

引用:孙嫣然,张中洋,战艳虎. 聚氨酯基电磁屏蔽材料研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(2): 274-281.

Citation: SUN Yanran, ZHANG Zhongyang, ZHAN Yanhu. Research progress of polyurethane-based electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(2): 274-281.

文章编号 1672-6634(2026)02-0274-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025050007

聚氨酯基电磁屏蔽材料研究进展

孙嫣然¹, 张中洋², 战艳虎¹

(1. 聊城大学 材料科学与工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 山东格润高分子材料有限公司, 山东 泰安 271600)

摘要 电子设备与数字技术的飞速发展造成了日益严重的电磁辐射干扰,影响了电子元件的运行与人类的身心健康。聚氨酯基电磁屏蔽材料因其耐腐蚀、分子结构易调控、性能稳定的优势得到科研人员的关注。综述总结了掺杂导电填料、磁性填料以及电磁杂化填料聚氨酯基电磁屏蔽材料的制备方法,讨论了微观结构及填料类型对聚氨酯基电磁屏蔽材料屏蔽效能的影响规律,展望了该材料面临的关键挑战与发展前景。

关键词 聚氨酯; 导电填料; 电磁屏蔽; 结构设计

中图分类号 TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress of polyurethane-based electromagnetic shielding materials

SUN Yanran¹, ZHANG Zhongyang², ZHAN Yanhu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. Shandong Gerun Polymer Material Co., Ltd., Taian 271600, China)

Abstract The accelerated development of electronic devices and digital technology has led to increasingly severe electromagnetic radiation interference, which not only affects the performance of electronic components but also poses risks to human physical and mental health. Polyurethane-based electromagnetic interference shielding materials have garnered significant attention due to their merits, such as anticorrosion, tunable molecular structure, and stable properties. This review examines the preparation methods of polyurethane-based electromagnetic interference shielding materials with conductive fillers, magnetic fillers, and electromagnetic hybrid fillers. The effect of microstructure and filler types on the shielding effectiveness of these materials has been discussed and the key challenges and future prospects are summarized.

Keywords polyurethane; conductive filler; electromagnetic interference shielding; structure design

0 引言

随着高新技术不断创新发展,电子通信系统和数字技术为人们生活和交流带来极大便利。电子设备在运行时产生的电磁波(EMW),既会干扰其他电子元件的正常工作,又威胁人类健康^[1-2]。解决电磁干扰的主要途径是设计和制备高效的电磁屏蔽材料。一般来说,材料的电磁屏蔽效能(EMI SE)与其导电性正相关^[3]。拥有超高导电性的金属材料是常见的电磁屏蔽材料^[4],但其成本高、易腐蚀的缺陷限制了它们的实际

收稿日期:2025-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52103054);山东省自然科学基金项目(ZR2025MS903)资助

通信作者:战艳虎,男,汉族,博士,副教授,研究方向:功能高分子材料, E-mail: zhanyanhu@lcu.edu.cn.

应用。另外,金属是以反射为主的屏蔽材料,因此使用过程中会造成二次污染^[5]。与金属材料相比,聚氨酯(PU)基电磁屏蔽材料具有抗腐蚀、易加工和屏蔽性能可调等优势,得到科研界与商业界研究人员的广泛关注^[6]。根据电磁屏蔽机理,引入导电填料和磁性填料可以有效提升 PU 材料电磁屏蔽性能。本文简述了电磁屏蔽原理,指出 PU 作为电磁屏蔽复合材料基体的优势,总结了不同种类填料填充 PU 基电磁屏蔽材料的制备工艺,比较了各种填料对 PU 基复合材料 EMI SE 的影响规律,同时展望了 PU 基电磁屏蔽材料的发展前景。

1 电磁屏蔽原理

目前,传输线理论是被广泛接受的电磁屏蔽机制。传输线理论指出,电磁屏蔽主要有吸收、反射和多重反射三种机制。如图 1 所示,入射 EMW 作用于材料表面后,由于材料表面与空气的界面阻抗不匹配,一部分 EMW 被反射到空气中,其余部分 EMW 进入材料内部,因发生吸收或多次反射得到衰减。

总屏蔽效能(SE, η_T)是衡量屏蔽材料衰减 EMW 能力的重要指标,表示电磁屏蔽材料的屏蔽性能,单位为分贝(dB)。EMI SE 定义为 EMW 通过屏蔽材料前后场强或功率的比值,如

$$\eta_T = \lg\left(\frac{P_I}{P_T}\right) = 20\lg\left|\frac{E_I}{E_T}\right| = 20\lg\left|\frac{H_I}{H_T}\right|, \quad (1)$$

式中 P_I 、 E_I 、 H_I 分别代表入射 EMW 的功率、电场强度、磁场强度, P_T 、 E_T 、 H_T 分别表示透射 EMW 的功率、电场强度、磁场强度。一般 η_T 数值越大,材料的 EMI SE 越好。

