

多孔石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料研究进展

贾锡琛^{1,2}, 沈 斌², 郑文革²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

摘要:电子与通讯技术的快速发展带来了大量电磁辐射, 不仅对电子设备造成干扰, 影响设备精度, 甚至威胁着人体健康, 因而对电磁屏蔽材料的需求日益增加。航空航天、便携式电子设备等更要求电磁屏蔽材料的轻量化。石墨烯作为新型的碳纳米材料, 具有优异的微观结构和介电性能, 因此在电磁屏蔽材料领域受到了广泛关注。本文综述了石墨烯/聚合物泡沫电磁屏蔽材料、石墨烯/聚合物多孔薄膜电磁屏蔽材料、石墨烯气凝胶/聚合物电磁屏蔽材料等三类多孔石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料的研究进展。并对未来多孔石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料的发展趋势做出了展望。

关键词:电磁屏蔽; 石墨烯; 多孔材料

引言

近年来, 电子、通讯等技术快速发展的同时伴随着大量的电磁干扰, 这不仅影响设备性能及周围环境, 还对人体健康造成一定的威胁。因此电磁屏蔽材料越来越引起科研工作者的注意。而航空航天领域以及电子设备智能化、便携化的发展趋势, 对电磁屏蔽材料的轻量化提出了更高要求^[1]。常用的电磁屏蔽材料包括金属材料、碳材料、磁材料及聚合物材料等。金属材料具有易腐蚀、密度大等缺点, 而聚合物材料由于轻质、耐腐蚀和易加工等优点, 更多地被应用在轻质电磁屏蔽材料的研究当中。此外多孔材料本身具有密度低等特点, 其多孔结构可以使电磁波在泡孔壁多次反射与散射, 使电磁波衰减与损耗, 提高屏蔽效果。因此多孔轻质电磁屏蔽材料在电子信息工业、航空航天及军事等诸多领域都具有非常重要的应用价值^[2,3]。

碳材料如碳纳米管、石墨烯、石墨、炭黑及碳纤等, 本身具有很好的导电性及轻质等特点, 经常被用作电磁屏蔽材料。其中石墨烯作为新兴的二维碳纳米材料, 具有高导电性和介电损耗、低密度等特点, 因此非常适合作为轻质电磁屏蔽材料。将石墨烯加入到聚合物基体中, 通过形成连续的导电网络结构可提高材料的导电性。二维结构的石墨烯同时具有很大的比表面积, 且石墨烯片层尺寸越大, 越有利于形成导电网络结构, 同时能够降低石墨烯与聚合物基体间总的接触面积, 从而减少石墨烯与聚合物界面产生的高阻抗, 使得材料的电磁屏蔽性能得以提升^[4,5]。

本文分别综述了石墨烯/聚合物泡沫电磁屏蔽材料、石墨烯/聚合物多孔薄膜电磁屏蔽材料、石墨烯气凝胶/聚合物电磁屏蔽材料等三类多孔石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料的研究进展, 并对未来多孔石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料的发展趋势做出了展望。

1 电磁屏蔽原理

在电子设备和产品中, 电磁干扰信号主要通过传导耦合和辐射耦合来进行传输。传导耦合是指干扰信号从干扰源通过导电介质耦合到敏感设备, 而辐射耦合是干扰信号从干扰源通过空间耦合到敏感设备。电磁波的传导性耦合信号可以通过电路设计, 或者采用滤波器和电感器来抑制。而辐射性耦合需要采用屏蔽技术来进行抑制, 以提高电磁兼容能力。当带有入射能的电磁波穿过材料时, 会在材料表面形

成两种波：一部分是由于两种介质阻抗不匹配而产生的反射波，产生反射损耗；另一部分则是进入到材料内部的透射波。在材料内部，一部分透射波会通过介电损耗以热的形式被消耗，产生吸收损耗；另一部分会在材料内部进行反射，产生多重反射损耗；极少部分的电磁波透过整个屏蔽材料到达另一侧，从而达到了电磁屏蔽的效果，如图 1 所示。在电磁波透过材料的整个过程中，被损耗的越多，电磁屏蔽效果越好。总的屏蔽效能计算方法如式(1)所示^[6~8]。

$$SE_{total} = SE_R + SE_A + SE_{MR} = 10\log \frac{P_i}{P_t}$$

(1)

