

非晶纳米晶软磁合金的特性及其在电力电子设备中的应用

The Characteristics of a Amorphous and Nanocrystalline and Its Application in power Electronics Device

高适 供稿

摘要: 文章首先介绍了非晶纳米晶软磁合金的特性, 然后着重论述这种合金材料在电力电子设备中的应用, 诸如制作配电变压器、漏电保护器、逆变电机、开关电源、磁放大器、尖峰信号抑制器、扼流圈和滤波器等等, 列举了一些实例。

关键词: 非晶, 纳米晶, 软磁合金, 电力电子, 磁性能, 应用

中图分类号: TM4 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2012)06-7-133

1 引言

众所周知, 非晶合金是 20 世纪 70 年代出现的一种材料, 它是使用急速冷却技术——即以每秒 $10 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} (\text{ } ^\circ\text{C} / \text{s})$ 的超急凝固技术, 将温度高达 $1500 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的母合金钢熔液急速冷却到 $200 \sim 300 \text{ } ^\circ\text{C}$, 经轧制形成 10 多 μm 厚度的固态薄带。采用这种工艺, 得到了其原子排列组合上的短程有序, 长程无序为特征的非晶合金, 不具备传统合金材料的晶体结构, 也因此具有与传统合金材料不同的性能, 例如优异的物理、化学和力学性能, 包括磁性能、耐腐蚀性、耐磨性、高强度、高硬度、高电阻率等等。特别于 1988 年, 日本 Yashiza 教授等人在非晶化的基础上研发了铁基纳米晶软磁合金材料, 由此开创了软磁材料的新纪元。这种非晶组织经过适当的晶化热处理以后, 获得了具有纳米级晶粒 (约 10 nm) 的 Fe(Si) 固熔体 + 非晶体的双相软磁合金组织, 具备了更为优异的软磁特性。同时, 由于铁基纳米晶软磁合金材料的带厚与电阻率使其最佳的应用频率在 kHz 频带, 这正好与高频开关电源相一致, 这就促进了它们在开关电源等电力电子技术中的应用, 用其制作的铁心器件已广泛应用于电力工业、电子工业和电力电子领域, 满足了电力电子技术向高频、大电流、小型化、节能等发展趋势的要求。

2 非晶纳米晶软磁合金的特性

非晶软磁合金一般将其分为四大类: 铁基非晶、铁镍基非晶、钴基非晶和铁基纳米晶合金。它们最优良的单项性能水平请见表 1 所列。而且, 它们的综合性能也远远优于硅钢、铁氧体、坡莫合金等, 表 2 列出了由国家非晶研究中心研制生产的非晶合金与传统软磁材料如硅钢片、坡莫合金及铁氧体的磁性能比较。现对其中几种材料的特性作简要介绍。

表1 非晶合金的最佳单项性能水平

性能名称	性能水平	材料
初始磁导率	12×10^4	Co基
最大磁导率	220×10^4	Co基
矫顽力	1m Oe	Co基
饱和磁感应强度	1.83T	Fe基
矩形比	0.995	Co基
电阻率	$270 \mu\Omega \cdot \text{cm}$	
硬度	1300	

铁基非晶合金的特性是具有高的饱和磁感应强度值 (1.56T), 其磁导率、铁损和激磁电流都优于硅钢片材料; 铁损低是其特别突出的优势 (为取向硅钢片的 $1/3 \sim 1/5$), 见表 3 所列, 因而可以替代传统的硅钢片材料制造多种规格、

表2 非晶软磁合金的典型性能与有关材料性能的比较

材料名称	$\mu_{0.08}$ 10^4	μ_{max} 10^4	H_c (A/m)	B_r/B_s	B_s (T)	W (W/kg)	ρ ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	d (g/cm^3)	居里温度 T_c ($^{\circ}\text{C}$)	λ_s 10^{-6}
超微晶(纳米晶)	8	30	1.2	0.9	1.25	$W_{0.2/20\text{K}}=3.4$	90	7.25	350	2
铁基非晶		15	3.0	0.85	1.56	$W_{1.0/1\text{K}}=0.4$	140	7.2	415	27
铁镍基非晶		40	1.0	0.8	0.75	$W_{0.5/10\text{K}}=30$	125	7.7	360	12
钴基非晶	10	80	0.3	0.95	0.57	$W_{0.5/10\text{K}}=4$	140	7.6	340	0.5
坡莫合金J85	5	18	1.2	0.95	0.70	$W_{0.5/10\text{K}}=45$	56	8.75	400	0.5
坡莫合金J79 ($\pm 0.1\sim 0.19$)	3	20	1.2		0.73	$W_{0.5/10\text{K}}=45$	55	8.60	450	2
功率铁氧体		0.5	6	0.2	0.5	$W_{0.2/20\text{K}}=7.5$	5×10^7	4.80	220	
冷轧硅钢		4	30		2.03	$W_{1.0/1\text{K}}=20$	47	7.65	740	5

