

垂直双排链式残膜回收机输膜卸膜 装置设计与试验

史增录^{1,2}, 张学军^{1,2}, 程金鹏^{1,2}, 周鑫城^{1,2}, 张朝书³

(1.新疆农业大学机电工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052;
3.阿拉尔市天典农机制造有限责任公司,新疆 阿拉尔 843013)

摘要:针对目前残膜回收机具存在的拾净率低和含杂率高等问题,设计了一种垂直双排链式残膜回收机。阐述了整体结构和工作原理,对输送装置的关键结构及参数进行分析,开展了垂直双排链作业过程中输膜和卸膜过程的运动学和动力学研究,通过理论计算确定了主要工作部件的作业参数,获得了影响残膜回收性能的关键因素;以输送链转速、卸膜链转速和输送链转运角为试验因素,以残膜拾净率及含杂率为试验指标进行响应面试验。结果表明:影响残膜回收性能的最佳工作参数为输送链转速 $86.08 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜链转速 $128.97 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、输送链转运角 91.92° ,最优参数组合下残膜拾净率为 86.3% ,含杂率为 36.57% 。在最优参数组合下进行田间验证试验,得到最优参数组合下的残膜拾净率为 86.7% ,含杂率为 35.9% ,满足行业要求。

关键词:农业机械;残膜回收;双排链式;输送装置

中图分类号:S223.5 **文献标志码:**A

Design and test of film transfer and unloading device of vertical double-row chain residual film recycling machine

SHI Zenglu^{1,2}, ZHANG Xuejun^{1,2}, CHENG Jinpeng^{1,2}, ZHOU Xincheng^{1,2}, ZHANG Chaoshu³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi, Xinjiang 830052 China;
3. Alar City Tiandian Agricultural Machinery Manufacturing Co. Ltd., Alaer, Xinjiang 843013 China)

Abstract: A vertical double-row chain residual film recovery machine was designed to address the problems of high contamination rate and poor utilization rate of residual film recovery in the current residual film recovery machine. The structure and working principle of the machine were introduced, and the key structure and parameters of the conveying device were analyzed. The kinematics and dynamics of the conveying and unloading process of the vertical double-row chain operation were studied. The operating parameters of the main working parts were determined by theoretical calculation, and the key factors affecting the performance of film recovery were obtained. The results showed that the optimum parameters affecting the film recovery performance were $86.08 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ of conveyor chain speed, $128.97 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ of unloading chain speed and 91.92° of transfer angle of conveyor chain. The film recovery rate was 86.3% and the trash rate was 36.57% under the optimum combination of parameters. The actual recovery rate of residual film under the optimal combination of parameters was 86.7% and the trash rate was 35.9% , which met the industry requirements.

Keywords: agricultural machinery; film residue recovery; double-row chain; conveying device

收稿日期:2022-10-07

修回日期:2022-12-08

基金项目:新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2020Q015);国家自然科学基金项目(52105278);新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-10)

作者简介:史增录(1986-),男,甘肃甘谷人,高级实验师,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究。E-mail:shizld@qq.com

通信作者:张学军(1966-),男,四川渠县人,教授,主要从事农田残膜污染治理技术与装备研究。E-mail:tuec@163.com

地膜覆盖技术因其具有增温、保墒、预防虫害、抑制杂草生长等益处在新疆等干旱及半干旱地区的农作物种植生产中得到了广泛应用^[1-3]。地膜使用过程中由于日照风化作用导致力学性能下降,且与作物根茬、土壤混杂在一起回收困难,大量地膜被残留在农田土壤中降低了土壤品质,已造成严重的农田生态污染问题^[4-5]。据统计,新疆地区地膜总覆盖面积达 340.5 万 hm^2 , 年地膜投入量超 20 万 t, 是我国残膜污染的典型地区, 促进残膜机械化回收、提高残膜回收利用率是有效治理农田残膜污染进而实现农业可持续发展的有效手段^[6-7]。

近年来,国内外学者针对残膜回收机械进行了大量研究,但由于国内外所使用的地膜力学特性差异较大,导致国外的残膜回收机械在我国不具备有效适用性。因此,研究适用于本土化地况的残膜回收机械是解决我国残膜污染问题的关键^[8-9]。目前我国的残膜回收机械主要有弹齿式、钉齿式、梳齿式、夹持式、链齿式、伸缩杆齿式等^[10-12],虽然农田残膜回收技术已经初见成效,但目前所回收的残膜仍然存在含杂率高、机收残膜回收再利用难度大等问题^[13-14],尚未形成残膜回收再利用的产业链,制约了农田残膜污染的有效治理。

为改善上述现状,重点解决秋收后棉田地表残膜回收时的含杂率高等问题,设计了一种垂直双排链式残膜回收机,通过垂直输送链及卸膜链的合理化布局充分延长膜土分离时间,在完成起膜、输膜、卸膜、集膜过程的同时可实现残膜-土壤-秸秆的有效分离,在保证残膜拾净率的同时有效降低含杂率,以提高机收残膜的再利用率,为农田残膜污染的有效治理提供技术与装备。

