

瓶栽鹿茸菇自动采收装置设计与试验

吴彦强^{1,2} 侯献伟³ 喻俊源¹ 石浩彤¹ 刘霞⁴ 侯加林^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 农业装备智能化山东省工程研究中心, 泰安 271018;

3. 山东省农业机械技术推广站, 济南 250014; 4. 山东农发智慧生物科技集团有限公司, 东营 257200)

摘要: 针对瓶栽鹿茸菇工厂化采收装备缺失的问题, 提出了一种“输-定-切-夹”采收工艺, 并设计了相应的自动采收装置, 阐述了装置总体结构及工作原理, 确定了整机作业流程。通过对栽培筐输送过程运动学与力学分析, 确定了导流条安装角及输送辊筒参数; 基于 ANSYS LS-DYNA 对切割过程进行了仿真分析, 以切割速度、进给速度、带锯条前角及齿距为试验因素, 以切割反作用力为响应指标, 通过响应面法进行了切割性能建模和优化。结合物理试验确定了最优参数组合: 切割速度为 6.49 m/min、进给速度为 0.12 m/min、前角为 25°、齿距为 7 mm; 采用 ABAQUS 软件对柔性手指弯曲过程进行了仿真, 结合物理试验确定了柔性手指最优结构参数为: 气腔厚度 2 mm、气腔 7 个、气压 25 kPa、限制层厚度 3 mm。整机试验表明, 装置运行平稳, 采收作业效果良好, 平均采净率、平均损失率和平均损伤率分别为 98.18%、3.66% 和 2.75%, 满足瓶栽鹿茸菇实际采收要求。

关键词: 瓶栽鹿茸菇; 自动采收装置; 回转式切割; 柔性夹持

中图分类号: S225.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0105-12

OSID:

Design and Experiment of *Lyophyllum decastes* Automatic Harvesting Device for Bottle PlantingWU Yanqiang^{1,2} HOU Xianwei³ YU Junyuan¹ SHI Haotong¹ LIU Xia⁴ HOU Jialin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Intelligent Agricultural Equipment, Taian 271018, China

3. Shandong Agricultural Machinery Technology Extension Station, Ji'nan 250014, China

4. Shandong Nongfa Smart Biotechnology Group Co., Ltd., Dongying 257200, China)

Abstract: Aiming to address the deficiency in mechanized harvesting equipment for cultivated bottle planting *Lyophyllum decastes*, an automated harvesting device was designed to achieve the transportation and positioning of the cultivation basket for bottle planting *Lyophyllum decastes*, the fixation of the cultivation bottle, low-loss and high-quality root cutting of *Lyophyllum decastes*, and flexible clamping and transportation. The overall structure and working principle of the device were explained. Through mechanical and kinematic analysis of the cultivation basket conveying process, the installation angle of the guide bar was determined to be 71°. Based on ANSYS LS-DYNA, a simulation analysis was conducted on the root cutting process. Considering cutting speed, feeding speed, saw blade rake angle, and tooth pitch as influencing factors, and the cutting force was used as the response index. The response surface method was used to analyze the significant impact of each factor on the index. The regression model was optimized and validated through bench tests. When the cutting speed was 6.49 m/min, the feeding speed was 0.12 m/min, the front angle was 25°, and the tooth pitch was 7 mm, the cutting force was the smallest. A flexible finger for harvesting *Lyophyllum decastes* was designed. Based on the Yeoh model theory, the rubber material parameters were fitted by using uniaxial tensile testing. Single factor experiments were conducted by using ABAQUS software, and combined with actual experiments, the optimal bending performance was obtained. The structural parameters of the flexible finger were air cavity

收稿日期: 2023-11-17 修回日期: 2024-01-10

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC010610)、山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ244)和山东省自然科学基金项目(ZR2022QE103)

作者简介: 吴彦强(1992—),男,讲师,博士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail: wuyq@sda.u.edu.cn

通信作者: 侯加林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jlhou@sda.u.edu.cn

thickness of 2 mm, 7 air cavities, air pressure at 25 kPa, and a restricting layer thickness of 3 mm. The overall machine trials demonstrated that the device operates smoothly, exhibiting excellent harvesting performance. The average net harvest rate, average loss rate, and average damage rate were recorded as 98.18%, 3.66%, and 2.75%, respectively. These results met the actual harvesting requirements for bottle planting *Lyophyllum decastes*, ensuring efficient and effective harvesting.

Key words: bottle planting of *Lyophyllum decastes*; automatic harvesting device; rotary cutting; flexible clamping

0 引言

我国是食用菌生产、消费、出口大国,2021 年我国食用菌总产量达 4.1×10^7 t, 占世界总产量的 70% 以上^[1]。食用菌生产规模日益扩大,已经成为国内种植业的重要组成部分之一。鹿茸菇(又名荷叶离褶伞)是高附加值珍稀食用菌品种,具有食药兼备的特点^[2-4]。瓶栽是工厂化鹿茸菇生产主要栽培方式之一,而采收是鹿茸菇生产的关键环节。但是,目前工厂化生产中仍然以人工采收为主,存在劳动强度大、成本高、效率低、损伤率高等问题,已经成为制约鹿茸菇产业发展的瓶颈^[5]。因此,迫切需要研发适用于工厂化瓶栽鹿茸菇生产的机械化采收装置,实现鹿茸菇自动化、低损采收^[6-8]。

近年来,国内外学者针对食用菌采收方法和装置相继开展了研究,采收对象主要为金针菇、褐菇、双孢蘑菇和平菇等。CATHA^[9]研发了一套装有刚性刀片的蘑菇收割机,但切割过程易对蘑菇造成损伤;REED 等^[10]使用气力式吸盘实现蘑菇的采摘,能够实现单个蘑菇的采收作业,但采收效率低,不适合工厂化采收作业。YANG 等^[11]针对双孢菇采摘设计了一种基于真空负压采摘的蘑菇采摘末端执行器,采收成功率为 88.2%,损伤率为 2.9%。HUANG 等^[12]设计了一种由 3 个力传感器和 1 个惯性测量单元组成的抓取力和抓取运动传感器系统,并开发了采摘末端执行器,试验表明弯曲采摘方法采摘率可以达到 100%。国内对食用菌采收方法和装置的研究起步较晚,市场上暂未发现成熟的采收装备。卢伟等^[13]设计一种褐菇无损采摘柔性手爪,能够实现单个褐菇的抓取,但通用性低。夏妮^[14]进行双孢蘑菇的基本力学参数测定试验,获得双孢蘑菇的物理参数,为不同种类食用菌的力学参数测量提供了参考方法。高文硕^[15]通过测量金针菇的物理参数后对其进行三维建模,为食用菌的仿真分析奠定了基础。姬江涛等^[16]基于颗粒阻塞原理设计了一种双孢菇柔性仿形采摘末端执行器。戴飞等^[17]针对双孢蘑菇工厂化生产过程中二次发酵、托盘在菇床收布及采收研发了配套装置。综上,国内外学者在该领域的研究尚处在起步阶段,在理论建

模、关键装置设计和优化、装备研发方面的研究还有待深入。

针对上述问题,结合瓶栽鹿茸菇物理和力学特性及实际采收需求,本文提出“输-定-切-夹”的采收工艺,并设计一种瓶栽鹿茸菇自动采收装置,实现栽培筐自动化输送转运、栽培筐和培养瓶的精准定位、低损高效切割、柔性夹持输送等作业过程。结合理论分析、结构仿真和物理试验手段,对相关结构和作业参数进行设计和优化。搭建试验样机,以采净率、损失率和损伤率为评价指标,对整机进行采收性能试验验证。

