

弹齿式残膜回收机脱膜装置 参数优化及试验

汤凯博^{1,2}, 王敏¹, 何玉泽¹, 营雨琨¹,
曹肆林¹, 卢勇涛¹, 唐志坤^{1,2}, 霍尚^{1,2}

(1. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 新疆 石河子 832000; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要:针对弹齿式残膜回收机脱膜过程中存在漏膜、缠膜、脱膜效果差等问题,对弹齿式残膜回收机脱膜装置进行参数组合优化。运用 Box-Behnken 试验设计方法,以摩擦因数、脱膜辊转速、弹齿缝长度为试验因素,以脱膜率和缠膜率为指标,开展三因素三水平试验,得到各因素交互作用响应面模型。脱膜率的显著性表现为脱膜辊转速>弹齿缝长度>摩擦因数,缠膜率的显著性表现为脱膜辊转速>摩擦因数>弹齿缝长度。以脱膜率和缠膜率建立目标函数,运用 MATLAB 对结果优化求解,确定最佳参数组合:采用机具前进速度为 $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.7、脱膜辊转速为 $210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、弹齿缝长度为 75 mm 进行田间试验,经试验得脱膜装置的平均脱膜率为 90.35%、平均缠膜率为 0.89%,该结果与优化预测值相对误差均小于 5%。弹齿式残膜回收机脱膜装置在该参数组合下可有效解决脱膜过程中漏膜、缠膜、脱膜效果差等问题。

关键词:残膜回收机;脱膜装置;参数优化;正交试验

中图分类号:S223.5 **文献标志码:**A

Parameter optimization and experimentation of the stripping device in a toothed residual film recycling machine

TANG Kaibo^{1,2}, WANG Min¹, HE Yuze¹, YING Yukun¹,
CAO Silin¹, LU Yongtao¹, TANG Zhikun^{1,2}, HUO Shang^{1,2}

(1. Institute of Mechanical Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To address the issues of film leakage, film wrapping, and poor film removal performance during the film removal process of the toothed residual film recycling machine, parameter optimization was conducted on its film removal device. Using the Box-Behnken experimental design method, a three factor three-level experiment was constructed with friction coefficient, peeling roller speed, and elastic tooth gap length as experimental factors. The experimental indicators were set as peeling rate and wrapping rate, and the interaction response surface model of each factor was obtained. The significance order of delamination rate was: delamination roller speed>elastic tooth gap length>friction coefficient. The significance order of film wrapping rate was: peeling roller speed>friction coefficient>elastic tooth gap length. Objective functions were established based on the detachment rate and wrapping rate, and MATLAB was used to optimize the results to determine the optimal parameter combination. Field experiments were conducted with a machine forward speed of $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, a friction coefficient of 0.7, a detachment roller speed of $210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, and an elastic tooth gap length of 75 mm. The average detachment rate of the detachment device was found to be 90.35%, and the average wrapping rate was 0.89%. The relative error between this result and the optimized prediction value was less than 5%. With this parameter combination, the stripping device of the

收稿日期:2024-07-20

修回日期:2024-10-11

基金项目:“兵团英才”青年项目培养人选(王敏,2023—2025);新疆生产建设兵团科技成果转化引导计划项目(2023BA004);新疆农垦科学院院级创新团队建设(NGC202302);新疆农垦科学院院级项目(2022YJ005)

作者简介:汤凯博(2000—),男,江苏如皋人,硕士研究生,研究方向为农机装备工程。E-mail:2970965568@qq.com

通信作者:王敏(1984—),女,甘肃天水人,研究员,主要从事农业装备研究。E-mail:275596114@qq.com

toothed residual film recycling machine can effectively address issues such as film leakage, film wrapping, and poor stripping performance during the stripping process, providing a valuable basis and reference for optimizing the structure and operating parameters of the stripping device.

Keywords: residual film recycling machine; delamination device; parameter optimization; orthogonal experiment

地膜覆盖栽培技术在 20 世纪 80 年代引入我国后开始大面积使用^[1],该技术具有增温保墒、保水保湿、抑制杂草等功能,还可以有效提高农作物产量^[2-4],使得我国每年的地膜覆盖面积持续增加。2022 年全国地膜覆盖面积为 1 747.09 万 hm²,其中新疆地区的地膜覆盖面积为 374.63 万 hm²,地膜使用量达到 26.10 万 t,新疆地区棉田的覆膜率达到了 100%,地膜使用量与覆盖面积位居全国首位^[5]。然而地膜的使用在提高农作物产量的同时也使大量残膜滞留在土壤中,导致土壤出现板结、盐碱化、水分不流通等问题^[6-7]。为解决残膜所产生的“白色污染”问题^[8-9],国外学者开始推广使用高强度地膜并且加大对可降解地膜的研究^[10-12],我国采取了使用机械化回收的方式对地膜进行回收处理^[13-14],主要通过残膜回收机对地膜进行回收作业。目前残膜回收机主要类型有滚筒式、耙齿式、弹齿式等,袁佳伟等^[15]设计了一种滚筒式残膜回收机,但存在脱膜不彻底和漏膜等问题;靳伟等^[16]设计了一种钉刺式残膜回收机,脱膜装置采用毛刷,毛刷在脱膜作业中易磨损并且在脱膜作业中受风阻较大从而影响脱膜效果;周新星等^[17]设计了一种耙齿式残膜回收机,具有较高的回收率,但是缺乏有效的脱膜机构,无法完成连续的脱膜作业。弹齿式残膜回收机结构简单,但是存在漏膜和脱膜效果差的问题。鉴于此,本研究以弹齿式残膜回收机脱膜装置为研究对象,以脱膜率和缠膜率为试验指标,对影响残膜回收机脱膜效果的关键参数进行试验研究,以寻求收膜参数的最佳组合,旨为提高弹齿式残膜回收机脱膜率提供依据。

