

这些数据除了被拟合为一个幂函数关系之外与一直线也有较好的相关性。在幂函数  $F/T = a(ApEn)^b$  中, 系数  $a$  随时间下降而系数  $b$  没有明显变化趋势。系数  $a$  或对数-对数曲线的截距随贮藏时间而下降(图9)。根据方差分析, Paula Red 苹果的  $F = 263$ , Jonamac 苹果的  $F = 34$ , 表明与贮藏时间有明显差异。在贮藏的前15天系数  $a$  大幅度下降, 随后降幅变缓。对 Paula Red 苹果  $a$  值开始较大, 但最后降至与 Jonamac 苹果类似的水平。在贮藏过程中, 苹果逐渐变软, 峰值力下降而到达峰值力所经历时间延长, 所以比值  $F/T$  随着两个变量的变化其值增大的敏感度将大于两者之中的任何一个。从刚采摘到果品变软,  $a$  值下降了25%。 $F/T$  值看来是对果品坚实度变化较敏感的参量, 而且和其他碰撞参量相比易变性较小。它也和贮藏过程中损伤体积的变化有关。

### 3 结论

①苹果四周组织特性的变化对跌落碰撞参量的测量有明显影响。②单位吸收能量内的损伤体积随贮藏时间而减小。③单位相遇能量内的损伤体积随贮藏时间而增大, 在贮藏方式和苹果品种之间存在差异。④在贮藏过程中撞击接触时间增大与损伤体积相比, 其结果的易变性较小。⑤ $F/T$  的对数随相遇能量的对数而线性增大, 这一关系随贮藏时间而减小。

### 参 考 文 献 (9篇, 略)

吴劲松摘译自: *Trans. ASAE*, 32, 3 (1989): 953-957. (董务民校)

## 农业物料动态力学性能的理论及测量

[匈牙利] G Sitkei

### 1 载荷类型

收获、加工和运输等过程常使谷物、果品、蔬菜受到发生机械损伤的撞击载荷。但动态载荷有时却又用来减小物料体积(压缩)、分离作物(自由切割)或粉碎谷粒。甚至动态载荷对获得意义明确的力学特性(粘弹性, 本构方程)或物料的各种响应特性(例如比切割能量或比粉碎能量, 破坏能量, 破坏应变等与循环次数的关系)也非常有用。

物料的力学行为在很大程度上依赖于载荷的特性。最常见的载荷类型和状态见图1。应根据研究和开发目标的需要来选择合适的载荷类型和状态。过去广泛采用简单的跌落试验装置和让农产品跌落到刚性表面的方法。而精确的撞击测量则需要配备有高频压电式传感器和数据采集系统的高级跌落实验装置。典型的力( $F$ )、位移( $z$ )和速度( $v$ )的曲线如图2所示。

一个重要的载荷类型是对于变形增量或力增量保持给定的恒定速度, 这样就能够以简单的方法确定粘弹性参数<sup>[6,12]</sup>。

最近已成功地用循环动态载荷来描述谷物干燥后的运输损伤特性和破坏特性。通常的载

荷类型是正弦波, 但为了研究应变率效应也可用其他波形如方波、三角波。使用不同波形时能量输入率也将不同; 对于具有相同作用力幅值的方波、正弦波和三角波形的载荷, 其能量比为  $\pi : 2 : \pi/2$ 。

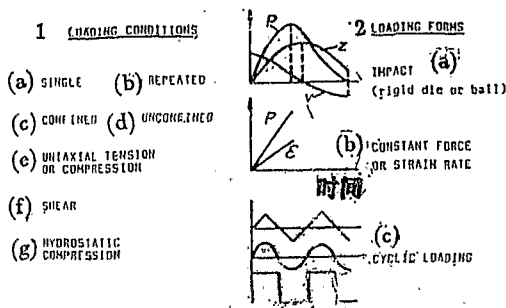


图1 载荷类型和状态

1 加载状态: (a) 单次的, (b) 重复的, (c) 有约束的, (d) 无约束的, (e) 单轴拉伸或压缩, (f) 剪切, (g) 水静力压缩。2 载荷类型: (a) 撞击(刚性垫或球), (b) 等变载率或应变率, (c) 循环载荷

