doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.040

背负式雪茄烟叶打顶抑芽机设计与试验

谢昊明[1]　郭宇鹏[1]　廖庆喜[1,2]　杨春雷[3]　杨锦鹏[3]　余　君[3]　张青松[1,2]　王　磊[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;
3. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030)

摘要: 针对雪茄烟叶种植生产中打顶抑芽人工劳动强度大、作业效率低、抑芽剂喷施不均匀等问题,本文设计了一种背负式雪茄烟草打顶抑芽机,提出了依次夹持、剪切、施药工艺流程,该打顶抑芽机主要由同步夹持机构、剪切机构和抑芽剂喷施装置组成。开展了同步夹持机构稳定夹持状态下力学分析,确定了其关键结构参数;结合顶芽植株性状分析结果,依据滑切原理得出剪切刀片关键结构参数;抑芽剂喷施装置采用环形对心射流式的喷施作业方式,根据射流喷嘴内部流量特性分析了喷施装置关键结构参数范围。基于 Fluent 开展了喷施装置喷口流量特性单因素仿真试验,结果表明,当主流道直径为 5 ~ 7 mm、喷口数量为 5 ~ 7、喷口直径为 1 ~ 2 mm 时,各喷口间平均流速变异系数较小。以雪茄烟叶叶片染药率为指标进行了喷施装置结构优化田间试验,结果表明,当主流道直径为 6 mm、喷口数量为 6、喷口直径为 1.5 mm、喷射角度为 60°时,叶片染药率为 0.37%;田间性能试验结果表明,背负式雪茄烟草打顶抑芽机平均顶芽切断率为 92.40%,切断后顶芽掉落率为 3.20%,抑芽剂喷施流量为 25 mL/s 时平均腋芽浸染率为 93.75%,背负式雪茄烟叶打顶机可完成打顶抑芽工序,抑芽剂喷施均匀。研究结果为雪茄烟叶打顶抑芽机研制提供新途径。

关键词: 雪茄烟叶; 打顶; 抑芽机; 背负式

中图分类号: S224.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0434-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Knapsack Topping and Bud Suppression Machine for Cigar Tobacco

XIE Haoming[1]　GUO Yupeng[1]　LIAO Qingxi[1,2]　YANG Chunlei[3]　YANG Jinpeng[3]
YU Jun[3]　ZHANG Qingsong[1,2]　WANG Lei[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*
3. *Tobacco Research Institute of Hubei Province*, *Wuhan* 430030, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity, low operation efficiency and uneven spraying of bud inhibitor in the process of cigar tobacco leaf planting and production, the work process of clamping, shearing, and spraying in turn was proposed. And the knapsack topping and bud suppression machine for cigar tobacco was developed. The machine was mainly composed of synchronous clamping mechanism, shearing mechanism and bud inhibitor spraying device. The mechanical analysis of the synchronous clamping mechanism under stable clamping state was carried out, and the key structural parameters were determined. Combined with the analysis of the structural characteristics of the top bud and the principle of sliding cutting, the key structural parameters of the shear blade were obtained. The spraying device of the bud inhibitor adopted the spraying operation mode of annular jet. According to the internal flow characteristics of the jet nozzle, the range of key structural parameters of the spraying device was analyzed. Based on Fluent software, the single factor simulation test of the nozzle flow characteristics was carried out. It was concluded that when the diameter of the main channel was 5 ~ 7 mm, the number of nozzles was 5 ~ 7, and the diameter of the nozzles was 1 ~ 2 mm, the fluid velocity between the nozzles

收稿日期: 2024 - 04 - 06　修回日期: 2024 - 05 - 10

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: 谢昊明(1998—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: xiehaoming11@126.com

通信作者: 杨锦鹏(1979—),男,研究员,博士,主要从事烟草栽培与调制技术研究,E-mail: yjp2022@126.com

was more uniform. The field experiment of spraying device structure optimization was carried out with the pesticide rate of cigar tobacco leaves as the index. The results showed that when the diameter of the main channel was 6 mm, the number of nozzles was 6, the diameter of the nozzle was 1.5 mm, and the spraying angle was 60°, the pesticide area of cigar leaves was 0.37%. The field performance test results showed that the average top bud cutting rate of the cigar tobacco leaf topping and bud suppression device was 92.40%, the top bud drop rate after cutting was 3.20%. And when the spraying flow rate of the bud suppressor was 25 mL/s, the average axillary bud infection rate was 93.75%. The knapsack topping and bud suppression machine for cigar tobacco can complete the process of topping and bud inhibition, and the bud inhibitor was sprayed evenly. The research can provide an approach for the development of cigar tobacco leaves topping and bud inhibition machine.

Key words: cigar tobacco; topping; bud inhibition; knapsack

0　引言

打顶抑芽是雪茄烟叶生产过程中的重要环节[1]。雪茄烟叶进入生长期后为防止营养物质向顶端花序流失,需要进行打顶作业,打顶后可改善烟叶营养分配,提高烟叶质量[2-4]。打顶后烟草腋芽生长会降低烟叶质量与产量[5],实际生产中对打顶后烟株还应施用抑芽剂抑制腋芽生长。雪茄烟叶多种植于丘陵地带,以垄作方式为主,作业空间较小[6-8];为了保证雪茄烟叶生产需要叶片完整[9],目前生产中雪茄烟叶打顶抑芽大部分通过人工作业完成,采用一人打顶一人抑芽双人模式,存在抑芽剂喷施不均匀、抑芽效果不理想、生产效率较低[10]等问题。

意大利生产的 JS 系列烟草自动打顶机[11],可实现打顶高度仿形、顶芽抛送收集及喷雾等功能。马利强等[12]为了提高烟叶打顶消毒工作效率设计了一种带有钩形割刀的自走式打顶装置;为了提高烟草打顶抑芽作业生产效率,马敏等[13]设计了烟草打顶抑芽机,可实现打顶与抑芽同步作业,但整机结构尺寸较为庞大,作业易损伤叶片,不适用于雪茄烟叶生产;任震宇等[14]设计了一种电动烟草打顶抑芽机控制系统,实现烟草打顶抑芽半自动化,提高了打顶抑芽作业生产效率。为了实现烟叶精准施药,刘雪美等[15]设计了喷杆喷雾机精确施药系统,该系统采用超声波测距方式精准识别作物施药位置,但喷杆式喷雾机仍只适用于大田作业,并不适用于雪茄烟叶种植地块。综上,为提高烟草打顶与抑芽施用生产效率在打顶装置研制、施药控制系统设计等方面开展了相关研究,但较少有满足雪茄烟叶打顶抑芽生产适用装置,适用于雪茄烟叶生产的打顶抑芽装置仍需进一步探索。

针对雪茄烟叶种植打顶抑芽人工作业抑芽剂喷施不均匀,生产效率低等问题,本文设计一种背负式雪茄烟草打顶抑芽机,提出依次夹持、剪切、施药的工作流程,以实现顶芽夹持、剪切、抑芽剂喷施的功能。确定剪切机构同步夹持机构、剪切机构、抑芽剂喷施装置主要结构参数;通过喷施装置喷口流量特性单因素仿真试验和喷施装置结构优化田间试验确定喷施装置结构参数组合,同时测试装置田间作业性能。以期为雪茄烟叶打顶抑芽作业装备研制提供新途径。

