

文章编号: 1001-4888(2024)05-0571-09

压缩载荷下脆性果品组织的 随机损伤演化特征研究*

张佩佩^{1,2}, 王怀文¹, 计宏伟^{1,2}

(1. 天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134; 2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350)

摘要: 脆性果品组织结构的多相性和随机性使得传统的损伤模型不足以描述其力学损伤行为。本文以富士苹果为例, 考虑组织内部孔隙微裂纹的扩展, 将切应力作为组织破坏的主要因素, 通过建立并联剪切微弹簧模型探索苹果组织在压缩载荷下的损伤演化过程。通过单轴压缩实验, 计算出与损伤相关的统计参数, 并基于此预测压缩应力。结果表明, 本研究模型的预测结果与实验结果之间的确定系数为 0.95, 能够较准确地描述单轴压缩状态下苹果组织的损伤行为。本文研究结果可为探索果品组织的力学性质和损伤行为提供参考。

关键词: 脆性果品; 苹果组织; 机械损伤; 损伤模型; 压缩载荷

中图分类号: O348; TS255 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-200

0 引言

新鲜果品色泽鲜艳、营养丰富, 已经成为人们饮食结构中重要的组成部分。然而, 果品在收获、包装和运输过程中不可避免会受到跌落、碰撞、挤压作用^[1-2]。当施加在果品上的外力超过了果品的承受能力时, 将会引起其内部细胞的破裂或者分离, 从而使果品产生了机械损伤^[3]。机械损伤不仅破坏了细胞结构, 还导致果肉组织迅速软化和出现褐变^[4], 这进一步降低了果品的质量。因此, 准确表征果品在机械载荷下的损伤过程对于深入了解果品品质的变化规律、开发新型的保鲜技术以及改进采后处理流程具有重要意义。

材料损伤的检测与分析已成为实验力学领域的研究热点之一^[5-7]。目前众多学者已从静压、振动和冲击特性等多个角度对果品的损伤模型进行了研究^[8-12]。AHMADI^[10]使用多元线性回归分析猕猴桃的损伤敏感性, 通过测量吸收能量构建了 2 个损伤预测模型。STROPEK 等^[11]定量地评价了苹果跌落时的塑性变性能。VAN ZECBROECK 等^[12]建立了多个线性和非线性回归模型, 将果实的成熟度、声学刚度、果实温度、曲率半径和收获日期等与损伤量相关联。上述研究多集中在整个果品的宏观层面, 缺乏对果品组织本身结构特性的考虑。

果品组织是复杂的多相材料, 包括固态的细胞膜、细胞壁、液态的细胞质以及气态的孔隙^[13-14]。细胞之间靠果胶等成分紧密排列。由于细胞的排列方式受生长环境、温度、地理条件、成熟度等多因素的影响, 可以在某种程度上理解为自组装机制的结果, 细胞排列方式具有随机性。果品组织具有多相性和随机性, 使得传统的损伤模型不足以描述其力学性质。在这一背景下, 引入随机损伤本构关系成为一种有前景的研究方法, 有助于理解和预测果品组织在压缩载荷下的损伤行为。

* 收稿日期: 2023-09-24; 修回日期: 2023-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11772225)

通信作者: 王怀文(1975-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 实验固体力学。Email: wanghw@tjcu.edu.cn

现有的随机损伤模型的建立与发展主要源于岩石、混凝土等材料,目前已经存在多种针对岩土体的随机损伤模型^[15-17]。随机损伤模型的主要思想为:材料力学性质的宏观非线性来源于细观组织和缺陷的非均匀性,而其中存在的随机性则可以通过统计损伤演化规律进行反映。KRAJČINOVIĆ等^[15]提出了平行杆模型,基于随机性模拟了混凝土、岩石等准脆性材料单轴拉伸的损伤演化规律。此后随机损伤模型得到了许多改进,例如:将细观单元断裂概率定义为损伤变量^[16]、将弹簧的破坏强度用连续随机变量表示^[17]、通过随机场的相关结构考虑相邻缺陷之间的相互影响^[17]、引入细观断裂应变作为基本的随机变量^[18]等,从而较系统地解释了细观损伤随机性导致损伤过程非线性的本质原因。混凝土是由水泥、粗骨料、细骨料、各种掺和料组成的多相复合材料,而果品组织的孔隙分布也呈现随机性^[19],因此,混凝土和果品的结构在一定程度上有相似性。果品在受力到损伤断裂的过程中具有连续性的损伤分布,其初始损伤分布和后续损伤演化都具有随机性。整个受载过程与微裂纹的形成、扩展、交错和滑移密切相关,因此,可以借鉴混凝土研究的分析策略,引入损伤力学的理论框架来研究果品受载破坏的全过程,从而为研究果品的损伤模型提供一些有价值的参考和启发。

