

复合结构电磁波屏蔽技术的创新与发展

范江涛

(湖南中观天下科技有限公司, 湖南 长沙 410005)

摘要 本文聚焦于复合结构电磁波屏蔽技术, 阐述了其在材料科学与电磁学交叉领域的重要意义, 深入探讨了该技术的创新点与发展历程, 包括各类复合结构的特性、制备方法及其在提升屏蔽效能、拓展频段、实现多功能一体化方面的创新成果, 并对其在多个应用领域的发展现状进行了详细剖析, 同时展望了未来的研究方向与面临的挑战, 旨在为该技术的进一步研究与应用提供全面且深入的参考。

关键词 复合结构设计; 电磁屏蔽效能; 多功能一体化

中图分类号: TB332

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.03.001

0 引言

随着现代电子设备的高度集成化和无线通信技术的发展, 电磁干扰 (EMI) 和电磁辐射问题日益严重。电磁波屏蔽技术作为保障电子设备正常运行、减少电磁污染的关键手段, 受到了人们的广泛关注。复合结构电磁波屏蔽技术凭借其独特的优势, 在提高屏蔽效能、拓展屏蔽频段以及实现多功能一体化等方面取得了显著进展, 对推动相关产业的发展具有重要意义^[1]。

1 复合结构电磁波屏蔽材料的类型与特性

1.1 金属-聚合物复合材料

(1) 结构与特性。多层复合结构通常由不同材料的多层膜或层状结构组成, 各层材料具有不同的电磁特性。通过合理设计各层的厚度、材料组成和排列顺序, 可实现对电磁波的高效屏蔽。(2) 制备方法与相关数据。第一, 共混法: 通过机械搅拌或超声分散等手段将金属颗粒或纤维与聚合物混合, 再经注塑、挤出等成型工艺制备复合材料。然而, 这种方法容易出现金属相分散不均匀的问题。例如, 研究发现采用简单共混法制备的金属-聚合物复合材料, 在金属含量为 30% (质量分数) 时, 由于金属团聚, 其电磁屏蔽效能某些频段波动较大, 平均屏蔽效能约为 30 dB。第二, 原位聚合法: 在聚合物单体中加入金属前驱体, 引发单体聚合反应使金属在聚合物基体中原位生成。这种方法可获得较好的界面结合效果和金属相分散性。以原位聚合法制备的某金属-聚合物复合材料, 在相同金属含量 30% (质量分数) 下, 电磁屏蔽效能平均可达到 45 dB。第三, 电镀法: 在聚合物表面通过电镀工艺沉积金属层。该方法能精确控制金属层的厚度和均匀性。如通过电镀

法在聚合物表面制备的铜层厚度为 10 μm 的复合材料, 在特定频段的电磁屏蔽效能可达 50 dB。

1.2 碳基材料复合材料

(1) 结构与特性。碳纤维具有高模量、高强度和一定的导电性能; 碳纳米管具有独特的一维纳米结构、超高的电导率和长径比; 石墨烯则是一种具有原子级厚度和极高载流子迁移率的二维碳材料。将这些碳基材料与其他材料复合, 可制备出高性能的电磁波屏蔽材料。(2) 制备方法与相关数据。第一, 溶液混合法: 将碳基材料分散在溶剂中后与基体材料溶液或分散液混合, 再经蒸发溶剂、固化等工艺制备复合材料。例如, 采用溶液混合法制备的碳纳米管-聚合物薄膜, 当碳纳米管含量为 10% (质量分数) 时, 在高频段 (1 ~ 10 GHz) 的电磁屏蔽效能可达 20 ~ 30 dB。第二, 原位生长法: 在基体材料表面或内部原位生长碳基材料。如通过化学气相沉积 (CVD) 在金属基体上生长石墨烯制备的复合结构, 在较宽频段 (0.1 ~ 10 GHz) 的电磁屏蔽效能可超过 40 dB。

