

纳米晶软磁材料及其应用

陆 伟 严 彪 殷俊林

摘要 本文首先回顾了纳米晶软磁材料的发展过程,介绍了纳米晶软磁材料的组织结构与磁特性,分析了优异磁性能的起源;并介绍了纳米晶软磁合金的应用,最后对纳米晶软磁材料的发展趋势作了展望。

关键词 纳米晶 软磁材料 铁芯 铁基合金 磁性能

The Development and Application of Nano - Crystalline Soft Magnetic Material

Lu Wei Yan Biao Yin Junlin

Abstract The developing process of nano - crystalline soft magnetic material is reviewed in the beginning of this paper. A detailed discussion is carried out on its structure and magnetid properties, the cause of its excellent magnetic properties. And the application of it is also reported The developing trends is prospected at last.

Keywords nanocrystalline soft magnetic material iron core Fe - based alloys magnetic properties

1 前言

软磁材料在工业中的应用始于十九世纪末。随着电力工业及电讯技术的兴起,开始使用低碳钢制造电机和变压器,在电话线路中的电感线圈的磁芯中使用了细小的铁粉、氧化铁、细铁丝等。到二十世纪初,研制出了硅钢片代替低碳钢,提高了变压器的效率,降低了损耗。直至今,硅钢片在电力工业用软磁材料中仍居首位。到二十年代,无线电技术的兴起,促进了高导磁材料的发展,出现了坡莫合金及坡莫合金磁粉芯等。从四十年代到六十年代,是科学技术飞速发展的时期,雷达、电视广播、集成电路的发明等,对软磁材料的要求也更高,生产出了软

磁合金薄带及软磁铁氧体材料。进入七十年代,随着电讯、自动控制、计算机等行业的发展,研制出了磁头用软磁合金,除了传统的晶态软磁合金外,又兴起了另一类材料—非晶态软磁合金。八十年代以来,由于计算机网络和多媒体技术、高密度记录技术和高频微磁器件等的发展和需要,越来越要求所用各种元器件高质量、小型、轻量,这就要求制造这些器件所用的软磁合金等金属功能材料不断提高性能,向薄小且高稳定性发展^[1]。正是根据这种需要,1988 年日本的 Yoshizawa 等人首先发现,在 Fe - Si - B 非晶合金的基体中加入少量 Cu 和 M (M = Nb, Ta, Mo, W 等),经适当的温度晶化退火以后,可获得一种性能优异的具有 b. c. c 结

构的超细晶粒 (D 约 10nm) 软磁合金^[2]。这时材料磁性能不仅不恶化,反而非常优良,这种非晶合金经过特殊的晶化退火而形成的晶态材料称为纳米晶合金。其典型成份为 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, 牌号为 Finemet。其后, Suzuki 等人又开发出了 $\text{Fe}-\text{M}-\text{B}$ ($\text{M}=\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Ta}$) 系。到目前为止,已经开发了许多纳米晶软磁材料,包括: Fe 基、Co 基、Ni 基^[3]。由于 Co 基和 Ni 基易于形成 K_1 , 同时为零的非晶态或晶态合金,如果没有特殊情况,实用价值不大。故本文主要介绍铁基纳米晶软磁合金。

铁基纳米晶合金是以铁元素为主,加入少量的 Nb、Cu、Si、B 元素所构成的合金经快速凝固工艺所形成的一种非晶态材料,这种非晶态材料经热处理后可获得直径为 10~20 纳米的微晶,弥散分布在非晶母体上,被称为微晶、纳米晶材料或纳米晶材料。纳米晶材料具有优异的综合磁性能: 高饱和磁感 (1.2T)、高初始磁导率 (8 万)、低 H_c (0.32A/M), 高磁感下的高频损耗低 ($P_{0.5T/20kHz}=30\text{W/kg}$), 电阻率为 80 微欧厘米,比坡莫合金 (50~60 微欧厘米) 高,经纵向或横向磁场处理,可得到高 B_r (0.9T) 或低 B_r 值 (1000Gs)。是目前市场上综合性能最好的材料。

2 纳米晶软磁合金的结构与性能

2.1 合金的成份

纳米晶软磁合金的典型成份为 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 。随着研究的不断进行,合金化元素几乎遍及整个元素周期表。从合金的化学成份在合金中的作用看,可以分为 4 类:

(1) 铁磁性元素: Fe、Co、Ni。由于 Fe 基合金具有高 B_s 的优势,且纳米晶合金可以实现 K_1 和 λ_s 同时为零,因而使 μ 值很高、损耗很低,价格便宜,成为了当今研究开发的中心课题。

