

文章编号: 1674-8085(2018)03-0077-07

微量镍元素添加对铁基非晶/纳米晶磁芯 软磁性能的影响

*蒋达国, 文兴旺, 王同帅, 刘启瑞

(井冈山大学数理学院, 江西, 吉安 343009)

摘要: 用单辊法制备的宽 20 mm, 厚 25 μm 的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 和 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 合金带材, 绕制成外径为 40 mm, 内径为 25 mm 的环型磁芯, 然后将磁芯在不同的温度下进行退火处理, 研究了微量 Ni 元素添加对合金带材的晶化行为以及对横向磁场退火后的非晶/纳米晶磁芯的软磁性能的影响。结果表明: 与 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金带材相比, 添加微量 Ni 元素的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 合金带材的一级起始晶化温度 T_{x1} 和一级晶化峰温度 T_{p1} 降低, 其二级起始晶化温度 T_{x2} 和二级晶化峰温度 T_{p2} 升高, 两级起始晶化温度之间的差值 ΔT_x 增大; 与横向磁场退火后的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶/纳米晶磁芯相比, 横向磁场退火后的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 非晶/纳米晶磁芯的起始磁导率 μ_i 和饱和磁感应强度 B_s 减小, 矫顽力 H_c 增大; 当测试频率 f 和最大磁感应强度 B_m 不变时, 有效幅值磁导率 μ_a 增大, 比总损耗 P_s 和矫顽力 H_c 减小; 当测试频率 f 不变时, 电感 L_s 和品质因数 Q 增大; 当励磁电流 I 不变时, 感应电动势 E 大。

关键词: $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金带材; 微量镍元素添加; 非晶/纳米晶磁芯; 软磁性能; 横向磁场退火

中图分类号: TG139.8

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2018.03.016

EFFECT OF TRACE NI ELEMENT ON THE SOFT MAGNETIC PROPERTIES OF FE-BASED AMORPHOUS/NANOCRYSTALLINE CORES

*JANG Da-guo, WENG Xing-wang, WANG Tong-shuai, LIU Qi-rui

(School of Mathematics and Physics, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China)

Abstract: Annular cores with an external diameter of 40mm and an internal diameter of 25mm were made after the alloy strips $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ and $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ with a width of 20 mm and a thickness of 25 μm were prepared by the single roll technique, and then annealed under different temperatures. The effect of trace Ni element on the crystallization behavior of alloy strips and on the soft magnetic properties of amorphous/nanocrystalline cores after annealing by transverse magnetic field were investigated. Results show that, relative to $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy strips, $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ alloy strips with trace Ni element have the lower first-stage starting crystallization temperature T_{x1} and crystallization peak temperature T_{p1} , the higher second-stage starting crystallization temperature T_{x2} and crystallization peak temperature T_{p2} , and a larger difference between the first-stage and the second-stage starting crystallization temperatures ΔT_x . After annealing by transverse magnetic field, $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ cores have the lower initial permeability μ_i and saturation

收稿日期: 2017-11-23; 修改日期: 2018-03-12

资助项目: 国家自然科学基金项目 (51461020); 江西省自然科学基金项目 (20151BAB202025); 江西省教育厅科技项目 (GJJ150786); 江西省原子与分子物理重点学科项目 (2011-2015)

作者简介: *蒋达国(1968-), 男, 江西吉安人, 教授, 硕士, 主要从事磁性材料与器件研究(E-mail:jgsxy_jdg@sohu.com);

文兴旺(1997-), 男, 江西萍乡人, 井冈山大学数理学院本科生(E-mail: 2213264109@qq.com);

王同帅(1997-), 男, 甘肃白银人, 井冈山大学数理学院本科生(E-mail: 596546869@qq.com);

刘启瑞(1997-), 男, 河南郑州人, 井冈山大学数理学院本科生(E-mail: 2552927653).

induction density B_s , and the higher coercive force H_c as compared with $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ amorphous/nanocrystalline cores. Meanwhile, $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ cores have the larger effective amplitude permeability μ_a , and the special magnetic loss P_s and smaller coercive force H_c when the test frequency f and maximum magnetic induction B_m are constant, the larger inductance L_s and quality factor Q when the test frequency does not change, and the larger volt-ampere characteristic E when the excitation current I is unchanged.