1　总体结构与工作流程

1.1　总体结构

背负式雪茄烟草打顶抑芽机主要由集成式刀头、直流电机、控制箱、操作手柄、电动药箱、输液管等组成,其装置总体结构如图 1 所示。其中集成式刀头包括顶芽夹持机构、剪切机构及抑芽剂喷施装置,装置主要技术参数如表 1 所示。

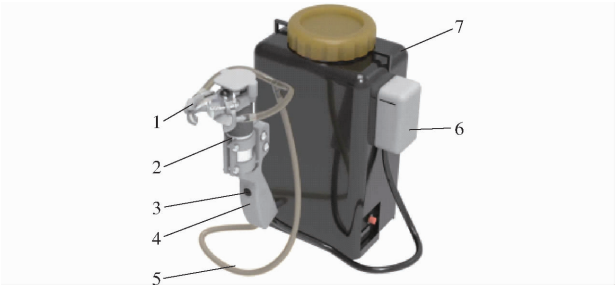

图 1　背负式雪茄烟草打顶抑芽机结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of topping and bud suppression device for cigar tobacco

1. 集成式刀头　2. 直流电机　3. 剪切启动按钮　4. 操作手柄　5. 输液管　6. 控制箱　7. 电动药箱

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of device

参数	数值
操作手柄高度/mm	250
操作手柄质量/kg	0.86
药箱容量/L	6
直流电机转矩/(N·m)	8
连续作业时间/h	4.2
作业效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	0.07

1.2 工艺流程

该装置可以一次完成顶芽剪切与抑芽作业。背负式雪茄烟草打顶抑芽机工作流程如图 2 所示。如图 2a 所示,手持操作手柄使顶芽茎秆进入定刀片理想作业区域内,同时顶芽与定刀片接触从而限制顶芽移动进入预剪切状态。如图 2b 所示,启动剪切机构按钮剪切机构开始闭合,随着动刀片闭合其上的同步夹持机构中的浮动夹持片先接触顶芽并逐渐增加夹持力,剪切机构在刀片完全闭合后完成顶芽剪切,此时上部顶芽被夹持机构完全固定。如图 2c 所示,动刀片闭合后启动喷施装置按钮,抑芽剂输入至喷施装置中的环形对心射流喷嘴,以倒锥状包络下部茎秆顶端,在茎秆表面汇聚后形成一层均匀的液膜沿茎秆流下,并沾染各叶柄处,达到抑芽效果。如图 2d 所示,关闭喷施装置开关,抑芽剂喷施停止,将装置连同固定其上的顶芽带离植株,断开启动按钮开关,动刀片张开复位,夹持机构同步张开,回收剪切后顶芽。

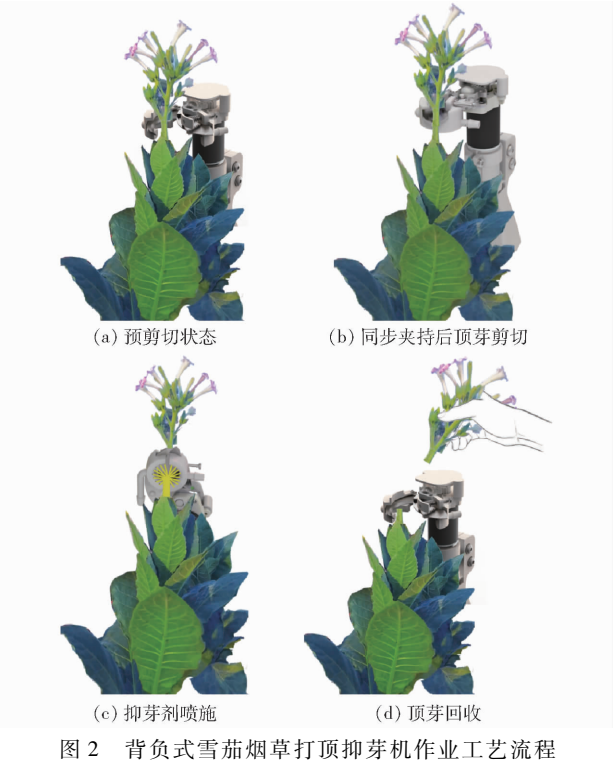

图 2 背负式雪茄烟草打顶抑芽机作业工艺流程

Fig. 2 Operation process of topping and bud suppression device for cigar tobacco

2 关键部件设计

2.1 夹持机构设计

在剪切作业过程中同步夹持机构对上部茎秆进行夹持,并在顶芽茎秆切断后对顶芽进行固定。作业时夹持片与动刀片一起向固定端闭合,对茎秆进行夹持,其结构如图 3 所示。

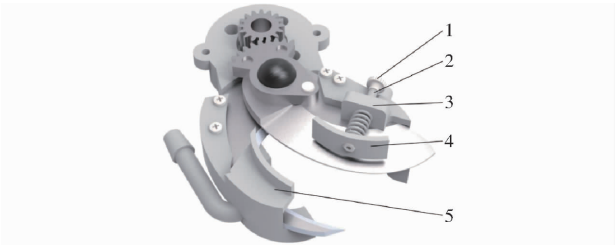

图 3 同步夹持机构结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of synchronous clamping mechanism

1. 调节螺母 2. 顶杆 3. 浮动端支座 4. 浮动端夹持片 5. 固定端支座

夹持机构浮动夹持片在随动刀片移动过程中与顶芽茎秆接触,并在动刀片剪切过程中与顶芽间压力逐渐增大,将切断的顶芽固定在剪切机构上方。在同步夹持过程中,当浮动夹持片与浮动端支座发生相对移动时,两夹持片间压力受弹簧作用不断增大,此时顶杆发生绕动刀片回转中心的定轴转动与沿支座内部滑道的直线运动,使顶杆与支座内滑道产生作用力,由于滑道内径与顶杆外径有一定间隙,其所受作用力位于顶杆与滑道进出口边缘接触点,整体受力如图 4 所示。

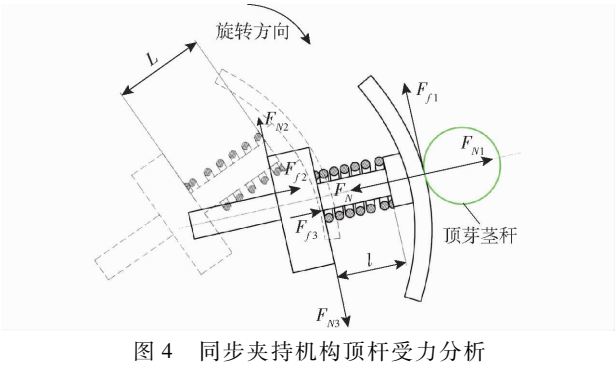

图 4 同步夹持机构顶杆受力分析

Fig. 4 Force analysis of jacking rod of synchronous clamping mechanism

由图 4 可知,同步夹持过程中顶杆所受各力满足

$$\begin{cases} F_{N2}+\mu_1 k_1(L-l)=F_{N3} \\ \mu_2(F_{N2}+F_{N3})=k_1(L-l) \\ F_{f1}=\mu_1 F_{N1} \\ F_{f2}=\mu_2 F_{N2} \\ F_{f3}=\mu_2 F_{N3} \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_{N1}——弹簧对夹持片产生的弹力,N

