

# 滚筒式机收膜杂除土装置设计及试验

周鹏飞<sup>1,2</sup>, 陈学庚<sup>1,2</sup>, 蒙贺伟<sup>1,2</sup>, 梁荣庆<sup>1</sup>, 张炳成<sup>1</sup>, 坎 杂<sup>1,2</sup>

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

**摘要:**为解决机收膜杂含土率高的问题,设计了一种滚筒式机收膜杂除土装置,对装置内物料进行动力学分析,确定了该装置的基本参数。在此基础上,以滚筛转速、喂料速度、滚筛倾角和叶片螺距为试验因素,以除土率、漏膜率和工作效率为评价指标进行了四因素五水平的响应面试验,分析了各因素对膜土分离作业性能的影响规律,获得了最佳组合参数如下:滚筛转速为24.90 r/min、喂料速度为11.52 kg/min、滚筛倾角为-2°、叶片螺距为699.99 mm。在该条件下验证试验结果如下:除土率为92.48%、漏膜率为1.90%、工作效率为7.61 kg/min,试验响应指标预测值与验证试验指标间误差分别为2.15%、5.79%、2.63%,表明所构建模型具有较好的预测可靠性,相关研究可为机收膜杂除土技术提供一定参考和理论支撑。

**关键词:**农业机械化工;机收膜杂;膜土分离;滚筒筛;响应面试验

**中图分类号:**S223.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)09-2718-14

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211267

## Design and experiment of trommel with function of separating soil from residual film mixture

ZHOU Peng-fei<sup>1</sup>, CHEN Xue-geng<sup>1,2</sup>, MENG He-wei<sup>1,2</sup>, LIANG Rong-qing<sup>1</sup>,  
ZHANG Bing-cheng<sup>1</sup>, KAN Za<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of high soil content of residual film by mechanical recovery, a trommel with function of separating soil from residual film was designed. Through the analysis of kinetics of the residual film material in the device, the basic structure parameters of the device were determined. The rotational speed of the trommel, the feeding speed, the inclination angle of the trommel and the pitch of the spiral blade were selected as the test factors, and the soil removal rate, the rate of the leakage of residual film and the work efficiency were selected as the evaluation indicators. A four-factor, five-level test was designed using the Central-Composite-Design experimental design principle to analyze the effects of each factor on the operational performance of membrane soil separation. The comprehensive effects of various factors on the response index were analyzed by using Design-Expert software surface response diagram,

收稿日期:2021-11-23.

基金项目:新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2020DB008);兵团重大科技项目(2018AA001).

作者简介:周鹏飞(1993-),男,工程师,博士.研究方向:现代农业机械装备.E-mail:15802220134@163.com

通信作者:坎杂(1963-),男,教授,博士生导师.研究方向:现代农业机械装备.E-mail:kz-shz@163.com

which showed that the optimal rotational speed of the trommel, the feeding speed, the inclination angle of the trommel and the pitch of the spiral blade are 24.90 r/min, 11.52 kg/min,  $-2^\circ$  and 699.99 mm, respectively. The experimental results under this parameter combination are 94.48%, 1.90‰ and 7.61 kg/min, respectively. The errors between the experimental results and the optimization results are 2.15%, 5.79%, 2.63%, respectively. The results indicate that the constructed model has good reliability. The device designed in this study meets the design requirements, can realize the effective separation of residual film and soil impurities, and is of great significance to the mitigation of rural ecological pollution and sustainable agricultural development.

**Key words:** agricultural mechanization engineering; residual film mixture by mechanical recovery; membrane soil separation; trommel; response surface test

## 0 引言

地膜凭借其具有增温保墒、抑制杂草和防虫防病的优势,在农作物的生产种植中得到广泛应用,已然成为与种子、农药和化肥同等重要的农业生产资料<sup>[1-3]</sup>。随着地膜的大规模使用,地膜残留所带来的生态环境污染问题日趋严重。目前,利用残膜回收机虽可实现农用地膜的有效回收,但回收后的地膜中裹挟大量土壤<sup>[4]</sup>,不利于残膜资源化利用。因此,如何有效降低机收残膜中的土壤含量已成为解决残膜资源化利用的难题之一。

国内外学者针对机械除土形式和作业原理展开了研究,Rose等<sup>[5]</sup>开发了一种带有筛孔的螺旋式种子除土设备,该设备利用螺旋输送机构驱动物料翻转,通过筛孔达到种子与土壤分离的目的。张佳等<sup>[6,7]</sup>设计了一种均布旋转圆盘结构,利用膜土间重力、摩擦力的差异性,实现残膜的输送和膜土的分离。游兆延等<sup>[8]</sup>对双筛体驱振式膜土分离和输送装置进行了设计和试验。魏忠彩等<sup>[9,10]</sup>设计研制了一种基于偏心轮机构的摆抖薯土分离装置,在实现薯土分离的同时降低了伤薯率。张学军等<sup>[11]</sup>设计了一种膜土逆向分离装置,并对其工作性能进行试验研究。吕金庆等<sup>[12]</sup>设计了一种除杂辊间距、转速以及倾角可调节的螺旋辊式马铃薯除土装置,除土后的马铃薯能够较好地满足仓储要求。石鑫等<sup>[13]</sup>和牛长河等<sup>[14]</sup>根据物料中不同组分之间空气动力学特性的差异性,设计了一种双螺旋叶片的气力式筛筒。王冠等<sup>[15]</sup>在现有基础上对滚筒筛进行优化设计,通过对比试验研究了除土处理对秸秆燃烧特性的影响。

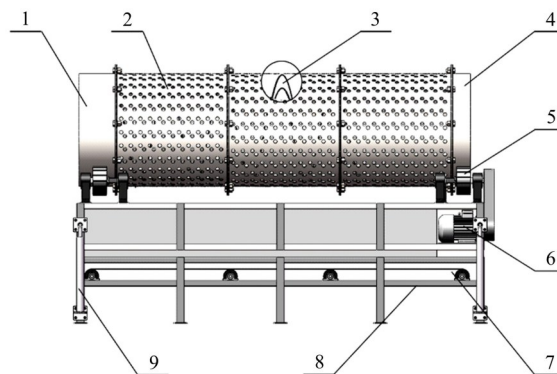
综上所述,结合机械化回收残膜的实际情况,本文设计了一种具有间断螺旋叶片的滚筒式机收

膜杂除土装置。采用响应曲面法、回归分析和方差分析研究了试验因素对该装置除土性能和工作效率的影响规律,获取了该装置的最佳组合参数,为残膜与土壤的有效分离提供了技术和理论基础。

## 1 整机结构和工作原理

### 1.1 整机结构

滚筒式机收膜杂除土装置整机结构如图1所示,主要由滚筒除土部件、机架、动力传动系统、电气控制系统、液压调节部件、排渣输送部件等组成。其中,滚筒除土部件由筛筒、螺旋叶片、喂料口和出料口组成;动力传动系统由减速电机、传动带和托轮等组成,可为装置运行提供动力;电气控制系统由变频器、开关面板及电子元器件等组成,可实现对目标参数的调节。筛筒两端分别为喂料口及出料口,中部由多个两端带有法兰的筛筒拼接而成,并通过托轮支撑水平放置于机架上部,其可绕自身轴线旋转。筛筒壁开有圆形筛孔,并设



1-出料口;2-筛筒;3-螺旋叶片;4-喂料口;5-托轮;6-减速电机;  
7-排渣输送带;8-机架;9-液压调节装置

图1 滚筒式棉田机收膜杂除土装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of trommel with function of separating soil from residual film

