

# 苹果蠕变特性与静载损伤机理的研究

李小昱 朱俊平 王 为 王耀忠

(西北农业大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 在描述苹果蠕变现象四元件 Burgers 模型的基础上, 建立了四元件五参数模型, 研究了静载损伤与所受载荷、作用时间、变形量之间的关系, 提出了苹果蠕变损伤的主要原因是其变形量超出了临界变形值, 并且模型的粘弹性系数与损伤体积有着显著的线性相关关系。

**关键词** 苹果, 蠕变, 静载, 损伤

**中图分类号** S661.109.3, Q66

苹果是中国栽培的主要果树种类, 其产量占水果生产的首位。值得注意的是, 在苹果大幅度增产和迅速商品化的同时, 每年的损失量也相当惊人, 而机械损伤是其损坏的主要形式。这大大降低了苹果的品质与经济价值, 影响了国内外市场竞争的能力, 阻碍了苹果生产的进一步发展。因此, 了解苹果机械损伤的生物力学特性是非常重要的。这些年来, 对水果静载损伤与力学特性的研究得到了国内外研究者的重视<sup>[1~6]</sup>。一种观点认为水果损伤是根据载荷条件由剪切或法向应力所致, 即所谓最大应力观点。近年来, 有文献提出水果损伤可根据某一正应变是否超过极限应变值来确定, 即所谓临界应变的新观点。这两种损伤机理的观点完全不同, 但至今未有结果<sup>[1,3]</sup>。也有研究者得出苹果在静载作用下变形的数学模型<sup>[4]</sup>。这些观点均在探索之中<sup>[1,3]</sup>。由于绝大多数水果都表现出粘弹性性质, 因而较多论文论述了水果流变特性和流变方程的问题, 而对流变特性与损伤机理关系的研究则较少。本文着重从苹果的蠕变特性与规律, 探讨其静载损伤的机理, 以促进对机械损伤理论基础与规律的认识, 寻求在生产实际中预测、控制和减少机械损伤的途径。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

采用苹果试样的直径在 62.5~85.1 mm, 硬度在 0.92~1.50 MPa。

### 1.2 试验装置

试验使用自行研制的农业物料试验机<sup>[9]</sup>, 被试苹果在底座用一蜡盘中的熔蜡冷凝固定。配备了力传感器和位移传感器, 其信号通过动态应变仪放大后, 由光线示波器或磁带机记录, 数据处理由电子计算机完成。

### 1.3 试验方法

采用二因素完全随机试验方案<sup>[10]</sup>, 文献[4,6]在静载试验中将加载时间定为 2~6 min, 为了进一步研究其粘弹性特性, 其试验因素水平的取值见表 1。考虑到苹果的力学特

收稿日期 1997-05-15

课题来源 陕西省自然科学基金资助项目

作者简介 李小昱, 女, 1953 年生, 副教授

性测定值较为分散, 每工况重复 3 次。

试验完成后, 损伤体积的测定采用 Schoorl<sup>[11]</sup> 等所叙述的计算体积法。

## 2 结果与分析

### 2.1 数学模型

#### 2.1.1 四元件 Burgers 模型

蠕变试验是研究材料粘弹性质的重要方法之一, 它描述了在恒定载荷(常应力)作用下, 变形(应变)随时间的变化历程。图 1 表示在不同定载荷作用下, 变形随时间变化的测定结果。

根据测定的数据及特性曲线图, 对于较大定载荷(本次试验中载荷为 4.5 kg 和 6.5 kg), 可用四元件 Burgers 模型<sup>[12~15]</sup>来描述苹果的蠕变现象(图 2), 加载过程中变形随时间的变化如下:

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_0} + \frac{F_0}{\gamma_1}(1 - e^{-t/\tau_1}) + \frac{F_0}{\eta_2}t \quad (1)$$

式中,  $D(t)$  为变形量(mm);  $F_0$  为定载荷(kg);  $\gamma_0, \gamma_1$  为弹性系数( $10^2 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ );  $\tau_1$  为延迟时间(s),  $\tau_1 = \eta_1/\gamma_1$ ;  $\eta_1, \eta_2$  为粘性系数( $10^2 \text{ kg} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$ );  $t$  为时间(s)。

卸载后的恢复曲线可用下式描述:

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_1}(1 - e^{-t_1/\tau_1})e^{-(t-t_1)/\tau_1} + \frac{F_0}{\eta_2}t \quad (2)$$

式中,  $t_1$  为卸载时间(s)。

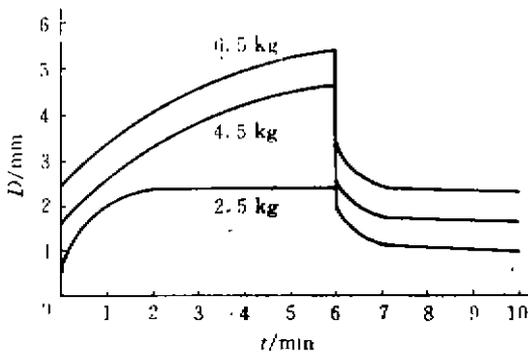


图 1 不同载荷下的蠕变曲线

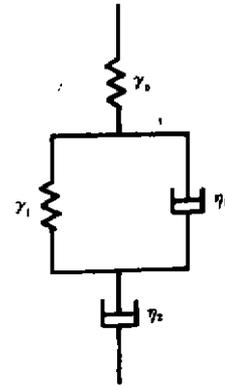


图 2 四元件 Burgers 模型

根据最小二乘法原理, 采用逐次逼近法, 以计算机对曲线进行解析拟合, 求出其流变特性参数及相关系数, 其相关系数均在 0.97 以上。由(1)式也可看出, 其变形量与所受载荷成正比, 并随加载时间的增大而增大。那么苹果的静载损伤可用其蠕变特性来描述。

2.1.2 四元件五参数模型 由蠕变试验曲线和数据可知, 当定载荷较小时(载荷为 2.5 kg), 蠕变曲线很平缓, 变形随时间达到一定值后, 则不再变化, 这种现象称之为“应变饱和”<sup>[16]</sup>。在几种常见流变学模型中, Burgers 模型相对最好, 它能反映出瞬时弹性变形、延迟弹性变形和粘性流动的性质, 但不能很好反映蠕变特性中的“应变饱和”现象。考虑到

“应变饱和”效应,对 Burgers 模型进行了如下修正<sup>[17]</sup>:将该模型的外部阻尼器扩展为一个广义阻尼器,它是由具有不同粘滞度的多个阻尼器元件并联而成,并且随着加载时间的延长,并联阻尼器的个数按一定规律增加,由此,该广义阻尼器的粘滞度便随加载时间而增大,从而有效地弥补了 Burgers 模型的不足。结合蠕变试验结果,取广义阻尼器的粘性系数为  $\eta(t) = Ae^{Bt}$  (式中  $A, B$  为材料参数,  $t$  为加载历时),并称这一模型为四元件五参数模型 ( $\gamma_0, \gamma_1, \eta, A, B$ )。该模型能精确地反映苹果蠕变试验中的“应变饱和”现象,其简图如图 3 所示(将广义阻尼器用具有粘性系数  $\eta(t) = Ae^{Bt}$  的单一阻尼器表示)。

描述该蠕变特性的模型,可由弹簧元件  $\gamma_0$ 、Kelvin 元件和广义阻尼器元件的蠕变方程线性迭加而得:

加载时:

$$D(t) = F_0 [1/\gamma_0 + (1 - e^{-Bt})/A \cdot B + (1 - e^{-t/\tau})/\gamma_1] \quad (3)$$

卸载时:

$$D(t) = F_0 [(1 - e^{-Bt})/A \cdot B + \frac{1}{\gamma_1} (1 - e^{-t/\tau})] e^{-t/\tau} \quad (4)$$

模型中各参数意义同前述。

同理,以计算机对曲线进行解析拟合,求出模型的 5 个参数

及相关系数。其相关系数均在 0.98 以上,这证明了该模型表征蠕变特性的“应变饱和”现象是合理和有效的。

## 2.2 数据分析

2.2.1 损伤体积与载荷、时间的关系 由散点图和试验数据检验了试验因素载荷与时间对试验指标损伤体积影响的显著性,由表 2 可知,时间对损伤的影响显著,而载荷对损伤的影响极显著。那么,可建立损伤体积关于载荷与时间的二元线性回归模型,即:

$$Y = -138.526 + 77.143X_1 + 1.312X_2 \quad (5)$$

$$2.5 \leq X_1 \leq 6.5 \quad 6 \leq X_2 \leq 12$$

式中,  $Y$  为损伤体积 ( $\text{mm}^3$ ),  $X_1$  为所受载荷 ( $\text{kg}$ ),  $X_2$  为作用时间 ( $\text{min}$ )。

