doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.039

自走式棉秆打捆残膜打包联合作业机设计与试验

李　涛[1,2]　张海春[3]　王小瑜[1,2]　王晓暄[4]　刘旋峰[3]　牛长河[3]　康建明[1,5]　李国明[6]

（1.山东省农业机械科学研究院，济南 250100；2.农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室，济南 250100；
3.新疆农业科学院农业机械化研究所，乌鲁木齐 830091；4.新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；
5.山东省丘陵山区智慧农业装备重点实验室，济南 250100；6.山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255049）

摘要：针对棉秆粉碎与残膜回收机存在的自走式机型缺失、联合作业性能差、智能化水平低、残膜拾净率低等问题，综合运用机械、液压和电子控制等领域关键技术，设计了自走式棉秆打捆残膜打包联合作业机，可实时监控作业参数。采用 Y 形刀片式棉秆粉碎装置、刮板式输送装置和活塞式棉秆打捆装置用于棉秆粉碎和收集；采用螺旋式排杂装置、钉齿式拾膜装置和无芯卷膜式残膜打包装置回收残膜，可实现膜秆分离，一次性完成秸秆粉碎、输送和压缩打捆，残膜拾取、输送和打包等作业。田间试验结果表明，当整机作业速度为 7 ~ 10 km/h、起膜齿作业深度为 40 ~ 60 mm、打包带表面状态为粗糙面和打包带线速度为 1.2 m/s 时，秸秆损失率为 3%，秸秆粉碎长度合格率为 97%，秸秆捆密度为 120 kg/m^3，秸秆捆成捆率为 98.5%，残膜拾净率为 90%，残膜包密度为 110 kg/m^3，残膜成包率为 99%，膜秆分离率为 90%，生产率为 1.4 hm^2/h。研究可为秸秆和残膜集中处理与再利用提供装备支撑。

关键词：棉秆；残膜；自走式联合作业机；棉秆打捆装置；残膜打包装置

中图分类号：S223.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0424-10　　**OSID**：

Development of Self-propelled Combined Operation Machine for Cotton Stalk Baling and Residual Film Packing

LI Tao[1,2]　ZHANG Haichun[3]　WANG Xiaoyu[1,2]　WANG Xiaoxuan[4]　LIU Xuanfeng[3]
NIU Changhe[3]　KANG Jianming[1,5]　LI Guoming[6]

(1. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*
2. *Huanghuaihai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Ji'nan* 250100, *China*
3. *Research Institute of Agricultural Mechanization*, *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*, *Urumqi* 830091, *China*
4. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
5. *Shandong Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Area*, *Ji'nan* 250100, *China*
6. *College of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*)

Abstract: At present, domestic cotton stalk crushing and residual film recovery machinery is characterized by lack of self-propelled models, poor combined operation performance, low production efficiency, poor film and stalk separation, low cotton stalk baling density and baling rate, low residual film collecting ratio, low residual film packaging density and baling rate, therefore a self-propelled combined operation machine for cotton stalk baling and residual film packing was designed. It was made up of the steering axle, front drive axle, hydraulic system, cab, frame assembly, power assembly, residual film collection and packing assembly, and cotton stalk crushing and baling assembly. The frame assembly was of upper and lower structure, i.e., including the upper frame and lower frame, and the cotton stalk crushing and baling assembly, cab, drive axle, power assembly, residual film recycling and baling assembly and steering axle were mounted on the frame from front to back in sequence. Cotton stalk crushing and baling assembly included cotton stalk crushing device, cotton stalk lifting device and cotton stalk baling device. Residual film collecting and packaging assembly included residual film picking

收稿日期：2024-04-17　修回日期：2024-06-04

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022)、国家自然科学基金项目(52175238)、工信部高效智能残膜回收装备工程化攻关项目(CEIEC-2022-ZM02-0226)和山东省生态农业技术体系项目(SDAIT-30-5)

作者简介：李涛(1972—)，男，研究员，主要从事农业机械装备关键技术研究，E-mail：228836007@qq.com

通信作者：康建明(1984—)，男，研究员，博士，主要从事农田残膜污染技术及装备研究，E-mail：kjm531@sina.com

device, residual film conveying device and residual film packing device. Hydraulic system included running system and working system, and the machine used fully hydraulic drive, which can collect and control the operating parameters of cotton stalk crushing, conveying and baling, and residual film picking, conveying and packaging for real-time, so as to avoid the occurrence of faults and improve the performance of the machine. Double screw Y-type blade cotton straw crushing device, scraper conveying device with front and rear dials and piston type cotton stalk baling device were used for cotton stalk crushing and collecting. Spiral discharge device, adjustable height loosening teeth, nail type film pickup device and coreless roll residual film packing device were used for residual film collecting and packing. It can achieve the separation of film and stalk, stalk crushing, stalk conveying and compressed baling, film pickup, film conveying, and packing at the same time. Field tests showed that when the operating speed was 7 ~ 10 km/h, the depth of the loosening film tooth was 40 ~ 60 mm, and the surface state of the packing belt was rough and the linear speed of the packing belt was 1.2 m/s, the straw loss rate was 3%, the qualification rate of cotton stalk chopping was 97%, the average density of the stalk bale was 120 kg/m^3, the balling rate of stalk was 98.5%, the residual film collecting ratio was 90%, the average density of the residual film bale was 110 kg/m^3, the balling rate of the residual film was 99%, the separation ratio of cotton stalk and residual plastic film was 90%, the operation efficiency was 1.4 hm^2/h. The research result can provide effective equipment for the centralized treatment and reuse of stalk and residual film.