式中， SE_{total} 指的是材料总的屏蔽效能， SE_R 代表材料表面反射的屏蔽效能， SE_A 代表材料吸收效能， SE_{MR} 代表材料内部的多重反射效能，单位均为分贝(dB)。通常当 $SE_{total} > 15$ dB 时， SE_{MR} 可以被忽略不计。此外，式中 P_i 代表入射波的功率， P_t 代表透过波的功率，可见 P_t 越小， SE_{total} 越大，屏蔽效能越好。影响材料屏蔽效能的主要因素包括材料的电导率、磁导率以及趋肤深度等。此外，材料的厚度也会显著影响 SE_{total} 的值，因而还可以采用比屏蔽效能来描述材料的屏蔽效果^[9]。

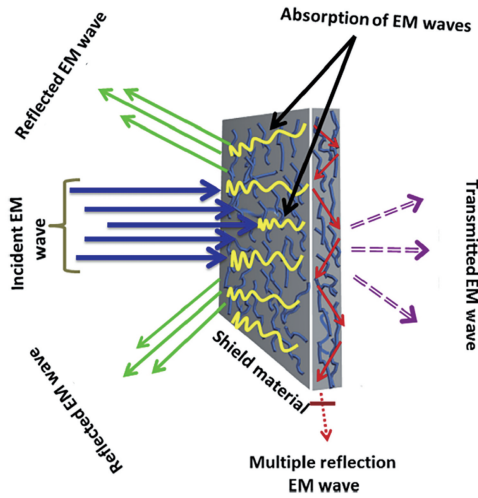


图 1 入射电磁波与屏蔽材料作用原理^[8]

Figure 1 Schematic diagram of incident EM wave interaction with shield material^[8]

2 石墨烯/聚合物泡沫电磁屏蔽材料

泡沫材料由于轻质、多孔等特点，在电磁屏蔽材料研究领域受到广泛关注(如表 1 所示)。泡孔在成核生长过程中会推挤石墨烯颗粒在泡孔边缘聚集，从而形成良好的导电网络结构。而且，泡沫材料的多孔结构可以使入射的电磁波在泡孔壁与石墨烯片层间多次反射、散射，使电磁波衰减，有利于提升材料的电磁屏蔽性能。比较常见的制备方法包括直接模板法^[10~12]、超临界 CO₂ 发泡法^[13~15] 和相分离法^[16~18] 等。

Sun 等^[10]以三维泡沫镍为模板，制备了石墨烯/碳纳米管/聚二甲基硅氧烷多孔复合材料。该材料具有较高的电导率 6.74 S·cm⁻¹，孔隙率高达 90.8%，在 X 波段(8~12 GHz)的屏蔽效能达到 75 dB。研究表明，石墨烯为电磁场提供了通路，使得入射电磁波能够快速衰减。而碳纳米管的存在，扩大了导电网络并同时增加了界面，进一步使表面电流衰减。此外，该复合材料屏蔽效能以电磁波吸收为主，而碳纳米管的加入，大大提高了复合材料的吸波性能，从而使得复合材料的屏蔽效率显著提高。

Kong 等^[11]以三位泡沫镍为模板，制备了碳纳米线/石墨烯/聚二甲基硅氧烷复合材料。复合材料在 X 波段屏蔽效能为 36 dB，密度为 97.1 mg/cm³。研究发现，三维石墨烯泡沫结构在聚合物基体中形成了

连续的导电网络,而碳纳米线可以在石墨烯基底上均匀生长,并与石墨烯以 C—C 共价键的形式连接。研究人员还通过高分辨率透射电镜(HRTEM)分析了石墨烯与碳纳米线之间的界面,经对高分辨率图像傅里叶转变(FFT)过程中进行滤波处理后,发现在界面连接处还存在一些七元环的缺陷(如图 2 所示)。这些缺陷起到了引发电子散射的作用,产生强的界面极化,增加了电磁波损耗,进一步提高了电磁屏蔽性能。