Key words: $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy strips; addition of trace Ni element; amorphous/nanocrystal cores; soft magnetic properties; transverse magnetic field annealing

0 引言

1988年 Yoshizawa 等人^[1]首先报道了型成分典为 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (at%)的 Finemet 合金, 对其晶化热处理后可以形成非晶/纳米晶双相结构, 获得优异的软磁性能, 如高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力、低剩磁和较低的损耗等^[1-2], 并被广泛应用在电力电子领域以及电流传感器中^[3]。

磁场退火作为材料加工工艺的一种, 其目的是通过感生的单轴各向异性来改变材料的磁滞回线(B-H回线)的形状, 以满足对材料的某些特殊的性能需求。对非晶态软磁材料来说, 最常用的磁场退火工艺是纵向磁场退火(热处理时所加磁场的方向和以后使用磁性的方向平行)和横向磁场退火(热处理时所加磁场的方向和以后使用的磁性的方向垂直)。纵向磁场退火能使材料的磁滞回线矩形化, 提高材料的剩磁比和最大磁导率, 有效减小材料的矫顽力, 同时铁磁损耗增大。横向磁场退火可以获得平伏的磁滞回线, 使材料具有恒磁导率, 低剩磁磁感应强度, 同时铁磁损耗减小, 低损耗的非晶态合金铁芯是非常优质的制作脉冲变压器的材料。制备恒导磁元器件的常用方法是铁芯开口、横磁场退火等^[4]。铁芯开口会使磁性能大大降低, 涡流损耗成倍增长。对Fe-Si-B非晶合金采用部分晶化的方法也可获得恒导磁性能^[5-6], 但其恒导磁性能较低。

在 Finemet 合金中用微量的 Ni (Co) 原子替代 Fe 原子后可以增大合金的磁各向异性常数 K_u , 从而改变材料的磁各向异性, 引起磁性能的变化^[4,7-10]。本文在 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 的基础上, 通过调节合金成份, 用 0.7 个 Si 原子和 0.3 个 Ni 原子取代 1 个 B 原子, 制备了 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 非晶带

材, 主要研究了微量 Ni 元素添加对 FeCuNbSiB 合金带材的晶化行为以及对横向磁场退火后的 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的软磁性能的影响。

1 实验

采用单辊快淬法制备了宽为 20 mm、厚为 25 μm 的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 和 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 合金带材; 用绕带机将其绕制成外径为 40 mm、内径为 25 mm 的环型磁芯; 将环型磁芯放进退火炉中在不同的温度下真空 (10^{-3} Pa) 退火 100 min, 再经 550 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火制备的非晶/纳米晶环型磁芯在真空 (10^{-3} Pa) 保护条件下进行横向磁场退火, 磁场方向沿环型样品的轴线方向, 考虑到 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶合金的居里温度为 365 $^{\circ}\text{C}$ ^[11], 磁场退火温度选为 490 $^{\circ}\text{C}$; 将退火后的磁芯装入护盘中, 用漆包线在护盘上绕上初级线圈和次级线圈, 磁芯的有效磁路长度为 98.44 mm, 有效截面积为 127.3 mm^2 。

采用 Bruker D-9 X-ray 衍射分析仪进行物相分析(铜靶 $K\alpha$ 辐射, 特征波长 λ 为 0.154 nm, 衍射角 (2 θ) 范围为 20 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$, 步长为 0.02 $^{\circ}$, 工作电流和电压分别为 40 kV 和 40 mA); 采用 SDT Q600 instrument (TA, America) 同步热分析仪进行差热分析(升温速率 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 高纯(99.99%)氩气气氛保护); 采用无磁不锈钢管式气氛电阻炉进行退火, 真空氛围 (10^{-3} Pa), 退火温度为 550 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 100 min, 退火后空冷; 采用 MATS-2010SD 软磁直流测试仪和 MATS-2010SA 软磁交流测试仪分别测试直流软磁性能和交流软磁性能(测试频率为 20 kHz, 初级线圈和次级线圈分别为 10 匝和 3 匝); 采用 XL2817B 型 LRC 数字电桥测试电感和品质因数(绕线 1 匝, 测试电平为 1 V, 测试频率为 5~200

