DOI:10.20038/j.cnki.mra.2022.000409

铁基非晶纳米晶磁芯软磁性能优化 的厚度效应和抗应力能力

蒋卫红,杨元政*,邱泽楠

(广东工业大学材料与能源学院,广东广州510006)

摘要:为了提高铁基非晶纳米晶带材磁芯的高频软磁性能和抗应力能力,采用单辊甩带工艺制备1K107系列J6铁基非晶合金带材,研究其在氮气和磁场相结合的热处理工艺对不同厚度带材磁芯的软磁性能和抗应力能力的影响。结果表明:经温度560℃氮气热处理后,厚度为20和26μm的纳米晶带材磁芯在工作频率100kHz时的有效磁导率分别为9.9和10k、损耗(*B*_m=0.1T)分别为9.41和9.79W·kg⁻¹;经460℃磁场热处理优化后,厚度为20μm的纳米晶带材磁芯在工作频率100kHz时的有效磁导率为17k、损耗为6.08W·kg⁻¹;经440℃磁场热处理后,厚度为26μm的纳米晶带材磁芯在100kHz时的有效磁导率为13.5k、损耗为7.30W·kg⁻¹;当外应力作用时,经温度为460℃磁场热处理的20μm厚的纳米晶带材磁芯在工作频率100kHz时的有效磁导率由16.2k降低到9k,而经温度为440℃磁场热处理的26μm厚的纳米晶带材磁芯 在工作频率100kHz时的有效磁导率由13.6k降低到6.4k,当外应力去除后两种纳米晶磁芯的有效磁导率都基本恢复,厚20μm纳米晶带材磁芯在工作频率100kHz时的有效磁导率恢复到15.9k,厚26μm纳米晶带材磁芯在工作频率100kHz时的有效磁导率恢复到13.4k。 **关键词:**热处理;纳米晶磁芯;软磁性能;抗应力能力;带材厚度

中图分类号:TB156.21 **文献标志码:** A **文章编号:**1673-9981(2022)04-0571-08

引文格式:蒋卫红,杨元政,邱泽楠.铁基非晶纳米晶磁芯软磁性能优化的厚度效应和抗应力能力[J].材料研究与应用,2022, 16(4):571-578.

JIANG Weihong, YANG Yuanzheng, QIU Zenan. Thickness Effect and Stress Resistance of Soft Magnetic Properties Optimization of Iron-Based Amorphous Nanocrystalline Magnetic Cores[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(4): 571-578.

随着节能、环保、廉价及高频化和小型化需求的 提出,对电子元器件的高频软磁性能提出了更高的 要求^[1-3]。磁芯作为电感器、互感器、电子变压器等 器件的核心部件^[4],长期以来国内外的研究者为提 高电磁元器件的高磁导率、高频低磁损耗等性能而 努力^[5-7]。1989年,日本Yoshizawa^[8]等发现,向Fe-Si-B系非晶合金中加入少量Cu、Nb等元素,通过适 当的热处理工艺,便可获得无规则取向的具有纳米 尺度的α-Fe(Si)晶粒的纳米晶合金,并且这些晶粒 均匀分布的在非晶体中。与传统非晶合金相比,这种具有双相结构的纳米晶合金展现出更加优异的软 磁性能,因此将其命名为Finetmet合金,该合金最典 型的成分是Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉。由于Finemet合金 具有更低矫顽力、更低损耗、更高磁导率等优点^[9], 受到人们广泛关注。2017年,Ohta等^[10]研究了 Fe_{81.8}Cu_{1.0} Mo_{0.2}Si₄B₁₄纳米晶合金薄带绕制磁芯的 软磁性能,通过适当热处理工艺得到纳米晶相,用这 种纳米晶合金薄带制备的环形磁芯在磁场强度为

收稿日期:2021-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52071089)

作者简介:蒋卫红(1994-),男,甘肃陇西人,硕士,主要研究方向为铁基非晶纳米晶软磁合金材料的研究, E-mail:2111902103@mail2.gdut.edu.cn。

