

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2022.02.019

## 基于谐振微扰技术的 PAM 溶液浓度测量方法

熊 杰,肖 夏\*,李 桥

(天津市成像与传感微电子技术重点实验室,天津大学微电子学院,天津,300072)

**摘 要:**提出一种基于谐振微扰技术的聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)溶液浓度的测量方法.通过高频结构模型的建立与仿真分析,设计工作频率为 7 GHz 的  $TE_{011}$  模圆柱形谐振腔,在传统微扰理论的基础上考虑材料微扰技术中介质的介电常数变化相对较大时计算值的偏差,并结合形状微扰技术分析电导率对谐振腔谐振频率的影响.结合理论推导与仿真数据获得了修正参数,建立了适用于高损耗溶液介质的微扰数学模型.配制浓度梯度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、浓度范围为  $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的九组 PAM 溶液,通过矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)进行实验验证.实验结果表明,谐振腔谐振频率与溶液浓度的对应关系与理论计算一致,浓度测量的总体相对误差低于 4.1%,平均测量误差为 2.62%.

**关键词:**微扰技术,微波谐振腔,聚丙烯酰胺溶液,浓度测量

中图分类号:TN98

文献标志码:A

## Measurement method of PAM solution concentration based on resonance perturbation technology

Xiong Jie, Xiao Xia\*, Li Qiao

(Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** In this paper, the method for measuring the concentration of polyacrylamide (PAM) solution based on resonance perturbation technology is proposed. The  $TE_{011}$  mode cylindrical resonator with the working frequency of 7 GHz is designed through the establishment and simulation analysis of high frequency structure model. On the basis of the classical perturbation theory, the deviation of the calculated value when the dielectric constant of the medium changes relatively large in the material perturbation technique is considered, and the influence of the conductivity on the resonant frequency of the resonator is analyzed combined with the shape perturbation technique. Combining theoretical derivation and simulation data, the correction parameters are obtained, and the complete perturbation mathematical model suitable for high loss solution medium is established. Nine groups of PAM solutions with concentration gradient of  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and concentration range from 100 to 300  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  are prepared. Through the vector network analyzer (VNA) for experimental verification, the experimental measurement results show that the corresponding relationship between the resonance frequency of the resonant cavity and the solution concentration is consistent with the theoretical calculation. The overall relative error of concentration measurement is less than 4.1%, and the average measurement error is 2.62%.

**Key words:** perturbation technology, microwave resonator cavity, polyacrylamide solution, concentration measurement

收稿日期:2021-10-13

\* 通讯联系人, E-mail: xiaxiao@tju.edu.cn

聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)是一种高分子聚合物,作为助凝剂、驱油剂、助滤剂等广泛应用于造纸、采油、冶金、污水处理等领域<sup>[1]</sup>,有“百业助剂”之称,所以它的工作效率与效果成为工业上关注的话题,想要提高净水效率或石油的采收率,就必须测出PAM溶液的浓度<sup>[2]</sup>. PAM的传统测量方法有多种,包括淀粉碘化铬法、浊度法、化学发光法等<sup>[3]</sup>,但这些传统的测量方法有着诸如测量范围窄、干扰大、效率低等缺点. 为了提高PAM的工作效率,解决其传统浓度测量方式的不足,PAM浓度的新兴测量方法也在不断得到开发应用. 加拿大卡尔顿大学的Örmeci and Di-Massimo<sup>[4]</sup>通过测量滤液在191 nm的吸光度来实现对残余高聚物浓度的直接测量. 东北石油大学齐晗兵等<sup>[5]</sup>通过研究PAM溶液的光谱特性提出一种PAM溶液浓度的光学检测方法. 北京化工研究院罗春霞等<sup>[6]</sup>使用旋转流变仪分析水解PAM溶液的流变特性,建立了利用多角度的激光光散射准确测量PAM分子量的方法. 目前对PAM溶液浓度测量方法的相关研究主要集中于光学检测领域,对微波技术在该领域的应用研究相对较少,而谐振微扰技术可以通过谐振腔谐振频率的偏移量精确反映腔内微扰材料介电特性的变化情况,具有测量精度高、可快速实时测量、易于系统实现等特点<sup>[7-8]</sup>. 溶液浓度的不同会导致其介电参数的改变,将谐振微扰技术应用于PAM的浓度测量,有利于促进该领域内的微波测量技术的发展.

