

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.027

# 龙眼力学参数测试与分析\*

卿艳梅 李长友 曹玉华 张增学 程红胜

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

**【摘要】** 对龙眼果实、果核进行压缩试验表明:龙眼整果的压缩力-变形曲线为二次多项式关系,其横向和纵向的刚度相近,弹性模量为 0.90 ~ 0.95 MPa;果核的压缩力-变形曲线为近似线性关系,横向和纵向刚度相近,弹性模量约为 40 MPa。龙眼整果破壳时变形随着加载速率的增加而减小。由果壳的拉伸试验得到应力-应变关系和果壳弹性模量-应变关系。试验表明龙眼果实可看作各向同性材料。

**关键词:** 龙眼 力学特性 弹性模量 刚度

**中图分类号:** S667.2; S183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0131-04

## Test and Analyse on Macromechanic Parameters of Longan

Qing Yanmei Li Changyou Cao Yuhua Zhang Zenxue Cheng Hongsheng

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

### Abstract

Compression experimental results on longan fruit and pit indicated that the force - deformation curves of longan fruit compression qualified with the second order quadratic equation and the elastic modulus ranged from 0.90 MPa to 0.95 MPa. The force - deformation curves of longan pit compression were nearly linear and the elastic modulus was roughly 40MPa. The transversal and longitudinal stiffness of longan fruit and pit were separately similar. Under different compression rates, longan deformation of broken-hull decreased along with the increase of compression rates. The fruit skin tensile tests were conducted that stress-strain curves and the relationships between elastic modulus and strains were determined. Experimental results indicated that longan can be regarded as isotropy material.

**Key words** Longan, Mechanical properties, Elastic modulus, Stiffness

## 引言

龙眼果肉柔软多汁,为假种皮果实,果壳薄且革质化并有一定韧性,果核圆形至扁圆形。在机械加工、包装运输和贮藏等各个环节,都可能出现由于相互间碰撞及与工具、设备的挤压而发生机械损伤。龙眼力学参数是建立龙眼力学模型、指导设计去核剥壳机械和包装设备的重要依据,但目前有关龙眼力学参数的研究很少。鉴于此,本文对龙眼果实、果

核进行压缩试验和果壳拉伸试验,得出龙眼果实、果核及果壳的弹性模量和刚度等力学参数,为建立龙眼力学模型提供基础数据。

## 1 龙眼整果和果核的压缩试验

### 1.1 试验材料、设备及方法

新鲜储良龙眼果实剪去果柄,其几何尺寸  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向直径分别为 26.8 ~ 30.5 mm、23.7 ~ 26.0 mm 和 24.6 ~ 27.6 mm,果实含水率为 71% ~ 74%。龙

收稿日期: 2009-11-30 修回日期: 2009-12-17

\* 广东省自然科学基金资助项目(9151001002000005)、华南农业大学校长基金资助项目(2009K007)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094404120002)和广东省农业厅资助项目(20091099)

作者简介: 卿艳梅,讲师,博士生,主要从事现代农业装备与设施研究,E-mail: yanmeiq@scau.edu.cn

通讯作者: 李长友,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与设施研究,E-mail: lichyx@scau.edu.cn

龙眼核  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向直径分别为 11.5 ~ 14.0 mm、13.7 ~ 15.6 mm 和 14.3 ~ 16.2 mm，果核含水率为 40% ~ 45%。龙眼果实纵切面构造如图 1 所示。试验设备为 WD-E 系列精密型微控电子式万能试验机，试验采用平板压缩方式。

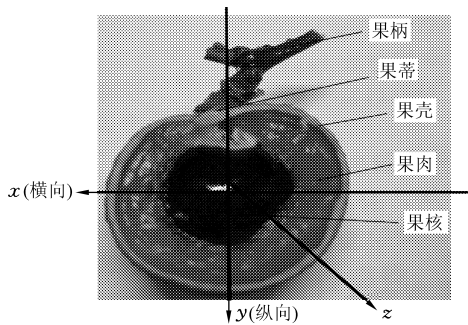


图 1 龙眼果实纵切面构造

Fig. 1 Vertical section of longan fruit

## 1.2 试验结果与分析

### 1.2.1 相同加载速率下龙眼整果和果核的压缩力-变形曲线

同一速率加载时，上压板以加载速率为 5 mm/min 垂直下压，下压板固定不动，每组试验随机选取 50 个试样。图 2 为整果和果核在横向和纵向压缩时力-变形曲线。从图 2a 可以看到，利用平板压头压缩龙眼时，无论是横向还是纵向受压，力-变形曲线均为非线性的，压缩力上升达到破裂力（峰值点）后果壳发生破裂，这时压缩力迅速下降，挤压过程中无明显生物屈服点出现。

