

基于感压胶片测量技术的苹果静压接触应力 及损伤分析

Study on contact pressure and mechanical damage of apple under compression
using pressure-sensitive film

冯哲^{1,2} 吴杰^{1,2}

FENG Zhe^{1,2} WU Jie^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 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, 新疆 石河子 832003)

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

摘要:采用 Prescale[®]感压胶片测量苹果静压接触应力的分布特性,并结合图像处理技术对褐变区域进行精确测量,以明确应力面积与损伤面积之间的关系,了解苹果损伤发生的机制。结果表明,苹果果肉出现酶促褐变损伤的应力为 0.29 MPa;0.20~0.40 MPa 的应力分布占 72%,构成苹果损伤的主要区域;苹果的损伤面积与应力均值无直接关系;应力总面积高出苹果损伤面积 9%,只有 ≥ 0.10 MPa 应力面积最接近苹果损伤面积,用其估测损伤面积的平均误差仅为 1.66%,两者之间的关系可表示为 $A = 0.98A_{P \geq 0.10} + 1.95$ 。

关键词:苹果;静压;损伤面积;感压胶片;接触应力

Abstract: In order to accurately predict the bruise area of apple subjected to compressive loading, the pressure distribution characteristics for apple compressed at different loads was investigated by the pressure-sensitive film technique combined with apple bruise measurements. Furthermore, the relationship between contact pressure area and bruise area was investigated and the range of pressure area that closed to the bruise area was determined. The result showed that the value of apple flesh failure stress was 0.29 MPa. Pressure distribution on the pressure-sensitive film showed that pressure of 0.20~0.40 MPa accounted for 72% of the total pressure area and taken the major proportion of apple bruise area. The average pressure had little influence on the apple bruise. The measured pressure area was up to 9% higher than the actual bruise area. Only the area occupied by the pressure over than 0.10 MPa was much close to the

bruise area with 1.66% relative error rate. The linear regression equation between bruise area and pressure area ($A = 0.98A_{P \geq 0.10} + 1.95$) could precise estimate the bruise area of apple under static load.

Keywords: apple; compression; bruise area; pressure-sensitive film; contact pressure distribution

近年来,中国苹果产量逐年递增^[1],据联合国粮农组织统计^[2],2012 年中国苹果产量达 3 800 万 t,居世界首位,占世界总产量的 63.3%。然而,苹果成熟后在采摘、包装、分级等自动化和机械化作业环节中不可避免受到静载作用而发生机械损伤,造成果品损耗率达到 30% 以上^[3,4]。因此,有必要开展苹果静压接触损伤规律研究,为各作业机具减损设计提供研究基础。

研究表明,损伤面积是评估果实损伤程度和外观品质分级的重要依据^[5,6],而损伤面积又与果实受载时的接触应力分布有直接关系^[7]。早期,果品受载时的接触应力分布采用 Hertz 弹性接触公式进行计算,但是果实的各向异性和粘弹性使得测量结果误差较大^[8]。随后,有学者分别采用柔性薄膜网格压力传感器^[9]、I-Scan50 测试系统^[10]和超声波技术^[11]对果品受载时的接触应力分布进行了测量,但柔性薄膜网格压力传感器准确标定较困难;I-Scan50 测试系统和超声波技术所获得的接触应力存在一定的偏差,不能真正反映接触应力的实际大小。近年来,随着微胶囊颗粒缓释控制技术的快速发展,感压胶片测量技术以非破坏式的力学测量方法,可同时满足静载和动载下各种接触面间应力分布的测量,并以可读性很强的二维/三维彩色图像显示应力分布的特征轮廓。这一测试方法很快在医学工程领域得到广泛应

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31160335)

作者简介:冯哲(1989—),男,石河子大学在读硕士研究生。

E-mail: fyszshzu@sina.cn

通讯作者:吴杰

收稿日期:2015-07-03

用^[12,13]。最近,开始出现感压胶片测量分析果实受载时接触应力分布的报道^[14,15],但是接触应力分布的面积与果肉损伤面积的关系,哪部分造成果肉组织破坏的失效力分布面积更接近损伤面积,以及接触应力的均值或峰值是否是造成果肉损伤的主要原因仍需要进一步探究,这也是实现果实损伤面积估测的重点。