通信作者:杨元政,男,教授,主要研究方向为铁基非晶纳米晶软磁合金材料的研究,E-mail: yangyzgdut@163.com。

800 A·m⁻¹时的磁感应强度(B)为1.74 T,在磁感应 强度为1.0 T和工作频率为1 kHz下的磁芯损耗为 5 W·kg⁻¹,在垂直磁场下进行二次热处理,在磁 感应强度0.2 T和工作频率10 kHz下的磁芯损 耗2 W·kg⁻¹。同年,Han等^[11]通过掺杂元素V研究 了 Fe_{73.5}Si_{13.5}B₉Cu₁Nb_{3-x}V_x合金,当x=1.5的纳米晶 合金表现出较低的矫顽力(H_e =0.89 A·m⁻¹)、较高 有效磁导率(1 kHz, μ_e =26.4 k)。2020年Wu等^[12] 通过掺杂质量分数为1%的Al代替Nb,研究发现 Fe₇₇Si₁₀B₉Cu₁Nb₃Al₁合金在工作频率为1 kHz时的有 效磁导率 μ_e 达到28 k。

虽然铁基纳米晶合金具有优异的软磁性能,然 而由纳米晶合金制备的磁芯随着工作频率的升高, 磁芯的损耗和温度也随之增加,有效磁导率迅速降 低,从而限制了磁芯在更高频率下的应用。此外,磁 芯在运输和使用的过程中受到外界环境作用(挤压、 碰撞、振动等因素)而产生应力,其有效磁导率将会 发生变化,从而影响到磁芯的正常使用。能否通过 优化热处理工艺,来提高磁芯的抗应力能力就显得 十分重要。因此,采用氮气热处理和磁场热处理相 结合的工艺,来研究不同厚度铁基非晶带材绕制磁 芯的高频软磁性能及抗应力能力。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验以厚度为(20±2)μm、宽度为10 mm和厚 度为(26±2)μm、宽度为20 mm的1K107系列J6铁 基非晶合金带材为研究材料,同时将其统一绕制成 内径为15 mm、外径为25 mm的环状磁芯。

1.2 实验方法

首先将环状磁芯通过管式真空炉进行氮气热处 理,氮气作为保护气体,根据合金带材的DSC曲线 图,将氮气热处理温度T。分别取值为540、550、560 和570℃。将经氮气热处理后的磁芯进行磁性能检 测,确定出最佳氮气热处理温度。然后将经氮气热 处理的最佳磁芯进行磁场热处理,氩气作为保护气 体,外加恒定横向磁场强度为800G,热处理温度T。 分别为440、460、480和500℃。图1为磁芯的热处 理工艺曲线图。



Figure 1 Heat treatment process curve of magnetic core

1.3 测试方法

通过 RigakuD/Max-UltimaIV 型 X 射线衍射仪 (XRD),检测了合金带材在氮气热处理前后的结构。通过 TA Instrument SDTQ600 型差示扫描量 热仪(DSC),研究带状样品的热稳定性,其中加热 速率为 20 K·min⁻¹、氮气为保护气体、升温温度为 300—800 ℃。通过 FE-2100SA 型软磁交流测量仪, 研究磁芯在工作频率 10—100kHz 下的损耗和矫顽 力,测试条件 B_m =0.1 T、匝数比为 2:10。通过 3260B 型精密磁性元件仪器,测量了磁芯在频 率为 1—200 kHz 的电感量。

通过公式^[13-14]计算环形磁芯的有效磁导率 $\mu_{e\circ}$ 式(1)—(3)中:L—电感量,N—线圈匝数(N=1), μ_{0} —真 空磁导率(4 π ×10⁻⁷ H·m⁻¹),*l*—磁芯的有效磁路长 度,A—磁芯的有效截面积;D—环形磁芯的外 径,d—环形磁芯的内径;K—叠片系数,其中K= 0.86(20 µm)、K=0.78(26 µm),h为磁芯的高度。

