

随动式残膜回收机清杂系统作业参数优化

蒋德莉^{1,2}, 陈学庚^{1,2*}, 颜利民^{1,2}, 莫毅松³, 杨松梅⁴, 王昭宇^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003;

3. 常州汉森机械有限公司, 常州 213034; 4. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要:残膜是一种可循环利用材料,残膜回收过程中只有将残膜和作物秸秆、土壤等杂质分离,才能实现残膜的回收利用,减少残膜污染。针对目前回收残膜含杂率高的问题,该文设计了一种随动式残膜回收机清杂系统。为明确该系统的作业性能,提高残膜回收作业质量,进行了随动式残膜回收机清杂系统作业参数优化。通过对工作原理、工作条件及膜杂分离影响因素的分析,确定以机具前进速度、地膜输送链速度、捡拾滚筒安装位置和二级杂质输送装置转速为试验因素,以残膜捡拾率、膜杂分离率和杂质输送效率为试验指标,根据二次回归正交组合试验设计原理,进行了四因素五水平回归正交组合田间试验设计。利用 Design-Expert 软件对试验结果进行响应面分析,得到各因素与试验指标之间的数学模型,分析得出影响残膜捡拾率和膜杂分离率的主次因素依次是捡拾滚筒安装位置、机具前进速度、地膜输送链速度和二级杂质输送装置转速;影响杂质输送效率的主次因素依次为二级杂质输送装置转速、捡拾滚筒安装位置、地膜输送链速度和机具前进速度。根据优化目标的重要程度,对回归模型进行多目标优化,得出清杂系统最佳作业参数组合为:机具前进速度 1.26 m/s、地膜输送链速度 1.55 m/s、捡拾滚筒安装位置-17 mm(即以支架长孔中心与捡拾滚筒中心在竖直方向重合为原点,向机具前进方向调整 17 mm)、二级杂质输送装置转速为 205 r/min,在最优参数组合下残膜捡拾率为 90.19%,膜杂分离率为 92.21%,杂质输送效率为 89.6%。并通过田间试验验证了最优组合,试验结果显示:残膜捡拾率为 91.54%、膜杂分离率为 90.37%、杂质输送效率为 88.4%,与预测值误差分别为 1.50%、2.00% 和 1.34%,参数优化结果可靠。研究结果可为提升随动式残膜回收机清杂系统作业质量提供参考。

关键词:农业机械;优化;作业参数;残膜回收;膜杂分离;响应曲面

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.001 <http://www.tcsae.org>

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1002-6819(2019)-19-0001-10

蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 莫毅松, 杨松梅, 王昭宇. 随动式残膜回收机清杂系统作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 1—10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.001 <http://www.tcsae.org>

Jiang Deli, Chen Xuegeng, Yan Limin, Mo Yisong, Yang Songmei, Wang Zhaoyu. Optimization of working parameters of cleaning system for master-slave residual plastic film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 1—10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

地膜覆盖作为一种农业栽培技术,因具有增温保墒、抑制杂草等功能被广泛应用^[1-2],但中国农田地膜回收率不足 60%,地膜残留导致土壤物理结构层次破坏和“白色污染”等一系列问题,残膜污染治理工作刻不容缓^[3-6]。人工捡拾残膜回收效率低、劳动强度大、成本高,机械化回收已成为解决残膜污染问题的有效手段^[7-9]。目前,国内外众多科研工作者对残膜回收机械进行了研制。国外

使用的地膜厚度大、拉伸强度好,地膜回收机械多采用卷收原理,如 Rocca 等^[10]研制了一种具有链式传送装置的地膜回收机,地膜通过链式传送装置传送到卷膜辊上实现回收。国内学者刘旋峰等^[11]设计了一种滚筒式残膜回收机,田间残膜拾净率为 88.2%。戴飞等^[12]设计了一种帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机,田间验证试验表明,提土-全膜面覆土装置覆土合格率均值为 99.6%。罗凯等^[13]设计了一种链筛式耕层残膜回收机,针对耕层碎片化残膜进行了回收和膜土分离研究,残膜回收率为 85.07%。王旭峰等^[14]设计了一种起膜抛送、链齿输送和自动脱膜的抛膜链齿输送式残膜回收机,解决了残膜回收中缠绕、卸膜难的问题,地表残膜回收率为 91.8%。现阶段研制的残膜回收机回收率较高,但大部分机具存在回收后残膜缠绕严重,棉壳、棉秆、土壤等杂质分离较难,因此回收残膜资源化利用困难,而直接焚烧或集中堆放

收稿日期: 2019-03-02 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)

作者简介: 蒋德莉,主要从事农业机械设计及理论分析研究。Email: jdl490473814@163.com

※通信作者: 陈学庚,中国工程院院士,研究员,主要从事棉花生产机械化和残膜污染治理研究。Email: chenxg130@sina.com

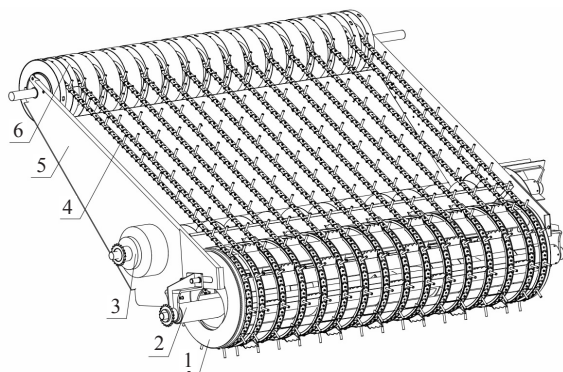
又造成极大的资源浪费和严重的二次污染。残膜作为一种可循环利用材料,只有将残膜和杂质分离开来,才能实现残膜的回收利用,减少污染。

残膜回收作业中的膜杂分离装置主要分为2大类:一类是在田间残膜回收过程中直接进行膜杂分离,主要研究成果如 Brooks^[15]、赵岩等^[16-17];另一类是将残膜、棉秆、土壤等回收集中后,再利用膜杂分离装置进行膜杂混合物分离,主要研究成果如康建明等^[18-19]。目前的膜杂分离装置主要采用风选法、振动法和浮力漂选法等进行膜与杂分离。因残膜具有轻、柔、易吸附和缠绕等特性,回收后的残膜与秸秆、土壤等杂质进一步缠绕,致使集膜箱短时间内被集满,作业时频繁停机卸膜,严重影响作业效率,同时后续膜杂分离困难、分离效果不佳,因此,亟需对在残膜捡拾回收作业中同时完成膜杂分离的技术进行研究。针对膜杂分离问题,课题组设计了一种可将膜面翻转而清除杂质的随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机,对其关键部件—秸秆粉碎输送装置和残膜捡拾装置等进行了设计与试验^[20-21]。为进一步明确随动式残膜回收机清杂系统作业参数对残膜回收作业性能的影响,本文通过理论分析和二次回归正交组合试验优化设计方法,寻求清杂系统优化作业参数组合,以期为提高残膜回收作业质量提供技术和理论基础。

