

一个改进的农产品介电特性的测试系统*

尤田束

(浙江大学)

摘要 介绍一种适于测量谷物(黄豆、小麦等)和某些小颗粒的观赏植物种籽及其研碎的粉状材料介电特性的测试系统,也可用在液体及含水量较高的生物材料介电特性的确定。为该“短路波导装置”而编制的计算机程序使得利用该装置的测试步骤变得很简单。用湿度为11%和17%的磨碎的小麦作样品,在工作频率为10.51GHz时,对该设备的可靠性进行测试验证,并和美国农业部(U.S.D.A)已发表的相应数据作比较,结果非常接近。对于介电常数(湿度11%和17%)和损耗因子(湿度17%),用该设备测量的结果和U.S.D.A的数据相差都在3%~5%之内。

关键词 短路波导 介电特性 农产品 测量

介电加热处理生物体以改善产品营养质量及种子催芽,需要知道被处理对象的介电常数和损耗因子^[1]。在介电加热的“参数优化组合”的研究中,更需要知道在尽可能宽的频率、密度和湿度(尤其是频率)范围内材料介电特性的变化趋势。但由于微波测试设备价格昂贵,每一测试设备又仅限于某一较窄的频率范围^[2]。

应用价格较为低廉、容易操作、且能提供满足测量精度的测试装置,在有限的几个常规微波频段(K、X、C和S)上进行实测,结合某些已知的“介电方程”,并运用“统计分析系统(SAS)”软件包及“插值方法”,就能获得极宽频率范围内连续的介电数据^[3],加速“参数优化组合”的研究进程。

1 基本理论和方法

“短路波导原理”^[4,5]常被用来测量材料(工业上的绝缘材料、农产品和生物体)的复相对介电常数($\epsilon = \epsilon_r - j\epsilon_r$)的实部(ϵ_r)和虚部(ϵ_r);待测样品置于波导短路终端。已知测量讯号频率和样品长度,分别测量无样品和有样品时,波导中的电压驻波比和驻波最小点的位置,就能确定 ϵ_r 和 ϵ_r 。由于介质的存在,“最小点”(即“节点”)的位置发生偏移,驻波比的大小也起变化。前者与 ϵ_r 有关,而后者取决于 ϵ_r 。

由测量数据来计算 ϵ_r 、 ϵ_r 值的方程:

$$\epsilon_r - j\epsilon_r = \left(\frac{\Delta L}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{Y_d \Delta L}{2\pi d}\right)^2 \quad (1)$$

收稿日期: 1998-01-02 1998-03-10修订

* 国家自然科学基金资助项目(69271024)

尤田束,副教授,杭州市玉古路20号 浙江大学材料系,310027

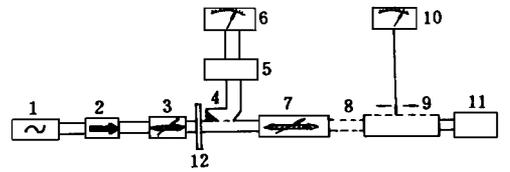
$$\frac{\tanh \gamma_2 d}{\gamma_2 d} = \frac{\frac{E_{\min}}{E_{\max}} - j \tan \frac{2\pi Z_0}{\lambda_c}}{1 - j \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \cdot \tan \frac{2\pi Z_0}{\lambda_c}} \cdot \left(-j \frac{\lambda_c}{2\pi d} \right) \quad (2)$$

式中 λ_0 ——工作波长; λ_c ——截止波长 ($\lambda_c = 2a$); γ_2 ——样品中的复传播常数 ($\gamma_2 = a_2 + j\beta_2$); λ_g ——无样品区的波导波长; $\frac{E_{\min}}{E_{\max}}$ ——驻波比的倒数; d ——样品长度; Z_0 ——样品外部从“空气—样品”交界面到第一个电压最小点的距离。

通过测量得到 $\frac{E_{\min}}{E_{\max}}$ 和 Z_0 值,再用计算机程序来解超越方程(2)。计算机程序还考虑了测量线探针槽的影响。对低损耗材料的精确测量,还必须计入波导壁的高频损耗^[6]。对于大的驻波比 (E_{\max}/E_{\min}),不能通过直接测 E_{\max} 及 E_{\min} 来确定。因此,习惯上采用“三分贝电平法”(即“两倍最小功率法”)。在计算机程序中,也可以取任意方便的分贝数。

