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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.05.022

不同成熟度莲籽力学特性试验

侯群喜,曾荣,张国忠,万志华,王洋,董昭

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要　以产自湖北洪湖的太空莲 36 号莲籽为研究对象,测定不同成熟度莲籽外形尺寸和含水率,并进行力学特性试验。结果显示:乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽纵横径比平均值分别为 1.35、1.28、1.19,含水率分别为 79.84%、70.28%、57.72%,莲籽长轴弹性模量分别为 1.09、1.22、1.85 MPa,短轴弹性模量分别为 1.33、1.42、2.16 MPa;3 种不同成熟度莲籽极限破坏载荷分别为 81.995、117.107、167.640 N。研究结果表明,莲籽同一成熟度和剪切深度条件下,剪切力不随剪切速率改变;莲籽同一成熟度和剪切速率条件下,剪切力与剪切深度呈显著线性相关;莲籽在 X、Y、Z 轴方向上的压缩破壳力随着成熟度的增加而增加;相同成熟度下,莲籽三轴方向上的压缩力在数值上 X 轴<Y 轴<Z 轴;莲壳弹性模量随着成熟度增加而增加;相同成熟度下,莲籽垂直方向弹性模量小于水平方向弹性模量。

关键词　莲籽;成熟度;物料特性;三轴压缩;弹性模量;极限载荷;剪切力;通用莲籽去皮机

中图分类号　TS 254.58　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2020)05-0159-08

莲籽,又名藕实、水芝丹[1],含有丰富的蛋白质、维生素、钙、黄酮类等有益健康的成分,具有较高的食用价值[2]。乳熟期莲籽汁液丰富、口感清甜,适宜鲜食;随成熟度增加,莲子淀粉含量增加,适宜深加工[3]。莲籽由莲壳、种皮、莲仁、莲芯组成[4],莲籽脱壳是深加工的重要技术环节,现有脱壳装备主要针对完熟莲籽开发,如用于乳熟期、蜡熟期新鲜莲籽脱壳时,存在破碎率高的问题。

近些年来,莲籽加工机械主要集中在莲籽去皮、取芯等工艺过程,加工对象主要是完熟期及枯熟期莲籽[5-6];相关研究也多集中于完熟期与枯熟期莲籽,且研究内容主要涉及莲籽的挤压破碎特性、坚实度、剪切力等力学特性参数的测量以及莲仁最佳脱壳方式等研究[7-9]。莲籽剥壳去皮方法主要有往复式刀片环切、滚搓去壳以及根部切口处理、挤压迫使莲籽壳仁分离等[10-11]。上述研究均针对于完熟期及枯熟期莲籽,而对乳熟期与蜡熟期莲籽的物料特性研究鲜有报道。因此,生产中迫切要求开发研制新型乳熟期、蜡熟期新鲜莲籽脱壳技术与装备,对不同成熟度的莲籽力学特性进行对比分析研究也十分必要。

本研究对不同成熟度莲籽物料特性以及鲜莲籽与成熟莲籽间的力学特性差异进行考察,旨在为通用莲籽剥壳去皮机刀具设计、剥壳与输送方式的确定提供必要的力学性能参数。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验选用样品为产自湖北省洪湖市的太空莲 36 号(Space Lotus No.36),共 3 份,分别为盛花后 13～16 d 乳熟期莲籽、盛花后 18～22 d 蜡熟期莲籽和盛花后 24～26 d 完熟期莲籽[12],无损伤、无病虫害,莲籽实物如图 1 所示。由于试验周期约为 3 d,为了避免样品因存放时间长以及呼吸作用导致腐坏、营养流失和水分流失,将莲籽用保鲜膜密封并存放至冰箱 4 ℃保鲜室。

1.2　试验仪器

美国 TFC 公司生产的 TMS-PRO 质构仪,精度为±1%,量程在 0～1 000 N;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

收稿日期:2019-09-24
基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02)
侯群喜,硕士研究生.研究方向:现代农业装备设计与测控.E-mail:390769637@qq.com
通信作者:张国忠,博士,教授.研究方向:现代农业装备设计与测控.E-mail:zhanggz@mail.hzau.edu.cn

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,量程为0～300 mm;太尔3D打印机,用以打印压缩、压溃、剪切试验时莲籽安装座。

1.乳熟期 Milk ripening stage; 2.蜡熟期 Wax ripening stage; 3.完熟期 Maturity period.

