

热风干燥过程中果蔬片脆性变化规律

Variation of food brittleness of the fruit and vegetable slices during hot air drying process

武旭瑶¹ 马有川¹ 黄文英¹ 马鑫¹ 吴中华^{1,2}

WU Xu-yao¹ MA You-chuan¹ HUANG Wen-ying¹ MA Xin¹ WU Zhong-hua^{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)

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry and Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

摘要:目的:从脆性角度优化果蔬片干燥工艺和调控干燥过程。方法:以新鲜马铃薯和香蕉片为研究对象,采用力学和声学测定装置,采集80℃热风干燥过程中不同时刻果蔬样品在机械压缩过程中产生的力学和声学信号,综合评价果蔬片的脆性。结果:80℃热风干燥条件下,马铃薯片声发射信号从干燥45 min后才出现,其能量随干燥时间增加而逐渐增大;应力快速增加后保持稳定;干燥180 min为马铃薯片的最佳干燥终点时间,此时声发射能量和力值分别为255.38 mV·ms和20.25 N。香蕉片应力从干燥初期就出现,其值随干燥进行而快速增加,而后在干燥150 min时有一个下降过程,并在200 min后保持稳定。声发射信号从干燥60 min后出现,快速增加,在240 min时保持稳定。香蕉片最佳干燥时间为240 min,此时能量和力分别为122.58 mV·ms和18.01 N。结论:力学—声学综合检测方法可用于监测果蔬片干燥过程中脆性变化,优化干燥过程。

关键词:热风干燥;果蔬片;脆性;质构

Abstract: **Objective:** Aims at the brittleness regulation of fruit and vegetable slices during hot air drying process. **Methods:** This article takes fresh potatoes and bananas as the research materials, adopts mechanical and acoustic measuring devices to collect mechanical and acoustic signals generated by the fruit and vegetable slice samples at the mechanical compression mode, which were collected at different drying times during the hot air drying process of 80℃, to comprehensively evaluate the fragility

of the fruit and vegetable slices. **Results:** The acoustic emission (AE) signal of the potato slice appeared the drying time of 45 min, and its AE energy increased gradually with the increase of drying time. The stress increased rapidly and then remained stable; The best drying end time of potato was 180 min. At this time, the AE energy and force were 255.38 mV·ms and 20.25 N respectively. The AE signal of the banana slices appeared from the early stage of drying, and its energy increased rapidly with the progress of drying, decreased after 150 min of drying, and remained stable after 200 min. The stress appeared after drying for 60 min, increased rapidly until the peak at 240 min, and remained stable. The optimum drying end time of banana slices was 240 min, and the energy and force were 122.58 mV·ms and 18.01 N, respectively. **Conclusion:** The mechanical-acoustic detecting method can be used to monitor the crispness variation of the fruit and vegetable slices being dried and to optimize the hot air drying process.

Keywords: hot air drying; fruit and vegetable slices; brittleness; texture

果蔬干制品是一种方便即食、口感酥脆、营养丰富、绿色健康、便于携带的果蔬休闲食品,越来越受消费者的喜爱^[1]。干制是果蔬干制品的主要加工方法,包括热风干燥、真空干燥、自然晾晒、挤压膨化和冷冻干燥等方式^[2-3];其中热风干燥是工业生产中使用最普遍的干燥方法,具有成本低、操作简单等优点,在马铃薯、葡萄、香蕉等果蔬的干燥加工中得到了广泛应用^[4-8]。脆性是衡量果蔬脆片质构品质的一个重要指标,是指食品在口腔中的器官(牙齿等)的挤压作用下破碎过程的内心感受,包括牙齿咬合食品的触感(力学)和食品破裂时声音感受

基金项目:国家重点研发计划子课题(编号:2017YFD0400904-4)

作者简介:武旭瑶,女,天津科技大学在读硕士研究生。

通信作者:吴中华(1977—),男,天津科技大学教授,博士。

E-mail: wuzhonghua@tust.edu.cn

收稿日期:2021-11-25 **改回日期:**2022-02-11

(声学)^[9]。脆性的仪器分析方法包括力学方法和声学方法^[10],目前国内外对于果蔬干制品质构的研究主要采用力学测量方法,即测定物料在机械压缩或剪切过程中的力学变化,并采用物料的最大断裂距离、力一位移曲线峰个数、斜率等反映物料脆性^[10-14]。例如,Jia等^[13]采用柿片断裂时的力、断裂时间和断裂能量来表示脆性。类似的,Zhang等^[14]采用断裂时间表示马铃薯片的脆性。近年来,有研究采用声学方法对物料脆度进行检测^[15-17],声学方法是通过分析物料被压缩至破裂时发出的声音信号来对物料脆性进行反映^[18]。目前声学信号测量主要采用麦克风和声压计,但其采样频率和灵敏度低,用于测量果蔬干制品破裂发出的短促声音时易丢失信号。