尺寸的环形与开口铁心、C型铁心，CD型铁心等等，被广泛地用作配电变压器铁心，频率低于10kHz的各种主变压器铁心、电抗器及电感器、互感器铁心等等。

表3 配电变压器用铁基非晶合金与硅钢的损耗比较

铁心材料	100kVA		50kVA		30kVA	
	空载	负载	空载	负载	空载	负载
Fe基非晶	122	1772	68	849	44	584
S7型硅钢	320		190		150	
73型硅钢	540	1870	350	960	240	640

铁基纳米晶合金是利用制作非晶带材的工艺，首先得到非晶态结构的材料，然后经过适当的热处理产生纳米晶弥散分布的组织结构，这便得到了优异的综合磁性能。铁基纳米晶优异软磁性能的机理尚未完全清楚，但普遍认为这是由于存在如下两个关键因素：①晶粒尺寸细小，使局部区域各向异性变小；②磁致伸缩系数低于铁基非晶合金。磁致伸缩系数变小与它们的主相含Si，B的bccFe固溶体有关。当晶粒尺寸达到纳米量级而小于交换长度 L_{ex} 时，这些无规则取向的小晶粒磁晶各向异性将被平均，从而表现出很低的有效各向异性(K)。有效各向异性(K)值变小是由于有效各向异性(K)正比于 D^n ($n \geq 1$)，晶粒尺寸D减小，则导致(K)变小，而合金的起始磁导率 $\mu_i = P\mu JS^2/\mu_0(K)$ ，(K)值越小， μ_i 值越大，矫顽力 H_c 正比于 D^n ($n=6,2$)，D值小， H_c 就小。

铁镍基非晶合金材料具有中等的饱和磁感应强度(0.75T)，较高的初始磁导率和很高的最大磁导率，并且经过在磁场中退火处理后可以得很好的矩形磁滞回线。铁镍基非晶合金是国内开发最早、用量最大的非晶合金。现已广泛应用于漏电保护开关零序电流互感器。

钴基非晶合金的饱和磁致伸缩系数接近于零，对应力不敏感，具有优良的软磁性能，如极高的初始磁导率(120000，10kHz以下时)和最大磁导率(1000000)，很低的矫顽力和高频损耗，同时也具有很高的机械强度，很好的韧性及耐磨性，是非晶材料系列中性能最优、价格最高的合金材料，其应用领域与高镍坡莫合金相对应。这种材料经过纵向磁场热处理后的矩形比可达0.95，广泛应用于磁放大器、可饱和扼流圈及尖峰抑制器等。经过横向磁场热处理后可获得高的初始磁导率，用其制作的小尺寸环型磁心($\phi 9.8/6.5/4.5$)大量地应用于ISDN信号转换器及电流补偿抵制器。此外，钴基非晶合金尤其适用于高频(50kHz~200kHz)的开关电源和脉冲变压器，军工及航空航天器用的电源均趋向于采用钴基非晶合金铁心替代铁氧体磁心，因为它们可以做到尺寸小、重量轻、性能高、温度稳定性好。现在我们将这些合金材料的性能与优缺点作些比较：硅钢和Fe-Al-Si材料具有高的饱和磁感应强度 B_s ，但它的有效磁导率值低、损耗大、特别是在高频频率时的损耗更大；坡莫合金具有高磁导率、低矫无力和损耗，磁性能稳定等优点，但其 B_s 值不够高，应力敏感性大，频率大于20kHz时的损耗和有效磁导率不理想，加工和热处理工艺复杂且价格比较昂贵；钴基非晶合金的缺点在于 B_s 值低且价格昂贵；铁镍基非晶合金的 B_s 值低且初始磁导率不够高；而具有高 B_s 值、低价位的铁基非晶合金则由于其有效磁导率较低而限制了它们的应用范围。但铁基纳米晶具有优良的综合软磁性能，如初始磁导率高(60000以上)，矫顽力低(接近于高镍坡莫合金及钴基非晶的水平)，饱和磁感应强度值较高(1.25T)，高频损耗在100kHz以下时低于坡莫合金与铁氧体，热处理工艺简单，铁基纳米晶材料是目前最理想的廉价高性能软磁材料。

