

非晶、纳米晶软磁合金材料的昨天、今天和明天

张继松, 何虹, 王燕明, 杨仁富
西南应用磁学研究所 四川绵阳 621000

摘要: 本文对非晶、纳米晶软磁合金材料的发展历程、生产工艺、性能特点和现状作了描述, 对其应用进行了较详细地介绍, 同时对其发展前景进行了分析和展望。

关键词: 非晶、纳米晶, 发展历程, 性能特点, 产业现状, 应用领域, 发展展望

中图分类号: TM27 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2014)06-8-131

1 概述

在日常生活中人们接触的材料一般有两种:一种是晶态材料,另一种是非晶态材料。材料内部的原子排列遵循一定的规律周期性地排列,被称为晶态材料,一般的金属,其内部原子排列有序,都属于晶态材料。反之,内部原子排列处于无规则长程无序状态,则为非晶态合金。科学家发现,金属在熔化后,内部原子处于活跃状态。一旦金属开始冷却,原子就会随着温度的下降,而慢慢地按照一定的晶态规律有序地排列起来,形成晶体。如果冷却过程很快,(例如用每秒高达一百万度的冷却速率)原子还来不及重新排列就被凝固住了,由此就产生了非晶态合金。不同的物质形成非晶态合金所需要的冷却速度大不相同。单一金属需要每秒高达一亿度以上的冷却速度才能形成非晶态。受工艺水平的限制,实际生产中难以达到如此高的冷却速度,因此,普通的单一的金属难以从生产上制成非晶态合金材料。为了获得非晶态合金材料,一般将金属与其它物质混合。当原子尺寸和性质不同的几种物质搭配混合后,就形成了合金。这些合金具有两个重要性质:合金的成分一般在冶金学上的所谓“共晶”点附近,它们的熔点远低于纯金属,例如 FeSiB 合金的熔点一般为 1200 度以下,而纯铁的熔点为 1538 度;由于原子的种类多了,合金在液体时它们的原子移动困难,在冷却时更加难以整齐排列,也就是说更加容易被“冻结”成非晶态。实际上,目前所有的实用非晶态合金都是两种或更多种元素组成的合金,例如 Fe-Si-B, FeNiPB, CoZr, ZrTiCuNi 等。

迄今为止,国内外非晶态合金开发最多的是作为软磁材料的一类。它们在化学成分上的一个共同点是:由两类元素组成:一类是铁磁性元素(铁、钴、镍或者他们的组合),它们用来产生磁性;另一类是硅、硼、碳等,它们称为类金属,也叫做玻璃化元素,有了它们,合金的熔点比纯金属降低了很多,才容易形成非晶。

非晶态合金与晶态合金相比,在物理性能、化学性能和机械性能方面都发生了显著的变化。以铁元素为主的非晶态软磁合金为例,它具有高饱和磁感应强度和低损耗的特点。因此,非晶态软磁合金材料在电子、航空、航天、机械、微电子等众多领域中具备了广阔的应用空间。

2 发展历程

1967 年 Duwez 教授率先开发出 Fe-P-C 系非晶软磁合金,带动了第一个非晶合金研究开发热潮。1979 年美国 Allied Signal 公司开发出非晶合金宽带的平面流铸带技术,并于 1982 年建成非晶带材连续生产厂,先后推出命名为 Metglas 的 Fe 基、Co 基和 FeNi 基系列非晶合金带材,标志着非晶合金产业化和商品化的开始。1984 年美国四个变压器厂家在 IEEE 会议上展示了实用的非晶配电变压器,从而将非晶合金应用开发推向高潮。在这期间,美国主要致力于非晶合金带材的大规模生产和节能非晶配电变压器的推广应用,在技术和产品方面基本形成垄断。到 1989 年,美国 Allied Signal 公司已经具有年产 6 万吨非晶带材的生产能力,全世界约有 100 万台非晶配电变压器投入运

行,所用铁基非晶带材几乎全部来源于该公司。除美国之外,日本和德国在非晶合金应用开发方面拥有自己的特色,重点是电子和电力电子元件,例如高级音响磁头、高频电源(开关电源)用变压器、扼流圈、磁放大器等。1988年日本日立金属公司的Yashizawa等人在非晶合金基础上通过晶化处理开发出纳米晶软磁合金(Finemet)。此类合金的突出优点在于兼备了铁基非晶合金的高磁感和钴基非晶合金的高磁导率、低损耗,并且是成本低廉的铁基材料。因此铁基纳米晶合金的发明是软磁材料的一个突破性进展,从而把非晶态合金研究开发又推向一个新高潮。纳米晶合金可以替代钴基非晶合金、晶态坡莫合金和软磁铁氧体,在高频电力电子和电子信息领域中获得广泛应用,达到减小体积、降低成本等目的。1988年当年,日立金属公司纳米晶合金既实现了产业化,并有产品推向市场。1992年德国VAC公司开始推出纳米晶合金替代钴基非晶合金,尤其在网络接口设备上,如ISDN,大量采用纳米晶磁心制作接口变压器和数字滤波器件。在此期间,美国Allied Signal公司(现被Honeywell公司兼并)也加强了非晶合金在电力电子领域的推广应用,先后推出4个系列的铁心制品。

