

# 水果和蔬菜的生物力学 (续)

K. Peleg

## V. 水果和蔬菜的流变模型

许多农产品的力-变形曲线具有典型的 S 形状。图 5 中的曲线  $F = f(X + x)$  就是这种力-变形方式的一个例子。Chuma et al (1978) 报道了单是桔子的一条类似的力-变形曲线, Pitt & Chen (1983) 和 Peleg (1981) 则发现, 对于装在波纹纸板装运箱中的苹果, 具有同样的曲线形状。

对于由波纹纸板减振材料、机械隔离支架以及水果和蔬菜等组成的一类包装系统, Peleg (1983) 提出了一种非线性流变模型, 用来改进预测这类包装系统的粘塑性材料行为的方法。

跟线性模型不一样, 这个模型跟典型流变试验中获得的观测资料并不矛盾。

这个模型包括具有两个 3 次方弹性特性的非线性弹簧, 一个是粘性阻尼器(粘壶), 另一个是 Coulomb 阻尼器 (图 5)。

在准静态常加载速率  $V$  下, 这个模型通过两个变形区域, 一个是对于  $X \leq x_p$  的弹性变形区域, 另一个是对于  $X > x_p$  的弹塑性区域, 如图 5 所示。

在弹性区域, 只有硬的弹簧变形, 而软的弹簧则由于 Coulomb 阻尼器的作用保持是刚性的。弹性区域结束于此模型中使阻尼元件运动所需要的力达到最小值  $F_p$  时, 这时弹塑性变形开始。在任何时候, 模型的总变形可以由两个弹簧的变形之和得到。硬弹簧的弹性变形  $X$  与时间无关, 软弹簧的变形  $x$  则由于并联的粘壶力  $C\dot{x}$  的作用而与时间有关。

只要两个弹簧的哪一个都不达到底部, 即都不变成刚性的, 这种力-变形方式就是正确的。如果在某一变形  $x_b$  下硬弹簧到了底, 则所有以后的变形都将只在软弹簧上产生。不管硬弹簧是否到达了底部, 模型的两个部分都必然总是传递着相等的力  $F$ 。在软弹簧发生变形以前, 这个力一定大于  $F_p = CV + F_f$ 。只要变形小于  $x_p$  和施加的力小于  $F_p$ , 则模型就显示出具有非线性(硬)刚度的弹性体特性。大于  $x_p$  的变形包括与刚度降低(例如软弹性)同时发生的塑性变形。也计算了屈服力  $F_y$  及其相应的变形  $x_y + X_p$ 。硬弹簧到达底部以前, 它的力-变形方程为

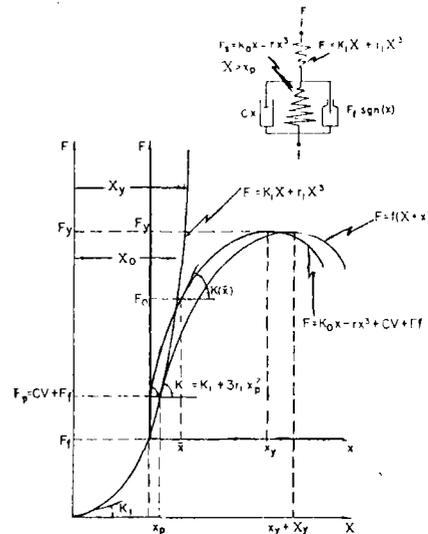


图 5 非线性粘塑性固体的常速率力与变形的关系曲线。右上角的小图表示描写控制方程中参数的力学模型

$$X \leq x_p, F = K_1 X + r_1 X^3 \quad (26)$$

而在常加载速率  $\dot{x} = V$  下, 模型的弹塑性部分的力-变形方程为

$$F = K_0 x - r x^3 + C V + F_f \quad (27)$$

或换个写法,

$$F = K_0 x - r x^3 + F_p \quad (28)$$

为了使用这个模型, 我们必须知道方程 (26) 和 (28) 中的参数  $K_1, r_1, K_0, r$  和  $F_p$ 。

对于实际的粘塑性材料, 当然, 并不存在如图 5 中的力学模型所描述的弹簧或阻尼器。可是, 通过如 Peleg (1983) 所描述的从实际的力-变形曲线确定参数  $K_1, r_1, K_0, r$  和  $F_p$ , 就可在模型跟实际的粘塑性材料之间建立一个一一对应的关系。

如果把某一变形  $X_0$  突然施加在模型上并保持不变, 则最初此变形将全部由硬弹簧来承受。作用在模型上的初始力  $F_0$  将是

$$F_0 = K_1 X_0 + r_1 X_0^3 \quad (29)$$

随着时间的流逝, 随着硬弹簧的变形的恢复而弹塑性部分从  $x=0$  被压缩到某  $x(t)$  值, 作用在模型的两个部分上的力将逐渐减小。在所有的时空中, 模型的总变形  $X_0$  是不变的, 而且是由它的两个部分的变形所组成, 即  $X + x = X_0$ 。模型中产生力的松弛所需要的最小变形是  $x_p$ 。如果  $X_0 < x_p$ , 则初始力  $F_0$  将不足以作用到模型的弹塑性部分上, 因此,  $X$  不随时间而恢复, 力不随时间而减小。于是,  $X_0 \geq x_p$  是松弛的先决条件。当这个先决条件存在时, 硬弹簧的变形从  $X_0$  减小到  $x_p$ , 而软弹簧的变形则从 0 增加到某  $x$  值。

Peleg (1983) 指出, 在  $X_0$  下非线性固体的力松弛函数  $F(t)$  可以写为

$$\begin{aligned} F(t) &= F_0 - \left[ (F_0 - F_f) / \left( 1 + \frac{K_1 + 3r_1 x_p^2}{K_1 + 3r_1 X_0^2} \right) \right] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \\ &= F_0 - \frac{F_r}{K_r} (K_1 + 3r_1 X_0^2) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

式中  $F_r$  为用来产生  $x$  的合力:

$$F_r = F_0 - F_f \quad (31)$$

$K_r$  为等效松弛弹簧速率:

$$K_r = (K_1 + 3r_1 x_p^2) + (K_1 + 3r_1 X_0^2) = 2K_1 + 3r_1 (x_p^2 + X_0^2) \quad (32)$$

而松弛时间常数为  $T_r = C/K_r$ 。

非线性固体的诸性能可以利用松弛模量进一步搞清楚。为此目的, 用  $K_1 X_0 + r_1 X_0^3$  来代替  $F_0$ 。从而在某一变形  $X_0$  下, 松弛模量  $E(t)$  就可以确定为  $E(t) = F(t)/X_0$ 。因此, 根据方程 (30), 我们有

$$E(t) = K_1 + r_1 X_0^2 - \left[ \left( K_1 + r_1 X_0^2 - \frac{F_f}{X_0} \right) / \left( 1 + \frac{K_1 + 3r_1 x_p^2}{K_1 + 3r_1 X_0^2} \right) \right] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \quad (33)$$

这样确定的松弛模量依赖于时间和变形。在模量形式下, 可以把它看成是: 在零时刻,

$$E_0 = K_1 + r_1 X_0^2$$

而当  $r_1 \neq 0$  时, 我们有非线性的弹性模量, 或者当  $r_1$  可以忽略时, 我们有 Hooke 固体的线性弹性模量。如果非线性参数  $r_1$  和  $F_f$  被略去, 则  $E(t)$  就化为 Boltzmann 固体的松弛模量, 它依赖于时间, 但不依赖于变形:

$$E(t)_{r_1=F_f=0} = K_1 - \frac{K_1}{1 + K_0/K_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_v}\right) \right] \quad (34)$$

