doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.013

低损捋叶式艾草脱叶装置设计与试验优化

何　涛　崔得州　杨全合　王　伟　郑志安　吴　敏
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对艾草人工脱叶劳动强度大、现有机械脱叶装置损伤率高、作业效率低等问题，开展了基于DEM-MBD的低损捋叶式艾草脱叶装置设计与试验优化研究。首先，建立了脱叶装置运动学和动力学模型，通过理论分析对输送带、压茎带、捋叶齿、拉茎对辊等关键部件进行了结构设计。其次，通过EDEM-RecurDyn耦合开展了脱叶装置联合仿真，验证了装置设计的合理性，并确定影响艾草脱叶的主要作业参数及其取值范围。最后，以捋叶孔隙高度、输送滚筒转速和拉茎辊转速为试验因素，艾叶脱净率、损伤率、含杂率为评价指标开展样机试验，并利用Design-Expert软件分析最优作业参数。结果表明，当最优参数组合为捋叶孔隙高度6.8 mm、输送滚筒转速25 r/min、拉茎对辊转速383.7 r/min时，艾叶脱净率、损伤率、含杂率分别为83.59%、4.27%、4.74%，满足艾草脱叶要求。

关键词：艾草；低损捋脱；差速脱叶；EDEM-RecurDyn；参数优化
中图分类号：S226.1+2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S2-0122-12

Design and Experimental Optimization of Low-destruction Leaf-pulling *Artemisia argyi* Defoliation Device

HE Tao　CUI Dezhou　YANG Quanhe　WANG Wei　ZHENG Zhian　WU Min
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the issues of high labor intensity in manual defoliation, high damage rates, and low operational efficiency in existing mechanical de-leafing devices for *Artemisia argyi*, the design and experimental optimization of a low-destruction leaf-pulling defoliation device based on DEM-MBD were conducted. Firstly, the kinematic and dynamic model of the defoliating device was established, and the key components such as the conveyor belt, stem-pressing belt, stripping teeth, and stem-pulling rollers were designed through theoretical analysis. Subsequently, the joint simulation of the defoliation device was performed by coupling EDEM - RecurDyn to verify the rationality of the device design, and the main operation parameters and their value ranges affecting the defoliation of *Artemisia argyi* were determined. Finally, prototype tests were carried out, with stripping gap height, conveyor roller speed, and stem-pulling roller speed as test factors, while whole-plant de-leafing rate, damage rate, and impurity rate served as evaluation indicators. The results showed that under the optimal parameter combination of a stripping gap height of 6.8 mm, conveyor roller speed of 25 r/min, and stem-pulling roller speed of 383.7 r/min, the removal rate, damage rate, and impurity rate of *Artemisia argyi* were 83.59%, 4.27%, and 4.74%, respectively, meeting the de-leafing requirements for *Artemisia argyi*.

Key words: *Artemisia argyi*; low-destruction stripping; defoliation by speed difference; EDEM-RecurDyn; parameter optimization

0　引言

艾草是我国传统大宗优质药材[1]，其种植面积和产量逐年增加[2]，对机械化采收技术和装备提出了新的发展需求。根据艾草采后干燥方式，其采收分为趁鲜脱叶采收和整株采收，其中机械化采收以趁鲜脱叶方式为主；人工采收以整株收割后脱叶为主。目前的艾草机械化采收多选择其他作物采收机代替，艾叶损伤较大，采

收稿日期：2024-08-04　修回日期：2024-09-30
基金项目：国家中药材产业技术体系项目(CARS-21)
作者简介：何涛(2001—)，男，硕士生，主要从事中药材采收脱叶装备研究，E-mail: hetao@cau.edu.cn
通信作者：吴敏(1982—)，女，副教授，博士生导师，主要从事中药材采收与加工技术装备研究，E-mail: minwu@cau.edu.cn

收效率不高，缺乏专用高效机型；人工收割存在劳动强度大、人工成本高等问题，已严重制约了艾草产业高质量发展，亟需深入研究艾草采收特征与要求，探究艾草高效低损脱叶原理，开发艾草采收机的脱叶关键部件。

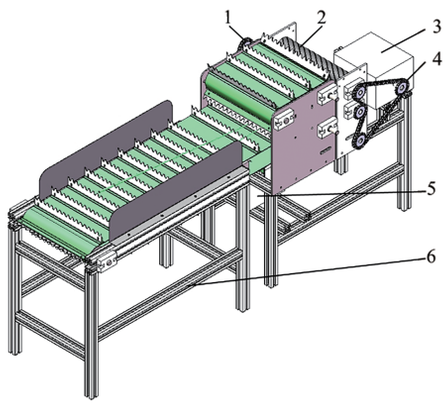
目前，国内外学者针对艾草脱叶研究较少，集中在艾草茎叶分离原理设计与技术装备开发方面，主要分为叶片受力式和非叶片受力式两种。叶片受力式茎叶分离方式依靠高速回转的刚性齿、弹性齿、尼龙绳、毛刷、揉搓纹杆、滚筒等执行元件产生的梳刷、冲击或搓擦等作用力使叶片脱落[3-4]，如文献[5]设计了一种回转击打式艾草脱叶机，该脱叶机主要由脱叶辊、输送辊、脱叶齿等关键部件组成，通过脱叶齿快速回转产生的离心力击打艾草，使艾叶脱落，在特定条件下，能有效实现艾草的茎叶分离，该机型具有高效分离优势，脱叶率达78.3%，但其对艾草损伤较大。为了降低艾叶损伤率，也有研究采用非叶片受力式，主要利用气力机械[6]与夹茎叶柄分离式[7]，结构由夹持喂入装置、吸叶滚筒、脱叶辊、离心风机等组成，通过吸叶滚筒的气力吸附引导叶片进入脱叶区，然后利用脱叶辊拉拽叶片完成脱叶，在充分减少艾叶损伤目标下，可采用单排气动夹持装置，选择柔性夹持元件材料，模拟人手动作完成叶柄与叶茎的分离，并辅以气力收集装置完成脱叶过程。该机型很好解决了叶片损伤问题，但其装置整体结构复杂，作业部件精度要求较高，作业效率较低。基于上述文献研究，在脱叶原理设计中应兼顾高效率与低损伤两个目标，文献[8]设计了一种甜叶菊脱叶机，其脱叶机构由同向差速的带式毛刷和粗糙传送带组成，通过两者接触产生的搓擦力与拉扯力使叶片脱落；该原理较好地提供了叶柄与叶茎间剥离的差速扭矩和拉力，研究发现可以有效降低叶片损伤，在探究结构系统稳定性、可行性及仿真法优化作业参数[9-10]后可以为艾草脱叶装置设计提供重要参考。

本文以艾草高效低损脱叶为目标，系统分析艾草脱叶力学特征及外观参数，采用艾草从上向下的逆向脱叶方向，基于转棍速度差产生的拉拽力为主要脱叶方式，设计一种低损捋叶式艾草脱叶装置，并基于EDEM-RecurDyn耦合仿真确定脱叶过程主要作业参数及其取值范围，通过三因素三水平的Box-Behnken样机试验，优化最佳脱叶参数，以期为艾草低损高效专用采收机设计和开发提供理论参考。

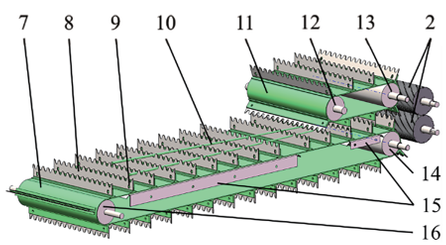
1　整体结构与工作原理

1.1　整体结构

脱叶装置是艾草收获机的关键部件，直接影响艾叶的质量。该脱叶装置结构如图1所示，主要由压茎输送组件、拉茎对辊组件、动力传动组件和机架组成。压茎输送组件由下输送带、上压茎带、捋叶齿、滚筒、承托板、侧边挡料板组成，4个滚筒通过轴承分别固定在机架和安装侧板上，捋叶齿通过螺栓固定在输送带上，承托板与下输送带上端内侧紧贴并通过螺栓固定在机架上。拉茎对辊组件由上拉茎辊、下拉茎辊、中间驱动轴组成，上、下拉茎辊以一定中心距纵向排列，通过轴承固定在安装侧板上。动力传动组件由三相异步电机、变频器、传动链轮、链条等组成。