据 Schelkunoff 理论, η_T 可表示为 EMW 的反射损耗(SE_R , η_R)、吸收损耗(SE_A , η_A)和多重反射损耗(SE_M , η_M)之和。

$$\eta_T = \eta_R + \eta_A + \eta_M = 10 \lg\left(\frac{1}{T}\right), \quad (2)$$

$$\eta_R = 20 \lg \frac{(\eta + \eta_0)^2}{4\eta\eta_0} = 39.5 + 10 \lg \frac{\sigma}{2f\pi\mu} = 10 \lg\left(\frac{1}{1-R}\right), \quad (3)$$

$$\eta_A = 131.4t\sqrt{f\sigma\mu} = 10 \lg\left(\frac{1-R}{T}\right), \quad (4)$$

$$\eta_M = 20\lg(1 - e^{\frac{-2t}{\delta}}), \quad (5)$$

式中 T 、 R 、 A 分别为透射系数、反射系数、吸收系数,三者之和为 1。 η 和 η_0 分别为屏蔽材料和空气的阻抗; f 为 EMW 频率; σ 为电导率; μ 为磁导率; t 为材料厚度; δ 为趋肤深度,定义为入射 EMW 场强衰减到初始强度 $1/e$ 时穿过材料的厚度。当 SE_A 高于 10 dB, SE_M 近似为 0。

2 PU 基体优势

金属及金属基材料作为传统电磁屏蔽材料,存在一定局限性:其一,其屏蔽机制以反射为主,易引发二次电磁污染;其二,加工性能较差,难以成型复杂结构;其三,环境稳定性不足,易氧化腐蚀造成屏蔽效能衰减;其四,高密度限制了轻量化应用场景。相比之下,PU 材料在湿热、化学腐蚀等复杂环境下仍能保持优异的化学稳定性和机械稳定性,被广泛应用于生物医学、电子器件、航空航天等领域。正是这种卓越的稳定性,结合其可设计性强、轻质柔性等固有特点,使 PU 成为高性能电磁屏蔽复合材料的理想基体。其主要优势可概括为以下方面:(1) 力学性能优异。PU 独特的微相分离结构是其力学性能的基础。异氰酸酯形成的硬段赋予材料刚性和强度,多元醇构成的软段赋予材料优异的弹性和韧性。(2) 耐化学性好。分子结构中氨基甲酸酯基团稳定性高,能够在一定程度上抵抗酸、碱及有机溶剂的侵蚀。(3) 易加工。PU 具有出色的加工成型性,可通过刮涂、喷涂、模压等多种工艺制备成不同形状和尺寸的产品,满足多样化的应用场景需求。(4) 轻质与柔性。PU 密度低,保持优异的柔性和可变形性,适用于可穿戴电子设备。(5) 屏蔽性能可调。尽管

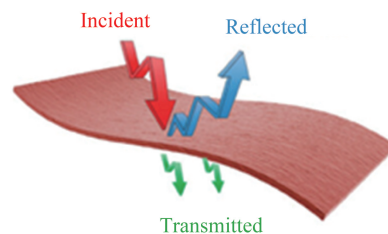


图 1 电磁屏蔽机理示意图^[5]

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic shielding mechanism^[5]

PU 本身不具备电磁屏蔽能力,但其独特的结构可设计性与功能兼容性使其成为理想的基体材料。通过与导电或导磁填料(如 MXene、碳纳米管和磁性颗粒等)复合,PU 基体能有效构筑电磁损耗网络,实现“基体-填料”协同屏蔽效应。

尽管 PU 基电磁屏蔽材料的研究取得了显著进展,但仍存在一些关键问题。例如,填料分散均匀性与材料微观结构的控制是技术难点,此外,设计具有高屏蔽效能、良好力学性能的电磁屏蔽材料也是目前研究的重点挑战。

3 导电填料/PU 基电磁屏蔽材料

根据导电填料种类,可划分为金属/PU 基电磁屏蔽材料、碳/PU 基电磁屏蔽材料、MXene/PU 基电磁屏蔽材料和导电聚合物/PU 基电磁屏蔽材料等。

3.1 金属/PU 基电磁屏蔽材料

高导电的金属银是 PU 基电磁屏蔽材料的重要填料^[7]。根据形貌可以分为银纳米颗粒(AgNPs)、银纳米棒(AgNRs)、银纳米线(AgNWs)和银纳米片(AgNFs)等。Li 等^[8]采用盐模板和真空辅助热压联用工艺制备了多孔热塑性 PU/AgNR 复合材料。在 X 波段,该材料的平均 EMI SE 为 35.5 dB,反射系数 R 仅为 0.085,可有效降低 EMW 的二次污染。Sun 等^[9]利用溶液混合与重力诱导沉积技术制备了具有梯度分布的 AgNW/水性 PU(WPU)复合膜。该材料在 X 波段表现出优异的电磁屏蔽性能,EMI SE 高达 58.1 dB。Ye 等^[10]采用刮涂工艺制备的 WPU/AgNFs/MXene 复合薄膜,其 EMI SE 达 87.3 dB。图 2 为负载不同形貌 Ag 填料的 PU 基复合材料的 EMI SE^[8-10]。

