复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

轻质聚合物基电磁屏蔽材料的研究进展

杨继飞 刘珊 樊峤 何露露 何敏

Research progress of lightweight polymer electromagnetic shielding materials

YANG Jifei, LIU Shan, FAN Qiao, HE Lulu, HE Min

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230119.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构设计与性能研究进展
Research progress of structure design and performance of polymer-based electromagnetic shielding composites
复合材料学报. 2021, 38(5): 1358-1370 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.003

3D打印制备碳纳米管/环氧树脂电磁屏蔽复合材料
3D-printed carbon nanotubes/epoxy composites for efficient electromagnetic interference shielding
复合材料学报. 2019, 36(1): 1-6 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180511.002

石墨烯基聚合物复合电解质的设计、性能及其应用研究进展
Research progress on design, performance and application of graphene based polymer composite electrolytes
复合材料学报. 2021, 38(3): 680-697 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201126.002

石墨烯纳米片/聚乙烯复合薄膜电磁干扰屏蔽
Electromagnetic interference shielding performance of graphene/nanosheet-polyethylene composite films
复合材料学报. 2019, 36(2): 293-303 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180416.002

不同聚合物基压电纤维复合材料应变性能的温度稳定性
Temperature stability of strain performance of piezoelectric fiber composites with different polymer matrices
复合材料学报. 2021, 38(6): 1817-1824 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201015.002

磷-硼杂化聚合物/环氧树脂复合材料的制备及阻燃性能
Preparation and flame retardant properties of phosphorus-boron hybrid polymer/epoxy resin composites
复合材料学报. 2019, 36(1): 28-38 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180404.001

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 40 卷 第 7 期 7 月 2023 年
Vol. 40 No. 7 Jul 2023

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20230119.002

轻质聚合物基电磁屏蔽材料的研究进展

分享本文

杨继飞[1,3]，刘珊[2,3]，樊峤[1,3]，何露露[1,3]，何敏*[1,3]

（1. 贵州大学 材料与冶金学院，贵阳 550025；2. 贵州理工学院 材料与能源工程学院，贵阳 550003；
3. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心，贵阳 550022）

摘 要：随着科技不断的进步，5G 技术快速的普及及可穿戴设备的飞速发展，生活变得越来越便利，同时电磁干扰对人们的身体健康和精密电子设备的运行造成威胁。如今传统的电磁屏蔽材料已不能满足人们生活的日常需求，轻质聚合物电磁屏蔽材料得到越来越多的关注。本文总结了电磁屏蔽机制及聚合物结构对电磁屏蔽性能的影响，综述了前沿碳/聚合物电磁屏蔽材料、金属/聚合物电磁屏蔽材料、新型 MXene/聚合物电磁屏蔽材料的制备方法、电磁屏蔽性能及其相关机制，探讨了其优势和局限性，并对轻质聚合物电磁屏蔽材料面临的关键挑战、潜在应用和发展前景进行展望。

关键词：电磁屏蔽；聚合物；轻质；多孔材料；吸收衰减

中图分类号：TB34；TB332 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2023)07-3785-10

Research progress of lightweight polymer electromagnetic shielding materials

YANG Jifei[1,3], LIU Shan[2,3], FAN Qiao[1,3], HE Lulu[1,3], HE Min*[1,3]

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Materials and Energy Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 3. National Engineering Research Center for Composite Modified Polymer Materials, Guiyang 550022, China)

Abstract: With the continuous progress of science and technology, the rapid popularization of 5G technology and the rapid development of wearable devices, life is becoming more and more convenient. Meanwhile, electromagnetic interference poses a threat to the health of people and the operation of precision electronic devices. Nowadays, traditional electromagnetic interference shielding materials can no longer meet the daily needs of people's life, lightweight polymer-based electromagnetic interference shielding materials have attracted more and more attention. This study summarized the electromagnetic interference shielding mechanism, and the influence of polymer structures on electromagnetic interference shielding performance, reviewed the preparation methods, electromagnetic shielding properties, and related mechanisms of advanced carbon/polymer materials, metal/polymer materials, and novel MXene/polymer materials, discussed their advantages and limitations, and prospected the key challenges, potential applications and development prospects of lightweight polymer-based electromagnetic shielding materials in the future.

Keywords: electromagnetic interference shielding; polymer; lightweight; porous material; absorption attenuation

如今，随着电子设备和 5G 通信的飞速发展和普及，环境中存在大量电磁污染[1]，电磁污染已被称为“第四大污染”[2]。雷达、广播电台等无线设备及电磁炉、电视等家用电器设备产生的电磁污染远远大于自然界产生的电磁污染，对环境和人们身体健康产生威胁[3]。电磁辐射通过非热

收稿日期：2022-11-15; **修回日期**：2022-12-13；**录用日期**：2022-12-15；**网络首发时间**：2023-01-20 08:29:25
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230119.002
基金项目：国家自然科学基金地区基金 (52163011); 贵州省学术新苗培养及创新探索项目 (GZLGXM-22)
Authors Acknowledge Financial Support from National Natural Science Foundation of China (52163011); Academic Novice Cultivation and Innovative Exploration Project of Guizhou Province (GZLGXM-22)
通信作者：何敏, 本科, 教授, 博士生导师, 研究方向为功能复合材料 E-mail：hemin851@126.com
引用格式：杨继飞, 刘珊, 樊峤, 等. 轻质聚合物基电磁屏蔽材料的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3785-3794.
YANG Jifei, LIU Shan, FAN Qiao, et al. Research progress of lightweight polymer electromagnetic shielding materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3785-3794(in Chinese).

效应、热效应和积累效应对人造成影响[4]，电磁辐射的积累效应会对人体造成不可逆的伤害。其次，电磁干扰会影响电子设备的正常运行[5-9]。当飞机受到电磁辐射时，飞机的导航、通讯系统等会受到影响，导致飞机无法正常起飞；电磁波会影响设备信号传输，导致设备无法正常运行；当医院设备受到电磁辐射的影响，将危及人们的生命安全。通过收集泄漏的电磁信号，可以窃取军事信息，对国家安全造成威胁[10]。

传统电磁屏蔽材料存在厚度大、密度大、电磁屏蔽效能低、在电磁屏蔽领域应用具有局限性等缺点[11-12]。目前具有轻质、高效、柔性、耐久性等优点的新型电磁屏蔽材料成为研究热点[13-14]。与传统电磁屏蔽材料相比，聚合物基电磁屏蔽材料具有轻质、高柔性、结构可设计、易加工、加工成本低等优点，但是聚合物基电磁屏蔽材料是由填料与聚合物基体组成，两相不同的材料相结合会引起电化学作用，导致聚合物基电磁屏蔽材料受到环境的侵蚀比任何单一相都要严重，并且两相之间的界面强度将直接影响其力学性能。研究人员将聚合物电磁屏蔽材料与碳系填料、金属系填料、MXene 填料等复合，尝试解决上述问题[15-17]。

