

随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验

王昭宇<sup>1</sup> 陈学庚<sup>1,2</sup> 颜利民<sup>1,2</sup> 蒋德莉<sup>1</sup> 王明恩<sup>1</sup>

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

**摘要:** 针对随动式残膜回收机在捡拾地膜过程中存在的杂质堵塞问题,设计了一种新型起膜捡拾机构。通过分析机构起膜过程,确定了起膜轮轮刺高度、起膜轮排列间距等主要结构参数,通过分析机构拾膜过程,确定了机具行进速度和起膜轮转速等工作参数。以起膜轮转速、机具行进速度和起膜轮间距为试验因素,以起膜率、排杂率为响应值,利用 Design-Expert 8.0.5 软件进行回归分析和响应面分析,得出各因素对起膜率和排杂率的影响顺序由大到小均为:起膜轮转速、机具行进速度、起膜轮间距,并分别建立了起膜率、排杂率与起膜轮转速、机具行进速度、起膜轮间距的三元二次回归模型。采用非线性优化计算方法进行优化计算,结果表明:当起膜轮转速为 26.2 r/min、机具行进速度为 1.23 m/s、起膜轮间距为 139.95 mm 时,起膜率理论值为 91.49%,排杂率理论值为 92.92%。在起膜捡拾机构参数最优组合下的田间试验表明,起膜率均值为 90.45%,排杂率均值为 91.30%。

**关键词:** 残膜回收机;起膜捡拾机构;随动式

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0080-11

OSID:



Design and Experiment on Collecting and Removing Device for Profile Modeling Residual Plastic Film Collector

WANG Zhaoyu<sup>1</sup> CHEN Xuegeng<sup>1,2</sup> YAN Limin<sup>1,2</sup> JIANG Deli<sup>1</sup> WANG Ming'en<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** It is well known that mulch technology can effectively improve crop yield, but residual mulch will also damage soil structure and cause agricultural pollution. At present, China has developed a variety of residual film recycling machine to solve this problem. Aiming at the problem of impurities congestion in the process of picking up plastic film with the following film recycling machine, a new film picking up mechanism was designed based on the existing types of film recycling machine. The main structural parameters of the height of the working rod of wheel to remove impurities and the spacing of wheel to remove impurities were determined by analyzing the separation process of membrane soil in the mechanism, and through the analysis of the process of picking up the mulch film, the travel speed of the machine and the rotation speed of wheel to remove impurities were determined. The rotating speed of the wheel to remove impurities, the moving speed of the machine and the spacing of the wheel to remove impurities were determined as the main factors of the test. The ratio of membrane to soil separation and the ratio of impurities removal were taken as the response values. Design-Expert 8.0.5 was used for regression analysis and response surface analysis, and the influence of various factors on the membrane soil separation ratio and the impurity removal ratio was determined by using this method. The results showed that the degree of influence on the separation ratio of mulched soil and the ratio of impurities discharged both were the rotating speed of the wheel to remove impurities, the moving speed of the machine and the spacing of the wheel to remove impurities. Moreover, a ternary quadratic regression model was established, which contained these factors. The nonlinear optimization method was used to optimize the parameters of the mechanism, the results showed that when the rotating speed of the wheel to remove impurities was 26.2 r/min, the moving speed of the machine was 1.23 m/s and the spacing of the wheel to remove impurities was 139.95 mm that the maximum theoretical value of membrane soil separation ratio was 91.49%, and the maximum theoretical value of impurity removal ratio was 92.92%.

**Key words:** residual plastic film collector; collecting and removing device; follow-up

收稿日期: 2020-06-22 修回日期: 2020-07-31

基金项目: 兵团重大科技项目(2018AA001/02)和自治区研究生科研创新项目(XJ2019G119)

作者简介: 王昭宇(1995—),男,研究实习员,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: wzyshzu@126.com

通信作者: 陈学庚(1947—),男,中国工程院院士,研究员,主要从事棉花生产机械化和残膜污染治理研究,E-mail: chenxg130@sina.com

0 引言

新疆是我国棉花种植面积最大的省份,棉花种植绝大部分采用地膜覆盖<sup>[1-3]</sup>。地膜覆盖种植技术可有效抑制杂草生长、改善作物品质<sup>[4-6]</sup>。但自然条件下的地膜极难降解,大量地膜滞留在田间,影响作物生长,给我国农业可持续发展带来巨大隐患<sup>[1,7-9]</sup>。

为解决地膜污染问题,我国学者研制出多种残膜回收机<sup>[10-13]</sup>,包括钉齿式、齿链式、耙齿式等多种机型,作业流程包括起膜环节、拾膜环节、输送环节、脱膜环节、卷膜环节和卸膜环节等<sup>[10,14-15]</sup>。起膜与拾膜是残膜机械回收过程的重要环节<sup>[16]</sup>。针对起膜环节要求,起膜过程中能疏松板结土壤,同时避免杂质壅堵,完成膜土分离;针对拾膜环节要求,捡拾过程中能顺利拾起地膜,并保证分离后地膜的完整性及排杂率<sup>[17-19]</sup>。作为残膜回收机的关键部件,起膜拾膜机构的结构及工作参数对整机残膜回收作业效果影响较大,此方面的主要研究成果包括:靳伟等<sup>[20]</sup>研制的弹齿式残膜回收机主要完成 30 ~ 50 mm 深的地膜捡拾作业,利用惯性将地膜回收到集膜箱;谢建华等<sup>[21]</sup>研制的行星架式伸缩杆齿拾膜机构主要捡拾土壤表层内长度大于 50 mm 的残地膜;张慧明等<sup>[22]</sup>研制的随地仿形起膜装置主要完成秋后距地表 30 mm 深的起膜作业。

基于以上研究,本文根据随动式残膜回收机起膜、捡拾环节的工作要求,设计一种起膜捡拾机构,在保证起膜、捡拾效果的同时提高机构的工作效率与稳定性,并减少工作区域的杂质壅堵。起膜捡拾机构主要分为起膜装置和捡拾装置两部分:起膜装置在起膜过程中松动土壤,排出机构工作区域堆积的杂质,避免因杂质壅堵而影响后续作业;捡拾装置需顺利捡拾膜土分离后的地膜,并保证捡拾与输送过程中地膜的完整性及排杂率。本文通过分析起膜捡拾机构的结构和工作参数,并进行田间试验研究,从而获取最优参数值,取得较优作业性能。

1 结构与工作原理

1.1 整机结构与工作原理

目前地膜回收方式多以机械回收为主<sup>[15]</sup>,所述随动式残膜回收作业机结构如图 1 所示,主要包括起膜装置、捡拾装置、脱膜与卷膜装置<sup>[23-27]</sup>,其中起膜装置、捡拾装置位于残膜回收机的末端,机架前端连接卷膜装置与脱膜装置。