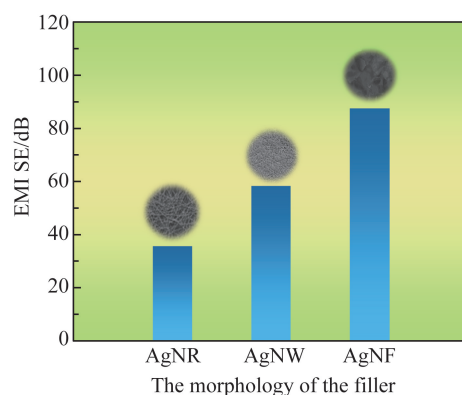


图 2 不同形貌 Ag 填料/PU 的 EMI SE 对比^[8-10]

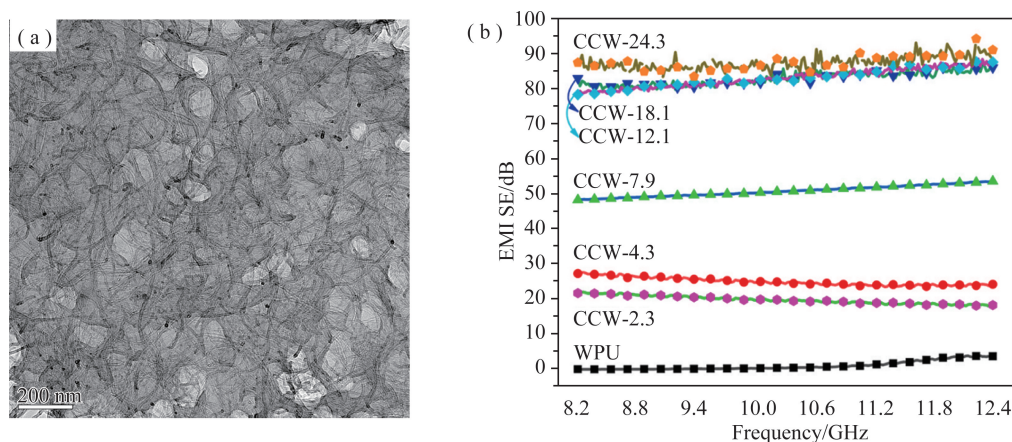
Fig. 2 The EMI SE of PU-based composites filled with different morphologies of Ag^[8-10]

铜、铝等高导电性金属填料也因其优异的 EMI SE 而被广泛应用。Zhang^[11]将微米级铜粉掺杂于 PU 中,并将其涂覆于棉织物表面,成功制备了一种有优异吸波性能的涂层织物。铜粉的质量分数为 11%时,材料的 EMI SE 达到 25.92 dB。必须注意的是,过高的填料负载量会显著降低聚合物复合材料的柔韧性和拉伸性能。为了克服该问题,柔性的液态金属(LM)被应用于制备柔性、高效 PU 基电磁屏蔽材料。Mani^[12]等采用溶液浇铸法制备了 LM 包埋的自修复 PU 复合材料。借助拉伸工艺调控复合材料微观结构,当材料被拉伸至 300%应变时,分散的 LM 液滴沿拉伸方向定向排列,形成有效的导电网络。即使在此高应变状态下,材料在 X 波段仍保持优异的电磁屏蔽性能,其 EMI SE 高达 72 dB。

金属填料虽然可用于制备高效的 PU 基电磁屏蔽材料,但是面临价格昂贵、易氧化的缺陷。PU 表面的金属涂层发生氧化后,会严重降低材料的电磁屏蔽性能。因此,提升金属涂层 PU 材料 EMI SE 的稳定性是该领域的研究重点。

3.2 碳基填料/PU 电磁屏蔽材料

碳基填料的种类比较多,但常用于电磁屏蔽领域的材料主要包括碳纳米管(CNT)、石墨烯(GE)、还原氧化石墨烯(rGO)和导电炭黑(CCB)等。碳基填料具有优异的导电性、化学稳定性及较大的长径比,易构成三维网络,并且与 PU 分子链具有较强的界面作用力,因此它们在增加 PU 材料电磁屏蔽性能的同时也可以增强其力学性能^[13]。制备该类材料的关键是实现 CNT 在 PU 中的均匀分散。如图 3 所示,Zhan 等^[14]以十六烷基三甲基溴化铵为表面活性剂,借助超声分散技术实现了高含量 CNT 在 WPU 基体中的均匀分散,形成导电通路。当 CNTs 含量为 24.3%时,材料的 EMI SE 高达 88.8 dB。Yi 等^[15]用分散剂对碳纤维(CF)表面修饰,提高填料分散性,利于形成连续导电网络。在 300 kHz~3 GHz 频率范围内,经修饰 CF 增强的 TPU 复合材料的 EMI SE 达到 32.5 dB,是未修饰 CF 增强 TPU 复合材料的 1.2 倍。



注:(a) SEM 照片和(b) EMI SE。

图3 CNT/WPU 复合材料的微观结构和电磁屏蔽性能^[14]

Fig. 3 The microstructure and EMI shielding performance of CNT/WPU composites^[14]