kHz); 采用 HT36 铁芯测试仪测试伏安特性 (初级线圈和次级线圈均为 1 匝, 励磁电流为 0.25~1 A)。

2 结果与分析

2.1 微量镍元素添加对合金带材的非晶特性和晶化行为的影响

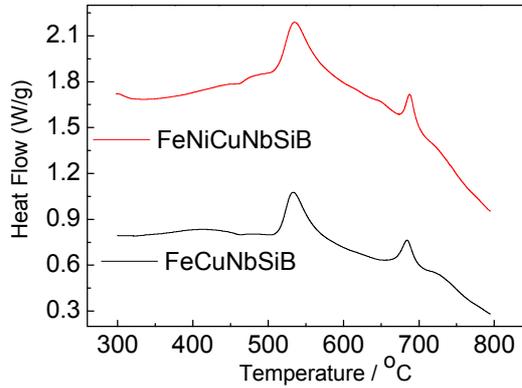
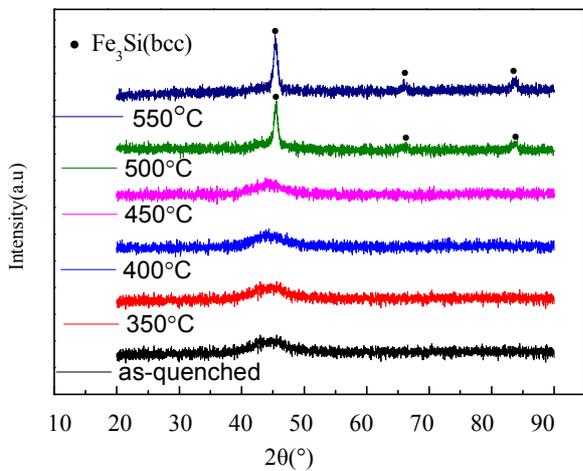


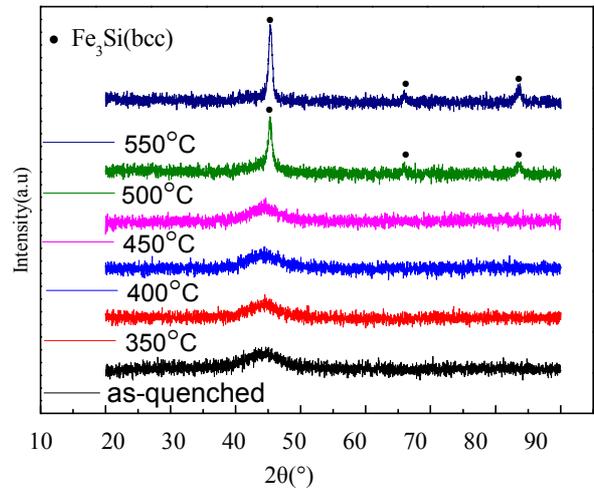
图 1 微量镍元素添加对非晶带材在淬火态的 DSC 曲线的影响

Fig.1 Effect of trace Ni element on DSC curves of as-quenched amorphous strips

由图 1 可知, 两种非晶带材在淬火态的 DSC 曲线均呈现出两级晶化过程, 其一级起始晶化温度 T_{x1} 分别为 514.4 °C 和 513.2°C, 一级晶化峰温度 T_{p1} 分别为 533.4 °C 和 531.5°C; 二级起始晶化温度 T_{x2} 分别为 665.4 °C 和 676.9 °C, 二级晶化峰温度 T_{p2} 分别为 684.1 °C 和 687.4 °C; 两级起始晶化温度之间的差值 ΔT_x 分别为 151 °C 和 163.7°C。其中一级晶化峰对应 Fe-Si 相的析出, 二级晶化峰对应着 Fe-B 相的析出。与 FeCuNbSiB 非晶带材相比, 添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶带材, 其一级起始晶化温度 T_{x1} 和一级晶化峰温度 T_{p1} 降低; 其二级起始晶化温度 T_{x2} 和二级晶化峰温度 T_{p2} 升高; 两级起始晶化温度之间的差值 ΔT_x 增大。由于微量 Ni 元素的添加, 使得非晶态合金带材的第一、二级的晶化温度区间 ΔT_x 增大, 这有利于在工业生产过程中通过退火工艺来控制析出对磁性能有利的单一的 α -Fe(Si)相和减少析出对磁性能有害的 Fe-B 相。



