doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.012

气力机械组合式藜蒿脱叶机设计与试验

万星宇[1,2]　武安阳[1,2]　廖庆喜[1,2]　马国庆[1,2]　李运通[1,2]　廖宜涛[1,2]
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 藜蒿是我国特色蔬菜,可食部为茎秆与顶部嫩叶,因茎秆鲜嫩易折、径向叶片多且易相互缠绕,售前脱叶工序难度大,仍以人工脱叶为主。针对藜蒿脱叶装备匮乏,人工劳动强度大、成本高等问题,在统计分析藜蒿植株特性的基础上,设计了一种气力机械组合式藜蒿脱叶机,通过吸叶滚筒气力吸附引导、脱叶辊机械拉拽脱叶实现藜蒿茎叶的有效分离。统计分析了藜蒿外形几何参数,测试了叶片顺向、垂直、逆向拉拽的抗拉力,明确采用逆向拉拽脱叶方式;开展了吸叶滚筒、脱叶辊等关键部件结构参数和运行参数分析,基于 CFD 模拟了吸叶滚筒气流场状态,结合仿真正交试验确定了吸孔轴向间距为 10 mm,周向分布夹角为 10°,有效孔个数为 121 个,吸孔直径为 4 mm、深度为 4 mm,脱叶辊相对高度为 30 mm;以吸叶滚筒转速、脱叶辊转速和夹持喂入速度为试验因素,以脱叶率和断叶率为评价指标,开展了二次回归正交试验,建立了脱叶率、断叶率与各试验因素之间的回归数学模型,求解得到最佳参数组合为吸叶滚筒转速 77 r/min、脱叶辊转速 65 r/min、喂入速度 40 mm/s;在最佳参数组合条件下,藜蒿脱叶机的脱叶率与断叶率分别为 94.32% 和 12.93%,单辊作业效率可达 12.3 kg/h,满足藜蒿脱叶技术要求。

关键词: 藜蒿; 脱叶机; 气力吸附; 机械拉拽
中图分类号: S226.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)08-0132-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Pneumatic – Mechanical Combined Leaves Removing Machine for *Artemisia selengensis*

WAN Xingyu[1,2]　WU Anyang[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]　MA Guoqing[1,2]　LI Yuntong[1,2]　LIAO Yitao[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: *Artemisia selengensis*, whose edible part is stem and several fresh leaves at the top, is a characteristic vegetable in China. Most of the leaves need to be removed before the sale. However, it is hard to remove the easy folding leaves without damaging the fresh stem. Existing leaves removing operation of the *Artemisia selengensis* is still rely on the hand labor with high cost and labor consumption. To improve the mechanization level of leaves removing operation, a pneumatic – mechanical combined leaves removing machine for the *Artemisia selengensis* was designed. The effective removing of leaves from the stem was realized through the pneumatic adsorption guidance of leaves suction drum and the mechanical pulling of leaves pulling roller. Characteristics based on the defoliation machine was designed. The geometric parameters of *Artemisia selengensis* were statistically analyzed while the pull resistance of leaves in forward, normal, and reverse pulling were tested. It was indicated that the reverse pulling method was better to remove the leaves. The analysis of the structural parameters and operating parameters of the key components such as the leaves suction drum and pulling roller was carried out. The air flow field of the leaves suction drum was simulated based on CFD. Combined with the simulation orthogonal test, the axial spacing of the suction hole was determined to be 10 mm, the circumferential distribution angle was 10°, the number of effective holes was 121, the diameter of the suction hole was 4 mm with the depth of 4 mm, and the relative height of the leaves pulling roller was 30 mm. By taking the leaves suction drum speed, the leaves pulling roller speed and feeding rate as experimental factors,

收稿日期: 2023-01-16　修回日期: 2023-05-05
基金项目: 农业农村部现代农业装备重点实验室开放项目
作者简介: 万星宇(1991—),男,博士后,主要从事机械化收获技术与装备研究,E-mail: wanxy@mail.hzau.edu.cn
通信作者: 廖宜涛(1983—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

taking the removal rate and breaking rate of leaves as evaluation indexes, the quadratic regression orthogonal experiment was conducted. The regression mathematical model was established. The optimal parameter combination was obtained as leaves suction drum speed of 77 r/min, leaves pulling roller speed of 65 r/min, and feeding rate of 40 mm/s. Under the optimal parameter combination condition, the leaves removal rate and breaking rate were 94.32% and 12.93%, respectively. The operation efficiency could reach 12.3 kg/h, which met the production of the *Artemisia selengensis*. The research result could provide a reference for the structure improvement and optimization of leaves removing machine for *Artemisia selengensis*.

Key words: *Artemisia selengensis*; leaves removing machine; pneumatic suction; mechanical pulling

0　引言

藜蒿是一种可食用草本植物，口感脆爽，富含多类营养成分，具有极高的食用和药用价值，目前已广泛种植于东北、华北、华中、云南等地[1-4]。藜蒿可食部为地上鲜嫩茎秆及顶部少量嫩叶，售前一般需脱去中部和底部掌状叶片，即脱叶处理，可提高经济价值 4～5 倍[5]。然而，藜蒿茎秆鲜嫩易折、叶片多且易相互缠绕，脱叶难度大，仍以人工脱叶为主，单人作业脱叶效率仅 9 kg/h，效率低、成本高，而现有茎叶分离装置主要针对玉米、甘蔗等作物，藜蒿机械化脱叶装备仍然匮乏，已成为制约藜蒿产业发展的重要因素。

常见作物的待脱叶片可分为轴向叶片和径向叶片，轴向叶片生长方向与主茎方向基本一致，一般位于主茎顶部，径向叶片主要位于茎秆中下部，环绕主茎生长，现有茎叶分离装备作业形式包括机械式、气力式和气力机械组合式 3 种。对于机械式茎叶分离装备，针对径向叶片分离主要依靠弹齿、刀片、尼龙刷等脱叶元件的回转运动施加冲击、梳刷、搓擦等作用[6-10]，迫使叶片和主茎连接处断裂，作业效率较高，应用于藜蒿脱叶时会过度揉搓挤压茎秆，导致茎秆折断和汁水溢出，影响藜蒿质量，故不适宜于鲜嫩易折藜蒿茎秆的脱叶处理，多用于玉米、甘蔗等不易受损的作物；针对轴向叶片的分离，多采用拉拽、切割等方式，如曾功俊等[11]研制的胡萝卜缨果拉拽分离装置和 TANG 等[12]开发的螳螂前肢胫骨仿生切割刀具，主要施加轴向力，对茎秆损伤较小，但不适用于藜蒿相互缠绕的径向叶片的分离。对于气力式茎叶分离装备，主要利用作物不同组织悬浮速度的差异进行物料分离[13-15]，应用场景多为脱叶完成后的叶片、茎秆分离，如高扬等[13]通过热气流、旋转滚筒和旋风分离器的共同作用，实现了苜蓿茎叶的干燥分离，多运用 CFD 模拟并优化内部气流场[14]。对于气力机械组合式茎叶分离装置，普遍采用搓擦和梳刷的机械式分离方式，并配合气力清选进行茎叶分离，在甘蔗收获领域应用较为广泛，如凯斯 A8000 型甘蔗收获机[16]、约翰迪尔 CH570 型甘蔗收获机、中联重科 AS60 型甘蔗收获机等，核心脱叶处理仍以机械式为主。