过高的 CNT 含量会增加材料的成本和降低力学性能。渗流结构、隔离网络结构等构建技术可以在低含量 CNT 时实现 PU 材料电磁屏蔽性能的高效化,因此成为该领域的研究热点。渗流结构本质上是使填料选择性分布于多相聚合物体系的特定相中,构建三维连续导电网络。这种结构实现了填料的有效衔接,更易形成导电网络,使得复合材料在低填料负载下仍能实现高效电磁屏蔽。Wang 等^[16]将 CNT 选择性分布在 TPU 的硬段区域,有效地构建了导电网络,获得了 EMI SE 为 35.4 dB 的材料。Kwon 等^[17]将聚甲基丙烯酸甲酯微粒作为分散相,诱导炭黑铁粉/CNT 选择性分布在 TPU 相中,成功设计出具有双渗透结构的复合薄膜。该薄膜材料 1 mm 厚时的 EMI SE 为 29 dB。隔离网络结构是基于体积排除效应将纳米填料选择性分布在聚合物颗粒的界面,通过热压过程形成导电网络^[18]。Wang 等^[19]以具有隔离网络结构的 CNT/TPU 材料为表层,以具有隔离网络结构的氮化硼(BN)/TPU 材料为芯层,热压合成三明治结构 TPU/CNT/BN 复合材料。当添加 CNT 的质量分数为 10%时,复合材料 EMI SE 高达 53.61 dB。Niu 等^[20]采用 3D 打印技术制备了具有不同层间夹角的 TPU 基体,经 CNT 浸涂及热压处理成功制备共连续隔离式 CNT/TPU 复合材料。在 CNTs 质量分数为 4.0%时,层间夹角为 $\pi/3$ 的 CNT/TPU 复合材料的 EMI SE 为 43.1 dB,是具有传统隔离结构的 CNT/TPU 复合材料的 1.7 倍。并且,该材料的拉伸强度和断裂伸长率分别为 17.8 MPa 和 377.3%,分别是传统隔离结构 CNT/TPU 复合材料的 3 倍和 16 倍。

泡沫材料的多孔结构在赋予其轻质柔韧性的同时,还可增加界面面积,延长 EMW 传输路径,协同增强 EMI SE,在电磁屏蔽领域展现出广泛的应用前景。Oraby 等^[21]发现当热剥离 GE 质量分数为 5%时,经原位复合工艺制备 PU 复合泡沫材料的 EMI SE 最大为 25.6 dB。Yao 等^[22]采用一锅法制备的 GE/PU 多孔复合材料在低频段 EMI SE 为 30 dB。

有机碳填料重量轻且导电性强,掺入 PU 基体中会改善其化学稳定性、力学性能、电学性能和热学性能,可应用于柔性可穿戴电子产品。通过工艺优化和结构设计制备高效的电磁屏蔽材料仍是今后研究的重点。

3.3 MXene/PU 电磁屏蔽材料

MXene 是由过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物组成的二维纳米材料,具有超高导电性、丰富的表面化学官能团、高比表面积以及良好的柔性与可加工性,广泛应用于储能、吸波、催化和电磁屏蔽等领域。Li 等^[23]在 TPU@PDA 泡沫表面浸渍 MXene 涂层,构建均匀分布的导电网络。由于空气与 MXene 涂层间显著的阻抗失配,部分 EMW 被直接反射回空气;其余 EMW 进入材料内经多次反射衰减。MXene 的体积分数为 0.66%时,泡沫材料在 X 波段 EMI SE 为 72.2 dB,反射系数(R)大于吸收系数(A),屏蔽机制以反射为主,图 4 为复合泡沫的屏蔽机制示意图^[23]。复合泡沫材料 MXene 超高的导电性,致使大部分 MXene/聚合物基电磁屏蔽材料屏蔽机制以反射为主^[1]。因此,如何进行合理的结构设计,使得 MXene/PU 电磁屏蔽材料具有低填料、高吸收特性成为该领域的研究重点。通过构建不对称梯度结构或分层结构,使得材料表面具有最佳的阻抗匹配,可减少反射,并促进 EMW 深入渗透到复合材料内部以增强吸收。Feng 等人^[24]经浸涂

结合冷冻干燥技术制备了具有梯度 MXene 材料,后将其沉积在 PU 骨架表面,制得多孔复合材料。当 EMW 从低导电层入射时,少部分被反射回空气,另一部分则进入材料内部,在多孔海绵结构和 MXene 多层结构之间经历多次反射,并通过导电损耗得到有效耗散,显著提升了材料衰减 EMW 的能力。值得注意的是,梯度 MXene 层间的电导率差异显著,通过界面极化进一步增强了 EMW 的衰减,凸显了这种非对称导电结构的独特优势。该复合材料在 X 波段表现出以吸收为主的电磁屏蔽性能:其平均 EMI SE 达 44.6 dB, A 为 0.82。Wang 等^[25]以 MXene/纳米纤维素薄膜为外层,以多孔废 PU 泡沫为中间层,经热处理制备具有三明治结构的夹层材料。EMW 在外层部分被反射,另一部分进入内层发生多重反射、吸收而衰减,极大提高了电磁屏蔽性能,EMI SE 高达 83.37 dB。