1 相关参数测定

工厂化生产采用了标准化栽培筐和培养瓶,为自动化采收装置的研发提供了条件。本文面向的栽培筐为方筐,培养瓶为广口瓶、形状为圆柱形,如图 1 所示。相关参数为:栽培筐长度 L_k 为 440 mm、高度 H_k 为 90 mm、空筐质量 500 g;培养瓶瓶身直径 D_{ps} 为 100 mm、瓶高 H_p 为 175 mm、瓶身壁厚 S_p 为 2.5 mm、瓶口外径 D_{pk} 为 70 mm、瓶口高度 H_{pk} 为 32.5 mm。鹿茸菇采收过程中菇体受到持续变化的切割力,在采收时切割力过小会导致切不断菇体或断口不平整,切割力过大会增加机器功耗和刀具磨损。为了分析切割作业力学机理以及为仿真、优化提供数据支撑,对鹿茸菇相关参数进行测定。

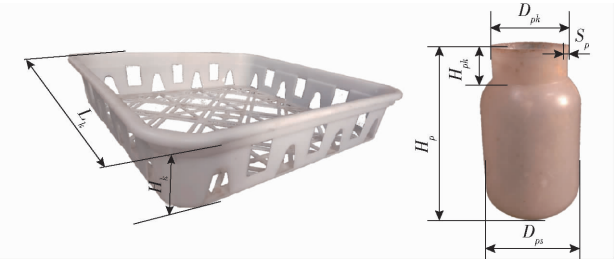


图1 栽培筐和培养瓶

Fig. 1 Cultivation baskets and bottles

测定对象为山东省东营市河口区山东农发智慧生物科技集团有限公司培育的“龟山 1 号”瓶栽鹿茸菇(图 2),随机选取 10 筐及 30 瓶成熟采收期鹿茸菇进行外尺寸、单瓶质量、密度等参数测定,并通过岛津 EZ-SX 型质构仪对鹿茸菇菇体泊松比、弹

性模量、剪切模量等相关力学参数进行测定,测定过程中针对不同测定目标为质构仪编制了合适的测定方案,同时使用保鲜膜、医用胶带等避免菇体损伤。测定结果见表 1。

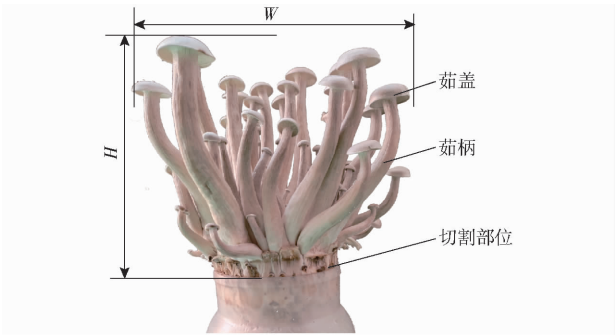


图 2 龟山 1 号鹿茸菇外形参数示意图

Fig. 2 Kameyama 1 *Lyophyllum decastes*

表 1 相关参数测定结果

Tab. 1 Measurement results of relevant parameters	
参数	数值
宽度最大值/mm	200. 0
宽度平均值/mm	170. 5
高度最大值/mm	120. 0
高度平均值/mm	110. 3
单瓶未采收鹿茸菇平均质量/g	954. 0
单瓶未采收鹿茸菇最大质量/g	992. 2
单瓶已采收鹿茸菇平均质量/g	665. 0
单瓶已采收鹿茸菇最大质量/g	740. 0
菇体密度/(g·cm ⁻³)	0. 921
菇体泊松比	0. 380
菇体弹性模量/MPa	2. 986
菇体抗拉强度/MPa	0. 925
菇体抗剪切强度/MPa	0. 330
菇体径向最大剪切力平均值/N	11. 698

2 整机结构与工作原理

针对所调研企业的瓶栽鹿茸菇工厂化栽培模式,本文采用“输-定-切-夹”的采收工艺,相对应的自动采收装置整机结构如图 3 所示。该机主要由输送定位机构、带锯切割机构、六自由度机械臂、柔性夹取机构、采后输送机构组成,主要参数如表 2 所示。其中,六自由度机械臂位于整机后侧,由机械臂控制器控制其运动实现定点抓取。柔性夹取机构安装在六自由度机械臂末端,其末端柔性手指由气力驱动,主要实现切割后鹿茸菇的夹取及转运。带锯切割机构安装在整机中部,切割形式为带锯条回转式,能够完成鹿茸菇快速低损高效切割。输送定位机构安装在带锯切割机构下方,实现鹿茸菇栽培筐自动喂入、栽培筐和培养瓶的输送定位功能。采后输送机构安装在六自由度机械臂与输送定位机构的

中间,主要用于输送采收后的鹿茸菇至分拣和包装模块。整机工作流程如图 4 所示。

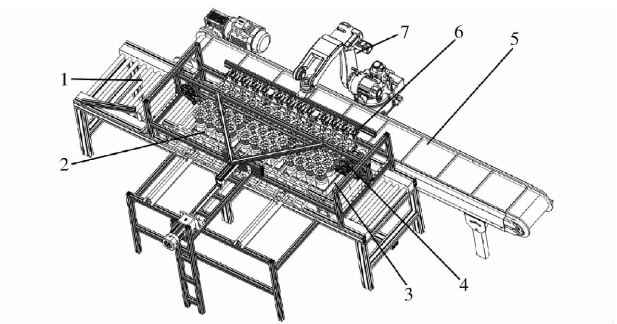


图 3 整机结构简图

Fig. 3 Structure diagram of device

1. 输送定位机构 2. 培养瓶 3. 栽培筐 4. 带锯切割机构 5. 采后输送机构 6. 柔性夹取机构 7. 六自由度机械臂

表 2 瓶栽鹿茸菇自动采收机技术参数

Tab. 2 Parameters of harvesting device	
参数	数值
整机配套功率/kW	12. 5
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 000×2 050×1 250
割幅/mm	0~1 700
夹持直径/mm	80~110
主气路输入气压/MPa	0. 6~0. 8
单筐培养瓶数量/个	16
单次采收栽培筐数量/个	3
切割高度/mm	≥1
损失率/%	≤5
损伤率/%	≤5
采净率/%	≥95
纯工作生产率/(kg·h ⁻¹)	≥150

整机通过可编程控制器(PLC)实现各环节的协同作业,整机控制原理图如图 5 所示。

3 关键部件设计

3. 1 输送定位机构

输送定位机构主要由辊式输送机、导流条、规整挡板、横距挡板和瓶肩挡棒等组成。栽培筐在辊式输送机导流条引导下调整运动方向,从而输送至指定位置;3 块横距挡板安装于辊式输送机辊筒下方,挡板由气缸控制升起后将 3 个栽培筐在整机长度方向上进行固定并保证各筐间距一致;规整挡板安装在辊式输送机左侧机架上,其作用是将 3 个栽培筐在整机宽度方向上进行固定,避免发生左右晃动;3 组瓶肩挡棒安装在辊式输送机左侧板上,挡棒由无杆气缸驱动穿过培养瓶瓶肩,使培养瓶在筐内固定从而不发生晃动和倾覆。PLC 在采集栽培筐经过光电开关和 3 个行程开关的信号后自动控制相关部件动作。当已有 3 筐鹿茸菇正采收时,双轴气缸将下一批次栽培筐在喂入口进行固定等待采收。输送