本研究拟采用图像处理技术对苹果静压接触损伤面积进行准确测量,同时采用感压胶片测量分析苹果静压接触应力分布特性,以明确应力面积与损伤面积的关系,确定最接近损伤面积的应力范围,实现苹果静压接触损伤面积的准确估测。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

红富士苹果:采自新疆阿克苏红旗坡农场同一果园,采样期在 2013 年 10 月 15 日(苹果成熟期),人工采摘,剔除有病虫害、霉伤的苹果及畸形果,其基本物性参数见表 1。采后迅速冷藏,冷藏温度为 $(2 \pm 1) ^\circ\text{C}$,相对湿度 $(90 \pm 5) \%$ 。试验前将苹果试样取出,在室温环境下放置 24 h。

表 1 苹果试样的基本物性参数

Table 1 Physical properties of apple sample

物性参数	平均值	标准差
质量/g	197.77	6.68
硬度/N	79.91	2.62
可溶固形物/ $^\circ\text{Brix}$	13.74	0.43
含水率(湿基)/%	86.84	1.20

1.1.2 主要仪器设备

Prescale[®]感压胶片:LLLW 型,日本 Fuji 公司;

压力图像数字化分析系统:FPD-8010E 型,日本 Fuji 公司;

CCD 专用扫描仪:PerfectionTM V300 Photo 型,日本 Epson 公司;

数显果实硬度计:FT-327 型,意大利 BREUZZI 公司;

糖度计:PR-101 型,日本 ATAGO 公司;

数显曲率半径仪:RG512C5 型,桂林市晶瑞电子有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:GZX-9140 MBE 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

1.2 方法

1.2.1 苹果静压试验 试验时,将苹果试样放置在两平行钢板间进行静载压缩,平板与苹果赤道部接触。根据文献^[10],红富士苹果果肉屈服应力临界值在 40~100 N,本研究预备试验中苹果在 50~60 N 时开始损伤,因此本研究选取压力水平为 50,52,54,56,58,60,70,80,90,100 N。为了避免接触位置曲率半径对苹果受载损伤面积的影响^[16,17],本研究保持苹果受压时接触位置曲率半径为 $(35.00 \pm 1.34) \text{ mm}$ 。每个水平试验重复 10 次。

1.2.2 苹果静压接触应力分布的测量方法 感压胶片的测量原理见参考文献^[7]。压缩时,将感压胶片固定于平板与苹果的接触表面,保压时间 300 s。测量时环境温度保持 20~35 $^\circ\text{C}$,相对湿度 35%~80%。如图 1 所示,静压试验后,采用扫描仪和颜色校正板对感压胶片进行扫描处理,读取接触应力分布特征图,图像分辨率为 0.125(200 dpi)。然后采用 FPD-8010E 压力图像数字化分析系统进行数值解析,将结果导入绘图软件 Surfer 9 进行平滑处理,获得接触应力值以及应力分布范围。

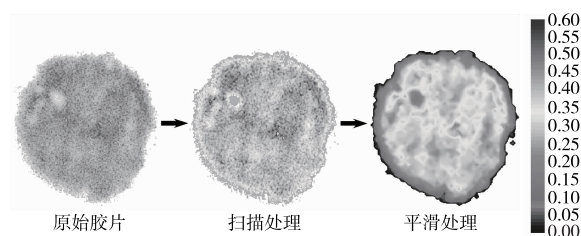


图 1 苹果静压接触应力分布图的处理

Figure 1 Mapping of contact pressure distribution for apple under compression

1.2.3 果实损伤部位褐变处理及损伤面积测量方法 正常状态下,细胞内多酚氧化酶(PPO)与细胞器内膜结合,受细胞膜保护和控制。当果蔬受到机械损伤时,受损部位细胞膜发生破坏,氧气侵入,质体内多酚类物质在大量被激活的 PPO 的催化作用下促使醌的形成和积累,醌进一步氧化聚合形成褐色素而引起组织褐变,即酶促褐变。酶促褐变进程受空气和反应环境的 pH 值影响,研究^[18]发现大多 PPO 活性最适宜 pH 范围为 6.0~7.4。因此,调节 pH 值可加快受损部位酶促褐变反应,以获得果实损伤部位明显的褐变区域。

