

聚合物及其混合物的太赫兹介电性质测定与分析方法

张天尧^{1, 2, 3}, 张朝晖^{1, 2*}, Arnold Mark A.³

1. 北京科技大学自动化学院仪器科学与技术系, 北京 100083
2. 北京市工业波谱成像工程技术研究中心, 北京 100083
3. Department of Chemistry, University of Iowa, Iowa City 52246, USA

摘要 聚合物材料因其对太赫兹波的高透过率以及良好的塑形能力在太赫兹研究中扮演了重要的角色, 由于材料的介电特性直接关系着折射率、极化率等重要性质, 不同的应用场合通常需要材料呈现出特殊的太赫兹介电响应, 一方面可以选取不同的聚合物材料, 另一方面可以通过多种聚合物的混合实现材料介电性质的调制。聚合物材料合理的选取和设计建立在材料太赫兹介电精确表征之上, 然而利用太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)对聚合物材料进行透射式太赫兹介电表征时, 材料内部空气孔隙的存在会影响表征结果的复现性, 同时也会影响共混聚合物介电性质的分析和预测。因此以 Landau, Lifshitz, Looyenga(LLL)模型为基础提出了考虑空气影响的介电分析模型, 并选取了在太赫兹研究中广泛使用的聚合物材料聚乙烯(PE)和聚四氟乙烯(PTFE)对模型的有效性和稳定性加以验证, 展开了两种材料单质和混合物两方面的介电分析。在太赫兹波透射样品之后的相位变化信息中提取出样品的介电常数, 同一种物质制备的样片间太赫兹介电谱存在明显差异, 使用包含气隙影响的 LLL 模型处理实验数据后, 样品介电常数中空气的介电影响被移除, 从而得到了两种材料的本征介电常数, 在此基础上, 使用测得的本征介电常数和混合物样品中两种材料的体积占比信息代入包含气隙影响的 LLL 模型计算得到了不同配比混合物的太赫兹介电常数的模拟值, 并与 THz-TDS 实验获取的实验值进行了对比。利用所提出的有效介质模型, 聚乙烯和聚四氟乙烯在 $10\sim 40\text{ cm}^{-1}$ 波段内移除空气影响后的平均介电常数为 $2.315\pm 0.003(\pm 0.13\%)$ 和 $2.109\pm 0.003(\pm 0.14\%)$, 在不同重量、不同厚度的单组份样品间模型测定的聚合物介电常数保持了良好的重复性, 在对混合物的太赫兹介电性质测定与分析中, 利用模型计算的混合物介电常数模拟值与 THz-TDS 测定的介电常数实验值保持了高度线性相关, 其相关系数为 0.964 3, 全局相对误差为 1.08%, 体现了模型的可靠性。提出的介电分析模型可以扩展到更多的高分子材料单质及其混合物的太赫兹介电性质表征中, 对太赫兹波段的共混聚合物材料设计具有参考价值。

关键词 聚合物; 太赫兹光谱; 介电常数; 有效介质理论

中图分类号: O657.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1689-06

引言

高分子聚合物材料如聚乙烯(Polyethylene, PE)、聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE 或 Teflon)、聚酰亚胺(Polyimide, PI 或 Kapton)、聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA 或 Acrylic), 聚苯乙烯(Polystyrene, PS)等由于在 $0.3\sim 3\text{ THz}(10\sim 100\text{ cm}^{-1})$ 波段没有明

显吸收特征, 被认为是“太赫兹透明”材料, 一方面广泛应用于对强吸收物质进行太赫兹吸收特征测定时的稀释和塑形^[1], 扮演着类似红外光谱分析中溴化钾的作用; 另一方面可以用作太赫兹分光镜^[2]、透镜^[3]等太赫兹器件的制备材料。由于材料的介电特性直接关系着折射率、极化率等重要理化性质^[4], 在面对不同的应用场合时, 通常需要聚合物材料表现出不同的太赫兹介电响应, 一方面可以选取不同的聚合物材料^[5], 另一方面也可以通过多种聚合物合理配比混合

