doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.034

气力机械组合式雪茄烟叶展平装置设计与试验

杨　恒[1]　廖庆喜[1,2]　邓承诺[1]　刘凯文[1]　杨春雷[3]　杨锦鹏[3]　张青松[1,2]　杜文斌[1]

（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；
3.湖北省烟草科学研究院，武汉 430030）

摘要：针对雪茄烟叶晾制回潮后蜷缩褶皱严重，人工展平作业劳动强度大、成本高且机械化展叶技术与装备缺乏等问题，本文提出了依次上料吸附加湿、间歇输送展平、压平定形下料的烟叶展平工艺方案，同时在晾制回潮后雪茄茄衣烟叶特性的基础上，设计了一种气力机械组合式雪茄烟叶展平装置。测试了雪茄茄衣烟叶各部位横向和纵向拉伸抗拉力，明确了采用横向拉伸展平、纵向压平定形的展叶方式；基于 CFD 模拟了负压腔气流场状态，仿真正交试验确定了负压带吸孔直径为 6 mm、深度为 4 mm、孔间距为 25 mm；分析确定了初展机构和压平机构等关键部件结构参数和工作参数，开展了精展烟叶过程力学分析，构建了压平烟叶过程力学模型。以电动推杆速度、步进电机转速、离心风机转速为试验因素，叶面平展率和烟叶破损率为评价指标，正交试验结果表明，最佳参数组合为电动推杆速度 22 mm/s、步进电机转速 201 r/min 和离心风机转速 2 275 r/min，此时，开展验证试验，展叶装置叶面平展率和烟叶破损率分别为 85.72% 和 5.76%，与人工展叶相比，叶宽与叶面积增加率分别为 93.82% 和 92.76%，满足雪茄茄衣烟叶展叶要求。研究结果可为雪茄烟叶展平装置机械化与自动化研究提供参考。

关键词：雪茄烟叶；展平装置；气力吸附；CFD 仿真

中图分类号：TS43　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0397-13　　**OSID**：

Design and Experiment of Pneumatic – Mechanical Combined Flattening Device for Cigar Tobacco Leaves

YANG Heng[1]　LIAO Qingxi[1,2]　DENG Chengnuo[1]　LIU Kaiwen[1]　YANG Chunlei[3]　YANG Jinpeng[3]
ZHANG Qingsong[1,2]　DU Wenbin[1]

(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*
3. *Tobacco Research Institute of Hubei Province*, *Wuhan* 430030, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of severe curling and wrinkling of cigar tobacco leaves after rehydration by air-drying, as well as the high labor intensity and cost of manual flattening, and the lack of mechanized leaf spreading technology and equipment, etc. The tobacco leaf flattening process scheme of sequentially feeding adsorption humidification, intermittent conveying flattening, flattening and setting and blanking was proposed. At the same time, based on the characteristics of cigar-coated tobacco leaves after air-curing and moisture regaining, a pneumatic mechanical combined cigar leaf flattening device was designed. The tensile strength of various parts of cigar wrapper tobacco leaves was tested in both horizontal and vertical directions. It was clarified that the method of spreading leaves involves horizontal stretching for flattening and vertical pressing for shaping. The air flow field of the suction chamber was simulated based on CFD. The simulation orthogonal test determined that the negative pressure belt of suction hole was determined to be 6 mm, the depth of suction hole was 4 mm, the hole spacing of suction hole was 25 mm. The structural and operational parameters of key components such as the spreading mechanism and pressing mechanism were analyzed and defined. A mechanical analysis of the leaf expansion process was conducted, leading to the development of a mechanical model for the leaf pressing

收稿日期：2024-07-14　修回日期：2024-08-15

基金项目：中国烟草总公司重大专项(110202101059(XJ-08))和湖北省烟草公司科技项目(027Y2021-006)

作者简介：杨恒(2000—)，男，博士生，主要从事智慧农业技术与装备研究，E-mail：yangheng@webmail.hzau.edu.cn

通信作者：廖庆喜(1968—)，男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备与计算机测控研究，E-mail：liaoqx@mail.hzau.edu.cn

process. By taking the electric push rod speed, the stepper motor speed and the centrifugal fan speed as experimental factors, taking the leaf surface leveling rate and leaf breakage rate as evaluation indexes, the results of the orthogonal experiment indicated that the optimal parameter combination was obtained as electric push rod speed of 22 mm/s, stepper motor speed of 201 r/min and centrifugal fan speed of 2 275 r/min. At this time, the validation test was carried out. The leaf spreading rate and leaf damage rate of the leaf spreading device were 85.72% and 5.76%, respectively. Compared with the artificial leaf spreading, the leaf width and leaf area increase rate were 93.82% and 92.76%, respectively, meeting the requirements for cigar leaf flattening. The research results can provide reference for the mechanization and automation of cigar tobacco leaf flattening devices.

Key words: cigar tobacco leaves; flattening device; pneumatic suction; CFD simulation

0 引言

雪茄烟是经过晾干、发酵、陈化后的烟叶卷制而成的一种烟草制品[1-3],目前广泛种植于海南、四川、湖北等地[4]。卷制雪茄所用的烟叶按用途由内而外可分为茄芯、茄套和茄衣[5-6],茄衣烟叶为最外层包装,主要采用雪茄植株价值最高的中下部烟叶[7],其作为雪茄烟最外层包装需要确保平整性,加工过程中需要对晾干发酵后蜷缩的烟叶进行展叶处理,保证其平整性以便卷制。晾制回潮后雪茄茄衣烟叶蜷缩褶皱严重,含水率较低时烟叶韧性较差,机械展叶难度大,仍以人工展叶为主,劳动强度大、人工成本高,已成为制约雪茄烟产业发展的重要因素。

目前国内雪茄烟叶展平装置以机械式和气力机械式为主。机械式展平装置多采用毛刷与传送带的组合方式实现烟叶展平。吴雪梅等[8]设计了一种烟叶滚刷铺平机构,通过上下多对不同转速卷刷毛的滚刷转动来实现烟叶展平。文献[9]提出了一种烟叶平铺装置,其中加湿机构增加了烟叶含水率,可提高烟叶韧性以减少展叶破损。气力机械式展平装置则多采用负压吸附的方式实现烟叶展平。如文献[10]设计的烟叶自动展开机,烟叶吸附后被运输到展开机构和滚压机构,从而进行烟叶展开和滚压操作。文献[11]设计了一种烟叶摊铺、展平、单层化装置,通过负压单层化筛筒正压、零压转换将重叠、包裹的烟叶展开摊平。国外多采用机械式雪茄烟叶展平装置方式对烟叶进行展平。CAFFOZ 等[12]设计了一种可变形为二面体支架以摊开烟叶的装置,烟叶中心叶脉延伸至支架边缘,通过支架变形将烟叶摊开。EIJSERMANS[13]设计了铺展单片烟叶装置,2 个无端元件夹住烟叶边缘组成第 1 输送机,烟叶松散部分平铺在第 2 输送机上并与第 1 输送机方向成锐角,通过第 2 输送机横向速度使烟叶拉伸展平,但装置结构有待简化。为提高烟叶展平作业效果,KJAER 等[14]设计了一种用于铺展烟叶设备,烟叶在加湿后横向穿过底座,通过刷毛转动对烟叶进行铺平。目前烟叶展平装置主要为机械式和气力机械式 2 种,但多数为理论研究,烟叶展平装置缺乏,需一种可满足雪茄烟叶展平作业装置,以期降低人工展叶劳动强度、减少人工成本。

针对雪茄茄衣烟叶晾制回潮后蜷缩褶皱严重,需实现茄衣烟叶高效低损的展叶需求,本文提出依次上料吸附加湿、间歇输送展平、压平定形下料的烟叶展平工艺方案,同时在统计分析晾制回潮后雪茄茄衣烟叶特性的基础上,设计一种气力机械组合式雪茄烟叶展平装置,基于 CFD 模拟负压腔内部气流场状态,分析确定初展机构和压平机构等关键部件结构参数和工作参数,开展精展烟叶过程力学分析,构建压平烟叶过程力学模型,开展正交试验得到最佳参数组合,以期为雪茄烟叶展平装置机械化与自动化研究提供参考。