如图 2 所示,根据上述果实褐变机理,将苹果试样受压部位去皮,然后完全浸泡于 10% pH 7.1 的 NaHCO_3 溶液 4 h,使损伤部位充分褐变并形成明显边界,然后取出后用吸水纸去除表面多余的溶液。随后采集损伤区域的图像,将其导入 MATLAB R2008a 进行灰度转换和形态学运算,提取损伤轮廓区域,最后采用 bwarea 算法计算轮廓面积,得到苹果静压损伤面积。

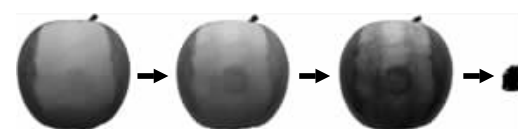


图 2 苹果静压损伤区域的褐变处理及轮廓提取过程

Figure 2 Process of apple enzymatic browning treatment and bruise contour extraction

2 结果与分析

2.1 苹果静压损伤与应力分布的特征分析

不同压力下苹果接触时的损伤和接触应力分布的轮廓特征见图 3。苹果静压接触损伤轮廓接近椭圆形,但边缘的不规则也很明显,因此以往果实损伤研究中采用椭圆形假设

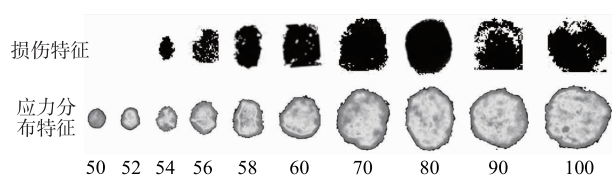


图 3 苹果静压损伤与应力分布的特征

Figure 3 Characterizing bruise and contact pressure for apple under compression

测量计算损伤面积一定存在不同程度的误差。此外,苹果损伤区域局部有点状或成片的白色分布,这可能是苹果表面的凹陷引起接触不充分,使该部位果肉组织仅发生轻微褐变损伤甚至未发生损伤。

从不同压力下苹果接触应力分布特征图观察可以看出,应力分布轮廓更趋近于椭圆形,但与其对应压力下的损伤面积轮廓并不吻合,应力分布的区域明显要高于损伤区域,可以观察到较低应力(<0.10 MPa)主要分布在应力分布的边缘且面积很小,这很可能是未造成苹果损伤的应力分布区域。由于感压胶片对材料表面的粗糙程度反应敏感,苹果表面直观上存在不同程度凹凸使应力分布区域内部仍然会有零星分布的较低应力,这也与苹果受压所表现出的类似损伤特征相一致。

2.2 苹果静压接触应力分布特性分析

由图 4 可知,苹果静压时的应力均值随压力变化很小,主要在 $0.26 \sim 0.31$ MPa 波动。说明,苹果的应力均值对损伤面积无影响,换言之,苹果的损伤面积与应力均值无直接关系。

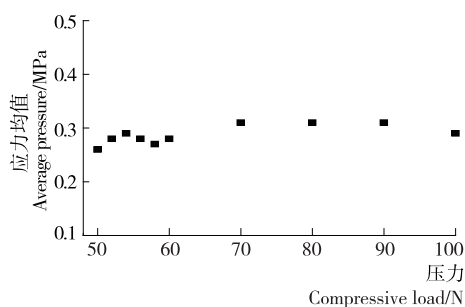


图 4 苹果静压接触应力均值随压力的变化

Figure 4 Change of average pressure of apple with increasing compressive loads

由图 5 可知,不同范围的接触应力分布具有正态分布的特征。 <0.10 MPa 的低应力和 ≥ 0.50 MPa 的高应力的面积都很小,其中, <0.10 MPa 的应力分布面积均值为 16.9 mm^2 ,与接触应力面积和损伤面积间的差值非常接近,进一步暗示,主要分布在受压边缘 <0.10 MPa 的应力面积应该反映了苹果果肉未发生损伤的区域; ≥ 0.50 MPa 的应力分布面积仅为 $1 \sim 13 \text{ mm}^2$,只在受压区域零星分布,这应该是苹果表面的凸起所引起局部较大应力,并不是造成苹果损伤的主要原因。相比较而言, $0.20 \sim 0.40$ MPa 的应力面积分布始终最大,占应力总面积的 72% ,构成了苹果褐变损

