

镀镍碳纤维/铁硅铝/环氧树脂复合涂层的制备及吸波性能的研究

Preparation and Research of Nickel-plated Carbon Fiber/FeSiAl/Epoxy Resin Composite Coatings and Their Wave-absorbing Properties

供稿|王嘉琪, 杨健, 刘毅 / WANG Jiaqi, YANG Jian, LIU Yi

内容导读

随着无线通信技术的普及,电磁污染已成为影响设备运行与人体健康的新型环境问题。为应对这一挑战,本文研制了一种基于镀镍碳纤维(Ni@CFs)与铁硅铝(FeSiAl)的复合吸波涂层,并系统研究了其吸收电磁波的性能。实验通过化学镀工艺在碳纤维表面包覆镍层,再将其与片状FeSiAl粉末共同分散于环氧树脂中,制备出兼具介电损耗与磁损耗的双功能吸波涂层。研究显示,随着镀镍碳纤维含量的增加,涂层的电磁参数逐步提升,阻抗匹配性能显著改善。当镀镍碳纤维质量分数为0.8%、涂层厚度为1.8 mm时,该材料在10.9~12.4 GHz频段内反射损耗最低可达-46.1 dB,有效吸收带宽为1.5 GHz;厚度增至2.2 mm时,吸收带宽进一步扩展至3.4 GHz(8.3~11.7 GHz),反射损耗为-17.6 dB。本研究为开发高效、轻质的电磁波吸收材料提供了新思路,在电子信息防护、军事隐身技术及人体健康保护等领域具有广泛的应用前景。

随着信息技术的迅猛发展,无线电子通信技术在军事和民用领域的应用范围不断扩大。各类电子设备的普及虽然极大提升了人类生活的便捷性,但也引发了电磁污染和信息泄露等严峻问题。电磁污染被广泛认为是继大气污染、水污染和噪声污染之后的新型环境危害,已受到学界与工业界的高度关注^[1]。该污染不仅会干扰精密仪器的正常运行,还可能对人体健康产生深远影响。研究表明,电磁辐射的热效应和非热效应可能引发头痛、失眠、焦虑等健康问题,甚至会增加某些疾病的发病风险^[2-3]。在

军事领域,雷达探测技术的发展同样受到电磁污染的严重制约,进而威胁战场武器的生存能力与航空航天信息安全^[4]。在此背景下,如何有效降低或消除电磁波的负面影响,已成为亟待解决的重要课题。吸波材料作为一种高效的电磁波防护手段,可通过吸收与衰减电磁波降低其对环境 and 生物的危害,正逐渐受到广泛关注。近年来,开发高性能吸波材料成为应对军事和商业领域电磁波问题的关键路径^[5]。

在众多吸波材料中,碳纤维基吸波材料的研究成为热点。碳纤维因其轻质、耐腐蚀、形状各向异

性及优异的导电性能,已被广泛用作介电吸收剂。然而,碳纤维较高的导电性和复介电常数,使其在吸波应用中面临阻抗匹配性能较差的问题^[6],需通过调节质量分数并与绝缘基体复合来优化性能。尽管研究者常采用碳纤维与绝缘基体复合的方式改善涂层的阻抗匹配性能,但单损耗复合涂层的吸波性能仍有较大提升空间。磁性材料(如 FeSiAl、FeCoNi、MnZnFe₂O₄ 等)主要依赖磁损耗机制发挥作用,但其在高频段吸收能力较弱。近年来,复合型吸波材料成为研究热点,通过将磁性材料与碳基材料结合,可同时增强介电损耗和磁损耗,从而提升吸波效率。即便如此,当前吸波材料仍面临诸多挑战:

(1) 阻抗匹配优化问题,即如何在提高损耗能力的同时,确保材料的输入阻抗接近自由空间阻抗,以减少反射损耗;(2) 宽频吸收问题,多数材料仅能在特定频段展现优异的吸波性能,难以实现宽频吸收;(3) 材料的轻量化设计问题,目前高效吸波材料大多密度较高,限制了其在航空航天等领域的应用。

在碳纤维表面负载 Ni^[7]、Fe^[8] 等磁性金属,可提升材料的磁损耗性能,从而显著改善复合涂层的阻抗匹配性能与吸波性能。例如,在碳纤维表面复合镀镍磷(Ni-P)层,可在保持碳纤维高介电损耗的同时提升磁损耗性能;片状铁硅铝(FeSiAl)合金微粉具有高饱和磁化强度和较高的复磁导率,在提升复合涂层复磁导率方面表现出显著优势^[9-10]。

基于上述研究背景,本文将镀镍碳纤维(Ni@CFs)与片状 FeSiAl 分散于环氧树脂,制备出双损耗型复合吸波涂层。通过化学镀引入磁性镍(Ni)合金微粉,进一步提升涂层的阻抗匹配性能和吸波性能,并系统探究 Ni@CFs/FeSiAl/环氧树脂复合涂层电磁参数的变化规律。

