

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.08.007

何梁, 薛龙, 曾瑜琦, 等. 莲蓬采摘末端执行器设计[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 38-42

He Liang, Xue Long, Zeng Yuqi, et al. Design on end-effector for picking lotus pods [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 38-42

莲蓬采摘末端执行器设计*

何梁¹, 薛龙¹, 曾瑜琦¹, 刘木华¹, 杨君², 黎静¹

(1. 江西农业大学工学院, 南昌市, 330045;
2. 农机智能控制与制造技术福建省高校重点实验室, 福建武夷山, 354300)

摘要:针对目前人工收获莲蓬效率低, 莲蓬机械化收获设备发展缓慢的问题, 对莲蓬采摘末端执行器进行设计。为确定莲蓬茎秆的相关力学参数, 以成熟期莲蓬茎秆作为试验材料, 使用质构仪对莲蓬茎秆进行剪切力学特性试验。试验表明, 剪切速度在500 mm/min以内时, 剪切速度、茎秆直径对莲蓬茎秆剪切强度影响不显著。剪切位置对莲蓬茎秆剪切强度影响最大, 剪切位置越靠近莲蓬, 所需要的剪切力越小。成熟莲蓬的茎秆剪断所需的剪切力为10.29~132.17 N, 剪切应力为0.20~2.71 MPa。由此确定莲蓬采摘末端执行器的最佳采摘范围及所需剪切力, 并根据试验结果设计莲蓬采摘末端执行器。采摘试验表明, 所设计的莲蓬夹持剪切装置的莲蓬剪切成功率为100%, 但由于莲蓬从末端执行器滑落, 导致整体采摘成功率为92%。

关键词:莲蓬茎秆; 采摘机器人; 力学特性; 末端执行器

中图分类号:S645.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2024)08-0038-05

Design on end-effector for picking lotus pods

He Liang¹, Xue Long¹, Zeng Yuqi¹, Liu Muhua¹, Yang Jun², Li Jing¹

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, 330045, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Machinery Intelligent Control and Manufacturing Technology of Fujian Education Institutions, Wuyishan, 354300, China)

Abstract: In view of the low efficiency of artificial harvesting and the slow development of mechanized harvesting equipment, the lotus picking end-effector was designed. In order to determine the mechanical parameters of lotus stem, the mechanical properties of lotus stem in mature stage were tested by texture instrument. The experiment indicated that when the shear speed was within 500 mm/min, the shear speed and stem diameter had no significant impact on the shear strength of lotus stem, while the shear position had the greatest influence on it. The closer the shear position was to the lotus pods, the smaller the shear force was required. The shear force required for stem cutting of mature lotus was 10.29-132.17 N, and the shear stress was 0.20-2.71 MPa. Then, the optimal picking range and the required shearing force of the lotus picking end-effector were determined, and the lotus picking end-effector was designed according to the test results. The results showed that the cutting success rate of the device was 100%, but the whole picking success rate was 92% because of the falling from the end-effector.

Keywords: lotus stem; picking robot; mechanical properties; end-effector

0 引言

莲是一种多年水生草本植物, 主要生长于池塘、沼

泽与湖泊之中。其中莲蓬为莲的花托, 其内部生长的莲子既可作为水果鲜食, 也可将莲子去皮、通芯、烘干, 制成的干莲子及莲芯, 可入药、煮食等, 具有极高的营

收稿日期: 2022年10月18日 修回日期: 2023年1月1日

* 基金项目: 武夷学院农机智能控制与制造技术福建省高校重点实验室开放课题(AMICM202202)

