

多壁碳纳米管/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯复合 材料及其蜂窝结构的电磁屏蔽性能*

任鹭声¹⁾ 夏乾善^{1)†} 王岩^{2)‡} 王永正¹⁾ 黎涛¹⁾
崔鹏¹⁾ 刘添一¹⁾ 石金乐¹⁾

1) (哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (哈尔滨玻璃钢研究所有限公司, 哈尔滨 150029)

(2026 年 3 月 31 日收到; 2026 年 4 月 24 日收到修改稿)

电磁干扰不仅会严重影响电子设备的工作精度, 还会对人体健康造成潜在危害. 虽然商用金属材料的屏蔽效果优异, 但是其存在加工难、成本高和易腐蚀等问题, 限制了其在电子产品中广泛的应用. 为了解决上述问题, 本文制备了多壁碳纳米管/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (MWCNT/ABS) 复合材料线材, 探究不同官能团修饰的 MWCNT 对复合材料电磁屏蔽性能的影响. 研究结果表明无官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的电磁屏蔽性能最好, 其 EMI SE 可达 29.4 dB. 此外, 为获得更优的屏蔽性能, 本文采用熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印技术制备的孔径为 3 mm 的轻质蜂窝结构, 可促进电磁波在结构内部的反射和吸收损耗, 其在 X 频段的电磁屏蔽效能高达 43.5 dB. 本文开发出的快速和便捷的聚合物基复合材料结构的制备策略, 为该类材料在电磁屏蔽领域的应用奠定了重要基础.

关键词: 3D 打印, 复合材料, 电磁屏蔽, 蜂窝结构

DOI: 10.7498/aps.75.20260445

CSTR: 32037.14.aps.75.20260445

1 引言

虽然无线通信设备给人们的生活带来了极大便利, 但其所产生的电磁波辐射问题日益突出, 不仅会影响高灵敏度设备的工作精度, 还会危害人类的身体健康^[1,2]. 为了解决上述问题, 电磁屏蔽材料的研究至关重要. 传统的金属材料因其高导电性而广泛应用于电磁屏蔽领域, 通过改变组分和构建结构, 可以获得优异的电磁屏蔽性能^[3-5]. 但是上述材料存在加工难、易腐蚀及密度大等问题, 相比之下, 聚合物基电磁屏蔽复合材料因具备易加工耐腐蚀

及轻质等优势已成为研究热点^[6-9].

而聚合物基体材料通常为绝缘体, 需通过引入高导电性填料赋予其电磁屏蔽效能. 研究表明, 石墨烯、炭黑、碳纳米管和碳纤维等的碳材料凭借良好的导电性能和轻质等优势, 在能够显著提升聚合物基复合材料的电磁屏蔽效能的同时, 还为实现轻量化与结构功能一体化提供了可能^[10-13]. 其中, 多壁碳纳米管 (MWCNT) 不仅具备上述碳材料的低密度、高导电性和化学稳定性等共性优势, 而且其独特的一维管状结构和极高的长径比, 使其在聚合物基体中更容易相互搭接形成高效的导电网络, 从而在较低的添加量下即可实现更显著的屏

* 中国博士后科学基金 (批准号: 2021M701019)、黑龙江省博士后资助项目 (批准号: LBH-Z20069) 和黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目 (批准号: 2022-KYYWF-0152) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiaqianshan@sina.com

‡ 通信作者. E-mail: 13895728604@163.com

蔽效能提升^[14]. 如 Ren 等^[15]以聚乳酸 (PLA) 和 MWCNT 为原料, 制备的具有高效电磁屏蔽性能的 PLA 基复合材料, 其在 8.2 GHz 下的电磁屏蔽性能达到了 31.02 dB. Wu 等^[16]利用 MWCNT 作为填料掺入醋酸纤维素 (CA) 纤维中, 由此制作的 CA/MWCNT/PANI 复合薄膜实现了 33.04 dB 的 EMI 屏蔽效能.

研究表明通过合理的结构设计可获得更优的电磁屏蔽性能, 如蜂窝、空心 and 网格等结构^[17-20]. 其中蜂窝结构可以延长电磁波的路径, 能够有效促进电磁波的吸收, 从而提高聚合物复合材料结构的 EMI 屏蔽性能^[21]. 然而, 传统的注射成型、挤出成型和压制成型等制造手段主要依赖于模具和大型设备, 在制备具有复杂几何形状的定制化构件时, 存在成本高、周期长及灵活性差等问题, 难以满足结构设计的自由性要求. 3D 打印技术凭借能够一次性制造各种复杂结构及不需要昂贵的模具等优势获得了广泛关注^[22]. 其中的熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印技术因操作简便、材料选择多样、成本低廉等优势, 在制备电磁屏蔽复合材料复杂结构方面展现出独特潜力^[23,24]. 如 Subramanian 等^[25]制备了聚乳酸/炭黑/铝粉复合材料蜂窝结构, 当厚度为 6 mm 时, 其在 8—12 GHz 的频率范围内的 EMI SE 为 23.8 dB. Shi 等^[26]采用 FDM 3D 打印技术制备的聚乳酸/石墨烯/多壁碳纳米管 (PLA/GNPs/MWCNT) 复合材料蜂窝结构, 其 EMI 屏蔽效能可达到 36.8 dB. 目前关于电磁屏蔽复合材料的研究大多集中在通过考虑填料含量和网络结构构建来提高屏蔽效率. 但很少仔细探讨官能团类型对电磁屏蔽性能的影响, 不同官能团修饰会改变碳纳米管的表面极性、分散状态及与聚合物基体的界面相互作用, 进而影响导电网络的形成和载流子传输能力, 而这一机制尚缺乏系统研究.