作业时,起膜装置松动地表土壤,将地表地膜挑起,实现膜土分离。同时地膜挂接在捡拾装置上,捡拾装置与土壤接触并将拾起的地膜向上输送,地膜

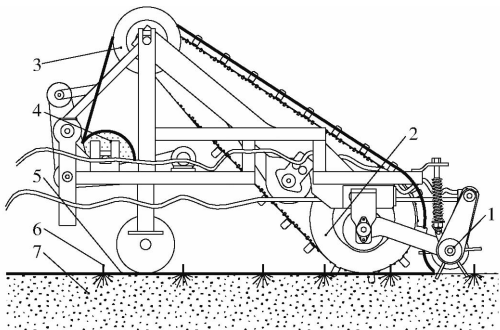


图 1 随动式残膜回收作业机结构简图

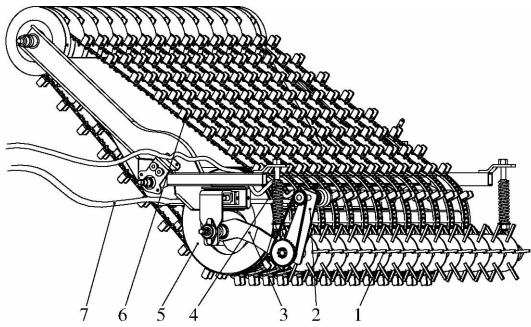
Fig. 1 Structure schematic of follow-up residual film recycling operation machine

1. 起膜装置 2. 捡拾装置 3. 脱膜装置 4. 卷膜装置 5. 地表地膜 6. 棉秆根茬 7. 土壤

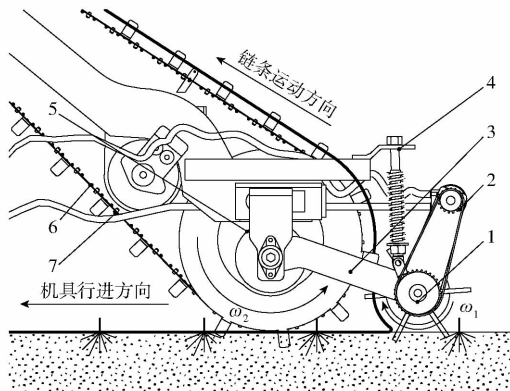
经脱膜装置分离并落至卷膜装置,卷膜装置卷收地膜,完成地膜的打卷回收作业,捡拾输送过程中,地膜逆向翻转,膜面上杂质落入捡拾装置中,排至机具外侧。

1.2 起膜捡拾机构结构与工作原理

起膜捡拾机构结构与工作原理如图 2 所示。如图 2a 所示,起膜装置主要包括起膜轮、液压马达、支撑板、加压弹簧和液压油管等,起膜轮通过支撑板与机架相连,支撑板上连接加压弹簧。工作时,液压马达提供起膜装置动力,通过支撑板及加压弹簧随地



(a) 结构示意图



(b) 工作原理图

图 2 起膜捡拾机构结构与工作原理图

Fig. 2 Mechanism and working principle diagram of collecting and removing device

1. 起膜轮 2. 液压马达 3. 支撑板 4. 加压弹簧 5. 捡拾滚筒 6. 捡拾链条 7. 液压油管

仿形。捡拾装置主要由捡拾链条和捡拾滚筒组成,捡拾滚筒两侧与机架固连,捡拾滚筒圆周上均布滑槽,捡拾链条嵌入捡拾滚筒滑槽内并与起膜轮等间距交错排列。如图 2b 所示,拖拉机带动残膜回收机行进,液压马达通过链传动将动力传递给起膜轮,起膜轮顺时针挑起地膜;捡拾链条入土(捡拾链条入土处线速度等于机具行进速度),并带动捡拾滚筒逆时针滚动,由于捡拾链条和起膜轮在交汇处转动方向相反,使得地膜能顺利挂接到捡拾链条上并输送至其他装置。

2 结构设计 with 参数确定

2.1 关键部件结构组成

起膜轮是起膜装置的关键部件,其结构如图 3 所示。起膜轮主要由起膜轮轮刺、起膜轮轮盘及起膜轮传动轴组成。起膜轮传动轴两端连接支撑板,轴向等间距焊接多个起膜轮轮盘,起膜轮轮刺沿起膜轮圆盘径向均布焊接。捡拾装置主要通过捡拾滚筒及捡拾链条进行地膜的捡拾作业。如图 4 所示,捡拾滚筒主要由螺旋输送机、圆环、拨杂板等组成。螺旋输送机位于圆环内并与圆环偏心安装,螺旋输送机两端装有轴承并与机架连接,圆环沿螺旋输送机轴等间距轴向均布。相邻圆环间沿圆环径向方向等间距分布多个拨杂板,相邻拨杂板之间留有间隙;捡拾链条主要由捡拾钉齿和捡拾链板组成,两捡拾钉齿间安装 3 个捡拾链板,相邻捡拾链板之间、捡拾钉齿与捡拾链板之间通过销钉铆接。

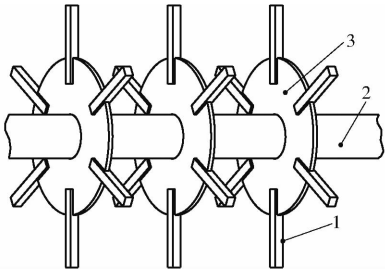


图 3 起膜轮结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of wheel to remove impurities

1. 起膜轮轮刺 2. 起膜轮传动轴 3. 起膜轮轮盘

起膜过程中,起膜装置工作区域内堆积大量杂质,由于捡拾滚筒相邻拨杂板之间留有间隙,膜面上堆积的杂质经间隙进入捡拾滚筒内,经螺旋输送机排至机具的两侧,剩余部分杂质则沿着起膜轮轮盘之间的间隔排至机具后侧,解决了杂质壅堵的问题;捡拾过程中,起膜轮轮刺挑起地膜向起膜装置与捡拾装置的交汇区域运动,捡拾钉齿捡拾挑起的地膜并向其他装置输送。地表地膜经起膜轮挑起到由捡

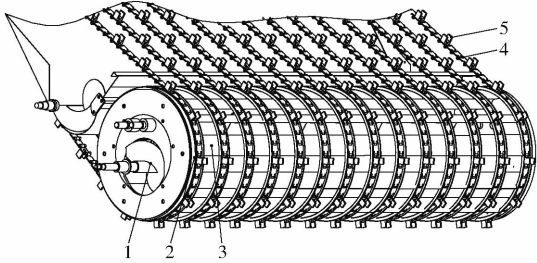


图 4 捡拾装置结构示意图

Fig. 4 Schematic of pick-up device structure

1. 螺旋输送机 2. 圆环 3. 拨杂板 4. 捡拾链板 5. 捡拾钉齿

拾钉齿拾膜输送的过程中,地膜近 180° 翻转,膜面上剩余的杂质排至机具外侧,提高残膜回收率并降低回收残膜的含杂率。

2.2 起膜过程分析及参数确定

起膜捡拾机构进行起膜、捡拾作业时,易发生地膜从起膜轮上脱落与分离后的地膜被起膜轮拉断,捡拾装置捡拾地膜效果差。为确定影响因素并便于分析,对该过程中作用对象的运动简化处理。起膜过程中,仅分析地膜受到起膜轮施加的拉力、摩擦力及膜面杂质对地膜的拉力影响;捡拾过程中,仅分析捡拾输送过程中起膜轮和捡拾钉齿工作参数对地膜捡拾输送情况的影响。

2.2.1 起膜过程分析

为保证地膜能够被挑起不脱落且不发生断裂,对起膜轮起膜过程中作用对象的运动状态进行分析。起膜轮轮刺带动地膜转动时,地膜受到离心力作用需克服向心综合作用力,受力分析如图 5a 所示。图中  $F_n$  为地膜受到起膜轮轮刺的支持力,  $F_a$  为地膜受到的离心力,  $G$  为挑起的地膜受到的拉力,大小等于膜面上杂质的重量,  $f$  为地膜受到轮刺的摩擦阻力,地膜恰好从起膜轮上脱落的临界条件为挑起的地膜所受离心力等于其他外力的合力,即

$$F_a = mv^2 = mR_1\omega_1^2 = f - G\cos\theta \tag{1}$$

式中  $R_1$ ——传动轴圆心到轮刺与地膜交点的距离, mm

$\theta$ ——相邻轮刺与竖直方向的夹角, (°)