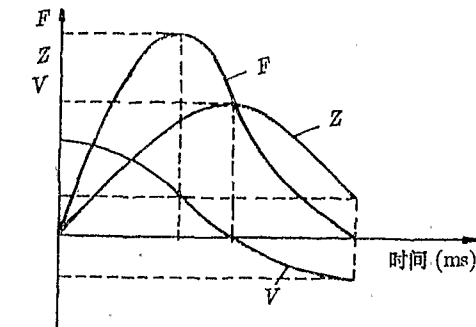


图2 撞击载荷的特性曲线

## 2 测量技术

高速过程的测量需要一个合适的测试和数据采集系统。撞击持续时间约为几微秒, 为了确定作用力-时间曲线需要高频采样速率(每点5至10  $\mu\text{s}$ )。撞击力可用固有频率达100 kHz的压电式传感器测得。如果必须用粘贴在传感器上的金属板来增大撞击面积, 则固有频率将显著下降<sup>[4]</sup>。

等变形率可以在标准试验机(如Instron)上实现。等变载率可以在带有移动砝码的加载装置上得到<sup>[6]</sup>。

机械的、电-液压组合的或电-机械组合的试验设备都可以产生循环动态载荷。用偏心传动的机械加载装置只能实现变形或作用力的正弦变化, 更先进的电-液压组合的或电-机械组合的试验装置则可以产生不同的载荷类型和频率。图3为这种试验装置的示意图<sup>[10]</sup>。电-机械组合式动力发生器由一个作用力或位移发生器、功率放大器、作用力或位移传感器以及控制系统所组成。

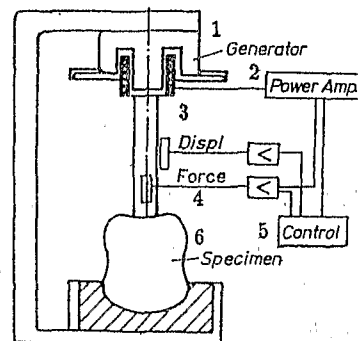


图3 用于循环加载的电-机械组合式动力发生器, 它可以产生方波、正弦波和三角波

1 发生器, 2 功率放大器, 3 位移, 4 力, 5 控制, 6 试件

## 3 理论

只有在本构方程中物料特性是已知的情况下, 才能精确描述农业物料的力学行为。物料力学特性受众多因素的影响, 而这些因素的影响效应通常又都是未知的。这给农业物料动态力学性能的计算带来许多困难, 同时应考虑误差问题。

最初人们采用弹性理论并计及某些粘弹性特性。对于小变形和物料含水量小的情况, 这种方法给出可以接受的结果。把强有力的有限元法用于粘弹性应力分析是一个重大进步<sup>[3]</sup>。刚性垫的粘弹性理论(Boussinesq问题)允许确定粘弹性参数的上界和下界( $\dot{P} \rightarrow \infty$ 和 $\dot{P} \rightarrow 0$ )<sup>[6]</sup>。这样的测量结果如图4所示。

从图4可见，变形有0.5—0.6mm的偏差，它可用下列事实来解释：变形较大时物料的组织将遭到破坏并分离出水，这导致应力场严重畸变。由这些结果可以推断：对于含水量大的物料，粘弹性应力分析方法只能有限制地使用。

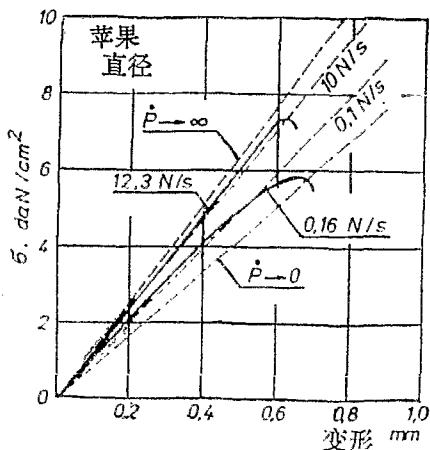


图4 粘弹性参数的上界和下界(苹果, 直径6mm, 刚性垫)

最近已采用动态加载过程的塑性流动理论<sup>[6]</sup>。理论上已建立使一定体积物料损伤所需能量的上界和下界模型。这些模型的数值使实验结果处于上界和下界范围内。在选择塑性区的形状、塑性区内的速度分布和物料的可压缩性时可能会出现一些困难。这个理论的进一步完善可能对更好地了解含水量大的物料破坏过程的真实机理非常有用。