因此, 本文选择高导电性和低密度的不同种类 MWCNT 作为导电填料, 其中包括多壁碳纳米管 (MWCNT)、羟基化多壁碳纳米管 (MWCNT-OH) 和羧基化多壁碳纳米管 (MWCNT-COOH), 并采用熔点低和熔体黏度低的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 作为基体, 制备多种 MWCNT/ABS 复合材料线材, 系统研究不同官能团修饰的 MWCNT 对复合材料 EMI SE 的影响, 以确定最佳填料种类. 在此基础上, 利用 FDM 3D 打印技术制备轻质的 MWCNT/ABS 复合材料蜂窝结构, 探究孔

径对其电磁屏蔽性能的影响, 并分析其屏蔽机理. 本研究可为定制化电磁屏蔽构件提供材料与成型一体化方案, 能够推动 FDM 3D 打印技术在电磁屏蔽领域的应用.

2 实验部分

2.1 材料

MWCNT, MWCNT-OH 和 MWCNT-COOH 均购自成都中科时代纳能科技有限公司, ABS 颗粒购自奇美实业股份有限公司.

2.2 MWCNT/ABS 复合材料线材的制备

本文采用微型单螺杆挤出机制备 MWCNT-COOH/ABS 复合材料, 具体流程如图 1(a) 所示, 将质量分数为 12% 的 MWCNT-COOH 与 ABS 颗粒放入搅拌设备中, 充分搅拌 10 min, 确保填料均匀分散. 将搅拌均匀的混合物转移至鼓风烘箱中, 在 80 °C 下干燥 4 h. 干燥完成后, 将混合物加入到单螺杆挤出机 (Wellzoom, 深圳市米思达科技有限公司) 中, 制备出直径为 (1.75 ± 0.05) mm 的复合材料线材, 命名为 MWCNT-COOH/ABS. 挤出机的温度为 190 °C, 挤出速度为 70 mm/s. 随后, 采用相同工艺制备了 MWCNT-OH/ABS 和 MWCNT/ABS 复合材料线材.

2.3 MWCNT/ABS 复合材料结构的制备

利用 Solidworks 建模软件创建用于 X 波段屏蔽的实心板材以及不同孔径的蜂窝结构的三维模型, 将模型导入 Snapmaker Luban 软件进行切片. 采用复合材料线材, 通过 FDM 3D 打印机 (Snapmaker J1, 深圳快造科技有限公司) 制备结构样品. 为研究蜂窝孔径对电磁屏蔽性能的影响, 本研究设计了 3 种不同孔径的蜂窝结构, 孔径分别为 2, 3 和 4 mm. 所有蜂窝结构的外形尺寸均为 22.86 mm × 10.16 mm × 5 mm (长 × 宽 × 高), 壁厚统一为 0.8 mm. 除孔径外, 所有样品的 FDM 3D 打印参数均保持一致: 喷嘴直径为 0.6 mm, 喷嘴温度 260 °C, 热床温度为 100 °C, 层高 0.16 mm, 打印速度 110 mm/s, 填充率 100%. 每种孔径的样品至少制备 3 个独立试样用于测试. 打印过程及所使用的模型如图 1(b), (c) 所示, 其中 (i) 为力学性能测试样品, (ii) 为电导率测试样品, (iii) 为实心板