置间断螺旋导流叶片。机架采用分体式结构,通过液压调节部件调节筛筒与水平方向的夹角。排渣输送装置位于筛筒的正下方,可排出筛分过程中的土壤杂质。

### 1.2 工作原理

在工作时,以减速电机为核心的动力传输系统驱动托轮进行旋转,进而通过摩擦力驱动与托轮接触的滚筒除土部件进行回转运动。与此同时,由喂料口进入至滚筒除土部件内腔的机收膜杂沿滚筒内壁移动,并在滚筒内壁上设置的间断式螺旋叶片作用下,机收膜杂由喂料口向出料口运移的同时,不断被螺旋叶片扰动和打散,此时机收膜杂中小于滚筛筛孔的土壤杂质透过筛孔落到下方的排渣输送带上,通过输送带排出装置,而大于筛孔的残膜物料则由滚筛的出料口排出,完成机收膜杂除土作业。

## 2 机收膜杂动力学分析及装置关键部件设计

### 2.1 机收膜杂动力学分析

通过对机收膜杂在滚筛内的运移状态进行分析可知,其运动可分解为沿滚筛轴线方向的线性运动和滚筛旋转平面内的平面运动。沿筛体轴线方向的线性运动是由滚筛倾斜安装和滚筛内壁的螺旋叶片共同作用而产生的,其速度与滚筛倾角和螺旋叶片的螺旋升角密切相关。机收膜杂在滚筛旋转平面内的运动由物料自身所受重力、物料与滚筛内壁间的摩擦力和离心力共同作用产生。

根据相关文献[16-18]可知,物料在滚筛内的运动状态可分为滑落、抛落和离心运动3种,如图2所示。当物料处于滑落状态时,不易使膜杂物料中的土壤杂质运移至边缘后透过筛孔,进而影响筛分效率;当物料处于离心状态时,物料受离心作用紧贴滚筛内壁,无法下落、翻滚,将会影响物料的筛分效果和作业效率。因此,使物料处于抛落状态有利于残膜与杂质的筛分。如图3所示,对物料在滚筛内的受力进行分析,假设 $O'$ 点为物料随滚筛运移的最高点,以 $O'$ 点为坐标原点,滚筛切线方向为 $x$ 轴,法向方向为 $y$ 轴建立坐标系。当 $O'$ 点位于 $A$ 点与 $B$ 点之间时,物料所受重力 $G$ 沿 $y$ 轴分量与离心力 $F$ 的合力与物料所受支撑力 $N$ 相平衡,物料所受重力 $G$ 沿 $x$ 轴分量与摩擦力 $f$ 相平衡,即:

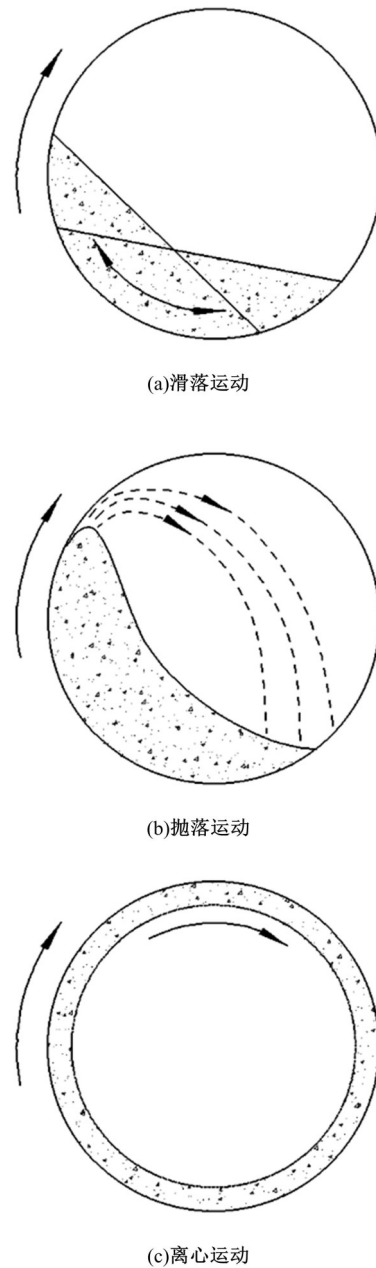


图2 不同转速下物料在滚筛截面内的运动状态  
Fig. 2 Movement state of residual film mixture in the cross section of trommel at different speed

$$\begin{cases} N = F + G \cos \alpha \\ f = G \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} F = \frac{mv^2}{R} \\ G = mg \\ f = \mu(F + G \cos \alpha) \\ v = \frac{\pi}{30} Rn \end{cases} \quad (2)$$

式中: $m$ 为物料质量,kg; $v$ 为物料线速度,m/s; $R$ 为

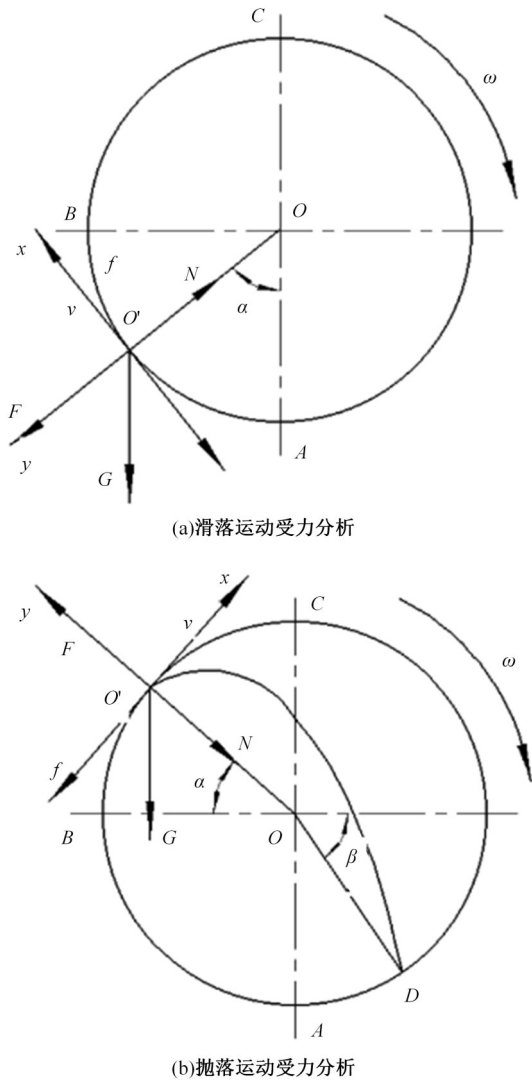


图 3 滚筛截面内物料受力分析图

Fig. 3 Analysis of the forces on residual film mixture in the cross section of the trommel

滚筛半径,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $\mu$  为物料与滚筛内壁间接触的摩擦因数;  $\alpha$  为接触点和圆心连线与竖直方向间的夹角,  $^\circ$ ;  $n$  为滚筛转速,  $\text{r/min}$ 。

此时,物料发生滑落运动时的转速  $n_1$  为:

$$n_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{\mu R}} \quad (3)$$

式中:  $\alpha \in (0, \pi/2)$ 。

当  $O'$  点位于  $B$  点与  $C$  点之间时,物料所受重力  $G$  沿  $y$  轴分量与物料所受支撑力  $N$  的合力与离心力  $F$  相平衡,物料所受重力  $G$  沿  $x$  轴分量与摩擦力  $f$  相平衡,即:

$$\begin{cases} F = N + G \sin \alpha \\ f = G \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$f = \mu(F - G \sin \alpha) \quad (5)$$

