

# 基于片状羰基铁的复合橡胶电磁性能研究

张存瑞, 赵永罡, 米玉洁, 周必成, 王 喆, 张小刚, 张贵恩

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: 2023年2月2日; 录用日期: 2023年3月6日; 发布日期: 2023年3月13日

## 摘 要

本文以片状羰基铁吸收剂作为硅橡胶基吸波材料的主吸收剂, 通过混炼分散、模压硫化的方式制备出硅橡胶基吸波材料, 并对制备的硅橡胶基吸波材料的电磁参数和雷达波反射率进行了表征。通过对电磁参数和雷达波反射率的实验结果分析可以发现: 通过模压的方式制备的橡胶基吸波材料具备介电损耗和磁损耗双复型损耗特性, 通过对橡胶基吸波材料的雷达波反射率的仿真模拟可以发现, 基于片状羰基铁粉体的橡胶基吸波材料的低频雷达波反射率吸波效果较好。本文同时对双复损耗型吸波材料的雷达波吸收机理进行了分析。

## 关键词

硅胶, 片状羰基铁, 电磁特性

# Study on Electromagnetic Properties of Flake Carbonyl Iron Based Composite Rubber

Cunrui Zhang, Yonggang Zhao, Yujie Mi, Bicheng Zhou, Zhe Wang, Xiaogang Zhang, Gui'en Zhang

No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper flake carbonyl iron absorbent was used as the main absorbent of silicone rubber-based microwave absorbing material to prepare silicone rubber-based microwave absorbing material by mixing dispersion and molding vulcanization. The electromagnetic parameters and radar reflectivity of the prepared silicone rubber-based microwave absorbing material were cha-

racterized. Through the analysis of the experimental results of electromagnetic parameters and radar wave reflectivity, it can be found that the rubber-based absorbing material prepared by molding has the characteristics of dielectric loss and magnetic loss dual complex loss. Through the simulation of the radar wave reflectivity of the rubber-based absorbing material, it can be found that the rubber-based absorbing material based on the flake carbonyl iron powder has better low-frequency radar wave reflectivity and absorption effect. At the same time, the radar wave absorption mechanism of the dual-complex loss absorbing material is analyzed.

## Keywords

Rubber, Carbonyl Iron Power, Electromagnetic Properties

Copyright © 2023 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

电磁辐射是电子设备与电子系统之间存在的普遍问题，电磁辐射已经成为影响电子设备和电子系统稳定性的一个关键因素。因为电磁辐射干扰不但可能导致电子设备和电子系统出现误操作等现象，严重时会导致电子系统和电子设备出现不可逆的破坏，不仅会导致军用电子信息和数据电磁泄露，被敌方发现或者截获，同时也会危害和伤害处于电磁环境下人员的身心健康。在这种背景下，如何研究在隐身以及电磁兼容电磁干扰领域的吸收效果好、轻质的吸波材料具有重要的理论和现实意义，同时对于医疗保健、电子信息等领域，也迫切需要研制和开发吸收效果好、轻质的吸波材料，以满足电子设备对电磁兼容的要求。如果想要实现对电磁波的高效吸收，吸波材料必须满足以下条件：第一个条件就是所谓的“诱波深入”，也就是材料要满足阻抗匹配条件，满足这个条件的基本要求是雷达波入射到吸波材料表面后不至于被散射而是可以进入材料内部；第二个条件是所谓的“各个击破”，也就是所说的要满足材料对电磁波的损耗条件，即满足将进入材料内部的电磁波尽可能多地转化或者转变为热能以及其他形式的能量[1]。可以通过改变电磁波的相位和自身的损耗这两个条件来满足材料对电磁波的吸收。而通过改变吸收剂本身的尺寸和形状等本身的特性以及通过调整吸波材料的有效厚度和吸收剂本身的浓度等方式是工程实际中比较常用的方法。这种方法可以拓宽吸波材料的有效吸收带宽和吸收峰的强度和位置，在实际应用中可以有效拓宽材料的使用范围，具有重要的研究意义和现实实用化意义。