$v$ ——起膜轮轮刺与地表地膜接触位置的线速度, m/s

$m$ ——膜面杂质总质量, g

$\omega_1$ ——起膜轮转动角速度, rad/s

根据文献[28]方法测得地膜的摩擦因数  $\mu = 0.4$ , 确定地膜受到轮刺的摩擦阻力  $f$  为

$$f = \mu mg\cos\theta \tag{2}$$

式中  $g$ ——重力加速度

此外,地膜未脱离起膜轮轮刺时,挂接在起膜轮轮刺上的地膜角速度处处相等(等同于起膜轮角速

度),即

$$\omega_1 = 2\pi n_1 \tag{3}$$

式中  $n_1$ ——起膜轮转速, r/min

联立式(1)~(3)可得,保证地膜挑起后不脱离的临界条件为

$$R_1 n_1^2 \leq \frac{\mu g \cos \theta - g \sin \theta}{4\pi^2} \tag{4}$$

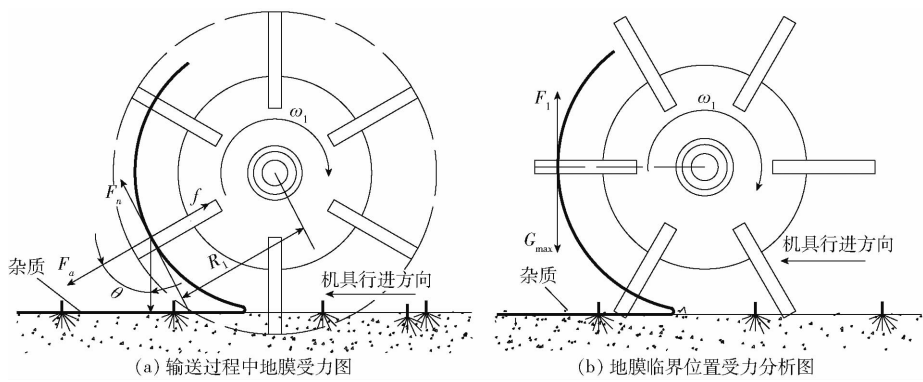


图 5 起膜过程分析

Fig. 5 Analysis of the process of removing the residual mulch

为确定引起地膜断裂的因素,对单个起膜轮挑膜过程进行分析,结果如图 5b 所示。起膜轮进行膜土分离作业时,地膜受到的拉力受起膜轮轮刺转动角度的影响。起膜轮轮刺挑起地膜转动到水平位置时地膜所受到的拉力最大为  $G_{\max}$ 。为使地膜不发生断裂,应保证挑膜过程中地膜所受最大拉力  $G_{\max}$  小于地膜自身纵向拉断力  $F_1$ ,即

$$G_{\max} < F_1 \tag{5}$$

此外,起膜装置起膜过程是由多个起膜轮共同完成。如图 6 所示,为确保装置顺利挑起整个幅宽地膜而不断裂,同一截面处总纵向抗拉力大于该位置处膜面上杂质的总重量。将装置挑起整个幅宽的地膜作为整体进行受力分析,如图 7 所示。

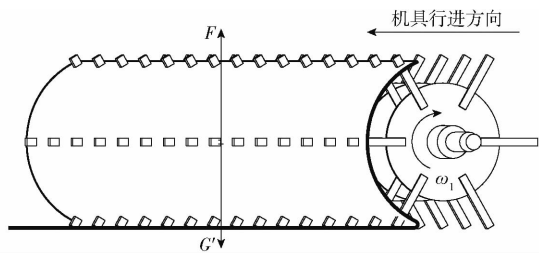


图 6 地膜总受力分析图

Fig. 6 Overall force analysis chart of plastic film

试验测得整个幅宽地膜纵向拉断力  $F = 2.4 \text{ N}$ ,膜面上杂质含量  $W = 110 \text{ g/m}$ ,结合新疆棉花铺膜种植模式,根据单一起膜轮挑膜过程中挑起的地膜不断裂需满足的条件,则有

$$g \left( \frac{L_z}{D} - 1 \right) WQ < F \tag{6}$$

由上述公式可得,导致挑起的地膜脱落的主要因素包括  $n_1$  及  $R_1$ 。由式(4)可知, $R_1$  和  $n_1$  的增大均会影响起膜轮挑膜效果。轮刺入土深度不变的情况下, $R_1$  增大,轮刺拾起地膜处的线速度增大,离心力增大,起膜效果降低; $n_1$  增大,地膜所受离心力增大,影响装置的起膜效果,并且  $n_1$  对起膜轮起膜效果的影响大于  $R_1$  对起膜效果的影响。

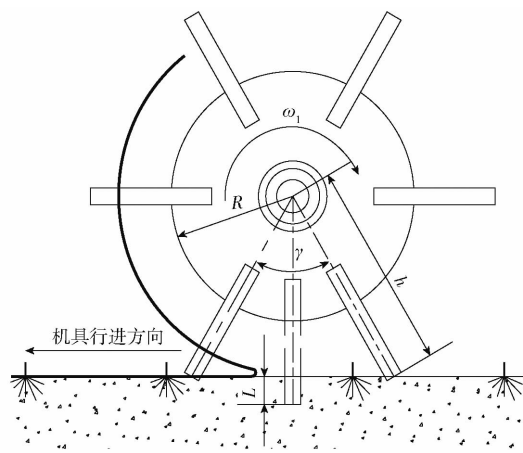


图 7 起膜轮工作原理图

Fig. 7 Stress analysis diagram of critical position of plastic film

其中  $Q = 2\pi(h - L) \frac{\gamma}{360^\circ}$

式中  $Q$ ——起膜轮入土到挑膜过程中转过角  $\gamma$  的位移, mm

$L_z$ ——起膜轮工作幅宽, mm

$D$ ——相邻起膜轮间距, mm

$\gamma$ ——起膜轮轮刺间距角, ( $^\circ$ )

$L$ ——轮刺入土深度, mm

$h$ ——起膜轮轮刺高度, mm

即确保起膜装置挑起地膜不断裂,应保证整个幅宽地膜的纵向抗拉力大于膜上杂质的总重力  $G'$ 。根据式(6)可知,导致挑起地膜发生拉断的主要影响因素包括起膜轮间距  $D$ 、起膜轮轮刺间距角  $\gamma$ 、起膜轮工作幅宽  $L_z$  等参数。

2.2.2 起膜轮轮刺高度确定

结合 2.2.1 节可得,起膜轮轮刺的高度(大小等于  $L$  与  $R_1$  之和,其中起膜轮入土深度  $L$  为确定值)影响装置的起膜效果。作业时,起膜轮轮刺与竖直方向夹角及入土深度都在发生变化,起膜轮轮刺与土壤产生工作阻力,由文献[29]可知,保证最小工作阻力时起膜轮轮刺高度为

$$h = L + \frac{L}{\tan \frac{\gamma}{2} \tan \varphi} \tag{7}$$

式中  $\varphi$ ——土壤内摩擦角, ( $^{\circ}$ )