在非晶态合金的产业化发展过程中,非晶纳米晶合金带材及其铁心制品一直是主流,非晶丝材的研究开发和产业化是重要分支。1980年,日本Hagiwara首先提出采用内圆水纺法制备非晶合金丝材,随后日本的Unitika公司开始利用此法商业生产Fe基和Co基非晶丝,作为产业化的软磁材料,应用重点集中在图书馆和超市用防盗标签。此外,利用非晶丝材各种独特的物理效应开发各类高性能传感器一直受到特别关注。尤其最近在钴基非晶丝材中发现巨磁阻抗效应以来,高精度磁敏传感器的开发成为热点。1999年日本科学技术振兴事业团委托名古屋大学和爱知钢铁公司联合开发MI微型磁传感器和专用集成电路芯片,目标是将非晶丝MI传感器用于高速公路汽车自动导航和安全监测系统。日本前些年新开发的FeCuB、FeCuSiB、FeCuSiBP系合金的Bs可达1.80~1.94T,在Bm=1.3~1.75T范围内的工频损耗均优于磁性能最佳的0.23mm厚细畴取向硅钢。这种Fe含量高达85at%的高Bs纳米晶合金急冷“异质”非晶薄带宽度已达30mm,已于2012年投产用于变压器和电机。

我国于2003年颁布了GB/T1934—2003非晶、纳米晶软磁合金带材标准。2012年我国中科院宁波材料技术与工

程研究所沈宝龙课题组在前期探索发现的具有高饱和磁感应强度和良好软磁性能的FeSiBPCu合金基础上,对合金成分及纳米晶化工艺进行了进一步优化,成功研制出具有更优异性能的FeSiBPCu纳米晶软磁合金。该合金的纳米晶粒尺寸为15nm。其饱和磁感应强度达到1.8T,已接近于硅钢,矫顽力仅为1.1A/m,而铁损则远低于硅钢,在工频条件下(50Hz,1T)的铁损为0.22W/kg,分别是取向硅钢铁损(0.64W/kg)的三分之一,无取向硅钢铁损(2.0W/kg)的九分之一。优良的综合性能使之有望应用于配电变压器、马达以及开关电源等领域。所获研究成果均有自主知识产权。

3 现状

美国曾是世界上最大的非晶态合金材料制造商,Honeywell公司Metglas业务部(前身为Allied Signal公司),是非晶态合金材料制造技术的平板流技术专利所有者,年生产能力3万吨以上,带材生产实现自动控制和自动卷取。Honeywell公司Metglas业务部拥有两个独资工厂:美国Conway非晶金属制带厂和印度Gurgaon电子铁芯元件厂,两个合资公司:日本非晶质金属公司(NAMCO)和上海汉威非晶金属公司(SHZAM)。在美国Conway非晶金属制带厂,有年产万吨级非晶带材生产线两条,主要生产Metglas2605SA-1,最大带材宽度为250mm,配有自动在线卷取设备及年产千吨级和百吨级非晶带材生产线各一条,主要生产电子材料、钎焊材料和新材料,最大带材宽度为220mm和100mm,配有自动在线卷取设备。目前,美国非晶软磁合金带材所持有的知识产权全部卖给了日本日立金属。

日本主要有日立金属公司和东芝公司。日立金属公司是利用快淬技术非晶化基础上制备纳米晶软磁合金材料的发明者,2003年购买了美AlliedSignal公司50%的权益,2006年底日立金属已经把非晶产能从原来的约3万吨扩展到6万吨,这使日立金属在这个领域处于绝对垄断的地位,成为世界上非晶带材最大生产厂商。生产基地在日本清水。产品包括所有的市售商品,尤其以铁基纳米系列化产品占据世界非晶纳米晶领域的重要地位,它拥有一条配有自动在线卷取设备的非晶带材生产线,年生产能力达百吨,最大宽度150mm。日立金属现在的产能为7~10万吨,2015年将达15万吨。东芝公司主要生产Co基非晶产品,带