针对藜蒿茎秆鲜嫩易损伤、去除径向叶片为主的特点，需尽量通过轴向力实现茎叶分离以满足藜蒿高效低损脱叶需求。本文在统计分析藜蒿植株特性的基础上，设计一种气力机械组合式藜蒿脱叶机，通过吸叶滚筒气力吸附引导径向叶片、脱叶辊轴向拉拽脱叶实现藜蒿茎叶的有效分离[17-18]，开展吸叶滚筒、脱叶辊、喂入装置等关键部件结构参数和运行参数分析，基于 CFD 模拟吸叶滚筒内部气流场状态，开展二次回归正交试验以得到最佳参数组合，为藜蒿脱叶机结构改进和优化提供参考。

1　藜蒿植株特性及脱叶技术

以湖北省孝感市三清藜蒿种植合作社的大叶青藜蒿为研究对象，其植株形态如图 1 所示，随机选取收获期藜蒿进行叶片统计，结果表明：藜蒿叶片呈掌状，顶部嫩叶数为 3～5 片/株，待脱叶叶片数为 7～14 片/株，平均面积为 25.06 cm^2；茎秆和叶片的平均长度分别为 414 mm 和 121.2 mm，茎秆直径为 3.95～6.81 mm，茎秆投影面积小于叶片，易出现叶片与茎秆相互缠绕的现象。

图 1 测试了叶片含水率、茎秆弯曲特性等，结果如表 1 所示，藜蒿茎秆和叶片含水率均在 91% 以

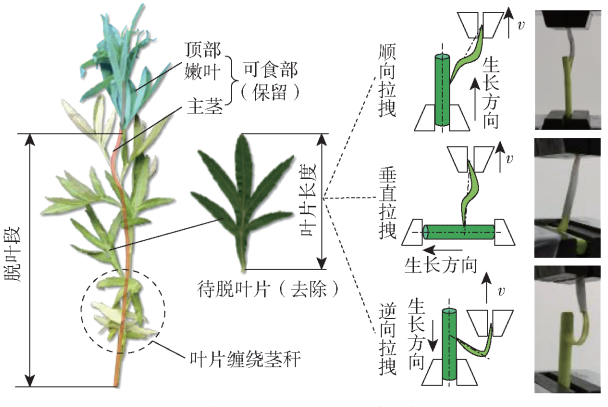


图 1　藜蒿形态和茎叶拉拽测试

Fig. 1　Morphology and leaf pulling test of *Artemisia selengensis*

上,茎秆弯曲应力仅为 11.36 MPa,脱叶时受法向力极易发生断折,影响藜蒿质量,宜使用轴向力实现茎叶分离。

表 1 藜蒿主要物理特性参数

Tab. 1 Main physical characteristics parameters of *Artemisia selengensis*

参数		数值	平均值
叶	长/mm	105 ~ 145	121.2
	宽/mm	68 ~ 125	95.41
	面积/cm^2	16.23 ~ 36.56	25.06
	含水率/%	91.5 ~ 92.2	91.8
	摩擦角/(°)	38.8 ~ 41.3	40.1
茎秆	长/mm	363 ~ 492	414
	直径/mm	2.71 ~ 6.81	4.41
	含水率/%	92.9 ~ 93.9	93.4
	弯曲应力/MPa	8.56 ~ 13.89	11.36
	弹性模量/MPa	19.14 ~ 27.40	23.08
茎叶抗拉力	顺向/N	7.07 ~ 13.97	10.90
	垂直/N	1.63 ~ 5.30	3.23
	逆向/N	0.93 ~ 2.10	1.51

利用瑞格尔 RGM - 3005 型万能材料试验机(采用 X001T 型传感器,最大载荷 1 kN,载荷测试精度 0.01 N)对藜蒿 3 个方向的茎叶抗拉力进行测定,其中顺向拉拽为拉扯叶片的方向与藜蒿茎秆生长方向相同的拉拽叶片方式,逆向拉拽为拉扯叶片的方向与藜蒿茎秆生长方向相反的拉拽叶片方式。结果表明,茎叶顺向抗拉力均值为 10.9 N,垂直抗拉力均值为 3.23 N,逆向抗拉力均值为 1.51 N,藜蒿茎叶连接处的逆向抗拉力远小于顺向和垂直抗拉力,故采用轴向力实现藜蒿拉拽脱叶时,应采取逆向拉拽方式,减少茎叶分离过程中对藜蒿茎秆造成的损伤;拉拽过程中,部分叶片在非连接点处断裂,即断叶现象,造成破损叶片残留,影响藜蒿品相。

藜蒿脱叶主要技术难点包括:①茎叶初步分离。因藜蒿叶片数量多,分布不均匀,叶片面积较大易缠绕茎秆,且茎秆易损伤,需采用不对茎秆直接施加作用力的茎叶初步分离方式。②逆向拉拽脱叶而不断叶。使用轴向力逆向拉拽叶片,在脱尽叶片、减少茎秆损伤的同时减少叶片断裂,保证藜蒿品相。

2 整机基本结构和工作过程

2.1 基本结构

针对藜蒿脱叶茎叶初步分离、逆向拉拽脱叶的技术需求,提出采用吸叶滚筒气力吸附引导叶片、脱叶辊轴向拉拽脱叶的工艺方案,设计了一种气力机械组合式藜蒿脱叶机,其结构如图 2 所示,关键部件包括夹持喂入装置、吸叶滚筒、脱叶辊、离心风机、电控系统等,主要技术参数如表 2 所示。吸叶滚筒、脱叶辊、喂入护板共同构成了脱叶区;夹持喂入装置略高于吸叶滚筒,通过两个步进电机进行往复和旋转运动,辅助叶片分离;为提高吸附效果,吸叶滚筒负压室选择 115°的包络式滚筒结构。

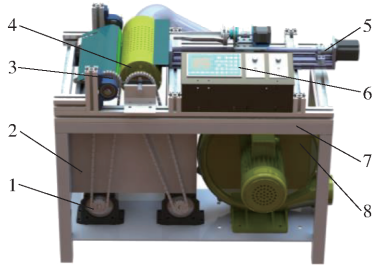


图 2 气力机械组合式藜蒿脱叶机结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of pneumatic - mechanical combined leaves removing machine for *Artemisia selengensis*

1. 步进电机 2. 残叶收集箱 3. 脱叶辊 4. 吸叶滚筒 5. 夹持喂入装置 6. 电控系统 7. 机架 8. 离心风机

表 2 藜蒿脱叶机基本参数

Tab. 2 Basic parameter of leaves removing machine for *Artemisia selengensis*

参数	数值
尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	680 × 470 × 880
整机质量/kg	75
脱叶率/%	> 90
断叶率/%	< 15
作业效率/(kg·h^{-1})	> 10
功率/kW	1.2

