

## $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ 复合材料及其改性涂层的电磁吸波性能

谢艳娇 马晓 包云凤 官新菊 官海龙 郭思瑶

## Electromagnetic absorption properties of $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ composites and their modified coatings

XIE Yanjiao, MA Xiao, BAO Yunfeng, GONG Xinju, GUAN Hailong, GUO Siyao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240604.001>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 可氧化再生的“核-壳”结构磁性吸附剂 $\text{Mn}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{CeO}_2$ 对水中氧氟沙星的吸附机制

Adsorption mechanism of ofloxacin in water with "core-shell" magnetic adsorbent  $\text{Mn}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{CeO}_2$  capable of oxidation regeneration

复合材料学报. 2022, 39(6): 2750–2763 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210722.002>

#### $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体/氰酸酯-环氧树脂复合材料的制备和性能

Preparation and properties of  $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  ferrite/cyanate ester-epoxy composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 13–19 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181112.003>

#### 基于超材料拓展蜂窝吸波性能设计方法

A method of enhancing honeycomb absorbing performance based on metamaterial

复合材料学报. 2024, 41(7): 3791–3797 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240604.001>

#### 氧化热处理温度对多孔镍泡沫微观结构及吸波性能的影响

Effect of oxidation heat treatment temperature on microstructure and microwave absorption properties of porous nickel foam

复合材料学报. 2022, 39(8): 3794–3803 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211103.002>

#### 多孔木炭/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合吸波材料的制备与性能

Preparation and microwave absorption properties of porous charcoal/  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  composites

复合材料学报. 2022, 39(10): 4590–4601 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211105.001>

#### $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @锂铝硅微晶玻璃/还原氧化石墨烯复合材料的制备和吸波性能

Preparation and microwave absorbing properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @lithium aluminum silicate glass ceramic/reduced graphene oxide composite

复合材料学报. 2019, 36(11): 2651–2664 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181224.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

# Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO 复合材料及其改性涂层的电磁吸波性能



分享本文

谢艳娇<sup>2</sup>, 马晓<sup>3</sup>, 包云凤<sup>1</sup>, 宫新菊<sup>1</sup>, 官海龙<sup>1,4</sup>, 郭思瑶<sup>\*1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266033; 2. 青岛西海岸新区自然资源局, 青岛 266400; 3. 中国船舶集团有限公司 第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 青岛 266237; 4. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014)

**摘要:** 随着 5G 时代的到来, 各类电子设备的广泛使用随之导致了严重的电磁污染问题, 迫切需要开发高性能的电磁吸波材料来解决上述问题。本文采用简单的原位生长法在还原氧化石墨烯 (rGO) 片层上生长了镍锌铁氧体 (Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 纳米粒子, 通过控制 rGO 的掺量制备了一系列的 Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO (NZFO/rGO) 吸波剂, NZFO/rGO-1:0.5 在 11.24 GHz 时的最小反射损耗 (RL) 值为 -60.72 dB, 匹配厚度为 2.98 mm。此外, 制备的 NZFO/rGO/环氧树脂吸波涂层在 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料掺量为 5wt% 时, 涂覆在水泥基平板上的最小 RL 值为 -42.2 dB, 比纯环氧树脂涂层的最小 RL 值降低了 90.95%; 当掺量为 3wt% 时, 有效吸收带宽 (EAB) 为 8.88 GHz, RL 值小于 -5 dB 时吸收带宽可达 13.2 GHz。

**关键词:** Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; 匹配厚度; 反射损耗; 环氧树脂; 吸波涂层

**中图分类号:** TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)03-1368-12

## Electromagnetic absorption properties of Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO composites and their modified coatings

XIE Yanjiao<sup>2</sup>, MA Xiao<sup>3</sup>, BAO Yunfeng<sup>1</sup>, GONG Xinju<sup>1</sup>, GUAN Hailong<sup>1,4</sup>, GUO Siyao<sup>\*1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Qingdao West Coast Natural Resources Bureau, Qingdao 266400, China; 3. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China; 4. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250014, China)

**Abstract:** With the advent of the 5G era, the widespread use of various electronic devices has led to serious electromagnetic pollution problems. It is urgent to develop high-performance electromagnetic wave absorption materials to solve the above problems. In our work, nickel zinc ferrite (Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles were grown on reduced graphene oxide (rGO) sheets by a simple in situ growth method, and a series of Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO (NZFO/rGO) absorbers were prepared by adjusting the dosage of rGO. The minimum reflection loss (RL) of NZFO/rGO-1:0.5 at 11.24 GHz is -60.72 dB with the matching thickness of 2.98 mm. In addition, when 5wt% NZFO/rGO-1:0.5 composites were used to prepare the modified epoxy resin coating, the minimum RL value of the cement-based materials coated the coating is -42.2 dB, which is 90.95% lower than the minimum RL value of pure epoxy resin specimen; When the dosage is 3wt%, the effective absorption bandwidth (EAB) value is 8.88 GHz, and the absorption bandwidth can reach 13.2 GHz when the RL value is less than -5 dB.

**Keywords:** Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; matching thickness; reflection loss; epoxy resin; absorption coating

收稿日期: 2024-04-11; 修回日期: 2024-05-13; 录用日期: 2024-05-24; 网络首发时间: 2024-06-04 11:55:21

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240604.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51978354)

National Natural Science Foundation of China (51978354)

通信作者: 郭思瑶, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型纳米材料在土木工程的多元化应用 E-mail: [guosy@qut.edu.cn](mailto:guosy@qut.edu.cn)

引用格式: 谢艳娇, 马晓, 包云凤, 等. Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO 复合材料及其改性涂层的电磁吸波性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(3): 1368-1379.

XIE Yanjiao, MA Xiao, BAO Yunfeng, et al. Electromagnetic absorption properties of Ni<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO composites and their modified coatings[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3): 1368-1379(in Chinese).

近些年来,由于无线通信技术的快速发展和电子设备的广泛应用,产生了大量的电磁波,这不仅对精密设备和仪器造成了电磁干扰,还可能加热人体细胞或干扰人体固有的电磁场,对人体健康产生不利的影响,从而引发一系列的社会生存和环境污染问题<sup>[1-3]</sup>。

具有高纵横比的二维片层氧化石墨烯(GO)由于其特殊导电网络的构建在电磁波吸收领域发挥了重要的作用<sup>[4-6]</sup>,其损耗机制主要为介电损耗,但是其自身存在的“趋肤效应”通常会使电磁波在材料表面产生大量的反射,从而导致阻抗失配,降低电磁吸波性能。为了改善这一缺陷,通常利用磁性材料来优化其阻抗匹配,从而提升微波吸收性能。例如,Ding等<sup>[7]</sup>制备了一种在GO上自组装的磁性FeCo纳米结构来增强微波吸收,在匹配厚度为5 mm下的最小反射损耗(RL)值为-39.2 dB,小于-10 dB的有效吸收带宽为3.8 GHz(8.6~12.4 GHz)。Hou等<sup>[8]</sup>通过简单的水热法制备了磁性 $x\text{Ni}/y\text{NiO}$ 纳米颗粒修饰的还原氧化石墨烯(rGO),在负载比为15wt%时,最小RL值为-46.5 dB,匹配厚度为3.6 mm。铁氧体材料所具备的铁磁性、高磁导率、高磁晶各向异性、低成本、制备简单等优点使其发挥着巨大的磁损耗吸收潜力<sup>[9-10]</sup>。Saleem等<sup>[11]</sup>采用共沉淀法制备了掺杂镍铜铁氧体的 $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米晶,在频率为16.09 GHz时,最小RL值为-22.8 dB。由此可以发现,构建介电-磁双损耗型GO/铁氧体复合材料可以有效改善吸波剂的阻抗匹配,从而增强电磁波吸收性能。

因此,本工作通过简单的原位生长法制备了一系列的 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ (NZFO/rGO)复合材料,并具有优异的电磁波吸收性能,NZFO/rGO-1:0.5复合材料在11.24 GHz时的最小RL值为-60.72 dB,匹配厚度为2.98 mm,负载比为20wt%。此外,还利用具有优异电磁吸波性能的NZFO/rGO-1:0.5吸波剂改性环氧树脂制备了吸波涂层,采用机械搅拌混合法成功制备了NZFO/rGO/环氧树脂复合材料,并将其涂覆于水泥基平板表面,在NZFO/rGO-1:0.5复合材料掺量为5wt%时,涂覆改性吸波涂层的水泥基平板具有最小RL值为-42.2 dB,比纯环氧树脂涂层的最小RL值降低了90.95%,这项工作为解决日益严重的军用和民用电磁污染问题提供了有效的理论指导。

