

棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验

胡 凯, 王吉奎^{*}, 李 斌, 蒋 蓓, 丁双双, 李天文

(石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘 要: 针对新疆棉区秸秆粉碎还田与残膜回收机联合作业时出现的膜秆不分、残膜回收率低、脱膜效果差以及残膜易缠绕等问题, 该文设计了棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机, 主要由牵引装置、秸秆粉碎装置、秸秆输送装置、浮动式残膜回收装置、脱膜装置、传动系统、残膜回收箱、机架和地轮等组成, 一次作业可实现棉秸秆粉碎还田、膜秆分离和残膜回收。该机将锤片式棉秸秆粉碎装置与刮板式输送装置相结合, 用于秸秆粉碎还田和秸秆与待收残膜分离; 采用浮动式起膜机构和齿耙式搂膜装置回收残膜, 地面仿形效果好, 有利于提高残膜回收率; 用气力脱膜装置脱膜, 提高脱膜可靠性, 并防止残膜与收膜装置的缠绕而影响机具正常工作。通过对主要工作部件的设计, 确定主要结构和工作参数, 并分析了样机的工作过程。田间试验表明, 在机具作业速度 5~5.5 km/h、秸秆输送链轮转速 125 r/min、输送装置倾角 40°、残膜输送链轮转速 70 r/min 和风机转速 1 620 r/min 时, 能达到膜秆分离率 97%, 残膜回收率 88.6%, 脱膜率 89.4%, 能够满足秸秆粉碎还田与残膜回收的技术要求, 研究成果有利于解决棉田残膜污染问题。

关键词: 棉花, 秸秆, 地膜, 粉碎, 回收

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.003

中图分类号: S223.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0024-09

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 24—32. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

新疆棉区由于连年铺膜植棉且使用过的地膜未能及时有效回收, 给农业生态环境造成了严重的“白色污染”。据统计^[1], 新疆棉花种植已超过 153 万 hm^2 , 占全疆农作物总播种面积的 1/3, 每年仅铺膜植棉新增残膜就高达近 10 万 t, 棉田是治理残膜污染的重点领域。目前机械化回收残膜是解决棉田残膜污染的主要手段, 按作业季节残膜回收可分为: 苗期收膜、春播前整地收膜和秋后收膜, 由于膜下滴灌技术的大面积使用, 苗期已不能收膜; 播前整地时间紧, 残膜破碎严重, 残膜回收率低; 棉花收获后当年使用的地膜强度相对较高, 且在地表连成一片, 是机械化回收的较佳时期; 但田间残留大量棉

秸秆, 收膜时残膜容易缠绕在秸秆上, 给机械化回收残膜带来不便^[2-5]。

秋后棉秸秆通常做粉碎还田处理, 若粉碎还田后的秸秆与待收残膜不能有效分离, 则会使所收残膜含秸秆等杂物较多, 残膜箱会在较短时间内盛满, 作业过程中需频繁停机卸膜, 严重影响作业效率, 给机械化回收残膜带来很大不便^[6]。因此, 粉碎后的棉秆与待收残膜分离是秋收后机械化回收残膜需要首先解决的问题。

目前用于秋后收膜的主要机型有新疆农垦科学院农机研究所研制的 4SJ-1.6 型残膜回收与秸秆粉碎联合作业机和新疆农业科学院农机化研究所研制 4JSM-1800A2 型棉秸秆还田及残膜回收联合作业机, 上述机型采用横轴锤爪式秸秆粉碎装置粉碎秸秆, 采用螺旋输送或抛送的方式分离膜秆^[7-10]。工作时易出现堵塞, 膜秆分离率低, 其残膜清理滚筒装置收膜效果虽好, 但结构复杂, 易出故障^[11-16]。

本文将锤片式棉秸秆粉碎装置与刮板式输送装置相结合用于棉秸秆粉碎还田与膜秆分离; 采用浮动式起膜机构和齿耙式搂膜装置回收残膜, 并用气力脱膜装置脱膜, 设计了棉秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业机, 并对样机进行了性能试验。

收稿日期: 2013-03-10 修订日期: 2013-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50865010); 石河子大学高层次人才科研资助项目 (RCZX201211)。

作者简介: 胡 凯 (1985—), 男, 山东临沂人, 研究方向为农业机械装备创新与性能设计。石河子 新疆石河子大学机械电气工程学院, 832003。Email: jang_hukai@126.com

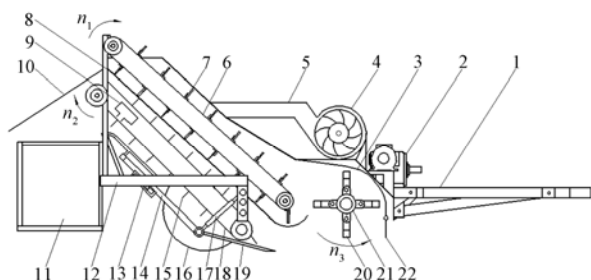
※通信作者: 王吉奎 (1970—), 男, 新疆玛纳斯人, 副教授, 主要从事农业机械化工程研究。石河子 新疆石河子大学机械电气工程学院, 832003。Email: shzwjk@126.com

试验表明,该机具可有效实现秸秆粉碎还田和膜秆分离,回收的残膜含杂率低,浮动式残膜回收装置地面仿形性较好,有助于地表残膜回收,气力脱膜可防止残膜与脱膜装置的缠绕。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

机具由牵引装置、秸秆粉碎装置、秸秆输送装置、浮动式残膜回收装置、脱膜装置、传动系统、机架、残膜回收箱和地轮等部分构成。其结构如图 1 所示。



1. 牵引装置 2. 传动系统 3. 罩壳 4. 离心风机 5. 风道 6. 秸秆输送链 7. 刮板 8. 底板 9. 吹风口 10. 尾板 11. 残膜箱 12. 机架 13. 滑道 14. 起膜架 15. 链齿耙 16. 地轮 17. 调节吊杆 18. 残膜输送链 19. 起膜齿 20. 动刀 21. 刀轴 22. 前挡板
1. Traction device 2. Transmission system 3. Shell 4. Centrifugal fan 5. Air passage 6. Straw conveyor chains 7. Scraper 8. Bottom plate 9. Air outlet 10. Tailboard 11. Plastic film box 12. Frame 13. Slideway 14. Onwards film frame 15. Sprocket rake 16. Ground wheel 17. Adjust lever 18. Plastic film conveyor chains 19. Up film tooth 20. Moving blade 21. Cutter shaft 22. Front bezel.