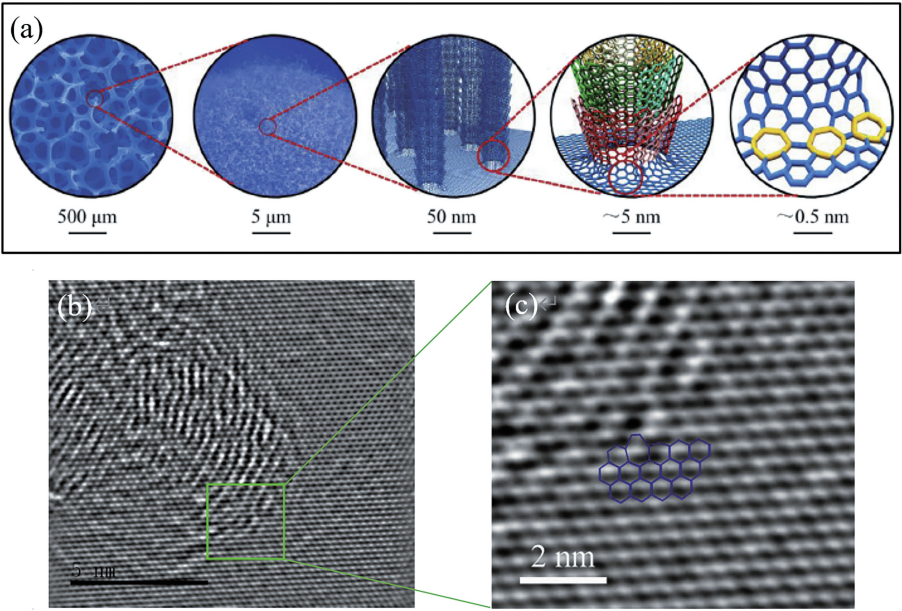


图 2 (a)在不同尺度下的结构设计和界面增强策略;(b)石墨烯与碳纳米线界面处的高分辨率透射电镜图像;
(c)对选定区域原始图像傅里叶转换过程中进行滤波处理后的高分辨率图像^[11]

Figure 2 (a)Design strategy describing the control at multiple scales of structural design, and interface reinforced strategy; (b)HRTEM of junction interface between G and CNWs; (c)The high-resolution image after applying a filter to the FFT of raw HRTEM image in the selected area^[11]

Wu 等^[12]首先在泡沫镍基底上通过 CVD 制备了石墨烯泡沫(GF),并利用十二烷基苯磺酸对石墨烯进行官能化改性。之后在石墨烯泡沫基底上沉积聚(3,4-乙烯环氧噻吩)(PEDOT)和聚苯乙烯磺酸(PSS),最终制得了 GF/PEDOT:PSS 复合材料。复合材料密度为 $18.2 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙率高达 98.8%。添加导电的 PEDOT:PSS 后,复合材料的电导率从 $11.8 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 提高到了 $43.2 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$,在 X 波段的屏蔽效能提高到 91.9 dB。研究发现,电磁屏蔽性能的提升主要得益于石墨烯形成的三维交联导电网络结构,导电聚合物的加入进一步扩大了导电网络,提高了材料的界面极化。同时 PEDOT:PSS 的加入还提高了材料的偶极极化,从而使得材料的电磁屏蔽性能进一步增强。

Gedler 等^[13]利用超临界 CO₂ 做为发泡剂,通过一步发泡法制备了聚碳酸酯(PC)/石墨烯发泡材料。结果表明,复合材料在 X 波段的比屏蔽效能达到了 $39 \text{ dB} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,相比于未进行发泡的材料提高了 35 倍。此外 Gedler 等^[14]还利用超临界 CO₂ 做为发泡剂,通过两步发泡法制备了 PC/石墨烯发泡材料。测试得到其在 X 波段下比屏蔽效能最高为 $78 \text{ dB} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,相较于未发泡的材料提高了 70 倍。研究发现,在发泡过程中,如果样品的扩张不是各向同性的,石墨烯粒子和高分子链就会沿着扩张程度较大的一个方向进行取向(在该研究中为垂直方向),使得入射的电磁波在入射方向上反射较少,从而降低了电磁屏蔽效能。而采用两步发泡法,能够提高石墨烯的分散性,促进石墨烯颗粒的各向同性和随机分布,从而提高了材料的电磁屏蔽性能。

