

羰基铁粒径和填充含量对电磁波吸收性能的影响及其研究

白伟伟, 张存瑞*, 周必成, 李克训, 张小刚, 王胜利, 米玉洁

中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

收稿日期: 2026年8月28日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月28日

摘要

本文以球型羰基铁为磁性吸收剂, 硅橡胶为基体, 选择粒径尺寸和填充含量为变量, 测试2 GHz~18 GHz电磁参数数据, 计算1.5 mm厚度下的电磁波衰减系数和反射率, 旨在系统探索粒径和填充含量对吸波性能的调控机制。结果表明, 羰基铁粒径的减小使比表面积增大, 复介电常数影响明显, 改善了阻抗匹配, 反射率吸收强度增强, $D_{50} \leq 3 \mu\text{m}$ 粒径时吸波材料反射率在4.24 GHz处反射率峰值为-18.5 dB; 相同粒径羰基铁填充含量越高, 复介电常数和复磁导率提升明显, 电磁波衰减系数显著增大, 89%含量在18 GHz处衰减系数达135.7 dB/cm, 但介电常数的激增导致吸波材料表面阻抗失配, 电磁波吸收峰向低频移动, 且反射率峰值由80%含量时的-35.3 dB升高至-16.8 dB, 有效吸收带宽变窄。本研究探究了“粒径/填充含量 - 电磁参数 - 吸波性能”的关联关系, 为吸波材料调控设计提供研究基础。

关键词

羰基铁, 粒径, 填充含量, 电磁波衰减系数, 反射率

Study on the Influence of Carbonyl Iron Particle Size and Filling Content on Electromagnetic Wave Absorption Performance

Weiwei Bai, Cunrui Zhang*, Bicheng Zhou, Kexun Li, Xiaogang Zhang, Shengli Wang, Yujie Mi

The 33rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: August 28, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 白伟伟, 张存瑞, 周必成, 李克训, 张小刚, 王胜利, 米玉洁. 羰基铁粒径和填充含量对电磁波吸收性能的影响及其研究[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(4): 413-423. DOI: 10.12677/amc.2026.144038

Abstract

Spherical carbonyl iron was adopted as the magnetic absorber and silicone rubber as the matrix in this work. Particle size and filling content were set as variable factors. Electromagnetic parameters within the frequency range of 2 GHz~18 GHz were measured, and the electromagnetic wave attenuation coefficient and reflection loss under a thickness of 1.5 mm were calculated to systematically investigate the regulation mechanism of particle size and filling content on wave absorption performance. The results reveal that reducing the particle size of carbonyl iron increases its specific surface area, imposes a prominent effect on complex permittivity, optimizes impedance matching, and strengthens the absorption intensity of reflection loss. For carbonyl iron with $D_{50} \leq 3 \mu\text{m}$, the minimum reflection loss of the wave-absorbing material reaches -18.5 dB at 4.24 GHz . For carbonyl iron of identical particle size, higher filling content directly raises the complex permittivity and complex permeability, which drastically increases the electromagnetic wave attenuation coefficient; the attenuation coefficient reaches 135.7 dB/cm at 18 GHz at a filling content of 89% . Nevertheless, the sharp rise in permittivity causes impedance mismatch on the surface of wave-absorbing materials. The electromagnetic wave absorption peak shifts toward low frequencies, the minimum reflection loss rises from -35.3 dB (80% filling content) to -16.8 dB , and the effective absorption bandwidth narrows accordingly. This study explores the correlation of “particle size/filling content-electromagnetic parameters-wave absorption performance”, providing theoretical and experimental foundations for the regulation and design of wave-absorbing materials.

Keywords

Carbonyl Iron, Particle Size, Filling Content, Electromagnetic Wave Attenuation Coefficient, Reflection Loss

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着 5G 通信技术的规模化和电子设备的发展普及,空间电磁环境日益复杂,电磁辐射不仅干扰精密仪器的正常运行,还可能对人体健康构成潜在威胁[1]。与此同时,国防军事领域雷达探测技术的持续升级和雷达波频段的扩展,对装备用隐身吸波材料提出了更高的要求[2]-[4]。吸波材料经过近年来的发展已经形成了一套较为成熟的理论及应用体系,在干扰信号吸收、雷达天线探测、电磁污染防控等领域得到了广泛的应用,但同时也暴露出密度大、吸收强度差、吸收频带窄等缺陷[5]。在此背景下,吸波材料的综合发展趋势为“薄、轻、宽、强”[6][7]。在众多吸波材料体系中,铁基吸收剂因其资源丰富、成本较低且兼具磁损耗与介电损耗能力而备受关注。其中,羰基铁粉(Carbonyl Iron Powder, CIP)作为典型的磁损耗型吸收剂,是通过五羰基铁($\text{Fe}(\text{CO})_5$)热分解制备的微米级磁性金属粉末。相较于铁氧体等传统吸波材料,羰基铁具有更高的饱和磁化强度和磁导率,能够在微波频段通过磁滞损耗、涡流损耗和自然共振等机制高效衰减电磁波能量[8]-[10]。

