

基于介电特性的豆浆固形物含量检测

郭文川 王东阳 孔繁荣 李伟强

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为检测豆浆中固形物含量(S),采用网络分析仪研究了频率(20~4 500 MHz)、温度(20~80℃)和 S (2.00~7.01 g/(100 mL))对豆浆介电参数(相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因子 ϵ'')的影响规律;建立了豆浆介电参数与温度、 S 之间的关系模型,并对模型预测 S 的可行性进行了检验。结果说明,在20~4 500 MHz的频率范围内, ϵ' 随频率的增大而减小, ϵ'' 随频率的增大先减小后增大,在600~2 000 MHz之间有最小值。 ϵ' 随温度的升高而减小,低频段下 ϵ'' 随温度的升高而增大,而高频段下 ϵ'' 随温度的升高而减小, ϵ'' 达到最小值时的频率随着温度的升高而增大。 ϵ' 随 S 的增大而减小,而 ϵ'' 随 S 的增大而增大。一定频率下,可用二次多项式表达豆浆的 ϵ' 和 ϵ'' 与温度、 S 的关系;基于100 MHz下的 ϵ' 和20 MHz下的 ϵ'' 所建立的二次多项式的决定系数分别为0.989和0.990。对模型的验证结果表明,基于20 MHz下的 ϵ'' 计算的 S 值与实测值之间的决定系数为0.978。研究结果表明介电特性可用于检测豆浆中的固形物含量。

关键词: 豆浆; 固形物含量; 频率; 温度; 介电参数

中图分类号: TS214.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0239-07

Solids Content Detection of Soybean Milk Based on Permittivities

Guo Wenchuan Wang Dongyang Kong Fanrong Li Weiqiang

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

Abstract: To explore a method for detecting solids content of soybean milk, network analyzer and open-ended coaxial-line probe were applied to study the influence of frequency (20~4 500 MHz), temperature (20~80℃) and solid content (2.00~7.01 g/(100 mL)) on dielectric parameters (relative dielectric constant ϵ' and dielectric loss factor ϵ'') of soybean milk. The models describing the permittivities as functions of temperature and solid content were built, and its feasibility to predict solid content using obtained permittivities were verified. The results showed that over the frequency range of 20~4 500 MHz, ϵ' was decreased with an increase of frequency, and ϵ'' was increased after decrease with increasing frequency. The minimum ϵ'' was observed at 600~2 000 MHz. ϵ' was decreased with an increase of temperature, and ϵ'' was increased with increasing temperature at low frequency end and decreased at high frequency end. The frequency where minimum ϵ'' was increased with increasing temperature. ϵ' was decreased but ϵ'' was increased with increasing solid content. At a given frequency, quadratic polynomial could be used to describe the relationship among permittivities (ϵ' and ϵ'') and temperature and solid content. The determination coefficient of the built model was 0.989 for ϵ' (100 MHz) and 0.990 for ϵ'' (20 MHz). The model verification results showed that the determination coefficient was 0.978 between the calculated solid content using obtained ϵ'' at 20 MHz and the measured ones. This study indicated that permittivities could be used to detect the solid contents of soybean milk.

Key words: soybean milk; solid content; frequency; temperature; permittivities

引言

豆浆含有丰富的植物蛋白、磷脂、维生素以及铁、钙等矿物质,具有很高的营养价值,在欧美被誉为“植物奶”。固形物含量是衡量豆浆品质的主要指标。国家轻工行业标准 QB/T 2132—2008《植物蛋白饮料 豆奶(豆浆)和豆奶饮料》规定,合格豆浆中的固形物含量应不小于 4 g/(100 mL)。豆浆不仅是消费者的重要日常饮品,而且是生产豆腐、腐竹等豆制品的原料,其固形物含量直接影响豆腐的产量、破碎率、硬度和弹性等^[1],影响腐竹的产量、品质和成膜速率等^[2]。因此,对豆浆的固形物含量进行检测是保证和提高豆浆及其豆制品品质的重要技术手段。但是 QB/T 2132—2008 规定的检测固形物含量的烘干法存在检测时间长、能耗大,不能实现实时或在线检测等缺点,使得多数豆浆或豆制品生产者常凭经验感知豆浆的固形物含量,从而导致豆浆及其制品的品质不稳定。因此,研发适用于豆浆固形物含量实时或在线检测的方法对于保证豆浆及其制品的品质具有重要的意义。

