

单自由度模型苹果脆值的预测

颜建伟, 林丹

(暨南大学 产品包装与物流广东普通高校重点实验室, 广州 519070)

摘要: **目的** 以苹果为研究对象, 建立一种易操作的脆值测定方案对苹果进行缓冲包装设计和分析。**方法** 通过静态压缩试验测得苹果的线刚度, 通过跌落试验测出破损临界跌落高度, 进而基于单自由度理论模型计算出苹果脆值。根据苹果的脆值和缓冲材料的静态缓冲系数设计出最优包装方案。最后, 模拟公路随机振动和跌落试验评价上述缓冲方案的可行性。**结果** 无泡沫网苹果的破损临界跌落高度为 5 cm, 线刚度为 106.59 kN/m, 固有频率为 109.79 Hz; 带泡沫网苹果破损临界跌落高度为 10 cm, 线刚度为 104.48 kN/m, 固有频率为 106.58 Hz, 临界脆值 G_c 约为 96.28。据此, 按照 80 cm 的搬运跌落高度设计时, 缓冲材料 EPE 厚度需要达到 1.98 cm。**结论** 建立的脆值测定方案具有精准度高, 且较传统脆值测定方法对仪器依赖度低, 具有操作简便易行、普适性强等优点, 易于推广到其他类型包装件脆值的测定。

关键词: 脆值; 苹果; 固有频率; 缓冲包装; 振动; 跌落

中图分类号: TB112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)15-0054-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.009

Predicting the Fragility of an Apple Based on a Single Freedom Degree Model

YAN Jian-wei, LIN Dan

(Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes,
Jinan University, Guangzhou 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a fragility measurement scheme easy to operate for the cushioning packaging design and analysis of apples, with the apples as study object. The elastic stiffness of apples was determined by the static compression test. The critical drop height of damage was obtained by the drop test. Furthermore, the fragility of apples was calculated on the basis of single freedom theoretical model. Then, an optimal packaging scheme was designed according to the apple fragility and static cushioning coefficient of the cushioning materials. Finally, the road random vibration test and drop test were simulated to evaluate the feasibility of the above-mentioned cushioning scheme. For apples with mesh-foam protection, the critical drop height of damage was 5 cm, the elastic stiffness was 106.59 kN/m, and the natural frequency was 109.79 Hz, while those without mesh-foam protection were 10 cm, 104.48 kN/m and 106.58 Hz, respectively, and the fragility G_c was about 96. In view of the above, as for the design according to the 80 cm handling drop height, the cushioning material EPE should be 1.98 cm thick. The fragility measurement scheme developed has high precision and it has such advantages as low demand on the instruments, good handle ability and generalization, compared with the traditional fragility measurement method. It is easy to apply the fragility measurement scheme in the fragility measurement of other types of packages.

KEY WORDS: fragility; apple; natural frequency; cushion packaging; vibration; drop

收稿日期: 2018-11-26

基金项目: 广东省自然科学基金 (2017A030310183)

作者简介: 颜建伟 (1986—), 男, 博士, 暨南大学副教授, 主要研究方向为低维材料和智能传感与控制。

随着人们生活水平的提高,对果蔬的需求越来越多,因此其运输范围越来越广。作为大众最喜爱的水果之一,我国苹果市场需求量极大,据统计仅 2017 年我国苹果的产量就达到了 43 800 kt。由于我国幅员辽阔,苹果往往需要经过长远的公路运输,在达到消费者手中前的流通过程中会经历装卸、运输、存储等多个环节,同时物理上会受到冲击、振动、气候等多因素的影响。苹果作为一种较高市场价值的水果,以山东红富士苹果为例,市场单价约 18 元/kg,其由于包装缓冲保护不善而造成的坏果现象时有发生,因此造成经济上的大量损失^[1-2]。综上所述,有必要对苹果等贵重的果蔬产品进行合理的缓冲包装安全保护^[3-5]。生鲜果蔬的运输包装防护在静载、冲击、碰撞、挤压等多种类型载荷作用下的损坏模式已经引起广泛关注^[6-15]。国内学者中,卢立新和王志伟^[6]最早关注运输贮运过程中,果品受到静载、挤压、振动和冲击等多形式载荷作用下产生的永久塑性变形及延时损伤,论述了在运输过程中产生的多激励作用下,由于果品的流变特性导致的复杂损伤机理,并提出了相关减损包装方案。王芳等^[7]探讨了果蔬运输过程中控制振动冲击损伤的各控制因素,并进行了参数化分析,为果蔬运输包装提供了重要理论指导。肖月等^[16]研究了巨峰葡萄在贮运过程中跌落冲击损伤及振动疲劳累积的影响规律,发现新型缓冲包装对振动疲劳累积有明显的改善效果。JARIMOPAS 等^[17]测试分析了卡车运输振动幅度与橘子受损严重程度之间的关系。魏露霞等^[18]研究了果蔬机械损伤的主要类型,探索了静压损伤、振动损伤、冲击损伤等机械损伤特性及温度、成熟度、水分含量等其他因素的耦合作用。