# 1 实验材料及方法

## 1.1 原材料

天然鳞片状石墨(C,青岛市莱西碳源贸易有限公司,>50 μm);浓硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,98%)、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,分析纯)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB,分析纯)、氢氧化钠(NaOH,分析纯)、无水乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )、二甲苯( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ,分析纯)、正丁醇( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$ ,分析纯)均购于上海国药化学试剂有限公司;硝酸钠( $\text{NaNO}_3$ ,分析纯)、高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ ,分析纯)、六水合硝酸镍( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,分析纯)、六水合硝酸锌( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,分析纯)、九水合硝酸铁( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,分析纯)均购于上海麦克林生化科技有限公司;双酚A型环氧树脂(E44)、固化剂(低分子量聚酰胺650)购于济南天茂树脂化工有限公司;普通波特兰水泥(P·O 42.5 R,中国山东山水功源水泥有限公司);配制水泥砂浆的细骨料为ISO 679—1989标准砂<sup>[12]</sup>。

## 1.2 制备方法

NZFO/rGO复合材料的制备:根据改进的Hummers法制备了氧化石墨烯(GO)<sup>[13]</sup>,采用简单的水热原位生长法制备了NZFO/rGO复合材料。将1 g CTAB充分溶解于50 mL去离子水中,将 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (其中 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 的摩尔比为0.6:0.4:2)通过搅拌和超声溶解于上述溶液中,然后在混合溶液中加入GO,在搅拌过程中加入NaOH(5 mol/L)溶液,调节pH值至10,连续搅拌2 h。随后将反应混合物转移到200 mL高压釜(SH-200ML,苏州晟华仪器科技)中,在180℃下反应10 h。最后用去离子水和无水乙醇交替洗涤数次,在60℃的真空干燥箱(DGG-9013A,上海一恒仪器制造有限公司)中干燥24 h,获得样品。不同GO添加量制备的NZFO/rGO复合材料记为NZFO(GO质量为0 g),NZFO/rGO- $n$ ( $n=1:0.2$ 、 $1:0.5$ 、 $1:1$ ),其中 $n$ 表示GO的质量为0.2 g、0.5 g和1 g(表1)。

NZFO/rGO/环氧树脂复合材料的制备:采用具有最优微波吸收性能的NZFO/rGO-1:0.5复合材料来制备NZFO/rGO/环氧树脂复合材料,NZFO/rGO-1:0.5复合材料在环氧树脂中所占的比例分别为0wt%、1wt%、3wt%和5wt%。以1wt%的掺量为例,制备方法如下:首先,将100 g环氧

表 1 NZFO/rGO 复合材料的各组分  
Table 1 Compositions of NZFO/rGO composites

| Sample         | Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/mmol | Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/mmol | Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O/mmol | GO/g | NaOH/(mol·L <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|-----------------------------|
| NZFO           | 0.6                                                       | 0.4                                                       | 2                                                         | 0    | 5                           |
| NZFO/rGO-1:0.2 | 0.6                                                       | 0.4                                                       | 2                                                         | 0.2  | 5                           |
| NZFO/rGO-1:0.5 | 0.6                                                       | 0.4                                                       | 2                                                         | 0.5  | 5                           |
| NZFO/rGO-1:1   | 0.6                                                       | 0.4                                                       | 2                                                         | 1    | 5                           |

Note: When NZFO is in-situ grown on GO, the high-temperature hydrothermal reaction transforms GO into rGO. Therefore, the substance listed in the table for the preparation of NZFO/rGO is GO.

树脂在 80℃ 的水浴锅中预热 2 h，将 1 g NZFO/rGO-1:0.5 复合材料分散在体积比为 7 : 3 的二甲苯和正丁醇混合物中，将混合溶液超声分散 30 min，然后将分散溶液滴加到预热好的环氧树脂中，充分搅拌混合，反应温度保持在 80℃，获得 NZFO/rGO/环氧树脂复合涂料。

水泥基试件的制备与养护：本文采用 0.5 的水灰比 (水泥 450 g，标准砂 1 350 g，水 225 g) 来制作水泥基试件。普通波特兰水泥的具体化学成分见表 2。具体流程如下：将称好的水泥加入搅拌锅中，然后加入拌合水，低速搅拌 30 s，然后在 30 s 内加入标准砂，再均匀搅拌 2 min。先将模具内壁均匀刷上薄层脱模剂，然后将搅拌均匀的水泥砂浆倒入模具中，在振动台上振动 1 min，盖上塑料薄膜，防止水分蒸发导致试块过早开裂。24 h 后，将水泥基试件进行脱模，置于温度为 (20±2)℃、湿度为 95%±2% 的养护室内养护 28 d 后进行涂层处理。

环氧树脂涂料在水泥基试件上的涂覆：在水泥基试件表面分别涂覆了上述制备的 4 种改性环氧树脂涂料，涂层厚度约为 1.5 mm。在涂覆前，由于水泥基试件制备过程中不可避免地会产生一些较大的孔洞，严重影响了涂覆的均匀性，因此采用早强硫铝酸盐水泥作为填料，对水泥砂浆试

件表面的孔洞进行填充。填充固化后，用砂纸除去涂覆表面上多余的硫铝酸盐水泥，擦拭试件表面，清除灰尘。由于环氧树脂的高黏度，在涂覆过程中会产生微量气泡，对涂层的性能有很大的影响。因此，一旦涂层过程中出现气泡，应立即将其打破，以保证涂层表面的光滑度。最后，将 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料在 0wt%、1wt%、3wt% 和 5wt% 掺量下制备的改性环氧树脂复合材料涂覆的水泥基试件分别标记为 RP0、RP1、RP3 和 RP5(表 3)。

1.3 表征及测试方法

微观表征方法：采用 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪 (XRD，日本理学) 测试样品的晶体结构。采用 Hitachi SU8010 型扫描电子显微镜 (SEM，日本电子) 对复合材料的微观形貌进行了表征。

电磁参数测试：采用同轴测试法对制备的所有 NZFO/rGO 复合材料进行电磁参数测试，测试的参数主要包括介电常数实部 (ε')、介电常数虚部 (ε'')、介电损耗正切值 (tan δ<sub>ε</sub>)、磁导率实部 (μ')、磁导率虚部 (μ'') 和磁损耗正切值 (tan δ<sub>μ</sub>)。样品制备过程如下：将被测样品粉末与熔融状态的石蜡按质量分数 20wt% 进行混合，压制成外径 7.00 mm、内径 3.04 mm、厚度为 2~5 mm 的圆环试样，采用 Agilent N5234A 型微波矢量网络分析

表 2 普通硅酸盐水泥 (P·O 42.5 R) 的化学成分 (wt%)  
Table 2 Chemical composition of ordinary portland cement (P·O 42.5 R) (wt%)

| CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Na <sub>2</sub> O | Other |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------|-------|
| 55.34 | 19.91            | 6.92                           | 5.91                           | 5.19 | 3.21            | 1.61             | 1.04                          | 0.12              | 0.75  |

表 3 NZFO/rGO-1:0.5 改性环氧树脂复合材料涂覆的水泥基试件的各组分质量 (单位：g)  
Table 3 Mass of each component of cement-based specimens coated with NZFO/rGO-1:0.5 modified epoxy resin composites (Unit: g)

| Sample | Cement | Water | Standard sand | Epoxy resin | NZFO/rGO-1:0.5 |
|--------|--------|-------|---------------|-------------|----------------|
| RP0    | 450    | 225   | 1 350         | 100         | 0              |
| RP1    | 450    | 225   | 1 350         | 100         | 1              |
| RP3    | 450    | 225   | 1 350         | 100         | 3              |
| RP5    | 450    | 225   | 1 350         | 100         | 5              |



仪(罗德 & 施瓦茨)进行电磁参数测试,测试频段为 2~18 GHz。为了评估 NZFO/rGO 复合材料的微波吸收性能,通过下式计算 RL 值<sup>[14-15]</sup>:

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

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

式中:  $Z_{\text{in}}$  为电磁吸波材料的输入阻抗;  $Z_0$  为自由空间的阻抗;  $\varepsilon_r$  为复介电常数;  $\mu_r$  为复磁导率;  $d$  为吸波材料的厚度;  $c$  表示光在真空中的速度;  $f$  为电磁波的频率;  $j$  为虚数单位。一般认为 RL 值的大小可以反映电磁吸波材料的吸收强度,RL 值越小,表示对电磁波的吸收能力越强。通常,将 RL 值小于 -10 dB (电磁波的损耗率为 90%) 的电磁波频段认定为电磁波的有效吸收,称为有效吸收带宽 (EAB)。

平板反射率试验: 平板反射率试验的水泥基试件尺寸为 180 mm×180 mm×30 mm。本实验采用弓形法,对应 GJB 2038A—2011《雷达吸波材料反射率测量方法》<sup>[16]</sup>。采用 Agilent N5234A 型矢量网络分析仪测试水泥基平板的反射率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NZFO/rGO 复合材料的微观结构

为了探究 NZFO 和 NZFO/rGO 复合材料的晶体结构,采用了 X 射线衍射仪对其进行了测试。NZFO 和 NZFO/rGO 复合材料的 XRD 谱图如图 1 所示。显然,在  $2\theta=18.2^\circ$ 、 $30.2^\circ$ 、 $35.7^\circ$ 、 $43.2^\circ$ 、 $57.7^\circ$ 、 $60.1^\circ$ 、 $62.5^\circ$  处分别代表了 NZFO 的 (111)、(220)、(311)、(400)、(422)、(511) 和 (440) 晶面,这与之前的报道是一致的<sup>[17]</sup>。并且,所有的 NZFO/rGO 复合材料均显示出 NZFO 的所有晶面,说明复合材料的成功制备并且无其他成分生成,另外复合材料未体现出 rGO 的峰,可以认为是 NZFO 的衍射峰强度较大,覆盖了 rGO 的峰,上述结果证明了本文成功制备了 NZFO 和 NZFO/rGO 复合材料。

为了进一步分析制备的 NZFO 和 NZFO/rGO 复合材料的微观形貌和结构,对其进行了 SEM 表征,结果如图 2 所示。由图 2(a) 和图 2(e) 可以看到, NZFO 呈现出球形的纳米颗粒,其表面相对光滑,尺寸约为数十至数百纳米;不同复合质量比下的 NZFO/rGO 复合材料呈现出相似的微观形

貌特征, NZFO 纳米粒子原位生长在 rGO 的片层上,并且随着 rGO 掺量的增加,纳米粒子在片层上的分布密度也逐渐稀疏(图 2(b)、2(d)),经 NZFO 纳米粒子修饰后的 rGO 片层表面显示为粗糙形态。当 rGO 的掺量较少时, NZFO/rGO-1:0.2 复合材料整体显示出较多的 NZFO 纳米粒子聚集在 rGO 片层表面,产生了一定的团聚现象(图 2(b)、图 2(f));随着 rGO 掺量的增加, NZFO 纳米粒子逐渐均匀分布于 rGO 片层上(图 2(c)、图 2(g));当 rGO 的掺量更多时,相同量的 NZFO 纳米粒子不能完全分布于 rGO 表面,会造成一定的阻抗失配,反而降低了电磁吸波性能。

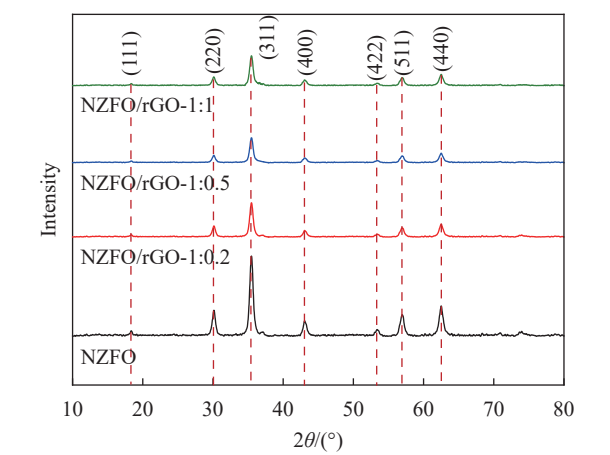


图1 镍锌铁氧体 ( $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) 和  $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /还原氧化石墨烯 (NZFO/rGO) 复合材料的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of nickel zinc ferrite ( $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) and  $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /reduced graphene oxide (NZFO/rGO) composites

### 2.2 NZFO/rGO 的电磁吸波性能

众所周知,一般通过测试材料的电磁参数来评估材料的电磁吸波性能,电磁参数包括复介电常数  $\varepsilon_r$  ( $\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$ ) 和复磁导率  $\mu_r$  ( $\mu_r = \mu' - j\mu''$ )。在上述方程中,实部 ( $\varepsilon'$  和  $\mu'$ ) 表示介质中电磁能量的存储能力,虚部 ( $\varepsilon''$  和  $\mu''$ ) 则表示相应的耗散能力。此外,介电损耗和磁损耗分别通过介电损耗正切 ( $\tan\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ ) 和磁损耗正切 ( $\tan\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$ ) 来计算。值得注意的是,  $\varepsilon_r$  和  $\mu_r$  之间的适当一致性强烈地影响着材料的电磁吸波性能<sup>[18-19]</sup>。

图 3 表示了复合材料在 2~18 GHz 频率范围内测得的电磁参数。如图 3(a) 所示,随着频率的增加,所有复合材料的  $\varepsilon'$  数值均呈现逐渐减小的趋势。并且,随着 rGO 掺量的增加, NZFO/rGO 复合材料的  $\varepsilon'$  值也逐渐增加, NZFO/rGO-1:1 的  $\varepsilon'$  值

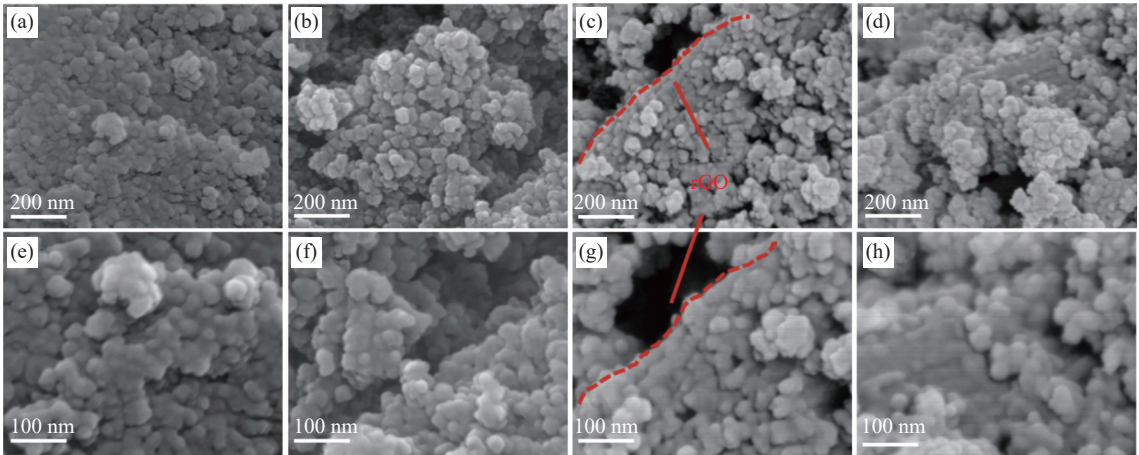


图2 NZFO ((a), (e))、NZFO/rGO-1:0.2 ((b), (f))、NZFO/rGO-1:0.5 ((c), (g)) 和 NZFO/rGO-1:1 ((d), (h)) 复合材料的 SEM 图像  
Fig. 2 SEM images of NZFO ((a), (e)), NZFO/rGO-1:0.2 ((b), (f)), NZFO/rGO-1:0.5 ((c), (g)) and NZFO/rGO-1:1 ((d), (h)) composites