第一作者: 何梁, 男, 1998年生, 南昌人, 硕士研究生; 研究方向为农业机械化。E-mail: heliang_1106@163.com

通讯作者: 黎静, 女, 1978年生, 南昌人, 博士, 副教授; 研究方向为智能农机技术及装备。E-mail: lijing3815@163.com

养价值^[1,2]。莲的分布范围广阔,遍及亚洲和大洋洲,在我国的长江流域以及福建、浙江、江苏、江西等地区均有种植。莲子的口感清甜,营养价值高,深受消费者欢迎,市场前景开阔。以广昌为例,白莲的经济效益相对水稻高出37 500~52 500元/hm²^[3],成为了当地的特色经济作物,白莲产业逐渐形成并发展壮大,但采收作业成为了白莲生产过程中急需解决的问题。莲蓬生长环境复杂,成熟于8—9月^[4],目前仅能依靠人工下水收获,夏季高温高湿的工作环境下,收获劳动强度大,效率低,严重阻碍了白莲产业的进一步发展,因此迫切需要研发适合莲蓬的机械化采摘装置。

目前国内外学者对植物茎秆的力学特性进行了大量研究,涉及水稻^[5]、玉米^[6]、小麦^[7]、葱白、韭菜、葡萄等,但还未出现与莲蓬茎秆力学相关的研究。与水稻、玉米、小麦等作物不同,莲蓬成熟时期不一致,无法进行大面积统一收获。因此在收获作业时,需要将逐一判断莲蓬的成熟度,再将成熟的莲蓬从茎秆分离,完成采摘。含水率也是影响材料剪切性能的指标之一^[8],但本文研究对象为新鲜的成熟莲蓬(忽略水分流失情况),因此不考虑含水率对剪切力学特性带来的影响。本文对莲蓬茎秆进行力学特性试验,研究剪切速度、剪切位置、茎秆直径对莲蓬茎秆剪切特性的显著性关系,并根据试验结果,设计莲蓬采摘末端执行器,并通过试验验证可行性,为莲蓬机械化采摘装置的研发提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用的莲蓬于2022年7月31日下午5点采摘于江西省南昌市溪霞镇溪果农场。进行试验的60个成熟期莲蓬至少保留50 cm茎秆,保证茎秆无任何外力损伤。为避免莲蓬失水严重影响试验结果,在取样后的4 h内完成试验。

1.2 试验设备

试验用到的仪器为TMS-Pro质构仪,量程为0~1 000 N,精度为±1%,最大剪切速度500 mm/min。剪切装置由刀架、切刀及底座组成,其中剪切刀厚度为0.5 mm,双面刃口,刃口角度为15°;刀架固定好切刀后安装于质构仪末端,调整底座位置,使得切刀与底座缝隙对齐。刀架及底座均采用PLA材料3D打印制作,如图1所示。测量剪切位置所采用的工具为皮尺,分辨率为1 mm;测量茎秆直径所用的工具为数显游标卡尺,分辨率为0.01 mm。

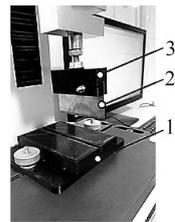


图1 剪切装置

Fig. 1 Shearing device

1. 底座 2. 切刀 3. 刀架

1.3 试验方法

如图2所示,为便于将样本平放在剪切台上,进行试验前将莲蓬与茎秆沿虚线位置分离。以虚线为起点,用皮尺按2 cm为间隔标记剪切点,得到A~E共5个剪切点,用游标卡尺测量每个剪切点的茎秆直径。最后将标记好的样本随机分为3组,每组20个样本。

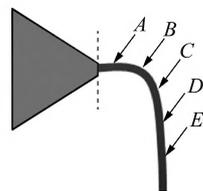


图2 标记剪切点

Fig. 2 Shearing points

为验证剪切速度对剪切力的影响,对3组样本分别设置了100 mm/min、300 mm/min和500 mm/min的剪切速度进行试验。首先将茎秆样本水平放置在剪切平台上,按照A~E的顺序进行剪切,进行剪切时,刀具匀速下降直到刀具将茎秆切断为止。剪切过程中数据采集软件以50 Hz的采集频率记录剪切数据,最后将数据导出通过软件SPSS 26.0进行数据分析。

2 结果与分析

分别以剪切速度(100 mm/min、300 mm/min和500 mm/min)、茎秆直径与剪切位置(A点~E点)作为自变量,最大剪切力为因变量进行回归分析,表1为对试验结果进行主体间效应检验结果。