本综述介绍了电磁屏蔽机制、聚合物结构对电磁屏蔽性能的影响，综述了前沿碳/聚合物电磁屏蔽材料、金属/聚合物电磁屏蔽材料、新型 MXene/聚合物电磁屏蔽材料的制备方法和电磁屏蔽性能的最新研究进展，总结了其结构特点及其填料对电磁屏蔽效能的影响，探讨了其优势和局限性及轻质聚合物电磁屏蔽材料的潜在应用和面临的关键挑战。

1 电磁屏蔽机制

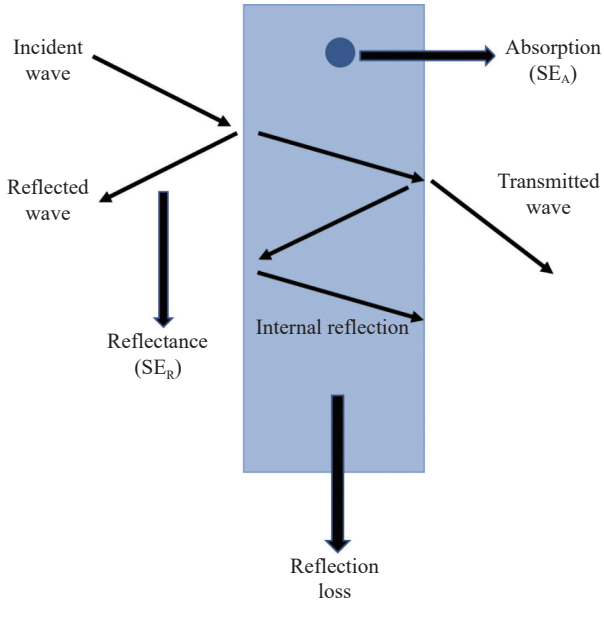
电磁屏蔽材料指的是能通过反射或吸收电磁波、衰减和阻止电磁波在某些区域传递的材料。电磁屏蔽机制如图 1 所示，当电磁波传输到电磁屏蔽材料时，电磁波在电磁屏蔽材料的表面发生部分反射，其余电磁波进入到材料的内部，进行多次反射损耗和介电损耗、磁损耗，最终剩余的电磁波会透过电磁屏蔽材料[18]。电磁屏蔽机制主要分为 3 种：

(1) 由于电磁屏蔽材料与空气阻抗不匹配而导致电磁波在电磁屏蔽材料外表面发生反射 (Reflection loss efficiency，SE_R)；

(2) 电磁波进入到材料内部被吸收衰减 (Absorption loss efficiency，SE_A)；

(3) 电磁波在屏蔽材料内部的多次反射衰减 (Multiple reflection loss efficiency，SE_M)。

电磁屏蔽效能 (Electromagnetic shielding efficiency，EMI SE) 是表示材料电磁屏蔽能力的重要参数 (EMI SE=SE_R+SE_A+SE_M)。为提高电磁屏蔽效能，在反射损耗时，需确保电磁屏蔽材料具有良好的导电性，即其在电场中具有可自由移动的载流子；在进行吸收衰减时，电磁屏蔽材料应具有高磁导率和高介电常数，即高电磁损耗特性，增强电磁屏蔽材料对电磁波的吸收能力。在进行多次反射损耗时，电磁屏蔽材料内部的多孔或多层结构可以大大提高反射次数及散射次数，从而使电磁屏蔽性能得到极大地提升。



SE_R—Reflection loss efficiency; SE_A—Absorption loss efficiency

图 1 电磁屏蔽机制

Fig. 1 Electromagnetic shielding mechanism

电磁波在通过电磁屏蔽材料时，其强度明显降低，因此用同一位置无屏蔽体时与加屏蔽体之后电磁场强度之比来表示电磁屏蔽效能，具体表示为

$$\text{EMI SE}_E = 20\lg\frac{E_1}{E_2},\quad \text{EMI SE}_H = 20\lg\frac{H_1}{H_2}$$

此外，传输系数 (T) 是指有屏蔽体时与无屏蔽体时的电磁场强度比值，即

$$T = \frac{E_2}{E_1},\quad T = \frac{H_2}{H_1}$$

因此电磁屏蔽效能也可表示为

$$\text{EMI SE} = 20\lg\frac{1}{T} \tag{1}$$

其中：E_1、H_1、E_2、H_2 分别指放置电磁屏蔽材料前后的电场强度、磁场强度；EMI SE_E、EMI SE_H 分别为电场屏蔽效能、磁场屏蔽效能。传输系数与电磁屏蔽效能互为倒数，即 EMI SE = 20lg(1/T)。电磁屏蔽材料的评判如表 1 所示，当材料的 EMI SE 大于 90 dB 时，则认为该材料具有优异的电磁屏蔽性能。

表 1　电磁屏蔽效果

Table 1　Electromagnetic shielding effect

No.	EMI SE/dB	Electromagnetic shielding effect	Remarks
1	<10	Bad	—
2	10-30	General	≥20 dB Has commercialization potential
3	30-60	Moderate	≥35 dB Meeting civilian needs
4	60-90	Good	≥75 dB Meeting military requirements
5	>90	Excellent	

Note: EMI SE—Electromagnetic shielding efficiency.

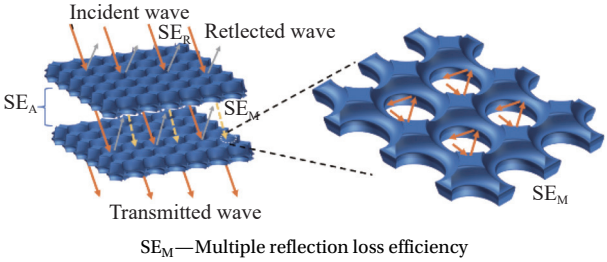
聚合物基电磁屏蔽材料的电磁屏蔽机制与传统电磁屏蔽材料类似，聚合物基电磁屏蔽材料常被制备为多层多孔的电磁屏蔽材料，其与空气的阻抗匹配，减少了 SE_R，大幅度减少了电磁波对环境造成二次污染，并且电磁波进入聚合物基电磁屏蔽材料时，会大幅度增加 SE_M，进而增加其 EMI SE 。

