

引文格式: 李天天, 程玉贤, 夏龙, 等. In元素掺杂对Sn/rGO复合材料介电性能的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(4): 90-96.

LI Tiantian, CHENG Yuxian, XIA Long, et al. Effect of In element doping on dielectric properties of Sn/rGO composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(4): 90-96.

## In元素掺杂对Sn/rGO复合材料介电性能的影响

李天天<sup>1</sup>, 程玉贤<sup>1</sup>, 夏龙<sup>2</sup>, 梁莹<sup>1</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 威海 264209)

[摘要] 本文以纳米级 SnO<sub>2</sub> 为前驱体, 采用溶胶-凝胶法结合高温热处理的方式制备具有不同含量 In 元素掺杂的 In-Sn/rGO 复合材料。研究了 In 元素含量对复合材料微观组织结构、物相组成、缺陷程度、介电常数、导电性和介电性能的影响。结果表明, 引入 In 元素未对 Sn/rGO 复合材料的微观组织形貌和物相组成产生较大影响, 仅稍降低了复合材料的缺陷程度; 随着 In 元素掺杂含量的增加, 复合材料的介电常数和导电性呈现先升高后降低的趋势; In-Sn/rGO 复合材料的介电性能在 In 掺杂质量分数为 1.0% 时达到最佳, 反射损耗值为 -51.16 dB, 相应的吸收频率为 8.72 GHz, 且有效吸收带宽为 3.60 GHz。

关键词: 溶胶-凝胶法; In-Sn/rGO 复合材料; 微观组织结构; 缺陷程度; 介电性能

### Effect of In Element Doping on Dielectric Properties of Sn/rGO Composites

LI Tiantian<sup>1</sup>, CHENG Yuxian<sup>1</sup>, XIA Long<sup>2</sup>, LIANG Ying<sup>1</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Technology, Weihai 264209, China)

[ABSTRACT] In-Sn/rGO composites with different In doping contents were prepared by sol-gel method combined with high temperature heat treatment using nano-SnO<sub>2</sub> as precursor. The effects of In content on the micro-structure, phase composition, defect degree, dielectric constant, electrical conductivity and dielectric properties of the composites were investigated. The results show that the introduction of In has no significant effect on the micro-structure and the phase composition, only slightly reducing the degree of defects in the composite material. With the increase of In content, the dielectric constant and electrical conductivity of the composite increase first and then decrease. The dielectric properties of In-Sn/rGO composite are best when the In doping mass fraction is 1.0%, the reflection loss value is -51.16 dB, the corresponding absorption frequency is 8.72 GHz, and the effective absorption bandwidth is 3.60 GHz.

Keywords: Sol-gel method; In-Sn/rGO composites; Micro-structure; Defect degree; Dielectric property

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.04.090

随着无线电子信息技术特别是通信和探测技术的蓬勃发展, 相关电子设备已经被广泛应用到生活的各个领域, 包括工业、医疗、军事和无线电通信<sup>[1-3]</sup>, 由此产生的电磁污染和电磁干扰已成为一种不可忽视的社会公害<sup>[4-5]</sup>。军事领域中, 为满足未来军事强国对空天战斗机的严苛需求, 防止军事战备被探测并提高装备的生存性能和突防能力, 亟须研发在 X 波段 (8~12 GHz) 拥有

较好介电性能的电磁波防护材料<sup>[6-8]</sup>。碳材料具有优异的导电性、导热性和机械性能, 使其成为当前最为典型的高频强吸收介电损耗吸收剂<sup>[9-10]</sup>, 然而, 由于过高的电导率和介电常数, 无法满足阻抗匹配原理, 致使纯碳材料的介电性能较差。为了解决这一问题, 科研工作者采用加载低电导率材料的方式调节碳材料的阻抗匹配特性, 增强碳材料对电磁波的衰减能力, 通过控制低

电导率材料和碳材料的复合比例制备最佳介电性能的吸收剂。目前,常见的用于调整碳材料阻抗匹配的低导电性材料主要有磁性金属氧化物和非磁性金属氧化物。磁性材料的磁导率主要体现在低频频段,在 X 波段往往不能达到预期的效果。因此,将低导电性非磁性金属氧化物(如 ZnO、TiO<sub>2</sub> 和 SnO<sub>2</sub>)与碳材料复合制备出的纳米杂化材料是满足 X 波段高性能需求的理想吸收剂。Lu 等<sup>[11]</sup>在 MWCNT 表面修饰 ZnO 纳米粒子合成 ZnO@MWCNT,当 ZnO@MWCNT 质量分数为 10%,厚度为 2.5 mm 时,相应的反射损耗(RL)值达到 -20.7 dB。Zhao 等<sup>[12]</sup>制备了 SnO<sub>2</sub>@MWCNT,其质量分数为 7.5%,厚度为 2.6 mm 时,RL 值达到 -56.9 dB,有效吸收带宽为 3.1 GHz。值得注意的是,SnO<sub>2</sub>/碳材料因具有低密度、高稳定性、宽频带等特点逐渐被科研人员所关注,但其作为新兴的电磁波吸收体,相关研究工作亟待开发<sup>[13-15]</sup>。