在定常状态下, 即从施加变形  $X_0$  起经过相当长时间以后, 我们有非线性固体的长期松弛模量  $E_\infty$ :

$$E_\infty = \frac{(K_1 + r_1 X_0^2)(K_1 + 3r_1 x_p^2) + (F_f/X_0)(K_1 + 3r_1 X_0^2)}{(K_1 + 3r_1 X_0^2) + (K_1 + 3r_1 x_p^2)} \quad (35)$$

这可以看成是依赖于变形但不依赖于时间。这里又有, 当  $r_1 = F_f = 0$  时,

$$E_\infty = K_1 K_0 / (K_1 + K_0)$$

即我们有 Boltzmann 固体的长期松弛模量。我们注意到, 根据初始模量和剩余模量  $E_0$  和  $E_\infty$ , 方程 (33) 可以写成

$$E(t) = E_0 \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_v}\right) \right] + E_\infty \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_v}\right) \right] \quad (36)$$

这种确定松弛弹性模量的方法, 是 Yang (1966) 为了把 Hertz 接触问题的解法推广到粘弹性体而采用的。然而, Yang (1966) 用了传统的三参量线性粘弹性模型。Pelcg (1983) 同样把此解法推广到非线性粘塑性体。

注意,  $E(t)$  可以看成是依赖于时间和变形的弹簧速率, 或者看成是依赖于时间和应变的应力应变比。于是,  $E(t)$  既可以表示成单位长度的力, 也可以表示成单位面积的力。

上述关于非线性粘塑性固体的参量的推导, 假设了是准静态常速率加载的情况, 这对于蠕变和松弛的研究是非常有利的。可是, 类似地也可以用来确定动态力-变形曲线的参量, 只要加载速率  $\dot{x} = V = \text{常数}$ 。这发生在动态加载为脉冲式加载的时候。从而我们有阶跃速度  $\dot{x} = V$ 。

然而应当注意, 较快的加载速率将增大  $x_p$  的值, 有效地延长图 5 中的纯弹性硬弹簧区。此外, 用同样的试样由静态和动态试验得到的参量之间, 可以有相当大的差别。于是, 在确定蠕变和松弛研究中的参量时, 我们应该选用准静态力-变形曲线, 而当动态行为是主要的研究目的时, 需要的则是冲击试验。

## VI. 机械损伤的数学模拟

大多数水果和蔬菜的形状是球状或椭球状的。分配过程中的机械损伤, 主要是水果与水果之间以及水果与装运箱壁或箱底之间的接触点处的一种永久变形现象。如果水果是装在具有杯形凹坑的托盘中, 则彼此的接触发生在球形的杯跟杯内的椭球形水果之间。有时, 最严重的损伤发生在收获阶段, 例如采用振动树干或藤蔓的机械化收获。在这些操作过程中, 水果在振动力的作用下脱离树枝之前可能相互碰撞。然后, 它们在下落过程中可能碰撞树枝, 最后, 在自由下落几米之后碰撞地面或收集筐。水果在田间装箱后, 在加工厂里进行加工之前, 暂时储存在田间以及运往加工厂的过程中, 又会增加另一些可能遭受损伤的来源。假定在加工厂里进行分等时可清除掉损伤了的农产品。然而, 非常明显, 不可能把所有损伤了的农产品都清除掉。如果我们假定, 装运箱中的水果都是理想的弹性球, 即在去掉压榨载荷后全部变形可以完全恢复, 则如 Timoshenko & Goodier (1951) 和 Goldsmith (1960) 所述的, 可以直接应用一力作用在两个接触的球上的 Hertz 定律 (1881)。

真实的水果并非理想的弹性材料, 也非几何的球体。不过, 只要假定它们平均来看是球形

并且是粘塑性材料,就可以得到一个相当好的近似(Hamann 1970; Horsfield et al 1972)。

一般地讲,水果和蔬菜的果肉可以看成是非线性粘弹性或粘塑性材料,都具有不同程度的液体性质和固体性质。例如,西红柿的质构(Miles et al 1969)比苹果的更象一种液体,而桔子的粘性成分可以归入二者之间的某一类。这些情况下变形水果的接触面积的很好的近似是圆形形状(Mohsenin 1970; Holt & Schoorl 1977)。在某一给定的挤压力以及碰伤深度下,接触圆的直径可以很容易地测定和算出(Schoorl & Holt 1980)。

遵循 Pao (1955), Goldsmith (1960) 和 Yang (1966) 提出的路线, Peleg (1984a) 指明,对于非线性粘塑性体,用方程 (36) 中的  $E(t)$  代替线性三参量松弛模量,可以得到 Hertz 接触问题的一个良好的近似。这是可能的,因为弹性情况和粘塑性情况的几何形状是相同的,但是粘塑性情况的压坑尺寸依赖于时间。

利用这种非线性松弛模量, Peleg (1984a) 提出了计算农产品碰伤尺寸参量的方程,这些参量例如有常加载力下、变加载力下及二者相结合情况下的接触圆直径和水果变形的深度。也计算了接触圆中心处的最大压力。

实际上,这假定了瞬态变形或快速变形  $X$  仅发生在模型的硬弹簧部分。随着加载后时间的流逝,  $X$  减小,而软弹簧的变形  $x$  增大。于是对于弹性情形,我们具有的是材料性能函数  $\delta(t)$  而非材料性能常数  $\delta$ ;

$$\delta(t) = (1 - \nu^2) / \pi E(t) \quad (37)$$

式中  $\nu$  为 Poisson 比。

根据图 6,如果把两个物体推到一起的加载力是一常数  $F(t) = F_w$ ,比如说是一突然施加的净重,则不仅接近度  $\alpha(t)$ ,而且接触圆直径  $d(t)$ ,都将随时间而增大,而接触压力  $P(t)$  则因此逐渐减小。对于两个相互接触的水果,或一个水果跟一块刚性平面相接触,我们可以写

$$[d(t)]^3 = 6F_w(1 - \nu^2) / E(t) \quad (38)$$

$$P(t)_{\max} = 6F_w / \pi d(t)^2 \quad (39)$$

对处于杯中的水果,可以写出类似的方程。Yang (1966) 证明了在粘弹性的情形,  $1/E(t)$  可以近似地

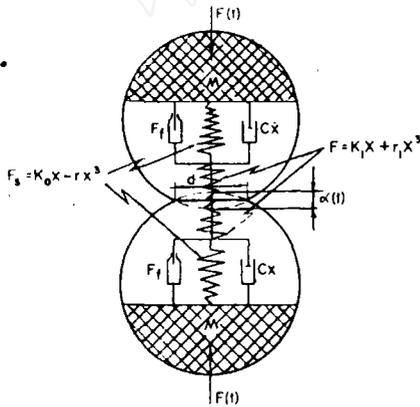


图 6 当两个接触的水果受静态外载荷作用时,或一段时间受变力  $F(t)$  作用时,损伤形成的模型。水果的材料性能用一个定量确定了非线性粘塑性固体各参量的力学模型来描述

