

# Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的制备和 多种性能研究

倪训伟\*

(郯城县应急救援指挥服务中心, 山东 郯城 276100)

**摘要:**利用两步法成功制备了核壳结构的四氧化三铁/聚(3,4-二氧乙基噻吩)(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT)复合材料,并考察了稳定剂PVP、温度和反应时间对其形貌的影响。利用XRD、EDX和红外光谱等方法对其进行表征,同时还研究了该复合材料的电、磁以及吸波性能等。结果表明,当复合材料涂层厚度为4 mm时,最大反射损耗为-12 dB,复合材料的矫顽力为94.2 Oe,饱和磁化强度为64.6 emu/g,剩磁为7.3 emu/g。

**关键词:**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT;导电性能;吸波性能;磁性能

中图分类号:O631

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)05-0197-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.05.040

## Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT composite materials and study on their multiple performances

NI Xun-wei\*

(Emergency Rescue Command Center for Work Safety of Tancheng County, Tancheng 276100, China)

**Abstract:** Ferric oxide/poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT) composites with a core-shell structure are successfully synthesized through two-step method. The influences of reaction conditions (stabilizing agent, reaction temperature and time) on the morphologies of the composites are studied, and the composites' morphology and structure are characterized by XRD, EDX and FT-IR, and their electrical, magnetic and microwave-absorbing properties are also explored. It is shown when the coating thickness of the composites is 4 mm, the maximum reflection loss is -12 dB, and the composites' coercivity, saturation magnetization and remanence are 94.2 Oe, 64.6 emu·g<sup>-1</sup> and 7.3 emu·g<sup>-1</sup>, respectively.

**Key words:** Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT; electrical conductivity; microwave absorbing properties; magnetic properties

导电聚合物与磁性材料形成的复合材料是近年来研究的热点。Liu等<sup>[1]</sup>采用无机磁性材料(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)与吡咯通过化学氧化聚合法得到了兼具磁性和导电性的聚吡咯复合材料。Yang等<sup>[2]</sup>利用两步法制备了Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PANI复合物,并研究了其磁性和微波吸收能力。董培等<sup>[3]</sup>以碳纸(CP)为基底,电沉积聚苯胺(PANI)后通过水热法使Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米微球原位自组装于电极表面制备碳纸@聚苯胺@四氧化三铁(CP@PANI@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanospheres)催化电极(1 cm×2 cm)。刘佳威等<sup>[4]</sup>通过两步自由基聚合制备了PAN/P(St-NIPAM)/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>温敏导电磁性复合颗粒并研究了其导电性能。张龙等<sup>[5]</sup>用聚吡咯(PPy)并通过溶剂热法制备出具有核壳结构的Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PPy@PANI复合吸波材料。Zhang等<sup>[6]</sup>制备了单晶Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PPy,研究了其室温下的磁性能。Kakarla等<sup>[7]</sup>采用化学氧化聚合法制备了聚苯胺磁

性铁复合物,发现其具有较高的电导率和较低的磁性。Cabrer等<sup>[8]</sup>通过电化学聚合方法制备了Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PPy复合物,并重点研究了其磁性、热稳定性等性质。Kiko等<sup>[9]</sup>通过两步法制备了γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PPy复合物,结果发现其具有较强的磁性。Fu等<sup>[10]</sup>利用一步法制备了α-FeOOH/PPy复合物,并研究了该复合物的磁性和吸波性质,其最大反射损耗为-17 dB左右。Yang等<sup>[11]</sup>制备了电磁功能化的系列导电聚苯胺复合物:采用固相法制备了二茂铁磺酸及硫酸亚铁掺杂的导电聚苯胺;Yang等<sup>[12]</sup>利用硬模板法获得了PAN/SPS-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>实心微纳米球复合物,发现空心微球的吸波性能明显优于同样磁流体含量的实心微球。张杰等<sup>[13]</sup>阐述了导电聚合物与其他材料复合制备吸波材料的科学性和必要性,总结了近年来导电聚合物在电磁防护材料领域的研究进展。Zhu等<sup>[14]</sup>利用硬模板法获得了PAN/

