

荔枝挤压损伤有限元预测分析

李嘉威,陈 燕*,蒋志林,邹湘军,彭红星,王佳盛

(华南农业大学 工程学院/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:为减小荔枝的挤压损伤,通过试验测定了荔枝果壳和果肉的极限应力,建立了根据荔枝结构所对应的有限元模型,模拟了外力沿不同方向挤压荔枝的过程,得到荔枝内部组织的等效应力云图。结果显示:挤压过程中,荔枝果壳的应力大于果肉,果肉的损伤先于果壳;相同挤压压力下,果壳的纵向挤压应力小于横向,但果肉的纵向挤压应力却大于横向;荔枝的挤压损伤具有各向异性,试验范围内,果肉出现机械损伤的纵向和横向挤压压力分别为10 N和20 N,果壳出现机械损伤的纵向和横向挤压压力为35 N和25 N。

关键词:荔枝;挤压损伤;有限元预测

中图分类号:S667.1;O242 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2016)11-0145-04

Finite Element Analytic Prediction of Compression Injury of Litchi

LI Jiawei, CHEN Yan*, JIANG Zhilin, ZOU Xiangjun, PENG Hongxing, WANG Jiasheng

(College of Engineering, South China Agricultural University/Ministry of Education Key Laboratory of

Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to reduce the compression injury of litchi, the limit stress of litchi hull and litchi flesh was measured by experiment, a finite element model was established based on the structure of litchi, the process of compressing litchi by the force in different directions was simulated, and the equivalent stress nephograms of the inner organization of litchi were made. The results indicated that during compressing, the stress of the hull was greater than that of the flesh and the injury of the flesh was ahead of the hull. Under the same extrusion force, the vertical extrusion stress was less than the landscape extrusion stress for the hull, but opposite for the flesh. Because the compression injury of litchi was anisotropic, in the experimental scope, the extrusion forces (vertical and landscape) were 10 N and 20 N when the mechanical injury of litchi flesh occurred, and the extrusion forces (vertical and landscape) were 35 N and 25 N when the mechanical injury of litchi hull occurred.

Key words: litchi; compression injury; finite element analytic prediction

荔枝素有岭南佳果之称,但因其皮薄、肉多、含水量高,在采摘、加工和储运等过程中受到外力作用容易产生机械损伤^[1-2],损伤后的荔枝极易腐烂、变质。为减少果蔬的机械损伤,有许多学者通过建立果蔬的有限元模型,仿真模拟果蔬受载荷过程,分析果蔬的内部应力分布^[3-8],这些研究表明,采用有限元法通过分析果蔬的微观力学特性可以研究预测果

蔬的损伤规律。而针对荔枝的机械损伤,文献[9]研究了宏观损伤后荔枝的生理和果皮形态,并采用有限元法研究了荔枝的微观力学特性^[10]。水果的宏观损伤可见,而微观损伤是生物表皮下的组织结构破坏,目前关于荔枝的内部损伤规律、损伤的边界条件等研究在国内外尚未见报道。

前期研究^[11]已测定了荔枝各组分弹性模量,本

收稿日期:2016-06-20

基金项目:广东省科技计划项目(2014A020208091,2015A020209120,2015A020209111,2013B020503059);广东省自然科学基金项目(2015A030310258)

作者简介:李嘉威(1993-),男,广东江门人,在读硕士研究生,研究方向:机械自动化。E-mail:lijiawei110@stu.scau.edu.cn

*通讯作者:陈 燕(1964-),女,广东广州人,副教授,硕士,主要从事农业机械化工程研究。E-mail:cy123@scau.edu.cn

研究在此基础上将进一步测定荔枝果壳和果肉的极限应力,构建荔枝有限元模型,仿真模拟荔枝受挤压过程,分析受挤压荔枝内部应力分布规律,预测荔枝的挤压损伤,从而为减少荔枝机械损伤和荔枝作业装备设计开发提供基础数据和可控措施。

1 材料和方法

1.1 材料与设备

损伤预测分析和测定用的荔枝品种为增城桂味,纵向直径(果蒂与果顶连线方向)为 30.10~35.21 mm,2 个相互垂直的横向直径(腰部方向)分别是 30.28~35.48 mm 和 29.82~35.30 mm,采后 12 h 内完成荔枝果壳、果肉的极限应力测定。测定设备采用广材试验仪器有限公司的 WD-E 系列精密型微控电子式万能试验机,精度 $\pm 0.5\%$,分辨率 $\pm 1/120\,000$,试验过程可由计算机自动完成力和位移的数据采集。