基于 Maxwell-Wagner Sillars 效应,由晶界、位错、界面/表面重构和点缺陷等晶体缺陷引起的界面电荷聚集可以增强材料的界面极化,进而对其介电性能起到促进作用。因此,可以通过调节晶体的缺陷程度来调整材料的介电常数<sup>[16]</sup>。杂质缺陷作为晶体缺陷的一种,引入机制简单且易于表征,是提升材料介电性能的最佳技术手段,其本质在于杂质缺陷中的晶格振动散射和电离杂质散射能够使体系中的载流子迁移率发生变化,进而调节材料的导电性和介电性能<sup>[17-19]</sup>。其中,In<sup>3+</sup>(0.079 nm)和 Sn<sup>4+</sup>(0.069 nm)的离子半径较为接近,在发生元素取代的过程中不会造成较大的晶格失配现象。而且,在禁带中出现的 In 4d 新能级会导致 SnO<sub>2</sub> 的电子结构发生改变,降低的电子密度可以减弱 Sn 和 O 原子轨道能级的耦合能力,促使 In-SnO<sub>2</sub> 的禁带宽度变窄,增强电子的跃迁能力。此外,当热处理温度升高后,In-SnO<sub>2</sub> 开始本征激发,会使载流子浓度大幅升高,有利于优化碳材料的阻抗匹配特性和介电性能。

因此,本文以纳米级 SnO<sub>2</sub> 为基体,通过引入 In 离子使 SnO<sub>2</sub> 体系中存在杂质缺陷,进一步与氧化石墨烯(GO)复合且经过高温热处理后合成 In-Sn/rGO 复合材料。探究不同 In 元素掺杂含量对复合材料微观组织结构、物相组成、缺陷程度、介电常数、导电性和介电性能的影响。

## 1 试验及方法

### 1.1 试样制备

(1) 利用溶胶-凝胶法制备纳米级 SnO<sub>2</sub>。

首先,将 SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 溶解于乙醇和蒸馏水的混合液中。然后,滴加正硅酸乙酯(TEOS)形成凝胶。密封老化后,加入 NaOH 溶液(2 mol/L),持续搅拌 30 min。

最后,经过洗涤、过滤、干燥并 550 °C 煅烧后获得纳米级 SnO<sub>2</sub> 粉末,留存备用。

### (2) In-SnO<sub>2</sub> 及 In-Sn/rGO 复合材料的制备。

首先,上述纳米级 SnO<sub>2</sub>(75 mmol)合成过程中,在加入 TEOS 的步骤之前,引入不同含量的硝酸铟(In(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>),经过 550 °C 下煅烧 4 h 后获得 In-SnO<sub>2</sub>。然后,将 In-SnO<sub>2</sub> 与 GO 按一定的质量比(1:30)混合后溶解于去离子水中,加入 1 mL 的硅烷偶联剂 KH-550 并置于反应釜中进行 180 °C 水热。最终,将真空抽滤且冷冻干燥后的粉末在 Ar 气氛下 800 °C 高温煅烧 2 h,获得 In-Sn/rGO 复合材料。

In 元素的掺杂质量分数分别为 0、0.5%、1.0% 和 1.5%,命名为 In-0、In-0.5%、In-1.0%、In-1.5%。

### 1.2 性能表征

复合材料的物相组成由丹东方圆仪器有限公司生产的 X 射线衍射(XRD)分析仪(DX-2700)进行测试。设备性能参数为采用铜靶的 K $\alpha$  射线( $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ ),扫速为 10 (°)/min,扫描范围为 10°~90°。使用德国 Zeiss 生产的 MERLIN compact 型场发射扫描电子显微镜(SEM)、日本电子公司的 JEOL-2100 型透射电子显微镜(TEM)及其配套的 X 射线能谱(EDAX)设备测试样品的微观组织结构和元素分布。采用雷尼绍公司的 RM-1000 型显微激光拉曼光谱仪(Raman)对材料进行缺陷程度表征。采用上海辰华仪器的 CHI760E 型电化学工作站测试材料的电化学阻抗谱(EIS),通过分析图谱去衡量材料的导电性。采用美国-安捷伦公司生产的 N5245A 型矢量网络分析仪对所有样品进行电磁参数的测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 In 元素掺杂对 Sn/rGO 物相组成和缺陷程度的影响

图 1 为不同 In 元素掺杂含量下 In-Sn/rGO 复合材料的 XRD 图谱,可以明确所有材料的物相组成。图 1

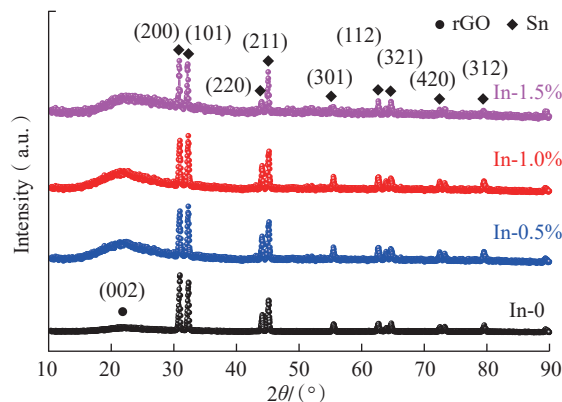


图 1 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of In-Sn/rGO with different In element doping contents