1 结构组成和工作原理

弹齿式残膜回收机的脱膜装置包括脱膜链轮、转动轴、加强筋以及脱膜板,其中转动轴与脱膜板构成脱膜辊(图 1)。图 2 中脱膜装置整体长度 L 为 1 900 mm,脱膜装置工作半径 D 为 140 mm,脱膜板根据残膜回收机弹齿轴的分布规律对弹齿缝间距进行设计, D_1 为 50 mm, D_2 为 40 mm。图 1 为简化脱膜装置的整体结构,将 4 块完全相同的脱膜板等间距安装在转动轴上增加脱膜作业过程中的脱膜次数,脱膜板上带有梯形的弹齿缝有利于增大脱膜

板弹齿缝与弹齿间的接触面积,脱膜过程中弹齿的角度发生变化时弹齿也能顺利通过弹齿缝,顺利将弹齿上的残膜脱下,提高脱膜装置的脱膜效率,脱膜板的材料选择使用弹性好、耐磨、耐热的丁苯橡胶。

在残膜回收机进行脱膜作业的过程中,外部动力传输至脱膜链轮后,通过脱膜链轮带动转动轴旋转,脱膜板安装在转动轴上随着转动轴一起转动。当动力传输至拾膜装置后,弹齿在弹齿轴带动下扎入土壤中,残膜在弹齿拉力、自身张力以及和弹齿之间的摩擦力作用下随着弹齿一起运动。在弹齿输送残膜的过程中,残膜当中的杂质例如秸秆等会由于自身的重力而下落,实现膜、杂初分离。当弹齿轴运动至换向挡板处,弹齿的方向发生改变,由原先的垂直于弹齿轴变为竖直向下,弹齿改变方向后继续将残膜运输至脱膜装置处,转动轴在脱膜链轮的带动下旋转,使得弹齿输送的残膜多次通过脱膜板弹齿缝进行脱膜。为增大有效脱膜面积,脱膜板弹齿缝设计为梯形,弹齿在开始通过脱膜板弹齿缝时不与脱膜板弹齿缝接触,通过转动轴在旋转的条件下产生空气动力进行脱膜。随着脱膜板弹齿缝宽度的减小,弹齿与脱膜板弹齿缝开始接触产生摩擦力,通过与残膜接触产生的摩擦力以及脱膜辊旋转产生的空气动力将残膜从弹齿上刮下并落入集膜装置中。

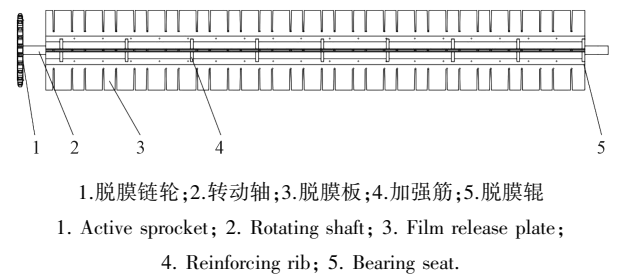


图 1 脱膜装置结构图

Fig.1 Structure diagram of the membrane removal device

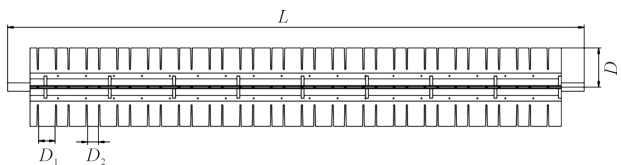


图 2 脱膜机构参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of delamination mechanism parameters

2 脱膜装置工作参数分析

在进行脱膜作业时,残膜回收机的外部动力由拖拉机提供,动力由拖拉机传输至链耙架主动链轮处,主动链轮带动弹齿轴进行旋转控制弹齿作业过程中的移动速度。主动链轮与脱膜链轮采用链传动连接,为脱膜装置提供动力,带动脱膜装置旋转。为了提高脱膜装置的脱膜效率,需要增加脱膜作业次数,脱膜作业次数由脱膜装置转速决定。在脱膜作业中主动链轮转速为 $120\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,通过对主动链轮与脱膜链轮的传动比进行调节,使脱膜装置转速 n_2 达到 $188\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。脱膜装置在旋转工况下残膜受到的力如图 3 所示:

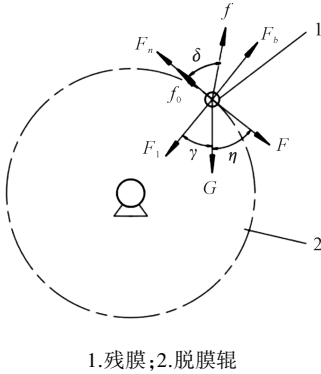


图 3 残膜受力分析简图

Fig.3 Schematic diagram of residual membrane force analysis

在装置进行脱膜作业时,以弹齿上的残膜为对象进行受力分析:离心力 F_b 在弹齿接近 90° 时可忽略,根据力的平衡公式可得:

$$\begin{cases} G\cos\eta + F > f_0 + F_n + f\cos\delta \\ G + F_1\cos\gamma + F\cos\eta > F_n\cos\delta + f + f_0\cos\delta \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为弹齿对残膜的摩擦力(N); f_0 为残膜受到的空气阻力(N); F_n 为弹齿对残膜的支持力(N); F 为脱膜板对弹齿的力(N); G 为残膜的重力(N); F_1 为脱膜辊对残膜的力(N); γ 为向心力与竖直方向的夹角($^\circ$); η 为脱膜板对弹齿的力与竖直方向的夹角($^\circ$); δ 为弹齿与脱膜辊切线方向的夹角($^\circ$)。

f_0 为残膜在脱膜过程中受到的空气阻力,结合空气阻力公式可得:

$$\begin{cases} f_0 = \frac{1}{2} \rho c s v^2 \\ v = \omega r \\ \omega = 2\pi n \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 为空气阻力系数; ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 即 $1.29\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; s 为残膜迎风面积(m^2); v 为脱膜

装置与残膜作用位置的线速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ω 为脱膜装置的角速度($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); n 为脱膜装置的转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); r 代表转动圈数。

将转速值 $n = 188\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 带入式(2)中解得 $\omega = 19.6\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,将脱膜装置的最大工作半径 $r = 140\text{ mm}$ 带入解得 $v = 2.74\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 c 需通过风洞试验测得,采用设定的风速模拟脱膜装置受到的线速度,通过对阻力与残膜受力面积进行受力分析对残膜的空气阻力系数进行求解,解得其空气阻力系数约等于 0.81。由于残膜在回收过程中呈现不规则的形状,为确定脱膜作业过程中残膜的迎风面积,取 50 组未经脱膜的弹齿,对弹齿上残膜的有效迎风面积进行测量,取残膜在脱膜作业过程中的最大迎风面积 0.027 m^2 代入上式解得脱膜作业过程中残膜所受的空气阻力 f_0 为 0.106 N 。

F 为脱膜板作用在弹齿上的力,即 $F = \mu F_k$,摩擦系数 μ 通过斜面试验测得约等于 0.7; F_k 为脱膜板作用在弹齿上的压力,由于橡胶板属于弹性材料,脱膜板对弹齿的压力可以结合弹力公式 $F_k = k\Delta x$ 求得:

$$F_k = \int_0^2 kx dx \quad (3)$$

丁苯橡胶的弹性系数 k 取 0.3,代入上式得 $F_k = 0.6\text{ N}$,将 $F_k = 0.6\text{ N}$ 代入 $F = \mu F_k$ 得 $F = 0.42\text{ N}$,由脱膜装置受力图分析可知残膜的脱膜条件为:

$G + F_1\cos\gamma + F\cos\eta > F_n\cos\delta + f + f_0\cos\delta$ (4)
结合向心力公式可得 $F_1 = m\omega^2 r$, $G = mg$,弹齿对残膜的滑动摩擦力为 $f = \mu_c F$,为测量残膜的最大静摩擦力,通过摩擦力斜面试验得到最大静摩擦系数为 $0.392 \sim 0.408$,由该数据取弹齿与残膜间的摩擦系数 $\mu_c = 0.4$ 。通过拉伸弹力测试试验得到残膜的弹力范围在 $0.77 \sim 0.81\text{ N}$ 内,取 $F = 0.8\text{ N}$ 带入进行计算。为测量脱膜作业过程中残膜在弹齿上的量,将残膜回收机作业后未进行脱膜的弹齿上剩余残膜进行收集,弹齿上的残膜平均质量为 $3.45 \times 10^{-3}\text{ kg}$,将上述各值代入脱膜条件中可得:

$$\begin{aligned} mg + m\omega^2 r \cos\gamma + 0.42\cos\eta &> F_n\cos\delta + f_0\cos\delta + 0.32 \\ 0.19 &> F_n + f_0 \end{aligned} \quad (5)$$

在该模型当中,弹齿对残膜的支持力可以简化为残膜所受到的离心力,结合离心力的公式:

$$F_n = \frac{mv^2}{r} \quad (6)$$

将已知量代入可得残膜所受弹齿的支持力 $F_n = 0.048\text{ N}$,结合脱膜条件将数值带入可得 $0.19\text{ N} >$

0.154 N,即在脱膜过程中残膜可以顺利从弹齿上脱下。

3 田间试验与数据分析

3.1 试验条件

2024 年 4 月在沙湾市进行了整机田间试验。试验地长 600 m,宽 400 m,土壤坚实度为 367 kPa,含水率 12.4%~14.1%,地膜厚度为 0.01 mm。由中联重科 RS1604 拖拉机进行作业。