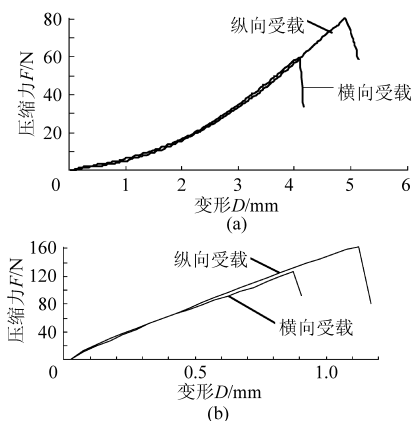


图 2 龙眼整果和果核压缩力-变形曲线

Fig. 2 Force - deformation curves of longan and pit compression  
(a) 整果 (b) 果核

由图 2b 可知，龙眼果核压缩力-变形曲线近似线性，压缩力上升达到破裂力（峰值点）后果核发生破裂，这时压缩力迅速下降，挤压过程中无明显生物屈服点出现。果核破裂变形远小于整果，龙眼的果核较脆，有一定的硬度，压缩破坏时不易看到明显的破裂裂纹。试验时以压缩受载曲线的变化来判断果

核是否已经破裂，当受载曲线上升到最大值突然下降，说明果核已经破裂。

### 1.2.2 龙眼整果和果核的刚度与变形关系

由于整果压缩力与变形关系曲线是非线性的，因此龙眼整果刚度是变化的。刚度是指力-变形曲线的斜率<sup>[1-3]</sup>，故可用龙眼的力-变形曲线拟合的曲线斜率表示龙眼整果的刚度。通过对图 2a 所得的整果压缩试验曲线采用曲线拟合的最小二乘法，得到和试验数据拟合较好的不完全二次多项式。横向加载破裂点前多项式回归模型和相关系数为  $F = 3.0315D^2 + 1.8684D + 0.1858$ ,  $R^2 = 0.9998$ ；纵向加载破裂点前多项式回归模型和相关系数为  $F = 3.1773D^2 + 1.6697D + 1.023$ ,  $R^2 = 0.9997$ 。

对图 2b 所得的果核压缩试验曲线进行拟合，得到和试验数据拟合较好的近似线性关系。横向加载破裂点前线性回归模型和相关系数为  $F = 141.49D + 4.7319$ ,  $R^2 = 0.9964$ ；纵向加载破裂点前线性回归模型和相关系数为  $F = 147.92D + 4.0589$ ,  $R^2 = 0.9976$ 。

刚度为

$$H = \frac{dF}{dD} \quad (1)$$

取破裂极限位移计算刚度，龙眼整果横、纵向刚度为 27.51 kN/m、31.59 kN/m。果核的横、纵向刚度为 141 kN/m、148 kN/m。

### 1.2.3 龙眼整果和果核的弹性模量与变形关系

对龙眼进行载荷与变形分析，其试验物料的弹性模量的计算式为<sup>[4]</sup>

$$E = \frac{0.338K^{1.5}F(1-\mu^2)}{D^{1.5}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式中  $\mu$ ——试件泊松比  $K$ ——系数

$R$ 、 $R'$ ——试件在接触点最小、最大曲率半径

根据  $\cos T = \frac{R' - R}{R' + R}$  求出  $\cos T$ ，根据文献[4]查表

求  $K$  值。当龙眼整果为球形时， $R' = R$ ,  $\cos T = 0$ ，查表得  $K = 1.3514$ ，所以用钢板对球形物料加载时弹性模量计算式为

$$E = \frac{3F(1-\mu^2)}{4D^{1.5}} \left( \frac{1}{R} \right)^{0.5} \quad (3)$$

其中，龙眼整果的泊松比  $\mu$  可根据文献[4~5]求出  $\mu = 0.3$ 。

图 3 和图 4 分别为龙眼整果和果核在横向、纵向压缩时的弹性模量与变形的关系。从图 3 可以看出，龙眼整果的弹性模量为 0.5 ~ 4.8 MPa，不同的加载力和变形对应不同的弹性模量。对于生物物料考虑用中间较平直直线段作为其平均弹性模量，所以取龙眼整果横向弹性模量为 0.95 MPa，纵向弹性