中显示所有材料的物相并未产生明显变化,均由一个明显的包峰和 Sn 单质的特征峰组成。23.0° 附近出现的包峰均归属于复合材料中非晶态的 rGO。2θ 为 30.7°、32.08°、43.93°、44.95°、55.36°、62.59°、64.63°、72.46° 和 79.54°, 分别对应 Sn 单质的 (200)、(101)、(220)、(211)、(301)、(112)、(321)、(420) 和 (312) 晶面,标准卡片为 PDF#86-2264,表明所有材料的主要成分均为 Sn/rGO。此外,利用 TEM 配套的 EDAX 能谱仪对具有不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 复合材料进行元素分析,结果显示 In 掺杂质量分数为 0.5%、1.0%、1.5% 的 In-Sn/rGO 复合材料均包含 C、In 和 Sn 3 种元素。测试结果表明,掺杂质量分数 1.0% 的 In-Sn/rGO 复合材料中,C、In 和 Sn 元素质量比分别为 44.79%、11.44% 和 43.77%,证明 In 元素被成功掺杂到 Sn/rGO 复合材料中。综上说明,少量 In 元素引入 Sn/rGO 后,复合材料的主要相成分并未发生改变。

利用 Raman 光谱分析 In-Sn/rGO 复合材料的缺陷程度,如图 2 所示。可以看出,所有材料在 1358 cm<sup>-1</sup> 和 1592 cm<sup>-1</sup> 附近存在明显的特征峰,归属于 rGO 的 D 峰 (Disorder peak, 无序峰) 和 G 峰 (Graphite peak, 石墨峰)。D 峰来源于 C 原子晶格的缺陷,对应电子结构的 A<sub>1g</sub> 振动模式,相对强度可以反映结晶结构的紊乱程度;而 G 峰则代表与一阶散射 E<sub>2g</sub> 振动模式对应的有序峰,是由 C 原子 sp<sup>2</sup> 杂化的面内伸缩振动引起的。D 峰和 G 峰的强度比 (I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub>) 是碳材料无序度和缺陷密度的衡量指标<sup>[20-21]</sup>。未掺杂 In 元素的 Sn/rGO 复合材料的 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 值为 1.29,与其相比,In-Sn/rGO 复合材料的 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 值较小,具有较低的缺陷程度。原因为在石墨化过程中,In、Sn 元素侵入碳原子点阵并占据位置的原子减少,促使复合材料的石墨化程度增强。此外,随着 In 元素掺杂含量的增多,In-Sn/rGO 复合材料的 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 值变化幅度不大,近似为 1.13,证明 In 元素的引入对复合材料缺陷程度

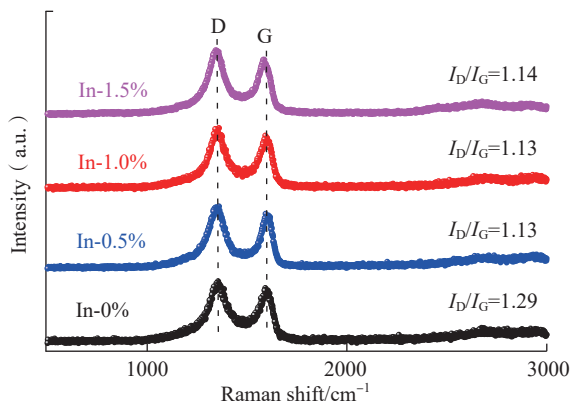


图 2 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的 Raman 图谱  
Fig.2 Raman patterns of In-Sn/rGO with different In element doping contents

影响较小。

### 2.2 In 元素掺杂对 In-Sn/rGO 微观形貌的影响

图 3 为不同 In 元素掺杂含量下, In-Sn/rGO 复合材料的微观形貌。从图 3 (a) 可以看出, Sn 微球被均匀地分布和包裹在 rGO 的薄片层中,尺寸约为 1.4 μm。从图 3 (b)~(d) 可以看出,相比于未掺杂 In 元素的 Sn/rGO 复合材料,其形貌并未产生较大变化,均为 rGO 片层包裹微球的状态,微球尺寸略有增加,直径约为 1.5 μm。因此,In 元素的掺杂对 Sn 微球和 Sn/rGO 复合材料的微观形貌影响并不明显。此外,利用 TEM 配合高灵敏度的 EDAX 对 In-Sn/rGO 复合材料展开检测,以此获取其微观结构和元素组成信息,并确认 In 元素在 Sn 微球中掺杂的分布情况。

从图 4 (a)~(c) EDAX 谱图可以观察到, In 元素掺杂质量分数为 1.0% 时, In-Sn/rGO 由 C、In 和 Sn 3 种元素组成,根据 TEM 照片 (图 4 (d)) 可知, In 和 Sn 元素仅分布在黑色球型结构中 (In-Sn 微球),说明具有杂质缺陷的 In-Sn/rGO 复合材料被成功合成,而且 In 元素在 Sn 微球中分布均匀。