由式(7)可知,起膜轮轮刺间距  $\gamma$  影响起膜轮轮刺的最小高度  $h$ ,同时  $\gamma$  决定起膜轮转速及其他因素确定时起膜轮轮刺工作数量。单个起膜轮轮刺进行起膜作业过程为从起膜轮轮刺进入地表开始,到该起膜轮离开土壤挑膜向其他装置输送时结束。起膜装置工作时,起膜轮既自身转动又跟随整机运动,为提高起膜轮起膜工作的连续性和可靠性,确保起膜轮进行膜土分离作业时挑起的地膜不发生脱落,应使得一起膜轮轮刺结束起膜作业的同时至少另一起膜轮轮刺进行起膜作业。即起膜轮轮刺间距  $\gamma$  最大值不超过起膜轮一轮刺处于离开土壤挑膜的临界状态时,相邻另一轮刺应处于入土挑膜的临界状态时两起膜轮轮刺组成的夹角,从而实现起膜轮挑膜的连续性,相应状态下起膜轮轮刺高度  $h$  和轮刺入土深度  $L$  关系如图 7 所示。

通过对图 7 起膜轮作业的临界状态进行分析,根据起膜轮各参数的关系确定起膜轮膜土分离作业的起膜轮最小轮刺间距角  $\gamma_{\min}$  为

$$\gamma_{\min} = 2\arctan \sqrt{\frac{L}{2h - L}} \tag{8}$$

考虑到起膜轮工作特性及同其他装置的装配关系,确定起膜轮连接圆盘直径不宜过大,本文取起膜轮连接圆盘半径  $R = 90\text{ mm}$ ,通过试验确定轮刺入土深度  $L = 20\text{ mm}$ ,并联立式(7)、(8),计算得轮刺最小高度  $h$  的最小值为  $130\text{ mm}$ ,根据整机的结构尺寸及起膜轮与其他部件装配关系,取  $h = 150\text{ mm}$ 。

2.2.3 起膜轮排列间距确定

起膜轮间距  $D$  影响整个幅宽地膜的受力。试验时,当  $D$  过大时,挑起的地膜断裂严重。相同截面的地膜受到的起膜轮轮刺支撑包括一支撑点支撑、两支撑点支撑及多支撑点支撑,该截面的轮刺数越多,地膜支撑点越多,通过分析发现,地膜截面支撑点越多受膜面上杂质重力的影响越小,为避免地膜破损严重,起膜轮轮刺个数不宜过多。此外膜面上积累的杂质重心同地膜与起膜轮接触的区域存在

一定距离,受杂质重力影响产生剪切力,剪切力的大小与同一截面支撑点数量有关。同时试验发现,造成杂质壅堵的主要原因是棉花打秆机打秆后膜面残留的棉秆及土壤等杂质在起膜装置的工作区域不断累积,影响了装置的起膜效果。由于起膜装置由多个起膜轮组成,相邻起膜轮之间留有间距,起膜轮间距越小,起膜装置起膜效果越好,但当起膜轮数量增加到一定程度时,对起膜装置的起膜效果影响不大,对清杂的效果影响极大。当膜面残留棉秆的长度小于相邻起膜轮的间距时,起膜装置的起膜、排杂效果明显;当残留棉秆的长度大于相邻起膜轮的间距时,相邻起膜轮之间聚集少许杂质,影响起膜轮的起膜、排杂效果;当相邻起膜轮的间隔过大时,相邻起膜轮之间无杂质壅堵但起膜轮的起膜效果变差。因此需确定最优起膜轮间距,以提高起膜装置的起膜、清杂效果。目前新疆棉花种植模式主要为  $660\text{ mm} + 100\text{ mm}$ ,地膜幅宽为  $2\,050\text{ mm}$ ,工作幅宽  $L_z = 1\,916\text{ mm}$ ,通过结合新疆棉花种植模式并考虑起膜轮和棉垄的匹配,分析膜面杂质的物料特性,确定合理的起膜轮间距  $D$ ,如图 8 所示。

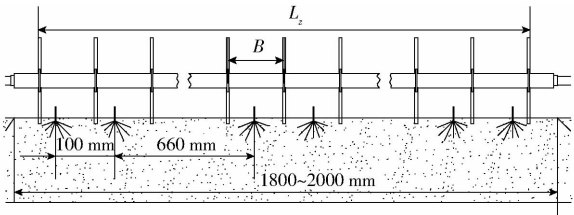


图 8 棉花宽窄行种植模式示意图

Fig. 8 Structural diagram of planting pattern of cotton

2019 年进行了田间试验,获取了残膜回收前膜面棉秆物料特性,并对取得的数据进行分析。剔除不合理的数据,对剩余数据进行试验分析。本文假设膜面棉秆的长度呈正态分布,并对试验数据进行了单样本柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验,结果如表 1 所示。表 1 中渐进显著性  $P = 0.2$ ,膜面秆长符合正态分布。将测得的棉秆长度等数据代入到 SPSS 软件中,获取数据的正态曲线直方图,结果如图 9 所示。

由于膜面上杂质主要为棉秆,长度为  $L'$ ,根据起膜轮的结构特性及棉秆的尺寸参数,应保证起膜装置正常工作时膜面上杂质均能通过起膜轮,其中起膜轮排除杂质的区域是由起膜轮间距  $D$  和起膜轮轮刺高度  $h$  组成的矩形区域。已知起膜轮轮刺高度  $h = 150\text{ mm}$ ,棉秆  $L'$  最长为  $180\text{ mm}$ ,起膜装置工作时,膜面上的棉秆随机经过两起膜轮间距。允许最长棉秆通过的的最小起膜轮间距为最长棉秆从起膜轮间距  $D$  和起膜轮轮刺高度  $h$  组成的矩形区域

表 1 单样本柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验  
Tab.1 One-sample Kolmogorov – Sminov test

| 秆长   | 个案数 | 正态参数   |       | 最极端偏差 |       |        | 检验统计  | 渐进显著性<br>(双尾) |
|------|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|---------------|
|      |     | 平均值    | 标准偏差  | 绝对    | 正     | 负      |       |               |
| 0.75 | 115 | 120.81 | 22.09 | 0.053 | 0.035 | -0.053 | 0.053 | 0.200         |

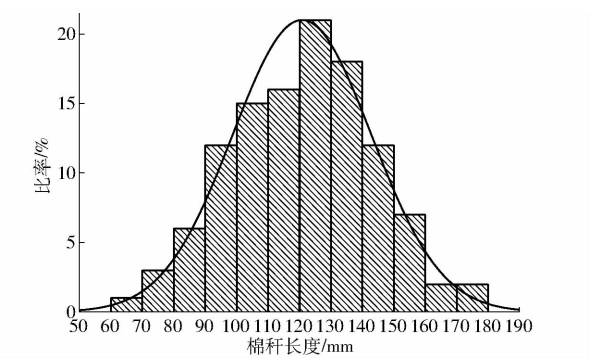


图 9 膜上棉秆长度分布图

Fig.9 Distribution of cotton stalk length on plastic film

的对角线通过时的距离,允许最长棉秆通过的最大起膜轮间距为棉秆从起膜轮间距  $D$  通过时的间距,即满足排出棉秆等杂质的起膜轮间距  $D$  取值为

$$\sqrt{L'^2 - h^2} \leq D \leq L' \tag{9}$$

同时由图 9 可以看出,试验获取的膜面上棉秆长度主要集中在 100 ~ 150 mm 之间,棉秆长度多以 125 mm 为主,棉秆长度超过 150 mm 的较少。通过分析棉秆长度的分布并考虑新疆棉花种植模式和同捡拾装置的配合,最终确定起膜轮间距范围为  $100\text{ mm} \leq D \leq 150\text{ mm}$ 。同时由式(9)可知,该范围内长度介于 150 ~ 180 mm 的棉秆也能通过起膜轮间隙。

