

鲜食葡萄电商悬固包装薄膜的力学性能分析与 优化设计研究

张涵涵¹, 梁欣², 魏婧怡¹, 赵通¹, 姚刚², 阎瑞香^{1*}

(1. 天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2. 深圳顺丰泰森控股(集团)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: **目的** 针对电商物流包装存在操作繁琐、透气透湿不足、寄递中暴力分拣的问题以及葡萄易落粒损伤的特点, 设计一种针对鲜食葡萄的透气透湿性适宜的简便化包装。**方法** 采用激光打孔调整 TPU 薄膜透气透湿性, 通过力学性能测试选出适宜厚度与孔隙排列方式, 根据跌落试验确认 TPU 薄膜包裹葡萄的最佳凹陷程度, 并验证悬固包装的有效性。**结果** 厚度为 0.08 mm、孔隙排列方式为 Z 形的 TPU 薄膜有优良的力学性能与透气透湿性, 打孔后薄膜水蒸气透过率极显著提高 ($P<0.01$), 并且 0.08 mm 的 Z 形 TPU 薄膜凹陷 3 cm 的悬固包装在 610 mm 的高度跌落不触底, 对葡萄的保护效果良好。纸浆模塑盒可承受 400 N 以上的力, 循环压缩 20 次后仍有很好的支撑性, 通过跌落测试可得悬固包装葡萄的表面损伤指数比袋中袋更小。**结论** 综合来看, 该悬固包装操作方便, 打孔后透气透湿性显著提高, 与包装箱匹配使用能满足堆码与运输要求, 是一种符合包装运输要求的鲜食葡萄电商包装方式, 本研究为果蔬类产品的电商包装结构设计提供了新思路。

关键词: 鲜食葡萄; 电商包装; 悬固结构; 激光打孔; 热塑性聚氨酯; 纸浆模塑

中图分类号: TB485.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)07-0082-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.011

Analysis and Optimization Design of Mechanical Properties for E-commerce Suspension Packaging Film of Table Grape

ZHANG Hanhan¹, LIANG Xin², WEI Jingyi¹, ZHAO Tong¹, YAO Gang², YAN Ruixiang^{1*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Shenzhen SF Taisen Holding (Group) Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: In response to the complicated operation, insufficient air and moisture permeability, violent sorting during delivery and the characteristics that grapes are easy to fall and be damaged, the work aims to propose a simplified packaging with appropriate air and moisture permeability for the table grape. Laser drilling was used to adjust the air and moisture permeability of TPU film and mechanical test was adopted to select the thickness and pore arrangement. The depression degree of TPU film wrapping grapes was confirmed by drop experiment, and the effectiveness of suspension packaging was verified. TPU film with a thickness of 0.08 mm and a Z-shaped pore arrangement had excellent mechanical properties and air and moisture permeability. Drilling considerably increased the water vapor transmittance ($P<0.01$) of the film. Furthermore, when dropped from 610 mm, the suspension packaging of the 0.08 mm Z-shaped TPU film with 3 cm depression did not contact the bottom, providing excellent protection. The pulp molded box could sustain a force over

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 天津市产业技术体系项目 (ITTVRS2023020); 顺丰横向合作项目 (90202205240357)

*通信作者

400 N and still provided support after 20 compression cycles. Drop test revealed that the surface damage of grapes in suspension packaging was lower than that in bag. Overall, the suspension packaging is simple to use, with the air and moisture permeability greatly improved after laser drilling, which can meet the criteria of stacking and transportation and is an appropriate e-commerce logistics packaging method for table grapes that meets the packaging and transportation requirements. This study provides new ideas for the structural design of e-commerce packaging for fruit and vegetable products.

KEY WORDS: table grapes; e-commerce packaging; suspension; laser drilling; thermoplastic polyurethane; pulp molding

葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 酸甜可口, 味美汁鲜, 深受消费者喜爱^[1]。“互联网+农业”产业的兴起使鲜食葡萄通过电商寄递至全国各地^[2], 但其多在高温高湿季节成熟, 采后有大量田间热与呼吸热, 且具有果肉软、果穗散的特点, 寄递过程中暴力分拣、包装透气透湿性不足均易导致葡萄品质劣变^[3]。葡萄采后损失率高达 20%~30%^[4], 严重影响其电商发展。

