

基于微波干燥的江南年糕介电特性的研究

宋春芳, 桑田, 王燕, 杨桐, 续艳峰, 张鹏, 崔政伟, 朱海清

(江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 本文以江南年糕为对象, 利用网络分析仪测量并研究了频率 (915~2450 MHz)、年糕含水率 (16~48%) 和温度 (25~60 °C) 对相对介电常数 ϵ' 和介电损耗因数 ϵ'' 的影响; 计算了微波穿透深度并分析频率、含水率和温度对其影响; 建立了部分频率下年糕介电参数与主要影响因素的关系模型, 检验了基于介电参数预测含水率的精度和可行性。结果表明, 在 915~2450 MHz 频率段内, 年糕的 ϵ' 随频率的增大而减小, ϵ'' 随频率的增大而增加, ϵ' 和 ϵ'' 均随含水率的增大而增加, 但随温度的增大而减小; 能量穿透深度随含水率、频率的升高而降低, 随温度的升高而增加。可用二元三次方程描述介电参数和主要影响因素的关系, 且各模型的判定系数皆大于 0.99。本研究对了解年糕的介电特性以及含水率检测仪的开发有重要的指导意义。

关键词: 年糕; 介电性能; 含水率; 温度; 频率; 穿透深度

文章编号: 1673-9078(2015)11-177-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.028

Effect of Microwave Drying on the Dielectric Properties of Jiangnan Rice Cakes

SONH Chun-fang, SANG Tian, WANG Yan, YANG Tong, XU Yan-feng, ZHANG Peng, CUI Zheng-wei, ZHU Hai-qing

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Jiangnan rice cakes were used as the object in this study, and a network analyzer was used to determine the effects of frequency (915~2450 MHz), moisture content of rice cakes (16~48%), and temperature (25~60 °C) on the relative permittivity ϵ' and dielectric loss factor ϵ'' . The microwave penetration depth was calculated and the impacts of frequency, moisture content, and temperature on the microwave penetration depth were analyzed. A relationship model between dielectric parameters of rice cakes and the main factors at some frequencies was established to examine the accuracy and feasibility of moisture content prediction based on the dielectric parameters. The results showed that in the frequency range of 915~2450 MHz, ϵ' of rice cakes decreased and ϵ'' increased with increasing frequency; both ϵ' and ϵ'' increased with increasing moisture content, but decreased with increasing temperature. The value of energy penetration depth decreased with increasing moisture and frequency, and increased with increasing temperature. The relationship between dielectric parameters and the main influencing factors could be described by binary cubic functions, and the coefficients of determination of all models were greater than 0.99. These findings would have an important guiding significance on understanding the dielectric properties of rice cakes and developing moisture detectors.

Key words: rice cake; dielectric properties; moisture content; temperature; frequency; penetration depth

江南年糕即江浙一带的年糕呈白色, 本身属淡味, 由粳米跟糯米按一定比例混合制成, 经浸泡、水磨、压榨、蒸煮、挤压成型等工序加工而成的一种传统食品, 具有爽滑、香糯的优良品质, 深受消费者欢迎^[1]。年糕含有蛋白质、脂肪、碳水化合物、烟酸、

收稿日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (21206051); 江南大学国家级大学生创新创业训练计划项目 (201410295050); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放基金课题 (FM-201503)

作者简介: 宋春芳 (1974-), 女, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事食品工艺与机械方面的研究

钙、磷、钾、镁等营养元素, 在江南水乡一带最为著名。而年糕产品在储存过程中, 特别是夏季, 容易发生霉变^[2], 导致其保质期不长, 一般情况下保质期在一周以内, 影响了其销量和销售范围, 因此延长年糕的保质期是目前市场急需解决的问题^[3]。传统的干燥方法主要为热风干燥, 干燥过程中温度梯度与水分梯度是相反的, 越到干燥后期, 物料水分越难蒸发, 干燥时间越长, 能量消耗越大, 而微波干燥由于干燥时间短, 效率高, 能耗相对少而得到越来越多食品企业的关注^[4]。在介电加热处理和烹调中, 介电特性在很大程度上决定了处于高频或微波电场中的物料行为, 此

外物质的介电特性决定于其组织成分等。因此,可以利用介电特性识别物质的含水率、新鲜度等品质因素^[5]。目前,国内外对食品介电的研究主要应用于快速检测、物料杀菌和杀虫^[6-8],而关联与介电干燥的物料介电特性的研究鲜有文件报道。