1 清杂系统结构与工作原理

1.1 清杂系统结构组成

随动式残膜回收机主要由起膜装置、清杂系统、卷膜卸膜装置、地轮和机架等组成,其前端与棉花秸秆还田机通过机架相连接,主要设计参数指标同文献[21]。清杂系统由捡拾滚筒、一级杂质输送装置、二级杂质输送装置、地膜捡拾输送链排、脱膜装置和支架等组成,如图1所示。捡拾滚筒径向均布栅格板,栅格板之间形成间隙便于杂质落入。地膜捡拾输送链排沿捡拾滚筒轴向排列,并形成漏杂间隙,清杂系统作业幅宽为2 135 mm。



1. 捡拾滚筒 2. 一级杂质输送装置 3. 二级杂质输送装置 4. 地膜捡拾输送链排 5. 支架 6. 脱膜装置
1. Tooth roller for collecting 2. Primary impurity transport device 3. Secondary impurity conveying device 4. Plastic film picking up conveyor chain row 5. Support frame 6. Film removing device

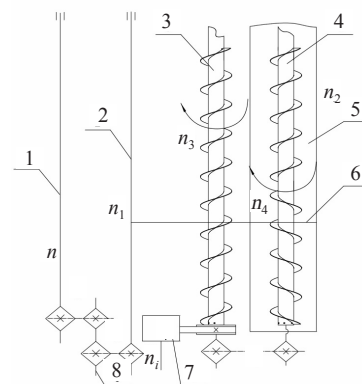
图1 清杂系统结构图

Fig. 1 Structure of cleaning system

1.2 清杂系统工作原理

作业时,拖拉机牵引联合作业机前行,动力由拖拉机后输出轴传递至秸秆还田机刀轴,高速旋转的刀轴将棉

秆切碎,并将切碎的棉秆、膜面棉壳、土壤等混合物后抛至秸秆还田机的螺旋输送机,输送机将混合物输送抛撒至田间,完成棉花秸秆还田。联合作业机前进过程中,起膜装置破坏膜下土壤结构,使残膜与地表分离,同时将膜上板结土壤破坏;在地轮的带动下脱膜装置转动,由脱膜装置、地膜捡拾输送链排和捡拾滚筒形成链传动,在脱膜辊和捡拾滚筒上均布圆孔,圆孔与地膜捡拾输送链排底部的圆柱配合传递动力。捡拾滚筒逆时针转动,地膜捡拾输送链排上的钉齿刺破地膜、入土,带动地膜和膜面上杂质逆时针逐渐翻转并向上输送,在重力和振动条件下,膜面上的秸秆、土壤和棉壳等杂质与残膜分离,分离后的杂质落入捡拾滚筒中和二级杂质输送装置内;一级和二级杂质输送装置内的螺旋输送机将分离后的杂质输送至机具两侧,完成残膜回收作业中膜杂分离和杂质输送。残膜随地膜捡拾输送链排继续向上输送,在脱膜装置处完成脱膜作业。



1. 地轮轴 2. 脱膜辊 3. 一级杂质输送轴 4. 二级杂质输送轴 5. 捡拾滚筒 6. 地膜捡拾输送链排 7. 中间传动(齿箱、带轮和链轮等多级组合传动) 8. 链轮中间传动轴

1. Ground wheel shaft 2. Film removing roller 3. Primary impurity transport shaft 4. Secondary impurity transport shaft 5. Pickup drum 6. Plastic film pick up conveyor chain row 7. Intermediate transmission (multi-stage combined transmission such as tooth box, pulley and sprocket) 8. Middle drive shaft of sprocket wheel

注: n 为地轮转速, $r \cdot \min^{-1}$; n_1 为脱膜装置转速, $r \cdot \min^{-1}$; n_2 为捡拾滚筒转速, $r \cdot \min^{-1}$; n_3 为二级杂质输送装置转速, $r \cdot \min^{-1}$; n_4 为一级杂质输送装置转速, $r \cdot \min^{-1}$; n_i 为拖拉机主轴转速, $r \cdot \min^{-1}$ 。

Note: n is the speed of ground wheel, $r \cdot \min^{-1}$; n_1 is the speed of the stripping device, $r \cdot \min^{-1}$; n_2 is pickup drum speed, $r \cdot \min^{-1}$; n_3 is the rotation speed of the secondary impurity conveying device, $r \cdot \min^{-1}$; n_4 is the rotation speed of the primary impurity conveying device, $r \cdot \min^{-1}$; n_i is the spindle speed of the tractor, $r \cdot \min^{-1}$.

图2 清杂系统传动系统示意图

Fig.2 Transmission system diagram of cleaning system

1.3 清杂系统传动系统

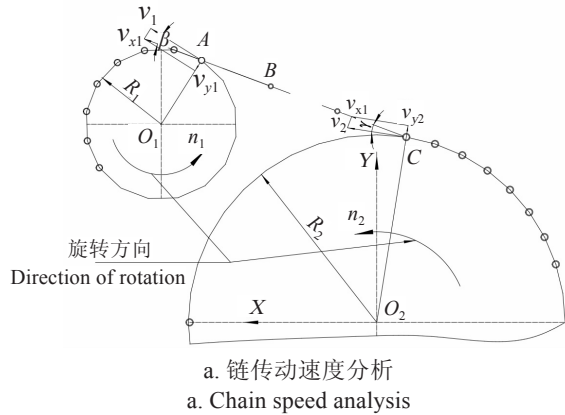
清杂系统传动系统中,拖拉机后置动力输出轴经万向传动轴和中间传动,将动力传递至一级杂质输送轴,一级杂质输送轴经链传动,带动二级杂质输送轴转动。同时在拖拉机的牵引下整机前进,带动地轮轴转动,地轮轴通过二级链轮传动带动脱膜辊转动,脱膜辊通过地膜捡拾输送链排带动捡拾滚筒转动。清杂系统传动系统可以通过改变链传动和中间传动速比进行各装置的速度调整。