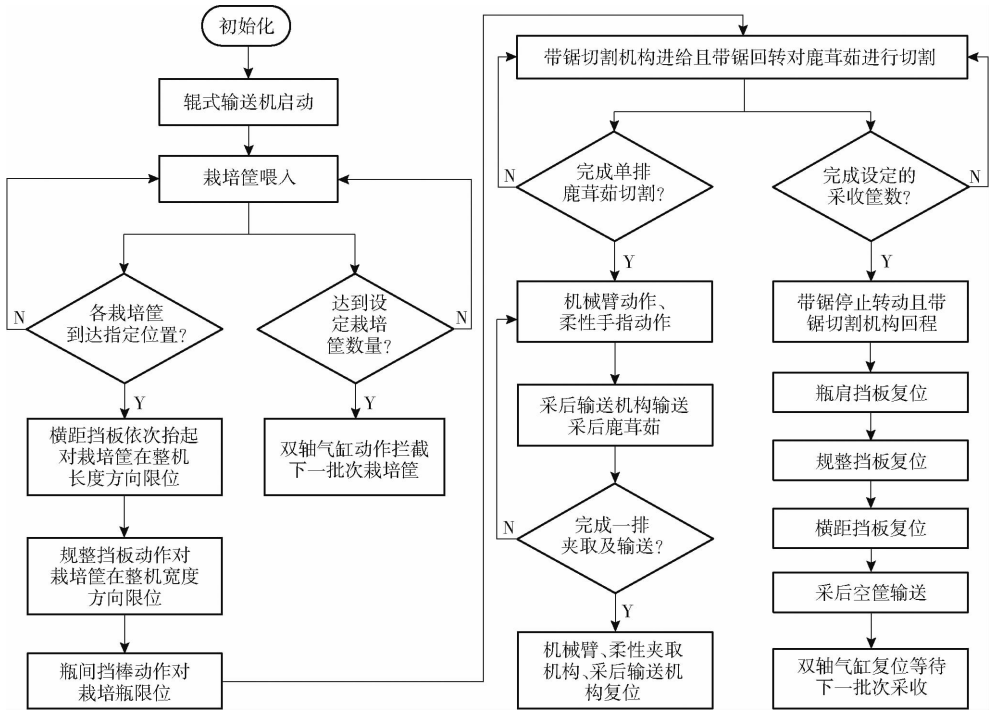


图 4 整机工作流程图

Fig. 4 Flowchart of device

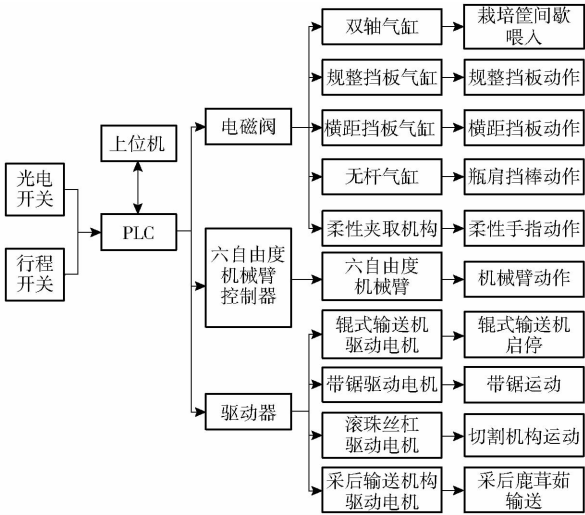


图 5 整机控制原理图

Fig. 5 Diagram of control system

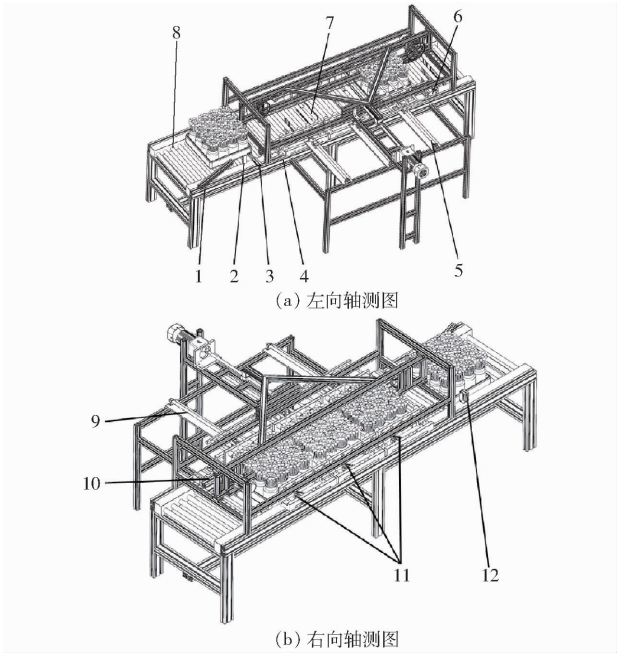


图 6 输送定位机构结构简图

Fig. 6 Structural diagrams of conveying and positioning mechanism

1. 导流条 2. 光电开关接收器 3. 双轴气缸 4. 规整挡板气缸 1
5. 瓶肩挡棒 6. 规整挡板气缸 2 7. 横距挡板 8. 辊式输送机
9. 无杆气缸 10. 规整挡板 11. 行程开关 12. 光电开关

滚动,两者在点 P 相对静止,则栽培筐以点 P 为瞬心进行顺时针滚动应满足

$$M_{j1} > M_{j2} \tag{1}$$

其中

$$M_{j2} = \delta F_{N1} \tag{2}$$

$$F_{N1} = \mu_1 mg \cos \alpha \tag{3}$$

定位机构如图 6 所示。

3.1.1 导流条安装角

导流条的作用是将输送至辊式输送机入口处向后运动的栽培筐导入到输送辊上,并调整栽培筐位姿,矫正其运动方向,使之按正确姿态快速到达工作区域。在工作区域,栽培筐在辊式输送机右侧板和导流条共同限位下调整到一侧边与右侧板平行。导流条安装角是关键设计参数,通过分析栽培筐位姿发生变化的临界条件进行确定。

(1)栽培筐沿导流条开始滚动的条件

不考虑栽培筐圆角,如图 7 所示,喂入到辊式输送机入口处的栽培筐在点 P 与导流条接触并开始

式中 M_{f1} ——栽培筐底部所受输送辊摩擦力相对滚动瞬心 P 的力矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$
 M_{f2} ——栽培筐沿着导流条滚动的滚动摩阻力偶, $\text{N} \cdot \text{mm}$
 δ ——栽培筐与导流条间滚动摩阻系数, mm
 F_{N1} ——导流条对栽培筐的正压力, N
 μ_1 ——栽培筐与输送辊间的动摩擦因数
 m ——栽培筐及培养瓶总质量, kg
 α ——导流条安装角, $(^\circ)$

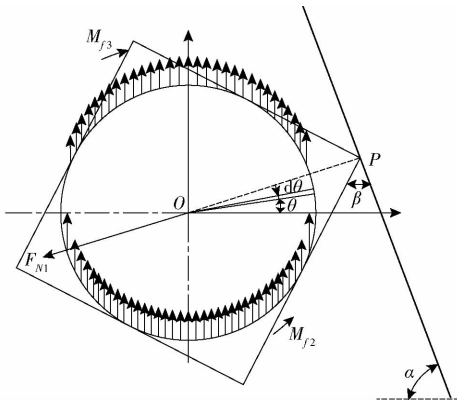


图7 栽培筐与导流条接触示意图

Fig.7 Schematic of contact between cultivation basket and guide bar

由于栽培筐底部为方环形,栽培筐受输送辊的摩擦力相对滚动瞬心 P 的力矩 M_{f1} 不易求得。这里,假设栽培筐底部正方形最大内接圆环受输送辊的摩擦力相对滚动瞬心 P 的力矩为 M_{f3} ,则有

$$M_{f1} > M_{f3} \quad (4)$$

圆环所受到输送辊的摩擦力可以近似看作均匀作用于栽培筐底部外边缘线,则该摩擦力线密度 q_f 为

$$q_f = \frac{\mu_1 mg}{2\pi R} \quad (5)$$

式中 R ——栽培筐最大内接圆半径, mm
 则有

$$M_{f3} = 2 \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\sqrt{2}R \cos \left(\frac{3\pi}{4} - \alpha - \beta \right) - R \cos \theta \right) q_f R d\theta + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left(\sqrt{2}R \cos \left(\frac{3\pi}{4} - \alpha - \beta \right) - R \cos \theta \right) q_f R d\theta \right] = 2\sqrt{2}\pi q_f R^2 \cos \left(\frac{3\pi}{4} - \alpha - \beta \right) \quad (6)$$

式中 β ——栽培筐右下侧边与导流条夹角, $(^\circ)$
 θ ——栽培筐底部最大内接圆中心与摩擦力作用点的连线同水平方向夹角, $(^\circ)$

由式(1)~(6)可得

$$\alpha > \arctan \frac{\delta - R \cos \left(\frac{3\pi}{4} - \beta \right)}{R \sin \left(\frac{3\pi}{4} - \beta \right)} \quad (7)$$