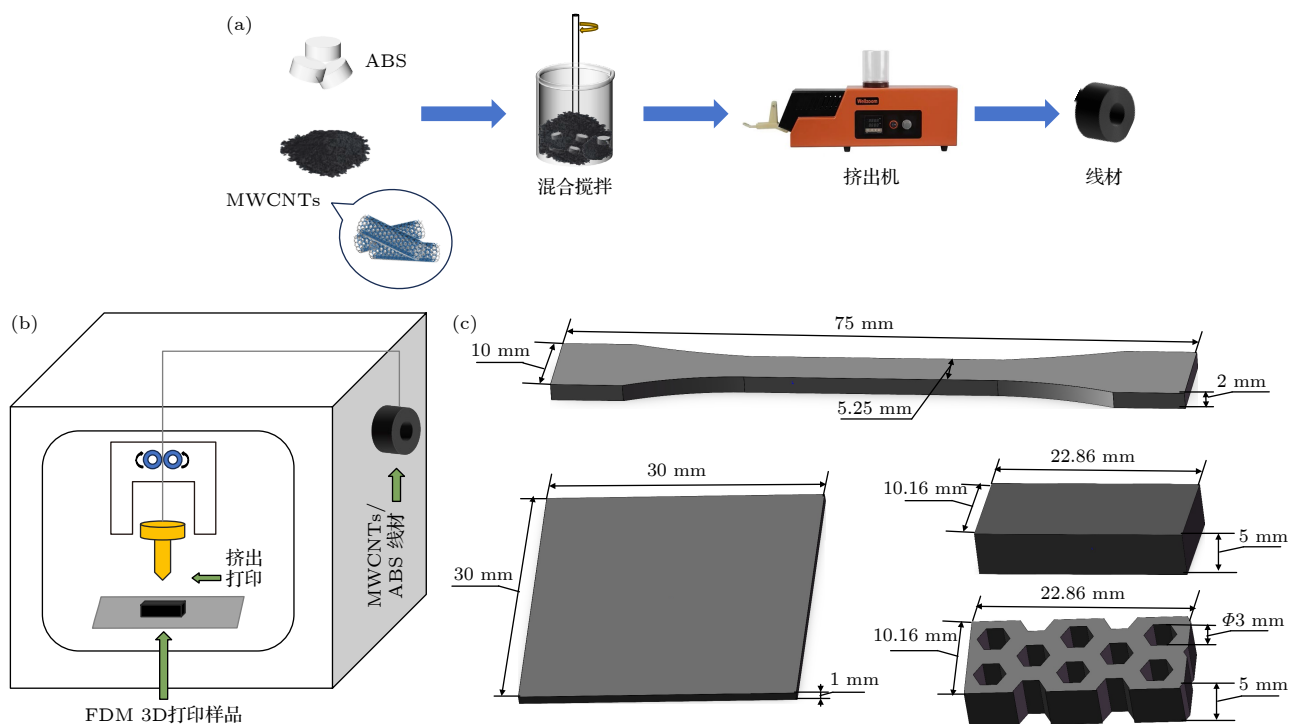


图 1 (a) MWCNT/ABS 复合线材的制备流程图; (b) 3D 打印过程的示意图; (c) 3D 打印样品模型结构

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the preparation process for the MWCNT/ABS composite filament; (b) schematic diagram of the 3D printing process; (c) structure models of 3D printing samples.

样品, (iv) 为蜂窝结构样品。

2.4 表征与测量

采用场 SU8020 型扫描电子显微镜分析复合线材断面的微观形貌。采用 D8Discover 型 X 射线衍射仪, 来测定复合材料的物相组成。采用 WDW-10 H 万能材料试验机分析样品的力学性能, 试样采用哑铃型样条, 总长 75 mm, 标距 50 mm, 窄段宽度 5.25 mm, 厚度 2 mm, 测试加载速率为 50 mm/min, 每组测 5 个平行样。采用直流电源 (Stanford) 与皮安表 (Keithley6517 b) 对样品进行电导率的测试。采用 3656D 型矢量网络分析仪对复合材料及其结构的 S_{11} 和 S_{21} 参数进行测试, 通过计算得到反射损耗效能 (SE_R)、吸收损耗效能 (SE_A) 和总电磁屏蔽效能 (SE_T)。

3 结果与讨论

图 2 为 ABS 和不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料线材的微观形貌。ABS 截面光滑且无缺陷, 表明基体材料均匀且致密。MWCNT-COOH/ABS 复合材料线材存在明显的 MWCNT 团聚现象。这是因为 MWCNT-COOH

之间具有较强的氢键作用, 导致 MWCNT-COOH 间的相互聚集。与 MWCNT-COOH/ABS 复合材料线材相比, MWCNT-OH/ABS 复合材料线材中的 MWCNT 团聚体数量较少, 分散性略好, 其原因是 MWCNT-OH 之间氢键作用弱于 MWCNT-COOH。并且, 这些极性官能团与非极性的 ABS 基体之间存在较大的相容性差异, 导致填料在基体中分散不均, 进一步加剧了团聚现象。相比于前两种复合材料, MWCNT/ABS 复合材料线材中的 MWCNT 在高填充量下, 仍能保持较好的分散性, 形成了连续的网络结构, MWCNT 之间的直接接触和短程搭接, 有利于提升复合材料的导电性能, 从而提升其电磁屏蔽性能。

图 3(a) 为不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的 XRD 谱图。不同官能团修饰的 MWCNT 在 26° 和 43° 处均存在特征衍射峰, 分别对应其 (002) 和 (100) 晶面。此外, ABS 在 20.3° 处呈现特征衍射峰。所有复合材料的特征峰出现在 26° , 43° 和 20.3° , 分别对应 MWCNT 和 ABS 的特征衍射峰。这表明 MWCNT, MWCNT-COOH 和 MWCNT-OH 均已掺入到 ABS 中, 且制备过程中未对其晶体结构造成影响。

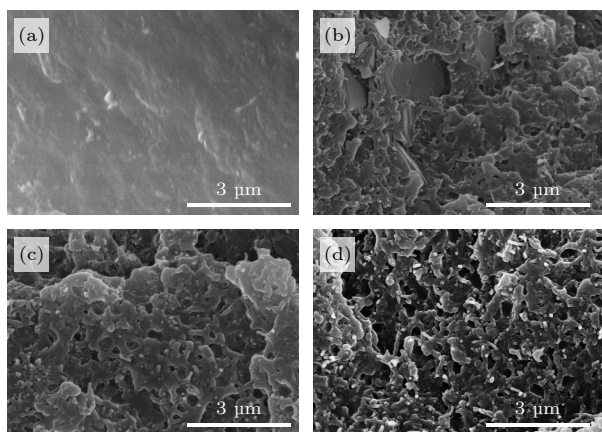


图2 (a) ABS; (b) MWCNT-COOH/ABS; (c) MWCNT-OH/ABS; (d) MWCNT/ABS 线材的 SEM 图像

Fig. 2. SEM images of (a) ABS; (b) MWCNT-COOH/ABS; (c) MWCNT-OH/ABS; (d) MWCNT/ABS filaments.

图3(b) 为不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的电导率. ABS 电导率为 5×10^{-13} S/cm 呈现出绝缘性能. 在复合材料中,

MWCNT/ABS 复合材料电导率最优, 达到 1.091×10^{-6} S/cm; 而 MWCNT-COOH/ABS 和 MWCNT-OH/ABS 复合材料电导率分别为 1.42×10^{-11} S/cm 和 4.67×10^{-8} S/cm. 这是由于 MWCN 在 ABS 基体中已形成连续导电网络, 使 MWCNT/ABS 复合材料具有优异的导电性. 相比之下, 经官能团修饰的 MWCNT 的芳香结构受到破坏, 导致其碳原子的杂化状态由 sp^2 向 sp^3 转变, 从根本上破坏了导电的电子传输通道. 接入的羧基和羟基官能团在影响填料分散状态的同时, 也会散射载流子, 将显著降低其电子迁移率. 由于羧基的电子效应最为显著, 因此, MWCNT-COOH/ABS 复合材料的电导率最低.

