

荔枝应力松弛特性及其损伤的试验研究

蒋志林, 陈燕, 谈建豪, 李博, 邹湘军

(华南农业大学工程学院, 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东广州 510642)

摘要: 为探讨荔枝的应力松弛特性及其在压缩松弛条件下的损伤规律, 对其进行了不同试验条件的压缩应力松弛和损伤统计试验, 确定了荔枝应力松弛模型并分析了试验因素对模型参数和荔枝损伤的影响等。结果表明: 荔枝的应力松弛特性可用五元件 Maxwell 模型描述, 模型拟合 R^2 达到 0.98; 试验范围内, 变形量对模型弹性模量影响不显著, 而加载方向对其影响最大; 试验因素均影响模型松弛时间和粘性系数; 模型弹性模量与松弛时间之间无显著相关, 但各自都显著相关; 对损伤影响显著的因素依次为压缩变形量、加载方向、松弛时间和加载速率; 变形量、松弛时间和加载速率分别每增加 1 mm、10 s 和 10 mm/s, 荔枝吸收的能量分别平均增加 3.3 mJ、0.26 mJ 和 0.2 mJ; 荔枝的粘性系数与其吸收的能量无显著相关; 随着压缩变形量增加, 荔枝吸收的能量和损伤度也不断增加; 荔枝损伤度与其吸收的能量近似二次曲线关系。

关键词: 荔枝; 应力松弛特性; 模型; 损伤; 影响因素

文章编号: 1673-9078(2015)5-96-101

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.016

Experimental Study on Stress Relaxation Characteristics and Associated Damage of Litchi

JIANG Zhi-lin, CHEN Yan, TAN Jian-hao, LI Bo, ZOU Xiang-jun

(College of Engineering, South China Agricultural University, Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to investigate the stress relaxation characteristics of litchi as well as the damage patterns induced in the relaxation condition, a compression stress relaxation test and statistical analysis on the associated damage were carried out under different experimental conditions. The stress relaxation model was confirmed, and the influence of experimental factors on model parameters and litchi damage was analyzed. The results indicated that the stress relaxation characteristics of litchi could be described by a five-element generalized Maxwell model with a coefficient determination (R^2) of 0.98. Within the test range, deformation did not significantly affect the elastic modulus of the model, but loading direction had a significant impact. All of the experimental factors affected the relaxation time and viscosity coefficient of the model, and although the elastic moduli and relaxation time were not significantly correlated, each factor showed a significant correlation independently. The prominent damage factors were in the order of compression deformation, loading direction, loading rate, and relaxation time. For the increment of 1 mm in deformation, 10 s in relaxation time, and 10 mm/s in load rate, the average increase of the absorbed energy in litchi were 3.3 mJ, 0.26 mJ, and 0.2 mJ, respectively. The viscosity coefficient was not significantly correlated with the absorbed energy in litchi. With the increase of compression deformation, absorbed energy and the damage degree of litchi also increased; there was an approximate quadratic relationship between damage degree and absorbed energy in litchi.

Key words: litchi; stress relaxation characteristics; model; damage; influencing factors

农业物料的流变特性在生产、质量控制和发展新产品中起着重要作用。通过对物料流变特性的研究, 可为各种机械和设备的设计提供形状、速度等技术指标的设计依据, 从而可大大减少物料的机械损伤, 同时

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31171457)

作者简介: 蒋志林 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农业机械化

通讯作者: 陈燕 (1964-), 女, 副教授, 硕导, 研究方向: 农业机械化工程、

智能设计与制造研究

时通过对物料流变特性的测定来评价其质地品质^[1]。荔枝是南方一种重要的农产品, 由于其皮薄、肉多, 含水量高, 在采摘、加工和储运等过程中均受到外力作用容易产生机械损伤。为减少荔枝在采摘和采后各环节的机械损伤, 并为其品质评价提供科学方法, 有必要对荔枝的流变特性进行研究。

多年来, 国内外学者针对果蔬等农业物料在收获和贮运过程中的流变学问题进行了大量的研究: 如陆秋君等^[2]和 WU 等^[3]等分别研究了番茄的应力松弛和

蠕变特性,分析了松弛和蠕变各特性参数与贮藏时间、品质等的相关性;李小昱等^[4]对苹果的流变学特性进行了研究,建立了苹果应力松弛模型,分析了流变特性参数对其损伤体积的影响;郭文斌等^[5]研究了马铃薯的应力松弛特性,建立了相应的流变学模型,并对模型参数进行了相关性分析,得到马铃薯松弛试验各参数间的相关关系;王俊等^[6]对梨肉松弛特性差异进行了深入研究,认为这种差异将影响果实存放、贮藏方式和果片等加工过程;此外还有对梨果实、特色油桃等水果蔬菜开展的流变特性研究^[7~9];但目前,国内外尚未见有关荔枝流变特性的相关研究报道。

