

喂入调节式膜杂切碎装置的设计与试验

谢建华^{1,2}, 杜亚坤¹, 张佳^{1,3}, 李沅泽¹, 岳勇^{1,2}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆工程学院机电工程学院, 乌鲁木齐 830023)

摘要: 针对膜杂混合物呈团簇状易产生喂入堵塞的问题, 设计了一种满足白星花金龟幼虫适口性要求的具有喂入调节功能的膜杂切碎装置。通过对膜杂混合物喂入及切碎作业过程进行受力分析, 确定了主要零部件的结构参数与工作参数。为了验证机具工作的可靠性与作业性能, 通过单因素试验确定喂入压辊转速、动定刀间隙、切碎刀辊转速的合理取值范围, 以喂入压辊转速、动定刀间隙、切碎刀辊转速为试验因素, 棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率与消耗功率为评价指标进行三因素三水平响应面试验, 建立了回归模型, 分析了各因素及其交互作用对机具作业性能的影响, 并对各因素进行优化。优化结果表明: 当喂入压辊转速为 24.8 r/min、动定刀间隙为 0.4 mm、切碎刀辊转速为 256.4 r/min 时作业效果最佳; 以优化后的结果进行试验验证, 结果表明: 平均棉秆切碎长度合格率为 89.99%、平均残膜切碎长度合格率为 90.53%、平均消耗功率为 0.97 kW。研究结果可为膜杂混合物切碎技术的发展提供参考。

关键词: 农业机械; 膜杂混合物; 喂入调节; 切碎

中图分类号: S225 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0275-14

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240703

Design and experiment of feeding adjustable membrane debris shredding device

XIE Jian-hua^{1,2}, DU Ya-kun¹, ZHANG Jia^{1,3}, LI Yuan-ze¹, YUE Yong^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: In response to the problem of feeding blockage caused by the clustering of membrane debris mixture, this paper designs a membrane debris shredding device with feeding regulation function that meets the palatability requirements of white star flower beetle larvae. By conducting force analysis on the feeding and shredding process of the membrane mixture, the structural and working parameters of the main components were determined. In order to verify the reliability and operational performance of the machinery, a single factor experiment was conducted to determine the reasonable range of values for the feeding roller speed, dynamic and fixed blade clearance, and chopper roller speed. The feeding roller speed, dynamic and fixed blade clearance, and chopper roller speed were used as experimental factors, and

收稿日期: 2024-05-23.

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02046; 2022B02033); 国家自然科学基金项目(51965058).

作者简介: 谢建华(1975-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 农业机械设计. Email: xjh199032@163.com

the cotton stem shredding length qualification rate, residual film shredding length qualification rate, and power consumption were used as evaluation indicators for a three factor three-level response surface test. A regression model was established to analyze the influence of each factor and its interaction on the operational performance of the machinery, and optimize each factor. The optimization results showed that the optimal operating effect was achieved when the feeding roller speed was 24.8 r/min, the dynamic and fixed blade clearance was 0.4 mm, and the shredding blade roller speed was 256.4 r/min. The optimized results were verified through experiments, and the average qualified rate of cotton stem shredding length was 89.99%, the average qualified rate of residual film shredding length was 90.53%, and the average power consumption was 0.97 kW. The research results can provide reference for the development of film mixed shredding technology.

Key words: agricultural machinery; membrane mixture; feed adjustment; shred

0 引言

农田地膜覆盖栽培技术对提升农作物产量和促进农民经济效益做出了巨大贡献^[1-3],但随着地膜使用量及覆盖面积的逐年增加,残膜污染也越来越严重,机械化回收并资源化利用是解决残膜污染的必由之路^[4]。机械化回收的膜杂混合物中呈带状或片状的柔性残膜与棉秆和泥土等其他杂质紧密缠绕包裹在一起^[5],导致地膜和棉秆都无法直接资源化利用。近年来,利用昆虫转化农牧业废弃物技术为破解这个难题提供了新思路^[6]。研究发现,白星花金龟幼虫对高纤维含量的农作物秸秆处理效果较好^[7],利用白星花金龟幼虫取食发酵后膜杂混合物中的棉秆可实现分离残膜。为了满足白星花金龟幼虫的适口性要求,需要将膜杂混合物先进行粉碎预处理。

国内外针对塑料垃圾和饲料秸秆等单一物料的粉碎技术进行了大量研究^[8-11],研发了如单轴塑料粉碎机、剪切式薄膜塑料切碎机、粗饲料切碎机、滑切式秸秆粉碎机等机器。Moiceanu等^[12]研究了不同刃角刀片对芒草切割力和切割能量的影响。Krajnc等^[13]研究了刀辊的结构参数对粉碎效果的影响。张瑞新等^[14]利用EDEM软件研究了不同变量对双齿辊破碎机破碎效率的影响规律。柔性残膜和木质棉秆的机械剪切特性相差较大,对膜杂混合物粉碎技术研究相对较少。梁荣庆等^[15]设计了一种差速对辊式膜杂切碎装置,揭示了膜杂切碎特性的影响规律。Pan等^[16]提出了一种V型滚刀式膜杂破碎装置,提高了膜杂破碎效率,但存在膜杂切碎不均匀和缠轴等问题。胡斌等^[17]提出了一种切膜过滤排杂新方法,虽能同时完成物

料的剪切和分离作业,但作业性能不稳定,能量消耗较高。

为了满足白星花金龟幼虫适口性要求,本文设计了一种具有喂入调节功能的膜杂切碎装置,采用双摆杆机构实现喂入压辊的上下浮动,解决了膜杂混合物呈团簇状易产生喂入堵塞的问题;提出一种分段错位式平板滚刀剪切破结的技术方案,将膜杂剪切成短小且均匀的散状物料,解决了缠轴问题。基于膜杂混合物在喂入及切碎作业过程进行受力分析,对装置的关键零部件进行设计,借助响应面试验分析机具工作参数对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率的影响,确定机具的较优参数并进行试验验证,为膜杂混合物切碎装置的设计提供参考。

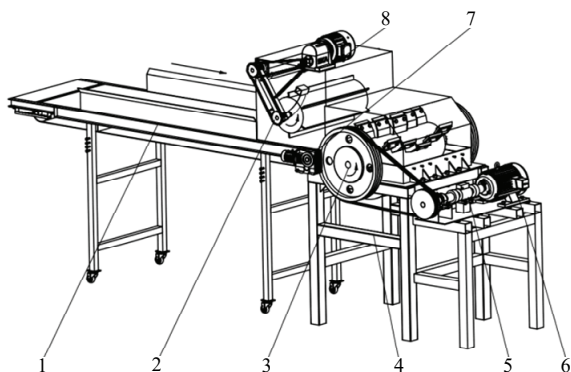
1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

喂入调节式膜杂切碎装置总体结构如图1所示。主要由带式输送机构、自适应调节喂入机构、切碎机构、机架和电动机组成。其中自适应调节喂入机构安装在带式输送机构末端上方,切碎机构主要由切碎刀辊、定刀和弧形筛等构成。