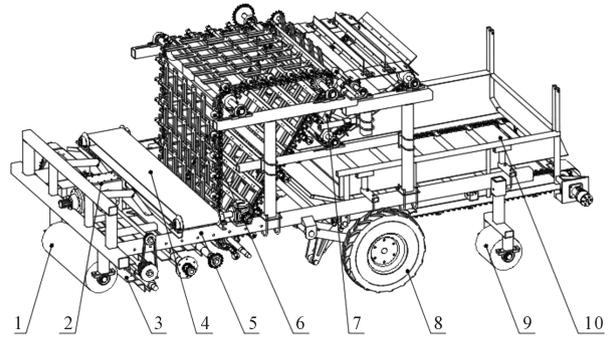
1 结构及工作原理

1.1 结构及主要参数

如图 1 所示,垂直双排链式残膜回收机主要由起膜抛送装置、限深辊、减速箱、杂质输送带、机架、垂直输送链、卸膜链、行走轮、集膜箱等组成,主要用于秋后棉花收获及秸秆粉碎还田后的残膜回收作业,其主要工作参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

工作时,起膜抛送装置将膜杂混合物抛起,在起膜抛送装置的抛送作用下完成初步杂质分离和输送^[15],随后膜杂混合物被垂直输送链上由钉齿带动依次完成垂直与水平输送过程,在此过程中完成二次膜杂分离,秸秆、土壤等杂质在垂直输送阶段靠自身重力掉落至横向输杂装置上被排至机具一侧,



- 1.限深辊;2.减速箱;3.起膜抛送装置;4.杂质输送带;5.机架;
6.垂直输送链;7.卸膜链;8.行走轮;9.限深轮;10.集膜箱
1. Depth limiting roller;2. Reducer box;3. Film starting device;
4. Impurity conveyor belt;5. Frame;6. Vertical conveying chain;
7. Film unloading chain;8. Walking wheel;
9. Depth limiting wheel;10. Film collection box

图 1 整机结构

Fig.1 Whole machine structure

表 1 主要工作参数

Table 1 Main working parameters

参数 Parameters	数值 Value
整机尺寸 Overall dimension/(mm×mm×mm)	5650×2250×2130
工作速度 Working speed/(km·h ⁻¹)	3~5
作业幅宽 Working width/mm	1250
拾净率 Recovery rate/%	80
拾拾土层深度 Pick up soil depth/mm	≤100
集膜箱容积 Volume of film collection box/m ³	0.81
配套动力 Matching power/kW	≥50

被水平输送的残膜运送至卸膜区,在卸膜板主动捋膜及刮膜板逆向卸膜的共同作用下完成卸膜过程,被卸下的残膜继续随卸膜链输送至末端后在重力作用下掉落至集膜箱,如此循环完成残膜连续回收作业。

垂直输送链与卸膜链相互配合工作,形成双排链回收机构,其结构如图 2 所示,在链条转向作用及卸膜导向板的共同作用下,位于卸膜区的钉齿在脱膜导向板的作用下转动与卸膜板之间形成一定夹角,钉齿相对卸膜板缩回进行主动卸膜,经过卸膜区的残膜在卸膜板自卸膜及刮膜板刮膜的共同作用下完成二次卸膜过程,有效提高卸膜率,降低含杂率,防止输膜过程中残膜脱落造成二次污染。

2 关键部件设计

2.1 输送装置的排布方式

2.1.1 钉齿及卸膜板排布 垂直双排链式残膜回收机主要适用于秋后棉花收获及秸秆粉碎还田后地表残膜回收作业,因此钉齿密度和数量是影响运

输过程中残膜及杂质运输效率的重要因素,钉齿排布过于稀疏会导致残膜漏输,排布过密则会导致运输过程中的秸秆、土壤等杂质不易掉落而使含杂率升高。结合大块残膜规格及整机尺寸的综合考虑,将钉齿设定为长度65 mm、粗端直径10 mm、细端直径6 mm的圆锥台,相邻钉齿之间间距为220 mm,每排设定钉齿与卸膜板数量为5;为提高主动卸膜效果,设定卸膜板为橡胶材质,其厚度为5 mm、宽度为80 mm、长度为220 mm,同时为避免从上一级钉齿中脱落的杂质掉落至下一级钉齿上被继续运输,设定相邻钉齿排之间的排列方式为交错排列,其排布方式如图3所示。

2.1.2 输送链转运角 输送链的转运角度排布方式如图4所示,图中CA段为升运段、AB段为平运段、BC段为卸膜段,由前期预实验已知当卸膜段BC倾角为 55° 时卸膜效果最佳,因此设定AB与BC之间夹角 $\alpha_2 = 55^\circ$,则输送链的分布可分为三种情况:在图4a中, $\alpha_1 > \pi/2$,升运段后倾,此时从上一级钉齿中脱落的杂质易掉落与下一级钉齿中,逐级积累易造成杂质堆积,造成含杂率升高;在图4b中, $\alpha_1 = \pi/2$,升运段竖直,此时位于升运段的钉齿逐级有效工作,由于钉齿的交错排布,在保证残膜合理输送的同时能有效避免残膜中杂质的堆积;在图4c中, $\alpha_1 < \pi/2$,升运段前倾,此时有利于杂质脱落,降低含杂率,但易导致拾取的残膜随杂质同时脱落,降低捡

拾率,致使机具作业性能降低。综上分析,选择将升运段设定为垂直排布能有效保证残膜回收机的作业性能,因此初步设定 $\alpha_1 = 90^\circ$,误差为 5° [16]。