收稿日期: 2018-11-20, 修订日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302007), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-BD-18-002A), 国家留学基金委研究生公派联合培养项目(201506460064)资助

作者简介: 张天尧, 1991年生, 北京科技大学仪器科学与技术系博士研究生 e-mail: zh71070@163.com

* 通讯联系人 e-mail: zhangzhaohui@ustb.edu.cn

制备具有特定介电响应的共混聚合物^[6]。

对聚合物材料的太赫兹介电分析已经引起了研究者的关注^[4-5, 7-9]，然而对于同一种聚合物材料在不同的研究报道给出的介电常数也存在差异，以 PE 和 PTFE 为例，在 1 THz 处的介电常数分别在 2.33~2.50 和 2.06~2.10 范围内都有报道^[7-9]。我们认为其原因是不同报道中所使用的聚合物样品致密度不同，而存在于样品中的空气孔隙作为另一种组份影响着样品的整体介电性质，这种差异对合理选取聚合物材料造成了影响，也不利于共混聚合物的设计。

为此，本文基于 Landau, Lifshitz, Looyenga (LLL) 理论^[10]提出了将空气孔隙影响考虑在内的有效介质模型，选择了两种常见的太赫兹透明材料聚乙烯 (PE) 和聚四氟乙烯 (PTFE) 对模型展开验证，对每一种材料，我们制备了不同重量的单质样品进行了 THz-TDS 实验，获取样片的太赫兹介电谱后使用有效介质模型移除了样品内空气对实验结果的影响，得到了两种单质材料自身的太赫兹介电常数，结果具有高度复现性。在此基础上，又制备了两者的混合物样品进行了太赫兹介电常数的实验测定，并利用单质的介电常数和 LLL 模型对混合物的太赫兹介电常数进行了理论模拟，实验结果与模拟结果保持了高度线性相关，证明了处理方法的可行性，能够为太赫兹波段聚合物材料介电响应的设计提供理论参考。

1 包含气隙影响因素的 LLL 模型

在使用 THz-TDS 对聚合物材料进行表征时，材料一般压制为图 1 中所示的样片，样片呈现出的总体太赫兹介电响应需要通过有效介质理论进行研究，有效介质模型是指通过混合物内各组分自身的介电性质结合相应的混合物中所占体积比描述混合物总体的介电性质。

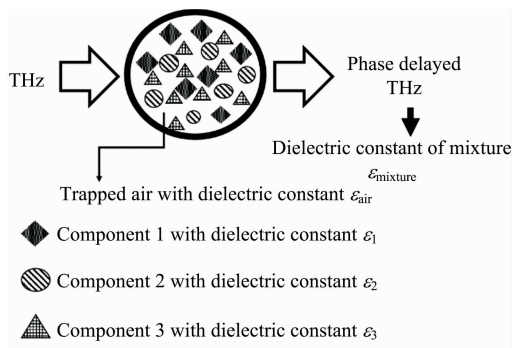


图 1 THz-TDS 中样品介质组成示意图

Fig. 1 General description of mixture sample prepared for THz-TDS

常见的有效介质模型列于表 1，其中前三者在表征混合物介电特性时需要获知样品内部各介质的颗粒形状，而 LLL 模型则没有这一限制，适用于无规则形状介质组成的混合物。另一方面，LLL 模型的有效使用要求混合物中各组分间满足较小的介电差异，Scheller^[10]曾报道了 LLL 模型在碳酸钙与聚丙烯混合物中的成功应用，其介电差异为 6.63，与之

相比，聚合物之间以及聚合物与空气之间的介电差异相对较小，因此，我们选用 LLL 模型作为有效介质模型。此模型将样品的整体介电常数的三次方根描述为样品内各组分介电常数三次方根的线性组合，其中线性组合系数为各组分在混合物中的体积占比。

表 1 常见有效介质模型及其适用的介质形态

Table 1 Effective medium theories and particle shape requirements

Effective medium theory	Particle shape
Maxwell-garnett (MG)	Spheres
Polder and van Santen (PvS)	Ellipsoidal
Bruggeman (BM)	Ellipsoidal
Landau, Lifshitz and Looyenga (LLL)	Arbitrary