图1 试验莲籽实物图

Fig.1 Test picture of lotus seeds

1.3 试验方法

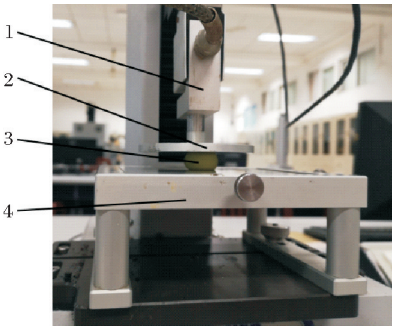
1)莲籽含水率测定。随机选取乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽各15粒作为样本,每个成熟度莲籽随机取3粒作为1组进行含水率测定。为使莲籽受热均匀,测定时将莲籽用裁纸刀切成片状,快速卤素水分测定仪设定温度为150 ℃,当样品质量不再发生变化时认为干燥结束。此时屏幕上显示的为所测样品的含水率。每个成熟度的莲籽重复5次试验,最后求得平均值。

2)莲籽外形尺寸测定。随机选取乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽各40粒作为样本,采用数字显示电子游标卡尺测定莲籽长轴尺寸,在同一平面内垂直于长轴测定方向位置处测定短轴最大直径,利用公式(1)计算莲籽的纵横径比,并统计各个成熟度莲籽纵横径比分布情况以及平均值。

$$\gamma=\frac{a}{b} \tag{1}$$

式(1)中:γ 为莲籽的纵横径比;a 为莲籽的长轴尺寸,mm;b 为莲籽短轴最大直径,mm。

3)莲籽压缩特性测定。①莲籽极限载荷与其对应位移测定。在TMS-PRO质构仪上,用直径为60 mm的圆盘压头进行试验,如图2所示。农产品压缩速率一般采用10～75 mm/min[13]。本试验压缩速率为50 mm/min。随机取3种不同成熟度的莲籽各20粒,分别放置在质构仪试验台上,设置位移触发起点为压缩力 $F=0.1$ N,当压缩过程中压缩力出现断崖式下降,莲籽或莲仁发出破裂声音时,停止加载,记录最大加载力与其对应的位移。重复20次,取平均值。

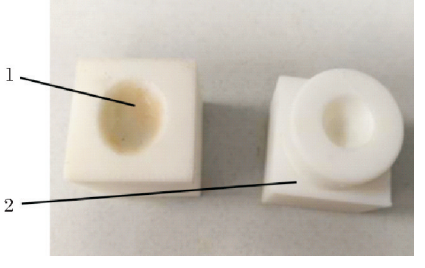


1.力、位移传感器 Force and displacement sensor; 2.圆盘压头 Disc indenter; 3.试验样本 Experimental sample; 4.试验台 Test bench.

图2 试验压缩台

Fig.2 Compressed map test bench

②莲籽弹性模量测定。乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽莲仁与莲壳之间紧密接触或存在极小间隙,在进行压缩试验时莲壳包裹着种皮、莲仁、莲芯一起发生形变,故将整个莲籽简化为线弹性材料。采用3D打印机打印的压缩安装座实现莲籽长轴、短轴压缩(图3)。



1.短轴安装座 Short axle mounting seat; 2.长轴安装座 Long axle mounting seat.

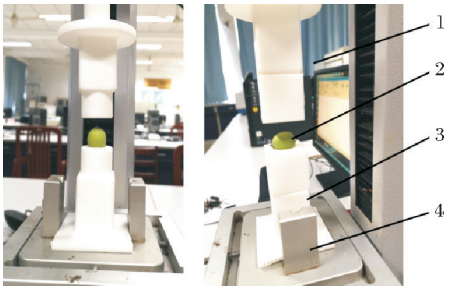
图3 莲籽安装座

Fig.3 Lotus seed installation seat

进行长轴、短轴压缩试验时,将莲籽放置在压缩安装座凹穴内,安装座固定于质构仪试验台工作桌面上。因极限载荷试验时莲籽破裂位移约6 mm,故加载位移为5 mm,同时设置压缩加载速率为50 mm/min。随机取3种不同成熟度莲籽各40粒,每种成熟度莲籽分别沿长、短轴各压缩20次,当加载位移达5 mm时,记录此时加载力,最后求20组加载力平均值。压缩过程及物料放置如图4所示。

