

海洋装备隐身技术

海洋苛刻环境服役的 CIPs/EP 吸波防腐功能材料

周金堂, 何燕茹, 陶佳麒, 郝秀清

(南京航空航天大学, 南京 211106)

摘要: **目的** 制备兼具吸波与耐腐蚀性能的复合材料。**方法** 使用 KH560 对羰基铁粉进行改性, 在此基础上分别制备羰基铁粉体积分数为 0%、15%、20%、25% 的复合材料。通过红外光谱 (FTIR)、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和矢量网络分析仪 (VNA) 等测试技术对所制备复合材料的微观特征和电磁性能进行分析对比。研究不同羰基铁 (CIP) 的体积占比与复合材料电磁波吸收性能和耐腐蚀性能之间的关系。**结果** 通过 KH560 改性后的羰基铁与环氧树脂混合均匀, 形成了紧密的网络结构。羰基铁粉为片状, 长度为 3~10 μm 。当羰基铁粉的体积分数为 20% 时, 样品的吸波性能和防腐性能较好, 综合性能相对最佳。所制备的样品在较宽范围内均拥有良好的吸波性能, 在厚度 2 mm 时反射损耗小于 -10 dB 的有效带宽达到了 4.2 GHz, 在 8.5 GHz 左右时达到了最小反射损耗值 (-42.5 dB)。样品在酸和盐的环境下进行 7 d 加速腐蚀实验后吸波性能未明显降低, 这显示了其良好的耐腐蚀特性。**结论** 将吸波性能优良的羰基铁粉与耐腐蚀性能优异的环氧树脂进行复合, 通过调控片状羰基铁粉的体积占比提高了材料的磁导率和介电常数, 实现了良好的阻抗匹配, 所制备复合材料的吸波性能和耐腐蚀性能均较好。

关键词: 海洋环境; 复合材料; 微波吸收; 防腐蚀; 羰基铁; 环氧树脂

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)05-0304-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.05.031

CIPs/EP Wave-absorbing and Anti-corrosion Functional Materials
for Service in Harsh Marine Environments

ZHOU Jin-tang, HE Yan-ru, TAO Jia-qi, HAO Xiu-qing

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: In order to prepare composites with both microwave absorption and corrosion resistance. KH560 was used to modify the CIPs, composites materials with the volume ratio of modified CIPs of 0%, 15%, 20%, 25% were prepared. FTIR, SEM, XRD, VNA and other modern testing techniques were used to analyze the microscopic characteristics and electromagnetic properties of the prepared composites materials. The relationship between the volume fraction of different CIP and the electromagnetic absorption and corrosion resistance of the composites was studied. When the volume ratio of CIPs was 20%, the

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-03-25

Received: 2022-02-24; Revised: 2022-03-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3502500)

Fund: National Key R&D Program (2021YFB3502500)

作者简介: 周金堂 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为吸波材料。

Biography: ZHOU Jin-tang (1984-), Male, Doctor, Associate Professor, Research focus: microwave absorbing material.

通讯作者: 郝秀清 (1986—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面微结构的设计制备技术。

Corresponding author: HAO Xiu-qing (1986-), Female, Professor, Research focus: design and preparation technology of surface micro-structure.

引文格式: 周金堂, 何燕茹, 陶佳麒, 等. 海洋苛刻环境服役的 CIPs/EP 吸波防腐功能材料[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 304-311.

ZHOU Jin-tang, HE Yan-ru, TAO Jia-qi, et al. CIPs/EP Wave-absorbing and Anti-corrosion Functional Materials for Service in Harsh Marine Environments[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 304-311.

microwave absorbing performance and anti-corrosion performance of the sample were better matched, and the overall performance was the best. The composites had good absorption performance in a wide range, as the bandwidth with reflection loss less than -10 dB reached 4.2 GHz at a thickness of about 2.1 mm, and a maximum reflection loss of -42.5 dB at about 2.4 mm. In addition, there was no obvious change for electromagnetic performance in 7 days under acid and salt environment, showing good corrosion resistance. CIPs powder with excellent microwave absorption performance was compounded with epoxy resin with excellent corrosion resistance. By adjusting the volume proportion of flake CIP, the permeability and dielectric constant of the material are improved, and good impedance matching is realized. The prepared composite materials have good microwave absorption performance and corrosion resistance.

KEY WORDS: marine environment; composite material; microwave absorption; corrosion resistance; CIP; epoxy resin

吸波材料广泛地应用于我国国防、军工和民用等多个方面,可以在雷达隐身技术、信息泄露防护等方面起到关键作用^[1-8]。热带远洋海区常年处于高湿、高温、高盐雾和高紫外线状态,使得舰船飞行甲板的温度高达 70°C ,机库内温度一般在 30°C 以上,相对湿度一般在 80% 以上。舰载机常处于高湿、高盐雾和强光照等恶劣的海洋性环境中,会受到海雾、海水飞溅等多种环境因素的影响,其雷达吸波涂层极易发生腐蚀^[9-10]。如何在保证材料吸波性能的基础上提高其防腐蚀性能,制造结构功能一体化的防腐吸波材料成为了目前研究领域的热点问题^[11-17]。