如图 1 所示，物理混合压制的聚合物样品中孔隙的存在不可避免，为了将空气对整体的介电影响也应考虑在内，我们对 LLL 模型加以改进，表达形式为：

$$\epsilon_{\text{mixture}}^{1/3} = \left(\sum_{i=1}^n v_i \epsilon_i^{1/3} \right) + v_{\text{air}} \epsilon_{\text{air}}^{1/3} \quad (1)$$

其中， $\epsilon_{\text{mixture}}$ 、 ϵ_i 和 ϵ_{air} 分别代表样品、样品中各组份自身以及空气的介电常数， v_i 和 v_{air} 分别为各组份以及空气在混合物中的体积占比，即单组份体积与样品整体体积之比，其中单组份体积通过制作样品时各组份的质量和密度算得，而混合物样品体积由几何方法得到，以本文所用的碟状样片为例，由厚度和直径即可算得。而空气体积占比 v_{air} 则满足

$$v_{\text{air}} = 1 - \sum_{i=1}^n v_i \quad (2)$$

可以看出，当样品为单质样品 ($n=1$) 时，模型仍将样品看作单一组分与空气的混合物，这表明对同一种介质，当呈现出的整体密度不同时，介电常数也不同，且整体致密度越高介电常数越高^[11]。在对实验结果的分析中，此模型的使用有两种意义。第一，对于聚乙烯和聚四氟乙烯的单质样片，需要使用模型去除样片介电信息中空气的影响，获取聚乙烯和聚四氟乙烯的自身的介电常数；第二，对于聚乙烯和聚四氟乙烯的混合物样品，利用获取的单质本征介电常数，结合两组份的体积占比，使用模型预测混合物样品介电常数并与实验值进行对比。

2 实验部分

2.1 样品制备和数据采集

本文所涉及的聚合物样品有聚乙烯 (Polyethylene, PE) 和聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE)，分别购置于 Sigma-Aldridge 和 Micro-Powders。为了从稳定性和有效性两方面考察含气隙影响的介电模型，我们设计制备了三组样品，分别为聚乙烯和聚四氟乙烯各自的单质样品以及二者的混合物样品。其中对于每一种聚合物，分别制备了 200~600 mg 以 100 mg 为间隔的 5 个样品，而混合物样品的制作是通过控制混合物中某一成分的质量比例 0~100% 以 10% 为间

隔增加或减少,共制备了 11 个样品。粉末状的样品置于内径 13 mm 的样片模具中,置入压片机(Specac GS15011)以五吨的压力压制五分钟制备为圆柱状样片,压片过程中真空泵始终作用于压片模具以尽可能限制样片中空气尤其是水蒸气的含量,在压片结束以后,样品被放置于干燥箱中两天以释放其中残存的压力,待其几何性质稳定后^[12],测量样片的直径和样片厚度。

本文中使用的透射式太赫兹时域光谱仪为 TPS 1000D (英国 TeraView 公司),其具体的工作原理和光路图可见文献^[13],此处不再赘述。所有样品的太赫兹时域数据的采集流程是一致的,首先在光路中没有样品的情况下采集参考信号,之后将样品置于太赫兹波焦点处连续采集三次样品信号,为了降低随机误差的影响,每一次信号采集是 1 800 次快速扫描后的平均结果,为了降低实验系统误差对实验结果的影响,我们对每一组样品以随机顺序进行了三轮数据采集,故对每一个样品进行了 9 次信号采集。进行信号采集的过程中,向样品室中持续通入干燥空气以驱赶水蒸气。仪器的快速扫描速度设置为 $30 \text{次} \cdot \text{s}^{-1}$,故每次信号采集的时间为 1 分钟,我们对样品架进行了改造,使其在信号采集一次过程中垂直于太赫兹波进行旋转一周,用以降低样品不均匀性对实验结果的影响。

