

# 基于石墨烯基复合吸波材料的构筑及其研究进展

朱孟辉, 谭琳, 冯辉霞  
(兰州理工大学, 甘肃 兰州 73000)

**摘 要:** 综述了石墨烯基复合吸波材料的构筑及其应用研究进展。详细论述了石墨烯与导电聚合物、磁性纳米粒子等材料复合后的构效关系。并介绍目前石墨烯基复合吸波材料的合成、结构与性质研究进展, 对其在吸波方面的应用前景进行展望。

**关键词:** 石墨烯; 电磁污染; 复合材料; 聚合物; 磁性纳米粒子

中图分类号: TQ 201 文献标识码: A 文章编号: 1671-0460 (2020) 02-0373-04

DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2020.02.030

## Construction and Research Progress of Graphene-based Composite Wave-absorbing Materials

ZHU Meng-hui, TAN Lin, FENG Hui-xia  
(Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The progress in the construction and application of graphene-based composite wave-absorbing materials was reviewed. And the structure-activity relationship between graphene and conductive polymer, magnetic nanoparticles was introduced in detail. The research progress in synthesis, structure and properties of graphene-based composite wave-absorbing materials was discussed. The application prospect of graphene-based composite wave-absorbing materials was analyzed.

**Key words:** Graphene; Electromagnetic pollution; Composite material; Polymer; Magnetic nanoparticles

石墨烯具有超高比表面积、低密度、高稳定性和优良可加工性等特点, 被视为制备理想的“高、薄、宽、轻、强”型微波吸收材料之一。然而, 将石墨烯直接用于微波吸收, 由于其超高的电子迁移率 ( $\sim 10\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 导致高反射率 (降低了阻抗匹配特性), 吸波性能并不理想<sup>[1]</sup>。另外, 由于  $\pi$ - $\pi$  堆积的团聚作用, 使得石墨烯本身分散性极差, 这也严重影响了相应复合材料的整体性能<sup>[2]</sup>。

目前对石墨烯在吸波方面的研究主要集中在通过控制石墨烯基复合材料电导率的同时增大偶极极化和界面极化, 以达到阻抗匹配, 增加介电损耗。主要方法包括与磁损耗型吸波材料<sup>[3]</sup>、导电聚合物<sup>[4]</sup>等材料的复合, 以及自身的改性处理上。此外, 构建多孔 3D 结构<sup>[5]</sup>, 增加电磁波在材料内部的多次反射也不失为一种行之有效的处理手段。本文介绍了近几年石墨烯基吸波材料的研究进展, 并提出展望。

## 1 与其他介电、磁性材料复合

### 1.1 与磁性纳米粒子复合

石墨烯与磁性铁氧体复合, 可以降低其整体相

对介电常数 ( $\epsilon_r$ ), 而其本身的磁性又可以增加材料的整体磁导率 ( $\mu_r$ ), 在很大程度上促使其接近完全阻抗匹配所需的条件 ( $\epsilon_r = \mu_r$ ), 以确保入射电磁波能最大限度地进入材料内部完成吸收损耗, 不失为是一种常见有效的手段。

Yin 等<sup>[6]</sup>通过简单的溶剂热法制备 RGO/ $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  复合材料, 该材料在 X 波段具有超强的介电损耗能力。研究发现  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的加入增加了界面间的相互作用加强了界面极化, 有效地改善了石墨烯的电磁参数, 降低入射电磁波反射率, 增强微波吸收, 拓宽有效吸收频带宽, 使石墨烯具有良好的吸波性能, 在吸波涂层厚度 2.5 mm 时, 在 10.09 GHz 处最低反射损耗 -59.65 dB。

Peng 等<sup>[7]</sup>采用简单、快速的微波辅助法制备了 RGO/ $\text{Co}_{0.33}\text{Ni}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Fe}_2\text{O}_4$  二元复合材料。结果表明, 当填充率为 20% (wt) 涂层厚度 2.3 mm 时, 最低反射损耗 -24.29 dB, 有效吸收频带宽 8.48 GHz (9.52~18 GHz)。与纯石墨烯和  $\text{Co}_{0.33}\text{Ni}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Fe}_2\text{O}_4$  纳米粒子相比, 纳米复合材料表现出更好的电磁波吸收能力, 这主要是因为介电损耗和磁损耗的协同

