

基于介质损耗因数的红小豆含水率测量方法研究

王 婧, 郭文川*, 邓业胜

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以红小豆为对象, 研究测量信号频率(1kHz~1MHz)、含水率(13.8%~21.8%)、容积密度(747~851kg/m³)和温度(5~40℃)对介质损耗因数的影响规律, 从理论上分析介质损耗因数的变化原因, 建立 500kHz 条件下红小豆的介质损耗因数、容积密度和温度与含水率的数学模型, 并验证模型的正确性。结果表明: 在 1kHz~1MHz 频段内, 红小豆的介质损耗因数随测量信号频率的增大而减小, 却随含水率、容积密度和温度的增大而增大; 可用三元二次方程表征含水率与介质损耗因数、容积密度和温度之间的关系, 模型的决定系数为 0.9882。

关键词: 红小豆; 介质损耗因数; 含水率; 温度; 频率; 容积密度

Determination of Water Content in Small Red Beans Based on Dielectric Loss Factor

WANG Jing, GUO Wen-chuan*, DENG Ye-sheng

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

Abstract: A mathematical model for water content of small red beans with respect to relative dielectric loss factor, bulk density and temperature was set up and validated under a signal frequency of 500 kHz. The effects of measurement signal frequency (1 kHz—1 MHz), bulk density (747—851 kg/m³) and temperature (5—40 °C) on relative dielectric loss factor were studied, and the mechanism underlying the change in relative dielectric loss factor was analyzed in theory. The results indicated that dielectric loss factor of small red beans revealed a decreasing trend with increasing signal frequency in the range of 1 kHz—1 MHz, but presented an opposite trend as the water content, bulk density and temperature increased. A quadratic model characterizing the relationship of water content with relative dielectric loss factor, bulk density and temperature was established with a determination coefficient of 0.9882.

Key words: small red bean; dielectric loss factor; water content; temperature; frequency; bulk density

中图分类号: S125

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)16-0216-05

红小豆又名赤小豆、赤豆和饭豆^[1], 是我国北方地区主要种植的一种小杂粮, 其产量与出口量在粮食中均占很大比例^[2]。红小豆营养丰富, 含有丰富的蛋白质、膳食纤维以及铁、钙、磷、钾等多种矿物质元素, 并含有较低的脂肪; 同时红小豆还具有补血、清毒、利尿和治水肿等药用功效^[3]。粮食含水率是影响粮食保存期加工方法及质量的主要因素。目前, 粮食含水率的传统测量方法主要有干燥称量法、减压干燥法、中子法、声学法和微波加热法等^[4], 但这些方法存在耗时长、检测仪器和费用昂贵等问题。

国外从 20 世纪 50 年代、国内从 20 世纪 90 年代开始, 研究人员对粮食的介电特性与其含水率之间的关系

进行研究^[5-9]发现, 除了含水率外, 测量信号的频率、样品的温度和容积密度等都影响粮食的介电特性。在频率一定且忽略容积密度影响的前提下, 可根据测量得到的介电参数值、样品温度计算粮食的含水率。该方法具有高效、低成本和精度较高等优点。在大量实验的基础上, 国内外科研工作者已经开发出一系列根据粮食物料的介电或电导特性测量粮食含水率的仪器^[10-13]。但主要测量对象是大宗粮食, 如玉米、小麦、黄豆, 而适用于小杂粮含水率的测量仪器国内几乎没有。为了给开发豆类小杂粮含水率检测仪提供基础数据, 本实验以红小豆为对象研究信号频率(1kHz~1MHz)、含水率(13.8%~21.8%)、容积密度(747~851kg/m³)和温度

收稿日期: 2011-07-22

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项(QN2009043)

作者简介: 王婧(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事农产品品质检测与质量安全研究。E-mail: ionlylovebibi@163.com

* 通信作者: 郭文川(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事农产品和食品品质检测技术研究。E-mail: guowenchuan69@126.com

