

# 不同形貌羰基铁的复合对电磁特性及吸波性能的影响

卢明明<sup>1</sup>, 刘甲<sup>1</sup>, 宫元勋<sup>1</sup>, 赵宏杰<sup>1</sup>, 曹茂盛<sup>2</sup>

(1. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

**摘 要:** **目的** 增强羰基铁的低频吸波性能, 掌握吸收峰频率的调控方法。**方法** 将球形羰基铁与片状羰基铁混合, 制作复合材料。通过扫描电子显微镜对两种羰基铁的微观形貌进行分析。通过矢量网络分析仪测量 5 种质量配比下 (3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3) 羰基铁复合材料的复介电常数和复磁导率, 分析不同形貌羰基铁的复合对电磁特性的影响。同时分析不同配比羰基铁复合材料的吸波性能。**结果** 随着球形羰基铁加入比例的提高, 复合材料的复介电常数实部和虚部均逐步下降。羰基铁复合材料的复磁导率实部整体变化不大, 虚部呈下降趋势。当片状羰基铁和球形羰基铁质量比为 1 : 2 时, 在 3.08 GHz 处最大吸波性能为 -20.2 dB, 有效吸波带宽 (反射率损耗不大于 -8 dB) 为 2.43 GHz。**结论** 球形羰基铁的加入可以有效调控复合材料的吸收峰在低频范围内定向移动, 增强 1~4 GHz 范围内的低频吸波强度, 扩宽有效吸波带宽。球形羰基铁的加入, 降低了片状羰基铁的介电常数, 复合材料的电磁阻抗匹配条件得到优化, 电磁损耗耦合效应增强, 从而提升了该复合材料的吸波性能。

**关键词:** 球形羰基铁; 片状羰基铁; 复合材料; 介电常数; 磁导率; 吸波性能

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0095-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.012

## Electromagnetic Characteristics and Microwave Absorption Properties of Carbonyl Iron Composites with Different Morphologies

LU Ming-ming<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, GONG Yuan-xun<sup>1</sup>, ZHAO Hong-jie<sup>1</sup>, CAO Mao-sheng<sup>2</sup>

(1. Aerospace Institute of Advanced Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the microwave absorption performance of carbonyl iron at low frequency and master the method of controlling the frequency of absorption peak. The spherical carbonyl iron was mixed with sheet carbonyl iron to prepare composites. The morphologies of two types of carbonyl iron were analyzed by SEM. The complex permittivity and complex permeability of carbonyl iron composites at different mass ratios (3 : 1, 2 : 1, 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3) were measured by

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-12-20

Received: 2019-10-16; Revised: 2019-12-20

作者简介: 卢明明 (1989—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电磁衰减材料。

**Biography:** LU Ming-ming (1989—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: electromagnetic attenuation materials.

**通讯作者:** 曹茂盛 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁功能材料和器件。邮箱: caomaosheng@bit.edu.cn

**Corresponding author:** CAO Mao-sheng (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: electromagnetic functional materials and devices. E-mail: caomaosheng@bit.edu.cn

**引文格式:** 卢明明, 刘甲, 宫元勋, 等. 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.

LU Ming-ming, LIU Jia, GONG Yuan-xun, et al. Electromagnetic characteristics and microwave absorption properties of carbonyl iron composites with different morphologies[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 95-99.

vector network analyzer to study the effect of carbonyl iron composites with different morphologies on electro magnetic characteristics and analyze the microwave absorption performance of the composites at different mass ratios. With the increase of the proportion of spherical carbonyl iron, the real imaginary parts of complex permittivity in the composites decreased gradually. The real part of complex permeability in carbonyl iron composites had a small change while the imaginary part decreased. When the mass ratio between the sheet carbonyl iron with spherical carbonyl iron was 1 : 2, the minimum reflection loss reached -20.2 dB at 3.08 GHz. The effective absorption bandwidth for  $RL \leq -8$  dB reached 2.43 GHz at low frequency. The addition of spherical carbonyl iron into sheet carbonyl iron can control movement of absorption peak at low frequency, improve the microwave absorption within 1~4 GHz and broad the effective absorption bandwidth. The addition of spherical carbonyl iron also decreases the complex permittivity of sheet carbonyl iron, which can make the impedance matching condition better and improve the electromagnetic loss coupling effect, thus enhancing the microwave absorption performance.

