

# 静压力对苹果介电特性和胞内水分的影响

屠 鹏,边红霞

(甘肃农业大学理学院,甘肃兰州 730070)

**摘要:**对苹果施加不同大小静压力,同时利用平行板电极法监测其介电参数,用针状电极监测其电阻抗图谱,根据Hayden等效电路模型计算分析了胞内电阻、胞外电阻和细胞内、外液体积分布的变化。结果表明:静压力小于120 N,相对介电常数和损耗因子随静压力的增大而非线性增大,大于120 N后线性增大;同一静压力下,相对介电常数随加载频率增大而变小,损耗因子则在加载频率为20 kHz时有极小值;随静压力增大,苹果组织胞内电阻增大,胞外电阻在小于120 N阶段基本保持水平,大于120 N后开始增大。在静压力增大至250 N的过程中,细胞外液体积百分比由5.69%增加至9.22%,苹果相对介电常数、损耗因子和细胞外液体积百分比之间呈极显著正相关,相关系数大于0.94,说明细胞外液的体积变化是引起果品介电参数变化的主要原因。本研究有望为果品受压过程中内部生理状态的同步监测研究提供新思路,也将为采用介电特性法快速评价其损伤提供理论指导。

**关键词:**静压力,介电特性,细胞外液,Hayden模型

## The influence of static pressure on dielectric property and intracellular moisture of apple

TU Peng, BIAN Hong-xia

(College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The dielectric parameters of compressed apple in various pressures were monitored by parallel plate electrode and the electrical impedance spectroscopy (EIS) was monitored by stainless steel needle electrode and the resistance of intracellular fluid and extracellular fluid and the change of volume distribution of intracellular fluid and extracellular fluid were calculated by Hayden equivalent circuit model. The results were as follows: relative dielectric constant and loss factor were nonlinear increase with static pressure increase when the pressure was less than 120 N, and were linear increase under the pressure of more than 120 N. Under the same static pressure, relative dielectric constant decreased with the loading frequency increase and loss factor existed in minimum value at 20 kHz. With the static pressure increasing, the intracellular resistance increased, and extracellular resistance remained unchanged less than 120 N then increased. During static pressure increase to 250 N, the volume percentage of extracellular fluid increased from 5.69% to 9.22%. The relative dielectric constant, loss factor and the volume percentage of extracellular fluid was significant positive correlation and correlation coefficient was more than 0.94, in which account for the volume percentage of extracellular fluid was the main reason of dielectric parameters change. The work is hopeful to find a new idea for simultaneous monitoring physiological state of compressed fruit, and also provides theoretical guidance for rapid reevaluation damage degree of fruit and realizing fruit grading by dielectric property.

**Key words:** static pressure; dielectric property; extracellular fluid; Hayden model

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)20-0030-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.20.007

苹果是中国农业部确定的11种优势农产品之一,也是中国第一大果品产业<sup>[1]</sup>。在贮存过程中,大量采收的果蔬成堆堆积,某一层的果蔬受到其上各层果蔬重量的作用而受损,称作果品的静压损伤。静压损伤不仅会影响果品的外观质量,若表皮破裂还会发生酶促褐变<sup>[2]</sup>,而且会使果实的内部组织结构

遭到破坏<sup>[3]</sup>,细胞膜的通透性发生变化,进而影响其生理状态。果品的介电特性与其品质和生理状态密切相关<sup>[4-5]</sup>,可通过介电参数快速评价其受压时生理状态的变化,进而用于果品贮藏过程中品质变化的评价。

生物体的介电特性指生物分子中的束缚电荷

收稿日期: 2017-04-05

作者简介: 屠鹏(1979-),男,硕士,副教授,研究方向:农产品品质分析及无损检测研究, E-mail: tupeng815@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金(31560474)。

(只能在分子限度范围内运动的电荷)对外加电场的响应特性,主要参数有相对介电常数和损耗因子<sup>[6]</sup>。相对介电常数是表征介质材料的介电性质或极化性质的物理参数,该值也是材料贮电能力的表征<sup>[7-8]</sup>,与物质的电容和它对电场能量的吸收能力有关<sup>[9]</sup>。介质损耗是指绝缘材料在电场作用下,由于介质电导和介质极化的滞后效应,在其内部引起的能量损耗,把  $\tan\delta$  称为损耗因子  $\epsilon''$ <sup>[10]</sup>。

