



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220130

不同加工工艺香蕉片脆性的量化与比较

马鑫¹, 马有川¹, 李媛¹, 武旭瑶¹, 吴中华^{1,2}

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;

2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

摘要: 采用力学和声发射结合的检测方法和装置, 分别采集不同加工工艺香蕉片产品从开始压缩到断裂过程中产生的力学和声学信号, 对香蕉片产品的脆性进行量化检测和分析. 结果表明: 真空脱水香蕉片的最大压力统计平均值和最大声发射能量统计平均值最高, 分别为 53.74 N 和 114.57 mV·ms; 而油炸香蕉片的最大压力统计平均值和最大声发射能量统计平均值最低, 分别为 24.88 N 和 20.18 mV·ms. 力学和声发射结合的检测方法可定量检测香蕉片脆性; 在烘烤、真空脱水、油炸、晾晒 4 种加工工艺中, 真空脱水条件下获得的香蕉片硬度和脆性最高.

关键词: 香蕉片; 脆性; 声发射; 质构

中图分类号: TS255.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)01-0048-07

Quantitative Analysis and Comparison of the Brittleness of Banana Chips Processed by Different Technologies

MA Xin¹, MA Youchuan¹, LI Yuan¹, WU Xuyao¹, WU Zhonghua^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

Abstract: In our study we adopted a new detection method, which combined mechanics and acoustic emission devices, to collect the mechanical and acoustic signals generated in the process of banana chips from compression to fracture, and quantitatively detected and analyzed the brittleness of banana chips. The results show the vacuum-dried banana chips exhibited a highest statistical average maximum stress and acoustic emission energy, which reached 53.74 N and 114.57 mV·ms, respectively. The fried banana chip exhibited a lowest statistical average maximum stress and acoustic emission energy, which reached 24.88 N and 20.18 mV·ms, respectively. The new method can quantitatively detect the brittleness of banana slices. In the four processing processes of roasting, vacuum drying, frying and sun drying, the banana chips obtained with vacuum drying shows the highest hardness and brittleness.

Key words: banana chips; brittleness; acoustic emission; texture

果蔬脆片是水果片和蔬菜片的统称, 是以水果、蔬菜为主要原料, 经各种加工工艺制备而成的方便即食、口感酥脆、营养丰富、绿色健康、便于携带的果蔬休闲食品. 果蔬脆片近年来受到消费者欢迎, 市场上销售的果蔬脆片种类越来越多, 相关产业发展迅速^[1-2]. 脆性是衡量果蔬脆片质构品质的一个重要指标, 也是影响消费者购买欲的重要因素之一, 因此需

要对果蔬片脆性进行评价. 对生产企业而言, 脆性的快速定量评价是十分必要的. 目前, 对食品“脆性”没有明确定义, 评价脆性时主要考虑产品的结构、咬或咀嚼时产生的声音、产品破碎时需要的力等^[3-4]. 脆性评价方法主要分为感官评定法、力学法和声学法 3 种^[5]. 感官评定法是评价者对测试产品的主观评价, 主要包括牙齿咬合食品的触感(力学)以及食品碎

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-09-21

基金项目: 国家重点研发计划子课题项目(2017YFD0400904-4)

作者简介: 马鑫(1997—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生; 通信作者: 吴中华, 教授, wuzhonghua@tust.edu.cn

裂时的听觉感受(声学)。感官评定需要一定量的合格的评价测试人员,且测试过程具有较强的主观性,无法达到定量测量的效果^[6]。力学法主要依靠质构仪等仪器对实验物料施加一定的外力,对样本进行压缩,得到力与时间的曲线,再对曲线进行分析得到反映脆性的数据^[7]。力学法操作简单,但只能分析力学属性,不能直接反映产品的酥脆程度^[8]。声学法是通过分析实验物料在被压缩时发出的声音信号来反映脆性^[9]。利用声学法研究食品脆性时,得到的声音信号通常是非平稳和不规则的,例如不同频率声波占比随时间变化,信号持续时间也因样本不同而存在差异^[10]。目前声学信号的测量主要采用麦克风和声压计,但其采样频率和灵敏度低,用于测量果蔬片破裂过程中发出的短促声音时易丢失信号。2020年,本课题组发现声发射技术的采样频率可达2 MHz,更适合分析食品破裂时发出的声音信号^[13]。

