

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.01.023

玉米大根茬作物倾角揉搓型残膜打包装置设计与试验

靳伟¹ 刘婧一¹ 姜涛¹ 何虎¹ 张朝书²

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 阿克苏天地机械制造有限公司, 阿克苏 843000)

摘要: 针对玉米根茬大且易缠附残膜, 从而导致膜卷打包成型难且易散开的问题, 设计了一种适用于玉米大根茬作物的倾角揉搓型残膜打包装置。通过对打包支撑架和打包空间进行设计与优化, 提高膜卷在打包过程中所受的摩擦力, 使膜卷更易打包成型。建立打包装置受力分析模型, 得出打包皮带表面摩擦因数越大、打包空间角度越小, 膜卷所受摩擦力越大, 残膜打包成包率与膜卷密度越高, 但前进速度过快会导致打包密度不均匀。利用 EDEM 离散元仿真分析打包皮带摩擦因数对成包率和膜卷密度的影响。通过田间试验与 Design-Expert 13 对试验参数进行分析与优化, 确定了影响成包率的主次顺序为打包皮带摩擦因数、打包空间角度、前进速度, 影响膜卷密度的主次顺序为打包空间角度、前进速度、打包皮带摩擦因数。优化后的理论最佳参数组合为: 前进速度 6.758 km/h、打包皮带摩擦因数 1.378、打包空间角度 55°, 在此条件下成包率达到 100%、膜卷密度为 131.835 kg/m³。在前进速度 6.8 km/h、打包皮带摩擦因数 1.38、打包空间角度 55°的参数组合条件下进行田间验证试验, 得出实际成包率为 100%, 膜卷密度为 127.31 kg/m³, 膜卷密度误差为 3.55%, 证实模型符合实际、满足作业要求。

关键词: 玉米; 残膜回收机; 打包装置; 优化分析; EDEM; 田间试验

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)01-0252-10 OSID: 

Design and Experiment on Tilting Angle Kneading Type Residual Film Baling Device for Corn Large Stubble Crop

JIN Wei¹ LIU Jingyi¹ JIANG Tao¹ HE Hu¹ ZHANG Chaoshu²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China
2. Aksu City Tiandi Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Aksu 843000, China)

Abstract: Aiming at the problem that corn stubble is large and easily entangled with residual film, which makes it difficult for film rolls to be baled and easy to be scattered, a tilting angle kneading residual film baling device suitable for corn stubble crops was designed. Through the design and optimization of the baling support frame and baling space, the friction force on the film rolls in the baling process was improved to make the film rolls easier to be baled. The force analysis model of the baling device was established. By analyzing and optimizing the experimental parameters through field tests and Design-Expert 13, it was determined that the primary and secondary orders affecting the bale formation rate were baling belt friction coefficient, baling space angle and forward speed, and the primary and secondary orders affecting the film roll density were baling space angle, forward speed and baling belt friction coefficient. The optimized theoretical best parameter combinations were forward speed of 6.758 km/h, baling belt friction coefficient of 1.378, baling space angle of 55°, under which can be concluded that the bale formation rate reached 100%, the film roll density was 131.835 kg/m³. Under the condition of advancing speed of 6.8 km/h, the pattern of baling tape was a word pattern ($\mu = 1.38$), and the baling space angle was 55°, the actual bale formation rate was 100%, the density of film rolls was 127.31 kg/m³, and the film roll density error was 3.55%, which confirmed that the model was in line with the actual situation, meeting the operational requirements, and providing practical basis for the technological innovation of residual film recycling.

Key words: corn; residual film recovery machine; baling device; optimization analysis; EDEM; field test

收稿日期: 2025-05-28 修回日期: 2025-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005425)和新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02011-1)

作者简介: 靳伟(1987—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: jwnice007@163.com

0 引言

当前,新疆地区玉米种植模式为铺膜滴灌^[1],通过国家统计局^[2]与新疆维吾尔自治区农业农村厅的统计数据可知,2024 年中国玉米种植面积为 $4.474\,07 \times 10^7\text{ hm}^2$,新疆地区玉米种植面积约为 $1.667 \times 10^6\text{ hm}^2$ 。地膜年使用量从 1981 年的 $6 \times 10^3\text{ t}$ 增长到 2021 年的 $1.32 \times 10^6\text{ t}$ 。

中国长期使用的地膜为超薄地膜,其材质是聚乙烯或聚氯乙烯^[3-5],地膜厚度仅为 0.01 mm,在使用过程中,随着覆盖时间增加,地膜会在紫外线照射、化学物质侵蚀等因素的共同作用下逐渐风化,其力学特性也逐渐变差,且会产生一定程度破损,加之玉米根茬对地膜机械性破损,造成了地膜难以回收利用的问题,因此多年使用的地膜没有完全回收,对农田周围造成了“白色污染”^[6-9],新疆是受污染最严重的地区,长期覆膜农田地膜残留量为 42 ~ 540 kg/hm²,平均残留量高于 200 kg/hm²,需要通过人工干预的方式解决残膜污染问题^[10]。机械化的残膜回收机对解决残膜污染问题具有积极影响,但根据实际调研,发现在残膜回收机打包过程中出现玉米根茬等杂质较多,使得残膜不易打包成型;且人工经验不足导致卸膜时机的错误把控,打包带易产生塑性变形等问题。

国内外学者对残膜回收打包机进行大量的研究,其中石河子大学王征等^[11]设计了双三角形结构的带式残膜揉搓打包机,研究发现残膜包密度与打包带的张紧度成正比。甘肃农业大学刘小龙^[12]设计了由 8 个卷膜辊组成的半包围无轴卷捆式集膜器,能实现玉米茬地膜打捆作业,平均残膜回收率达 84.9%。新疆农业大学张学军等^[13]基于钢辊圆捆式残膜捡拾打包机打包过程中易打滑、打包不成型的问题,设计了八边形钢辊打包装置,提高了残膜打包成型的效率并且适用于玉米大根茬作物,使成捆率达到 98.4%。WANG 等^[14]为解决河西灌区玉米地残膜难以大面积回收的问题,设计了能提起膜高度和切割玉米茬的双翼单叶片铲、偏心齿移缸等,使残膜回收率达到 92.56%,残膜含杂质为 16.65%。目前关于玉米大根茬作物残膜打包装置相关研究相对较少,多为卷膜辊组成的圆捆残膜打包装置,适用于玉米大根茬作物的带式倾角揉搓型残膜打包装置研究相对较少。

本文以新疆玉米种植区为例,选用残膜回收打捆与秸秆粉碎还田联合作业机(简称残膜回收机)作为试验对象,针对在玉米地杂质多打包不易成型和打包带发生塑性变形等问题,设计一套玉米大根

茬作物残膜打包装置。残膜与杂质的混合物通过揉搓在前打包机构与后打包机构之间的打包空间中形成膜卷,同时,在打包架上安装加强梁并优化打包空间,保证打包带在作业过程中最大形变量在其弹性限度范围内。打包装置安装在残膜回收机尾部,将回收的残膜打包成卷,便于运输和后续处理,以期减少地膜种植造成的“白色污染”。

