

挤压对荔枝机械损伤和力学参数的影响

陈燕^{1,2}, 向和平^{1,2}, 谈建豪^{1,2}, 邹湘军^{1,2*}, 黄国钢^{1,2}, 李博^{1,2}

(1.华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642; 2.南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642)

摘 要: 为探讨荔枝在机械采摘、贮运中的挤压受损状况, 以挤压损伤的可能因素(压缩率、挤压材料、挤压方向和挤压速度)为试验因子, 通过加卸载正交试验, 研究了挤压对荔枝机械损伤和力学参数的影响。结果表明: 对荔枝挤压机械损伤影响显著的因素依次为压缩率、挤压方向、挤压材料和挤压速度。压缩率每增加 1%, 荔枝的机械损伤度平均增加 3.03%; 挤压材料为橡胶时, 荔枝的机械损伤度最小。影响荔枝弹性度最显著的因素是挤压方向, 而对荔枝其余力学参数影响最显著的因素是压缩率; 荔枝的弹性度横向大于纵向; 压缩率增加, 弹性度减少, 而其余力学参数增加。荔枝挤压机械损伤与力学参数的关系方程决定系数为 0.913, 与荔枝挤压机械损伤最相关的力学参数是峰值挤压力和弹性度。

关 键 词: 荔枝; 挤压; 机械损伤; 影响因素; 力学参数

中图分类号: S183 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2013)06-0688-05

Effects of extrusion on mechanical damage and mechanical parameters of litchi

CHEN Yan^{1,2}, XIANG He-ping^{1,2}, TAN Jian-hao^{1,2}, ZOU Xiang-jun^{1,2*}, HUANG Guo-gang^{1,2}, LI Bo^{1,2}

(1.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to investigate the damage rule of litchi by extrusion in harvesting, storing and transporting, we have studied the effects of extrusion conditions on mechanical damage and mechanical parameters of litchi by using the possible factors causing extrusion damage as test factors(including compression ratio, extrusion material, extrusion direction and extrusion speed), and by loading and unloading orthogonal tests. The results show that the factors which have significant effects on the extrusion mechanical damage of litchi are compression ratio, extrusion direction, extrusion material and extrusion speed in turn. The average ratio of mechanical damage of litchi raised by 3.03% as the compression ratio increased by 1%. When the extrusion material is the rubber, the ratio of mechanical damage of litchi is the lowest. The extrusion direction is the most significant factor for litchi's elasticity while compression ratio is the most significant for the other mechanical parameters; and the litchi's elasticity in the horizontal direction is greater than in the vertical direction. When the compression ratio increases, the elasticity decreases and the other mechanical parameters raise. The determinant coefficient of the relation equation between the extrusion mechanical damage and the mechanical parameters of litchi is 0.913, and the most relevant mechanical parameters to the extrusion mechanical damage of litchi are the peak pressure and elasticity level. The research can provide theory evidences for the derogation design and development of litchi operation equipments.

Key words: litchi; extrusion; mechanical damage; factors; mechanical parameters

收稿日期: 2013-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171457; 51175189); 广东省自然科学基金项目(S2011010001933)

作者简介: 陈燕(1964—), 女, 广东广州人, 硕士, 副教授, 主要从事农业机械化研究, cy123@scau.edu.cn; *通信作者, xjzou1@163.com

中国是最大的荔枝生产国^[1]。荔枝皮薄、肉多，含水量高，在采摘、加工和储运过程中受到静力挤压或动力碰撞后，其组织易出现细胞破裂、细胞破碎或细胞分离，从而产生宏观或微观的机械损伤。荔枝的机械损伤为病原菌打开了入侵通道，会加速果实的衰老腐败，导致荔枝果实的外观变差^[2]，经济效益显著下降。

国内外学者通过跌落、冲击和压缩等试验对果蔬的各种机械损伤进行的研究表明：苹果组织材料具有连续性和各向异性，其机械损伤受加载速度和方向的影响^[3]；柑橘、番茄、草莓和香梨的机械损伤受跌落高度、跌落面和冲击面材料、冲击速度的影响^[4-8]；加载速度、果实硬度和加载部位等因素影响葡萄、蜜瓜、苹果和番茄的力学特性和机械损伤^[9-12]。

为减少荔枝的机械损伤，笔者研究了荔枝的宏观和微观力学特性，得到荔枝的宏观损伤临界力等力学参数，并分析了受压荔枝的内部应力分布规律和果壳破裂应力特点^[13-14]。水果的机械损伤与其力学特性密切相关^[15]，笔者依据荔枝在机械采摘、贮运中受挤压产生机械损伤的可能影响因素，对荔枝进行了不同条件下的挤压试验，研究不同挤压条件对荔枝内部机械损伤和力学参数的影响，以期为低损的荔枝作业装备设计和开发提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

