

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.028

桃 10 ~ 4 500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析*

郭文川 陈克克

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 以不同成熟度的银风桃为对象,利用同轴探头技术测量了 25℃ 下 10 ~ 4 500 MHz 间桃肉和桃汁的介电参数,并测量了桃肉的含水率、桃汁的可溶性固形物含量、pH 值和电导率,分析了介电特性和内部品质间的关系。结果表明,桃肉和桃汁的相对介电常数皆随着频率的增大单调减小,而介质损耗因数呈现“V”型的变化趋势。离子的导电性和偶极子的极化分别是引起低频和高频下介电损耗的主要原因。桃肉和桃汁的介电参数与可溶性固形物含量、pH 值以及含水率间没有明显的线性关系。

关键词: 桃 品质 可溶性固形物 含水率 介电特性

中图分类号: S183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0134-05

Relationship between Dielectric Properties from 10 to 4 500 MHz and Internal Quality of Peaches

Guo Wenchuan Chen Keke

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

In order to explore the potential of dielectric properties in determining fruit internal quality, peaches with different maturities were selected and coaxial open-ended probe technology was used to measure permittivity of peach pulp and juice over the frequency range from 10 to 4 500 MHz at 25°C. The moisture content of peach pulp, soluble solids content, pH value and electrical conductivity of juice were also measured. The results showed that the dielectric constants of pulp and juice decreased with increased frequency, while the loss factors changed with “V” type. The ionic conduction and dipolar polarization were the major loss mechanisms at lower frequencies and higher frequencies, respectively. The relationship between permittivity and soluble solids content, pH value, and moisture content was non-linear.

Key words Peach, Quality, Soluble solids content, Moisture content, Dielectric properties

引言

寻求评价水果品质指标的方法是水果品质研究中的一个主要问题。食品物料的介电特性描述了处于电磁场中的物质是如何与电磁波相互作用的。常用具有实部和虚部的复数相对介电常数 ϵ_r^* 表示物质的介电特性,即 $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ 。其中 ϵ_r' 为相对介电常数, ϵ_r'' 为介质损耗因数(反映总介电损耗),它们分别反映了物质储存电磁场能量的能力和将电磁

能转换为热能的能力。食品物料的介电特性除了受电磁波的频率和样品的温度影响外,还决定于食品物料的组织成分^[1-6]。

水果的主要成分是水分。Nelson 等^[7-8]、Feng 等^[9]研究了含水率对水果介电特性的影响,而糖度是水果的主要内部品质指标。在对蜜瓜果肉^[8,10]和果汁^[11]的研究中,发现 1 800 MHz 下果肉和果汁的损耗角正切 $\tan\delta = \epsilon_r''/\epsilon_r'$ 与反映糖度的可溶性固形物含量有很好的线性相关性,介电参数可用于预测

收稿日期: 2009-02-10 修回日期: 2009-04-14

* 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08-ZT06)和西北农林科技大学青年学术骨干项目(Z111020711)

作者简介: 郭文川,教授,博士,主要从事农产品和食品介电特性研究,E-mail: guowenchuan69@126.com

蜜瓜果肉和果汁中的糖度。但在对西瓜^[12]和苹果^[13]的研究中,尚未发现介电参数与糖度之间较好的关系。为了进一步探索介电特性在其他水果内部品质检测中的潜力,本文以银凤桃为对象,研究不同成熟度桃在25℃、10~4500 MHz范围内桃肉和桃汁的介电特性,以及桃肉的含水率,桃汁的可溶性固形物含量、pH值和电导率等,分析介电特性和内部品质之间的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为不同成熟度的银凤桃,于试验前一天下午采摘于杨陵区夏家沟村的桃园内。随机将桃分装于大小相同的保鲜袋内,置于25℃的恒温恒湿箱中贮存。试验中共用样品79个,其可溶性固形物含量为9.0%~13.4%,pH值为3.65~4.59,湿基含水率为84.92%~89.73%。

1.2 测试参数与方法

1.2.1 介电参数

利用E5071C型网络分析仪(Agilent Technologies,马来西亚)和85070E型末端开路同轴探头(Agilent Technologies,马来西亚)测量探头与样品接触时所设定频率下的反射系数,由计算机和85070C软件计算 ϵ'_r 和 ϵ''_r 。试验前,先将网络分析仪预热1h,然后对试验中所用网络分析仪的端口依次进行开路、短路和50Ω负载校准。用同轴电缆连接被校准的网络分析仪的端口和同轴探头,启动Agilent Connection Experts软件使计算机和网络分析仪连接。然后启动85070C软件,设定测量频率范围为10~4500 MHz,选择线性扫描点数为101个,进而用空气、短路和25℃的去离子水校准垂直向下的同轴探头。随后测量25℃去离子水的介电参数(ϵ'_r 和 ϵ''_r),以确定是否需要重新校准。