(a) $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$



(b) $Fe_{73.5}Ni_{0.3}Cu_1Nb_3Si_{14.2}B_8$

图 2 微量镍元素添加对合金带材 XRD 谱的影响
Fig.2 Effect of trace Ni element on XRD curves of alloy strips

由图 2 可知, 两种合金带材在淬火态的衍射谱均显示出非晶结构典型的漫散峰特征, 不存在任何尖锐的晶体相衍射峰, 只是在 $2\theta = 45^\circ$ 附近显现宽化的漫散峰, 说明两种淬火态合金带材均为非晶态结构。随着退火温度的升高, 两种合金带材在 $2\theta = 45^\circ$ 处的漫散峰的强度逐渐增强, 漫射峰宽度逐渐变窄, 且经 450 °C 退火没有出现明显的晶化现象, 基

本为非晶态。

当退火温度升高到 500 °C 时, 两种合金带材衍射谱线上在 $2\theta = 44.7^\circ$ 、 65° 、 82° 显现了尖锐的衍射峰, 经 PDF 卡片对照, 在 (110)、(200)、(211) 三个晶面的相结构为 $Fe_3Si(bcc)$ 。

当退火温度达到 550 °C 时, 与 FeCuNbSiB 合金带材相比, 添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 合

金带材的衍射峰的强度更强,峰宽度更窄。用谢乐公式计算出 $2\theta=44.7^\circ$ 处, FeCuNbSiB 和 FeNiCuNbSiB 合金带材的晶粒尺寸大小分别为 11.044 nm 和 12.583 nm ,表明两种合金带材经 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后均形成了非晶和纳米晶双相共存结构。这种由纳米晶和非晶组成的结构使其具有优良的软磁性能,如高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力、低剩磁和较低的损耗等^[12-13]。

Finemet 合金可获得优异软磁特性的重要条件之一是其经热处理后(一般选择一级晶化峰温度升

高 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 为最佳退火温度)可以形成具有 bcc 结构的单一的 $\alpha\text{-Fe(Si)}$ 纳米级晶粒。而对于一般的非晶态合金,加热到一级起始晶化温度 T_{x1} 时就剧烈晶化,形成的晶粒大小为微米级,晶粒长大得很快,且不能获得单一的晶化相。但在 Fe-Si-B 合金中加入 Cu 和 Nb 后形成的 Fe-Cu-Nb-Si-B 非晶态合金,晶化后可以形成单一的 $\alpha\text{-Fe(Si)}$ 纳米级晶粒结构,获得由非晶和纳米晶组成的复相组织,平均晶粒尺寸可达到 $8\sim 16\text{ nm}$ ^[14]。

2.2 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的直流软磁性能的影响

表 1 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的直流软磁性能的影响

Table 1 Effect of trace Ni element on DC soft magnetic properties of amorphous/nanocrystal cores

非晶/纳米晶磁芯	$\mu_i(\text{H/m})$	$\mu_m(\text{H/m})$	$P_u(\text{J/m}^3)$	$B_s(\text{mT})$	$B_r(\text{mT})$	$H_c(\text{A/m})$	$H_s(\text{A/m})$
$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$	0.0820	0.0947	1.131	1499	47.79	0.4431	200.3
$\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$	0.0490	0.0576	0.3518	1145	63.8	0.9987	199.8