利用公式(2)求莲籽长、短轴弹性模量 E。

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{F/A}{\Delta L/L}=\frac{F\cdot L}{A\cdot\Delta L} \tag{2}$$



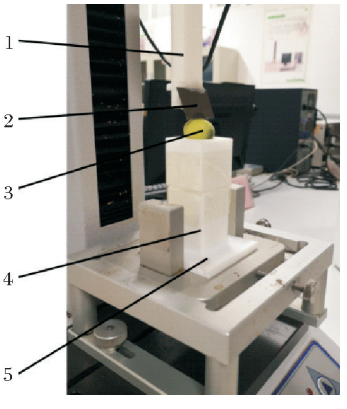
1.上压缩装置 Upper compression device；2.试验样本 Experimental sample；3.下压缩装置 Downward compression device；4.试验台 Test bench.

图 4　压缩试验

Fig.4　Compression test

式(2)中：E 为莲子弹性模量，MPa；F 为加载力，N；L 为试样有效长度，mm；A 为试样有效截面积，mm^2；ΔL 为形变量，mm。

4)莲籽剪切特性试验。由于完熟期莲籽莲壳渐老呈褐色，莲壳木质层有硬化现象，故剪切试验选取的研究对象为乳熟期、蜡熟期莲籽各 250 粒，在质构仪上分别进行剪切速率 20、40、60、80、100 mm/min[14]和剪切深度为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 mm 的全因素试验(图 5)。刀具支撑架和莲籽安装座均采用 3D 打印机打印，用美工刀作为剪切刀具，在相同成熟度、剪切速度、剪切深度条件下进行 10 次试验，取平均值。

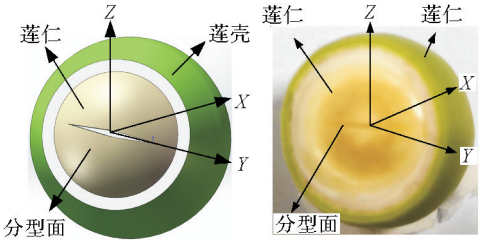


1.剪切刀架 Cutting tool holder；2.剪切刀片 Cutting blade；3.试验样本 Experimental sample；4.剪切底座 Shear base；5.试验台 Test bench.

图 5　剪切试验

Fig.5　Shearing experiment

5)莲籽三轴压缩试验。每颗莲仁都由两瓣组成，两瓣中间为莲心，称莲仁两瓣的分界面为分型面，将莲籽以分型面沿长轴方向的延伸线分为 X、Y、Z 3 个轴向，按照这 3 个轴向在莲籽上施加载荷进行试验。试验均采用准静态加载方式，加载速率为 30 mm/min(图 6)。



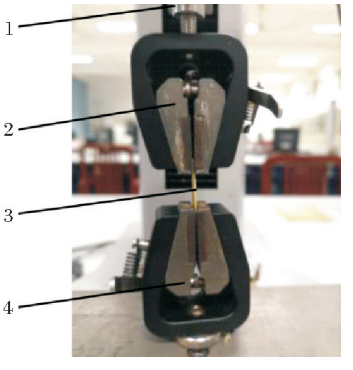
A.整粒莲籽三轴示意图 3-Axis diagram contrast；B.实物对照图 Physical map of whole lotus seed.