本研究采用经过参数修正的谐振微扰法测量PAM溶液浓度,设计工作频率约为7 GHz的TE<sub>011</sub>模圆柱形谐振腔作为测量器件. 将注入腔体中央细管中的溶液作为扰动,通过谐振腔谐振频率的变化确定溶液的浓度. 传统微波微扰理论直接应用于溶液测量会产生偏差<sup>[9]</sup>,一般的解决方法是使用标准样品(例如纯水)作为未扰动态进行校准<sup>[1-]</sup>,然而偏差依然存在,且测量误差会随着溶液浓度的增大而增大. 本文分析了其产生偏差的原因,并结合形状微扰理论引入了溶液电导率对测量造成的影响. 通过高频结构仿真(High Frequency Structure Simulator, HFSS)软件获得了修正参数,建立了适用于高损耗溶液介质的微扰数

学模型,并进行实验测量,以验证该方法的可行性与准确性.

## 1 谐振微扰技术

**1.1 理论分析** 谐振微扰技术的基本原理是假定微扰腔(有一个小的形状变化或少量填充材料的变化)的真实场分布与无扰动时的场分布相同<sup>[11]</sup>,一般分为材料微扰和形状微扰两种类型<sup>[12]</sup>. 材料微扰是将待测样品引入谐振腔中,样品的电磁特性可从谐振频率的变化中推导出来<sup>[13]</sup>;形状微扰可以通过改变腔的尺寸或者插入一个可调螺丝使腔的形状发生改变,根据体积变化的大小和具体位置确定谐振频率的变化情况<sup>[14]</sup>.

材料微扰和形状微扰的基本公式分别如式(1)和式(2)所示:

$$\frac{f-f_0}{f_0} = -\frac{\int_{V_1} (\Delta\epsilon |E_0|^2 + \Delta\mu |H_0|^2) dV}{\int_V (\epsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dV} \quad (1)$$

$$\frac{f-f_0}{f_0} = \frac{\int_{V_2} (\mu_0 |H_0|^2 - \epsilon_0 |E_0|^2) dV}{\int_V (\mu_0 |H_0|^2 + \epsilon_0 |E_0|^2) dV} \quad (2)$$

其中, $f_0$ 和 $f$ 分别是谐振腔微扰前后的谐振频率, $\epsilon_0$ 和 $\mu_0$ 是微扰前谐振腔中介质的相对介电常数和磁导率, $\Delta\epsilon$ 和 $\Delta\mu$ 是由微扰介质引起的相对介电常数和磁导率的变化量, $E_0$ 和 $H_0$ 是微扰前腔内的电磁场强度, $V$ 是腔体内部的体积, $V_1$ 是微扰介质的体积, $V_2$ 是腔体形变的体积. 式中 $|E_0|^2 \approx E_1 \cdot E_0^*$ ,其中 $E_1$ 为微扰后腔中的电场强度,一般情况下,在推导过程中可忽略微扰引起的电磁场的变化,即 $E_1 \approx E_0$ .

由于谐振腔内部的总电能等于总磁能<sup>[15]</sup>,以溶液作为微扰介质,则式(1)可化简为式(3):

$$\frac{f-f_0}{f_0} = -\frac{\int_{V_1} \Delta\epsilon |E_0|^2 dV}{2 \int_V \epsilon_0 |E_0|^2 dV} \quad (3)$$

根据本文微扰技术的实际应用环境,使得式(3)可以被计算. 将空腔状态定义为未扰动状态,即腔内介质为空气. 由于溶液引起的扰动较大,导致谐振频率与相对介电常数的实际关系偏离式(3)所示的线性关系,所以需要对其进行修正. 同时,在用微扰技术分析引入空腔的微小扰动时,往

往只考虑材料微扰理论,这会导致微扰介质的电导率对谐振腔谐振频率的影响被忽略.形状微扰可以看作是由金属材料的增减引起的腔内空间的体积变化,可以等效为电导率极大的扰动介质对腔体谐振频率的影响.因此,本文结合式(2)来分析微扰介质电导率对谐振频率造成的影响.