(2) 非晶形成元素: 主要有 Si、B、P、C 等。对于纳米晶软磁合金带材,一般都是先形成非晶带,然后通过退火使材料出现纳米晶,因而非晶化元素使基本元素。特别是 B 对形成非晶有利,几乎是所有纳米晶软磁合金的构成元素,含量在 5at%~15at% 之间。Si 也是重要的非晶化元素,通常含量在 6at% 以上;含 Si 量过高将使 B_s 降低,含 Si 量过低则不易形成非晶因而形成纳米晶较难;Si 还往往是纳米晶主相 $\text{Fe}-\text{Si}(\alpha-\text{Fe})$ 的基本构成元素。

(3) 纳米晶形成元素,主要包括两类: 一类是 Cu、Ag、Au 及其替代元素,如 Ib 族元素和 Pt 系贵金属元素。这些金属在 Fe 中的固溶度小或基本不固溶于 Fe,晶化时首先与 Fe 分离,造成该金属元素的富相区,起 $\alpha-\text{Fe}$ 的形核作用。第二类是 Nb、Mo、W 及其替代元素,如 IVb、Vb、VIb 族元素等。这类元素的主要作用是扩散缓慢,阻止 $\alpha-\text{Fe}$ 晶粒长大,从而保证晶粒的纳米尺寸,同时对降低 λ_s 、扩大热处理温区、改善脆性和工艺性能有益,Cr 对耐腐蚀性也有明显作用。

(4) 调整元素,是根据特种需要而添加的少量元素,如 Ru 等,常用于磁头材料。

2.2 组织结构与晶化过程

纳米晶的组织结构与其制备工艺密切相关。本文只讨论由非晶晶化法获得的 Finemet 型纳米晶的组织结构问题。

不少材料物理学者,用高倍电镜、X-Ray 衍射仪、原子探针等现代分析仪器,对 Finemet 合金进行了研究,并有不少报道^[4]。其显微结构如图 1 所示^[5]: (1) 非晶态 $\text{Fe}-\text{CuNbSiB}$ 合金经晶化处理后,析出 10~15nm 的体心立方 (bcc) 结构的 $\alpha-\text{Fe}(\text{Si})$ 固溶体纳米晶,弥散分布于非晶母相中, $\alpha-\text{Fe}(\text{Si})$ 相约占 70% 的体积分数, $\alpha-\text{Fe}(\text{Si})$ 相中含 Si 约 20at%, 少量 B, 微量 Cu、Nb, 且纳米晶取向无规; (2) 剩余相是非晶

母相, 含富 Nb、B, 少量 Fe、Si (Fe_3Si 、 Fe_2B_4 、 Fe_2B); (3) 在非晶母相中还有几个纳米粒径的 Cu 原子团, 还含少量 Fe < 30at%。

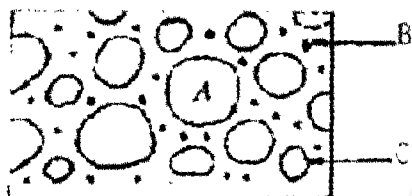


图 1 FeCuNbSiB 非晶合金晶化处理后的结构
A: bcc Fe-Si; B: 富 Nb、B 剩余非晶相; C: Cu 原子团

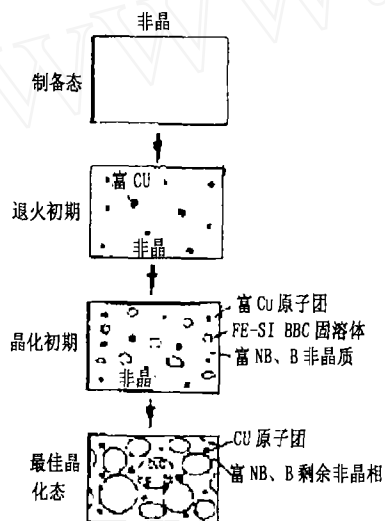


图 2 FeCuNbSiB 非晶合金晶化过程示意图

大量研究表明, Cu、Nb 元素是 Finemet 纳米晶形成的关键元素^[6]。在非晶晶化过程中, 由于 Cu 在 Fe 中的固溶度很小, 故在退火过程中的较低温度下, Cu 与 Fe 趋于分离形成富 Cu 区、富 Nb 区和富 Fe 区。由于富 Fe 区的 α -Fe(Si) 相的晶化温度低, 因而优先形核, 而环绕 α -Fe(Si) 固溶体晶粒周围的富 Cu 区和富 Nb 区由于他们的晶化温度高难于晶化, 从而阻碍了 α -Fe(Si) 固溶体晶粒的长大, 使得具有均匀细小纳米晶结构由较好的热稳定性。Cu 的加入使得 α -Fe(Si) 固溶体晶化温度大为降低, 这就避免在退火中 α -Fe(Si) 晶体与 Fe-B 化合物晶体同时析出。这一 α -Fe(Si) 晶化过程反复在 FeCuNbSiB 系非晶的各处进行, 最终形成纳米晶软磁结构。图 2 为 Hono 等

