

矩形波导中试管对液体柱散射特性的影响

钟淑蓉, 刘长军, 许小玲

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要:为了探讨影响矩形波导中心加载分层介质圆柱散射特性的因素,通过实验得到了矩形波导中装满水的玻璃试管反射系数的频率响应特性,并对电磁波频率、液体相对介电常数、液体柱高度以及试管壁厚度发生变化时,试管对液体柱散射特性的影响进行了数值模拟。结果证明:当液体柱处于谐振状态,或者液体柱高度小于波导窄边高度的 $1/2$ 时,试管的存在对液体柱反射系数影响较大,试管壁厚度对反射系数也有影响。该结论可用于基于波导的微波化学实验系统的研究中。

关键词:电子技术;反射系数;数值模拟;介电常数;矩形波导

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1672-2892 (2006)01-0010-04

Impact of Test Tube on the Scattering Characteristics of a Liquid Cylinder in Rectangular Waveguide

ZHONG Shu-rong, LIU Chang-jun, XU Xiao-ling

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The factors which may affect on the scattering characteristics of a layered dielectric cylinder in the center of a rectangular waveguide are discussed in this paper. Experiments are performed to study the frequency response characteristics of a glass test tube filled with liquid. The impact of the test tube on the scattering characteristics is simulated when the frequency of the incident electromagnetic wave, the relative permittivity, the height of the liquid and the thickness of the test tube wall vary. The results show that the influence caused by the test tube is distinct, and the thickness of the test tube wall has impact on the reflection coefficient when the liquid cylinder is under the resonance state or the height of liquid is below one half of the length of the narrow side of the waveguide. The conclusion in this paper is of great importance for the research of microwave chemistry experiment systems.

Key words: electronic technology, reflection coefficient, numerical simulation, permittivity, rectangular waveguide

1 引言

在微波化学实验系统中,微波化学反应器是整个系统的核心部分。波导型微波化学反应器是根据基本的波导传输理论,在特定的工作频段,使用标准矩形或圆形波导单模传输模式的一种反应器。在使用波导型微波化学反应器的实验研究中,多数液相化学反应都在置于波导中心的试管或烧杯中进行。

对矩形波导中介质柱体的不连续问题已有一些研究。文献[1-6]对波导中介质的散射、不连续的等效电路、谐振效应及相对介电常数的测量等方面进行了相关研究,其中,文献[2]、[3]、[5]都仅考虑介质柱的情况,在应用到液体柱时忽略了试管壁的影响;文献[1]、[4]、[6]考虑了多层介质(如盛装液体的试管)的情况,但没有针对试管对介质柱反射系数的影响进行研究。在实际测量中,通常认为试管的相对介电常数远小于溶液的相对介电常数,因而忽略了试管对液体柱反射系数的影响。本文研究了试管对液体柱反射系数的影响,发现在某些条件下试管壁会对测量结果产生较大影响,如果使用测量的反射系数来反演溶液的介电常数,反射系数的误差会给反演的介电常数带来更大偏差。本文经过数值模拟得到了不同情况下试管的影响,对基于矩形波导的微波化学系统的实验研究具有重要参考价值。

2 基本理论

在矩形波导中放入盛有液体的圆形试管,考虑入射波为 TE_{10} 模式,液体圆柱的中心轴平行于电场矢量的方向,液体和外壁都是均匀各向同性的线性介质,波导壁则视为良导体。系统结构如图1所示,其中 ϵ_p 和 ϵ_c 分别是试管壁和液体介质的相对介电常数, R_1 和 R_2 分别为试管内壁和外壁的半径, a 和 b 分别为矩形波导宽边和窄边的

收稿日期: 2005-09-11; 修回日期: 2005-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60301004)