2.2.4 起膜轮轮刺间距角确定

结合上文可知,起膜轮的轮刺间距角  $\gamma$  既影响起膜过程中经起膜轮挑起的地膜脱落又影响地膜发生断裂。如图 7 所示,当起膜轮入土挑膜时,由于起膜轮轮刺与土壤接触形成工作阻力,当起膜轮轮刺顺时针转动从贴入地表到入土深入到铅垂位置时,该过程中起膜轮轮刺入土对土壤进行挤压,该动作有助于抵抗起膜轮的下沉,同时土壤的反作用力有助于起膜轮的转动,当起膜轮轮刺从铅垂位置到离开地表时,起膜轮轮刺受到土壤的阻力,增加了装置的能量消耗。因此为减小挑膜过程中起膜装置的消耗,应保证起膜轮轮刺间距角  $\gamma$  最小,且当起膜轮轮刺进入土壤在达到铅垂位置时,其后方与其相邻的钉齿应开始进入土壤,起膜轮轮刺间距角  $\gamma$  最大时应保证起膜轮轮刺离开地表时,其后方与其相邻的钉齿应开始进入土壤。通过对起膜轮挑膜作业的临界状态进行分析,根据起膜轮各参数的关系确定满

足起膜轮膜土分离作业的起膜轮轮刺间距角  $\gamma$  为

$$\arctan \frac{\sqrt{h^2 - (h - L)^2}}{h - L} \leq \gamma \leq 2\arctan \frac{\sqrt{h^2 - (h - L)^2}}{h - L} \tag{10}$$

根据起膜轮轮刺高度  $h$  及起膜轮挑膜入土深度  $L$ ,确定起膜轮轮刺间距角  $\gamma$  的范围为  $32^\circ \sim 64^\circ$ 。结合 2.2.1 节,相邻另一轮刺最大轮刺间距角应满足

$$\gamma_{\max} = \pi - 2\arctan \left( \frac{2R}{h} + 1 \right) \tan \varphi \tag{11}$$

联立式(7)、(8)、(11),计算得  $\gamma_{\max} = 89^\circ$ ,即相邻轮刺间距角最大不超过  $89^\circ$ 。结合上文对起膜作业过程中整个幅宽地膜的受力分析,根据式(6)在其他因素数值确定的情况下,为保证地膜自身纵向拉断力大于挑膜过程中地膜所受最大拉力,起膜轮间距角  $\gamma$  取值范围为  $46^\circ \sim 83^\circ$ ,结合式(10),起膜轮间距角  $\gamma$  的取值范围为  $46^\circ \sim 64^\circ$ ,本文取  $\gamma = 60^\circ$ ,并根据确定的起膜轮间距角可以确定单个起膜轮轮盘上焊接的起膜轮轮刺个数为

$$K = \frac{\gamma}{2\pi} \tag{12}$$

根据上文确定的起膜轮间距角  $\gamma$ ,确定与之对应的轮刺个数  $K = 6$ 。

2.3 捡拾过程分析及参数确定

为分析起膜装置进行膜土分离作业后,分离后的地膜挂接在捡拾钉齿时起膜轮和捡拾钉齿的运动规律,对地膜由膜土分离到拾膜输送过程进行运动学分析,确定起膜轮和捡拾链条合理的工作参数。该过程中,捡拾钉齿同起膜轮跟随整机运动,捡拾钉齿拾膜轨迹同起膜轮起膜轨迹产生轨迹交汇区域。地膜被起膜轮挑起后,跟随起膜轮转动,在交汇处挂接到捡拾钉齿上,为确保地膜能顺利挂接到捡拾钉齿上,应保证捡拾钉齿及起膜轮轮刺均处于交汇处。因此起膜轮转速和捡拾钉齿的转速直接决定地膜捡拾的效果。以捡拾滚筒圆心位置为原点,以与机具行进方向相反的方向作为  $x$  轴,以竖直方向为  $y$  轴,建立  $xOy$  直角坐标系。地膜由膜土分离到输送过程的运动轨迹分析如图 10 所示。图中  $M$ 、 $N$  两点为捡拾钉齿拾膜处同起膜轮进行膜土分离时运动轨迹的交点,图 10 中阴影部分为起膜轮挑膜挂接到捡拾钉齿的过渡区域。

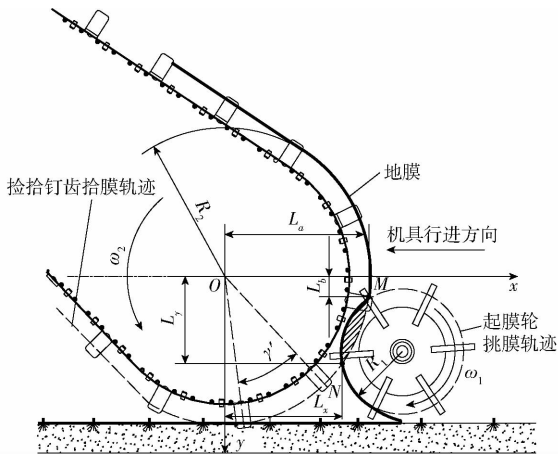


图 10 地膜捡拾过程示意图

Fig. 10 Schematic of plastic film picking process

试验确定在  $xOy$  直角坐标系中,两捡拾钉齿之间的角度  $\gamma' = 30^\circ$ ,捡拾滚筒  $y$  轴方向到点  $M$  的角度为  $60^\circ$ ,到点  $N$  的角度为  $80^\circ$ ,捡拾钉齿由点  $M$  到点  $N$  的弧长  $S = 105\text{ mm}$ 。工作时,起膜装置挑起地表的地膜经过点  $M/N$  组成工作区域将地膜挂接在捡拾装置上输送至其他装置。通过对图 10 中捡拾的地膜经过起膜装置与捡拾装置的运动轨迹分析可得,为保证机具行进残膜回收作业时,起膜轮挑起的地膜均能被捡拾钉齿挂接,则应使起膜轮经过点  $M$ 、 $N$  组成工作区域所用的时间内,捡拾钉齿均能在该工作区域内,即保证挑起的地膜顺利挂接到捡拾钉齿的条件为

$$t = \frac{S}{v} = \frac{S}{2\pi R_1 n_1} \quad (13)$$

$$L_x \leq R_2 \sin(\omega_2 t) \leq L_a \quad (14)$$

$$L_b \leq R_2 \cos(\omega_2 t) \leq L_y \quad (15)$$

其中

$$\omega_2 = \frac{v'}{R_2}$$

式中  $L_x$ ——点  $M$  水平位移,mm  
 $L_y$ ——点  $M$  竖直位移,mm  
 $L_a$ ——点  $N$  水平位移,mm  
 $L_b$ ——点  $N$  竖直位移,mm  
 $R_2$ ——捡拾钉齿拾膜转动半径,mm  
 $\omega_2$ ——捡拾滚筒角速度,rad/s  
 $v'$ ——捡拾钉齿拾膜处线速度,m/s  
 $t$ ——起膜轮经过点  $M$ 、 $N$  组成工作区域所用的时间,s

为确定合适的起膜轮转速,本文根据选取拖拉机不同行进速度(等于捡拾钉齿速度,取  $0.9 \sim 1.5\text{ m/s}$ )和式(13)~(15),通过获取不同速度下捡拾钉齿通过过渡区域的时间  $t$ ,确定起膜轮转速  $n_1$  的取值范围。并根据田间试验情况,最终选取起膜轮对应的转速为  $16 \sim 36\text{ r/min}$ 。

