

树脂基导电纳米复合材料电磁屏蔽性能的研究进展

岳生金^{1,2} 蒲浩² 颜春² 祝颖丹² 冯力³

(1 宁波大学材料科学与化学工程学院, 宁波 315211)

(2 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

(3 深圳市飞荣达科技股份有限公司, 深圳 518000)

文 摘 随着5G时代的来临,电磁污染问题日益严重。电磁屏蔽是解决电磁污染的有效方法,已成为人们关注的热点。导电纳米粒子具有优异的导电性及其独特物理特性,其树脂基复合材料可作为轻质高电磁屏蔽效能的电磁屏蔽材料。本文主要介绍了含有导电一维纳米粒子(碳纳米管、银纳米线)和二维纳米粒子(石墨烯、MXenes)的树脂基复合材料在电磁屏蔽性能方面的研究进展,进一步对其发展趋势进行了展望。

关键词 电磁屏蔽,导电纳米粒子,树脂基纳米复合材料

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.01.002

Research Progress in Electromagnetic Shielding Performance of Resin Matrix Conductive Nanocomposites

YUE Shengjin^{1,2} PU Hao² YAN Chun² ZHU Yingdan² FENG Li³

(1 School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211)

(2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Material Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201)

(3 Shenzhen FRD Science & Technology Co., LTD., Shenzhen 518000)

Abstract With the advent of the 5G era, the problem of electromagnetic pollution is becoming increasingly serious. Electromagnetic shielding is an effective method to solve electromagnetic pollution, which has become the focus of attention. Conductive nanoparticles have excellent electrical conductivity and unique physical properties, and their resin matrix composites can be used as electromagnetic shielding materials with lightweight and high electromagnetic shielding efficiency. In this paper, the electromagnetic shielding properties of resin matrix composites containing one-dimensional conductive nanoparticles (such as carbon nanotubes and silver nanowires) and two-dimensional conductive nanoparticles (such as graphene and MXenes) are summarized, and their development trend is further prospected.

Key words Electromagnetic shielding, Conductive nanoparticles, Resin matrix nanocomposites

0 引言

随着5G网络的蓬勃发展,各种电子设备的发展与应用突飞猛进,在提高人们生活质量水平的同时,也带来了电磁干扰(EMI)和辐射等新的环境污染问题,不仅影响通信安全,也直接危害人类身体健康^[1]。因此,防止电磁波引起的电磁干扰对改善电子产品和仪器的安全性、可靠性以及人体防护具有重要意义。

电磁屏蔽是防止外部电磁波干扰和内部电磁信息

泄漏的最有效方法。电磁屏蔽材料的屏蔽效能主要取决于其反射衰减值和吸收衰减值的多少。电磁屏蔽材料已广泛应用于民用及军事领域,如通信、遥感、导弹制导等。其中,美国在雷达吸波材料领域处于国际领先水平,紧随其后的是德国、英国、法国、日本等军事大国。我国于20世纪50年代开始电磁屏蔽的理论研究与工程应用,研究基础相对薄弱,与国外还存在一定差距。

传统的电磁屏蔽材料为导电(磁渗透)材料,如金

收稿日期:2022-08-20

基金项目:国家自然科学基金(U1909220, 52177056),浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2024C01156),浙江省自然科学基金(LD22E050011),宁波市科技创新2025重大专项(2020Z057),宁波市重点研发计划项目(2023Z086)

第一作者简介:岳生金,1998年出生,硕士研究生,主要从事树脂基电磁屏蔽复合材料的研究工作。E-mail: yueshengjin@nimte.ac.cn

通信作者:颜春,博士,高级工程师,主要从事树脂基复合材料的制备及性能的研究工作。Email: yanchun@nimta.ac.cn

属及其合金,但由于其密度大、柔韧性低、制作成本高等缺点,不能满足轻量化、智能化、柔性化和小型化设备的要求^[2]。因此,为了满足电子设备轻量化和高度集成化的发展需求,轻质、高性能电磁屏蔽材料(ESMs)越来越受到人们的重视。树脂基电磁屏蔽复合材料因其质量轻、比强度高、易于成形加工、抗腐蚀性能好等优点,已被广泛应用于电磁干扰屏蔽材料。其中,以碳纤维、碳化硅纤维、导电石墨/炭黑及金属微粉等为填料的树脂基电磁屏蔽复合材料的应用最广泛,主要应用于导弹壳体、隐身飞机、建筑防护、电磁信息泄露等方面。然而单组分材料很难同时具有高介电常数和磁导率,以及其复合材料的加工难度大、成本高是限制EMI屏蔽材料发展的主要因素^[2]。