吸波材料核心作用在于通过阻抗匹配使入射电磁波高效进入材料内部,并借助电磁吸收剂损耗机制将电磁能转化为热能或其他形式能量耗散,其性能优劣直接取决于吸收剂的本征物性、微观形貌、粒径分布以及在基体中的填充含量等关键因素。针对微观形貌和粒径这一调控维度,国内外学者已开展相关

研究工作。王轩[11]等系统综述了羰基铁吸收剂的形貌与尺寸效应,指出球形羰基铁的粒径调控可实现电磁参数的连续调节,而片状化与粒径级配能够进一步优化阻抗匹配,提升宽频吸收能力。Sista [12]等通过对比不同粒径羰基铁的吸波性能发现,微米级颗粒在低频段(2 GHz~8 GHz)表现出优异损耗特性,纳米级颗粒则在 8~18 GHz 高频段具备更优吸收效果,粒径级配设计可实现全频段吸收性能提升。除粒径因素外,羰基铁在基体中的填充含量是调控复合材料电磁性能与力学性能的另一核心变量。董立超[13]等研究表明,羰基铁体积分数为 20%时,涂层综合吸波性能最优,厚度 2 mm 条件下反射损耗小于-10 dB 的有效带宽达 4.2 GHz,在 8.5 GHz 处最小反射损耗可达-42.5 dB。汪旭文[14]等在导热吸波复合材料研究中发现,羰基铁含量变化不仅影响电磁性能,还会改变填料堆积状态与界面导热路径,实现吸波与导热性能的协同调控。Jiang [15]等通过溶胶-凝胶法制备羰基铁复合涂层,证实过量填充会导致颗粒团聚,引发介电损耗过剩与磁损耗不足,破坏损耗平衡,而适量填充可实现介电常数与磁导率的良好匹配,获得宽频强吸收效果。但相关研究工作都是以性能突破为目的,没有从工程应用角度系统阐明工业微米级层面羰基铁颗粒吸收剂对羰基铁/硅胶吸波材料体系的调控规律[16]-[20]。羰基铁颗粒的粒径尺度与填充含量直接调控吸波材料的电磁参数、界面极化、涡流效应与阻抗匹配特性,进而决定吸波强度、有效吸收带宽与吸收峰位置,揭示粒径与含量的调控作用机制,对定向设计高性能羰基铁吸波材料具有重要理论价值与工程意义。

本文以微米级球型羰基铁为研究对象,系统研究不同粒径尺度的羰基铁颗粒和同粒径不同填充含量的吸波材料对吸波性能的影响规律,测试其复介电常数、复磁导率计算电磁波衰减系数和反射率等关键吸波性能,深入分析粒径对涡流损耗、界面极化的调控规律,揭示填充含量对阻抗匹配、损耗强度的影响机制,意在构建多因素关联的吸波性能预测模型,为高性能宽频强吸收吸波材料的设计、制备与工程应用提供理论依据与实验支撑,同时为其他磁性吸波材料的性能优化提供参考思路。

2. 研究内容

2.1. 实验过程

实验 1: 采用四种不同粒径范围的球型羰基铁作为电磁吸收剂实验材料,粒径尺寸如表 1 所示,依据粒径从大到小依次编号为 I 型、II 型、III 型和 IV 型,羰基铁吸收剂含量均为 89%进行实验。实验 2: 采用 II 型羰基铁研究填充含量变化对吸波材料的性能影响,填充含量分别为吸波材料质量分数 80%、83%、86%、89%。基体材料采用硅橡胶。球型羰基铁典型微观形貌如图 1 所示。

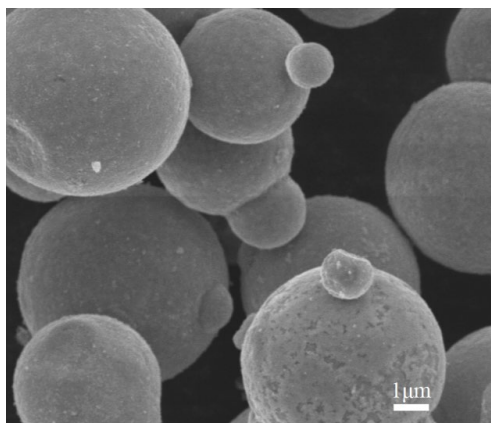


Figure 1. Typical morphology of spherical carbonyl iron particles
图 1. 球型羰基铁典型形貌图

Table 1. Particle size and model types of carbonyl iron absorbers
表 1. 羰基铁吸收剂粒径和型号

