



罗亦心, 胡淑芬, 邓勇杰, 等. 油茶花剪切力学性能试验与分析[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(1): 248–261.

LUO Y X, HU S F, DENG Y J, et al. Experimental and analytical study on the shearing mechanical properties of *Camellia oleifera* flowers[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(1): 248–261.

油茶花剪切力学性能试验与分析

罗亦心^{1,2}, 胡淑芬^{1,2}, 邓勇杰^{1,2}, 胡坚文^{1,2}, 刘木华^{1,2}, 李忠英^{1,2},
廖阳森^{1,2}, 钟鑫旺^{1,2}, 张英敏^{1,2}, 赖曲芳^{1,2*}

(1. 江西农业大学 工学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省现代农业装备重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在提高油茶花朵剪切采摘装置的工作性能, 分析刀片厚度、刀片刃角和剪切速度对油茶花梗剪切性能的影响规律, 获得油茶花梗剪切力学参数, 为剪切式油茶花朵采摘装置设计提供数据支撑。【方法】以“长林”系列油茶树的油茶花为试验对象, 通过对油茶花朵和花梗物料特性分析, 以刀片厚度、刀片刃角、剪切速度为试验因素, 采用单因素试验法, 通过质构仪对油茶花梗进行剪切力学试验; 并以刀片厚度、刀片刃角、剪切速度为试验因素, 以剪切力和剪切功为评价指标, 开展三因素三水平正交试验; 运用 Design-Expert 软件对试验因素进行参数优化, 获得各因素的最优参数组合。【结果】不同刀片厚度与刀片刃角的刀具在不同剪切速度条件下, 获得油茶花梗“剪切力-位移”曲线, 该“剪切力-位移”曲线主要分为4个阶段: I 剪切力缓慢增加阶段、II 剪切力急剧上升阶段、III 剪切力波动阶段和 IV 剪切力急速下降阶段, 剪切力峰值出现在第 II 和 III 阶段。试验表明, 各因素对油茶花梗剪切力影响的主次顺序是刀片刃角、刀片厚度、剪切速率; 对剪切功影响的主次顺序是刀片厚度、刀片刃角、剪切速率。综合分析, 确定油茶花朵采摘的较优参数组合为: 刀片厚度为 0.5 mm, 刀片刃角为 30°, 剪切速度为 88.4 mm/min, 油茶花采摘剪切力为 4.6 N, 剪切功为 11.32 mJ。【结论】研究结果可为剪切式油茶花朵采摘装置关键零部件设计提供理论依据和数据支撑, 也可为剪切式油茶花朵采摘装置的研发提供试验依据。

关键词: 油茶花; 剪切力学性能; 剪切力; 剪切功

中图分类号: S224; S794.4 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2026)01-0248-14

CSTR: 32399.14.auj.2026022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental and analytical study on the shearing mechanical properties of *Camellia oleifera* flowers

LUO Yixin^{1,2}, HU Shufen^{1,2}, DENG Yongjie^{1,2}, HU Jianwen^{1,2}, LIU Muhua^{1,2},
LI Zhongying^{1,2}, LIAO Yangsen^{1,2}, ZHONG Xinwang^{1,2},
ZHANG Yingmin^{1,2}, LAI Qufang^{1,2*}

收稿日期: 2025-07-16 修回日期: 2025-09-10 接受日期: 2025-09-16

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目[JXTG(2025)20号]

Project supported by the Central Finance Forestry Science and Technology Promotion Demonstration Project [JXTG(2025)No.20]

作者简介: 罗亦心, 硕士生, orcid.org/0009-0000-3242-8413, 1332552922@qq.com; *通信作者: 赖曲芳, 高级实验师, 主要从事现代农业装备研究, orcid.org/0009-0004-7970-3418, 36844013@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1. School of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] To provide data support for the design of *Camellia oleifera* flower shearing and picking device by analyzing blade thickness, blade angel and shearing speed. [Method] With the *Camellia oleifera* of “Changlin” series as the test object, the material characteristics of *Camellia oleifera* flowers and peduncles, the thickness of the blade, the blade angle and the shearing speed of the blade were analyzed as the test factors, and the shearing mechanics test of the *Camellia oleifera* peduncle was carried out by the texture analyzer. The three-factor three-level orthogonal test was carried out with the thickness of the blade, the blade angle and the shear speed as the test factors, and the shearing force and shearing work as the evaluation indexes. The Design-Expert software was used to optimize the parameters of the test factors and obtain the optimal combination of parameters of each factor. [Result] Under different shearing speed conditions, the “shearing force-displacement” curve of *Camellia oleifera* peduncle was obtained, and the “shearing force-displacement” curve was mainly divided into four stages: I slowly increasing, II. rising, III. fluctuating and IV rapidly decreasing, and the shearing force peak appeared in stage II and III. The results showed that the main and secondary order of the influence of various factors on the shearing force of *Camellia oleifera* peduncle is blade angle, blade thickness and shearing rate. The order of influence on shearing work is blade thickness, blade angle, and shear rate. Comprehensive analysis shows that the optimal combination of parameters is as follows: the blade thickness is 0.5 mm, the blade angle is 30°, the shearing speed is 88.4 mm/min, the shearing force of *Camellia oleifera* picking is 4.6 N, and the shearing power is 11.32 mJ, which is the most suitable for *Camellia oleifera* flower picking. [Conclusion] The results of this study can provide a theoretical basis and data support for the design of key components and R&D of *Camellia oleifera* flower shearing and picking device.

Keywords: *Camellia oleifera*; shear mechanical properties; shear force; shear work

【研究意义】油茶(*Camellia oleifera* Abel)是山茶科中的一种山茶属常绿小乔木或灌木,是我国特有的木本油料植物^[1],其果实榨取的茶油不饱和脂肪酸含量达90%以上^[2],并与油棕、油橄榄、椰子并称世界四大木本油料^[3]。油茶花为雌雄同花,虫媒异花授粉,自交不亲和,授粉主要通过昆虫活动^[4-6]。油茶盛花期在秋冬季,阴湿寒冷的气候不利于昆虫活动,致使油茶花粉得不到及时传播,导致花多果少、花而不实、坐果率低^[7-8],严重制约油茶产业的健康发展^[9-10]。【前人研究进展】辅助授粉是提高油茶坐果率和产量的重要途径。辅助授粉必须采集足够的高活性花粉,这是因为油茶高活性花粉采集是提高油茶产量的基础^[11-14]。目前油茶花粉采集主要依靠人工,通常油茶树多种植在山地丘陵地带,地形复杂、坡度大,人工采集花粉作业危险、耗时费力、成本高,且油茶花分泌的花蜜致使花粉难以采集^[15]。通过机械采摘油茶花朵,可先集中提取油茶花药,再收集油茶花药开裂释放出的全部花粉,且此时花粉活性高,有利于提高辅助授粉的效果。此外,油茶花富含多酚类、黄酮类、多糖类和氨基酸等活性成分,具有较好的抗氧化性、抗炎、调节心血管和增强免疫力的作用^[16]。分离花药的油茶花还可以应用在日化、食品和药用等产品中^[17]。因此,机械采摘油茶花朵既能实现高活性油茶花粉的高效采集,满足辅助授粉的需求,又能发挥疏花的作用,减少无效花朵的营养和养分消耗,还能提高油茶花朵的高值化利用,增加油茶经济效益。现有机械采花方式有齿梳式^[18]、旋扭式^[19]、剪切式^[20]等。其中齿梳式机械采摘适合生长于茎枝顶端的花朵,由于油茶树是花叶共生,油茶花生长位置多样,齿梳式采摘会受到叶片的干扰,不利于油茶花朵采摘;旋扭式采摘直接接触花朵,易造成花瓣、花药脱落,花朵易损伤;而剪切式采摘因其作业范围广,剪切刀片可精准地将花梗剪断,保证花朵的完整性,因此剪切式采摘更合适油茶花。因油茶花梗较短特性,探究不同刀片厚度、刀片刃角与剪切速度条件下油茶花梗的剪切力学特性,可为剪切式油茶花朵采摘装置的研制提供依据。由于油茶种植主要在中国,国外对油茶花剪切力学特性的研究尚无文献报道。吕

