doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.014

全膜双垄沟旋齿式残膜回收机设计与试验

潘海福[1]　赵武云[1]　戴　飞[1]　张仕林[1]　史瑞杰[1]　王久鑫[1]　马明义[2]　潘海宏[3]

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 定西 730500;
3. 甘肃省定西市渭源县田家河乡人民镇府, 定西 748202)

摘要: 甘肃全膜双垄沟播技术收获后大垄垄面和垄沟被板结覆土带覆盖,留茬高使得垄沟玉米根茬、须根与地膜相互交织造成残膜回收不彻底,导致土壤环境污染,影响作物根系生长和水肥运移。传统机型在该工况下存在含杂率高、地膜易缠绕、易壅土、垄沟地膜回收不彻底等问题,本文基于拨禾轮原理设计了一种全膜双垄沟旋齿式残膜回收机,实现残膜连续挑起、定向输送与膜杂分离。结合全膜双垄沟播技术种植农艺和残膜回收工况,确定了整机结构和关键部件参数,运用理论计算和数值分析,对挑膜装置、输膜装置、卷膜装置、膜杂侧输出装置等关键部件进行分析和参数设计,依照 Box－Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应面分析方法对机具作业参数进行优化,并进行试验验证。结果表明,最优参数为:机具前进速度为 1.5 m/s、挑膜深度为 105 mm、挑膜角速度为 15 rad/s,此时残膜回收率为 93.3%。

关键词: 全膜双垄沟; 旱区农业; 残膜回收机; Box－Behnken 试验

中图分类号: S223.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)12-0153-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Rotary-tooth Residual Film Recycling Machine with Whole Film Double Ridges and Furrows

PAN Haifu[1]　ZHAO Wuyun[1]　DAI Fei[1]　ZHANG Shilin[1]　SHI Ruijie[1]　WANG Jiuxin[1]
MA Mingyi[2]　PAN Haihong[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Gansu Taohe Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi* 730500, *China*
3. *People's Government of Tianjiahe Township, Weiyuan County, Dingxi City, Gansu Province, Dingxi* 748202, *China*)

Abstract: After the harvest of full-film double-ridge furrow planting technology in Gansu, the surfaces and furrows of the large ridges are covered with compacted soil layers. The high stubble height leads to the interweaving of corn stubble, fibrous roots and plastic film in the furrows, resulting in incomplete recovery of residual film. This not only causes soil environmental pollution but also affects crop root growth and the transport of water and nutrients. Traditional models under such working conditions have problems, including high impurity content, easy plastic film entanglement, prone to soil accumulation, and incomplete recovery of plastic film in furrows. Based on the principle of the reel, a rotary-tooth residual film recovery machine for full-film double-ridge furrows was designed, realizing continuous lifting, directional transportation and separation of residual film from impurities. Combined with the planting agronomy of the full-film double-ridge furrow planting technology and the residual film recovery working conditions, the overall structure and key component parameters of the machine were determined. Through theoretical calculations and numerical analysis, key components such as the film-picking device, film conveying device, film rolling device, and film-impurity side output device were analyzed and parameterized. According to the Box－Behnken experimental design principle, a three-factor three-level response surface methodology was adopted to optimize the operating parameters of the machine, and the optimization results were verified through experiments. The results showed that the optimal parameters

收稿日期: 2025－12－18　修回日期: 2026－01－06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701903)、甘肃省科技计划项目(25JRRA382)和国家自然科学基金项目(52065005、52365029)

作者简介: 潘海福(1997—),男,博士生,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究,E-mail: 18198029608@163.com

通信作者: 戴飞(1987—),男,教授,博士生导师,主要从事西北旱区农机-膜土-作物互作系统机理研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

were a machine forward speed of 1.5 m/s, a film-picking depth of 105 mm, and a film-picking rotational speed of 15 rad/s, with a residual film recovery rate of 93.3%.

Key words: full film double furrow; dryland agriculture; residual film recycling machine; Box - Behnken test

0 引言

我国西北地区大多数属于干旱半干旱地区,降雨量小于 500 mm,而蒸发量高达 1 400 mm,降雨主要集中 7—9 月,春季干旱少雨,是典型的雨养农业区[1]。覆膜种植具有维持土壤结构、保持土壤疏松,有助于防止土壤板结和改善光照条件,有效减少土壤水分蒸发,提高地表温度,有利于肥料腐蚀和分解,提高土壤肥力[2],尤其针对甘肃“十年九旱”雨养农业提出的全膜双垄沟播新型抗旱技术,可实现蓄水保墒、集流入渗、雨水富集叠加、保水保肥,增加地表温度、提高水肥利用率,对旱作玉米种植作用极为显著,能有效提高农作物产量和品质,保障了国家粮食安全和农民经济收入[3-8]。但随着使用量增大,作物收获后大量地膜遗留田间,造成土壤和环境污染,影响土壤水分渗透、含水率以及透气性,阻碍水肥运移和土壤板结,造成作物根系生长发育困难[9-10]。据研究统计,我国常年使用地膜覆盖种植区土壤残膜量为 60 ~ 90 kg/hm^2,文献[11 - 12]表明,当土壤残膜量达到 58.5 kg/hm^{2}时,会对作物根系生长和土壤水肥运移产生明显影响。

目前,残膜回收方式主要为人工捡拾和机械化回收,美、日、法以及以色列等多个发达国家机械化程度较高,并且国外普遍采用厚度 0.02 mm 以上的地膜,使用 1 年后地膜仍具有较强的韧性和抗拉强度,回收难度小[13-14],因此国外残膜回收机主要以卷膜回收方式为主。SAWYER 等[15]设计了卷膜辊式残膜回收机,由卷膜装置、驱动装置以及机架组成,结构较为简单,工作时,需要人工辅助将地膜一头缠绕在卷膜辊上,对地膜进行倒扯起膜,后将地膜收集到卷膜辊上,完成残膜回收工作。ROCCA[16]研究设计了一种先去除地膜表面杂质再进行残膜回收的机具,整机工作时,先通过松土装置对膜两侧松土,后通过链式输送装置进行膜面清理,最后通过卷膜辊对地膜进行缠绕收集,完成残膜回收工作。以色列研制了一种苗期卷膜式残膜回收机,通过液压马达驱动卷膜辊,匹配卷膜辊转速与拖拉机前进速度完成残膜回收工作[17]。日本研制了一种地膜侧边卷膜机,拖拉机挂接残膜回收机行走在地膜一侧,斜扯地膜将膜面杂质全部掉回土壤表面,减少残膜含杂率[17]。

国内残膜回收机主要分为:苗期残膜回收机、秋收后残膜回收机以及播前残膜回收机[18]。而目前现有机具中主要为秋后残膜回收机和播前残膜回收机,机型以弹齿式残膜回收机、滚筒式残膜回收机、链式残膜回收机、振筛式残膜回收机以及旋抛式耕层残膜回收机为主[19-20]。田辛亮等[21]设计了 4JSM - 2000A 型棉秆粉碎及搂膜联合作业机,并优化了弹齿入土深度、弹齿组数以及机具前进速度。王科杰等[22]研究设计了单组仿形搂膜机构,仿形地轮通过平行四杆结构与机架连接使地轮始终接触地面实现仿形,利用调节手柄调节搂膜弹齿入土深度。王旭峰等[23]研究设计了抛膜链齿输送式残膜回收机,采用刨膜辊刀起膜、抛膜辊刀抛送原理设计的残膜回收机,通过抛送起膜,配合链齿输送,实现残膜与土块分离,利用自动脱膜和刮板式脱膜机构完成卸膜,解决了残膜缠绕、卸膜难的问题。张攀峰[24]研究设计了旋耕钉齿式耕层残膜回收机,整机的核心部件为钉齿式起膜装置和脱膜装置。王久鑫等[8]优化设计了玉米全膜双垄沟残膜回收机,整机由起膜装置、偏心伸缩弹齿挑膜滚筒、残膜回收装置等组成,起膜装置中起膜单体具有仿形功能,实现了高效缠膜和便捷卸膜。申世龙等[25]设计了旋抛式耕层残膜回收机起挖装置,实现了耕层残膜回收机高效回收。