收稿日期:2020-06-29;修回日期:2021-03-15

作者简介:倪训伟(1981-),男,硕士,工程师,研究方向为导电聚合物及其磁性材料复合物的制备与检测,通讯联系人,tcyznxw@163.com。

SPS- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  实心微纳米球复合物,发现空心微球的吸波性能明显优于同样磁流体含量的实心微球。雷文娟等<sup>[15]</sup>以单分散的苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯共聚物[P(St-co-MMA)]微球为载体,制备了 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /P(St-co-MMA)微纳米原位复合物。黄威等<sup>[16]</sup>在综述电磁波材料吸波工作原理的基础上,讨论了核壳结构材料在吸波领域的优势。

笔者拟采用两步法制备磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 与PEDOT的核壳复合材料,并对其导电性能、吸波性能、磁性等多种性能进行研究和表征。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂

3,4-二氧乙基噻吩(EDOT),Aldrich生产;聚乙烯吡咯烷酮(PVP),分析纯,Acros organics生产;过硫酸铵(APS),分析纯,汕头市西陇化工厂有限公司生产;乙醇、乙二醇,分析纯,北京化工厂生产;氯化铁( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、乙二胺,分析纯,北京益利精细化学品有限公司生产;对甲苯磺酸,分析纯,北京市西中化工厂生产;所有试剂使用前均未作处理。

### 1.2 仪器

样品的纯化分离使用Beckman L8-80M超速离心机;样品结构形貌观察在透射电子显微镜(JEM-2100)(Japan)和透射电子显微镜(JEM-2100F)(Japan)上进行;XRD测试使用X射线粉末衍射仪(D8 Focus 德国, Bruker);红外光谱测定使用(Excalibur 3100, American) Varian 红外光谱仪;电导率测定使用四电极法测定,仪器为Keithley 220 Source Meter;磁性测试使用振动样品磁强计(VSM, Lakeshore 707 Series)。

### 1.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PEDOT 复合材料制备

#### 1.3.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的制备

采用文献[1]所述溶剂热法制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。将1.35 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 置于锥形瓶中,加入30 mL乙二醇,搅拌使其充分溶解,得浅黄色澄清溶液;在磁力搅拌下逐滴加入3 mL乙二胺溶液,滴加完毕后继续搅拌30 min;将上述溶液转入带聚四氟乙烯内衬的不锈钢反应釜中,密闭并升温至200℃,保温24 h;待反应完全后自然冷却至室温,将釜底黑色沉淀离心分离,并用乙醇水溶液[V(乙醇):V(水)=1:1]洗涤3次以除去杂质;真空60℃下干燥12 h,得棕黑色粉末状固体。

#### 1.3.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PEDOT 复合材料的制备

将一定量上述制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 固体溶于PVP水溶液中,超声20 min,加入掺杂剂,搅拌20 min;边搅拌边加入EDOT,并搅拌12 h;加入一定量的氧化剂,搅拌反应24 h。待反应完全后,将黑色沉淀离心分离,并用乙醇水溶液[V(乙醇):V(水)=1:1]洗涤3次以除去杂质;真空60℃下干燥12 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PEDOT 复合材料的制备

#### 2.1.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 微球的制备

不同放大倍率下观察到的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 微球如图1所示。由图1中可以看出,微球直径分布相对比较均匀,大约在300~500 nm。多数微球为实心微球,只含有少量的空心微球,空心微球的壁厚大约50 nm。