2　聚合物结构对电磁屏蔽性能的影响

聚合物材料具有来源广泛、轻质、易加工和可设计等优点，是电磁屏蔽材料的候选材料之一。由于聚合物材料的导电性不高，目前大量研究者对聚合物电磁屏蔽复合材料的结构和填料进行优化以提高其电磁屏蔽性能。

常见聚合物复合材料是均质结构，填料均匀分布在聚合物基体中，其制造简单、成本低，但是该结构对电磁屏蔽能力没有提升。研究人员致力于制备具有隔离结构[19]、层状结构[20-22]、多孔结构[23-25]的聚合物电磁屏蔽复合材料。隔离结构是指填料在聚合物基体中有选择的定向分布，形成完整的导电通道，是提高聚合物电磁屏蔽性能的途径之一；多孔结构具有隔音、隔热、耐化学性好等优点，同时多孔结构不仅能降低材料的质量，还能使电磁波在孔洞处多次反射损耗，是解决聚合物材料表面与自由空间的阻抗不匹配问题的途径之一，能有效提高电磁屏蔽效能；层状结构比隔离结构和多孔结构更具柔韧性，该结构可以增加电磁波在层与层间多次反射损耗，从而提高电磁屏蔽性能 。

隔离结构、层状结构、多孔结构都能使聚合物电磁屏蔽材料获得突出的 EMI SE。图 2 和图 3 分别是 3D 多层多孔结构电磁屏蔽原理和 3D 泡孔结构电磁屏蔽原理的示意图，当电磁波接触到 3D 多层多孔电磁屏蔽材料或 3D 泡孔电磁屏蔽材料时，电磁波在材料表面被反射，其余的电磁波进入材料内部在层与层之间、孔洞处发生多次反射，并且部分电磁波被材料吸收，剩余的电磁波透过电磁屏蔽材料。与隔离结构相比，多孔结构和多层结构能极大程度地降低聚合物电磁屏蔽复合材料的密度，得到轻质电磁屏蔽材料，并且多孔结构能改善电磁屏蔽材料的阻抗匹配性，增加 SE_A。一些研究人员将轻质碳、金属、MXene 填料等与聚合物材料复合，制备多层和多孔电磁屏蔽材料，进而增强电磁屏蔽材料的反射损耗和吸收损耗，得到电磁屏蔽性能更加突出的材料。



SE_M—Multiple reflection loss efficiency

图 2　3D 多层多孔结构电磁屏蔽原理

Fig. 2　Electromagnetic shielding mechanism of 3D multilayer porous structures

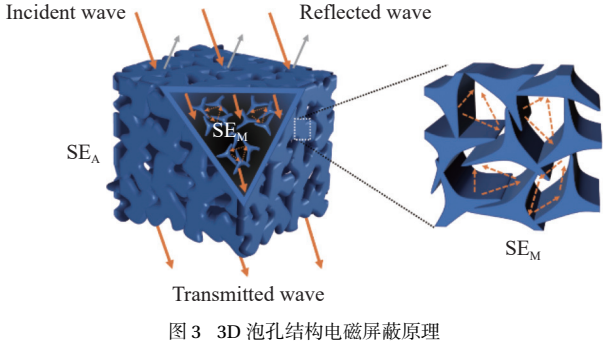


图 3　3D 泡孔结构电磁屏蔽原理

Fig. 3　Electromagnetic shielding mechanism of three dimensional bubble structure

聚合物电磁屏蔽材料需要具有良好的导电性。导电聚合物分为复合型导电聚合物和本征型导电聚合物，复合型导电聚合物本身不具备导电性，而是通过添加填料使其具有导电性和磁性，而常见的填料如表 2 所示。本征型导电聚合物含有共轭键，双键附近的离域电子跃迁进入导带中，从而使聚合物成为导电高分子，通过掺杂可提高其导电性及使其具有磁性，进而增强其介电损耗和 SE_R。磁性聚合物分为多自由基聚合物和过渡金属螯合型聚合物，自由基聚合物其不成对电子使其具有磁性，而过渡金属型螯合物的磁性来源于过渡金属的电子。磁性聚合物具有一定的磁损耗使其是以吸收为主的电磁屏蔽材料，可通过掺杂磁性粒子和导电粒子增强其磁损耗、介电损耗等。聚合物共轭双键的电子和不成对电子及金属离子为其提供导电性和磁性，使聚合物具有优异的 EMI SE，若 EMI SE 不满足使用要求可通过添加多种填料提高 EMI SE。

表 2　常见的填料

Table 2　Common filler

Classification	Example	Remarks
Carbon	Carbon fiber, carbon nanotubes, graphene, etc.	Enhanced material conductivity and dielectric loss
Metal	Nickel, cobalt, iron, zinc, copper, alloy, etc.	Enhanced material conductivity, magnetic properties, dielectric losses and magnetic losses
Composite filler	Carbon and metals, metals and alloys, carbon and MXene, etc.	Packing composition can be designed according to material requirements

3　新型轻质聚合物电磁屏蔽材料研究进展

3.1　碳/聚合物电磁屏蔽材料

碳材料因其高比表面积、低密度、低成本、柔韧性、优异的电气性能等优点[26-27]，被广泛应用于电磁屏蔽领域。不同维度的碳材料与聚合物材料复合用作电磁屏蔽材料时，具有不同的特点。

3.1.1　一维碳/聚合物复合材料

一维碳材料通常具有低密度、高拉伸强度和突出的长径比，使其能以相对较低的填料负载量形成有效的导电网络，并且大幅度增加其力学性能。例如，碳纤维 (CFs) 的长径比很大，能在较低添加量时，作为填料增强聚合物材料的抗拉强度、模量及 EMI SE 等。Kaushal 等[28] 使用 0.5wt% 多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和 20wt%CFs 作为聚丙烯纳米复合材料的填料时，聚丙烯的抗拉强度和拉伸模量分别提高了 31.14% 和 60.14%，并且当其厚度为 2 mm 时，EMI SE 高达 51.9 dB 。一维碳材料突出的长径比，在基体中能承载更多的载荷，并且形成更多的导电通路，使材料的力学性能和 EMI SE 更优异。材料的制备工艺直接影响其性能，因此简单、可控的制备工艺使碳纤维在聚合物基体中形成连续导电网络是获得高 EMI SE 的一种途径，同时也是研究难点之一。Tunakova 等[29] 研究连续的 CFs 编织方法对其电磁屏蔽性能的影响，发现平纹编织和平衡斜纹编织形成的导电网络比均匀编织更多。使一维碳材料均匀地分布在聚合物基体中的工艺，不一定使其在基体中形成导电通路，因此，简单、可控的制备工艺是获得高 EMI SE 的有效途径之一。