**1.2 腔体结构与模态分析** 本研究设计的谐振腔结构图如图 1 所示,其具体结构参数如表 1 所示.腔体材料为黄铜,矩形波导通过耦合孔与圆柱形腔体相连.全氟烷氧基(Perfluoroalkoxy, PFA)塑料细管位于腔体中心,用于引入溶液作为扰动.PFA 的典型相对介电常数为 2.1.在高频下,塑料细管对腔内电磁场分布的影响可以忽略不计.本研究中,将细管插入谐振腔且没有溶液引入细管的状态定义为未扰动状态.在这种状态下,谐振腔的谐振频率定义为  $f_0$ .

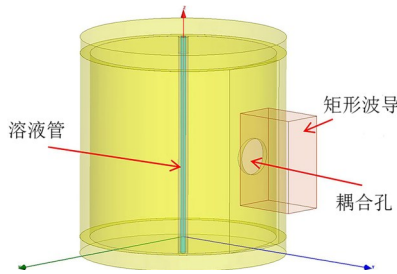


图 1 谐振腔结构图

Fig. 1 Structure diagram of the resonant cavity

表 1 谐振腔的结构参数

Table 1 Structural parameters of the resonant cavity

微扰腔	高度	腔体 半径	管内 半径	管外 半径	耦合孔 半径
尺寸(mm)	56.8	28.4	0.8	1.6	5.6

该谐振腔的工作频率约为 7 GHz,工作模式为  $TE_{011}$ ,该模式场结构稳定,品质因数高,损耗小,有利于提高测量精度.此模式的场分量表达式如式(4)所示:

$$\begin{cases} E_{\varphi} = j \frac{\eta K}{K_c} H_m J_0'(K_c r) \sin\left(\frac{\pi}{l} z\right) \\ H_r = \frac{H_m}{K_c} \frac{\pi}{l} J_0'(K_c r) \cos\left(\frac{\pi}{l} z\right) \\ H_z = H_m J_0(K_c r) \sin\left(\frac{\pi}{l} z\right) \\ E_r = E_z = H_{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\eta$  是腔内介质的波阻抗,  $K$  是波数,  $K_c$  是截止波数,  $l$  是腔体高度,  $J_0$  是零阶贝塞尔函数.对于  $TE_{011}$  模式,  $K_c = 3.832/R$ ,  $R$  为腔体半径.

**1.3 HFSS 仿真** 利用 HFSS 分别考虑扰动介质的相对介电常数和电导率对谐振频率的影响.常温常压下,在频率为 7 GHz 时水溶液的相对介电常数约为 68.在 HFSS 中,设置管内介质的相对介电常数为 68,电导率为 0,激发功率默认为 1 W,仿真得到管内纵截面处的电场强度分布,如图 2 所示.

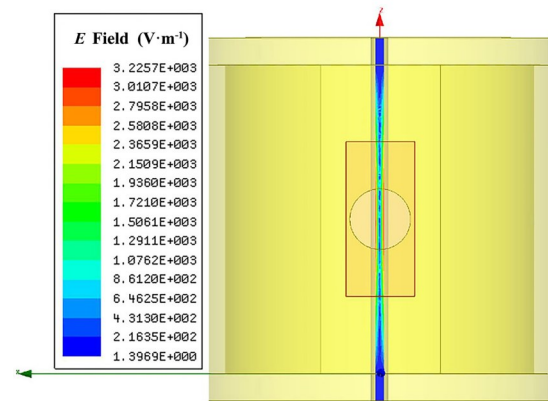


图 2 溶液管中纵向截面的电场强度分布

Fig. 2 Electric field intensity distribution of longitudinal section in solution tube

由式(4)可知,在  $TE_{011}$  模式下,电场强度只存在  $E_{\varphi}$  分量,因此可以通过该横截面反映溶液管中整体的电场强度分布情况.将图 2 中的电场强度数据依次与无扰动态(即相对介电常数设为 1)时的相比,可以发现比值几乎相同.因此,可以假设管内的整体电场强度随着介质相对介电常数的变化而均匀变化.将此比值设为  $\alpha$ ,获得关系式  $E_1 = \alpha E_0$ ,则式(3)可转化为:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = - \frac{\int_{V_1} \Delta \epsilon E_1 \times E_0^* dV}{2 \int_V \epsilon_0 |E_0|^2 dV} = - \frac{\alpha \int_{V_1} \Delta \epsilon |E_0|^2 dV}{2 \int_V \epsilon_0 |E_0|^2 dV} \quad (5)$$