国外因地膜厚度标准与国内不同,残膜回收机结构简单,不适用于国内残膜回收作业[26]。国内弹齿式、链式、滚筒式、振筛式等残膜回收机分别存在回收率低、易缠膜壅土、成本高、膜杂分离难等问题[27-28],且现有机型多适配平作模式,适用于全膜双垄沟播特殊工况的机型较少。

针对垄作残膜回收率低、易壅土、缠绕以及对土壤扰动大等问题,本文采用拨禾轮结构设计旋齿式挑膜装置,通过平行四杆机构保证挑膜齿始终竖直向下,避免根茬缠绕;后经过输膜装置、卷膜装置和膜杂侧输出装置实现膜杂分离和集膜,完成垄作残膜回收作业。分析挑膜装置运动过程,得出挑膜齿运动轨迹方程,分析挑膜原理,计算输膜链轮转速和卷膜装置转速,解决输膜和卷膜过程撕膜漏膜问题。对样机进行田间试验,以检验残膜回收效果。

1 整机结构与工作原理

全膜双垄沟残膜回收机整机结构主要由旋齿式

挑膜装置、输膜装置、卷膜装置、液压卸膜装置、膜杂侧输出装置、传动系统、牵引装置以及机架等组成，如图 1 所示，设计参数如表 1 所示。

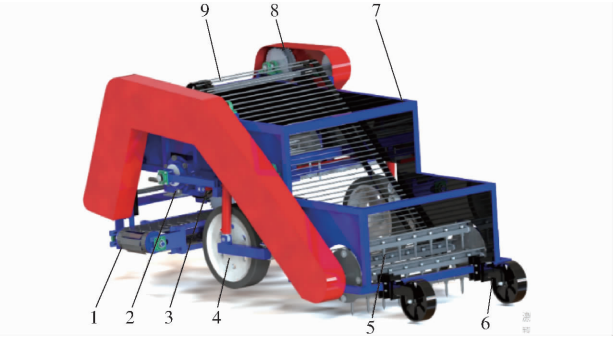

图 1　全膜双垄沟旋齿式残膜回收机结构图

Fig. 1　Structure diagram of full-film double-furrow spiral-tooth residual film recycling machine

1. 膜杂侧输出装置　2. 卷膜装置　3. 液压卸膜装置　4. 支撑轮　5. 旋齿式挑膜装置　6. 地轮　7. 机架　8. 传动系统　9. 输膜装置

表 1　残膜回收机主要设计参数

Tab. 1　Main design parameters of residual film recovery machine

参数	数值/形式
机具尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 050×2 035×1 830
挂接形式	牵引式
捡拾机构形式	旋齿式
配套功率/kW	36.8～51.5
工作幅宽/mm	1 200
工作速度/(km·h^{-1})	5.4
作业效率/(hm^2·h^{-1})	0.8～1.0

旋齿式全膜双垄沟残膜回收机采用拖拉机牵引形式，动力来源于拖拉机后动力输出装置，将动力通过万向连接轴传递到残膜回收机变速箱，变速箱一侧动力通过链传动传递到输膜装置，再传递到卷膜装置；另一侧动力通过链传动先传递到机架上方，再通过变速传递到挑膜装置；膜杂侧输出装置动力直接从变速箱传递，液压卸膜装置的液压缸油管通过快速接头直接与拖拉机后液压输出口连接。

拖拉机带动残膜回收机前进(从右向左)，如图 2 所示，旋齿式挑膜装置顺时针转动，挑膜齿在平行四杆机构控制下始终保持竖直状态扎入土壤，通过液压限深轮调节入土深度，确保挑起垄沟底部残膜。挑膜齿将残膜与部分土块、根茬一同挑起后，推压至输膜装置，输膜装置通过 45°安装角设计与钉齿/无钉齿链杆间隔布置，利用重力与振动作用实现膜杂初步分离，土块与细小根茬从链杆间隙掉落，地膜则被输送至顶端并掉落至卷膜装置，卷膜装置逆时针转动缠绕收集地膜，地膜表面杂质掉落至底部膜杂侧输出装置被输送至残膜回收机一侧。当卷膜辊直径达到设定值时，通过液压缸将卷膜辊从中间分离，回收的地膜卷掉落完成残膜回收工作。

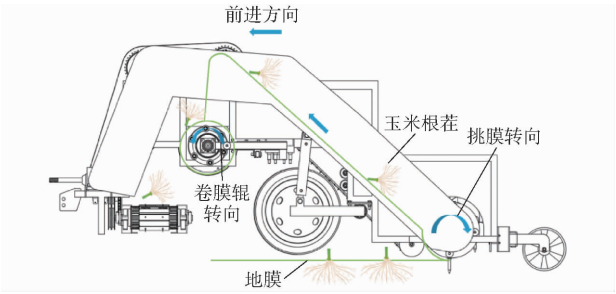

图 2　残膜回收过程示意图

Fig. 2　Schematic of residual film recovery process

根据挑膜装置挑膜原理和特性，挑膜装置挑起地膜后，地膜具有向前的惯性速度(与残膜回收机前进速度同向)，因此输膜装置呈 45°设置在挑膜装置前部，并且输膜装置下端低于挑膜轴，卷膜装置设置在输膜装置末端正下方。膜杂分离主要分为 3 级，首先为挑膜过程土壤自重分离，挑膜齿竖直运动减少土壤夹带和减少挑起根茬，大块土块在挑起过程自然脱落；其次为输膜过程振动分离，输膜装置链杆运动与 45°安装角使土块与细小根茬在重力与惯性作用下从链杆间隙掉落和输膜链表面滚落；最后为输膜链表面未掉落的杂质被输送至输膜链顶端后掉至卷膜辊，卷膜辊逆时针转动，将杂质排到膜杂侧输出装置输送至残膜回收机一侧。

2　关键装置

2.1　旋齿式挑膜装置

旋齿式挑膜装置为降低作业过程地膜缠绕并实现自动脱膜，参照偏心式拨禾轮结构设计，使挑膜齿始终处于竖直状态，主要由挑膜齿梁轴、挑膜齿、支撑盘、动盘、定盘、摇臂以及挑膜齿轴等组成，如图 3 所示，支撑盘和动盘构成平行四杆机构，挑膜装置在转动过程，支撑盘除公转外还受到动盘约束作平面平行运动，保证挑膜齿始终垂直入土，在确保地膜被挑起的同时减少对地膜损伤，避免挑膜齿上挂膜和缠膜现象，并减少根茬和土块夹带量。