本文旨在探讨将随机损伤本构关系引入脆性果品(如富士苹果)的可行性,并提供一种全面的研究方法,以便更好地理解模拟果品组织在压缩载荷下的损伤行为。通过建立适用于果品组织的损伤模型,有助于更好地了解 and 最大限度地减少果品的损伤,并为果品的力学性能分析和成熟度区分等提供实质性的参考。

1 单轴压缩随机损伤模型的建立

1.1 纯剪切随机损伤建模

苹果果肉组织类似于混凝土,包含大量大小不同的孔隙,可以将孔隙、微裂纹扩展视为损伤因素。本文通过预压缩实验发现,脆性苹果组织试样在压缩过程中沿约 45° 方向剪切破坏,因此,将切应力视为组织破坏的主要因素。本文采用细观尺度意义上的、强度服从某一分布的微弹簧来表征细观单元^[20],从而建立苹果组织在受到切应力时损伤的产生和演化规律。在建立模型之前,考虑以下基本假定。

- (1)单元体高为 h ,长为 l ,厚度为1。
- (2)单元体总共分解为 N 个微弹簧,每个微弹簧的面积为 l/N 。
- (3)每个微弹簧服从线弹性本构关系。
- (4)微弹簧断裂临界应变 Δ 为随机变量,服从某一类随机场分布。

微弹簧的随机断裂用 Heaviside 函数表达

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x \geq \Delta \\ 1 & x < \Delta \end{cases} \quad (1)$$

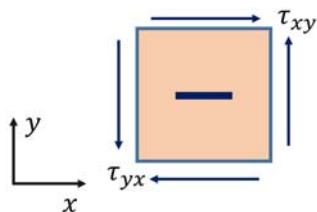


图1 包含一条中心裂纹的剪切单元体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a shear unit cell containing a single crack

当裂缝在正交坐标系内,且处于纯剪切应力状态时,单元体受力如图1所示, τ_{xy} 和 τ_{yx} 为单元体的切应力。当应变超过 Δ 时,表示微弹簧断裂。弹簧的断裂受到剪切作用的诱导,纯剪切损伤的本构关系表示为

$$\tau = (1 - D_s(\gamma))G\gamma \quad (2)$$

式中: τ 为切应力; γ 为切应变; D_s 为剪切损伤变量; G 为剪切模量。

材料的损伤可表示为^[21]

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (3)$$

式中: A_d 为因细观剪切单元(微弹簧)破坏而导致苹果组织失效的面积; A 为受压组织的横截面积。

假定材料离散后模型中细观单元截面积均相等,剪切损伤变量可定义为

$$D_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(\gamma - \Delta_i) A_i \tag{4}$$

式中： A_i 为第 i 个细观单元截面积； N 为细观单元的总数量； Δ_i 为第 i 个细观单元发生剪切破坏时的断裂应变，是服从一定概率分布的随机变量； $H(\cdot)$ 为 Heaviside 函数。

当模型中细观单元总数 N 趋于无穷大时，式(4)中的等效细观模型可以看作一维连续体，当 N 趋于无穷大的极限存在，则剪切损伤变量可以表示为

$$D_s(\gamma) = \int_0^1 H[\gamma - \Delta(x)] dx \tag{5}$$

式中， Δ 由随机变量转化为以 x 为参数的随机过程 $\Delta(x)$ 。假设随机过程 $\Delta(x)$ 组成为一组各向同性且服从正态分布的均匀随机场，随机场一维密度函数的形式为

$$f(\Delta; x) = f(\Delta) \tag{6}$$

定义分布函数为 $F(\Delta; \gamma)$ ，令随机过程 $\xi(x) = H[\gamma - \Delta(x)]$ ，可得

$$P[\xi(x) = 1] = P\{H[\gamma - \Delta(x)] = 1\} = P\{\gamma - \Delta(x) \geq 0\} = \int_0^\gamma f(\Delta) d\Delta = F(\gamma) \tag{7}$$

$$P[\xi(x) = 0] = 1 - F(\gamma) \tag{8}$$

随机过程 $\xi(x)$ 的均值函数表示为

$$\mu_\xi(\gamma) = E[\xi(x)] = F(\gamma) \tag{9}$$

对于剪切损伤变量的表达式，可知其均值函数为

$$\mu_{D_s}(\gamma) = E\left[\int_0^1 \xi(x) dx\right] = \int_0^1 E[\xi(x)] dx = \int_0^1 F(\gamma) dx = F(\gamma) \tag{10}$$