Liu 等^[18]通过两步法设计合成了三元还原氧化石墨烯(rGO)/ Fe_3O_4 /PANI(GMP)复合材料,采用电化学方法测试复合材料,结果表明其防腐性能优良,在频率为 14.4 GHz 时反射损耗达到了 -28.2 dB,反射损耗小于 -10 dB 的有效带宽达到了 5.4 GHz。Zhang 等^[19]采用催化化学气相沉积技术(CCVD)成功合成了 FeSiAl@C 复合结构,之后测试了 FeSiAl@C 复合结构的电磁性能,在频率为 6.8 GHz、厚度为 2.5 mm 时,其最大反射损耗能够达到 -45.7 dB,腐蚀电流密度从 $3.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降为 $1.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,腐蚀速率从 $1.02 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ 减小到 $3.04 \times 10^{-13} \text{ m/s}$,体现了良好的耐腐蚀性能。马程成等^[20]采用沉淀-水热法成功地制备了三维空心 NiCo_2O_4 结构,并负载缓蚀剂苯并三唑(BTA),当样品厚度为 2 mm、频率为 16.01 GHz 时最小反射损耗为 -35.39 dB,此时小于 -10 dB 的吸收带宽高达 4.64 GHz,且划伤后可以释放出 BTA,可以在钢表面形成钝化膜,有效抑制腐蚀的发生,具有优异的微波吸收性能,而且具有良好的防腐性能和自修复性能。羰基铁粉的自然共振频率通常为 2~18 GHz,而且具有较高的饱和磁化强度,在频率为 8~18 GHz 时具有优异的吸收性能。由于羰基铁粉的表面活性较高,因此在实际应用中容易吸收水分及结块,并难以均匀地分散在基质中。特别是制备吸波复合材料时,面对以酸碱为主的环境,羰基铁容易发生反应,导致其氧化和腐蚀,从而降低了材料的吸波性能。环氧树脂防腐涂层的主要优点有耐腐蚀性、耐理化性质良好,并具有很强的附着力,是面向海洋苛刻环境的常用涂料之一。

文中将片状羰基铁粉与环氧树脂(CIPs/EP)混合制成复合材料,通过扫描电子显微镜(SEM)对羰基铁的微观形貌进行分析;采用傅里叶红外变换光谱仪(FTIR)、X 射线衍射仪(XRD)对所制备复合材料的化学结构进行分析;通过矢量网络分析仪测量 4 种不同体积分数(0%、15%、20%、25%)复合材料的电磁参数,并评价其吸波性能,探讨片状羰基铁粉含量对复合材料电磁性能的调节作用,通过加速腐蚀试验测试其耐腐蚀性能,以制备具有优良性能的防腐吸波复合材料。

1 实验

1.1 原料

主要材料:片状羰基铁粉(CIPs),平均长度为 3~10 μm ,江苏天一超细金属粉末有限公司;环氧树脂(E-44),南通星辰合成材料有限公司;固化剂(T31),南京尔邦化工有限公司;硅烷偶联剂(KH560),南京辰工有机硅材料有限公司;消泡剂,常州市润翔化工有限公司;脱模剂,美国肯天公司。

1.2 制备过程

将环氧树脂置于 50°C 的恒温水浴箱内预热,增加其流动性。按照不同的体积分数(0%、15%、20%、25%)称量羰基铁粉,放置于 50°C 的烘箱中 30 min,使得羰基铁粉充分干燥,取出后置于干燥器中冷却至室温。采用 KH560 对羰基铁粉进行表面处理,将干燥后的羰基铁粉倒入盛有环氧树脂的烧杯中,同时添加除泡剂,机械搅拌一段时间后加入事先准备好的固化剂,使其充分混合。将上述体系置于真空干燥箱中进行除气泡操作,完成后便得到了羰基铁粉/环氧树脂反应前驱体。模具采用钢化玻璃,将反应前驱体涂覆在钢化玻璃上,并在其上面同样覆盖钢化玻璃板,使其表面平整、形状均匀,固化脱模后便得到了羰基铁粉/环氧树脂复合板材。

1.3 性能测试及表征

采用 Vector-33 型傅里叶红外变换光谱仪(FITR)

测定 CIPs/EP 样品的红外光谱。采用 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品截面的微观形貌。采用 250Xi 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测试样品的晶型结构。采用 N5244A 矢量网络分析仪, 通过波导法测试复合材料的电磁参数。

2 结果与讨论

2.1 CIPs/EP 复合材料的化学结构分析

对应不同 CIP 含量样品的 XRD 图如图 1a 所示。由 XRD 图谱可以看出, 纯环氧树脂基体没有特征峰, 表明典型的有机物无具体晶形结构^[21]。在图谱中, 复合材料在 44° 、 64.5° 、 81.6° 时出现较强的衍射峰, 这对应着 (110)、(200) 和 (211) 晶面, 说明羰基铁粉为体心立方 (bcc) 晶体 (标准 PDF 卡片编号为 06-0696)。随着羰基铁含量的上升, 其衍射峰的位置未发生变化^[22-23]。

不同羰基铁含量样品的 FTIR 图谱如图 1b 所示。由图 1b 可知, 添加羰基铁后复合材料的红外光谱与纯 EP 较为接近, 其中 3448 cm^{-1} 属于 EP 表面吸附水 O—H 键的伸缩振动峰, 而 2971 cm^{-1} 为亚甲基的 C—H 的伸缩振动峰, 1512 cm^{-1} 为苯环骨架的伸缩

振动峰, 1251 cm^{-1} 为环氧键 C—O 的特征峰, 1042 cm^{-1} 为 Si—O—C 键的伸缩振动吸收峰, 834 cm^{-1} 为环氧基团的特征峰。对比纯环氧树脂与羰基铁/环氧树脂基复合材料的红外光谱可以看出, 在加入羰基铁粉后环氧树脂的特征峰及其位置没有发生改变。这说明羰基铁的加入只是单纯的机械共混, 没有破坏环氧树脂的结构, 没有发生新的化学反应, 且没有生成新键^[23-26]。