实验材料及方法

实验材料

实验所用主要材料包括碳纤维(CFs)、双酚 A 型环氧树脂、聚酰胺树脂、FeSiAl、六水合硫酸镍(NiSO₄·6H₂O)、柠檬酸钠(Na₃C₆H₅O₇)、硫酸铵((NH₄)₂SO₄)、次亚磷酸钠(NaH₂PO₂)和十二

烷基磺酸钠(C₁₂H₂₅SO₃Na)等。所有试剂均为分析纯,实验用水为去离子水。

实验方法

(1) CFs 的预处理:先将 CFs 样品置于通有氩气保护的石墨坩埚中,以 5 °C/min 的升温速率加热至 400 °C,保温 30 min 后自然冷却,以去除表面有机黏结剂;随后经超声清洗去除表面油脂,采用浓硝酸粗化处理以增强表面结合力,再利用氯化亚锡(SnCl₂)溶液进行敏化,形成还原性吸附层,为后续化学镀工艺奠定基础。

(2) CFs 化学镀镍:在预处理后的 CFs 基础上,采用化学镀法制备 Ni@CFs。实验所用镀液主要由硫酸镍、Na₃C₆H₅O₇、NaH₂PO₂ 和 C₁₂H₂₅SO₃Na 组成,通过调节镀液 pH 值与反应温度,保障镀镍层的均匀性和稳定性。具体工艺流程如图 1 所示,操作步骤如下:

首先,分别称取 15 g/L 的 NiSO₄·6H₂O、28 g/L 的 Na₃C₆H₅O₇ 和 2.4 g/L 的 (NH₄)₂SO₄,依次加入小烧杯中溶解并搅拌均匀;向硫酸镍溶液中加入 0.7 g/L 的 C₁₂H₂₅SO₃Na,再与 Na₃C₆H₅O₇ 溶液混合,随后加入 (NH₄)₂SO₄ 溶液,补加去离子水至目标体积;将预处理后的 CFs 加入镀液,超声分散 15 min 以提高均匀性。

其次,将混合溶液置于恒温水浴锅中,预热至 90 °C 并以 250 r/min 的速度机械搅拌,搅拌过程中每隔 10 min 进行一次超声处理,防止 CFs 团聚;采用 100 g/L 氢氧化钠溶液将镀液 pH 值调至 9,并在反应过程中保持 pH 稳定;随后向镀液中滴加 26 g/L 的 NaH₂PO₂ 溶液,待反应溶液中气泡消失后终止反应。

最后,反应完成后,将 CFs 从溶液中分离,用无水乙醇和去离子水交替洗涤至中性;洗涤后的 CFs 置于真空干燥箱,在 90 °C 下干燥 4 h。

(3) Ni@CFs/FeSiAl/环氧树脂复合涂层的制备:先按质量比 2 : 1 称取双酚 A 型环氧树脂和低分子量聚酰胺树脂 650,将其置于鼓风干燥箱,在 60 °C 下保温 30 min 以去除树脂内气泡;然后向保温后的树脂中加入一定量的 FeSiAl 粉末,添加适量无水乙醇作为稀释剂,机械搅拌 30 min;再加入适量 Ni@CFs,继续机械搅拌 30 min;搅拌均匀后,将浆料注

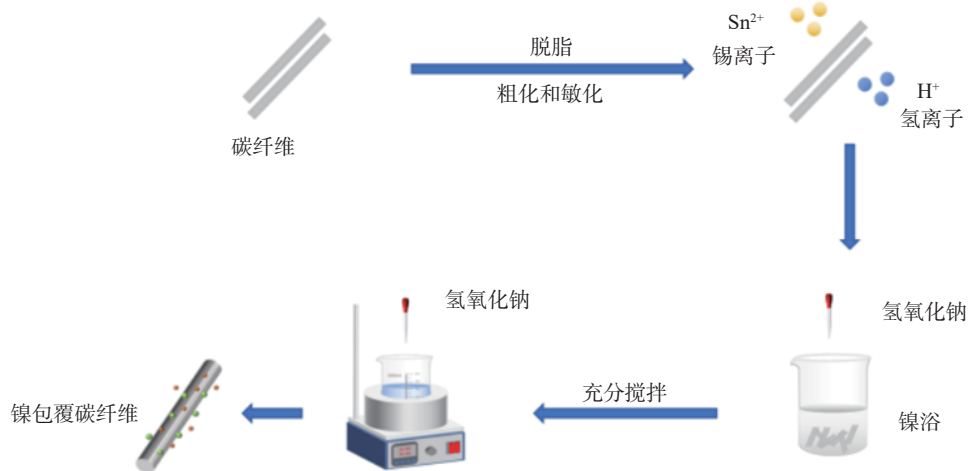


图1 Ni@CFs 制备示意

入尺寸为 22.86 mm×10.16 mm×2.00 mm 的模具，在 35 °C 下固化 12 h，待固化完成后脱模。

为研究不同质量分数 Ni@CFs 对复合涂层吸波性能的影响，实验选用长度为 4 mm、镍质量分数为 60% 的 Ni@CFs，固定 FeSiAl 质量分数为 10%，分别制备 Ni@CFs 质量分数为 0.2%、0.4%、0.6% 和 0.8% 的复合涂层样品。