由表 1 可知,与 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯相比,添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的初始磁导率 μ_i 和饱和磁感应强度 B_s 减小,矫顽力 H_c 增大。说明微量 Ni 元素的添加降低了非晶/纳米晶磁芯的直流软磁性能。初始磁导率 μ_i 的降低在一定程度上可提高 FeCuNbSiB 非晶态合金的直流偏置的抗饱和能力及抗偏磁能力,特别是在含有直流分量的电磁应用环境中,可以大大提高用 FeCuNbSiB 非晶态合金制成的各种电磁元件的稳定性。

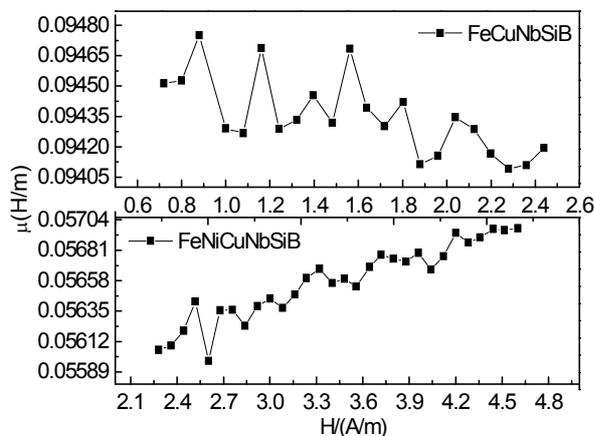


图 3 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的磁导率的影响
Fig.3 Effect of trace Ni element on permeability of amorphous/nanocrystal cores

由图 3 可知, FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯,当磁场强度 H 在 $0.72\sim 2.44\text{ A/m}$ 的范围内,呈现恒磁导率的特点,其磁导率 μ 恒定在 $0.09475\sim 0.09409\text{ H/m}$ 范围内,变化幅度为 0.00066 H/m ;而添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯,当磁场强度 H 在 $2.28\sim 4.60\text{ A/m}$ 的范围内,呈现恒磁导率的特点,其磁导率 μ 恒定在 $0.05698\sim 0.05598\text{ H/m}$ 范围内,变化幅度为 0.001 H/m 。

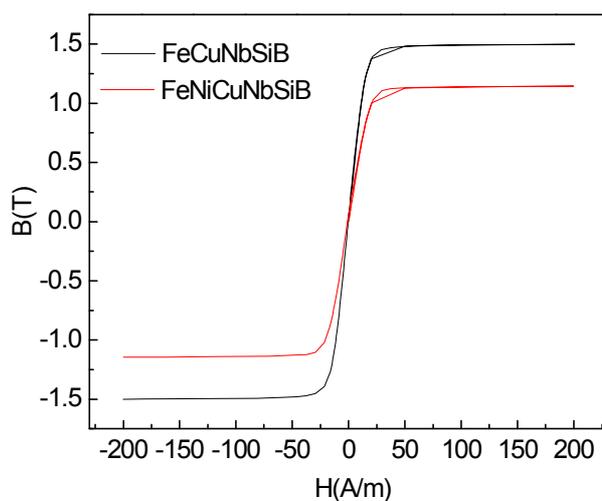
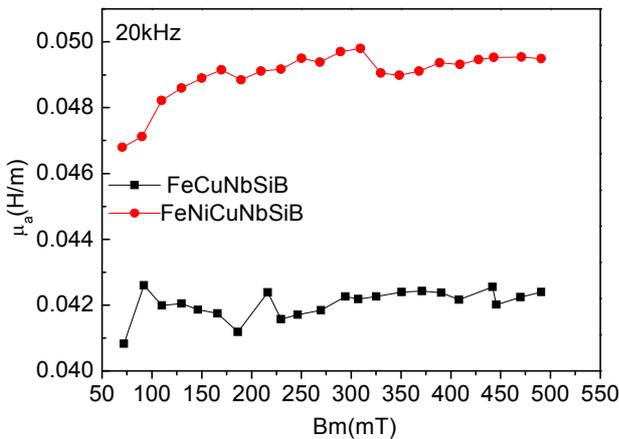


图 4 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的磁滞回线的影响
Fig.4 Effect of trace Ni element on hysteresis loops of amorphous/nanocrystal cores