**基金项目:** 国家自然科学基金(21664009, 51063003); 国家科技部“科技人员服务企业行动项目”(2009GJG10041); 甘肃省高校基本科研业务费项目(1105ZTC136)甘肃省自然科学基金(17JR5RA135)。

**收稿日期:** 2019-04-19

**作者简介:** 朱孟辉 (1992-), 男, 周口市人, 硕士, 研究方向: 电磁屏蔽与吸波材料。E-mail: ZHUMHK@163.com。

**通讯作者:** 谭琳 (1979-), 女, 副教授, 博士, 研究方向: 电磁屏蔽与吸收、石墨烯基复合材料。E-mail: tanlin@lut.cn。

效应, 以及良好的阻抗匹配。Liu 等<sup>[8]</sup>通过溶胶-凝胶自蔓延法制备  $\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  (CNZF), 热还原法制备 RGO, 研究了 CNZF/RGO 单层和双层复合材料的吸波性能。30% (wt) 的 CNZF 为复合材料的匹配层, 30% 的 RGO 为复合材料的吸收层, 总厚度 2.5 mm 的双层吸波材料, 在 16.9 GHz 处, 最大反射损耗-49.5 dB。-10 dB 以下的吸收频带宽 6 GHz。双层吸波材料吸波性能的提高归因于 CNZF 层的阻抗匹配特性和 RGO 层的介电损耗能力。

### 1.2 与导电聚合物复合

由于石墨烯电导过高, 造成高反射, 吸波性能差, 人们致力于复合低介电的高分子聚合物来调节。与导电聚合物复合, 其总体吸收性能主要来自介电损耗。石墨烯与聚合物的协同作用可以大大促进其整体介电损耗的增加, 再加上石墨烯的层状结构可以高效的提高其内部多重反射, 从而可以更加有效地提高其整体吸收性能。

Li 等<sup>[9]</sup>采用简单的一步还原自组装工艺制备石墨烯/聚吡咯 (GPA) 复合材料, 聚吡咯纳米棒 (PNRs) 不仅可以避免石墨烯片堆叠, 提高机械强度还能调节 GPA 的介电常数, 相比于石墨烯微波吸收性能得到改善。当匹配厚度 3 mm 时, 在 6.4 GHz 处最大反射损耗-51.12 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 5.88 GHz (10.48~16.36 GHz)。Chen 等<sup>[10]</sup>采用原位插层聚合一步合成石墨烯/聚苯胺 (EG/PANI) 复合材料, 通过改变 EG 与 PANI 的质量比得到系列 EG/PANI 复合材料。并研究了不同导电性下复合材料的吸波性能。随着 EG 量的增加导电性呈现出先减小后增加的趋势, 复合材料在吸波厚度 3.5 mm 时, 10.3 GHz 处最大反射损耗-36.9 dB, 有效吸收频带宽 5.3 GHz (8.2~13.5 GHz), 与纯石墨烯相比吸波性能得到显著提高。

Yan 等<sup>[11]</sup>以氨基化石墨烯 (AFG) 为基底通过原位聚合法合成了聚苯胺纳米棒/石墨烯 (PANI-AFG) 复合材料。利用矢量网络分析仪测试了复合材料的吸波性能, 当匹配厚度 2.5 mm 时, 在 11.2 GHz 处最大反射损耗-51.5 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 4 GHz。Liu 等<sup>[12]</sup>采用原位聚合法和水热法制备了石墨烯/聚噻吩 (GN/PEDOT) 复合材料, 涂层厚度 2.5 mm 时, 在 6.9 GHz 处最大反射损耗-13.4 dB。Zhag 等<sup>[0]</sup>采用简单的热成型技术, 以聚偏氟乙烯 (PVDF) 和氧化石墨烯 (RGO) 为原料制备 RGO/PVDF 复合材料。通过 GO 表面的含氧官能团与 PVDF 中的氟基团之间的相互作用。使 GO 均匀的分散到 PVDF 中, 经过热压工艺将 GO 还原为 RGO。测试结果表明, 当填充量为 3% (wt) 时, RGO/PVDF 复材料在 10.8 GHz 处的最大反射损耗