2.2 工作过程

夹持喂入装置设置两组电机分别控制夹持喂入装置的往复运动和旋转运动,脱叶前,将若干藜蒿顶部放置于夹持喂入装置,随后启动夹持喂入装置,将藜蒿推送进入脱叶区,单面脱叶完成后夹持装置回到初始位置并旋转 120°,随后进入下一个脱叶行程,通过夹持装置的 3 次往复运动和 2 次转动确保径向交错叶片的完全脱叶;同时,脱叶辊、吸叶滚筒对象转动,离心风机启动后在吸叶滚筒内形成负压气流,透过吸叶滚筒吸孔,在表面形成稳定负压吸附区。

在单个脱叶行程中,脱叶装置脱叶区工作过程可分为叶片捕捉、负压吸附、拉拽分离、残叶清理 4 个阶段,如图 3 所示。在叶片捕捉阶段,进入脱叶区的叶片在吸叶滚筒转动作用下与茎秆初步分离;在负压吸附阶段,初步分离后的叶片进入吸叶滚筒负压吸附区,在力气作用下紧贴于滚筒表面;在拉拽分离阶段,吸附后的叶片跟随吸叶滚筒转动至脱叶辊处,吸叶滚筒和脱叶辊对叶片形成一个夹持力,二者对辊对叶片产生拉拽力,从而实现对藜蒿茎叶的

拉拽分离；分离后的残叶随着吸叶滚筒继续转动，至无负压区域后与吸叶滚筒分离，分离后的残叶下落至残叶收集箱，完成残叶清理阶段。

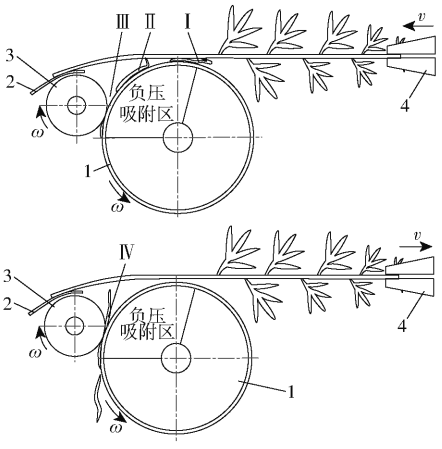


图 3　单个脱叶行程工作过程示意图

Fig. 3　Schematic of working process of single leaves removing stroke

1. 吸叶滚筒　2. 喂入护板　3. 脱叶辊　4. 夹持喂入装置　Ⅰ. 叶片捕捉阶段　Ⅱ. 负压吸附阶段　Ⅲ. 拉拽分离阶段　Ⅳ. 残叶清理阶段

3　关键部件设计与参数分析

3.1　吸叶滚筒设计与参数分析

吸叶滚筒是藜蒿脱叶机的核心，其结构如图 4 所示，主要包括带吸孔筒体、气室端盖、芯轴、气室分隔装置等。带吸孔筒体通过轴承与气室端盖和芯轴连接，可以独立转动，其内部由气室分隔装置划分为负压室和无压室，负压由与气室端盖相连的离心风机提供，无压室气压为标准气压。吸叶滚筒关键参数主要包括筒体直径、吸孔数量、吸孔尺寸和分布以及气室内腔结构等。

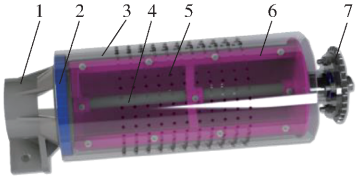


图 4　吸叶滚筒结构图

Fig. 4　Structural drawing of leaves suction drum

1. 气室端盖　2. 轴承　3. 筒体　4. 芯轴　5. 吸孔　6. 气室分隔装置　7. 链轮

3.1.1　筒体直径与吸附有效长度

筒体回转过程中应保证吸附的藜蒿叶片可在脱叶辊配合下完成拉拽脱叶，在叶片完全吸附且紧贴于筒体表面的临界条件下，筒体外圆 1/4 弧长应小于最小叶片长度，即

$$\frac{\pi D}{4} < l_{\min} \tag{1}$$

式中　D——筒体外径，mm

$l_{\min}$——藜蒿最小叶片长度，取 105 mm

计算得 $D < 133.7$ mm，为增大负压吸附区域面积，筒体外径取大值，取整后为 133 mm。

筒体吸附有效长度，即吸孔排列宽度，影响吸叶滚筒作业效率和气压分布均匀性，吸附有效长度越长则负压区的作用面积越大，单次作业量提高，但吸附有效长度增加则吸孔数量增多，在离心风机作业性能不变的情况下会降低负压室的气压，且影响吸叶滚筒轴向吸孔气压分布的均匀性。综合夹持喂入情况选定筒体吸附有效长度 270 mm，可同时吸附 3 片藜蒿叶片。

3.1.2　基于 CFD 的吸孔孔型对比

开展直孔、锥孔和槽孔 3 种孔型的对比分析，基于 CFD 模拟不同吸孔内的气流速度与压力分布[19-22]。为避免其他因素干扰，设置 3 种吸孔截面积相等，均为 12.56 mm^2，如图 5 所示。

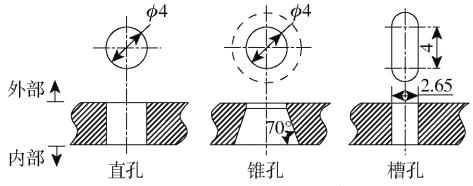


图 5　3 种吸孔结构示意图

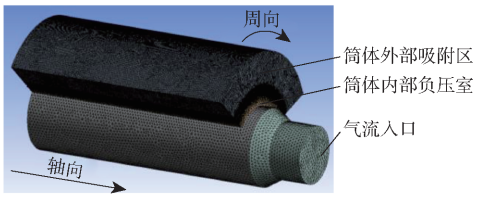
Fig. 5　Structure diagram of three kinds of hole

为提升运算速度，去除吸叶滚筒次要细节特征，基于 Fluent 划分吸叶滚筒网格并采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型构建仿真模型，建立吸孔内侧和外侧监测点，设置气室端盖入口为气流速度入口，根据预试验结果设置入口静压 -1 300 Pa、入口速度 -20 m/s，仿真结束后提取监测点气压和气流速度，如图 6 所示。

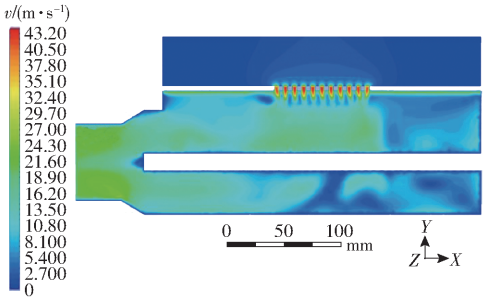
不同吸孔下筒体的内外部风压、风速及其分布均匀性如表 3 所示。由表 3 可知，不同吸孔的筒体内、外压力和筒体外风速的平均值差异不大，槽孔的轴向风压略大于直孔和锥形孔，直孔的外风速略高于锥孔和槽孔，直孔的周向内外风压略高于锥孔和槽孔；在分布均匀性方面，直孔的周向稳定性分布最佳，直孔和槽孔的轴向外部风压和轴向外部风速稳定性分布最佳。综合分析 3 种吸孔的内外部气压和外部风速分布，直孔综合情况较优，故选择直孔作为吸叶滚筒的吸孔。