碳纳米管 (CNTs) 具有优异的力学性能、长径比、导电导热和磁学性能[30]，是聚合物基电磁屏蔽材料的最常用填料之一。Formela 等[31] 通过 CNTs 增强废旧轮胎橡胶 (GTR)，并且其 EMI SE 高达 66.9 dB。为制备高效聚合物/CNTs 的 EMI SE，其常被制备为多孔结构，降低其 SE_R。Fu 等[32] 熔融共混工艺结合环保物理发泡方法制备了具有夹层结构的碳纳米管/等规聚丙烯 (CNTs/iPP) 纳米复合泡沫，并且当其 EMI SE 高达 38.0 dB 时，SE_R 仅占据 15.5%，有效地降低了电磁辐射对环境造成的二次污染。Kuang 等[33] 通过超临界 CO_2 发泡法制备 Ni-CNTs/聚乳酸 (PLA) 复合泡沫，当 Ni-CNTs 的体积比为 0.805% 时，其平均 EMI SE 高达 25.2 dB 。Ni-CNTs/PLA 三元协同损耗作用，增强了 PLA 的 EMI SE。在使用 CNTs 作为填料时，可掺杂磁损耗填料与其构成二元协同损耗，增强其 EMI SE。Pei 等[34] 通过简单可控的 3D 打印工艺制备网络结构的 CNTs/壳聚糖 (CS) 电磁屏蔽材料，该制备工艺使孔径分布更加均匀，并且其导电网络具有可设计性。CNTs/CS的密度为 72 mg/cm^3 时，其 EMI SE 为 25.07 dB，SE_R 为 5.97 dB，减少了电磁波对环境造成的二次污染。一维碳材料在聚合物基体中的均匀分布和结构优化能大幅提高

其 EMI SE，但是在选择制备工艺时，应注意一维碳材料的物理化学性质，避免制备工艺导致复合材料性能下降，因此合适的制备工艺至关重要。一维碳/聚合物材料填料的缺陷对 EMI SE 产生间接影响，Manna 等[35]使用不同的方法在单壁碳纳米管 (SWCNTs) 和 MWCNTs 引入缺陷，发现缺陷对 SWCNTs/聚苯乙烯 (PS) 和 MWCNTs/PS 的 EMI SE 影响各不相同。无论 SWCNTs 的含量如何，其缺陷会导致 SWCNTs 变形、扭结和断裂，从而使 SWCNTs 的长径比减小、电导率下降、渗透阈值增大，导致 SWCNTs/PS 的 EMI SE 下降。但是对于 MWCNTs/PS 复合材料，MWCNTs 的缺陷增加会导致 MWCNTs 界面面积扩大，促进连续导电网络的形成，使其电导率增加、渗透阈值下降，进而提高 MWCNTs/PS 的 EMI SE，因此选择制备工艺时除了注意一维碳材料的性质以外，还需注意其微观结构。

3.1.2 二维碳/聚合物复合材料

石墨烯是碳原子通过 sp^2 杂化紧密堆叠而形成的二维原子厚晶体，具有柔韧性、导电性和导热性等优点[36]，常用于提高复合材料的电磁屏蔽性能。随着石墨层数的增加，其 EMI SE 增加，光学透过率下降。但是石墨烯存在结构单一、低磁导率和污染环境等缺点，研究人员将石墨烯的结构进行优化，或将石墨烯与高磁导率材料相结合加入聚合物中[37-38]，以获得高效的 EMI SE。

Gill 等[39]通过原位化学氧化法制备石墨烯/聚吡咯纳米复合材料。添加 0.1wt% 石墨烯，聚吡咯复合材料的电导率提升 5 倍，添加 0.2wt% 石墨烯，聚吡咯纳米复合材料的 SE_A 约为 33 dB，SE_R 远远小于 1 dB，避免了电磁波造成二次污染。石墨烯具有小物质大响应，微量的石墨烯可大幅度提高复合材料的 EMI SE。Li 等[40]通过在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜中嵌入镀铜的还原氧化石墨烯 (rGO) 纤维网，制备了耐久度高的多孔 Cu@rGO/PDMS 电磁屏蔽材料。Cu@rGO 嵌入孔径为 1 250 μm×1 250 μm 的 PDMS 器件后，在 X 波段的 EMI SE 由 2 dB 增强至 23.3 dB。当 PDMS/Cu@rGO 的孔径为 500 μm×500 μm 时，其 EMI SE 均高于 74.2 dB，随着孔径尺寸的增加，EMI SE 下降。该薄膜的电磁屏蔽效果可以通过网格设计和电镀时间进行控制。

由此可以得出，石墨烯/聚合物因其结构单一、低磁导率及在层与层之间未形成导电网络，导致聚合物/石墨烯的 EMI SE 较差，可以通过增加石墨烯的层数或掺杂其他填料，提高 EMI SE。同时石墨烯也可与高磁导率的网状结构的材料复合使用，以获得轻质、高效的电磁屏蔽复合材料。

3.1.3 三维碳/聚合物复合材料

碳泡沫是一种轻质、高比表面积、可定制导热性和导电性的 3D 泡孔结构材料，广泛应用于热、电和磁领域。碳泡沫对电磁波具有突出的吸收和反射能力，在电磁屏蔽领域有很好的前景[41]。目前，主要通过热分解法、模版法和发泡法等制备碳泡沫。热分解法和模板法所制备的碳泡沫骨架稳定性比发泡法更佳。随着对电磁屏蔽性能要求的提高，单一的碳泡沫已经无法满足电磁屏蔽的需求，避免电磁波对环境造成二次污染，研究者将其与高磁性填料复合使用，减少材料的 SE_R。Liu 等[42]直接碳化三聚氰胺泡沫获得具有开孔结构的碳泡沫，通过水热法使 Fe_3O_4 纳米颗粒在碳泡沫骨架表面原位生长。当其厚度为 4 mm 时，复合碳泡沫的 EMI SE 为 21 dB，SE_A 值为 17 dB，SE_R 值为 4 dB。当材料厚度增加到 6 mm 时，其平均 EMI SE 为 26 dB，并且随着频率的增加，SE_A 增加，SE_M 减小。将碳泡沫与高磁导率填料复合使用大大减小 SE_R，减少电磁波的二次污染。