图 6　莲籽结构图

Fig.6　Structural diagram of lotus seed

试验时，随机抽取 3 种不同成熟度的莲籽各 30 粒，沿 X、Y、Z 轴方向进行试验，质构仪对莲籽施加载荷、变形量等参数自动化采集、记录。试验结束后，对每组试验获得的破壳力、变形量求其平均值。

6)莲籽莲壳弹性模量测量。分别沿莲籽垂直(莲籽长轴方向)和水平(短轴)方向取莲籽外壳拉伸试样，每组取 10 个，试样长度分别为 10、20 mm，宽度为 5～10 mm。经测量，3 种成熟度莲壳厚度平均值分别为 1.06、0.93、0.84 mm，取完莲壳后，立即放在夹具上以 30 mm/min 的速率进行拉伸，直至断裂(图 7)。试验中，试样必须在两夹具之间断裂，发生在夹具根部和夹具内部的破坏，均废除该试样。莲壳弹性模量 E 可用公式(2)求得。



1.力、位移传感器 Force and displacement sensor；2.上夹子 Upper clip；3.试验样本 Experimental sample；4.下夹子 Lower clip.

图 7　弹性模量测量

Fig.7　Elastic modulus measurement

2　结果与分析

2.1　莲籽含水率

随机对 3 种不同成熟度莲籽各 15 个样本采用

干燥法进行含水率测试，结果显示乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽含水率分别为78.58～80.88%、67.35%～73.79%、53.18%～63.46%，平均值分别为79.84%、70.28%、57.72%。

2.2 莲籽外形尺寸

随机取3种不同成熟度共计120粒莲籽进行外形尺寸测定(表1)，结果显示，乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽外形纵横径比平均值分别为1.35、1.28、1.19，表明莲籽在生长过程中逐渐饱满。

表1 不同成熟度莲籽外形尺寸纵横径分布

Table 1 Lotus seed shape size vertical and horizontal diameter distribution results

成熟度 Maturity	纵横径比区间 Longitudinal-transverse ratio interval		
	1.0～1.2	1.2～1.4	>1.4
乳熟期 Milk stage	0(0%)	35(87.5%)	5(12.5%)
蜡熟期 Ripening stage	1(2.5%)	39(97.5%)	0(0%)
完熟期 Mature period	24(60.0%)	16(40.0%)	0(0%)

2.3 莲籽压缩特性

1)莲籽极限载荷与其对应位移测定。试验对3种不同成熟度的莲籽分别进行了极限载荷和其对应位移的测定。结果显示，乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽的极限载荷分别为81.995、117.107、167.640 N，对应的位移分别为5.421、6.592、6.724 mm。结果表明，随莲籽成熟度增加，极限载荷逐渐增加，表明莲籽剥壳刀具、传输装置的预紧与调节和成熟度密切相关。

2)莲籽弹性模量测定。3种不同成熟度莲籽的长轴和短轴压缩特性测量结果如表2所示。由公式(2)计算出乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽长轴弹性模量分别为1.09、1.22、1.85 MPa；短轴弹性模量分别为1.33、1.42、2.16 MPa。

2.4 莲籽剪切特性试验

乳熟期、蜡熟期莲籽的全因素剪切试验结果见表3。不同剪切速度下剪切力与剪切深度的拟合见图8。对图8曲线进行线性拟合，乳熟期剪切力与剪切深度相关系数R^2分别0.996 7、0.990 8、0.997 8、0.999 1、0.999 1，蜡熟期剪切力与剪切深度相关系数R^2分别0.955 3、0.991 4、0.987 6、0.93 76、0.987 9，可知在相同剪切速度下，乳熟期和蜡熟期莲籽剪切力与剪切深度均呈线性相关，且蜡熟期莲籽剪切力增加较乳熟期莲籽显著。不同剪切深度下，乳熟期和蜡熟期莲籽剪切力与剪切速度的曲线如图9所示。对图9曲线进行线性拟合，乳熟期剪切力与剪切速度相关系数R^2分别为0.385 1、0.744 8、0.571 9、0.473 1、0.172 5，蜡熟期剪切力与剪切速度相关系数R^2分别为0.257 7、0.149 2、0.353 3、0.182 1、0.058 8，可知在同一剪切深度下，乳熟期和蜡熟期莲籽的剪切力随剪切速度的增加改变量很小，显示试验条件下的刀具切割速度对剥壳质量影响不显著，其原因可能在于乳熟期和蜡熟期莲籽莲壳在硬度、抗剪强度等方面的改变量较小，同时试验时剪切速度较低，因此剪切速度对剪切力影响较小。