注: n_1 和箭头指向分别为秸秆输送链轮转速和转动方向; n_2 和箭头指向分别为残膜输送链轮转速和转动方向; n_3 和箭头指向分别为刀轴的转速和转动方向。

Note: n_1 and arrow points are the straw conveyor chain wheel rotation speed and rotation direction; n_2 and arrow points are the plastic film transport chain wheel rotation speed and rotation direction; n_3 and arrow points cutter shaft rotation speed and rotation direction.

图 1 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机结构图

Fig.1 Cotton straw smashing and plastic film recycling combined operation machine structure diagram

其中秸秆粉碎装置由刀轴、定刀片、动刀片、罩壳和前挡板组成,秸秆输送装置由秸秆输送链、刮板、底板和尾板组成,浮动式残膜回收装置由起膜齿、起膜架、残膜输送链、链齿耙和调节吊杆等组成,脱膜装置由离心风机、风道和吹风口组成^[17]。

1.2 工作原理

如图 1 所示,机具以牵引方式与拖拉机相联,拖拉机动力输出轴通过传动轴与机具的传动系统相联,分别带动风机 4、秸秆粉碎刀轴 21 和秸秆输送装置工作,地轮 16 带动残膜回收装置工作。作业时,机组顺着作物苗行前进,秸秆粉碎装置的刀轴带动动刀 20 作高速回转运动,在动刀和定刀的共同作用下棉秸秆被打碎,打碎后的秸秆在罩壳 3 的导向作用下被抛撒至秸秆输送装置,刮板 7 在秸

秆输送链的带动下沿底板 8 运动,刮板将抛撒过来的秸秆沿底板刮送至尾板 10,然后秸秆顺着尾板滑落到残膜箱 11 后侧已回收了残膜的地面上,实现地面秸秆与待收残膜分离。同时,调节好入土深度的浮动式残膜回收装置的起膜齿 19,在秸秆已被粉碎且抛送输走的地表顺着膜行前行,地表残膜被起膜齿托起,残膜输送链 18 带动齿耙 15 依次划过起膜齿,齿耙挑住起膜齿托起的残膜向残膜回收箱上侧输送,当残膜经过风机 4 送风的吹风口 9 处时,在气力作用下残膜被吹落到残膜箱中。残膜箱装满后,将膜箱底部箱板打开,可卸下收集的残膜。

1.3 主要技术指标

根据新疆棉花的种植模式和农艺要求,整机主要技术参数要求如表 1 所示。

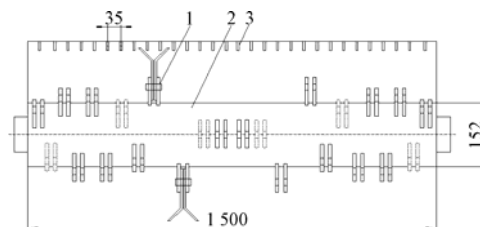
表 1 设计要求主要技术指标
Table 1 Main technical parameters of design requirement

项目 Items	技术指标值 Technical indexes
牵引方式 Mode of traction	牵引式
整机尺寸 Complete machine size /mm×mm×mm	3600×1500×1900
配套动力 Matched power/kW	30~66
作业幅宽 Operation width/m	1.5
作业速度 Operation speed/(km·h ⁻¹)	5.5
留茬高度 Stubble height/mm	≤80
残膜回收率 Plastic film recovery ratio/%	≥85
膜秆分离率 Film-straw separation ratio/%	≥95
秸秆粉碎长度 Straw chopping length/mm	≤150

2 主要部件设计及参数确定

2.1 秸秆粉碎还田装置

秸秆粉碎采用横轴锤片式秸秆粉碎还田装置,主要由刀轴、定刀片、动刀片、罩壳和前挡板组成。其结构如图 2 所示。



1. 动刀 2. 刀轴 3. 定刀
1. Movable knife 2. Cutter shaft 3. Fixed knife

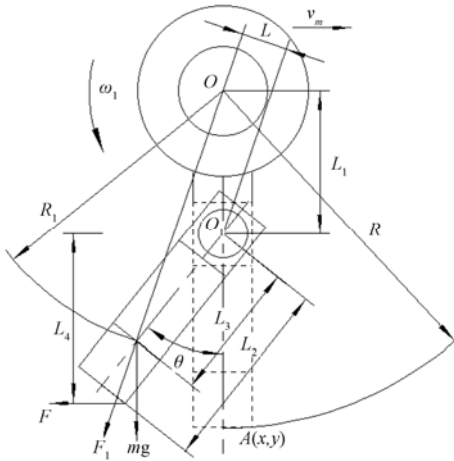
图 2 刃刀排列示意图

Fig.2 Array of knives

动刀片铰接在刀轴上,采用 Y 型刀片,为减少秸秆粉碎阻力和刀轴平衡运转,动刀片在刀轴

上呈螺旋布置。定刀设在粉碎罩壳内侧,据试验,秸秆粉碎性能与定刀间距有关,间距越小秸秆粉碎长度越小,但作业能耗增大,实际生产中秸秆粉碎长度小于 0.15 m 即可满足生产要求^[18],结合现有秸秆粉碎机,此处定刀间距设计为 35 mm,粉碎还田装置的宽度为 1 500 mm,刀轴直径为 152 mm。