材质量和性能居世界领先地位，尤其是磁放大器类产品，在市场上占有相当地位。带材生产实现自动化，最大宽度在100mm左右。

德国的真空熔炼公司（VAC）通过购买非晶纳米晶软磁合金专利许可证的方式获得生产许可，主要生产用于电子产品的Co基非晶和Fe基纳米晶材料，并在专利基础上研制开发出不同用途的新型合金材料，也是非晶纳米晶材料重要制造商之一。带材实现自动化生产，非晶带材最大宽度为150mm。德国产量不大，主要满足本国需要。

在俄罗斯，主要开发一些Co基非晶合金产品，近几年同韩国的公司合作开发应用Co基产品，虽然生产规模不太大，但设备及自动化技术水平不低。

我国非晶软磁合金材料研究始于1976年，二十世纪八十~九十年代国家科委、原冶金部等组织钢研总院（转制企业为安泰科技）上海钢研所以及有关高校院所进行多次联合科技攻关。国家科委从“六五”开始连续5个五年计划均将非晶、纳米晶合金研究开发和产业化列入重大科技攻关项目。“七五”期间建成百吨级非晶带材中试生产线，带材宽度达到100mm；“八五”期间突破了非晶带材在线自动卷取技术，并建成年产20万只非晶铁心中试生产线；“九五”期间，成立了国家非晶微晶合金工程技术研究中心，建成了千吨级铁基非晶带材生产线，带材宽度达到220mm，同时建成年产600吨非晶配电变压器铁心生产线。通过前4个五年科技攻关计划的实施，我国基本实现了非晶合金带材及制品产业化。在十五期间，纳米晶带材及其制品产业化开发又被列入重大科技攻关计划，国家给予重点支持，旨在推动纳米晶材料应用开发快速发展，满足电力电子和电子信息等高新技术领域日益增长的迫切需求。由国家科技部批准的“国家非晶节能材料产业技术创新战略联盟”于2012年9月6日在北京成立。该联盟的组建对满足我国电力系统发展和节能减排对非晶合金材料的需求，提升非晶节能材料产业链自主创新能力和核心竞争力，打破发达国家的长期垄断具有重要意义。2013年4月28日，我国首个千吨级总投资2.4亿元的非晶软磁合金材料成套设备生产线项目在安庆市非晶软磁设备产业园开工建设，打破了我国在该项技术上完全依靠进口的局面，这将极大促进我国非晶软磁合金材料产业的发展。

我国从事非晶软磁合金材料生产的企业约70多家，主要企业有安泰科技、北京冶科、江西大友科技、安徽芜湖

君华科技、安庆天瑞新材料、青岛云路新能源、滨州非晶金属、佛山中研非晶、佛山万瀚隆、安阳高科电子、北京方能晶欣、上海安泰至高非晶（原上海钢研所）、山西昌盛—斯波雷堡、上海米创等。其中安泰科技股份有限公司是国内非晶软磁合金材料研究开发力量最强、产业规模最大、具有领先的技术、是目前国内唯一一家通过OSA认证的企业。目前拥有4万吨铁基非晶带材及制品的产能，占据全球一半市场份额，成为全球最大的第二家生产企业。并于2013年开始建设6万吨非晶带材示范线，预计2014年中期开始投产，这将使公司非晶带材产能扩大到10万吨。

4 生产工艺流程



主要生产设备：真空熔炼炉、万吨级制带机、自动卷取机、抛丸机、开条机、保温炉、自动控制系统、直读谱光仪、冷却塔、水循环系统、气循环系统等。

非晶态合金材料通常采用冷却速度大约每秒一百万度的快速凝固术，将熔融的合金液一次成型为厚度小于50μm的非晶带材或直径小于200μm的非晶丝材。由于其冷却速度高达10⁶ /s，必需采用独特的冷却方式才能实现。

纳米晶合金材料是首先将特定成分的合金利用急冷技术制备成非晶态，再通过适当的热处理将其晶化为晶粒尺寸约10nm的超微晶结构。

通常非晶带材的制备方法大多采用外圆法（单辊制带法），这一方法已发展成为工业生产应用最广泛的实用方法。

非晶丝材的制备方法有喷丝法和玻璃包覆拉丝法等。

非晶粉末的制备方法有雾化法、高能球磨法及非晶带材破碎法等。

非晶薄膜的制备方法有真空蒸镀法、溅射法、化学气相反应沉积法等。

5 种类及特点

5.1 种类

5.1.1 铁基

铁基非晶合金是由80%Fe及20%Si，B类金属元素所

构成,它的特点是磁性强(饱和磁感应强度可达1.4-1.77T)、磁导率、激磁电流和铁损等软磁性能优于硅钢片,价格便宜,特别是铁损低(为取向硅钢片的1/3-1/5)。铁基非晶合金的带材厚度为0.03毫米左右,广泛应用于配电变压器、大功率开关电源、脉冲变压器、磁放大器、中频变压器及逆变器铁芯,尤其适合于10kHz以下频率使用。

