

镍锌铁氧体吸波材料研究进展

谭春林 李宇东 陈肯 刘墨轩

(湖南航天磁电有限责任公司, 长沙 410299)

文 摘 综述了镍锌铁氧体吸波材料的研究情况。从磁性能、配方对吸波性能的影响,以及与其他材料复合对吸波性能的影响等方面,对镍锌铁氧体吸波材料进行比较全面的总结,并与我司研究情况进行对比,希望对镍锌铁氧体吸波材料的开发与应用提供支持。

关键词 镍锌铁氧体,吸波材料

中图分类号:TM277

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.01.003

Research Progress of NiZn Ferrite Microwave Absorbing Materials

TAN Chunlin LI Yudong CHEN Ken LIU Moxuan

(Hunan Aerospace Magnet & Magneto Co., LTD., Changsha 410299)

Abstract The research of nickel zinc ferrite microwave absorbing material is reviewed. A comprehensive summary of nickel zinc ferrite absorbing materials is conducted from aspects of magnetic performance, the influence of formula on absorbing performance, and the influence of composite with other materials on absorbing performance. The comparison is made with our research situation, hoping to provide support for the development and application of nickel zinc ferrite absorbing materials.

Key words Nickel zinc ferrite, Microwave absorbing material

0 引言

镍锌铁氧体是常见的铁氧体材料之一,一般作为软磁材料使用,因其较优异的耐高温和宽频特性,而广泛应用于信息与通讯、汽车电子等相关领域的变压器、电感器。

镍锌铁氧体具有高磁导率、高电阻率等优点,兼具磁滞损耗、共振损耗及介电损耗,可以作为吸波材料使用,在电磁兼容和雷达隐身等应用领域发挥着重要作用^[1-2]。通过等效媒质理论进行仿真计算,尖晶石镍锌铁氧体吸波材料的共振峰分布于400~1000 MHz频段内^[3],因此被认为是低频段吸波材料的首选。

镍锌铁氧体为尖晶石结构铁氧体,其化学式为 MeFe_2O_4 ,其中Me为二价金属阳离子 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 或与掺杂离子的组合,Fe为三价阳离子 Fe^{3+} ,单个晶胞由24个金属阳离子和32个氧离子组成,含有8个 MeFe_2O_4 分子。因为氧离子半径大,所以形成以氧离子密堆的立方晶格,金属阳离子占据部分空隙位置,包括八面体间隙(B位)和四面体间隙(A位)^[4],其晶胞结构如图1所示,通过改变阳离子类型和数量可以改变其

磁性能。本文从磁性能、配方对吸波性能的影响与其他吸波材料复合对吸波性能的影响等方面分别介绍镍锌铁氧体的研究情况。

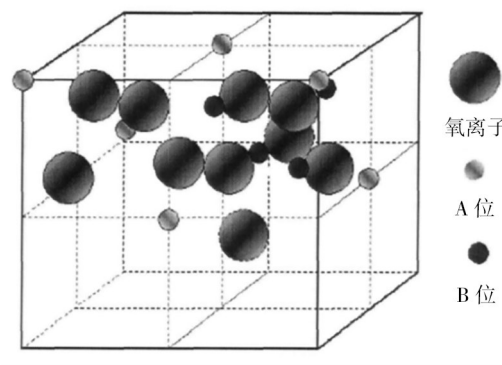


图1 尖晶石晶胞结构示意图

Fig. 1 The model of spinel cell structure

1 磁性能的研究进展

镍锌铁氧体本质是亚铁磁性材料,其磁性能主要包括饱和磁化强度 M_s 、磁晶各向异性(有磁晶各向异性场 H_A 、磁晶各向异性常数 K_1)、剩磁 M_r (或 B_r)和矫顽力 H_c 等。根据吸波材料的损耗机理分类,镍锌

