doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.038

滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置设计与试验

张　佳[1,2]　谢建华[1,3]　杜亚坤[1]　黄伟荣[1]　刘迎春[4]　岳　勇[1]

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆工程学院机电工程学院, 乌鲁木齐 830023;
3. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4. 新疆昌吉州玛纳斯县农牧业技术推广中心, 玛纳斯 832200)

摘要: 针对新疆地区残膜资源化利用需求和现有膜杂混合物(膜杂)切碎及分离难度大、作业效果不理想问题,设计一种可实现膜杂喂入切碎、膜杂分离以及棉秆破碎作业的滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置。基于动力学与运动学分析了膜杂喂入、切碎以及分离过程,得出影响膜杂切碎及分离效果的主要因素及参数取值范围。以喂入辊转速、切碎器转速以及分离滚筒转速为试验因素,膜中含膜率、杂中含膜率以及棉秆破碎长度合格率为评价指标,通过 Design-Expert 软件开展了单因素和 Box-Behnken 响应面试验,对试验结果进行方差分析和响应面分析,明晰了试验因素及其交互作用对试验指标的影响规律,对构建的二阶多项式响应面模型进行多目标求解优化,优化结果表明:当喂入辊转速为 20.94 r/min、切碎器转速为 335.78 r/min 以及分离滚筒转速为 282.38 r/min 时作业效果最佳,以优化后的参数进行试验验证,试验结果表明:膜中含膜率为 91.26%、杂中含膜率为 7.22% 以及棉秆破碎长度合格率为 93.78%,满足膜杂切碎及分离作业需求。

关键词: 膜杂混合物; 膜杂切碎; 膜杂分离; 滚刀式; 轴流滚筒

中图分类号: S223.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0409-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Rotary Knife - Axial Flow Drum Combined Device for Chopping and Separating Film Residue Mixture

ZHANG Jia[1,2]　XIE Jianhua[1,3]　DU Yakun[1]　HUANG Weirong[1]　LIU Yingchun[4]　YUE Yong[1]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi* 830023, *China*
3. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi* 830052, *China*
4. *Xinjiang Changji Prefecture Manas County Agriculture and Animal Husbandry Technology Extension Center, Manas* 832200, *China*)

Abstract: In response to the demand for the resource utilization of residual films in Xinjiang and the challenges of shredding and separating existing film residue mixture, a combined shredding and separation device featuring a rolling knife and axial flow drum was designed. This device can facilitate the feeding and shredding of mixed residual films, as well as the separation of residual films and the crushing of cotton stalks. Utilizing dynamics and kinematics, the processes of feeding, shredding, and separation were analyzed, revealing the main factors and parameter ranges that affected the efficiency of shredding and separation. The experimental factors included the feeding roller speed, shredder speed, and separation drum speed, while the evaluation indicators were the residual film content in the residual films, the residual film content in impurities, and the qualified rate of cotton stalk crushing length. Single-factor and Box - Behnken response surface experiments were conducted by using Design-Expert software, followed by variance and response surface analyses to clarify the impact patterns of experimental factors and their interactions on the experimental indicators. Through multi-objective optimization of the

收稿日期: 2024-09-27　修回日期: 2024-11-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项(2022B02022-3、2022B02046、2022B02017-3)、新疆维吾尔自治区区域协同创新专项-科技援疆计划项目(2024E02007)和新疆维吾尔自治区研究生教育创新计划项目(XJ2024G104)

作者简介: 张佳(1987—),男,博士生,新疆工程学院副教授,主要从事农业产后资源物回收及再利用技术研究,E-mail: 304165686@qq.com

通信作者: 谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业产后资源物回收及再利用技术研究,E-mail: xjh199032@163.com

established second-order polynomial response surface model, the optimal operational parameters were determined: feeding roller speed of 20.94 r/min, shredder speed of 335.78 r/min, and separation drum speed of 282.38 r/min. Experimental validation with these optimized parameters yielded residual film content of 91.26% in the residual films, 7.22% in impurities, and qualified rate of 93.78% for cotton stalk crushing length, thereby meeting the operational requirements for shredding and separating film-mixed residues.

Key words: film residue mixture; shredding of film residue mixture; separating of film residue mixture; rotary knife type; axial flow cylinder

0 引言

新疆地区棉花均采用覆膜种植,地膜年使用量约 1.124×10^5 t,地膜使用后未能及时回收致使新疆地区残膜污染较为严重[1-2]。随着残膜回收机械的不断发展,很大程度解决了地膜残留问题,但回收后的地膜包裹大量秸秆等杂质,形成了膜-秆相互缠绕复杂、结构特征不稳定等特征的膜杂混合物(膜杂),极不利于残膜初清理及资源化利用[3]。

膜杂中的残膜经过漂洗,可制成滴灌带等塑料制品;棉秆切碎后可作为牛羊、昆虫的饲料以及造纸工艺中的主要原料[4]。膜杂切碎及分离是实现残膜与棉秆资源化利用的首要环节[5]。近来年,学者对膜杂切碎及分离技术进行了大量研究,LIANG 等[6]设计了一种多刃齿刀式膜杂切碎装置,通过高低速多刃齿刀的相对旋转,对膜杂进行均匀切碎,研究了关键参数对膜杂切碎长度分布的影响规律;GUO 等[7]设计了一种滑切刀式膜杂切碎装置,通过左右滑切刀的相对旋转对膜杂捆料进行破碎,破碎率为 88.33%;胡斌等[8]提出了一种在水泵负压输送作用下的旋流沉降和切膜过滤排杂新方法,设计了可一次完成切碎排杂功能的切碎排杂装置,碎膜合格率及碎膜含杂率为 88.80% 和 7.26%;石鑫等[9]设计了一种滚筒式膜杂分离装置,根据残膜与棉秆在空气流场中悬浮特性差异,实现膜杂分离,分离后残膜中含杂率为 13.71%;张佳等[10]对滚筒式膜杂分离装置进行改进,优化了装置结构及运动参数,分离后膜中含杂率为 6.5%;李俊虹等[11]根据残膜与棉秆在水流作用下漂浮特性不同设计了一种水洗膜杂分离装置,分离率为 75.8%。

综上所述,现有膜杂切碎及分离装置大多为单一功能结构,只能完成膜杂切碎或分离作业,通用性及适用性较差。为满足膜杂切碎分离效率高、膜杂分离以及棉秆破碎效果好的生产需求,提高残膜与棉秆资源化利用技术及装备水平,本文设计一种滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置,一次性完成膜杂喂入切碎、分离以及棉秆破碎作业。通过对膜杂喂入机构、切碎机构以及分离机构的理论分析,确定影响膜杂切碎及分离效果的关键参数及取值范围,通过单因素试验和 Box-Behnken 响应面试验,探究切碎、分离装置关键参数对棉秆破碎以及膜杂分离效果的影响规律,寻求最佳参数组合并进行试验验证,以期为膜杂切碎分离技术及装备的发展提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

整体结构如图 1 所示。主要由输送带、喂料机构、切碎机构以及分离机构组成。喂料机构架设在输送机构上方,且与后方的切碎机构相连,切碎机构与其下方分离机构相连。

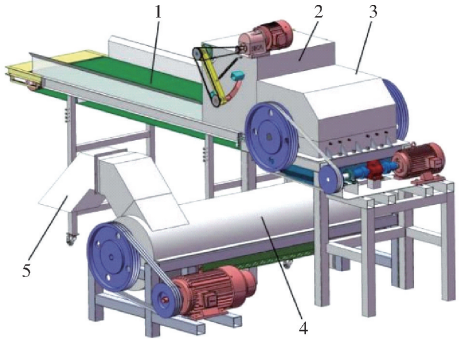


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure

1. 输送带 2. 喂料机构 3. 切碎机构 4. 分离机构 5. 出料口

1.2 工作原理与技术参数

整机工作原理如图 2 所示。作业时,输送带将膜杂输送至喂料机构下方,喂入辊将体积大、质地柔软的膜杂匀速且顺畅地喂入切碎机构;在喂入辊对膜杂正压力的作用下,切碎器快速旋转,切碎器上的动刀与定刀相互配合将膜杂切碎成段状,切碎长度符合要求的膜杂通过切碎器旋转产生的气流和离心力的双重作用穿过切碎凹板筛进入分离机构;分离机构内的螺旋叶片将切碎的膜杂沿分离机构轴线方向推送,切碎的棉秆受螺旋板齿冲击、揉搓作用再次被破碎成小段通过分离凹板筛排出,残膜由于质地柔软、质量较轻等特性不易被破碎,受分离滚筒内气流影响从出料口排出,实现棉秆破碎以及膜杂分离作业。机具主要设计参数如表 1 所示。

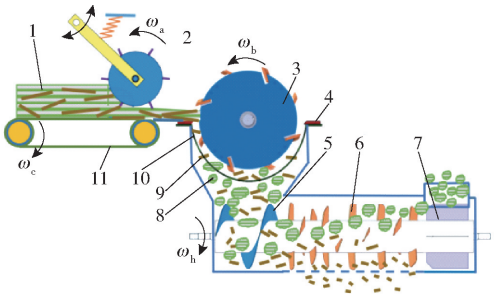


图 2　整机工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram of whole machine

1. 膜杂　2. 喂入辊　3. 滚刀式切碎器　4. 定刀　5. 螺旋叶片　6. 螺旋板齿　7. 排料板　8. 切碎后残膜　9. 切碎后棉秆　10. 切碎凹板筛　11. 输送带