(2) 栽培筐沿导流条保持匀速运动的条件

如图8所示,栽培筐沿导流条滚动后,其中一条侧板会与导流条接触重合,为使栽培筐能够保持此状态并快速进入下一阶段,即栽培筐需要沿导流条保持匀速运动,此时栽培筐相对于输送辊的速度为

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 \quad (8)$$

式中 v_1 ——输送辊线速度, mm/s

v_2 ——栽培筐绝对速度, mm/s

设 v_3 与 v_1 两个速度方向之间的夹角为 ζ ,栽培筐受到导流条的摩擦力 F_{f1} 、支持力 F_{N2} ,同时受到输送辊的摩擦力 F_{f2} ,则 F_{f2} 方向与 v_3 方向相反。

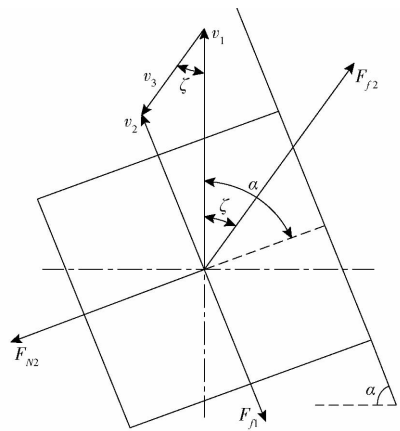


图8 栽培筐侧边与导流条平行状态

Fig.8 Cultivation baskets with sides parallel to guide bars

栽培筐保持匀速运动,则有

$$\begin{cases} F_{N2} = F_{f1} \cos(\alpha - \zeta) \\ F_{f2} = F_{f1} \sin(\alpha - \zeta) \\ F_{f2} = \mu_2 F_{N2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 μ_2 ——栽培筐与导流条间的摩擦因数

由式(9)可得

$$\tan(\alpha - \zeta) = \mu_2 \quad (10)$$

将式(8)分别沿导流条方向和与导流条垂直方向进行分解,得到

$$\begin{cases} v_3 \sin(\alpha - \zeta) = v_1 \sin \alpha - v_2 \\ v_3 \cos(\alpha - \zeta) = v_1 \cos \alpha \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得

$$\frac{v_1 \sin \alpha - v_2}{v_1 \cos \alpha} = \tan(\alpha - \zeta) \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得

$$v_2 = v_1 (\sin \alpha - \mu_2 \cos \alpha) \quad (13)$$

输送辊运动速度 v_1 可视为常数,为了使栽培筐快速进入到工作区,则 v_2 需要尽量大,对 v_2 求导并令其为0,可得

$$\alpha = \operatorname{arccot}(-\mu_2) \quad (14)$$

已知栽培筐边长为470 mm,则 $R = 235 \text{ mm}$, β 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,栽培筐与导流条之间的滚动摩

阻系数 δ 取 3 mm,代入到式(7)中得到导流条倾角 α 应大于 45.53° 。经测定,栽培筐与导流条间摩擦因数 μ_2 为 0.35,代入到式(14)计算得到 α 为 70.7° ,因此,确定 α 为 71° 。

3.1.2 辊筒参数确定

辊式输送机采用双链传动、动力辊筒驱动方式,其有效宽度 l 、间距 c 计算式分别为^[18-19]

$$l = \sqrt{2}L_{kd} + \Delta l \tag{15}$$

$$c = \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3} \right) L_{kd} \tag{16}$$

$$c = \frac{Np}{2} \tag{17}$$

式中 Δl ——余量,取 50 ~ 150 mm
 L_{kd} ——栽培筐底边长度,mm
 N ——正整数
 p ——链条节距,mm

L_{kd} 为 420 mm, Δl 取 120 mm,经圆整确定 l 为 720 mm;链条选择 08B14T,链条节距为 12.7 mm,确定 c 为 127 mm。单个辊筒上面的许用载荷 $[q]$ 应满足

$$[q] \leq q \tag{18}$$

其中
$$q = \frac{G}{n'} \tag{19}$$

$$n' = 0.7n \tag{20}$$

式中 q ——作用在每个辊筒上面的载荷,kg
 G ——采收前栽培筐与鹿茸菇总质量,kg
 n' ——有效承载辊筒数,个
 n ——栽培筐下方辊筒数,个

G 取 16 kg, n 取 4,则 $[q]$ 小于 5.71 kg,辊筒直径根据 l 和 $[q]$ 由辊筒选型手册查询确定,经查询确定辊筒直径为 50 mm。

3.2 带锯切割机构

切割机构是整机的关键和核心部件,切割质量直接影响后续抓取和分级工作,带锯切割机构结构如图 9 所示,工作时,3 筐鹿茸菇经输送定位机构输送至指定位置并固定,带锯驱动电机驱动主动带锯轮旋转,从而带动带锯做回转运动完成鹿茸菇菇体切割。

菇体切割过程中,由于带锯作回转运动且在滚珠丝杠驱动电机驱动下沿导轨滑动,锯条在有效切割范围内可看作平直进给和直线切割。本文选用食品级等齿距尖齿单金属带锯条,为了高效、高质、省力地完成鹿茸菇切割,需要确定合理的切割速度、进给速度及带锯条主要参数。

本文采取显式动力学软件 ANSYS LS-DYNA 进行鹿茸菇切割数值模拟和台架试验验证的方式来

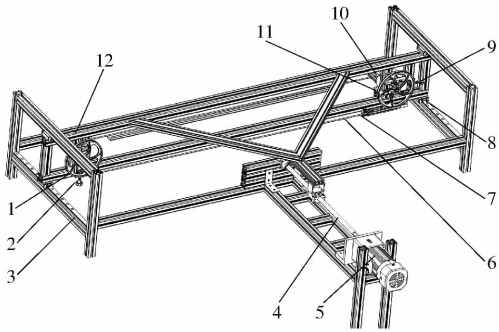


图 9 带锯切割机构结构图

Fig. 9 Structural diagram of band saw cutting device

1. 从动带锯轮 2. 锯轮平行度微调旋钮 3. 直线导轨 4. 滚珠丝杠 5. 滚珠丝杠驱动电机 6. 带锯条 7. 带锯条导向部件 8. 滑块 9. 带锯张紧部件 10. 带锯驱动电机 11. 主动带锯轮 12. 龙门架

确定切割机构关键参数。选择齿距和前角作为带锯条主要设计参数,以切割速度、进给速度、前角和齿距为试验因素,以带锯条切割反作用力为试验指标来表征切割难易程度。利用 Box- Behnken 方法设计多因素试验确定最佳参数,在经过充分预试验后,确定试验因素编码如表 3 所示。其中,切割速度和进给速度,取值范围主要考虑电机转速、传动系统可靠性以及整个切割结构的振动特性。前角和齿距取值范围参考了带锯条制造相关标准。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors codes

编码	因素			
	切割速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	前角/ ($^\circ$)	齿距/ mm
-1	6.048	0.124 8	25.0	7
0	6.804	0.218 4	27.5	8
1	7.560	0.312 0	30.0	9

3.2.1 切割过程数值模拟

因瓶口的挤压和鹿茸菇自身特性,菇体在瓶口附近存在一部分致密部分,因此菇体底部靠近瓶口位置是切割作业区域,其形状呈圆柱体(如图 2 所示)。通过 Solidworks 建立菇体底部和带锯条的三维模型,并进行切割过程数值建模和仿真。其中带锯条厚度为 0.65 mm、宽度为 19 mm,将带锯条材料定义为高碳钢,弹性模量为 2.05×10^{11} Pa、密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3。将菇体定义为柔性体,使用测定的力学特性参数定义菇体材料。单元类型选择 SOLID164,接触类型定义为 Surface to Surface Eroding,动摩擦因数设定为 0.286,静摩擦因数设定为 0.327,设置单元失效的失效法则为失效剪应变。切割过程中,带锯条与菇体发生接触前,切割反作用力为零,当两者接触后,带锯条锯齿对菇体