长度。

当试管中充满液体（或为分层介质柱）时，可简化为二维的情况，在试管的圆柱区域可使用极坐标 (ρ, θ) 。该区域电场的表达式为^[4]：

$$E_y = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \left[\frac{f_n}{g_n} J_n(k_2 R_2) + Y_n(k_2 R_2) \right] e^{-jn\theta} \quad (1)$$

$$\text{式中：} g_n = \frac{J_n(k_2 R_1)}{J_n(k_1 R_1)} - \frac{k_2}{k_1} \frac{J'_n(k_2 R_1)}{J'_n(k_1 R_1)},$$

$$f_n = \frac{k_2}{k_1} \frac{Y'_n(k_2 R_1)}{J'_n(k_1 R_1)} - \frac{Y_n(k_2 R_1)}{J_n(k_1 R_1)}。J_n \text{ 和 } Y_n \text{ 分别是}$$

贝塞尔函数和诺依曼函数，其中 $k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_p}$ ， $k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_c}$ 。由此可见，试管壁及液体的相对介电常数和频率对试管圆柱区域电场分布都有影响，只有当满足一定条件时才可忽略试管壁的影响。

以上理论分析仅仅适用于简化的二维情况，当试管中未充满液体时则不能当作二维情况处理。对于三维的情况很难获得解析解，需要通过数值模拟方法分析试管壁的存在对系统反射系数的影响。

3 数值模拟及结果分析

3.1 频率变化对反射系数的影响

本文使用基于有限元（Finite Element Method, FEM）的数值方法模拟了BJ-22型波导中心放入装液体的圆形试管的反射系数，结构如图1所示。在波导端口加上正弦激励波，波导内设为真空，波导壁设为理想电壁。液体柱由于相对介电常数较高，需要对液体柱增加网格划分，以提高计算精度并减少计算时间。

实验中使用BJ-22型波导，采用内半径为8.885mm，外半径为9.975mm，相对介电常数为 $\epsilon_r = 5.5$ 的玻璃试管。将试管装满水放置在波导中央，使用Agilent E8362B矢量网络分析仪，通过标准波导同轴转换器连接波导系统，波导终端接匹配负载。在2-3GHz频率范围进行扫频测量，测量时环境温度为24℃，而数值模拟时水的复介电常数采用德拜方程计算而得，测量得到的 $|S_{11}|$ 和通过数值模拟（考虑试管和不考虑试管两种情况）得到的 $|S_{11}|$ 如图2所示。

由图2可看出， $|S_{11}|$ 随频率的变化存在谐振现象，测量值和数值模拟值（考虑试管）符合较好。但由于测量时接入了波导同轴转换器和匹配负载，二者之间仍存在一定误差，其平均误差小于4%，证明了数值模拟的正确性。

同时可以看到，考虑试管和不考虑试管时，当数值模拟的 $|S_{11}|$ 在谐振频率附近的频率范围（2.0~2.5GHz）内，玻璃壁的存在对 $|S_{11}|$ 影响较大。例如当频率为2.1GHz时， $|S_{11}|$ 的相对误差为11.8%，此时玻璃壁的存在对 $|S_{11}|$ 的影响不可忽略；而在远离谐振点的频率点（2.6~3.0GHz）， $|S_{11}|$ 的相对误差小于2%，玻璃壁对 $|S_{11}|$ 的影响可以忽略。

3.2 液体相对介电常数变化对反射系数的影响

先不考虑试管壁，将液体充满并放在波导的中央，在 $r/a=0.05$ 和 $\lambda/a=1.4$ 的条件下（其中 r 是液体柱的半径， a 是波导宽边的长度， λ 是波在自由空间的波长），取 $a=109.20\text{mm}$ ，则 $r=5.46\text{mm}$ ， $\lambda=152.88\text{mm}$ 。仅考虑液体的相对介电常数的实部，数值模拟得到 $|S_{11}|$ 随相对介电常数的变化规律，如图3(a)所示。由图3(a)可以看到， $|S_{11}|$ 随相对介电常数的改变而变化，并存在谐振现象。图中的模拟范围内有两个谐振点，第1个在 $\epsilon_r=112$ 处，第2个在 $\epsilon_r=292$ 处，而文献[7]提供的两个谐振点 ϵ_r 分别为112.8，291.6，相对误差分别为0.7%和0.1%，证明了数值模拟的正确性。

