

# 苹果—EPS 泡沫系统冲击响应分析

王彪<sup>1</sup>, 卢富德<sup>1</sup>, 高德<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** **目的** 分析苹果在运输包装环境中的抗冲击性能, 并优化苹果—EPS 泡沫缓冲包装设计。**方法** 以 80 mm 果径洛川富士苹果为研究对象, 通过万能压缩试验机对苹果进行压缩试验, 得到应力—应变曲线。通过 ABAQUS/Explicit 建立苹果运输包装系统有限元模型, 并进行有限元仿真分析, 其中发泡聚苯乙烯有限元模型采用 Crushable Foam 模型, 苹果采用线弹性力学模型。模拟苹果在沿轴竖直摆放和沿轴水平摆放 2 种摆放方式下落时的冲击响应, 并分析不同厚度、密度为 28 kg/m<sup>3</sup> 的 EPS 泡沫的缓冲效果。**结果** 得出苹果的弹性模量为 2.44 MPa、屈服极限为 0.38 MPa。通过模拟仿真分析可得出, EPS 泡沫能有效减缓运输过程中冲击对苹果的损伤, 并以此为基础得到了针对该包装系统的缓冲设计。**结论** 通过与龙格—库塔数值分析法的对比可以得出, 本研究以试验为基础, 结合仿真分析能为相关果蔬运输提供数据支持和参考。

**关键词:** 苹果; 缓冲包装; 冲击; 有限元分析

**中图分类号:** TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)07-0122-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.014

## Impact Response Analysis of Apple-EPS Foam System

WANG Biao<sup>1</sup>, LU Fu-de<sup>1</sup>, GAO De<sup>2</sup>

(1. School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Zhejiang Ningbo 315100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze the impact resistance of apple in transportation packaging environment and optimize the design of apple-EPS foam cushion packaging. The stress-strain curve of apple was obtained by compression test on universal compression tester. Finite element model of apple transportation packaging system was established by ABAQUS/Explicit and analyzed by finite element simulation. Crushable Foam model was used for foamed polystyrene finite element model and linear elasticity model was used for apple. The impact response of apple falling down in vertical and horizontal layouts along the axis was simulated, and the cushioning effect of EPS foam with different thicknesses was analyzed. The elastic modulus of the apple was 2.44 MPa and the yield limit was 0.38 MPa. The simulation analysis showed that EPS foam could effectively reduce the impact damage to the apple during transportation, and under the same conditions, the horizontal layout of the apple along the axis was more reasonable. By comparison to the numerical analysis method, it can be concluded that the research can provide data support and reference for related fruit and vegetable transportation based on experiment and finite element analysis.

**KEY WORDS:** apple; cushion packaging; impact; finite element analysis

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 湖南自然科学基金 (2022JJ30223)

作者简介: 王彪 (1998—), 男, 硕士生, 主攻包装动力学。

通信作者: 卢富德 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为缓冲动力学。

苹果在果园收获时和收获后的各种处理都会使其受到不同程度的冲击或振动等机械损伤。机械损伤是水果在运输过程中受到的主要损伤, 苹果受到损伤的部位也是病原微生物的入侵之门<sup>[1]</sup>。针对苹果在运输过程中受到的冲击与振动, 通常通过使用水果网套或者缓冲包装来减少损伤<sup>[2]</sup>。破损边界曲线概念认为, 产品受到损伤的根源在于产品的易损件受到了来自缓冲包装传来的脉冲, 当易损件的响应加速度大于本身能承受的最大加速度时, 产品将不能正常使用。

许多学者对果实的冲击损伤以及其防护包装做过研究, 周然等<sup>[3-4]</sup>研究了在运输过程中不同强度的振动对黄花梨的损伤; Thompson 等<sup>[5]</sup>分析了托盘包装对梨在运输振动中的防护效果; Shahbazi 等<sup>[6]</sup>以弹性模量为损伤评价标准分析了运输振动对西瓜的损伤; Gyeong-Won 等<sup>[7]</sup>利用有限元分析, 对苹果进行建模, 分析了苹果的力学性能, 并确定了其弹性模量, 但未进一步分析运输包装; 何晓东等<sup>[8]</sup>通过试验得出影响苹果碰撞损伤体积的因素显著性由高到低依次为跌落高度、碰撞材料、果实质量; Dintwa 等<sup>[9]</sup>和 Ahmadi 等<sup>[10]</sup>分析了苹果果实相互碰撞以及与刚体碰撞的动力学过程, 但并未分析缓冲材料在苹果运输中的缓冲效果。