材料受力产生变形或断裂,以弹性波形式释放出能量的现象称为声发射,声发射技术则是采用电子技术、计算机技术以及信号处理手段将声音信号进行量化的技术,可更直观全面地反映试样结构变化的声音信号特征^[19-20]。相对麦克风和声压计(几十到几百赫兹),声发射传感器采样频率可达2 MHz,更适合分析食品破裂时发出的短促声音。胥慧丽等^[21]利用自建的食品脆性力学和声学综合检测装置,对马铃薯片产品的脆性进行了力学和声学的测量,发现可通过声波能量信号的峰值与最大应力对马铃薯片产品的脆性进行量化分级;试验结果表明采用将力学与声发射结合的测量方法,可以更全面和准确地分析果蔬干制品的脆性。但仅限于干燥后马铃薯产品的脆性,对干燥过程中果蔬脆性的变化情况还未开展。

研究拟基于实验室搭建的食品脆性力学和声学检测装置,以新鲜马铃薯片和香蕉片为试验物料,通过测量80℃热风干燥中不同时刻样品的脆性表征参数(应力和声发射能量值),结合含水率和密度参数来揭示热风干燥过程果蔬片的脆性变化规律,以优化干燥工艺和调控果蔬片的干燥过程,并从脆性角度确定最佳的干燥终了时间。

1 材料及方法

1.1 试验材料

新鲜马铃薯和香蕉购于当地的大润发超市,挑选形状规整、大小适中、表皮光滑、表面没有芽根和任何损伤的新鲜土豆,于0℃的冰箱中贮藏备用。试验时将马铃薯清洗、去皮后用果蔬切片机和标准切圆模具切成厚度为3 mm、直径为40 mm的圆形薄片。马铃薯片初始含水率为83.17%左右。香蕉于每次试验前购买,选用外表色泽青黄、气味清香、直径在35 mm左右的新鲜香蕉,去皮后用标准尺刀切成厚度为3 mm的圆形薄片。香蕉片的初始含水率为79.39%左右。

1.2 主要仪器设备

电热鼓风干燥箱:DL-101-3BS型,天津市中环实验电炉有限公司;

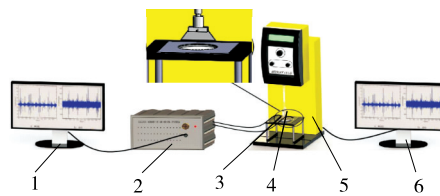
果蔬智能热风干燥箱:SY-5型,北京华珍烘烤设备工程有限公司;

食品脆性力学和声学检测装置(如图1所示);实验室自制;

全信息声发射信号分析仪:DS5-8B型,中国北京软导时代科技有限公司;

质构仪:CT3型,美国博勒飞公司;

场发射扫描电子显微镜:Sigma300型,德国卡尔蔡司公司。



1. AE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. 数据采集系统

图1 食品脆性力学和声学检测装置示意图

Figure 1 Self-developed mechanical compression and acoustic emission detection experimental setup for food crispness

1.3 试验方法

1.3.1 脆性 将切好的马铃薯片,置于铁丝网盘中编号,单层平铺在果蔬智能热风干燥箱的同一层内,干燥温度设置为80℃。每隔30 min取出10个样本,待样本温度达到室温时,利用实验室搭建的食品脆性力学和声学检测装置测量脆性,操作方法及参数设置见文献^[21]。与马铃薯片相同,将切好的香蕉片,重复以上步骤,对每个时间段内香蕉片的脆性重复10次测量。

1.3.2 密度 参考刘勇等^[22]的方法,采用电子天平加密度组件测定马铃薯片以及香蕉片的密度。

1.3.3 微观结构 利用Sigma300型场发射扫描电子显微镜对干燥完成,含水率降到5%左右的果蔬片样品进行微观结构扫描,操作步骤:开启气瓶气阀,按压设备启动按钮;打开样品室将需要镀膜的样品放在样品台上,关闭样品室,点击开始按钮;镀膜结束后取出样品,关设备,关气瓶样品。选取放大倍数为100倍进行分析讨论。

1.4 数据处理

应用Origin 2020软件将质构仪采集到的力学参数与声发射仪器采集到的声学参数进行统计和绘图。

2 结果与分析

2.1 热风干燥过程中马铃薯片脆性变化

2.1.1 单个时刻马铃薯片脆性的声学 and 力学分析 以于80℃干燥90 min的马铃薯片样品为例,利用食品脆性力学和声学检测装置采集到的马铃薯片在压缩过程中的声

