

石墨烯基吸波材料的研究进展

康 帅, 乔士亚, 胡祖明, 于俊荣, 王 彦, 诸 静

(东华大学 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘 要: 诸如铁氧体、磁性金属粒子及其合金等传统吸波材料, 密度大、环境稳定性差、对电磁波的吸收弱以及吸收频带窄的缺陷限制了其在吸波领域的应用, 而石墨烯因其较高的机械强度、较小的密度以及优异的介电性能受到了吸波材料领域众多学者的关注; 但由于石墨烯的阻抗匹配性能较差, 损耗机制比较单一, 导致其吸波性能较差, 因此, 研究人员通常将石墨烯与其他介电损耗型或者磁损耗型材料复合来增强其吸波性能, 此外对吸波剂的结构进行合理的设计也是增强其吸波性能的有效途径。结合国内外的发展状况, 对石墨烯基吸波材料的制备以及性能研究做了综述性介绍, 并展望了未来石墨烯基吸波材料的发展方向。

关键词: 石墨烯; 介电性能; 反射损耗; 吸波性能; 吸波材料

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)01-0064-06

Advances in Graphene-Based Microwave Absorption Materials

KANG Shuai, QIAO Shiya, HU Zuming, YU Junrong, WANG Yan, ZHU Jing

(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Conventional microwave absorption materials, such as ferrite, magnetic metal particles and their alloys, have a few shortcomings of high density, poor environmental stability, weak electromagnetic wave absorption and narrow absorption bandwidth, limiting their applications in the field of microwave absorption. Recently, graphene has grabbed the considerable attention from many researchers, owing to its high mechanical strength, low density and excellent dielectric properties. However, the poor impedance matching and single loss mechanism of graphene result in the weak microwave absorption performance. Thus, it is a common strategy to enhance the microwave absorption performance by the incorporation of other dielectric or magnetic loss material. In addition, the rational structure design of the microwave absorber is also conducive to the absorption of the microwave. Based on the research situation at home and abroad, this paper summarizes the recent research progresses of both preparation and performance of graphene-based microwave absorption materials, and the development tendency is also put forward.

Key words: graphene; dielectric properties; reflection loss; microwave absorption properties; microwave absorption materials

1 前 言

现如今, 电磁波技术的运用越来越广泛, 在社交、休闲娱乐等领域给我们带来便利的同时也造成了严重的电磁污染; 而在军事领域, 军用飞机担负着夺取制空权的重大作战使命, 在未来战争中, 如何有效地减弱甚至

避免雷达对飞机的探测就显得格外重要, 于是广大科研工作者将目光投向了吸波材料^[1-5]。吸波材料对电磁波具有较强的吸收能力, 不论是在民用领域还是军事领域, 都具有较大的研究价值。

一种优异的吸波材料需同时具备两大特性, 即阻抗匹配特性和衰减特性^[6]。阻抗匹配特性要求吸波材料的阻抗和自由空间的阻抗相匹配, 以使得电磁波能最大限度地进入材料内部; 衰减特性则是通过材料本身所具有的性质, 如介电损耗和磁损耗, 将进入材料的电磁能转化为热能进而耗散掉, 或是由于材料自身的结构特性, 通过干涉相消的原理达到吸收电磁波的目的^[7]。材料的吸波性能主要取决于其本身的介电性能、磁性能以及不同组分间的界面极化现象。

收稿日期: 2018-10-15 修回日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51473031); 上海市自然科学基金项目(15ZR1401100)

第一作者: 康 帅, 男, 1994 年生, 硕士研究生

通讯作者: 胡祖明, 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师,

E-mail: hzm@ dhu. edu. cn

DOI: 10. 7502/j. issn. 1674-3962. 201810008

传统的吸波材料, 如铁氧体^[8, 9]、磁性金属粒子及其合金^[10, 11]等, 由于其具有优异的磁性能, 因此在复合吸波剂的设计中发挥着重要的作用。然而, 此类吸波材料密度大、易腐蚀、吸收弱、吸收频带窄的缺点限制了其在功能性复合材料中的应用, 因此, 新型吸波材料的研发迫在眉睫, 目前, “薄、轻、宽、强”成为新型吸波材料的研究方向。