最大，这是由于 rGO 为导电性材料，具有较高的介电常数。此外，所有 NZFO/rGO 复合材料的  $\epsilon''$  数值整体呈波动上升的趋势，存在多个振动峰(图 3(c))，这是由多次谐振频移和表面几何增强效应引起的，较纯 NZFO 相比，NZFO/rGO-1:0.5 的  $\epsilon''$  值显著提升，促进了吸波剂电磁吸波性能的提高，这是由于较大的介电常数虚部可以有效地改善吸波剂的介电损耗<sup>[20]</sup>。对于大多数介电材料来说，电导率对介电常数虚部的影响非常重要，因此提高电导率有利于增加介质损耗。同时，具有较大比表面积的纳米材料可以提供大量的活性界面原子，导致界面极化，从而显著提高介电损耗。此外，介电损耗正切的频率依赖性代表了储能与损耗之间的联系。一般来说， $\tan\delta_\epsilon$  值越高，吸收的能量越多。如图 3(e) 所示，在频率为 8~18 GHz 时，NZFO/rGO-1:0.5 复合材料的  $\tan\delta_\epsilon$  值高于其他复合材料，这是由于 NZFO 纳米粒子与 rGO 片层之间形成了多处异质界面，提供了更多的界面极化位点，促进了极化损失，从而获得了优异的电磁吸波性能。图 3(b)、3(d)、3(f) 显示了频率范围为 2~18 GHz 内的 NZFO、NZFO/rGO-1:0.2、NZFO/rGO-1:0.5 和 NZFO/rGO-1:1 复合材料的  $\mu'$  和  $\mu''$  值，显然随着高导电性 rGO 掺量增加，复合材料的磁导率显著降低，此外， $\mu'$  和  $\mu''$  值均出现了共振损失的波动峰，共振损失可能是由于量纲共振、域共振、自然共振以及随频率增加可能产生的交换共振引起的，为磁损耗作出了贡献。由于共振现象的存在， $\tan\delta_\mu$  也呈现出明显的波动峰值。结果表明，NZFO/rGO 复合材料是一种兼具介电损耗和磁损耗的双损耗电磁吸波材料。

根据测试所得的电磁参数，通常根据计算所得的 RL 值和 EAB 值来评估材料的电磁波吸收性能<sup>[21-23]</sup>。图 4 表示了 在 2~18 GHz 频率范围内，不同复合材料在不同厚度下的 RL 值及相应的三维 RL 图。纯 NZFO 纳米粒子由于阻抗失配几乎不具备吸收电磁波的性能，与 rGO 复合后，3 种 NZFO/rGO 复合材料的电磁吸波性能均优于纯 NZFO 纳米粒子，NZFO/rGO-1:0.2 复合材料在 2.08 mm 下的最小 RL 值为 -20.36 dB；随着 rGO 掺量的增加 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料显示出了最优的电磁吸波性能，在 11.24 GHz 时的最小 RL 值为 -60.72 dB，匹配厚度为 2.98 mm。这是由于 NZFO 纳米粒子和 rGO 之间具有良好的阻抗匹配，并且 rGO 的高比表面积为 NZFO 纳米粒子提供了较多的生长位点，产生了更多的异质界面，促进了界面极化损耗的增强。当 rGO 掺量过高时，NZFO/rGO-1:1 复合材料在 18 GHz 处的最小 RL 值为 -22.16 dB，匹配厚度为 1.54 mm，虽然 rGO 掺量的增加提升了介电性能降低了匹配厚度，但是过高的导电性反而会导致 NZFO/rGO 复合材料的磁-介电匹配失衡，造成电磁波吸收强度的降低，因此合理调控 NZFO 与 rGO 之间的复合比对改善吸波性能具有重要意义。

众所周知，rGO 呈现较大的二维片状结构，表面存在大量异质基团和载流子，加速了界面极化及偶极极化过程的产生，有效增强了复合材料的介电损耗能力。为了进一步分析复合材料的介电损耗特性，采用德拜弛豫模型对其进行分析<sup>[24]</sup>，
$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2}\right)^2 + (\epsilon'')^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}\right)^2 \tag{3}$$

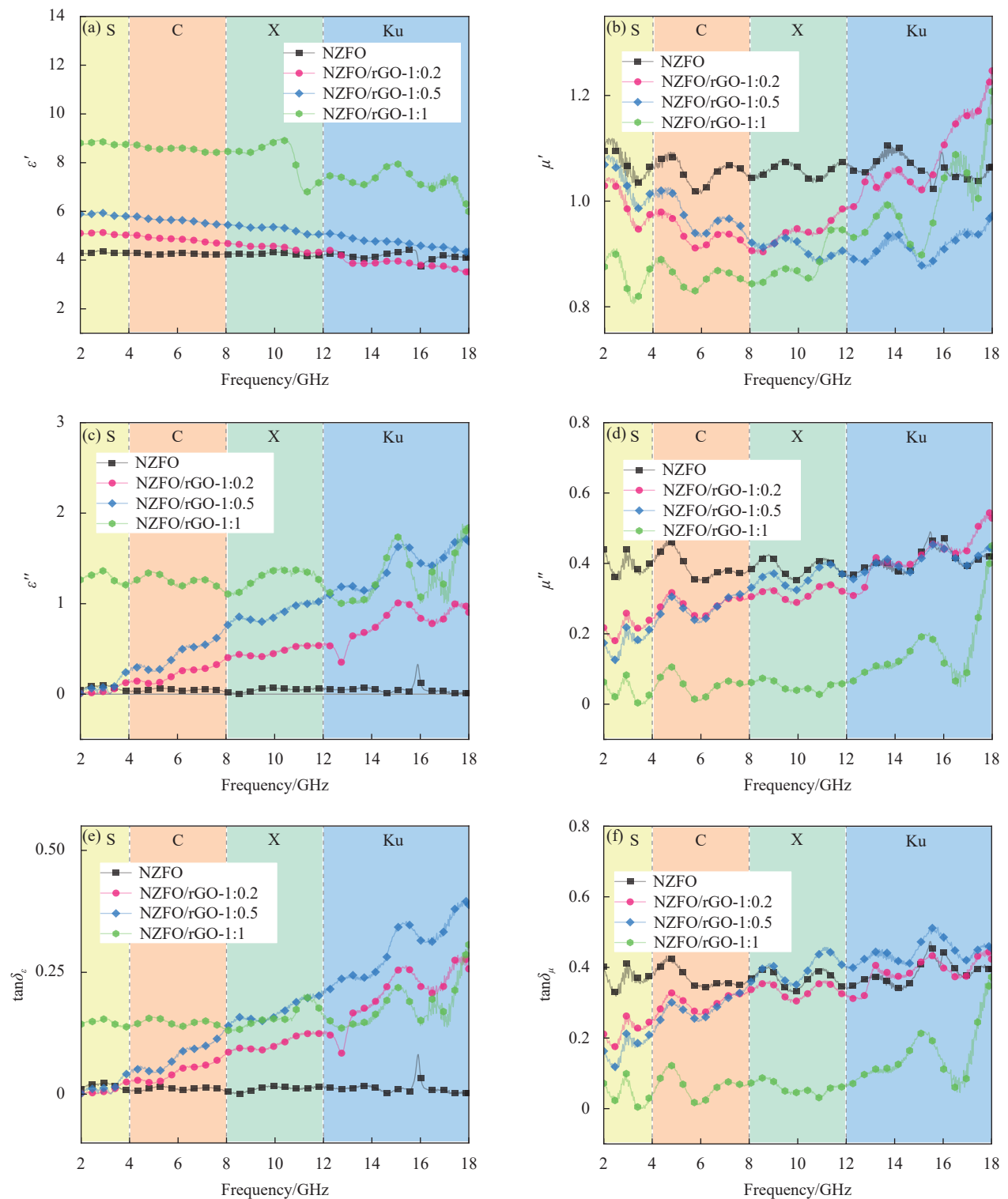


图3 复合材料的介电常数实部 $\epsilon'$  (a)、磁导率实部 $\mu'$  (b)、介电常数虚部 $\epsilon''$  (c)、磁导率虚部 $\mu''$  (d)、介电损耗正切 $\tan\delta_\epsilon$  (e)和磁损耗正切 $\tan\delta_\mu$  (f)

Fig. 3 Real part of complex permittivity  $\epsilon'$  (a), real part of complex permeability  $\mu'$  (b), imaginary part of complex permittivity  $\epsilon''$  (c), imaginary part of complex permeability  $\mu''$  (d), dielectric loss tangent  $\tan\delta_\epsilon$  (e) and magnetic loss tangent  $\tan\delta_\mu$  (f) of composites