**KEY WORDS:** spherical carbonyl iron; sheet carbonyl iron; composites; permittivity; permeability; microwave absorption

随着电子信息技术的快速发展,电磁辐射对环境 and 人类健康的影响日益严重,尤其是随着高超声速飞行器 etc 武器装备的发展,高性能、宽频、强吸收的电磁衰减材料,包括低频电磁衰减材料,急需研发。电子设备能够产生热辐射和释放干扰电磁波,这将损害周边电子元件的功能和寿命。理想的电磁衰减材料不仅仅能屏蔽掉电磁波,更能对电磁波产生强吸收效果,从而维持周边电磁环境的洁净。低频强吸收的吸波材料成为微波吸收领域中的一个重要挑战。

微波吸收材料主要有炭黑、碳化硅、石墨、碳纤维、碳纳米管、石墨烯、铁氧体、羰基铁粉、羰基镍粉、铁硅铝粉等<sup>[1-11]</sup>。羰基铁作为一种传统的超细金属粉类吸收剂,在微波频段具有磁导率较高、对雷达波能够强烈吸收等优点。卿玉长等人<sup>[1]</sup>制备了羰基铁/树脂基涂层,结果表明,当涂层厚度为 2 mm 时,最大反射率在 5.12 GHz 处达到 -32.2 dB。景红霞等人<sup>[2]</sup>为提高羰基铁在低频段下的吸波性能,采用化学氧化聚合法和物理共混法制备聚苯胺和羰基铁-聚苯胺复合材料。研究发现,在 0.3~6 GHz,羰基铁-聚苯胺复合材料的吸波性能较纯羰基铁有了很大提高,最大吸波性能为 -39.1 dB。

值得注意的是,不同微观形貌的羰基铁具有不同的微波吸收性能,微观形貌对电磁性能影响巨大。杨芾蓁等人<sup>[12]</sup>对球状和树枝状的羰基铁粉进行了电磁吸波性能研究,结果显示,相比于球状羰基铁,树枝状羰基铁的最大反射率损耗增加了 94%,达到 -47.14 dB。片状羰基铁比表面积较大,同时具有高磁导率和高介电常数,导致填充羰基铁粉进行阻抗匹配时比较困难。在微波高频段,片状羰基铁内涡流损耗较大,抑制高频电磁波的进入,导致高频吸波性能不够理想。为了有效降低其介电常数,许多研究者对片状羰基铁进行了改性处理,尤其是包覆处理手段研究较多<sup>[13-15]</sup>。李泽等人<sup>[13]</sup>采用溶胶凝胶法和高能球磨法制备了 BaTiO<sub>3</sub> 表面改性羰基铁的复合吸收剂,研究发现,通过 BaTiO<sub>3</sub> 对羰基铁表面改性,能够调节介电常数,在 3.2 GHz 处,反射率达到 -15.5 dB。韩

铮等人<sup>[14]</sup>采用溶胶凝胶法在不同粒径的羰基铁粉表面包覆 TiO<sub>2</sub> 薄膜,研究发现, TiO<sub>2</sub> 薄膜可以有效阻隔颗粒间涡流的形成,包覆层对 1  $\mu$ m 粒径的羰基铁粉微波吸收性能有增强作用。但这些方法在降低介电常数的同时也降低了磁导率,增强效果并不好。

本文将球形羰基铁与片状羰基铁混合制作复合材料。通过扫描电子显微镜 (SEM) 对两种羰基铁的微观形貌进行分析;通过矢量网络分析仪测量 5 种不同质量配比下 (3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3) 羰基铁复合材料的电磁参数,并计算评价其吸波性能,探讨球形羰基铁对片状羰基铁介电常数和磁导率的调节作用,以制备具有优良电磁阻抗匹配的低频复合吸波材料。