1.2 工作原理

膜杂混合物切碎装置可将其运动过程划分为输送、压紧拉拔、挤压切削、切断随动、抛送和二次破碎6个阶段。工作时,膜杂混合物由带式输送机构输送到自适应调节喂入机构的喂入口处,通过自适应调节组件(滑轨、摆动杆、拉伸弹簧等)调节喂入压辊的高度(即喂入间隙),将膜杂混合物压紧并夹持喂入切碎机构,防止膜杂混合物在切碎过程中发生堵塞,在切碎动刀与定刀的挤压和



1-带式输送机构; 2-自适应调节喂入机构; 3-切碎机构; 4-机架; 5-动态扭矩传感器; 6-变频器的电动机I; 7-变频器的电动机II; 8-变频器的电动机III

图1 膜杂切碎装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of membrane chopping device

剪切作用下实现膜杂混合物的连续粉碎。被切断后的物料在切碎刀辊的作用下,随着切碎刀辊一起转动,经弧形筛分后,已完全切碎的物料在离心惯性力的作用下从筛孔处抛出,未完全切碎的物料在动定刀作用下进行二次破碎。该装置工作时,通过“输-压-切-抛”等部件实现膜杂混合物的粉碎预处理。

2 关键部件设计与分析

2.1 带式输送机构

带式输送机构主要用于将膜杂混合物输送到切碎机构的喂料口处,主要包括输送机架、输送带、输送带滚筒、张紧装置等零部件,带式输送机构的结构示意图如图2所示。

为了保证膜杂混合物在切碎过程中稳定流畅且不堵料,切碎机构喂入口处理量要大于机具的生产率 $P=0.6\text{ t/h}$,同时喂入压辊的喂入速度 v_0 要大于带式输送机构的输送速度 V ,取切碎机构喂入口理论最大处理量 P_1 为机具生产率 P 的1.6倍^[18],则有:

$$P_1 = 1.6P \quad (1)$$

喂入口的最大通过能力:

$$P_1 = 3600Bh v_0 \lambda_1 \quad (2)$$

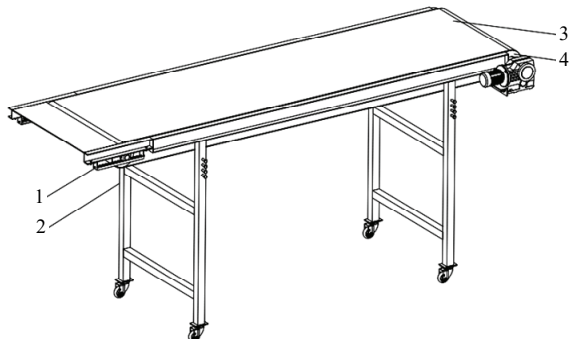
式中: B 为输送带宽度,mm; λ_1 为膜杂混合物压缩后的体积质量,取 0.021 t/m^3 。

联立式(1)(2)可得喂入口的尺寸:

$$B \cdot h = \frac{1.6P}{3600v_0 \lambda_1} \quad (3)$$

为了满足机具 $P=0.6\text{ t/h}$ 的生产率要求,根

据《运输机械选型设计手册》^[19],确定带式输送机构输送带宽度 B 为800 mm。将上述参数代入式(3)可得膜杂混合物的喂入速度 $v_0=0.45\text{ m/s}$ 。



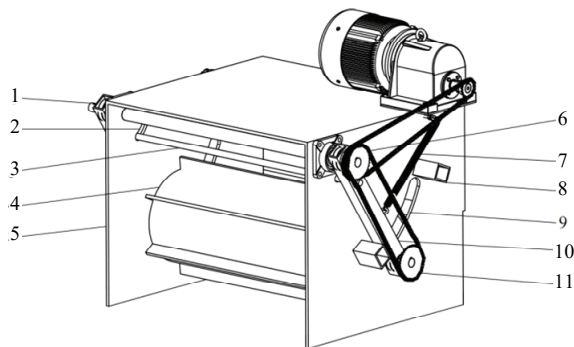
1-张紧装置;2-输送机架;3-输送带;4-输送带滚筒

图2 带式输送机构的结构示意图

Fig. 2 Belt conveyor mechanism structure schematic diagram

2.2 自适应调节喂入机构

自适应调节喂入机构主要由主动轴、喂入压辊、壳体、主动链轮、压辊轴链轮、拉伸弹簧、限位挡块、摆动杆、连接杆、滑轨I、滑轨II等组成,其中滑轨I、滑轨II左右对称布置,自适应调节喂入机构结构示意图如图3所示。喂入压辊与带式输送机构滚筒的轴心线平行且转向相反,两者相互作用为膜杂混合物提供一定喂入速度。膜杂混合物中的残膜属于柔性材料,容易缠绕在喂入压辊滚筒上,因此,将喂入压辊牙板设计成光滑的长方形板状,沿喂入压辊滚筒周向上等间距的布置有6个牙板。



1-主动轴;2-滑轨I;3-连接杆;4-喂入压辊;5-壳体;6-主动链轮;7-拉伸弹簧;8-限位挡块;9-滑轨II;10-摆动杆;11-压辊轴

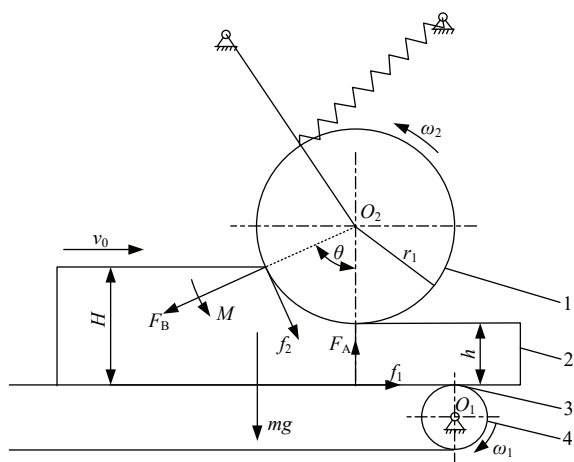
图3 自适应调节喂入机构结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of adaptive adjustment feeding mechanism

工作时,首先将膜杂混合物输送到自适应调节喂入机构的喂入口处;当膜杂混合物与喂入压辊接触时,根据膜杂混合物的喂入量大小,喂入压

辊在自重和拉伸弹簧及膜杂混合物的支撑作用下沿着滑轨Ⅱ上下浮动,以实现不同喂入尺寸下膜杂混合物的压实;最后,在喂入压辊的压实作用下形成支撑切割,利用切碎机构将膜杂混合物切碎处理。通过自适应调节喂入机构自动控制物料的喂入间隙,避免膜杂混合物因喂入量过大而造成切碎机构发生堵塞,提高切碎机构对喂入物料的适应性。

喂入机构的喂入作用主要是依靠喂入压辊挤压膜杂混合物产生的正压力和摩擦力,将喂料过程中的膜杂混合物简化为柔性长方体,喂入压辊简化为圆柱体,在喂入作业过程对膜杂混合物进行受力分析,如图4所示。