5.1.2 铁镍基

铁镍基非晶合金是由40%Ni、40%Fe及20%类金属元素所构成,它具有中等饱和磁感应强度(1T以下)、较高的初始磁导率和很高的最大磁导率以及高的机械强度和优良的韧性。在中、低频率下具有低的铁损。空气中热处理不发生氧化,经磁场退火后可得到很好的矩形回线。价格比坡莫合金便宜30-50%。它的应用范围与中镍坡莫合金相对应,但低的铁损和高的机械强度远比晶态合金优越;可代替坡莫合金,广泛用于漏电开关、精密电流互感器铁芯、磁屏蔽等。

5.1.3 钴基

钴基非晶合金:由钴和硅、硼等组成,有时为了获得某些特殊的性能还添加其它元素,由于含钴,它们价格很贵,磁性较弱(饱和磁感应强度一般在1T以下),但磁导率极高,其磁致伸缩系数对应力不敏感,是非晶软磁合金材料中性能最优异的材料,一般用在要求严格的军工电源中的变压器、电感等,替代坡莫合金和软磁铁氧体,也可以制成传感器敏感材料,用于图书馆及超市防窃装置。

5.1.4 纳米晶(超微晶)

二十世纪八十年代末,日本的吉泽克仁等发现,含有Cu和Nb的铁基非晶态合金在晶化温度以上退火时,会形成非常细小的晶粒组织,晶粒尺寸仅有10-20纳米。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(也曾称为超微晶合金)。

铁基纳米晶合金是由铁元素为主,加入少量的Nb、Cu、Si、B元素所构成的合金,(其中铜和铌是获得纳米晶结构必不可少的元素)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10-20nm的微晶,弥散分布在非晶态的基体上,形成微晶和非晶的混合组织。纳米晶软磁材料的综合磁性能优异:高饱和磁感(1.2T)、高初始磁导率(8×10^4)、低 $H_c(0.32A/M)$,高磁感下的高频损耗低($P_{0.5T/20kHz} = 30W/kg$),电阻

率为 $80 \mu \Omega/cm$,比坡莫合金($50-60 \mu \Omega/cm$)高,是名副其实的“二高一低”材料,几乎能够和钴基非晶合金相媲美。适用频率范围:50Hz-100kHz,最佳频率范围:20kHz-50kHz。广泛应用于大功率开关电源、逆变电源、磁放大器、高频变压器、高频变换器、高频扼流圈铁芯、电流互感器铁芯、漏电保护开关、共模电感铁芯。它不含有昂贵的钴,是工业和民用中高频变压器、互感器、电感的最理想的材料。

5.2 特点

5.2.1 磁性能优良

非晶、纳米晶合金的优异软磁特性都来源于其特殊的组织结构。非晶态合金中没有晶粒和晶界,易于磁化。纳米晶合金的晶粒尺寸小于磁交换作用长度,导致平均磁晶各向异性很小,并且通过调整成分,可以使其磁致伸缩趋近于零。与传统的金属磁性材料相比,其电阻率高,导磁率高、损耗低,是优良的软磁材料。

5.2.2 温度稳定性好

非晶态合金的晶化温度在450-600℃之间。钴基非晶合金的磁性能温度稳定性相当好,通常作为军工产品使用。对于铁基微晶合金,虽然性能的变化率较大,但值得注意的是,其高频损耗随使用温度的升高而降低。考虑到变压器铁心的实际工作温度总是高于室温,这种变化实际上是有利的。非晶态合金的使用温度用于在130℃以下工作的变压器铁心是完全胜任的。