1 残膜打包装置结构与工作原理

1.1 整机结构与工作原理

残膜回收打捆与秸秆粉碎还田联合作业机主要由悬挂机构、起膜装置、秸秆还田输送带、运膜钉齿带、脱膜机构、残膜打包装置、车轮等部分组成,如图 1 所示。

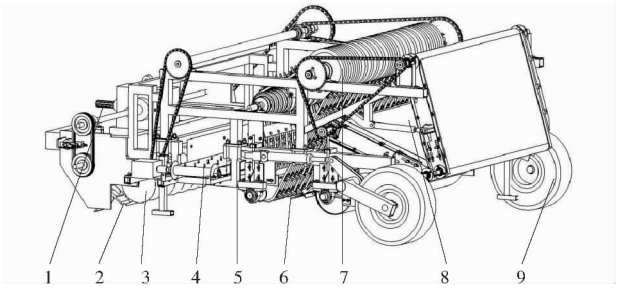


图 1 残膜回收打捆与秸秆粉碎还田联合作业机结构示意图

Fig. 1 Combined operation machine for residual film recycling and straw crushing and returning to field

1. 悬挂机构 2. 起膜滚刀 3. 粉碎机构 4. 秸秆还田输送带
5. 机架 6. 运膜钉齿带 7. 脱膜机构 8. 残膜打包装置 9. 车轮

残膜回收机由悬挂机构与拖拉机相连接,当拖拉机启动时,依靠拖拉机动力输出轴与残膜回收机动力输入轴连接,再经过链传动、带传动和齿轮传动等传递动力使残膜回收机能够正常工作。机具向前匀速工作,起膜滚刀将 100 mm 内土壤中的残膜铲起,使土壤与残膜处于蓬松状态。部分玉米根茬经过粉碎机构的粉碎受离心力与重力的影响落到残膜表面。残膜再由运膜钉齿垂直向上勾起,残膜表面上被切碎的玉米根茬落到下方物料输送带,经物料输送带传递到工作区域外的土壤上,实现机械化还田。运膜钉齿带上的残膜通过脱膜机构落入残膜打包装置内的打包空间,残膜经过揉搓被打包成膜卷。当膜卷足够大时,通过液压油缸控制残膜打包装置的后打包机构打开,使膜卷掉落。残膜回收机的主要技术参数如表 1 所示。

1.2 倾角揉搓型打包装置结构与工作原理

残膜打包装置主要由齿轮传动机构、前打包机构、后打包机构、油缸等组成,而前打包机构与后打包机构都分别由打包支撑架、主动辊、从动辊、打包

表 1 残膜回收机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of residual film recycling machine

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	6 170×2 850×1 850
工作幅宽/mm	2 000
前进速度/(km·h ⁻¹)	4~8
膜卷密度/(kg·m ⁻³)	85~135
残膜成包率/%	100

皮带、挡膜板等部分组成,如图 2 所示。前打包机构与后打包机构的打包皮带由主动辊与从动辊撑起,打包皮带由两个辊子相互压紧。

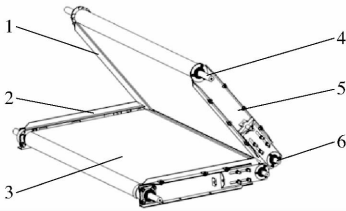


图 2 前后打包机构结构示意图

Fig.2 Schematic of front and rear packing mechanism structure

1.后挡膜板 2.前挡膜板 3.打包皮带 4.主动辊 5.打包支撑架 6.从动辊

残膜打包装置由拖拉机与链传动提供动力,从动辊通过带传动获得动力,使前打包机构与后打包机构的打包皮带均进行顺时针运转,处在打包空间内的物料会受到 2 个不同方向的摩擦力 f_{31} 、 f_{32} 。使残膜通过揉搓形成长条,再随着膜杂混合物的增多长条逐渐揉搓成卷,实现膜杂混合物打包成型,如图 3 所示(注: v 为打包带线速度,m/s; f_{31} 为前打包带与膜卷间的摩擦力,N; f_{32} 为后打包带与膜卷间的摩擦力,N)。当膜卷尺寸与质量足够大时,液压油缸控制残膜打包装置打开,膜卷受重力影响掉落,完成一次打包工作。

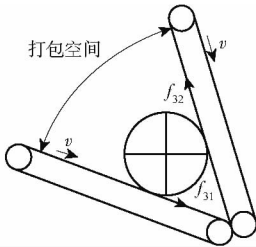


图 3 残膜揉搓打包原理图

Fig.3 Schematic diagram of residual film kneading and baling

2 主要部件设计与参数确定

2.1 打包支撑架设计

残膜打包装置用于接收膜杂混合物并将其打包

成卷。根据实际工作要求,为方便后续收集,膜卷应尽量卸在农田两侧。由于新疆玉米种植区面积大,且玉米大根茬极易与残膜相互缠绕,玉米地中残膜含杂率高于其他作物种植区残膜含杂率。玉米地中回收一行的膜卷质量高于其他作物种植区回收一行的膜卷质量。为了适应玉米大根茬地的残膜回收工作,设计了一种稳固性更高且具备打包皮带过度形变防护功能的打包支撑架,延长使用寿命。

残膜打包装置实际残膜收获宽度为 2 000 mm,3 个加强梁均匀分布在打包支撑架中,间隔为 240 mm。在与定位边板装配过程中,发现打包支撑架过长不易加工,因而长度缩短为 920 mm。经过测试与实际加工装配可以得知:①设计的 3 个加强梁与间隔距离能够保证打包皮带工作过程中的变形量一直处在弹性限度内。②打包支撑架的长度优化使加工过程更加便利,其两侧加装了挡膜板,防止残膜通过打包皮带与打包支撑架间的缝隙进入打包装置内部与加强梁缠绕,提高了残膜打包装置的工作性能。打包支撑架结构如图 4 所示。

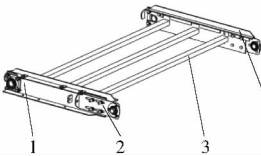


图 4 打包支撑架结构示意图

Fig.4 Packing support frame structural diagram

1.支撑边板 2.定位边板 3.加强梁 4.挡膜板

图 5 为打包皮带形变分析,由图 5a 知 AD 为打包皮带发生弹性形变变形前的形态, $AB-BC-CD$ 为打包皮带发生弹性形变变形后的形态,由图 5b 所示得知 l_1 增长到 l'_1 得到 AB , l_2 等于 l'_2 为 BC ,由 l_3 增长到 l'_3 得到 CD ,由《材料力学》^[15] 可以得出打包皮带的极限弹性形变量 $\sigma_{\max}$ 为

$$\sigma_{\max} = \frac{FL}{ES}$$

(1)

