

香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的接触应力分布分析及损伤预测

孙慧杰, 吴杰, 冯哲, 王翌鹏

(石河子大学机械电气工程学院, 教育部绿洲特色经济作物生产机械化工程研究中心, 新疆石河子 832003)

摘要: 为了实现香梨果实跌落碰撞时损伤面积的准确评估和预测, 本研究采用 Prescale 感压胶片对香梨与瓦楞纸板不同高度跌落碰撞下的接触应力分布进行测量分析, 探讨接触应力分布与损伤面积的关系, 确定了最接近损伤面积的应力面积范围。并在此基础上采用有限元模拟方法对香梨碰撞瓦楞纸板的损伤面积进行预测分析。研究结果表明, 感压胶片测量的接触应力分布中 $>0.20\text{MPa}$ 范围的应力面积与损伤面积最为接近, 相对误差率平均为 6.81%。当该应力范围应用于有限元模拟的损伤面积预测时, 香梨损伤面积的预测值略高于实际损伤面积, 损伤预测的相对误差率平均约为 13.29%, 显著提高了预测精度, 实现了有限元法对香梨与瓦楞纸板跌落碰撞损伤面积的较准确地预测, 为今后香梨机械化作业中减损设计提供了研究基础。

关键词: 库尔勒香梨; 瓦楞纸板; 跌落碰撞; 接触应力分布; 有限元法; 损伤预测

文章编号: 1673-9078(2014)2-48-52

Contact Stress of Drop Impact to Corrugated Board and Damage Predication for Korla Pear

SUN Hui-jie, WU Jie, FENG Zhe, WANG Zhao-peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Research Center of Oasis Agricultural Mechanization, Ministry of Education, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to predict damage area of Korla pear after drop impact accurately, the contact stress characteristics for Korla pear impacts against corrugated board at varied drop heights were measured using pressure-sensitive film. Meanwhile, the relationship between the area occupied by the pressure and damage area was investigated and the range of stress area that closed to the damage area was determined. Furthermore, the finite element analysis (FEA) was used to predicate the damage area for Korla pear impact. The film measurements showed that the stress area more than 0.20 MPa was well approximate to the damage area, and the relative error rate was around 6.81%. When the above-mentioned contact stress range was applied to pear model of FEA for estimation of damage area, the predict value was slightly higher than actual one and the relative error rate was around 13.29%. Therefore, the results can provide data for damage predication of Korla pear packaged in corrugated board and ,the design of packing tools thereby reducing the damage occurring.

Key words: Korla pear; corrugated board; drop impact; contact pressure distribution; finite element analysis; bruising predication

成熟香梨在采摘、分级、包装等多个环节都需要实现机械化和自动化作业, 然而这些作业环节不可避免出现香梨与接触材料碰撞而导致损伤。瓦楞纸板作为贮运过程常用的减损包装材料, 也常被用作梨果自动分级包装的缓冲材料。在梨果输送至自动包装生产线的入口或出口处, 存在落高会发生果品与瓦楞纸板碰撞损伤^[1], 而鲜梨果在等级分类标准中规定^[2]: 特

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160335)

作者简介: 孙慧杰 (1987-), 男, 硕士, 研究方向为农产品品质安全

通信作者: 吴杰 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向为农产品品质安全与检测

级果无碰压伤, 一级果碰压面积 $\leq 50\text{mm}^2$, 二级果碰压面积 $\leq 100\text{mm}^2$ 。因此, 有必要研究香梨与瓦楞纸板碰撞的损伤面积变化规律, 为香梨自动化和机械化作业过程减损工艺设计和包装优化提供依据。

研究表明, 梨果表面的碰压面积与其受载时接触应力分布有直接的关系^[3-4], 早期, 采用 Hertz 弹性接触公式进行理论计算, 但是果实的粘弹特性使接触应力分布的 Hertz 公式计算误差较大^[5]。由于瓦楞纸板所具有各向异性的力学性能, 也给果实与其接触碰撞时应力分布的精确计算带来更大困难。近年来, Lewis 采用有限元法模拟了苹果与单层瓦楞纸板碰撞的接触应力分布, 但是各向同性的假设使其碰撞损伤预测误

差偏高, 相对误差为 26%^[6]。最近, 有研究利用感压胶片技术成功实现了梨果跌落碰撞时接触应力分布的测量分析^[7-8], 但是对梨果与瓦楞纸板碰撞的应力面积和损伤面积的关系尚缺乏深入探讨, 无法为梨果碰撞模拟的损伤面积准确预测提供指导。为此, 本研究中采用感压胶片对香梨与瓦楞纸板碰撞的接触应力分布特性进行测量分析, 探讨损伤面积和应力面积之间的关系, 并在此基础上进一步采用有限元法模拟分析香梨与瓦楞纸板碰撞时的接触应力分布, 以实现香梨与瓦楞纸板碰撞损伤的精确预测。