式中： $\epsilon_\infty$ 为高频极限下的介电常数； $\epsilon_s$ 为静态介电常数。

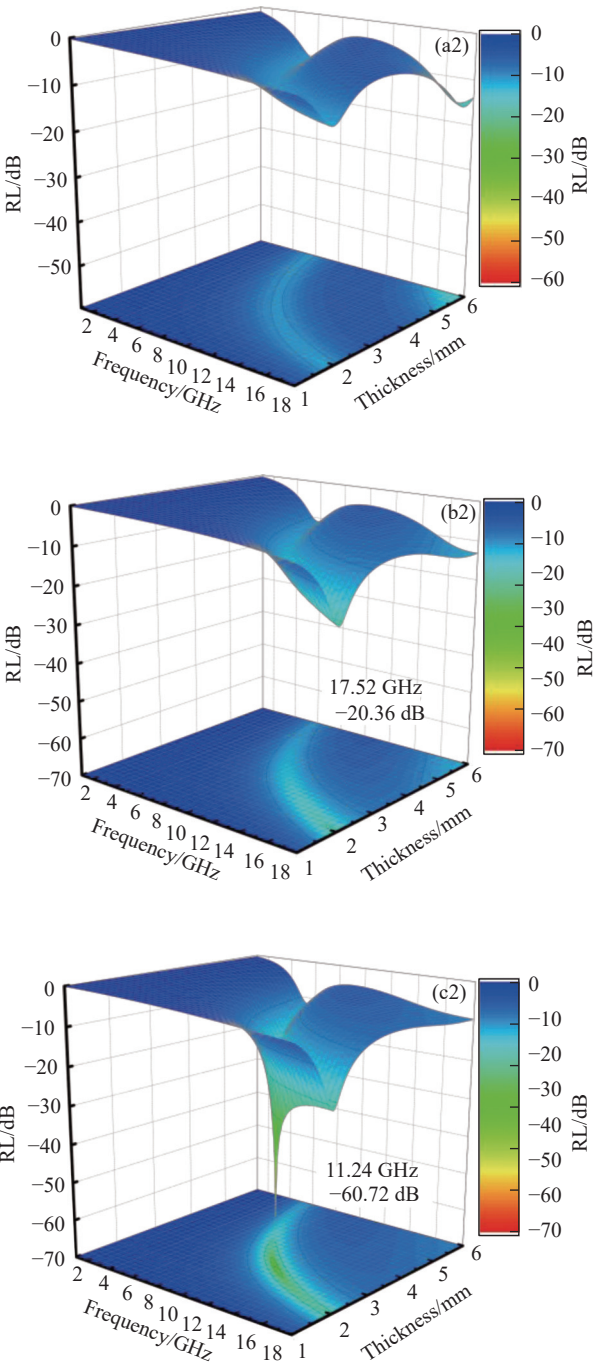
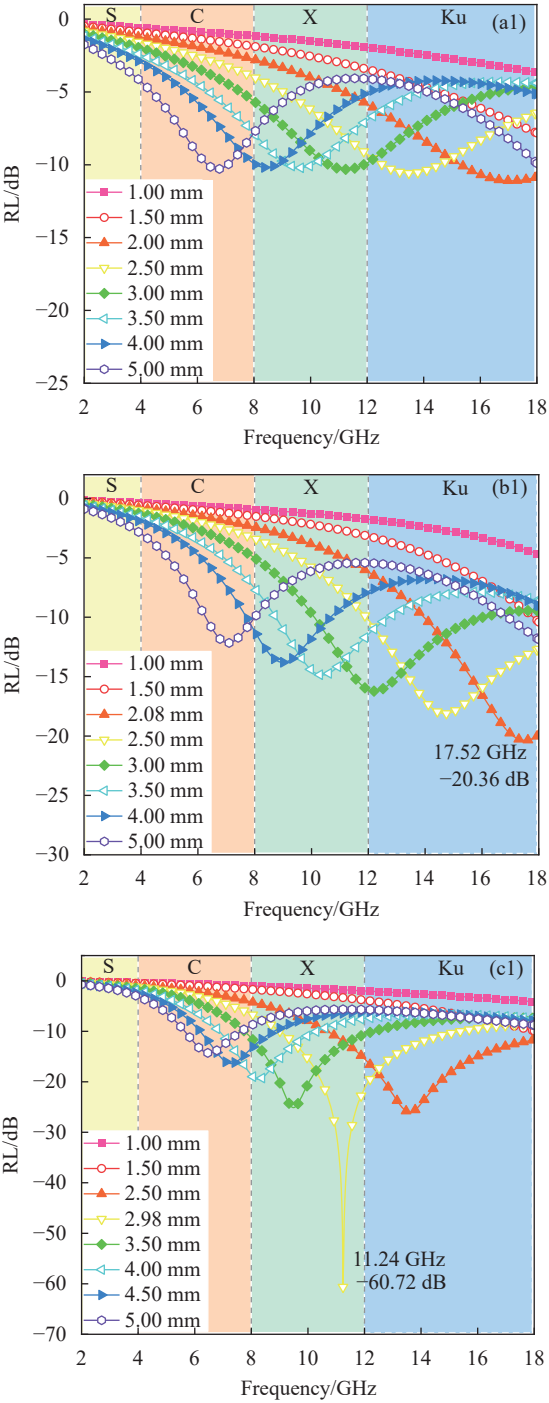
如图 5(a) 所示，NZFO 具有一个 Cole-Cole 半

圆，这意味着只有一个德拜弛豫过程。然而，在图 5(b)~5(d) 中，掺入 rGO 后，所有 NZFO/rGO 复合材料的半圆出现了一定程度的变形。可以认



为，除了极化弛豫外，还在其他极化机制，如界面极化和偶极极化等。显然，如图 5(c) 所示，与其他复合材料相比，NZFO/rGO-1:0.5 复合材料具有更多的半圆，这说明 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料具有更强烈的界面极化衰减能力，这是由于 NZFO 纳米粒子与 rGO 之间异质界面的增加促进了界面极化过程的产生，这有利于电磁吸波性能的提高。

为了进一步分析电磁波吸收性能增强机制，分析了 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料在 2~18 GHz 频率下的 RL 和阻抗匹配  $Z$  值的对应关系，如图 6(a) 所示。可以看出，在 11.24 GHz 时，在厚度为 2.98 mm 时 RL 达到最小值。同时，NZFO/rGO-1:0.5 复合材料的  $Z = |Z_{in}/Z_0|$  值接近 1<sup>[25]</sup>，表明具有铁磁性的 NZFO 纳米粒子和具有导电性能的 rGO 的磁-介电协同损耗促进了复合材料良好的阻抗匹



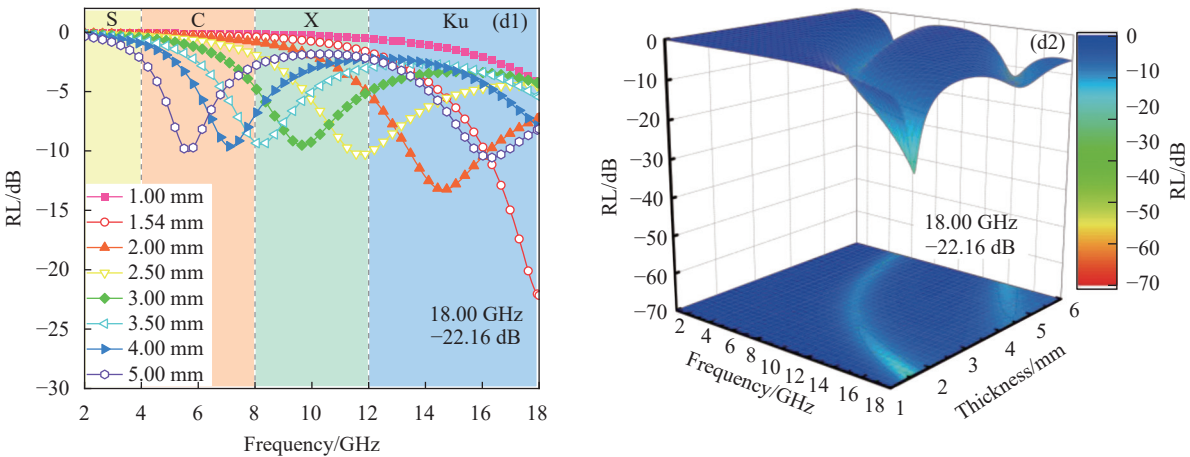


图4 NZFO (a)、NZFO/rGO-1:0.2 (b)、NZFO/rGO-1:0.5 (c) 和 NZFO/rGO-1:1 (d) 复合材料的反射损耗 (RL) 值和三维反射损耗 (RL) 图  
Fig. 4 Reflection loss (RL) values and 3D RL plots of NZFO (a), NZFO/rGO-1:0.2 (b), NZFO/rGO-1:0.5 (c) and NZFO/rGO-1:1 (d) composites

