

文章编号: 1001-9731(2017)12-12209-05

Zn^{2+} 掺杂对 NiFe_2O_4 纳米颗粒吸波性能的增强*

李应涛¹, 李生娟¹, 徐波², 索路路¹, 程志海³, 任光鹏¹, 张莉¹

(1. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 3. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘要: 采用超声活化与化学共沉淀相结合的方法制备了结晶性良好的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒, 分析了 Zn^{2+} 掺杂对 NiFe_2O_4 结构和微波吸收性能的影响。X 射线衍射和 SEM 检测结果表明样品的形貌大多为片状结构, NiFe_2O_4 粒度约在 30 nm 左右, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粒度约在 70 nm, 随着烧结温度增加结晶性提高。振动样品磁强计分析结果表明 Zn^{2+} 掺杂对 NiFe_2O_4 的磁化性能有显著影响, 其矫顽力降低, 饱和磁化强度提高。矢量网络分析仪分析结果显示在 NiFe_2O_4 中掺杂了 Zn^{2+} 后, 微波吸收量显著提高, 有效地改善了 NiFe_2O_4 的吸波性能, 随着烧结温度加大, NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 吸波性能也有所增加。

关键词: 化学共沉淀; 超声活化; 镍铁氧体; Zn^{2+} 掺杂; 吸波性能

中图分类号: TM277

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2017.12.038

0 引言

随着电子技术的快速发展以及各种新型武器平台的研发, 吸波材料越来越引起专家学者的关注^[1-2], 其主要作用是使入射电磁波最大限度进入材料内部, 并通过能量转换的方式将电磁能转变成其它形式的能量而损耗掉, 从而达到“隐身”、微波通讯防护、抗电磁污染以及抗电磁干扰等目的。

由于铁氧体纳米材料具有优良的电磁性能, 进而被广泛应用于信息存储系统、磁流体技术和微波器件等领域^[3-6]。在立方晶系中, 反尖晶石结构的镍铁氧体 (NiFe_2O_4) 材料具有电阻率高, 能够有效消除金属导体高频趋肤效应导致的电磁波不能进入体内的缺陷, 对微波有良好的衰减作用。然而纯镍铁氧体具有密度大、稳定性较差等缺点, 使其吸波频率范围受到限制, 通常采用离子取代^[7-8]、调整离子配比^[9]、改善工艺条件^[10]等方法, 改变材料的化学组成、粒径分布、粒子形貌, 提高材料的电磁损耗特性, 降低材料的密度^[11-17]。

Zn^{2+} 是一种非磁性的过渡金属离子, 用 Zn^{2+} 掺杂 NiFe_2O_4 可以减弱磁性离子间的耦合作用, 降低矫顽力, 提高饱和磁化强度, 使得掺杂后的 NiFe_2O_4 磁性发生改变, 对高频和超高频信号有良好的衰减作用。本文采用超声强化与化学共沉淀相结合的方法制备了 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒, 通过 Zn^{2+} 掺杂改善 NiFe_2O_4 的结构和微波吸收性能。

1 实验

1.1 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒的制备

按化学计量比分别称取 10.812 g 氯化高铁 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、2.876 g 硫酸锌 ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 和 2.377 g 氯化镍 ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 混合后溶于 100 mL 的去离子水中, 磁力搅拌至完全溶解, 得到的黄色透明溶液为样品 1。同时按化学计量比分别称取 5.406 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、2.377 g $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 混合后溶于 100 mL 的去离子水中, 磁力搅拌至完全溶解, 得到的黄色透明溶液为样品 2。

将样品 1 和 2 分别搅拌并加热至 80 °C 时, 逐滴加入浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液作为沉淀剂, 调节 pH 值为 11, 得到红褐色的溶胶, 陈化 1 h 后用去离子水反复洗涤、分离, 直到 pH 值为 7。超声强化 2 h 后, 60 °C 干燥得到红褐色前驱体粉末, 分别在 600, 700 和 800 °C 下煅烧 5 h, 得到 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 NiFe_2O_4 纳米颗粒。

1.2 表征与测试

使用 X 射线衍射仪 (XRD, 日本理学, D/MAX-2550 型, Cu 靶, $\text{K}\alpha$ 辐射源, 波长为 0.15406 nm) 分析样品物相特征, 测试条件是: 形貌分析采用美国 FEI 公司 quanta450 型场发射扫描电子显微镜 (SEM)。静态磁性能通过 JDM-13 型振动样品磁强计 (VSM) 测试分析, 最大加载磁强度为 1.8 T, 步进精度为 79.6 A/m, 稳定度 0.001 mA。微波吸收性能测试使用安捷伦