1 材料与方法

1.1 材料

库尔勒香梨: 采自新疆库尔勒市大墩子乡果园, 采样期为 2012 年 11 月 15 日, 香梨试样确保无畸形、虫害和损伤, 其基本物性如表 1 所示。采摘后迅速冷藏, 冷藏温度设定为-2~0 °C, 相对湿度为 85~90%, 试验前, 香梨在 20 °C 常温下放置 24 h。

表 1 香梨试样的基本物性参数

Table 1 Material properties of Korla pear sample

参数	平均值	标准误差
曲率半径/mm	30.25	4.28
单果质量/g	110.17	4.02
带皮坚实度/N	81.11	4.23
可溶固形物/°Brix	10.64	0.48
含水率/%	87.62	0.56

1.2 方法

1.2.1 瓦楞纸板的选取

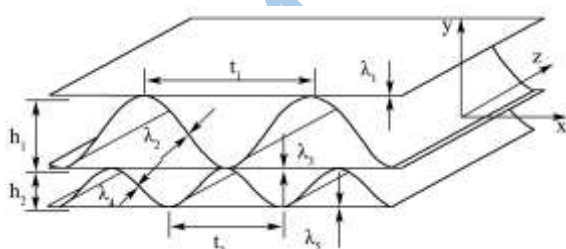


图 1 测试用瓦楞纸板

Fig.1 Corrugated board used in impact testing

表 2 测试用瓦楞纸板几何尺寸

Table 2 Geometrical characteristics of corrugated board used in testing

参数	h_1	h_2	t_1	t_2	$\lambda_1-\lambda_5$
尺寸/mm	4.30	2.53	8.35	5.86	0.26

本次试验瓦楞纸板选取双瓦楞, 由三层面纸和两层芯纸组成(见图 1), 瓦楞齿形为 UV 型, 楞型为

AB 型, 其主要几何尺寸及材料特性如表 2 所示^[9]。

1.2.2 跌落碰撞试验



图 2 香梨跌落碰撞测试装置

Fig.2 Test apparatus for drop impact of Korla pear

香梨跌落碰撞装置如图 2 所示, 通过真空泵产生负压使吸盘稳固吸附香梨, 开关关闭, 负压消失, 香梨试样自由跌落, 与刚性跌落台上的瓦楞纸板发生碰撞。碰撞后迅速抓取反弹香梨以防止二次碰撞。瓦楞纸板与钢板良好固定, 每次碰撞后更换, 以保证瓦楞纸板力学性能一致。根据梨果作业环节中潜在的跌落高度范围, 选取 8 个跌落高度, 即: 10、15、20、30、40、60、80、100 cm^[6], 每一跌落试验重复 5 次。碰撞后的试样在室温下放置 7 d (168 h) 使接触位置充分褐变, 损伤面积采用 Mohsenin 提出的针对果蔬材料瘀伤测量方法进行计算^[10]。

1.2.3 接触应力分布的测量

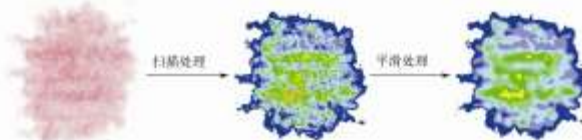


图 3 香梨碰撞接触应力分布图的处理

Fig.3 Mapping of Fuji film pressure distribution for Korla pear impact

选择 Fuji 公司的 Prescale ® LLLW 型双层特超低压胶片(测量范围 0.20~0.60 MPa, 测试精度为 $\pm 10\%$), 将其放置在接触材料表面, 如图 3 示, 碰撞后的感压胶片采用 Perfection™ V300 Photo 型 CCD 专用扫描仪(Epson 公司, 日本)扫描, 经颜色校正板校正后获取接触应力分布特征图, 最后通过配套的 FPD-8010E 压力图像数字测量分析系统 V2.0 进行数值解析以及平滑处理, 获得接触应力分布面积和接触应力分布图像的平滑处理图。

1.2.4 香梨跌落碰撞的有限元模拟

1.2.4.1 实体模型的建立及网格划分

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行实体建模, 其中香梨实体建模参考文献^[11]方法, 视香梨为各向同性的线弹性体, 单元类型选取实体单元 Solid164。瓦楞纸板建模参考文献^[12]的方法, 将瓦楞芯层截面轮廓形