石墨烯作为新型碳材料中重要的一员, 密度低、耐腐蚀、比表面积大、电导率和热导率高以及机械强度高的优异性能使其成为各个领域科研工作者的热点研究对象^[12-15], 更为重要的是, 其轻质和优异的介电性能满足新型吸波材料“薄、轻、宽、强”的发展需求, 于是石墨烯逐渐替代传统吸波材料, 成为一种新型吸波材料。然而, 石墨烯较大的介电常数造成其阻抗匹配性能较差, 而且石墨烯的电磁波损耗机制只能单纯依靠介电损耗, 所以将其单独作为吸波剂来使用, 必然会造成吸波性能差的问题^[16-19], 进而无法满足实际需求; 因此为了获得吸波性能优异的吸波剂, 研究者们通常将石墨烯与其他介电损耗型或者磁损耗型材料复合形成阻抗匹配的吸波剂; 此外, 通过对吸波剂的结构进行优化也可达到该目的。本文结合国内外的研究状况, 对石墨烯基复合材料的制备及其吸波性能研究做了综述性介绍, 并展望了未来石墨烯基吸波材料的发展方向。

2 石墨烯吸波材料

经过十几年的发展和完善, 石墨烯的制备技术日趋成熟, 考虑到生产成本, 化学氧化还原法仍然是目前实验室能够大规模制备还原氧化石墨烯(rGO, 通常意义上的石墨烯)的方法, 所以被广大学者所采用。Wang 等^[20]采用化学还原氧化石墨烯的方法制备了 rGO, 并对其吸

波性能进行了研究, 结果发现, 该 rGO 在 7 GHz 频率处取得最小反射损耗(reflection loss, RL), 为-6.9 dB, 相较于通过机械剥离法制备得到的石墨烯, 其吸波性能有了较大的提高, 原因在于: rGO 表面存在残余的缺陷和基团, 这不但能够提高其和自由空间的阻抗匹配, 促进电磁能向热能转化, 同时还会产生缺陷极化弛豫和基团的电子偶极子弛豫, 进而促进 rGO 对电磁波的吸收; 而高质量的石墨烯表面的缺陷和基团极少, 而且具有的较高的介电常数和较低的磁导率造成了其和自由空间的阻抗不匹配, 无法使电磁波入射到石墨烯的内部, 因此不利于石墨烯对电磁波的吸收。

纯石墨烯吸波材料, 无法通过改变材料的组成来增强其吸波性能, 所以只能通过设计材料的结构来增强其阻抗匹配性能, 并引入多重损耗机制。近几年, 关于石墨烯的研究从二维片层结构向三维网络结构转化^[21], 与二维片层结构相比, 三维网络结构在维持二维片层结构属性的同时, 逐渐向 Z 轴方向扩展, 从而达到设计材料结构、优化材料吸波性能的目的。Zhang 等^[22]通过溶剂热—冻干—高温退火三步法成功制备出三维石墨烯泡沫吸波材料(图 1)^[22], 由于该泡沫结构中三维网络的存在, 使得入射到该材料内部的电磁波经过多次漫反射, 能量逐级衰减, 因此该三维石墨烯泡沫吸波材料表现出优异的吸波性能。Chen 等^[23]通过喷雾干燥—预还原—热退火的技术, 成功制备出具有多孔结构的石墨烯微米花吸波材料, 其最小 RL 为-42.9 dB, 而石墨烯的填充量只有 10%, 密度仅为 40~50 kg/m³。

在国外, Andrea 等^[24]将石墨烯聚合物涂料浸涂在芳纶蜂窝材料上, 形成三维蜂窝状吸波材料, 芳纶蜂窝材料作为石墨烯涂料涂覆基质, 与其他吸波材料相比, 其轻质的特点顺应了新型吸波材料的发展趋势, 其高弹、