如果存在反复撞击，就会出现更多的困难。对于单次载荷，苹果发生塑性流动的比能量约为0.1—0.15 J/cm<sup>3</sup>。这个值将由于被损伤组织吸收能量的能力随着载荷循环次数的增长而急剧增长<sup>[19,7]</sup>。对更精确的应力-应变分析的进一步需要是建立破坏应力与应变率之间的关系。遗憾的是目前能够得到的这种关系还非常少，一个可能的关系可以用下式表示<sup>[19]</sup>：

$$\sigma_n = \sigma_{n0} (1 + C' \log \dot{\epsilon}_{eff}) \quad (1)$$

式中  $\dot{\epsilon}_{eff}$  为有效应变率， $C'$  为常数(对于苹果为0.107)。

#### 4 计算方法

应根据不同的问题来选择适当的计算方法。

刚性垫法适合于用粘弹性解来确定粘弹性参数<sup>[6]</sup>。在不同的变载率下读取数据可以获得三单元模型的参数。如果施以重复载荷，则作用力峰值的松弛或畸变(峰值的包络线)可以很容易地确定<sup>[10]</sup>。

重复加载法也适用于用相似性方程来确定各种农业物料的撞击损伤<sup>[7]</sup>。这种方法已成功地用来确定物料干燥后的特性变化，并用来给出一个在循环动态载荷下农业物料(谷物颗粒、土壤泥块)破裂的一般关系式<sup>[9]</sup>。由观察得到的应变与物料破坏所需载荷循环次数之间的强关系式为定量描述这些物料的动态力学性能提供了可能性<sup>[19]</sup>。

能量法也常用下列公式来描述(谷物颗粒)破坏过程的一般关系式和软化物料的机械损伤<sup>[9]</sup>：

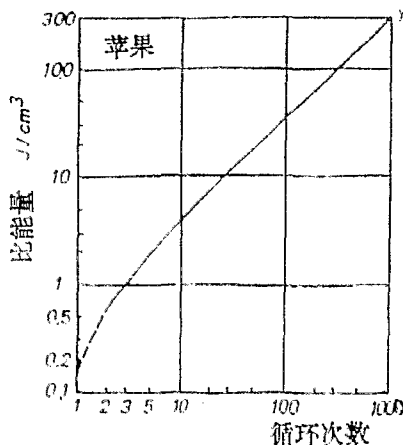


图5 损伤比能量的增加与循环次数的函数关系(软化物料)

$$\sum_{i=1}^r \int P(i) dz = v d^2 \quad (2)$$

或

$$\sum_{i=1}^n \int P(i) dz = v_v \Delta V \quad (3)$$

式中  $P(i)$  为一给定循环中的作用力,  $v$ ,  $v_v$  为破坏和损伤的比能量 (单位分别为  $\text{cmN}/\text{cm}^2$  和  $\text{cmN}/\text{cm}^3$ )

这个方法还给出了描述软化率或吸振能力特性作为循环次数及载荷量的函数的一个量度 (图 5)。

等变载率和等变形率方法特别适合于用单轴载荷来确定本构方程<sup>[11,12]</sup>。一般说来, 剪切松弛函数是用如下一个三项指数的级数来表示的:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \exp(-\beta_i t) \quad (4)$$

而体积模量则可假定为弹性的、粘弹性的或无限大的 (不可压缩物料)。

对于可压缩性大的物料 (玉米青贮饲料、粉状饲料、草料), 需要考虑依赖于水静应力和时间的可压缩性。在这种情况下, 把模量  $E$  表达为应变的函数是非常有用的。例如, 对可压缩性大的物料, 下列关系式可以在许多场合下使用 (单轴受限压缩):

$$P = K \left\{ \exp \left[ \frac{A \cdot \varepsilon (1 - \varepsilon_{\max})}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon} \right] - 1 \right\} \quad (5)$$

和

$$\frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = E = K \cdot A \cdot \frac{\varepsilon_{\max} (1 - \varepsilon_{\max})}{(\varepsilon_{\max} - \varepsilon)^2} \cdot \exp \left[ \frac{A \varepsilon (1 - \varepsilon_{\max})}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon} \right] \quad (6)$$

其中,  $\varepsilon_{\max} = 1 - \gamma_0 / \gamma_{\max}$ ,  $E_0 = K A (1 - \varepsilon_{\max}) / \varepsilon_{\max}$ ; 而  $P$  为压力,  $K$ ,  $A$  为常数,  $\gamma_0$ ,  $\gamma_{\max}$  为初始的和最大的单位体积重量。