式中 F ——打包皮带受到的力,N
 L ——打包皮带总长,m
 E ——打包皮带弹性模量,N/m²
 S ——打包皮带截面积,m²

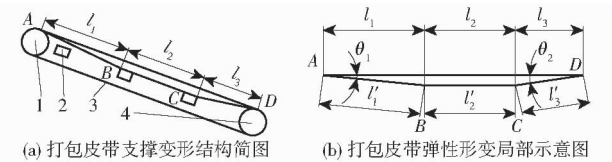


图 5 打包皮带形变分析图

Fig.5 Packing belt deformation analysis diagrams

1.主动辊 2.加强梁 3.打包皮带 4.从动辊

根据图 4 打包支撑架结构确定打包皮带总长 L

为 1 310 mm、宽为 2 000 mm,现有打包皮带的厚度为 5 mm,打包皮带截面积 S 通过计算确定为 0.01 m^2 。打包皮带发生弹性形变的实际变形量 σ 为

$$\sigma = l'_1 + l'_2 + l'_3 - (l_1 + l_2 + l_3) \tag{2}$$

即
$$\sigma = \frac{l_1}{\cos\theta_1} + \frac{l_3}{\cos\theta_2} - l_1 - l_3 \tag{3}$$

式中 l_1 ——AB 段弹性形变前的长度,mm
 l_2 ——BC 段弹性形变前的长度,mm
 l_3 ——CD 段弹性形变前的长度,mm
 l'_1 ——AB 段弹性形变后的长度,mm
 l'_2 ——BC 段弹性形变后的长度,mm
 l'_3 ——CD 段弹性形变后的长度,mm
 θ_1 ——AB 段的形变夹角, (°)
 θ_2 ——CD 段的形变夹角, (°)

为达到防止打包皮带发生不可逆变形的要求,需保证 $\sigma \leq \sigma_{\max}$,即

$$\frac{l_1}{\cos\theta_1} + \frac{l_3}{\cos\theta_2} - l_1 - l_3 \leq \frac{FL}{ES} \tag{4}$$

2.2 打包空间的结构参数确定

打包空间是以前打包机构与后打包机构为框架,用于膜杂混合物揉搓成卷的区域。在膜卷形成过程中,可根据膜卷在打包空间内揉搓时受到的支撑力、摩擦力、转矩等情况分为 2 个阶段,第 1 阶段为无阻打包阶段,第 2 阶段为有阻打包阶段。

第 1 阶段为膜杂混合物初步进入打包空间时,膜卷具有质量小、密度低等特点。由于膜卷质量轻,膜卷对前后打包皮带的压力不足以使其造成较大变形。打包空间内的膜卷会受到前后打包皮带的摩擦力,使膜卷受到转矩。第 2 阶段为膜杂混合物不断进入打包空间,膜卷直径与密度逐渐变大。质量越来越大的膜卷会给前后打包皮带足够大的压力,使前后打包皮带发生弹性形变并加大与膜卷之间接触面积。此时膜卷受到转矩的同时,还会受到前后打包皮带产生的滚动摩擦阻力偶的影响。在打包皮带线速度不变的条件下,膜卷转速随膜卷尺寸增大而减小。第 1 阶段与第 2 阶段膜卷在打包空间的受力情况如图 6 所示。

在打包过程中,打包空间内膜卷形状近似为圆柱体,所以膜卷中心线至前打包皮带的距离和膜卷中心线至后打包皮带的距离均为 r 。

第 1 阶段前后打包皮带与膜卷之间的摩擦力 f_1 、 f_2 分别为

$$\begin{cases} f_1 = \mu_1 F_{n1} \\ f_2 = \mu_2 F_{n2} \end{cases} \tag{5}$$

式中 μ_1 ——前打包机构打包皮带与膜卷之间的滑动摩擦因数

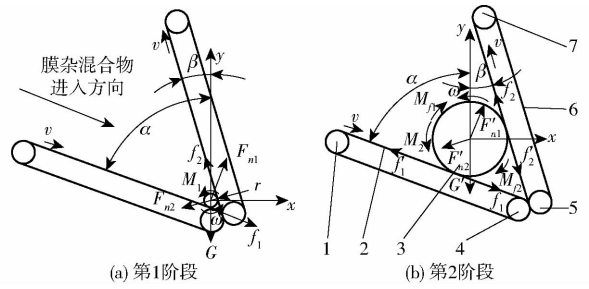


图 6 2 个阶段内膜卷在打包空间受力对比示意图
Fig. 6 Comparison of force on inner film roll in packing space at two stages

1. 前主动辊 2. 前打包皮带 3. 膜卷 4. 前从动辊 5. 后从动辊 6. 后打包皮带 7. 后主动辊

μ_2 ——后打包机构打包皮带与膜卷之间的滑动摩擦因数

F_{n1} ——第 1 阶段前打包皮带对膜卷的支持力,N

F_{n2} ——第 1 阶段后打包皮带对膜卷的支持力,N

而第 2 阶段打包皮带受力发生弹性形变,前后打包带与膜卷之间的滚动摩擦阻力 f'_1 、 f'_2 为

$$\begin{cases} f'_1 = \delta_1 F'_{n1} \\ f'_2 = \delta_2 F'_{n2} \end{cases} \tag{6}$$

式中 δ_1 ——前打包机构的打包皮带与膜卷之间的滚动摩擦因数

δ_2 ——后打包机构的打包皮带与膜卷之间的滚动摩擦因数

F'_{n1} ——第 2 阶段前打包皮带对膜卷的支持力,N

F'_{n2} ——第 2 阶段后打包皮带对膜卷的支持力,N

根据图 6a,可以分析出膜卷初期在打包空间受到水平方向 x 与竖直方向 y 的受力平衡式为

$$\begin{cases} F_{n1} \cos\alpha - F_{n2} \cos\beta + f_1 \sin\alpha - f_2 \sin\beta = 0 \\ F_{n1} \sin\alpha - F_{n2} \sin\beta - f_1 \cos\alpha + f_2 \cos\beta - G = 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中 α ——前打包皮带与竖直方向 y 的夹角, (°)
 β ——后打包皮带与竖直方向 y 的夹角, (°)
 G ——第 1 阶段膜卷所受重力,N

根据图 6b,可以分析出第 2 阶段膜卷在打包空间受到水平方向 x 与竖直方向 y 的受力平衡式为

$$\begin{cases} F'_{n1} \cos\alpha - F'_{n2} \cos\beta + f'_1 \sin\alpha - f'_2 \sin\beta - \\ f'_1 \sin\alpha + f'_2 \sin\beta = 0 \\ F'_{n1} \sin\alpha - F'_{n2} \sin\beta - f_1 \cos\alpha + f_2 \cos\beta + \\ f'_1 \cos\alpha - f'_2 \cos\beta - G' = 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中 G' ——第 2 阶段膜卷所受重力,N
由于前打包皮带与后打包皮带的材质与花纹一