收稿日期:2022-09-27

第一作者简介:谭春林,1974年出生,博士,研究员,主要从事铁氧体磁性材料和吸波材料的研究工作。E-mail:cltan74@163.com

铁氧体是以磁损耗为主,附带电损耗。而磁损耗与材料的磁性能密切相关,如自然共振、畴壁共振、磁滞损耗等。镍锌铁氧体的损耗机理主要为自然共振和磁畴共振,其共振角频率 ω_r 与 M_s 、 H_A 密切相关^[5-6]。

$$\gamma H_A < \omega_r < \gamma(H_A + 4\pi M_s) \quad (1)$$

研究表明,随着 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中Ni含量的增大, M_s 先增大后减小^[7-11](图2),不同研究结果显示, x 在0.5~0.6时, M_s 最高(表1)。王敏^[7]采用共沉淀法制备的 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.6$)材料的 M_s 为62.9 emu/g,SHINDE^[8],YADOJI^[9]等通过共沉淀法制备的纳米晶 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体, M_s 分别为68 emu/g和52 emu/g。刘倩等人^[10]采用固相法制备 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.5$)材料的 M_s 为67 emu/g,范伟^[12]采用溶胶-凝胶自蔓延法制备的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 材料的 M_s 为63.3 emu/g。而J. C. APHESTEGUY等人^[13]采用燃烧合成法合成了 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 材料的 M_s 最高,达到83.2 emu/g。

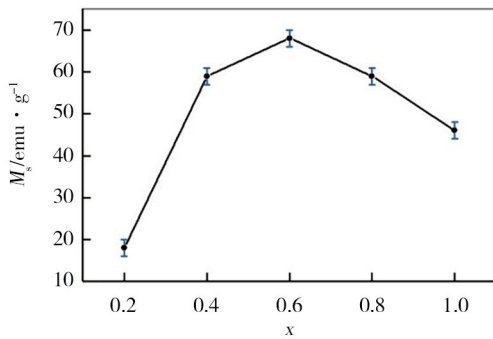


图2 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 材料 M_s 变化曲线^[8]

Fig. 2 M_s change curve of $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ material^[8]

当在镍锌铁氧体中添加其他元素时, M_s 会发生一定变化。J. C. APHESTEGUY等人^[13]采用燃烧合成法合成的 $\text{Ni}_{0.35}\text{Cu}_{0.15}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体纳米粒子(50~70 nm), M_s 为91 emu/g,Cu替代0.15Ni后, M_s 提高7.8 emu/g。F. GENC等人^[14]采用固相法制备了添加Mn的镍锌铁氧体 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{0.9-x}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$,添加0.1Mn的情况下,随镍含量提高, M_s 先增大后减小, $\text{Ni}_{0.45}\text{Zn}_{0.45}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.3}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 样品的 M_s 分别为78、78.5 emu/g,矫顽力 H_c 分别为3.8和1.4 Oe,仅在小范围内波动。刘作华等^[15]以黄钠铁矾为原料合成掺杂Dy的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{2-x}\text{Dy}_x\text{O}_4$ 铁氧体,发现掺杂质量分数为3%的Dy后, M_s 从29.58 emu/g提高到42.59 emu/g。在 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中进行稀土镧(La)和钐(Sm)的掺杂,发现随着La、Sm掺杂量的增加,样品的 M_s 均降低,从无添加时的63.28 emu/g降低到 $x=0.2$ 时的48.06 emu/g^[12], H_c 变化不大,在50.1~50.5 Oe波动。

M. N. AKHTAR等人^[16]采用溶胶凝胶法研究了

不同浓度Mg取代Zn的镍锌铁氧体 $\text{Ni}_{0.5}\text{Mg}_x\text{Zn}_{0.5-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$)性能,饱和磁化强度和剩磁随Mg含量的增加而增加,但其 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的 M_s 仅为14.59 emu/g,与其他研究者的结果差异较大。

从以上对磁性能的研究来看,不同研究者的 M_s 值波动较大。可能与制备的具体工艺参数和晶粒尺寸(纳米晶或微米晶)有一定关系,有待进一步系统验证。

表1 部分镍锌铁氧体材料磁性能

Tab. 1 Magnetic performance of some nickel zinc ferrite materials

成分	M_s /emu·g ⁻¹	H_c /Oe	制备方法
$\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$	62.9	80 ^[7]	共沉淀法
	68	- ^[8]	共沉淀法
	52	- ^[9]	固相法
$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	67	150 ^[10]	固相法
	83.2	6.6 ^[13]	燃烧合成法
	14.59	- ^[16]	溶胶凝胶法
	63.28	- ^[12]	溶胶凝胶自蔓延法
$\text{Ni}_{0.5}\text{Mg}_{0.4}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$	51.09	- ^[12]	
$\text{Ni}_{0.35}\text{Cu}_{0.15}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	91	20 ^[13]	燃烧合成法
$\text{Ni}_{0.45}\text{Zn}_{0.45}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$	78	3.8 ^[14]	固相法