(5~40℃)对红小豆介质损耗因数的影响规律,从理论上分析介质损耗因数的变化原因;建立红小豆的介质损耗因数、容积密度和温度与含水率的数学模型,并对模型进行验证。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

“朱砂”红小豆(初始湿基含水率 13.8%) 陕西西安杨陵区市购。实验前,剔除坏粒、扁粒及杂物(如小石子、杂草、谷物茎秆碎末和其他作物颗粒等)。选取形状规则、颗粒饱满、无病虫害且表皮无裂痕的颗粒作为实验样品。用游标卡尺测量随机选取的 50 粒红小豆的长径和短径,其平均长径和短径分别为 6.84、5.70mm。

1.2 仪器与设备

150 游标卡尺 星星精密量具厂; WG-71 电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司; 3532-50LCR 测量仪 日本日置公司; 同心圆式电容器 自制; FA2104N 电子分析天平 上海精密科学仪器有限公司; MP31001 电子分析天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; YHG-400BS 远红外快速恒温干燥箱 上海跃进医疗器械厂; DM6801A 数字温度计 深圳市胜利高电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备

使用电子分析天平分别称取 4 份约 1500g 初始含水率的红小豆样品,置于密封性良好的玻璃器皿中,通过添加一定量的去离子水配制不同含水率的样品。当欲配制含水率较高的样品(例如大于 17%)时,需少量多次的加入去离子水,加水过程中需边搅拌边喷水。所有样品每隔 3~4h 搅动一次。1d 后,将配制得到的不同含水率的红小豆样品装入双层密封塑料袋内置于 2℃冰箱内 2~3d,使其吸水均匀。期间每天摇动 3~4 次。实验中所配样品的湿基含水率为 13.8%(初始含水率)、15.8%、17.8%、19.8% 和 21.8%。

1.3.2 介质损耗因数测量

测量前,预热电感-电容-电阻(inductance-capacitance-resistance, LCR)测量仪 1h 左右,然后将 LCR 测量仪的两个电极分别与同心圆式电容器两铜管的引出线相连。测试在频率 1kHz~1MHz 的对数值构成的坐标下等间距选取的 51 个频率点下的电容。

1.3.3 含水率测量

将 10g 红小豆样品置于 130℃电热鼓风干燥箱内烘干 18h^[14],根据烘干前与烘干后红小豆质量计算各样品的实际湿基含水率。

1.3.4 容积密度测量

实验所用同心圆式电容器的外筒直径 $R(0.085\text{m})$ 、内筒直径 $r(0.03\text{m})$ 、高 $h(0.1\text{m})$ 。在电子分析天平上称得空电容器的质量 m_0/kg ,电容器装满红小豆时电容器和红小豆的总质量为 m_1/kg 。按式(1)计算物料的容积密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{\pi(R^2 - r^2)h} \quad (1)$$

1.3.5 温度测量

将数字温度计插入红小豆样品内部,保证温度计的探头在同心圆式电容器外筒与内筒的中心位置,且探头的深度在圆筒的一半高度处。

1.3.6 测量步骤

在电子分析天平上称得空电容器的质量 m_0 后,将空电容器连接到测量系统上,在 1kHz~1MHz 频段内测量所选频率下空电容器的电容 C_0 。随后将红小豆样品以自由落体方式装满同心圆式电容器的介质空腔内,利用直刮板刮出多余样品。测量装有样品的电容器重量 m_1 ,计算得到电容器内样品的容积密度,以此作为初始容积密度值。将装有红小豆样品的电容器放入冰箱的冷藏室内,待样品温度降至 2℃后,将电容器放入远红外快速恒温干燥箱内,同时将数字温度计插入红小豆样品内。当样品温度达到 5℃时,测量所选频率下样品的电容 C 和品质因数 Q 。随后依次设定干燥箱的温度为 10、15、20、25、30、35、40℃。当红小豆样品温度达到设定值时,测量每个温度下的电容 C 和品质因数 Q 。每个样品每个温度下测量 3 次,取其平均值作为测试结果。在初始容积密度值的基础上,通过振动及加压等方式改变电容器内红小豆样品的质量,进而改变容积密度值,共得到 3 个不同的容积密度梯度。依照上述测量步骤对每个含水率下剩余两组容积密度值的样品进行测试。最后由式 $\varepsilon'' = C/(C_0Q)$ 计算得到样品的介质损耗因数 ε'' 。