2 膜杂分离过程分析

2.1 输送链速度分析

脱膜辊和捡拾滚筒上各均布16个和40个圆孔,相邻2个圆孔间距离40 mm,由脱膜装置、地膜捡拾输送链排

和捡拾滚筒形成的链传动,可简化为主动轮齿数为16、从动轮齿数为40、节距为40 mm的链传动,其结构简图



1. 杂质 2. 捡拾滚筒定位销 3. 支架 4. 残膜

1. Impurity 2. Pick up roller locating pin 3. Support frame 4. Residual film

注: XO_2Y 为以捡拾滚筒圆心建立的坐标系, X 轴正向与机具前进方向相反; O_1 为脱膜辊圆心; R_2 为捡拾滚筒半径, m ; R_1 为脱膜辊半径, m ; A 、 B 、 C 为地膜捡拾输送链节; v_1 为链节 A 的速度, 方向垂直于 O_1A , $m \cdot s^{-1}$; v_{x1} 为链节 A 的径向运动速度, 方向沿 O_1A , $m \cdot s^{-1}$; v_{y1} 为链节 A 牵引链排运动的速度, 方向沿输送链运动方向, $m \cdot s^{-1}$; v_2 为链节 C 的速度, 方向垂直于 O_2C , $m \cdot s^{-1}$; v_{x2} 为链节 C 的径向运动速度, 方向沿 O_2C , $m \cdot s^{-1}$; β 为链节 A 线速度与链条运动方向夹角, $(^\circ)$; γ 为链节 C 线速度与链条运动方向的夹角, $(^\circ)$ 。

Note: XO_2Y is the coordinate system established based on the pick up drum center, the direction of X -axis is in the opposite direction of forward direction of the machine; O_1 is the central point of film stripping roller; R_2 is radius of pickup drum, m ; R_1 is radius of film stripping roller, m ; n_1 and n_2 represent the rotating speed of film stripping roller and pick up roller, $r \cdot \min^{-1}$. A , B and C are the plastic film picking up and conveying chains; v_1 is the speed of chain segment A , its direction is perpendicular to O_1A , $m \cdot s^{-1}$; v_{y1} is the radial motion velocity of chain segment A , its direction along the O_1A , $m \cdot s^{-1}$; v_{x1} is the actual velocity of chain segment A used for traction chain row movement, its direction along the conveyor chain, $m \cdot s^{-1}$; v_2 is the radial motion velocity of chain segment C , its direction is perpendicular to O_2C , $m \cdot s^{-1}$; v_{x2} is the up-down velocity of chain segment C , its direction along the O_2C , $m \cdot s^{-1}$; β is the angle between the linear velocity of chain segment A and the linear motion direction of the chain, $(^\circ)$; γ is the included angle between the linear velocity of chain segment C and the linear movement direction of chain, $(^\circ)$ 。

图3 地膜输送链速度分析

Fig. 3 Velocity analysis of plastic film conveyor chain

$$v = \frac{z_1 n_1 p}{60 \times 1000} = \frac{z_2 n_2 p}{60 \times 1000} \quad (1)$$

式中 v 为地膜输送链的平均速度, m/s ; z_1 、 z_2 为主、从动轮齿数, 即脱膜辊和捡拾滚筒圆环上圆孔数; p 为链节距, 即脱膜辊和捡拾滚筒圆环上圆孔间距, mm 。

在传动系统动力传输下, 地轮带动脱膜辊转动, 脱膜装置转速为

$$\begin{cases} n_1 = \frac{n}{i_1 \times i_2} \\ n = \frac{60v_m}{\pi D_0} \end{cases} \quad (2)$$

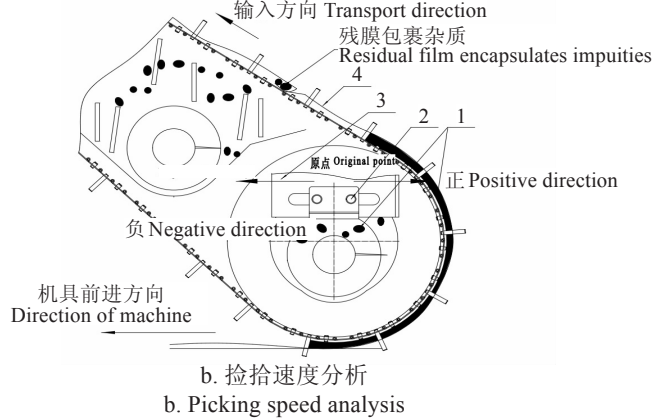
式中 i_1 、 i_2 为地轮与链轮、链轮与脱膜装置传动比; v_m 为地轮线速度, 同机具前进速度, m/s ; D_0 为地轮直径, m 。

随动式残膜回收机作业时, 脱膜辊带动地膜捡拾输送链排钉齿将地膜挑起翻转 180° 并向上输送, 膜面上杂质随地膜一起运动, 并通过捡拾滚筒上的间隙和地膜捡拾输送链排排列形成的间隙落入杂质输送装置中。当机具前进速度 v_m 大于链的平均速度 v 时, 即相同时间内, 待捡拾的残膜长度大于链排输送残膜的长度, 则残膜捡拾输送过程中出现残膜堆积, 膜面上秸秆、土壤等杂质被包裹, 膜杂分离困难, 如图3b所示; 当机具前进速度 v_m 小于或等于链的平均速度 v 时, 即相同时间内, 待捡拾的残膜长度小于或等于链排输送残膜的长度, 则残膜捡拾输送作业中残膜被拉伸或为平展状态。适当的拉伸会使地膜平整, 增大地膜延展面积, 能有效分离膜面上棉秆、棉壳、土壤等杂质。

残膜回收作业中, 为降低回收残膜含杂率, 地膜输送链速度(即链的平均速度)应大于机具前进速度。为保证残膜捡拾率同时提高整机作业效率, 经前期田间试验, 确

和传动速度分析如图3a所示。

由图3a几何关系可知, 输送链的平均速度为



定机具前进速度(即地轮线速度) v_m 的范围为 $1.12 \sim 1.80 m/s$ ($4.0 \sim 6.5 km/h$), 地膜输送链速度 v 的范围为 $1.34 \sim 2.17 m/s$ ($4.8 \sim 7.8 km/h$)。

2.2 输送链振动分析

如图3a所示, 在链传动中, 地膜捡拾输送链节 A 牵引链条沿直线运动, 由图3a链传动速度分析可知, 链节 A 的径向运动速度为

$$v_{y1} = v_1 \tan \beta = \frac{R_1 n_1}{30} \tan \beta \quad (3)$$

由式(3)可知, 链条沿垂直方向分速度 v_{y1} 与脱膜辊半径 R_1 、脱膜辊转速 n_1 、铰链线速度与链条直线运动方向的夹角 β 等有关。因 β 随链节呈周期性变化, 则链条沿垂直方向分速度 v_{y1} 也呈周期性变化^[22]。链条与捡拾滚筒和脱膜辊的啮合周期性冲击以及多边形效应使地膜捡拾输送链排产生横向振动即上下振动^[23]。链排振动能加速分离膜面上土壤、棉秆等杂质, 降低回收残膜含杂率。因脱膜辊直径为定值, 可通过改变脱膜辊转速和夹角 β 改变链传动的横向振幅。在支架上设计横向长孔(如图3b), 通过调节捡拾滚筒定位销与支架长孔位置改变脱膜辊与捡拾滚筒中心位置, 改变铰链线速度与链条直线运动方向的夹角 β , 进而调整链排振动。根据链排长度及传动要求, 链排理论长度可缩短小于 $40 mm$ 。因链排节距为 $40 mm$, 当链排理论长度缩短大于 $40 mm$ 时, 在传动过程中将出现跳齿。根据链排链接销孔直径与链排链接销轴直径偏差, 以及脱膜辊和捡拾滚筒圆环上圆孔与地膜捡拾输送链排底部的圆柱的配合偏差, 在牵引力作用下, 链排理论长度可适当伸长。为便于记录捡拾滚筒调整范围和建立坐标系, 经前期田间试验调整, 以支架长孔中心与捡拾滚筒中心在竖直方向的重合点为原点建立坐标系, 确定捡

