

机收棉田残膜混合物粉碎揉丝装置设计与试验

谢建华^{1,2} 孟庆河¹ 张佳^{1,3} 刘旺¹ 杜亚坤¹ 李沅泽¹ 石鑫⁴

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 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; 4. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对机收残膜混合物资源化利用困难、现有粉碎与揉丝装置处理的残膜混合物不满足白星花金龟幼虫适口性等问题,设计了一种残膜混合物粉碎揉丝装置,利用粉碎揉丝技术对残膜混合物进行加工处理以满足白星花金龟幼虫的适口性。该装置主要由粉碎装置、输送装置和揉丝装置等组成,通过对残膜混合物粉碎、揉丝装置作业过程进行运动学与动力学分析确定了各零部件的结构参数与工作参数。为了验证残膜混合物粉碎揉丝装置的作业性能,以粉碎辊转速、揉丝辊转速与揉丝辊间隙作为试验因素,残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率、棉秆揉丝率为试验指标进行三因素三水平二次回归响应面试验,建立了回归模型,分析了各因素对残膜混合物粉碎揉丝装置作业性能的影响,并进行了参数优化与试验验证。试验结果表明:影响残膜破碎合格率和棉秆粉碎长度合格率的因素大小顺序为粉碎辊转速、揉丝辊间隙、揉丝辊转速;影响棉秆揉丝率的因素大小顺序为揉丝辊间隙、揉丝辊转速、粉碎辊转速。优化后最优工作参数组合为:粉碎辊转速 13.0 r/min、揉丝辊转速 60.0 r/min、揉丝间隙 1.6 mm。以此参数组合进行试验,得到残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率平均值分别为 90.4%、92.6%、92.2%,与理论优化值相对误差不超过 2.0%,研究结果可为残膜混合物粉碎揉丝装置的设计提供参考。

关键词: 残膜混合物; 粉碎; 揉丝; 对辊式; 尖角接触

中图分类号: S226.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0133-12

OSID:



Design and Test of Crushing and Kneading Device for Machine Harvested Cotton Field Residual Film Mixture

XIE Jianhua^{1,2} MENG Qinghe¹ ZHANG Jia^{1,3} LIU Wang¹ DU Yakun¹ LI Yuanze¹ SHI Xin⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China

4. Research Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: In response to the difficulties in resource utilization of machine-harvested residual film mixtures, and the fact that the residual film mixtures processed by the existing shredding and kneading devices do not satisfy the palatability of larvae of white-starred golden tortoise, a residual film mixture crushing and kneading device was designed, processing of residual film mixtures to meet the palatability of white-starred golden tortoise larvae using crushing and kneading techniques. The device was mainly composed of crushing device, conveying device and silk kneading device, etc. The structural and working parameters of each component were determined through kinematic and dynamic analysis of the operation process of the residual film mixture crushing and silk kneading device. In order to verify the operational performance of the residual film mixture crushing and kneading device, a three-factor, three-level quadratic regression response surface experiment was conducted by using the grinding roller speed, kneading roller speed, and kneading roller gap as experimental factors, and the residual film crushing qualification rate, cotton stem crushing length qualification rate, and cotton stem kneading rate as experimental indicators. A regression model was established to analyze the impact of each factor on the operational performance of the residual film mixture crushing and kneading device, and parameter optimization and experimental verification were carried out. The experimental results showed that the

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-01-03

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B02046、2022B02017)和中央引导地方科技发展专项资金项目(ZYYD2023C08)

作者简介: 谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业固废废弃物回收机械装备研究,E-mail: xjh199032@163.com

main and secondary factors affecting the qualified rate of residual film crushing and the qualified rate of cotton straw crushing length were the speed of the crushing roller, the gap between the kneading rollers, and the speed of the kneading roller. The main and secondary order of factors affecting the cotton straw kneading rate was the gap between kneading rollers, speed of kneading rollers, and speed of crushing rollers. The optimized optimal working parameters were: crushing roller speed of 13.0 r/min, kneading roller speed of 60.0 r/min, kneading gap of 1.6 mm, and the average values of residual film crushing qualification rate, cotton stalk crushing length qualification rate and cotton stalk kneading rate were 90.4%, 92.6% and 92.2%, respectively, which were the same as the theoretical optimization value, with the relative error of no more than 2.0%, the research results can provide reference for the design of residual film mixture crushing and kneading device.

Key words: residual film mixtures; crushing; kneading; roller type; contact with sharp angle

0 引言

随着棉花种植面积逐年增大,地膜总覆盖面积及总使用量逐年增加,致使新疆地区残膜污染越来越严重^[1-2],地膜使用与农业生态环境保护及农业可持续发展间的矛盾日益突出。以秋后残膜回收技术为主的棉田残膜回收机的应用^[3-4],虽在一定程度上缓解了新疆棉田残膜污染问题,但大部分机具回收的残膜裹绕大量棉秆及以土壤为主的散料颗粒,极不利于残膜清理及资源化的利用^[5]。

近年来,昆虫转化农牧业废弃物技术的发展,为解决机收残膜混合物资源化利用问题提供了新思路。白星花金龟幼虫是以动物粪便和腐烂的农作物秸秆为食的腐生蛴螬^[6],拥有“大自然清道夫”的美誉^[7]。研究发现,白星花金龟幼虫对发酵的玉米秸秆^[8-9]、食用菌菌糠^[10]、棉花秸秆^[11]等有机废弃物有较强的转化能力,可利用白星花金龟幼虫取食发酵后的残膜混合物,达到分离残膜混合物的目的。因白星花金龟幼虫口器较小,无法进食未经处理的棉花秸秆,为满足白星花金龟幼虫的适口性,需对发酵前的残膜混合物进行粉碎及揉丝处理。

粉碎揉丝技术作为农业物料生产加工的必要环节^[12-13],可有效减少物料体积,提高物料的均匀性和应用性,被广泛应用于农业工程领域^[14-15]。为提高物料粉碎揉丝质量,相关学者围绕机具结构、粉碎揉丝形式等方面开展了一系列研究。如 SHEN 等^[16]针对单轴塑料粉碎机功耗、振动与噪声问题,提出了一种自动变频降耗的方案,优化了粉碎刀轴及粉碎刀具结构;XUE 等^[17]采用有限元法研究了薄壁球在不同载荷作用下的塑性粉碎行为,对其塑性变形过程产生的后屈服过程进行跟踪和记录,将试验结果与理论分析进行对比,结果表明两者吻合;于志恒等^[18]对 SG-4390 型塑料粉碎装置进行了研究,提出一种变频结构设计方案以用于降低粉碎装置无用功输出,同时优化改进了粉碎刀,提高了粉碎

装置粉碎效率;裴钰等^[19]设计了一种带有凸轮式压缩机构的粉碎装置,采用凸轮机构先对物料挤压粉碎,降低粉碎刀具的使用时间;刘公雨等^[20]设计了一种挤压式薄膜塑料剪切粉碎机,采用高速旋转的粉碎刀对塑料等柔性物料进行剪切;高根树等^[21]设计了一种柔性塑料粉碎机,采用高速旋转钢丝绳对垃圾袋、包装袋等塑性材料进行粉碎;刘鹏等^[22]设计了一种针对玉米秸秆的异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置,捡拾粉碎刀和滑切支撑刀转速存在差异,增加了秸秆流动性;耿端阳等^[23]设计了一种螺旋缺口锯齿型破碎辊,揉丝破碎辊在差速作用下对物料揉搓破碎的同时还通过三角缺口在横向上对物料进行剪切。

针对现有粉碎和揉丝装置处理的残膜混合物不能满足白星花金龟幼虫适口性需求,本文设计一种适用于机收棉田残膜混合物的粉碎及揉丝装置。基于残膜混合物在各装置中的受力和运动分析,进行整机关键结构与传动系统的匹配,分析关键结构与工作参数及其交互作用对机器生产能力与残膜混合物粉碎、秸秆丝化效果的影响,并验证参数优化组合结果及最优参数组合条件下的性能,旨在为膜杂高效分离及资源化利用提供基础,也为膜杂粉碎揉丝技术研究及装置开发提供理论支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

