

伤做了模拟试验, 得到相应的数学模型, 并对预测和评价这种损伤的方法进行了探讨。

2 机械损伤规律

2.1 贮存期间的机械损伤

取适时采摘存放 6~7 个月的秦冠苹果为样品, 对其施加 4.9~34.3 N 的外载(相当于 0.20~1.3 m 的果堆高度), 测定 12~84 h 承载过程中苹果的接触面直径 D 。它与外载 G 、时间 T 的关系为^[2]

$$D = 32.9G + 0.12T + 2.21 \quad (1)$$

为了说明苹果本身的粘弹特性, 做了在 0.5 kg 压力下的蠕变恢复曲线, 且用四元件 Burgers 模型求得流变参数 E_v, E_s, η, η' 其中延迟时间 $T_r = \eta/E_s, 1/E_r$ 与接触面直径 D 有以下关系^[2]

$$T_r = 38.61 - 0.65D \quad (2)$$

$$1/E_r = 4.89 + 0.21D \quad (3)$$

贮存时外载的大小和贮存时间直接影响机械损伤的程度。贮存过程由于水果品质变化引起的最大允许应力值或应变值的下降也是造成贮存损伤的直接原因。在用四元件模型的流变参数表示苹果的机械特性时, T_r 和 $1/E_r$ 与损伤程度相关, 它表示了贮存过程中苹果品质变化的信息。由于贮存引起的机械损伤发生在接触面上, 可用接触面直径说明损伤程度。上述关系可描述贮存中苹果的现有损伤和延迟损伤。

2.2 运输中的机械损伤

在自制的振动试验台上, 对贮存期为 6 个月的苹果进行模拟运输试验。取振动频率 $X_1 = 2\sim 9$ Hz, 振幅 $X_2 = 3\sim 9$ mm, 时间 $X_3 = 10\sim 40$ min (相当于汽车运输 1500 km 或火车运输 4500 km)。得出损伤程度 Y 与振动参数之间的关系为^[3]

$$Y = AX_1 + BX_2 + CX_3 + K \quad \text{其中, } A, B, C, K \text{ 为系数} \quad (4)$$

当振动加速度 $X_1 = 4.9\sim 19.6$ m/s², 振动时间 $X_2 = 5\sim 12$ min, 外载 $X_3 = 0\sim 39.2$ N 时, 损伤程度 Y 可表示为^[4]

$$Y = AX_1 + BX_2 + CX_3 + K \quad \text{其中, } A, B, C, K \text{ 为系数} \quad (5)$$

运输时的道路、车辆及包装系统的特性决定了振动的频率、振幅和振动加速度; 运输距离由时间表达; 外载是上层苹果的重量引起的。若上述条件已知, 便可预测运输后苹果的损伤程度。

2.3 碰撞时的机械损伤

贮存 7 个月的苹果, 在自由落体状态下与吸收能量 x_1 (J)、最大加速度 x_2 (m/s²)、垫子厚度 x_3 (mm)、碰撞时间 x_4 (ms) 的关系为^[5]

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 \quad (6)$$

式中 Y ——损伤体积, cm³; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ——系数

采收和装卸过程有可能产生碰撞。由此产生的损伤与包装系统和碰撞状态相关。 β_1, β_2 为正数, 说明苹果吸收的能量、最大加速度是损伤增加的原因。 β_3, β_4 为负数, 说明垫子厚度和时间加大时损伤减少。

当两个苹果自由碰撞时, 总损伤体积 V (cm³) 随接触面积 S (cm²) 的 5/2 次方的函数关系而增加^[6]

$$V = 0.458 + 0.045 S^{5/2} \quad (7)$$

通过接触面积的测量,可预测损伤体积。这为迅速测量或预测碰撞损伤提供了方便。

2.4 苹果原始状态的影响

苹果贮运过程中的损伤程度与主要影响因素之间可用多元线性回归的关系表示。这时苹果原始状态的差异体现在方程和各系数项中。这在应用中需对不同原始状态的苹果做上述试验求得系数项后再求其损伤程度。苹果的原始状态及对损伤程度的影响还可用流变模型的参数值和流变方程表示。以四元件Burgers模型为例,在粘弹性范围内选载荷 F_0 。做蠕变恢复试验可求得流变参数 E_0 、 E_1 、 η 和 T_r 把它们代入贮存条件为外载 P_0 、时间 T 的流变方程中可求得贮存后苹果的变形量。短期贮存可视 E_0 、 E_1 、 η 、 T_r 不变,流变方程为

$$\epsilon = \frac{P_0}{E_0} + \frac{P_0}{E_1} (1 - e^{-T/T_r}) + \frac{P_0 \cdot T}{\eta} \quad (8)$$