(a) 整体结构



(b) 压茎输送组件与拉茎对辊组件结构图

图1　艾草脱叶装置结构图

Fig. 1　Structure diagram of *Artemisia argyi* defoliation device

1. 压茎输送组件链传动装置　2. 拉茎对辊　3. 拉茎对辊驱动电机　4. 拉茎对辊组件链传动装置　5. 压茎输送组件驱动电机　6. 机架　7. 下输送带　8. 捋叶齿　9. 捋叶齿安装槽　10. 艾草植株　11. 上压茎带　12. 上压茎带从动滚筒　13. 上压茎带主动滚筒　14. 下输送带主动滚筒　15. 承托板　16. 下输送带从动滚筒

1.2　工作原理

脱叶作业时，驱动压茎输送组件的电机输出轴转动，链条将动力传递到上压茎带主动滚筒和下输送带主动滚筒，同时链条反向布置在滚筒轴的等大链轮上，实现上下两带的同步反向转动，拉茎对辊组件在另一电机的驱动下，以同样的方式实现同步反转。在上压茎带和下压茎带重叠区，上下捋叶齿相互配合形成捋叶孔隙。收割后的艾草按生长方向（梢部朝右，根部朝左）铺放在输送带上向右输送进入捋叶孔隙，随后拉茎对辊抓取到艾草梢部，将艾草快速拽离捋叶孔隙，捋叶孔隙对叶柄产生的摩擦力与冲击力使叶柄脱落。脱落的艾叶经输送带落入收集袋中，完成艾草脱叶。

2　关键结构设计

2.1　艾草外形参数与力学参数测量

本文以河南省南阳市的成熟期艾草为研究对

象。艾草茎秆呈类圆柱形，从根部到梢部逐渐变细，叶片直接与茎秆连接，植株形态如图2所示。

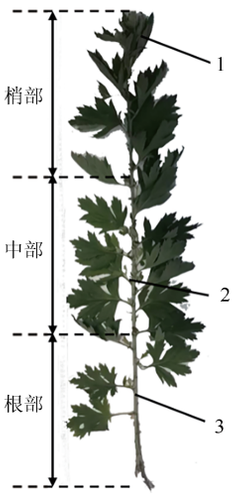


图2 艾草植株形态

Fig. 2 *Artemisia argyi* plant morphology

1. 艾叶 2. 叶柄 3. 艾草茎秆

随机选取20株南阳成熟期艾草，采用精度为0.01 mm的数显游标卡尺和精度为1 mm的卷尺，测量艾草株高、平均叶片间距和艾草梢部、中部、根部的茎秆直径。株高可为装置输送带尺寸的设计提供参考，平均叶片间距用于建立艾草的仿真三维模型，茎秆直径则直接影响捋叶孔隙高度及拉茎对辊中心距。使用Instron3367型万能材料试验机测试了不同方向的茎叶抗拉连接力和不同部位的茎秆抗拉力、茎秆抗剪切力，设置加载速率为20 mm/min，每组重复12次。不同方向的茎叶抗拉力大小不同，会影响茎叶分离的难易程度[11]；拉力是拉茎对辊拉拽茎秆产生的，剪切力是捋叶齿夹持茎秆产生的，拉力与剪切力过大会导致艾草茎秆的断裂，使脱叶无法继续进行。测试结果如表1所示，相较于顺向脱叶和垂直脱叶，逆脱的茎叶抗拉连接力最小，因此，对叶柄施加逆向的作用力更易于脱叶。

2.2 捋叶过程运动学分析

如图3所示，拉茎对辊抓取艾草梢部并向右拉拽时开始捋叶。每株艾草的初始喂入状态不同，其接触的捋叶齿与输送带尾端的最短距离x_0也不同。在拉拽过程中，捋叶齿无法作用于红色段的艾草茎秆，此段艾叶无法剥落，属于固定损失部分。假设齿①表面的接触点为点A，与点A接触的茎秆表面为点A'；同理，齿②表面的接触点及其接触的茎秆表面为点B和点B'。在对辊抓取艾草时，艾草速度由v_1变为v_2。此时，受压茎输送线速度、拉茎对辊线速度、捋叶齿间距等因素的综合影响，茎秆$A'B'$段可能出现漏脱现象，从而影响艾叶脱净率。因此，对可能出现的捋叶结果进行运动学分析，探明装置结构参数和运动参数对脱净率的影响机理。

（1）茎秆$A'B'$段无漏脱

$A'B'$段无漏脱时，茎秆运动示意图如图4所示。齿①从初始位置（图中浅黄色填充区域）向右移动至压茎带尾端，其运动学计算公式为

$$\begin{cases} x_0 = v_1 t_1 \\ x_1 = t_1 v_2 \\ l_1 \geqslant x_0 > 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中 t_1——捋叶齿运动时间，s

x_1——茎秆位移，m

l_1——相邻捋叶齿间距，m

茎秆$A'B'$段无漏脱需满足

$$x_1 - x_0 \geqslant l_1 \tag{2}$$

由式（1）、（2）得，$A'B'$段无漏脱的条件为

$$l_1 \geqslant x_0 \geqslant \frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1} \tag{3}$$

$$v_2 \geqslant 2v_1 \tag{4}$$

表1 艾草外形参数与力学参数

Tab. 1 Shape parameters and mechanical parameters of *Artemisia argyi*

参数		数值	平均值	标准差
株高/cm		86.80~109.37	98.37	7.61
平均叶片间距/cm		4.08~6.07	5.06	0.52
茎秆直径/mm	梢部	3.97~6.07	4.99	0.63
	中部	5.69~8.04	7.27	0.62
	根部	7.03~9.62	8.49	0.63
茎叶抗拉连接力/N	顺脱	4.80~8.70	6.77	0.78
	垂直脱	1.80~7.60	4.21	1.15
	逆脱	1.10~3.20	1.68	0.53
茎秆抗拉力/N	梢部	56.20~196.30	111.20	40.21
	中部	113.40~503.80	287.73	110.49
	根部	328.60~588.90	390.06	111.44
茎秆抗剪切力/N	梢部	9.80~45.60	26.55	7.74
	中部	27.50~98.80	51.39	18.02
	根部	51.40~178.40	96.38	41.79

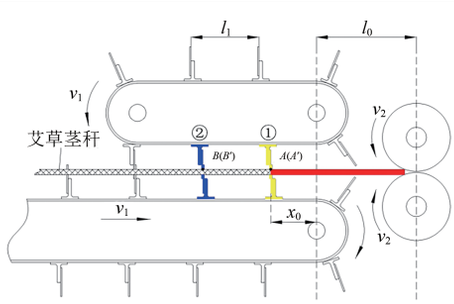


图3 开始捋叶时装置简化示意图

Fig. 3 Simplified diagram of device at beginning of defoliation

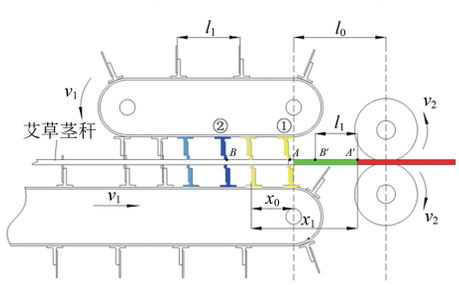


图4 $A'B'$段无漏脱时茎秆运动示意图

Fig. 4 Schematic of stem movement in segment $A'B'$ without leakage

在不考虑捋叶齿对艾草脱叶效果影响的情况下，当拉茎对辊抓取艾草时，若满足式(3)、(4)，假设艾叶在长度为L_0的艾草植株上均匀分布，而实际漏脱的艾草部分的长度为L_1，理论漏脱率为漏脱部分艾草长度与总艾草长度的比值，即

$$\varepsilon_1 = \frac{L_1}{L_0} \times 100\% = \frac{l_0 + x_0}{L_0} \times 100\% \tag{5}$$