## 1 试验

### 1.1 羰基铁复合材料试样制备

将片状羰基铁粉和球形羰基铁粉分别按照质量配比 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3 进行混合,将混合好的复合粉体倒入装有切片石蜡的玻璃杯内,铁粉质量总含量为 87%。将样品加热直至石蜡溶化,搅拌均匀后,加入模具中,制备同轴法测试用的小圆环试样。该试样外径 7.0 mm,内径 3.0 mm,厚度 2.0 mm。

### 1.2 性能表征

1) 采用扫描电子显微镜对两种羰基铁的微观形貌进行分析。

2) 采用矢量网络分析仪测量 5 种不同质量配比下羰基铁复合材料的复介电常数和复磁导率,根据传输线理论,计算反射率损耗值。

## 2 结果及分析

### 2.1 两种羰基铁粉的形貌分析

图 1 是两种不同微观形貌的羰基铁粉的 SEM 图

片。图 1a 中的羰基铁呈片状, 片状尺寸范围为  $1\sim 8\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $0.8\ \mu\text{m}$  左右; 图 1b 中的羰基铁呈现球形, 颗粒直径范围为  $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 。理论上, 相比于球

状羰基铁粉, 片状羰基铁的形貌有利于形成不连续网络, 增加对入射微波的漫反射, 还可以带来更多的界面电荷极化, 从而增强对电磁波的吸收强度<sup>[12]</sup>。

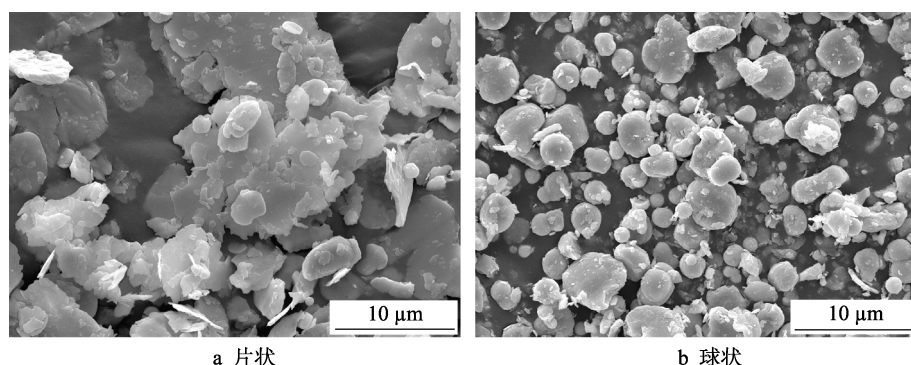


图 1 羰基铁 SEM 图

Fig.1 SEM figures of iron: a) sheet carbonyl iron; b) spherical carbonyl iron

## 2.2 不同配比对羰基铁复合材料电磁性能的影响

微波吸收材料指的是可以吸收或者衰减入射的电磁波, 将入射电磁波转化为热能而耗散掉的一类功能材料。良好的微波吸收材料需要从以下两个方面考虑: 一方面需要使入射电磁波最大限度地进入材料内部而不被反射, 满足阻抗匹配条件; 另一方面, 进入材料内部的电磁波能够最大程度地被材料转化为热能, 即损耗特性。表征吸波性能最主要的参数是材料

的复介电常数实部  $\epsilon'$  和虚部  $\epsilon''$ , 及复磁导率的实部  $\mu'$  和虚部  $\mu''$ 。理论上通过调节材料的电磁参数即可优化材料的吸波性能。一般情况下,  $\epsilon''$  和  $\mu''$  越大, 电损耗和磁损耗越大, 更多的入射电磁波被衰减掉, 材料吸波性能越好。但是吸波性能不仅仅受电磁损耗特性的影响, 还需要考虑阻抗匹配条件。需要同时考虑减少电磁波在材料界面上的反射, 即需要尽量同时具有良好的阻抗匹配和损耗特性。