羰基铁类型	型号编号	粒径 D50/ μm
球型	I 型	≤ 10
	II 型	≤ 7
	III 型	≤ 5
	IV 型	≤ 3

2.2. 数据计算

通过电磁参数测量得到的电磁参数数据，并通过下属公式进行电磁波衰减系数和反射率的计算。

1) 电磁波衰减系数计算公式：

电磁波衰减系数 A ，

$$A = |-0.2\alpha \lg e| \quad (1)$$

式中：

A ——电磁波衰减系数，单位为分贝每厘米(dB/cm)；

α ——电磁波电场衰减系数，单位为每米(m^{-1})；

e ——自然常数。

其中 α 的计算公式为：

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

式中：

f ——电磁波频率，单位为赫兹(Hz)；

c ——空气中的光速，单位为米每秒(m/s)；

ε' 、 ε'' ——吸波材料介电常数的实部和虚部；

μ' 、 μ'' ——吸波材料磁导率的实部和虚部。

2) 反射率计算公式

反射率 RL ，

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (3)$$

$$z_{in} = Z_{in}/Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (4)$$

式中：

RL ——反射率，单位为 dB；

z_{in} ——单层吸波材料归一化输入阻抗；

Z_{in} ——单层吸波材料输入阻抗，单位为 Ω ；

Z_0 ——自由空间本征阻抗，单位为 Ω 。

其中：

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (5)$$

$$Z_0 = \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (8)$$

式中：
 μ_r 、 ε_r ——吸波材料复相对磁导率、复相对介电常数；
 μ_0 ——真空磁导率，常数，为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m；
 ε_0 ——真空介电常数，常数，为 8.854×10^{-12} F/m；
 t ——吸波材料厚度，单位为 m。

3. 粒径变化对吸波性能的影响

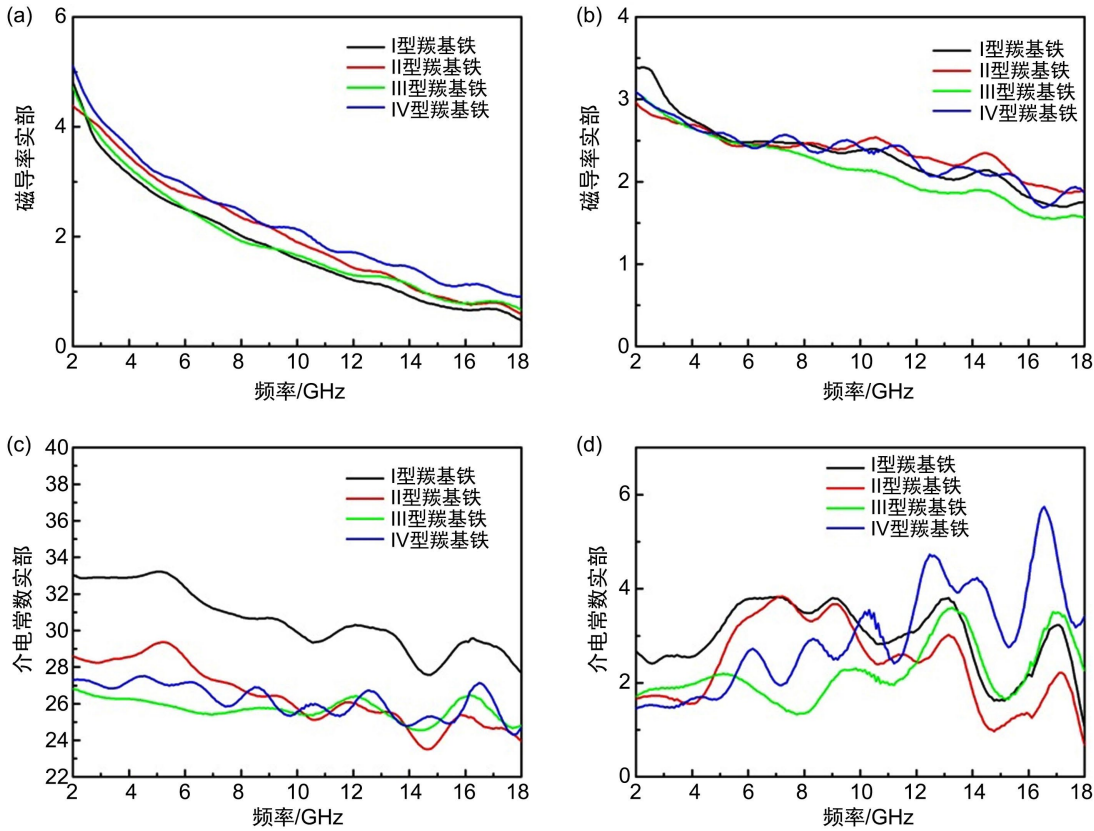


Figure 2. Curves of eletromagnetic parameters varying with particle size: (a) Real part of permeability; (b) Imaginary part of permeability; (c) Real part of permittivity; (d) Imaginary part of permittivity

图 2. 电磁参数随粒径变化曲线：(a) 磁导率实部；(b) 磁导率虚部；(c) 介电常数实部；(d) 介电常数虚部

四种粒径的碳基铁吸收剂在相同质量分数(89%填充含量)下的电磁参数数据如图 2 所示，图中分别为磁导率实部(a)、虚部(b)和介电常数实部(c)、虚部(d)随频率(2 GHz~18 GHz)的变化趋势。由图 2(a)和图 2(b)可知，随着型号 I 到 IV 吸收剂粒径的减小，吸波材料的磁导率实部 μ' 和虚部 μ'' 都随频率的增加而降低，