文中拟以红富士苹果质量安全为例,通过科学的理论分析和数据计算确定最优缓冲包装设计方案。脆值是运输过程中机械损伤的一个最关键因素,因此其测定有着非常重要的现实价值。考虑到脆值在传统测定方法中对试验设备要求高,测定精度受操作影响波动大,因此文中基于单自由度理论模型建立一种简便易行的脆值测定方案,其受试验设备限制较小。通过静态压缩试验测得苹果线刚度、跌落试验测出临界跌落高度,据此设计最适缓冲包装方案,并在实验室条件下模拟公路随机振动和跌落试验评价缓冲包装的有效性。

1 试验

1.1 材料

试验样品选用红富士苹果,产于中国山东。试验选用的苹果尺寸、形状、成熟情况基本一致,表面无伤疤和可视损伤,苹果的基本参数:质量为 (230 ± 10) g,赤道果径为 (83 ± 3) mm。包装苹果的泡沫网为 EPE

发泡塑料,缓冲衬垫材料为厚 10 mm, 30~40 倍高发泡形成的 EPE 珍珠棉。

1.2 仪器

主要仪器有 WDW-10C 万能材料试验机,深圳市新三思材料检测有限公司; DT-315 跌落试验台,华威检测设备有限公司; Model 7000 液压振动实验系统,美国 Lansmont 公司; GZX-9420MBE 恒温恒湿箱,上海博讯实业有限公司。

1.3 方法

1.3.1 EPE 发泡塑料静态压缩试验

将厚度为 10 mm 的 EPE 发泡缓冲垫片切成 10 cm×10 cm 的方形试样,将试样放置在万能材料试验机上,进行压缩试验。为避免材料表面不平整,首先对试样进行预加载,当压缩载荷达到 0.5 N 时开始记录数据,压缩速率为 2 mm/min。试验结束后,记录试验的压缩载荷-位移数据。EPE 发泡塑料缓冲衬垫静态压缩试验设置见图 1。



图 1 EPE 缓冲衬垫静态压缩
Fig.1 Static compression of EPE cushioning pad

1.3.2 苹果跌落预试验

选取若干苹果,分为带泡沫网和无泡沫网 2 组,并进行编号。将样品放置在跌落试验台上,调节跌落高度,进行跌落预试验,跌落试验机的低限跌落高度为 29 mm。由预试验可知,无论是否带泡沫网,苹果都会产生大面积淤损(见图 2),因此采用量尺辅助跌落法,以测定低高度下的苹果跌落状态。选用 5, 10, 15, 20 cm 等 4 个跌落高度,试验发现很难严格控制苹果以底平面着地的姿势跌落,因此,改用平行双量尺法,使苹果上下面平行于量尺,确保所有苹果的跌落面都在赤道线上。事实上,受接触面曲率大的影响,后一种跌落方式严酷程度较前一种更大,因此采用赤道处作为跌落接触面是合理的。跌落试验后将苹果放置在常温下 24 h,观察并测定其淤损面积(A),以网格硫酸纸映射标记淤损面积。

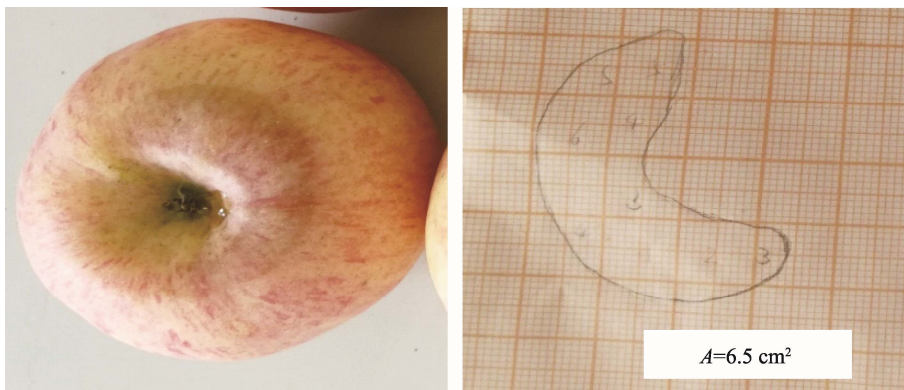


图2 带泡沫网苹果跌落淤损(跌落高度 29 cm)