分析与讨论

断面形貌分析

图 2 为不同质量分数 Ni@CFs 复合涂层的断面

形貌，可见 Ni@CFs 在环氧树脂基体中呈随机取向分布；随着 Ni@CFs 质量分数的增加，其在涂层中的数量逐渐增多，与片状 FeSiAl 的接触概率逐步提高。由于 Ni@CFs 最高质量分数仅为 0.8%，其涂层中未出现显著的聚集现象。当 Ni@CFs 质量分数增至 0.6% 及以上时，部分纤维相互接触，且片状 FeSiAl 主要分布于 Ni@CFs 附近，该分布特征有助于提升复合涂层的介电损耗性能。

电磁参数

本实验采用安捷伦公司 E8362B 型矢量网络分析仪，配合传输线、矩形波导和计算机组成测试系

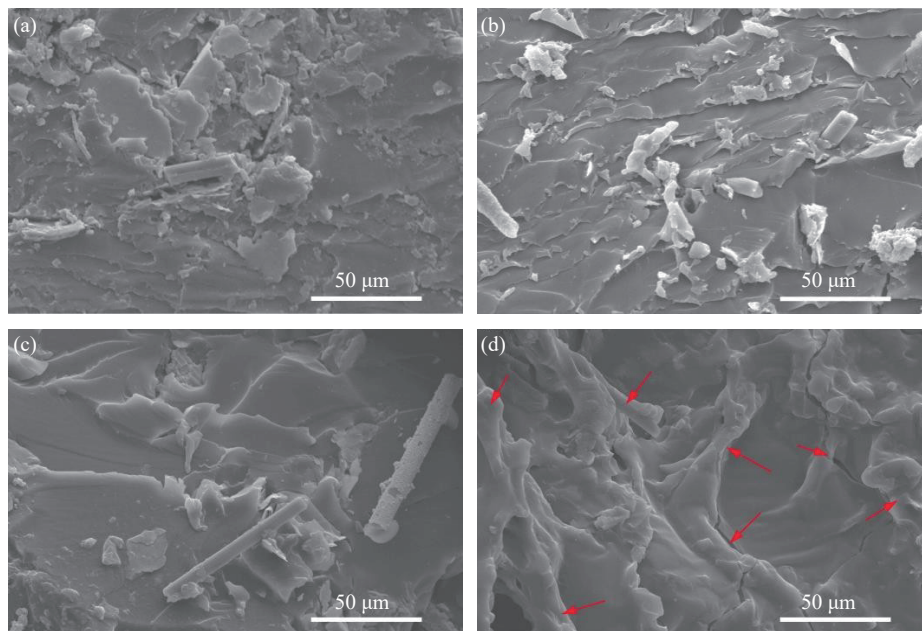


图2 不同质量分数 Ni@CFs 复合涂层的断面形貌: (a) 0.2%; (b) 0.4%; (c) 0.6%; (d) 0.8%

统,通过矩形波导法测试复合涂层的电磁参数。测试频段为 8.2~12.4 GHz (X 波段),样品尺寸为 22.86 mm×10.16 mm×2.00 mm,测试过程示意如图 3 所示。

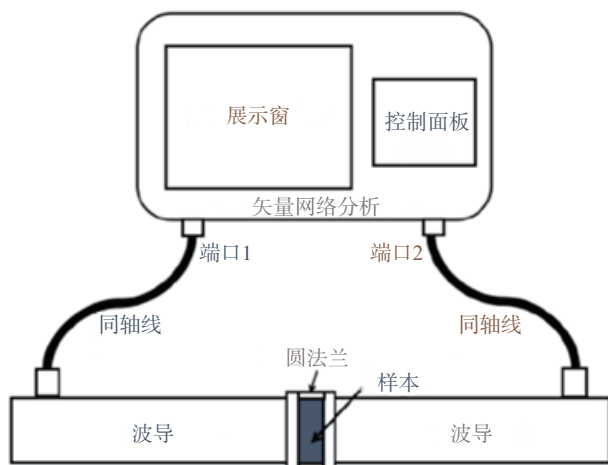


图 3 波导法测量电磁参数示意^[11]

图 4 展示了不同质量分数 Ni@CFs 对复合涂层电磁参数的影响规律。由图 4(a) 和 4(b) 可知,随着 Ni@CFs 质量分数的增加,复合涂层的复介电常数逐