1 雪茄茄衣烟叶特性及展叶技术

以湖北省丹江口市雪茄烟叶种植基地种植采收的经晾制回潮后的 CX-014 型品种雪茄茄衣烟叶为研究对象,其展平前后叶片形态如图 1 所示,随机选取展平前和人工展平后茄衣烟叶各 20 片,分别进行叶片形态和拉伸特性测试,其中烟叶长度和烟叶宽度可通过钢直尺直接测量,烟叶叶面积利用 Matlab 软件读取待测烟叶与标准 10 cm × 10 cm 纸片对比图像,通过对比待测烟叶和标准纸片对应显示的像素点个数,求解烟叶叶面积[15],计算式为

$$S_Y = \frac{N_Y}{N_0} S_0 \tag{1}$$

式中 S_Y——雪茄烟叶叶面积,cm^2

N_Y——待测烟叶对应像素点个数

S_0——标准纸片面积,cm^2

N_0——标准纸片对应像素点个数

展平前后烟叶形态分析结果表明,雪茄茄衣烟叶外观呈类椭圆形,晾制回潮后茄衣烟叶沿叶边缘向主脉蜷缩褶皱;未展平的烟叶平均长度、平均宽度和

平均面积分别为 44.36 cm、17.25 cm 和 629.28 cm^2；人工展平后烟叶平均长度、平均宽度和平均面积分别为 45.01 cm、23.65 cm 和 812.16 cm^2，茄衣烟叶人工展平前后叶长变化较小，叶宽与叶面积分别增加 37.10% 和 29.06%。



图 1　雪茄茄衣烟叶形态和烟叶拉伸特性测试

Fig. 1　Morphology and tobacco leaf tensile characteristics test of cigar wrapper tobacco leaves

晾制回潮后茄衣烟叶含水率约为 20%，展叶时为避免烟叶受力发生破损，影响烟叶质量，应考虑烟叶各部分受力并取抗拉力最小值。

在烟叶拉伸特性测试方面，晾制回潮后雪茄茄衣烟叶主脉相较烟叶其余部分，硬度大、拉伸强度大，为避免主脉对烟叶拉伸测试的影响，烟叶拉伸样本制作不含有主脉，如图 1 中 *ABCD* 区域所示。随机选取 20 片茄衣烟叶进行烟叶拉伸样本制作，单片烟叶制作相同拉伸方向上烟叶不同部位的拉伸样本各 2 个，即烟叶拉伸测试样本数量为横向拉伸方向上叶尖、叶中和叶基各 20 个，纵向拉伸方向上叶尖、叶中和叶基各 20 个。利用美国 FTC 公司 TMS－Pro 型质构仪（最大载荷 1 kN，载荷测试精度 0.01 N）对茄衣烟叶叶尖、叶中和叶基的横向与纵向 2 个方向进行烟叶抗拉力测定。其中横向拉伸为与主脉生长方向垂直的烟叶拉伸方式，纵向拉伸为与主脉生长方向平行的烟叶拉伸方式。

雪茄茄衣烟叶拉伸特性测试结果如表 1 所示。由表 1 可知，同一茄衣烟叶上，烟叶各部位横向抗拉力平均值均低于纵向抗拉力，从叶尖、叶中到叶基横向抗拉力和纵向抗拉力依次增加。为减少展叶作业中对茄衣烟叶造成损伤，并结合晾制回潮后茄衣烟叶沿叶边缘向主脉蜷缩褶皱形态，采用横向拉伸烟叶方式对烟叶进行展平，在充分展平烟叶的同时减少烟叶破损，保证雪茄茄衣烟叶完整度。

2　装置结构和工作过程

2.1　装置结构

针对雪茄茄衣烟叶晾制回潮后蜷缩褶皱，需横向拉伸展平、纵向压平定形的技术需求，提出依次上料吸附加湿、间歇输送展平、压平定形下料的烟叶展平工艺方案，设计了一种气力机械组合式雪茄烟叶展平装置，其结构如图 2 所示，关键部件包括加湿机构、吸附输送机构、初展机构、精展机构和压平机构等。加湿机构由雾化喷头、雾化管和雾化控制箱等组成；吸附输送机构由机架、负压带、负压腔、负压生成仓、通风管道、离心风机和电控系统等组成；初展机构由电推杆和万向球等组成；精展机构由滑台、毛刷辊、展搓辊和步进电机等组成；压平机构主要由压平侧板、压平辊和轴承座等组成。

表 1　晾制回潮后雪茄茄衣烟叶主要物理特性参数

Tab. 1　Main physical characteristics parameters of cigar wrapper tobacco leaves after rehydration by air-drying

	参数	数值	平均值
未展平茄衣烟叶	长/cm	37.64～46.89	44.36
	宽/cm	14.45～19.01	17.25
	面积/cm^2	457.28～786.26	629.28
人工展平后茄衣烟叶	长/cm	37.87～47.11	44.65
	宽/cm	19.92～24.78	23.65
	面积/cm^2	718.16～994.68	812.16
茄衣烟叶	含水率（晾制回潮后）/%	19.5～20.4	19.8
	含水率（最大抗拉力）/%	44.3～45.7	45.3
	摩擦角/(°)	36.7～39.2	37.9
茄衣烟叶抗拉力	叶尖横向/N	1.94～3.83	2.52
	叶中横向/N	2.21～4.98	3.16
	叶基横向/N	2.39～5.87	3.55
	叶尖纵向/N	2.54～5.02	3.34
	叶中纵向/N	3.14～6.21	4.08
	叶基纵向/N	3.58～7.08	4.65

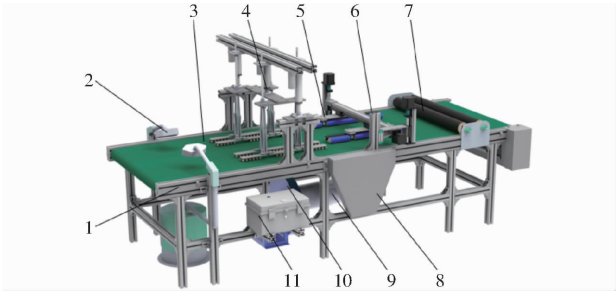


图 2　气力机械组合式雪茄烟叶展平装置结构示意图

Fig. 2　Structural diagram of pneumatic－mechanical combined flattening device for cigar tobacco leaves

1. 机架　2. 雾化喷头　3. 负压带　4. 展平电推杆　5. 滑台　6. 毛刷辊　7. 压平辊　8. 负压生成仓　9. 通风管道　10. 离心风机　11. 电控系统

配套电控系统由 Arduino 控制器对各机构驱动器件进行集中控制，其中输送模块主要由 220 V 交流电机、中间继电器和调速器等组成，初展模块由 24 V 直流电推杆和 5V－6 路继电器等组成，电推杆控制初展机构烟叶初展和机构升降，精展模块由 57 步进电机和驱动器等组成，步进电机控制精展机构烟叶精展和机构升降，Arduino 控制器由 9 V 电源单

独供电,各模块驱动器件由 24 V 开关电源供电,220 V 交流电机单独供电,5V－6 路继电器由 Arduino 控制器供电,电控系统实现对装置各机构工作的间歇控制和参数调节,且各元器件整合至电控箱中,控制系统硬件组成图如图 3 所示,装置主要技术参数如表 2 所示。

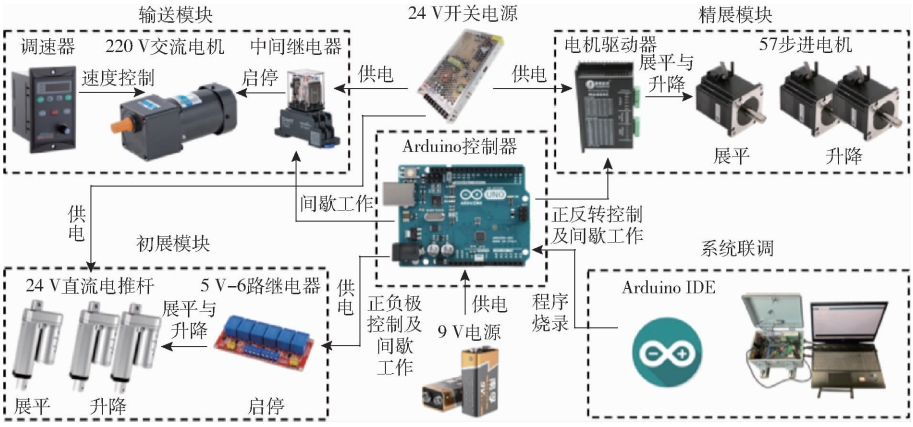


图 3 控制系统硬件组成图

Fig. 3 Hardware composition diagram of control system

表 2 气力机械组合式雪茄烟叶展平装置主要参数

Tab. 2 Main parameters of pneumatic－mechanical combined flattening device for cigar tobacco leaves