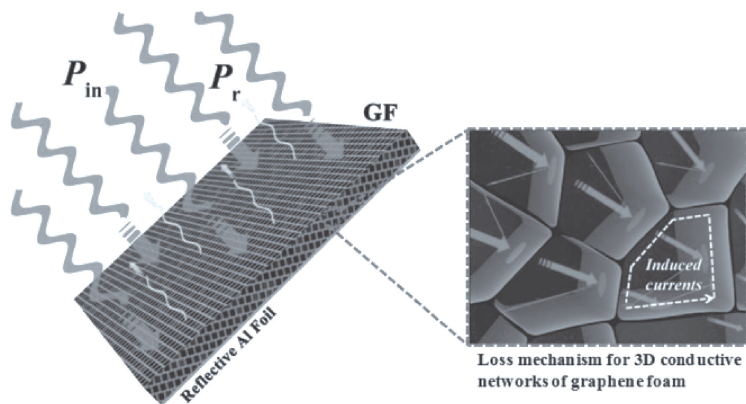


图 1 三维石墨烯泡沫吸波材料吸收电磁波的机理示意图^[22]

Fig. 1 Schematic diagram of the microwave absorption mechanism of the 3D graphene foam-absorbing material^[22]

高模的优异性能拓宽了该吸波材料的应用领域。综合国内外石墨烯吸波材料的发展状况,对比可知,纯二维石墨烯吸波材料远远不能满足高性能吸波材料“强吸收”的设计要求,唯有对石墨烯进行三维网络结构的设计,才能优化其阻抗匹配性能,并引入多重损耗机制,进而增强其吸波性能。

3 石墨烯基吸波材料

3.1 石墨烯磁性复合吸波材料

磁性金属粒子、合金及其氧化物具有较大的饱和磁化强度、优异的磁导率、环境友好以及来源天然丰富等优点,正是因为这些优点使得磁性金属粒子、合金及其氧化物成为构建高性能吸波材料重要的磁性组分来源,然而这些磁性组分密度较大、环境稳定性差、对电磁波的吸收较弱、吸收频带窄,导致其吸波性能较差^[25];同时单一的介电损耗型材料(如石墨烯、碳管等)吸波性能也较差。因此,为了弥补各自的不足,研究人员通常将介电损耗型的石墨烯和磁损耗型的磁性金属粒子、合金及其氧化物复合来制备高性能吸波材料,金属与石墨烯界面间电子的相互作用会引起电荷转移并改变石墨烯的电性能,从而在金属-石墨烯异质结构中产生新的电学和磁学性质,进而增强复合材料对电磁波的吸收性能^[26]。

Zeng 等^[27]结合水/油乳化的技术和退火的方法,成功制备出内部嵌有 Co 纳米粒子的中空 rGO 微球,该复合微球独特的中空结构引起的多重反射以及 Co 纳米粒子和石墨烯之间的界面极化现象增强了该复合微球内部对电磁波的耗散,同时协同发挥 rGO 微球的介电性能和 Co 纳米粒子的磁性能,使得该复合微球表现出优异的吸波性能,其在 13.8 GHz 处取得最小 RL,为-68.1 dB,且材料厚度只有 2.2 mm,有效吸收带宽(RL<-10 dB)为 7.1 GHz (10.9 GHz~18.0 GHz)。

作为磁性金属合金,FeCo 合金和 NiCo 合金具有较大的饱和磁化强度、高导电性和高居里温度,所以将磁性金属合金和石墨烯复合,不但能够增强复合材料的吸波性能,而且由于磁性合金的存在,该复合吸波剂的耐热性能也有较大的提高^[28]。Feng 等^[29]通过一种简单的一锅多元醇路线,将 CoNi 纳米晶均匀地分布在氮掺杂石墨烯片层上,其中氮掺杂石墨烯纳米片没有明显的团聚现象,在超声处理之后,该复合材料也没有发生相分离,仍然能够稳定存在,说明 CoNi 合金和氮掺杂石墨烯纳米片之间存在较强的作用力。该复合材料在 10 GHz 处出现最小 RL,为-22 dB,且厚度只有 2.0 mm,有效吸收带宽为 14.4 GHz (3.6 GHz~18.0 GHz)。