3.1.3　吸孔尺寸和数量对吸孔吸附力的影响

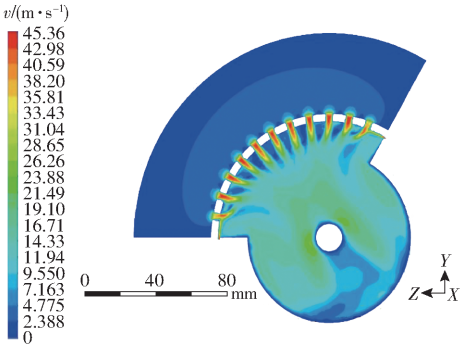
吸附力是获得最佳吸叶滚筒脱叶效果的关键，可由滚筒吸孔外表面压强、吸孔表面积等计算得到，但在实际试验过程中，吸叶滚筒的旋转和藜蒿叶片吸附、脱离对吸孔外表面压强等影响较大，难以直接通过仪器设备测试得到吸附力，因此基于 CFD 探索



(a) 网格划分



(b) 轴向气流场分布



(c) 周向气流场分布

图 6 吸叶滚筒气流场分布(以直孔为例)

Fig. 6 Air field distribution of leaves suction drum (taking straight hole as an example)

表 3 吸孔形状对筒体内外压力和外部风速的影响

Tab. 3 Influence of hole shape on air speed and pressure inside and outside cylinder

孔型	气流分布		均值	标准差	变异系数/%
直孔	轴向	内压/Pa	-1 168.4	27.63	2.36
		外压/Pa	-635.8	17.84	2.81
		外速/(m·s⁻¹)	32.3	0.45	1.40
	周向	内压/Pa	-1 170.7	16.98	1.45
		外压/Pa	-636.9	12.69	1.99
		外速/(m·s⁻¹)	32.3	0.49	1.53
锥孔	轴向	内压/Pa	-1 073.1	41.03	3.82
		外压/Pa	-611.0	29.13	4.77
		外速/(m·s⁻¹)	31.7	0.61	1.93
	周向	内压/Pa	-1 057.5	78.20	7.40
		外压/Pa	-614.1	31.79	5.18
		外速/(m·s⁻¹)	31.9	0.84	2.64
槽孔	轴向	内压/Pa	-1 199.3	25.20	2.10
		外压/Pa	-646.1	18.43	2.81
		外速/(m·s⁻¹)	32.2	0.46	1.43
	周向	内压/Pa	-1 143.1	32.75	2.87
		外压/Pa	-613.3	36.09	5.89
		外速/(m·s⁻¹)	31.7	0.95	3.00

不同吸孔孔型、孔深、数量等对吸附力的影响。

当吸叶滚筒直径、气室分布、气流入口流量压力不变时,藜蒿脱叶过程中吸叶滚筒吸孔对叶片的吸附效果与单孔吸附力和吸孔流量有关。在明确采用直孔吸孔以保证吸叶滚筒内外风速压力稳定的基础上,选择对叶片吸附力影响较大的吸孔直径、吸孔深度、吸孔数量等为影响因素,提取吸叶滚筒内部气压和外部气流速度,分别计算单孔吸附力和吸孔流量,计算式为

$$\begin{cases} F_i = \dfrac{\pi d^2 p}{4} \\ Q = \dfrac{\pi d^2 v}{4} \end{cases} \tag{2}$$

式中 F_i——吸孔吸附力,N

Q——吸孔流量,m^3/h

d——吸孔直径,mm

p——筒体内部气压,Pa

v——筒体吸孔外部气流速度,m/s

通过仿真分析可提取筒体内部气压及外部气流速度,配合吸孔尺寸即可计算得到吸孔吸附力及吸孔流量。

为获得孔型尺寸及数量的最佳参数组合,以吸叶滚筒的吸孔直径、吸孔深度和吸孔数量为试验因素,以单孔吸附力和吸孔流量为试验指标进行三因素三水平仿真正交试验,其试验因素水平如表 4 所示。

表 4 正交试验因素水平

Tab. 4 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	吸孔直径 A/mm	吸孔深度 B/mm	吸孔数量 C/个
1	3	2	363
2	4	3	121
3	5	4	242

为了消除单孔吸附力和吸孔流量之间不同量纲的影响,采用最大-最小标准化的归一化方法对单孔吸附力和吸孔流量进行隶属值转换。为了获得较为理想的试验参数组合,对单孔吸附力和吸孔流量附加权重,由于二者都较为重要,因此设置单孔吸附力和吸孔流量的权重均为 0.5,计算式为

$$\begin{cases} s' = \dfrac{s_i - \min N}{\max N - \min N} \\ W = 0.5 s_1 + 0.5 s_2 \end{cases} \tag{3}$$

式中 s'——指标隶属值 s_i——指标值

s_1——单孔吸附力隶属值

s_2——吸孔流量隶属值

N——指标最值 W——综合分数

以综合分数作为总指标进行极差分析,其结果

如表 5 所示，可以得知各个因素对综合指标的影响由大到小为 C、B、A，优选方案为吸孔直径 4 mm，吸孔深度 4 mm，有效吸孔个数 121 个。以该优选方案进行仿真试验验证，求得吸孔的气流流量为 4.16×10^{-4} m³/s，单孔吸附力为 1.468×10^{-2} N，综合分数为 0.90，该分数优于表中结果；藜蒿茎秆平均质量为 16.75 g、平均直径仅为 4.41 mm，自身所受重力大于型孔吸附力，藜蒿茎秆受吸孔吸附力影响较小。

表 5　试验方案及试验结果

Tab. 5　Test scheme and results

序号		吸孔直径	吸孔深度	吸孔数量	吸附力/N	流量/(m³·s⁻¹)	吸附力隶属值	流量隶属值	综合分数
1		1	1	1	3.94×10^{-3}	1.57×10^{-4}	0.15	0	0.08
2		1	2	2	1.53×10^{-2}	3.20×10^{-4}	1.00	0.54	0.77
3		1	3	3	6.95×10^{-3}	2.11×10^{-4}	0.37	0.18	0.28
4		2	1	2	1.46×10^{-2}	3.98×10^{-4}	0.94	0.80	0.87
5		2	2	3	5.31×10^{-3}	2.42×10^{-4}	0.25	0.28	0.27
6		2	3	1	2.71×10^{-3}	1.74×10^{-4}	0.06	0.06	0.06
7		3	1	3	3.82×10^{-3}	2.59×10^{-4}	0.14	0.34	0.24
8		3	2	1	1.94×10^{-3}	1.81×10^{-4}	0	0.08	0.04
9		3	3	2	1.24×10^{-2}	4.60×10^{-4}	0.78	1.00	0.89
综合分数	k_1	0.37	0.39	0.06					
	k_2	0.40	0.36	0.84					
	k_3	0.39	0.41	0.26					
	极差 R	0.03	0.05	0.78					

3.2　脱叶辊设计与参数分析

脱叶辊、吸叶滚筒组成对辊，与喂入护板配合实现对藜蒿茎叶拉拽分离。脱叶辊外侧覆盖 HRA50 的橡胶，表面设置凸起结构以减小脱离后叶片对脱叶辊的黏附性。根据藜蒿叶片长度，为减少对辊差速转动造成的叶片的揉搓和叶片缠绕现象，胶辊直径选择为 60 mm。

