

猕猴桃果实生物力学特性的研究

何东健¹ 高卫民²

(1 西北农业大学农工系, 陕西杨陵·712100)

(2 西北林学院木工系, 陕西杨陵, 712100)

S663.909.3

摘 要 用流变仪—电子计算机实时测定装置, 测定和分析了猕猴桃果实的载荷—变形、蠕变及应力松弛等生物力学特性, 并探讨了果实硬度和力学特性之间的相关性, 结果表明: 果实的压缩或压入强度及破断能均随贮藏时间的增加而减少; 果实的蠕变和应力松弛现象, 可分别用 6 单元 Burgers 模型和 5 单元 Maxwell 模型表示, 力学模型的粘弹性系数随贮藏时间增加而发生变化; 果实硬度和粘弹性模型的弹性系数及压缩或压入强度、破断能间有极显著的线性相关。

关键词 猕猴桃、蠕变、应力松弛、果实硬度、粘弹性、贮藏

中图分类号 S663.909

设计和使用猕猴桃果实的贮藏、加工、运输机械及设备时, 果实的生物力学特性是必不可少的基础资料。然而, 国内外对猕猴桃果实的生物力学特性研究极少。本文着重研究猕猴桃果实的载荷—变形特性、蠕变及应力松弛特性, 用电子计算机解析压缩及压入强度、破断能、蠕变和应力松弛变化的等价粘弹性模型及参数, 并对力学特性值随贮藏时间的变化进行回归分析, 为贮藏、加工及运输机械的设计和使用提供依据。同时, 探讨果实的生物力学特性值和硬度的相关性, 探求无损测定硬度和品质的新方法。

1 材料及方法

1.1. 材料

采用日本福冈县生产的猕猴桃果实(品种为海沃德, 长 64~74 mm, 长径 50~60 mm, 短径 46~52 mm, 单个果重 100~115 g)。采收后即运回实验室, 装入铺有塑料薄膜的水果周转箱内, 并将薄膜折起覆盖, 然后在温度 3℃, 相对湿度 95% 条件下贮藏。此后, 每 14 d 测试一次。

1.2 装置

试验装置如图 1 所示, 检测器①和测定器②构成流变仪(日本山电股份有限公司产), 精度为 1 g 或 0.01 mm。选择测定器②的测定方式, 可以分别进行压缩、蠕变及应力松弛试验。从测定器②输出的模拟信号(载荷或变形量), 经 A/D 转换器变成数字信号后输入电子计算机③(NEC 产), 自动按程序进行解析, 解析结果显示在计算机屏幕上, 并由绘图仪④(山电产)输出。

1.3 方法

1.3.1 压缩试验 用平板压缩试样; 压入试验分别用 $\phi=8\text{ mm}$ 的塑料圆柱压头和 $\phi=12.7\text{ mm}$ 的球形压头从果皮上压入果实侧面^[1]。测定数据直接由计算机解析, 求出破断载荷、破断能及变形量。压缩速度均为 1 mm/s 。

1.3.2 蠕变试验 用定载荷压缩试样使之变形, 经过 5 min 后卸载。蠕变变形随时间的变化由检测器的驱动电机检测, 经 A/D 转换器变成数字量输入电子计算机, 电子计算机自动解析粘弹性模型和参数。由预备试验, 定载荷确定为 20 N , 并在 10 、 20 、 30 、 40 及 50 N 不同定载荷下进行蠕变试验, 探讨不同定载荷对粘弹性参数的影响。

1.3.3 应力松弛试验 将试样在一定变形量下应力随时间的变化用记录仪记录下来, 由记录曲线解析粘弹性力学模型和参数。定变形量确定为 3 mm (不损伤果实), 并改变定变形量为 2 、 3 、 4 和 5 mm 四级, 以分析定变形量大小对粘弹性参数的影响。

蠕变和应力松弛试验用 $\phi=80\text{ mm}$ 的塑料圆柱盘加载, 加载速度均为 5 mm/s 。

1.3.4 果实硬度 用果实硬度计测定, 以果实赤道上 3 个点 (约相差 180°) 的平均值表示。

考虑到农产品的力学特性测定值分散较大, 因此, 每一试区用 30 个果实, 结果用平均值表示。

2 结果及分析

2.1 果实硬度

对果实硬度进行测定的结果表明: 刚采收的果实硬度较高, 约为 $2.4 \times 10^5\text{ Pa}$, 随贮藏时间增加逐渐软化; 78 d 后, 减小到刚采收的 $1/2$, 进入适熟状态。在本试验贮藏条件下, 硬度随贮藏时间呈指数函数变化, 即:

$$H = 2.37 \times e^{-0.0079T} \quad (r = 0.96, \alpha = 0.01)$$

式中: H ——果实硬度 (10^5 Pa); T ——贮藏时间 (d)