另外,还有学者研究了磁导率和截止频率的变化。固相法制备的 $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.5,0.6$ 和 0.7)在1 MHz~1.8 GHz频率范围内,起始磁导率 μ_i 和相对损耗因子均随着Zn含量的增加而增大^[17]。当在 $\text{Ni}_{0.25}\text{Cu}_{0.4}\text{Co}_x\text{Zn}_{0.35-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体材料中添加Co取代Zn时,随Co含量增加,起始磁导率 μ_i 不断减小,截止频率 f_r 向高频方向移动。当 x 从0.05增至0.20, μ_i 从12.5下降到6.5时, f_r 从180 MHz提高到550 MHz;当额外添加质量分数为3%的PbO助熔剂时,其截止频率 f_c 提高到700 MHz^[18]。

2 吸波性能的研究进展

吸波材料的吸波性能,常用反射损耗RL表示,其常用计算公式为:

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right) \right] \quad (3)$$

式中, μ_r 和 ε_r 分别为复磁导率和复介电常数, f 为频率, d 为涂层厚度。当涂层的背板为金属时, Z_0 取1。

镍、锌含量和添加元素对镍锌铁氧体吸波性能的影响较大,是镍锌铁氧体吸波材料的研究重点之

一。对纯镍锌铁氧体而言,吸波性能在高频和低频的都有。当 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中 x 增大时, RL 先增大后减小,但纯 NiFe_2O_4 材料的吸波性能优于纯 ZnFe_2O_4 材料。采用共沉淀法的研究如图3所示^[7],当 $x=0.6$ 即 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 时,材料厚度为4 mm的吸收峰-14 dB位于8.8 GHz附近。而乐成^[19]采用固相法研究了低频0.1~1 GHz时不同氧化锌含量对镍锌铁氧体吸波性能的影响,随着Zn的变化最强峰集中在0.9 GHz附近(图4)。在ZnO的摩尔分数为27%时,吸波性能最好;6 cm厚度时,0.92 GHz处吸收峰达到-55 dB(铁氧体与吸收剂比例为2:8)。这是因为随着铁氧体中ZnO的摩尔分数的增大,在0.1~1 GHz频率内,介电常数 ϵ' 和 ϵ'' 减小,磁导率 μ' 缓慢减小,而 μ'' 则单调增大。庞超^[20]研究了 $(\text{Zn}_{0.4+x}\text{Ni}_{0.5-x}\text{Cu}_{0.1})_{1.02}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{0.98}$ 在10 MHz~1 GHz的电磁特性,当ZnO含量增加时,铁氧体与石蜡为9:1的样品的介电常数随着ZnO含量增加而增加,当Zn的摩尔分数从25%增加到40%时,其介电常数实部 ϵ' 从7上升到12,与文献^[19]的 ϵ' 变化趋势相反。

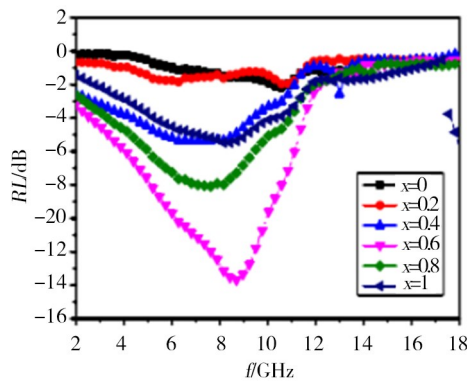


图3 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 材料的吸波性能($d=4$ mm)

Fig. 3 The microwave absorption performance of $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($d=4$ mm)

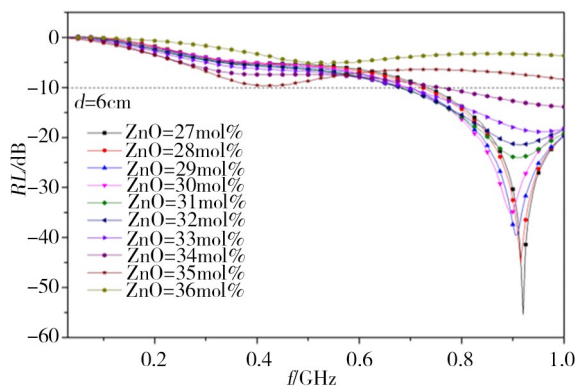


图4 不同ZnO量的镍锌铁氧体的吸波性能

Fig. 4 The microwave absorption performance of nickel zinc ferrite with different ZnO content