5.2.3 强韧性高和耐磨性好

高的强韧性和优良的耐磨性,再加上它们的磁性,可以制造各种磁头。

5.2.4 处理工艺灵活

和其它磁性材料相比,非晶合金具有很宽的化学成分范围,而且即使同一种材料,通过不同的后续处理也能够很容易地获得所需要的磁性能,这为电力电子元器件的选材提供了方便。

5.2.5 制造工艺简单、节能、环保

非晶态合金的制造是在真空熔炼之后直接喷带,只需一步就制造出了薄带成品,工艺大大简化,节约了大量宝贵的能源,同时无污染物排放,对环境保护非常有利。

表1是非晶软磁合金材料的特性。表2是非晶软磁合金材料与其它常用软磁材料性能的比较。

表 1 非晶软磁合金材料的特性

合金		硬度 H_V (N/mm^2)	断裂强度 σ_f (N/mm^2)	延伸率 δ (%)	弹性模量 E (N/mm^2)	E/σ_f	断裂能 $\mu J/cm^2$
非晶态	$Pd_{73}Fe_7Si_{20}$	4018	1860	0.1	66640	50	-
	$Cu_{57}Zr_{43}$	5292	1960	0.1	74480	38	0.6×10^7
	$Co_{75}Si_{15}B_{10}$	8918	3000	0.2	53900	18	-
	$Ni_{75}Si_8B_{17}$	8408	2650	0.14	78400	30	-
	$Fe_{90}P_{13}C_7$	7448	3040	0.03	121520	40	1.1×10^7
	$F_{72}Ni_8P_{13}C_7$	6660	2650	0.1	-	-	-
	$F_{80}Ni_{20}P_{13}C_7$	6470	2450	0.1	-	-	-
	$F_{72}Cr_5P_{13}C_7$	8330	3770	0.05	-	-	-
$Pd_{77.5}Cu_6Si_{16.5}$	7450	1570	40 (压缩率)	93100	60	-	
晶态	18Ni - 9Co - 5Mo X - 200	- -	1810 ~ 2130 -	10 ~ 12 -	- -	- -	- 1.7×10^6

表 2 非晶软磁合金材料与其它常用软磁材料性能比较

	铁基非晶合金	冷轧硅钢	铁镍基非晶	钴基非晶	铁基纳米晶	坡莫合金	软磁铁氧体
饱和磁感应强度/T	>1.5	2.0	>0.7	0.5 - 0.8	>1.2	0.5 - 1.5	<0.5
居里温度/°C	>415	730	>250	>320	>560	>400	<230
晶化温度/°C	>550		>410	>480	>510		
电阻率/ $\mu\Omega \cdot cm$	140	50	125	140	90	55	>106
密度(g/cm^3)	7.18	7.65	7.5	8.0	7.25	8 - 8.8	4.8
硬度(hg/mm^2)	860		640	900	880	120	600
饱和磁致伸缩系数/ $\times 10^{-6}$	20 - 30	27	12	0	1 - 2	0 - 25	14
初始导磁率	>1000	1000	>4000	>30000	>80000	>100002000	
最大导磁率	>200000	>10000	>200000	>200000	>2000000	>200000	
矫顽力(A/m)	<3	>8.0	<0.8	<2.0 <2.0	>0.4 20		
铁损 (W/kg)	P1/50=0.07 P1/400=1.2	P1/50>0.3 P1/400=5.8	P0.2/20k<20	P0.2/20k<5	P0.2/20k<10	P0.2/20k=13	P0.2/20k<20

注：铁损的表示方法：如 P1/50 表示频率为 50Hz，磁通密度为 1T 的铁损。

6 应用

非晶软磁合金材料的应用首先是在二十世纪八十年代初期，在军工电源上开始的。军工电源严酷的工作条件是对非晶软磁合金材料磁性能稳定性的极大考验。在过去的三十多年中，非晶软磁合金材料已经应用在多种军工装备，如火箭、机载雷达、水雷、坦克等电源中。随着市场经济的发展，非晶软磁合金材料的应用领域逐渐扩展到广大的民用产品。应用场合主要包括：互感器铁心、大功率逆变

电源变压器和电抗器铁心、各种形式的开关电源变压器和电感铁心、各种传感器铁心等。

在低频电磁元件中，铁基非晶软磁合金材料被大量应用，在电力配电变压器中的应用已取得良好效果，成为生产量最大的非晶软磁合金材料。同时电源中的整流变压器，滤波电抗器等电磁元件也已陆续开始应用。FeMB (M 为 Zr、Hf、Ta) 和 FeZrNbBCu 纳米晶合金，不但工频损耗低，而且饱和磁密高，磁致伸缩系数也小，是工频电磁元件比较理

想的软磁合金材料，在低频领域可以代替硅钢和铁基合金，在中、高频领域可以代替钴基非晶合金和铁镍高导磁合金。FeCoZrBCu 非晶合金，饱和磁通密度 B_s 高达 2.0T，可以代替 FeCoV 系高导磁合金，是低频电磁元件常选用的软磁材料。

