

宋欣, 杨磊, 李艳聪. 果蔬机械损伤研究综述[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1196-1200.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.05.038

果蔬机械损伤研究综述

宋欣, 杨磊, 李艳聪

(天津农学院工程技术学院, 中国 天津 300384)

摘要: 论述了近年来, 国内外关于果蔬机械损伤试验及损伤影响因素分析, 机械损伤预测和机械损伤有限元模拟分析等方面的研究方法和进展, 分析并指出了当前研究存在的问题, 提出了今后重点研究的内容。

关键词: 果蔬; 机械损伤; 影响因素; 损伤预测

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2016)05-1196-05

Research advances in mechanical damage of fruits and vegetables

SONG Xin, YANG Lei, LI Yan-cong

(College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Experiments on mechanical damages of fruits and vegetables and the influencing factors, the assessment of the damage degree, the simulation and prediction of mechanical damages based on finite element were reviewed in this paper. The limits needed to be improved in current researches were analyzed and the emphasis for future studies were proposed.

Key words: fruit and vegetable; mechanical damage; influencing factor; damage prediction

水果和蔬菜的机械损伤是指果蔬在采收、分级、包装、贮藏、运输、加工和销售等过程中因受到跌落、碰撞、挤压、摩擦作用而造成的果实变形、果皮和果肉破损的现象^[1], 特别是当采收处理过程采用自动化和机械化方式处理时极易出现, 是果蔬损伤的主要形式。机械损伤会直接造成果实受伤部位的细胞结构破坏, 导致果肉组织迅速软化, 并引起受伤部位的组织褐变^[2]。轻者会降低果蔬的外观等级, 加速其衰老。重者会导致果蔬外表产生明显的伤口, 加速果实的腐烂, 严重影响了果蔬的品质及其经济效益。据调查, 中国每年采后因机械损伤及腐烂而导致的果蔬损耗高达总量的 25%~30%^[3], 而发达国家的损耗率普遍低于 5%, 特别是美国仅有 1%~

2%^[4]。提高和改善果蔬在采摘、商品化处理和流通过程中的自动化和机械化作业水平, 保障果蔬的质量等级和经济价值是当前值得高度关注和亟待解决的问题。

开展果蔬机械损伤规律及其影响因素研究, 实现对果蔬机械损伤的准确预测, 能够为有效控制果蔬损耗, 为果蔬采收、分级、包装、贮运等作业设备的减损设计和优化改进, 包装、贮运减损方式的选择和改善提供必要的科学理论依据, 对中国果蔬机械化自动化处理装备的推广应用以及对提高中国果蔬的产品质量等级和经济价值具有重要的现实意义。

1 国内外研究现状

果蔬在从种植地到上市所经历的采收、分级、包装、运输、贮藏和销售整个处理过程中, 不可避免会受到静载、挤压、振动、碰撞、摩擦等不同载荷形式的作用, 造成以塑性或脆性破坏形式为主的现时损伤和以粘弹性变形为主的延迟损伤^[5], 统称为机械

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305299)

作者简介: 宋欣(1979-), 女, 天津人, 博士, 副教授, 从事农业智能装备研究。(Tel) 13820286466; (E-mail) songxin-tju@163.com

损伤。近年来,国内外学者开展了大量关于果蔬生物力学特性和机械损伤的研究工作,在果蔬机械损伤试验和损伤影响因素分析,以及机械损伤预测和机械损伤有限元模拟分析等方面取得了一些行之有效的研究成果。

1.1 果蔬机械损伤试验及损伤影响因素分析

果蔬机械损伤以冲击损伤和压缩损伤2种形式为主。其中,冲击损伤主要产生于机械采摘阶段的高空跌落和包装、分级及运输过程中的振动和冲撞,是果蔬机械损伤中最为严重的一种损伤形式^[6]。压缩损伤主要来自于机械采摘过程中末端执行器对果实的夹持作用和果实在包装箱中的相互挤压。压缩损伤的影响因素^[7-8]主要有加载位置、加载方式以及果实的成熟度、自身内部组织结构的力学特性。压缩作用与冲击作用的最大区别在于,压缩作用是对果实表面施加静载或准静载的过程,载荷与果实表面的接触时间较长。而冲击作用是施加的瞬间载荷,接触时间短,往往以毫秒或者微秒为单位。因此两种作用产生的损伤形式也是有所区别的。Chen^[9]等分别对梨、苹果和桃进行压缩和冲击试验,试验过后观察三种水果的横截面发现,压缩损伤呈抛物线状分布,而冲击损伤程度则沿半径方向从损伤区域到果实内部一直上升。冲击损伤的不规则性决定了其量化难度要高于压缩损伤。

