

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.022

基于介电特性的薏米含水率检测方法*

郭文川 王婧 刘驰

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 研究了测量信号频率(1~1 000 kHz)、温度(5~40℃)和含水率(14.7%~22.7%)对薏米相对介电常数的影响,分析了影响相对介电常数变化的原因,建立了100 kHz下基于相对介电常数和样品温度预测薏米含水率的数学模型,并对模型进行了验证。研究表明,在1~1 000 kHz频段内,薏米的相对介电常数随着样品含水率和温度的升高而增大,却随着信号频率的增大单调减小;频率一定时,可用三次多项式表示含水率与相对介电常数和温度的关系;100 kHz下模型的决定系数是0.997 6,实测薏米含水率与预测含水率的决定系数为0.997 7。

关键词: 薏米 含水率 介电特性 无损检测

中图分类号: S125 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0113-05

Predicating Moisture Content of Pearl Barley Based on Dielectric Properties

Guo Wenchuan Wang Jing Liu Chi

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

Abstract

Pearl barley was used to study the influence of frequency (1~1 000 kHz), temperature (5~40℃) and moisture content (14.7%~22.7%) on the relative dielectric constant. The reasons for dielectric constant changed with these factors were analyzed. Furthermore, the mathematical model for predicating moisture content of pearl barley based on the dielectric constant and temperature at 100 kHz was established, and the model was verified. The results indicated that the dielectric constant of pearl barley increased as moisture content and temperature increasing, decreased with frequency increasing over the frequency range from 1~1 000 kHz. The relationship between the dielectric constant, temperature and moisture content can be described by cubic polynomial, with the coefficient of determination of 0.997 6 at 100 kHz. Obvious linear relationship was observed between measured moisture contents and calculated moisture contents, with coefficient of determination of 0.997 7.

Key words Pearl barley, Moisture content, Dielectric property, Nondestructive test

引言

含水率是评价粮食品质和选取加工工艺条件的一个重要指标^[1]。如果粮食中的含水率过高,在收购、运输和贮藏等环节中就会出现变质、霉烂等问题,从而严重影响食用品质,因此必须严格控制其含水率。目前国内外粮食含水率的测量方法主要有电加热干燥法、红外干燥法、蒸馏法、微波法和核磁共

振法等^[2-3],但这些检测方法均存在检测时间长、检测费用高等缺点。与以上检测方法相比,基于粮食介电特性的含水率检测方法具有成本低、耗时少、易于实现连续测量等特点,因此粮食介电特性的研究得到了广泛关注。但现阶段国内外关于粮食介电特性的研究多集中于大宗粮食,如:玉米、小麦和大豆等^[4-9]。

近年来,小杂粮的种植面积和产量逐年递增,但

收稿日期:2011-06-23 修回日期:2011-08-02

*国家自然科学基金资助项目(31171720)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(西北农林科技大学 QN2009043)

作者简介:郭文川,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

对小杂粮介电特性的研究甚少,尚缺乏专门用于测量小杂粮的含水率检测仪。为此,本文以薏米为对象,研究测量信号频率(1~1 000 kHz)、温度(5~40℃)和含水率(14.7%~22.7%)对薏米相对介电常数的影响,进而建立预测薏米含水率的数学模型,验证模型的可靠性,为开发薏米含水率检测仪奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用薏米购于陕西省杨陵区“好又多”超市,初始湿基含水率为14.7%。试验前,用筛网筛除破粒和碎粒,并剔除杂物(如外壳碎末、小石子和其他作物颗粒等)。选用形状完整、籽粒饱满的颗粒作为试验样品。用游标卡尺(150型,星星精密量具厂)测量随机选取的50粒薏米的长径、短径以及高度,其平均长径、短径和高度分别为5.83、4.61和5.20 mm。