### 3 试验设计

#### 3.1 试验条件和方法

为检验随动式残膜回收机起膜捡拾机构的田间性能,2019 年 10 月底,在新疆生产建设兵团石河子市 145 团 7 连进行起膜捡拾机构试验。残膜回收机作业时由迪尔 904 轮式拖拉机牵引工作,试验田棉花种植模式采用  $660\text{ mm} + 100\text{ mm}$ ,所铺地膜采用厚度为  $0.01\text{ mm}$  的耐候性地膜,覆膜幅宽为  $2\,050\text{ mm}$ ,地膜滞留田间时间约为  $180\text{ d}$ ,打秆机作业后膜面上有少量棉铃壳、棉叶和土壤覆盖。本文按照 GB/T 25412—2010 规定对随动式残膜回收机起膜捡拾装置进行田间试验,随机选取试验田铺膜种植区域作为试验区域,选取 1 个膜幅进行试验,每个测试区域长  $20\text{ m}$ ,相邻测试区域间隔  $10\text{ m}$ 。

#### 3.2 试验因素与评价指标

根据机具田间的实际工作情况,通过对随动式残膜回收机起膜捡拾机构的结构及工作机理分析,确定影响该机构工作性能的主要因素为起膜轮间距、起膜轮转速及拖拉机牵引机具的行进速度;起膜输送过程中,该机构的田间工作性能指标为地膜的起膜率  $\eta_1$  和起膜轮的排杂率  $\eta_2$ 。

#### 3.3 试验方案

各因素对试验效果有影响且呈非线性,采用响应曲面法构建模型。本文针对随动式残膜回收机具,根据机具在田间的作业情况,采用三因素三水平正交方法进行试验设计,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码  
Tab. 2 Coding of test factor

| 编码 | 因素                                            |                                              |                        |
|----|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
|    | 起膜轮转速<br>$A/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 机具行进速度<br>$B/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 起膜轮间距<br>$C/\text{mm}$ |
| -1 | 16                                            | 0.9                                          | 100                    |
| 0  | 26                                            | 1.2                                          | 140                    |
| 1  | 36                                            | 1.5                                          | 180                    |

依据机具起膜捡拾机构的田间作业要求与效果,将起膜率  $\eta_1$ 、排杂率  $\eta_2$  作为响应值,对起膜轮转速  $A$ 、拖拉机牵引机具行进速度  $B$  及起膜轮间距  $C$  进行试验研究。试验田随机选取  $20\text{ m}$  长的试验区。试验期间由人工将试验区内未回收的地膜进行回收编号,并对回收的地膜进行清洗、晾干与称量。作业后单个测试区残留地膜的质量为  $m_1$ ,机具作业前单个测试区地膜的质量为  $m_2$ ,作业后起膜装置起膜处膜上剩余杂质的质量为  $m_3$ ,机具作业前单个测试区膜面上杂质的质量为  $m_4$ 。

4 试验结果与参数优化

针对随动式残膜回收机的作业要求,根据起膜捡拾机构的结构与工作参数,将起膜率  $\eta_1$ 、排杂率  $\eta_2$  作为响应值,对起膜轮转速  $A$ 、机具行进速度  $B$  及起膜轮间距  $C$  进行试验研究,试验结果如表 3 所示。

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Experimental design and results

| 编号 | 起膜轮<br>转速 $A$ /<br>( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 机具行进<br>速度 $B$ /<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 起膜轮<br>间距 $C$ /<br>mm | 起膜率<br>$\eta_1$ /% | 排杂率<br>$\eta_2$ /% |
|----|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 1  | 36                                                    | 1.2                                                  | 180                   | 87.82              | 93.94              |
| 2  | 26                                                    | 1.2                                                  | 140                   | 91.31              | 96.40              |
| 3  | 16                                                    | 1.2                                                  | 180                   | 88.02              | 94.55              |
| 4  | 36                                                    | 1.2                                                  | 100                   | 88.81              | 94.18              |
| 5  | 16                                                    | 0.9                                                  | 140                   | 86.27              | 94.11              |
| 6  | 26                                                    | 1.2                                                  | 140                   | 90.89              | 96.70              |
| 7  | 36                                                    | 0.9                                                  | 140                   | 89.91              | 94.55              |
| 8  | 26                                                    | 0.9                                                  | 100                   | 88.84              | 96.25              |
| 9  | 26                                                    | 0.9                                                  | 180                   | 90.20              | 96.02              |
| 10 | 16                                                    | 1.5                                                  | 140                   | 88.25              | 94.59              |
| 11 | 26                                                    | 1.5                                                  | 180                   | 90.82              | 95.73              |
| 12 | 26                                                    | 1.5                                                  | 100                   | 91.08              | 96.24              |
| 13 | 16                                                    | 1.2                                                  | 100                   | 85.14              | 94.94              |
| 14 | 26                                                    | 1.2                                                  | 140                   | 91.34              | 96.33              |
| 15 | 26                                                    | 1.2                                                  | 140                   | 91.92              | 96.42              |
| 16 | 26                                                    | 1.2                                                  | 140                   | 91.67              | 96.57              |
| 17 | 36                                                    | 1.5                                                  | 140                   | 89.04              | 92.97              |

4.1 模型建立与显著性检验

应用 Design-Expert 8.0.5 软件对表中数据进行多元线性回归拟合及方差分析,结果如表 4 所示,并建立起膜率  $\eta_1$  和排杂率  $\eta_2$  对起膜轮转速、机具行进速度、起膜轮间距的二次多项式响应回归模型。对起膜率  $\eta_1$  的数据分析可知,在  $P < 0.05$  水平上  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $AB$ 、 $AC$ 、 $A^2$ 、 $C^2$  的系数显著,其余不显著。该模型  $P < 0.000\ 1$ ,说明以起膜率  $\eta_1$  作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项  $P = 0.401\ 3$ ,失拟不显著,回归模型方程具有高度的拟合性,回归方程为

$$\eta_1 = 91.43 + 0.99A + 0.5B + 0.37C - 0.71AB - 0.97AC - 2.92A^2 - 1.06C^2$$

(16)

对排杂率  $\eta_2$  的数据分析可知,在  $P < 0.05$  水平上  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $AB$ 、 $A^2$ 、 $B^2$  的系数显著,其余不显著。该模型  $P < 0.000\ 1$ ,说明以排杂率  $\eta_2$  作为响应函数的回归模型显著性,失拟项  $P = 0.392\ 3$ ,失拟不显著,回归模型方程具有高度的拟合性,回归方程为