2.2 数据处理

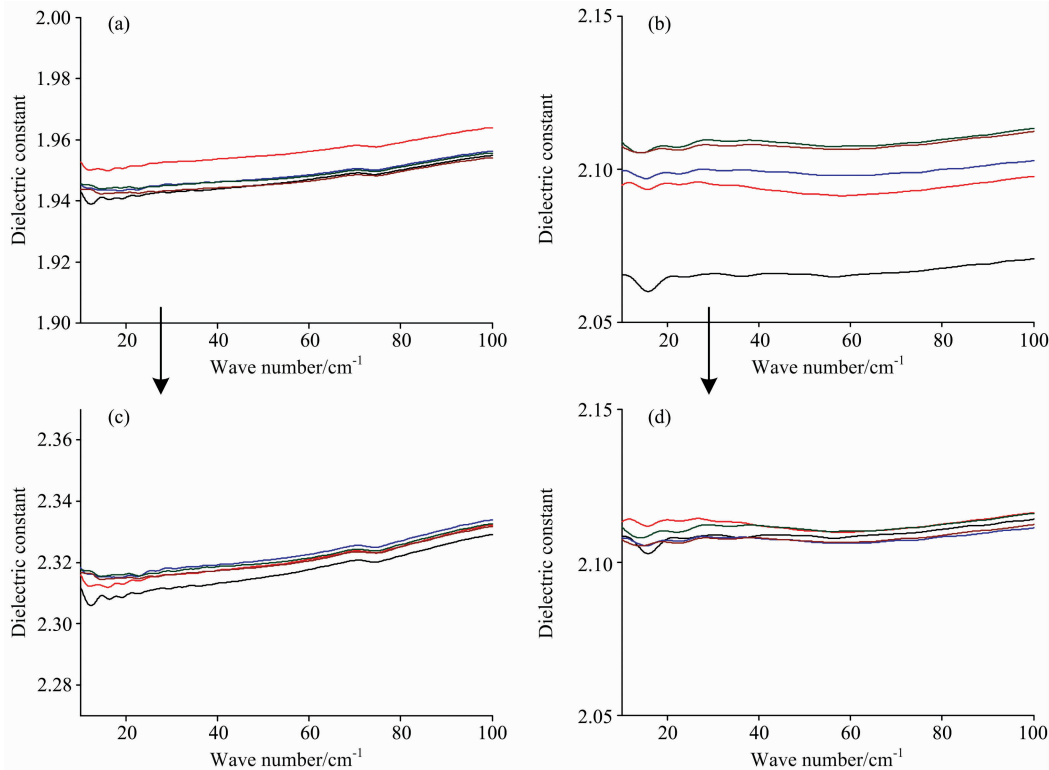


图 2 实验获取的含有空气的聚乙烯(a)和聚四氟乙烯样片(b)的太赫兹介电常数谱,以及二者经过 LLL 模型移除空气影响后的本征太赫兹介电常数谱(c)(d),样品编号对应着不同重量的样片

Fig. 2 Experimental dielectric spectra calculated from THz-TDS phase delay (a, b) and corresponding intrinsic dielectric spectra processed with LLL model (c, d) of PE(left) and PTFE (right), sample labels indicate different sample masses and thicknesses

在完成信号采集后,分别对时域中的参考信号 $E_r(t)$ 和样品信号 $E_s(t)$ 进行傅里叶变换,将信号由时域转换到频域,利用频域信号中的相位信息 $\varphi_s(\omega)$ 和 $\varphi_r(\omega)$ 结合样品厚度计算样品的折射率 $n(\omega)$

$$n(\omega) = 1 - \frac{c[\varphi_s(\omega) - \varphi_r(\omega)]}{\omega d} \quad (3)$$

式(3)中, c 是光速, d 是样品厚度, ω 是角频率。在此基础上,通过式(4)计算其介电常数

$$\epsilon = n^2 - \kappa^2 \quad (4)$$

其中 κ 为消光系数,对于聚乙烯和聚四氟乙烯以及其混合物来说,其数值远远小于折射率,故在实际计算中实介电常数直接取为折射率的平方^[6]。

3 结果与讨论

3.1 聚乙烯和聚四氟乙烯的单质本征介电常数测定

对于两组单质样片的太赫兹时域信号,经过傅里叶变换和相位信息的处理[式(3)和式(4)]后,得到图 2(a, b)所示的样片介电谱,每张图中的五条谱线来自五个不同厚度的样片,可以看出 PE 的介电谱具有以 76cm^{-1} 为中心频率的反常色散特征^[12],对应 PE 在该位置的一个弱吸收,而 PTFE 则没有任何色散特征。