拾滚筒沿机具前进方向可正负调整 30 mm(-30 ~30 mm)。

2.3 杂质清理输送过程分析

残膜回收作业中,与膜分离的棉秆、土壤、棉壳等杂质落入一级和二级杂质输送装置中,通过螺旋输送器的旋转将杂质输送至田间。螺旋输送器的输送量应大于或等于其最大喂入量^[24]。即

$$Q = 47D^2 \cdot \varphi \cdot S \cdot n_3 \cdot \rho \cdot C \geq q$$

(4)

式中 Q 为输送量, t/h; D 为螺旋叶片直径, m; φ 为螺旋输送器的填充系数; S 为螺距, m; ρ 为物料松散密度, 与原料的种类、湿度、切料的长度等多种因素有关; C 为倾斜输送修正系数; q 为杂质最大喂入量, t/h。

为了测得残膜捡拾输送作业中土壤、秸秆等杂质的质量,将棉花秸秆还田-随动式残膜回收联合作业机残膜捡拾部件升起,只进行秸秆粉碎作业,作业后测得单幅膜面(膜宽为 2 050 mm)在长度方向上的土壤、秸秆等杂质的质量为 2.47 kg/m,则输送装置的杂质最大喂入量为

$$q = 2.47 \times (v_m)_{\max}$$

(5)

式中 $(v_m)_{\max}$ 为机具前进速度最大值, km/h

查表可得^[25],物料填充系数 $\varphi=0.3$,物料松散密度 $\rho=0.92 \text{ t/m}^3$,由于二级杂质输送装置为水平放置,倾斜输送修正系数 $C=1$,螺旋叶片直径 $D=0.2 \text{ m}$,螺距 $S=0.185 \text{ m}$,经前期试验,机具前进速度最大值 $(v_m)_{\max}$ 为 6.5 km/h,将上述各值代入式(5)得二级杂质输送装置转速为

$$n_3 \geq \frac{2.47 \times (v_m)_{\max}}{47D^2 \cdot \varphi \cdot S \cdot \rho \cdot C} = 167$$

(6)

螺旋轴转速是影响物料输送稳定性的主要因素^[26],为保证装置输送效率,确保装置输送能力具备较大余量,结合前期单因素试验,确定一级和二级杂质输送装置转速 n_3 、 n_4 的变化范围为 180 ~ 300 r/min。

在传动系统动力传递中,一级、二级杂质输送装置转速可通过改变式(7)中 i_3 和 i_4 获得需要的杂质输送装置转速。

$$\begin{cases} n_3 = \frac{n_i}{i_3} \\ n_4 = \frac{n_3}{i_4} \end{cases}$$

(7)

3 清杂系统作业参数优化试验

3.1 试验材料

2018年10月25日至2018年10月27日,在新疆石河子市145团3分场耐候型地膜基地进行的田间试验。

试验仪器:棉花秸秆还田-随动式残膜回收联合作业

机样机,约翰迪尔904拖拉机,电子称(满量程7 000 g,精度1 g),电子称(满量程500 g,精度0.001 g),智能型数字转速表(99 999 r/min,测量精度 $\pm(0.05\%+1d)$),皮尺(量程50 m,精度0.002 m),土壤水分速测仪(型号:Field-Scout TDR300,量程0~100%,精度为0.1%),水分测定仪(型号:Sartorius-MA45,精度0.01%),编织袋,记号笔等。试验前用记号笔标识捡拾滚筒安装调整位置,便于调试安装。

试验材料:回收残膜为耐候型地膜(地膜厚度0.01 mm),地膜铺设和棉花播种时间为2018年4月20日。根据GB/T 5262-2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》的标准,运用5点法在田间试验地区测试土壤含水率、棉秆含水率和作业前5 m范围内表层残膜和边膜质量。测得土壤平均含水率为17.1%,棉秆平均含水率为24.62%,作业前5 m内表层残膜洗净后平均质量为85.721 g(根据地膜宽度为2 050 mm,计算得单位面积内表层残膜平均质量为8.36 g/m²)。

3.2 试验设计

3.2.1 试验因素

由第2节分析可知,残膜回收作业时,地膜捡拾输送链排在输送地膜过程中,膜面上的土壤、棉秆等杂质在重力和振动作用下实现膜杂分离。膜杂分离率与机具前进速度、链条输送残膜速度和输送链排振动等相关,杂质输送性能与一级、二级杂质输送装置转速有关。与残膜分离后的土壤、秸秆等杂质主要落入二级杂质输送装置中,故以二级杂质输送装置转速为试验因素,同时以二级杂质输送装置的工作性能为评价指标,一级杂质输送装置转速同二级杂质输送装置转速。故选取机具前进速度 x_1 、地膜输送链速度 x_2 、捡拾滚筒安装位置 x_3 、二级杂质输送装置转速 x_4 为试验因素,试验采用二次回归正交组合设计试验方法^[27],各试验因素水平根据公式(8)取值,如表1所示。

$$\begin{cases} z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{0j}}{\Delta_j} \\ \Delta_j = \frac{x_{2j} - x_{1j}}{2\gamma} \\ x_{0j} = \frac{x_{2j} + x_{1j}}{2} \end{cases}$$

(8)

式中 z_{ij} 为各因素水平编码值; x_{ij} 为因素水平自然值; x_{0j} 为试验因素 x_j 的零水平, x_{1j} 为试验因素 x_j 的下水平, x_{2j} 为试验因素 x_j 的上水平 Δ_j 为因素 x_j 的变化间距; γ 为 r 星号臂,根据试验因素个数和中心点试验次数,取值为1.719。

表1 试验因素水平及编码表

Table 1 Test factor level and coding table

编码值 Code value	机具前进速度 Forward speed of machine $x_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	地膜输送链速度 Velocity of plastic film conveyor chain $x_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	捡拾滚筒安装位置 Installation position of pick up drum $x_3/(\text{mm})$	二级杂质输送装置转速 Speed of secondary impurity conveyer $x_4/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1.719	1.80	2.17	30	300
1	1.66	2.00	17	275
0	1.46	1.76	0	240
-1	1.26	1.51	-17	205
-1.719	1.12	1.34	-30	180