机具工作时甩刀作高速旋转运动,在离心力作用下,甩刀处于圆周径向位置,甩刀工作时的受力分析如下图 3 所示。



注: v_m 为机具前进速度, m/s; $A(x, y)$ 为甩刀端部处某一点; R 为甩刀半径, mm; R_1 为刀轴中心到甩刀重心的距离, mm; θ 为甩刀工作偏转角, ($^\circ$); L_1 为刀轴中心到销轴中心之间的距离, mm; L_2 为销轴中心到甩刀端部之间的距离, mm; L_3 为销轴中心到甩刀重心之间的距离, mm; L_4 为甩刀端点到销轴距离, mm; ω_1 为刀轴的角速度, rad/s; F 为甩刀切割阻力, N; F_1 为离心力, N; O 为刀轴的中心; O_1 为甩刀的铰接中心; m 为质量, kg。

Note: v_m is the machine forward speed, m/s; $A(x, y)$ is a point of flail end portion; R is radius of knife shaft, mm; R_1 is distance between knife shaft center and flail center of gravity, mm; θ is balisongs work deflection angle, ($^\circ$); L_1 is distance between knife shaft center and pin shaft center, mm; L_2 is distance between pin shaft center and flail center of gravity, mm; L_3 is distance between pin shaft center and flail endpoint, mm; L_4 is distance between flail endpoint and pin shaft, mm; ω_1 is the angular velocity of the cutter shaft, rad/s; F is the flail cutting resistance, N; F_1 is the centrifugal force, N; O is the center of cutter shaft; O_1 is the center of hinged flail; m is the mass, kg.

图 3 甩刀受力分析

Fig.3 Balisongs force analysis

忽略销轴对甩刀的摩擦力矩,由图 3 可得^[19]

$$L_4 = L_2 \cos \theta \quad \frac{R_1}{L_1} = \frac{L_3 \sin \theta}{L} \quad (1)$$

作用在甩刀上相对于销轴中心的力矩平衡方程为

$$FL_2 \cos \theta = mgL_3 \sin \theta + m\omega_1^2 L_1 L_3 \sin \theta \quad (2)$$

整理得,

$$\tan \theta = \frac{F}{m \frac{L_3}{L_2} (g + \omega_1^2 L_1)} \quad (3)$$

式中, R_1 为刀轴中心到甩刀重心的距离, mm; θ

为甩刀工作偏转角, ($^\circ$); L_1 为刀轴中心到销轴中心之间的距离, mm; L_2 为销轴中心到甩刀端部之间的距离, mm; L_3 为销轴中心到甩刀重心之间的距离, mm; L_4 为甩刀端点到销轴距离, mm; ω_1 为刀轴的角速度, rad/s; F 为甩刀切割阻力, N; m 为重量, kg。

甩刀工作时,工作偏转角 θ 越大越不利于棉秆粉碎,由式(3)知,当甩刀的长度与安装位置一定时,增加刀辊角速度 ω 、甩刀质量 m 都能使用刀偏转角减小,粉碎效果提高,但动力消耗也会相应增加,且对刀轴动平衡要求也较高,因此要确定合适的刀轴转速。

有一定刚度的茎秆无支撑切割最小速度 $v_a=48 \text{ m/s}$ ^[20],刀轴的转速 n_3 根据下式确定

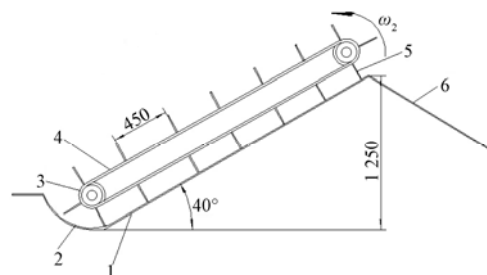
$$n_3 = \frac{30(v_a + v_m)}{\pi R} \quad (4)$$

式中, v_a 为刀具切割速度, m/s; v_m 为机具前进速度, m/s; R 为甩刀半径, m。

在机具作业速度 $v_m=1.53 \text{ m/s}$ 时,由式(4)可得到刀轴的设计转速 $n_3=2\ 005 \text{ r/min}$ 。据试验,当刀轴转速 $n_3<1\ 800 \text{ r/min}$ 时,棉秸秆不能充分粉碎,部分粉碎后的棉秸秆长度大于 150 mm,达不到秸秆粉碎还田农艺要求;当 $n_3>2\ 200 \text{ r/min}$ 时,虽对棉秸秆粉碎有利,但相应的功耗增加,刀具磨损加剧,机具振动也随之增大,因此确定合适的刀轴转速 $n_3=1\ 800\sim 2\ 200 \text{ r/min}$ 。

2.2 秸秆输送装置

秸秆输送装置是棉秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业机的重要组成部分,设在秸秆粉碎装置之后,用来输送粉碎后的棉秸秆,主要由秸秆输送链、刮板、底板和尾板等部分组成。其结构如图 4 所示。



1. 底板 2. 接料斗 3. 链轮 4. 刮板组架 5. 刮板 6. 尾板
1. Bottom plate 2. Receiving hopper 3. Sprocket wheel 4. Scraper frame group 5. Scraper 6. Tailboard

注: ω_2 为秸秆输送链的旋转方向。

Note: ω_2 is direction of the straw convey chains.