介电特性是物质的固有特性之一^[3]。物质的介电特性可用相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因子 ϵ'' 等表示^[4]。 ϵ' 反映了物质存储电场能量的能力,而 ϵ'' 反映物质消耗电场能量的能力^[5]。大量的研究表明,物质的介电特性受物质的组成成分如含水率^[6,7]、含盐量^[8]、脂肪^[9] 等的影响。此外,电磁场的频率和物质的温度也是影响介电特性的主要因素^[10,11]。在豆浆介电特性研究方面,文献[12-15] 研究结果说明,频率、温度和固形物含量是影响豆浆介电特性的主要因素。当测试信号频率一定时,可根据豆浆的温度和测量的介电参数值计算出豆浆的固形物含量。而目前,尚未见研究频率、温度和固形物含量对豆浆介电特性综合影响的报道。为给豆浆中固形物含量的实时或在线检测提供一种方法,本文采用矢量网络分析仪和同轴探头技术研究频率(20~4 500 MHz)、温度(20~80℃)和固形物含量(2.00~7.01 g/(100 mL))对豆浆介电特性的影响规律,建立介电特性参数与温度和固形物含量之间的关系模型,并检验模型的可靠性。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验所用优质黄豆购自杨凌某超市,所用黄豆的初始含水率为 9.2%。选取形状完整、籽粒饱满、无破损、无虫眼豆粒为原料。浸泡黄豆的水为自来水,室温(25±1)℃下该自来水的电导率为(180±

10) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.2 豆浆样品的制备方法

取适量黄豆于自来水中浸泡 12 h。随后取浸泡好的黄豆 300 g 和自来水约 1 L 放入豆浆机(DJ13B-C639SJ 型,九阳股份有限公司)中,选择豆浆机上的“好豆浆”功能制备可直接饮用的豆浆。将制备的豆浆沉淀 10 min 后依次用豆浆机自带滤网和 80 目标准筛过滤,冷藏备用。用规格为 5 mL 的分度吸量管从搅拌均匀的豆浆中取样 5 份,用精度为 0.000 1 g 的精密电子天平(FA2104N 型,上海精密科学仪器有限公司)测量样品的质量后,将样品置于 105℃ 电热鼓风干燥箱(101-1AB 型,天津泰斯特仪器有限公司)中干燥至质量恒定,得到干燥前后豆浆的质量。按 QB/T 2132—2008 计算制备的豆浆样品的初始固形物含量,按 GB/T 5009.5—2010 和 GB/T 5413.3—2010 分别测量豆浆中的蛋白质和脂肪含量。在此期间,剩余豆浆置于 4℃ 冰箱冷藏室保存。据此方法制备的豆浆初始固形物含量在 7.0~7.5 g/(100 mL) 之间,蛋白质含量为 3.6~3.9 g/(100 g),脂肪含量为 1.8~2.1 g/(100 g)。在得到样品的初始固形物含量后,将置于冷藏室中的豆浆取出,根据豆浆的初始固形物含量以及欲制备样品的固形物含量(2.0~7.0 g/(100 mL),间隔 1 g/(100 mL)),于 250 mL 容量瓶中配制所需固形物含量的豆浆样品。配制完成后用干燥法检验制备样品的固形物含量。为了防止样品变质对测试结果的影响,当样品的冷藏时间超过 36 h 时,需再制备新的样品。最终得到固形物含量为 2.00、3.00、3.99、4.99、5.99、7.01 g/(100 mL) 的豆浆样品。

1.3 介电特性的测量方法

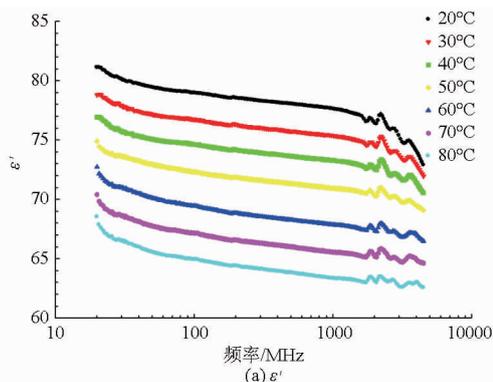
试验前,先将网络分析仪(E5071C 型,Agilent Technology 公司,马来西亚)预热 1 h,然后对其端口依次进行开路、短路和 50 Ω 负载校准。进而启动 85070C 软件(Agilent Technology 公司,马来西亚),设定测量频率范围为 20~4 500 MHz,设定对数刻度下的采样点为 201 个。然后对同轴探头(85070E-020 型,Agilent Technology 公司,马来西亚)依次进行开路、短路和 25℃ 去离子水校准。