为减少荔枝的机械损伤,课题组研究了荔枝的挤压力学特性^[10]。应力松弛是一项重要的流变特性,本文在前期荔枝常规力学性质研究的基础上,通过对荔枝进行不同条件的压缩应力松弛试验,研究荔枝的应力松弛特性及其损伤特性,建立荔枝的流变学模型,并探讨荔枝在压缩松弛条件下的损伤机理与规律,为荔枝的品质评价和低损的荔枝作业装备的设计和开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

试验用荔枝品种为增城桂味,9成熟。荔枝肩部硬度为1.63 MPa(采用GY-1水果硬度计测量),蒂部、肩部、腰部、顶部果壳厚度分别为1.16 mm、0.72 mm、0.70 mm和0.63 mm,纵向直径(果蒂与果顶连线方向)为:30.10~35.21 mm,2个相互垂直的横向直径(腰部方向)分别是30.28~35.48 mm和29.82~35.30 mm。所有试验用荔枝成熟度相近,完好无破损并剪去果柄,且在采后12 h内进行试验。

试验用设备为WD-20KE型精密微控电子万能试验机(广州市广材试验仪器有限公司),精度±5%,分辨率±1/120000,试验过程可由微机自动完成力、位移和时间的数据采集。

1.2 试验方法

应力松弛,是指物料突然地变形到给定值并保持不变时,应力随时间的变化历程^[1],因而变形量、变形速率、时间等参数均为试验影响因素。此外,荔枝的变形量、变形速率和加载方向均是影响其机械损伤的因素,其中变形量是主要影响因素^[14]。为探究各因素对荔枝应力松弛特性和损伤的影响,本文首先选取这些因素作为试验因子,采用正交试验法对荔枝进行压缩应力松弛试验,试验安排选用正交表 $L_9(3^4)$,试

验因素水平如表1。压缩试验时,变形量太小,不能反映整果的流变特性,但变形量太大,容易造成果实损伤,也不能真实的反映果实的某些特性^[9]。前期试验可知,荔枝压缩率在15%(变形量约4.5 mm)内属于内部损伤,故变形量选用小于4.5 mm的三个水平;加载速率在5~50 mm/min属于准静态范围,因此加载速率选取5~50 mm/min内三个水平;由于松弛时间90 s后荔枝松弛应力已接近平衡应力,故松弛时间选取90 s内三个水平。加载方向如图1所示,其中横向b为垂直荔枝两侧缝合线(此部位果壳较薄,受力易开裂)的腰部方向,即垂直横向a。

为进一步考察松弛条件下变形量对荔枝应力松弛特性和机械损伤的影响,选取压缩变形量为分别为0.8 mm、1 mm、1.2 mm、1.4 mm、1.6 mm、2.4 mm和3.2 mm,以加载速率5 mm/min、松弛时间90 s、纵向,对荔枝作单因素压缩松弛试验。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Table of factors and levels in the orthogonal test

水平	变形量/mm	松弛时间/s	加载速率/(mm/min)	加载方向
1	0.8	20	5	纵向
2	1.6	55	25	横向 a
3	2.4	90	45	横向 b

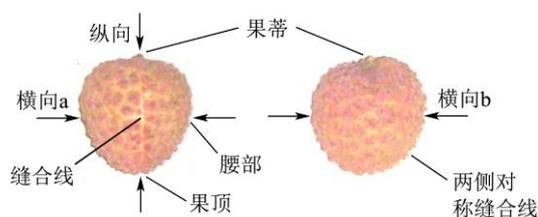


图1 荔枝外部形态及挤压方向

Fig.1 External morphology and extrusion direction of litchi

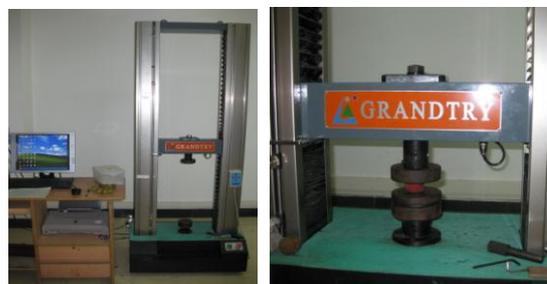


图2 电子万能试验机和荔枝加载方式

Fig.2 Electronic universal testing machine and loading mode of litchi

压缩应力松弛试验在电子万能试验机上完成,采用平板压缩方式(如图2)。试验时荔枝试样放置在固定的下压板上,上压板垂直下压,将试样压缩至某一常应变,到达设置的松弛时间后卸载结束试验,每组