鉴于此, 本文通过试验确定苹果果肉的最大屈服极限, 利用 ABAQUS/Explicit 建立苹果-EPS 泡沫缓冲包装系统的有限元模型并进行有限元分析, 以此研究苹果受到冲击时的应力分布以及包装材料 EPS 的缓冲作用, 并分析苹果在不同摆放方式下的冲击响应。最后将龙格-库塔数值分析与仿真分析 2 种方法得到的加速度进行对比, 为相关果蔬产品的缓冲包装提供依据。

## 1 苹果压缩试验

### 1.1 试验材料及设备

选用较大品种的洛川红富士苹果作为试验样本。苹果果肉分布均匀, 压缩力学性能不依赖试件尺寸<sup>[11]</sup>。为了得到更真实可靠的数据, 将选取的试验样本去除表皮以及内部的核, 并选取合适的位置制作 20 mm×20 mm×20 mm 的正方体苹果果肉块。切除果皮后的果肉暴露在空气中容易变质腐烂, 因此, 先使用聚乙烯保鲜膜将果肉包好待用<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试验过程

将试验前选取的没有虫洞、未破损的苹果, 按照所需要的尺寸切样。为防止苹果果肉暴露在空气中氧化对试验产生影响, 将样品准备好后立即进行压缩试验。该试验采用直径为 10 cm 的圆柱形压头, 如图 1 所示, 并以 7 mm/min 的压缩速率对苹果试样进行压缩试验。

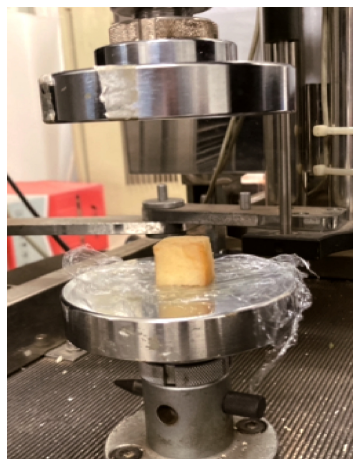


图 1 苹果果肉压缩试验

Fig.1 Compression test of apple pulp

包裹在压头上的塑料薄膜用于防止压缩过程中, 飞溅的果汁污染到万能压缩机。塑料薄膜厚度很小, 压缩过程中对试验结果的影响可忽略不计。

### 1.3 试验结果

试验得到的 10 组力-位移曲线, 除个别因偶然误差造成的差异点外, 整体趋于一致。原则上去除误差过大超过 5% 的曲线, 取误差最小的 4 条曲线并转换为应力-应变曲线, 经 origin 数据拟合后, 试验得到的苹果应力-应变曲线, 如图 2 所示。

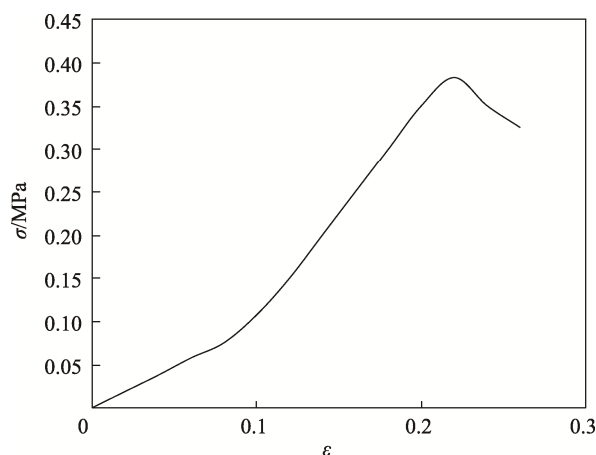


图 2 苹果应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of apple

从图 2 可以得出, 在压缩过程中苹果果肉经历了 2 个力学变形阶段, 分别是弹性阶段和屈服阶段。试样在压缩初始部分几乎重合且接近直线, 说明试样有一定的线性黏弹性。从该线性阶段的函数拟合结果来看, 苹果果肉的弹性模量约为 2.44 MPa; 而当压缩力继续增大时, 苹果果肉变形继续增大, 当苹果果肉的应变达到 0.23 时, 达到了苹果的屈服极限为 0.38 MPa, 果肉之后被压溃, 失去了弹性。

