# 农产品保鲜与食品包装

# 皇冠梨静压力学特性及模拟研究

吴映桐<sup>1</sup>,吴子鸣<sup>1</sup>,张立军<sup>1</sup>,孙一鸣<sup>1</sup>,王立军<sup>1,2</sup>,宋海燕<sup>1,2\*</sup>

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2.中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室,天津 300457)

摘要:目的 建立皇冠梨生理特性与力学损伤关系模型,实现果实静压过程的模拟研究。方法 通过材料 松弛试验和静态压缩试验,研究果实材料力学特性。使用三维扫描方法辅助建立果实有限元模型,并对 果实静载损伤过程进行模拟。结果 使用 Maxwell 黏弹性材料本构模型,成功模拟了果实流变特性。通 过静压试验将所建立的梨果实黏弹性材料模型与传统弹塑性材料模型进行对比,误差降低了 7%,从而 验证了模拟的准确性。根据 von Mises 等效应力分布结果进行预测,发现在静载力为 161.21 N 时梨果实 会出现明显损伤。结论 以上研究使用 2 种材料对静态压缩试验进行仿真模拟,进一步验证了使用数值 模拟方法对水果静力学过程模拟的可靠性。为皇冠梨果实机械化采摘、储存包装及加工搬运过程提供了 理论依据。

关键词:有限元模拟;松弛试验;本构模型;静压试验;水果损伤 中图分类号:TB485.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)19-0050-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.007

#### Static Pressure Mechanical Properties and Simulation of Huangguan Pears

WU Ying-tong<sup>1</sup>, WU Zi-ming<sup>1</sup>, ZHANG Li-jun<sup>1</sup>, SUN Yi-ming<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, SONG Hai-yan<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Materials and Technology of China Light Industry, Tianjin 300457, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a relationship model between physiological characteristics and mechanical damage of Huangguan pears to simulate the static pressure process of the fruit. The mechanical properties of fruit materials were studied by material relaxation test and static compression test. The three-dimensional scanning method was used to assist in the establishment of the finite element model of the fruit, and the static load damage process of the fruit was simulated. The Maxwell viscoelastic constitutive model was used to successfully simulate the rheological properties of the fruit. By comparing the static pressure test with the traditional elastic-plastic material model, the error was reduced by 7%, which verified the simulation accuracy. According to the results of von Mises equivalent stress distribution, it was found that the pear would be significantly damaged under static load of 161.21 N. In the above studies, two materials are used to simulate the static compression test, which further verifies the reliability of the numerical simulation method to simulate the static process of the fruit. It also provides a theoretical basis for the mechanized picking, storage, packaging and processing of Huangguan pears.

KEY WORDS: finite element simulation; relaxation experiment; constitutive model; static pressure test; fruit damage

我国梨果实年产量约1781.5万t,其中河北地区 梨果产量的占比超过全国总产量的60%<sup>[1]</sup>。皇冠梨作 为当地梨果的代表,具有极高的营养价值和较好的风 味口感。水果等农产品从果园到消费者手中会经历采 摘、包装、搬运、储存等过程。在这些过程中,水果 很容易受到压缩力,如机械手采摘时发生夹损、在包 装盒内与其他水果接触、箱内堆码时受到挤压和储存 过程中发生的蠕变行为等<sup>[2]</sup>。静压力会导致包装内水 果发生损伤,细胞壁膜破裂,水果发生软化,细菌和 真菌更容易渗透到受损组织中,导致水果发生褐变从 而加速腐烂<sup>[3-4]</sup>。因此,分析果实承受的压缩载荷极 限,对避免果实在运输包装过程中发生机械损伤具有 重要意义。

许多学者对番茄、西柚、桃子、梨、苹果、猕 猴桃、西瓜等水果在收获、储运过程中的静载、振 动和撞击的机械损伤问题进行了研究<sup>[5-10]</sup>。由于不同 品种水果之间力学特性存在较大差异,试验往往需 要更加严格的试验环境和装置。有限元法的实用性 在于可以用原型模拟代替物理试验,从而减少试验 次数。随着计算机建模技术的发展,数值方法目前 已被证明可以与实际试验之间建立可靠联系,为预 测水果采后损伤敏感度提供理论依据<sup>[11]</sup>。水果材料 的生物流变特性以及细胞间果胶质和纤维组织的 影响,使得计算外力在果皮下产生的内应力非常困 难<sup>[12-13]</sup>。因此,采用数值模拟的方式,建立水果材 料宏观-微观多元力学系统模型是本次研究的重难 点问题。