MXene 在无添加剂添加时,可以形成稳定的水分散体,这有利于构建具有低渗透阈值的高导电性聚合物复合材料,使得复合材料在低填料含量下仍展现出高效的电磁屏蔽性能。但该类材料在实际应用中具有一定缺陷:如何增加 MXene 的抗氧化性能,增加性能的稳定性;如何将 MXene 与其他材料结合,满足电磁屏蔽领域的实际应用;如何设计合成多孔、隔离形式的复合材料,减少反射带来的二次污染。

3.4 导电聚合物/PU 电磁屏蔽材料

本征导电聚合物(ICP)既具有密度低、易加工和耐腐蚀等优势,又兼具金属的电学、光学和磁学等特性。常见的 ICP 包括聚吡咯(PPy)、聚苯胺(PANI)等。在实际应用中,常在 ICP 中引入金属纳米颗粒、碳纳米颗粒等第二相粒子改善其介电性能,从而增强电磁屏蔽性能。Dai 等^[26]采用化学氧化法制得了电导率可调的 PPy 纳米颗粒,并将其均匀分散于 TPU 基体中。当 PPy(质量分数为 50%)与氧化剂摩尔比为 1:1 时,1.8 mm 厚的

复合材料在 X 波段 EMI SE 提升至 35.9 dB。Zhang 等^[27]将高阻燃性生物质植酸(PA)掺杂到 PANI 中,后用银微米线(AgMWs)浸渍,在 PU 泡沫表面构建具有阻燃、屏蔽性能的多功能涂层,其屏蔽机制如图 5 所示^[27],当 EMW 到达泡沫表面时,因泡沫材料与空气之间的阻抗不匹配导致部分 EMW 被反射;其余 EMW 进入泡沫材料内部,在互连的 PA/PANI 及 AgMWs 微纳米涂层中发生介质损耗,并转化为热能,导致大量入射微波衰减;剩余 EMW 在 PU 泡沫骨架、PA/PANI 和 AgMWs 的多个界面之间的多次反射进一步逐渐衰减。在 X 波段,EMI SE 高达 51.22 dB。

ICP 凭借轻质、可调导电性及环境友好等优势,在多功能电磁屏蔽领域展现出广阔应用前景。由于不易熔,加工困难,传统导电聚合物泡沫长期使用导电网络易断裂。为此,制备 ICP/PU 屏蔽材料须要设计合理的加工工艺。

4 电磁杂化填料/PU 基电磁屏蔽材料

引入磁性金属、铁氧体等磁性填料是降低材料-空气的界面阻抗和反射损耗的有效途径,因此成为制备“绿色”电磁屏蔽材料的重要手段。Zhang 等^[28]直接在静电纺丝织物聚丙烯腈/PU 表面镀 Ni-Co 合金纳米颗粒涂层。Ni、Co 金属纳米粒子同时具有导电性和磁性,增强衰减 EMW 的能力,因此材料在 8.0~26.5

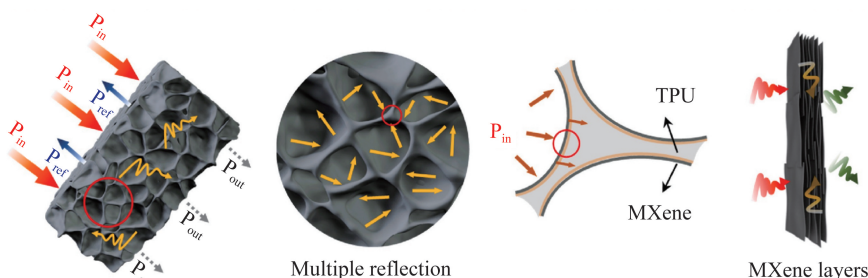


图 4 TPU@PDA/MXene 泡沫的电磁屏蔽机制示意图^[23]

Fig. 4 Diagram of the electromagnetic shielding mechanism of TPU@PDA/MXene foam^[23]

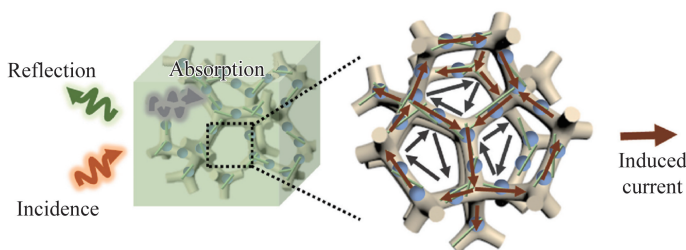


图 5 PA/PANI-AgMWs 泡沫材料电磁屏蔽机制示意图^[27]

Fig. 5 Diagram of the electromagnetic shielding mechanism of PA/PANI-AgMWs foam^[27]