F_{N2}——滑道末端对顶杆的压力,N

F_{N3}——滑道首端对顶杆的压力,N

F_{f1}——夹持片与茎秆间摩擦力,N

F_{f2}——滑道末端与顶杆间摩擦力,N

F_{f3}——滑道首端与顶杆间摩擦力,N

μ_1——茎秆与夹持片表面间摩擦因数

μ_2——滑道内壁与顶杆间摩擦因数

L——弹簧原长，mm

l——夹持状态下弹簧长度，mm

k_1——弹簧刚度

由式(1)可得

$$\begin{cases} F_{f2} = \dfrac{k_1(L-l)(1+\mu_1\mu_2)}{2\mu_2} \\ F_{f3} = \dfrac{k_1(L-l)(1-\mu_1\mu_2)}{2\mu_2} \end{cases} \tag{2}$$

式(2)表明，随着弹簧弹性系数增大，顶杆受滑道内壁摩擦力增大；随着弹簧压缩程度增加，顶杆受滑道内壁摩擦力增大。同步夹持在达到稳定夹持状态前顶杆应始终保持与滑道的相对移动，发生卡顿时临界状态满足

$$F_{f2} + F_{f3} = F_N \tag{3}$$

式中　F_N——茎秆对夹持片的反作用，N

故可通过适当减小弹簧弹性系数来减小顶杆所受摩擦力，防止顶杆运动过程中发生卡顿。

夹持过程中由于顶芽头部较重，顶芽易翻转掉落，因此开展顶芽稳定夹持状态下受力分析。假设顶芽为圆柱均质无变形直杆，重心位于点 M_0，茎秆被夹持部中心为 C_0，在夹持状态下受到顶芽与夹持片接触线上的均布摩擦载荷 q_0 与 q_1，其受力状态如图 5 所示。茎秆在倾斜夹持状态下，产生以夹持中心为转动中心的定轴转动倾向，茎秆发生临界转动满足

$$\begin{cases} G_0 L_1 \sin\theta_0 = 2\displaystyle\int_0^{L_2} q_0 x \mathrm{d}x \\ q_0 = q_1 = \mu_1 \dfrac{F_{N3}}{L_2} \end{cases} \tag{4}$$

式中　G_0——茎秆所受重力，N

L_1——茎秆质心到夹持中心的距离，mm

L_2——茎秆夹持部分长度，mm

θ_0——茎秆轴线与剪切平面夹角，(°)

结合式(4)得顶芽稳定夹持所需的弹簧力满足关系式

$$F_{N1} = \frac{2G_0 L_1 \sin\theta_0 \cos\theta_0}{\mu_1 b} \tag{5}$$

式中　b——浮动夹持片高度，mm

稳定夹持所需弹簧力与夹持片-茎秆间摩擦因数、夹持片垂直高度成反比，与弹簧弹性系数成正比。由夹持机构工作原理可知，保证组件稳定工作的关键在于防止顶杆在滑道内卡顿及减小顶芽夹持过程中发生转动；为提高夹持机构夹持能力，应增加夹持片垂直高度，使用较小弹性系数的弹簧，在降低

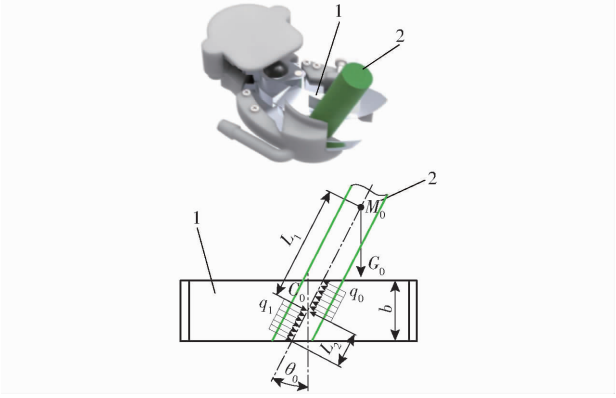

图 5　稳定夹持状态受力分析

Fig. 5　Stable clamping state force analysis

1. 浮动夹持片　2. 顶芽茎秆

顶杆与滑道内壁间摩擦力的同时增加夹持机构与茎秆间的摩擦力。前期物料特性测试表明，雪茄烟叶顶芽平均鲜质量为 39.23 g，重心位置 L_1 为 147.12 mm，为保证夹持稳定性，取浮动夹持片高度 b 为 15 mm，得出稳定夹持下，夹持片弹力 F_{N1} 为 2.12 N，为防止顶杆卡顿，选用弹簧原长为 40 mm，弹簧刚度为 0.97 N/mm。

2.2　剪切机构设计

剪切机构定刀片固定于刀座卡槽内，通过圆柱销固定动刀片与摆齿，由输出轴齿轮带动摆齿进而驱动刀片完成开合，剪切机构闭合时工作过程如图 6 所示。

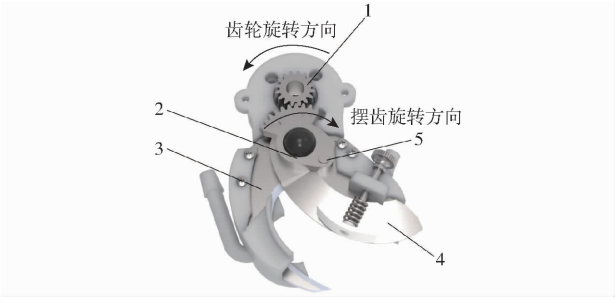

图 6　剪切机构闭合工作过程

Fig. 6　Closure working process of shear mechanism

1. 驱动齿轮　2. 摆齿　3. 定刀片　4. 动刀片　5. 圆柱销

结合顶芽结构性状分析结果[16-17]，以最小茎叶角确定定刀片前宽满足拨叶功能，以茎秆直径最大的部位确定定刀片结构参数，以满足茎秆运移空间及后续功能组件作业空间，定刀片结构如图 7 所示。取定刀片总长 H_1 为 45 mm，茎秆直径均值最大段位于第 3～4 顶叶之间，该段测试直径最大值为 10.45 mm，故取理想剪切段长度 H_2 为 12 mm、外滑段长度 H_3 为 15 mm；为确保定刀片前刀面能拨开顶叶，结合各段茎秆平均长度，确定定刀片前宽 H_0 为 6 mm。

雪茄烟叶打顶期主要集中在初花期至盛花期，该时期雪茄烟叶顶芽韧皮部维束管开始纤维化并逐

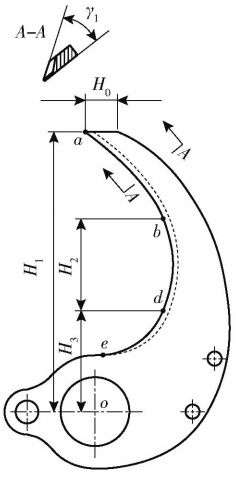

图 7 定刀片结构示意图

Fig. 7 Schematic of fixed knife structure

渐形成木质部包裹于髓质部外侧。为提升动刀片对茎秆表层的穿透能力,基于对数螺线方程设计动刀片等滑切角刃口曲线,以提高滑切过程中的稳定性及切割效率[18]。

对数螺线极坐标方程为

$$\begin{cases}\rho = a\mathrm{e}^{c\varphi} \\ c = \dfrac{1}{\tan\beta_a}\end{cases} \tag{6}$$

式中 ρ——曲线上某一点极径

a——常数系数

c——常数系数

φ——极角,(°)

β_a——动刀片滑切角,(°)