人根据实验结果作出的 FeCuNbSiB 的晶化过程示意图, 它很有代表性, 其它纳米晶合金也有相似过程。

Koster 研究了 FeCuNbSiB 系非晶晶化动力学, 认为 α -Fe(Si) 固溶体晶粒长大为 Nb 扩散控制过程^[8]。在 FeCuNbSiB 系非晶中, Nb 的原子尺寸最大, 而且在非晶中的扩散跃迁机制为原子的协同运动方式, 即运动过程涉及的原子较多, 扩散较为缓慢, 因而使 α -Fe(Si) 固溶体晶粒长大速度较低, 保持细小晶粒尺寸。由于 α -Fe(Si) 晶体自非晶中析出, 则在非晶中发 Nb、B 富集^[9]。如果把富集的 Nb、B 原子团看作是相变中的第二相, 则 Nb-B 原子团将对界面迁移产生钉扎作用, 从而起到阻止晶粒进一步长大的作用。

2.3 软磁合金的磁特性

对于纳米晶软磁合金, 按性能要求, 常分为高 B_s 型、高 μ_0 型等^[10-13]。

(1) 高 μ_0 型纳米晶合金, 其成份至今局限于 FeSiB 系。以 FeCuNbSiB 系磁性最佳, 其性能参数达到: 在磁场 0.08 A/m 下, 相对磁导率达 14 万以上, 矫顽力最低已达 0.16 A/m, 饱和磁感 B_s 高达 1.35 T, 在频率 100 kHz 和磁感 0.2 T 下铁损达 250 kW/m³。值得研究的是饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s \approx 2.1 \times 10^{-6}$, 而不是 $\lambda_s \approx 0$ 左右。

(2) 高 B_s 型铁基纳米晶合金, 其 Fe 含量在 88 at% 以上, B_s 值可达 1.6 ~ 1.72 T, 典型成份为 FeMB (M = Zr, Hf 等)。对于 FeZrB 系合金, 典型成份为 $\text{Fe}_{91}\text{Zr}_7\text{B}_2$, 经 600℃ 退火 1 h, 其 $B_s \approx 1.66$ T, μ_r (1 kHz) = 24000。对于 FeHfB 系, 典型成份也是 $\text{Fe}_{91}\text{Hf}_7\text{B}_2$ 在 600℃ 退火 1 h, 其 $B_s \approx 1.6$ T, μ_r (1 kHz) = 18000。另外, 对于 Fe-P-C 系合金, 以 Nd 作为添加元素也可获得高 B_s 的铁基软磁合金。

FeCuNbSiB 系纳米晶合金是综合性能优秀的典型合金。曾将 FeCuNbSiB 系纳米

软磁合金与其它软磁材料的磁特性进行过对比^[14],发现其它各类软磁材料都是在一两项性能方面具有优势,例如 Co 基非晶的优势在于高磁导率和低损耗,铁基非晶的优势在于高 Bs,超坡莫的优势在于高初始磁导率,硅钢的优势在于高 Bs 及廉价,铁氧体的优势在于低的高频损耗。而 FeCuNbSiB 系纳米软磁材料则具有多方面的综合优势,这一突出优点与特点是软磁材料中仅有的。

2.4 纳米晶软磁材料优异磁性的起因

从传统的技术磁化的观点来看^[15],材料的晶粒尺寸越小,晶界所占分数越大。因而畴壁位移时所受的钉扎作用也越明显,从而恶化材料的软磁性能。与此相反,纳米晶材料的性能不仅没有降低反而大幅度提高,Herzer^[16]采用 Alben 的无规取向各向异性模型对此作出了比较满意的解释。