用下式来表示:

$$\frac{1}{E(t)} \approx \frac{1}{E_0} e^{-\xi t/T} + \frac{1}{E_\infty} (1 - e^{-\xi t/T}) = \frac{1}{E_\infty} + \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_\infty} \right) e^{-\xi t/T} \quad (40)$$

式中  $\xi$  为渐近松弛模量  $E_\infty$  与瞬态非线性弹性模量  $E_0$  之比:

$$\xi = \dot{E}_\infty / E_0 \quad (41)$$

于是方程 (37) 变为

$$\delta(t) = \left( \frac{1 - \nu^2}{\pi} \right) \left[ \frac{1}{E_\infty} + \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_\infty} \right) e^{-\xi t/T} \right] \quad (42)$$

因为  $E_\infty < E_0$ , 所以  $(1/E_0 - 1/E_\infty) < 0$ 。于是  $1/E(t)$  从  $t=0$  时的 1, 指数式地增大到

$t \rightarrow \infty$  时的  $1/E_\infty$ 。换句话说, 最大损伤直径  $d_{\max}$  由于两个水果之间的接触压力而最后将是, 由方程 (38) 和 (42), 当  $t \rightarrow \infty$  时,

$$d_{\max}^3 = 6RF_w(1-\nu^2)/E_\infty \quad (43)$$

式中  $E_\infty$  由方程 (35) 给出。类似地, 损伤中心处的接触压力  $P(t)_{\max}$ , 可以由方程 (38) 和 (39) 确定:

$$P(t)_{\max} = [6F_w(E(t))^2/\pi^3 R^2(1-\nu^2)^2]^{1/3} \quad (44)$$

$P(t)_{\max}$  从它在  $t=0$  时的  $E(t)=E_0$  的初始值减小到它在  $t \rightarrow \infty$  时的  $E(t)=E_\infty$  的最终值的松弛值

$$P(\infty)_{\max} = [6F_w E_\infty^2/\pi^3 R^2(1-\nu^2)^2]^{1/3} \quad (45)$$

相互接触的两个水果之间的最大接近度  $\alpha_{\max}$  为

$$\alpha_{\max} = [F_w^2(1-\nu^2)/2RE_\infty^2]^{1/3} \quad (46)$$

而每个水果的最大损伤深度  $W_{\max}$  则由于对称性而等于最大接近度的一半:  $W_{\max} = \alpha_{\max}/2$ 。一个水果与一块平面相互接触或一个水果位于一个杯中情形的类似的表达式, 可以很容易推导出来。

如果加载力并非常数而是依赖于时间的某一函数  $F(t)$ , 则数学模型依然成立。然而, 不用如方程 (38) 中的  $(F\delta)$  的代数乘法, 可以用类似于 Yang (1966) 对线性粘弹性体采用的接近度的褶积积分来导出  $d(t)$ :

$$[d(t)]^3 = \frac{6\pi}{\lambda^2} \int_0^t [\delta_1(t-\tau) + \delta_2(t-\tau)] \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (47)$$

特别地, 假定  $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$  (这近似于包装箱内两个接触水果的定常运输振动, 即  $\lambda = \sqrt{2/R}$ ,  $\delta_1 = \delta_2$ ), 我们可以从方程 (42) 引入  $\delta(t-\tau)$  而写出方程 (47), 使得

$$[d(t)]^3 = 6\omega RF_0(1-\nu^2) \int_0^t \left\{ \left[ \frac{1}{E_\infty} + \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_\infty} \right) e^{-\xi(t-\tau)/T} \right] \cos \omega \tau \right\} d\tau \quad (48)$$

进行有关的积分并整理有关的项, 我们得到

$$[d(t)]^3 = 6RF_0(1-\nu^2) \left\{ \frac{1}{E_\infty} \sin \omega t + \left[ \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_\infty} \right) / (\xi^2 + (\omega T)^2) \right] \right. \\ \left. \times [\xi \omega T \cos \omega t + (\omega T)^2 \sin \omega t - \xi \omega T e^{-\xi t/T}] \right\} \quad (49)$$

方程 (49) 表达了振动响应, 例如, 由于正弦式脉动挤压力而引起的接触圆直径  $d(t)$ , 假定没有初始静重变形。

于是  $d(0) = 0$ 。如果振动加载力持续一个与  $T/\xi$  相比长得多的时间, 则指数部分将衰减, 方程 (49) 便化为

$$[d(\infty)]^3 = \frac{6RF_0(1-\nu^2)}{E_0(\xi^2 + \omega^2 T^2)} \{ (\xi + \omega^2 T^2) \sin \omega t - (1 - \xi) \omega T \cos \omega t \} \quad (50)$$

用  $[d(\infty)]^3_{\max}$  表示  $[d(\infty)]^3$  的最大值, 即方程 (50) 中两个正弦之和的最大振幅。对时间将方程 (50) 微分, 并使所得结果等于零, 可以得到对应于  $[d(\infty)]^3_{\max}$  的  $\omega t$  的值。于是所得条件为

$$\tan \omega t = (\xi + \omega^2 T^2) / (\xi - 1) \omega T, \quad (51)$$

由此可以证明

$$[d(\infty)]^3_{\max} = \frac{6RF_0(1-\nu^2)}{E_0} \sqrt{\frac{1+\omega^2 T_r^2}{\xi^2 + \omega^2 T_r^2}} \quad (52)$$

于是方程 (52) 表示一正弦式变化力作用于两个相互接触的水果上或一个水果与一块刚性平板接触时所引起的接触圆的最大直径。一个水果在一个杯子中的情形可以采用类似的方法，不过所得的表达式将更复杂些，这是因为水果与杯子的材料性能有差别而曲率半径不相同。

注意，在高频时，即当振动的周期比松弛时间常数  $T_r$  小得多时， $\omega^2 T_r^2 \gg 1$ ，并且必然有  $\omega^2 T_r^2 \gg \xi$ 。在这些情形下，方程 (52) 可以用下式来近似：

$$[d(\infty)]^3_{\max} \approx \frac{6RF_0}{E_0} (1-\nu^2) \quad (53)$$

我们看到，方程 (52) 中平方根的值，表示了由正弦式脉动载荷力引起的损伤尺寸与由静态载荷  $F_0$  引起的损伤尺寸相比增大的值。对一给定的  $T_r$  值，增大  $\xi$  或  $\omega$  的值，将减小平方根这个因式的值。在高加载频率时，这个因式的值趋于 1，其损伤尺寸便与由静态载荷  $F_0$  所产生的损伤尺寸没有差别。

注意，方程 (52) 和 (53) 中出现的是初始模量  $E_0$ ，而不是象方程 (43) 中的  $E_{\infty}$ 。之所以如此，是因为迅速变化的加载力只在变形范围的弹性部分才能产生水果的变形。

对于半正弦脉冲形式的瞬态加载力情形，我们有： $0 \leq t \leq T$  时， $F(t) = F_0 \sin(\pi t/T)$ ； $t > T$  时， $F(t) = 0$ 。于是方程 (47)–(49) 仅当  $0 \leq t \leq T$  而  $\omega$  由  $\pi/T$  代替时才成立。瞬变时间之末，即  $t = T$  时水果上所产生的接触圆直径，可以由下述方程 (54) 求得。方程 (54) 由方程 (49) 当  $\omega = \pi/T$  和  $t = T$  时导出：

$$[d(T)]^3 = \left[ 6RF_0 / \left( \frac{T\xi}{\pi T_r} + \frac{\pi T_r}{T\xi} \right) \right] (1-\nu^2) \left( \frac{1}{E_{\infty}} - \frac{1}{E_0} \right) (1 + e^{-\xi T/T_r}) \quad (54)$$