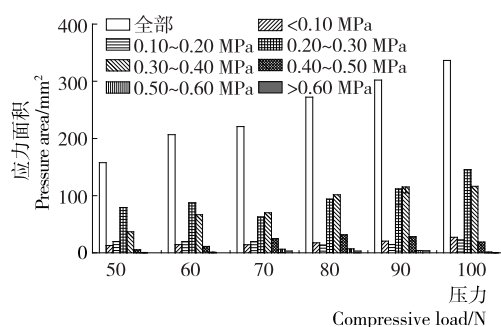


图 5 苹果不同压力时的接触应力分布

Figure 5 Contact pressure distribution of apple under different compressive loads

伤的主要区域。

2.3 苹果静压损伤面积与应力面积的关系

由图 6 可知,当压力 ≤ 52 N 时,苹果虽存在一定的接触应力面积但无损伤,这是因为苹果表面尽管出现较小的压陷,只是果肉弹性变形的反映,而其果肉细胞却未发生破裂,因而无法释放酚类物质使受压部位果肉发生酶促褐变。但当压力达到 54 N 时,苹果却在应力面积未出现剧增的情况下,受压部位出现酶促褐变而形成肉眼可辨的较大损伤,表明 54 N 压力时苹果果肉细胞已发生破裂。根据 54 N 压力及相对应的应力分布面积计算可知,此时苹果果肉的平均应力为 0.29 MPa,该值很可能就是苹果果肉失效或细胞破裂的失效力,这也与 Chakespari 等^[19]获得的苹果组织静压破裂应力值较为接近。此外,从苹果损伤面积与接触应力面积随压力变化趋势比较可以看出,两趋势线近乎于平行,苹果应力总面积高出其损伤面积 9% ,其间距所表示的接触应力面积和损伤面积差值约为 19.2 mm^2 ,与上一节分析中 <0.10 MPa 应力分布的平均面积完全一致。由表 2 可知,分别采用 ≥ 0.05 , ≥ 0.10 , ≥ 0.15 , ≥ 0.20 MPa 的应力面积来估测苹果损伤时, ≥ 0.10 MPa 的应力面积最接近苹果损伤面积,平均相对误差率仅为 1.66% ,这与本课题组^[7]采用 ≥ 0.20 MPa 的应力面积估测香梨静压损伤面积的误差要低得多,图 7 的统计结果也进一步表明,苹果静压损伤面积与 ≥ 0.10 MPa 的应力面积呈高度线性正相关($R^2 = 0.99$),应力面积(A)与损伤面积($A_{P \geq 0.10}$)的关系为: $A = 0.98A_{P \geq 0.10} + 1.95$ 。

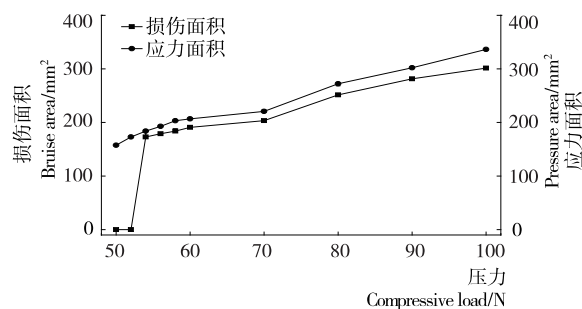


图 6 不同压力下苹果损伤面积与应力面积

Figure 6 Changes of bruise area and contact pressure area of apple with increasing compressive loads

表2 应力面积与损伤面积结果比较

Table 2 Comparisons of contact pressure area with bruise area

压力/N	平均相对误差率/%				
	≥0 MPa	≥0.05 MPa	≥0.10 MPa	≥0.15 MPa	≥0.20 MPa
50	—	—	—	—	—
52	—	—	—	—	—
54	9.72	6.69	1.22	2.04	6.42
56	10.72	9.74	2.09	9.50	11.20
58	13.16	9.73	2.05	10.34	11.32
60	6.07	5.18	1.11	12.23	11.74
70	8.53	5.50	1.23	17.90	15.92
80	8.26	5.99	2.12	7.60	4.07
90	7.45	4.80	1.74	8.49	5.12
100	9.49	6.12	1.74	7.89	5.84