选择合适的包装材料和包装结构能降低葡萄在贮运中由于挤压、冲击和振动等引起的损坏^[5]。目前在葡萄贮运中效果较好的包装为袋中袋, 所用材料为聚乙烯 (Polyethylene, PE), 但其需要工具辅助充气^[6]。悬固包装是常见的包装形式之一^[7], 其使用高弹性的薄膜定位产品, 能有效减缓冲击和振动^[8]。悬固包装的材料通常为热塑性聚氨酯 (Thermoplastic Polyurethanes, TPU) 和瓦楞纸板。其中, TPU 的拉伸强度大、回弹范围广^[9]; 瓦楞纸板轻便、缓冲性能好。近年来, 纸浆模塑制品发展迅速, 具有强度大、缓冲性能好的特点^[10]。梁奕昆等^[11]利用 TPU 和瓦楞纸板设计出针对轻小型电子产品的悬固包装。孟子涵等^[8]则将悬固包装作为红酒内衬, 使红酒在正常的储运条件下完好无损。通过模拟运输试验发现, 悬固包装能减轻葡萄^[12]、桃子和李子^[13]等水果在运输中受到的机械损伤。但关于悬固包装由于薄膜透气透湿性不足造成产品腐烂变质的情况还鲜有报道。因此, 研究出操作简单、透气透湿性适宜的电商包装是促进葡萄电商物流产业发展的关键。

本研究设计一种由 TPU 与纸浆模塑组成的悬固包装, 筛选出力学性能优良的 TPU 薄膜厚度, 然后对其激光打孔提高透气透湿性, 再筛选出较好的孔隙排列方式, 确认 TPU 薄膜的最佳凹陷程度, 通过跌落试验验证悬固包装的有效性, 优化适用于鲜食葡萄的悬固包装设计方案, 以期降低鲜食葡萄在电商物流过程中的腐烂损失, 保持物流品质。

1 试验

1.1 材料与仪器

主要材料: 巨峰葡萄 (*Vitis labrusca*×*vinifera* 'Kyoho'), 产于天津市滨海新区; TPU 薄膜 (厚度为 0.05、0.08、0.10、0.15、0.20 mm), 购于东莞市特普优环保新材

料有限公司; 纸浆模塑盒 (规格为 33 cm×21 cm×7.5 cm), 购于中山市三秦包装材料有限公司。

主要仪器: 3369 电子万能试验机, 美国 Instron 公司; TA.XT Plus 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; ECLIPSE LV100ND POL/DS 偏光显微镜, 尼康精机 (上海) 有限公司; UV-3C 紫外激光打标机, 大族激光科技产业集团股份有限公司; W-B-121F 水蒸气透过率测试仪, 广州西唐机电科技有限公司; BSG-33F 气体透过率测试仪, 广州西唐机电科技有限公司; DY-2 跌落试验机, 美国 Lansmont corporation 公司。

1.2 方法

1.2.1 薄膜力学性能测试

1) 拉伸性能。根据 GB/T 1040.3—2006, 裁取尺寸为 150 mm×15 mm 的 TPU 样品, 夹距设为 50 mm, 拉伸速率为 450 mm/min。每组 5 个平行试样, 取平均值。

2) 弹性回复率。参照梁飞飞等^[14]的方法并稍作修改, TPU 样品尺寸为 60 mm×5 mm, 夹距 L_0 为 20 mm, 在常温 (23±3) °C 下将夹距拉至 L_0 的 3 倍, 保持 1 min 停留再撤去外力并等待 1 min, 测出 TPU 恢复后的长度 L , 根据式 (1) 得到 TPU 在常温下的弹性回复率。

$$T = \frac{3L_0 - L}{2L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T 为弹性回复率; L 为原长度, mm; L_0 为夹距长度, mm。

3) 穿刺强度。根据 GB/T 10004—2008, 将直径为 100 mm 的试片安装在样膜固定夹环上, 然后用 P/2N 钢针, 以 55 mm/min 的速度穿刺, 读取钢针穿透试片的最大负荷。

4) 压缩强度。根据 GB/T 1041—2008, 试样尺寸为 350 mm×250 mm, 压缩速度为 10 mm/min, 每组 5 个平行试样, 取平均值。

1.2.2 薄膜阻隔性能测试

1) 打孔参数确定。经多次测试, 最终确定紫外激光打孔参数为: 激光速度 $v=200$ mm/s, 脉冲重复频率 $F_{PR}=15$ kHz, 电流 $I=7$ A, 打标次数 $N=28$ 次。