Tang 等[43]通过乳液模板法将 CNTs 和 Ni@CNTs 与间规聚苯乙烯/三氯苯 (sPS/TCB) 连续相混合，碳化得到碳泡沫 (CsPS-*x*-*y*，*x* 和 *y* 分别代表 CNTs 和 Ni@CNTs 的质量百分比)。CsPS-7.5-2.5 的电导率为 97 $S\cdot m^{-1}$，远远大于纯 CsPS 的导电率，大幅度增加其 SE_A 和 SE_R。在 X 波段，厚度为 5 mm 的 CsPS 和 CsPS-7.5-2.5 的 EMI SE 分别为 36 dB 和 78 dB，得到复合碳泡沫 EMI SE 高、应用前景好的新材料。总的来说，碳泡沫具有纳米纤维孔壁，其导电性和电磁屏蔽性能优异，但是其脆性大，很难作为结构材料使用。另外，碳泡沫的分层间隙会导致其 EMI SE 下降，降低分层间隙的缺陷是增加碳泡沫 EMI SE 的有效途径之一。

碳气凝胶是具有轻质、多孔、超低密度及三维网络结构的新型气凝胶[44]，其孔隙率高达 80%。碳气凝胶因其独特的多孔结构和三维导电网络等特点，被广泛应用于电磁屏蔽领域。石墨烯气凝胶是作为特殊的碳气凝胶之一，因其具有良好的导电、导热性，使石墨烯气凝胶具有突出的电磁

屏蔽性能。Zhu 等[45] 通过水合肼还原氧化石墨烯制备具有优异力学性能和稳定 EMI SE 的石墨烯气凝胶。当石墨烯气凝胶密度 ρ=3.7 mg/cm^3、厚度为 1 mm 时，其 EMI SE 为 64.1 dB，并且该石墨烯气凝胶具有优异的环境适应性，在不同的环境中仍具有稳定的 EMI SE。Yu 等[46] 通过定向冷冻法制备了各向异性石墨烯/聚酰亚胺 (PI) 复合气凝胶。当其复合气凝胶密度为 0.076 g/cm^3 时，其 EMI SE 高达 28.8 dB，并且具有优异的热稳定性和抗压缩性能。Quan 等[47] 引入三聚氰胺海绵 (MS) 作为石墨烯气凝胶的支撑骨架，增强了石墨烯气凝胶的力学稳定性。Fan 等[48] 通过超临界 CO_2 发泡还原氧化石墨烯-短切碳纤维/环氧树脂 (rGO-SCF/EP) 制备，其EMI SE高达95.5 dB，rGO-SCF/EP 的抗压强度是纯 EP 泡沫的 4.2 倍。石墨烯气凝胶具有高效的 EMI SE，但是其力学性能较差，一般可通过定向冷冻干燥及纤维或聚合物填充提高石墨烯气凝胶的力学性能，其次石墨烯气凝胶可通过添加 CNTs、CFs 及银纳米线 (AgNWs) 等具有优异导电性和高长径比的填料，进一步提高其 EMI SE。

3.2 金属/聚合物电磁屏蔽材料

金属材料因其结构简单、良好的导电导热性、突出的电磁屏蔽效能、宽频带等优点[49]，被广泛用于电磁屏蔽领域，但是金属材料存在价格昂贵、密度高及湿热条件下易腐蚀生锈，导致电阻升高、导电性能变差等缺点。近几年来，为了克服传统金属的缺点，结合聚合物的优点，进一步提高材料的力学性能、耐腐蚀性及电磁屏蔽性能，许多研究集中在金属/聚合物、合金/聚合物复合电磁屏蔽材料[50-51]。

3.2.1 金属/聚合物电磁屏蔽材料

研究人员逐步开发出具有轻质、柔性和突出的 EMI SE 的金属/聚合物复合电磁屏蔽材料，但是金属/聚合物电磁屏蔽材料通常不具有光学透过性，因此在可视窗电磁屏蔽等领域的使用受限。为了改善其透明性，近几年纳米级金属材料/聚合物电磁屏蔽材料得到广泛关注，其中 AgNWs 因突出的导电性和高长径比、简单的制备工艺、低成本被用于与聚合物复合，制备电磁屏蔽材料。AgNWs 的高长径比使其易于在聚合物基体中形成连续的导电网络，增加其导电性，增加阻抗匹配和 SE_A，获得优异的 EMI SE。

Qin 等[52] 制备了具有突出 EMI SE 的 AgNWs/聚 (3,4-乙烯二氧噻吩)：聚 (苯乙烯磺酸)(PEDOT：PSS) 透明薄膜，其平均 EMI SE 在 1 GHz 至 12 GHz 内达到 30.5 dB。当其 EMI SE 达到 41.4 dB 时，透光率达到 81.1%，并且可以根据需求调节其光学透过率和 EMI SE。Wang 等[53] 采用包覆法将棒状 AgNWs 镶嵌在明胶基质覆盖层间，得到具有出色的抗拉强度、透光率、抗冻性和 EMI SE 的多层 G/AgNWs/G 膜 (G 代表明胶基质)。其 EMI SE 达到 37.74 dB 时，透光率保持在 72%。Zhu 等[54] 通过简单的 Mayer-rod 涂层法制备透明 AgNWs 电磁屏蔽膜，后经 $NaBH_4$ 处理得到高效 EMI SE 的 AgNWs/聚二烯丙基二甲基氯化铵 (PDDA) 复合薄膜，其平均 EMI SE 为 28 dB，透光率高达 91.3%，当电磁屏蔽效能达到 31.3 dB 时，透光率仍达到 86.8%。

常将聚合物与金属纳米粒子复合为多层结构的电磁屏蔽材料，增加 SE_M，进而提高 EMI SE。很多可视金属/聚合物电磁屏蔽材料不能满足军用 EMI SE，有待进一步研究。同时，聚合物基纳米金属电磁屏蔽材料的屏蔽波段属于低频电磁波 (X 波段)，因此研发满足屏蔽高频电磁波的金属/聚合物电磁屏蔽材料是研究重点。

3.2.2 合金/聚合物电磁屏蔽材料

研究人员进一步研究合金/聚合物电磁屏蔽材料，以获取更加突出的 EMI SE。Ni-Co 合金因其低密度、高比强度、超刚度等优点[55]，广泛用于电磁屏蔽领域。研究表明[56-57]，通过化学镀法将 Ni-Co 合金负载在聚合物纤维表面，能获得轻质、高耐久度和高 EMI SE 的 Ni-Co/聚合物电磁屏蔽材料。在 Ni-Co 合金中添加铁、碳等元素能增加合金/聚合物复合材料对电磁波的诱导效应，从而显著提高 EMI SE。Wang 等[58] 通过化学镀法使 Ni-Co 在导电芳纶-碳共混织物表面形成涂层，C-Ni-Co 的三元协同诱导效应，显著提高了 EMI SE，在 30~6 000 MHz 范围内的平均 EMI SE 为 42.57 dB。