## 1 试验

#### 1.1 材料与仪器

主要材料: 皇冠梨, 采摘自河北省赵县。按质量 和外观进行分类, 选择单果质量大于 300 g 且无表面 损伤的特级果<sup>[14]</sup>。在采后运输过程中, 质量和体积较 大的水果更容易出现机械损伤, 因此在包装中需要特 别注意<sup>[15]</sup>。特级果实不仅作为水果进出口的首选,还可为其他级别的水果在采摘、搬运和贮藏过程中的力学特性提供参考价值。将成熟的皇冠梨果实从果园采摘后运至实验室恒温恒湿(温度为 20 ℃、相对湿度为 40%),并贮藏 24 h 进行预处理。

主要仪器: 万能试验机, RG1-3, 深圳瑞格尔仪 器有限公司, 该设备最大载荷为 10 kN, 载荷精度为 示值的 1%(±0.5%)以内, 速度精度为示值的 0.5% (±0.15%)以内; Archer Thunk 3D 扫描仪, 北京科 讯有限公司。

#### 1.2 材料性能

#### 1.2.1 弹性参数

为了确定梨果实材料参数,根据 ASAE 标准<sup>[16]</sup> 基于赫兹理论计算表观弹性模量。在梨的相对对称位 置沿其茎-萼轴切成两半。其中一半被置于固定板的 中心,选取 10 个试样,用万能试验机进行压缩试验, 载荷为 1 kN。试验过程如图 1 所示。用曲率半径仪 测量梨与上盘接触的最大和最小曲率半径值,并将结 果代入式(1)计算弹性模量。

$$E = \frac{0.338K_{\rm U}^{3/2}F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left(\frac{1}{R_{\rm U}} + \frac{1}{R_{\rm U}}\right)^{1/2}$$
(1)

式中: *E* 为表观弹性模量, Pa; *F* 为施加在样品上的压缩力, N; *D* 为压缩变形, m;  $\mu$  为泊松比(无量纲);  $R_U$  和  $R'_U$ 分别为接触点处表面曲率的最小和最大半径, m;  $K_U$ 为上凸表面的常数。

#### 1.2.2 果皮参数

梨果实多尺度有限元模型的建立还需要对果皮 组织的力学特性进行测量。为了分析皇冠梨果皮轴向 和径向力学性能的差异,将果皮分别制成宽为10 mm、 长为45 mm、厚为0.5 mm的长方形薄片,轴切向和 径切向的拉伸试样共20个。使用万能试验机进行拉 伸试验,加载速度设定为5 mm/min,记录下相应的 力-位移曲线数据。



a 曲率半径测量

b 表观弹性模量试验

图 1 皇冠梨弹性参数测定 Fig.1 Determination of elastic parameters of Huangguan pears

#### 1.2.3 黏弹性参数

为了表征梨果实的黏弹性流变特性,本研究参照 ASTM标准采用应力松弛试验方法<sup>[17]</sup>。由于梨果实各 部位的流变学特性、营养供应、光照方位等因素可能 对果实石细胞分布产生影响,导致力学特性差异<sup>[18]</sup>。 因此,随机挑选 10 个皇冠梨果实,分别在每个果实 的上部、中部、轴向和径向位置取样进行比较。用直 径为 10 mm 的软木钻提取果肉制成高度 10 mm 的圆 柱体,采样过程如图 2 所示。通过单轴压缩试验,以 0.1 mm/s 的变形速率对试件施加 0.05 的应变,保持 应变值不变,记录应力与时间的关系<sup>[19]</sup>。

#### 1.3 静态压缩试验

整果静态压缩试验,可以模拟箱内静载和采摘过 程机械手夹损的情况。通过压缩试验机,将皇冠梨放 置在2块坚硬的钢板之间。压缩速率为5 mm/min, 压缩位移直至梨果实达到破裂点。具体试验过程可见 图7中箭头对应位置。