此时,物料发生抛落运动时的转速  $n_2$  为:

$$n_2 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{R}} \quad (6)$$

当物料运动至  $C$  点时,物料转速为:

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (7)$$

由上可知,当滚筛转速较低 ( $n \leq n_1$ ) 时,物料将开始滑落运动,位于滚筛底部的物料流随滚筛的转动被稍微抬起,待其到达一定高度后向滚筒底部下滑;随着滚筛转速的提高,物料运动特征由滑落向抛落转换,继而产生较强烈的抛落运动,物料开始脱离滚筛内壁,向滚筛底部作自由落体运动;随着滚筛转速的继续提高 ( $n \geq n_c$ ),物料开始紧贴于滚筛内壁,并随滚筛转动,出现离心运动<sup>[19]</sup>。

机收膜杂中土壤杂质为散粒物料,与滚筛内壁的摩擦形式为滚动摩擦,残膜为片状物料,与滚筛内壁的摩擦形式为滑动摩擦。根据国家标准《塑料薄膜和薄片摩擦因数的测定》(GB/T 10006—2021)对回收残膜与接触钢材间的滑动摩擦因数进行测定,得到其滑动摩擦因数为 0.387。查阅文献[20-22]可知,土壤与钢材间的滚动摩擦因数远小于残膜与钢材间的滑动摩擦因数,即土壤颗粒由滑落运动向抛落运动转换时所需的转速远大于残膜由滑落运动向抛落运动转换时所需的转速。因此,当转速处于残膜抛落运动且土壤滑落运动时,有利于机收膜杂的抛散和土壤杂质的透筛。

机收膜杂在自身重力、与螺旋叶片间的摩擦力以及螺旋叶片法向推力的共同作用下沿筛体轴线方向运动,对其进行受力分析,如图 4 所示。图 4 中,  $Q$  为螺旋叶片与机收膜杂的作用点;  $MN$  为螺旋叶片切平面;  $WV$  为滚筛轴线;  $P_N$  为螺旋叶片对机收膜杂的法向推力;  $P_f$  为螺旋叶片与机收膜杂间的摩擦力;  $\theta$  为滚筛倾斜角;  $\beta$  为螺旋叶片升角。

当螺旋叶片升角  $\beta$  一定时,由受力分析可知,螺旋叶片沿水平方向的分量  $P_x = P_N \cos(\beta + \theta) = G / \tan(\beta + \theta)$ 。此时,随着滚筛倾角  $\theta$  的增大,螺旋叶片对机收膜杂的水平驱动力  $P_x$  减小。由此可知,滚筛倾角  $\theta$  和螺旋叶片升角  $\beta$  均会对滚筛内

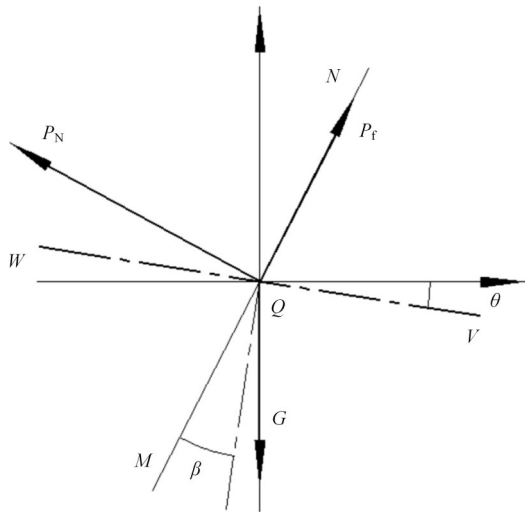


图 4 螺旋叶片受力分析图

Fig. 4 Analysis of the forces on the spiral blade

机收膜杂的输送性能产生影响。滚筛的输送性能决定了机收膜杂在筛面的停留时长,进而影响装置的筛分除土性能。

## 2.2 筛分部件设计

### 2.2.1 滚筛直径和长度

筛筒直径和长度决定滚筒筛的工作面积大小,直接影响装置的处理能力。按照生产工艺要求,根据经验公式<sup>[23]</sup>计算滚筛的直径为:

$$D = \left( \frac{11.36Q}{\rho F K g^{0.5} \tan \theta} \right)^{0.4} \times 37.808 \quad (8)$$

式中: $D$ 为滚筛直径,mm; $Q$ 为滚筛处理量,t/h; $\rho$ 为机收膜杂容重,t/m<sup>3</sup>; $F$ 为填充系数(常用值 $F=0.25\sim 0.33$ ); $K$ 为速度修正系数。

将相关参数<sup>[24]</sup>代入式(8)计算可得 $D=1193.5$  mm,对其进行圆整后确定本滚筛的直径为1200 mm。由于土壤筛分属于概率问题,理论上通过增大滚筛长度可以增大土壤颗粒的透筛概率,但受实际条件限制,一般情况下,滚筛的长度是直径的2~6倍。为确保滚筛强度及残膜与土壤有效分离,参考相关文献<sup>[25]</sup>并结合经验公式,滚筛采用厚度5 mm的钢板,有效长度为3600 mm。在此基础上为保证筛筒强度需求,采用分段式结构。筛筒间通过法兰连接,用螺栓将法兰盘紧固。

### 2.2.2 筛面筛孔及排布形式

筛孔形状和尺寸需要依据物料粒度和形状大小等实际情况确定。常用的筛孔形状可分为矩形、三角形和圆形等,由于被筛分的土壤颗粒普遍呈类球体,故选择圆形筛孔,其大小根据经验公式

确定。通过筛孔的最大颗粒直径 $d_{\max}$ 为:

$$d_{\max} = \kappa d_0 \quad (9)$$

式中: $\kappa$ 为筛孔系数<sup>[26]</sup>,其中圆形孔 $\kappa=0.7$ ; $d_0$ 为筛孔直径,mm。

由机收膜杂中土壤颗粒尺寸测定结果可知,大颗粒土壤粒径为20~25 mm,为保证筛分质量,本文选取筛孔直径 $d_0=40$  mm。常见的筛孔排布形式可分为直行正列和错列排列两种,而交错排列时筛面筛孔率较高,可以有效提高筛选效率<sup>[27,28]</sup>,因此筛孔按照等边三角形错列排布,为保证滚筛整体刚度,取孔间距 $L=60$  mm。

### 2.2.3 螺旋叶片

螺旋叶片是滚筛连续输送的核心部件,决定着滚筛单位时间的处理量和物料在滚筛内的筛分效率。螺旋叶片根据安装形式的不同,可分为有轴螺旋叶片和无轴螺旋叶片,由于无轴螺旋叶片质量小、运行功耗低且可以有效防止物料缠绕,故本文选择使用无轴螺旋叶片<sup>[29]</sup>。一般情况下,无轴螺旋叶片的设计主要包括螺旋叶片外径 $D$ 、螺距 $S$ 和螺旋叶片宽度 $h$ 等参数的确定<sup>[30]</sup>。螺旋叶片的螺距 $S$ 可依据经验公式确定:

$$S = (0.5 \sim 2.2) D \quad (10)$$

式中: $D$ 为螺旋叶片的外径,即滚筛的内径,mm。

当螺距相对于螺旋叶片的直径较大时,物料轴向移动的驱动作用显著增强,不利于物料的正常筛分。综合考虑筛分效果因素,螺距初步确定为600 mm。根据相关文献<sup>[31]</sup>和实际试验结果可知,当螺旋叶片高度较小时,无法满足膜杂物料的驱动需求;当螺旋叶片高度较大时,不利于物料在滚筛内的翻滚抛落,从而影响筛分效率,故本文选取螺旋叶片高度 $h=100$  mm。