表 1　机具主要参数

Tab. 1　Main parameters of device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 788×2 975×2 450
输送带工作幅宽/mm	800
切碎机构配套功率/kW	18.5
喂料机构配套功率/kW	1.5
输送带配套功率/kW	1.5
分离机构配套功率/kW	11.5
喂入辊转速/(r·min^{-1})	20～30
切碎器转速/(r·min^{-1})	225～375
分离辊筒转速/(r·min^{-1})	250～350

2　关键部件设计

2.1　喂料机构

如图 3 所示，喂料机构主要由机架、喂料电机、第 1 链轮组、第 2 链轮组、回转臂、喂入辊、拉簧以及限位块构成。为提高喂入辊抓取能力和降低残膜缠轴风险，喂入辊辊筒上圆周等分安装有矩形板。作业时，喂入辊与输送带的传动滚筒转向相反，随着膜杂喂入量的波动，喂入辊可绕回转臂沿机架上的导向槽自适应上下摆动，自动调节喂入辊与输送带之间的间隙，使得膜杂始终受到一定的正压力。

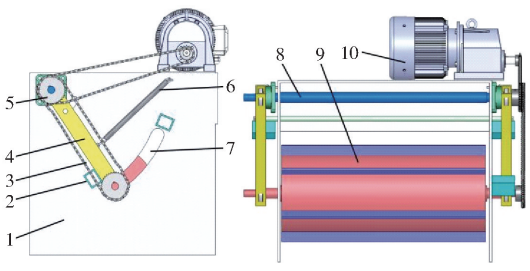


图 3　喂料机构结构示意图

Fig. 3　Schematic of feeding mechanism

1. 机架　2. 限位块　3. 第 2 链轮组　4. 回转臂　5. 第 1 链轮组　6. 拉簧　7. 导向槽　8. 回转轴　9. 喂入辊　10. 喂料电机

喂料机构通过喂入辊与输送带的共同作用对膜杂完成喂入，为保证喂入顺畅、不发生堵塞，将膜杂简化为柔性长方体，喂入辊简化为圆柱体，对喂入过程中膜杂受力进行分析[12]，如图 4 所示。

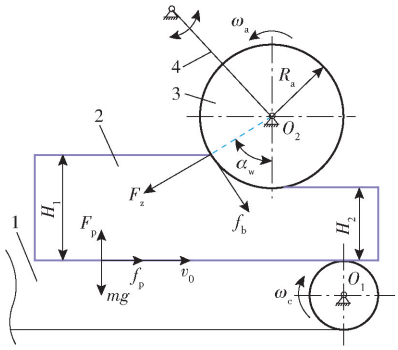


图 4　膜杂喂入过程受力分析

Fig. 4　Force analysis of film residue mixture feeding process

1. 输送带　2. 膜杂　3. 喂入辊　4. 回转臂

由图 4 可知，为保证膜杂能够稳定均匀喂入，喂入辊对膜杂的摩擦力应大于等于其正压力的水平分力[12]，即

$$f_p + f_b\cos\alpha_w \geqslant F_z\sin\alpha_w \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} f_p = F_p\mu_p \\ f_b = F_z\mu_b \\ F_p = mg + F_z\cos\alpha_w + f_b\sin\alpha_w \end{cases} \tag{2}$$

式中　F_p——输送带对膜杂的支撑力，N

F_z——喂入辊对膜杂的正压力，N

f_p——输送带对膜杂的摩擦力，N

f_b——喂入辊对膜杂的摩擦力，N

μ_p——输送带与膜杂间摩擦因数

μ_b——喂入辊与膜杂间摩擦因数

α_w——喂入夹角，(°)

m——膜杂质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

联立式(1)、(2)可推导出保证膜杂能够稳定均匀喂入的必要条件为

$$\frac{\mu_p mg}{F_z} + (\mu_p + \mu_b)\cos\alpha_w + \mu_p\mu_b\sin\alpha_w \geqslant \sin\alpha_w \tag{3}$$

为使式(3)成立，只需满足$(\mu_p + \mu_b)\cos\alpha_w \geqslant (1 - \mu_p\mu_b)\sin\alpha_w$，参考文献[13－14]，输送带与膜杂间的静摩擦因数μ_p为 0.44，喂入辊与膜杂间静摩擦因数μ_b为 0.34。通过式(3)求出 $\alpha_w \leqslant 42°$，即 $\alpha_w \leqslant 42°$能够保证膜杂均匀稳定喂入。

输送带幅宽、喂入辊直径和转速与装置的输送性能以及生产率有直接关系。为使膜杂喂入输送稳定，且满足生产率要求，需对输送带幅宽、喂入辊直径和转速进行合理设定。由图 4 可知

$$\begin{cases} H_1 - H_2 = R_a(1 - \cos(2\alpha_w)) \\ n_a \geqslant \dfrac{30v_a}{\pi R_a} \\ Q = 3\,600\eta BH_2v_a\kappa_a \end{cases} \tag{4}$$

式中 Q——生产率,kg/h

η——物料填充系数,取 0.3[15]

v_a——喂料速度,m/s

κ_a——膜杂容重,t/m^3

B——输送带幅宽,mm

H_1、H_2——膜杂喂入前和喂入后高度,mm

R_a——喂入辊半径,mm

n_a——喂入辊转速,r/min

取膜杂喂入前高度 H_1 为 230 mm,喂入后高度 H_2 为 80 mm,由式(4)可计算出 R_a =200 mm,喂入辊长度取 800 mm。喂入辊上的矩形板尺寸(长×宽×厚)设计为 800 mm×50 mm×5 mm。输送带幅宽 B 与喂入辊长度一致,为 800 mm,长度取 3 000 mm。设定输送带移动速度 v_0 为 0.25 m/s,为使膜杂喂入更加顺畅,一般要求喂料速度 v_a 为输送带移动速度 v_0 的 2~3 倍[16],即喂料速度 v_a =0.5~0.75 m/s,可计算出 $n_a \geqslant$23.87 r/min。试验测得 κ_a =0.024 t/m^3,可计算出膜杂切碎理论生产率 Q 为 829.4 kg/h,满足生产率(800 kg/h)设计要求。

2.2 滚刀式切碎机构

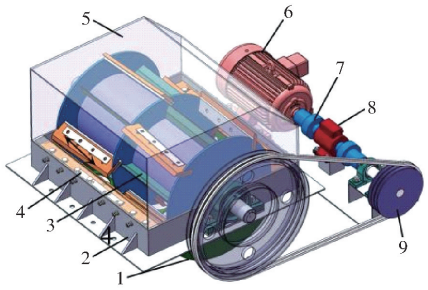
滚刀式切碎机构如图 5a 所示,主要包括切碎电机、滚刀式切碎器、定刀、动定刀间隙调节部件、切碎凹板筛以及机架。其中滚刀式切碎器主要包括固定刀盘、传动轴、安装滚筒、动刀以及排料板,结构如图 5b 所示。考虑到装置作业效果及稳定性,2 组动刀周向 4 等分设置于固定刀盘上,且采用前后交错人字形布置,相比于对称人字形布置形式,可减少单次切削幅宽,降低切削功耗。考虑到残膜柔软不易排出,在每排动刀之间均设置有排料板。切碎凹板筛位于滚刀式切碎器下方,结构如图 5c 所示。

2.2.1 滚刀式切碎器

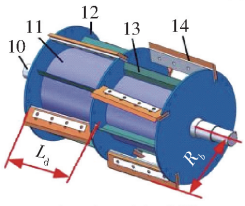
根据装置工作幅宽以及切碎腔尺寸,切碎器宽度取 800 mm,动刀刀刃轨迹半径 R_b 设计为 265 mm。采用 2 组共 8 把动刀左右对称安装在切碎器辊筒上,动刀长、宽、厚为 410 mm×90 mm×15 mm,结构如图 5b 所示。动刀斜置时其刃口直线可近似看作椭圆曲线的一部分,动刀在滚刀式切碎器上的位置参数如图 6 所示。

椭圆曲线为动刀底部平面与滚筒圆柱体形成的相贯线,取图中刃口端点 MN,已知椭圆曲线长半轴为 $R_b/\sin\beta$,短半轴为 R_b(刀刃轨迹半径),以 xoz 为坐标系,建立动刀刃口曲线方程为

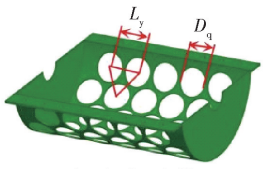
$$\frac{X^2}{R_b^2}+\frac{Z^2}{\left(\frac{R_b}{\sin\beta}\right)^2}=1 \tag{5}$$



(a) 切碎机构



(b) 滚刀式切碎器



(c) 切碎凹板筛

图 5 切碎机构结构示意图

Fig. 5 Schematics of chopping mechanism structure

1. 切碎凹板筛 2. 机架 3. 滚刀式切碎器 4. 定刀 5. 上壳体 6. 切碎电机 7. 联轴器 8. 扭矩传感器 9. 传动带轮组 10. 传动轴 11. 安装滚筒 12. 固定刀盘 13. 排料板 14. 动刀