残膜混合物粉碎与揉丝装置结构如图 1 所示,主要由电机 I、电机 II、减速器 I、减速器 II、粉碎装置、输送装置、揉丝装置组成;粉碎装置包括粉碎装置入料口、粉碎辊和粉碎装置下料口,粉碎辊上有等间距安装的粉碎刀,两个粉碎辊上的粉碎刀相互交错排列;揉丝装置包括揉丝装置入料口、揉丝辊和揉丝装置下料口,揉丝辊之间存在间隙,且可通过滑轨、丝杠等滑动组件调节。

1.2 工作原理

机具工作时,电机输出的动力经减速器传递给

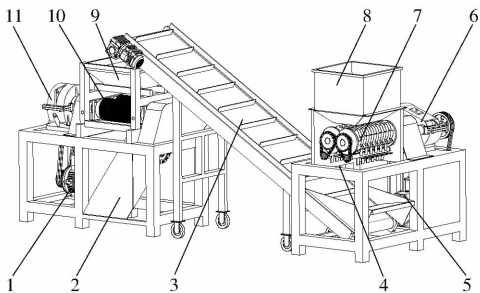


图 1 残膜混合物粉碎及揉丝装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of residual film mixture crushing and kneading machine

1. 电机 I 2. 揉丝装置下料口 3. 输送装置 4. 粉碎装置下料口 5. 电机 II 6. 减速器 I 7. 粉碎装置 8. 粉碎装置入料口 9. 揉丝装置入料口 10. 揉丝装置 11. 减速器 II

粉碎装置,由粉碎装置入料口进入粉碎装置的膜杂混合物,经粉碎刀挤压切碎后,随粉碎刀向下运动,通过粉碎装置下料口落在输送装置上,经输送装置输送到揉丝装置上方,从揉丝装置入料口进入到由两个相对转动的揉丝辊组成的揉丝装置中,由于揉丝间隙小于残膜混合物中棉秆直径,进入揉丝区域的残膜混合物在揉丝辊挤压、揉搓作用下丝化,从揉丝装置下料口排出。

2 关键部件设计

2.1 粉碎装置

粉碎装置包括主动粉碎辊、拨料辊 I、拨料辊链轮 I、拨料辊 II、拨料辊链轮 II、粉碎辊链轮 I、粉碎辊链轮 II、从动粉碎辊、主动齿轮、从动齿轮等,如图 2 所示。主动粉碎辊与从动粉碎辊相对转动,对残膜混合物进行粉碎。参考《农业机械设计手册》^[24],设计主动粉碎辊上 6 个粉碎刀,从动粉碎辊上 7 个粉碎刀,粉碎刀等间距安装,主动粉碎辊和从动粉碎辊上的粉碎刀相互交错安装。针对残膜缠绕粉碎轴的问题,设计了 2 个拨料辊,拨料辊 I 与主动粉碎辊、拨料辊 II 与从动粉碎辊转向相同,用以拨下缠绕在粉碎轴上的残膜。

粉碎过程物料受力示意图如图 3 所示,以垂直于粉碎刀 I 对物料的支持力 F_{N1} 方向为 x 轴,以粉碎刀 I 对物料的支持力 F_{N1} 反方向为 y 轴,以点 O 为坐标原点,建立直角坐标系 xOy ,各力在 x 轴、 y 轴上的合力为

$$\begin{cases} F_x = F_{N2} \sin \tau + f_2 \cos \tau - f_1 - m_1 g \sin \theta = 0 \\ F_y = F_{N2} \cos \tau - f_2 \sin \tau - F_{N1} - m_1 g \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu_1 F_{N1} \\ f_2 = \mu_1 F_{N2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_{N2} ——粉碎刀 II 对物料的支持力, N
 f_1 ——粉碎刀 I 对物料的摩擦力, N

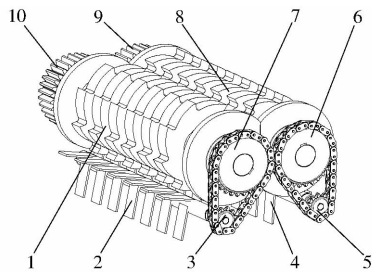


图 2 粉碎装置结构示意图

Fig.2 Structure diagram of crushing device

1. 主动粉碎辊 2. 拨料辊 I 3. 拨料辊链轮 I 4. 拨料辊 II 5. 拨料辊链轮 II 6. 粉碎辊链轮 II 7. 粉碎辊链轮 I 8. 从动粉碎辊 9. 从动齿轮 10. 主动齿轮

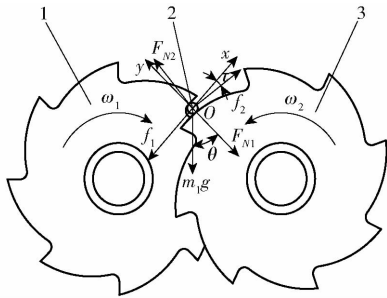


图 3 物料粉碎过程受力分析

Fig.3 Force analysis of cotton stalk crushing process

1. 粉碎刀 I 2. 物料 3. 粉碎刀 II

- f_2 ——粉碎刀 II 对物料的摩擦力, N
 μ_1 ——物料与粉碎刀之间的摩擦因数
 m_1 ——物料质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 τ ——粉碎刀 II 对物料的摩擦力与 x 轴夹角, ($^\circ$)
 θ ——粉碎刀 I 对物料的支持力与竖直方向夹角, ($^\circ$)

将式(2)代入式(1)求解可得

$$\begin{cases} F_{N1} = \frac{(m_1 g \sin \theta - \mu_1 m_1 g \cos \theta) (\cos \tau - \mu_1 \sin \tau)}{(1 + \mu_1^2) \sin \tau} - m_1 g \cos \theta \\ F_{N2} = \frac{m_1 g \sin \theta - \mu_1 m_1 g \cos \theta}{(1 + \mu_1^2) \sin \tau} \end{cases} \quad (3)$$

物料受力情况直接影响物料粉碎质量,当粉碎刀 I 和粉碎刀 II 材料确定后,粉碎刀 I 与物料之间的摩擦因数和粉碎刀 II 与物料之间的摩擦因数为定值。在粉碎刀 I、物料和粉碎刀 II 发生接触时,随着粉碎刀 I 和粉碎刀 II 的转动,粉碎刀 I 对物料的支持力与竖直方向的夹角 θ 在不断减小,由式(3)可知,当粉碎刀 I 对物料的支持力与竖直方向的夹角 θ 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 区间内不断减小时,粉碎刀 I 对物料的支持力和粉碎刀 II 对物料的支持力均随之增大。

粉碎刀Ⅰ对物料的支持力和粉碎刀Ⅱ对物料的支持力越大,越有利于物料粉碎,从而提升物料的粉碎质量。本文设计粉碎刀直径为 260 mm,设计粉碎刀宽为 40 mm。

针对残膜静力吸附粉碎轴的问题,在粉碎轴的下方附加拨料辊,如图 4a 所示,强制将吸附在粉碎轴上的残膜拨下。如图 4b 所示,拨料辊Ⅰ与主动粉碎辊、拨料辊Ⅱ与从动粉碎辊转向相同,用以拨下吸附在粉碎轴上的残膜。根据粉碎轴和粉碎刀的结构尺寸确定拨料齿旋转半径 $R = 100\text{ mm}$ 。

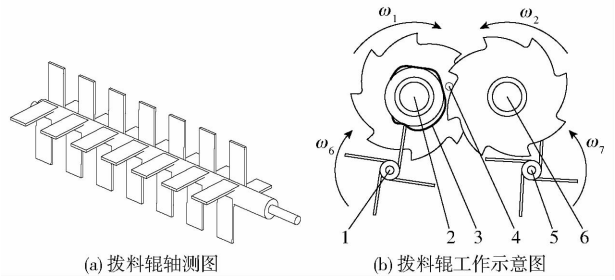


图 4 拨料辊及拨齿分布

Fig. 4 Distribution of feeding rollers and teeth

1. 拨料辊Ⅰ 2. 主动粉碎辊 3. 残膜 4. 棉秆 5. 拨料辊Ⅱ
6. 从动粉碎辊

2.2 输送装置

皮带输送机主要包括输送带、电动机、减速器、张紧装置等。合理的输送倾角对输送器的输送能力影响明显,输送倾角过大会导致物料输送能力下降,不能满足额定输送量,输送倾角过小则会导致输送带过长,影响输送效率。