辉等^[20]设计了一种剪切式油茶花采摘末端执行器,但缺乏对油茶花的剪切力学特性进行研究。而国内外学者对树枝和农作物秸秆等剪切性能的研究较多,如郭宇辉等^[21]通过对黄精须根在不同取样部位、不同含水率和加载速率条件下的剪切力学特性进行了研究;李宁等^[22]研究分析了刀具的剪切角度、刀型和剪切速度对枣树枝条剪切性能的影响规律;王宏立等^[23]为提高免耕播种机破茬刀的工作性能,开展了玉米根茬的剪切速度、切刀刀型和剪切方式等剪切性能试验。以上研究可为油茶花梗剪切力学特性研究提供借鉴与参考。

【本研究切入点】针对油茶花梗与枝条连接尺寸短,油茶花采摘难度大的问题,本研究设计了一种剪切式油茶花朵采摘装置,以带枝油茶花苞为试验对象,探究油茶花高效低损采摘方法。【拟解决的关键问题】旨在研究剪切式油茶花采摘装置的剪切性能,以剪切力和剪切功为评价指标,以刀片厚度、刀片刃角和剪切速度为影响因素,分析各影响因素对油茶花梗剪切力学特性的影响,确定油茶花朵高效低损采摘的最佳参数组合,为剪切式油茶花采摘装置的设计提供数据依据。

1 油茶花生物学特性及采摘原理

1.1 油茶花生物学特性

油茶花结构如图 1 所示,主要由花瓣、花药、柱头、花丝组成。油茶花粉储藏在花药中^[9],当花粉成熟,便会从花药中释放出来,此时花粉活性最佳^[24]。



1:花瓣;2:花药;3:柱头;4:花丝。
1: Petal; 2: Anthus; 3: Stigma; 4: Filigree.

图 1 油茶花结构

Fig.1 Structure of *Camellia oleifera*

油茶花的生长过程可分为花苞露白期(图 2a)、松蕾期(图 2b)、初开期(图 2c)、盛花期(图 2d)4 个阶段,直至花谢^[25-26]。油茶花不同时期的花粉活性不同。有研究^[27]发现,花苞未达到松蕾状态之前,其花粉萌发率偏低;松蕾期到花朵盛花期,其花粉萌发较高。但花朵盛开时,花粉已从花药中释放,不利于花粉的收集,且花粉离体后活力易下降。因此,在油茶花松蕾期和初开期进行油茶花采摘,有利于高活性花粉的收集。

对松蕾期和初开期油茶花的物料性能进行测量分析。松蕾期和初开期油茶花呈椭球形状,用数显游标卡尺测量油茶花朵的直径 d_1 、高度 h_1 ,如图 3 所示,得出油茶花呈椭球形状,平均直径 d_1 为 17.8 mm,平均高度 h_1 为 20.06 mm,用电子天平测量油茶花朵质量 m ,得出油茶花平均质量 m 为 1.2 g。

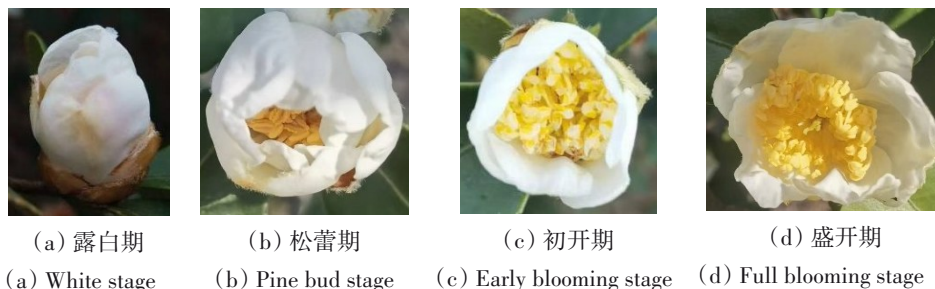


图 2 油茶花生长过程

Fig.2 The growth process of *Camellia oleifera*

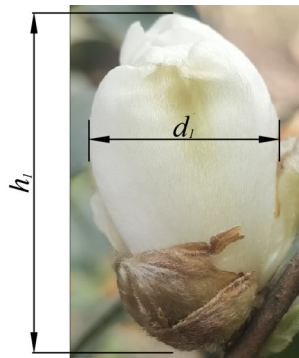


图3 油茶花朵尺寸
Fig.3 Size of *Camellia oleifera* flowers

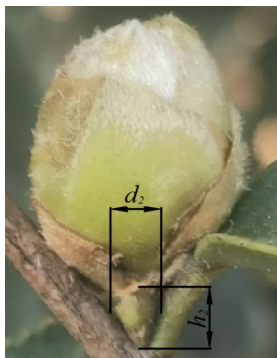


图4 花朵与花枝连接处尺寸
Fig.4 Dimensions of the connection between

通过数显楔形塞尺对花朵与花枝连接部位(花梗)进行测量观察可知,花梗尺寸较小(图4),为保证采摘油茶花朵的完整性和采摘效率,对 100 份油茶花花梗的直径与高度进行了统计分析。由图 5 和图 6 可知,油茶花梗直径 d_2 主要介于 2.3~2.9 mm,高度 h_2 主要介于 1.1~1.9 mm。因此,需要根据花梗高度来设计刀片刃角和厚度,并进行花梗剪切力分析,以保证剪切刀片有足够的剪切力和消耗更少的剪切功。