2.2 输膜过程的力学分析

输膜过程中膜杂混合物组成及分布如图5a所示,其受力分析如图5b所示。

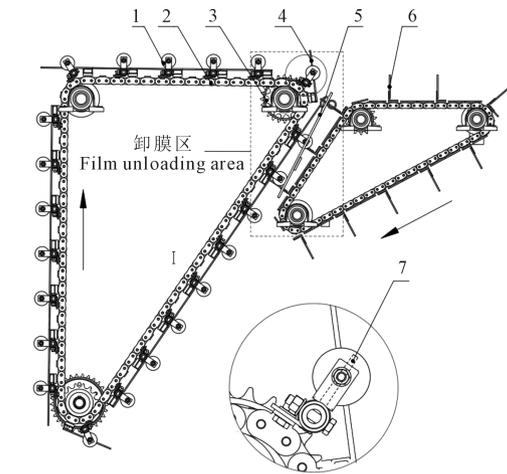
作业过程中,膜杂混合物依次经过起膜抛送装置、垂直输送链装置的起膜抛送、分离输送等过程,由于此时为膜杂抛送后的状态,因此忽略土壤粘结力影响,残膜在输送链上的受力主要为重力、钉齿摩擦力及支持力。为防止输送转运过程中残膜滑落的同时避免残膜断裂[17],应满足:

$$G \sin \alpha \leq f \tag{1}$$

$$f = F \cdot \mu \tag{2}$$

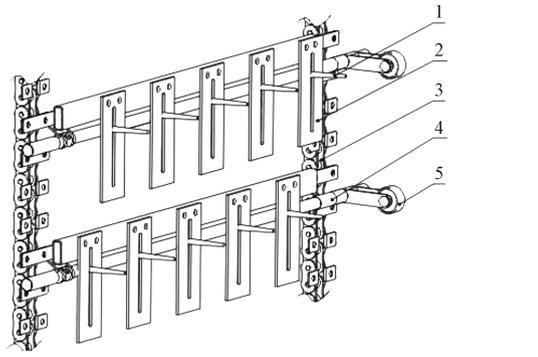
$$F = G \cos \alpha + F_a \tag{3}$$

式中, G 为膜杂混合物总重量(N); α 为此刻输膜链钉齿法向与垂直方向的夹角($^\circ$); μ 为钉齿与残膜混合物间的摩擦因数; f 为残膜混合物所受钉齿的摩擦力(N); F 为钉齿对膜杂混合物的支持力(N); F_a 为残膜自身张弛力(N)。

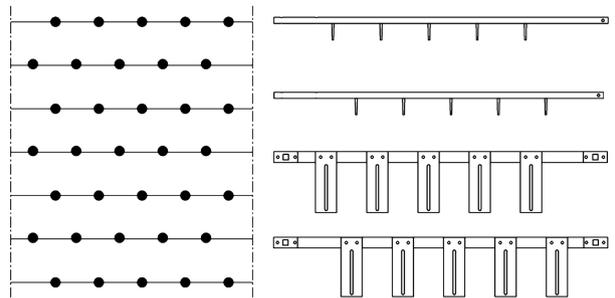


1. 导向辊;2. 链条;3. 链轮;4. 卸膜板;
5. 卸膜导向板;6. 刮膜板;7. 钉齿
1. Guide roller;2. Chain;3. Sprocket;4. Film unloading plate;
5. Unloading guide plate;6. Film scraper;7. Spike teeth

图2 垂直双排链机构
Fig.2 Double-row chain mechanism



(a)钉齿排布轴侧图 Axonometric diagram of nail teeth arrangement



(b)钉齿排布示意图 Diagram of nail teeth arrangement

1. 钉齿;2. 卸膜板;3. 链条;4. 钉齿杆;5. 导向辊
1. Spike teeth;2. Film scraper;3. Chains;
4. Spike tooth lever;5. Guide roller

图3 钉齿排布图

Fig.3 Nail teeth layout diagram

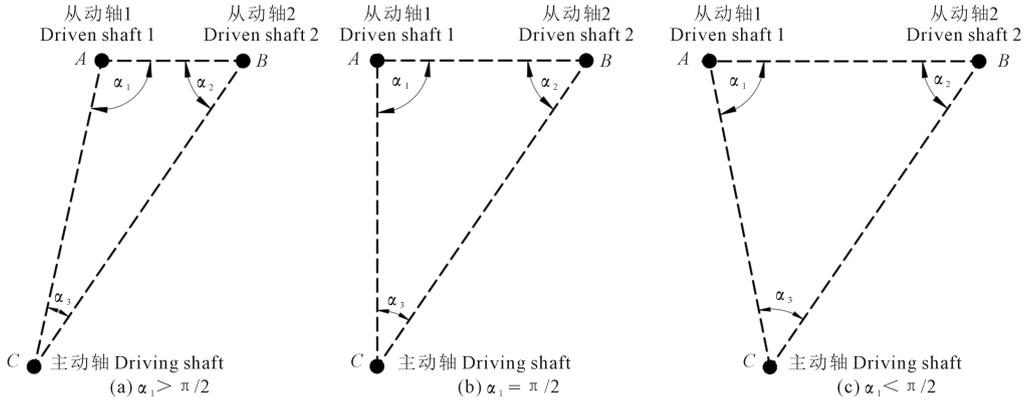
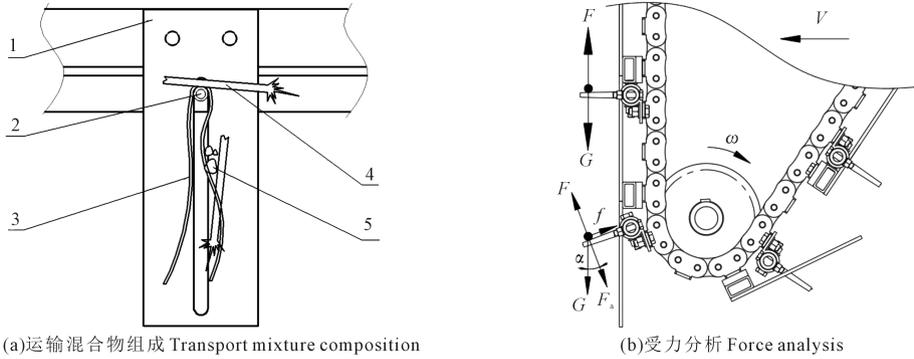