本文介绍电磁屏蔽机理,总结近年来含一维导电纳米粒子(碳纳米管、银纳米线)和二维导电纳米粒子(石墨烯、MXenes)的树脂基复合材料在电磁屏蔽性能方面的研究进展,以便对未来树脂基纳米复合电磁屏蔽材料满足“薄、轻、宽、强”的设计加工及应用研究提供相应的参考,最后对其电磁屏蔽材料的发展与应用进行展望。

1 电磁屏蔽机理

电磁屏蔽是利用导电或导磁材料将电磁辐射控制在某一频段,其目的是抑制电磁辐射对周围空间仪器设备的干扰和人员的危害。通常用屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)来评价屏蔽材料的屏蔽能力和对电磁波的影响,可定义为入射辐射功率与传输功率的比值,其大小可表示为^[3-4]:

$$SE(\text{dB}) = 20\lg \frac{|E_0|}{|E_s|} = 20\lg \frac{|H_0|}{|H_s|} = 10\lg \left(\frac{P_0}{P_s} \right) \quad (1)$$

式中, E_0 、 H_0 和 P_0 分别为入射到屏蔽层上的电场强度、磁场强度和功率密度, E_s 、 H_s 和 P_s 分别为通过屏蔽层材料传输的电场强度、磁场强度和功率密度。

根据当前研究可知,电磁波的屏蔽可以通过反射损耗、吸收损耗和多次反射来实现,如图1所示。根据屏蔽机理,EMI屏蔽材料可分为两类:反射损耗为主导的材料和吸收为主导的材料。目前,基于传输线模型的Schelkunoff公式被广泛应用于均匀屏蔽材料的屏蔽效能计算,其具体形式为:

$$SE(\text{dB}) = SE_R + SE_A + SE_M \quad (2)$$

式中, SE_R 为反射屏蔽效能, SE_A 为吸收效能, SE_M 为多重反射损耗效能。而当材料的 $SE_A > 15$ dB时, SE_M 可以不计入。其中

$$SE_A = 131.43t \sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (3)$$

$$SE_R = 168.2 + 10\lg \left(\frac{\sigma_r}{f\mu_r} \right) \quad (4)$$

$$SE_M = 20\lg [1 - \exp(-\frac{2t}{\delta})] \quad (5)$$

式中, μ_r 为屏蔽材料的相对磁导率, σ_r 为屏蔽材料的相对电导率, f 为波频率, t 为屏蔽材料的厚度, δ 为趋肤深度。

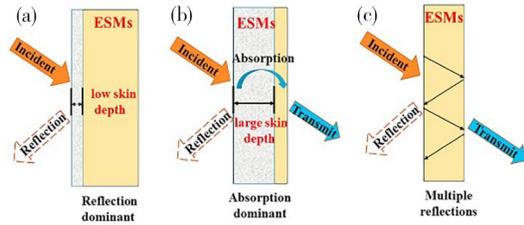


图1 电磁屏蔽机理示意图^[4]

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic shielding mechanism^[4]

由式(5)可知,电磁波在不同表面或界面上的多重反射,受材料厚度的影响,当屏蔽材料的厚度大于趋肤深度时, SE_M 可以忽略。趋肤深度 δ 定义为电磁波入射场强在材料中衰减到其原始场强 $1/e$ 时的深度,其计算如式(6)所示:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}} \quad (6)$$

式中, μ 为磁导率, σ 为电导率。

由式(6)可知,较大的电导率将导致较小的趋肤深度,这意味着大多数入射电磁波在其表面反射而没有进入屏蔽材料内部[图1(a)]。电磁波吸收发生在ESMs内部,它可以通过介电/磁损耗将电磁能量转换为热能或其他形式的能量。与可能导致二次污染的反射损耗主导机制相比,电磁波吸收是屏蔽有害电磁波、减少有害辐射的更有效途径,如图1(b)所示。具有吸收主导机制的ESMs应具有相对较大的趋肤深度和良好的阻抗匹配,允许大部分入射波进入ESMs内部。当入射电磁波在材料内部层之间传输时,会产生多次反射,导致多次反射损失[如图1(c)所示]。

