

香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性

吴杰^{1,2}, 郭康权⁴, 葛云^{1,2}, 王艳云³

(1. 石河子大学机械与电气工程学院, 石河子 832003; 2. 教育部绿洲特色经济作物生产机械化工程研究中心, 石河子 832003;
3. 石河子大学水利与建筑工程学院, 石河子 832003; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 为了揭示梨果实的碰撞损伤机理, 该文采用 Prescale 感压胶片对香梨果实不同跌落高度与 4 种材料触件碰撞时的接触应力进行测量, 并分析了其分布规律, 确定接触应力分布与香梨果实损伤之间的关系。研究表明, 从 20~80 cm 跌落碰撞时, 香梨碰撞接触应力峰值为 0.5~0.6 MPa; 与钢板和胶合板碰撞, 接触应力呈正态分布, 应力面积接近损伤面积, 0.2~0.3 MPa 应力面积最高, 应力均值为 0.25~0.28 MPa; 与 EPE (聚乙烯发泡棉) 板和瓦楞纸板上低冲击水平下碰撞, 接触应力呈非正态分布特征, 应力面积与损伤面积相差较大, <0.2 MPa 应力分布面积很大, 应力均值为 0.18~0.25 MPa; 随着冲击水平提高, 香梨的接触应力峰值基本不变, 应力分布面积都呈线性增大, 在钢板和胶合板上的接触应力均值变化不显著, 但在 EPE 板和瓦楞纸板上的接触应力均值有较明显增大; 基于接触应力分布面积和应力均值对香梨损伤面积所建立的线性回归模型, 可对香梨碰撞损伤精确预测和评估。该研究可为梨果机械化作业和自动化处理装置的减损设计提供依据。

关键词: 果实, 跌落, 压力传感器, 碰撞, 接触应力分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.044

中图分类号: S12; O348

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0250-05

吴杰, 郭康权, 葛云, 等. 香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 250-254.
Wu Jie, Guo Kangquan, Ge Yun, et al. Contact pressure distribution characteristics of Korla pear fruit at moment of drop impact[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 250-254. (in Chinese with English abstract)

0 引言

梨果成熟后在整个流通链要经过采收、分级、包装、运输、贮藏及销售各作业环节, 在这些环节的机械化和自动化作业过程, 梨果不可避免会发生碰撞、振动和挤压等, 导致果实发生机械损伤而变质腐烂, 因此需要对梨果与各作业部件的接触力学特性进行研究, 以便梨果机械的减损优化设计。

果实机械损伤程度通常以果肉褐变部位的面积、体积、深度等进行经验性评价, 国内外文献报道多是研究冲击能与果实损伤体积的关系^[1-6]。然而, 损伤体积是果实内部损伤的度量, 实际情况下并不易观察和测度, 不利于实践中指导防损。相反, 果实表面可见的损伤面积却更有助于损伤程度判断, 也是果品外观品质分级的重要指标^[7-8]。因此, 基于梨果损伤面积, 进行梨果受载的力学特性分析和损伤评估预测, 对梨果机械防损和品质保持更具有实践指导价值。

果实受载时接触应力分布与损伤面积有直接关系, 是果实损伤规律研究的重要切入点。早期, 传统力学测试仪器还很难对复杂几何特征果实的接触应力分布进行测量, 只有采用 Hertz 弹性接触公式进行理论计算, 然而果实的各

向异性和粘弹特性使计算果误差很大^[9]。国外有研究分别采用 Tekscan[®]5051 柔性薄膜网格压力传感器^[10]和超声波技术^[11], 对苹果准静态压缩接触应力分布进行测量分析, 但还未见有关于果实动载接触应力分布测量分析的报道。随着微胶囊颗粒缓释控制技术 (particle size control, PSC) 快速发展, 最近美国和日本研制的压力感应胶片 (或称压敏片) 以非破坏式的力学测量方法, 实现了静载和动载条件下各种接触面间应力分布的测量分析, 并很快在医学的生物组织工程领域得到应用^[12-14], 2010 年有报道采用感压胶片对苹果挤压和碰撞时的接触应力和损伤关系进行研究分析^[15-16], 因此本文采用 Prescale 感压胶片对梨果实跌落碰撞的接触应力分布进行测量分析, 以探索梨果实的碰撞损伤机理, 实现梨果实机械损伤的可靠预测和评估。