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51402192); 沪江基金资助项目 (B14006)

收到初稿日期: 2017-05-31

收到修改稿日期: 2017-10-16

通讯作者: 李生娟, E-mail: lsjmoon@163.com

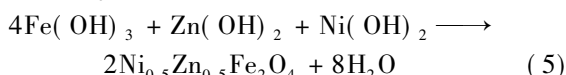
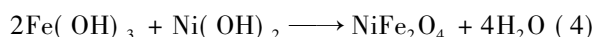
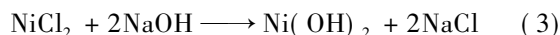
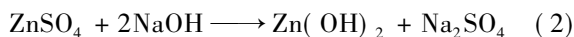
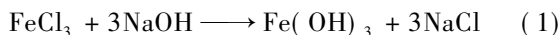
作者简介: 李应涛 (1991-), 男, 河南人, 在读硕士, 师承李生娟副教授, 从事磁性纳米材料的制备及应用。

KeysightE5071CENA 矢量网络分析仪,测试材料的扫描复介电常数和复数磁导率,将样品分散在石蜡中,样品与石蜡的质量比为 7: 3,样品厚度为 2 mm,测试波段范围为 2 ~ 18 GHz。

2 结果与讨论

2.1 铁氧体样品的合成机理

NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒的固相合成过程如式(1)~(5)所示,固体颗粒在超声空化效应作用下,反应物的活化能降低,煅烧温度下降^[18-19]。固态反应通常情况下主要是由相界面上的化学反应和固体内部的物质迁移构成。离子扩散速率主要受反应温度(质点的运动)、颗粒尺寸(反应界面和反应物的接触面积)控制,对于 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒固相合成反应而言,化学反应为 ZnO 、 NiO 和 Fe_2O_3 通过固相产物层扩散的加成反应, NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 形成是由 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Fe^{3+} 逆向经过两种氧化物扩散所至,其反应为



2.2 物相分析

图 1(a) 为在不同煅烧温度下制备的尖晶石型 NiFe_2O_4 纳米颗粒的 X 射线衍射图谱。

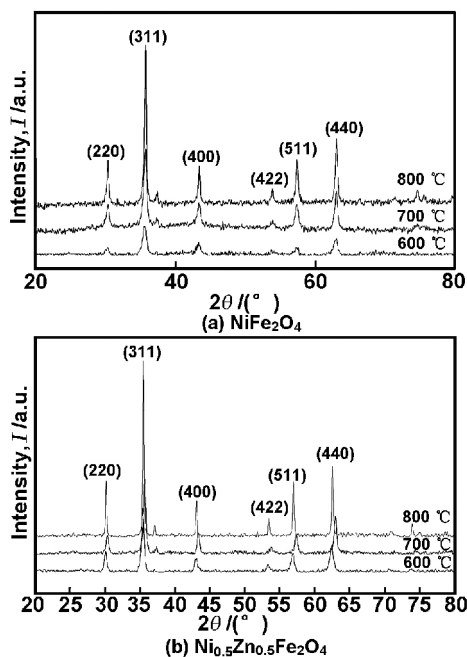


图 1 不同煅烧温度下样品的 XRD 图

Fig 1 XRD patterns of NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at different temperature

在 (220)、(311)、(422)、(511)、(440) 晶面处均有 NiFe_2O_4 特征峰出现 (PDF 卡 #10-0325), 可见煅烧

温度为 600 °C 时, NiFe_2O_4 已经开始生成, 产物的衍射峰强度较弱且宽化, 存在一定的非晶成分。随着煅烧温度增加, 衍射峰增强且尖锐, NiFe_2O_4 晶形趋于完整, 结晶程度优化。在不同的煅烧温度煅烧下, 样品的化学成分没有明显变化。谢乐公式计算出晶粒度分别为 13.61, 16.94 和 26.30 nm。图 1(b) 掺杂 Zn^{2+} 后得到的为不同煅烧温度下镍锌铁氧体的 X 射线衍射图, 与 PDF(19-0629) 对比可知, 出现标准的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 衍射峰, 可见产物仍为典型的尖晶石型结构, Zn^{2+} 取代了 50% Ni^{2+} 的位置, 随着煅烧温度升高, 样品的晶体结构和化学成分没发生明显变化, 而晶粒尺寸逐渐变大, 通过谢乐公式计算出晶粒度分别为 32.27, 41.94 和 65.72 nm。与 NiFe_2O_4 相比, 在相同的焙烧温度下, 其晶粒尺寸有所增加。

