

# Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>合金粉的制备及吸波性能

## Preparation and Microwave Absorbing Properties of Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> Alloy Powders

姚永林<sup>1</sup>, 张传福<sup>2</sup>, 樊友奇<sup>1</sup>, 湛 菁<sup>2</sup>

(1 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

2 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

YAO Yong-lin<sup>1</sup>, ZHANG Chuan-fu<sup>2</sup>, FAN You-qi<sup>1</sup>, ZHAN Jing<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology,

Maanshan 243032, Anhui, China; 2 School of Metallurgy and Environment,

Central South University, Changsha 410083, China)

**摘要:** 采用草酸盐沉淀-前驱体热分解法制备不同成分的 Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> (0 < x < 1) 合金粉。采用 XRD 和 SEM 分别测试前驱体和合金粉的物相结构与形貌。结果表明: 随着 Ni 含量增大, 前驱体物相由 FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 逐渐向 NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 转变, 形貌由短棒状向立方体、多面体转变。Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉的几何外形与前驱体基本一致, 但结构上呈多孔状, 且粒径变小。Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉的物相结构随其成分变化, 由富铁的 bcc 结构向富镍的 fcc 结构转变。测试不同成分 Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉与石蜡复合物的电磁参数, 并计算其吸波性能, Fe<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub> 具有最大的电磁损耗能力, 厚 3.0mm 时在 6.82GHz 处具有最小反射损耗 R<sub>L</sub>, 为 -52.58dB。Fe<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.4</sub> 具有最大有效频宽, 厚 1.5mm 时反射损耗小于 -10dB 的有效频宽达 4.02GHz。

**关键词:** FeNi 合金; 电磁参数; 反射损耗; 吸波

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001067

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)08-0071-07

**Abstract:** The Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> (0 < x < 1) alloy powders with different compositions were prepared by an oxalate precipitation-precursor thermal decomposition process. The phase structure and morphology of the precursor and Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> powder were characterized by XRD and SEM, respectively. With the increase of Ni content, the phase structure of precursor was gradually changed from FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O to NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O, and the morphology was changed from short rod to cube and polyhedron. The Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> powders show porous structure and its geometric shape is similar to the corresponding precursor and the particle size becomes smaller. The phase structure of Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> powders is changed with the composition from iron-rich bcc to nickel-rich fcc structure. The electromagnetic parameters of the composites of Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> powders and paraffin were measured and the microwave absorbing properties were calculated. The results reveal that Fe<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub> sample shows a best electromagnetic loss, and when the composite thickness is 3.0mm, the minimum R<sub>L</sub> reaches -52.58dB at 6.82GHz. Fe<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.4</sub> sample with a thickness of 1.5mm shows a maximum effective bandwidth (R<sub>L</sub> < -10dB), which reaches up to 4.02GHz.

**Key words:** FeNi alloy; electromagnetic parameter; reflection loss; microwave absorbing

随着现代科学技术的不断进步, 无线通信技术及各类电子设备已经深入到人们生活的各个方面, 而由此带来的电磁干扰和电磁污染也成为严重的一个社会问题<sup>[1-2]</sup>。电磁干扰对航空、医疗、信息等领域设备的正常运转造成了极大影响, 而电磁污染更是对人类健康、动植物的正常生长具有严重威胁。与此同时, 在现

代战争中, 武器装备的隐形性能对战争的胜负也起着举足轻重的作用。因此, 吸波材料作为一种能够有效损耗电磁波的手段得到了广泛研究<sup>[3-5]</sup>。磁性金属粉体材料因为同时具有磁损耗和介电损耗能力而成为一类极具潜力的吸波材料。而且相比于广泛应用的铁氧体吸波材料, 磁性金属粉具有较高的 Snoek's 极限, 在