测试前 1 h 将样品从冷藏室中取出,将制备的任一固形物含量下的样品倒入 3 个 50 mL 的试管中,将试管用夹子夹住置于电热恒温水浴锅(DK-98-1 型,天津泰斯特仪器有限公司)的水中,保证试管口高于水面 2~3 cm。然后通过液压升降台提升水浴锅,使垂直朝下的同轴探头浸入豆浆中。在 20~80℃ 间以每 10℃ 的间隔设置水浴锅的温度,用

精度 0.1°C 的探针式温度计检测豆浆温度。待豆浆样品的温度达到设定温度后,测量每个温度下样品的 ε' 和 ε'' 。每个温度下测量 3 次,3 个重复 9 次测量的平均值作为测量结果。

1.4 数据处理和模型建立

采用 SigmaPlot 9.0 (SystatSoftware Inc., 美国) 以及 Excel (Microsoft, 美国) 进行数据处理和分析,用 Matlab R2010a (MathWorks, 美国) 建立模型,应用



Design Expert 8.0 (Stat - Ease Inc., 美国) 对模型进行方差分析。

2 试验结果分析

2.1 频率对介电参数的影响

图 1 为 $20 \sim 4\,500$ MHz 的频率范围内,频率对不同温度下固形物含量为 $2.00\text{ g}/(100\text{ mL})$ 的豆浆样品 ε' 和 ε'' 的影响规律。

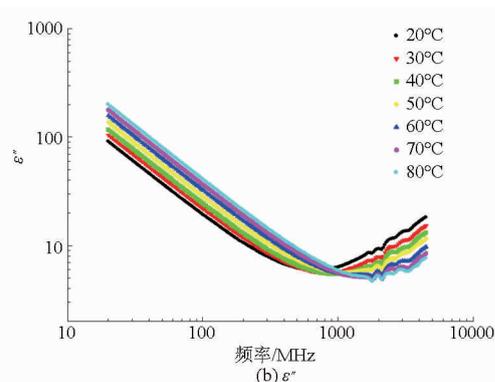


图 1 频率对固形物含量为 $2.00\text{ g}/(100\text{ mL})$ 的豆浆样品 ε' 和 ε'' 的影响

Fig. 1 Effect of frequency on ε' and ε'' of soybean milk with $2.00\text{ g}/(100\text{ mL})$ solids content at different temperatures

由图 1 可以看出,在 $20 \sim 4\,500$ MHz 频率范围内,豆浆的 ε' 值随频率的增大而减小,而 ε'' 随频率的增大先减小后增大。 ε'' 在 $600 \sim 2\,000$ MHz 之间有最小值,且该最小值随温度的升高略有减小。此外, ε'' 达到最小值时的频率随温度的升高也呈现出增大的趋势。例如,当温度为 $20、40、60、80^{\circ}\text{C}$ 时, ε'' 的最小值分别为 $5.877、5.446、5.209、4.801$,该最小值分别出现在 $738、950、1\,796、2\,125$ MHz 处。

由图 1b 可知,当频率小于 300 MHz 时,随着频率的增大, ε'' 在双对数坐标下直线下降,说明在低频段下 $\lg\varepsilon''$ 与 $\lg f$ 存在很好的负线性关系。类似现象也发现于果汁^[16-17]、乳品^[18-19]等介电特性的研究中。

ε' 的变化主要是由非均匀混合物中的偶极子、电子和原子的极化、Maxwell - Wagner 效应造成的^[20]。电荷的累积会导致物质在低频下的总电容

量和 ε' 的增大,当频率增大时,偶极子的振动速度将滞后于电场的变化。当频率增大到一定程度时,偶极子的取向极化停止,导致 ε' 随频率的增大而减小^[21]。频率小于 300 MHz 时,离子的导电性是引起介电损耗的主要原因,故 ε'' 随频率的增大而减小,而在微波频段下偶极子的极化成为引起介质损耗的主要原因,此时 ε'' 随着频率的增大而增大^[10]。