2 GHz~18 GHz 频率范围内磁导率实部 μ' 数值在 0~5 之间, 虚部 μ'' 数值在 1.5~3.5, 且各频点随粒径变化磁导率实部稍有变化, 大部分频段内规律为粒径越小磁导率实部 μ' 越大, 磁导率虚部 μ'' 无明显变化规律, 由此表明吸收剂粒径越小越易发生磁畴, 而磁滞回归损耗变化不大, 故粒径的减小对吸波性能稍有一定的增强效果。而随着吸收剂粒径的减小, 从图 2(c) 和图 2(d) 可知, 四种粒径的吸波材料介电常数实部 ϵ' 有着明显变化。I 型羰基铁介电常数实部 ϵ' 各频点数值远高于其余三型羰基铁, 且在 2.0 GHz~8.2 GHz 频段范围内, II 型羰基铁比 III 型和 IV 型羰基铁介电常数实部高, 而 IV 型羰基铁介电常数实部比 III 型稍高, 8.2 GHz~18.0 GHz 频段范围内介电常数实部 ϵ' 变化不明显, 说明大粒径在一定范围范围内有利于吸收剂的电场极化能力, 有利于吸收剂储存电场能力的提升。介电常数虚部 ϵ'' 在低频时, 变化趋势与实部相似, 但在 12 GHz~18 GHz 时, IV 型羰基铁介电常数虚部比其他三类高, 说明高频下粒径减小使得羰基铁极化滞后的介电损耗能力提升。

图 3 和图 4 分别为电磁参数仿真计算得到的电磁波衰减系数和反射率与频率、粒径变化关系曲线图, 反射率为吸波材料厚度 1.5 mm 的计算结果。由图 3 可知, 2 GHz~18 GHz 电磁波衰减系数随着频率的增加而增大, 相同频点下, 衰减系数随着吸收剂粒径减小先降后升, 变化趋势与介电常数变化规律相似。III 型羰基铁粒径在 18 GHz 时电磁波衰减系数最小, 与衰减系数最大的 I 型之间同频率差值不超过 19.2 dB/cm。由图 4 可知, 四种粒径的吸收剂反射率变化趋势基本相同, 反射率峰值处于 S、C 波段, 变化范围在 3.91~4.24 GHz 之间。随着吸收剂粒径的减小, 反射率吸收峰位置总体趋势为向右移动, 吸收峰值向下移动, 即粒径减小电磁波吸收强度增大, 反射率 ≤ -10 dB 的有效频段随粒径减小而加宽。此时, I 型吸收剂时反射率峰值在 3.91 GHz 最小, 为 -13.2 dB, IV 型吸收剂在 4.24 GHz 时峰值为 -18.5 dB。由此可知, 随着频率的增大, 电磁波波长变短, 磁滞损耗变化不大的条件下, 电磁波衰减系数的影响主要来自于介电常数差距, 粒径的减小使羰基铁涡流损耗受抑制, 但颗粒细度下降至一定程度后, 比表面积剧增, 即羰基铁极化滞后效应加剧, 介电损耗持续增加, 介电损耗的增量超过涡流损耗的损失, 呈现与低频时介电常数相似的变化规律; 同时粒径的减小改善了吸波材料与自由空间的阻抗匹配, 使电磁波更多地进入吸波材料内被损耗, 而非表面反射, 从而吸收增强, 如图 5 所示, 归一化输入阻抗随粒径变化曲线证明 IV 型羰基铁吸波材料峰值更接近 1。

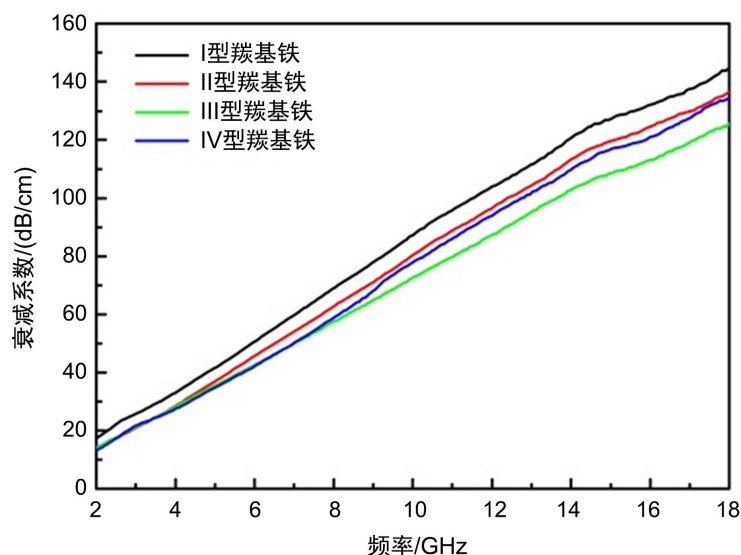


Figure 3. Curves of electromagnetic wave attenuation coefficient versus particle size
图 3. 电磁波衰减系数随粒径变化曲线