表1 主体间效应检验

Tab. 1 Results of significance analysis

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	206 873.00	189	1 094.57	4.88	0
截距	406 116.34	1	406 116.34	1 810.11	0
剪切速度	352.88	2	176.44	0.79	0.46
茎秆直径	41 286.47	183	225.67	1.00	0.50
剪切位置	57 682.80	4	14 420.70	64.28	0
误差	24 679.64	110	224.36		
总计	728 612.38	300			
修正后总计	231 552.65	299			

检验结果中的 $R^2=0.89$,模型拟合良好,取显著性水平 $\alpha=0.05$ 。当 $P\leq\alpha$ 时,说明变量和因变量呈显著性,否则显著性较小。

2.1 剪切速度对最大剪切力的影响

3组剪切试验剪切速度分别是100 mm/min、300 mm/min和500 mm/min,每组包含20个样本,每个样本根据剪切点进行5次剪切。将每组样本在同一剪切点剪切时产生的最大剪切力取平均值,如图3所示。由图3可知,在不同速度下A、B、C三处剪切点产生的最大剪切力平均值相差不超过1 N,D、E两处不超过10 N。三个剪切速度在同一剪切点产生的最大剪切力的平均值相近,随着剪切速度的增加,最大剪切力平均值变化无相应变化趋势。并且表1中剪切速度的显著性 $P=0.46>\alpha$, $F=0.79$,进一步说明500 mm/min以内的剪切速度对最大剪切力无显著影响。剪切效率会对采摘效率造成直接影响,因此在实际生产收获中,应在保证最大剪切力的前提下,尽可能提高剪切速度。

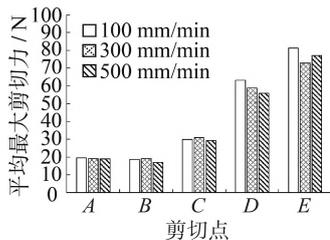


图3 平均最大剪切力与剪切速度对比

Fig. 3 Graph of relation between average maximum shear force and shear velocity

2.2 直径与最大剪切力的关系

由表1可知,茎秆直径的显著性 $P=0.50>\alpha$, $F=1$,说明剪切点的茎秆直径与最大剪切力相关性较小。根据式(1)可计算出切断茎秆所需的切应力。对于不同的剪切点,最大剪切力为132.17 N,最大剪切应力为2.71 MPa,

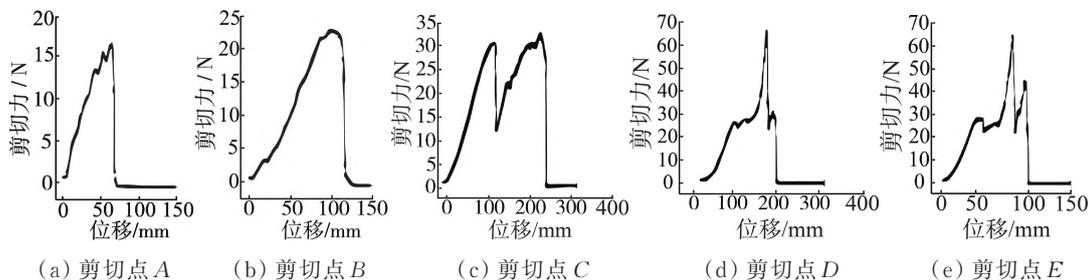


图4 各点典型剪切曲线

Fig. 4 Typical shear curves at various points

从图5(a)、图5(b)可以看出,从接触茎秆开始直接切入到茎秆内部,并未出现压缩茎秆的情况,原因是该段茎秆纤维素含量较少,抗剪切能力弱。从剪切点C开始,剪切曲线包含两个剪切阶段,从图5(d)、图5(e)可以看出,切刀在一开始并未切入茎秆内部,而是对茎秆进行压

最小剪切力仅10.29 N,最小剪切应力为0.20 MPa。

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2$$

式中: τ ——切应力;

d ——直径;