渐增大,实部 (ϵ') 由 5.5~6.3 升至 7.5~9.3,虚部 (ϵ'') 由 0.2~0.5 升至 2.3~4.3,当 Ni@CFs 质量分数为 0.8% 时,涂层介电常数达到最大值。这一现象主要归因于 Ni@CFs 在基体中的分布及其与 FeSiAl 颗粒的协同作用:随着 Ni@CFs 质量分数的增加,涂层内部的界面极化和偶极极化显著增强,界面处极化电荷累积形成强烈的介电响应,提高了复介电常数的虚部,进而增强了介电损耗能力;同时,适量 Ni@CFs 的引入有助于构建均匀的导电网络,提高载流子迁移率,进一步增强电磁波的衰减能力。然而,若 Ni@CFs 质量分数继续增加,则过量导电电路径的形成可能引发阻抗失配,导致吸波性能下降。这是因为高质量分数下, Ni@CFs、片状 FeSiAl 和树脂基体之间的界面极化和偶极极化显著增加,吸波剂间接触概率提升并形成更多导电通路,从而增强涂层的导电性;此外,新生成的极化现象及导电通路在外加电磁场作用下产生极化弛豫损耗,进一步提升涂层的电磁波衰减能力。

如图 4(c) 和 4(d) 所示,随着 Ni@CFs 质量分数的升高,复合涂层的复磁导率同样呈持续上升趋势

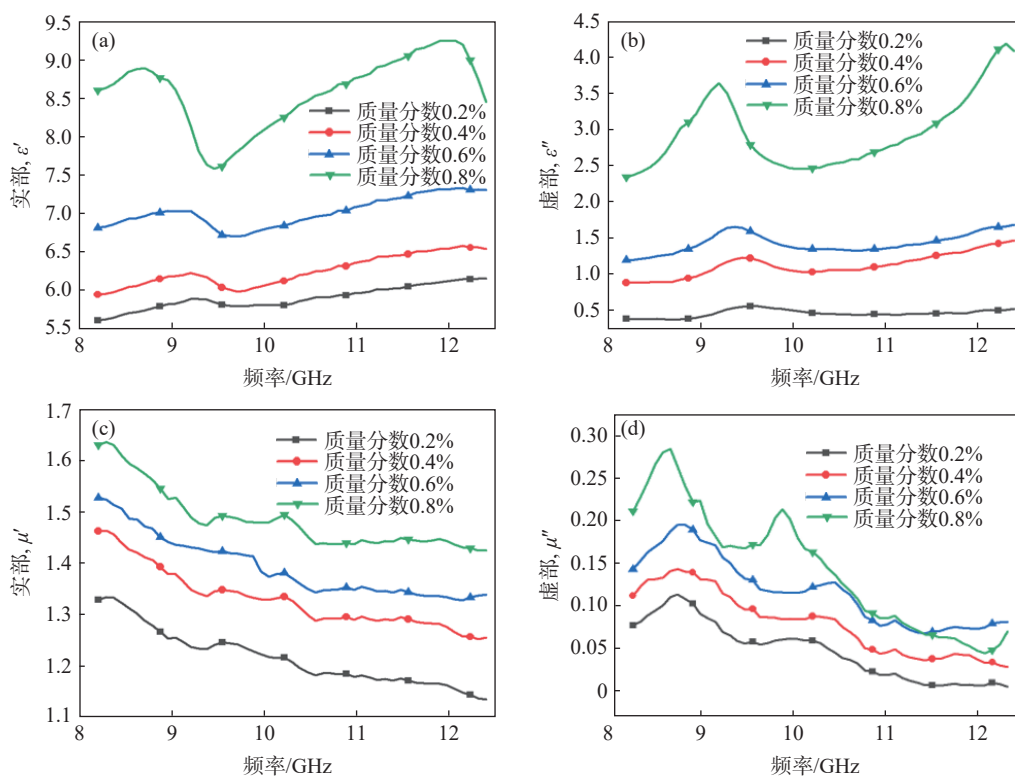


图 4 不同质量分数 Ni@CFs 的复合涂层电磁参数: (a) 复介电常数实部; (b) 复介电常数虚部; (c) 复磁导率实部; (d) 复磁导率虚部

势。当 Ni@CFs 质量分数从 0.2% 增至 0.8% 时, 复磁导率实部 (μ') 由 1.15~1.35 增至 1.45~1.65, 虚部 (μ'') 由 0~0.10 增至 0.05~0.28。这主要是由于 Ni@CFs 与 FeSiAl 之间的磁相互作用增强, 磁畴壁移动受阻, 增加了磁共振损耗; 同时, Ni@CFs 作为一种磁性材料, 其磁损耗效应在高质量分数下更加显著, 与 FeSiAl 颗粒的协同作用进一步优化了复合涂层的磁损耗性能。需要注意, 当 Ni@CFs 质量分数达到 0.8% 时, 涂层输入阻抗最接近自由空间阻抗 (377Ω), 入射电磁波可更有效地进入涂层内部, 避免过度反射。因此, 该质量分数下, 涂层的阻抗匹配性能和损耗能力达到最佳平衡, 表现出最优吸波性能。