施加压力,当剪切应变超过菇体的极限值后,菇体受到破坏,单元开始失效。切割反作用力最大峰值出现在切割过程的中间时刻,此时带锯条切割在菇体切割截面直径处,菇体受力最大的方向为带锯条前进方向的反方向,将其值的绝对值近似为切割反作用力。应力云图及实际采收效果如图 10 所示。

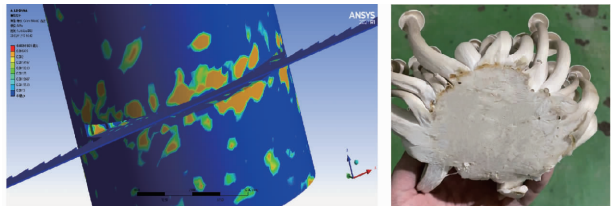


图 10 切割应力及实际采后效果图

Fig. 10 Cutting stress and post-harvest *Lyophyllum decastes* diagram

试验方案及结果如表 4 所示(*A*、*B*、*C*、*D* 为因素编码值), 每组试验重复 3 次取平均值。使用 Design-Expert 8. 0. 6. 1 数据分析软件进行多元回归拟合分析和因素方差分析,同时得到切割反作用力 *Y* 的回归模型

表 4 试验方案与结果
Tab. 4 Test plan and results

序号	因素				切割反作用力 <i>Y</i> /N
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
1	-1	-1	0	0	6. 803 7
2	1	-1	0	0	6. 874 5
3	-1	1	0	0	6. 822 2
4	1	1	0	0	7. 900 1
5	0	0	-1	-1	6. 000 3
6	0	0	1	-1	6. 435 2
7	0	0	-1	1	6. 234 9
8	0	0	1	1	6. 763 2
9	-1	0	0	-1	6. 123 4
10	1	0	0	-1	7. 554 3
11	-1	0	0	1	6. 324 5
12	1	0	0	1	7. 445 3
13	0	-1	-1	0	6. 006 5
14	0	1	-1	0	7. 014 5
15	0	-1	1	0	6. 089 9
16	0	1	1	0	6. 956 7
17	-1	0	-1	0	6. 232 2
18	1	0	-1	0	7. 333 2
19	-1	0	1	0	6. 884 3
20	1	0	1	0	7. 442 3
21	0	-1	0	-1	5. 900 6
22	0	1	0	-1	6. 886 4
23	0	-1	0	1	5. 842 3
24	0	1	0	1	7. 002 3
25	0	0	0	0	6. 624 3
26	0	0	0	0	6. 663 2
27	0	0	0	0	6. 302 3
28	0	0	0	0	6. 756 4
29	0	0	0	0	6. 620 1

$$Y = 6. 59 + 0. 45A + 0. 42B + 0. 15C + 0. 059D + 0. 25AB - 0. 14AC - 0. 078AD - 0. 035BC + 0. 044BD + 0. 023CD + 0. 47A^2 + 0. 013B^2 - 0. 076C^2 - 0. 185 6D^2 \quad (21)$$

表 5 为回归模型方差分析。通过对模型方差分析可知,模型 $P < 0. 000 1$, 表明回归模型极显著;失拟项 $P > 0. 05$, 不显著,说明回归模型拟合程度较高。其中切割速度的二次项 $P < 0. 01$, 影响极显著;带锯条前角、切割速度与进给速度的交互项 $P < 0. 05$, 影响显著。切割速度与进给速度交互作用的响应曲面如图 11 所示,当固定切割速度,切割反作用力随着进给速度的增加而增大,但增大的速度逐步减缓;当固定进给速度,切割反作用力随着切割速度的增加先降低后增加。以最小切割反作用力为优化目标,对模型进行求解,得到最优参数组合:切割速度为 6. 49 m/min、进给速度为 0. 12 m/min、前角为 25°、齿距为 7 mm,此时最小切割反作用力为 5. 661 39 N。

表 5 回归模型方差分析

Tab. 5 Regression model equation analysis

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	7. 220	14	0. 520	10. 250	<0. 000 1 **
<i>A</i>	2. 390	1	2. 390	47. 560	<0. 000 1 **
<i>B</i>	2. 140	1	2. 140	42. 470	<0. 000 1 **
<i>C</i>	0. 260	1	0. 260	5. 070	0. 040 9 *
<i>D</i>	0. 042	1	0. 042	0. 840	0. 374 9
<i>AB</i>	0. 250	1	0. 250	5. 040	0. 041 5 *
<i>AC</i>	0. 074	1	0. 074	1. 460	0. 246 2
<i>AD</i>	0. 024	1	0. 024	0. 480	0. 500 8
<i>BC</i>	$4. 984 \times 10^{-3}$	1	$4. 984 \times 10^{-3}$	0. 099	0. 757 6
<i>BD</i>	$7. 586 \times 10^{-3}$	1	$7. 586 \times 10^{-3}$	0. 150	0. 703 7
<i>CD</i>	$2. 181 \times 10^{-3}$	1	$2. 181 \times 10^{-3}$	0. 043	0. 838 1
<i>A</i> ²	1. 420	1	1. 420	28. 21	0. 000 1 **
<i>B</i> ²	$1. 063 \times 10^{-3}$	1	1. 063	0. 021	0. 886 5
<i>C</i> ²	0. 037	1	0. 037	0. 730	0. 405 7
<i>D</i> ²	0. 220	1	0. 220	4. 440	0. 053 7
残差	0. 700	14	0. 050		
失拟项	0. 590	10	0. 059	1. 990	0. 264 7
误差	0. 120	4	0. 029		
总和	7. 930	28			

注: * 表示显著(0. 01≤*P* < 0. 05), ** 表示极显著(*P* < 0. 01)。

3. 2. 2 切割试验台搭建

为进一步验证模型仿真结果,搭建如图 12 所示的切割试验台。栽培筐放置在托盘上,托盘可沿直线导轨自由滑动,数据采集模块压力传感器选用精度为 0. 01% 的 S 型拉压传感器 DLFS, 一端与托盘相接触,另一端通过滑块固定于进给模组。工作时,栽培筐进给电机驱动进给模组带动滑块动作,从而推动托盘运动,压力传感器通过采集鹿茸菇切割前

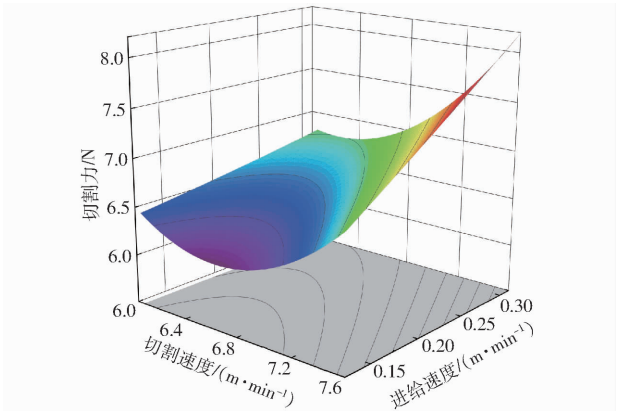


图 11 切割速度与进给速度交互作用的响应曲面

Fig. 11 Response surface of interaction effect between cutting speed and feed speed

及切割时的压力差来表征鹿茸菇菇体受到的切割反作用力,其同样可在进给模组上自由滑动。根据相关设计标准和要求^[20-23],确定带锯轮直径为 200 mm、带锯轮中心距为 1 022 mm。

