

# 钴纳米粒子改性石墨烯复合材料的电磁性能

张海琴, 徐双双, 陈元, 肇研

(北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 采用化学镀的方法, 先后用氯化亚锡敏化、氯化钯活化, 在石墨烯表面沉积钴纳米粒子。XRD、TEM 结果显示钴在石墨烯表面的晶体结构和含量因钴前驱体盐和还原剂浓度而异。电磁测试结果表明: 钴含量的增加和石墨烯的还原均能提升 Co-RGO 的电导率; 同时, Co-RGO 纳米复合材料由于具有磁损耗和大量界面引入的介电损耗, 吸波性能优异, Co-RGO\*1 在 1~18 GHz 频段内反射率低于 -10 dB 的频宽约为 4 GHz, Co-RGO\*2 在 26.5~40 GHz 频段内反射率均小于 -23 dB。

**关键词:** 石墨烯; 复合材料; 钴; 纳米粒子; 电磁性能

**中图分类号:** TB34

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)12-3785-07

吸波材料是一类可以将入射到其表面的电磁波转化为热能或其他形式的能量而耗散掉, 从而减少电磁波反射的功能材料<sup>[1]</sup>。根据电磁波在材料内部的衰减机制, 吸波材料可分为电阻型、电介质型和磁介质型。电阻型吸波剂中载流子的运动会引起宏观电流, 能量以热能的形式耗散, 所以电导率越大, 能量损耗越大。电介质型吸波剂的介电损耗角正切较大, 其机理是通过介质的电子极化、离子极化、分子极化、界面极化等衰减、吸收电磁波。磁介质型吸波剂具有较高的磁损耗, 通过畴壁共振和自然共振、后效损耗等磁极化机制衰减、吸收电磁波<sup>[2-5]</sup>。

传统的吸波材料主要有铁氧体、磁性金属微粉(如羰基铁粉、羰基镍粉等)、钛酸钡、碳材料(如炭黑、石墨等)。铁氧体是目前研究较多且相对较成熟的一类吸波剂, 吸波效率高、频段宽<sup>[6]</sup>, 缺点是密度大。羰基铁粉也是一种磁介质型吸波剂, 其缺点与铁氧体类似<sup>[7]</sup>。钛酸钡是一种电介质型吸波剂, 耐高温性能好, 但吸波强度低且频段较窄<sup>[8]</sup>。炭黑、石墨等材料最大的特点是密度小, 属于电阻型吸波剂, 但吸波性能较差<sup>[9]</sup>。由于传统吸波材料在实际应用中存在的一些问题, 于是对新型吸波材料提出了“薄、轻、宽、强”的要求。

目前吸波材料的设计正朝着介电和磁性复合的方向发展, 通过复合, 既可以保留各组分各自的优点, 又可以通过调节介电常数和磁导率常数使之匹配, 发挥出更优异的吸波性能<sup>[10,11]</sup>。

石墨烯导电性好、介电常数高, 在电磁场的作用下易出现极化弛豫从而损耗电磁波。Chao Wang 等人<sup>[12]</sup>的研究工作表明, 化学还原的氧化石墨烯带有的残余缺陷和含氧官能团不仅能提高材料的阻抗匹配特性, 还能引入缺陷极化弛豫和官能团的偶极子极化弛豫, 从而有利于电磁波的吸收。石墨烯独特的二维片层结构和大的比表面积又使其成为负载无机纳米粒子的理想载体。例如石墨烯表面负载上  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[13]</sup>、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ <sup>[14]</sup>、 $\text{Co}_3\text{O}_4$ <sup>[15]</sup>等纳米粒子后, 吸波性能都获得了很大的提高。

钴(Co)具有独特的铁磁性, 但许多研究都只能通过高温的反应条件在石墨烯表面沉积上钴粒子<sup>[16,17]</sup>。利用前处理工艺在还原氧化石墨烯(RGO)表面沉积上分散性较好的钯(Pd)纳米粒子, 再通过化学镀在其表面沉积上金属钴粒子, 同时将 RGO 进一步还原。由于 RGO 具有优异的介电损耗, 钴具有较好的磁损耗, 两者复合后电偶极子和磁矩的耦合作用可能产生更强的电磁损耗, 有望进一步提高材料的吸波性能。

## 1 实验

### 1.1 试剂和仪器

实验所用石墨(粉)由国药集团化学试剂有限公司生产, 颗粒大小 20  $\mu\text{m}$ , 纯度 99%。硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )、高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ )、浓硫酸(98% $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、过氧化氢(30% $\text{H}_2\text{O}_2$ )、浓盐酸(37%)、柠檬酸钠( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 北京市科学技术委员会基金(D141100002414001); 航空基金(2013ZF51073)