合金/聚合物电磁屏蔽材料中的聚合物基质的交联反应提高其熔体黏度，有利于金属片材沿轧制方向取向，增加合金/聚合物的各向异性，增加其 SE_A。Oh 等[59] 使用辊磨技术制备稳定的 Fe-Si-Al 合金/聚苯乙烯-b-乙烯-丁二烯-b-苯乙烯，交联使其黏度增加，辊磨使粉末合金变为片状合金，其磁导率提高 5 倍，获得高 EMI SE[60]。

优化合金金属的组成、各类金属所占的比例

及添加其他的非金属物质，增加合金/聚合物电磁屏蔽材料的多元损耗，从而提升其力学性能和 EMI SE。另外，合金的制备工艺直接影响其微观结构，改善合金的制备工艺，更好的控制其微观取向，以获取优异的 EMI SE 和突出的力学性能，增加合金/聚合物电磁屏蔽材料的导电性、加工性和 EMI SE 是一个有价值的研究方向。

3.3 新型 MXene/聚合物电磁屏蔽材料

MXene 是一种二维材料，通式为 $M_{n+1}X_nT_x$(M：过渡金属元素；X：碳氮元素；T：官能团通常为—F、—O、—OH；n=1、2、……)[61]。MXene 因其高导电性、高比表面积和丰富的官能团而深受研究人员的关注[62-63]。聚合物基体与 MXene 主要通过物理混合、冷冻干燥及预支撑成型等方法复合使用。

3.3.1 MXene 凝胶泡沫电磁屏蔽材料

多孔 MXene 泡沫凝胶因其超低的密度，常被用于轻质电磁屏蔽材料的研发[64]。Zeng 等[65]通过简单的方法制备了轻质、柔性及高 EMI SE 的交联 MXene/聚酰亚胺复合泡沫凝胶材料 (C-MXene@PI)，其 EMI SE 远远超过了其他典型的多孔结构。在 X 波段，涂覆厚度为 1.5 mm 的 C-MXene@ PI 复合泡沫的 EMI SE 从 1.4 dB 增加到 60 dB。Cheng 等[66]采用先水固化后冷冻干燥的方法制备轻质高效 EMI SE 的 MXene/AgNWs/聚氨基甲酸酯 (PU) 泡沫薄膜。因复合泡沫膜的多重界面和导电网络对电磁波具有高效衰减，故随着 MXene 质量比的提高，MXene/AgNW/PU 的 EMI SE 增强，当 MXene 含量为 4.71wt% 时，其 EMI SE 在 Ku 波段达到 50 dB。这是由于超高长径比的 AgNWs 与 MXene 构建了连续的 3D 导电网络，PU 促进 AgNWs 和 MXene 均匀分散，支撑基质和保护层，这独特的结构使 MXenen/AgNWs/PU 在 12.4~20 GHz 下的 EMI SE 高于 59 dB。在 X 波段，厚度为 4.21 mm 的 3 层复合泡沫薄膜的 EMI SE 不低于 70 dB。

MXene/聚合物泡沫凝胶电磁屏蔽材料具有优异的导电性、突出的力学性能、高 EMI SE、高耐久度、结构可控可拓展等优点。碳纳米管、金属纳米线等具有超高长径比的材料与 MXene 联合使用时，易构成连续的 3D 导电网络，大幅度提升材料的 EMI SE，因此 MXene/聚合物电磁材料在电磁屏蔽领域具有很大的前景，但是其制备工艺苛刻，各因素对电磁屏蔽性质的影响非常复杂，有待进一步研究。

3.3.2 MXene 发泡电磁屏蔽材料

与 MXene/聚合物凝胶泡沫相比，MXene/聚合物泡孔材料一般通过发泡法制备，具有制备方法简单、力学性能优异等优点。MXene/聚合物与高长径比的材料复合使用，能有效提高 EMI SE。Yin 等[67]通过发泡法制备轻质、超薄、高 EMI SE 的 MXene/AgNWs/聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 复合薄膜。在 X 波段，MXene/AgNWs/PVP 复合薄膜厚度为 1.2 μm 时，其 EMI SE 为 41.3 dB。为获得更加优异的 EMI SE，常将 MXene/聚合物与具有高磁损耗或高介电损耗的材料混合使用。Li 等[68]将 MXene 与 CNTs 分散在聚偏氟乙烯/二甲基甲酰胺 (PVDF/DMF) 溶液中，通过超声、真空干燥、压缩成型得到各向异性的 CNT/MXene/PVDF 复合薄膜，发泡后 CNT/MXene/PVDF 复合泡沫的 SE_A 占总 EMI SE 的 66% 以上。MXene 含量为 1wt% 和 12wt% 时，复合薄膜的 EMI SE 分别为 45.2 dB 和 65.1 dB，其 EMI SE 是加入相同含量其他填料的 4~5 倍。

随着科技的进步，MXene 泡孔材料的制备方法朝着绿色、清洁的方向发展。目前已存在简单、高效、环保、低成本且易扩展的发泡工艺，制备具有 3D 大孔结构的 MXene 薄膜，且 3D 大孔结构的 MXene 薄膜的平均 EMI SE 高达 53 dB[69]。如何进一步改进 MXene/聚合物的制备工艺，是目前 MXene/聚合物复合材料的发展趋势和难题之一。

4 结语与展望

聚合物基电磁屏蔽材料具有很好的应用前景，除电导率、磁导率外，聚合物复合材料的结构也是影响其电磁屏蔽效能 (EMI SE) 的主要因素。将聚合物基电磁屏蔽材料设计为多层结构、隔离结构、多孔结构，能显著提高其电磁屏蔽效能。通常，单一的填料制备的聚合物复合材料无法提供足够的电导率和磁导率。另外，填料在聚合物基体中的分布不可控、复合材料加工困难等因素都是阻碍聚合物基电磁屏蔽材料规模化和市场化的重要因素，有待进一步研究。

轻量化、柔性和可视化的高效电磁屏蔽材料是未来的发展方向。纳米材料具有光学透过率、高磁导率和电导率、突出的 EMI SE。将纳米填料与聚合物复合为轻质、透明、高效的电磁屏蔽材料是未来的研究热点。近几年来，将石墨烯、

MXene 等二维材料与聚合物复合，在电磁屏蔽的研究领域取得了巨大的进展。另外，为避免电磁波反射造成二次危害，制备以吸收为主的高性能电磁屏蔽材料将成为未来电磁屏蔽材料的热点。

参考文献：

[1] GUPTA S, TAI N. Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band[J]. Carbon, 2019, 152: 159-187.