1 材料与方法

1.1 梨果实取样

试样采自新疆库尔勒市大墩子乡果园的香梨, 采样期在 2010 年 9 月 21 日 (香梨成熟期), 果样确保无畸形、虫害、损伤、粗皮果和凸顶果, 香梨平均质量为 (110.13 ± 5.04) g, 采后迅速冷藏, 贮藏温度 -2~0°C, 相对湿度 85%~95%, 以备试验使用。

1.2 梨果实的跌落试验

如图 1 所示, 由空气压缩机产生文氏管 (Venturi) 效应, 真空发生器产生负压使吸盘吸附香梨试样, 然后旋转开关使香梨跌落, 使香梨赤道部与触件接触^[6]。香梨碰撞触件采取钢板、胶合板、瓦楞纸板和 EPE (聚乙烯发泡棉)

收稿日期: 2011-06-02 修订日期: 2011-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31160335); 石河子大学科学技术研究发展计划“自然科学与技术创新项目”一般项目 (ZRKX2009YB04)

作者简介: 吴杰 (1972-), 男, 河南许昌人, 副教授, 博士, 主要从事农产品品质安全研究。石河子 石河子大学机械与电气工程学院, 832003。

Email: wjshz@126.com

板 4 种材料（见表 1），其中瓦楞纸板为单瓦 3 层，瓦楞齿形 UV 型，A 型楞型；跌落高度分为 20、40、60 和 80 cm。对于缓冲材料瓦楞纸板和 EPE 板，每次跌落试验后必须更换，以保证触件材料缓冲性能的一致性。Prescale®感压胶片（Fuji 公司，日本）放置于触件表面，每一高度跌落碰撞接触试验重复 5 次，测量香梨的碰撞接触应力分布。

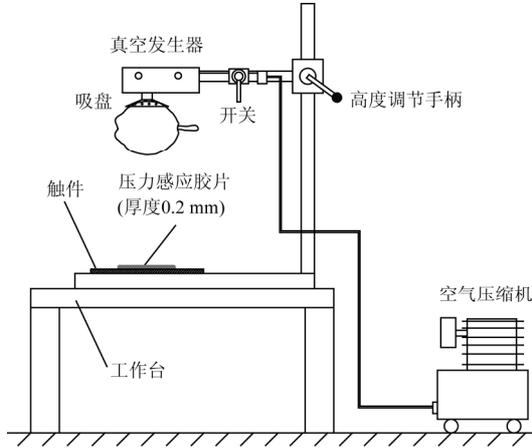


图 1 梨果实跌落碰撞测试系统

Fig.1 Test apparatus of drop impact for pear fruit

表 1 触件的材料特性

Table 1 Material properties of impact contact part

材料类型	厚度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
钢板	5	7.8	210	0.3
胶合板	10	0.86	1.9(E ₂)	0.345
瓦楞纸板	4.5	0.19	0.0026(E ₂)	0.1
聚乙烯发泡棉 (EPE) 板	5	0.031	0.003	0

注：E₂表示各向异性材料的纵向弹性模量

1.3 感压胶片的测量原理及方法

通过预备试验测试，本研究确定采用 Prescale®双层特超低压胶片（LLLW 型，测量范围 0.2~0.6 MPa，测试精度为 ≤±10%）。测量原理如图 2 所示，发色胶片上涂有微胶囊颗粒的发色剂层，发色剂层中不同的微胶囊对应不同压力水平，显色胶片涂有显色剂层，测试时两胶片贴合。当施加压力后，施压区域内色囊破裂释放发色材料，然后被显色剂层材料吸收并发生化学反应，显出不同浓度的红色^[17]。