针对休闲果蔬片脆性定量评价的需求,本文以香

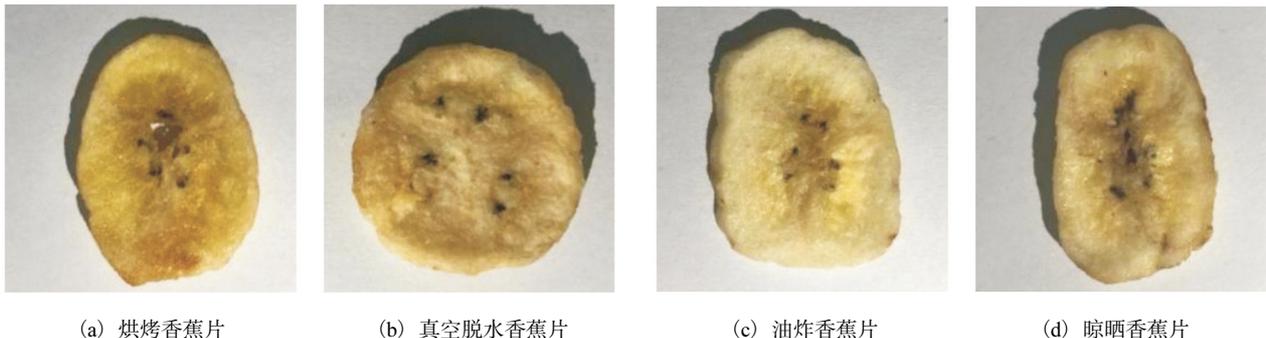


图1 香蕉片样品的外观图

Fig. 1 Appearance of the banana chips samples

表1 不同加工工艺香蕉片的营养成分及干基含水率

Tab. 1 Nutrients and dry basis moisture content of banana chips in different processing processes

加工工艺	能量/kJ	质量分数/%			干基含水率/%
		蛋白质	脂肪	碳水化合物	
烘烤	2 135	1.7	32.8	52.5	3.0
真空脱水	1 932	2.2	15.1	78.6	2.2
油炸	2 291	1.4	37.7	51.3	2.7
晾晒	2 120	1.8	26.8	64.6	3.0

注:表中能量数据为100 g样品所提供的能量

Micro-II型数字声发射系统(包括声发射仪、声发射传感器、前置放大器、信号采集系统等),北京声华兴业科技有限公司;CT3型食品质构仪,美国博勒飞公司;Sigma 300型场发射扫描电子显微镜,卡尔蔡司(上海)管理有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香蕉片脆性实验

香蕉片脆性检测装置如图2所示。实验时,在质

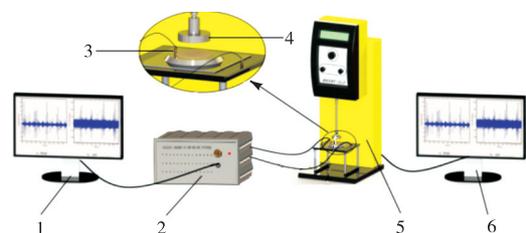
蕉片作为研究对象,选取市售的4种不同加工工艺的香蕉片产品,将力学法和声学法结合起来,利用声发射技术以及质构仪采集果蔬脆片从压缩至断裂的过程中产生的力学和声学信号。根据香蕉片断裂时的能量以及力的大小,定量分析果蔬脆片的脆性,同时分析加工工艺对香蕉片质构和脆性的影响。

