

王洪昌, 杜弟壮, 潘睿, 等. 不同成熟度莲蓬组织力学特性试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 249-258.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.025

不同成熟度莲蓬组织力学特性试验

王洪昌^{1,2}, 杜弟壮¹, 潘睿¹, 任泽栩¹, 张国忠^{1,2}, 曾荣^{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

摘要 为探究鲜莲蓬破蓬脱粒方式, 以实现高效低损机械化莲籽脱蓬, 以太空莲为研究对象, 对不同成熟度莲蓬开展含水率、外观特征及力学特性试验研究, 重点探究剪切、拉伸以及穿刺3种加载方式下莲蓬组织的破坏规律。结果表明, 莲蓬中莲籽含水率最高, 莲蓬表皮含水率最低, 且随着莲蓬含水率降低, 莲蓬表皮含水率下降最明显; 莲蓬表皮剪切与拉伸表现为明显各向异性, 加载方式对剪切及拉伸破裂力影响较大; 随着成熟度的增加, 莲蓬表皮横剪破裂力与轴向拉伸破裂力逐渐增大, 分别从13.32 N增至21.91 N、13.70 N增至37.38 N, 纵剪破裂力与横向拉伸破裂力无明显变化; 加载速度对莲蓬表皮剪切及拉伸破裂力无显著影响; 纤维组织完熟期平均拉伸破裂力最大, 约为17.19 N, 乳熟期与蜡熟期平均拉伸破裂力相差不大, 加载速度对纤维组织拉伸破裂力无显著影响; 莲蓬蓬面与表皮穿刺破坏不受各向异性的影响, 随着成熟度的增加, 蓬面穿刺破裂力逐渐减小, 表皮穿刺破裂力逐渐增大; 随着探头直径的增大, 蓬面穿刺破裂力与表皮穿刺破裂力均增大, 其最大值分别为21.60、32.05和39.25 N; 表皮加载破裂力影响为加载方式>成熟度>加载速度。综合上述力学特性分析结果可知, 可先施加穿刺载荷, 再施加拉伸破裂力实现撕扯式破蓬。

关键词 莲蓬; 力学特性; 成熟度; 加载方式; 加载速度

中图分类号 TS254.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0249-10

莲籽为睡莲科植物的种子, 含有多种有益于人体健康的成分, 具有较高食用价值、营养价值与药用价值^[1-3], 在我国湖北、江西、江苏等地区广泛种植^[4-5]。鲜食莲籽口感脆甜爽口、回味清香, 可深加工莲籽汁、莲籽酒、莲籽乳、莲籽罐头等副产品, 深受国内外消费者的青睐, 极具经济价值^[6-8]。但鲜食莲籽的获取仍需要人工进行处理, 劳动力需求量大, 人工成本高, 严重制约鲜食莲籽加工产业的发展^[9-10]。因此, 实现鲜食莲籽脱蓬作业机械化对于提高生产率、降低劳动强度、提升莲籽产业价值具有重要意义。

农作物物料特性的研究对其相关机具的设计加工有着重要意义^[11-14]。侯群喜等^[15]为研制针对乳熟期与蜡熟期新鲜莲籽脱壳技术与装备, 对不同成熟度莲籽力学特性进行了测定。马秋成等^[16]为研制莲籽壳仁分离设备, 对莲籽物料的风选技术进行研究, 确定了合适的莲籽壳仁分离气流速度范围。陈红等^[17]为实现高剥净率、低破损率机械化柑橘果皮分

离, 通过自制试验平台探究了柑橘果皮分离过程中不同加载条件对拉力以及分离位移的影响。李小强等^[18]为研制甘蓝收获装置, 以切割方式、切割刀片形式、切割速度和切割位置为因素展开切割单因素及正交试验, 获得较优切割方案, 为切割器的设计和安装提供了理论依据。张龙唱等^[19]通过对不同品种棉花展开拉伸分离试验, 探究了棉花拉伸分离特性, 揭示了铃壳物理参数对机采棉采摘力学特性的影响规律。

莲蓬组织对莲蓬具有保护、支撑、输送养分的作用, 是莲籽脱粒过程中首先需要破坏的部分, 其力学特性是影响破蓬脱粒机械设计的重要参数和依据, 需要根据其力学特性探究合适的破蓬脱粒机制, 以此确定适合的外载荷和加载方式。目前针对鲜莲蓬组织力学特性的研究鲜有报道。因此, 开展不同成熟度莲蓬组织力学特性研究对研制鲜食莲籽脱粒机械装备有着重要意义。

为探究适合鲜食莲蓬破蓬脱粒的加载方式, 本

收稿日期: 2024-12-06

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202218); 国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02)

王洪昌, E-mail: wanghc84@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 曾荣, E-mail: zengrong@mail.hzau.edu.cn

研究以太空莲为研究对象,对莲蓬组织开展剪切、拉伸以及穿刺等力学特性试验,在探究莲蓬各组织力学特性的同时对比莲蓬组织在不同加载条件下的破坏状态,为鲜食莲籽最佳脱粒方式的确定以及鲜食莲籽脱粒机械的设计提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验样品选用产自湖北省洪湖市的同一批次太空莲莲蓬,根据不同成熟度莲蓬划分标准,挑选3种分别为乳熟期、蜡熟期和完熟期的莲蓬若干,如图1所示,挑选外形完整、无病虫害的新鲜莲蓬作为试验样本。因新鲜莲蓬较易因呼吸作用发生褐变、腐坏等情况^[20-21],在试验过程中,将莲蓬用密封袋密封后放至冰箱4℃保鲜室储存。