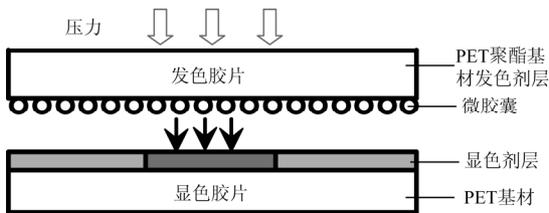


图 2 压力感应胶片的压力成色原理图

Fig.2 Coloring mechanism of pressure-sensitive film

测试时，环境温度保持 20~35℃，相对湿度保持 35%~85%。测试后的胶片采用 Perfection™ V300 Photo 型 CCD（电荷耦合器件）专用扫描仪（Epson 公司，日本）

和颜色校正板读取接触应力分布的特征图，图像分辨率为 0.125（200 dpi），然后经配套的 FD-8010E 压力图像数字测量分析系统 V2.0（Fuji 公司，日本）进行数值解析，获得接触应力峰值、均值及应力分布面积等参数。

1.4 果实损伤测量方法

香梨跌落碰撞后，在室温环境放置 24 h 以上充分褐变。梨果实近似为椭球体，因此香梨损伤区域近似为椭圆形，则损伤面积可由下式测量计算

$$A = \pi ab \quad (1)$$

式中，A 为梨果实损伤褐变面积，mm²；a, b 分别为梨果实椭圆形损伤区域的长短轴，mm。

2 结果与分析

2.1 梨跌落碰撞的损伤规律

如图 3 所示，香梨分别与钢板、胶合板、瓦楞纸板和 EPE 板碰撞，香梨的损伤面积随着跌落高度增加呈线性增大趋势。当跌落高度在 20 cm 以上时，香梨在钢板和胶合板上都会发生碰撞损伤；对于具有缓冲性能的瓦楞纸板和 EPE 板，香梨在瓦楞纸板上碰撞的损伤面积比 EPE 板上略高，但差异不显著（p<0.05）；只有跌落高度超过 40 cm 时，香梨才会出现明显损伤，而且其损伤面积也远远低于在钢板等非缓冲性材料上的碰撞损伤面积。这意味着，不同材料的缓冲性能差异所造成香梨损伤面积的差异，很可能与香梨接触应力的大小及其分布面积有直接关系。

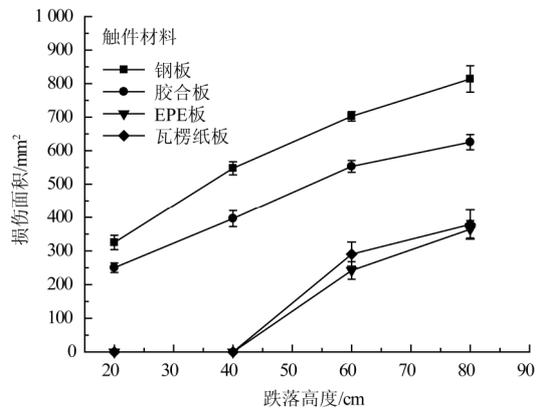


图 3 梨在 4 种触件上碰撞损伤面积与跌落高度的关系

Fig.3 Relationship between impact bruise area and drop heights of pear against four counterfaces

2.2 梨碰撞接触应力分布特性

2.2.1 梨碰撞接触应力分布特征

如图 4 所示，香梨与缓冲性能较差的钢板和胶合板碰撞时，接触应力分布轮廓接近椭圆形，但是与缓冲材料瓦楞纸板和 EPE 板碰撞时，接触应力分布的轮廓边缘极不规则，呈放射状。接触应力峰值分布在临近接触中心的区域且不连续，在钢板和胶合板上碰撞，低应力（≤0.2 MPa）主要在边缘分布，而且面积很小；香梨在瓦楞纸板和 EPE 板 2 种缓冲材料上低于 40 cm 高度跌落碰撞时不发生损伤时，低应力占主要面积，但随着跌落高度增大，香梨开始发生损伤，≤0.2 MPa 的低应力的分布面