图 4 秸秆输送装置结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of straw conveying means

由于粉碎后的棉秸秆长度不一、粗细不均,为减少输送摩擦、保证棉秸秆输送中稳定可靠,采用

齿形刮板。其结构如图 5 所示。

刮板由棉帆布输送带做成, 齿形刮板切入性能较好, 且在输送过程中能够减少与底板之间的摩擦、减轻输送重量, 提高秸秆输送性能。

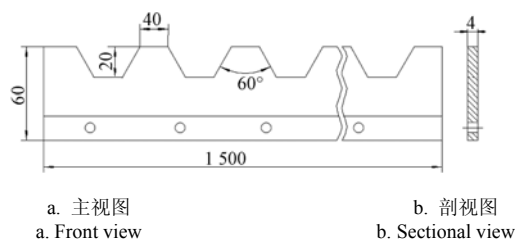


图 5 刮板结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of scraper

秸秆输送效率主要由刮板高度、排列方式、工作倾角及输送速度等因素决定。在秸秆输送速度一定时, 刮板高度过低在输送过程中会造成秸秆掉落, 过高则会增加功率损耗; 同时, 刮板排列间距过大, 会造成秸秆输送能力降低, 过小则会增加刮板的数量, 相应的运动部分的重量和运动阻力也随之增加, 且刮板本身占用空间也会影响秸秆的输送能力; 结合前期试验, 确定刮板的高度为 60 mm, 2 刮板间的排列间距 450 mm, 刮板个数 9, 考虑到整机结构布置及工作方式, 确定秸秆输送部分的工作倾角为 40°。

刮板组工作行程阻力与秸秆输送效率密切相关, 刮板组工作行程阻力可由下式求得^[21]

$$F_f = ndqg\mu\cos\psi + ndq_0(\mu_v\cos\psi + \sin\psi) \quad (5)$$

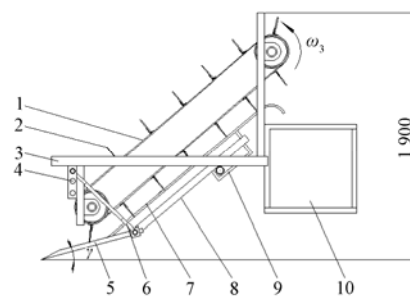
式中, F_f 为工作行程的阻力, N; n 为刮板个数; q 为物料单位长度平均质量, kg/m; q_0 为刮板组单位长度平均质量, kg/m; d 为刮板间距, m; μ 为物料运动阻力系数, 与摩擦系数有关; μ_v 为刮板运动阻力系数; ψ 为工作倾角, (°)。

秸秆输送链转速的确定必须能够保证粉碎后的棉秸秆及时可靠的输送到尾板处, 经多次试验, 在输送链轮转速 $n_1=125$ r/min 时, 未出现秸秆大量积聚, 秸秆能顺利输送到尾板, 表明该装置工作性可靠。在实际工作过程中, 考虑到秸秆抛洒的不均匀性, 输送链轮转速可适当提高, 取 $n_1=125\sim 150$ r/min。

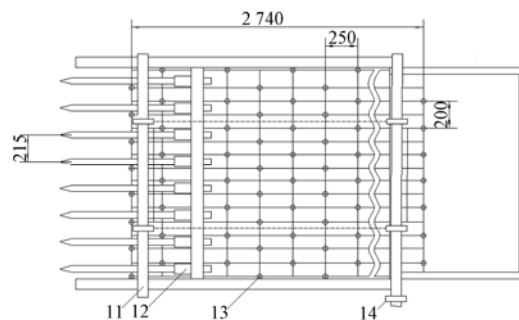
2.3 浮动式残膜回收装置

浮动式残膜回收装置设在秸秆粉碎装置下侧, 由起膜齿、起膜架、链齿耙、输送链和调节吊杆等部分组成。其结构如图 6 所示。

起膜架由滑道、调节吊杆和栅条组成, 调节吊杆的上端通过销子与机架相连, 下端通过套筒直接与起膜架相连, 起膜架可沿滑道上下移动, 通过调节吊杆与机架上不同的联接点和调节吊杆的长度可改变起膜齿的入土深度。



a. 主视图
a. Front view



b. 俯视图
b. Plan view

1. 输送链 2. 齿耙 3. 机架 4. 销孔 5. 起膜齿 6. 调节吊杆 7. 栅条 8. 起膜架 9. 滑道 10. 残膜箱 11. 传动轴 12. 齿套 13. 齿杆 14. 链轮
1. Conveyor chains 2. Tooth rake 3. Frame 4. Pin hole 5. Up film tooth 6. Adjust lever 7. Walkways 8. Onwards film frame 9. Slideway 10. Plastic film box 11. Transmission shaft 12. Sets of teeth 13. Rack bar 14. Sprockets

注: ω_3 为残膜输送链的旋转方向; γ 为起膜齿入土角, (°)。
Note: ω_3 is direction of the plastic film conveyor chains; γ is the buried angle of up film tooth, (°).