概率密度函数 $f(\Delta)$ 服从标准正态分布，其数学期望和标准差分别为 λ_s 和 ζ_s^2 ，由此可求

$$\lambda_s = E(f(\Delta)) \tag{11}$$

$$\zeta_s^2 = \text{Var}(f(\Delta)) \tag{12}$$

利用上述细观模型，只需引入 λ_s 和 ζ_s ，即可完整描述剪切损伤变量的分布特性。 λ_s 与 ζ_s 参数值可以通过单轴压缩实验得到，由此进一步建立单轴压缩随机损伤模型。

1.2 单轴压缩随机损伤模型

在单轴压缩状态下，苹果组织单元体中损伤的产生和演化如图 2 所示。苹果组织单元承受压应力 σ ， σ 产生和扩展的裂缝方向与压应力方向夹角 α 是关键因素。可以通过坐标轴转换来分析裂缝方向相关的应力和应变。

在 σ 已知的情况下，通常需要分析与 x 轴夹角 α (即裂缝方向) 所在平面上的应力，因此需要将应力转换到与裂缝正交的坐标系 $x'y'$ 上。在这种情况下，通过 y' 方向的受力平衡可得

$$\sigma \cdot A_i \cdot \sin\alpha = \sigma'_y \frac{A_i}{\sin\alpha} \tag{13}$$

式中， α 为两坐标轴之间的夹角，改写可得

$$\sigma'_y = \sigma \sin^2 \alpha \tag{14}$$

类似地，可得斜截面上切线方向受力平衡为

$$\tau' = \sigma \sin\alpha \cos\alpha \tag{15}$$

单元体承受的压应力 σ 在新坐标系下表示为

$$\sigma'_x = \sigma \cos^2 \alpha, \sigma'_y = \sigma \sin^2 \alpha, \tau' = \sigma \sin\alpha \cos\alpha \tag{16}$$

式(16)得到的 2 个方向正应力均为压应力，在假定苹果组织为线弹性材料、应变在弹性范围内的前提下，根据胡克定律计算对应方向上的应变，两坐标轴方向的应变表示为

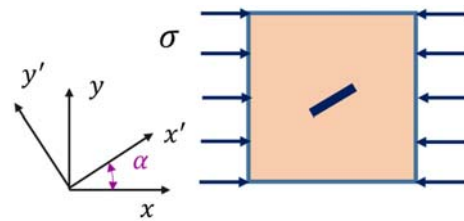


图 2 单元体单轴压缩受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the unit cell under uniaxial compression

$$\begin{cases} \epsilon'_x = \frac{1}{E} [\sigma \cos^2 \alpha - \nu \sin^2 \alpha] \\ \epsilon'_y = \frac{1}{E} [\sigma \sin^2 \alpha - \nu \cos^2 \alpha] \end{cases} \quad (17)$$

在坐标系转换后,斜截面上的切应力将引起微裂缝的产生和扩展,即切应力 τ 引起的切应变 γ 将导致微裂缝的生成和扩展,最终导致单元体的损伤演化直到破坏。剪切损伤的演化方程为

$$\gamma = \frac{\tau'}{[1 - D_s]G} \quad (18)$$

至此,可以得到坐标系 $x'y'$ 的正应变 ϵ'_x, ϵ'_y 和切应变 γ 的表达式,再利用应变转轴公式可以得到原坐标系 xy 中与加载方向对应的应变,应力与应变之间的关系表示为

$$\epsilon = \frac{1-\nu}{2E}\sigma + \frac{1+\nu}{2E}\sigma \cos^2 2\alpha + \frac{1+\nu}{2E[1-D_s]}\sigma \sin^2 2\alpha \quad (19)$$

进一步化简可得

$$\sigma = (1 - D_c)E\epsilon \quad (20)$$

$$D_c = \frac{(1 - K) D_s}{1 - K D_s} \quad (21)$$

式中, D_c 为压缩损伤变量。

$$K = \frac{1-\nu}{2} - \frac{1+\nu}{2} \cos^2 2\alpha \quad (22)$$

式(21)可以表述压缩损伤变量和剪切损伤变量之间的关系,同时满足 $D_s=0$ 时 $D_c=0$ 和 $D_s=1$ 时 $D_c=1$ 的约束条件。

联立式(16)、式(18)、式(20)和式(21)可得

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1 - D_s(\gamma)}{(1 + \nu) \sin 2\alpha} E\gamma \\ \epsilon = \frac{1 - K D_s(\gamma)}{(1 + \nu) \sin 2\alpha} \gamma \end{cases} \quad (23)$$