3 非晶纳米晶软磁合金材料的主要应用范围

3.1 配电变压器

配电变压器需要具有高的能量传输效率，因为它们在整个配电系统中，无论是轻载还是空载条件下的损耗都较大，所以，世界各国的变压器厂商都在寻找单位重量损耗较低的材料。

在电力工业中，新型高效硅钢铁心的损耗比普通硅钢铁心低 50% 左右，而铁基非晶合金比目前使用的最优晶体取向硅钢的铁心损耗要减少 70%~75%。而且，这种铁心的性能稳定，据报道称，美国采用铁基非晶作铁心的变压器，使用了十多年，其性能没有明显变化，非常可靠。但是，由于非晶带材的厚度只有 0.025mm，是硅钢片的 1/10，故非晶铁心的叠片系数一般为 0.7~0.8，而硅钢片可达 0.95 以上，因此，对于相同横截面积的铁心柱而言，非晶变压器的铁心、线圈和油箱尺寸都要比硅钢铁心变压器大。此外，铁基非晶材料受力敏感、脆性大、可加工性差，对大批量生产变压器比较困难。

3.2 开关电源

从非晶合金材料的带厚和电阻率等方面的特性看，它的最佳应用频率范围是 kHz 频带。由于这个频带与开关电源采用的频带一致，所以开关电源中使用的磁性器件很乐意采用非晶合金材料。

开关电源中使用的磁性器件较多，典型的线路图如图 3 所示。其中常用软磁材料的器件是：作为开关电源核心部件的主变压器（高频功率变压器）、电流互感器、驱动变压器、控制功率变压器、共模扼流圈、高频磁放大器、滤波阻流圈、尖峰信号抑制器等等。它们存在不同的性能要求。有个实例：某军工产品的开关电源变压器参数是 $P=22\text{kW}$ ， $U_1=220\text{V}$ ， $n=48$ 匝， $f=30\text{kHz}$ 。这个高频大功率开关变压器的频率较高，传统做法是选择铁氧体材料做磁心，但实践证明，其波形不能维持平顶，达不到足够的平均功率，变

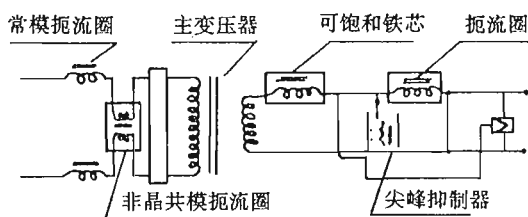


图1 开关电源中的磁性器件示意图

压器的效率低。因为其磁导率 μ 值较低，以致使变压器的线匝数过多，影响了波形，增大了体积。也曾选用过坡莫合金材料作铁心，但其在 30kHz 频率时的铁损太大，使变压器温升过高，造成所在整机无法正常工作。为此，该变压器选用了纳米晶合金作变压器，成功地解决了波形、损耗和体积三方面的难题。其指标参数见表 4。从表中可见，铁氧体材料由于其 μ 值低而造成变压器的效率只有 50%；坡莫合金的温升高损耗大，而超微晶材料较好地满足了该变压器的技术指标要求。

表 4 开关电源主变压器铁心性能

金属类型	效率(%)	温升(°C)	体积(cm ³)	重量(kg)
铁氧体	50	50	1785	5.5
坡莫合金	60	>120	1592	5
超微晶合金	99	55	1450	5

3.3 电力用电流互感器

电流互感器是一种专门用作变换电流的特种变压器。其主要用途是：传递信息给测量仪表、仪器或继电保护、控制设备。可根据互感器的准确级别及其它技术参数的要求，选择不同的软磁材料制作铁心，例如冷轧硅钢片、坡莫合金以及超微晶合金等。