2 导电粒子复合树脂基电磁屏蔽材料及其性能

导电树脂基复合材料是指在树脂基体中加入导电填料获得具有多相结构电磁屏蔽复合材料,由于其易成型、机械性能好、轻质等优点,具有较好的应用前景。该类复合材料中常用的导电填料主要有:一维的碳纳米管和纳米银线粒子以及二维的石墨烯和MXenes粒子。

2.1 导电一维纳米粒子复合电磁屏蔽材料

2.1.1 树脂基碳纳米管复合电磁屏蔽材料

碳纳米管作为石墨碳的螺旋微管,具有一维结构,直径可达几纳米,同时 sp^2 杂化赋予其可调的电性能,广泛应用于电磁屏蔽领域。Min Ye KOO等^[5]采用单壁碳纳米管(SWCNT)纸预浸环氧树脂制备SWCNT预浸料,固化后获得50 μm 厚的单层SWCNT/环氧树脂复合材料。其SWCNTs含量高达46%,10层复合材料在1 GHz频率下的电磁干扰屏蔽

效能(EMI SE)和比屏蔽效能(SSE)分别达 71.67 dB 和 83.3 dB·cm³/g。

相较于SWCNT,多壁碳纳米管(MWCNT)易制备且成本低,其导电复合材料具有优异的电磁屏蔽性能^[6-8]。如 FANG 等^[6]采用原位交联聚乙二醇二丙烯酸酯(CPEGDA)作为橡胶增韧改性剂, MWCNT 作为导电填料,制备出聚 L-丙交酯(PLLA)基三元纳米复合材料。为了提高 MWCNT 在树脂基体中的分散性,通过溶液分散沉淀法制备了 PLLA 包裹 MWCNT 的母料,以提高与树脂基体的相容性,然后与 PLLA 和 PEGDA 进一步密炼共混,获得纳米复合材料。发现仅添加体积分数为 2.4% 的 MWCNT 时,在 8.0~12.0 GHz 内的 EMI SE 达到 26.4 dB。随着 MWCNT 含量增加,由于 MWCNT 的团聚,引起复合材料的韧性和玻璃化转变温度降低,但其电磁屏蔽效能变化不大。CHEN 等^[8]通过将熔融共混和超临界二氧化碳(scCO₂)发泡相结合,开发了具有多孔双渗流结构的聚苯乙烯(PS)/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/MWCNT 电磁屏蔽复合材料。由于多孔结构和相互连接的 MWCNT 传导通路的共同作用,与固体材料相比,在 MWCNT 体积分数为 1.61% 且厚度为 2 mm 的情况下,复合材料的密度从 1.12 g/cm³ 下降为 0.4 g/cm³; 在 X 波段(8.2~12.4 GHz)的 SSE 从 37.79 dB·cm³/g 提高到 57 dB·cm³/g。

碳纳米管复合树脂基复合材料具有轻质、导电导热性、结构柔韧性好等特点,在电磁屏蔽领域具有较好的应用前景。但如何提高碳纳米管在树脂基体中的分散性并保持复合材料优异的电磁屏蔽效能仍面临着挑战。

2.1.2 树脂基银纳米线复合电磁屏蔽材料

一维的银纳米线(AgNW)由于其独特的纳米结构和优异的导电性能($\sigma > 10\,000$ S/m),在电磁屏蔽领域具有广泛应用。

采用 AgNW 通过涂层^[9]、真空辅助过滤^[10]等不同工艺将其与聚合物复合,从而制备具有优异电磁屏蔽性能的 AgNW/树脂基电磁屏蔽材料。如 JIA 等^[9]采用简单且低成本的 Mayer 棒涂层方法,构建了由海藻酸钙(CA)、AgNW 和聚氨酯(PU)组成的高效透明 EMI 屏蔽膜。CA/AgNW/PU 薄膜具有 92% 的高光学透光率,其在 X 波段的 EMI SE 达到 20.7 dB,可满足商业应用的要求。当透明膜的 EMI SE 达 31.3 dB 时,其透射率仍保持在 81%。另外,该透明膜在复杂的使用环境中表现出高度可靠的电磁屏蔽能力,如经超声处理 30 min 和 1.5 mm 弯曲半径、5 000 次弯曲循环后,EMI SE 的保持率分别高达 98% 和 96%。ZHANG 等^[10]采用真空辅助过滤技术制备了一种由交替热塑性聚氨酯(TPU)纳米纤维膜和 AgNW 层组成的多层复合膜。连续的 AgNW 导电层和三明治结构可以通过多次反射和共振效应促