图3(c), (d) 分别为不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的力学性能及其对应的应力-应变曲线. MWCNT/ABS 复合材料的拉伸强度为 45.4 MPa, 其力学性能虽然低于 ABS, 但高

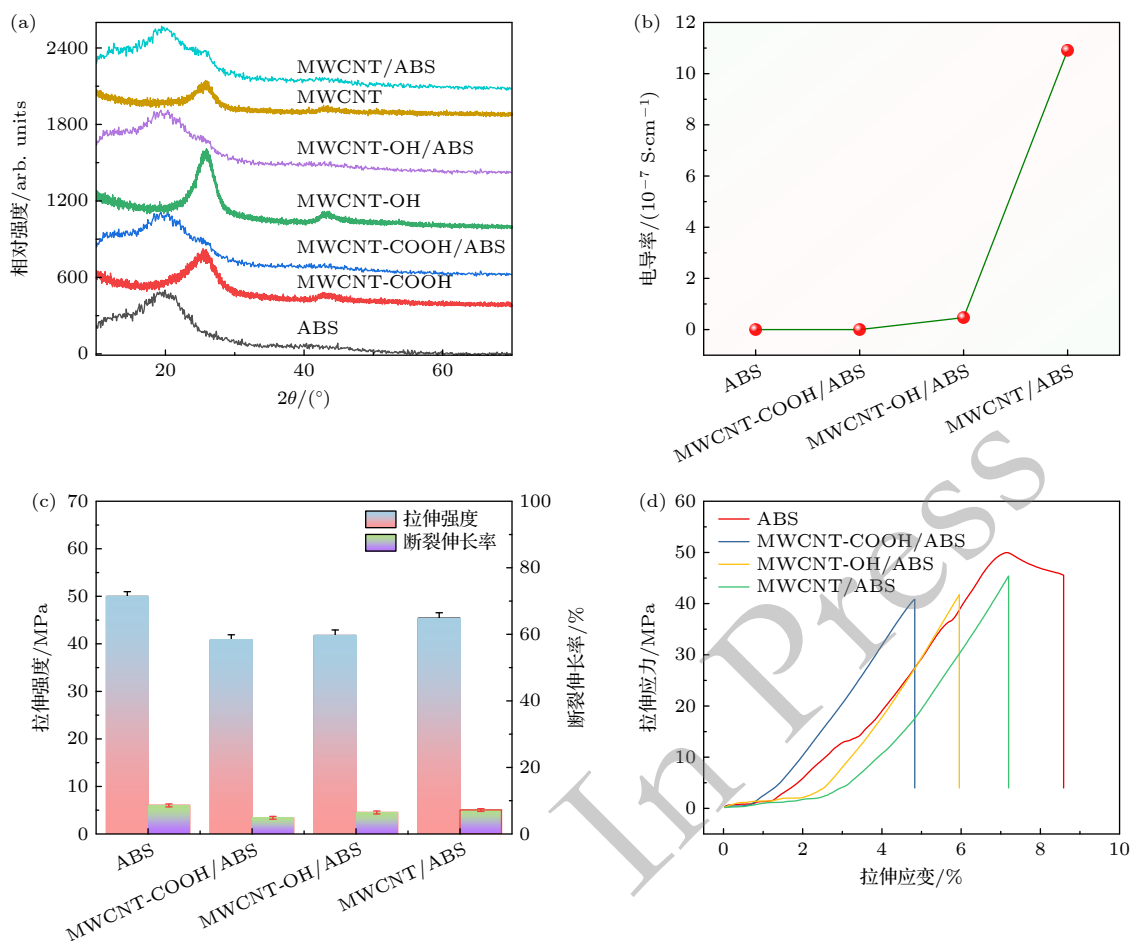


图3 不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的 (a) XRD 谱图; (b) 电导率; (c) 力学性能; (d) 应力-应变曲线

Fig. 3. (a) XRD spectra; (b) electrical conductivity; (c) mechanical properties; (d) stress-strain curves of ABS matrix composites doped with MWCNT modified by different functional groups.

于 MWCNT-COOH/ABS 和 MWCNT-OH/ABS 复合材料. 主要原因是羧基和羟基修饰后的 MWCNT 易因氢键作用发生团聚, 团聚体会在复合材料界面形成应力集中点, 会促进裂纹扩展, 从而降低复合材料的力学性能. 而未被修饰的 MWCNT 在 ABS 中均匀分布, 促进应力在复合材料内部进行分散与传递, 使复合材料内部界面应力均匀化, 不易形成界面局部应力过大, 避免过早形成应力裂纹, 有效延缓复合材料断裂, 从而增强其力学性能, 因而 MWCNT/ABS 复合材料的力学性能最优.

图 4 为不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的电磁屏蔽性能. 与未修饰的 MWCNT/ABS 复合材料相比, 引入官能团后复合材料的 SE_T 与 SE_A 均呈现降低趋势, 而 SE_R 的变化幅度较小, 保持相对稳定. 其中 MWCNT/ABS 复合材料的电磁屏蔽性能最优, SE_T 最高可达到 29.4 dB, 其总电磁屏蔽效能较 MWCNT-OH/ABS 和 MWCNT-COOH/ABS 复合材料分别提升了 180% 和 277%.

原因在于官能团的引入会导致 MWCNT 出现团聚, 会抑制复合材料的导电性的提升, 并且减少 MWCNT 与 ABS 的有效界面数量, 造成电磁屏蔽性能降低, MWCNT-COOH 的氢键作用更强, 因此 MWCNT-COOH/ABS 复合材料的电磁屏蔽性能最低.