挑膜齿长度是影响挑膜性能的重要参数，挑膜齿过短，则垄沟地膜未挑起造成漏膜现象，挑膜齿过长，则对土壤扰动较大，功耗也随之增加。根据全膜双垄沟农艺要求，小垄垄高 150～200 mm，大垄垄高 100～150 mm，经调研，由于作物经过一个生长周期，覆膜种床被踩踏和机具碾压，作物收获后垄高均小于 100 mm，如图 4 所示。因此，挑膜齿长度应大于等于 100 mm，为保证挑膜齿在最大垄沟深度条件下仍能扎入覆土层并挑起垄沟底部残膜，同时预留 20 mm 安全余量以补偿地表起伏和机具振动影响，确定挑膜齿最小有效长度为 120 mm。

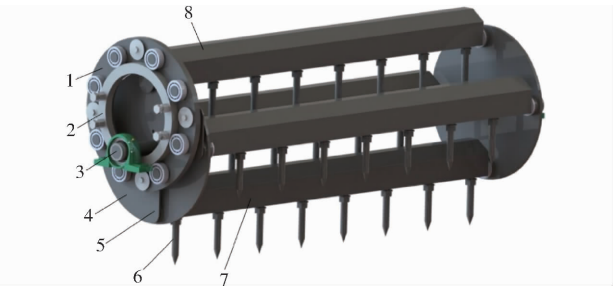

图 3 旋齿式挑膜装置示意图

Fig. 3 Schematic of spiral tooth film picking device

1. 动盘 2. 定盘 3. 挑膜齿轴 4. 支撑盘 5. 摇臂 6. 挑膜齿 7. 挑膜齿梁轴 8. 防缠绕护罩

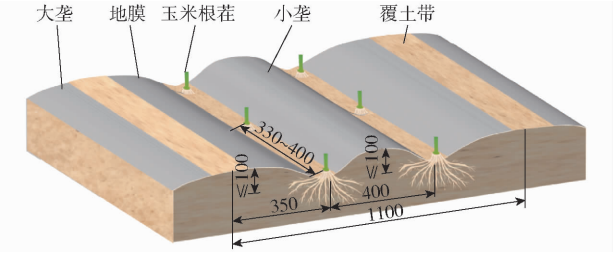

图 4 全膜双垄沟收获后垄形示意图

Fig. 4 Schematic of ridge shapes after harvest in full-film double-ridge furrows

为了便于更换和安装挑膜齿,挑膜齿一端设置有螺纹,通过螺栓固定在挑膜齿梁轴上。挑膜齿间距也影响挑膜效果,挑膜齿间距过大,则会造成漏膜现象,降低回收率,挑膜齿间距过小,作物秸秆和土壤相互影响,造成壅土现象,影响回收率和含杂率。铺设地膜时以小垄为中心两侧对称,2 幅地膜交接处为大垄垄面中心。为便于起膜,在满足全幅覆盖前提下,通过分析挑膜齿间距与漏膜风险及壅土倾向的关系,结合小垄宽 400 mm、大垄宽 700 mm 的农艺参数,挑膜装置与垄体位置关系如图 5 所示,2 个垄沟和大垄垄面边膜处均设置有挑膜齿,并尽可能避开根茬,因此挑膜齿间隔设定为 150 mm,工作幅宽 1 100 mm,每排均布设置 7 个齿。

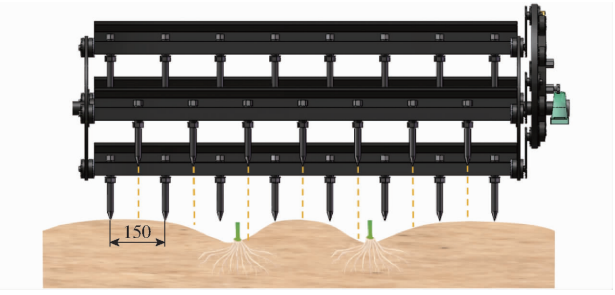

图 5 挑膜装置与垄体位置关系示意图

Fig. 5 Schematic of positional relationship between film-picking device and ridges

挑膜装置直径影响整机尺寸和输膜装置安装位置,挑膜装置直径太小,挑膜齿与挑膜齿轴易形成干涉,如图 6 所示,挑膜装置直径应满足

$$D \geqslant 2(a + l + r + 10) \tag{1}$$

式中 D——挑膜装置直径,mm

a——挑膜齿梁轴厚度,取 40 mm

r——挑膜齿轴半径,取 25 mm

l——挑膜齿长度,取 120 mm

计算得挑膜装置直径应大于等于 410 mm。

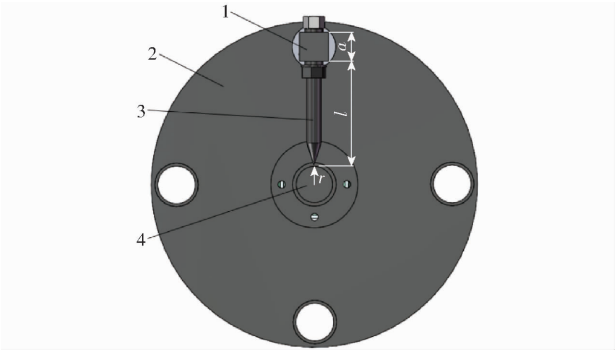

图 6 挑膜装置直径示意图

Fig. 6 Schematic of diameter of film-picking device

1. 挑膜齿梁轴 2. 支撑盘 3. 挑膜齿 4. 挑膜齿轴

工作时,挑膜齿尖运动轨迹由残膜回收机前进运动和挑膜装置自身转动组成,图 7 为挑膜装置中挑膜齿尖轨迹,设挑膜齿尖对应地面水平向右距离 R 为坐标原点,X 轴方向表示残膜回收机前进方向,Y 轴过坐标原点垂直于 X 轴,挑膜齿从一点运动到轨迹与圆相切,挑膜装置上某点轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_m t + R\cos(\omega t) \\ y = R + h - R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 v_m——残膜回收机前进速度,m/s

R——挑膜装置半径,m

ω——挑膜装置角速度,rad/s

h——挑膜齿向上运动距离,m

t——挑膜装置运动时间,s

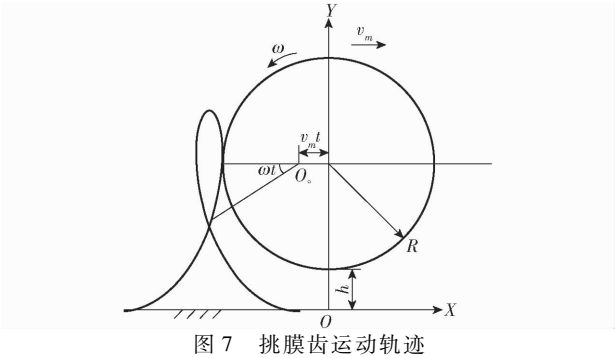

图 7 挑膜齿运动轨迹

Fig. 7 Pick film tooth trajectory

对式(2)求导可得挑膜装置水分速度和竖直速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_m - R\omega\sin(\omega t) \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = -R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

设挑膜装置圆周线速度为 v_b，残膜回收机前进速度为 v_m，挑膜装置速度比计算式为

$$\lambda = \frac{v_b}{v_m} = \frac{R\omega}{v_m} \tag{4}$$

挑膜装置上任意一点运动轨迹由挑膜装置速比 λ 决定，按照拨禾轮设计经验，λ 应大于 1，其运动轨迹为余摆线，计算挑膜装置转速，设定残膜回收机前进速度为 1.5 m/s，利用 RecurDyn 软件进行仿真试验，当挑膜装置角速度为 15 rad/s 时，轨迹如图 8 所示，λ = 1.65。

