

# Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS 复合材料的微波吸收性能研究

钟锦鹏<sup>1,2</sup>, 谭果果<sup>2</sup>, 刘新才<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 中科院宁波材料技术与工程研究所 磁性材料与器件重点实验室, 浙江 宁波 315201)

**摘要** 随高频电子器件快速发展, GHz 频段电磁污染成为严重问题。本文旨在研究用稀土软磁材料为微波吸波材料。以稀土软磁材料 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub> 为填料, 制备 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS 复合吸波材料, 研究不同质量分数的 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS 复合材料在 2~18 GHz 内的微波吸收性能及机理。结果表明: 质量分数为 70% 时, 复合材料综合吸波性能最好。在厚度为 1.6 mm, 频率为 13.9 GHz 处具有 -57.5 dB 的最低反射损耗, 有效带宽为 7.62 GHz, 表明 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS 复合材料的 GHz 高频吸收前景好。其反射损耗峰的变化趋势可由 1/4 波长抵消模型解释, 最佳反射损耗峰主要由阻抗匹配和 1/4 波长相消共同决定。

**关键词** 稀土软磁材料; 微波吸收; 反射损耗

中图分类号 TG146.4

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2021)03-0108-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20210507.001

## Researches on microwave absorption properties of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites

ZHONG Jinpeng<sup>1,2</sup>, TAN Guoguo<sup>2</sup>, LIU Xincai<sup>1</sup>

(1. Faculty of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Key Laboratory of Magnetic Materials and Devices, Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract** With the rapidly development of the high frequency electronic devices, electromagnetic wave pollution at GHz frequency has become a serious problem. This study aims to investigate rare earth soft magnetic materials as excellent microwave absorption materials. The Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites were prepared as microwave absorption materials on basis of the rare earth soft magnetic materials Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>. The microwave absorbing properties and mechanisms of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites with various mass fraction were studied in the frequency range from 2 GHz to 18 GHz. The results show that the Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites with 70% mass fraction of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub> exhibit the most optimal comprehensive microwave absorbing performance, and achieve the lowest reflection loss of -57.5 dB at 13.9 GHz with a thickness of 1.6 mm, at which its effective absorption bandwidth is 7.62 GHz. It indicates that Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composite is a promising microwave absorption material for high-frequency application. Besides, the variation trend of *RL* peak can be explained by the quarter-wavelength cancellation model and the peak of optimal *RL* are mainly determined by impedance matching and quarter-wavelength cancellation.

**Keywords** rare earth soft magnetic materials; microwave absorption; reflection loss

近年来, 随电子通信、国防科技等领域的发展, 各种电子器件的工作频率趋于高频化(GHz), 高频条件下的电磁波污染成为严重问题<sup>[1]</sup>。因此, GHz 频率的吸波材料已引起科学界的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。其中, 用于该频段常见的吸波材料有铁氧体、磁性金属等传统磁性材料, 这类材料主要通过磁电耦合吸收电磁波, 减少电磁波反射。Zhang 等<sup>[5]</sup>研究了羰基铁/Fe<sub>91.2</sub>Si<sub>3.1</sub>P<sub>2.9</sub>Sb<sub>2.8</sub>/石蜡复合物的吸波性能, 结果表明, 当粉末的质量分数为 80% 时, 复合材料在厚度为 2.5 mm, 频率为 5.2 GHz 时, 对应最小反射损耗 *RL* 为 -37 dB, 带宽小于 2 GHz。该复合材料的厚度、吸收强度等性能优异, 但有效吸收

带宽不足。Jiao 等<sup>[6]</sup>制备了 Ni<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Nd<sub>0.04</sub>Fe<sub>1.96</sub>O<sub>4</sub> 铁氧体聚苯胺纳米复合物, 在厚度为 4.0 mm、频率为 8.4 GHz 时, 最小 *RL* 为 -37.4 dB, 有效带宽为 4.9 GHz。该复合材料的有效吸收带宽明显改善, 但厚度过大不利于吸波材料的实际应用。传统磁性吸波材料对高频电磁波的综合吸收能力较差, 主要原因是传统磁性材料受 Snoek 极限<sup>[7]</sup>限制, 磁导率和共振频率不能同时获得较大值, 表现为在高频下无法获得较大的磁导率, 限制了高频吸收材料“薄、轻、宽、强”的设计需求。因此, 高频高性能磁性材料对获得良好的吸波性能至关重要。稀土磁性材料 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub> 具有磁晶各向异性, 存在易磁化