其中,分母是对于整个谐振腔内部空间的体积分,分子是对于溶液管内部空间的体积分.其意义在于,忽略由扰动介质引起的腔内整个空间中的电场强度的变化,考虑由于介质的相对介电常数变

化引起的溶液管内部的电场强度的变化. 仿真得到所有  $\alpha$  的参数值, 做出曲线图, 如图 3 所示, 对曲线进行拟合得到  $\alpha(\epsilon)$  的解析式:

$$\alpha(\epsilon) = 1.00075 + 0.00182 \times \epsilon + 1.04567 \times 10^{-5} \times \epsilon^2 \quad (6)$$

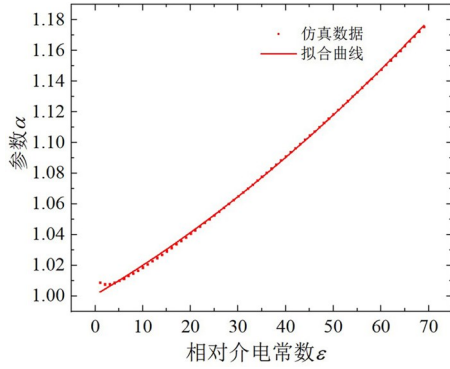


图3 参数  $\alpha$  的仿真数据及其拟合曲线

Fig. 3 Simulation data of parameter  $\alpha$  and its fitting curve

基于材料微扰理论, 微扰介质电导率的变化不会改变微扰腔的谐振频率, 但根据图 4 所示的谐振频率相对变化率与微扰介质电导率的仿真关系可见, 随着电导率的增加, 谐振频率的相对变化率也会增加. 仿真设置中, 相对介电常数设为 1, 电导率的值从 10.13 依次增加至 10.73, 每次递增 0.05 (7 GHz 下水溶液的电导率约为  $10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ). 本研究创新性地利用形状微扰理论来分析微扰介电电导率的影响.

由式 (2) 可知, 形状微扰对谐振腔谐振频率的影响与腔体发生形变的具体位置有关. 假设溶

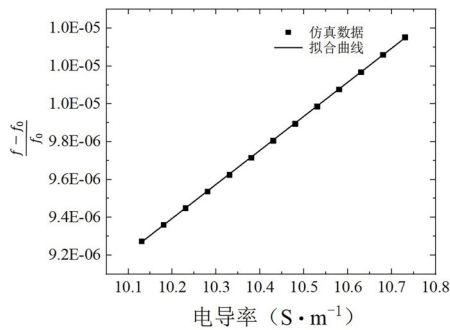


图4 谐振频率相对变化率与微扰介质电导率的关系

Fig. 4 The relationship between the relative change rate of the resonance frequency and the conductivity of the perturbation medium

液管中插入了相同体积的实心金属棒, 将式 (4) 和表 1 中的数据代入式 (2), 可得:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = 0.0024 \quad (7)$$

其意义为当腔中心的溶液细管中填充金属时, 根据形状微扰理论, 谐振频率将会增加, 且增加比率为 0.0024. 将式 (7) 的右端视为与电导率相关的函数, 设为  $\beta(\sigma)$ , 可得:

$$\begin{cases} \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \beta(\sigma) = 0.0024 \\ \lim_{\sigma \rightarrow 0} \beta(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

当  $\sigma$  为 0 时, 相当于谐振腔没有发生变化, 其谐振频率保持不变. 当  $\sigma$  接近于无穷大时, 谐振频率的变化率为 0.0024, 符合形状微扰原理. 结合式 (8), 将图 4 中的数据拟合成一条曲线, 得到  $\beta(\sigma)$  的表达式:

$$\beta(\sigma) = 0.0024 - \frac{0.0024 \times 253}{0.00954 \times \sigma^2 + 253} \quad (9)$$

