# 钡铁氧体与羰基铁复合材料的吸波性能研究

# 李风姣<sup>1,2</sup>,石建建<sup>1</sup>,欧正昕<sup>1</sup>,何 茗<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>成都工业学院电子工程学院,四川 成都 <sup>2</sup>西南交通大学信息科学与技术学院,四川 成都

收稿日期: 2024年4月10日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

### 摘要

本文制备了钡铁氧体和羰基铁复合材料作为吸波材料,分析讨论了钡铁氧体在复合材料中不同含量对复 合材料在2~18 GHz波段的电磁参数及吸波性能的影响。结果表明:随着钡铁氧体含量的减少,介电常数 先增大后减小,在钡铁氧体含量为25%时达到最大。在2~7 GHz频段,磁导率随钡铁氧体含量的减少而 增加,在7~18 GHz频段,磁导率随钡铁氧体含量的减少而减少;当钡铁氧体含量为50%,厚度为1.7 mm, 最小反射损耗为-41 dB,有效吸收频率为9.2~14.9 GHz,带宽达5.7 GHz,复合材料的吸波性能最佳。

#### 关键词

钡铁氧体,羰基铁,复合材料,电磁参数,吸波性能

# The Absorption Performance of Composite Materials Combining with Barium Ferrite and Carbonyl Iron

#### Fengjiao Li<sup>1,2</sup>, Jianjian Shi<sup>1</sup>, Zhengxin Ou<sup>1</sup>, Ming He<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan <sup>2</sup>School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

#### Abstract

In this work, composite materials combined with Barium ferrite and carbonyl iron were prepared

\*通讯作者。

as absorbing materials. The influence of different contents of barium ferrite in the composite materials on the electromagnetic parameters and absorption performance in the  $2 \sim 18$  GHz band was analyzed and discussed. The results show that as the content of barium ferrite decreases, the dielectric constant first increases and then decreases, reaching its maximum at a barium ferrite content of 25%. In the  $2 \sim 7$  GHz frequency band, the magnetic permeability increases with a decrease in barium ferrite content, while in the  $7 \sim 18$  GHz, the magnetic permeability decreases with a decrease in barium ferrite content; When the content of barium ferrite is 50%, with the thickness of 1.7 mm, the minimum reflection loss is -41 dB and the effective absorption frequency is  $9.2 \sim 14.9$  GHz. The composite material has the best absorption performance.

#### **Keywords**

Barium Ferrite, Carbonyl Iron, Composite Materials, Electromagnetic Parameters, Absorption Performance

Copyright © 2024 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/

# 1. 前言

羰基铁是一种传统的吸波材料,因其饱和磁化强度高、居里温度高、成本低等优点[1][2]受到广泛关注,但是因为自身固有的缺点,如高频下,其磁导率下降,阻抗匹配差等,无法达到吸波材料所要求的 "超薄、带宽、轻质、强吸收"特性[3][4][5],因此,国内外的研究者通过将羰基铁进行形貌控制、包 覆改性或者与其他材料进行复合以提高其吸波性能。研究表明,羰基铁与磁损耗型吸波材料复合能有效 改善材料的吸波性能,提升阻抗匹配[6][7]。钡铁氧体因其具有高频响应特性、较高的稳定性以及低廉的 价格在吸波材料领域得到广泛的应用[8][9][10]。本文通过物理共混的方式制备了钡铁氧体和羰基铁的复 合材料,通过调节复合体组分的配比得到各复合体的电磁参数,研究复合材料的吸波性能。

## 2. 实验方法

#### 2.1. 样品制备

按铁氧体质量占复合粉料(钡铁氧体和羰基铁)总质量的 80%、75%、50%、25%、20%进行配料。在 超声波清洗仪中将不同质量配比的粉料超声分散均匀。采用丙酮做溶剂,环氧树脂做粘接剂,将环氧树 脂和固化剂完全溶于丙酮。将不同配比的混合粉料加入上述溶液中,再次将其置于超声波清洗机中加热 搅拌均匀,然后研磨 1~2 小时,直至丙酮完全挥发,样品再次变为粉末状,此时环氧树脂均匀分布在混 合粉料中,得到具有一定可塑性的钡铁氧体 - 羰基铁混合物粉体。最后模压成型,制成外径小于6.90 mm, 内径大于 3.04 mm 的圆环状样品。将环状样品置于真空干燥箱 80℃环境 2 小时固化定型,自然冷却至室 温,即可获得不同质量配比的铁氧体/羰基铁复合材料。

### 2.2. 样品性能测试

采用同轴法测量样品的 S11、S12、S21 和 S22 参数,测量频段为 2~18 GHz。过矢量网络分析仪(VNA, Agilent E5071C)自带程序得到复合材料的复介电常数和复磁导率,通过分析数据得到复合材料的电磁波吸收特性。