试验重复 10 次。正交试验使用荔枝 90 个，单因素试验使用荔枝 80 个（包括 10 个对照果），其中单因素试验后的荔枝采用文献^[11]的方法考察其果肉褐变情况。

1.3 数据处理方法

1.3.1 试验后荔枝损伤的确定

荔枝受载后，产生的机械损伤有二种情况：果皮出现破裂的宏观损伤和果皮没有出现破裂的微观损伤^[15]。经应力松弛试验后荔枝只产生微观损伤，但其损伤体积较难测定。由于水果在加载情况下，吸收的能量完全造成了机械损伤，损伤的体积与其所吸收的能量成正比^[12]。本文通过计算荔枝在压缩-松弛-卸载过程吸收的能量（用吸收能表示）来间接代替其损伤体积，从而评价荔枝在不同试验条件下的损伤程度。正交试验和单因素试验后，分别通过其压缩-松弛-卸载曲线（如图 3）计算荔枝吸收能，它等于试验曲线所包围的面积，其计算公式如下：

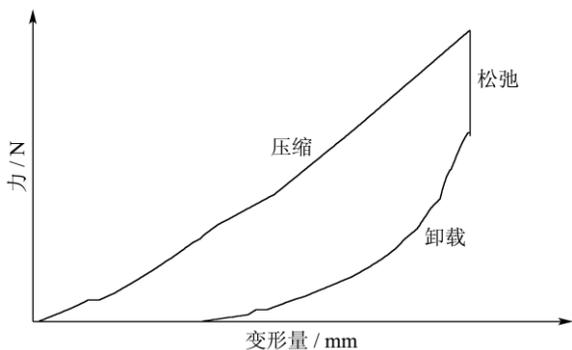


图3 荔枝压缩-松弛-卸载曲线

Fig.3 Compression-relaxation-unloading curve of litchi

$$U_p = \int_0^{\delta} F_s d\delta - \int_0^x F_e dx \quad (1)$$

式中： U_p 为吸收能，mJ； F_s 为压缩力，N； δ 为压缩位移，mm； F_e 为卸载力，N； x 为卸载位移，mm。

由于试验数据为离散量，本文采用微积分法求荔枝的吸收能。

本文试验范围，荔枝只发生内部损伤，受载点果肉会出现褐变，损伤越严重，褐变点越大、褐变色越深。未受载荔枝随着贮藏时间延长，果肉也会出现褐变，但出现深色褐变的时间长些。单因素松弛试验后，统计荔枝受压部位果肉出现深色褐变斑点前的贮藏天数，以进一步评价变形量对荔枝机械损伤的影响，计算公式^[11]如下：

$$y = \frac{t - t_1}{t} \times 100\% \quad (2)$$

式中： y 为损伤度，%； t 为对照果果肉出现深色褐变前的贮藏天数，d； t_1 为被加载荔枝果肉出现深色褐变斑点前的贮藏

天数，d。

1.3.2 荔枝松弛试验的力学参数

根据 Hertz 接触应力理论，用刚性平板对类球形物料加载时，物料任意时刻的弹性模量可采用以下公式计算^[1]：

$$E = \frac{3F(1-\mu^2)}{4D^{\frac{3}{2}}R^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中： E 为物料弹性模量，MPa； F 为压缩力，N； D 为变形量，mm； R 为物料半径，mm； μ 为物料泊松比。

松弛试验可得到力随时间的变化关系，通过以下公式（4）可计算得到松弛应力，从而可得应力随时间的变化关系。

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4)$$

式中： σ 为物料受载时的应力，MPa； E 为物料的弹性模量，MPa； ε 为物料受载时的应变。

1.3.3 统计分析

试验结果采用平均值表示，并采用 SPSS 软件对试验数据进行拟合、方差分析和回归分析。回归方程建立采用向后剔除法。由于正交试验中的试验因子加载方向为定性变量，在建立吸收能的回归方程前，需将定性变量转换为虚拟变量并赋值，如表 2 所示。