在苹果运输过程中, 外部因素造成苹果冲击与振

动,产生的应力应该小于该最大屈服极限以防止苹果受到损伤,失去弹性,进而在微生物的作用下,以较快的速度腐烂,影响销售。因此在进行该缓冲包装设计时,其缓冲作用须保证苹果在采摘处理前后和运输过程中受到的冲击最大应力小于其屈服极限 0.38 MPa,并在此前提下,进行减量化的设计。

## 2 有限元仿真分析

### 2.1 苹果-EPS 泡沫运输包装系统有限元模型

在 ABAQUS/Explicit 中建立包装系统有限元模型,其中苹果果径方向的长度为 80 mm,垂直果径的长度为 80 mm。将草图画好后,通过旋转可变形体得到苹果的有限元模型。发泡聚苯乙烯有限元模型采用 Crushable Foam 模型,其尺寸为 16 mm×16 mm,通过拉伸得到不同厚度的发泡聚苯乙烯有限元模型。在“装配”界面得到该包装系统的有限元模型如图 3 所示。

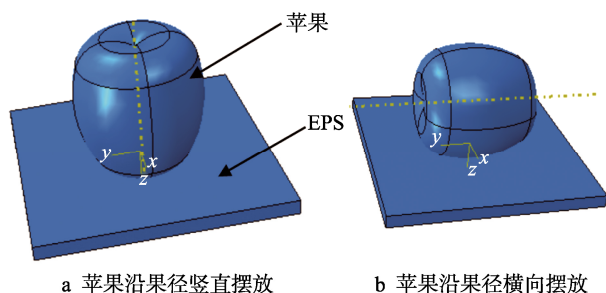


图 3 包装系统有限元模型  
Fig.3 Finite element model of packaging system

在完成苹果-EPS 泡沫包装系统有限元模型构建后,即可仿真分析苹果在运输时的跌落冲击响应。苹果和 EPS 泡沫的相关力学性能参数如下:

1) 苹果力学性能: 试验中选取的苹果的实测密度为 796 kg/m<sup>3</sup>, 根据压缩试验,其弹性模量为 2.44 MPa,泊松比为 0.384<sup>[13]</sup>,在有限元模拟中采用线弹性本构模型。

2) 缓冲材料发泡聚苯乙烯材料的相关力学性能: 密度为 28 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为 4 MPa、泊松比为 0<sup>[14]</sup>、单轴初始屈服应力与静水压初始屈服应力比为 1.1、静水拉应力与静水压应力比为 0.1<sup>[15]</sup>。

赋予苹果和 EPS 材料属性后,需要对有限元模型进行网格划分。其中, EPS 泡沫形状规则,可直接对其进行网格划分,单元为六面体,并在多次仿真分析之后,得出最佳网格密度设置为 0.002。在该网格密度设置下,能在效率较高的情况下准确地模拟泡沫的力学行为。苹果是一个不规则的物体,不能直接对其进行网格划分,需要先进行模型切割,再对其进行网格划分,切割后的模型如图 4 所示。采用 EPS 泡沫划分的方法,得出苹果网格划分采用的网格

密度为 0.002 6。

### 2.2 苹果沿轴水平摆放下跌落

苹果在运输时的跌落冲击使得果肉会在一个十分短暂的时间内发生一些较为复杂的动态力学响应<sup>[16]</sup>,其中影响冲击响应的主要因素为跌落的高度,且苹果跌落后的变形不是线性的<sup>[17]</sup>。苹果在果园被摘下到运输到消费者手中的过程中,有不同的潜在动态装载情况以及相关的下降高度<sup>[13]</sup>。表 1 展示了苹果在运输过程中可能存在的跌落高度情况。

表 1 潜在的动态苹果装载情况和相关的下降高度  
Tab.1 Potential dynamic apple loading situations and associated drop heights

| 运输过程 | 潜在跌落情况 | 潜在跌落高度/m    |
|------|--------|-------------|
| 果园   | 采摘     | 0.6         |
| 包装车间 | 搬运     | 0.6 ~ 1     |
| 经销商  | 分拣     | 0.05 ~ 0.15 |
| 零售商  | 展出     | 0.5 ~ 0.3   |