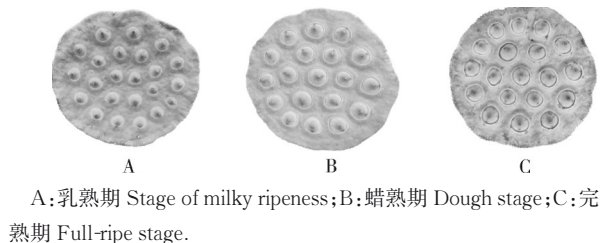


图1 不同成熟度莲蓬示意图

Fig.1 Schematic diagram of lotus seedpod at different maturity

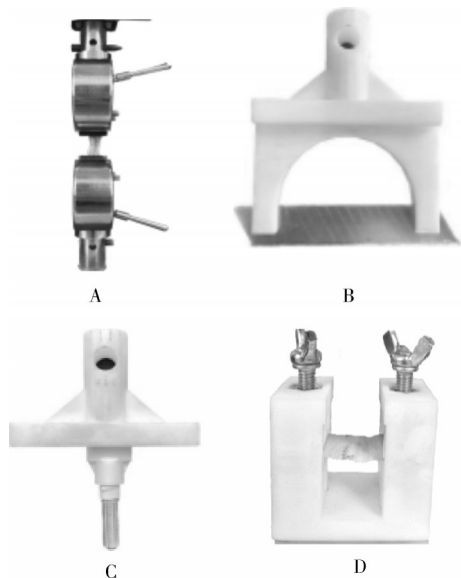
1.2 试验仪器

所用仪器设备包括:深圳市瑞格尔仪器有限公司生产的RG-M3005型万能材料试验机,实现对物料的拉伸、压缩及剪切等试验;浙江赛德仪器设备有限公司生产的SDH-1202快速卤素水分测定仪,精度为0.002 g;艾瑞泽公司生产的数字显示电子游标卡尺,精度为0.01 mm;裁剪刀和3D打印的夹具等。

本研究通过拉伸、剪切以及穿刺试验来探究不同成熟度莲蓬组织力学特性。拉伸试验使用万能试验机配套的拉伸夹具,内侧为锯齿形橡胶条,可增大对物料的夹紧力,如图2A所示;剪切试验所用刀具为美工刀,使用3D打印的夹具固定在万能试验台上,如图2B所示;穿刺试验所用探头同样使用3D打印的夹具固定在万能试验台上,如图2C所示;莲蓬组织夹具如图2D所示。

1.3 试验方法

1)莲蓬组织含水率测定。随机选取乳熟期、蜡熟期和完熟期莲蓬各15颗,每3颗莲蓬为1组,每个成熟度测5组。将莲蓬用工具刀裁开,莲蓬组织主要



A:拉伸夹具 Tensile fixtur;B:剪切刀具 Shearing tool;C:穿刺探头 Puncture probe;D:表皮夹具 Epidermis fixture.

图2 试验用具

Fig.2 Test equipment

由莲蓬蒂、绿色莲蓬表皮、芯部絮状纤维组织、莲籽(莲籽心、莲仁、莲壳)、蓬面等组成,如图3所示。选取3颗莲蓬的同一组织放入快速卤素水分测定仪进行测定,为使测定结果更加精准,使组织均匀充分受热,将各部分均裁成薄片。快速卤素水分测定仪温度设定为105℃,测定完毕仪器自动停止加热,记录试验数据,最后求取平均值。

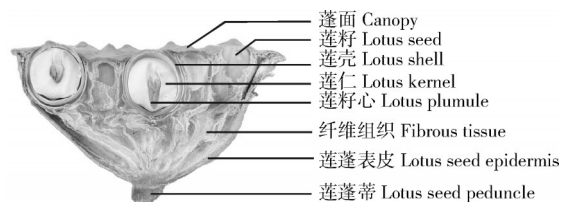


图3 莲蓬结构图

Fig.3 Structure diagram of lotus seed

2)莲蓬外形尺寸测定。随机选取不同成熟度莲蓬各30颗,采用数显式电子游标卡尺分别测量莲蓬的蓬面直径与蓬高(蓬面至蒂部的尺寸),每颗莲蓬测量3次并求平均值;计算蓬面直径与蓬高比值,记为蓬高比,见式(1),以此反映莲蓬饱满程度;每颗莲蓬随机测量3颗莲籽所在的孔径尺寸,计算其平均值,以此反映不同成熟度莲蓬的蓬面特征。

$$i = \frac{d}{h} \quad (1)$$

式(1)中, i 为蓬高比; d 为蓬面直径,mm; h 为蓬高,mm。

3)莲蓬表皮剪切特性测定。莲蓬表皮对莲蓬主

要起到保护作用,鲜莲蓬脱粒过程中对其进行有效破坏是关键步骤,因此选取莲蓬表皮对其力学特性进行针对性研究。将莲蓬表皮裁剪为长 40 mm、宽 10 mm 的矩形,两端粘有医用胶带便于夹具夹持,避免在剪切过程中滑动,并避免夹持部位出现损伤。为探究成熟度、加载方式及加载速度对莲蓬表皮剪切破裂力的影响规律,开展单因素试验。加载速度为 10、20、30 mm/min;成熟度为乳熟期、蜡熟期、完熟期;加载方式为横向剪切(垂直于纤维生长的方向)与纵向剪切(平行于纤维生长的方向)。受生长环境影响,莲蓬个体差异较大,试验样本选取相同成熟度下不同莲蓬个体,每个试验水平重复 10 次,取平均值。

为探究不同条件下莲蓬表皮剪切破坏方式最优组合,以成熟度、加载方式、加载速度为因素展开三因素四水平正交试验,选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,各因素水平如表 1 所示。

表 1 莲蓬表皮剪切特性试验因素水平表
Table 1 Test factor for shear characteristics of lotus seed-pod surface

水平 Level	A 成熟度 Maturity	B 加载方式 Loading method	C 加载速度/ (mm/min) Loading speed
1	乳熟期 Milky-ripe stage	纵向剪切 Longitudinal shear	10
2	蜡熟期 Dough stage	横向剪切 Transverse shear	20
3	完熟期 Full-ripe stage	—	30

4)莲蓬组织拉伸特性测定。莲蓬芯部絮状纤维组织均为单向生长,纤维间仅靠极薄组织连接,前期预试验结果表明,纤维组织的破坏形式主要以撕扯而非剪切,其拉伸特性更为重要,因此对纤维组织和表皮分别进行单因素拉伸试验,纤维组织拉伸方向为顺着纤维生长的方向;莲蓬表皮的加载方式为轴向拉伸(方向平行于纤维)与横向拉伸(方向垂直于纤维);莲蓬成熟度和加载速度与剪切试验相同。