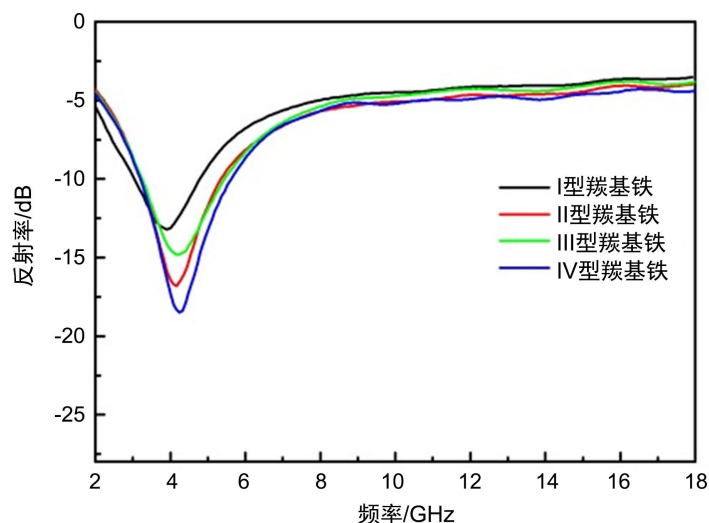


Figure 4. Curves of reflection loss versus particle size

图 4. 反射率随粒径变化曲线

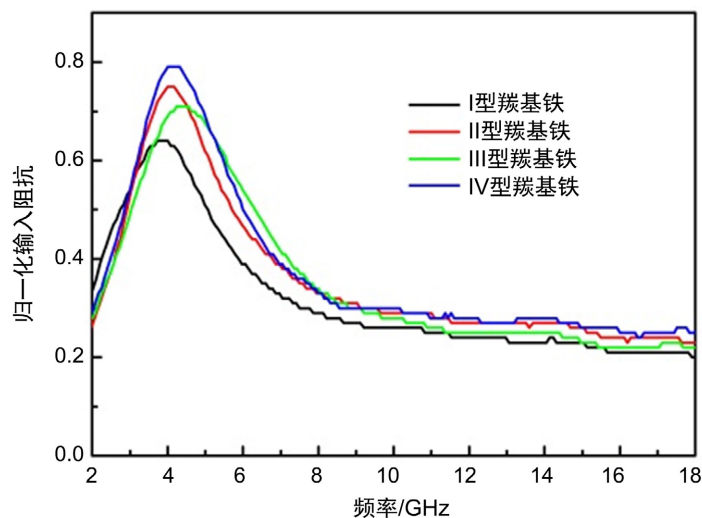


Figure 5. Curves of normalized input impedance versus particle size

图 5. 归一化输入阻抗随粒径变化曲线

4. 含量变化对吸波性能的影响

选用 II 型羰基铁吸收剂探究填充含量对吸波性能的影响规律, 填充含量分别为质量分数 80%、83%、86%和 89%, 梯度差 3%。随羰基铁填充含量变化的电磁参数数据结果如图 6 所示, 经计算后得到的电磁波衰减系数和反射率结果分别如图 7 和图 8 所示。

从图 6(a)可知, 在 2 GHz~18 GHz 频段范围内磁导率实部 μ' 呈单调递减趋势, 羰基铁填充含量越高, 随频率下降幅度越大。低频时高含量磁导率实部 μ' 比低含量高, 随着频率的增大高含量磁导率实部 μ' 的下降幅度要比低含量更大。图 6(b)中磁导率虚部 μ'' 随着羰基铁填充含量的增加, 高填充含量试样在低频出现明显的损耗峰, 但随着频率的增大损耗缓慢平缓回落。因此, 羰基铁填充含量的提升可有效增强磁场损耗能力, 但在高频时涡流损耗加剧, 羰基铁不同填充含量的吸波材料之间的磁损耗差异被逐步缩小。

图 6(c), 吸波材料的介电常数实部和羰基铁填充含量呈正向相关, 吸波材料羰基铁含量越高介电常数实

部越高, 在 2 GHz~18 GHz 频段范围内波动幅度不大, 但随着含量的变化, 实部 ϵ' 之间差距较大, 80% 和 83% 含量时介电常数实部 ϵ' 主要分布在 10~15 范围内, 86% 和 89% 含量时介电常数实部 ϵ' 则分布在 21~30 范围内。图 6(d) 可知介电常数虚部 ϵ'' 在低频时变化规律与磁导率虚部相似, 但随着向高频移动, 填充含量变化引起的介电常数虚部 ϵ'' 差异逐渐减小, 甚至可能在更高频段呈现与低频相反的变化规律。