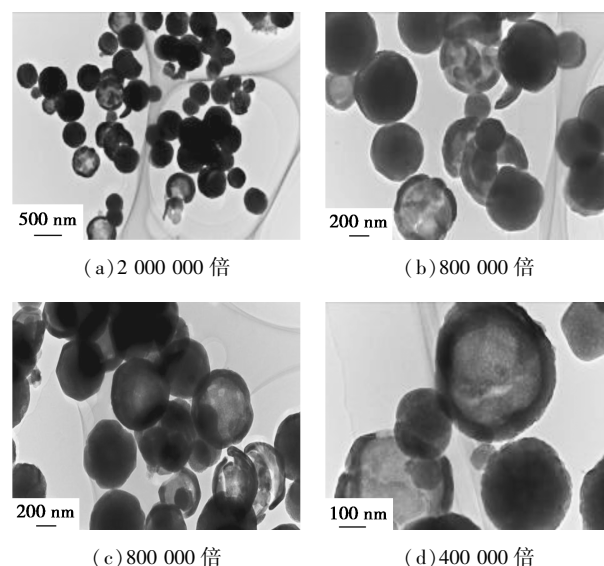


图1 溶剂热法制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 微球的TEM图

溶剂热法制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 和文献[14]中制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的XRD谱图的对比如图2所示。

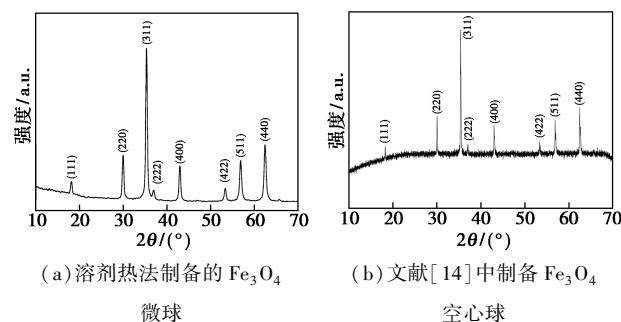


图2 溶剂热法制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 微球和文献[14]中制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 空心球的XRD谱图

从图 2 中可以看出,所制备产物的晶面和文献 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 基本一致,证明制备的产物是 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。

### 2.1.2 核壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的制备

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和核壳结构的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的 TEM 及其 EDX 能谱图如图 3 所示。

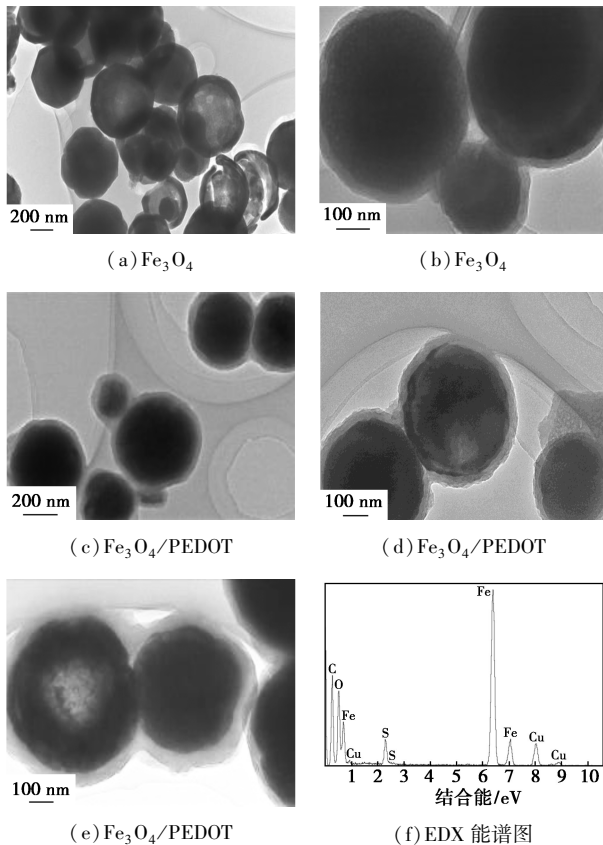


图 3 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和核壳结构的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的 TEM 及其 EDX 能谱图

由图 3(a)~图 3(d)中可以看出,不同放大倍率下,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 微球表面均匀包覆着一层有机物,有机物层厚度大约为 35 nm。由图 2(f)中可以看出,复合物中含有 Fe 和 O 以及代表 PEDOT 特征的 C 和 S,表明复合材料成分为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT。