介电特性表征了物质内部生物分子中的束缚电荷对外加电场的响应特性。常用于评价物料介电特性的参数包括介电常数、电导率、介电损耗因数,此外还有损耗角正切、等效阻抗、电阻电导和电容等^[9]。本文主要研究分析介电常数和介电损耗因数及能量穿透深度。介电常数是电介质物料的固有物理属性,反应物料存储电能的能力;而介电损耗因数反映食品在电磁场中消耗能量的能力。

本文以年糕为研究对象,研究频率为工业微波频率到家用微波频率之间即测定频率(915~2450 MHz),样品含水率(16~48%) (w.b.),由于年糕干燥温度高于 60 °C时会发生龟裂影响年糕品质^[10],则研究温度(25~60 °C)。研究频率、温度、含水率对年糕介电性能的影响规律,确定年糕在微波加热处理中适宜的物料厚度。另外研究年糕介电性能与含水率、温度的相关关系,构建介电参数与主要影响因素的数学模型。依据介电参数预测年糕含水率,评价介电特性在含水率预测中的可行性。为开发基于介电特性含水率检测仪提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用从无锡雪浪市场购买的新鲜条状年糕,试验前对年糕样品进行含水率测定,测定初始湿基含水率为 48% (w.b.)。将样品切成厚度约 2 mm 的年糕片,挑选出形状大小基本相同的部分标准年糕,准备用于实验。

1.2 仪器与设备

ARB120 电子天平:梅特勒-托利多仪器上海有限公司;E5062A 网络分析仪:美国安捷伦公司;HH-601 超级恒温油浴:荣华仪器制造有限公司;DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱:上海精宏试验设备有限公司;CENTER-309 热电偶测温仪。

1.3 试验方法

1.3.1 样品的制备

利用电子天平分别称取 3 份约 10 片初始含水率的试样样品,放置在蒸发皿中利用恒温鼓风干燥箱

50 °C 热风干燥至湿基含水率 16%^[11],而后将样品放置于密封性良好的密封袋中,通过已知样品的初始湿基含水率和样品质量,利用公式计算得到需要添加的去离子水量,用以配制含水率分别为 16%、24%、32%、40% 和 48% (w.b) 的样品^[12]。样品配置含水率过程中需要置于 4 °C 冰箱密封放置 24 小时,使样品水份充分均匀。所配样品的含水率为(初始含水率)均为湿基。

1.3.2 介电参数测定方法

介电特性测定系统主要由计算机、安捷伦 E5061B 网络分析仪、3.5 mm 校准套件、开放式同轴探头和温度控制单元组成。切片年糕被均匀放置在圆柱形测量单元下,样品的表面积大于测试单元的表面积,测量介电特性时探头底面紧贴样品,确保在测量过程中探头不与外部空气接触,通过计算机读出介电常数与损耗因子的数值。

1.3.3 含水率测量方法

按照 105 °C 恒重法测定年糕片的含水率^[13]。

1.3.4 温度测量方法

利用恒温油浴锅设定 120 °C,使得物料整体受热均匀,利用热电偶测温仪检测样品的温度。为了在测量过程中准确地检测样品温度的变化情况,将热电偶温度计的感应探头插入试验样品的内部。

1.3.5 穿透深度测定方法

能量穿透深度指微波在穿透物料过程中,其能量减少为原来的 1/e (e=2.718) 之处距表面的深度,是反应食品微波加热特性的重要参数,用来量化食品对微波能衰减能力的大小^[14],由下列方程式计算:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2e \left[\sqrt{1 + \left(\frac{e''}{e'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (1)$$

式中, $c = 3 \times 10^8$ m/s, f 为电磁波频率, MHz。

1.3.6 测量步骤

将恒温油浴锅设定 120 °C,把不同含水率年糕样品密封放入恒温油浴锅中加热,利用热电偶测量样品温度,网络分析仪及末端开路的同轴探头、安捷伦 85070 测试软件和计算机组成同轴探头测试系统。开机预热 1 h 后,用开路、短路和 50 Ω 匹配阻抗校准实验中所用网络分析仪的端口,接着利用开路、短路子和 25e 的去离子水校准同轴探头并选择测量频率范围^[15]。当达到所需温度立即取出,充分接触网络分析仪探头,测出介电常数和介电损耗因子并在电脑中保存数据。试验进行三次,所测数据取平均值。