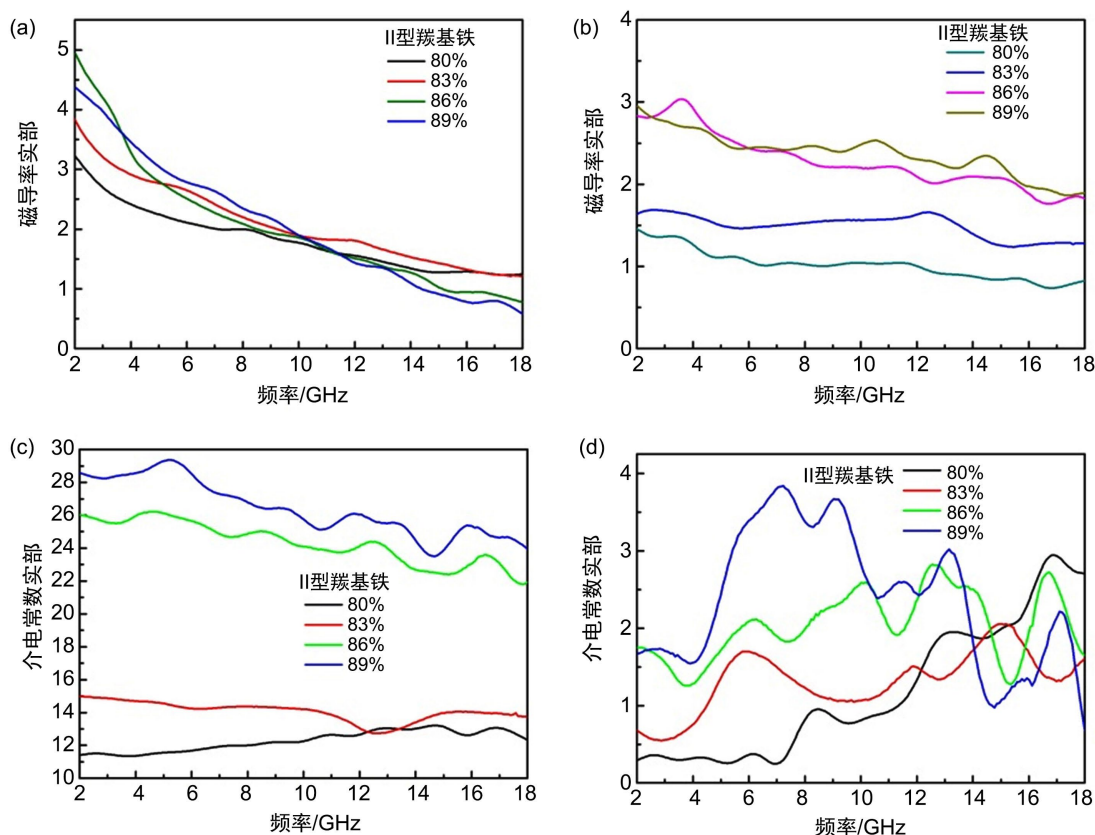


Figure 6. Curves of electromagnetic parameters varying with filling content: (a) Real part of permeability; (b) Imaginary part of permeability; (c) Real part of permittivity; (d) Imaginary part of permittivity

图 6. 电磁参数随含量变化曲线: (a) 磁导率实部; (b) 磁导率虚部; (c) 介电常数实部; (d) 介电常数虚部

由图 7 和图 8 可知, 碳基铁填充含量的增大对吸波性能的影响较为明显, 电磁波衰减系数和反射率的计算结果随着频率的变化呈现较大差异。图 7 表明, 电磁波衰减系数随着频率增加单调递增, 而随着碳基铁含量的增加, 电磁波衰减系数在相同频率时更大, 且随着频率向高频移动差距逐渐增大, 与介电常数实部规律相似, 80% 和 83% 含量时电磁波衰减系数比 86% 和 89% 含量时更小, 在 18 GHz 时数值差异最大, 此时吸收剂含量 80%、83%、86% 和 89% 含量时吸波材料电磁波衰减系数分别为 55.08 dB/cm、71.80 dB/cm、125.4 dB/cm 和 135.7 dB/cm。从图 8 可知, 吸波材料厚度相同时, 随着碳基铁填充含量变化, 反射率吸收峰位置和数值均发生明显变化。随着碳基铁含量从 80% 逐渐增加到 89%, 反射率吸收峰位置逐渐向 2 GHz 移动, 吸收峰值也由 -35.3 dB 降至 -15.3 dB, -10 dB 以下有效带宽也随着填充含量的增加越来越窄, 其特征值变化见表 2。图 9 为归一化输入阻抗随含量变化曲线, 其阻抗匹配变化规律与反射率曲线变化规律相吻合。由此可知, 碳基铁填充含量的增加, 吸波材料内入射电磁波损耗能力也随之增强, 单位面积碳基铁颗粒的增加使得多重损耗机制功能大幅提升, 低频时损耗性能差距不大, 但随着频率的增加, 碳基铁颗粒介电极化、涡流损耗、磁畴共振损耗逐渐充分激发, 电磁波衰减系数差距随频

率逐渐显现；而反射率曲线代表了入射波进入吸波材料的阻抗匹配和衰减损耗双重控制能力，填充含量提高，介电常数明显增高，空气 - 吸波材料界面阻抗在高频失配严重，部分电磁波在表面直接反射，从而电磁波吸收率下降，同时随着填充含量的增加吸波材料的最佳阻抗匹配点，即吸收峰位置，向低频移动。

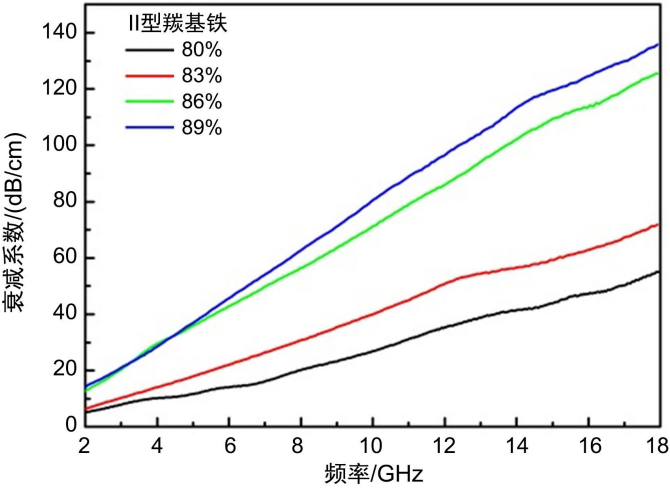


Figure 7. Curves of electromagnetic wave attenuation coefficient versus filling content
图 7. 电磁波衰减系数随含量变化曲线

