

# 一维 $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$ (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的结构和磁性能

戴剑锋<sup>1,2</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>, 王青<sup>2</sup>, 李维学<sup>2</sup>

(1. 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 采用溶胶-凝胶法、静电纺丝技术和热处理技术相结合制备了一维  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR)、扫描电子显微镜 (SEM) 和振动样品磁强计 (VSM) 对  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的结构、形貌和磁性能进行表征。结果表明,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝表面光滑、直径均匀、连续, 直径约 60 nm。掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  均没有改变  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  的尖晶石结构, 掺杂均降低了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  的结晶度, 晶粒尺寸  $D$  从 44.8 nm 减小到 33.8 nm。 $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝都表现出软磁特性。 $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的饱和磁化强度 ( $M_s$ ) 分别为 39.58, 41.10, 34.23  $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ; 矫顽力 ( $H_c$ ) 分别为 14119.2, 13678.4, 15937.6  $\text{A}/\text{m}$ ; 其中  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$  纳米丝的  $M_s$  (41.10  $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ) 最大, 矫顽力  $H_c$  (13678.4  $\text{A}/\text{m}$ ) 最小, 软磁性能最好。

**关键词:** 镍铁氧体; 稀土掺杂; 静电纺丝; 纳米丝; 磁性能

**中图分类号:** TM277; O614.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)05-1539-05

在磁性纳米材料中, 一维磁性纳米铁氧体材料不仅有细小直径和较长的长度两个不同于纳米颗粒和薄膜的特征, 而且还具有极特别的形状各向异性和磁各向异性, 具有比零维铁氧体磁性纳米材料更优越的物理化学性能<sup>[1,2]</sup>。铁氧体磁性纳米材料表现出许多优异的性能, 如纳米钴铁氧体、纳米钡铁氧体、纳米锶铁氧体具有稳定的化学性质、高矫顽力等优点, 是很好的硬磁材料<sup>[3-6]</sup>; 纳米镍铁氧体有较高的居里温度和饱和磁化强度, 纳米镍锌铁氧体颗粒出现超顺磁性, 是良好的软磁材料<sup>[7,8]</sup>。由于铁氧体纳米材料有良好的性能, 目前被广泛应用于信息通讯、计算机技术、催化、医学生物、雷达导航、磁记录材料、磁流体材料、隐身技术等领域<sup>[9-16]</sup>。 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  具有良好的软磁特性, 饱和磁化强度和矫顽力较低, 是一种典型的铁氧体软磁材料, 在电磁器件、高密度磁记录、催化剂、生物医药等领域有潜在的应用价值。其制备方法主要有水热法<sup>[17]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[18]</sup>、化学共沉淀法<sup>[19]</sup>等。稀土元素具有独特的 4f 电子轨道和特殊的电磁性能, 磁性铁氧体掺杂少量的稀土元素会影响其晶体结构和磁性能, 所以稀土掺杂铁氧体材料的研究受到研究者的广泛关注。Heiba<sup>[20]</sup>等研究了稀土 Gd 元素掺杂  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$

纳米材料的光学性能和磁性能。Xu<sup>[21]</sup>等研究了稀土 Pd 元素掺杂  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米材料的催化性能。Sahariya<sup>[22]</sup>等研究了稀土 Dy, Gd 元素掺杂  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米材料的磁性能。Pachpinde<sup>[23]</sup>等研究了稀土 Pr 元素掺杂  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  纳米材料的结构和磁性能。Tholkappiyan<sup>[24]</sup>等研究了稀土 Er 元素掺杂  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  纳米材料的结构、磁性能和光学性能。

目前制备铁氧体纳米纤维的方法有模板法、水热法、磁场辅助法等, 这些方法所需设备和制备过程复杂, 样品的制备种类受到限制; 而静电纺丝法具有设备操作简单、成本低廉等优点。本实验采用静电纺丝法制备表面光滑、直径均匀、连续的一维  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝。研究不同稀土  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  掺杂对其结构、形貌和磁性能的影响。