电流互感器由铁心和初级、次级线圈组成。初级线圈串联于被测控的线路中组成一次回路；次级线圈与负载连接，组成二次回路。电流互感器应能准确地变换一、二次回路电流，才能保证测量数值的精确度。不同等级的互感器，国家标准文件中规定了不同的误差要求，如 0.5、0.2、0.2S、0.1 级等。电流互感器的误差包括电流误差（比值差）和相位差。其误差的大小除了受互感器的结构类型、一次安匝数、二次线圈阻抗与漏感等因素的影响外，铁心材料的磁性能也直接影响互感器的误差值。铁心的磁导率越高，损耗越低，则互感器的误差就越小。设计电流互感器铁心，最为关键的两个技术参数是材料的 B-H 曲线和损耗角曲线。对于超微晶合金材料，通过合适热处理工艺加工，可以使其相对初始磁导率 $\mu_0 \geq 60000$ ，同时使其损耗角曲线比较坡莫合金材料的曲线左移，从而满足高精度互感器对比值差和相位差的要求。鉴于电力电流互感器的工作特点，其设计制造中很重视材料的温度稳定性。对铁基纳米晶材料进行的温度稳定性研究发现，铁心的工作磁通密度低于 8000G，温度低于 120°C 时，铁心的 μ 值随温度的升高而增

加,这种特性有利于减小互感器的误差,这样,在实际工作时温度的变化不会影响电流互感器准确度。

一般情况下,大尺寸纳米晶合金环型铁心的初始磁导率在40000~60000左右,填充系数为0.68~0.75,比重为7.2g/cm³。在尺寸相同的条件下,电力电流互感器中应用的纳米晶合金铁心比坡莫合金铁心重量轻1/3。此外,由于纳米晶合金铁心的加工工艺简单,其铁心的单价比坡莫合金铁心便宜,总的价格可下降近一半,而且纳米晶合金铁心的性能更好,见图2及图3所示。它们很容易达到0.2S级。

3.4 中高频大功率C型铁心

我们知道,环型铁心具有很多优点,但其绕线困难。为了使匝数较多时方便绕线,于是开发了C型与CD型铁心。采用新的铁心切割工艺和低应力粘结剂固化技术制造的铁基非晶合金C型铁心具有高饱和磁感应强度、高ΔB、低矫顽