式(23)表达了压应力与压应变之间的对应关系。 $D_s(\gamma)$ 实质上为随机变量,因此式(23)的结果可以通过均值描述,均值函数表达式为

$$\begin{cases} \mu_\sigma = \frac{1 - F(\gamma)}{(1 + \nu) \sin 2\alpha} E\gamma \\ \mu_\epsilon = \frac{1 - KF(\gamma)}{(1 + \nu) \sin 2\alpha} \gamma \end{cases} \quad (24)$$

式中, $F(\gamma)$ 表示参数 λ_s 和 ζ_s 正态分布的一维分布函数。通过上述建模过程,可以得到考虑了剪切损伤和压缩损伤影响时应力与应变之间的关系。这一模型可以通过压缩实验来获得损伤变量的变化趋势,并引入损伤相关的统计参数 λ_s 和 ζ_s 来描述损伤的分布特性。该模型的建立依据苹果组织断裂角度接近 45° 的实验事实,将切应力作为组织破坏的主要因素。若将该模型应用于其他类型的脆性果品,其断裂面倾角可能偏于 45° ,意味着静水压力参与了断裂过程,则可进一步考虑静水应力的影响。

2 单轴压缩实验及实验结果分析与讨论

2.1 实验试样与压缩方案设计

本研究中,实验样品为烟台富士苹果。通过切割得到形状规则的立方体样品,其尺寸为 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。样品组织位于果皮赤道部位下 10mm 处,以确保样品的一致性。使用质构分析仪(TA, XT plus, Stable Micro Systems Ltd., UK)进行单轴压缩实验。实验过程中,样品被放置在操作平台上,并确保压缩中心点与样品中心在同一条轴线上,以避免受载偏心。力传感器和位移传感器分别记录压缩过程中的载荷和位移数据。压缩探头选择 P36R。实验采用位移加载控制模式,加载速率为 5mm/s ,加载到 10mm 位置探头停止下移并返回原位。

实验操作平台及压缩实验后的断裂截面如图 3 所示,由图可观察到苹果组织的断裂呈现为斜截面断裂。实验测量结果表明,断裂面与水平方向上的平均角度接近最大切应力断裂理论中的 45° 断裂角,该测量结果证实了组织损伤断裂由最大切应力引起,这与现有文献中的一些研究结果相吻合^[22-25]。因此,基于实测结果,本文将角度参数 α 设置为 45° ,泊松比 ν 设置为 0.3。

2.2 压缩实验结果分析与讨论

苹果组织的压缩实验通常受到多种因素的影响,包括尺寸误差、断裂形式不确定性、几何结构等^[26],这些因素增加了实验的复杂性。由于果品作为自然生长的材料,在切割成标准试样的过程中会存在尺寸误差,因此对断裂形式的精确控制具有挑战性。在某些情况下,单轴压缩的过程中难以确保试样的上下表面完全平行,试样接触面与探头之间将产生摩擦力,导致试样出现破碎类型的断裂。此外,由于水平方向的膨胀可能引起拉应变,从而导致垂直断裂面的产生。经过大量重复实验,结果显示斜截面断裂仍然是主要实验现象。取 5 个试样进行分析,实验数据如图 4 所示。由图 4 可以看出,应力-应变曲线与经典压缩实验的结果相符,虽然数据存在一些差异,但总体趋势是相似的。均值曲线表现出较好的连续性,表明实验数据具有一定的内在一致性。标准差和变异系数曲线揭示了实验数据在加载过程中的离散性,尤其是在加载超过峰值应力后的阶段,数据表现出更大的差别。