#### 1.4 三维建模

现实中,由于梨果实具有复杂的非对称形状,传 统的几何建模难以精确复原,而通过逆向工程可以准 确地提取水果的三维特征。本研究从无损伤的测试样 品中选取一个具有代表性的皇冠梨。使用非接触式三 维扫描仪捕捉旋转时果实表面的点云特征,构建水果 表面曲面片,建立果实实体模型并测量了果实的几何 参数,如图3所示。

### 1.5 静压有限元模拟

有限元模拟过程分为前处理、求解和后处理3个阶段。将建立的皇冠梨果实多尺度三维实体模型导入 有限元分析软件 Abaqus 中进行设置。其中,果皮部 分采用线弹性材料模型,由壳体单元组成,壳体厚度 为 0.5 mm。果肉部分为各向同性的实体单元。各层 结构间通过面对面接触关系连接为一个整体。有限元 模型网格划分的单元和尺寸是控制仿真质量的重要 因素,合适的网格划分尺寸既能确保模型准确,又能 节省计算时间。经过从 6 mm 到 2 mm 的多次网格无 关化模拟试验,最终确定 3 mm 为最佳尺寸。皇冠梨 果皮和果肉网格单元分别采用四面体和四边形。果皮 部分使用 S4R 壳体单元,节点数为 2 429 个,单元数 为 2 424 个。果肉部分使用 C3D10M 型四面体单元, 节点数为 62 705 个,单元数为 43 520 个。具体有限 元模型及网格划分如图 4 所示。



a 采样过程



b 试验过程

图 2 果肉松弛试验过程 Fig.2 Flesh relaxation test



图 3 皇冠梨几何模型及各部分尺寸 Fig.3 Geometric model and part size of Huangguan pears

使用有限元模型进行静态压缩试验模拟,将建立 好的皇冠梨实体模型放置在刚性约束的上、下两极板 之间。刚性平面的网格单元采用结构六面体,网格尺 寸为10 mm。下压板为完全固定约束,上压板沿 z 轴 方向以5 mm/min的速度向下移动。压缩位移为15 mm, 直至梨果实达到屈服极限。



图 4 皇冠梨静压有限元模型 Fig.4 Finite element model of Huangguan pears static pressure

# 2 结果与分析

#### 2.1 材料模型

根据上述试验测定的皇冠梨果皮和果肉的力学 特性,分别定义了2种材料模型。依据果实的生物学 特性,石细胞、果胶物质和薄壁细胞是影响果肉力学 特性的主要因素<sup>[20]</sup>。结合生物材料的力学本构模型特 点,弹性模量通常用于描述生物材料的流变行为,在 各向位置相差不大,因此可将梨果肉视为各向同性材 料。梨果实的弹性力学特性如表1所示。



a 弹塑性本构模型

表 1 皇冠梨材料特性 Tab.1 Material characteristics of Huangguan pears

部位	弹性模量	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	
内部果肉	2.15	0.461	063	
外部果皮	5.68	0.401	903	

相关文献表明<sup>[21-22]</sup>,在水果领域,黏弹性材料 可能更接近实际情况。本研究首次建立了皇冠梨果 实黏弹性材料本构模型,并将其应用于数值仿真过 程。在生物材料中通过模拟模型的黏性元素,来表 示线性黏弹性材料的流变行为。将 Maxwell 模型与 力学模型中的 2 个基本力学要素相结合,反映果实 的流变特性。广义的 Maxwell 模型表示,使用平衡 和衰减模量及松弛时间的 Prony 系列,用线性弹簧和 线黏性减震器来表示水果的黏弹性。2 种材料的本构 模型关系见图 5。

在 Maxwell 模型中,所有的初始应力都进入弹 簧,导致初始变形阶段服从胡克定律。随着弹簧的变 化,压板承受的应力越来越大,直到应力和应变不能 线性变化。最后,所有应力在阻尼器中流动,应力-应变曲线趋于瞬态稳定。在压缩和应力松弛试验中, 反作用力是由试样的应变在一段时间内保持恒定得 到的<sup>[23]</sup>。在数值模拟中要对剪切模量和体积模量进行 归一化处理。采用非线性回归方程对数据进行非线性 应力松弛分析。恒应变阶段的本构关系可以写成式 (2)~(3)的形式。

$$F(t) = A(t) \cdot \varepsilon_i \tag{2}$$

$$A(t) = E_0 \cdot \left[ 1 - \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right]$$
(3)