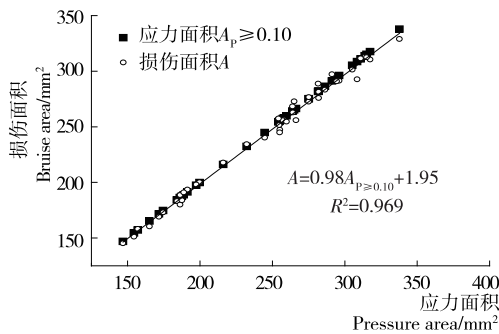


图7 接触应力面积与损伤面积的关系

Figure 7 Relationship between contact pressure area of ≥ 0.10 MPa and bruise area

综上所述,苹果果肉失效的平均应力为 0.29 MPa,但损伤面积已超出了 0.29 MPa 的应力分布范围,达到了 0.10 MPa 的,可能是果肉在 0.29 MPa 应力作用下发生破裂后,会导致周围相邻组织的溃塌或破裂,而引起褐变的酚类物质的释放则会进一步增强这种扩散效应,只有 <0.10 MPa 应力范围的果肉组织可能相对完整,未受酚类物质褐变作用。从这些分析充分说明,苹果果肉在受压边缘 <0.10 MPa 范围的应力区域内未发生褐变损伤,只有 ≥ 0.10 MPa 的应力面积才是苹果实际损伤区域。

3 结论

苹果静压时,当压力达到 54 N 时开始出现酶促褐变损伤,果肉失效或细胞破裂的失效力为 0.29 MPa。苹果静压接触时的应力均值与其损伤面积无直接关系; ≥ 0.50 MPa 的应力分布面积积极小,不是造成苹果损伤的主要原因,0.20~0.40 MPa 的应力分布占 72%,是苹果损伤的主要区域。苹果静压接触应力总面积比其实际损伤面积高出 9%, ≥ 0.10 MPa 的应力面积最接近苹果损伤面积,可采用回归方程 $A = 0.98A_{p \geq 0.10} + 1.95$ 对苹果静压损伤面积精确估测,平均误差仅为 1.66%,这可为苹果静压损伤面积的有限元准确模拟预测提供重要依据。

参考文献

1 王艳颖,胡文忠,庞坤. 机械损伤对富士苹果抗氧化酶活性的影响[J]. 食品与机械, 2007, 23(5): 26~30.

2 汪景彦,张彦昌. 2013 年我国苹果产量和售价预测[J]. 果树实用技术与信息, 2013(6): 4.

3 Bulanon D M, Kataoka T. A fruit detection system and end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International, 2010, 1 285(7): 1~14.

4 Zhao De-an, Lv Ji-dong, Ji Wei. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112~122.

5 中华人民共和国农业部. NY/T 1973—2009 苹果等级规格[S]. 北京:中国农业出版社,2009.

6 Van Zeebroeck M, Van Linden V, Ramon H, et al. Impact damage of apples during transport and handling (Review)[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2007a, 45(2): 157~167.

7 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.

8 Siyami S, Brown G K, Burgess G J, et al. Apple impact bruise predication models[J]. Transaction of the ASAE, 1988, 31(4): 1 038~1 046.

9 Herold B, Geyer M, Studman C J, et al. Fruit contact pressure distribution-equipment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(3): 167~179.

10 Dan H, Okuhara K, Kohyama K. Visualization of planar stress distributions in cucumber cultivars using a multiple-point sheet sensor[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004 (84): 1 091~1 096.

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, Demarco 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 & 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): 5 125~5 128.

14 Lu Fei, 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.

15 孙慧杰,吴杰,冯哲. 香梨跌落碰撞接触应力分布特性及损伤估测[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 183~186.

16 Zarifneshat S, Ghassemzadeh H R, Sadeghi M, et al. Effect of impact level and fruit properties on golden delicious apple bruising[J]. Am. J. Agri. & Biol. Sci., 2010, 5(2): 114~121.

17 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(1): 10~19.

18 宋莲军,唐贵芳,杨月. 苹果多酚氧化酶的提取及其酶学特性的研究[J]. 农业机械, 2011(2): 146~149.

19 Chakespari A G, Rajabipour A, Mobli H, et al. Strength behavior study of apples (cv. Shafi Abadi & Golab Kohanz) under compression loading[J]. Modern Applied Science, 2010, 4(7): 173~182.