模量为 0.90 MPa。由图 4 可知,龙眼果核的弹性模量为 15 ~ 135 MPa,取龙眼果核横向、纵向弹性模量约为 40 MPa。由此可知,龙眼整果和果核的横向、纵向弹性模量均较接近。

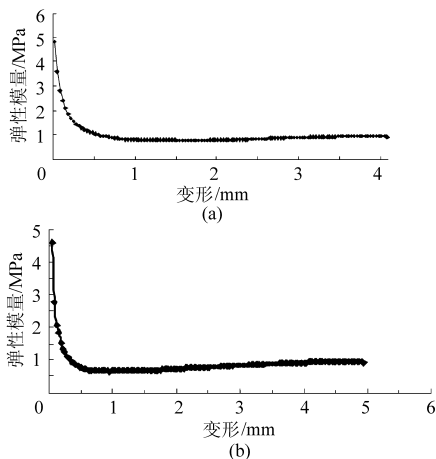


图 3 龙眼整果弹性模量-变形曲线

Fig. 3 Elastic modulus - deformation curves of longan fruit

(a) 横向 (b) 纵向

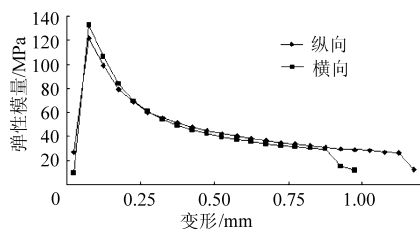


图 4 龙眼果核弹性模量-变形曲线

Fig. 4 Elastic modulus - deformation curves of longan pit

### 1.2.4 不同加载速率下龙眼整果力-变形曲线

采用不同速率对龙眼加载时,设定上压板以 2, 10, 20, 50, 100 mm/min 加载速率垂直下压,下压板固定不动。

通常农业生物材料是粘弹性材料,因此它对外载的响应要受到加载速率的影响。图 5 是用平板压头在不同加载速率下整果的力-变形曲线,其压缩曲线的初始区段并不重合,这是因为在加载过程中平板与龙眼的接触面积是不断变化的,使应力与应变也随之变化,从而影响其压缩曲线的形状与特性。由数据和试验曲线可知,加载速率在 2 ~ 20 mm/min 变化时,压缩曲线初始区段的斜率基本上不受加载速率的影响。理论上认为,在较小载荷作用下,龙眼在较大程度上具有弹性或线性粘弹性<sup>[4]</sup>。当载荷接近果壳破裂点时,压缩曲线产生分离。但随着加载速率的进一步增加,曲线的斜率也随之增加。在不同的加载速率情况下,龙眼破壳时的变形是不同的,破壳时变形随着加载速率的增加而减小,而破坏极限相差不大。

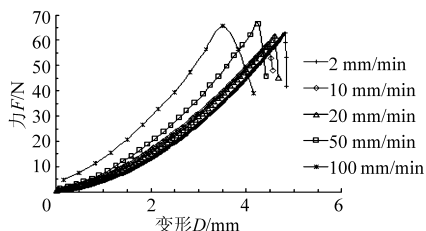


图 5 不同加载速率下龙眼整果的力-变形曲线

Fig. 5 Force - deformation curves under compression in different rates

## 2 龙眼壳的拉伸试验

### 2.1 试验材料、设备及方法

试验材料为新鲜广东储良龙眼,测试用果的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向直径范围和试验设备与压缩试验相同。试验时拉伸速率为 5 mm/min,每组取 50 个试样,样品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。样壳制成长方形,试样长度的选择没有标准可以参考,但龙眼果限制了壳的最大长度。本试验中,每个试样的长度都在 25 mm 以上,宽度在 6 ~ 14 mm 之间,试样的厚度为 0.75 mm。取完试样后,立即放在夹具上进行拉伸,直至拉断。

### 2.2 结果与分析

#### 2.2.1 龙眼壳应力-应变曲线

在试验机上对龙眼壳进行拉伸,并将力-变形曲线转换为应力-应变曲线,转换关系为

$$\sigma = \frac{F_1}{A} \quad (4)$$

$$A = bh \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

式中  $F_1$ ——拉伸力  $A$ ——样壳横截面积

$\sigma$ ——拉应力  $\varepsilon$ ——应变

$b$ 、 $h$ ——试样宽度和厚度

$\Delta L$ 、 $L$ ——试样的绝对伸长量和原长

在数据处理时采用曲线拟合的最小二乘法,得到和试验数据拟合较好的三次多项式,拟合曲线如图 6 所示,拟合多项式为

$$\sigma = a_1 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon \quad (7)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ——拟合系数