预试验结果表明，脱叶辊与吸叶滚筒的相对高度对脱叶效果影响显著，脱叶辊较高时，喂入过程中藜蒿茎秆易进入对辊区域，造成损伤，因此应当确定脱叶辊的合理安装位置。假设藜蒿茎秆质地均匀，因藜蒿脱叶后茎秆只受自身重力作用，在夹持喂入装置固定下，可将其简化为受均匀载荷的悬臂梁[23-24]，如图 7 所示。

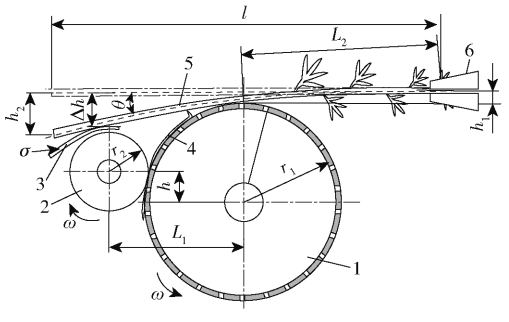


图 7　脱叶辊高度分析图

Fig. 7　Height analysis diagram of leaves pulling roller

1. 吸叶滚筒　2. 脱叶辊　3. 喂入护板　4. 叶片　5. 茎秆　6. 夹持喂入装置

根据悬臂梁的均匀载荷挠曲线方程可计算藜蒿茎秆下降量，计算式为

$$w=\frac{qx^2}{24EI}(4lx-6l^2-x^2) \tag{4}$$

式中　w——藜蒿弯曲时的挠度，mm

q——藜蒿重力均布载荷，N/mm

x——计算点与固定端的距离，mm

E——藜蒿茎秆弹性模量，MPa

I——藜蒿茎秆惯性矩，mm⁴

l——藜蒿茎秆悬臂总长度，mm

由藜蒿物料特性测试结果可知，单株藜蒿平均质量为 13.4 g，藜蒿脱叶段平均长度为 314 mm，假定藜蒿茎秆上下等粗，取保留叶处与根端的平均直径为 4.41 mm，同时忽略顶部留叶片的质量，计算藜蒿茎秆的重力均布载荷约为 0.42 N/m，在重力作用下藜蒿向下弯曲，根据式(4)可计算出藜蒿底端到达脱叶辊上端最大下降位移为 9.38 mm。

在吸叶滚筒顶端的藜蒿茎秆存在倾斜角 θ，故而藜蒿茎秆的下降位移除了因藜蒿重力作用的挠度变形值外，还应当加上该倾角产生的下降量，茎秆总体下降量应小于喂入护板顶部与吸叶滚筒顶端相对高度 Δh，即满足

$$\begin{cases} L_1=\sqrt{(r_1+r_2)^2-h^2} \\ h_2=L_1\tan\theta \\ h=r_1-r_2-\sigma-\Delta h \\ \theta=\arcsin\dfrac{h_1}{L_2} \\ h_2+w<\Delta h \end{cases} \tag{5}$$

式中 h——脱叶辊相对安装高度,mm

h_1——夹持喂入装置距吸叶滚筒顶端距离,mm

h_2——藜蒿茎秆根端因倾斜角度产生的下落距离,mm

Δh——喂入护板顶部与吸叶滚筒顶端的相对高度,mm

L_1——吸叶滚筒顶端至喂入护板顶端的水平距离,mm

L_2——吸叶滚筒顶端与夹持喂入装置之间的藜蒿段长度,mm

r_1——吸叶滚筒外圆半径,取 66.5 mm

r_2——脱叶辊外圆半径,取 30 mm

θ——藜蒿茎秆倾斜角,(°)

σ——喂入护板厚度,取 1.5 mm

综合式(4)、(5)计算得脱叶辊相对安装高度 $h \leqslant 49$ mm。若相对高度过高,则藜蒿茎秆更易进入对辊区域,造成茎秆损伤;若相对高度过低,则藜蒿脱叶过程更易形成顺向拉拽,造成茎秆折断。预试验结果表明,当脱叶辊相对高度为 30 mm 时,可在保证脱叶效率的基础上,有效降低藜蒿茎秆的断折概率,故取脱叶辊相对安装高度为 30 mm。

因藜蒿特性复杂、植株各异,吸叶滚筒转速、脱叶辊转速、喂入速度等运行参数难以通过理论分析确定准确取值,拟采取实际试验探寻气力机械组合式藜蒿脱叶机最佳参数组合。

4 藜蒿脱叶机性能试验

4.1 试验材料与方法

选取湖北省孝感市三清藜蒿合作社的现采藜蒿,选取长势良好且茎秆无损伤的藜蒿植株,试验前将藜蒿木质化部分切除,保留藜蒿茎秆约 300 mm,与市场售卖藜蒿长度基本一致。依托气力机械组合式藜蒿脱叶机(图 8),以吸叶滚筒转速、脱叶辊转速、喂入速度为因素,以影响藜蒿品质的脱叶率和断叶率为评价指标,开展单因素试验确定脱叶性能较优的因素水平范围,在此基础上开展回归正交试验,明确最佳参数组合并验证。

试验前复位夹持喂入装置,随机选取 5 株藜蒿放置于树脂固定槽上,使用前后 2 根柔性带缠绕藜蒿茎部,确保顶部叶片在固定槽内顺向固定,通过调整柔性带张紧力来调节对藜蒿的夹持力度,确保吸叶滚筒所施加的拉拽力小于藜蒿茎叶与夹持喂入装置间的最大摩擦力,避免夹持装置对藜蒿顶部茎叶的损伤。记录待脱叶叶片数量 N_1,通过电控系统设定吸叶滚筒转速、脱叶辊转速、喂入速度、离心风机转速等,使用 ZC1000-1F 型智能压力风量仪(上海亿欧仪表设备有限公司,压力测量范围:±2 000 Pa)检测气室风压;调试后启动设备,待脱叶完成后,取出藜蒿,统计应脱叶片剩余数量 N_2 及断叶后残留叶柄数量 N_3;每组试验重复 5 次取平均值,脱叶率与断叶率计算公式为

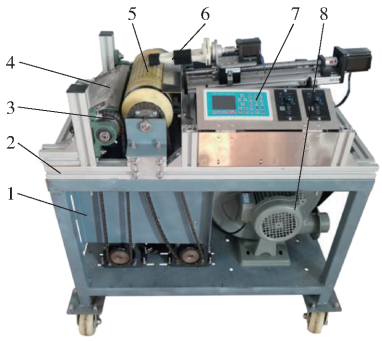


图 8 气力机械组合式藜蒿脱叶机实物图

Fig. 8 Real product of pneumatic-mechanical combined leaves removing machine for *Artemisia selengensis*

1. 残叶收集箱 2. 机架 3. 脱叶辊 4. 喂入护板 5. 吸叶滚筒 6. 夹持喂入装置 7. 电控系统 8. 离心风机

$$Y_1 = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \tag{6}$$

$$Y_2 = \frac{N_3}{N_1} \times 100\% \tag{7}$$

式中 Y_1——脱叶率,% Y_2——断叶率,%

4.2 试验结果与分析

4.2.1 吸叶滚筒转速对脱叶性能的影响

设置吸叶滚筒转速为 10~120 r/min,将其平均分成 12 个梯度进行试验,控制负压室风压 -960 Pa,脱叶辊转速 30 r/min,喂入速度 40 mm/s,喂入高度 35 mm,脱叶辊相对高度 30 mm,吸叶滚筒转速对脱叶性能的影响如图 9 所示。