图 4 输送链转角
Fig.4 Conveyor chain transfer angle



1.卸膜板;2.钉齿;3.残膜;4.秸秆;5.土壤
1. Unloading film plate; 2. Nail teeth; 3. Residual film; 4. Straw 5. Soil

图 5 输膜过程力学分析

Fig.5 Mechanical analysis of membrane delivery process

联立式(1)、(2)、(3)可得:

$$F_a \geq \frac{G \cdot \sin \alpha}{\mu} - G \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

式中,膜杂混合物重量 G 、摩擦因数 μ 、钉齿法向与垂直方向夹角 α 为定值,因此残膜张弛力 F_a 可增大钉齿与残膜间的摩擦力,可有效避免残膜相对钉齿滑落。残膜在不发生塑性变形断裂的前提下,张弛力 F_a 的大小与其形变量有关^[17],而钉齿的转动速度是影响残膜形变量的主要因素,转动速度越高,残膜发生弹性变形的程度越大,当钉齿的结构参数一定的前提下,其转动速度受输膜链转速影响,因此对输膜链转速进行合理控制可有效提升残膜的输送、分离能力,满足残膜的可靠输送与分离要求。

2.3 输膜过程的运动学分析

膜杂混合物经起膜抛送装置抛至输膜链钉齿的过程可视为平抛运动,在此过程中,抛起的残膜混合物已经进行了初步分离,对输膜过程进行运动学分析如图 6 所示。

图 6 中起膜抛送装置对残膜混合物的作用可视为平抛运动,忽略空气阻力影响,此过程满足

$$v = \omega_1 R_1 \quad (5)$$

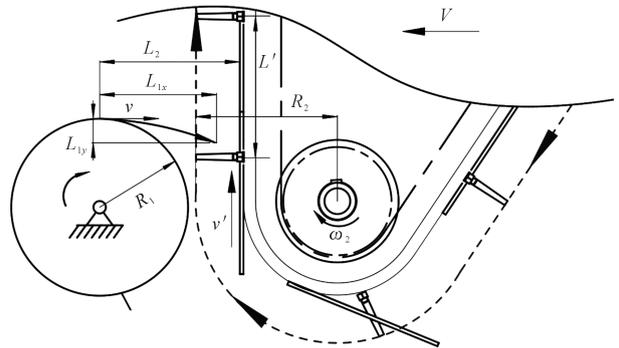


图 6 输膜过程运动学分析

Fig.6 Kinematic analysis of membrane delivery process

$$\omega_1 = 2\pi n_1 \quad (6)$$

$$L_{1y} = \frac{1}{2}gt^2 \quad (7)$$

$$L_{1x} = vt \quad (8)$$

式中, v 为混合物水平初速度 ($m \cdot s^{-1}$); ω_1 为起膜抛送装置旋转角速度 ($rad \cdot s^{-1}$); R_1 为起膜抛送装置回转半径 (m); n_1 为起膜抛送装置转速 ($r \cdot min^{-1}$); L_{1y} 为膜杂混合物垂直方向位移 (m); L_{1x} 为膜杂混合物水平方向位移 (m); t 为混合物运动时间 (s)。

由于该机主要应用于秋后地表大膜的回收,此时的残膜完整性高,接触面积大,力学性能好,容易被捡拾和运输,在一次起膜抛送过程中,只需有一组输膜链钉齿经过残膜混合物抛送落点区域,即可有效完成残膜的回收。因此,在起膜抛送装置的抛送过程中进行运动分析如下:

$$L' \leq v't' \tag{9}$$

$$v' = \omega_2 R_2 \tag{10}$$

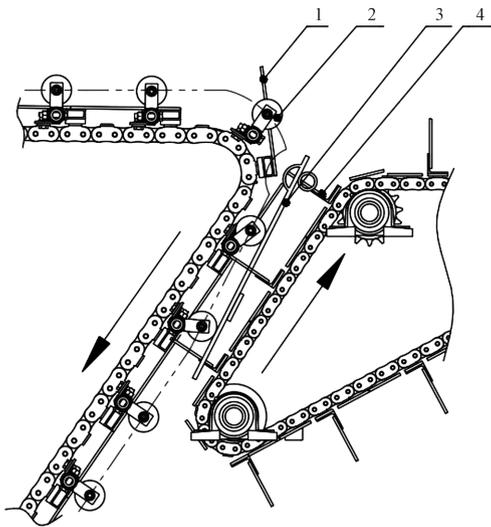
$$\omega_2 = 2\pi n' \tag{11}$$

式中, L' 为相邻输膜链钉齿组间距,取220 mm; v' 为钉齿转运线速度($m \cdot s^{-1}$); t' 为抛送过程总时间(s); ω_2 为输送链主动轴转动角速度($rad \cdot s^{-1}$); R' 为转运输送半径(m); n' 为输送链主动轴转速($r \cdot min^{-1}$)。