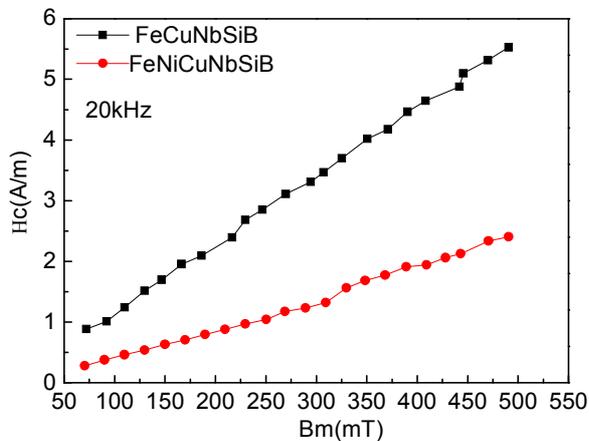
由图 4 可知, 与 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯相比, 添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的磁滞回线更向横轴偏斜。

磁滞回线的变化的主要原因是在磁场退火中, 由于铁磁交换作用, 使得一些晶粒结合在一起, 阻碍了单个晶粒磁晶各向异性的形成, 最后形成了一有效各向异性 K_u (感生单轴各向异性), 又可称为磁畴各向异性。在理想情况下, 由于磁场退火的作用, 许多晶粒结合在一起形成磁畴各向异性, 其磁矩沿着退火时外磁场的方向或接近该方向。而横向感生的 K_u 垂直于易轴方向, 从而磁滞回线变得狭长, 趋向恒导磁特性^[1]。通过横向磁场退火, 使磁畴取向垂直于磁化场方向, 故可将磁化过程视为完全的畴转动过程, 所以损耗很低。这种以低剩余磁感应强度和低损耗为特征的非晶/纳米晶铁芯, 是制作脉冲变压器的优质材料。

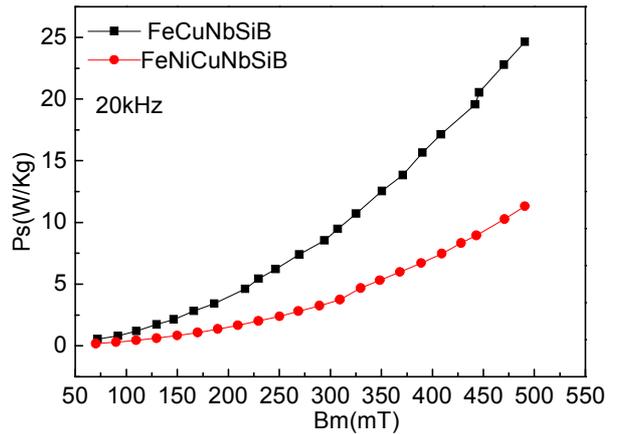
2.3 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的交流软磁性能的影响



(a) Effective amplitude permeability curves



(b) Coercivity curves



(c) Special magnetic loss curves

图 5 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的交流软磁性能的影响

Fig.5 Effect of trace Ni element on AC soft magnetic properties of amorphous/nanocrystal cores

由图 5 可知, 测试频率为 20 kHz 时, 与 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯相比, 当最大磁感应强度 B_m 不变时, 添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的有效幅值磁导率 μ_a 增大, 矫顽力 H_c 和比总磁损耗 P_s 均减小。两种非晶/纳米晶磁芯的交流矫顽力 H_c 和比总磁损耗 P_s 均随着最大磁感应强度 B_m 的增大而增大。

FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯, 当最大磁感应强度 B_m 在 72~490 A/m 的范围内, 呈现恒磁导率的特点, 其有效幅值磁导率 μ_a 恒定在 0.0408~0.0426 H/m 范围内, 变化幅度为 0.0018 H/m; 而添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯, 当最大磁感应强度 B_m 在 70~490 A/m 的范围内, 呈现恒磁导率的特点, 其有效幅值磁导率 μ_a 恒定在 0.0468~0.0498 H/m 范围内, 变化幅度为 0.0021 H/m。