## 1 实验

**实验原料:** 硝酸镍 $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{AR}]$  (分析纯), 上海中泰化学试剂有限公司; 硝酸铁 $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}, \text{AR}]$  (分析纯), 天津市凯信化学工业有限公司; 柠檬酸 $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}, \text{AR}]$  (分析纯), 天津市百世化工有限公

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11664023)

作者简介: 戴剑锋, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973780, E-mail: daijif@lut.cn

司; 聚乙烯吡咯烷酮[PVP,  $M_w=1\ 300\ 000$ , AR](分析纯), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 硝酸镨 [ $\text{PrN}_3\text{O}_9 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , AR](分析纯), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 硝酸钕 [ $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , CP](化学纯), 国药集团化学试剂有限公司; 硝酸钐 [ $\text{SmN}_3\text{O}_9 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , AR](分析纯), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 乙醇 [ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , AR](分析纯), 天津市百世化工有限公司。

实验设备: 电子天平 (FA1004N, 上海精密科学仪器有限公司); 数显恒温磁力搅拌器 (85-2, 上海梅香仪器有限公司); 高压直流电源 (DW-P303-1ACFO, 东文高压电源(天津)股份有限公司); 真空管式高温烧结炉 (OTF-1200X, 合肥科晶材料技术有限公司)。

样品的制备过程分为前驱体溶液的配制、前驱体胶丝的制备和热处理 3 个阶段。

(1) 前驱体溶液的配制: 按照金属离子摩尔比  $\text{Ni}:(\text{Fe}+\text{RE})=1:2$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 和总金属离子:柠檬酸 =1:1 称取原料。称取 0.2850 g 的硝酸镍、0.7879 g 的硝酸铁、0.0086 g 的硝酸镨或 0.0025 g 的硝酸钕或 0.0089 g 的硝酸钐、0.6273 g 的柠檬酸完全溶解在 2 mL 的去离子水中, 室温下磁力搅拌 3 h; 称取 0.2 g 的 PVP 溶于 2 mL 的无水乙醇溶液中, 室温下磁力搅拌 3 h。然后将金属盐的水溶液缓慢滴加到 PVP 的无水乙醇溶液中, 室温下磁力搅拌 12 h, 得到具有一定黏度透明的前驱体溶液。PVP 在无水乙醇溶液中的质量分数为 10%。

(2) 前驱体胶丝的制备: 将前驱体溶液加入一次性注射器中, 用铝箔作为收集板, 收集距离为 20 cm, 施加 13 kV 的电压进行静电纺丝, 得到前驱体凝胶丝。

(3) 热处理: 将前驱胶丝放入真空管式高温烧结炉中, 在温度 800 °C 空气气氛下煅烧 3 h, 升温速率 1 °C/min。

利用美国 Nicolet 公司生产的 Nexus670 型傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 分析样品的红外光谱。利用德国布鲁克 AXS 公司生产的 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析热处理产物的物相组成, Cu 靶  $K\alpha$  射线 ( $\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$ )。利用日本电子株式会社生产的 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 观察样品的形貌。利用美国 LakeShore 公司生产的 7304 型振动样品磁强计 (VSM) 分析样品的磁性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构分析

图 1 为  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 XRD 图谱, 图 2 为  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 FT-IR