1.2 荔枝果肉和果壳极限应力测定

荔枝去壳去核,将果肉裁成边长为 10 mm 的正方体试样后马上进行压缩试验,试验重复 10 次。试验后,根据试验数据,按式(1)计算荔枝果肉压缩极限应力。

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

式中 σ 为极限应力(MPa); A 为试样横截面面积(mm^2); F_{\max} 为试样失效时所受的最大力。

沿荔枝纵向和横向分别取果壳试样各 10 个,试样长 30 mm、宽 8 mm,以 10 mm/min 的速率进行单向拉伸试验^[11]。根据试验数据,按式(1)求取荔枝果壳纵向和横向的拉伸极限应力。

1.3 荔枝挤压损伤有限元预测方法

采用有限元法预测分析荔枝的挤压损伤,需建立荔枝的有限元模型,然后再模拟荔枝受挤压过程。

1.3.1 荔枝几何模型的建立 荔枝的剖切面如图 1(a)^[10] 所示。荔枝果实主要由果柄、果蒂、果壳和果肉组成。果柄、果蒂与果壳连接在一起,果壳、果肉、果核均有明显的接触面。建立荔枝几何模型时,将其看作由果壳、果肉和果核三部分组成。由文献[11]可知,荔枝的整果球度达到了 0.97,因此在实际建模时可以将荔枝整果简化为球体,果核简化为长椭圆体。根据荔枝整体和各部分实测数据,确定荔枝有限元模型的直径为 34 mm,果核的长轴和短轴分别为 15 mm 和 9 mm,果壳厚度为 1 mm,建立的有限元模型如图 1(b)所示。

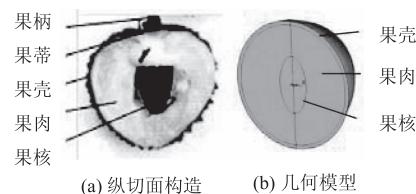


图 1 荔枝的构造与几何模型

1.3.2 荔枝有限元模型的建立 为减少计算机模拟分析所需的时间,建立 1/2 荔枝有限元模型进行研究。建模时,将荔枝果皮和果肉视为各向同性的线弹性材料,根据文献[12]定义材料的弹性模量,泊松比参考文献[13]取值,具体数值见表 1。荔枝各部分网格划分采用具有 20 节点的 solid186 单元,用六面体映射划分方法。

表 1 荔枝果肉和果壳材料属性

组分	方向	弹性模量/MPa	泊松比
果核	纵向	10.40	0.33
	横向	24.30	0.33
果壳	纵向	16.94	0.33
	横向	18.06	0.33
果肉		0.45	0.40

外物挤压荔枝时其刚度远大于荔枝的自身刚度,因此可以把荔枝与挤压面的接触类型视为刚-柔接触。模拟挤压时只需选取刚性目标面上的一个点作为控制节点,载荷将被施加于该节点上,通过控制单一节点则可等效为整个刚性目标面的运动。纵向和横向的模型网格划分与挤压方式如图 2 所示, F 为挤压力,加载处为所选定的刚性面控制节点。

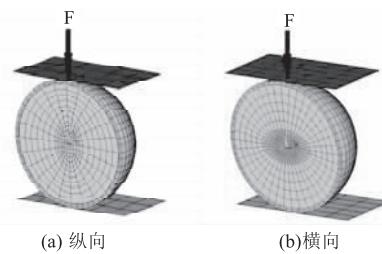


图 2 荔枝网格划分与挤压方向

1.3.3 模型验证与挤压损伤预测分析方法 为了使用有限元模拟结果准确分析荔枝的夹持损伤,需要对有限元模型的正确性进行验证。验证时,采用刚性平板对荔枝有限元模型进行挤压模拟。模拟试验后,分析比较仿真曲线与实物压缩试验曲线。

荔枝果肉与果壳的极限应力不同,其受损的挤压力也不同。本研究采用 9 个挤压压力(1 N、5 N、10 N、15 N、20 N、25 N、30 N、35 N 和 40 N)分别进行荔枝的有限元挤压模拟试验。模拟试验后通过荔枝的内部最大等效应力和应变图分析其挤压损伤情况。

2 结果与分析

2.1 荔枝各组分极限应力

试验测得荔枝果壳纵向和横向拉伸的极限应力分别为 1.553 MPa 和 1.771 MPa, 果肉压缩极限应力为 0.089 MPa。

当荔枝受挤压时, 果壳在拉应力作用下发生破裂, 拉应力方向垂直于挤压方向^[10]。因此, 在荔枝挤压有限元模拟分析时, 判断果壳纵向挤压下出现损伤的极限应力取其横向拉伸极限应力 1.771 MPa, 而横向挤压时则取其纵向拉伸极限应力 1.553 MPa。

2.2 荔枝的有限元模型验证

图 3 是荔枝整果压缩试验和有限元模拟试验所得的支反力与变形关系曲线图。由图 3 可见, 在夹持力小于 40 N 时, 模型曲线与试验曲线非常接近, 相关系数均达到了 0.998 以上。因此, 在试验范围