式中　ε_1——$A'B'$段无漏脱时艾草漏脱率，%

l_0——拉茎对辊与压茎带尾端中心距，m

(2)茎秆$A'B'$段存在漏脱

$A'B'$段存在漏脱时，茎秆运动示意图如图5所示，此时需满足的前提为

$$x_1 - x_0 < l_1 \tag{6}$$

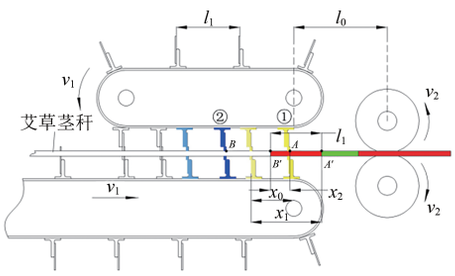


图5　$A'B'$段存在漏脱时茎秆运动示意图

Fig. 5　Schematic of stalk movement when there was leakage in segment $A'B'$

由式(1)、(6)得，$A'B'$段存在漏脱的条件为

$$0 < x_0 < \frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1} \tag{7}$$

$A'B'$段中漏脱部分的茎秆长度计算公式为

$$x_2 = l_1 - (x_1 - x_0) \tag{8}$$

式中　x_2——$A'B'$段中漏脱部分的茎秆长度，m

在不考虑捋叶齿对艾草脱叶效果影响的情况下，此时，艾草植株的理论漏脱率为

$$\varepsilon_2 = \frac{L_2}{L_0} \times 100\% = \frac{l_0 + x_0 + x_2}{L_0} \times 100\% \tag{9}$$

式中　ε_2——$A'B'$段漏脱时艾草漏脱率，%

L_2——$A'B'$段漏脱时漏脱部分总长，m

(3)点B'左方茎秆无漏脱验证

根据前述条件，当满足$v_2 \geqslant 2v_1$时，点B'左方艾叶不出现漏脱现象应满足

$$x_3 - (x_0 + l_1) \geqslant l_1 \tag{10}$$

$$x_3 = \frac{v_2(x_0 + l_1)}{v_1} \tag{11}$$

式中　x_3——点B'位移，m

由式(10)、(11)得，点B'左方茎秆无漏脱的条件为

$$x_0(v_2 - v_1) \geqslant l_1(2v_1 - v_2) \tag{12}$$

不等式(12)恒成立，因此，点B'左方茎秆不发生漏脱。

综合茎秆$A'B'$段无漏脱情况、茎秆$A'B'$段存在漏脱情况、点B'左方茎秆无漏脱验证的分析可知，由于艾草茎秆初始喂入状态的随机性，即x_0存在差异，导致每株艾草的理论漏脱率不同。由式(1)可知$l_1 \geqslant x_0 > 0$，且在满足式(4)的前提下，若$0 < x_0 < \frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1}$，茎秆$A'B'$段存在漏脱，若$\frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1} \leqslant x_0 \leqslant l_1$，茎秆$A'B'$段无漏脱。因此，茎秆$A'B'$段无漏脱发生的概率和茎秆$A'B'$段存在漏脱发生的概率分别为

$$p_1 = 1 - \frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1} \Big/ l_1 = \frac{v_2 - 2v_1}{v_2 - v_1} \times 100\% \tag{13}$$

$$p_2 = \frac{l_1 v_1}{v_2 - v_1} \Big/ l_1 = \frac{v_1}{v_2 - v_1} \times 100\% \tag{14}$$

式中　p_1——茎秆$A'B'$段无漏脱发生的概率，%

p_2——茎秆$A'B'$段存在漏脱发生的概率，%

则在艾草批量喂入时，该装置的总理论漏脱率计算方法为

$$\varepsilon = p_1 \varepsilon_1 + p_2 \varepsilon_2 \tag{15}$$

式中　ε——总理论漏脱率，%

将式(1)、(5)、(8)、(9)、(13)、(14)代入式(15)得，该装置的总体漏脱率为

$$\varepsilon = \left[\frac{v_1 l_1}{L_0(v_2 - v_1)} + \frac{l_0}{L_0} \right] \times 100\% \tag{16}$$

由式(16)可知，捋叶齿间距、压茎带线速度和拉茎对辊线速度是影响艾叶脱净率的重要参数，为降低损失，可在合理范围内缩短捋叶齿间距，增大拉茎对辊线速度，降低压茎带线速度。

2.3　捋叶过程动力学分析

在捋叶过程中，艾草的受力可分为仅受冲击力、同时受冲击力与摩擦力两种情况。当艾草茎秆直径小于捋叶孔隙尺寸时，捋叶齿仅对叶柄产生冲击力，此时叶柄断裂条件为

$$F_a > F_r \tag{17}$$

式中　F_a——茎秆叶柄处受到的冲击载荷，N

F_r——叶柄处的茎叶连接力，N

拉茎对辊抓取艾草时，茎秆以Δv($\Delta v = v_2 - v_1$)的速度碰撞捋叶齿。捋叶齿一端固定在带上，另一端为自由状态，为了便于力学分析，将其视为悬臂梁结构，将碰撞的瞬间看作悬臂梁受动载荷作用产生的位移问题，采用能量法进行求解。因此，将此碰撞系统简化为质量m_l的叶柄(含附带的叶片)以瞬时速度Δv撞击捋叶齿的点Q，叶柄受力点为J，如图6所示。

将捋叶齿产生的小变形看作线弹性体，为计算捋叶齿对叶柄的冲击载荷，将叶柄视作为刚性体，载荷与形变关系为

$$\begin{cases} F_a' = m_l g K_d \\ \Delta_d = K_d \Delta_{st} \\ K_d = 1 + \sqrt{1 + \dfrac{\Delta v^2}{g \Delta_{st}}} \\ \Delta_{st} = \dfrac{m_l g h_1^2}{3 E_r I_r} \end{cases} \tag{18}$$

式中 F'_a——捋叶齿点Q受到的冲击载荷，N

K_d——叶柄以Δv速度碰撞捋叶齿时的动载荷系数

Δ_{st}——捋叶齿在受等量静载荷时产生的最大挠度，m

Δv——茎秆相对于捋叶齿的速度，m/s

h_1——冲击载荷的力臂长，m

E_r——捋叶齿的弹性模量，MPa

I_r——惯性矩，m^4

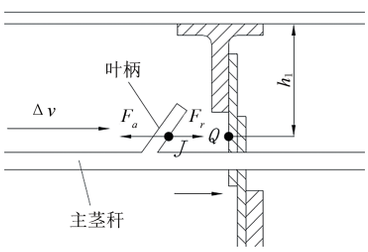


图6 叶柄与捋叶齿碰撞示意图

Fig. 6 Diagram of collision between petiole and stroking teeth

根据力的相互作用原理，捋叶齿与叶柄受到的冲击载荷F_a与F'_a数值相同，由式(17)、(18)得，叶柄断裂需满足

$$\left(1+\sqrt{1+\frac{\Delta v^2}{g\Delta_{st}}}\right)m_l g > F_r \tag{19}$$

当艾草茎秆直径大于捋叶孔隙尺寸时，捋叶齿对茎秆产生向下的正压力，捋叶齿对叶柄同时产生冲击力和滑动摩檫力，如图7所示。

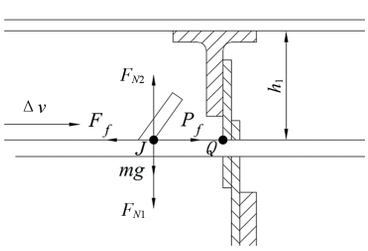


图7 叶柄同时受冲击力和摩擦力示意图

Fig. 7 Diagram of petiole subjected to both impact force and friction force

在捋叶过程中，茎秆视为匀速运动，处于平衡态，对茎秆受力点J受力分析得

$$\begin{cases} F_{N2} = m_l g + F_{N1} \\ F_f = P_f = f_s F_{N1} \end{cases} \tag{20}$$

式中 F_{N2}——下捋叶齿对茎秆的支持力，N

F_{N1}——上捋叶齿对茎秆的压力，N

F_f——上捋叶齿对茎秆的滑动摩擦力，N

f_s——艾草茎秆与45号钢之间的静摩擦因数，取0.73

P_f——拉茎对辊对茎秆的拉力，N

此时，叶柄的断裂条件为

$$F'_a + F_f > F_r \tag{21}$$

将式(19)、(20)代入式(21)得

$$\left(1+\sqrt{1+\frac{\Delta v^2}{g\Delta_{st}}}\right)m_l g + f_s F_{N1} > F_r \tag{22}$$