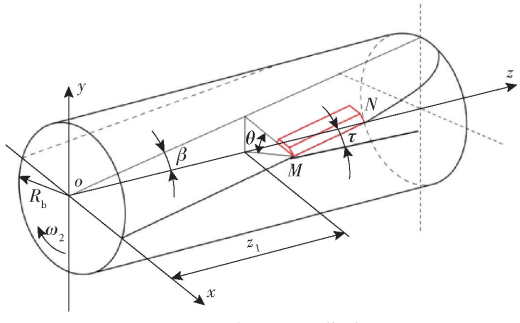


图 6 动刀刃口曲线

Fig. 6 Blade edge curve

式中 (X,Z)——动刀刀刃上任一点坐标值,mm

β——动刀所在椭圆面与中心面夹角,(°)

从图 6 可知,动刀安装前倾角 θ 满足

$$\begin{cases} X=R_b\cos\theta \\ Z\tan\beta=R_b\sin\theta \end{cases} \tag{6}$$

动刀安装前倾角 θ 越大,其切碎性能越好,但会增加残膜缠轴风险[17]。综合考虑残膜柔软易缠刀的特点,取点 M 安装前倾角 θ_M 为 30°,由式(6)计算得点 N 的安装前倾角 θ_N 为 37°,夹角 β 受切碎器结构限制,设计中取 β=5°。

作业时,膜杂在喂入辊正压力的作用下,动刀与前定刀配合形成“单支撑切割+滑切”将膜杂切碎,切碎长度符合要求的膜杂穿过切碎凹板筛,长度不符合要求的膜杂在切碎器作用下与后定刀配合完成二次切碎。假设整个喂入及切碎过程均匀且连续,并且在任意时刻都处于受力平衡的稳定状态,切碎过程中膜杂受力分析如图 7 所示。

动刀与前定刀配合时,膜杂受力平衡方程为

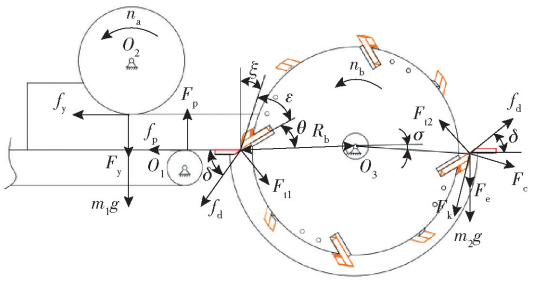


图 7　膜杂切碎过程受力分析

Fig. 7　Force analysis diagram of film residue mixture chopping process

$$\begin{cases} m_1 g + F_{t1}\cos\delta + f_d\sin\delta + F_y = F_p \\ f_y + f_p + f_d\cos\delta = F_{t1}\sin\delta \end{cases} \tag{7}$$

其中

$$\delta = \theta + \varepsilon \tag{8}$$

式中　F_{t1}——动刀对膜杂的正压力，N

F_y——喂入辊对膜杂的正压力，N

f_d——动刀刀面对膜杂的摩擦力，N

F_p——输送带对膜杂的正压力，N

δ——动刀前刀面与水平方向夹角，(°)

ε——动刀刃角，(°)

m_1——首次切碎时膜杂质量，kg

联立式(7)、(8)可得，动刀与前定刀配合时，动刀对膜杂的剪切应力 $F_{\tau 1}$ 为

$$F_{\tau 1} = \frac{(F_p - m_1 g - F_y - f_d\sin(\theta+\varepsilon))\cos\tau}{l_m b_m} \tag{9}$$

式中　l_m——待切膜杂长度，mm

b_m——待切膜杂宽度，mm

动刀与后定刀配合时，膜杂受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_e + m_2 g + F_k\cos\sigma + F_c\sin\sigma = F_{t2}\cos\delta + f_d\sin\delta \\ F_k\sin\sigma + F_{t2}\sin\delta = f_d\cos\delta + F_c\cos\sigma \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$\begin{cases} F_c = m_2 R_b \omega_b^2 \\ f_d = \mu_d F_{t2} \\ F_k = 2 m_2 \omega_b v_b \end{cases} \tag{11}$$

式中　F_{t2}——后动刀对膜杂的正压力，N

F_e——定刀对膜杂的正压力，N

F_c——二次切碎时膜杂所受离心力，N

F_k——二次切碎时膜杂所受科里奥利力，N

m_2——二次切碎时膜杂质量，kg

σ——动刀前刀面与水平方向夹角，(°)

ω_b——动刀转动角速度，rad/s

v_b——动刀刀尖旋转线速度，m/s

μ_d——动刀与膜杂间的摩擦因数

联立式(10)、(11)可得，动刀与后定刀配合时，动刀对膜杂的剪切应力 $F_{\tau 2}$ 为

$$F_{\tau 2} = \frac{(F_e + m_2 g + 2 m_2 \omega_b v_b\cos\sigma + m_2 R_b \omega_b^2\sin\sigma - f_d\sin(\theta+\varepsilon))\cos\tau}{l_m b_m} \tag{12}$$

由受力分析可得，切碎器在膜杂上的剪切应力与喂入辊对膜杂的正压力 F_y、动刀安装隙角 ξ、动刀刃角 ε、动刀安装前倾角 θ、滑切角 τ 以及切碎器转速 n_b 有关。动刀刃角 ε 越大，切削力越大，作业功耗越高。动刀安装隙角 ξ 越小，切削力越大，切碎性能越好，但会增加残膜缠刀风险。参考文献[18－19]，动刀刃角 ε、动刀安装隙角 ξ 与安装倾角 η 应满足 $\xi + \eta + \varepsilon < 90°$，已知 $\varepsilon = 35°$，θ 为 30°～37°，则动刀安装隙角 ξ 取 10°。根据《农业机械设计手册》[20]，滚刀式切碎器滑切角取值为 10°～18°，本设计取 $\tau = 11°$。

切碎器转速 n_b 不仅影响切碎机构切碎性能，还影响膜杂理论切碎长度。其理论切碎长度为相邻动刀 2 次切割动作间隔时间内物料进给长度。滚刀式切碎器转速 n_b 与膜杂理论切碎长度 l_c 满足[21]

$$n_b = \frac{120 v_a}{l_c Z_d} \tag{13}$$

式中　Z_d——圆周上动刀数量，取 4

由式(13)可知，膜杂理论切碎长度与切碎器转速成反比。膜杂分离预试验结果表明，当棉秆切碎长度为 0～100 mm、残膜轮廓长度为 50～200 mm 时，膜杂分离效果最佳且满足膜杂资源化利用生产工艺要求。综合考虑，以棉秆和残膜重叠长度区间(50～100 mm)为设计依据，由式(13)计算出切碎器转速 n_b 为 150～450 r/min。

2.2.2　切碎凹板筛

凹板筛常见筛孔形状主要有圆孔、方孔、三角孔及长圆孔[22]。为提高切碎效率，切碎凹板筛选用筛分效率较高的圆孔。筛孔直径和开孔率是影响切碎质量与生产率的重要参数。筛孔直径 D_q 与膜杂理论切碎长度满足[23]

$$l_c = (0.75 \sim 0.85) D_q \tag{14}$$

开孔率 K 计算公式为

$$K = \frac{0.91}{\frac{L_y}{D_q} + 0.1} \times 100\% \tag{15}$$

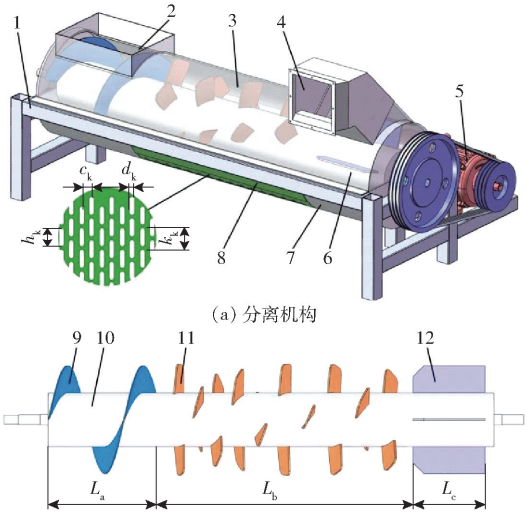
式中　L_y——筛孔孔距，mm

考虑切碎机构整体结构及尺寸，切碎凹板筛长度取 820 mm，直径取 630 mm，结合实际切碎以及分离作业需求，经式(14)、(15)计算，筛孔直径 D_q = 120 mm，筛孔孔距 L_y = 135 mm，开孔率 K = 74.3%，筛孔呈等三角形排列，结构如图 5c 所示。

2.3　轴流式分离机构

轴流式分离机构如图 8 所示，主要包括机架、分离滚筒、上盖板、下盖板、分离凹板筛以及分离电机，

其中分离滚筒由滚筒轴、螺旋叶片、螺旋板齿以及抛送叶片构成。轴流式分离机构采用径向喂入、径向排出方式,进料口和出料口分别位于上盖板左右两端。



(a) 分离机构

(b) 分离滚筒

图 8 分离机构和分离滚筒结构示意图

Fig. 8 Structure diagrams of separation mechanism and separation drum

1. 机架 2. 进料口 3. 分离滚筒 4. 出料口 5. 分离电机 6. 上壳体 7. 下壳体 8. 分离凹板筛 9. 螺旋叶片 10. 滚筒轴 11. 螺旋板齿 12. 抛送叶片