Herzer 认为,磁晶各向异性为 K_1 的多个小晶粒间存在铁磁相互作用,材料的磁性取决于多个小晶粒磁晶各向异性的平均涨落 $\langle K \rangle$,即磁各向异性。若晶粒直径为 D , L_{ex} 为铁磁交换长度,且 $D \ll L_{ex}$ 时,则有 $\langle K \rangle = k_1 (D/L_{ex})^{3/2}$ 。又因为 $L_{ex} = (A/\langle K \rangle)^{1/2}$,故 $\langle K \rangle = K_1^4 D^6 / A^3$ 。其中, A 为交换劲度(exchange stiffness),对于 $\alpha - \text{Fe}$, $A = 10^{-11} \text{ J/m}$, $K_1 = 8 \text{ kJ/m}^3$,因此可以计算 $\langle K \rangle$ 与 D 的关系,如图 3 所示,可见随着 D 减小,平均涨落 $\langle K \rangle$ 急剧减小。若假定磁化过程是自旋的一致转动过程,则矫顽力 H_c 和起始磁导率 μ_i 仅与 $\langle K \rangle$ 有关,从而可导出:

$$H_c = P_c \langle K \rangle / J_s \approx P_c \cdot K_1^4 \cdot D^6 / (J_s \cdot A^3)$$

$$\mu_i = P_\mu J_s^2 / (\mu_0 \cdot \langle K \rangle) \approx P_\mu J_s^2 \cdot A^3 / (\mu_0 \cdot K_1^4 \cdot D_6)$$

其中 P_c 、 P_μ 为常数, J 为饱和磁化强度,此式说明,若 $D < L_{ex}$,则有 $H_c \propto D^6$, $\mu_i \propto D^{-6}$,因此晶粒尺寸减小,矫顽力将明显降低,磁

导率增大。

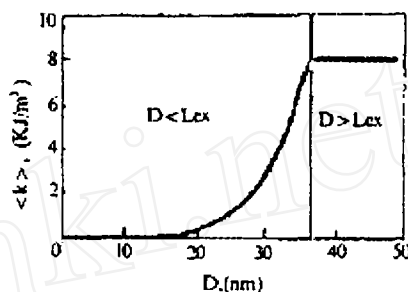


图3 $\langle K \rangle$ 与晶粒直径 D 之间的关系^[17]

纳米晶合金具有双相结构: $\alpha - \text{Fe}(\text{Si})$ 相和非晶相。从 Herzer 理论给出的结果来看,在定性解释纳米晶软磁合金高性能的物理起源问题上无疑是成功的,但该理论主要反映了纳米晶 $\alpha - \text{Fe}(\text{Si})$ 相因素,没有考虑导非晶相的作用,与纳米软磁合金的双相组织结构的特点不符,无法全面解释合金的磁性显微结构参数及晶化退火温度间的关系。针对这一问题,Herzer^[18]提出了更新的随机各向异性模型,对于双相系统:

$$\langle K \rangle = (V \cdot (D_1/(A/K_1)^{1/2})^3 \cdot K_1^{1/2} + (1 - V) \cdot (D_2/(A/K_2)^{1/2})^3 \cdot K_2^{1/2})^2$$

由于纳米晶软磁合金的第二相是非晶相,其结构相关长度 D_2 在 0.5nm 左右,而相应的交换长度一般至少 10nm,所以第二相可以被忽略,得:

$$\langle K \rangle = V^2 \cdot K_1 \cdot (D/(A/K_1))^{1/2}$$

根据这一模型,我们相应可以得到:

$$H_c = V^2 \cdot P_c \cdot K_1^4 \cdot D^6 / (J_s \cdot A^3)$$

$$\mu_i = V^2 \cdot P_\mu J_s^2 \cdot A^3 / (\mu_0 \cdot K_1^4 \cdot D_6)$$

注:此式忽略了宏观各向异性

此外,文献^[19]提出了纳米软磁合金的双相无规磁各向异性模型,考虑了纳米软磁合金的双相组织结构的特点,按照 Alben 非晶无规磁各向异性的处理方法,得到了纳米软磁合金的有效磁各向异性 $\langle K \rangle$ 与纳米晶尺寸 D 、非晶及纳米晶的体积分数 V_c 、 V_A 和非晶结构长度 δ 及交换积分常数 A 、局域磁各向异性常数 K 等特性参数间的关系。

3 铁基纳米晶合金的应用

3.1 高频功率变压器

变压器铁芯的大小取决于输出功率和温升等。变压器的设计公式如下:

$$P = KfNBSI \times 10^{-6}$$

$$T = h_c P_c + h_w P_w$$

其中, P 为电功率; K 为与波形有关的系数; f 为频率; N 为匝数; S 为铁芯面积; B 为工作磁感; I 为电流; T 为温升; P_c 为铁损; P_w 为铜损; h_c 和 h_w 为由实验确定的系数。

由以上公式可看出: 高的工作磁感 B 可以得到大的输出功率或减少体积重量; 但 B 值的增加受到材料的 B_s 值的限制; 而频率 f 可以提高几个数量级, 从而有可能使体积重量显著减小; 而低的铁芯损耗可以降低温升, 温升反过来又影响使用频率和工作磁感的选取^[20]。

3.1.1 逆变弧焊电源单端脉冲变压器铁芯^[21]

