

DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2019-0359

退火温度对 FeCuNbSiB 纳米晶合金磁性能的影响

潘 贇^{1,2}, 刘天成^{1,2}, 陈非非^{1,2}, 刘迎春^{1,2}, 李广敏^{1,2}, 唐冬冬^{1,2}

(1. 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081; 2. 安泰科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 用熔体快淬法制备出 3 种 FeCuNbSiB 纳米晶合金带材, 绕制成 50 mm × 32 mm × 20 mm 的环形磁环, 随后在 530 ~ 620 °C 下进行等温退火, 研究退火温度对合金磁性能的影响。结果表明: 随着退火温度的增加, 合金内部晶化相的晶粒尺寸和体积分数有所增加。在 550 ~ 600 °C 等温退火后合金具有相对较低的矫顽力 (H_c 为 1.0 ~ 1.5 A/m, 测试条件: $B_m = 100$ mT, $f = 10$ kHz) 和损耗值 (P_m 为 1.4 ~ 1.8 W/kg, 测试条件: $B_m = 300$ mT, $f = 10$ kHz), 特别是经过 570 ~ 590 °C 退火后合金在 1 kHz ~ 50 kHz 频率范围内具有最佳的磁导率。同时, 在 1 kHz ~ 10 MHz 频率范围内, 不同测试频率下合金阻抗值对应的最佳退火温度也不同。

关键词: 纳米晶合金; 磁性能; 热处理

中图分类号: TG132.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-6264(2020)03-0089-07

Effect of annealing temperature on magnetic properties of FeCuNbSiB nanocrystalline alloys

PAN Yun^{1,2}, LIU Tian-cheng^{1,2}, CHEN Fei-fei^{1,2}, LIU Ying-chun^{1,2}, LI Guang-min^{1,2}, TANG Dong-dong^{1,2}

(1. China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China;

2. Advanced Technology & Materials Co Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: Three FeCuNbSiB nanocrystalline alloy strips were prepared by melt-fast quenching method, and the ring-shaped magnetic ring with dimensions of 50 mm × 32 mm × 20 mm was prepared and then annealed at 530-620 °C, and the effect of the annealing temperature on the magnetic properties of the FeCuNbSiB alloys was studied. The results show that, with the increase of the annealing temperature, the grain size and volume fraction of the crystallization phase in the alloy are increased. After annealing at 550-600 °C, the alloys have a relatively low coercivity (H_c is 1.0-1.5 A/m, test condition: $B_m = 100$ mT, $f = 10$ kHz) and core loss value (P_m is 1.4-1.8 W/kg, test condition: $B_m = 300$ mT, $f = 10$ kHz), especially after annealing at 570-590 °C, the alloy has the best magnetic permeability in the frequency range of 1 kHz to 50 kHz. At the frequency range of 1 kHz to 10 MHz, the optimum annealing temperature corresponding to the impedance value of the alloy at different test frequencies is also different.

Keywords: nanocrystalline alloys; magnetic properties; heat treatment

自 1967 年 Duwez 教授首次利用熔体急冷技术制备出非晶态金属以来, 该材料就开始被人们研究和利用。1988 年, 日立金属的 Yoshizawa 博士在非晶合金的基础上通过晶化退火获得了铁基纳米晶合金, 命名为“FINEMET”, 该合金具有高初始磁导率、低矫顽力和低损耗等优异的软磁性能, 在众多领域得到了广泛的应用^[1]。

纳米晶合金具有优异软磁性能的原因可由 Herzer^[2] 提出的随机各向异性模型来解释。在大尺寸晶粒中, 晶粒的磁化主要沿易磁化轴进行, 磁化过程由磁晶各向异性决定, 表现为随晶粒取向不同磁化的难易程度也不相同。而在晶粒尺寸小于畴壁宽度的晶粒中, 一个磁畴内往往包含多个晶粒, 其有效各向异性是几个晶粒的平均值, 磁化过程随晶粒取向的

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0300500)

作者简介: 潘 贇(1996—) 男, 硕士研究生, 主要从事非晶纳米晶合金软磁性能研究, E-mail: panyun1996@outlook.com。

通信作者: 刘天成(1978—) 男, 硕士, 博士, 高级工程师, 主要从事非晶纳米晶软磁材料研究, E-mail: liutiancheng@atmcn.com。

引用格式: 潘贇, 刘天成, 陈非非, 等. 退火温度对 FeCuNbSiB 纳米晶合金磁性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(3): 89-95.