KIM Sung Soo 等人^[21]采用固相法制备了 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$,在空气中烧结样品低频下表现出典型

的高磁损耗特征, μ'' 远高于 μ' 。当 x 从0.2提高到0.5, μ'' 和 μ' 提高,吸收峰往高频偏移,而且匹配厚度降低。 $\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的匹配厚度9 mm,其吸收峰约为-42 dB位于180 MHz处,而 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的匹配厚度为4 mm,其吸收峰约为-47 dB位于590 MHz处。

添加一定的掺杂元素后,吸收峰位置一般发生变化,大多往高频移动。武小娟等人^[22]用高分子凝胶法研究了La掺杂镍锌铁氧体 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x=0, 0.05, 0.1$)。研究发现,掺杂La后对微波的吸收特性发生改变,随La掺杂量的增加,2个样品的吸收峰都向高频移动, $x=0.05$ 时,2 mm厚度吸收峰位于12 GHz,峰值为-15 dB; $x=0.1$ 时,吸收峰移到13 GHz处(图5)。Y. LIU 等人^[23]则采用溶胶-凝胶自燃烧法研究了复合添加Mg和La的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Mg}_{0.1}\text{La}_{0.01}\text{Fe}_{1.99}\text{O}_4$ 铁氧体。质量分数为60%的铁氧体和石蜡混合物的反射损耗如图6所示,其吸收峰位于14 GHz附近,且随厚度变化,峰值基本不变。

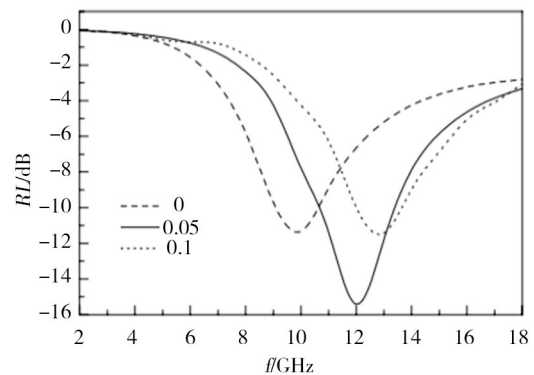


图5 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 的吸波性能^[21]

Fig. 5 The microwave absorption performance of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ^[21]

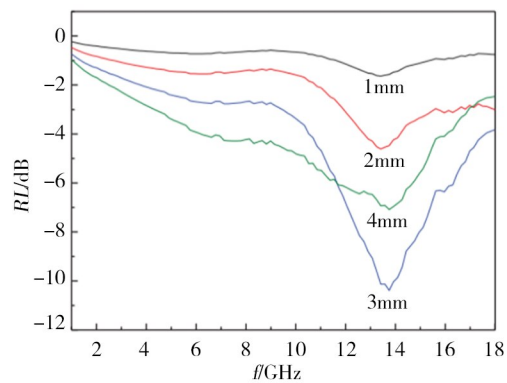


图6 不同厚度下 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Mg}_{0.1}\text{La}_{0.01}\text{Fe}_{1.99}\text{O}_4$ 材料的吸波性能

Fig. 6 The microwave absorbing performance of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Mg}_{0.1}\text{La}_{0.01}\text{Fe}_{1.99}\text{O}_4$ at different thicknesses

于美等人^[24]研究了在 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末表面化学镀铜对吸波性能的影响情况。结果发现,镀铜后 $\text{Cu}/\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复合粉末的吸波性能有了明显改

善,增重比为65%的复合粉体在频率为11 GHz处吸收峰达到-12 dB左右,认为是表面的铜数量达到一定值以后,可以显著提高复合粉体的宏观电导率,有利于形成传导电流。

马志军等人^[25-27]应用水热法在纳米镍锌铁氧体 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中掺杂 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Cu^{2+} 取代Zn,未掺杂时纳米镍锌铁氧体的吸波反射峰为-12.02 dB,有效吸波频带(RL低于-10 dB)为2~5 GHz,掺杂0.15 Co^{2+} 后,增加了吸收带宽,有效吸波频带为3~10 GHz,有效带宽拓宽近两倍(图7)。在 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{(0.4-x)}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中掺杂 Mn^{2+} 后,其电磁损耗性能整体降低,不利于提高吸波效率。在 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 掺杂 Cu^{2+} 后并不影响纳米镍锌铁氧体电磁损耗的频段范围,吸波频段都集中在1~5 GHz内(图8),峰值都在 $f=3.5$ GHz左右。仅当 Cu^{2+} 掺杂量为0.15时制备的纳米 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.25}\text{Cu}_{0.15}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 吸波性能稍好,其余Cu添加量均降低吸波性能。