损耗角

复合涂层的介电损耗角和磁损耗角的差值越小, 其阻抗匹配性能越优异。单一损耗型吸波材料由于无法同时实现良好的损耗能力与阻抗匹配性

能, 其电磁波吸收效果较差。基于测试参数, 本文计算了复合涂层的介电损耗角正切与磁损耗角正切, 结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 在 8.2~12.4 GHz, 复合涂层的介电损耗角正切值较高, 且随着 Ni@CFs 质量分数的增加显著提升, 由 0.075~0.100 增至 0.260~0.470。这主要是由于 Ni@CFs 质量分数增加后, 涂层内部形成了更多界面和导电通路, 介电损耗能力随之提高。图 5(b) 显示, 磁损耗角正切同样随着 Ni@CFs 质量分数的增加而增大, 由 0~0.09 增至 0.04~0.18。这是由于随着 Ni@CFs 质量分数的增加, 磁性粒子浓度提高, 复合涂层的磁损耗能力增强。在整个测试频段内, 复合涂层的介电损耗角正切值始终大于磁损耗角正切值, 表明介电损耗在电磁波吸收过程中占据主导地位; 同时, 二者差值较小, 使复合涂层具有良好的阻抗匹配性能, 显著提升了电磁波吸收效果。

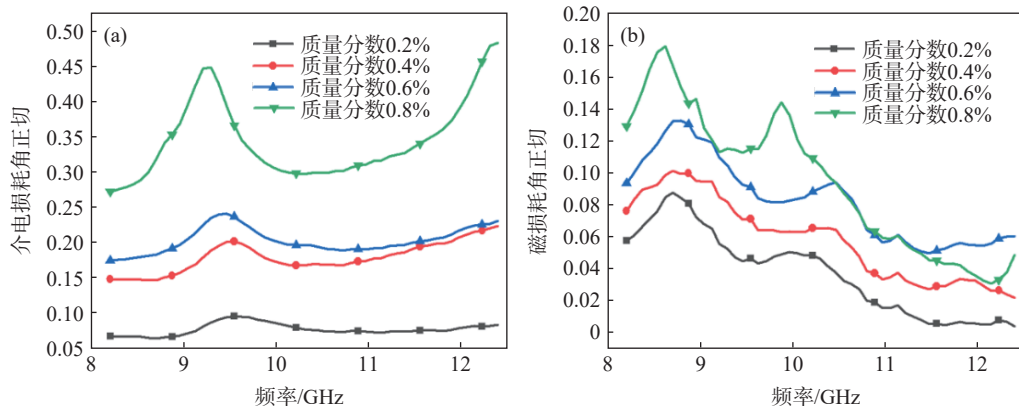


图 5 不同质量分数 Ni@CFs 的复合涂层损耗角正切: (a) 介电损耗角; (b) 磁损耗角

反射损耗

根据传输线理论^[12-14], 结合得到的复介电常数和复磁导率, 通过式 (1) 计算得出单层吸波材料对电磁波的反射损耗 RL:

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} f d \right] \quad (3)$$

式中: Z_0 为自由空间的本征阻抗, $Z_0 \approx 377 \Omega$; μ_0 为自由空间磁导率; ε_0 为自由空间介电常数; Z_{in} 为吸

波材料的输入阻抗; μ_r 为复磁导率; ε_r 为复介电常数; j 为虚数单位; c 为光速, 取 3×10^8 m/s; f 为电磁波频率; d 为涂层厚度。

图 6 展示了不同 Ni@CFs 质量分数复合涂层的二维和三维反射损耗结果。由图 6(a) 和 6(e) 可知, 当 Ni@CFs 质量分数为 0.2% 时, 由于涂层总损耗能力较低, 无有效吸收带宽 (反射损耗未低于 -10 dB), 且反射损耗值随涂层厚度增加呈先减小后增大的趋势。由图 6(b) 和 6(f) 可知, 当 Ni@CFs 质量分数提升至 0.4% 时, 3.0 mm 厚复合涂层的反射损耗达到最小值 -9 dB, 但所有厚度下的反射损耗