Key words: cotton stalk; residual film; self-propelled combined operation machine; cotton stalk baling device; residual film packing device

0　引言

我国是世界上最大的棉花种植国，其副产物棉秆产量也十分可观，但综合利用率低，同时棉花大多采用覆膜种植，促进农作物增产增收的同时也产生了“白色污染”[1]。

根据作业功能不同，残膜回收机主要分为单项作业机和联合作业机。单项作业机只具备回收残膜功能，联合作业机作业效率高，分为茎秆粉碎还田与残膜回收联合作业、茎秆粉碎收集与残膜回收联合作业 2 种方式。国内能同时处理棉秆和残膜的联合作业机应用较少，大都采用棉秆和残膜分别处理的作业方式。同时，联合作业机多采用牵引式，但牵引式机型机动性差、转弯半径大和调整不方便，自走式联合作业机克服了牵引式机型的缺点，能同时进行棉秆粉碎打捆及残膜回收打包的联合作业机在国内尚不多见[2]。

目前，国内棉秆打捆机包括张爱民等[3]研制的自走式不对行棉秆收获打捆机，其机型可实现棉秆拔除、输送、切断、压缩和打捆作业，但不具备残膜处理功能。残膜回收打包机包括赵岩等[4]研制的 CMJY－1500 型农田残膜捡拾打包作业机，能一次完成搂后集条残膜的捡拾、清理、打包作业，但不具备棉秆处理功能。能同时进行棉秆和残膜处理的联合作业机包括新疆农垦科学院机械装备研究所研制的 4JSM－2000 型秸秆还田弹齿搂膜联合作业机，新疆农业科学院农业机械化研究所研制的 4JSM－2100 型秸秆粉碎还田残膜回收联合作业机，乌苏鹏程植保机械厂研制的 4JSM－2200 型秸秆还田地膜回收联合作业机。但上述机型均为牵引式，没有秸秆收集功能，工作时存在膜秆分离率低、作业参数调整困难、粉尘大、作业效率低等问题。

针对以上联合作业机存在的问题，根据棉秆和残膜物理性状和收获特点，本文设计自走式棉秆打捆残膜打包联合作业机，采用全液压传动，可一次性完成秸秆粉碎、输送和压缩打捆，残膜捡拾、输送和打包等作业，并开展田间试验验证作业性能，以实现棉秆和残膜即时储运，为开展棉秆和残膜集中处理与再利用提供有效技术支撑。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

整机由棉秆粉碎打捆装置、驾驶室及智能控制系统、机架、动力系统、残膜回收打包装置、转向桥、驱动桥和液压系统组成。机架为上下层结构，包括上机架和下机架，棉秆粉碎打捆装置、驾驶室、驱动桥、动力系统、残膜回收打包装置和转向桥从前向后依次安装在机架上，棉秆粉碎打捆装置包括棉秆粉碎装置、棉秆升运装置和棉秆打捆装置，残膜回收打包装置包括残膜回收装置、残膜输送装置和残膜打包装置。液压系统包括行走系统和工作系统，整机采用全液压驱动，可对整机行走，棉秆粉碎、输送和打捆，残膜捡拾、输送和打包等作业参数进行实时采集和调控，避免故障发生，提高整机作业性能，整机结构如图 1 所示。

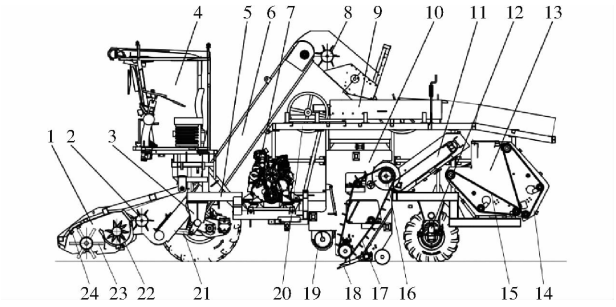

图 1 自走式棉秆打捆残膜打包联合作业机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of self-propelled combined operation machine for cotton stalk baling and residual film packing

1. 棉秆粉碎装置 2. 棉秆拨轮 1 3. 驱动桥 4. 驾驶室及智能控制系统 5. 下机架 6. 棉秆升运装置 7. 动力系统 8. 棉秆拨轮 2 9. 棉秆打捆装置 10. 残膜回收装置 11. 残膜输送装置 12. 转向桥 13. 残膜打包装置 14. 卸膜板 15. 打包带 16. 脱膜轮 17. 起膜钉齿输送链 18. 起膜齿 19. 排杂螺旋输送器 20. 上机架 21. 液压系统 22. 螺旋输送器室 23. 动刀 24. 定刀

1.2 主要工作原理

如图 1 所示,作业时作业机沿着膜行前行,棉秆在粉碎装置动刀和定刀的相互作用下被捡拾以及粉碎,高速旋转定刀产生的气流将捡拾粉碎棉秆沿粉碎壳体向后抛送到螺旋输送器室,螺旋输送器将棉秆汇集到中部,然后通过棉秆拨轮 1、棉秆升运装置和棉秆拨轮 2 输送到棉秆打捆装置,棉秆被压缩打捆后从上机架后方卸下。同时,残膜回收装置排杂螺旋输送器可向左排出碎棉秆等杂质,起膜齿将前方的土壤松动,并排布置的起膜钉齿穿透残膜,在前进转动的同时将残膜挑起,挑起的残膜通过输送链向后上方输送,在脱膜轮刮送作用下落入残膜输送装置。然后,残膜由进料口进入打包室底部,夹在两打包带间,打包带与残膜间方向不同的摩擦力对残膜产生转矩,残膜在打包室中旋转形成包芯。随着包芯直径不断增大,可适时控制油缸打开卸膜板,残膜包从打包室内落下,完成一次打包作业。

1.3 总体方案

联合作业可实现棉秆和残膜同时收获,提高作业效率和节约成本。整机作业过程主要包括田间行走、秸秆粉碎打捆和残膜回收打包。联合作业需解决的关键问题是实现棉秆和残膜有效分离,在行走装置、秸秆粉碎打捆装置和残膜回收打包装置作业参数合理配比下实现棉秆和残膜联合收获。

本机型采用全液压传动,实现各系统高效的功率分配,各作业部件采用马达驱动,解决了传统联合作业机采用机械结构造成的传动线路复杂、故障率高和作业参数调整不方便等问题。采用液压驱动还能实现对各工作参数的实时获取和调节,实现联合作业机的智能化控制,降低驾驶员劳动强度,提高收获质量。在整机作业过程中,可利用传感器测量棉田起伏信息、棉秆密度和棉秆喂入量,通过动态扭矩传感器检测棉秆粉碎刀轴、棉秆拨轮和打捆装置主轴扭矩及转速,通过传感器采集排杂装置、收膜装置、残膜输送装置和打包装置运动参数等信息,同时通过北斗导航定位系统实时获取整机作业位置和行进速度。当采集的作业参数值超过设定值会自动报警,同时控制系统能自动调节液压缸伸缩、作业部件马达转速和行走速度,从而保证合适的棉秆和残膜喂入量,防止堵塞和其他故障发生。采集到的参数可实时显示在驾驶室触摸屏上,驾驶员通过触摸屏可手动控制各液压缸及液压马达,调控棉秆粉碎装置和残膜回收装置高度、各工作部件转速等作业参数以适应我国不同地区作业环境需求,从而提高膜秆分离率、减小棉秆损失率和提高残膜拾净率。