1.3.7 数学模型的建立

根据得到的不同温度、含水率的年糕介电参数,建立介电参数与影响因素之间的拟合公式。

2 结果与分析

2.1 频率对介电性能的影响

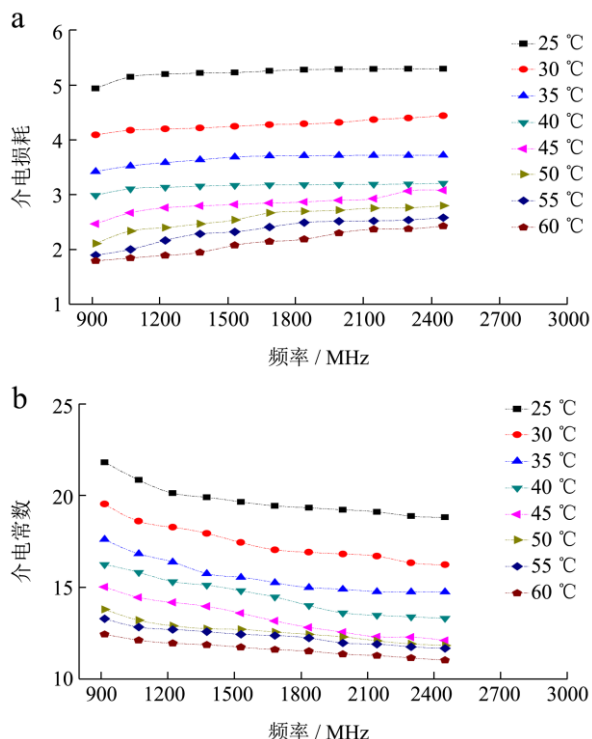


图1 含水率32%的年糕样品不同温度下频率对介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 的影响

Fig.1 Effect of frequency on the relative permittivity ϵ' and the dielectric loss factor ϵ'' of rice cakes with a moisture content of 32% under different temperatures

注: a.介电常数 ϵ' ; b.介电损耗因子 ϵ'' 。

由图1可知在915~2450 MHz频段内,年糕样品的介电常数 ϵ' 随着频率的增大而减小,而介电损耗因子 ϵ'' 却随着频率的增大而增加,其中低频段变化趋势更为显著。25℃时,频率从915 MHz增加到1682 MHz的过程中,含水率为32%的年糕介电常数从21.8降低到19.43,介电损耗因数从4.93上升到5.25;当频率继续增加到2450 MHz时,介电常数降低到18.81,介电损耗因数上升到5.29。同一频率下,温度越低,介电参数值越大,并且介电参数随频率变化的现象越显著。

2.2 含水率对介电性能的影响

图2是频率915 MHz和2450 MHz时,不同温度下含水率对年糕介电参数的影响曲线。由图2分析可知,在8个温度阶梯下,年糕的 ϵ' 和 ϵ'' 皆随着含水率的增大呈单调递增的趋势。