高频下仍然具有较高的饱和磁化强度和磁导率,因而能够适用于高频下吸波材料的制备<sup>[6]</sup>。其中 FeNi 合金是一种重要的磁性金属功能材料,因具有较高的居里温度和良好的软磁性能,尤其是高饱和磁化强度、低矫顽力而得到广泛应用<sup>[7]</sup>。目前对于磁性金属吸波材料的研究主要关注于形貌对吸波性能的影响,如片状、纤维状及纳米线等形貌的磁性金属粉已被用于吸波材料的研究<sup>[8-10]</sup>。而在成分影响方面,仅有少量不同成分 FeNi 合金吸波材料的研究。如 Feng 等<sup>[11-12]</sup>研究了球形和片状  $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$  的吸波性能。Yu 等<sup>[13]</sup>以球磨法制备了  $\text{FeNi}_3$  粉,发现其比单独的 Fe, Ni 具有更好的吸波性能。Liu 等<sup>[14]</sup>制备了颗粒和片状的 Fe-40% Ni(质量分数)合金粉末,考察了 1~4GHz 内其与硅橡胶复合物的吸波性能。本工作通过草酸盐沉淀-热分解法制备了  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ,  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$ ,  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ,  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$ ,  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ,  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$  合金粉,考察了  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉成分对其形貌、物相结构和电磁参数的影响,并计算了其吸波性能,得到了具有最小反射损耗及最大有效频宽的  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金成分。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ 合金粉的制备

实验所用的试剂  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、氨水、 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  及无水乙醇皆为分析纯。称量 0.04mol 草酸溶于 75mL 去离子水与 25mL 无水乙醇的混合溶液中,配置成一定浓度的草酸溶液 A,并加入适量氨水调节溶液 pH 值为 5.0。另外,根据目标  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉的成分要求,按化学计量比称取一定量的  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶于 100mL 去离子水,配置成金属盐溶液 B。在 60℃ 恒温水浴下把溶液 B 加入溶液 A 中,搅拌 30min 即可得到草酸铁镍前驱体沉淀。所得前驱体沉淀于 60℃ 真空干燥 4h,随后在氮气和氢气混合气氛下(流量比 1:1)于 450℃ 保温 30min,即可得到不同成分的  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉。

### 1.2 分析与检测

采用 TTR III 型 X 射线衍射仪( $\text{CuK}_\alpha$ , 波长 0.154056nm)测定前驱体及  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉末的晶体结构和物相组成;采用 JSM-5600L 型扫描电镜观察粉末的形貌及粒度。将质量分数为 30% 的  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡混合均匀后压制内径 3.04mm、外径 7.0mm、厚 2mm 的同轴环样品,采用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪测定其相对复介电常数和相对复磁导率,根据传输线法计算其在不同频率下的反射损耗。

## 2 结果与分析

### 2.1 前驱体的物相与形貌

图 1 为不同成分草酸铁镍前驱体的 XRD 谱图。可知,随着前驱体中 Ni 含量的增加,前驱体特征峰右移,物相由  $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS, No. 22-0635) 逐渐向  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS, No. 25-0582) 转变。因为  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  的晶体结构同属 *Cccm* 空间群,且 Fe 原子和 Ni 原子半径相差不大,因此不同成分下前驱体的 XRD 特征峰较为相似。

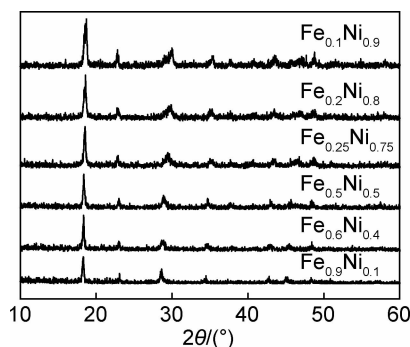


图 1 不同成分前驱体的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of precursors with different compositions

图 2 为不同成分前驱体的 SEM 图。可知,形貌随着前驱体成分的变化而变化。其中  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  前驱体呈短棒状;而后随着 Ni 含量的增加,  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  和  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  前驱体呈立方体形貌;当 Ni 含量增大到 75% 以后,前驱体为多面体形貌。前驱体粒度也与其成分有关,随着 Ni 含量的增加,前驱体粒度先增大后减小,其中  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  前驱体的粒度最大,粒径为 5μm 左右。表明草酸铁镍的生长方式受其成分控制,具体的生长过程受晶面自由能的影响,高表面能的晶面生长速率较快而最终消失,具有低表面能的晶面则因生长速率较慢而得以体现。

### 2.2 $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ 合金粉的物相与形貌

图 3 为前驱体热分解还原产物的 XRD 谱图。可知,当 Ni 含量增加时,产物物相结构由 bcc 向 fcc 转变。 $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  为 bcc 结构,  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  主要为 fcc 结构,但在 44.5° 左右仍存在微弱的 bcc 峰,当 Ni 含量在 50% 以上时,产物均为单一的 fcc 结构。另外,随着 Ni 含量的增加,衍射峰右移,这是由于原子固溶过程中引起的残余应力导致晶胞参数发生变化的缘故。