$$\mu_e = L \frac{l}{N^2 \mu_0 A} \tag{1}$$

$$l = \frac{(D+R)\pi}{2} \tag{2}$$

$$A = \frac{(D-R)h}{2K} \tag{3}$$

2 结果及讨论

2.1 合金带材的结构与热性能

2.1.1 淬态

图 2 为厚度 20 和 26 μm 的 淬态合金带材的 XRD和DSC图。从图 2 XRD图谱可见,厚度 20 和 26 μm的带材均在 45°附近出现了较宽的衍射峰,表 现出长程无序结构的衍射特征,说明不同厚度的合金带材在进行氮气热处理之前为非晶态结构。从图 2 DSC曲线图可见:厚度 20和 26 μm 的淬态合金带材的 DSC曲线上都有两个明显的晶化放热峰,第一 晶化峰是 *a*-Fe 相析出放热引起的,第二个晶化峰一 般是 Fe-B(二次相)析出放热引起的,Fe-B的析出会 严重恶化合金带材的磁性能,所以在进行热处理工 艺的设计时应尽量控制热处理温度来避免二次相的 析出;20 μm 合金带材的第一晶化放热峰的起始晶 化温度 T_{x1} =536 °C、第二晶化放热峰的起始晶化温度 T_{x2} =706 °C,而厚 26 µm 的合金带材的第一晶化放热峰的起始晶化温度 T_{x1} =530 °C、第二晶化放热峰的起始晶化温度 T_{x2} =695 °C。由 ΔT_x = T_{x2} - T_{x1} 可知,两种带材的 ΔT_x 分别为170和165 °C,较宽的 ΔT_x 为优化铁基非晶合金带材的纳米结晶提供了充足的热处理温度范围,表明合金具有很好的热性能,在 T_{x1} 和 T_{x2} 区间范围热处理的合金基本都只析出单一的 *a*-Fe相。



Figure 2 XRD patterns and DSC profiles of quenched alloy strips with thickness of 20 µm and 26 µm

2.1.2 氮气热处理

图 3为厚 20 和 26 μm 的非晶合金带材在氮气热 处理后的 XRD 图。从图 3 可见,随着氮气热处理温 度的升高,两种非晶合金带材衍射峰的变化较小,合 金在(110)、(200)和(211)晶面都出现了晶化峰。 经过分析发现,析出的是α-Fe相。表明,在氮气热 处理温度为540—570℃范围内,温度的变化对合金 的晶化程度影响不大。



Figure 3 XRD patterns of the amorphous alloy strips with different thicknesses after nitrogen heat treatment

通过对 XRD 图谱 45°附近处衍射峰的分析,经 过 Scherrer 公式^[15] $d = k\lambda/\beta \cos\theta$ 可以计算出不同厚 度带材在不同温度的平均晶粒尺寸(d),其中 k表示 Scherrer 常数(k=0.89)、 λ 表示 X 射线波长($\lambda =$ 1.1541Å)、 θ 表示衍射角、 β 表示带材的衍射半高 峰宽。表 1为厚 20和 26 μm 的非晶合金带材在不同 氮气热处理温度后的平均晶粒尺寸。

表 1 合金带材在不同氮气热处理温度后的平均晶粒尺寸 Table 1 Average grain size of alloy strips after different nitrogen heat treatment temperatures

•	•	
氮气热处理温	晶粒平均尺寸	晶粒平均尺寸
度/℃	(20 µm)/nm	(26 µm)/nm
540	18.73	19.85
550	19.08	19.75
560	19.12	19.88
570	20.22	19.74

2.2 热处理对不同厚度带材磁芯有效磁导率的 影响

2.2.1 氮气热处理

图 4 为氮气热处理后纳米晶磁芯的有效磁导率 随频率的变化。从图 4 可见:经过 560 ℃氮气热处理 的厚 20 µm 纳米晶带材磁芯整体上表现出较高的有 效磁导率,随着工作频率的升高,其有效磁导率由 76.6 k(1 kHz)快速降低到 9.9 k(100 kHz),之后缓 慢降低到 5.2 k(200 kHz);经过 560 ℃氮气热处理 的厚 26 µm 纳米晶带材磁芯也具有较高的有效磁导 率,其有效磁导率由 83.1 k(1 kHz)迅速降低到 10 k (100 kHz),之后缓慢降低到 5.3 k(200 kHz)。

两种磁芯在工作频率100 kHz附近的有效磁导 率随着氮气热处理温度的升高呈现递减的趋势。厚 20 μm 磁芯的有效磁导率随温度的增加呈现出先增 后减的趋势,这可能是纳米晶粒尺寸增大所导致的; 厚 26 μm 纳米晶带材磁芯的平均晶粒尺寸基本变化 不大,但是随着热处理温度的升高,其有效磁导率反 而下降,这可能是纳米晶粒之间的内应力导致的,内 应力的产生使得磁芯的有效磁导下降。

2.2.2 磁场热处理

为了进一步优化纳米晶磁芯高频下的有效磁导 率,将560℃氮气热处理后的纳米晶磁芯再进行 440、460、480和500℃磁场热处理,外加恒定横向磁 场强度为800Gs。磁场热处理的目的一方面是消 除氮气热处理对磁芯内应力的影响,另一方面是减 小磁畴运动的阻力,使纳米晶磁芯内部的磁畴发生 转动,优化纳米晶磁芯的软磁性能。