1-喂入压辊;2-膜杂混合物;3-输送带;4-输送带滚筒

图4 喂入作业过程膜杂混合物受力分析

Fig. 4 Force analysis of membrane mixed material during feeding operation

根据定向喂入条件下的物料破碎理论^[20,21],工作时,为使膜杂混合物能够顺畅喂入,需满足:

$$f_1 + f_2 \cos \theta \geq F_B \sin \theta \quad (4)$$

由图4可知:

$$F_A = mg + F_B \cos \theta + f_2 \sin \theta \quad (5)$$

$$H - h = r_1 - r_1 \cos 2\theta \quad (6)$$

因为

$$\begin{cases} f_1 = \mu_1 F_A \\ f_2 = \mu_2 F_B \end{cases} \quad (7)$$

联立式(4)~式(7)可得:

$$\frac{\mu_1 mg}{F_B} + (\mu_1 + \mu_2) \cos \theta + \mu_1 \mu_2 \sin \theta \geq \sin \theta \quad (8)$$

式中: F_A 为输送带对膜杂混合物的支撑合力,N; F_B 为喂入压辊对膜杂混合物的正压力,N; f_1 为输

送带对膜杂混合物的摩擦力,N; f_2 为喂入压辊对膜杂混合物的摩擦力,N; μ_1 为输送带与膜杂混合物之间的摩擦因数; μ_2 为喂入压辊与膜杂混合物之间的摩擦因数; θ 为喂入压辊回转中心与正压力的夹角,°; H 为膜杂混合物的喂入高度,取220 mm; h 为喂入压辊挤压后的高度,取35 mm; m 为膜杂混合物的质量,kg; g 为重力加速度,m/s²。

喂入夹角 θ 受喂入物料的高度和喂入压辊轴心高度的影响,为使物料能够均匀稳定地喂入,需要合理设计喂入压辊的直径。由于多项式 $\mu_1 mg/F_B \geq 0$ 恒成立,当满足 $(\mu_1 + \mu_2) \cos \theta \geq (1 - \mu_1 \mu_2) \sin \theta$ 条件时,式(8)恒成立。根据文献[22-25],取输送带与膜杂混合物之间的摩擦因数 $\mu_1 = 0.43$,喂入压辊与膜杂混合物之间的摩擦因数 $\mu_2 = 0.34$,则求出膜杂混合物的最大喂入夹角 $\theta = 42^\circ$ 。将上述参数代入式(6)可得喂入压辊的最小半径 $r_1 = 200$ mm,牙板尺寸设计为800 mm×50 mm×5 mm。

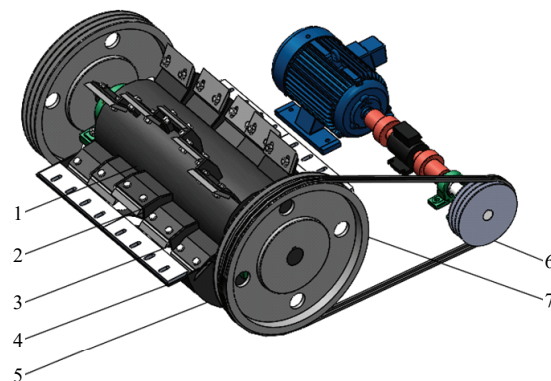
为保证膜杂混合物能够顺畅喂入,喂入压辊转速 n_1 需满足:

$$n_1 \geq \frac{30v_0}{\pi r_1} \quad (9)$$

将 $v_0 = 0.45$ m/s、 $r_1 = 200$ mm代入式(9)可计算出喂入压辊的最小转速 $n_1 = 21$ r/min。

2.3 切碎机构

膜杂混合物切碎机构主要由切碎刀辊、定刀、弧形筛和主、从动带轮等组成,其中切碎刀辊选用平板滚刀式,主要由动刀、动刀架和切碎滚筒等组成,切碎机构结构如图5所示。



1-切碎滚筒;2-动刀架;3-动刀;4-定刀;5-弧形筛;
6-主动带轮;7-从动带轮

图5 切碎机构

Fig. 5 Chopping mechanism

2.3.1 切碎刀辊设计

切碎机构的工作性能主要与切碎刀辊的转

速、膜杂混合物喂入速度、刀辊周向上均布动刀数量等参数有关。因此,需要对切碎机构的主要工作参数进行分析,以确保膜杂混合物的切碎长度符合加工需求。

切碎刀辊的转速计算式为^[26]:

$$n_2 = \frac{120v_0}{lz} \quad (10)$$

式中: n_2 为切碎刀辊转速,r/min; z 为刀辊周向上均布动刀的数量,取5; l 为膜杂混合物理论切碎长度,mm。

对于膜杂混合物的切碎长度目前没有统一标准,依据《废塑料再生利用技术规范》(GB/T 37821-2019)和黑龙江省地方标准《秸秆饲料铡碎机质量评价技术规范》(DB23/T 1368-2010),从残膜废弃物水洗再回收利用的角度考虑,最大轮廓长度不小于50 mm的残膜可以被水洗设备处理;从白星花金龟幼虫饲养的角度考虑,长度小于50 mm的棉秆可以满足白星花金龟幼虫的适口性要求,综合考虑膜杂混合物理论切碎长度 $l=50$ mm。将 $v_0=0.45$ m/s、 $l=50$ mm、 $z=5$ 代入式(10)计算可得切碎刀辊转速 $n_2=216$ r/min。

选用合理的排列方式可以保证膜杂混合物输出层均匀性,并大幅度减小切碎机构的振动。考虑到机具的作业效果及稳定性,切碎动刀设计为分体式,通过定位螺栓固定在动刀架上,易于维修和更换,降低制造成本。分段交错排布使得单次切削膜杂混合物较少,降低切削功耗^[27]。此外,相邻动刀之间还可以对膜杂混合物起到一个撕拉作用,提高作业效率,切碎机构的5把动刀沿刀辊轴轴向分段交错式排列。切碎动刀排列展开图如图6所示。

2.3.2 弧形筛设计

弧形筛是在膜杂混合物出料口处对物料进行

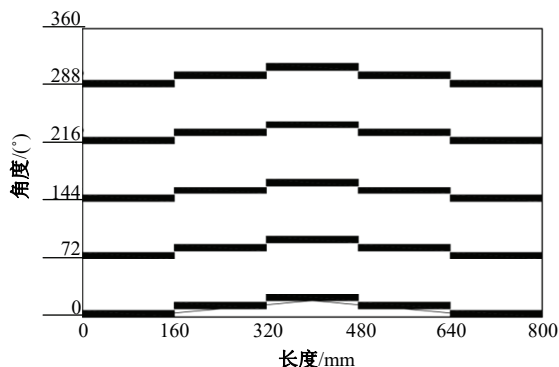


图6 切碎动刀排列展开图

Fig. 6 Expanded view of chopping knife arrangement

筛分的部件,通过定位螺栓安装在切碎刀辊正下方。弧形筛最关键的两个参数是筛网孔径和开孔率。筛网孔径越大,残膜和棉秆切碎粒径越大,越有利于出料,切碎效率越高。筛网孔径越小,残膜和棉秆切碎粒径越小,切碎物料越均匀,但能耗越高。为保证膜杂混合物的切碎效率,筛网的开孔率不宜过低,为了提高筛网的强度,筛网的开孔率也不宜过高。

已完全粉碎的膜杂混合物通过筛网时应满足^[18]:

$$v \leq \left[D - \frac{l}{2}(1 + \tan \zeta) \right] \frac{g \cos \zeta}{l} \quad (11)$$