于2012年6月中旬在广东增城果园采摘“桂味”荔枝。荔枝纵向直径(果蒂与果顶连线方向)为29.70~33.64 mm，2个相互垂直的横向直径分别为29.00~33.86 mm和29.30~34.22 mm，荔枝含水率为79%~82%。荔枝成熟度相近，且在采后12 h内进行试验。

试验设备采用广州市广材试验仪器有限公司的WD-20KE型精密微控电子万能试验机，精度为±0.5%，分辨率为±1/120000。试验过程由微机自动完成力和位移的数据采集。

1.2 试验方法

由于果蔬的挤压损伤是在采摘、贮运过程中压

缩载荷引起的，本研究通过对荔枝进行压缩试验模拟其在实际采摘、加工和储运过程中所受的挤压。

影响水果机械损伤的主要因素有作用载荷的速率和水果变形量^[16]，此外，荔枝抗挤压能力具有各向异性^[20]，挤压方向、挤压材料均影响荔枝机械损伤程度，同时也影响荔枝的力学特性，因此，选取压缩率(荔枝压缩量与其直径之比)、挤压材料、挤压方向和挤压速度作为试验因子，每个因子设置3个水平，采用正交试验法($L_9(3^4)$)对荔枝进行加卸载试验。试验因子水平设置：压缩率分别是5%、10%和15%(由前期试验和文献[14]可知，此范围压缩率，荔枝只发生内部机械损伤)，挤压材料分别为钢板、橡胶和塑料，挤压方向为纵向(果蒂与果顶连线方向)、横向①(垂直果实两侧缝合线的腰部方向)和横向②(腰部方向)，挤压速度为15、30和45 mm/min，属于准静态范围。

由于在压缩试验中使用圆柱压头易使荔枝产生剪切破坏，故采用平板压缩方式，固定下压板，上压板垂直下压。将荔枝随机分为9组，为增加试验可靠性，每组试验重复10次，共做90次加载-卸载试验。试验后的荔枝(包括10个对照果)轻轻去除外壳，将果肉放入冰箱贮藏，观察并记录荔枝果肉出现褐变前的贮藏天数。

1.3 数据处理方法

1.3.1 荔枝机械损伤程度的确定

荔枝受挤压后，产生的机械损伤分为果皮出现破裂的宏观损伤和果皮没有出现破裂的微观损伤。

通过考察不同挤压条件下微观损伤的荔枝果肉出现较重褐变前的贮藏天数，评价荔枝的机械损伤度。

$$\eta = \frac{t - t_1}{t} \times 100\% \quad (1)$$

式中： η 为机械损伤度(%)； t 为对照果果肉出现褐变前的贮藏天数(d)； t_1 为被加载荔枝果肉出现褐变前的贮藏天数(d)。

1.3.2 荔枝弹塑性力学参数

荔枝的弹塑性力学参数主要包括应变能 U_s 、塑性应变能 U_p 、峰值力 F_{\max} 、弹性度 r 和刚度 K 。挤压条件不同，相应的弹塑性力学参数也不同。应变能

是荔枝在加载阶段储存于其内部的变形势能,而塑性应变能表示其在加卸载循环中吸收的能量,它影响荔枝的挤压损伤。弹性度表示荔枝在卸载后的恢复程度,弹性度越大,其在加卸载循环中吸收的能量越小。刚度可表征物料的硬度,刚度越大,其抵抗损伤的能力越大。正交试验后,从得出的加卸载曲线提取荔枝的弹塑性力学参数^[16]。

1.3.3 统计分析

采用SPSS软件对试验数据进行方差分析和回归分析。回归方程建立采用向后剔除法。由于试验因子挤压材料和挤压方向为定性变量,在建立受挤压荔枝力学参数和机械损伤度的回归方程前,需将所有定性变量转换为虚拟变量并赋值,如表1所示。

表1 虚拟变量的设置和赋值

挤压材料	虚拟变量赋值		挤压方向	虚拟变量赋值	
	D_1	D_2		Q_1	Q_2
钢板	0	1	纵向	0	1
橡胶	1	0	横向②	1	0
塑料	1	1	横向	1	1