表 2 蠕变试验因素方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	58236.16	2	29118.08		
载荷	797481.76	2	398740.88	8.81	**
时间	475095.52	2	237547.76	5.25	*
误差	904943.91	20	45247.20		
总计	2235757.35	26			

注:  $F_{0.01}(2,20) = 5.85, F_{0.05}(2,20) = 3.49$

对回归方程进行显著性检验,  $F_{0.01}(2,6) = 10.92, F = 11.52^{**}$ ,故回归方程极显著。

然后对偏回归系数进行显著性检验,  $t_{0.01}(6) = 3.21$ , 而  $t_1 = 4.47^{**}, t_2 = -11.41^{**}$ , 偏回归系数均达到极显著水平,说明二个自变量载荷与时间均重要,不必对自变量进行剔除工作,故该二元线性回归方程具有实际意义。

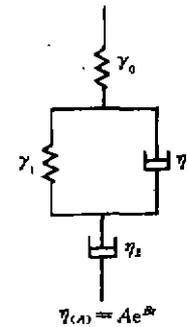


图 3 四元件五参数模型

由试验曲线与数据可知,当所受载荷一定时(除“应变饱和”现象外),变形随作用时间的增大而增大。作用时间短,则变形量小,苹果不发生损伤,作用时间长,则变形量大,达到一极限变形值时苹果产生损伤。同样,当作用时间一定时,变形量与所受载荷成正比。所受载荷小,则变形量小,苹果不发生损伤,所受载荷大,则变形量大,达到一极限变形值时苹果产生损伤。另外,当所受载荷较小时,所造成的变形量也小,虽然作用时间不断增加,但出现“应变饱和”现象,变形不再增大,苹果并不产生损伤。由此表明,蠕变损伤与载荷或时间造成的一极限变形值有关,当变形量达到某临界值时则产生损伤。

2.2.2 损伤体积与变形量的关系 为了定量地描述损伤体积与苹果变形量之间的关系,对其作相关性分析,得线性回归方程为:

$$Y = -72.556 + 67.487X \quad (X \geq 1.075 \text{ mm}) \quad (6)$$

其  $F=17.521$ ,  $r=0.945$ , 而  $F_{0.01}(1,25)=7.77$ ,  $r_{0.01}(25)=0.478$ 。经检验回归方程是有意义的。

由上式可知,其回归截距为负值,那么当  $X \geq 1.075$  时,方程才有实际意义。这表明,苹果发生损伤的临界变形值为  $1.075 \text{ mm}$ ,这与试验结果也是吻合的。对于不同品种,不同成熟度等物性条件的苹果,其发生损伤的临界变形值是不同的。

综上所述,在蠕变过程中,苹果损伤的主要原因是由于变形超过一临界变形值造成的,即临界应变破坏的观点<sup>[1]</sup>。临界应变破坏理论表现在蠕变现象中则为:在恒定载荷(应力不变)情况下,变形(应变)随时间变化,达到某临界值形成破坏。另外,变形量也随所受定载荷的增大而增大,同样达到某临界值时形成破坏。那么,用临界应变破坏理论来解释苹果蠕变损伤是合理的。

2.2.3 损伤体积与粘弹性系数的关系 苹果的蠕变现象可用四元件的 Burgers 模型和四元件五参数模型来描述。试验结果表明,模型的粘弹性系数是苹果本身固有的,不随外部载荷、变形量等条件发生变化。因此,可研究损伤体积与粘弹性系数的关系,以无损测定或判断苹果的损伤状态。其回归方程及显著性检验如表 3。

结果表明,苹果的粘弹性参数  $\gamma_0$ 、 $\gamma_1$ 、 $\tau_1$ 、 $\eta_2$  与损伤体积线性显著相关。那么,在生产实际中,可用粘弹性参数来评价、预测和控制苹果的损伤。

表 3 损伤体积与粘弹性系数的关系

回归方程	F 值	r 值
$V=341.407-8145.290\gamma_0$	6.583*	-0.498**
$V=340.137-696.142\gamma_1$	6.141*	-0.185**
$V=-53.692+63.588\tau_1$	7.140*	0.513**
$V=160.498-14.136\eta_2$	36.287**	0.833**