2) 水蒸气透过性。参照马清华等^[15]的方法, 测

试温度为 38 ℃, 相对湿度为 90%。由于每组薄膜的激光参数与打孔数量都一致, 所以选择条形打孔组作为水蒸气透过量的测试组。

3) 氧气透过性。参照王洋样等^[16]的方法并稍作修改, 裁取直径为 100 mm 的圆形 TPU 样品, 测试温度为 23 ℃、相对湿度为 50%。每组 3 个平行试样, 取平均值。

1.2.3 纸浆模塑力学性能测试

1) 压缩性能。将组装后的纸浆模塑盒压缩葡萄最大直径的距离, 即可得到最小支撑强度。根据 GB/T 4857.4—2008, 试验速度为 10 mm/min, 每组 5 个平行试样, 取平均值。

2) 循环加载性能。根据国家标准, 公路运输的堆码高度最高为 2.5 m, 通过循环压缩试验对纸浆模塑盒循环加载性能进行测试, 循环压缩试验速度采用 10 mm/min。

1.2.4 悬固包装效果验证

1) 触底测试。在 TPU 与葡萄接触面的背面涂抹不易干白胶, 将粘有 TPU 薄膜的纸浆模塑盒组装, 放入 500 g 葡萄, 调整跌落高度, 跌落后盒体内侧底面粘有白胶即为触底。

2) 跌落测试。根据 ASTM D4169-16, 利用重力作用做方向向下的自由落体, 模拟实际运输中包装件装卸搬运过程中的跌落冲击, 每组 3 个平行试样, 取平均值。

3) 葡萄落粒率。以固定高度对整穗葡萄进行跌落试验, 根据式 (2) 计算落粒率:

$$A = \frac{m_0}{M} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A 为落粒率, %; m_0 为落粒果实质量, g; M 为果实总质量, g。

4) 葡萄表面损伤指数。参照肖越等^[17]的方法, 按损伤的面积大小将果实划分为 4 级, 根据式 (3) 计算表面损伤指数。

$$B = \frac{\sum w \times n}{W \times N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: B 为表面损伤指数, %; w 为损伤级别,

mm; n 为该级果实数, mm; W 为最高损伤级别; N 为总果实数。

1.3 数据处理

数据采用 3 个或 3 个以上样本平均值, 通过 Origin 64 软件对数据进行绘图, 利用 Microsoft Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 26 软件处理数据。使用邓肯试验确定不同组之间的显著性, 以 $P < 0.05$ 判断结果差异是否显著。

2 结果与分析

2.1 TPU 力学与阻隔性能

力学性能是包装材料最主要的性能^[18]。如表 1 所示, 0.05 mm 的 TPU 薄膜弹性模量最大, 其余性能均显著最小 ($P < 0.05$); 0.08 mm 的 TPU 薄膜拉伸强度最大; 0.20 mm 的 TPU 薄膜断裂伸长率最大; 除了 0.05 mm 的 TPU 弹性回复率在 85.83%, 其余均在 92% 以上; 被修剪的果梗可能刺破薄膜, 测试了穿刺强度, 袋中袋的 PE 膜穿刺强度比 TPU 薄膜小 68.4%~89.9%。由于悬固包装主要通过薄膜将葡萄悬空紧固, 所以薄膜的拉伸强度和弹性回复率尤为重要^[11], 最终选择拉伸强度最大、弹性回复性能良好的 0.08 mm 的 TPU 薄膜。

对 0.08 mm 的 TPU 薄膜进行静态压缩试验以确定其承载能力。向下压缩 75 mm (纸浆模塑盒的高度) 后, 薄膜承受载荷为 113 N, 一串葡萄重约 5 N, 故其能满足支撑葡萄的要求。放入葡萄后, 薄膜位移在 35~55 mm, 此时葡萄受力大于 21 N, 受力过大将导致葡萄损伤, 需要将薄膜进行凹陷以减少薄膜对葡萄的挤压力。

果蔬包装要防止水分大量散失导致果蔬萎蔫, 避免水分大量积累出现结露从而加速果蔬腐败^[16, 19]。王洋样等^[16]对聚乳酸薄膜进行改性提高了其力学与透气透湿性能, 将葡萄的货架期延长至 30 d。如表 2 所示, 0.08 mm 的 TPU 薄膜氧气与水蒸气透过量分别比上述改性聚乳酸低 4.3% 和 26.7%。为达到更好的保鲜效果, 需要提高 TPU 薄膜的透气透湿性。