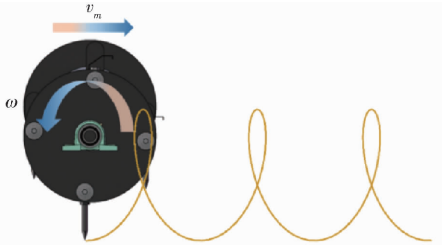

图 8　挑膜齿齿尖仿真轨迹

Fig. 8　Simulated trajectory of film-picking tooth tip

挑膜装置转速决定挑膜质量，转速过快，易撕碎地膜，功率消耗大，残膜回收机损耗大，转速过慢，功率消耗小，残膜回收机损耗也较小，但会产生转速过慢使得挑膜装置对地膜的惯性力太小而挑不起地膜，易造成漏膜现象。为防止撕膜和漏膜现象出现，应设计合理挑膜装置转速。

挑膜齿是挑膜装置的重要部分，不同挑膜齿将影响挑膜效果和入土性能，目前挑膜齿形状为普通锥形，挑膜工作时，挑膜齿先扎入土壤，旋转到最低点后，挑起地膜，挑膜齿受力分析如图 9、10 所示。

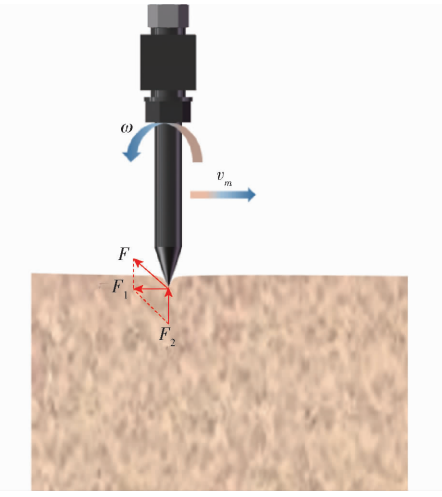

图 9　挑膜齿入土受力分析

Fig. 9　Analysis of force of tooth into soil

挑膜齿入土时速度可分解为水平向右和竖直向下，则受土壤对挑膜齿的竖直入土阻力 F_2 和挑膜齿水平阻力 F_1，所受合力为 F，挑膜齿出土时速度可分解为水平向右和竖直向上，则挑膜齿受水平阻力 F_3 和出土时土壤对挑膜齿的摩擦力 F_4。

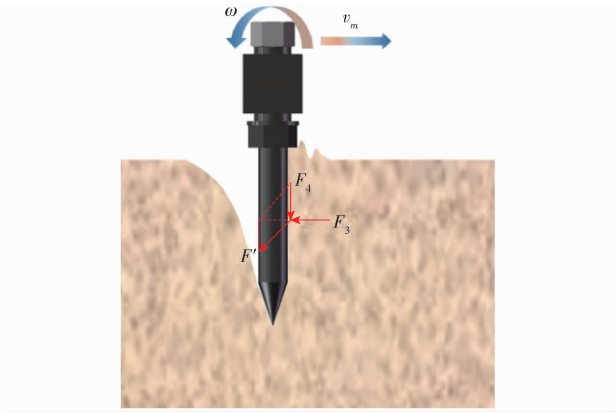

图 10　挑膜齿出土受力分析

Fig. 10　Excavation force analysis of picking film tooth

2.2　输膜装置设计

输膜装置是挑膜装置挑膜完成后进行地膜输送的关键部件，具有输送地膜和膜杂分离作用，主要由主动橡胶链轮、从动橡胶轮、托轮、链杆、橡胶带等组成，如图 11 所示。工作时，传动系统将动力传递到主动链轮轴，带动主动橡胶链轮转动，从而带动整个挂膜输送链工作。

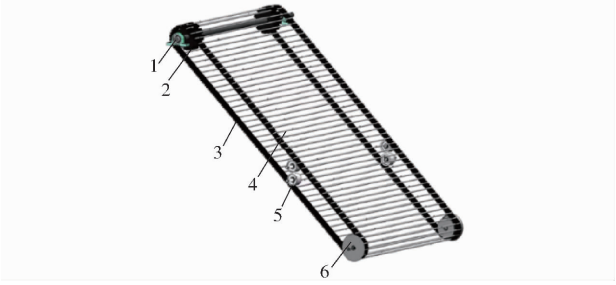

图 11　输膜装置结构示意图

Fig. 11　Structure diagram of film conveying device

1. 主动链轮轴　2. 主动橡胶链轮　3. 橡胶带　4. 链杆　5. 托轮　6. 从动橡胶轮

链杆分为有钉齿链杆和无钉齿链杆，如图 12 所示，输膜装置为了提高挂膜输送链输送能力，防止在输送过程地膜滑落，橡胶带上有钉齿链杆和无钉齿链杆间隔布置。如橡胶带上全部为无钉齿链杆，输膜过程会出现地膜滑落，降低输膜效率；如橡胶带上全部为有钉齿链杆，脱膜时地膜易缠绕，不利于后期卷膜收集，因此有钉齿链杆与无钉齿链杆间隔布置。

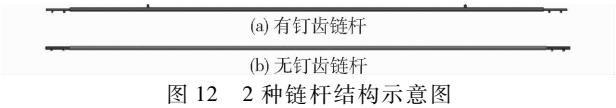

图 12　2 种链杆结构示意图

Fig. 12　Two kinds of chain rod structure diagrams

输膜时地膜中夹杂作物秸秆和土块，影响地膜回收利用，链杆间隙、挂膜输送链安装角度、机具工作过程的振动，使地膜表面的部分杂质掉落，降低含杂率。输膜装置安装角度根据动摩擦角设置，如

图 13 所示,安装角度太小膜杂分离效果差,安装角度太大地膜与链杆摩擦力减小,地膜容易滑落,输送效率降低,由于链杆选用钉齿链杆与无钉齿链杆组合,增大了地膜与输膜装置的摩擦因数,为减小含杂率,θ 应大于测定的摩擦角,取 $\theta=45°$。

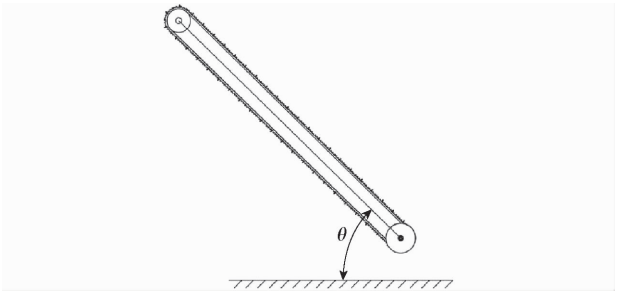

图 13 输膜装置安装角示意图

Fig. 13 Installation angle diagram of film conveying device

输送装置速度和安装角度均影响输送质量,输送装置速度过快,挑膜速度和残膜回收机前进速度较慢时,易造成撕膜扯膜现象,速度过慢易造成地膜堆积拥堵,降低回收率。输送链线速度应与残膜回收机前进速度相匹配,关系满足

$$v_d = v_m \tag{5}$$

其中

$$v_d = 2\pi r_d n_d \tag{6}$$

$$n_d = \frac{v_m}{2\pi r_d} \tag{7}$$

式中 v_d——输送装置线速度,m/s

r_d——主动橡胶链轮半径,m

n_d——主动橡胶链轮转速,r/s

残膜回收机前进速度 v_m 为 1.5 m/s,主动橡胶链轮半径 r_d 为 0.1 mm,为保证输膜顺畅,地膜在使用和挑膜过程中有一定拉伸,因此输送装置线速度应略大于残膜回收机前进速度,根据动力学设计原则,经计算得主动橡胶链轮转速 n_d 为 2.39 r/s,最终取 n_d 为 2.5 r/s。