2.2 CIPs/EP 复合材料的形貌分析

纯羰基铁样品的扫描电镜图如图 2 所示。对比图 2a 和图 2b 可以发现, 羰基铁粉在经过 KH560 改性后, 其片状结构未发生变化, 但其表面均匀覆盖了一层由硅烷偶联剂水解后接枝形成的薄膜物质, 羰基铁使团聚现象减少。不同含量的羰基铁/环氧树脂基复合材料的 SEM 图如图 3 所示。

由图 3 可知, 经硅烷偶联剂 KH560 改性后, 吸波剂羰基铁在环氧树脂基体中呈均匀弥散分布, 未观察到明显的大面积团聚现象。随着羰基铁粉体积分数的上升, 羰基铁粉与环氧树脂形成了良好的交互网络, 避免在固化过程中羰基铁粉因密度较大出现沉降现象。

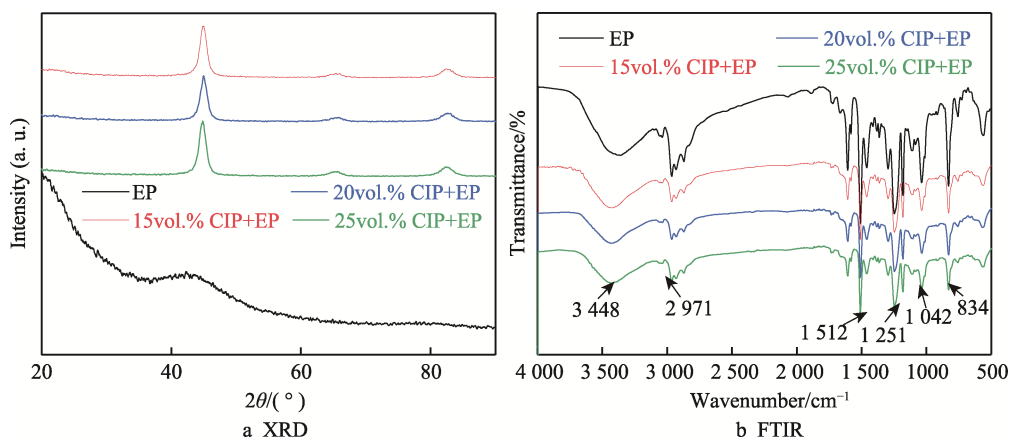


图 1 不同含量 CIP/EP 复合材料的 XRD 图和 FTIR 图
Fig.1 XRD patterns and FTIR patterns of CIP/EP composites with different contents

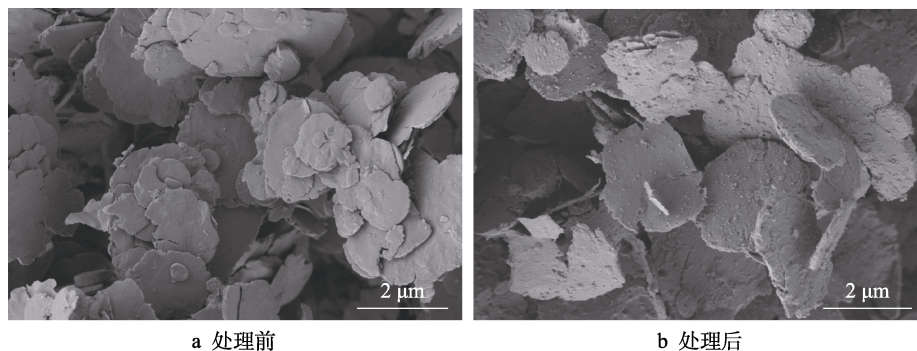


图 2 纯羰基铁样品的扫描电镜图
Fig.2 SEM of pure CIPs sample: a) before treatment; b) after treatment