1.4 主要技术参数

自走式联合作业机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 自走式联合作业机主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of self-propelled combined operation machine

参数	数值
发动机功率/kW	191
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 450×3 100×3 870
轮距(前轮距/后轮距)/mm	2 280/2 350
轴距/mm	3 730
质量/kg	10 000
作业幅宽/mm	2 200
作业速度/(km·h^{-1})	≥7
秸秆损失率/%	≤3
棉秆捆密度/(kg·m^{-3})	≥120
残膜拾净率/%	≥90
残膜包密度/(kg·m^{-3})	≥110
膜秆分离率/%	90
生产率/(hm^2·h^{-1})	1.4

2 关键部件设计

2.1 机架设计

机架是整机的基础,主要功能是支撑、连接各部件,并承受整机内外载荷,机架结构如图 2 所示。

机架包括上机架和下机架,其上下机架通过螺栓连接,拆装方便。上下机架构成一种笼式结构,提高了机架强度和刚度,承载能力增加的同时扩展了整机各功能部件的安装空间。下机架前部加高用于安装驾驶室,机架下沉方便安装发动机,可有效降低整机重心,中部加宽用于安装作业宽度为 2 200 mm 的残膜回收装置,后部降低高度以安装残膜打包装

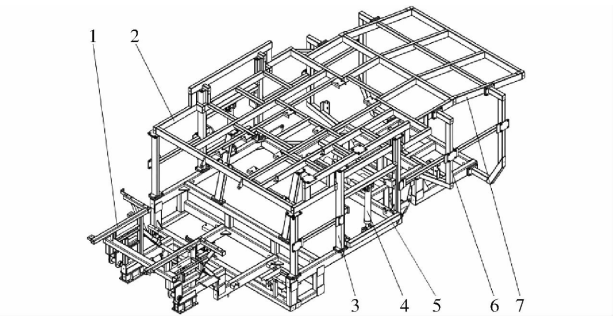

图 2　机架结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of body frame

1. 下机架　2. 上机架　3. 滑槽　4. 油缸Ⅰ　5. 升降架　6. 支撑架　7. 二层机架

置。上机架包括滑槽、升降架、二层机架和支撑架，上机架上平面主要用于安装棉秆打捆装置和整机液压件，增加了整机的可使用空间。升降架上设置有油缸Ⅰ，可控制残膜回收装置升降，调整起膜齿作业高度，油缸Ⅰ完全收起时可增加整机离地高度，提高整机通过性。上机架尾部设置倾斜角度，方便完成打捆的棉秆顺利滑下。

2.2　棉秆粉碎打捆装置设计

棉秆粉碎打捆装置不仅可以将打捆的棉秆回收利用，也可以及时清理膜面上的杂质，实现膜杂分离，方便后续的残膜回收打包作业。前期试验表明，如果不进行棉秆回收，在回收残膜过程中，残膜很容易挂在棉秆枝杈上，从而造成残膜回收率下降，同时所回收的残膜中也很容易裹挟棉壳和细小棉秆，造成残膜含杂率升高。此外，回收棉秆后根茬高度同样对残膜回收有一定影响。根茬高度越高，在其上所挂的残膜量越多。因此在残膜回收之前对棉秆进行回收，并使根茬高度控制在一定的范围内，有利于后期残膜回收打包作业，提高残膜拾净率和膜秆分离率。

2.2.1　棉秆粉碎装置

棉秆粉碎装置包括粉碎壳体、刀轴、动刀、定刀、螺旋输送器、棉秆拨轮 1 和油缸Ⅱ。通过传感器可实时获取实际作业棉田地形及棉秆密度，可适时调整作业中粉碎刀部件转速及离地高度，获得最优棉秆粉碎效果及最小残留棉秆高度。粉碎壳体围板采用折线形设计，可使秸秆在高速旋转的动刀和定刀作用下多次被打击，能得到更好的切碎效果，提高整机作业性能。螺旋输送器将打碎棉秆汇集在中部，棉秆拨轮 1 迅速将棉秆拨入刮板式棉秆升运装置，清除接口处物料，防止棉秆堵塞[5-8]。棉秆粉碎装置结构如图 3 所示。

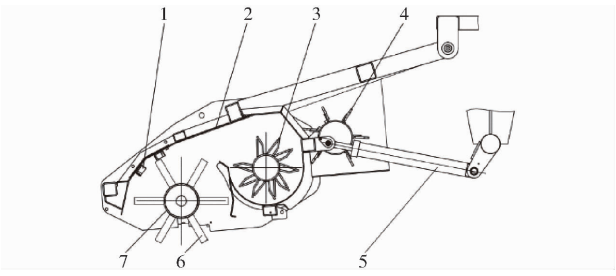

图 3　棉秆粉碎装置结构示意图

Fig. 3　Structure diagram of cotton stalk crushing device

1. 定刀　2. 粉碎壳体　3. 螺旋输送器　4. 棉秆拨轮 1　5. 油缸Ⅱ　6. 动刀　7. 刀轴

2.2.1.1　甩刀型式、数量和排列方式

动刀形状不仅直接影响棉秆粉碎装置粉碎效果，同时影响定刀排列方式。动刀按形状可分为直刀形、L 形、T 形、锤爪形、Y 形等类型。L 形刀具有正切刃和侧切刃，其切割阻力小，切断速度较小，粉碎效果好。Y 形刀一般切割部位开刃，切割阻力较小，秸秆粉碎率高，捡拾性能良好，同时其重量轻，成本低，功率消耗低。按照棉秆粉碎装置设计要求，选取 Y 形刀，采用 2 把 L 形刀组装成 Y 形刀，安装互换性好[9-10]。

为有效提升棉秆粉碎质量，降低棉秆掉落率和减少功耗，需优化设计甩刀数量和排列方式。甩刀数量可由

$$N = CL \tag{1}$$

式中　N——甩刀总数，把

C——甩刀密度，把/mm

L——甩刀在刀轴上的分布长度，mm

确定。对于 Y 形刀，一般取 0.02 ~ 0.04 把/mm，甩刀分布长度为 2 000 mm，取 0.02 把/mm，则 Y 形甩刀总数为 40 把。

Y 形动刀片采用等距双螺旋线排列方式进行排列，左右相邻动刀片夹角为 90°，动刀间距为 50 mm。该排列方式不仅可提高秸秆粉碎质量，保证刀辊平衡性和减少机具振动；而且在作业时秸秆不堵塞、不漏收、不重收。定刀设置在粉碎壳体内侧，焊接在定刀板上，根据试验，棉秆粉碎性能与定刀间距有关，间距越小棉秆粉碎长度越小，但作业能耗增大，实际生产中秸秆粉碎长度小于 150 mm 即可满足生产要求，结合现有秸秆粉碎机，定刀间距设计为 50 mm。Y 形甩刀在刀轴上的排列方式如图 4 所示。