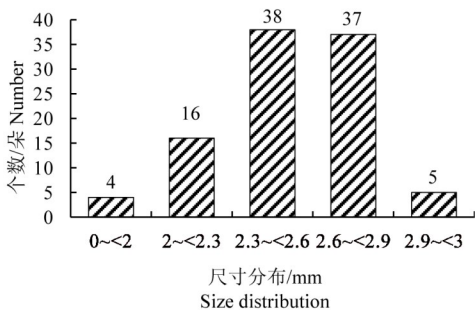


图5 花梗直径分布
Fig.5 Peduncle diameter distribution

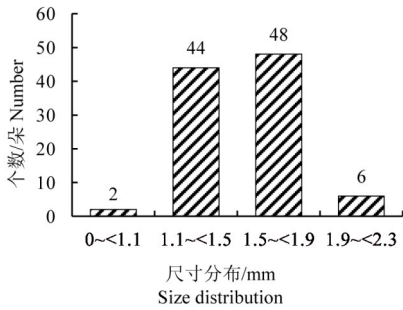


图6 花梗高度分布
Fig.6 Peduncle height distribution

1.2 油茶花剪切采摘原理

由于油茶花花梗高度较小,刀片剪切方式会影响油茶花朵采摘性能。刀片剪切方式一般有 3 种类型,分别为单支撑剪切(图 7a)、双支撑剪切(图 7b)和无支撑剪切(图 7c)。有支撑切割可以增加花梗被剪切时的抗弯强度^[28],为确保花朵能顺利被剪切,动、定刀片的间隙须介于 0~0.5 mm^[28],否则剪切阻力将变大。无支撑切割仅用于动刀片高速切割灌木,动刀片高速剪切时,被剪切的灌木可以立即获得刀片传递的能量,瞬间提高剪切速度和加速度,并获得反向惯性力,有助于灌木的成功剪切。往复式剪切属于有支撑剪切,圆盘回转式切割属于无支撑剪切^[29]。

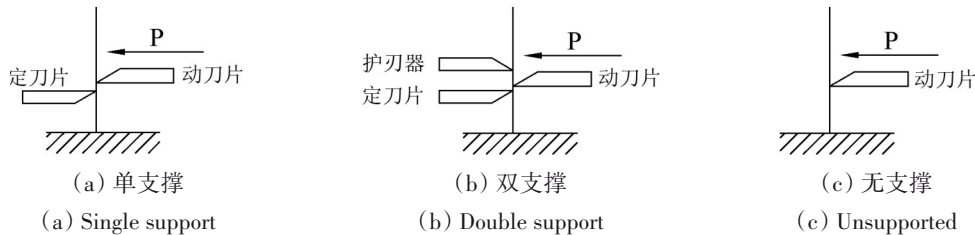


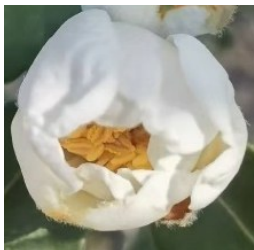
图7 剪切方式
Fig.7 Cutting method

基于油茶花的物料与生长特性,实际采摘时,无支撑剪切方式会因其高速旋转的刀片而破坏花朵的完整性,并不适用于油茶花的采摘。使用有支撑剪切方式,不仅可对油茶花起到固定夹持作用,还可控制刀片切割速度,保证剪切花朵的完整性。基于油茶花花梗高度较小,选取单支撑切割方式。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料选用江西农业大学科技园内(28.76°N,115.84°E)种植的“长林”系列油茶树的油茶花。采摘试验于2024年11月20日,选取松蕾期和初开期的生长健康、无病虫害的连枝油茶花,如图8所示。试验时,摘除花枝上的叶片,以便进行油茶花剪切力试验。



(a) 松蕾期油茶花

(a) *Camellia oleifera* flowers in the pine bud period



(b) 初开期油茶花

(b) Early bloom of *Camellia oleifera* flowers

图8 连枝油茶花

Fig.8 *Camellia oleifera* flowers branches

2.2 试验设备

TMS-Pro 质构仪(美国 FTC 公司,精度 $\pm 1\%$,量程0~1 000 N);电子天平(苏州恒锦机电科技有限公司,WT20002型,精度0.01 g);数显游标卡尺(苏州宝睿丰精密量仪有限公司,精度0.02 mm);数显楔形塞尺(东莞市景如量仪科技有限公司,精度0.01 mm)。

2.3 试验方法

使用数显游标卡尺测量试验用油茶花梗直径,使用数显楔形塞尺测量油茶花梗高度,使用质构仪测定油茶花梗的剪切力。首先将载物台固定到质构仪的底座上,再将带枝油茶花固定在载物台上,如图9所示。同时将自制的刀片通过螺栓连接到探头的螺孔中,如图10所示。试验时,探头带动刀片向下匀速运动,从刀片接触到花枝上的花梗开始,直至花梗被完全切断,探头停止运动,计算机数据采集系统记录下剪切力-位移曲线。



图9 质构仪

Fig.9 Texture analyzer

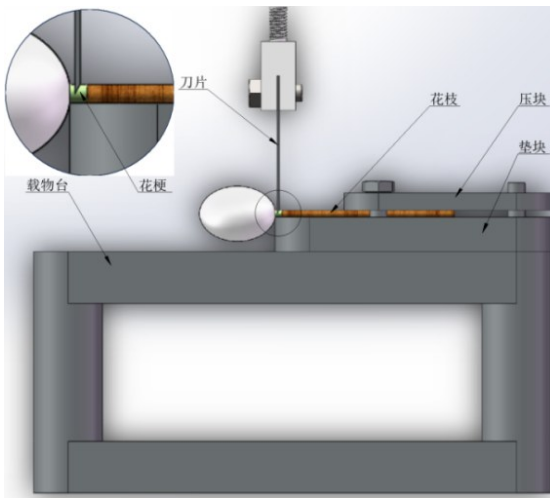


图10 剪切示意

Fig.10 Shear schematic

采用尼康 EclipseE100 光学显微镜,观察油茶花梗横切面的显微结构,结合油茶花梗组织细胞结构对花梗剪切过程进行分析。油茶花梗横切面如图11所示,花梗横切面显微结构如图12所示,花梗组织结构由表皮纤维、表层细胞、木质部和木髓部组成。



图 11 油茶花梗横切面

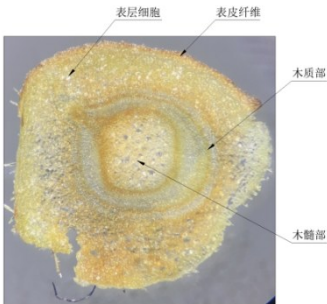


图 12 油茶花梗横切面显微结构

Fig.11 Cross-section of *Camellia oleifera* peduncle Fig.12 Microstructure of cross-section of *Camellia oleifera* peduncle

2.4 试验设计

2.4.1 试验因素与评价指标

影响油茶花梗剪切力的因素主要有刀片厚度、刀片刃角、剪切速度、花梗直径等。因油茶花梗为确定值,因此不将花梗直径作为试验因素。本试验选取刀片厚度、刀片刃角和剪切速度作为试验因素,以花梗切断时所受的剪切力和剪切功^[30-31]为试验评价指标。