致,则前打包皮带与膜卷间的滑动摩擦因数 μ_1 等于后打包皮带与膜卷间的滑动摩擦因数 μ_2 ,即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ 。由式(9)可以得出前后打包带对第1阶段膜卷的支撑力为

$$\begin{cases} F_{n1} = \frac{G(\cos\beta + \mu\sin\beta)}{(1 + \mu^2)\sin(\alpha - \beta)} \\ F_{n2} = \frac{G(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{(1 + \mu^2)\sin(\alpha - \beta)} \end{cases} \quad (9)$$

同理,前打包皮带与膜卷间的滚动摩擦因数 δ_1 等于后打包皮带与膜卷间的滚动摩擦因数 δ_2 ,即 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ 。由式(10)可以得出在第2阶段膜卷能让前后打包皮带发生弹性形变的压力为

$$\begin{cases} F'_{n1} = \frac{G'(\cos\beta + \mu\sin\beta - \delta\sin\beta)}{[1 + (\mu - \delta)^2]\sin(\alpha - \beta)} \\ F'_{n2} = \frac{G'(\cos\alpha + \mu\sin\alpha - \delta\sin\alpha)}{[1 + (\mu - \delta)^2]\sin(\alpha - \beta)} \end{cases} \quad (10)$$

在第1阶段,膜卷受到的转矩为

$$M_1 = f_1 r + f_2 r \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)可得

$$M_1 = \frac{G\mu}{(1 + \mu^2)\sin(\alpha - \beta)}(\cos\alpha + \cos\beta) + \frac{G\mu^2}{(1 + \mu^2)\sin(\alpha - \beta)}(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (12)$$

由式(12)可知,前打包皮带与竖直方向的夹角 α 、后打包皮带与竖直方向的夹角 β 、打包空间角度 $(\alpha - \beta)$ 、打包皮带与膜卷之间的滑动摩擦因数 μ 、膜卷质量 G 与膜卷半径 r 影响第1阶段膜卷所受转矩 M_1 。由于机架结构限制及安装要求,也为了方便卸膜,前打包皮带与水平方向的夹角固定为 15° ,因此 α 为 75° 。分别对 β 、 $\alpha - \beta$ 、 μ 、 G 和 r 求偏导, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \alpha - \beta \leq 90^\circ$,通过分析随着 $\sin(\alpha - \beta)$ 的减小 M_1 增大,而 $\sin(\alpha - \beta)$ 随着 $\alpha - \beta$ 的减小而减小,即第1阶段膜卷所受转矩 M_1 随着 β 的增大而变大。 G 和 r 随着膜杂混合物进入打包空间揉搓成卷时间的增长而增大,而随着 G 、 r 与 μ 的增大, M_1 也会随之增大。

而打包过程处在第2阶段时,膜卷受到的转矩为

$$M_2 = f_1 r + f_2 r - f'_1 r - f'_2 r \quad (13)$$

将式(10)代入式(13)可得

$$M_2 = \frac{G'r(\mu - \delta)}{[1 + (\mu - \delta)^2]\sin(\alpha - \beta)}(\cos\alpha + \cos\beta) + \frac{G'r(\mu - \delta)^2}{[1 + (\mu - \delta)^2]\sin(\alpha - \beta)}(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (14)$$

同理,由式(14)可知,前打包皮带与竖直方向的夹角 α 、后打包皮带与竖直方向的夹角 β 、打包空间角度 $(\alpha - \beta)$ 、打包带与膜卷之间滑动摩擦因数与滚动摩擦因数的差 $\mu - \delta$ 、膜卷质量 G' 与膜卷半径 r

会影响第2阶段膜卷所受转矩 M_2 。分别对 β 、 $\alpha - \beta$ 、 $\mu - \delta$ 、 G' 和 r 求偏导, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \alpha - \beta \leq 90^\circ$,第2阶段膜卷所受转矩 M_2 随着 β 的增大而变大。 G' 和 r 随着膜杂混合物进入打包空间揉搓成卷时间的增长而增大,而随着 G' 、 r 与 $\mu - \delta$ 的增大, M_2 也会随之增大。

通过实地调研发现当 $\beta > 20^\circ$ 时,随着残膜回收工作的进行,会出现膜杂混合物从打包装置上方飞出打包空间丢膜问题。且根据结构安装的限制,可以得出 $\beta_{\min} \geq 10^\circ$ 。因此后打包皮带与竖直方向的夹角 β 的范围为 $10^\circ \sim 20^\circ$,即打包空间角度 $(\alpha - \beta)$ 的范围为 $55^\circ \sim 65^\circ$ 。

3 基于 EDEM 的打包过程仿真分析

利用 Solidworks 软件建立打包装置三维立体模型,为了减少仿真运行时间,对三维模型进行了简化,只保留了打包皮带、打包支撑架、主动辊和从动辊4部分。三维模型转化为 stl 格式并导入 EDEM 2024 软件中。根据《农业机械设计手册》,残膜回收机的前进速度为 $4 \sim 8 \text{ km/h}$,结合前期卷膜效果试验选取前进速度为 6 km/h ,根据石河子大学王征等^[11]对打包装置的研究与现有试验材料斜面法试验,确定打包皮带摩擦因数 μ 为 0.77 、 1.12 、 1.38 。当前进速度为 6 km/h 、打包空间角度为 60° 时,对不同打包皮带摩擦因数进行单因素残膜打包模拟试验。

3.1 颗粒模型建立

建立玉米地表层残膜回收打包过程中膜杂混合物的颗粒模型,即表层残膜、土壤及玉米根茬的模型,同时为减少仿真运行时间对模型进行简化。

表层残膜是由 $8\,445$ 个直径为 10 mm 的球形颗粒线性排列构成的长 $2\,060 \text{ mm}$ 、宽 410 mm 的柔性颗粒模型;土壤仿真颗粒模型为直径 20 mm 的球形颗粒;玉米根茬为总长 74 mm 、直径 7.5 mm 的球柱形颗粒。为了能够较为准确地模拟摩擦因数对膜杂混合物打包效果,通过文献^[16-22],得到打包皮带、表层残膜、土壤、玉米根茬的泊松比、剪切模量、密度和碰撞恢复系数,通过倾斜平面法测量得到摩擦因数,仿真参数如表2所示。

3.2 仿真结果与分析

将打包空间角度为 60° 的打包装置模型导入 EDEM 并设置仿真参数,根据打包空间的设计与文献研究,设定机架前进速度为 6 km/h ,打包皮带线速度为 1.167 m/s ,总仿真时间为 6.5 s ,设定表层残膜颗粒生成速度为 22.5 kg/s ,玉米根茬颗粒生成速度为 5.1 kg/s ,土壤颗粒生成速度为 2.4 kg/s ,生成