**1.4 参数修正** 综上所述, 对于本研究设计的微扰谐振腔, 微扰介质的相对介电常数越大, 谐振腔的谐振频率越小; 微扰介质的电导率越大, 谐振腔的谐振频率越大. 根据表 1 中的结构参数以及式 (4) 中的  $E_\varphi$  表达式, 可以将谐振腔的谐振频率与溶液的相对介电常数和电导率之间的关系表示为:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = -\frac{\alpha(\epsilon) \times (\epsilon - 1) \times \int_0^r [J'_0(K_c r)]^2 r dr}{2 \int_0^K [J'_0(K_c r)]^2 r dr} + \beta(\sigma) \quad (10)$$

求解积分并化简, 最终得到:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = -3.556 \times 10^{-6} \times \alpha(\epsilon) \times (\epsilon - 1) + \beta(\sigma) \quad (11)$$

式 (11) 是本研究中结合了修正参数  $\alpha$  和  $\beta$  的微扰公式, 适用于高损耗溶液介质的微扰数学模型. 它不仅考虑了微扰介质相对介电常数相差较大时的影响, 还包含了电导率对谐振频率的影响. 与传统的微扰公式相比, 它更准确, 特别是定量分析应用于溶液测量的微扰技术时. 对于一般物质的水溶液, 不同浓度的溶液对应于不同的相对介电常数和电导率. 本研究根据实验测得的 PAM 溶液浓度与其相对介电常数和电导率之间



的关系,建立了谐振频率与PAM溶液浓度之间的数学关系,从而达到使用微扰谐振腔来测量PAM溶液浓度的目的.

## 2 实验测量

共配制浓度梯度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、浓度范围为  $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的九组 PAM 溶液用于实验测量. 使用的 PAM 粉末为非离子型,相对分子量为 500 万,纯度规格为分析纯. 实验过程中用热电偶温度计测得溶液温度为  $19^\circ\text{C}$ . 实验测量分两部分:一是 PAM 溶液介电参数的测量;二是不同浓度 PAM 溶液扰动下谐振腔谐振频率的测量,从而计算得出所测 PAM 溶液的浓度.

**2.1 PAM 溶液介电参数的测量** 与直接使用其他来源提供的 PAM 介电参数数据相比,通过在相同的实验环境中直接测出不同浓度 PAM 溶液的相对介电常数和电导率值更容易使最终的实验获得准确的结果. 本实验的测量过程如图 5 所示,实验测量系统包括 VNA (ZVA40, Rohde & Schwarz)、微波同轴探头 (Speag)、测量支架、计算机、烧杯和待测溶液等. 微波同轴探头用于测量各种浓度的 PAM 溶液,可以在很宽的频率范围内得到高精度的介电参数<sup>[16-17]</sup>. 将探头一端浸入溶液中,完成校准操作后进行测量,并在 PC 上收集数据,以进行后续分析. 该实验测量了 7 GHz 频率附近各种浓度的样品溶液的相对介电常数和电导率.

**2.2 不同浓度溶液下腔体谐振频率的测量** 本实验的测量过程如图 6 所示,实验测量系统包括 VNA、微扰谐振腔、待测溶液、溶液细管和注射器

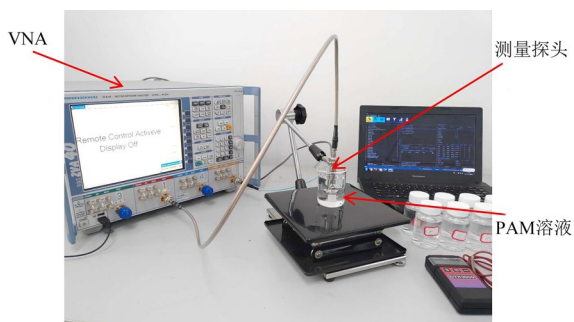


图 5 PAM 溶液介电参数的实验测量

Fig. 5 Experimental measurement for dielectric parameters of PAM solution

等. 将 VNA 与矩形波导相连,盛有溶液的烧杯放置于谐振腔下方,并通过注射器将溶液吸入细管中. 与直接注入相比,通过注射器吸入可以有效地消除气泡的影响. 测量得到微扰腔不同状态下的  $S_{11}$  参数曲线,曲线最低点对应的频率值即为谐振频率. 首先测得未扰动状态下谐振腔的谐振频率  $f_0$  为  $6.946012 \text{ GHz}$ ,然后在溶液管中依次吸入不同浓度的溶液,得到对应的  $S_{11}$  参数曲线用于后续分析.