根据表 1 可知仿真分析时苹果从最大潜在高度 1 m 跌落时的损伤情况,即苹果冲击接触到泡沫时的速度为 4.427 m/s。通过模拟苹果在该速度下跌落在不同厚度聚苯乙烯泡沫上,得到冲击时的最大应力,为苹果在运输过程中的缓冲包装设计提供依据。

结合实际包装情况,苹果在包装中有 2 种典型的摆放方式,一种是沿轴水平摆放,另一种是沿轴竖直摆放,如图 3 所示。在相同的运输情况下,2 种摆放方式对苹果产生的冲击应力不同,因此,分析 2 种摆放情况下的动力学响应,并进行对比是有必要的。

苹果在运输过程中,沿轴水平摆放方式下,从 1 m 高度跌落在 9 mm EPS 泡沫上,其应力云图如图 4 所示。

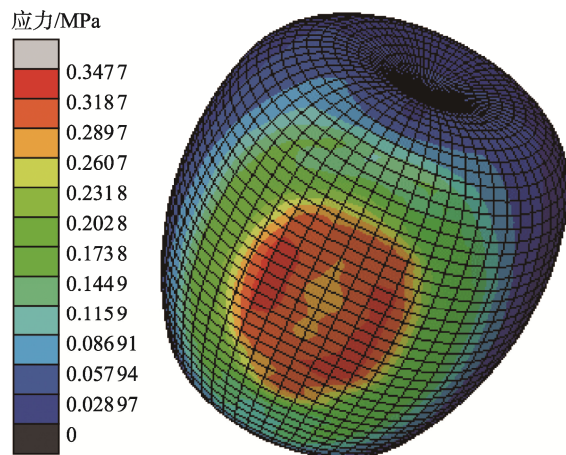


图 4 苹果沿轴水平摆放,从 1 m 高度跌落在 9 mm EPS 上的应力云图  
Fig.4 Stress cloud diagram of apple arranged horizontally along the axis falling to the 9 mm EPS from a height of 1 m

如应力云图所示, 苹果在该摆放方式时, 运输过程中, 在 9 mm EPS 的缓冲作用下, 跌落时的最大应力为 0.347 7 MPa, 没有超过其本身的屈服极限, 苹果的果肉不会受到不可回复的损伤。在该缓冲包装设计下, EPS 能有效地保护苹果不受损坏。

## 2.3 苹果沿轴竖直摆放下跌落

仿真分析苹果在沿轴竖直摆放的情况下, 从 1 m 高度跌落在 9 mm EPS 泡沫上, 其冲击应力云图见图 5。

应力/MPa

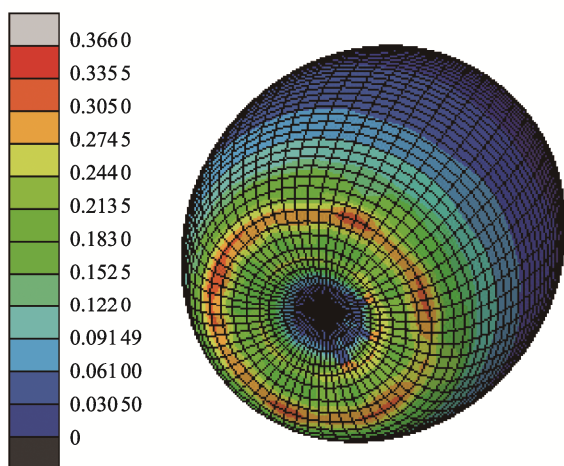


图 5 苹果沿轴竖直摆放, 从 1 m 高度跌落在 9 mm EPS 上的应力云图  
Fig.5 Stress cloud diagram of apple arranged vertically along the axis falling to the 9 mm EPS from a height of 1 m

在该情况下, 苹果从 1 m 高度跌落, 在 9 mm EPS 泡沫的缓冲作用下, 冲击造成的最大应力为 0.366 0 MPa, 没有达到苹果的屈服极限, 该厚度 EPS 也可以有效地保护苹果在运输过程中不受损伤。上述 2 种情况下, 9 mm EPS 泡沫都能有效地保护苹果在运输中不受到机械损伤, 但不一定是最佳的缓冲包装设计, 需要分析更多不同厚度的 EPS 的缓冲作用, 综合考虑缓冲作用与运输成本才能得出最佳缓冲包装设计。