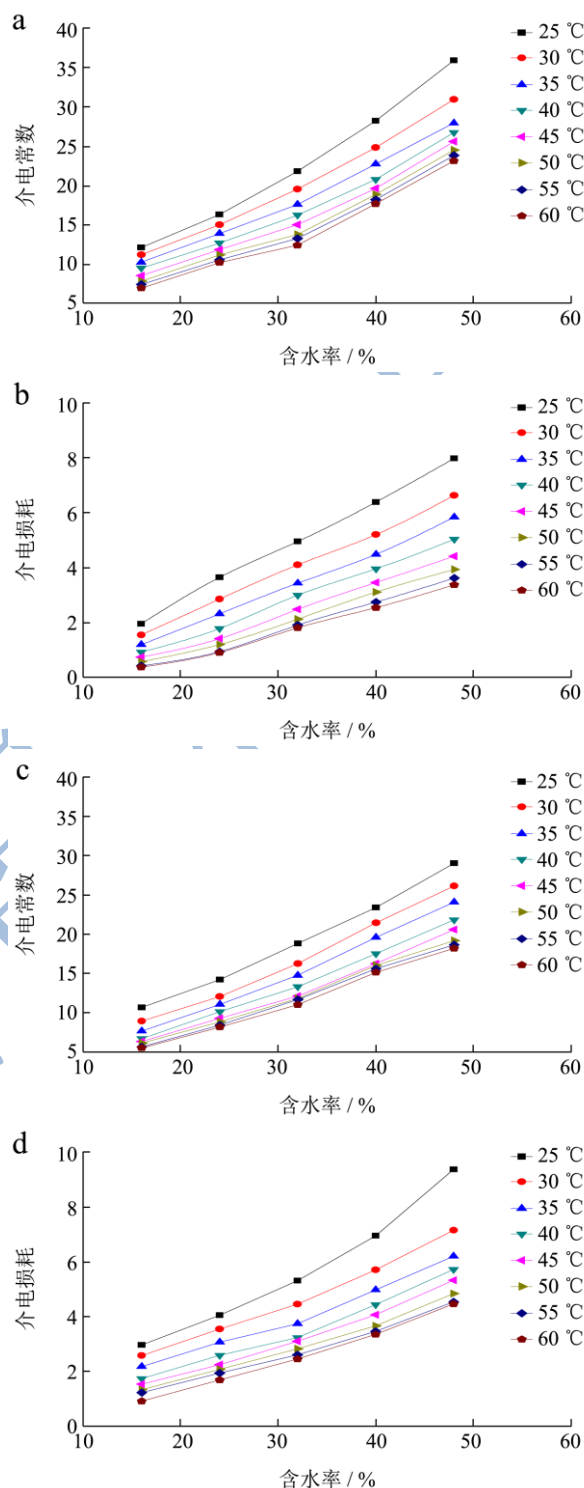


图2 频率915 MHz不同温度下含水率对年糕介电常数 ϵ' (a) 和介电损耗 ϵ'' (b) 的影响,频率2450 MHz不同温度下含水率对年糕介电常数 ϵ' (c) 和介电损耗 ϵ'' (d) 的影响

Fig.2 Effect of moisture content on the relative permittivity ϵ' and the dielectric loss factor ϵ'' of rice cakes under different temperatures and at a microwave frequency of 915 MHz (a and b, respectively) and 2450 MHz (c and d, respectively)

注: a. 915 MHz 介电常数; b. 915 MHz 介电损耗; c. 2450

MHz 介电常数; d. 2450 MHz 介电损耗。

当温度相同时, 含水率越高, 介电参数的增大趋势越显著, 这是因为水是一种极性分子, 也是影响介电参数的重要因素。含水率的增大导致整体代谢加速并且内部离子的活动性增强, 此时年糕的 ϵ' 和 ϵ'' 均表现出增大的趋势^[16,17]。该与鹰嘴豆含水率对介电参数影响趋势相似^[18]。当频率 915 MHz 温度 35 °C 含水率从 16% 增加到 32% 时, ϵ' 和 ϵ'' 分别从 10.26 和 1.17 增加到 17.59 和 3.42; 当含水率从 32% 增加到 48% 时, ϵ' 和 ϵ'' 增加到 27.93 和 5.83。同一含水率下, 温度越低, 介电参数值越大。另外, 再一次验证了频率对介电参数的影响。

2.3 温度对介电特性的影响

频率为 915 MHz 和 2450 MHz 时, 温度对不同含水率的年糕样品 ϵ' 和 ϵ'' 的影响曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出, 燕麦的 ϵ' 和 ϵ'' 均随着温度的升高而减小。低温条件下, 样品的含水率越高, 介电参数值越大且变化趋势越显著。当温度为 25 °C 时, 对含水率为 16%、24%、32%、40% 和 48% 的样品 ϵ' 和 ϵ'' 的增长值分别为 3.54、1.09、4.56、1.27、4.63、1.64 和 5.64、2.43。关于温度对介电参数影响在各文献中存在差异, 有些物料如面包, 在微波频率下介电参数随温度的升高而增大^[19]; 液态蛋白在微波频率下, 介电常数随温度升高而下降, 而介电损耗却随温度升高而增加^[20]。总体而言, 样品的介电参数的变化规律, 都是受温度、频率和含水率综合影响的结果。