式中: v 为已完全粉碎物料在筛面上的运动速度,m/s; D 为筛网孔径,mm; ζ 为筛面倾角,取 75° 。

弧形筛的开孔率计算公式如下:

$$K = 90.7 \times \frac{D^2}{a^2} \times 100\% \quad (12)$$

式中: K 为筛网开孔率,%; a 为筛网孔中心距,mm。

若使已完全粉碎的膜杂混合物在筛面上的运动速度 $v>0$ m/s,则需满足 $D>118.30$ mm,故取筛孔直径 $D=120$ mm,筛网孔中心距 $a=135$ mm,将上述参数代入式(12)计算可得弧形筛的开孔率 $K=72\%$ 。弧形筛筛面上共设有38个等直径筛孔呈等三角形排列,弧形筛展开图如图7所示。

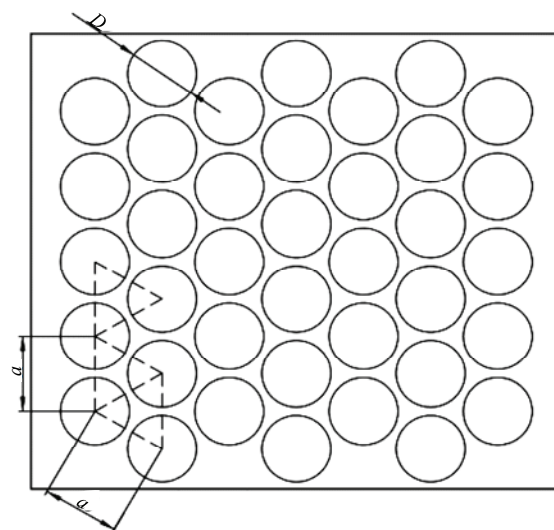


图7 弧形筛展开图

Fig. 7 Arc sieve expanded view

2.3.3 膜杂切碎过程受力分析

膜杂混合物的切碎过程可以分为挤压切削阶段和二次破碎阶段。挤压切削阶段是由切碎动刀

和定刀相互作用对膜杂混合物产生的切削力与喂入压辊对膜杂混合物产生的夹持拉力共同作用所实现的,二次破碎阶段是由切碎动刀和定刀相互作用对部分未完全粉碎的膜杂混合物进行再次破碎。对膜杂切碎过程进行受力分析,假设膜杂混合物在喂入及切碎过程中均匀且连续,并且在任意时刻受力平衡,在切碎作业过程对膜杂混合物进行受力分析,如图8所示。

由图8可知,膜杂混合物在切削挤压阶段的受力平衡方程为:

$$f_1 + f_2 + f_3 \cos \sigma = F_C \sin \sigma \quad (13)$$

$$mg + F_C \cos \sigma + f_3 \sin \sigma + F_B = F_D \quad (14)$$

由于:

$$\sigma = \beta + \gamma \quad (15)$$

联立式(13)~(15)可得,切削挤压阶段动刀作用在膜杂混合物上的剪切应力 τ_1 为:

$$\tau_1 = \frac{F_C \cos \sigma}{lb} = \frac{F_D - mg - F_B - f_3 \sin(\beta + \gamma)}{lb} \quad (16)$$

式中: F_C 为动刀刀面对膜杂混合物的正压力,N; F_D 为输送带与定刀对膜杂混合物的支撑合力,N; f_3 为动刀刀面对膜杂混合物的摩擦力,N; σ 为动刀前刀面与水平方向的夹角, $^\circ$; β 为动刀刃角, $^\circ$; γ 为动刀切割前角, $^\circ$; b 为切碎后膜杂混合物的宽度,mm。

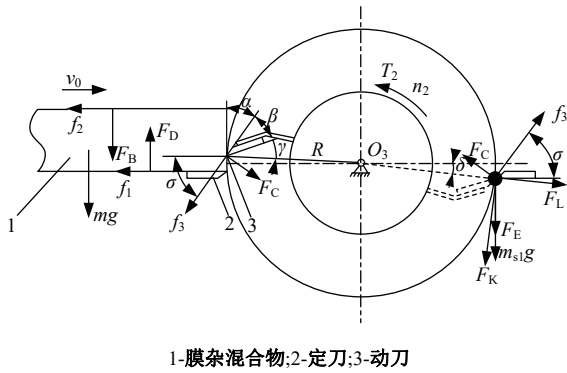


图8 切碎作业过程膜杂混合物受力分析

Fig. 8 Force analysis of membrane mixtures during shredding operations

由图8可知,膜杂混合物在二次切碎阶段的受力平衡方程为:

$$F_E + m_{s1}g + F_K \cos \delta + F_L \sin \delta = F_C \cos \sigma + f_3 \sin \sigma \quad (17)$$

$$F_K \sin \delta + F_C \sin \sigma = f_3 \cos \sigma + F_L \cos \delta \quad (18)$$

由于

$$\begin{cases} F_L = m_{s1}R\omega^2 \\ f_3 = \mu_3 F_C \\ F_K = 2m_{s1}\omega v \end{cases} \quad (19)$$

联立式(17)~(19)可得,二次切碎阶段动刀作用在膜杂混合物上的剪切应力 τ_2 为:

$$\tau_2 = \frac{F_C \cos \sigma}{lb} = \frac{F_E + m_{s1}g + 2m_{s1}\omega v \cos \delta}{lb} + \frac{m_{s1}R\omega^2 \sin \delta - f_3 \sin(\beta + \gamma)}{lb} \quad (20)$$

式中: F_E 为定刀刀面对膜杂混合物的正压力,N; F_L 为未完全粉碎物料所受离心力,N; F_K 为未完全粉碎物料所受科里奥利力,N; m_{s1} 为未完全粉碎物料的质量,kg; δ 为动刀刀尖和轴心连线与水平方向夹角, $^\circ$; ω 为动刀转动角速度,rad/s; v 为动刀转动速度,m/s。

由受力分析可知,切碎过程动刀作用在膜杂混合物上的剪切应力受动刀刃角与动刀切割前角等因素的影响。一般来说,动刀刃角越大,切削力越大,功耗越大;反之动刀刃角越小,功耗也越小,但动刀刃角过小会加剧刀具磨损,降低刀具寿命。根据文献[28]可知,动刀切割前角决定了切碎机构的切割性能和抛送性能,动刀切割前角越大,膜杂混合物的切碎性能越好,但其抛送性能越差。综合考虑,本文取动刀刃角 β 为 35° ,动刀切割前角 γ 为 22° 。

工作时,为减小膜杂混合物在送进过程中摩擦动刀的前刀面,需满足^[28]:

$$\begin{cases} R \geq \frac{LN_c}{2\pi \tan \alpha} \\ \alpha + \beta + \gamma \leq 90^\circ \end{cases} \quad (21)$$

式中: R 为动刀运动圆半径,mm; N_c 为动刀数量; α 为动刀安装角, $^\circ$ 。

由式(21)可得,切碎动刀的最小运动圆半径 $R=306$ mm。为避免切碎滚筒堵塞,动刀刃角与切碎滚筒之间应具有足够间隙,取动刀刃角与切碎滚筒之间的间隙为148 mm,则切碎滚筒半径为158 mm。