作者简介: 张海琴, 女, 1992 年生, 硕士, 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191, 电话: 010-82317127, E-mail: 993099466@qq.com

氨水(NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)、氯化亚锡(SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O)、氯化钯(PdCl<sub>2</sub>)、次亚磷酸钠(NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>·7H<sub>2</sub>O)、七水合硫酸钴(CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)均为分析纯。

实验中用到的仪器设备主要有超声波清洗器、循环水真空泵、真空干燥箱、集热式恒温加热磁力搅拌器、高速台式离心机、场发射透射电子显微镜(FETEM)、X射线衍射仪(XRD)、矢量网络分析仪等。

### 1.2 化学镀法制备 Pd-Co/RGO 纳米复合材料

“敏化”、“活化”是化学镀前处理中非常重要的 2 个步骤。Pd 活化是目前较成熟且常用的活化工艺。取 250 mg 氧化石墨烯溶于去离子水中,超声剥离得到氧化石墨烯。称量 18.8 g 的 SnCl<sub>2</sub> 溶于浓盐酸中,加入到上述溶液中,起“活化”作用,再加入适量的去离子水配成 250 mL 混合溶液,在 60 °C 水浴超声 60 min 后静置一夜抽滤洗至中性待用。称取 75 mg 的 PdCl<sub>2</sub> 溶于浓盐酸中,加入上述滤渣中,并加水配制成 250 mL 的混合液,在 60 °C 水浴下超声反应 60 min。反应产物静置一夜后抽滤,用去离子水洗至中性。滤渣 80 °C 真空烘干,研磨后密封保存。

将柠檬酸钠、七水合硫酸钴、次亚磷酸钠分别溶于 40、20、40 mL 去离子水中,待完全溶解后将三者混合,并使最终混合溶液中各组分浓度分别为 0.03、0.01、0.1 mol/L。滴入氨水调节 pH 值至约 11,再加入 0.1 g 的 Pd-RGO。60 °C 水浴中超声反应 1 h,静置一夜后抽滤洗至中性。石墨烯表面的 Pd 作为活化中心,表面吸附的氢原子还原 Co<sup>2+</sup>,使得化学镀钴顺利进行,反应机理如图 1 所示<sup>[18]</sup>。滤渣 60 °C 真空烘干,研磨后密封保存,最终得到的便是 Pd-Co\*1/RGO。将初始的 CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> 投入量增加为上述的 2 倍和 5 倍,便可得到 Pd-Co\*2/RGO 和 Pd-Co\*5/RGO。

### 1.3 表征及性能测试

用场发射透射电子显微镜(FEI Tecnai G2 F20 型)对 Pd-Co/RGO 纳米复合材料形貌和局部微观结构进行表征。用日本 Rigau 公司 D/max 2200PC 型 X 射线衍射仪对产物成分进行分析。参照 ASTM F1529 的双电测量法,采用 RTS-8 型四探针测试仪对 Pd-Co/RGO 的体电阻率进行测试。参照 GJB2038-94,通过 HP8722ES 矢量分析仪间接测量材料的电磁参数。其中以石蜡作为粘合剂,吸波剂添加量为 20%(质量分数),测试频段为 1~18 GHz 和 26.5~40 GHz。