2.2.1.2　甩刀受力分析及工作参数确定

工作时，高速旋转的甩刀受力如图 5 所示。图中 O_1 为刀轴中心；O_2 为甩刀铰接中心；O_3 为甩刀重心；R_1 为甩刀半径，mm；R_2 为刀轴中心到销轴中心距离，mm；R_3 为刀轴中心到甩刀重心距离，mm；α 为甩刀工作偏转角，(°)；L_1 为销轴中心到甩刀端部间距离，mm；L_2 为离心力 F_1 作用线与 O_2 距离，mm；L_3

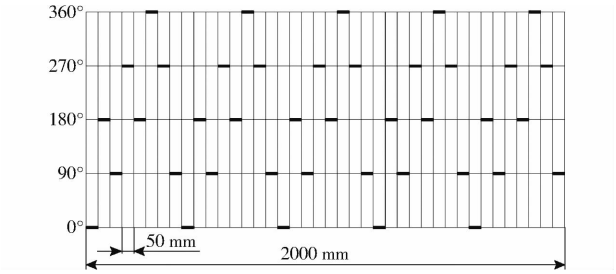

图 4 甩刀在刀轴上排列展开示意图

Fig. 4 Unfold drawing of arrangement of knife on cutter shaft

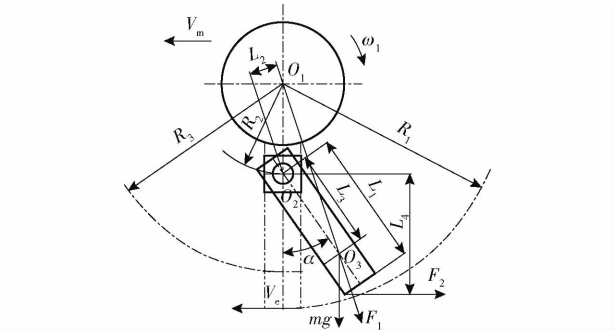

图 5 甩刀受力分析

Fig. 5 Force analysis of knife

为销轴中心到甩刀重心间距离,mm;L_4为甩刀端点到销轴距离,mm;V_m为整机前进速度,m/s;V_e为甩刀端点回转线速度,m/s;ω_1为刀轴角速度,rad/s;m为质量,kg;F_1为离心力,N;F_2为甩刀切割阻力,N。

在离心力 F_1作用下,甩刀处于径向射线位置,其部分动能用来克服切割阻力 F_2而产生偏距,即偏转角 α,甩刀相对于销轴中心点 O_2的力矩平衡方程为

$$F_2L_1\cos\alpha = mgL_3\sin\alpha + m\omega_1^2R_3L_2 \tag{2}$$

式中 g——重力加速度,m/s^2

由于 $\frac{R_3}{R_2}=\frac{L_3\sin\alpha}{L_2}$,则有

$$F_2L_1\cos\alpha = mgL_3\sin\alpha + m\omega_1^2R_2L_3\sin\alpha \tag{3}$$

整理得

$$\tan\alpha = \frac{F_2}{m\dfrac{L_3}{L_1}(g+\omega_1^2R_2)} \tag{4}$$

甩刀工作时,偏转角 α 过大,不利于切割和粉碎,由式(4)可知:当甩刀外形和安装尺寸一定时,增大质量 m,则 α 减小,可通过增加甩刀板厚来实现,板厚增加提高捡拾率和粉碎质量,但板厚过大会增加功耗,取甩刀板厚为 10 mm。增大 L_3/L_1,α 将变小,即甩刀质心向刀端移动,Y 形刀片外形特点符合这一要求,取 L_3 = 95 mm,L_1 = 120 mm。增加刀轴角速度 ω_1和甩刀安装半径 R_2,α 也将变小,但 ω_1和 R_2增大会增加机具尺寸,对动平衡要求也较高,同时增大功率损耗,取 R_2 = 130 mm。

合适的甩刀切割速度是保证粉碎长度合格和捡拾率良好的重要指标,甩刀切割作业是整机沿垄行前进和甩刀回转的合成运动,根据速度合成原理有

$$\boldsymbol{V}_f = \boldsymbol{V}_m + \boldsymbol{V}_e \tag{5}$$

式中 V_f——甩刀绝对速度,m/s

有一定刚度的茎秆无支撑切割最小速度 V_a = 48 m/s,一般情况下棉秆的切割点均在甩刀旋转轨迹的最下端,如图 5 所示,此时 V_m 和 V_e 同方向,则式(5)可变换为

$$V_f = V_m + \frac{\pi nR_1}{30} \geqslant 48 \text{ m/s} \tag{6}$$

式中 n——甩刀轴转速,r/min

将 R_1 = 250 mm、V_m = 1.94 m/s 代入式(6)计算得甩刀轴最小转速为 $n_{min} \geqslant 1\ 760$ r/min,取 n = 2 100 r/min。

2.2.2 棉秆打捆装置

棉秆打捆装置由活塞、压捆箱、离合器、打结器、带杆齿轮、大针、压草门、压草通道等组成。其喂入口宽度为 330 mm,压草通道截面尺寸(宽 × 高)为 450 mm × 350 mm,采用 2 个 D 型打结器。工作时,棉秆升运装置和棉秆拨轮 2 将棉秆输送到棉秆打捆装置压捆箱内,活塞做直线往复运动将喂入的棉秆挤压,同时带动带杆齿轮、弧形齿条和大针工作。当三者运转到打结位置时,由离合器带动打包针工作,打包针将绳送往打结器进行打结,当秸秆打好一捆时,借助后一捆棉秆的推力,沿着压草通道向后推送至掉落地面,棉秆捆尺寸(长 × 宽 × 高)为 800 mm × 450 mm × 350 mm。棉秆打捆装置结构如图 6 所示。

