting mode in Xinjiang. The cotton stalks' recycling and reliability greatly contributed to the resource utilization of cotton stalks. A box was added to bundle the stalk. A guided pickup roller of mulch film was built with anti-winding and impurity cleaning functions. A pneumatic film removal device was also added to rapidly remove the film. The film picking, film stripping and contamination removal operation were realized in the improved device at one time. The structural parameters of the stalk box, mulch film picking roller and film removal mechanism were also determined using kinematic and kinetic analysis. The working parameters of key components were analyzed after optimization. The front tilt angle of the stalk box was designed to be 30° considering the congestion and the forward resistance of the machine. The motion position and oscillation of the hook teeth at each station of the film pickup roller were combined to clarify the motion trajectory of the roller center. The mathematical model of the slide profile curve was established using the analytical method. The kinetic analysis of the film pickup roller was carried out, where the rotation speed range of the roller was determined to be 41-68 r/min. A systematic investigation was implemented to explore the relationship between the full pressure at the outlet of the film removal hood and the rotation speed of the film removal shaft using aerodynamics. The rotation speed of the film removal impeller was 980 r/min. To verify the operational performance of the device, A three-factor, three-level response surface test was conducted with the machine advancing velocity, the depth of hook-tooth into the soil and the rotation speed of the film pickup roller as the test factors, and the film pickup rate and the film content rate as the test indexes. The response surface model of each factor was established to optimize for better operational performance. The test results showed that the significant effects of the test factors on the film pickup rate were ranked as the rotation speed of the film pickup roller, the machine advancing velocity, and the depth of hook-tooth into soil. The significant effects of the test factors on the film content rate were the rotation speed of the film pickup roller, the depth of hook-tooth into soil, and the machine's advancing velocity. The best operation was achieved, when the rotation speed of the film pickup roller was 65 r/min, the machine advancing velocity was 5 km/h, and the depth of hook-tooth into the soil was 50 mm. The optimized performance was verified for the average film pickup rate was 86.8 % and the average film content rate was 14.9 %. The findings can provide a strong reference to design the subsequent machines for the stalk-collect mulch film.

Keywords: agricultural machinery; design; experiment; stalk pressing; roller; guide; mulch film