1.2 测量方法

1.2.1 含水率

将薏米样品置于130℃电热鼓风干燥箱(WG-71型,天津市泰斯特仪器有限公司)内干燥18 h^[10],根据干燥前、后薏米质量的差值计算得到各样品的湿基含水率。

1.2.2 介电参数

介电参数测量系统主要由LCR测量仪(3532-50型,日置公司,日本)、同心圆式电容器(自制)、计算机及测试软件等组成。同心圆式电容器由两个高100 mm的铜管组成。外筒为黄铜,直径85 mm;内筒为紫铜,直径30 mm。将两个铜管固定于有机玻璃底座上,使其圆心重合,此时两铜管即为电容器的两个极板。测量前,预热LCR测量仪1 h左右,然后将LCR测量仪的两个电极分别与两铜管的引出线相连。测试在1~1 000 kHz对数频率坐标下等间距选取的51个频率点下的电容。

1.3 样品制备

利用电子分析天平(MP31001型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司)分别称取4份约500 g初始含水率的薏米样品,放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置不同含水率的样品。为保证样品吸水均匀,边搅拌边喷水。当欲配制样品的含水率过高(如大于20%)时,需多次加入去离子水。所有样品每隔3~4 h搅动一次。1 d后,将配制得到的不同含水率薏米样品装入2层塑料袋内密封后置于2℃冰箱内3~4 d,以使吸水均匀。期间每天摇动3~4次。试验前,采用电加热干

燥法测量所配样品的含水率。试验中所配样品的含水率为14.7%(原始含水率)、16.7%、18.7%、20.8%和22.7%。

1.4 测量步骤

在电子分析天平上称得空电容器的质量后,将空电容器连接到测量系统上,在1~1 000 kHz频段内测量所选频率下空电容器的电容 C_0 。随后将薏米样品以自由落体方式装满同心圆式电容器的介质空腔内,利用刮板刮出多余样品。测量装有样品的电容器质量,根据薏米装填质量及容器体积得到电容器内样品的容积密度。湿基含水率为14.7%、16.7%、18.7%、20.8%和22.7%时的容积密度分别为742、716、703、694和674 kg/m³。将装有薏米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(YHG-400BS型,上海跃进医疗器械厂)内,同时将数字温度计(DM6801A型,深圳市胜利高电子科技有限公司)插入薏米样品内,使得温度计的测量探头处于电容器内筒与外筒的中间且在圆筒的1/2高度处。当样品温度达到5℃时,测量所选频率下样品的电容 C_s 。随后依次设定干燥箱的温度为10、15、20、25、30、35和40℃。当薏米样品温度达到设定值时,测量电容。每个样品每个温度下测量3次,取其平均值作为测试结果。由 $\varepsilon' = C_s/C_0$ 计算样品的相对介电常数 ε' 。

2 结果与分析

2.1 频率对相对介电常数的影响

图1是不同温度下频率对含水率为16.7%和20.8%的薏米相对介电常数的影响曲线。由图1可知,在1~1 000 kHz频段内,两个含水率下薏米的相对介电常数皆随着测试信号频率的增大而减小。与高频段相比,低频段下相对介电常数减小较快。同一频率下,温度越高,相对介电常数越大。在测试频段内,温度对相对介电常数随着频率增大而逐渐减小的变化规律没有影响。相对介电常数的变化主要是由于非均匀混合物中的偶极子、电子和原子的极化和Maxwell-Wagner效应造成的^[11-12]。低频时,电荷的积累导致物料的总电容量和相对介电常数增大,而当频率不断增大时,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,偶极子的取向极化便停止。于是,随着测量信号频率的增大,相对介电常数呈减小趋势。

2.2 温度对相对介电常数的影响

不同含水率下温度对频率为100 kHz和500 kHz的薏米相对介电常数影响曲线如图2所示。

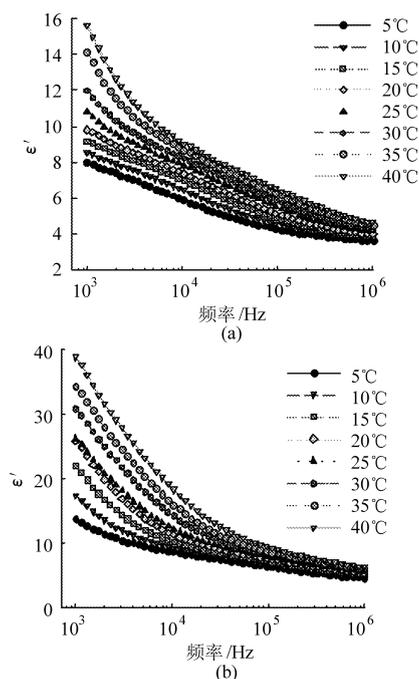


图1 不同温度下频率对薏米相对介电常数的影响曲线

Fig.1 Frequency dependence of the relative dielectric constant of pearl barley at indicated temperatures