A ——面积;

F_s ——剪切点最大的剪切力;

S ——剪切面的面积。

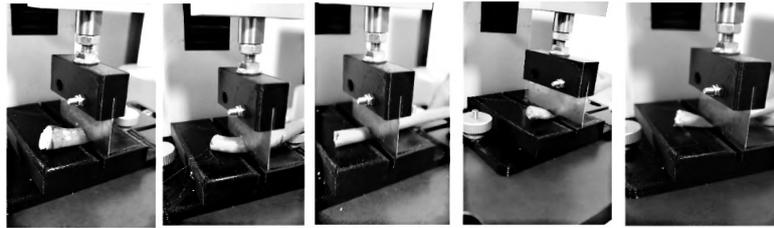
对60个样本进行统计发现,A~E剪切点出现最大剪切力的次数分别为0、0、2、18、40次,即同一截茎秆中最大剪切力普遍出现于D、E两点,A、B两点所需的剪切力小于D、E,因此可以选择A、B两点作为莲蓬机械化收获时优先考虑的采摘点。

2.3 剪切位置对最大剪切力的影响

由图3可知,A、B剪切点产生的最大剪切力相近。从剪切点B开始,随着剪切位置的推后,剪断茎秆所需要的剪切力也随之增加。从表1中剪切位置的显著性 $P=0<\alpha$, $F=46.28$,也说明剪切位置对最大剪切力影响较为显著。产生显著影响的原因是随着莲蓬的生长发育,莲蓬茎秆顶端部分持续分裂新的细胞,此时新生的细胞内部纤维素含量较少,远端茎秆部分的细胞逐渐失去分裂能力,细胞成熟度增加,维管组织含量升高,能为果实提供更大的支撑作用^[9]。所以由剪切点B到E,越后端的茎秆纤维素、维管组织等成分含量越高^[10],相比于前端茎秆,抗剪强度增加,韧性减小,并表现出一定脆性。

图4为A~E剪切点剪切时的典型曲线及现象,剪切曲线图4(a)、图4(b)有且仅有一个断崖式下降趋势,即当茎秆被剪断的一瞬间,茎秆对切刀的承载能力消失,剪切力下降至0 N。

从图5(a)、图5(b)可以看出,从接触茎秆开始直接切入到茎秆内部,并未出现压缩茎秆的情况,原因是该段茎秆纤维素含量较少,抗剪切能力弱。从剪切点C开始,剪切曲线包含两个剪切阶段,从图5(d)、图5(e)可以看出,切刀在一开始并未切入茎秆内部,而是对茎秆进行压缩,此时剪切力处于上升阶段。压缩到极限时,茎秆上半部分截面表皮被破坏,切刀切入茎秆内部,此时剪切力出现了第1次下降。随着剪切的进行,茎秆内部纤维组织继续提供承载能力,剪切力略微提升,到达极限后被完全剪断,此时剪切力出现第2次下降,如图4(d)、图4(e)所示。



(a) 剪切点 A (b) 剪切点 B (c) 剪切点 C (d) 剪切点 D (e) 剪切点 E

图 5 各点典型剪切现象

Fig. 5 Typical shear phenomena at various points

3 末端执行器设计与试验

3.1 末端执行器设计

为进一步验证结论,基于Creo6.0设计了莲蓬夹持剪切装置,如图6所示。由于剪切点A和剪切点B平均最大剪切力小于20 N,因此选用MHZL2-25D型气缸手指作为动力源,夹持力最大为104 N,详细参数如表2所示。