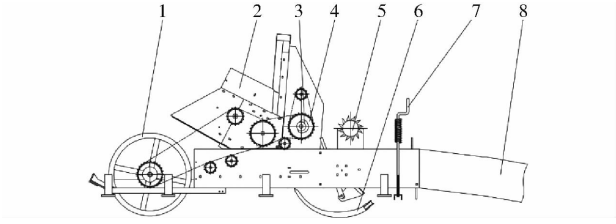

图 6 棉秆打捆装置结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of cotton stalk baler

1. 活塞 2. 压捆箱 3. 离合器 4. 打结器 5. 带杆齿轮 6. 大针 7. 压草门 8. 压草通道

2.3 残膜回收打包装置设计

2.3.1 残膜回收装置

残膜回收装置包括残膜回收机架、排杂螺旋输送器、起膜齿、起膜钉齿输送链、后限深轮和脱模装置[11-15]。起膜齿可根据地面起伏变化,通过液压装置控制入土深度,实现地面自动仿形;可根据作业中含杂量监控状态值,调节起膜钉齿输送链和残膜除杂机构运动参数;可根据残膜阻塞和缠绕监控状态,及时报警并排除作业故障。残膜回收装置结构如图 7 所示。

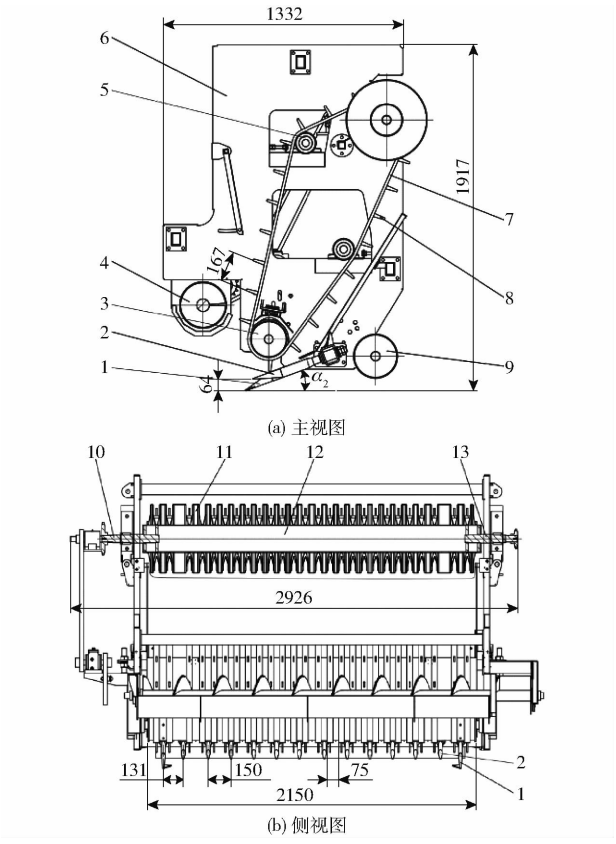

图 7　残膜回收装置结构示意图

Fig. 7　Structure diagrams of film residual collecting device

1. 侧面长齿　2. 中间短齿　3. 收膜辊　4. 排杂螺旋输送器　5. 张紧辊　6. 残膜回收机架　7. 窄 V 带　8. 钉齿　9. 后限深轮　10. 输入轴　11. 脱膜带轮　12. 脱模套筒　13. 输出轴

起膜效果与起膜齿排列方式和间距密切相关。如图 7 所示，起膜齿包括侧面长齿和中间短齿，侧面长齿入土深度大于中间短齿入土深度（深度差 64 mm），侧面长齿可切开土壤，松动整张残膜，中间短齿用于划破和挑起残膜。同时，若齿间距过大，起膜齿无法有效托起残膜，造成残膜漏收；若齿间距过小，棉秆根茬会阻碍起膜齿前行，且碎石等杂物无法从齿间落下，造成壅土，给收膜造成很大影响。根据山东滨州地区棉花铺膜种植模式（膜宽 205 cm，每膜 3 行，行距 76 cm、两边覆土压膜各 7.5 cm），初步设计中间短齿数量为 12，短齿间距为 150 mm。侧面长齿数量为 2，短齿和长齿间距为 131 mm。

起膜齿工作阻力与其结构参数和作业地况有关，起膜齿工作时的水平阻力为

$$F_L = \frac{1}{2}\rho g B T^2 \zeta_f \tag{7}$$

其中　$$\zeta_f = \tan^2\left(45° + \frac{\phi_f}{2}\right)$$

式中　F_L——起膜齿水平阻力，N

ρ——土壤密度，kg/m^3

B——起膜铲作业宽度，m

T——作业深度，m

ζ_f——无量纲因数，取决于摩擦特性及断裂条件

ϕ_f——摩擦角，(°)

由式(7)可知，起膜齿工作时的水平阻力与起膜齿宽度和作业深度呈线性关系，水平阻力随起膜齿宽度和作业深度增大而增大。实际作业中，侧面长齿入土深度为 12 cm，中间短齿入土深度为 5 cm，考虑作业功耗影响，起膜齿宽度初步设计为 4 cm。取 $\rho = 2\,650$ kg/m^3，$\phi_f = 33°$，则单个侧面长齿和单个中间短齿的水平阻力分别为 25.37 N 和 4.40 N，起膜齿水平阻力总和为 103.54 N。

起膜铲入土角 α_2 直接影响起膜质量和残膜回收率，α_2 增大有利于破碎土块，但起膜齿工作阻力将增加，残膜破损严重，造成地膜和杂物壅堵；若 α_2 减小，则起膜齿碎土能力差，不利于膜土分离。根据文献[16]，起膜铲入土角 α_2 取 10°～35°时起膜效果较好，结合试验数据取 $\alpha_2 = 20°$。

排杂螺旋输送器设置在残膜回收装置前部，排杂螺旋输送器包括螺旋叶片轴和排杂壳体，为左旋向设计，主要功用是除杂，将收膜辊前拥堵的土和棉秆混合物等杂质排向机具左侧，并将起膜齿带起的棉秆和杂质回落至螺旋输送器中的部分排向机具左侧。起膜钉齿输送链包括收膜辊、张紧辊、窄 V 带和钉齿，窄 V 带下面环绕收膜辊，上面环绕脱模套筒，起膜钉齿均匀设置在窄 V 带上。窄 V 带和钉齿采用橡胶材料，可柔性收获残膜，减少残膜破损，提高残膜回收率。窄 V 带排间距为 75 mm，钉齿间距为 167 mm，排间距和齿间距优化配置可减少残膜漏收和壅土，降低残膜含杂率，提高残膜回收率。