输送机输送量 Q 为

$$Q = \frac{1\,800\rho_1 H_1 B_1 v_1 t_q}{t_s} \tag{4}$$

其中 $t_q = H_1 \cot\gamma$ (5)

- 式中 ρ_1 ——物料堆积密度, t/m^3
 H_1 ——挡板高度,取 0.05 m
 B_1 ——有效带宽,取 0.7 m
 v_1 ——皮带速度, m/s
 t_q ——物料与皮带的理论接触长度, m
 t_s ——挡板间距, m
 γ ——输送倾角, $(^\circ)$

联立式(4)与式(5)有

$$Q = \frac{1\,800\rho_1 H_1^2 B_1 v_1 \cot\gamma}{t_s} \tag{6}$$

根据《运输机械选型设计手册》^[25]及 0.8 t/h 的生产条件,确定 2 个滚筒的中心距离为 3 200 mm,输送带周长为 6 770 mm,物料堆积密度 ρ_1 为 0.1 t/m^3 ,初定输送器的输送倾角为 30° ,将数据代入式(6),可得出输送器的皮带速度为 0.44 m/s ,即输送器的

输送倾角为 30° 时,皮带速度大于 0.44 m/s ,输送器就可满足 0.8 t/h 的生产要求。

驱动功率计算式为

$$P = \frac{F_w v_1}{1\,000\eta_1} \tag{7}$$

其中 $F_w = C_1 F_H + F_{St}$ (8)

$$F_H = f_H g \sqrt{H_2^2 + L_1^2} \left[q_1 + q_2 + \frac{(2q_B + q_C)L_1}{\sqrt{H_2^2 + L_1^2}} \right] \tag{9}$$

$$F_{St} = g q_C H_2 \tag{10}$$

$$q_C = \frac{Q}{3.6v_1} \tag{11}$$

式中 P ——驱动功率, kW

F_w ——传动滚筒圆周力, N

η_1 ——传动装置总效率

C_1 ——附加阻力系数

F_H ——传动滚筒主要阻力, N

F_{St} ——传动滚筒提升阻力, N

f_H ——模拟摩擦因数

H_2 ——输送机提升高度,取 2 m

L_1 ——输送机水平投影长度,取 3 m

q_1 ——上托辊转动部分单位长度质量,取 7 kg/m

q_2 ——下托辊转动部分单位长度质量,取 6 kg/m

q_B ——输送带单位长度质量, kg/m

q_C ——物料单位长度质量, kg/m

将式(11)代入式(10)可得

$$F_{St} = \frac{gQH_2}{3.6v_1} \tag{12}$$

将式(11)代入式(9)可得

$$F_H = f_H g (q_1 + q_2) \sqrt{H_2^2 + L_1^2} + f_H g L_1 \left(2q_B + \frac{Q}{3.6v_1} \right) \tag{13}$$

将式(12)与式(13)代入式(8)可得

$$F_w = C_1 f_H g (q_1 + q_2) \sqrt{H_2^2 + L_1^2} + C_1 f_H g L_1 \left(2q_B + \frac{Q}{3.6v_1} \right) + \frac{gQH_2}{3.6v_1} \tag{14}$$

参考《运输机械选型设计手册》,输送带 q_B 为 17.133 kg/m ,输送带向上输送时 η_1 取 0.7~0.9,本文选取传动装置总效率 η_1 为 0.75,附加阻力系数 C_1 为 9,模拟摩擦因数 f_H 为 0.03,重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 ,皮带速度为 1 m/s ,上托辊转动部分单位长度质量 q_1 为 7 kg/m ,下托辊转动部分单位长度质量 q_2 为 6 kg/m ,将上述数据代入到式(7)与式(14)可得驱动功率 P 为 0.547 kW ,结合上述计算和生产实践,选取输送机电动机功率为 0.75 kW 。

为提高输送带输送效率^[26],皮带输送机选用带挡板的输送带,挡板间距为 300 mm。如图 5 所示,当物料在输送带上以速度 v_1 匀速向后上方运动时,可得出物料匀速运动时受力平衡方程为

$$\begin{cases} m_2 g \cos \beta_0 - F_{N3} - F_{N4} \cos(\alpha_1 + \beta_0) = 0 \\ F_{N4} \sin(\alpha_1 + \beta_0) - m_2 g \sin \beta_0 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中 m_2 ——输送带上挡板位置物料质量,kg
 α_1 ——挡板对物料的支持力与竖直方向夹角, (°)
 β_0 ——输送带对物料的支持力与竖直方向夹角, (°)
 F_{N3} ——输送带对物料的支持力, N
 F_{N4} ——挡板对物料的支持力, N

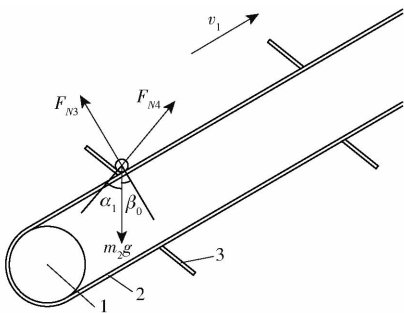


图 5 输送带物料受力分析

Fig. 5 Force analysis of conveyor belt materials

1. 滚筒 2. 输送带 3. 挡板

综合上述受力平衡方程式,可以得出 F_{N3} 、 F_{N4} 的计算式为

$$\begin{cases} F_{N3} = m_2 g \cos \beta_0 - \frac{m_2 g \sin \beta_0}{\tan(\alpha_1 + \beta_0)} \\ F_{N4} = \frac{m_2 g \sin \beta_0}{\sin(\alpha_1 + \beta_0)} \end{cases} \quad (16)$$

挡板与输送带形成的夹角应在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 之间^[27],如果夹角过小,会出现拥堵现象,输送器的输送能力也会下降,如果夹角过大,部分物料则会从挡板处滑下。本文中输送带上的物料是残膜和棉秆混合物,为散状物料,重量较轻,挡板与输送带 90° 夹角即可满足作业要求,机具作业时输送带倾斜角度为 30° ,则挡板对物料的支持力与竖直方向的夹角 α_1 为 60° ,输送带对物料的支持力与竖直方向的夹角 β_0 为 30° 。

2.3 揉丝装置

揉丝装置是残膜混合物粉碎揉丝装置的重要组成部分,由 2 个转向相反的揉丝辊组成。粉碎装置切碎的物料经输送装置输送到揉丝装置中,由于揉丝间隙远小于棉秆直径,当两个揉丝辊呈一定间隙并排做匀速、反向旋转时,可以起到将棉秆送入挤压、揉搓丝化的效果。

2.3.1 揉丝辊接触面纹理分析

本文选择 2 种接触面不同的揉丝辊,分别为圆弧接触揉丝辊和尖角接触揉丝辊,如图 6 所示,用以对比并提升揉丝装置工作性能,两种揉丝辊轮廓尺寸相同,可直接替换安装。