根据传统吸波材料的吸收机理，吸波材料吸收电磁波首先是通过改变反射到表面的电磁波的能量完成的。在这种理论指导下，首先要实现材料的阻抗匹配条件以使入射电磁波尽可能多地进入吸收体表面，然后通过磁损耗方式和电损耗方式使得进入材料内部的电磁波能量转化为热能或者其他形式的能量成为国内外吸收剂研发的重点。由于复数磁导率( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ )和复数介电常数( $\mu = \mu' - j\mu''$ )是表征吸波材料电磁参数性能的两个重要参数，其中 $\mu''$ 和 $\epsilon''$ 这两个参数分别表示材料本身的磁损耗特性和电损耗特性， $\mu''$ 和 $\epsilon''$ 的数值越大那么材料本身的磁损耗和电损耗特性越强。满足复数磁导率和复数介电常数相等使得材料最大限度进入材料内部的条件；同时，提高 $\mu''$ 和 $\epsilon''$ 可以保证材料将进入吸波体的电磁波能转化为热能等其他形式的能量而被完全消耗。因为 $\mu$ 的值远低于 $\epsilon$ 的值，所以对于多数金属磁性吸波材料来说，如何寻找具有适中的介电常数和高的复数磁导率是摆在科研工作者面前的主要和重要的工作[2] [3] [4] [5]。

镍、钴、铁及镍、钴、铁的合金是主要的金属磁性吸波材料。对于镍、钴、铁及镍、钴、铁的合金

在不同频段下的电磁参数和吸波特性和电磁特性,国内外早就开展过广泛而深入的研究[6][7][8][9]。对于铁氧体等金属磁性吸波材料来说,本身具有比较高的居里温度、高的磁导率和高的饱和磁化强度和剩余磁化强度。但是这类材料的共振频率较低,导致这个结果的主要原因是铁氧体类吸波材料本身具有比较低的体积电阻率,同时材料的磁晶各向异性场比较小导致磁晶各向异性较低。这一类材料的趋肤效应在高频的应用中更明显。同时材料的高复数介电常数会导致高的电导率和介电常数,这种现象导致材料的自由空间的阻抗匹配特性下降。为了解决材料趋肤效应和金属本身的电磁参数之间的矛盾,通过控制材料的粒径控制到纳米级或者亚微米级,并将材料在某几个或者一个维度上保持材料的形状各向异性是很有必要的。因为由于表面各向异性,应力各向异性或形状各向异性等方法的引入,可以提高吸波材料的高频共振频率,还可以有效地抑制吸波材料本身的趋肤效应。制备片状金属磁性材料的主要制备方法是球磨法,当球磨法制备的片状金属磁性材料的厚度低于样品的趋肤深度,比如说羰基铁吸收剂(1 mm, 1 GHz)时,那么材料本身趋肤效应对材料的雷达波反射率的影响效应就会得到了有效抑制,可以大大提高传统金属磁性材料的实际应用范围和效果。

通过对国内外文献的分析发现,磁性空心微球作为雷达波吸波材料已经被研制出来,这种材料不但具有较低的密度,而且可以有效抑制趋肤效应,是一种新型的轻质化吸波材料。国内外实用化的常用吸收剂主要是羰基铁,形状大部分都是洋葱状,由于这类材料本身趋肤效应的限制,导致要想实现材料的高导磁特性,必须依靠提高材料的堆积密度才能实现。而片状羰基铁作为洋葱状羰基铁的替代产品,具有更大的形貌各向异性,可以实现材料的高导磁,并且具有低密度的特点,是一种比较有前景的吸收剂。本论文拟通过对片状羰基铁橡胶基复合材料电磁特性的研究,为研发一种新型轻质高效的低频复合吸波材料提供试验和理论依据。

## 2. 实验

### 2.1. 片羰基铁橡胶复合材料的制备

将片状羰基铁按照与硅胶(硬度为 30)的质量比为 83:17、84:16、85:15、86:14、87:13 的比例制备样品 A、B、C、D、E。上述样品在在开炼机上混合均匀,后加入双二五硫化剂,通过混炼的方式混合均匀后,将混炼胶放到预制的模具中,在 15 MPa 压力下,180℃ 的温度下,压制成外径为 7.00 mm,内径为 3.0 mm 的橡胶复合吸波材料样品,开模后采用适当的长度,并将吸波材料打磨,打磨成的厚度控制到 2 mm,并记下具体厚度。材料的具体配比见表 1 所示。