音信号的全波形图如图 2 所示。由图 2 可知,CH1 通道(对照组)测量环境声音,没有出现明显的声脉冲信号;CH2 通道测量样品破碎发出的声音,可发现明显的声发射脉冲信号。对照 CH1 和 CH2 两通道测量结果,发现声发射信号是马铃薯片在压缩过程中产生的,即果蔬脆片在机械压缩过程中,其发出的多次短促声发射信号可被测定并表征^[22]。

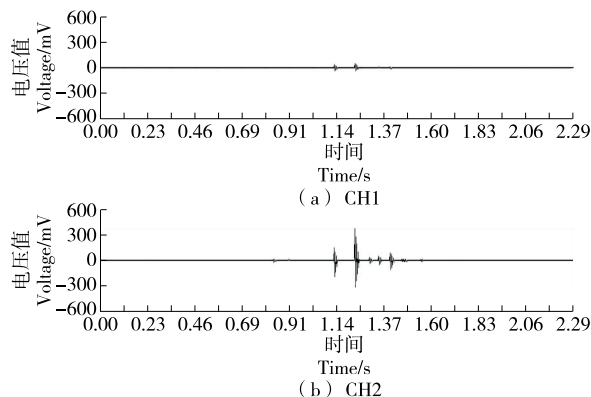


图 2 马铃薯片声发射全波形图

Figure 2 Transient acoustic emission signal of potatoes

马铃薯片样品机械压缩至破裂过程中,质构仪采集到的应力与压缩时间关系如图 3 所示,随着压缩时间的增加,应力的变化趋势为先增大后急剧减小,并且在应力逐渐增大的过程中出现了多个中间波峰,说明马铃薯片发生多次小破裂;应力达到峰值后急剧减小,说明马铃薯片发生整体性破裂^[21]。

图 4 为图 2 和图 3 合并得到的马铃薯片样品在机械压缩时应力和声发射能量图,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信号,将应力和声发射信号时刻同步;对图 3 中单位时间声发射信号能量进行累加。由图 4 可以看出,在压缩初始阶段(0~0.3 s),无声发射能量出现;当压缩到 0.3 s 时,马铃薯片受到的应力增大,出现声发射能量信号;在 0.3~0.5 s 时,声发射信号比较密集,说明在此时间段内,马铃薯片出现了明显的

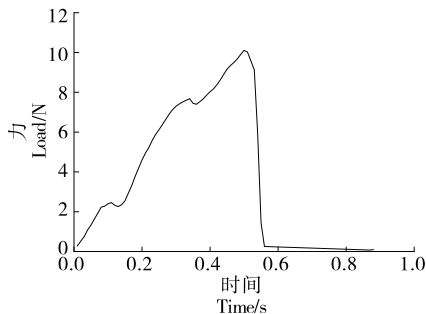


图 3 马铃薯片应力与压缩时间的关系曲线

Figure 3 Variation of the stress with the compression of potatoes

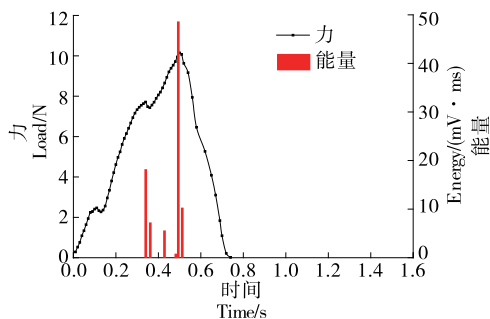


图 4 马铃薯片应力与声发射能量关系

Figure 4 Stress and acoustic emission energy of potatoes

断裂现象。此外,声发射能量信号最大值对应了应力的最大峰值,说明马铃薯片应力变化和声发射信号之间存在着对应关系。图 4 中,马铃薯片最大应力为 10 N,最大声发射能量为 11.9 mV·ms。

2.1.2 热风干燥过程中马铃薯片脆性变化规律 将干燥箱温度设为 80 ℃,每隔 30 min 取出马铃薯片样品 10 个,并根据 2.1.1 的方法测量样品的声学 and 力学信号,得到不同干燥时刻马铃薯样品能量、力与时间的关系图,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在质构仪机械压缩过程中,力呈先增大后急剧减少的趋势;力增大过程中,存在多个力信号峰,且每个力信号峰下对应一个或者多个 AE 能量信号峰。随着干燥时间的增加,马铃薯片样品在机械压缩过程中检测到的 AE 能量信号峰数量增多,而且 AE 能量信号峰值增大。干燥过程中马铃薯脆性应力和声学参数变化,与其内部质构密切相关。原因可能是随着干燥的进行,马铃薯片内部的水分逐渐扩散,含水率逐渐降低到一定程度时,马铃薯片内部逐渐由充满水分的细胞状结构,变成具有蜂窝状空隙结构,如图 6 所示。马铃薯片断口表面有很多淀粉颗粒,多数为圆形或者椭圆形,大小不一,排列紧密,并且表面附着一层纤维,纤维呈蜂窝状排列。机械压缩过程中,马铃薯片在整体断裂出现最大力峰信号前,质构仪探头需压碎内部的蜂窝状排列结构,因此采集到多个显著的力峰和丰富的 AE 信号。