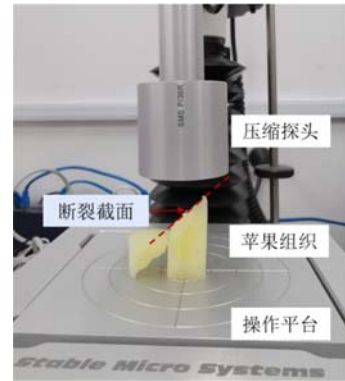


图 3 压缩后的苹果组织样品

Fig. 3 The compressed apple tissue sample

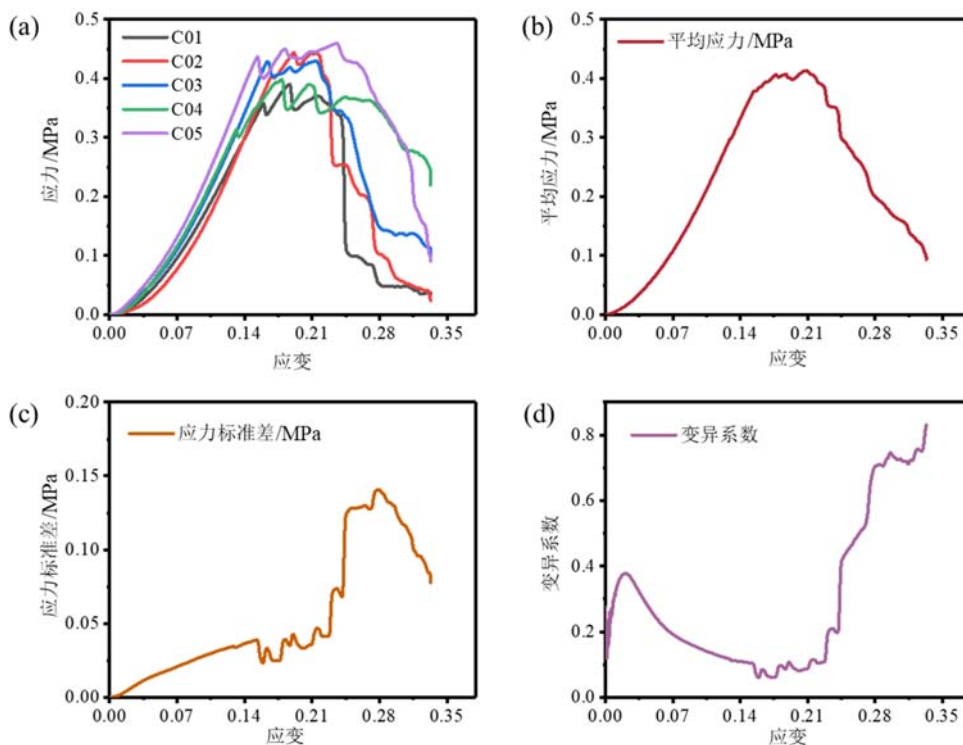


图 4 苹果组织的压缩实验数据:(a)应力-应变曲线;(b)均值曲线;(c)标准差曲线;(d)变异系数曲线

Fig. 4 The compression experimental data of the apple tissue; (a) stress-strain curves; (b) mean curves; (c) standard deviation curves; (d) coefficient of variation curves

依据单轴压缩实验获得的平均应力-应变数据,采用所建立的模型计算剪切损伤变量,基于偏最小二乘可得到拟合剪切损伤变量,计算结果如图 5 所示。依据压缩过程中随机过程概率分布为正态分布的假设,可得该分布的均值和标准差分别为 $\lambda_s=0.24$ 、 $\zeta_s=0.05$ 。考虑到其他果品品种以及不同成熟阶段参数可能会有所不同,可在此基础上进行扩展研究。从开始加载到发生破裂的阶段为弹性阶段,此阶

段可以视为损伤未发生。随着位移的增加,损伤变量的值逐渐增大。由图5可以看出,损伤变量满足损伤演化基本条件: $D(0)=0$,此刻作为未损伤材料,损伤为0; $D(\infty)=1$,完全损伤时,材料损伤接近1。通过式(19)可以求得压缩损伤变量值 D_c ,苹果组织在压缩载荷下压缩损伤变量的演化曲线如图6所示。由此可见,当应变超过0.14时,损伤迅速增加,此时试样组织逐渐开裂。随着裂纹不断扩展,损伤进一步加剧,最终进入压溃阶段,直至苹果组织完全断裂。