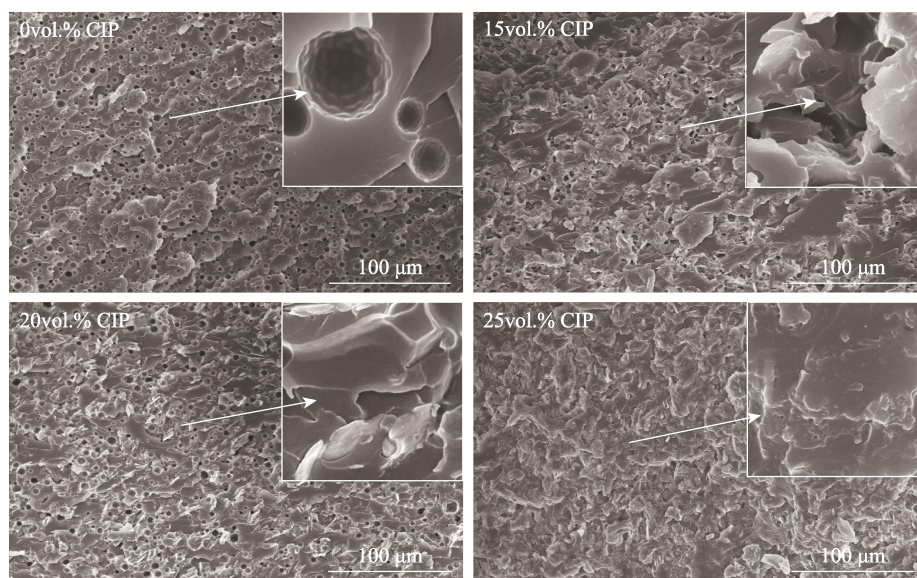


图 3 不同含量 CIP/EP 复合材料的 SEM 图

Fig.3 SEM of CIP/EP composite materials with different contents

2.3 CIPs/EP 复合材料的电磁性能分析

CIP 体积分数分别为 0%、15%、20%、25%的 CIP/EP 复合材料的电磁性能参数如图 4a—h 所示, 其中包含试样在 X 波段范围内相对介电常数的实部 ϵ' 、虚部 ϵ'' , 磁导率的实部 μ' 、虚部 μ'' 随频率变化的曲线。介电常数的实部 ϵ' 衡量材料在每周期储存的最大电能的变量, 介电常数的虚部 ϵ'' 为电磁场作用下材料损耗电磁波的量度。磁导率的实部 μ' 代表材料对磁场能量的储存能力, 虚部 μ'' 代表材料对磁场能量的损耗能力, 主要由涡流损耗吸收入射的电磁波提供。厚度和吸波剂的添加量都对吸收峰的位置有着重要影响^[27-28]。由图 4a—d 可知, 复合材料的介电常数和磁导率都随着 CIP 体积分数的增加而增大, 特别是介电常数实部增加极为明显。CIP 体积分数为 25% 的样品的最大反射损耗值在频率 8 GHz 时达到了 -11.8 dB, 而 CIP 体积分数为 0% 的样品仅有 3.6。随着碳基铁含量的增大, 涡流损耗也增大。介电常数虚部和磁导率虚部增大则损耗增强, 当材料的磁导率虚部大于 1 时, 具有放大损耗的作用。在材料未导通时, 电磁波与碳基铁的作用为弹性碰撞, 不发生吸收作用。随着碳基铁含量的增大, 这种弹性碰撞增多, 介电常数实部增大, 但虚部变化不大。

由图 4e 可知, 随着碳基铁体积分数的上升, 其界面反射系数 R 也逐渐增大。材料的电导率越大, 反射系数越大。材料的反射特性与频率密切相关, 当电导率减小或电磁波频率增大时, 反射系数则减小。当反射系数过高则呈现为屏蔽材料的特性, 不能用作电磁波吸收材料。吸波材料首先要减少反射, 因此材料的介电常数和磁导率必须接近, 方能将雷达波引入吸波材料中。由图 4f 可知, 随着碳基铁体积分数的

上升, 其衰减常数 α 也逐渐增大, 且每组材料的衰减常数 α 都随着频率的增大而增大, 因此材料在高频区有较大吸收。 α 为 ϵ' 、 μ' 的单调增函数, 要获得较高的 α 值, 则要求 ϵ' 、 μ' 的取值较大。要提高材料损耗吸收性能就必须提高介电常数的虚部和磁导率虚部, 但是材料的界面反射系数 R 也随之增大。可见, 为了提高反射损耗性能, 首先需要减少材料的界面反射系数 R 。随着碳基铁含量的上升, 以及复合材料涂层厚度的增加, 其最小反射峰逐渐移向低频区域。进一步提高 CIP 含量时, 介电常数虚部过大, 无法实现较好的匹配, 吸收性能下降。反射损耗主要由表面阻抗特性变化引起的, 在特定的频率范围内, 反射损耗值越小, 电磁波吸收效率越高。

最大吸收峰位可通过调节材料厚度实现, 随着材料厚度的增大, 吸收峰从高频移动到低频。为了解决低频强或宽吸收这个雷达波吸收材料设计中的技术难点, 需要增大材料的厚度, 或者使用高磁导率的磁性吸收剂^[29-30]。碳基铁粉体积分数为 20% 的样品在涂层厚度为 2.4 mm 时, 反射损耗值在频率 10 GHz 附近达到最大值, 在 X 波段的最大反射损耗值达到 -42.5 dB; 在厚度为 2.1 mm 左右时, 反射损耗值小于 -10 dB 的有效频带宽度达到了最大值 (4.2 GHz), 在 8.2~12.4 GHz 频段内显示出较好的吸波性能。

2.4 CIPs/EP 复合材料的防腐性能分析

对比分析 SEM 图 (见图 5a) 可知, 经质量分数 5% 的 NaCl 溶液浸泡 1 周后, CIP 体积分数为 20% 的试样表面微观形貌未发生明显变化, 碳基铁粉与环氧树脂形成了良好的交互网络; CIP 体积分数为 20% 的试样在质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中浸泡 1 周后质量上升, 这主要是由于试样在水中浸泡时, 聚合物分子

