

软磁材料应用研究进展*

Research Progresses of the Application of Soft Magnetic Materials

湛永钟¹, 潘燕芳¹, 黄金芳¹, 梁江², 王肖铮²

ZHAN Yong-zhong¹, PAN Yan-fang¹, HUANG Jin-fang¹, LIANG Jiang², WANG Xiao-zheng²

(1. 广西大学材料科学与工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西新高新科技发展有限公司, 广西柳州 545001)

(1. College of Materials Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Xingaoxin Science & Technology Development Co. Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545001, China)

摘要:软磁材料因其饱和磁感应强度高、磁导率高、矫顽力低、损耗低和环境稳定性好等优点,被广泛应用于通信、电源、计算机和各种电子产品等领域。随着信息技术和电子产品数字化的发展,电子仪器设备向着精密化、高效化和节能化方向发展,这就对软磁材料和元件提出了新的要求和挑战。如何取得具有较高饱和磁感应强度和低损耗的软磁材料已成为研究的重点。本文对传统软磁材料与新型软磁材料的研究现状作了总结,并对软磁材料的发展趋势作了展望,为后续软磁材料的发展提供指导方向。

关键词:软磁材料 非晶合金 纳米晶合金 软磁复合材料

中图分类号: TG111.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)05-0467-06

Abstract: Because of its high saturation magnetic induction intensity, high permeability, low coercivity, low loss and high environmental stability, soft magnetic materials are widely used in the fields like communications, power, computers, a variety of electronic products and so on. With the development of information technology and digital electronic products, electronic equipments are developing toward high precision, high efficient and high energy efficient, which puts forward new demands and challenges to soft magnetic materials and components. How to get the soft magnetic materials with high saturation magnetic induction intensity and low loss has become a focus of research. In this paper, the research status of traditional and new soft magnetic materials has been summarized with the hope to provide a direction for further development of the soft magnetic materials.

Key words: soft magnetic materials, amorphous alloys, nanocrystalline alloys, soft magnetic composite materials

收稿日期: 2015-08-13

修回日期: 2015-09-15

作者简介: 湛永钟(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构功能一体化复合材料、铝钛等轻合金结构材料、基于材料热力学及晶体化学的材料设计。

* 国家自然科学基金项目(51361002), 柳州市科学研究与技术开发项目(2013C010602)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0650)资助。

0 软磁材料的发展背景

软磁材料具有磁电转换的特殊功能,是一种广泛应用的功能材料。新的经济形势对软磁材料器件提出了更高的要求,如需要器件向小型化、轻量化、节能

化、高频化、耐高温等方向发展。除了如何提高现有材料的性能和质量外,发展综合性能优异的软磁材料已经成为磁性材料领域发展的重要目标之一。

软磁材料在工业中的应用始于 19 世纪末。人们研发出了铁硅系软磁材料和铁镍系软磁材料的坡莫合金。硅钢在变压器设计中的应用,推进了输变电工程的发展。电子工业的飞速发展对软磁材料的研究起了极大的推动作用,20 世纪 40 年代至 60 年代研制出了软磁合金薄带及软磁铁氧体材料,应用于雷达、电视广播、集成电路的等元件上。进入 70 年代,随着电讯、自动控制、计算机等行业的发展,磁头用软磁合金研制成功。当时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”。该合金对于促进各种具有高性能的新电子产品的问世和应用起了很大作用,也推进了科学技术的发展和进步。

软磁材料的剩磁和矫顽力均很小,在磁场中容易反复磁化,当外磁场去掉后,获得的磁性会大部分或全部丧失,因此已广泛应用于电工设备和电子设备中。现在应用的软磁材料种类繁多,主要有电工纯铁、Fe-Si 合金、Fe-Ni 合金、Fe-Al 合金; Mn-Zn 系、Ni-Zn 系、Mg-Zn 系等铁氧体;非晶、纳米晶软磁复合材料。它们都具有共同的特性:有效磁导率高、电阻率高、饱和磁感应强度 B_s 高、居里温度高、矫顽力 H_c 低、损耗低、磁致伸缩系数低、磁晶各向异性低。

1 传统软磁材料

传统软磁材料的发展经历了从纯铁、硅钢、坡莫合金到软磁铁氧体的过程。

1.1 纯铁

纯铁资源丰富,价格低廉,是使用最早的软磁材料。其磁导率 μ_m 高(3500~20000),饱和磁感应强度高(室温达到 2.16 T)、矫顽力低,具有较好的加工性能。纯铁电阻率较低(室温 $10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$),因此只适合在直流或低频条件下工作,否则在高频交变的涡流损

表 1 电工用纯铁的磁性^[1]