2.3 形貌表征

图 2 分别为 800 °C 煅烧的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒的 SEM 图。 NiFe_2O_4 铁氧体样品为薄片状, 尺寸在 30 nm 左右, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的颗粒尺寸在 70 nm 左右, 与 XRD 检测结果相符。

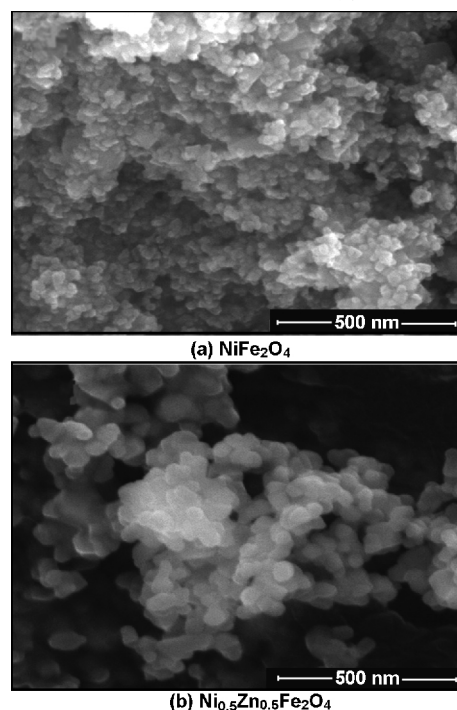


图 2 800 °C 煅烧温度下样品的 SEM 图

Fig 2 SEM images of NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at 800 °C

2.4 电磁性能

800 °C 下煅烧样品的 M-H 磁滞曲线如图 3 所示。 NiFe_2O_4 (图 3(a)) 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (图 3(b)) 的磁滞回线均为 S 型曲线, Zn^{2+} 掺杂后其饱和磁化强度由 $31.6172 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 上升至 $70.5138 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, 矫顽力由 8920.852 A/m 降为 7677.985 A/m , 剩余磁化强度分别为 4.9757 和 $6.0747 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。可见 Zn^{2+} 掺杂后, 磁性离子间的耦合作用减弱, 导致矫顽力降低, 饱和磁化强度提高。

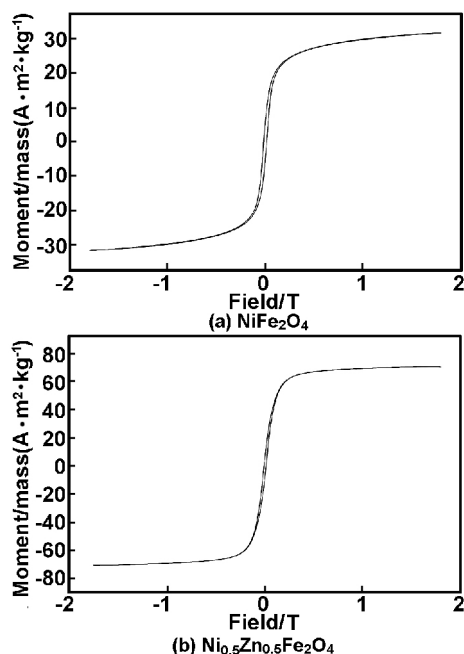


图3 800 °C 煅烧温度下样品的 VSM 图

Fig 3 VSM image of the sample at 800 °C

2.5 微波吸收性能

由于铁氧体材料属于双复介质,同时具有介电性能和铁磁性能,在微波场中主要表现为介电损耗及磁损耗。评价吸波材料性能优劣的复介电常数(ε)和复磁导率(μ)的表达式为

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \mu = \mu' - j\mu'' \quad (6)$$

其中, ε' 和 μ' 为吸波材料在电场或磁场作用下产生的极化或磁化程度的变量, ε'' 为在外加电场作用下,材料电偶矩产生重排引起损耗的量度, μ'' 为在外加磁场作用下,材料磁偶矩产生重排引起损耗的量度。在电磁学中,损耗角的正切表示出物质在电磁场中的损耗,其表达式为

$$\tan\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \tan\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (7)$$