GHz 宽频波段的 EMI SE 高达 77.8 dB, 平均 SE_R 和 SE_A 分别为 13.9 和 63.9 dB。数据表明: 该材料仍是以反射为主的屏蔽材料。为实现高 EMI SE 与低反射的统一, 研究者开发了“吸收-反射-再吸收”的结构, 即: EMW 首先被具有高磁导率和低电导率的吸收层衰减吸收, 未被吸收的 EMW 又经高导电层反射并被吸收层重新吸收。Wang 等^[29]经冷冻干燥制备了多层电磁屏蔽复合材料, 其吸收层为掺杂 Fe_3O_4 @CNT 的 WPU/纳米纤维素气凝胶, 反射层则为镀银泡沫。具有高阻抗匹配特性的吸收层主要负责衰减 EMW; 而低阻抗匹配的反射层则用于捕获并反射 EMW。其屏蔽机制如图 6 所示^[29]。入射 EMW 首先穿透气凝胶层, 通过吸收和多次反射实现初步衰减; 到达镀银泡沫界面后被反射, 再次进入气凝胶层进行二次衰减, 从而显著增强电磁能量损耗。不同损耗机制的材料协同互补, 最终实现了高达 62.8 dB 的 EMI SE, 且屏蔽机制以吸收为主(反射系数 R 为 0.14)。Zhu 等^[30]设计了一种具有层状结构的 WPU 薄膜, 其中 $rGO@FeCo$ 作为阻抗匹配的吸收层, 薄膜表面的导电银作为反射层, 非对称分层结构赋予材料高 EMI SE(50.5 dB) 及低反射系数(0.49)。

多孔结构的构建不仅利于提高屏蔽材料的柔韧性、降低屏蔽材料的密度、优化填料的分散性, 而且有利于降低阻抗匹配。此外, 多孔网络提供了更多界面, 延长 EMW 传播路径, 有利于入射波在材料内部多次反射, 直至被衰减吸收。Wang 等^[31]经冷冻干燥制得各向异性的多孔 WPU/MXene/ $NiFe_2O_4$ 杂化气凝胶。定向多孔结构和多相骨架的协同效应使材料的 EMI SE 达到 64.7 dB。此外, 研究发现, 相较于仅添加导电填料 MXene 的复合气凝胶材料, 引入磁性填料 $NiFe_2O_4$ 可使 EMI SE 提升 13%。Li 等^[32]经气相诱导分离制备多孔 TPU/GE 复合泡沫材料, GE 质量分数为 3% 时, 最小反射损失为 51.86 dB。引入 Fe_3O_4 后最小反射损失进一步提升至 58.96 dB。

磁性物质的引入可在一定程度上降低界面阻抗, 但对反射损耗的影响较低。多层结构的设计可以实现吸收型电磁屏蔽材料, 但是该类材料具有方向性。气凝胶材料往往具有较低的反射损耗, 但是力学性能应该得到进一步提升。因此, 如何实现高强度、低反射的 PU 基电磁屏蔽材料仍是研究的重点。

5 结论

本文综述了掺杂金属、碳、MXene 和 ICP 等导电填料以及电磁杂化材料的 PU 基屏蔽材料的研究进展, 分析了材料结构对其 EMI SE 的影响规律。表 1 为掺杂不同填料的 PU 基电磁屏蔽材料的屏蔽性能比较。

表 1 掺杂不同填料的 PU 基电磁屏蔽材料的屏蔽性能比较

Tab. 1 Comparison of EMI SE of PU-based electromagnetic shielding materials doped with different fillers

材料	填料含量	电磁屏蔽效能/dB	反射系数、吸收系数	参考文献
c-WPU/AgNW	AgNW 的质量分数为 9.1%	58.10	0.48、0.52	[9]
CNT/WPU	CNTs 的质量分数为 24.3%	88.80	0.98、0.01	[14]
TPU/MWCNTs	MWCNTs 的质量分数为 6%	35.40		[16]
TPU/CNT/BN	CNTs 的质量分数为 10%	53.61		[19]
GE/PU	GE 的添加量为 0.75%	30.00		[22]
TPU@PDA/MXene	MXene 的体积分数为 0.66%	72.20	0.19、0.81	[23]
GMPS	MXene 的浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	44.60	0.18、0.82	[24]
PUDA-Ag	AgMWs 的质量分数为 30.4%	51.22		[27]
Fe_3O_4 @CNTs/WPU@CNT	$m(\text{CNT}) : m(Fe_3O_4) = 2 : 1$	62.80	0.14、0.96	[29]
Ag/rGO@FeCo/WPU	rGO@FeCo 的质量分数为 10%	50.50	0.49、0.51	[30]

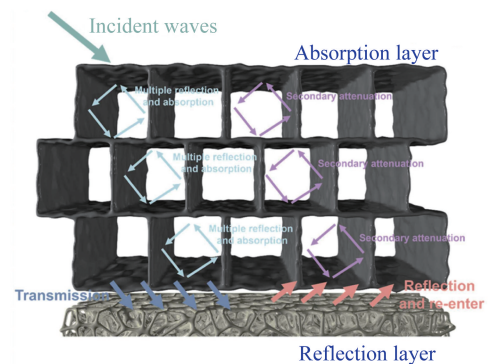


图 6 气凝胶/泡沫复合材料的电磁干扰屏蔽机理示意图^[29]

Fig. 6 EMI shielding mechanism of the aerogel/foam composites^[29]