基于油茶花梗高度较小,需用较薄的刀片采摘油茶花,以保证油茶花朵的完整性。但刀片厚度或刀片刃角过小,则刀片强度下降,不满足花朵采摘强度的要求^[32]。因此,刀片厚度和刀片刃角不宜过小。试验用刀片材质为不锈钢,选取刀片厚度分别为0.3、0.6、0.9、1.2 mm。根据王宏立等^[23]的研究结果可知,刀片刃角越小,滑切作用也越明显,花梗所受的剪切力也越小。刃角越小,刀刃越锋利,但强度和耐用性随之降低。因此,试验选取刀片刃角分别为15°、30°、45°、60°。将刀片安装在质构仪探头上,质构仪探头以60 mm/min的速度匀速加载荷,获得剪切力-位移曲线。考虑油茶花朵采摘效率,选取剪切速度分别为30、60、90、120 mm/min。

根据试验获得的剪切力-位移曲线进行微积分,得到剪切花朵所需的剪切功。剪切功越小,剪切消耗的能量就越低,花朵采摘就越节能。剪切功计算公式如式(1):

$$W = \int_0^{S_{\max}} F(S) ds$$

(1)

式(1)中: $S_{\max}$ 为最大剪切位移,mm。

2.4.2 试验设计

为探究刀片厚度、刀片刃角和剪切速度3个因素对油茶花梗剪切性能的影响,以剪切力和剪切功为评价指标,进行单因素试验。试验因素水平如表1所示。

表 1 单因素试验因素水平表
Tab.1 Single factor experiment level table

水平 Level	因素 Factor		
	刀片厚度/mm	刀片刃角/(°)	剪切速度/(mm•min ⁻¹)
	Bladethickness	Bladeedgeangle	Loadingrate
1	0.3	15	30
2	0.6	30	60
3	0.9	45	90
4	1.2	60	120

3 结果与分析

3.1 剪切试验结果

试验测定了不同刀片厚度、刀片刃角和剪切速度下,油茶花梗被切断的剪切力。相同处理方式重复试验3次,取平均值作为该处理的剪切力。试验获得油茶花梗剪切力-位移曲线(图13)。结合油茶花梗

剪切受力分析(图14)和油茶花梗组织细胞结构(图12),对油茶花梗剪切过程进行分析。油茶花梗剪切过程可分为4个阶段:第I阶段为剪切力缓慢增加阶段,刀具接触花梗表皮,刀具刀刃方向与表皮纤维垂直,刀具由表皮纤维向表层细胞切入,由于表层细胞组织较疏松,可压缩性大,因此刀具切入深度虽然较大,但其表皮纤维尚未被切破,剪切力增加缓慢,曲线斜率较小;第II阶段为剪切力急剧上升阶段,随着刀具切入深度的增加,剪切力增大,花梗表皮纤维被切断,刀具穿过表层组织到达木质部,因木质部的细胞壁较厚,木质素含量较高,使得剪切力迅速上升,曲线斜率增大,当木质部被切断,剪切力达到第一个波峰;第III阶段剪切力波动阶段,随着刀具切入深度的增加,刀具切至花梗中间的木髓部组织,因木髓部细胞壁较厚,木质素含量高,且木髓部细胞组织不均匀,致使剪切力上升并产生波动,随着刀具切入深度进一步增加,木髓部被切断,剪切力达到最大;第IV阶段剪切力急剧下降阶段,当花梗彻底切断时,剪切力急剧下降。

质构仪工作时,刀刃对准花梗部位,在剪切力的作用下将花朵与花枝分离。对剪切过程进行力学分析,可将刀具看作一个单楔面^[33-35]。剪切过程中,刀具与花梗受力情况如图14所示。

根据水平、垂直方向受力平衡原理:

$$N_1 - \frac{N}{\cos\varphi} \cos(\gamma + \varphi) = 0 \quad (2)$$

所需剪切力为:

$$F = F_0 + \frac{N_1}{\cos\varphi} \sin\varphi + \frac{N}{\cos\varphi} \sin(\gamma + \varphi) \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: F_0 为刀刃切入花梗的阻力, N ; N ; N_1 为刀具楔面切入花梗的正压力, N ; γ 为刀刃刃角, $(^\circ)$; φ 为摩擦角, $(^\circ)$ 。同时,由式(2)、式(3)可知,在满足刀片强度的情况下,切断油茶花梗所需的剪切力与刀片厚度、刀片刃角 γ 成正比。

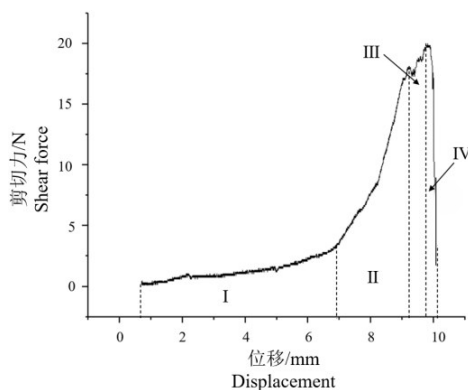


图13 剪切力—位移曲线分析

Fig.13 Force-displacement curve

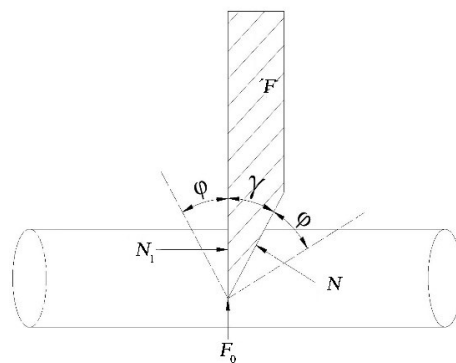


图14 油茶花梗剪切受力分析

Fig.14 Shear force analysis

3.2 剪切试验分析

由图15可知,当刀片刃角为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时,剪切力和剪切功随刀片刃角的增大而减小;当刀片刃角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,剪切力和剪切功随刀片刃角的增大而增大。其原因如下:从花梗组织细胞结构来分析,刀片对花梗的剪切过程是刀刃挤压花梗组织使其发生拉伸变形的过程。当花梗所受剪切力大于花梗的抗拉强度,花梗就会发生断裂,即花梗被切断。当刀片刃角为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时,随着刃角的增大,刀刃强度相应增大,刃口刚性显著提升,剪切过程中,刃口对花梗组织的应力能更快的大于花梗组织的抗拉强度,可快速切断花梗组织,避免因刃口崩缺导致的阻力波动,因此切削阻力小,剪切过程的能耗降低,剪切力和剪切功随之减小;当刀片刃角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,随着刃角的增大,刀具变钝,切削阻力变大,剪切力和剪切功也增大。由此,确定刀片刃角取值范围为 $15^\circ \sim 45^\circ$ 。

由图16可知,当刀片厚度为 $0.3 \sim 0.6$ mm时,剪切力和剪切功随刀片厚度的增大而减小;当刀片厚度为 $0.6 \sim 1.2$ mm时,剪切力和剪切功随刀片厚度的增大而增大。其原因可能是,刀片厚度为 $0.3 \sim 0.6$ mm

时,刀片厚度较薄,随着刀片厚度增加,刀片强度增大,剪切过程中刀片不易弯曲,刃口能稳定接触花梗表面不偏斜,并快速切断花梗,刀片变形能耗减小,剪切力小,剪切力和剪切功随之减小;当刀片厚度为 0.6~1.2 mm 时,刀片厚度较厚,随着刀片厚度的增大,刀侧与被切花梗的接触面积显著增大,摩擦阻力随之增大,剪切力和剪切功增大;当刀片厚度为 0.9~1.2 mm 时,随着刀片厚度的增加,剪切力和剪切功增大幅度不大。由此,确定刀片厚度取值范围为 0.3~0.9 mm。