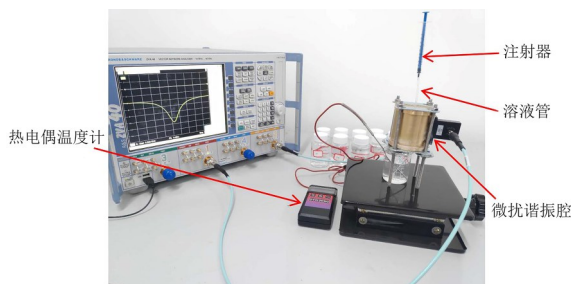


图 6 不同浓度溶液下扰动下腔体谐振频率的测量

Fig. 6 Measurement for cavity resonance frequency under perturbation in solution with different concentrations

## 3 结果与讨论

对实验测得的数据进行处理与分析,对于 PAM 溶液介电参数的测量实验得到如图 7 和图 8 所示的数据折线图,分别为所需频段下不同浓度的 PAM 溶液的相对介电常数和电导率值.

对各条折线进行线性拟合并整合所得到的拟合直线,分别获得 PAM 溶液的相对介电常数和

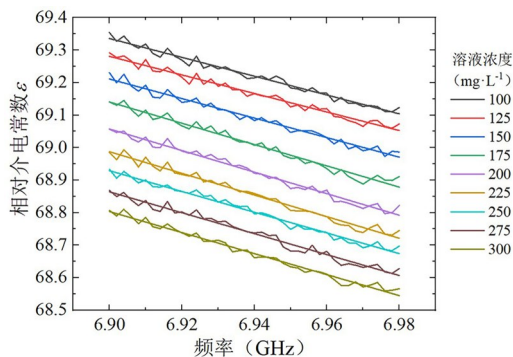


图 7 不同浓度的 PAM 溶液在所需频带中的相对介电常数及其线性拟合

Fig. 7 The relative dielectric constant of PAM solutions with various concentrations in the required frequency band and its linear fitting

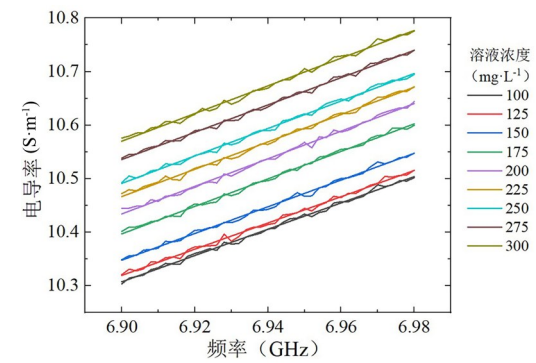


图8 不同浓度的PAM溶液在所需频带中的电导率及其线性拟合

Fig. 8 The conductivity of PAM solutions with various concentrations in the required frequency band and its linear fitting

电导率与频率 $f$  (GHz)和溶液浓度 $c$  (mg·L<sup>-1</sup>)之间的关系,如式(12)所示:

$$\begin{cases} \epsilon = -3.2 \times f + 91.71125 - 0.00281 \times c \\ \sigma = 2.52 \times f - 7.236950 + 0.00140 \times c \end{cases} \quad (12)$$

从图7和图8以及式(12)可以看出:对于同一浓度的PAM溶液,随着频率的增高,其相对介电常数逐渐减小,电导率逐渐增大;随着PAM溶液浓度的增大,溶液的相对介电常数逐渐减小,电导率逐渐增大.结合式(11)可知,微扰腔的谐振频率随着溶液浓度的增大而增大,即可以通过判断谐振腔谐振频率的变化情况得出PAM溶液的浓度值,从而实现对PAM溶液浓度的测量应用.

对于不同浓度溶液下谐振腔谐振频率的测量实验,得到了如图9所示的曲线,图中显示了在溶液细管中吸入不同浓度的PAM溶液时在所需频段下的谐振腔 $S_{11}$ 参数曲线.曲线最低处表示此时谐振腔向外反射出的信号功率最弱,即谐振腔具有最强的谐振强度,则最低点对应的横坐标的频率值即为该浓度溶液作为扰动时谐振腔对应的谐振频率.取九组溶液浓度和谐振频率的对应值作为实验测量值,同时联立式(11)和式(12)得到方程组,将测量得到的谐振频率代入该方程组,解出对应的浓度值,即得到九组溶液浓度和谐振频率的对应值作为理论计算值.九组PAM溶液浓度的测量结果如表2所示,其总体测量相对误差低于4.1%,平均测量相对误差为2.62%,证明了该测量方法的可行性.