参数	数值/形式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 440×1 000×1 130
整机质量/kg	176
功率/kW	3.6
加湿机构加湿方式	热蒸汽
压平辊表面材质	海绵

2.2 工作过程

在单组展叶行程中,展叶装置工作过程可分为上料吸附加湿、烟叶初展、烟叶精展、压平定形下料 4 个阶段,如图 4 所示。在上料吸附加湿阶段,人工将待展烟叶放置在负压带加湿区域上,雾化喷头产生热蒸汽对烟叶进行加湿,同时在气力作用下紧贴于负压带表面;在烟叶初展阶段,加湿软化后的烟叶输送至初展机构下方,万向球对烟叶边缘褶皱进行横向初展平;在烟叶精展阶段,初展平后的烟叶输送至精展机构下方,毛刷辊对烟叶进行横向精展平,同时展搓辊对烟叶进行展搓保实;在压平定形下料阶段,精展平后烟叶输送至压平机构,压平辊对烟叶进行纵向压平定形,保证烟叶平整性,最后人工取出烟叶,完成一次单组展叶工作,下料后烟叶随即多片叠放保存。

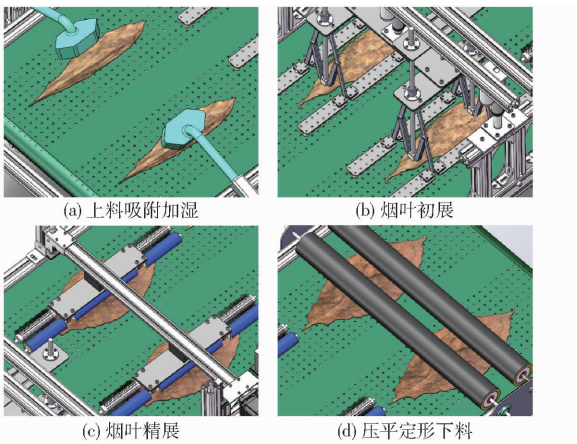


图 4 单组雪茄茄衣烟叶展平工作过程示意图

Fig. 4 Schematics of working process of single set

3 关键部件设计

3.1 吸附输送机构设计

雪茄烟叶吸附能保证烟叶在展平过程中不发生位置偏移与回卷,吸附输送机构吸附性能直接影响烟叶展平质量,结构如图 5 所示,主要包括负压带吸孔、负压腔、离心风机、通风管道和负压生成仓等。

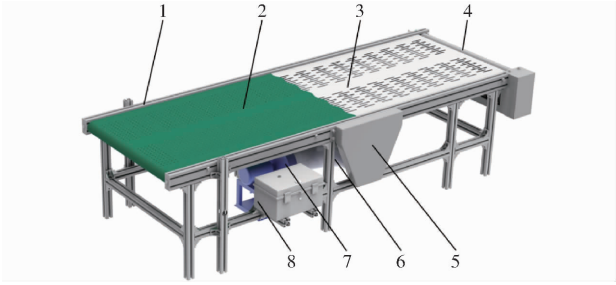


图 5 吸附输送机构结构示意图

Fig. 5 Schematic of structure of adsorption and conveying mechanism

1. 机架 2. 负压带吸孔 3. 负压腔 4. 传送带滚轴 5. 负压生成仓 6. 通风管道 7. 离心风机 8. 电控系统

3.1.1 负压带吸附宽度与负压腔高度

雪茄烟叶吸附过程中应保证展平前后烟叶均位于负压吸附区域内,故负压带吸附区域宽度(单侧)应大于人工展平后的最大烟叶宽度,即

$$D_0 > D_{max} \tag{2}$$

式中 D_0——负压带吸附区域宽度(单侧),mm

D_{max}——人工展平后茄衣烟叶最大宽度,mm

为减小机架横向尺寸,负压带吸附区域宽度取

最小值，考虑展平机构工作幅宽，负压带吸附区域两侧应留有余量，设计负压带宽度为 80 cm，且两侧吸孔对称分布，横向和纵向上吸孔间距相等。

负压腔高度，即负压气室内部高度，影响离心风机工作效率和气压分布均匀性，负压腔高度越大则离心风机作业性能不变的情况下会降低负压气室内气压，且影响负压带表面吸孔气压分布均匀性。为保证装置气密性，负压带与负压腔上方应紧贴，综合机架尺寸，传送带滚轴直径设计为 60 mm，故负压腔高度取 60 mm。

3.1.2　吸孔尺寸对吸附力的影响

吸附力是获得最佳展叶效果的关键，可由负压带外表面压强、吸孔表面积等计算得到，但在实际试验过程中，雪茄烟叶吸附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 探索吸孔尺寸对吸附力的影响[16-18]。

为便于仿真分析提升运算速度，去除负压腔次要细节特征，结合雪茄烟叶长度选取一块长 450 mm、宽 400 mm 的负压带吸附区域（单侧），基于 Fluent 建立负压腔仿真模型流体域[19-20]，划分网格并采用标准 $k-\varepsilon$ 计算方法，建立吸孔内侧和外侧监测点，设置负压腔与吸附转换接口连接处为气流速度入口，根据预试验结果设置入口静压为 -600 Pa、入口速度为 -10 m/s，仿真结束后提取监测点气压和气流速度，如图 6 所示。

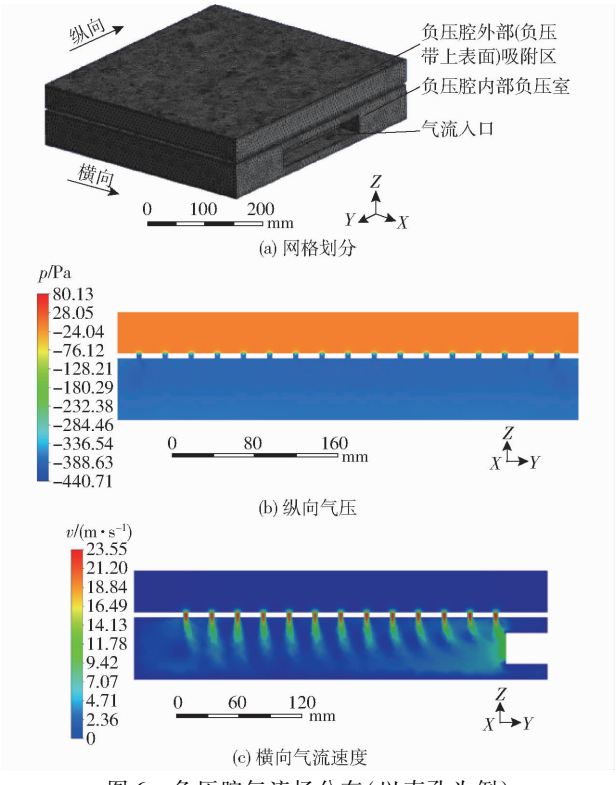


图 6　负压腔气流场分布（以直孔为例）

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

当负压腔高度、气室分布、气流入口流量压力不变时，展叶过程中负压带对雪茄烟叶的吸附效果与单孔吸附力和吸孔流量有关。选择对烟叶吸附力影响较大的吸孔直径、吸孔深度、吸孔间距等为影响因素，提取负压腔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

$$\begin{cases} F_i = \dfrac{\pi d^2 p}{4} \\ Q = \dfrac{\pi d^2 v}{4} \end{cases} \tag{3}$$

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——负压腔内部气压，Pa

v——负压带吸孔外部气流速度，m/s

通过仿真分析可提取负压腔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与吸孔流量。

为获得吸孔尺寸最佳参数组合，以负压带吸孔直径、吸孔深度和吸孔间距为试验因素，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 3 所示。

表 3　试验因素水平

Tab. 3　Test factors and levels

水平	因素		
	吸孔直径 A/mm	吸孔深度 B/mm	吸孔间距 C/mm
1	4	3	15
2	5	4	25
3	6	5	35

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权重均为 0.5[21]，计算式为

$$\begin{cases} S = \dfrac{S_i - \min N}{\max N - \min N} \\ W = 0.5S_1 + 0.5S_2 \end{cases} \tag{4}$$