在利用介电特性评价果品品质方面,国内外学者已经在果品新鲜度与成熟度检测方面开展了一些工作<sup>[11-12]</sup>。例如, Nelson 等<sup>[13]</sup>对不同成熟阶段桃子介电特性的研究发现,200 MHz 下的相对介电常数和 10 GHz 下的损耗因子可应用于桃子成熟度的识别。张立彬等<sup>[14]</sup>用破坏性方法研究了金帅苹果切片组织的介电特性与新鲜度的关系,发现在 10~100 kHz 的频率范围内,苹果的介电特性与新鲜度具有明显的相关性。郭文川等<sup>[15]</sup>从生理特性角度分析了影响采后苹果电参数变化的原因。但是,目前对介电特性与损伤果品的品质、生理状态变化方面关注很少。仅有少量研究表明,带伤组织的介电特性与无伤组织的介电特性明显不同<sup>[16-17]</sup>。但是,这些研究主要针对果品受伤前后及伤后贮藏期间介电参数的变化,受不同力静压过程中对果品介电参数的同步实时监测还鲜见报道。研究表明,可用静压作用力大小及作用时间来模拟果品受压情况<sup>[3]</sup>。本研究在对苹果连续施加静压力的过程中,同步监测其介电特性和电阻抗图谱的变化,利用电阻抗图谱构建苹果受压过程中细胞内外液体积百分比的变化模型,有望为果品受压过程中内部生理状态的同步监测研究提供新思路,也将为采用介电特性法快速评价其损伤提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

红富士苹果 采自甘肃省静宁县,在十月下旬选取树龄、生长情况接近的红富士采摘,静置 24 h 后密闭装箱运回实验室 4 °C 冷藏,实验前 12 h 取出常温 (22 ± 1) °C 静置,精选大小均一、成熟度好、色泽接近、无机械损伤的果实待用,样品赤道平均直径 74.69~81.03 mm,平均单果重 176.06~213.94 g。

TH2828A 型精密 LCR 数字电桥 常州同惠电子股份有限公司;CMT-2502 型电子万能试验机 深圳新三思计量技术公司;AUX-220 型电子天平 岛津(中国)有限公司;02050123-1 型游标卡尺 无锡锡工量具有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 静压力的施加 采用万能试验机对果实连续施加静压力。具体方法为将果品沿赤道方向置于平行板电极之间,以 2 mm/min 的速率压缩苹果,待力达到 0~250 N 间的 10 倍整数压力时,保持 5 min,测试该压力下苹果的介电参数和电阻抗图谱。经万能试验机测试发现,红富士在受静压作用时,其极限受压力(表皮破裂)在 450~480 N 之间,实验中选择力的加载范围为 0~250 N。

1.2.2 苹果压缩量及其变化率 对苹果施加不同静压力时,其压缩量由相邻两个力所对应的极板间距之差计算得到,压缩量随力的变化率由相邻两个力所对应的压缩量差值除以力的增量计算得到。

1.2.3 介电参数测试 介电参数测定采用平行板电极法<sup>[18]</sup>:平行板电极为厚 1 mm、直径 85 mm 的两块圆形紫铜片,将铜电极圆心位置与精密 LCR 数字电桥通过四终端夹具(仪器自带)连接。输出频率选择 200 Hz~1 MHz 之间的 38 个频率点。测试期间平均室温 (22 ± 1) °C。

1.2.4 电阻抗图谱测量 电阻抗图谱测量参照李星恕等<sup>[19]</sup>的方法:电阻抗测量系统由 LCR 测试仪、直径为 0.7 mm 不锈钢针状电极和 PC 机组成。测量时,将 2 个不锈钢针状电极垂直于苹果果皮表面插入,电极间距 30 mm,深度 15 mm。测试过程先将 LCR 数字电桥与平行板电极系统连接测定介电参数,后与不锈钢针状电极连接测试电阻抗图谱。万能实验机和 LCR 数字电桥由同一计算机控制,结果自动存储在计算机中进行处理,整个测试系统如图 1 所示。