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-05-06

基金项目: 宁波市 2025 重大专项(2018B10031; 2018B10085)

第一作者: 钟锦鹏, 男, 硕士研究生; 从事稀土软磁和吸波材料研究。E-mail: 275351184@qq.com。

通信作者: 刘新才, 男, 教授; 从事新型磁性材料性能调控技术研究。E-mail: liuxincai@nbu.edu.cn。

面,突破了Snoek极限,从而能获得高磁导率和共振频率,是理想的高频磁性吸波材料<sup>[8-9]</sup>。但Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉体直接作为吸波材料存在阻抗难匹配及成型困难的问题,通过与高分子材料复合使用,调控磁粉比例可获得良好的阻抗匹配,进而获得高频优异的吸波性能。另外,相较常用黏接剂石蜡和环氧树脂,聚二甲基硅氧烷(PDMS)<sup>[10-11]</sup>具有更好的电绝缘性、化学稳定性、抗剪切能力等特性,是优良的吸波材料黏接剂。鉴于上述背景,作者将Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>与PDMS复合制备高频电磁波吸收材料,通过调控Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末在PDMS中的含量,分析其对电磁特性和吸波性能的影响,对吸波机理进行分析。

## 1 试验方法及表征

### 1.1 样品制备

Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末以质量分数大于99.9%的金属钇(Y)、铁(Fe)和钴(Co)为原料,按各元素占比进行称量配料。其中,增配质量分数为5%的稀土元素Y补偿高温蒸发损失。用熔炼炉在氩气下熔炼得到Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>合金。用中碎机粗破碎、气流磨细破碎获得Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末。按下述步骤进行样品制备:将Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末与聚二甲基硅氧烷(PDMS)按不同质量分数(60%、65%、70%、75%、80%、85%)均匀混合,在真空脱泡机中脱泡0.5 h至无气泡,模具定型,放于烘箱90℃固化2 h。同轴测量样品利用配套模具冲制得到环形样品,外径为7 mm,内径为3.04 mm。

### 1.2 样品表征

用Cu-K $\alpha$ 辐射源的X射线衍射仪(XRD, Bruker D8 ADVANCE)对Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末晶体结构进行表征;磁粉的磁性能用振动样品磁强计(VSM, Lakeshore 7410)在室温下测定其磁滞回线;用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS EVO18)观察磁粉形貌;用激光粒度分析仪(LP-SA, HELOS-OASIS)分析磁粉粒度分布;用矢量网络分析仪(VNA, Agilent N5225A)的同轴法对复合材料复数介电常数和磁导率在2~18 GHz频率进行测量。

## 2 结果与分析

### 2.1 磁粉性能

图1为Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末的物相结构、磁性能及微观形貌图。由图1a可知,Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末晶体结构为菱方Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub>类型<sup>[12]</sup>。Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末的典型磁滞回线,如图1b所示。其比饱和磁化强度为150.95 A·m<sup>2</sup>/kg,表现出良好的磁性能。图1c、d为Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末的微观形貌和粒径分析图。可知,Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末的表面光滑,接近