3.2 试验设计

3.2.1 试验指标 为检验脱膜装置在弹齿式残膜回收机中的工作效果,选取脱膜率与缠膜率为试验指标,其计算公式如下:

$$Y_1 = \left(1 - \frac{M_1}{M_0 + M_1 + M_2} \times 100\% \right) \quad (7)$$

$$Y_2 = \frac{M_2}{M_0 + M_1 + M_2} \quad (8)$$

式中, Y_1 为脱膜率(%); Y_2 为缠膜率(%); M_1 为残留在弹齿上的残膜质量(g); M_0 为回收的残膜质量(g); M_2 为缠绕在脱膜装置上的残膜质量(g)。

3.2.2 试验方法 该试验中影响弹齿式残膜回收机脱膜装置工作效果的主要因素有摩擦因数、脱膜辊转速和弹齿缝长度。试验过程中,可通过更换脱模板材料改变脱模板与弹齿之间的摩擦因数而对残膜所受到的摩擦力进行调整,通过对主动链轮与脱膜链轮传动比进行调整改变脱膜辊转速。因此设计三因素三水平试验,筛选该脱膜装置最佳工作状态下的参数取值。随机选取 17 个数据采集区,规定每个数据采集区的长度为 20 m,在弹齿式残膜回收机作业后采集已回收的残膜和残留在弹齿上的残膜,将采集的残膜清洗晾干后进行称重。试验因素水平如表 1 所示。

3.3 正交试验结果与分析

3.3.1 试验结果 通过分析弹齿式残膜回收机脱膜原理,可确定影响脱膜率的主要因素包括摩擦因数 X_1 、脱膜辊转速 X_2 、弹齿缝长度 X_3 ,试验参数各因素水平编码如表 1 所示,试验结果如表 2 所示。

利用 Design-expert 软件对脱膜率数据多元回归拟合并进行方差分析^[18-19],从表 3 可知,脱膜率 Y_1 的回归模型 $P = 0.0001$,说明该模型为极显著。其中 X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 为极显著因素, X_1 、 X_3 、 X_1X_2 为显著因素。剔除 $P > 0.05$ 的不显著因素,得到脱膜率 Y_1 的回归方程为:

$$Y_1 = 90 + 0.6X_1 + 1.55X_2 + 0.7X_3 - X_1X_2 - 1.93X_1^2 - 3.78X_2^2 - 1.87X_3^2$$

同法对缠膜率数据多元回归拟合并进行方差分析,缠膜率 Y_2 的回归模型 $P < 0.0001$,说明该模型为极显著,其中 X_1 、 X_2 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 $X_1^2X_3^2$ 为极显著因素, X_3 为显著因素。剔除 $P > 0.05$ 的不显著因素,得到缠膜率 Y_2 的回归方程为:

$$Y_2 = 0.894 - 0.0875X_1 - 0.1188X_2 + 0.0688X_3 - 0.205X_1X_2 + 0.1725X_2X_3 + 0.7242X_1^2 + 0.4868X_3^2$$

3.3.2 残差分析 残差是观测值与模型预测值之间的差异,即实际观测结果中未被模型解释的部分。残差分析主要用于模型评估、模型检验以及提高模型预测准确值。如图 4a 所示,该模型中内学生化残差随机排列,未表现出任何趋势,由此可得该试验假设是独立的;如图 4b 所示,模型的内学生化残差正态分布概率图接近于一条直线,反映残差正态分布,证明了模型的正态性假设。

表 1 弹齿式残膜回收机脱膜装置试验因素水平表

Table 1 Test factors and levels of the stripping device of the toothed residual film recycling machine

水平 Level	因素 Factor		
	摩擦因数 Friction coefficient	脱膜辊转速 Release roller speed	弹齿缝长度 Elastic tooth gap length
	X_1	$X_2/(r \cdot \min^{-1})$	X_3/mm
1	0.4	94	70
0	0.7	188	75
-1	1.0	282	80

表 2 弹齿式残膜回收机脱膜装置正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results of the stripping device of the toothed residual film recycling machine

编号 Code	因素水平 Factor level			试验指标 Experimental indicator	
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
		$/(r \cdot \min^{-1})$	$/\text{mm}$	$/\%$	$/\%$
1	1	1	0	85.4	1.22
2	1	-1	0	84.3	1.87
3	1	0	1	87.6	2.08
4	-1	0	-1	84.7	2.11
5	-1	-1	0	81.2	1.64
6	0	-1	-1	82.8	1.62
7	0	0	0	90.6	0.74
8	-1	0	1	86.4	2.27
9	0	1	1	87.1	1.52
10	0	0	0	89.7	0.96
11	0	1	-1	84.7	1.04
12	1	0	-1	86.1	1.96
13	0	0	0	89.1	0.94
14	0	0	0	89.3	0.89
15	-1	1	0	86.3	1.81
16	0	-1	1	82.8	1.41
17	0	0	0	91.3	0.94

表 3 弹齿式残膜回收机脱膜装置脱膜率和
回归方程的显著性检验

Table 3 Significance test of the regression equation for the
delamination and wrapping rate of the stripping device in
the toothed residual film recycling machine