末端执行器所用剪切刀片是与本文力学特性试验的剪切刀片相同,剪切刀厚度为0.5 mm,双面刃口,刃口角度为15°。剪切刀片通过螺栓与剪切手指A固定,同时在剪切手指B侧设计有嵌刀槽,保证气缸手指闭合时能够完全剪断莲蓬茎秆。剪切刀片的剪切宽度范围为36 mm,为了提高容错率,剪切手指A、B设计了如图6(a)所示的倒三角形缺口,增加采摘范围至74.8 mm,以至于莲蓬夹持剪切装置向下运动时,尽可能将莲蓬茎秆送入剪切范围。经测量统计的莲蓬茎秆直径平均值为8.3 mm。如图6(c)所示,当莲蓬夹持剪切装置完全闭合时,夹持元件A和夹持元件B的间距为7 mm,略小于莲蓬茎秆平均直径,从而对莲蓬茎秆进行压缩,实现莲蓬夹持。



(a) 莲蓬夹持剪切装置 (b) 剪切面示意图 (c) 夹持面示意图

图 6 莲蓬夹持剪切装置

Fig. 6 Lotus pods picking end-effector

- 1. 剪切手指 B 2. 夹持元件 B 3. 气缸手指 4. 剪切刀片
- 5. 夹持元件 A 6. 剪切手指 A

表 2 MHZL2-25D 气缸手指相关参数

Tab. 2 Relevant parameters of MHZL2-25D cylinder finger

参数	数值
气压范围/MPa	0.1~0.7
最大夹持力/N	104
开闭行程/mm	22
重复精度/mm	±0.01

3.2 莲蓬采摘试验

为了分析设计的莲蓬采摘末端执行器可行性,使用PLA材料3D打印制作了夹持剪切装置,用于安装剪切刀片以及夹持元件,随后进行了如图7所示的莲蓬剪切试验。剪切刀片安装示意图如图7(b)所示,图7(c)为莲蓬夹持元件,用于夹持住剪下的莲蓬,待下一步运输。在进行剪切试验时,保证剪切执行装置剪切范围始终在A、B点附近。



(a) 莲蓬采摘示意图 (b) 剪切面 (c) 夹持面

图 7 剪切试验示意图

Fig. 7 Shear test

75次采摘试验中,75个莲蓬被成功剪切,剪切成功率为100%,所设计的剪切装置能够很好地实现莲蓬剪切。但其中有6个莲蓬从夹持剪切装置滑落,综合采摘成功率为92%。产生夹持失败的原因是夹持元件材料为PLA材料打印而成,在进行夹持时,不能适应不同直径的莲蓬茎秆,对于较细的茎秆,夹持元件提供的摩擦力不足,导致莲蓬滑落。当替换成柔性材料时,会对茎秆的夹持效果有所提升,在以后的研究中,将会对其更进一步研究。

4 结论

通过对成熟莲蓬茎秆的剪切试验,结合试验数据和剪切时茎秆呈现的现象,分析成熟莲蓬茎秆在剪切过程中所受剪切力与剪切速度、茎秆直径以及剪切位置的关系。

1) 剪断茎秆所需的最大剪切力与剪切速度和茎秆直径无显著性影响,但随着剪切点的推后,剪断茎秆所需的最大剪切力也随之增加,引起最大剪切力变化的原因是不同剪切点内的组织结构的含量不同。

2) 计算得出成熟莲蓬茎秆剪断所需要的剪切力为10.29~132.17 N,剪切应力为0.20~2.71 MPa。确定最小剪切力普遍出现在A、B两点范围附近,因此

该范围为成熟莲蓬的最适宜采摘点,由此可为莲蓬机械化采摘装置的研发提供参考。

3) 根据莲蓬茎秆力学特性试验结果设计一种莲蓬采摘末端执行器,通过对75个莲蓬的采摘试验表明,本文所设计的莲蓬夹持剪切装置的莲蓬剪切成功率为100%,但由于莲蓬从末端执行器滑落,导致整体采摘成功率为92%。