图4为800 °C煅烧温度下 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复介电常数随频率的变化曲线。 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末的介电常数实部 ε' 值约为3.68,高于 NiFe_2O_4 的 ε' 值,在2~18 GHz范围内,所有样品的介电常数实部基本不随频率变化。 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的介电常数虚部 ε'' 低于 NiFe_2O_4 的 ε'' 值,共振峰更为明显,其值随频率的升高略有降低,二者的 ε'' 平均值分别为0.02和0.04,表明两种材料皆具有一定的介电损耗性能。

图5为800 °C下的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复磁导率随频率的变化曲线。从图5可以看出,二者的磁导率实部值 μ' ,随频率变化先降低后升高,最后趋于平稳。 NiFe_2O_4 复磁导率虚部 μ'' 最大值约为0.35,在2~18 GHz范围内随频率的升高而降低,这有利于吸波材料实现阻抗匹配。而 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的 μ'' 值总体上比 NiFe_2O_4 的 μ'' 值要大。

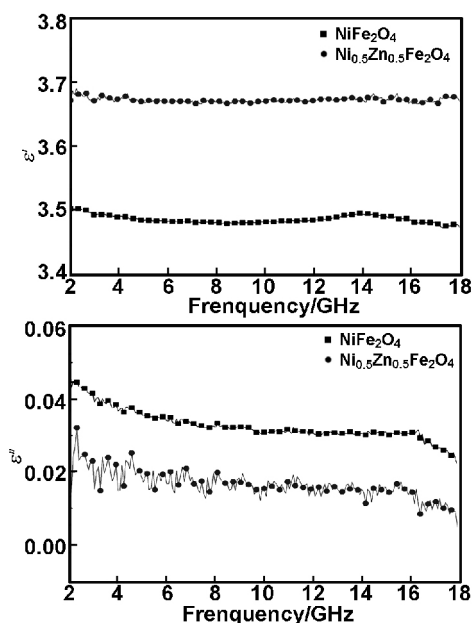
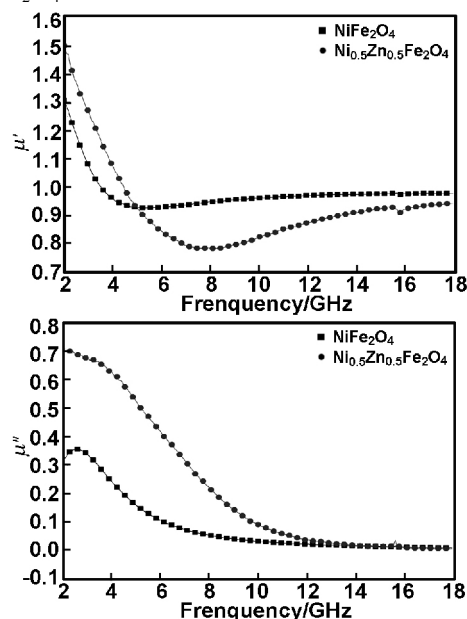
图4 800 °C 下的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复介电常数Fig 4 Complex permittivity of NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at 800 °C图5 800 °C 下的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复磁导率Fig 5 Complex permeability of NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at 800 °C

图6为800 °C焙烧下 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 在2~18GHz的介电损耗角正切值 $\tan\delta_\varepsilon$ 和磁损耗角正切值 $\tan\delta_\mu$,从图6可知,在2~18GHz频率范围内 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的介电损耗角正切值比 NiFe_2O_4 低,随频率变化不大,这表明 Zn^{2+} 的加入降低了 NiFe_2O_4 的介电损耗。在反尖晶石型镍铁氧体晶体中, Fe^{3+} 占据四面体的位置, Ni^{2+} 占据八面体的位置,二者非平行旋转产生了较强的磁力矩,因而具有一定的磁损耗。在电磁场的作用下,铁氧体中的粒子包括原子、离子、电子、空穴等会发生畴壁位移、磁畴转化,这也会导致磁损耗。镍铁氧体属于磁损耗型材料,所以 Zn^{2+} 的加入

会导磁损耗性能提高。在 2 ~ 15.8 GHz 频率范围内 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的磁损耗角的正切值比 NiFe_2O_4 高,在 15.8 ~ 18 GHz 频率范围内 2 种材料的磁损耗角正切值差别不大,说明在 2 ~ 15.8 GHz 频率范围内 Zn^{2+} 的加入提高了 NiFe_2O_4 的磁损耗性能,在 15.8 ~ 18 GHz 频率范围内 Zn^{2+} 的加入对 NiFe_2O_4 的磁损耗影响不大。