2.3 卷膜装置与液压卸膜装置设计

卷膜装置和液压卸膜装置是残膜回收机收集装置,主要由安装机架、滑轮架、卸膜液压缸、卸膜套管、母收缩卷膜辊、子收缩卷膜辊、绕膜齿、卸膜盘、传动链轮、卷膜辊滑套、滑管等组成,如图 14 所示,传动系统将动力传递到传动链轮,传动链轮拨杆拨母收缩卷膜辊转动,母收缩卷膜辊与子收缩卷膜辊通过内外接头连接,带动子收缩卷膜辊转动,子母收缩卷膜辊上设置有绕膜齿,退膜架通过滚轮固定在卷膜辊滑套上,卸膜液压缸安装在卸膜管下方。工作时,传动系统带动子母卷膜辊转动,将输膜装置上输送的地膜缠绕在卷膜辊上,当卷膜辊达到一定直径后,卸膜液压缸顶动卸膜套管,使子母卷膜辊分离向相反方向运动,子母卷膜辊上的地膜被卸膜盘阻挡,从卷膜辊掉落,完成卸膜工作。

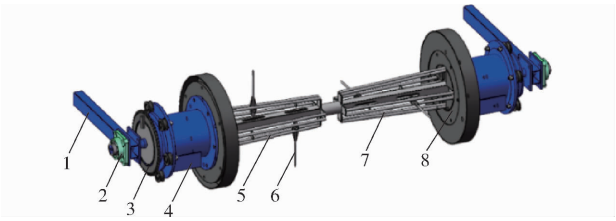

图 14 卷膜装置结构示意图

Fig. 14 Structure diagram of film rolling device

1. 卸膜支撑管 2. 轴承 3. 传动链轮 4. 固定支座 5. 子收缩卷膜辊 6. 卷膜绕齿 7. 母收缩卷膜辊 8. 卸膜盘

子母收缩卷膜辊组成的卷膜辊为了卸膜方便,设计为中部直径小,两端直径大。工作时,卷膜辊转速太慢,则收集不及时,将输送来的地膜掉落,造成漏膜现象,卷膜辊速度过快,会产生撕膜,使地膜碎片化不易收集,降低回收率。卷膜辊转速应满足

$$v_j = v_d \tag{8}$$

其中

$$v_j = 2\pi r_j n_j \tag{9}$$

$$n_j = \frac{v_d}{2\pi r_j} \tag{10}$$

式中 v_j——卷膜辊平均直径处线速度,m/s

r_j——卷膜辊平均半径,m

n_j——卷膜辊转速,r/s

卷膜辊平均半径 r_j 为 0.085 m,代入数据计算得 n_j 为 2.95 r/s。

卸膜装置动力来源于拖拉机后液压输出装置,通过快速接口连接,液压原理如图 15 所示。当需要卸膜时,将三位四通换向阀阀芯通过调节手柄向右移动,液压活塞杆伸出撑开,卸完地膜后,通过调节手柄将三位四通换向阀阀芯向左移动,液压活塞杆返回,完成工作。

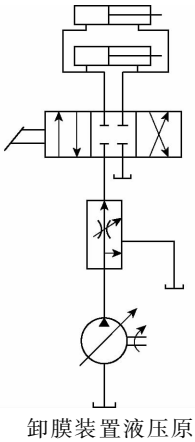

图 15 卸膜装置液压原理图

Fig. 15 Hydraulic principle diagram of film unloading device

2.4 膜杂侧输出装置设计

膜杂侧输出装置安装在卷膜装置下方,从输膜装置顶端以及卷膜辊卷膜时掉落的作物秸秆、土块

等杂质落到侧输送链上，然后侧输送链从残膜回收机的一侧输出杂质，由于输膜装置、卷膜装置安装在挑膜装置前方，如将杂质直接掉落在未回收的垄面，则影响挑膜装置挑膜和回收后残膜的含杂率，因此，膜杂侧输出装置可以清洁膜面。

膜杂侧输出装置主要由侧输出安装架、橡胶带、主动托轮、从动托轮、钉齿输杂链板、无钉齿输杂链板等组成，如图 16 所示。膜杂侧输出装置工作时，变速箱动力输出轴通过传动系统将动力传递到膜杂侧输出装置的主动托轮，主动托轮带动由橡胶带和输杂链板组成的膜杂输送带运动，将落到膜杂输送带的杂质输送至残膜回收机一侧，完成膜杂测输送工作。膜杂输送链线速度与输膜装置线速度相等，即主动托轮转速满足

$$v_c = v_d \tag{11}$$

$$n_c = \frac{v_d}{2\pi r_c} \tag{12}$$

式中　v_c——膜杂输送链线速度，m/s

n_c——主动托轮转速，r/s

r_c——主动托轮半径，取 0.07 m

经计算主动托轮转速 n_c 为 3.57 r/s。

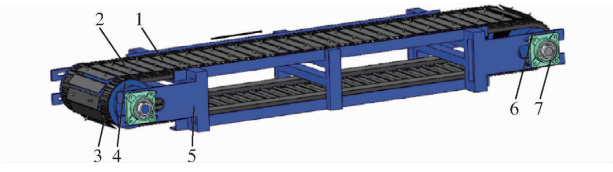

图 16　膜杂侧输出装置示意图

Fig. 16　Membrane stray side output device schematic

1. 钉齿输杂链板　2. 无钉齿输杂链板　3. 橡胶带　4. 从动拖轮　5. 安装架　6. 主动托轮　7. 安装轴承

3　传动系统

3.1　传动系统设计

全膜双垄沟残膜回收机工作时由拖拉机牵引前进，动力来源于拖拉机后输出轴，需对挑膜装置、输膜装置、卷膜装置、膜杂侧输出装置进行传动。而传动系统设计在残膜回收机设计中属于关键环节，良好的匹配传动能更好地发挥机具性能，保证机具可靠性和适用性，确保机具正常运转。

整机传动较为复杂，将动力传递、分配到各关键部件，传动设计示意如图 17 所示，动力经变速箱后分为 3 条：第 1 条为从变速箱后输出轴输出动力通过一级链传动传递到二级带传动，带动膜杂侧输出主动托轮转动。第 2 条为从变速箱动力输出轴一侧通过一级链传动和二级链传动分别传递到卷膜装置和输膜装置，带动卷膜辊和输膜链主动橡胶链轮转动。第 3 条由于传递距离较远，从变速箱动力输出轴另一侧通过四级链传动将动力传递到挑膜装置，带动挑膜装置转动。整个传动系统中，除了第 1 条传动的二级传动为带传动，其余均为链传动，设计第 1 条传动的二级传动为带传动是因为膜杂侧输出装置工作时，输送带上有作物秸秆和地膜，并且由于空间和工作环境，传动系统上无防尘罩，如果设计为链传动，则会将地膜和秸秆夹缠在链齿上，影响作业，而带传动刚好避免了这一问题。

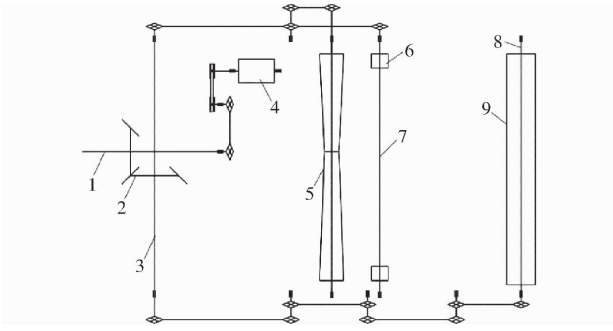

图 17　全膜双垄沟残膜回收机传动示意图

Fig. 17　Transmission schematic of full-film double-furrow residual film recycling machine