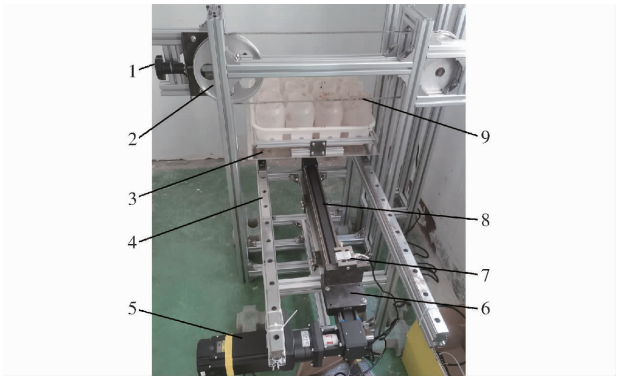


图 12 切割试验台

Fig. 12 Cutting test bench

1. 张紧部件 2. 带锯轮 3. 托盘 4. 直线导轨 5. 栽培筐进给电机 6. 滑块 7. 拉压力传感器 8. 进给模组 9. 带锯条

试验材料为山东农发智慧生物科技集团有限公司培育的龟山 1 号鹿茸菇,搔菌后到出菇为 25 d,菇盖直径 1.6 ~ 3.0 cm、菇柄长度 10 ~ 12 cm,试验在室温条件下进行,试验时带锯条距离瓶口约 2 mm,试验地点在山东农业大学岱宗校区,试验时间为 2023 年 9 月 20—21 日,选择菇体形状较为一致规整的鹿茸菇进行试验,重复 3 次,测得切割反作用力分别为 5.958 6、6.013 9、5.808 8 N,取平均值。为了验证数值仿真优化结果的可靠性,对最佳参数组合进行仿真试验。台架试验测得切割反作用力为 5.927 1 N、仿真结果为 5.878 3 N,试验结果与仿真结果差异较小说明最优参数可靠。

3.3 柔性夹取机构

柔性夹取机构如图 13 所示,其中,柔性手指采用硅胶材料,其结构由应变层和限制层组成并采用气体正压驱动,利用不同刚度材料层间应变差产生

弯曲自由度的方式实现抓取动作。应变层和限制层分别由硅胶材料浇筑而成,通过硅胶粘合剂进行粘合组成上下两层。限制层是平板结构,应变层内部有多个气腔,通过气道连接,当向柔性手指内部充气时,应变层变形较大、限制层变形较小,驱动柔性手指向内弯曲,从而实现鹿茸菇抓取。当停止充气时,柔性手指恢复原状。推板用于将抓取后的鹿茸菇从手指中间推出放置于采后输送机构输送带上,推板由推板气缸驱动。

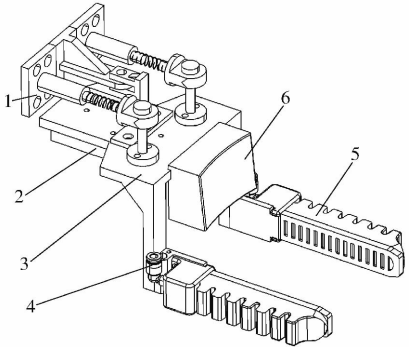


图 13 柔性夹取机构结构图

Fig. 13 Structural diagram of flexible clamping device

1. 支撑架 2. 推板气缸 3. 底座 4. 快接插头 5. 柔性手指 6. 推板

3.3.1 柔性手指结构设计

本文设计的柔性手指采用单爪双指结构对切割下来的菇体进行环抱夹持操作。由于相邻瓶瓶颈间距只能容纳一根手指,因此在保证采收效果的前提下,相邻两对柔性手指采取上下交错布置。根据栽培筐尺寸、培养瓶尺寸、菇体尺寸及培养瓶与培养瓶之间的实际空间情况,初步确定柔性手指相关参数。其中外形参数为:长度 110 ~ 120 mm、宽度 14 ~ 18 mm、厚度 20 ~ 28 mm,其中厚度方向为垂直于夹持工作表面的方向;内部参数为:气腔 5 ~ 9 个、气腔厚度 1.6 ~ 2.2 mm、限制层厚度 1 ~ 5 mm。同时根据工作时手指与菇体接触的位置确定其理想的弯曲角度为 30° ~ 40°。其结构如图 14 所示。

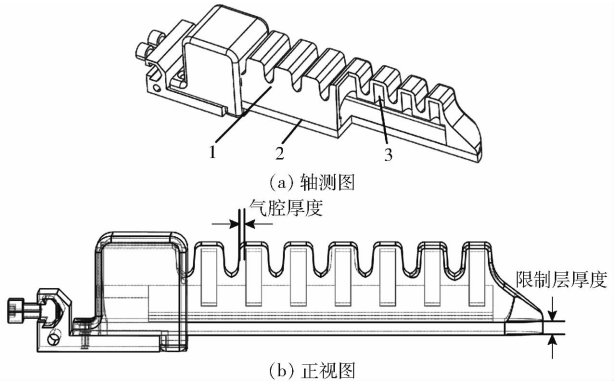


图 14 柔性手指结构图

Fig. 14 Structure diagrams of flexible fingers

1. 应变层 2. 限制层 3. 气腔

3.3.2 柔性手指制备

柔性手指的应变层和限制层均选用 Smooth - ON 公司的 Dragon Skin 20 硅胶,首先采用 3D 打印技术制作应变层和限制层模具;随后将硅胶 A、B 均匀混合,加入适量正己烷稀释,利用搅拌器搅拌均匀后放入模具中,并使用真空泵进行脱泡处理;静置 24 h 后进行脱模,取出应变层和限制层用硅胶粘合剂粘结,并将快插接头插入气道后用硅胶粘合剂密封粘结,最终得到柔性手指。

3.3.3 基于有限元分析的柔性手指参数确定

为了确定柔性手指气囊个数、气腔厚度、限制层厚度等最优化参数,采用 ABAQUS 对其进行有限元仿真。柔性手指采用的硅胶材料具有非线性、大形变及超弹性等特性,本构模型选择 Yeoh 模型,该模型形式简单,可通过单轴拉伸试验确定常数,可较好拟合橡胶大变形的能力^[24-26]。

首先按照 GB/T 528—2009/ISO 37:2005《硫化橡胶或热塑橡胶拉伸应力应变性能的测定》,通过专用模具制作拉伸试样,选择哑铃 1A 型标准试样,利用岛津 EZ - SX 型质构仪对其进行单轴拉伸试验,得到材料的应力应变试验数据导入 Origin 软件中进行 Yeoh 模型数据拟合,得到拟合曲线如图 15 所示,确定相关材料参数。

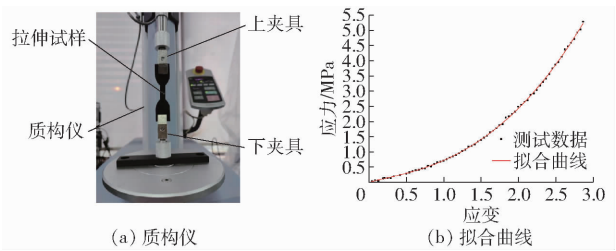


图 15 质构仪及单轴拉伸试验拟合曲线
Fig. 15 Texture analyzer and uniaxial tensile test and fitting curve

仿真时,将上述拟合得到的数据输入软件,同时材料密度设置为 1.20 g/cm^3 。采用流体腔模型来实现充气模拟,将充气端进行固定处理,打开几何非线性开关。采用四面体网格进行仿真,几何阶次选择 2 次。手指弯曲情况如图 16 所示。

(1) 气腔厚度

气腔厚度对手指弯曲特性影响的仿真结果见图 17。在相同气压下,气腔厚度越大,弯曲角小,且随着气压的增大,厚度较大的手指弯曲角增大的趋势越接近线性。仿真中发现,当气压超过 40 kPa 时,对于厚度小于等于 1.8 mm 的手指会在达不到所需弯曲角时发生气腔上侧及连接处单元格的损坏;在气压处于 30 ~ 40 kPa 时,厚度为 2.2 mm 的手指对气压变化的敏感度差,无法对变化的气压做出