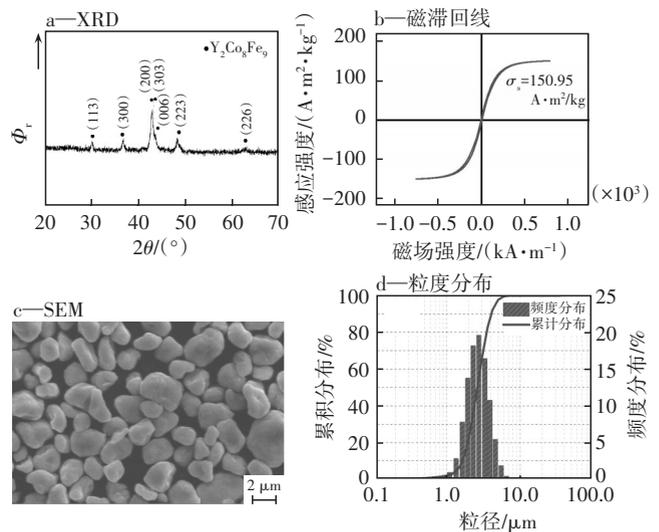


图1 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>粉末的物相结构、磁性能及微观形貌

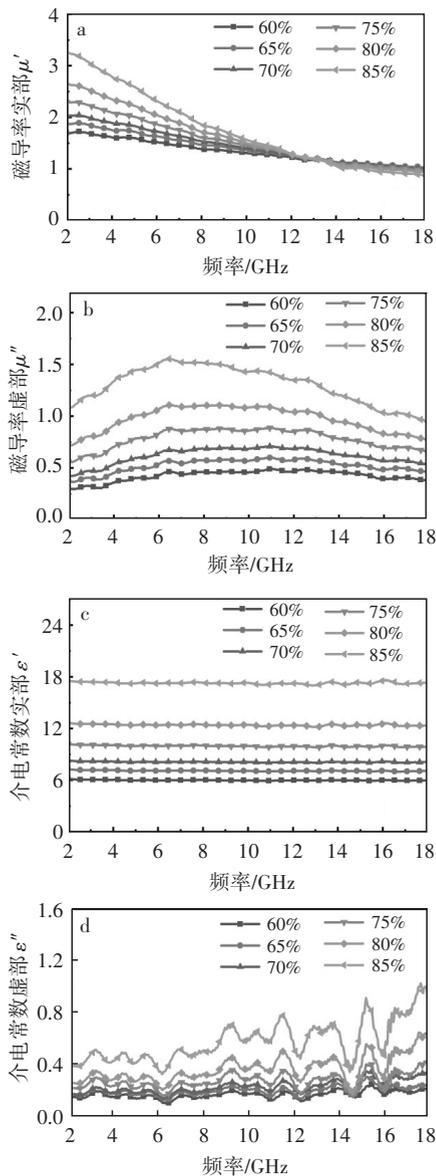
Fig.1 Phase structure, magnetic properties and micromorphology of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub> powders

球形颗粒,尺寸主要为1~6 μm。平均粒径为2.6 μm,可很大程度避免趋肤效应,提高磁粉利用率。这是因为导电性好的导体,趋肤深度随频率升高而变小,特别在频率为GHz时,趋肤深度一般在微米甚至纳米级,电磁波很难穿透磁粉更深的内部,降低了磁粉有效利用率。另外,圆滑表面减少了磁粉间接触面积,进而减少材料的导电通路使得复合材料的导电性减弱,降低介电常数。较低的介电常数有利于提高阻抗匹配,增强微波吸收性能<sup>[13]</sup>。

### 2.2 电磁特性及吸波性能

众所周知,吸波材料与电磁波相互作用通过复数磁导率( $\mu_c = \mu' - j\mu''$ )和复数介电常数( $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$ )表征<sup>[14]</sup>。图2为不同含量Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料的电磁参数。其中,复数磁导率 $\mu_c$ 和复数介电常数 $\epsilon_c$ 的实部( $\mu'$ ,  $\epsilon'$ )表示磁能和电能的存储能力,虚部( $\mu''$ ,  $\epsilon''$ )表示消耗能力<sup>[15]</sup>。对于固定质量分数的复合材料,随频率增加,复合材料磁导率实部减小,虚部先增后减。此现象主要由稀土软磁材料的自然共振导致。对于不同含量的Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合物,随含量增大,复合材料的磁导率实部、虚部均增大,这是由比饱和磁化强度增加和非磁性材料占比降低造成<sup>[16]</sup>。磁粉含量除影响材料的磁性能外还影响电性能,复合材料的介电常数实部和虚部也分别随磁粉含量增加而增大。随磁粉含量增大,磁粉有效界面增加,极化作用和导电性增强,使介电常数的实部、虚部都增大。因此,随含量提高,复合材料的电磁参数整体都增加。