状近似认为是正弦曲线，建立由芯层和面层构成的瓦楞纸板模型，假设瓦楞纸板为各向异性的线弹性体，单元类型选择壳单元 Shell163。利用映射网格分别将香梨实体和瓦楞纸板实体划分为六面体单元和四边形单元，其中香梨设定网格最大边界 3 mm，将其划分为 34178 个单元；瓦楞纸板设定网格最大边界为 4 mm，将其划分为 23670 个单元。香梨与瓦楞纸板的材料特性分别如表 3 和表 4 所示^[11-12]。

表 3 香梨试样特性

Table 3 Material properties of Korla pear

材料	密度/(g/mm ³)	弹性模量/MPa	泊松比
香梨	0.94×10 ⁻³	2.50	0.71

表 4 瓦楞纸板材料特性值

Table 4 Material parameters of corrugated board

项目	面层	芯层
ρ/(g/mm ³)	0.19×10 ⁻³	0.19×10 ⁻³
E _x /MPa	7600	5400
E _y /MPa	38	27
E _z /MPa	4020	2280
V _{xy}	0.01	0.01
V _{yz}	0.01	0.01
V _{xz}	0.34	0.34
G _{xy} /MPa	20	20
G _{yz} /MPa	70	65
G _{xz} /MPa	2140	1360

1.2.4.2 香梨跌落碰撞模拟

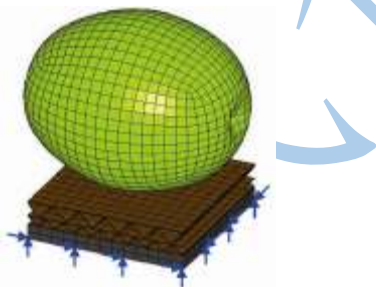


图 4 香梨跌落碰撞有限元模型

Fig.4 Finite element model of Korla pear and impact surface

图 4 所示为香梨跌落碰撞的有限元模型。模拟香梨与瓦楞纸板碰撞时，采用面面接触，香梨表面为目标面，约束钢板下表面所有自由度。碰撞模拟过程中，为了减少 CPU 计算时间，根据不同跌落高度定义香梨与瓦楞纸板碰撞瞬间的初速度。

1.2.4.3 香梨跌落碰撞求解

香梨跌落碰撞模拟分析时，香梨失效的等效应力遵循 Von-Mises 屈服准则，即当应力达到某一极限值时，材料发生屈服破坏，破坏条件为^[13]：

$$\sigma_e = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

注：σ_e 为等效应力，等价于材料的屈服点，是应力张量分量的标量函数，MPa；σ₁，σ₂，σ₃ 分别表示作用于材料无剪应力的主平面上 x，y，z 3 个方向的应力，MPa。

1.3 数据分析和作图

每个试验数据重复 5 次，采用 Origin8.0 软件进行数据处理和作图，数据结果采用均值±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 香梨跌落碰撞接触应力分布特性

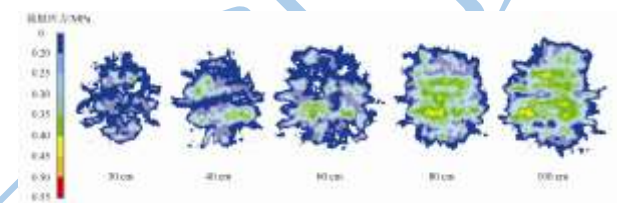


图 5 香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的接触应力分布特征图

Fig.5 Images of pressure-sensitive distribution for pear impacts against corrugated board

香梨从不同高度与瓦楞纸板跌落碰撞时，接触应力分布特征如图 5 所示。接触应力分布的边缘呈放射状，主要为低应力(≤0.20 MPa)大面积分布，这应该与瓦楞纸板的各向异性和缓冲性能有关。有 2~3 条带状的较高应力区域，被较低应力区域分割，与瓦楞纸板的瓦楞方向相一致。峰值应力在带状区域内零星分布，可能是瓦楞与香梨最先接触的位置。

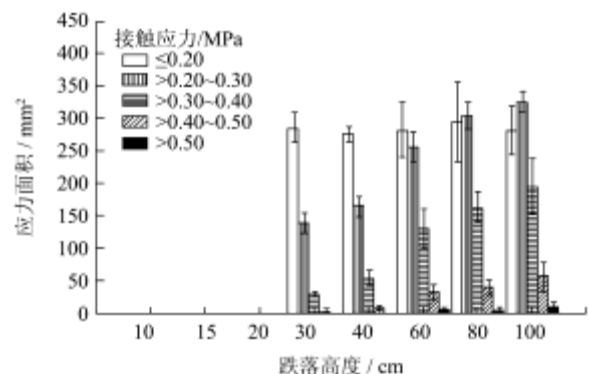


图 6 香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的接触应力分布

Fig.6 Contact pressure distribution for Korla pear impacts against corrugated board