2 结果与分析

2.1 各含水率下红小豆的容积密度

表 1 各含水率下红小豆的容积密度值

Table 1 Bulk densities of small red beans with various water contents

容积密度等级特征	含水率/%				
	13.8	15.8	17.8	19.8	21.8
松散状态/(kg/m ³)	807	797	762	762	747
中等紧实度/(kg/m ³)	830	817	784	782	771
高等紧实度/(kg/m ³)	851	837	813	803	787

每个含水率下, 容积密度分为3个等级: 松散状态、中等紧实度和高等紧实度。各含水率下红小豆的容积密度值如表1所示。

2.2 频率对介质损耗因数的影响

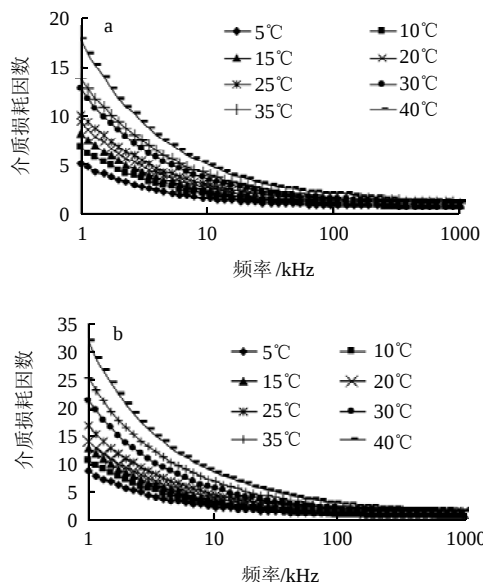


图1 不同温度下频率对含水率17.8%、容积密度762kg/m³(a)和21.8%、747kg/m³(b)的红小豆介质损耗因数的影响

Fig.1 Effect of frequency on relative dielectric loss factor of small red beans with water content of 17.8% and bulk density of 762 kg/m³ (a) or water content of 21.8% and bulk density of 747 kg/m³ (b)

由图1可以看出, 在1kHz~1MHz频段内, 对于两个不同的含水率, 红小豆的介质损耗因数均随着测试信号频率 f 的增大而减小。当 $f < 100\text{kHz}$ 时, 介质损耗因数的下降趋势相比 $f > 100\text{kHz}$ 时更为明显。当测量信号的频率相同时, 温度越高, 其介质损耗因数数值越大, 不同温度下介质损耗因数随频率的变化趋势基本相同。根据介电损耗理论, 引起湿性食品中介质损耗的主要原因是离子的电导性和偶极子的极化作用。低频下, 离子的电导性致使频率的对数和介质损耗因数间呈现反比例关系, 因此随着频率的增大, 离子的传导和偶极子的旋转与极化成为导致介质损耗因数变化的主要原因^[15]。

2.3 含水率对介质损耗因数的影响

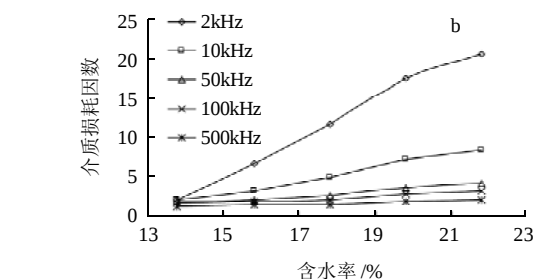
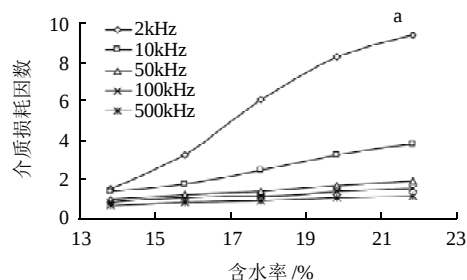