(a) 含水率 16.7% (b) 含水率 20.8%

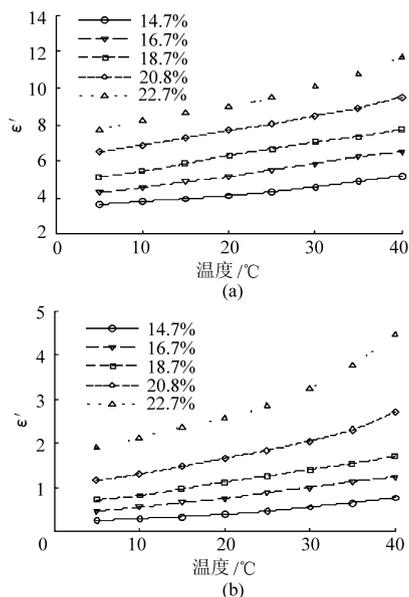


图2 不同含水率下温度对薏米相对介电常数的影响曲线

Fig.2 Temperature dependence of the relative dielectric constant of pearl barley at indicated moisture contents

(a) 频率 100 kHz (b) 频率 500 kHz

不同的测量频率下,薏米的相对介电常数随着温度的升高呈单调递增趋势,含水率越高相对介电常数越大且变化趋势越显著。同一温度下,相对介电常数随着含水率的增大不断增大。在测试样品的含水率范围内,含水率没有改变相对介电常数随着温度增大而增大的变化规律。介电常数反映的是静态

电场下分子极化和布朗运动间的动态平衡。温度升高有利于极性分子的取向,导致单位体积内的极化分子数增加;温度的升高加速了物料内自由水的布朗运动,最终使相对介电常数增大^[13-14]。

2.3 含水率对相对介电常数的影响

薏米相对介电常数随含水率的变化如图3所示。由图3可见,频率为100 kHz和500 kHz时,在8个不同的温度下,薏米的相对介电常数均随其含水率的增大而不断增大。当温度相同时,含水率的增大引起相对介电常数的增大,且各温度下相对介电常数随含水率的增大而升高的变化规律相同。同一含水率下,温度越高,薏米的相对介电常数越大,各温度间相对介电常数的差值随含水率的增大而增大。

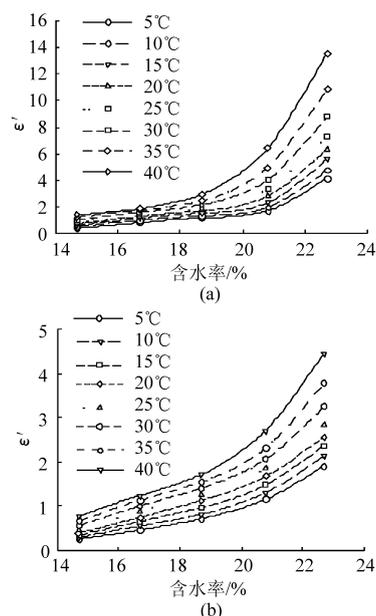


图3 不同温度下含水率对薏米相对介电常数的影响曲线

Fig.3 Moisture content dependence of the relative dielectric constant of pearl barley at indicated temperatures

(a) 频率 100 kHz (b) 频率 500 kHz

研究表明,常温下水的静态相对介电常数为81^[15],它作为一种强极性的分子,具有很强的电偶极矩,因此水是影响薏米介电特性的主要因素。当薏米含水率较低时,内部的水分分为束缚水,此时细胞基本处于休眠状态,在这种状态下细胞内的离子运动不活跃,因此水分对相对介电常数的影响并不显著。随着含水率的不断增大,自由水含量增大,细胞由于吸水使其内部的原生质溶解,细胞体积膨胀,导致整体代谢加速并且内部离子运动随之加快^[16-18],此时薏米的相对介电常数表现出增大的趋势。