1.2.2 含水率

将已知质量(约10~13g)桃肉放在直径55mm的铝盒中于70℃的WG-71型热风干燥箱(天津泰斯特仪器公司)中干燥24h后取出,放在装有变色硅胶的干燥室中冷却至室温后测量干燥后的质量。根据干燥前和干燥后的质量计算果肉样品的湿基含水率。

1.2.3 可溶性固形物

由于果汁中可溶性固形物含量近85%的成分为糖,因此常以可溶性固形物含量(SSC)反映果汁的糖度。试验中,用PR101α型数字折射计(Atago Co., Ltd.,日本)测量果汁样品的SSC。每个样品重复3次,3次读数的平均值作为测量结果。

1.2.4 pH值

严格地说,果品的酸度是由其可滴定酸的含量决定的,但由于可滴定酸测试比较麻烦,而pH值在一定程度上反映了果品的酸度,且很容易由pH计测得,因此,常以pH值反映果品的酸度。试验中用PHSJ-3F型pH计(上海精密科学仪器公司)测量果汁的pH值,每个样品重复3次,3次读数的平均值作为测量的结果。

1.2.5 电导率

为了解射频/微波下样品的 ϵ''_r 与直流电导率 σ 的关系,用DDSJ-308A型电导率仪(上海精密科学仪器公司)测量桃汁的 σ 。每个样品重复3次,3次读数的平均值作为测量的结果。

1.3 测试步骤

每次试验前,取出样品10~13个,清洗干净后选择无损伤的桃为试验样品。待表面水分晾干后,在果品赤道上间隔90°处选取4个点,依次用刀子切去3~4mm厚的果皮和果肉,然后将桃放在直径50mm的支架上,使去皮处的果肉处于水平,改变支架的高度,使果肉和探头可靠接触。启动85070C软件,测量桃肉的介电参数。4个点均测量完后,将桃沿赤道分成两半,一半用于测量果肉的含水率,一半用于压榨果汁。其中,将含水率测量部分再均匀分成3份,放在热风干燥箱中干燥,3份的平均值作为该样品的测试结果。将压汁部分的果肉切碎后,放在铺有两层纱布的家用压蒜器中压汁,果汁盛于10mL的烧杯中。将烧杯放于直径50mm的支架上,调节支架的高度,使同轴探头浸入摇匀的汁液中,进而通过计算机采集10~4500 MHz间101个频率点下果汁的 ϵ'_r 和 ϵ''_r 。接着依次测量被搅拌均匀果汁的SSC、pH值和 σ 。试验中,除了干燥试验温度为70℃外,其余试验均在25℃室温下完成。

2 结果与分析

2.1 桃肉与桃汁介电参数的频率特性

测试结果说明,相同条件下,所有样品的 ϵ'_r 和 ϵ''_r 随频率 f 变化的规律是相同的,但某一频率下,介电参数的值有所差异。图1、2分别是其中一个样品的果肉与果汁的 ϵ'_r 、 ϵ''_r 在25℃下10~4500 MHz范围内随频率变化的趋势。由于桃汁介电参数的重复性非常好,因此,图中仅给出了果肉介电参数的标准偏差。图1说明在10~4500 MHz范围内,桃肉和桃汁的 ϵ'_r 皆随着 f 的增大单调减小,且低频下,桃肉 ϵ'_r 的减小较桃汁迅速。约20 MHz以下,桃肉的 ϵ'_r 比桃汁大,而当 $f > 20$ MHz时,桃汁的 ϵ'_r 比桃肉大。图2给出了 ϵ''_r 随 f 的变化。由图2可见,在整

个测量频段内,随着 f 的增大, ε_r' 呈现“V”型的变化趋势,即存在最小值,该最小值出现在1 000 MHz附近。低频段下的直线关系说明此时 $\lg\varepsilon_r'$ 与 $\lg f$ 呈负的线性关系。

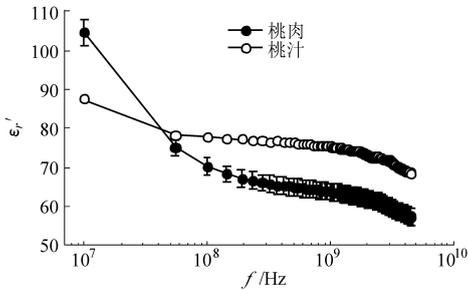


图1 25℃下桃肉与桃汁 ε_r' 的频率特性

Fig.1 Frequency dependence of relative dielectric constant of peach pulp and juice