## 2.4 不同厚度 EPS 的缓冲效果

不同密度、厚度的 EPS 的缓冲效果是不同的。在设计缓冲包装时, 在保证产品运输中不受损伤的前提下, 尽可能减少运输成本, 即使用减量化的缓冲设计是必要的。

与上述操作一致, 通过在 ABAQUS/Explicit 中模拟不同厚度的 EPS 对苹果跌落时的缓冲效果, 以及苹果不同摆放方式对冲击的影响, 可以得到如图 6 所示的曲线。

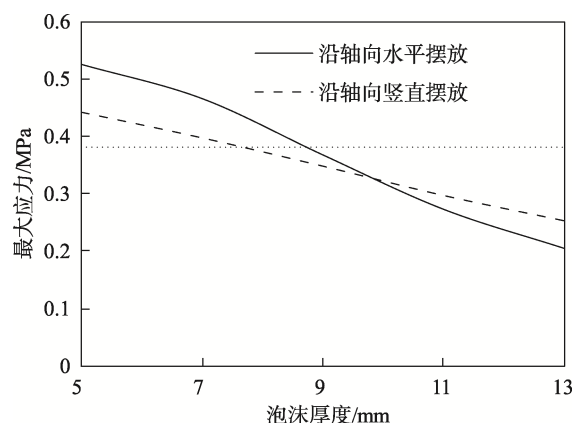


图 6 苹果不同摆放方式下跌落所需的最小 EPS 厚度

Fig.6 Minimum EPS thickness for falling of apple in different layouts

从图 6 中可以看出, 苹果在不同摆放方式下, 从 1 m 高度跌落在相同厚度的 EPS 上, 冲击响应有较大的区别。泡沫厚度小于 9.8 mm 时, 沿轴水平摆放有更好的缓冲效果, 大于 9.8 mm 时, 沿轴竖直摆放有更好的缓冲效果。根据实际情况以及控制成本需要, 苹果沿轴水平摆放下能更有效地利用包装空间, 因此, 在该情况下, 最佳缓冲包装方案为苹果沿轴水平摆放下, 用 8.2 mm EPS 作为缓冲包装。

## 2.5 EPS 缓冲作用

EPS 的缓冲作用来自于材料中的大量发泡孔, 这些发泡孔细密均匀, 基本呈现闭孔结构, 气孔与气孔之间有完整的孔壁结构。在运输过程中, 可以通过改变和回复气孔形状来缓冲冲击或振动, 这一过程可以有效吸收瞬间冲击带来的能量, 为苹果提供较好的防护。

在 ABAQUS/Explicit 可视化界面上, 利用 ODB 场变量输出得到, 在 9 mm 的 EPS 泡沫与没有泡沫的 2 种情况下, 沿轴水平摆放的苹果从 1 m 高度跌落时同一点的应力响应如图 7 所示。

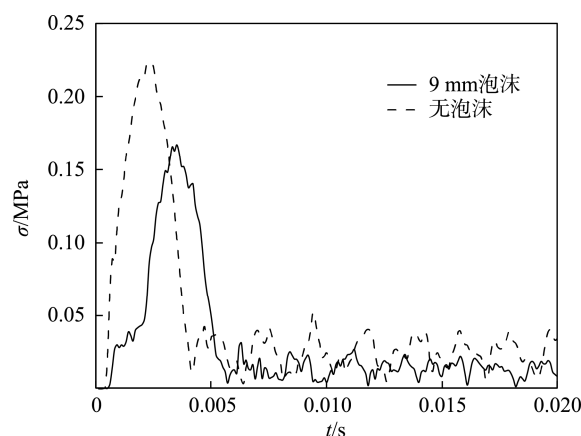


图 7 苹果跌落应力响应曲线  
Fig.7 Curve of apple drop stress response

如图7所示,在没有EPS缓冲作用的情况下,苹果该位置受到的应力为0.23 MPa,而有EPS缓冲作用情况下,该位置受到的应力为0.16 MPa,能有效地吸收运输过程中冲击产生的能量,体现了EPS的缓冲作用。

### 3 数值分析与仿真模拟对比

#### 3.1 EPS泡沫本构关系

EPS泡沫应力-应变曲线<sup>[13]</sup>如图8所示,对其进行拟合,见式(1)。

$$\sigma = a_1 \tanh(a_2 \varepsilon) + a_3 \tan(a_4 \varepsilon) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为泡沫应力;  $\varepsilon$  为泡沫应变;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为系数。