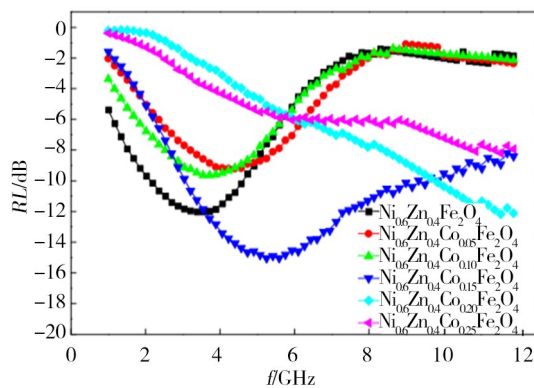


图7 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的吸波性能^[26]

Fig. 7 The microwave absorbing performance of $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ^[26]

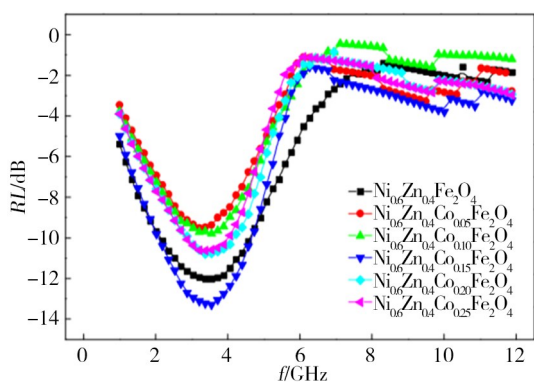


图8 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的吸波性能^[26]

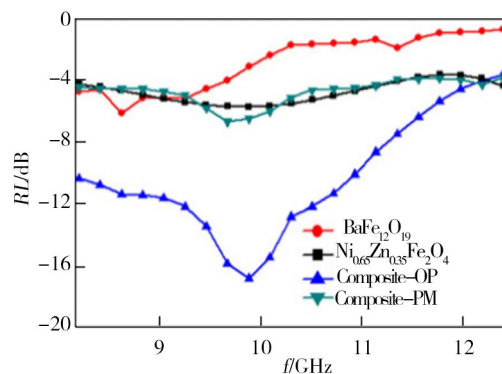
Fig. 8 The microwave absorbing performance of $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ^[26]

MOHIT等^[28]制备了钴取代锌的 $\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_x\text{Zn}_{0.8-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.2\sim 0.8$)纳米铁氧体,研究发现随Co含量的增加,铁氧体粉末粒径减小,介电常数 ϵ_r 减小。 ϵ_r 从 $x=0.2$ 时的7.474减小到了 $x=0.8$ 时的5.548。当以钴取代镍时,

钴锌铁氧体的吸波频率往高频移动。 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 在2 mm厚度下的吸收峰移到16.47 GHz处,达-33.9 dB^[26],有效带宽为11.5~18 GHz。

3 与其他材料复合的吸波性能研究进展

镍锌铁氧体与其他吸波材料复合后,性能有不同程度提高。S. HAZRA等人^[29]采用一锅法合成 $(\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_2\text{O}_4)_x(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{1-x}$ 镍锌铁氧体和钡铁氧体纳米复合材料(图9)。2.9 mm厚度条件下(粉末与聚乙烯醇比例为9:1,采用波导法测试),纯 $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米材料的吸收峰为-5.7 dB,采用一锅法制备的 $(\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_2\text{O}_4)_{0.85}(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{0.15}$ 纳米复合材料的吸收峰达到-16.8 dB,带宽也大大增加,8.2~10.85 GHz的损耗小于-10 dB。



注:OP为一锅法;PM为机械混合。

图9 镍锌与钡铁氧体复合材料2.9 mm厚度的吸波性能
Fig. 9 The microwave absorbing performance of nickel zinc ferrite and barium ferrite composite with thickness of 2.9 mm