2.2 温度对介电参数的影响

图 2 是温度对 $7.01\text{ g}/(100\text{ mL})$ 的豆浆样品在 $100、915、2\,450$ MHz 下的 ε' 和 ε'' 的影响规律。如图 2 所示,在任一给定的频率下, ε' 均随温度的升高呈线性减小的趋势,这一规律也发现于其他测试频率下。在 $100、915$ MHz 下, ε'' 随温度的升高而增大,而 2450 MHz 下 ε'' 随温度的升高先减小后略有增大,其最小值出现在 70°C 。不同频率下 ε' 和 ε'' 随温度变化的规律也出现于其他固形物含量下的豆浆

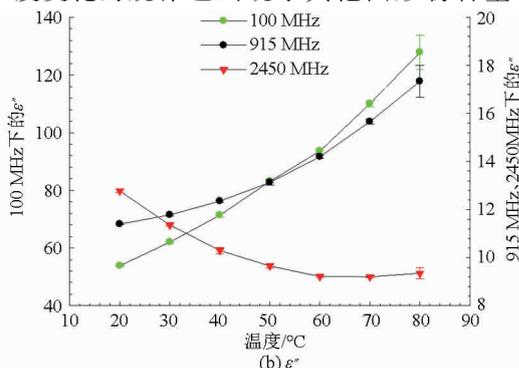
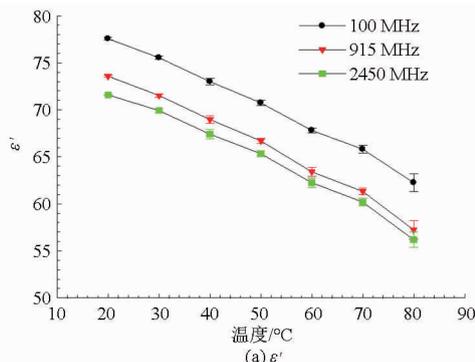


图 2 给定频率下,温度对固形物含量为 $7.01\text{ g}/(100\text{ mL})$ 的豆浆样品 ε' 和 ε'' 的影响

Fig. 2 Influence of temperature on ε' and ε'' of soybean milk with $7.01\text{ g}/(100\text{ mL})$ solid content at given frequencies

中。类似规律也发现于新鲜椰子汁^[22]、大豆分离蛋白溶液^[23]、酱油^[24]等介电特性的研究中。

水是一种强极性溶剂,而豆浆中90%以上的成分是水,故豆浆也是一种极性液体^[25]。由极性液体介电参数的德拜方程可知,温度升高导致静电场下分子布朗运动加剧,削弱了偶极子的转向极化,从而导致了 ϵ'' 的降低^[26]。由于低频下离子导电性是引起介电损耗的主要原因,温度升高使得离子的导电性增强,从而表现出100 MHz和915 MHz下的 ϵ'' 随温度的增大而增大。随着频率的增大,偶极子极化成为引起介电损耗的主要因素。温度升高导致偶极子的转向极化变弱,临界频率增大,曲线右移,因而表现出一定频率下的 ϵ'' 变小。故2450 MHz下的 ϵ'' 随温度的增大而减小。

2.3 固形物含量对介电参数的影响

图3为40℃下,不同固形物含量的豆浆在20~4500 MHz间介电参数的变化规律。图3说明,固形物含量的变化并没有改变 ϵ' 和 ϵ'' 随频率的变化规律,但却影响了介电参数的值。由图3a可见,当频率大于80 MHz时, ϵ' 随豆浆固形物含量的增大而减小,而且固形物含量越大, ϵ' 减小越迅速。图3b说明,最小的 ϵ'' 值及其所在处的频率均随固形物含量的增大而增大。

固形物中的蛋白质和脂肪等成分的电场作用力

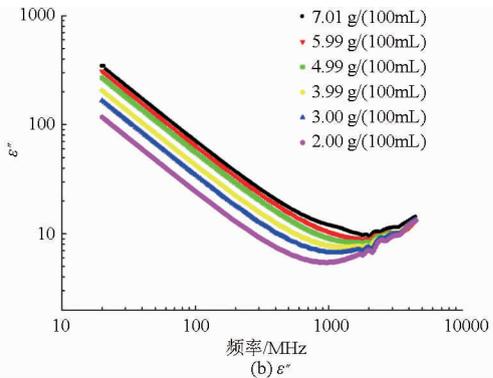
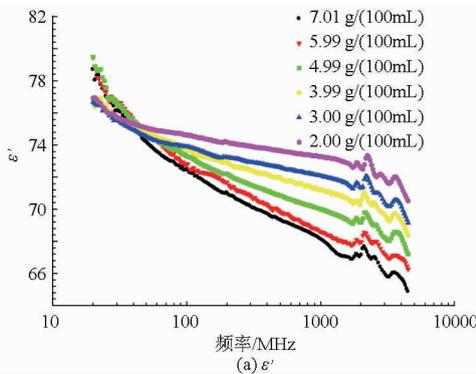