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，结果如

表 4 所示,可知各个因素对综合指标的影响由大到小为吸孔间距、吸孔直径、吸孔深度,优选方案为:吸孔直径 6 mm、吸孔深度 4 mm、吸孔间距 25 mm。以该优选方案进行仿真试验验证,求得吸孔单孔吸附力为 3.12×10^{-3} N,气流流量为 2.94×10^{-4} m^3/s,综合分数为 0.91。

3.2 展平机构设计

初展机构通过电推杆伸长与收缩,带动万向球向两边伸展与收拢,对烟叶进行往复展搓,使边缘卷皱烟叶展开;精展机构通过步进电机正反转,带动滑台下方毛刷辊和展搓辊沿丝杠往复运动对烟叶进行展搓保实。

表 4 试验方案及结果

Tab.4 Test scheme and results

序号		因素			单孔吸附力/N	吸孔流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	单孔吸附力隶属值	吸孔流量隶属值	综合分数
		吸孔直径	吸孔深度	吸孔间距					
1		1	1	1	1.82×10^{-3}	1.12×10^{-4}	0.50	0	0.25
2		1	2	2	3.03×10^{-3}	2.83×10^{-4}	0.93	0.81	0.87
3		1	3	3	1.15×10^{-3}	2.20×10^{-4}	0.26	0.51	0.39
4		2	1	2	3.23×10^{-3}	2.32×10^{-4}	1.00	0.57	0.79
5		2	2	3	1.52×10^{-3}	2.05×10^{-4}	0.39	0.44	0.42
6		2	3	1	4.19×10^{-4}	1.92×10^{-4}	0	0.38	0.19
7		3	1	3	1.88×10^{-3}	1.84×10^{-4}	0.52	0.34	0.43
8		3	2	1	1.35×10^{-3}	1.77×10^{-4}	0.33	0.31	0.32
9		3	3	2	2.61×10^{-3}	3.23×10^{-4}	0.78	1.00	0.89
综合分数	k_1	0.50	0.49	0.25					
	k_2	0.47	0.54	0.85					
	k_3	0.55	0.49	0.41					
	极差 R	0.08	0.05	0.60					

3.2.1 初展机构结构参数设计

为确定初展机构中各结构参数,初展机构在初始和极限展搓位置时的示意图如图 7 所示(一侧单体),$2L_{O_1D_0}$为初始展搓宽幅、$2L_{O_1C_1}$为极限展搓宽幅、曲虚线 C_0C_1 为万向球中心点相对运动轨迹。

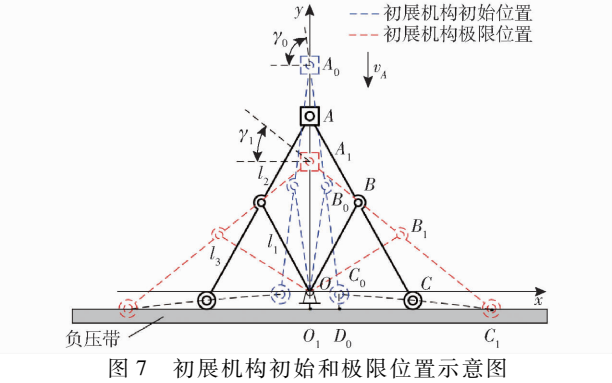


图 7 初展机构初始和极限位置示意图

Fig.7 Stretch of initial and limit positions of initial exhibition rubbing mechanism

雪茄烟叶自身存在形态差异性,结合人工展平前后特征参数,展平前烟叶横向宽度为 144.5 ~ 190.1 mm,展平后烟叶横向宽度为 199.2 ~ 247.8 mm。初始位置下展搓宽幅应小于展平前烟叶最小宽度,极限位置下展搓宽幅应大于展平后烟叶最大宽度、小于负压带宽度的一半,初展机构在初始和极限位置各尺寸关系为

$$\begin{cases} L_{A_0C_0}\cos\gamma_0 = L_{O_1D_0} \\ L_{A_1C_1}\cos\gamma_1 = L_{O_1C_1} \\ L_{AC} = l_2 + l_3 \\ 2L_{O_1D_0} < 144.5\ \text{mm} \\ 247.8\ \text{mm} < 2L_{O_1C_1} < 400\ \text{mm} \end{cases} \tag{5}$$

式中 l_2——连杆 AB 长度,mm

l_3——工作臂 BC 长度,mm

L_{AC}——长连杆 AC 长度,mm

γ_0——长连杆 A_0C_0 初始位置与水平方向所夹锐角,(°)

γ_1——长连杆 A_1C_1 极限位置与水平方向所夹锐角,(°)

机构在初始位置时应与烟叶良好接触,因使曲柄 OB 长度等于工作臂 BC 长度,同时使 AB 长度大于 BC,考虑初展机构设计要求,要求转动角大于等于 40°[22-23],则有

$$\begin{cases} l_1 = l_3 \\ l_2 > l_3 \\ \gamma_0 \geqslant 40° \\ \gamma_1 \geqslant 40° \\ L_{AC} = L_{A_0C_0} = L_{A_1C_1} \end{cases} \tag{6}$$

式中 l_1——曲柄 OB 长度,mm

考虑加工安装精度，曲柄 OB 与工作臂 BC 长度为 120 mm，结合式(5)、(6)求解得连杆 AB 长度 l_2 为 120 ~ 141 mm。基于初展机构空间布局与加工装配安装方便，设计连杆 AB 长度 l_2 为 130 mm。

3.2.2　毛刷辊展平过程烟叶受力分析

精展机构中，毛刷辊展平烟叶时，刷毛材质弹韧性好，平展烟叶与下折叠烟叶被吸附在负压带上不易发生位置偏移，故只分析上折叠烟叶受力，对烟叶模型进行简化，受力分析如图 8 所示。毛搓辊与上折叠烟叶接触点为 m，平展烟叶和下折叠烟叶被吸附在负压带上，上折叠烟叶在毛刷辊作用下实现展开，整个展搓过程中烟叶各部分质量保持不变。

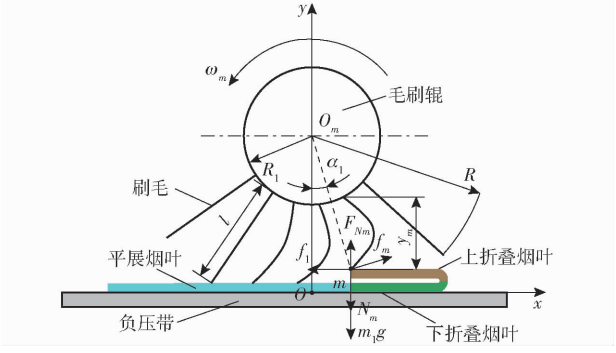


图 8　毛刷辊展平过程烟叶受力分析

Fig. 8　Force analysis of tobacco leaf during flattening process of brush roller

为方便计算，烟叶各部分质量均匀，所受作用力均匀分布，忽略在初展平过程中烟叶质量的变化，上折叠烟叶在 xy 平面上受力平衡方程为

$$\begin{cases} f_m\cos\alpha_1 - f_1 = m_1 a_{x1} \\ F_{Nm} + f_m\sin\alpha_1 - N_m - m_1 g = m_1 a_{y1} \end{cases} \tag{7}$$

式中　m_1——上折叠烟叶质量，g

α_1——烟叶接触点 m 和毛刷辊中心点连线与竖直方向所夹锐角，(°)

a_{x1}——上折叠烟叶 x 方向加速度，mm/s^2

a_{y1}——上折叠烟叶 y 方向加速度，mm/s^2

F_{Nm}——下折叠烟叶对上折叠烟叶支持力，N

N_m——刷毛对上折叠烟叶压力，N

f_m——刷毛对上折叠烟叶摩擦力，N

f_1——下折叠烟叶对上折叠烟叶摩擦力，N

烟叶在刷毛弹性作用下受到压力，N_m 计算式[24]为

$$N_m = 0.17EJ\frac{l^6}{y_m^8}n_m\arccos\frac{y_m + R_1}{R} \tag{8}$$

式中　R——毛刷辊滚刷半径，mm

R_1——毛刷辊滚刷轴半径，mm

l——刷毛自由长度，mm

E——刷毛材料弹性模量，GPa

J——刷毛截面极惯性矩，m^4

n_m——触烟刷毛数量

y_m——刷毛与接触点 m 的铅锤距离，mm

考虑到单根刷毛直径较小，约为 0.01 mm，毛刷辊运动过程中，刷毛是以刷毛簇的形式工作，通过实际测量，一簇刷毛直径为 4 ~ 6 mm，为便于分析计算，一簇刷毛假定为一根刷毛。由式(7)、(8)可知，刷毛材质、毛刷辊滚刷半径 R 和毛刷辊滚刷轴半径 R_1 等是影响烟叶展平的重要因素。结合雪茄烟叶拉伸特性结果及前期预试验结果，刷毛材质选择尼龙 1010、毛刷辊滚刷半径为 28 mm、毛刷辊滚刷轴半径为 13 mm。