进了电子传输效率和电磁波耗散,其中两层 AgNW 和三层 TPU 膜在 X 波段的 EMI SE 高达 97.3 dB。而且,高柔韧性的多层 TPU/AgNW 薄膜展现出优异的稳定性,如在跨距为 20 mm 时,进行 1 000 次弯曲测试后,EMI SE 保持率可达 97%。

一维的 AgNW 因其电导率优异、长径比大,可在树脂基体中形成坚固的导电网络,其复合材料的电磁屏蔽效能较高,可满足商业应用的要求,如在柔性太阳能电池、可穿戴电子产品等领域具有广泛的应用。然而,AgNW 成本高,存在氧化腐蚀的问题,将导致其电导率大幅度下降^[11],从而会降低材料的电磁屏蔽效能。

2.2 导电二维纳米粒子复合电磁屏蔽材料

2.2.1 树脂基石墨烯复合电磁屏蔽材料

石墨烯作为碳家族最薄的材料,具有导电性好、电子迁移率高、比表面大等优点,其树脂基纳米复合材料具有优异的电磁屏蔽性能。

采用石墨烯薄膜^[12]、纳米片^[13]以及 3D 打印技术^[14]制备的石墨烯/聚合物复合材料具有以吸收为主的高效电磁屏蔽特性。如 WEI 等^[12]采用扫描离心浇铸法制备了高取向层压石墨烯(PG)薄膜和类珍珠层 PG/聚合物复合材料。特殊 PG 纳米片结构使该薄膜在超低厚度下具有超高的 EMI SE。当 PG 膜厚度约为 100 μ m 时,在 X 波段的 EMI SE 为 93 dB;当 PG/聚酰亚胺(PI)复合膜厚度约为 60 μ m 时,EMI SE 为 63 dB。FU 等^[13]以三聚氰胺泡沫(MF)骨架为基材,通过反复浸渍干燥的方法成功制备了石墨烯纳米片(GNSs)包覆三聚氰胺泡沫(GNSs@MF)。进一步将 GNSs@MF 浸渍热塑性聚氨酯(TPU),构建了具有独特三维导电网络的 TPU-GNSs@MF 多孔结构,当 GNSs 体积分数为 2.01%,厚度为 2 mm 时,其电导率高达 45.2 S/m,在 X 波段的 EMI SE 为 35.6 dB。WANG 等^[14]使用 3D 打印技术制备了具有高可伸缩和导电的石墨烯/聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合材料。由于其独特的 3D 互连和坚固的导电网络,复合材料的延展性可达 130%,在 X 波段的 EMI SE 高达 45 dB。另外,复合材料具有优异的耐久性,在高达 100% 的应变下重复拉伸和释放应力 200 个周期后,EMI SE 仍保持在 90% 以上。

二维片状结构的石墨烯具有优异的导电性,可应用于电磁干扰屏蔽材料,但低成本高质量石墨烯仍难以进行规模化生产。

2.2.2 树脂基 MXenes 复合电磁屏蔽材料

MXenes 是一种新型的二维纳米材料,其结构通式为 $M_{n+1}X_nT_x$,其中 M 为过渡金属, X 为 C 或 N, T_x 为片层表面的活性官能团(包括—OH、=O 和—F)。MXenes 是通过对其前驱体 MAX 相中的 A 层采用 HF

进行刻蚀获得,具有独特的类“手风琴”状多层结构,同时其表面具有大量的极性基团(—OH、—F),为磁性单元、聚合物及纳米级物质等提供活性位点,从而增加其极化行为,有利于耗散入射电磁波。因此,其树脂基复合材料在电磁屏蔽应用领域具有巨大的潜力^[15]。目前,研究最广泛的MXenes为 $Ti_3C_2T_x$,其制备及结构如图2所示^[17]。