由图 17 可知,剪切力和剪切功随剪切速度的增大而减小。分析其原因如下,随着剪切速度的增大,花梗剪切变形的时间减小,剪切力和剪切功随之降低^[36]。考虑到剪切时便于油茶花梗的定位,确定剪切速度取值范围为 60~120mm/min。

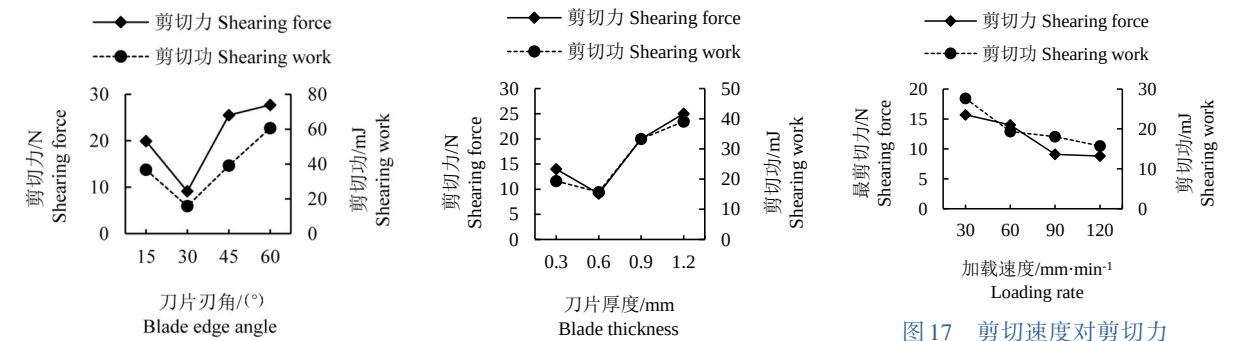


图 15 刀片刃角对剪切力和剪切功的影响

图 16 剪切刀片厚度对剪切力和剪切功的影响

图 17 剪切速度对剪切力和剪切功的影响

Fig.15 The impact of blade angle on shear force and shearwork

Fig.16 The impact of blade thickness on the maximum shear force and shearwork

Fig.17 The impact of loading speed on the maximum shear force and Shearwork

3.3 正交试验分析

(1)试验方案。为分析刀片厚度、刀片刃角和剪切速度对油茶花朵剪切性能的影响,寻找最佳的参数组合,开展正交试验研究。采用三因素三水平的 Box-Behnken 试验设计原理进行正交试验,结合单因素试验因素取值范围,分析各因素对评价指标的影响程度。正交试验因素与水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表
Tab.2 Table of experimental factor levels

水平 Level	刀片厚度/mm Bladethickness	刀片刃角/(°) Bladeedgeangle	剪切速度/(mm·min ⁻¹) Loadingrate
-1	0.3	15	60
0	0.6	30	90
1	0.9	45	120

(2)回归模型建立与显著性分析。正交试验结果如表 3 所示,利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合,如表 4、表 5 所示。

由表 4 可知,刀片厚度 A、刀片刃角 B 的回归模型($P<0.01$)极显著,模型的失拟项($P>0.05$)不显著,说明拟合方程拟合好。三因素对油茶花梗剪切力 F 影响的显著性依次为刀片刃角 B、刀片厚度 A 和剪切速度 C。刀片刃角 B 对剪切力 F 影响最大,刀片厚度 A 对剪切力 F 影响相对较小,剪切速度 C 对剪切力 F 无显著影响,其中刀片刃角 B 与刀片厚度 A 交互作用(AB)对剪切力 F 影响显著。剔除不显著项因素($P>0.05$),得到剪切力 F 与刀片刃角 A、刀片厚度 B、剪切速度 C 三因素的二次多项回归方程:

$$F = 6.18 + 4.93A + 5.88B + 3.07AB + 6.95A^2 + 9.90B^2 + 8.65C^2$$

式(4)中: F 为剪切力,N。

由表 5 可知,刀片厚度 A、刀片刃角 B 的回归模型($P<0.01$)极显著,模型的失拟项($P>0.05$)不显著,说明拟合方程拟合好。三因素对油茶花梗剪切功 W 影响的显著性依次为刀片厚度 A>刀片刃角 B>剪切速度 C,其中,刀片厚度 A 对剪切功 W 影响最大,刀片刃角 B 对剪切功 W 影响相对较小,剪切速度 C 对油茶

表3 油茶花梗剪切正交试验结果
Tab.3 Orthogonal experimental results of *Camellia oleifera* stalk cutting

试验号 Test number	因素 Factor			评价指标 Evaluation indexes	
	A/mm	B/(°)	C/(mm·min ⁻¹)	F/N	W/mJ
1	0.3	15	90	14.5	27.64
2	0.9	15	90	18.9	36.69
3	0.3	45	90	21	37.14
4	0.9	45	90	37.7	68.15
5	0.3	30	60	17.9	36.27
6	0.9	30	60	25	45.08
7	0.3	30	120	16.5	38.26
8	0.9	30	120	27.7	60.50
9	0.6	15	60	19.9	36.73
10	0.6	45	60	25.5	39.08
11	0.6	15	120	18.7	39.68
12	0.6	45	120	34.8	58.43
13	0.6	30	90	3.6	8.47
14	0.6	30	90	4.6	11.33
15	0.6	30	90	4.8	9.90
16	0.6	30	90	8.8	18.07
17	0.6	30	90	9.1	15.74

A 为刀片厚度, B 为刀片刃角, C 为剪切速度。
A is the blade thickness, B is the blade corners, C is the shear rate.

表4 剪切力二次多项式回归模型的方差分析
Tab.4 Variance analysis of quadratic regression mode of shearforce

方差来源 Source of variation	平方和 Square sum	自由度 Df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
模型 Model	1 587.74	9	176.42	35.46	<0.000 1	**
A	194.05	1	194.05	39.00	0.000 4	**
B	276.13	1	276.13	55.50	0.000 1	**
C	11.05	1	11.05	2.22	0.179 9	
AB	37.82	1	37.82	7.60	0.028 2	*
AC	4.20	1	4.20	0.844 7	0.388 6	
BC	27.56	1	27.56	5.54	0.050 8	
A ²	203.23	1	203.23	40.85	0.000 4	**
B ²	412.47	1	412.47	82.90	<0.000 1	**
C ²	314.86	1	314.86	63.28	<0.000 1	**
残差 Residual	34.83	7	4.98			
失拟项 Lack of fit	8.38	3	2.79	0.422 5	0.747 5	
纯误差 Pure error	26.45	4	6.61			
总误差 Cor total	1 622.57	16				

“**”表示极显著($P<0.01$), “*”表示显著($P<0.05$)。
“**”indicates extremely significant correlation($P<0.01$) and “*” indicates significant correlation($P<0.05$).