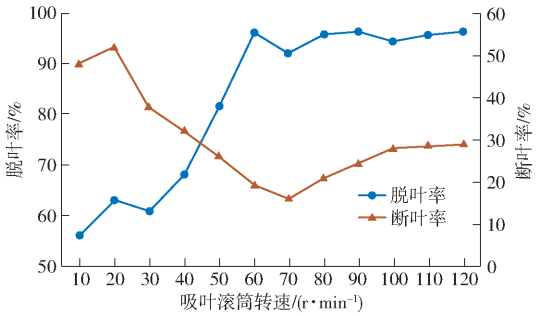


图 9 吸叶滚筒转速与脱叶性能关系曲线

Fig. 9 Curves of relationship between leaves suction roller speed and leaves removing performance

由图 9 可知,吸叶滚筒转速为 60~80 r/min 时,脱叶率基本稳定在 90% 以上,断叶率均低于 20%。其原因是喂入速度一定时,吸叶滚筒转速越快,藜蒿叶片更易形成逆向拉拽,所受茎叶连接力最小,叶片

更容易去除，断叶率也有所下降，但吸叶滚筒转速过高时，叶片受到吸叶滚筒带动过快，藜蒿叶片姿态调整时间不足，叶柄容易断裂。因此吸叶滚筒转速较优范围为 60 ~ 80 r/min。

4.2.2　脱叶辊转速对脱叶性能的影响

设置脱叶辊转速为 10 ~ 120 r/min，均分为 12 个梯度，控制负压室气压为 -960 Pa，吸叶滚筒转速 70 r/min，喂入速度为 40 mm/s，喂入高度 35 mm，脱叶辊相对高度 30 mm，脱叶辊转速对脱叶性能的影响如图 10 所示。

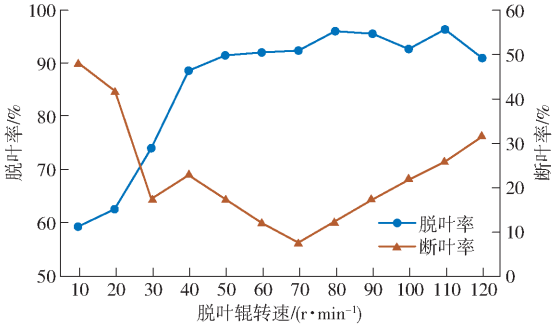


图 10　脱叶辊转速与脱叶性能关系曲线

Fig. 10　Curves of relationship between leaves pulling roller speed and leaves removing performance

由图 10 可知，脱叶辊转速为 50 ~ 80 r/min 时，随脱叶辊转速增大，藜蒿脱叶率呈先上升后趋近稳定，断叶率呈先下降后上升的趋势。其原因是脱叶辊用于拉拽藜蒿叶片，当拉拽较慢时，藜蒿叶片难以形成有效拉拽条件，导致断裂率较高；当脱叶辊转速较快时，叶片拉拽较为猛烈，断叶率增大。综合考虑脱叶辊较优转速为 50 ~ 80 r/min。

4.2.3　喂入速度对脱叶性能的影响

设置藜蒿喂入速度为 10 ~ 80 mm/s，将其平均分为 8 个梯度，设置负压室气压为 -960 Pa，吸叶滚筒转速为 70 r/min，脱叶辊转速为 30 r/min，喂入高度为 35 mm，脱叶辊相对高度 30 mm，喂入速度对脱叶性能的影响如图 11 所示。

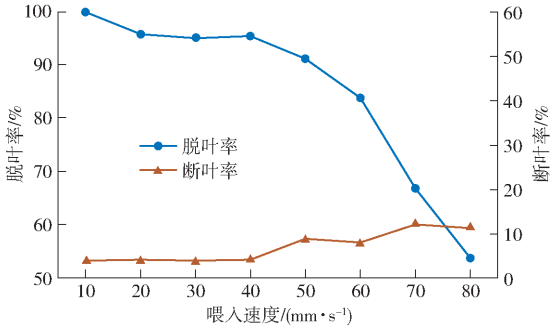


图 11　喂入速度与脱叶性能关系曲线

Fig. 11　Curves of relationship between feeding rate and leaves removing performance

由图 11 可知，随喂入速度的不断增大，藜蒿脱叶率呈逐步下降趋势，当喂入速度大于 60 mm/s 时，藜蒿脱叶率迅速降低；断叶率随喂入速度增大呈先上升后稳定的趋势。原因在于喂入速度较低时，藜蒿叶片总呈逆向拉拽的趋势，随喂入速度增加，藜蒿叶片拉拽方向由逆向拉拽变为垂直或顺向拉拽，藜蒿断叶率上升。考虑到作业效率，喂入速度较优取值范围为 30 ~ 60 mm/s。

4.2.4　回归正交试验

为探究试验因素对评价指标的影响显著性和各因素间交互作用对评价指标的影响，得到最优的参数组合，开展三因素三水平 Box - Behnken 试验，试验因素水平及试验结果如表 6 所示。

表 6　Box - Behnken 试验结果

Tab. 6　Box - Behnken test results

试验号	因素			脱叶率	断叶率
	吸叶滚筒转速 X_1/(r·min^{-1})	脱叶辊转速 X_2/(r·min^{-1})	喂入速度 X_3/(mm·s^{-1})	Y_1/%	Y_2/%
1	70	65	45	89.66	13.79
2	60	65	60	90.32	22.58
3	60	80	45	93.75	15.63
4	70	65	45	91.10	16.34
5	60	65	30	96.55	17.24
6	80	50	45	96.67	16.67
7	60	50	45	93.43	21.03
8	70	50	60	92.59	22.22
9	80	65	60	94.86	17.86
10	70	65	45	91.59	14.81
11	80	80	45	96.55	13.79
12	80	65	30	94.55	12.68
13	70	50	30	92.59	11.11
14	70	80	30	93.10	10.34
15	70	80	60	90.32	12.90
16	70	65	45	92.10	13.79
17	70	65	45	91.33	13.33

运用数据处理软件 Design-Expert 12 对试验数据进行多元回归拟合，得脱叶率和断叶率的二次回归模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 272.13 - 4.43X_1 - 0.41X_2 - 0.63X_3 - \\ \quad 7.27\times10^{-4}X_1X_2 + 0.01X_1X_3 - 0.003X_2X_3 + \\ \quad 0.029X_1^2 + 0.004X_2^2 - 7.6\times10^{-5}X_3^2 \\ Y_2 = 313.33 - 7.09X_1 - 1.85X_2 + 1.09X_3 + \\ \quad 0.02X_1X_2 + 0.004X_1X_3 - 0.009X_2X_3 + \\ \quad 0.036X_1^2 + 0.004X_2^2 - 0.006X_3^2 \end{cases} \tag{8}$$