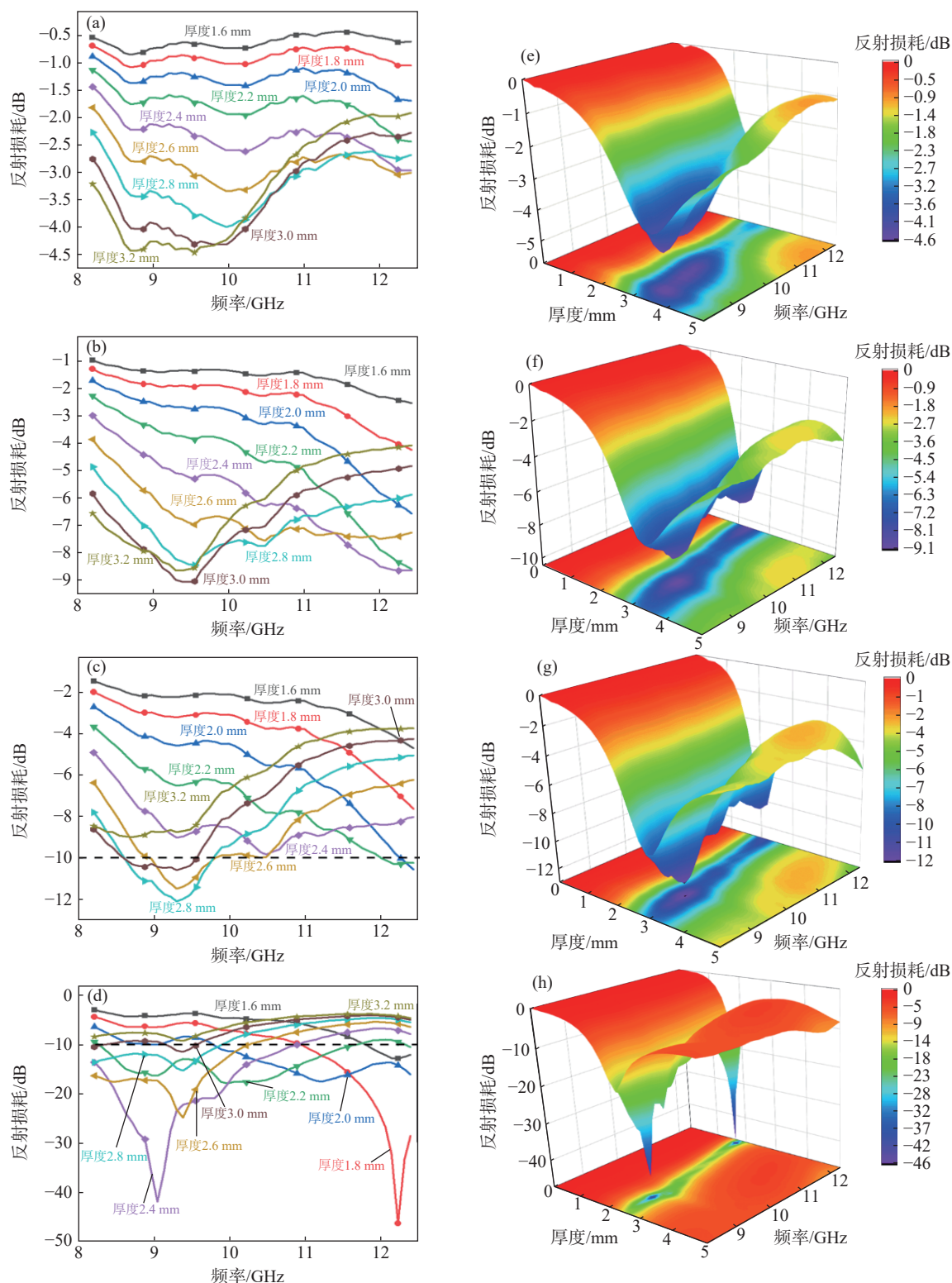


图6 不同质量分数Ni@CFs的复合涂层2D和3D反射损耗:(a,e) 0.2%;(b,f) 0.4%;(c,g) 0.6%;(d,h) 0.8%

均未低于-10 dB,其吸波性能较质量分数0.2%的涂层显著提升。由图6(c)和6(g)可知,当Ni@CFs质

量分数为0.6%时,2.8 mm厚复合涂层的最小反射损耗值达到-12.1 dB,有效吸收带宽为1.16 GHz

(8.60~9.76 GHz)。随着厚度增加,反射损耗值呈先减小后增大的趋势,这得益于涂层介电损耗能力的提升与阻抗匹配性能的优化。如图 6(d)和 6(h)所示,当 Ni@CFs 质量分数增至 0.8% 时,1.8 mm 厚涂层厚度的最小反射损耗值为-46.1 dB,有效吸收带宽为 1.5 GHz (10.9~12.4 GHz);当厚度增至 2.2 mm 时,反射损耗值为-17.6 dB,有效吸收带宽扩展至 3.4 GHz (8.3~11.7 GHz)。随着 Ni@CFs 质量分数的增加,复合涂层的电磁波吸收性能显著提高,这归因于其损耗能力及阻抗匹配性能的增强。由图 6(e)~6(h)可知,复合涂层的吸收峰随厚度增加逐渐向低频移动,这是由于涂层厚度增加后,需与波长更长的电磁波形成干涉损耗,从而进一步改善了低频吸波性能。

输入阻抗

优异的吸波性能取决于复合涂层能否满足两个关键特性:良好的阻抗匹配性能和电磁波衰减性能。当复合涂层的阻抗值接近自由空间阻抗 (377Ω) 时,其阻抗匹配性能较好,能有效使更多电磁波进入材料内部,从而提升吸波效率。图 7 为不同厚度下 Ni@CFs/FeSiAl/环氧树脂复合涂层的输入阻抗随频率的变化规律,结果表明,随着 Ni@CFs 质量分数的增加,涂层输入阻抗逐渐降低并接近自由空间阻抗,表明其阻抗匹配性能得到显著提升。当 Ni@CFs 质量分数达到 0.8% 时,涂层输入阻抗与空气阻抗最为接近,且厚度为 2.2 mm 时匹配效果最佳,而其他厚度下的匹配性能偏差较大;当质量分数为 0.6% 时,复合涂层展现出较好的综合电磁波吸收性能。