图 7 表示 80 ℃ 干燥过程中,马铃薯的脆性参数,含水率和密度随干燥时间变化,其中脆性参数—最大应力与声发射能量从图 5 中得到。从图 7 可以看出,随着干燥时间的增加,密度的变化趋势为先增大后减小;干燥时间为 150 min 时,密度达到最大。原因是干燥时间增加,马铃薯出现明显皱缩,体积减小导致密度增加,当干燥到一定时间时,体积及质量变化不再明显,密度变化曲线比较平滑,含水率随干燥时间增加而减小,干燥 180 min 后,含水率下降趋势变缓。Rojo 等^[23]研究发现,薯片的机械强度与材料的固有性能和内部的结构有关;不同干燥时

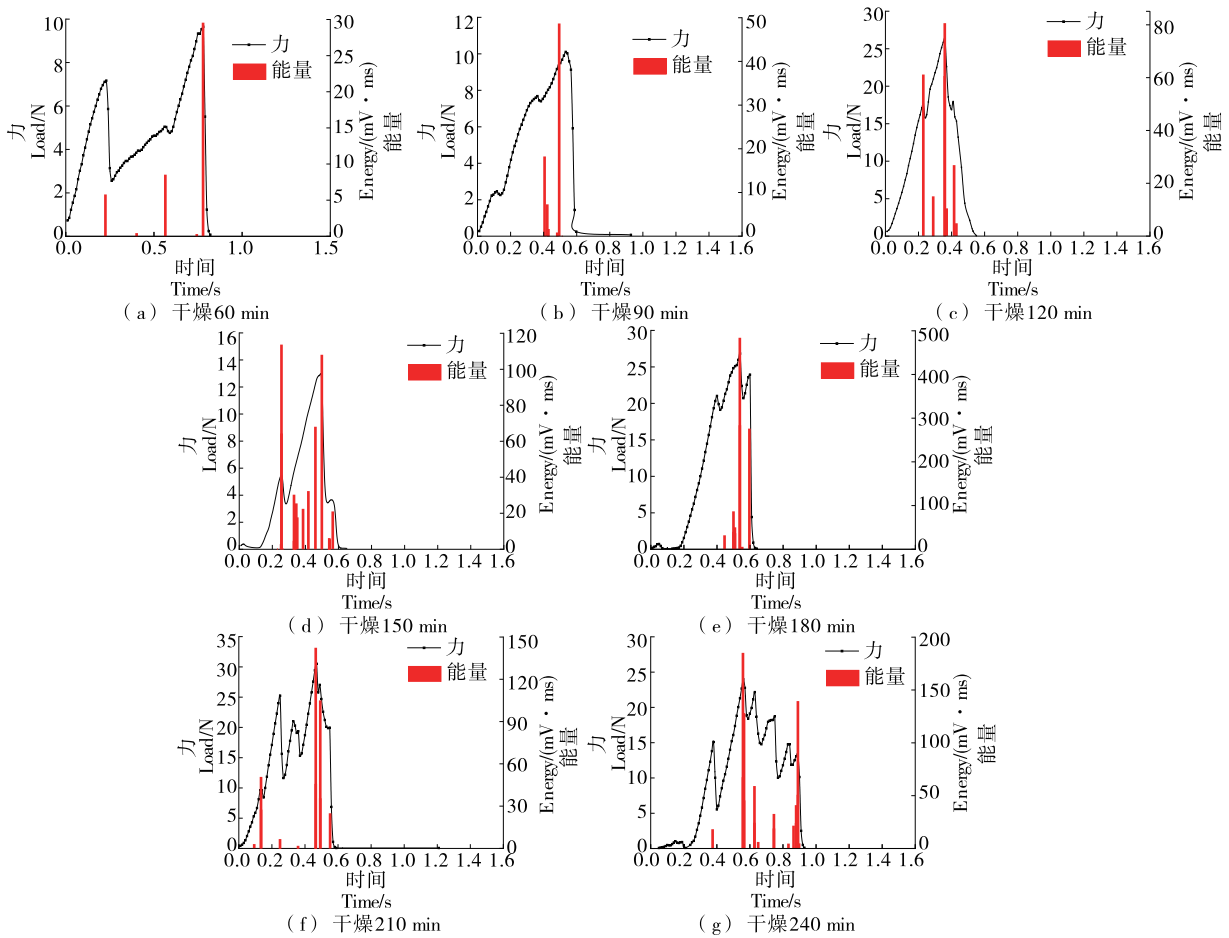


图5 80 °C干燥过程中力及AE能量

Figure 5 Force and AE energy during drying at 80 °C

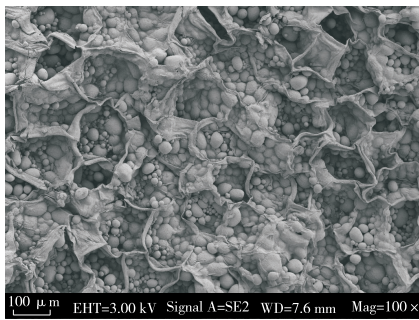


图6 马铃薯片扫描电镜下结构特征图

Figure 6 Structural characteristics of the potato slice under scanning electron microscopy

间的马铃薯片,其内部结构不同,导致机械强度和声发射能量不同,与图7中的试验结果类似。

图7中,声发射信号能量在干燥45 min后才出现,此时含水率为80%左右;而后随着干燥时间增加和含水率减小,声发射信号能量逐渐增大。其原因是热风干燥过程中,马铃薯从表面向内部逐渐脱水干燥,先在马铃薯表面形成干燥层(带空隙的结构),此时声发射信号开始出