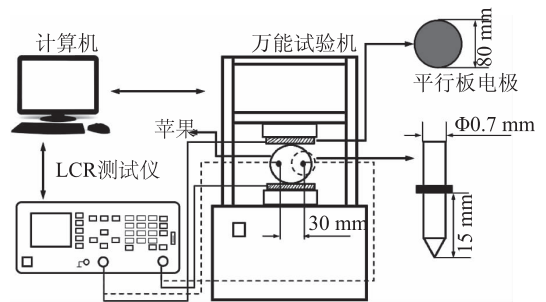


图 1 果品静压及介电参数、阻抗图谱测试系统

Fig.1 The schematic diagram of fruit static pressure and electrical parameters testing

### 1.3 数据的处理及分析

1.3.1 相对介电常数和损耗因子的计算 实验中相对介电常数等于以预测材料为介质(C)与以真空为介质(C<sub>0</sub>)制成的同尺寸电容器电容量之比,即  $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$ ,而损耗因子是以损耗角正切  $\tan\delta$  来表示。相对介电常数和损耗因子均以果品受不同静压力时的实际板间距计算得出,即两个参数均消除了因果品的个体差异和受压变形造成的尺寸影响。

### 1.3.2 细胞内外电阻和细胞外液体积百分比的计算

苹果受压过程中细胞结构会发生较大的变化,阻抗图谱亦会发生变化,Hayden 模型<sup>[20]</sup>可用于分析由细胞微观结构引起的阻抗变化。苹果组织的总电阻抗 Z 为:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_i + Z_m}} = Z' + j \cdot Z'' \quad \text{式(1)}$$

式(1)中:Z 为苹果组织电阻抗,Ω;Z' 为电阻抗实部,Ω;Z'' 为电阻抗虚部,Ω;Z<sub>m</sub> 为一具有常相位角的常相位元件;R<sub>e</sub> 为胞外电阻,Ω;R<sub>i</sub> 为胞内电阻,Ω。利用非线性最小二乘法拟合计算 Hayden 模型中的胞外电阻 R<sub>e</sub> 和胞内电阻 R<sub>i</sub><sup>[21]</sup>。利用拟合得到的胞外电阻 R<sub>e</sub> 和胞内电阻 R<sub>i</sub>,按照式(2)计算静压过

程中细胞内外液的体积比<sup>[22]</sup>。

$$\left(1 + \frac{V_i}{V_e}\right)^{5/2} = \frac{R_e + R_i}{R_i} \left(1 + 3.2 \times \frac{V_i}{V_e}\right) \quad \text{式(2)}$$

式(2)中： $\frac{V_i}{V_e}$ 为苹果组织细胞内、外液的体积比

率。由细胞内外液的体积比,进而可计算细胞外液体积占细胞总水分的百分比(简称:细胞外液体积百分比)。

1.3.3 数据分析 苹果介电参数和电阻抗图谱以每组3个苹果的平均值做为该组测试结果,全部测试过程重复5次取平均。数据处理采用 Matlab 2015,标准差、相关分析采用 SPSS 22.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同静压力下苹果压缩量及其变化率变化

图2为对苹果施加不同静压力时,其压缩量及其变化率的变化情况。由图2可以看出,当静压力小于70 N时,随静压力增大,压缩量呈非线性增大,而压缩量变化率逐渐变小。说明在静压的初始阶段相同的静压力引起的变形更大,这与压缩初始阶段苹果在受压变形的同时与极板的接触面积不断增大有关。当静压力大于70 N时,压缩量随静压力增大呈线性增大,而压缩量变化率基本保持同一水平,表明相同的静压力引起的变形基本相同,这主要是与此阶段接触面积保持相对稳定,静压使苹果果实整果发生形变有关。

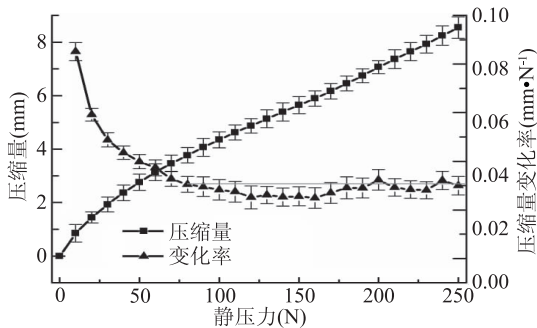


图2 不同静压力下压缩量及其变化率

Fig.2 The amount of compression and change ratio under various static pressures

### 2.2 不同静压力下苹果介电特性变化

图3给出了不同加载频率下苹果相对介电常数随静压力变化,以及同一静压力下相对介电常数随加载频率的变化情况。由图3可知,苹果果实相对介电常数随静压力增大而增大,而随加载频率增大而减小。加载频率在1 MHz时,250 N静压的相对介电常数是未施加静压力时的7倍。加载频率在1 kHz时,250 N静压的相对介电常数是未施加静压力时的46倍。