表 2 仿真参数设置

Tab.2 Simulation parameters setting

仿真参数	数值	仿真参数	数值
打包皮带泊松比 ν_1	0.43	土壤-土壤静摩擦因数 f_2	0.44
打包皮带剪切模量/Pa	1.75×10^7	玉米根茬-玉米根茬静摩擦因数 f_3	0.63
打包皮带密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.3×10^3	土壤-表层残膜静摩擦因数 f_4	0.30
表层残膜泊松比 ν_2	0.42	土壤-玉米根茬静摩擦因数 f_5	0.39
表层残膜剪切模量/Pa	8.3×10^8	表层残膜-玉米根茬静摩擦因数 f_6	0.45
表层残膜密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	910	表层残膜-表层残膜滚动摩擦因数 f_{g1}	0.45
土壤泊松比 ν_3	0.32	土壤-土壤滚动摩擦因数 f_{g2}	0.35
土壤剪切模量/Pa	4.5×10^6	玉米根茬-玉米根茬滚动摩擦因数 f_{g3}	0.22
土壤密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.5×10^3	土壤-表层残膜滚动摩擦因数 f_{g4}	0.28
玉米根茬泊松比 ν_4	0.40	土壤-玉米根茬滚动摩擦因数 f_{g5}	0.15
玉米根茬剪切模量/Pa	2.12×10^9	表层残膜-玉米根茬滚动摩擦因数 f_{g6}	0.26
玉米根茬密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.3×10^3	打包皮带($\mu=1.12$)-表层残膜碰撞恢复系数 e_7	0.15
表层残膜-表层残膜碰撞恢复系数 e_1	0.87	打包皮带($\mu=0.77$)-表层残膜静摩擦因数 f_{f7}	0.34
土壤-土壤碰撞恢复系数 e_2	0.21	打包皮带($\mu=0.77$)-表层残膜滚动摩擦因数 f_{g7}	0.14
玉米根茬-玉米根茬碰撞恢复系数 e_3	0.17	打包皮带($\mu=1.12$)-表层残膜静摩擦因数 f_{f8}	0.50
土壤-表层残膜碰撞恢复系数 e_4	0.31	打包皮带($\mu=1.12$)-表层残膜滚动摩擦因数 f_{g8}	0.20
土壤-玉米根茬碰撞恢复系数 e_5	0.50	打包皮带($\mu=1.38$)-表层残膜静摩擦因数 f_{f9}	0.62
表层残膜-玉米根茬碰撞恢复系数 e_6	0.33	打包皮带($\mu=1.38$)-表层残膜滚动摩擦因数 f_{g9}	0.25
表层残膜-表层残膜静摩擦因数 f_{f1}	0.50		

物料颗粒后进行打包仿真试验。不同打包皮带摩擦因数条件下卷膜效果与网格空隙率如图 7 所示(空隙率从高到低由从红到紫表示)。当摩擦因数分别为 0.77、1.12、1.38 时,残膜打包效果的仿真结果如图 7a~7c 所示。在相同仿真时间下,通过结果图对比分析可以发现:当摩擦因数为 0.77 时,物料会在打包空间内产生堆积,无法形成膜卷;当摩擦因数为 1.12 时,膜杂混合物在打包空间内形成膜卷但打包成型差,且仍有部分物料产生堆积;当摩擦因数为 1.38 时,膜杂混合物在打包空间内打包成型效果好,未产生堆积。摩擦因数低时,物料产生大量堆积,成包率低,摩擦因数高时,膜卷成型好,无堆积,成包率高。

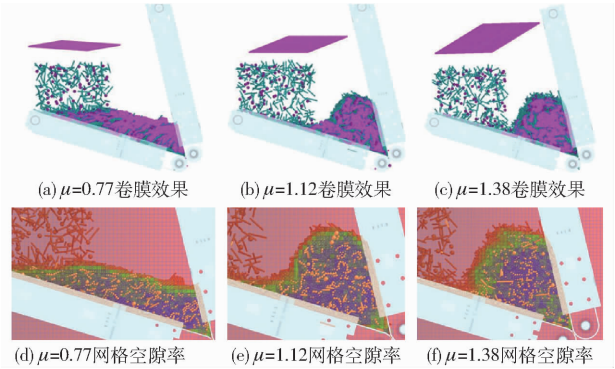


图 7 不同摩擦因数下卷膜效果与网格空隙率

Fig.7 Film winding effects and grid void ratio under different friction coefficients

仿真结果中平均网格空隙率可视为膜杂混合物

空隙率,对不同摩擦因数的仿真结果进行分析,并经过软件后处理与计算得出平均网格空隙率,如图 7d~7f 所示。当摩擦因数为 0.77 时,紫色部分分布较少且边界未形成类圆形,平均网格空隙率为 73.25%;当摩擦因数为 1.12 时,紫色部分分布较多但边界不规则且密度最大的位置偏下,平均网格空隙率为 71.88%;当摩擦因数为 1.38 时,紫色部分能形成较为规则的圆形,且密度最大的位置处在膜卷中心部位,平均网格空隙率为 71.11%。摩擦因数低时,紫色部分分布少且不规则,平均网格空隙率高,表明膜卷密度低且成型差,摩擦因数高时,紫色部分分布多、规则且密度最大的位置靠近中心,平均网格空隙率低,表明膜卷密度大且成型好。

通过以上综合分析可知,摩擦因数会影响打包装置的成包率和膜卷密度,打包皮带摩擦因数越大,平均网格空隙率越低,同时局部空隙率低的位置越靠近膜卷中心,膜卷成型越好,膜卷内部越紧实。

4 田间试验

4.1 试验条件

试验于 2024 年 8 月在新疆维吾尔自治区阿克苏 6 团玉米试验地进行,试验进行前玉米已收获完毕,滴灌带回收完成。玉米种植模式为 70 cm(宽)+40 cm(窄),根茬高度约为 12 cm,株距为 25 cm,田间铺设的地膜为厚度 0.01 mm 的聚乙烯农用地膜,如图 8 所示。试验所用机具包括雷沃欧豹 m904 型

拖拉机、残膜回收打捆与秸秆粉碎还田联合作业机、电子秤、卷尺等。

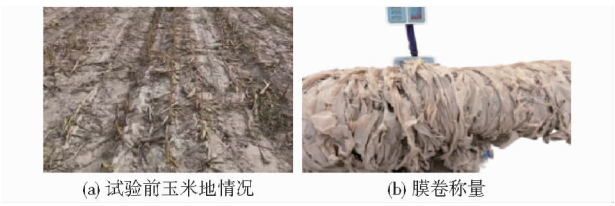


图 8 试验条件
Fig.8 Test conditions

4.2 试验设计

为充分验证所设计的残膜打包装置打包性能是否满足使用要求,进行田间试验验证。以前进速度、打包空间角度、打包皮带花纹为试验因素,以残膜成包率和残膜膜卷密度为指标进行三因素三水平试验,试验过程参考 GB/T 14290—2021《圆草捆打捆机》和 GB/T 25412—2021《残地膜回收机》进行田间试验。

