

苹果切割刀具的有限元分析及切割方式研究

Finite element analysis and cutting method of apple cutting tool

吴小华¹ 张舒慧¹ 陈建军² 谭佐军²

WU Xiao-hua¹ ZHANG Shu-hui¹ CHEN Jan-jun² TAN Zuo-jun²

(1. 华中农业大学工学院, 湖北 武汉 430070; 2. 华中农业大学理学院, 湖北 武汉 430070)

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

摘要:切割方式会直接影响鲜切果蔬的质量。通过压缩试验测量富士苹果的杨氏弹性模量,建立果肉实体力学模型。通过 Ansys-Workbench 建立切割苹果的有限元模型,模拟在不同刀具形状、楔角、材料和切割速度下,果肉受到的最大弹性变形量和最大剪切力值。确定了适合于苹果切割的刀具形状为矩形,楔角为 $11^{\circ}\sim 15^{\circ}$,材料为 45 钢,同时切割速度越快,果肉受到变形和剪切力越大。该研究确定了切割苹果的方式,为工业切割果蔬提供了一定参考依据。

关键词:果蔬切割;有限元分析;切割方式;楔角

Abstract: The different cutting methods can directly affect the quality of fruits and vegetables in cutting fruit and vegetable. The Elastic Modulus of the Fuji apples were measured by the compression experiment, and the physical model of the pulp was established. In this study, the finite element model of simulated cutting apple was established by Ansys-Workbench, and the maximum elastic strain and the maximum shear stress were also analyzed under different tool shape, wedge angle, and material, and the cutting speed. It was determined that the shape of the tool suitable for apple cutting was rectangular, the wedge angle is $11^{\circ}\sim 15^{\circ}$ and the material was 45 steel. The faster the cutting speed could get the greater distortion strain and shearing stress. The study identified the way to cut apples and provided some reference for industrial cutting of fruits and vegetables.

Keywords: Fruit and vegetable cutting; finite element analysis; cutting method; wedge angle

切割果蔬又称为轻度加工果蔬或半处理果蔬^[1],由果蔬的采后清洗、去皮、切片或切割、修整、用塑料薄膜袋或外覆

塑料膜包装等组成,具有新鲜、方便、营养、无公害等特点。果蔬的切割会使其受到机械损伤,而引发一系列不利于贮藏的生理生化反应,如乙烯产生加速、呼吸加快、酶促和非酶促褐变加快、组织变老等,也会使营养物质流出,同时使果蔬抵抗微生物的能力下降^[2],导致组织腐烂变质。因而切割果蔬产品必须保证组织新鲜、品质一致、无病害缺陷和颜色变化(如褐变)等,而达到此要求的关键是尽可能减少果蔬切割中受到的机械损伤。苹果是最常见的切割果蔬之一^[3]。目前仅针对苹果削皮的方式和特点,设计了全自动苹果削皮机或去皮机^[4-5],未见有关苹果切割刀具及切割方式的报道。

本设计采用基于 Ansys-Workbench 软件的有限元分析方法,建立了刀具切削苹果过程的三维分析模型,选择合理的刀具形状、材料,对刀具切削苹果过程进行动态仿真,比较在不同刀具形状、楔角和材料下,苹果果肉组织的最大弹性变形和最大剪切力值,以确定最佳刀具参数,同时对比在不同切割速度下,苹果果肉组织受力与变形情况,旨在为工业切割苹果的刀具参数选择以及切割速度提供参考。

1 材料与方法

1.1 苹果杨氏弹性模量

采用 TMS-PRO 型质构仪测量 20 个山东极品富士苹果果肉在被压缩过程中的受力情况。根据胡克弹性原理,以长方体试样采用单轴压缩方式测得果肉的力学参数,压缩试样采用平板压头,加载速度 20 mm/min,最大的加载位移 8 mm,回程速度 30 mm/min。

记录样品受到最大弹性应力值 F (弹性阶段最大压力) 和最大压缩距离 ΔL ,按照式(1)计算苹果果肉样品的杨氏弹性模量^[6-7]:

$$E = \frac{FL}{A \Delta L}, \quad (1)$$

式中:

E ——杨氏弹性模量,MPa;

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:2662016PY059);湖北省自然科学基金面上项目资助(编号:2015CFB479)