图2 容积密度为松散状态时不同频率下含水率对温度为20℃(a)和40℃(b)的红小豆介质损耗因数的影响

Fig.2 Effect of frequency on relative dielectric loss factor of small red beans with loose bulk density at 20 (a) and 40 °C (b)

由图2可知, 当 $f > 50\text{kHz}$, 随着红小豆含水率的增大, 红小豆的介质损耗因数呈缓慢增大趋势; 当 $f < 50\text{kHz}$, 随着含水率增加, 介质损耗因数急剧增加。含水率相同时, 测量信号频率越高, 红小豆的介质损耗因数值越小。自然界和食品中的水带有各种离子, 含水率增大, 则溶于水中的离子活性增强, 导致介质损耗因数增大^[16]。

2.4 容积密度对介质损耗因数的影响

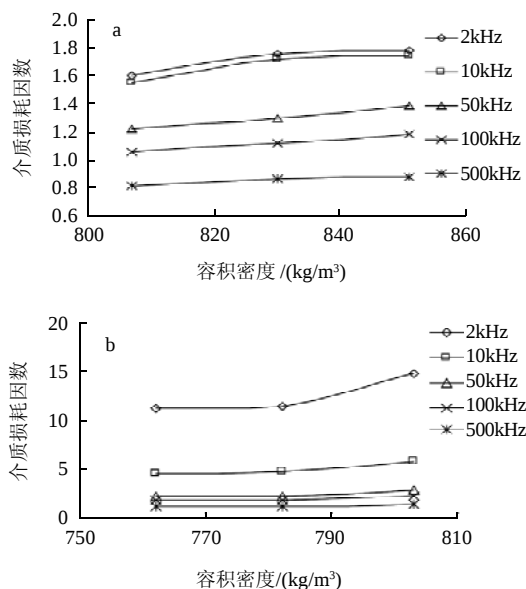


图3 30℃、不同频率下容积密度对含水率为13.8%(a)和19.8%(b)的红小豆介质损耗因数的影响

Fig.3 Bulk density dependence of the dielectric loss factor of small red bean at 13.8% (a) and 19.8% (b) moisture content at indicated frequencies and 30 °C

由图3可以看出, 同一含水率下, 红小豆的介质损耗因数随着样品容积密度的增大呈现逐渐变大的趋势, 与高频段相比低频下变化趋势更显著。当容积密

度增大时,单位体积内红小豆质量增加,在外加电场的作用下,有更多的电介质被极化,则物料储存电场的能量也增加,表现在介质损耗因数呈增大趋势。

2.5 温度对介质损耗因数的影响

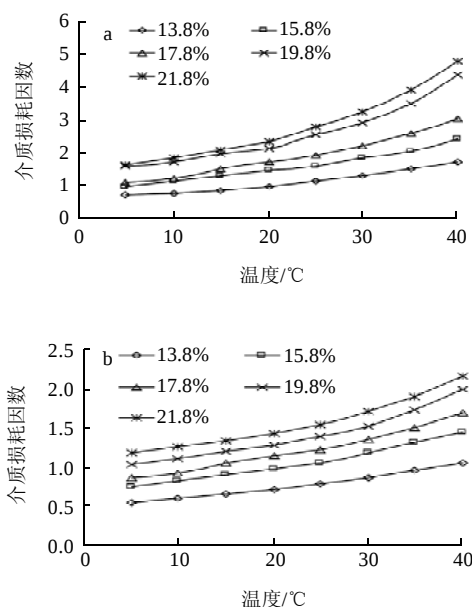


图4 容积密度为高等紧实时不同含水率下温度对频率在50kHz (a)和500kHz(b)时的红小豆介电损耗因数的影响

Fig.4 Temperature dependence of the dielectric loss factor of small red bean at 50kHz (a) and 500kHz (b), highest bulk density level at indicated moisture contents