根据《农业机械设计手册》,为保证残膜回收机的工作稳定性与工作效率,残膜回收机的前进速度选取 4~8 km/h。打包空间角度范围为 55°~65°。打包皮带选取 PVC 材质,表面花纹为光面、直条纹、一字纹,如图 9 所示。残膜与不同花纹打包皮带之间的摩擦因数 μ 分别为 0.77、1.12、1.38,试验因素编码表如表 3 所示。试验时,每个水平连续打包 5 个,整个试验重复 5 次,为了降低误差,最终结果求取数据平均值。

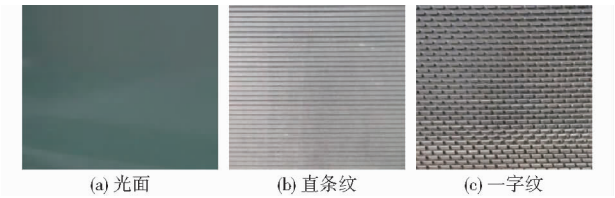


图 9 打包皮带花纹类型
Fig.9 Types of packing belt patterns

残膜成包率和残膜膜卷密度计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{I_1}{I} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{M}{V} \end{cases} \quad (15)$$

- 式中 Y_1 ——残膜成包率,%
 Y_2 ——残膜膜卷密度,kg/m³
 I_1 ——成功打包次数,次
 I ——残膜总打包次数,次
 M ——膜卷质量,kg
 V ——膜卷体积,m³

4.3 试验结果

利用 Design-Expert 13 进行三因素三水平试验

表 3 试验因素编码
Tab.3 Experimental factor codes

编码	前进速度/ (km·h ⁻¹)	摩擦因数	打包空间角度/ (°)
-1	4	0.77	55
0	6	1.12	60
1	8	1.38	65

分析,试验设计原理采用 Box-Behnken 方法。试验设计方案与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 4 试验设计方案与结果
Tab.4 Experimental design scheme and results

序号	因素			试验结果	
	X_1	X_2	X_3	残膜成包率 Y_1 /%	残膜膜卷密度 Y_2 /(kg·m ⁻³)
1	-1	0	1	78.89	86.279
2	0	0	0	92.11	104.492
3	0	0	0	93.33	105.255
4	0	1	1	93.78	94.917
5	0	0	0	92.89	105.203
6	-1	1	0	93.33	99.764
7	1	-1	0	75.56	110.493
8	0	-1	-1	79.33	120.486
9	1	0	-1	94.89	132.437
10	0	1	-1	100	129.367
11	0	-1	1	71.33	89.927
12	0	0	0	94.33	103.938
13	1	0	1	90.33	95.676
14	-1	0	-1	93.11	116.634
15	0	0	0	94.44	106.207
16	-1	-1	0	73.11	96.672
17	1	1	0	96.56	114.119

4.3.1 方差分析

在 Design-Expert 13 中进行多元回归拟合分析^[23-26],以前进速度、摩擦因数、打包空间角度为自变量,建立残膜成包率、残膜膜卷密度的回归模型,并进行方差分析,分析结果如表 5 所示。

由表 5 的分析结果可以得出:残膜成包率、残膜膜卷密度模型的 P 值均小于 0.000 1,失拟项大于 0.05,表明回归模型影响极显著,能正确分析与预测各因素对试验指标的影响。其决定系数 R^2 分别为 0.989 3、0.995 9,表明 2 个模型可拟合 98% 以上的试验结果。根据 2 个模型各因素回归系数的绝对值大小可知,影响残膜成包率 Y_1 的主次顺序为 X_2 、 X_3 、 X_1 ,影响残膜膜卷密度 Y_2 的主次顺序为 X_3 、 X_1 、 X_2 。

各因素对残膜成包率 Y_1 的影响回归方程为

$$Y_1 = 93.42 + 2.3625X_1 + 10.5425X_2 - 4.125X_3 + 0.195X_1X_2 + 2.415X_1X_3 + 0.445X_2X_3 - 2.7925X_1^2 - 5.9875X_2^2 - 1.3225X_3^2 \quad (16)$$

表 5 回归模型方差分析
Tab.5 ANOVA of regression model

方差来源	残膜成包率 Y_1			残膜膜卷密度 Y_2		
	平方和	F	P	平方和	F	P
模型	1 299. 81	72. 05	<0. 000 1 **	2 647. 57	187. 12	<0. 000 1 **
X_1	44. 65	22. 28	0. 002 2 **	356. 12	226. 52	<0. 000 1 **
X_2	889. 15	443. 61	<0. 000 1 **	52. 99	33. 70	0. 000 7 **
X_3	136. 13	67. 91	<0. 000 1 **	2 182. 13	1 388. 01	<0. 000 1 **
X_1X_2	0. 15 1	0. 075 9	0. 790 9	0. 071 3	0. 045 3	0. 837 4
X_1X_3	23. 33	11. 64	0. 011 3 *	10. 26	6. 53	0. 037 9 *
X_2X_3	0. 792 1	0. 395 2	0. 549 5	3. 78	2. 41	0. 164 7
X_1^2	32. 83	16. 38	0. 004 9 **	0. 479 3	0. 304 8	0. 598 0
X_2^2	150. 95	75. 31	<0. 000 1 **	1. 42	0. 902 1	0. 373 8
X_3^2	7. 36	3. 67	0. 096 8	39. 81	25. 32	0. 001 5 **
残差	14. 03			11. 00		
失拟项	10. 16	3. 50	0. 129 0	8. 06	3. 65	0. 121 8
误差	3. 87			2. 95		
总和	1 313. 84			2 658. 57		

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

各因素对残膜膜卷密度 Y_2 的影响回归方程为

$$Y_2 = 105.019 + 6.672X_1 + 2.573\,63X_2 - 16.515\,63X_3 + 0.133\,5X_1X_2 - 1.601\,5X_1X_3 - 0.972\,75X_2X_3 - 0.337\,375X_1^2 + 0.580\,375X_2^2 + 3.074\,88X_3^2 \quad (17)$$

在试验过程中,根据不同试验因素参数的选择,打包得到的膜卷会处于不同的形态,如图 10 所示。第 1 种为膜卷不成型,膜杂混合物堆积在打包装置中并未成型,打开后打包机构掉落的是松散、未成型的膜杂混合物,如图 10a 所示,这种会造成农田“白色污染”。第 2 种为膜卷松散,膜杂混合物在打包装置中成功打包成卷但不紧实、密度低、有少量堆积,打开后打包机构掉落的是密度低、打包成型差的膜卷,如图 10b 所示。第 3 种膜卷紧实,膜杂混合物

在打包装置中揉搓打包成卷且紧实密度大,打开后打包机构掉落的是密度大、打包成型好的膜卷,如图 10c 所示。



图 10 试验过程的膜卷情况
Fig.10 Membrane rolls during test

图 11a ~ 11c 为前进速度 X_1 、摩擦因数 X_2 、打包空间角度 X_3 对残膜成包率影响的三维响应曲面。从图 11a 可以分析出,当前进速度 X_1 提高时,残膜成包率逐渐增高,增加幅度逐渐降低,而摩擦因数 X_2 逐渐增加,打包皮带粗糙度逐渐提高,残膜成包率逐渐提高,并且响应面曲线的变动幅度大于沿前进