2.4 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的电感和品质因数频率特性的影响

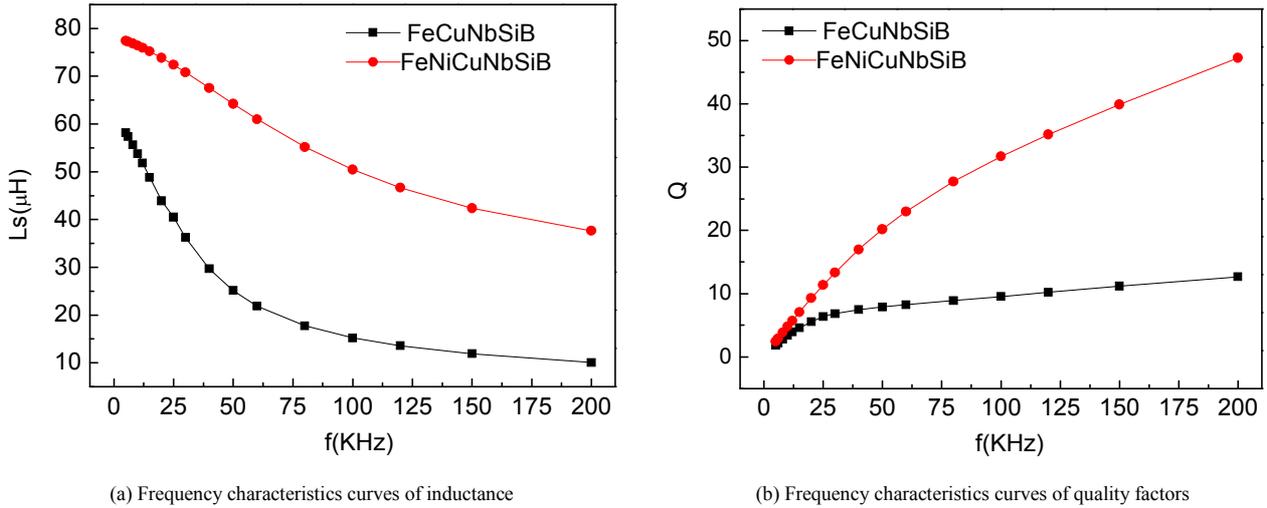


图 6 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的电感和品质因数频率特性的影响

Fig.6 Effect of trace Ni element on frequency characteristics curves of inductance and quality factors of amorphous/nanocrystal cores

由图 6 可知, 与 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯相比, 当测试频率 f 不变时, 添加微量 Ni 元素的 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的电感 L_s 和品质因数 Q 均增大。随着测试频率 f 的升高, 两种非晶/纳米晶磁芯的电感 L_s 均减小, 品质因数 Q 均增大^[15]。

2.5 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的伏安特性的影响

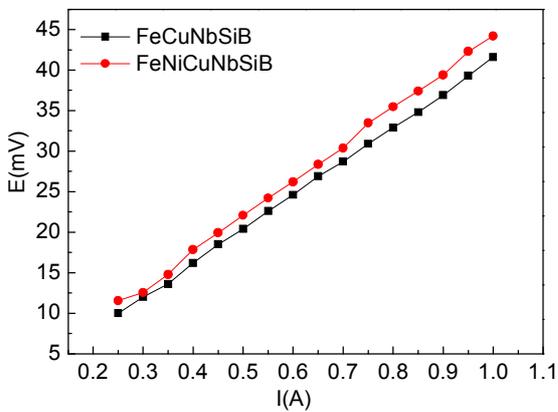


图 7 微量镍元素添加对非晶/纳米晶磁芯的伏安特性的影响

Fig.7 Effect of trace Ni element on volt-ampere characteristic of amorphous/nanocrystal cores

由图 7 可知, 与 FeCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯相比, 当励磁电流 I 不变时, 添加微量 Ni 元素 FeNiCuNbSiB 非晶/纳米晶磁芯的感应电动势 E 大。两种非晶/纳米晶磁芯的感应电动势 E 均随着励磁电流 I 的增大而线性增大^[16]。