经计算可知,输送链主动轴转速 $n' \geq 81.68 r \cdot min^{-1}$,但当转速过快时会导致链传动振动加剧,使残膜在输送过程中掉落,导致输膜率降低,影响捡拾率,为防止输膜过程残膜掉落的同时提高机具效率,设定输送链主动轴转速为 $82 \sim 90 r \cdot min^{-1}$ 。

2.4 卸膜过程的分析

垂直双排链式残膜回收机的卸膜过程由卸膜板的主动捋膜及卸膜链的逆向卸膜共同作用完成,如图7所示,其中卸膜导向板采用与链条非平行方式排布,当输膜链将残膜输送至卸膜区时,导向辊受卸膜导向板安装方位的影响,相对卸膜板运动方向发生逆向转动,同时带动一组钉齿绕钉齿杆逆时针转动,由于卸膜板与输膜链为固定连接,卸膜板在卸膜过程中的运动规律不发生改变,因此实现钉



1.卸膜板;2.导向辊;3.卸膜导向板;4.刮膜板
1. Unloading film plate; 2. Guide roller;
3. Unloading film guide plate; 4. Film scraper

图7 组合式卸膜装置

Fig.7 Combined film unloading device

齿与卸膜板之间的相对运动,即钉齿向内缩回形成主动卸膜动作。与此同时,位于卸膜链上的刮膜板在卸膜区与钉齿做逆向平行运动,将完成主动卸膜动作后处于脱落临界位置的残膜反向刮刷并向后运输,完成被动卸膜过程。被动卸膜过程进行受力分析如图8所示。

卸膜时残膜主要受钉齿拉力、卸膜板吸附力、重力及刮膜板支持力影响,为使残膜能够有效被刮膜板刮卸,则其所受力应满足:

$$F_1 \geq G \cos \beta + F_2 \tag{12}$$

式中, G 为残膜重力(N); F_1 为刮膜板对残膜支持力(N); F_2 为残膜所受钉齿拉力、卸膜板吸附力等综合作用力(N); β 为卸膜链倾斜角($^\circ$)。

为实现卸膜板与刮膜板的共同卸膜,在卸膜链转轴处卸膜板与刮膜板开始接触,此时可视 F_1 为卸膜板于卸膜链旋转轴处离心力,据文献[18],刮膜过程中 $F_2 \approx 3G$,为确保刮膜效果,设 $F_2 = 4G$,则式(12)可转化为:

$$F_1 = m\omega^2 r \tag{13}$$

$$G = mg \tag{14}$$

$$F_1 \geq mg \cos \beta + 4mg \tag{15}$$

$$\omega > \sqrt{\frac{g \cos \beta + 4g}{r}} \tag{16}$$

$$\omega = 2\pi n \tag{17}$$

式中, ω 为卸膜链旋转轴转动角速度($rad \cdot s^{-1}$); n 为卸膜链旋转轴转速($r \cdot min^{-1}$); r 为卸膜的回转半径(mm),可视为卸膜链旋转轴半径与刮膜板高度之和。

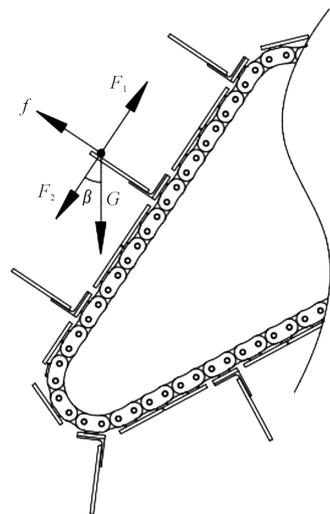


图8 卸膜过程受力分析

Fig.8 Force analysis in the process of unloading film

由式(13)~(17)可知,卸膜链转速与刮膜板高度对于刮膜过程受力情况有着重要影响,结合机具尺寸设定刮膜板高度为 100 mm,同时结合预实验设定卸膜链转速 125~135 r·min⁻¹。

3 田间试验

3.1 试验方案

垂直双排链式残膜回收机的输送装置工作性能受多个因素影响,为验证各因素对残膜回收效率的影响关系,试制了一台垂直双排链式残膜回收机物理样机,在阿克苏市 6 团双城镇进行田间试验,试验田为粘性土壤,采用一膜四行的棉花种植模式,0~10 cm 深度含水率为 15%~18%,残膜厚度为 0.01 mm,试验情况如图 9 所示。以输送链转速 X_1 、卸膜链转速 X_2 、输送链转运角度 X_3 为试验因素,以残膜拾净率 Y_1 、含杂率 Y_2 为指标进行 Box-Behnken 试验,试验因素水平编码如表 2 所示。