为获得高电磁屏蔽性能, 本研究基于综合性能最优的 MWCNT/ABS 复合材料, 通过 FDM 3D 打印技术制备不同孔径的复合材料蜂窝结构, 并研究了孔径尺寸对复合材料蜂窝结构电磁屏蔽性能的影响规律. 由图 5(a) 可知, 蜂窝结构的电磁屏蔽性能随孔径的增大呈先升后降趋势, 当蜂窝孔径为 3 mm 时, 蜂窝结构的电磁屏蔽性能最佳, 其 SE_T 高达 43.53 dB, 优于同厚度的实心板样品 (29.4 dB). 所以, 孔径为 3 mm 的 MWCNT/ABS 复合材料蜂窝结构不仅具有轻质特性, 而且展现出了优异的电磁屏蔽性能. 这主要归因于当蜂窝结构的孔径远小于入射波长时, 电磁波无法从蜂窝结构

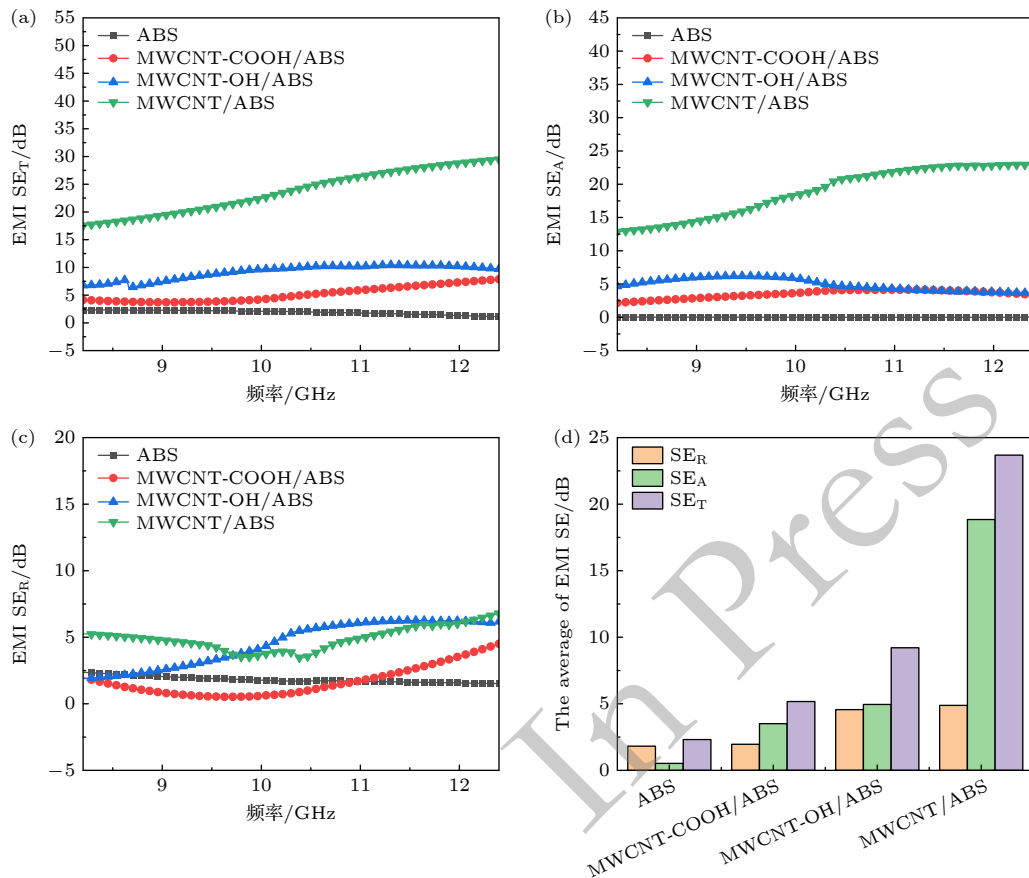


图 4 不同官能团修饰的 MWCNT 掺杂 ABS 基复合材料的电磁屏蔽性能 (a) SE_T ; (b) SE_A ; (c) SE_R ; (d) EMI SE 的平均值
Fig. 4. (a) SE_T ; (b) SE_A ; (c) SE_R ; (d) the average of EMI SE of ABS matrix composites doped with different functional group modifications MWCNT.