### 2.3 In 元素掺杂对 Sn/rGO 导电性的影响

导电性是衡量复合材料介电性能的重要指标,通过电化学阻抗谱 (EIS) 的谱图能够详细分析 In-Sn/rGO 复合材料的载流子转移电阻 (R<sub>CT</sub>),不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 复合材料的 EIS 谱图如图 5 所示。曲线的半圆尺寸越小,代表着相应复合材料的导电性能越好。由此可知, In 元素的引入使 In-Sn/rGO 复合材料的导电性能发生了改变。随着 In 元素掺杂含量的逐渐增多,半圆的尺寸呈现出 In-1.0% > In-0% > In-1.5% > In-0.5% 的规律,说明复合材料导电性的变化趋势为先升高后降低。

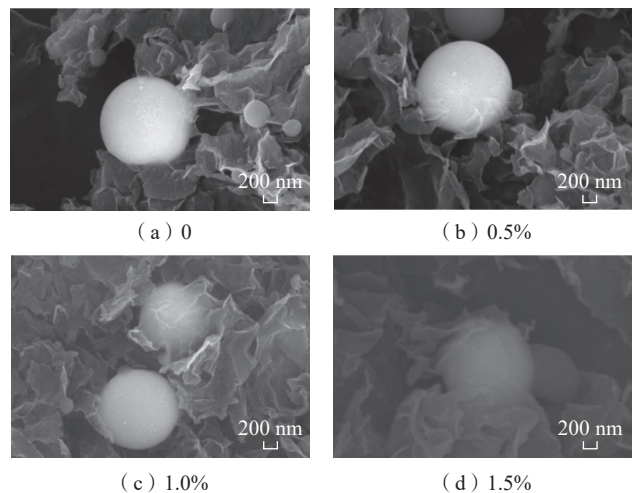


图 3 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的 SEM  
Fig.3 SEM images of In-Sn/rGO with different In element doping contents

### 2.4 In 元素掺杂对 In-Sn/rGO 介电常数的影响

通过观察复合材料的介电常数可以详细分析 In 元素掺杂含量与介电性能的内在联系。

复合材料的介电常数实部和虚部分别代表材料的储能和耗能能力,图 6 (a) 为不同 In 元素掺杂含量的 Sn/rGO 复合材料在 2~18 GHz 范围内的介电常数实部 ( $\epsilon'$ ) 的变化。随着 In 元素掺杂含量的增多,复合材料的实部数值也发生了改变, In-0、In-0.5%、In-1.0%、In-1.5% 在 X 波段范围内介电常数实部的平均数值分别近似为 7.6、22.5、7.4、18.7。由此可知,相较于其他 In-Sn/rGO 复合材料,掺杂 In 质量分数 1.0% 时的复合材料具有较低的储能能力。图 6 (b) 为复合材料的介电常数虚部 ( $\epsilon''$ ) 数值,其大体变化趋势与实部值一致,但 In 掺

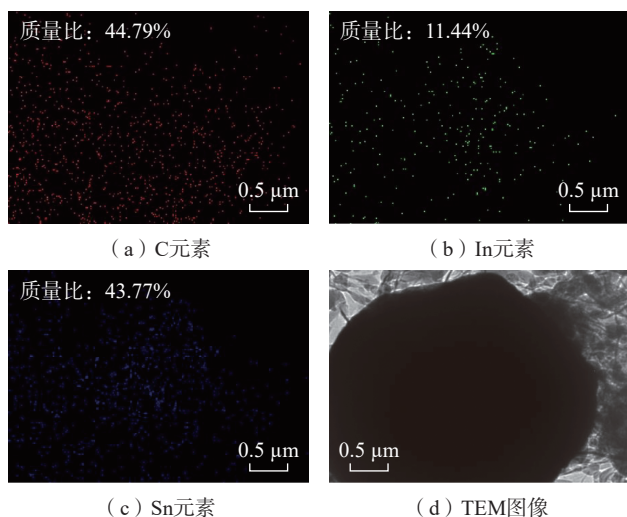


图 4 In 元素掺杂质量分数 1.0% 的 In-Sn/rGO 的 TEM 图像和 EDAX 谱图

Fig.4 TEM image and EDAX spectra of In-Sn/rGO with 1.0% mass fraction of In element doping

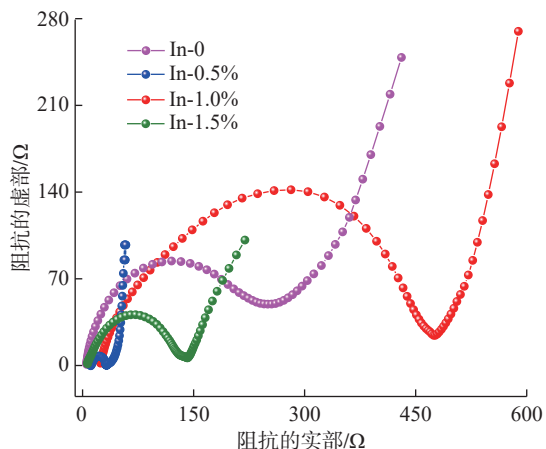


图 5 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的 EIS 谱图

Fig.5 EIS pattern of In-Sn/rGO with different In element doping contents

杂后复合材料的损耗能力明显高于 Sn/rGO 复合材料。这意味着 In 元素掺杂可以改变 In-Sn/rGO 复合材料的介电常数,且随着 In 元素含量增多介电常数呈现先升高后降低的趋势。