PAN Yun, LIU Tian-cheng, CHEN Fei-fei, et al. Effect of annealing temperature on magnetic properties of FeCuNbSiB nanocrystalline alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(3): 89-95.

差异显著降低。纳米晶合金的磁化过程是由交换作用决定的^[2],交换软化作用使合金表现出随晶粒尺寸减小矫顽力也减小同时磁导率增加的特点。铁基纳米晶合金的最小交换作用长度为20~40 nm,因此晶粒尺寸往往需要控制在5~20 nm^[3],这样交换作用导致的磁晶各向异性平均化会使合金获得良好的软磁性能^[1-3],下式为合金平均磁晶各向异性常数 $\langle K_1 \rangle$ 同晶粒尺寸的关系^[4],

$$\langle K_1 \rangle = |K_1| \cdot x^2 \left(\frac{D}{L_0} \right)^6 \quad (1)$$

式(1)中: K_1 为磁晶各向异性常数, x 为晶化体积分数, D 为晶粒尺寸, L_0 为临界相关交换长度。由式(1)可知当晶粒尺寸降低时平均各向异性也显著降低。对纳米晶合金来说,当晶粒尺寸远远小于临界交换长度时,合金的矫顽力同晶粒尺寸的关系满足如下的经验公式^[5]:

$$H_c \propto D^n \quad (2)$$

Suzuki等^[6]研究了铁基纳米晶合金在不同退火条件下的磁晶各向异性,发现在晶化过程中随着晶化相结构的变化,合金矫顽力与晶粒尺寸之间的关系也发生了变化, n 的取值介于3~6之间,但无论晶化相结构如何变化,减小晶粒尺寸均可以显著降低矫顽力。与此同时,交换作用长度也存在下限,对于晶粒尺寸在 L_0 下限的合金,矫顽力则变化很小^[5]。

纳米晶合金中磁弹性各向异性或磁致伸缩的存在也会影响合金的软磁性能,当软磁材料被置于磁场中时,其尺寸会随着磁化过程发生变化,该现象被称为磁致伸缩。尽管常规软磁材料的磁致伸缩现象并不明显,却会显著地降低磁导率同时增加矫顽力。非晶合金中磁致伸缩同饱和磁化强度成二次方关系,因此无法同时达到低磁致伸缩和高饱和磁化强度。铁基纳米晶合金中由于内部存在非晶相和晶体相的两相结构,其总的磁致伸缩可以由下式来表示^[6]:

$$\lambda_s = v_a \lambda_s^a + (1 - v_a) \lambda_s^c \quad (3)$$

式(3)中: v_a 为非晶相的体积分数, λ_s^a 为非晶相的饱和磁致伸缩系数,其值为正, λ_s^c 为晶体相的饱和磁致伸缩系数,其值为负。因此当合金内部具有合适的晶化体积分数时,合金总体的磁致伸缩接近于零,对于提高铁基纳米晶合金的软磁性能具有积极意义。

前已述及,铁基纳米晶软磁合金主要是通过控制合金中晶体相的析出来获得优异的软磁性能。当热处理后获得的纳米晶相具有合适的晶粒尺寸(小于20 nm)以及晶化体积分数时,合金才能发挥出最佳

的软磁性能^[1],因此热处理时的保温温度^[7]、保温时间^[8]、冷却速度^[9]以及外界磁场方向^[10]等都对于合金的磁性能影响显著。特别是保温温度会显著影响纳米晶的晶粒尺寸和晶化体积分数,所以合适的退火温度对于获得最佳磁性能尤为重要。Mikhailitsyna等^[11]对 $\text{Fe}_{73.9}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.2}\text{B}_{8.9}$ 纳米晶合金分别在350、400和450℃下进行退火,发现在低温退火后合金内部依然保持非晶态特点,而在450℃退火后合金内部形成直径约16 nm的纳米晶相,获得了较好的磁性能。同时发现随着退火温度的增加,感生各向异性逐渐减弱,在450℃退火后完全消失,其认为该现象的发生与退火导致的应力释放有关。左江波等^[12]对1K107纳米晶合金进行530~600℃下的退火,发现随退火温度的升高合金的晶化量增多,并且在560℃退火时合金具有最佳的磁性能。王志辉等^[13]研究了 $\text{Fe}_{73.5}\text{Co}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 合金在350~650℃退火后的性能,发现在550℃退火后合金内部为非晶相+纳米晶相的双相结构,同时纳米晶相的晶粒尺寸约为12.5 nm,此时合金具有最大的初始磁导率、最小的矫顽力以及最大的饱和磁感应强度。本文在此基础上拟通过对FeCuNbSiB纳米晶合金合金进行不同温度下的退火处理,研究其磁性能随退火温度的变化规律,寻找不同性能要求的纳米晶合金的最佳热处理温度。