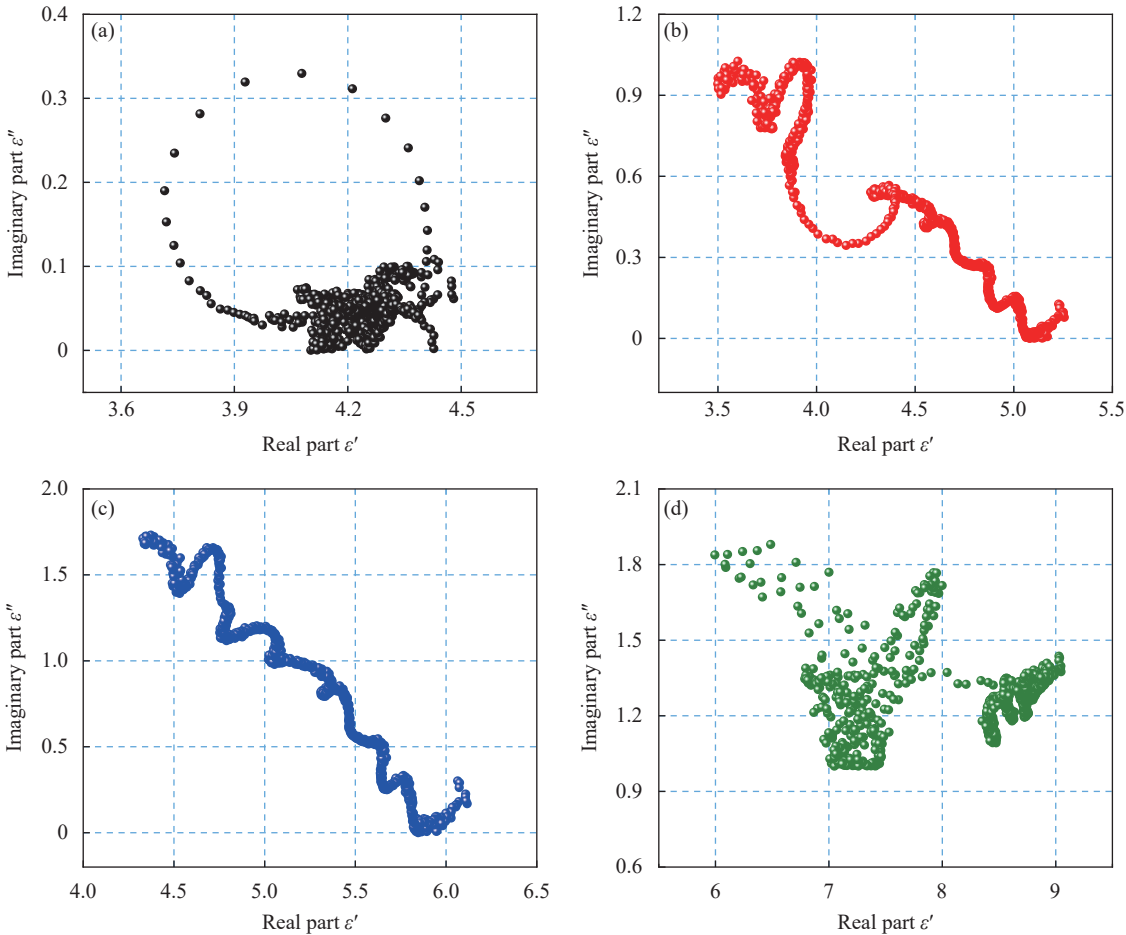


图5 NZFO (a)、NZFO/rGO-1:0.2 (b)、NZFO/rGO-1:0.5 (c) 和 NZFO/rGO-1:1 (d) 复合材料的 Cole-Cole 曲线  
Fig. 5 Cole-Cole curves of NZFO (a), NZFO/rGO-1:0.2 (b), NZFO/rGO-1:0.5 (c) and NZFO/rGO-1:1 (d) composites

配，有利于更多的电磁波进入到吸波材料内，加速了电磁波的耗散。

当电磁波入射到电磁吸波材料内部后，材料

会对电磁波进行有效的衰减，将电磁波转变为热能及其他形式的能量，从而来消散和吸收电磁波。通常可采用衰减常数 ( $\alpha$ ) 来表示电磁吸波材料对

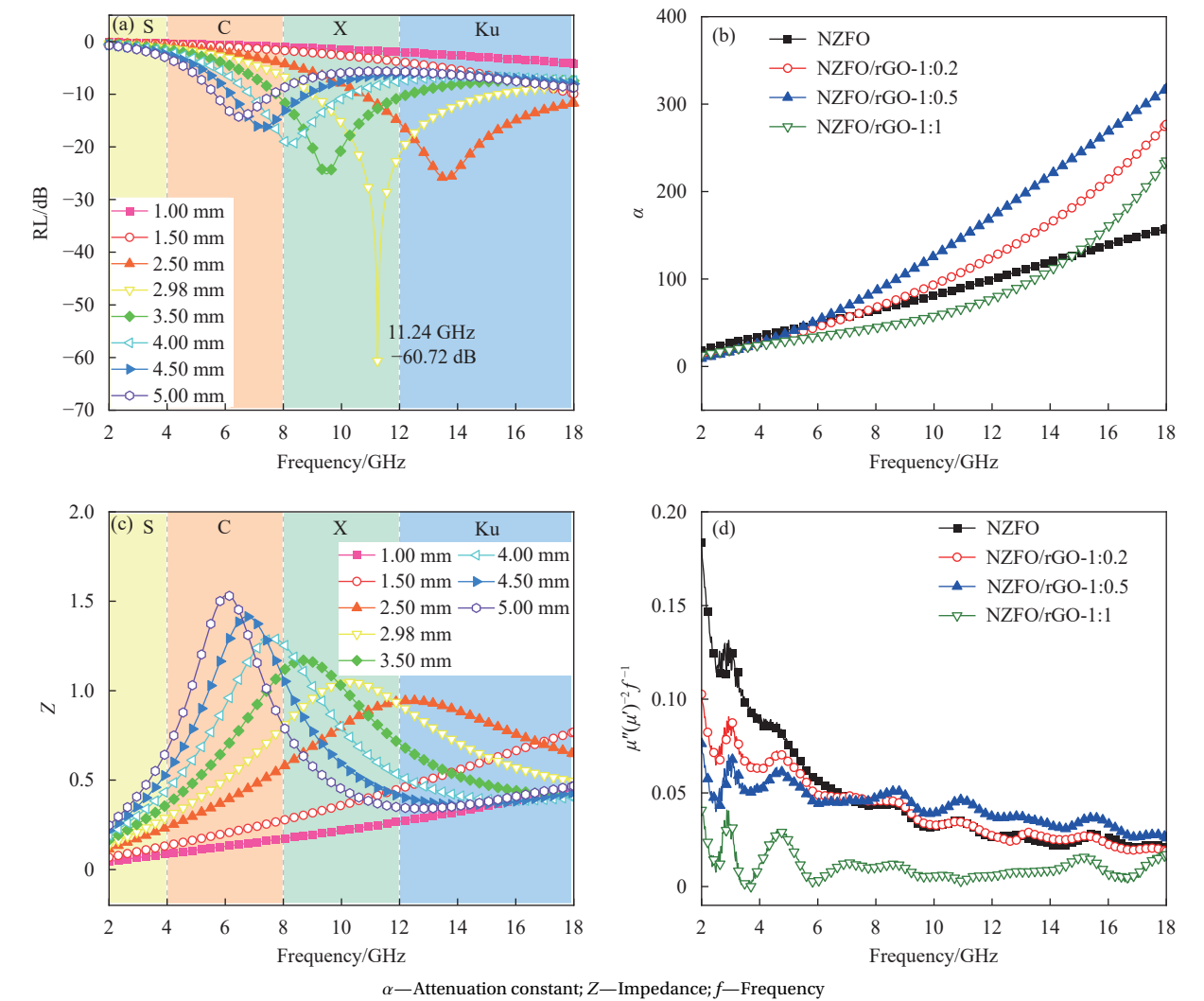


图 6 ((a), (c)) 不同厚度的 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料与 RL 值的频率依赖关系以及对应的阻抗匹配; NZFO/rGO 复合材料的衰减常数 (b) 和涡流系数 (d)

Fig. 6 ((a), (c)) Frequency dependence of RL values for the NZFO/rGO-1:0.5 composite with different thicknesses and the corresponding impedance matching; Attenuation constant (b) and the eddy current loss (d) of NZFO/rGO composites