图 2 是不同配比的羰基铁复合材料在  $0.3\sim 18\ \text{GHz}$  范围内的复介电常数和复磁导率。从图 2a 和 2b 中可

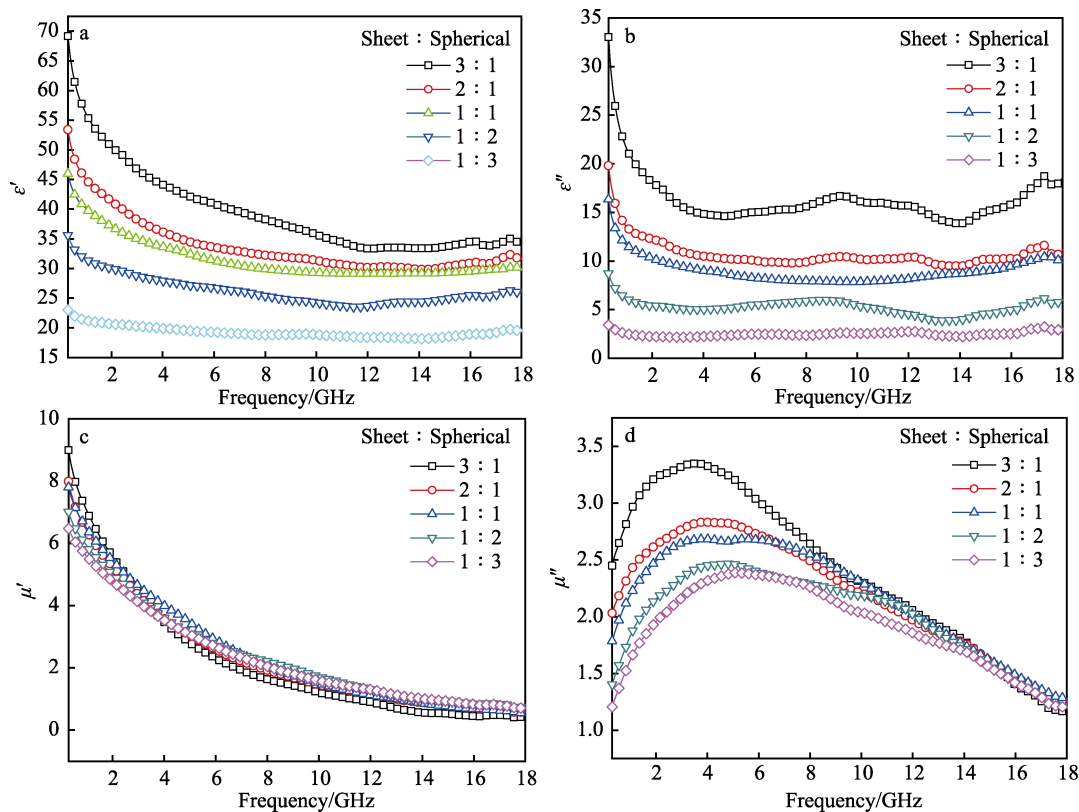


图 2 不同配比下的羰基铁复合材料的复合介电常数和复合磁导率

Fig.2 Permittivity and permeability of carbonyl iron composites with different mass ratios: a) real part of permittivity; b) imaginary part of permittivity; c) real part of permeability; d) imaginary part of permeability

以看出,介电常数实部  $\varepsilon'$  和虚部  $\varepsilon''$  均随频率的增加呈现下降趋势。从图 2a 中可以看出,随着球形碳基铁含量的增加,碳基铁复合材料的  $\varepsilon'$  在整个测试频率范围内逐渐下降。以频率 3 GHz 处为例,  $\varepsilon'$  从 46.8 依次下降为 38.3、34.1、28.9、20.3。片状碳基铁和球形碳基铁质量配比为 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3 的复合材料的  $\varepsilon'$  在整个频段的变化范围依次为 69.2~33.3、53.4~29.8、45.9~28.6、35.6~23.6、23.0~18.4。从图 2b 可以看出,随着球形碳基铁含量的增加,碳基铁复合材料的  $\varepsilon''$  在整个 0.3~18 GHz 范围内逐渐下降。以频率 3 GHz 处为例,  $\varepsilon''$  从 15.9 依次下降为 11.2、9.0、5.2、2.2。片状碳基铁和球形碳基铁质量配比为 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3 的复合材料的  $\varepsilon''$ , 在整个频段的变化范围依次为 33.0~13.9、19.8~9.5、16.4~7.4、8.7~3.9、3.4~2.2。