超临界 CO₂ 发泡法制备的石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料,发泡条件及泡孔结构对材料的电磁屏蔽性

表 1 典型的石墨烯/聚合物泡沫电磁屏蔽材料

Table 1 Typical graphene/polymer foams electromagnetic shielding materials

泡沫材料	厚度(mm)	电导率($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	屏蔽效能(dB)(频率)	比屏蔽效能($\text{dB}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)
GF/CNT/PDMS ^[10]	1.6	31.5	75(X-band)	833
CNWs/G/PDMS ^[11]	10.16	3.4	36(X-band)	/
GF/PEDOT:PSS ^[12]	1.5	43.2	91.9(X-band)	1206
PI/RGO/MWCNTs ^[16]	0.5	1.87×10^{-2}	16.6~18.2(X-band)	755~823
PI/RGO ^[17]	0.8	0.8×10^{-2}	17~21(X-band)	75
Graphitized PI/Graphene ^[18]	0.024	~2500	24(X-band)	/
PU/Graphene ^[19]	~20~60	~0.25	~19.9~57.7(X-band)	>320
PU/Graphene ^[20]	~11.3	~0.03	~17~21(Ku-band)	/

能有很大的影响。Zakiyan 等^[15]采用超临界 CO₂ 作为发泡剂,通过一步法制备了聚甲基丙烯酸甲酯/石墨烯电磁屏蔽材料。通过研究发现,发泡温度会影响泡孔的尺寸与几何形状,而随着石墨烯颗粒的加入,体系中的成核中心增加并降低了成核能量,从而使泡孔的数量增加,泡孔尺寸减少。这会导致泡孔的分散性提高,从而增加了对电磁波的反射,同时还能减少纳米粒子之间的距离,进而更容易形成导电网络结构,提高电磁屏蔽性能。此外该小组还研究了微孔结构对电磁性能与电性能的影响。结果表明,相同组成的开孔结构材料的电磁波吸收效能较高,但反射效能下降。这是因为开孔结构具有更高的气体体积,从而降低了对电磁波的反射,使得更多的电磁波进入到材料内部而转化为热能,提高了吸收效能。而闭孔结构材料则由于气体体积相对较少,因而反射效能更高。

Li 等^[17]先后通过原位聚合、非溶剂诱导相分离和热亚胺化三步法制备了聚酰亚胺(PI)/还原氧化石墨烯(rGO)泡沫材料。当 rGO 添加质量为 16%时,材料的密度为 $0.28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,厚度为 0.8 mm,并在 X 波段范围内电磁屏蔽效能达到 17~21 dB。此外,如图 3 所示,Li 等^[18]还通过相分离制备了聚酰亚胺(PI)/石墨烯复合泡沫材料,随后通过高温热解石墨化过程制得了 24 μm 厚的超薄碳泡沫材料。研究发现,石墨烯的加入不仅能够稳定多孔结构,还能够加速石墨化过程。所制得的碳泡沫材料的电磁屏蔽效能(SE 值)在 X 波段达到了 24dB。这是因为碳化后碳层的缺陷以及石墨烯与碳质基体的界面,能够在一定程度上引发极化并产生松弛损耗,而多孔结构增加了内部多重散射和反射,从而提高了电磁波的吸收损耗,二者协同作用提高了材料的电磁屏蔽性能。此外,当材料厚度增加到 51 μm 和 73 μm 时,SE 值分别提高至 43 dB 和 51 dB。

3 石墨烯/聚合物多孔薄膜电磁屏蔽材料

多孔薄膜类电磁屏蔽材料本身具有超薄、轻质、柔性、可加工性好以及低成本等特点,可广泛应用于可穿戴便携式电子设备、航空航天等多个领域^[21]。Chen 等^[22]通过不使用发泡剂的一步法制备了石墨烯/聚二甲基硅氧烷(PDMS)发泡薄膜材料。材料的密度低至 $0.06\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,且当石墨烯添加质量为 0.8%时,屏蔽效能为 30 dB,单位密度屏蔽效能达到了 $500\text{ dB}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 。此外,该材料具有非常好的柔韧性,在反复弯曲成半径为 2.5 mm 的圆形 10000 次后,屏蔽效能基本保持不变。