图3 40℃下,不同固形物含量的豆浆在20~4500 MHz间 ϵ' 和 ϵ'' 的变化规律

Fig.3 Changing trend of ϵ' and ϵ'' of soybean milk with different solids mass fractions from 20 MHz to 4500 MHz at 40℃

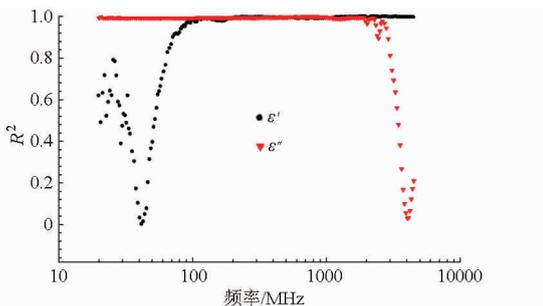


图4 40℃下各个频率点下的决定系数

Fig.4 Determination coefficients at each frequency and 40℃

弱于自由水,其相对介电常数小于水。随着豆浆中固形物含量的增大,蛋白质和脂肪的含量增大,水的含量减小,故 ϵ' 减小。此外,固形物含量的增大使得粒子运动的束缚力变大,也会导致 ϵ' 的减小。而固形物含量的增大又使豆浆中的离子数增多,从而导致 ϵ'' 增大。

为了更好地了解豆浆的介电参数与固形物含量之间的关系,建立了201个频率下 ϵ' 和 ϵ'' 分别与固形物含量的线性关系式: $y = aS + b$,其中, y 代表 ϵ' 和 ϵ'' , S 代表固形物含量, a 和 b 为回归系数。图4所示为40℃时20~4500 MHz间201个频率下该关系式的线性决定系数。由图4可知,当频率大于80 MHz时, ϵ' 与 S 的决定系数大于0.92,而当频率小于2800 MHz时, ϵ'' 与 S 的决定系数大于0.90。可见在一定条件下豆浆固形物含量与其介电参数之间存在很好的线性相关性,类似的规律也发现于其他温度下。从仪器开发的角度讲,当信号的频率大于100 MHz时,电子线路之间的干扰比较严重,电路开发的难度高。为此,图5给出了100 MHz下的 ϵ' 和20 MHz下的 ϵ'' 分别与 S 的线性关系图。

由图5可知,在给定频率下, ϵ' 随固形物含量的增大而减小, ϵ'' 随固形物含量的增大而增大。对其他频率下介电参数的值分别与固形物含量的分析发现, ϵ' 和 ϵ'' 与固形物含量的线性关系为

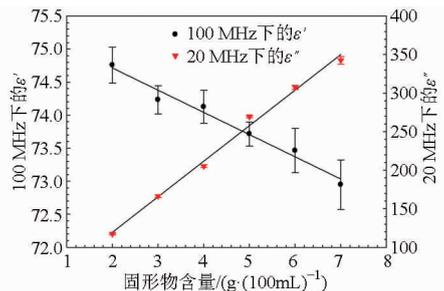


图5 40℃下,固形物含量对豆浆 ϵ' (100 MHz)和 ϵ'' (20 MHz)的影响

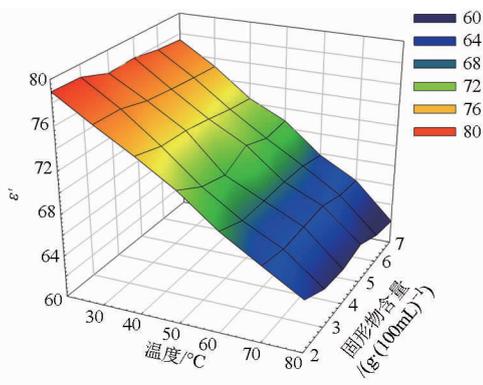
Fig.5 Influence of solids content on ϵ' (100 MHz) and ϵ'' (20 MHz) of soybean milk at 40℃

$$\epsilon' = a_1 S + b_1 \quad (1)$$

$$\epsilon'' = a_2 S + b_2 \quad (2)$$

式中 a_1, b_1, a_2, b_2 ——回归常数

图5说明,若已知豆浆的温度和一定频率下豆浆的介电参数,则可根据介电参数与固形物含量之间的线性关系式计算豆浆的固形物含量。但事实上,测量信号的频率容易固定,而很难获得一个固定温度下的样品。为此,建立考虑温度影响的介电参数模型对于开发便携式的豆浆固形物含量检测仪具有重要的作用。