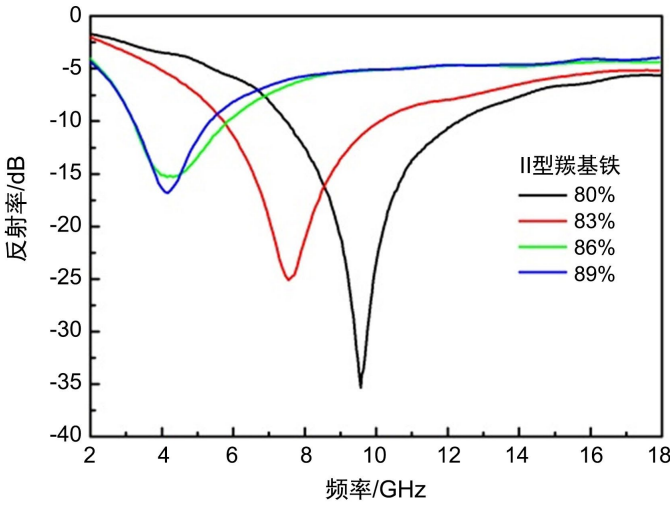


Figure 8. Curves of reflection loss versus filling content
图 8. 反射率随含量变化曲线

Table 2. Characteristic values of reflection loss curves with different carbonyl iron filling contents
表 2. 反射率曲线随羰基铁含量特征值变化表

吸收剂含量/%	吸收峰位置/GHz	吸收峰值/dB	≤-10 dB 有效频段范围/GHz
80	9.56	-35.3	7.48~12.32
83	7.55	-25.1	5.76~10.10
86	4.32	-15.3	3.21~5.85
89	4.17	-16.8	3.28~5.34

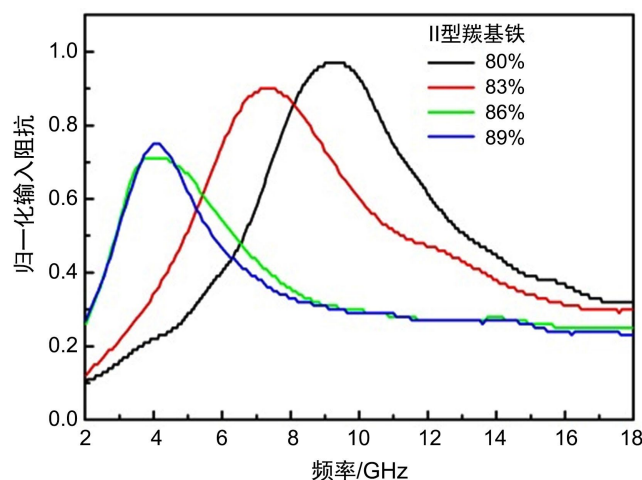


Figure 9. Curves of normalized input impedance versus filling content

图 9. 归一化输入阻抗随含量变化曲线

5. 结论

本文用羰基铁为磁性吸收剂，以粒径和填充含量为变量制备吸波材料试样，在 2 GHz~18 GHz 微波频段下进行了电磁参数测试，并仿真计算得到电磁波衰减系数和 1.5 mm 厚度时吸波材料反射率，系统探究了羰基铁粒径和填充含量对吸波性能之间的关联关系、带宽适配特征及电磁损耗机理。羰基铁作为经典的磁损耗型吸波剂，在实际工程应用中粒径尺寸和填充含量是两个决定吸波材料电磁参数的关键工程变量，吸波性能的按需调控从本质上是电磁参数的数理调控，探究吸波剂粒径和填充含量对性能的影响规律可为吸波材料的配方设计和电磁参数基因调控提供参考。主要结论如下：

1) 羰基铁粒径的变化对吸波材料反射率吸收峰值，即电磁波吸收强度，影响较大。随着粒径的细化，羰基铁的比表面积增大，羰基铁内部的磁畴结构发生改变，磁滞损耗得以增强。羰基铁颗粒的细化导致高频段介电常数虚部增大，同时根据趋肤效应，粒径减小可抑制电场回路的形成，削弱涡流损耗，磁损耗机制由涡流主导向自然共振与畴壁位移转变，这使得反射率吸收峰向高频移动一定频段；而大粒径羰基铁因其高介电常数导致电磁波输入阻抗与自由空间严重失配，入射波表面反射强烈，吸收强度不足。

2) 羰基铁填充含量的递增则对电磁波衰减系数和反射率均产生较大影响，填充含量的升高意味着单位体积内的极化偶极子密度与磁损耗位点浓度上升，复介电常数和复磁导率同步增大，电磁波衰减效果明显；而过度的填充使羰基铁颗粒间距逼近渗流阈值，介电常数攀升，界面阻抗失配使得最佳匹配位置向低频移动，同时高填充量下羰基铁颗粒间易形成宏观涡流，衰减增强，但磁导率因趋肤效应下降，电磁波在表面被反射，同样导致吸收强度严重下降。