2 结果与分析

利用正交加卸载试验数据分别求得各组荔枝弹塑性力学参数及其挤压机械损伤度的平均值如表2。

表2 荔枝受挤压的力学参数和机械损伤度

试验号	F_{max}/N	U_s/mJ	U_p/mJ	r	$K/(N \cdot mm^{-1})$	$\eta/\%$
1	7.43	6.06	3.43	0.65	4.61	26.36
2	3.74	2.68	1.16	0.72	2.29	15.45
3	5.32	4.31	2.10	0.69	3.23	22.73
4	17.08	25.74	14.81	0.68	5.15	37.27
5	9.19	12.05	5.93	0.69	2.79	29.09
6	15.55	23.02	14.42	0.59	4.79	39.09
7	28.78	56.71	32.00	0.68	5.93	52.73
8	25.39	50.76	30.88	0.62	5.20	51.82
9	25.03	50.39	29.59	0.66	5.03	50.91

2.1 试验因素对荔枝挤压机械损伤的影响

荔枝的挤压机械损伤度与试验因素间的关系如式(2)所示。

$$\eta = 4.14 + 3.03C + 0.06v - 1.21D_1 + 5.45D_2 - 4.39Q_1 \quad (2)$$

式中: η 为机械损伤度(%); C 为压缩率(%); v 为挤压速度(mm/min); D_1 和 D_2 为挤压材料虚拟变量; Q_1 为挤压方向虚拟变量。

经整体显著性 F 检验,荔枝挤压机械损伤度对试验因素的回归方程非常显著,决定系数 R^2 为0.996。利用方程(2)可以解释99.6%的荔枝挤压机械损伤度变化。

对荔枝挤压机械损伤度影响最主要的因素是压缩率和挤压方向,其次是挤压材料,再次为挤压速度。压缩率每增加1%,荔枝的机械损伤度平均增加3.03%;挤压速度每增加10 mm/min,荔枝的机械损伤度平均增加0.6%。

将表2的挤压材料虚拟变量 D_1 、 D_2 和挤压方向虚拟变量 Q_1 所对应的取值分别代入式(2)可知:挤压材料为橡胶时,荔枝的机械损伤度最小,比使用塑料少5.45%;挤压材料为钢板时,荔枝的机械损伤度最大,比使用塑料大1.21%。挤压方向为横向①或横向②时,荔枝的机械损伤度差异不大,在同一压缩率下,均比纵向小4.39%。

分析试验因素对荔枝挤压机械损伤的影响,提示设计荔枝作业装备时,接触荔枝的元件采用弹性材料,注意减少荔枝受挤压的程度和冲击力的作用,可减少荔枝的挤压机械损伤。荔枝横向①或横向②的机械损伤度差异不大,说明荔枝果皮中强度较弱的缝合线对荔枝的挤压机械损伤影响较小,因此,对荔枝作业时,可忽略其横向加载位置的差异性。

2.2 试验因素对荔枝力学特性的影响

采用SPSS软件对荔枝的弹塑性力学参数作方差分析,结果如表3所示。除挤压方向对应变能以及挤压速度对弹性度的影响不显著外,各试验因素对其余力学参数的影响均为显著,但显著性有差异。对峰值挤压力、应变能和塑性应变能影响最显著的因素是压缩率,其次是挤压材料,再次是挤压方向;对弹性度影响最显著的因素是挤压方向,其次是挤压速度,再次是挤压材料;对刚度影响最显著的因素是压缩率和挤压材料,其次是挤压方向,再次是挤压速度。

表3 荔枝受挤压的力学参数的方差分析

Table 3 Variance analysis of mechanical parameters of litchi's extrusion

方差来源	统计与检验值	F_{max}	U_s	U_p	r	K
挤压材料	F	29.410	18.460	10.910	3.130	63.870
	P	0.000	0.000	0.000	0.049	0.000
挤压方向	F	3.390	1.850	5.450	23.160	17.260
	P	0.039	0.163	0.006	0.000	0.000
挤压速度	F	6.900	8.070	7.140	0.040	2.920
	P	0.002	0.001	0.001	0.959	0.060
压缩率	F	522.230	757.810	534.790	5.870	80.060
	P	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000

根据表2的挤压试验数据对荔枝的弹塑性力学参数进行线性回归，所得各回归方程如表4所示。除弹性度回归方程外，其他回归方程决定系数都较高。虽然弹性度回归方程的决定系数较低，但方程

的整体检验非常显著，且经残差分析，模型的假定条件都满足，因此所建立的弹性度回归模型有统计学意义。

表4 力学参数与试验因素的回归方程

Table 4 Regression equations of mechanical parameters

回归方程	R^2	F	P
$F_{max} = -6.86 + 2.09C + 0.07v - 2.47D_1 + 2.52D_2 - 1.27Q_1$	0.918	187.030	0.000
$U_s = -26.95 + 4.83C + 0.14v - 3.60D_1 + 4.08D_2$	0.911	218.280	0.000
$U_p = -15.71 + 2.86C + 0.10v + 3.40D_2 - 2.91Q_1 - 1.85Q_2$	0.882	158.746	0.000
$r = 0.69 - 0.01C - 0.02D_1 - 0.03D_2 + 0.07Q_1$	0.484	15.650	0.000
$K = 2.45 + 0.20C + 0.13v - 0.88D_1 + 0.92D_2 - 0.80Q_1$	0.797	65.890	0.000