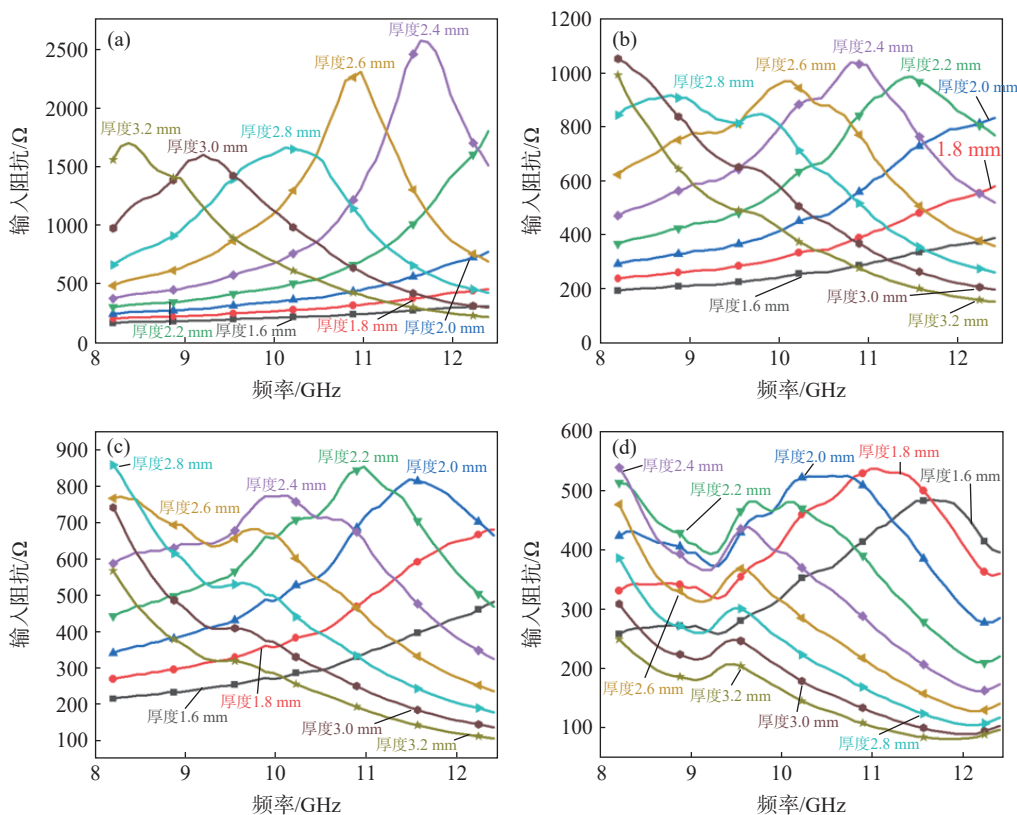


图 7 不同质量分数 Ni@CFs 的复合涂层输入阻抗: (a) 0.2%; (b) 0.4%; (c) 0.6%; (d) 0.8%

衰减常数

除了优异的阻抗匹配性能,复合涂层还需具有良好的电磁波衰减性能,以快速吸收进入材料内部的电磁波并将其转化为其他形式的能量。图 8 展示

了 Ni@CFs/FeSiAl/环氧树脂复合涂层的衰减常数随 Ni@CFs 质量分数的变化规律。随着 Ni@CFs 质量分数的增加,复合涂层的衰减常数不断增大;当 Ni@CFs 质量分数为 0.8% 时,复合涂层的衰减能力

达到最大值 (125~230 NP/m)，即对入射电磁波的损耗能力最强。由图 8 可知，当 Ni@CFs 质量分数为 0.8% 时，涂层不仅具有优异的阻抗匹配性能，还表现出较佳的电磁波吸收性能。

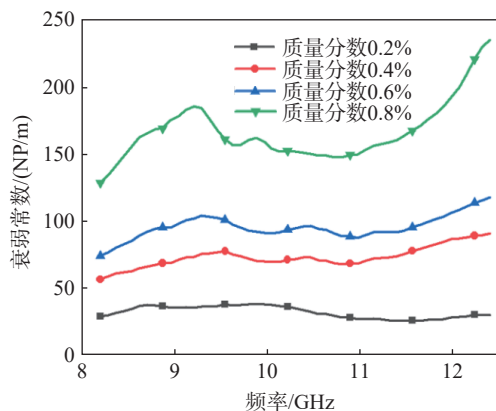


图 8 不同质量分数 Ni@CFs 的复合涂层衰减常数

结束语

本文成功制备了基于 Ni@CFs 和 FeSiAl 的复合涂层，研究了 Ni@CFs 质量分数对涂层电磁参数及微波吸收性能的影响，并系统评估了其吸波性能的微观作用机理。通过在 CFs 表面化学镀镍，显著提升了涂层的介电损耗与磁损耗能力，片状 FeSiAl 的引入则进一步优化了复合涂层的复磁导率和电磁参数。