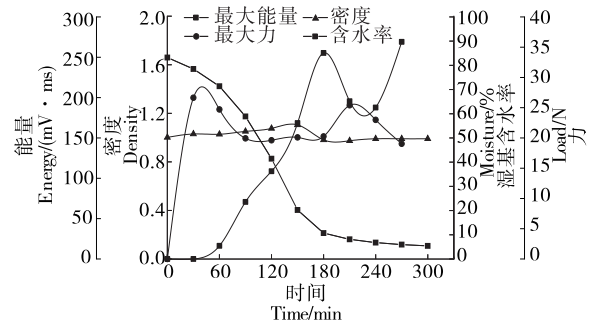


图7 80 °C干燥过程中马铃薯片脆性、密度与含水率的变化

Figure 7 Changes in brittleness, density and moisture content of the potato slice during drying at 80 °C

现并比较弱;随着干燥层向马铃薯内部延伸,声发射能量逐渐增大。当马铃薯片含水率降低到一定程度后,干燥层保持不变,声发射能量不再增加。当干燥到180 min时,马铃薯片的含水率降到了10.7%,此时的声发射能量最大,为255.38 mV·ms;密度最低,为0.984;应力也处于最低状态,为20.25 N;意味着此时马铃薯片,所需牙齿

咬合力最小,但压合过程中感受到的声音大,感官上马铃薯片脆性较好。干燥到 250 min 时,马铃薯片脆性也较好,但此时含水率为 5%,马铃薯过干,干燥时间也延长 70 min(干燥时间增加近 39%)。因此,从马铃薯脆性角度考虑,将干燥 180 min 作为干燥的终点较适当。由于研究目标为干燥过程马铃薯脆性变化,因此仅考虑了马铃薯脆性参数、含水率和密度等指标;生产实践中,增加马铃薯片色泽、形状、营养成分等指标,可更全面判断干燥终点。从图 8 可以看出,当含水率降到 10% 左右时,马铃薯片的能量和力值较为集中,且处于峰值阶段。

2.2 热风干燥过程中香蕉片脆性变化规律

与马铃薯片干燥过程类似,将干燥温度设为 80 ℃,每隔 30 min 测量香蕉片干燥过程中的声学 and 力学信号,得到各个时间段内能量、力与时间的关系如图 9 所示。