3.2.3　展搓辊展平过程烟叶受力分析

为确定展搓辊展搓过程中烟叶受力情况，对烟叶模型进行简化，受力分析如图 9 所示。展搓辊与平展烟叶接触点为 e，与上折叠烟叶接触点为 s，平展烟叶和下折叠烟叶被吸附在负压带上，上折叠烟叶在展搓辊作用下实现展开，整个展搓过程中烟叶各部分质量保持不变，为方便计算，烟叶各部分质量均匀，所受作用力均匀分布，如图 9a 所示，平展烟叶在展搓过程中 y 方向上的位移很小，可忽略不计，故平展烟叶力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_{fC} - F_{fZ} = m_2 a_{x2} \\ F_{CN} + F_P + m_2 g - F_{ZN} = m_2 a_{y2} \end{cases} \tag{9}$$

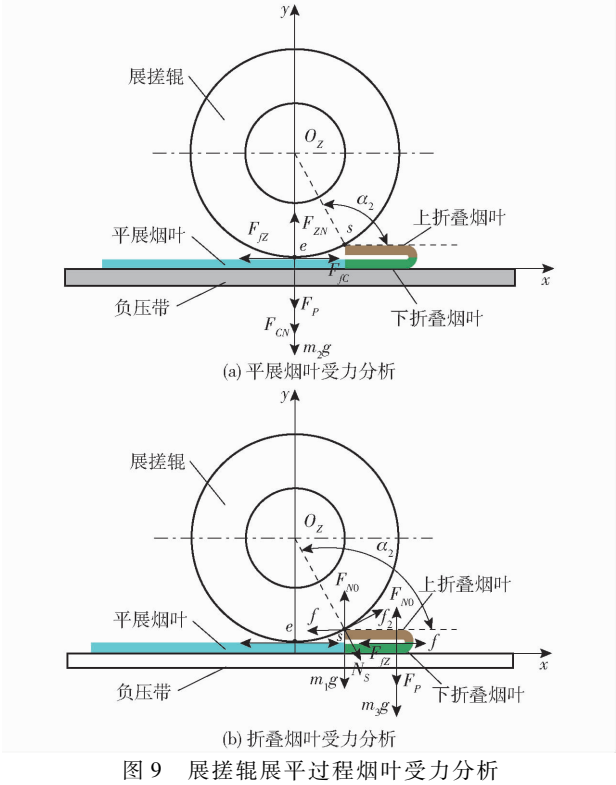


图 9　展搓辊展平过程烟叶受力分析

Fig. 9　Stress analysis of tobacco leaves in flattening process of spreading roller

式中 m_2——平展烟叶质量,g

a_{x2}——平展烟叶 x 方向加速度,mm/s^2

a_{y2}——平展烟叶 y 方向加速度,mm/s^2

F_{fC}——展搓辊对平展烟叶摩擦力,N

F_{fZ}——负压带对平展烟叶摩擦力,N

F_{CN}——展搓辊对平展烟叶压力,N

F_P——负压吸附力,N

F_{ZN}——负压带对平展烟叶支持力,N

下折叠烟叶吸附在负压带上,展搓辊接触上折叠烟叶的瞬间,将平展烟叶与下折叠烟叶看成一个整体,两者所受负压带摩擦力相同、负压带支持力相同。由于上下折叠烟叶之间存在一定间隙且折叠烟叶自身质量较小,为方便分析计算,忽略上折叠烟叶对下折叠烟叶产生的压力,受力分析如图 9b 所示,下折叠烟叶在 xy 平面上受力平衡方程为

$$\begin{cases} f - F_{fZ} = m_3 a_x \\ F_P + m_3 g - F_{N0} = m_3 a_{y3} \end{cases} \tag{10}$$

式中 m_3——下折叠烟叶质量,g

a_{x3}——下折叠烟叶 x 方向加速度,mm/s^2

a_{y3}——下折叠烟叶 y 方向加速度,mm/s^2

f——上折叠烟叶对下折叠烟叶摩擦力,N

F_{N0}——负压带对下折叠烟叶支持力,N

上折叠烟叶在展搓辊的作用下与下折叠烟叶发生相对滑动,从而实现烟叶展开,受力分析如图 9b 所示,上折叠烟叶在 xy 平面上受力平衡方程为

$$\begin{cases} N_S \sin\alpha_2 - f_2 \cos\alpha_2 - f = m_1 a_{x1} \\ F_{N0} + f_2 \sin\alpha_2 + N_S \cos\alpha_2 - m_1 g = m_1 a_{y1} \end{cases} \tag{11}$$

式中 α_2——烟叶接触点 s 和展搓辊中心点连线与水平方向所夹钝角,(°)

f_2——展搓辊对上折叠烟叶摩擦力,N

N_S——展搓辊对上折叠烟叶作用力,N

分析可知,烟叶在展搓辊作用下实现展开,平展烟叶与下折叠烟叶应被吸附在负压带上不发生位置偏移,上折叠烟叶与下折叠烟叶发生相对滑动,故应满足条件

$$\begin{cases} a_{x2} = a_{y2} = 0 \\ a_{x3} = a_{y3} = 0 \\ a_{x1} > 0 \\ a_{y1} > 0 \end{cases} \tag{12}$$

由式(9)和式(10)可得

$$\begin{cases} F_{fC} = F_{fZ} = f \\ F_{CN} + F_P + m_2 g = F_{ZN} \\ F_P + m_3 g = F_{N0} \end{cases} \tag{13}$$

由式(9)~(13)可知,负压吸附力 F_P 越大,平展烟叶与下折叠烟叶吸附效果越好,展搓辊作用力 N_S 越大,上折叠烟叶越容易展开。结合离心风机实际吸附效果及风机转速调节范围可知,离心风机转速为 1 900~2 300 r/min 时,烟叶能充分吸附在负压带上,展搓后无回卷现象发生;展搓辊运动速度较慢时,烟叶展搓效果不显著,展搓辊运动速度较快时,烟叶易发生破损,根据作业效率及烟叶展搓效果综合分析,当步进电机转速为 170~210 r/min 时,烟叶展搓破损少且展搓效果较好。

3.3 压平机构设计

烟叶吸附输送至压平机构,压平辊表面安装有海绵套,压平辊可看作为柔性体,烟叶进入压平辊过程中压平辊发生形变[25],轴向边缘存在少许褶皱的烟叶在负压带吸附带动下进入压平机构,计算模型如图 10 所示,以烟叶输送方向为 x 轴,烟叶厚度方向为 y 轴,建立坐标系,其中 k 为烟叶褶皱部分与压平辊接触点,压平辊只发生径向变形,烟叶在压平辊挤压作用下,实现轴向压平定形。

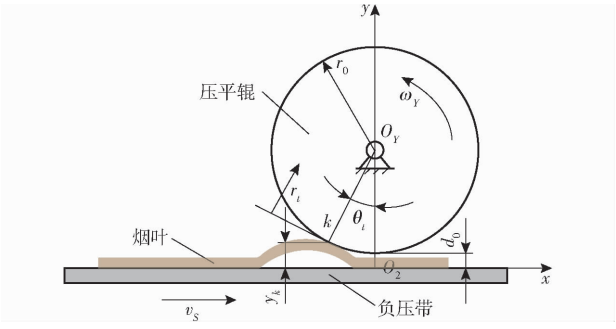


图 10 烟叶进入压平机构计算模型

Fig. 10 Calculation model of tobacco leaf entering flattening mechanism

由图 10 可得,褶皱烟叶与压平辊接触点 k 与 y 轴夹角为

$$\theta_t = \arctan \frac{x_0 - v_S t}{r_0 + d_0 - y_k} \tag{14}$$

式中 θ_t——接触点 k 和 O_Y 连线与 y 轴所夹锐角,(°)

v_S——吸附输送机构输送速度,mm/s

t——褶皱烟叶从与压平辊接触开始到运行至坐标原点 O_2 过程中的时间,s

x_0——褶皱烟叶与 y 轴初始距离,mm

r_0——压平辊原始半径,mm

d_0——压平辊与负压带间距,mm

y_k——接触点 k 与 x 轴的铅锤距离,mm

由于式(14)中 x_0、r_0 和 d 均为定值,故 θ_t 为一个与输送速度 v_S 和时间 t 有关的变量,褶皱烟叶在初始接触点位置时有

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \sin\theta_0 \\ \theta_0 = \arccos\dfrac{r_0 + d_0 - y_k}{r_0} \\ L_{O_YO_2} = r_0 + d_0 = r\cos\theta_t + y_k \\ \tan\theta_t = \dfrac{x_0 - v_S t}{r_0 + d_0 - y_k} \end{cases} \tag{15}$$