如图4所示,苹果果实损耗因子随静压力增大而增大,随加载频率的增大,损耗因子先减小后增大,在频率为20 kHz时有极小值。分析发现,加载频率在1 MHz时,250 N静压的损耗因子是未施加静压力时的8倍。加载频率在1 kHz时,250 N静压的损耗因子是未施加静压力时的6.8倍。

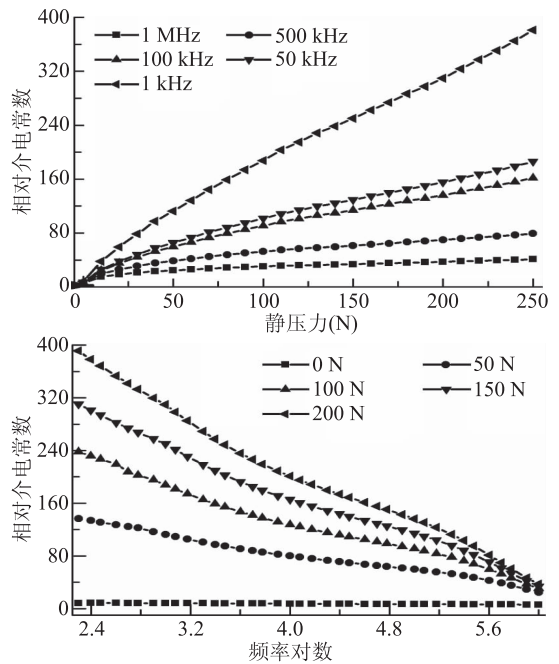


图3 不同静压力和加载频率下苹果相对介电常数的变化

Fig.3 Changes of the relative dielectric constant under various static pressures and loading frequencies

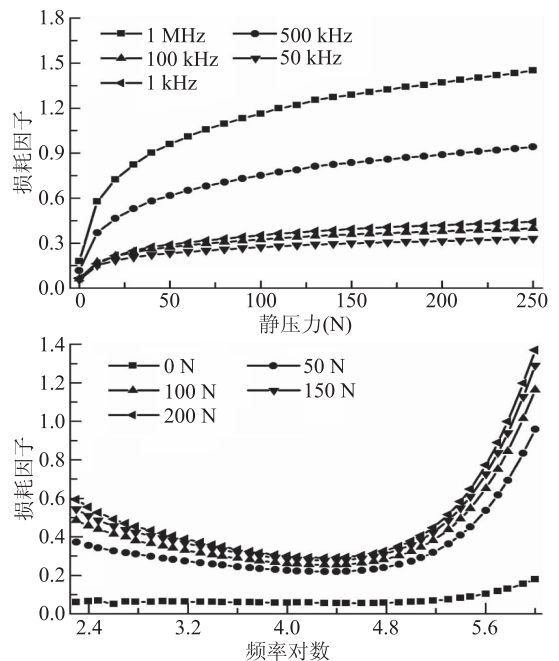


图4 不同静压力和加载频率下苹果损耗因子的变化

Fig.4 Changes of the loss factor under various static pressures and loading frequencies

图5为在1 MHz频率下,苹果果实相对介电常数和损耗因子随静压力的变化率(相邻两个力所对应的介电参数差值除以力的增量)。由图5可见,当静压力小于120 N,随静压力的增大,果实相对介电常数和损耗因子变化率逐渐变小。当静压力大于120 N,果实相对介电常数和损耗因子变化率基本保持不变。结合图3、图4的结论,当静压力小于120 N,果实相对介电常数和损耗因子随静压力非线性增大。当静压力大于120 N,果实相对介电常数和