依据国家标准 GB/T 25412-2021《残地膜回收机》及行业标准 NY/T1227-2019《残地膜回收机作

表 2 试验因素及水平

Table 2 Test factors and levels

水平 Level	输送链转速 Conveyor chain speed X_1 /(r·min ⁻¹)	卸膜链转速 Film unloading chain speed X_2 /(r·min ⁻¹)	输送链转运角度 Conveyor chain transfer angle X_3 (°)
-1	82	125	85
0	86	130	90
1	90	135	95

业质量》,测定长度为 100 m,每组数据进行三次试验,对试验样品进行清洗、晾晒及称重等环节,并对残膜拾净率及含杂率进行计算。

3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,垂直双排链式残膜回收机作业的残膜拾净率均值为 80.26%,含杂率均值为 44.8%。对试验结果进行多元回归拟合分析,得出输送链转速、卸膜链转速、输送链转运角与拾净率及含杂率的回归模型,对模型进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,拾净率 Y_1 的回归模型极显著,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_{12} 对 Y_1 的影响极显著, X_2X_3 、 X_{12} 对 Y_1 的影响显著;含杂率 Y_2 的回归模型极显著,其中 X_1 、 X_3 、 X_{12} 、 X_{12} 、 X_{32} 对 Y_2 的影响极显著, X_2 、 X_1X_3 对 Y_2 的影响显著,去除不显著项,得到输送链转速 X_1 、卸膜链转速 X_2 、输送链转运角度 X_3 对残膜拾净率 Y_1 、含杂率 Y_2 的回归方程为:

$$Y_1 = 86.83 + 3.42X_1 - 2.68X_2 - 2.61X_3 - 3.31X_1X_3 - 2.39X_2X_3 - 11.49X_1^2 - 2.99X_2^2 \quad (18)$$

$$Y_2 = 38.12 + 2.84X_1 - 1.57X_2 - 6.94X_3 - 2.68X_1X_3 + 3.68X_1^2 + 4.75X_2^2 + 4.63X_3^2 \quad (19)$$

3.3 响应曲面分析

为直观分析各因素的交互作用对于各项评价指标的影响,通过 Design-Expert 软件绘制输送链转速、卸膜链转速、输送链转运角对拾净率及含杂率的响应曲面,如图 10 所示。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

试验号 Test No.	试验因素 Test factors			试验指标 Test index	
	输送链转速 Conveyor chain speed X_1	卸膜链转速 Film unloading chain speed X_2	输送链转运角 Conveyor chain transfer angle X_3	拾净率 Recovery rate Y_1 /%	含杂率 Impurity rate Y_2 /%
1	-1	0	-1	70.79	43.31
2	-1	0	1	77.60	54.42
3	0	-1	1	69.09	42.40
4	0	1	-1	71.90	46.08
5	0	0	0	69.34	48.30
6	0	0	0	84.82	57.62
7	0	1	1	70.12	40.58
8	-1	1	0	72.35	39.20
9	-1	-1	0	86.07	57.33
10	1	0	-1	83.85	52.36
11	0	-1	-1	86.25	39.31
12	1	0	1	74.46	41.00
13	1	1	0	86.59	40.46
14	0	0	0	88.13	37.59
15	0	0	0	85.57	37.10
16	0	0	0	85.26	39.32
17	1	-1	0	88.59	37.14

表 4 方差分析

Table 4 Variance analysis

来源 Source	拾净率 Recovery rate / Y_1				含杂率 Impurity rate / Y_2			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	903.34	9	30.14	<0.0001	793.16	9	25.93	0.0001
X_1	93.37	1	28.04	0.0011	64.58	1	19.00	0.0033
X_2	57.30	1	17.21	0.0043	19.63	1	5.77	0.0473
X_3	54.60	1	16.40	0.0049	385.31	1	113.37	<0.0001
X_1X_2	4.00	1	1.20	0.3093	13.80	1	4.06	0.0837
X_1X_3	43.89	1	13.18	0.0084	28.62	1	8.42	0.0229
X_2X_3	22.90	1	6.88	0.0343	11.09	1	3.26	0.1138
X_{12}	556.02	1	166.98	<0.0001	56.95	1	16.76	0.0046
X_{22}	37.68	1	11.32	0.0120	95.11	1	27.99	0.0011
X_{32}	5.85	1	1.76	0.2265	90.08	1	26.50	0.0013
残差 Residual	23.31	7			23.79	7		
失拟项 Lack of fit	14.41	3	2.16	0.2355	11.63	3	1.28	0.3960
误差 Error	8.90	4			12.16	4		
总和 Total	926.65	16			816.90	16		

注: $P<0.01$ 为极显著, $P<0.05$ 为显著。

Note: $P<0.01$ is highly significant, $P<0.05$ is significant.