脱膜装置由脱膜带轮、脱模套筒、输入轴和输出轴等组成，脱膜带轮通过螺钉安装在脱模套筒上，窄 V 带环绕在两脱膜带轮中间，输入轴和输出轴与下机架通过轴承连接，动力由输入轴传入，然后传递给脱膜装置、起膜装置和排杂螺旋输送器。当脱膜带轮直径为 450 mm、带轮间距为 85 mm 时，在带轮支撑力作用下，残膜变形逐渐增大，当残膜变形产生的拉力足够克服钉齿对残膜的摩擦力时，残膜开始向钉齿齿尖方向运动，直至脱离捡拾钉齿。从钉齿上脱离的残膜附着在脱膜装置带轮上，随着带轮的继续运动落入残膜输送装置。

2.3.2　残膜打包装置

残膜打包装置是一种无芯卷膜式打包装置，由带式打包机构、传动系统和打包机架组成。其中打包机构由前打包带、后打包带、皮带辊、张紧辊筒和张紧调节装置组成，前打包带与后打包带呈 V 形布

置,两打包带之间的 V 形空间为打包室。打包室上端开口为进料口,下端为出料口。液压油缸Ⅲ安装在打包机架上,可实现打包室开合[17-19]。打包装置外形尺寸(长×宽×高)为 1 670 mm×2 150 mm×1 270 mm,残膜打包装置结构如图 8 所示。

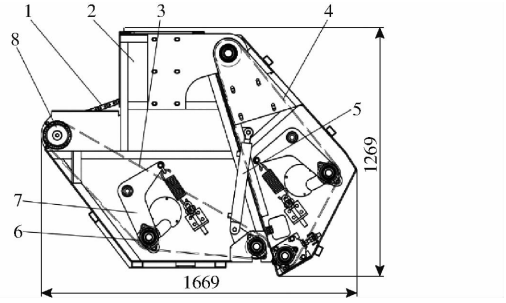

图 8 残膜打包装置结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of film residual packing device

1. 传动系统 2. 打包机架 3. 前打包带 4. 后打包带 5. 液压油缸Ⅲ 6. 张紧辊筒 7. 张紧调节装置 8. 皮带辊

打包装置工作时,打包室中的残膜在前后打包带作用下旋转并逐渐形成包芯,新喂入的残膜不断缠绕在包芯上,最终形成残膜包。残膜包芯受力分析如图 9 所示。图中 o 为残膜包芯回转中心;G 为残膜包芯重力,N;N_1为前打包带对残膜包芯的支持力,N;N_2为后打包带对残膜包芯的支持力,N;f_{1h}为前打包带与残膜包芯间滑动摩擦力,N;f_{2h}为后打包带与残膜包芯间滑动摩擦力,N;f_{1g}为前打包带对残膜包芯的滚动阻力,N;f_{2g}为后打包带对残膜包芯的滚动阻力,N;α_b为前打包带和包芯接触面与水平面夹角,即前打包带水平角,(°);β_b为前打包带和包芯接触面与后打包带和包芯接触面夹角,即打包室角,(°);V_b为打包带速度,m/s。

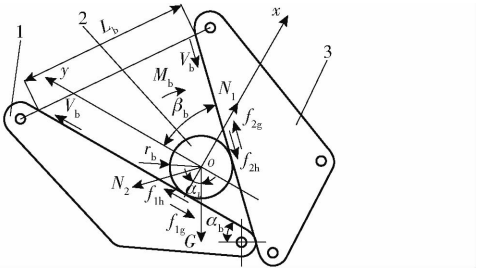

图 9 残膜包芯受力示意图

Fig. 9 Force diagram of film residual core

1. 前打包带 2. 残膜包芯 3. 后打包带

取 y 轴平行于前打包带与残膜包芯接触面,x 轴垂直于 y 轴,x 轴和 y 轴均通过残膜包芯回转中心 o,则残膜包芯在 x 轴和 y 轴方向上受力为

$$\begin{cases} N_1 - G\cos\alpha_b - f_{2h}\sin\beta_b + f_{2g}\sin\beta_b - N_2\cos\beta_b = 0 \\ N_2\sin\beta_b - G\sin\alpha_b + f_{1h} - f_{1g} - f_{2h}\cos\beta_b + f_{2g}\cos\beta_b = 0 \end{cases} \tag{8}$$

其中 $f_{1h} = \mu_h N_1$ $f_{1g} = \mu_g N_1$

$f_{2h} = \mu_h N_2$ $f_{2g} = \mu_g N_2$

式中 μ_h——包芯与打包带间滑动摩擦因数

μ_g——包芯与打包带间滚动摩擦因数

则可得前后打包带对残膜包芯的支持力为

$$\begin{cases} N_1 = \dfrac{G[\sin\alpha_b\cos\beta_b + (1 - \mu_h\mu_g + 2\mu_g^2)\cos\alpha_b\sin\beta_b]}{[1 + (\mu_h - \mu_g)^2]\sin\beta_b} \\ N_2 = \dfrac{G[\sin\alpha_b - (\mu_h - \mu_g)\cos\alpha_b]}{[1 + (\mu_h - \mu_g)^2]\sin\beta_b} \end{cases} \tag{9}$$

由受力分析可知残膜包芯受到的转动力矩 M_b 为

$$M_b = f_{1h}r_b + f_{2h}r_b - f_{1g}r_b - f_{1g}r_b \tag{10}$$

式中 r_b——残膜包半径,mm

将式(9)代入式(10),整理得

$$M_b = \frac{Gr_b(\mu_h - \mu_g)[\sin\alpha_b(1 + \cos\beta_b) + \cos\alpha_b(\sin\beta_b + \mu_h - \mu_g)]}{[1 + (\mu_h - \mu_g)^2]\sin\beta_b} \tag{11}$$

由式(11)可知,残膜包芯受到的转动力矩 M_b 与前打包带水平角 α_b、打包室角 β_b、滑动摩擦因数 μ_h、滚动摩擦因数 μ_g、残膜包半径 r_b及残膜包重力 G 有关。随着进入打包室的残膜增多,即 r_b和 G 增大,M_b随之也增大。取 $\mu = \mu_h - \mu_g$,式(11)分别对 α_b、β_b和 μ 求偏导数,由于 $0° \leqslant \alpha_b \leqslant 90°$,$0° \leqslant \beta_b \leqslant 90°$,通过分析可知当其他参数一定时,转矩 M_b随着 α_b递增而增加,随着 β_b减小而增加,随着 μ 递增而增加,即改变打包带的表面形态可以增大力矩 M_b,同时由于滑动摩擦因数 μ_h大于滚动摩擦因数 μ_g,即 $\mu > 0$,则 $M_b > 0$,所以残模包芯可以在前后打包带作用下进行旋转打包作业。