1.3 多层复合结构材料

多层复合结构由不同材料的多层膜或层状结构构成, 各层电磁特性各异, 合理设计其厚度、材料组成和排列顺序能实现高效电磁波屏蔽, 如金属-绝缘层-金属层结构可利用金属高反射特性并借助绝缘层减少电磁耦合来提升屏蔽效能。在制备方法方面, 物理气相沉积 (PVD) 可通过蒸发、溅射等在基底上沉积薄膜形成多层结构, 采用 PVD 制备的金属-绝缘层-金属三层复合结构, 在每层金属层厚 50 nm、绝缘层厚 100 nm 时, 特定频段屏蔽效能可达 60 dB。

2 复合结构电磁波屏蔽技术的创新

2.1 提升屏蔽效能

(1) 优化复合结构设计。通过对复合结构中各组成部分的形状、尺寸、分布和界面进行优化设计,可显著提高屏蔽效能。例如,在金属—聚合物复合材料中,当金属纳米颗粒的尺寸在10~50 nm范围且均匀分散在聚合物基体中时,电磁波的反射和吸收能力明显增强。研究表明,在该尺寸范围内,金属纳米颗粒与电磁波的相互作用增强,部分频率下的电磁屏蔽效能可比未优化结构提高20%~30%。(2) 协同效应利用。在复合结构中,不同材料之间可产生协同效应。如在碳基材料—金属复合材料中,碳基材料的电磁波吸收能力与金属材料的电磁波反射能力相结合,可在较宽频率范围内实现高效屏蔽。例如,某碳—铜复合材料,相比单一铜材料,在0.5~5 GHz频段内的平均屏蔽效能从35 dB提升至50 dB。

2.2 拓展屏蔽频段

(1) 多相复合结构设计。单一材料往往只能在特定频段内实现较好的电磁屏蔽效果,通过设计多相复合结构可拓宽屏蔽频段。例如,将具有低频屏蔽优势的磁性材料(如铁氧体)与具有高频屏蔽优势的导电材料(如银)复合,形成的复合结构在100 Hz~10 GHz的宽频段内都能有效屏蔽电磁波。通过调节铁氧体和银的比例,可在不同频段实现最佳屏蔽效果,如表1所示。(2) 分级结构设计。采用分级结构设计是拓展屏蔽频段的有效手段。例如,制备具有纳米—微米分级结构的电磁屏蔽材料,在纳米尺度上与高频电磁波相互作用,在微米尺度上与低频电磁波相互作用,从而实现宽频段电磁屏蔽。通过模板法制备的纳米—微米分级结构材料,在0.1~10 GHz频段内的屏蔽效能均高于30 dB。

表1 不同铁氧体与银质量比下的电磁屏蔽效能对比

铁氧体:银 (质量比)	低频段(100 Hz ~ 1 kHz)屏蔽效能(dB)	高频段(1~10 GHz) 屏蔽效能(dB)
3:1	40	30
1:1	30	45
1:3	20	55

2.3 实现多功能一体化

(1) 电磁屏蔽与力学性能一体化。在许多应用场景中,电磁屏蔽材料需要具备良好的力学强度。通过将高强度纤维(如碳纤维、玻璃纤维等)与电磁屏蔽材料复合,可制备出兼具高电磁屏蔽效能和良好力学

性能的多功能材料。例如,在碳纤维—金属电磁屏蔽复合材料中,当碳纤维含量为20%(体积分数)时,材料的拉伸强度可达500 MPa,同时在特定频段的电磁屏蔽效能可达40 dB。(2) 电磁屏蔽与热管理一体化。电子设备运行产生热量,良好的热管理对设备稳定运行至关重要。将具有高导热性的材料(如石墨、金属等)与电磁屏蔽材料复合,可实现电磁屏蔽与热管理的一体化。例如,在某石墨—金属电磁屏蔽复合结构用于电子芯片封装时,其导热系数可达到10 W/(m·K),在芯片工作频段的电磁屏蔽效能达到35 dB,有效防止电磁干扰并及时散发热量。