1 实验材料及方法

用熔体快淬法制备出厚度为20~22 μm的FeCuNbSiB纳米晶合金带材,具体成分及编号如表1所示。用自动卷绕机卷绕成相同规格的环形磁环(50 mm×32 mm×20 mm)。在氮气气氛保护下对磁环进行退火处理,为了研究退火温度对于合金磁性能的影响并尽可能排除退火时间对晶化过程的影响,选择保温区间的保温时间为60 min,使其在相应温度下的晶化过程充分进行。具体工艺:60 min加热至500℃后再以30 min加热至保温区间保温60 min,区间温度根据DSC结果选择530~620℃,之后磁环随炉冷却至150℃以下出炉,冷却时间不少于120 min。

用NETZSCH DSC404C差示扫描量热仪对带材进行了DSC分析,差示扫描量热仪经标样In、Sn、Bi、Al等校正,选用氧化铝坩埚,升温速率设定10 K/min,测量的温度范围为室温至750℃。用BRUKERD8 ADVANCE X射线衍射分析仪对带材进行物相分析(Cu靶 K_α 辐射,特征波长 λ 为0.154056 nm,

表 1 合金成分及编号(原子分数,%)

Table 1 Chemical composition and corresponding number of the alloys(at%)

No.	Fe	Cu	Nb	Si	B
F-B	73.8	1	3	15.3	6.9
F-E	73.4	1	2.9	15.8	6.9
F-W	74.1	1	3	15	6.9

衍射角(2θ)范围 20~100°,步长 0.02°。用 IWATSU B-H Analyzer 对磁环的交流磁特性进行测量,测试时饱和磁感应强度 B_m 选择 100 mT 和 300 mT,频率 10 kHz~100 kHz。用 Agilent 4294 A 对磁环进行阻抗和电感测试,绕制单匝线圈,频率范围 1 kHz~10 MHz,测试电压 0.5 V。

2 实验结果及分析

2.1 DSC 曲线及热处理温度选择

图 1 为 F-B、F-E 和 F-W 3 种纳米晶合金的 DSC 曲线。由图 1 可以看到 FeCuNbSiB 纳米晶合金有比较明显的两个晶化峰,分别对应 Fe-Si 相和 Fe-B 相^[13]。两个晶化峰温度相差较大,意味着该系列合金有比较宽泛的退火区间,有利于退火工艺选择。随合金成分改变,晶化峰位置发生轻微偏移,其中 F-W 的二次晶化温度(T_{c2})最低,约为 669 °C。由于温度达到二次晶化温度时合金内部将会析出 Fe_2B 硬磁

相,恶化磁性能^[13],因此实验最终选择保温区间 530~620 °C,温度变量间隔 10 °C。

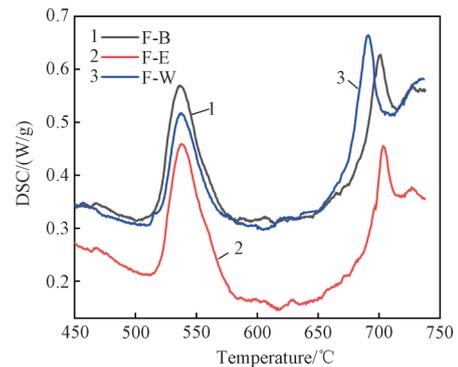


图 1 FeCuNbSiB 纳米晶合金 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curves of the FeCuNbSiB nanocrystalline alloys

2.2 退火温度对合金组织的影响

图 2 是 3 种合金分别在 530、580 和 620 °C 退火后的 XRD 图谱。可以看到,经过上述温度退火后,合金内部已经析出 $\alpha-Fe_3Si$ 相,同时随退火温度的增加,衍射峰强度也存在一定程度的增加,特别是在 620 °C 退火后合金内部晶化相的(110)晶面和(211)晶面对应的衍射峰强度较高。利用衍射峰强度可以定量计算合金中晶化相的体积分数,但需要经过多次修正及拟合^[14],从定性的角度出发,晶化相体积分数与衍射峰强度成正比。