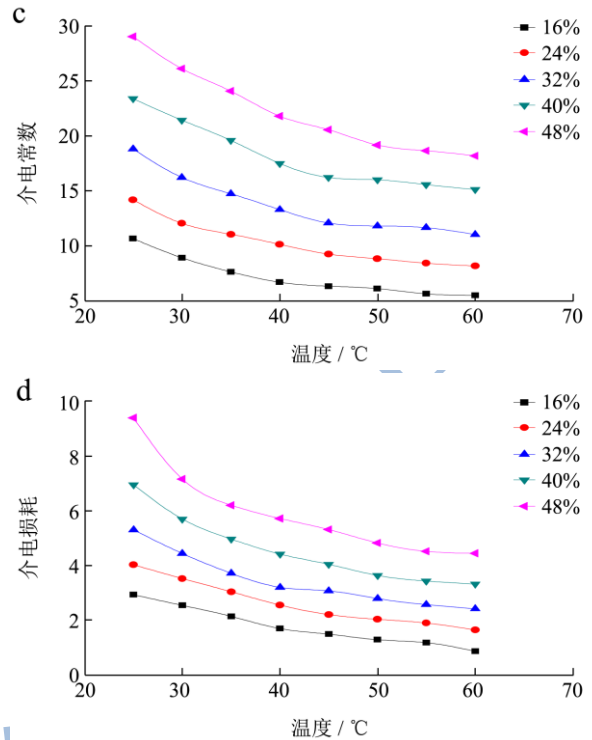
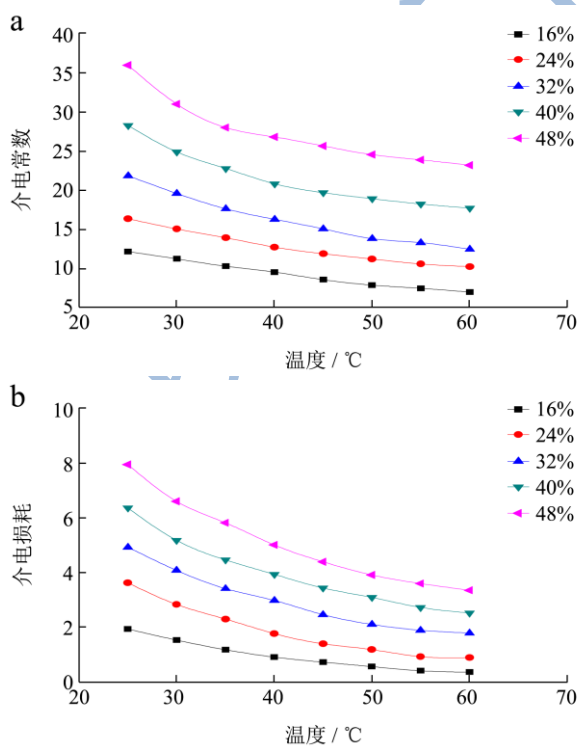


图 3 频率 915 MHz 温度对不同含水率年糕的相对介电常数 ϵ' (a) 和介质损耗因数 ϵ'' (b) 的影响
频率 2450 MHz 温度对不同含水率年糕的相对介电常数 ϵ' (c) 和介质损耗因数 ϵ'' (d) 的影响

Fig.3 Effect of temperature on the relative permittivity ϵ' and the dielectric loss factor ϵ'' of rice cakes under different moisture contents and at a microwave frequency of 915 MHz (a and b, respectively) and 2450 MHz (c and d, respectively)

注: a. 915 MHz 介电常数; b. 915 MHz 介电损耗; c. 2450 MHz 介电常数; d. 2450 MHz 介电损耗。



2.4 微波摄入深度

不同温度、频率及含水率下, 微波在年糕中的穿透深度由式(1)计算得到表 1。总体上, 能量穿透深度随含水率、频率的升高而降低, 随温度的升高而增加。915 MHz 的电磁能比 2450 MHz 有更深的穿透深度, 这表明年糕在 915 MHz 下加热可以获得更为均一的加热特性。对于不同样品而言, 能量穿透深度受频率、温度、含水率的影响也会有所差异。其中, 大多数样品同本文一样穿透深度随频率增加而降低^[21-23], 但是温度和含水率对穿透深度的影响在各文献中存在差异, 在对土豆泥的研究中发现, 穿透深度随含水率升高而增加, 随温度的升高而降低^[24], 与本文研究样品所得结论恰恰相反。而对于绿豌豆、扁豆等样品, 穿透深度又随含水率升高而降低^[25]。