2.3.1 螺旋叶片

为提高膜杂轴向输送的顺畅性,喂入段(长度为 L_a)采用螺旋叶片结构。作业时,螺旋叶片将膜杂以间歇螺线形式向分离段(长度为 L_b)运动,分离滚筒以角速度 ω_h 旋转,假设整个喂入过程均匀且连续,膜杂在螺旋叶片作用下轴向速度 v_a 恒定,对膜杂在螺旋叶片作用下的喂入过程进行力学分析[24],如图 9 所示。

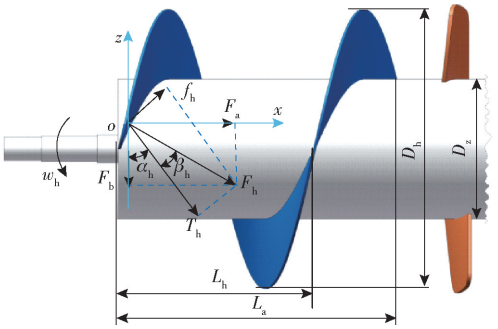


图 9 膜杂在螺旋叶片作用下的受力分析

Fig. 9 Force analysis of film residue mixture under action of spiral blade

由图 9 可知,螺旋叶片与膜杂存在摩擦力 f_h 和法向推力 T_h,两者合力 F_h 与 T_h 偏离一个角度 β_h,为膜杂与螺旋叶片摩擦角(取 18.8°)。膜杂所受合力可分解为轴向分力 F_a 和圆周方向分力 F_b,即

$$\begin{cases} F_a = F_h\cos(\alpha_h+\beta_h) \\ F_b = F_h\sin(\alpha_h+\beta_h) \\ \alpha_h = \arctan\dfrac{L_h}{\pi D_z} \\ \beta_h = \arctan\mu \end{cases} \tag{16}$$

式中 α_h——螺旋叶片螺旋升角,(°)

L_h——螺旋叶片螺距,mm

D_z——螺旋叶片内径,mm

μ——膜杂与螺旋叶片间摩擦因数

膜杂在螺旋叶片推动下轴向运动的条件为轴向动力大于轴向阻力,即满足

$$\begin{cases} T_h\sin\alpha_h > f_h\cos\alpha_h \\ f_h = \mu T_h = T_h\tan\beta_h \end{cases} \tag{17}$$

由式(17)可得

$$\tan\alpha_h > \tan\beta_h \tag{18}$$

根据分离机构整体结构和尺寸,取螺旋叶片长度 L_z 为 740 mm,为使膜杂从进料口顺畅进入及输送,螺旋叶片螺距 L_h 取 420 mm,根据式(18)可知 $\alpha_h > \beta_h$,考虑增加分离腔体内部流场速度以提高残膜轴向运动速度,取 $\alpha_h = 19°$。

2.3.2 螺旋板齿

残膜与棉秆分离过程中,既要求板齿具备较强的冲击、打散作用,还要求具有较强的轴向风送性能。为此,设计一种螺旋面结构的螺旋板齿,如图 10 所示。螺旋板齿由厚度 M_h 为 10 mm、螺距为 500 mm 的螺旋叶片剪切制成,圆心角 θ_t 为 40°,为避免残膜缠绕,将螺旋板齿端面进行圆弧处理。

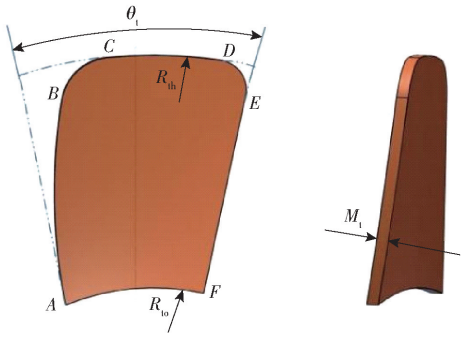


图 10 螺旋板齿结构示意图

Fig. 10 Schematic of spiral plate tooth structure

螺旋板齿齿根圆直径 D_{to} 与分离滚筒直径以及螺旋叶片内径 D_z 相等,分离滚筒直径太小容易缠绕残膜,同时会减少凹板筛作用面积,但分离滚筒直径过大,作业功耗会增大。根据文献[25],分离滚筒直径周长应大于 1.5 倍残膜长度。螺旋板齿齿顶圆直径 D_{th} 等于分离滚筒直径与 2 倍螺旋板齿高度 H_t 之和,且小于分离凹板筛半径,即

$$\begin{cases} D_{to} = D_z \geqslant \dfrac{1.5L_p}{\pi} \\ D_{th} = D_{to} + 2H_t \end{cases} \tag{19}$$

式中　L_p——残膜长度，mm

经测量，切碎后残膜长度为 54.3 ~ 308.5 mm，以最大残膜长度（308.5 mm）计算，可得螺旋板齿齿根圆直径 D_{to} 应大于等于 294.6 mm，取 300 mm，齿顶圆直径 D_{th} 为 600 mm。螺旋板齿排布对作业平稳性、功耗以及膜杂分离效率有重要影响，为消除作业时产生的圆周作用力，螺旋板齿采用双头螺旋线排列，排列方式展开如图 11 所示。

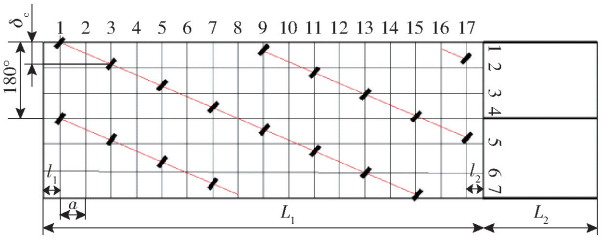


图 11　螺旋板齿排列方式

Fig. 11　Arrangement of spiral plate teeth

分离滚筒分离段长度 L_1 和总长度 L 计算式为

$$\begin{cases} L_1 = \left(\dfrac{Z_c}{K} - 1\right)a + l_1 + l_2 \\ L = L_1 + L_2 + L_z \end{cases} \tag{20}$$

式中　L_2——排料板长度，mm

l_1——分离板齿与螺旋叶片间距，取 100 mm

l_2——分离板齿与排料板距离，取 100 mm

a——螺旋板齿齿迹距，取 80 mm

Z_c——螺旋板齿数量，取 20

K——螺旋头数，取 2

由式（20）计算可得，分离滚筒分离段长度 L_1 为 1 650 mm，总长度 L 为 2 220 mm。为保证残膜从出膜口顺畅排出，在分离滚筒末端圆周等分安装有 4 块 400 mm × 150 mm × 2 mm 排料板。

膜杂在分离腔内的运动状态决定了其分离效果，为进一步明晰膜杂分离以及运动过程，将螺旋板齿螺旋面上的膜杂简化为质点，对其进行运动学分析，如图 12 所示。

由图 12 可知，在摩擦力作用下，物料实际运动速度相对于螺旋线切线方向偏移一个角度 β_e，在该参考系下膜杂沿螺旋板齿旋转的合速度 v_e 由轴向分速度 v_c 与圆周方向分速度 v_d 合成。膜杂运动速度分析可运用速度三角形方法求解[26]，表示为

$$\begin{cases} v_c = v_e\cos(\alpha_e + \beta_e) \\ v_d = v_e\sin(\alpha_e + \beta_e) \end{cases} \tag{21}$$

其中

$$v_e = \frac{nL_c}{60\tan\alpha_e}\frac{\sin\alpha_e}{\cos\beta_e} = \frac{nL_c\cos\alpha_e}{60\cos\beta_e} \tag{22}$$

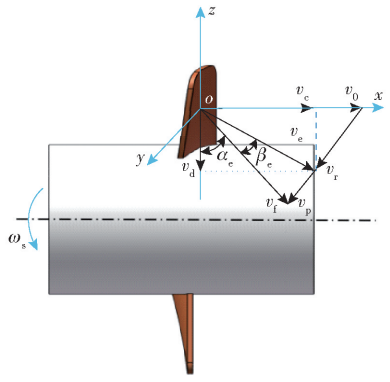


图 12　膜杂在螺旋板齿作用下的运动学分析

Fig. 12　Kinematics analysis of film residue mixture under action of spiral plate teeth

式中　α_e——螺旋升角，（°）

β_e——膜杂与螺旋叶片的摩擦角，（°）

n——分离滚筒转速，r/min

L_c——螺旋板齿螺距，mm

将式（22）代入式（21），整理可得

$$\begin{cases} v_c = \dfrac{nL_c}{60}(\cos^2\alpha_e - \cos\alpha_e\sin\alpha_e\tan\beta_e) \\ v_d = \dfrac{nL_c}{60}(\cos\alpha_e\sin\alpha_e + \cos^2\alpha_e\tan\beta_e) \end{cases} \tag{23}$$