图 4 为所得产物的 SEM 照片。可知,  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉的几何外形基本与其相应的前驱体保持一致,但粒径均明显减小,且呈多孔状结构,这是因为热分解过程中  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  气体释放留下孔道并引起体积收缩的

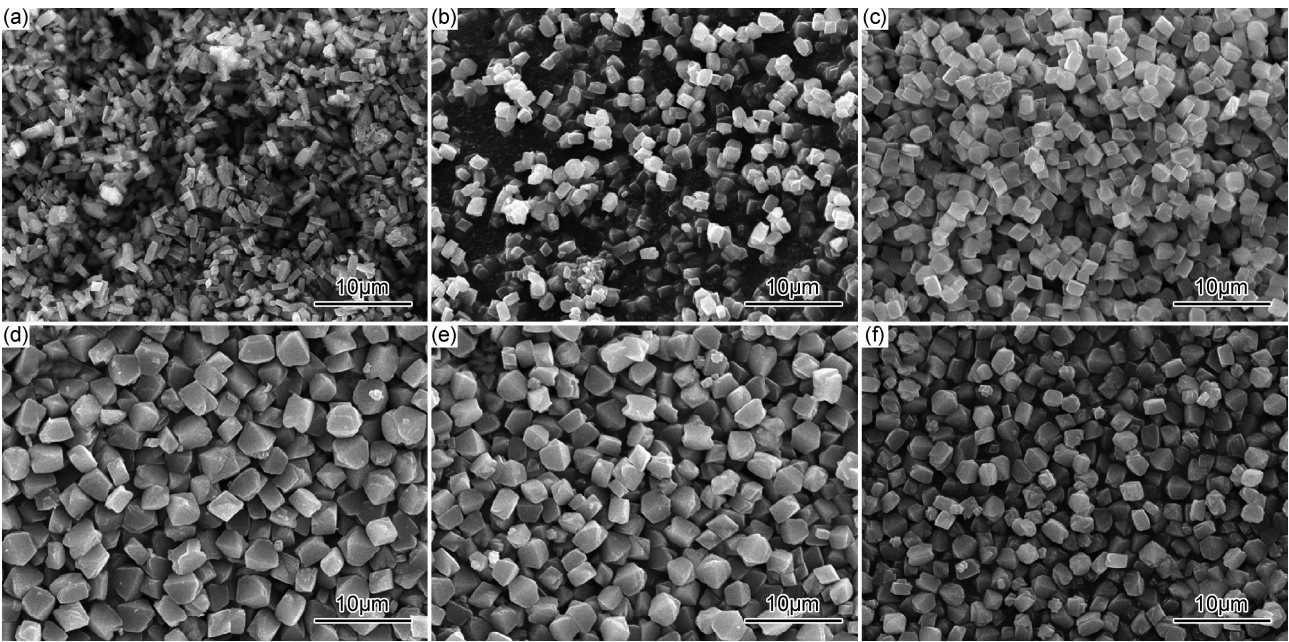


图 2 不同成分前驱体的 SEM 图  
(a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$ ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$ ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$   
Fig. 2 SEM images of precursors with different compositions  
(a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$ ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$ ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$

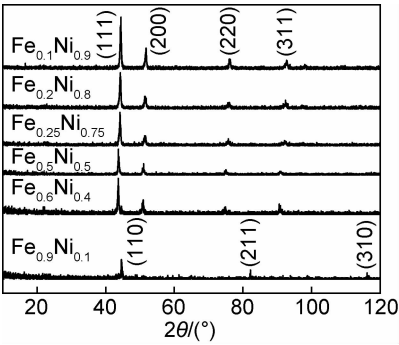


图 3  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉的 XRD 谱图  
Fig. 3 XRD patterns of  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  alloy powders

缘故。

2.3  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉的吸波性能

图 5 为  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡复合物的介电性能。图 5(a), (b) 为不同成分  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡复合物的介电常数实部、虚部随频率的变化关系图。可知,  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  在整个频率范围内都具有最大的介电常数实部和虚部,  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  和  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  有所降低, 而  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$ ,  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ,  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  的介电常数则相对较低。介电常数的实部代表着介质存储能量的能力, 而虚部代表着损耗能量的能力, 因此常用介电损耗因子  $\tan\delta_e$  (介电常数虚部与实部之比,  $\tan\delta_e = \epsilon''/\epsilon'$ ) 来表征材料对电磁波的介电损耗能力。由图 5(c) 可以看出, 介电损耗因子随频率的变化趋势与介电常数虚部基本