Yang 等^[23]通过非溶剂诱导相分离制备了聚酰亚胺/还原氧化石墨烯(PI/RGO)复合多孔薄膜材料。结果表明,当添加 8%质量的 GO 时,PI/RGO 薄膜的电导率为 $0.015\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,X 波段内的比电磁屏蔽效能达到 $693\text{ dB}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。这主要是由于 RGO 形成了互联的导电网络结构,提高了材料的体积电导率。

静电纺丝技术也是一种常见的制备多孔薄膜材料的方法,制得的纤维薄膜材料具有孔隙率高、比表面积大等特点,而且还可以根据纺丝时间来调控薄膜的厚度,而且加工灵活性高。此外,在电纺膜中掺杂的石墨烯等导电填料,可以沿着连续纤维基体表面直接形成连续的导电网络结构,从而有利于提升材料

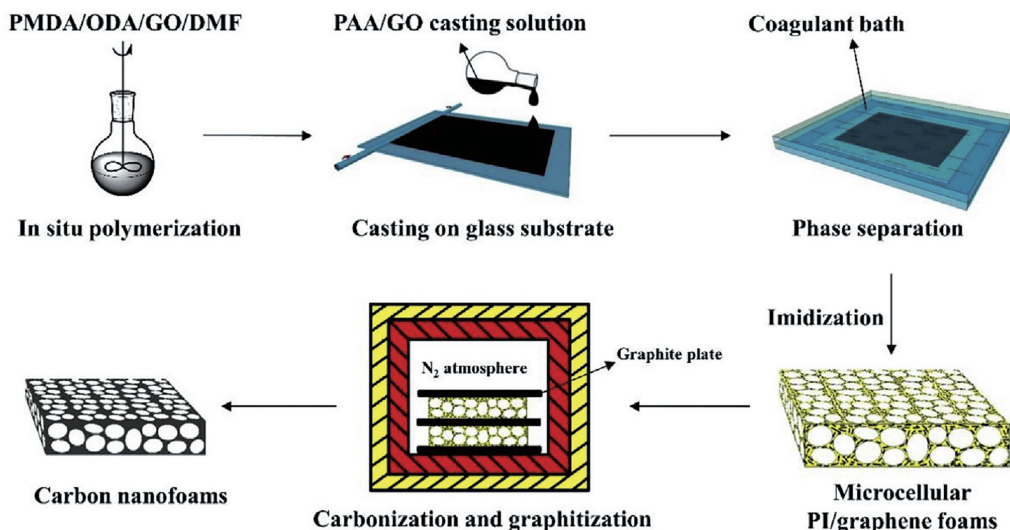


图 3 先后通过原位聚合、相分离、热亚胺化以及热解将 PIGFs 制备成碳发泡材料流程图^[18]

Figure 3 Sketch for the preparation of carbon foams from PIGFs via the combination of *in situ* polymerization, phase separation, thermal imidization and decomposition^[18]

的电磁屏蔽性能。Hsiao 等^[24]首先通过静电纺丝技术制备了水溶性聚氨酯(WPU)薄膜,然后采用逐层组装法(L-b-L)将 WPU 膜浸渍到两种带有相反电荷的氧化石墨烯(GO)溶液中,循环多次后,经还原制得了还原氧化石墨烯(rGO)/WPU 复合薄膜材料。研究发现,该复合材料的屏蔽效能随着 L-b-L 组装循环次数的增加而增加,当循环至 15 次、且 r-GO 质量分数为 7.5%时,rGO/WPU 在 X 波段范围的屏蔽效能达到了 34 dB。这主要是由于经 L-b-L 组装过程,GO 会在 WPU 纤维表面形成双分子层;而随着循环次数的增加,由 r-GO 形成的导电网络结构更为复杂,但如果循环次数过多,大量的 GO 双分子层将覆盖在 WPU 基体表面上,并阻止还原剂的渗透,使深层的 GO 难以被还原,从而抑制了 r-GO 导电网络的形成。