3 试验与结果分析

3.1 试验条件

为验证喂入调节式膜杂切碎装置工作的可靠性与作业性能,确定其最优的工作参数,于2024年4月在乌鲁木齐市中小微企业产业园进行试

验。供试物料为2023年10月中旬在昌吉回族自治州玛纳斯县由1CMJ-2.0残膜回收与秸秆粉碎还田联合作业机回收的膜杂混合物。

试验仪器包括希玛AR925接触式转速表(东莞万创电子制品有限公司)、JN-DN型旋转(动态)扭矩传感器(量程0~500 N·m,蚌埠传感器系统工程有限公司)、MCK-Z系列智能显示控制仪、100B32尚氏塞尺、MTC008-C型高精度电子分析天平(精度0.001 g)、数显游标卡尺(精度0.02 mm)、秒表、卷尺(量程100 m)、记号笔及自封袋。

3.2 试验指标

试验以棉秆切碎长度合格率 Y_1 、残膜切碎长度合格率 Y_2 、消耗功率 Y_3 作为评价指标。采用五点取样法对切碎后的膜杂混合物进行取样,每组试验需进行3次取样,每个样本质量为 350 ± 20 g。参照《碳纤维增强塑料 粉碎料尺寸和长宽比的测定》(GB/T 41709-2022)和《畜牧机械 粗饲料粉碎机》(GB/T 26551-2011)中的切碎长度测定方法,对取样后的膜杂混合物进行分拣并称取棉秆的总质量为 M_1 、残膜的总质量为 M_2 。用卷尺分选出长度大于50 mm的棉秆并称取其质量为 M_3 ,最大轮廓长度小于50 mm的残膜并称取其质量为 M_4 ,即为不合格的棉秆和残膜质量。棉秆和残膜切碎长度合格率的计算公式为:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{M_1 - M_3}{M_1} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{M_2 - M_4}{M_2} \times 100\% \end{cases} \quad (22)$$

式中: Y_1 为棉秆切碎长度合格率,%; Y_2 为残膜切碎长度合格率,%。

消耗功率通过安装在切碎机构上的动态扭矩传感器测定,每组试验结束后将动态扭矩传感器测定的扭矩和转速导出,利用有效工作时段平均扭矩和转速计算切碎刀辊的消耗功率为:

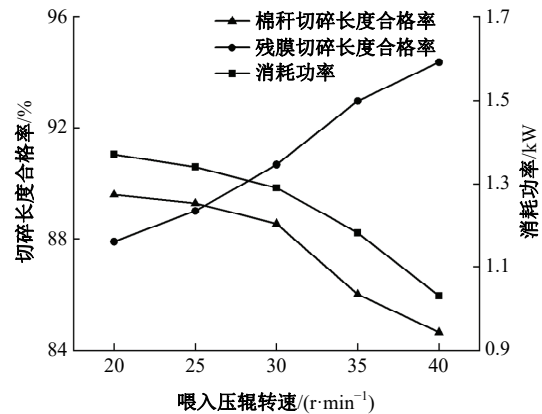
$$Y_3 = \frac{Tn_2}{9550} \quad (23)$$

式中: Y_3 为消耗功率,kW; T 为切碎刀辊在工作时的平均扭矩,N·m。

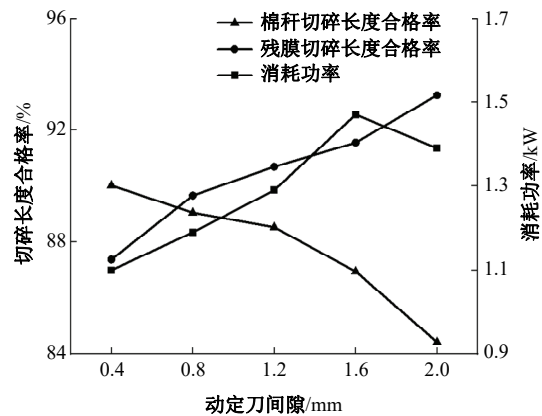
3.3 单因素试验方案及结果

根据2.2节自适应调节喂入机构设计分析和2.3节切碎机构设计分析并考虑实际作业生产需求,取喂入压辊转速为20~40 r/min,切碎刀辊转速为220~340 r/min,依据前期预试验取动定刀

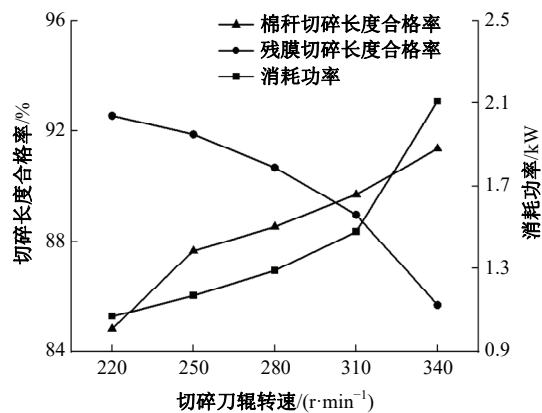
间隙为0.4~2.0 mm。通过单因素试验确定喂入压辊转速、切碎刀辊转速、动定刀间隙在不同水平下对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率及消耗功率的影响,每组试验仅调整单个试验因素,通过螺栓调节动定刀间隙,通过变频器调节喂入压辊和切碎刀辊转速。每组试验重复3次,取3次试验的平均值作为各组的试验结果,图9为单



(a) 喂入压辊转速对装置作业性能的影响



(b) 动定刀间隙对装置作业性能的影响



(c) 切碎刀辊转速对装置作业性能的影响

图9 单因素试验结果

Fig. 9 Single factor experiment results

因素试验结果。

由图 9(a)可知,随着喂入压辊转速的提高,棉秆切碎长度合格率和消耗功率整体呈下降趋势,残膜切碎长度合格率整体呈上升趋势。当喂入压辊转速在 20~30 r/min 区间时,棉秆切碎长度合格率变化较为稳定,当喂入压辊转速在 35 r/min 时棉秆切碎长度合格率急剧下降,因此,喂入压辊的转速不宜超过 30 r/min。综合考虑,喂入压辊转速为 20~30 r/min 是满足装置作业要求的最优区间。

由图 9(b)可知,棉秆切碎长度合格率随着动定刀间隙的增大呈下降趋势,残膜切碎长度合格率随着动定刀间隙的增大呈上升趋势,消耗功率随着动定刀间隙的增大呈先上升后下降趋势。当动定刀间隙在 0.4~1.2 mm 时,棉秆切碎长度合格率维持在较高水平,消耗功率较低。综合考虑,动定刀间隙为 0.4~1.2 mm 是满足装置作业要求的最优区间。

由图 9(c)可知,棉秆切碎长度合格率和消耗功率均随着切碎刀辊转速提高呈上升趋势,残膜切碎长度合格率随着切碎刀辊转速的提高呈下降趋势。当切碎刀辊转速在 250~310 r/min 区间时,消耗功

率增长缓慢,当切碎刀辊转速在 340 r/min 时残膜切碎长度合格率急剧下降,消耗功率急剧升高,因此,切碎刀辊的转速不宜超过 340 r/min。综合考虑,切碎刀辊转速为 250~310 r/min 是满足装置作业要求的最优区间。