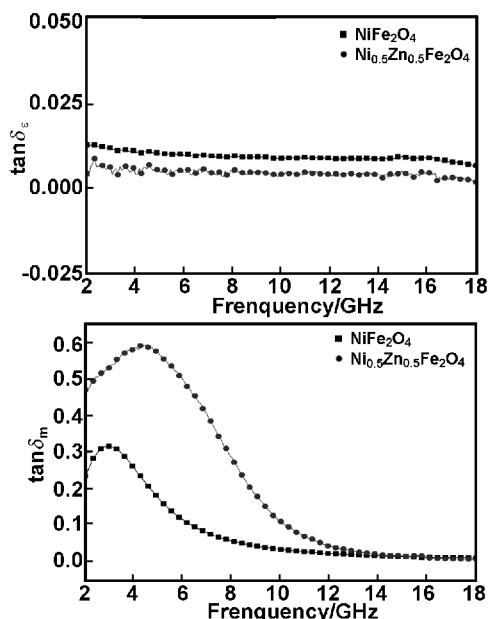


图 6 800 °C 下的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 介电损耗和磁损耗

Fig 6 Curves of dielectric loss and magnetic loss for the NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at 800 °C

图 7 为煅烧温度为 800 °C 时 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 在 2 ~ 18 GHz 范围内的微波反射损失。从图 7 可以看出, NiFe_2O_4 掺杂 Zn^{2+} 后反射率大大降低,随着频率增加, NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的吸波性能都是先增加而后逐渐平稳,微波损耗最大值分别为 -2.21 和 -8.78 dB。磁性金属粉末是具有自由电子吸波和磁损耗性能的吸波材料,由于掺杂了 Zn^{2+} 元素,其磁导率和介电常数增大,电磁损耗加大, μ'' 和 μ' 随频率上升而降低,使掺杂了 Zn^{2+} 后的 NiFe_2O_4 吸波性能得到改善^[20]。原因是 Zn^{2+} 掺杂后,离子间的交换电子对起到重要作用。

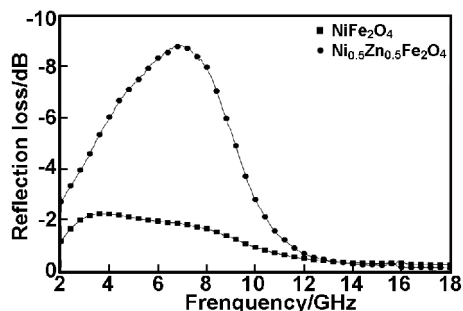


图 7 微波反射损失

Fig 7 The loss of microwave reflection

3 结 论

(1) 用超声强化和化学共沉淀法相接结合的方法制备了结晶性良好的 NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米片状颗粒,粒度分别为颗粒 30, 70 nm 左右,随烧结温度增加纳米颗粒的结晶性愈加完善。

(2) 从铁氧体样品的静态磁性能分析发现 Zn^{2+} 掺杂对 NiFe_2O_4 的磁化性能有显著影响, Zn^{2+} 掺杂后,磁性离子间的耦合作用减弱, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 较 NiFe_2O_4 饱和磁化强度由 $31.61 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 上升至 $70.51 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$,矫顽力由 $8\,920.852 \text{ A/m}$ 降为 $7\,677.977 \text{ A/m}$ 、剩余磁化强度分别为 4.975 和 $6.074 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。

(3) 样品的微波吸收性能表明在 NiFe_2O_4 中掺杂了 Zn^{2+} 后,离子间的交换电子对更加频繁,微波吸收量显著提高,有效的改善了 NiFe_2O_4 的吸波性能,随烧结温度加大, NiFe_2O_4 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 吸波性能也有所增加。

参考文献:

- [1] Giannakopoulou T, Oikonomou A, Kordas G. Double-layer microwave absorbers based on materials with large magnetic and dielectric losses [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271(2): 224-229.
- [2] Duan Haiping, Li Guofang, Duan Yuping, et al. Electromagnetic properties of silicone rubber composites absorbing sheet [J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 61-64 (in Chinese).
- [3] Li Xianrui, Hou Changmin, Yuan Long, et al. Hydrothermal synthesis and ferrimagnetism of $\text{Nd}_{3-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) substituted garnets [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013, 34(2): 277-283 (in Chinese).
- [4] Dai Jianfeng, Lu Ruie, Fu Bi, et al. Aligned ferrite nanofibers fabricated by electrospinning [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013, 34(3): 514-519 (in Chinese).
- [5] Komari H, Konishi Y. Wide band electromagnetic wave absorber with thin magnetic layers [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1994, 40(4): 219-222.
- [6] Kim S S, Jo S B, Gueon K I, et al. Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite at X-band frequencies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(6): 5462-5464.
- [7] Allgaier R S. A new analysis of the linear high-field magne-