Table 1 Magnetism of electrician's pure iron

磁性等级 Magnetic level	牌号 Marks	H_c ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	μ_m ($10^{-3} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	磁感应强度 Magnetic induction intensity(T)				
				B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}
普级 Ordinary	DT3、DT4、DT5、DT6	≤ 96	≥ 7.50					
高级 High grade	DT3A、DT4A、DT5A、DT6A	≤ 72	≥ 8.75					
特级 Special grade	DT4E、DT6E	≤ 48	≥ 11.30					
超级 Super grade	DT4C、DT56C	≤ 32	≥ 15.00	≥ 1.40	≥ 1.50	≥ 1.62	≥ 1.71	≥ 1.80

注: B_5 、 B_{10} 、 B_{25} 、 B_{50} 、 B_{100} 分别表示磁场强度为 500 A/m,1000 A/m,2500 A/m,5000 A/m,10000 A/m 时的磁感应强度。

Note: B_5 、 B_{10} 、 B_{25} 、 B_{50} and B_{100} represent the magnetic induction intensity of magnetic field strength for 500 A/m,1000 A/m,2500 A/m,5000 A/m and 10000 A/m, respectively.

耗很大。根据纯铁磁性能分为 4 个等级(表 1)。

1.2 硅钢

硅钢片发展已经有 100 多年的历史,在工业生产过程中占有重要地位。19 世纪末 20 世纪初,Hadffeld 等研究出 Fe-Si 合金即硅钢片,成为历史上第一种应用于交变强磁场的软磁材料,硅钢片的研制成功使软磁材料研究迈上新的台阶。硅钢的性能比铁优越,具有电阻率高(是电工纯铁的几倍)、涡流损耗低、饱和磁感应强度高、价格便宜且稳定性好等优点,而且易于批量生产,是目前应用量最大的软磁材料,主要应用于发电机、变压器、继电器、马达、电磁机构等电子器件。根据加工工艺的不同,硅钢片可分为热轧、冷轧无取向、冷轧单取向和电讯用无取向冷轧硅钢片。

1.3 坡莫合金

坡莫合金是指 Fe-Ni 系合金,一般镍含量在 30%~90%。与硅钢片相比,其最大的特点是在弱磁场中具有良好的磁性能。坡莫合金普遍的特点是初始磁导率较高(37.5~125 mH/m),在弱磁场下具有极高磁导率(125~375 mH/m),环境稳定性较高,但是电阻率及矫顽力较低,价格昂贵,生产工艺复杂,因此其应用范围有限^[2]。坡莫合金适用于方波变压器、直流变换器、电流变压器、接地故障断路器、微电机、继电器等电子元件。

1.4 软磁铁氧体

最早由荷兰 Philip 实验室的 Snoek 于 1935 年研制成功的软磁铁氧体材料,解决了纯铁及 Fe-Si 合金等金属软磁材料在高频率下损耗较大的问题。铁氧体成分为具有磁性的 Fe_2O_3 与其它金属氧化物配制烧结而成的复合氧化物软磁材料,常见的软磁铁氧体主要有 MnZn 铁氧体、NiZn 铁氧体和 MgZn 铁氧体 3 大系列^[3]。铁氧体具有较高的电阻率和磁导率,普遍应用于电子元件,如滤波器、热簧继电器、天线中磁芯、电磁感应线、录像磁头以及汽车中的传感器等。

但由于其初始磁导率不高(1000以内),饱和磁化强度较低,导致其磁能存储能力较低,故其在磁能密度要求较高和低频大功率领域的应用受限。

2 新型软磁材料

非晶态合金(亦称金属玻璃)、纳米晶(超微晶)软磁合金、软磁复合材料等均为采用粉末冶金技术制造的新型软磁材料,因具有优异的物理、化学、电学、力学、热学、磁学等性能,其在国内外已越来越受到重视,物理学、冶金学和材料学等各个领域的科研人员对其展开研究。非晶、纳米晶软磁合金和软磁复合材料的制备工艺和设备相对简单,生产周期短,性价比高,因此,这些材料能够在工业生产中迅速发展并服务于经济建设。