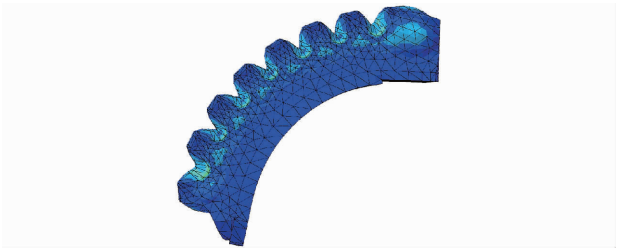


图 16 手指在 40 kPa 时弯曲的情况
Fig. 16 Finger bending at 40 kPa

较及时的响应,难以使气动手指达到理想的弯曲角。因此,在确保材料安全使用的前提下,同时使手指弯曲至目标角度所需的气压较小,确定气腔厚度为 2 mm。

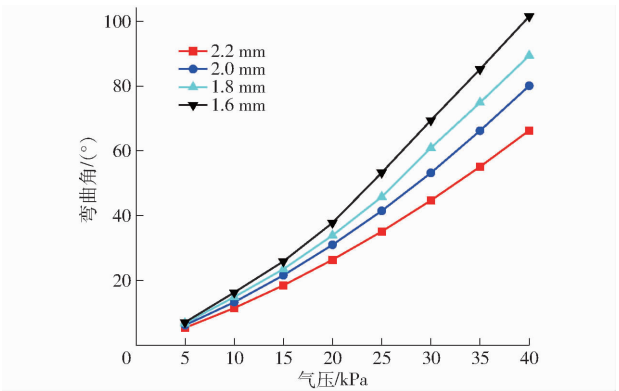


图 17 不同厚度时弯曲角随气压变化曲线
Fig. 17 Curves of bending angle change with different thicknesses

(2) 气腔数

气腔数对手指弯曲特性影响的仿真结果见图 18,可见气腔数对驱动手指弯曲特性影响不大,手指实际使用时可根据被抓取目标的大小,选择合适的气腔数,改变手指的长度,达到对目标的稳定抓取,通过对实际工况进行反复测试,为保证鹿茸菇与手指接触位置及夹起成功率,确定气腔数为 7 个,手指整体长度为 110 mm。

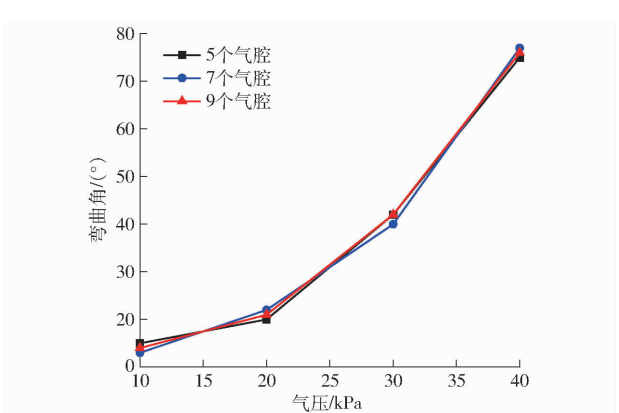


图 18 不同气腔数时弯曲角变化曲线
Fig. 18 Curves of bending angle changed with different numbers of gas chambers

(3)工作气压

工作气压对手指弯曲特性影响的仿真结果如表6所示,为了保证单指弯曲角位于 30°~40°之间,确定气压为 25 kPa。

表 6 不同气压下所选定手指的弯曲角
Tab.6 Bending angle of selected finger at different air pressures

气压/kPa	5	10	15	20	25	30	35	40
弯曲角/(°)	6.2	13.3	21.6	31.0	38.5	53.2	66.2	80.1

(4)限制层厚度

为了确定限制层厚度,制作厚度为 1~5 mm 的手指进行现场试验。通过试验发现厚度为 1 mm 时手指硬度不够、产生下垂,从而极易造成鹿茸菇滑落,夹持失效(图 19a);厚度为 5 mm 时手指弯曲角度较小,对于部分鹿茸菇无法有效包络,造成夹持失效(图 19b)。因此最终确定限制层厚度为 3 mm,夹持效果如图 19c、19d 所示,为了便于观察,以手指基座俯视图中右下角为原点,延伸出的两条边分别为 X 轴及 Y 轴,构建一直角坐标系,从图中可以看出,限制层厚度为 3 mm 时,代表手指弯曲角的点画线偏离 Y 轴的程度较大,弯曲包络效果较好。

综合上述仿真结果,确定手指其它参数:手指厚度 22 mm,手指宽度 24 mm。

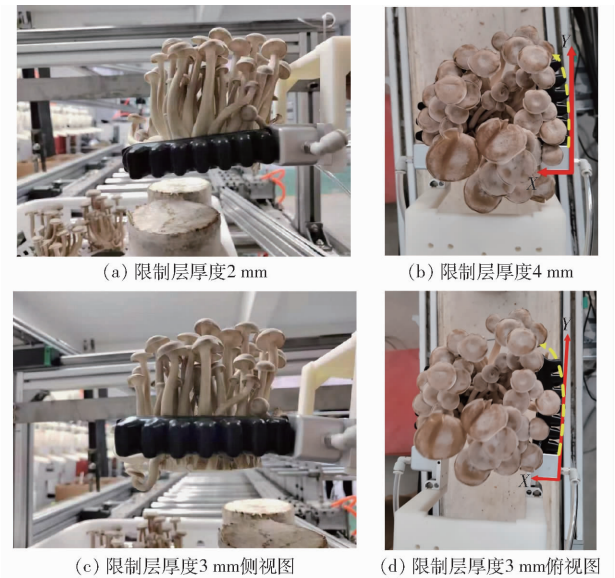


图 19 不同限制层厚度时手指夹持效果

Fig.19 Influence of different limiting layer thicknesses on finger clamping effect

4 整机试验

为进一步验证整机实际作业效果,搭建鹿茸菇自动采收装置,并于 2023 年 10 月 17—21 日,在山东农业大学岱宗校区进行整机性能试验,试验样本为山东农发智慧生物科技集团有限公司栽培的龟山

1 号鹿茸菇,试验现场如图 20 所示。



图 20 整机试验现场

Fig.20 Device testing

以鹿茸菇采净率 Y_1 、损失率 Y_2 和损伤率 Y_3 为评价指标,其中鹿茸菇的损伤包括菇体的挤压损伤、扭转损伤及断裂损伤等,损伤情况由山东农发智慧生物科技集团有限公司鹿茸菇品质检测人员进行判定。相关指标计算式为

$$Y_1 = \left(1 - \frac{M_2}{M_1 + M_2 + M_3} \right) \times 100\% \quad (22)$$

$$Y_2 = \frac{M_2 + M_3}{M_1 + M_2 + M_3} \times 100\% \quad (23)$$

$$Y_3 = \frac{M_4}{M_1} \times 100\% \quad (24)$$

式中 M_1 ——已采收鹿茸菇质量,kg

M_2 ——漏采鹿茸菇质量,kg

M_3 ——掉落鹿茸菇质量,kg

M_4 ——已采收鹿茸菇中损伤鹿茸菇质量,kg

首先设定主气路气压和柔性手指气路气压,调整带锯条张紧力、带锯条切割速度和进给速度等关键作业参数,进行预试验无误后开展整机试验,试验重复 5 次,取平均值,试验结果如表 7 所示。整机试验表明,瓶栽鹿茸菇自动采收装置运行平稳,各模块协同正常。平均采净率、平均损失率和平均损伤率分别为 98.18%、3.66% 和 2.75%。试验中发现漏采鹿茸菇的原因是工厂化培养时菇柄弯曲较大的鹿茸菇,位于带锯条下方,无法切割造成漏采;鹿茸菇掉落的原因主要是由于工厂化栽培鹿茸菇菇体较短,造成鹿茸菇比较松散,在切割和夹持过程中出现了少量掉落;鹿茸菇出现损伤是由于瓶与瓶间鹿茸菇发生交叉,在柔性手指插入时出现干涉损伤。

表 7 整机试验结果

Tab.7 Testing results %

试验次序	采净率	损失率	损伤率
1	97.5	3.87	2.91
2	98.2	4.32	3.03
3	99.7	3.07	1.41
4	97.1	4.51	3.62
5	98.4	2.53	2.79
平均值	98.18	3.66	2.75