从图 2c 中可以看出,磁导率实部  $\mu'$  出现了频散现象。随着频率的增加,不同配比的复合材料的  $\mu'$  呈现下降趋势。在 0.3~4.5 GHz 范围内,  $\mu'$  随着球形碳基铁含量的增加而下降;在 4.5~18 GHz 范围内,  $\mu'$  随着球形碳基铁含量的增加而呈现增加的趋势。从图 2d 中可以看出,磁导率虚部  $\mu''$  随着频率的增加先升高后下降,呈现一个较大的磁损耗峰;随着球形碳基铁含量的增加,  $\mu''$  在较低频段下降明显,在较高频段呈现较弱下降趋势。从图 2d 中可以分析得出,  $\mu''$  展示出一个明显的损耗峰,随着球形碳基铁含量的升高,损耗峰对应的频率由低频逐渐移向高频。富含片状碳基铁的复合材料磁损耗峰偏向于低频,而富含球形碳基铁的复合材料磁损耗峰偏向于高频。

图 3 是不同配比的碳基铁复合材料的介电损耗正切值  $\tan\delta_e$  和磁损耗正切值  $\tan\delta_u$ 。从图中可以看出,随着球形碳基铁含量的增加,介电损耗逐渐减弱,磁损耗也呈现减弱的趋势。随着频率的增加,介电损耗整体比较平稳,磁损耗呈现增强的趋势。以频率 3 GHz 处为例,随着球形碳基铁含量的增加,  $\tan\delta_e$  从 0.34 依次下降为 0.29、0.27、0.18、0.11,  $\tan\delta_u$  从 0.74 依次下降为 0.63、0.57、0.54、0.52,磁损耗减弱幅度较小,保持较高磁损耗。

从图 2a 和 2c 中可以看出,相比于复磁导率,碳基铁复合材料明显具有较高的复介电常数,这种高介电常数能够提高材料对电磁波的电损耗性能,但不利于吸波材料的阻抗匹配。片状碳基铁和球形碳基铁质量配比为 3 : 1 时,复合材料的  $\varepsilon'$  在整个频段的变化范围为 69.2~33.3。增加球形碳基铁含量,当片状碳基铁和球形碳基铁质量配比为 1 : 3 时,复合材料的  $\varepsilon'$  在整个频段的变化范围下降为 23.0~18.4。球形碳基铁的加入,有效降低了碳基铁复合材料的复介电常数,这主要是因为片状碳基铁粉的相对减少,导致片状颗粒空间电荷极化被弱化,涡流效应减弱<sup>[12]</sup>。与此同时,随着球形碳基铁的加入,碳基铁复合材料的复

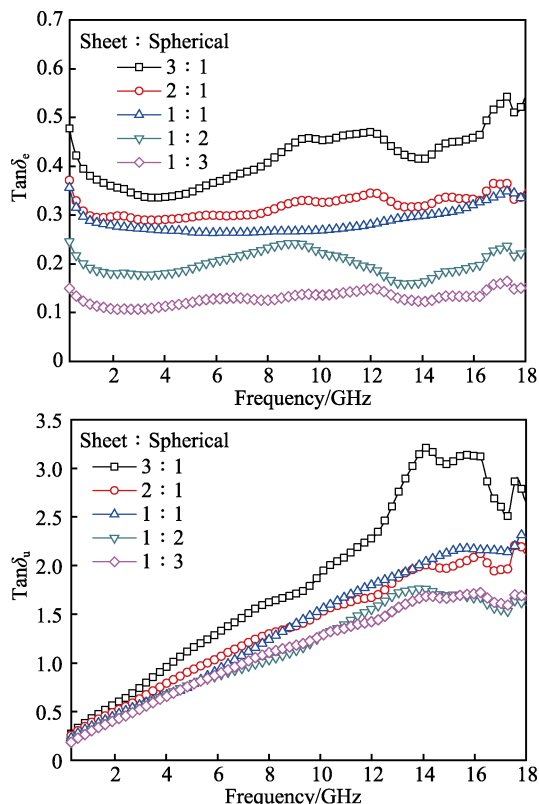


图3 不同配比下的碳基铁复合材料的介电损耗正切值  $\tan\delta_e$  和磁损耗正切值  $\tan\delta_u$

Fig.3 Dielectric loss tangent  $\tan\delta_e$  (a) and magnetic loss tangent  $\tan\delta_u$  (b) for different massratios