作者简介:吴小华,男,华中农业大学在读硕士研究生。

通信作者:谭佐军(1977—),男,华中农业大学教授,博士。

Email:tzj@mail.hzau.edu.cn

收稿日期:2017-04-14

F ——试样弹性极限点所对应力的80%^[8],N;
 $L, \Delta L$ ——试样压缩前长度和被缩量,mm;
 A ——试样横截面积,mm²。

1.2 几何模型的建立

研究苹果有限元模型时,大部分学者将苹果果实假设为仅有果肉构成的单一模型或是只由果皮和果肉组织构成的双层模型^[9]。本设计仅考虑切割果蔬中果肉组织的变化情况,因此只建立果肉组织的单层模型。苹果纯果肉组织一般位于果梗中心径向10~15 mm处,假设切割部位位于离果皮径向13 mm处。将苹果切断后的半切面图像导入 Auto CAD 软件,根据苹果截面实际尺寸与图像尺寸的比值作为缩放比例,使苹果截面实际尺寸与导入的苹果图像大小相等;然后采用样条曲线功能提取苹果半切面的轮廓曲线;最后用 Solidworks 三维软件对轮廓线进行放样,建立苹果半切体几何模型^[10]。将苹果半切体几何模型与刀具模型组合成装备的几何模型。

1.3 单元类型及接触对

刀具与苹果模型均属于三维实体模型,采用 Solid 单元类型。其中苹果模型运用 Solid187 单元划分^[11]。Solid187 单元由 10 个节点定义,有二次方位移,具有很好的划分不规则网格能力,且在生物组织网格划分中二次方位移的效果更好。而刀具模型采用常规 Solid186 钢单元类型划分。通过 2 种单元网格划分后刀片拥有 374 个单元体,苹果模型拥有 8 449 个单元体。

在刚性和柔性接触问题中,刚性面被定义为目标面,柔性面被定义为接触面。刀具属于刚性体,苹果属于柔性体。刀具切面与苹果半切面两两接触中,刀具切面为刚性面被定义为目标面,而苹果半切面为柔性面被定义为接触面。刀具目标面选择常用钢材接触单元 TARGE170。果肉接触面选用 CONTA174 单元类型,CONTA174 单元类型可以位于有中节点的三维实体单元或壳单元的表面,且在三维面接触中,其高阶四边形单元可最大化地查看组织变形和受力情况^[12-13],因此选用此单元类型来定义果肉接触面的接触单元。

1.4 苹果在切割中的受力情况

刀具的切割方式主要由刀具进入材料的方向决定。砍切和滑切为 2 种主要的切割方式,切割方向的垂直和法向分力分别为砍切力和滑切力^[14]。目前运用于果实切割中的常用刀具形状有矩形、梯形和月牙形 3 种。3 种刀具对切面的受力情况见图 1。

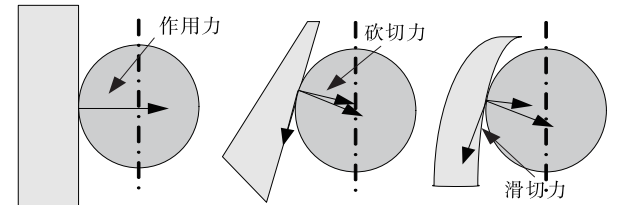


图 1 切割面在不同刀具下的受力情况
Figure 1 Analysis of force of the cutters in different shapes

切力,而在梯形和月牙形刀具下,苹果同时承受砍切力和滑切力,砍切力与滑切力大小与梯形角度和弧度相关。

2 结果与分析

2.1 苹果果肉的杨氏弹性模量

质构仪测量苹果果肉的应力与压缩量的关系见图 2。果肉样品受力主要经历了 2 个过程。由图 2 可见,在 0.0~5.5 mm 时为弹性变形过程,在 5.5~7.0 mm 时为塑性变形过程,7.0 mm 之后为平板压头回程阶段。

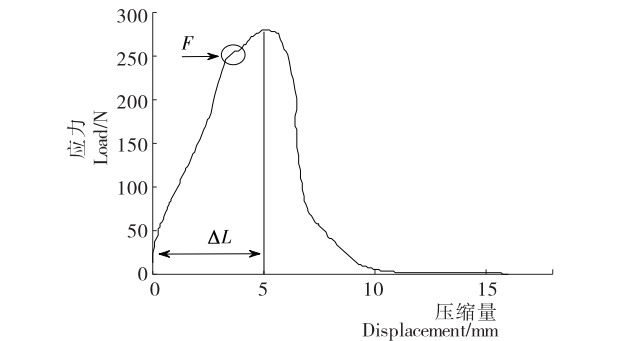


图 2 果丁应力与压缩量的关系
Figure 2 The relation of stress and compression of fresh from apple