导电金属导电性强,EMI SE 良好,但电磁屏蔽机制以反射为主,易引起二次干扰且易腐蚀。碳基填料的分散性和网络构筑成为影响 PU 的 SE 的关键因素。MXene 材料凭借高导电性、低渗透阈值、界面损耗等特性,在低填料含量下展现出更强的 EMI SE。ICP 导电性可调,在电磁屏蔽领域展现出广泛应用前景,但本征导电网络长期稳定性差。将磁性填料与导电填料复合使用,充分发挥磁损耗与介电损耗的协同效应,从而显著提升材料的电磁屏蔽性能。此外,设计复合材料的微观结构,延长 EMW 的传播路径,也会改善其 EMI SE,利于在低填料含量下实现高屏蔽。

虽然 PU 基复合屏蔽材料的得到快速发展,但是该类材料仍面临着许多挑战:(1) 电磁屏蔽-力学性能一体化调控。填料在 PU 基体分散性和分布特征是影响材料力学性能和电磁屏蔽性能的关键。通过增加导电填料的含量提升电磁屏蔽性能,往往会导致材料力学性能的显著降低。力学性能和屏蔽性能呈现此消彼长的矛盾关系。因此,如何通过结构设计实现电磁屏蔽-力学性能一体化调控是该领域的研究趋势。(2) 适应高频波段 PU 基电磁屏蔽材料的开发。5G、6G 通讯技术的快速发展以及 THz EMW 的使用,造成高频电磁污染越来越严重,但是目前制备的材料主要是应对 X 波段的 EMW。目前开发的电磁屏蔽材料无法满足在高频波段实现良好的屏蔽效果。因此,开发高频波段的电磁屏蔽材料成为研究热点。(3) PU 基电磁屏蔽材料的多功能化。PU 基屏蔽材料将向多功能方向发展,如热管理、自修复、抗菌、形状记忆等,以满足复杂应用场景下对材料的多元化需求,扩展材料的应用领域。(4) 可反复循环利用 PU 基电磁屏蔽材料的设计。为了减少资源浪费并满足环境保护需求,随着可持续发展理念的推进,兼具轻质特性和可设计优势的 PU 基电磁屏蔽材料,其闭环再生技术开发将成为该领域重点研究方向。

高频 EMW(如 5G/6G 通信、毫米波雷达)的广泛应用对屏蔽材料提出新需求。传统 X 波段材料在高频段因趋肤效应减弱、介电损耗机制变化导致屏蔽效能下降,成为技术发展瓶颈。实现高频段 PU 基电磁屏蔽材料高效化的策略有以下几种:(1) 超结构设计:根据高频波的波长特点,通过多组分复合与仿生设计和构建高吸收、低屏蔽超结构,突破传统性能,增强高频介电极化与磁损耗。(2) 高性能填料选型与定制:选择和定制集磁损耗与欧姆损耗于一体的高性能填料,拓宽材料的有效频带,改善其在 Ku/Ka 以及 THz 等等高频波段的 EMW 吸收性能。(3) 先进生产工艺:使用 3D 打印等先进成型技术,精度复刻仿生结构,制备可用于高频波段的屏蔽材料的规模化生产。

综上所述,“绿色”屏蔽理念日益普及,在这一趋势下,有望通过设计新型填料组合,并构建合理的材料结构,进而开发低填料、高屏蔽、高吸收的 PU 基电磁屏蔽材料,以期减少电磁辐射干扰。

参 考 文 献

- [1] 魏子健,谢兆新,胡煦煦,等. 掺杂磁性填料的聚合物基电磁屏蔽材料研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(12): 1646-1659.
- [2] 邵春妍,田秀娟,温喜梅,等. 基于动态二硫键的聚氨酯弹性体自修复及阻尼性能研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 74-82.
- [3] ZHAN Y H, SANTILLO C, MENG Y Y, et al. Recent advances and perspectives on silver-based polymer composites for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(3): 859-892.
- [4] 唐婧缘,陈耀,刘倩,等. 外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料的研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2023, 36(3): 42-49.
- [5] ISARI A, GHAFAR KHAH A, HASHEMI S A, et al. Structural design for EMI shielding: from underlying mechanisms to common pitfalls[J]. Advanced Materials, 2024, 36(24): 2310683.
- [6] 李灿刚,常源智,张磊,等. NCO 含量对潜固化型单组分聚氨酯材料性能的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 85-91.
- [7] ZHAN Y H, HAO X H, WANG L C, et al. Superhydrophobic and flexible silver nanowire-coated cellulose filter papers with sputter-deposited nickel nanoparticles for ultrahigh electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(12): 14623-14633.
- [8] LI Z Y, SHEN Y, ZHOU Y, et al. Compressible thermoplastic polyurethane/silver nanorod foams for absorption dominant electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 197: 9-16.
- [9] SUN Y R, CHENG Y, ZHAN Y H, et al. Castor oil-based waterborne polyurethane/silver nanowire gradient films for electromagnetic interference shielding and thermal management[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 220: 119247.
- [10] YE X A, ZHOU X, ZENG X Y, et al. Conductive composite inks comprised of waterborne polyurethane, silver nanosheets, and heat-treated MXene nanosheets for electromagnetic shielding and thermal management[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(16):

19075-19088.