近年来,国内外很多学者通过电子水果^[10]、自由落体^[11]、冲击摆^[12-13]等试验方法进行了番茄、苹果、梨、桃等各类果蔬的冲击测试,获得了大量有关冲击损伤影响因素的研究成果。其中,国内外研究者普遍认为:果实冲击损伤程度与冲击面材料、跌落高度等受载条件,冲击能、冲击力加载速度、冲击力峰值、碰撞时间和加载位置等受载方式以及果实的品种、成熟度、硬度、含水率、形态特征、果实内部组织结构力学特性和贮存温度等因素有着密切关联^[11,14-26]。冲击试验的难点在于果实碰撞是瞬间行为,如何实时并且准确地采集到碰撞时间、碰撞的峰值力和冲击加速度是决定试验结果准确性的关键。随着高性能数据采集技术和传感器技术的发展,智能信号采集与处理分析仪、加速度传感器以及高速摄像机的使用^[21,27-28],推动了果实碰撞损伤机理的研究。目前,已经可以实现水果与不同缓冲材料的碰撞过程中对冲击能损耗和碰撞时间的准确测量与分析,相关研究成果对开展果实冲击力学特性研究

具有重要的借鉴意义。

Schoorl等^[29]指出果实机械损伤不仅与冲击能损耗有关,还与果实受载时接触应力分布特性有关。果实受载时接触应力分布特性的研究主要通过理论计算和试验测量的方式。理论计算方面,普遍采用Hertz弹性球接触理论进行果实受载时接触应力的理论计算,但是由于果实具有各向异性和粘弹性特点,会使得计算结果误差较大^[30]。另外,Varith等^[31]采用弹性理论和动态轴向压缩理论进行了损伤阈值的计算。Rabelo等^[32]通过传感器平板阵列对柑橘的静载接触应力分布面积进行了测量;Herold等^[33]采用Tekscan® 5051柔性薄膜网格压力传感器对苹果进行了准静态压缩接触应力分布的测量与分析,得到了比使用传统力传感器更为精确的试验结果;Van Zeebroeck等^[34]应用Tekscan® 9500苹果间相互碰撞的动态失效点进行测量,但该传感器成本高,且采用破坏式测量,标定困难较大。Lewis等^[35]则是采用超声波技术对苹果静载压缩的接触面积和接触应力进行了非破坏式的测量分析。上述试验研究都是对果实进行的静载或准静载接触应力分析,而果实从高空跌落或者受到撞击均属于动态载荷作用,应进行动载接触应力分析,而目前鲜有这方面的研究成果报道。美国SPI公司和日本富士公司最新研制出一种压力感应胶片,可以以非破坏式的力学测量方法对柔性和具有曲面特征材料的动载接触应力进行测量与分析,并在生物力学方面很快得到了应用。Lu等^[36-37]首次尝试采用压力感应胶片,对苹果跌落碰撞以及在包装箱内受压的接触应力分布开展了测量研究,促进了对苹果碰压损伤机理更深入的认识。国内石河子大学的吴杰等^[38]使用Prescale感压胶片对库尔勒香梨的碰撞损伤机理进行了探索,得到了梨果实与不同接触材料碰撞接触应力分布的特征。这一方法充分考虑了果实间的形态特征差异和生理结构差异,为今后动载条件下接触应力分布特性的准确测量与分析,以及果蔬冲击损伤机理的深入认识、可靠评价和预测提供了重要的技术手段。

1.2 机械损伤程度的评价和预测

果实机械损伤程度通常采用损伤直径、面积或体积来度量。其中,损伤直径指的是果实表面褐变区域的直径^[39],可以用游标卡尺测得,这种度量方式非常简单,但其缺点在于是从一维角度进行损伤