一致, 其中  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  具有最大的介电损耗能力。  
图 6 为  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡复合物的磁性能。图 6(a), (b) 为不同成分  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金与石蜡复合物的磁导率实部、虚部随频率的变化关系图。可知, 随着频率的增大, 磁导率实部都呈下降的趋势, 这是畴壁位移和转动引起的结果<sup>[14]</sup>。磁导率虚部则在不同频率下存在一定峰值, 这是磁性金属粉末在电磁场中的自然共振所引发的<sup>[15]</sup>。和介电常数一样, 磁导率实部也代表着介质存储能量的能力, 而虚部代表着损耗能量的能力, 因此常用磁损耗因子  $\tan\delta_m$  (磁导率虚部与实部之比,  $\tan\delta_m = \mu''/\mu'$ ) 来表征材料对电磁波的磁损耗能力。 $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  具有最小的磁导率实部和最大的磁导率虚部, 因此在图 6(c) 中表现出最大的磁损耗能力。 $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  和  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  的磁损耗相对较低, 而  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$ ,  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ,  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  的磁损耗则最差。

由上述所得电磁参数, 根据式(1), (2)即可计算得到样品的反射率<sup>[16]</sup>。

$$Z_{in} = (\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi fd/c)(\mu_r\epsilon_r)^{1/2}] \quad (1)$$

$$R_L = 20\lg |(Z_{in} - 1)/(Z_{in} + 1)| \quad (2)$$

式中:  $Z_{in}$  为归一化输入阻抗;  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为复相对介电常数和复相对磁导率 ( $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ ,  $\mu_r = \mu' - j\mu''$ );  $f$  为电磁波频率;  $d$  为样品厚度;  $c$  为真空中的光速;  $R_L$  为反射损耗。

图 7 为  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡复合物在不同厚度与频率下的反射损耗。可以看出,  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  的电磁损

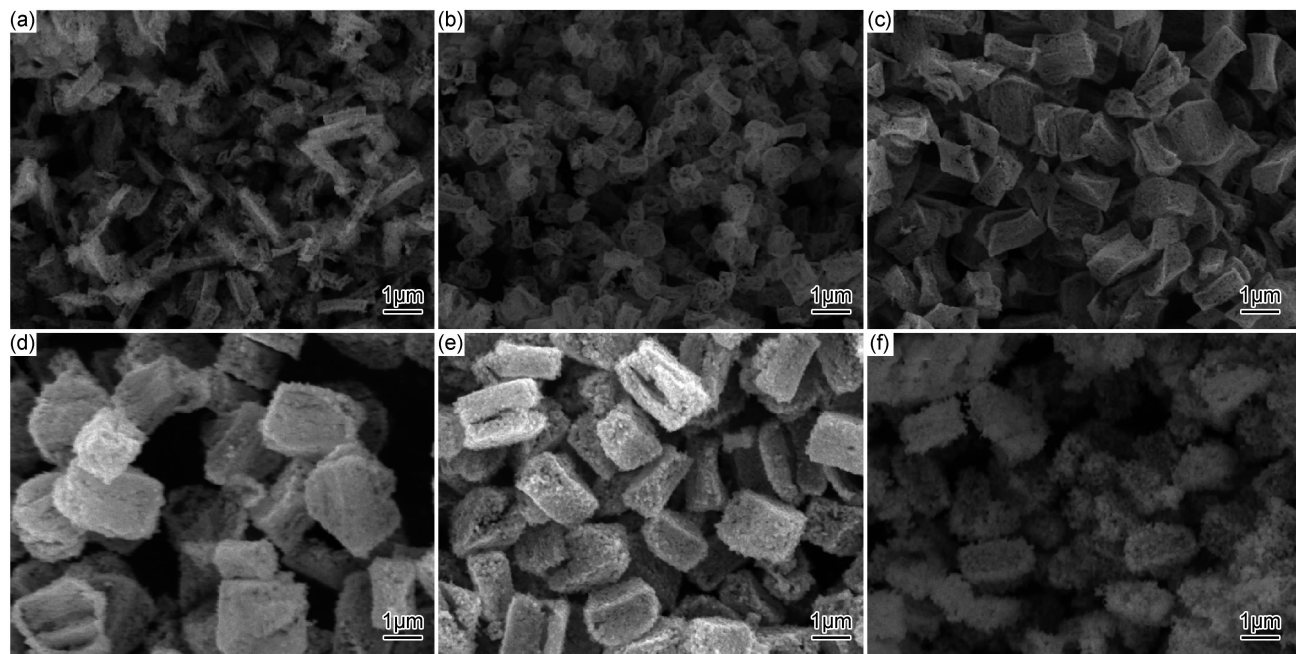


图 4  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ 合金粉的 SEM 图 (a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$  ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$