3 结论

1) 在 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶态合金的基础上, 通过调节合金成分, 用 0.7 个 Si 原子和 0.3 个 Ni 原子取代 1 个 B 原子, 制备的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 非晶带材, 其一级起始晶化温度 T_{x1} 和一级晶化峰温度 T_{p1} 降低, 二级起始晶化温度 T_{x2} 和二级晶化峰温度 T_{p2} 升高, 两级起始晶化温度之间的差值 ΔT_x 增大。这说明添加微量 Ni 元素对 FeCuNbSiB 非晶态合金工业化生产的热处理温度控制的过程极为有利。

2) 横向磁场退火后的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 和 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 非晶/纳米晶磁芯均呈恒磁导率的特点。与 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶/纳米晶磁芯相比, 虽然添加微量 Ni 元素的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 非晶/纳米晶磁芯的直流软磁性能降低 (起始磁导率 μ_i 和饱和磁感应强度 B_s 减小, 剩磁 H_c 增大), 但在较高频率时的交流软磁性能提高 (有效幅值磁导率 μ_a 、电感 L_s 、品质因数 Q 和感应电动势 E 增大, 比总损耗 P_s 和矫顽力 H_c 减小), 从而大大提高了 FeCuNbSiB 非晶态合金在高频下 (100 kHz 以内) 的软磁性能, 特别有利于在逆变电源的高频变压器、脉冲变压器、UPS 电源变压器、开关电源输出滤波电抗器、EMC 电磁兼容领域的共模滤波电感、仪表领域的抗直流分量的互感器等中的应用。

参考文献:

- [1] Yoshizawa Y, Oguma S, Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64: 6044-6046.
- [2] Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic materials[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1992, 112(1-3):258-262.
- [3] Alves F, Simon F, Kane S N, et al. Influence of rapid stress annealing on magnetic and structural properties of nanocrystalline $\text{Fe}_{74.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_6$ alloy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 294(2): 141-144.
- [4] 吴晓荣,李德仁,李准,等. Ni 对 FeCuNbSiB 纳米晶合金恒导磁性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(04): 66-73.
- [5] 郭世海,张羊换,王煜,等. Fe基非晶合金的恒导磁性能研究[J]. 功能材料, 2007, 38(11): 1790-1792.
- [6] 蒋达国,叶媛秀,黄强,等. $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 合金的非晶形成能力和软磁性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(2): 49-52.
- [7] Yoshizawa Y, Yamauchi K. Effects of magnetic field anneal on magnetic properties in ultrafine crystalline Fe-Cu-Nb-Si-B alloy[J]. Magnetics IEEE Transactions, 1989, 25(5): 3324-3326.
- [8] Suzuki K, Ito N, Garitaonandia J S. High saturation magnetization and soft magnetic properties of nanocrystalline $(\text{Fe,Co})_{90}\text{Zr}_7\text{B}_3$ alloy annealed under a rotating magnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(8): 08F114.
- [9] 史瑞民,王治,郑燕,等. 磁场退火对纳米晶 $\text{Fe}_{74.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{Si}_{17.5}\text{B}_5$ 合金饱和磁致伸缩系数和 μ_i -T 曲线的影响研究[J]. 功能材料, 2017, 48(4): 04145-04148.
- [10] 周龙. 磁场退火对非晶及纳米晶合金软磁性能的影响[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [11] 宁翀昉,陈学定,俞伟元,等. Fe 基非晶软磁合金的纳米晶化及磁性[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2): 14-17.
- [12] 黄兴民. 铁基非晶的制备及晶化研究[D]. 苏州:江苏大学, 2005.
- [13] 张延松,丁昂,贺勇,等. 晶化退火对铁基纳米晶软磁材料磁性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(3): 67-68.
- [14] 郭斌,蒋达国,叶媛秀,等. 环氧树脂封装对 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶磁芯软磁性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(6): 90-92.
- [15] 蒋达国,郭斌. 环氧树脂封装对铁基纳米晶磁芯磁导率和伏安特性的影响[J]. 井冈山大学学报:自然科学版, 2016, 37(5): 83-86.