式中　θ_0——褶皱烟叶刚与压平辊接触时接触点 k 与 y 轴所夹锐角，(°)

$L_{O_YO_2}$——负压带与压平辊中心间距，mm

r——压平辊压平烟叶时发生形变后的压平辊半径，mm

在实际接触过程中压平辊会发生形变，其半径为

$$r = r_0 - r_t \tag{16}$$

式中　r_t——压平辊径向形变量，mm

将式(16)代入式(15)得到压平辊径向形变量计算式，并对压平辊径向变形量求导得到压平辊径向变形量变化速率为

$$\begin{cases} r_t = r_0 - \dfrac{r_0 + d_0 - y_k}{\cos\theta_t} \\ \dot{r}_t = \dfrac{v_S \sin\theta_t}{\cos^2\theta_t(1 + \theta_t^2)} \end{cases} \tag{17}$$

烟叶进入压平机构与压平辊接触时，压平辊发生径向变形，对烟叶进行挤压实现纵向压平定形处理。由式(17)可知，压平辊径向变形量 r_t 和压平辊径向变形量变化速率 $\dot{r}_t$ 与压平辊初始半径 r_0 和输送速度 v_S 有关。结合雪茄烟叶长度及前期预试验结果，为减少压平辊作业转动时造成烟叶黏附带卷，设计压平辊直径为 70 mm，机构间歇输送速度为 0.15 m/s。

4　雪茄烟叶展平装置性能试验

4.1　试验材料与方法

试验材料为湖北省丹江口市雪茄烟叶种植基地种植长势良好且叶片无损伤的茄衣烟叶，试验前将茄衣烟叶晾制回潮，保证烟叶含水率约为 20%，与人工展叶时含水率基本一致。依托气力机械组合式雪茄烟叶展平装置(图 11)，以电动推杆速度、步进电机速度、离心风机转速为试验因素，以影响茄衣烟叶展平质量的叶面平展率和烟叶破损率(烟叶边缘破损不影响茄衣质量)为评价指标，开展回归正交试验，明确最佳参数组合并进行验证。

试验前随机将晾制回潮后满足试验要求的茄衣烟叶分成若干组，每组 2 片烟叶，通过电控系统设定电动推杆速度、步进电机转速、离心风机转速、间歇输送速度等参数；调试后启动装置，待装置展叶完成后，取出烟叶，统计各标记点处烟叶宽度并计算其算术平均值 W_1，并利用 Matlab 计算烟叶破损面积 S_3；对装置展叶后烟叶进行人工充分展平，统计原标记点处烟叶宽度并计算其算术平均值 W_2，并计算人工展叶后烟叶应有完整总面积 S_4，对每组试验重复 5 次并取平均值，叶面平展率[26]与烟叶破损率计算式为

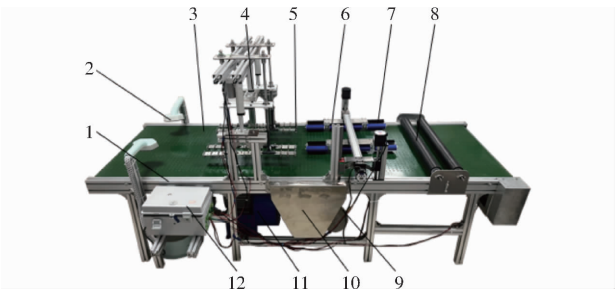


图 11　气力机械组合式雪茄烟叶展平装置实物图

Fig. 11　Real product of pneumatic - mechanical combined flattening device for cigar tobacco leaves

1. 机架　2. 雾化喷头　3. 负压带　4. 展平电推杆　5. 万向球　6. 滑台　7. 毛刷辊　8. 压平辊　9. 通风管道　10. 负压生成仓　11. 离心风机　12. 电控系统

$$Y_1 = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \tag{18}$$

$$Y_2 = \frac{S_3}{S_4} \times 100\% \tag{19}$$

式中　Y_1——叶面平展率，%

Y_2——烟叶破损率，%

4.2　回归正交试验

4.2.1　试验设计

在单因素试验基础上，确定电动推杆速度为 6 ~ 22 mm/s，步进电机转速为 170 ~ 210 r/min，离心风机转速为 1 900 ~ 2 300 r/min，根据 Box - Behnken 模型进行三因素三水平的组合试验，因素编码如表 5 所示，试验结果如表 6 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 5　试验因素编码

Tab. 5　Test factors and codes

编码	因素		
	电动推杆速度/(mm·s^{-1})	步进电机转速/(r·min^{-1})	离心风机转速/(r·min^{-1})
-1	6	170	1 900
0	14	190	2 100
1	22	210	2 300

4.2.2　试验结果与分析

运用数据处理软件 Design-Expert 13.0.5 对试验数据进行多元回归拟合，得叶面平展率和烟叶破损率二次回归模型为

$$Y_1 = 84.39 + 0.24X_1 + 0.294X_2 + 0.804X_3 + 0.215X_1X_3 + 0.253X_2X_3 + 0.301X_1^2 + 0.773X_3^2 \tag{20}$$

表 6 试验结果

Tab. 6 Test results

试验号	因素			叶面平展率 Y_1/%	烟叶破损率 Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	84.59	4.90
2	-1	0	1	85.89	5.61
3	1	0	-1	84.60	5.01
4	-1	-1	0	84.51	6.75
5	0	0	0	84.41	4.75
6	1	-1	0	84.86	5.96
7	0	0	0	84.21	5.02
8	0	0	0	84.38	4.97
9	-1	1	0	84.71	4.95
10	1	0	1	86.78	5.33
11	0	1	-1	84.76	5.02
12	0	1	1	86.73	5.46
13	0	-1	-1	84.44	6.07
14	-1	0	-1	84.57	5.06
15	0	0	0	84.34	4.92
16	0	-1	1	85.40	6.82
17	1	1	0	85.36	4.94

$$Y_2 = 4.91 - 0.141X_1 - 0.654X_2 + 0.258X_3 + 0.195X_1X_2 + 0.664X_2^2 + 0.267X_3^2 \quad (21)$$

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，叶面平展率和烟叶破损率响应面模型 P 小于 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，可用来预测展叶装置最佳参数。

采用 Design-Expert 得到各因素对叶面平展率、烟叶破损率影响的响应面，如图 12 所示。

由图 12a 可知，当步进电机转速不变时，叶面平展率均随电动推杆速度和离心风机转速增加呈先减小后增加趋势，响应面曲线沿离心风机转速方向变化得更快，即离心风机转速比电动推杆速度对叶面平展率的影响更为显著；由图 12b 可知，当电动推杆速度不变时，叶面平展率均随步进电机转速和离心风机转速增加呈先减小后增加趋势，响应面曲线沿离心风机转速方向变化得更快，即离心风机转速比步进电机转速对叶面平展率的影响更为显著；由图 12c 可知，当离心风机转速不变时，烟叶破损率随电动推杆速度增加，烟叶破损率下降，随步进电机转速增加呈先减小后增加趋势，响应面曲线沿步进电机转速方向变化得更快，即步进电机转速比电动推杆速度对烟叶破损率影响更为显著。