图 5为磁场热处理优化后纳米晶磁芯的有效磁 导率随频率的变化。从图5可见:经磁场热处理后 两种磁芯的有效磁导率同样随频率的升高而减小, 与氮气热处理磁芯相比较,磁场热处理后的磁芯在 较低频率下的有效磁导率虽有所下降,但在较高频 率下的有效磁导率整体有所提高;厚 20 μm 纳米晶 带材磁芯经过 460 ℃磁场热处理后,与氮气热处理 的纳米晶磁芯相比,其具有较高的有效磁导率,在1 kHz时有效磁导率由76.6 k降低到60 k,在100 kHz 时有效磁导率由9.9 k提高到17 k;厚26 μm纳米晶 带材磁芯在440 ℃磁场热处理后,与氮气热处理的 纳米晶带材磁芯相比,其具有较高的有效磁导率,在 1 kHz 时有效磁导率由83.1 k降低到55 k,在100 kHz 时有效磁导率由10 k提高到13.5 k。由此可 见,氮气热处理后的磁芯,由于非晶基体上出现了大 量纳米晶粒,通过磁场热处理的优化,非晶相与各晶 粒之间相互耦合,减小了钉扎磁畴壁的阻力,各磁畴 在磁场的作用下磁矩取向趋于一致,从而明显提高 了其在高频范围的有效磁导率。



图 5 磁场热处理优化后纳米晶磁芯的有效磁导率随频率的变化

Figure 5 Variation of effective permeability of nanocrystalline magnetic cores with frequency after optimization of magnetic field heat treatment

2.3 热处理对不同厚度带材磁芯损耗的影响

损耗也是衡量磁芯性能的重要指标,磁芯损耗的大小,对磁芯的应用起着重要作用,如果磁芯的损耗过高,会严重影响磁芯的正常工作状态。在金属软磁材料中,损耗主要是由涡流损耗和磁滞损耗组成。

2.3.1 氮气热处理

图 6 为氮气热处理后纳米晶磁芯的损耗随频率 的变化。从图 6 可见,随着工作频率的增大,薄带材 和厚带材纳米晶磁芯的损耗也增加。厚 20 μm 纳米 晶带材磁芯的损耗,当工作频率为30 kHz以下时损 耗受热处理温度的影响较小,在30 kHz以上时随着 温度的升高损耗缓慢降低,在频率为100 kHz时经 过560和570 ℃氮气热处理后的损耗分别为9.41和 8.40 W·kg⁻¹。厚26 μm纳米晶带材磁芯的损耗,整 体上来说受温度的影响较小,经过560 ℃氮气热处理 的纳米晶磁芯在100 kHz时的损耗为9.79 W·kg⁻¹。 对比厚为20和26 μm纳米晶带材磁芯的磁损,当工 作频率为100 kHz时,经过560 ℃氮气热处理后,厚 20 μm纳米晶带材磁芯的损耗略低于厚26 μm纳米 晶带材磁芯。





2.3.2 磁场热处理

将 560 ℃氮气热处理后的纳米晶磁芯在外加 800 Gs的恒定横向磁场强度中进行 440、460、480 和 500 ℃的磁场热处理。图 7 为磁场热处理后纳米晶 磁芯的损耗随频率的变化。从图7可见:厚20 µm 纳米晶带材磁芯的损耗,随磁场温度的升高呈现出 先降低后升高的变化;经过460℃磁场热处理后,其 损耗较小;在频率100 kHz时,其损耗由560℃氮气 热处理后的9.41 W·kg⁻¹降低到6.08 W·kg⁻¹;同时, 随着工作频率的升高其损耗降低的幅度逐渐增大, 当工作频率100 kHz及经460 ℃磁场优化后,其损耗 降低的幅度最大。从图7还可见:厚26 µm 纳米晶 带材磁芯的损耗,随磁场温度的升高呈现缓慢增大 的变化;与氮气热处理的磁芯相比较,在工作频率 40 kHz以下时其损耗降低幅度不太明显,在40 kHz 以上时其损耗逐渐降低且降低的幅度缓慢增大;经 过440℃磁场热处理后,在工作频率100 kHz时其损 耗由560℃氮气热处理后的9.79 W·kg⁻¹降低到 7.30 W·kg⁻¹。在工作频率100 kHz时,对比两种带 材的损耗可知,厚20 µm纳米晶带材磁芯明显低于 厚26 µm纳米晶带材磁芯。