表2 莲籽压缩特性试验

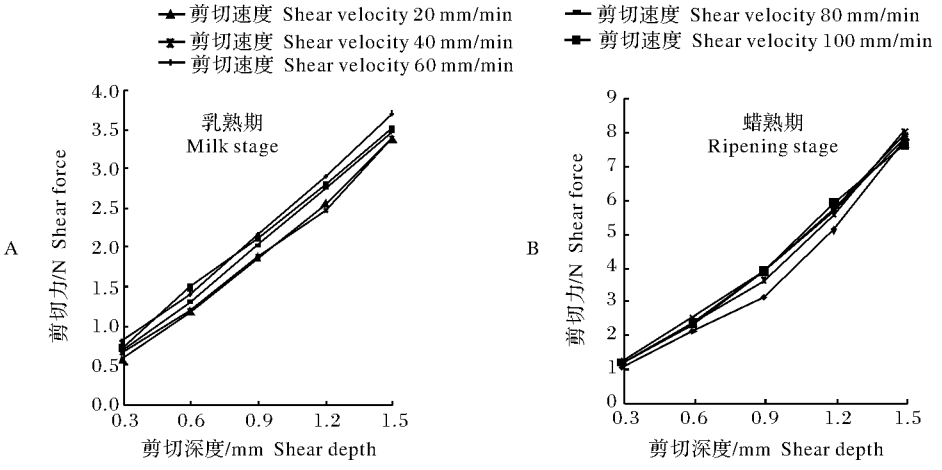
Table 2 Lotus seeds compression test result N

编号 Number	乳熟期 Milk stage		蜡熟期 Ripening stage		完熟期 Mature period	
	长轴 Long-axis	短轴 Short-axis	长轴 Long-axis	短轴 Short-axis	长轴 Long-axis	短轴 Short-axis
1	79.2	109.4	78.0	143.6	169.9	244.0
2	87.7	179.7	111.9	179.8	153.7	219.5
3	89.3	139.2	75.4	185.1	138.8	292.7
4	95.8	140.9	89.8	165.7	157.6	227.8
5	88.7	126.8	124.8	175.1	156.1	190.2
6	89.3	172.2	123.7	150.3	154.0	218.0
7	100.7	168.6	87.2	163.9	110.5	294.9
8	105.1	168.4	138.6	172.1	170.9	356.7
9	86.6	158.1	77.2	129.8	177.6	206.5
10	89.5	136.1	113.3	139.5	161.8	188.4
平均值 Average	91.19	149.94	101.99	160.49	155.09	243.87

表 3　莲籽剪切特性试验结果

Table 3　Lotus seed shear test result　　N

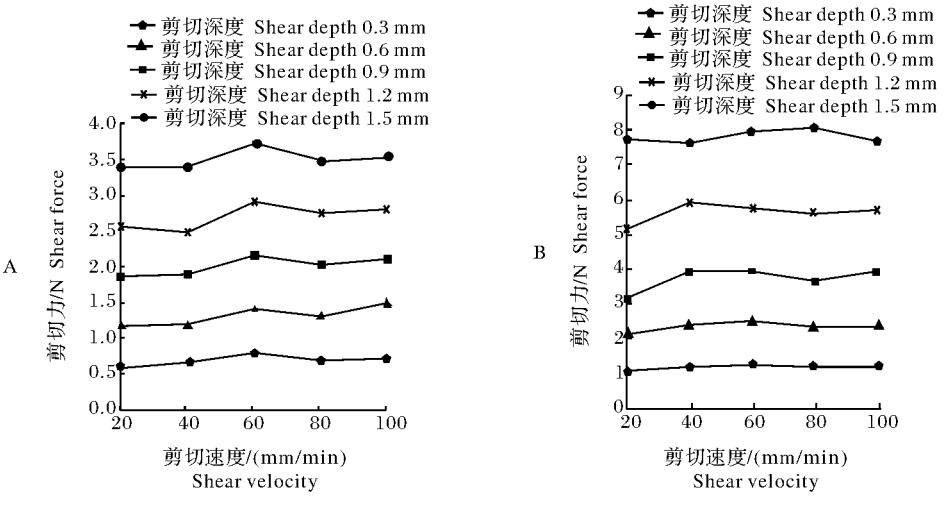
成熟度 Maturity	剪切速度/(mm/min) Shear velocity	剪切深度/mm Shear depth				
		0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
乳熟期 Milk stage	20	0.57	1.18	1.87	2.55	3.39
	40	0.66	1.19	1.88	2.48	3.40
	60	0.80	1.41	2.16	2.91	3.71
	80	0.69	1.31	2.03	2.76	3.48
	100	0.72	1.49	2.11	2.80	3.52
蜡熟期 Ripening stage	20	1.07	2.14	3.15	5.14	7.75
	40	1.21	2.37	3.92	5.94	7.64
	60	1.23	2.53	3.94	5.75	7.94
	80	1.19	2.35	3.64	5.59	8.05
	100	1.18	2.32	3.93	5.72	7.86