3) 吸波材料中羰基铁粒径和填充含量的协同效应是微观结构和电磁场的耦合。大粒径羰基铁饱和磁化强度高，小粒径界面极化活跃。但若填充含量过高，吸收剂在基体中存在分散不均的情况，团聚体形成多尺度介电通路，引起介电损耗过剩、涡流屏蔽增强和磁损耗效率骤降，综合吸波性能反而衰退。因此粒径和填充含量通过阻抗匹配、界面极化和磁畴运动共同构成了“粒径/填充含量 - 电磁参数 - 吸波性能”的关联关系，可为吸波材料的定向化设计研究基础，结合基因数据库仿真计算多变量预测模型，实现吸波材料的数字化配方设计与工程化应用。

基金项目

项目等级：国家重点研发计划重点专项；

项目名称：面向下一代移动通信应用的高性能电磁屏蔽复合材料研究；

项目编号：2023YFB3811304。

参考文献

- [1] 王健, 陈晨. 5G 移动通信射频电磁场暴露与健康影响研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2021, 38(9): 832-837.
- [2] 吴岭, 邱彦文, 王泉. 美军反导预警体系电子目标研究[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(1): 28-32.
- [3] 索庆涛, 许宝才, 王建江, 等. 雷达吸波材料低频化研究现状及进展[J]. 化工新型材料, 2019, 47(4): 25-28.
- [4] Suo, Q.T., Xu, B.C., Wang, J.J., *et al.* (2019) Research Status and Progress of Low Frequency Radar Absorbing Materials. *New Chemical Materials*, **47**, 25-28.
- [5] 王轩, 朱冬梅, 向耿, 周万城, 罗发, 周影影. 羰基铁吸收剂的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(23): 17-21+27.
- [6] 刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 孙杨阳, 余欣燃, 杨在清, 王强. 雷达吸波材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(9): 685-698.
- [7] 张亚坤, 曾凡, 戴全辉, 武振波. 雷达隐身技术智能化发展现状与趋势[J]. 战术导弹技术, 2019(1): 56-63.
- [8] 刘浩宇, 王磊, 张斌, 等. CB-CIP@SiO₂-GF/PA6 复合材料的制备及其宽带微波吸收和力学性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(11): 5120-5132.
- [9] 周旭, 马健. 基于片状羰基铁的复合橡胶电磁性能与损耗机理研究[J]. 材料科学进展, 2023, 37(6): 447-456.
- [10] Liu, X., Wang, H. and Zhang, Y. (2019) Effects of Particle Size on Electromagnetic Properties of Spherical Carbonyl Iron. *AIP Advances*, **9**, Article 035311.
- [11] 王轩, 孙阳, 马天泽. 球形/片状羰基铁粒径级配对电磁参数的调控规律[J]. 材料科学, 2025, 15(3): 327-335.
- [12] Sista, K.S., Dwarapudi, S., Kumar, D., Sinha, G.R. and Moon, A.P. (2021) Carbonyl Iron Powders as Absorption Material for Microwave Interference Shielding: A Review. *Journal of Alloys and Compounds*, **853**, Article 157251. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157251>
- [13] 董立超, 李凯, 江伟. 环氧树脂基羰基铁涂层填充含量与吸波、导热协同特性[J]. 材料科学, 2024, 14(8): 1103-1111.
- [14] 汪旭文, 李刚, 张勇, 等. 基于氧化铝/羰基铁粉的导热吸波片特性分析[J]. 功能材料, 2022, 53(11): 4123-4129.
- [15] Jiang, W. and Zhang, Y. (2024) Electromagnetic Matching Regulation of Sol-Gel Carbonyl Iron Composite Coatings with Different Filler Content. *Journal of Materials Science Research*, **13**, 112-121.
- [16] 赵文杰, 黄思远. 微米/纳米羰基铁复配涂层全频段吸波特性[J]. 材料科学, 2026, 16(2): 201-209.
- [17] Luo, X.X., Xie, H., Ma, Y., *et al.* (2026) Advances in Fe-Based Electromagnetic Wave Absorbers: Multiscale Engineering from Atomic Defects to Macroscopic Architectures for Performance Optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **33**, 768-797. <https://doi.org/10.1007/s12613-025-3252-1>
- [18] Oliveira, A.P.S., Rodrigues, A.C., Quirino, S.F., Vergara, D.E.F., Pinto, S.S., Rezende, M.C., *et al.* (2018) Study of the Influence of Carbonyl Iron Particulate Size as an Electromagnetic Radiation Absorbing Material in 12.4 to 18 GHz (Ku) Band. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, **17**, 619-627. <https://doi.org/10.1590/2179-10742018v17i41547>
- [19] 李凤姣, 石建建, 欧雪梅. 钡铁氧体与羰基铁复合材料的吸波性能研究[J]. 材料科学, 2024, 14(5): 713-718.
- [20] 卢明明, 刘甲, 宫元勋, 赵宏杰, 曹茂盛. 不同形貌羰基铁的复合对电磁特性及吸波性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 95-99.