2 设备的结构和特点

本测量系统的方框图如图1所示^[5,7]。图中的1、2和3分别是风冷的微波发生器(X-13A)、隔离器及可变衰减器,给整个系统提供频率及电平符合要求的功率源。4、5及6一起构成一个正向分功率支路,从主通道中提取1%的功率,供测量及监视测试信号的频率。5是经频率计数器校准过的直读式波长计。如果仪器不充裕,6与10可以用一个转换器共用(省去其中的任意一台);图中的7、9及10用来测量本设备波导系统中无样品与有样品时的电压驻波比及驻波最小点位置,是本测试设备的核心部分。零件8是“E平面”的90°弯波导,用它来改变波导系统轴线的方向,使测量线和样品架处于垂直位置。这样,测量线探针座的重力必须用弹性可



1. 微波发生器 2 隔离器 3 可变衰减器 4 定向耦合器
5 波长计 6, 10 选频放大器 7 精密可变衰减器
8 E-90 弯波导 9 测量线 11. 样品架 12 短路开关
图1 测试系统方框图

Fig. 1 Block diagram of the measurement system

调的橡皮带的向上拉力来平衡。样品架11,对于无需改变密度的固体样品,可直接用商品化的“可调短路活塞”来代替。对于液体试样(或水含量高的生物体),也可用市售的“短路波导”元件。当应用“混合物介电方程”,需要在大范围内改变粉末(或颗粒)样品密度时,样品架则必须用一段4~5 cm长的直波导,加可拆卸的短路“法兰板”构成。保证“空气—样品”界面与波导轴线的垂直,靠一段有刻度的、与波导内壁滑配的长方形黄铜塞规来实现。

本测试系统具有中高测量精度,完全能满足介电加热的“参数优化组合”研究工作的需要。和美国农业部的同类设备相比^[2,8],它的整体结构紧凑,避免使用某些昂贵的零部件,使系统的总费用大大降低。针对被测材料的三种类型,分别用三种不同的“样品架”,免去复杂的机械加工,而且测试操作方便、灵活。

3 可靠性的验证

USDA 测试系统用苯(分析试剂级)作为第一种标准材料,来检验用它所获得的介电特性的可靠性。为了对高损耗试样检验该系统的有效性,也对两种牌号的酒精进行测量,结果

达到期望的精度。考虑到用上述液体进行测量, 由于纯度的差别和样品的长度(即液面高度)的不确定性(由于苯和酒精与波导壁之间的表面张力和粘着力, 使表面不是平面), 所以用一种热成形的固体苯乙烯共聚物(Rexolite 1422 高频绝缘材料)作样品, 测量结果与用其它更精密的测量仪器所得数据很好地吻合。

本设备可靠性的验证是在频率为10.51 GHz, 对四种“湿基湿度”的“全麦面粉”(即含麦皮的小麦粉), 在很宽的密度范围测量介电常数 ϵ_r 与损耗因子 ϵ_r , 其部分结果列于表1。图2与图3的曲线是用本装置所获得的介电数据与用USDA 测试系统所得相应数据的比较。

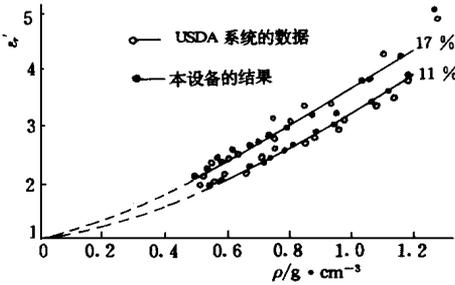


图2 介电常数与样品密度的关系
(频率10.51 GHz, 湿度分别为11%和17%的“全麦面粉”样品)

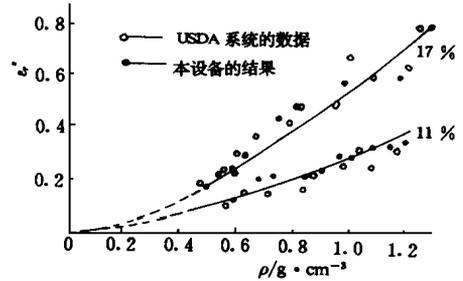


图3 损耗因子(ϵ_r)与样品密度的关系
(频率10.51 GHz, 湿度分别为11%和17%的“全麦面粉”样品)