由式(1)计算得 20 个果肉样品杨氏弹性模量的平均值为 2.23 MPa,标准误差为 0.279。模拟中取苹果果肉样品的杨氏弹性模量为 2.23 MPa。果蔬的泊松比为 0.2~0.5^[15],本设计中设置苹果果肉的泊松比为 0.35。通过排水法测得苹果果肉组织的密度为 910 g/cm³。

2.2 刀具形状的影响

由于果肉在被切割过程中,主要受到剪切力,来自于刀具的正压力很小,且对于剪切力而言,正压力对果肉的损害更小,因而只分析果肉组织受到的剪切力。不同的刀具形状会影响切割过程中果肉受到的砍切力和滑切力。在刀具材料为 45 号钢,刀具楔角 7°,切割速度 10 mm/s 下,模拟得到果肉组织受到的最大弹性变形和最大剪切力见表 1。由表 1 可知,在矩形刀具切割下,果肉组织的最大弹性变形和最大剪切力均低于其他 2 种刀具,主要原因在于矩形刀具在切割果肉组织时,只有垂直于切割方向的砍切力,而梯形和月牙形刀具均存在法向的滑切力;其中月牙形刀的滑切力相对梯形刀具而言更大。

图 3 为不同刀具受到的最大弹性变形图。刀具在切割中几乎没有弹性形变,图中将其隐藏。由图 3 可知,矩形刀

表 1 不同刀具形状下的变形和剪切力		
Table 1 Elastic strain and Shearing stress of cutters indifferent shapes		
刀具形状	最大弹性变形/(mm·mm ⁻¹)	最大剪切力/MPa
矩形	6.79E-4	0.113
梯形	6.81E-4	0.144
月牙形	4.13E-2	0.263

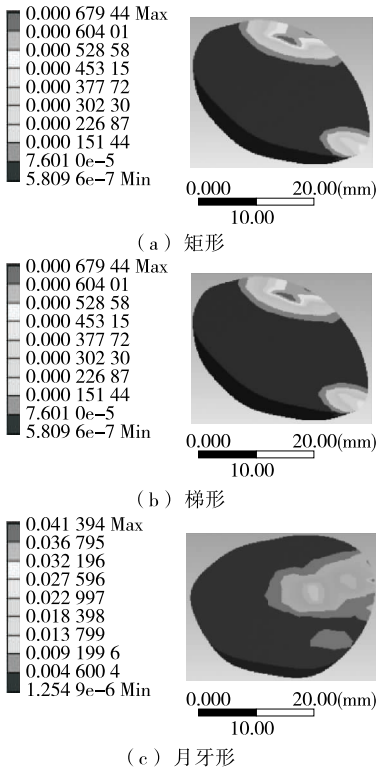


图 3 不同刀形下组织的弹性变形图
Figure 3 Elastic strain in different tool shapes

具的最大形变量位于组织边缘集中地带;在梯形刀具下,组织受到的最大形变量在边缘呈线性化分布;而在月牙形刀具下组织最大形变量扩大到组织中间部位。由表 1 和图 3 可知,矩形刀具在切割苹果果肉时具有最小的弹性形变和最小剪切力,且最大形变分布区域小,说明了矩形刀具最适合苹果果肉的切割。

2.3 刀具楔角的影响

刀具楔角影响切割时的阻力,也影响刀具的强度和磨损程度,反过来也会影响苹果果肉组织的应力情况。合理的刀具楔角能适度减小切割时苹果果肉组织受到的伤害。选择 5 种不同楔角的刀具进行仿真,分析切割苹果时,其内部最大形变量和最大剪切力。

设定刀具长度为 80 mm,刃长为 15 mm,材料为 45 号钢,取刀具楔角分别为 7°,11°,15°,19°,23°,在 10 mm/s 的切割速度下,仿真得到苹果果肉最大弹性变形和剪切应力,见表 2。

表 2 不同楔角的刀具对应的变形和剪切力		
Table 2 Elastic strain and Shearing stress in different wedge-shaped angles		
刀具楔角/(°)	最大弹性变形/(mm·mm ⁻¹)	最大剪切力/MPa
7	6.791E-4	0.113
11	6.218E-4	0.081
15	6.743E-4	0.056
19	6.798E-4	0.067
23	5.345E-3	0.087