## 2 结果和讨论

### 2.1 Pd-Co/RGO 的表征

#### 2.1.1 XRD 分析

图 2 表明,氧化石墨烯经无机纳米粒子改性后,

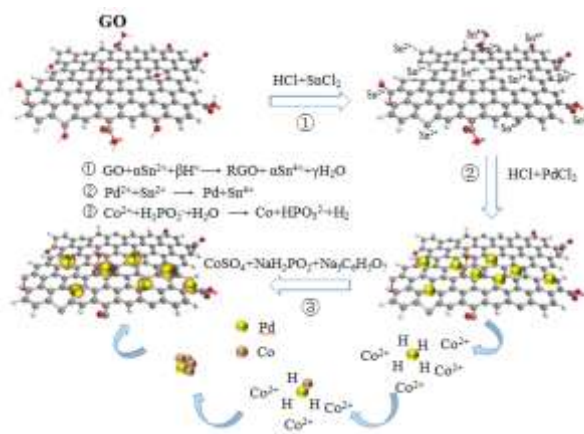


图 1 Pd-Co/RGO 制备过程的原理图

Fig.1 Schematic of synthesis of Pd-Co/RGO<sup>[18]</sup>

在 11°左右的尖峰消失,说明在反应过程中氧化石墨烯获得了还原。这是因为加热和还原剂的作用使得氧化石墨烯表面的含氧官能团脱除。这一方面为无机纳米粒子的原位沉积提供了“落脚点”<sup>[19]</sup>,另一方面也提高了纳米复合材料的电磁性能。Pd 在 4 条谱线上均有较强的衍射峰。2θ 为 44.6°、51.5°和 76.1°分别对应了面心立方 Co 的(111)、(200)和(220)晶面,2θ 为 41.8°、47.6°分别对应了密排六方 Co 的(100)、(101)晶面。当初始钴盐浓度较低时,产物中的钴同时有 fcc-Co 和 hcp-Co。但随着浓度的增加,fcc-Co 的含量减少(2θ = 51.5°的衍射峰在 Pd-Co\*5/RGO 中消失),反之 hcp-Co 的含量增加。XRD 图谱中没有观察到钴的氧化物的衍射峰,说明在石墨烯表面得到的是单质钴,这主要是因为反应在水相中进行,温度低、时间短,可有效抑制钴的氧化物的生成。文献[20, 21]中也记录有相似的实验结果。这可能与载体石墨烯的电子结构有关,石墨烯片层的堆叠也可阻碍钴纳米颗粒与空气的直接接触,抑制其氧化。

#### 2.1.2 TEM 分析

无机纳米粒子改性石墨烯的 TEM 图像如图 3 所示。从图 3 可以看到, Pd-Co\*1/RGO 样品中石墨烯表面的钴粒子尺寸均匀且没有明显团聚,粒子平均直径约为 12.9 nm。当钴含量提高时,在 Pd-Co\*2/RGO 样品中石墨烯表面沉积的钴粒子尺寸增大了近 1 倍,平均直径为 21.1 nm,但仍未出现明显的团聚。在 Pd-Co\*5/RGO 样品中,钴粒子开始出现轻微的团聚,但未团聚粒子尺寸较小,平均粒子尺寸约为 13.0 nm。

图 3d~3f 为 Pd-Co\*1/RGO、Pd-Co\*2/RGO、Pd-Co\*5/RGO 的 HRTEM 照片。图中间距为 0.224 nm

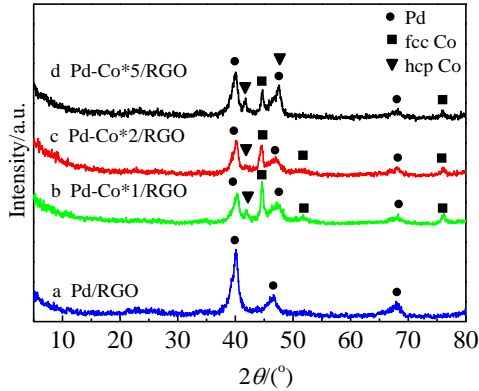


图 2 Pd/RGO、Pd-Co/RGO 的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of Pd/RGO and Pd-Co/RGO

的晶面为 fcc-Pd 的 (111) 晶面，在 3d~3f 的 3 图中钯主要以该晶面出现。图 3d、3e 中，间距为 0.215 nm 的晶面属于 hcp-Co 的 (100) 晶面，图 3f 中，间距为 0.190 nm 的晶面则对应了 hcp-Co 中的 (101) 晶面。钴表面未出现第二相的晶格条纹，也再次证明了没有钴的氧化物的存在。钯纳米粒子的周围有若干个尺寸较小的钴纳米粒子，从而证明了石墨烯表面的双金属结构是以钯为核，钴为壳的近似半核壳结构，同时钯粒子表面仍有部分的自由表面未被钴粒子包覆。