1 材料与方

1.1 原料与仪器

本文测试所用的香蕉片为通过4种不同加工工艺得到的香蕉片产品,均购于当地超市,分别为烘烤香蕉片(上海某公司)、真空脱水香蕉片(防城港某公司)、油炸香蕉片(杭州某公司)、晾晒香蕉片(新沂某有限公司)。不同香蕉片的厚度为 (3.5 ± 0.5) mm。4种香蕉片样品的外观图如图1所示,其营养成分以及干基含水率见表1。

构仪载物台上放置一块直径77 mm、厚度4 mm、表面平整的不锈钢载物圆盘,将香蕉片放置在不锈钢载物圆盘上的固定位置,利用食品质构仪对香蕉片进行机械压缩。



1. 声发射监测分析系统; 2. 声发射仪; 3. 声发射探头; 4. 质构仪探头; 5. 质构仪; 6. 载荷数据采集系统

图2 香蕉片脆性检测装置

Fig. 2 Measurement experimental setup for banana chips brittleness

利用耦合剂将一个声发射传感器探头耦合在载

物盘底面中心位置(防止每次实验探头位置不同造成声音信号的衰减),采集香蕉片在压缩过程中产生并通过金属圆盘传递的声发射信号(CH2 通道);另一个声发射探头放置在载物盘旁的空气中,作为对照组收集背景噪声信号(CH1 通道),以便与实验组声发射信号进行对比分析。

在压缩测试过程中,质构仪选用 TA35 探头(直径 35 mm),设置触发载荷为 5 g,探头前进速率为 2 mm/s。同时采集压力和声发射数据,采集到的数据收集在力学与声学测量装置的系统软件中,后期进行整理与分析。

1.2.2 微观结构

参考 Yi 等^[11]的方法对样品断裂面进行微观结构分析。在扫描电子显微镜的样品台上贴上导电胶,取香蕉片断面切片粘在导电胶上,喷金处理,利用扫描电子显微镜拍照观察。

1.2.3 密度

参考刘勇等^[12]的方法,采用电子天平加密度组件测定香蕉片的密度。

1.3 数据处理

分别使用 SPSS 18.0 和 Origin 2020 软件对数据进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 烘烤香蕉片的脆性

2.1.1 单样本烘烤香蕉片脆性的声学 and 力学测量

利用图 2 所示的香蕉片脆性检测装置,对烘烤香蕉片分别进行 20 次样品脆性实验,分别采集香蕉片在机械压缩过程中的压力和声发射信号。对其中的一次实验结果进行分析说明,质构仪采集到的压力与压缩时间关系如图 3 所示。

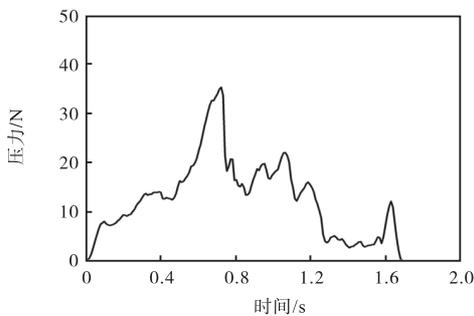


图 3 烘烤香蕉脆片压力-压缩时间关系

Fig. 3 Variation of the stress with the compression of the roasted banana chips

随着时间的变化,压力的变化趋势为先增大后减小,并且出现了多个压力的波峰。香蕉片虽然表面平整,但内部存在孔隙结构,在机械压缩过程中,这些孔隙结构不断破裂,外在表现为图 3 中出现的多个压力的峰值。

烘烤香蕉片在本次机械压缩过程中的声发射信号波形图如图 4 所示。由图 4 可知:对照组 CH1 通道没有出现脉冲信号,而实验组 CH2 通道采集到多次声发射脉冲信号,说明声发射信号是香蕉片在压缩过程中产生的,该信号可被测定并表征^[13]。值得说明的是,在声发射信号中,有信号峰的个数、声发射峰值大小、信号峰形状等参数,它们对应表达果蔬产品在机械压缩过程中破碎现象的不同方面,例如信号峰个数表示细微破碎次数,峰值大小表示破碎发出声音的大小。本文定义的声发射能量,是单位时间内(1 ms)声发射能量的累加,是一个更为方便测量的综合性指标。