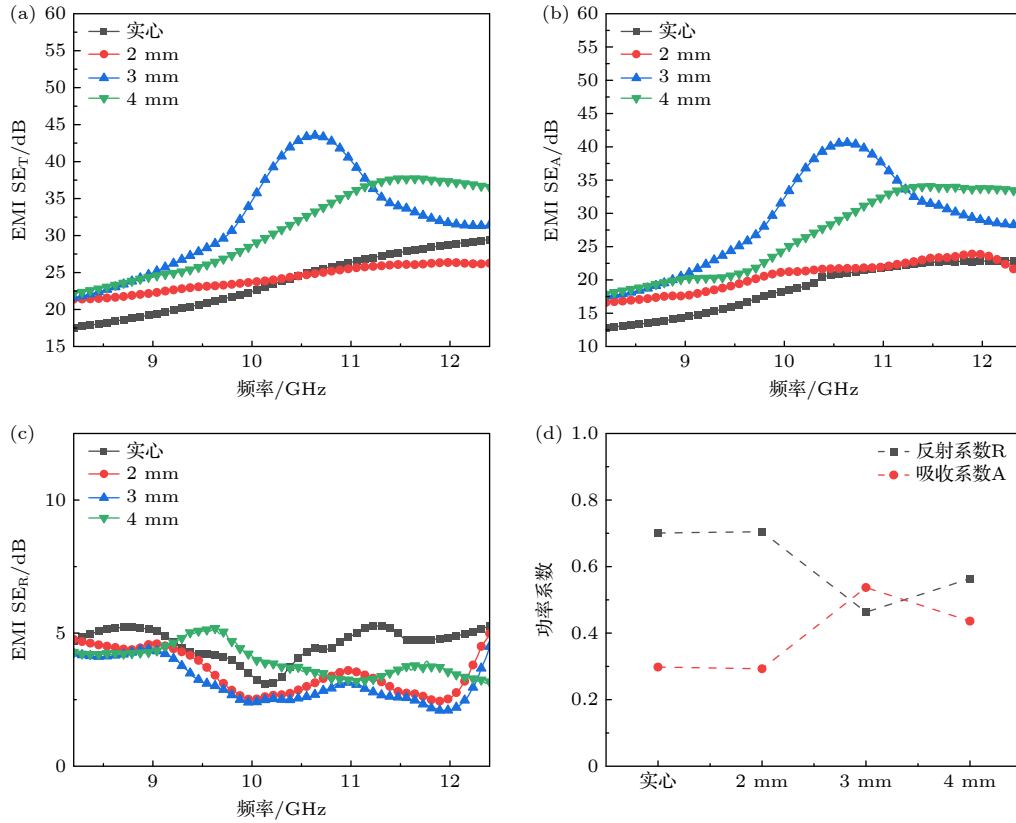


图 5 复合材料蜂窝结构的 (a) SE_T ; (b) SE_A ; (c) SE_R 和 (d) 功率系数

Fig. 5. (a) SE_T ; (b) SE_A ; (c) SE_R and (d) power factor of composite honeycomb structure.

穿过;当蜂窝孔径增大,电磁波在蜂窝结构内壁的传输路径延长,从而增强复合材料的电磁波吸收损耗;当孔径过大时,电磁波会通过孔径逃逸,导致电磁波在复合材料中的传输路径减少,降低电磁波的损耗.由图 5(b), (c) 可知,不同孔径蜂窝结构的 SE_A 的变化趋势和 SE_T 变化趋势相同,而 SE_R 差别不大,这表明蜂窝结构主要通过增强吸收损耗来提升整体屏蔽效能.如图 5(d) 所示,对反射 (R) 和吸收 (A) 系数的分析表明,这两个参数都随着孔径的增大而变化.当孔径为 3 mm 时,吸收系数值从 0.3 增至 0.54,而反射系数从 0.7 减至 0.46,进一步支持吸收损耗主导的结论.

图 6 为 MWCNT/ABS 复合材料蜂窝结构的电磁屏蔽机制,主要包括反射损耗和吸收损耗.当入射电磁波到达 MWCNT/ABS 复合材料结构的表面时,由于空气介质与复合材料之间的阻抗失配,导致部分入射电磁波在蜂窝结构表面发生反射,产生反射损耗.剩余的电磁波进入复合材料结构的内部,进一步经历多种损耗机制的协同吸收损耗.首先,电磁波作用于由 MWCNT 构建的导电网络产生感应涡流,引起显著的电导损耗,实现对

电磁波的吸收.其次,基于 MWCNT 与 ABS 基体之间显著的导电性差异,复合材料内部形成大量异质界面,在外部电场作用下,载流子于界面处聚集并产生界面极化,该极化过程伴随明显的弛豫损耗,以吸收电磁波;最后,电磁波延长在复合材料蜂窝内壁间的传输路径,增强电磁波的吸收损耗.

4 结 论

本研究采用不同种类的 MWCNT 掺杂 ABS,制备了多个种类的 MWCNT/ABS 复合材料,并探讨多壁碳纳米管表面官能团种类对其电磁屏蔽性能的影响.研究表明,未经官能化处理的多壁碳纳米管因其完整的 sp^2 碳结构,具备较高的电导率,在复合材料中易形成高效的导电网络,表现出最优的电磁屏蔽性能,而官能团的引入会导致 MWCNT 团聚、破坏导电网络,使屏蔽效能显著降低.其中, MWCNT/ABS 复合材料在 X 波段的最高电磁屏蔽性能达到 29.4 dB.采用性能最优的 MWCNT/ABS 复合材料所制备的蜂窝状结构,与实心板材相比,蜂窝结构的电磁屏蔽机理有所不

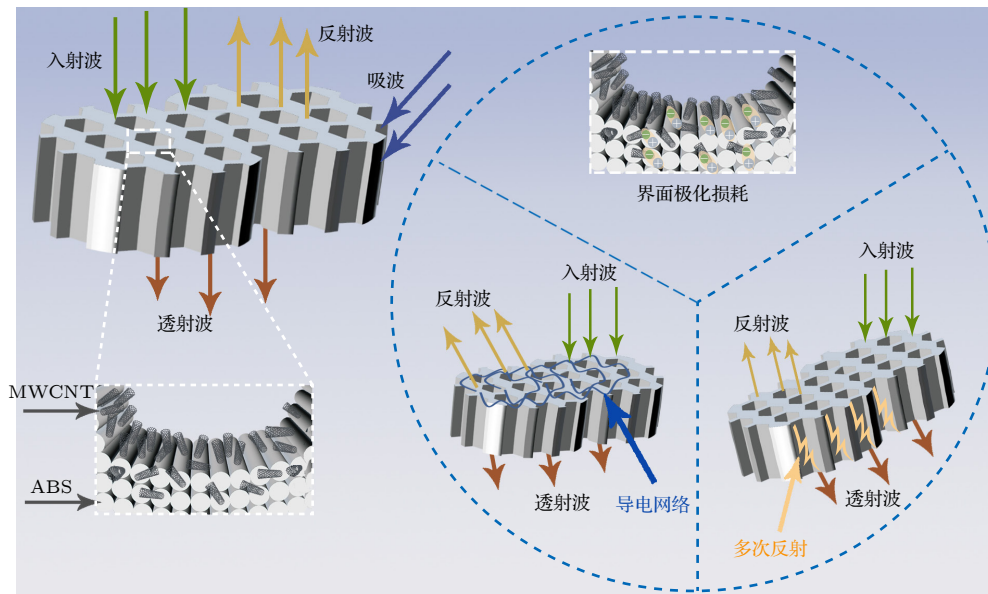


图6 复合材料蜂窝结构的电磁屏蔽机理

Fig. 6. Electromagnetic shielding mechanism of composite material honeycomb structures.