电磁波的耗散能力<sup>[26-27]</sup>,

$$\alpha = \frac{\sqrt{2\pi f}}{c} \times \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu''\epsilon' + \mu'\epsilon'')^2}} \quad (4)$$

从图 6(b) 中可以发现, NZFO/rGO-1:0.5 复合材料的衰减常数从 0 增加到 320, 其较大的衰减常数是由于其  $\epsilon''$  和  $\mu''$  值较高。因此, 电磁参数值越大、衰减常数越大的 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料具有最佳的电磁波吸收性能。

磁损耗通常是由于共振损耗和涡流损耗共同产生的。涡流损耗存在于大部分的磁性材料中。通过计算涡流损耗系数  $C_0$  值的曲线可以反映涡流损耗的影响<sup>[28-29]</sup>:

$$C_0 = \mu''(\mu')^{-2} f^{-1} = \frac{2\pi\mu_0\sigma d^2}{3} \quad (5)$$

式中:  $\mu_0$  是真空中磁导率;  $\sigma$  是吸收体的电导率。

如果随着频率的增加,  $C_0$  的值保持不变, 说明涡流损耗为主要的磁损耗方式。在图 6(c) 中, 计算所得的涡流系数随频率的变化而变化, 这意味着 NZFO/rGO 复合材料可以通过自然共振 (1~4 GHz) 及涡流损耗 (4~18 GHz) 等不同的磁损耗来耗散电磁波。

基于以上讨论结果, NZFO/rGO 复合材料可能的电磁波吸收机制如图 7 所示。首先, 铁磁性 NZFO 纳米粒子与导电性 rGO 的组合有效地调节了吸波材料的阻抗匹配, 有利于更多的电磁波进入材料中从而被消散; 其次, NZFO 纳米粒子与

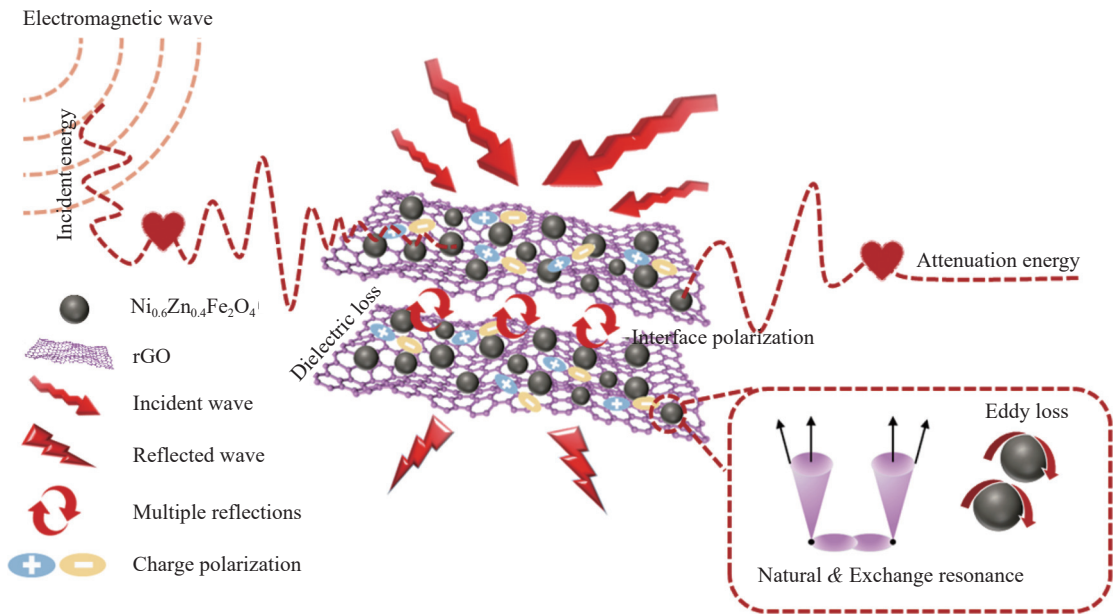


图 7 NZFO/rGO 复合材料可能的电磁波吸收机制

Fig. 7 Possible electromagnetic wave mechanisms for NZFO/rGO composites

rGO 片层之间存在大量的异质界面，从而产生更多的界面极化过程，导致电磁波能量由于偶极子的极化和位移而减小<sup>[17]</sup>；rGO 能够捕获自由载流子，从而促使异质结区域周围的空间电荷积累，有效地增强界面极化损耗，rGO 的高导电性也可以提高介电损耗；此外，铁磁性 NZFO 纳米粒子提供磁损耗。磁损耗-介电损耗的协同效应高效提高了材料的电磁吸波性能。

2.3 NZFO/rGO/环氧树脂涂层对水泥基平板反射率的影响

由于经济和科技的快速发展，各类电子产品

在人们生活中的应用越来越广泛，随之也造成了严重的电磁污染问题，水泥基材料广泛应用于人们生活的建筑中。因此，在水泥基材料上涂覆电磁波吸收涂层是解决建筑空间内电磁污染问题的有效途径。图 8 表示了在实测频率范围 2~18 GHz 内，涂覆有不同改性环氧树脂涂层的水泥基平板的反射率变化曲线和电磁波吸收带宽。通常将  $RL < -10 \text{ dB}$  的值作为吸波材料的有效反射损失值，但普通水泥基材料的电磁吸波性能较差，因此民用建筑使用的水泥基材料在  $RL < -5 \text{ dB}$  时的反射率具有实际应用价值。由图 8(a) 可以看出，所有

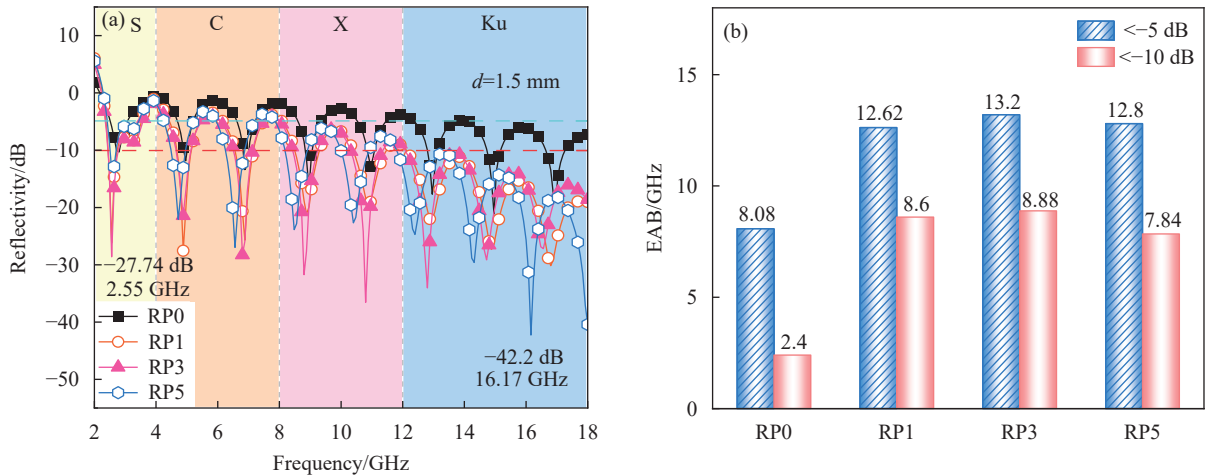


图 8 不同改性环氧树脂涂层的水泥基板的反射率 (a) 和有效吸收带宽 (b)

Fig. 8 Reflectivity (a) and effective absorption bandwidth (EAB) (b) of the cement-based with different modified epoxy resin coatings



试样在反射率曲线上都出现了多个吸收峰,这是由于当电磁波入射到水泥基体内部时,其上表面与下表面之间会产生多次反射与干涉,当水泥基材料厚度为  $1/4$  入射电磁波波长的基数倍时,从而出现多个干涉峰。涂覆有纯环氧树脂涂层的水泥基试件 RP0 的最小 RL 值为  $-22.1$  dB, EAB 值为  $2.4$  GHz, 反射损耗小于  $-5$  dB 的带宽为  $8.08$  GHz。显然 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料改性的吸波涂层显著提高了水泥基试件的电磁波吸收性能。其中,当掺量为  $5\text{wt}\%$  时, RP5 的最小 RL 值为  $-42.2$  dB, 比 RP0 的最小 RL 值降低了  $90.95\%$ 。当掺量为  $3\text{wt}\%$  时, RP3 的 EAB 值为  $8.88$  GHz, RL 值小于  $-5$  dB 时带宽可达  $13.2$  GHz。值得注意的是,在  $7.8\sim 18$  GHz 范围内,整个频段的 RL 值均小于  $-5$  dB。因此, NZFO/rGO-1:0.5 复合材料在掺量为  $3\text{wt}\%$  和  $5\text{wt}\%$  时,涂覆有改性环氧树脂吸波涂层的水泥基试样均具有良好的电磁波吸收性能,在军事和民用领域具有良好的应用前景。