与石墨烯和磁性金属及其合金复合相比,更多科研

工作者将研究方向集中在石墨烯和铁氧体的复合,因为铁氧体同时具有介电性能和磁性能,而且能够有效避免磁性金属及其合金的缺陷,在保持吸波材料吸波性能的前提下,可最大限度地延长其使用寿命、降低成本,此外铁氧体成本低和耐腐蚀的优点更是其能够得到广泛应用的原因^[30-32]。Debabrata 等^[33]利用简单的水热法合成了 BiFeO₃纳米线-rGO 复合材料,BiFeO₃纳米线具有高比表面积和高纵横比,所以表现出优异的高场各向异性,此外,相较于 BiFeO₃纳米颗粒-rGO 复合吸波剂,该复合吸波剂的吸波性能有了较大的提升,主要是由于相比于 BiFeO₃纳米颗粒,BiFeO₃纳米线的偶极子极化现象有所增强,从而增强了该复合吸波剂的介电损耗,促进了其对电磁波的吸收。

调整复合材料的组成是优化其吸波性能常见的策略,然而大量研究表明,合理的结构设计对实现复合材料吸波性能最大化也是至关重要的,如层状、多孔状、纳米棒状、球状等特殊结构会形成一定的缺陷和多重界面,而这些缺陷和界面会引入额外的损耗机制,增强复合吸波材料的空间极化和界面极化现象,进而激发电子极化,促进其对电磁波的吸收。

3.2 石墨烯基导电聚合物复合吸波材料

聚合物因其具有较低的密度、一定的柔韧性、环境稳定性好以及成本低等优点而受到各个领域研究者的广泛关注,正是由于导电聚合物具有良好的介电性能和较小的密度,所以将其应用于电磁波吸收领域。

聚苯胺(PANI)作为导电聚合物的代表物质,因其具有原料易得、制备工艺简单、成本低、导电性和微波吸收特性优良等优点,被众多科研工作者所关注。Yu 等^[34]通过原位聚合法成功制备出石墨烯/聚苯胺纳米棒混合物,其中聚苯胺纳米棒垂直生长在石墨烯片层上,相比于纯聚苯胺纳米棒,该二元复合材料的德拜弛豫过程有所增强,同时其独特的纳米棒状结构和两相之间的电荷转移促进了该复合材料对电磁波的吸收,因此其最小 RL 可达到-45.1 dB,而厚度只有 2.5 mm。

Chen 等^[35]利用原位插层聚合法,使苯胺单体在膨胀石墨的间隙中聚合,得到膨胀石墨/聚苯胺吸波材料。聚苯胺的插层聚合导致膨胀石墨分离成为石墨烯片层,主要是由于聚苯胺合成过程中产生的放热效应以及聚苯胺分子链的剧烈运动(图 2);同时纳米棒状聚苯胺成为片层石墨烯之间优良的导电桥梁,增强了该复合材料的介电损耗,促进了其对电磁波的吸收,因此该复合材料最小 RL 为-36.9 dB,厚度为 3.5 mm。

就目前来讲,几乎所有的石墨烯/聚苯胺复合吸波剂两相之间都只是通过范德华力或者 π - π 键进行连接,很

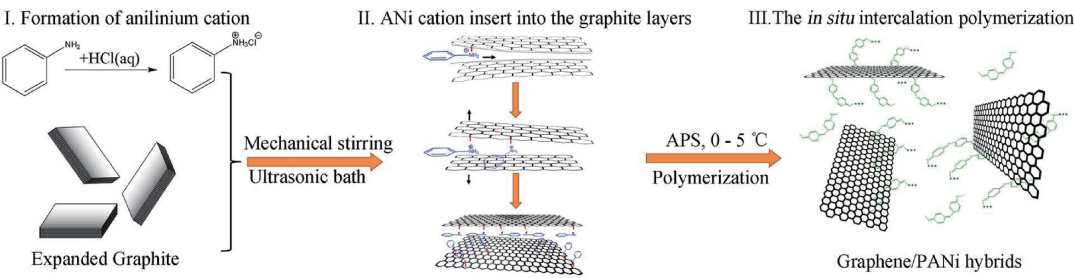


图 2 石墨烯/聚苯胺复合材料插层聚合的示意图^[35]