图 6 浮动式起膜架结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of adjustable on-wards membrane frame

收膜效果的优劣与收膜齿杆的排列间距密切相关, 齿杆排列间距越小, 收膜率越高, 但田间的秸秆等杂物会随残膜一起被收起, 使得回收的残膜含杂率高, 给后续处理带来困难; 齿杆间距过大, 易造成残膜漏收, 降低了残膜回收率。考虑到以上因素, 结合田间试验, 同排齿杆的间距设计为 200 mm, 相邻齿排列间距 250 mm。

起膜齿的排列方式也会对收膜产生很大影响, 若排列间距过大, 残膜无法被起膜齿托起, 造成残膜漏收; 若间距过小, 棉秆根茬会阻碍起膜齿前行, 且田间的石块等杂物无法从起膜齿间通过, 造成壅土, 给收膜造成很大影响。根据当前新疆棉花铺膜种植模式 (株距 10 cm, 行距 66 cm、两边覆土压膜各 7.5 cm) 确定相邻起膜齿的间距为 215 mm。另外, 起膜齿在齿套中可自由调节长短, 从而能够满足不同地况的作业要求。

起膜齿的工作阻力与其本身结构参数、运动参数及作业地况有关^[22], 起膜齿工作时的水平阻力 F_L 为

$$F_L = \frac{1}{2} \rho g B T^2 \xi_f \quad (6)$$

式中, ρ 为土壤密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, N/kg ; B 为起膜齿的工作宽度, m ; T 为作业深度, m ; ζ_f 为无量纲系数, 取决于摩擦特性及断裂条件, $\xi_f \approx \text{tg}^2(45 + \delta_f/2)$; δ_f 为摩擦角, $(^\circ)$ 。

起膜齿的入土角度直接影响残膜回收率, 入土角度增大, 起膜齿的入土性能提高, 但残膜破损严重, 残膜回收率低; 若入土角度减小, 则起膜齿碎土能力差, 影响膜土分离。据文献[23], 起膜齿入土角 $\gamma=10^\circ \sim 35^\circ$ 时起膜效果较好, 结合田间试验的实际情况, 取 $\gamma=25^\circ$ 。

机具工作时, 浮动式残膜回收装置的起膜齿沿高低不平的地面前行, 地面仿形性好, 残膜回收率高, 该装置能防止起膜齿瞬间因冲击载荷过大而损坏, 可适应于不同地况的棉田。

2.4 脱膜装置

脱膜装置的主要作用是将链齿耙上齿杆收回的残膜吹落到残膜箱中。其结构如图 1 所示, 由离心风机、风道和吹风口组成, 离心风机的动力由变速箱一侧的皮带轮提供, 吹风口设在链齿耙中间靠近残膜箱上侧。考虑到链齿耙上齿杆的实际排列方式及脱膜需要, 脱膜风口的的设计尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 均等排列 8 个, 且安装时要求风口正对齿杆。

风机的设计转速 $n_4=1620 \text{ r/min}$, 利用风速仪经试验测得脱膜临界风速为 6.2 m/s , 由于田间收回的残膜粘有泥土、秸秆等杂质, 因此实际脱膜风速要略高于临界风速。气流出口面积 $A=2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 出风

口的气流流量可由式 (7) 求得^[24-25]

$$Q = v_1 \times A \quad (7)$$

式中, Q 为气流流量, m^3/s ; v_1 为脱膜风速, m/s ; A 为气流出口截面积, m^2 。

脱膜风速 v_1 越大对脱膜越有利, 但相应的消耗功率随之增大, 且部分残膜会被吹到残膜箱外。据多次试验, 当脱膜风速 $v_1=6.2 \sim 10.5 \text{ m/s}$ 时能够满足脱膜的工作性能要求, 此时残膜在气力作用下能克服齿杆的阻力顺利脱到残膜回收箱中。

风机全压 p 可由式 (8) 求得

$$p = p_d + p_s \quad (8)$$

式中, p 为风机全压, N/m^2 ; p_d 为气流出口动压,

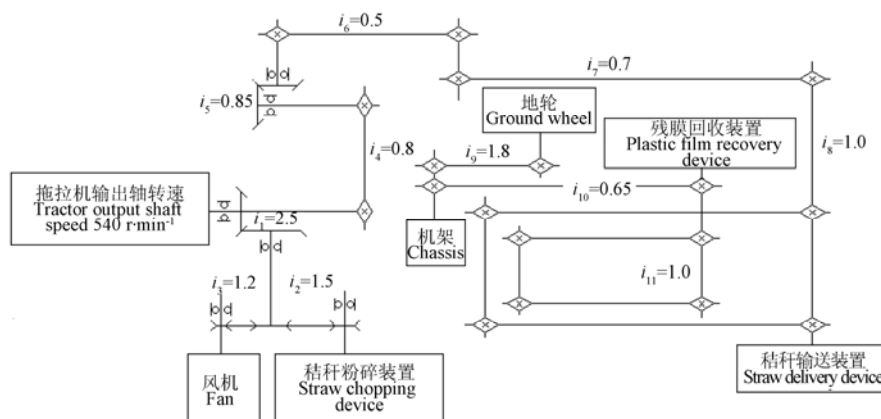
$$p_d = \frac{\rho_1 v_1^2}{2}, \text{ N/m}^2; p_s \text{ 为风机出口静压, N/m}^2; \rho_1$$

为空气密度, 1.2 kg/m^3 ; v_1 为脱膜风速, m/s 。

由式 (8) 可求得气流出口动压 $p_d=23.1 \text{ N/m}^2$, 利用排气试验装置测得风机工作时的出口静压 $p_s=196.3 \text{ N/m}^2$, 则风机的全压 $p=219.4 \text{ N/m}^2$ 。

2.5 传动系统

4JM-1500 型秸秆粉碎与残膜回收机采用分路传动系统, 动力从拖拉机输出轴输出后, 一路经带传动到达秸秆粉碎装置和风机; 另一路通过链传动传递到秸秆输送装置, 地轮通过链传动传递到残膜回收装置。该传动系统结构紧凑、功率消耗低、传动效率高、动力分配合理, 能够满足秸秆粉碎装置、秸秆输送装置、残膜回收装置和脱膜装置所需的合适转速。具体传动系统配置及参数如图 7 所示。



注: i 为传动比。

Note: i is drive rate.