表 7 试验结果方差分析

Tab. 7 Test result variance analysis

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
叶面平展率 Y_1	模型	10.02	9	1.11	33.96	<0.000 1 **
	X_1	0.460 8	1	0.460 8	14.05	0.007 2 **
	X_2	0.690 3	1	0.690 3	21.05	0.002 5 **
	X_3	5.17	1	5.17	157.60	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.022 5	1	0.022 5	0.686 1	0.434 8
	X_1X_3	0.184 9	1	0.184 9	5.64	0.049 3 *
	X_2X_3	0.255 0	1	0.255 0	7.78	0.027 0 *
	X_1^2	0.380 8	1	0.380 8	11.61	0.011 3 *
	X_2^2	0.126 4	1	0.126 4	3.85	0.090 4
	X_3^2	2.52	1	2.52	76.77	<0.000 1 **
	残差	0.229 5	7	0.032 8		
	失拟	0.154 2	3	0.051 4	2.73	0.178 2
	误差	0.075 3	4	0.018 8		
	总和	10.25	16			
烟叶破损率 Y_2	模型	6.61	9	0.733 9	49.93	<0.000 1 **
	X_1	0.159 6	1	0.159 6	10.86	0.013 2 *
	X_2	3.42	1	3.42	232.58	<0.000 1 **
	X_3	0.530 5	1	0.530 5	36.08	0.000 5 **
	X_1X_2	0.152 1	1	0.152 1	10.35	0.014 7 *
	X_1X_3	0.013 2	1	0.013 2	0.899 6	0.374 5
	X_2X_3	0.024 0	1	0.024 0	1.63	0.241 9
	X_1^2	0.023 1	1	0.023 1	1.57	0.250 7
	X_2^2	1.86	1	1.86	126.28	<0.000 1 **
	X_3^2	0.299 0	1	0.299 0	20.34	0.002 8 **
	残差	0.102 9	7	0.014 7		
	失拟	0.061 4	3	0.020 5	1.97	0.260 0
	误差	0.041 5	4	0.010 4		
	总和	6.71	16			

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

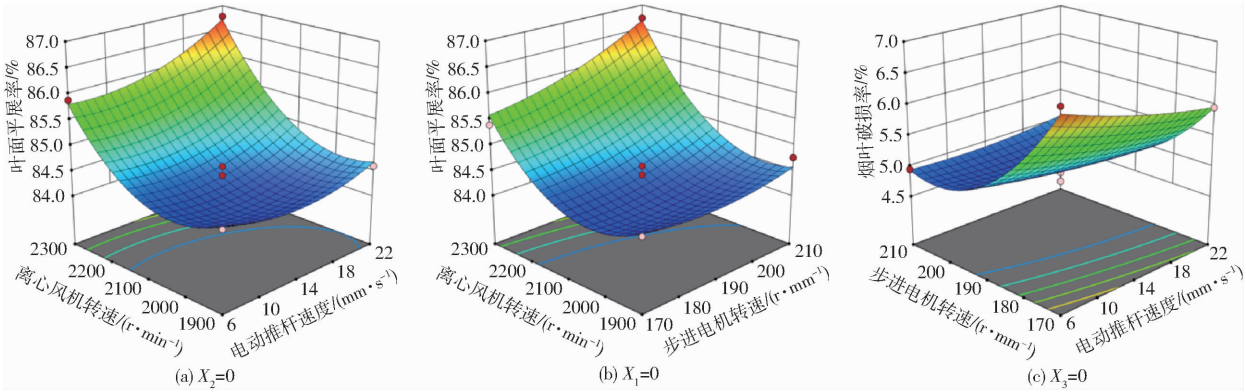


图 12 试验因素对叶面平整率和烟叶破损率交互影响的响应面

Fig. 12 Interaction effects of test factors on tobacco leaf surface flatness rate and tobacco leaf damage rate

4.3　最佳参数组合设计

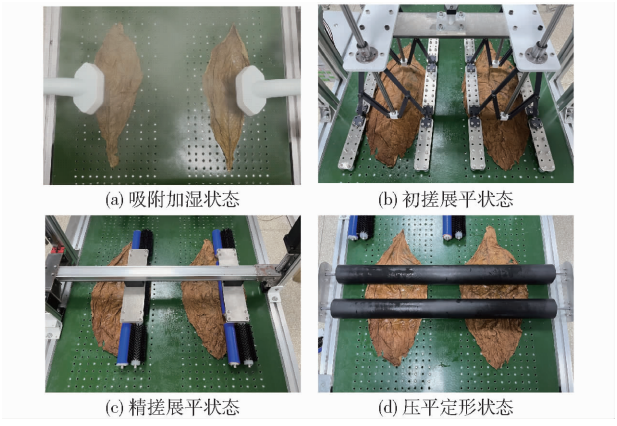
为提高装置展叶性能，利用 Design-Expert 软件求解最佳参数组合，约束各试验因素水平，以最大叶面平展率和最小烟叶破损率为优化指标，建立目标函数和边界约束函数为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

使用 Design-Expert 的 BBD 模块优化后得出最佳参数组合为：电动推杆速度 21.9 mm/s、步进电机转速 200.8 r/min 和离心风机转速 2 274.9 r/min，在最佳参数组合条件下，叶面平展率和烟叶破损率预测值分别为 86.78% 和 5.13%。

5　试验验证

为验证优化参数可行性，综合控制精度选取最佳参数组合为：电动推杆速度 22 mm/s、步进电机转速 201 r/min 和离心风机转速 2 275 r/min，开展验证试验，如图 13 所示。试验前记录晾制回潮后茄衣烟叶叶宽和叶面积，试验重复 5 次并取平均值，装置展叶完成后，记录装置展叶后茄衣烟叶叶宽和叶面积，结果表明在最佳参数组合条件下叶面平展率为 85.72%，烟叶破损率为 5.76%，其结果与预测值基本吻合。装置展叶前后茄衣烟叶叶宽增加 34.81%，叶面积增加 26.96%，与人工展叶相比，叶宽与叶面积增加率分别为 93.82% 和 92.76%。

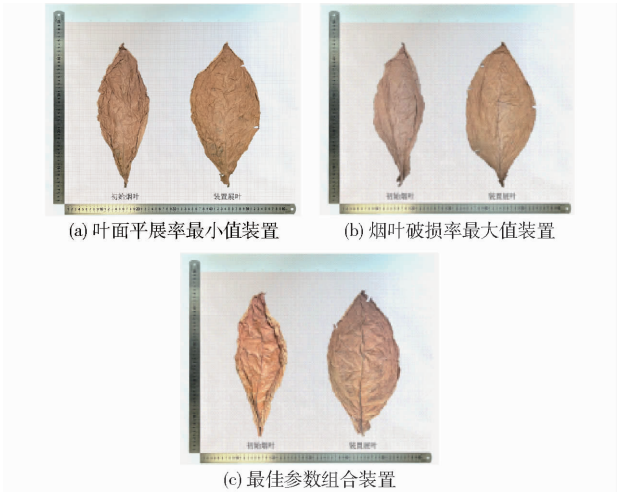


(a) 吸附加湿状态　(b) 初搓展平状态　(c) 精搓展平状态　(d) 压平定形状态

图 13　雪茄茄衣烟叶展叶效果

Fig. 13　Leaves flattening performance of device for cigar wrapper tobacco leaves

选取表 6 试验结果中，叶面平展率最小值和烟叶破损率最大值的参数组合进行装置试验，并与最佳参数组合下的烟叶展平效果进行对比。由图 14a 可知，当电动推杆速度 14 mm/s、步进电机转速 190 r/min 和离心风机转速 2 100 r/min 时，叶面平展率最小值为 84.21%，烟叶破损率为 5.02%，与最佳参数组合试验效果相比，叶面平展率减小 1.51 个百分点，烟叶破损率减小 0.74 个百分点，装置叶面平展率性能降低；由图 14b 可知，当电动推杆速度 14 mm/s、步进电机转速 170 r/min 和离心风机转速 2 300 r/min 时，叶面平展率为 85.40%，烟叶破损率最大值为 6.82%，与最佳参数组合试验效果相比，叶面平展率减小 0.32 个百分点，烟叶破损率增加 1.06 个百分点，装置叶面平展率性能和烟叶破损率性能均降低。试验对比结果可知，最佳参数组合条件下装置展叶性能较优。



(a) 叶面平展率最小值装置　(b) 烟叶破损率最大值装置　(c) 最佳参数组合装置

图 14　表 6 代表性试验结果与最佳参数组合作业效果对比

Fig. 14　Comparison of representative test results of Tab. 6 with the best parameter combination operation effect

6　结论

(1) 基于横向拉伸展平、纵向压平定形的展叶原理，提出了依次上料吸附加湿、间歇输送展平、压平定形下料的烟叶展平工艺方案，设计了一种气力机械组合式雪茄烟叶展平装置。