3 复合结构电磁波屏蔽技术的应用

3.1 电子设备防护

(1) 手机与平板电脑。在智能手机和平板电脑中,内部电路高度集成,易受外部电磁干扰。采用复合结构电磁波屏蔽材料可对电路板、显示屏、电池等部件进行电磁防护。(2) 计算机与服务器。计算机和服务器中的高速数据处理芯片、内存模块等对电磁环境敏感。利用复合结构电磁屏蔽材料对计算机机箱、服务器机柜等进行电磁屏蔽设计。如某服务器机柜采用多层复合结构材料,在0.1~10 GHz频段内的电磁屏蔽效能达到60 dB,防止内部电磁辐射泄漏和外部电磁干扰进入,确保数据处理的准确性和安全性。

3.2 电磁兼容

(1) 汽车电子系统。随着汽车电子化程度提高,汽车内部电子控制单元、传感器、导航系统等需良好的电磁兼容。复合结构电磁波屏蔽材料可用于汽车线束屏蔽、电子控制单元外壳等^[2]。(2) 工业自动化设备。在工业自动化领域,PLC、变频器、伺服电机等设备需在复杂电磁环境中稳定运行。复合结构电磁屏蔽材料用于这些设备的外壳和布线系统,保障设备的电磁兼容性。

3.3 航空航天领域

(1) 飞行器电子设备。在飞行器中,电子设备如飞行控制系统、通信设备、雷达等对电磁屏蔽要求极高。例如,飞机雷达罩内表面采用多层复合结构电磁屏蔽材料,在不影响雷达信号传输的前提下,对1~10 GHz频段的外部电磁干扰屏蔽效能达到50 dB,保障雷达正常工作^[3]。(2) 卫星系统。卫星在空间环境中面临太阳电磁辐射和宇宙射线威胁,内部电子设备和通信系统需可靠的电磁屏蔽保护。例如,卫星太阳能电池板支架采用碳纤维—金属复合结构,在0.1~10 GHz频段内的电磁屏蔽效能达到45 dB,在提供结构支撑的

同时保护卫星电子设备免受电磁干扰^[4]。

4 复合结构电磁波屏蔽技术面临的挑战

4.1 材料制备工艺复杂

(1) 复合均匀性问题。在制备复合结构电磁波屏蔽材料,尤其是纳米复合结构时,实现各组分在基体中的均匀分布较为困难。例如,在制备金属纳米颗粒—聚合物复合材料时,金属纳米颗粒容易团聚,导致在聚合物基体中分散不均匀,影响电磁屏蔽性能的一致性。研究发现,在一些制备工艺下,金属纳米颗粒团聚体尺寸可达 100 ~ 500 nm,导致局部电磁屏蔽效能差异可达 10 ~ 20 dB。(2) 界面结合问题。不同材料之间的界面结合强度直接影响复合结构的整体性能。在碳基材料—金属复合材料中,若界面结合不好,在受到外力或电磁作用时,界面易出现分离现象,降低材料的电磁屏蔽效能和力学稳定性。例如,在某碳纳米管—金属复合材料中,由于界面结合不良,在经过多次弯折测试后,电磁屏蔽效能降低了 15% ~ 20%。

4.2 成本控制难度大

(1) 高性能材料成本高。一些高性能的电磁屏蔽材料,如石墨烯、碳纳米管等,制备成本较高,限制了复合结构电磁波屏蔽技术的推广。例如,目前石墨烯的市场价格约为 100 ~ 500 元/克,在大规模电磁屏蔽材料应用中成本过高。(2) 复杂工艺增加成本。制备复合结构电磁波屏蔽材料往往需要多种复杂的制备工艺,如化学气相沉积、原位聚合等,这些工艺需昂贵设备和严格操作条件,增加了材料的制备成本。例如,一套化学气相沉积设备的购置成本可达数十万元,且运行维护成本高,导致材料的综合成本上升。