A.乳熟期 Milk stage；B.蜡熟期 Ripening stage.

图 8　不同剪切速度下剪切力-剪切深度拟合曲线

Fig.8　Fitting curve of shear force-shear depth under different shear velocities



A.乳熟期 Milk stage；B 蜡熟期 Ripening stage.

图 9　不同剪切深度下剪切力-剪切速度拟合曲线

Fig.9　Fitting curves of shear force-shear velocity at different shear depths

2.5 莲籽三轴压缩试验

对3种不同成熟期莲籽进行三轴压缩试验，结果如表4所示。由表4可知，乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽在X、Y、Z轴方向上的压缩破壳力随着成熟期增加，莲籽三轴方向上的压缩力随之增加。同一成熟期下，X轴压缩力小于Y、Z轴压缩力，这是由于X轴为长轴，截面积较Y、Z轴小且莲籽存在脆性，长轴受力后易发生脆裂破坏。Y、Z轴压缩力相近，但Y轴压缩力略小于Z轴，这是因为Y、Z都是莲籽最大截面压缩，所以压缩力相近，但由于Y轴压缩平行于分型面而Z轴压缩垂直于分型面，分型面的存在使得在进行Y轴压缩时，莲籽相比于Z轴压缩更容易破裂。

2.6 莲籽的莲壳弹性模量

对3种不同成熟度莲籽莲壳的弹性模量进行了垂直和水平方向的测量，结果如表5所示。由表5可知，乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽莲壳垂直和水平方向弹性模量平均值分别为1.87、3.81、3.73、7.75、6.67、12.06 MPa。随成熟度增加，莲籽含水率逐渐下降，莲籽内淀粉含量逐渐增加，莲籽逐渐饱满，硬度增加，弹性模量也逐渐增加。同一成熟度下，垂直方向弹性模量小于水平方向弹性模量，这是由于莲壳主要由木质纤维构成，而纤维排列结构具有一定方向性，水平方向进行拉伸时，平行于纤维方向，而垂直方向则相反，所以呈现出水平方向弹性模量大于垂直方向。

表4 不同成熟期莲籽三轴压缩破壳力

Table 4 Triaxial compression of lotus seeds with different maturity N

次数 Times	乳熟期 Milk stage			蜡熟期 Ripening stage			完熟期 Mature period		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	98.9	132.4	136.2	196.5	190.9	207.6	226.2	314.6	374.2
2	98.2	139.4	147.1	160.1	217.7	197.6	272.1	317.3	318.5
3	112.3	126.5	140.9	153.3	197.3	191.1	241.6	332.1	322.1
4	116.1	143.6	134.6	164.6	186.4	217.7	258.0	342.6	364.4
5	128.9	138.5	153.6	131.0	197.7	201.2	232.7	296.8	339.6
6	119.4	133.1	144.0	187.6	191.3	209.7	248.6	301.2	340.2
7	97.1	137.4	122.1	171.8	190.2	227.1	233.3	279.3	337.7
8	112.8	141.9	164.6	162.2	188.4	219.2	213.9	299.8	329.9
9	117.7	152.5	144.5	169.0	201.2	205.3	268.4	308.4	325.6
10	97.7	121.0	165.7	141.3	186.6	229.2	279.3	305.2	340.2
平均值 Average	109.91	136.60	145.30	163.80	194.77	210.57	247.41	309.73	339.24