在瞬态力脉冲结束后随着时间的流逝，变形的一部分将得到恢复。但是，这不能由方程 (49) 算出，因为在这种情形下，仅当  $0 \leq t \leq T$  时方程 (49) 才成立。注意，当加载脉冲非常短时，即  $T \rightarrow 0$  时，有  $[d(T)]^3 \rightarrow 0$ ，不管其峰值  $F_0$  多么大。另一方面，当  $T \rightarrow \infty$  时，我们也有  $[d(T)]^3 \rightarrow 0$ 。可以证明，将产生最大损伤的脉冲持续时间  $T_m$  为

$$T_m = 2.62 T_r / \xi$$

于是，接触圆的最大直径将是

$$[d(T)]^3_{\max} = 3.17 RF_0 (1-\nu^2) \left( \frac{1}{E_{\infty}} - \frac{1}{E_0} \right) \quad (55)$$

对于任何加载力方式，随时间变化的接近度  $\alpha(t)$  与接触圆直径  $d(t)$  之间的基本几何关系保持为

$$\alpha(t) = \left[ \frac{\lambda}{2} d(t) \right]^2 \quad (56)$$

于是，知道了  $d(t)$ ，就能算出损伤深度  $w(t)$ 。对于两个水果相互接触的情形，我们有，

$$\lambda = \sqrt{2/R}, \quad w(t) = \alpha(t)/2$$

而对于一个水果与一块刚性平面接触的情形， $\lambda = \sqrt{1/R}$ ， $w(t) = \alpha(t)$ ，因此，对于两种情形，我们都有

$$w(t) = d(t)^2/4R \quad (57)$$

作为静重与随时间变化的加载力相结合的一个例子，我们可以取

$$F(t) = F_w H(\tau) + F_0 \sin(\omega\tau)$$

式中  $H(\tau)$  是单位阶跃函数。这种加载方式在农产品包装系统中是典型的，其中  $F_w$  表示静重，而  $F_0 \sin \omega t$  表示连续运输振动或如上述的瞬态力脉冲。在这种情形下，

$$[\partial F(\tau)/\partial \tau] = F_w \Delta(\tau) + F_0 \omega \cos(\omega\tau)$$

这里  $\Delta(\tau)$  是 Dirac  $\Delta$  函数，即  $H(t)$  的导数。于是，方程 (47) 的褶积分取如下形式：

$$[d(t)]^3 = \frac{6\pi}{\lambda^2} \int_0^t [\delta_1(t-\tau) + \delta_2(t-\tau)] [F_w \Delta(\tau) + F_0 \omega \cos(\omega\tau)] d\tau \quad (58)$$

可以证明，对于上面讨论的一个水果与一个刚性平面相接触和两个水果彼此相接触的构形，当  $t \rightarrow \infty$  时，对于正弦式的变力，方程 (58) 给出

$$[d(\infty)]^3_{\max} = 6R(1-\nu^2) \left[ \frac{F_w}{E_\infty} + \frac{F_0}{E_0} \sqrt{\frac{1+\omega^2 T_r^2}{\xi^2 + \omega^2 T_r^2}} \right] \quad (59)$$

而在半正弦力脉冲的末了，给出

$$[d(\tau)]^3 = 6R(1-\nu^2) \left[ \frac{F_w}{E_\infty} + F_0 \left( \frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) (1 + e^{-\xi T_r / T_r}) / \left( \frac{T_r \xi}{\pi T_r} + \frac{\pi T_r}{T_r \xi} \right) \right] \quad (60)$$

我们看到，方程 (59) 和 (60) 分别是方程 (43) 与 (53) 及方程 (43) 与 (54) 之和。严格地说，这种叠加仅仅对线性系统才是正确的。然而，因为  $1/[E(t)]$  是局部线性化的，所以在平均初始变形  $X_0$  的邻域，方程 (59) 和 (60) 成立。对于较大的变形，对  $d(t)$  必须进行递归计算，因为在偏离  $X_0$  很大时，由于非线性性质， $1/[E(t)]$  是不成立的。

注意，上述计算接触压力、损伤直径和损伤深度的方程，仅仅对于加载力  $F(t)$  施加的期间才成立。外力  $F(t)$  一除去，水果变形的某些部分就将恢复。因为只有残余变形才形成水果的实际损伤尺寸，所以上述方程由于忽略了恢复的变形而导致保守的设计。利用如 Peleg (1983) 描述的蠕变曲线加载和卸载方程，如果需要的话，我们还可以计算恢复的变形量和残余变形量。

也要看到， $E_0, E_\infty$  和  $T_r$  并非真正的常数，因为它们跟某一平均变形  $X_0$  有关。因此，我们或者必须采用它们的平均值，或者对现有的平均变形有一个预先确定的估值。前者较简单但不够精确，后者则需进行递归计算。利用实验上确定的平均值  $E_0, E_\infty, T_r$  来估计  $E(t)$ ，通常能够提供足够精确的结果。

### Ⅶ. 几何方面的考虑

支撑包装箱内水果的接触点数越多，每个接触点处的压力就越小，因为加载力分布到水果的较大部分上了。

于是，一个有趣的问题是，怎样的包装箱提供最多的接触点数目？主要有两种农产品包装方式：随机包装，即所谓“混杂包装”；或图案包装，有时称为“定位包装”。前者主要用于包装价钱比较便宜的水果，后者一般用于包装专供出口的品质优良的水果及蔬菜。

自从 Kelvin 对榴弹炮弹堆放的几何形状感兴趣以来，数学家已对三维或多维空间中球体的有规则的包装方式广泛地进行了研究。这些研究是纯理论性的，没有考虑周围容器壁面的存在，而容器壁面在包装中起着主要的作用。Peleg (1972a, 1973) 提出了一些数学模

型和计算机程序，用来研究矩形容器中椭球体的有规则的图案包装方式。

考虑一层同样大小的球，它们排到成如图 7 所示平面形状。想象各行球体之间作彼此相对的滑动，但彼此之间保持相互接触，如图 7B 和 7C 所示。

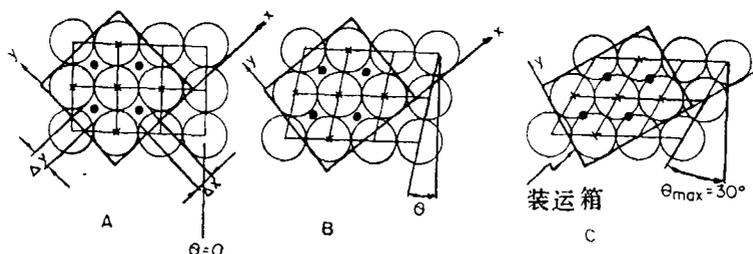


图 7 矩形装运箱内包装的球体可能形成一个“单位箱”的图案变化。注意，在图 A 中，当  $\theta=0$ ， $x=\theta y$  时，图案是“面心立方”的，从而包装箱内每个水果与其相邻各水果间有最多的接触点数目（12 个）