图 7 传动系统

Fig.7 Schematic diagram of transmission system

3 主要工作过程分析

3.1 秸秆粉碎与秸秆输送分析

机具工作时, 刀轴的转向与拖拉机前进时地轮

的转向相反, 在前挡板的作用下, 棉秸秆以倾斜状态进入到粉碎腔后, 立即受到高速旋转的甩刀打击而粉碎, 粉碎的棉秸秆抛到定刀板上后再次粉碎, 随后被抛送至接料斗。

以刀辊中心 O 点为坐标原点 (如图 3 所示), 机具前进方向为 x 轴正方向, 垂直向上为 y 轴正方向, 取甩刀端部处某一点 $A(x, y)$, 则其运动轨迹参数方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos \omega t \\ y = R \sin \omega t \end{cases} \quad (9)$$

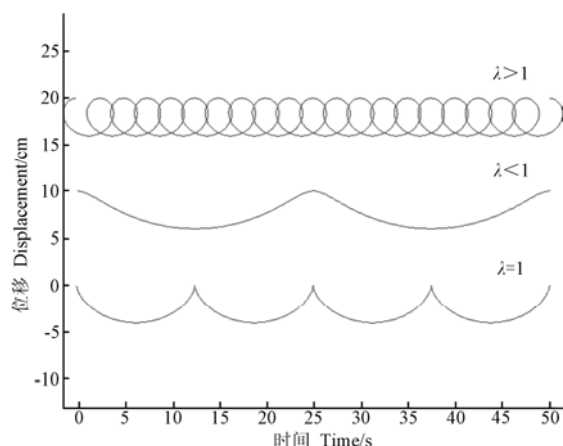
式中, ω 为甩刀的旋转角速度, rad/s; t 为时间, s。

秸秆粉碎速度比 λ 能够较好的反映出机具作业后田间棉秸秆的粉碎效果, λ 由下式求得,

$$\lambda = \frac{u}{v_m} \quad (10)$$

式中, u 为甩刀端点的回转线速度, m/s。

应用 MATLAB 软件模拟甩刀工作时的运动轨迹如下图 8 所示。



注: λ 为秸秆粉碎速度比。

Note: λ is straw chopping velocity ratio.

图 8 不同粉碎速度比对应的甩刀工作运动轨迹图

Fig.8 Different crushing speed ratio corresponding balisongs trajectories

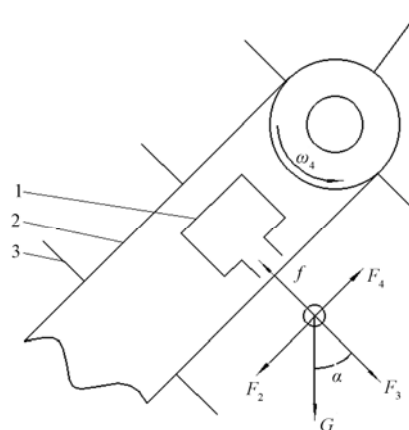
由图 8 可知, 当 $\lambda \leq 1$ 时, 甩刀轨迹为短幅摆线, 甩刀的运动方向始终与机具前进方向一致, 甩刀只能对棉秸秆进行一次粉碎, 无法对棉秸秆进行反复冲击粉碎, 且棉秸秆漏切严重, 机具无法满足田间工作要求。当 $\lambda > 1$ 时, 其运动轨迹为余摆线, 存在重合部分, λ 越大甩刀对棉秸秆进行粉碎的次数就越多, 棉秸秆的粉碎效果就越好, 甩刀在旋转到最高点时其端部的水平速度方向与机具的前进方向正好相反, 此时, 甩刀对粉碎的棉秸秆有向后抛撒的作用。

在粉碎罩壳的作用下, 粉碎后的棉秸秆被抛送至接料斗处, 同时, 在秸秆输送链的带动下刮板将接料斗内秸秆刮起, 并沿着底板向上运动, 秸秆输送至尾板后, 在重力作用下, 秸秆滑落到残膜回收箱后侧已收膜的地面上, 依此实现待收残膜与棉秸秆分离。

3.2 收膜与脱膜分析

秸秆粉碎与输送完成后, 地面上一个工作幅宽

内的秸秆被清理, 地膜便会裸露在地面, 调节好入土深度的起膜齿在机具的牵引下前行, 残膜被起膜齿托起一定高度, 在驱动轮的带动下, 链齿耙开始工作, 链齿耙的转动方向与机具前进方向相同, 当链齿耙转过时, 残膜输送链带动齿耙依次划过起膜齿, 杆齿挑住起膜齿托起的残膜向残膜回收箱上侧输送, 残膜被输送到吹风口处时, 在气力的作用下, 残膜被吹落到回收箱中。残膜脱膜瞬间受力如下图 9 所示。



1. 风箱 2. 残膜输送链 3. 齿杆

1. Bellows 2. Plastic film conveyor chains 3. Gear rod

注: ω_4 为残膜输送链的旋转方向; G 为残膜所受重力, N; f 为摩擦力, N; F_3 为气流冲击力, N; F_4 为齿杆支持力, N; F_2 为相邻杆齿对残膜拉力, N; α 为气流冲击力与重力的夹角, $(^\circ)$ 。

Note: ω_4 is direction of plastic film conveyor or chains; G is Plastic film gravity, N; f is friction force, N; F_3 is airflow impulsive force, N; F_4 is rackbar support force, N; F_2 is adjacent rackbar of plastic film pulling force, N; α is the angle between airflow impulsive force and gravity flow, $(^\circ)$.