### 2.5 In 元素掺杂对 Sn/rGO 介电性能的影响

复合材料的介电性能可以用反射损耗值 RL 衡量,通过下列公式进行计算。

$$RL = 20 \lg |(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)| \quad (1)$$

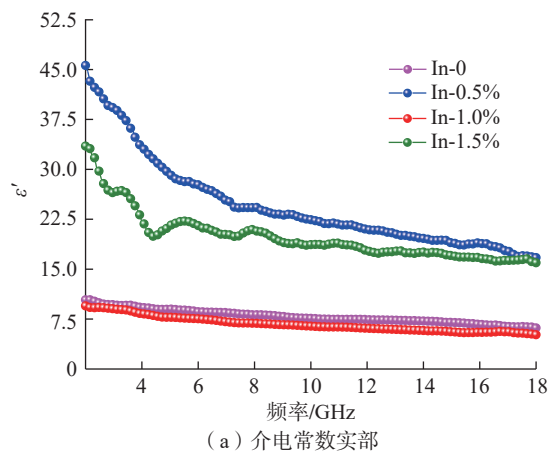
$$Z_{in} = Z_0 (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \tanh [j(2\pi f d / c) (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}] \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

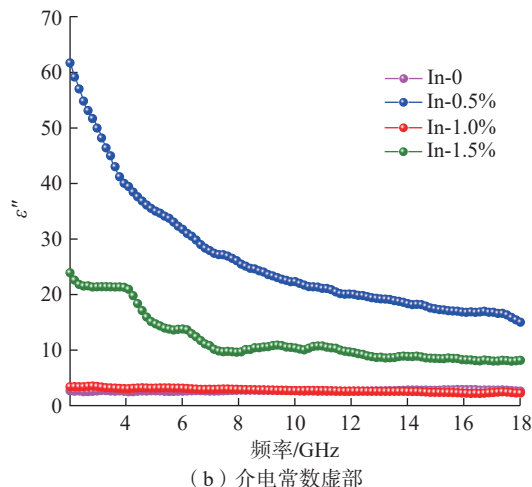
$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_r$  为相对复介电常数;  $\mu_r$  为相对复磁导率;  $d$  为吸收剂厚度;  $c$  为光速;  $f$  为频率;  $Z_{in}$  为吸收介质波阻抗;  $Z_0$  为自由空间波阻抗; RL 为吸收介质的反射损耗值;  $j$  为虚数单位;  $\mu_r$  为复磁导率;  $\mu'$  为磁导率实部;  $\mu''$  为磁导率虚部。由公式可知,材料的阻抗匹配特性决定了其介电性能的优异程度。

图 7 为掺杂不同 In 含量的 In-Sn/rGO 的阻抗匹配,



(a) 介电常数实部



(b) 介电常数虚部

图 6 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的介电常数实部和虚部

Fig.6 Permittivity real part and imaginary part of In-Sn/rGO with different In element doping contents

Z 值越趋近于 1,代表相应材料的阻抗匹配特性较好,可以看出, In 质量分数为 1.0% 时的复合材料具有最佳的阻抗匹配和电磁波衰减能力。由图 6 可以看出,过高的介电常数会导致 In-Sn/rGO 复合材料的阻抗失配,使其介电性能变差。