谱。由图 1 可以看出,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝的 XRD 谱线均在  $2\theta=18.49^\circ, 30.35^\circ, 35.71^\circ, 43.43^\circ, 53.91^\circ, 57.48^\circ, 63.12^\circ, 74.58^\circ$  出现了明显尖锐的特征衍射峰, 其  $d$  值和相对强度与标准卡片 (JCPDS: 74-2081, 空间群: Fd-3m)  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  的  $d$  值和衍射峰相对强度对比一致, 分别属于其 (111), (220), (311), (400), (422), (511), (440), (533) 晶面, 且没有发现杂质相, 表明  $\text{Pr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$  均进入  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  的晶格中, 形成固溶体, 生成了结晶完整纯相的尖晶石型  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝。通过 Scherrer 公式  $D=K\lambda/\beta\cos\theta$ ,  $K=0.89$ , Cu 靶  $K\alpha$  射线  $\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$ ,  $\beta$  为  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 最强衍射峰 (311) 的半高宽,  $\theta$  为衍射角, 近似计算出  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝的平均晶粒尺寸 ( $D$ ), 依次为 39.8, 38.2, 33.8 nm, 列于表 1。 $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝与  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 XRD 谱线图相比, 掺杂  $\text{Pr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$  的特征衍射峰较宽, 峰强较弱, 表明掺杂  $\text{Pr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$  均降低了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  的结晶度, 减小了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的晶粒尺寸 (表 1)。随着掺杂元素 Pr, Nd, Sm 相对原子质量的增大, 其特征衍射峰逐渐变宽, 峰强减弱, 晶粒尺寸逐渐减小 (表 1)。由图 2 可以看出,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝的 FT-IR 谱线与  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 FT-IR 谱线图相比, 掺杂  $\text{Pr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$  纳米丝的特征吸收峰与纯相  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的特征吸收峰对比一致,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝的谱线都没有出现有机物的吸收峰, 表明 PVP 和金属盐完全分解, 在 602 和 411  $\text{cm}^{-1}$  处分别出现 Fe—O 键和 Ni—O 键的特征振动吸收峰, 证明形成了纯相的尖晶石型  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  晶体。

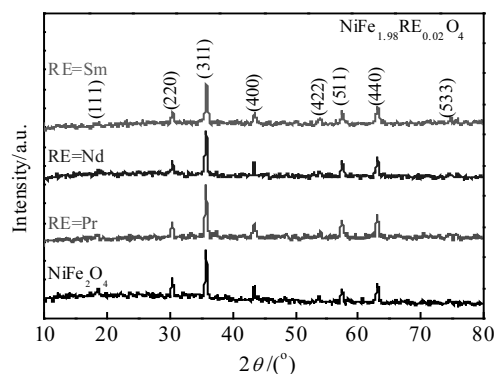


图 1  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  ( $\text{RE}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) and  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanowires

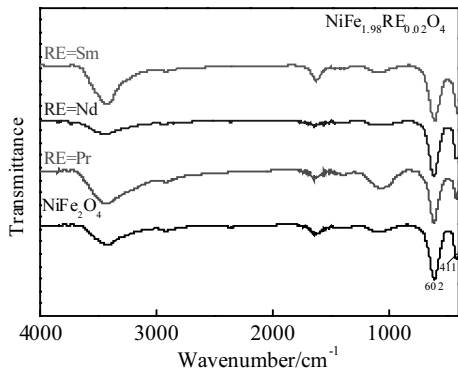


图 2  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 FT-IR 谱

Fig.2 FT-IR spectra of  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) and  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanowires

2.2 样品形貌

图 3 为  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的 SEM 照片。由图 3 可以看出,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝均表面光滑、直径均匀、连续, 直径在 60 nm 左右。由于掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  的  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的晶粒尺寸明显减小, 使其掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  的  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝 (图 3b~3d) 比  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝 (图 3a) 的表面更加光滑、致密。

2.3 磁性能分析

图 4 为  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的磁滞回线, 表 1 给出了所制备的  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的平均晶粒尺寸 ( $D$ )、饱和磁化强度 ( $M_s$ )、剩余磁化强度 ( $M_r$ ) 和矫顽力 ( $H_c$ ) 的大小。由图 4 可以看出, 所有  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳

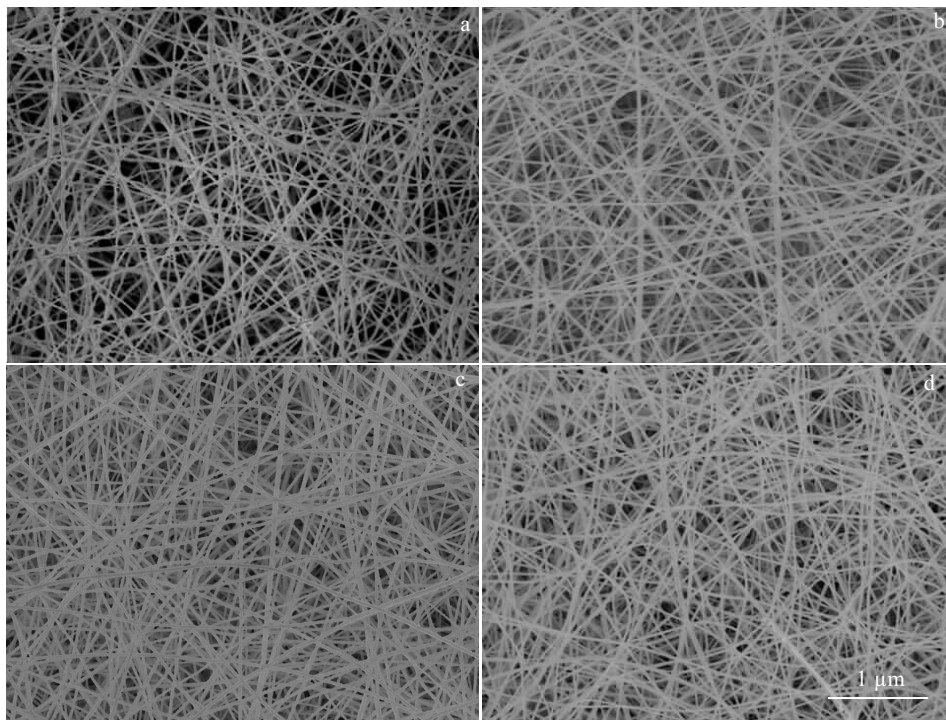


图 3  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Pr}_{0.02}\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$  和  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Sm}_{0.02}\text{O}_4$  纳米丝的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of nanowires: (a)  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , (b)  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Pr}_{0.02}\text{O}_4$ , (c)  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$ , and (d)  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Sm}_{0.02}\text{O}_4$

米丝都表现出软磁特性, 其中  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$  纳米丝的  $M_s$  最大,  $H_c$  最小, 软磁性能最好。由表 1 可知,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的  $M_s$  分别为 35.53, 39.58, 41.10, 34.23 ( $\text{A}\cdot\text{m}^2$ )/kg, 表明掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  均增大了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的  $M_s$ , 掺杂  $\text{Sm}^{3+}$  则减小了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的  $M_s$ 。  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,

$\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的  $M_r$  分别为 12.26, 10.26, 10.56, 10.28 ( $\text{A}\cdot\text{m}^2$ )/kg;  $H_c$  分别为 16980, 14119.2, 13678.4, 15937.6 A/m; 表明掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  均减小了  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  纳米丝的  $M_r$  和  $H_c$ 。这主要与掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  的有效磁矩、离子半径和纳米丝的晶粒尺寸和磁晶各向异性有关<sup>[25]</sup>。尖晶

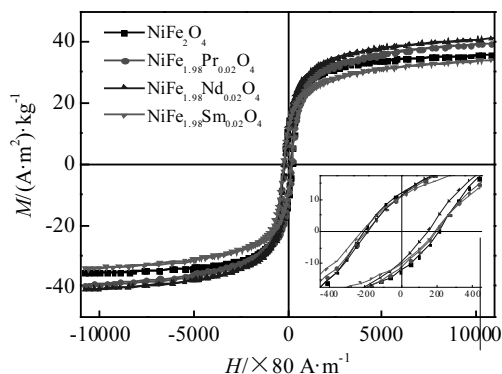


图 4 NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝和 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的磁滞回线

Fig.4 Hysteresis loops of NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) and NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanowires

表 1 NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub>(RE=Pr, Nd, Sm)纳米丝和 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的平均晶粒尺寸及磁性性能参数

Table 1 Average grain size and magnetic parameters of NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) and NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanowires

Sample	D/nm	M <sub>s</sub> /(A·m <sup>2</sup> )·kg <sup>-1</sup>	M <sub>r</sub> /(A·m <sup>2</sup> )·kg <sup>-1</sup>	H <sub>c</sub> /80 A·m <sup>-1</sup>
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	44.8	35.53	12.26	212.25
NiFe <sub>1.98</sub> Pr <sub>0.02</sub> O <sub>4</sub>	39.8	39.58	10.26	176.49
NiFe <sub>1.98</sub> Nd <sub>0.02</sub> O <sub>4</sub>	38.2	41.10	10.56	170.98
NiFe <sub>1.98</sub> Sm <sub>0.02</sub> O <sub>4</sub>	33.8	34.23	10.28	199.22

石型 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的磁矩主要来源于 B 位上的 Ni<sup>2+</sup>, 这是 A, B 位晶格 Fe<sup>3+</sup>磁矩相互抵消的结果。稀土 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>的半径大于 Fe<sup>3+</sup>, 少量的稀土 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>在尖晶石 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 结构中代替 B 位晶格的 Fe<sup>3+</sup>, 优先占据 B 位, 导致 A、B 位内磁矩差的改变; 同时, 掺杂少量的稀土 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>改变了 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的晶粒大小, 使其比表面积改变, 表面效应影响明显, 从而导致 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的 M<sub>s</sub> 改变<sup>[26]</sup>。由于掺杂 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>均减小了 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的晶粒尺寸, 使其磁晶各向异性减弱, 因此, 导致其 H<sub>c</sub> 减小。

### 3 结 论

1) 利用溶胶-凝胶法、静电纺丝技术和热处理技术相结合, 成功制备出表面光滑、直径均匀、连续的纯相一维 NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝, 直径约 60 nm。掺杂 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>均没有改变 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的尖晶石结构。NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的晶粒尺寸与 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的晶粒尺寸

相比均减小, 纳米丝的表面变得更加光滑、致密。

2) 所有 NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝都表现出软磁特性, 其中 NiFe<sub>1.98</sub>Nd<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的 M<sub>s</sub> 最大, H<sub>c</sub> 最小, 软磁性能最好。NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的磁性能与 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米丝的磁性能相比有明显的改变, 稀土 Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>的掺杂均抑制了晶粒的增长和改变了超交换作用, 调节了 NiFe<sub>1.98</sub>RE<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub> (RE=Pr, Nd, Sm) 纳米丝的磁性能。

### 参考文献 References

[1] Saensuk Orapan, Phokha Sumalin, Bootchanont Atipong *et al.* *Ceramics International*[J], 2015, 41: 8133

[2] Dai Jianfeng, Lu Rui'e, Fu Bi *et al.* *Chinese Physics B*[J], 2014, 23(3): 1

[3] Hodaei A, Ataie A, Mostafavi E. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 640: 162

[4] Lisjak D. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2014, 148(1-2): 311

[5] Nasrollahzadeh Mahmoud, Bagherzadeh Mojtaba, Karimi Hirbod. *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2016, 465: 271

[6] Dai Jianfeng(戴剑锋), Gao Huifang(高会芳), Wang Junhong (王军红) *et al.* *Acta Physico-Chimica Sinica*(物理化学学报)[J], 2012, 28(3): 729

[7] Kotsikau D, Ivanovskaya M, Pankov V *et al.* *Solid State Sciences*[J], 2015, 39: 69

[8] Naidu K C B, Madhuri W. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2016, 420: 109

[9] Duan Hongzhen(段红珍), Chen Guohong(陈国红), Zhou Fangling(周芳灵) *et al.* *Chinese Journal of Inorganic Chemistry* (无机化学学报)[J], 2015, 31(11): 2181