积明显减小, 并逐渐趋于边缘分布。这表明, 0.2 MPa 这一应力值可能低于香梨果肉组织破坏的临界应力。

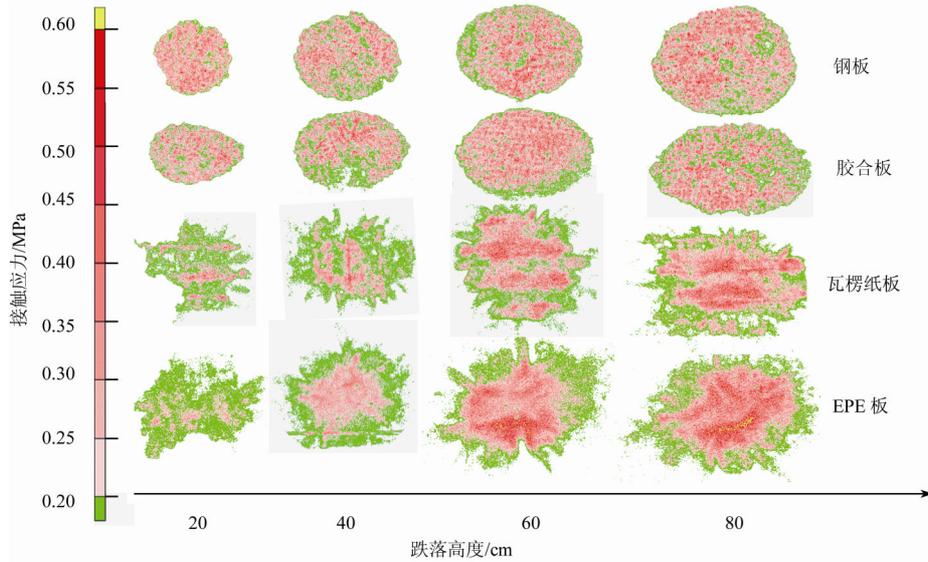
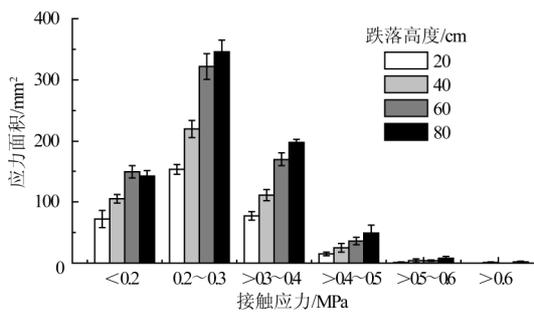


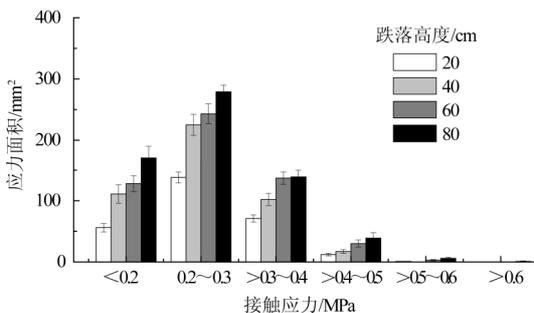
图 4 香梨不同高度跌落与 4 种触件碰撞的典型应力分布图

Fig.4 Typical pressure distribution diagram for Korla pear impacts against four counterfaces at four drop heights