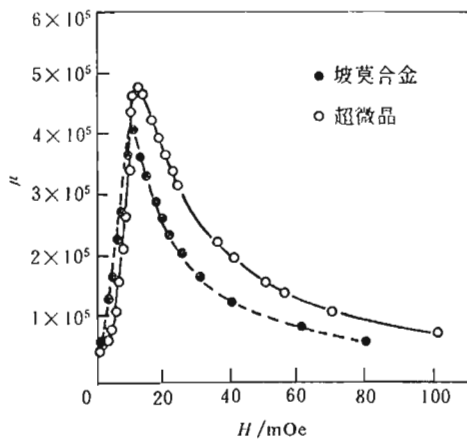


图2 超微晶合金铁芯与坡莫合金铁心的μ-H曲线对比

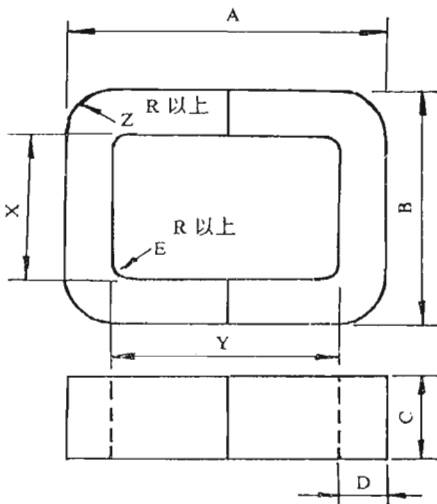


表5 铁基非晶合金C型铁心和电抗器铁心的尺寸及特性

铁心牌号	铁心尺寸/mm						有效截面积 (cm ²)	平均磁路长度 (cm)	适用功率 (kVA)	适用电流 (A)
	A	B	C	D	X	Y				
AC-1	85	54	20	12	30	60	1.68	21.77	1	160
AC-2	117	75	20	20	35	77	2.80	28.68	2	250
AC-3	128	79	25	22	35	84	3.85	30.71	3	315
AC-5	140	97	30	26	45	88	5.46	34.76	5~6	400
AC-7	140	97	40	26	45	88	7.28	34.76	7~8	500
AC-10	177	114	40	32	50	113	8.96	41.65	10~12	630
AC-15	193	130	40	40	50	113	11.2	45.16	15~16	
AC-20	210	130	50	40	50	130	14.0	48.56	18~22	
160A	105	65	20	12.5	40	80	1.75	27.92		160
315A	124	75	20	20	35	84	2.80	30.08		315
500A	150	82	40	25	32	100	7.0	34.25		500

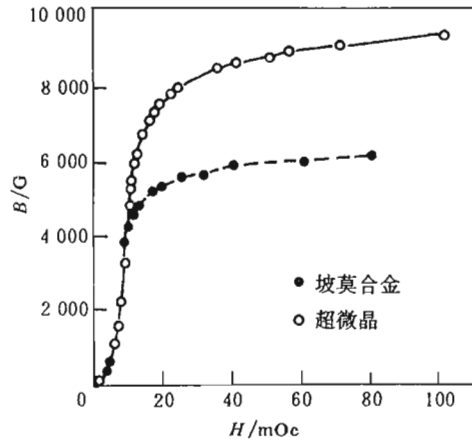


图3 同等尺寸下超微晶合金铁心与坡莫合金铁心的B-H曲线

力;在10kHz以下的频率使用时,铁心的损耗是硅钢片铁心的1/10,温升低并有优良的温度稳定性。这种铁心主要用于高压变压器、脉冲变压器、激光电源、X光电源、电镀电源、逆变焊机等的变压器铁心和电抗器铁心。其常用的规格尺寸见表5所示。

3.5 高频大功率逆变电源主变压器

为了探讨变压器所用铁心材料的选择,让我们首先列出变压器设计的常用公式:

$$\eta = P_2 / P_1$$

$$P_1 = 2.22 B_i S_m S f \times 10^{-6}$$

$$P_2 = P_1 - (P_c + P_m)$$

式中, B 是工作磁感应强度, S_m 为线圈的总铜截面积, S 是铁心的有效截面积, f 是工作频率, P_c 为铁损, P_m 为铜损, P₁ 为初级功率, P₂ 为输出功率。

用作电源变压器铁心的材料,通常要求其具有高的饱和磁感应强度、低铁损、高电阻率、带材薄以及高的磁导率。电源变压器作为能量传输器件,要有一定的功率输出和较高的效率。在铁心尺寸选定的情况下,工作磁感应强度越高,则工作频率 f 越高、输出功率越大。在保证相等功率输出的情况下, B 和 f 增大,则可减少铁心的体积和重量。然而, B 值和 f 值的增大则受到变压器损耗温升、功率因数和过载能力的限制。变压器铁心的总损耗中,铁损约占75%,而铁损中的涡流损耗又正比于 B_2 、 f_2 或材料的厚度,反比于材料的电阻率。所以,在要求铁心材料的 B 和 f 都高的条件下具有尽量狭窄陡立的磁滞回线和较高的电阻率,并且带材要薄。

以前,电源变压器铁心常使用的材料有冷轧晶粒取向硅钢片,II50坡莫合金以及铁氧体。后来开发的新型逆变弧焊机电源用单端变压器具有高频大功率的特点,故其要求主变压器具有低的高频损耗、高的饱和磁感应强度以及低的剩余磁感,这样可以获得大的工作磁感,使焊机的体积和重量减小。几年前,高频逆变焊机电源变压器的铁心材料常选用铁氧体材料。虽然铁氧体的电阻率高,而且具有低的高频损耗,但是,其温度稳定性差、工作磁感较低,变压器的体积和重量较大,故铁氧体铁心并不能符合新型弧焊机的要求。目前,由纳米晶合金材料制作的环型铁心,由于其具有高饱和磁感应强度、极低的损耗、高的磁导率、高的电阻率,而且厚度薄,被认为是20~50kHz高频大功率逆变电源变压器铁心的最佳材料。多年的实践证明,用纳米晶合金铁心制作的焊机,具有体积小、重量轻、引弧可靠、电弧稳定、飞溅极小、动态特性好、可靠性高、节省电能、效率达85%、整机噪声低、无振动、焊缝美观等优点。