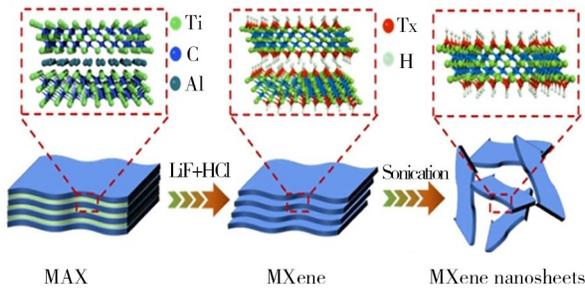


图2 MXene的刻蚀及分层工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MXene etching and stratification process

树脂基MXene复合薄膜^[16-17]以及含有高导电MXene的气凝胶/泡沫^[18-20]复合材料因其易加工、高性能的优点,能够获得与金属相近但密度更低的EMI SE,近年来已成为电磁屏蔽材料研究的热点之一。如LIU等^[16]采用聚氨酯和MXene纳米片进行胶体组装以及真空过滤制备出具有层次有序的仿珍珠层纳米结构的PU/MXene纳米复合膜。由于聚氨酯和MXene表面的一OH基团形成的多个氢键,以及仿珍珠层的“砖和砂浆”结构,该纳米复合薄膜拉伸强度可达100 MPa,断裂韧度可达3.0 MJ/m³。另外该纳米复合薄膜还具有优异的导电性和EMI屏蔽性能,其导电率达2 897.4 S/cm,在X波段的比厚度屏蔽效能达33 771.92 dB·cm²/g。HUANG等^[18]通过冷冻干燥制备具有三维多孔结构的MXene/羟乙基纤维素(HEC)混合气凝胶(MHA),将其浸渍在硅树脂中以形成疏水性的MXene/HEC/硅树脂复合材料,其导电率达3 166.4 S/m,在X波段的屏蔽效能达74.5 dB。另外,该复合材料具有良好的疏水性,其接触角范围在151.5°~155.0°。

面对复杂的电磁屏蔽环境,需要进一步开发多功能性电磁屏蔽复合材料。ZHOU等^[21]利用喷涂结合纺丝方法制备了具有超疏水性、EMI屏蔽效能和焦耳加热性能的三明治结构聚碳酸酯(PC)/MXene/超疏水气相二氧化硅(Hf-SiO₂)透明薄膜。其具有较低的电阻,为35.1 Ω/sq,相应的透射率为33.4%,在X波段内EMI SE >20 dB,在安全电压(<13 V)下具有稳定的焦耳加热行为。另外,该薄膜良好的柔韧性使其经过2 mm弯曲半径、1 000次反复弯折后,薄膜的电导率和电磁干扰屏

蔽性能均没有明显降低。此外,Hf-SiO₂保护层赋予PM₃F膜较强的环境耐受性,如在户外暴露100 d以上,材料的疏水性、电导率和电磁屏蔽性能均无明显变化。

二维MXenes因其具有优异的导电性,其树脂基复合材料在电磁屏蔽领域已经展现出潜在的应用前景。然而,MXenes的制备过程中存在污染大、成本高以及MXenes在加工过程中难分散、易氧化等问题,制约了其快速发展应用。提高MXenes在树脂基体中的分散,保持其优异的电导率是提高复合材料EMI屏蔽性能的关键。