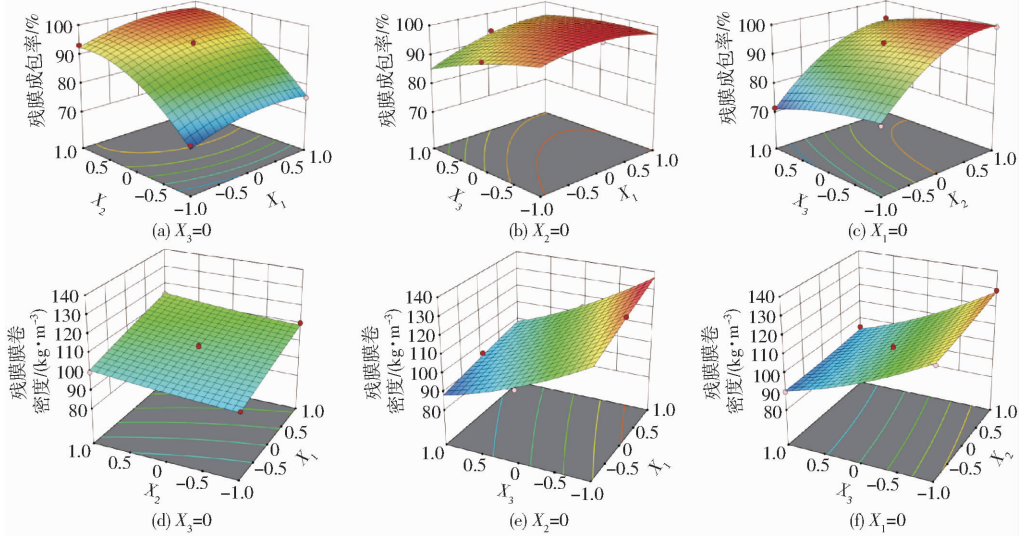


图 11 各因素对残膜成包率、残膜膜卷密度影响的响应曲面

Fig.11 Surface plots of effect of each factor on residual film formation rate and residual film roll density

速度变化的幅度。从图 11b 可以分析出,当前进速度 X_1 提高时,残膜成包率逐渐增高,增加幅度逐渐降低,而打包空间角度 X_3 逐渐增大,残膜成包率逐渐降低,减小幅度逐渐提高,但整体变动幅度相对较低。从图 11c 可以分析出,当摩擦因数 X_2 逐渐增加,打包皮带粗糙度逐渐提高时,残膜成包率逐渐增高,增加幅度逐渐降低,整体变动幅度较大,而打包空间角度 X_3 逐渐增大,残膜成包率逐渐降低,减小幅度逐渐提高。

图 11d ~ 11f 为前进速度 X_1 、摩擦因数 X_2 、打包空间角度 X_3 对残膜膜卷密度影响的三维响应曲面。从图 11d 可以分析出,当前进速度 X_1 提高时,残膜膜卷密度逐渐增大,并且摩擦因数 X_2 逐渐增加,打包皮带粗糙度逐渐提高时,残膜膜卷密度逐渐增大。从图 11e 可以分析出,当前进速度 X_1 提高时,残膜膜卷密度逐渐增大,而打包空间角度 X_3 逐渐增大,残膜膜卷密度逐渐降低,变动幅度相对较大。从图 11f 可以分析出,当摩擦因数 X_2 逐渐增加,打包皮带粗糙度逐渐提高时,残膜膜卷密度逐渐增大,而打包空间角度 X_3 逐渐增大,残膜膜卷密度逐渐降低。

根据模型分析结果并结合残膜回收一体机的实际田间试验条件和机具本身性能要求,通过 Design-Expert 13 中的 optimization 进行优化分析。优化后的试验参数为:前进速度 6.758 km/h、摩擦因数 1.378、打包空间角度 55°。

4.3.2 田间验证试验

为了验证优化后预测的残膜成包率和残膜膜卷密度准确性,根据得到的最优试验参数进行 3 次田间验证试验,由于现有打包皮带材料的限制和实际田间情况,将残膜回收一体机的工作参数设置为前进速度 6.8 km/h、摩擦因数为 1.38 的一字纹打包皮带、打包空间角度 55°,进行田间验证试验并与优化结果进行对比,如表 6 所示。

表 6 田间验证试验与理论优化对比结果
Tab.6 Comparison of field validation test and theoretical optimization results

项目	残膜成包率/%	残膜膜卷密度/(kg·m ⁻³)
田间试验平均值	100	127.310
理论优化结果	100	131.835
误差	0	4.525

通过表 6 的试验对比结果可知:残膜成包率的试验平均值与理论优化结果均为 100%;残膜膜卷

密度的试验平均值与理论优化结果之间的差值为 4.525 kg/m³,占田间试验平均值的 3.55%,软件参数优化模型合理。即在残膜回收一体机进行打包工作时,当前进速度为 6.8 km/h、打包带花纹为一字纹($\mu = 1.38$)、打包空间角度为 55°时,残膜成包率为 100%、残膜膜卷密度为 127.310 kg/m³,田间验证试验结果与理论优化结果之间的误差相对较小。田间验证试验与卸下膜卷实际情况如图 12 所示。



图 12 田间验证试验
Fig.12 Field validation trial

5 结论

(1)针对玉米根茬多、不易打包成型且膜卷质量相对较大的问题,设计了一种支撑力更强、稳固性更好的打包支撑架。通过受力与 EDEM 仿真分析,膜杂混合物形成膜卷需要打包带与膜卷之间产生足够的摩擦力,摩擦力与打包皮带对膜卷产生的支持力之间为正相关,设计了一种玉米大根茬作物残膜打包装置。

(2)以前进速度、打包皮带摩擦因数和打包空间角度为试验因素,以残膜成包率和残膜膜卷密度为评价指标,进行三因素三水平的田间试验。利用 Design-Expert 13 对试验结果进行回归分析,并建立相应的二次多项式响应模型。可以得出,影响残膜成包率的主次顺序为打包皮带摩擦因数、打包空间角度、前进速度,影响残膜膜卷密度的主次顺序为打包空间角度、前进速度、打包皮带摩擦因数。

(3)通过 optimization 进行优化分析,得出残膜回收机工作参数的最优组合为:前进速度 6.758 km/h、摩擦因数 1.378、打包空间角度 55°,此时理论优化结果为:残膜成包率 100%,残膜膜卷密度 131.835 kg/m³。为验证优化结果,以前进速度 6.8 km/h、摩擦因数为 1.38 的一字纹打包皮带、打包空间角度 55°进行田间验证试验,得到实际田间试验平均值为:残膜成包率 100%,残膜膜卷密度 127.310 kg/m³。与理论值相比,残膜膜卷密度的误差为 3.55%,模型可靠且满足残膜打包作业要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[3] 周金豹. 辊轴式残膜打包装置的设计与试验[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
ZHOU Jinbao. Design and experiment of roller type residual film packing device[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[4] LIU J, LIU X, JIANG Y, et al. Research on the adaptability of high-performance film for full recycling to the curl-up film collecting method[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 1051.