# 3. 结果及分析

#### 3.1. 铁氧体/羰基铁复合材料的电磁性能分析

材料的吸波性能高度依赖材料的复介电常数( $\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$ )和复磁导率( $\mu_r = \mu' - j\mu''$ )这两个基本参数。当电磁波与介质相互作用时,电磁波的存储能力由介电实部 $\varepsilon'$ 、磁导率实部 $\mu'$ 衡量,而介电虚部 $\varepsilon''$ 、磁导率虚部 $\mu''$ 则衡量电磁波的损耗[1]。样品的介电实部 $\varepsilon'$ 、介电虚部 $\varepsilon''$ ,磁导率实部 $\mu'$ ,磁导率虚部 $\mu''$ 随频率的变化如图1所示。图1(a)、图1(b)为复合材料的介电常数实部 $\varepsilon'$ 、虚部 $\varepsilon''$  随频率变化的曲线。从图中可以看出,复合材料中,随着钡铁氧体质量占比的减少,介电常数实部逐渐增大,在质量比为25%时达到最大,然后减小。 $\varepsilon''$ 变化规律和 $\varepsilon'$ 一样,随羰基铁的增多先增大后减小,在钡铁氧体含量 25%时达到最大,但不同的是,当钡铁氧体含量大于等于羰基铁含量时,即铁氧体占 80%、75%、50%, $\varepsilon''$ 随频率的变化不大,其值在 0~3 附近,当铁氧体含量小于羰基铁含量,即铁氧体占 25%、20%时,在大于10 GHz 时, $\varepsilon''$ 增幅较大,最大达到 7.45,即在高频段,增大羰基铁含量,介电虚部会大幅增大。这表明,复合材料在高频段将会拥有更强大的电损耗能力。



Figure 1. Electromagnetic parameters of composite materials with different contents of barium ferrites (a) real part of complex permittivity  $\varepsilon'$ ; (b) imaginary part of complex permittivity  $\varepsilon''$ ; (c) real part of complex permeability  $\mu''$ ; (d) imaginary part of complex permeability  $\mu''$ 

图 1. 不同钡铁氧体含量的复合材料的电磁参数(a) 复介电常数实部  $\varepsilon'$ ;(b) 复介电常数虚部  $\varepsilon''$ ;(c) 复磁导率实部  $\mu'$ ; (d) 复磁导率虚部  $\mu''$ 

图 1(c)、图 1(d)为复合材料的磁导率实部 µ'和磁导率虚部 µ" 随频率的变化曲线。从图中可以看出,

当钡铁氧体占复合材料的主要成分时,即钡铁氧体含量为 80%、75%、50%,三组样品的 μ'值变化不大, 在 1~2.2 之间,而当羰基铁占主要成分,即钡铁氧体含量为 25%、20%时,这两组样品的 μ'都是随着频 率的增加逐渐减小的,其值从最大的 3.2 降到最小 0。这与羰基铁在高频时,磁导率下降有关。

从图 1(d)可以看出, μ"的变化也是呈现两种不同的趋势, 钡铁氧体含量大于等于羰基铁的样品, μ" 变化不明显, 而钡铁氧体含量小于羰基铁的样品, 其 μ"随频率升高逐渐降低。不同的是, 钡铁氧体含量 为 25%、20%的样品的 μ"值明显比 80%、75%、50%的样品的 μ"大。即增大羰基铁的含量, 可以明显增 强磁损耗能力。这主要是因为羰基铁的加入改善了铁氧体在高频下的频散效应, 并且, 掺杂越多, 效果 越显著[11]。

#### 3.2. 铁氧体/羰基铁复合材料的吸波性能分析

基于测量到的样品的相对介电常数  $\varepsilon_r$ 、相对磁导率  $\mu_r$ ,可以分析样品的吸波性能。由传输线理论可知,材料的输入阻抗为:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left[j\left(\frac{2\pi fd}{c}\right)\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}\right]$$
(1)

其中, Z<sub>0</sub>是空气的本征阻抗, 其值为 1, c 是真空中的光速, d 为厚度。Z<sub>in</sub> = Z<sub>0</sub>时, 为最完美的阻抗匹配, 即电磁波可以全部进入材料中。当电磁波从空间垂直入射到材料时,反射损耗 RL 可以表示为:

$$RL = 201g \left| \left( Z_{in} - Z_0 \right) / \left( Z_{in} + Z_0 \right) \right|$$
(2)

RL 用来估计材料的吸收特性,其值越小,材料的吸波性能越好。各组样品的最小反射损耗及其对应的频率、厚度以及该厚度下的有效带宽如表 1 所示。80%样品反射损耗达到-69.4 dB,但是厚度为 8 mm,这在实际应用中存在一定的困难。一般把 RL 小于-10 dB 的频率区间称为有效吸收带宽。50%样品在厚度为 1.7 mm 时,有效吸收带宽高达 5.7 GHz,在五组样品中有效带宽最宽。从表中还可以看出,随着羰基铁含量的增加,有效吸收频率向低频移动。各组样品在不同厚度时的 RL-f 曲线如图 2 所示。随着厚度的增加,所有样品的反射损耗峰均向低频移动,这可以从公式(1)中得到较好的说明。厚度相同时,随着羰基基铁的增加,反射率损耗峰也向低频移动,这是因为羰基铁的有效吸收频段较铁氧体低。