通过分析对比连续螺旋叶片与间断螺旋叶片间的差异性可知,间断螺旋叶片能根据喂料时物料浓度变化进行自适应调整<sup>[32,33]</sup>。物料运移至螺旋叶片中的间断处后失去沿滚筛轴向的驱动力,直到间断处的物料堆积至能被下一段螺旋叶片推进时,物料才能继续沿滚筛轴向方向运移,从而实现对物料浓度自调节。本文采用的间断螺旋叶片排布形式如图5所示,图中极坐标系里极轴正方向表示滚筛沿轴线到喂料口的距离,圆弧对应每一个螺旋叶片在滚筛内的角度及到喂料口的距离。

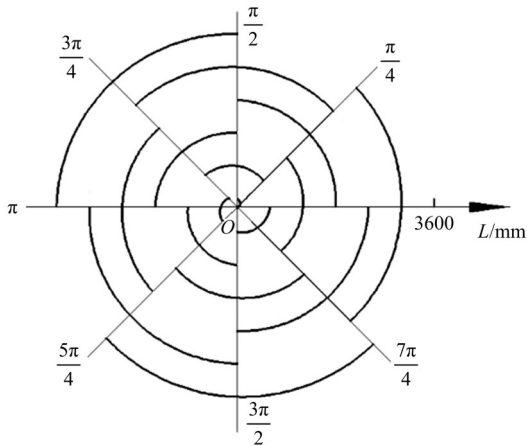


图5 间断式螺旋叶片排布方式

Fig. 5 Schematic diagram of the discontinuous spiral blade arrangement form

### 3 性能试验

#### 3.1 试验材料及设备

本试验于2021年8月在阿拉尔金准机械制造有限公司进行。试验物料为往复式切碎装置处理后的机收膜杂,采样地点为新疆生产建设兵团第一师七团三连。对机收膜杂进行随机抽样5次,通过人工分拣出膜杂混合物料中各种成分,称量各成分质量并统计分析各成分占比,其中残膜质量占比为 $(34.72 \pm 1.08)\%$ ,棉秸秆质量占比为 $(17.86 \pm 0.61)\%$ ,土壤质量占比为 $(47.42 \pm 1.12)\%$ 。利用Sartorius MA-45型快速含水率测定仪对土壤含水率进行测定,得出该物料中土壤杂质的含水率为 $(12.64 \pm 1.05)\%$ 。

主要仪器设备如下:标准土壤筛(孔径为1~5 mm,供应商为浙江绍兴市上虞圣超仪器设备有限公司)、TCS-60型电子秤(分度值为10 g,测量值为0~60 kg,供应商为广东巨衡精密测控有限公司)、JMB-5003型电子天平(测量值为0~500 g,测量精度为0.001 g,供应商为苏州金钻称重设备系统开发有限公司)、Sartorius MA-45型快速含水率测定仪(质量精度为0.001 g,含水率精度为0.01%,供应商为上海民仪电子有限公司)、UT372型激光转速仪(测量值为10~99 999 r/min,测量精度为0.04%,供应商为广东中山子浩仪器有限公司)、数显式倾角仪(测量值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ,分辨率为 $0.05^\circ$ ,供应商为山东济宁山测仪器有限公司)、数显式游标卡尺(测量值为0~150 mm,精度为0.02 mm)、秒表、卷尺、塑料袋、标签纸、塑料绳。试验装置为自制的滚筒式棉田

机收膜杂除土装置。

#### 3.2 试验方案及响应指标

##### 3.2.1 试验方案

为研究不同结构参数和工作参数对膜杂除土率、除土效率的变化规律,对实际试验条件及影响因素进行分析。根据机收膜杂在滚筛内的动力学分析,结合预实验分别选取滚筛转速、喂料速度、滚筛倾角和叶片螺距作为响应曲面的设计因素,并令其因素代号分别为A、B、C、D,试验采用响应曲面中Central-composite-design试验设计方法,各试验因素水平编码表如表1所示<sup>[13,15,23,25,31]</sup>。其中,通过利用变频器分别调节滚筛驱动电机、喂料输送带驱动电机的转速实现对滚筛转速、喂料速度的调整,通过利用液压装置调节筛筒首、末端距离地面的高度并通过游标卡尺进行测量,利用数显式倾角仪修正筛筒倾角,实现滚筛倾角的调整,通过改变叶片在滚筛内壁的安装位置实现叶片螺距的调整。

表1 四元二次回归组合设计因素水平取值及编码表

Table 1 Quaternary quadratic regression combination design factor level value and coding table

编码值	A/(r·min <sup>-1</sup> )	B/(kg·min <sup>-1</sup> )	C/(°)	D/mm
2	25	20	2	700
1	22.5	17.5	1	650
0	20	15	0	600
-1	17.5	12.5	-1	550
-2	15	10	-2	500

对膜杂物料进行打包分组,每包装填机收膜杂5 kg。每组试验前确定试验因素水平,调试电机并检查装置空转性能,完成装置性能试验的准备工作。待装置运转稳定后,借助输送带将残膜物料送至滚筛入料口,同时按下秒表开始记录筛分时间。当滚筛内的物料全部被排出后计时结束,停机并收集出料口排出的物料和排渣输送带上排出的物料,分别称量出料口排出物料中土壤杂质的质量和排渣输送带上排出的物料中残膜的质量并记录数据。另外,为了方便计算除土率,试验时出料口铺设塑料篷布,以便收集滚筛排出的物料。

##### 3.2.2 响应指标

除土率和漏膜率通过不同方面共同反映了装置作业性能的指标,而工作效率是装置作业能力的重要表现形式。因此,本文选取除土率、漏膜率

和工作效率为响应指标进行试验研究,分别用  $Y_1$ 、 $Y_2$  和  $Y_3$  表示,具体计算方式如下:

(1)除土率

除土率是检验和衡量装置针对残膜与土壤杂质分离效果的重要指标,即在一个完整的试验过程中,待加工物料中的土壤质量与排料中土壤的质量之差与待加工物料中的土壤质量的比值,如下所示:

$$Y_1 = \frac{M_1 \times s - M_2}{M_1 \times s} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $M_1$ 为试验前机收膜杂总质量,kg; $s$ 为试验前机收膜杂中土壤质量占比,%; $M_2$ 为试验后出料口排出物中土壤质量,kg。

(2)漏膜率

漏膜率是检验和衡量残膜与杂质分离效果的另一指标,每次试验结束后将排渣输送带上的杂质收集,称量计算杂质中残膜质量与待加工物料中残膜质量的比值,如下所示:

$$Y_2 = \frac{M_3}{M_1 \times s'} \times 1000\% \quad (12)$$

式中: $s'$ 为试验前机收膜杂中残膜质量占比,%; $M_3$ 为试验后筛下物中残膜质量,kg。

(3)工作效率

工作效率是指单位时间内滚筒式棉田机收膜杂除土装置所处理的物料质量,如下所示:

$$Y_3 = M_4 / T \quad (13)$$

式中: $M_4$ 为试验后出料口排出物总质量,kg; $T$ 为试验过程中物料从开始喂入至筛分结束的总时间,min。

3.3 模型建立和显著性分析

根据 Central-composite-design 中心组合试验方法进行四因素五水平试验,试验方案及结果如表 2 所示。

应用 Design-expert 软件进行方差分析<sup>[34-36]</sup>,除土率、漏膜率和工作效率的分析结果分别如表 3~表 5 所示。除土率、漏膜率和工作效率的响应面模型  $P$  值均小于 0.0001,表明所建立回归模型极显著;除土率、漏膜率和工作效率的响应面模型决定系数  $R^2$  分别为 0.9150、0.9361 和 0.9199,表明所建立回归模型可以较好地描述模型;失拟项  $P$  值分别为 0.3617、0.7327 和 0.5518,表明失拟项不显著,即在试验因素水平范围内,其解析结果与实际试验匹配较好,回归模型能够对试验参数进行优化。