3 含水率模型的建立与验证

3.1 响应曲面分析

图4为100 kHz下薏米的含水率与温度和相对

介电常数间的响应曲面。由图4可知,当温度一定时,薏米含水率随着相对介电常数的增大而增大;而当相对介电常数一定时,含水率随着温度的升高而减小。

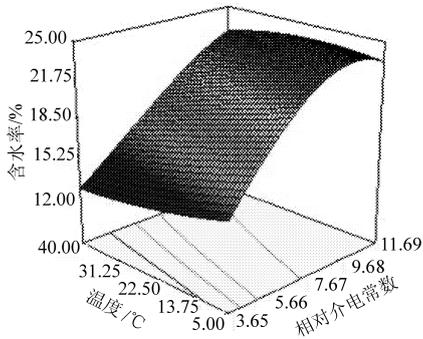


图4 温度和相对介电常数对薏米含水率的影响
Fig. 4 Effect of temperature and dielectric constant on moisture content of pearl barley

3.2 回归方程的建立

由前期试验可知,温度、薏米相对介电常数与其含水率之间具有相关性,因此为了提高实际应用时含水率测量结果的准确性及可靠性,本文利用 Design-Expert 7.6.1 软件对薏米试验数据进行多元回归拟合,分别在 10、50、100 和 500 kHz 频率下建立相对介电常数 ε' 和温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 对于湿基含水率 W (%) 的数学模型。各频率下模型的确定系数分别为 0.994 5、0.997 4、0.997 6 和 0.997 4。说明当频率为 100 kHz 时,含水率模型的确定系数最大,该频率下的数学表达式为

$$W_1 = 5.3822 + 2.9991\varepsilon' - 0.0154T - 0.0471\varepsilon'T - 0.0179\varepsilon'^2 + 2.6076 \times 10^{-3}T^2 + 4.8237 \times 10^{-3}\varepsilon'^2T - 4.4706 \times 10^{-4}\varepsilon'T^2 - 9.4021 \times 10^{-3}\varepsilon'^3 + 5.1781 \times 10^{-6}T^3 \quad (1)$$

对式(1)进行方差分析,结果见表1。由表1可知,用式(1)描述相对介电常数、温度与含水率的关系时,模型的 P 值小于 0.000 1,表明模型极显著。模型的确定系数 $R^2 = 0.997 6$ 。说明在信号频率为 100 kHz 时,相对介电常数、温度与薏米含水率间具有很好的相关性。同时,式(1)中除 T^2 、 ε'^3 和 T^3 项外,其余各项均对模型有显著或极显著的影响。

3.3 模型的验证

为了对上述所建模型的准确性及适用性进行评估,本文进行了模型验证试验。在含水率 14% ~ 23% 范围内,随机配制了 10 个含水率水平的薏米样品,在 5 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ 测量样品的相对介电常数。由式(1)计算的含水率与以干燥法测量的含水率进行比较,如图5所示。

表1 回归模型方差分析表

Tab. 1 ANOVA of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
ε'	5.72	1	5.72	218.61	< 0.000 1	**
T	2.97	1	2.97	113.31	< 0.000 1	**
$\varepsilon'T$	0.14	1	0.14	5.33	0.028 0	*
ε'^2	0.44	1	0.44	16.77	0.000 3	**
T^2	0.092	1	0.092	3.53	0.070 2	
ε'^2T	0.21	1	0.21	8.17	0.007 7	**
$\varepsilon'T^2$	0.13	1	0.13	4.93	0.034 1	*
ε'^3	0.065	1	0.065	2.47	0.126 8	
T^3	0.001	1	0.001	0.040	0.843 6	
模型	322.48	9	35.83	1 368.60	< 0.000 1	**
误差	0.79	30	0.028			
总和	323.26	39				