(a) CH1 通道



(b) CH2 通道

图 4 烘烤香蕉片声发射信号波形图

Fig. 4 Transient acoustic emission signal of the roasted banana chips

图 5 为图 3 与图 4 合并后得到的烘烤香蕉片在机械压缩时压力和声发射能量图,合并处理包括:当质构仪探头接触到物料时开始采集声发射能量信号,同步采集压力和声发射能量信号;对图 4 中单位时间内声发射能量信号进行累加。

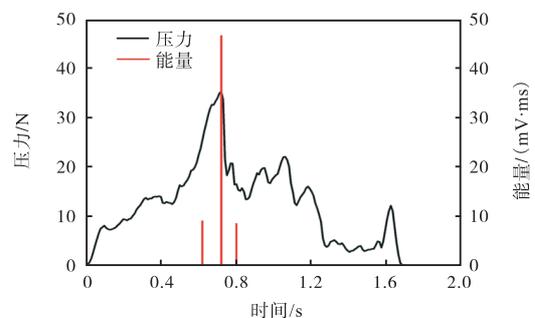


图 5 烘烤香蕉片压力与声发射能量的关系

Fig. 5 Relationship between stress and acoustic emission energy of the roasted banana chips

由图 5 可知:在压缩初始阶段(0~<0.60 s),无声发射能量信号出现;当压缩到 0.60 s 以后,香蕉片受到的压力增大,出现声发射能量信号(0.62 s);在 0.6~0.9 s 时,声发射能量信号比较密集,说明在此时间段内,香蕉片出现了明显的压缩破裂现象.此外,声发射能量最大值对应了压力的最大值,说明香蕉片压力的变化和声发射能量之间存在着对应关系.

从图 5 中分别提取压力最大值(35.00 N)和声发射能量最大值(46.50 mV·ms)作为表征香蕉片脆性的力学和声学参数,用于定量评价香蕉片脆性.

2.1.2 多样本烘烤香蕉片脆性的声学 and 力学参数统计平均值

对 2.1.1 节的实验结果再进行数据处理,绘制出类似于图 5 的压力与声发射能量关系图,分别提取压力最大值和声发射能量最大值,以压力最大值为横坐标,声发射能量最大值为纵坐标,可得到烘烤香蕉片的 20 组样本最大声发射能量-最大压力散点分布图,如图 6 所示.

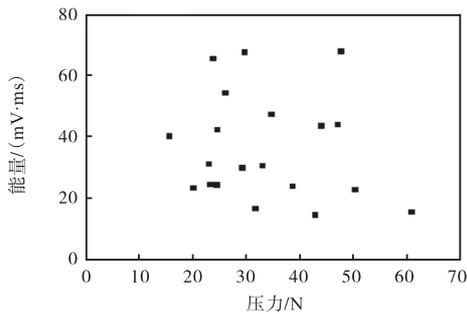


图 6 烘烤香蕉片最大声发射能量-最大压力散点分布图
Fig. 6 Maximum acoustic emission energy-maximum stress scatter distribution of the roasted banana chips

从图 6 可以看出:最大压力分布在 15.50~60.60 N,主要集中在 20.00~40.00 N,最大压力统计平均值为 33.39 N;最大声发射能量分布在 14.50~67.40 mV·ms,主要集中在 20.00~50.00 mV·ms,最大声发射能量统计平均值为 36.26 mV·ms.由此可见,对于休闲果蔬片,采用 2.1.1 节的方法,可以测得当前样品脆性的力学和声学的具体参数,而采用 2.1.2 节的方法,可以得到该种样品脆性的力学和声学参数的统计平均值.与感官评价法相比,该方法可实现果蔬片脆性的量化.