2.3 多组分导电纳米粒子复合电磁屏蔽材料

单一纳米材料对提高材料电磁屏蔽效能有限,利用不同维度纳米粒子之间的协同效应及界面极化作用,在复合材料中形成异质结构可获得具有优良综合性能的树脂基电磁屏蔽材料。

2.3.1 与石墨烯复合协同作用的电磁屏蔽材料

由于石墨烯结构单一、磁导率低,对电磁屏蔽性能大多依赖于其晶格缺陷、界面及原子精细结构等,电磁屏蔽效能难以进一步提升。为了改善石墨烯基复合材料的电磁屏蔽效能,通常需要将石墨烯与碳纳米管^[22]、金属^[23-24]和磁性纳米粒子^[25]等材料进行掺杂复合,以获得更好的阻抗匹配以及吸收损耗。如WANG等^[22]采用一种简单的方法来制备具有稳定压缩性和完善导电网络的碳纳米管/石墨烯/聚酰亚胺(PI)泡沫。其在8.2~12.8 GHz频率范围内的平均EMI SE为28.2 dB, SSE为7 050 dB·cm²/g,且其密度只有0.02 g/cm³。同时,PI基体与石墨烯片在接触面间形成的多层结构和化学键合赋予复合泡沫良好的循环压缩稳定性。LIANG等^[23]制备了具有规则球状空心结构的三维银片/还原氧化石墨烯泡沫(AgPs/rGF)。进一步将AgPs/rGF与环氧树脂(EP)相结合,成功制备了具有高度规则隔离网络结构的3D AgPs/rGF/EP纳米复合材料。由于AgPs/rGF互连球形空心导电网络以及AgPs/rGF与EP之间的界面协同作用,含有体积分数为0.44%的rGF和体积分数为0.94%的AgPs的3D AgPs/rGF/EP纳米复合材料在X波段最大的EMI SE为58 dB(屏蔽99.999 8%的入射电磁波),与3D rGF/EP纳米复合材料(~21 dB)相比提高了274%。S. ANAND等^[25]通过溶剂浇注法制备出超薄的PVDF/RGO/W型六铁氧体钡(BaCo₂Fe₁₆O₂₇)柔性复合薄膜,当复合材料中BaCo₂Fe₁₆O₂₇的质量分数为10%时,复合材料在11.8 GHz下的EMI SE为35.94 dB,厚度仅为0.2 mm。该复合材料的主要微波吸收机制是介电损耗、磁损耗以及PVDF、RGO和BaCo₂Fe₁₆O₂₇纳米粒子之间的协同效应,从而提高其吸收性能。

采用向石墨烯中掺入CNTs、银(Ag)、铁氧体磁性颗粒或采用金属或磁性纳米颗粒修饰的石墨烯获得的复合纳米粒子,通过不同纳米粒子间的协同效应,可以

提高其树脂基复合材料的电磁屏蔽性能。但纳米粒子的尺寸及形貌调控是提高该类复合材料屏蔽效能的关键,通常纳米粒子由于小尺寸效应、表面效应和量子尺寸效应使得更小尺寸的纳米粒子具有更好的吸波性能;形貌不规则的吸波剂会改变电磁波传输路径、穿透路径以及诱导散射效应,使其具有更高的电磁屏蔽效能。

2.3.2 与MXenes复合协同作用的电磁屏蔽材料

MXenes纳米片在导电和EMI屏蔽方面有着非常大的应用前景,但MXenes纳米片之间的弱相互作用使得它们难以形成具有高导电性的可压缩三维结构。采用CNTs^[26-27]和AgNWs^[28-30]纳米粒子增强MXenes纳米片之间的相互作用和构建互连网络,不仅可以提高复合纳米结构的机械性能,还可以提高其树脂基复合材料的电磁屏蔽性能。如DENG等^[26]根据MXene纳米片和酸化碳纳米管(aCNT)之间的协同效应,利用冷冻干燥技术制备了MXene/aCNT各向异性气凝胶(MCAs)。MXene纳米片作为多孔骨架,aCNT贯穿MXene纳米片的孔壁,从而使MCAs具有高导电性、低密度、超弹性和可压缩性。当aCNT质量分数为5%时,MCAs的密度为9.1 mg/cm³,电导率为447.2 S/m,在X波段EMI SE超过51 dB。当MCAs密度增加到18.2 mg/cm³时,MCA/石蜡复合材料的EMI SE达到90 dB,其中MXene和aCNT的总体积分数仅为0.59%。CHEN等^[28]通过可扩展的喷涂技术制备出具有高屏蔽效能、高透光率导电MXene焊接AgNW薄膜。发现EMI SE值与层数呈线性增长关系,当层数增加到4层时,薄膜在X波段内的EMI SE为96.5 dB,且透光率可达59%。

通过二维MXene与一维CNTs、AgNWs纳米粒子结构组合的优势,发挥异质结构的协同效应,不仅提高其树脂基复合材料的电磁屏蔽性能、力学性能、光学性能等,同时可降低复合材料的密度。但是这些多材质多维结构的复合纳米粒子在设计和制备上目前仍处于实验室阶段。