为进一步探讨损耗机制,计算磁导率的损耗角正切( $\tan\delta_m = \mu''/\mu'$ )和介电常数的损耗角正切( $\tan\delta_e = \epsilon''/\epsilon'$ ),如图3所示。可知,磁导率的 $\tan\delta_m$ 随磁粉含量增

图2 不同含量Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料电磁参数Fig.2 Electromagnetic parameter of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites with different contents

大而增大,有实质性提升。介电常数的 $\tan\delta_e$ 在整个频率范围内轻微波动,随含量增大,增幅不大。表明随磁粉在PDMS中含量增加,介电损耗无显著增大,其主要原因是PDMS具有良好的电绝缘性,使介电性能减

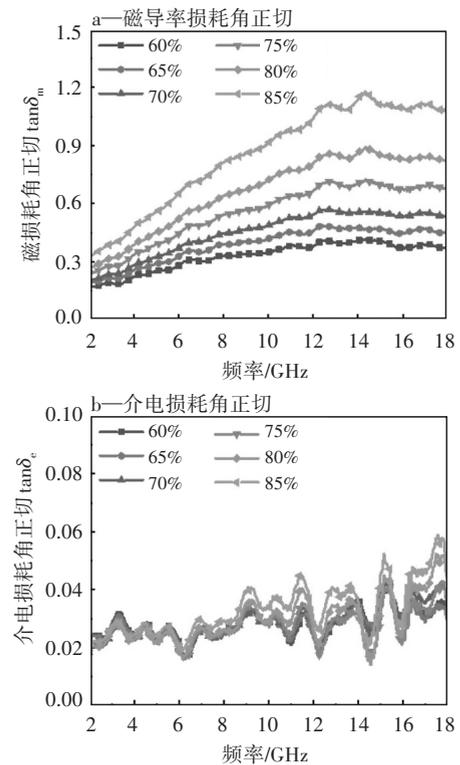
图3 Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料磁导率和介电损耗角正切

Fig.3 Magnetic loss tangent and dielectric loss tangent of

Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS composites

弱。另外,磁导率 $\tan\delta_m$ 值远大于介电常数 $\tan\delta_e$ ,表明在Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合物中,磁损耗占主要地位。但 $\tan\delta_e$ 越小,可减少电磁波反射,对扩展频宽越有利,可实现宽频、强吸收<sup>[17]</sup>。综上所述,随含量增加,复合材料的 $\tan\delta_m$ 和 $\tan\delta_e$ 同步增加, $\tan\delta_m$ 显著增加而 $\tan\delta_e$ 增幅很小,损耗以磁损耗为主。

从吸波理论出发,高性能吸波材料需满足<sup>[18]</sup>:良好的自由空间与吸波材料的阻抗匹配;材料对电磁波有很强的衰减能力。第1个条件保证电磁波最大可能地进入吸波材料内部,减少表面反射,这是决定吸波性能的关键参数。第2个条件表现为磁电损耗对电磁波的损耗能力,保证电磁波在材料内部最大限度的消散。因此,计算Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料的衰减常数 $\alpha$ <sup>[19]</sup>和相对输入阻抗 $Z$ <sup>[20]</sup>供进一步讨论:

$$Z = |Z_{in}/Z_0| = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh\left(j\left(\frac{2\pi fd}{c}\right)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}\right); \quad (1)$$

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

式中: $Z_0$ 为自由空间阻抗; $Z_{in}$ 为材料特征阻抗; $d$ 为吸波材料厚度; $f$ 为电磁波频率; $c$ 是真空中光的传播速度; $\epsilon_r$ 为复数介电常数; $\mu_r$ 为复数磁导率。为表征不同含量的微波吸收性能,相对输入阻抗和衰减常数随频率的变化,如图4所示。根据阻抗匹配规则,相对输入