○ 底层球体      ● 中层球体      × 上层球体

这层球体将从图 7A 的矩形形状变形成为图 7B 和 7C 的平行四边形形状。这种变形受变形角  $\theta$  所控制。当  $\theta=0^\circ$  时，我们有矩形形状。当  $\theta>0^\circ$  时，图形变为平行四边形形状，直至达到最大变形角  $\theta_{max}=30^\circ$  时为止。注意，变形角  $\theta$  不可能增大到超过  $30^\circ$  而仍能保持球体之间的相互接触。可以证明，在一个平面上的圆的所有包装图案，都包括在界限  $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$  内。假如我们想要建造一个“单位箱”或象晶体学中已知的“单位晶胞”。我们想在单位箱中封装入最少数目的球，比如说 14 个球。选取 14 这个数目的理由马上就会明白。

将一箱球体按图案包装的唯一方式，是从底层的图案开始，依次一层层地放到顶部。如果我们建造了一个箱匣能在底层容纳 5 个球体，则其顶视图将如图 7A 所示，为  $\theta=0^\circ$  时的正方形。随着  $\theta$  的增大，此箱匣的正方形底部将变为矩形，逐渐拉长，直到达到  $\theta_{max}=30^\circ$  为止，如图 7B 和 7C 所示。

一旦第一层(底层)已经形成，放置第二层球体就只有两种方式。一种方式是完全重复底层的图案，在每个球的上部竖直堆放球体，如图中的叉号 × 所示。这样得到的图案是晶体学中已知的“立方堆积结构”。另一种方式是把第二层水果放入第一层水果所形成的“袋子”里，如图中的黑圆点 ● 所示。然后，第三层可以按第一层的图案堆放，如图中的叉号 × 所示。这样轮流按叉号 × 的图形和黑圆点 ● 的图形，把水果堆放到我们希望的任何层数。

$\theta=0^\circ$  的堆放图案可得到立方体形状的单位箱（当堆放的是球体时），这正象晶体学中已知的面心立方结构（FCC）。这种结构有一些独特的性质，这些性质特别对农产品包装有利，因为它可以得到最大的包装密度和每个水果最大的接触点数。当堆放的是椭球体时，单位箱（当  $\theta=0^\circ$  时）将不是立方体。代替其长宽比的将是等于椭球的主轴之间的比值。如果象原子点阵模型那样没有限制球体堆放的有限容器壁，则每个球体可以跟直接与它相邻的球体接触的点数将在 6 点和 12 点之间。最大的点数 12 对应于最密的原子点阵堆积面心立方结构。密度小些的点阵可能有 10 个，8 个或 6 个接触点，视堆积图案而定。

对于水果堆积的情况，容器壁面对接触点数有很大的影响，因为有相当大一部分水果不仅接触它们相邻的水果，而且接触容器壁面。于是每个水果的平均接触点数小于有限大小面

心立方堆积的接触点数12。

### Ⅷ. 冲击损伤边界法

受冲击载荷农产品损伤边界的概念，其基础是一组简单谐振器的理论响应曲线（Kornhauser 1954；Mustin 1968）。

这条边界线由两条渐近线组成：短时脉冲渐近线确定最小速度变化  $\Delta V_{min}$ ，而长时脉冲渐近线则给出引起损伤所要求的最小平均输入脉冲加速度。在这里，损伤意味着分谐振器的显著相对运动，见图 8。

损伤边界线的概念，也许可以通过考虑激励一个惯性机构例如简单谐振器的二元问题得到较好的了解。这类机构一般使用于自动手枪，其中炸药装药冲击的反应必须激发再加载机构，此机构主要是一个弹簧系统。为了得到正激发，这里也要求一个最小的加速度和速度变化。于是损伤边界线应当称为“激发区”而不是“损伤”。类似地，“无损伤”区应当是平均加速度和速度变化的“无激发”范围。损伤边界线实际上确定了农产品的“脆弱度”。换句话说，它定量确定了农产品在受到不同的冲击载荷作用时的抗过度变形、抗破损等能力。

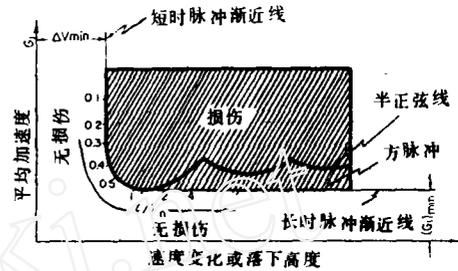


图 8 典型冲击损伤边界线图，示出方形加速度脉冲和半正弦形加速度脉冲的短时渐近线和长时渐近线

损伤边界线和脆弱度的概念已广泛用于评价机械装置和工业产品的冲击灵敏度。Peleg (1972) 指出，在农产品包装系统中可以类似地利用这种概念。机械装置或电子仪器的脆弱度，可以通过它们在受到冲击输入之后继续执行其功能的能力来定义。

当冲击输入引起农产品品质由 A 级变成 B 级甚至 C 级这类的过度损伤时，我们可以类似地定义充满容器的农产品的脆弱度。

损伤边界线的实验确定，一般是使充满装运箱的农产品在冲击试验机上受到继续增加强度的一系列冲击试验来得到。

初始试验用阶跃速度冲击输入来进行，这种冲击输入模拟装运箱内农产品自由下落到刚性表面上的情况。阶跃速度变化  $\Delta V$  的最大输入水平应当与分配环境中装运箱预期的最大落下高度成正比。这确定了短时渐近线  $\Delta V_{min}$ 。

第二批冲击试验确定了加速度边界线，或长时渐近线。这种试验是使装运箱内农产品受到来自最大预期落下高度的一系列冲击试验，但要控制冲击的加速度水平。冲击试验机的程序装置把每次冲击调节为使冲击的加速度水平逐次递增。这类似于将装运箱落在很厚的弹性软垫层上，逐次取去一些软垫层，直至剩下的软垫不再能保护农产品不受损伤为止。

于是，损伤边界线的确定乃是逐次递增落下高度和控制情况下的加速度水平，直至不能容许的损伤的最初迹象出现时为止。

作为这种概念的应用实例，考虑表 2，其中概括了 Peleg (1972) 进行的两种苹果包装类型的损伤边界线试验结果。

这些试验的目的，是比较聚乙烯袋和套盒零售苹果包装的保护性能。脆弱度取为损伤苹果（典型的标准装运箱内的）的百分数，变化等级按 USDA 分类标准为从“特优”到“优良”。

表 2 套盒包装和聚乙烯袋包装苹果脆弱度比较试验结果

试验名称	包装类型	落下高度 (mm)	脉冲形状	脉冲时间 $\tau$ (ms)	冲击水平 $(G_i)_{\min}$ g	速度变化 ( $\text{ms}^{-1}$ )	脆弱度: 苹果 变化等级 (%)
临界加速度试验 $(G_i)_{\min}$	聚乙烯袋包装	127	梯形	53.0	6.0	3.12	1.3
	套盒包装	127	梯形	42.0	8.5	3.50	1.0
临界速度变化 试验 $\Delta V_{\min}$	聚乙烯袋包装	10	半正矢	5.5	25	0.86	2.0
	套盒包装	10	半正矢	5.5	25	0.86	2.0