为探究不同条件下莲蓬组织拉伸破坏方式最优组合,以成熟度、加载方式、加载速度为因素展开三因素四水平正交试验,选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,各因素水平见表 2。

5)莲蓬组织穿刺特性测定。鲜莲蓬脱粒作业时,蓬面和表皮与作业部件均会产生接触,及在外力作用下发生穿透作用,因此,选取蓬面和表皮 2 种莲蓬组织进行穿刺特性研究。

表 2 莲蓬组织拉伸特性试验因素水平
Table 2 Test factors for tensile properties of lotus seedpod tissue

水平 Level	A 成熟度 Maturity	B 加载方式 Loading method	C 加载速度/ (mm/min) Loading speed
1	乳熟期 Milky-ripe stage	横向拉伸 Transverse tensile	10
2	蜡熟期 Dough stage	轴向拉伸 Axial tensile	20
3	完熟期 Full-ripe stage	—	30

蓬面穿刺试验所用样本为含莲籽的完整蓬面,即沿蓬面与蓬身表皮连接处去除莲蓬下部及芯部絮状纤维组织。将蓬面部分放置于夹具上方,夹具上部台面留有 50 mm 圆孔便于穿刺过程中探头穿过,穿刺探头置于中心莲籽上方,以 20 mm/min 进行加载,探究成熟度及探头直径对穿刺破裂力的影响规律。每种试验条件下 5 次重复,取平均值。

莲蓬表皮穿刺试验样本长 40 mm、宽 40 mm,表皮两端粘有医用胶带便于夹具夹持,避免在试验过程中表皮滑动,并避免表皮在夹持部位出现损伤,以 20 mm/min 进行加载,探究成熟度及探头直径对穿刺破裂力的影响规律。每种试验条件下 5 次重复,取平均值。

2 结果与分析

2.1 莲蓬各组织含水率

乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽含水率分别为 80.77%、71.78% 和 57.20%,芯部絮状纤维组织含水率分别为 78.60%、76.35% 和 64.24%,表皮组织含水率分别为 77.71%、73.64% 和 53.69%。由结果可知,随着成熟度的增加,莲蓬各部分组织含水率均呈现下降趋势,其中表皮组织处于最外侧,组织逐渐木质化,其含水率变化最大;芯部絮状纤维组织处于内部,且作为莲蓬水分输送组织,含水率变化最小。上述结果表明,乳熟期、蜡熟期莲籽因含水率高且变化小,表皮含水率相对较低,使得在脱蓬时破坏表皮的同时易造成莲籽损伤,需选择合适的破蓬方式。

2.2 莲蓬外形尺寸

莲蓬外形尺寸测试结果如表 3 所示,乳熟期、蜡熟期及完熟期莲蓬蓬面直径均值分别为 85.51、88.47 和 98.66 mm,蓬高均值分别为 53.33、52.19 和 52.90

mm,蓬高比分别为1.61、1.70和1.87。随着成熟度的增加,莲籽逐渐饱满,蓬面直径逐渐增大,蓬高尺寸主要集中在52~53 mm,无较大的变化,莲蓬外形逐渐饱满;莲籽孔径也逐渐变大,蜡熟期莲籽与蓬面逐渐开始出现缝隙,完熟期部分莲籽开始松动,甚至少数发生脱落。

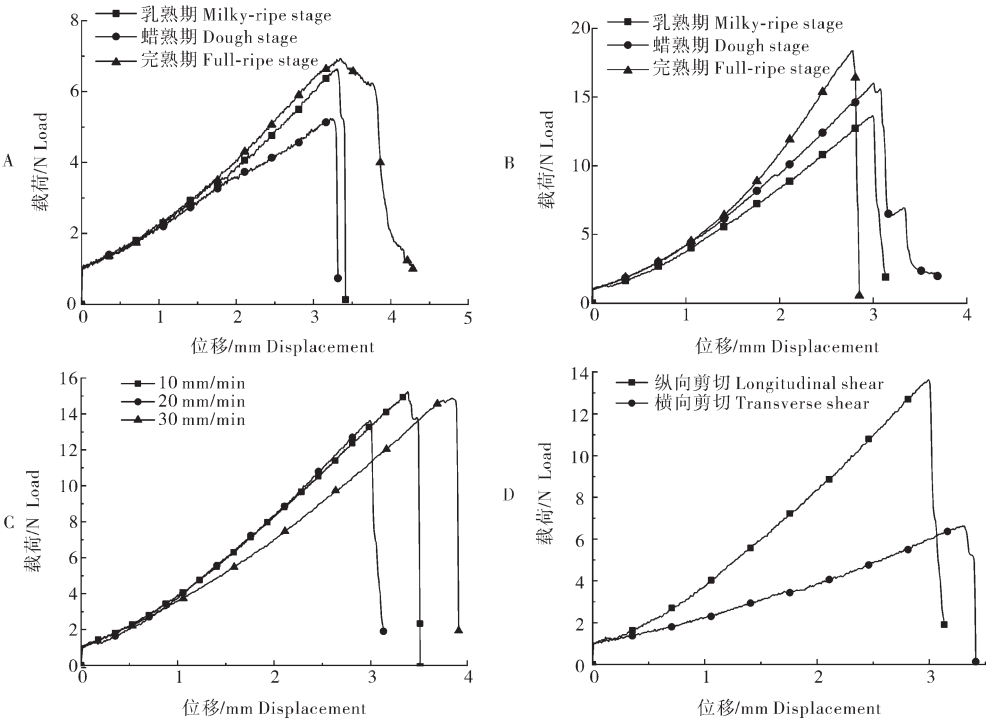
表 3 莲蓬外形尺寸参数

Table 3 Dimensions parameters of lotus seedpod								
成熟度 Maturity	蓬面直径/mm Canopy diameter		蓬高/mm Lotus canopy height		直径与蓬高比值 Diameter-to-height ratio		莲籽孔径/mm Lotus seed aperture	
	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation
乳熟期 Milky-ripe stage	85.51	6.13	53.33	3.39	1.61	0.13	8.12	0.60
蜡熟期 Dough stage	88.47	5.26	52.19	3.83	1.70	0.16	10.49	0.64
完熟期 Full-ripe stage	98.66	8.07	52.90	5.48	1.87	0.27	12.01	0.65