## 2.2 Co-RGO 粉体的电磁性能

### 2.2.1 电导率

从表 1 可以看出，GO 的电导率极低，随着 GO 的还原和钴含量的增加，复合材料的电导率有着数量级的提高。这其中有两方面的原因：一方面，还原剂

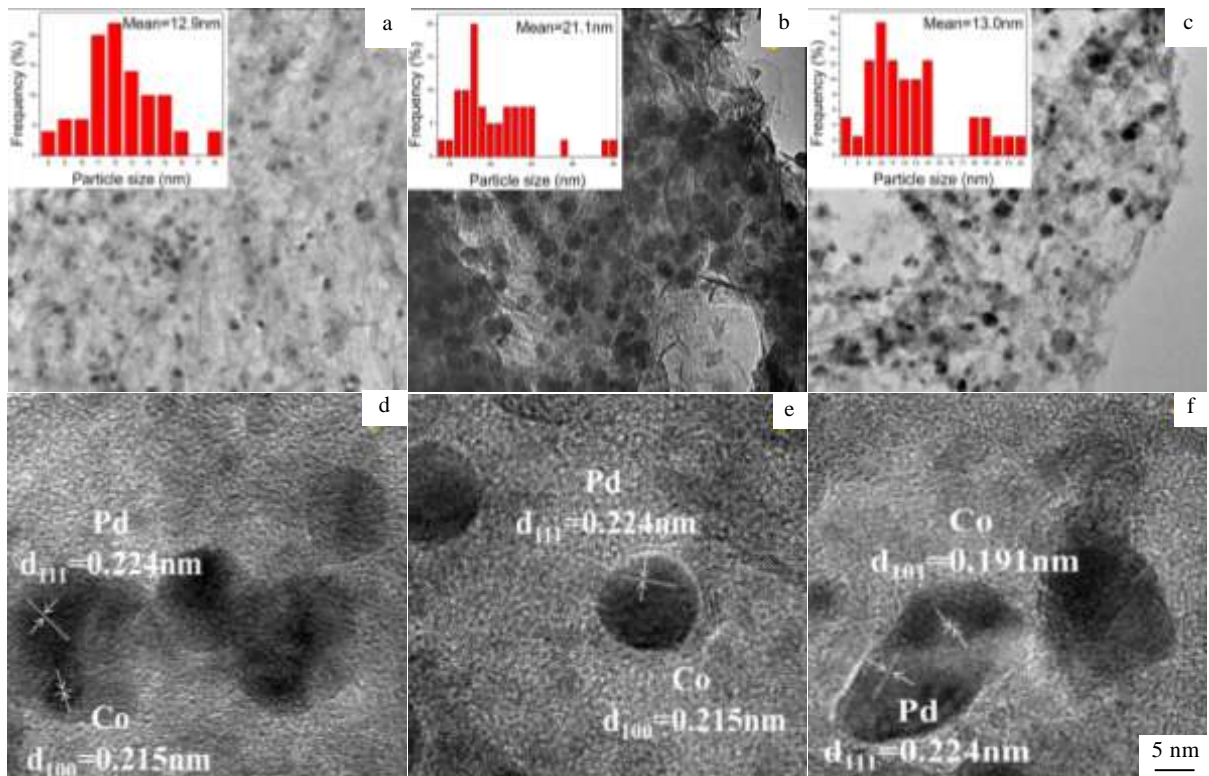


图 3 Pd-Co\*1/RGO, Pd-Co\*2/RGO, Pd-Co\*5/RGO 的 TEM 图像粒子尺寸统计分布和 HRTEM 像

Fig.3 TEM images with histograms of particle size distribution and HRTEM images of Pd-Co\*1/RGO (a, d), Pd-Co\*2/RGO (b, e), Pd-Co\*5/RGO (c, f)

表 1 GO、Pd/RGO 和 Pd-Co/RGO 的直流电导率

Table 1 Direct current conductivity of Pd/RGO and Pd-Co/RGO ( $S m^{-1}$ )