2.2 其他 3 种加工工艺香蕉片脆性的量化

测定 20 组真空脱水香蕉片在机械压缩至断裂过程中的压力与声发射能量的数据,绘制最大压力与最大声发射能量关系的散点分布图,结果如图 7 所

示.由图 7 可知:最大压力分布在 34.87~71.06 N,主要集中在 50.00~65.00 N,最大压力统计平均值为 53.74 N;声发射能量分布在 25.16~201.46 mV·ms,主要集中在 80.00~160.00 mV·ms,最大声发射能量统计平均值为 114.57 mV·ms.对于真空脱水香蕉片而言,其最大压力的分布比较集中,而最大声发射能量分布的跨度比较大.

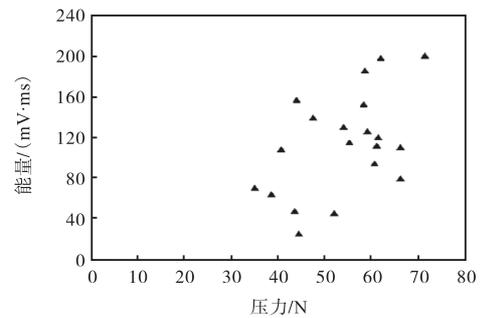


图 7 真空脱水香蕉片最大声发射能量-最大压力散点分布图
Fig. 7 Maximum acoustic emission energy-maximum stress scatter distribution of the vacuum-dried banana chips

测定 20 组油炸香蕉片在机械压缩至断裂过程中的压力与声发射能量的数据,绘制最大压力与最大声发射能量关系的散点分布图,结果如图 8 所示.由图 8 可知:最大压力分布在 15.46~39.33 N,主要集中在 16.00~30.00 N,最大压力统计平均值为 25.18 N;最大声发射能量分布在 2.60~73.14 mV·ms,主要集中在 3.00~45.00 mV·ms,其中声发射能量有一个异常值 73.00 mV·ms,可能与香蕉片的切片厚度有关,造成能量激增.忽略异常值,油炸香蕉片的最大压力统计平均值为 24.88 N,最大声发射能量统计平均值为 20.18 mV·ms.

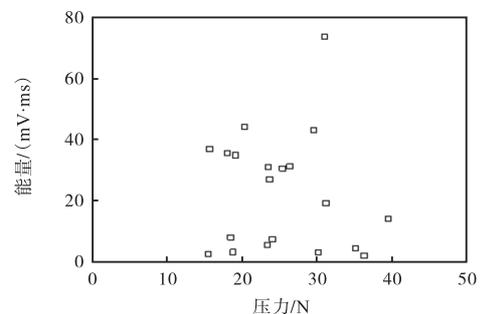


图 8 油炸香蕉片最大声发射能量-最大压力散点分布图
Fig. 8 Maximum acoustic emission energy-maximum stress scatter distribution of the fried banana chips

测定 20 组晾晒香蕉片在机械压缩至断裂过程中的压力与声发射能量的数据,绘制最大压力与最大声发射能量关系的散点分布图,结果如图 9 所示.由图

9可知:最大压力分布在 27.76 ~ 87.30 N,主要集中在 40.00 ~ 60.00 N;声发射能量分布在 6.85 ~ 293.99 mV·ms,主要集中在 10.00 ~ 150.00 mV·ms. 晾晒香蕉片的最大压力统计平均值为 48.23 N,最大声发射能量统计平均值为 72.51 mV·ms.

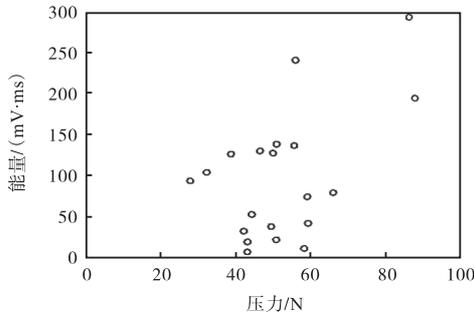


图9 晾晒香蕉片最大声发射能量-最大压力散点分布图
Fig.9 Maximum acoustic emission energy-maximum stress scatter distribution of the sun-dried banana chips

2.3 4种加工工艺香蕉片脆性的比较

4种加工工艺下香蕉片样品的最大声发射能量-最大压力散点分布图汇总结果如图10所示.由图10可知:油炸香蕉片的最大压力与声发射能量分布最集

中,晾晒香蕉片的最大压力分布最分散;真空脱水和晾晒香蕉片的最大声发射能量明显高于烘烤香蕉片与油炸香蕉片,最大压力分布的差别不是很明显,说明真空脱水和晾晒这两种工艺获得的香蕉片声发射能量高于油炸和烘烤工艺,对应的脆性也比较高,硬度则相差不大.