3.4 多因素试验方案及结果

为探究各试验因素与评价指标之间的交互作用,得到机具的较优工作参数组合,以喂入压辊转速 x_1 、动定刀间隙 x_2 、切碎刀辊转速 x_3 为试验因素,棉秆切碎长度合格率 Y_1 、残膜切碎长度合格率 Y_2 、消耗功率 Y_3 为评价指标,选择 Box-Behnken 试验设计方法进行三因素三水平响应面试验。试验因素水平编码如表 1 所示,试验方案及结果如表 2 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。

表 1 试验因素水平编码
Table 1 Test factor level code

编码	因素		
	喂入压辊转速 x_1 / ($r \cdot \min^{-1}$)	动定刀间隙 x_2 /mm	切碎刀辊转速 x_3 / ($r \cdot \min^{-1}$)
-1	20	0.4	250
0	25	0.8	280
1	30	1.2	310

表 2 试验方案及结果

Table 2 Program and results of experiment

试验序号	X_1	X_2	X_3	棉秆切碎长度合格率 Y_1 /%	残膜切碎长度合格率 Y_2 /%	消耗功率 Y_3 /kW
1	-1	0	-1	84.15	91.65	1.45
2	0	0	0	89.15	88.87	1.28
3	0	0	0	87.67	89.27	1.31
4	1	0	-1	84.49	92.53	1.06
5	0	1	-1	85.31	94.08	1.28
6	1	-1	0	90.02	87.38	1.05
7	-1	-1	0	90.75	87.54	1.14
8	0	0	0	88.53	89.45	1.29
9	0	0	0	88.39	89.35	1.26
10	0	1	1	90.98	86.56	1.72
11	-1	1	0	89.60	87.89	1.32
12	0	-1	-1	89.24	91.12	0.96
13	0	-1	1	91.26	86.29	1.69
14	1	1	0	88.53	90.69	1.24
15	1	0	1	86.15	86.87	1.92
16	0	0	0	88.72	90.81	1.22
17	-1	0	1	88.76	85.28	2.01

利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行多元线性回归拟合分析处理,并建立棉秆切碎长

度合格率 Y_1 、残膜切碎长度合格率 Y_2 、消耗功率 Y_3 对喂入压辊转速、动定刀间隙、切碎刀辊转速

的响应面回归模型,对其进行方差分析,模型方差分析表如表 3 所示。

表 3 模型方差分析

Table 3 Model variance analysis							
指标	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
棉秆切碎长度合格率 Y_1	模型	72.62	9	8.07	32.09	<0.000 1	**
	X_1	2.07	1	2.07	8.23	0.024 0	*
	X_2	5.87	1	5.87	23.32	0.001 9	**
	X_3	24.36	1	24.36	96.87	<0.000 1	**
	X_1X_2	0.03	1	0.03	0.11	0.744 5	
	X_1X_3	2.18	1	2.18	8.65	0.021 7	*
	X_2X_3	3.33	1	3.33	13.24	0.008 3	**
	X_1^2	4.54	1	4.54	18.06	0.003 8	**
	X_2^2	21.73	1	21.73	86.39	<0.000 1	**
	X_3^2	10.33	1	10.33	41.06	0.000 4	**
	残差	1.76	7	0.25			
	失拟	0.59	3	0.20	0.67	0.614 3	
	误差	1.17	4	0.29			
	总和	74.38	16				
残膜切碎长度合格率 Y_2	模型	91.37	9	10.15	32.04	<0.000 1	**
	X_1	3.26	1	3.26	10.30	0.014 9	*
	X_2	5.93	1	5.93	18.73	0.003 4	**
	X_3	74.30	1	74.30	234.49	<0.000 1	**
	X_1X_2	2.19	1	2.19	6.91	0.033 9	*
	X_1X_3	0.13	1	0.13	0.40	0.548 3	
	X_2X_3	1.81	1	1.81	5.71	0.048 2	*
	X_1^2	2.71	1	2.71	8.56	0.022 2	*
	X_2^2	0.58	1	0.58	1.84	0.216 6	
	X_3^2	0.47	1	0.47	1.49	0.261 5	
	残差	2.22	7	0.32			
	失拟	0.04	3	0.01	0.02	0.994 1	
	误差	2.18	4	0.54			
	总和	93.59	16				
消耗功率 Y_3	模型	1.42	9	0.158	44.92	<0.000 1	**
	X_1	0.053	1	0.053	15.06	0.006 1	**
	X_2	0.065	1	0.065	18.47	0.003 6	**
	X_3	0.839	1	0.839	239.04	<0.000 1	**
	X_1X_2	0.000	1	0.000	0.007	0.935 1	
	X_1X_3	0.023	1	0.023	6.41	0.039 1	*
	X_2X_3	0.021	1	0.021	5.99	0.044 2	*
	X_1^2	0.013	1	0.013	3.83	0.091 2	
	X_2^2	0.084	1	0.084	23.86	0.001 8	**
	X_3^2	0.334	1	0.334	95.12	<0.000 1	**
	残差	0.025	7	0.004			
	失拟	0.020	3	0.007	5.66	0.063 6	
	误差	0.005	4	0.001			
	总和	1.44	16				

注: $P\leq 0.01$ 表示极其显著**; $P\leq 0.05$ 表示显著*; $P>0.05$ 表示不显著。

由表 3 可知,棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率回归模型的 P 值均小于 0.000 1,说明模型的上述 3 项指标均显著;失拟项 P 值均大于 0.05,说明失拟项均不显著,回归模型方程拟合效果较好;相关系数 R^2 均大于 0.97,说明建立的模型预测值与试验值吻合程度高,故可用此模型对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率进行分析和优化。通过对试验结果进行回归分析,得到喂入压辊转速、动定刀间隙和切碎刀辊转速对棉秆切碎长度合格率 Y_1 、残膜切碎长度合格率 Y_2 和消耗功率 Y_3 的回归方程分别为:

$$Y_1 = 88.49 - 0.51X_1 - 0.86X_2 + 1.75X_3 - 0.74X_1X_3 + 0.91X_2X_3 - 1.04X_1^2 + 2.27X_2^2 - 1.57X_3^2 \quad (24)$$

$$Y_2 = 89.55 + 0.64X_1 + 0.86X_2 - 3.05X_3 + 0.74X_1X_2 - 0.67X_2X_3 - 0.80X_1^2 \quad (25)$$

$$Y_3 = 1.27 - 0.08X_1 + 0.09X_2 + 0.32X_3 + 0.075X_1X_3 - 0.073X_2X_3 - 0.14X_2^2 + 0.28X_3^2 \quad (26)$$

根据方差分析及式(24)~(26)可得,各因素对棉秆切碎长度合格率显著性的影响顺序依次为切碎刀辊转速、动定刀间隙、喂入压辊转速;对残膜切碎长度合格率显著性影响顺序依次为切碎刀辊转速、动定刀间隙、喂入压辊转速;对消耗功率显著性影响顺序依次为切碎刀辊转速、动定刀间隙、喂入压辊转速。为了直观了解各交互因素对评价指标的影响,运用 Design-Expert 13 软件作出各交互因素对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率的响应曲面分析图,如图 10 所示。