如前文描述,同一种物质的样品由于压片过程空气含量的不可控,使得样品间介电常数也存在差异,体现在图 2(a, b)中为同一种物质的样品介电谱线存在明显的分离,需要使用有效介质模型移除空气的干扰,LLL 模型在这种情况下为两组分形式(图 3),且变形为

$$\epsilon_p = \left(\frac{\epsilon_{\text{pellet}}^{1/3} - (1 - v_p)\epsilon_{\text{air}}^{1/3}}{v_p} \right)^3 \quad (5)$$

其中 v_p 为聚合物的体积分数,由聚合物的质量和密度得出的聚合物体积与样品实际体积作比得到,其中聚乙烯的密度

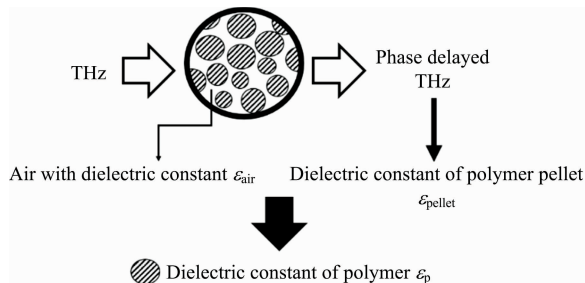


图 3 聚合物单质样品中提取聚合物介电常数示意图

Fig. 3 Extraction of the THz dielectric constant of polymer from experimental data

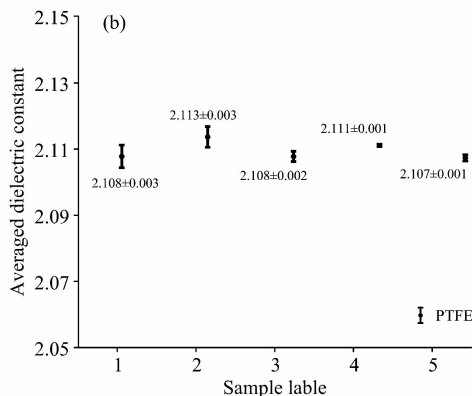
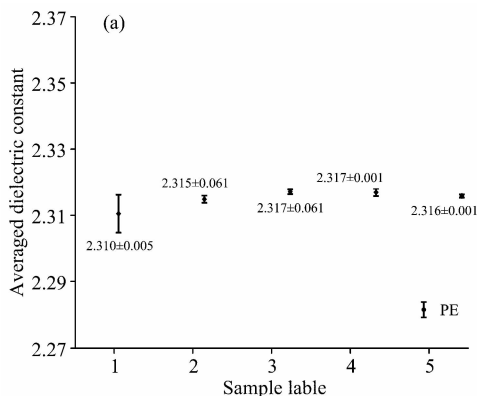


图 4 移除空气影响后,各样品中提取出的 PE(a)和 PTFE(b) $10\sim 40\text{ cm}^{-1}$ 间介电常数的平均值,误差棒代表着对同一个样品的九次实验数据采集后结果的标准差

Fig. 4 Averaged dielectric constant ($10\sim 40\text{ cm}^{-1}$) of PE (a) and PTFE (b). Error bar stands for the standard deviation between same sample measurements

从图 5 中可以观察到,对于聚乙烯和聚四氟乙烯的混合物样品,其介电常数并不会随着某一成分质量占比的增加而单调增长或下降,在聚乙烯 30 Wt% 而聚四氟乙烯 70 Wt% 时介电常数达到最高,造成这一现象的原因是混合物样品中空气的含量,聚乙烯在压制成型的过程中会含有相对多的空气(体积占比 25% 左右)而聚四氟乙烯在压制过程中包含的空气远远小于聚乙烯(体积占比 1% 以内);在样品完全由聚乙烯组成时,样品中空气的体积占比为 25% 左右,随着样品中聚四氟乙烯比例增加,介电常数为 2.315 的聚乙烯会影响混合物的介电常数下降,同时聚四氟乙烯也置换了介电常数为 1 的空气影响混合物介电常数上升,因此在质量比例达到 70 Wt% 之