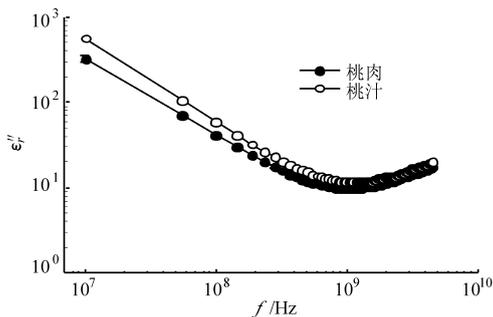


图2 25℃下桃肉与桃汁 ε_r'' 的频率特性

Fig.2 Frequency dependence of dielectric loss factor of peach pulp and juice

2.2 介质损耗因数与直流电导率的关系

在各向同性的物质中,引起介电损耗的主要原因是偶极子极化、电子极化、原子极化和表面极化等。在射频和微波频段下,导致食品和农产品介电损耗的主要机理是偶极子极化和离子的导电性^[14]。因此, ε_r'' 可以被表示成^[14]

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_{rd}'' + \varepsilon_{rs}'' \quad (1)$$

其中

$$\varepsilon_{rs}'' = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (2)$$

式中 ε_{rd}'' ——偶极子旋转引起的介电损耗

ε_{rs}'' ——离子导电性引起的介电损耗

ε_0 ——真空中的介电常数, 8.854×10^{-12} F/m

式(2)中, σ 和 f 的单位分别是 S/m 和 Hz。对式(2)的两边同取对数,得

$$\lg \varepsilon_{rs}'' = -\lg f + \lg \frac{\sigma}{2\pi \varepsilon_0} \quad (3)$$

显然, $\lg \varepsilon_{rs}''$ 与 $\lg f$ 呈负的线性关系。这也就是在图2所示的低频段下出现直线的原因,说明离子导电性是引起低频下介电损耗的主要原因。因此,在已知 σ 的条件下,可以根据式(2)计算出 ε_{rs}'' 。图3所示是利用网络分析仪测得的图2所给桃汁的 ε_r''

与根据该桃汁的 σ 计算得到的 ε_{rs}'' 的比较。该图说明,当频率小于约100 MHz时,计算得到的 ε_{rs}'' 和测量得到的总介电损耗 ε_r'' 几乎相同。这进一步说明,低频下离子的导电性是介电损耗的主要原因。 ε_r'' 与 ε_{rs}'' 的差是 ε_{rd}'' 。随着频率的增大, ε_{rd}'' 逐渐增大,说明偶极子极化成为介电损耗的主要因素。由于网络分析仪比较昂贵,而电导率仪较便宜,且测试方便,因此,在低频段,尤其是100 MHz以下某个频率点下的 ε_r'' 时,可根据电导率值通过式(2)计算得到。

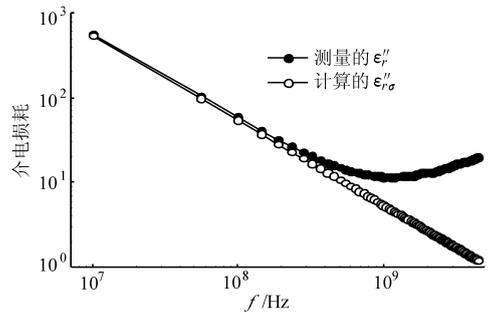


图3 测量的 ε_r'' 与根据 σ 计算的 ε_{rs}'' 的比较

Fig.3 Comparison between measured ε_r'' and calculated ε_{rs}'' according to electrical conductivity

2.3 介电参数与可溶性固形物的关系

在对蜜瓜介电特性的研究中发现蜜瓜果肉和果汁的介电参数值与蜜瓜的可溶性固形物间具有较好的线性关系^[10-11]。为此,对桃肉和桃汁的 ε_r' 、 ε_r'' 和 $\tan\delta$ 分别与SSC进行线性拟合,发现单个介电参数与SSC最好的线性判定系数 R^2 出现在4 500 MHz时的 $\tan\delta$ 和SSC之间,但该值仅有0.51。在蜜瓜的研究中,意外地发现当用果肉的 ε_r' 和 ε_r'' 分别除以SSC时,两个比值之间具有非常好的线性关系^[8]。为此分别对桃肉和桃汁进行了相应的线性拟合,发现其间也具有非常好的线性关系。对于桃肉,最好的线性判定系数 R^2 为0.96,出现在4 500 MHz,如图4所示。其关系式为

$$\frac{\varepsilon_r''}{S} = 0.2387 \frac{\varepsilon_r'}{S} + 0.3311 \quad (4)$$