表 1 不同厚度 TPU 薄膜的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of TPU films of different thickness

厚度/mm	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	弹性回复率/%	穿刺强度/N
0.05	40.61±3.77 ^b	315.17±22.54 ^d	12.87±0.34 ^a	82.83±0.63 ^d	2.53±0.32 ^d
0.08	50.35±7.71 ^a	614.99±71.61 ^b	8.38±0.89 ^{bc}	94.58±0.38 ^b	4.63±0.45 ^c
0.10	43.80±3.77 ^{ab}	432.28±38.57 ^c	10.16±0.87 ^b	95.67±0.52 ^a	5.20±0.94 ^c
0.15	46.57±9.10 ^{ab}	666.66±96.69 ^{ab}	7.24±2.40 ^{ab}	92.83±0.38 ^c	6.87±0.48 ^b
0.20	45.34±4.73 ^{ab}	715.25±50.04 ^a	6.36±0.71 ^d	92.41±0.14 ^c	8.70±0.76 ^a

注: 上标不同小写字母表示在同一列中显示出显著差异 ($P < 0.05$)。

表 2 薄膜的透气透湿性
Tab.2 Air and moisture permeability of film

薄膜	氧气透过量/ [cm ³ ·(m ² ·d·0.1 MPa) ⁻¹]	水蒸气透过量/ (g·m ⁻² ·d ⁻¹)
0.08 mm TPU	755.04±7.24	352.00±2.26

2.2 TPU 阻隔性优化筛选

为增加薄膜的透气透湿性, 扩散田间热和呼吸热, 采用紫外激光对 0.08 mm 的 TPU 薄膜打孔^[20]。如图 1a, 孔隙边缘整齐, 周围的熔融层使其不易开裂^[21]。打孔后 TPU 薄膜的水蒸气透过量提高, 更接近目前效果较好的改性聚乳酸薄膜的水蒸气透过量 (图 1b)。

在薄膜透气透湿性能一致的情况下, 孔隙排列方

式可能会对薄膜的力学性能造成影响。根据线条“横、竖、斜、曲”的类型, 设计了 4 种孔隙排列方式, 分别为条形、Z 形、工形和圆形, 打孔数量均为 30 个, 孔隙直径平均为 45 μm^[22]。由于取样尺寸的限制, 无法整体对打孔部分进行力学性能测试, 于是测试了打孔 TPU 薄膜中间和边缘部位的拉伸性能。在相同应变下, 打孔 TPU 薄膜承受应力均大于未打孔 TPU 薄膜; 打孔后 TPU 薄膜的拉伸强度下降了 14.5%~30.7%; 中间部位圆形孔 TPU 薄膜的拉伸强度与断裂伸长率在打孔 TPU 薄膜中最大, 其次为 Z 形孔 TPU 薄膜; 边缘部位 Z 形孔 TPU 薄膜的拉伸强度与断裂伸长率在打孔 TPU 薄膜中均最大 (图 2)。综上所述, 孔隙排列方式会对 TPU 薄膜的力学性能产生影响, 但仍有优良的力学性能, 其中力学性能综合较好的打孔排列方式为 Z 形。