图 9 田间试验

Fig.9 Field trials

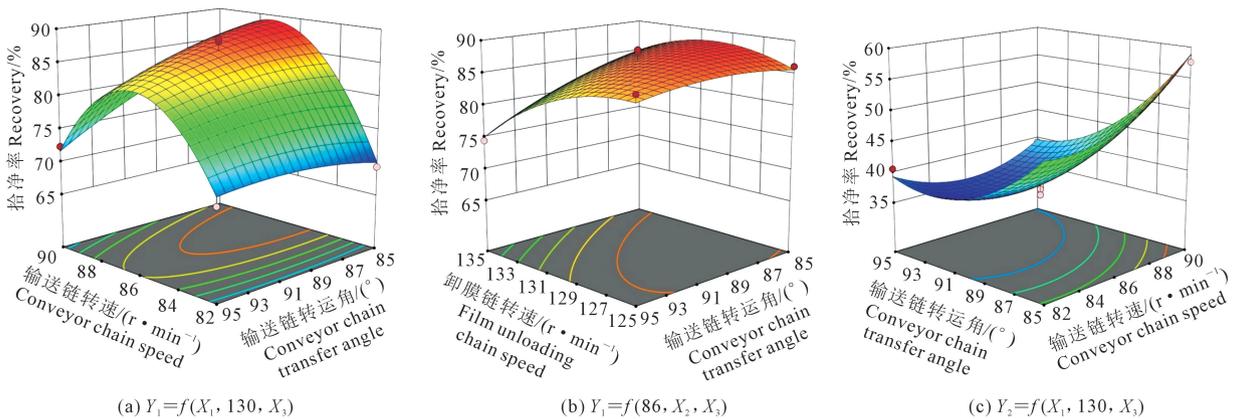


图 10 各因素交互作用对残膜回收性能的影响响应曲面

Fig.10 Response surface of the interaction of various factors on the performance of residual film recovery

由图 10a 可以看出,当输膜链转运角一定时,随着输送链转速的增加,残膜拾净率先增大后减小,具有显著的变化趋势;而随着输送链转运角的增加,残膜拾净率缓慢降低。由图 10b 可以看出,当输

送链转运角一定时,随着卸膜链转速增加,残膜拾净率先增加后减小,变化幅度显著;而随着输送链转运角的增加,残膜拾净率逐渐减小,变化趋势缓慢。由图 10c 可以看出,当输送链转速一定时,随着

输送链转运角的增加,含杂率先减小后增加,变化趋势显著;而随着输送链转运角增加,含杂率先减小后增加,变化趋势缓慢。

为得到影响垂直双排链式残膜回收机回收性能的最佳参数组合,以提高拾净率、降低含杂率为目标,对残膜回收的输送链转速、卸膜链转速及输送链转运角进行多目标优化分析,得到优化模型为:

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ 82 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq x_1 \leq 90 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 125 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq x_2 \leq 135 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 85^\circ \leq x_3 \leq 95^\circ \end{cases} \quad (20)$$

通过分析计算,得到最佳参数组合为:输送链转速 $86.08 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜链转速 $128.97 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、输送链转运角 91.92° ,此时残膜拾净率为 86.3%,含杂率为 36.57%。

3.4 验证试验

为验证优化结果,将最佳参数组合圆整为输送链转速 $86 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜链转速 $129 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、输送链转运角 92° 进行验证试验,试验结果如表 5 所示,在较优参数组合下的残膜拾净率为 86.7%,含杂率为 35.9%,满足国家行业作业标准的要求。

表 5 验证试验结果

Table 5 Validation test results

试验号 Test No.	拾净率 Recovery rate/%	含杂率 Impurity rate/%
1	86.7	35.8
2	86.3	36.2
3	87.1	35.8
平均值 Average	86.7	35.9

4 结 论

1)设计了一种垂直双排链式残膜回收机,并对其输送装置进行重点研究,介绍了其工作原理,对输送装置关键部件建立力学模型,对输膜和卸膜过程进行力学和运动学分析,得到了影响残膜回收性能的主要因素。

2)以输送链转速、卸膜链转速、输送链转运角为试验因素,以残膜拾净率及含杂率为试验指标进行响应面试验,并对试验结果进行优化,得到影响残膜回收性能的最佳工作参数为输送链转速 $86.08 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、卸膜链转速 $128.97 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、输送链转运角 91.92° ,最优参数组合下残膜拾净率为 86.3%,含杂率为 36.57%。

3)在最优组合下进行田间验证试验,得到垂直双排链式残膜回收机在较优参数组合下残膜拾净率为 86.7%,含杂率为 35.9%,优化模型得到的结果和验证试验结果一致,作业性能指标满足 GB/T 25412-2021《残地膜回收机》的技术要求。

参 考 文 献:

- [1] 李玉环,何新林,杨丽莉,等.不同残膜量对土壤盐运移及棉花生长发育的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(3):154-161.
LI Y H, HE X L, YANG L L, et al. Effects of different amount of residual film on soil water and salt transport and cotton growth and development[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 154-161.
- [2] 王海翼,李彦彬,王圆明,等.抛膜钉齿式残膜弧形起膜捡拾装置设计与田间模拟试验[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):209-218.
WANG H Y, LI Y B, WANG Y M, et al. Design and field simulation test of throwing film nail tooth arc picking up device for residual film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 209-218.
- [3] 杨扬,何文清.农田土壤微塑料污染现状与进展[J].环境工程,2021,39(5):156-164,15.
YANG Y, HE W Q. Research status and progress of microplastic pollution in farmland soil[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5): 156-164, 15.
- [4] 李开宇,杨宁,冯良山,等.地膜覆盖带来的残膜污染与解决对策[J].农机使用与维修,2019,(2):29-30.
LI K Y, YANG N, FENG L S, et al. Residual film pollution brought by mulching and countermeasures to solve the problem[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2019,(2): 29-30.
- [5] 刘海.地膜残留量对玉米及土壤理化性质的影响[J].甘肃农业科技,2017,(2):53-56.
LIU H. Effect of mulch residues on physical and chemical properties of maize and soil[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017, (2): 53-56.
- [6] 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 H J, NIU Q, JI C. Current status of and analysis on the mechanical technology of plastic film[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 145-153.
- [7] 金维政,颜越,刘倩,等.农用地膜污染现状与防治对策[J].南方农业,2018,12(14):182-183.
JIN W Z, YAN Y, LIU Q, et al. Current situation of agricultural land film pollution and prevention measures[J]. South China Agriculture, 2018, 12(14): 182-183.
- [8] 李伟,嵯冬玲,刘玉京,等.棉田残膜污染及机械化回收技术探讨[J].中国农机化学报,2017,38(1):136-140,145.
LI W, ZHUO D L, LIU Y J, et al. Discussion on remnant film pollution and mechanized residual film recovery technology in cotton fields[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 136-140, 145.
- [9] 梁荣庆,陈学庚,张炳成,等.新疆棉田残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 R Q, CHEN X G, ZHANG B C, et al. Problems and counter-