式中 S ——可溶性固形物含量, %

由式(4)可得

$$S = 3.0202 \varepsilon_r'' - 0.7209 \varepsilon_r' \quad (5)$$

为了验证式(5)的正确性,将79个建模样品桃肉的 ε_r' 和 ε_r'' 分别代入式(5)进行内部验证,判定系数仅有0.5,如图5所示。对于桃汁,该判定系数仅有0.3。同时,没有在介电参数与pH值、含水率、以及反映果实风味的糖酸比之间发现较好的线性相关性。这说明,在应用桃肉和桃汁的介电参数预测可溶性固形物含量、pH值以及含水率方面尚有一定的困难,同样的问题也发现于苹果和西瓜中^[12-13]。

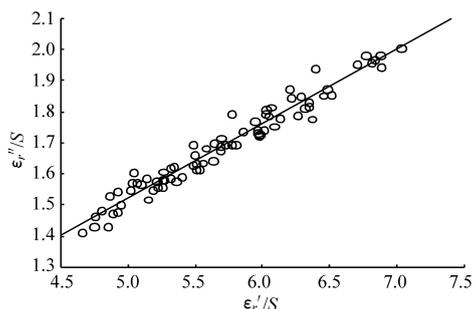


图 4 桃肉的 ϵ'_r 和 ϵ''_r 在分别除以 SSC 时的关系

Fig. 4 Correlation between ϵ'_r and ϵ''_r of peach pulp divided by SSC

另外,桃肉的含水率 $M(\%)$ 与其可溶性固形物含量间存在负的线性关系,如图 6 所示,其间的关系式为 $M = -1.070 2S + 99.44, R^2 = 0.89$ 。

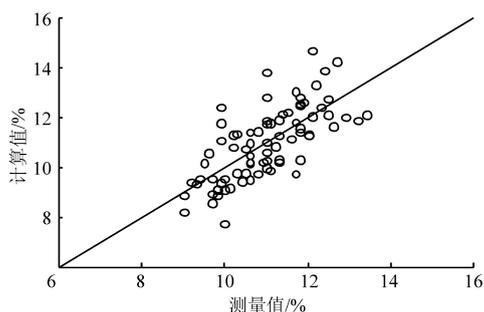


图 5 SSC 计算值与测量值之间的关系

Fig. 5 Predicted SSC against the measured SSC

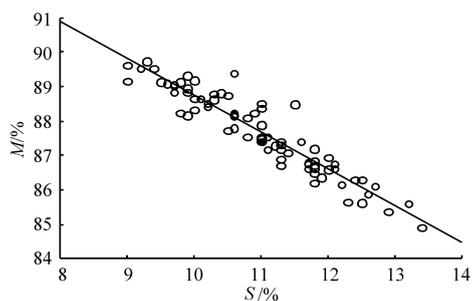


图 6 桃子果肉的含水率与可溶性固形物含量的关系

Fig. 6 Correlation between moisture content and soluble solids content of pulp

2.4 穿透深度

当电磁波通过物质时,物质吸收能量使得电磁波的能量逐渐衰减。当电磁能量衰减到物质表面能量的 $1/e$ (欧拉数 $e \approx 2.718$) 时穿透物质的深度被定义为穿透深度。其计算公式为^[15]

$$D_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon'_r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (6)$$

式中 D_p ——穿透深度, m

c ——光在真空中的速度, 3×10^8 m/s

图 7 给出了不同频率的电磁波在桃肉和桃汁中的穿透深度。穿透深度随着频率的增大而单调减小,且在低频和高频下减小迅速。例如当频率为 10.915、2450 和 4 500 MHz 时,在桃肉中的穿透深度分别为 217.3、42.7、12.4 和 4.6 mm。前述介电参数和可溶性固形物含量间最好的相关性出现在 4 500 MHz 下,即使该相关性能应用于桃肉或桃汁可溶性固形物含量的检测上,穿透深度却是难以克服的问题,因为这样小的穿透深度能否提供精确的介电参数值是值得考虑的。

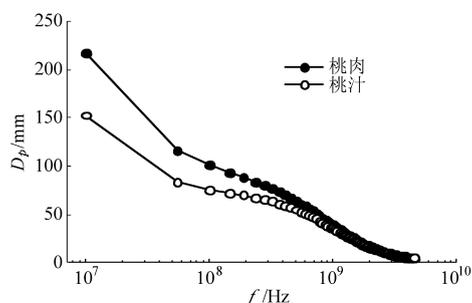


图 7 不同频率的电磁波在桃肉和桃汁中的穿透深度

Fig. 7 Penetration depths of electromagnetic wave with different frequencies in peach pulp and juice