2.3 莲蓬表皮剪切特性

莲蓬表皮剪切单因素试验结果如图4所示,剪切载荷-位移曲线可分为2个阶段:类弹性阶段与断裂阶段。在类弹性阶段,随着载荷位移增大,载荷呈近线性增加,载荷与位移的关系近似为线性关系,此阶段表皮组织主要发生弹性变形;随着外载荷增加至一定值后迅速下降,此时表皮发生断裂,对应的载荷即为剪切破裂力。

由图4A可知,加载方式为纵剪,加载速度为20 mm/min时,随着成熟度的不断增加,纵剪破坏载荷无较明显变化趋势,其平均值分别为6.12、5.01和7.33 N,分析原因可能为成熟度的变化对组成表皮的纤维组织间的连接无较大影响;由图4B可知,加载方式为横剪,加载速度为20 mm/min时,随着成熟度的不断增加,横剪破坏载荷逐渐增大,其平均值分别为13.32、15.37和21.91 N,原因可能为随着成熟度的



A:不同成熟度表皮纵剪载荷位移曲线 Longitudinal shear load displacement curve of epidermis with different maturity;B:不同成熟度表皮横剪载荷位移曲线 Transverse shear load displacement curves of epidermis with different maturity;C:不同加载速度表皮横剪载荷位移曲线 Transverse shear load displacement curves of epidermis with different loading speed;D:不同加载方式表皮剪切载荷位移曲线 Shear load displacement curves of epidermis with different maturity.

图 4 莲蓬表皮剪切单因素试验结果

Fig.4 Results of single factor test on epidermal shear of lotus seedpod

增加,莲蓬表皮的纤维组织逐渐发生木质化,木质化后的纤维承载能力增加,抗剪切能力增强,纤维的木质化主要发生在蜡熟期与完熟期阶段,故横剪破坏载荷急剧增加。由图 4C 可知,加载方式为横剪,成熟度为蜡熟期,随着加载速度的变化,横剪破坏载荷无较明显变化,说明加载速度对横剪破坏影响不显著。由图 4D 可知,由于莲蓬表皮沿水平方向仅靠外表皮组织层连接,无水平生长纤维,故横向剪切破坏载荷大于纵向剪切破坏载荷,纤维为主要承力部分。

为探究不同条件下莲蓬表皮剪切破坏方式最优组合以及各因素对表皮剪切破坏力的影响规律,开展三因素四水平正交试验,试验结果如表 4 所示。

表 4 莲蓬表皮剪切特性正交试验设计与结果

Table 4 Design and results of orthogonal experiment of epidermal shear characteristics of lotus seedpod

序号 Serial number	A 成熟度 Maturity	B 加载方式 Loading method	C 加载速度/ (mm/min) Loading speed	剪切破裂力/ N Shearing force
1	1	1	1	5.48
2	1	2	2	13.33
3	1	2	3	14.59
4	2	1	2	6.14
5	2	2	3	11.87
6	2	2	1	12.28
7	3	1	3	9.45
8	3	2	1	16.28
9	3	2	2	21.93
k_1	9.79	7.02	13.74	
k_2	8.76	15.05	16.19	
k_3	14.55	—	14.36	
R	5.79	8.02	2.45	

由极差分析可知,加载方式对表皮剪切破裂力影响最大,其次是成熟度,最小是加载速度。由表 5 可知,加载方式对剪切破裂力有显著影响,综合极差与方差分析结果,各因素对拉伸破裂力的影响由大到小依次为加载方式、成熟度及加载速度。不同成熟度莲蓬表皮均在纵剪的加载方式下以 10 mm/min 的加载速度实现较小外载荷的剪切破坏,蜡熟期表皮在此条件下剪切破裂力最小。

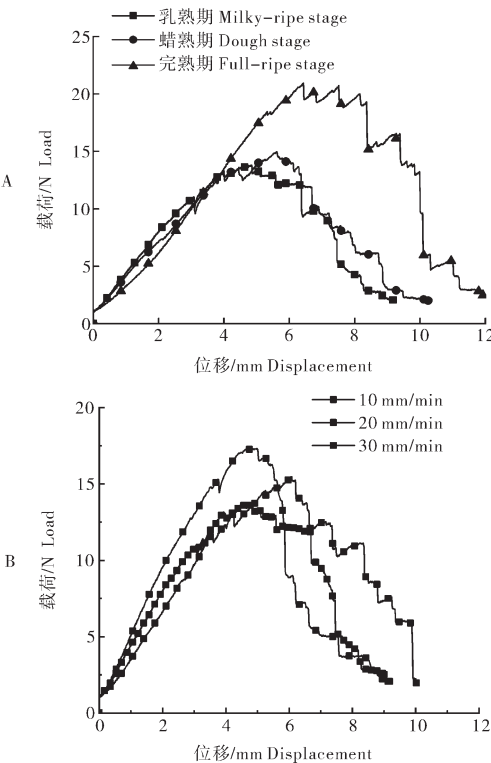
2.4 莲蓬组织拉伸特性

1)纤维组织拉伸特性。纤维组织拉伸单因素试验结果如图 5 所示,拉伸载荷-位移曲线表现为 2 个阶段:类弹性阶段与屈服断裂阶段。在类弹性阶段,

表 5 莲蓬表皮剪切特性正交试验方差分析

Table 5 Variance analysis of orthogonal experiment of epidermal shear characteristics of lotus seedpod

源 Source	Ⅲ类平方和 Ⅲ square sum	自由度 Degrees of freedom	F	显著性 Significance
A 成熟度 Maturity	57.25	2	7.23	
B 加载方式 Loading method	128.76	1	32.54	*
C 加载速度 Loading speed	9.72	2	1.23	
误差 Inaccuracies	11.87	3		



A:不同成熟度纤维组织拉伸载荷位移曲线 Tensile load displacement curve of fiber tissues with different maturity; B:不同加载速度纤维组织拉伸载荷位移曲线 Tensile load displacement curve of fiber tissue with different loading speed .