将模量  $E$  代入给定流变模型 (如三单元模型) 的微分方程中, 就可用数值方法求解。

跌落试验法对实际应用 (水果和蔬菜的损伤) 是有用的。与此同时, 精确确定碰撞参量 (加速度、速度和位移) 则需要合适的测试手段。有了这些参量, 物料的恢复系数和吸振能力就可以算出<sup>[4]</sup>。

对于处理试验数据, 有关撞击和接触应力的力学给出了下列一些相似数:

$$\pi_1 = H \cdot \gamma \cdot A; \quad \pi_2 = v^2 \cdot A \cdot \gamma / g; \quad \pi_3 = P \cdot A / R^2 \quad (7)$$

式中,

$$A = (1 - \gamma_1^2) / E_1 + (1 - \gamma_2^2) / E_2$$

而  $H$  为跌落高度,  $\gamma$  为单位体积的重量,  $v$  为撞击速度,  $P$  为撞击力,  $R$  为物体半径。

在许多实用场合下, 农业物料可能受到无约束的重复载荷的作用。例如, 水果和蔬菜的运输损伤, 青贮饲料或湿玉米粒的受压, 谷粒在运输和加工过程中的撞击损伤等。

蠕变或峰值力松弛的描述, 可以用理论的、半经验的或经验的方程。理论的描述是用一个给定的流变模型假设一个线性的或分段线性的粘弹性行为<sup>[10]</sup>。在其他场合则应用半经验的或经验的方法。例如, 对于水果和蔬菜, 下列峰值力松弛函数可以得到成功的应用:

(下转第68页)

- 50 Hall J F, Chopra A K. *ibid*, 10 (1982) : 305  
 51 Humar J, Roufaei M. *J. Eng. Mech., ASCE*, 109 (1983) : 215  
 52 Yamamoto T. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2 (1983) : 92  
 53 Siddharthan R. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 11 (1987) : 155  
 54 章根德等. *力学与实践*, 12 (1990) : 29  
 55 ——. *力学学报*, 24 (1992)

## CONTINUUM THEORIES OF SOLID-FLUID MIXTURES AND THEIR APPLICATIONS IN ENGINEERING

Zhang Gen-de

Institute of Mechanics, Academia Sinica

**Abstract** In this paper, the continuum theories of mixtures are presented and their applications to engineering with solid-fluid mixtures are also given.

**Keywords** *mixture; geological material; continuum theory*

(上接第 143 页)

$$P(i)/P_1 = \sum_{k=1}^i a_k \exp[-(i-k)/I_k], \text{ 其中 } \sum a_k = 1 \quad (8)$$

或

$$P(i)/P_1 = 1 - A(i-1)^n \cdot Z^m \text{ (对于苹果 } n=0.18, m=0.65) \quad (9)$$

最简单的形式为

$$P(i)/P_1 = i^{-n}, \text{ 其中 } n = B \cdot Z^{m'} \quad (10)$$

式中  $i$  为循环次数,  $I_k$  为松弛的循环次数, 并且可能依赖于变形,  $Z$  为变形,  $P_1$  为第一循环的作用力幅值,  $a_k, A, B, n, m, m'$  为常数.

对于恒定的作用力幅值, 相对蠕变可以描述为

$$Z(i)/Z_1 = 1 + A(i-1)^n \text{ (对于苹果, } A=0.17-0.22, n=0.15) \quad (11)$$

或最简单的形式为

$$Z(i)/Z_1 = i^m \text{ (对于苹果, } m=0.075) \quad (12)$$

式中  $Z_1$  为第一循环中的变形,  $A, n, m$  为常数.

这里有个有趣的现象要注意: 在第一近似中, 蠕变与作用力幅值无关.

在重复载荷下, 大筒仓中受压的湿玉米粒的坚实度可以用下列关系式描述:

$$\gamma = \gamma_0 [1 + A \cdot P^m (1 - \exp(-i/I))] \quad (13)$$

这里,  $\gamma_0, \gamma$  为初始的和瞬时的单位体积重量,  $P$  为竖直载荷应力,  $A, m, I$  为常数 ( $A=0.68, m=0.1-0.15, I=3-3.7$ ).

$I$  的值给出了有关坚实度的合理数值的信息.

**参考文献** (13篇, 略)

210014农业部南京农机化研究所吴劲松摘译自: 4th Int. Conf. Phys. Properties of Agric. Mater. and their Influence on Technological Processes (4th ICPPAM) (1989): 752-759. (董务民校)