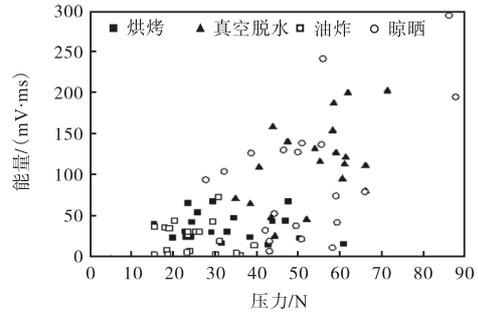


图10 不同加工工艺香蕉片最大声发射能量-最大压力散点分布图汇总
Fig.10 Summary of maximum acoustic emission energy-maximum stress scatter distribution of banana chips in different processing processes

不同加工工艺香蕉片的最大压力和最大声发射能量统计平均值及密度见表2.

表2 不同加工工艺香蕉片的最大压力和最大声发射能量统计平均值及密度

Tab.2 Statistical average of maximum stress and acoustic emission energy of banana chips in different processing processes and their density

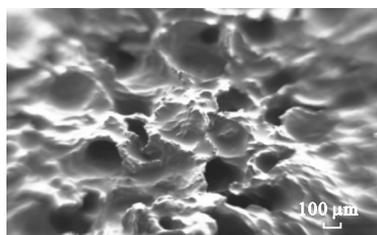
加工工艺	最大压力统计平均值/N	最大声发射能量统计平均值/(mV·ms)	密度/(g·cm ⁻³)
烘烤	33.39	36.26	0.94
真空脱水	53.74	114.57	0.76
油炸	24.88	20.18	0.97
晾晒	48.23	72.51	0.90

可以把最大压力与最大声发射能量分布均分为3个部分.按最大压力分,0 ~ <20.00 N 分为低压力区域,20.00 ~ <40.00 N 分为中压力区域,40.00 ~ 60.00 N 分为高压区域;按最大声发射能量分,0 ~ <40.00 mV·ms 分为低声发射能量区域,40.00 ~ <80.00 mV·ms 分为中声发射能量区域,80.00 ~ 120.00 mV·ms 分为高声发射能量区域.烘烤香蕉片和油炸香蕉片基本处于中压力-低声发射能量区域,真空脱水香蕉片和晾晒香蕉片处于高压-高声发射能量区域.将处于相同压力-声发射能量区域的烘烤香蕉片与油炸香蕉片进行比较,烘烤香蕉片的压力与声发射能量明显高于油炸香蕉片,可以认为烘烤香蕉片比油炸香蕉片更具有硬脆性;将真空脱水香蕉片与晾晒香蕉片进行比较,发现真空脱水香蕉片和晾晒香蕉片的压力分布差别不大,而真空脱水香蕉片

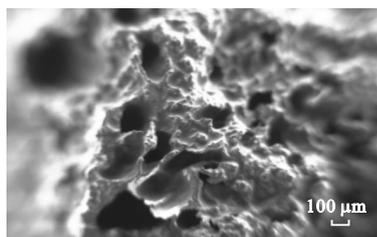
的声发射能量高于晾晒香蕉片,可以认为真空脱水香蕉片的脆性比晾晒香蕉片更高.