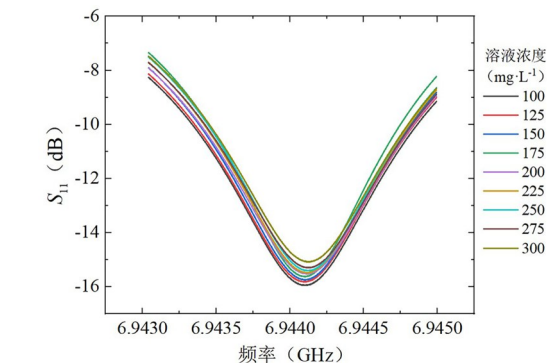


图9 不同浓度的PAM溶液扰动下的谐振腔 $S_{11}$ 参数曲线

Fig. 9 The  $S_{11}$  parameter curves of the resonant cavity when PAM solutions with various concentrations are used as perturbations

表2 基于微扰谐振腔的PAM溶液浓度测量结果与相对误差

Table 2 Measurement results and relative errors of PAM solution concentration based on perturbation resonator

实际值(mg·L <sup>-1</sup> )	实验测量值(mg·L <sup>-1</sup> )	测量相对误差
100	96.88	3.12%
125	120.19	3.85%
150	152.49	1.66%
175	177.66	1.52%
200	208.20	4.10%
225	228.46	1.54%
250	256.45	2.58%
275	279.70	1.71%
300	296.73	1.09%
平均		2.62%

将实验值与计算值进行比较(图10),可以看出,实验拟合直线与理论计算得出的曲线具有很好的一致性,说明实验数据反映的规律与理论计算相符合,表明了本研究中结合了参数修正的适用于高损耗溶液浓度测量的微扰数学模型的精确性.分别使用基于传统微扰理论(没有引入修正参数 $\alpha$ 和 $\beta$ )、只引入参数 $\alpha$ 和只引入参数 $\beta$ 的计算公式得出理论计算曲线,并以浓度100 mg·L<sup>-1</sup>对应的数据点为基准点平移这些曲线,以便在图10中做对比分析.由图10可见,未经过参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 修正的三条理论计算曲线,与实际情况相比,其谐振腔谐振频率随溶液浓度的变化率均有不同程度

的偏差. 并且, 由于理论计算一般以充入空气的状态为未受扰动的基准态, 随着扰动介质的介电特性越来越远离空气的对应值, 传统理论计算与实际情况的偏差会越来越大, 说明把谐振微扰技术应用于溶液等具有高损耗特性的材料测量时, 引入修正参数  $\alpha$  和  $\beta$  是十分必要的.

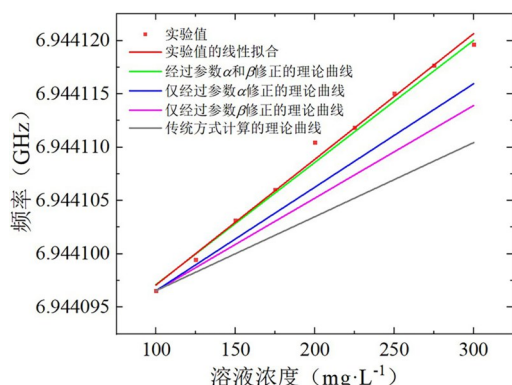


图 10 实验值与不同情况下的理论计算曲线的对比及实验值的线性拟合

Fig. 10 Comparison of experimental values with various theoretical calculated values and linear fitting of experimental data