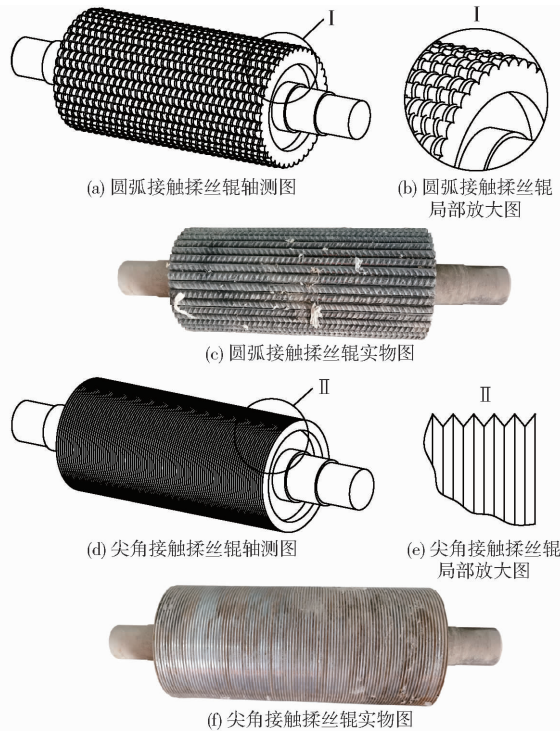


图 6 揉丝辊结构图与实物图

Fig. 6 Structure diagrams of kneading roller and physical drawings

受加工工艺限制以及材料表面硬度要求,圆弧接触揉丝辊是在圆柱辊表面焊接一圈钢筋,结构和细节如图 6a、6b 所示,借鉴国内外揉丝破碎辊设计经验^[28-29],确定揉丝辊上有 40 个凸面,为使揉丝辊能更好地达到挤压和揉搓丝化的作用,相邻两个钢筋方向相反。

圆弧接触揉丝辊的接触方式可分为凸面对凸面与凸面对凹面 2 种,各组合具体的揉丝分析效果如图 7 所示。不同组合方式可以达到不同的揉丝效果:凸面对凸面,挤压作用强,揉搓效果较弱,有效揉丝区域小;凸面对凹面,主要是挤压和揉搓,伴随着一定的剪切效果,适合有一定韧性的物料,有效揉丝区域大。

对图 7b 中物料进行受力平衡分析,可得出

$$\begin{cases} F_{b1} \sin \beta_2 + F_{b2} \sin \beta_1 - f_{b1} \cos \beta_2 - f_{b2} \cos \beta_1 - G_b = 0 \\ F_{b1} \cos \beta_2 + f_{b1} \sin \beta_2 - F_{b2} \cos \beta_1 - f_{b2} \sin \beta_1 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} f_{b1} = \mu_2 F_{b1} \\ f_{b2} = \mu_2 F_{b2} \end{cases} \quad (18)$$

式中 F_{b1} ——凸面对物料的支持力, N

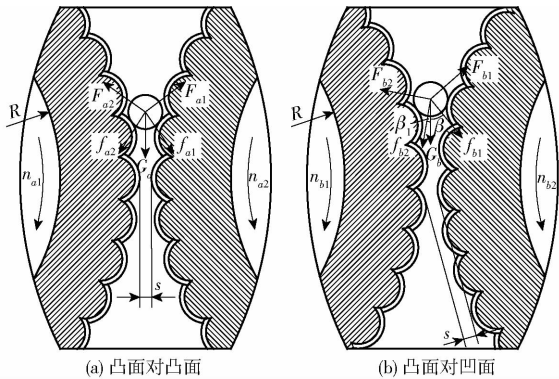


图 7 对辊排布方式对物料揉搓效果影响力学分析

Fig. 7 Mechanical analysis of influence of roller arrangement on rubbing effect of cotton stalks

F_{b2} ——凹面对物料的支持力, N
 G_b ——物料所受重力, N
 f_{b1} ——凸面对物料的摩擦力, N
 f_{b2} ——凹面对物料的摩擦力, N
 μ_2 ——物料与揉丝辊之间的摩擦因数
 β_1 ——凹面对物料的摩擦力与竖直方向夹角, ($^\circ$)
 β_2 ——凸面对物料的摩擦力与竖直方向夹角, ($^\circ$)

将式(18)代入式(17)可得

$$\begin{cases} F_{b1} = \frac{F_{b2}(\cos\beta_1 + \mu_2\sin\beta_1)}{\cos\beta_2 + \mu_2\sin\beta_2} \\ F_{b2} = \frac{F_{b1}(\mu_2\cos\beta_2 - \sin\beta_2) + G_b}{\sin\beta_1 - \mu_2\cos\beta_1} \end{cases} \quad (19)$$

对式(19)求解可得

$$\begin{cases} F_{b1} = \frac{G_b(\cos\beta_1 + \mu_2\sin\beta_1)}{(\cos\beta_2 + \mu_2\sin\beta_2)(\sin\beta_1 - \mu_2\cos\beta_1)} + \frac{G_b}{\sin\beta_2 - \mu_2\cos\beta_2} \\ F_{b2} = \frac{G_b}{\sin\beta_1 - \mu_2\cos\beta_1} - \frac{G_b(\cos\beta_2 + \mu_2\sin\beta_2)}{(\mu_2\cos\beta_2 - \sin\beta_2)(\cos\beta_1 + \mu_2\sin\beta_1)} \end{cases} \quad (20)$$

已知单位体积物料所受重力为定值,当揉丝辊材料确定后,物料与揉丝辊之间的摩擦因数为定值,从式(20)可知,影响凸面对物料的支持力以及凹面对物料的支持力的因素主要为凹面对物料的摩擦力与竖直方向的夹角以及凸面对物料的摩擦力与竖直方向的夹角,随着揉丝辊的转动,两个夹角逐渐减小,揉丝辊对物料的支持力逐渐增大,揉丝辊对物料的揉丝效果越来越好。

考虑到常规揉丝辊齿虽然对玉米等秸秆揉丝效果较好,但对棉秆的揉丝效果较差,另一种揉丝辊辊齿设计成尖角型,尖角接触揉丝辊结构和细节如图 6d、6e 所示,两个揉丝辊组合使用,能够很好地对棉秆进行挤压和揉丝。

尖角接触揉丝辊是直接圆柱面上用车刀加

工出三角形辊齿,辊齿参数如图 8a 所示,揉丝辊转向如图 8b 所示,考虑对残膜混合物中棉秆的挤压和剪切效果,根据国内外揉丝破碎辊设计经验^[30-31],本文尖角高定为 $\xi = 3\text{ mm}$, 宽为 $l_1 = 5\text{ mm}$,揉丝辊总长为 $L = 500\text{ mm}$,齿数 $Q = l_1/L = 100$,揉丝间隙为 s 。

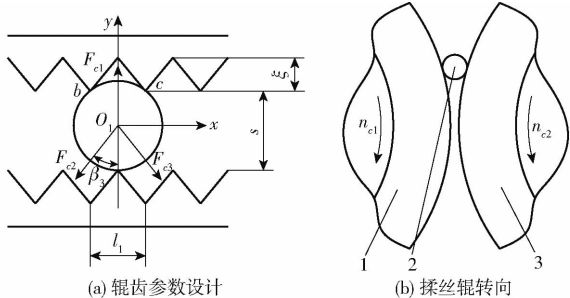


图 8 尖角接触揉丝辊齿参数示意图

Fig. 8 Parameter designs of kneading roller teeth with sharp angle contact

1. 尖角接触揉丝辊 I 2. 物料 3. 尖角接触揉丝辊 II

如图 8 所示,以水平方向为 x 轴,以竖直方向为 y 轴,以点 O_1 为坐标原点,建立直角坐标系 xO_1y ,得出物料受力平衡公式为

$$\begin{cases} F_x = F_{c2}\sin\beta_3 - F_{c3}\sin\beta_3 = 0 \\ F_y = F_{c1} - F_{c2}\cos\beta_3 - F_{c3}\cos\beta_3 = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中 F_{c1} ——揉丝辊 II 对物料的支持力, N
 F_{c2} ——在点 b 揉丝辊 I 对物料的支持力, N
 F_{c3} ——在点 c 揉丝辊 I 对物料的支持力, N
 β_3 ——在点 b 揉丝辊 I 对物料的支持力与竖直方向夹角, ($^\circ$)

对式(21)求解可得

$$\begin{cases} F_{c1} = 2F_{c2}\cos\beta_3 \\ F_{c2} = F_{c3} \end{cases} \quad (22)$$