由各回归方程可以看出，在试验范围内，随着压缩率的增加，峰值挤压力、应变能、塑性应变能和刚度增加，而弹性度下降。压缩率每增加1%，峰值挤压力、应变能、塑性应变能和刚度分别平均增加2.09 N、4.83 mJ、2.86 mJ和0.20 N/mm，弹性度平均减少1%；挤压速度每增加10 mm/min，峰值挤压力、应变能、塑性应变能和刚度分别平均增加0.7 N、1.4 mJ、1.0 mJ和1.3 N/mm；挤压材料钢板和塑料的峰值挤压力、应变能、塑性应变能和刚度大于橡胶，而弹性度小于橡胶；纵向加载的峰值挤压力、塑性应变能和刚度大于横向，弹性度小于横向；除横向②加载的塑性应变能大于横向①外，其他力学参数差异小。

塑性应变能即滞后损失，表示在加载和卸载循环中物料所吸收的能量。弹性度表示物料卸载后恢复的程度。物料应变能越大，弹性度越低，塑性应变能越大，物料吸收的能量越多。Holt等^[17]认为：水果在加载情况下，吸收的能量完全造成了机械损

伤，因此，结合以上试验因素对荔枝力学参数的影响分析可知：荔枝受挤压时，压缩率越大、挤压速度越高，塑性应变能越大，荔枝吸收的能量越多，其机械损伤越严重；同一压缩率下，对荔枝纵向采用刚性材料挤压，荔枝吸收的能量较大，较易产生机械损伤。这与前面挤压机械损伤度的回归方程(2)所反映的规律是一致的。

2.3 机械损伤度与力学参数的关系

根据表3的试验结果，建立荔枝挤压机械损伤度与弹塑性力学参数之间的关系方程。

$$\eta = 28.05 + 1.28F_{max} + 0.10U_s - 12.35r - 1.20K \quad (3)$$

式中： η 为机械损伤度(%)； F_{max} 为峰值挤压力(N)； U_s 为应变能(mJ)； r 为弹性度； K 为刚度(N/mm)。

式(3)的决定系数 R^2 为0.913，说明荔枝机械损伤度对力学参数的回归方程显著，荔枝损伤度与力学参数之间的变化关系有91.3%可用此方程来解释。

由式(3)可见，在试验范围内，除塑性应变能外，其余力学参数均与荔枝机械损伤度显著相关。随着

峰值挤压力和应变能的增加,荔枝机械损伤度增加;随着弹性和刚度的增加,荔枝机械损伤度减少。

峰值挤压力和应变能分别每增加1 N和1 mJ时,荔枝的机械损伤度分别平均增加1.28%和0.10%;当弹性和刚度分别每增加0.1和1 N/mm时,荔枝的机械损伤度分别平均减小1.24%和1.20%。

参考文献:

- [1] 陈厚彬. 中国荔枝现状和发展分析[J]. 世界热带农业信息, 2008(6): 3-6.
- [2] 李建国. 荔枝学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [3] 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.
- [4] Idah P A, Yisa M G. An assessment of impact damage to fresh tomato fruits[J]. AU Journal of Technology, 2007, 10(4): 271-275.
- [5] 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.
- [6] Ortiz C, Blasco J, Balasch S, et al. Shock absorbing surfaces for collecting fruit during the mechanical harvesting of citrus[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(1): 2-9.
- [7] 陈萃仁, 崔绍荣, 柴德, 等. 草莓果实冲击损伤规律的研究[J]. 农业工程学报, 1997(4): 431-432.
- [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.
- [9] 王荣. 葡萄与番茄力学特性及机械损伤的研究[D]. 北京: 中国农业大学理学院, 2003.
- [10] 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.
- [11] Lu Lixin. Dropping bruise fragilities and bruise boundaries of 'Gala' apples[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 37-43.
- [12] 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, 26(5): 112-116.
- [13] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 360-364.
- [14] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝的力学特性测试及其有限元分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 358-363.
- [15] 吴亚丽, 郭玉明. 果蔬生物力学性质的研究进展及应用[J]. 农产品加工, 2009(3): 34-49.
- [16] 孙国辉. 特色油桃流变力学特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学生物与环境工程学院, 2005.
- [17] Schoorl D, Holt J E. Impact bruising in 3 apple arrangements[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(1): 507-512.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 张健