表 2 中的数字表明, 套盒包装显然提供比聚乙烯袋更好的冲击保护。

对于聚乙烯袋装水果, 在 6 g 时有 1.3% 的苹果改变了等级, 而对于套盒包装, 则在 8.5 g 时只有 1% 的苹果改变了等级。然而可以看到, 对于临界速度变化来说, 两种包装之间没有什么差别。

这可能是由于  $\Delta V_{\min}$  的值很小所致。甚至在 10 mm 的落下高度落到坚硬表面上的情形 (5.5ms 脉冲时间), 由于 25 g 的高加速度水平, 所以也发生显著的损伤。另一方面, 在 127 mm 的相当高的落下高度落到柔软垫子上的情形 (53 或 42 ms 脉冲时间), 由于加速度水平 g 很小, 所以引起的损伤不大。

从以上的讨论我们可以得到结论: 对于引起农产品过度损伤而从 A 级降到 B 级或 C 级等等的瞬态力的定量确定, 实际上是确定对冲击输入的抗力。还要指出, 脆弱度评价结果可以跟预期的环境事故相比较, 以确定包装防护的要求, 或比较不同包装农产品对冲击载荷的敏感度。

#### IX. 农产品损伤的定量确定

不管设计的和在实验室试验的一个包装系统是多么优良, 在全面的商业应用之前总是必须进行一些现场包装和装运试验。促进一个新的包装系统的全面大规模生产, 往往要求最初投资很大。此外, 还需要确信此新系统能提供对农产品的适当保护, 并且不仅从市场观点看, 而且在功能方面是运行良好的。一个新的包装系统的市场适销问题的重要性, 不亚于它的功能良好性。因此, 包装试验和装运试验应当继之以市场的试验, 并且检验损伤水平是在可以接受的容限之内。

Schoorl & Holt(1980) 叙述了一个巧妙的方法, 用它可以测量和计算各单个苹果的外部 and 内部损伤体积, 从而可通过此体积定量确定损伤程度。这种方法对于比较小的试样可能是灵敏的, 例如可以用于实验室试验。对于较大尺寸的装运试验和常规的质量控制, 几种损伤的实际测量 (有时是对每一个苹果进行的) 是不能实行的, 因为大量的水果必须检测, 以便得到统计学上有意义的试样尺寸。

Peleg et al (1979) 利用等价的“损伤指数”描述了装运试验, 从而可以迅速检测比较大量的水果试样, 并以客观而精确的方式定量确定损伤水平。

这些试验的主要目的, 是比较面心立方包装 (Peleg 1978) 跟广泛使用的包装 Michigan 苹果的传统纸盘包装及混杂包装的相对保护质量。为了排除无关的变量, 所有的装运箱都同样地用人工或装袋机装满。面心立方包装和混杂包装使用的是同样的特制箱子, 而纸盘包装使用的是大得多的商用箱子, 以便装入纸盘并使每个箱子内的苹果数量近似相等。

在 Michigan 的几个苹果加工厂进行了四个包装和装运试验。四次试验装运的93箱苹果（约 12000 个苹果）中的每个苹果都作了损伤检验，这些损伤都按损伤等级表分了级，如表 3 所示。根据这个等级表，“中”伤和“重”伤不适于在销售过程中考虑，而“轻”伤和“微”伤则即使受到很挑剔的检查，也很可能被一般的顾客所忽略。

定义等效严重损伤指数 EBI 为

$$\%EBI = \text{微伤}(0.1) + \text{轻伤}(0.2) + \text{中伤}(0.7) + \text{重伤}(1.0)$$

这个定义使我们可以把所有四类损伤综合在一起，得到一个较方便的统计的评价结果。

**表 3 用于评价农产品包装系统保护质量的损伤等级表**

等级指数	损伤程度	单个损伤的直径	综合损伤的等效直径
0.0	无伤	0.0	<12 mm
0.1	微伤	<12 mm	12—19 mm
0.2	轻伤	12—19 mm	19—25 mm
0.7	中伤	19—25 mm	25—32 mm
1.0	重伤	>25 mm	>32 mm

作为例子，这个等级表可以把一个带微伤的苹果，加一个带轻伤的苹果，再加一个带中伤的苹果，看成是等效于单独一个带重伤的苹果。如果受检验的水果数量很大，则可以由受过训练的人员来进行检验，他们可以适当简化操作以获得统一的分级。每次作业分配给每一检验员同样多的装运箱数，可以进一步减小检验的偏差。

表 4 概括表示了这四次装运试验中的一次的结果，从而可以客观地比较所试验的三种包装系统的保护质量。另外三次装运试验基本上显示出相同的有关结果。

表 4 中所概括的装运试验，是故意在坚硬的弹簧平板车上受到特别恶劣的运载状况，以便得到特别高的水果损伤水平。这些装运箱不是紧固地堆积在一起，而是随机地放在平板车上成为单独的一层，使它们在整个运输途中能够自由地蹦上蹦下。

由于这些原因，所记录的损伤水平特别高，如 EBI 的值所定量确定的，在所有包装方法中，约为 27—35%。然而，这样高的损伤水平，在正常的商业装运中可能经常遇到。

比较表 4 中的中伤和重伤的百分比或等效损伤指数 EBI，我们可以得到如下结论：

- ①面心立方包装的保护质量，与纸盘包装的相同或稍好一些。
- ②面心立方包装及纸盘包装的保护质量，显著优于混杂包装的保护质量。

除了上述直接定量确定农产品损伤的方法之外，一些间接的水果损伤指标可以较好地使用于某些农作物栽培品种。尤其适用于受内伤的水果，或者在受机械力很久以后才显出潜不可见的损伤的水果。一个适当的例子是桔子。虽然可能有桔皮上油细胞的破坏和内部的损坏，但它的损伤并不能直接看出。间接损伤的定量确定，通常以物理学和生理学的指数为基础，这种指数与水果所受机械损伤的程度成正比。Giladi et al (1967) 对食品加工厂流水线上的桔子的质量控制，提出了一个这样的指数。

这个指数的基础是，受机械损伤而变弱的桔子，比未受伤的桔子将丧失更多的水分到大气中，例如减轻了重量。此外，Giladi et al (1967) 还发现，桔子从受到损伤起的一段时间

表 4 在受控制的装运试验下三种包装系统保护质量的比较  
红苹果, 平均直径 70 mm (18 箱)

包装系统	箱号	% 微伤	% 轻伤	% 中伤	% 重伤	% EBI
面心立方 包装系统	1	22.8	35.3	27.2	6.6	35.0
	2	13.5	42.8	19.5	1.5	25.0
	3	32.6	57.9	17.7	3.7	30.9
	4	20.8	40.7	16.9	6.1	28.1
	5	38.0	50.7	10.4	2.2	23.4
	6	20.3	38.8	15.8	6.7	27.5
平均		24.6	44.3	17.9	4.4	28.3
均方根偏差		9.0	8.4	5.5	2.3	4.5
混杂包装 系统	1	16.4	28.9	42.9	7.8	45.3
	2	15.5	42.6	31.0	3.9	34.1
	3	18.5	50.0	25.8	6.5	36.4
	4	16.0	48.8	22.4	6.4	33.4
	5	29.9	33.8	16.5	7.0	28.3
	6	17.8	31.0	31.0	6.2	35.9
平均		19.0	39.2	28.3	6.3	35.6
均方根偏差		5.4	9.2	9.0	1.3	5.6
纸盘包装 系统	1	34.0	31.1	12.3	2.1	20.3
	2	25.3	39.1	22.5	2.1	28.2
	3	15.7	60.0	15.7	4.3	28.9
	4	21.0	56.5	17.4	1.4	27.0
	5	28.7	27.2	23.5	8.8	33.6
	6	18.8	31.9	24.6	3.6	29.1
平均		23.9	41.0	19.3	3.7	27.9
均方根偏差		6.8	14.0	4.9	2.7	4.3