中、高频领域首选的非晶和微晶合金是钴基非晶合金和铁基微晶合金软磁材料。一般 (18~25) μm 厚的带材，用于 100kHz，小于 18 μm 厚的薄带，用于 500kHz~1MHz。钴基非晶合金 20 μm 厚的薄带，P0.2T/100kHz 只有 30W/kg。在电力领域，非晶、纳米晶合金均得到大量应用。利用非晶合金取代硅钢可使配电变压器的空载损耗降低 70%-80%，非晶配电变压器作为换代产品具有很好的应用前景。纳米晶合金的最大应用是电力互感器铁心。电力互感器是专门测量输电线路上电流和电能的特种变压器。随着高精度等级（如 0.2 级、0.2S 级、0.5S 级）的互感器需求量迅速增加。传统的冷轧硅钢片铁心达不到精度要求，虽然高磁导率坡莫合金可以满足精度要求，但价格高，而采用纳米晶铁心不但可以达到精度要求、而且价格低于坡莫合金。

从目前国内外应用以及今后发展来看，非晶软磁合金材料的主要应用还是在电力系统。

铁基非晶合金变压器运行过程中的空载损失远低于硅钢变压器。这种情况尤其适用于空载时间长、用电效率低的农村电网。美国通过使用这种变压器每年可节约近 $50 \times 10^9 \text{KWh}$ 的空载损耗，节能产生的经济效益每年约为 35 亿美元。

变电站大量的使用电力互感器，它们对铁心材料的要求非常苛刻，不仅要求高的磁性指标（如高导磁率、高饱和磁感、低损耗等），而且要求铁心材料的整个磁化曲线满足一定的条件，以保证互感器在整个测量范围内的精度。非晶、纳米晶软磁合金材料作为互感器铁心的应用近年来逐渐广泛起来，取得了非常理想的效果。

漏电开关过去一般采用坡莫合金（铁镍合金）作为这种互感器铁心。非晶软磁合金材料从二十世纪八十年代以来开始作为漏电开关中的互感器铁心，而且用量越来越大。

随着高频逆变技术的成熟，在电力电子领域，传统大功率线性电源开始大量被高频开关电源所取代，开关电源是自二十世纪七十年代发展起来的新型电源技术，它采用 20 千赫兹以上的工作频率，大大缩小了变压器的体积、减轻了重量、提高了效率。为了提高效率，减小体积，开关

电源的工作频率越来越高，这就对其中的软磁材料提出了更高的要求。硅钢高频损耗太大，已不能满足使用要求；软磁铁氧体虽然高频损耗较低，但在大功率条件下，一是饱和磁感低，无法减小变压器的体积；二是居里温度低，热稳定性差；三是制作大尺寸铁心成品率低，成本高。纳米晶软磁合金材料同时具有高饱和磁感和很低的高频损耗，且热稳定性好，是大功率开关电源用软磁材料的最佳选择。采用纳米晶软磁合金材料的变压器的转换功率可达 500kW，体积比功率铁氧体变压器减少 50% 以上。在开关电源中使用非晶、纳米晶软磁合金材料作为铁心的元器件有：主变压器、控制变压器、共模电感、噪声滤波器、滤波电感、储能电感、电抗器、磁放大器、尖峰抑制器、饱和电感、脉冲压缩器、开关管保护电感等。

纳米晶软磁合金在逆变焊机电源中已经获得广泛应用，在通讯、电动交通工具、电解电镀等领域的应用正在积极开发之中。

在电子防窃系统中，早期利用钴基非晶窄带的谐波式防盗标签在图书馆中获得了大量应用。后来利用铁镍基非晶带材的声磁式防盗标签克服了谐波式防盗标签误报警率高、检测区窄等缺点，应用市场已经扩展到超市。可以预见，随开放式服务方式的发展，作为防盗防伪的非晶合金带材和丝材的应用会急剧增长。

在电子信息领域，随着计算机、网络和通讯技术的迅速发展，对小尺寸、轻重量、高可靠性和低噪音的开关电源和网络接口设备的需求日益增长、要求越来越高。为了减小体积，计算机开关电源的工作频率已经从 20kHz 提高到 500kHz；为了实现 CPU 的低电压大电流供电方式，采用磁放大器稳定输出电压；为了消除各种噪音，采用抑制线路自生干扰的尖峰抑制器，以及抑制传导干扰的共模和差模扼流圈。因此，在开关电源和接口设备中增加了大量高频磁性器件。非晶、纳米晶软磁合金材料在这些高频磁性器件中得到大量使用。