前打包带水平角 α_b和打包室角 β_b是打包装置的重要参数,由上述分析可知,增加 α_b和减小 β_b有利于增大残膜受到的转矩,进而促进残膜包成型。同时 α_b和 β_b取值不仅受到安装空间限制,也与打包装置进料口宽度 L_b有关,进一步影响打包性能。α_b减小会增加打包装置纵向长度,造成整机机动性能变差;α_b增加会加大前打包带装置安装空间,与残膜输送装置干涉,综合考虑取 $\alpha_b = 30°$。β_b减小会减小 L_b,造成丢膜现象;β_b增加会加大 L_b,同时增加打包装置安装高度,造成后打包装置与上机架发生干涉,考虑到以上原因,取 $\beta_b = 44°$,$L_b = 830$ mm。

3 田间试验

3.1 试验条件

依据项目任务书要求,试制自走式联合作业机样机,验证样机性能指标参数,于 2024 年 3 月在山

东省滨州市滨城区杨柳雪镇进行样机试验。试验田前茬种植作物为棉花，试验地面积为 20 hm^2，滴灌管带和滴灌设备已清理，地面平整，土壤含水率为 10.5%，土壤坚实度为 260 kPa。棉花种植行距为 760 mm，株距为 250 mm，棉秆平均高度为 950 mm，棉秆平均直径为 18.5 mm，棉秆含水率为 22.5%。采用厚度 0.01 mm 耐候地膜，地膜幅宽为 2.05 m，铺膜方式为每膜 3 行，地膜两边压入土中，膜中间有部分覆土，有少量破损。样机作业速度为 7 ~ 10 km/h，棉秆粉碎主轴转速为 2 100 r/min，拨轮主轴转速为 1 100 r/min，棉秆升运主轴转速为 400 r/min，打捆主轴转速为 100 r/min，起膜齿作业深度为 40 ~ 60 mm，收膜主轴转速为 90 r/min，，残膜输送主轴转速为 140 r/min，残膜打包主轴转速为 150 r/min。残膜打包装置打包带表面状态为粗糙面，打包带线速度为 1.2 m/s[20]。样机和田间试验情况如图 10 所示。



(a) 样机　　(b) 田间试验现场

图 10　样机和田间试验

Fig. 10　Prototype and field experiment

3.2　试验方法

依据 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械 第 6 部分：秸秆粉碎还田机》、GB/T 34390—2017《自走式秸秆收获方捆压捆机》、GB/T 25412—2021《残地膜回收机》和 GB/T 14290—2021《圆草捆打捆机》等标准要求，对自走式样机进行试验，选取秸秆损失率、秸秆粉碎长度合格率、秸秆捆密度、秸秆成捆率、残膜拾净率、膜秆分离率、残膜成包率和残膜包密度为评价指标，并验证秸秆粉碎、秸秆输送、秸秆压缩打捆、残膜拾取、残膜输送和残膜打包等工作部件作业性能。

3.2.1　秸秆损失率

测区长度为 60 m，宽度等于工作幅宽，将测区漏割、漏拾、遗失等损失秸秆收集并称量其质量，为测区秸秆损失质量。待样机通过测区后，称量并记录测区内收获的秸秆质量总和。秸秆损失率计算式为

$$S_j = \frac{W_j}{W_c + W_j} \times 100\% \tag{12}$$

式中　S_j——棉秆损失率，%

W_j——测区秸秆损失质量，g

W_c——测区内收获的秸秆质量，g

3.2.2　秸秆粉碎长度合格率

秸秆粉碎长度合格率为粉碎长度合格棉秆质量占粉碎棉秆总质量百分比，棉秆长度小于等于 200 mm 为合格。单个行程在测区长度方向上等间距测定 3 点，往返共 6 点，每点随机测定 1 m × 1 m 面积，捡拾所有秸秆称量，从中挑出粉碎长度不合格的秸秆称量，计算秸秆粉碎长度合格率和平均值。

3.2.3　秸秆捆密度

在行程中随机选择 10 个秸秆捆，称量秸秆捆质量，测量秸秆捆体积，计算秸秆捆密度，取其平均值作为最终数据，计算式为

$$\rho_j = \frac{10^6 W_1}{V_1} \tag{13}$$

式中　ρ_j——秸秆捆密度，kg/m^3

W_1——秸秆捆质量，kg

V_1——秸秆捆体积，cm^3

3.2.4　秸秆捆成捆率

试验结束后，从试验区内统计秸秆捆成捆数和散捆数，计算秸秆捆成捆率，计算式为

$$S_{jk} = \frac{I_{jc}}{I_{jd}} \times 100\% \tag{14}$$

式中　S_{jk}——秸秆捆成捆率，%

I_{jd}——秸秆捆打捆总数

I_{jc}——秸秆捆成捆数

3.2.5　残膜拾净率

试验地地膜主要分布在地表浅层，采用五点法确定作业前的 5 个测点，然后在作业前的 5 个测点附近但不重叠的区域再选取 5 个测点，作为作业后的 5 个测点。分别测量作业前、后各 5 个测点的残膜质量，计算拾净率并取平均值，计算式为

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{W_3}{W_2}\right) \times 100\% \tag{15}$$

式中　η_2——拾净率，%

W_2——作业前残膜质量，g

W_3——作业后残膜质量，g

3.2.6　残膜包密度

在行程中随机选择 10 个残膜包，分别测量残膜包质量、宽度和直径，计算残膜包密度，取其平均值作为最终数据，计算式为

$$\rho_m = \frac{4W_4}{\pi D_4^2 A_4} \tag{16}$$

式中　ρ_m——残膜包密度，kg/m^3

W_4——残膜包质量，kg

D_4——残膜包直径，m

A_4——残膜包长度，m

3.2.7 残膜成包率

试验结束后,从试验区内统计残膜包成包数和散包数,计算残膜成包率,计算式为

$$S_{mb}=\frac{I_{mc}}{I_{md}}\times 100\% \tag{17}$$

式中 S_{mb}——残膜成包率,%

I_{md}——残膜打包总数

I_{mc}——残膜成包数

3.2.8 膜秆分离率

膜秆分离率是评价秸秆粉碎和输送效果的重要指标,体现了整机性能,计算式为

$$\eta_3=\frac{W_5}{W_5+W_6}\times 100\% \tag{18}$$

式中 η_3——膜秆分离率,%

W_5——残膜打包装置回收残膜质量,kg

W_6——残膜打包装置回收秸秆质量,kg

3.3 试验结果与分析

自走式联合作业机田间试验结果如表 2 所示。

表 2 田间试验结果

Tab.2 Field experiment results

参数	试验结果	合格值或设计值
秸秆损失率/%	3	≤8
秸秆粉碎长度合格率/%	97	≥90
秸秆捆密度/(kg·m^{-3})	120	≥100
秸秆捆成捆率/%	98.5	≥98
残膜拾净率/%	90	≥80
残膜包密度/(kg·m^{-3})	110	≥100
残膜成包率/%	99	≥99
膜秆分离率/%	90	≥85
生产率/(hm^2·h^{-1})	1.4	1.3