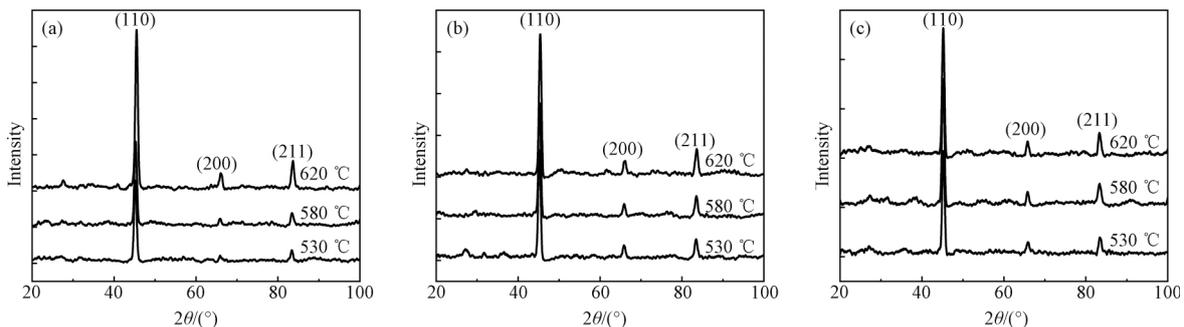


图 2 合金经过不同温度退火后的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the alloys annealed at different temperatures (a) F-B; (b) F-E; (c) F-W

根据 XRD 衍射图谱,利用谢乐公式可以估算晶粒尺寸 D ,公式如下,

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4)$$

式(4)中: k 为谢乐常数且取值为 0.94, λ 为 Cu 靶 $K\alpha$ 衍射的波长,其值为 0.154056 nm, θ 为衍射角, β 为半高峰宽度,其一般取 2θ 角小于 60° 的(110)晶面衍射峰强度的一半所对应的衍射线宽度为值,计算时

换算为弧度制。根据式(4)估算出的晶粒尺寸以及对应的(110)晶面衍射峰强度列于表 2 中。可以看到,随退火温度增加晶粒尺寸和衍射峰强度也有所增加。结合 DSC 结果分析可知,在该温度区间退火时合金内部析出单一晶化相,随退火温度增加形核驱动力也有所增加,因此晶化相的晶粒尺寸和晶化体积分数同时增加。

表2 合金经不同退火温度后的晶粒尺寸及(110)晶面衍射峰强度

Table 2 Grain size and (110) plane intensity of the alloys annealed at different temperatures

No.	F-B			F-E			F-W		
Temperature/°C	530	580	620	530	580	620	530	580	620
D/nm	22.1	24.4	29.4	24.9	28.6	29.3	23.9	27.3	28.6
Intensity/a. u.	544	586	890	636	656	804	541	637	650

2.3 退火温度对合金交流磁性能的影响

图3是3种合金在300 mT、10 kHz条件下矫顽力随退火温度的变化曲线。可以看到,F-B、F-E和F-W的矫顽力值在550~610 °C变化较小,只有F-W在590 °C退火后矫顽力值出现最小值,排除测量误差的干扰,说明矫顽力在该退火温度区间内对于温度的敏