3.2.2 试验指标及计算方法

随动式残膜回收机清杂系统的性能指标包括回收残

膜的膜杂分离率和杂质输送性能。前期田间试验表明,二级杂质输送装置在土壤和棉秆较多时易发生堵塞,对装置

结构和工作参数进行了优化改进后的田间试验结果表明^[28],杂质输送装置能有效将土壤、棉秆等杂质输送抛撒至田间,满足清杂系统工作要求。故本文清杂系统工作参数优化试验以杂质输送效率作为杂质输送装置的性能指标^[29]。机具前进速度和地膜输送链速度不仅影响膜杂分离率,也影响残膜捡拾率,故本文以残膜捡拾率作为试验性能指标。

1)残膜捡拾率 Y_1

在测定区域内的 2.5~7.5 m、7.5~12.5 m 和 12.5~17.5 m 的 3 个 5 m 范围内,捡拾作业后地表残膜,洗净晾干后称质量,计算残膜捡拾率平均值。计算公式为

$$Y_1 = (1 - \frac{W}{W_0}) \times 100\% \tag{9}$$

式中 Y_1 为残膜捡拾率,%; W 为作业后地表残膜质量,g; W_0 为作业前地表残膜质量,g。

2)膜杂分离率 Y_2

在测定区内,收集回收残膜、膜秆和土壤等混合物并称其总质量,人工抖动分离残膜、棉秆、土壤等杂质,称残膜质量。膜杂分离率计算公式为

$$Y_2 = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \tag{10}$$

式中 Y_2 为膜杂分离率,%; W_1 为回收残膜质量,g; W_2 为回收残膜和棉秆、土壤等杂质的总质量,g。

3)杂质输送效率 Y_3

棉秆、棉壳和土壤等杂质在输送过程中易于相互缠绕,因此,在叶片摩擦力作用下杂质物料做圆周运动^[26]。选

取杂质物料群为研究对象,通过试验测得杂质物料群输送 2 125 mm(杂质输送装置长度)所用时间的平均值,以此计算杂质物料群的平均运动速度(v_0 ,m/s)。为了分析物料的实际前移速度与理论速度的差异,本文将杂质物料的平均速度与叶片的轴向速度之比定义为物料群的输送效率。

$$\begin{cases} Y_3 = \frac{v_0}{v_x} \times 100\% \\ v_x = \frac{n_3 \cdot S}{60 \times 1\,000} \end{cases} \tag{11}$$

式中 Y_3 为杂质输送效率,%; v_0 为杂质平均运动速度,m/s; v_x 为螺旋叶片的轴向速度,m/s。

3.2.3 试验方法

根据 GB / T 25412—2010《残地膜回收机》和 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》进行试验。试验区由 10 m 速度稳定区和 20 m 测试区组成。稳定区在试验前完成秸秆粉碎和残膜回收作业,不同地膜输送链速度通过更换链轮齿数获得,二级杂质输送装置转速通过改变中间传动比获得,每组试验进行 2 次重复,试验结果取平均值。

4 结果与分析

采用二次回归正交组合设计试验方法对清杂系统作业参数优化试验进行设计。根据试验因素,二水平试验全实施 16 组,星号点试验 8 组,共计 24 组析因点试验,选择 6 组零水平中心点试验用以误差估计,共计 30 组回归正交组合试验,试验设计方案及结果如表 2 所示。

表 2 试验方案与结果
Table 2 Test scheme and results

试验号 Test No.	机具前进速度 Forward speed of machine X_1	地膜输送 链速度 Velocity of plastic film conveyor chain X_2	捡拾滚筒安装位置 Installation position of pickup drum X_3	二级杂质 输送装置转速 Speed of secondary impurity conveyer X_4	残膜捡拾率 Residual film picking rate $Y_1/\%$	膜杂分离率 Residual film impuri- ty separation rate $Y_2/\%$	杂质输送效率 Impurity transport efficiency $Y_3/\%$
1	1	1	1	1	92.82	87.05	72.5
2	1	1	1	-1	92.94	87.29	86.4
3	1	1	-1	1	89.56	90.59	76.3
4	1	1	-1	-1	89.42	90.93	89.9
5	1	-1	1	1	82.78	74.76	74.8
6	1	-1	1	-1	82.24	74.14	87.5
7	1	-1	-1	1	76.25	78.94	78.1
8	1	-1	-1	-1	76.82	78.42	91.8
9	-1	1	1	1	84.28	81.95	71.7
10	-1	1	1	-1	84.15	81.62	84.2
11	-1	1	-1	1	81.94	85.08	75.5
12	-1	1	-1	-1	82.37	85.17	88.1
13	-1	-1	1	1	94.75	86.91	73.5
14	-1	-1	1	-1	94.58	86.75	85.6
15	-1	-1	-1	1	90.64	92.58	77.9
16	-1	-1	-1	-1	90.12	92.92	90.7
17	1.719	0	0	0	81.92	78.72	81.6
18	-1.719	0	0	0	85.51	83.43	81.4
19	0	1.719	0	0	86.22	82.79	81.9
20	0	-1.719	0	0	80.71	78.61	82.1
21	0	0	1.719	0	92.37	84.68	82.3
22	0	0	-1.719	0	88.25	93.54	82.7
23	0	0	0	1.719	90.97	87.98	70.4
24	0	0	0	-1.719	91.25	87.26	93.4
25	0	0	0	0	91.48	88.09	81.8
26	0	0	0	0	90.43	87.84	81.5
27	0	0	0	0	91.57	87.15	80.2
28	0	0	0	0	90.58	88.96	81.2
29	0	0	0	0	91.31	88.35	80.7
30	0	0	0	0	90.62	88.74	80.6

4.1 回归模型及显著性检验

运用 Design-Expert.8.0.6 软件对表 2 试验结果进行方差分析,剔除模型中显著性大于 0.05 的系数项,结果如表 3 所示。试验指标与因素之间的回归模型为

$$Y_1 = 90.84 - 1.19X_1 + 0.86X_2 + 1.76X_3 + 5.25X_1X_2 - 0.60X_2X_3 - 2.26X_1^2 - 2.35X_2^2$$
 (12)

$$Y_2 = 87.94 - 1.78X_1 + 1.44X_2 - 2.25X_3 + 4.68X_1X_2 - 2.08X_1^2 - 2.21X_2^2 + 0.64X_3^2$$
 (13)

$$Y_3 = 81.54 + 0.48X_1 - 0.71X_2 - 1.50X_3 - 6.55X_4$$
 (14)

回归模型 $P<0.0001$,说明模型极显著,失拟项不显著,表明在试验范围内,回归模型预测值与实际值拟合度好,3 个试验指标决定系数 R^2 分别为 0.9854、0.9845 和 0.9720,表明回归模型可以解释 98.54%、98.45% 和 97.20% 的试验数据变异性,预测值与实际值高度相关,可用此模型对残膜捡拾率、膜杂分离率和输送效率等试验指标进行分析和预测。