注:  $F_{0.05}(1,25)=4.24$ ;  $F_{0.01}(1,25)=7.77$ ;

$r_{0.05}(25)=0.381$ ;  $r_{0.01}(25)=0.478$ 。

### 3 结论与讨论

1) 苹果的蠕变现象可用四元件 Burgers 模型来描述;当作用载荷较小时,由于蠕变产生了“应变饱和”现象,用四元件五参数模型能很好描述这一现象。

2) 苹果损伤体积与所受载荷及作用时间显著相关,据此,建立了损伤体积与载荷、时间之间的二元线性回归模型。另外,苹果的蠕变损伤与载荷或时间造成的临界变形值有关,由此,建立了损伤体积与变形量之间的一元线性回归模型。那么用所受载荷、作用时间或变形量均可预测和控制苹果的静载损伤。

3) 苹果蠕变损伤的主要原因是其变形量超出了一临界变形值造成的。因此,用临界应

变破坏理论来解释苹果蠕变损伤机理是合理的。

4) 苹果的粘弹性参数是本身固有的,不随外部载荷、变形等条件发生变化。所以,分别建立了损伤体积与粘弹性系数之间的线性回归模型,由粘弹性系数可无损地评价和测定苹果的静载损伤。

5) 在生产实际中,一旦确定了描述蠕变的模型和参数,那么可计算其蠕变变形量,以预测和控制引起损伤的临界变形值,来减少苹果的静载损伤。

#### 参考文献

- 1 王泽南,单明彻. 水果机械特性及损伤的研究. 农牧与食品机械,1986,3:19~25
- 2 Peleg M. Compression failure patterns in some juicy fruits. J Food Sci,1976,41:1320~1324
- 3 孙一源,余登苑. 农业生物力学及农业生物电磁学. 北京:中国农业出版社,1996:205~262
- 4 冯能莲. 苹果在静载作用下的变形规律. 安徽农业大学学报,1995,22(2):168~172
- 5 石曙东,孙一源. 影像云纹法测定苹果及土豆的流变特性. 流变学进展,上海,华东化工学院出版社,1990:321~323
- 6 冯能莲,单明彻. 苹果静重损伤规律的研究. 安徽工学院学报,1990,9(4):74~80
- 7 Sherif S M, Segerlind L J, Frame J S. An equation for the modulus of elasticity of a radially compressed cylinder. Trans ASAE, 1976,19:782~786
- 8 Baerdemaeker De J G, Segerlind L J. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh. Trans ASAE, 1976, 19:346~348
- 9 李小昱,王 为,孙 驷. 农业物流变特性试验机的研制. 西北农业大学学报,1996,24(6):105~107
- 10 莫惠栋. 农业试验统计. 上海:上海科学技术出版社,1990
- 11 Schoorl D, Holt J E. Bruise resistance measurement in apple. Journal of Texture Studies, 1980,11(4):389~394
- 12 赵学笃,陈元生,张守勤. 农业物科学. 北京:机械工业出版社,1987:25~29
- 13 李小昱,王 为,孙 驷等. 苹果流变特性的研究. 西北农业大学学报,1991,19(3):70~74
- 14 周祖卿. 农业物科学. 北京:农业出版社,1994,36~39
- 15 Cenkowski S, Bielewicz J, Britton M G. A single kernel creep and recovery test. Trans ASAE, 1991, 34(4):2484~2490
- 16 冈小天著;吴云鹏,陶祖莱译. 生物流变学. 北京:科学出版社,1980:110
- 17 徐世法. 表征沥青及沥青混合料高低温蠕变性能的流变学模型. 力学与实践,1992,14(1):37~40

## A Study on Creep Properties and Static Loading Damage Mechanisms of Apple

Li Xiaoyu Zhu Junping Wang Wei Wang Yaozhong

(College of Mechanical and Electronics Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

**Abstract** The four elements-five parameters model was established to describe the creep phenomena of apple based on the four elements Burgers model. Relationships of static damage and loading, as well as time and deformation were investigated. The reason of creep damage was deformation values in excess of threshold. There existed a remarkable linear correlation between the model's viscoelastic coefficients and bruise volume.

**Key words** apple, creep, static loading, damage