### 2.1.3 核壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料 XRD 表征

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的 XRD 谱图如图 4 所

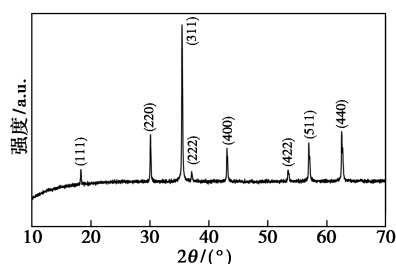


图 4 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的 XRD 谱图

示。由图 4 中可以看出,核壳 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料形成过程中,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 结构未发生变化。

### 2.1.4 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的红外表征

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料红外光谱测定结果如图 5 所示。与 PEDOT 微球的红外光谱比较发现,356.5 cm<sup>-1</sup>和 1 068.1 cm<sup>-1</sup>分别属于噻吩环醌型结构的 C—C 及 C=C 振动和 C—O—C 振动,688.7 cm<sup>-1</sup>处属于 C—S 键振动,表明该复合物中含有 PEDOT。此外,1 648 cm<sup>-1</sup>处有 1 个较强吸收峰,归属于 PVP 稳定剂,表明 PVP 参与了核壳 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 的形成,而最终留在复合材料中。

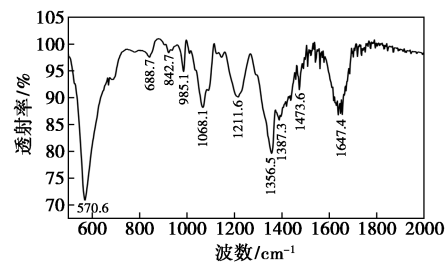


图 5 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合物的 FT-IR 谱图

### 2.1.5 稳定剂 PVP、温度和反应时间的影响

稳定剂 PVP 对 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料形貌的影响如图 6 所示。由图 6(a)、图 6(b)中可以看

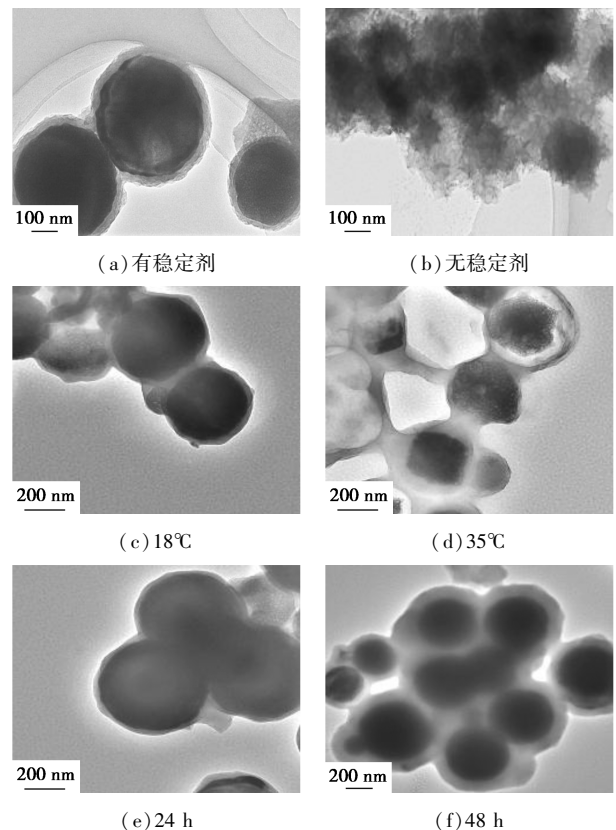


图 6 稳定剂、温度和时间对 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料影响的 TEM 图

出,当不加入稳定剂时,难以得到核壳结构材料;而有稳定剂时,PVP 先行吸附到  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  表面,引发 EDOT 在其表面的吸附,进而在其表面氧化形成 PEDOT 壳。

由图 6(c)、图 6(d)中可以看出,当温度升高到  $35^\circ\text{C}$  时, $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的微球结构被破坏,变成了不规则结构,核壳复合材料无法形成。表明温度升高已破坏内核材料,影响后续反应,所以实验一般选择室温  $18^\circ\text{C}$  左右。

由图 6(e)、图 6(f)中可以看出,与反应 24 h 相比,反应 48 h 制备的复合物壳层(PEDOT)相对较厚,所以控制反应时间可以控制复合物的壳层厚度。