由图4可知,介质损耗因数随着温度的升高呈递增趋势。同一温度下,红小豆含水率越高,介质损耗因数值越大且变化趋势越显著。同一含水率下,介质损耗因数随温度的变化趋势相同。根据电介质理论分析,温度升高时有利于极性分子的取向,尤其是在低频范围内。在整个测量过程中,随着温度的升高,偶极子的取向极化能力增强,但是取向极化的速度始终跟不上电场的变化频率,取向过程中也会消耗更多的能量。温度的升高还会导致离子的导电性和水分子的极化扩散性增强,因而表现出介质损耗因数随着温度的上升而增大^[17]。

2.6 含水率模型的建立与验证

2.6.1 回归方程的建立

利用SAS V8软件对数据进行多元回归拟合,分别在2、10、50、100、500kHz和1MHz频率条件下建立介质损耗因数 ϵ'' 、容积密度 ρ 和温度 T 与含水率 W 的数学关系模型。各频率下模型的决定系数分别为0.9750、0.9757、0.9813、0.9843、0.9882和0.9851。当频率为500kHz时,回归方程具有最大的决定系数,该频率下的回归方程为:

$$W = 24.6895 + 73.9968 \epsilon'' - 0.0611 \rho - 1.1291 T - 3.2145 \epsilon''^2 - 0.0716 \rho \epsilon'' + 0.00005 \rho^2 - 0.0104 T \epsilon'' + 0.0013 T \rho - 0.0017 T^2 \quad (2)$$

对式(2)进行方差分析(表2)可知,模型中的一次项、二次项和交叉项的显著水平(P 值)均小于0.0001,说明各项均对模型具有极显著的影响。模型的 F 值为1019.43($P < 0.0001$),表明所选模型极为显著。模型的决定系数 R^2 为0.9882,说明在测量频率为500kHz时,介质损耗因数、容积密度和温度与红小豆含水率之间具有较高的相关性。

表2 回归模型方差分析表

Table 2 Analysis of variance for the fitted regression model

回归	自由度	平方和	R^2	F 值	P 值	显著性
一次项	3	899.1511	0.9366	2898.78	< 0.0001	**
平方项	3	38.9260	0.0405	125.49	< 0.0001	**
叉积项	3	10.5495	0.0110	34.01	< 0.0001	**
模型	9	948.6266	0.9882	1019.43	< 0.0001	**

对模型进行模型系数的显著性检验(表3)可知,回归方程的一次项 ϵ'' 和 T 极显著($P < 0.0001$),交互项 ϵ''^2 、 $\rho \epsilon''$ 和 $T \rho$ 也极显著($P < 0.0001$),其余各项均不显著。根据方程中一次项 t 值的绝对值大小可知,因素主效应关系为介质损耗因数 $\epsilon'' >$ 温度 $T >$ 容积密度 ρ 。

表3 回归方程模型系数的显著性检验

Table 3 Significance test of each coefficient in the fitted regression model

模型系数	系数估计值	自由度	标准误差	t 值	P 值	显著性
截距	24.6895	1	37.2108	0.66	0.5084	
ϵ''	73.9968	1	8.0092	9.24	< 0.0001	**
ρ	-0.0611	1	0.0883	-0.69	0.4904	
T	-1.1291	1	0.1902	-5.94	< 0.0001	**
ϵ''^2	-3.2145	1	0.5984	-5.37	< 0.0001	**
$\rho \epsilon''$	-0.0716	1	0.0094	-7.64	< 0.0001	**
ρ^2	0.00005	1	0.00005	0.91	0.3633	
$T \epsilon''$	-0.0104	1	0.0297	-0.35	0.7260	
$T \rho$	0.0013	1	0.0002	5.83	< 0.0001	**
T^2	-0.0017	1	0.0004	-3.85	0.0002	