表 2 试验设计方案及结果

Table 2 Experimental design scheme and results

试验号	A	B	C	D	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	-1	-1	-1	-1	90.80	3.44	8.27
2	1	-1	-1	-1	90.38	2.81	6.91
3	-1	1	-1	-1	89.54	3.39	5.43
4	1	1	-1	-1	88.28	2.85	6.71
5	-1	-1	1	-1	92.90	4.25	3.73
6	1	-1	1	-1	93.53	3.58	3.99
7	-1	1	1	-1	92.17	2.56	4.07
8	1	1	1	-1	91.64	3.52	4.08
9	-1	-1	-1	1	89.75	3.17	5.71
10	1	-1	-1	1	91.64	4.42	7.06
11	-1	1	-1	1	89.96	3.93	6.16
12	1	1	-1	1	89.75	5.83	7.08
13	-1	-1	1	1	88.49	3.24	3.65
14	1	-1	1	1	92.48	3.22	4.88
15	-1	1	1	1	91.01	2.60	4.14
16	1	1	1	1	93.79	3.41	5.13
17	-2	0	0	0	92.27	7.06	4.50
18	2	0	0	0	92.48	8.11	5.49
19	0	-2	0	0	92.27	3.36	5.75
20	0	2	0	0	91.64	3.88	5.01
21	0	0	-2	0	87.44	2.71	7.82
22	0	0	2	0	92.48	1.79	3.24
23	0	0	0	-2	91.43	1.79	5.61
24	0	0	0	2	88.91	2.89	5.84
25	0	0	0	0	89.96	5.31	6.33
26	0	0	0	0	89.77	6.35	5.30
27	0	0	0	0	90.90	4.52	5.37
28	0	0	0	0	89.75	5.60	5.93
29	0	0	0	0	89.75	5.50	5.19
30	0	0	0	0	89.12	5.08	6.21

通过对各因素  $P$  值进行分析可知,各因素对除土率的影响由大到小排序为:滚筛倾角  $C$ 、叶片螺距  $D$ 、滚筛转速  $A$ 、喂料速度  $B$ ;各因素对漏膜率的影响由大到小排序为:叶片螺距  $D$ 、滚筛倾角  $C$ 、滚筛转速  $A$ 、喂料速度  $B$ ;各因素对工作效率的影响由大到小顺序为:滚筛倾角  $C$ 、滚筛转速  $A$ 、喂料速度  $B$ 、叶片螺距  $D$ 。得到除土率  $Y_1$ 、漏膜率  $Y_2$  和工作效率  $Y_3$  关于滚筛转速  $A$ 、喂料速度  $B$ 、滚筛倾角  $C$ 、叶片螺距  $D$  的编码回归解析函数模型,建立的二次回归方程分别为:

$$Y_1 = 89.88 + 0.3A - 0.21B + 1.08C - 0.31D - 0.33AB + 0.43AC + 0.63AD + 0.39BC + 0.51BD - 0.41CD + 0.61A^2 + 0.5B^2 - 3.229 \times 10^{-3}C^2 + 0.056D^2 \quad (14)$$

表 3 除土率回归模型方差分析

**Table 3 Analysis of variance of  $Y_1$  regression model**

误差来源	平方和	自由度	均方和	$F$	$P$
模型	69.58	14	4.97	11.53	0.0001
A	2.21	1	2.21	5.14	0.0386
B	1.08	1	1.08	2.50	0.1344
C	28.15	1	28.15	65.29	<0.0001
D	2.29	1	2.29	5.31	0.0360
AB	1.76	1	1.76	4.09	0.0614
AC	2.95	1	2.95	6.84	0.0195
AD	6.29	1	6.29	14.59	0.0017
BC	2.44	1	2.44	5.66	0.0310
BD	4.13	1	4.13	9.58	0.0074
CD	2.70	1	2.70	6.26	0.0244
$A^2$	10.11	1	10.11	23.44	0.0002
$B^2$	6.91	1	6.91	16.03	0.0011
$C^2/10^{-4}$	2.863	1	2.863	6.643	0.9798
$D^2$	0.085	1	0.085	0.20	0.6630
残差	6.47	15	0.43		
失拟项	4.80	10	0.48	1.44	0.3617
纯误差	1.67	5	0.33		
总和	76.05	29	$R^2$	0.9150	

表 4 漏膜率回归模型方差分析

**Table 4 Analysis of variance of  $Y_2$  regression model**

误差来源	平方和	自由度	均方和	$F$	$P$
模型	62.26	14	4.45	15.69	<0.0001
A	1.11	1	1.11	3.91	0.0666
B	0.042	1	0.042	0.15	0.7068
C	1.17	1	1.17	4.13	0.0603
D	1.32	1	1.32	4.64	0.0479
AB	0.64	1	0.64	2.26	0.1537
AC	0.051	1	0.051	0.18	0.6786
AD	1.45	1	1.45	5.12	0.0389
BC	1.19	1	1.19	4.19	0.0586
BD	0.76	1	0.76	2.67	0.1231
CD	2.48	1	2.48	8.75	0.0098
$A^2$	6.2	1	6.2	21.87	0.0003
$B^2$	7.3	1	7.3	25.74	0.0001
$C^2$	20.21	1	20.21	71.28	<0.0001
$D^2$	19.16	1	19.16	67.59	<0.0001
残差	4.25	15	0.28		
失拟项	2.42	10	0.24	0.66	0.7327
纯误差	1.84	5	0.37		
总和	66.51	29	$R^2$	0.9361	

表 5 工作效率回归模型方差分析

**Table 5 Analysis of variance of  $Y_3$  regression model**

误差来源	平方和	自由度	均方和	$F$	$P$
模型	41.63	14	2.97	12.30	<0.0001
A	1.85	1	1.85	7.65	0.0144
B	0.35	1	0.35	1.43	0.2503
C	34.61	1	34.61	143.19	<0.0001
D	0.049	1	0.049	0.20	0.6603
AB	0.18	1	0.18	0.77	0.3956
AC	$5.63310^{-3}$	1	$5.63310^{-3}$	0.023	0.8808
AD	1.16	1	1.16	4.78	0.0450
BC	0.87	1	0.87	3.62	0.0766
BD	0.91	1	0.91	3.77	0.0711
CD	0.66	1	0.66	2.71	0.1202
$A^2$	0.86	1	0.86	3.54	0.0794
$B^2$	0.18	1	0.18	0.73	0.4051
$C^2$	0.051	1	0.051	0.21	0.6541
$D^2$	$9.33310^{-4}$	1	$9.33310^{-4}$	$3.86310^{-3}$	0.9513
残差	3.63	15	0.24		
失拟项	2.39	10	0.24	0.97	0.5518
纯误差	1.24	5	0.25		
总和	45.25	29	$R^2$	0.9199	

$$Y_2 = 9.36 + 0.37A + 0.071B - 0.38C + 0.41D + 0.35AB - 0.1AC + 0.52AD - 0.47BC + 0.38BD - 0.68CD + 0.83A^2 - 0.9B^2 - 1.49C^2 - 1.45D^2 \quad (15)$$

$$Y_3 = 5.72 + 0.28A - 0.12B - 1.2C + 0.045D + 0.11AB + 0.019AC + 0.27AD + 0.236BC + 0.24BD + 0.2CD - 0.18A^2 - 0.08B^2 - 0.043C^2 + 5.833 \times 10^{-3}D^2 \quad (16)$$