指标 Index	变异来源 Source of variance	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
脱膜率 Delamination rate	模型 Model	9	14.54	28.75	0.0001
	X_1	1	2.88	5.69	0.0484
	X_2	1	19.22	38.01	0.0005
	X_3	1	3.92	7.75	0.0271
	X_1X_2	1	4.00	7.91	0.0261
	X_1X_3	1	0.01	0.02	0.8921
	X_2X_3	1	1.44	2.85	0.1354
	X_1^2	1	15.60	30.85	0.0009
	X_2^2	1	60.00	118.65	<0.0001
	X_3^2	1	14.80	29.27	0.0010
	残差 Residual	7	0.51		
	失拟 Lack of fit	3	0.03	0.04	0.9883
	误差 Pure error	4	0.86		
缠膜率 Wrapping rate	总和 Total	16			
	模型 Model	9	0.43	93.66	<0.0001
	X_1	1	0.06	13.24	0.0083
	X_2	1	0.11	24.38	0.0017
	X_3	1	0.04	8.17	0.0244
	X_1X_2	1	0.17	36.32	0.0005
	X_1X_3	1	0.00	0.09	0.7773
	X_2X_3	1	0.12	25.72	0.0014
	X_1^2	1	2.21	477.24	<0.0001
	X_2^2	1	0.00	0.26	0.6289
	X_3^2	1	1.00	215.56	<0.0001
	残差 Residual	7	0.00		
	失拟 Lack of fit	3	0.00	0.00	0.9997
	误差 Pure error	4	0.01		
	总和 Total	16			

3.3.3 响应曲面分析 利用 Design-expert 中 Box-Behnken 模块对试验数据进行分析并绘制三维响应曲面图,直观地表示摩擦因数、脱膜辊转速、弹齿缝长度对脱膜率以及缠膜率的影响,如图 5、6 所示。由正交试验结果分析可知,3 个试验因素对脱膜率的显著性顺序为脱膜辊转速>弹齿缝长度>摩擦因数;3 个试验因素对缠膜率的显著性顺序为脱膜辊转速>摩擦因数>弹齿缝长度。

图 5a 为脱膜辊转速位于中间水平 $188\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时摩擦因数、弹齿缝长度交互作用对脱膜率的影响,由图可知:摩擦因数逐渐增加时,脱膜率先增大后减小,变化趋势较为平缓。弹齿缝长度逐渐增加时,脱膜率先增大后减小,变化趋势明显。表明当脱膜辊转速位于中间水平时,弹齿缝长度对脱膜率的影响更为显著。图 5b 为摩擦因数位于中间水平 0.7 时脱膜辊转速、弹齿缝长度交互作用对脱膜率的影响,由图可知:脱膜辊转速逐渐增加时,脱膜率

先增大后减小,变化趋势明显。弹齿缝长度逐渐增加时,脱膜率先增大后减小,与脱膜辊转速相比,弹齿缝长度的变化趋势较为平缓。表明当摩擦因数位于中间水平时,脱膜辊转速对脱膜率的影响更为显著。图 5c 为弹齿缝长度位于中间水平 75 mm 时脱膜辊转速、摩擦因数交互作用对脱膜率的影响,由图可知:脱膜辊转速逐渐增加时,脱膜率先增大后减小,变化趋势明显。摩擦因数逐渐增加时,脱膜率先增大后减小,变化趋势较为平缓。表明当弹齿缝长度位于中间水平时,脱膜辊转速对脱膜率的影响更为显著。

图 6a 为脱膜辊转速位于中间水平 $188\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时摩擦因数、弹齿缝长度交互作用对缠膜率的影响,由图可知:摩擦因数逐渐增加时缠膜率增大,其变化趋势较为明显。弹齿缝长度逐渐增加时,缠膜率先减小后增大,与摩擦因数相比变化趋势较平缓。表明当脱膜辊转速位于中间水平时,摩擦因数对缠膜率的影响更为显著。图 6b 为摩擦因数位于中间水平 0.7 时脱膜辊转速、弹齿缝长度交互作用对缠膜率的影响,由图可知:脱膜辊转速逐渐增加时缠膜率减小,其变化趋势较明显。弹齿缝长度逐渐增加时,缠膜率先减小后增大,与脱膜辊转速相比,弹齿缝长度的变化趋势较平缓。表明当摩擦因数位于中间水平时,脱膜辊转速对缠膜率的影响更为显著。图 6c 为弹齿缝长度位于中间水平 75 mm 时脱膜辊转速、摩擦因数交互作用对缠膜率的影响,由图可知:脱膜辊转速逐渐增加时,缠膜率减小,变化趋势较显著。摩擦因数逐渐增加时,缠膜率先减小后增大,与脱膜辊转速相比变化趋势较为平缓。表明当弹齿缝长度位于中间水平时,脱膜辊转速对缠膜率的影响更为显著。