1. 动力输入轴　2. 变速箱　3. 动力输出轴　4. 膜杂侧输出主动托轮　5. 卷膜辊　6. 输膜链主动橡胶链轮　7. 输膜链主动橡胶链轮轴　8. 挑膜轴　9. 挑膜装置

3.2　传动系统工作参数确定

全膜双垄沟残膜回收机工作时，功率消耗主要集中在残膜回收机前进、残膜回收机工作阻力和传动损失等，则有

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3 \tag{13}$$

式中　N_T——残膜回收机所需总功率，kW

N_1——残膜回收机前进消耗功率，kW

N_2——残膜回收机工作阻力消耗功率，kW

N_3——传动损失功率，kW

由于传动损失功率很小，忽略后残膜回收机所需总功率可认为拖拉机对残膜回收机的牵引功率，即

$$N_0 = N_1 + N_2 = \frac{(F_a + F_b)v}{3\,600} \tag{14}$$

式中　N_0——残膜回收机牵引功率，kW

F_a——残膜回收机行走阻力，N

F_b——作业时土壤对挑膜齿的总阻力，N

v——残膜回收机作业速度，m/s

残膜回收机在田间残膜回收作业时，轮胎在地里受到的行走阻力 F_a 可估算为

$$F_a = 9.8\mu' M_0 \tag{15}$$

式中　μ'——轮胎滚动摩擦因数，取 0.15 ~ 0.30

M_0——残膜回收机质量，kg

旋齿式挑膜装置在挑膜作业时，土壤对挑膜齿

总阻力 F_b 主要包括挑膜齿与土壤摩擦力、土壤形变以及前进阻力，则根据土壤阻力计算公式得旋齿式挑膜挑膜齿所受的土壤阻力 F_b 为

$$F_b = n'(\mu_0 mg + Kh_1 d + \varepsilon h_1 dv^2) \tag{16}$$

式中 n'——扎进土壤中挑膜齿数量

μ_0——综合摩擦因数，取 0.3 ~ 0.5

K——与土壤变形、切割阻力有关的系数，取 2 ~ 4 N/cm^2

ε——与作业深度和实际工作幅宽有关的系数，取 4 000 N·s^2/m^4

h_1——作业深度，mm

d——挑膜齿直径，mm

m——单个挑膜齿受到土壤的正压力质量，kg

联立式(14) ~ (16)，代入数据得残膜回收机最大牵引功率 $N_0 \approx 26.5$ kW。

拖拉机效率 η_1 为 0.8 ~ 0.9，链传动效率 η_2 为 0.9 ~ 0.93[29]，计算得所需总功率 N_T 大于 36.8 kW。

全膜双垄沟残膜回收机工作时，拖拉机克服自身重力与土壤阻力所做的总功为

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{17}$$

式中 Q——拖拉机做的总功，J

Q_1——拖拉机牵引残膜回收机所做的功，J

Q_2——拖拉机驱动残膜回收机所做的功，J

残膜回收机作业时，假设残膜回收机作业速度保持恒定，在 t 时刻时，拖拉机牵引残膜回收机所做的功为

$$\begin{cases} Q_1 = F_q vt \\ F_q = \mu' M_0 g \end{cases} \tag{18}$$

式中 F_q——拖拉机牵引力，N

拖拉机驱动残膜回收机所做的功为

$$\begin{cases} Q_1 = n_0 Q_0 \\ n_0 = \dfrac{vt}{2\pi R} \\ Q_0 = \dfrac{2\pi M_0'}{zSh_1 d} \\ M_0' = F_0 R \end{cases} \tag{19}$$

式中 Q_0——比功，N·m

M_0'——转矩，N·m

z——旋齿式挑膜装置挑膜齿数量

S——相邻挑膜齿间的入土节距，mm

F_0——圆周力，N

旋齿式挑膜装置在作业时，有

$$\begin{cases} S = vt = \dfrac{2\pi R}{z\lambda} \\ \lambda = \dfrac{v_0}{v} \\ v_0 = \dfrac{\pi n}{30} \end{cases} \tag{20}$$

式中 v_0——挑膜齿圆周运动线速度，m/s

n——旋齿式挑膜装置转速，r/min

联立式(17) ~ (20)可得

$$Q = \mu' M_0 gvt + \frac{15F_0 v^2 t}{\pi^2 Rdh_1 n} \tag{21}$$

由式(21)可知，残膜回收机前进速度 v、旋齿式挑膜装置转速 n、挑膜齿作业深度 h_1 等工作参数和挑膜齿直径 d、旋齿式挑膜装置半径 R 等结构参数对残膜回收机作业有影响。

4 田间试验

通过前期对旋齿式全膜双垄沟残膜回收机整机设计与关键部件设计、理论计算，确定整机结构方案，对样机进行试制，参照文献[30 - 31]进行田间试验。

全膜双垄沟残膜回收机试制完成后，试验于 2023 年 10 月底在甘肃省临洮县甘肃洮河拖拉机制造有限公司试验田进行，试验条件如表 2 所示，试验所需设备有：雷沃 704 型拖拉机、JE3001 型电子秤、卷尺、样品袋、快速水分仪和推拉力计等。

表 2 田间试验条件

Tab. 2 Field experiment conditions

参数	数值
前茬作物	玉米
玉米品种	先玉 335
割茬高度/mm	193
根茬密度/(株·m^{-2})	8
地膜厚度/mm	0.01
地膜质量/(g·m^{-2})	180.5
平均土壤含水率/%	15
平均土壤坚实度/kPa	1 006

4.1 田间试验条件

试验时，将残膜回收机挂接好后，调节地轮液压推杆，使残膜回收机触土部件离开地面 100 ~ 150 mm，后运转残膜回收机，空转 10 min，无故障后将残膜回收机移至试验田。将选定的试验区域分为 5 组，每组工作幅宽根据全膜双垄沟幅宽为 1 100 mm，长度为 20 m。回收前，采用五点取样法选取 5 个测试点，每个测试点长 1 000 mm，宽 1 100 mm，先人工捡拾，确保无漏膜，残膜试样进行清洗晾干后装袋。随后进行残膜回收机回收作业，进行 5 组试验，当前一组试验后将卷膜辊上的地膜卸掉后再进行下一组试验，将回收后每组试验小区内随机选取 5 个测试点，每个测试点长 1 000 mm，宽 1 100 mm，将未回收干净的试样进行清洗晾干后装袋。然后称量记录数据。残膜回收机回收率计算式为

$$Y_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \tag{22}$$

式中　Y_1——残膜回收率，%

m_0——作业前人工捡拾残膜质量，g

m_1——作业后未回收干净残膜质量，g

4.2　响应曲面法试验

(1)试验方案设计

为了减少田间试验次数，采用 Box－Behnken 试验设计原理[32-33]，以机具前进速度、挑膜深度、挑膜角速度为试验因素，以地膜捡拾率 Y 为试验指标，根据农业机械作业速度要求，前进速度取 1.5、1.8、2.1 m/s，挑膜角速度与前进速度相关联，使挑膜齿齿尖轨迹为余摆线，挑膜角速度取 15、18、21 rad/s，挑膜深度根据图 4 所示作业工况，垄高小于等于 100 mm，挑膜深度取 80、100、120 mm，采用三因素三水平响应曲面分析法，建立各因素与捡拾率之间的数学模型，并分析各因素及其交互作用对捡拾率的影响。试验因素编码如表 3 所示，分别实施 17 组响应面分析试验，试验结果如表 4 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 3　试验因素编码