为保证茎秆不被拉茎对辊的拉拽力拉断，同时不被捋叶齿正压力剪断，还需满足

$$\begin{cases} P_f < F_b \\ F_{N2} < F_c \end{cases} \tag{23}$$

式中 F_b——茎秆抗拉力，N

F_c——茎秆抗剪切力，N

由上述分析可知，捋叶齿的刚度、捋叶孔隙尺寸、压茎带速度与拉茎对辊速度差是影响脱叶效果的重要参数：捋叶孔隙过小，茎秆同时受到摩擦力和冲击力，艾草茎秆易发生断裂，捋叶孔隙过大，冲击力无法作用于叶柄处，影响脱叶；在拉茎对辊对茎秆的拉力小于茎秆抗拉力时，速度差越大越有利于脱叶。

2.4 捋叶齿参数设计

捋叶齿是艾草脱叶装置的核心部件，与拉茎对辊配合将力施加在艾草茎秆和叶柄上，直接影响艾叶脱净率和损伤率。在脱叶过程中主要发挥两个作用：艾草进入压茎区时引导其进入捋叶孔隙；上下捋叶齿相互配合形成捋叶孔隙，艾草在拉茎对辊的拉拽下，孔隙对叶柄和茎秆表面施加摩擦和冲击，撕裂叶柄，实现脱叶。

捋叶齿的结构如图8所示，材质为45号钢，齿底部设置有直径为8 mm的圆槽孔，用于调节捋叶孔隙高度和固定捋叶齿，齿形为波浪形，凹槽与凸起的半径r_0相同，齿形角为δ，相邻凸起与凹槽的竖直方向间距h_2为6 mm。

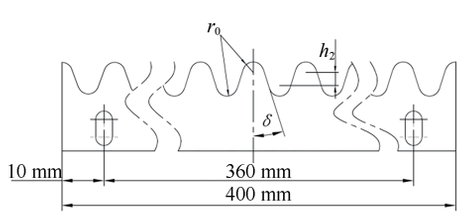


图8 捋叶齿结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of stroking teeth

为确保艾草茎秆与凹槽良好接触，凹槽半径r_0需满足

$$2r_0 > d_1 \tag{24}$$

式中 d_1——艾草茎秆直径，mm

由于艾草茎秆直径为4.99~8.49 mm，取r_0=4.5 mm。当艾草被喂入至捋叶齿表面时，在齿形凸起结构的作用下，茎秆会下滑至凹槽内，为确保茎秆顺利下滑，齿形角δ需满足以下条件

$$\delta < \frac{\pi}{2} - \arctan f_s \tag{25}$$

2.5 压茎输送组件结构设计与分析

压茎输送组件是脱叶装置的主体结构，主要由下输送带、上压茎带、滚筒、安装侧板、侧边挡料板、支撑板与

承托板等构成，结构如图9所示。在作业过程中，下输送带和上压茎带上捋叶齿的间距及其线速度保持一致，以确保上下捋叶齿在运动过程中始终保持配合状态，形成捋叶孔隙。

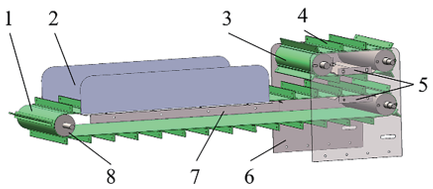


图9　输送带与压茎带组件结构示意图

Fig. 9　Structural diagram of conveyor belt and stem belt

1. 下输送带　2. 侧边挡料板　3. 上压茎带　4. 捋叶齿安装带　5. 支撑板　6. 安装侧板　7. 承托板　8. 滚筒

根据相关标准，输送带滚筒的最小直径应满足

$$d_{2\min} = T_0 C \tag{26}$$

式中　$d_{2\min}$——输送带滚筒最小直径

T_0——带芯厚度，mm

C——带芯材质系数

通过查表计算，输送带滚筒最小直径为85 mm，因此确定滚筒直径d_2为90 mm。根据捋叶过程运动学分析，捋叶齿间距取100 mm，且在作业过程中需确保捋叶孔隙组数不少于3组。根据几何关系得

$$a_1 \geqslant 3l_1 \tag{27}$$

式中　a_1——压茎带输送距离，mm

输送带与压茎带的滚筒包角均为180°，带长计算公式为

$$\begin{cases} l_{a1} = 2a_1 + \pi d_2 \\ l_{a2} = 2a_2 + \pi d_2 \end{cases} \tag{28}$$

式中　l_{a1}——压茎带带长，mm

l_{a2}——输送带带长，mm

a_2——输送带输送距离，mm

压茎带和输送带为整体闭环结构，捋叶齿间距一致，带长还需满足

$$\begin{cases} l_{a1} = Nl_1 \\ l_{a2} = Nl_1 \end{cases} \quad (N = 1,2,3\cdots) \tag{29}$$

为确保捋叶齿的良好配合，输送带与压茎带除输送距离不同外，其余参数均应相同。其中，输送带的输送距离与艾草株高应满足

$$a_2 - a_1 > L_0 \tag{30}$$

艾草株高的最大值约为110 cm。根据计算，压茎带的输送距离为308.7 mm，输送带输送距离为1 048.7 mm，因此，压茎带带长取整为900 mm，输送带带长取整为3 100 mm。

2.6　拉茎对辊设计与分析

拉茎对辊和捋叶齿配合完成脱叶，通过辊子表面与艾草之间的摩擦力抓取并拉拽艾草，为防止拉拽过程中出现打滑现象，选用橡胶作为拉茎辊的材料，并在辊表面开设螺旋槽以增加摩擦。

对辊抓取艾草的受力分析[12]如图10所示。分析艾草与拉茎辊接触弧中点处的受力情况，为保证艾草能够顺利被抓取，转动的拉茎辊对艾草的摩擦力需大于其正压力F_{N3}的水平分力，即

$$2F_{N3}\sin\gamma < 2f_{s1}F_{N3}\cos\gamma \tag{31}$$

其中

$$f_{s1} = \tan\tau \tag{32}$$

式中　f_{s1}——拉茎辊与艾草间的静摩擦因数

τ——拉茎辊与艾草的摩擦角，(°)

γ——压力方向与竖直方向的夹角，(°)

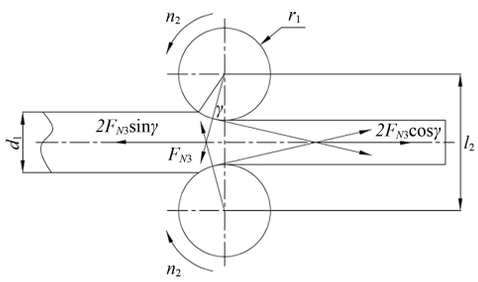


图10　对辊抓取茎秆示意图

Fig. 10　Schematic of roller grasping stem

在拉茎辊半径r_1一定时，对辊的中心距决定对辊间隙，间隙过大，摩擦力不足，间隙过小，将导致对辊无法抓取艾草茎秆或因摩擦力过大而导致茎秆断裂。根据几何关系得拉茎对辊中心距

$$l_2 = 2r_1 + d_1' = 2r_1\cos(2\gamma) + d_1 \tag{33}$$

式中　l_2——拉茎对辊中心距，mm

d_1'——拉茎对辊间隙，mm

由式(31)~(33)得拉茎辊半径

$$r_1 > \frac{d_1 - d_1'}{2(1 - \cos(2\tau))} \tag{34}$$

分析表明，当$\tau > \gamma$时，拉茎对辊顺利抓取艾草。由于艾草茎秆直径范围为4.99~8.5 mm，当d_1>5 mm时，拉茎对辊无法产生足够的摩擦力。因此，确定对辊间隙d_1'为4 mm，则拉茎辊半径需满足r_1>4.17 mm。考虑到加工经济性和艾草挠度，取拉茎辊半径为50 mm。

拉茎对辊通过轴承固定在两侧安装板之间，侧边安装板设有用于拉茎辊安装与调节的孔槽。根据捋叶过程的运动学分析，拉茎对辊与压茎带水平距离l_0对装置的脱净率有重要影响。为了避免对辊与捋叶齿发生干涉，l_0还需满足

$$l_0 > \sqrt{\left(l_3 + h_2 + 2r_0 + r_1\right)^2 - \left(l_3 - r_1 - \frac{d_1'}{2}\right)^2} \tag{35}$$