2.2 压缩压入特性

图 2 为果实的载荷-变形量曲线。显然, 不管采用平板、圆柱或球形压头, 都无生物屈服点出现, 载荷及变形量均匀增加, 达到强度极限后被破坏。

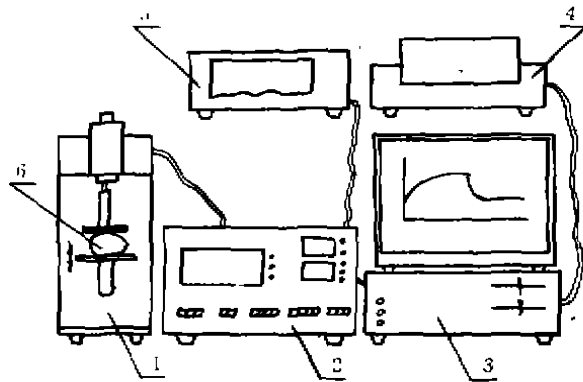


图 1 试验装置示意图

1. 检测器 (RE-3305-2); 2. 测定器 (RE-3305-1);
3. 计算机 (PC-9801); 4. 绘图仪 (DR-1100);
5. 记录仪 (UP-6543); 6. 试样

为了比较不同装箱状态下果实的强度, 从赤道的长径方向和短径方向用平板进行压缩试验的结果表明, 虽然达到破断点的变形量几乎相同, 但短径方向压缩强度(即破断载荷)约为长径方向的 1.3 倍。因此, 贮藏或运输时, 最好使短径方向垂直装箱, 以提高抗损伤能力。

破断载荷 F_b 及破断能 E_b 在贮藏中的变化如表 1 所示。平板压缩时的 F_b 和 E_b 比圆柱或球形压头压入大得多, F_b 和 E_b 均随贮藏时间增加呈指数函数减小。

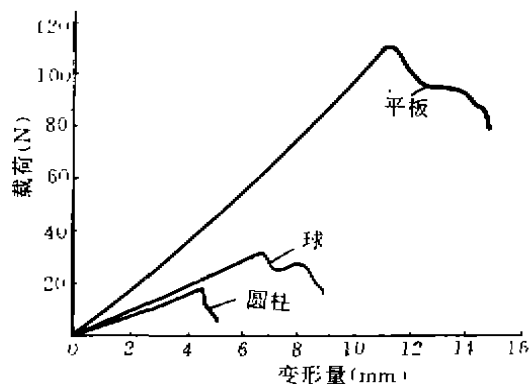


图2 载荷-变形量曲线

表1 破断载荷和破断能在贮藏中的变化

压头形式	破断载荷 $F_b(N)$		破断能 $E_b(J)$	
	回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
平板	$F_b = 152.1 \cdot e^{-0.00027t}$	0.98 ^{**}	$E_b = 0.7636 \times e^{-0.00247t}$	0.96 ^{**}
圆柱	$F_b = 34.1 \cdot e^{-0.00857t}$	0.94 ^{**}	$E_b = 0.1127 \cdot e^{-0.01017t}$	0.86 ^{**}
球	$F_b = 25.9 \cdot e^{-0.00507t}$	0.93 ^{**}	$E_b = 0.0761 \times e^{-0.01077t}$	0.97 ^{**}

2.3 蠕变特性

大部分农产品在外力作用下所表现出的粘弹性, 可以用蠕变或应力松弛表示。所谓蠕变, 严格定义为在恒定应力作用下, 物体的应变随时间的变化^[2]。用平板对球形或椭球形果实加载时, 接触面积不断变化, 难以保持恒定应力。因此, 本文将蠕变广义解释为恒定载荷作用下物体的变形随时间的变化, 并在该解释下进行分析。

图3表示在不同定载荷作用下, 果实变形随时间变化的测定结果。图中曲线与巴格斯模型的蠕变曲线^[3]极为相似。利用电子计算机对曲线进行解析的结果表明, 猕猴桃果实的粘弹性特性, 可以用图3中所示的6单元 Burgers 模型表示。加载过程中变形随时间的变化如下:

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_0} + \frac{F_0}{\gamma_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{F_0}{\gamma_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + \frac{F_0 t}{\eta_3} \quad (1)$$

式中: $D(t)$ ——变形量(mm); F_0 ——定载荷(N); $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ ——弹性系数(10^3 N/m);