3.6 漏电保护器

漏电保护器的核心部分是零序电流互感器。而零序电流互感器在漏电保护器中是个能量传输元件,并用输出能量与输入电流的比值来表征互感器传输特性的优劣。在电工学中,互感器的传输特性 β 由下式表述:

$$\beta = K \cdot \frac{I_1 \omega N_1^2 S \mu}{D}$$

式中, K 是常数, I_1 是一次回路电流, ω 是电源的角频率, N_1 是一次回路匝数, S 为铁心截面积, μ 为铁心工作点处的磁导率, D 是铁心的平均直径。

由该式可见,要提高零序电流互感器的传输特性,除了要提高铁心材料的磁导率外,还应尽可能地提高一次回路的匝数,增大铁心的截面积和减小铁心平均直径。然而在实际应用中,一次回路的匝数和铁心截面积均受互感器体积和材料消耗的限制,很难进行有效调整。因此,最为有效的办法就是提高铁心材料的软磁特性,即选用高磁导率、低矫顽力的材料制造零序电流互感器铁心。

一般情况下,坡莫合金和铁镍基非晶合金的软磁性能都能满足漏电保护器的技术要求,但是,由于非晶合金在结构上不同于传统的晶态合金,它的原子密堆于一起,短程有序而长程无序,使其形成了一个组织均匀的整体,各向异性 $K=0$,而且该合金的磁致伸缩系数很小,所以,非晶合金具有很高的磁导率和很低的矫顽力,磁性能远优于坡莫合金。在同样的外形尺寸,同样匝数比以及配用同一个漏电保护器的情况下,非晶合金铁心的工作电流比坡莫合金铁心小得多,因此可以大大提高漏电保护器的灵敏度和可靠性。在同一个灵敏度等级的漏电保护器中,由于非晶合金的磁性能优良,还可以进一步减少一次回路的匝数,从而相应地减小漏电保护器的体积,可降低其成本。从对非晶铁心漏电保护器的温度稳定性和长期时效性等试验情况和大量实际使用结果表明,非晶合金在120℃以下使用时,其稳定可靠,长期使用没有出现明显的变化。尽管非晶合金的初始磁导率 μ 0.001很低,有时甚至很难测出,但当磁场强度 $H \geq 0.0020e$ 时,磁导率急剧上升,并很快达到最大值。由于高灵敏度漏电保护器工作时的磁场强度 H 约为0.0050e,所以采用非晶合金制造的零序电流互感器,只要能正确地选定互感器的工作点,决不会影响电流保护器的灵敏度。同时,由于非晶合金铁心的加工工艺简单价廉,所以成本低,容易被市场普遍接受。

3.7 磁放大器

磁放大器是利用软磁材料磁化曲线的非线性特点,通过控制铁心的工作状态来控制输出信号或功率的磁性器件。在两种场合应用:①利用其铁心材料磁化曲线的非线性特点,用一个信号控制另一个信号;②利用软磁材料的矩形磁滞回线特征。实现开关电源输出调节和多路输出。用磁放大器稳压是开关电源的一种重要稳压方法。

通过对磁放大器基本工作原理的分析可知,作为磁调制器、磁性开关、饱和电抗器的铁心,要求材料在磁化到

饱和之前的磁导率尽量高，而饱和后的磁导率尽量低；矩形比尽量大，以提高其控制灵敏度与放大系数；同时要求材料的矫顽力低、铁损小，以减小控制功率。

目前用于磁放大器铁心的软磁材料有硅钢片、坡莫合金、铁氧体和非晶合金。随着开关电源高频化的进展，对磁放大器的要求更高了，在 20kHz 以上，坡莫合金由于电阻率太低而致使涡流损耗太大，温升较高。可以使用到 50kHz 的铁氧体材料的电阻率很高，但其饱和磁感值过低，居里温度也太低，故难以满足磁放大器的需要。图 4 为坡莫合金与非晶合金的可饱和铁心的高频磁滞回线对比。由图可见，在磁饱和铁心的基本特性中，除了优异的磁滞回线矩形比之外，从导致铁心损耗和发热原因的磁滞回线面积的对比上可知，非晶合金铁心可望用于效率更高的高频磁放大器（可扩展到 200kHz 以上）。尤其是钴基非晶合金在保持高矩形比的同时还具有很低的高频损耗，用于高频磁放大器中可以大大提高电源效率，明显减小重量和体积。