以后, 每单位表面积所丧失的重量跟机械损伤之间, 有一个良好的相关关系。因此, 把比重损失指数定义为每 24 h 内每  $\text{cm}^2$  桔子表面积上重量损失的 mg 数。

也可以采用另一些评价农产品损伤的间接方法。例如, Chuma et al (1978) 利用近紫外光线 ( $3.150 \text{ \AA}$ ) 去检验 satsuma 桔子的表面损伤。他们发现, 当用近紫外光线照射时, 桔子破损组织处的桔皮油将发出荧光。这种方法甚至可以检验出轻伤。这种研究目前仍在继续进行。Dewey et al (1981) 提出了遥测苹果和桔子损伤的一些新方法, 其基础是放出的  $\text{CO}_2$  跟农产品的损伤(例如损伤组织的体积)成正比。对于苹果的组织, Dewey et al (1981) 证明了受冲击和挤压载荷的苹果, 比未受载荷的苹果增加  $\text{CO}_2$  输出的原因, 既非需氧呼吸也

非厌氧呼吸的增加。看来,损伤组织的物理破坏导致破裂细胞内物质的泄漏,从而由酶的生化反应而产生 $\text{CO}_2$ ,其数量显著大于正常呼吸产生的 $\text{CO}_2$ 数量。这可以解释观测结果,表明 $\text{CO}_2$ 的增加量与机械损伤即损伤组织的数量成正比。

### X. 对今后研究工作的建议

本文提出的运输环境的资料,其范围相当有限。它只适于用作第一近似。为了更精确地估算农产品分配环境中的机械损伤,需要特别从事于研究新鲜农产品装卸和运输系统的类似的综述。基本上还没有各种不同农产品品种在收获、加工和包装过程中受力学输入时的资料。

大多数农作物栽培品种都需要进行实验室实验,以便可以利用本文所述数学模型的各项参数来计算松弛模量和定量确定机械损伤。

在发展测量和模拟水果和蔬菜的机械损伤的技术方面,需要作进一步的研究工作。定量确定根据商业需要的许多栽培品种的潜在机械损伤,这个困难问题尚未得到解决。

根据力学性能来对水果和蔬菜分选,已用于一些栽培品种。这方面的进一步的研究,不仅可以发现一些新的应用,而且可以改进现有机械的性能。

在最近的将来,不可避免地要引入农业机器人来进行水果和蔬菜的收获、分选、包装和加工,这方面也将需要进行广泛的生物力学研究工作和发展工作。

## 参 考 文 献

- Chappell, T. W. and Hamann, D. D. (1968) Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 11, 608-610, 612.
- Chen, P. and Fridley, R. B. (1972) Analytical methods for determining viscoelastic constants of agricultural materials. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 15, 1103-1106.
- Chuma, Y., Shiga, T. and Iwamoto, M. (1978) Mechanical properties of satsuma oranges as related to the design of a container for bulk transportation. *J. text. Studies* 9, 461
- Dal Fabbro, I. M., Murase, H. and Segerlind, L. J. (1980) Strain failure of apple, pear, and tomato tissue. American Society of Agricultural Engineers paper No 80-3048. ASAE, St. Joseph, MI.
- Dewey, D. H., Peleg, K. and Klein, J. D. (1981) Carbon dioxide as a possible measure of handling injury. *Hort. Sci.* 16, 424.
- Finney, E. E. and Hall, C. W. (1967) Elastic properties of tomatoes. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 10, 4-8.
- Finney, E. E., Hall, C. W. and Mase, G. E. (1964) Theory of linear viscoelasticity applied to potato. *J. Agric. Engng Res.* 9, 307-312.
- Foley, J. T., Gens, M. B. and Magnuson, C. F. (1973) Current predictive models of the dynamic environment of transportation. *J. envir. Sci.*
- Fridley, R. B. and Adrian, P. A. (1966) Mechanical properties of peaches, pears, apricots and apples. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 9, 135-138, 142.
- Gens, M. D. (1970) Rail transport environment. *J. envir. Sci.* 14-20.
- Giladi, J., Cohein, J., Goldberg, H. (1967) Development of a standard method for quality control of citrus fruit in packinghouses. Technical report Citrus Marketing Board of Israel (in Hebrew).
- Godshall, W. D. (1968) Effects of vertical dynamic loading on corrugated fiberboard containers. USDA Forest Service Research Paper FPL 94.
- Godshall, W. D. (1971) Frequency response damping and transmissibility characteristics of top-loaded corrugated containers. USDA Forest Service Research Paper FPL 160.
- Goff, J. W. et al. (1973) Preliminary measurement and analysis of the vibration environment of common motor carriers. Technical research report No. 22, p. 60. School of Packaging, Michigan State University, East Lansing, MI.
- Goldsmith, W. (1960) *Impact, the Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Edward Arnold, London
- Guins, S. G. and Young, D. E. (1974) Vibration environment in freight cars and its effect on damage to lading. ASME technical paper 74-WA/RT-9.
- Hamann, D. D. (1970) Analysis of stress during impact of fruit considered to be viscoelastic. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 13, 893-899.
- Hamann, D. D. (1969) Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 12, 170-174.
- Hertz, H. (1881) The contact of elastic solids. *J. Math. Grelle* 92.
- Holt, J. E. and Schoorl, D. (1977) Bruising and energy dissipation in apples. *J. text. Studies* 7, 421-432.
- Holt, J. E., and Schoorl, D. (1981) Fruit packaging and handling distribution systems: an evaluation method. *Agric. Syst.* 7, 209-218
- Horsfield, B. C., Fridley, R. B. and Claypool, L. L. (1972) Application of the theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum bruising. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 746-750.
- Juselius, A. (1974) Significance of edge crush value in testing corrugated board boxes. Paper presented at the 8th IAPRI Symposium, 25-27 September.
- Kellicutt, K. Q. and Landt, E. F. (1951a) Safe stacking life of corrugated boxes. *Fibre Contain. Paperbd Mills* 36, 1-5.
- Kellicutt, K. Q. and Landt, E. F. (1951b) Basic data for the use of fiberboard in shipping containers. USDA Forest Service Report No. D1911. Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Kellicutt, K. Q. (1963) Effect of contents and load bearing surface on compressive strength and stacking life of corrugated containers. *TAPPI* 46, 151A-154A.
- Koeijer, A. J. (1971) Moisture in paper and board at low temperatures. Technical report No. 61/71 Institute TNO