Fig.2 Ecchymosis due to drop of the apple with mesh-foam protection (drop height: 29 cm)

1.3.3 苹果静态压缩试验

选取 6 个苹果, 分为带泡沫网和无网 2 组, 每组 3 个苹果, 并对其编号, 选用 18 cm 的平板压头对样品进行压缩试验。考虑到试样表面可能不平整, 因此首先对试样进行预加载, 当压缩载荷达到 0.5 N 时开始试验, 压缩速率为 2 mm/min。每组重复上述操作 3 次, 试验结束后, 记录试验的压缩载荷-位移数据。

1.3.4 苹果包装件

利用瓦楞纸箱及 EPE 发泡缓冲衬垫, 对苹果进行包装。将 6 个苹果分两边置于瓦楞纸箱内, 设置有缓冲垫片和无缓冲垫片对照组, 一组在苹果的底部铺设设计好尺寸的 EPE 缓冲垫片, 而对照组的苹果直接放置于瓦楞纸板上, 见图 3。



图3 苹果缓冲包装对照

Fig.3 Contrast of cushion packaging for apples

1.3.5 包装件振动试验

1) 扫频试验。苹果用 AB 胶固定在振动台上, 加速度传感器粘到苹果正上方, 与振动台台面垂直, 测量扫频振动试验苹果的实时加速度, 扫频范围设置 0~2000 Hz, 记录苹果加速度频谱数据, 确定苹果固定频率。苹果扫频试验设置见图 4。

2) 公路谱随机振动试验。将苹果包装件置于振

动台上, 用弹性约束将包装件固定在台面上, 防止箱体在试验过程中发生移动。再按照 ASTM D4169—16 的高水平卡车公路谱(见表 1)对包装件进行随机振动, 固定装置见图 5。

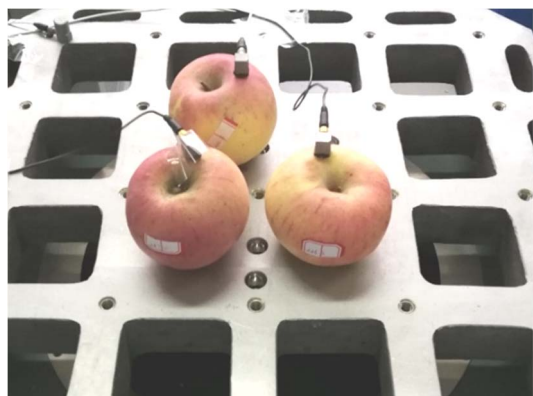


图4 苹果扫频

Fig.4 Sweep frequency test for apples

表1 卡车功率谱密度

Tab.1 Power spectrum density of the truck

固定 频率/Hz	功率谱密度/(g ² ·Hz ⁻¹)		
	高	中	低
1	0.000 72	0.000 72	0.0004
3	0.030	0.018	0.010
4	0.030	0.018	0.010
6	0.0012	0.000 72	0.000 40
12	0.0012	0.000 72	0.000 40
16	0.006	0.0036	0.0020
25	0.006	0.0036	0.0020
30	0.0012	0.000 72	0.000 40
40	0.0060	0.0036	0.0020
80	0.0060	0.0036	0.0020
100	0.000 60	0.000 36	0.000 20
200	0.000 030	0.000 018	0.000 010
<i>G</i> _{rms}	0.70	0.54	0.40



图 5 弹性约束固定
Fig.5 Elastic constraint fixation

1.3.6 包装件跌落试验

按照 GB/T 4857.17 准备跌落试验用苹果试样，将跌落机支撑装置调整到指定位置，将包装件放置在支撑装置中间，见图 6。随后进行跌落试验，见图 6b，试验结束后检查内装苹果的破损程度。