损耗因子随静压力线性增大。

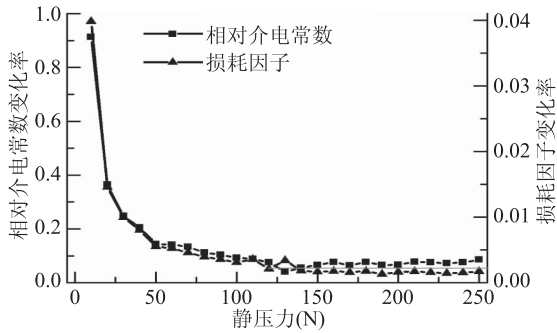


图5 1 MHz 频率下相对介电常数和损耗因子随静压力的变化率

Fig.5 Change ratio of the relative dielectric constant and the loss factor under various static pressures at 1 MHz

### 2.3 不同静压力下苹果电阻抗图谱和细胞内外液变化

为了研究在受静压作用过程中,苹果果实介电特性和细胞内外液间的关系,本研究同时检测了苹果电阻抗图谱随静压力的变化。图6给出了不同静压力下苹果电阻抗图谱(也称 Cole-Cole 图),横坐标为其复阻抗的实部(电阻成分),纵坐标为虚部(电抗成分)。由图6可知,不同静压力下苹果的 Cole-Cole 图均为一段圆弧,符合生物组织的电学特征<sup>[23]</sup>。随静压力的增大,果实的电阻增大,其电抗在高频时增大,在低频时减小。研究表明,苹果果实胞内电阻随静压力增大而增大,胞外电阻在静压力为 0~120 N 之间基本保持稳定,在 120 N 后随静压力增大而增大(如图7)。

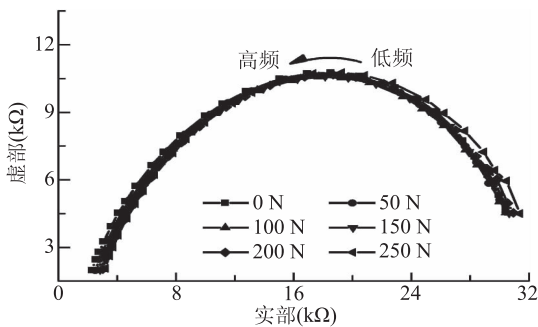


图6 不同静压力下苹果的 Cole-Cole 图  
Fig.6 The Cole-Cole plot of apple under various static pressures

由图8可知,0~250 N 静压过程中,苹果果实中细胞外液体积百分比由 5.69% 增加至 9.22%。同时,在静压力小于 120 N 时,其细胞外液体积百分比的变化率(相邻两个力所对应细胞外液体积百分比的差值除以力的增量)随着静压力增大逐渐变小,在 120 N 后在 0.01% 附近水平波动。说明苹果所受静压力小于 120 N 时,其细胞外液体积非线性增加,在大于 120 N 后,其细胞外液体积线性增加。细胞内外液的体积百分比,与果蔬干燥过程的水分跨膜传输模型得到的结果相符<sup>[24]</sup>。静压力改变了细胞膜的通透性,随静压力的增大细胞内液会向细胞外渗透,即细胞内液体积减小,细胞外液体积增大。受不同大小静压

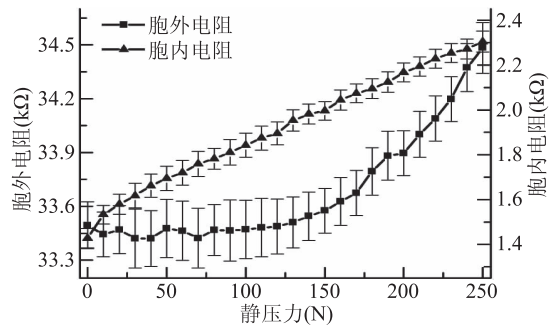


图7 不同静压力下苹果的胞外电阻和胞内电阻变化  
Fig.7 Resistance change of extracellular fluid and intracellular fluid of apple under various static pressures

力作用时,苹果细胞外液体积百分比变化与压缩量的变化亦具有相似性,都表现为初始阶段的非线性增大和达到一定值后的线性增大,只是细胞外液体积百分比压缩量的变化具有一定的“滞后”效应,这与细胞内压变化导致的细胞内液外渗不是瞬时完成的,而是一个渐进的过程有关。数据对比发现,胞外电阻约为胞内电阻的 20 倍,这可能与生物组织的阻抗值在低频时主要表现为胞外电阻有关<sup>[21]</sup>。压力引起的果品应力、应变和细胞内压之间呈非线性关系<sup>[25]</sup>,而细胞内压随细胞应力或应变增加而增加。这种宏观力的刺激在生物体内部会产生一系列复杂的生理和化学响应,并且这些响应发生的强弱与外界机械刺激力的大小和类型密切相关。