### 3.4 显著交互项影响规律分析

通过响应曲面图可以直观地分析各因素对试验指标的影响,根据二次回归模型绘制滚筛转速、喂料速度、滚筛倾角和叶片螺距与除土率、漏膜率和工作效率之间的响应曲面,利用响应曲面的形状反映交互项的影响作用<sup>[37,38]</sup>。

#### (1) 试验因素交互项对除土率的影响

由图 6(a)可知,当螺旋叶片螺距一定时,除土率随着滚筛转速的增大呈先减后增大的趋势。其主要原因是随着滚筛转速的增大,物料在螺旋叶片作用下沿轴线方向运移速度加快,从而缩短了物料在滚筛内停留时间,降低了土壤杂质透筛概率,致使除土率下降;随着滚筛转速的继续增大,物料在滚筛端面内的抛落运动加剧,物料被充分打散,使土壤杂质在有限空间内可更好地透筛,

除土率随之增大。当滚筛转速较低时,除土率随螺旋叶片螺距的增大呈递减的趋势,其主要原因是随着螺旋叶片螺距的增大,其对物料驱动能力提升,物料尚未充分筛分便被运移至出料口处排出,造成物料中土壤杂质含量增大。当滚筛转速较高时,除土率随螺旋叶片螺距增大呈递增的趋势,其主要原因是较高转速使物料在滚筛端面内的抛落运动更充分,随着螺旋叶片螺距增大,滚筛内物料在螺旋叶片作用下进行斜抛运动,受残膜与土壤杂质间的物料差异性影响,使两物料在运移中分离,提高了土壤杂质透筛率,除土率随之提升。

由图 6(b)可知,当喂料速度为 10 kg/min 时,除土率随螺旋叶片螺距的增大呈递减的趋势。其主要原因是当喂料速度较低时,物料在滚筛内填充率较低,随着螺旋叶片螺距增大,物料在滚筛内沿轴线方向运移速度加快,部分物料尚未筛分完全便运移至出料口处排出。当喂料速度为 20 kg/min 时,除土率随螺旋叶片螺距的增大呈递增的趋势,其主要原因是当滚筛内物料填充率较大时,螺旋叶片对物料轴向驱动作用下降,随着螺旋叶片螺距的增大,物料在滚筛内被充分打散,有利于土壤杂质透筛。当螺旋叶片螺距一定时,除土率随喂料速度的增大呈先减小后增大的趋势。由响应曲面形状可知,螺旋叶片螺距对除土率的影响大于喂料速度的影响,与方差分析结果相同。

### (2) 试验因素交互项对漏膜率的影响

预试验结果表明,筛出杂质中残膜主要为尺寸较小的残膜碎片,其质量占比较低且普遍裹挟在其余残膜中。由图 6(c)可知,当滚筛转速一定时,漏膜率随螺旋叶片螺距的增大呈先增大后减小的趋势,其原因是当叶片螺距增大,物料在运移过程中被充分打散,使残膜碎片更易透筛排出,漏膜率增大。随着螺旋叶片螺距的继续增大,其对物料沿滚筛轴向驱动的作用增强,物料在滚筛内停留时间缩短,故漏膜率减小。当螺旋叶片螺距一定时,漏膜率随滚筛转速的增大呈先减小后增大的趋势,其主要原因是滚筛转速增大,物料在滚筛内沿轴线方向运移加快,物料在滚筛内停留时间减短,碎膜透筛概率降低。随着滚筛转速的继续增大,滚筛内物料运移加剧,部分残膜碎片随土壤杂质排出,漏膜率增大。

由图 6(d)可知,滚筛倾角和螺旋叶片螺距对

漏膜率的影响权重存在差异,螺旋叶片螺距对漏膜率的影响明显大于滚筛倾角,其结果与方差分析一致。当滚筛倾角一定时,漏膜率随螺旋叶片螺距的增大呈先增大后减小的趋势,其主要原因是当螺旋叶片螺距较小时,物料在滚筛内沿轴线方向速度较小,物料在运移过程中抛散不充分,随螺旋叶片螺距的增大,物料被充分抛散,碎膜透筛排出。随着螺旋叶片螺距的继续增大,物料在滚筛内停留时间缩短,漏膜率呈下降趋势。当螺旋叶片螺距一定时,漏膜率随滚筛倾角的增大呈先增大后减小的趋势,其主要原因是当滚筛倾角向负方向增大时,物料在滚筛内停留时间逐步缩短,透筛的碎膜也逐步减小。当滚筛倾角向正方向增大时,物料沿轴线方向运移减缓,装置对物料打散作用降低,漏膜率降低。

### (3) 试验因素交互项对工作效率的影响

由图 6(e)可知,当螺旋叶片螺距为 700 mm 时,工作效率随滚筛转速的增大呈递增的趋势,其主要原因是随着滚筛转速的增大,物料在滚筛内轴线方向的速度增大,物料在滚筛内停留时间缩短,装置工作效率提升。当螺旋叶片螺距为 500 mm 时,工作效率随滚筛转速的增大呈递减的趋势,其主要原因是螺旋叶片螺距较小时,其在水平面内投影面积较小,随着滚筛转速的增大,物料在滚筛横截面内抛落运动加剧,螺旋叶片对物料的摩擦驱动作用降低,使物料在滚筛内停留时间增长,装置工作效率降低。由响应曲面形状可知,滚筛转速对工作效率的影响大于螺旋叶片螺距的影响,结果与方差分析一致。

## 3.5 参数优化及验证

### 3.5.1 参数优化

为获得装置较优除土性能的作业参数,利用 Design-expert 中的 Optimization 模块对构建的二阶回归响应模型进行优化求解,根据装置的实际作业条件和工作要求,确定目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(A, B, C, D) \\ \min Y_2(A, B, C, D) \\ \max Y_3(A, B, C, D) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 15 \text{ r/min} \leq A \leq 25 \text{ r/min} \\ 10 \text{ kg/min} \leq B \leq 20 \text{ kg/min} \\ -2^\circ \leq C \leq 2^\circ \\ 500 \text{ mm} \leq D \leq 700 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