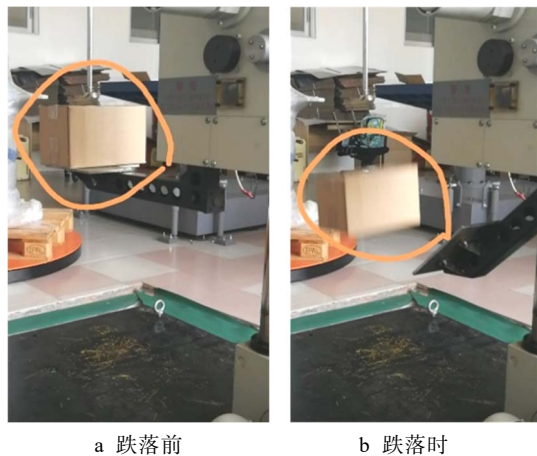


图 6 包装件跌落试验
Fig.6 Drop test for the packages

2 结果与分析

2.1 苹果跌落试验

由于苹果是否受损与淤损面积的大小并没有统一的判定标准，因此文中定义淤损面积占总面积 0.5% 左右时，即 1 cm^2 （影响苹果经济价值）为损坏。对于无网苹果，根据预试验结果，确定选择在 4，5，6 cm 等 3 个跌落高度进行跌落试验，重复 3 次，试验结果见图 7。由图 7 可知，在无网情况下，跌落高度间隔 1 cm，苹果损伤情况相差明显。当跌落高度为 6 cm 时，苹果损伤面积超过 1 cm^2 ；当跌落高度为 5 cm 时，苹果损伤面积在临界值附近；当跌落高度为 4 cm 时，苹果损伤面积明显小于 1 cm^2 ，且肉眼观

察几乎无损伤。综上所述，可以判定无网苹果的破损临界跌落高度为 5 cm。

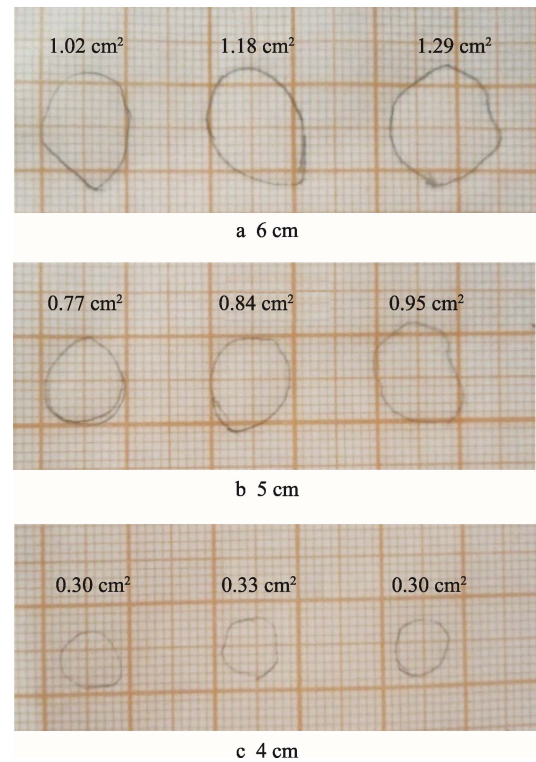


图 7 无网苹果跌落淤损
Fig.7 Ecchymosis due to drop of the apple without mesh-foam protection

对于带泡沫网苹果，跌落试验结果见图 8。从图 8 可以看出，当跌落高度为 15，20 cm 时，带网苹果损伤面积分别为 $2.57, 4.12\text{ cm}^2$ ，远大于 1 cm^2 ，损伤面积肉眼清晰可见；当跌落高度为 10 cm 时，苹果损伤面积为 1.09 cm^2 ，接近 1 cm^2 ，肉眼观察不明显；当跌落高度为 5 cm 时，苹果无明显损伤或者损伤极其轻微。

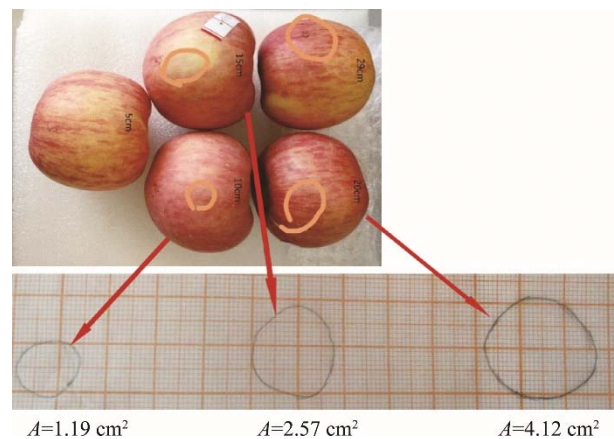


图 8 网装苹果试跌落试验淤损
Fig.8 Ecchymosis due to trial drop of the apple with mesh-foam protection

在 8, 9, 10, 11 cm 的跌落高度下重复上述步骤进行跌落试验, 试验结果见图 9, 具体的试验数据见表 2。由表 2 可知, 当跌落高度为 8, 9 cm 时, 苹果平均淤损面积分别为 0.627, 0.813 cm², 均小于 1 cm², 损伤面积轻微, 肉眼观测不明显; 当跌落高度为 11 cm 时, 苹果平均损伤面积为 1.167 cm², 超过 1 cm², 静置 24 h 后, 损伤情况明显可见; 当跌落高度为 10 cm 时, 苹果损伤情况在破损界定范围内, 接近 1 cm², 因此, 可以判断网装苹果的临界破损跌落高度为 10 cm。与无网苹果跌落相比, 泡沫网能有效保护苹果。