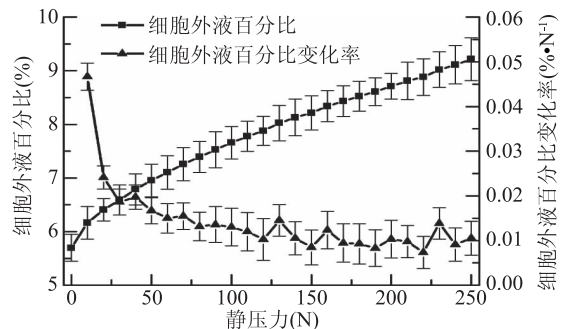


图8 细胞外液体积百分比随静压力的变化  
Fig.8 Changes of volume percentage of extracellular fluid with static pressure increase

为分析苹果受压过程中,果实相对介电常数、损耗因子和细胞外液体积百分比间的相互关系,表1列出了 Pearson 相关系数和差异显著性检验结果,发现相对介电常数、损耗因子与细胞外液体积百分比间均呈极显著正相关( $r > 0.94, p < 0.001$ )。细胞外液体积百分比与相对介电常数、损耗因子极显著相关,说明细胞外液的体积变化是引起果品介电参数变化的主要原因。苹果受到的静压力增大,其细胞内液外渗致细胞外液体积增大。低频电流主要流经细胞外液,则可以被极化的电荷量变大,所以其相对介电常数随静压力的增大而增大。细胞外液体积的增加也使得其介质极化的滞后效应更加显著,极化过程中损耗的能量更大,即损耗因子随着静压力的增大而增大。苹果相对介电常数、损耗因子与细胞内外液的体积百分比的这种高度相关性,可用于用

介电参数快速预测细胞内外液的变化,极大方便了实际应用,也为理解介电特性与生理状态间的关系提供借鉴意义。

表1 苹果介电参数与细胞外液体积百分比间的差异显著性检验  $p$  值及相关系数  $r$

Table 1 P value and correlation coefficient  $r$  between the dielectric parameters and the volume percentage of extracellular fluid in apple

频率	相对介电常数		损耗因子	
1 MHz	$p = 0.000$	$r = 0.979$	$p = 0.000$	$r = 0.954$
500 kHz	$p = 0.000$	$r = 0.994$	$p = 0.000$	$r = 0.957$
100 kHz	$p = 0.000$	$r = 1.000$	$p = 0.000$	$r = 0.948$
50 kHz	$p = 0.000$	$r = 0.999$	$p = 0.000$	$r = 0.941$
1 kHz	$p = 0.000$	$r = 0.997$	$p = 0.000$	$r = 0.961$

对受伤果品的及时检测,有利于及时剔除伤果,避免伤情传递,预防好果品质劣变。受伤果品的检测中视觉观察是最为简单而常用的手段,能直接了解果品表面损伤的情况,如挤伤、开裂等。果品受静压作用往往造成的损伤是表皮无破裂的内伤,就需要用到无损检测方法。在静压过程中果品内部组织结构的变化会引起其生理状态变化,进而通过介电特性的变化表现出来。利用介电特性法可快速评价果品是否受伤,有利于及时剔除伤果避免伤情传递。果品介电特性的研究目前主要集中用介电参数预测其内部生理参数和数学模型的构建方面<sup>[26-27]</sup>,而对其微观机理解释,因微观参量不易测试以及影响因素复杂多变,目前尚很难开展有效的工作。本研究对苹果不同静压力下介电参数的研究,为通过介电参数检测果品的受伤情况提供了方法,有望为通过介电参数评价果品的损伤程度提供理论指导。