图 5 莲蓬纤维组织拉伸单因素试验结果

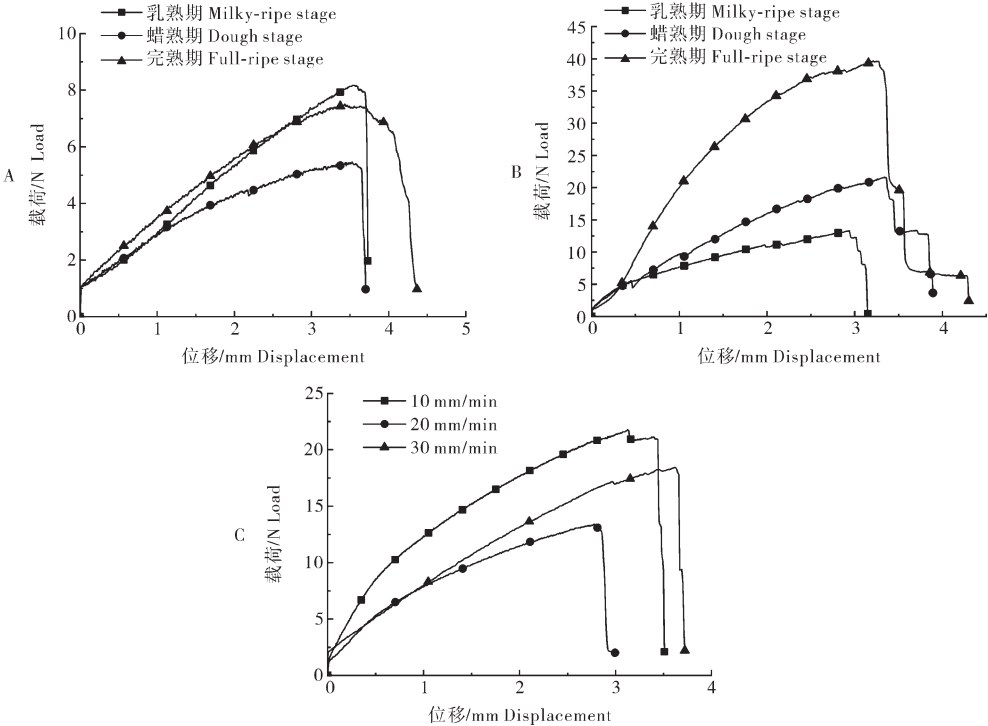
Fig.5 Results of tensile single factor test of fiber tissue

主要发生弹性变形,载荷与位移近似为线性关系;随着外载荷增加至一定值,进入较复杂的屈服断裂阶段,载荷-位移曲线表现为锯齿状,纤维组织逐渐发生断裂,载荷在波动中逐渐减小,在此阶段弹性变形与塑性变形同时发生,塑性变形为主要变形方式。对于纤维组织拉伸试验,完熟期平均拉伸破裂力最大,约为 17.19 N,乳熟期与蜡熟期平均拉伸破裂力相差不大,分别为 13.26、14.31 N,纤维组织主要作用

为向莲籽输送水分与养分,在蜡熟期后纤维组织发生老化,抗破坏能力增强;加载速率对其无较大影响。

2)莲蓬表皮拉伸特性。莲蓬表皮组织拉伸单因

素试验结果如图6所示,表皮的拉伸载荷-位移曲线可分为类弹性阶段与断裂阶段。在类弹性阶段随着外载荷增加至一定值,外载荷迅速下降,此时表皮发生断裂,对应的载荷即为拉伸破坏力。



A:不同成熟度表皮横向拉伸载荷位移曲线 Transverse tensile load displacement curve of epidermis with different maturity;B:不同成熟度表皮轴向拉伸载荷位移曲线 Axial tensile load displacement curve of epidermis with different maturity;C:不同加载速度表皮轴向拉伸载荷位移曲线 Axial tensile load displacement curve of epidermis with different speed .

图6 莲蓬表皮拉伸单因素试验结果

Fig.6 Results of tensile single factor test of epidermis

由图6A可知,横向拉伸时,乳熟期和完熟期破坏载荷无较明显差别,分别为8.09、8.74 N,而蜡熟期破坏载荷明显小于乳熟期和完熟期,为5.89 N;由图6B可知,不同成熟期轴向拉伸破坏载荷差别较大,分别为13.70、22.08、37.38 N,分析原因可能为莲蓬表皮的纤维组织生长方向为纵向,随着成熟度的增加,纤维逐渐发生木质化,木质化过程主要发生在蜡熟期与完熟期之间,木质化后的纤维组织承力能力大大增加,故轴向最大拉伸破坏载荷急剧增加,而表皮无横向纤维,横向仅靠外表皮组织层连接,故横向拉伸破坏载荷无较明显变化,轴向最大拉伸破坏载荷远大于横向最大拉伸破坏载荷。由图6C可知,加载速度对轴向最大拉伸破坏载荷无明显变化,说明加载速度对其影响不显著。

为探究不同条件下莲蓬表皮拉伸破坏组合以及各因素对表皮拉伸破坏力的影响,开展了三因素四水平正交试验,试验结果如表6所示。

表6 莲蓬表皮拉伸正交试验设计与结果

Table 6 Design and results of orthogonal experiment of epidermis tensile of lotus seedpod

序号 Serial number	A 成熟度 Maturity	B 加载方式 Loading method	C 加载速度/ (mm/min) Loading speed	剪切破坏力/N Shearing force
1	1	1	1	7.83
2	1	2	2	13.76
3	1	2	3	15.47
4	2	1	2	5.89
5	2	2	3	16.43
6	2	2	1	18.83
7	3	1	3	7.31
8	3	2	1	34.96
9	3	2	2	37.37
K ₁	9.72	7.01	17.91	
K ₂	11.08	22.80	16.38	
K ₃	23.91	—	10.43	
R	14.19	15.79	7.48	

由极差分析可知,加载方式对表皮拉伸破裂力影响最大,其次是成熟度,最小是加载速度。由表 7 可知,加载方式对表皮拉伸破裂力有显著影响,综合极差分析和方差分析可知,3 个因素对拉伸破裂力的影响由大到小为加载方式、成熟度和加载速度,不同成熟度莲蓬表皮均在横向拉伸的加载方式下以 30 mm/min 的加载速度实现较小外载荷的拉伸破坏,乳熟期表皮在此条件下剪切破裂力最小。