Fig. 2 Schematic diagram of the intercalation polymerization of graphene/PANI hybrids^[35]

少有学者通过共价键修饰将两相进行键合。而 Yan 等^[36]利用重氮化反应将 rGO 和聚苯胺通过共价键键合在一起，制备出吸波性能优异的二元复合材料，该复合吸波材料最小 RL 为-51.5 dB，有效吸收带宽为 4 GHz，而厚度仅为 2.5 mm。与传统的石墨烯/聚苯胺复合材料相比，该复合材料中 rGO 和聚苯胺之间的共价键能够促进电子的转移^[37]，进而增强其对入射电磁波的吸收性能；此外，共价键的存在能够有效降低复合材料在大规模生产和长期使用过程中产生相分离的可能性，进而避免其吸波性能的降低，延长其使用寿命，降低成本；同时重氮化反应会对 rGO 的结构造成一定的破坏，进而在其结构上引入缺陷，同时在电磁场的作用下，形成更多的极化中心，从而促进复合吸波剂对电磁波的吸收。

3.3 石墨基多组分复合吸波材料

大量研究表明，单一组分的吸波剂阻抗匹配性能较差，损耗机制也较为单一，势必会造成吸波性能差的问题，出于对高性能吸波剂“薄、轻、宽、强”的设计要求，研究人员通常将多种损耗（如介电损耗和磁损耗）组分复合制备高性能吸波剂，该方法在提升吸波剂阻抗匹配性能的同时，进一步引入了除介电损耗和磁损耗以外的损耗机制（如多重反射、界面极化、偶极子极化等），

使吸波剂对电磁波的吸收性能得到增强。

基于石墨基二元复合吸波剂的研究，近几年关于石墨基多元复合吸波剂的研究也逐渐增多。Li 等^[38]通过电泳技术，将 rGO 稳定地沉积在 CNT-Fe₃O₄-PANI 膜上，形成一种多层复合吸波剂，该复合吸波剂最小 RL 为-53.2 dB，且吸波性能超过大多数石墨基和碳纳米管基复合吸波剂。其之所以有如此出众的吸波性能，主要是由于该四元复合吸波剂呈现层状结构，在电磁场作用下该吸波剂界面间的极化弛豫显著增强，从而改善了其吸波性能；同时介电损耗型组分和磁损耗型组分的复合更有利于该吸波剂和自由空间之间的阻抗匹配，这也是其吸波性能较高的原因之一；此外，经过 20 h 的充放电循环，该复合吸波剂仍然显示出较高的环境稳定性。

Yang 等^[39]通过简单的三步法成功合成出尺寸均一、且具有优异电磁波吸收性能的 Fe₃O₄@LASI（锂铝硅）/石墨烯复合吸波剂，其吸波机理如图 3 所示，该吸波剂最小 RL 为-65 dB，而厚度仅为 2.1 mm。大量研究表明：石墨烯/Fe₃O₄二元复合吸波剂只有厚度达到 4~5 mm 时，才能获得优异的吸波性能^[40, 41]，但这就无法达到高性能吸波剂“轻、薄”的要求，而在 Fe₃O₄@LAS/石墨烯复合材料中，LAS 玻璃陶瓷具有透波功能，在优化复合材料