表5 3种不同成熟度莲籽莲壳弹性模量

Table 5 Elastic modulus of three lotus seed shells with different maturity MPa

次数 Times	乳熟期 Milk stage		蜡熟期 Ripening stage		完熟期 Mature period	
	垂直 Vertical	水平 Elastic	垂直 Vertical	水平 Elastic	垂直 Vertical	水平 Elastic
1	1.98	3.53	3.73	6.02	7.18	12.05
2	1.97	4.04	4.01	7.06	6.01	11.59
3	1.69	3.68	3.68	7.85	6.60	12.48
4	1.85	3.72	3.66	6.00	6.36	12.60
5	1.88	4.01	3.79	7.63	6.84	12.01
6	1.75	3.88	3.42	7.71	6.59	12.00
7	1.79	3.87	3.60	7.52	6.78	11.36
8	1.89	3.92	3.76	7.49	6.91	11.74
9	1.93	3.66	3.59	7.66	7.02	12.83
10	1.95	3.79	4.05	7.08	7.33	11.94
平均值 Average	1.87	3.81	3.73	7.20	6.67	12.06

3 讨　论

本研究对不同成熟度莲籽力学特性进行了测试，结果表明，不同成熟度的莲籽纵横径比分布不同，这不仅反映了莲籽外形尺寸的差异，也为莲籽破壳去皮相关刀具的仿形设计提供了数据支持。莲籽长轴、短轴弹性模量、莲壳垂直和水平方向弹性模量平均值均随着莲籽成熟度增加而增加，相同成熟度下，垂直方向弹性模量小于水平方向弹性模量。这为莲籽仿真分析提供了参数设定依据。在相同剪切速度下，乳熟期、蜡熟期莲籽剪切力与剪切深度增加呈线性相关；在同一剪切深度下，剪切力随剪切速度增加改变量很小，显示试验条件下的刀具切割速度不是影响剥壳质量的主要因素。乳熟期、蜡熟期、完熟期莲籽在 X、Y、Z 轴方向上的压缩破壳力平均值随着成熟度的增加而增加；相同成熟度下，三轴方向上的压缩力在数值上 X 轴$<Y$ 轴$<Z$ 轴。

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. Study on the main nutritional components of lotus seed in China[J].China food safety magazine，2019(9)：127(in Chinese with English abstract).

[2] HONG Y Z，LIAN H C，XI L C，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.

[3] 赵秀玲，党亚丽.莲子心化学成分及其提取、药理作用的研究进展[J].食品科学，2018，39(23)：329-336.ZHAO X L，DANG Y L. Recent advances in chemical components，extraction and pharmacological effects of nelumbinis plumula[J]. Food science，2018，39(23)：329-336(in Chinese with English abstract).

[4] 陈长卿，朱建锡，郑涛，等.鲜莲子机械化加工研究现状及存在的问题[J].农业开发与装备，2018(7)：103-104.CHEN C Q，ZHU J X，ZHENG T，et al.Research status and existing problems of mechanized processing of fresh lotus seeds[J].Agricultural development & equipments，2018(7)：103-104(in Chinese with English abstract).

[5] 糜旺.全自动气动莲子通芯机研究与试验[D].南昌：江西农业大学，2016.MI W.Research and experiment of automatic pneumatic lotus seed core machine[D].Nanchang：Jiangxi Agricultural University，2016(in Chinese with English abstract).

[6] 王锦霞，甘婷婷，张妙，等.莲子去皮方法及其产品开发研究进展[J].农产品加工，2019(14)：65-68.WANG J X，GAN T T，ZHANG M，et al. Research progress of lotus seed peeling methods and product development[J].The processing of agricultural products，2019(14)：65-68(in Chinese with English abstract).

[7] 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 Chinese society of agricultural engineering，2018，34(6)：263-271 (in Chinese with English abstract).

[8] 朱亨银，何金成，方文熙，等.小型鲜莲子剥壳机的设计与试验[J].农业工程学报，2017，33(7)：28-35.ZHU H Y，HE J C，FANG W X，et al. Design and test of small fresh lotus seed sheller[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering，2017，33(7)：28-35(in Chinese with English abstract).