图 8 为掺杂不同 In 含量的 Sn/rGO 的介电性能, RL

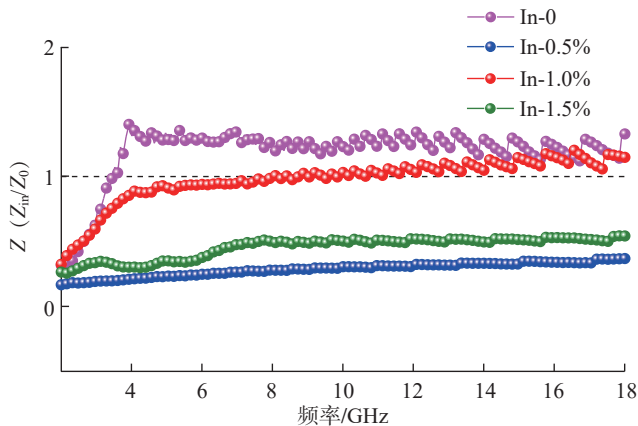


图 7 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的阻抗匹配

Fig.7 Impedance matching of In-Sn/rGO with different In element doping contents

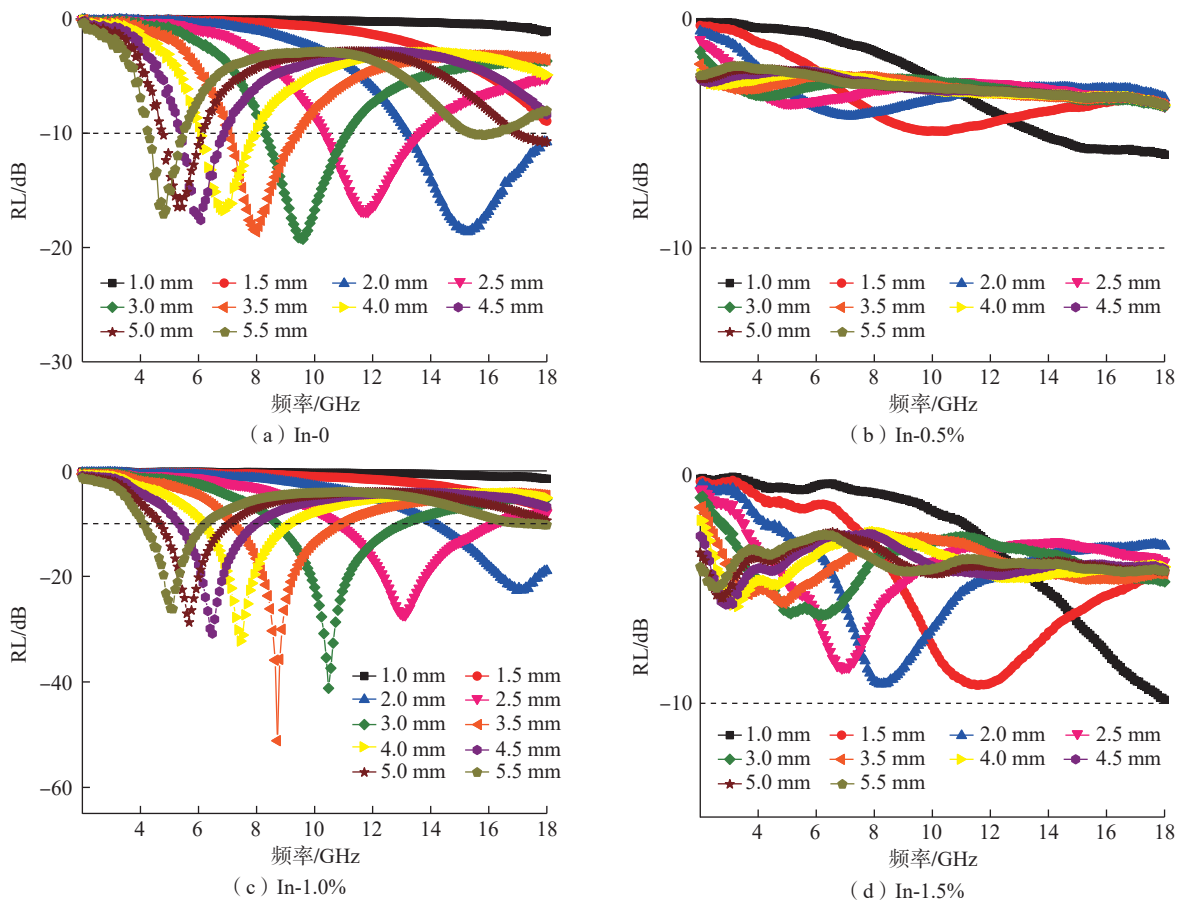


图 8 不同 In 元素掺杂含量的 In-Sn/rGO 的介电性能

Fig.8 Dielectric properties of In-Sn/rGO doped with different In element doping contents

值越小代表材料的介电性能越好。图 8 (a)为不含 In 元素 Sn/rGO 复合材料在 2~18 GHz 范围内的介电性能,匹配厚度为 2.0~5.5 mm 时,有效吸收频带范围为 4.32~18.00 GHz ( $<-10$  dB, 13.68 GHz),最佳 RL 值为  $-19.27$  dB。随着 In 元素掺杂含量逐渐增加, In-Sn/rGO 的介电性能呈现先升高后降低的趋势,证实可以通过控制 In 含量的方式实现复合材料的介电性能可调。从图 8 (c)可以看出, In 质量分数为 1.0% 时, In-Sn/rGO 复合材料具有最佳的介电性能, RL 值为  $-51.16$  dB,且有效吸收带宽为 3.60 GHz。此外, In 质量分数为 0.5% 和 1.5% 时,复合材料的最佳 RL 值分别为  $-5.94$  dB、 $-9.85$  dB,归因其较差的阻抗匹配特性。综上,引入适当的 In 元素有利于增强 Sn/rGO 复合材料的介电性能。

In-Sn/rGO 复合材料属于介电损耗型吸波材料,电磁波的损耗方式主要有电导损耗和极化损耗两种。电导损耗主要是由导电网络中自由电子的迁移和跳跃引起的。引入 In 元素使 SnO<sub>2</sub> 中出现新的能级态密度 (In 4d),使 Sn 和 O 原子周围的电子密度降低,且相应的轨道耦合作用减弱,这有利于体系中的载流子迁移。而后,经过高温热处理过程形成 In-Sn,高价金属中掺杂

低价金属后,会使 In-Sn 的费米能级降低,有助于 In-Sn/rGO 复合材料中的电子传输能力的提升,并增强其电导损耗;此外,极化损耗是由偶极极化和界面极化损耗组成的。一方面,In 元素掺杂后会使复合材料中存在缺陷,由该区域的空格点和束缚不紧密的电子所形成的偶极子,可在电场的作用下产生强烈的缺陷偶极极化损耗。另一方面,由于 In-Sn 和 rGO 之间存在较大的电导率差异,使得空间电荷在大量的非均质界面处积累,有利于产生界面极化并增强复合材料的电磁波衰减能力。综上所述,In 元素掺杂有利于增强 Sn/rGO 复合材料的电磁波吸收性能。