对物料在两种揉丝辊中的受力进行对比可知,圆弧接触揉丝辊主要是通过对物料挤压来完成揉丝,挤压作用强,剪切作用弱,对物料的揉搓丝化效果一般;尖角接触揉丝辊通过对物料剪切、挤压来完成揉丝,剪切和挤压作用强,进入揉丝区域的物料首先会被揉丝辊齿剪切,随着物料在揉丝区域逐渐向下,揉丝间隙慢慢变小,剪切后的物料在被揉丝辊挤压揉搓后离开揉丝区域,对比可知尖角接触揉丝辊揉丝效果更好。

圆弧接触揉丝辊与物料的接触分析如图 9a 所示,对物料进行接触分析,可知

$$\begin{cases} a_1 = \sqrt{2R_1d_1} \\ \sigma_1 = \frac{E_1d_1}{2a_1} \\ S_1 = 2L_2a_1 \end{cases} \quad (23)$$

圆弧接触揉丝辊对物料的法向作用力为

$$F_1 = \sigma_1 S_1 \quad (24)$$

式中 a_1 ——物料接触半径, m

R_1 ——凸面半径, m

d_1 ——物料压入深度, m

σ_1 ——物料所受应力, Pa

E_1 ——弹性模量, Pa

S_1 ——圆弧接触揉丝辊与物料接触面积, m^2

L_2 ——物料长度, m

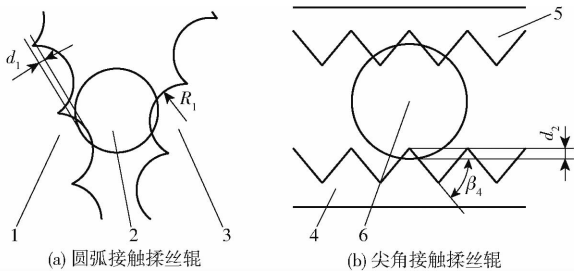


图 9 揉丝辊接触分析

Fig. 9 Contact analysis of kneading rolls

1. 圆弧接触揉丝辊 I 2、6. 物料 3. 圆弧接触揉丝辊 II 4. 尖角接触揉丝辊 I 5. 尖角接触揉丝辊 II

将式(23)代入式(24)可得

$$F_1 = E_1 L_2 d_1 \quad (25)$$

由式(25)可知,圆弧接触揉丝辊对物料的法向作用力与物料压入深度成正比。

尖角接触揉丝辊与物料的接触如图 9b 所示,物料压入深度为

$$d_2 = a_2 \tan \beta_4 \quad (26)$$

物料所受的应变为

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \tan \beta_4 \quad (27)$$

物料所受的应力为

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon \quad (28)$$

式中 a_2 ——物料接触半径, m

E_2 ——弹性模量, Pa

β_4 ——辊齿边与水平方向夹角, ($^\circ$)

将式(27)代入式(28)可得

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} E_2 \tan \beta_4 \quad (29)$$

由式(29)可知,物料所受的应力与物料的压入深度无关,尖角接触揉丝辊法向作用力为

$$F_2 = \frac{\pi E_2 d_2^2}{2 \tan \beta_4} \quad (30)$$

可以看出,尖角接触揉丝辊法向作用力与物料压入深度的平方成正比。

对物料在两种揉丝辊中的接触进行对比可知,受加工工艺的限制,圆弧接触揉丝辊表面焊接钢筋的尺寸相对较大,导致圆弧接触揉丝辊不能很好地

对物料进行挤压,揉丝效果一般;尖角接触揉丝辊则是直接在圆柱面上用车刀加工出三角形辊齿,辊齿的尺寸相对物料小很多,导致尖角接触揉丝辊能较好地对物料进行挤压剪切、揉搓丝化,故本文选择尖角接触揉丝辊。

2.3.2 揉丝辊直径的确定

采用揉丝辊对棉秆进行揉搓丝化时,受残膜外廓尺寸较大及延展性较好等因素影响,部分残膜易缠绕揉丝辊。为避免揉丝辊被残膜缠绕以及确定揉丝辊直径,分别对残膜及其单元体与揉丝辊之间的力学特性进行分析,获取揉丝辊缠绕条件。忽略揉丝辊结构特征及残膜结构特征,假设揉丝辊为光辊,简化后的残膜及其单元体受力特性示意图如图 10 所示。

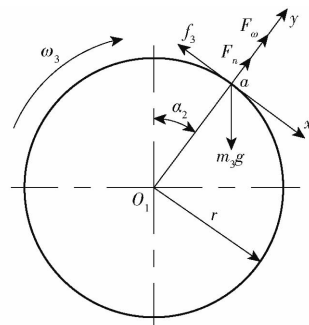


图 10 残膜及其单元体受力特性示意图

Fig. 10 Schematic of residual film and its unit body stress characteristics

在图 10 中揉丝辊以角速度 ω_3 旋转时,作用于残膜的力主要有摩擦力 f_3 、支撑力 F_n 、离心力 F_ω 及其自身重力 m_3g 等。在瞬时时间 t 时,揉丝辊转动角度为 α_2 ,此时残膜处于揉丝辊表面点 a 处,对点 a 处残膜与揉丝辊间受力特性分析, x 轴与 y 轴上的力平衡方程为

$$\begin{cases} m_3 g \sin \alpha_2 = f_3 \\ F_n + F_\omega = m_3 g \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (31)$$

残膜与揉丝辊表面间摩擦力 f_3 及揉丝辊作用于残膜的离心力 F_ω 为

$$\begin{cases} f_3 = \mu_c F_n \\ F_\omega = m_3 r \omega_3^2 \end{cases} \quad (32)$$

式中 m_3 ——残膜质量, kg

μ_c ——残膜与揉丝辊表面间的摩擦因数

r ——揉丝辊半径, m

由式(31)可知,为避免残膜缠绕揉丝辊,需克服的最小外作用力应为残膜与揉丝辊表面间摩擦力 f_3 ,即

$$f_3 \leq m_3 g \sin \alpha_2 \quad (33)$$

将式(31)中 y 轴力平衡表达式与式(32)代入式(33)中,可得

$$\frac{\omega_3^2 r}{g} \geq \cos \alpha_2 - \frac{\sin \alpha_2}{\mu_c}$$

(34)

由图 11 可知

$$\cos \alpha_3 = \frac{D + s}{D + d}$$

(35)

式中 α_3 ——压力角, (°)
 D ——揉丝辊直径, mm
 d ——棉秆直径, mm

由式 (34) 可知, 在残膜与揉丝辊间摩擦因数 μ_c 一定时, 残膜与揉丝辊是否发生缠绕与揉丝辊半径 r 及角速度 ω_3 有关。另外, 随着揉丝辊半径 r 及角速度 ω_3 不断增加, 残膜随揉丝辊转角 α_2 也不断增加, 易造成残膜与揉丝辊缠绕。确定揉丝辊直径 D 为 220 mm。

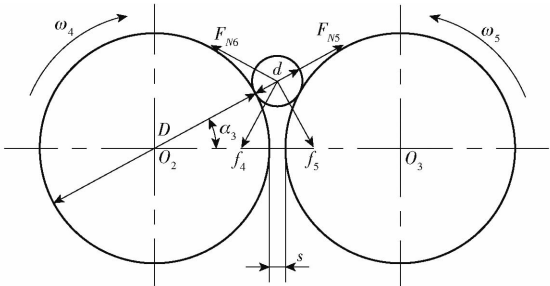


图 11 物料在揉丝区域的受力分析

Fig. 11 Force analysis of cotton stalk in rolling area

2.3.3 压力角确定

为了便于分析计算, 将物料看作对称的几何体, 物料中心连线与水平线所呈的角度称为压力角 α_3 。如图 11 所示, 在工作过程中, 两个揉丝辊产生的正压力 F_{N5} 、 F_{N6} 都作用在物料上, 将物料所受力分别分解为水平分力和垂直分力。确保揉丝辊能将物料扎入揉丝区的条件为

$$\begin{cases} F_{N5} \sin \alpha_3 + F_{N6} \sin \alpha_3 \leq f_4 \cos \alpha_3 + f_5 \cos \alpha_3 \\ f_4 = f_5 = \mu_2 F_{N5} = \mu_2 F_{N6} \\ \mu_2 = \tan \varphi \end{cases}$$