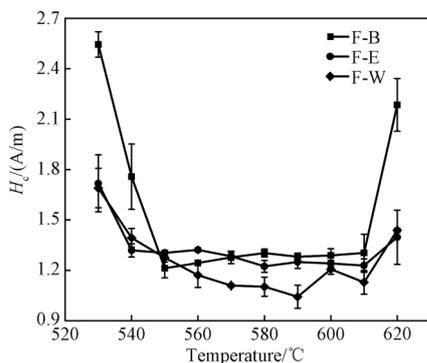


图3 合金矫顽力随温度变化曲线

Fig. 3 Curves of coercivity with temperature of the alloys

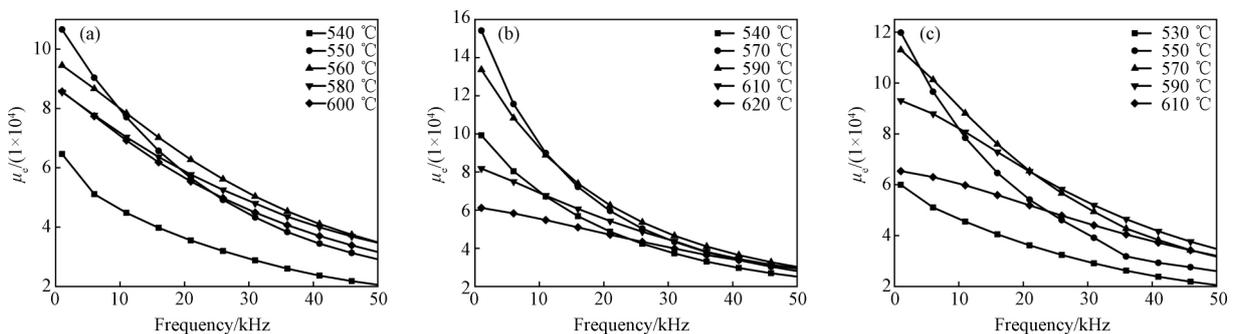


图4 经不同温度退火后合金的有效磁导率(μ_e)随频率变化曲线

Fig. 4 Curves of effective magnetic permeability (μ_e) with frequency of the alloys annealed at different temperatures

(a) F-B; (b) F-E; (c) F-W

综合矫顽力和有效磁导率的变化趋势,低温度退火后合金的有效磁导率较低而矫顽力较高可能与制备态非晶合金薄带磁畴结构的复杂和不规则有关^[15]。在较低温度退火,合金内部的晶化过程进行不充分,晶化体积分数较小,主要表现非晶态特性,此后随退火温度升高,由于内应力释放引起磁晶各向异

感性较小。

软磁材料在直流环境中往往通过测量磁感应强度与磁场强度的比值得到磁导率,而在交变磁场中,一般利用磁环的电感量计算有效磁导率,计算公式如下^[12]:

$$\mu_e = \frac{Ll_e}{\mu_0 N^2 A_e} \quad (5)$$

式(5)中: μ_e 为有效磁导率, L 为磁环电感量, μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, N 为线圈匝数, A_e 为磁环有效横截面积, l_e 为磁环磁路长度。3种合金计算所得的有效磁导率随频率的变化曲线如图4所示。可以看到,经不同温度退火后合金的有效磁导率随频率的变化趋势也有所不同。对F-B来说,测试频率为1 kHz时经550 °C退火的磁环有效磁导率较高,之后随频率的增加衰减较快,而560 °C退火的磁环有效磁导率随频率衰减较小。F-E在570 °C退火后,磁环在1 kHz的有效磁导率较高,其后随频率增加有效磁导率衰减较快,但和其他温度退火后的磁环相差较小。F-W的有效磁导率则对退火温度较为敏感,550 °C退火后在1 kHz条件下磁环有效磁导率较高,但随频率增加衰减较快,此后随退火温度的增加,有效磁导率随频率的衰减程度逐渐减小。上述3种合金超过600 °C退火后的有效磁导率在全频率段内均有所降低,这也与左江波等^[12]的实验规律较为吻合。

性降低^[15],同时晶化体积分数增加使磁致伸缩系数减小,因此合金的有效磁导率升高同时矫顽力下降。当退火温度超过600 °C时,内应力释放趋于饱和,由晶粒长大导致的磁晶各向异性增加以及晶化相体积分数增加导致的磁致伸缩系数绝对值增加又会使合金的有效磁导率下降同时矫顽力增加。

对于电子元器件, 过大的损耗通常会导致器件温度升高, 浪费能量的同时也会影响器件的灵敏度和线性度。图 5 是 3 种合金在 300 mT、频率分别为 10 kHz 和 100 kHz 条件下单位质量损耗(P_m) 随退火温度的变化

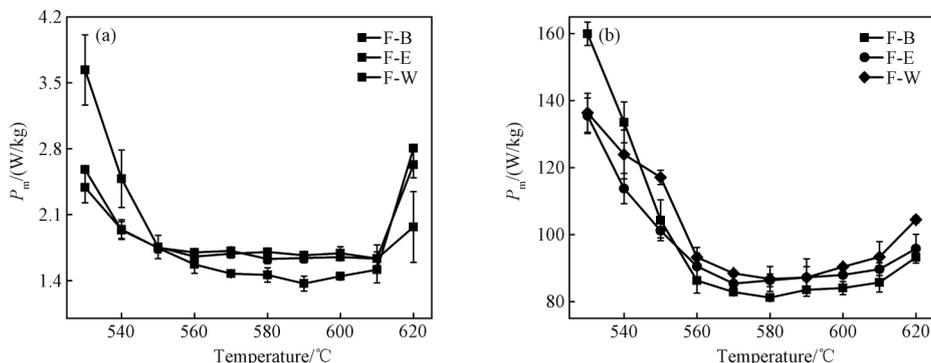


图 5 合金单位质量损耗(P_m) 随温度的变化曲线

Fig. 5 Curves of unit mass loss (P_m) with temperature of the alloys (a) 10 kHz; (b) 100 kHz