4.2 各因素对残膜捡拾率的影响

回归方程中,系数绝对值大小决定该因素对残膜捡拾率的影响大小^[30]。由回归方程和表 3 可知,各因素对残膜捡拾率的影响重要性依次为捡拾滚筒安装位置 x_3 、机具前进速度 x_1 、地膜输送链速度 x_2 。任意固定某 2 个因素在 0 水平,研究其余 2 个因素间的交互效应,各因素的交互响应曲面和等高线如图 4 所示。由表 3 和图 4 可以看出, x_1x_2 、 x_2x_3 对残膜捡拾率 Y_1 有显著影响。机具前进速度和地膜输送链速度的交互作用最大,其次为地膜输送链速度和捡拾滚筒安装位置的交互作用。

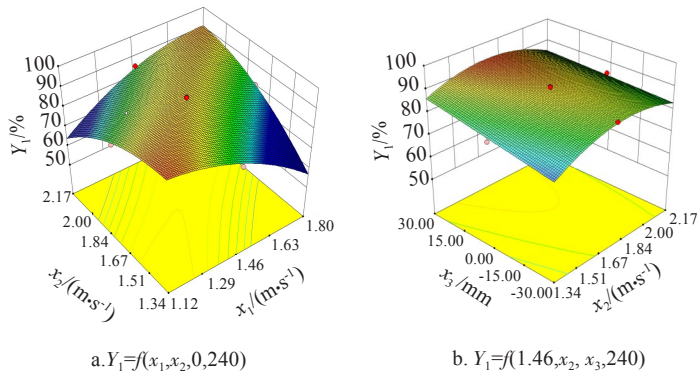


图 4 因素交互作用对残膜捡拾率的影响
Fig. 4 Effect of factor interaction on picking rate of residual film

由图 4a 可以看出,残膜捡拾率随着机具前进速度的增加,呈先增后降的趋势,当机具前进速度约为 1.46 m/s 时残膜捡拾率达到最大值;当机具前进速度一定时,随着地膜输送链速度的增加,残膜捡拾率也呈现先增后减的趋势,当地膜输送链速度约为 1.75 m/s 时残膜捡拾率达到最大值。由响应曲面变化趋势看出,当地膜输送链速度与机具前进速度之比约为 1.2 时,残膜捡拾率处于较大区域。由图 4b 可以看出,残膜捡拾率随着地膜输送链速度的增加先增后减;当地膜输送链速度不变时,随着捡拾滚筒安装位置的后移,残膜捡拾率逐渐增大,但趋势不明显。

表 3 试验指标方差分析
Table 3 Analysis of variance of test indicators

试验指标 Test index	方差来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
Y ₁	x ₁	31.26	1	31.26	42.05	<0.000 1
	x ₂	16.08	1	16.08	21.63	0.000 3
	x ₃	67.66	1	67.66	91.02	<0.000 1
	x ₁ x ₂	441.00	1	441.00	593.24	<0.000 1
	x ₂ x ₃	5.78	1	5.78	7.78	0.013 8
	x ₁ ²	89.45	1	89.45	120.33	<0.000 1
	x ₂ ²	96.26	1	96.26	129.49	<0.000 1
	模型 Model	750.94	14	53.64	72.16	<0.000 1
	残差 Residual	11.15	15	0.74		
	失拟 Lack of fit	9.85	10	0.99	3.80	0.076 9
	误差 Pure error	1.30	5	0.26		
	总和 Total	762.09	29			
	R ²	0.9854				
	CV	0.98%				
Y ₂	x ₁	68.27	1	69.27	88.46	<0.0001
	x ₂	45.13	1	45.13	57.64	<0.0001
	x ₃	111.34	1	111.34	142.19	<0.0001
	x ₁ x ₂	351.00	1	351.00	448.26	<0.0001
	x ₁ ²	75.48	1	75.48	96.40	<0.0001
	x ₂ ²	84.98	1	84.98	108.53	<0.0001
	x ₃ ²	7.16	1	7.16	9.14	0.0086
	模型 Model	748.15	14	53.44	68.25	<0.0001
	残差 Residual	11.75	15	0.78		
	失拟 Lack of fit	9.61	10	0.96	2.25	0.1918
	误差 Pure error	2.14	5	0.43		
	总和 Total	759.89	29			
	R ²	0.9845				
	CV	1.04%				
Y ₃	x ₁	4.98	1	4.98	4.31	0.0484
	x ₂	11.17	1	11.17	9.66	0.0046
	x ₃	49.07	1	49.07	42.44	<0.0001
	x ₄	939.03	1	939.03	812.21	<0.0001
	模型 Model	1004.25	4	251.06	217.16	<0.0001
	残差 Residual	28.90	25	1.16		
	失拟 Lack of fit	27.08	20	1.35	3.72	0.0752
	误差 Pure error	1.82	5	0.36		
	总和 Total	1033.15	29			
	R ²	0.9720				
	CV	1.32%				

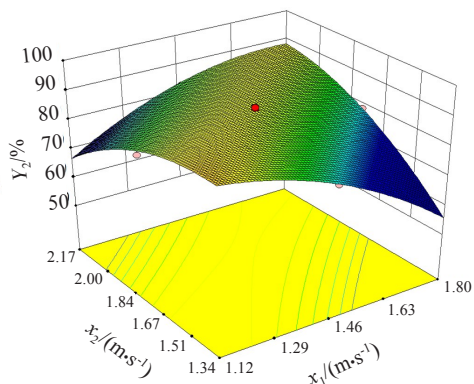
注: $P<0.01$ (极显著, **); $0.01<P<0.05$ (显著, *); CV 为指变异性系数。
Note: $P<0.01$ (highly significant, **); $0.01<P<0.05$ (significant, *); CV means coefficient of variation.

4.3 各因素对膜杂分离率的影响

由表 3 可知,机具前进速度(x_1)、地膜输送链速度(x_2)、捡拾滚筒安装位置(x_3)、二级杂质输送装置转速(x_4)对膜杂分离率(Y_2)的影响重要性顺序为 x_3 、 x_1 、 x_2 。根据二次回归模型式(13)作出因素之间关系响应面图,响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱^[31-32]。由方差分析 F 值可知,机具前进速度(x_1)和地膜输送链速度(x_2)的交互作用对膜杂分离率有显著影响,其响应曲面如图 5 所示。

分析图 5 可知,机具前进速度与地膜输送链速度的交互作用,对膜杂分离率的影响趋势同残膜捡拾率。当地膜输送链速度与机具前进速度之比约为 1.2 时,膜杂分离率处于较大区域。这主要是因为当地膜输送链速度大