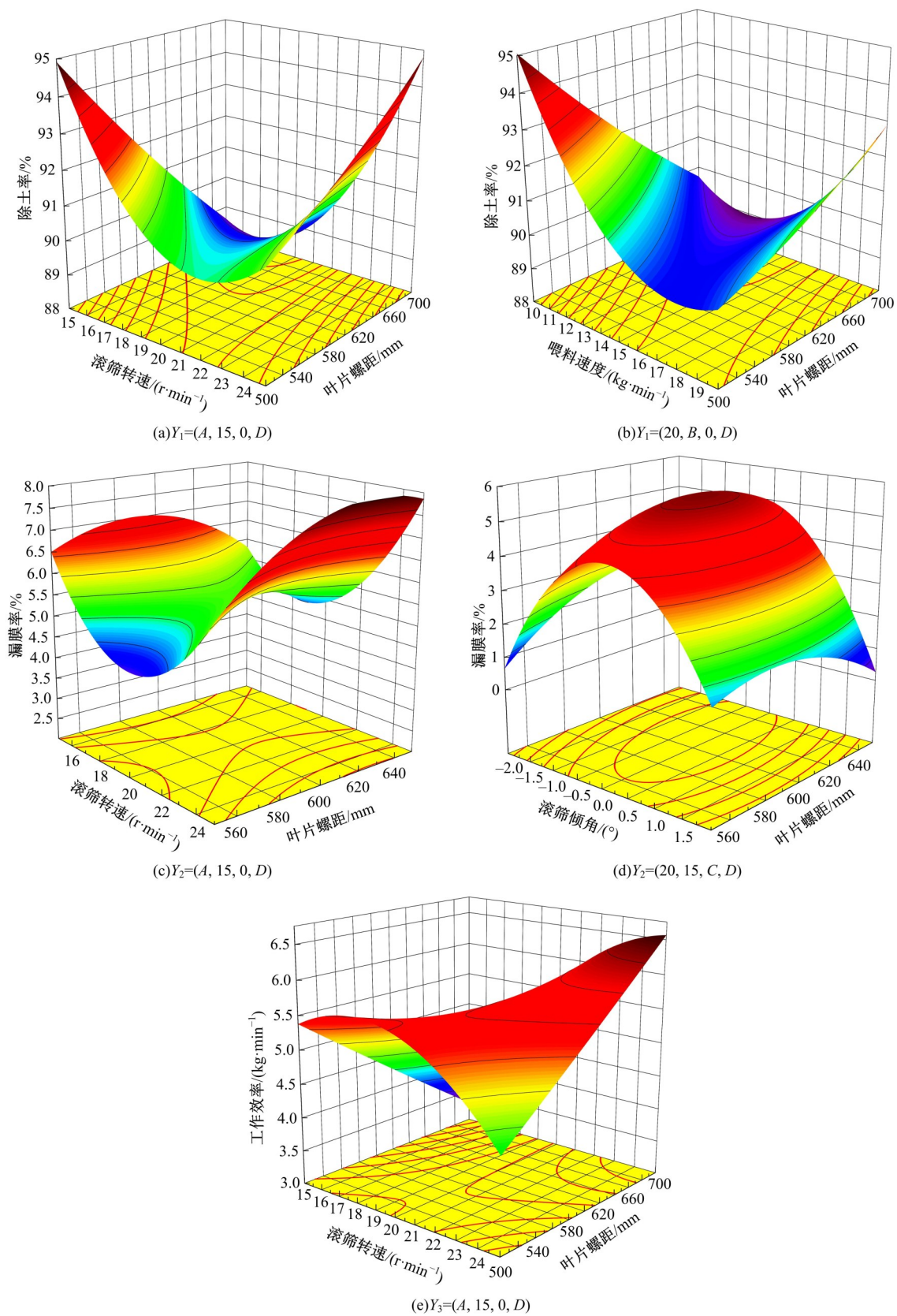


图 6 因素交互作用对除土率、漏膜率和工作效率的影响

Fig. 6 Effects of interaction of various factors on the soil removal rates, the rate of the leakage of residual film and the work efficiency

优化后所得最优组合参数如下:滚筛转速为 24.90 r/min,喂料速度为 11.52 kg/min,滚筛倾角为 $-2^{\circ}$ ,叶片螺距为 699.99 mm,该条件下的预测除土率为 94.51%,漏膜率为 1.79‰,工作效率为 7.81 kg/min。

### 3.5.2 试验验证

为了验证优化结果的准确性,按照优化后的参数组合进行验证试验。为方便参数调整,设定滚筛转速为 25 r/min,喂料速度为 12 kg/min,滚筛倾角为 $-2^{\circ}$ ,叶片螺距为 700 mm,试验进行 3 次取平均值,试验结果如表 6 所示。试验结果表明,验证试验所得除土率平均值为 92.48%,漏膜率平均值为 1.90‰,工作效率平均值为 7.61 kg/min,物理试验值和预测值间误差分别为 2.15%、5.79%、2.63%,实测值与预测值接近,表明本文模型具有较好的预测可靠性。

表 6 优化结果与试验值比较

Table 6 Comparison of optimization results with actual values

试验	A	B	C	D	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
预测值	24.80	11.43	-2	694.99	94.51	1.79	7.81
实际值 1	25	12	-2	700	92.28	1.80	7.38
实际值 2	25	12	-2	700	93.66	2.00	7.64
实际值 3	25	12	-2	700	91.49	1.91	7.82

## 4 结 论

(1)结合新疆棉田机收膜杂的特点,设计了一种滚筒式棉田机收膜杂除土装置,并对筛分部件进行设计,提高装置对机收膜杂筛分的性能。通过对滚筛内膜杂混合物的运动分析,确定了影响除土率、漏膜率和工作效率的相关试验因素。

(2)根据 Central-composite-design 试验设计原理,利用 Design-expert 软件,以滚筛转速、喂料速度、滚筛倾角和叶片螺距为试验因素,以除土率、漏膜率和工作效率为试验指标,设计了四因素五水平二次回归试验,对滚筒式棉田机收膜杂除土装置进行性能试验。通过响应曲面分析,确定各因素对除土率的影响从大到小排序为:滚筛倾角、叶片螺距、滚筛转速、喂料速度,各因素对漏膜率的影响从大到小排序为:叶片螺距、滚筛倾角、滚筛转速、喂料速度,各因素对工作效率的影响从大到小排序为:滚筛倾角、滚筛转速、喂料速度、叶片螺距。

(3)分别建立了除土率、漏膜率和工作效率

与滚筛转速、喂料速度、滚筛倾角和叶片螺距的二次多项式回归模型,利用 Design-expert 中优化模块进行求解,得到滚筒式棉田机收膜杂除土装置最优参数组合如下:滚筛转速为 24.90 r/min,喂料速度为 11.52 kg/min,滚筛倾角为 $-2^{\circ}$ ,叶片螺距为 699.99 mm。验证试验结果表明,除土率均值为 92.48%,漏膜率均值为 1.90‰,工作效率均值为 7.61 kg/min,实测值和预测值分别相差 2.15%、5.79%、2.63%,结果可靠。

### 参考文献:

- [1] 胡灿,王旭峰,陈学庚,等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 213-224.  
Hu Can, Wang Xu-feng, Chen Xue-geng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 213-224.
- [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 Xue-geng, Wen Hao-jun, 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.
- [3] 梁荣庆,陈学庚,张炳成,等. 新疆棉田残膜回收方式及资源化再利用现状问题与对策[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 1-13.  
Liang Rong-qing, Chen Xue-geng, Zhang Bing-cheng, et al. Problems and countermeasures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 1-13.
- [4] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等. 农田残膜资源化利用技术与装备研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 179-190.  
Jiang De-li, Chen Xue-geng, Yan Li-min, et al. Research on technology and equipment for utilization of residual film in farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 179-190.
- [5] Rose B L, Sr T R M, Gaude A, et al. System and method for removing soil from seed[P]. United States: 8590174, 2013-11-26.
- [6] 张佳,杨宛章,韩长杰,等. 驱动耙残膜回收联合作