表 2 虚拟变量的设置和赋值

Table 2 Setting and assignment for virtual variables

加载方向	虚拟变量赋值	
	L_1	L_2
纵向	0	1
横向 a	1	0
横向 b	1	1

2 结果与分析

2.1 流变学模型

建立物料的流变学模型，可将压缩试验获得的流变曲线与已知的粘弹性模型^[13-15]进行比较，选用力学性态相似的作为其流变模型，然后求解模型参数。荔枝是粘弹性物料，其应力松弛试验表明，在应力松弛过程中存在平衡应力，因此本文选用广义的 Maxwell 模型分析和描述荔枝的应力松弛特性。

利用应力松弛试验数据应用公式（5）可求得不同松弛时间的荔枝弹性模量，将正交试验计算所得的荔枝弹性模量与松弛时间的关系数据采用五元件广义 Maxwell 模型用 SPSS 软件进行曲线拟合，模型参数拟合结果见表 3。五元件广义 Maxwell 模型应力松弛方程如下：

$$E(t) = E_1 e^{-t/T_1} + E_2 e^{-t/T_2} + E_e \quad (5)$$

E_2 均为衰变弹性模量, MPa; E_e 为平衡弹性模量, MPa; T_1 、 T_2 均为 Maxwell 元件的松弛时间, s。

式中: $E(t)$ 为任意时间 t 时的瞬时弹性模量, MPa; E_1 、

表 3 模型参数拟合结果

Table 3 Fitting results of model parameters

试验组	E_1 /MPa	E_2 /MPa	E_e /MPa	T_1 /s	T_2 /s	R^2
1	0.33±0.10	0.74±0.14	3.55±0.63	1.00±0.17	9.21±1.79	0.987
2	0.45±0.08	0.46±0.08	2.47±0.41	1.78±0.41	23.28±7.14	0.994
3	0.81±0.12	0.76±0.09	2.84±0.39	2.01±0.11	36.59±1.88	0.986
4	0.37±0.08	0.44±0.10	2.87±0.57	0.85±0.08	8.74±0.67	0.989
5	0.88±0.09	0.85±0.18	3.56±0.33	19.57±1.15	1.50±0.12	0.996
6	0.39±0.08	0.26±0.06	2.44±0.46	50.89±3.42	4.46±0.48	0.986
7	0.45±0.06	0.34±0.06	2.57±0.28	7.15±0.62	0.58±0.07	0.995
8	0.24±0.02	0.41±0.06	2.62±0.17	2.66±0.17	30.18±2.27	0.994
9	0.76±0.14	0.75±0.33	3.42±0.38	32.55±2.32	2.41±0.23	0.996

由表 3 可见, 各组模型的拟合相关系数都较高, 达到 0.98 以上。因此, 荔枝的应力松弛变化规律可用五元件的广义 Maxwell 模型来描述。用 SPSS 软件对模型参数作方差分析, 结果如表 4 所示。

表 4 模型参数方差分析

Table 4 Variance analysis of model parameters

方差来源	统计与检验值	变量				
		E_1	E_2	E_e	T_1	T_2
变形量	F 值	0.517	0.999	1.373	1428.447	411.388
	P 值	0.598	0.373	0.259	0.000	0.000
松弛时间	F 值	63.605	3.859	2.472	2076.475	127.304
	P 值	0.000	0.044	0.091	0.000	0.000
加载速率	F 值	61.452	11.739	0.973	161.558	3.545
	P 值	0.000	0.000	0.382	0.000	0.033
加载方向	F 值	30.976	73.223	19.336	1201.682	398.931
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

由表 4 可以看出: 变形量对模型的弹性模量影响不显著, 可能原因是试验因素变形量整体较小, 压缩过程荔枝内部基本还处在弹性变形阶段, 因此变形量对弹性模量无明显影响。除平衡弹性模量 E_e 外, 松弛时间和加载速率对衰变弹性模量 E_1 、 E_2 影响都显著, 而加载方向对三个弹性模量的影响都极为显著, 这说明平衡弹性模量 E_e 主要受加载方向影响, 荔枝抵抗变形的能力纵向大于横向, 因此纵向的 E_e 也大于横向, 这点从表 3 也可看出 (1、5、9 试验号加载方向为纵向)。所有试验因素均影响模型的松弛时间(T_1 和 T_2), 但相比较加载速度影响显著性低些。因此荔枝应力松弛过程趋于稳定的时间主要由变形量、松弛时间和加载方向决定。此外, 通过分析还知, 试验因素对荔枝的粘性系数 (η_1 和 η_2) 影响也是很显著的, 同样, 相