对二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验，结果如表 7 所示。由表 7 可知，脱叶率和断

叶率的响应面模型 $P<0.01$，失拟不显著，表明该回归模型与实际试验数据和试验规律相近，可用来预测脱叶装置的最佳参数。

表 7 试验结果方差分析

Tab. 7 Test result variance analysis

变异来源	脱叶率 Y_1 平方和	自由度	P	断叶率 Y_2 平方和	自由度	P
模型	73.66	9	0.004 8**	423.26	9	0.000 7**
X_1	9.18	1	0.017 0*	101.44	1	0.000 6**
X_2	0.3013	1	0.590 3	100.60	1	0.000 6**
X_3	9.46	1	0.015 9*	92.40	1	0.000 8**
X_1X_2	0.047 6	1	0.829 0	39.29	1	0.007 8**
X_1X_3	10.69	1	0.012 1*	2.02	1	0.431 2
X_2X_3	1.93	1	0.196 1	18.29	1	0.040 1*
X_1^2	36.13	1	0.000 5**	57.31	1	0.003**
X_2^2	4.31	1	0.070 2*	4.17	1	0.268 8
X_3^2	0.001 2	1	0.972 3	8.79	1	0.124 7
残差	6.63	7		20.25	7	
失拟	3.25	3	0.393 4	10.32	3	0.368 7
误差	3.37	4		9.93	4	
综合	80.29	16		443.50	16	

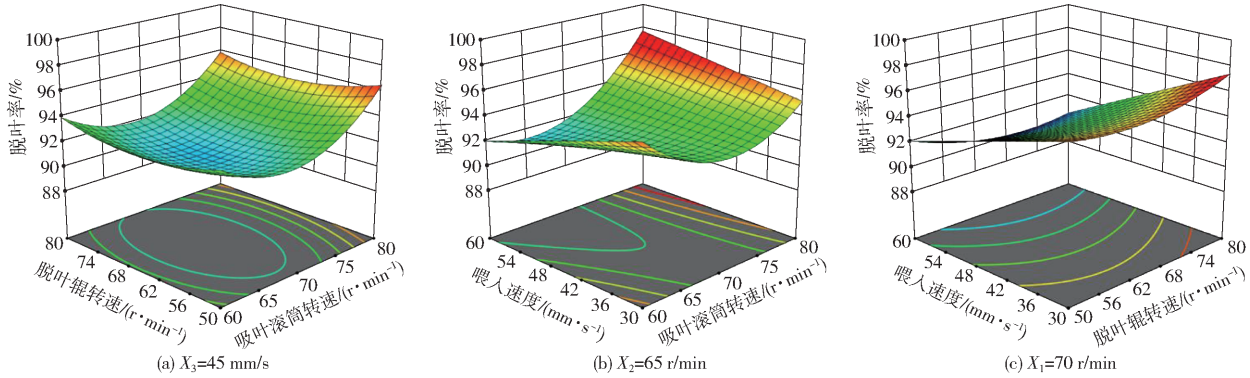
注：* 表示差异显著（$P<0.05$）；** 表示差异极显著（$P<0.01$）。

双因素交互作用对脱叶率的影响如图 12 所示。由图 12a 可知，当喂入速度不变时，脱叶率均随吸叶滚筒转速和脱叶辊转速的增加呈先减小后增加的趋势；由图 12b 可知，当脱叶辊转速不变时，响应面曲线沿喂入速度方向变化得更快，即喂入速度对脱叶率影响更为显著；由图 12c 可知，当吸叶滚筒转速一定时，响应面曲线沿脱叶辊转速方向变化得更快，即脱叶辊转速对脱叶率影响更为显著。

双因素交互作用对断叶率的影响如图 13 所示。由图 13a 可知，当喂入速度不变时，随脱叶辊转速的增加，断叶率上升，响应面曲线沿脱叶滚转速方向变化得更快，脱叶辊转速对断叶率影响更为显著；由图 13b 可知，当脱叶辊转速一定时，断叶率随喂入速度增加呈现先上升后稳定的趋势，喂入速度对断叶率影响更加显著；由图 13c 可知，当吸叶滚筒转速一定时，脱叶辊转速越小，断叶率上升趋势越明显。

5 最佳参数组合及试验验证

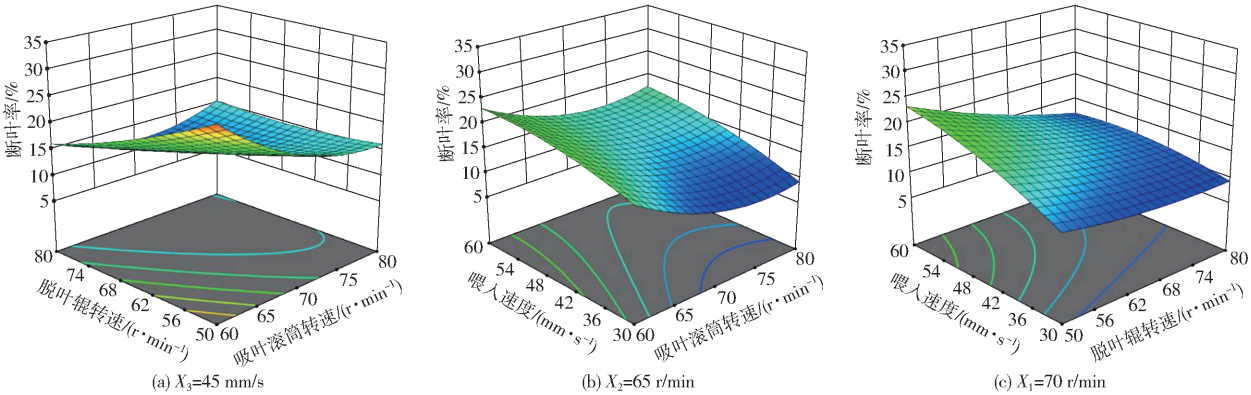
为提高脱叶机脱叶率、降低断叶率，利用 Design-Expert 软件求解最优参数组合；以吸叶滚筒转速、脱叶辊转速和喂入速度为试验因素，以最大脱叶率和最小断叶率为评价指标进行优化设计，建立目标函数和边界约束函数为



(a) X_3=45 mm/s (b) X_2=65 r/min (c) X_1=70 r/min

图 12 交互作用对脱叶率影响的响应面

Fig. 12 Response surface diagrams of effects of interaction on leaves removal rate



(a) X_3=45 mm/s (b) X_2=65 r/min (c) X_1=70 r/min

图 13 交互作用对断叶率影响的响应面

Fig. 13 Response surface diagrams of effect of interaction on leaves breaking rate

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 60\ \text{r/min} \leqslant X_1 \leqslant 80\ \text{r/min} \\ 50\ \text{r/min} \leqslant X_2 \leqslant 80\ \text{r/min} \\ 30\ \text{mm/s} \leqslant X_3 \leqslant 60\ \text{mm/s} \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

使用 Design-Expert 的 BBD 模块优化后得出最优参数组合为吸叶滚筒转速 77.3 r/min、脱叶辊转速 65.2 r/min 和喂入速度 39.8 mm/s，在最佳参数组合条件下，脱叶率与断叶率预测值分别为 95.12% 和 11.13%。

为验证优化参数的可行性，综合控制精度选取最优参数组合为：吸叶滚筒转速 77 r/min、脱叶辊转速 65 r/min 和喂入速度 40 mm/s，开展验证试验，如图 14 所示。试验重复 3 次取平均值，结果表明在最佳参数组合条件下脱叶率为 94.32%，断叶率为 12.93%，其结果与预测值基本吻合，单辊作业效率可达 12.3 kg/h，满足藜蒿脱叶要求。