- [11] 张梦欣, 刘让同, 李亮, 等. 聚氨酯掺杂铜粉涂层的电磁特征及其涂层织物的吸波性能[J]. 中国塑料, 2022, 36(9): 46-52.
- [12] MANI D, VU M C, ANAND S, et al. Elongated liquid metal based self-healing polyurethane composites for tunable thermal conductivity and electromagnetic interference shielding[J]. Composites Communications, 2023, 44: 101735.
- [13] QIAN Q H, CAI Y F, ZHAN Y H, et al. Carbon nanotube/castor oil-based waterborne polyurethane films with gradient structure for absorption-dominated electromagnetic interference shielding and Joule heating[J]. Polymer Composites, 2024, 45(3): 2786-2794.
- [14] ZHAN Y, H LIU F, CAI Y F, et al. EMI shielding, thermal and antibacterial performances of ecofriendly castor oil-based waterborne polyurethane favored by combining carbon nanotube and cetyltrimethylammonium bromide[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 117060.
- [15] YI D C, JEONG G, PARK S D, et al. Surface-modified carbon fiber for enhanced electromagnetic interference shielding performance in thermoplastic polyurethane composites[J]. Functional Composites and Structures, 2022, 4(4): 045008.
- [16] WANG X, H ZOU F F, ZHAO Y S, et al. Electromagnetic interference shielding composites and the foams with gradient structure obtained by selective distribution of MWCNTs into hard domains of thermoplastic polyurethane[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 176: 107861.
- [17] KWON S J, RYU S H, HAN Y K, et al. Electromagnetic interference shielding films with enhanced absorption using double percolation of poly (methyl methacrylate) beads and CIP/MWCNT/TPU composite channel[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103401.
- [18] WEI Z J, CAI Y F, ZHAN Y H, et al. Ultra-low loading of ultra-small Fe_3O_4 nanoparticles on nonmodified CNTs to improve green EMI shielding capability of rubber composites[J]. Small, 2024, 20(9): 2307148.
- [19] WANG G, LIAO X, ZOU F F, et al. Flexible TPU/MWCNTs/BN composites for frequency-selective electromagnetic shielding and enhanced thermal conductivity[J]. Composites Communications, 2021, 28: 1009530.
- [20] NIU J H, YANG T B, LI X Y, et al. 3D-printed co-continuous segregated CNT/TPU composites with superb electromagnetic interference shielding and excellent mechanical properties[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(27): 10498-10506.
- [21] ORABY H, NAEEM I, DARWISH M, et al. Electromagnetic interference shielding of thermally exfoliated graphene/polyurethane composite foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(41): 53008.
- [22] YAO Y Y, JIN S H, MA X L, et al. Graphene-containing flexible polyurethane porous composites with improved electromagnetic shielding and flame retardancy[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200: 108457.
- [23] LI Z Y, SUN Y, ZHOU B, et al. Flexible thermoplastic polyurethane/MXene foams for compressible electromagnetic interference shielding[J]. Materials Today Physics, 2023, 32: 101017.
- [24] FENG Y H, ZHU M Y, HE W J, et al. Customizable gradient MXene/polyurethane modules for electromagnetic interference shielding with low reflection and thermal management[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 155959.
- [25] WANG Q H, ZHANG J, ZHOU Z H, et al. Sandwich-structured MXene/waste polyurethane foam composites for highly efficient electromagnetic interference, infrared shielding and joule heating[J]. Small, 2024, 20(35): 2309803.
- [26] DAI Y L, ZHANG X J, WEN B Y, et al. Facile synthesis of polypyrrole nanoparticles with tunable conductivity for efficient electromagnetic wave absorption and shielding performance[J]. CrystEngComm, 2022, 24(17): 3287-3296.
- [27] ZHANG L, LIU B W, WANG Y Z, et al. P-doped PANI/AgMWs nano/micro coating towards high-efficiency flame retardancy and electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 238: 109944.
- [28] ZHANG N, ZHAO R, HE D Y, 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.
- [29] WANG L Z, ZUO T C, YU D, et al. Fe_3O_4 @CNTs/WPU@CNF aerogel/Ag foam composites with a double-layer structure for absorption-dominated electromagnetic shielding performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175170.
- [30] ZHU H X, YANG Y Q, SHENG A, et al. Layered structural design of flexible waterborne polyurethane conductive film for excellent electromagnetic interference shielding and low microwave reflectivity[J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 1-9.
- [31] WANG Y, QI Q B, YIN G, et al. Flexible, ultralight, and mechanically robust waterborne polyurethane/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/nickel ferrite hybrid aerogels for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(18): 21831-21843.
- [32] LI Y F, LI X Y, LI Q F, et al. Low-energy-consumption fabrication of porous TPU/graphene composites for high-performance microwave absorption and the influence of Fe_3O_4 incorporation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 909: 164627.

(责任编辑:蒲锡鹏)