式中　l_3——压茎带滚筒与中心线竖直距离，mm

3　基于EDEM-RecurDyn的耦合仿真

艾草脱叶装置的脱叶过程涉及运动学、动力学分析及装置与艾草间的相互作用。其主要包括3组运动：28个捋叶齿随柔性皮带的回转运动、滚筒驱动皮带运动、两个拉茎辊的回转运动。由于装置运动的复杂性和艾

草叶柄与茎秆断裂的不确定性，单一仿真软件无法满足需求，因此使用多体动力学仿真软件RecurDyn和离散元仿真软件EDEM进行耦合仿真分析[13-17]，验证装置的可行性，并确定影响艾草脱叶效果的试验因素取值范围。

3.1 艾草离散元模型建立

艾草主要由主茎秆、叶柄和艾叶组成，成熟期的茎秆较粗，叶柄较细，但其结构相似。基于脱叶装置的设计，捋叶齿主要作用于叶柄，因此，为减少计算量，仅对艾草茎秆进行离散元建模，聚焦叶柄断裂过程。EDEM中Hertz-Mindlin with bonding模型常用于模拟物料破碎和断裂过程[18-20]，可以有效模拟叶柄因捋叶齿的冲击和摩擦导致的断裂。基于测得的艾草外形参数，用Solidworks软件建立简化的艾草茎秆三维模型以减小计算量：株高取500 mm，主茎秆从4.99 mm过渡到8.49 mm，每隔50 mm在茎秆圆周上随机布置一个叶柄，共10个。课题组前期采用物理试验与仿真试验相结合的方法，以成熟期新鲜艾草为研究对象，基于EDEM仿真软件中的Hertz-Mindlin(no slip)模型和Hertz-Mindlin with bonding模型对茎秆物理参数和粘结参数进行标定。通过Plackett-Burman试验、最陡爬坡试验和Central-Composite试验确定艾草茎秆接触参数和粘结参数，并利用艾草茎秆堆积角台架试验和剪切物理试验验证了参数值的准确性，得到了艾草茎秆离散元仿真参数如表2所示。将艾草三维模型划分网格后导入EDEM软件，完成相关参数设置后开始填充颗粒。填充过程及结果如图11所示，该艾草粘结模型共有19 128个半径为0.5 mm球形颗粒和62 058个bonding键构成。

3.2 耦合仿真模型建立

考虑到仿真计算量，本次仿真分析仅涉及输送、压茎和拉拽过程，省略机架、侧边挡料板、安装板、驱动链及链轮等部件，并缩短输送带长度。使用Solidworks软件建立脱叶装置的简化模型，并以step格式导入RecurDyn软件中。对输送带进行柔性化处理后，添加接触和约束(表3)，建立多体动力学模型，如图12所示。

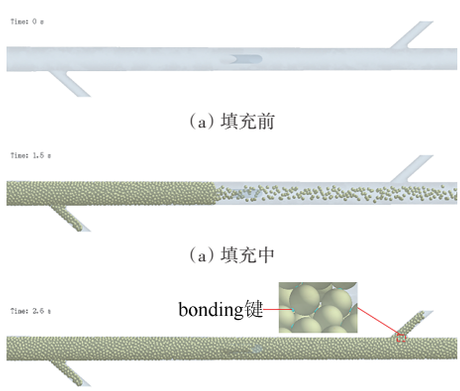
为验证滚筒驱动下两带运转的同步性，保证上下捋叶齿形成稳定的捋叶孔隙，对模型进行空载运动分析。上下两带的驱动滚筒等速反向运转，设置仿真时间为4.5 s，步长为450[21]，分析一对配合捋叶齿沿x轴方向的位移时间曲线，如图13所示。0~0.1 s为电机启动阶段；0.1~2 s为直线输送阶段；2~3.1 s为捋叶齿随驱动滚筒回转并逐渐分离。两个捋叶齿的位移曲线几乎重合，表明脱叶装置在运转过程中捋叶齿能够形成稳定的捋叶孔隙。

根据捋叶过程的运动学和动力学分析，捋叶孔隙高度、输送滚筒速度和拉茎辊转速是影响脱叶装置脱叶效果的重要参数。打开EDEM和RecurDyn耦合仿真接口，在EDEM中导入脱叶装置模型，得到耦合仿真模型如图14所示[22-23]。分别以捋叶孔隙高度、输送滚筒转速和拉茎辊转速为试验因素，以茎秆断裂与否为试验指标，开展单因素仿真试验确定试验因素水平范围，以缩短试验周期。仿真时间设置为10 s，步长为1 000，在RecurDyn的仿真设置页面选择“Display Animation”，可以看到艾草脱叶的全过程[24-25]。

表2 艾草茎秆离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation parameters of *Artemisia argyi* stalk

对象	参数	数值
艾草茎秆	泊松比	0.42
	剪切模量/MPa	7.38
	密度/(kg·m^{-3})	845
	法向接触刚度/(N·m^{-1})	3.91×10^{9}
	切向接触刚度/(N·m^{-1})	2.43×10^{9}
	临界法向应力/ Pa	4.35×10^{6}
	临界切向应力/Pa	6.14×10^{6}
45号钢	泊松比	0.31
	剪切模量/MPa	77 200
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
橡胶	泊松比	0.47
	剪切模量/MPa	2.653
	密度/(kg·m^{-3})	1 200
艾草茎秆-艾草茎秆	碰撞恢复系数	0.13
	静摩擦因数	1.13
	滚动摩擦因素	0.021 2
艾草茎秆-45号钢	碰撞恢复系数	0.43
	静摩擦因数	0.73
	滚动摩擦因素	0.015 6
橡胶-艾草茎秆	碰撞恢复系数	0.2
	静摩擦因数	1.2
	滚动摩擦因素	0.1



(a) 填充前

(a) 填充中

(c) 填充后

图11 艾草茎秆粘结模型

Fig. 11 Stalk bonding models of *Artemisia argyi*

表3 多体动力学模型约束与接触添加类型

Tab. 3 Constraints and contact addition types for multi-body dynamics models

构件名称	运动副/接触类型	数量
承托板与大地	固定副	1
捋叶齿与输送带	固定副	28
输送带滚筒与大地	旋转副	4
拉茎对辊与大地	旋转副	2
输送带与滚筒	FFlex-solid to solid	4
输送带与捋叶齿	FFlex-solid to solid	28
下输送带与承托板	FFlex-surface to surface	1
输送带侧面与滚筒法兰盘	FFlex-surface to surface	4

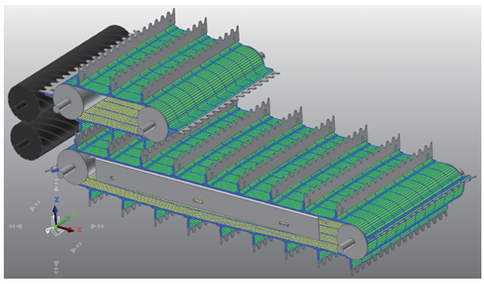


图 12　RecurDyn 软件构建的脱叶装置模型

Fig. 12　Defoliating device model built by RecurDyn software

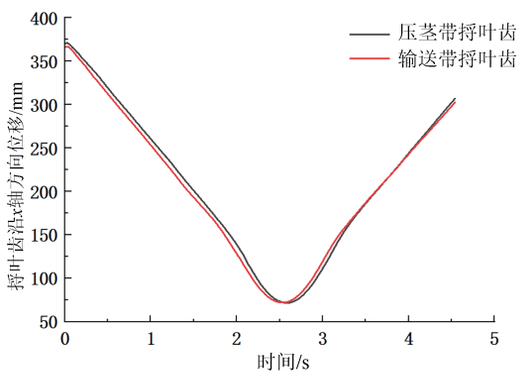


图 13　相互啮合的捋叶齿沿 x 轴方向的位移曲线

Fig. 13　Displacement curves of meshing blade teeth along x-axis direction

3.3　耦合仿真试验结果与分析

由于茎秆梢部直径为 4.99 mm，根部直径为 8.49 mm，考虑到茎秆固定损失部分，艾草大约在直径为 6.0 mm 处开始捋叶。分别设置捋叶孔隙为 6.0 mm 和 8.5 mm 进行单因素试验，控制输送滚筒转速为 25 r/min，拉茎辊转速为 380 r/min，以确定捋叶孔隙高度的水平范围；分别设置输送滚筒转速为 15 r/min 和 35 r/min 进行单因素试验，控制捋叶孔隙高度为 7.5 mm，拉茎辊转速为 380 r/min，以确定输送滚筒转速的水平范围；分别设置拉茎对辊转速为 360 r/min 和 410 r/min 进行单因素试验，控制捋叶孔隙高度为 7.5 mm，输送滚筒转速为 25 r/min，以确定拉茎辊转速的水平范围。拉茎对辊未抓取艾草时，其转矩为 0；拉茎对辊抓取艾草时，需克服拉茎辊与艾草间的摩擦力，拉茎辊转矩会增大，当脱叶完成或转矩过大使茎秆发生断裂时，由于摩擦力的瞬时消失，拉茎辊转矩可能会出负值的情况。当断裂茎秆的剩余部分继续喂入拉茎辊时，拉茎辊转矩会出现相同的变化趋势。因此，以试验过程中拉茎对辊的转矩是否发生多次瞬时增大为依据判断茎秆断裂情况。拉茎辊转矩随时间的变化趋势图如图 15 所示。