GO	Pd-RGO	Pd-Co* 1/RGO	Pd-Co* 2/RGO	Pd-Co* 5/RGO
0.0004	103	173	714	1031

的增加使得氧化石墨烯的还原程度提高，电导率提高；

另一方面，钴本身具有导电性，钴含量的提高也会使得复合材料的电导率提高。两者的共同作用使得 Pd-Co\*5/RGO 的电导率提高至 1031 S/m。

### 2.2.2 电磁参数

3 种不同钴含量的 Co-RGO (以下将 Pd-Co/RGO

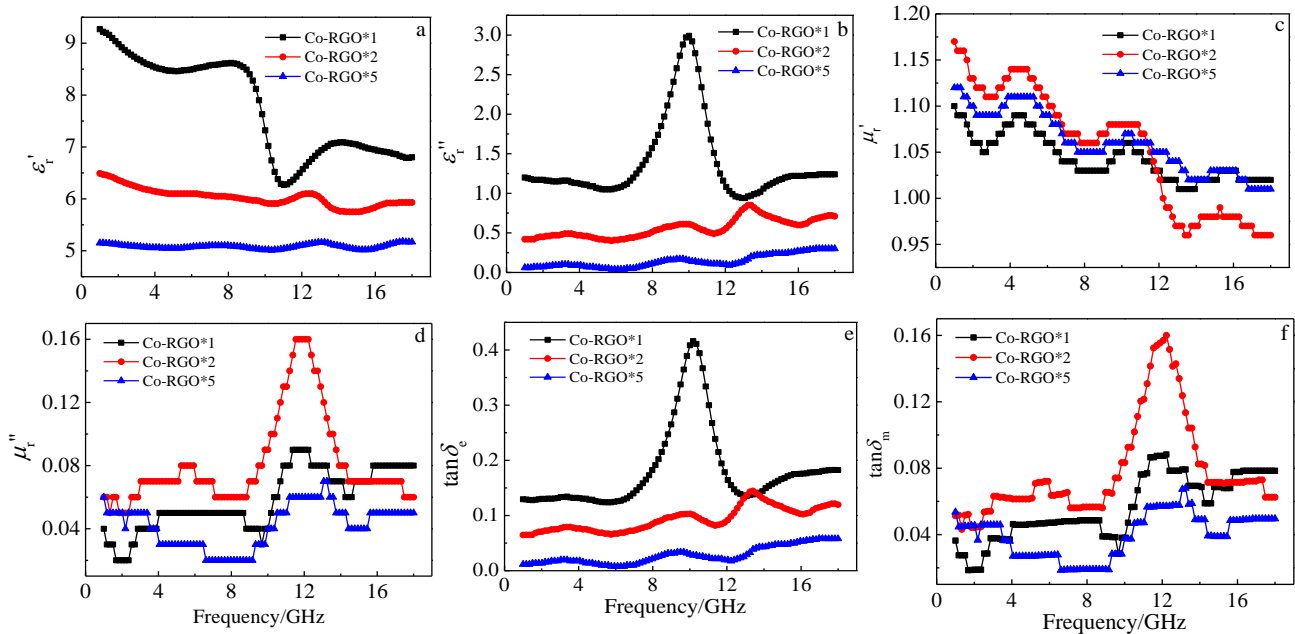


图 4 在 1~18 GHz 内 3 种 Co-RGO 纳米复合材料的介电常数磁导率，介电常数损耗角正切及磁导率损耗角正切

Fig.4 Dielectric constants (a, b), permeability (c, d), dielectric constant loss tangents (e) and permeability loss tangents (f) of Co-RGO nanocomposites in 1~18 GHz

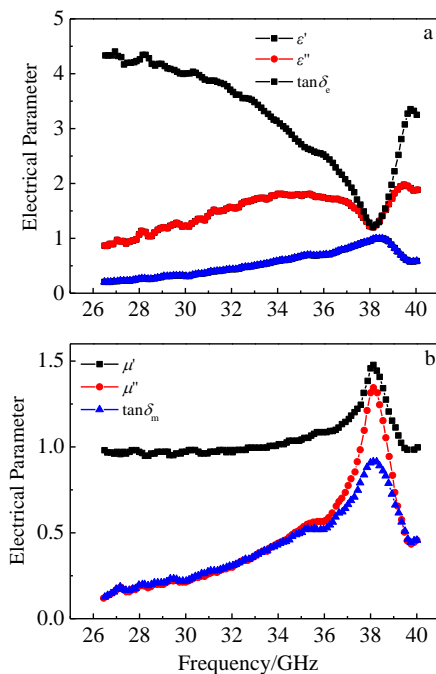


图 5 26.5~40 GHz 内 Co-RGO\*2 的电磁参数曲线

Fig.5 Electrical parameter curves (a) and ferrite parameter curves (b) of Co-RGO\*2 in 26.5~40 GHz

简记为 Co-RGO，并将 3 种不同钴含量的纳米复合材料记为 Co-RGO\*1、Co-RGO\*2 和 Co-RGO\*5) 电磁参数如图 4 所示，三者中 Co-RGO\*1 的介电常数实部和虚部最大，于 10 GHz 处实部出现极小值，虚部出现极大值。从介电损耗角正切的谱线 (图 4e) 也可以看出，Co-RGO\*1 在 10 GHz 处达到最大介电损耗，为 0.425，这是因为 Co-RGO\*1 在该频率入射电磁波作用下材料内部发生了共振<sup>[22]</sup>。另一方面，3 种不同钴含量的 Co-RGO 的磁导率实部 (图 4c) 均在 0.95~1.17 之间，随着频率增大而小幅波动减小。图 4d、4f 中 Co-RGO\*2 表现出最佳的磁损耗，12 GHz 处磁导率虚部为 0.16，磁导率损耗角正切为 0.16。Co-RGO 纳米复合材料对于电磁波不仅存在介电损耗，还具有磁损耗，损耗的强弱因材料而异。Co-RGO\*1 具有最优的介电损耗，Co-RGO\*2 则具有较好的磁损耗。

为了进一步研究 Co-RGO 在高频波段 (26.5~40 GHz) 的电磁性能，选取中等钴含量的 Co-RGO\*2 进行测试，得到如图 5 所示的曲线。从图 5a 可以看出，Co-RGO\*2 的介电常数实部和虚部在 38 GHz 出现极小值，介电损耗角正切在 38.4 GHz 处达到极大值 1。与低频段相比，介电常数实部有所下降，虚部和损耗

角正切都有了很大的提高。图 5b 中磁导率实部在 38 GHz 处达到极大值 1.4，虚部在该处达到极大值 1.3，损耗角正切则达到极大值 0.91。Co-RGO\*2 在低频波段的磁损耗角正切在 0.04~0.16 之间，而在高频波段获得了数倍的提高，处于 0.1~1.0 之间。