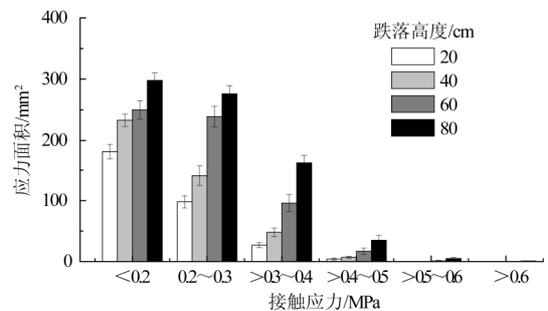
从图 5 可看出, 香梨与各触件不同高度跌落碰撞时, 0.1~0.4 MPa 范围的接触应力占主要面积, 其中香梨与钢板和胶合板碰撞时, 接触应力具有正态分布的特征, 分布面积最高的应力为 0.2~0.3 MPa, 对香梨损伤起主要贡献; 与之相比, 香梨在瓦楞纸板和 EPE 板上碰撞的接触应力不具有正态分布特点, <0.2 MPa 应力的分布面积最大, 所以香梨在缓冲材料上碰撞的损伤面积也就很小。此外, >0.6MPa 的接触应力面积非常小, 仅为 2~11 mm², 几乎可以忽略不计, 因此接触应力峰值通常在 0.5~0.6 MPa 范围, 由于其所占面积也很小, 显然不是造成香梨损伤的主要应力。



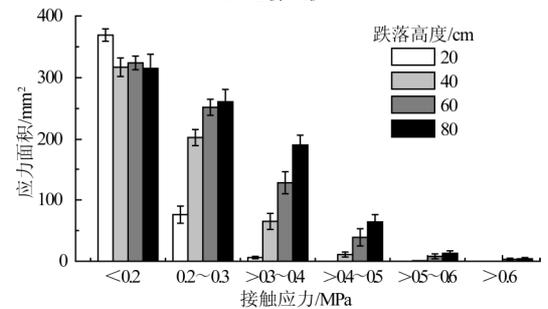
a. 钢板



b. 胶合板



c. 瓦楞纸板



d. EPE 板

图 5 梨与 4 种触件碰撞的接触应力分布

Fig.5 Contact pressure distribution of pear against four counterfaces

2.2.2 梨碰撞接触应力分布面积和应力均值

从图 6 可看出, 香梨同一高度跌落, 在不同触件上接触应力分布面积由高到低依次为: EPE 板、瓦楞纸板、钢板和胶合板。香梨在钢板和胶合板上碰撞的应力面积是果肉变形的结果, 接近损伤面积; 相反, 香梨在 EPE 板和瓦楞纸板上的应力面积较高, 但其损伤面积却最小, 甚至不发生损伤, 原因是 EPE 板通过自身较大的变形扩大与香梨接触面积, 以吸收冲击能减轻香梨的损伤程度。由此可见, 香梨接触应力面积在刚性材料和缓冲材料上变化的机制不同, 从而导致香梨损伤程度竟完全不同。

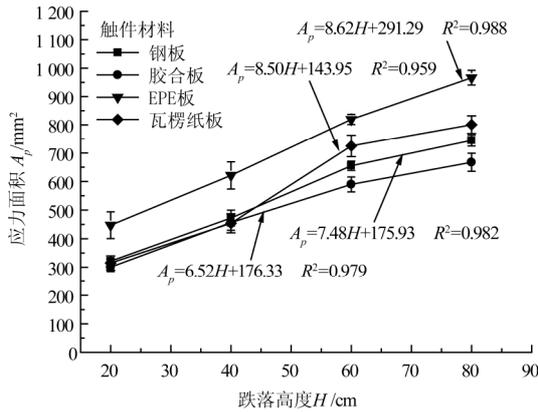


图 6 梨在 4 种触件上碰撞接触应力面积与跌落高度的关系
Fig.6 Relationship between contact pressure area and drop heights for pear impacts against four counterfaces