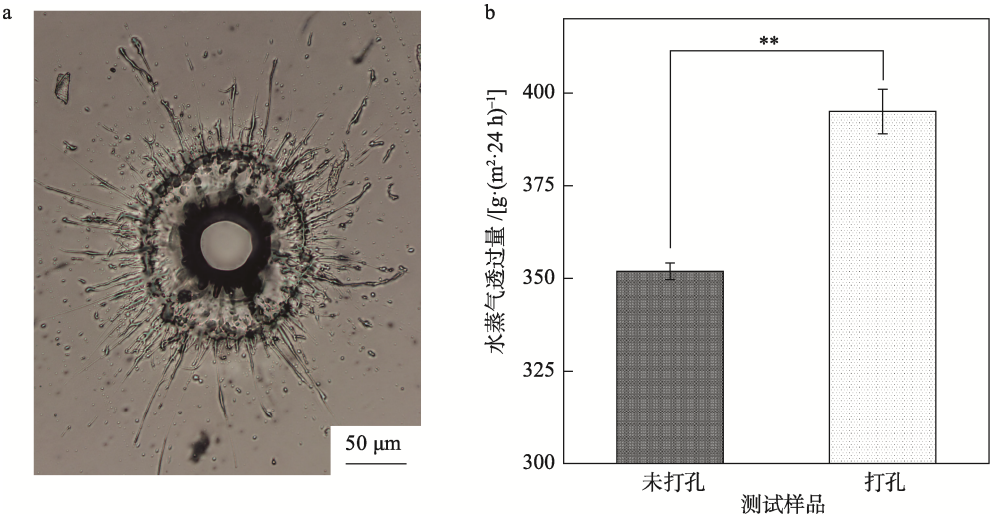


图 1 紫外激光打孔典型显微镜图像 (a) 和 TPU 打孔前后水蒸气透过量 (b)
Fig.1 Microscopic images of UV laser drilling (a) and water vapor permeability of TPU film before and after drilling (b)

注: **表示 $P<0.01$ 。

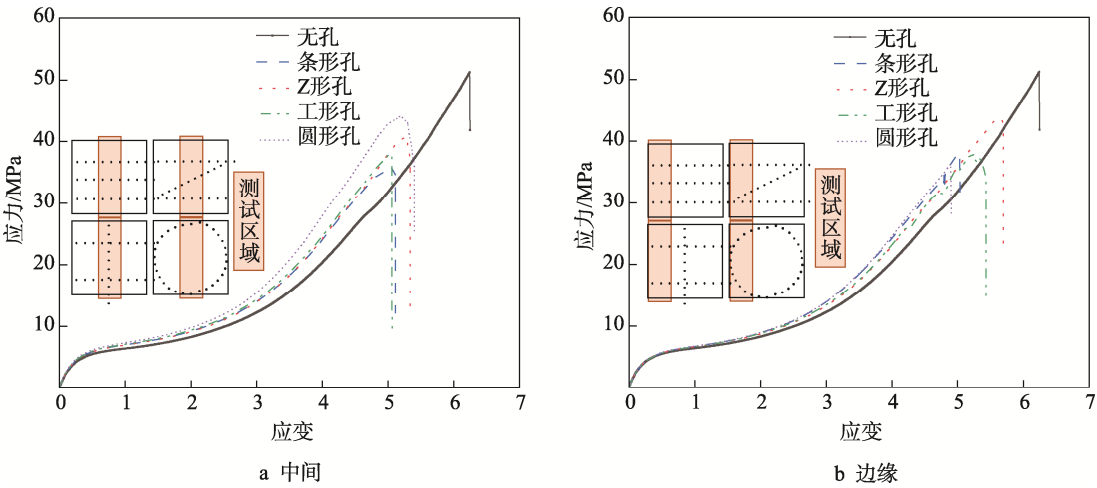


图 2 打孔 TPU 中间和边缘的拉伸性能
Fig.2 Tensile properties of the middle and edge of perforated TPU

对打孔后的 TPU 薄膜进行压缩试验,以测试其承载能力。如图 3 所示,向下压缩 75 mm 后,打孔 TPU 薄膜的压缩强度比未打孔 TPU 薄膜低 28%,但承受载荷大于葡萄重力 5 N,仍能达到要求;位移为 30~70 mm 时,Z 形孔和工形孔 TPU 薄膜承受载荷大于圆形孔和条形孔 TPU 薄膜;位移为 70~80 mm 时,Z 形孔 TPU 薄膜压缩强度略微高于其他打孔 TPU 薄膜。综合拉伸性能结果,筛选出力学性能较好的 Z 形孔 TPU 薄膜。

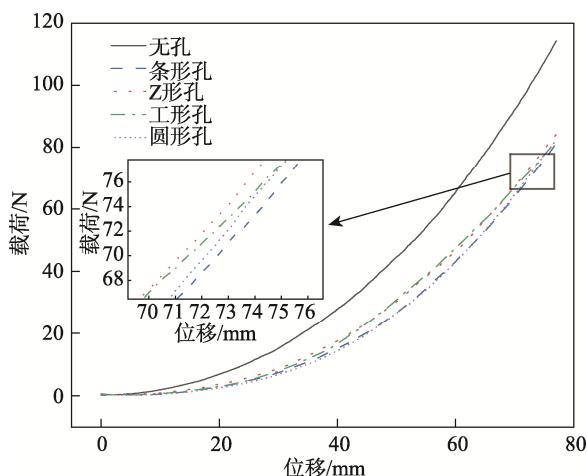


图 3 打孔 TPU 压缩性能
Fig.3 Compression performance of perforated TPU

2.3 纸浆模塑力学性能

通过压缩试验得到最小支撑强度^[23]。组装后的纸浆模塑盒承受的载荷下限为 400 N,同样尺寸的瓦楞纸箱压缩同样位移后的支撑强度为 248 N,比纸浆模塑盒低 29% (图 4a)。