对数螺线几何特性在于极点引发的任意射线与曲线交点的切线方向角均相等[19],同时方向角与刃口曲线上滑切角相等,可基于对数螺线方程构建等滑切角刃口曲线;以动刀片转动中心点 O 为原点,令 Y 轴与动刀片刀背平行建立坐标系,如图 8 所示。取刃口曲线上任意一点,当刃口曲线从任意角转过微小角度 $\mathrm{d}\theta$ 时,点 A 移动到点 A',极径 r 增加 $\mathrm{d}r$,以 OA 画圆弧,交 OA'于点 N',点 N 为点 A 在 OA'上的投影。当 $\mathrm{d}\theta$ 趋近于 0 时,$\overset{\frown}{AN'}$、$\overset{\frown}{AA'}$可视为直线,结合滑切角定义可知,在△NAA'中有

$$\tan\beta_a = \frac{l_{AN}}{l_{AN'}} = \frac{r\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}r} \tag{7}$$

由对数螺线性质可知,$\tan\beta_a$为定值,令 $\tan\beta_a = K_0$,结合式(6)计算得刃口曲线方程

$$\rho = a\mathrm{e}^{\frac{\varphi}{K_0}} \tag{8}$$

当茎秆沿定刀片刃口滑移至理想切割范围内且与动刀片接触后,在理想条件下,茎秆应处于稳定待剪切状态,在该状态下茎秆不发生沿刃口的滑动,其受力如图 9 所示。

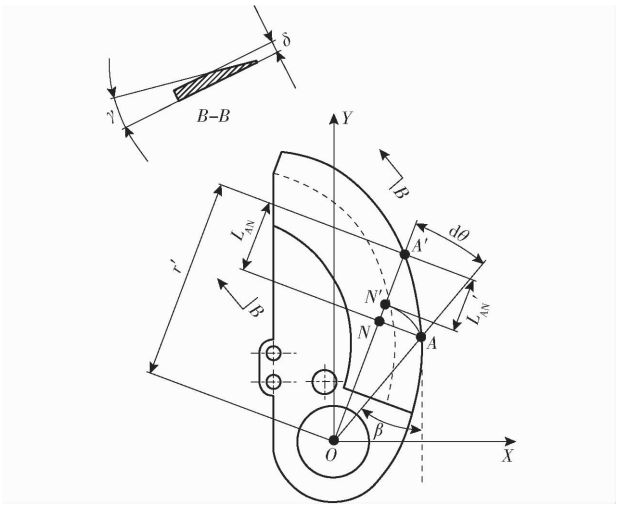

图 8 动刀片刃口曲线

Fig. 8 Edge curve of knife

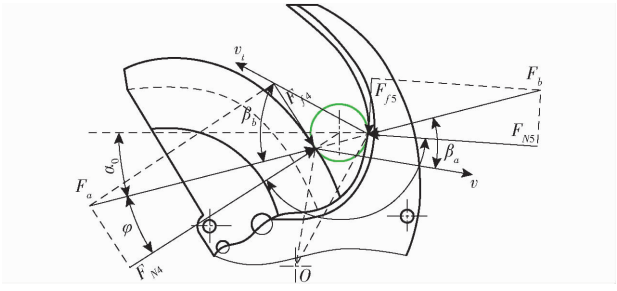

图 9 茎秆稳定剪切受力分析

Fig. 9 Stem stabilization shear force analysis

此时茎秆与动刀片刃口接触侧受到沿接触点法线方向的正压力 F_{N4}、沿接触点切线方向的静摩擦力 F_{f4},其合力为 F_a;茎秆与定刀片刃口接触侧受到合力 F_b,当 F_a、F_b共线时茎秆在切割瞬间处于稳定状态,满足方程

$$\begin{cases}\alpha_0 + 2\varphi_1 = \pi \\ \alpha_0 + \beta_a + \beta_b > \pi\end{cases} \tag{9}$$

式中 β_b——定刀片接触点滑切角,(°)

α_0——茎秆两侧所受正压力方向所夹锐角,(°)

φ_1——顶芽茎秆与不锈钢间静摩擦角

得稳定切割条件为

$$\beta_a + \beta_b > 2\varphi_1 \tag{10}$$

测得 φ_1为 29.4°,由于滑切角过大会引起切割功耗上升[20],同时为保证刀刃强度并降低切割阻力,确定剪切刀片结构参数如表 2 所示。

结合前期雪茄烟叶顶芽机械物理特性测试可得顶叶间茎秆平均剪切力为 108.46 N;剪切机构由驱动电机带动输出轴齿轮带动摆齿进而驱动刀片完成开合,则驱动电机所需扭矩为

$$T > \frac{z_a F_q d_r}{z_b \cos\beta_a} \tag{11}$$

表 2　剪切刀片结构参数

Tab. 2　Shear blade structure parameters

项目	参数	数值
动刀片	滑切角/(°)	30
	刀片厚度/mm	4
	刃口角/(°)	12
定刀片	点 b 滑切角/(°)	50
	点 d 滑切角/(°)	30
	刀片厚度/mm	2.7
	刃口角/(°)	40

式中　z_a——驱动齿轮齿数　　z_b——摆齿齿数

F_q——茎秆最大剪切力，N

d_r——剪切力作用点力臂，m

计算得出电机扭矩应大于 6.63 N·m，选用 GA32Y－31ZY 型直流减速电机，最大扭矩为 8 N·m，满足打顶剪切力要求。

2.3　喷施装置结构设计

喷施抑芽剂是作业最后环节，对应的功能组件应在完成顶芽剪切后向下部茎秆喷施抑芽剂，使抑芽剂沿途下流接触各腋芽完成作业，要求较高的腋芽浸染率，故采用“杯淋法”[21]喷施药液，采用环形对心射流喷嘴[22]作业，如图 10 所示。

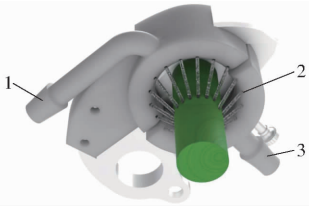

图 10　抑芽剂喷施装置示意图

Fig. 10　Sprout inhibitor spraying parts schematic

1. 定刀片端进液口　2. 支路喷口　3. 动刀片端进液口

该喷施装置整体包括定刀片端进液口和动刀片端进液口，及均布于主流道上的等径支路喷口；各支路轴线汇聚于一点，与环形主流道圆心在剪切平面垂直方向上共线。

由于喷嘴采用对称设计，故对单侧喷嘴对称面一侧的流量特性进行分析，如图 11 所示。在喷嘴稳定喷施抑芽剂状态下，流道内液流可视为恒定不可压缩流，取药液入口流道与主流道交界处为过水断面 0－0，取主流道另一过水断面 1－1，根据能量守恒原理并引入断面平均流速可得恒定总流在任意两过水断面间能量方程

$$\begin{cases} H_a = z_0 + \dfrac{P_0}{\gamma_0} + \dfrac{a_0 v_0^2}{2g} \\ H_b = z_1 + \dfrac{P_1}{\gamma_0} + \dfrac{a_1 v_1^2}{2g} \\ H_a = H_b + h_{w1} \end{cases} \tag{12}$$