然后用相同的方法对相同的波导进行数值模拟，放入内半径为8.885mm，外半径为9.975mm，相对介电常数 ϵ_r 为5.5的充满液体的玻璃试管，在考虑玻璃壁和不考虑玻璃壁的情况下，采用频率为2.45GHz的微波入射，只考虑试管中液体的相对介电常数的实部。由于实验系统是针对液相化学反应，因此取相对介电常数的范围为

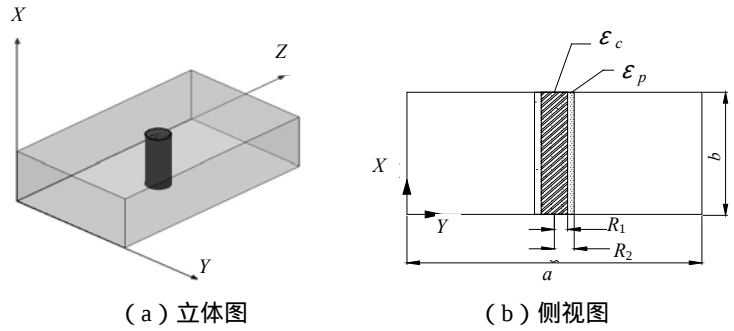


图 1 矩形波导中放入盛有液体的试管

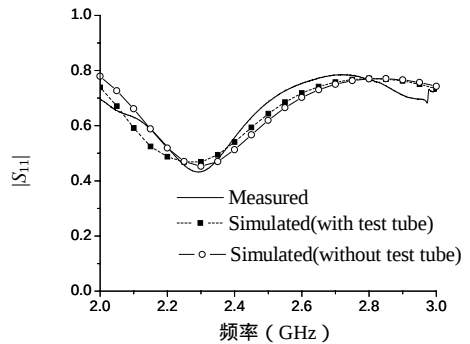


图 2 $|S_{11}|$ 随频率的变化

1~80, 得到 $|S_{11}|$ 与相对介电常数的关系, 如图3(b)所示。由图3(b)可以看出, $|S_{11}|$ 随相对介电常数的改变而变化, 也存在谐振现象。而玻璃壁的存在对 $|S_{11}|$ 的影响在谐振点附近较大, 在两个相对介电常数谐振点之间的一定范围($\epsilon_r=33\sim54$)内几乎没有影响。这是由于在谐振点附近曲线尖锐, 因此相对介电常数很小的变化也会造成 $|S_{11}|$ 的较大影响; 在两个谐振点之间的一定范围内曲线平坦, 因此相对介电常数的变化对 $|S_{11}|$ 影响较小。