表 1<sup>[11-12,22-24]</sup> 将近年来具有代表性的非磁性金属氧化物 / 碳材料的电磁波吸收性能的文献内容与本工作中的 In-Sn/rGO 复合材料进行了对比。可以看出,本文所研究的 In-Sn/rGO 复合材料的介电性能具有一定的优势。

### 3 结论

本文采用溶胶-凝胶法结合高温热处理的方式合成了 In-Sn/rGO 复合材料,通过调整 In 元素的质量分数(0、0.5%、1.0% 和 1.5%)控制 SnO<sub>2</sub> 原料体系中的杂质缺陷程度,进而探究 In 元素掺杂对 Sn/rGO 复合材料本征特性和介电性能的影响规律,结论如下。

(1) In 元素掺杂含量对 In-Sn/rGO 复合材料微观形貌、物相组成、石墨化程度的影响较小。被 rGO 薄片包裹的微球尺寸略有变化,直径约为 1.5 μm; 因 In 元素掺杂含量较少, XRD 结果均显示出 Sn 和 rGO 的特征峰,相结构无明显变化; In-Sn/rGO 复合材料的  $I_D/I_G$  值约为 1.13,石墨化程度较为接近。

(2) 导电性和介电常数是衡量材料介电性能的重要指标。随着 In 元素掺杂含量的增加,导电性呈现先升高后降低的趋势,介电常数的变化规律与之相同,介电常数实部和虚部的数值先增大后减小。

(3) 随着掺杂的 In 元素质量分数增大, In-Sn/rGO 复合材料的阻抗匹配特性和介电性能呈现先升高后降低的规律。In 质量分数为 1.0% 时, In-Sn/rGO 复合材料具有最佳的阻抗匹配和介电性能, RL 值为 -51.16 dB,且有效吸收带宽为 3.60 GHz。

### 参考文献

- [1] ZHOU Y, CHEN L Y, JIAN M L, et al. Recent research progress of ferrite multielement microwave absorbing composites[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(12): 2200526.
- [2] YANG K, CUI Y H, LIU Z H, et al. Design of core-shell structure NC@MoS<sub>2</sub> hierarchical nanotubes as high-performance electromagnetic wave absorber[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131308.
- [3] LI W C, FENG L, SHI X L, et al. Mechanical and electromagnetic shielding properties of carbon foam[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(12): 2100452.
- [4] ZHOU Y, WANG S J, LI D S, et al. Lightweight and recoverable ANF/rGO/PI composite aerogels for broad and high-performance microwave absorption[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 213: 108701.
- [5] WANG L, MA Z L, ZHANG Y L, et al. Polymer-based EMI shielding composites with 3D conductive networks: A mini-review[J]. *SusMat*, 2021, 1(3): 413-431.
- [6] ZHOU M F, WAN G P, MOU P P, et al. CNT@NiO/natural rubber with excellent impedance matching and low interfacial thermal resistance toward flexible and heat-conducting microwave absorption applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(3): 869-880.
- [7] LIANG L L, GU W H, WU Y, et al. Heterointerface engineering in electromagnetic absorbers: New insights and opportunities[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(4): 2106195.
- [8] LI T T, XIA L, YANG H, et al. Construction of a Cu-Sn heterojunction interface derived from a Schottky junction in Cu@Sn/rGO composites as a highly efficient dielectric microwave absorber[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(10): 11911-11919.
- [9] XU J, CUI Y H, WANG J Q, et al. Fabrication of wrinkled carbon microspheres and the effect of surface roughness on the microwave absorbing properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 401: 126027.
- [10] ZHANG Y L, GU J W. A perspective for developing polymer-based electromagnetic interference shielding composites[J]. *Nano-Micro*

表 1 非磁性金属氧化物 / 碳材料的介电性能

Table 1 Dielectric properties of non-magnetic metal oxide/carbon materials

吸波剂	填充质量分数/%	RL/dB	厚度/mm	X 波段有效吸收带宽/GHz	参考文献
ZnO@MWCNT	10	-20.70	2.50	3.40	[11]
SnO <sub>2</sub> @MWCNT	7.5	-56.90	2.60	3.10	[12]
ZnO@MWCNT	40	-30.00	3.00	4.00	[22]
ZnO/C spheres	40	-52.00	1.75	2.50	[23]
C/ZnO	50	-48.63	1.30	3.36	[24]
In-Sn/rGO	10	-51.16	3.50	3.60	本文

Letters, 2022, 14(1): 89.

[11] LU M M, CAO W Q, SHI H L, et al. Multi-wall carbon nanotubes decorated with ZnO nanocrystals: Mild solution-process synthesis and highly efficient microwave absorption properties at elevated temperature[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(27): 10540–10547.

[12] ZHAO J, ZHANG J L, WANG L, et al. Superior wave-absorbing performances of silicone rubber composites via introducing covalently bonded SnO<sub>2</sub>@MWCNT absorbent with encapsulation structure[J]. Composites Communications, 2020, 22: 100486.