4.3 性能评估标准不完善

(1) 多频段评估困难。随着电磁屏蔽技术应用范围拓展,对材料在多频段下的电磁屏蔽性能评估愈发重要,但目前测试标准大多针对单一频段或有限频段,缺乏对宽频段电磁屏蔽性能的全面评估方法。(2) 多功能评估标准缺失。对于具有多功能一体化的复合结构电磁屏蔽材料,缺乏统一的多功能性能评估标准^[5]。

5 复合结构电磁波屏蔽技术的未来发展方向

5.1 新材料研发

(1) 新型碳基复合结构。继续探索新型碳基材料与其他材料的复合结构,如开发基于石墨烯量子点、碳纳米纤维等新型碳基材料的复合电磁屏蔽材料。这些新型碳基材料具有独特的电学和光学特性,通过合理复合有望在电磁屏蔽性能上取得新突破^[6]。(2) 智

能电磁屏蔽材料。研发具有智能响应特性的电磁屏蔽材料,如温度—电磁屏蔽、应力—电磁屏蔽等智能材料。这些材料能根据外界环境变化自动调节电磁屏蔽性能,在自适应电磁防护、可穿戴电子设备等领域有广阔应用前景。例如,在可穿戴设备中,智能电磁屏蔽材料可根据人体温度或运动状态调整屏蔽效果,在保障设备正常运行的同时提高用户舒适度^[7]。

5.2 绿色制备工艺

(1) 环保型制备方法。开发环保、低成本的复合结构电磁波屏蔽材料制备工艺。例如,采用生物基聚合物作为基体材料,结合天然矿物或可再生资源衍生的电磁屏蔽填料制备绿色电磁屏蔽材料。(2) 简化工艺降低成本。探索能够简化复合结构制备工艺的方法,减少制备过程中的能源消耗和设备投资。例如,通过开发新型的一步合成法或原位复合技术,在简化工艺的同时保证材料的电磁屏蔽性能,降低生产成本,促进复合结构电磁波屏蔽材料的大规模应用^[8]。

6 结束语

复合结构电磁波屏蔽技术在创新与应用方面取得了显著成就,通过各类复合结构的设计与制备,实现了屏蔽效能提升、频段拓展和多功能一体化。然而,目前该技术在材料制备工艺、成本控制和性能评估等方面面临挑战。通过新材料研发、绿色制备工艺开发和跨学科研究与应用等方向的探索,复合结构电磁波屏蔽技术有望在更多领域实现深入应用,为解决复杂电磁环境问题提供更有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 李莹,王思佳,董春雷,等.电磁防护水泥基复合材料研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(11):3631-3649.
- [2] 汪恒.空心漂珠/MXene复合多层结构电磁屏蔽材料的制备及性能研究[D].吉林市:吉林化工学院,2024.
- [3] 李忠卿.强电磁脉冲下碳纤维复合材料电磁屏蔽性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024.
- [4] 周聪俐.碳基、碳化物材料闪热制备及其屏蔽和吸波性能研究[D].成都:电子科技大学,2024.
- [5] 祝溜溜.多元复合结构型聚合物基屏蔽和吸波材料的制备及其性能研究[D].上海:上海电力大学,2023.
- [6] 朱炳生.AgBr/C3N5复合材料可见光去除无机废水中氨氮[J].日用化学工业:中英文,2024,54(12):1473-1480.
- [7] 刘长金,吴洁,涂文杰,等.导电高分子复合材料电磁屏蔽性能研究现状与展望[J].化工新型材料,2024,52(S2):118-123,129.
- [8] 刘北佳,刘新宇,王楠楠,等.超表面电磁波调控实验教学器件设计[J].实验室研究与探索,2024,43(11):35-38.