Fujimori 等^[25]也通过静电纺丝技术制备了聚乙烯醇(PVA)/石墨烯复合材料。随后,在制品表面上沉积上一层金属铜(Cu),并最终得到 Cu 包覆的 PVA/石墨烯复合材料。研究发现,复合材料的屏蔽效能随着石墨烯含量和包覆 Cu 厚度的增加而增加,当石墨烯质量分数为 6%、包覆 Cu 的厚度为 200 nm 时,材料的屏蔽效能可在 0.5 GHz 到 18.0 GHz 频率下为 33~35 dB。

4 石墨烯气凝胶/聚合物电磁屏蔽材料

石墨烯气凝胶是一种具有三维结构,同时具有低密度、高孔隙率和比表面积等特点、可应用于轻质电磁屏蔽材料的理想材料。其独特的三维结构,一方面能在聚合物基体中形成连续的导电网络结构,提高对电磁波的吸收能力;另一方面也有效解决了石墨烯填料的聚集问题^[26]。石墨烯气凝胶通常先通过溶胶凝胶过程制备成水凝胶,再通过超临界干燥、冷冻干燥、常温常压干燥等方式制得。而聚合物则通常以真空浸渍回填的方式加入到石墨烯气凝胶的网络结构中^[27~30]。

Chen 等^[27]先后通过水热合成法和高温热处理,制得了酚醛树脂改性的多孔石墨烯气凝胶(p-GAs),之后将 p-GAs 与环氧树脂(EP)通过真空辅助浸润过程得到了具有优异电磁屏蔽性能的 EP/p-GAs 复合材料。当 p-GAs 添加量仅为 0.33%(质量分数,下文同)时,复合材料的电导率高达 $73 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,电磁屏蔽效能可在 X 波段下达到 35 dB。这主要是酚醛树脂通过热处理后转变为无定形碳,起到了连接石墨烯片层的作用,从而增加了石墨烯片层的相互连接并形成连续的导电网络结构,有效增加了材料的导电性。

Li 等^[28]对石墨烯通过定向冷冻后再进行冷冻干燥,得到了各向异性的石墨烯气凝胶(AGAs),其中

石墨烯网络具有高度的有序性。通过真空回填浸入环氧树脂胶液并制得了 TAGAs/环氧树脂(EP)复合材料。如图 4 所示,该材料具有高度各向异性的力学性能和电性能,并在较低的石墨烯掺杂量下具有很好的电磁屏蔽效能,与掺杂热退火石墨烯气凝胶(TGAs)的环氧树脂复合材料相比,径向的电磁屏蔽效能要优于后者,而轴向电磁屏蔽效能略差。这是由于聚合物和石墨烯片层沿着轴向方向有序排列,使得径向方向产生了大量的聚合物/石墨烯和石墨烯/石墨烯的界面,增加了对入射波的多重反射和损耗,从而增强了电磁屏蔽效能。

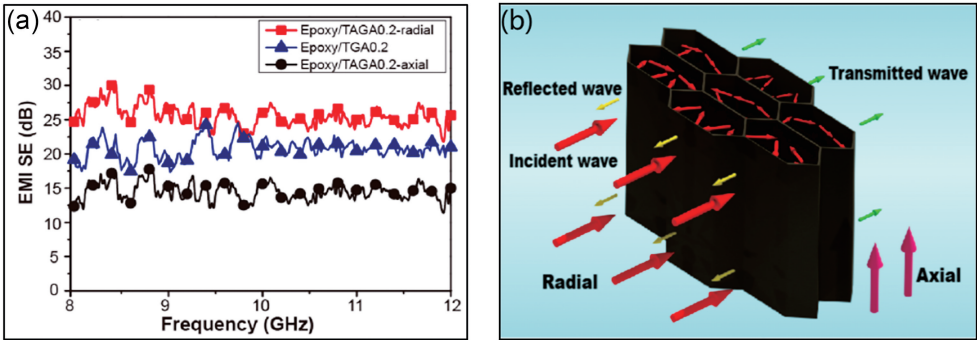


图 4 (a)TGA 或 TAGA 掺杂量为 0.2% 的环氧树脂复合材料 EMI SE 值随频率的变化曲线;
(b)各向异性环氧树脂/石墨烯复合材料沿径向与轴向的电磁屏蔽机理^[28]