近年来发展起来的新型逆变弧焊电源单端脉冲变压器, 具有高频大功率的特点, 因此要求变压器铁芯材料具有低的高频损耗、高的饱和磁感 B_s 和低的 B_r 以获得大的工作磁感 B , 使焊机体积和重量减小。常用的用于高频弧焊电源的铁芯材料为铁氧体, 虽然由于其电阻率高而具有低的高频损耗, 但其温度稳定性较差, 工作磁感较低, 变压器体积和重量较大, 已不能满足新型弧焊机的要求。采用纳米晶环形铁芯后, 由于其具有高的 B_s 值 ($B_s > 1.2T$), 高的 ΔB 值 ($\Delta B > 0.7T$), 很高的脉冲磁导率和低的损耗, 频率可达 100kHz。可使铁芯的体积和重量大为减小。^[22]

据报道, 近年来逆变焊机已应用纳米晶铁芯达几万只, 用户反映用纳米晶变压器铁芯再配以非晶高频电感制成的焊机, 不仅体积小、重量轻、便于携带, 而且电弧稳定、飞

溅小、动态特性好、效率高及可靠性高。这种环形纳米晶铁芯还可用于中高频加热电源、脉冲变压器、不停电电源、功率变压器、开关电源变压器和高能加速器等装置中。环形纳米晶铁芯具有很多优点, 但它也有绕线困难的不利因素。为了在匝数较多时绕线方便, 可选用高频大功率 C 型非晶纳米晶铁芯。采用低应力粘结剂固化及新的切割工艺制成的非晶纳米晶合金 C 型铁芯的性能明显优于硅钢 C 型铁芯。目前这种铁芯已批量用于逆变焊机和切割机等。逆变焊机主变压器铁芯和电抗器铁芯系列有: 120A、160A、200A、250A、315A、400A、500A、630A 系列。

3.1.2 高频高压大功率开关电源变压器铁芯^[23]

高频大功率开关电源是铁基纳米晶合金的应用独特领域, 其工作频率为 20 ~ 50kHz, 输出功率在 10kW 以上, 电源变压器效率在 90% 以上, 还要求体积小, 温升高。因而其电源变压器铁芯必须具备 (1) 高饱和磁感强度; (2) 高磁导率; (3) 高频损耗低。铁基纳米晶材料正好具备这些条件。

上海钢铁研究所研制出了 50kHz 高压大功率三相开关变压器铁芯, 其铁芯性能: $SD13 \times 20 \times 75 \times 32$ $B_s \approx 1.25T$, $H_c = 0.95A/M$, $P_{5/5k} = 45W/kg$ 占空系数 $\alpha = 0.7$ 。50kHz 高压大功率三相开关变压器, 原采用 1J851 坡莫合金铁芯, 温升高达 80℃, 无法正常工作, 而铁基纳米晶合金铁芯在铁芯体积、重量减少 10% 的情况下, 温升仅为 32℃, 变压器效率达 98%, 三相高频, 铁芯经测试性能满足技术要求, 工作稳定可靠。上海钢铁研究所还研制出了大功率通讯电源变压器铁芯、高频淬火设备电源变压器铁芯等。

文献^[24]报道了某单位用内径 3.5cm, 外径 6.6cm, 高 3.0cm 的铁基纳米晶合金制作全桥式大功率开关电源变压器铁芯, 铁芯

重量仅为 $300 \pm 10\text{g}$, $f = 30\text{kHz}$, $P_0 = 26\text{V} \times 80\text{A} \approx 2\text{kW}$ 。设定 $B_m = 0.67$ 时, $P_{6/30\text{kg}} = 51 \sim 60\text{W/kg}$, 变压器功率达到 96%。在自然冷却条件下, 电源尺寸为 $400 \times 300 \times 250$ (mm), 重量仅为 18kg。原有电源重达 200kg。

3.2 脉冲变压器

脉冲变压器是用来传输脉冲的变压器。当一系列脉冲持续时间为 t_d (μs)、脉冲幅值电压为 U_m (V) 的单极性脉冲电压加到匝数为 N 的脉冲变压器绕组上时, 在每一个脉冲结束时, 铁芯中的磁感应强度增量 ΔB (T) 为: $\Delta B = U_m t_d / N S_c \times 10^{-2}$ 其中 S_c 为铁芯的有效截面积 (cm^2)。即磁感应强度增量 ΔB 与脉冲电压的面积 (伏秒乘积) 成正比。