- Voor verpakking Delft Holland
- Koning, J. W. and Stern, R. K. (1977) Long-term creep in corrugated fiberboard containers. *TAPPI* 60, 129-130.
- Koning, J. W. (1964) A short column crush test of corrugated fiberboard. *TAPPI* 47, 134-137
- Kornhauser, M. (1954) Damage sensitivity curves. *J. appl. Mech.* 21, 371
- Lars, N. (1978) Investigation of the compression of corrugated board. *Paperbd Packag.* 63, 48-62.
- Luke, R. R. (1960) The impact response of a single degree of freedom system with viscous damping. Austin Texas Research Report O.I. No. 9118, Structural Mechanics Research Laboratory.
- Maltenfort, G. G. (1958) Compression strength of double-wall corrugated containers. *Fibre Contain. Paperbd Mill*, 51-59.
- Maltenfort, G. G. (1963) Compression strength of corrugated. *Paperbd Packag* 48, 160-162.
- McKee, R. C., Gander, J. W. and Wachuta, J. R. (1961) Edgewise compression strength of corrugated board. *Paperbd Packag* 46, 70-76.
- McKee, R. C., Gander, J. W. and Wachuta, J. R. (1962) Flexural stiffness of corrugated board. *Paperbd Packag* 47, 111-118.
- McKee, R. C., Gander, J. W. and Wachuta, J. R. (1963) Compression strength formula for corrugated boxes. *Paperbd Packag* 48, 144-159.
- McLoughlin, N. B. and Pitt, R. E. (1984) Failure characteristics of apple tissues under cyclic loading. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 27, 311-319.
- Miles, E. A., Fridley, R. B. and Lorenzen, C. (1969) Strength characteristics of tomatoes subjected to quasistatic loading. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 627-630.
- Miles, J. A. and Rehkugler, G. E. (1973) A failure criterion for apple flesh. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 16, 1148-1153.
- Mindlin, R. D. (1945) Dynamics of package cushioning. *Bell Syst. tech. J.* 24, 353-467.
- Mohsenin, N. N. (1970) *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach, New York
- Moody, R. C. (1965) Edgewise compressive strength of corrugated fiber-board as determined by local instability. USDA Forest Service Research Paper, FPL 46.
- Moody, R. C. and Koning, J. W. (1966) Effect of loading rate on the edgewise compressive strength of corrugated fiberboard. USDA Forest Service Research Note FPL-0121. April.
- Moody, R. C. and Skidmore, K. E. (1966) How dead load downward creep influence corrugated box design. *Package Engrng*
- Morris, R. M. and VanView, G. P. (1975) An improved edgewise compression test for lineboard. *TAPPI* 58, 110-113.
- Murase, H., Merva, G. E. and Segerlind, L. J. (1980) Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 23, 794-796, 800.
- Murase, H. and Merva, G. E. (1977) Static elastic modulus of tomato epidermis as affected by water potential. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 20, 594-597.
- Mustin, G. S. (1968) *Theory and Practice of Cushion Design*. The Shock and Vibration Information Center, Washington, DC.
- Newton, R. E. (1968) Fragility assessment theory and test procedure. A publication of MTS Systems. Corporation Box 24012, Minneapolis, MN 55424, U.S.A.
- O'Brien, M. L. et al. (1960) Effects of mechanical vibrations on fruit damage during transportation. ASA Paper No. 60-311.
- O'Brien, M., Claypool, L. L., Leonard, S. J., York, G. K. and McGillivray, J. H. (1963) Causes of fruit bruises in transport trucks. *Hilgardia* 35, 113-124.
- O'Brien, M., Gentry, J. P. and Gibson, R. C. (1965) Vibrating characteristics of fruits as related to in transit injury. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 8, 241-243.
- Ostrem, F. E. and Rumerman, M. L. (1965) Shock and vibration transportation environmental criteria. National aeronautics and space administration. George C. Marshall Space Flight Center. Final report NAS-8-11451, p. 64.
- Ostrem, F. E. and Rumerman, M. L. (1967) Transportation and handling shock and vibration environmental criteria. National aeronautics and space administration. George C. Marshall Space Freight Center. Final Report NAS-8-11451, p. 98.
- Pao, Y. H. (1955) Extension of the Hertz theory of impact to the visco-elastic case. *J. appl. Mech.* 26, 1083-1089.
- Peleg, K. (1972a) Systematic dense packaging of oranges. *Kivvim* 22, 225-236.
- Peleg, K. (1972b) Stick pack for fresh produce. *Mod. Packag* 45, 50-54.
- Peleg, K. (1978) The K.P. Produce packing system. ASAE Paper No. 70-6538.
- Peleg, K. (1979a) Frequency response of non-linear single degree of freedom systems. *Int. J. Mech. Sci.* 21, 75-84.
- Peleg, K. (1979b) Shock response of nonlinear systems. *Shock Vibrat. Bull.* 49, 145-157.
- Peleg, K. (1980) Cushioning energy dissipation in foam polymers. *Polymer Sci. Engrg* 20, 738-740.
- Peleg, K. (1981) Package product interaction in corrugated containers for fresh produce. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 24, 794-800.
- Peleg, K. (1983) A rheological model of non-linear viscoplastic solids. *J. Rheol.* 27, 411-431.
- Peleg, K. (1984a) A mathematical model of produce damage mechanisms. *Trans. ASAE* 27, 287-293.
- Peleg, K. (1984b) Impact and vibration testing of shipping containers. *J. Sound Vib.* 93, 371-388.
- Peleg, K. (1985) *Produce Handling Packaging and Distribution*. AVI, Westport, CT.
- Peleg, K. and Dewey, D. H. (1985) Produce damage simulator detector. Final technical report. Project I-113-80 BARD. P.O. Box 6, Bet Dagan, Israel.
- Peleg, K., Dewey, D. H., Pierson, T. and Novakoski, D. (1979) Packaging Michigan apples by the K. P. system. Technical report. Michigan State University School of Packaging.
- Peleg, K. and Peleg, E. (1976) Container dimensions for optimal utilization of storage and transportation space. *Comput. aided Design* 8, 175-180.
- Peleg, K. and Sagi, R. (1973) Mechanized pattern packaging of citrus fruit. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 15, 622-623.
- Perls, T. A. and Sherrard, E. S. (1956) Frequency response of second order systems with combined Coulomb and viscous damping. *J. Res. nat. Bur. Stand.* 57, 45-65.
- Pitt, R. E. (1982) Models for rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 25, 1776-1784.
- Pitt, R. E. and Chen, H. L. (1983) Time dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 26, 1275-1280.
- Rao, V. N. M., Hammerle, J. R. and Hamann, D. D. (1974) Uniaxial modulus of sweet potato flesh using various types of loading. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 17, 956-959.
- Rumsey, T. R. and Fridley, R. B. (1977) Analysis of viscoelastic contact stresses in agricultural products using a finite element method. *Trans. Am. Soc. agric. Engrs* 20, 162-167, 171.
- Schoorl, D. and Holt, J. E. (1980) Bruise resistance measurements in apples. *J. Texture Stud.* 11, 389-394.
- Takahasi, Y. (1954) Spectral density distribution of road surface and car vibrations. *Proceedings of the 3rd Japan National Congress of Applied Mechanics* pp. 377-380. Tokyo, Japan.
- Timoshenko, S. and Goodier, N. J. (1951) *Theory of Elasticity*. McGraw Hill, New York.
- Urbanik, T. J. (1978) Transportation vibration effects on unitized corrugated containers. USDA Forest Products Laboratory Research Paper FPL 322.
- Yang, W. H. (1966) The contact problem of viscoelastic bodies. *J. appl. Mech.* 33, 395-401.
- Zener, C. (1948) *Elasticity and Anelasticity*. University of Chicago Press.

董务民 钱民全译自: *J. Biomechanics*,  
18, 11 (1985); 843-862.