(36)

则

$$\alpha_3 \leq \varphi$$

(37)

式中 φ ——物料与揉丝辊之间摩擦角, (°)
 f_4 ——主揉丝辊对物料摩擦力, N
 f_5 ——副揉丝辊对物料摩擦力, N
 F_{N5} ——主揉丝辊对物料的支持力, N
 F_{N6} ——副揉丝辊对物料的支持力, N

可得: 压力角应小于等于摩擦角。

当揉丝辊揉丝残膜混合物时, 一般摩擦因数为 0.33 ~ 0.36; 摩擦角 φ 为 18° ~ 20°, 则揉丝辊最大压力角为 18°。

由前期试验确定揉丝辊间隙 s 为 1 ~ 3 mm, 残膜混合物中棉秆平均直径为 7.98 mm, 代入式 (35) 可求出啮合角 α_3 为 12.00° ~ 14.21°, 满足压力角小

于摩擦角的要求。

3 试验

3.1 试验条件

试验在石河子市华都物流园新疆优厚普农业机械有限公司厂房内进行, 供试物料为 2022 年残膜回收机在石河子大学教学试验场回收的膜杂混合物。随机抽样测定膜杂混合物中棉秆含水率在 15.64% ~ 20.32% 之间, 选取棉秆含水率在 16% ~ 18% 范围内的膜杂混合物作为试验材料。试验仪器设备包括精度 0.001 g 的电子天平、游标卡尺、塞尺、卷尺等。

3.2 试验因素

应用 Design-Expert 软件, 选择三因素三水平响应面试验设计方法。根据前期预试验, 结合残膜混合物粉碎揉丝装置的结构设计及工作原理, 选取影响作业性能的 3 个主要工作参数: 粉碎辊转速、揉丝辊转速和揉丝辊间隙作为试验因素。

粉碎辊与揉丝辊的转速通过带变频器的电机控制。粉碎辊转速对物料的破碎有直接影响, 粉碎辊转速过高会使物料粉碎不充分, 过低会导致物料中的残膜过小, 不利于后续的资源化利用, 根据前期预试验, 选取粉碎辊转速分别为 10、15、20 r/min; 揉丝辊转速对物料的揉丝有直接影响, 揉丝辊转速过高会导致物料揉丝不彻底, 过低会使效率降低, 试验选取揉丝辊转速分别为 50、60、70 r/min; 揉丝辊间隙可通过滑轨、丝杠等滑动组件调节, 揉丝辊间隙过大会降低揉丝效果, 试验选取揉丝辊间隙分别为 1、2、3 mm。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Test factors and codes

编码	因素		
	粉碎辊转速	揉丝辊转速	揉丝辊间隙
	$x_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$x_2 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	x_3 / mm
-1	10	50	1
0	15	60	2
1	20	70	3

3.3 试验指标

试验参考 GB/T 41709—2022《碳纤维增强塑料粉碎料尺寸和长度比的测定》与 NY/T 509—2015《秸秆揉丝机 质量评价技术规范》, 对残膜混合物粉碎揉丝装置进行性能检测试验, 结合样机工作原理确定残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率作为试验指标。在出料口抽取试验样本, 每组重复抽取的试验样本容量均为 3 个, 每个样本质量为 (400 ± 20) g。对样本中残膜及棉秆分拣称量, 为了满足白星花金龟幼虫饲喂的要求, 棉秆长度小

于等于 50 mm;为满足粉碎后残膜水洗造粒的要求,膜片长度大于等于 50 mm,故求取最大外廓长度大于等于 50 mm 残膜质量与残膜取样总质量 M_1 比值,长度小于等于 50 mm 的棉秆质量 M_4 与棉秆取样总质量 M_3 比值,揉丝棉秆总质量 M_5 与棉秆取样总质量 M_3 比值。残膜破碎合格率 Y_1 、棉秆粉碎长度合格率 Y_2 和棉秆揉丝率 Y_3 计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{M_4}{M_3} \times 100\% \\ Y_3 = \frac{M_5}{M_3} \times 100\% \end{cases} \quad (38)$$

式中 M_2 ——最大外廓长度小于 50 mm 残膜质量,g
试验过程及试验后的物料如图 12 所示。

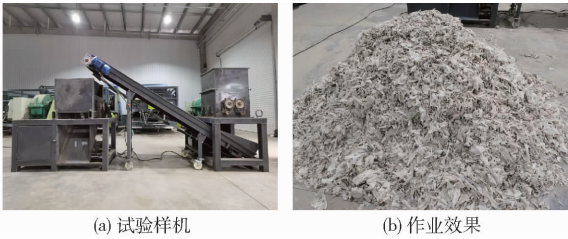


图 12 台架试验
Fig. 12 Bench tests

3.4 结果与分析

残膜破碎合格率 Y_1 、棉秆粉碎长度合格率 Y_2 、棉秆揉丝率 Y_3 试验结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 试验方案与结果
Tab. 2 Test plan and result

试验 序号	因素			残膜破碎	棉秆粉碎	棉秆揉丝
	X_1	X_2	X_3	合格率 $Y_1/\%$	长度合格 率 $Y_2/\%$	率 $Y_3/\%$
1	1	-1	0	83.07	87.27	89.57
2	0	0	0	92.13	92.91	92.46
3	0	-1	-1	85.27	90.05	93.38
4	-1	-1	0	85.89	94.75	88.62
5	0	1	-1	85.83	90.53	93.49
6	0	0	0	91.24	92.62	92.33
7	0	0	0	91.82	92.78	92.26
8	-1	0	-1	86.69	93.98	94.24
9	1	0	1	84.33	87.16	87.18
10	1	0	-1	83.98	86.52	94.21
11	0	-1	1	83.82	90.57	86.24
12	-1	1	0	84.28	94.61	88.61
13	0	0	0	91.69	93.09	92.17
14	1	1	0	83.79	87.11	88.43
15	0	0	0	91.56	93.48	91.79
16	0	1	1	84.64	90.76	85.68
17	-1	0	1	83.85	94.71	86.78

3.4.1 方差分析

利用 Design-Expert 软件对回归模型进行方差分析和显著性检验,结果如表 3 所示。由表 3 可知,粉碎辊转速 X_1 对 Y_1 和 Y_2 均有极显著影响 ($P <$

表 3 回归模型方差分析
Tab.3 Regression model analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
残膜破碎合格率 Y_1	模型	188.24	9	20.92	119.75	<0.000 1 **
	X_1	3.84	1	3.84	21.97	0.002 2 **
	X_2	0.03	1	0.03	0.17	0.690 9
	X_3	3.29	1	3.29	18.83	0.003 4 **
	X_1X_2	1.36	1	1.36	7.77	0.027 0 *
	X_1X_3	2.54	1	2.54	14.57	0.006 6 **
	X_2X_3	0.02	1	0.02	0.10	0.764 8
	X_1^2	60.93	1	60.93	348.84	<0.000 1 **
	X_2^2	55.37	1	55.37	317.05	<0.000 1 **
	X_3^2	42.35	1	42.35	242.48	<0.000 1 **
	残差	1.22	7	0.17		
	失拟项	0.79	3	0.26	2.46	0.202 5
	误差	0.43	4	0.11		
	总和	189.47	16			
棉秆粉碎长度合格率 Y_2	模型	132.28	9	14.7	170.81	<0.000 1 **
	X_1	112.43	1	112.43	1306.63	<0.000 1 **
	X_2	0.02	1	0.02	0.20	0.669 1
	X_3	0.56	1	0.56	6.53	<0.037 8 *
	X_1X_2	0.000 1	1	0.000 1	0.001 2	0.973 8
	X_1X_3	0.002	1	0.002	0.024	0.882 4
	X_2X_3	0.02	1	0.02	0.24	0.636 2
	X_1^2	3.9	1	3.9	45.38	0.000 3 **
	X_2^2	4.89	1	4.89	56.87	0.000 1 **
	X_3^2	8.5	1	8.5	98.74	<0.000 1 **
	残差	0.6	7	0.086		
	失拟项	0.17	3	0.055	0.51	0.698 6
	误差	0.44	4	0.11		
	总和	132.88	16			
棉秆揉丝率 Y_3	模型	137.79	9	15.31	293.8	<0.000 1 **
	X_1	0.16	1	0.16	3.12	0.120 8
	X_2	0.32	1	0.32	6.14	0.042 3 *
	X_3	108.34	1	108.34	2078.99	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.32	1	0.32	6.13	0.042 5 *
	X_1X_3	0.05	1	0.05	0.89	0.377 6
	X_2X_3	0.11	1	0.11	2.15	0.185 7
	X_1^2	6.52	1	6.52	125.19	<0.000 1 **
	X_2^2	19.46	1	19.46	373.40	<0.000 1 **
	X_3^2	0.53	1	0.53	10.17	0.015 3 *
	残差	0.36	7	0.05		
	失拟项	0.11	3	0.04	0.56	0.67
	误差	0.26	4	0.06		
	总和	138.16	16			