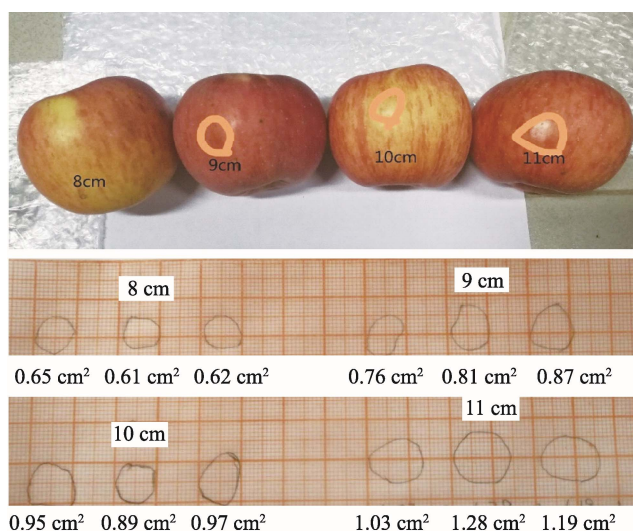


图 9 网装苹果跌落试验淤损
Fig.9 Ecchymosis due to drop of the apple with mesh-foam protection

表 2 网装苹果淤损面积
Tab.2 Ecchymosis area of the apple with mesh-foam protection

跌落破 损高 度/cm	试验 1 淤 损面 积/cm ²	试验 2 淤 损面 积/cm ²	试验 3 淤 损面 积/cm ²	均值/ cm ²
8	0.65	0.61	0.62	0.63
9	0.76	0.81	0.87	0.81
10	0.95	0.89	0.97	0.94
11	1.03	1.28	1.19	1.17

2.2 苹果静态压缩试验

无网装与网装苹果静态压缩情况见图 10。从图 10 可以看出, 静态压缩试验后, 苹果均被挤压变形, 组织被破坏, 其中无网苹果裂纹明显, 网装苹果没有出现裂纹。这一显著差异是由于在静态压缩试验时, 泡沫网自适应变形贴伏在苹果上。与无网苹果相比, 带网苹果上承受的集中力经泡沫网分散成分布载荷, 应力集中得到弱化。这一结果与上述带网与无网苹果的临界跌落高度有明显差异相吻合。由于分散了苹果跌落时的应力集中, 因此带网苹果的破损临界跌落高

度提高了一倍。对输出的压缩载荷-位移数据进行分析, 通过拟合线性关系提取出苹果的线刚度。2 组数据经处理后结果见表 3。

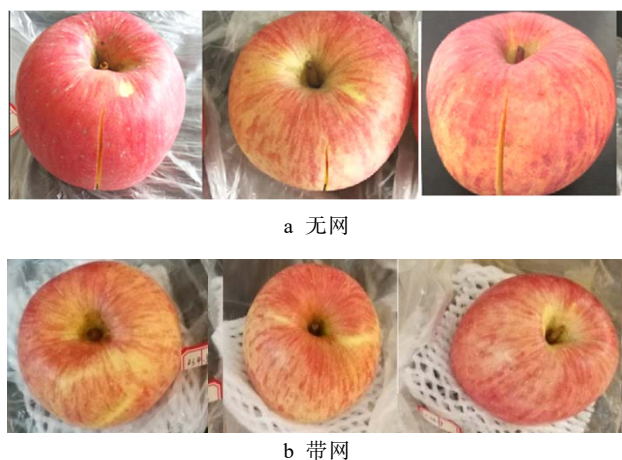


图 10 无网/带网苹果静态压缩情况
Fig.10 The static compression of apples with and without mesh-foam protection

表 3 苹果线刚度
Tab.3 The elastic stiffness of the apple

组别	无网苹果		带网苹果	
	质量/kg	刚度/(N·m ⁻¹)	质量/kg	刚度/(N·m ⁻¹)
1	0.219	110 102	0.232	104 444
2	0.225	103 776	0.233	102 617
3	0.229	105 899	0.234	106 386
均值	0.224	106 592	0.233	104 482

由表 3 结果可知, 无网苹果的刚度均值为 106.59 kN/m, 带网苹果的刚度均值为 104.48 kN/m。可见, 泡沫网对整体的刚度影响可以略去不计。苹果的圆频率 ω_n 和振动频率 f_n 分别为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (1)$$