式中: A(t)为松弛函数;  $p_i$ 为第 *i* 阶 Prony 常数 (*i*=1, 2, ...);  $\tau_i$ 为第 *i* 阶 Prony 延迟时间常数(*i*=1, 2, ...);  $E_0$ 为材料瞬时模量。为了将以上数值带入数 值模拟中,对于线性各向同性弹性系统,假设黏弹性 材料由无量纲松弛模量的 Prony 级数展开定义:



b Maxwell本构模型

图 5 材料本构模型 Fig.5 Constitutive model of materials

$$gR(t) = 1 - \sum_{i=1}^{n} \overline{g}_{i}^{P} (1 - e^{-t/\tau_{i}})$$
(4)

$$\tau(t) = G_0(\gamma - \sum_{i=1}^n \gamma_i)$$
(5)

将上述结果作为输入数据,可以经过推导得出基于 广义 Maxwell 模型的 Prony 级数表示法的平衡和衰减模 量,以及松弛时间的相关方程<sup>[22]</sup>,见式(6)~(8)。

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[ E_0 + E_1 \cdot e^{-\frac{t - t_0}{\tau_1}} + E_2 \cdot e^{-\frac{t - t_0}{\tau_2}} \right]$$
(6)

$$E_0 = E_e + (E_1 + E_2) \tag{7}$$

$$\eta_i = \tau_i \cdot E_i \tag{8}$$

式中: $\sigma(t)$ 为松弛应力; $\varepsilon_0$ 为松弛应变; $E_0$ 为瞬 时弹性模量; $E_e$ 为平衡弹性模量; $E_i$ 为衰减弹性模量;  $\tau_i$ 为 Prony 级数的松弛时间; $\eta_i$ 为第 *i* 项的比黏度。 将 Prony 级数中衰减模量和瞬时模量的商分别对应弹 性、剪切和体积模量的分量,见式(9)。

$$\beta_{i}^{\rm E} = \frac{E_{i}}{E_{0}} = \beta_{i}^{\rm G} = \frac{G_{i}}{G_{0}} = \beta_{i}^{\rm K} = \frac{K_{i}}{K_{0}}$$
(9)

式中:  $\beta_i^{E}$ 、 $\beta_i^{G}$ 和 $\beta_i^{K}$ 分別表示 Prony 级数第 *i* 项 的弹性模量、剪切模量和体积松弛模量;  $G_i$ 和  $K_i$ 分 別为衰减剪切模量和衰减体积模量的第 *i* 项。

通过式(9)可以计算出2种比黏度值( $\eta_1$ 和 $\eta_2$ ) 分别为6.54和209.66 MPa·s。对黏弹性材料的时间相 关剪切和体积模量进行建模,可以得到数值模拟 Prony级数中的值。表2中给出了广义 Maxwell 模型 非线性模拟结果的参数汇总。

表 2 梨果肉 Prony 系列松弛仿真参数 Tab.2 Prony series relaxation simulation parameters of pear flesh

参数	$E_0/MPa$	<i>E</i> <sub>1</sub> /MPa	$\tau_1/s$	$E_2/MPa$	$\tau_2/s$	$E_{1}/E_{0}$	$E_{2}/E_{0}$
最小值	2.00	0.28	10.17	0.55	254.56	0.12	0.24
最大值	2.75	0.70	20.88	0.76	348.76	0.31	0.32
平均值	2.34	0.43	15.20	0.66	317.67	0.18	0.28
标准差	0.20	0.17	2.96	0.07	25.65	0.07	0.02

对黏弹性材料模型进行松弛试验仿真,验证其力 学特性。建立与实体试样一致的三维圆柱体几何模 型,模拟应力松弛试验,试验结果如图6所示。数值 模拟得到的材料力学特性与试验曲线几乎一致,面积 误差为1%。证明了使用黏弹性材料表征皇冠梨果实 特性的准确性。同时得出,应力为0.3 MPa时,梨果 肉细胞组织会发生不可恢复的变形,因此可将此数值 作为损伤判定的依据。

# 2.2 静压试验结果

如图 7 所示为 10 个整果试件在压缩作用下的力-位移曲线,可以看出梨果实在压缩位移 13~17 mm 出现了破裂点。果皮在达到破裂点时突然开裂,大量 汁液从内部溢出。这表明梨果实整体在宏观结构上受 到了极大地破坏<sup>[23]</sup>。同时可以发现,在开裂之前内部 果肉可能已经严重受损。微观结构的研究也可以说 明,梨果实生物屈服点远早于破裂点。通过对 10 组 数据进行处理,得到平均力-位移曲线,用于模拟压 缩载荷下全果多尺度的有限元模型。