式中 $T_r = \eta/E_1$, P_0 ——初始载荷; ϵ ——变形量。

运输中振动应力变化若为正弦规律时,由四元件模型流变方程式

$$\ddot{\epsilon} + \frac{\dot{\epsilon}}{T_r} = \frac{1}{E_0} [\ddot{\sigma} + (\frac{E_0}{E_1 T_r} + \frac{E_0}{\eta} + \frac{1}{T_r}) \dot{\sigma} + (\frac{E_0}{\eta T_r}) \sigma] \quad (9)$$

可得出齐次方程的解为: ($\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$ 时)

$$\epsilon(t) = C_1 + C_2 e^{-t/T_r} \quad (10)$$

非齐次方程的解为: ($\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$ 时)

$$\epsilon(t) = C_1 + C_2 e^{-t/T_r} - A (B_1 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t) \quad (11)$$

式中 $A = \frac{T_r}{1 - \omega^2 T_r^2}$; $B_1 = T_r(a_1 + a_3) - \frac{a_2}{\omega}$; $B_2 = \frac{1}{\omega}(a_1 + a_3) + a_2 T_r$;

$$a_1 = -\frac{\omega}{E_0 \omega^2}; \quad a_2 = \frac{\omega \omega}{E_0} (\frac{E_0}{E_1 T_r} + \frac{E_0}{\eta} + \frac{1}{T_r}); \quad a_3 = \frac{\omega}{\eta T_r}; \quad C_1, C_2 \text{ 为初始条件。}$$

将苹果的原始参数 E_0 、 E_1 、 η 和 T_r 代入(10)、(11)式可求得运输后的变形量。若贮运过程中外载变化是其它规律,亦可依公式(8)求得其变形规律。将上述变形量 ϵ 与产生损伤的临界变形量 $[\epsilon]$ 比较, $\epsilon > [\epsilon]$ 即发生损伤。

3 贮运过程中的损伤状态

3.1 机械损伤的形成

苹果在贮运过程中的机械损伤是外力引起的局部质地变化的结果。质地主要取决于细胞间的结合力,细胞壁构成物的机械强度和细胞的大小、形状及紧张度^[7]。当外载的类型和强度不同时会引起这三方面质地的骤变或缓变,从而发生现时或延迟的损伤。细胞间的结合力与果胶物质的质量和数量有密切的关系。果胶物质有三种类型,其中不溶于水的原果胶在细胞间层与蛋白质等形成粘合剂,起连接细胞的作用,赋予果品组织一定的强度和致密度。第二种是由长键高分子化合物组成的溶于水的可溶性果胶。第三种是果胶酸,它在稀酸或酶的作用下将原果胶逐步降解为可溶性果胶酸和果胶酸,从而使细胞间结合力逐渐减弱,强度和致密度下降。即使苹果不受外力作用,这种肉质型果实在成熟期间和存放时的果实软化现象都是存在的。从细胞壁的构成看,果胶质特别是原果胶的含量很大,它们填充于纤维素组成的网状结构中,是支撑细胞壁结构和保持机械强度的关键,细胞壁的其他构成物及细胞的

大小、形状和紧张度,也对苹果的力学特性有一定影响。各种类型外力的作用直接或间接地破坏或改变着苹果的原有质地,从而产生不同类型的损伤。

3.2 贮运过程与损伤

贮存过程中原果胶的降解直接造成强度和致密度下降,在接触面上承受的外载逐渐破坏了细胞壁的原有结构和细胞间的连接状态,造成平浅型损伤。贮存时间愈长,外载愈大这种破坏程度愈烈。由于原果胶的降解、细胞壁及细胞连接状态的破坏都具有依时性,此时的损伤也就呈现着延迟现象。苹果的原始状况不同,细胞间的结合力和强度便有了差异;贮存环境不同,使原果胶的降解过程亦有相当大差异。这些都直接影响着损伤状态和程度。

运输使苹果经受着反复的加压和碰撞,苹果的体位随时都在变化,表面接触部位受到挤压、冲击、摩擦等作用,形成不规则的平浅型环状损伤。经外载的反复作用,细胞壁的强度和细胞间的连接力发生破坏和变化,产生塑性或脆性损伤,并使苹果有软化趋势。即使运输后未显示现有损伤,放置后由于果胶的加速降解等原因,也要出现延迟损伤。良好的包装和运输条件能使外载作用减少,苹果的原始状态对外载的承受程度也有一定影响。

碰撞使苹果在接触部位瞬间受到快速作用的力,此力在瞬间又因回弹而消失。苹果的变形经历了弹性变形、塑性变形开始、塑性变形结束和弹性变形恢复四个阶段。弹性变形未引起现时损伤;塑性变形产生细胞破裂、变形、错位或果肉变软引起现时损伤;碰撞时较大的力变化速率加剧了细胞微观结构的变化,使损伤变褐较为迅速,碰撞力向深处传递以吸收碰撞能量,使果皮下组织较深处亦有损伤。