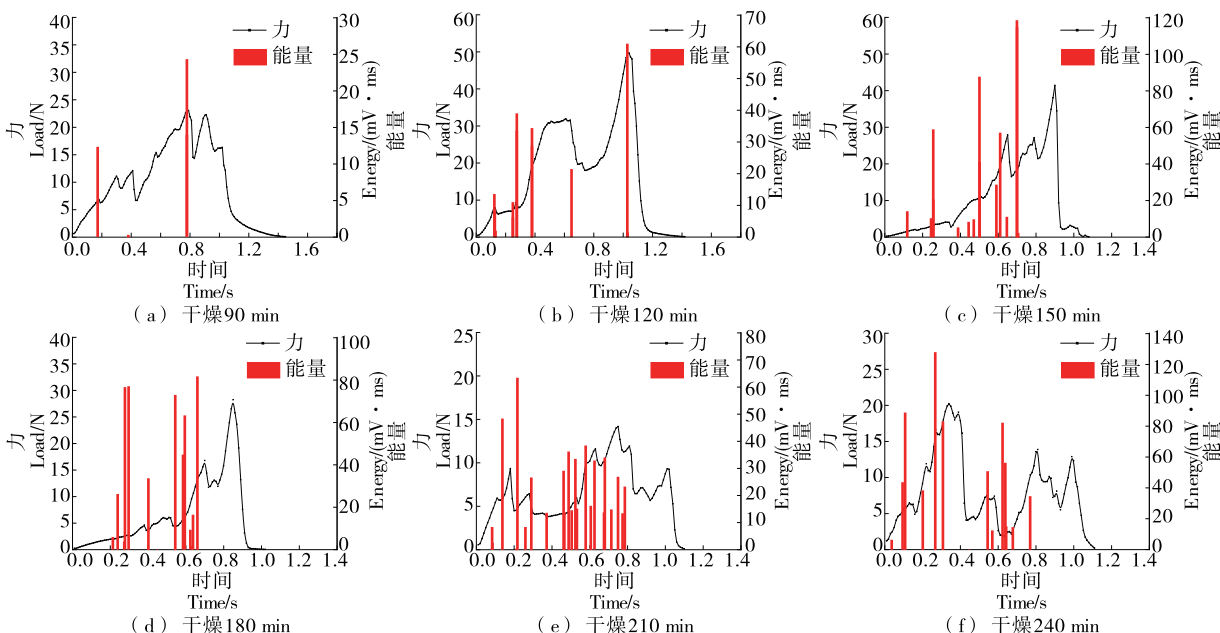


图 9 80 ℃干燥过程中香蕉片脆性变化

Figure 9 Force and AE energy during drying at 80 ℃

从图 9 可以看出,在机械压缩过程中,香蕉片的最大力值和最大能量值随干燥时间的变化趋势与马铃薯片相似。但相对于马铃薯片,热风干燥香蕉片的应力峰和声发射能量峰更丰富。如图 10 所示,香蕉片断口表面出现较多数量孔洞,整体呈蜂窝状结构,孔隙间排列有序;从单个的孔洞外观来看,形状比较规则、具有一定的壁厚,孔径区别相差不大。机械压缩过程中,香蕉片在整体断裂出现最大力峰信号前,质构仪探头需压碎内部充满空气的蜂窝状小孔洞或裂缝,因此采集到多个显著的力峰和丰富的 AE 信号。

图 11 为 80 ℃干燥过程中,香蕉片的脆性参数,含水率和密度随干燥时间变化;图 12 为 80 ℃干燥过程中香

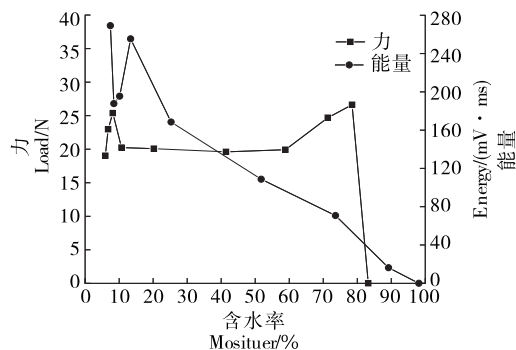


图 8 80 ℃干燥过程中马铃薯片最大力、能量与含水率的关系

Figure 8 Relationship between maximum force, energy and water content of potato chips during 80 ℃ drying process

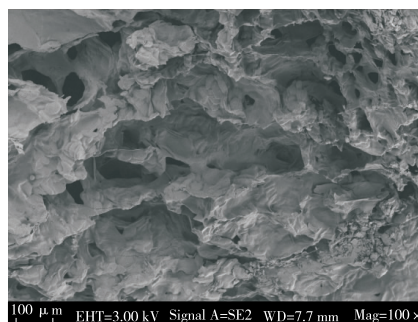


图 10 香蕉片扫描电镜下结构特征图

Figure 10 Structural characteristics of the banana slice under scanning electron microscopy

蕉片最大力、能量与含水率的关系。观察图 12 可以得出,当含水率降到 10% 左右时,香蕉片的能量和力值较为集中,且处于峰值阶段。从图 11 可以看出,干燥过程中香蕉片密度变化趋势不具有明显的规律性,可能是因为香蕉本身具有一定的黏性,干燥过程中质量减小,而体积变化无规律,导致密度出现不规则变化。当干燥时间为 300 min 时,密度达到最大,原因是干燥时间增加,香蕉体积出现明显皱缩,而质量变化不大,导致密度增加。干燥 150 min 时,应力最大(可能是随着干燥时间的增加在香蕉的表面形成了一层硬壳,造成应力升高);干燥 150~200 min 时,应力值有一个下降过程,并在 200 min 后保持稳定。声发射能量从干燥 60 min 后出现并快速增加,到 240 min 后增加变缓,在 270 min 时达到峰值后保持稳定。综合干燥时长考虑,将干燥 240 min 作为干燥的最佳时间,此时香蕉片的含水率为 8%,声发射能量为 122.58 mV·ms,应力为 18.01 N,密度为 0.936。