Figure 7 Variation of loss with frequency in nanocrystalline magnetic cores after magnetic field heat treatment

2.4 热处理对不同厚度磁芯抗应力能力的影响

磁芯受到外界应力的作用时会发生一定变形, 其磁性能也将会发生变化,所以要提高磁芯的抗应 力能力。磁芯的抗应力能力是指磁芯受到外应力 时,而使其磁性能尽可能保持不变或外应力消失后 性能恢复到原来状态的能力。图8为磁场热处理优 化的纳米晶带材磁芯在受外应力前后的有效磁导率 随频率的变化。从图8可以明显看出:纳米晶磁芯 受到一定外应力后其有效磁导率显著降低,经 460℃磁场热处理的厚20 µm 纳米晶带材磁芯在工 作频率100 kHz 时的有效磁导率由16.2 k降低到 9.0 k,而经440℃磁场热处理的厚26 µm纳米晶带 材磁芯在100 kHz时的有效磁导率由13.6 k降低到 6.4 k,但是在外应力撤去后其有效磁导率基本恢复 原状,厚20 µm纳米晶带材磁芯在工作频率100 kHz 时的有效磁导率恢复到15.9 k,厚26 µm纳米晶带 材磁芯在工作频率100 kHz时的有效磁导率恢复到 13.4 k。从磁畴的角度来说,由于纳米晶磁芯在磁 场热处理后,纳米晶磁芯内部的磁畴基本趋于稳定, 当施加外应力时由于外应力迫使磁芯内部的磁畴发 生无规则的取向的转动,所以磁芯的有效磁导率下 降。然而,当外应力去点以后,各磁畴又近似恢复到





原来的状态,所以磁芯的磁导率也近似地恢复到不 加应力时的状态。对比100 kHz时的两种纳米晶磁 芯可知,厚20 µm 纳米晶带材磁芯受到外应力时有 效磁导率降低的幅度比厚26 µm 纳米晶带材磁芯的 较小,说明在100 kHz时,厚20 µm 纳米晶带材磁芯 经过460 ℃的磁场热处理优化后,比440 ℃磁场热处 理优化的厚26 µm 纳米晶带材磁芯具有相对较好的 抗应力能力。

3 结论

(1)采用氮气热处理和磁场热处理相结合的工艺,虽然降低了纳米晶磁芯在低频下的有效磁导率, 但明显提高了纳米晶磁芯在高频下的有效磁导率。 厚 20 和 26 μm 度的纳米晶带材磁芯经过 560 ℃氮气 热处理后,分别再经过 460 和 440 ℃磁场热处理优化 后,在工作频率 100 kHz 时的有效磁导率分别为 17 和 13.5 k,损耗分别为 6.08 和 7.30 W·kg⁻¹。对比 100 kHz 时的这两种纳米晶带材磁芯可知,厚 20 μm 纳米晶带材磁芯要比厚 26 μm 纳米晶带材磁芯具有 更高的有效磁导率和更低的磁芯损耗。

(2)在外应力作用时,经460℃磁场热处理优化的厚 20 μm 纳米晶带材磁芯的有效磁导率和经440℃磁场热处理优化的厚 26 μm 纳米晶带材磁芯的有效磁导率显著降低,但外应力撤去后两种纳米晶磁芯的有效磁导率都基本恢复,都具有较好的抗应力能力。

参考文献:

- [1] HASEGAWA R, AZUMA D. Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(20): 2451-2456.
- [2] YANG Z, HE X, NING Z, et al. Effect of nanocrystallization of magnetic amorphous ribbon on thermoelectric and magnetic properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 535: 119990.
- [3] GUTFLEISCH O, WILLARD M A, BRUCK E, et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient [J]. Advanced Materials, 2011, 23(7): 821-842.
- [4] 刘君昌,梅云辉,陆国权.电力电子中高频软磁材料的

研究进展 [J]. 材料工程, 2017, 45(5): 127-134.