式中: k 为刚度; m 为苹果质量。

根据试验得到的刚度计算出的圆频率和振动频率见表 4。

表 4 苹果固有频率
Tab.4 Natural frequency of the apple

频率	圆频率/(rad·s ⁻¹)	振动频率/Hz
无网装苹果	689.83	109.79
网装苹果	669.64	106.58

2.3 EPE 发泡塑料缓冲衬垫的静态压缩试验

EPE 发泡缓冲衬垫是超弹性材料, 压缩过程中没有产生屈服现象。根据试样的厚度、面积和压缩载荷-位移数据, 计算缓冲材料的应力-应变数据。通过应力-应变曲线可以计算出静态缓冲系数。

$$C = \frac{\sigma}{u} = \frac{\sigma}{\int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon} \quad (2)$$

式中: C 为缓冲系数; σ 为应力; u 为应变能; ε 为应力。

静态缓冲系数曲线见图 11。结果显示, 缓冲衬垫的最小缓冲系数为 2.39, 对应的应力为 175.92 kPa。

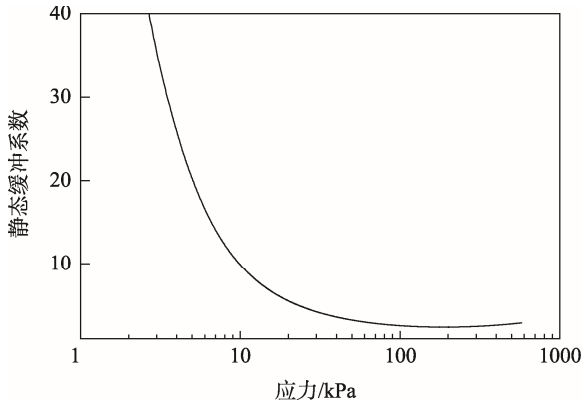


图 11 EPE 静态缓冲系数-应力曲线

Fig.11 Static cushion coefficient-stress curve for EPE

根据单自由度振动模型估算法:

$$G = \frac{a}{g} = 2\pi f_n \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (3)$$

式中: G 为脆值; a 为加速度; g 为重力加速度; h 为高度。

将网装苹果的临界跌落高度 $h_0=10$ cm, 频率 $f_n=106.58$ Hz, 代入式(3), 得临界脆值 $G_c=96.28$, 即破损前能承受的最大加速度为 $a_c=943.54$ m/s²。代入苹果的平均质量 0.23 kg, 因此, 苹果能承受的最大力为 $F=217.01$ N。由界定的苹果临界破损面积 $S=1$ cm², 可计算得苹果破损前承受的应力 $\sigma_{\max}=F/S=2.17$ MPa。该应力远大于缓冲衬垫最小静态系数对应的应力 (175.92 kPa)。这表明在缓冲衬垫破损之前, 苹果都不会破损。缓冲衬垫厚度为:

$$t = \frac{Ch}{G_c} \quad (4)$$

缓冲材料厚度与静态缓冲系数 C 成正比, 因此, 为选择最省材料的缓冲衬垫设计方案, 静态缓冲系数 C 应取最小值 2.39。 h 指苹果可能跌落高度, 搬运高度取值约 80 cm, 因此, 缓冲材料厚度 $t=1.98$ cm。

2.4 包装件振动试验校核

扫频数据结果见图 12。由图 12 可知, 苹果基频为 104.03 Hz, 与上述试验单自由度理论模型得到的苹果固定频率 106.58 Hz 相吻合, 因此, 上述试验方案合理、准确。相较于扫频试验, 单自由度模型测定苹果基频时, 对设备依赖较低, 试验操作简便易行。

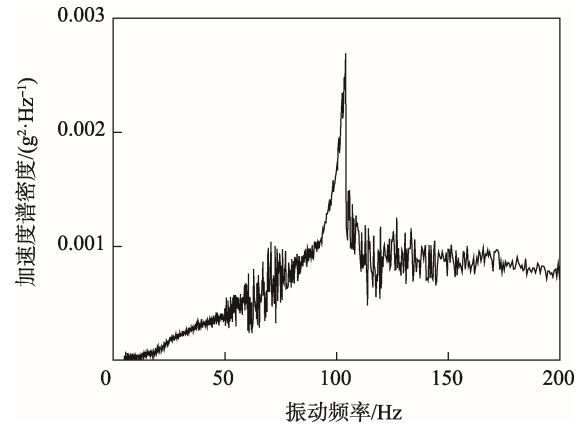


图 12 苹果扫频数据

Fig.12 Sweep frequency data for the apple

公路随机振动试验发现振动时间从 0.5 h 增加到 3 h 时, 包装件中的 2 组苹果均没有发生明显损坏, 即基于 ASTM D4169—16 的高水平卡车公路谱随机振动不会出现使苹果破损的情况。弹性约束在随机振动过程中虽可能会吸收部分振动能量, 但由于其体积小、吸收量少, 因此忽略其影响。作为对照试验, 将单果直接放置于振动台面上, 约束其跳动, 发现将振动时间从 0.5 h 增加到 2 h, 单果发生了不同程度的破损 (见图 13), 因此, 长时间的振动累积导致发生脱离振动台的现象, 进而使得苹果淤损。综上所述, 只要保证苹果在振动过程中不直接与高硬度平面长期接触, 便不会由于振动造成破损。简言之, 苹果破损受冲击控制而不是振动。