其中

$$\begin{cases} \cos\alpha_e = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{L_c}{2\pi R_c}\right)^2}} \\ \sin\alpha_e = \dfrac{\dfrac{L_c}{2\pi R_c}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{L_c}{2\pi R_c}\right)^2}} \end{cases} \tag{24}$$

式中　R_c——膜杂所在位置旋转半径，mm

将式（24）代入式（23），整理可得

$$\begin{cases} v_c = \dfrac{nL_c}{60}\dfrac{1 - \mu_1\dfrac{L_c}{2\pi R_c}}{1 + \left(\dfrac{L_c}{2\pi R_c}\right)^2} \\ v_d = \dfrac{nL_c}{60}\dfrac{\mu_1 + \dfrac{L_c}{2\pi R_c}}{1 + \left(\dfrac{L_c}{2\pi R_c}\right)^2} \end{cases} \tag{25}$$

式中　μ_1——膜杂与螺旋板齿间的摩擦因数

由式（25）可知，膜杂轴向分速度 v_c 和周向分速度 v_d 与螺旋板齿螺距 L_c、旋转半径 R_c 和分离滚筒转速 n 有关。当螺旋板齿螺距 L_c、旋转半径 R_c 恒定时，分离滚筒转速直接影响膜杂分离效果，转速过大，棉秆和残膜受到的冲击力较大，残膜容易破碎，导致集杂箱内杂中含膜率升高，同时，棉秆容易随分离腔内部气流从出料口排出，导致集膜箱内膜中含

膜率降低;转速过小,棉秆破碎效果差,残膜在分离滚筒内停留时间长,膜杂分离效率低。根据膜杂各成分空气悬浮试验以及预试验结果,初步设定分离滚筒转速 n 为 200 ~ 400 r/min。

2.3.3 分离凹板筛

分离凹板筛用于筛出螺旋板齿破碎后的棉秆,由于破碎后棉秆呈细条状,切碎凹板筛选用筛分率高的长圆孔。当凹板筛面积一定时,筛孔尺寸及排列方式与开孔率 K_d 有关,开孔率 K_d 越高,筛分效率越高,筛分效果越好。如图 8a 所示,筛孔排列方式采用同向交错排列,分离凹板筛开孔率 K_d 计算式为[22]

$$K_d = \frac{d_k h_k - \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d_k^2}{c_k k_k} \times 100\% \tag{26}$$

式中 d_k——筛孔宽度,mm

h_k——筛孔长度,mm

c_k——横向孔距,mm

k_k——纵向孔距,mm

为满足破碎后棉秆资源化利用需求,破碎后棉秆长度应小于 50 mm,为保证破碎后的棉秆顺畅透过筛孔,残膜不易穿过筛孔,取筛孔长度 h_k 为 70 mm,筛孔宽度 d_k 为 15 mm,为提高筛分效率,取横向孔距 c_k 为 30 mm,纵向孔距 k_k 为 100 mm,通过式(26)计算得分离凹板筛开孔率 K_d 为 33.39%。

3 样机试验

3.1 试验材料与设备

试验于 2024 年 8 月中旬在新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市米东区小微创业产业园进行,试验样机及材料如图 13 所示,试验所需膜杂取自新疆维吾尔自治区玛拉斯县上庄子村,由 1CMJ-2.0 型残膜回收与秸秆粉碎还田联合作业机回收,室外堆放时间为 9 个月。经测定,膜杂主要由棉秆(占比约 35.5%)、残膜(占比约 21.8%)以及土壤颗粒等(占比约 42.7%)组成,其中测得棉秆平均长度为 24.31 mm,平均直径为 5.22 mm,残膜平均长度为 536.45 mm,由于土壤颗粒粒径小,容易造成环境污染,对试验结果影响较小,因此试验时,由抓机对膜杂捆料进行抖散,将土壤颗粒剔除。

如图 13 所示,试验设备包括试验样机 1 套、变频器 A(WXQ-5.0KW-380V 型)、变频器 B(VFD075M43A-5.0KW-380V 型)、变频器 C(ABE800A-18.5KW-380V 型)以及变频器 D(ABE800A-15KW-380V 型)、MTC008-C 型电子天平(量程:0 ~ 500 g,精度:0.001 g)、AR925 型激光测速仪(量程:0.5 ~ 19 999 r/min,精度:0.1 r/min)、卷尺、储物袋等。变频器 A 用于输送带无级转速调节,变频器 B 用于喂入辊无级转速调节,变频器 C 用于切碎器无级转速调节,变频器 D 用于分离滚筒无级转速调节。



(a) 试验样机 (b) 试验物料

图 13 试验样机及试验材料

Fig. 13 Experimental prototype and experiment materials

3.2 试验设计

膜中含膜率越高以及杂中含膜率越低越有利于残膜资源化利用,棉秆破碎合格率越高越有利于棉秆资源化利用[27-28]。故以膜中含膜率、杂中含膜率、棉秆破碎合格率为试验指标,以喂入辊转速、切碎器转速以及分离滚筒转速为试验因素进行单因素试验和三因素三水平 Box-Behnken 响应面试验。每组试验结束后,对集膜箱和集杂箱中的物料分别进行取样。参照 GB/T 26551—2011 交叉取样法,每个样本质量为(400 ± 20)g,膜中含膜率 Y_1、杂中含膜率 Y_2 以及棉秆破碎长度合格率 Y_3 计算公式分别为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_m} \times 100\% \tag{27}$$

式中 M_m——集膜箱中取样样本总质量,g

M_1——集膜箱样本中杂质总质量,g

$$Y_2 = \frac{M_2}{M_z} \times 100\% \tag{28}$$

式中 M_z——集杂箱中取样样本总质量,g

M_2——集杂箱样本中残膜质量,g

$$Y_3 = \frac{M_g - M_3}{M_g} \times 100\% \tag{29}$$

式中 M_g——集杂箱中棉秆样本质量,g

M_3——集杂箱棉秆样本中长度大于 50 mm 的棉秆质量,g

3.3 试验结果与分析

3.3.1 单因素试验

根据理论分析以及前期预试验结果,喂入辊转速取值为 20 ~ 40 r/min,切碎器转速取值为 150 ~ 450 r/min,分离滚筒转速取值为 200 ~ 400 r/min。各因素均选取等间隔 5 水平进行单因素试验,当各试验因素作为固定因素时,以中间水平为试验取值。试验因素对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响如图 14 所示。

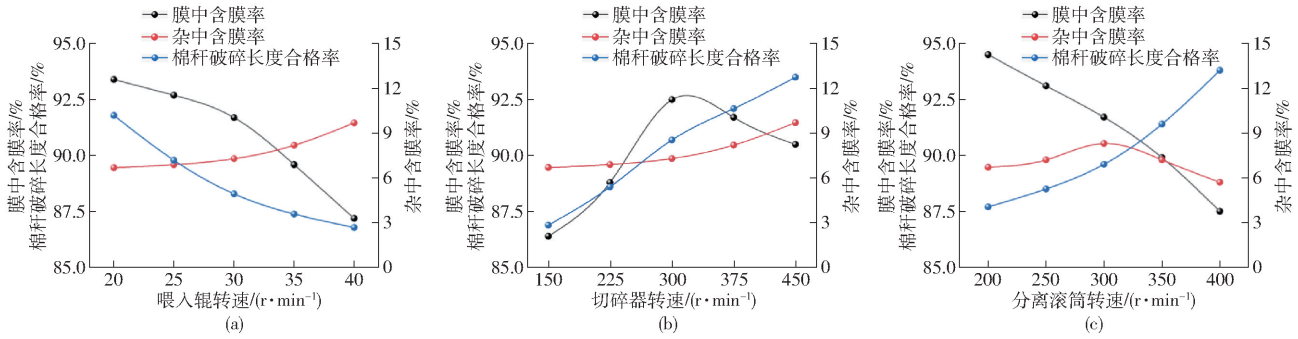


图 14　试验因素对试验指标的影响

Fig. 14　Influence of experimental factors on experimental indices

喂入辊转速对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响如图 14a 所示。随着喂入辊转速提高，膜中含膜率和棉秆破碎长度合格率整体呈下降趋势，杂中含膜率整体呈上升趋势。原因在于喂入辊转速越大，膜杂切碎长度越大，且膜杂喂入量越大，从而降低膜中含膜率和棉秆破碎长度合格率，提高了杂中含膜率。因此，喂入辊转速不宜超过 30 r/min，选取喂入辊转速为 20 ~ 30 r/min。

切碎器转速对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响如图 14b 所示。随着切碎器转速的提高，杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率整体呈上升趋势，膜中含膜率整体呈先上升后下降趋势。原因在于切碎器转速越高，膜杂切碎长度在 50 mm 内的数量增多，杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率均增加，当切碎器转速超过 300 r/min 时，膜杂切碎长度更小，更容易被分离滚筒中的气流吹出，膜中含膜率呈下降趋势。综合考虑，选取切碎器转速为 225 ~ 375 r/min。