对纸浆模塑盒进行循环加载以验证其缓冲性能^[24]。根据公路堆码高度最高为 2.5 m^[25]和包装件高度可得出最大堆码层数为 16 层,进而可得包装最大受力 78.4 N。在 78.4 N 的载荷下进行 20 次循环加载试验^[24],如图 4b 所示,循环加载 20 次后,纸浆模塑盒仍具有较好的支撑性与回弹性,循环加载重复度较好。

2.4 悬固包装结构设计效果验证

悬固包装由 TPU 薄膜、纸浆模塑盒和气柱组成。原理是处于拉伸状态的薄膜将葡萄紧固在中间,薄膜的高弹性和气柱缓冲冲击和振动,而跌落冲击是果品机械损伤的主要因素^[26],故根据 ASTM D4169-16,在 610 mm 的高度进行跌落测试。结果表明,袋中袋的葡萄落粒较少,损伤较大;加气柱的悬固包装的葡萄落粒和损伤明显改善,验证了气柱的有效性;Z 形孔 TPU 凹陷 2 cm 时,葡萄损伤较大,说明葡萄受挤压力较大,加大凹陷至 4 cm 后葡萄损伤明显减小,但落粒较多,说明葡萄受束缚力较小,缩小凹陷至 3 cm 后葡萄落粒明显减少。综上可知,“Z 形孔 TPU 凹陷

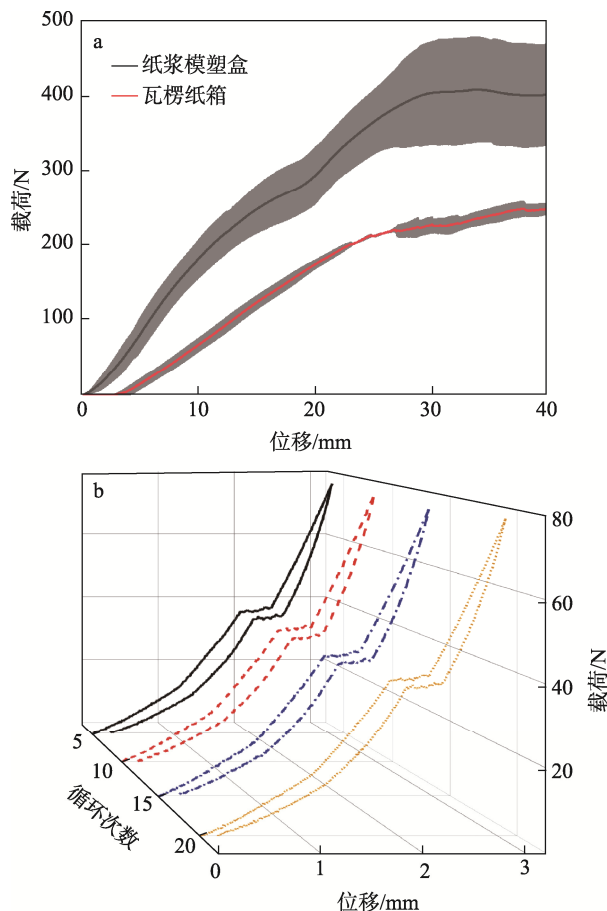


图 4 纸浆模塑盒与瓦楞纸箱压缩性能对比 (a) 和纸浆模塑盒的循环压缩性能 (b)
Fig.4 Comparison of compression performance between pulp molded box and corrugated box (a) and cyclic compression performance of pulp molded box (b)

3 cm + 气柱”的包装方式对葡萄保护效果较好。

运输过程中受到过大冲击力可能会导致葡萄触底,进而使其失去商品性^[27]。如图 5 所示,选用效果较好的凹陷 3 cm 的 Z 形孔 TPU 薄膜进行测试。根据标准要求跌落高度为 610 mm,0.08 mm 的 Z 形孔 TPU 薄膜触底高度为 750 mm,能达到要求。