5 结论

(1)提出了瓶栽鹿茸菇“输-定-切-夹”采收工艺,并设计了一种瓶栽鹿茸菇自动采收装置。通过输送定位机构、带锯切割机构、控制系统、六自由度机械臂、柔性夹取机构及采后输送机构的协同配合,实现了一次3筐的喂入、输送、瓶筐与瓶体限位、单排切割、单排夹取和采后转运的全流程自动化作业。

(2)对关键部位的结构和运行参数进行优化,获得了最优参数组合。通过栽培筐输送过程力学与运动学分析,确定了输送定位机构导流条安装角为 71° 。基于ANSYS LS-DYNA仿真分析,通过响应面法分析切割速度、进给速度、带锯条前角及齿距等

因素对切割反作用力的影响,建立了4个因素的回归模型并进行了台架验证试验,结果表明当切割速度为 6.49 m/min 、进给速度为 0.12 m/min 、前角为 25° 、齿距为 7 mm 时,切割性能最优;基于ABAQUS对影响柔性手指弯曲性能的各因素进行了单因素试验,结合物理试验,获得了最佳弯曲性能时柔性手指结构参数为:气腔厚度 2 mm 、气腔数7个、气压 25 kPa 、限制层厚度 3 mm 。

(3)搭建瓶栽鹿茸菇自动采收装置整机进行了采收试验。试验结果表明,装备运行平稳,采收作业效果良好,平均采净率为 98.18% ,平均损失率为 3.66% ,平均损伤率为 2.75% ,达到了低损高效切割和柔性夹持输送效果,满足鹿茸菇实际采收要求。

参 考 文 献

- [1] 中国食用菌协会. 2021年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2023, 42(1): 118-127.
- [2] 鲍大鹏, 邹根, 裴晓东, 等. 中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 103-110. BAO Dapeng, ZOU Gen, PEI Xiaodong, et al. Discussion on the path toward high quality modernization of edible fungi industry in China[J]. Acta Edulis Fungi, 2022, 29(6): 103-110. (in Chinese)
- [3] 宋卫东, 周德欢, 任彩虹, 等. 我国食用菌生产装备的发展现状、趋势及建议[J]. 食药菌, 2021, 29(1): 1-5. SONG Weidong, ZHOU Dehuan, REN Caihong, et al. Development status, trend and suggestion of mushroom production equipment in China[J]. Edible Medicinal Bacteria, 2021, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] 李文佼, 温世勇, 张洪勇, 等. 鹿茸菇研究进展[J]. 中国食用菌, 2022, 41(3): 1-5. LI Wenjiao, WEN Shiyong, ZHANG Hongyong, et al. Research progress of *Lyophyllum decastes*[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(3): 1-5. (in Chinese)
- [5] 黄晨阳, 陈强, 赵梦然. 中国食用菌工厂化生产现状与问题分析[J]. 农业工程技术, 2021, 41(10): 12-14.
- [6] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18. LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1-18. (in Chinese)
- [7] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 26-34. JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26-34. (in Chinese)
- [8] 张茜, 李洋, 王磊明, 等. 果蔬机械损伤特性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(1): 193-199. ZHANG Xi, LI Yang, WANG Leiming, et al. Research progress of mechanical damage characteristics of fruits and vegetables[J]. Food Research and Development, 2018, 39(1): 193-199. (in Chinese)
- [9] CATHA M C. Method and apparatus for harvesting mushrooms and the like:US4545186[P]. 1985-10-08.
- [10] REED J N, TILLET R D. Initial experiments in robotic mushroom harvesting[J]. Mechatronics, 1994, 4(3): 265-279.
- [11] YANG Shuzhen, JI Jiancheng, CAI Hongxia, et al. Modeling and force analysis of a harvesting robot for button mushrooms[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78519-78526.
- [12] HUANG Mingsen, HE Long, CHOI Daeun, et al. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106145.
- [13] 卢伟, 王鹏, 王玲, 等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 28-36. LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 28-36. (in Chinese)
- [14] 夏妮. 双孢蘑菇力学特性及机械损伤机理的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013. XIA Ni. Study on the mechanical properties and its mechanism of *Agaricus bisporus*[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 高文硕. 瓶栽金针菇机械化采摘技术试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. GAO Wenshuo. Research on mechanized picking technology of bottled *Flammulina velutipes*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
- [16] 姬江涛, 李梦松, 赵凯旋, 等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 104-115. JI Jiangtao, LI Mengsong, ZHAO Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104-115. (in Chinese)

[17] 戴飞,杨杰,赵武云,等. 双孢蘑菇工厂化生产关键配套装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (6):43 – 51.
DAI Fei, YANG Jie, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of key assorted device based on factory production of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 43 – 51. (in Chinese)

[18] JB/T 7012—2020 辊子输送机[S]. 2020.

[19] 邱卫东. 常用辊子输送机的设计与计算[J]. 机械研究与应用,2010(4):69 – 70.

[20] JB/T 7430—2010 木工带锯机 锯轮[S]. 2010.

[21] 曾百功,黎奎良,叶进,等. 工厂化上海青流水线收割装置的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022,52(11): 2756 – 2764.
ZENG Baigong, LI Kuiliang, YE Jin, et al. Design and experiment of harvesting device for industrialized production line of Shanghaiqing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52 (11): 2756 – 2764. (in Chinese)

[22] 江平,丁泽林,丁侠胜,等. 带锯床张紧装置结构设计[J]. 轻工机械,2017,35(1):82 – 85.
JIANG Ping, DING Zelin, DING Xiasheng, et al. Structural design of tensioning device in band sawing machine[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(1): 82 – 85. (in Chinese)

[23] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

[24] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业,2014,61(8):453 – 457.
YAN Shan, WANG Wei. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(8): 453 – 457. (in Chinese)

[25] 华超,褚凯梅,陈昕,等. 软体水果采摘机械手系统设计分析与试验[J]. 林业工程学报,2021,6(3):127 – 132.
HUA Chao, CHU Kaimei, CHEN Xin, et al. Design, analysis and experimental study of soft picking manipulator system for fruit harvesting[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 127 – 132. (in Chinese)

[26] 李雪冰,危银涛. 一种改进的 Yeoh 超弹性材料本构模型[J]. 工程力学,2016,33(12):38 – 43.
LI Xuebing, WEI Yintao. An improved Yeoh constitutive model for hyperelastic material[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12): 38 – 43. (in Chinese)

(上接第 80 页)

[18] 汪沛,冯达文,陈高隆,等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报,2023,54(3):41 – 48.
WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):41 – 48. (in Chinese)

[19] 周俊,许建康,王耀羲,等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):38 – 43.
ZHOU Jun, XU Jiankang, WANG Yaoxi, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):38 – 43. (in Chinese)

[20] 郑劲松. 土地平整系统算法研究[D]. 长春:长春理工大学,2004.

[21] 密雅荣. 土地平整度传感测定评价系统设计与实现[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
MI Yarong. Design and implementation of land flatness evaluation system based on laser sensor[D]. Yangling:Northwest A&F University,2013. (in Chinese)

[22] 李泽昕,王宁,刘晓亮,等. 一种新型地面平整度检测装置[J]. 自动化应用,2022(3):159 – 161.

[23] 文永双,张宇,田金元,等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):123 – 129.
WEN Yongshuang, ZHANG Yu, TIAN Jinyuan, et al. Design and experiment of detection and supply system of vegetable plug seedlings for transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):123 – 129. (in Chinese)

[24] 刘诚. 农机与农艺相结合的水稻机插秧[J]. 云南农业,2024(2):88 – 89.

[25] 陆博远. 旋转式苗床平地机工作装置设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2024.
LU Boyuan. Design and experimental study on the working device of rotary seedbed grader[D]. Daqing:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2024. (in Chinese)

[26] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C] // Proceedings of the Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3 – 19.