τ_1, τ_2 ——延迟时间(s), $\tau_1 = \frac{\eta_1}{\gamma_1}, \tau_2 = \frac{\eta_2}{\gamma_2}$; η_1, η_2, η_3 ——粘性系数($10^3 \text{ N} \cdot$

s/m); t ——时间(s)。

(1)式右边第1项表示瞬息弹性变形, 第2项和第3项表示延迟弹性变形, 第4项表示粘性流动^[4]。在时间 t_1 卸载后, 瞬息弹性变形 F_0 / γ_0 立即恢复, 但是, 由于阻尼器 η_3 流动引起的变量 $F_0 \cdot t_1 / \eta_3$ 将永不恢复, 成为永久变形。卸载后的恢复曲线可用下式描述:

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_1} (1 - e^{-t/\tau_1}) \cdot e^{-\alpha(t-t_1)} + \frac{F_0}{\gamma_2} (1 - e^{-t/\tau_2}) \cdot e^{-\alpha(t-t_1)} + F_0 t_1 / \eta_3 \quad (t > t_1) \quad (2)$$

在不同定载荷下进行蠕变试验的结果表明, 粘弹性参数因定载的不同有所变化, 变异系数一般在 16.7% 以下, 而且果实个体之间的差异较大。因此可以认为粘弹性参数的变化不是由定载不同引起的, 而是由于试样之间的差异造成的。

在贮藏过程中, 猕猴桃果实逐渐变软, 粘弹性系数也随之变化。试验结果表明, 与 γ_1 , γ_2 相比, γ_0 变化极微, 其值也小, 约为 10^4 N/m。 γ_1 和 γ_2 几乎相同, 在贮藏初期为 58.8×10^3 N/m, 78 d 后呈线性减小到 39.2×10^3 N/m。

粘性系数 η_1 , η_2 和 η_3 同样表现出减小趋势, η_1 约为 η_2 的 10 倍, η_3 约为 η_2 的 100 倍。

如上所述, 猕猴桃果实的 γ_0 较小, 而 η_3 较大, 表明果实的变形主要取决于瞬息弹性变形和延迟变形, 由粘性流动引起的变形量较小, 卸载后易于恢复。

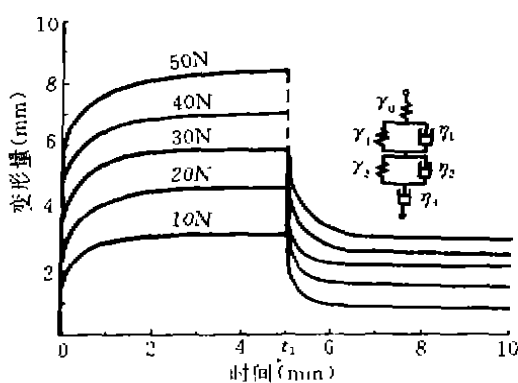


图 3 不同定载下的蠕变曲线和粘弹性模型

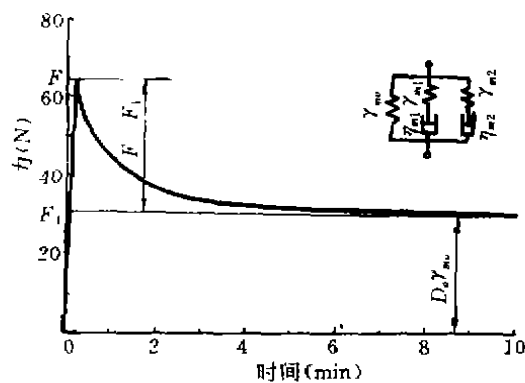


图 4 3 mm 定变形量下应力松弛曲线及粘弹性模型

2.4 应力松弛特性

由图 4 可知, 在一定变形量下, 果实受力 $F(t)$ 随时间增加呈指数函数减小, 经过较长时间后, 趋近于一定值, 留下残余应力。根据逐次余数法^[5]对果实的应力松弛曲线进行解析, 结果表明, 这种变化可以用图 4 中的 5 单元 Maxwell 模型表示, $F(t)$ 随时间的变化如下:

$$F(t) = D_0 \left(\gamma_{m_1} e^{-t/\tau_{m_1}} + \gamma_{m_2} e^{-t/\tau_{m_2}} \right) + D_0 \gamma_{m_0} \quad (3)$$

式中: D_0 ——定变形量(mm); γ_{m_0} , γ_{m_1} , γ_{m_2} ——弹性系数(10^3 N/m); τ_{m_1} , τ_{m_2} ——松弛时间(s), $\tau_{m_1} = \gamma_{m_1} / \eta_{m_1}$, $\tau_{m_2} = \gamma_{m_2} / \eta_{m_2}$; η_{m_1} , η_{m_2} ——粘性系数(10^3 N·s/m); t ——时间(s)

用 5 单元 Maxwell 模型表示果实的应力松弛特性, 模型的粘弹性系数随贮藏时间增加而减小, γ_{m_0} 由 6.08×10^3 N/m 逐渐减小到 4.13×10^3 N/m; γ_{m_1} 和 γ_{m_2} 变化