Fig. 4 SEM images of  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  alloy powders (a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$  ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$  ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$

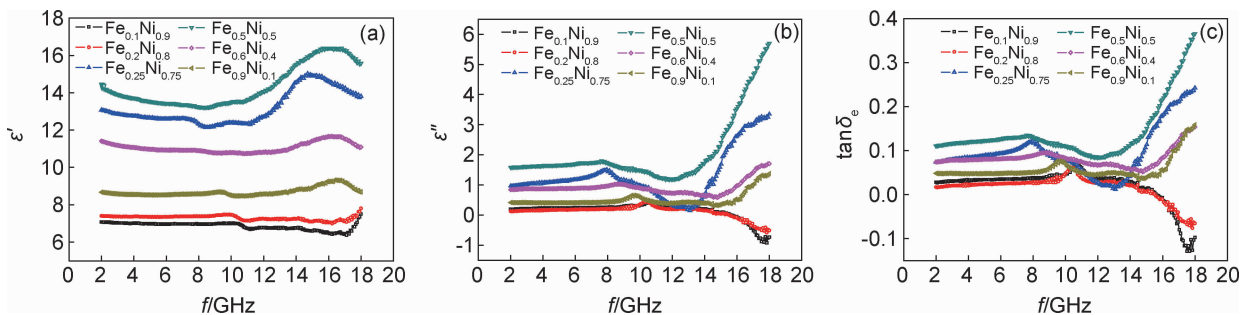


图 5  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ 合金粉与石蜡复合物的介电性能

(a)介电常数实部;(b)介电常数虚部;(c)介电损耗因子

Fig. 5 Dielectric properties of the  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  alloy powders and paraffin composites

(a)real part of the permittivity;(b)imaginary part of the permittivity;(c)dielectric loss factor

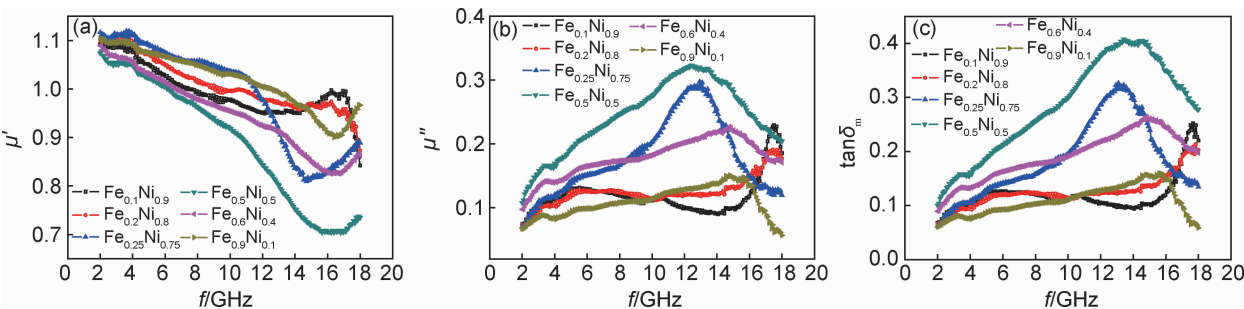


图 6  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ 合金粉与石蜡复合物的磁性能

(a)磁导率实部;(b)磁导率虚部;(c)磁损耗因子

Fig. 6 Magnetic properties of the  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  alloy powders and paraffin composites

(a)real part of the permeability;(b)imaginary part of the permeability;(c)magnetic loss factor

耗能力最强,当厚度为 3.0mm 时在 6.82GHz 处具有最小反射损耗,为-52.58dB。  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$  与  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$

稍差,分别在 13.82GHz 和 15.91GHz 处具有最小反射损耗,分别为-35.67dB 和-26.54dB,  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$ ,