由图 6 可以看出,果壳的应力与应变关系是非线性关系,无明显生物屈服点出现,达到破裂力后,果壳被拉断。

#### 2.2.2 龙眼壳弹性模量-应变关系

在论述生物物料的弹性模量时总是要说明计算弹性模量时的载荷与应变大小。龙眼壳弹性模量为

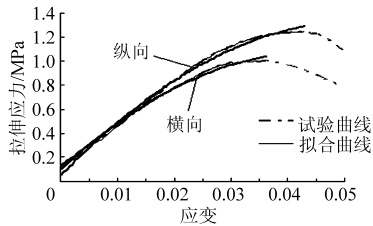


图6 龙眼壳的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of tensile test of longan hull

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 3a_1\varepsilon^2 + 2a_2\varepsilon + a_3 \quad (8)$$

由式(8)已知应变,就可求出相应点处的弹性模量值。将试验机自动记录的拉伸数据经软件计算可得龙眼壳的横向和纵向弹性模量与应变的关系曲线,如图7所示。

### 3 结论

(1) 龙眼整果压缩力-变形近似二次多项式关

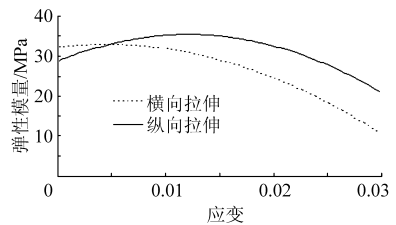


图7 龙眼壳弹性模量-应变曲线

Fig. 7 Elastic modulus-strain curves of longan hull

系,整果横向、纵向的刚度为 27.51 kN/m、31.59 kN/m,横向、纵向弹性模量为 0.90~0.95 MPa。

(2) 龙眼果核压缩力-变形为线性关系,果核横、纵向的刚度为 141 kN/m、148 kN/m,龙眼果核横向和纵向弹性模量相接近,约为 40 MPa。

(3) 龙眼整果的破壳变形随加载速率的增加而减小。

(4) 可近似将龙眼看作是各向同性材料。

### 参 考 文 献

- 1 卿艳梅,曹玉华,李长友,等. 龙眼鲜果剥壳力学特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(5):122~126.  
Qing Yanmei, Cao Yuhua, Li Changyou, et al. Mechanical properties of fresh longan hulling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(5): 122~126. (in Chinese)
- 2 赵学笃,陈元生,张守勤. 农业物科学[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- 3 Pitt R E, Davis D C. Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading[J]. Transactions of the ASAE, 1984,27(5):1976~1983.
- 4 周祖镠. 农业物科学[M]. 北京:农业出版社,1994:42~50.
- 5 丁林峰,李耀明,徐立章. 稻谷压缩试验的接触力学分析[J]. 农机化研究,2007,29(12):112~115.  
Ding Linfeng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Research and analysis in the compressing experimentation about corn with contact mechanicals[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(12):112~115. (in Chinese)
- 6 Singh Krishna K, Sreenivasula Reddy B. Post-harvest physico-mechanical properties of orange peel and fruit[J]. Journal of Food Engineering,2006,73(2):112~120.
- 7 王荣,焦群英,魏德强. 葡萄与番茄宏观力学特性参数的确定[J]. 农业工程学报,2004,20(2):54~57.  
Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang. Determination of macromechanic parameters of grapes and tomatoes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(2):54~57. (in Chinese)
- 8 王新忠,王敏. 银杏种核力学特性试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):84~88.  
Wang Xinzong, Wang Min. Experiment on mechanical properties of the seed nucleus of ginkgo bilob[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):84~88. (in Chinese)
- 9 李耀明,王显仁,徐立章,等. 水稻谷粒的挤压力学性能研究[J]. 农业机械学报,2007,38(11):56~58.  
Li Yaoming, Wang Xianren, Xu Lizhang, et al. Study on compression properties of rice grain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(11):56~58. (in Chinese)
- 10 高永毅,焦群英,唐果,等. 番茄压缩载荷的响应分析[J]. 农业工程学报,2008,24(1):40~43.  
Gao Yongyi, Jiao Qunying, Tang Guo, et al. Analysis of response to the external compressive force on tomatoes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008, 24(1):40~44. (in Chinese)