3 结语

树脂基导电纳米复合材料具有轻质、耐腐蚀,高电磁屏蔽效能等优点,在电磁屏蔽领域得到广泛应用研究。然而大多数树脂基纳米复合电磁屏蔽材料结构设计、制造工艺及性能调控还停留在实验室阶段。树脂基导电纳米复合材料的发展与应用趋势有下面几方面。

(1)导电纳米粒子与树脂基体的复合工艺需要进一步创新和优化,实现高效、连续可控制备;同时,还需揭示和掌握不同类型导电纳米粒子与电磁波的作用规律及屏蔽机制;结合电磁屏蔽机理,设计出新型复合材料结构,构建树脂基多维度纳米粒子复合材料,形成坚固完善的导电网络,实现电磁屏蔽阻抗匹配,发挥其协同电磁屏蔽效应,从而进一步提高复合材料的EMI SE。

(2)为了较大程度降低或避免电磁辐射的二次反射污染,需研发以吸收为主的EMI屏蔽材料,可在树脂基复合材料中构建具有优异损耗特性的结构或引入特定基团以提高其对电磁波的吸收能力,从而实现以吸收为主导且宽频范围的电磁屏蔽。

(3)电磁屏蔽材料的研究应该面向国家和社会的应用需求进行展开。需开发低成本、工艺简单且可规模化生产的具有轻质、宽频、高屏蔽效能等特性电磁屏蔽复合材料,以满足实际应用的需求。

参考文献

- [1] SOFFRITTI M, GIULIANI L. The carcinogenic potential of non-ionizing radiations: The cases of S-50 Hz MF and 1.8 GHz GSM radiofrequency radiation [J]. *Basic Clin Pharmacol Toxicol*, 2019, 125(Suppl 3): 58-69.
- [2] YAO Y Y, JIN S H, ZOU H M, et al. Polymer-based lightweight materials for electromagnetic interference shielding: A review [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56 (11): 6549-6580.
- [3] KUMAR R, SAHOO S, JOANNI E, et al. Recent progress on carbon-based composite materials for microwave electromagnetic interference shielding [J]. *Carbon*, 2021, 177: 304-331.
- [4] WU N N, HU Q, WEI R B, et al. Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects [J]. *Carbon*, 2021, 176: 88-105.
- [5] KOO M Y, SHIN H C, SUHR J, et al. A suggested vacuum bagging process for the fabrication of single-walled carbon nanotube/epoxy composites that maximize electromagnetic interference shielding effectiveness [J]. *Polymers*, 2021, 13 (11): 1867.
- [6] FANG H, WANG S, YE W, et al. Simultaneous improvement of mechanical properties and electromagnetic interference shielding performance in eco-friendly polylactide composites via reactive blending and MWCNTs induced morphological optimization [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 178: 107452.
- [7] 吴同华, 岳喜贵, 梅笑寒, 等. 三明治结构多壁碳纳米管/聚醚醚酮电磁屏蔽复合材料的制备 [J]. *高等学校化学学报*, 2021(8):2627-2634.
- [8] WU T H, YUE X G, MEI X H, et al. Preparation of MWCNTs/PEEK electromagnetic shielding composites with sandwich structure [J]. *Chemical Journal of Colleges and Universities*, 2021(8):2627-2634.
- [8] CHEN J, LIAO X, LI S, et al. A promising strategy for efficient electromagnetic interference shielding by designing a porous double-percolated structure in MWCNT/polymer-based composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 138: 106059.