[2] DU S, CHEN H, HONG R. Preparation and electromagnetic properties characterization of reduced graphene oxide/strontium hexaferrite nanocomposites[J]. Nanotechnology Reviews (Berlin), 2020, 9(1): 105-114.

[3] FAISAL M, KHASIM S. Polyaniline-antimony oxide composites for effective broadband EMI shielding[J]. Iranian Polymer Journal, 2013, 22(7): 473-480.

[4] LI D, YANG N, TAO Y, et al. Induced electric field intensification of acid hydrolysis of polysaccharides: Roles of thermal and non-thermal effects[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105484.

[5] WANG H, TENG K, CHEN C, et al. Conductivity and electromagnetic interference shielding of graphene-based architectures using MWCNTs as free radical scavenger in gamma-irradiation[J]. Materials Letters, 2017, 186: 78-81.

[6] LU M, CAO M, CHEN Y, et al. Multiscale assembly of grape-like ferroferric oxide and carbon nanotubes: A smart absorber prototype varying temperature to tune Intensities[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(34): 19408-19415.

[7] HE J, WANG X, ZHANG Y, et al. Small magnetic nanoparticles decorating reduced graphene oxides to tune the electromagnetic attenuation capacity[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(29): 7130-7140.

[8] WANG G, WANG L, MARK L H, et al. Ultralow-threshold and lightweight biodegradable porous PLA/MWCNT with segregated conductive networks for high-performance thermal insulation and electromagnetic interference shielding applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(1): 1195-1203.

[9] SACHDEV V K, SHARMA S K, TOMAR M, et al. EMI shielding of MWCNT/ABS nanocomposites in contrast to graphite/ABS composites and MWCNT/PS nanocomposites[J]. RSC Advances, 2016, 6(51): 4549-4558.

[10] LIU H, WU S, YOU C, et al. Recent progress in morphological engineering of carbon materials for electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2021, 172: 569-596.

[11] WANASINGHE D, ASLANI F, MA G, et al. Advancements in electromagnetic interference shielding cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117116.

[12] YUAN Y, SUN X, YANG M, et al. Stiff, thermally stable and highly anisotropic wood-derived carbon composite monoliths for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(25): 21371-21381.

[13] QIN L, LIU S, QIN S, et al. MOF derived porous Ni/Co@C nanocomposite as electromagnetic wave absorber with optimized impedance matching[J]. Composites Communications, 2022, 33: 101196.

[14] LIU S, QIN S, JIANG Y, et al. Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 145: 106376.

[15] LIU H, XU Y, ZHAO X, et al. Lightweight leaf-structured carbon nanotubes/graphene foam and the composites with polydimethylsiloxane for electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2022, 191: 183-194.

[16] DOGAN S, KAYACAN O, GOREN A. A lightweight, strength and electromagnetic shielding polymer composite structure for infant carrier strollers[J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4559-4572.

[17] ZHANG K, GU X, DAI Q, et al. Flexible polyaniline-coated poplar fiber composite membranes with effective electromagnetic shielding performance[J]. Vacuum, 2019, 170: 108990.

[18] WANG H, LI S, LIU M, et al. Review on shielding mechanism and structural design of electromagnetic interference shielding composites[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(6): 2100032.

[19] YUAN D, GUO H, KE K, et al. Recyclable conductive epoxy composites with segregated filler network structure for EMI shielding and strain sensing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 132: 105837.

[20] QI Q, MA L, ZHAO B, et al. An effective design strategy for the sandwich structure of PVDF/GNP-Ni-CNT composites with remarkable electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(32): 36568-36577.

[21] WANG G, LIAO X, YANG J, et al. Frequency-selective and tunable electromagnetic shielding effectiveness via the sandwich structure of silicone rubber/graphene composite[J]. Composites Science and Technology, 2019, 184: 107847.

[22] SONG W, GONG C, LI H, et al. Graphene-based sandwich structures for frequency selectable electromagnetic shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 36119-36129.

[23] LIU J, ZHANG H, SUN R, et al. Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding[J]. Advanced Materials, 2017, 29(38): 1702367.

[24] ZHANG H, ZHANG G, GAO Q, et al. Multifunctional microcellular PVDF/Ni-chains composite foams with enhanced electromagnetic interference shielding and superior thermal insulation performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122304.

[25] LIANG C, LIU Y, RUAN Y, et al. Multifunctional sponges with flexible motion sensing and outstanding thermal insulation for superior electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 139: 106143.

[26] WU N, LIU C, XU D, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption of three-dimensional porous Fe_3O_4/C composite flowers[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(9): 12471-12480.

[27] WU N, LIU C, XU D, et al. Ultrathin high-performance electromagnetic wave absorbers with facilely fabricated hierarchical porous Co/C crabapples[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(6): 1659-1669.

[28] KAUSHAL A, SINGH V. Excellent electromagnetic interference shielding performance of polypropylene/carbon fiber/multiwalled carbon nanotube nanocomposites[J]. Polymer Composites, 2022, 43(6): 3708-3715.

[29] TUNAKOVA V, TUNAK M. Carbon-fiber reinforcements for epoxy composites with electromagnetic radiation protection-prediction of electromagnetic shielding ability[J]. Composites Science and Technology, 2021, 215: 109029.

[30] CULICA M E, BILIUTA G, ROTARU R, et al. New electromagnetic shielding materials based on viscose-carbon nanotubes composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(7): 1499-1506.

[31] FORMELA K. Waste tire rubber-based materials: Processing, performance properties and development strategies[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2022, 5(4): 234-247.

[32] FU L, LI K, QIN H, et al. Sandwich structured iPP/CNTs nanocomposite foams with high electromagnetic interference shielding performance[J]. Composites Science and Technology, 2022, 220: 109297.

[33] KUANG T R, JU J J, CHEN F, et al. Coupled effect of self-assembled nucleating agent, Ni-CNTs and pressure-driven flow on the electrical, electromagnetic interference shielding and thermal conductive properties of poly(lactic acid) composite foams[J]. Composites Science and Technology, 2022, 230: 109736.

[34] PEI X, ZHAO M, LI R, et al. Porous network carbon nanotubes/chitosan 3D printed composites based on ball milling for electromagnetic shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 145: 106363.

[35] MANNA K, SRIVASTAVA S K. Contrasting role of defect-induced carbon nanotubes in electromagnetic interference shielding[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(34): 19913-19920.