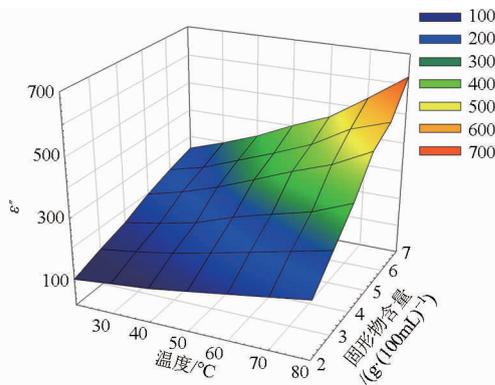


(a) 100 MHz下的 ϵ'

3 介电参数与温度、固形物含量关系模型的建立与验证

3.1 模型的建立

图6为豆浆的温度与固形物含量分别对100 MHz下的 ϵ' 、20 MHz下的 ϵ'' 综合影响图。由图6可知,温度一定时, ϵ' 随固形物含量的增加而减小,而 ϵ'' 随固形物含量的增加而增大;当固形物含量一定时, ϵ' 随温度的升高而减小, ϵ'' 随温度的升高而增大。



(b) 20 MHz下的 ϵ''

图6 温度与固形物含量对100 MHz下 ϵ' 和20 MHz下 ϵ'' 的综合影响

Fig. 6 Comprehensive influence of temperature and solids content on ϵ' (100 MHz) and ϵ'' (20 MHz) of soybean milk

为了满足不同温度下豆浆固形物含量检测的需求,利用 Matlab R2010a 软件对试验数据进行了多元回归拟合,建立了不同频率下介电参数与温度、固形物含量之间的二元二次模型。100 MHz 下 ϵ' 和 20 MHz 下 ϵ'' 与温度、固形物含量之间模型为

$$\epsilon'_{100} = 83.13 - 0.1804T - 0.218S - 5.989 \times 10^{-4}T^2 + 3.752 \times 10^{-4}TS + 6.733 \times 10^{-3}S^2 \quad (3)$$

$$\epsilon''_{20} = 77.97 - 3.005T + 16.52S + 3.316 \times 10^{-2}T^2 + 0.8452TS - 0.4162S^2 \quad (4)$$

式中 T ——温度,取 20 ~ 80°C

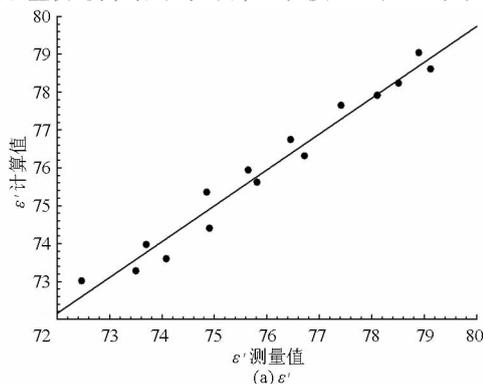
$\epsilon'_{100}, \epsilon''_{20}$ ——100 MHz 下 ϵ' 和 20 MHz 下 ϵ''

其决定系数分别为 0.989 和 0.990。对式(3)、式(4)进行方差分析,结果表明,2 个模型的 P 均小

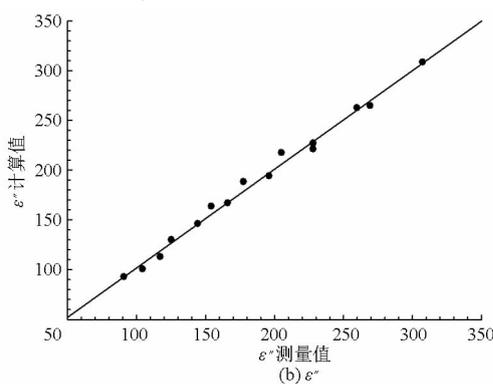
于 0.000 1,说明模型极显著。式(3)中, T 和 S 在 $P < 0.000 1$ 的水平上显著;式(4)中,除 S 和 S^2 项在 $P < 0.05$ 的水平上显著外,其余各项均在 $P < 0.000 1$ 的水平上显著。说明在一定频率下介电参数与温度、固形物含量之间有良好的相关性。