图 9 残膜脱膜瞬间的受力分析

Fig.9 Force analysis at the moment of taking off film

在气力作用下, 残膜脱离杆齿的条件为

$$\cos \alpha > \frac{f - F_3}{G} \quad (11)$$

式中, G 为残膜所受重力, N; f 为摩擦力, N; F_3 为气流冲击力, N; α 为气流冲击力与重力的夹角, $(^\circ)$ 。

影响脱膜的主要因素有脱膜风速和残膜输送链轮转速, 脱膜风速越大, 气流冲击力 F_3 越大, 对脱膜越有利, 但会增加风机功率的消耗; 同时, 若收膜装置的转速过高将会使残膜来不及脱下就被杆齿回带, 缠绕到链齿耙上, 增加了脱膜难度, 转速越低虽有利于脱膜, 但过低的转速会影响机具的工作效率。根据试验, 残膜输送链轮转速 $n_2=60\sim90$ r/min, 风机转速在 $n_4=1\ 600\sim1\ 800$ r/min 时, 地表残膜被齿杆顺利收起, 收起的残膜未出现回带且能够顺利脱膜。

4 田间试验

4.1 试验条件

田间试验在石河子市 143 团 10 连秋后棉花已

收获的棉田进行,棉花种植行距为 660 mm,株距为 100 mm,试验地面积 1 000 m×540 m,地面平整,有少量碎石,滴灌带已回收,土壤体积含水率为 18.24%,土壤坚实度 386 kPa;棉秆有部分倒伏,秸秆高度在 40~75 cm 之间,棉秸秆平均直径为 10.14 mm,秸秆含水率 16.35%;地膜幅宽为 150 cm,地膜厚度 0.007 mm,地膜两边压入土中,膜中间有部分覆土,有少量破损;机具作业速度为 5~5.5 km/h,配套动力为铁牛 55 拖拉机。

4.2 试验方法

依据 GB/T 24675.6-2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》和 GB/T 25412-2010《残地膜回收机》对棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机进行试验,选取秸秆粉碎长度合格率、留茬平均高度、残膜回收率等参数进行现场测试,并考察秸秆粉碎、秸秆输送、残膜回收、脱膜等装置的工作运转情况和整机的工作性能。

脱膜效果直接反应出整机的工作性能,脱膜率可由式(12)得出

$$c = \frac{w_1}{w_0 - w_2} \times 100\% \quad (12)$$

式中, w_0 为试验区域所铺地膜的总质量, kg; w_1 为残膜回收箱中残膜的质量, kg; w_2 为试验区域内未能收起的残膜的质量, kg。

膜秆分离率则由式(13)算的

$$c_1 = \frac{w_3}{w_3 + w_4} \times 100\% \quad (13)$$

式中, w_3 为试验区域留茬高度以上所有棉秆总质量, kg; w_4 为粉碎过程中洒落到地面上的秸秆质量, kg。

田间试验机具作业长度为 100 m, 作业幅宽 1.5 m, 随机选取 5 个试验区域进行重复试验, 每次试验后记录相关数据, 最后取 5 次试验的平均值。

4.3 试验结果与分析

棉秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业机田间试验结果如下表 2 所示。

表 2 试验结果
Table 2 Experiment results

检测项目 Test items	标准值 Experiment results standard values	试验结果 Experiment results
残膜回收率 Plastic film recovery ratio/%	≥80	88.6
膜秆分离率 Film-straw separation ratio/%	—	97.0
棉秆粉碎长度 Straw chopping length/cm	≤20	13.2
脱膜率 Film removing ratio/%	—	89.4
留茬高度 Stubble height/mm	≤80	76.5

在作业过程中,少量未被土壤压实的残膜碎片在甩刀的高速旋转下会随粉碎后的棉秸秆一起被抛送到秸秆输送装置,对膜秆分离率有一定影响;其次,对田间风化的小片残膜回收时存在一定困难,从而影响了残膜回收率;最后,影响脱膜率的主要原因是少量细长残膜在自然风力作用下与齿耙缠绕。因此,在后续研究中,还需对收膜装置进行改进,进一步提高样机的工作性能。

5 结 论

1) 棉秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业机可一次完成秸秆粉碎还田、膜秆分离和残膜回收等作业,在机具作业速度 5~5.5 km/h、秸秆输送链轮转速 125 r/min、风机转速 1 620 r/min 以及残膜输送链轮转速 70 r/min 时,整机工作性能良好,基本能够满足秸秆粉碎还田与残膜回收的田间工作性能要求。

2) 锤片式棉秸秆粉碎装置与刮板式输送装置相结合既能够实现棉秸秆粉碎还田又可实现粉碎后的秸秆与待收残膜分离,膜秆分离后,连成片的残膜便裸露在地表,便于后续残膜回收,回收的残膜含杂率低,膜秆分离率达 97%;浮动式起膜机构和齿耙式搂膜装置回收残膜,残膜回收率达 88.6%;采用气力脱膜装置脱膜,避免了因残膜与脱膜装置缠绕而影响机具正常工作,脱膜率达 89.4%。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2011 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [2] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269—272.
Yan Changrong, Mei Xurong, He Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(11): 269—272. (in Chinese with English abstract)
- [3] 侯书林, 胡三媛, 孔建铭, 等. 国内残膜回收机研究的现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 186—190.
Hou Shulin, Hu Sanyuan, Kong Jianming, et al. Present situation of research on plastic film residue collector in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李斌, 王吉奎, 蒋蓓. 新疆棉区残膜污染及其治理技术[J]. 农机化研究, 2012(5): 228—232.
Li Bin, Wang Jikui, Jiang Bei. The plastic film pollution and treatment technology in Xinjiang cotton area[J].