由表 2 可知,刀具楔角为 11°时,果肉组织受到的最大弹性变形量具有最小值;而在楔角为 15°时,组织受到的最大剪切力具有最小值,其它楔角刀具得到弹性变形和剪切力均高于以上 2 种。说明刀具楔角在 11°~15°时,能得到相对最小的弹性变形和相对最大的剪切力值。

图 4 为刀具楔角为 15°时,果肉受到的最大弹性变形图和最大剪切力图。同样刀具在切割中几乎没有弹性形变,在最大弹性变形图中将其隐藏,由图 4(a)可知,果肉的最大弹性变形位于组织边缘地带,中间组织部位的变形量可以忽略;由图 4(b)可知,刀具尾部受到最大剪切力,因为随着切割的深入,刀具受到的剪切力不断由刀尖向刀尾集中化分布,而果肉组织受到的最大剪切力在 0.011~0.033 MPa,保持均匀。

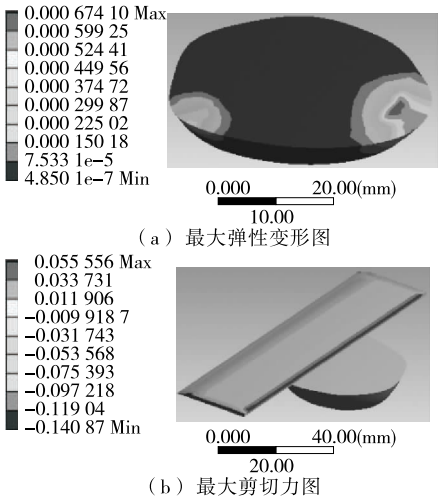


图 4 果肉的弹性形变和剪切力
Figure 4 Elastic strain and Shearing stress of fresh

2.4 刀具材料的影响

刀具材料影响刀具与果肉的接触情况,从而影响组织的受力与形变情况。采用 45 号钢、不锈钢(9Cr18)、工程塑料(聚氯乙烯)和橡胶 4 种材料的刀具,刀具楔角均为 15°,运行速度 10 mm/s,仿真得到苹果果肉受到的最大弹性变形量和最大剪切力见表 3。由表 3 可知,45 钢刀的最大弹性形变量和最大剪切力均最小,因而 45 钢材料的刀具在苹果果肉的切割中具有最优性能,其能最大化减少果肉组织受到的机械损伤。而工程塑料和橡胶得到的最大弹性变形值较大,这 2 种材料的刀具不适用于果蔬切割。

表 3 不同材料刀具对应的变形和剪切力		
Table 3 Elastic strain and Shearing stress in different materials		
刀具材料	最大弹性变形/(mm·mm ⁻¹)	最大剪切力/MPa
45 钢	6.743E-4	0.056
不锈钢	6.941E-4	0.073
聚氯乙烯	8.765E-3	0.082
橡胶	2.404E-2	0.165

2.5 切割速度的影响

在工业化的果蔬切割中,切割速度会直接影响工程的进展。在刀具形状矩形,刀具楔角 15°,材料为 45 号钢时,组织的最大弹性变形和最大剪切力具有最小值,在以上条件下,模拟不同的切割速度,果肉受到的最大弹性变形量和最大剪切力见表 4。由表 4 可知,刀具的切割速度越快,组织的最大弹性变形量和最大剪切力越大,因此在苹果切割中,为了减少对苹果果肉的破坏,应尽可能采用低速切割。但为了满足市场需求,在一定的最大弹性变形(无塑性变形)下,可以适当加大切割速度。

表 4 不同切割速度对应的变形和剪切力
Table 4 Elastic strain and Shearing stress in different cutting speeds

切割速度/ (mm·s ⁻¹)	最大弹性变形 (mm·mm ⁻¹)	最大剪切力/ MPa
5	9.520E-5	0.051
10	6.743E-4	0.056
15	1.014E-3	0.060
20	1.434E-3	0.068
25	1.705E-3	0.071

3 结论

在质构仪测量苹果杨氏弹性模量的基础上,运用 Ansys-Workbench 模拟在不同的刀具形状、楔角、材料和切割速度下,苹果果肉组织的形变量和受到的剪切力。发现在刀具形状为矩形,楔角在 11°~15°,刀具材料为 45 钢时,得到的组织最大弹性变形量和最大剪切力均具有最小值,同时发现,切割速度越快对组织的损伤量越大。为工业化切割果蔬的刀具选择及苹果切割器的设计提供了参考。