于机具前进速度时,被捡拾残膜成拉伸平展状态,增大膜平展面积,有利于膜面上棉秆、土壤、棉壳等杂质与膜分离,提高膜杂分离率。同时,地膜输送链速度高于机具前进速度,在捡拾残膜过程中,有利于地膜链排输送链排捡拾由起膜装置铲起堆积的残膜。



$$Y_2 = f(x_1, x_2, 0, 240)$$

图5 机具前进速度与地膜输送链速度对膜杂分离率的影响

Fig.5 Effect of forward speed of machine and velocity of plastic film conveyor chain on separation rate of film impurity

4.4 各因素对杂质输送效率的影响

由表3方差分析 F 值可知,各因素对杂质输送效率影响重要性顺序为:二级杂质输送装置转速 x_4 、捡拾滚筒安装位置 x_3 、地膜输送链速度 x_2 和机具前进速度 x_1 。由回归模型式(14)可知,杂质输送效率与各因素之间成线性关系且成负相关。当输送装置转速改变时,棉秆、土壤等与输送装置螺旋叶片之间的相对切向速度发生变化导致摩擦系数改变。根据 Striebeck 摩擦模型得知,两接触体间的相对切向速度与摩擦系数存在一定的非线性,随着转速的增加,物料与叶片间的摩擦系数先减小再增大^[33-34]。当摩擦系数随输送装置转速的增大而增大时,棉秆、土壤等杂质与螺旋叶片间的摩擦力增大,杂质完全黏着在螺旋叶片上做圆周运动,进而影响输送效率。当地膜输送链速度和机具前进速度较小时,杂质喂入量小,

输送装置螺旋内的物料量少,在运动过程中物料松散而相互挤压力小,基本不产生抱团现象,棉秆、土壤等杂质不容易做圆周运动,因此输送效率高。而当输送装置内棉秆、土壤等的密度达到一定程度时,产生聚集、抱团现象,在叶片摩擦力的作用下杂质做圆周运动,降低输送效率^[26]。

4.5 作业参数优化

综合上述分析,为使残膜回收作业质量达到最佳,需使残膜捡拾率达到最大,同时膜杂分离率高。为此建立残膜捡拾率 Y_1 、膜杂分离率 Y_2 和杂质输送效率 Y_3 的多目标函数的数学模型。利用 Design-Expert 8.0.6 软件对回归方程进行参数优化。清杂系统作为随动式残膜回收机的关键核心部件,本文以提高残膜回收作业质量为目的,同时考虑到回收残膜的后处理与再加工利用,故残膜捡拾率最重要,膜杂分离率次之;残膜捡拾输送中与棉秆、土壤等杂质分离,分离后杂质及时有效地输送至机具外侧是保证清杂系统正常作业的重要条件,故输送效率也十分重要,但次于前2个指标。所以将优化求解方程中残膜捡拾率重要性设置为5“+”,膜杂分离率设置为4“+”,输送效率设置为1“+”,得到清杂系统作业参数最优组合:机具前进速度1.26 m/s(4.5 km/h),地膜输送链速度1.55 m/s(5.6 km/h),捡拾滚筒安装位置-17 mm(即以支架长孔中心与捡拾滚筒中心在竖直方向重合为原点,向机具前进方向调整17 mm),二级杂质输送装置转速205 r/min。优化后的残膜回收作业性能指标理论值为:残膜捡拾率90.19%,膜杂分离率92.21%,杂质输送效率89.6%。

为验证优化结果的可靠性,采用清杂系统作业参数最优组合在田间进行3次重复试验,试验结果取平均值,田间试验情况如图6所示。试验测得残膜捡拾率均值为91.54%,膜杂分离率均值为90.37%,杂质输送效率均值为88.4%,与预测值误差分别为1.50%、2.00%和1.34%。试验验证结果表明,回归模型具有较好的可靠性。



a. 残膜捡拾输送

a. Pick up and transport of residual film



b. 作业后效果

b. Effects after operation



c. 回收残膜

c. Recovery of residual film

图6 田间试验

Fig. 6 Field tests

5 结论

1)根据随动式残膜回收机清杂系统工作原理和膜杂分离分析,确定了残膜回收清杂系统作业质量的影响因素和评价指标。

2)根据二次回归正交组合试验设计方案并进行田间试验,采用响应曲面分析法对试验结果进行了分析,对多

目标试验指标进行了参数优化,通过优化得到清杂系统作业参数最优组合为:机具前进速度1.26 m/s(4.5 km/h),地膜输送链速度1.55 m/s(5.6 km/h),捡拾滚筒安装位置-17 mm(即以支架长孔中心与捡拾滚筒中心在竖直方向重合为原点,向机具前进方向调整17 mm),二级杂质输送装置转速205 r/min。在最优参数组合下残膜捡拾率为

90.19%,膜杂分离率为92.21%,杂质输送效率为89.6%。

3)田间验证试验结果表明回归模型能很好地预测残膜回收作业指标,清杂系统在最优作业参数组合下工作时,残膜捡拾率为91.54%,膜杂分离率为90.37%,输送效率为88.4%,与预测值误差分别为1.50%、2.00%和1.34%。试验效果良好,满足作业要求。

[参考文献]

- [1] 平全荣. 旱地农业覆盖栽培技术研究应用进展与展望[J]. 山西农业科学, 2008, 36(2): 63—66.
Ping Quanrong. Research and using development and prospect of farming in dry land covers technology[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008, 36(2): 63—66. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王耀林. 地膜覆盖栽培技术大全[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [3] 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 with English abstract)
- [4] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水力参数及土壤结构的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 101—106, 140.
Wang Zhichao, Li Xianye, Shi Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101—106, 140. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张丹, 胡万里, 刘宏斌, 等. 华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 1—5.
Zhang Dan, Hu Wanli, Liu Hongbin, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [6] 董合干, 刘彤, 李勇冠, 等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 91—99.
Dong Hegan, Liu Tong, Li Yongguan, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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(S1): 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(S1): 295—303. (in Chinese with English abstract)
- [8] 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 95—102.
Yan Changrong, Liu Enke, Shu Fan, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(2): 95—102. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张佳, 张宇涛, 董黎明. 国内残膜回收机械现状及发展趋[J]. 农业装备技术, 2014(4): 29—31.
Zhang Jia, Zhang Yutao, Dong Liming. Domestic residual film recovery machine research status and development trend [J]. Agricultural Equipment and Technology, 2014(4): 29—31. (in Chinese with English abstract)
- [10] Rocca A R. Plastic mulch retriever: US8302699B2 [P]. 2012-11-06.
- [11] 刘旋峰, 石鑫, 郭兆峰, 等. 滚筒式残膜回收机的性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 26—31.
Liu Xuanfeng, Shi Xin, Guo Zhaofeng, et al. Performance test on roller type residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [12] 戴飞, 郭笑欢, 赵武云, 等. 帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 104—113.
Dai Fei, Guo Xiaohuan, Zhao Wuyun, et al. Design and experiment of canvas belt combined operation machine for potato digging and plastic film collecting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 104—113. (in Chinese with English abstract)
- [13] 罗凯, 袁盼盼, 靳伟, 等. 链筛式耕层残膜回收机设计与工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 19—27.
Luo Kai, Yuan Panpan, Jin Wei, et al. Design of chain-sieve type residual film recovery machine in plough layer and optimization of its working parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 19—27. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 等. 抛膜链齿输送带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 Chinese with English abstract)
- [15] Brooks T W. Apparatus for removing and baling plastic mulch, US5452652 [P]. 1995-09-26.
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(5): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [17] 罗威, 王吉奎, 牛海龙, 等. 夹指链式残膜回收机清杂装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 75—79.
Luo Wei, Wang Jikui, Niu Hailong, et al. Design and test on debris clean-up device of clamping finger-chain type device for recycling agricultural plastic film[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [18] 康建明, 彭强吉, 焦伟, 等. 农田残膜清杂装置, 201810133968.X [P]. 2018-06-26.
- [19] 李俊虹, 罗昕, 胡斌, 等. 机收残膜混合物水洗清选装置的研究与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 152—156.
Li Junhong, Luo Xin, Hu Bin, et al. Research and experiment of the water-separating device for residual film mixture[J]. Journal of Agricultural, 2019, 41(5): 152—156. (in Chinese with English abstract)