从图 6 也可以看出，当跌落高度较低时，在边缘大面积分布的≤0.20 MPa 范围应力所占比例最高，随着跌落高度的增加，尽管≤0.20 MPa 应力仍保持较大

面积,但所占比例开始明显减小,这充分反映瓦楞纸板的缓冲性能。高应力(>0.40 MPa)分布面积非常小,应该对香梨损伤贡献不大。0.20~0.40 MPa范围的应力面积相对较大,并且随着跌落高度增加而明显变大,是造成香梨损伤的主要部分。

香梨从不同高度与瓦楞纸板跌落碰撞时,不同范围的接触应力面积与损伤面积的关系如图7所示。香梨在30 cm跌落高度以下与瓦楞纸板碰撞时,由于实际褐变面积非常小且非常不明显,可近似认为无损伤。从图可以看出, >0.20 MPa范围的应力面积与损伤面积最为接近,采用>0.20 MPa范围的应力面积估测损伤面积的平均相对误差为6.81%。

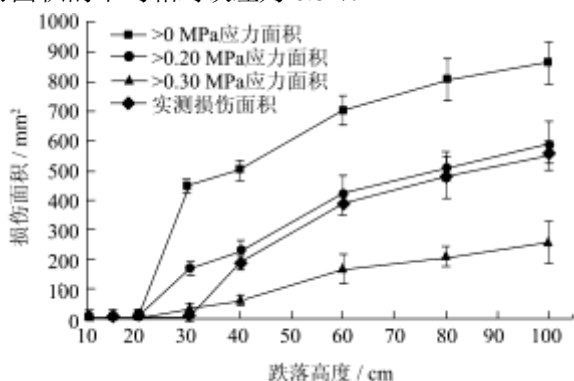


图7 香梨与瓦楞纸板碰撞时的接触应力分布面积与损伤面积比较

Fig.7 Comparisons of pressured area and bruise area for Korla pear impacts against corrugated board

2.2 香梨跌落碰撞接触应力的有限元模拟结果分析

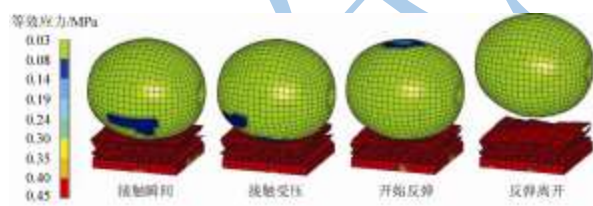


图8 香梨跌落碰撞过程的有限元模拟比较

Fig.8 Comparison of modeling of Korla pear dropped against impact surface

香梨与瓦楞纸板在80 cm高度跌落碰撞的有限元模拟过程如图8所示。可以发现,在香梨与瓦楞纸板碰撞受压时,瓦楞纸板出现了较大变形,从而吸收了更多能量,这使得香梨吸收能量减少使其在表面产生的等效应力分布面积和最大等效应力都相对较小。

根据感压胶片测量分析结果可知, >0.20 MPa范围的接触应力分布面积最接近香梨损伤面积,因此在有限元等效应力分析中,取>0.20 MPa的应力云图颜

色进行标定,获取香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的应力区域作为香梨损伤预测区域,见图9。

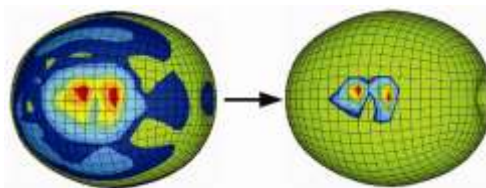


图9 香梨有限元模拟损伤面积的确定

Fig.9 Determination of predicated bruise area in finite element model of Korla pear

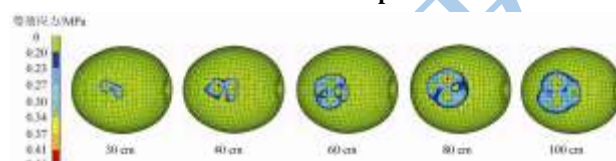


图10 香梨不同跌落高度碰撞有限元模拟的损伤预测区域

Fig.10 Predicated bruise area of FEASimulation of Korla pear under varied drop heights