注: **. $P < 0.01$, 差异极显著。

2.6.2 模型的验证

为了评价上述所建模型的准确性和实用性,对模型进行了验证。在13%~22%含水率范围内随机配制6组不同含水率的红小豆样品。按照1.4节所述的步骤测量500kHz条件下分别选取两个不同容积密度,每个容积密度下测量4个温度点的红小豆介电损耗因数,代入式(2)得到8个含水率数值。以各样品的介电损耗因数、温度和容积密度计算得到的含水率与以干燥称量法测量得到的含水率进行比较,结果如图5所示。

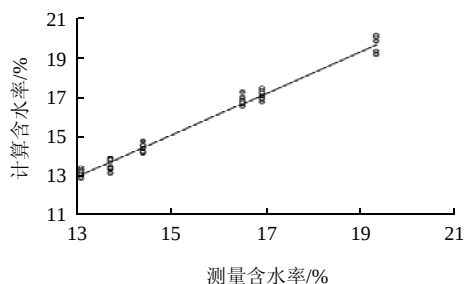


图5 测量含水率与计算含水率相关分析

Fig.5 Correlation analysis between measured and calculated water content

由图5可知,红小豆的测量含水率与计算含水率之间的决定系数是 $R^2 = 0.9861$,说明在已知样品温度和容积密度前提下,根据红小豆的介质损耗因数能很好地预测其含水率。

3 结 论

红小豆的介质损耗因数随测量信号频率(1kHz~1MHz)的增大而减小,随含水率(13.8%~21.8%)、容积密度(747~851kg/m³)和温度(5~40℃)的增大而增大。利用SAS V8软件建立了某些频率下红小豆含水率的与介质损耗因数、温度和容积密度的数学模型,其中500kHz条件下模型的决定系数最高,为0.9882。500kHz条件下影响模型的因素主效应关系为介质损耗因数 $\varepsilon'' >$ 温度 $T >$ 容积密度 ρ 。模型验证实验表明,红小豆的测量含水率与计算含水率之间的决定系数是 $R^2 = 0.9861$,说明利用红小豆的介质损耗因数能很好地预测其含水率。此研究为基于介质损耗因数的红小豆含水率检测仪的开发提供了基础数据。

参考文献:

- [1] 杨治业. 红豆加工前景广阔[J]. 农产品加工, 2010(7): 10-11.
- [2] 梁丽雅, 闫师杰. 红小豆的加工利用现状[J]. 粮油加工与食品机械, 2004(3): 68-69.
- [3] 杜双奎, 于修焯, 闫小强, 等. 红小豆淀粉理化性质研究[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 92-95.
- [4] 秦文, 张惠, 邓伯勋, 等. 部分农产品水分含量与其介电常数关系模型的建立[J]. 中国食品学报, 2008, 8(3): 62-67.
- [5] NELSON S O, LAWRENCE K C, KANDALA C V K, et al. Comparison of DC conductance, RF impedance, microwave, and NMR methods for single-kernel moisture measurement in corn[J]. The Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 893-898.
- [6] NELSON S O, TRABELSI S. Principles for microwave moisture and density measurement in grain and seed[J]. The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2004, 39(2): 107-117.
- [7] GUO Wenchuan, TIWARI G, TANG J, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 217-224.
- [8] 鲍一丹, 朱哲燕. 基于电特性的大豆含水率测量研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(2): 94-98.
- [9] 郭文川, 朱新华. 国内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.
- [10] 张胜全. 电阻式粮食水分含量的测定方法[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(2): 66-67; 69.
- [11] 李业德. 基于介质损耗因数的粮食水分测量方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 14-17.
- [12] 李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 56-59.
- [13] 吴才章. 基于微波的粮食水分智能化检测仪[J]. 仪表技术与传感器, 2010(11): 25-26; 29.
- [14] ASABE. Standards engineering practices data[S]. Michigan: American Society of Agricultural Engineering, 2005.
- [15] SACILIK K, CILAK A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz[J]. Powder Technology, 2010, 203(2): 365-370.
- [16] 徐树来, 郑先哲. 食品微波加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
- [17] 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.