同: 除表面反射损耗和复合材料本身的吸收损耗外, 蜂窝结构内壁对电磁波传播路径的延长作用, 增强了吸收损耗. 因此, 所制备的孔径为 3 mm 的蜂窝结构实现了 43.53 dB 的高屏蔽效能, 相较于相同材质的实心板材提升了 48%. 本研究所提出的方法为制造高性能和轻质化的电磁屏蔽部件提供了新途径.

参考文献

- [1] Hu Y Z, Jiang M Q, Cong X Y, Liu G Y, Yi X, Liu X L 2024 *Chem. Eng. J.* **489** 151122
- [2] Niu S, Jiao C Q, Li L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214102 (in Chinese) [牛帅, 焦重庆, 李琳 2013 *物理学报* **62** 214102]
- [3] Liu M J, Wang Z Y, Song Z Q, Wang F C, Zhao G Y, Zhu H J, Jia Z F, Guo Z B, Kang F Y, Yang C 2024 *Nat. Commun.* **15** 5486
- [4] Maruthi N, Faisal M, Raghavendra N 2021 *Synth. Met.* **272** 116664
- [5] Wang M, Tang X H, Cai J H, Wu H, Shen J B, Guo S Y 2021 *Carbon* **177** 377
- [6] Wang T C, Xia Q S, Huang X Z, Wang Y Z, Liu Bin, Zhang J T, Li T 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 178101 (in Chinese) [王天赐, 夏乾善, 黄信佐, 王永正, 刘斌, 张晋通, 黎涛 2024 *物理学报* **73** 178101]
- [7] Wang L, Ma Z L, Zhang Y L, Chen L X, Cao D P, Gu J W 2021 *SusMat.* **1** 413
- [8] Singh A K, Shishkin A, Koppel T, Gupta N 2018 *Compos. Part B Eng.* **149** 188
- [9] Huang S, Wang L, Li Y C, Liang C B, Zhang J L 2021 *J. Appl. Polym. Sci.* **138** 50649
- [10] Cheng Z, Wang R F, Wang Y, Cao Y S, Shen Y X, Huang Y, Chen Y S 2023 *Carbon* **205** 112
- [11] Wang G, Liao X, Zou F F, Song P W, Tang W Y, Yang J M, Li G X 2021 *Compos. Commun.* **28** 100953
- [12] Liu J, Garcia J, Leahy L M, Song R, Mullarkey D, Fei B, Dervan A, Shvets I V, Stamenov P, Wang W, O'Brien F J, Coleman J N, Nicolosi V 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2214196
- [13] Jayanth N, Senthil P, Mallikarjuna B 2022 *Radiat. Phys. Chem.* **198** 110263.
- [14] Lv Q N, Tao X Y, Shi S H, Li Y J, Chen N 2022 *Compos. Part B Eng.* **230** 109500
- [15] Ren F, Li Z, Xu L, Sun Z F, Ren P G, Yan D X, Li Z M 2018 *Compos. Part B Eng.* **155** 405
- [16] Wu Z, Yao X K, Xing Y Q, Huang P, Li B J, Liu L 2025 *Colloids Surf. A* **718** 136957
- [17] Lee S, Kim D, Nguyen N K, Kim W, Kim M, Nah J 2025 *Carbon* **231** 119759
- [18] Wang C Y, Ma S Q, Li D D, Zhao J Y, Zhou H W, Wang D Z, Zhou D P, Gan T H, Wang D M, Liu C W, Qu C Y, Chen C H 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 15690
- [19] Pei X Y, Zhao M Y, Li R X, Lu H, Yu R R, Xu Z W, Li D S, Tang Y H, Xing W J 2021 *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **145** 106363
- [20] Wang Y F, Li L C, Hofmann D, Andrade J E, Daraio C 2021 *Nature* **596** 238
- [21] Yuan Y, Liu L Y, Yang M L, Zhang T L, Xu F, Lin Z S, Ding Y J, Wang C H, Li J J, Yin W L, Peng Q Y, He X D, Li Y B 2017 *Carbon* **123** 223
- [22] Lv Q N, Peng Z L, Pei H R, Zhang X X, Chen Y H, Zhang H R, Zhu X, Wu S L 2024 *Nano-Micro Lett.* **16** 279
- [23] Lalegani D M, Bodaghi M, Serjoui A, Afazov S, Zolfagharian A 2023 *Adv. Eng. Mater.* **25** 2200797
- [24] Yang L, Chen Y H, Wang M, Shi S H, Jing J J 2020 *Ind. Eng. Chem. Res.* **59** 8066
- [25] Subramanian J, Selvaraj V K, Saxena K K, Jayamani E, Singh R, Prakash C, Buddhi D 2025 *J. Process Mech. Eng.* **239** 1694
- [26] Shi S H, Peng Z L, Jing J J, Yang L, Chen Y H 2020 *ACS Sustainable Chem. Eng.* **8** 7962