同时, 在两个不同的谐振点, 玻璃壁对 $|S_{11}|$ 的影响也不同, 在相对介电常数较小的谐振点附近影响较大。

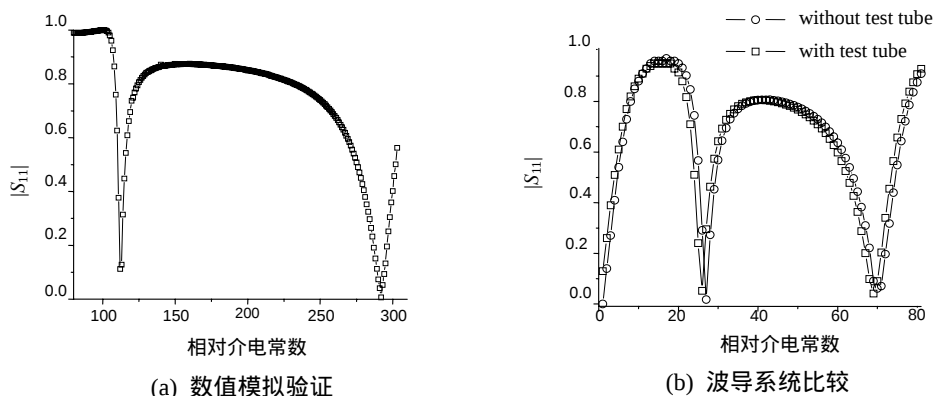


图3 $|S_{11}|$ 随相对介电常数的变化

而且当液体的相对介电常数小于10时, 由于这时试管的相对介电常数相对于液体的相对介电常数较大, 试管壁的存在对反射系数影响很大。

3.3 液体高度变化对反射系数的影响

如果玻璃试管并未装满, 试管壁的影响将与液体高度有关。以液体相对介电常数 $\epsilon_r=40$ 为例, 液体高度改变时, 存在玻璃壁和不存在玻璃壁两种情况下, $|S_{11}|$ 随液体高度的变化如图4所示。

从图4可以看到, 即使 $\epsilon_r=40$, 当试管中盛装液体的高度不同, 玻璃壁的存在对 $|S_{11}|$ 影响也不同。谐振现象仍然存在, 且与前面的谐振不同, 液体高度是在很小的范围中谐振的, 如在不考虑试管的情况下, 在0.77~0.86cm的液体高度之间存在很尖锐的变化: $|S_{11}|$ 从0.77cm时的0.289迅速上升, 然后又迅速回落到0.86cm时的0.297。因此当液体的高度在这个范围时, 试管壁对 $|S_{11}|$ 的影响最大。当试管中液体的高度超过波导窄边的一半, 除谐振点附近很小的范围(3.60~3.80cm)以外, $|S_{11}|$ 的相对误差都很小, 可以忽略玻璃壁的影响。

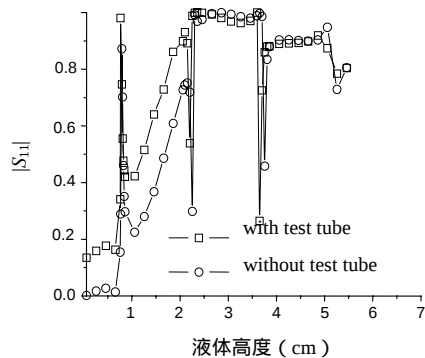


图4 $|S_{11}|$ 随试管中液体高度的变化

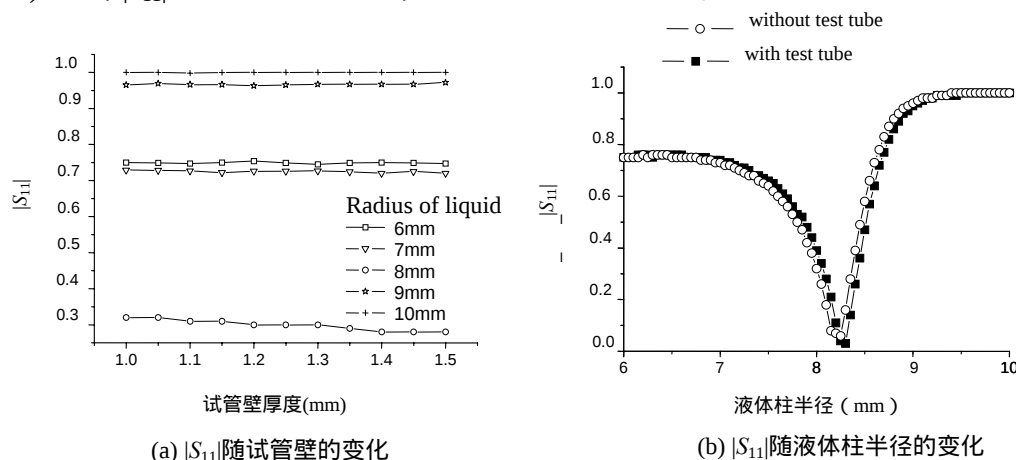


图5 试管参数变化对 $|S_{11}|$ 的影响

3.4 试管壁厚变化对反射系数的影响

微波化学实验中会使用不同规格的试管, 而不同试管会对液体柱周围的场以及反射系数产生不同影响。首先确定试管内半径, 改变试管外半径, 即保持试管内液体不变而只改变试管壁厚度。在实验室中常用试管壁的