试验结果表明,该机型对棉秆粉碎打捆和残膜回收打包联合作业适应性较好,其底盘系统、棉秆粉碎打捆装置、残膜回收打包装置等部件工作性能良好,秸秆损失率、秸秆粉碎长度合格率、秸秆捆密度、秸秆捆成捆率、残膜拾净率、膜秆分离率、残膜成包率、残膜包密度和生产率等各项指标均达到合格要求或设计要求,其生产率指标相比牵引式机型也有提高。

在作业过程中,高速旋转的甩刀会将部分残膜碎片同粉碎后的大量棉秆一起抛送到棉秆螺旋输送器中,同时,起膜齿在破膜入土和托起残膜过程中,会造成部分残膜破损或漏收,从而影响残膜拾净率;甩刀转速和螺旋输送器转速配比不理想会导致秸秆粉碎长度合格率减低,同时可能会造成棉秆螺旋输送器发生堵塞现象,少量棉秆会掉落到膜上被残膜回收装置拾取,造成膜秆分离率降低;由于棉秆输送装置运输距离较长,如果整机前进速度、输送装置转速和打捆装置马达转速配比不合理,同时如果秸秆粉碎长度达不到设计要求,会造成打捆装置入口处堵塞,影响打捆性能;打包带表面状态、打包带线速度对残膜成包率和残膜包密度的影响显著,加大打包带表面摩擦因数和在合理范围内增加打包带线速度,可以使残膜在打包室内更容易成型。本次试验未深入探究秸秆粉碎打捆和残膜回收打包等装置在不同作业参数组合下的作业效果,在后续研究中还需进行样机各工作装置作业参数优化试验,进一步提高整机作业效果。

4 结论

(1)自走式联合作业机采用全液压传动,可实时监控作业参数,可实现膜秆分离,一次性完成秸秆粉碎、输送和压缩打捆,残膜捡拾、输送和打包等作业,满足农艺要求,同时可为棉秆和残膜集中处理与再利用提供有效技术支撑。

(2)确定了整机总体方案及控制型式、整机结构和主要技术参数,设计了机架、秸秆粉碎打捆和残膜回收打包等工作装置的结构型式和作业参数。

(3)当整机作业速度为 7 ~ 10 km/h、起膜齿作业深度为 40 ~ 60 mm、残膜打包装置打包带表面状态为粗糙面和打包带线速度为 1.2 m/s 时,秸秆损失率为 3%,秸秆粉碎长度合格率为 97%,秸秆捆密度为 120 kg/m^3,秸秆捆成捆率为 98.5%,残膜拾净率为 90%,残膜包密度为 110 kg/m^3,残膜成包率为 99%,膜秆分离率 90%,生产率为 1.4 hm^2/h。田间试验结果表明,整机及各部件工作性能良好,其性能指标满足标准和设计要求。

参 考 文 献

[1] 贺小伟,刘金秀,李传峰,等. 我国棉秆机械收获技术现状分析及对策研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):19 - 25.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, LI Chuanfeng, et al. Current status and countermeasure research for cotton stalk mechanical harvesting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3):19 - 25. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 张爱民,廖培旺,陈明江,等. 自走式不对行棉秆联合收获打捆机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2019,24(9):127 - 138.

ZHANG Aimin, LIAO Peiwang, CHEN Mingjiang, et al. Design and experiment of self-propelled non-aligned cotton stalk combined harvest baler[J]. Journal of China Agricultural University, 2019,24(9):127 – 138. (in Chinese)

[4] 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 Yan, ZHENG Xuan, CHEN Xuegeng, et al. Design and test of CMJY – 1500 type plastic film residue collecting and balling machine[J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(5): 1 – 9. (in Chinese)

[5] 宋占华,宋华鲁,耿爱军,等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(16): 37 – 45.
SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 37 – 45. (in Chinese)

[6] 侯加林,蒋韬,吴彦强,等. 小麦秸秆往复式切割试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):101 – 106.
HOU Jialin, JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):101 – 106. (in Chinese)

[7] WANG Yi,YANG Yan,ZHAO Hongmei,et al. Effects of cutting parameters on cutting of citrus fruit stems[J]. Biosystems Engineering,2020,193: 1 – 11.

[8] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 马铃薯杀秧机设计与优化[J]. 农业机械学报,2016,47(5):106 – 114.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design and experimental on potato haulm cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 106 – 114 . (in Chinese)

[9] KENTARO A, HIROYUKI Y. Comparison of the characteristics of cellulose micro fibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber[J]. Cellulose, 2009, 23(16): 1017 – 1023.

[10] 吴昆,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):1 – 20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):1 – 20. (in Chinese)

[11] 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(增刊):304 – 310.
SUN Yue,JIAN Jianming,TIAN Yutai, 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(Supp.):304 – 310. (in Chinese)

[12] 由佳翰,张本华,温浩军,等. 铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2017,48(11):97 – 104.
YOU Jiahan,ZHANG Benhua,WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):97 – 104. (in Chinese)

[13] 康建明,彭强吉,王士国,等. 弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):295 – 303.
KANG Jianming,PENG Qiangji,WANG Shiguo, et al. Improved design and experiment on pickup unit of spring-tooth residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):295 – 303. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 王昭宇,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[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)

[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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):143 – 148. (in Chinese)

[17] 王学农, 刘杰, 刘旋峰,等. 无芯卷膜式残膜打包装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 28 – 35.
WANG Xuenong, LIU Jie, LIU Xuanfeng, et al. Design and test of a coreless-roll packing device for residual film[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 28 – 35. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 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)

[20] 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)