由图 6 表明，香梨与各触件材料碰撞的接触应力分布面积 A_p 与跌落高度 H 的关系呈高度线性正相关，决定系数 R^2 均大于 0.95。

由图 7 所示，香梨在钢板和胶合板上碰撞的接触应力均值差异不显著，在钢板上的略高，应力均值范围 0.25~0.28 MPa，随跌落高度增大，应力均值增大的趋势不明显；在较低冲击水平下，香梨在瓦楞纸板和 EPE 板上接触应力均值明显低于钢板和胶合板上的应力均值，且随跌落高度增大呈较为明显的增大趋势，其应力均值范围 0.18~0.25 MPa。接触应力均值在刚性材料和触件材料上所表现出的显著差异表明，应力均值与香梨的损伤面积存在一定关联。

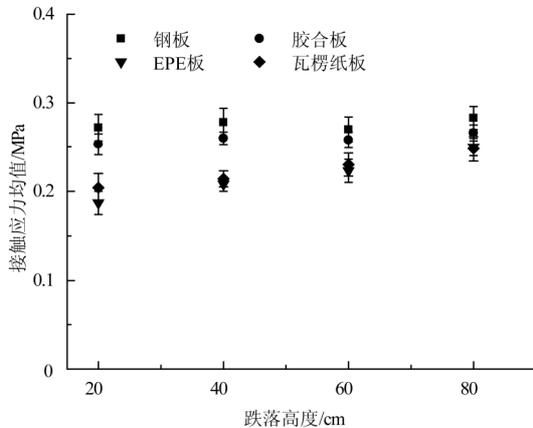


图 7 梨在 4 种触件上碰撞接触应力均值与跌落高度的关系
Fig.7 Relationship between average contact pressure and drop heights for pear impacts against four counterfaces

2.3 梨碰撞接触应力分布与损伤的关系

根据上述分析，香梨接触应力均值 P 及应力分布面积 A_p 与香梨的损伤面积存在相关性。香梨碰撞接触应力均值与应力分布面积的乘积即碰撞冲击力

$$F = A_p \times P \quad (2)$$

式中， F 为梨碰撞时的冲击力，N； A_p 为梨接触应力面积， mm^2 ； P 为梨接触应力均值，MPa。

表 2 所示为冲击力与香梨损伤面积的线性拟合关系，拟合结果表明，香梨在钢板和胶合板上碰撞的冲击力与香梨损伤面积之间具有高度线性相关性，决定系数 $R^2 \geq 0.94$ ；

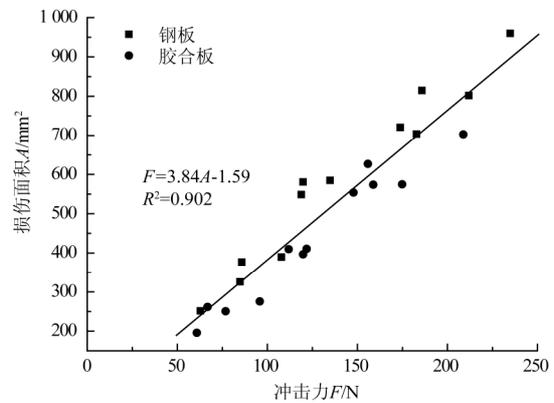
香梨在瓦楞纸板和 EPE 板上碰撞的力与香梨的损伤面积之间也存在较高的线性相关性，决定系数 R^2 接近 0.90。

表 2 梨在不同触件材料上碰撞的损伤面积与冲击力关系
Table2 Relationship between bruise area and impact force for pear against four counterfaces

触件材料	损伤面积的回归方程	R^2
钢板	$A = 3.93 \times P \times A_p + 29.43$	0.95
胶合板	$A = 3.58 \times P \times A_p - 12.27$	0.94
EPE 板	$A = 3.24 \times P \times A_p - 390.44$	0.89
瓦楞纸板	$A = 1.48 \times P \times A_p - 12.27$	0.90