在民用产品中，变频技术有利于节约电能、并减小体积和重量，正在大量普及。但负面效应不可忽视，如果变频器中缺少必要的抑制干扰环节，会有大量高次谐波注入电网，使电网总功率因数下降。减少电网污染最有效的办法之一是在变频器中加入功率因数校正（PFC）环节，其中关键部件是高频损耗低、饱和磁感大的电感铁心。铁基非晶软磁合金在此类应用中具备明显优势，在变频空调中

使用非晶 PFC 电感已经成为一个热点, 铁基非晶软磁合金在变频家电绿色化方面发挥着重要作用。

7 发展前景

7.1 主要研究开发方向

行业专家们认为目前和今后主要研究开发方向是：

- (1) 改进生产工艺技术装备, 提高带材质量, 使其达到剪切水平；
- (2) 开发高 Bs、低 Br 的新型铁基非晶合金, 满足大型脉冲电源需要；
- (3) 开发新型钴基非晶合金, 满足电力电子技术和高频电子技术需要；
- (4) 开发新型 FeCuMSiB 系纳米晶合金；
- (5) 开发新型 FeMB 系纳米晶合金, 进行技术储备；
- (6) 开发非晶、纳米晶软磁合金粉末及粉末制品；
- (7) 开发具有巨磁阻抗效应的钴基非晶和纳米晶合金磁敏材料；
- (8) 开发具有高电阻率和高饱和磁感的非晶纳米晶薄膜磁性材料, 即借助镀膜技术制成磁性薄膜；
- (9) 开发大块铁磁性非晶态合金, 解决合金材料需要添加 Zr(易氧化)、Ga(贵且少)等元素及块体尺寸太小等问题；
- (10) 开发纳米非晶磁性液体的磁介质；
- (11) 开发非晶纳米晶磁粉心；
- (12) 开发大块非晶软磁性金属玻璃 (SM-BMG)。

7.2 市场展望

如前所述, 非晶、纳米晶软磁合金材料是一种具有磁性能、耐蚀性、耐磨性、高硬度、高强度、高电阻率等许多独特优异性能的新型软磁材料。与传统的硅钢片相比, 工艺流程较为简单, 制作过程中节能, 磁性能优良, 能降低变压器使用过程中的损耗, 因此被称为绿色材料和二十一世纪的材料。非晶合金变压器被誉为“没有发电机的绿色发电厂”。

不同的非晶态合金具有不同的饱和磁通密度和居里点, (铁基非晶: >400), 可以应用于高频或低频, 同时价格也低于相应的其它材料。因此, 可以说非晶、纳米晶软磁合金材料作为变压器铁心使用是非常理想的。

用非晶、纳米晶软磁合金材料替代极薄硅钢在 400Hz 以上各种电子元件如高频变压器、电抗器、磁屏蔽等中的

应用, 不仅可以提高产品性能、质量和促使小型化, 而且价格上也有利可图。

采用非晶、纳米晶软磁合金材料取代高磁导率、高性能、大功率软磁铁氧体, 可以促使一些电子设备国产化、小型化。

用非晶、纳米晶软磁合金材料制作的各种磁性器件, 可以大量用于油田钻探、海洋探测等工作环境温度高和恶劣等的一些电子产品中。

用非晶、纳米晶软磁合金材料制成的磁性器件性能优于其他软磁材料, 可以用于需要小而轻、温度稳定性好、磁性要求高的航空、航天等军工产品。

用非晶、纳米晶软磁合金材料来制作高频、大电流、大功率电源变压器、电抗器、滤波器, 可将工作频率提高到 40kHz~50kHz, 大大减小磁心器件的体积和尺寸, 使这些器件实现小型化。

各种抗 EMI 器件、噪声抑制器和尖峰抑制器、共模电感均是小信号工作状态, 要求电感是越大越好, 电感量正比于有效磁导率, 选用纳米晶软磁合金材料来制作这些器件可以大大缩小磁心尺寸, 具有良好的性价比。

非晶、纳米晶磁粉心的开发, 不仅扩大了非晶、纳米晶软磁合金材料的应用领域, 也促进了金属磁粉心产业的发展。其优点是: 可利用非晶纳米晶急冷薄带的头、尾或边角料经球磨气流复合破碎等方法获得便宜的磁粉心原料。由于非晶纳米晶软磁材料有较高的电阻率和综合磁性能, 制成磁粉心后, 在同样绝缘条件下有比常规金属磁粉芯更好的高频特性。Fe₈₁(Si_{0.3}B_{0.7})₁₇C₂ 非晶磁粉的心 Bs 达 1.62T, P_{0.1/100k} 450mW/cm³, $\mu_r(10\text{MHz})=60$, 综合磁性能极佳, 特别适合在高频大电流大功率的场合应用。