比较加载速率的影响程度也低一些。

进一步对模型参数的相关性分析可知, 荔枝模型的弹性模量 (E_1 、 E_2 和 E_e) 与松弛时间(T_1 和 T_2) 之间无显著相关 ($P \geq 0.076$), 但弹性模量之间都显著正相关 ($P=0.000$)、松弛时间之间显著负相关 ($P=0.000$)。

2.2 应力松弛曲线

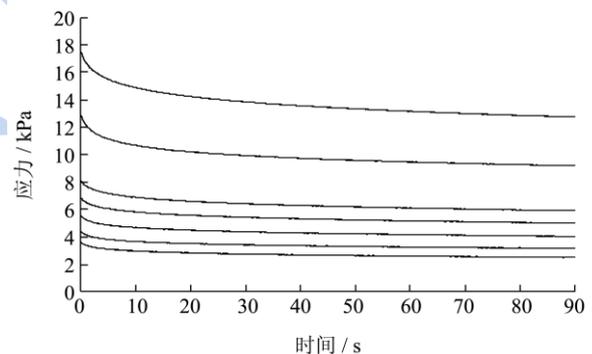


图 4 荔枝应力松弛曲线

Fig.4 Stress relaxation curve of litchi

采用公式 (3) 和 (4) 根据试验数据可求得荔枝应力随时间的变化关系。图 4 是单因素试验不同变形量下荔枝应力松弛曲线 (图中曲线对应的变形量从下往上依次递增)。由图可见, 不同变形量下的荔枝应力松弛曲线的变化规律相同, 松弛应力在松弛时间前 10 s 内大幅下降, 随后逐渐下降并缓慢趋于平衡; 变形量越大, 最大松弛应力越大, 任一时刻的松弛应力也越大, 且最终的平衡应力也越大, 也就是残余应力越大。

2.3 压缩松弛条件下荔枝损伤分析

2.3.1 正交试验因素对荔枝损伤影响

由前所述, 本文通过计算荔枝在压缩-松弛-卸载过程吸收的能量(用吸收能表示)间接评价其在压缩-松弛条件下的损伤程度。利用正交试验数据分别求得各组荔枝的吸收能的平均值如表 5 所示。用 SPSS 软件对荔枝吸收能作方差分析, 结果如表 6 所示。

表 5 荔枝的吸收能

Table 5 Absorbed energy of litchi

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
平均值/mJ	0.84	0.72	0.93	2.47	4.27	2.37	5.06	4.66	10.63
标准差/mJ	0.19	0.12	0.08	0.46	0.61	0.42	0.63	0.35	1.98

表 6 荔枝吸收能方差分析

Table 6 Variance analysis of the absorbed energy

方差来源	平方和	均方差	F 值	P 值
变形量	543.644	271.822	463.471	0.000
松弛时间	56.568	28.284	48.226	0.000
加载速率	59.559	29.780	50.776	0.000
加载方向	129.523	64.761	110.421	0.000

由表 6 方差分析可知, 正交试验各因素: 变形量、松弛时间、加载速率和加载方向对荔枝吸收能的影响均极为显著, 即均显著影响荔枝的损伤。但各因素的影响显著性有差异, 其中影响最显著的因素是变形量, 其次是加载方向, 最后是松弛时间和加载速率。

荔枝是一种粘弹性物料, 在压缩过程除了弹性变形还有部分粘性变形, 当压缩停止, 有的粘性变形会恢复, 但有些因荔枝组织破坏等原因不能恢复而产生永久变形。因此荔枝压缩过程变形越大, 内部积聚的能量越大, 松弛和卸载阶段的变形恢复越小, 则吸收的能量越大。而粘性系数的大小可反映物料压缩时产生粘性流动的难易程度, 即粘性变形的大小。变形越大, 荔枝内部积聚的能量越大, 因此, 荔枝的粘性系数与其吸收的能量有一定联性, 但最终还要看变形恢复的程度如何。在本试验范围内, 荔枝的粘性系数与吸收能相关性不显著 ($P \geq 0.081$)。进一步分析可知, 随着变形量和加载速率的增加, 荔枝粘性系数是增加的, 且纵向的粘性系数大于横向。