-25.6 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 4.32 GHz。

### 1.3 与过渡金属硫化合物复合

与 CoS、CuS、MoS<sub>2</sub>、ZnO 等硫化合物复合, 通过牺牲石墨烯部分电导来增强吸波效能, 也是近几年比较常见的方法。

Yuan 等<sup>[14]</sup>通过简单溶液剂热法合成了 CoS-RGO 复合材料, 在石蜡基体中加入 20% (wt) 的复合材料, 系统的研究了负载质量、涂层厚度和 CoS 的用量对吸波性能的影响, 当厚度 2 mm 时, 在 6.8 GHz 处最大反射损耗-54.2 dB, 有效吸收带宽 4 GHz, 当匹配厚度 4 mm, 低于-10 dB 的吸收频带宽 13.6 GHz (4.4~18 GHz)。Zhang 等<sup>[15]</sup>在温和的湿化学条件下, 采用原位生长法成功的制备了 RGO/CuS 纳米复合材料, CuS 纳米球均匀的嵌入石墨烯片层中间, 形成了独特的核-壳纳米结构, 匹配厚度 2.5 mm 时最低反射损耗-32.7 dB。Zhang 等<sup>[16]</sup>采用还原氧化石墨烯 (RGO) 和四角状 ZnO (T-ZnO) 混合制备了一种新型的微波吸收材料, 在 2~18 GHz 范围内研究了 RGO 质量分数和复合材料厚度对微波吸收性能的影响。电磁参数表明, RGO-ZnO 复合材料主要依赖介电损耗。5% (wt) RGO 和 10% T-ZnO 的复合材料厚度 2.9 mm 时, 在 14.43 GHz 处最佳反射损耗-59.5 dB。

Wang 等<sup>[17]</sup>首次制备了 RGO/MoS<sub>2</sub> 复合材料研究了其吸波性能, RGO/MoS<sub>2</sub> 在较薄的厚度和较低的填料下具有较高的吸收效率和较宽的吸收带, 在涂层厚度小于 2 mm 时, 在 11.68 GHz 处最大反射损耗-50.9 dB。Liu 等<sup>[18]</sup>通过阴离子交换反应在超长氮掺杂碳纳米管上生长 MoS<sub>2</sub> 纳米薄膜, 形成三维分层结构, 制备的混合纳米管长度约 100 μm, 其中 MoS<sub>2</sub> 纳米片的厚度小于 7.5 nm。在 2.5 mm 厚度下表现出良好的电磁波衰减性能, 最大反射损耗-38.8 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 5.4 GHz, 研究结果表明碳纳米管表面直接生长 MoS<sub>2</sub> 是提高电磁波衰减常数的关键因素。

### 1.4 与其他材料

Ding 等<sup>[19]</sup>采用超声过滤法, 将 PVP 处理的多壁碳纳米管 (PVP@MWNTs) 和石墨烯纳米片 (GNPs) 相结合得到 PVP@MWNTs/GNPs 复合材料。研究了材料在 8.2~12.4 GHz 频率范围内的吸波性能。涂层厚度 2 mm 时, 在 11.29 GHz 处的最大反射损耗-26.5 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 1.6 GHz。由于将 PVP@MWNTs 均匀的嵌入 GNPs 片层内, 使 PVP@MWNTs/GNPs 杂化材料具有最佳分散性, 电子转移效率显著提高。

Jiang 等<sup>[20]</sup>通过氧化石墨烯涂覆 SiC 晶须浆料的定向凝固和 GO@SiC 气凝胶的热还原制备轻质海绵状的 RGO/SiC。由于石墨烯包裹 SiC 晶须形成了

独特的有序结构, 这种特殊结构具有密度低, 微波吸收性能强等优点。在涂层厚度 3 mm 时, 在 10.52 GHz 处最大反射损耗-47.3 dB。低于-10 dB 的吸收频带宽 4.7 GHz。

### 1.5 构筑三元/四元复合材料

通过同时加入介电和磁损耗材料, 可以使得电磁特性最优化, 让吸波材料具备更宽更强的吸收能力。目前更多的工作, 是将石墨烯同时与介电材料和磁性材料复合, 制备三元甚至四元体系, 从而得到性能更加优异的吸波材料。