## 2.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$ 复合材料的性质

### 2.2.1 电导率

不同反应时间制备的复合材料的电导率如表 1 所示。

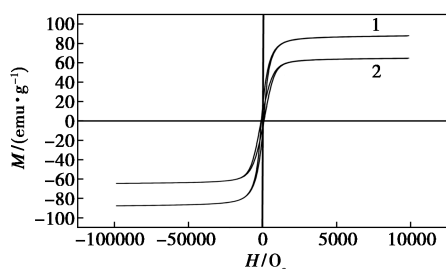
表 1 不同反应时间制备的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料的电导率

反应时间/h	24	48
电导率/( $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$2.36\times 10^{-4}$	$2.08\times 10^{-5}$

由表 1 中可以看出,复合材料的电导率都在半导体的范围内,远低于单一 PEDOT 空心球( $1.56\times 10^{-2}\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )的电导率<sup>[18]</sup>,且随着反应时间的延长电导率降低。

### 2.2.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$ 复合材料磁性能

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  在室温下的磁滞曲线如图 7 所示。 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的室温磁性能参数如表 2 所示,从表 2 中可以看出,复合材料中的 PEDOT 对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的矫顽力( $H_c$ )、饱和磁化强度( $M_s$ )、剩磁强度( $M_r$ )和剩磁比( $M_r/M_s$ )都有较大影响,复合材料的矫顽力较单一  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  增大较多,其余各磁性能参数却都有所降低。



1— $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 2— $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$ -24 h

图 7  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料和  
室温 M-H 曲线

表 2  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料(24 h)和  
室温磁性能参数

	矫顽力 $H_c/\text{Oe}$	饱和磁化强度 $M_s/(\text{emu}\cdot\text{g}^{-1})$	剩磁强度 $M_r/(\text{emu}\cdot\text{g}^{-1})$	剩磁比 $(M_r/M_s)$
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$	94.2	64.6	7.3	0.11
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	76.2	87.7	13.0	0.15

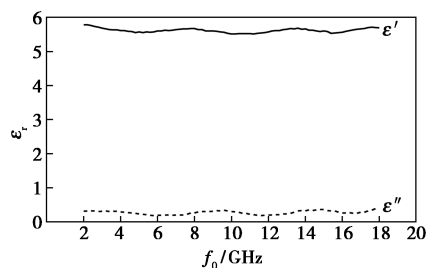
复合材料和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  在 2 000 Oe 左右就达到了饱和,且饱和磁化强度较高,分别为  $64.6\text{emu/g}$  和  $87.7\text{emu/g}$ 。通过仔细比较这 2 条曲线还可以发现,2 种材料的磁滞回线所围成的面积都不是很大,为典型的软磁材料的磁滞回线,这与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的本性有关。

材料的性质与材料的形貌、尺寸等密切相关。就磁性材料来说,其维度、结构、尺寸大小及尺寸分布都直接影响其矫顽力的大小。据文献[2]中报道,提高磁性材料矫顽力的方法之一是对样品进行形貌修饰,具体方式包括:形貌一维化,即通过控制材料的生长制备得到(准)一维材料,诸如纳米棒、纳米线、纳米带、纳米管等来提高磁性材料的形貌各向异性,从而实现磁各向异性,达到提高矫顽力的目的;而大多数情况,由于较小的维度使得磁性纳米晶往往在室温下呈现超顺磁性,因此形貌修饰的另一种方式是磁性材料的形态多维化,即通过一维或二维构件块的自组装得到有序的多维结构,从而实现矫顽力的提高。本实验中,核壳  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  较单一  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  矫顽力有所提高,可能是核壳结构的界面效应相当于多维构造,引起了矫顽力的提高。

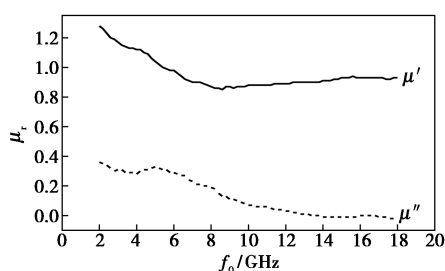
### 2.2.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$ 复合材料的吸波性质