2.5 年糕介电参数模型建立

以含水率、温度为自变量，以介电参数 ϵ' 和 ϵ'' 为因变量，利用 SAS 软件对试验数据进行二元回归拟合，分别在 915 MHz 和 2450 MHz 建立年糕的介电性

能 ϵ' 和 ϵ'' 分别与含水率、温度为主要影响因素的数学模型。

表 1 微波在不同温度不同含水率年糕中的能量穿透深度

Table 1 Microwave energy penetration depth in rice cakes with different moisture contents at different temperatures

含水率 /%	频率 /MHz	温度/°C							
		25	30	35	40	45	50	55	60
16	915	9.44	11.46	14.27	17.82	21.29	26.39	35.15	38.85
	2450	6.00	2.31	2.53	2.99	3.29	3.74	3.90	5.23
24	915	5.84	7.17	8.48	10.55	12.92	14.78	18.38	18.75
	2450	1.84	1.94	2.15	2.44	2.69	2.85	2.99	3.39
32	915	4.97	5.68	6.44	7.08	8.24	9.25	10.08	10.32
	2450	1.61	1.79	2.03	2.23	2.22	2.41	2.60	2.69
40	915	4.38	5.04	5.59	6.07	6.75	7.36	8.19	8.72
	2450	1.37	1.60	1.75	1.86	1.96	2.16	2.25	2.30
48	915	3.95	4.41	4.76	5.40	6.02	6.61	7.09	7.50
	2450	1.14	1.40	1.56	1.61	1.68	1.78	1.88	1.89

表 2 915 MHz 和 2450 MHz 频率下年糕介电参数与主要影响因素关系模型的确定系数

Table 2 Determination coefficients of relation models for dielectric parameters and main factors of rice cakes at frequencies of 915 MHz and 2450 MHz

频率/MHz	介电参数
915	ϵ'
	ϵ''
2450	ϵ'
	ϵ''

由表 2 可知，各频率下模型的确定系数皆大于 0.99，说明年糕介电参数与含水率和温度具有很好的相关性。模型分别为：

$$\epsilon'_{915} = 7.0111 + 1.3276w - 0.4552t - 0.0064w^2 + 0.015t^2 - 0.0352wt + 0.0001w^3 - 0.0001t^3 + 0.0003wt^2 + 3.9 \times 10^{-5}w^2t \quad (2)$$

$$\epsilon''_{915} = 1.9179 + 0.318w - 0.1838t + 0.0006w^2 + 0.0041t^2 - 0.0081wt - 1.1 \times 10^{-5}w^3 - 2.8 \times 10^{-5}t^3 + 5.4 \times 10^{-5}wt^2 + 1.7 \times 10^{-5}w^2t \quad (3)$$

$$\epsilon'_{2450} = 20.9748 + 0.1214w - 0.8324t + 0.0173w^2 + 0.0141t^2 - 0.0088wt - 0.0001w^3 - 8.6 \times 10^{-5}t^3 + 0.0001wt^2 - 8.3 \times 10^{-5}w^2t \quad (4)$$

$$\epsilon''_{2450} = 5.6517 + 0.3139w - 0.3699t - 0.0009w^2 + 0.0089t^2 - 0.0088wt - 4.7 \times 10^{-5}w^3 - 7.9 \times 10^{-5}t^3 + 0.0001wt^2 - 4.9 \times 10^{-5}w^2t \quad (5)$$

式中，w 为湿基含水率，%；t 为温度，°C； ϵ' 为相对介电常数； ϵ'' 为介质损耗因数。

分别对 (2)、(3)、(4)、(5) 式进行方差分析，

结果见表 3。

由表 3 可知模型的显著水平均小于 0.0001，表明模型极显著。式 (2) 中除 t、 w^2 、 w^2t 项外，其余各项均对模型具有显著或极显著的影响。式 (3) 中除 w^2 、 w^3 、 w^2t 项外，其余各项也均对模型有显著或极显著的影响。式 (4) 中除 w 项外，其余各项也均对模型有显著或极显著的影响。式 (5) 中除 w^2 项外，其余各项也均对模型有显著或极显著的影响。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for regression models