## 4 结论

本文利用谐振微扰技术实现了对 PAM 溶液浓度的测量. 针对传统微扰技术用于溶液测量时具有的偏差, 结合材料微扰和形状微扰理论, 考虑微扰介质具有较大相对介电常数和电导率时对谐振腔谐振频率的影响, 提出对应的修正参数, 建立适用于高损耗溶液介质的微扰数学模型. 设计并制作了微扰谐振腔, 配制不同浓度的 PAM 溶液进行实验验证. 通过微波同轴探头测量了所需频段范围内各种浓度样品溶液的相对介电常数和电导率. 使用 VNA 对不同浓度溶液扰动状态下的谐振腔  $S_{11}$  参数进行测量, 并获得对应的谐振频率. 实验测量结果表明, 微扰腔的谐振频率随着 PAM 溶液浓度的增加而增大, 谐振腔谐振频率与溶液浓度的对应关系与理论计算一致, 浓度测量的总体相对误差低于 4.1%, 平均测量误差为 2.62%. 本文的研究工作为实现快速实时监测 PAM 溶液浓度的测量系统提供了理论基础.

## 参考文献

- [1] Pommella A, Preziosi V, Caserta S, et al. Using optical tweezers for the characterization of polyelectrolyte solutions with very low viscoelasticity. *Langmuir*, 2013, 29(29): 9224—9230.
- [2] Seo M S, Youn H J, Lee H L. Penetration control of surface sizing starch using cationic PAM and its effect on the bending stiffness of paper. *BioResources*, 2020, 15(3): 5489—5502.
- [3] Keating L R, Lacourse W R. Indirect pulsed electrochemical detection following high-performance reversed-phase liquid chromatography. *Talanta*, 2019 (199): 155—163.
- [4] Örmeci B, DiMassimo R. Dewatering optimization with in-line and real-time measurement of polymer: Results from full-scale treatment plants. *Water Science and Technology*, 2017, 76(6): 1318—1323.
- [5] 齐哈兵, 李舒婷, 王秋实, 等. 聚丙烯酰胺溶液的光谱特性及其浓度光学检测. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1466—1470. (Qi H B, Li S T, Wang Q S, et al. Optical property and concentration optical detection of polyacrylamide solution. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1466—1470.)
- [6] 罗春霞, 张龙贵, 侯家祥, 等. 驱油用聚丙烯酰胺分子量测试的光散射研究. *高分子学报*, 2012(3): 313—317. (Luo C X, Zhang L G, Hou J X, et al. Molecular weight characterization of polyacrylamide for oil recovery by multiangle light scattering. *Acta Polymerica Sinica*, 2012(3): 313—317.)
- [7] Ishino S. Microwave-heating characteristics of ferrite-particle-containing silicone. *IEICE Electronics Express*, 2019, 16(5): 20170609.
- [8] Wang D, Wang Z H, Lee A, et al. Highly sensitive nano-aerosol detection based on the whispering-gallery-mode in cylindrical optical fiber resonators. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50(12): 1366—1374.
- [9] Peter R, Fischerauer G. Measurement of axially inhomogeneous permittivity distributions in resonant microwave cavities. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(6): 2433—2442.
- [10] Chao H W, Chang T H. Wide-range permittivity measurement with a parametric-dependent cavity.

- IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(10): 4641—4648.
- [11] Steiner C, Malashchuk V, Kubinski D, et al. Catalyst state diagnosis of three-way catalytic converters using different resonance parameters: A microwave cavity perturbation study. *Sensors*, 2019, 19(16): 3559.
- [12] Peter R, Fischerauer G. De-embedding method for strongly coupled cavities. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(4): 2025—2033.
- [13] Yu C Y, Li E, Zhang Z Y, et al. Broadband complex permittivity measurements of nematic liquid crystals based on cavity perturbation method. *Liquid Crystals*, 2020, 47(1): 89—98.
- [14] Bonnet M, Burczyński T, Nowakowski M. Sensitivity analysis for shape perturbation of cavity or internal crack using BIE and adjoint variable approach. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(9): 2365—2385.
- [15] Li Q, Xiao X, Fu H, et al. Glucose solution concentration detection using  $TE_{011}$  microwave resonant cavity. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2018, 32(14): 1824—1833.
- [16] Bansal N, Dhaliwal A S, Mann K S. Dielectric characterization of rapeseed (*Brassica napus* L.) from 10 to 3000 MHz. *Biosystems Engineering*, 2016 (143): 1—8.
- [17] Rana V A, Pandit T R. Microwave dielectric relaxation spectroscopy of paracetamol and its aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 2020 (314): 113673.

(责任编辑 杨可盛)