图 10(a)和(e)为动定刀间隙处于中间水平(0.8 mm)时,喂入压辊转速和切碎刀辊转速交互作用对棉秆切碎长度合格率和消耗功率影响的响应面图。喂入压辊转速固定在低水平(20 r/min)时,棉秆切碎长度合格率和消耗功率均随着切碎刀辊转速的加快呈上升趋势,这是因为当切碎刀辊转速提高时单位时间内动刀作用在物料上的次数增多,导致棉秆切碎长度合格率和消耗功率上升;切碎刀辊转速固定在低水平(250 r/min)时,棉秆切碎长度合格率和消耗功率均随着喂入压辊转速的加快呈现下降趋势,这是因为当喂入压辊转速加快时膜杂混合物的喂入流速显著提高,导

致棉秆切碎长度合格率和消耗功率下降。

图 10(c)为切碎刀辊转速处于中间水平(280 r/min)时,喂入压辊转速和动定刀间隙交互作用对残膜切碎长度合格率影响的响应面图。喂入压辊转速和动定刀间隙增大对残膜切碎长度合格率都呈现上升趋势,从图 10(c)中可以得出,动定刀间隙比喂入压辊转速对残膜切碎长度合格率有更显著的作用。

图 10(b)(d)和(f)分别为喂入压辊转速处于中间水平(25 r/min)时,动定刀间隙和切碎刀辊转速交互作用对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率影响的响应面图。动定刀间隙固定在低水平(0.8 mm)时,随着切碎刀辊转速的加快,棉秆切碎长度合格率和消耗功率呈上升趋势,残膜切碎长度合格率呈下降趋势,这是因为当膜杂混合物的喂入流速一定时,切碎刀辊的转速越快膜杂混合物在单位时间内被切削次数越多,导致棉秆切碎长度合格率和消耗功率上升,残膜切碎长度合格率下降;切碎刀辊转速固定在低水平(250 r/min)时,棉秆切碎长度合格率随着动定刀间隙的增大呈下降趋势,残膜切碎长度合格率和消耗功率均随着动定刀间隙的增大呈上升趋势,这是因为当动定刀间隙增大时对膜杂混合物的切削效果减弱,并会有部分未完全粉碎残膜和棉秆从间隙中滑落,降低了棉秆切碎长度合格率。

以棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率最大值和消耗功率最小值为优化目标,以切碎刀辊转速、动定刀间隙、喂入压辊转速为优化对象,应用 Design-Expert 13 软件对建立的线性回归模型进行优化,优化目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 20 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 30 \text{ r/min} \\ 0.4 \text{ mm} \leq x_2 \leq 1.2 \text{ mm} \\ 250 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 310 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

得到机具较优工作参数组合为:喂入压辊转速 24.8 r/min、动定刀间隙 0.4 mm、切碎刀辊转速 256.4 r/min,此时棉秆切碎长度合格率为 90.0%、残膜切碎长度合格率为 90.4%、消耗功率为 0.90 kW。

3.5 试验验证

为验证优化后的试验效果,在乌鲁木齐市中小微创业产业园进行验证试验,考虑到试验的可

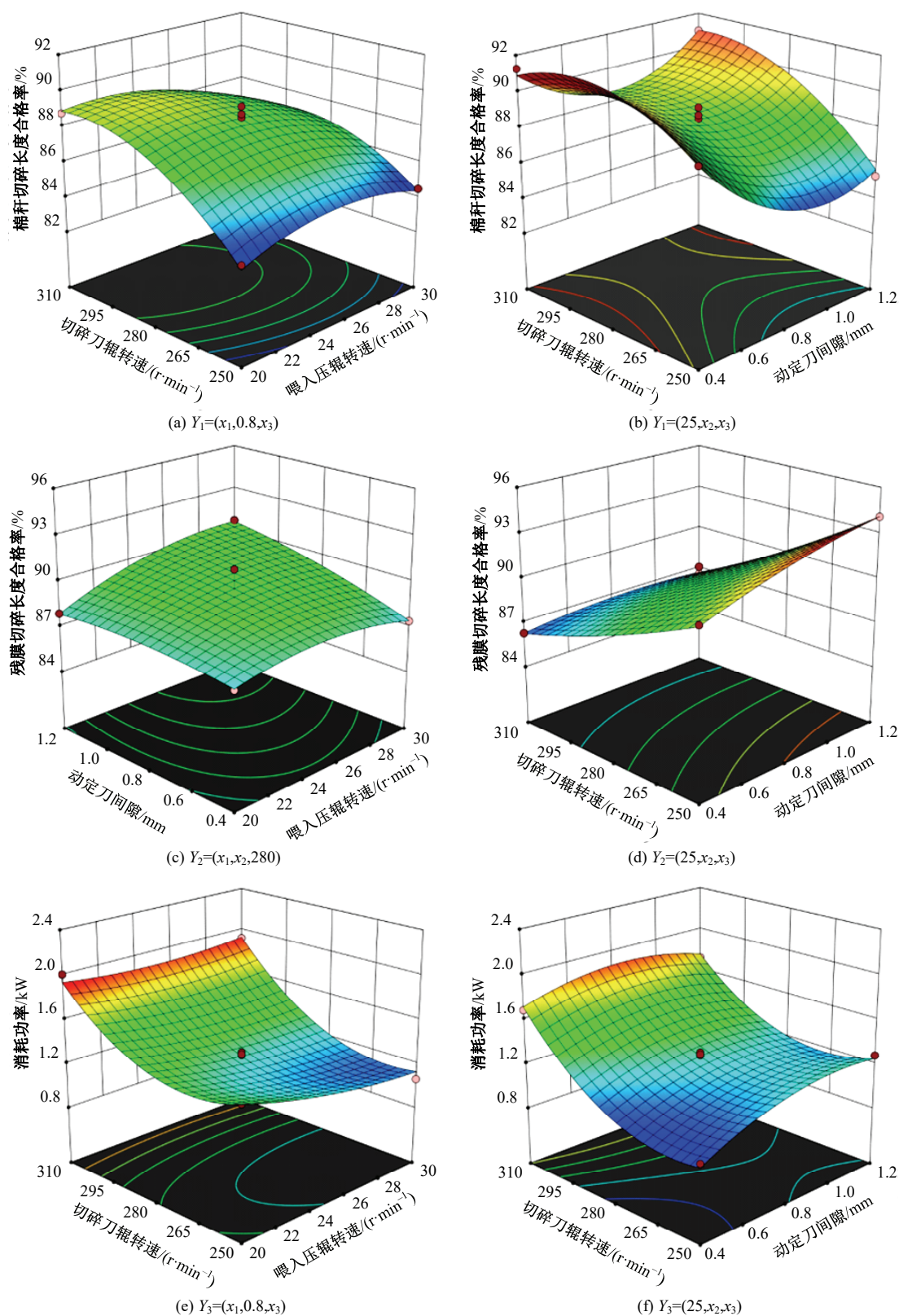


图 10 试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of interaction experiment factors on index

行性,将以上数据进行规整,设置参数为喂入压辊转速 25 r/min、动定刀间隙 0.4 mm、切碎刀辊转速 255 r/min,在此参数作用下进行 3 次重复验证

试验,并取其平均值作为试验的验证值,试验效果如图 11 所示,试验验证结果如表 4 所示。

由表 4 试验验证结果可知,当机具以最优参



图 11 装置作业效果

Fig. 11 Equipment operation effect

表 4 试验验证结果

Table 4 Experimental verification results

试验号	棉秆切碎长度合格 率 $Y_1/\%$	残膜切碎长度合格 率 $Y_2/\%$	消耗功率 Y_3/kW
1	89.94	90.34	0.95
2	90.17	90.54	1.04
3	89.86	90.71	0.92
平均值	89.99	90.53	0.97