方差来源	P 值			
	式 (2)	式 (3)	式 (4)	式 (5)
w	<0.0001	<0.0001	0.4770	0.0025
t	0.1708	0.0182	0.0005	0.0045
wt	<0.0001	<0.0001	0.0132	<0.0001
w^2	0.3725	0.6937	0.0008	0.7245
t^2	0.0494	0.0197	0.0065	0.0028
w^3	0.0796	0.5080	0.0246	0.0767
t^3	0.0125	0.0339	0.0267	0.0007
w^2t	<0.0001	<0.0001	0.0018	<0.0001
w^2t	0.4410	0.1312	0.0158	0.0119
模型	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

2.6 基于介电特性的年糕含水量预测

按照 1.3.3 所述的测量方法与步骤分别测得 2450 MHz 及不同温度下年糕的 ϵ' 和 ϵ'' 。根据测得的介电参数和温度，利用牛顿迭代法根据式 (4) 和式 (5) 计算样品的含水率。将计算得到的含水率 Ms 与以烘干

法测得的含水率 M_c 进行比较, 结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 年糕样品的实际含水率与计算含水率间的决定系数 R^2 均大于 0.99, 含水率测定误差较小, 基于介电特性预测年糕含水率是可行的。

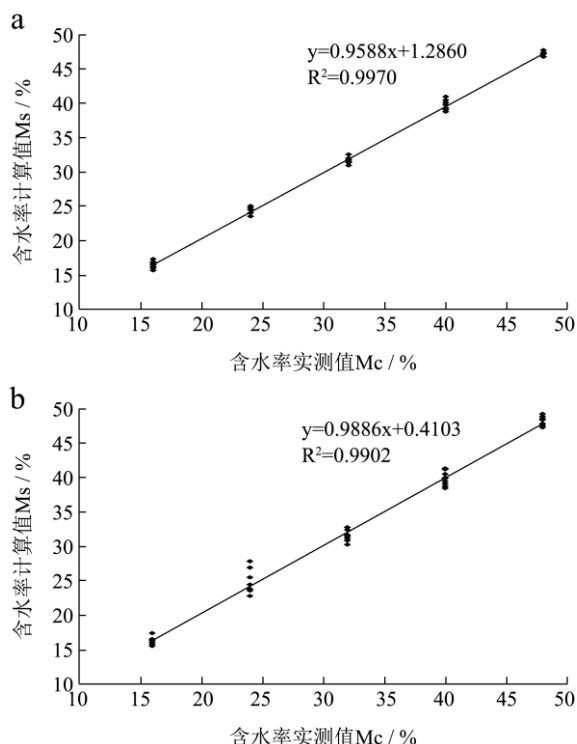


图 4 年糕含水率实测值与计算值的关系

Fig.4 Relationship between measured values and calculated values for the moisture content of rice cakes

注: a.含水率实测值与式(4)的计算值, b.含水率实测值与式(5)的计算值。

3 结论

3.1 在频率为 915~2450 MHz、含水率为 16~48% 和温度为 25~60 °C 的条件下, 年糕的相对介电常数随着频率的增大而减小, 介质损耗因数随着频率的增大而增加, 随含水率的增加而增大, 但随着温度的增加而减小。

3.2 通过计算得出能量穿透深度, 分析得穿透深度随含水率、频率的升高而降低, 随温度的升高而增加。

3.3 915 MHz 和 2450 MHz 下年糕的 ϵ' 和 ϵ'' 与含水率、温度 2 因素数学模型的决定系数皆大于 0.99。说明根据年糕的含水率和温度就可以快速、准确地计算出相应频率下年糕的介电参数值。

3.4 年糕介电参数的实测值与根据模型计算值之间存在很好的线性相关性 ($R^2 > 0.99$), 说明所构建的模型可以很好地描述年糕的介电参数与各主要影响因素的关系, 基于介电参数和温度预测年糕的含水率是可行的。