从组成成分角度分析,马铃薯的主要组成成分为淀粉,占总成分的 9%~20%;香蕉的淀粉成分为 0.5%,主要组成成分纤维素含量为 11.5%。马铃薯的初始淀粉含

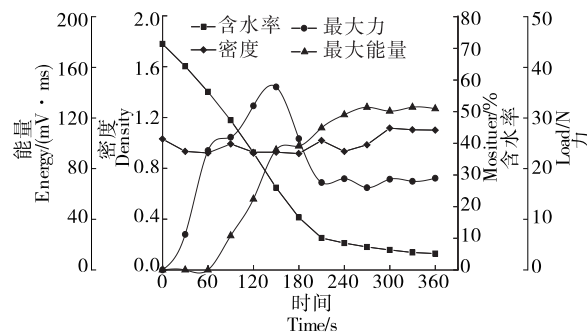


图 11 80 °C 干燥过程中脆性、密度与含水率的变化

Figure 11 Changes in brittleness, density and moisture content during drying at 80 °C

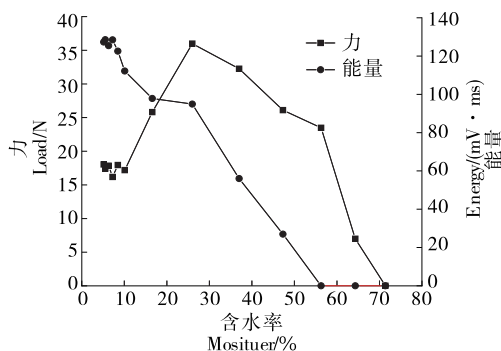


图 12 80 °C 干燥过程中香蕉片最大力、能量与含水率的关系

Figure 12 Relationship between maximum force, energy and water content of banana chips during 80 °C drying process

量高,最终形成的骨架比较密实,造成马铃薯片的硬度以及能量大于香蕉片,表现为硬脆性,而香蕉片表现为酥脆性。

3 结论

以新鲜马铃薯片和香蕉片为研究对象,利用质构仪以及声发射仪组成的食品脆性力学与声学检测装置,测量在热风温度为 80 °C 时,干燥过程中的果蔬样品脆性力学和声学参数,结合样品含水率和密度变化,揭示热风干燥过程中果蔬脆性变化规律。结果表明:干燥过程中不同果蔬呈现不同脆性变化规律。干燥过程中马铃薯片分别出现两次应力和声发射能量峰值;香蕉片出现一次应力峰值,并且声发射能量随干燥时间不断增加趋势。干燥果蔬片脆性与内部质构存在紧密关联,当样品密度处于最低状态,内部较疏松时,果蔬片的声发射能量最高。结合马铃薯与香蕉片的应力、声发射能量、密度和含水率变化,得出在 80 °C 下,干燥 180 min 为马铃薯的最佳干燥时间,此时最大力为 20.25 N,最大声发射能量为 255.38 mV·ms;干燥 240 min 为香蕉片的最佳干燥时间,此时脆性力学参数最大力为 18.01 N,最大声发射能量为 122.58 mV·ms。

研究主要从力学和声学特性方面研究果蔬干燥过程中脆性变化规律,并结合含水率变化优化干燥时间。后续将进一步研究干燥条件如干燥温度、热风风速等对果蔬脆性的影响,同时结合色泽、外形、营养成分保留值等参数优化干燥过程。

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] SI Y. New leisure food fruit and vegetable crisp pieces to welcome the development period[J]. Chinese Food, 2016(5): 89.
- [3] 毕金峰, 易建勇, 陈芹芹, 等. 国内外休闲食品产业与科技现状及发展趋势[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 320-328.
- [4] BI J F, YI J Y, CHEN Q Q, et al. Current status and development trend of international leisure food industry and technology[J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(12): 320-328.
- [5] 李志雅, 李清明, 苏小军, 等. 果蔬脆片真空加工技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(17): 384-387.
- [6] LI Z Y, LI Q M, SU X J, et al. Research progress in vacuum processing technology of fruit and vegetable chips[J]. Food Industry Science and Technology, 2015, 36(17): 384-387.
- [7] KHAMPAKOO A, SOISUNGWAN S, PARK S H. Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 355-363.
- [8] 王辉, 欧阳岁燕, 黄珊, 等. 马铃薯干片干燥工艺参数优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(12): 33-38.