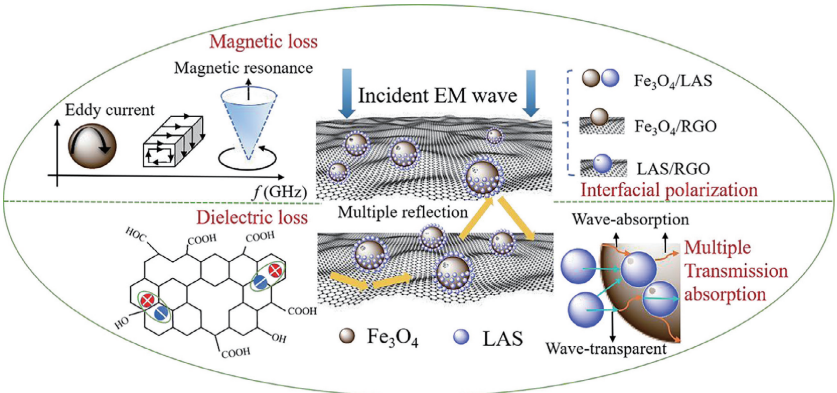


图 3 Fe₃O₄@LAS/石墨烯的吸波机理图^[39]

Fig. 3 Schematic diagram of the microwave absorption mechanism of Fe₃O₄@LAS/RGO^[39]

阻抗匹配性能的同时,还可提高其损耗能力,故而能够在低匹配厚度下达到强吸收的目的。

4 结 语

近年来,新型吸波材料的研究取得了突破性进展,打破了传统吸波材料密度大、环境稳定性差、吸收弱和吸收频带窄的壁垒,通过设计复合吸波材料的组成和结构,获得了具有优异吸波性能的复合吸波材料,复合吸波材料逐渐向“薄、轻、宽、强”的方向发展,因此未来复合吸波剂的发展将会集中在以下几方面:

(1)优化多元复合吸波材料的组分和结构(层状、多孔、核-壳结构等),增强各组分间的界面极化弛豫,充分发挥各组分的协同作用,在追求吸收强、吸收频带宽的前提下,最大限度地降低复合吸波剂的密度和厚度;

(2)多变的应用环境迫使复合吸波材料朝着多功能(耐高/低温、疏水、疏油等)方向发展,因此,在维持吸波性能的前提下,可通过适当的方法对复合吸波材料或其组分进行改性以使其适应不同的使用环境。

(3)石墨烯和碳纳米管作为碳材料中的典型代表材料,不论是密度,还是介电性能,在吸波领域都具有较大的优势;此外,相比于金属材料 and 无机非金属材料,在追求轻质方面,聚合物材料仍然是极具竞争力的候选者,但其介电性能较差,因此,改善聚合物材料的介电性能,并将其与碳材料复合也是未来构建高性能复合吸波剂的一个发展方向。

(4)在多孔吸波材料的设计中,ZIF(类沸石咪唑酯骨架)多孔碳是一种具有广阔应用前景的材料,其密度小、比表面积大,同时可通过调整 ZIF 中金属元素的种类和比例来设计 ZIF 中孔的结构和孔径分布,并且可向吸波剂中引入多重反射的损耗机制,突破传统吸波材料的设计理念。