庞超等人^[3]将镍锌铁氧体与铁粉复合,分析不同配比在P波段的电磁参数及吸波性能。随着铁粉含量增加,复合材料的介电常数 ϵ' 逐渐增大, ϵ'' 几乎不变;磁导率 μ' 与 μ'' 则逐渐降低。当铁粉的质量分数为20%、厚度为10 mm时,所制得的复合材料的吸波性能最好,P波段内的有效频宽为0.58~1 GHz,其在700~880 MHz时反射损耗小于-20 dB。

FLAIFEL等人^[30]在热塑性橡胶中加入纳米镍锌铁氧体粉末,研究了复合材料的吸波性能,结果表明,镍锌的质量分数为12%时纳米复合材料的微波吸收结果显示出多个吸收峰的特征,并获得了极大的增强,厚度为4 mm时,0.2~8 GHz频段内都可以达到-10 dB。

杨洋等人^[31]利用溶胶直接自蔓延反应制备了镍锌铁氧体纳米粉末,并以聚乙烯醇为基体(PVA)制备了炭黑/镍锌铁氧体复合材料吸波平板。结果表明,具有双层结构的炭黑/镍锌铁氧体复合材料在8~18 GHz频段具有较好的吸波效果。当试样厚度为

3 mm、面层镍锌铁氧体的质量分数为40%、底层炭黑的质量分数为20%时,在8~18 GHz的测试频段范围内,复合材料最大吸收峰位于18 GHz,峰值为-15.7 dB,优于-6 dB的有效带宽(6.4 GHz);当底层炭黑的质量分数为15%时,复合材料最大吸收峰位于18 GHz,峰值为-13.6 dB,优于-6 dB的有效带宽(8.2 GHz)。

常传波^[32]在针状结构的尖晶石型 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体基础上,采用化学镀的手段制备出了 Co-Ni 合金/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米复合材料。研究表明,在 Co-Ni 合金/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米复合材料中,当 Co: Ni=7:3 时复合材料的吸波性能最好,吸收峰往高频偏移,从2 GHz位置的-7.5 dB 偏移到3.5 GHz位置的-23 dB,低于-5 dB的频宽从0.6 GHz(1.8~2.4 GHz)扩大到2.7 GHz(3.3~6 GHz)。

4 本公司的结果

本公司采用固相法对镍锌铁氧体吸波材料进行实验,制得镍锌铁氧体粉末后,采用同轴法测试其介电常数和磁导率(粉末与石蜡比例为85:15),根据电磁参数计算反射损耗RL。当厚度为3 mm时,镍锌铁氧体 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 反射损耗 ≤ -8 dB的频宽范围为4~12 GHz,随厚度增大,峰值往低频移动(图10)。与文献中的结果有一点差异,可能跟制备工艺和烧结参数有关。

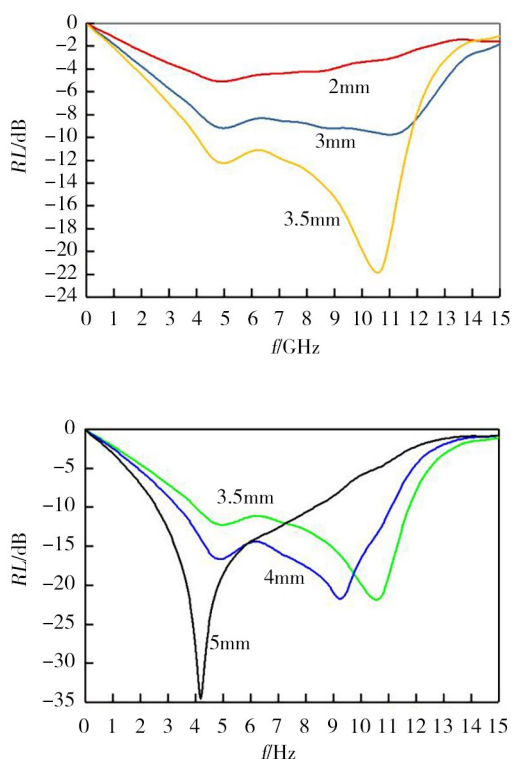


图10 本公司 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 材料不同厚度的吸波性能
Fig. 10 The microwave absorbing performance of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ with different thicknesses made by our company

5 结语

(1)对镍锌铁氧体采用不同的制备方法均可改善吸波性能,不同研究方法的 M_r 和吸波性能波动较大。

(2)镍锌铁氧体吸波材料的理论截止频率在低频,但实际制备的材料中,低频和高频(X、Ku波段)都有吸收峰,说明镍锌铁氧体可以应用于高频吸波。实际使用中,可根据应用需求来进行高低频材料的选择。