进一步对表 5 的试验结果采用 SPSS 进行线性回归, 得到荔枝的吸收能与试验因素间的关系方程如下所示:

$$U_p = -2.66 + 3.271D + 0.026t + 0.02v - 2.545L_1 \quad (6)$$

式中: U_p 为荔枝的吸收能, mJ; D 为变形量, mm; t 为松弛时间, s; v 为加载速率, mm/s; L_1 为加载方向的虚拟变量赋值。

回归方程 (6) 的决定系数 R^2 为 0.863, 经整体检验非常显著。由回归方程可见, 随着变形量、松弛时

间和加载速率的增加, 荔枝的吸收能增加, 损伤增加。随着变形量、松弛时间和加载速率分别每增加 1 mm、10 s 和 10 mm/s, 荔枝吸收的能量分别平均增加 3.3 mJ、0.26 mJ 和 0.2 mJ; 将表 2 的虚拟变量所对应的取值分别代入方程 (6) 中可知: 在相同的压缩量等条件下荔枝加载方向纵向比横向吸收的能量多, 但纵向 a 和横向 b 无差异。通过以上分析可见, 对荔枝作业时, 可忽略其横向加载位置的差异性, 并尽量减少荔枝受载的程度和时间, 以及冲击力的作用, 可减少荔枝的机械损伤。

2.3.2 变形量对荔枝损伤影响

通过正交试验结果可知, 变形量对荔枝损伤的影响非常显著。进一步对单因素松弛试验结果进行分析, 得荔枝变形量分别与吸收能和损伤度的关系曲线如图 5 和图 6 所示, 其拟合曲线的决定系数 R^2 均为 0.998。由图 5 和图 6 可见, 随着变形量的增加, 荔枝的吸收能和损伤度增加, 这与正交试验结果一致; 变形量较小时, 荔枝吸收的能量和损伤度增加缓慢; 但随着变形量的增加, 荔枝的最大松弛应力增加, 其吸收的能量和损伤度快速上升, 且接近线性关系。由此可见, 要减小荔枝的机械损伤, 一定要严格控制其受压缩的程度。

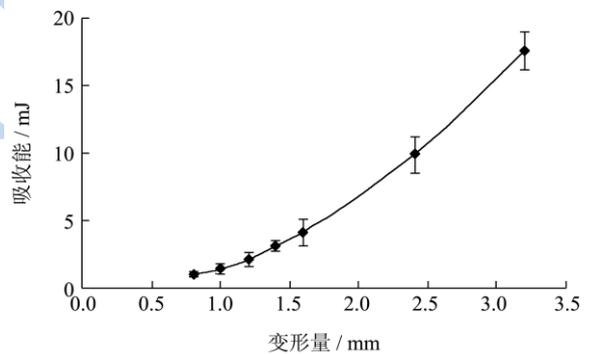


图 5 变形量与吸收能的关系

Fig.5 Relationship between deformation and absorbed energy

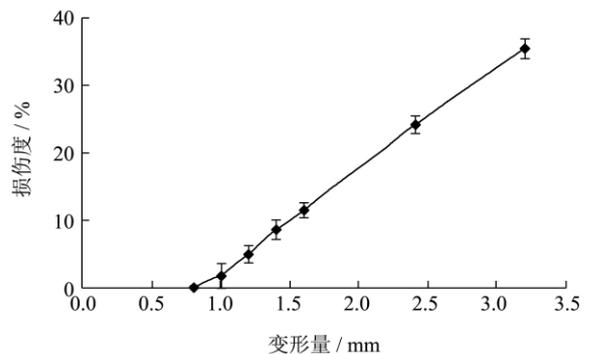


图 6 变形量与损伤率的关系

Fig.6 Relationship between deformation and damage degree

根据图 5 和图 6 数据建立了本试验范围内荔枝损

伤度与吸收能间的关系方程, 方程的决定系数 R^2 为 0.998。

$$y = -0.086U_p^2 + 3.691U_p - 2.957 \quad (7)$$

式中: y 为损伤度, %; U_p 为荔枝的吸收能, mJ。

3 结论

通过压缩应力松弛试验, 分析研究了荔枝的应力松弛特性, 以及压缩松弛条件下荔枝的机械损伤, 主要结论如下:

3.1 荔枝的应力松弛特性可用五元件广义 Maxwell 模型描述; 试验范围内, 变形量对模型的弹性模量影响不显著, 与其它试验因素相比较, 加载方向对模型的弹性模量影响最大; 所有试验因素均影响模型的松弛时间和粘性系数; 模型的弹性模量与松弛时间之间无显著相关, 但弹性模量之间和松弛时间之间都显著相关。

3.2 不同压缩变形量下的荔枝应力松弛曲线的变化规律相同; 变形量越大, 最大松弛应力越大, 任一时刻的松弛应力也越大, 且最终的平衡应力也越大。

3.3 试验范围内, 影响荔枝在压缩-松弛-卸载过程吸收的能量最显著的因素是变形量, 其次是加载方向, 最后是松弛时间和加载速率; 荔枝粘性系数与其吸收的能量无显著相关。

3.4 试验范围内, 随着压缩变形量的增加, 荔枝的吸收的能量和损伤度增加, 且初期增加缓慢, 后期快速上升; 荔枝损伤度与其吸收的能量近似二次曲线关系。

参考文献

- [1] 周祖镠. 农业物料学[M]. 北京: 农业出版社, 1994
ZHOU Zu-e. Agricultural material science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994
- [2] 陆秋君, 王俊, 何喜玲. 常温贮藏中番茄应力松弛特性试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 77-80, 88
LU Qiu-jun, WANG Jun, HE Xin-lin. Experimental study on intact tomato's stress-relaxation during storing at normal temperature [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 77-80, 88
- [3] WU Tian-xia, Judith A. Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices [J]. *Abbott Postharvest Biology and Technology*, 2002, 24: 59-68
- [4] 李小昱, 王为, 朱俊平, 等. 苹果机械损伤应力松弛特性的研究[J]. 农业机械学报, 1997, 28: 66-70
LI Xiao-yu, WANG Wei, ZHU Jun-ping, et al. A study on stress relaxation properties of mechanical damage of apple [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28: 66-70
- [5] 郭文斌, 王春光, 刘百顺. 马铃薯应力松弛特性[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 205-207
GUO Wen-bin, WANG Chun-guang, LIU Bai-shun. Stress relaxation characteristics of potato [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 205-207
- [6] 王俊, 王剑平, 蒋亦元, 等. 梨肉松弛特性各向差异研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 123-126
WANG Jun, WANG Jian-ping, JIANG Yi-yuan, et al. Anisotropic relaxation properties of pear [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 123-126
- [7] 张谦益, 吴洪华. 梨果实蠕变基本流变特性研究[J]. 现代食品科技, 2006, 22(4): 46-48
ZHANG Qian-yi, WU Hong-hua. The creep rheological properties of pear [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2006, 22(4): 46-48
- [8] Peleg M, Calzada J F. Stress relaxation of deformed fruits and vegetables [J]. *Journal of Food Science*, 1976, 41(6): 1325-1329
- [9] 孙国辉. 特色油桃流变力学特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005
SUN Guo-hui. Studies on rheological properties of characteristic nectarine [D]. ZhenJiang: JiangSu University, 2005
- [10] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 360-364
CHEN Yan, CAI Wei-liang, ZOU Xiang-jun, et al. Extrusion mechanical properties of fresh litchi [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 360-364
- [11] 陈燕, 向和平, 谈建豪, 等. 挤压对荔枝机械损伤和力学参数的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2013, 39(6): 688-692
CHEN Yan, XIANG He-ping, TAN Jian-hao, et al. Effects of extrusion on mechanical damage and mechanical parameters of litchi [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2013, 39(6): 688-692
- [12] School D, Holt J E. Impact bruising in 3 apple arrangements [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1982, 27(1): 507-512
- [13] Dogherty M J O. A review of the mechanical behavior of straw when compressed to high densities [J]. *Engng Res*, 1989, 44(2): 241-265

- [14] Pictiaw Cher, Suming Chen. Stress relaxation function of apples under high loading rates [J]. Trans of the ASAE, 1986, 29(6): 1754-1759
- [15] 朱凯,牛智有.粉体棉花秸秆的应力松弛特性与模型建立[J].华中农业大学学报,2014,33(5):130-134
ZHU Kai, NIU Zhi-you. Compression stress relaxation characteristic of cotton stalk particles and its model building of cotton stalk particles [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5): 130-134

现代食品科技