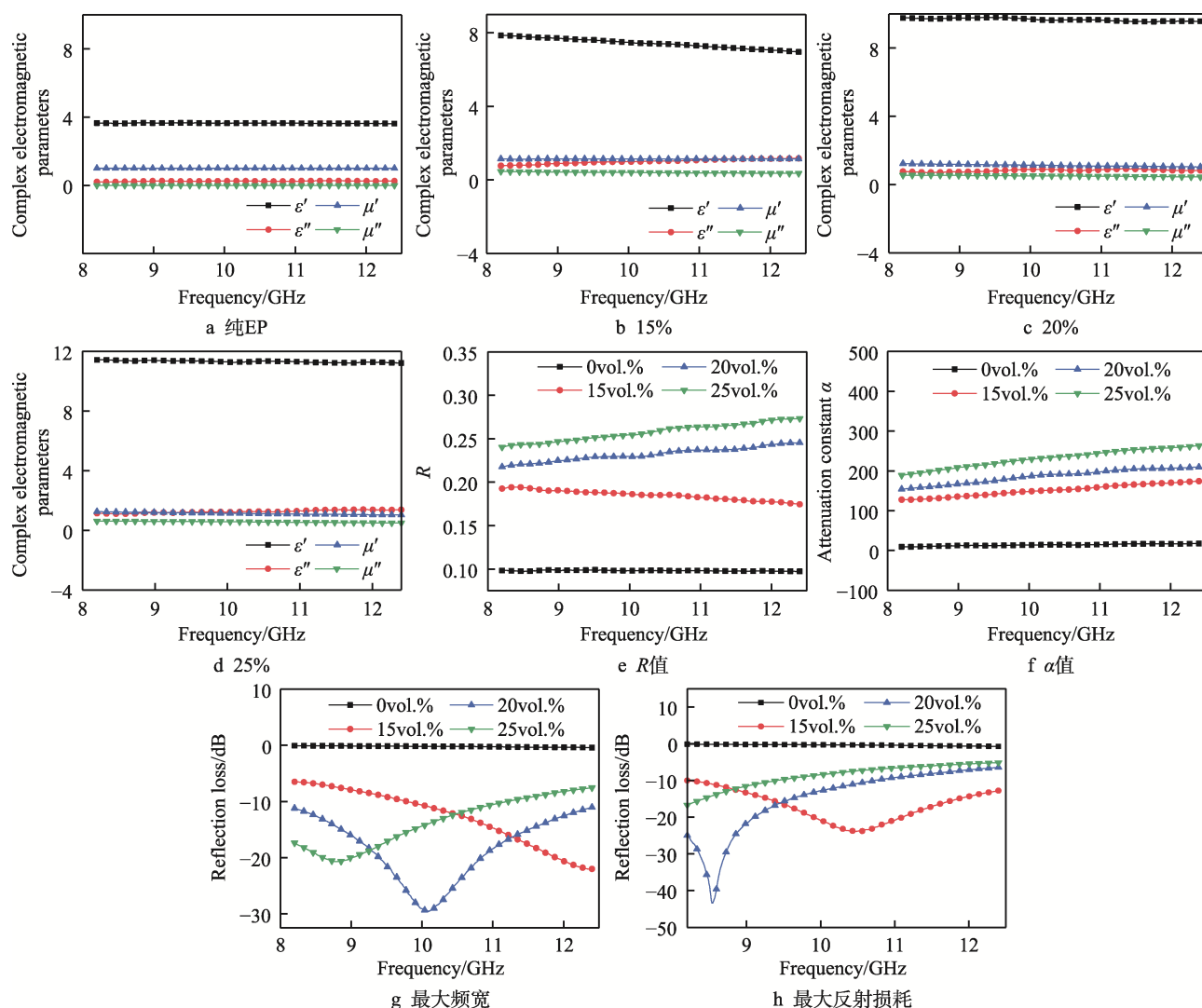


图4 不同CIP体积分数的CIP/EP复合材料的电磁性能参数

Fig.4 Electromagnetic performance parameters of CIP/EP composites with different CIP volume ratios:
a) 0 %; b) 15%; c) 20 %; d) 25 %; e) R -values; f) α -values; g) maximum bandwidths; h) maximum reflection loss

中的自由体积吸收了部分水分。由图 5b 可知, CIP 体积分数为 20% 的试样在质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中浸泡 1 周后介电常数实部相对于浸泡前轻微下降, 介电常数虚部与浸泡前基本重合。由图 5c 可知, 磁导率实部相对于浸泡前轻微上升; 浸泡后的磁导率虚部轻微上升, 但保持相同变化趋势。

CIP 体积分数为 20% 的 CIP/EP 复合材料在质量分数为 1% 的 HNO_3 溶液中浸泡 1 周后 SEM 图如图 5d 所示, 显示羰基铁粉与环氧树脂形成的交互网络未被明显破坏。对比经质量分数为 1% HNO_3 溶液浸泡 1 周前后试样质量可知, CIP 体积分数为 20% 的试样质量出现轻微下降, 这主要是由于硝酸的强腐蚀性, 使得试样表面的小分子被硝化溶解, 溶液基本不变色。由图 5e 可知, CIP 体积分数为 20% 的试样在质量分数为 1% HNO_3 溶液中浸泡 1 周后, 介电常数实部相对于浸泡前轻微下降, 介电常数虚部与浸泡前基本重合。由图 5f 可知, 磁导率实部和虚部相对于浸泡前轻微上升, 但保持相同变化趋势。

由图 6a 可知, CIP 体积分数为 20% 的试样在质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中浸泡 1 周后, 在厚度为 2.1 mm 时仍完全覆盖 X 波段, 最大频宽为 4.2 GHz, 最大反射损耗从 -29 dB 变为 -34 dB。由图 6b 可知, 在厚度为 2.4 mm 时 CIP 体积分数为 20% 试样的最小反射损耗从 -43 dB 变为 -42.5 dB。羰基铁环树脂基复合材料在盐腐蚀后仍然具有优良的吸波性能, 其中 CIP 体积分数为 20% 样品的最大反射损耗为 -42.5 dB, 更适合在较宽频率下应用, 其反射损耗在 8.8 GHz 左右时达到最大值。由图 6c 可知, CIP 体积分数为 20% 的 CIP/EP 复合材料在质量分数为 1% 的 HNO_3 溶液中浸泡 1 周后, 样品于厚度 2.1 mm 时其反射损耗小于 -10 dB 的频宽仍然覆盖整个 X 波段, 最大频宽为 4.2 GHz, 且最大反射损耗从 -30 dB 变为 -58 dB。CIP 体积分数为 20% 的 CIP/EP 复合材料在质量分数为 1% HNO_3 溶液中浸泡 1 周后于 X 波段范围内的反射损耗随频率变化的曲线如图 6d 所示。在厚度为 2.4 mm 时, CIP 体积分数为 20% 的样品的最大反射损