4 损伤评价指标

4.1 现有损伤评价指标

用于水果方面的现有损伤评价指标有损伤面积、深度、体积、面积平均值或综合评价指标。此时依果肉变褐部位的几何尺寸为基本依据来说明已经形成的损伤状况。另外用容积密度、呼吸速率、光学特性、染色法、X射线探查、电阻抗等方法亦能测定损伤程度。

4.2 评价指标间的相关性

振动损伤规律研究中发现现有损伤评价指标间有很好的相关性。苹果的粘弹性变形量与现行评价指标间相关也极显著^[4]。外载作用前苹果的原始力学状态可用流变模型或粘弹性变形量表示,外载作用后苹果的力学特性亦可用此时的流变模型或粘弹性变形量表示。根据这两种状态相应变形或变形差与现行损伤指标的相关性,可描述损伤程度。如振动后蠕变变形量与振动前蠕变变形量之差,振动前后总变形量之差,振动后蠕变变形量都与现行损伤评价指标间显著相关,均可做为损伤评价和预测的指标。按规定损伤面积、体积和深度是在施载后24~48 h测得的变褐部位尺寸。获得这些数据时,显得滞后和繁琐。如果用苹果的力学特性评价并有相应的仪器和数据处理系统,就可以更方便实现现测和预测。

4.3 变形量与损伤预测

蠕变法求流变参数并计算变形量来评价损伤时可视苹果为四元件模型,在粘弹性范围内取恒定载荷 F_0 ,做在 F_0 下的蠕变曲线,经时间 t_1 后卸载,得恢复曲线。蠕变方程如式(8),恢复方程为

$$\epsilon = \frac{E_a}{E_r} (1 - e^{-t/T_r}) e^{-(t-t_1)/T_r} + \frac{E_a}{\eta} t_1 \quad (12)$$

对(8)、(12)式进行计算,可求得 E_a 、 E_r 、 η 、 η 和 T_r 值。然后按照外载特征求变形量或变形量差值,再根据其与损伤指标的相关性得到损伤程度的评价。

4.4 应力值与损伤预测

蠕变法求流变参数并计算应力值来评价损伤时仍视苹果为四元件模型,求出 E_a 、 E_r 、 η 、 η 和 T_r ,代入应力松弛方程中求得应力值 σ ,将它与极限应力比较来评价损伤程度。根据公式(9),令 $\epsilon = \epsilon$,且在粘弹性变形范围内,可得出

$$\sigma(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} \quad (13)$$

式中 $r_1 = \frac{1}{2}(-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2})$; $r_2 = \frac{1}{2}(-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2})$; 其中: $a_1 = \frac{E_a}{E_r T_r} + \frac{E_a}{\eta} + \frac{1}{T_r}$;

$a_2 = \frac{E_a}{\eta T_r}$; C_1 C_2 为初始条件。

若已知苹果的极限应力值依时间的变化规律,将其与(13)式比较便可评价损伤程度。

不同质地的苹果在不同外载条件下的流变参数会有不同的值域。例如贮存时 T_r 和 $1/E_r$ 与 D 线性相关。若再寻得它们与损伤程度的关系,对评价和预测损伤将会有新的意义。这种仪器的研制有待继续进行。

5 结 语

1) 用模拟试验的方法对苹果贮运过程中的机械损伤与主要影响参数的关系进行了多元线性回归,其数学模型用来预测该状态的损伤程度。

2) 苹果贮运过程中的损伤形式,除由外载作用形成塑性、脆性的现时损伤外,还存在着因粘弹性变形和苹果质地的改变形成的延迟损伤。损伤的形状和依时性与苹果的生理、生化等特性也有关系。

3) 做苹果的蠕变恢复试验可求得流变参数,将外载特性代入流变方程中可求得变形或力随时间变化的规律。依临界应变或应力的损伤理论可预测损伤程度。

4) 现行损伤评价指标间及它们与粘弹性变形、粘弹性参数间有一定的相关性。这些都可为现时损伤和延迟损伤的评价指标。

5) 根据贮运过程中机械损伤的规律和损伤评价指标间的相关性,有望开发出新型的测量—计算系统,用来评价和预测损伤程度。这将给生产、经营和销售者带来方便和效益。

参 考 文 献

- 1 中国农业年鉴编辑部 中国农业年鉴(1994). 北京: 中国农业出版社, 1994 308
- 2 孙 骊等. 苹果贮存的接触面积和蠕变特性. 西北农业大学学报, 1996, 24(1): 104~ 106
- 3 孙 骊等. 运输中振动参数对苹果损伤的影响. 西北农业大学学报, 1996, 24(3): 81~ 86
- 4 孙 骊等. 苹果振动损伤规律及其评价. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 78~ 83
- 5 李小昱等. 苹果碰撞损伤预测模型的研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(2): 79~ 83
- 6 李小昱等. 苹果之间碰撞损伤的研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 83~ 87
- 7 任仲博等. 果品蔬菜贮藏运销学. 西安: 陕西科学出版社, 1993 66~ 68