**Table 1.** Correspondence table of electromagnetic parameters sample numbers

**表 1.** 电磁参数样品编号对应表

样品编号	样品份数(%)		
	硅胶	羰基铁	双二五
A	17	83	0.17
B	16	84	0.16
C	15	85	0.15
D	14	86	0.14
E	13	87	0.13

### 2.2. 性能测试

将制好的橡胶基吸波材料样品置于测试系统的同轴线夹具内测试,通过测试可以获得 S22、S21、S11

和 S12 这四个端口的具体参数，项目利用 AV3629 型矢量网络分析仪(中国电科 41 所)自带的计算程序得到复合材料的电磁参数：磁导率实部、磁导率虚部、介电常数实部、介电常数虚部。为了减少实验误差，测试之前要使用专用的校准设备对设备和系统进行双端口校准。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 复合材料的电磁参数分析

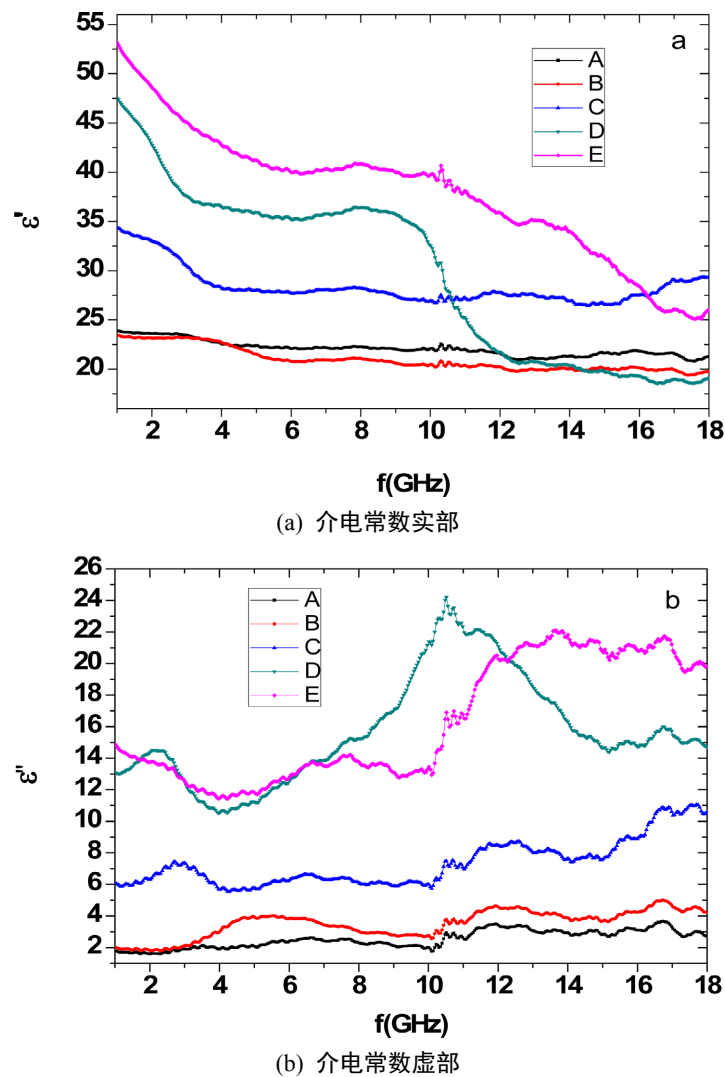
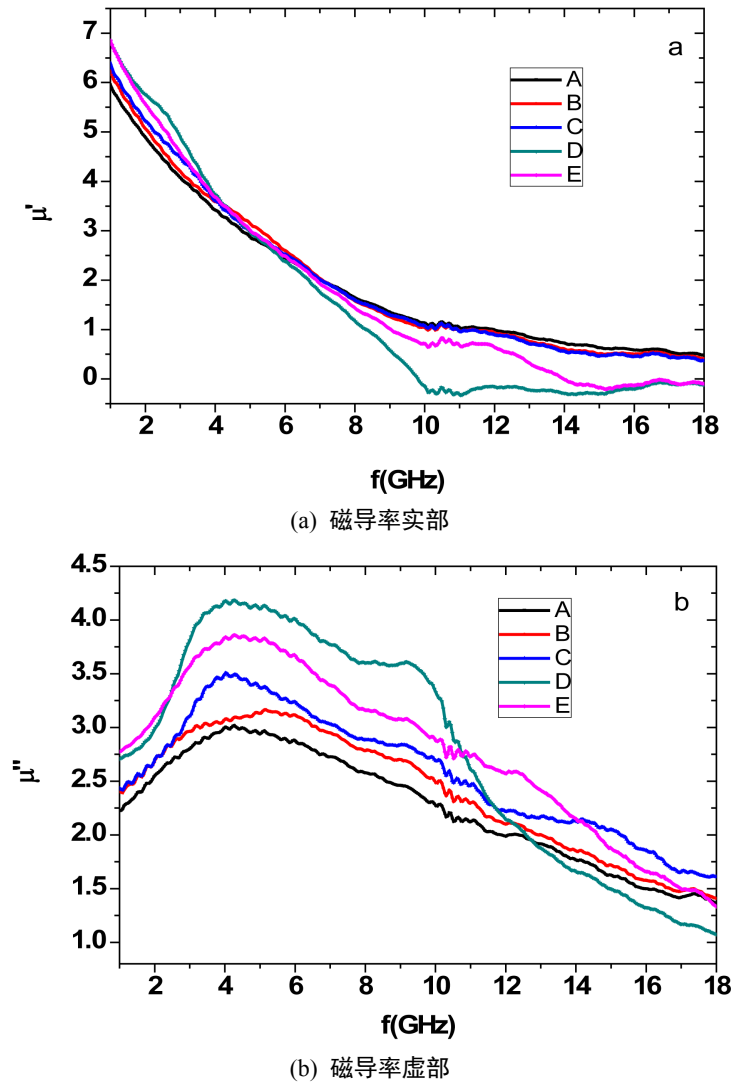