Tab.3　Test factors and coding

编码	因素		
	机具前进速度/(m·s^{-1})	挑膜深度/mm	挑膜角速度/(rad·s^{-1})
－1	1.5	80	15
0	1.8	100	18
1	2.1	120	21

表 4　响应曲面试验结果

Tab.4　Response surface test results

试验序号	因素			Y/%
	X_1	X_2	X_3	
1	0	0	0	93.0
2	0	－1	－1	87.0
3	0	－1	1	87.1
4	0	0	0	93.1
5	0	0	0	92.4
6	0	0	0	93.3
7	1	1	0	87.6
8	1	－1	0	86.9
9	1	0	1	91.3
10	0	1	1	92.5
11	－1	1	0	91.9
12	－1	－1	0	86.6
13	0	1	－1	88.2
14	－1	0	1	92.1
15	－1	0	－1	94.3
16	1	0	－1	87.2
17	0	0	0	93.4

(2)回归模型建立与检验

根据试验结果，对机具前进速度(X_1)、挑膜深度(X_2)和挑膜角速度(X_3)进行回归模型方差分析，结果如表 5 所示，得到 Y 二次回归模型为

$$Y = 93.04 - 1.32X_1 + 1.86X_2 + 0.912\,5X_3 - 1.48X_1X_2 + 1.57X_1X_3 + 0.8X_2X_3 - 1.17X_1^2 - 3.95X_2^2 - 0.645X_3^2 \tag{23}$$

表 5　回归方程方差分析

Tab.5　Analysis of variance of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	129.68	9	14.41	30.20	<0.000 1 **
X_1	17.70	1	17.70	37.10	0.000 5 **
X_2	19.85	1	19.85	41.60	0.000 4 **
X_3	4.96	1	4.96	10.40	0.014 6 *
X_1X_2	5.29	1	5.29	11.09	0.012 6 *
X_1X_3	9.92	1	9.92	20.80	0.002 6 **
X_2X_3	4.41	1	4.41	9.42	0.018 8 *
X_1^2	5.40	1	5.40	11.32	0.012 0 *
X_2^2	56.33	1	56.33	118.07	<0.000 1 **
X_3^2	1.96	1	1.96	4.11	0.082 2
残差	3.34	7	0.477 1		
失拟	2.73	3	0.909 2	5.94	0.059 0
误差	0.612	4	0.153 0		
总和	133.02	16			

注：** 表示差异极显著($P<0.01$)；* 表示差异显著($0.01 \leqslant P<0.05$)。

由表 5 可知，捡拾率二次回归模型 $P<0.000\,01$，表明回归模型极显著，失拟项 $P>0.05$，失拟不显著，说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符，能正确反映捡拾率 Y 与机具前进速度 X_1、挑膜深度 X_2 和挑膜角速度 X_3 之间的关系。其中 X_1、X_2、X_1X_3、X_2^2 极显著，X_3、X_1X_2、X_2X_3、X_1^2 显著，其他项不显著。根据模型各因素回归系数，得到各因素对捡拾率影响由大到小为 X_2、X_1、X_3，即挑膜深度、机具前进速度、挑膜角速度。

(3)模型交互项解析

根据试验所得各响应值的二次回归模型，得到机具前进速度、挑膜深度和挑膜角速度三因素不同交互作用对捡拾率的响应曲面，如图 18 所示。

由图 18 可知，残膜回收机前进速度与挑膜角速度交互作用对捡拾率的影响最显著，因为残膜回收机前进速度太快，而挑膜角速度过慢会造成漏膜现象，而残膜回收机前进速度太慢，挑膜角速度太快会造成撕膜现象，遗留地表的碎小地膜过多。挑膜深度与残膜回收机前进速度交互作用对捡拾率影响显著，但较小，因为全膜双垄沟垄体在经过中耕、收获等机具碾压和人踩踏，垄体高度小于 100 mm，因此

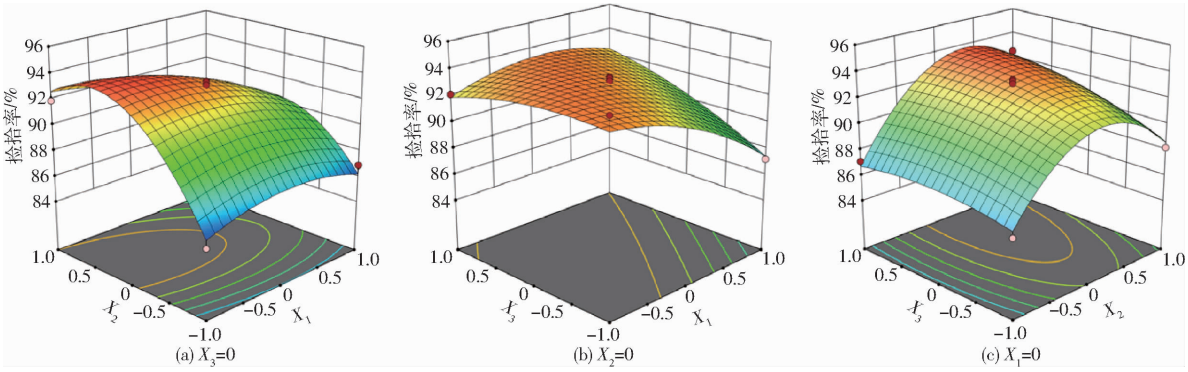

图 18 交互因素对捡拾率的影响

Fig. 18 Influence of interaction factors on pickup rate

挑膜深度太浅对残膜捡拾率的影响较小,挑膜太深会使地膜更完整,但挑起的土壤等杂质更多,不利于地膜输送和收集,反而降低捡拾率。

(4)最优工作参数确定

为进一步提升全膜双垄沟残膜回收机的作业性能,以捡拾率(Y)最大为优化指标,在各试验因素约束条件下,建立性能指标全因子二次回归方程[34]

$$\begin{cases} \max G(X) = Y(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

利用 Design-Expert 软件求解,可得最优工作参数为:机具前进速度为 1.51 m/s、挑膜深度为 108 mm、挑膜角速度为 14.4 rad/s。

4.3 最优参数验证

将最优参数圆整为机具前进速度为 1.5 m/s、挑膜深度为 105 mm、挑膜角速度 15 rad/s。田间试验如图 19 所示,试验前进速度基本稳定在 5.4 km/h,试验后回收效果如图 20 所示,试验完成后残膜收集效果如图 21 所示,人工收集试验结果如表 6 所示,残膜回收机试验结果如表 7 所示。



图 19 田间试验

Fig. 19 Field experiment

经参数优化后全膜双垄沟旋齿式残膜回收机平均回收率为 93.3%,均高于标准[30-31]技术要求,5 次重复试验残膜回收率标准差为 0.78%,表明试验结果具有良好的稳定性和重复性。