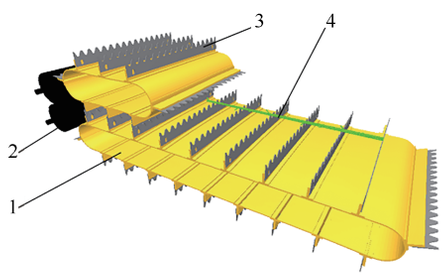
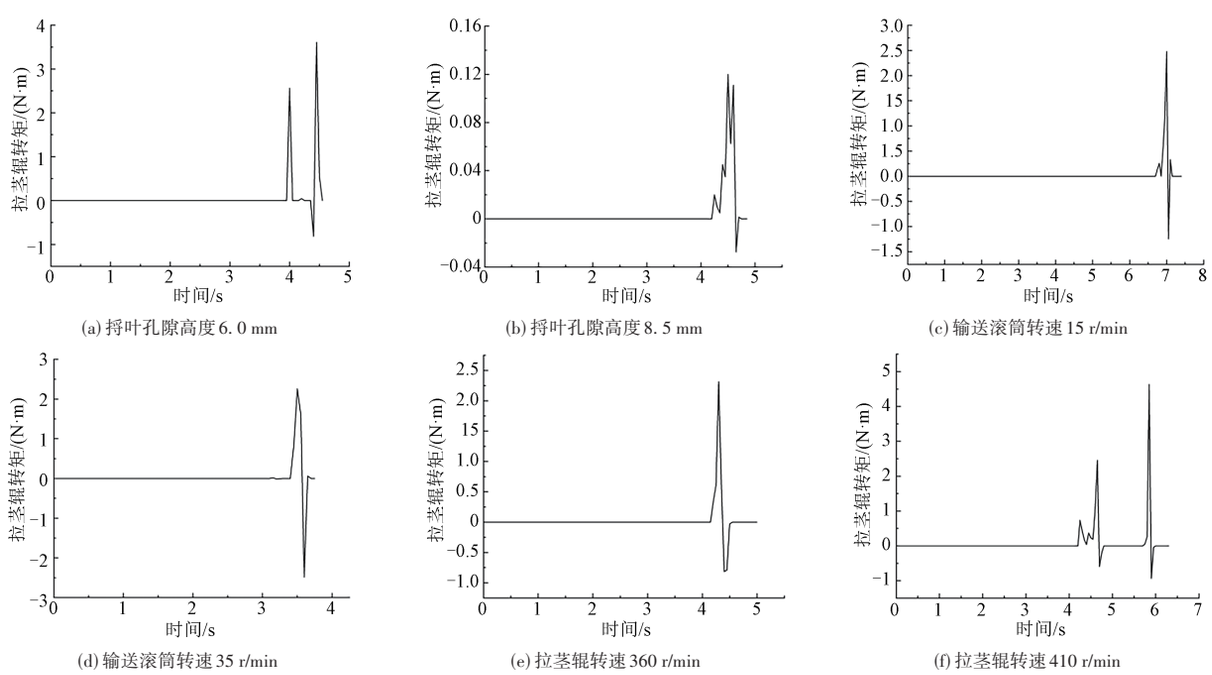


图 14　EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型

Fig. 14　EDEM-RecurDyn coupling simulation model

1. 输送带　2. 拉茎辊　3. 捋叶齿　4. 艾草茎秆



(a) 捋叶孔隙高度 6.0 mm　(b) 捋叶孔隙高度 8.5 mm　(c) 输送滚筒转速 15 r/min

(d) 输送滚筒转速 35 r/min　(e) 拉茎辊转速 360 r/min　(f) 拉茎辊转速 410 r/min

图 15　拉茎辊转矩-时间曲线

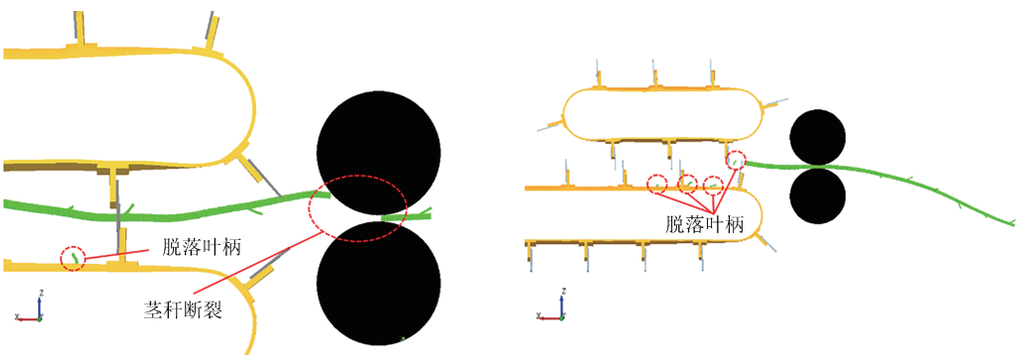
Fig. 15　Pull stem roller time-torque diagram

由图 15a、15b 可知，当捋叶孔隙高度为 6.0 mm 时，拉经辊转矩出现两次瞬时增大，且在峰值转矩下，两辊对艾草茎秆产生的摩擦合力接近艾草茎秆抗拉力，说明在脱叶过程中艾草茎秆发生了断裂，如图 16a

所示。其原因是捋叶孔隙高度小于艾草茎秆中部和根部直径，对茎秆产生冲击力和摩擦力之和大于艾草梢部茎秆抗拉力。当捋叶孔隙为8.5 mm时，茎秆不发生断裂，如图16b所示。因此，捋叶孔隙较优高度为6.0~8.5 mm。

由图15c、15d可知，当输送滚筒转速为15、35 r/min时，艾草茎秆均未发生断裂，且叶柄脱落个数均为4。考虑整株艾草的株高和喂入效率，仍取输送滚筒转速范围为15~30 r/min进行样机试验。

由图15e、15f可知，当拉茎辊转速为360 r/min时，艾草顺利脱叶。但当拉茎辊转速为410 r/min时，拉茎辊转矩出现两次瞬时增大，且峰值转矩较大，艾草茎秆发生断裂。原因在于艾草与捋叶孔隙的速度差随着拉茎辊转速增大而增大，艾草与捋叶孔隙间的冲击力增大，导致其摩擦力与冲击力之和大于艾草茎秆抗拉力。因此，拉茎辊较优转速为360~410 r/min。



(a) 茎秆断裂 (b) 茎秆未断裂

图16 茎秆断裂与未断裂示意图

Fig. 16 Broken and unbroken stems

4 样机试验

4.1 试验材料与方法

艾草脱叶装置样机于2024年5月完成了研制，并在中国农业大学农产品加工实验室开展台架试验。试验选用来自河南南阳的成熟期艾草，艾草平均株高约600 mm、平均直径约7 mm、含水率约71.56%。台架试验所采用的设备主要有脱叶装置样机(图17)、电子天平和便携式转速仪。