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PEDOT}$  复合材料的复合物的复相对介电常数实部  $\epsilon'$  与虚部  $\epsilon''$  和复相对磁导率实部  $\mu'$  与虚部  $\mu''$  变化情况如图 8(a) 和图 8(b) 所示。由图 8(a) 中可以看出,复相对介电常数实部  $\epsilon'$  和虚部  $\epsilon''$  都随着频率的增加没有明显变化,且虚部  $\epsilon''$  几乎为 0,即复合材料几乎没有电损耗,这是复合材料电导率太低( $2.08\times 10^{-5}$ )的缘故。由图 8(b) 中可以看出,复相对磁导率实部  $\mu'$  和虚部  $\mu''$  都随着频率的增加逐渐降低,表明复合材料具有明显的磁损耗。根据反射损耗公式,计算了不同厚度下复合材料涂层的反射损耗,结果如图 8(c) 所示。由图 8(c) 中可以看出,在 1~2 mm 涂层厚度时,复合材料的反射损耗非常低;3 mm 涂层厚度时,最大反射损耗为 -5 dB;当涂层厚度达到 4 mm 时,复合材料的最大反射损耗为 -12 dB(反射损耗为 -10dB 意味着可以

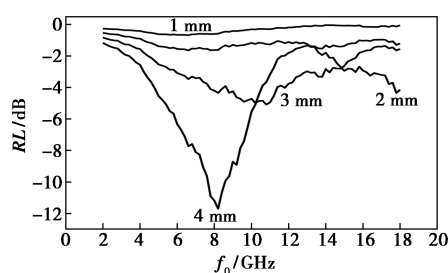
吸收反射波的 90%)。



(a) 复相对介电常数



(b) 复相对磁导率



(c) 不同厚度下复合材料涂层的反射损耗

图 8 48 h 制备的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的电磁参数和反射损耗

## 2.2.4 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的密度

### (1) 松装密度

松装密度即粉体自由流落于规定的标准容器中形成的质量体积比。测量的过程是:①称量 10 mL 空量筒的质量为  $m_1$ ;②将 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料经三角漏斗加入量筒中;③称量 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料与量筒的总质量  $m_2$ , 读出 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合物的体积  $V$ ;④计算松装密度  $\rho_1 = (m_2 - m_1) / V$ 。

实验测量的结果:  $m_1 = 10.6186 \text{ g}$ ;  $m_2 = 11.1188 \text{ g}$ ;  $V = 0.7 \text{ mL}$ 。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的松装密度  $\rho_1 = 0.715 \text{ g/cm}^3$ 。

### (2) 摇实密度

摇实密度是指粉体填入规定的标准容器中震荡、摇实后的质量体积比。测量过程:①称量 10 mL 空量筒的质量为  $m_1$ ;②将 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料加入量筒中, 加入量可超过量筒最大刻度;③用小木

棍轻轻击打量筒侧壁至 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合物不再下降, 即 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的体积保持不变;④称量 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料与量筒的总质量  $m_2$ , 读出 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的体积  $V$ ;⑤计算摇实密度  $\rho_c = (m_2 - m_1) / V$ 。

实验测量后的结果是:  $m_1 = 10.6186 \text{ g}$ ;  $m_2 = 11.1188 \text{ g}$ ;  $V = 0.5 \text{ mL}$ 。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的摇实密度  $\rho_c = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

### (3) 真密度

采用阿基米德测真密度: 将已知质量的粉体样品加入到容量瓶中, 然后加满测量用的介质, 粉体的体积由容量瓶的体积减去介质的体积求得。所用介质要满足以下要求:①介质应纯净且不能使试样溶解、溶胀及起反应;②样品表面必须为介质所浸湿。

样品 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料对水的浸润性不好, 但是能被无水乙醇完全浸湿, 所以采用无水乙醇为测量 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料真密度的介质。具体过程如下:

①称量空容量瓶 ( $V = 10 \text{ mL}$ ) 的质量  $m_{\text{空}}$ ;②称取适量 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料 ( $m_p$ ) 加入到容量瓶中;③先加入少量无水乙醇, 在超声清洗器中超声 5 min, 样品充分润湿后继续加入无水乙醇至刻度线, 擦干容量瓶外表面的水后称量总质量  $m_{\text{总}}$ ;④将上述容量瓶倒空并用无水乙醇清洗干净, 注满无水乙醇至刻度线, 擦干容量瓶外表面后称量质量  $m_{\text{介}}$ ;⑤ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的真实密度的计算式为:  $\rho = m_p(m_{\text{介}} - m_{\text{空}}) / (m_{\text{介}} - m_{\text{总}} + m_p)V$ 。

实验测量后的结果是:  $m_{\text{空}} = 9.4275 \text{ g}$ ;  $m_p = 0.4862 \text{ g}$ ;  $m_{\text{总}} = 17.5459 \text{ g}$ ;  $m_{\text{介}} = 17.2403 \text{ g}$ 。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的真密度  $\rho = 2.11 \text{ g/cm}^3$ 。

通过上述方法测得制备的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的真密度为  $3.56 \text{ g/cm}^3$ , 这是由于空心球的存在, 使其密度小于块体 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的真密度 ( $\approx 5.2 \text{ g/cm}^3$ ), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料的真密度更低。

## 3 总结

(1) 利用两步法成功制备了核壳结构的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PEDOT 复合材料, 其中 PVP 对核壳结构的获得起关键作用, 红外光谱显示明显的 PVP 特征吸收, 表明 PVP 参与了 PEDOT 壳层的形成, 反应时间延长, 壳层厚度增加。

(2) 复合材料电导率较单一 PEDOT 降低, 饱和磁化强度 (64.6 emu/g) 和剩磁 (7.3 emu/g) 较单一  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  略低, 矫顽力 (94.2 Oe) 较单一  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  提高。

(3) 复合材料吸波性能主要由磁损耗产生, 涂层厚度 4 mm 时获得最大反射损耗为 -12 dB。

### 参考文献

- [1] Liu Jin, Wan Meixiang. Composites of polypyrrole with conducting and ferromagnetic behaviors [J]. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, 2000, 38(15): 2734-2739.
- [2] Yang Chunhui, Du Jingjie, Peng Qian, *et al.* Polyaniline/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle composite: Synthesis and reaction mechanism [J]. *J Phys Chem B*, 2009, 113(15): 5052-5058.
- [3] 董培, 王浩龙, 刘文静, 等. 碳纸@聚苯胺@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米微球催化电极的制备及其性能研究 [C]. 全国环境催化与环境材料学术会议, 沈阳, 2018.
- [4] 刘佳威, 张强, 刘继广. 具有温敏导电多重响应的智能磁性颗粒制备及性能 [J]. *高分子学报*, 2019, (7): 695-701.
- [5] 张龙, 万晓娜, 段文静, 等.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @聚吡咯@聚苯胺核壳结构的制备及吸波性能 [J]. *高等学校化学学报*, 2018, 39(1): 185-192.
- [6] Zhang Hong, Gong Xinglong, Hao Lingyun, *et al.* Fabrication and biocompatible characterization of magnetic hollow capsules [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2008, 19(7): 877-880.
- [7] Kakarla Raghava Reddy, Kwang-Pill Lee, Anantha Gopalan Iyengar. Synthesis and characterization of novel conducting composites of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles and sulfonated polyanilines [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 104(6): 4127-4134.
- [8] L Cabrera A B, S Gutierrez B, M P Morales C, *et al.* Magnetic conducting composites based on polypyrrol and iron oxide nanoparticles synthesized via electrochemistry [J]. *J Magn Magn Mater*, 2009, 321(14): 2115-2120.
- [9] Kiko Sunderland, Philip Brunetti, Leonard Spinu, *et al.* Synthesis of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /polypyrrole nanocomposite materials [J]. *Materials Letters*, 2004, 58(25): 3136-3140.
- [10] Xiao Hongmei, Zhang Weidong, Fu Shaoyun. One-step synthesis, electromagnetic and microwave absorbing properties of  $\alpha\text{-FeOOH}$ /polypyrrole nanocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(6): 909-915.
- [11] Yan Chunming, Hai in Li. A study on the solid-state synthesis and electromagnetic properties of polyaniline doped with ferrous sulfate [C]. The 6<sup>th</sup> China International Conference on Nano Science Technology Symposium, Chengdu, 2007.
- [12] Yan Chunming, Hai in Li, Xiong Dongbai, *et al.* Hollow polyaniline/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  microsphere composites: Preparation, characterization, and applications in microwave absorption [J]. *React Funct Polym*, 2009, 69(2): 137-144.
- [13] 张捷, 刘伟, 张婷, 等. 导电聚合物基复合吸波材料的研究进展 [J]. *微纳电子技术*, 2018, 55(2): 91-97, 129.
- [14] Zhu L, Xiao H, Zhang W, *et al.* One-pot template synthesis of monodisperse and single-crystal magnetite hollow spheres by a simple solvothermal route [J]. *Crystal Growth & Design*, 2008, 8(3): 957-963.
- [15] 雷文娟, 马应霞, 喇培清, 等. 磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /P(St-co-MMA) 微米复合物的制备和性能 [J]. *材料研究学报*, 2016, (9): 711-716.
- [16] 黄威, 魏世丞, 梁义, 等. 核壳结构复合吸波材料研究进展 [J]. *工程科学学报*, 2019, (5): 547-556.
- [17] Ni X W, Hu X J, Zhou S Y, *et al.* Synthesis and microwave absorbing properties of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) microspheres [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2011, 22(5): 532-537. ■