- [5] XIAO M, ZHENG Z G, JI L, et al. The role of V and Mo on crystallization process and magnetic properties of FeSiBCuNb alloys using in wide frequency scale [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 521: 119546.
- [6] PARSONS R, LI Z, SUZUKI K. Nanocrystalline soft magnetic materials with a saturation magnetization greater than 2 T [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 485: 180-186.
- [7] SHEN N N, DOU Z X, LI Y L, et al. Effect of Fe content on crystallization behavior and soft magnetic properties in FINEMET-type alloys [J]. Materials Letters, 2021, 305: 130759.
- [8] YOSHIZAWA Y, OGUMA S, YAMAUCHI K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 6044-6046.
- [9] 马海健,魏文庆,鲍文科,等.铁基纳米晶软磁合金研 究进展及应用展望[J].稀有金属材料与工程,2020, 49(8):2904-2912.
- [10] OHTA M, HASEGAWA R. Soft magnetic properties of magnetic cores assembled with a high bs Fe-based nanocrystalline alloy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(2): 1-5.
- [11] HAN Y B, WEI R, LI Z C, et al. Improvement of magnetic properties for V-substituted Fe_{73.5}Si_{13.5}B₉Cu₁ Nb_{3-x}V_x nanocrystalline alloys [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28 (14): 10555-10563.
- [12] WU J X, HE A N, DONG Y Q, et al. Structural and magnetic characterization of Al microalloying nanocrystalline FeSiBNbCu alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 505: 166746.
- [13] LUO T, XU J, WANG G T, et al. Composition dependence of amorphous forming, crystallization behavior, magnetic and electronic properties of siliconrich FeSiBCuNb alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 505: 166714.
- [14] 曾玉婷,甘章华,吴传栋,等.热处理工艺对 Fe_{75.5}Si_{12.9}B₇Cu₁Nb_{1.8}V_{1.4}Co_{0.4}纳米晶合金高频软磁性能 的影响[J].功能材抖,2019,5(50):5018-5022.
- [15] 张瑜,邱嘉杰.热处理工艺对铁基非晶合金纳米晶晶 粒尺寸的影响[J].上海有色金属,2008,29(1):6-9.

Thickness Effect and Stress Resistance of Soft Magnetic Properties Optimization of Iron-Based Amorphous Nanocrystalline Magnetic Cores

JIANG Weihong, YANG Yuanzheng^{*}, QIU Zenan

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to improve the high frequency soft magnetic properties and stress resistance of iron-based amorphous nanocrystalline strip magnetic cores, the effect of the combined nitrogen and magnetic field heat treatment process on the soft magnetic properties and stress resistance of strip magnetic cores with different thicknesses was investigated for 1K107 series J6 iron-based amorphous alloy strips prepared by a single-roller strip dumping process. The results show that the effective permeability of the magnetic core of nanocrystalline strips with 20 µm and 26 µm thicknesses after nitrogen heat treatment at 560 °C was 9.9 k and 10 k, respectively, at a frequency of 100 kHz, and the loss was 9.41 $W \cdot kg^{-1}$ and 9.79 $W \cdot kg^{-1}$ at 100 kHz, respectively (test condition $B_m = 0.1$ T). The nanocrystalline strip magnetic core with a thickness of 20 µm was optimized by a magnetic field heat treatment at 460 °C. Its effective permeability was improved to 17 k at 100 kHz and the loss was reduced to 6.08 $W \cdot kg^{-1}$ at 100 kHz. The nanocrystalline strip magnetic core with a thickness of 26 µm was optimized by a magnetic field heat treatment at 440 °C. Its effective permeability was improved to 13.5 k at 100 kHz, and the loss was reduced to 7.30 $W \cdot kg^{-1}$ at 100 kHz. When the external stress is applied, the effective permeability of the magnetic core of a 20 µm-thick nanocrystalline strip heat-treated with a magnetic field at 460 °C was reduced from 16.2 k to 9 k at 100 kHz, and the effective permeability of the magnetic core of a 26-um-thick nanocrystalline strip heat-treated with a magnetic field at 440 °C was reduced from 13.6 k to 6.4 k at 100 kHz. When the external stress is removed, the effective permeability of the two nanocrystalline cores is basically restored. The effective permeability of the thick 20 µm nanocrystalline magnetic strip cores recovered to 15.9 k at a frequency of 100 kHz and the effective permeability of the thick 26 µm nanocrystalline strip magnetic cores recovered to 13.4 k at a frequency of 100 kHz.

Keywords: heat treatment; nanocrystalline magnetic core; soft magnetic properties; stress resistance; strip thickness

(学术编辑:黎小辉)