- toresistance in n-type PbTe films [J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(4): 1388-1390.
- [8] Yao Xuebiao, Zheng Wanliu, Liu Zongying, et al. Development of the magnetoresistance sensor of ferromagnetic metal film [J]. Journal of Anhui University, 1995, 15(2): 40-44 (in Chinese).
- 姚学标, 郑万鏊, 刘宗英, 等. 铁磁金属薄膜磁阻传感器的研制 [J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 1995, 19(2): 40-44.
- [9] Lee W Y, Toney M F, Mauri D. High magnetoresistance in sputtered permalloy thin films through growth on seed layers of $(\text{Ni}_{0.81}\text{Fe}_{0.19})_{1-x}\text{Cr}_x$ [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2000, 36(1): 381-385.
- [10] Li H, Yu G, Teng J, et al. Ultrathin high anisotropic magnetoresistance $\text{Ni}_{0.81}\text{Fe}_{0.19}$ films [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(23): 4915-4919.
- [11] Maisnam M, Phanjobam S, Sarma H N K, et al. Dielectric properties of vanadium substituted lithium zinc titanium ferrites [J]. International Journal of Modern Physics B, 2003, 17(21): 3881-3887.
- [12] Hu Guoguang, Yao Xuebiao, Yin Ping, et al. Studies of microwave-absorbing properties of BaMnZnCo-Y type ferrites [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1999, 30(1): 36-38 (in Chinese).
- 胡国光, 姚学标, 尹平, 等. BaMnZnCo-Y 型铁氧体微波吸收特性的研究 [J]. 磁性材料及器件, 1999, 30(1): 36-38.
- [13] Rezlescu N, Rezlescu E, Popa P D, et al. Effects of rare-earth oxides on physical properties of Li-Zn ferrite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998, 275: 657-659.
- [14] Singh M, Sud S P. Mg-Mn-Al ferrites for high frequency applications [J]. Modern Physics Letters B, 2000, 14(14): 531-537.
- [15] Lakshman A, Rao P S V S, Rao K H. Mossbauer spectroscopic analyses of $\text{Mg}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Ln}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ spinel ferrites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 284(12): 352-357.
- [16] Topal U, Ozkan H, Sozeri H. Synthesis and characterization of nanocrystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ obtained at 850 °C by using ammonium nitrate melt [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 284(1): 416-422.
- [17] Ata-Allah S S. Influence of Ga substitution on the magnetic and electric behavior of $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ compound [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 284(6): 227-238.
- [18] 冯若, 李化茂. 声化学及其应用 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992: 51-62.
- [19] Wang X, Yao Z, Wang J, et al. Degradation of reactive brilliant red in aqueous solution by ultrasonic cavitation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(1): 43-48.
- [20] 胡传炳. 隐身涂层技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 266-269.

Reinforcement of Zn^{2+} dopant on the microwave absorbing properties of NiFe_2O_4 nanoparticles

LI Yingtao¹, LI Shengjuan¹, XU Bo², SUO Lulu¹,
CHENG Zhihai³, REN Guangpeng¹, ZHANG Li¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science
and Technology, Shanghai 200093, China;

3. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel nanoparticles with good crystallinity were prepared by the synergy of the ultrasonic reaction and the chemical co-precipitation method. The microwave absorbing properties were improved by the Zn^{2+} doping. XRD and SEM analysis indicated that the NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ flaky nanoparticles, with size of 30 and 70 nm, respectively, showed better crystallization with the increasing temperature. The exploration of static magnetic properties showed that the coercive force of samples decreased, while the saturation magnetization of the samples was reinforced via the Zn^{2+} doping. The testing results of the vector network analyzer showed that Zn^{2+} doping effectively improved the microwave absorption properties of NiFe_2O_4 , and the wave absorbing properties were also strengthened with the increasing calcination temperature.

Key words: chemical co-precipitation method; ultrasound activation; nickel ferrite; Zn-doped; microwave absorbing