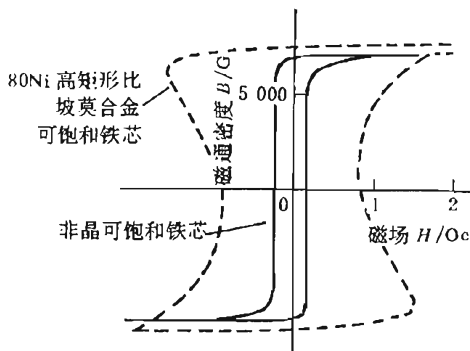


图 4 坡莫合金与非晶合金的可饱和铁心的高频磁滞回线对比

3.8 尖峰抑制器

开关电源的最大缺点是容易产生噪声干扰，它们主要由开关功率管和开关整流二极管中快速变化的高压切换电流和脉冲短路电流引起，一般采用非线性饱和电感器抑制反向恢复电流尖峰。在续流二极管 VD2 回路中串联非线性饱和电感器 L_1 、 L_2 ，即能有效地抑制 VD2 的电流下降速度，在电流反转之前消除二极管的存储电荷，从而减小反向恢复电流。 L_2 采用非线性饱和电感器能使电流下降时间显著减少。当二极管电流接近零时， L_2 才起作用，其下降速度被限制，使反向恢复电流几乎减小到零。 L_2 的量值应根据二极管的反向恢复时间选择。

这种电感器应具有较大的电感量，故铁心材料的磁导

率应较高。当铁心饱和时，电感量被迅速下降到零。铁心的工作状态是从 $-B_s$ 到 $+B_s$ ，因此要求铁心材料具有尽量高的矩形比，而且矫顽力要小，高频损耗要低。采用钴基非晶合金可以得到性能优异的尖峰抑制器。图 5 和图 6 是采用非晶合金铁心和铁氧体铁心的尖峰抑制器之性能比较。从两者的直流磁化曲线的比较中可见，非晶合金的矫顽力很小，显示出急剧磁化的上升趋势，该铁心的起始及最大电感值特别大，饱和后的剩磁几乎为零。这样就实现了尖峰抑制器仅在电流上升的瞬间起高阻抗的作用，在正常情况下是一个回路损耗很小的非线性电感线圈的作用。图 7 示出了上述功能的实例。

3.9 输出扼流圈

用非晶带材制作的扼流圈作为开关电源中的输出扼流圈和差速式滤波器，使用的是带有单一气隙的环形铁心。它与铁粉心 MPP 或硅钢片铁心相比，具有较小的尺寸和低的温升。

输出扼流圈是一种阻止交流电流成分，只让直流电流通过的电感元件，所以直流电流和交流电流叠加在铁心时的磁性能即直流偏磁特性是其重要指标。具体地说，电感值应使直流电流不易达到磁饱和，而对于交流成分都是足