阻抗 $Z_{in}/Z_0$ 越接近1,阻抗匹配越好<sup>[21]</sup>。由图4a可知,随含量增加,相对输入阻抗值逐渐减小。质量分数为60%、65%时,相对输入阻抗的值大于1。而质量分数为70%、75%、80%、85%时,可在不同频率达到较好的阻抗匹配,质量分数为70%的Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材

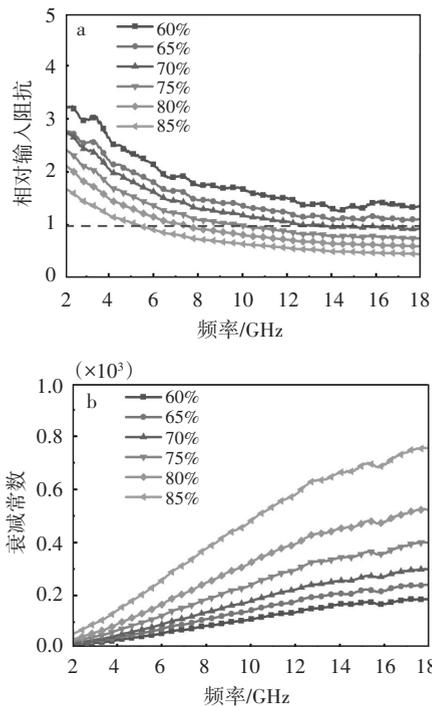


图4 不同含量复合材料相对输入阻抗和衰减常数随频率变化  
Fig.4 Relative input impedance and attenuation constant of composites with different contents of Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>

料相对输入阻抗最优,在频率为12~18 GHz有良好的阻抗匹配。由图4b可知,衰减常数随频率增加而增加,表明吸波材料对高频电磁波具有更强的损耗能力。且随含量提高,衰减能力明显增强,也表示磁粉含量增加有助于提高电磁波损耗能力。

为研究材料的吸波性能,根据传输线理论,电磁反射损耗可由复数磁导率和介电常数参数计算<sup>[22]</sup>:

$$RL = 20 \lg |(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)|; \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left( j \left( \frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right). \quad (4)$$

图5为2~18 GHz频率不同厚度(1~3 mm,增量为0.1 mm)的Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料3D电磁反射损耗图。可知,随含量增加,相同厚度下反射损耗峰向低频移动。某特定含量下,随厚度增加,RL峰向低频移动。在不同含量下,Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料在1~3 mm反射损耗能达到-10 dB,总体吸波性能良好。质量填充率在70%以上的复合材料具有-40 dB以下的反射损耗,表现出极优异的吸波性能,是由于质量分数大于70%的复合材料比质量分数为60%和65%的复合物具有更好的阻抗匹配和衰减常数,有利于对微波的强吸收。最优吸波性能:质量分数为70%时,厚度为1.6 mm的Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合物反射损耗在13.9 GHz达-57.5 dB,有效带宽(RL<-10 dB)为7.62 GHz。质量分数为75%的复合物在厚度为1.8 mm、频率为9.7 GHz时反射损耗达-41.3 dB,小于-10 dB的带宽为5.19 GHz。对于质量分数为80%的复合物,在厚度为1.9 mm和频率为7.33 GHz时,RL为-45.1 dB,带宽为3.76 GHz。质量分数为85%的复合物在厚度为1.9 mm、频率为5.36 GHz时RL为-55.8 dB,其带宽为2.6 GHz。值得关注的是,质量分数为70%的Y<sub>2</sub>Co<sub>8</sub>Fe<sub>9</sub>/PDMS复合材料可在低填充率和厚度下,具有更优异的反射损耗和带宽,主要原因是其具有最优的阻抗匹配和不错的衰减能力。

为解释RL峰的变化规律(图5)及更好地理解吸波机理,用1/4波长抵消模型描述反射损耗峰的变化<sup>[23]</sup>:

$$t_m = \frac{nc}{4f_m \sqrt{|\epsilon_r| |\mu_r|}}, n=1, 3, 5, \dots \quad (5)$$