式中　z_0——过水断面 0－0 处微小流束位置势能，m

P_0——过水断面 0－0 处微小流束压强，Pa

γ_0——液体容重，N/m^3

g——重力加速度，m/s^2

z_1——过水断面 0－0 处微小流束位置势能，m

P_1——过水断面 0－0 处微小流束压强，Pa

H_b——过水断面 1－1 处实际液体微小流束总水头，m

H_a——过水断面 0－0 处实际液体微小流束总水头，m

h_{w1}——过水断面 0－0 流至过水断面 1－1 的平均水头损失，m

a_0——过水断面 0－0 处动能修正系数

a_1——过水断面 1－1 处动能修正系数

v_0——过水断面 0－0 处平均流速，m/s

v_1——过水断面 1－1 处平均流速，m/s

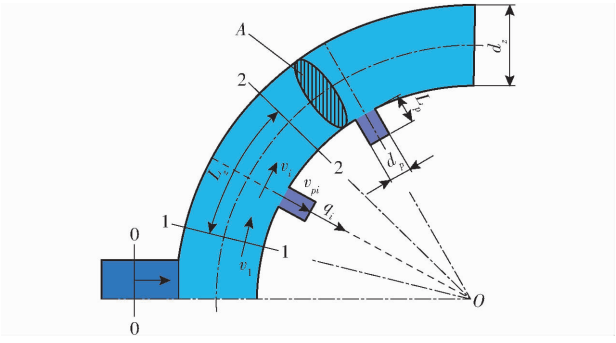

图 11　抑芽剂喷施装置工作效果图

Fig. 11　Working effect of sprout suppressant spraying device

由式(12)可知，主流道过水断面间水头能量损失为单位重量液体由一个断面流向另一断面的平均水头损失。由于主流道内侧均布等径喷口，各喷口处泄流造成主要水头沿程损失，同时喷嘴主流道内壁、各支路喷口内壁存在水头沿程损失；药液入口流道与主流道交界处的流道急转、主流道自身环形结构及主流道与支路喷口间的边界变化均会引起一定的回流漩涡加剧液体质点间摩擦与碰撞，产生局部水头损失，即

$$\begin{cases} h_{w2} = \sum h_f + \sum h_j \\ h_f = \lambda \dfrac{L_z}{4R} \dfrac{v^2}{2g} \end{cases} \tag{13}$$

式中　h_{w2}——过水断面 1－1 流至过水断面 2－2 平均水头损失，m

h_f——沿程水头损失，m

h_j——局部水头损失，m

λ——沿程阻力系数　　L_z——流段长度，m

R——水力半径，m

v——平均流速，m/s

沿程阻力系数 λ 的计算方式与边界内液流形态有关,液流形态可通过边界内流体雷诺数 Re 进行判断[23],其计算式为

$$\begin{cases} Re = \dfrac{\rho_0 v d}{\mu_0} \\ \lambda = 0.11\left(\dfrac{\Delta}{d} + \dfrac{68}{Re}\right)^{0.25} \end{cases} \tag{14}$$

式中 ρ_0——液体密度,kg/m^3

Δ——流道内表面绝对粗糙度,m

d——流道特征长度,mm

μ_0——动力粘度,Pa·s

实际生产中抑芽剂使用配比为每10 L 水用药 20 g,其物理特性与液态水类似,ρ_0取为 998.2 kg/m^3、d 取主流道内径最小值 3 mm,μ_0为 1.01×10^{-3} Pa·s,计算流体最小雷诺数为 4.45×10^5,大于临界值4 000。沿程阻力系数计算式采用阿里特苏里公式[24],可得过水断面 1-1 与过水断面 2-2 中由沿程阻力引起的沿程水头损失 h_{zi}为

$$h_{zi} = \lambda\frac{L_z}{d_z}\frac{v_i^2}{2g} + \lambda\frac{L_p}{d_p}\frac{v_{pi}^2}{2g} \tag{15}$$

式中 d_z——主流道内径,m

v_i——两过水断面间主流道液流平均流速,m/s

L_p——支路流道流段长度,m

d_p——支路流道内径,m

v_{pi}——支路液流平均流速,m/s

由于支路喷口存在泄漏情况,则由泄漏引起的沿程水头损失为

$$h_{xi} = A_p q_i^2 L_p \tag{16}$$

式中 h_{xi}——两过水断面间泄漏所引起的沿程水头损失,m

A_p——比阻 q_i——支路流量,L/min

通过查阅水流局部阻力系数表可知,流道内沿程局部阻力系数 ξ_1正比于主流道直径 d_z,各支路与主流道呈空间直角分流,局部阻力系数 ξ_2取 2,则图 11 中两过水断面 1-1 与过水断面 2-2 中局部水头损失为

$$\sum h_j = \xi_1\frac{v_i^2}{2g} + \xi_2\frac{v_{pi}^2}{2g} \tag{17}$$

结合式(15)~(17)图 11 中两过水断面 1-1 与过水断面 2-2 中总水头损失为

$$h_{w2} = 0.11\left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}\frac{L_z}{d_z}\frac{v_i}{2g} + 0.11\left(\frac{\Delta}{d_p} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}\frac{L_p}{d_p}\frac{v_{pi}^2}{2g} + A_p q_i^2 L_p + \zeta_1\frac{v_i^2}{2g} + \zeta_2\frac{v_{pi}^2}{2g} \tag{18}$$

由式(18)可知,包含支路喷口的两过水断面间水头总损失与主流道直径、喷口支路直径成反比,与流道内壁粗糙度、流段长度、喷口支路流段内平均流速成正比,同时喷口数量也会影响水头损失。为减小水头损失以提高喷口流量一致性,可通过减小主流道直径和喷口直径。设计主流道直径为 3~7 mm,喷口直径为 1~3 mm,单侧喷口数量为 5~9,喷射角度为 40°~80°。

电动隔膜泵具有结构紧凑体积小、工作效率高等优点,为保证背负式雪茄烟草打顶抑芽机结构紧凑,选用电动隔膜泵提供动力。运行时隔膜泵可确保喷施装置压力和流量保持稳定,同时通过将一部分流体回流到药箱,防止药剂在底部沉淀促进药液的均匀混合。隔膜泵流量需满足

$$Q > q_i n + VK \tag{19}$$

式中 Q——隔膜泵流量,L/min

n——喷嘴数量 V——药箱体积,L

K——药液搅拌系数,取 0.15

背负式雪茄烟草打顶抑芽机药箱体积为 6 L,计算可得隔膜泵流量 Q 大于 2.4 L/min,因此选用浙江盛世源林科技有限公司 YL-5001B 型隔膜泵。

3 仿真试验

施药过程中各喷口药液流速一致性将影响喷施药液均匀程度。基于 Fluent 开展了抑芽剂喷施装置主要结构参数对各喷口流速一致性的仿真试验。分别以主流道直径、喷口支路直径、喷口喷射角度、喷口数量为因素,喷口流速变异系数为指标开展单因素仿真试验。

设置仿真模型流道材料为光固化树脂,流体材质设置为液态水,解算器设置为稳态计算,流体为不可压缩流体,解算模型根据雷诺数选取;入口边界条件为入口速度,取恒定流量 25 mL/s,根据不同主流道直径换算入口流速,出口边界条件设置为出口压力;因素水平表如表 3 所示。各因素仿真试验效果如图 12 所示,仿真结果如表 4 所示。

表 3 单因素试验因素水平

Tab.3 Test factors and levels

水平	因素			
	主流道直径/mm	喷口支路直径/mm	喷口喷射角度/(°)	喷口数量
1	3	1.0	40	5
2	4	1.5	50	6
3	5	2.0	60	7
4	6	2.5	70	8
5	7	3.0	80	9