使用了 Sigma-Aldrich 提供的颗粒密度 $0.941\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,由于 Micro Powders 提供的聚四氟乙烯密度为 $2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 精度不足,在此我们使用了实测的聚四氟乙烯压制后的最大密度 $2.241\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,将实验得到的样品介电常数 ϵ_{pellet} 代入式(5)即可提取聚合物的本征介电常数 ϵ_p 。

对聚乙烯和聚四氟乙烯的处理结果分别展示于图 2(c)和(d)。对比图 2 中(a, b)和(c, d)可以发现,在利用 LLL 模型移除了空气影响之后,在相同的纵坐标尺度内,可以明显看出聚乙烯和聚四氟乙烯样品间介电谱差距的缩小,一致性有了显著提高。

在此,我们将每条介电谱信噪比最高且没有异常色散特征的 $10\sim 40\text{ cm}^{-1}$ 之间的介电常数取平均,得到其平均介电常数列于图 4,从中可以看出实验结果的高度一致性,最终将五个样品的测试结果进行平均,得到聚乙烯和聚四氟乙烯的本征介电常数为 2.315 ± 0.003 和 2.109 ± 0.003 , 0.13% 和 0.14% 的相对误差体现了研究方法良好的重复性。

3.2 混合物样品的太赫兹介电常数实验测定结果

两种聚合物不同配比混合物的太赫兹实验介电谱如图 5(a),图右侧的百分比代表了样品中聚乙烯在混合物中的质量占比,同时我们再次对 $10\sim 40\text{ cm}^{-1}$ 之间的介电常数取平均以观察其变化趋势[图 5(b)]。

前,聚四氟乙烯置换出的空气的介电影响高于聚乙烯的介电影响,使混合物整体介电常数呈上升趋势,在 70 Wt% 之后,聚四氟乙烯置换聚乙烯的介电影响开始占据主导,整体介电常数呈下降趋势。这一现象表明了共混聚合物的介电设计将空气的介电影响考虑在内的重要性。

3.3 混合物 LLL 理论模拟与实验结果对比

我们使用提出的有效介质模型模拟了混合物样品的介电常数,此时样品介质组成如图 6 所示。故使用的 LLL 模型为三组份形式其表达式为式(6)

$$\epsilon_{\text{LLL-model}} = [v_{\text{PE}}\epsilon_{\text{PE}}^{1/3} + v_{\text{PTFE}}\epsilon_{\text{PTFE}}^{1/3} + (1 - v_{\text{PE}} - v_{\text{PTFE}})\epsilon_{\text{air}}^{1/3}]^3 \quad (6)$$