分离滚筒转速对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响如图 14c 所示。随着分离滚筒转速提高，膜中含膜率整体呈下降趋势，杂中含膜率整体呈先上升后下降趋势，棉秆破碎长度合格率整体呈上升趋势。原因在于分离滚筒转速提高，产生轴向气流增大，棉秆易随残膜一同从出膜口排出，故膜中含膜率降低，同时，螺旋板齿冲击力更大，棉秆破碎长度合格率和杂中含膜率均升高，当分离滚筒转速超过 300 r/min 时，膜杂受冲击力进一步破碎，同时，更容易被分离滚筒中的空气流场吹出，因此杂中含膜率呈下降趋势。综合考虑，选取分离滚筒转速为 250 ~ 350 r/min。

3.3.2　Box - Behnken 试验

为探究各试验因素与评价指标之间的交互作用，得到装置较优工作参数组合，根据单因素试验得到的各因素取值范围，采用 Design-Expert 12.0 软件进行三因素三水平 Box - Behnken 响应面试验，因素编码如表 2 所示。共进行 17 组试验，试验方案与结果如表 3 所示，X_1、X_2、X_3为因素编码值。

表 2　试验因素和编码

Tab. 2　Experimental factors and coding

编码	因素		
	喂入辊转速 x_1/(r·min^{-1})	切碎器转速 x_2/(r·min^{-1})	分离滚筒转速 x_3/(r·min^{-1})
-1	20	225	250
0	25	300	300
1	30	375	350

表 3　试验方案及结果

Tab. 3　Experiment design and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	88.9	7.3	87.2
2	1	-1	0	85.0	7.1	86.7
3	-1	1	0	89.7	7.7	93.8
4	1	1	0	87.9	9.5	88.7
5	-1	-1	-1	91.0	7.5	88.1
6	1	-1	-1	88.6	8.7	86.8
7	-1	1	1	88.3	9.1	90.9
8	1	1	1	84.6	9.8	89.9
9	0	0	-1	87.1	8.2	82.8
10	0	0	-1	89.6	7.4	90.6
11	0	-1	1	85.4	8.2	89.3
12	0	1	1	85.2	10.2	92.6
13	0	0	0	89.6	7.2	91.1
14	0	0	0	89.3	6.9	92.6
15	0	0	0	90.1	7.1	92.2
16	0	0	0	89.7	7.2	92.8
17	0	0	0	89.9	7.1	92.6

对表 3 数据进行分析，得到膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的回归模型，方差分析结果如表 4 所示。由表 4 可知，膜中含膜率、杂中含膜率以及棉秆破碎率回归模型均极显著（$P < 0.01$），失拟项均不显著（$P > 0.05$），说明回归模型方程拟合效果较好，故可用该模型对试验指标进行分析和优化。将不显著项剔除后得到各试验因素与试验指标的回归方程为

表 4 回归模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of regression model

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	65.28	9	7.25	74.88	<0.000 1 **
	X_1	17.40	1	17.40	179.70	<0.000 1 **
	X_2	4.50	1	4.50	46.46	0.000 2 **
	X_3	20.48	1	20.48	211.45	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.10	1	1.10	11.38	0.011 9 *
	X_1X_3	0.422 5	1	0.422 5	4.36	0.075 1
	X_2X_3	1.82	1	1.82	18.82	0.003 4 **
	X_1^2	0.312 7	1	0.312 7	3.23	0.115 4
	X_2^2	10.41	1	10.41	107.49	<0.000 1 **
	X_3^2	7.36	1	7.36	76.03	<0.000 1 **
	残差	0.678 0	7	0.096 9		
	失拟	0.310 0	3	0.103 3	1.12	0.439 1
	误差	0.368 0	4	0.092 0		
	总和	65.96	16			
Y_2	模型	17.83	9	1.98	35.32	<0.000 1 **
	X_1	1.53	1	1.53	27.31	0.001 2 **
	X_2	2.00	1	2.00	35.67	0.000 6 **
	X_3	3.78	1	3.78	67.44	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.000 0	1	1.000 0	17.83	0.003 9 **
	X_1X_3	0.062 5	1	0.062 5	1.11	0.326 1
	X_2X_3	1.96	1	1.96	34.96	0.000 6 **
	X_1^2	1.22	1	1.22	21.69	0.002 3 **
	X_2^2	0.290 1	1	0.290 1	5.17	0.057 1
	X_3^2	5.45	1	5.45	97.16	<0.000 1 **
	残差	0.392 5	7	0.056 1		
	失拟	0.332 5	3	0.110 8	7.39	0.051 5
	误差	0.060 0	4	0.015 0		
	总和	18.22	16			
Y_3	模型	131.43	9	14.60	21.04	0.000 3 **
	X_1	7.80	1	7.80	11.24	0.012 2 *
	X_2	48.51	1	48.51	69.88	<0.000 1 **
	X_3	25.92	1	25.92	37.34	0.000 5 **
	X_1X_2	5.29	1	5.29	7.62	0.028 1 *
	X_1X_3	0.022 5	1	0.022 5	0.032 4	0.862 2
	X_2X_3	5.06	1	5.06	7.29	0.030 6 *
	X_1^2	9.86	1	9.86	14.20	0.007 0 **
	X_2^2	11.19	1	11.19	16.11	0.005 1 **
	X_3^2	13.72	1	13.72	19.76	0.003 0 **
	残差	4.86	7	0.694 2		
	失拟	2.99	3	0.995 8	2.13	0.239 4
	误差	1.87	4	0.468 0		
	总和	136.29	16			

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

$$Y_1 = 89.72 - 1.47X_1 + 0.75X_2 - 1.6X_3 + 0.525X_1X_2 + 0.675X_2X_3 - 1.57X_2^2 - 1.32X_3^2 \quad (30)$$

$$Y_2 = 7.1 + 0.437\,5X_1 + 0.5X_2 + 0.687\,5X_3 + 0.5X_1X_2 + 0.7X_2X_3 + 0.537\,5X_1^2 + 1.14X_3^2 \quad (31)$$

$$Y_3 = 92.26 - 0.987\,5X_1 + 2.46X_2 + 1.8X_3 - 1.15X_1X_2 - 1.13X_2X_3 - 1.53X_1^2 - 1.63X_2^2 - 1.8X_3^2 \quad (32)$$

根据方差分析及回归方程（30）~（32）可知，各因素对膜中含膜率影响由大到小依次为分离滚筒转速、喂入辊转速、切碎器转速；对杂中含膜率影响由大到小依次为分离滚筒转速、切碎器转速、喂入辊转速；对棉秆破碎长度合格率影响由大到小依次为切碎器转速、分离滚筒转速、喂入辊转速。

使用 Design-Expert 软件对试验结果进行响应面分析，以明晰各试验因素显著交互作用对试验指标的影响规律。各试验因素显著交互作用对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响如图 15 所示。

各因素交互作用对膜中含膜率的影响如图 15a、15b 所示。当分离滚筒转速 x_3 为 300 r/min 时，喂入辊转速 x_1 和切碎器转速 x_2 存在明显交互作用。当喂入辊转速低于 25 r/min，切碎器转速高于 285 r/min 时，膜中含膜率明显提高，但切碎器转速超过 315 r/min 时，膜中含膜率略有降低，原因在于喂入速度降低，切碎器转速高会明显降低膜杂的切碎长度，有利于切碎后的膜杂分离，提高膜中含膜率。当切碎器转速过高时，膜杂切碎长度过小，从而更容易被排膜口排出，导致膜中含膜率略有降低趋势；当喂入辊转速 x_1 为 25 r/min 时，切碎器转速 x_2 和分离滚筒转速 x_3 交互作用较为明显；当切碎器转速超过 315 r/min、分离滚筒低于 290 r/min 时，膜中含膜率明显提高，但切碎器转速超过 345 r/min 时，膜中含膜率略有降低，原因在于切碎器转速增大，膜杂破碎长度减小，残膜与棉秆质量差异明显，致使膜中含膜率明显提高，但膜杂破碎长度过小时，棉秆易从排摸口排出，致使膜中含膜率略有降低趋势。

各因素交互作用对杂中含膜率的影响如图 15c、15d 所示。当分离滚筒转速 x_3 为 300 r/min 时，喂入辊转速 x_1 和切碎器转速 x_2 存在明显交互作用。当喂入辊转速低于 27.5 r/min、切碎器转速低于 345 r/min 时，杂中含膜率呈明显降低趋势，原因在于喂入辊转速越低，膜杂喂入量越小，膜杂破碎长度适中，因此杂中含膜率降低；当喂入辊转速 x_1 为 25 r/min 时，切碎器转速 x_2 和分离滚筒转速 x_3 存在明显交互作用；当切碎器转速超过 345 r/min、分离滚筒转速超过 330 r/min 时，杂中含膜率呈明显上升趋势，原因在于过高的切碎器转速和分离滚筒转速均导致膜杂破碎长度减小，过多的碎小膜片致使杂中含膜率明显提高。

各因素交互作用对棉秆破碎长度合格率的影响如图 15e、15f 所示。当分离滚筒转速 x_3 为 300 r/min 时，喂入辊转速 x_1 和切碎器转速 x_2 存在明显交互作用。当喂入辊转速低于 25 r/min、切碎器转速高于