Figure 4 (a)Plots of EMI SE versus frequency for epoxy composites with various TGA or TAGA contents of 0.2%;
(b)Schematic illustrating the EMI shielding mechanisms for anisotropic epoxy/graphene composites along radial and axial directions^[28]

Wan 等^[29]以不同尺寸的氧化石墨烯(GO)作为前驱体,通过冻干法制备得到了不同泡孔尺寸的石墨烯气凝胶,并进一步通过渗透法制备了可控微孔结构的石墨烯气凝胶/环氧树脂(GA/EP)复合材料。实验表明,相较于由小尺寸 GO 制得的 GA/EP(SGA-EP)复合材料,大尺寸 GO 所制得的 GA/EP(LGA-EP)具有更优异的电磁屏蔽性能。当添加量为 1.0% 时,3mm 厚的 LGA-EP 的电磁屏蔽效能可在 10~20GHz 频率范围内能达到 30dB。而 SGA-EP 具有更高的储能模量及玻璃化转变温度。此外,Wan 等^[30]还通过冻干法和退火过程制备了纤维素纤维/还原氧化石墨烯(CF/RGO)杂化气凝胶材料。该材料厚度为 5mm 时,密度仅为 2.83mg·cm⁻³,屏蔽效能约为 47.8dB,比电磁屏蔽效能高达 33780dB·cm²·g⁻¹。此外,该材料可通过压缩来调控材料的电磁屏蔽效能。压缩后由于降低了泡孔的界面面积,而削弱了对电磁波的多重反射和散射,使得屏蔽效能有所下降。

5 结语

目前,对于电磁屏蔽材料与吸波材料,越来越要求其具有“薄、轻、宽、强”的特点,因而石墨烯/聚合物轻质多孔电磁屏蔽材料具有非常好的应用前景。尽管采用聚合物作为电磁屏蔽材料有着轻质、耐腐蚀、易加工等优点,但大多数聚合物对电磁波的屏蔽很弱。因此一些研究中将制得的石墨烯/聚合物复合材料通过碳化处理,来进一步提高材料的导电性,或者直接选用一些导电聚合物作为研究对象,例如聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)等。

未来有望进一步研制石墨烯与其它碳纳米材料协同作用的电磁屏蔽材料,而石墨烯与磁纳米粒子的复合还可以制备出兼具磁损耗与电损耗的电磁屏蔽材料。此外,未来研制的石墨烯/聚合物电磁屏蔽材料,除提高材料的电磁屏蔽性能之外,还将关注材料的耐高温、耐腐蚀、可压缩、柔性等特性以进一步提高电磁屏蔽材料的实用性。同时,当前石墨烯存在的生产成本低、在聚合物基体中易团聚、屏蔽频段较窄等问题也有待进一步解决。

参考文献：

[1] Shahzad F, Alhabeab M, Hatter C B, Anasori B, Hong S M, Koo C M, Gogotsi Y. Science, 2016, 353(6304): 1137~1140.

[2] Fang J, Liu T, Chen Z, Wang Y, Wei W, Yue X, Jiang Z. Nanoscale, 2016, 8(16): 8899~8909.

[3] Xia X, Wang Y, Zhong Z, Weng G J. J Appl Phys, 2016, 120(8).

[4] Gavgani J N, Adelnia H, Zaarei D, Moazzami Gudarzi M. RSC Adv, 2016, 6(33): 27517~27527.

[5] Liu P, Huang Y, Yan J, Zhao Y. J Mater Chem C, 2016, 4(26): 6362~6370.

[6] Nazir A, Yu H, Wang L, Haroon M, Ullah R S, Fahad S, Naveed K U R, Elshaarani T, Khan A, Usman M. J Mater Sci, 2018, 53(12): 8699~8719.

[7] González M, Pozuelo J, Baselga J. Chem Rec, 2018, 18: 1~11.

[8] Mondal S, Nayak L, Rahaman M, Aldalbahi A, Chaki T K, Khastgir D, Das N C. Compos Part B: Eng, 2017, 109: 155~169.

[9] Rao B V, Yadav P, Aepuru R, Panda H S, Ogale S, Kale S N. Phys Chem Chem Phys, 2015, 17(28): 18353~18363.

[10] Sun X, Liu X, Shen X, Wu Y, Wang Z, Kim J K. Compos Part A: Appl Sci Manuf, 2016, 85: 199~206.