由于磁滞损耗和涡流损耗分别同频率及其二次方成正比, 因此随频率增加合金的涡流损耗占总损耗的比值也随之升高^[16]。分析矫顽力的变化趋势可知, 合金小于 550 °C 和大于 600 °C 退火时矫顽力较大, 因此磁滞损耗较高, 使总损耗增加。除此之外, 100 kHz 条件下合金损耗随退火温度的变化规律可能与晶化相析出导致电阻率变化进而影响涡流损耗有关, 这有待于深入研究。徐其付等^[17] 认为 FeCuNbSiB 纳米晶合金在超过 600 °C 退火后磁性能恶化的主要原因是晶界相结构的改变, 在 600 ~ 650 °C 这一温度区间内, 虽然晶粒尺寸的增加不明显, 但晶界相结构的改变会在磁化过程中钉扎畴壁导致反常损耗增加, 从而使合金总体损耗上升。结合实验结果可知在不同的频率下由于各项损耗占总体损

耗的比例不同, 因此合金对应的最佳的退火温度也存在差异。

耗的比不同, 因此合金对应的最佳的退火温度也存在差异。图 6 是 3 种合金在 1 kHz ~ 10 MHz 条件下的阻抗曲线。可以看到, F-B 合金在 530 ~ 540 °C 退火后, 在测试频率小于 1 MHz 时阻抗值较小, 之后随频率增加阻抗值开始升高, 接近 10 MHz 时经过 540 °C 退火后的合金阻抗值最高。F-E 合金的阻抗值随频率变化的趋势同前者相似, 在 1 kHz ~ 1 MHz 范围内 570 ~ 580 °C 退火的合金阻抗值相对较高, 在大于 1 MHz 后, 540 ~ 560 °C 退火后的合金则表现出了较高的阻抗值。同样地, F-W 合金经过 540 °C 退火后的试样在小于 2 MHz 时阻抗值最低, 之后随频率的增加其阻抗值表现出明显的上升趋势, 在 10 MHz 时阻抗值最大。

耗的比例不同, 因此合金对应的最佳的退火温度也存在差异。

图 6 是 3 种合金在 1 kHz ~ 10 MHz 条件下的阻抗曲线。可以看到, F-B 合金在 530 ~ 540 °C 退火后, 在测试频率小于 1 MHz 时阻抗值较小, 之后随频率增加阻抗值开始升高, 接近 10 MHz 时经过 540 °C 退火后的合金阻抗值最高。F-E 合金的阻抗值随频率变化的趋势同前者相似, 在 1 kHz ~ 1 MHz 范围内 570 ~ 580 °C 退火的合金阻抗值相对较高, 在大于 1 MHz 后, 540 ~ 560 °C 退火后的合金则表现出了较高的阻抗值。同样地, F-W 合金经过 540 °C 退火后的试样在小于 2 MHz 时阻抗值最低, 之后随频率的增加其阻抗值表现出明显的上升趋势, 在 10 MHz 时阻抗值最大。