文献^[25]介绍了 $\text{Fe}_{73.2}\text{Cu}_{0.8}\text{V}_{1.5}\text{Si}_{11.5}\text{B}_{11}$ 纳米晶合金在脉冲变压器上的应用。由于该纳米晶合金具有高的脉冲磁导率、饱和磁感、矩形比, 低的矫顽力、损耗, 因而用于制作脉冲变压器是十分理想的。应用该纳米晶合金开发了 10kV 等级高压脉冲变压器, 该脉冲变压器的前沿陡度大于 $1.5\text{A}/\mu\text{s}$, 在高频下, 铁芯损耗小, 并简化了电路, 提高运行效率。

文献^[23]还报道了某单位用内径 2.0cm, 外径 3.2cm, 高 1.0cm 纳米晶合金铁芯制成高压隔离脉冲变压器, 能在脉冲调制器上正常工作, 能顺利变换 $1\mu\text{s}$, 200kHz; $3\mu\text{s}$, 14.7kHz; $5\mu\text{s}$, 7.3kHz 和 $40\mu\text{s}$, 1kHz 的脉冲, 其前沿与原 Co 基非晶铁芯变压器大致相同, 但激磁电流明显小于 Co 基非晶变压器。

3.3 电流互感器

电流互感器是一种专门用作变换电流的特种变压器, 其主要作用是传递信息给测量仪表、仪器或继电保护、控制装置。电流互感器由铁芯及绕于其上的一次绕组和二次绕组三部分组成。一次绕组串联在电力

线路中, 线路电流就是互感器的一次电流; 二次绕组外部回路接有测量仪器或继电保护、自动控制装置。

文献^[24]用单辊快淬法制成厚度为 $25 \sim 30\mu\text{m}$ 的非晶带, 卷绕并用合适的真空热处理工艺, 得到的纳米晶软磁合金电流互感器铁芯, 其相对初始磁导率一般可达到 60000 以上, 相对最大磁导率达 200000 左右。文献^[26]研究了纳米晶软磁合金在电力系统中高压断路器及全封闭组合电器上的配套测量级电流互感器中的应用, 并采用纳米晶合金制作 GCB? T 用测量级电流互感器铁芯。该电流互感器精度达 0.1 级, 仪表保安系数 $F_s < 3$, 容量 30VA, 且成本较低, 重量较轻, 满足了需要。现已有近百台在中国西北电网上运行。

3.4 纳米晶合金的一些新应用

下面介绍近年来纳米晶软磁合金的一些新的应用领域, 包括共模电感、ISDN、尖峰抑制器、传感器等。

3.4.1 共模扼流圈 (共模电感)

随着开关型电源在工业和家用电器中越来越多的应用, 电器之间的相互干扰成为日益严重的问题, 电磁环境越来越为人们所关心。电磁干扰有很多种类, 其中在 30MHz 以下的共模干扰是非常重要的, 它们主要以传导方式传播, 对仪器的安全正常运行造成很大危害, 必须加以控制。通常在输入端附加共模滤波器, 以减轻外界共模干扰通过电源线进入仪器, 同时防止仪器产生的共模干扰进入电网。共模滤波器的核心是带有软磁铁芯的共模电感, 其性能的高低决定了滤波器的水平。共模扼流圈实际上是在一只铁芯上同方向绕制两组相同匝数的线圈并分别接设备的火线和零线。

一般地, 由于共模干扰信号的脉宽很窄, 铁芯仅处于初始磁化阶段。因此主要要求铁芯材料具有高的初始导磁率。同时, 干扰信号通常具有较宽的频段, 所以还要求规

模滤波器铁芯具有良好的频率特性,即不仅在低频、而且在高频也具有高导磁率。另外,这种信号的伏秒面积很小,所以铁芯的尺寸一般不要求很大,只要绕线窗口足够大即可。

为了得到对共模干扰最佳的抑制效果,共模电感铁芯必须具有高导磁率、优良的频率特性等。从前绝大多数采用铁氧体作为共模电感的铁芯材料,它具有极佳的频率特性和低成本的优势。但是,铁氧体也具有一些无法克服的弱点,例如温度特性差、饱和磁感低等,在应用时受到了一定限制。近年来,铁基纳米晶合金的出现为共模电感增加了一种优良的铁芯材料。

由于铁基纳米晶软磁合金具有高饱和磁感应强度、高的初始导磁率、卓越的温度稳定性、灵活的频率特性,因此是应用于共模扼流圈铁芯的理想材料。

3.4.2 尖峰抑制器

开关电源最大的缺点就是容易产生噪声和干扰,这是开关电源的一个重要技术问题。开关电源的噪声主要是由开关功率管和开关整流二极管快速变化的高压切换和脉冲短路电流引起。可采用非线性饱和电感来抑制反向恢复电流尖峰,这种电感元件被称为尖峰抑制器。