[9] 谢丽娟，宗力.莲子受力有限元分析[J].农业机械学报，2006(6)：94-97. XIE L J，ZONG L. Analysis of finite element method for loaded lotus seed[J].Transactions of the Chinese society of agricultural machinery，2006(6)：94-97(in Chinese with English abstract).

[10] 徐谐庆，饶洪辉，李涛，等.全自动莲子剥壳去皮机的设计与试验[J].农业工程学报，2014，30(13)：28-34. XU X Q，RAO H H，LI T，et al.Design and experiment on automatic husking and peeling machine for lotus seeds[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering，2014，30(13)：28-34(in Chinese with English abstract).

[11] 梁诗华，林毅鑫，范泽泽，等.鲜莲剥壳技术研究进展与探讨[J].湖北农业科学，2017，56(4)：603-607.LIANG S H，LIN Y X，FAN Z Z，et al. Progress and discussion of fresh lotus seed shelling technology[J]. Hubei agricultural sciences，2017，56(4)：603-607(in Chinese with English abstract).

[12] 许丽宾.不同成熟期莲子品质特性的研究与应用[D].福州：福建农林大学，2015.XU L B.Research and application on quality characteristics of lotus seed in different maturity[D].Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2015(in Chinese with English abstract).

[13] 王丽丽.梨果实压缩特性与品质特性关系的研究[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2009.WANG L L. Study on the relationship between compressive properties and quality of pear fruits[D]. Huhhot：Inner Mongolia Agricultural University，2009(in Chinese with English abstract).

[14] 张永丽，高连兴，刘红力，等.玉米籽粒剪切破碎的试验研究[J].农机化研究，2007(5)：136-138.ZHANG Y L，GAO L X，LIU H L，et al. Experimental study on corn kernel shear crash[J]. Journal of agricultural mechanization research，2007(5)：136-138(in Chinese with English abstract).

Mechanical properties of lotus seeds with different maturity

HOU Qunxi, ZENG Rong, ZHANG Guozhong, WAN Zhihua, WANG Yang, DONG Zhao

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract Lotus seeds with different maturity have different mechanical properties. At present, shelling machinery is only suitable for lotus seeds after ripening stage. However, the crushing rate increases greatly when milk and wax ripening stages of lotus seeds are shelled. In order to improve the applicability of shelling machinery and reduce the crushing rate of fresh lotus seeds in the process of shelling and peeling, the compression, crushing and shearing characteristics of lotus seeds with different maturity were studied. In this study, the lotus seeds of space lotus No. 36 from Honghu Lake, Hubei Province were used to measure the shape dimensions and water content. The long-axis and short-axis compression and the crush test for whole lotus seed were conducted. The shear test under different speeds and depths, and the compression test in three-axis direction were carried out. The elastic modulus of lotus shell was tested. The long axis and short axis elastic modulus were analyzed and calculated based on experiments above. The ultimate failure load, the relationship between shear stress and depth, speed and maturity were obtained. The results showed that the average longitudinal and transverse ratio of the lotus seeds with milk maturity, wax maturity and maturity was 1.35, 1.28, 1.19, respectively. The water content was 79.84%, 70.28%, 57.72%, respectively. The long axis elastic moduli of lotus seeds were 1.09 MPa, 1.22 MPa, and 1.85 MPa, respectively. The short axis elastic moduli were 1.33 MPa, 1.42 MPa, and 2.16 MPa, respectively. The limit damage load of three maturity lotus seeds was 81.995 N, 117.107 N, and 167.640 N, respectively. Under the same maturity and shear depth, the shear force did not change with shear speed and was linearly correlated with shear depth. The compression shelling force of lotus seed in the X, Y and Z directions increases with maturity. The compressive force in the three-axis direction of the lotus seed is numerically X axis $<Y$ axis $<Z$ axis under the same maturity. The elastic modulus of the lotus shell increases with maturity. The elastic modulus in vertical direction is smaller than that in horizontal direction under the same maturity. It will provide references for studying shelling technology and developing equipment for fresh lotus seeds.

Keywords lotus seed; maturity; material characteristics; compression in the three-axis direction; elastic modulus; limit damage load; shear force; universal lotus seed peeling machine

（责任编辑：陆文昌）