[13] ZHAO J, LU Y J, YE W L, et al. Enhanced wave-absorbing performances of silicone rubber composites by incorporating C–SnO<sub>2</sub>–MWCNT absorbent with ternary heterostructure[J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 20282–20289.

[14] WANG C, FENG Y M, ZHOU J J, et al. Numerical analysis, experimental verification and criterion establishment of non-magnetic microwave absorbing material[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 613: 256–264.

[15] LI T T, XIA L, ZHANG T, et al. Facile synthesis of Sn/reduced graphene oxide composites with tunable dielectric performance toward enhanced microwave absorption[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 108.

[16] QIN M, ZHANG L M, ZHAO X R, et al. Defect induced polarization loss in multi-shelled spinel hollow spheres for electromagnetic wave absorption application[J]. Advanced Science, 2021, 8(8): 2004640.

[17] MCCLUSKEY M D. Point defects in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(10): 101101.

[18] HU Z H, LIU X, HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ P L, et al. Interfacial charge and energy transfer in van der Waals heterojunctions[J]. InfoMat, 2022, 4(3): e12290.

[19] QUAN B, LIANG X H, JI G B, et al. Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption: Review and perspective[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 1065–1075.

[20] XU X F, SHI S H, TANG Y L, et al. Growth of NiAl-layered double hydroxide on graphene toward excellent anticorrosive microwave absorption application[J]. Advanced Science, 2021, 8(5): 2002658.

[21] WANG Y, DI X C, WU X M, et al. MOF-derived nanoporous carbon/Co/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNTs/rGO composite with hierarchical structure as a high-efficiency electromagnetic wave absorber[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 846: 156215.

[22] SONG W L, CAO M S, WEN B, et al. Synthesis of zinc oxide particles coated multiwalled carbon nanotubes: Dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave absorption[J]. Materials Research Bulletin, 2012, 47(7): 1747–1754.

[23] HAN M K, YIN X W, REN S, et al. Core/shell structured C/ZnO nanoparticles composites for effective electromagnetic wave absorption[J]. RSC Advances, 2016, 6(8): 6467–6474.

[24] WEI D C, QI Y J, LV S H, et al. Facile synthesis of thin coating C/ZnO composites with strong electromagnetic wave absorption[J]. Ceramics International, 2019, 45(4): 4448–4454.

(上接第 89 页)

HE Ning, YANG Yinfei, LI Liang, et al. Machining deformation of aircraft structure and its control[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(6): 32–35.

[2] 姜汇洋. 不同装夹方式下航空整体结构件的模态研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(26): 17–18.

JIANG Huiyang. Modal study of aviation integral structure under different clamping modes [J]. China High-Tech Enterprises, 2016(26): 17–18.

[3] 刘胤, 胡小秋. 基于ABAQUS的弱刚度结构件装夹布局优化技术[J]. 工具技术, 2008, 42(11): 19–22.

LIU Yin, HU Xiaoqiu. Optimum technology on clamping distribution of low-rigidity structure part based on ABAQUS[J]. Tool Engineering, 2008, 42(11): 19–22.

[4] GONZALO O, SEARA J M, GURUCETA E, et al. A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 209–218.

[5] CHAI S L, OUYANG L H, BI Q Z, et al. An adaptive fixture for suppress vibrations and measuring workpiece deformation of thin-walled casings[J]. Procedia CIRP, 2021, 101: 322–325.

[6] 张航, 雷学林, 何云, 等. 基于有限元仿真的聚酰亚胺切削参数优化[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 265–272.

ZHANG Hang, LEI Xuelin, HE Yun, et al. Optimization of polyimide cutting parameters based on finite element simulation[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2022, 48(2): 265–272.

[7] 马鹏举, 徐汶, 高延, 等. 薄壁机匣铣削加工颤振抑制研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 16–23.

MA Pengju, XU Wen, GAO Yan, et al. Research on chatter suppression in thin-walled casing milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(11): 16–23.

[8] 刘适, 马飞, 褚福舜. 基于TRIZ的飞机大型结构件加工适应性装夹设计[J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 90–95.

LIU Shi, MA Fei, CHU Fushun. Design of adaptive machining fixture for large aircraft structural part based on TRIZ[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 90–95.

[9] SHIRINZADEH B. Flexible fixturing for workpiece positioning and constraining[J]. Assembly Automation, 2002, 22(2): 112–120.

[10] 吴宝海, 郑志阳, 张阳, 等. 面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 21–34.

WU Baohai, ZHENG Zhiyang, ZHANG Yang, et al. Intelligent clamping technology for machining deformation and vibration control of thin-wall parts: A review of recent progress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(17): 21–34.

[11] RAGHU A, MELKOTE S N. Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 373–382.

[12] 阎青松, 莫秉华, 胡立光. 机床夹具设计与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

YAN Qingsong, MO Binghua, HU Liguang. Machine tool fixture design and practice[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.

通信作者: 程玉贤, 正高级工程师, 博士, 研究方向为隐身涂层。

(责编 七七)

通信作者: 雷学林, 副教授, 博士, 研究方向为高效自动化切削与检测技术、超硬涂层工具的制备与应用。

(责编 晓月)