图17 艾草脱叶装置样机图

Fig. 17 *Artemisia argyi* defoliating device prototype

试验前，将捋叶齿调整到配合位置，并检查输送带和压茎带的张紧情况，确保装置运行稳定。调整实验参数后，随机选取5株艾草喂入输送带进行脱叶。脱叶完成后，采用电子天平称量法，分别统计未脱离叶片质量、成功脱叶叶片质量、有损伤叶片质量和收集产物总质量。根据艾草脱叶农艺要求，以艾叶脱净率、艾叶损伤率、含杂率作为脱叶效果评价指标，其中，艾叶脱净率是指成功脱叶叶片质量占艾草总叶片质量比例；艾叶损伤率是指有损伤叶片质量占成功脱叶叶片质量比例，含杂率是指除成功脱叶叶片外物质质量占收集产物总质量比例。

4.2 试验结果

根据结构设计过程分析，影响艾草脱叶效果的主要因素包括捋叶孔隙高度、输送滚筒转速、拉茎辊转速。通过单因素仿真试验，确定捋叶孔隙高度为6.0~8.5 mm，输送滚筒转速为15~35 r/min，拉茎辊转速为360~420 r/min。在试验过程中，为避免艾草应该发生断裂，影响脱叶效果，捋叶孔隙高度应大于6.0 mm，拉茎辊转速应小于410 r/min。采用三因素三水平的Box-Behnken试验分析各因素对各指标的影响程度并确定最优参数组合[26]。试验因素编码如表4所示，试验组数为17，每组试验重复3次，取3次平均值作为该组试验结果。

表4 试验因素编码

Tab. 4 Horizontal coding of experiment factors

编码	因素		
	捋叶孔隙高度/mm	输送滚筒转速/(r·min^{-1})	拉茎辊转速/(r·min^{-1})
1	7.8	35	405
0	7.3	25	390
−1	6.8	15	375

试验方案与结果如表5所示，表中X_1、X_2、X_3分别表示捋叶孔隙高度、输送滚筒转速、拉茎辊转速编码值。通过Design-Expert 13软件进行方差分析，结果表明，关

于含杂率的方差分析模型不显著（平均含杂率为3.34%），而关于艾叶脱净率和艾叶损伤率的方差分析模型显著（表6）。因此，仅建立艾叶脱净率Y_1、艾叶损伤率Y_2对捋叶孔隙高度X_1、输送滚筒转速X_2、拉茎转速X_3的二次多项式响应面回归模型

$$Y_1 = 80.81 - 13.41X_1 - 1.15X_2 + 8.08X_3 - 12.50X_2^2 - 10.69X_3^2 \quad (36)$$

$$Y_2 = 6.03 + 0.023\,8X_1 + 0.063\,8X_2 + 1.45X_3 + 0.591X_3^2 \quad (37)$$

由表6可知，输送滚筒转速对整株脱净率影响不显著，而捋叶孔隙高度和拉茎辊转速影响极显著，影响的重要性依次为：捋叶孔高度、拉茎辊转速，该回归模型的P值小于0.01，决定系数R^2为0.951 1，失拟项显著性P值为0.507 4（大于0.05），表明模型拟合程度高，能准确反映试验因素与响应指标之间的关系。捋叶孔隙高度和输送滚筒转速对艾叶损伤率影响不显著，拉茎辊转速对艾叶损伤率影响极显著，该回归模型的P值小于0.01，决定系数R^2为0.968 7，失拟项显著性P值为0.866 3（大于0.05），表明回归方程拟合效果良好，能准确反映试验因素与响应指标之间的关系。根据回归方程分析结果，使用Design-Expert 13软件分别做艾叶脱净率和艾叶损伤率的响应面图，如图18所示。

当输送滚筒转速为中间水平（即25 r/min）时，捋叶孔隙高度和拉茎辊转速的交互作用对艾叶脱净率的影响如图18a所示，随着捋叶孔隙高度的减小，整株脱净率逐渐提高，因为较小的捋叶孔隙高度能够对艾草茎秆施加更大的正压力，从而产生更大的摩擦力，使茎秆表面的叶柄更容易断裂。随着拉茎辊转速的增加，脱净率呈现出先增高后降低的趋势。拉茎辊转速增加时，叶柄受到的冲击载荷加剧，导致其更容易脱落，从而提高整株脱净率。然而，当拉茎辊转速超过某一临界值时，拉茎辊的离心力对茎秆的拉拽作用增大，可能造成茎秆损伤和断裂，从而降低断裂处后方的艾叶脱净率。

表5　试验方案与结果

Tab. 5　Test plan and results

序号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	艾叶脱净率 Y_1/%	艾叶损伤率 Y_2/%	含杂率 Y_3/%
1	−1	−1	0	78.25	5.77	3.24
2	1	−1	0	54.92	6.29	1.95
3	−1	1	0	81.36	6.19	2.69
4	1	1	0	52.59	6.05	4.37
5	−1	0	−1	76.92	5.25	2.84
6	1	0	−1	49.25	5.14	3.85
7	−1	0	1	87.85	8.29	5.18
8	1	0	1	60.35	8.21	4.66
9	0	−1	−1	54.37	4.88	3.57
10	0	1	−1	42.64	5.46	2.28
11	0	−1	1	68.94	8.04	2.69
12	0	1	1	70.68	7.79	3.10
13	0	0	0	81.90	5.53	1.97
14	0	0	0	90.53	6.02	4.08
15	0	0	0	80.85	6.52	5.18
16	0	0	0	78.34	6.07	4.19
17	0	0	0	78.55	5.87	1.94

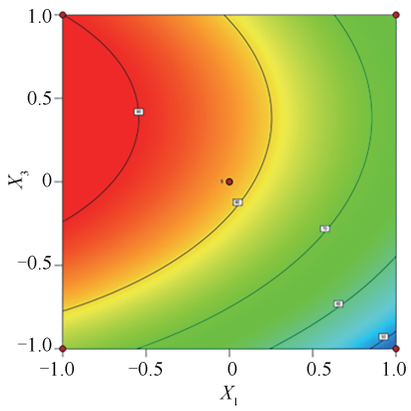
当输送滚筒转速为中间水平（即25 r/min）时，捋叶孔隙高度和拉茎辊转速的交互作用对艾叶损伤率的影响如图18b所示，艾叶损伤率主要受拉茎辊转速的显著影响。当拉茎辊转速增加时，拉拽过程中已被拉拽的植株与未被拉拽的相邻植株之间产生相对运动，导致叶片与茎秆或相邻叶片之间的摩擦增大，进而容易造成叶片损伤。

表6　响应面试验方差分析

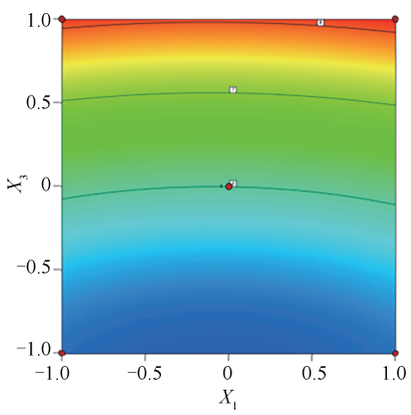
Tab. 6　Variance analysis of response surface test

方差来源	艾叶脱净率 Y_1					艾叶损伤率 Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 267.57	9	3 267.57	15.13	0.000 8**	18.73	9	2.08	24.08	0.000 2**
X_1	1 438.36	1	1 438.36	59.93	0.000 1**	0.004 5	1	0.004 5	0.052 2	0.825 8
X_2	10.60	1	10.60	0.441 8	0.527 5	0.032 5	1	0.032 5	0.376 2	0.559 0
X_3	522.29	1	522.29	21.76	0.002 3**	16.82	1	16.82	194.63	<0.000 1**
X_1X_2	7.40	1	7.40	0.308 3	0.596 0	0.108 9	1	0.108 9	1.26	0.298 7
X_1X_3	0.007 2	1	0.007 2	0.000 3	0.986 6	0.000 2	1	0.000 2	0.002 6	0.960 7
X_2X_3	45.36	1	45.36	1.89	0.211 6	0.172 2	1	0.172 2	1.99	0.200 9
X_1^2	35.64	1	35.64	1.49	0.262 5	0.067 4	1	0.067 4	0.779 6	0.406 6
X_2^2	641.63	1	641.63	26.73	0.001 3**	0.012 1	1	0.012 1	0.139 5	0.719 9
X_3^2	467.04	1	467.04	19.46	0.003 1**	1.49	1	1.49	17.19	0.004 3**
残差	168.00	7	24.00			0.605 0	7	0.086 4		
失拟	68.62	3	22.87	0.920 6	0.507 4	0.091 5	6	0.030 5	0.237 5	0.866 3
误差	99.39	4	24.85			0.513 5	4	0.128 4		
总和	3 435.57	16				19.33	16			