[10] Dai Jianfeng(戴剑锋), Lu Rui'e(路瑞娥), Fu Bi(付比) *et al.* *Chemical Journal of Chinese Universities*(高等学校化学学报)[J], 2013, 34(3): 514

[11] Yan Zhaoxia(燕照霞), Jiang Lei(姜磊), Liu Hanyun(刘涵云) *et al.* *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*(中国稀土学报)[J], 2017, 35(3): 301

[12] Reddy M P, Madhuri W, Reddy N R *et al.* *Journal of Electroceramics*[J], 2012, 28(1): 1

[13] Zhou Haiyan, Hu Li, Wan Jinzhong *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2016, 284: 54

[14] Wang S F, Li Q, Zu X T *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2016, 419: 464

[15] Singh J P, Won S O, Lim W C *et al.* *Journal of Molecular Structure*[J], 2016, 1108: 444

- [16] Shakir I, Sarfraz M, Ali Z *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 660: 450
- [17] Li Hua, Wu Huazhong, Xiao Guoxian. *Powder Technology*[J], 2010, 198(1): 157
- [18] Montemayor S M, García-cerda L A, Torres-Lubián J R *et al.* *Journal of Sol-Gel Science and Technology*[J], 2007, 42(2): 181
- [19] Sugimoto S, Haga K, Kagotani T *et al.* *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2005, 41(10): 3871
- [20] Heiba Zein K, Imam N G, Mohamed Bakr Mohamed. *Journal of Molecular Structure*[J], 2015, 1095: 61
- [21] Xu Chaochao, Sun Wei, Cao Limei *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2016, 283: 1137
- [22] Sahariya J, Mund H S, Sharma A *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2014, 360(4): 113
- [23] Pachpinde A M, Langade M M, Lohar K S *et al.* *Chemical Physics*[J], 2014, 429(11): 20
- [24] Tholkappiyan R, Vishista K. *Materials Science in Semiconductor Processing*[J], 2015, 40: 631
- [25] Rakesh Kumar Singh, Jyoti Shah, Kotnala R K. *Materials Science & Engineering B*[J], 2016, 210: 64
- [26] Li Jianan, Jing Panpan, Zhang Xinlei *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2017, 425: 37

## Structure and Magnetic Properties of One-dimensional $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$ (RE=Pr, Nd, Sm) Nanowires

Dai Jianfeng<sup>1,2</sup>, Liu Peng<sup>2</sup>, Wang Qing<sup>2</sup>, Li Weixue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou 730050, China)

(2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The one-dimensional  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) nanowires have been fabricated by sol-gel method, electrospinning technique and heat treatment technology. The structure, morphology and magnetic properties of  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) nanowires were characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM) and vibrating sample magnetometer (VSM). The results show that the nanowires surface is smooth and the diameter of the nanowires is about 60 nm which is continuous and symmetrical. All samples present a pure phase spinel structure. Separate doping of  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  and  $\text{Sm}^{3+}$  decreases the crystallinity of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , and the grain size  $D$  decreases from 44.8 nm to 33.8 nm.  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) nanowires exhibit soft ferrimagnetic behavior. The saturation magnetization ( $M_s$ ) of  $\text{NiFe}_{1.98}\text{RE}_{0.02}\text{O}_4$  (RE=Pr, Nd, Sm) nanowires are 39.58, 41.10, 34.23 ( $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ), respectively; and the coercivity ( $H_c$ ) of the nanowires are  $176.49\times 80$ ,  $170.98\times 80$ ,  $199.22\times 80$  A/m, respectively. Among them,  $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$  nanowires have the best soft magnetic properties including the largest  $M_s$  ( $41.10 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ) and the smallest  $H_c$  ( $170.98\times 80 \text{ A/m}$ ).

**Key words:** nickel ferrite; rare earth substituted; electrospinning; nanowires; magnetic properties

---

Corresponding author: Dai Jianfeng, Ph. D., Professor, School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973780, E-mail: daijf@lut.cn