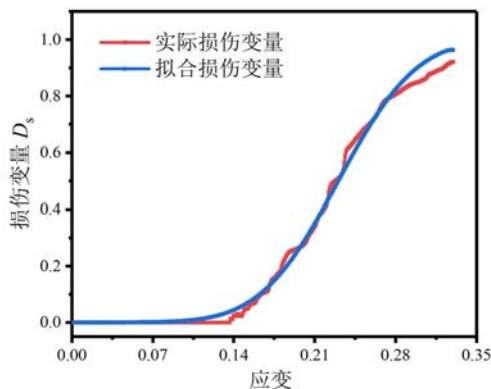


图5 实际和拟合剪切损伤变量值

Fig. 5 Shear damage variable-strain curves

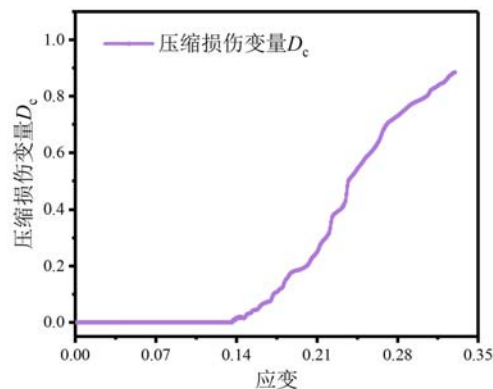


图6 压缩损伤变量-应变曲线

Fig. 6 Compress damage variable-strain curves

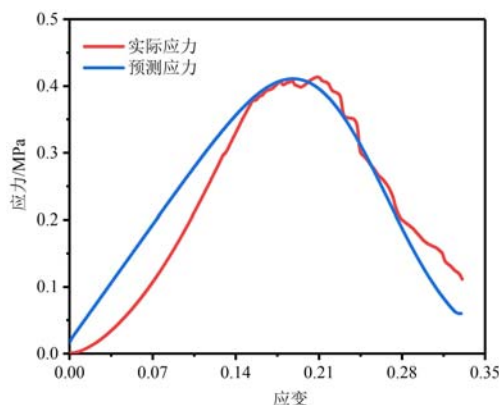


图7 实测和预测应力值

Fig. 7 Measured and predicted stress values

基于所得 λ_i 和 ζ_i 值,代入式(24)可求得均值应力的预测结果。由于实验过程采用位移控制加载,压应变 ϵ 作为控制变量具有确定性,压应力 σ 作为测量变量具有随机性,因此式(24)可将压应力看作以压应变为参数的随机过程。预测应力曲线如图7所示,结合平均应力-应变曲线,可计算确定系数 R^2 。 R^2 越接近1,表示拟合结果越好。预测的应力与实际应力之间的确定系数为0.95,表明预测结果较为准确。本文通过合理地分析和建模,研究了苹果组织在压缩载荷下的损伤行为,并得出了有关损伤变量的相关信息,研究结果有助于了解果品品质的变化规律,并可为探索果品组织的力学性质和损伤行为提供参考。然而本文所建立的损伤模型仍有局限

性,仅适用于脆性果品。对于不同质地的果品损伤模型探索,还需要考虑更多因素,以找到适用于多种质地果品的损伤评价标准^[27]。

2.3 损伤演化过程分析

为了进一步分析单轴压缩载荷下的整个破坏过程,需要同时采集压缩过程中的实时图像。苹果组织试样的尺寸在2.1节已有详细说明。为得到试样清晰的图像,对试件表面进行喷斑处理。喷斑后的苹果组织表面散斑图如图8所示,从图中可观察到图像灰度变化较为明显且散斑呈随机分布。图像采集系统如图9所示,采集频率为50fps。为了实时观测加载过程中试件的结构变化和损伤演化,需要保证质构仪压缩过程与CCD相机采集图像过程相对应。因此,在质构仪的探头接触样品时,立即点击图像采集按钮,开始记录采集时间、载荷及位移信息,质构仪每秒采集200个数据点。

所有试样的加载过程呈现高度相似的特征,以其中的一个试样为例,其载荷-位移曲线如图10所示。在A点时,苹果组织处于未受载状态。在加载的初始阶段,随着位移的增加,载荷缓慢增长,曲线呈上凹形。到达B点时,组织受压但没有发生破裂。随后载荷线性增长,在加载点C处,图像显示组织表面出现反光点,即有汁水溢出,表明组织已经形成裂纹特征,损伤开始发生。随后载荷继续增长,在D

点载荷峰值约为 71.74N,载荷开始出现波动,并开始逐渐下降。单轴压缩实验过程表明,损伤在峰值点之前就已经发生。随着载荷的继续增大,裂纹持续扩展,汁水溢出更多。到达 E 点和 F 点时,试样已出现明显的斜裂纹,最终完全断裂,苹果组织遭受严重损伤。随着应变的增加,应力会减小或保持稳定的点为生物屈服点^[28]。微裂缝导致的破坏在生物屈服点之前就已经开始^[29]。本研究得到的损伤演化曲线和不同载荷水平下的图像进一步支持了这一特征,证实了损伤演化曲线的合理性。

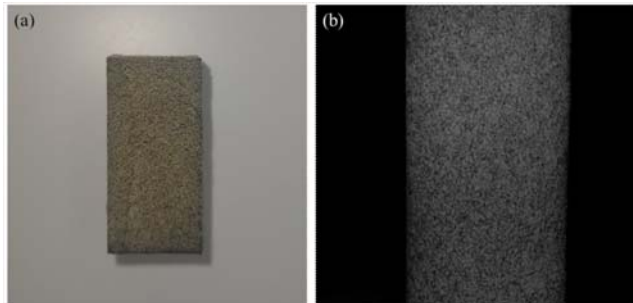


图 8 苹果组织的散斑图:(a)带散斑的苹果组织图像;
(b)CCD 相机得到的苹果组织试件散斑图像

Fig. 8 Speckle image of apple tissue: (a)image of apple tissues with speckles; (b)speckle images captured by CCD camera