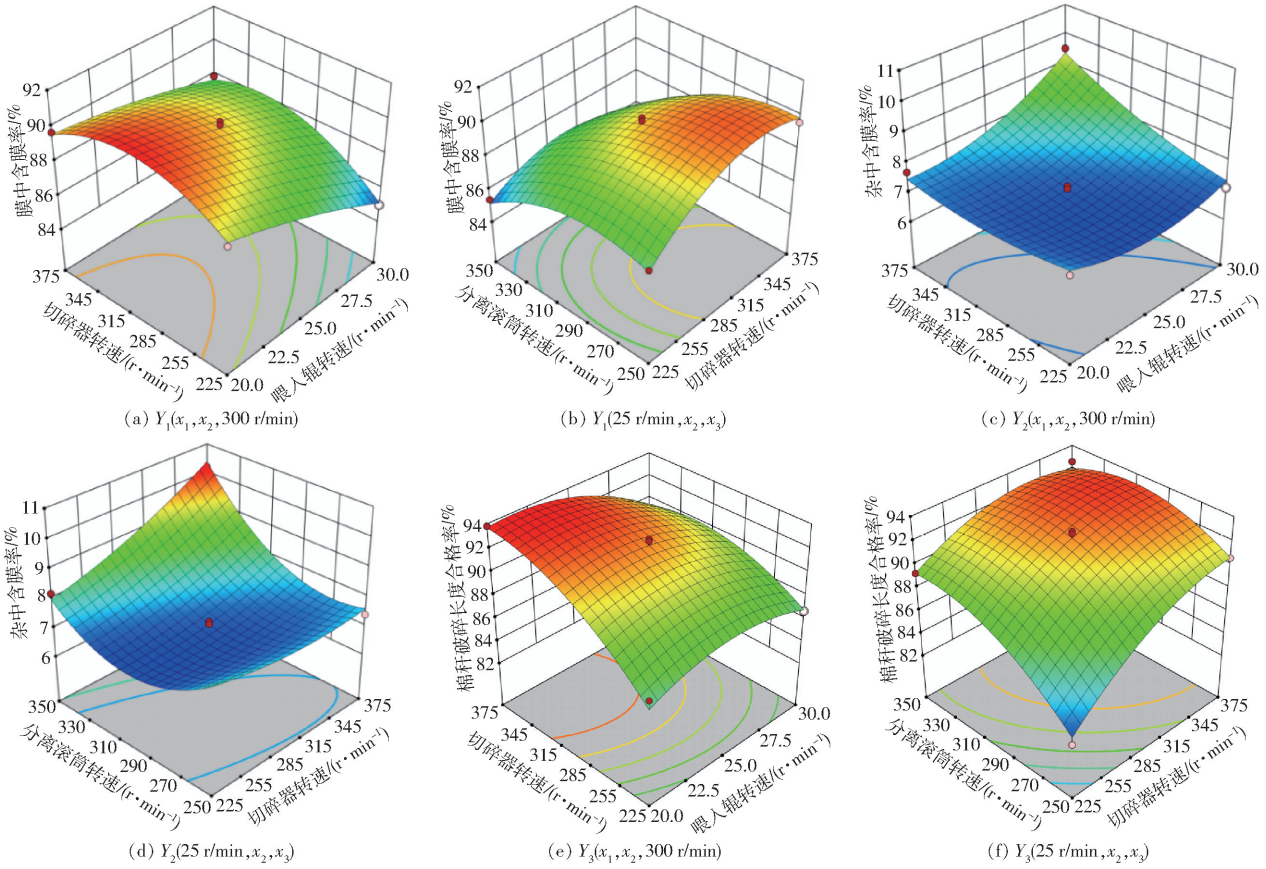


图 15　各因素交互作用对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率影响响应面

Fig. 15　Influence of interaction of various factors on residual film content in residual film, residual film content in impurities and qualified rate of cotton stalk breaking length

315 r/min 时，棉秆破碎长度合格率呈明显上升趋势，原因在于喂入辊转速降低和切碎器转速增高均可导致膜杂破碎长度减小，从而导致棉秆破碎长度合格率升高；当喂入辊转速 x_1 为 25 r/min 时，切碎器转速 x_2 和分离滚筒转速 x_3 交互作用较为明显；当切碎器转速超过 315 r/min、分离滚筒转速超过 310 r/min 时，棉秆破碎长度合格率呈明显上升趋势，原因在于增大切碎器转速和分离滚筒转速均导致膜杂破碎长度减小，导致棉秆破碎长度合格率升高。

3.4　参数优化及试验验证

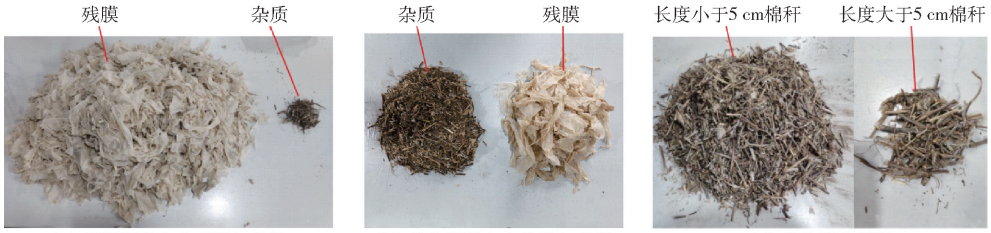
为使本装置工作性能达到最佳状态，利用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率进行多目标优化。设置各因素约束优化区间为试验因素上、下限值，试验指标优化目标设置为膜中含膜率最大、杂中含膜率最小和棉秆破碎长度合格率最大，根据膜杂再利用技术需求，膜中含膜率相较于杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率更为重要，膜中含膜率重要程度设定为“+ + + +”，杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率重要程度设定为“+ + +”，建立约束条件的优化数学模型为

$$\begin{cases} \mathrm{Max}Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \mathrm{Min}Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \mathrm{Max}Y_3(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.}\begin{cases} 20\ r/min \leqslant x_1 \leqslant 30\ r/min \\ 225\ r/min \leqslant x_2 \leqslant 375\ r/min \\ 250\ mm \leqslant x_3 \leqslant 350\ mm \end{cases} \end{cases} \tag{33}$$

通过式(33)求解得到最优工作参数组合：喂入辊转速为 20.94 r/min、切碎器转速为 335.78 r/min 以及分离滚筒转速为 282.38 r/min，预测膜中含膜率为 90.95%、杂中含膜率为 6.95%、棉秆破碎长度合格率为 92.66%。

2024 年 9 月，在乌鲁木齐市米东区小微创业产业园进行验证试验，选取喂入辊转速为 22 r/min、切碎器转速为 335 r/min 以及分离滚筒转速为 280 r/min，试验重复 3 次取平均值，试验效果如图 16 所示，试验结果见表 5。

由表 5 可知，膜中含膜率、杂中含膜率以及棉秆破碎合格率平均值为 91.26%、7.22%、93.78%，预测结果与试验结果比较，各性能指标相对误差均小于 4%，其预测结果与试验结果基本吻合，表明所建立的模型可靠，满足膜杂切碎及分离生产要求。



(a) 集膜箱样本中残膜与杂质 (b) 集杂箱样本中杂质与残膜 (c) 集杂箱中棉秆

图 16 试验效果

Fig. 16 Effect of prototype experiment

表 5 模型优化值与验证值对比

Tab. 5 Comparison between model optimization and validation test value %

参数	Y_1	Y_2	Y_3
模型优化值	90.95	6.95	92.66
验证值	91.26	7.22	93.78
相对误差	3.40	3.70	1.19

4 结论

(1)根据膜杂混合物资源化利用需求以及膜杂各成分物理特性,提出一种基于“单支撑切割 + 滑切”原理的膜杂切碎方法,以及气力机械组合式膜杂分离方法,设计一种滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置,实现膜杂喂入切碎、膜杂分离一体化作业,解决残膜与棉秆资源化利用过程中膜杂切碎、分离的技术难题。

(2)基于对膜杂喂入、切碎以及分离过程的动力学和运动学分析,开展了喂入辊转速、切碎器转速以及分离滚筒转速对装置作业效果的单因素试验,得到影响作业效果较佳时各因素的合理取值范围:喂入辊转速为 20 ~ 30 r/min、切碎器转速为 225 ~ 375 r/min 以及分离滚筒转速为 250 ~ 350 r/min。

(3)以单因素试验得到的因素及其取值范围开展三因素三水平响应面试验,采用多元拟合得到各因素对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的回归方程,对试验结果进行分析,确定各因素及其交互作用对膜中含膜率、杂中含膜率和棉秆破碎长度合格率的影响规律。采用 Design-Expert 软件对二阶响应面模型进行优化求解,得到装置最优工作参数组合:喂入辊转速为 20.94 r/min、切碎器转速为 335.78 r/min 以及分离滚筒转速为 282.38 r/min。

(4)以该最优工作参数进行验证试验,试验结果表明,膜中含膜率、杂中含膜率以及棉秆破碎长度合格率平均值为 91.26%、7.22%、93.78%。试验结果与预测结果比较,各性能指标相对误差均小于 4%,表明验证试验结果与模型预测结果基本一致,切碎分离装置作业质量满足行业要求。

参 考 文 献

[1] 温浩军,陈学庚,陈浩,等. 农田地膜回收机械应用现状与发展[J]. 农业环境科学学报,2024,43(6):1271 - 1277.
WEN Haojun, CHEN Xuegeng, CHEN Hao, et al. Application status and development of farmland mulch recycling machinery [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(6):1271 - 1277. (in Chinese)

[2] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(6):1 - 14.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):1 - 14. (in Chinese)

[3] 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):223 - 234.
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 223 - 234. (in Chinese)

[4] 张佳,胥俊,黄勇. 机收残膜混合物膜杂分离机械的研究现状[J]. 现代农机,2022(3):119 - 121.
ZHANG Jia, XU Jun, HUANG Yong. Research status of membrane impurity separation machinery for machine harvesting residual membrane mixture[J]. Modern Agricultural Machinery, 2022(3):119 - 121. (in Chinese)

[5] 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 Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Current problems and countermeasures of recycling methods and recycling of residual film in cotton fields in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 1 - 13. (in Chinese)

[6] LIANG R Q, ZHANG B C, ZHOU P F, et al. Power consumption analysis of the multi-edge toothed device for shredding the residual film and impurity mixture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196:106898.