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(5): 228—232. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵海军, 史建新. 残膜回收工艺探讨[J]. 中国农机化, 2004(6): 68—71.
Zhao Haijun, Shi Jianxin. Discussion on technology of collecting plastic film residue[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2004(6): 68—71. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王吉奎, 付威, 王卫兵, 等. SMS-1500 型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 7(7): 168—172.
Wang Jikui, Fu Wei, Wang Weibing, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 7(7): 168—172. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张东兴. 残膜回收机的设计[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(6): 41—43.
Zhang Dongxing. Research and design on collector of used plastic film on farm field[J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(6): 41—43. (in Chinese with English abstract)
- [8] 史建新, 陈发, 郭俊先, 等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 68—72.
Shi Jianxin, Chen Fa, Guo Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [9] 侯书林, 张淑敏, 孔建铭, 等. 弹齿式收膜机的主要结构设计[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(2): 18—22.
Hou Shulin, Zhang Shumin, Kong Jianming, et al. Development of spring—tooth plastic film collecting machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(2): 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [10] 那明君, 董欣, 侯书林, 等. 残膜回收机主要工作部件的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 112—115.
Na Mingjun, Dong Xin, Hou Shulin, et al. Research on main components of the machine for retrieving the used plastic film after harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 112—115. (in Chinese with English abstract)
- [11] 卢博友, 杨青, 薛少平, 等. 圆弧形弹齿滚筒式残膜捡拾机构设计及捡膜性能分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 68—71.
Lu Boyou, Yang Qing, Xue Shaoping, et al. Design of arc spring-tooth type collector for collecting mulching plastic film the collecting property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(6): 68—71. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张学军. 残膜分离与输送装置的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Zhang Xuejun. Study on Separation and Transport Device for Remnant Plastic Film[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Bin, Wang Jikui, Hu Kai, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王吉奎, 王卫兵, 王序俭, 等. 一种秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业机[P]. 中国专利: 200810072982.X, 2009.05.06.
- [15] 陈发, 史建新, 王学农, 等. 弧型齿残膜捡拾滚筒捡膜的机理[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 36—41.
Chen Fa, Shi Jianxin, Wang Xuenong, et al. Study on collecting principle of arc-type tooth roller for collecting plastic residue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2006, 37(6): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张佳喜, 王学农, 陈发, 等. 秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 82—85.
Zhang Jiayi, Wang Xuenong, Chen Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese society for Agriculture Machinery, 2007, 38(6): 82—85. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王吉奎, 张红艳, 胡凯, 等. 新型秸秆粉碎与残膜回收机[P]. 中国专利: 201210241660, 2012.07.13.
- [18] 陈黎卿, 王莉, 张家启, 等. 适用于全喂入联合收割机的 1JHSX-34 型秸秆粉碎机设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 28—32.
Chen Liqing, Wang Li, Zhang Jiaqi, et al. Design of 1JHSX-34 straw crusher for whole-feeding Combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 28—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李明, 王金丽, 邓怡国, 等. 1GYF-120 型甘蔗叶粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 121—126.
Li Ming, Wang Jinli, Deng Yiguo, et al. Structural design and experiments on sugarcane leaf shattering and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(2): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中国农业机械化科学研究院编. 农业机械设计手册: (上册) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [21] 顾玲, 管荣根, 张瑞宏, 等. 链板式连续运输机械的现代设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2003, 10(3): 149—153.

- Gu Ling, Guan Ronggen, Zhang Ruihong, et al. Research of modern design method on chain slat type continuous conveying machine[J]. Journal of Engineering Design, 2003, 10(3): 149 — 153. (in Chinese with English abstract)
- [22] 毛罕平, 陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62—66.
- Mao Hanping, Chen Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(4): 62—66. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王文明, 王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 43(10): 82—89.
- Wang Wenming, Wang Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 82 — 89. (in Chinese with English abstract)
- [24] 华中工学院李庆宜主编. 通风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1977.
- [25] 卡那沃依斯基. 收获机械[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.

Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting

Hu Kai, Wang Jikui^{*}, Li Bin, Jiang Bei, Ding Shuangshuang, Li Tianwen
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: According to the problems of plastic film without distinction as straw, the plastic film recovery rate is low, the effect is poor in removing the collected film, and plastic films are easy to wind in cotton straw chopping and a plastic film collecting combined machine in Xinjiang province, the 4JM-1500 straw chopping and plastic film collecting machine has been designed. It consists of a traction device, straw chopping device, straw conveying device, floating gear-rake institution and chain rake device, film removing device, driven system, plastic film box, and rack and wheel, etc. It can realize straw chopper returning, the straw separation with plastic film, and the plastic film recycling with one operation. This machine combining the hammer device of cotton straw chopping and scraper conveyor device, the machine could separate cotton straws and plastic film, and collect the plastic film by the floating gear-rake institution and chain rake device. It also has a good effect for ground profile modeling and improving the plastic film recovery ratio. It can remove the collected film though the air force device in the operating process, which can prevent the plastic film winding with the film stripping device and affect the work. The structure and working principle of the machine, and the parameters of working parts, and main structures were determined through the main components designed. Knife shaft speed $n_3=1800\sim2200$ r/min, straw conveying speed $n_1=120\sim150$ r/min, plastic film conveying chains speed $n_2=60\sim90$ r/min, film removing wind speed $v_1=6.2\sim10.5$ m/s and the working width was 1500 mm. It effectively decreased the labor cost and enhanced the plastic film collecting efficiency. Field trials demonstrated that the separation ratio of cotton straws and plastic film was 97%, the plastic film collecting ratio was 88.6%, and the film removing ratio was 89.4% under the conditions of machine operating speed of 5-5.5 km/h and straw conveying speed of 1.8m/s, which could meet the requirements of straw chopping and plastic film collecting. The research results could help to solve the problem of plastic film pollution in farmland.

Key words: cotton, straw, plastic films, smash, recycling

(责任编辑: 鲍洪杰)