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

0.01), 揉丝辊转速 X_2 对 Y_3 有显著影响 ($P < 0.05$), 揉丝辊间隙 X_3 对 Y_1 和 Y_3 有极显著影响 ($P < 0.01$)、对 Y_2 有显著影响 ($P < 0.05$); 各因素对残膜破碎合格率 和 棉秆粉碎长度合格率的影响主次顺序为粉碎辊转速、揉丝辊间隙、揉丝辊转速, 对棉秆揉丝率的影响主次顺序为揉丝辊间隙、揉丝辊转速、粉碎辊转速。粉碎辊转速和揉丝辊转速交互作用 ($X_1 X_2$) 对 Y_1 和 Y_3 有显著影响 ($P < 0.05$); 粉碎辊转速和揉丝辊间隙交互作用 ($X_1 X_3$) 对 Y_1 有极显著影响 ($P < 0.01$)。

通过对试验结果进行回归分析, 得到粉碎辊转速、揉丝辊转速和揉丝辊间隙对揉丝辊残膜破碎合格率 Y_1 、棉秆粉碎长度合格率 Y_2 、棉秆揉丝率 Y_3 的

回归方程分别为

$$Y_1 = 91.69 - 0.69X_1 + 0.06X_2 - 0.64X_3 + 0.58X_1X_2 + 0.80X_1X_3 + 0.07X_2X_3 - 3.80X_1^2 - 3.63X_2^2 - 3.17X_3^2 \quad (39)$$

$$Y_2 = 92.98 - 3.75X_1 + 0.05X_2 + 0.27X_3 - 0.01X_1X_2 - 0.02X_1X_3 - 0.07X_2X_3 - 0.96X_1^2 - 1.08X_2^2 - 1.42X_3^2 \quad (40)$$

$$Y_3 = 92.20 + 0.14X_1 - 0.20X_2 - 3.68X_3 - 0.28X_1X_2 + 0.11X_1X_3 - 0.17X_2X_3 - 1.24X_1^2 - 2.15X_2^2 - 0.35X_3^2 \quad (41)$$

3.4.2 响应曲面分析

各因素及其交互作用对指标影响的响应曲面如图 13 所示。

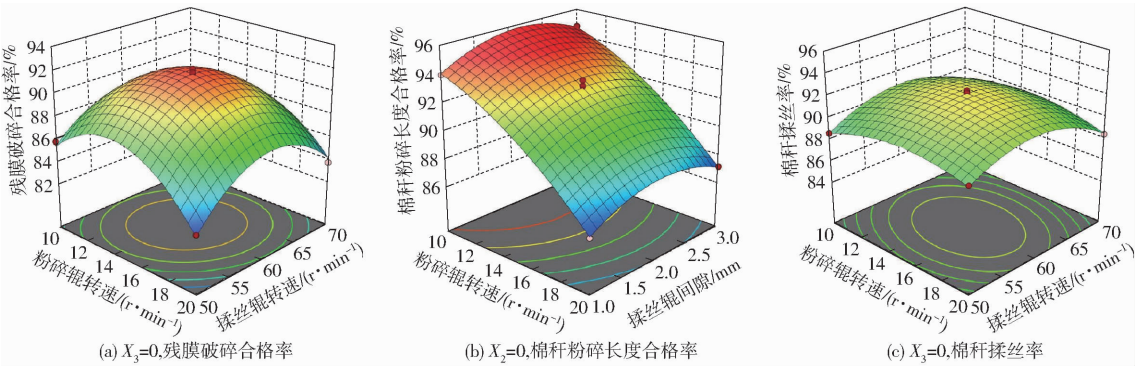


图 13 试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of interaction experiment factors on index

由图 13a 可知, 在试验因素取值范围内, 当 x_1 一定时, Y_1 随 x_2 的增大先增大再减小, 这是因为当揉丝辊转速增加到一定程度后, 部分残膜和棉秆未进行完全破碎处理, 直接从装置中间落下, 从而影响了残膜破碎合格率; 当 x_2 一定时, Y_1 随 x_1 的增大先增大再减小, 这是因为当粉碎辊转速增加到一定程度后, 粉碎辊对残膜的粉碎效果增加, 最大外廓长度小于 50 mm 的残膜数量增大, 降低了残膜破碎合格率。

由图 13b 可知, 在试验因素取值范围内, 当 x_1 一定时, Y_2 随 x_3 的增大先增大再减小, 这是因为粉碎辊转速及揉丝辊间隙的增加提高了单位时间内的物料处理量, 二者的交互作用使棉秆粉碎长度合格率提升, 当揉丝辊间隙增加到一定程度后, 揉丝装置对棉秆的破碎效果下降, 从而影响棉秆粉碎长度合格率; 当 x_3 一定时, Y_2 随 x_1 的增大而减小, 这是因为随着粉碎辊转速的增加, 部分棉秆会在未完全粉碎的情况下直接落下, 从而降低棉秆粉碎长度合格率。

由图 13c 可知, 在试验因素取值范围内, 当 x_1 一定时, Y_3 随 x_2 的增大先增大再减小, 这是因为揉丝装置处理物料的能力是有限的, 当揉丝辊转速增加到一定程度, 单位时间内进入到揉丝区域的棉秆增加, 部分棉秆会在未完全揉丝的情况下离开揉丝区域,

从而影响棉秆揉丝率; 当 x_2 一定时, Y_3 随 x_1 的增大先增大再减小, 这是因为随着粉碎辊转速的增加, 棉秆的粉碎效果增加, 粉碎效果好的棉秆更易揉搓丝化, 当粉碎辊转速增加到一定程度后, 部分未完全破碎的棉秆从装置中间直接落下, 从而影响了棉秆揉丝率。

3.5 参数优化与验证试验

利用 Design-Expert 软件中的多目标优化算法, 以残膜破碎合格率最大值、棉秆粉碎长度合格率最大值和棉秆揉丝率最大值为优化目标, 设置优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \max Y_3 \\ \text{s. t. } \begin{cases} 10 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 20 \text{ r/min} \\ 50 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 70 \text{ r/min} \\ 1 \text{ mm} \leq x_3 \leq 3 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (42)$$

求解得到最优工作参数组合: 粉碎辊转速为 13.0 r/min、揉丝辊转速为 60.0 r/min、揉丝辊间隙为 1.6 mm, 预测残膜破碎合格率为 91.1%、棉秆粉碎长度合格率为 93.9%、棉秆揉丝率为 93.5%。

为了进一步验证数学模型的可靠性与适应性,在相同的试验条件下,对优化结果进行试验验证,分别进行 3 次重复试验,取各次试验结果的平均值为该条件下性能指标实际值。测得残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率平均值为 90.4%、92.6%、92.2%,对比可知,残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率实际值与预测值之间的相对误差均小于 2.0%,说明所建模型及分析结果可信,机器具有较好的工作性能。

4 结论

(1)针对现有残膜回收机回收的残膜混合物难以清理及资源化利用等问题,设计了一种残膜混合物粉碎揉丝装置。通过对残膜混合物粉碎揉丝装置作业过程进行运动学与动力学分析确定了各部件的结构参数与工作参数。