花梗剪切功 W 无显著影响,其中刀片厚度 A 与刀片刃角 B 交互作用(AB)对剪切功 W 影响显著。剔除不显著项因素($P>0.05$),得到剪切功 W 与刀片刃角 B 、刀片厚度 A 、剪切速度 C 三因素的二次多项回归方程:

$$W = 12.70 + 8.89A + 7.76B + 4.96C + 5.49AB + 15.63A^2 + 14.08B^2 + 16.70C^2$$

式(5)中: W 为剪切功,mJ。

表 5 剪切功二次多项式回归模型的方差分析
Tab.5 Variance analysis of quadratic regression mode of shear work

方差来源 Source of variation	平方和 Square sum	自由度 Df	均方 Mean square	W 值 W vale	P 值 P vale	显著性 Significance
模型 Model	4 935.08	9	548.34	29.96	<0.000 1	**
A	632.08	1	632.08	34.53	0.000 6	**
B	481.43	1	481.43	26.30	0.001 4	**
C	197.11	1	197.11	10.77	0.013 5	*
AB	120.56	1	120.56	6.59	0.037 2	*
AC	45.09	1	45.09	2.46	0.160 5	
BC	67.24	1	67.24	3.67	0.096 8	
A^2	1 027.99	1	1 027.99	56.16	0.000 1	**
B^2	834.45	1	834.45	45.59	0.000 3	**
C^2	1174.31	1	1 174.31	64.16	<0.000 1	**
残差 Residual	128.13	7	18.30			
失拟项 Lack of fit	62.44	3	20.81	1.27	0.398 2	
纯误差 Pure error	65.69	4	16.42			
总误差 Cor total	5 063.21	16				

“**”表示极显著($P<0.01$),“*”表示显著($P<0.05$)。
“**”indicates extremely significant correlation($P<0.01$)and“*”indicates significant correlation($P<0.05$).

3.4 响应曲面分析

为直观分析刀片厚度 A 、刀片刃角 B 、剪切速度 C 对剪切力 F 和剪切功 W 的影响规律,绘制回归模型的响应曲面图,如图 18 所示。

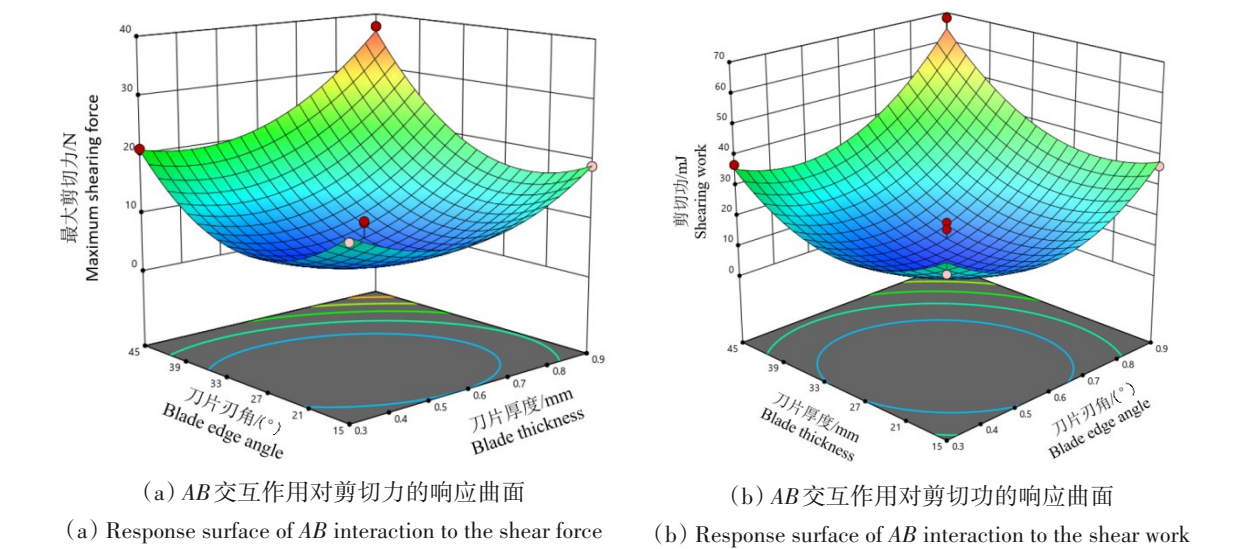


图 18 交互效应 3D 响应曲面
Fig.18 Interaction 3D response surface

(1)剪切力响应曲面分析。当剪切速度 C 固定在0水平($C=60$ mm/min)时,刀片厚度 A 与刀片刃角 B 的交互作用(AB)对剪切力 F 的影响如图18a所示。当刀片厚度 A 一定,刀片刃角 B 在 $15^{\circ}\sim 27^{\circ}$ 时,剪切力 F 随着刀片刃角 B 的增大而减小;当刀片刃角 B 在 $27^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,剪切力 F 随着刀片刃角 B 的增大而增大;当刀片厚度 A 在 $0.6\sim 0.8$ mm时,最小剪切力 F 为 3.6 N。当刀片刃角 B 一定,刀片厚度 A 为 $0.3\sim 0.6$ mm时,剪切力 F 随着刀片厚度 A 增大而减小;当刀片厚度 A 为 $0.6\sim 0.9$ mm时,剪切力 F 随着刀片厚度 A 增大而增大;当刀片刃角 B 为 $21^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 时,最小剪切力 $F_{\min}$ 可为 4.6 N。由响应曲面可知,剪切力 F 沿着刀片刃角 B 方向变化较快,沿着刀片厚度 A 方向变化较慢,刀片刃角 B 对剪切力 F 的影响要比刀片厚度 A 显著。

(2)剪切功响应曲面分析。当剪切速度 C 固定在0水平($C=60$ mm/min)时,刀片厚度 A 与刀片刃角 B 的交互作用对剪切功 W 的影响如图18b所示。当刀片厚度 A 一定,刀片刃角 B 在 $15^{\circ}\sim 27^{\circ}$ 时,剪切功 W 随着刀片刃角 B 的增大而减小;当刀片刃角 B 在 $27^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,剪切功 W 随着刀片刃角 B 的增大而增大;当刀片厚度 A 在 $0.6\sim 0.8$ mm时, $W_{\min}$ 可达 8.47 mJ。当刀片刃角 B 一定,刀片厚度 A 为 $0.3\sim 0.6$ mm时,剪切功 W 随着刀片厚度增大而减小;当刀片厚度 A 为 $0.6\sim 0.9$ mm时,剪切功 W 随着刀片厚度增大而增大;当刀片刃角 B 为 $21^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 时,油茶花梗 $W_{\min}$ 可达 9.9 mJ。由响应曲面可知,油茶花梗剪切功沿着刀厚度方向变化较快,沿着刀片刃角方向变化较慢,刀片厚度对剪切功的影响要比刀片刃角显著。