注： A_p 为梨接触应力面积， mm^2 ； P 为梨接触应力均值，MPa； A 为梨损伤面积， mm^2 。

由于香梨在 EPE 板和瓦楞纸板上碰撞接触应力分布面积与损伤实测面积相差很大，因此如果对所有触件材料上的香梨碰撞损伤面积与其冲击力之间数据进行线性回归，决定系数很低，不会具有一个普遍适用的回归模型。但是，仅对钢板和胶合板上所有碰撞损伤数据进行线性拟合，损伤面积预测的决定系数 R^2 可达 0.90 以上（见图 8），能较为准确地评估和预测香梨在刚性材料上的碰撞损伤程度。



注： F 为梨碰撞时的冲击力，N； A 为梨损伤面积 mm^2 。

图 8 梨在钢板和胶合板上碰撞的冲击力与损伤面积的关系
Fig.8 Relationship between impact force and bruise area for pear impacts against steel and plywood

3 结论

1) 香梨与钢板和胶合板碰撞，接触应力分布轮廓为近椭圆形，应力分布面积接近损伤面积，以 0.2~0.4 MPa 范围的接触应力为主， ≤ 0.2 MPa 的低应力在边缘分布且面积极小；与 EPE 板和瓦楞纸板碰撞，接触应力分布轮廓边缘呈放射状特征，在低冲击水平下，应力分布面积远高于损伤面积， ≤ 0.2 MPa 的低应力面积很大。

2) 香梨不同条件下碰撞时，接触应力峰值均为 0.5~0.6 MPa 且分布面积很小，与损伤关系不大。与钢板和胶合板碰撞，应力呈正态分布特征，应力均值为 0.25~0.28 MPa，0.2~0.3 MPa 应力面积最高，对香梨损伤起主要贡献；在瓦楞纸板和 EPE 板上碰撞，应力非正态分布，应力均值为 0.18~0.25 MPa， < 0.2 MPa 应力的分布面积最大。

3) 随着跌落高度增大，香梨的接触应力峰值基本不变，应力分布面积都呈线性增大，在钢板和胶合板上的接触应力均值变化不显著，但在 EPE 板和瓦楞纸板上的接触应力均值有较为明显的增大趋势。