[5] 何玉泽, 王敏, 曹肆林, 等. 弹齿链耙式残膜回收机脱膜装置设计与试验[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(1): 150 – 153, 161.
HE Yuze, WANG Min, CAO Silin, et al. Design and testing of the peel off device for the elastic tooth chain rake residual film recycling machine[J]. Hubei Agricultural Science, 2025, 64(1): 150 – 153, 161. (in Chinese)

[6] 牛琪, 纪超, 赵岩, 等. 集条残膜打包机捡拾清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 101 – 107.
NIU Qi, JI Chao, ZHAO Yan, et al. Design and experiment on collecting and separating device for strip plastic film baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 101 – 107. (in Chinese)

[7] 王成, 宋瑜涵, 杨建明, 等. 液压式棉田地膜回收压捆机设计与参数优化[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 30 – 39.
WANG Cheng, SONG Yuhuan, YANG Jianming, et al. Design and parameter optimization of hydraulic baling machine for cotton field film recycling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 30 – 39. (in Chinese)

[8] LIU X, ZHAO W, ZHANG H, et al. Design and experiment of an upper-side-discharge straw-returning and bundle self-unloading integrated corn residual film recycling machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(5): 61 – 70.

[9] 刘学虎, 田辛亮, 赵岩, 等. 残膜回收机集膜装置研究进展[J]. 农业工程, 2024, 14(1): 5 – 14.
LIU Xuehu, TIAN Xinliang, ZHAO Yan, et al. Research on film collection device of residual film recycling machine[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(1): 5 – 14. (in Chinese)

[10] 杨程. 滚刀式青贮玉米残膜回收关键部件理论设计与试验分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
YANG Cheng. Theoretical design and experimental analysis on key components of residual membrane recovery in hob-type silage corn[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[11] 王征, 王吉奎, 唐永飞, 等. 带式残膜揉搓打包机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 11 – 18.
WANG Zheng, WANG Jikui, TANG Yongfei, et al. Design and test of the belt-type residual film rubbing and baling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 11 – 18. (in Chinese)

[12] 刘小龙. 河西灌区玉米茬地膜面清杂-起膜压茬碎土机理与装置研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
Liu Xiaolong. Research on the mechanism and device for film surface cleaning and stubble crushing of corn stubble land in Hexi irrigation district[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[13] 张学军, 黄爽, 史增录, 等. 残膜捡拾打包机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(4): 1220 – 1230.
ZHANG Xuejun, HUANG Shuang, SHI Zenglu, et al. Design and test of the remaining film picking and baling machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2023, 53(4): 1220 – 1230. (in Chinese)

[14] WANG J, ZHAO W, LIU X, et al. The design and testing of a combined operation machine for corn straw crushing and residual film recycling[J]. Agriculture, 2025, 15(9): 916.

[15] 王向东, 邓爱民, 朱为玄. 材料力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020: 619.

[16] WEI L, LIU X, SUN W, et al. Design and testing of an integrated corn stubble residual film-recycling machine[J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1809.

[17] LIANG R, ZHANG L, JIA R, et al. Study on friction characteristics between cotton stalk-residual film-external contact materials[J]. Industrial Crops & Products, 2024, 209: 118022.

[18] LIU X, SHI R, ZHAO W, et al. Study on the characteristics of residual film-soil-root stubble complex in maize stubble fields of the Hexi corridor and establishment of a discrete element model[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1542.

[19] 蒋永新, 曲衡, 刘旋峰, 等. 残膜回收机铲齿式起膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 282 – 289.
JIANG Yongxin, QU Heng, LIU Xuanfeng, et al. Design and experiment of spade tooth film lifting device for residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 282 – 289. (in Chinese)

[20] 申世龙, 张佳喜, 蒋永新, 等. 基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 132 – 141.
SHEN Shilong, ZHANG Jiayi, JIANG Yongxin, et al. Tensile properties of residual film in tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 132 – 141. (in Chinese)

[21] 靳伟, 丁幼春, 农峰, 等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 71 – 82.
JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film – soil – straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 71 – 82. (in Chinese)

[20] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016: 770 – 778.

[21] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks[C] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 4510 – 4520.

[22] TAN M, LE Q. EfficientNet: rethinking model scaling for convolutional neural networks[C] // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2019: 6105 – 6114.

[23] TAN M, CHEN B, PANG R, et al. MnasNet: platform-aware neural architecture search for mobile[C] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019: 2815 – 2823.

[24] ENGLE R, YOO B S. Forecasting and testing in co-integrated systems[J]. Journal of Econometrics, 1987, 35(1): 143 – 159.

[25] 方雪清, 吴春胤, 俞守华, 等. 基于 EEMD – LSTM 的农产品价格短期预测模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 68 – 77.
FANG Xueqing, WU Chunyin, YU Shouhua, et al. Research on short-term forecast model of agricultural product price based on EEMD – LSTM[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 68 – 77. (in Chinese)

[26] HYNDMAN R J, KOEHLER A B. Another look at measures of forecast accuracy[J]. International Journal of Forecasting, 2006, 22(4): 679 – 688.

[27] ZENG A, CHEN M, ZHANG L, et al. Are transformers effective for time series forecasting? [C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2023: 11121 – 11128.

[28] ZHOU H, ZHANG S, PENG J, et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021: 11106 – 11115.

~~~~~

( 上接第 261 页 )

[22] 靳伟, 张学军, 丁幼春, 等. 基于 EDEM – Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[ J ]. 农业机械学报, 2022, 53( 4 ): 89 – 98.  
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM – Fluent coupling[ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53( 4 ): 89 – 98. ( in Chinese )

[23] 王昭宇, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收机起膜拾拾机构设计与试验[ J ]. 农业机械学报, 2021, 52( 4 ): 80 – 90.  
WANG Zhaoyu, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52( 4 ): 80 – 90. ( in Chinese )

[24] 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 ]. 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 ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52( 2 ): 135 – 144. ( in Chinese )

[25] 蒋德莉, 颜利民, 陈学庚, 等. 纵向型钉齿链式地膜拾拾装置设计与试验[ 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 )

[26] 营雨琨, 霍尚, 王敏, 等. 1. MSF – 2.0 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机设计与试验[ J ]. 干旱地区农业研究, 2025, 43( 2 ): 281 – 293.  
YING Yukun, HUO Shang, WANG Min, et al. Design and experiment of 1. MSF – 2.0 plastic film recycling bundling and straw crushing joint operation machine[ J ]. Arid Region Agricultural Research, 2025, 43( 2 ): 281 – 293. ( in Chinese )