[11] Kong L, Yin X, Han M, Yuan X, Hou Z, Ye F, Zhang L, Cheng L, Xu Z, Huang J. Carbon, 2017, 111: 94~102.

[12] Wu Y, Wang Z, Liu X, Shen X, Zheng Q, Xue Q, Kim J K. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(10): 9059~9069.

[13] Gedler G, Antunes M, Velasco J I, Ozisik R. Mater Design, 2016, 90: 906~914.

[14] Gedler G, Antunes M, Velasco J I, Ozisik R. Mater Lett, 2015, 160: 41~44.

[15] Zakiyan S E, Azizi H, Ghasemi I. Compos Sci Technol, 2018, 157: 217~227.

[16] Yang H, Yu Z, Wu P, Zou H, Liu P. Appl Surface Sci, 2018, 434: 318~325.

[17] Li Y, Pei X, Shen B, Zhai W, Zhang L, Zheng W. RSC Adv, 2015, 5(31): 24342~24351.

[18] Li Y, Shen B, Pei X, Zhang Y, Yi D, Zhai W, Zhang L, Wei X, Zheng W. Carbon, 2016, 100: 375~385.

[19] Shen B, Li Y, Zhai W, Zheng W. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8(12): 8050~8057.

[20] Li Y, Shen B, Yi D, Zhang L, Zhai W, Wei X, Zheng W. Compos Sci Technol, 2017, 138: 209~216.

[21] Zhang L, Liu M, Bi S, Yang L, Roy S, Tang X Z, Mu C, Hu X. J Colloid Interface Sci, 2017, 493: 327~333.

[22] Chen Z, Xu C, Ma C, Ren W, Cheng H M. Adv Mater, 2013, 25(9): 1296~1300.

[23] Yang H, Li Z, Zou H, Liu P. Polym Adv Technol, 2017, 28(2): 233~242.

[24] Hsiao S T, Ma C C M, Liao W H, Wang Y S, Li S M, Huang Y C, Yang R B, Liang W F. ACS Appl Mater Interfaces, 2014, 6(13): 10667~10678.

[25] Fujimori K, Gopiraman M, Kim H K, Kim B S, Kim I S. J Nanosci Nanotechnol, 2013, 13(3): 1759~1764.

[26] Liu B, Li J, Wang L, Ren J, Xu Y. Compos Part A: Appl Sci Manuf, 2017, 97: 141~150.

[27] Chen Y, Zhang H B, Wang M, Qian X, Dasari A, Yu Z Z. Compos Sci Technol, 2017, 152: 254~262.

[28] Li X H, Li X, Liao K N, Min P, Liu T, Dasari A, Yu Z Z. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8(48): 33230~33239.

[29] Wan Y J, Yu S H, Yang W H, Zhu P L, Sun R, Wong C P, Liao W H. RSC Adv, 2016, 6(61): 56589~56598.

[30] Wan Y J, Zhu P L, Yu S H, Sun R, Wong C P, Liao W H. Carbon, 2017, 115: 629~639.

Porous Graphene/Polymer Materials for Electromagnetic Interference Shielding: A Review

JIA Xi-chen^{1,2}, SHEN Bin², ZHENG Wen-ge²

(1. *School of Chemistry and Chemical Engineering, UCAS, Beijing 100049, China*;

2. *Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China*)

Abstract: With the rapid development of electronic and communication technology, a large amount of electromagnetic radiation has been produced, which not only disturbs other electronic equipment, but also affects the precision of equipment, and even threatens the human health. Therefore, the demand for electromagnetic interference (EMI) shielding materials is increasing. On the other hand, in terms of aerospace and portable electronic equipment, lightweight EMI shielding materials are also needed. Graphene, the new carbon nanomaterial, has received extensive attention in the field of EMI shielding owing to its excellent microstructure and dielectric properties. In this paper, three kinds of porous graphene/polymer materials for EMI shielding have been reviewed, including graphene/polymer composite foams, graphene/polymer porous films, and graphene aerogels/polymer composites. The development trend of porous graphene/polymer electromagnetic shielding materials in the future has also been prospected.

Key words: Electromagnetic shielding materials; Graphene; Porous materials