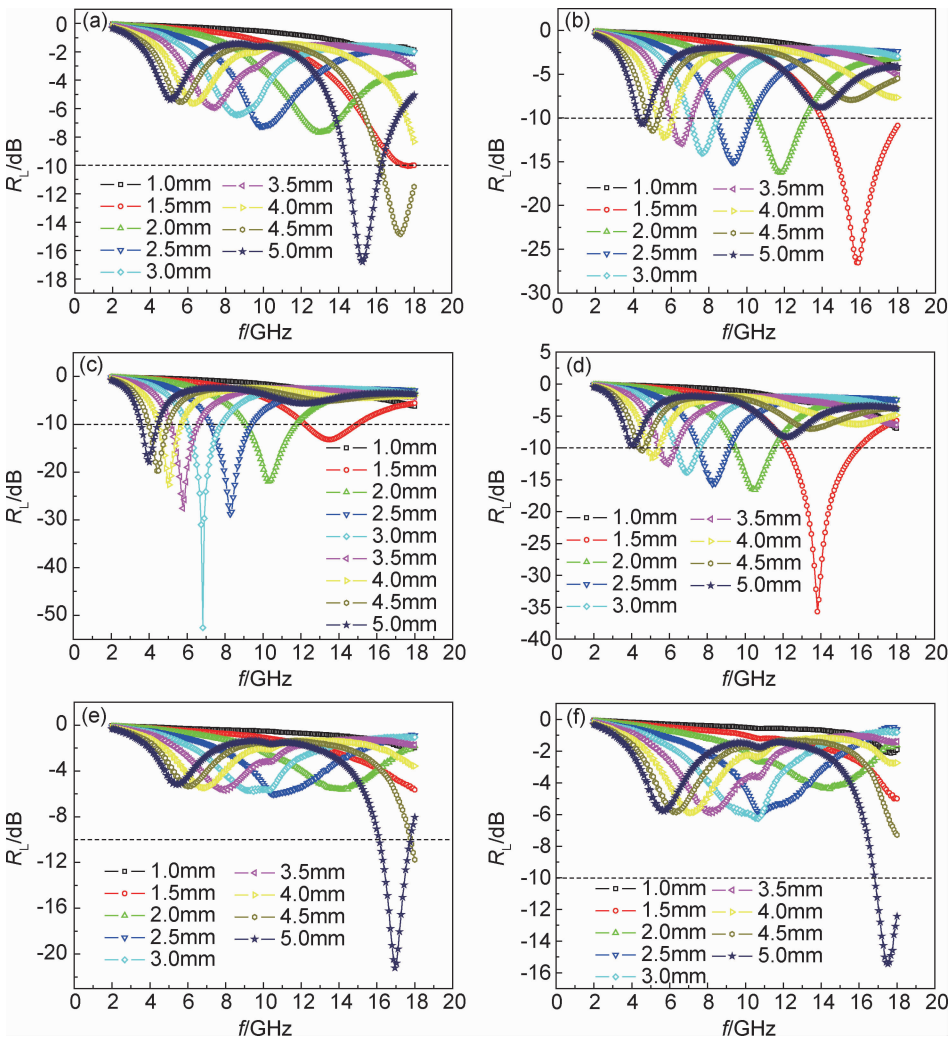


图 7  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  合金粉与石蜡复合物的反射损耗  
(a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$ ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$ ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$   
Fig. 7 Reflection loss of the  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$  alloy powders and paraffin composites  
(a)  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ; (b)  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$ ; (c)  $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ; (d)  $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}$ ; (e)  $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ; (f)  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$

$\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ ,  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$  的反射损耗则较差。以上结果与图 5(c) 和图 6(c) 中损耗因子的结果是一致的。但需要注意的是,  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  具有最大有效频宽, 厚 1.5mm 时在 13.98 ~ 18.00GHz 范围内反射损耗均小于 -10dB, 有效频宽达 4.02GHz, 这与其介电常数和磁导率的匹配有关<sup>[17]</sup>。

由图 7 还可以看出, 样品的反射损耗峰值频率随其厚度增大而向低频移动, 这是因为对于吸波涂层而言, 其匹配厚度  $t$  与峰值频率  $f$  存在式 (3) 的反比关系, 也称为 1/4 波长模型<sup>[11, 18]</sup>。

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

式中  $n$  为奇数系数。

以  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  为例, 图 8 绘制了其 1/4 波长模型。图 8(a) 为  $\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}$  样品在不同厚度下反射损耗随频