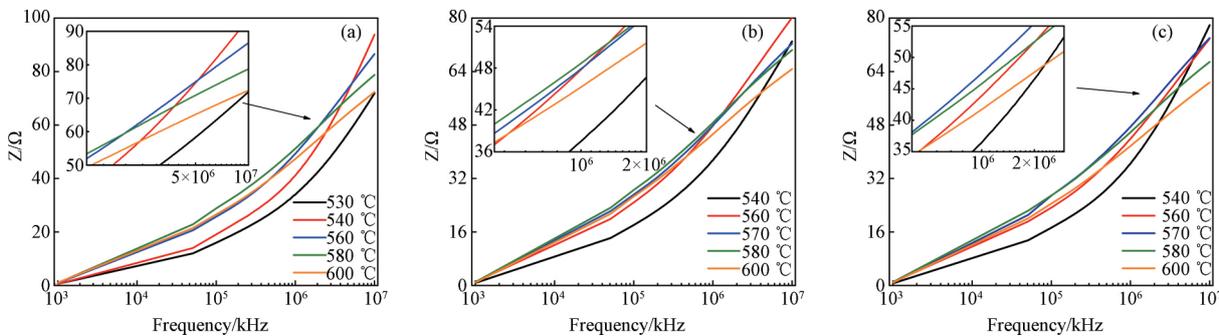


图 6 经过不同温度退火后的合金阻抗值随频率变化曲线

Fig. 6 Curves of impedance with frequency of the alloys annealed at different temperatures (a) F-B; (b) F-E; (c) F-W

在高频条件下纳米晶合金的磁化主要以畴壁旋转为主, 有效磁导率会明显降低进而影响阻抗值, 同时在

高频条件下趋肤效应对阻抗值的影响也不容忽视。综合来看, 阻抗与频率的关系式可由下式表示^[18]:

$$Z \approx \frac{l_e}{2d} \sqrt{\pi \mu_0 \mu_e \rho f} \quad (9)$$

式(9)中: l_e 为有效磁路长度, d 为磁环宽度, μ_0 为真空磁导率, μ_e 为有效磁导率, f 为频率, ρ 为合金电阻率,由式(9)可知合金阻抗的变化与电阻率密切相关。王哨东等^[19]发现纳米晶合金表面与内部晶化程度不同,同时杨全民等^[20]发现纳米晶合金晶化过程中电阻率和磁导率的变化会对阻抗值产生影响,因此不同温度退火后合金阻抗值变化的原因可能是退火温度不仅影响了合金内部的晶粒尺寸和晶化体积分数,同时导致带材表面和内部的晶化体积分数也存在差异,因此在高频率的测试条件下合金受到趋肤效应的影响,带材表面和内部晶化体积分数的差异使合金表现出与低频率不同的变化趋势。因此,根据使用频率的不同,需要选择合适的退火温度得到更为理想的阻抗值。

3 结论

1) FeCuNbSiB 纳米晶合金在 530 ~ 620 °C 进行等温退火时,随着退火温度的增加其内部 α -Fe(Si) 相的晶粒尺寸和晶化体积分数也有所增加;

2) FeCuNbSiB 纳米晶合金在 550 ~ 600 °C 等温退火后合金表现出相对较低的矫顽力(H_c 为 1.0 ~ 1.5 A/m, B_m 为 100 mT, f 为 10 kHz) 和损耗值(P_m 为 1.4 ~ 1.8 W/kg, B_m 为 300 mT, f 为 10 kHz) 以及相对较高的有效磁导率,当退火温度小于 550 °C 或大于 600 °C 时,合金的软磁性能恶化;除此之外,在不同测试频率下,合金阻抗值对应的最佳退火温度不同,测试频率低于 1 MHz 时,F-B、F-E 和 F-W 纳米晶合金经过 580 °C 退火后的阻抗值最大,测试频率为 10 MHz 时,上述 3 种合金最大阻抗值对应的退火温度分别为 540、560 和 540 °C。