[7] GUO M Y, HU B, LUO X, et al. Design and test of a sliding cutting device for the plastic mulch waste[J]. Sustainability, 2023, 15(5):4513.

[8] 胡斌,袁成林,解彦宇,等. 基于水泵负压输送的切膜排杂装置设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(1):268 - 280.

HU Bin, YUAN Chenglin, XIE Yanyu, et al. Design and test of cutting film and removal impurities device based on negative pressure conveying of water pump[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2024,54(1):268 - 280. (in Chinese)

[9] 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 Changhe, WANG Xuenong, et al. Design of roller sieve waste plastic film and trash winnowing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 19 - 26. (in Chinese)

[10] 张佳,胥俊,肖萍,等. 机收膜杂混合物分离装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(7):9 - 14.
ZHANG Jia, XU Jun, XIAO Ping, et al. Design and test of separation device for mechanically collecting membrane miscellaneous mixture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(7):9 - 14. (in Chinese)

[11] 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 Mechanization Research,2019,41(5):152 - 156. (in Chinese)

[12] 王铁军,王铁良,崔红光,等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):148 - 158.
WANG Tiejun, WANG Tieliang, CUI Hongguang, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 148 - 158. (in Chinese)

[13] 谢建华,杜亚坤,张佳,等. 喂入调节式膜杂切碎装置的设计与试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版),1 - 11[2024 - 09 - 21]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240703.
XIE Jianhua, DU Yakun, ZHANG Jia, et al. Design and experiment of feeding adjustable membrane debris shredding device [J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),1 - 11[2024 - 09 - 21]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240703. (in Chinese)

[14] LIANG R, ZHANG L, JIA R, et al. Study on friction characteristics between cotton stalk-residual film-external contact materials[J]. Industrial Crops and Products,2024,209:118022.

[15] 蒋亚军. 饲用油菜收获机关键装置设计及试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
JIANG Yajun. Design and test of key equipments for fodder rapeseed harvester[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[16] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等. 铡切揉碎协同式牧草揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):149 - 159.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Design and test of cutting and crushing cooperative silk kneading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):149 - 159. (in Chinese)

[17] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜. 冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):102 - 111.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102 - 111. (in Chinese)

[18] 王教滨,阿力木·买买提吐尔逊,李谦绪,等. 青饲料收获机切碎装置设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(5):31 - 36,44.
WANG Jiaobin, ALYM Memettrsun, LI Qianxu, et al. Design and test of shredding device of green feed harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(5):31 - 36,44. (in Chinese)

[19] 曾明军,丛锦玲,闫琴,等. 饲用油菜收获机切碎防堵系统的设计与试验[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2024,42(1):15 - 21.
ZENG Mingjun, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Design and experiments of a chopping and anti-blocking system for rapeseed forage harvesters[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2024,42(1):15 - 21. (in Chinese)

[20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[21] 李向阳,李晓康,张锋伟,等. 青贮玉米收获机喂入切碎试验台设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(7):41 - 47,337.
LI Xiangyang, LI Xiaokang, ZHANG Fengwei, et al. Design and test of the feeding and shredding test benchon silage corn harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(7):41 - 47. (in Chinese)

[22] 张胜伟,张瑞雨,曹庆秋,等. 油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):148 - 157.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CAO Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):148 - 157. (in Chinese)

[23] 王飞,阿力木·买买提吐尔逊,张俊三,等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):135 - 147,166.
WANG Fei, ALYM Memettrsun, ZHANG Junsan, et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):135 - 147,166. (in Chinese)

[24] 谢建华,李沅泽,刘迎春,等. 分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11):329 - 341,428.
XIE Jianhua, LI Yuanze, LIU Yingchun, et al. Design and test of segmented drum pneumatically assisted *Potosia brevitarsis* larva biotransformation mixture separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):329 - 341,428. (in Chinese)

(下转第 456 页)

atrous convolution, and fully connected CRFS[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 40(4):834 - 848.

[31] 段立娟, 孙启超, 乔元华, 等. 基于注意力感知和语义感知的 RGB - D 室内图像语义分割算法[J]. 计算机学报, 2021,44(2):275 - 291.
DUAN Lijuan, SUN Qichao, QIAO Yuanhua, et al. Attention-aware and semantic-aware network for RGB - D indoor semantic segmentation[J]. Chinese Journal of Computers,2021,44(2):275 - 291. (in Chinese)

[32] 刘浩, 骆剑承, 黄波, 等. 基于特征压缩激活 Unet 网络的建筑物提取[J]. 地球信息科学学报, 2019,21(11):1779 - 1789.
LIU Hao, LUO Jiancheng, HUANG Bo, et al. Building extraction based on SE - Unet[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(11): 1779 - 1789. (in Chinese)

[33] 常惠, 饶志强, 赵玉林, 等. 基于改进 U - Net 网络的隧道裂缝分割算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2021,57(22): 215 - 222.
CHANG Hui, RAO Zhiqiang, ZHAO Yulin,et al. Research on tunnel crack segmentation algorithm based on improved U - Net network[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(22): 215 - 222. (in Chinese)

[34] 殷晓航, 王永才, 李德英. 基于 U - Net 结构改进的医学影像分割技术综述[J]. 软件学报, 2021,32(2):519 - 550.
YIN Xiaohang,WANG Yongcai, LI Deying. Suvery of medical image segmentation technology based on U - Net structure improvement[J]. Journal of Software,2021,32(2):519 - 550. (in Chinese)

[35] 于营, 王春平, 付强, 等. 语义分割评价指标和评价方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2023,59(6):57 - 69.
YU Ying, WANG Chunping, FU Qiang, et al. Survey of evaluation metrics and methods for semantic segmentation[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(6): 57 - 69. (in Chinese)

[36] 张晓宇, 王彬, 安卫超, 等. 基于融合损失函数的 3D U - Net + + 脑胶质瘤分割网络[J]. 计算机科学, 2021,48(9): 187 - 193.
ZHANG Xiaoyu, WANG Bin, AN Weichao,et al. Glioma segmentation network based on 3D U - Net + + with fusion loss function[J]. Computer Science, 2021, 48(9): 187 - 193. (in Chinese)

[37] 吴止锾, 高永明, 李磊, 等. 类别非均衡遥感图像语义分割的全卷积网络方法[J]. 光学学报, 2019,39(4):401 - 412.
WU Zhihuan, GAO Yongming, LI Lei, et al. Fully convolutional network method of semantic segmentation of class imbalance remote sensing images[J]. Acta Optica Sinica,2019,39(4):401 - 412. (in Chinese)

[38] MILLETARI F, NAVAB N, AHMADI S A. V - net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation[C]//2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), 2016.

[39] 张悦琦, 任鸿瑞. 融合特征优选与随机森林算法的 GF - 6 影像东北一季稻遥感提取[J]. 遥感学报, 2023,27(9):2153 - 2164.
ZHANG Yueqi, REN Hongrui. Remote sensing extraction of paddy rice in Northeast China from GF - 6 images by combining feature optimization and random forest[J]. National Remote Sensing Bulletin,2023,27(9):2153 - 2164. (in Chinese)

[40] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U - net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention, 2015.

[41] XIE Enze, WANG Wenhai, YU Zhiding, et al. SegFormer: simple and efficient design for semantic segmentation with transformers[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021,34:12077 - 12090.

(上接第 421 页)

[25] 廖庆喜,徐阳,袁佳诚,等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7): 140 - 150.
LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):140 - 150. (in Chinese)

[26] 连国党,魏鑫鑫,马丽娜,等. 轴流螺旋滚筒式食用向日葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(17):42 - 51.
LIAN Guodang, WEI Xinxin, MA Li'na, et al. Design and experiments of the axial-flow spiral drum threshing device for the edible sunflower[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 42 - 51. (in Chinese)

[27] PAN F, HU B, LUO X. Design and testing of a shearing and breaking device for mulch film and cotton stalk mixtures[J]. Transactions of the ASABE, 2021(2):64.

[28] 严义其,坎杂,王吉亮,等. 膜杂捆料多级破碎机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(2):187 - 195.
YAN Yiqi, KAN Za, WANG Jiliang, et al. Design and experiment of multi-stage crusher for film and miscellaneous bundle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(2): 187 - 195. (in Chinese)