Liu 等<sup>[21]</sup>采用原位聚合法、共沉淀法和两步法分别制备了 GN/PEDOT、GN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 GN/PEDOT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 三种复合材料。GN/PEDOT 复合材料在涂层厚度 2.5 mm 时, 在 6.9 GHz 处最大反射损耗-13.4 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 2 GHz (8.5~10.5 GHz); GN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 复合材料在涂层厚度 2 mm 时, 在 13.6 GHz 处最大反射损耗-18.9 GHz; GN/PEDOT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 三元复合材料的吸波能力得到显著提高, 涂层厚度 2.9 mm 时, 在 8.9 GHz 处最大反射损耗-56.5 dB, 低于-10 dB 的吸收频带宽 3 GHz。

He 等<sup>[22]</sup>通过湿化学法和热压法合成了聚偏氟乙烯 (PVDF)、聚偏氟乙烯/钡铁氧体 (PVDF-BFO) 和聚偏氟乙烯/钡铁氧体/还原氧化石墨烯 (PVDF-BFO-RGO) 复合材料。测试结果表明 PVDF 几乎没有反射损耗; PVDF/BFO 在 11~16 GHz 中最大反射损耗-10 dB; PVDF-BFO-RGO 三元复合材料吸波效果最佳, 涂层厚度 2 mm 时, 在 11 GHz 处最大反射损耗-32 dB, 低于-20 dB 的吸收频带宽 3.2 GHz (9.6~12.8 GHz)。

Wang 等<sup>[23]</sup>通过水热法和化学氧化聚合法, 成功的制备了由 WO<sub>3</sub> 修饰的 GS@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI 四元复合材料, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 WO<sub>3</sub> 的纳米粒子的平均粒径分别为 300~500 nm 和 50~150 nm, 均匀的分布在 GS@PANI 层间, GS@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI@WO<sub>3</sub> 的吸波性能比 GS@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、GS@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI, 有显著提高, 涂层厚度 4 mm 时最大反射损耗-46.7 dB, 1.5 mm 时低于-10 dB 的吸收频带宽 1.8 GHz。

## 2 构建 3D 多孔框架

三维石墨烯结构, 可实现电磁波在材料内部的多重反射, 在减少材料用料的前提下, 进一步提高吸波性能, 实现拓宽吸收频带, 增大吸收强度。

Zhang 等<sup>[24]</sup>通过一步水热法合成了大比表面积 rGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 三维多孔骨架的三元复合材料。涂层厚度 2 mm 时, 在 13.44 GHz 处最大反射损耗-36 dB, 低于-10 dB 的吸收带宽 3.6 GHz (12~15.6 GHz)。Chen 等<sup>[25]</sup>采用超声过滤法, 将二维氧化还原石墨

烯 (RGO) 与一维多壁碳纳米管 (MWTNs) 相结合制备了含极性官能团的三维吸波材料, 在此基础上, 采用相同的方法制备了石墨烯纳米片 (GNPs) 和 MWNTs 三维混合吸收材料, 研究了不用石墨烯结构 (GNPs, rGO) 对微波吸收性能的影响, RGO/MWNTs 最大反射损耗-41 dB, GNPs/MWNTs 最大反射损耗-23 dB。

Zhao 等<sup>[26]</sup>采用自蔓延燃烧法制备了三维非晶碳纳米管 (ACNT)/还原氧化石墨烯 (RGO)/BF<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (BF) 复合材料。相互连接的 ACNTs 和石墨烯与 BF 形成导电网络提高材料的介电损耗和磁损耗。ACNT/RGO/BF 复合材料在 2~18 GHz 范围内的最大反射损耗-19.03 dB。由 ACNT/RGO 构建的三维结构, 具有一定的二面角, 可以通过三维结构内部的多次反射来吸收电磁波。三维互联的 ACNT/RGO 网络的高导电率将通过分子摩擦和介电损耗以热的形式引起能量耗散。

Zhang 等<sup>[27]</sup>采用水热法合成了 RGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 三维三元复合水凝胶, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子均匀的分布在 MCNTs 纤维和 RGO 组成的三维结构表面, RGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 具有良好的吸波性能, 当涂层厚度 2 mm 时, 在 13.44 GHz 处的最大反射损耗-36 dB。涂层厚度从 2 到 4 mm 时, 低于-10 dB 的吸收频带宽 11.4 GHz (6.5~17.9 GHz)。因此制备的 RGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 复合水凝胶是一种新的轻质高性能吸波材料。其良好的微波吸收性能主要由于阻抗匹配较好。