在 1 mm~3 mm 厚度时, 2~18 GHz 频段内,只有 50%、25%、20%样品的 RL < -10 dB,这说明在复合材料中减小钡铁氧体的含量,可以降低有效吸波时材料的厚度,实现更"薄"。钡铁氧体含量为 50% 的复合材料可以在保证有效吸收带宽的条件下,将材料厚度降到最低。

	RLmin		EAB/GHz		Thickness
	Values/dB	Position/GHz	Range	Width	/mm
80%	-69.4	9.45	8.35~10.35	2	8
75%	-49.5	11.85	10.85~13.05	2.2	6.2
50%	-41	12.55	9.2~14.9	5.7	1.7
25%	-45.3	4	2.7~5.75	3.05	3.2
20%	-41.7	4.65	3.2~6.75	3.55	3

 Table 1. RLmin and EAB values of composite materials with different contents of barium ferrites

 表 1. 复合材料的最小反射损耗及有效吸收带宽



**Figure 2.** Reflection Loss of composite materials with different thickness (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm 图 2. 不同钡铁氧体含量的复合材料在不同厚度的反射损耗(a) 1 毫米; (b) 2 毫米; (c) 3 毫米; (d) 4 毫米; (e) 5 毫米;

图 2. 个问切扶剿体召里的复合材料在个问序是的及别  $_{0}$  和 (a) 1 毫木; (b) 2 毫木; (c) 3 電木; (d) 4 電木; (e) 5 電木; (f) 6 毫米

## 4. 结论

在钡铁氧体中加入羰基铁粉,实现复合材料电磁参数的调控,展宽有效吸收带宽、增大电磁波的吸收效能并能减小材料厚度;当钡铁氧体含量为50%,厚度为1.7 mm,反射损耗峰值为-41 dB,有效吸收频率为9.2~14.9 GHz,带宽可达5.7 GHz,是一种性能优良的微波吸收材料。

## 基金项目

成都工业学院校级项目(编号: 2021ZR031)、成都工业学院校级重点项目(编号: 2023ZR005)对本研 究工作提供了资金支持。

## 参考文献

- [1] Duan, Y.-P., Liu, Y., Cui, Y.L., et al. (2018) Graphene to Tune Microwave Absorption Frequencies and Enhance Absorption Properties of Carbonyl Iron/Polyurethane Coating. Progress in Organic Coatings, 125, 89-98. <u>https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.08.030</u>
- [2] 王轩,朱冬梅,向耿,等. 羰基铁吸收剂的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(12): 21-25, 31.
- [3] Zheng, S.N., Zeng, Z.H., Qiao, J., et al. (2022) Facile Preparation of C/MnO/Co Nanocomposite Fibers for High-Performance Microwave Absorption. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 155, Article 106814. <u>https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106814</u>
- [4] Cao, X.L., Jia, Z.R., Hu, D.Q., *et al.* (2022) Synergistic Construction of Three-Dimensional Conductive Network and Double Heterointerface Polarization via Magnetic FeNi for Broadband Microwave Absorption. *Advanced Composites*

and Hybrid Materials, 5, 1030-1043. https://doi.org/10.1007/s42114-021-00415-w

- [5] Wang, X., Pan, F., Xiang, Z., *et al.* (2020) Magnetic Vortex Core-Shell Fe3O4@C Nanorings with Enhanced Microwave Absorption Performance. *Carbon*, **157**, 130-139, <u>https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.10.030</u>
- [6] 王璟, 张虹, 白书欣, 等. 铁氧体/羰基铁粉复合吸波材料研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(1): 39-41.
- [7] Dosoudil, R. and Ušáková, M. (2017) High-Frequency Absorbing Performances of Carbonyl Iron/MnZn Ferrite/PVC Polymer Composites. *Acta Physica Polonica A*, **131**,687-689. <u>https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.687</u>
- [8] Pullar, R.C., Appleton, S.G. and Bhattacharya, A.K. (1998) The Manufacture, Characterisation and Microwave Properties of Aligned M Ferrite Fibres. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 186, 326-332. https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00107-3
- [9] 宋振家. 基于 M 型钡铁氧体吸波超材料电磁特性研究[D]: [硕士学位论文]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [10] 沈国柱. 铁氧体复合材料吸波性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2021.
- [11] 庞超,梁迪飞,陈慧,等.P波段镍锌铁氧体复合材料电磁吸收性能研究[J].电子元件与材料,2018,37(7):4.