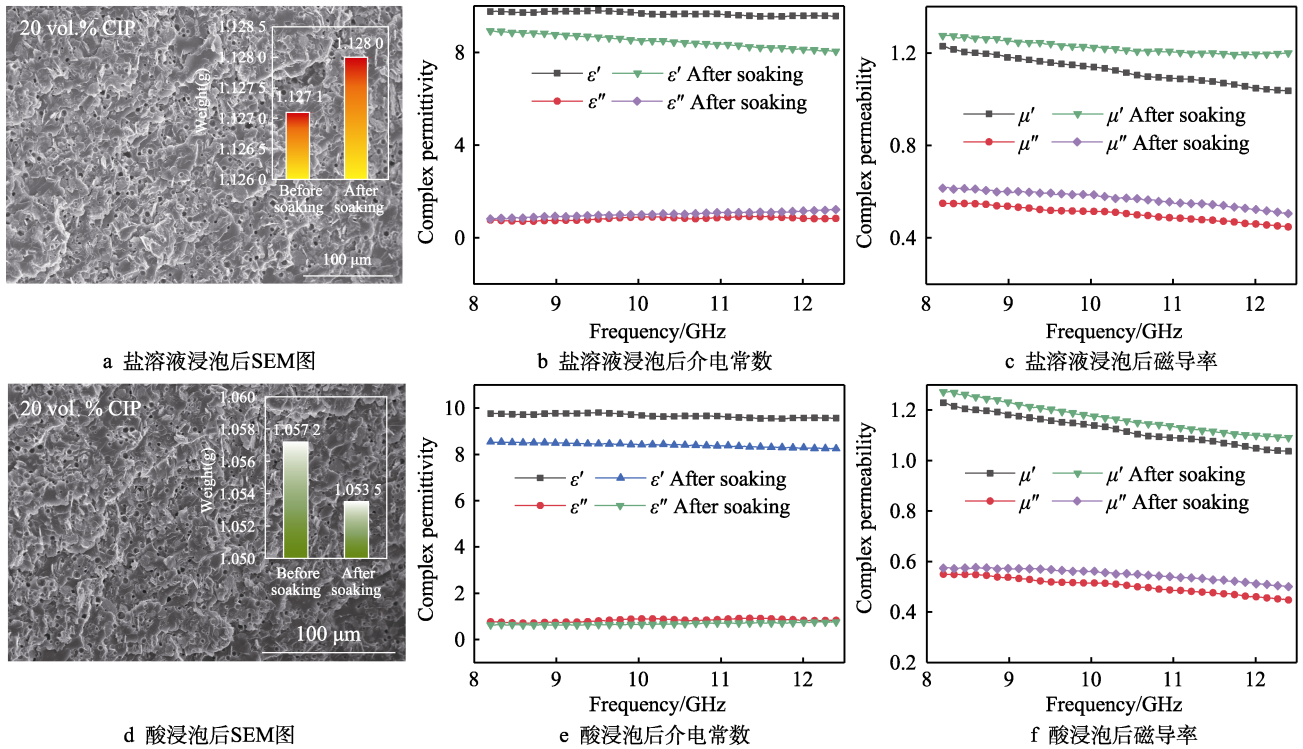


图 5 样品 (20%) 腐蚀前后对比

Fig.5 Comparison of before and after corrosion of 20 vol.% sample: a) SEM image and weight comparison image after soaking in salt solution; b) comparison of complex permittivity before and after soaking in salt solution; c) comparison of complex permeability before and after soaking in salt solution; d) SEM image and weight comparison image after soaking in acid solution; e) comparison of complex permittivity before and after soaking in acid solution; f) comparison of complex permeability before and after soaking in acid solution

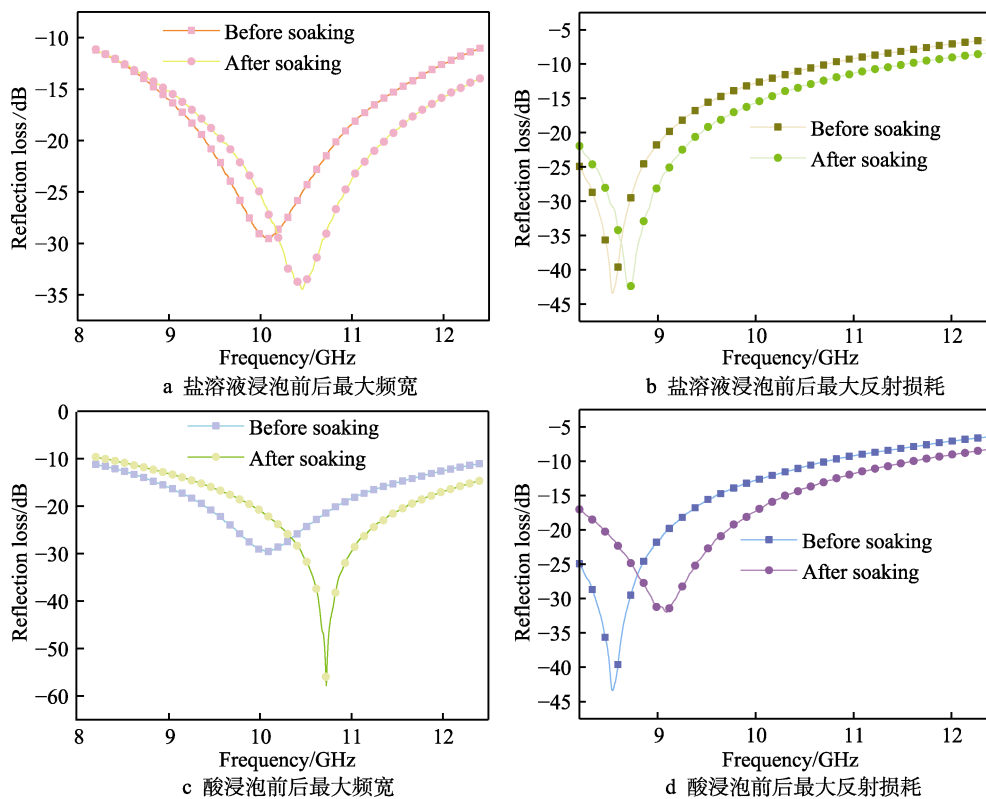


图 6 样品 (20%) 腐蚀前后最大频宽和反射损耗对比

Fig.6 Comparison of max frequency and loss reflection before and after corrosion of 20 vol.% sample: a) maximum bandwidth soaking in salt solution; b) maximum reflection loss soaking in salt solution; c) maximum bandwidth soaking in acid solution; d) maximum reflection loss soaking in acid solution.