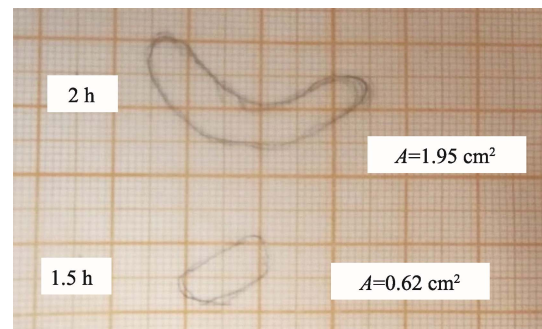


图 13 单苹果振动淤损

Fig.13 Ecchymosis due to vibration of a single apple

2.5 包装件跌落试验校核

按照 2.3 节的缓冲方案进行跌落试验, 发现 3 个苹果都未受到损伤, 而对照组 3 个苹果均有不同程度的损伤。将破损苹果放置 24 h 后, 用网格硫酸纸表征苹果损伤面积, 见图 14。由图 14 可知, 左边 2 个苹果 (对应图 3 左右两边的苹果) 损伤面积较小, 分别为 0.51 cm² 和 0.83 cm², 右边苹果 (对应图 3 中间的苹果) 损伤面积为 2.43 cm²。这是因为左右两边箱底实际上叠合了 2 层瓦楞纸板, 而中间处只有 1 层,

见图3。通过跌落试验的2组结果对比,可以确定上述缓冲包装方案设计是有效的。

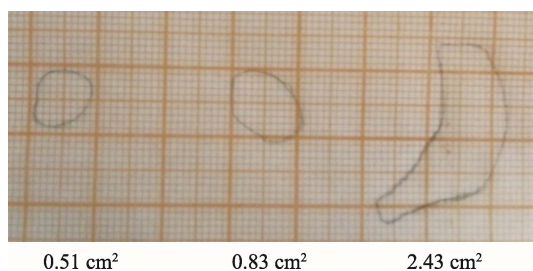


图14 包装箱苹果跌落淤损

Fig.14 Ecchymosis due to drop of the apple in the packaging box

3 结语

文中以苹果为例,通过静态压缩试验和跌落试验分别测得其线刚度和临界跌落高度,基于单自由度线性理论模型计算出其脆值。据此优化设计苹果的缓冲运输包装方案。通过苹果跌落试验,测得无网装苹果临界跌落高度为5 cm,而网装苹果临界跌落高度为10 cm。由静态压缩试验测得苹果的刚度为106.59 kN/m,网装苹果刚度为104.48 kN/m,并计算得到前者固定频率为109.79 Hz,后者固定频率为106.58 Hz。上述结果说明尽管泡沫网对系统刚度的影响可以忽略不计,但由于泡沫网的自适应变形可对应力进行重新分布,弱化应力集中,进而大幅度提高了苹果的破损临界跌落高度。由EPE发泡塑料缓冲衬垫的静态压缩试验得到EPE衬垫的静态缓冲系数曲线,发现最小静态缓冲系数为2.39,对应的应力为175.92 kPa。结合苹果搬运过程中的跌落高度约为80 cm,设计出最省材料方案,缓冲垫厚度为1.98 cm,以此对苹果产品进行缓冲包装。在扫频振动验证试验中测得苹果固定频率为104.03 Hz,与前述方案测得的固定频率(106.58 Hz)一致,证实了方案的可行性。公路谱随机振动试验发现苹果破损主要受冲击控制而非振动。跌落校核试验结果显示无缓冲衬垫的苹果产生破损,有缓冲衬垫的苹果完好无损,与预期结果一致。综上所述,基于单自由度模型的缓冲设计方案是有效的。值得注意的是,文中提出的方案在试验操作上具有简便性,且对试验设备要求较传统脆值测定方法低,同时具有普适性、可靠性和经济性。

参考文献:

- [1] 李光,王子蕊,宋海燕. 苹果运输包装振动损伤预测方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 251—256.
LI Guang, WANG Zi-rui, SONG Hai-yan. Prediction of Vibration Damage of Apples in Transportation