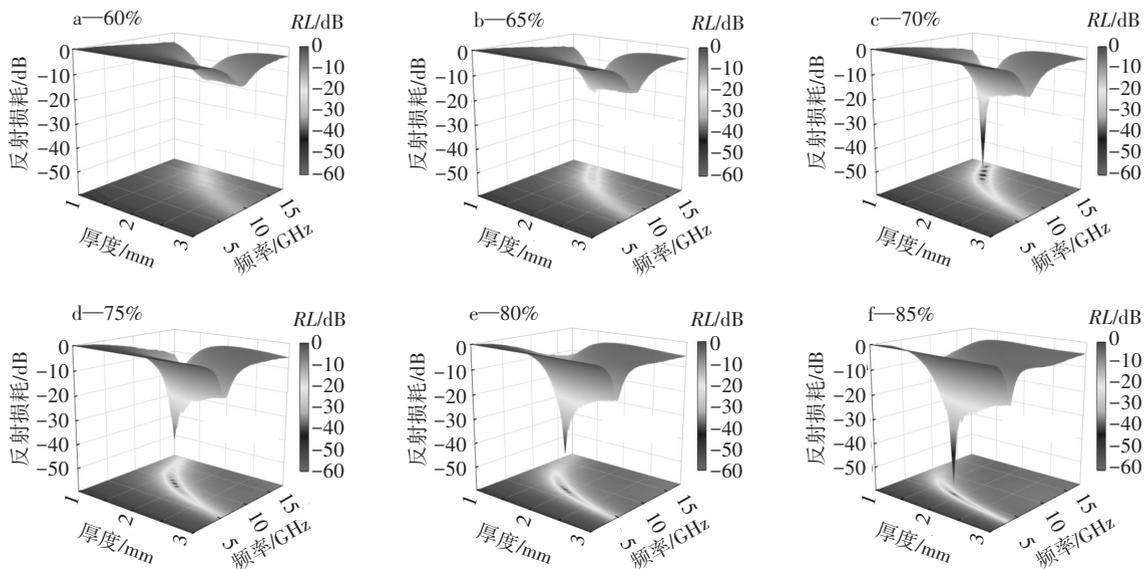


图5 2~18 GHz频率不同厚度复合材料3D电磁反射损耗图

Fig.5 3D RL plots of composites with various thicknesses in 2-18 GHz frequency

式中  $t_m$ 、 $c$ 、 $f_m$  分别为匹配的厚度、光速、反射损耗峰频率。入射到吸波材料内的电磁波部分被损耗吸收,其余电磁波通过吸波材料-金属界面反射到自由空间,与吸波材料-空气界面反射的电磁波产生干扰。当厚度满足  $1/4$  波长原理时,两种电磁波相位差为  $180^\circ$ ,在吸波材料表面相抵消。图 6 是质量分数为 70% 的  $Y_2Co_8Fe_9$ /PDMS 复合物  $RL$ 、 $1/4$  波长厚度、相对输入阻抗间的关系。图 6a 为不同厚度  $Y_2Co_8Fe_9$ /PDMS 复合材料  $RL$  与频率的关系。图 6b 为根据公式计算的  $1/4$  波长厚度。观察到  $RL$  曲线各峰的厚度与  $1/4$  波长计算值  $t_m$  重合,说明  $RL$  峰的位置可用  $1/4$  波长抵消模型解释。根据式(5),当质量分数一定时,  $|\epsilon_r||\mu_r|$  值为定值,频率与厚度成反比。当厚度一定时,含量增加,  $|\epsilon_r||\mu_r|$  增大,频率减小。 $1/4$  波长诠释了图 5 反映的  $RL$  峰变化规律,且在满足  $1/4$  波长理论一定厚度下,当相对输入阻抗接近 1 时,吸波材料表现出最强的吸收峰。此时,质量分数为 70% 的  $Y_2Co_8Fe_9$ /PDMS 复合材料在厚度为 1.6 mm 时微波吸收最高,最小  $RL$  值为  $-57.5$  dB,吸收带宽为 7.62 GHz,频率为 13.9 GHz。