- [9] JIA L C, YAN D X, LIU X, et al. Highly efficient and reliable transparent electromagnetic interference shielding film [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10(14): 11941–11949.
- [10] ZHANG F, HU J, ZHAO P, et al. Multifunctional electromagnetic interference shielding films comprised of multilayered thermoplastic polyurethane membrane and silver nanowire [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 147: 106472.
- [11] KIM S, JEON H R, AN C H. Improvement of conductivity of Ag nanowires-networked film using 1, 8-diazabicyclo [5, 4, 0] undec-7-ene (DBU) [J]. *Materials Letters*, 2017, 193: 63–66.
- [12] WEI Q, PEI S, QIAN X, et al. Superhigh electromagnetic interference shielding of ultrathin aligned pristine graphene nanosheets film [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(14): 1907411.
- [13] FU B, REN P, GUO Z, et al. Construction of three-dimensional interconnected graphene nanosheet network in thermoplastic polyurethane with highly efficient electromagnetic interference shielding [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215: 108813.
- [14] WANG Z, YANG W, LIU R, et al. Highly stretchable graphene/polydimethylsiloxane composite lattices with tailored structure for strain-tolerant EMI shielding performance [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 206: 108652.
- [15] RIAZI H, NEMANI S K, GRADY M C, et al. Ti3C2 MXene-polymer nanocomposites and their applications [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(13): 8051–8098.
- [16] LIU Z, WANG W, TAN J, et al. Bioinspired ultrathin polyurethane/MXene nacre-like nanocomposite films with synergistic mechanical properties for electromagnetic interference shielding [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(21): 7170–7180.
- [17] GAO Q, PAN Y, ZHENG G, et al. Flexible multilayered MXene/thermoplastic polyurethane films with excellent electromagnetic interference shielding, thermal conductivity, and management performances [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(2): 274–285.
- [18] HUANG J J, WANG T, SU Y M, et al. Hydrophobic MXene/hydroxyethyl cellulose/silicone resin composites with electromagnetic interference shielding [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(11): 2100186.
- [19] XU H, YIN X, LI X, et al. Lightweight Ti2CTx MXene/poly(vinyl alcohol) composite foams for electromagnetic wave shielding with absorption-dominated feature [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(10): 10198–10207.
- [20] KIM E, ZHANG H, LEE J H, et al. MXene/polyurethane auxetic composite foam for electromagnetic interference shielding and impact attenuation [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 147: 106430.
- [21] ZHOU B, LI Z, LI Y, et al. Flexible hydrophobic 2D Ti3C2Tx-based transparent conductive film with multifunctional self-cleaning, electromagnetic interference shielding and joule heating capacities [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 201: 108531.
- [22] WANG Y Y, SUN W J, YAN D X, et al. Ultralight carbon nanotube/graphene/polyimide foam with heterogeneous interfaces for efficient electromagnetic interference shielding and electromagnetic wave absorption [J]. *Carbon*, 2021, 176: 118–125.
- [23] LIANG C, SONG P, QIU H, et al. Constructing interconnected spherical hollow conductive networks in silver platelets/reduced graphene oxide foam/epoxy nanocomposites for superior electromagnetic interference shielding effectiveness [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(46): 22590–22598.
- [24] YANG X, FAN S, LI Y, et al. Synchronously improved electromagnetic interference shielding and thermal conductivity for epoxy nanocomposites by constructing 3D copper nanowires/thermally annealed graphene aerogel framework [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 128: 105670.
- [25] ANAND S, PAULINE S. Electromagnetic interference shielding properties of BaCo2Fe16O27 nanoplatelets and RGO reinforced PVDF polymer composite flexible films [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 8(3): 2001810.
- [26] DENG Z, TANG P, WU X, et al. Superelastic, ultralight, and conductive Ti3C2Tx MXene/acidified carbon nanotube anisotropic aerogels for electromagnetic interference shielding [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(17): 20539–20547.
- [27] YANG R, GUI X, YAO L, et al. Ultrathin, lightweight, and flexible CNT buckypaper enhanced using mxenes for electromagnetic interference shielding [J]. *Nano-micro Letter*, 2021, 13(1): 66.
- [28] CHEN W, LIU L X, ZHANG H B, et al. Flexible, transparent, and conductive Ti3C2Tx MXene-silver nanowire films with smart acoustic sensitivity for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(12): 16643–16653.
- [29] CHENG H, PAN Y, CHEN Q, et al. Ultrathin flexible poly(vinylidene fluoride)/MXene/silver nanowire film with outstanding specific EMI shielding and high heat dissipation [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(3): 505–513.
- [30] CHENG Y, LU Y, XIA M, et al. Flexible and lightweight MXene/silver nanowire/polyurethane composite foam films for highly efficient electromagnetic interference shielding and photo-thermal conversion [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 215: 109023.