数组合作业时,平均棉秆切碎长度合格率为 89.99%、平均残膜切碎长度合格率为 90.53%、平均消耗功率为 0.97 kW,在满足高切碎长度合格率的同时,与传统的切碎装置相比消耗功率较低,机具作业效果可达到设计预期,能够满足残膜和棉秆的切碎作业要求。

4 结 论

(1)针对膜杂混合物呈团簇状易产生喂入堵塞的问题,创新设计了喂入调节式膜杂切碎装置,实现了膜杂混合物的均匀喂入和连续性切碎等功能。对膜杂混合物喂入及切碎作业过程进行力学分析,确定了主要零部件的结构参数和工作参数。

(2)通过单因素试验确定了各因素的合理取值范围,运用 Design-Expert 13 软件,设计了三因素三水平响应面试验,对试验数据进行采集与分析,采用多元拟合得到了各因素对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率的回归方程,对试验结果进行分析,确定了各因素及其交互作用对棉秆切碎长度合格率、残膜切碎长度合格率和消耗功率的影响。

(3)通过多因素试验结果对装置的工作参数进行了优化,当喂入压辊转速为 24.8 r/min、动定刀间隙为 0.4 mm、切碎刀辊转速为 256.4 r/min 时作业效果最佳。以优化后的结果进行试验验证,

结果表明平均棉秆切碎长度合格率、平均残膜切碎长度合格率、平均消耗功率分别为 89.99%、90.53%、0.97 kW,与模型预测值间相对误差值均小于 5%,表明试验验证结果与模型预测结果基本一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王振华,贺怀杰,郑旭荣,等. 新疆典型绿洲棉秆还田对覆膜滴灌棉田残膜分布的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 120-127.
Wang Zhen-hua, He Huai-jie, Zheng Xu-rong, et al. Effect of cotton stalk returning to fields on residual film distribution in cotton fields under mulched drip irrigation in typical oasis area in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 120-127.
- [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. Current problems and counter measures of recycling methods and recycling of residual film in cotton fields in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 1-13.
- [4] 康建明,解臣硕,王小瑜,等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 91-98.
Kang Jian-ming, Xie Chen-shuo, Wang Xiao-yu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 91-98.
- [5] 李俊虹. 机收残膜混合物水洗分离装置的研究[D]. 石河子: 石河子大学机械电气工程学院, 2018.
Li Jun-hong. Study on the water-separation device of residual film mixture collected by machine[D]. Shihezi: School of Mechanical and Electrical Engineering,

- Shihezi University, 2018.
- [6] 徐业山, 张广杰, 王谊, 等. 虫菌复合技术分离棉田残膜回收混合物研究[J]. 应用昆虫学报, 2023, 60(5): 1580-1591.
- Xu Ye-shan, Zhang Guang-jie, Wang Yi, et al. Study on the separation of recycled plastic film residual mixtures from cotton field by the composite technology of insect combined with the decomposing fungus[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2023, 60(5): 1580-1591.
- [7] 杨诚, 刘玉升, 徐晓燕, 等. 白星花金龟幼虫对醇化玉米秸秆取食效果的研究[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(1): 122-127.
- Yang Cheng, Liu Yu-sheng, Xu Xiao-yan, et al. The study on the effect of *Protaetia brevitarsis* Lewis larvae transformation the corn straw[J]. Journal of Environmental Entomology, 2015, 37(1): 122-127.
- [8] Shen X M, Qian S X, Yu Z H. Research on crushing effectiveness of a new type of plastic crusher[C]//International Conference on Mechanics & Mechanical Engineering, Shanghai, China, 2016: 274-281.
- [9] 刘公雨, 马明旭, 刘红林, 等. 剪切式薄膜塑料粉碎机设计[J]. 机械设计与制造, 2015(5): 32-35.
- Liu Gong-yu, Ma Ming-xu, Liu Hong-lin, et al. Design of plastic film crushing machine on shearing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(5): 32-35.
- [10] Gapparov S, Karshiev F. Development chopper device that chops baled rough fodders[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Online, 2020: 1-6.
- [11] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊 1): 108-116.
- Zheng Zhi-qi, He Jin, Li Hong-wen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supl. 1): 108-116.
- [12] Moiceanu G, Voicu P, Paraschiv G, et al. Behaviour of *Miscanthus* at cutting shear with straight knives with different edge angles[J]. Environmental Engineering & Management Journal, 2017, 16(5): 1203-1209.
- [13] Krajnc M, Dolšak B. The influence of drum chipper configuration on the quality of wood chips[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 64: 133-139.
- [14] 张瑞新, 刘煜, 郑群飞, 等. 基于 EDEM 的双齿辊破碎机破碎效率影响因素仿真分析[J]. 金属矿山, 2018(2): 154-159.
- Zhang Rui-xin, Liu Yu, Zheng Qun-fei, et al. Simulation analysis of influencing factors of double-gear roller crusher crushing efficiency based on EDEM[J]. Metal Mine, 2018(2): 154-159.
- [15] 梁荣庆. 多刃齿刀式棉田机收膜杂切碎特性研究[D]. 石河子: 石河子大学机械电气工程学院, 2022.
- Liang Rong-qing. Study on the cutting characteristics of residual film and impurities for machine harvesting in cotton field with multi-edge tooth cutter[D]. Shihezi: School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, 2022.
- [16] Pan F, Hu B, Luo X, et al. Design and testing of a shearing and breaking device for mulch film and cotton stalk mixtures[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(2): 545-555.
- [17] 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 Cheng-lin, Xie Yan-yu, 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.
- [18] 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.
- [19] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [20] 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 Tie-jun, Wang Tie-liang, Cui Hong-guang, 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.
- [21] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267-276.
- Sun Ni-na, Wang Xiao-yan, Li Hong-wen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 267-276.

- [22] 解臣硕. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置理论研究与试验[D]. 泰安: 山东农业大学机械与电子工程学院, 2022.
- Xie Chen-shuo. Research and experiment investigation of tumbler screen type residual film-impurities wind separator screen hole-clearing device[D]. Tai'an: College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, 2022.
- [23] Zhang B, Liang R, Li J, et al. Test and analysis on friction characteristics of major cotton stalk cultivars in Xinjiang[J]. Agriculture, 2022, 12 (7): No. 906.
- [24] Lu C, Zhao C, Meng Z, et al. Straw friction characteristic based on rotary cutting anti-blocking device with slide plate pressing straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(11): 83-89.
- [25] 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: No. 118022.
- [26] 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 Ya-jun, Liao Yi-tao, Liao Qing-xi. 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.
- [27] 李宁. 滚刀式果园枝条粉碎装置的设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学机械电气工程学院, 2022.
- Li Ning. The design and research of the cutter-type orchard branch crushing device[D]. Shihezi: School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, 2022.
- [28] 庞声海, 王乃信. 直刀刃滚刀式切碎器的分析与设计[J]. 农业机械学报, 1983(2): 46-54.
- Pang Sheng-hai, Wang Nai-xin. Analysis and design on the cylinder-type forage cutterhead with straight knife edge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983(2): 46-54.