(2)制作了残膜混合物粉碎揉丝装置,以粉碎辊转速、揉丝辊转速与揉丝辊间隙作为试验因素,残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率、棉秆揉丝率为试验指标进行试验,试验结果表明粉碎辊转速对残膜破碎合格率和棉秆粉碎长度合格率的影响比揉丝辊间隙、揉丝辊转速更显著;揉丝辊间隙对棉秆揉丝率的影响比揉丝辊转速、粉碎辊转速更显著。

(3)对建立的线性回归模型进行优化,得到揉丝辊最优工作参数组合:粉碎辊转速为 13.0 r/min、揉丝辊转速为 60.0 r/min、揉丝辊间隙为 1.6 mm,以该工作参数进行试验,得到残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率平均值为 90.4%、92.6%、92.2%,残膜破碎合格率、棉秆粉碎长度合格率和棉秆揉丝率实际值与预测值之间的相对误差不超过 2.0%,模型优化可靠。

参 考 文 献

[1] 王志超,李仙岳,史海滨,等. 农膜残留对砂壤土和砂土水分入渗和蒸发的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 198 – 205.
WANG Zhichao, LI Xian Yue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on infiltration and evaporation for sandy loam and sandy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 198 – 205. (in Chinese)

[2] 祖米来提·吐尔干,林涛,严昌荣,等. 地膜覆盖时间对新疆棉田水热及棉花耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 113 – 120.
ZUMILAITI Tuer gan, LIN Tao, YAN Changrong, et al. Effect of plastic film mulching duration on soil temperature and moisture in field and cotton water consumption and yield in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 113 – 120. (in Chinese)

[3] 于云海,陈学庚,温浩军. 秸秆粉碎与残膜集条联合作业机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 1 – 8.
YU Yunhai, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Development and experiment of straw chopping and plastic film strip-collection combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 1 – 8. (in Chinese)

[4] 靳伟,张学军,鄢金山,等. 曲轴式棉田地表残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 Wei, ZHANG Xuejun, YAN Jinshan, et al. Characteristic analysis and working parameter optimization of crankshaft type cotton field surface residual film collecting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 10 – 18. (in Chinese)

[5] 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, 2022.
LIANG Rongqing. Study on the cutting characteristics of residual film and impurities for machine harvesting in cotton field with multi-edge tooth cutter[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)

[6] 王佳男. 基于白星花金龟幼虫活体筛选高致病力白僵菌菌株[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
WANG Jianan. Screening of high pathogenicity on strain of beauveria based on living larvae of *Protaetia brevitarsis*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[7] 郭勇. 郯城县农业有机废弃资源调查和环保昆虫转化处理模式探究[D]. 泰安:山东农业大学, 2020.
GUO Yong. Investigation on agricultural organic waste resources and exploration on conversion mode of agricultural organic waste resources by environment-friendly insects in Yuncheng County[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[8] 刘玉升,张大鹏. 基于白星花金龟幼虫转化玉米秸秆的微循环农牧场模式研究[J]. 安徽农业科学, 2015(31): 85 – 87.
LIU Yusheng, ZHANG Dapeng. Study on the model of microcirculation farm and ranch on the corn straw transformed by larval of *Potosia brevitarsis lewis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015(31): 85 – 87. (in Chinese)

[9] 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 Yusheng, XU Xiaoyan, 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. (in Chinese)

[10] 孙晨可. “小麦秸秆—大球盖菇—白星花金龟”循环模式研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2018.
SUN Chenke. Study on the recycling mode of “wheat straw – *Stropharia rugosoannulata* – *Protaetia brevitarsis*” [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[11] 徐业山. 虫菌复合技术分离棉田残膜回收混合物研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022.
XU Yeshan. Study on the separation of recycled plastic film residual mixtures from cotton field by the composite technology of

- insect combined with the decomposing fungus[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [12] VASUDEVAN R, RAMALINGA C S A, SUNDARAKANNAN B, et al. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way-application in construction of flexible pavements[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 311–320.
- [13] LESLIE H A, LEONARDS P E G, BRANDSMA S H, et al. Propelling plastics into the circular economy-weeding out the toxics first[J]. Environment International, 2016, 94: 230–234.
- [14] ZHAO L, WANG Z, ZANG F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(2): 316–320.
- [15] LI Y, ZHAO L, HU E, et al. Laboratory-scale validation of a DEM model of a toothed double-roll crusher and numerical studies[J]. Powder Technology, 2019, 356: 60–72.
- [16] 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, 2016.
- [17] XUE P, HE J P, LI Y L. Plastic crushing behavior of thin-walled spheres[J]. Advanced Materials Research, 2008, 33–37: 719–724.
- [18] 于志恒, 钱苏翔, 黄凤立, 等. 基于动态特性分析的 SG-4390 型粉碎机刀架轴刀片布置设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(14): 9–12.
- YU Zhiheng, QIAN Suxiang, HUANG Fengli, et al. Layout design of SG-4390 granulator carrier shaft blade based on dynamic analysis[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(14): 9–12. (in Chinese)
- [19] 裴钰, 马培勇, 邢献军, 等. 城市生活垃圾破碎机研究分析[J]. 矿山机械, 2016(4): 1–5.
- PEI Yu, MA Peiyong, XING Xianjun, et al. Research and analysis on MSW shredder[J]. Mining & Processing Equipment, 2016(4): 1–5. (in Chinese)
- [20] 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 Gongyu, MA Mingxu, LIU Honglin, et al. Design of plastic film crushing machine on shearing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(5): 32–35. (in Chinese)
- [21] 高根树, 任悦, 刘中明, 等. 生活垃圾分选线上柔性破袋机的原理与设计[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6554–6558.
- GAO Genshu, REN Yue, LIU Zhongming, et al. Principle and design of flexible bag-breaker for municipal solid waste sorting line[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6554–6558. (in Chinese)
- [22] 刘鹏, 何进, 李艳洁, 等. 异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 69–79.
- LIU Peng, HE Jin, LI Yanjie, et al. Design and experiment of double rollers maize stalk chopping device with different rotation speeds[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 69–79. (in Chinese)
- [23] 耿端阳, 牟孝栋, 孙延成, 等. 青贮玉米螺旋缺口锯齿型揉丝破碎辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 134–141.
- GENG Duanyang, MOU Xiaodong, SUN Yancheng, et al. Simulation and test of silage corn screw notched sawtooth type crushing roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 134–141. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [26] 伍磊. 带式膜土分离装置的设计及试验[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- WU Lei. Design and test of belt type membrane soil separation device[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [27] 陈桂斌, 董超, 张立, 等. 对辊挤压式砂姜黑土整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 50–59.
- CHEN Guibin, DONG Chao, ZHANG Li, et al. Design and experiment of Shajiang black soil preparation machine with double pressing roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 50–59. (in Chinese)
- [28] 刘海涛, 张伟, 马军民, 等. 青贮玉米饲料籽粒破碎装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 32–39.
- LIU Haitao, ZHANG Wei, MA Junmin, et al. Simulation analysis and experiment of silage corn feed grain crushing device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 32–39. (in Chinese)
- [29] 马彩龙, 王丽娟, 王保爱, 等. 新型玉米秸秆揉丝机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 216–222.
- MA Cailong, WANG Lijuan, WANG Baoai, et al. Design and experiment of new corn stalk kneading machine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 216–222. (in Chinese)
- [30] 刘晓飞, 宋华, 魏志松, 等. 青贮饲料收获机籽粒破碎技术现状及发展趋势[J]. 拖拉机与农用运输车, 2020, 47(4): 5–8.
- LIU Xiaofei, SONG Hua, WEI Zhisong, et al. Current status and development trend on grain crushing technology for silage harvester[J]. Tractor & Farm Transporter, 2020, 47(4): 5–8. (in Chinese)
- [31] 牟孝栋. 基于碟盘辊的全株青贮玉米破碎机理研究与试验[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- MOU Xiaodong. Study and experiment on crushing mechanism of whole silage maize based on dish roller[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)