表 7 莲蓬表皮拉伸正交试验方差分析

Table 7 Variance analysis of orthogonal experiment of epidermis tensile of lotus seedpod

来源 Source	Ⅲ 类平方和 Ⅲ square sum	自由度 Degrees of freedom	F	显著性 Significance
A 成熟度 Maturity	367.77	2	5.95	
B 加载方式 Loading method	498.99	1	16.15	*
C 加载速度 Loading speed	93.55	2	1.51	
误差 Inaccuracies	92.67	3		

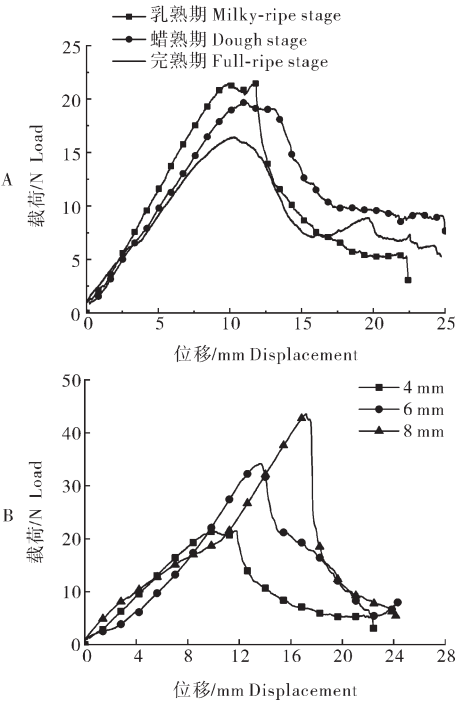
2.5 莲蓬组织穿刺特性

1) 蓬面穿刺试验。由图 7A 可知,加载速度为 20 mm/min、探头直径为 4 mm 时,随着成熟度的增加,蓬面穿刺破裂力逐渐降低,其最大值分别为 21.60、19.11、16.50 N,原因为莲蓬由乳熟期生长至完熟期,莲籽与蓬面组织间开始出现间隙并逐渐增大,探头相对较易使莲籽与蓬面组织分离。由图 7B 所示,随着探头直径的增大,与其相接触的表皮面积增大,承力能力增大,穿刺力破裂力增大,其最大值分别为 21.60、32.05、39.25 N。

2) 莲蓬表皮穿刺试验。由图 8A 可知,固定加载速度为 20 mm/min、探头直径为 4 mm,乳熟期与蜡熟期表皮穿刺破裂力相差不大,分别为 7.88、7.15 N,完熟期表皮穿刺破裂力较大为 13.21 N,分析原因可能是乳熟期与蜡熟期莲蓬表皮组织为完全分化,力学特性相差不大,穿刺力破裂力相差不大,完熟期莲蓬纤维组织逐渐木质化,承力能力增强,穿刺力破裂力增大。由图 8B 可知,随着探头直径的增大,与探头相接触表皮面积增大,其完熟期莲蓬纤维组织木质化,承力能力增大,穿刺破裂力明细增大,其最大值分别为 7.88、8.71、12.51 N。

2.6 破蓬方式确定

图 9 比较了腊熟期莲蓬表皮在相同加载速度不同加载方式下的破坏规律。探头直径越大,莲蓬表皮破裂力越大,越易造成莲籽损伤,在设计机械结构



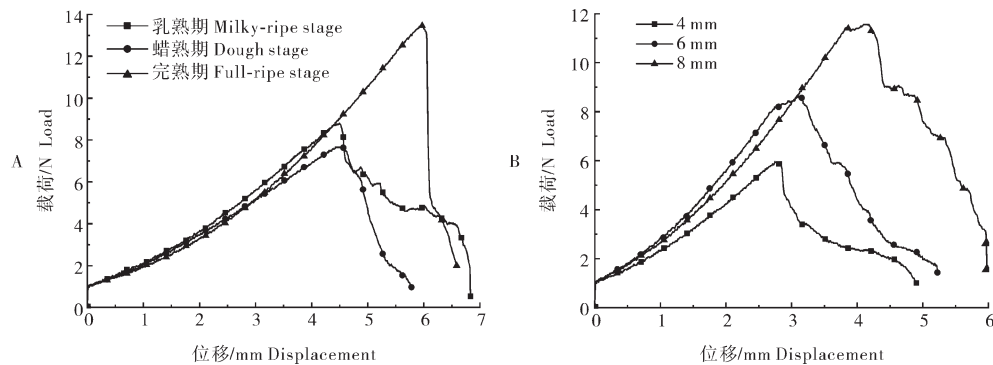
A: 不同成熟度蓬面穿刺载荷位移曲线 Puncture load displacement curve of canopy surface with different maturity; B: 不同直径探头蓬面穿刺载荷位移曲线 Puncture load displacement curves of canopy surface with different diameter probe.

图 7 蓬面穿刺单因素试验结果

Fig.7 Result of single factor test of canopy puncture

时应选取较小的穿刺探头直径,因而图 9 中选取了 4 mm 直径探头的穿刺载荷位移曲线,比较结果显示,莲蓬表皮破坏力由大到小为:轴向拉伸破坏力>横向剪切破坏力>穿刺破坏力>横向拉伸破坏力>纵向剪切破坏力。其中穿刺形式的破坏为较小载荷较大加载位移的破坏,实施破坏载荷时较大的加载位移可使莲籽有一定的缓冲移动空间,降低莲籽损伤的概率。穿刺破坏较剪切与拉伸破坏方式而言其加载更加便利,无需考虑表皮各向异性的特点,且穿刺破裂力随成熟度变化较另外两种加载破坏方式下力变化程度较小,对于不同成熟度莲蓬破蓬普适性较好。

侯群喜等^[15]对不同成熟度莲籽学特性研究结果表明,鲜莲籽平均壳厚为 0.64~0.84 mm,乳熟期莲籽剪切深度为 1.50 mm 时,所需力为 3.00~3.50 N,蜡熟期莲籽剪切深度为 1.50 mm 时,所需力为 7.50~8.50 N。而莲蓬表皮在纵剪的状态下其破裂力为 5.10~7.30 N,若采用剪切方式为破蓬机理设计机具,极易造成莲籽损伤,且需要考虑刀具加载深度。另外成熟度对莲籽剪切破裂力影响极显著,采取剪切的方式对不同成熟度莲蓬破蓬普适性较差。穿刺



A:不同成熟度表皮穿刺载荷位移曲线 Load displacement curve of epidermis puncture with different maturity;B:不同直径探头表皮穿刺载荷位移曲线 Load displacement curve of epidermis puncture with different diameter probe.