参 考 文 献

- [1] 姚可夫,施凌翔,陈双琴,等.铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J].物理学报,2018,67(1):8-15.
YAO Ke-fu, SHI Ling-xiang, CHEN Shuang-qin, et al. Research progress and application prospect of Fe-based soft magnetic amorphous/nanocrystalline alloys[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 8-15.
- [2] Herzer G. Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets[C]//IEEE International Magnetics Conference, Brighton UK, 1990, 26(5): 1397-1402.
- [3] Lashgari H R, Chu D, Xie S, et al. Composition dependence of the microstructure and soft magnetic properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys: A review study[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 391: 61-82.
- [4] Herzer G. Anisotropies in soft magnetic nanocrystalline alloys[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 294(2): 99-106.
- [5] Bolyachkin A S, Komogortsev S V. Power-law behavior of coercivity in nanocrystalline magnetic alloys with grain-size distribution[J]. Scripta Materialia, 2018, 152: 55-58.
- [6] Suzuki K, Ito N, Garitaonandia J S, et al. Local random magnetocrystalline and macroscopic induced anisotropies in magnetic nanostructures[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(47): 5089-5092.
- [7] Smith C, Katakam S, Nag S, et al. Improved soft magnetic properties by laser de-vitrification of Fe-Si-B amorphous magnetic alloys[J]. Materials Letters, 2014, 122: 155-158.
- [8] Skulkina N A, Ivanov O A, Pavlova I O, et al. Time of isothermal holding in the course of in-air heat treatment of soft magnetic Fe-based amorphous alloys and their magnetic properties[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2011, 112(6): 583-588.
- [9] Pradeep K G, Herzer G, Choi P, et al. Atom probe tomography study of ultrahigh nanocrystallization rates in FeSiNbBCu soft magnetic amorphous alloys on rapid annealing[J]. Acta Materialia, 2014, 68: 295-309.
- [10] 李青,李博,赵伟伟.热处理对铁基纳米晶薄带高频磁导率的影响[J].磁性材料及器件,2015,46(3):51-53.
LI Qing, LI Bo, ZHAO Wei-wei. Influence of heat-treatment on the high-frequency permeability of Fe-based nano-crystalline ribbon[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2015, 46(3): 51-53.
- [11] Mikhailitsyna E, Zakharchuk I, Soboleva E, et al. Heat treatment effect on magnetic microstructure of Fe_{73.9}Cu₁Nb₃Si_{13.2}B_{8.9} thin films[C]//Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow, Russia, 2017, 185: 04001.
- [12] 左江波,陈先朝,杨元政,等.热处理对1K107纳米晶磁芯性能的影响[J].金属热处理,2017,42(1):136-138.
ZUO Jiang-bo, CHEN Xian-chao, YANG Yuan-zheng. Effect of heat treatment on properties of 1K107 nanocrystalline magnetic core

- [J]. Heat Treatment of Metals 2017 42(1): 136 – 138.
- [13] 王志辉,黄强,蒋达国. 退火温度对 $\text{Fe}_{73.5}\text{Co}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ 合金带材磁性能的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2017 38(6): 71 – 76.
WANG Zhi-hui, HUANG Qiang, JIANG Da-guo. Influence of annealing temperature on magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Co}_{0.3}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14.2}\text{B}_8$ alloy strips [J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science) 2017 38(6): 71 – 76.
- [14] 周玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社 2011.
- [15] 刘笑闯,李准,崔兴华,等. 磁场热处理对铁基纳米晶合金磁性能的影响[J]. 金属功能材料 2015 22(2): 4 – 6.
LIU Xiao-chuang, LI Zhun, CUI Xing-hua, et al. Effects of magnetic heat treatment on the magnetic properties of Fe-based nanocrystalline alloy [J]. Metallic Functional Materials 2015 22(2): 4 – 6.
- [16] 刘刚,孙立鹏,王雪刚,等. 正弦及谐波激励下的铁心损耗计算方法改进及仿真应用[J]. 电工技术学报 2018 33(21): 4909 – 4918.
LIU Gang, SUN Li-peng, WANG Xue-gang, et al. Improvement of core loss calculation method and simulation application under sinusoidal and harmonic excitations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2018 33(21): 4909 – 4918.
- [17] 徐其付,徐庆镇,石松耀. 退火对铁基超微晶软磁合金磁性能影响的研究[J]. 上海钢研, 1994 2: 12 – 15.
XU Qi-fu, XU Qing-zheng, SHI Song-yao. The effect of annealing on the magnetic properties of Fe-based nanometer-sized crystalline soft magnetic alloys [J]. Journal of Shanghai Iron and Steel Research, 1994 2: 12 – 15.
- [18] 胡怀谷. 软磁材料的交流阻抗和微波特性[D]. 天津: 天津科技大学 2015.
HU Huai-gu. Giant magnetoimpedance and microwave absorption properties in some soft magnetic materials [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology 2015.
- [19] 王哨东,沈楚英,汤志华. Fe 基非晶薄带淬态表面晶化的形成[J]. 上海钢研, 1994(1): 40 – 41.
WANG Shao-dong, SHEN Chu-ying, TANG Zhi-hua. Crystallization on the surface of the Fe-base thin-ribbon of amorphous alloys [J]. Journal of Shanghai Iron and Steel Research, 1994(1): 40 – 41.
- [20] 杨全民,王玲玲. 频率对纳米晶软磁合金磁性能影响的理论解释[J]. 物理学报 2005 54(9): 4256 – 4262.
YANG Quan-min, WANG Ling-ling. Influence of frequency on magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ and the explanation [J]. Acta Physica Sinica 2005 54(9): 4256 – 4262.