## 3 杂原子掺杂石墨烯基复合材料

杂原子掺杂是调控石墨烯电学性质的一种有效手段。近几年, 通过杂原子掺杂制备石墨烯基吸波材料的工作也渐露端倪。

氮掺杂石墨烯后, 费米能级高于狄拉克点, 费米能级附近的能态密度被抑制, 导致价带和导带分离, 从而形成 N 型半导体材料, Li 等<sup>[28]</sup>将氮掺杂石墨烯与 CoNi 纳米晶体复合用于吸波, 低于-10 dB 的吸收频带宽 3.6~18 GHz, 最大衰减率为-22 dB。Sudeep 等<sup>[29]</sup>通过氟化, 将氟原子引入石墨烯片层形成 C-F 共价键, 从而产生宽带隙的氟掺杂石墨烯, 实现了对 S 波段和 X 波段的微波吸收, 最低反射损耗分别为-37 dB 和-31 dB。

## 4 结论与展望

本文综述了石墨烯与低介电型材料及磁损型纳米粒子复合制备优异性能吸波材料的思路、制备方法及其构效关系, 但这无疑会使吸波材料变得厚重, 从而无法实际应用到国防安全及航天航空中的吸波隐身及杂电流干扰消除等领域。近几年人们通过 3D

结构构筑,实现了多种反射从而更大限度的减少了材料的用量,可以有效达到吸波材料“轻”、“薄”的要求;而掺杂原子在其表面生成缺陷和杂原子官能团可对其本身在电磁场下的阻抗匹配和偶极化产生贡献,提高其吸波效能,也是实现吸波材料的“轻、薄、强”的有效方法。结合复合手段,成为现在石墨烯基吸波隐身材料研究的新热点。