耗从-43 dB 变为-31 dB, 可以判断, 羰基铁/环氧树脂基复合材料在酸腐蚀后仍然具有优良的吸波性能, 更适合在较宽频率下应用。这主要是因为环氧树脂对腐蚀离子的阻隔性优良, 其有效阻止了腐蚀离子扩散至金属表面。环氧树脂的活性腐蚀防护作用源于电化学界面的转移, 将阳极与阴极腐蚀过程分离。相较于纯聚合物涂层, 腐蚀介质和腐蚀产物在涂层中的扩散路径大幅度延长了, 因此表现出优异的防腐性能。由于羰基铁粉具有表面积大的特点, 可以防渗水及氧和离子的扩散, 因此提供了良好的屏障。

3 结论

1) 由红外分析可知, 加入羰基铁的含量对特征峰的位置没有影响。由 XRD 可知, 羰基铁在与环氧树脂反应固化后, 其特征峰未发生明显变化, 说明羰基铁的加入没有与环氧树脂发生反应。

2) 由 SEM 图可知, 经过 KH560 改性后羰基铁在基体树脂中分布稳定且均匀, 形成了良好的交互网络和均匀的结构, 使材料具有良好的韧性。

3) 吸波剂 CIP 的体积分数影响着所制备羰基铁/环氧树脂基复合材料的微波吸收性能。在制备相同厚度的复合材料时, CIP 体积分数较小时, 电磁波的损耗能力较弱, 吸波性能不够突出; 在增大 CIP 的体积分数后, 介电常数和磁导率也得到提高, 但是其阻抗匹配下降, 导致材料的吸波性能变差。CIP 体积分数为 20% 的 CIP/EP 复合材料的电磁性能最佳, 具有较高的吸收电磁波能力, 在较宽范围内的吸波性能均良好。

4) CIP 体积分数为 20% 的样品在酸和盐环境下进行 7 d 加速腐蚀后, 其表面微观形貌、质量、电磁综合性能均未明显降低, 显示出良好的耐腐蚀特性。

参考文献:

- [1] 罗强, 刘甲, 曹茂盛. 典型低维过渡金属材料电磁波吸收性能研究进展[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2017, 34(1): 54-68.
LUO Qiang, LIU Jia, CAO Mao-sheng. Research Progress on Electromagnetic Wave Absorption Performance of Typical Low-Dimensional Transition Metal Materials [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2017, 34(1): 54-68.
- [2] 何朋, 蔡永珠, 曹茂盛. 剥离的碳化钛($d\text{-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)纳米片吸波性能[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 75-80.
HE Peng, CAI Yong-zhu, CAO Mao-sheng. Microwave Absorption Properties of Delaminated Titanium Carbide ($d\text{-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) Nanosheet[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 75-80.
- [3] 刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及

其发展趋势[J]. 材料导报, 2013, 27(17): 74-78.

- LIU Dan-li, LIU Pin-gan, YANG Qing-song, et al. Research Status and Prospect of Wave Absorbing Materials[J]. Materials Review, 2013, 27(17): 74-78.
- [4] 徐飞, 李铨. 舰用雷达波隐身材料的应用及发展[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(11): 10-12.
XU Fei, LI Xian-bin. The Application and Development of the Radar Wave Stealth Material on Combat Vessels[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(11): 10-12.
- [5] 来侃, 陈美玉, 孙润军, 等. 吸波材料在雷达隐身领域的应用[J]. 西安工程大学学报, 2015, 29(6): 655-665.
LAI Kan, CHEN Mei-yu, SUN Run-jun, et al. Electromagnetic Wave Absorbing Materials for Radar Stealth[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2015, 29(6): 655-665.
- [6] DUAN Yu-ping, LIU Yi, CUI Yu-long, et al. Graphene to Tune Microwave Absorption Frequencies and Enhance Absorption Properties of Carbonyl Iron/Polyurethane Coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 125: 89-98.
- [7] HE Li-hua, ZHAO Yan, XING Li-ying, et al. Preparation of Reduced Graphene Oxide Coated Flaky Carbonyl Iron Composites and Their Excellent Microwave Absorption Properties[J]. RSC Advances, 2018, 8(6): 2971-2977.
- [8] 彭雪伟, 张淇, 谢志勇. 碳纳米管/聚乙烯醇/羰基铁粉复合材料的制备及吸波性能研究[J]. 炭素技术, 2020, 39(2): 39-43.
PENG Xue-wei, ZHANG Qi, XIE Zhi-yong. Preparation and Wave Absorption of Carbon Nanotube/Polyvinyl Alcohol/Carbonyl Iron Powder Composites[J]. Carbon Techniques, 2020, 39(2): 39-43.
- [9] 景红霞, 李巧玲, 叶云, 等. 羰基铁/钛酸钡复合材料的制备及吸波性能[J]. 材料工程, 2015, 43(7): 38-42.
JING Hong-xia, LI Qiao-ling, YE Yun, et al. Preparation and Microwave Absorbing Properties of $\text{Fe}(\text{CO})_5/\text{BaTiO}_3$ Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(7): 38-42.
- [10] 狄莹莹, 石艳飞, 任鹏刚. 石墨烯-羰基铁/氰酸酯复合材料的制备及电磁屏蔽性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(6): 111-116.
DI Ying-ying, SHI Yan-fei, REN Peng-gang. Preparation and Electromagnetic Shielding Properties of Graphene/Carbonyl Iron Filled Epoxy Modified Cyanate Composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(6): 111-116.
- [11] SEDLAČÍK M, PAVLÍNEK V, SÁHA P, et al. Rheological Properties of Magnetorheological Suspensions Based on Core-Shell Structured Polyaniline-Coated Carbonyl Iron Particles[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(11): 115008.
- [12] ABSHINOVA M A, KAZANTSEVA N E, SÁHA P, et al. The Enhancement of the Oxidation Resistance of Carbonyl Iron by Polyaniline Coating and Consequent Changes in Electromagnetic Properties[J]. Polymer Degra-