(a) 夹持态　　(b) 吸附态　　(c) 脱叶效果

图 14　藜蒿脱叶效果

Fig. 14　Leaves removing performance of machine for *Artemisia selengensis*

6　结论

(1)针对藜蒿机械化脱叶装备匮乏等问题，基于分离吸附、拉拽脱叶的原理，设计了一种气力机械组合式藜蒿脱叶机，可实现吸叶滚筒气力吸附引导、脱叶辊机械拉拽脱叶。

(2)结合藜蒿植株特性及茎叶抗拉力分析，设计了吸叶滚筒、脱叶辊等关键部件，基于 CFD 开展了吸叶滚筒气流场数值分析，确定了吸叶滚筒筒体直径为 133 mm、有效吸附长度为 270 mm、吸孔直径为 4 mm、深度为 4 mm、有效孔个数为 121 个，构建了脱叶辊和吸叶滚筒作业的藜蒿悬臂梁模型，确定了脱叶辊相对高度为 30 mm。

(3)开展了气力机械组合式藜蒿脱叶机单因素试验及回归正交试验，试验结果表明，最佳参数组合为吸叶滚筒转速 77 r/min、脱叶辊转速 65 r/min 和喂入速度为 40 mm/s，最佳参数组合下，藜蒿脱叶机的脱叶率和断叶率分别为 94.32% 和 12.93%，单辊作业效率可达 12.3 kg/h，满足藜蒿脱叶技术要求。

参　考　文　献

[1] 刘宏伟，聂西度. 野生藜蒿中的微量元素的质谱分析[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(12)：3923－3928.
LIU Hongwei，NIE Xidu. Analysis of trace elements in wild *Artemisia selengensis* using inductively coupled plasma tandem mass spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2018，38(12)：3923－3928.(in Chinese)

[2] 曹伟伟，吴婷，方雅静，等. 藜蒿叶中 1，4-双咖啡酰奎宁酸的鉴定及双咖啡酰奎宁酸类化合物体外抑制黄嘌呤氧化酶和抑制尿酸钠诱导 IL－1β 的构效关系[J]. 中国食品学报，2020，20(2)：1－8.
CAO Weiwei，WU Ting，FANG Yajing，et al. Identification of 1，4-Di-caffeoylquinic acid in *Artemisia selengensis* turcz leaves and structure-activity relationship of Di-caffeoylquinic acids on inhibiting xanthine oxidase and inhibiting monosodium urate induced IL－1β in vitro[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2020，20(2)：1－8.(in Chinese)

[3] SHI Yinyan，CHEN Man，WANG Xiaochan，et al. Experiment and analysis on mechanical properties of *Artemisia quinoa* stalk [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2017，10(2)：16－25.

[4] 汲文峰，吴启明，黄海东，等. 基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验[J]. 农业工程学报，2015，31(增刊)：21－27.
JI Wenfeng，WU Qiming，HUANG Haidong，et al. Design and experiment of seedling seperation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(Supp.)：21－27.(in Chinese)

[5] 杨雅婷，高庆生，陈永生，等. 江苏省芦蒿机械化生产现状及发展方向[J]. 中国农机化学报，2020，41(4)：222－228.
YANG Yating，GAO Qingsheng，CHEN Yongsheng，et al. Mechanized technologies status and development trends of *Artemisia selengensis* production in Jiangsu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(4)：222－228.(in Chinese)

[6] 吴昆，宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：1－20.
WU Kun，SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(6)：1－20.(in Chinese)

[7] 耿令新，孙成龙，左杰文，等. 燕麦籽粒揉搓式除杂装置设计[J]. 农业工程学报，2019，35(11)：38－47.
GENG Lingxin，SUN Chenglong，ZUO Jiewen，et al. Design on oat-grains purification device with rubbing roller[J].

Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 38 - 47. (in Chinese)
[8] 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)
[9] 周阳,黄海东,张国忠,等. 艾草脱叶机设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(2): 197 - 202.
ZHOU Yang, HUANG Haidong, ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment research of *Artemisia argyi* leaves removing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(2): 197 - 202. (in Chinese)
[10] 周绍鹏,刘庆庭,杨丹彤,等. 甘蔗立式夹持输送通道剥叶装置设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 117 - 124.
ZHOU Shaopeng, LIU Qingting, YANG Dantong, et al. Design and test on leaf-stripping device of sugarcane harvester by a vertical clamping-conveying channel[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 117 - 124. (in Chinese)
[11] 曾功俊,陈建能,夏旭东,等. 胡萝卜缨果拉拽式分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 73 - 79.
ZENG Gongjun, CHEN Jianneng, XIA Xudong, et al. Design and experiment on pull type of tassel fruit separation for carrot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 73 - 79. (in Chinese)
[12] TANG Han, JIANG Yeming, WANG Jinwu, 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(2): 1 - 14.
[13] 高扬,王德成,王光辉,等. 紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 113 - 117.
GAO Yang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Effect prediction model and process optimization of the drying and separating for leaf-stem of fresh chopped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 113 - 117. (in Chinese)
[14] 罗小燕,王德成,王光辉,等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 71 - 74.
LUO Xiaoyan, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 71 - 74. (in Chinese)
[15] 万星宇,袁佳诚,廖庆喜,等. 油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 159 - 172.
WAN Xingyu, YUAN Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of cyclone separation cleaning device with raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 159 - 172. (in Chinese)
[16] 杨望,王二朋,杨坚,等. 凯斯 A8000 甘蔗联合收割机切割质量影响因素的试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 192 - 196.
YANG Wang, WANG Erpeng, YANG Jian, et al. Test on influencing factors of cutting sugarcane quality of Case A8000 sugarcane combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 192 - 196. (in Chinese)
[17] ODA A M, EL-WAHAB A, TAWFIK M A, et al. Evaluating of a prototype machine for carrot crop harvesting suitable for small holdings[J]. Zagazig Journal of Agricultural Research, 2018, 45(1): 213 - 226.
[18] 郑攀,张衍林. 气吸式藜蒿去叶机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 110 - 116.
ZHENG Pan, ZHANG Yanlin. Design and experiment of air suction type *Artemisia selengensis* leaves removing machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 110 - 116. (in Chinese)
[19] 程修沛,卢彩云,孟志军,等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 1 - 9.
CHENG Xiupei, LU Caiyun, MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 1 - 9. (in Chinese)
[20] 颜丙新. 盘室同步气吸式精量排种器设计研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
YAN Bingxin. Design and research of vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating plate and chamber [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[21] 高丽萍,施彬彬,廖庆喜,等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 22 - 33.
GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seeding performance of conical-hole seeding plate of the positive and negative pressure combination precision seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 22 - 33. (in Chinese)
[22] 刘海,廖宜涛,王磊,等. 小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 54 - 65.
LIU Hai, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 54 - 65. (in Chinese)
[23] 刘兴华,苑进,李扬,等. 采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 68 - 76.
LIU Xinghua, YUAN Jin, LI Yang, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 68 - 76. (in Chinese)
[24] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 110 - 116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 110 - 116. (in Chinese)