[36] WANG W, CUI R, ZHANG P, et al. High electromagnetic interference shielding effectiveness in MgO composites reinforced by aligned graphene platelets[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(6): 2868-2878.

[37] BARANI Z, KARGAR F, MOHAMMADZADEH A, et al. Multifunctional graphene composites for electromagnetic shielding and thermal management at elevated temperatures[J]. Advanced Electronic Materials, 2020, 6(11): 2000520.

[38] SIM H J, LEE D W, KIM H, et al. Self-healing graphene oxide-based composite for electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2019, 155: 499-505.

[39] GILL N, GUPTA V, TOMAR M, et al. Improved electromagnetic shielding behaviour of graphene encapsulated polypyrrole-graphene nanocomposite in X-band[J]. Composites Science and Technology, 2020, 192: 108113.

[40] LI M, YANG K, ZHU W, et al. Copper-coated reduced graphene oxide fiber mesh-polymer composite films for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(6): 5565-5574.

[41] ZENG Y, LUO X, YU K, et al. EMI shielding performance of phenolic-based carbon foam modified with GO/SiO_2 hybrid nanomaterials[J]. Chemical Physics Letters, 2019, 715: 166-172.

[42] LIU H, WU S, YOU C, et al. Fe_3O_4 nanoparticles decorated flexible carbon foam for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Ceramics International, 2022, 48(13): 19452-19459.

[43] TANG R, XU P, DONG J, et al. Carbon foams derived from emulsion-templated porous polymeric composites for electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2022, 188: 492-502.

[44] GUO F, JIANG Y, XU Z, et al. Highly stretchable carbon aerogels[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 881.

[45] ZHU E, PANG K, CHEN Y, et al. Ultra-stable graphene aerogels for electromagnetic interference shielding[J]. Science China Materials, 2023, 66(3): 1106-1113.

[46] YU Z, DAI T, YUAN S, et al. Electromagnetic interference shielding performance of anisotropic polyimide/graphene composite aerogels[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(27): 30990-31001.

[47] QUAN L, WANG C, XU Y, et al. Electromagnetic properties of graphene aerogels made by freeze-casting[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 131337.

[48] FAN X, GAO Q, ZHANG Y, et al. Anisotropic microcellular epoxy/rGO-SCF aerogel foam with excellent compressibility and superior electromagnetic interference shielding performance[J]. Composites Science and Technology,

2022，230：109718.

[49] CHANG H, GAO J, LAI S, et al. Prediction of the electromagnetic shielding effectiveness of metal grid using neural network algorithm[J]. IEEE Photonics Journal，2021，13(4)：1-6.

[50] YAO Y, JIN S, ZOU H, et al. Polymer-based lightweight materials for electromagnetic interference shielding: A review[J]. Journal of Materials Science，2021，56(11)：6549-6580.

[51] ZHANG J, LI J, TAN G, et al. Thin and flexible Fe-Si-B/Ni-Cu-P metallic glass multilayer composites for efficient electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2017，9(48)：42192-42199.

[52] QIN F, YAN Z, FAN J, et al. Highly uniform and stable transparent electromagnetic interference shielding film based on silver nanowire-PEDOT:PSS composite for high power microwave shielding[J]. Macromolecular Materials and Engineering，2021，306(2)：2000607.

[53] WANG G, HAO L, ZHANG X, et al. Flexible and transparent silver nanowires/biopolymer film for high-efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2022，607：89-99.

[54] ZHU X, XU J, QIN F, et al. Highly efficient and stable transparent electromagnetic interference shielding films based on silver nanowires[J]. Nanoscale，2020，12(27)：14589-14597.

[55] YE J, CHEN X, LUO Z, et al. Improving strength and electromagnetic shielding effectiveness of Mg-Sn-Zn-Ca-Ce alloy by Sn addition[J]. Advanced Engineering Materials，2021，23(9)：2100166.

[56] WANG Y, WANG W, DING X, et al. Multilayer-structured Ni-Co-Fe-P/polyaniline/polyimide composite fabric for robust electromagnetic shielding with low reflection characteristic[J]. Chemical Engineering Journal，2020，380：122553.

[57] ZHANG N, ZHAO R, HE D, et al. Lightweight and flexible Ni-Co alloy nanoparticle-coated electrospun polymer nanofiber hybrid membranes for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Alloys and Compounds，2019，784：244-255.

[58] WANG Q, XU Y, BI S, et al. Enhanced electromagnetic-interference shielding effectiveness and mechanical strength of Co-Ni coated aramid-carbon blended fabric[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2021，34(10)：103-114.

[59] OH K, HONG S M, SEO Y. Effect of crosslinking reaction on the electromagnetic interference shielding of a Fe-Si-Al alloy (Sendust)/polymer composite at high frequency[J]. Polymers for Advanced Technologies，2014，25(11)：1366-1370.

[60] PANDEY R, TEKUMALLA S, GUPTA M. Effect of defects on electromagnetic interference shielding effectiveness of magnesium[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics，2018，29(11)：9728-9739.

[61] HU M, ZHANG H, HU T, et al. Emerging 2D MXenes for supercapacitors: Status, challenges and prospects[J]. Chemical Society Reviews，2020，49(18)：6666-6693.

[62] JIANG Y, RU X, CHE W, et al. Flexible, mechanically robust and self-extinguishing MXene/wood composite for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part B: Engineering，2022，229：109460.

[63] KIM E, ZHANG H, LEE J, 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.

[64] IQBAL A, SAMBYAL P, KOO C M. 2D MXenes for electromagnetic shielding: A review[J]. Advanced Functional Materials，2020，30(47)：2000883.

[65] ZENG Z H, WU N, WEI J J, et al. Porous and ultra-flexible crosslinked MXene/polyimide composites for multifunctional electromagnetic interference shielding[J]. Nano-Micro Letters，2022，14(1)：59.

[66] 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 photothermal conversion[J]. Composites Science and Technology，2021，215：109023.

[67] YIN H, BI L, WU Z, et al. 2D foaming of ultrathin MXene sheets with highly conductive silver nanowires for wearable electromagnetic interference shielding applications owing to multiple reflections within created free space[J]. Nano Futures，2020，4(3)：35002.

[68] LI R, DING L, GAO Q, et al. Tuning of anisotropic electrical conductivity and enhancement of EMI shielding of polymer composite foam via CO_2-assisted delamination and orientation of MXene[J]. Chemical Engineering Journal，2021，415：128930.

[69] YIN L, KANG H, MA H, et al. Sunshine foaming of compact Ti_3C_2T MXene film for highly efficient electromagnetic interference shielding and energy storage[J]. Carbon，2021，182：124-133.