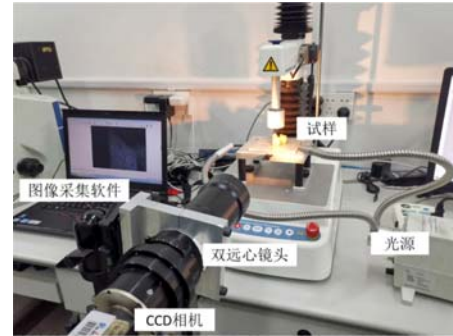


图 9 单轴压缩过程图像采集系统

Fig. 9 Image acquisition system of uniaxial compression process

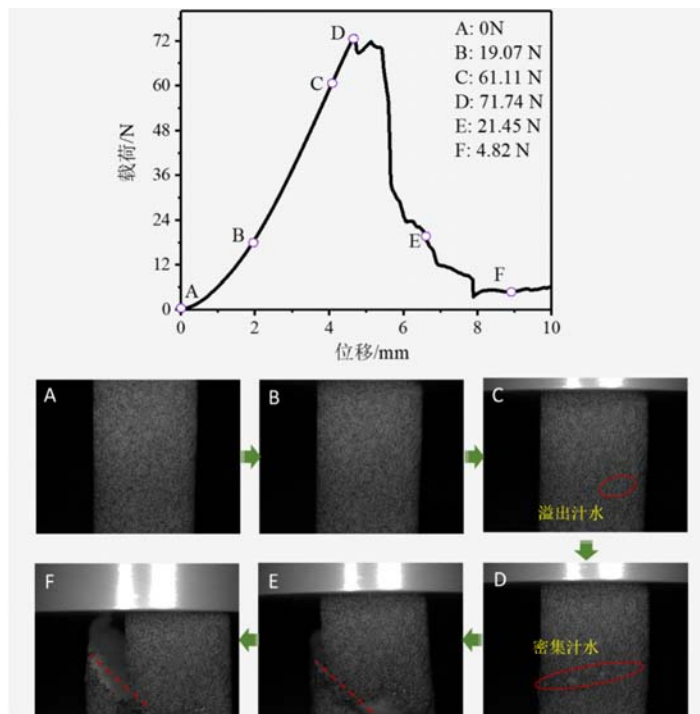


图 10 单轴压缩实验载荷-位移曲线及不同载荷水平下的图像(加载时刻对应的压力载荷分别为 A-0N,B-19.07N,C-61.11N, D-71.74N,E-21.45N,F-4.82N)

Fig. 10 Load-displacement curve in uniaxial compression test and images at different loading levels (The loads corresponding to the loading moments were A-0N, B-19.07N, C-61.11N, D-71.74N, E-21.45N, F-4.82N, respectively)

3 结论

考虑到脆性果品组织结构的非均质特性,本研究以富士苹果为例,将组织内部孔隙微裂纹的扩展作为损伤因素,将切应力作为主要诱因,通过实验和理论建模,探讨了苹果组织在压缩载荷下的损伤行为。

主要结论如下:

(1) 将随机损伤本构关系应用于脆性果品(如富士苹果)是可行的,这为研究压缩载荷下苹果组织的损伤行为提供了研究思路。

(2) 通过单轴压缩随机损伤模型得到了与损伤相关的参数 λ_s 和 ζ_s ,参数值分别为 $\lambda_s=0.24$ 、 $\zeta_s=0.05$ 。

(3) 将预测应力与实际应力数据进行比较,验证了理论模型的准确性,确定系数为0.95,表明了模型预测结果的可靠性。

参考文献:

- [1] LIN M, FAWOLE O A, SAEYS W, et al. Mechanical damages and packaging methods along the fresh fruit supply chain: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 26(1):1566–1578.
- [2] ZHANG W, PAN Y, JIANG Y, et al. Advances in control technologies and mechanisms to treat peel browning in postharvest fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311:111798.
- [3] DU Z, ZENG X, LI X, et al. Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99:133–141.
- [4] LI Z, THOMAS C. Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2014, 35(2):138–150.
- [5] 朱昌星, 安焯明, 李伟东. 单轴压缩下透明类岩石损伤演化特征研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(5):701–710 (ZHU Changxing, AN Yeming, LI Weidong. Research on damage evolution characteristics of transparent rock under uniaxial compression[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(5):701–710 (in Chinese))
- [6] 赵健宇, 谢惠民. 基于数字图像相关的激光修复镍基合金疲劳损伤表征方法研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(1):1–8 (ZHAO Jianyu, XIE Huimin. Study on fatigue damage characterization method of laser repair nickel-based alloy based on digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(1):1–8 (in Chinese))
- [7] 郑跃滨, 雷振坤, 徐浩, 等. 基于数据驱动的无基准导波损伤诊断成像方法研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(4):458–470 (ZHENG Yuebin, LEI Zhenkun, XU Hao, et al. Research on a data-driven reference-free probability diagnostic imaging method using guided waves[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(4):458–470 (in Chinese))
- [8] JI W, QIAN Z, XU B, et al. Apple viscoelastic complex model for bruise damage analysis in constant velocity grasping by gripper[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162:907–920.
- [9] LI Z, ANDREWA J, WANG Y. Mathematical modelling of mechanical damage to tomato fruits[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 126:50–56.
- [10] AHMADI E. Bruise susceptibilities of kiwifruit as affected by impact and fruit properties [J]. *Research in Agricultural Engineering*, 2012, 58(3):107–113.
- [11] STROPEK Z, GOŁACKI K. Quantity assessment of plastic deformation energy under impact loading conditions of selected apple cultivars[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 115:9–17.
- [12] VAN ZEEBROECK M, DARIUS P, DE KETELAERE B, et al. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(1):10–19.
- [13] PIECZYWEK P M, ZDUNEK A. Automatic classification of cells and intercellular spaces of apple tissue[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81:72–78.
- [14] ATAKHANI A, BOGDZIEWIEZ L, VERGER S. Characterising the mechanics of cell-cell adhesion in plants[J]. *Quantitative Plant Biology*, 2022, 3:1–13.
- [15] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1982, 18(7):551–562.
- [16] BREYSSE D. Probabilistic formulation of damage-evolution law of cementitious composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116(7):1489–1510.
- [17] KANDARPA S, KIRKNER D J, SPENCER B F. Stochastic damage model for brittle materials subjected to monotonic loading[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 122(8):788–795.

- [18] LI J, CHEN J. Stochastic dynamics of structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [19] TING V J, SILCOCK P, BREMER P J, et al. X-Ray micro-computer tomographic method to visualize the microstructure of different apple cultivars[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(11):1735–1742.
- [20] 任晓丹. 混凝土随机损伤本构关系试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006 (REN Xiaodan. Experimental research on stochastic damage constitutive law for concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese))
- [21] KRAJČINOVIC D. Damage mechanics[M]. Berlin: Elsevier, 1996.
- [22] MILES J A, REHKUGLER G E. A failure criterion for apple flesh[J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16(6): 1148–1153.
- [23] DIEHL K C, HAMANN D D. Structural failure in selected raw fruits and vegetables[J]. Journal of Texture Studies, 1980, 10(4):371–400.
- [24] YUWANA Y, DUPRAT F. Prediction of apple bruising based on the instantaneous impact shear stress and energy absorbed[J]. International Agrophysics, 1998, 12(2):1–8.
- [25] ALVAREZ M D, CANET W. Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. Monalisa)[J]. Zeitschrift Für Lebensmitteluntersuchung Und-Forschung A, 1998, 207(1):55–65.
- [26] CHEN P, SUN Z. Critical strain failure criterion: pros and cons[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 278–281.
- [27] HAMANN D D, ZHANG J H, DAUBERT C R, et al. Analysis of compression, tension and torsion for testing food gel fracture properties[J]. Journal of Texture Studies, 2006, 37(6):620–639.
- [28] MOHSEENIN N N. Physical properties of plant and animal materials; v. 1: physical characteristics and mechanical properties[M]. New York: Routledge, 1986.
- [29] ZDUNEK A, UMEDA M. Extension and fracture of cell walls after parenchyma tissue deformation [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(3):269–278.

Research on stochastic damage evolution of brittle fruit tissue under uniaxial compression

ZHANG Peipei^{1,2}, WANG Huaiwen¹, JI Hongwei^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The multiphase and stochastic nature of the microstructure of brittle fruit tissue renders traditional damage models inadequate in describing its mechanical behavior. Taking Fuji apples as an example, this study considered the expansion of microcracks in the internal pores of apple tissues, with shear stress as the main factor of tissue damage. The evolution of damage in apple tissue under compressive loads was explored by employing a parallel shear micro-spring model. Statistical parameters associated with damage were computed through uniaxial compression experiments and utilized to predict compressive stress. The results show that the coefficient of determination between the prediction results of the model and the experimental results is 0.95, which can describe the damage behavior of apple tissues under uniaxial compression accurately. This study can provide a reference for exploring the mechanical properties and damage behavior of fruit tissues.

Keywords: brittle fruit; apple tissue; mechanical damage; damage model; compression