3.2 模型的验证

为了评判模型的准确性与适用性,在固形物含量 2.00 ~ 7.01 g/(100 mL) 范围内随机配制了 5 个不同固形物含量的豆浆样品,测量了 20 ~ 80°C 间任意 3 个温度下,豆浆样品在 100 MHz 下的 ϵ' 和 20 MHz 下的 ϵ'' 。将基于式(3)和式(4)计算的介电参数值分别与测量值进行比较,结果如图 7 所示。结果表明,豆浆 100 MHz 下 ϵ' 和 20 MHz 下 ϵ'' 的计



(a) ϵ'



(b) ϵ''

图7 100 MHz 下 ϵ' 和 20 MHz 下 ϵ'' 的计算值与测量值的关系

Fig. 7 Calculated ϵ' at 100 MHz and ϵ'' at 20 MHz against measured ones

算值与测量值之间的决定系数分别为 0.968 和 0.992,说明式(3)和式(4)能准确地描述豆浆介电参数与温度和固形物含量之间的关系。

3.3 对模型计算固形物含量性能的检验

按照第 1.2 节的方法重新制备了 5 个固形物含量的豆浆样品,分别测量了在 20 ~ 80℃ 间任意 4 个温度下豆浆样品在 100 MHz 下的 ϵ' 和 20 MHz 下 ϵ'' 。根据测得的介电参数和温度,利用牛顿迭代法根据式(4)计算样品的固形物含量。将计算得到的固形物含量与干燥法所得测量值进行比较。基于 100 MHz 下的 ϵ' 计算的 S 值与实测值的决定系数是 0.563。图 8 所示是基于 20 MHz 下的 ϵ'' 依据式(4)利用牛顿迭代法计算的 S 值与实测值的比较,二者的决定系数为 0.978。说明基于介电参数可以较好

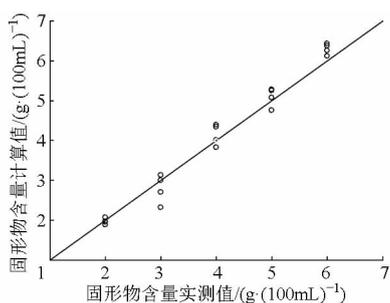


图 8 基于 20 MHz 下 ϵ'' 的固形物含量计算值与实测值比较

Fig. 8 Comparison between calculated solid contents using obtained ϵ'' at 20 MHz and measured ones

地计算豆浆的固形物含量。

4 结论

(1) 在 20 ~ 4 500 MHz 间豆浆的 ϵ' 值随频率的增大而减小, ϵ'' 随频率的增大先减小后增大, 在 600 ~ 2 000 MHz 之间有最小值。

(2) 在整个测试频段内, ϵ' 随温度的升高而减小; 当频率小于 600 MHz 时, ϵ'' 随温度升高而增大, 而当大于 2 000 MHz 时, ϵ'' 随温度的升高而减小, ϵ'' 达到最小值时的频率随着温度的升高而增大。

(3) ϵ' 随固形物含量的增大而减小, ϵ'' 随固形物含量的增大而增大。在某些频率下, 各介电参数与固形物含量之间有很好的线性相关性。

(4) 可用二元二次模型描述豆浆的介电参数与温度、固形物含量的关系。100 MHz 下的 ϵ' 和 20 MHz 下的 ϵ'' 模型的决定系数均大于 0.98。对模型的验证结果表明, 100 MHz 下的 ϵ' 和 20 MHz 下的 ϵ'' 的计算值与测量值之间的决定系数分别为 0.968 和 0.992。