图8 表皮穿刺单因素试验结果

Fig.8 Results of single factor test of epidermis puncture

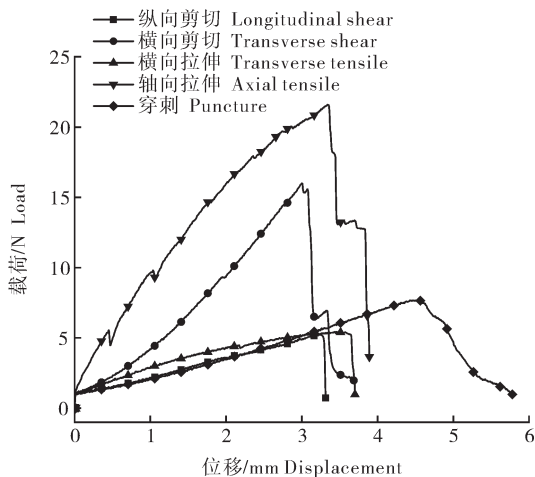


图9 不同加载方式表皮破坏载荷位移曲线

Fig.9 Load displacement curve of epidermal failure with different loading method

方式可实现不受表皮各向异性的影响并能以较小载荷实现破蓬,且对不同成熟度莲蓬破蓬普适性较好。然而单独采取穿刺方式破蓬并设计机具,无法实现莲蓬组织与莲籽的分离,难以实现莲蓬的高效脱粒。结合上述力学特性分析结果可知,在进行破蓬时可先施加穿刺载荷对莲蓬进行破坏,继而施加拉伸破裂力实现撕扯式高效破蓬,使得莲籽与莲蓬组织分离,实现脱粒。

3 讨论

本研究对不同成熟度莲蓬的物料特性进行了研究,开展了不同成熟度莲蓬各组织的含水率、不同成熟度莲蓬外观尺寸的测试,重点开展了不同加载方式、加载方向及加载速度下的力学特性试验,并对试验结果进行了分析,结果表明:同种成熟度下莲籽含水率最高,其次是芯部絮状纤维组织,最后是莲蓬表

皮,随着成熟度增大,莲籽含水率下降最少,莲蓬表皮含水率下降最多;从外观上看,随着成熟度的增加,莲籽逐渐饱满,蓬面直径逐渐增大,莲蓬外形逐渐饱满;莲籽孔径也逐渐变大。上述结果均表明乳熟期与腊熟期莲籽脱粒较完熟期更易造成莲籽损伤。表皮的拉伸与剪切位移载荷曲线相似,均表现为类弹性阶段与断裂阶段,在类弹性阶段主要以弹性变形为主,断裂阶段主要发生塑性变形。莲蓬表皮抗剪与抗拉能力具有明显各向异性,外载荷加载方式对剪切及拉伸破裂力具有显著影响($P<0.05$),表皮纤维的生长方向对拉伸及剪切破坏有较大影响;表皮穿刺破坏不受表皮各向异性特点的影响,穿刺破坏相较于其他2种加载破坏方式更具普适性。纤维组织完熟期平均拉伸破裂力较大,乳熟期与蜡熟期平均拉伸破裂力相差不大,主要作用为向莲籽输送水分与养分,在蜡熟期后纤维组织发生老化,抗破坏能力增强;加载速率对其无较大影响。较理想的破蓬方式是以较小的外载荷实现莲蓬表皮的破坏,破蓬过程中需要的加载破裂力越小,莲籽破损的概率越低。确定先施加穿刺载荷对莲蓬进行破坏,继而施加拉伸破裂力实现撕扯式高效破蓬,可为鲜食莲籽剥蓬脱粒机具的设计提供理论依据。

参考文献 References

- [1] 蒋露.我国主要莲子品种营养成分研究[J].食品安全导刊,2019(9):127. JIANG L. Research on the nutritional components of major lotus seed varieties in China[J]. China food safety magazine, 2019(9):127(in Chinese).
- [2] 方嘉沁,韩舜羽,王凤娇,等.莲子的营养成分及其在食品工业中的加工研究进展[J].农产品加工,2019(6):72-75. FANG J Q, HAN S Y, WANG F J, et al. Research progress