通过对响应曲面的分析可知脱膜辊转速过大时,脱膜作业的次数增大,有利于提高脱膜率,但由于转速过快时会产生较大的空气动力,导致弹齿上的残膜更易被撕裂,残膜滞留在弹齿上使缠膜率增大,因此脱膜辊转速不宜过高。随着摩擦因数的增大,脱膜板对弹齿上残膜的摩擦力增大,有利于提高脱膜作业的效率,但摩擦因数较大时,在脱膜作业过程中脱膜板对弹齿上的残膜产生较大的摩擦力,易撕裂残膜导致缠膜率增大,因此脱膜板的摩擦因数不宜过大。弹齿缝深度对脱膜板的脱膜效果有直接影响,当弹齿缝长度较长时脱膜板与弹齿接触不完全,不利于脱膜作业;当弹齿缝长度较短时,脱膜板在进行脱膜作业时会与弹齿发生干涉,不利于残膜的脱膜作业。

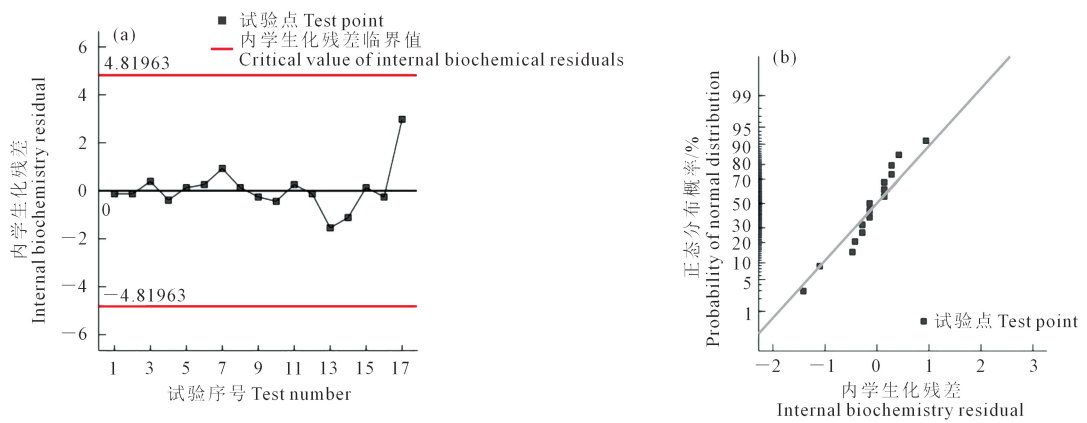


图 4 模型残差正态性检验分析

Fig.4 Analysis of normality test for model residual

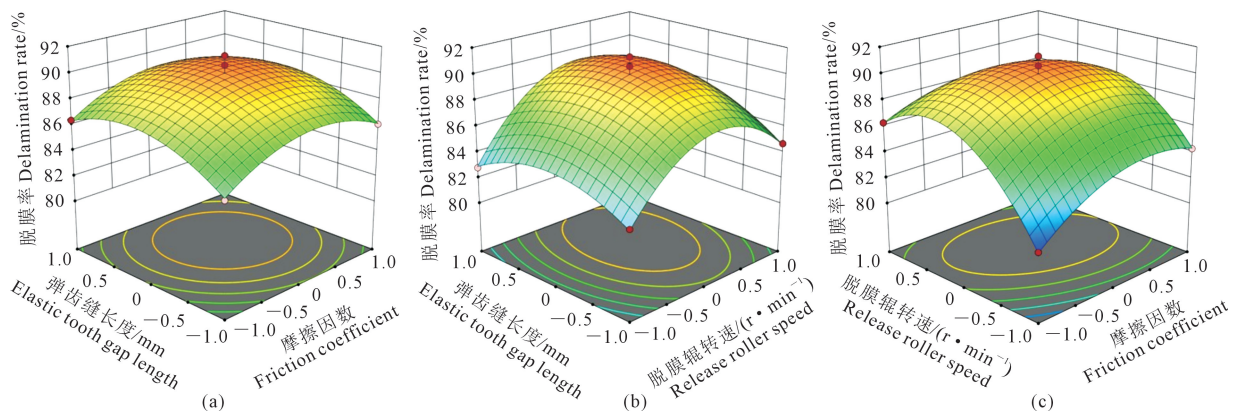


图 5 各因素对脱膜率的影响

Fig.5 Influence of various factors on the delamination rate

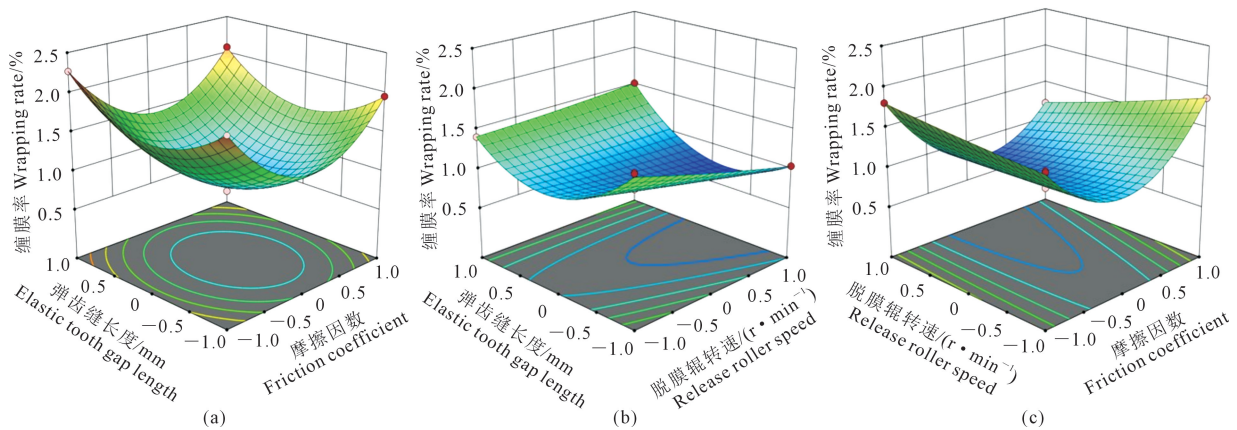


图 6 各因素对缠膜率的影响

Fig.6 Influence of various factors on the wrapping rate

4 参数优化与验证

4.1 参数优化

对试验因素水平进行优化,以提高脱膜率与缠膜率为优化目标,设置目标函数与约束条件为:

$$\begin{cases} Y_{1\max} \\ Y_{2\min} \\ 0.4 \leq X_1 \leq 1 \\ 94 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq X_2 \leq 215 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 70 \text{ mm} \leq X_3 \leq 80 \text{ mm} \\ 0 \leq [Y_1(X_1, X_2, X_3), Y_2(X_1, X_2, X_3)] \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

利用 MATLAB 软件对脱膜率以及缠膜率的数学模型式(9)进行最优化求解^[20],在残膜回收机实际作业过程中,脱膜率与缠膜率作为评判残膜回收机工作效率的标准,为求解残膜回收机在工作过程中脱膜率以及缠膜率的最优解,在求解时对脱膜率以及缠膜率进行权重设置,通过对比脱膜率以及缠膜率不同权重下的作业效果,将权重设置为 3 组,分别为:第 1 组设置脱膜率权重为 0.9,缠膜率权重为 0.1;第 2 组设置脱膜率权重为 0.7,缠膜率权重为 0.3;第 3 组设置脱膜率权重为 0.5,缠膜率权重为 0.5。

使用 MATLAB 对设定的 3 种情况进行求解可得:(1)设置脱膜率权重为 0.9、缠膜率权重为 0.1 时,结果显示当摩擦因数为 0.73、脱膜辊转速为 208.68 r · min⁻¹、弹齿缝长度为 75.85 mm 时,脱膜率为 90.26%、缠膜率为 0.89%。(2)设置脱膜率权重为 0.7、缠膜率权重为 0.3 时,结果显示当摩擦因数为 0.73、脱膜辊转速为 210.56 r · min⁻¹、弹齿缝长度为 75.4 mm 时,脱膜率为 90.22%、缠膜率为 0.87%。(3)设置脱膜率权重为 0.5、缠膜率权重为 0.5 时,结果显示当摩擦因数为 0.727、脱膜辊转速为 216.2 r · min⁻¹、弹齿缝长度为 75.05 mm 时,脱膜率为 90.14%、缠膜率为 0.85%。