### 3 结论

以苹果为研究对象,对其受 0~250 N 静压力时的介电参数和电阻抗图谱进行监测。苹果果实介电参数与所受的静压力、加载频率相关性较强:静压力小于 120 N 时,相对介电常数和损耗因子均随静压力的增大而非线性增大;大于 120 N 后,则随着静压力的增大呈线性增加。同一静压力下,相对介电常数随加载频率增大而变小,损耗因子则在加载频率为 20 kHz 时有极小值。随静压力增大,苹果果实胞外电阻在静压力小于 120 N 时基本保持水平,大于 120 N 后开始增大。利用 Hayden 模型计算发现,受压过程中苹果果实细胞外液体积百分比由 5.69% 增加至 9.22%,苹果相对介电常数、损耗因子和细胞外液体积百分比之间呈极显著正相关,相关系数大于 0.94。本研究有望为采用介电特性快速检测果品的受伤情况提供方法。

### 参考文献

[1] 王海波,李林光,陈学森,等.中早熟苹果品种果实的风味物质和风味品质[J].中国农业科学,2010,43(1):2300-2306.  
[2] Kevin R, Paul D P, Pucker G, et al. Phenolic compounds and their role in oxidatibe processes in fruits[J]. Food Chemistry,

1999,66(4):401-436.

[3] 魏露霞,李萍,侯晓荣,等.果蔬采后机械损伤特性研究进展[J].食品工业科技,2013,34(1):389-391,396.  
[4] Soltani M, Alimardani R, Omid M. Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system [J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(6):443-447.  
[5] 张立彬,胥芳,贾灿纯,等.苹果内部品质的介电特性无损检测研究[J].农业工程学报,2000,16(3):104-106.  
[6] Ikediala J N, Tang J, Drake S R, et al. Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5):1175-1184.  
[7] Everard C D, Fagan C C, Donnell C P O, et al. Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3):415-422.  
[8] Mariappan C R, Govindaraj G. Electrical properties of A2.6 + xTi1.4 - xCd (PO<sub>4</sub>) 3.4 - x (A = Li, K; x = 0.0 - 1.0) phosphate glasses [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2006, 352(26-27):2737-2745.  
[9] Luigi Ragni, Ali Al - Shami, Galina Mikhaylenko, et al. Dielectric characterization of hen eggs during storage [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4):450-459.  
[10] Khalid Mujasam Badoo, Shalendra Kumar, Chan Gyu Lee, et al. Influence of Al doping on electrical properties of Ni - Cd nano ferrites [J]. Current Applied Physics, 2009, 9(4):826-832.  
[11] Nelson S O. Dielectric spectroscopy in agriculture [J]. Journal of Noncrystalline Solids, 2005, 351(33-36):2940-2944.  
[12] Berardinelli A, Donati V. Damage to pears caused by simulated transport [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(2):219-226.  
[13] Nelson S O, Forbus W R, Lawrence K C. Assessment of microwave permittivity for sensing peach maturity [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(2):579-585.  
[14] 张立彬,胥芳,周国军,等.苹果的介电特性与新鲜度的关系研究[J].农业工程学报,1996,12(3):186-190.  
[15] 郭文川,朱新华,郭康权.采后苹果电特性与生理特性的关系及其应用[J].农业工程学报,2005,21(7):136-139.  
[16] Wang S, Monzon M, Gazit Y, et al. Temperature dependent dielectric properties of selected subtropical and tropical fruits and associated insect pests [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5):1873-1881.  
[17] 郭文川,朱新华,郭康权.损伤对苹果介电参数值的影响[J].农业机械学报,2006,37(8):133-135.  
[18] 边红霞,屠鹏,张小平.不同等级兰州百合的介电特性[J].食品科学,2013,34(3):105-108.  
[19] 李星恕,许刚,黄磊,等.后熟过程中植物生长调节剂对猕猴桃电阻抗图谱特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(1):288-293.  
[20] Toyoda K, Tsenkova R N, Nakamura M. Characterization of osmotic dehydration and swelling of apple tissues by bioelectrical impedance spectroscopy [J]. Drying Technology, 2001, 19(8):1683-1695.  
[21] 张钢,肖建忠,陈段芬.测定植物抗寒性的电阻抗图谱法

(下转第 43 页)