### 2.2.3 反射率 R

根据上述电磁参数测试结果，参考文献[23]计算反射率。图 6 为 2 和 2.8 mm 2 个不同厚度下的 Co-RGO 反射率计算曲线。Co-RGO\*1 的吸波性能最佳，在测试频段内出现了明显的峰值。厚度为 2 mm 时，Co-RGO\*1 在 14.8 GHz 处反射率为-9.6 dB；厚度为 2.8 mm 时，Co-RGO\*1 在 10.2 GHz 处反射率达到-35.4 dB，低于-10 dB 的频段宽约为 4 GHz。对比吸波剂的 2 个厚度，3 种不同 Co 含量的 Co-RGO 在 2 mm 厚度的吸波性能普遍低于 2.8 mm 厚度。图 7 为 1.5 mm 厚的 Co-RGO\*2 在 26.5~40 GHz 频段内测得的反射率计算曲线。该样品在测试频段内的反射率都小于-23 dB，在 37.8 GHz 处最低反射率达到-95.9 dB，反射率低于-35 dB 的频宽约为 4 GHz，表现出十分优异的吸波性能。磁性钴粒子的引入使得电偶极子和磁矩发生耦合作用，出现交叉极化，介电常数和磁导率匹配性提高；同时，多组分纳米复合材料体系中大量界面的引入提升了介电损耗，电磁性能优异。

### 2.2.4 谐振吸波原理

吸波材料的基本工作原理包括吸收型和谐振型，后者是吸波层下表面反射的波与上表面反射的波相位差正好为半个波长的奇数倍，两波发生干涉而相互抵消，此时吸波层厚度满足：

图 6 吸波剂在 2.0、2.8 mm 厚时的反射率计算曲线

Fig.6 Reflection curves by calculation of absorber with 2.0 mm (a) and 2.8 mm (b) in thickness

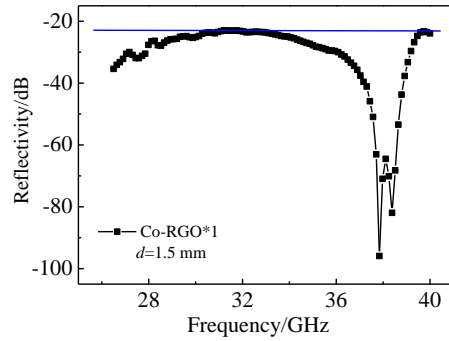


图 7 26.5~40 GHz 频段内吸波剂在 1.5 mm 厚时的反射率计算曲线

Fig.7 Reflectivity curve by calculation of GO-RGO\*1 with 1.5 mm in thickness

$$d = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \tag{1}$$

式中： $d$  为吸波层的厚度； $\lambda_0$  为真空中电磁波的波长； $\epsilon_r$  为相对介电常数； $\mu_r$  为相对磁导率<sup>[24]</sup>。

利用式（1）计算不同频率下的 Co-RGO\*1 谐振峰所对应的理论厚度，得到的曲线如图 8 所示。由图 6b 中 Co-RGO\*1 的反射率曲线可知，厚度为 2.8 mm 时，该纳米复合材料在 10.2 GHz 处反射损耗出现峰值。图 8 中，频率为 10.2 GHz 处对应的吸波剂厚度为 2.6 mm，当样品厚度等于 2.6 mm 的奇数倍时，吸波材料满足谐振吸波原理。该理论厚度与吸波剂样品的实际厚度较接近，由此可以将图 6b 中 Co-RGO\*1 在 10.2 GHz 处出现的峰理解为谐振峰，此时样品的介电常数与磁导率匹配效果最好。实际厚度与理论厚度的偏差可能是制样时样品表面的平整度不够和测试时的误差造成的<sup>[24]</sup>。由此可以看出谐振型吸波极大地提高了材料的吸波性能。

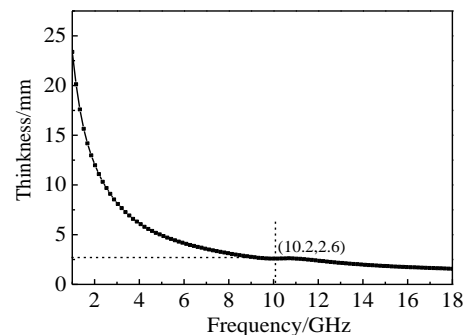
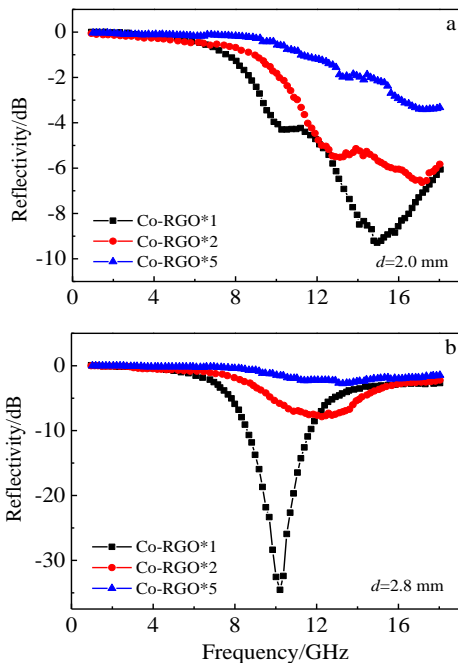