拟合后各系数为  $a_1=0.099\ 99$ ,  $a_2=29.023\ 35$ ,  $a_3=0.087\ 99$ ,  $a_4=1.72$ 。

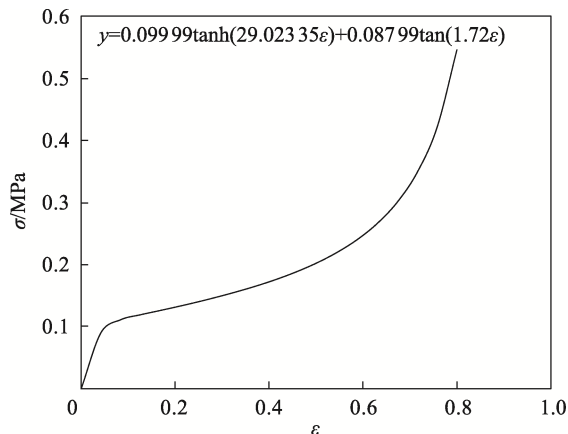


图8 EPS泡沫应力-应变曲线  
Fig.8 Stress-strain curve of EPS

#### 3.2 加速度响应对比

在ABAQUS/Explicit可视化界面上,利用ODB场变量输出可得到不同情况下苹果同一点的冲击加速度响应。龙格-库塔法是一种求解非线性常微分方程解的方法,利用此方法计算沿轴水平摆放的苹果从1 m高度跌落在9 mm EPS泡沫的过程中加速度随时间变化的关系。其中苹果质量为0.276 kg,泡沫面积为0.002 826 m<sup>2</sup>,跌落速度为4.427 m/s。

状态变量方程程序如下:

$$dy = @(t,y)[y(2); -A \times f(y(1)/h) \times 1e^6 / m]$$

ode45命令函数为:

$$[t,y] = \text{ode45}(dy,[0,0.005],[0;v_0])$$

结合EPS泡沫的本构关系在数值运算软件Matlab中运行,得到的结果如图9所示。通过图9可以看出,2种方法得出的加速度响应趋势一致,证明了仿真模型的有效性,但苹果等果品类无明确易损

件,其最佳设计方法是通过仿真模拟分析最大应力响应来进行缓冲设计。

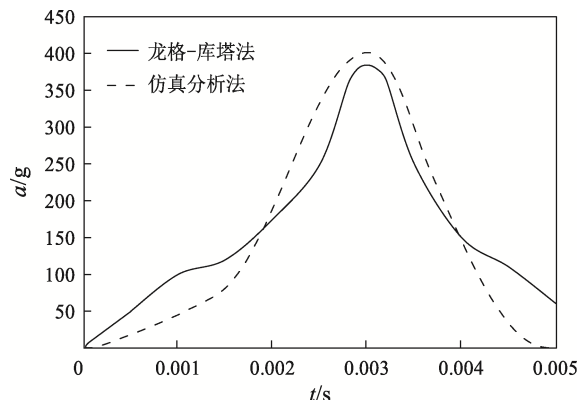


图9 仿真分析法与数值分析法对比  
Fig.9 Comparison between simulation analysis method and numerical analysis method

### 4 结语

本文通过压缩试验得出了80 mm果径洛川苹果的屈服极限;利用ABAQUS/Explicit建立了苹果-EPS泡沫运输包装系统;模拟分析了苹果在1 m高度跌落时,在不同厚度、密度为28 kg/m<sup>3</sup>的EPS泡沫缓冲作用下以及不同摆放方式下的冲击响应,并将仿真分析法与数值分析法进行了对比,得出以下结论:

1) 该种苹果沿轴竖直摆放下从1 m高度跌落,为了防止苹果不受到破损,即冲击响应不超过最大弹性极限0.38 MPa,所需密度为28 kg/m<sup>3</sup>的EPS厚度为8.9 mm,而在沿轴水平摆放情况下,所需最小厚度为8 mm。

2) 从图7可以得出EPS有良好的缓冲作用。从图6中可以看出,在不同摆放方式下,苹果从1 m高度跌落在相同厚度的EPS上的冲击响应有较大的区别。结合实际情况,为防止过度包装,该缓冲包装系统最佳方案为苹果沿轴水平摆放下,用厚度为8.2 mm、密度为28 kg/m<sup>3</sup> EPS泡沫作为缓冲材料可有效防止苹果在运输过程中受到冲击损伤。

3) 通过仿真分析法与龙格-库塔数值分析法的对比,说明了该苹果-EPS泡沫仿真模型的可靠性。

当前多数的果蔬力学研究是没有结合具体运输情况分析。本研究以试验为基础,结合有限元分析具体果蔬运输情况下的冲击响应,为果蔬运输提供数据支持和参考。

#### 参考文献:

- [1] 王妮睿,尤飞,江智. 猕猴桃的模拟振动实验及特性研究[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 172-177.