(2) 结合雪茄茄衣烟叶特性及烟叶抗拉力结果，分析了雪茄茄衣烟叶展叶技术需求，基于 CFD 开展了负压腔气流场数值分析，确定了负压带吸孔直径为 6 mm、深度为 4 mm、孔间距为 25 mm，分析确定了初展机构和压平机构等关键部件结构参数和工作参数，开展了精展烟叶过程力学分析，构建了压平烟叶过程力学模型。

(3) 开展了气力机械组合式雪茄烟叶展平装置正交试验，试验结果表明，最佳参数组合为电动推杆速度 22 mm/s、步进电机转速 201 r/min 和离心风机转速 2 275 r/min，最佳参数组合下，雪茄烟叶展平装置的叶面平展率和烟叶破损率分别为 85.72% 和 5.76%，与人工展叶相比，叶宽与叶面积增加率分别为人工的 93.82% 和 92.76%。

参 考 文 献

[1] 王琰琰,刘国祥,向小华,等. 国内外雪茄烟主产区及品种资源概况[J]. 中国烟草科学,2020,41(3):93 - 98.
WANG Yanyan, LIU Guoxiang, XIANG Xiaohua, et al. Overview of main cigar production areas and variety resources at domestic and overseas[J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(3): 93 - 98. (in Chinese)

[2] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):116 - 126,295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116 - 126, 295. (in Chinese)

[3] 李爱军,秦艳青,代惠娟,等. 国产雪茄烟叶科学发展刍议[J]. 中国烟草学报,2012,18(1):112 - 114.
LI Aijun, QIN Yanqing, DAI Huijuan, et al. On scientific development of China's cigar leaf[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(1): 112 - 114. (in Chinese)

[4] 张青松,陈志凌,杜文斌,等. 遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):122 - 133.
ZHANG Qingsong, CHEN Zhiling, DU Wenbin, et al. Design and experiment of novel sprayer for protecting middle and lower leaves of cigar tobacco plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 122 - 133. (in Chinese)

[5] 秦艳青,李爱军,范静苑,等. 优质雪茄茄衣生产技术探讨[J]. 江西农业学报,2012,24(7):101 - 103.
QIN Yanqing, LI Aijun, FAN Jingyuan, et al. Discussion on production technology of high-quality cigar wrapper[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(7): 101 - 103. (in Chinese)

[6] 李军华,唐杰,梁坤,等. 印尼与国内雪茄烟叶主要化学成分差异分析[J]. 浙江农业科学,2015,56(7):1080 - 1083.
LI Junhua, TANG Jie, LIANG Kun, et al. Analysis of main chemical components of cigar leaf difference between Indonesia and China[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(7): 1080 - 1083. (in Chinese)

[7] 闫新甫,王以慧,雷金山,等. 国产雪茄分类探讨及其实际应用分析[J]. 中国烟草学报,2021,27(5):100 - 109.
YAN Xinfu, WANG Yihui, LEI Jinshan, et al. Classification of domestic cigars and its practical application[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(5): 100 - 109. (in Chinese)

[8] 吴雪梅,顾金梅,张富贵,等. 烟叶滚刷铺平装置的设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(7):97 - 100,111.
WU Xuemei, GU Jinmei, ZHANG Fugui, et al. Design and experiment of roller-spreading device for tobacco leaves[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 97 - 100, 111. (in Chinese)

[9] 四川中烟工业有限责任公司. 一种用于烟叶平铺的设备:CN202220611459.5[P]. 2022 - 07 - 08.

[10] 青岛海奥瑞自动化科技有限公司. 烟叶自动展开机:CN201410483380.9[P]. 2015 - 02 - 04.

[11] 昆明船舶设备集团有限公司. 一种烟叶摊铺、展平、单层化的装置:CN201621408252.9[P]. 2017 - 10 - 13.

[12] CAFFOZ R, JUSTON C, BOUTRON C. Method and device for spreading out tobacco leaves and for enabling them to be retrieved, flat, after having been spread out: US19780970386[P]. 1981 - 02 - 24.

[13] EIJSERMANS H A P. Device for spreading individual tobacco leaf halves: US19790005717[P]. 1981 - 06 - 16.

[14] KJAER I, MOLLER HANS J, NIELSEN STEEN H. A device for spreading tobacco leaves: DE19813161092T[P]. 1983 - 11 - 10.

[15] 陈家茜,刘昌华. 基于植物图像的甘蓝型油菜叶片面积测量方法[J]. 武汉轻工大学学报,2021,40(2):18 - 23.
CHEN Jiaxi, LIU Changhua. Leaf area measurement of *Brassica napus* based on plant image[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2021, 40(2): 18 - 23. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 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)

[18] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(3):57 - 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas - solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 - 68. (in Chinese)

[19] 舒彩霞,杨佳,廖庆喜,等. 油菜联合收获导流式双筒旋风分离清选装置设计及试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(6):1807 - 1820.
SHU Caixia, YANG Jia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of diversion type double-cylinder cyclone separation system for rapeseed combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1807 - 1820. (in Chinese)

[20] 康建明,解臣硕,王小瑜,等.滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(9):91－98.
KANG Jianming,XIE Chenshuo,WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):91－98. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 朱磊磊,陈军,白晓鸽,等.基于曲柄滑块机构原理导航的农业机器人设计[J].农业机械学报,2009,40(增刊):33－36.
ZHU Leilei, CHEN Jun, BAI Xiaoge, et al. Design of agricultural robot navigated by the slider-crank mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(Supp.):33－36. (in Chinese)

[23] 王尚斌,孙宇,彭斌彬.曲柄滑块机构转速波动与动态静力综合分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):28－33.
WANG Shangbin,SUN Yu,PENG Binbin. Comprehensive analysis of revolving speed fluctuation and dynamic statics of slider-crank mechanism[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition),2014,42(1):28－33. (in Chinese)

[24] 潘东彪,吴雪梅,苏国樟,等.滚刷式烟叶铺平装置刷毛参数与结构设计[J].中国农机化学报,2016,37(8):91－95.
PAN Dongbiao,WU Xuemei,SU Guozhang,et al. Brush hairs parameters and structure design of the roiler brush type tobacco leaves paving device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(8):91－95. (in Chinese)

[25] 郑俊强.柔性纸币的平整化技术研究[D].贵阳:贵州大学,2016.
ZHENG Junqiang. The research on flexible banknote's levelling technology[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)

[26] 湖北省烟草科学研究院.一种测量雪茄烟叶叶面平展度的方法:CN202211571977.X[P].2023－03－21.

(上接第 339 页)

[16] 辜松. 蔬菜工厂化嫁接育苗生产装备与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[17] 张跃峰,杨艳丽,初麒,等. 设施园艺种苗生产装备系统[J]. 农机化研究, 2018, 40(10): 257－261.
ZHANG Yuefeng, YANG Yanli, CHU Qi, et al. Equipment system of facilities horticulture for seedling production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 257－261. (in Chinese)

[18] 辜松. 设施园艺现代生产装备与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.

[19] 秦黎. 岩棉再利用栽培蔬菜的效果评价[D]. 太原: 山西农业大学, 2022.
QIN Li. Evaluation on the effect of rock wool reusing cultivated vegetables[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[20] 刘湘伟,谢沅沛,杜莉雯. 椰糠与岩棉作为栽培基质的对比研究[J]. 农业工程技术, 2019, 39(34): 77－79.
LIU Xiangwei, XIE Yuanpei, DU Liwen. Comparative study on coconut bran and rock wool as cultivation substrates[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019, 39(34): 77－79. (in Chinese)

[21] 任焕琴. 圆锥轴承套圈上料剔除定向装置[J]. 轴承, 1998(10): 19－20, 44.
REN Huanqin. Directional device for material removal of tapered bearing rings[J]. Bearing, 1998(10): 19－20, 44. (in Chinese)

[22] 吴电建,张三强,杨光友. 克氏原螯虾头尾自动定向装置参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 44－52.
WU Dianjian, ZHANG Sanqiang, YANG Guangyou. Parameter optimization and experiment for the automatic head and tail orientation device of *Procambarus clarkii*[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 44－52. (in Chineses)

[23] BANEH N M, NAVID H, KAFASHAN J, et al. Development and evaluation of a small-scale apple sorting machine equipped with a smart vision system[J]. Agri. Engineering, 2023, 5(1): 473－487.

[24] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 395－405.

[25] 史鹏涛,文怀兴,王宁侠. 大枣全自动输送定向切片机设计与应用效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 28－34.
SHI Pengtao, WEN Huaixing, WANG Ningxia. Design and application effects of automatic conveying and directional slicer for jujube[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 28－34. (in Chineses)