Fig.7 Static compression test of whole fruit

## 2.3 静压仿真结果

如图 8 所示为整个皇冠梨静态压缩的有限元模 拟过程。由于无法模拟出果皮破裂的过程,因此只对 发生失效前的位移进行模拟,共设置 180 个子步。当 压缩时间达到 60 子步,位移为 4.6 mm 时,此时虽然 表皮部分未达到应力屈服点,但果肉接触部分已发生损 伤,此时压缩力为 161.21 N。当压缩位移达到 7.4 mm 时,果肉出现明显损伤,此时压缩力为 366.27 N。根 据 von Mises 等效应力分布,此时的应力波从接触位 置传递到了果实中心,果实中心部位的果皮和果核承 担了大部分压缩力。在压缩位移为 15 mm 时,中心区 域的果肉细胞达到了应力屈服极限,发生了不可恢复的 变形,因此等效应力值和变形面积没有明显增加。

如图 9 显示了有限元模拟梨果实失效结果与试







a 有限元仿真结果

b 试验结果



验损伤的对比结果,可以看出损伤部分基本吻合,进 一步说明了模拟结果的准确性。在模拟过程中,最大 等效应力均发生在刚性板与试样的接触位置,超过屈 服应力强度的区域也主要集中在这个位置,而较小的 应力出现在距离接触较远的位置。

# 2.4 仿真精度分析

从图 10 可以得到整个梨的平均失效力和失效位 移值分别为(1 098±200)N 和(15±2)mm。图 11 展示了 2 种材料的拟合误差,从数值上看,黏弹性材 料与弹塑性材料残差平方和(RSS)的拟合度分别为 4 812 和 47 916,相对误差增大了 89.95%。峰值点处 压缩力数值分别为 1 054 N 和 970 N,与试验数据的 误差分别为 4%和 11%。使用黏弹性材料进行仿真, 误差较小,相对精度提高了 7%。果实中存在的果胶、 纤维素、水分等物质具有明显的黏性特征,会影响果 实损伤变形时能量的吸收,从而出现延迟性损伤。因 此,黏弹性材料在静态试验中能更好地表征水果的生 理性能。 根据上述研究结果,提出了皇冠梨水果搬运和堆放的建议。为避免径向压缩力对果实造成损伤,垂直 叠放的水果一次不应超过 40 层,静压力不应超过 161.21 N,否则就会造成不可恢复的永久性损伤。





图 11 2 种材料仿真误差分析 Fig.11 Error of simulation analysis on two materials

### 3 结语

1)本研究建立了 Maxwell 黏弹性材料本构模型, 并且验证了该模型用于表征梨类果实非线性流变特 性的准确性。基于黏弹性材料的果实仿真模型与传统 弹塑性材料仿真模型进行对比,其误差减小了 7%。 说明在静态压缩试验中使用黏弹性材料能更好地表 征水果生理特性。

2)根据 von Mises 等效应力分布可以确定梨果 实受损的主要应力位置和大小。当应力值超过 0.3 MPa 时会发生不可恢复的变形,可将这一数值作为损 伤判定的阈值。

3)皇冠梨果实在静态压缩位移为13~17 mm时 出现破裂,最大压缩力为1098 N。为避免发生永久 性损伤,建议果实承受静载力不应超过161.21 N,一 次垂直叠放的果实不应超过40 层。

研究结论可为梨类果实机械化采摘设备的改进 和果实的包装堆码、储存运输提供一定的理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 侯煜庐,赵俊晔. 2020 年中国水果市场形势分析与后 市展望[J]. 农业展望, 2021, 17(4): 3-8.
  HOU Yu-lu, ZHAO Jun-ye. Analysis of China's Fruits Market Situation in 2020 and Its Future Prospects[J]. Agricultural Outlook, 2021, 17(4): 3-8.
- [2] MIRAEI ASHTIANI S H, SADRNIA H, MOHAMMADINEZHAD H, et al. FEM-Based Simulation of the Mechanical Behavior of Grapefruit under Compressive Loading[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 245: 39-46.
- [3] 王志华,王文辉,姜云斌,等.不同采收期对苹果常

温贮藏品质和衰老的影响[J].农业工程学报,2020,36(7):300-306.