表 4 试验结果分析

Tab. 4 Analysis of experiment results

| 试验指标         | 变异来源  | 平方和      | 均方       | $F$       | $P$      |
|--------------|-------|----------|----------|-----------|----------|
| 起膜率 $\eta_1$ | 模型    | 60.01    | 6.67     | 39.3      | <0.000 1 |
|              | $A$   | 7.80     | 7.80     | 45.98     | 0.000 3  |
|              | $B$   | 1.97     | 1.97     | 11.61     | 0.011 3  |
|              | $C$   | 1.12     | 1.12     | 6.59      | 0.037 2  |
|              | $AB$  | 2.03     | 2.03     | 11.97     | 0.010 6  |
|              | $AC$  | 3.74     | 3.74     | 22.07     | 0.002 2  |
|              | $BC$  | 0.66     | 0.66     | 3.87      | 0.090 0  |
|              | $A^2$ | 35.97    | 35.97    | 212.02    | <0.000 1 |
|              | $B^2$ | 0.077    | 0.077    | 0.46      | 0.521 3  |
|              | $C^2$ | 4.69     | 4.69     | 27.65     | 0.001 2  |
|              | 残差    | 1.19     | 0.17     |           |          |
|              | 失拟    | 0.58     | 0.19     | 1.26      | 0.401 3  |
|              | 误差    | 0.61     | 0.15     |           |          |
|              | 总和    | 61.20    |          |           |          |
| 排杂率 $\eta_2$ | 模型    | 21.111 4 | 2.345 7  | 93.858 0  | <0.000 1 |
|              | $A$   | 0.812 8  | 0.812 8  | 32.522 7  | 0.000 7  |
|              | $B$   | 0.245    | 0.245    | 9.803 1   | 0.016 6  |
|              | $C$   | 0.234 6  | 0.234 6  | 9.387 5   | 0.018 2  |
|              | $AB$  | 1.060 9  | 1.060 9  | 42.449 3  | 0.000 3  |
|              | $AC$  | 0.005 6  | 0.005 6  | 0.225 1   | 0.649 6  |
|              | $BC$  | 0.019 6  | 0.019 6  | 0.784 2   | 0.405 2  |
|              | $A^2$ | 17.578 4 | 17.578 4 | 703.357 1 | <0.000 1 |
|              | $B^2$ | 0.626 5  | 0.626 5  | 25.069 5  | 0.001 6  |
|              | $C^2$ | 0.006 2  | 0.006 2  | 0.246 5   | 0.634 8  |
|              | 残差    | 0.174 9  | 0.025 0  |           |          |
|              | 失拟    | 0.086 0  | 0.028 7  | 1.289 9   | 0.392 3  |
|              | 误差    | 0.088 9  | 0.022 2  |           |          |
|              | 总和    | 21.286 4 |          |           |          |

$$\eta_2 = 7.03 + 0.64A + 0.35B + 0.34C + 1.03AB + 4.08A^2 + 0.77B^2$$

(17)

4.2 试验因素对机构起膜率的影响

利用 Box - Behnken Design 进行试验数据分析并生成 3D 响应曲面图,通过分析各项系数大小确定各因素对机具起膜率  $\eta_1$  的影响,得出各因素对机具起膜率  $\eta_1$  的影响重要性依次为起膜轮转速  $A$ 、机具行进速度  $B$ 、起膜轮间距  $C$ ,其中起膜轮转速对机具起膜率  $\eta_1$  的影响最明显。为更直观判断各因素对机具起膜率  $\eta_1$  的影响趋势,通过固定一个试验因素处于零水平,研究其余 2 个因素间的交互效应,由表 4 和式 (16) 可以看出,  $BC$  和  $B^2$  的  $P$  值大于 0.05,对机具起膜率不具有显著性影响,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $AB$  的  $P$  值小于 0.05,对起膜率有显著性影响。图 11 为各显著性影响参数对机具起膜率的响应曲面。

由图 11a 可以看出,当起膜轮转速稳定不变时,随着起膜轮间距的增加,机具的起膜率  $\eta_1$  呈先增大后减小的趋势,当起膜轮间距为 130 ~ 150 mm 时,机具起膜率  $\eta_1$  达到最大值;当起膜轮间距固定不变

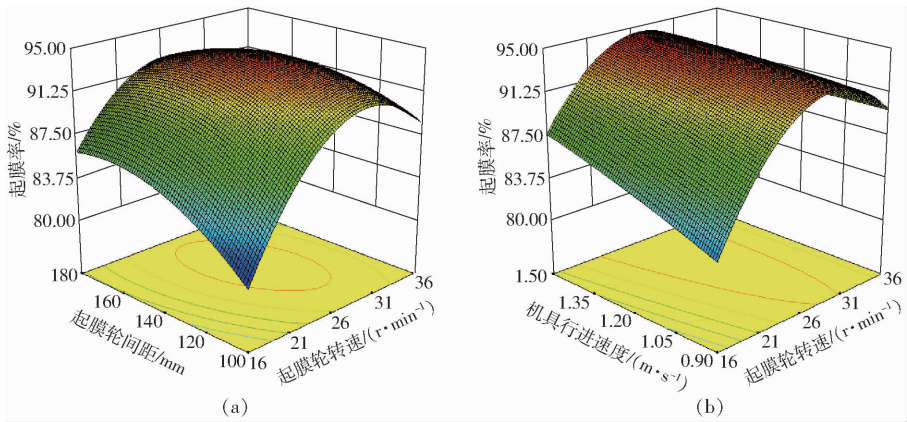


图 11 各因素交互作用对起膜率影响的响应曲面

Fig. 11 Response surface of influence of various factors on separation rate of membrane-raised soil

时,随着起膜轮转速的增加,机具的起膜率  $\eta_1$  先增大后减小,当起膜轮转速为 25 ~ 30 r/min 时,机具起膜率  $\eta_1$  达到最大值,其原因是当机具行进速度位于 0 水平时,自身速度不发生变化,而捡拾链条的速度等于机具的行进速度,因此起膜轮挑膜过程中,起膜轮转速增大,与捡拾链条的速度差逐渐减小,起膜效果明显,但是进一步加大,起膜轮转速过快,产生缠膜现象。由图 11b 可以看出,随着起膜轮转速的增加,机具起膜率先增加后减小;当起膜轮转速稳定不变时,随着机具行进速度的不断加快,机具起膜率逐渐增大,但机具起膜率增加的幅度逐渐降低,趋势不明显。

4.3 试验因素对机构排杂率的影响

由表 4 可知,起膜轮转速  $A$ 、机具行进速度  $B$ 、起膜轮间距  $C$  对机构排杂率的影响显著性由大到小依次为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。根据表中各项  $P$  值,仅起膜轮转速  $A$  和机具行进速度  $B$  的交互作用对机构的排杂率有显著影响,试验中起膜轮转速  $A$ 、机具行进速度  $B$  对排杂率影响响应曲面如图 12 所示。当起膜轮间距固定在零水平时,起膜轮转速固定不变,起膜捡拾机构的排杂率随着机具行进速度的逐渐增大呈现先减小后增大的趋势,当机具行进速度稳定不变时,随着起膜轮转速的增大,排杂率先减小后增大,但响应曲面沿起膜轮转速  $A$  的变化比沿机具行进速度  $B$  的变化快,说明起膜轮转速  $A$  对机构排杂率的影响更显著。

4.4 参数优化与田间试验

起膜捡拾工序是残膜回收作业的关键环节,起膜率是反映起膜效果最重要的指标,在试验范围内要求其值越大越好,排杂率则反映机构的工作性能优劣,应用 Design-Expert 8.0.5 的寻优功能对起膜捡拾机构的结构进行优化,得到最优参数组合为:起膜轮转速 26.2 r/min、机具行进速度 1.23 m/s、起膜轮间距 139.95 mm,此时起膜率为 91.49%,排杂率为 92.92%。

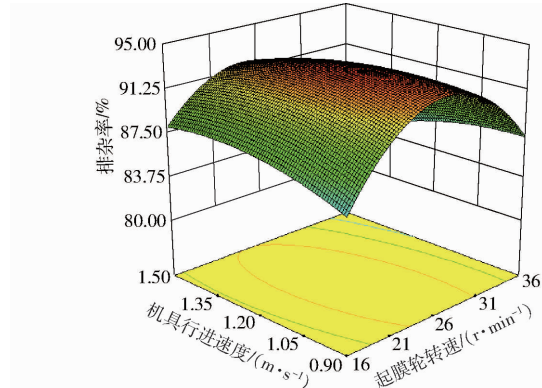


图 12 各因素交互作用对排杂率影响的响应曲面

Fig. 12 Response surface of influence of each factor on ratio of impurities removed