较小,且二者的值基本相同,在贮藏中平均为 $1.19 \times 10^3 \text{ N/m}$, η_{m_1} 由 $287.78 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 减小到 $201.01 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, η_{m_1} 由 $25.3 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 减小到 $17.1 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

2.5 测定指标间的相关性

压缩或压入强度、力学模型的弹性系数和果实硬度,分别从不同的侧面,反映了果实的成熟度。对以上测定数据进行了相关分析结果(表2)表明,破断载荷和破断能均与果实硬度线性正相关,因此,测定果实硬度值,可以推算出使其损伤的力或能量;相反,也可以利用破断载荷或能量,评价果实的成熟度。

表2 生物力学特性值和果实硬度H的相关性

生物力学特性值		回 归 方 程	相关系数
破断载荷 F_b (N)	平板	$F_b = -17.225 + 6.919 \times 10^{-4} H$	0.97**
	圆柱	$F_b = 9.211 + 6.914 \times 10^{-5} H$	0.96**
	球	$F_b = -0.273 + 1.430 \times 10^{-4} H$	0.96**
破断能 E_b (J)	平板	$E_b = -2.334 + 4.095 \times 10^{-5} H$	0.98**
	圆柱	$E_b = -0.047 + 3.259 \times 10^{-6} H$	0.97**
	球	$E_b = -0.194 + 5.528 \times 10^{-6} H$	0.91**
Burgers 模型弹性 系数 $\gamma_0, \bar{\gamma}$ (10^3 N/m)	平板	$\gamma_0 = 3.645 + 2.969 \times 10^{-5} H$	0.96**
	平板	$\bar{\gamma} = 6.184 + 2.240 \times 10^{-4} H$	0.96**
Maxwell 模型弹性 系数 $\gamma_0, \bar{\gamma}$ (10^3 N/m)	平板	$\gamma_{m_0} = 1.299 + 1.929 \times 10^{-6} H$	0.99**
	平板	$\bar{\gamma}_m = 0.252 + 5.042 \times 10^{-6} H$	0.95**

由表2还可以看出,弹性系数与果实硬度在1%置信水平上线性显著相关,据此对果实进行蠕变或应力松弛试验,可以无损测定果实的成熟度。

3 结 论

1) 猕猴桃果实硬度随贮藏时间增加呈指数函数减小,并与破断载荷及破断能线性相关,因此可用破断载荷或能量评价果实的成熟度。

2) 果实的破断载荷和破断能在贮藏中逐渐减小;果实赤道短径方向的抗压强度高,于长径方向,故应使短径方向垂直装箱。

3) 果实的蠕变和应力松弛现象,可分别用6单元 Burgers 模型和5单元 Maxwell 模型表示。模型的粘弹性系数均随贮藏时间增加而减小。

4) 定载荷或定变形量对力学模型的粘弹性系数影响较小。

5) 果实力学模型的弹性系数与果实硬度线性相关,因此,可对果实进行蠕变或应力松弛试验,无损测定其成熟度。

参 考 文 献

- 1 Kojima T. Mechanical properties and resonant vibration characteristics of fruits. *Bull Fac Agr, Saga Univ*, 1983, 3: 10~11(日文版)
- 2 Mohsenin N N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1970: 126~139
- 3 赵学笃, 陈元生, 张守勤. 农业物科学. 北京: 机械工业出版社, 1987: 20~30
- 4 Ishibashi S, Kojima T. Studies on the mechanical properties of agricultural products. *J S A M Japan*, 1970: 32(1): 59~64(日文版)
- 5 李瀚如, 潘君桥. 农业流变学导论. 北京: 农业出版社, 1990: 93~95

A Study on Biomechanical Properties of Kiwi Fruit

He Dongjian¹ Gao Weiming²

(1 Agro-engineering Department, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

(2 Wood Engineering Department, Northwestern College of Forestry, Yangling, shaanxi, 712100)

Abstract Rheometer—the computer timing determination installation is used to determine and analyse biomechanical properties of Kiwi fruit including deformation, creep and stress relaxation and also to study the correlation relations between fruit hardness and mechanical properties. The results showed that the compression or compressive strength and rupture energy of fruit decreased with an increase in storage time; creep and stress relaxation of fruit were expressed with 6-element Burgers model and 5-element Maxwell model separately; viscosity and elasticity coefficients of mechanical model vary with an increase in storage time; fruit hardness, elasticity coefficients of mechanical model of viscosity and elasticity, compression or compressive strength and rupture energy were found to have a strong linear relation.

Key words Kiwi, creep, stress relaxation, fruit hardness, viscosity and elasticity