(5) 20 MHz 下的 ϵ'' 计算的固形物含量与实测值之间的决定系数为 0.978。

(6) 研究结果说明, 基于介电特性可以检测豆浆中的固形物含量。该研究可为适于现场检测的便携式豆浆固形物含量检测仪的研发提供基础数据。

参 考 文 献

- CAI T D, CHANG K C. Dry tofu characteristics affected by soymilk solid content and coagulation time[J]. Journal of Food Quality, 1997, 20(5): 391 - 402.
- 韩智, 石谷孝佑, 李再贵. 不同豆浆浓度和浆液深度对腐竹生产的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 179 - 181. HAN Zhi, ISHITANI Takasuke, LI Zaigui. Effects of different soymilk concentration and depth on the formation of yuba [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 179 - 181. (in Chinese)
- 郭文川, 朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 308 - 312. GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Foreign dielectric property measurement techniques and their applications in agricultural products and food materials[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 308 - 312. (in Chinese)
- 王云阳, 李站龙, 杨绍龙, 等. 苹果汁电导率及介电损耗因子影响因素的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2810 - 2815. WANG Yunyang, LI Zhanlong, YANG Shaolong, et al. Influencing factors of conductivity and dielectric loss factor in apple juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(12): 2810 - 2815. (in Chinese)
- 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. GUO Wenchuan. Review of dielectric properties of fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 284 - 289. (in Chinese)
- LING Bo, GUO Wenchuan, HOU Lixia, et al. Dielectric properties of pistachio kernels as influenced by frequency, temperature, moisture and salt content[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 420 - 430.
- GUO Wenchuan, WANG Shaojin, TIWARI G, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(2): 193 - 201.
- AHMED J, RAMASWAMY H S, RAGHAVAN V G S. Dielectric properties of butter in the mw frequency range as affected by salt and temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 351 - 358.
- ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, LIANG Zhibin. Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1485 - 1494.

- 10 朱新华, 郭文川. 影响食品射频-微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 410-414.
ZHU Xinhua, GUO Wenchuan. A review of affecting factors and their mechanisms of the radio frequency-microwave dielectric properties of foods[J]. Food Science, 2010, 31(17): 410-414. (in Chinese)
- 11 郭文川, 陈克克. 桃 10~4 500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 134-138.
GUO Wenchuan, CHEN Keke. Relationship between dielectric properties from 10 to 4 500 MHz and internal quality of peaches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 134-138. (in Chinese)
- 12 宋华鲁, 闫银发, 宋占华, 等. 基于交流阻抗法的豆浆电特性检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 298-306.
SONG Hualu, YAN Yinfa, SONG Zhanhua, et al. Detection of electrical properties of soybean milk based on AC impedance method [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 298-306. (in Chinese)
- 13 李修渠, 李里特, 辰巳英三, 等. 豆浆的电导率[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(2): 103-106.
LI Xiuqu, LI Lite, EIZO Tatsumi, et al. Study on electrical conductivity of soybean milk [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(2): 103-106. (in Chinese)
- 14 李法德, 李里特, 辰巳英三. 不同加热条件对豆浆电导率的影响[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 107-111, 103.
LI Fade, LI Lite, EIZO Tatsumi. Effect of heating condition on electrical conductivity of soybean milk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 107-111, 103. (in Chinese)
- 15 LI Xingshu, TOYODA K, IHARA I. Coagulation process of soymilk characterized by electrical impedance spectroscopy [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(3): 563-568.
- 16 ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, WU Xiaoling. Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 258-266.
- 17 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 CSAE, 2008, 24(5): 289-292. (in Chinese)
- 18 郭文川, 康飞, 朱新华. 频率、温度和大豆蛋白对牛乳介电特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 274-278, 115.
GUO Wenchuan, KANG Fei, ZHU Xinhua. Influence of frequency, temperature and soy protein on dielectric properties of raw milk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 274-278, 115. (in Chinese)
- 19 ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng. Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4 500 MHz relevant to radio-frequency and microwave pasteurization process [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(6): 1830-1839.
- 20 SACILIK K, COLAK A. Determination of dielectric properties of corn deeds from 1 to 100 MHz [J]. Powder Technology, 2010, 203(2): 365-370.
- 21 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 113-117.
GUO Wenchuan, WANG Jing, LIU Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113-117. (in Chinese)
- 22 FRANCO A P, YAMAMOTO L Y, TADINI C C, et al. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 155: 69-78.
- 23 AHMED J, RAMASWAMY H S, RAGHAVAN G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(1): 71-81.
- 24 TANAKA F, MORITA K, MALLIKARJUNAN P, et al. Analysis of dielectric properties of soy sauce [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(1): 92-97.
- 25 ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng, et al. Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 670-680.
- 26 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 micro wave dielectric properties of edible vegetable oils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 124-129. (in Chinese)