- on nutrient components of lotus seed and its application in food industry[J]. Farm products processing, 2019(6): 72-75 (in Chinese with English abstract).
- [3] ZENG H Y, CAI L H, CAI X L, et al. Amino acid profiles and quality from lotus seed proteins[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2013, 93(5): 1070-1075.
- [4] 李静, 赵明明, 张隽娴, 等. 我国莲产业标准综合体建设现状研究及对策思考[J]. 农产品质量与安全, 2022(2): 32-36. LI J, ZHAO M M, ZHANG J X, et al. Current situation and strategies for constructing lotus industry standard complex in China[J]. Quality and safety of agro-products, 2022(2): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杜永臣. 发展特色蔬菜产业 助力乡村振兴: 评《中国特色蔬菜主产区产业发展报告》[J]. 中国蔬菜, 2020(5): 112. DU Y C. Developing characteristic vegetable industry to support rural revitalization: comments on *The industrial development report of major vegetable producing areas with Chinese characteristics*[J]. China vegetables, 2020(5): 112 (in Chinese).
- [6] 张凌. 太空莲子增效益[J]. 农家致富, 2019(1): 21. ZHANG L. Space lotus seeds increase efficiency[J]. Rural prosperity, 2019(1): 21 (in Chinese).
- [7] 齐欢欢, 祖明艳, 杨平仿. 莲子食用价值研究进展[J]. 植物科学学报, 2020, 38(5): 716-722. QI H H, ZU M Y, YANG P F. Progress in studies on nutritional value of *Nelumbo nucifera* Gaertn. seeds[J]. Plant science journal, 2020, 38(5): 716-722 (in Chinese with English abstract).
- [8] 高水桃, 吴蔚书, 武美莲. 鲜白莲发酵乳酸饮料加工工艺[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(2): 84-86. GAO S T, WU W S, WU M L. The processing technology of lactic acid beverage with fermented fresh lotus seeds[J]. Food research and development, 2012, 33(2): 84-86 (in Chinese with English abstract).
- [9] 常志强. 陶辛莲子生产加工机械化调研报告[J]. 农机科技推广, 2021(11): 61-63. CHANG Z Q. Research report on mechanization of Taoxin lotus seed production and processing[J]. Agriculture machinery technology extension, 2021(11): 61-63 (in Chinese).
- [10] 陈慧, 周鹏. 鲜莲莲蓬剥粒机技术研究[J]. 江西农业, 2018(22): 107. CHEN H, ZHOU P. Research on fresh lotus seed pelleting machine[J]. Jiangxi agriculture, 2018(22): 107 (in Chinese).
- [11] 谢丽娟. 莲子破裂最佳位置的有限元模拟及试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005. XIE L J. Research on optimal crack position of lotus seed based on FEA and experiment[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 172-176. LIU Q T, OU Y G, QING S L, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(7): 172-176 (in Chinese with English abstract).
- [13] ZHANG K F, HE Y J, ZHANG H M, et al. Research on mechanical properties of corn stalk[C]//11th Asian Conference on Chemical Sensors: (ACCS 2015), Penang, Malaysia. Author(s), 2017: 050007.
- [14] 王东洋, 金鑫, 姬江涛, 等. 典型农业物料机械特性研究进展[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 1-8. WANG D Y, JIN X, JI J T, et al. Review of the research on typical agricultural crops' mechanical properties[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(7): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [15] 侯群喜, 曾荣, 张国忠, 等. 不同成熟度莲籽力学特性试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(5): 159-166. HOU Q X, ZENG R, ZHANG G Z, et al. Mechanical properties of lotus seeds with different maturity[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(5): 159-166 (in Chinese with English abstract).
- [16] 马秋成, 郭耿君, 马婕, 等. 莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 263-271. MA Q C, GUO G J, MA J, et al. Determination of mechanical characteristic parameters and extrusion crushing characteristics test for lotus seed kernel[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 263-271 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 25-31. CHEN H, XU X Z, YIN Y J, et al. Experimental study on mechanical properties and peel separation characteristics of citrus reticulate blanco with peel clamped moving[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李小强, 王芬娥, 郭维俊, 等. 甘蓝根茎切割力影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 42-48. LI X Q, WANG F E, GUO W J, et al. Influencing factor analysis of cabbage root cutting force based on orthogonal test[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张龙唱, 张宏文, 王磊, 等. 不同铃壳物理参数对机采棉采摘力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 30-37. ZHANG L C, ZHANG H W, WANG L, et al. Influence of different boll shell physical parameters on mechanical properties of machine-harvested cottons[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 30-37 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王海蓝, 陈引生, 姚芳, 等. 莲蓬常温保鲜技术的研究[J]. 农产品加工, 2021(18): 29-32. WANG H L, CHEN Y S, YAO F, et al. Study on room temperature preservation of lotus[J]. Farm products processing, 2021(18): 29-32 (in Chinese with English abstract).
- [21] 隋棠, 李志文, 张瑛, 等. 箱式气调对鲜食莲蓬贮藏品质和生理的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6): 31-38. SUI T, LI Z W, ZHANG Y, et al. Effect of box-type modified atmosphere technology on storage quality and physiological of fresh lotus[J]. Storage and process, 2018, 18(6): 31-38 (in Chinese with English abstract).

Mechanical properties of tissues in lotus seedpods with different maturity

WANG Hongchang^{1,2}, DU Dizhuang¹, PAN Rui¹, REN Zexu¹, ZHANG Guozhong^{1,2}, ZENG Rong^{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

Abstract The space lotus was used to study the appropriate method of breaking and threshing fresh lotus seedpods to achieve the mechanized threshing of lotus seedpods with high efficiency and low damage. The content of moisture, the characteristics of appearance, and mechanical properties of lotus seedpods with different maturity were studied, with a focus on the failure patterns of tissues in lotus seedpods under three modes of loading including shear, tension, and puncture. The results showed that the content of moisture in lotus seedpods was the highest in seeds and the lowest in epidermis. The content of moisture in epidermis significantly decreased with the decrease of the content of moisture in lotus seedpods. The shear and tensile properties of epidermis in the lotus seedpods were obviously anisotropic, and the mode of loading significantly affected the rupture force of shear and tension. The rupture force of transverse shear and axial tension in the epidermis of lotus seedpods gradually increased with the increase of maturity, increasing from 13.32 to 21.91 N and 13.70 to 37.38 N, respectively. There was no significant change in the rupture force of longitudinal shear and transverse tension. The speed of loading had no significant effect on the rupture force of shear and tension in the epidermis. The average rupture force of tension in fiber tissues of lotus seedpods was larger at the stage of ripening, approximately 17.19 N. There was no significant difference in the average tensile strength between the stage of milk ripening and the stage of wax ripening, and the speed of loading had no significant effect on the tensile strength of the fiber tissues. Epidermal puncture damage of lotus seedpod was not affected by epidermal anisotropy. The rupture force of puncture in lotus seedpod decreased gradually with the increase of maturity, while the rupture force of epidermal puncture increased gradually. The rupture force of surface puncture and epidermal puncture increased with the increase of the diameter of the probe, with the maximum value of 21.60, 32.05, and 39.25 N, respectively. The effect of epidermal loading on the rupture force was in the decreasing order of mode of loading > maturity > speed of loading. It is indicated that the puncture loading was used first to destroy the lotus seedpod to achieve the damage with less destructive power, and then the tensile cracking force was used to achieve the efficient tearing of the lotus seed. It will provide theoretical basis for designing machines of peeling and threshing the fresh lotus seedpods.

Keywords lotus seedpods; mechanical properties; maturity; loading method; loading speed

(责任编辑:陆文昌)