尖峰抑制器为小信号工作状态,要求电感量越大越好。依据^[27]:

$$L = 0.4\pi\mu_e N^2 S_e / (100 \times l) \quad (\mu H)$$

式中: μ_e - 有效磁导率

S_e - 有效截面积/ cm^2

N - 绕线匝数

l - 平均磁路长度

由式可知,磁芯的有效磁导率 μ_e 越高电感量越大,因而纳米晶合金尖峰抑制器具有以下性能特点:(1)有效磁导率高,电感量大,体积小;(2)矫顽力低,损耗低;(3)绕线匝数少,分布电容小;(4)高饱和磁感,处理噪音尖峰效果好;(5)居里点高,温度稳定性好;(6)良好的频率特性。

表 1 列出了尖峰抑制器铁芯材料的比较,从中可以看出钴基非晶合金的矫顽力很小,显示出急剧磁化的上升趋势。铁芯的起始及最大电感值特别大,饱和后的剩余磁感几乎为零。实现了峰值断路器仅在电流上升时的瞬间起高阻抗的作用,而在正常时是一个回路损耗很小的优异非线性电感线圈。钴基非晶可以制作性能优异的尖峰抑制器,但是钴基非晶合金价格较高,而且其 B_s 不高,在 $B > 0.7T$ 时因磁饱和而使特性损耗增大。采用廉价的铁基超微晶合金来制作尖峰抑制器铁芯。可抑制原始尖峰的 70%,有效地改善了开关电源线路的质量,相当于钴基非晶合金制作的尖峰抑制器铁芯性能,价格比钴基非晶低得多。

表 1 典型尖峰抑制器铁芯材料的性能比较

铁芯	B_s (T)	B_r/B_s	m_0 10^4	m_m 10^4	P (mw/cm^3)	噪声降低	适用频率	价格
铁氧体	0.4	0.2	1	1	500kHz, 50mT = 310	20%	500kHz	低
钴基非晶	0.7	0.95	3	100	100kHz, 200mT = 330	90%	300kHz	高
纳米晶	1.2	0.9	2	40	50kHz, 200mT = 250	70%	100kHz	中

3.4.3 传感器

FeCuNbSiB 系纳米晶软磁合金,经过适当调整合金元素的配比之后,在微磁场范围内具有巨磁阻抗效应^[28]。利用这一效应,

已研制出了各种磁敏开关和磁敏传感器。电力设备绝缘在线检测传感器要求传感器信号转换的关键部件 - 磁芯具有很高的导磁性和宽的线性范围。纳米晶合金优异的

导磁性满足了这个要求。采用 $\Phi 29/45 \times 20\text{mm}$ 磁芯,在初级电流为 0.5mA 范围内,次级加一定负载时,实现 $0.5\text{mV} \sim 150\text{mV}$ 的线性变化,采用纳米晶磁芯的传感器在北方冰天雪地和南方热带经历了环境和时间的考验,证明性能稳定^[24]。

3.4.4 综合业务数字网(ISDN)用铁芯^[29]

为了实现 ISDN 网络之间的信号传输和电隔离,需要大量的微型变压器及电感元件。以 ISDN 中常用的一种 S0 端口为例,所需要的感性器件可分为两类:一是信号变压器,二是共模扼流圈。在 ISDN 技术的发展初期,上述两类器件的铁芯主要采用 MnZn-铁氧体制造。由于铁基纳米晶合金具有比铁氧体更高的饱和磁通密度、更低的铁损,良好的抗直流偏磁能力,更小的体积,因此成为在这一领域替代铁氧体的理想材料。

3.4.5 可控硅保护电感(保护电抗器)

在高频大功率设备中,大电流冲击可造成开关管击穿,因此一直是非常重要的问题。解决这个问题一个方法是在开关管回路中串联一只可饱和铁芯,即可控硅保护电感,常会起较好的保护作用。作为可控硅保护电感,要求铁芯在磁化饱和前有尽量高的导磁率,而在饱和后的导磁率尽量低,铁芯材料在高导磁率的同时应具有高的矩形比。铁基纳米晶软磁材料对于可控硅保护电感也是适用的。

4 纳米晶软磁材料的发展趋势^[2,30,31]

4.1 大块非晶软磁合金

近年来日本学者井上明久发明了铜模铸造法制取大块非晶合金,经过成份和工艺调整,提高磁性能,并结合非晶合金固有的高强度、高耐磨性及耐腐蚀性等特性,有望在某些特殊场合具有良好的应用前景。