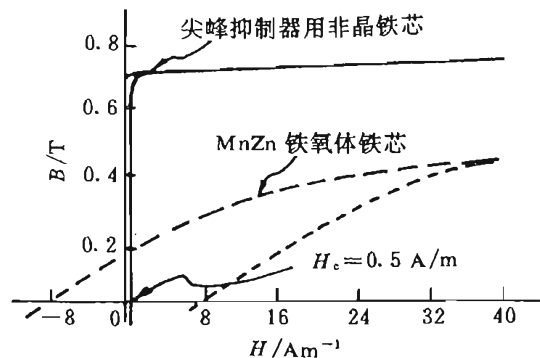


图 5 尖峰抑制器用铁心的磁性能

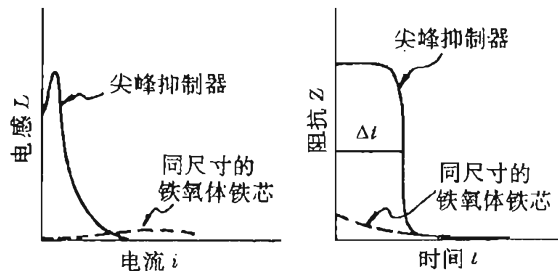


图 6 尖峰抑制器的特性

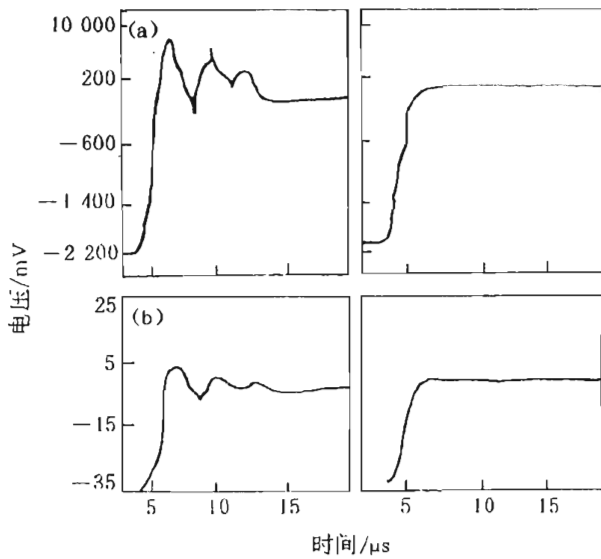


图7 采用铁基纳米晶合金制作尖峰抑制器的二极管恢复波形

够的大。所以，作为材料性能，高饱和磁通密度是必须的，而由于铁心存在间隙获得的恒磁导率特性，则改善了直流偏磁特性。铁基非晶合金输出扼流圈铁心的直流偏磁特性与Mn-Zn铁氧体铁心的特性比较见图8。图中，设定两种铁心扼流圈的电感值相同，横坐标以铁氧体铁心为基准，电感值减少一半时的偏磁电流规定为1。非晶扼流圈铁心直到很高的电流值时仍显示出恒定的电感值，这就清楚地表示了饱和磁通密度之差，同样也反映了铁心的尺寸。对于相同电气规格的扼流圈而言，非晶铁心扼流圈的体积约为铁氧体铁心扼流圈体积的一半。

因为要求扼流圈用铁心必须具有高饱和磁通密度，同时在实际应用的高温环境下仍必须保持高饱和磁通密度。非晶扼流圈铁心的饱和磁通密度之温度特性与铁氧体铁心的比较示于图9。由图可见，非晶扼流圈铁心因为其居里温度高，直到150℃，饱和磁通密度的降幅很小，温度特性良好。由此可见非晶合金与纳米晶合金特别适用于航空航天领域中。

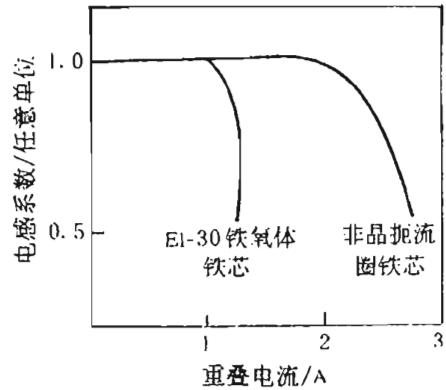


图8 非晶铁心与铁氧体铁心扼流圈的直流偏磁特性比较

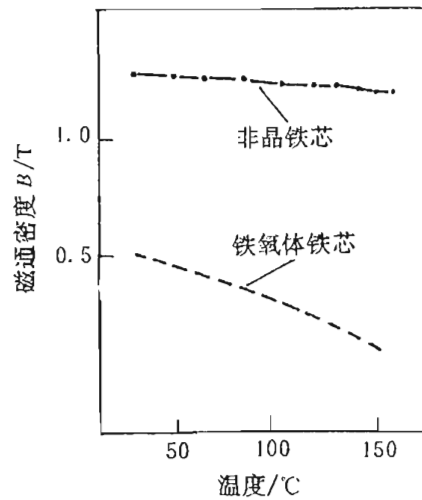


图9 非晶扼流圈铁心饱和磁通密度的温度特性

4 小结

从上述非晶和纳米晶合金材料的应用领域介绍可见，它们的发展为磁性器件的设计生产提供了优质资源，促进了多种新型磁器件的进步，特别在高频化、小型化和节省原材料方面的贡献更为显著。