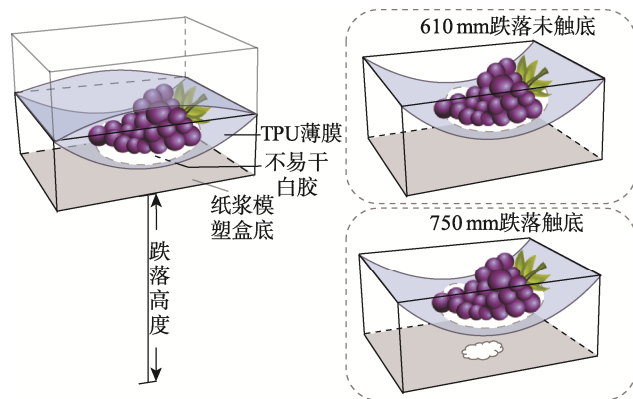


图 5 触底试验结果
Fig.5 Results of touch-down experiment

3 结语

本研究设计了一种由 TPU 与纸浆模塑组成的悬固包装, 通过对 TPU 薄膜优化设计使其对葡萄有更好的保护效果, 验证了悬固包装应用于鲜食葡萄的有效性。结果表明, “0.08 mm 的 Z 形孔 TPU 凹陷 3 cm + 气柱”的悬固包装对葡萄具有最佳保护性能。打孔后, TPU 薄膜的透湿性极显著提高 ($P < 0.01$)。所选纸浆模塑盒能抵抗 400 N 以上压力, 且循环压缩 20 次后仍有较好的回弹与支撑性。与袋中袋相比, 悬固包装的葡萄的表面损伤更少, 边缘放置气柱有更佳的保护效果。通过触底试验进一步验证凹陷 3 cm 的 Z 形孔 TPU 薄膜用于悬固包装的有效性。综合来看, 相较于袋中袋, 该悬固包装可显著降低果实损伤与落粒, 满足运输中跌落冲击的防护要求, 且操作方便, 可循环使用, 但该包装结构对葡萄实发寄递效果的影响还有待进一步优化验证。

参考文献:

- [1] SHI H, ZHOU W H, XU Y Y, et al. Effect of Calcium Spray at Flowering Combined with Post-Harvest 1-MCP Treatment on the Preservation of Grapes[J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): 19918.
- [2] 程赤云, 梁欣, 石伟伟, 等. 电商包装方式对水蜜桃运输缓冲防震及货架品质的影响[J]. *包装工程*, 2023, 44(3): 114-121.
CHENG C Y, LIANG X, SHI W W, et al. Effects of E-Commerce Packaging on Transportation Cushioning and Shelf Quality of Honey Peach[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(3): 114-121.
- [3] 黄瑞辉. 葡萄真空预冷影响因素的试验及传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 1.
HUANG R H. Experimental Study on Influencing Factors and Heat Transfer Characteristics of Vacuum Pre-cooling of Grapes[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021: 1.
- [4] LO'AY A A, EL-KHATEEB A Y. Impact of Chitosan/PVA with Salicylic Acid, Cell Wall Degrading Enzyme Activities and Berries Shattering of 'Thompson Seedless' Grape Vines during Shelf Life[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 238: 281-287.
- [5] CHAIWONG S, SAENGRAYAP R, RATTANAKARAN J, et al. Natural Rubber Latex Cushioning Packaging to Reduce Vibration Damage in Guava During Simulated Transportation[J]. *Postharvest Biology Technology*, 2023, 199: 112273.
- [6] 刘平, 高德政, 王春颖, 等. 鲜食葡萄袋中袋包装装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 376-384.
- [7] LIU P, GAO D Z, WANG C Y, et al. Design and Experiment of Bag-in-Bag Packaging Device for Fresh Grapes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 376-384.
- [8] YANG S P, LIU Z C. Reliability Analysis for Product Package Via Probability Density Function of Acceleration Random Response[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 0(0): 1-14.
- [9] 孟子涵, 陈爽爽, 姚卓楠, 等. 运输销售一体化的红酒包装结构设计研究[J]. *绿色包装*, 2023(8): 77-80.
MENG Z H, CHEN S S, YAO Z N, et al. Structural Design of Red Wine Packaging Integrating Transportation and Sales[J]. *Green Packaging*, 2023(8): 77-80.
- [10] CHEN T, XIE Y, WANG Z, et al. Recent Advances of Flexible Strain Sensors Based on Conductive Fillers and Thermoplastic Polyurethane Matrixes[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021, 3(11): 5317-5338.
- [11] ZHANG Y L, DUAN C, BOKKA S K, et al. Molded Fiber and Pulp Products as Green and Sustainable Alternatives to Plastics: A Mini Review[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2022, 7(1): 14-25.
- [12] 梁奕昆, 刘明, 傅秋佳, 等. 薄膜紧固包装设计与性能研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(13): 190-198.
LIANG Y K, LIU M, FU Q J, et al. Design and Performance of Film Fastening Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(13): 190-198.
- [13] BRIEN M, GENTRY J P, GIBSON R C. Vibrating Characteristics of Fruits as Related to In-Transit Injury[J]. *Transactions of the ASAE*, 1965, 8(2): 241-243.
- [14] GENTRY J P, MITCHELL F G, SOMMER N F. Engineering and Quality Aspects of Deciduous Fruits Packed by Volume-Filling and Hand-Placing Methods[J]. *Transactions of the ASAE*, 1965, 8(2): 584-585.
- [15] 梁飞飞, 王振亚, 王忠辉, 等. 水基聚氨酯回弹性与涂层耐磨性的关系研究[J]. *皮革科学与工程*, 2018, 28(6): 5-11.
LIANG F F, WANG Z Y, WANG Z H, et al. Study on the Relationship between Elasticity and Wear Resistance of Waterborne Polyurethane[J]. *Leather Science and Engineering*, 2018, 28(6): 5-11.
- [16] 马清华, 蔡铭, 谢春芳, 等. 聚乙烯醇基 SiO₂/TiO₂ 纳米包装膜制备及对双孢菇保鲜效果[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 182-187.
- [17] MA Q H, CAI M, XIE C F, et al. Evaluation of Polyvinyl Alcohol-Based SiO₂/TiO₂ Nanocomposite Films and Their Preservation Effect on Agaricus Bisporus[J].