Fig 2 Sample density dependence of the dielectric

Fig 3 Sample density dependence of the loss factor

表1 在频率为10.51 GHz, 湿度15% 的小麦面粉的介电特性

Tab 1 The dielectric properties of ground wheat with 15% moisture at 10.51 GHz

密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.530	0.560	0.599	0.643	0.677	0.740	0.850	0.958	1.084	1.181	1.249	—	—
ϵ_r	2.117	2.181	2.277	2.460	2.505	2.700	3.089	3.373	3.743	4.148	4.510	—	—
ϵ_r	0.179	0.218	0.204	0.229	0.308	0.341	0.477	0.676	0.677	0.637	0.654	—	—

4 结 论

从图2和图3的四组比较数据中可以看出, 两套测试系统所得结果非常接近, 在计算机上, 对各组数据进行“二次多项式回归”处理, 并分别在6个不同密度上“插值”, 发现用本测试装置的数据回归处理得出的 ϵ_r (湿度11%和17%) 和 ϵ_r (湿度17%) 与USDA 的对应值之间, 相差都在3%~5%之内。只有湿度为11%的 ϵ_r 值, 本设备的数值比USDA 系统的数值高出2%~8%。可能是由于本实验室没有空调, 测试时波导系统的内表面湿度较高造成的。可见, 本设备特别适合用来测量湿度较大(损耗较大)的生物材料的微波介电特性。而对于低损耗材料的 ϵ_r 的测量, 将有较大的百分比误差。如果希望获得更精确的 ϵ_r 测量值, 则必须设法对环境湿度加以控制。

用本系统测量, 使用塞规逐步按压样品, 通过改变长度(高度)来连续改变其密度, 完成一个样品(一种湿度, 8~10个不同密度)的测量工作, 并计算(用IBM 386兼容机)出 ϵ_r 及 ϵ_r 的全部结果, 只需30 min 左右。比USDA 系统进行类似的测试和计算所需时间, 约缩短了三分之一。这是由于本测试系统配置比较合理、紧凑, 样品架的结构比较简单。

参 考 文 献

- 1 Nelson S O. Use of electrical properties for grain moisture measurement J Microwave Power, 1991, 12(1): 67~ 72
- 2 Nelson S O. A system for measuring dielectric properties at frequencies from 8.2 to 12.4 GHz Trans of the A S A E, 1972, 15(6): 1094~ 1098
- 3 Nelson S O, Bartley P G, Lawrence K C. Measuring RF and microwave permittivities of adult rice weevils IEEE Trans on Instru and Meas, 1997, 46(4): 941~ 946
- 4 Roberts S, Von Hippel A. A new method for measuring dielectric constant and loss in the range of centimeter waves J Appl Phys, 1946, 17(7): 610~ 616
- 5 汤世贤. 微波测量. 北京: 国防工业出版社, 1981. 57~ 86
- 6 Dakin T W, Works C N. Microwave dielectric measurements J Appl Phys, 1947, 18(9): 789~ 796
- 7 尤田束. 参数检测与过程控制. 杭州: 浙江大学出版社, 1997. 242~ 281
- 8 Nelson S O, You T S. Microwave dielectric properties of corn and wheat kernels and soybeans Trans of the A S A E, 1989, 32(1): 242~ 249

Improvement on System for Determination of Dielectric Properties on Agricultural Products

You Tianshu

(Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract The present common microwave measurement system with the high cost is only suitable for a certain narrow frequency range, thus causing restrictions for the research work in this field. For this reason, a improved testing system based on the short-circuited waveguide principle was developed and used for the practical measurement. The system is suitable for measuring dielectric properties of the materials of grain (soybean, wheat, etc.), small seeds of ornamental species and their ground powder. It is also suited to measuring complex relative permittivity for biological materials including liquid or high moisture substance. With "Statistical Analysis System (SAS)" and "curve inserting and fitting method", combining the known dielectric equations, the needed dielectric data were obtained within the widest continuous frequency range. The research of optimum-combined parameters for dielectric heating treatment was speeding-up. The computer program makes it quite simple to use the measuring procedures of this system. It takes only about 30 minutes to complete all measurements for a single sample with certain moisture on about ten different densities and to perform all necessary calculations with the computer program for determining the values of dielectric constant and loss factor. The instruments are reason simpler, and more practicable. As a result, in comparison, the differences between these datum by this simplified equipment and those of USDA, U. S Department of Agriculture, are within the range from 3% to 5% for the dielectric constant of ground wheat on two moisture levels, 11% and 17%, at 10.51GHz and for the loss factor on 17%.

Key words short-circuited waveguide, dielectric properties, agricultural product, measurement