- Package[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 251—256.
- [2] 侯雪倩,周会玲,蒋帅,等. 苹果采后包装的作用与技术要求[J]. 北方园艺, 2016(17): 184—188.
HOU Xue-qian, ZHOU Hui-ling, JIANG Shuai, et al. Effect and Technical Requirement of Apple Packaging After Harvest[J]. Northern Horticulture, 2016(17): 184—188.
- [3] 阎帅,李光. 液晶电视包装件有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 121—127.
YAN Shuai, LI Guang. Finite Element Analysis and Optimization Design of LCD TV Package[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 121—127.
- [4] 刘艾,赵英芹,王玉龙,等. 白酒包装件跌落有限元分析与优化设计[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 22—26.
LIU Ai, ZHAO Ying-qin, WANG Yu-long, et al. Finite Element Analysis of Wine Bottle Drop and Optimal Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 22—26.
- [5] OGUT H, PEKER A, AYDIN C. Simulated Transit Studies on Peaches: Effects of Container, Cushion Materials and Vibration on Elasticity Modulus[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 1999, 30(3): 59—62.
- [6] 卢立新,王志伟. 果品运输中的机械损伤机理及减损包装研究进展[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 131—134.
LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Study of Mechanisms of Mechanical Damage and Transport Packaging in Fruits Transportation[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 131—134.
- [7] 王芳,魏星,魏巍,等. 果蔬运输受振动冲击作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 326—329.
WANG Fang, WEI Xing, WEI Wei, et al. Research Progress on Transport Vibration and Impact Damage of Fruit and Vegetable[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2015, 43(26): 326—329.
- [8] 卢立新,黄祥飞,华岩. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110—114.
LU Li-xin, HUANG Xiang-fei, HUA Yan. Effect of Packaging Methods on Vibration Bruising of Pear Fruits by Simulated Transport Tests[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 110—114.
- [9] 翁桢,李琛,刘颖. 葡萄贮运保鲜包装结构优化设计[J]. 森林工程, 2012, 28(4): 93—96.
WENG Zhen, LI Chen, LIU Ying. Optimal Design of Grape Storage and Transportation Packaging Structure[J]. Forest Engineering, 2012, 28(4): 93—96.
- [10] 李萍,王若伊,林顿,等. 果蔬运输振动损伤及其减振包装设计[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 353—357.
LI Ping, WANG Ruo-yi, LIN Dun, et al. Vibration Damage and Anti-vibration Packaging of Fruits and Vegetables during Transportation[J]. Science and

- Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 353—357.
- [11] 魏巍, 王芳, 赵满全, 等. 果蔬运输振动损伤与其品质评价指标的研究现状[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 260—263.
- WEI Wei, WANG Fang, ZHAO Man-quan, et al. Research Status of Fruit and Vegetable Transport Vibration Damage and Quality Evaluation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 260—263.
- [12] MENESA P, PAGLIA G. PH-postharvest Technology: Development of a Drop Damage Index of Fruit Resistance to Damage[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(1): 53—64.
- [13] BERARDINELLI A, DONATI V. Damage to Pears Caused by Simulated Transport[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(2): 219—226.
- [14] SHAHBAZI F, RAJABIPOUR A, MOHTASEBI S, et al. Simulated In-transit Vibration Damage to Watermelons[J]. Agricultural Science and Technology, 2010, 12(1): 23—24.
- [15] 张茜, 李洋, 王磊明, 等. 果蔬机械损伤特性研究进展[J]. 2018, 39(1): 193—199.
- ZHANG Qian, LI Yang, WANG Lei-ming, et al. Research Progress of Mechanical Damage Characteristics of Fruits and Vegetables[J]. 2018, 39(1): 193—199.
- [16] 肖越, 武佩, 王顺喜, 等. 葡萄贮运过程中跌落与振动损伤的试验分析[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 9—18.
- XIAO Yue, WU Pei, WANG Shun-xi, et al. Experimental Analysis of Dropping and Vibration Damage in Grapes Storage and Transportation[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 9—18.
- [17] JARIMOPAS B, SINGH S P, SAENGNI W. Measurement and Analysis of Truck Transport Vibration Levels and Damage to Packaged Tangerines during Transit[J]. Package Technology and Science, 2005, 18(4): 179—188.
- [18] 魏露霞, 李萍, 侯晓荣, 等. 果蔬采后机械损伤特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 389—392.
- GUO Lu-jia, LI Ping, HOU Xiao-rong, et al. Research Progress of Mechanical Damage in Postharvest Fruits and Vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 389—392.