4.2 机械合金化制备非晶纳米晶软磁材料

颗粒

90 年代以来,许多学者采用机械合金化制备铁基非晶纳米晶粉末颗粒,其具有较好的磁性能,克服了传统方法只能获得丝状或条带状成品的缺陷,有很好的应用前景。

4.3 铁基纳米晶复合薄膜磁性材料

国内外有学者利用复合材料方法制备磁性薄膜应用于超高频领域。1)利用磁性膜(FM)和非磁性膜(NM)交替间隔的方法制备多层调制膜。FM 为纳米晶铁磁性薄膜,NM 为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 AlN 等陶瓷膜,无论是 FM 还是 NM 其厚度均为几十 nm。2)将纳米晶的金属软磁颗粒弥散分布在高电阻的非磁性材料中构成两相组织的纳米颗粒薄膜,这种薄膜最大特点是电阻率高,在 100MHz 以上超高频段显示出优良的软磁特性。

4.4 纳米晶软磁合金粉末

利用纳米晶软磁合金薄带,借助粉末冶金技术制成纳米晶软磁合金粉末复合材料,如纳米晶软磁粉末与橡胶等混合制成磁屏蔽材料、吸波隐身材料;粉末冶金法制成高磁导率铁芯材料,这一领域随着纳米技术的发展会有良好的应用前景。

5 结束语

纳米晶软磁合金由于具有优异的软磁特性,其在电子、电力电子及中高频应用的一些领域的使用已得到肯定,节能明显,适用小型化和高频化,具有重要发展前景。随着快淬技术及纳米材料制备技术的发展,其它方法如雾化法、溅射法、真空蒸镀法、化学气相沉积法等制备的新型纳米晶软磁材料将应用于电子工业领域,推动电子技术向高频、大功率、小型化方向发展。

参考文献

- [1]秦添艳. 上海钢研. 2001, 1: 32 ~ 37
- [2]张甫飞,张洛等. 上海金属, 2002, 24(2): 21

- [3] 陈国钧. 功能材料. 1992, 23(1): 8
- [4] 何开元. 金属功能材料, 1995, 3: 81
- [5] 段代贤. 四川师范大学学报(自然科学版), 1997, 20(2): 61
- [6] Y. Yoshizawa, et al. Mater. Trans. Japan. Inst. Metals. 1990, 31(4): 307
- [7] K. Hono et al., Acta Metal Mater., 1992, 40(9): 2137
- [8] U. Koster et al., Mater. Sci. Eng., 1991, A133: 611
- [9] K. Hono et al., Appl. Phys. Lett., 1991, 58(9): 2180
- [10] 王新林. 金属功能材料. 1996, 6: 205 ~ 210
- [11] 泽孝雄, 冈村正一. 日本公开特许公报. 平 - 190452, 1990 - 07 - 26
- [12] 泽孝雄, 冈村正一. 日本公开特许公报. 平 - 190454, 1990 - 07 - 26
- [13] 李志华. 金属功能材料. 1994(2): 14
- [14] 杨国斌. 物理, 1995, 24(2): 66 ~ 70
- [15] 宛德福, 罗世华. 磁性物理. 北京: 电子工业出版社. 1987: 225 ~ 234
- [16] G. Herzer, IEEE Trans. Magn., 1990, Mag - 26: 1397 ~ 1402
- [17] G. Herzer, Mater. Sci. Eng., 1991, A133: 1 ~ 5
- [18] G. Herzer, L. K. Varga. J. Magn. Magn. Mater., 2000, 215 ~ 216: 506 ~ 512
- [19] 纪松, 杨国斌. 物理学报. 1996, 445(12): 2061 ~ 2067
- [20] 李春, 王立军. 金属功能材料. 1995, 1: 13 ~ 16
- [21] 韩一定. 电子变压器技术. 1996, 1: 16 ~ 19
- [22] 王红霞. 世界电子元件. ECN1997, 12: 74 ~ 77
- [23] 张延忠. 功能材料. 1994, 25(2): 183
- [24] 顾雪辉. 功能材料. 1999, 30(4): 355 ~ 357
- [25] 王明东, 张洛. 金属材料研究. 1997, 23(4): 7 ~ 9
- [26] 万云, 王云平. 西北大学学报(自然科学版). 2001, 31(2): 102 ~ 104
- [27] 张甫飞, 李挹红等. 金属功能材料. 2001, 8(3): 1 ~ 6
- [28] 王育德. 汽车电器. 2000, 2: 22
- [29] Akihisa Inoue, et al., IEEE Trans. Magn., 1997, MAG - 3: 3793 ~ 3798
- [30] D. Zuetzel et al. J. Magn. Mater. 1999, 196 ~ 197: 327
- [31] 李志华, 陈文智. 金属功能材料. 1995, 4 ~ 5: 172 ~ 174