#### 参考文献:

- [1] Wang C, Han X J, Xu P, et al. The electromagnetic property of chemically reduced graphene oxide and its application as microwave absorbing material[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 72906.
- [2] Ren Y L, Zhu C L, Zhang S, et al. Three-Dimensional SiO<sub>2</sub>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Core/Shell Nanorod Array/Graphene Architecture: Synthesis and Electromagnetic Absorption Properties[J]. *Nanoscale*, 2013, 5: 12296-12303.
- [3] Jian X, Wu B, Wei Y, et al. Facile Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GCs Composites and Their Enhanced Microwave Absorption Properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8 (9): 6101-6109.
- [4] Pan C, Gu H, Dong L. Synthesis and electrochemical performance of polyaniline@MnO<sub>2</sub>/graphene ternary composites for electrochemical supercapacitors[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 303: 175-181.
- [5] Liu W, Li H, Zeng Q, et al. Fabrication of ultralight three-dimensional graphene networks with strong electromagnetic wave absorption properties[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3 (7): 3739-3747.
- [6] Kong L, Yin X W. Electromagnetic wave absorption properties of reduced graphene oxide modified by maghemite colloidal nanoparticle clusters[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 117: 19701-19711.
- [7] Peng J H, Peng Z W, Zhu Z P, et al. Achieving ultra-high electromagnetic wave absorption by anchoring Co<sub>0.33</sub>Ni<sub>0.33</sub>Mn<sub>0.33</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on graphene sheets using microwave-assisted polyol method[J]. *Ceramics International*, 2018, 17 (24): 21015-21026.
- [8] Liu P J, Yao Z J, Ng V M H, et al. Enhanced Microwave Absorption Properties of Double-Layer Absorbers Based on Spherical NiO and Co<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.4</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ferrite Composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 31 (2): 1-9.
- [9] Liu B, Li J H, Wang L F, et al. Ultralight graphene aerogel enhanced with transformed micro-structure led by polypyrrolenano-rods and its improved microwave absorption properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 97: 141-150.
- [10] Chen X G, Meng F C, Zhou Z W, et al. One-step synthesis of graphene/polyaniline hybrids by in situ intercalation polymerization and their electromagnetic properties[J]. *Nanoscale*, 2014, 6 (14): 8140-8148.
- [11] Yan J, Huang Y, Wei C, et al. Covalently bonded polyaniline/graphene composites as high-performance electromagnetic (EM) wave absorption materials[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 99: 121-128.
- [12] Liu P B, Huang Y, Zhang X. Synthesis, characterization and excellent electromagnetic wave absorption properties of graphene/poly(3,4-ethylenedioxythiophene) hybrid materials with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5 (23): 12355-12360.
- [13] Zhang X J, Wang G S, Cao W Q, et al. Fabrication of multi-functional PVDF/RGO composites via a simple thermal reduction process and their enhanced electromagnetic wave absorption and dielectric properties[J]. *RSC Advances*, 2014, 4 (38): 19594-19601.
- [14] Huang T, He M, Zhou Y, et al. Solvothermal fabrication of CoS nanoparticles anchored on reduced graphene oxide for high-performance microwave absorption[J]. *Synthetic Metals*, 2017, 224: 46-55.
- [15] Zhang X J, Wang G S, Wei Y Z, et al. Polymer-composite with high dielectric constant and enhanced absorption properties based on graphene-CuS nanocomposites and polyvinylidene fluoride[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1 (39): 12115-12122.
- [16] Zhang L, Zhang X, Zhang G, et al. Investigation on the optimization, design and microwave absorption properties of reduced graphene oxide/tetrapod-like ZnO composites[J]. *RSC Advances*, 2015, 5 (14): 10197-10203.
- [17] Wang Y F, Chen D L, Yin X, et al. Hybrid of MoS<sub>2</sub> and Reduced Graphene Oxide: A Lightweight and Broadband Electromagnetic Wave Absorber[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7 (47): 26226-26234.
- [18] Liu L, Zhang S, Yan F, et al. Three-dimensional Hierarchical MoS<sub>2</sub>/Nanosheets/Ultralong N-doped Carbon Nanotubes as High-Performance Electromagnetic Wave Absorbing Material[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10 (16): 14108-14115.
- [19] Ding L C, Zhang A B, Lu H L, et al. Enhanced microwave absorbing properties of PVP@multi-walled carbon nanotubes/graphene three-dimensional hybrids[J]. *RSC Advance*, 2015, 5: 83953-83959.
- [20] Jiang Y, Chen Y, Liu Y J, et al. Lightweight spongy bone-like graphene@SiC aerogel composites for high-performance microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 377: 522-531.
- [21] Liu P, Huang Y, Zhang X. Synthesis, characterization and excellent electromagnetic wave absorption properties of graphene/poly(3,4-ethylenedioxythiophene) hybrid materials with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2014, 617: 511-517.
- [22] He H, Luo F, Qian N, et al. Improved microwave absorption and electromagnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>-Poly(vinylidene fluoride) composites by incorporating reduced graphene oxides[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117 (8): 85502.
- [23] Wang Y, Wu X, Zhang W, et al. 3D heterostructure of graphene@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@WO<sub>3</sub>@PANI: Preparation and excellent microwave absorption performance[J]. *Synthetic Metals*, 2017, 231: 7-14.
- [24] Zhang H, Hong M, Chen P, et al. 3D and ternary rGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite hydrogels: synthesis, characterization and their electromagnetic wave absorption properties[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 665: 381-387.
- [25] Chen Y, Zhang A, Ding L, et al. A three-dimensional absorber hybrid with polar oxygen functional groups of MWNTs/graphene with enhanced microwave absorbing properties[J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 108: 386-392.
- [26] Zhao T, Ji X, Jin W, et al. Direct in situ synthesis of a 3D interlinked amorphous carbon nanotube/graphene/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> composite and its electromagnetic wave absorbing properties [J]. *RSC Advances*, 2017, 7 (26): 15903-15910.
- [27] Zhang H, Hong M, Chen P, et al. 3D and ternary rGO/MCNTs/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite hydrogels: Synthesis, characterization and their electromagnetic wave absorption properties[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 665: 381-387.
- [28] Feng J, Pu F Z, Li Z X, et al. Interfacial interactions and synergistic effect of CoNi nanocrystals and nitrogen-doped graphene in a composite microwave absorber[J]. *Carbon*, 2016, 104: 214-225.
- [29] Sudeep P M, Vinayaree S, Mohanan P, et al. Fluorinated graphene oxide for enhanced S and X-band microwave absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 61301-212.