WANG Zhi-hua, WANG Wen-hui, JIANG Yun-bin, et al. Effects of Different Harvesting Periods on the Storage Quality and Senescence of Apple at Room Temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(7): 300-306.

- [4] LI Zhi-guo, ANDREWS J, WANG Yu-qing. Mathematical Modelling of Mechanical Damage to Tomato Fruits[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 126: 50-56.
- [5] LI Zhi-guo, WANG Yu-qing. A Multiscale Finite Element Model for Mechanical Response of Tomato Fruits[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 19-26.
- [6] WANG L, ZHANG Q, SONG H, et al. Mechanical Damage of 'Huangguan' Pear Using Different Packaging under Random Vibration[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 187: 111847.
- [7] STROPEK Z, GOŁACKI K. Bruise Susceptibility and Energy Dissipation Analysis in Pears under Impact Loading Conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 163: 111120.
- [8] OPARA U L, FADIJI T. Compression Damage Susceptibility of Apple Fruit Packed Inside Ventilated Corrugated Paperboard Package[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 227: 154-161.
- [9] SADRNIA H, AUTHOR E M, RAJABIPOUR A, et al. Internal Bruising Prediction in Watermelon Compression Using Nonlinear Models[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(2): 272-280.
- [10] AHMADI E, GHASSEMZADEH H, SADEGHI M, et

al. The Effect of Impact and Fruit Properties on the Bruising of Peach[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(1): 110-117.

- [11] ZULKIFLI N, HASHIM N, HARITH H, et al. Finite Element Modelling for Fruit Stress Analysis - a Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 29-37.
- [12] CELIK H K. Determination of Bruise Susceptibility of Pears (Ankara Variety) to Impact Load by Means of FEM-Based Explicit Dynamics Simulation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 128: 83-97.
- [13] SALARIKIA A, ASHTIANI S M, GOLZARIAN M R, et al. Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of Pear under Impact Loading[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4 (1): 64-77.
- [14] 王维,刘东琴,王佩. 果品分级检测技术的研究现状 及发展[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(6): 55-58.
  WANG Wei, LIU Dong-qin, WANG Pei. Status and Development of Fruit Detection of Mechanical Classification[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(6): 55-58.
- [15] 曹旭东,胡洋,许腾宇,等. 定则振动系统下黄冠梨振动特性及损伤研究[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 102-107.

CAO Xu-dong, HU Yang, XU Teng-yu, et al. Vibration Characteristic and Injury of Huangguan Pearunder Stationary Vibration System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 102-107.

- [16] ASABE S368, Compression Test of Food Materials of Convex Shape[S].
- [17] ASTM E328, Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures[S].

[18] 张琦,李金花,胡盼盼,等. 梨品种果实不同部位石 细胞特性研究[J]. 塔里木大学学报, 2014, 26(1): 99-104.

ZHANG Qi, LI Jin-hua, HU Pan-pan, et al. Studies on Characteristics of Stone Cell in Different Parts of Pear Fruits[J]. Journal of Tarim University, 2014, 26(1): 99-104.

- [19] KIM G W, KIM M S, SAGARA Y, et al. Determination of the Viscoelastic Properties of Apple Flesh under Quasi-Static Compression Based on Finite Element Method Optimization[J]. Food Science and Technology Research, 2008, 14(3): 221-231.
- [20] 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.
- [21] AHMADI E, BARIKLOO H, KASHFI M. Viscoelastic Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of Apple under Impact Loading with Regard to Its Different Layers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 1-11.
- [22] 师广强,田勇浩,吴建帮,等.不同缓冲压头下香梨 静压损伤特性研究[J].包装工程,2020,41(1):51-57.
  SHI Guang-qiang, TIAN Yong-hao, WU Jian-bang, et al. Static Pressure Damage Characteristics of Korla Pear under Different Cushioning Head[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 51-57.
- [23] LI Zhi-guo, YANG Hong-ling, LI Ping-ping, et al. Fruit Biomechanics Based on Anatomy: A Review[J]. International Agrophysics, 2013, 27(1): 97-106.

责任编辑:曾钰婵