- Food Science, 2020, 41(9): 182-187.
- [16] 王洋洋, 云雪艳, 周紫怡, 等. 微相分离结构对聚乳酸薄膜性能的调控及其在巨峰葡萄保鲜中的应用[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 228-237.
- WANG Y Y, YUN X Y, ZHOU Z Y, et al. Modulation of Poly(l-lactic acid) Films Properties by Microphase Separation Structure and Its Application in Preservation of Kyoho Grapes[J]. Materials Reports, 2023, 37(9): 228-237.
- [17] 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 Y, WU P, WANG S X, et al. Experimental Analysis of Dropping and Vibration Damage in Grapes Storage and Transportation[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 9-18.
- [18] SHAH Y A, BHATIA S, AL-HARRASI A, et al. Mechanical Properties of Protein-Based Food Packaging Materials[J]. Polymers, 2023, 15(7): 1724.
- [19] WU Y, XIAO K, ZHU L, et al. Preparation and Application of Equilibrium Modified Atmosphere Packaging Membranes with Polylactic Acid and Polymers of Intrinsic Microporosity[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 37: 101063.
- [20] WU C Y, LI M, HUANG Y, et al. Cutting of Polyethylene Terephthalate (PET) Film by 355 nm Nanosecond Laser[J]. Optics Laser Technology, 2021, 133: 106565.
- [21] RONG Y M, HUANG Y, LIN C R, et al. Stretchability Improvement of Flexible Electronics by Laser Micro-Drilling Array Holes in PDMS Film[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106307.
- [22] 蒋璇靓, 王南, 陈洪彬, 等. 激光微孔保鲜袋包装对采后荔枝果实的保鲜效应[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 124-130.
- JIANG X J, WANG N, CHEN H B, et al. Effect of Laser Microporous Film Packaging on the Postharvest Preservation of Litchi Fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 124-130.
- [23] WANG Z W, LI X F. Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products[J]. Materials and Design, 2014, 57: 598-607.
- [24] 阮丽. 缓冲材料性能及试验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 34-40.
- RUAN L. Performance and Experimental Study of Cushioning Materials[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 34-40.
- [25] 王成位. 公路运输中红酒瓶内衬结构缓冲特性分析与优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022: 12.
- WANG C W. Performance Analysis and Research of Red Wine Buffer Packaging[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022: 12.
- [26] 卢立新, 李春飞. 单层与多层苹果跌落冲击损伤研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 1-3.
- LU L X, LI C F. Research on Dropping Bruising of Single Layer and Multilayer Apples[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 1-3.
- [27] JUNG H M, LEE S, LEE W H, et al. Effect of Vibration Stress on Quality of Packaged Grapes during Transportation[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(2): 79-83.