Figure 1. Graph of dielectric constant of composite material  
图 1. 复合材料介电常数曲线图

图 1 为橡胶基复合材料复数介电常数随频率变化的曲线，由以上曲线可知制备的橡胶基复合吸波材料的介电常数随着含量的增加是呈现整体增加的趋势的，片状羰基铁粉复合材料的介电常数实部随着频率减小数值逐渐增加的趋势。对于片状羰基铁粉复合材料来说，随着频率的变化，其介电常数实部变化比较小，同时由于材料本身的介电常数比较低，有利于材料实现匹配条件。材料的介电常数虚部  $\epsilon''$  和电导率  $\rho$  的关系为： $\epsilon'' = 1/2\pi\rho\epsilon_0f$ 。其中  $\epsilon_0$  是真空介电常数， $f$  为电磁波的频率。由上述公式可以发现，材料本身的  $\epsilon''$  越大，表明材料的体积电阻率  $\rho$  越小。一般来说，复合吸波材料主要材料的极化与介电常数的

实部有关，材料本身的介电常数的虚部代表了材料的介电损耗。对于金属基吸波材料内部，通常包含两种极化机制：偶极矩极化和空间电荷极化。在碳基铁表面由于存在橡胶绝缘体，能阻止其在橡胶基体中形成电导网络结构，从而降低了空间电荷极化。弱的极化和高的电阻，导致了低的介电常数虚部。



**Figure 2.** Curves of magnetic permeability of composite materials  
**图 2.** 复合材料磁导率曲线图

图 2 为复合材料磁导率曲线，由曲线可知片状羰基铁吸收剂制备的吸波材料的磁导率比较大，且随着含量的增加而逐渐增加。而复合材料的磁导率虚部和实部在橡胶材料和片状羰基铁材料之间变化。根据有效介质理论，复合材料的磁导率可以表示为：

$$\mu_{eff} = \mu_0 \frac{2\mu_0 + \mu_m + 2V_m(\mu_m - \mu_0)}{2\mu_0 + \mu_m - V_m(\mu_m - \mu_0)}$$