Electromagnetic shielding performance of MWCNT/ABS composite materials and their honeycomb structures^{*}

REN Lusheng¹⁾ XIA Qianshan^{1)†} WANG Yan^{2)‡} WANG Yongzheng¹⁾
LI Tao¹⁾ CUI Peng¹⁾ LIU Tianyi¹⁾ SHI Jinle¹⁾

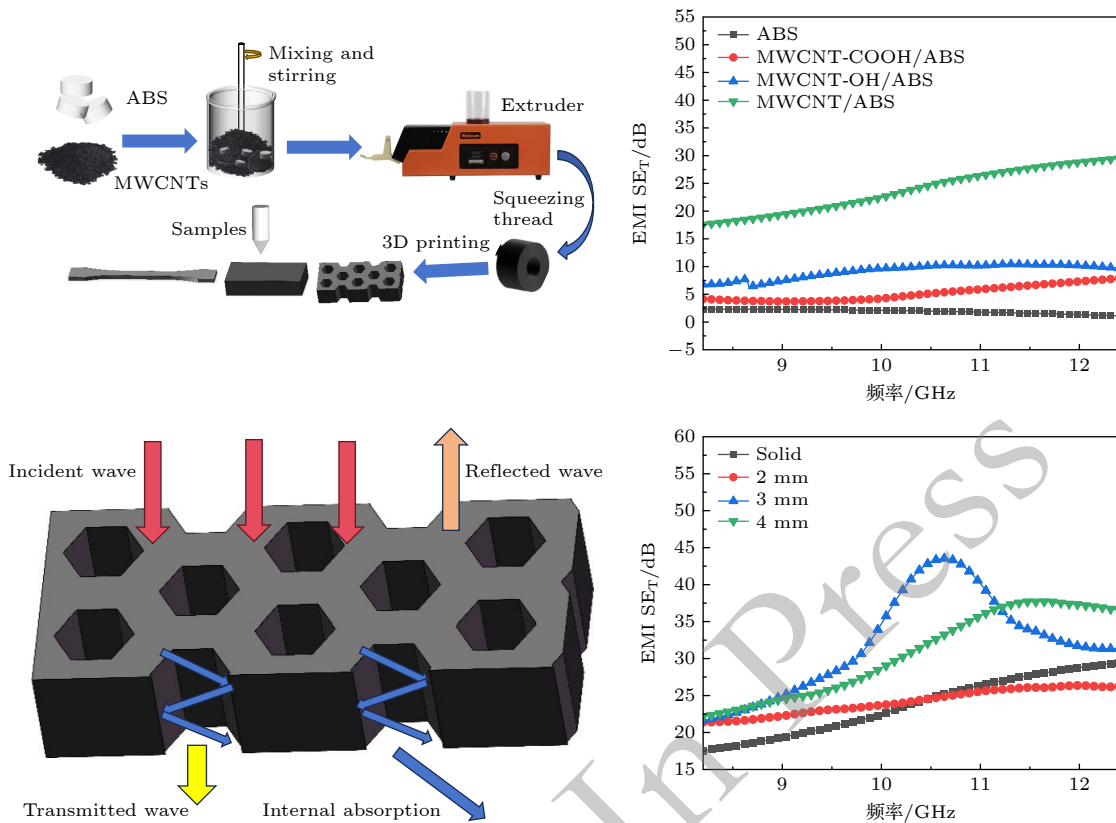
¹⁾ (Key Laboratory of Engineering Dielectric and Applications (Ministry of Education), School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

²⁾ (Harbin FRP Institute Co., Ltd, Harbin 150029, China)

(Received 31 March 2026; revised manuscript received 24 April 2026)

Abstract

The rapid development of communication technologies raises public health concerns regarding electromagnetic wave pollution. These concerns create an urgent demand for high-performance electromagnetic interference (EMI) shielding structures. However, traditional manufacturing techniques face limitations in



^{*} Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2021M701019), the Heilongjiang Postdoctoral Financial Assistance, China (Grant No. LBH-Z20069), and the Basic Research Project of Scientific Research Funds for Provincial Higher Education Institutions of Heilongjiang Province, China (Grant No. 2022-KYYWF-0152).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaqianshan@sina.com

[‡] Corresponding author. E-mail: 13895728604@163.com

fabricating the complex architectures required for efficient EMI shielding. To address the above issues, this study employs three types of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) as conductive fillers, namely MWCNT, hydroxylated MWCNT (MWCNT-OH), and carboxylated MWCNT (MWCNT-COOH). The fillers are melt-blended with an acrylonitrile butadiene styrene (ABS) matrix and extruded into composite filaments at a filler loading of 12%. The influence of the functional groups on EMI shielding performance is systematically investigated. The MWCNT/ABS composite exhibits the best performance and achieves a 29.4 dB EMI shielding effectiveness (EMI SE) in the X band. This superior EMI SE stems from the uniform dispersion of the MWCNT in the ABS matrix. This uniform dispersion builds a highly conductive network, increases the effective interfaces with the ABS, and yields a high EMI SE. To further enhance the performance, a lightweight honeycomb structure with a cell size of 3 mm is fabricated via fused deposition modeling (FDM) 3D printing technology. The structure lengthens the electromagnetic wave propagation path and promotes multiple reflections and scattering within the pores. This process enhances absorption loss. The results demonstrate that the honeycomb structure significantly improves the EMI SE and achieves 43.5 dB in the X band. This work presents a facile fabrication strategy for fabricating polymer-matrix composite structures for high EMI shielding performance.

Keywords: 3D printing, composite materials, electromagnetic shielding, honeycomb structure

DOI: [10.7498/aps.75.20260445](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260445)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260445](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20260445)