图 8 Co-RGO\*1 谐振峰所对应的理论厚度随频率变化曲线

Fig.8 Resonant thickness curve of Co-RGO\*1

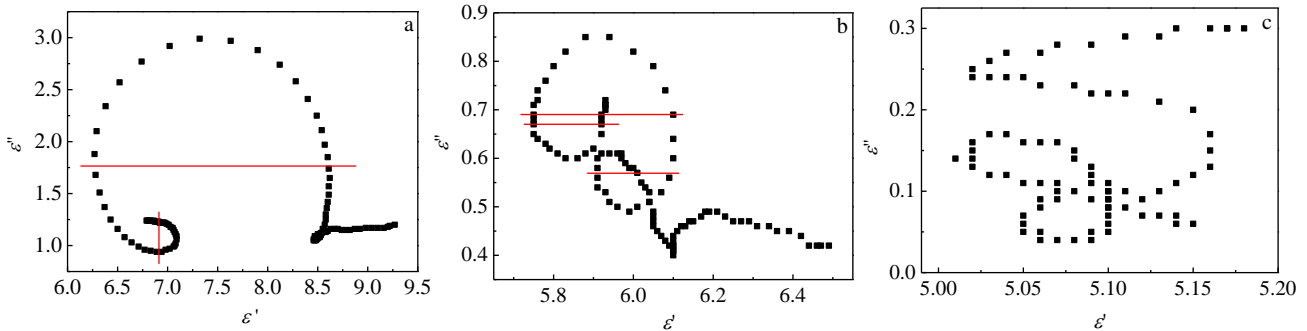


图 9 Co-RGO\*1、Co-RGO\*2 和 Co-RGO\*5 的科尔-科尔图

Fig.9 Cole-Cole plots of Co-RGO\*1 (a), Co-RGO\*2 (b), and Co-RGO\*5 (c)

### 2.2.5 科尔-科尔图 (Cole-Cole plot)

材料在电场的作用下会发生极化，极化的机制有电子、离子位移极化，弛豫（松弛）极化，取向极化，空间电荷极化。除了电子位移极化之外，其他极化都存在频率响应的问题，需要弛豫时间 ( $\tau$ )<sup>[25]</sup>。

在德拜模型<sup>[26]</sup>中，介电常数的实部  $\epsilon_r'$ 和虚部  $\epsilon_r''$ 满足如 (2) 的表达式：

$$(\epsilon_r' - \frac{\epsilon_3 - \epsilon_\infty}{2})^2 + (\epsilon_r'')^2 = (\frac{\epsilon_3 - \epsilon_\infty}{2})^2 \quad (2)$$

意味着  $\epsilon_r'$ 和  $\epsilon_r''$ 的曲线为一半圆 ( $\epsilon_r'' \geq 0$ )，称为科尔-科尔半圆 (Cole - Cole semicircle)<sup>[25,26]</sup>。对 Co-RGO\*1、Co-RGO\*2、Co-RGO\*5 粉末的电磁数据进行绘图，以  $\epsilon_r'$ 为横坐标， $\epsilon_r''$ 为纵坐标，得到的曲线如图 9 所示。

在 Co-RGO\*1 中，有 2 个非常标准的科尔-科尔半圆，且有 1 个半圆的半径较大，几乎覆盖了大半的测试频段，说明在该样品中发生了明显的弛豫极化，且满足德拜模型。弛豫极化中偶极子的转向排列与周围材料的摩擦作用会使部分能量耗散，由此引入了介电损耗，从而解释了 Co-RGO\*1 在 3 个测试样品中突出的介电性能。Co-RGO\*2 中有 3 个明显的科尔-科尔半圆，而 Co-RGO\*5 中则未能分辨出规整的半圆，与后者相比，Co-RGO\*2 中存在的弛豫极化使其介电损耗稍大。