3 结论

(1) 随着频率的增大,桃肉和桃汁的 ϵ'_r 皆随着频率的增大单调减小,而 ϵ''_r 呈现“V”型的变化局势,其最小值出现在 1 000 MHz 附近。

(2) ϵ''_r 的对数与频率的对数在低频段下呈现负的线性关系。低频下离子的导电性是引起介电损耗的主要原因,而高频下介电损耗的主要原因是偶极子的极化。低频下的 ϵ''_r 可根据直流电导率求出。

(3) 桃肉和桃汁的介电参数与其可溶性固形物含量、pH 值及含水率之间没有明显的线性关系,利用介电参数预测桃的内部品质尚有一定的困难。

(4) 电磁能在桃肉和桃汁中的穿透深度随着频率的增大单调减小,高频段下较小的穿透深度成为依据介电参数预测果品品质的瓶颈。

参 考 文 献

- 1 Nunes A C, Bohigas X, Tejada J. Dielectric study of milk for frequencies between 1 and 20 GHz [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76 (2): 250 ~ 255.
- 2 Trabelsi S, Nelson S O. Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave

- permittivity measurements[J]. *Food Control*, 2006, 17(4): 304 ~ 311.
- 3 Zhang L, Lyng J G, Brunton N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 142 ~ 151.
- 4 Gunasekaran N, Mallikarjunan P, Eifert J, et al. Effect of fat content and temperature on dielectric properties of ground beef [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(2): 673 ~ 680.
- 5 鲁勇军, 朱彤, 郭亚峰. 乳制品微波介电性能的测量[J]. *食品科学*, 2000, 21(9): 8 ~ 11.
Lu Yongjun, Zhu Tong, Guo Yafeng. Measurement and analysis on microwave dielectric properties of dairy products[J]. *Food Science*, 2000, 21(9): 8 ~ 11. (in Chinese)
- 6 郭文川, 吕俊峰, 谷洪超. 微波频率和温度对食用植物油介电特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 124 ~ 129.
Guo Wenchuan, Lü Junfeng, Gu Hongchao. Effect of frequency and temperature on microwave dielectric properties of edible vegetable oils[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 124 ~ 129. (in Chinese)
- 7 Nelson S O. Dielectric spectroscopy of fresh fruit and vegetable tissues from 10 to 1800 MHz[J]. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 2005, 40(1): 31 ~ 47.
- 8 Nelson S O, Trabelsi S, Kays S J. Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(6): 1977 ~ 1981.
- 9 Feng H, Tang J, Cavalieri R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(1): 129 ~ 135.
- 10 Guo W, Nelson S O, Trabelsi S, et al. Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality[J]. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 2007, 41(2): 44 ~ 54.
- 11 郭文川, Nelson S O, Trabelsi S, 等. 蜜瓜和西瓜果汁的射频介电特性及其与糖度的关系[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 289 ~ 292.
Guo Wenchuan, Nelson S O, Trabelsi S, et al. Radio frequency (RF) dielectric properties of honeydew melon and watermelon juice and correlations with sugar content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 289 ~ 292. (in Chinese)
- 12 Nelson S O, Guo W, Trabelsi S, et al. Dielectric properties of watermelons for quality sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(7): 1887 ~ 1892.
- 13 Guo W, Nelson S O, Trabelsi S, et al. 10 ~ 1800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(4): 562 ~ 569.
- 14 Rynnänen S. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles [J]. *Journal of Food Engineering*, 1995, 26(4): 409 ~ 429.
- 15 Metaxis R C, Meredith R J. *Industrial microwave heating*[M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1983.

(上接第 203 页)

- 6 Gosselin C, Nonaka T, Shiono Y, et al. Identification of the machine settings of real hypoid gear tooth surfaces[J]. *ASME, Journal of Mechanical Design*, 1998, 120(3): 429 ~ 440.
- 7 Litvin F L, Kuan C. Minimization of deviations of gear real tooth surface determined by coordinate measurements[J]. *ASME, Journal of Mechanical Design*, 1993, 115(4): 995 ~ 1001.
- 8 李敬财, 王太勇, 范胜波, 等. 基于数字化制造的螺旋锥齿轮齿面误差修正[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5): 174 ~ 177, 185.
Li Jingcai, Wang Taiyong, Fan Shenbo, et al. Error corrections of spiral bevel gear tooth surface based on digitized manufacturing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5): 174 ~ 177, 185. (in Chinese)