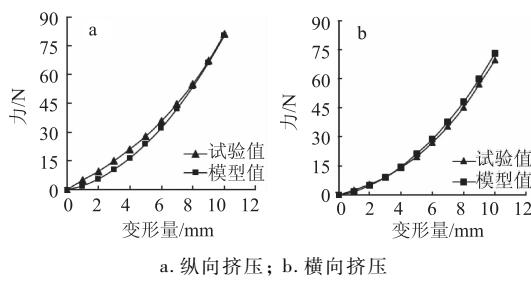


图 3 荔枝受挤压的仿真与试验曲线

内, 模型的精度完全满足模拟试验的要求。

2.3 荔枝挤压有限元模拟结果分析

2.3.1 荔枝受挤压后内部的应力与变形特性 不同方向挤压下荔枝果壳和果肉最大的等效应力 σ_{\max} 与变形量 δ_{\max} 如表 2 所示。由表 2 可见, 随着挤压力的增大, 荔枝果壳和果肉的最大等效应力与变形量也随之增大; 相同挤压方向和挤压压力下, 果壳的等效应力与变形量均大于果肉; 在同一挤压压力下, 纵向挤压下果壳的最大等效应力和变形量均小于横向挤压, 但纵向挤压下果肉的最大等效应力和变形量却大于横向挤压。模拟结果表明, 荔枝的抗挤压能力具有各向异性, 因此, 不同方向挤压下, 荔枝的损伤各异。

2.3.2 纵向挤压下荔枝损伤预测 由表 2 可见, 当挤压压力小于 10 N 时, 荔枝果壳和果肉的最大等效应力均小于各自的极限应力, 不会对荔枝造成机械损伤; 当挤压压力增大到 10 N 时, 果壳的最大等效应力仍小于其极限应力, 但果肉的最大等效应力为 0.098 MPa, 大于其极限应力 0.089 MPa, 这表明果肉组织开始出现机械损伤; 当挤压压力增大至 35 N 时, 果壳最大等效应力为 1.883 MPa, 大于其极限应力 (1.771 MPa), 说明此时不但果肉产生机械损伤, 果壳也出现机械损伤。图 4 是纵向挤压荔枝, 其果壳和果肉产生机械损伤时的等效应力分布云图。由图 4 可见, 沿挤压

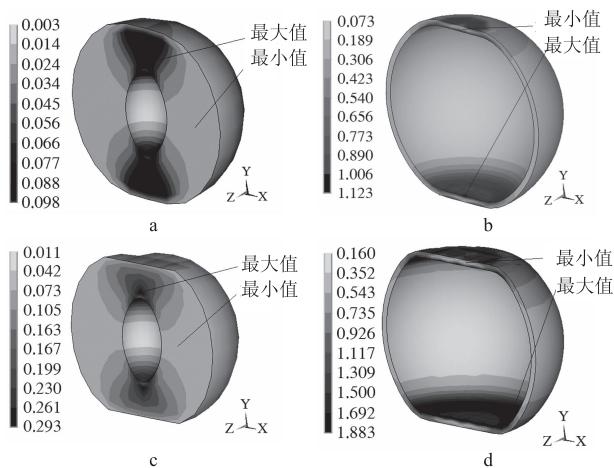
表 2 横向和纵向模拟挤压时荔枝各部分最大等效应力和变形量

挤压方向	组分	统计项	挤压压力/N								
			1	5	10	15	20	25	30	35	40
纵向	果壳	σ_{\max}/MPa	0.634	0.922	1.123	1.307	1.426	1.536	1.756	1.883	2.041
		δ_{\max}/mm	0.505	1.697	2.641	3.400	4.034	4.615	5.178	5.665	6.100
	果肉	σ_{\max}/MPa	0.022	0.068	0.098	0.142	0.181	0.219	0.258	0.293	0.325
		δ_{\max}/mm	0.478	1.664	2.504	3.290	3.994	4.635	5.215	5.634	6.009
横向	果壳	σ_{\max}/MPa	0.662	0.963	1.165	1.390	1.489	1.698	1.909	2.072	2.240
		δ_{\max}/mm	0.511	1.699	2.692	3.486	4.145	4.745	5.295	5.790	6.228
	果肉	σ_{\max}/MPa	0.018	0.058	0.073	0.089	0.105	0.118	0.133	0.152	0.169
		δ_{\max}/mm	0.473	1.668	2.659	3.455	4.124	4.722	5.263	5.749	6.194