磁导率实部整体变化不大,虚部在低频有少许下降,而在高频变化不大。因此,碳基铁复合材料的复介电常数和磁导率由于球形碳基铁的引入而更为接近,阻抗匹配条件得到优化。

## 2.3 不同对比对碳基铁复合材料吸波性能的影响

微波吸收材料一般可以通过涂覆的方式附着在金属材料表面。根据传输线原理,碳基铁复合材料的反射率损耗 (Reflection loss, 缩写 RL) 可以通过以下公式计算得到:

$$RL = 20 \log(|Z_{in} - Z_0| / |Z_{in} + Z_0|) \quad (1)$$

式(1)中,  $Z_0$  表示真空阻抗,可以表示为(2)式。

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

式(2)中,  $\mu_0$  和  $\varepsilon_0$  分别代表自由空间的复磁导率和复介电常数。 $Z_{in}$  代表涂层与自由空间界面的归一化输入阻抗,可以表示为:

$$Z_{in} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r / \varepsilon_0 \mu_0} \tanh(2\pi j \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} f d / c) \quad (3)$$

式(3)中,  $\mu_r$  和  $\varepsilon_r$  分别代表吸波涂层的相对复磁导率和复介电常数,  $f$  代表电磁波频率,  $d$  表示吸波涂层的厚度,  $c$  代表光速。

从公式(1)、(2)和(3)可以看出,微波吸收材料的阻抗值与自由空间的阻抗值越接近,反射率损耗越



小。因此，要使得电磁波全部入射到吸波材料内部，吸波材料的复介电常数和复磁导率必须相等。现实中，没有任何一种材料能够满足这个条件，只能尽可能使两者相匹配。

图 4 是不同配比的羰基铁复合材料的反射率损耗 RL。从图中可以看出，在厚度为 2.0 mm 时，随着球形羰基铁含量的增加，吸收峰往高频移动，频点由 1.98 GHz 依次移动至 2.42、2.57、3.08、4.44 GHz，吸收峰强度先增强后减弱。片状羰基铁和球状羰基铁比例为 1 : 2 时，羰基铁复合材料在 3.08 GHz 处最大吸波性能为 -20.2 dB，在 1~4 GHz 范围内有效吸波带宽（反射率损耗不大于 -8 dB）达到 2.43 GHz，比片状羰基铁和球状羰基铁比例为 3:1 时的有效吸波带宽增大 1.11 GHz。

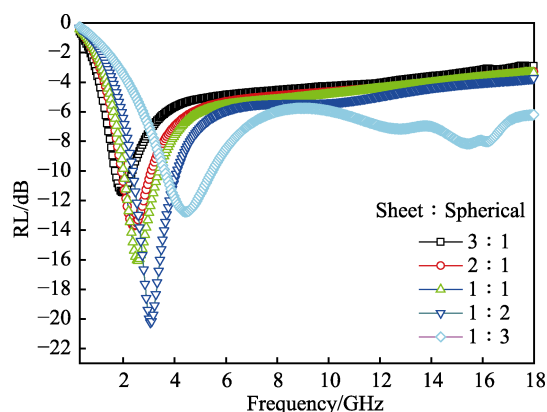


图 4 不同配比下的羰基铁复合材料的吸波性能  
Fig.4 Microwave Absorption Properties of carbonyl iron with different fill ratio

### 3 结论

1) 球形羰基铁加入到片状羰基铁中可以有效降低材料的复介电常数，优化阻抗匹配条件。

2) 随着球形羰基铁含量的增加，复合材料吸收峰在 1~4 GHz 低频范围内往高频定向移动，且在片状羰基铁和球状羰基铁质量配比为 1 : 2 时，羰基铁复合材料在 3.08 GHz 处最大吸波性能达到 -20.2 dB，在 1~4 GHz 范围内有效吸波带宽（反射率损耗不大于 -8 dB）达到 2.43 GHz。结果表明，球形羰基铁的加入可以有效增强吸波强度和扩宽低频吸波带宽。

3) 根据片状羰基铁和球状羰基铁配比对复合材料电磁参数和吸波性能的影响规律，可针对不同波段的吸波性能需求进行吸波材料设计。

### 参考文献：

[1] 卿玉长, 周万城, 罗发, 等. 羰基铁/环氧有机硅树脂涂层的吸波性能和力学性能研究[J]. 材料导报, 2009, 23(3): 1-4.