- WANG H, OUYANG S Y, HUANG S, et al. Optimization of drying conditions for dried potato slices[J]. Food Research and Development, 2018, 39(12): 33-38.
- [6] 李洪江, 杨林青. 花生仁薄层干燥试验研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(2): 56-62.
- LI H J, YANG L Q. A study on thin-layer drying of peanut kernels[J]. Journal of Agricultural Engineering, 1992, 8(2): 56-62.
- [7] 张建军, 王海霞, 马永昌, 等. 辣椒热风干燥特性的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 298-301.
- ZHANG J J, WANG H X, MA Y C, et al. Experimental research on hot-air drying properties of capsicum[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 298-301.
- [8] 黄珊, 王修俊, 沈畅萱. 白萝卜薄层热风干燥特性及其数学模型[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 137-143.
- HUANG S, WANG X J, SHEN C X. Drying characteristics and mathematical model on hot-air drying of Chinese radish slices[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 137-143.
- [9] CHEN J S. Food oral processing: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1): 1-25.
- [10] 于立波. 干脆性食品咀嚼过程中振动信号的分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 3.
- YU L B. Analysis of vibration signal during chewing of dry-crisp food[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 3.
- [11] SAELEAW M, SCHLEINING G. A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic-mechanical destructive techniques[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(3): 387-399.
- [12] TANIWAKI M, KOHYAMA K. Mechanical and acoustic evaluation of potato chip crispness using a versatile texture analyzer[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112(4): 268-273.
- [13] JIA Y Y, KHALIFA I, HU L L, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques[J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 118: 67-76.
- [14] ZHANG C, ZHAO W, YAN W X, et al. Effect of pulsed electric field pretreatment on oil content of potato chips[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110198.
- [15] GOUYO T, MESTRES C, MARAVAL I, et al. Assessment of acoustic-mechanical measurements for texture of French fries: Comparison of deep-fat frying and air frying[J]. Food Research International, 2020, 131: 108947.
- [16] 黄碧竹. 基于声音信号食品脆性检测方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 3-6.
- HUANG B Z. Measurement method of food crispness based on acoustic signal[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 3-6.
- [17] ANDREANI P, DE MORAES J O, MURTA B H P, et al. Spectrum crispness sensory scale correlation with instrumental acoustic high-sampling rate and mechanical analyses[J]. Food Research International, 2020, 129: 108886.
- [18] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 534-542.
- SONG Y M, XING T M, ZHAO T B, et al. Acoustic emission characteristics of deformation field development of rock under uniaxial loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 534-542.
- [19] EDMISTER J A, VICKERS Z M. Instrumental acoustical measures of crispness in foods[J]. Journal of Texture Studies, 1985, 16(2): 153-167.
- [20] DUIZER L. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures[J]. Trends in Food Science & Technology, 2001, 12(1): 17-24.
- [21] 胥慧丽, 吴中华, 董晓林, 等. 马铃薯片脆性的力学和声学测量[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 22-27.
- XU H L, WU Z H, DONG X L, et al. Mechanical and acoustic measurement of potato chip crispness[J]. Food Science, 2020, 41(21): 22-27.
- [22] 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): 5 714-5 723.
- LIU Y, XU N, CHEN J F, et al. Effects of different drying methods on appearance and internal components of Notoginseng Radix et Rhizoma[J]. Chinese Medicinal Herb, 2019, 50(23): 5 714-5 723.
- [23] ROJO F J, VINCENT J F V. Objective and subjective measurement of the crispness of crisps from four potato varieties[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(8): 2 698-2 704.
- (上接第 21 页)
- [21] DÁVALOS A, MIGUEL M, BARTOLOMÉ B, et al. Antioxidant activity of peptides derived from egg white proteins by enzymatic hydrolysis[J]. Food Protection, 2004, 67(9): 1 939-1 944.
- [22] 罗晓航. PEF 结合酶法提取鲍鱼脏器粗多糖及其抗氧化活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 60-61.
- LUO X H. Extraction of crude polysaccharide from abalone viscera by PEF combined with enzyme and its antioxidant activity[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012: 60-61.
- [23] 李晓梅, 鞠玉琳. 中药“FH”对小鼠血清溶血素和淋巴细胞转化的影响[J]. 延边大学农学报, 2005, 27(3): 197-200.
- LI X M, JU Y L. Effects of traditional Chinese medicine "FH" on serum hemolysin and lymphocyte transformation in mice[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2005, 27(3): 197-200.
- [24] 孔晨先, 肖波, 柳全文, 等. 山药多糖对动物机体免疫调节作用的 Meta 分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(19): 206-213.
- KONG C X, XIAO B, LIU Q W, et al. Meta analysis of immune regulation of yam polysaccharide on animals[J]. Food Research and Development, 2021, 42(19): 206-213.