方向靠近果核处的果肉应力最大, 因此果肉损伤首先出现在此处, 然后随着挤压压力的加大向外扩展; 果壳内侧的应力大于外侧, 因此果壳损伤首先出现在内侧。

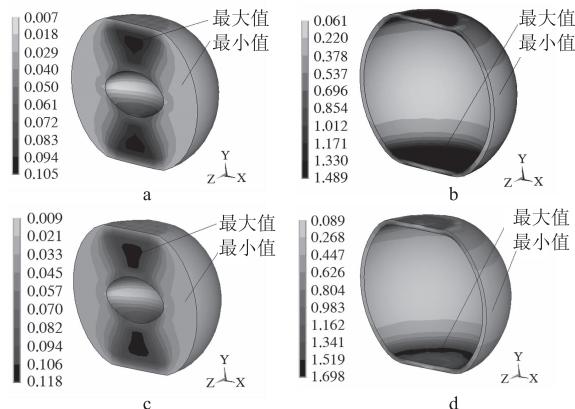
2.3.3 横向挤压下荔枝损伤预测 从表 2 可以看出, 当挤压压力小于 15 N 时, 荔枝果壳和果肉的最大等效应力均小于各自的极限应力, 不会对荔枝造成机械损伤; 当挤压压力增大至 20 N 时, 荔枝果壳的最大等效应力仍小于其极限应力, 但果肉的最大等效应力为 0.105 MPa, 大于其极限应力 0.089 MPa, 说

明此时果肉已经出现机械损伤; 当挤压压力增大至 25 N 时, 果壳内侧最大等效应力为 1.698 N, 大于其极限应力 (1.553 MPa), 说明此时不仅果肉出现机械损伤, 果壳内侧也出现了机械损伤。图 5 是横向挤压荔枝时, 其果壳和果肉产生机械损伤时的等效应力分布云图。由图 5 可见, 横向挤压时, 果肉损伤首先出现在挤压点与果核之间的果肉中部, 然后随着挤压压力的加大, 损伤向外扩展, 果壳的损伤也首先出现在内侧。



a、b 分别为果肉、果壳在 10 N 挤压力下的等效应力;
c、d 分别为果肉、果壳在 35 N 挤压力下的等效应力

图 4 纵向挤压荔枝果壳和果肉发生破坏时的等效应力分布



a、b 分别为果肉、果壳在 20 N 挤压力下的等效应力;
c、d 分别为果肉、果壳在 25 N 挤压力下的等效应力

图 5 横向挤压荔枝果壳和果肉发生破坏时的等效应力分布

3 结论与讨论

本试验通过对荔枝不同组分进行加载试验,测得荔枝的果壳纵向和横向拉伸的极限应力分别为 1.553 MPa 和 1.771 MPa, 果肉压缩的极限应力为 0.089 MPa。

荔枝挤压有限元模拟表明,相同挤压方向和挤压压力下,果壳的等效应力和变形量大于果肉;同一挤压压力下,纵向挤压下果壳的最大等效应力和变形量均小于横向挤压,但果肉的最大等效应力和变形量却大于横向挤压。

荔枝的挤压损伤具有各向异性,模拟试验范围内,荔枝果肉出现机械损伤的纵向和横向挤压压力分别为 10 N 和 20 N,果壳出现机械损伤的挤压压力为 35 N 和 25 N。纵向挤压下荔枝果肉损伤首先出现在沿挤压方向靠近果核处,横向挤压下其首先出现在挤压点与果核之间的果肉中部;无论纵向还是横向挤压,荔枝果壳损伤首先出现在内侧。

参考文献:

- [1] 蒋志林,陈燕,谈建豪,等.荔枝应力松弛特性及其损伤的试验研究 [J].现代食品科技,2015,31(5):96-101.
- [2] Li Z, Thomas C. Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits [J]. Trends in Food Science & Technology,2014,35(2):138-150.
- [3] 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.
- [4] Sadrnia H, Rajabipour A, Jafari A, et al. Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models[J]. Journal of Food Engineering,2008,86(2):272-280.
- [5] 王芳,王春光,杨晓清.西瓜的力学特性及其有限元分析[J].农业工程学报,2008,24(11):118-122.
- [6] 卿艳梅,李长友,黄汉东,等.龙眼力学特性的有限元分析[J].农业机械学报,2011,42(6):143-147.
- [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] 李智国.基于番茄生物力学特性的采摘机器人抓取损伤研究[D].镇江:江苏大学,2011.
- [9] 陈燕,蔡伟亮,向和平,等.机械损伤对荔枝生理与果皮形态的影响[J].农机化研究,2013,35(2):138-141.
- [10] 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):358-363,443.
- [11] 蔡伟亮.基于采摘机械的荔枝生物力学特性研究[D].广州:华南农业大学,2012.
- [12] 李建国.荔枝学[M].北京:中国农业出版社,2008.
- [13] 周祖锷.农业物科学[M].北京:农业出版社,1994:40-50.