程度的度量,并且要将褐变区域近似看成圆形,与实际结果出入较大。损伤面积同样是一种快速评价损伤程度的方法,该方法需要将损伤区域假设成为圆形或者椭圆形,再进行面积计算^[11]。对于非圆损伤区域来说,用损伤面积度量的准确性要高于用损伤直径度量。损伤体积的使用要先假设内部损伤的形状,然后用游标卡尺测量出损伤区域的长度、宽度和深度,最后根据假设的形状比如球状、椭圆锥体或椭圆体等来计算相应的体积^[36,40-41]。损伤面积除了可以用游标卡尺直接手工测量外,还可以用机器视觉系统自动进行测量和计算^[42],精度高于手工测量。

此外,为了有效评估果实抗机械损伤的能力,有些学者建立了果实损失程度与其受载条件的关系模型。例如,Schoorl等^[43]提出了冲击损伤敏感性指标,即果实损失体积与冲击能力的比值;Menesatti等^[44]提出了与跌落高度和果实硬度有关的跌落损伤指标DDI用于评价果实的耐损能力;卢立新等^[45]针对苹果碰撞损伤提出了损伤脆值和损伤边界的概念,来表征其损伤敏感性。由于果实机械损伤程度与诸多因素有关,而上述评价指标中涉及到的影响因素很少,故造成这些评价指标难以有效地对果实机械损伤程度做出客观的评估,应用局限性较大。

果实产生机械损伤,从本质上讲是外力引起的局部生物材料失效,与生物材料的力学特性是密切相关的。为了提高机械损伤预测的准确性,很多学者通过冲击试验、加卸载试验、穿刺试验等方式获得果实的应变能、塑性应变能、弹性应变能、峰值力、冲击能、压缩斜率等力学参数,进而利用试验数据拟合出机械损伤与果实受载条件、受载方式、自身力学参数、物理参数间的回归方程,用于果实机械损伤的预测^[34,46-49]。

1.3 基于有限元方法的机械损伤模拟及预测

由于果实机械损伤的复杂性和不确定性,无论是采用理论计算还是采用试验测试,都很难对果实机械损伤程度进行全面、客观、准确的评估和预测。因此,近年来利用有限元方法进行果实受载的数值模拟分析成为了国内外学者研究的热点。Edan等^[50]首次采用有限元法对采摘机械中的机械爪对甜瓜的抓取力以及甜瓜的变形进行了数值模拟和计算,并利用分析结果对采摘机械手结构进行了优化。后续又有很多学者利用有限元法对苹果、西瓜、葡萄等水果进行了静载压缩模拟和损伤程度预

测^[35,51-55],对苹果和梨进行了高空跌落^[28,38]和苹果相互碰撞^[56]的动载模拟分析。有限元数值模拟方法因其具有可视化和模拟复杂受载条件的优势,为改善和提高果实机械损伤评估及预测水平和实用性开辟出的一条新路。

2 存在的问题

首先,在考虑受载接触应力分布特性对果蔬机械损伤影响的研究中,大多是对果实进行的静载或准静载接触应力分析,而实际情况中,果实从高空跌落或者受到撞击均属于动态载荷作用,应进行动载接触应力分析。虽然有学者利用压力感应胶片对苹果和香梨等少数水果种类进行了动载接触应力分析,但尚处于尝试性研究阶段,是否对大多数果蔬种类具有普适性,试验方法和试验数据是否可靠仍需要进一步的研究和考证。此外,通过动载接触应力分析,应该揭示出对于果蔬在采收和商品化处理过程中所涉环节进行减损设计所必需的科学理论依据。

其次,已有研究成果中建立了大量用于果蔬机械损伤预测的回归模型,但是这些模型普遍缺乏机械损伤指标和涉及参数的一致性。不同果蔬种类有不同的预测模型,同类果蔬不同试验方法得到的预测模型也有所不同,导致这些预测模型仅仅局限于实验室研究,无法在实际中得到有效应用,需要建立一个统一的果蔬损伤预测模型和评价标准。