4) 香梨的碰撞损伤与接触应力分布面积与应力均值的乘积，即碰撞冲击力有直接关系，根据接触应力分布

面积和应力均值建立的梨损伤面积的线性回归模型,可实现梨碰撞损伤精确预测和评估。

致谢: 本文研究过程中, 石河子大学王维新教授为试验条件提供大力支持和帮助, 谨此致以衷心的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 王剑平, 王俊, 陈善锋, 等. 黄花梨的撞击力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 32—35.
Wang Jianping, Wang Jun, Chen Shanfeng, et al. Impact characteristics of Huanghua pear[J]. Transaction of the CSAE, 2002, 18(6): 32—35. (in Chinese with English abstract)
- [2] Blahovec J, Mareš V, Paprštejn F. Static and dynamic tests of pear bruise sensitivity[J]. Res Agr Eng, 2004, 50(2): 54—60.
- [3] Yurtluy B, Erdođan D. Effect of storage time on some mechanical properties and bruise susceptibility of pears and apples[J]. Turk J Agric For, 2005, 29(6): 469—482.
- [4] 曹海燕, 卢立新. 梨果实跌落冲击特性与流变模型[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(4): 11—14.
Cao Haiyan, Lu Lixin. The dropping impact behavior and rheological model of pear[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2007, 26(4): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [5] 卢立新, 王志伟. 跌落冲击下果实动态本构模型的构建与表征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 238—241.
Lu Lixin, Wang Zhiwei. Dynamic nonlinear viscoelastic model for the fruits under dropping impact[J]. Transaction of the CSAE, 2007, 23(4): 238—241. (in Chinese with English abstract)
- [6] 连振昌, 洪混佑. 苹果碰撞损伤之研究[J]. 农业机械学刊, 2007, 16(1): 49—60.
Lian Zhenchang, Hong Huangyou. The study of bruise damage for apple[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2007, 16(1): 49—60. (in Chinese with English abstract)
- [7] Van Zeebroeck M, Van linden V, Ramon H, et al. Impact damage of apples during transport and handling[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(2): 157—167.
- [8] 魏闻东. 鲜食梨[M]. 郑州: 河南科技出版社, 2005: 76—77.
- [9] 周祖镠. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 47—49.
- [10] Herold B, Geyer M, Studman C J. Fruit contact pressure distributions-equipment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(3): 167—179.
- [11] Lewis R, Yoxall A, Marshall L A, et al. Characterising pressure and bruising in apple fruit[J]. Wear, 2008, 264(1/2): 37—46.
- [12] Bachus K N, DeMarcoa A L, Judd K T, et al. Measuring contact area, force, and pressure for bioengineering applications: using Fuji film and TekScan systems[J]. Medical Engineering and Physics, 2006, 28(5): 483—488.
- [13] 司洪祥, 樊仕才, 徐艳军. 压敏片测量离体颈椎后路钢板固定术后关节突关节内压力的变化[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(26): 5125—5128.
Si Hongxiang, Fan Shicai, Xu Yanjun. Pressure variety of the facet joint using pressure sensitive film after cervical spine posterior fixation[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2007, 11(26): 5125—5128. (in Chinese with English abstract)
- [14] 颜冰, 王和鸣. 膝半月板载荷的压敏片测量[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2010, 18(2): 1—2.
Yan Bing, Wang Heming. Measurement of stress on the meniscus using pressure-sensitive film[J]. Chinese J Trad Med Traum and Orthop, 2010, 18(2): 1—2. (in Chinese with English abstract)
- [15] Lu F, Ishikawa Y, Kitazawa H, et al. Impact damage to apple fruits in commercial corrugated fiberboard box packaging evaluated by the pressure-sensitive film technique[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2010, 8(2): 132—136.
- [16] Lu F, Ishikawa Y, Kitazawa H, et al. Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 614—620.
- [17] FujiFilm Corporation. Operation Manual-Fujifilm Pressure Distribution Mapping System for Prescale[Z]. 2008.

Contact pressure distribution characteristics of Korla pear fruit at moment of drop impact

Wu Jie^{1,2}, Guo Kangquan⁴, Ge Yun^{1,2}, Wang Yanyun³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Research Center of Oasis Agricultural Mechanization, Ministry of Education, Shihezi 832003, China; 3. College of Hydraulic and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to understand the impact damage mechanism of Korla pear fruit, the contact pressure characteristics of Korla pear impacts against four counterfaces at varied drop heights were measured using prescale® pressure sensitive film, the distribution was analyzed and then the relationship between bruising area of Korla pear fruit and contact pressure distributions was determined. The results showed that the peak of contact pressure was 0.5-0.6 MPa for Korla pear impacting against four counterfaces. For Korla pears against steel and plywood surfaces, the pressures tended to a normal distribution with relative small pressure area which approximated to bruising area. Additional, the 0.2-0.3 MPa pressure covered largest area and the average pressure was 0.25-0.28 MPa. In the case of pear dropping onto expanded polyethylene (EPE) and corrugated board at low impact level, the pressures did not conformed to normal distribution and the pressure area was much larger than bruise area of pear. Also, it was founded that the pressure below 0.2 MPa was in larger area and the average pressure was 0.18-0.25 MPa for pear contacts with these cushion materials. With the increasing of the impact level, the pressure area increased linearly. The average pressure changed insignificantly for pear dropped onto rigid materials but tended to increase for impacts against cushion materials when impact level was increased. The linear regress models fitted by the production of pressure area and average pressure can exactly predicate and assess Korla pear bruise area. It provides a reference for designing the mechanized and automated equipment to reduce likelihood of pear bruising occurring.

Key words: fruits, drop, pressure sensors, impact, contact pressure distribution