- [3]张强,辛秀兰,杨富民,等.红树莓果醋酿造过程中抗氧化性能的变化[J].食品科学,2016,37(3):6-11.
- [4]Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S, Kunwisawa J, et al. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying[J]. LWT- Food Science and Technology, 2011, 44(6):1502-1510.
- [5]黄燕,程裕东,梁凯.微波、热风干燥对橙皮干燥特性及其品质影响的比较[J].食品科学,2009,30(21):16-20.
- [6]孙宇,郑先哲,李强,等.微波辅助泡沫干燥蓝莓果粉工艺的研究[J].东北农业大学学报,2012,43(5):17-23.
- [7]Zheng X Z, Liu C H, Zhou H. Optimization of parameters for microwave-assisted foam mat drying of blackcurrant pulp[J]. Drying Technology, 2011, 29(2):230-238.
- [8]Bórquez R M, Canales E R, Redon J P. Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(2):121-127.
- [9]Hangi A K, Amanifard N. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(3):491-501.
- [10]郑先哲,刘成海,周贺.黑加仑果浆微波辅助泡沫干燥特性[J].农业工程学报,2009,25(8):288-293.
- [11]Djaeni M, Prasetyaningrum A, Sasongko S B, et al. Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2):1170-1175.
- [12]王宏业.黑加仑果浆微波辅助泡沫干燥系统研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2011.
- [13]Lobo F A, Nascimento M A, Domingues J R, et al. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity[J]. Food Chemistry, 2017, 221:258-266.
- [14]唐辉,李梦雨,陈文学,等.番木瓜果浆微波辅助泡沫干燥过程中营养成分降解模型[J].食品工业科技,2016,37(11):89-95.
- [15]Kandasamy P, Varadharaju N, Kalemullah S, et al. Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp[J]. Journal Food Science and Technology, 2014, 51(10):2526-2534.
- [16]Sangamithra A, Venkatachalam S, Kuppuswamy K, et al. Foam mat drying of muskmelon[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(1):127-137.
- [17]Salahi M R, Mohebbi M, Taghizadeh M. Foam-Mat Drying of Cantaloupe (*Cucumis melo*): Optimization of Foaming Parameters and Investigating Drying Characteristics[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6):1798-1808.
- [18]Lyng J G, Arimi J M, Scully M, et al. The influence of compositional changes in reconstituted potato flakes on thermal and dielectric properties and temperatures following microwave heating[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124:133-142.
- [19]Kowalski S J, Grzegorz M, Jacek B. Heat and mass transfer during microwave-convective drying[J]. American Institute of Chemical Engineers, 2010, 56(1):24-35.
- [20]李秀伟.浆果微波泡沫干燥品质研究及过程模拟[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [21]Kumar R, Jose M, Singha G N, et al. RF characterization and testing of ridge waveguide transitions for RF power couplers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2016, 838:66-73.
- [22]Chouhan S S, Halonen K. Alternative approach to design matching network for differential drive rectifier used in RF energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2016, 58:39-43.
- [23]Zheng X Z, Wang Y K, Liu C H, et al. Microwave energy absorption behavior of foamed berry puree under microwave drying conditions[J]. Drying Technology, 2013, 31(7):785-794.
- [24]Botha G E, Oliveira J C, Ahrné L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2):304-311.
- [25]张赛.多孔材料毛细孔收缩热质传递及分形特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [26]Franco T S, Perussello C A, Ellendersena L S N, et al. Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 158:48-57.
- [27]郭文川,王婧,朱新华.基于介电特性的燕麦含水率预测[J].农业工程学报,2012,28(24):272-279.
- [28]王婧.小杂粮的介电特性与主要影响因素的关系研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2012.
- [29]张宝辉.浆果微波辅助泡沫干燥品质和过程模拟研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [30]林甄.微波加工浆果介电特性研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.

(上接第34页)

- [J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(1):19-26.
- [22]Halder A, Datta A K, Spanswick R M. Water transport in cellular tissues during thermal processing[J]. Aiche Journal, 2011, 57(9):2574-2588.
- [23]Volkov A G. Plant Electrophysiology[M]. Germany: Springer Verlag, 2012:205-223.
- [24]刘玲霞,刘相东,常剑,等.果蔬干燥过程的水分跨膜传输模型构建[J].农业工程学报,2012,28(20):256-264.
- [25]高永毅,焦群英,王荣.植物细胞对外加压缩载荷的响应分析[J].应用力学学报,2005,22(1):79-82.
- [26]郭文川.果蔬介电特性研究综述[J].农业工程学报,2007,23(5):284-289.
- [27]蔡骋,李永超,马惠玲,等.基于介电特征选择的苹果内部品质无损分级[J].农业工程学报,2013,29(21):279-287.