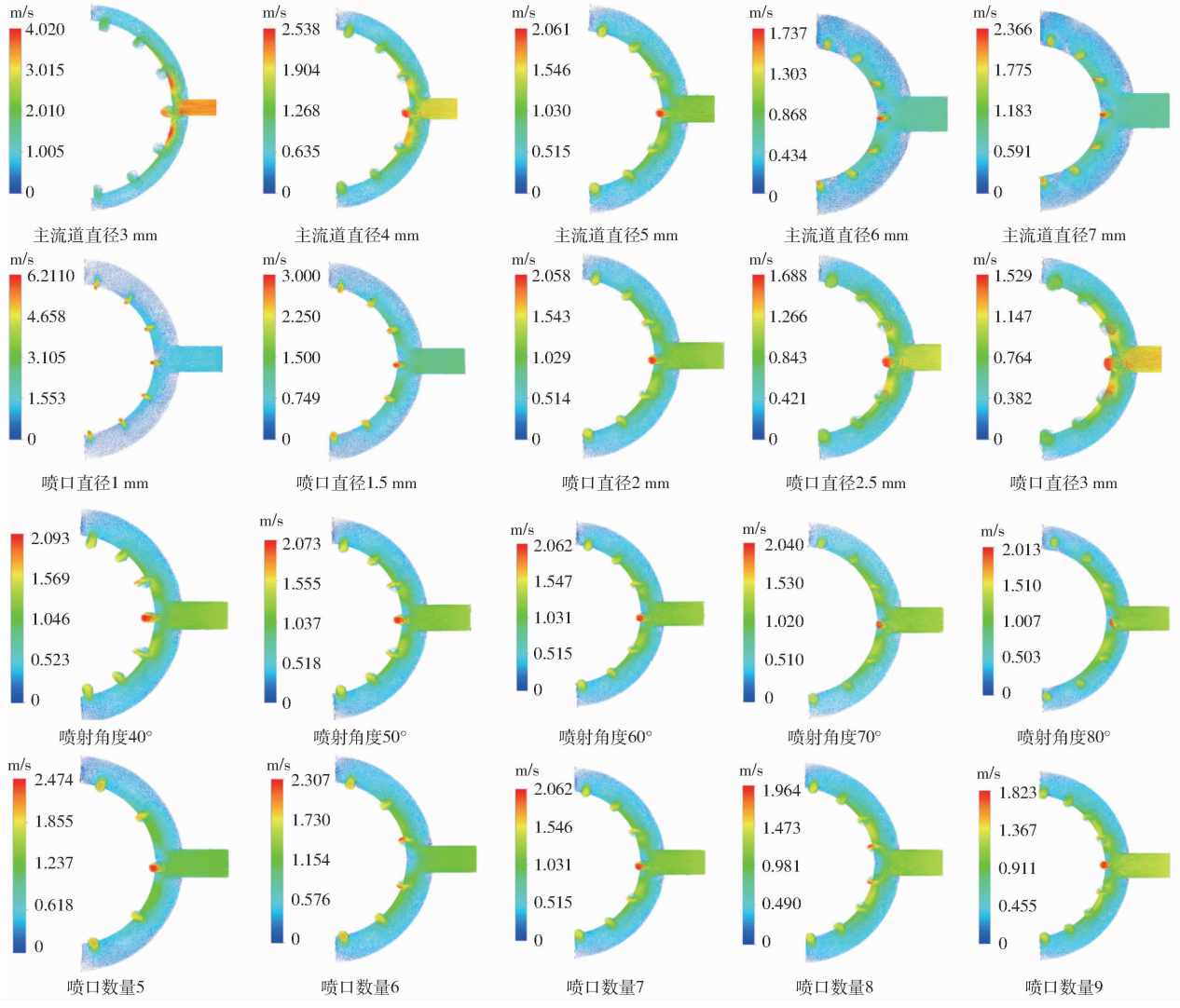

图 12　单因素仿真试验效果

Fig. 12　Single factor simulation test diagram

由图 12 可知，当主流道直径减小，管路入口与主流道交汇处局部流速增大，液流在管路内流动速度不均匀；主流道直径为 3 mm 时喷口有最大平均流速 1.27 m/s，位于管路附近的喷口较两侧喷口流速高；随着主流道直径增加，喷嘴各喷口流速变异系数降低，最小值为 0.05，喷口平均流速呈先下降再上升趋势，当主流道直径为 5、6 mm 时，最小值为 1.20 m/s。

当喷口直径逐渐增大，喷口间流速变异系数增大，喷口平均流速降低，喷口平均流速在支路直径由 1 mm 向 2 mm 变化的过程中急剧衰减，差值达 3.42 m/s；当喷口直径超过 1.5 mm 后，中心喷口与边缘喷口流速差异变大，但管路整体流速分布区间变小。

同时改变喷口喷射角度对主流道内流速影响不明显，对各喷嘴喷口平均流速影响不大，各组平均流速差值小于 0.02 m/s，各组位于管路进口处喷口平均流速显著高于两侧喷口，喷口间流速变异系数随喷射角度增大而减小。

随着喷口数量增加，喷口流速均值降低；平均流速变异系数随喷口数量增加呈先增后减再增趋势，当喷口数量为 7、9 时出现两峰值，分别为 0.17 和 0.25。

仿真结果表明，为使液流在茎秆表面形成均匀液膜从而提高抑芽剂对腋芽浸染，提高抑芽剂喷施装置喷施效果，通过对喷嘴内部结构对喷口流速一致性影响可知，改变喷嘴内部主流道直径、喷口数量及喷口直径，均会对出口平均流速及喷口流速稳定性产生影响。当主流道直径为 5 ~ 7 mm、喷口直径为 1 ~ 2 mm、喷射角度为 60° ~ 80°时各喷口间平均流速变异系数较小；当喷口数量为 5 ~ 7 时，各喷口间平均流速变异系数均小于 0.17。

4　田间试验

4.1　喷施装置结构优化试验

为保证雪茄烟叶生产质量，抑芽剂喷施作业要

表 4 单因素仿真试验结果

Tab. 4 Single factor simulation test results

因素	数值	喷口流速均值/(m·s⁻¹)	流速最大值/(m·s⁻¹)	流速最小值/(m·s⁻¹)	标准差/(m·s⁻¹)	喷口平均流速变异系数
主流道直径/mm	3	1.27	2.30	0.69	0.55	0.44
	4	1.21	1.77	0.82	0.33	0.27
	5	1.20	1.51	0.94	0.20	0.17
	6	1.20	1.37	1.03	0.12	0.10
	7	1.22	1.32	1.15	0.06	0.05
喷口直径/mm	1.0	4.62	4.80	4.52	0.09	0.02
	1.5	2.06	2.32	1.89	0.15	0.07
	2.0	1.20	1.51	0.94	0.20	0.17
	2.5	0.80	1.18	0.53	0.23	0.29
	3.0	0.59	0.99	0.33	0.23	0.40
喷射角度/(°)	40	1.21	1.67	0.91	0.26	0.22
	50	1.21	1.63	0.91	0.25	0.20
	60	1.20	1.51	0.94	0.21	0.17
	70	1.20	1.41	0.96	0.17	0.14
	80	1.19	1.30	0.99	0.13	0.11
喷口数量	5	1.62	1.86	1.47	0.16	0.10
	6	1.41	1.58	1.17	0.15	0.11
	7	1.20	1.51	0.93	0.21	0.17
	8	1.08	1.26	0.88	0.15	0.13
	9	0.95	1.40	0.67	0.24	0.25