果蔬片脆性与其内部结构密切相关,不同加工工艺下香蕉片脆性差异往往是由于加工过程中内部微观质构的改变而引起^[14-15].不同加工工艺香蕉片侧断面内部孔隙结构的扫描电子显微镜图如图11所示.由图11可知:烘烤香蕉片侧断面呈网状结构,孔隙数量较多,孔状结构分布面积大,从单个孔来看,孔壁薄、孔径小;真空脱水香蕉片侧断面孔隙大小各异,形状不规则,孔壁较厚,这可能是导致香蕉片破裂时压力较大的主要原因,而孔隙数量较多,可能是导致香蕉片破裂时声发射能量更高的原因^[16-17];油炸香蕉片孔隙大,孔数量较少,孔呈纵横交错式分布,组织结构疏松;晾晒香蕉片孔隙小,网络结构较为致密,孔壁较厚.总的来说,真空脱水香蕉片孔隙

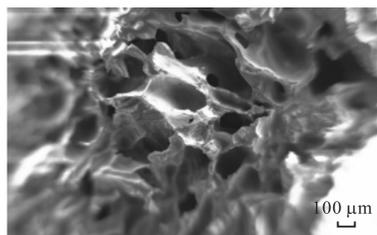
更大,孔壁更厚,因而造成香蕉片断裂时的压力更大,能量更高。



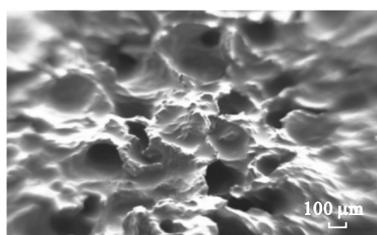
(a) 烘烤香蕉片



(b) 真空脱水香蕉片



(c) 油炸香蕉片



(d) 晾晒香蕉片

图 11 扫描电子显微镜下香蕉片的微观结构

Fig. 11 Microstructural characteristics of the banana chips under scanning electron microscopy

果蔬片密度也可间接反映其内部结构,当果蔬片内部孔隙大时,其密度较小.表2中,油炸香蕉片的密度最大,而真空脱水香蕉片的密度最小.油炸香蕉片的密度大,最大压力统计平均值和最大声发射能量统计平均值最小,这可能是油脂降低了香蕉片的脆性;真空脱水香蕉片的密度最小,同时最大压力统计平均值和最大声发射能量统计平均值处于最高,可能是由于香蕉中的水分在真空干燥中沸腾,使香蕉片内部产生了更多的孔隙,干物质所占体积小,因而由于干

物质形成的孔隙间壁面更密实,造成了压力和声发射能量高的脆性性质^[11].

3 结 论

(1)声发射技术可以准确地检测出香蕉片在机械压缩过程中发出的声学信号,与质构仪相结合,可以对香蕉片脆性进行量化表征.

(2)利用力学-声发射脆性检测方法,既可得到香蕉片脆性单样品相关数据的具体值,又可得到香蕉片脆性多样品相关数据的统计平均值.在本文实验条件下,真空脱水香蕉片脆性力学统计平均值为53.74 N,声发射能量统计平均值为114.57 mV·ms.

(3)在烘烤、真空脱水、油炸、晾晒4种加工工艺的香蕉片中,真空脱水条件下获得的香蕉片硬度和脆性最高.

参考文献:

- [1] 思雨. 新型休闲食品果蔬脆片迎发展期[J]. 中国食品, 2016(5): 89.
- [2] 孙芳,江水泉. 我国果蔬干燥加工技术现状及发展前景[J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(4): 11-15.
- [3] CHEN J S. Food oral processing: a review[J]. Food hydrocolloids, 2009, 23(1): 1-25.
- [4] TANIWAKI M, SAKURAI N, KATO H. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements[J]. Food research international, 2010, 43(3): 814-818.
- [5] 于泓鹏,曾庆孝. 脆度的研究方法及其控制参数[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(3): 85-89.
- [6] 孙钟雷,张长平,段建礼,等. 咀嚼脆裂声音与食品脆性的关系研究[J]. 食品科技, 2017, 42(6): 95-98.
- [7] 张小燕,赵凤敏,兴丽,等. 不同马铃薯品种用于加工油炸薯片的适宜性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 276-283.
- [8] 赵阿丹,谢静,张秋亮,等. 食品酥脆质地的评定与表征[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 188-192.
- [9] ENDO H, INO S, FUJISAKI W. The effect of a crunchy pseudo-chewing sound on perceived texture of softened foods[J]. Physiology & behavior, 2016, 167: 324-331.
- [10] LIU X Q, TAN J L. Acoustic wave analysis for food crispness evaluation[J]. Journal of texture studies, 1999, 30(4): 397-408.
- [11] YI J Y, ZHOU L Y, BI J F, et al. Influences of micro-