5 结论

(1)结合全膜双垄沟播技术农艺要求和残膜回



图 20 试验后回收效果

Fig. 20 Recovery effect after test



图 21 残膜收集效果

Fig. 21 Residual film collection effect

表 6 人工捡拾试验结果

Tab. 6 Manual picking test results

试验编号	试验值/g
1	182.1
2	175.9
3	179.6
4	189.1
5	176.5
平均值	180.5

表 7 残膜回收率试验结果

Tab. 7 Residual film recycling machine test results

试验编号	试验值/%
1	93.8
2	94.1
3	92.3
4	92.5
5	94.0
平均值	93.3

收工况，仿照拨禾轮结构设计了旋齿式挑膜装置，通过平行四杆机构保证挑膜齿竖直向下运动，有效解决了根茬缠绕与漏膜、壅土问题。

（2）对残膜回收机关键部件进行设计，确定了挑膜装置、输膜装置、卷膜装置、膜杂输出装置的设计参数和工作参数，依照 Box－Behnken 试验设计原理，以机具前进速度、挑膜深度、挑膜角速度 3 个因素进行响应面分析，对残膜回收机作业参数进行优化，并对最优参数通过试验验证。

（3）试验结果表明，最优参数为机具前进速度 1.5 m/s、挑膜深度 105 mm、挑膜角速度 15 rad/s，田间试验验证残膜回收率为 93.3%，符合国家标准。

参 考 文 献

[1] 潘海福，戴飞，史瑞杰，等. 基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 1)：78－86.
PAN Haifu, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Soil moisture modeling of corn full-film double ridge ditch sowing based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 78－86. (in Chinese)

[2] 周昌明，李援农，陈朋朋. 一次性施肥模式对覆膜夏玉米产量与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：329－337.
ZHOU Changming, LI Yuannong, CHEN Pengpeng. Effects of single application of fertilizer on yield and nitrogen utilization of mulching summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 329－337. (in Chinese)

[3] 戴飞，赵武云，张锋伟，等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报，2019，50(5)：1－16.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 1－16. (in Chinese)

[4] DAI F, SONG X F, ZHAO W Y, et al. Numerical simulation and analysis of mechanized suppression process of seedbed with whole plastic film mulching on double ridges[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(1): 142－150.

[5] DAI F, GUO W J, SONG X F, et al. Design and test of crosswise belt type whole plastic-film ridging-mulching corn seeder on double ridges[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(4): 88－96.

[6] 赵武云，戴飞，杨杰，等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报，2013，44(11)：91－97.
ZHAO Wuyun, DAI Fei, YANG Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91－97. (in Chinese)

[7] 史瑞杰，赵武云，戴飞，等. 全膜双垄沟膜面气流场与种床覆土互作过程模拟研究[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：40－51.
SHI Ruijie, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation of interaction between air flow field and soil seedbed covering on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 40－51. (in Chinese)

[8] 王久鑫，赵武云，刘小龙，等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(1)：119－128.
WANG Jiuxin, ZHAO Wuyun, LIU Xiaolong, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 119－128. (in Chinese)

[9] 王鑫，张涛，李树杰，等. 黑色全膜覆土马铃薯机械种植增产增效试验研究[J]. 中国农机化学报，2017，38(6)：89－93.
WANG Xin, ZHANG Tao, LI Shujie, et al. Experimental study on increasing yield and efficiency of mechanical potato planting with whole black film mulching technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 89－93. (in Chinese)

[10] 李荣，王敏，贾志宽，等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(2)：106－113.
LI Rong, WANG Min, JIA Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106－113. (in Chinese)

[11] 陈东城. 我国农用地膜应用现状及展望[J]. 甘蔗糖业，2014(4)：50－54.
CHEN Dongcheng. Application status and development of mulch film in China[J]. Sugarcane and Canesugar, 2014(4): 50－54. (in Chinese)

[12] 王艺君. 不同地膜覆盖对土壤理化性状及玉米产量的影响[D]. 银川：宁夏大学，2022.
WANG Yijun. Effects of different plastic film mulching on soil physicochemical properties and maize yield[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022. (in Chinese)

[13] SHAO Ziyi, XIAO Qingke, JIN M, et al. Environmental fate and effects of mulch films on agricultural soil: a systematic review from application to residual impact[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2026, 56(2): 43－66.

[14] XU Zechen, SHI Aiping, ZHANG Mingquan, et al. Design and testing of air-separation-type tillage layer residual film recovery machines[J]. Agri. Engineering, 2025, 7(8): 262.

[15] SAWYER A G, ROBERSON R L. Plastic sheet take-up implement: US 5236501[P]. 1993-08-17.
[16] ROCCA A R. Plastic mulch retriever: US 8302699B2[P]. 2012-11-06.
[17] JOHN L, MICHAEL B, ANDREWS B. The profitability of traditional and innovative mulching techniques using millet crop residues in the west African Sahara[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1998,67: 23-35.
[18] 胡凯, 王吉奎, 李斌, 等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24-32.
HU Kai, WANG Jikui, LI Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 24-32. (in Chinese)
[19] 蒋德莉,颜利民,陈学庚,等.纵向型钉齿链式地膜捡拾装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):267-281.
JIANG Deli, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Improved design and test of longitudinal nail-tooth-chain plastic film pickup device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):267-281. (in Chinese)
[20] 缑海啸,温浩军,陈学庚.二阶钉齿链板式残膜回收装置设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(19):1-11.
GOU Haixiao, WEN Haojun, CHEN Xuegeng. Design and test of the two-order pin-tooth chain plate type residual film recovery device[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(19):1-11. (in Chinese)
[21] 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 CSAE, 2018, 34(10): 25-35. (in Chinese)
[22] 王科杰, 胡斌, 罗昕,等. 残膜回收机单组仿形搂膜机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 12-20.
WANG Kejie, HU Bin, LUO Xin, et al. Design and experiment of monomer profiling raking-film mechanism of residue plastic film collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 12-20. (in Chinese)
[23] 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 等. 抛膜链齿输送式残膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 122-129.
WANG Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 122-129. (in Chineset)
[24] 张攀峰.旋耕钉齿式耕层残膜回收机的设计与试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学,2018.
ZHANG Panfeng. Design and test research of rotary tillage nail tooth rlastic film recycling machine[D]. Alar: Tarim University,2018. (in Chinese)
[25] 申世龙,张佳喜,王毅超,等.旋抛式耕层残膜回收机起挖装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(9):461-472.
SHEN Shilong, ZHANG Jiaxi, WANG Yichao, et al. Design and experimental of lifting device of rotary throw type topsoil residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9):461-472. (in Chinese)
[26] LAMONT W. The use of plastic mulches for vegetable production[J]. Food & Fertilizer Technology, 1991, 333: 1-7.
[27] 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 CSAE, 2020, 36(22): 76-86. (in Chinese)
[28] 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)
[29] 史明伟,王明刚,王伟,等.棉秆粉碎与残膜回收打包一体机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(12):397-406.
SHI Mingwei, WANG Minggang, WANG Wei, et al. Design and experiment of integrated machine for cotton stalk crushing and residual film recycling and baling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(12): 397-406. (in Chinese)
[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25412—2010:残地膜回收机[S]. 2010-11-10.
[31] 中华人民共和国农业农村部. DG/T 149—2021: 残膜回收机[S]. 2021-01-21.
[32] 戴飞, 赵武云, 马明义, 等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):83-90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):83-90. (in Chinese)
[33] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 20-30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20-30. (in Chinese)
[34] 史增录, 姚洁婷, 张学军, 等. 柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机设计与试验[J].农业机械学报, 2025, 56(11): 308-319.
SHI Zenglu, YAO Jieting, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of flexible nail teeth type residual film picking and strapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(11):308-319. (in Chinese)