参考文献 References

- [1] DHAMI A K. Environmental Monitoring and Assessment[J], 2012, 184(11): 6507-6512.
- [2] LIU P B, HUANG Y, YAN J, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2016, 8(8): 5536-5546.
- [3] WANG X X, MA T, SHU J C, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2018, 332: 321-330.
- [4] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁屏蔽和吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 315-320.
- [5] 汪彬, 徐文, 潘竟盛. 江苏建筑[J], 2014(4): 97-99.
- [6] LIU B, TANG D, CHEN J, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2010, 107(3): 033911.
- [7] 庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电子元件与材料[J], 2015, 34(2): 7-12.
- [8] PANG J F, MA X J, XIE X Y. Electronic Components and Materials[J], 2015, 34(2): 7-12.
- [9] MATHEW D S, JUANG R S. Chemical Engineering Journal[J], 2007, 129(1): 51-65.
- [10] GUNJAKAR J L, MORE A M, GURAV K V, *et al.* Applied Surface Science[J], 2008, 254(18): 5844-5848.
- [11] LIU Q H, XU X H, XIA W H, *et al.* Nanoscale[J], 2015, 7(5): 1736-1743.
- [12] LV H L, JIA G B, WANG M, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2014, 615: 1037-1042.
- [13] SHAHZAD F, YU S G, KUMAR P, *et al.* Composite Structures[J], 2015, 133: 1267-1275.
- [14] NAIR R R, BLAKE P, GRIGORENKO A N, *et al.* Science[J], 2008, 320(5881): 1308.
- [15] VAKIL A, ENGHETA N. Science[J], 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [16] YI L X, HU G X, LI H. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing[J], 2015, 76: 233-243.
- [17] ZOU T, ZHAO N, SHI C, *et al.* Bulletin of Materials Science[J], 2011, 34(1): 75-79.
- [18] WANG G, GAO Z, TANG S, *et al.* ACS Nano[J], 2012, 6(12): 11009-11017.
- [19] LIN J H, LIN Z I, PAN Y J, *et al.* Composites Part B: Engineering[J], 2016, 89: 424-431.
- [20] FANG Z, LI C, SUN J, *et al.* Carbon[J], 2007, 45(15): 2873-2879.
- [21] WANG C, HAN X, XU P, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2011, 98(7): 072906.
- [22] CHABOT V, HIGGINS D, YU A, *et al.* Energy & Environmental Science[J], 2014, 7(5): 1564-1596.
- [23] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG T F, *et al.* Advanced Materials[J], 2015, 27(12): 2049-2053.
- [24] CHEN C, XI J, ZHOU E Z, *et al.* Nano-Micro Letters[J], 2018, 10(2): 26.
- [25] RINALDI A, PROIETTI A, TAMBURRANO A, *et al.* IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility[J], 2018, 60(5): 1454-1462.
- [26] SONG W L, GUAN X T, FAN L Z, *et al.* Materials Research Bulletin[J], 2015, 72: 316-323.
- [27] LEE E J, BALASUBRAMANIAN K, WEITZ R T, *et al.* Nature Nanotechnology[J], 2008, 3(8): 486-490.
- [28] ZENG Q, CHEN P, YU Q, *et al.* Scientific Reports[J], 2017, 7(1): 8388.
- [29] YANG Y, XU C L, XIA Y X, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2010, 493(1/2): 549-552.
- [30] FENG J, PU F Z, LI Z X, *et al.* Carbon[J], 2016, 104: 214-225.
- [31] WANG T H, LI Y F, WANG L, *et al.* RSC Advances[J], 2015, 5

(74): 60114–60120.

[31] SUN D P, ZOU Q, QIAN G Q, *et al.* Acta Materialia[J], 2013, 61 (15): 5829–5834.

[32] FU M, JIAO Q Z, ZHAO Y, *et al.* Journal of Materials Chemistry A [J], 2014, 2(3): 735–744.

[33] MOITRA D, DHOLE S, GHOSH B K, *et al.* The Journal of Physical Chemistry C[J], 2017, 121(39): 21290–21304.

[34] YU H L, WANG T S, WEN B, *et al.* Journal of Materials Chemistry [J], 2012, 22(40): 21679–21685.

[35] CHEN X N, MENG F C, ZHOU Z W, *et al.* Nanoscale[J], 2014, 6 (14): 8140–8148.

[36] YAN J, HUANG Y, WEI C, *et al.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing[J], 2017, 99: 121–128.

[37] GAO Z Y, WANG F, CHANG J L, *et al.* Electrochimica Acta[J], 2014, 133(7): 325–334.

[38] LI J S, DUAN Y, LU W B, *et al.* Nanotechnology[J], 2018, 29 (15): 155201.

[39] YANG Y N, XIA L, ZHANG T, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2018, 352: 510–518.

[40] WANG T S, LIU Z H, LU M M, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2013, 113(2): 024314.

[41] GAO Y Y, ZHONG D B, ZHANG D F, *et al.* Journal of Chemical Technology and Biotechnology[J], 2014, 89(12): 1859–1865.

[42] QING Z J, LI B, LI H, *et al.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2014, 25(5): 2149–2154.

(编辑 费蒙飞)