- measures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 1-13.
- [10] 赵岩, 郑炫, 陈学庚, 等. CMJY-1500 型农田残膜捡拾打包联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 1-9.
ZHAO Y, ZHENG X, CHEN X G, et al. Design and test of CMJY-1500 type plastic film residue collecting and balling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 1-9.
- [11] 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 J H, ZHANG F X, CHEN X G, et al. Design and parameter optimization of arc tooth and rolling bundle type plastic film residue collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 26-37.
- [12] 罗威, 王吉奎, 罗新豫, 等. 夹指链式残膜回收装置仿形及收膜机构的改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 27-35.
LUO W, WANG J K, LUO X Y, et al. Improved design and experiment of profiling and recycling plastic film mechanism for clamping finger-chain type device of recycling residual plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 27-35.
- [13] 李东, 赵武云, 辛尚龙, 等. 农田残膜回收技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 204-209.
LI D, ZHAO W Y, XIN S L, et al. Current situation and prospect of recycling technology of farmland residual film[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 204-209.
- [14] 孙岳, 简建明, 田玉泰, 等. 残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 304-310.
SUN Y, JIAN J M, TIAN Y T, et al. Analysis and experiment of filming mechanism of rotary film-lifting device of residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 304-310.
- [15] 周鑫城. 链齿耙式残膜回收机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
ZHOU X C. Design and experiment test of chain-rake type residual film recycling machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [16] 赵攸乐, 张学军, 靳伟, 等. 链齿耙式耕层残膜回收机捡拾机构的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 119-122, 127.
ZHAO Y L, ZHANG X J, JIN W, et al. Design of pick-up mechanism for the chain-teeth-rake topsoil incomplete plastic film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 119-122, 127.
- [17] 杨松梅. 随动式棉田残膜回收机设计及关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
YANG S M. Design and key technology research of passive cotton field residual plastic film recycling machine[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [18] 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 B, WANG J K, HU K, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 23-28.
-
- (上接第 237 页)
- [24] 杨丽, 刘海军, 唐晓培. 气候变化对河北省宁晋县夏玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 113-122.
YANG L, LIU H J, TANG X P. Effects of climate change on yield of summer maize in Ningjin County of Hebei Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 113-122.
- [25] 邵景安, 张仕超, 李秀彬. 山区土地流转对缓解耕地撂荒的作用[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 636-649.
SHAO J A, ZHANG S C, LI X B. The role of rural farmland transfer in preventing farmland abandonment in the mountainous areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 636-649.
- [26] 王珂, 孙景妍, 张杰琳, 等. 基于 GEE 的陕西关中西部耕地季节性撂荒时空变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 106-115.
WANG K, SUN J Y, ZHANG J L, et al. Spatiotemporal variation of seasonal abandoned farmland in the Western Guanzhong Plain of Shaanxi based on GEE[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(10): 106-115.
- [27] 李红梅, 范建忠. 关中夏玉米生育期气象干旱特征分析[J]. 陕西气象, 2015, (4): 1-5.
LI H M, FAN J Z. Analysis of meteorological drought characteristics in maize growth period in Guanzhong in summer[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2015, (4): 1-5.
- [28] 李凤, 李毅, 于强, 等. 1961-2019 年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律[J]. 陕西气象, 2020, (6): 23-29.
LI F, LI Y, YU Q, et al. Spatio-temporal evolution of extreme drought and flood events in Shaanxi Province from 1961 to 2019[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2020, (6): 23-29.
- [29] 邹伟, 吴群, 曲福田. 免征农业税对农户土地利用行为的影响——基于 14 省 25 县(市) 496 农户的调查[J]. 资源科学, 2008, 30(6): 932-938.
ZOU W, WU Q, QU F T. Influence of agricultural tax exemptions on farmers' land use behavior: based on a survey of 496 farmers in 25 counties (cities) in 14 provinces[J]. Resources Science, 2008, 30(6): 932-938.
- [30] 李林义, 康卫斌. 凤翔县破解玉米机械化收获瓶颈[J]. 农机科技推广, 2011, (9): 34.
LI L Y, KANG W B. Fengxiang county breaks the bottleneck of maize mechanized harvesting[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2011, (9): 34.
- [31] 许定国, 袁浩. 金融危机下陕西农民工的就业问题探析[J]. 经济研究导刊, 2009, (15): 113-114.
XU D G, YUAN H. An analysis of the employment of migrant workers in Shaanxi under the financial crisis[J]. Economic Research Guide, 2009, (15): 113-114.