(3)从目前研究的情况来看,涂层厚度较薄时,比如厚度为2 mm时,镍锌铁氧体在2 GHz以下频段的吸波性能仍然难以优于-5 dB。因此,开发低频下较薄厚度的镍锌铁氧体吸波材料将是未来主要的研究方向之一,特别是适用于腐蚀环境下使用的低频吸波材料。

参考文献

[1] 邸永江,贾碧,望军. 铁氧体复合吸波材料研究现状[J]. 材料导报,2014,28(8): 136-141.
DI Y J, JIA B, WANG J. Research status of ferrite composite microwave absorbing materials [J]. Materials Reports, 2014,28(8): 136-141.
[2] 程涛,李铁虎,李莎莎,等. 吸波材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(8): 50-53,63.
CHENG T, LI T H, LI S S, et al. Research progress on stealth materials [J]. Materials Reports, 2011, 25 (8) : 50-53,63.
[3] 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): 75-78.
PANG C, LIANG D F, CHEN H, et al. Research of electromagnetic absorption of Ni-Zn ferrite composite materials in P band [J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37 (7):75-78.
[4] 都有为. 铁氧体[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.
DOU Y W. Ferrite [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1995.
[5] 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,2013.
LIU S H, LIU J M, DONG X L, et al. Electromagnetic Wave Shielding and Absorbing Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2013.
[6] 周影影. 磁性吸波材料[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2021.
ZHOU Y Y. Magnetic Wave Absorbing Materials [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2021.
[7] 王敏. 镍锌铁氧体及其复合材料的制备与吸波性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
WANG M. Preparation and microwave absorption

performance of nickel zinc ferrite and its composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[8] SHINDE T J, GADKARI A B, VASAMBEKAR P N, et al. Magnetic properties and cation distribution study of nanocrystalline Ni-Zn ferrites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 333: 152-155.

[9] YADOJI P, PEELAMEDU R, AGRAWAL D, et al. Microwave sintering of Ni/Zn ferrites: comparison with conventional sintering [J]. Materials Science and Engineering, 2003, 98: 269-278.

[10] 刘倩,程琳. 镍锌铁氧体 $Ni_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ 中锌含量对其微观结构以及磁电性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(7): 1409-1417.

LIU Q, CHEN L. Influence of zinc contents on microstructure, electric and magnetic properties of $Ni_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(7): 1409-1417.

[11] 张凯,闫妍,傅贻,等. Zn含量对NiZn铁氧体材料微观结构及磁性能影响[J]. 磁性材料及器件, 2021, 52(4): 33-36.

ZHANG K, YAN Y, FU B, et al. Influence of Zn content on the microstructure and magnetic property of NiZn ferrites [J]. Magnetic Materials and Devices, 2021, 52(4): 33-36.

[12] 范伟. NiZn铁氧体磁性能和穆斯堡尔谱研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2014.

FAN W. Mossbauer spectrum and magnetic property analysis in NiZn ferrites [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2014.

[13] APHESTEGUY J C, DAMIANI A, DIGIOVANNI D, et al. Microwave-absorbing characteristics of epoxy resin composites containing nanoparticles of NiZn- and NiCuZn-ferrites [J]. Physica B, 2009, 404: 2713-2716.

[14] GENÇ F, TURHAN E, KAVAS H, et al. Magnetic and microwave absorption properties of $Ni_xZn_{0.9-x}Mn_{0.1}Fe_2O_4$ prepared by boron addition [J]. J Supercond Nov Magn, 2015, 28: 1047-1050.

[15] 刘作华,尹建云,朱冰,等. 稀土掺杂改性镍锌铁氧体磁学性能研究[J]. 功能材料, 2017, 48(5): 05065-05069.

LIU Z H, YI J Y, ZHU B, et al. Study on magnetic properties of Ni-Zn ferrite doped with rare earth modification [J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(5): 05065-05069.

[16] AKHTAR M N, RAHMAN A, SULONG A B, et al. Structural, spectral, dielectric and magnetic properties of $Ni_{0.5}Mg_xZn_{0.5-x}Fe_2O_4$ nanosized ferrites for microwave absorption and high frequency applications [J]. Ceramics International. 2017, 43: 4357-4365.

[17] SUN G L, LI J B, SUN J J, et al. The influences of Zn^{2+} and some rare-earth ions on the magnetic properties of

nickel-zinc ferrites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 281: 173-177.