## 赢创推出全新 3D 打印光敏树脂产品线

赢创推出两款用于工业级 3D 打印应用的光敏树脂 INFINAM® TI 3100 L 与 INFINAM® ST 6100 L。这两款材料适用于光固化成型 (SLA)、数码光处理 (DLP) 等常见光聚合工艺 (VAT polymerization)。

赢创增材制造创新增长领域负责人 Dominic Störkle 博士表示:“这一新产品线的推出, 意味着赢创正式进入光固化技术市场。此举有助于我们在所有基于聚合物的主流 3D 打印技术材料市场中长期保持专业优势地位。通过全新即用型材料配方, 我们将继续推进材料战略, 使规模化 3D 打印技术在整条价值链上得到广泛应用。”

### (1) 全新光敏树脂产品线宣告诞生

作为赢创光敏树脂产品线中的首款高性能材料, INFINAM® TI 3100 L 可用于制造强度极高且耐冲击性良好的 3D 打印部件。得益于良好的特性组合, INFINAM® TI 3100 L 可用于生产基于 SLA、DLP 等光聚合工艺的工业组件。根据测试, 使用此种新材料打印而成的组件的冲击抗性为 30 J/m<sup>3</sup>, 断裂伸长率高达 120%, 因此可抵御强

力冲击或冲压等永久性力学作用。INFINAM® TI 3100 L 适用于从工业到汽车部件、消费品行业中的各类特定应用, 既可满足设计自由度上的需求, 又能应对物品使用中的高机械负载情况。

INFINAM® ST 6100 L 则有望填补高强度光敏树脂材料的需求缺口。INFINAM® ST 6100 L 的抗张强度为 89 MPa, 挠曲应力为 145 MPa, 热变形温度 (HDT) 为 120℃。得益于这些特性, 这一材料很适合对耐高温性及挠曲强度要求较高的应用。

### (2) 用于 SLA 与 DLP 工艺的 INFINAM® 光敏树脂

新的光敏树脂产品线为高性能即用型材料配方, 可在市面上各种常见的 SLA 和 DLP 打印机中直接使用。

赢创增材制造创新增长领域汇集了集团内部的 3D 打印技术专长, 专注于开发并制造适用于常见 3D 打印工艺的高性能即用型材料。在此背景下, 赢创近日对旗下的即用型 3D 打印材料产品组合进行调整, 创立新品牌 INFINAM®。(杨惠莹)