注：**表示极显著（P<0.01）。



(a) 艾叶脱净率



(b) 艾叶损伤率

图18 试验指标二维响应面(X_2=0)

Fig. 18 Test index 2-dimensional response surface diagram

4.3 试验因素参数优化与验证

利用Design-Expert 13软件对上述回归模型进行约束优化分析,以最大化整株脱净率和最小化艾叶损伤率为优化目标。由于输送滚筒转速对响应指标的影响不显著,本次优化主要针对捋叶孔隙高度和拉茎辊转速进行分析。目标函数及其对应的约束条件方程组为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_3) \\ \max Y_2(X_1,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{38}$$

优化分析得到最优参数组合:捋叶孔隙高度为6.8 mm、拉茎辊转速为383.7 r/min。此参数组合下,艾叶脱净率为86.75%,艾叶损伤率为5.52%。为验证该参数组合的实际脱叶效果,进行了实际试验,设置输送滚筒转速为25 r/min。试验结果显示,艾叶脱净率为83.59%,损伤率为4.27%,含杂率为4.74%,与优化预测值相对误差较小。结果表明,该最优参数组合具有较高的可靠性,脱叶装置脱叶效果良好,各项评价指标均符合设计要求。

5 结论

(1)为解决茎叶分离装置难以兼顾高效率和低损伤的问题,设计了一种低损捋叶式艾草脱叶装置。通过艾草外形参数和力学特性的测定、艾草脱叶过程的运动学和动力学分析,设计了输送带、压茎带、捋叶齿、拉茎对辊等脱叶装置关键部件,分析得到捋叶孔隙高度、压茎输送组件速度和拉茎辊转速是影响艾叶脱净率的重要参数。

(2)建立了艾草植株离散元模型和脱叶装置多体动力学模型,基于EDEM-RecurDyn耦合仿真,分别以捋叶孔隙高度、输送滚筒转速和拉茎辊转速为因素,以茎秆断裂与否为试验指标,开展单因素仿真试验确定脱叶性能较优的因素水平范围,以缩短试验周期。结果表明,较优的参数取值范围为捋叶孔隙高度6.0~8.5 mm,输送滚筒转速15~30 r/min,拉茎辊转速为360~410 r/min。

(3)在样机试验中,选取捋叶孔隙高度、输送滚筒转速、拉茎辊转速为试验因素,以艾叶脱净率、损伤率、含杂率为评价指标,开展了三因素三水平的Box-Behnken试验。通过Design-Expert对结果进行方差分析及参数优化与验证,确定了最优作业参数:捋叶孔隙高度为6.8 mm、拉茎辊转速383.7 r/min、输送滚筒转速25 r/min。在最优参数下,艾叶脱净率为83.59%、损伤率为4.27%、含杂率为4.74%,与回归模型预测值误差较小,表明该装置具有良好的脱叶效果,能够满足艾草脱叶作业要求。

参 考 文 献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:155.

[2] 吴传云,温浩军,吴崇友,等.我国主要经济作物机械化主攻方向与主推技术[J].中国农机化学报,2021,42(12):195-203.
WU Chuanyun, WEN Haojun, WU Chongyou, et al. Main directions and push technologies of economic crops mechanization in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(12):195-203. (in Chinese)

[3] 谢卢鑫,王俊,程绍明,等.整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(18):56-65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole-stalk sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(18):56-65. (in Chinese)

[4] TANG H, JIANG Y, WANG J, et al. Bionic design and parameter optimization of rotating and fixed stem- and leaf-cutting devices for carrot combine harvesters[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1-14.

[5] 王栋. 高效艾草脱叶机结构设计与试验分析[D]. 武汉:湖北工业大学,2020.

[6] 万星宇,武安阳,廖庆喜,等.气力机械组合式藜蒿脱叶机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(8):132-142.
WAN Xingyu, WU Anyang, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined leaves removing machine for *Artemisia selengensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8):132-142. (in Chinese)

[7] 董文涛. 艾草脱叶机设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
[8] 康丽春,祝城城,邓勇杰,等.甜叶菊的脱叶机构试验研究[J].农机化研究,2022,44(4):201－204, 230.
KANG Lichun, ZHU Chengcheng, DENG Yongjie, et al. Experimental research on defoliation mechanism of *Stevia rebaudiana*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(4):201－204, 230. (in Chinese)
[9] FENG Y, WU J, GUO C, et al. Numerical simulation and experiment on excavating resistance of an electric cable shovel based on EDEM-RecurDyn bidirectional coupling[J]. Machines, 2022, 10(12): 1203.
[10] PAN F, CHEN J, ZHANG H, et al. Numerical simulation and bench test of crawler-type cotton time-delay hole-forming device based on RecurDyn-EDEM coupling[J]. Machines, 2024, 12(7): 463.
[11] 竹筱歆,吕伊宁,于晶,等.马铃薯全垄仿形式茎叶切碎刀辊设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):140－150.
ZHU Xiaoxin, LÜ Yining, YU Jing, et al. Design and experiment of potato full ridge imitation stem and leaf chopping knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):140－150. (in Chinese)
[12] 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)
[13] 沈聪聪,马帅,谭好超,等.基于多柔体动力学的葡萄挑藤机构参数优化与试验[J].农业工程学报, 2024, 40(16): 24－33.
SHEN Congcong, MA Shuai, TAN Haochao, et al. Parameter optimization and experiment of grapevines picking-up mechanism using multi-flexible-body dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 24－33. (in Chinese)
[14] FANG W, WANG X, HAN D, et al. Parameter optimization and disturbance analysis of the film picking device of the chain-type plough layer residual film recovery machine based on DEM-MBD coupling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109041.
[15] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等.基于DEM-MBD耦合的链勺式人参精密排种器研究[J].农业机械学报,2022,53(3):91－104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):91－104. (in Chinese)
[16] ZHAO J, ZHAO H, TANG H, et al. Bionic threshing component optimized based on MBD-DEM coupling simulation significantly improves corn kernel harvesting rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108075.
[17] ZHANG P, YUAN J, WANG D, et al. Development of a novel pull-cutting end-effector for ex-situ robotic harvesting of white asparagus based on MBD-DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107641.
[18] ZOU L, YAN D, NIU Z, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108138.
[19] LI X, DU Y, LIU L, et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106722.
[20] LI X, DU Y, LIU L, et al. A rapid prototyping method for crop models using the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107451.
[21] 王万章,刘婉茹,袁玲合,等.小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):170－180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):170－180. (in Chinese)
[22] 胡建平,潘杰,陈凡,等.基于EDEM-RecurDyn的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):75－85, 301.
HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):75－85, 301. (in Chinese)
[23] 张红梅,张晨明,李志杰,等.基于EDEM-RecurDyn的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):36－46.
ZHANG Hongmei, ZHANG Chenyang, LI Zhijie, et al. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding device based on EDEM-RecurDyn coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.1):36－46. (in Chinese)
[24] 王善博,阿力木·买买提吐尔逊,黄强斌,等.基于EDEM-RecurDyn耦合的玉米剥皮装置仿真分析与试验[J].中国农机化学报,2023,44(10):115－120, 143.
WANG Shanbo, ALYM·Memettrsun, HUANG Qiangbin, et al. Simulation analysis and experiment of a maize peeling device based on EDEM-RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(10):115－120, 143. (in Chinese)
[25] 王法安,温博,谢晓红,等.三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):201－211,259.
WANG Fa'an, WEN Bo, XIE Xiaohong, et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of conveying and separating device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.1):201－211, 259. (in Chinese)
[26] 吴小伟, 张璐, 唐莉莉, 等. 基于Box-Behnken模型大蒜机播成本影响因素分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 211－217.
WU Xiaowei, ZHANG Lu, TANG Lili, et al. Influencing factors analysis of garlie mechanized sowing cost based on Box-Behnken model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 211－217.(in Chinese)