QING Yu-chang, ZHOU Wan-cheng, LUO Fa, et al. Microwave absorbing and mechanical properties of carbonyl iron/epoxy silicone coating[J]. Materials reports, 2009, 23(3): 1-4.

[2] 景红霞, 李巧玲, 叶云, 等. 羰基铁-聚苯胺复合吸波材料的制备及性能[J]. 功能高分子学报, 2015, 25(4): 393-396.

JING Hong-xia, LI Qiao-ling, YE Yun, et al. Synthesis and properties of carbonyl iron-polyaniline microwave absorption composites[J]. Journal of functional polymers, 2015, 25(4): 393-396.

[3] WEN B, CAO M S, LU M M, et al. Reduced graphene oxides: light-weight and high-efficiency electromagnetic interference shielding at elevated temperatures[J]. Adv mater, 2014, 26(21): 3484-3489.

[4] CAO M S, WANG X X, ZHANG M, et al. Electromagnetic response and energy conversion for functions and devices in low dimensional materials[J]. Adv funct mater, 2019, 29: 201807398.

[5] LU M M, CAO W Q, SHI H L, et al. Multi-wall carbon nanotubes decorated with ZnO nanocrystals: mild solution-process synthesis and highly efficient microwave absorption properties at elevated temperature[J]. J mater chem A, 2014, 2(27): 10540-10547.

[6] LU M M, WANG X X, CAO W Q, et al. Carbon nanotube-CdS core-shell nanowires with tunable and high-efficiency microwave absorption at elevated temperature[J]. Nanotechnology, 2016, 27(6): 065702-7.

[7] LU M M, CAO M S, CHEN Y H, et al. Multiscale assembly of grape-like ferroferric oxide and carbon nanotubes: a smart absorber prototype varying temperature to tune intensities[J]. Acsappl mater inter, 2015, 7(34): 19408-15.

[8] WANG X X, SUN C M, WEN F B, et al. Strong mechanics and broadened microwave absorption of graphene-based sandwich structures and surface-patterned structures[J]. J mater sci-mater el, 2018, 29(11): 9683-9691.

[9] 崔荣振, 王博翀, 王涛, 等. 羰基铁/有机硅环氧树脂复合材料的电磁性质及微波吸收性质[J]. 功能材料, 2011, 42(2): 218-221.

CUI Rong-zhen, WANG Bo-chong, WANG Tao, et al. Microwave absorbing and dielectric-magnetic properties of carbonyl iron/epoxy silicone composites[J]. Journal of functional materials, 2011, 42(2): 218-221.

[10] 程祥珍, 刘伟, 段玉平. 吸收剂复合对提升羰基铁涂层吸波性能的影响[J]. 应用科技, 2017, 44(6): 89-92.

CHENG Xiang-zhen, LIU Wei, DUAN Yu-ping. The effect of composite absorber on the absorption properties of carbonyl-iron coatings[J]. Applied science and technology, 2017, 44(6): 89-92.