[18] 陈良,孔占兴,梁迪飞,等. Co^{2+} 取代对NiZn铁氧体材料截止频率 f_c 的影响[J]. 功能材料, 2008, 39(5): 754-756, 760.

CHEN L, KONG Z X, LIANG D F, et al. Effect of Co^{2+} ions substitute on the cut-off frequency of NiZn ferrites [J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(5): 754-756, 760.

[19] 乐成. 镍锌铁氧体及铁基复合材料吸波性能研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2017.

LE C. The microwave absorbing properties of nickel-zinc ferrite and iron matrix composites [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.

[20] 庞超. P波段镍锌铁氧体吸收材料电磁特性研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.

PANG C. Study on electromagnetic characteristics of p-band nzn ferrite absorbing materials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology, 2018.

[21] KIM S S, HAN D H, CHO S B. Microwave absorbing properties of sintered Ni-Zn ferrite [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 4554-4556.

[22] 武小娟,赵海涛,张罡,等. La掺杂 $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 铁氧体的制备与微波吸收性能[J]. 过程工程学报, 2008, 8(6): 1237-1240.

WU X J, ZHAO H T, ZHANG G, et al. Preparation and microwave absorption properties of $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ doped with lanthanum [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(6): 1237-1240.

[23] LIU Y, WEI S C, WANG Y J, et al. Characterization of (Mg, La) substituted Ni-Zn spinel ferrite [J]. Physics Procedia, 2013, 50: 43-47.

[24] 于美,刘建华,李松梅,等. $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 粉末化学镀铜前后的电磁性能[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(4): 497-500.

YU M, LIU J H, LI S M, et al. Preparation and electromagnetic performance of Cu/ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ composite powders by electroless copper plating [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2007, 25(4): 497-500.

[25] 马志军,赵海涛,程亮,等. 对比不同离子的掺杂对镍锌铁氧体电磁损耗性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(8): 1642-1646.

MA Z J, ZHAO H T, CHENG L, et al. Influence of doping different ions on the electromagnetic loss performance of nickel-zinc ferrite [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(8): 1642-1646.

[26] 马志军,莽昌焯,翁兴媛,等. 基于纳米镍锌铁氧体以 Co^{2+} 逐步替代 Ni^{2+} 制备钴锌铁氧体及吸波性能对比[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(6): 68-74.

MA Z J, MANG C Y, WENG X Y, et al. Preparation of cobalt-zinc ferrite based on nano-nickel-zinc ferrite by Co^{2+} 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第1期

instead of Ni^{2+} and comparison of their wave absorption properties [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 26(6):68–74.

[27] 马志军, 莽昌焯, 王俊策, 等. 三种金属离子掺杂对纳米镍锌铁氧体吸波性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(12):909–917.

MA Z J, MANG C Y, WANG J C, et al. Influence of doping with metal ions Co^{2+} , Mn^{2+} and Cu^{2+} on absorbability of nano Ni-Zn ferrite [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017, 31(12):909–917.

[28] MOHIT K, GUPTA V R, GUPTA N, et al. Structural and microwave characterization of $\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_x\text{Zn}_{0.8-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ for antenna application [J]. *Ceramic International*, 2014, 40: 1575–1586.

[29] HAZRA S, GHOSH B K, PATRA M K, et al. A novel "one-pot" synthetic method for preparation of $(\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_2\text{O}_4)_x - (\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{1-x}$ nanocomposites and study of their microwave absorption and magnetic properties [J]. *Powder*

Technology, 2015, 279:10–17.

[30] FLAIFEL M H, AHMAD S H, ABDULLAH M H, et al. Preparation, thermal, magnetic and microwave absorption properties of thermoplastic natural rubber matrix impregnated with Ni-Zn ferrite nanoparticles [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 96:103–108.

[31] 杨洋, 刘顺华. 镍锌铁氧体的制备及其吸波性能的研究[J]. *功能材料*, 2007, 38(增刊):3001–3004.

YANG Y, LIU S S. The study of preparation and absorbing properties of Ni-Zn ferrites [J]. *Journal of Functional Materials*, 2007, 38(suppl):3001–3004.

[32] 常传波. $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体基纳米复合材料的制备及其吸波性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.

CHANG C B. Studies on the preparation and microwave absorbing properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite-based nanocomposite materials [D]. Taiyuan: Central North University, 2011.