求尽量减小抑芽剂飞溅,降低抑芽剂对叶片沾染,即尽量减小叶片染药面积比。采用荧光显影法,以单侧喷口个数、喷口直径、喷口喷射角度、主流道直径为试验因素,选取仿真试验中各因素下喷口间流速变异系数较低水平,以雪茄烟叶叶片染药率为指标开展正交试验,获得优化参数组合,因素水平如表 5 所示。

表 5 试验因素水平

Tab. 5 Test factors and levels

水平	因素			
	单侧喷口数量 A	喷口直径 B/mm	喷口喷射角度 C/(°)	主流道直径 D/mm
1	5	1.0	60	5
2	6	1.5	70	6
3	7	2.0	80	7

于湖北省丹江口市开展田间试验。试验采取荧光显影法检测抑芽剂在叶片上的分布情况及沾染面积;将荧光剂以适当比例加入到药箱中,将喷嘴放置于顶芽第 2 ~ 3 顶叶间茎秆处,保持动刀端、定刀端喷嘴闭合,使环形射流喷嘴完全环绕下部茎秆,采用流量计将荧光剂流量保持为 25 mL/s;收集叶片后使用相机在合适的曝光参数下逐叶拍摄获取叶片荧光图像,如图 13 所示。

将获取的荧光图片按试验组号分组,通过



(a) 逐叶拍摄荧光图像 (b) 荧光图像

图 13 荧光检测流程

Fig. 13 Fluorescence detection process

Image - J 二值化得到预处理图像,如图 14 所示,荧光图像中的白色区域及荧光药液都以纯白显示;将二值图像中雪茄烟叶片区域划分,在该区域中再次识别边界,识别所有染药区域并为各区域编号;将各区域所占像素点位逐一输出,烟叶叶片染药率计算式为

$$\eta = \frac{\sum S_w}{\sum S_w + \sum S_b} \times 100\% \tag{20}$$

式中 η——叶片染药率,%

S_w——单一白色区域面积

S_b——单一黑色区域面积

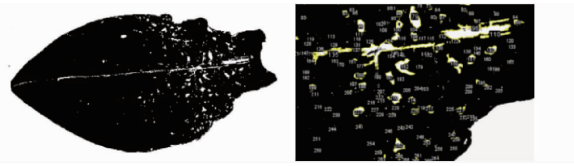

图 14 荧光显影照片后处理示意图

Fig. 14 Post-processing schematic of fluorescence development photos

正交试验结果如表 6 所示。由图 6 可知,4 个因素中对叶片染药率的影响由大到小为:喷口直径、喷口喷射角度、喷口数量、主流道直径。得到最优结构参数为喷口直径为 1.5 mm、主流道直径为 6 mm、喷口数量为 6、喷口排布角度为 60°,叶片染药率为 0.37%。

4.2 田间性能试验

为验证打顶抑芽装置作业性能,开展了田间性能试验,测试了腋芽药液浸染率、顶芽切断率与顶芽掉落率,田间性能试验如图 15 所示。参照文献[25]烟株打顶结束后单株施用 30% 浓度甲戊·烯效唑乳油20 mL,考虑抑芽剂施用生产效率,设置抑芽剂喷施流量为 25 mL/s。

抑芽剂在生产中的作用主要为阻止腋芽分生与抑制已分生腋芽的生长,结合雪茄烟叶仅在叶柄基部分生腋芽生物特性,试验前将试纸裁切为 10 mm × 15 mm,张贴于各叶片叶柄基部,已分生腋芽部位张贴于腋芽上方,每次喷施作业后清点腋芽上完全浸湿的试纸数量,再与该株所张贴全部试纸数量进行对比。试验方法如图 16 所示。

表 6　正交试验结果与极差分析

Tab. 6　Results of orthogonal test

序号	因素				叶片染药率/%
	单侧喷口数量	喷口直径	喷口喷射角度	主流道直径	
1	1	1	1	1	0.537
2	1	2	2	2	0.510
3	1	3	3	3	1.905
4	2	1	2	3	0.877
5	2	2	3	1	0.598
6	2	3	1	2	1.155
7	3	1	3	2	1.032
8	3	2	1	3	0.374
9	3	3	2	1	2.032
K_1	2.952	2.447	2.066	3.167	–
K_2	2.630	1.482	3.420	2.697	–
K_3	3.438	5.092	3.535	3.156	–
k_1	0.984	0.816	0.689	1.056	–
k_2	0.877	0.494	1.140	0.899	–
k_3	1.146	1.697	1.178	1.052	–
极差 R	0.269	1.203	0.489	0.157	–
最优方案	A_2	B_2	C_1	D_2	–



(a) 剪切打顶　(b) 夹持后抑芽剂喷施　(c) 顶芽回收　(d) 作业后效果

图 15　田间性能试验

Fig. 15　Field performance tests



图 16　腋芽药液浸染率试验方法

Fig. 16　Axillary bud liquid immersion rate test process

腋芽药液浸染率计算式为

$$\mu_m = \frac{n_p}{n_a} \times 100\% \tag{21}$$

式中　μ_m——腋芽药液浸染率，%

n_p——浸染试纸数量

n_a——样本全部试纸数量

顶芽切断率计算式为

$$\eta_c = \frac{n_b}{n_s} \times 100\% \tag{22}$$

式中　η_c——顶芽切断率，%

n_b——完全切断顶芽数量

n_s——总样本数

顶芽掉落率计算式为

$$\eta_h = \frac{n_d}{n_s} \times 100\% \tag{23}$$

式中　η_h——顶芽掉落率，%

n_d——回收前自夹持机构掉落顶芽数量

田间性能试验结果表明，背负式雪茄烟草打顶抑芽机一次性完成了打顶抑芽各工序，平均顶芽切断率为 92.40%，切断后顶芽掉落率为 3.20%，平均腋芽浸染率为 93.75%，单株平均作业时间为 2.25 ~ 4.48 s，该装置可完成打顶抑芽工序，作业过程中发现未损伤雪茄烟叶片，能够满足雪茄烟生产要求。

5　结论

(1)设计了一种背负式雪茄烟草打顶抑芽机，提出了依次夹持、剪切、施药的工作流程，可完成顶芽夹持、剪切、抑芽剂喷施联合作业。开展了同步夹持机构稳定夹持状态下力学分析得出稳定夹状态下夹持片弹力为 2.12 N，浮动夹持片高度为 15 mm；结合顶芽结构性状分析结果并依据滑切原理得出剪切刀片动刀片滑切角为 30°；确定抑芽剂喷施装置采用环形对心射流式的喷施作业方式并分析了射流喷嘴内部流量特性得出喷施装置关键结构参数范围。

(2)基于 Fluent 的喷施装置喷口流量特性单因素仿真试验结果表明，随着主流道直径增加，喷嘴各喷口流速变异系数降低，最小值为 0.05；当支路直径逐渐增大，喷口间流速变异系数增大；喷口间流速变异系数随喷射角度增大而减小；随着喷口数量增加，喷口流速均值降低，平均流速变异系数随喷口数量增加呈先增后减再增趋势。当主流道直径为 5 ~ 7 mm、喷口直径为 1 ~ 2 mm、喷射角度为 60° ~ 80°、喷口数量为 5 ~ 7 时各喷口间平均流速变异系数较小。