通过对 3 组不同的权重求解可知,当设置脱膜率权重为 0.7、缠膜率权重为 0.3 时,脱膜装置脱膜率最大且缠膜率适中,因此选择第 2 组求解结果进行试验验证,结合实际机械生产与工艺要求,由试验验证可知在进行回收作业时,当机具前进速度达到 7 km · h⁻¹时收膜效果最佳。因此,验证试验中机具前进速度选定为 7 km · h⁻¹时,各验证试验因素优化参数值分别为摩擦因数 0.7、脱膜辊转速 210 r · min⁻¹、弹齿缝长度 75 mm。

4.2 参数验证

由表 4 可知,试验指标验证值与优化预测值相对误差小于 5%,表明该参数优化模型准确可靠。

当参数组合摩擦因数为 0.7、脱膜辊转速为 210 r · min⁻¹、弹齿缝长度为 75 mm 时,脱膜率达到 90.35%,缠膜率为 0.89%,根据国家标准《残膜回收机》GB/T 25421-2021^[21]的规定,残膜回收机脱膜率需大于 90%,缠膜率需小于 2%,符合国家对残膜回收机的要求。

表 4 优化值与试验值验证

Table 4 Validation of optimization values and experimental values

项目 Item	脱膜率 Delamination rate Y ₁ /%	缠膜率 Wrapping rate Y ₂ /%
优化预测值 Optimize predicted value	90.16	0.87
第 1 次试验 1st experiment	89.39	0.89
第 2 次试验 2nd experiment	91.17	0.82
第 3 次试验 3rd experiment	90.85	0.94
第 4 次试验 4th experiment	89.54	0.81
第 5 次试验 5th experiment	90.78	0.83
平均值 Average value	90.35	0.89
相对误差 Relative error/%	0.21	2.25

5 结 论

1) 针对弹齿式残膜回收机脱膜装置脱膜作业过程中漏膜、脱膜效果差的问题,对弹齿式残膜回收机脱膜原理进行分析,确定了弹齿式残膜回收机脱膜作业质量的影响因素和评价指标。

2) 运用 Design-expert 软件进行了三因素三水平响应面分析试验,确定了各因素对脱膜率影响的主次顺序为:脱膜辊转速>弹齿缝长度>摩擦因数。对缠膜率影响的主次顺序为:脱膜辊转速>摩擦因数>弹齿缝长度。

3) 对构建的脱膜率回归方程进行优化求解,确定最佳参数组合为摩擦因数为 0.7、脱膜辊转速为 210 r · min⁻¹、弹齿缝长度为 75 mm,脱膜率达到 90.35%、缠膜率达到 0.89%,优化结果可靠。

参 考 文 献:

[1] 谢建华, 杨豫新, 曹肆林, 等. 导向链耙式地表残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 76-86.
XIE J H, YANG Y X, CAO S L, et al. Design and experiments of rake type surface residual film recycling machine with guide chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 76-86.
[2] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90-99.