将 Ni@CFs 与 FeSiAl 作为吸收剂分散于环氧树脂中，可制备出双损耗型复合吸波涂层。随着涂层中 Ni@CFs 质量分数的升高，其复介电常数和复磁导率等电磁参数逐渐增大。当 Ni@CFs 质量分数为 0.8% 时，涂层介电损耗角正切值与磁损耗角正切值之和达到最大，此时涂层具有较好的阻抗匹配性能和最优的电磁波衰减性能。该质量分数下，当复合涂层厚度为 1.8 mm 时，最小反射损耗值为 -46.1 dB，有效吸收带宽为 1.5 GHz (10.9~12.4 GHz)；当复合涂层厚度为 2.2 mm 时，最小反射损耗值为 -17.6 dB，有效吸收带宽为 3.4 GHz (8.3~11.7 GHz)。

综合分析表明，Ni@CFs 和 FeSiAl 的协同作用可显著改善复合涂层的吸波性能，为高效吸波材料的设计与应用提供了技术支持。此外，该研究结果对解决当前电磁污染问题、满足军事和民用领域对

吸波材料的需求具有重要意义。未来可进一步探索其他磁性材料与导电基体的复合效应，以实现更高性能吸波材料的设计。

参考文献

- [1] König H L, Krueger A P, Lang S, et al. Biologic Effects of Environmental Electromagnetism. New York: Springer New York, 2012
- [2] Chongchitpaisan W, Wiwatanadate P, Tanprawate S, et al. New trend of headaches among high school students affected by smartphone electromagnetic pollution exposures: A time series study. *Am J Public Health Res*, 2019, 7: 161
- [3] Sincak M, Adamkova P, Demeckova V, et al. Critical role of model organism selection in assessing weak urban electromagnetic field effects: Implications for human health. *Bioelectrochemistry*, 2024, 160: Art No. 108756
- [4] An T, Zhu S, Wang L D, et al. An overview of radar clutter simulation. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2018, 452, Art No. 042198
- [5] Li W Y, Gao M Y, Miao Y, et al. Recent progress in increasing the electromagnetic wave absorption of carbon-based materials. *New Carbon Mater*, 2023, 38(1): 111
- [6] Liu Y, Huang X, Yan X, et al. Pushing the limits of microwave absorption capability of carbon fiber in fabric design based on genetic algorithm. *J Adv Ceram*, 2023, 12(2): 329
- [7] Darvishzadeh A, Nasouri K. Broadband and tunable high-performance microwave absorption properties by Ni-coated carbon fibers. *Mater Chem Phys*, 2021, 274: Art No. 125127
- [8] Patle V K, Mehta Y, Kumar R. Nickel and iron nanoparticles decorated carbon fibers reinforced phenolic resin-based carbon composites foam for excellent electromagnetic interference shielding. *Diam Relat Mater*, 2024, 145: Art No. 111069
- [9] Gao J, Guan Z, Gong Y, et al. Developing robust FeSiAl/PEEK composites for wide-temperature-range electromagnetic wave absorption. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17(1): 2327
- [10] Lei C L, Ji Y J, Jia Q, et al. Constructing FeSiAl@ZnFe₂O₄@ZnO heterostructure with excellent microwave absorption. *Mater Sci Eng B*, 2024, 308: Art No. 117590
- [11] 杨朝宁. 周期结构与陶瓷涂层复合的吸波材料设计及其性能研究 [学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2018
- [12] Batista A F, de Oliveira A P S, Rodrigues A C, et al. Investigation of different graphite morphologies for microwave absorption at X and Ku-band frequency range. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2020, 31(21): 19064
- [13] Li M, Yang J R, Lu M J, et al. Facile design of ultrafine Co₇Fe₃ nanoparticles coupled with nitrogen-doped porous carbon nanosheets for non-enzymatic glucose detection. *J Colloid Interface Sci*, 2019, 555: 449

- [14] Wang T Q, Tian B B, Han B, et al. Recent advances on porous materials for synergetic adsorption and photocatalysis. *Energy Environ Mater*, 2022, 5(3): 711

作者简介: 王嘉琪 (2004—), 男, 陕西省安康人, 本科生。主要研究方向: 吸波材料。通信地址: 西安工程大学金花校区; E-mail: leafmoes@gmail.com。

杨健 (1997—), 男, 陕西省汉中人, 研究生。主要

研究方向: 碳纤维/环氧树脂复合材料的制备及吸波性能研究。通信地址: 四川省成都市高新西区西源大道2006号; E-mail: YJ15829797010@163.com。

通信作者: 刘毅 (1989—), 男, 湖北孝感人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 现任材料工程学院副院长。主要研究方向: 柔性功能涂层、电磁屏蔽及吸波材料。通信地址: 西安工程大学金花校区; E-mail: liuyi1021@foxmail.com。