3.5 参数优化

为获得油茶花朵采摘装置最优工作参数组合,运用Design-Expert软件对上述2个回归模型进行约束目标求解。采摘花朵时,应保证剪切力最小、并在此基础上消耗最少的剪切功。因此,设置目标函数最小剪切力和最小剪切功,优化所得最佳参数:刀片厚度 A 为 0.52 mm、刀片刃角 B 为 26.5° 、剪切速度 C 为 88.28 mm/min,此时,最小剪切力 $F_{\min}$ 为 4.73 N,最小剪切功 $W_{\min}$ 为 10.61 mJ。根据优化结果,将刀片厚度 A 设为 0.5 mm,其他条件不变,再次利用软件求优,优化参数结果:刀片厚度 A 为 0.5 mm、刀片刃角 B 为 26.67° 、剪切速度 C 为 88.41 mm/min,此时,最小剪切力 $F_{\min}$ 为 4.73 N,最小剪切功 $W_{\min}$ 为 10.74 mJ。为方便实际生产加工,将刀片刃角取整为 30° ,根据优化后的工作参数,进行3次重复试验,得到最小剪切力 $F_{\min}$ 为 4.6 N,最小剪切功 $W_{\min}$ 为 11.32 mJ,试验结果与理论优化结果一致。

4 结 论

本研究通过对油茶花梗剪切力学性能试验,分析了剪切油茶花梗的剪切力、剪切功随刀片厚度、刀片刃角、剪切速率等因素的变化规律。

油茶花梗剪切力-位移特征。油茶花梗剪切力-位移曲线主要分为4个阶段:I剪切力缓慢增加阶段、II剪切力急剧上升阶段、III剪切力波动阶段和IV剪切力急速下降阶段,其中剪切力峰值出现在第II和III阶段。通过分析油茶花梗横切面组织结构发现,剪切力与花梗组织细胞壁厚度和木质素含量有关,花梗组织细胞壁越厚、木质素含量越高,剪切力也越大。

采用了Box-Behnken试验设计原理进行正交试验,对试验结果进行分析。试验结果显示,刀片刃角 B 对剪切力 F 影响显著,因素影响主次顺序为刀片刃角 B 、刀片厚度 A 和剪切速度 C ;刀片厚度 A 对剪切功 W 影响显著,因素影响主次顺序为刀片厚度 A 、刀片刃角 B 和剪切速度 C 。

运用Design-Expert软件对试验结果进行多元回归拟合,得到最优参数组合:刀片厚度 0.5 mm、刀片刃角 30° 、剪切速度 88.41 mm/min时,剪切力为 4.6 N、剪切功为 11.32 mJ。研究结果可为剪切式油茶花朵采摘装置的研发提供理论依据和数据支撑。

致谢:江西省林业局油茶研究专项项目(YCYJZX[2023]231号)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] YOU L, YU S Q, LIU H Y, et al. Effects of biogas slurry fertilization on fruit economic traits and soil nutrients of *Camellia oleifera* Abel[J]. PLoS one, 2019, 14(5): e0208289.

- [2] 孙婷婷,陈志清,钟瑾璟,等.基于挥发性成分定量预测风味茶油掺浸出茶油的偏最小二乘回归模型的建立[J].中国粮油学报,2022,37(12):251-258.
SUN T T, CHEN Z Q, ZHONG J J, et al. Establishment of partial least squares regression model for quantitative prediction of flavor *Camellia* oil adulterated with extracted *Camellia* oil based on volatile components[J]. Journal of the Chinese cereals and oils association, 2022, 37(12): 251-258.
- [3] 姚小华,王开良,任华东,等.油茶资源与科学利用研究[M].北京:科学出版社,2012:3-5.
YAO X H, WANG K L, REN H D, et al. The research on oil *Camellia* resources and its scientific utilization[M]. Beijing: Science Press, 2012: 3-5.
- [4] 王湘南,陈永忠,王瑞,等.油茶主栽品种的开花授粉习性[J].中南林业科技大学学报,2013,33(12):1-6.
WANG X N, CHEN Y Z, WANG R, et al. Flowering and pollinating specifications of *Camellia oleifera* cultivars[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2013, 33(12): 1-6.
- [5] 程钦华,徐奥文,任志华,等.江西10个主栽油茶品种花器特性与结实率研究[J].江西农业大学学报,2023,45(4):905-914.
CHENG Q H, XU A W, REN Z H, et al. Floral organ characteristics and fruiting rate of 10 main *Camellia oleifera* varieties in Jiangxi Province[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4): 905-914.
- [6] 李震,黄强,彭成涛,等.油茶授粉蜜蜂的培育与应用[J].江西农业大学学报,2023,45(4):944-951.
LI Z, HUANG Q, PENG C T, et al. Cultivation and application of *Camellia oleifera* pollination bees[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4): 944-951.
- [7] 万炜,韦小平,于瀛龙,等.蜜蜂授粉在贵州油茶产业发展中的应用[J].蜜蜂杂志,2020,40(10):7-10.
WAN W, WEI X P, YU Y L, et al. Application of honey bee pollination on *Camellia oleifera* in Guizhou Province[J]. Journal of bee, 2020, 40(10): 7-10.
- [8] 葛雅婷,赵文正,杨慧鹏,等.引入中华蜜蜂和地熊蜂授粉对油茶座果率的提升效果[J].中国蜂业,2022,73(3):60-62.
GE Y T, ZHAO W Z, YANG H P, et al. Enhancing fruiting rate of *Camellia oleifera* by introducing pollination by *Apis cerana cerana* and *Bombus terrestris*[J]. Apiculture of China, 2022, 73(3): 60-62.
- [9] 李忠英,赖曲芳,邓勇杰,等.齿梳式油茶花药采集器关键部件设计与试验[J].江西农业大学学报,2024,46(4):1037-1051.
LI Z Y, LAI Q F, DENG Y J, et al. Design and testing of key components of comb-type *Camellia oleifera* anther collector[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1037-1051.
- [10] 胡淑芬,曹昕奕,邓勇杰,等.植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J].农业工程学报,2023,39(20):92-100.
HU S F, CAO X Y, DENG Y J, et al. Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of *Camellia* [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(20): 92-100.
- [11] 刘德承,姚国琼,彭雪迪,等.不同授粉方式对岑溪软枝油茶家系林座果率的影响研究[J].林业调查规划,2023,48(4):188-190.
LIU D C, YAO G Q, PENG X D, et al. Effect of different pollination methods on fruit setting rate of *Camellia oleifera* Cenruan clone forest[J]. Forest inventory and planning, 2023, 48(4): 188-190.
- [12] 李翱翔.油茶高效液体授粉技术研究[D].长沙:中南林业科技大学,2023.
LI A X. Study on efficient liquid pollination technology of *Camellia oleifera* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [13] 徐安糠,陆欢欢,晏巧,等.油茶花粉液配方初探[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2021,38(6):129-136.
XU A K, LU H H, YAN Q, et al. Primary exploration on pollinating solution of *Camellia oleifera* [J]. Journal of Chongqing normal university (natural science), 2021, 38(6): 129-136.
- [14] 陈雅,袁德义,李葵,等.油茶“三华系列”花粉活力测定及花粉保存[J].江西农业大学学报,2020,42(1):118-126.
CHEN Y, YUAN D Y, LI K, et al. Viability determination and preservation of pollen of *Camellia oleifera* ‘Huashuo’、‘Huaxin’