率的变化关系, 图 8(b) 为反射损耗与涂层厚度及电磁波频率的三维关系图。可知, 随着涂层厚度的增大, 吸收峰的频率向低频移动, 且出现两个最小反射损耗峰, 该变化关系与式 (3) 相一致。为了进一步描述反射损耗与厚度及频率的关系, 采用式 (3) 进行了计算, 如图 8(c) 所示。图 8(d) 为图 8(b) 的二维投影图, 对比图 8(a), (c), (d) 可知, 各厚度下吸收峰的频率及不同频率下的匹配厚度变化趋势与式 (3) 计算的理论值完全符合, 表明该吸波涂层符合 1/4 波长匹配模型。

### 3 结论

(1) 采用草酸盐沉淀法制备了不同组成的草酸铁镍前驱体, 随 Ni 含量的增加, 前驱体物相由  $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  逐渐向  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  转变, 形貌由短棒状向

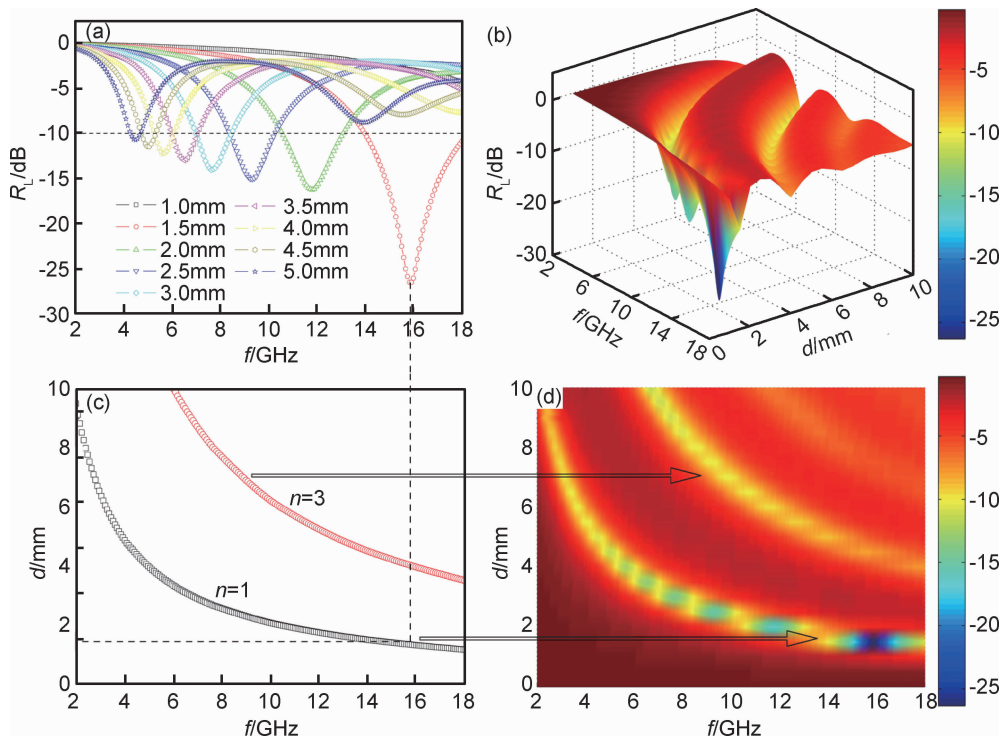


图 8 Fe<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.4</sub>样品的 1/4 波长匹配模型

(a) 反射损耗; (b) 反射损耗三维图; (c) 公式(3)的计算结果图; (d) 反射损耗的二维投影图

Fig. 8 Quarter-wavelength absorbing mechanism of the Fe<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.4</sub> sample

(a) reflection loss; (b) three-dimensional diagram of reflection loss; (c) calculated results of equation (3); (d) projection of the two-dimensional diagram for reflection loss

立方体、多面体转变。对前驱体进行热分解还原制备了不同成分的 Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉, 所得 Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉呈多孔状结构, 形貌与前驱体保持一致, 粒径变小。随着 Ni 含量的增加, Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金的物相结构由 bcc 结构向 fcc 结构转变。

(2) 测试了不同成分 Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> 合金粉与石蜡复合物的电磁参数并计算了其吸波性能。Fe<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub> 具有最大的电磁损耗能力, 当厚度为 3.0mm 时在 6.82GHz 处具有最小反射损耗, 为 -52.58dB。Fe<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.4</sub> 具有最大有效频宽, 厚 1.5mm 时在 13.98~18.00GHz 范围内反射损耗均小于 -10dB, 有效频宽达 4.02GHz。

参考文献

[1] SHEN X Q, SONG F Z, XIANG J, et al. Shape anisotropy, exchange-coupling interaction and microwave absorption of hard/soft nanocomposite ferrite microfibers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2012, 95(12): 3863-3870.