- NING S R, ZUO Q, SHI J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 90-99.
- [3] 田辛亮, 赵岩, 陈学庚, 等. 4JSM-2000A 型棉秆粉碎及搂膜联合作业机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 25-35.
- TIAN X L, ZHAO Y, CHEN X G, et al. Development of 4JSM-2000A type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 25-35.
- [4] 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 C R, LIU E K, SHU F, 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.
- [5] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴-2006[M]. 北京: 北京中国统计出版社, 2006: 55.
- Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook [M]. Beijing: Beijing China Statistical Publishing House, 2006: 55.
- [6] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 133-142, 112.
- ZHOU C M, LI Y N, GU X B, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 133-142, 112.
- [7] 杨丽, 刘佳, 张东兴, 等. 棉花苗期地膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊1): 73-77.
- YANG L, LIU J, ZHANG D X, et al. Design and experiment of plastic film collector for cotton fields during seedling period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(S1): 73-77.
- [8] 白圣贺, 张学军, 靳伟, 等. 链齿式残膜回收机捡拾机构参数优化及试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 136-141.
- BAI S H, ZHANG X J, JIN W, et al. Parameter optimization and test of pick up mechanism of chain tooth residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 136-141.
- [9] 王雪芳. 不同条件下残膜回收技术试验研究[J]. 现代农业科技, 2015, (4): 190, 194.
- WANG X F. Experimental study on residual film recycling technology under different conditions[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, (4): 190, 194.
- [10] 张佳喜, 杨程, 郭俊先, 等. 滚刀式青贮玉米起茬及残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 25-34.
- ZHANG J X, YANG C, GUO J X, et al. Design and experiment of hob-type joint operation machine for silage corn root stubble plucking and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 25-34.
- [11] 郭文松, 简建明, 散黎龙, 等. 4CML-1000 型链耙式地膜回收机设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 66-73.
- GUO W S, JIAN J M, SAN J L, et al. Design and experimental optimization of 4CML-1000 type chain rake film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 66-73.
- [12] 靳伟, 张学军, 鄢金山, 等. 曲轴式棉田地膜回收机捡膜特性分析及工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 10-18.
- JIN W, ZHANG X J, YAN J S, et al. Characteristic analysis and working parameter optimization of crankshaft type cotton field surface residual film collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 10-18.
- [13] 赵玺, 周彦芳, 张亚萍, 等. 农用残膜危害及其防治措施研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(11): 14-15, 21.
- ZHAO X, ZHOU Y F, ZHANG Y P, et al. Research progress on the damage and prevention of agricultural residual film[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 14-15, 21.
- [14] 许咏梅, 房世杰, 马晓鹏, 等. 农用地膜污染防治战略研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 96-102.
- XU Y M, FANG S J, MA X P, et al. Prevention and control strategy for the pollution of agricultural plastic film[J]. Engineering Science, 2018, 20(5): 96-102.
- [15] 袁佳伟, 李叔洋, 钱胜, 等. 滚筒式残膜回收机结构设计与研究[J]. 河南科技, 2019, (11): 46-50.
- YUAN J W, LI S Y, QIAN S, et al. Structural design and research of drum residual membrane recovery machine[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2019, (11): 46-50.
- [16] 靳伟, 张学军, 张朝书, 等. 钉刺式残膜回收机脱膜装置的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2014, (11): 172-175.
- JIN W, ZHANG X J, ZHANG Z S, et al. Design and experimental research of film removing device for stud type residual film collector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, (11): 172-175.
- [17] 周新星, 吴努, 严伟, 等. 耙齿式残膜回收机自动脱膜机构优化设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 171-177.
- ZHOU X X, WU N, YAN W, et al. Parameters optimization and experiment for hydraulic automatic stripping institutions of the rake teeth type residual film recovery machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 171-177.
- [18] 施丽莉, 胡志超, 顾峰玮, 等. 耙齿式垄作花生残膜回收机设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 8-15.
- SHI L L, HU Z C, GU F W, et al. Design and parameter optimization on teeth residue plastic film collector of ridged peanut[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 8-15.
- [19] 严伟, 胡志超, 吴努, 等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 17-24.
- YAN W, HU Z C, WU N, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 17-24.
- [20] 李军成, 杨炼, 刘成志. MATLAB 语言基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2022: 191.
- LI J C, YANG L, LIU C Z. MATLAB language fundamentals[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2022: 191.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 残地膜回收机: GB/T 25412-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, SAC. The farm waste film-pick up machines: GB/T 25412-2021[S]. Beijing: Standard Press of China, 2021.