为验证参数优化结果的可靠性,本文采用起膜捡拾机构参数最优组合在田间进行 3 次重复试验,如图 13 所示,棉田为经棉花打秆机打秆作业后的作业田,试验结果取平均值。试验测得机构起膜率均值为 90.45%,排杂率均值为 91.30%,比理论预测值分别降低 1.04、1.62 个百分点。试验验证结果表明,回归模型具有较好的可靠性。



图 13 田间试验结果

Fig. 13 Field test results

5 结论

(1) 针对随动式残膜回收机在起膜捡拾过程中杂质壅堵的问题,设计了一种起膜捡拾机构,通过对起膜捡拾机构的起膜、拾膜过程进行分析,确定了影响起膜捡拾机构作业质量的影响因素及评价指标。

(2)建立以起膜率、排杂率为响应指标的三元二次回归模型,通过对模型进行响应曲面分析,得出试验范围内机具行进速度、起膜轮转速、起膜轮间距对机构起膜效果的影响。各因素对起膜率和排杂率的影响顺序由大到小均为:起膜轮转速、机具行进速度、起膜轮间距。

(3)根据正交试验组合设计试验方案进行样机的田间试验,并对结构参数进行优化,得到其最优作

业参数组合为:起膜轮转速为 26.2 r/min、机具行进速度为 1.23 m/s、起膜轮间距为 139.95 mm,此时起膜率理论值为 91.49%,排杂率理论值为 92.92%。

(4)根据获取的优化数据进行机构改进设计,并进行田间试验验证。起膜捡拾机构在参数最优组合下测得机构起膜率均值为 90.45%,排杂率均值为 91.30%,比理论预测值分别降低 1.04、1.62 个百分点。试验验证结果良好,满足回收作业要求。

## 参 考 文 献

- [1] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.  
DONG Hegan, LIU Tong, LI Yongguan, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 91-99. (in Chinese)
- [2] 刘杰.影响新疆棉花价格波动的因素及应对的对策分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.  
LIU Jie. The analysis of influence Xinjiang's cotton price fluctuations factors and the counter measure[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [3] 刘建国,李彦斌,张伟,等.绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(2):246-250.  
LIU Jianguo, LI Yanbin, ZHANG Wei, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 246-250. (in Chinese)
- [4] 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. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 223-234. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] YAN Changrong, HE Wenqing, TURNER N C, et al. Plastic-film mulch in Chinese agriculture: importance and problems[J]. World Agriculture, 2014, 4(2): 32-36.
- [7] 李亚丽.1FM-110型地膜回收机的设计与研究[D].兰州:甘肃农业大学,2016.  
LI Yali. Design and research on 1FM-110 plastic film recovery machine[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [8] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):101-106,140.  
WANG Zhichao, LI Xian Yue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):101-106, 140. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150515&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150515&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.015. (in Chinese)
- [9] 舒帆.我国农用地膜利用与回收及其财政支持政策研究[D].北京:中国农业科学院,2014.  
SHU Fan. The recycling and utilizasin of agricultural film and its financial suppot policy research[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [10] 卢博友,杨青,薛少平,等.圆弧形弹齿滚筒式残膜捡拾机构设计及捡膜性能分析[J].农业工程学报,2000,16(6):68-71.  
LU Boyou, YANG Qing, XUE Shaoping, et al. Design of arc spring-tooth type collector for collecting mulching plastic film the collecting property analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 68-71. (in Chinese)
- [11] 薛文瑾,王春耀,朱振中,等.卷膜式棉花苗期残膜回收机的设计[J].农业机械学报,2005,36(3):147,148-149.  
XUE Wenjin, WANG Chunyao, ZHU Zhenzhong, et al. The design of the residual film recovery machine in cotton seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 147, 148-149. (in Chinese)
- [12] 李刚.链齿耙式地膜回收机关键机构研究与参数优化[D].北京:中国农业大学,2017.  
LI Gang. The key mechanism study and parameters optimization of chain-rake type plastic film recycling machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [13] 谢建华,张凤贤,陈学庚,等.弧形齿滚扎式残膜回收机的设计及参数优化[J].农业工程学报,2019,35(11):26-37.  
XIE Jianhua, ZHANG Fengxian, CHEN Xuegeng, et al. Design and parameter optimization of arc tooth and rolling bundle type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 26-37. (in Chinese)
- [14] 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/OL].农业机械学报,2013,44(增刊):94-99.  
XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.): 94-99. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s118&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s118&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.

2013. S1. 018. (in Chinese)
- [15] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):1-14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170601&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170601&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001. (in Chinese)
- [16] 康建明,王士国,颜利民,等. 残膜回收机起膜铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):143-148.  
KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin, et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):143-148. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s022&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s022&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.022. (in Chinese)
- [17] 王志欢. 挑夹式残膜捡拾输送机构的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2017.  
WANG Zhihuan. Design and research on pick-up and delivery mechanism of pick-up residual film[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [18] 赵海军. 残膜捡拾滚筒的运动学和动力学研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2005.  
ZHAO Haijun. Study on kinematics and dynamics of roller for collecting plastic film residue[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [19] 谢建华. 垄作残膜捡拾及脱卸装置的研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.  
XIE Jianhua. Research on the collecting and removing device of ridge and residual film[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [20] 靳伟,白圣贺,张学军,等. 弹齿式残膜回收机参数优化及试验[J]. 农机化研究,2020,42(9):186-190.  
JIN Wei, BAI Shenghe, ZHANG Xuejun, et al. Parameter optimization and test of elastic tooth residual film recovery machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(9):186-190. (in Chinese)
- [21] 谢建华,刘鸿智,巩怀仁,等. 行星架式伸缩杆齿拾膜机构的改进设计及试验[J]. 农机化研究,2016,38(5):122-126.  
XIE Jianhua, LIU Hongzhi, GONG Huairan, et al. Improved design and experiment of planetary type telescopic pole teeth collecting plastic film machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5):122-126. (in Chinese)
- [22] 张慧明,陈学庚,颜利民,等. 随动式秸秆还田与残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(19):11-19.  
ZHANG Huiming, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19):11-19. (in Chinese)
- [23] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):109-115,164.  
YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):109-115, 164. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181213&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181213&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.013. (in Chinese)
- [24] 刘鸿智. 杆齿式拾膜机构的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.  
LIU Hongzhi. Design and experimental study of pole teeth collecting plastic film machine[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [25] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):137-145.  
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):137-145. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190415&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190415&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.015. (in Chinese)
- [26] 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/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):135-144.  
YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on belt-type curl-up film device for residual plastic film recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):135-144. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210212&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210212&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.012. (in Chinese)
- [27] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):119-128. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210113&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210113&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.013. (in Chinese)
- [28] GB/T 10006—1988 塑料薄膜和薄片摩擦系数测定方法[S]. 1988.
- [29] 丁亮,高海波,邓全全,等. 月球车轮刺效应的理论分析与实验研究[J]. 宇航学报,2009,30(4):1351-1358.  
DING Liang, GAO Haibo, DENG Zongquan, et al. Theoretical analysis and experimental research on wheel lug effect of lunar rover[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4):1351-1358. (in Chinese)