最后,在基于有限元方法的机械损伤模拟研究中,普遍将果实简化成为线性弹性体,且具有各向同性,导致模拟分析结果与实际情况差异较大。由于果实具有各向异性的特点,不同组分的力学特性也有所差异。某些时候果实在外力作用下,从表面看不出有任何损伤,但是其内部组织的细胞质膜已经被破坏,也就是说损伤发生在小尺度范围,这种局部损伤的逐步演化会最终导致整果的腐烂。因此,应当考虑果蔬不同组分的结构特点及其力学特性,利用非线性有限元方法建立从果核、果肉到果皮的多尺度数值果实模型,实现对果实从微观损伤到宏观损伤的模拟和计算,从而提高果实机械损伤预测的能力和精度,特别是实现微损(肉眼不可辨)的可视化评估和预测。

3 展望

综上所述,今后果蔬损伤研究的重点内容包括:

开展动态载荷作用下果蔬的机械损伤规律及其影响因素研究;充分考虑果实间生物力学特性和形态学特征差异,建立统一的,具有实用性和可靠性的果蔬质量评估和机械损伤预测模型,以及考虑果蔬不同组分的结构特点及其力学特性,利用非线性有限元方法建立从果核、果肉到果皮的多尺度数值果实模型,实现对果实从微观损伤到宏观损伤的模拟和计算。

参考文献:

- [1] 王 荣.葡萄与番茄力学特性及机械损伤的研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
- [2] 王艳颖,胡文忠,庞 坤,等.机械损伤对富士苹果采后软化生理的影响[J]. 食品研究与开发,2008,5(29):132-136.
- [3] 钱骁,李 丹,田会清,等.京城果蔬商户降低物流损耗方法分析[J]. 中国食物与营养,2012,18(1):49-53.
- [4] 王安建,侯传伟,魏书信.生物技术在果蔬保鲜中的应用研究进展[J].河南农业科学,2009(9):171-173.
- [5] 孙 骊,仇农学,吴竞爽.苹果贮运时的机械损伤规律及评价[J]. 农业工程学报,1996,4(12):208-212.
- [6] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, DARIUS P, et al. Impact damage to apples during transport and handling [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45:157-167.
- [7] LI Z G, LI P P, LIU J Z. Effect of tomato internal structure on its mechanical properties and degree of mechanical damage [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(12): 1816-1826.
- [8] LI Z G, LI P P, YANG H L, et al. Stability tests of two-finger tomato grasping for harvesting robots [J]. Biosystems Engineering, 2013,2(116):163-170.
- [9] CHEN P, RUIZ M, LU F, et al., Study of impact and compression damage on Asian pears[J]. Transactions of ASABE, 1987, 30:1193-1197.
- [10] VAN LINDEN V. Identification of fruit parameters responsible for impact-bruising of tomatoes[D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [11] IDAH P, YISA M. An assessment of impact damage to fresh tomato fruits [J]. AU Journal of Technology, 2007, 10(4): 271-275.
- [12] AHMADI E. Bruise susceptibilities of kiwifruit as affected by impact and fruit properties [J]. Research Agricultural Engineering, 2012,3(58):107-113.
- [13] ABEDI G, AHMADI E. Design and evaluation a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: bruise modeling of red delicious apple[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013,7(7):962-968.
- [14] BAJEMA R W, BARITELLE A L, HYDE G M. Factors influencing dynamic mechanical properties of red delicious apple tissue [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 46(3): 1725-1731.
- [15] LIEN C C, AY C Y, TING C H. Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 402-407.
- [16] ZARIFNESHAT S, GHASSENZADEH H R, SADEGHI M, et al. Effect of impact level and fruit properties on Golden Delicious apple bruising[J]. American Journal of Agricultural and Biological Science, 2010,5:114-121.
- [17] ABEDI G, AHMADI E. Design and evaluation of a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: bruise modeling of Red Delicious apple[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7:962-968.
- [18] 杨晓清,王春光.河套蜜瓜机械特性与静载损伤关系的研究[J]. 农业工程学报,2008,24(3):31-37.
- [19] LU L X. Dropping bruise fragilities and bruise boundaries of 'Gala' apples [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 37-43.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 陈善锋,周亦斌,王 俊,等.梨的下落碰撞冲击加速度特性研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003,29(3): 339-342.
- [23] 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.
- [24] 王 俊,许乃章,胥 芳.桃子冲击力学特性及其与桃子硬度的数学模型[J]. 农业机械学报,1994,25(4):58-62.
- [25] 李小昱,王 为,赵 静.苹果碰撞损伤预测模型的研究[J]. 西北农业大学学报,1995,23(2):79-83.
- [26] 李小昱,王 为.苹果碰撞响应数学模型的研究[J]. 农业工程学报,1996,12(4):204-206.
- [27] 卢立新.苹果-瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型[J]. 农业工程学报,2008,9(24):276-280.
- [28] 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: 356-365.
- [29] SCHOORL D, HOLT J E. Bruise resistance measurements in apples [J]. J Texture Stud, 1980, 11: 389-394.
- [30] 周祖饬. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1994:47-49.
- [31] VARITH J, HYDE G M, BARITELLE A L, et al. Fruit and vegetable bruise threshold prediction using theory of elasticity and tissue failure properties[M]. St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2001.
- [32] RABELO G F, FABBRO I M, LINARES A W. Contact stress area measurement of spherical fruit[R]. Haifa Israel: III International Symposium on Sensors in Horticulture, 2001:195-200.
- [33] HEROLD B, GEYER M, STUDMAN C J. Fruit contact pressure distributions-equipment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(3): 167-179.
- [34] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, DARIUS P, et al. The

- effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46: 10-19.
- [35] LEWIS R, YOXALL A, MARSHALL L A, et al. Characterising pressure and bruising in apple fruit [J]. *Wear*, 2008, 264(1/2): 37-46.
- [36] 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: 614-620.
- [37] 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 & Environment*, 2010, 8(2): 132-136.
- [38] 吴杰. 库尔勒香梨的动态粘弹特性及碰压损伤机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [39] VURSAVUS K, OZGUVEN F. Determining the effects of vibration and packaging method on mechanical damage in golden delicious apples [J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2004, 28: 311-320.
- [40] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, DARIUS P, et al. The effect of fruit properties on the bruise susceptibility of tomatoes [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 45: 168-175.
- [41] MANESS N O, BRUSEWITZ G H, MCCULLUM T G. Impact bruise resistance comparison among peach cultivars [J]. *Hort Science*, 1992, 27: 1008-1011.
- [42] CUBERO S, ALEIXOS N, MOLTÓ E, et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4: 487-504.
- [43] SCHOORL D, HOLT J E. Bruise resistance measurements in apples [J]. *J Texture Stud*, 1980, 11: 389-394.
- [44] MENESATTI P, PAGLIA G, SOLAINI S, et al. Non-linear multiple regression models to estimate the drop damage index of fruit [J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(3): 319-326.
- [45] 卢立新. 跌落损伤脆值及损伤边界 [J]. *包装工程*, 2005, 26(6): 1-4, 11.
- [46] AHMADI E, GHASSEMZADEH H R, SADEGHI M, et al. The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97: 110-117.
- [47] ZARIFNESHAT S, GHASSEMZADEH H R, SADEGHI M, et al. Effect of impact level and fruit properties on Golden Delicious apples bruising [J]. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2010, 5(2): 114-121.
- [48] BLAHOVEC J, MARES V, PAPRSTEIN F. Static and dynamic tests of pear bruise sensitivity [J]. *Res Agr Eng*, 2004, 50(2): 54-60.
- [49] 李智国, 刘继展, 李萍萍. 机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系 [J]. *农业工程学报*, 2010, 5(26): 112-116.
- [50] EDAN Y, HAGHIGHI K, STROSHINE R, et al. Robot gripper analysis: finite element modeling and optimization [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1992, 8(4): 563-570.
- [51] LU R, ABBOTT J A. Finite elements analysis of modes of vibration in apples [J]. *Journal of Texture Studies*, 1996, 27: 265-286.
- [52] KIM G W, KIM M S, SAGARA Y, et al. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh under quasi-static compression based on finite element method optimization [J]. *Food Sci Technol Res*, 2008, 14(3): 221-231.
- [53] KIM G W, DO G S, BAE Y, 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.
- [54] SADRNI A H, RAJABIPOUR A, JAFARI A, et al. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86: 272-280.
- [55] 王荣, 焦群英, 魏德强, 等. 葡萄的力学特性及有限元模拟 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 7-10.
- [56] 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: 260-276.

(责任编辑: 张震林)