## 3 结 论

1) 采用化学镀的方法可在石墨烯表面均匀沉积分散性良好的钴纳米粒子 (Pd-Co/RGO\*1)，其直径为 12.9 nm。

2) Pd-Co/RGO\*1 在谐振厚度 2.8 mm 时吸波性能优异，在 1~18 GHz 频段内反射率最低可达 -35.4 dB，低于 -10 dB 的频宽约为 4 GHz；

3) Pd-Co/RGO\*2 在 26.5~40 GHz 频段内反射率均低于 -23 dB，反射率低于 -35 dB 的频段宽度约为 4 GHz，在 37.8 GHz 处最低反射率可达 -95.9 dB。

4) 根据德拜模型，Pd-Co/RGO\*1 和 Pd-Co/RGO\*2 样品中由于发生了明显的弛豫极化，使得介电损耗显著增大。

### 参考文献 References

[1] Qiu Qin(邱 琴), Zhang Yanqing(张晏清), Zhang Xiong(张 雄). *Electronic Components and Materials*(电子元件与材料)[J], 2009, 28(8): 78

[2] Wang Jiexuan(王洁萱). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015

[3] Lin Shuai(林 帅). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013

[4] Jing Hongxia(景红霞). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Taiyuan: North University of China, 2013

[5] Wang Lei(王 雷). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014

[6] Qiu J, Shen H, Gu M. *Powder Technology*[J], 2005, 154(2): 116

[7] Feng Y B, Qiu T, Shen C Y et al. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2006, 42(3): 363

[8] Chen X, Wang G, Duan Y et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2007, 40(6): 1827

- [9] Fan Y, Yang H, Li M *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2009, 115(2): 696
- [10] Ai Lunhong(艾伦弘), Jiang Jing(蒋 静). *Chinese Journal of Applied Chemistry*(应用化学)[J], 2010, 27(1): 92
- [11] Gu Hongbo, Huang Yudong, Zhang Xi *et al. Polymer*[J], 2012, 53(3): 801
- [12] Wang C, Han X J, Xu P *et al. Applied Physics Letters*[J], 2011, 98(7): 072 906
- [13] Li X, Yi H, Zhang J *et al. Journal of Nanoparticle Research* [J], 2013, 15(3): 1
- [14] Liu P B, Huang Y, Sun X. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2013, 23(5): 12 355
- [15] Zhang H, Xie A, Wang C *et al. Journal of Materials Chemistry A* [J], 2013, 30(1): 8547
- [16] Yang S B, Cui G L, Pang S P *et al. Chem Sus Chem*[J], 2010, 3, 236
- [17] Warner J H, Rummeli M H, Bachmatiuk A *et al. ACS Nano*[J], 2010(4): 470
- [18] Liang R, Hu A, Persic J *et al. Nano-Micro Letters*[J], 2013, 5(3): 202
- [19] Yang J, Tian C, Wang L *et al. Journal of Materials Chemistry* [J], 2011, 21(10): 3384
- [20] Karimi S, Tavasoli A, Mortazavi Y *et al. Applied Catalysis A: General*[J], 2015, 499: 188
- [21] Ji Z, Shen X, Song Y *et al. Materials Science and Engineering B* [J], 2011, 176(9): 711
- [22] Zhao Baoyan(赵宝燕). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014
- [23] Yusra Arooj(尤 拉). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beihang University, 2011: 65
- [24] Zhao Yan(肇 研), Duan Yuexin(段跃新), Li Weiwei(李蔚慰) *et al. Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报)[J], 2007, 24(3): 23
- [25] Tian Shi(田 蔚). *Physical Properties of Materials* (材料物理性能) [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 97
- [26] Yu H, Wang T S, Wen B *et al. J Mater Chem*[J], 2012, 22: 21679

## Electromagnetic Properties of Graphene Composites Modified with Cobalt Nanoparticles

Zhang Haiqin, Xu Shuangshuang, Chen Yuan, Zhao Yan  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Cobalt nanoparticles were deposited on the surface of graphene by electroless plating, including sensitization by stannous chloride and then activation using palladium chloride. XRD and TEM results show that the concentrations of cobalt precursor and reductant affect the structures and yield of cobalt crystals. Electromagnetic tests results indicate that the increasing cobalt content and reduction of graphene both improve the conductivity of Co-RGO. Meanwhile, Co-RGO nanocomposites have excellent absorbing properties because of magnetic loss and dielectric loss by lots of interfaces. For instance, the bandwidth of reflection below  $-10$  dB for Co-RGO\*1 during 1~18 GHz is about 4 GHz, and the reflection for Co-RGO\*2 is below  $-23$  dB from 26.5 to 40 GHz.

**Key words:** graphene; composites; cobalt; nanoparticles; electromagnetic properties

---

Corresponding author: Zhao Yan, Professor, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82317127, E-mail: jennyzhaoyan@buaa.edu.cn