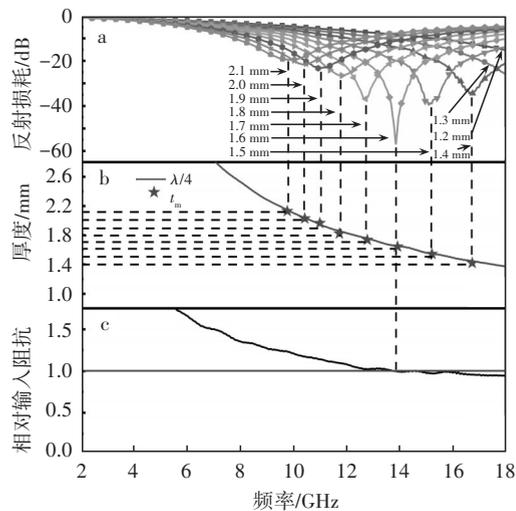


图 6 70% 复合物反射损耗、 $1/4$  厚度、相对输入阻抗间关系图

Fig.6  $RL$  values,  $\lambda/4$  thickness and relative input impedance of composites with 70% mass fraction

### 3 结论

1) 随磁粉含量增加,  $Y_2Co_8Fe_9$ /PDMS 复合物磁导率和介电常数的实部和虚部都增加,其中磁损耗占主要地位。相对输入阻抗随含量增加而降低,在质量分数为 70% 时达最优阻抗匹配,衰减常数随含量增加而增加。

2) 质量分数为 70%、75%、80%、85% 时比质量分数为 60%、65% 时具有更好的吸波性能,是由于良好的阻抗匹配和衰减常数增加。质量分数为 70% 的

$Y_2Co_8Fe_9$ /PDMS 复合材料获得最好的吸收性能,在频率为 13.9 GHz 时,最小  $RL$  值为  $-57.5$  dB,吸收带宽为 7.62 GHz,厚度为 1.6 mm。

3)  $1/4$  波长抵消模型解释了  $RL$  峰的变化规律,最佳的反射损耗峰主要由阻抗匹配和  $1/4$  波长抵消共同决定。

### 4 参考文献

- [1] ZHANG Xiaojun, ZHU Jiaqiang, YIN Penggang, et al. Tunable high - performance microwave absorption of  $Co_{1-x}S$  hollow spheres constructed by nanosheets within ultralow filler loading [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(49): 1800761.
- [2] YUAN Yue, WEI Shicheng, LIANG Yi, et al. Solvothermal assisted synthesis of  $CoFe_2O_4$ /CNTs nanocomposite and their enhanced microwave absorbing properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867: 159040.
- [3] DONG Jie, ZHOU Wancheng, WANG Chunhai, et al. Anisotropic particle geometry effect on magnetism and microwave absorption of carbonyl iron/polyimide composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 491: 165643.
- [4] GREEN M, LI Yong, PENG Zhonghua, et al. Dielectric, magnetic, and microwave absorption properties of polyoxometalate-based materials [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 497: 165974.
- [5] ZHANG Zhonglun, JI Zhijiang, DUAN Yuping, et al. The superior electromagnetic properties of carbonyl - iron /  $Fe_{91.2}Si_{3.1}P_{2.9}Sb_{2.8}$  composites powder and impedance match mechanism [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2012, 24(3): 968-973.
- [6] JIAO Zibao, YAO Zhengjun, ZHOU Jintang, et al. Enhanced microwave absorption properties of Nd-doped NiZn ferrite/polyaniline nanocomposites [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 25405-25414.
- [7] ZHAO Yanting, LIU Lin, HAN Jianü, et al. Effective modulation of electromagnetic characteristics by composition and size in expanded graphite /  $Fe_3O_4$  nanoring composites with high Snoek's limit [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 728: 100-111.
- [8] KONG L, YAO J, ZHANG M, et al. Magnetic properties of  $Sm_2(Fe_{1-x}Co_x)_{17}C$  and  $Y_2(Fe_{1-x}Co_x)_{17}C$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(10): 6154-6156.
- [9] YANG Jinbo, YANG Wenyun, LI Fashen, et al. Research and development of high-performance new microwave absorbers based on rare earth transition metal compounds: A review [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 497: 165961.
- [10] KIM K, LEE D, EOM S, et al. Stretchable metamaterial absorber using liquid metal-filled polydimethylsiloxane (PDMS) [J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(4): 521.