- and ‘Huajin’[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(1):118-126.
- [15] 吴泽超,赵青,李骏,等.油茶花粉采集分离系统的设计与研究[J].制造业自动化,2023,45(6):98-102.
WU Z C,ZHAO Q,LI J,et al.Design and research of *Camellia* pollen collection and separation system[J].Manufacturing automation,2023,45(6):98-102.
- [16] 马雅倩.向天果和油茶花的功能成分研究[D].南昌:南昌大学,2019.
MA Y Q.Study on functional components of fruits of *Swietenia macrophylla* and flowers of *Camellia oleifera* Abel[D].Nanchang:Nanchang University,2019.
- [17] 金蒙.油茶副产物中油茶花提取物的美白功效及作用机制初探[D].杭州:浙江大学,2023.
JIN M.Preliminary study on the whitening effect of mechanism of *Camellia oleifera* flower extract from *Camellia oleifera* by-products[D].Hangzhou:Zhejiang University,2023.
- [18] 王荣炎,郑志安,鹿秀凤,等.梳齿往复式杭白菊采摘装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(12):73-79.
WANG R Y,ZHENG Z A,LU X F,et al.Design and test of comb-teeth reciprocating *Chrysanthemum morifolium* picking device[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2019,50(12):73-79.
- [19] 赵青,李立君,吴泽超,等.油茶花苞采集机械手的设计与试验[J].农机化研究,2025,47(1):46-53.
ZHAO Q,LI L J,WU Z C,et al.Design and test of manipulator for *Camellia oleifera* flower buds collecting[J].Journal of agricultural mechanization research,2025,47(1):46-53.
- [20] 吕辉,李立君,赵青,等.剪切式油茶花采摘末端执行器设计与实验[J].农机化研究,2024,46(4):134-139.
LYU H,LI L J,ZHAO Q,et al.Design and experiment of cutting end effector for *Camellia* picking[J].Journal of agricultural mechanization research,2024,46(4):134-139.
- [21] 郭宇辉,邓勇杰,胡淑芬,等.黄精须根剪切力学特性试验研究[J].江西农业大学学报,2025,47(1):193-204.
GUO Y H,DENG Y J,HU S F,et al.Experimental study on shear mechanical properties of fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(1):193-204.
- [22] 李宁,丁龙朋,王贤斐,等.枣树枝条剪切力学性能试验与分析[J].农机化研究,2023,45(9):136-142.
LI N,DING L P,WANG X F,et al.Experiment and analysis on shear mechanical properties of jujube branches[J].Journal of agricultural mechanization research,2023,45(9):136-142.
- [23] 王宏立,张伟,董晓威,等.玉米根茬剪切力学性能试验与分析[J].实验力学,2014,29(1):73-82.
WANG H L,ZHANG W,DONG X W,et al.Experiment and analysis of shear mechanical property of corn stubbles[J].Journal of experimental mechanics,2014,29(1):73-82.
- [24] 陈勇.利用中华蜜蜂为油茶授粉提高座果率关键技术探索[J].中国蜂业,2022,73(9):28-29.
CHEN Y.Exploration of key technologies for pollination of *Camellia oleifera* by using Chinese honey bees to improve fruit setting rate[J].Apiculture of China,2022,73(9):28-29.
- [25] 丁涛,姜毅,赵芷萱,等.油茶杂交子代群体花柱和花粉性状的遗传分析[J].森林与环境学报,2025,45(2):212-217.
DING T,JIANG Y,ZHAO Z X,et al.Genetic analysis of style and pollen traits in hybrid progeny populations of *Camellia oleifera*[J].Journal of forest and environment,2025,45(2):212-217.
- [26] 覃春朗.四个威宁短柱油茶优良单株的花器官特性及开花规律分析[J].南方农业,2025,19(1):18-22.
QIN C L.Analysis of floral characteristics and flowering patterns of four excellent individual plants of *Camellia brachystyla* in Weining[J].South China agriculture,2025,19(1):18-22.
- [27] 蔡坚,刘晓飞,刘喻娟,等.油茶花期观察及花粉萌发率影响因素研究[J].广东农业科学,2015,42(23):72-75.
CAI J,LIU X F,LIU Y J,et al.Observation of flowering and influence factors of pollen germination rate in *Camellia oleifera*[J].Guangdong agricultural sciences,2015,42(23):72-75.
- [28] 张鹏峰.基于显式动力学的柠条生材切割机理及试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2024.
ZHANG P F.Study on cutting mechanism and experiment of *Caragana korshinskii* raw material based on explicit dynamics[D].Hohhot:Inner Mongolia University of Technology,2024.
- [29] PHILLIP C J,CLAIRMONT L C,SUNIL K M,et al.Cutting energy characteristics of *Miscanthus × giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J].Biosystems engineering,2012,112(1):2-8.
- [30] 陈红,李孝贤,周少秀,等.柑橘化渣性量化指标参数优化及模型建立[J].农业工程学报,2025,41(1):330-338.

- CHEN H, LI X X, ZHOU S X, et al. Parameter optimization and modeling for the quantitative indicators of citrus mastication [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2025, 41(1): 330-338.
- [31] 廖培羽. 温州蜜柑果实化渣性及其影响因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- LIAO P Y. Study on the satsuma mandarin fruit mastication trait and its influencing factors [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [32] 陈立明. 荸荠去皮关键技术研究及装置设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- CHEN L M. Research of key technology and device design for peeling water chestnut [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [33] 陈兴烁. 车载式樟树叶采集机的研发[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- CHEN X S. Development of a vehicle mounted camphor leaf collecting machine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [34] 黄涛. 往复式葡萄剪枝机的设计与试验[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- HUANG T. Design and test of reciprocating grape pruning machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [35] 黄涛, 张佳喜, 王茂博. 往复式葡萄剪枝机关键部件的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(10): 126-132.
- HUANG T, ZHANG J X, WANG M B. Mechanism and test of key components of reciprocating grape pruning machine [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2022, 44(10): 126-132.
- [36] 贺智涛, 丁慧玲, 李健, 等. 秸秆切割问题研究综述[J]. 机械设计与制造, 2023(8): 277-284.
- HE Z T, DING H L, LI J, et al. Review of researches on stalk cutting [J]. Machinery design & manufacture, 2023(8): 277-284.

(责任编辑: 熊淑琪)



第一作者简介: 罗亦心, 在读硕士研究生, 主要从事现代农业装备研究。本科期间获2次三等奖学金, 参与撰写并授权专利2项, 研究生期间获1次三等奖学金, 参与科研项目1项, 参与撰写并授权专利1项。



通信作者简介: 赖曲芳, 高级实验师, 硕士, 主要从事现代农业装备研究。主持或参与省级以上项目13项, 发表学术论文20余篇, 授权专利20余项, 出版教材1部, 获得江西省教学成果二等奖1项, 江西农业大学教学成果一等奖3项。