- 业机的残膜回收部件设计研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 143-146.
- Zhang Jia, Yang Wan-zhang, Han Chang-jie, et al. Design and research on plastic film collecting component of the driving target and plastic film collecting combined operation machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3): 143-146.
- [7] 张佳. 驱动耙残膜回收联合作业机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学机电工程学院, 2013.
- Zhang Jia. Design and experimental study on driving target and plastic film collecting combined operation machine[D]. Urumqi: College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [8] 游兆延, 吴惠昌, 陈有庆, 等. 双筛体驱振式膜土分离与输送装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(11): 4-11.
- You Zhao-yan, Wu Hui-chang, Chen You-qing, et al. Design and experiment on double-sieve-driving apparatus for film-soil separation and transportation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11): 4-11.
- [9] 魏忠彩, 李洪文, 孙传祝, 等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 129-140, 112.
- Wei Zhong-cai, Li Hong-wen, Sun Chuan-zhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129-140, 112.
- [10] 魏忠彩, 苏国梁, 李学强, 等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 109-122.
- Wei Zhong-cai, Su Guo-liang, Li Xue-qiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109-122.
- [11] 张学军, 刘家强, 史增录, 等. 残膜回收机逆向膜土分离装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 46-55.
- Zhang Xue-jun, Liu Jia-qiang, Shi Zeng-lu, et al. Design and parameter optimization of reverse membrane and soil separation device for residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 46-55.
- [12] 吕金庆, 杜长霖, 刘中原, 等. 马铃薯料斗机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 82-90, 61.
- Lv Jin-qing, Du Chang-lin, Liu Zhong-yuan, et al. Design and test of impurity removal device of potato receiving hopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 82-90, 61.
- [13] 石鑫, 牛长河, 王学农, 等. 滚筒筛式废旧地膜与杂质风选装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 19-26.
- Shi Xin, Niu Chang-he, Wang Xue-nong, et al. Design of roller sieve waste plastic film and trash winnowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(18): 19-26.
- [14] 牛长河, 石鑫, 蒋永新, 等. 废旧地膜杂质风选装置的设计及试验[J]. 新疆农机化, 2018(5): 23-25.
- Niu Chang-he, Shi Xin, Jiang Yong-xin, et al. Design and test on type of waste plastic mulch films and impurities winnowing machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2018(5): 23-25.
- [15] 王冠, 霍丽丽, 赵立欣, 等. 秸秆类生物质原料筛分除杂试验及滚筒筛改进[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 218-222.
- Wang Guan, Huo Li-li, Zhao Li-xin, et al. Screening of biomass straw materials and improvement of feedstock equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 218-222.
- [16] Mellmann J. The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior [J]. Powder Technology, 2001, 118(3): 251-270.
- [17] Forsyth A J, Hutton S R, Rhodes M J, et al. Effect of applied interparticle force on the static and dynamic angles of repose of spherical granular material[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2001, 63(3): 293-305.
- [18] 张禄文. 城市生活垃圾破碎筛分设备工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学环境科学与工程学院, 2004.
- Zhang Lu-wen. Research on technology of municipal solid waste crushing and screening equipment[D]. Kunming: Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2004.
- [19] 张林海, 薛党勤, 马世榜, 等. 农作物秸秆物料杂质及滚筒筛分研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 433-438.
- Zhang Lin-hai, Xue Dang-qin, Ma Shi-bang, et al. Reserch on impurities of the cropstraw and trommel

- sieve[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2014, 35(3): 433-438.
- [20] 蒋德莉. 随动式残膜回收机清杂系统研究与试验[D]. 石河子: 石河子大学机械电气工程学院, 2020.  
Jiang De-li. Research and experiment on cleaning system of profile modeling residual film recovery machine [D]. Shihezi: College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, 2020.
- [21] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 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.  
Jiang De-li, Chen Xue-geng, Yan Li-min, et al. Optimization of working parameters of cleaning system for master-slave residual plastic film recovery machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19): 1-10.
- [22] 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 Pan-pan, 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*, 2018, 34(19): 19-27.
- [23] 张征.  $\Phi 3\text{ m} \times 10\text{ m}$  垃圾滚筒筛设计与应用[J]. *水泥工程*, 2012(5): 53-55, 67.  
Zhang Zheng. Design of  $\Phi 3\text{ m} \times 10\text{ m}$  garbage trommel screen and the application[J]. *Cement Engineering*, 2012(5): 53-55, 67.
- [24] 李伟平, 张新昌. 田间残膜压缩打包装置及其关键技术[J]. *轻工机械*, 2017, 35(5): 70-75.  
Li Wei-ping, Zhang Xin-chang. Research on residual film compression and packaging device and key technology[J]. *Light Industry Machinery*, 2017, 35(5): 70-75.
- [25] 刘廷发. 堆肥滚筒筛分机开发研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2017.  
Liu Ting-fa. Research and design of compost trommel screen[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2017.
- [26] 郭祯祥. 小麦加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 27-35.  
Wan Xing-yu, Shu Cai-xia, Xu Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(14): 27-35.
- [28] 王升升, 陈盼, 卢梦晴, 等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊 2): 181-190.  
Wang Sheng-sheng, Chen Pan, Lu Meng-qing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for chinese cabbage seeds harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Sup. 2): 181-190.
- [29] 张世军, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 生物质热解柔性输送装置性能研究[J]. *农机化研究*, 2017, 39(6): 250-254.  
Zhang Shi-jun, Jiang En-chen, Wang Ming-feng, et al. Study on flexible delivery device performance of biomass pyrolysis[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(6): 250-254.
- [30] 张炎, 芮延年, 周宏伟, 等. 基于粒子群算法的高黏度大比重物料无轴螺旋输送机优化设计[J]. *工程设计学报*, 2014(2): 161-165.  
Zhang Yan, Rui Yan-nian, Zhou Hong-wei, et al. Optimization design of shaft-less screw conveyor mechanism for high viscosity and large specific gravity materials based on PSO[J]. *Journal of Engineering Design*, 2014(2): 161-165.
- [31] 徐强. 螺旋滚筒式生物质连续热解装置送料器设计及仿真[D]. 广州: 华南农业大学材料与能源学院, 2017.  
Xu Qiang. Design and simulation of screw drum biomass continuous pyrolysis device feeder[D]. Guangzhou: College of Materials and Energy, South China Agricultural University, 2017.
- [32] 付双成, 张亚磊, 姜毓圣, 等. 卧螺离心机不同螺旋结构流场的数值模拟研究[J]. *常州大学学报: 自然科学版*, 2020, 32(1): 56-61.  
Fu Shuang-cheng, Zhang Ya-lei, Jiang Yu-sheng, et al. Numerical simulating study on flow field of decanter centrifuges with different spiral structure[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2020, 32(1): 56-61.
- [33] 武军, 范德顺. 间断式螺旋挤压过滤机[J]. *过滤与分离*, 2008, 18(1): 36-37.  
Wu Jun, Fan De-shun. Interrupted screw filter[J]. *Journal of Filtration & Separation*, 2008, 18(1): 36-37.
- [34] 陈学深, 陈涛, 武涛, 等. 覆草冬种马铃薯收获机稻草分离机构设计与试验[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2020, 50(2): 749-757.

- Chen Xue-shen, Chen Tao, Wu Tao, et al. Design and experiment on harvester for winter planting potato of straw coverage[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 749-757.
- [35] 黄继承, 沈成, 纪爱敏, 等. 工业大麻收割机切割-输送关键部件作业参数优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(2): 772-780.
- Huang Ji-cheng, Shen Cheng, Ji Ai-min, et al. Optimization of cutting-conveying key working parameters of hemp harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 772-780.
- [36] 成科扬, 朱雪森, 裴运申, 等. 农业自动化机械障碍物检测研究进展[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(4): 415-425.
- Cheng ke-yang, Zhu Xue-sen, Pei Yun-shen, et al. Research progress of agricultural automatic machinery obstacle detection[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 415-425.
- [37] 李妍颖, 刘孟楠, 徐立友, 等. 基于非线性规划遗传算法的混合动力拖拉机控制策略[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(2): 166-172, 185.
- Li Yan-ying, Liu Meng-nan, Xu Li-you, et al. Control strategy of series hybrid tractor based on nonlinear program genetic algorithm[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2023, 44(2): 166-172, 185.
- [38] 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1): 304-310.
- Sun Yue, Jiang Jian-ming, Tian Yu-tai, 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(Sup. 1): 304-310.