- [57] ZHELUDKEVICH M L, TEDIM J, FERREIRA M G S. "Smart" coatings for active corrosion protection based on multi-functional micro and nanocontainers[J]. *Electrochimica acta*, 2012, 82: 314-323.
- [58] FIHRI A, BOVERO E, AL-SHAHRANI A, et al. Recent progress in superhydrophobic coatings used for steel protection: A review[J]. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 2017, 520: 378-390.
- [59] FENG L B, ZHU Y L, WANG J, et al. One-step hydrothermal process to fabricate superhydrophobic surface on magnesium alloy with enhanced corrosion resistance and self-cleaning performance[J]. *Applied surface science*, 2017, 422: 566-573.
- [60] LI Y, ZHANG X G, CUI Y X, et al. Anti-corrosion enhancement of superhydrophobic coating utilizing oxygen vacancy modified potassium titanate whisker[J]. *Chemical engineering journal*, 2019, 374: 1326-1336.
- [61] VOEVODIN N N, GREBASCH N T, SOTO W S, et al. Potentiodynamic evaluation of sol-gel coatings with inorganic inhibitors[J]. *Surface & coatings technology*, 2001, 140(1): 24-28.
- [62] SHEFFER M, GROYSMAN A, STAROSVETSKY D, et al. Anion embedded sol-gel films on Al for corrosion protection[J]. *Corrosion science*, 2004, 46(12): 2975-2985.
- [63] FEDEL M, CALLONE E, FABBIAN M, et al. Influence of  $Ce^{3+}$  doping on molecular organization of Si-based organic/inorganic sol-gel layers for corrosion protection[J]. *Applied surface science*, 2017, 414: 82-91.
- [64] SHCHUKIN D G, ZHELUDKEVICH M, MOHWALD H. Feedback active coatings based on incorporated nanocontainers[J]. *Journal of materials chemistry*, 2006, 16(47): 4561-4566.
- [65] WEI H G, WANG Y R, GUO J, et al. Advanced micro/nanocapsules for self-healing smart anticorrosion coatings[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2015, 3(2): 469-480.
- [66] GRIGORIEV D, SHCHUKINA E, SHCHUKIN D G. Nanocontainers for self-healing coatings[J]. *Advanced materials interfaces*, 2017, 4(1): 1600318-1600328.
- [67] ZHANG X F, CHEN R J, LIU Y H, et al. Electrochemically generated sol-gel films as inhibitor containers of superhydrophobic surfaces for the active corrosion protection of metals[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2016, 4: 649-656.
- [68] SHCHUKIN D, MOHWALD H. Self-repairing coatings containing active nanoreservoirs[J]. *Small*, 2007, 3(6): 926-943.
- [69] LIANG Y, WANG M D, WANG C, et al. Facile synthesis of smart nanocontainers as key components for construction of self-healing coating with superhydrophobic surfaces[J]. *Nanoscale research letters*, 2016, 11(1): 231-242.
- [70] QIAN H C, XU D, DU C W, et al. Dual-action smart coatings with a self-healing superhydrophobic surface and anti-corrosion properties[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2017, 5(5): 2355-2364.

(上接第 99 页)

- [11] WEN F S, ZUO W L, YI H B, et al. Microwave-absorbing properties of shape-optimized carbonyl iron particles with maximum microwave permeability[J]. *Physica B*, 2009, 404(20): 3567-3570.
- [12] 杨芾蓁, 侯兴哲, 郑可, 等. 羰基铁粉形貌对吸波性能的影响[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(10): 53-59.
- YANG Fu-li, HOU Xing-zhe, ZHENG Ke, et al. Effect of carbonyl iron powder morphology on the absorption properties of microwave[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(10): 53-59.
- [13] 李泽, 许宝才, 王建江, 等.  $BaTiO_3$  包覆羰基铁吸波剂的制备及其吸波性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(9): 2240-2250.
- LI Ze, XU Bao-cai, WANG Jian-jiang, et al. Preparation and wave absorption properties of  $BaTiO_3$  coated carbonyl iron absorbing material[J]. *Journal of synthetic crystals*, 2016, 45(9): 2240-2250.
- [14] 韩铮, 曾国勋, 熊小敏.  $TiO_2$  包覆对不同粒径羰基铁粉吸波性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(5): 708-712.
- HAN Zheng, ZENG Guo-xun, XIONG Xiao-min. Effects of  $TiO_2$  coating on the absorption properties of different sized carbonyl iron particles[J]. *Journal of materials science & engineering*, 2017, 35(5): 708-712.
- [15] 童国秀, 官建国, 张五一, 等. 纳米铁纤维与羰基铁粉共混制备轻质宽带吸波涂层材料[J]. *金属学报*, 2008, 44(8): 1001-1005.
- TONG Guo-xiu, GUAN Jian-guo, ZHANG Wu-yi, et al. Preparation of light radar absorbing materials with broad bandwidth by mixing iron nanofibers with carbonyl iron particles[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2008, 44(8): 1001-1005.