(3)喷施装置结构优化田间试验结果表明，当主流道直径为 6 mm、喷口数量为 6、喷口直径为 1.5 mm、喷射角度为 60°时，叶片染药率较小；田间

性能试验结果表明,背负式雪茄烟草打顶抑芽机单株平均作业时间为 2.25 ~ 4.48 s,平均顶芽切断率为 92.40%,切断后顶芽掉落率为 3.20%,抑芽剂喷施流量为 25 mL/s 时平均腋芽浸染率为 93.75%;该装置可完成打顶抑芽工序,作业过程中未发现损伤雪茄烟叶片,能够满足雪茄烟生产要求。

参 考 文 献

[1] 刘双喜,戚武振,王金星,等. 烟草打顶抑芽机无线控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(8):53 - 60.
LIU Shuangxi, QI Wuzhen, WANG Jinxing, et al. Design and test of wireless control system for tobacco topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 53 - 60. (in Chinese)

[2] 刘双喜,李伟,王金星,等. 双行智能烟草打顶抑芽机检测控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(6):47 - 52.
LIU Shuangxi, LI Wei, WANG Jinxing, et al. Design and test of testing control system for double rows intelligent tobacco topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 47 - 52. (in Chinese)

[3] 耿爱军,张晓辉,苗乃树,等. 3YDX - 3 型烟草打顶抑芽机设计[J]. 农业工程学报,2010,26(7):96 - 101.
GENG Aijun, ZHANG Xiaohui, MIAO Naishu, et al. Development of 3YDX - 3 topping and restrain-germinating machine of tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 96 - 101. (in Chinese)

[4] 林桂华,周冀衡,范启福,等. 打顶技术对烤烟产质量和生物碱组成的影响[J]. 中国烟草科学, 2002, 23(4): 8 - 12.
LIN Guihua, ZHOU Jiheng, FAN Qifu, et al. Effects of topping technology on leaf yield, quality, and alkaloid content of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2002, 23(4): 8 - 12. (in Chinese)

[5] 杨洁,胡日生,童建华,等. 打顶对烟草腋芽生长及植物激素含量的影响[J]. 烟草科技, 2013(10): 72 - 75.
YANG Jie, HU Risheng, TONG Jianhua, et al. Effects of topping on axillary bud growth of and plant hormone contents in tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2013(10): 72 - 75. (in Chinese)

[6] 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.
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. (in Chinese)

[7] 吴长兵,李再军,张富贵,等. 起垄机械研究现状及其在丘陵山区烟叶生产中的应用[J]. 现代农业科技,2022(13):100 - 107.
WU Changbing, LI Zaijun, ZHANG Fugui, et al. Research status of ridging machinery and its application in tobacco production in hilly and mountainous areas[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(13): 100 - 107. (in Chinese)

[8] 闫新甫,王欣,孔劲松,等. 全国近十年晾烟生产及市场变化分析[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(2): 98 - 104.
YAN Xinfu, WANG Xin, KONG Jinsong, et al. Changing trends of production and market of air-cured tobaccos of China in last 10 years[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, 42(2): 98 - 104. (in Chinese)

[9] 湖北省烟草科学研究院. 雪茄烟叶等级质量规范:DB42/T 1549—2023[S]. 湖北省市场监督管理局,2023.

[10] 耿爱军,张晓辉,曹胜柱,等. 烟草抑芽剂智能对靶施药系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(24):35 - 40.
GENG Aijun, ZHANG Xiaohui, CAO Shengzhu, et al. Development and experiment of intelligent toward-target system of spraying restrain-germinatin pesticide on tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(24):35 - 40. (in Chinese)

[11] 范国强,杨庆璐,张晓辉,等. 烟草夹持式智能打顶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 121 - 126.
FAN Guoqiang, YANG Qinglu, ZHANG Xiaohui, et al. Design and test of intelligent tobacco topping machine with clamping belt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 121 - 126. (in Chinese)

[12] 马利强,王金星. 烟草打顶消毒联合作业装置的设计[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 136 - 138.
MA Liqiang, WANG Jinxing. Design of device for tobacco topping and disinfecting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 136 - 138. (in Chinese)

[13] 马敏,张晓辉,宋涛,等. 智能烟草打顶抑芽机控制系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 129 - 135.
MA Min, ZHANG Xiaohui, SONG Tao, et al. Control system of intelligent zed tobacco topping and sucker controlling machine [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 129 - 135. (in Chinese)

[14] 任震宇,刘宏博,韩小斌,等. 电动烟草打顶抑芽机控制系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 196 - 200.
REN Zhenyu, LIU Hongbo, HAN Xiaobin, et al. Study on the control system of electric tobacco topping and sucker machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 196 - 200. (in Chinese)

[15] 刘雪美,李扬,李明,等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37 - 44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 37 - 44. (in Chinese)

[16] 张光海,孔光辉,焦方婵,等. 不同叶位雪茄烟叶质量特征变化趋势分析[J]. 中国烟草科学, 2023, 44(6): 91 - 99.
ZHANG Guanghai, KONG Guanghui, JIAO Fangchan, et al. Analysis on the quality characteristics change trendency in different leaf positions of cigar tobacco leaves[J]. Chinese Tobacco Science, 2023, 44(6): 91 - 99. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 刘鹏,何进,娄尚易,等. 异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 41 – 50.
LIU Peng, HE Jin, LOU Shangyi, et al. Design and experiment for dynamic supporting type maize straw chopping retention device with different rotation speeds of disc blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 41 – 50. (in Chinese)

[19] 宋昊,张学敏,谢鹏飞,等. 西兰花选择性采收作业平台识别切割装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 68 – 79.
SONG Hao, ZHANG Xuemin, XIE Pengfei, et al. Design and experiment of the identification cutting devices for a selective harvesting platform of broccoli[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 68 – 79. (in Chinese)

[20] 张仕林,黄玉祥,赵宏波,等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5): 40 – 52.
ZHANG Shilin,HUANG Yuxiang,ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5): 40 – 52. (in Chinese)

[21] 黄志鹏. 化学抑芽剂在红塔区烤烟生产上的推广应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
HUANG Zhipeng. Application and dissemination study of chemical restraining bud regent on tobacco production in Hongta District[D]. Changsha: Hunan Agricultural University,2012. (in Chinese)

[22] DENISOV V A, SLAVKINA V E, SVIRIDOV A S, et al. Study of 3D printed agricultural slotted spray nozzles[J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2022, 51(3): 271 – 276.

[23] 刘保君,刘云峰,孙婉婷. 玻璃钢管道沿程水头损失实验研究[J]. 化学工程, 2017, 45(12): 58 – 60, 65.
LIU Baojun, LIU Yunfeng, SUN Wanting. Experimental study on frictional head loss of FRP pipe[J]. Chemical Engineering, 2017, 45(12): 58 – 60, 65. (in Chinese)

[24] 陈凌顶. 内衬不锈钢管当量绝对粗糙度的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
CHEN Lingding. Experimental study on equivalent absolute roughness of composite steel pipe stainless steel lined[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

[25] 湖北省烟草科学研究院. 雪茄烟叶生产技术规程:DB42/T 2038—2023[S]. 湖北省市场监督管理局,2023.