### 3 结论

(1) 采用原位生长法制备了镍锌铁氧体 ( $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )/还原氧化石墨烯 (NZFO/rGO) 复合材料, NZFO 纳米粒子均匀生长在 rGO 片层表面,制备方法简单,快速。

(2) 随着 rGO 掺量的增加, NZFO/rGO 复合材料的吸波性能先增强后减弱。当 NZFO 与 rGO 的质量比为  $1:0.5$  时,复合材料具有最佳电磁吸波性能,最小反射损耗值为  $-60.72$  dB, 匹配厚度为  $2.98$  mm。

(3) NZFO/rGO 复合材料的电磁损耗机制主要包括良好的磁-介电协同作用、界面极化损耗、偶极极化损耗、导电损耗、涡流损耗等多重损耗机制,共同作用实现了复合材料优异的电磁吸波性能。

(4) 利用最佳吸波性能的 NZFO/rGO-1:0.5 复合材料制备了水泥基吸波涂层,当掺量为  $5\text{wt}\%$  时,涂覆有吸波涂层的水泥基试件具有最小反射损耗值  $-42.2$  dB, 比未改性吸波涂层的最小反射损耗值降低了  $90.95\%$ , 改性吸波涂层有效地增强了水泥基体的电磁吸波性能。

### 参考文献:

- [1] GAO Y, PAN L N, WU Q, et al. Honeycomb-like  $\text{SnS}_2$ /graphene oxide composites for enhanced microwave absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 915: 165405.
- [2] WANG Z, ZHAO H R, DAI D, et al. Ultralight, tunable monolithic SiC aerogel for electromagnetic absorption with broad absorption band[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(18): 26416-26424.
- [3] 谢文瀚, 耿浩然, 柳扬, 等.  $\text{MoS}_2$ /生物质碳复合材料的制备与吸波性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 2238-2248.  
XIE Wenhan, GENG Haoran, LIU Yang, et al. Preparation and microwave absorbing properties of  $\text{MoS}_2$ /biomass carbon composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 2238-2248(in Chinese).
- [4] YANG E Q, QI X S, CAI H B, et al. Composition optimization of  $\text{Co}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ /reduced graphene oxide nanohybrids as excellent electromagnetic wave absorption abilities[J]. *Materials Science Engineering B*, 2018, 238-239: 7-17.
- [5] ZHAO X, HUANG Y, LIU X, et al. Core-shell  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ @C nanoparticles coupled with rGO for strong wideband microwave absorption[J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2022, 607: 192-202.
- [6] 胡正浪, 吴海华, 杨增辉, 等. 石墨烯-铁镍合金-聚乳酸复合材料的制备及其吸波性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3303-3316.  
HU Zhenglang, WU Haihua, YANG Zenghui, et al. Preparation of graphene-iron-nickel alloy-poly(lactic acid) composites and their microwave absorption properties[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3303-3316(in Chinese).
- [7] DING J, CHENG L G, ZHAO W X. Self-assembly magnetic FeCo nanostructures on oxide graphene for enhanced microwave absorption[J]. *Journal of Electron Materials*, 2022, 51(6): 2856-2866.
- [8] HOU M M, DU Z J, LIU Y, et al. Reduced graphene oxide loaded with magnetic nanoparticles for tunable low frequency microwave absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 913: 165137.
- [9] HU F F, NAN H, WANG M Q, et al. Construction of core-shell  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ @ $\text{MnO}_2$  composite for effectively enhancing microwave absorption performance[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(12): 16579-16587.
- [10] GUO W M, ZHU H T, REN Q F, et al.  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ /ZnO/diatomite composites with electromagnetic wave absorption and antibacterial bifunctions[J]. *Solid State Sciences*, 2023, 138: 107152.
- [11] SALEEM A, ZHANG Y J, GONG H Y, et al. Electromagnetic wave absorption performance of Ni doped Cu-ferrite nanocrystals[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(1): 016117.
- [12] International Organization for Standardization. Methods of testing cements—Determination of strength: ISO 679—1989[S]. Geneva: International Organization for

- Standardization, 1989.
- [13] LIU C C, LIU S N, FENG X F, et al. Phthalocyanine-mediated interfacial self-assembly of magnetic graphene nanocomposites toward low-frequency electromagnetic wave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139483.
- [14] FU X Y, ZHENG Q, LI L, et al. Vertically implanting  $\text{MoSe}_2$  nanosheets on the RGO sheets towards excellent multi-band microwave absorption[J]. *Carbon*, 2022, 197: 324-333.
- [15] MA L L, DOU Z F, LI D G, et al. Facile synthesis of nitrogen-doped porous  $\text{Ni@C}$  nanocomposites with excellent synergistically enhanced microwave absorption and thermal conductive performances[J]. *Carbon*, 2023, 201: 587-598.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB 2038A—2011[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2011. Standardization Administration of the People's Republic of China. The measurement methods for reflectivity of radar absorbing material: GJB 2038A—2011[S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of Military Standards, General Armament Department, 2011(in Chinese).
- [17] GUO S Y, GUAN H L, LI Y, et al. Dual-loss  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/ $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  heterogeneous nanocomposites for highly efficient electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 887: 161298.
- [18] YANG N, LUO Z X, WU G, et al. Superhydrophobic hierarchical hollow carbon microspheres for microwave-absorbing and self-cleaning two-in-one applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140132.
- [19] MENG X, HE L, LIU Y Q, et al. Carbon-coated defect-rich  $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{MnO}$  heterojunction for high-performance microwave absorption[J]. *Carbon*, 2022, 194: 207-219.
- [20] YANG K, CUI Y, WAN L, et al. Preparation of three-dimensional  $\text{Mo}_2\text{C}/\text{NC@MXene}$  and its efficient electromagnetic absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(5): 7109-7120.
- [21] LI S S, MO W J, LIU Y, et al. Constructing 3D tent-like frameworks in melamine hybrid foam for superior microwave absorption and thermal insulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140133.
- [22] YANG Z Q, DUAN L Q, CHANG G, et al. Molten salt guided synthesis of carbon microfiber/ $\text{FeS}$  dielectric/magnetic composite for microwave absorption application[J]. *Carbon*, 2023, 202: 225-234.
- [23] 黄才华, 黄陈, 吴海华, 等. 熔融沉积成型  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MWCNTs/PLA 微波吸收材料性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1954-1967.
- HUANG Caihua, HUANG Chen, WU Haihua, et al. Properties of microwave absorbers formed by fused deposition modeling with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MWCNTs/PLA composite wire[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(4): 1954-1967(in Chinese).
- [24] YANG D, TAO J R, YANG Y, et al. Robust microwave absorption in silver-cobalt hollow microspheres with heterointerfaces and electric-magnetic synergism: Towards achieving lightweight and absorption-type microwave shielding composites[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 138: 245-255.
- [25] CHANG M, LI Q Y, JIA Z R, et al. Tuning microwave absorption properties of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene-based materials: Component optimization and structure modulation[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 148: 150-170.
- [26] CAI Y F, CHENG Y, WANG Z H, et al. Facile and scalable preparation of ultralight cobalt@graphene aerogel microspheres with strong and wide bandwidth microwave-absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457: 141102.
- [27] LI X, WANG G H, LI Q, et al. Dual optimized  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/ $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  heterostructure based on interface and vacancy engineering for improving electromagnetic absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139488.
- [28] XIANG Z, HUANG C, SONG Y M, et al. Rational construction of hierarchical accordion-like  $\text{Ni@porous carbon}$  nanocomposites derived from metal-organic frameworks with enhanced microwave absorption[J]. *Carbon*, 2020, 167: 364-377.
- [29] HOU T, JIA Z, HE S, et al. Design and synthesis of  $\text{NiCo}/\text{Co}_4\text{S}_3/\text{C}$  hybrid material with tunable and efficient electromagnetic absorption[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 583: 321-330.