参考文献

- [1] 胡庆松,刘青梅,杨性民,等.年糕腐败菌的鉴定和菌系分析[J].食品与生物技术学报,2009,04:564-568
HU Qing-song, LIU Qing-mei, YANG Xing-min, et al. Identification and strains analysis of rice cake spoilage bacteria [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2009, 4: 564-568
- [2] 刘青梅,胡庆松,杨性民,等.响应面法优化年糕抑菌保鲜剂的研究[J].中国粮油学报,2010,9:97-101
LIU Qing-mei, HU Qing-song, YANG Xing-min, et al. Research rice cake antimicrobial preservative optimization by response surface method [J]. Journal of the chinese cereals and oils association, 2010, 9: 97-101
- [3] 娄永江,熊海维,张晶.方便年糕保鲜技术研究[J].食品研究与开发,2004,2:139-141
LOU Yong-jiang, XIONG Hai-wei, ZHAG Jing. Research on fresh keeping technique of convenient rice cake [J]. Food research and development, 2004, 2: 139-141
- [4] 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,2009,21:16-20
HUANG Yan, CHENG Yu-dong, LIANG Kai. Comparison of microwave, hot air drying effect on the drying characteristics and quality of orange peel [J]. Food science, 2009, 21: 16-20
- [5] 郭文川.果蔬介电特性研究综述[J].农业工程学报, 2007, 5: 284-289
GUO Wen-chuan. Review of research on dielectric properties of fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 5: 284-289
- [6] 尹丽妍,吴文福,张亚秋.介电特性在粮食水分检测中的应用[J].中国粮油学报,2010,11:119-123
YIN Li-yan, WU Wen-fu, ZHANG Ya-qiu. Dielectric properties of application in determination of grain moisture [J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 11: 119-123
- [7] Wang Y, Zhang L, Gao M, et al. Temperature-and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(8): 2165-2176
- [8] Peng J, Tang J, Jiao Y, et al. Dielectric properties of tomatoes assisting in the development of microwave pasteurization and sterilization processes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 367-376

- [9] 鲁勇军,朱彤.乳制品微波介电性能的测量[J].食品科学,2000,21(9):8-11
LU Yong-jun, ZHU Tong. Measurement of microwave dielectric properties of dairy products [J]. Food Science, 2000, 21(9): 8-11
- [10] 徐仲咸,余保海,郑云峰.年糕片干燥技术的试验研究[J].粮食与食品工业,1995,2:008
XU Zhong-xian, YU Bao-hai, ZHENG Yun-feng. Experimental study on rice cake slice drying technology [J]. Cereal And Food Industry, 1995, 2:008
- [11] 徐仲咸,余保海,穆亚芬,等.年糕片干燥技术试验[J].商业科技开发,1995,2:34-36
XU Zhong-xian, YU Bao-hai, MU Ya-fen, et al. Drying technology experiment of rice cake slice [J]. Business and Technology Development, 1995, 2: 34-36
- [12] 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,2012,24:272-279
GUO Wen-chuan, WANG Jing, ZHU Xin-hua. Oats moisture forecast based on dielectric properties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 24: 272-279
- [13] Castro-Giradez M, Fito P J, Chenoll C, et al. Development of a dielectric spectroscopy technique for the determination of apple (Granny Smith) maturity [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 749-754
- [14] 王虹,秦维.105 °C恒重法与两次烘干法对于玉米水分测定的定量研究[J].粮食加工,2008,33(2):82-83
WANG Hong, QIN Wei. 105 °C constant weight method and the two drying method for quantitative research of corn moisture determination [J]. Grain Processing, 2008, 33(2): 82-83
- [15] Chua H S, Parkinson G, Haigh A D, et al. A method of determining the moisture content of bulk wheat grain [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1155-1158
- [16] Gao M, Tang J, Johnson J A, et al. Dielectric properties of ground almond shells in the development of radio frequency and microwave pasteurization [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112(4): 282-287
- [17] 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 Wen-chuan, ZHU Xin-hua. Foreign agricultural products and food dielectric property measurement technology and application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 308-312
- [18] Guo W, Tiwari G, Tang J, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 217-224
- [19] Liu Y, Tang J, Mao Z. Analysis of bread dielectric properties using mixture equations [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(1): 72-79
- [20] Wang J, Tang J, Wang Y, et al. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(7): 1204-1212
- [21] Ahmed J, Ramaswamy HS, Raghavan GSV. 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
- [22] Renard D, Lefebvre J. Gelation of globular proteins: effect of pH and ionic strength on the critical concentration for gel formation. A simple model and its application to β -lactoglobulin heat-induced gelation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1992, 14(5): 287-291
- [23] Guo W, Zhu X, Liu Y, et al. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 275-281
- [24] Uan D G, Cheng M, Wang Y, et al. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes [J]. Journal of Food Science, 2004, 69(1): FEP30-FEP37
- [25] Guo W, Wang S, 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