[2] 赵晓明, 刘元军. 铁氧体/碳化硅/石墨三层涂层复合材料介电性能[J]. 材料工程, 2017, 45(1): 33-37.

ZHAO X M, LIU Y J. Dielectric properties of ferrite/silicon carbide/graphite three-layer composite coating materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(1): 33-37.

[3] 礼嵩明, 蒋诗才, 望咏林, 等. “超材料”结构吸波复合材料技术研究[J]. 材料工程, 2017, 45(11): 10-14.

LI S M, JIANG S C, WANG Y L, et al. Study on "metamaterial" structural absorbing composite technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(11): 10-14.

[4] SUN D P, ZOU Q, WANG Y P, et al. Controllable synthesis of porous Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO sphere decorated graphene for extraordinary electromagnetic wave absorption[J]. Nanoscale, 2014, 6(12): 6557-6562.

[5] LU S W, ZENG X J, NIE P, et al. Electromagnetic and microwave absorbing performance of ultra-thin Fe attached carbon nanotube hybrid buckypaper[J]. Functional Materials Letters, 2014, 7(2): 1450006.

[6] WEI J Q, ZHANG Z Q, WANG B C, et al. Microwave reflection characteristics of surface-modified Fe<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> fine particle composites[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12): 123908.

[7] 姚永林, 张传福, 湛菁, 等. 不同形貌纳米 FeNi 合金的制备[J]. 化学进展, 2012, 24(12): 2312-2319.

YAO Y L, ZHANG C F, ZHAN J, et al. Preparation of FeNi nano-alloy with various morphologies[J]. Progress of Chemistry, 2012, 24(12): 2312-2319.

[8] YANG Y, XU C L, XIA Y X, et al. Synthesis and microwave absorption properties of FeCo nanoplates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 493(1/2): 549-552.

[9] ZHANG C F, YAO Y L, ZHAN J, et al. Template-free synthesis of Ni microfibers and their electromagnetic wave absorbing prop-

- erties[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(49): 495308.
- [10] QIAO L, HAN X H, GAO B, et al. Microwave absorption properties of the hierarchically branched Ni nanowire composites[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(5): 053911.
- [11] FENG Y B, QIU T. Preparation, characterization and microwave absorbing properties of FeNi alloy prepared by gas atomization method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 513(5): 455-459.
- [12] FENG Y B, QIU T. Enhancement of electromagnetic and microwave absorbing properties of gas atomized Fe-50wt%Ni alloy by shape modification[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(16): 2528-2533.
- [13] YU K C, MA C C M, TENG C C, et al. Preparation and microwave absorbency of Fe/epoxy and FeNi<sub>3</sub>/epoxy composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(33): 8427-8432.
- [14] LIU J, FENG Y B, QIU T. Synthesis, characterization, and microwave absorption properties of Fe-40wt%Ni alloy prepared by mechanical alloying and annealing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(23): 3071-3076.
- [15] 姚永林. 超细 FeNi 合金粉热分解法制备及其吸波性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- YAO Y L. Preparation of ultrafine FeNi alloy powders by thermal decomposition process and their microwave absorbing properties[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [16] MICHELSEN E, SAJER J M, RANJITHAN S, et al. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6): 1024-1031.
- [17] 王科伟, 时家明, 樊祥. 宽频带吸波材料的设计方法[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 29(6): 42-45.
- WANG K W, SHI J M, FAN X. Designing methods of broad-band absorbing materials[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 29(6): 42-45.
- [18] ZHAN J, YAO Y L, ZHANG C F, et al. Synthesis and microwave absorbing properties of quasioone-dimensional mesoporous NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanostructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 240-244.
- 
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51604005)
- 收稿日期:**2016-09-06; **修订日期:**2018-02-26
- 通讯作者:**姚永林(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事磁性功能材料方面的研究工作, 联系地址: 安徽省马鞍山市安徽工业大学秀山校区冶金工程学院(243032), E-mail: yonglinyao@163.com
- (本文责编: 王 晶)