- dation and Stability, 2008, 93(10): 1826-1831.
- [13] BAHRI-LALEH N, DIDEHBAN K, YARAHMADI E, et al. Microwave Absorption Properties of Polyaniline/Carbonyl Iron Composites[J]. Silicon, 2018, 10(4): 1337-1343.
- [14] WU Xiao-bing, LUO Hong-lin, WAN Yi-zao. Preparation of SnO₂-Coated Carbonyl Iron Flaky Composites with Enhanced Microwave Absorption Properties[J]. Materials Letters, 2013, 92: 139-142.
- [15] LI Wang-chang, LE Cheng, LYU Jun-jun, et al. Electromagnetic and Oxidation Resistance Properties of Core-Shell Structure Flaked Carbonyl Iron Powder@SiO₂ Nanocomposite[J]. Physica Status Solidi (a), 2017, 214(6): 1600747.
- [16] JANG D, YOON H N, NAM I W, et al. Effect of Carbonyl Iron Powder Incorporation on the Piezoresistive Sensing Characteristics of CNT-Based Polymeric Sensor [J]. Composite Structures, 2020, 244: 112260.
- [17] MISHRA D K, PANDEY P M. Experimental Investigation into the Fabrication of Green Body Developed by Micro-Extrusion-Based 3D Printing Process[J]. Polymer Composites, 2020, 41(5): 1986-2002.
- [18] LIU Ri-jie, ZHU Ai-ping. Synthesis, Characterization, Interfacial Interactions, and Properties of Reduced Graphene Oxide/Fe₃O₄/Polyaniline Nanocomposites[J]. Polymer Composites, 2019, 40(S2): 1111-1119.
- [19] ZHANG Xing-zhong, GUO Yang, RASHAD A, et al. Bifunctional Carbon-Encapsulated FeSiAl Hybrid Flakes for Enhanced Microwave Absorption Properties and Analysis of Corrosion Resistance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 828: 154079.
- [20] 马程成, 陈守刚. BTA@NiCo₂O₄ 自修复吸波防腐涂层的合成及其性能研究[C]// 第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 沈阳: 工程科技 I 辑, 2021: 656.
MA Cheng-cheng, CHEN Shou-gang. Synthesis and Properties of BTA@NiCo₂O₄ Self-healing Wave-absorbing Anticorrosion Coating[C]// Abstracts of the 11th National Corrosion and Protection Conference. Shenyang: Engineering Science and Technology Vol 1, 2021: 656.
- [21] CAI Wei, WANG Ji-xiao, QUAN Xiao-dong, et al. Anti-fouling and Anticorrosion Properties of One-Pot Synthesized Dedoped Bromo-Substituted Polyaniline and Its Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 334: 7-18.
- [22] MOTAMED M, RAMEZANZADEH M, RAMEZANZADEH B, et al. Enhancement of the Active/Passive Anti-Corrosion Properties of Epoxy Coating via Inclusion of Histamine/Zinc Modified/Reduced Graphene Oxide Nanosheets[J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 77-91.
- [23] WU L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle Size Influence to the Microwave Properties of Iron Based Magnetic Particulate Composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 285(1/2): 233-239.
- [24] LI Yong, CHEN Chang-xin, PAN Xiao-yan, et al. Multiband Microwave Absorption Films Based on Defective Multiwalled Carbon Nanotubes Added Carbonyl Iron/Acrylic Resin[J]. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404(8-11): 1343-1346.
- [25] PINHO M S, GREGORI M L, NUNES R C R, et al. Aging Effect on the Reflectivity Measurements of Polychloroprene Matrices Containing Carbon Black and Carbonyl-Iron Powder[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 73(1): 1-5.
- [26] LIU Li-dong, DUAN Yu-ping, LIU Shun-hua, et al. Microwave Absorption Properties of one Thin Sheet Employing Carbonyl-Iron Powder and Chlorinated Polyethylene[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(13): 1736-1740.
- [27] WANG Bo-chong, WEI Jian-qiang, YANG Yong, et al. Investigation on Peak Frequency of the Microwave Absorption for Carbonyl Iron/Epoxy Resin Composite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(8): 1101-1103.
- [28] DUAN Yu-ping, WU Guang-li, GU Shu-chao, et al. Study on Microwave Absorbing Properties of Carbonyl-Iron Composite Coating Based on PVC and Al Sheet[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(15): 5746-5752.
- [29] NGUYEN A T, LAI Wei-cheng, TO B D, et al. Layer Control of Tubular Graphene for Corrosion Inhibition of Nickel Wires[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(27): 22911-22917.
- [30] PRASAI D, TUBERQUIA J C, HARL R R, et al. Graphene: Corrosion-Inhibiting Coating[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1102-1108.

责任编辑: 彭颀