大块非晶软磁性金属玻璃可制作成块体(棒或厚板)薄带以及磁粉芯; 可制作成导磁器件(如极头、极靴、衔铁和膜片等); 利用其高强度(4~5Gpa)及过冷液相区的粘滞流动加工性作高速旋转元件和耐应力、耐磨器件及高强结构件、尺寸精密形状复杂的部件; 利用其高电阻率(2.2~2.4 $\mu\Omega\cdot\text{m}$)作电力电子技术用高功率器件; 利用其优良的耐腐蚀性作电磁阀、泵等; 也可制成大磁致伸缩(λ_s 达 50~60 $\times 10^{-6}$)材料和高频磁粉芯。

国务院《节能减排“十二五”规划》, 明确了“十二五”期间节能减排的具体目标和投资规划, 要求“十二五”期间降低电力变压器损耗, 其中空载损耗降低 10%~13%, 负

载损耗降低 17%~19%，这无疑将有利于节能型变压器的推广。据了解，国家电网公司正计划大规模推广非晶合金节能型变压器，未来非晶合金变压器或占配电网变压器的一半。国家电网下发文件，要求 2012~2014 年新增变压器中 50%、55%、60% 均采用非晶合金变压器，更新改造变压器原则上全部采用非晶合金变压器。国家发展改革委为此专门算过一笔帐，如果全国都换上非晶合金变压器，则每年可节电 126 亿千瓦时，等于少建一座装机容量为 240 万千瓦的发电厂，相当于少建 2 座石洞口发电厂或 8 座秦山核电站。如果国内有 15% 的 S9 高耗能配电变压器更换为非晶节能变压器，在变压器的有效运行周期内可节电约 1050 亿度，相当于减排二氧化碳 1 亿吨。由此可见，非晶合金变压器的推广应用符合国家产业政策和节能减排的要求。

根据国家节能减排政策，2015 年我国新增配电变压器中非晶配电变压器的比例将超过 50% 以上，对非晶带材的需求将达到 20 万吨 / 年以上。相关机构保守预测，今后 4 年非晶合金变压器的需求分别为 10.96 万、17.42 万、22.49 万、28.23 万台，年复合增长率达到 40.72%。

用非晶软磁合金带材是非晶合金变压器产业链中关键制约环节，非晶软磁合金带材从技术难度、工艺复杂性等方面来看，都比非晶合金铁芯和非晶合金变压器都大。非晶合金变压器的大范围推广主要制约于国产非晶软磁合金带材的产量。目前，国内非晶软磁合金生产企业中多数企业生产规模不大，程度不同地存在批量产品质量不够稳定、产品一致性差、性能指标离散较大的问题，其主要原因是有的生产厂家技术装备差、生产工序不全，检测手段落后，

综合研发实力不强。当然，作为新兴的产业，其发展和进步必然有一个动态过程。2013 年国内需求非晶软磁带材达到近 10 万吨，由于国内厂商带材和变压器的生产没有形成规模，国内生产量还不到需求量的一半，因此，导致非晶软磁合金材料和非晶变压器的成本较高，同等规格下非晶变压器的售价为 S9 的 1.5 倍，用户大约要 7-8 年才能通过节省的能耗收回初期增加的投资，虽然国家出台有关非晶变压器生产和使用者税收优惠的政策，但使用者积极性仍然不高，只有在非晶变压器的售价为 S9 的 1.3 倍（非晶铁心价格降为 30 元 / 公斤左右），大约要 3-4 年通过节省的能耗能收回初期增加的投资，用户才会有较强的积极性。因此如何协调非晶软磁合金带材、铁心的生产者同变压器生产者以及变压器使用者之间的关系是非晶软磁合金材料是否能大量应用的关键。目前的应用多偏向于一些特殊要求的场合，如上述问题能得到很好的解决，非晶软磁合金材料和非晶变压器的市场规模才会迅速增长。

总之，非晶、纳米晶软磁合金合金正在成为一类十分重要的、具有市场竞争优势的基础功能材料。随着纳米科学技术和快淬技术的迅速发展，非晶、纳米晶软磁合金材料也在不断进步，不仅现已产业化的薄带产品性能和质量大大提高，而且还在研制开发非晶纳米晶合金粉末及粉末制品、薄膜材料、复合材料等，这些新型纳米材料的研制开发及产业化将对电子变压器行业产生极大的潜在影响。可以预见，非晶、纳米晶材料对我国传统产业改造和高新技术快速发展将发挥越来越重要的作用。

参考文献（略）