式中 v_{PE} 和 v_{PTFE} 分别代表聚乙烯和聚四氟乙烯在混合物样品

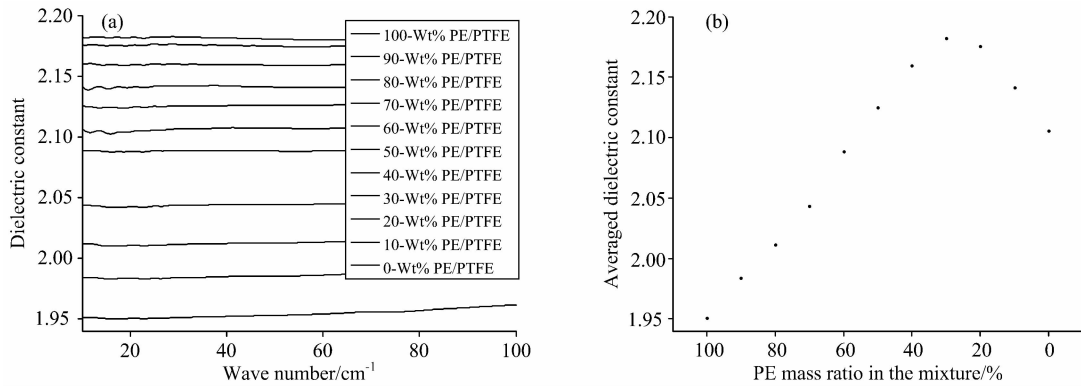


图 5 实验测定混合物样品的介电常数谱 (a) 以及 10~40 cm⁻¹ 范围内平均介电常数 (b), 图中百分比为 PE 在混合物中的质量占比, 误差棒代表着对同一个样品的九次实验数据采集后结果的标准差

Fig. 5 Dielectric spectra (a) and averaged dielectric constants over 10~40 cm⁻¹ (b) for pellets prepared from mixtures of PE and PTFE. Percentage values correspond to the weight-percent PE within the pellet

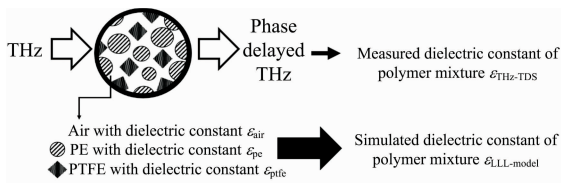


图 6 共混聚合物样品太赫兹介电常数的实验获取和理论模拟示意图

Fig. 6 Prediction of THz dielectric constant of PE and PTFE mixture with LLL model

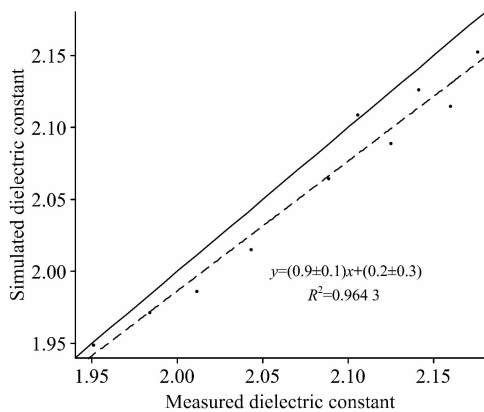


图 7 混合物样品实验测得的介电常数与有效介质模型模拟的介电常数对比

实线为理想情况, 虚线为线性拟合结果, 误差棒为同一样品九次测量值间的标准差

Fig. 7 Correlation between measured values for the dielectric constants and values calculated from the LLL-model

Error bar indicates the standard deviation between same sample measurements

中的体积占比, 获取方式与式(5)相同, 使用的聚合物密度为 0.941 和 2.241 g · cm⁻³, ε_{PE} 和 ε_{PTFE} 分别为由单质实验确定的聚乙烯和聚四氟乙烯的在相应密度下的介电常数 2.315 和 2.109, 由此模型计算的混合物实介电常数模拟值与实验值之间的对比展现于图 7。

由图 7 可知, 实验值和预测值保持了较高的线性相关性, 相关系数 r 达到了 0.9643, 将图 7 中的实验数据和有效介质理论模拟结果带入式(7)计算模拟结果与实验结果之间的相对误差为 1.08%, 我们认为造成系统偏移的重要因素是样品几何参数的获取的不确定性, 如厚度、直径等, 这直接影响了样品体积以及样品中各组份体积占比的计算, 从而影响有效介质模型的使用。

$$\text{Relative_Error} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\epsilon_{\text{THz-TDS},i} - \epsilon_{\text{LLL-model},i}}{\epsilon_{\text{THz-TDS},i}} \right|}{N} \times 100\% \quad (7)$$