这里， $\mu_m$  和  $\mu_0$  是磁性材料的起始磁导率， $V_m$  为磁性粒子的体积分数， $\mu_{eff}$  为复合材料的有效磁导率，试验数据遵从有效介质理论。材料的磁损耗特性可以通过调节材料的磁导率和配比进行调控，以提高材料本身的磁损耗特性。

### 3.2. 复合材料反射率仿真分析

图 3 为复合材料的反射率仿真曲线, 仿真厚度为 1.5 mm, 由仿真结果可知, 当材料的厚度不变时, 随着材料片状吸收剂含量的增加, 材料的谐振峰值由高频向低频方向移动, 导致材料的反射率峰值随着材料密度的增加向低频移动, 但是 -10 dB 吸收带宽逐渐降低, 这个的主要原因是随着材料介电常数的增加, 材料的阻抗匹配特性变差, 通过实验可知, 通过对吸收剂的配比的调节可以提高材料的综合吸波效果, 是一种有前景的低频吸波材料。

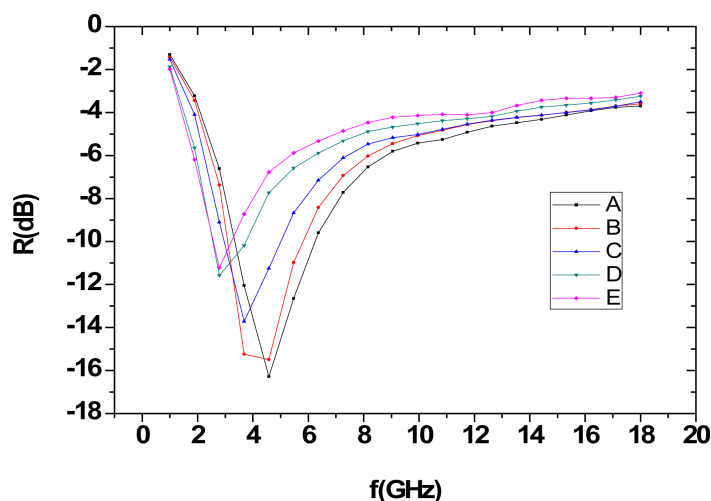


Figure 3. Composite material reflectance curve

图 3. 复合材料反射率曲线

## 4. 结论

(1) 本文采用片状羰基铁和橡胶复合的方式可以对材料的电磁参数进行调整, 进而满足使用要求。

(2) 通过对片状羰基金属粉吸收剂配比的调节可以提高材料的综合吸波效果, 特别是将吸收峰位置调到低频, 是一种有前景的低频吸波材料。

## 参考文献

- [1] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁屏蔽和吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 315-320.
- [2] Wang, Z.Z., Bi, H., Wang, M., et al. (2015) High Microwave Permittivity and Resonance-Antiresonance Electromagnetic Behaviors of Flake-Shaped Cobalt Microcrystals. *Materials Chemistry and Physics*, **159**, 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.03.067>
- [3] 霍天旭, 乔亮, 王涛, 等. 取向易面各向异性羰基铁粉体的高频磁性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(16): 18.
- [4] 郑夏莲, 朱正吼, 卢慧芳. 纳米 FeNi 粉体的吸波性能研究[J]. 功能材料, 2014, 24(45): 24014-24018.
- [5] 张伶俐, 曹红, 于轩, 等. 热处理温度对 Fe-50Ni 磁粉铁芯性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2016, 37(1): 60-62.
- [6] 王忠友, 江建军, 张传坤, 等. Cr 代替部分 Si 对 Sendust 微波吸收特性的影响[J]. 金属功能材料, 2008, 15(3): 15-17.
- [7] 王轩, 朱冬梅, 向耿, 等. 羰基铁吸收剂的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2014, 28(12): 17-27.
- [8] 刘姣. 包覆型羰基铁粉微波吸收剂的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京工业大学, 2008.
- [9] 孙新. 基铁粉及其复合材料的电磁性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.