- [20] 杨松梅, 颜利民, 莫毅松, 等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 109—115, 164.
Yang Songmei, Yan Limin, Mo Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 109—115, 164. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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(18): 11—19.
Zhang Huiming, Chen Xuegeng, Yan Limin, et al. Design and test of master-slave cotton straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [22] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计 第9版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [23] 程岩, 李宝林, 张燕, 等. 链传动中纵向振动问题的研究[J]. 机械传动, 2012, 36(7): 27—29.
Chen Yan, Li Baolin, Zhan Yan, et al. Study on longitudinal vibration of roller chain in chain drive[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(7): 27—29. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
Zhen Zhiqi. Study on Corn Straw Pickup-Chopping and Ditch-Burying Returning Field Machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [25] 运输机械设计选用手册编辑委员会编. 运输机械设计选用手册(下册)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [26] 乌兰图雅, 王春光, 祁少华, 等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送性能试验分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 51—59.
Wulantuya, Wang Chunguang, Qi Shaohua, et al. Test and analysis of performance of screw conveyor for rubbing and breaking corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(21): 51—59. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘静波, 陶旭, 姜玮, 等. 利用二次回归正交旋转组合设计优化鸡蛋壳膜唾液酸提取工艺[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(4): 1071—1076.
Liu Jingbo, Tao Xu, Jiang Wei, et al. Technology optimization of Sialic acid isolation from hen eggshell membrane by quadric regression orthogonal rotary tests[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(4): 1071—1076.
- [28] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 137—145.
Jiang Deli, Chen Xuegeng, Yan Limin, et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 137—145. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘师多, 牛康, 师清翔, 等. 玉米果穗螺旋摩擦输送装置的输送性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 9—16.
Liu Shiduo, Niu Kang, Shi Qingxiang, et al. Performance experiment of friction conveying device for maize ears[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 9—16. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王建楠, 刘敏基, 曹明珠, 等. 薏苡脱壳机关键部件作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 288—295.
Wang Jiannan, Liu Minji, Cao Mingzhu, et al. Working parameter optimization and experiment of key components of coix lacrym-jobi sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 288—295. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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 with English abstract)
- [32] 袁雪, 祁力钧, 王虎, 等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 45—50, 54.
Yuan Xue, Qi Lijun, Wang Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 45—50, 54. (in Chinese with English abstract)
- [33] Thomsen J J, Fidlin A. Analytical approximations for stick-slip vibration amplitudes[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(3): 389—403.
- [34] 李群松, 朱颖, 谭海林, 等. 变摩擦条件下三维接触问题有限元分析改进[J]. 中国机械工程, 2012, 23(16): 1929—1933.
Li Qunsong, Zhu Ying, Tan Hailin, et al. Improvement of 3D contact problem FEA under variable friction condition[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(16): 1929—1933. (in Chinese with English abstract)

Optimization of working parameters of cleaning system for master-slave residual plastic film recovery machine

Jiang Deli^{1,2}, Chen Xuegeng^{1,2*}, Yan Limin^{1,2}, Mo Yisong³, Yang Songmei⁴, Wang Zhaoyu^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China ;

3. Changzhou Han-Sun Machinery Co., Ltd., Changzhou, 213034, China ;

4. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Plastic film has been widely used to mulch soil in croplands, but its recycling rate is less than 60%. Since natural degradation of plastic film is slow, accumulative use of plastic films has resulted in soil structure degradation and environment deterioration. Recycling the film residuals is hence mandatory. Manual picking is labor intensity and inefficient, and mechanical recycling is thus called. Most machines available on market are unable to separate the film residuals from straw and large soil particles during pick-up process. To alleviate this problem, we designed and tested an machine equipped with an improved cleaning system. We optimized the working parameters of the system in attempts to improve the residual recovery efficiency. Analysis of the structure of the cleaning system, its working principle and conditions, as well as the factors affecting the machine operation revealed that the most important parameters were the advancing speed of the machine, the speed of the film-conveyer, position of the pick-up drum and the speed of the secondary impurity-conveyer. We investigated the recovery rate of the film residuals, rate of separating the film residuals from the straw, and transport efficiency of the impurity, using the regression orthogonal combination tests with four five-level factors. The response surface of the testing results was analyzed using the design-expert software, and the relationship between each impacting factor and the testing index was also analyzed. The results showed that the main and secondary factors affecting the picking-up rate were position of the picking drum and the advancing speed of the machine, and that the factor affecting the separation rate mostly was the speed of film transportation followed by rotating speed of the impurity conveyer. The transport efficiency was affected mostly by the rotational speed of the impurity conveyer, followed by location of the pick-up drum, speed of the film-conveyer and advancing speed of the machine. The regression model was optimized with multiple objectives, and the optimal working parameters for the cleaning system are: Advancing speed of the machine and equipment: 1.26 m/s, speed of the film transporter: 1.55 m/s, position of the pick-up drum: -17 mm (taking the center of the hole in the supporter and the center of the picking-drum in the vertical direction as the origin, adjusting 17 mm to the forward direction of the machine), speed of the secondary impurity conveyer: 205 r/min. Calculated using these optimal parameters, the pick-up rate of the film residuals was 90.19%, the separation rate of the film residuals from the impurities was 92.21%, the impurity transport efficiency was 89.6%. We verified these against field experiments, and the results showed that the picking-up rate was 91.54%, the separation rate was 90.37%, and impurity transport efficiency was 88.4%. This paper offers references to improving quality of the cleaning system in plastic-film pick-up machine.

Keywords: agricultural machinery; optimization; working parameters; residual film recovery; plastic film impurity separation; response surface