厚度为1~1.5mm,取内半径的计算范围为6~10mm,每1mm取一个值,得到 $|S_{11}|$ 和试管壁厚度的关系如图5(a)所示。由图5(a)可以看出,试管壁厚度的改变对 $|S_{11}|$ 影响较小。但在某些情况下也有较大影响,例如在内半径为8mm时,即图5(b)的液体柱随其半径谐振的谐振点附近,就有较大变化。

试管壁的厚度确定时,大小不同的试管装满水后, $|S_{11}|$ 和试管内半径(液体柱半径)的关系如图5(b)所示。由图5(b)可以看到, $|S_{11}|$ 随液体柱半径的改变而改变,并且也存在谐振现象。当液体柱处于谐振状态时,试管壁的存在对反射系数有明显影响;而在远离谐振点时,试管壁的存在对反射系数的影响可忽略。

4 结论

本文通过数值模拟计算了矩形波导中心放置装满液体的玻璃试管时,频率、液体柱相对介电常数、液体柱高度以及试管壁厚度分别变化时,试管对散射参数的影响。结果表明:当入射波的频率为谐振频率,或者液体柱高度小于波导窄边高度的1/2时,玻璃试管对液体柱反射系数的影响较大,必须考虑试管的影响;如果液体相对介电常数小于10,在某些情况下玻璃试管的存在对液体柱散射参数影响较大。另外,如果选用介电常数较小的聚四氟乙烯试管,同样条件下对散射参数影响较小。

在此基础上,可用测量得到的反射系数反演出液相化学反应的等效介电常数,并通过选择合适的参数建立映射关系,经过在线实时测量,反演出液相化学反应等效介电常数随时间的变化规律。

参考文献:

- [1] E D Nieleesen. Scattering by cylindrical post of complex permittivity in a waveguide[J]. IEEE Trans. on MTT, 1969, 17(3):148-153.
- [2] Y Leviatan, G Sheaffer. Analysis of inductive dielectric posts in rectangular waveguide[J]. IEEE Trans. on MTT, 1987, 35(1):48-59.
- [3] R Gesche. Scattering by a lossy dielectric cylinder in rectangular waveguide[J]. IEEE Trans. on MTT, 1988, 36(1):137-144.
- [4] J Abdunour. A generic approach for permittivity measurement of dielectric materials using a discontinuity in a rectangular waveguide or a microstrip line[J]. IEEE Trans. on MTT, 1995, 43(5):1060-1066.
- [5] K Siakavara. The discontinuity problem of a rectangular dielectric post in a rectangular waveguide[J]. IEEE Trans. on MTT, 1991, 39(9): 1617-1622.
- [6] 张 峰. 基于FDTD的矩形波导中多层有层介质柱数值分析[J].微波学报,1994, 36(1):36-41.
- [7] K Ise. Dielectric post resonances in a rectangular waveguide[J]. IEE Proc. Pt.H, 1990, 137(1):61-66.

作者简介:

钟淑蓉(1974-),女,四川金堂人,在读硕士研究生,1997年本科毕业于西南师范大学物理教育专业,目前主要从事微波化学相关的工作。Email:cjliu_cd@yahoo.com.cn.

刘长军(1973-),男,河北邢台人,教授,博士生导师,1994年毕业于河北大学应用物理专业,目前主要从事电磁场与微波技术方面的研究工作。

许小玲(1981-),女,黑龙江尚志人,在读硕士研究生,2003年本科毕业于四川大学电子信息学院电子信息工程专业,目前主要从事微波化学相关的工作。