4 结 论

以 Landau, Lifshitz, Looyenga (LLL) 模型为基础提出了考虑空气孔隙影响的介电分析模型, 对聚乙烯和聚四氟乙烯两种“太赫兹透明”的聚合物材料及其共混聚合物展开了太赫兹介电分析, 首先对于二者的单质样品利用两组分 LLL 模型移除了样片介电常数中空气的影响, 得到了具有高度一致性的聚乙烯和聚四氟乙烯单质的介电常数 2.315 ± 0.003 (±0.13%) 和 2.109 ± 0.003 (±0.14%), 在此基础上, 利用获取的本征介电常数和各组份的实际体积占比代入三组分 LLL 模型预测了不同配比混合物的介电常数, 并与实验测定的共混物的太赫兹介电常数进行了比较, 预测值与实际实验值保持了高度线性相关性, 全局相对误差仅为 1.08%。文章所提出的介电分析模型可以扩展到更多的高分子材料单质及其混合物的太赫兹介电性质表征中, 无需考虑材料是否具有明显的太赫兹吸收特性, 对太赫兹波段的共混聚合物材料设计具有参考价值。

References

- [1] ZHANG Tian-yao, ZHANG Zhao-hui, ZHAO Xiao-yan, et al(张天尧, 张朝晖, 赵小燕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(8): 2073.
- [2] Jördens C, Chee K L, et al. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010, 31(2): 214.
- [3] Scherger B, Scheller M, Jansen C, et al. Applied Optics, 2011, 50(15): 2256.
- [4] Zhang T, Zhang Z, Arnold M A. Applied Spectroscopy, 2019, 73(3): 253.
- [5] Wietzke S, Jansen C, Reuter M, et al. Journal of Molecular Structure, 2011, 1006(1-3): 41.
- [6] Agrawal H, Awasthi K, Saraswat V K. International Journal of Scientific Research in Physics and Applied Sciences, 2015, 3(1): 6.
- [7] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, et al. Journal of Applied Physics, 2011, 109(4): 043505.
- [8] Jin Y S, Kim G J, Jeon S G. Journal of the Korean Physical Society, 2006, 49(2): 513.
- [9] Winnewisser C, Lewen F, Helm H. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1998, 66(6): 593.
- [10] Scheller M, Wietzke S, Jansen C, Koch M. Journal of Physics D: Applied Physics 2009, 42(6): 065415.
- [11] Nelson S O. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(5): 2033.
- [12] Raglione M E, Zhang T, Arnold M A. International Journal of Experimental Spectroscopic Techniques, 2018, 3: 18.
- [13] Smith R M, Arnold M A. Applied Spectroscopy Reviews, 2011, 46(8): 636.

Dielectric Analysis of Polymeric Materials and Mixtures Using Terahertz Time Domain Spectroscopy

ZHANG Tian-yao^{1, 2, 3}, ZHANG Zhao-hui^{1, 2*}, Arnold Mark A.³

1. Department of Instrumentation Science, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center of Industrial Spectrum Imaging, Beijing 100083, China

3. Department of Chemistry, University of Iowa, Iowa City 52246, USA

Abstract Due to the transparency to the terahertz waves, many polymeric materials have been demonstrated various important applications as optical components as well as dilution matrix for terahertz research. Certain dielectric responses are usually preferred considering different application circumstances. The adjustment of dielectric property could be achieved by proper selection of polymer as well as design of polymer blend by physically mixing. Methodology is well described in this study for the terahertz dielectric analysis of polymeric materials and their mixtures in a quantitative manner, as exemplified by experiments with polyethylene (PE) and polytetrafluoroethylene (PTFE) for their widespread applications in terahertz research. Following the regular procedure of measuring the THz dielectric property of single component pellets with the phase delay information provided by the coherent detection of terahertz time domain spectroscopy, the intrinsic dielectric constants of PE and PTFE were determined as 2.315 ± 0.003 ($\pm 0.13\%$) and 2.109 ± 0.003 ($\pm 0.14\%$) by removing the influence of trapped air utilizing effective medium theory (EMT). These measured values were then used to simulate the THz dielectric constants of mixture pellets consisting of PE and PTFE at several mass ratios combining with EMT. The comparison between simulated values and experimental values of mixture samples presents a well linear correlation with $R^2 = 0.9643$ while the overall relative difference is 1.08%.

Keywords Polymeric materials; Terahertz spectroscopy; Dielectric constant; Effective medium theory

(Received Nov. 20, 2018; accepted Mar. 14, 2019)

* Corresponding author