香梨从不同高度与瓦楞纸板跌落碰撞的有限元损伤模拟预测如图10所示,可以看出,香梨碰撞瓦楞纸板时的损伤预测区域不规则,峰值应力呈零星分布,较高应力被较低应力分割,有两个应力明显较高的区域,这都与感压胶片实测的应力分布特征非常类似。

2.3 香梨跌落碰撞接触应力分布面积与损伤面积关系

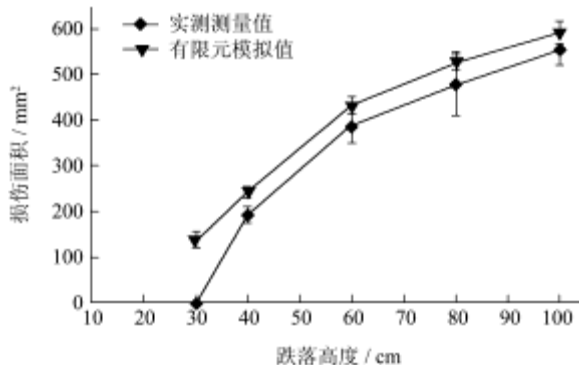


图11 香梨在瓦楞纸板上碰撞损伤面积的实际测量值与有限元模拟值的比较

Fig.11 Comparison of experimental and analytical bruising areas for pear impacts against corrugated board

图11表明,与瓦楞纸板碰撞模拟时,香梨损伤面积的预测值略高于实际损伤面积,损伤预测的相对误差率平均约为13.29%,低于Lewis et al.^[6]模拟苹果与瓦楞纸板碰撞损伤面积26%的预测误差。之所以取得较高预测精度,是因为与Lewis的研究不同,本研究将瓦楞纸板按照各向异性材料进行了准确建模,同

时感压胶片接触应力分布与损伤面积关系的分析,也使我们确定了香梨碰撞模拟等效应力准确预测损伤面积的范围。

3 结论

香梨从不同高度跌落碰撞瓦楞纸板时的接触应力分布边缘呈放射状,低应力(≤ 0.20 MPa)有大面积分布,较高应力区域被较低应力区域分割,峰值应力呈零星分布。高应力(>0.40 MPa)分布面积非常小,0.20~0.40 MPa范围的应力面积相对较大, ≤ 0.20 MPa范围应力所占比例在较低跌落高度时最高,并随着跌落高度的增加降低。因此, >0.20 MPa范围的应力面积与损伤面积最为接近,当用于香梨与瓦楞纸板碰撞损伤面积的预测时,相对误差率平均为13.29%,显著提高了预测精度,对今后香梨碰撞减损的工艺优化和包装设计提供了重要研究基础。

参考文献

- [1] García-Ramos F J, Ortiz-Cañavate J, Ruiz-Altisent M. Reduction of mechanical damage to apples in a packing line mechanical devices [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 10(6): 703-707
- [2] 魏闻东. 鲜食梨[M]. 郑州:河南科技出版社,2005
Wei Wendong. Fresh-Eating Pears [M]. ZhengZhou: Henan Science and Technology Press, 2005
- [3] Lewis R, Yoxall A, Marshall M B, et al. Characterizing Pressure and Bruising in Apple Fruit [J]. *Wear*, 2008, 264(1/2): 37-46
- [4] Herold B, Geyer M, Studman C J. Fruit Contact Pressure Distributions Equipment [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 32 (3): 167-179
- [5] 周祖镠. 农业物科学[M]. 北京:中国农业出版社,1994
Zhou Zu'e. Agricultural Material Science [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1994
- [6] Lewis R, Yoxall A, Canty L A, et al. Development of Engineering Design Tools to Help Reduce Apple Bruising [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83 (3): 356-365
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 付云刚. 双瓦楞纸板振动传递特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2005
Fu Yungang. Research on Vibration Transmissibility of Doubled-wall Corrugated Paperboard [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005
- [10] Mohsenin N N, Jindal V K, Manor A N. Mechanics of Impact of A Falling Fruit on a Cushioned Surface [J]. *Transaction of the ASAE*, 1978, 34 (3): 594-600
- [11] 吴杰,李凡,葛云,等. 香梨静压接触应力测量及损伤预测[J]. 农业工程学报,2013,29(6):261-266
Wu Jie, Li Fan, Ge Yun, et al. Measurement of Contact Pressure of Korla Pear Under Compression and Bruising Predication Using Finite Element Analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(6): 261-266
- [12] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安:西安理工大学,2004
Liu Bo. The Finite Element Analysis of The Mechanical Properties of Corrugated Paperboard [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004
- [13] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004
Liu Hongwen. Mechanics of Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004