参 考 文 献

- [1] 王宇良, 韩舜羽, 赵文红, 等. 红白莲蓉中营养成分及风味物质的分析[J]. 食品工业, 2022, 43(5): 282—287.
Wang Yuliang, Han Shunyu, Zhao Wenhong, et al. Analysis of nutritional components and flavor substances in red and white lotus seed [J]. The Food Industry, 2022, 43(5): 282—287.
- [2] Dhull S B, Chandak A, Collins M N, et al. Lotus seed starch: A novel functional ingredient with promising properties and applications in food: A Review [J]. Starch-Stärke, 2022, 74(9—10): 2200064.
- [3] 王思博, 李冬冬, 徐金星. 特色经济作物绿色生产效率影响因素及传导路径——以广昌县白莲绿色化种植为例[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2019, 20(5): 14—23.
Wang Sibao, Li Dongdong, Xu Jinxing. Influencing factors and conducting path of green production efficiency of characteristic economic crops: Taking the green planting of white lotus in Guangchang County as an example [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences), 2019, 20(5): 14—23.
- [4] 肖义芳. 黄陂地区籽莲种苗繁育技术[J]. 南方农业, 2017, 11(5): 19—23.
- [5] Tang Zhong, Liang Yaquan, Wang Meilin, et al. Effect of mechanical properties of rice stem and its fiber on the strength of straw rope [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 180: 114729.
- [6] Al-Mitewty M I, Yahya A, Razif M, et al. Physical and mechanical properties of sweet corn plant [J]. Agricultural Engineering International the Cigr E Journal, 2020.
- [7] 贺洁, 孙少光, 葛昌斌, 等. 不同小麦品种(系)茎秆显微结构、生化组分与茎秆强度的关系[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 68—76.
He Jie, Sun Shaoguang, Ge Changbin, et al. Relationship between stem microstructure, biochemical composition and stem strength of different wheat varieties (lines) [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(1): 68—76.
- [8] Chen J, Zhao N, Fu N, et al. Mechanical properties of hullless barley stem with different moisture contents [J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(1—2).
- [9] 周海宇, 江禹奉, 杨明冲, 等. 玉米茎秆强度与维管束数目及纤维含量的关系和评价[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(6): 1636—1643.
Zhou Haiyu, Jiang Yufeng, Yang Mingchong, et al. Relationship and evaluation of stalk strength, vascular bundle and fiber content in maize [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(6): 1636—1643.
- [10] 李洋, 王敏, 温宝琴, 等. 基于灰色关联理论的甘草茎秆力学特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 72—78.
Li Yang, Wang Min, Wen Baoqin, et al. Experimental study on the mechanical properties of Glycyrrhiza glabra stem on the grey correlation theory [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 72—78.
- [11] Monarca D, Cecchini M, Antonelli D. Modern machines for walnut harvesting [J]. Acta Horticulturae, 2006, 705: 505.
- [12] 乔园园, 牛长河, 孟详金, 等. 牵引式林果振动采收机的设计与田间试验[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(3): 528—534.
Qiao Yuanyuan, Niu Changhe, Meng Xiangjin, et al. Design of traction type fruit harvest machine and its experimental research in fields [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2015, 52(3): 528—534.
- [13] 类成朋, 王志坤, 王爱波. 核桃采摘机械手的创新设计[J]. 山西电子技术, 2018(1): 9—10.
- [14] 刘威, 王舜, 岳涛涛, 等. 全自动核桃采摘装置[J]. 农业技术与装备, 2017, 327(3): 69—72.
- [15] 赵嘉辉, 张耀中, 夏志鹏, 等. 山核桃采收一体无人机设计构想与矛盾分析[J]. 南方论坛, 2022, 53(15): 40—44.

(上接第7页)

- [8] 牛长河, 王学农. 可移动式果实收集装置的设计[J]. 新疆农机化, 2011(1): 33—34.
- [9] 杜小强, 李党伟, 王丹, 等. 小型侧翼折展式林果收集装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 11—17.
Du Xiaoqiang, Li Dangwei, Wang Dan, et al. Design and experiment on small fruit collecting device with flank deployable and foldable mechanisms [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 11—17.
- [10] Sumner H R, Churchill D B. Collecting and handling mechanically removed citrus fruit [C]. Proc. Int. Soc. Citriculture, 1977, 2: 413—418.
- [11] Monarca D, Cecchini M, Antonelli D. Modern machines