(上接第 80 页)

机方案确定了传动系统的方案,传动系统的关键机构是产生间歇运动的槽轮机构^[15],本研究对槽轮机构进行了参数设计和运动学仿真,可以看出槽轮机构的仿真结果与实际相符,Pro/E 的仿真结果对实际工程设计具有参考意义。

参考文献

[1] 曹有福,李树君,赵风敏,等.我国红枣开发加工现状、问题及对策[J].包装与食品机械,2009(4):46-49.
[2] 闫忠心,鲁周民,刘坤,等.我国红枣资源加工利用研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010(6):102-108.
[3] 宁天德.半自动硬枣去核划皮机:中国,01229251.6[P].2001-06-28.
[4] 彭三河.大枣去核装置的设计[J].包装与食品机械,2005(4):21-22.
[5] 刘振省.新型全自动红枣去核机:中国,201020249547.2[P].2011-01-12.

参考文献

[1] 胡文忠.鲜切果蔬加工与质量安全控制[J].食品安全质量检测学报,2015(7):2401-2402.
[2] 邵文俊,胡文忠,姜爱丽,等.鲜切果蔬次生代谢产物合成的研究进展[J].食品工业科技,2016,37(18):362-366.
[3] 祁景瑞,胡文忠,姜爱丽,等.果蔬切割加工与保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2005,5(4):7-9.
[4] 白雪宁,陈海峰.全自动苹果削皮机的开发与研究[J].陕西科技大学学报,2011,29(4):50-53.
[5] 曾珊琪,张翠珠,张建宁.全自动苹果去皮机的创新设计[J].包装与食品机械,2009,27(3):25-27.
[6] 吴杰.库尔勒香梨的动态粘弹特性及碰压损伤机理研究[D].西安:西北农林科技大学,2011:14-15.
[7] 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.
[8] 姬伟,李俊乐,杨俊,等.机器人采摘苹果抓取损伤机理有限元分析及验证[J].农业工程学报,2015,31(5):17-22.
[9] GYEONG-WON K, GAB-SOO D O, BAE Y, et al. Analysis of mechanical properties of whole apple using finite element method based on three-dimensional real geometry[J]. Food Science & Technology Research, 2008, 14(4): 329-336.
[10] 张柏树.基于 ANSYS-Workbench 的直线振动筛模态分析[J].科技展望,2016,26(13):121-123.
[11] 王鑫,麦云飞.有限元分析中单元类型的选择[J].机械研究与应用,2009,22(6):43-46.
[12] 贾明霞,钟佩思,杨梅,等.基于 ANSYS Workbench 的带夹套卧式储罐分析[J].食品与机械,2016,32(2):63-66.
[13] 李妍.基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的应用[D].长春:吉林大学,2004:20-24.
[14] 马保建,葛云,魏盼龙,等.红花切割刀具楔角有限元分析及刀具结构设计[J].中国农机化学报,2016,37(1):108-110.
[15] 周祖谔.农业物科学[M].北京:农业出版社,1994:27-28.
[6] 安锋利.红枣产品的开发利用[J].北方园艺,2010(10):235-236.
[7] 张雪松.连续式红枣去核机设计[J].食品工业,2013(11):192-194.
[8] 吕长安.大枣自动定向、输送及切片机的研究设计[D].兰州:甘肃农业大学,2010:52-55.
[9] 刘辰.外槽轮机构设计分析[J].机电工程技术,2009(2):61-63.
[10] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2004:236-237.
[11] 马成习.基于 Pro/E 的包机槽轮机构建模及运动仿真[J].包装工程,2008(2):36-37,40.
[12] 袁东阁.红枣自动去核机的设计与技术研究[D].泰安:山东农业大学,2014:44-47.
[13] 杨玉萍,季彬彬.同步带传动中张紧轮安装位置的优化设计[J].南通大学学报:自然科学版,2010(1):68-70.
[14] 张明辉,万全喜,吴家龙.基于 Matlab 与 Solidworks 方法的风力机叶片优化设计[J].流体机械,2012(11):41-45,65.
[15] 姚兆祯,张丽艳,李辉,等.基于 ANSYS 的 AP1000 安注箱壳体强度可靠性分析[J].压力容器,2016(2):61-66.