- WANG Ni-rui, YOU Fei, JIANG Zhi. Simulated Vibration Experiment and Features of Kiwifruit[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 172-177.
- [2] JARIMOPAS B, SINGH S P, SAYASOONTHORN S, Singh J. Comparison of Package Cushioning Materials to Protect Post-Harvest Impact Damage to Apples[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(5): 315-324.
- [3] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, YAN Li-ping, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huanghua Pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 20-28.
- [4] 周然, 李云飞. 不同强度的运输振动对黄花梨的机械损伤及贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 255-259.
- ZHOU Ran, LI Yun-fei. Effects of Different Strengths of Transport Vibration on Mechanical Damage and Storage Quality of Huanghua Pears(*Pyrus Pyrifolia* Nakai, Cv. Huanghua)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 255-259.
- [5] THOMPSON J F, SLAUGHTER D C, ARPAIA M L. Suspended Traypackage for Protecting Soft Fruit From mechanical Damage[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 71-75.
- [6] SHAHBAZI F, RAJABIPOUR A, MOHTASEBI S, et al. Simulated Intransit Vibration Damage to Watermelons[J]. Journal of Agriculture Science and Technology, 2010, 12(1): 23-34.
- [7] GYEONG-WON K, GAB-SOO O, YEONGHWANB E, et al. Analysis of Mechanical Properties of Whole Apple Using Finite Element Method Based on Three-Dimensional Real Geometry[J]. Food Sci Technol Res, 2008, 14(4): 329-336.
- [8] 何晓东, 朱德泉, 朱健军, 等. 苹果采后加工碰撞损伤影响因素研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 101-108.
- HE Xiao-dong, ZHU De-quan, ZHU Jian-jun, et al. Study on the Influencing Factors of Collision Damage in Apple Postharvest Processing[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 101-108.
- [9] DINTWA E, VAN ZEEBROECK M, RAMON H, et al. Finite Element Analysis of the Dynamic Collision of Apple Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(2): 260-276.
- [10] 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.
- [11] 冯慧敏, 郭玉明, 武新慧. 果蔬压缩破坏特性的试验研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(3): 1-4.
- FENG Hui-min, GUO Yu-ming, WU Xin-hui. Experimental Study on Compression Failure Characteristics of Fruits and Vegetables[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(3): 1-4.
- [12] CELIK H K, KABAS O, TOPAKCI M, et al. Deformation Behaviour Simulation of a Sample Apple under the Impact Effect with Finite Elements Method[J]. Tenth International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, 2008: 893-898.
- [13] CELIK H K, RENNIE A E W, AKINCI I. Deformation Behaviour Simulation of an Apple under Drop Case by Finite Element Method[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(2): 293-298.
- [14] 卢富德, 高德. 植物纤维餐具碗在运输包装环境抗冲击行为有限元分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 137-139.
- LU Fu-de, GAO De. Finite Element Analysis for Anti-Impact Behavior of Biogradable Plant Fibre Bowls with Foam Cushioning Packaging[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6): 137-139.
- [15] 张绍云, 储火, 卢富德, 等. 蜂窝-泡沫缓冲系统动力学有限元分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 52-54.
- ZHANG Shao-yun, CHU Huo, LU Fu-de, et al. Finite Element Analysis for Dynamic Response of Cushioning System Made out of Honeycomb Paperboard and Foam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 52-54.
- [16] 李艳聪, 杜晓勇, 王金海, 等. 苹果损伤力学特性[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 77-80.
- LI Yan-cong, DU Xiao-yong, WANG Jin-hai, et al. Mechanical Properties of Apple Picking Damage[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(6): 77-80.
- [17] 卢立新. 果实跌落冲击行为及其缓冲包装的理论与试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 216-223.
- LU Li-xin. Theoretic and Experimental Study on the Dropping Impact Behaviors and Cushioning Packaging of Apples[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 216-223.