- [11] LING Kenyu, KIM K, LIM S. Flexible liquid metal - filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (PDMS) [J]. Opt Express, 2015, 23(16):21375-83.
- [12] GU Xisheng, TAN Guoguo, CHEN Shuwen, et al. Microwave absorption properties of planar - anisotropy  $Ce_2Fe_{17}N_{3-\delta}$  powders/silicone composite in X-band [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 424:39-43.
- [13] LI L Z, WEI J Z, XIA Y H, et al. High frequency electromagnetic properties of interstitial - atom - modified  $Ce_2Fe_{17}N_x$  and its composites [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2):022902.
- [14] LIU Dong, ZHANG Yan, ZHOU Chenhui, et al. A facile strategy for the core-shell FeSiAl composites with high-efficiency electromagnetic wave absorption [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818:152861.
- [15] OUYANG Jing, HE Zilong, ZHANG Yi, et al. Trimetallic Fe-CoNi@C nanocomposite hollow spheres derived from metal-organic frameworks with superior electromagnetic wave absorption ability [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(42):39304-39314.
- [16] REN Xiaohu, CHENG Yankui. Electromagnetic and microwave absorbing properties of carbonyl iron/BaTiO<sub>3</sub> composite absorber for matched load of isolator [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 393:293-296.
- [17] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014:84-110.  
LIU Shunhua, LIU Junmin, DONG Xinglong, et al. Electromagnetic wave shielding and absorbing material [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014:84-110. (in Chinese)
- [18] GE Chaoqun, WANG Liuying, LIU Gu, et al. Enhanced electromagnetic properties of carbon nanotubes and SiO<sub>2</sub>-coated carbonyl iron microwave absorber [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767:173-180.
- [19] LIU Peijiang, YAO Zhengjun, NG V M H, et al. Facile synthesis of ultrasmall Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on MXenes for high microwave absorption performance [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 115:371-382.
- [20] CHEN Fu, LUO Hui, CHENG Yongzhi, et al. Nickel/nickel phosphide composite embedded in N-doped carbon with tunable electromagnetic properties toward high-efficiency microwave absorption [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140:106141.
- [21] LING An, PAN Jing, TAN Guoguo, et al. Thin and broadband  $Ce_2Fe_{17}N_{3-\delta}$ /MWCNTs composite absorber with efficient microwave absorption [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787:1097-1103.
- [22] XIANG Zhen, HUANG Chuang, SONG Yiming, et al. Rational construction of hierarchical accordion-like Ni@porous carbon nanocomposites derived from metal-organic frameworks with enhanced microwave absorption [J]. Carbon, 2020, 167:364-377.
- [23] YAO Yonglin, ZHU Meiyong, ZHANG Chuanfu, et al. Effects of composition on the microwave absorbing properties of Fe<sub>x</sub>Ni<sub>100-x</sub> (x=0-25) submicro fibers [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(5):1099-1105.

### 致谢本期审稿专家(按姓氏笔画排名)

王 荣 王渠东 刘文才 刘昌奎 刘宗昌 芦 笙 李志农  
 李树奎 李晓静 李海元 李 萍 杨超珍 吴明在 邹敏明  
 张全孝 张振宇 张景贤 陈东高 陈 刚 宗 铎 孟庆森  
 赵红梅 钟 涛 种法力 贺定勇 聂凤明 贾成厂 栗卓新  
 钱坤明 徐春杰 高光发 郭 珉 陶春虎 彭 刚 葛 鹏

《兵器材料科学与工程》编辑部