注: * $P \leq 0.05$, 显著; ** $P \leq 0.01$, 极显著。

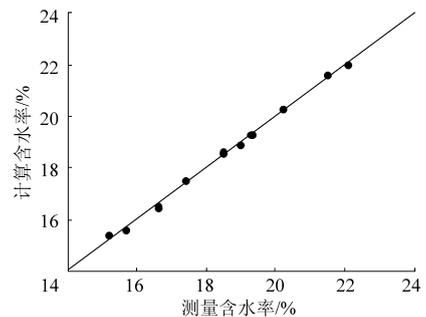


图5 测量含水率与计算含水率相关分析
Fig. 5 Correlative analysis of actual moisture content and measuring moisture content

由图5可以看出,薏米的测量含水率与计算含水率之间的确定系数 $R^2 = 0.997 7$,说明利用薏米的介电特性测量其含水率的方法具有较高的准确性。本试验对后续小杂粮介电特性的研究具有参考价值。

4 结论

(1) 薏米的相对介电常数随含水率的增大和温度的升高而增大,并且含水率越高相对介电常数增大速率越大。但薏米的相对介电常数随频率的增大而减小。

(2) 通过对试验数据进行分析处理,分别在 10、50、100 和 500 kHz 下建立了薏米含水率数学模型,最佳的建模频率为 100 kHz,该频率下模型的确定系数为 0.997 6。

(3) 薏米含水率模型验证试验表明,含水率测量值与计算值之间的确定系数为 0.997 7,说明利用薏米介电特性快速检测其含水率的办法是可行的。

参 考 文 献

- 1 廖西元,李凤博,徐春春,等. 粮食安全的国家战略[J]. 农业经济问题, 2011(4):10~15.
Liao Xiyuan, Li Fengbo, Xu Chunchun, et al. National strategy for food security [J]. Issues in Agricultural Economy, 2011(4):10~15. (in Chinese)
- 2 樊尚春,梁虹. 电容式固态物含水率传感器的模型[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊):1 022~1 023.
Fan Shangchun, Liang Hong. Mathematical model of capacitive-type moisture sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Supp. 1):1 022~1 023. (in Chinese)
- 3 罗承铭,师帅兵. 电容法粮食物料含水率与介电常数关系研究[J]. 农机化研究, 2011,33(4):149~151.
Luo Chengming, Shi Shuaibing. Research on the correlation between moisture content and dielectric constant of grain products based on capacitance method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(4):149~151. (in Chinese)
- 4 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.
- 5 裘揆,陈乐生,赵春宇,等. 种子含水率在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9):119~127.
Qiu Kui, Chen Lesheng, Zhao Chunyu, et al. On-line measuring system of seed moisture content [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):119~127. (in Chinese)
- 6 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.
Li Changyou. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):56~59. (in Chinese)
- 7 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.
- 8 Fariba J, Kaida K, Daud W M, et al. The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(3):324~331.
- 9 赵博,毛文华,胡小安,等. 粮食收购品质自动评定装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊):268~271.
Zhao Bo, Mao Wenhua, Hu Xiaohan, et al. Design and experiment of automatic quality grading equipment in grain purchase [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp):268~271. (in Chinese)
- 10 ASAE. ASAE standards 2005; standards engineering practices data[M]. ASAE, 2005.
- 11 Wang S, Monzon M, Johson J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: heating uniformity and energy efficiency [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(2):240~246.
- 12 Kamil S, Ahmet C. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz [J]. Powder Technology, 2010, 203(2):365~370.
- 13 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):1 873~1 881.
- 14 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.
- 15 秦文. 蔬菜物料的介电特性及其应用研究[D]. 重庆:西南大学, 2006.
Qin Wen. A study on the dielectric properties and the application of vegetables [D]. Chongqing: Southwest University, 2006. (in Chinese)
- 16 Trabelsi S, Nelson S O. Microwave sensing technique for nondestructive determination of bulk density and moisture content in unshelled and shelled peanuts [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(5):1 563~1 568.
- 17 Hong S C, Graham P, Arthur D H, et al. A method of determining the moisture content of bulk wheat grain [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 78(4):1 155~1 158.
- 18 Guo W, Zhu X, Liu Y, et al. Sugar and water content of honey with dielectric property sensing [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2):275~281.