- wave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips[J]. LWT, 2016, 70: 271–279.
- [12] 刘勇, 徐娜, 陈骏飞, 等. 不同干燥方法对三七药材外观性状与内在结构及其品质的影响[J]. 中草药, 2019, 50(23): 5714–5723.
- [13] XU H L, ZHAO Y, WU X Y, et al. Quick assessment of the potato chip crispness using the mechanical-acoustic measurement method[J]. International journal of food engineering, 2020, 16(12): 20200135-1–20200135-8.
- [14] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT, 2018, 96: 612–619.
- [15] LAMMERSKITTEN A, WIKTOR A, MYKHAILYK V, et al. Pulsed electric field pre-treatment improves microstructure and crunchiness of freeze-dried plant materials: case of strawberry[J]. LWT, 2020, 134: 110266.
- [16] 刘春菊, 王海鸥, 牛丽影, 等. 蔗糖调控对气流膨化黄桃片微观结构及品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 113–120.
- [17] 殷玲, 常诗洁, 赵立艳, 等. 低温油炸与冷冻干燥生产草菇脆片的特性[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 192–199.

责任编辑: 周建军

(上接第47页)

- of soil successive straw biochar amendment based on a five-year column trial with six different soils: views from crop production, carbon sequestration and net ecosystem economic benefits[J]. Journal of environmental management, 2019, 245: 173–186.
- [27] BABU Y J, NAYAK D R, ADHYA T K. Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice[J]. Biology and fertility of soils, 2005, 42(6): 532–541.
- [28] YANG R, WANG J H, ZHU L S, et al. Effects of interaction between enrofloxacin and copper on soil enzyme activity and evaluation of comprehensive toxicity[J]. Chemosphere, 2021, 268: 129208.
- [29] VILAR R P, IKUMA K. Adsorption of urease as part of a complex protein mixture onto soil and its implications for enzymatic activity[J]. Biochemical engineering journal, 2021, 171: 108026.
- [30] LI D Q, LAI C H, LI Y T, et al. Biochar improves Cd-contaminated soil and lowers Cd accumulation in Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) [J]. Soil and tillage research, 2021, 213: 105085.
- [31] MUNIR M A M, YOUSAF B, ALI M U, et al. In situ synthesis of micro-plastics embedded sewage-sludge copolymerized biochar: implications for the remediation of Cr and Pb availability and enzymatic activities from the contaminated soil[J]. Journal of cleaner production, 2021, 302: 127005.
- [32] REIJONEN I, HARTIKAINEN H. Oxidation mechanisms and chemical bioavailability of chromium in agricultural soil-pH as the master variable[J]. Applied geochemistry, 2016, 74: 84–93.
- [33] SAMBORSKA A, STEPNIIEWSKA Z, STEPNIIEWSKI W. Influence of different oxidation states of chromium (VI, III) on soil urease activity[J]. Geoderma, 2004, 122: 317–322.
- [34] ZHANG X P, GAI X, ZHONG Z K, et al. Understanding variations in soil properties and microbial communities in bamboo plantation soils along a chromium pollution gradient[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2021, 222: 112507.
- [35] PAN W L, MADSEN I J, BOLTON R P, et al. Ammonia/ammonium toxicity root symptoms induced by inorganic and organic fertilizers and placement[J]. Agronomy journal, 2016, 108(6): 2485–2492.
- [36] 杨旭, 刘海林, 黄艳艳, 等. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 619–629.
- [37] 黄连喜, 魏岚, 李衍亮, 等. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 101–107.

责任编辑: 郎婧