2.1 非晶合金软磁材料

1960年,Clement等^[4]在 $10^5 \sim 10^6$ K/s速度下,采用快速冷却技术首次制备出第一块厚度约 $20 \mu\text{m}$ 的 $\text{Au}_{75}\text{Si}_{25}$ 非晶态合金。此后,其它体系非晶合金陆续被合成,掀起了对非晶合金的研究热潮。1971~1973年,Chen等^[5]采用快冷连铸轧辊法成功制备铁基非晶态的薄带和细丝,并首次以商品形式出售,被应用于电力转换(如变压器)等工业领域;1976年,Lieberman等^[6]采用改进型快淬甩带设备成功制备Fe-Ni-P-B非晶条带,使非晶条带的大规模生产成为可能;美国的Allied Signal公司于1979年成功开发非晶合金宽带的平面流铸带技术,并先后推出命名为“Metglas”的Fe基、Co基和Fe-Co基系列非晶合金带材^[7];1990年,日本东北大学的Inoue^[8]在世界上首次成功制备出具有优异软磁性能的大块铁基非晶合金;1995年,Inoue课题组研究出直径为1 mm的Fe-Al-Ga-P-B-C体系;同年日本东北大学的井上明久研究室研制出厚4 mm、外径10 mm、内径6 mm的环状 $\text{Fe}_{70}\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{9.65}\text{C}_{5.75}\text{B}_{1.6}\text{Si}_3$ 非晶合金^[9];1997年,Inoue小组获得直径为75 mm合金体系,这是目前为止世界上相关合金体系中的最大尺寸^[10];进入21世纪以来,关于非晶合金的研究发展迅猛。虽然国内对非晶合金的研究起步晚,但仍取得许多长足的进展,例如Chen等^[11]研制出最大尺寸达16 mm的 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 铁基非晶合金。

非晶态材料的原子排列是短程有序长程无序的,理论上是磁晶各向同性的,这对于合金获得低矫顽力和高磁导率比较有利。在化学成分上,非晶态合金由两类元素组成:一类是铁磁性元素,如铁、镍、或者它们的组合,由其产生磁性;另一类是类金属,也称玻璃化元素,如硅、硼、碳等,它们使合金的熔点比纯金属

降低很多,更容易形成非晶。我国的非晶材料研究始于1976年,从“六五”开始连续5个五年计划,国家科委均将纳米晶、非晶合金的研究开发和产业化列入重大科技攻关课题。经过近40年的发展,我国的非晶材料研究取得了丰硕的成果,目前国内已实现非晶、纳米晶合金带材及其制品的规模化生产,且带材的宽度越来越宽,其中铁基非晶带材的生产能力达到3000 t/a,纳米晶带材的年产量超过500 t^[12]。

目前所研究的非晶合金软磁材料中,按所含铁磁性元素的不同主要分为铁基、镍基和钴基3类^[13]。

2.1.1 铁基非晶合金软磁材料

铁基非晶合金软磁材料的主要成分为Fe-Si-B,特点是磁感应强度高(饱和磁感应强度为1.4~1.7 T),磁导率、激磁电流和铁损等性能优于硅钢片,价格便宜。其应用频率范围为工频至10 kHz,是制备变压器、电抗器、功率因素校正器的理想材料。Makino等^[14]在此基础上开发出成分为 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 的合金,该合金的矫顽力为0.8 A/m,饱和磁感应强度达到1.51 T,且具有很高的非晶形成能力和稳定性。邱克强等^[15]对非晶合金的非晶形成能力和力学性能进行了深入的研究,发现在 $\text{Fe}_{48-x}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2\text{M}$ ($\text{M}=\text{Nb}, \text{Ni}$)_($x=0,1,2,3$)中,用2%的Ni和2%的Nb替代Fe时,合金具有最高的非晶形成能力,且Ni和Nb两种元素的添加提高了合金的力学性能。

2.1.2 镍基非晶合金软磁材料

镍基非晶合金具有高饱和磁感应强度、高磁导率和低矫顽力,而且还具有优异的高频磁性能,因此被认为是具有潜力的工程材料之一。1999年,Leonhardt等^[16]利用注射成型的方法成功制备出直径为1 mm的 $\text{Ni}_{59.5}\text{Nb}_{40.5}$ 全非晶样品,引起轰动效应,从而引发了近年的镍基非晶研究热潮。2003年研制出的Ni-Nb-Sn合金,其最大屈服强度高达3.8 GPa,硬度高达HV1280,耐腐蚀性和软磁性能都很高,机械性能良好^[17],是迄今最强韧的镍基非晶合金。2007年,Chang等^[18]利用Ni、Nb、Zr 3种原子的相互作用,在Ni-Nb合金基础上引入Zr原子,研究发现,添加不同量的Zr对Ni-Nb的非晶形成能力有明显的促进作用,并成功制备出直径为2 mm的 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Zr}_{10}$ 非晶圆棒。虽然镍基非晶合金在综合性能上优于其他非晶合金材料,但其发展时间不长,在研发过程中遇到了很多理论及工艺上的问题,这些问题都有待进一步深化。

2.1.3 钴基非晶软磁合金

钴基非晶合金因饱和磁致伸缩系数接近于0,所以它具有极高的起始磁导率和最大磁导率,很低的矫

顽力和高频损耗。主要用于传感器材料,如图书防窃磁条。该合金由于含大量的钴而价格很高。Quintana 等^[19,20]研究了钴基非晶软磁合金 vietrovac6025 的起始交流磁导率与等温退火时间的关系,发现在 693 K 或 716 K 时退火约 15 min 可显著提高初始磁导率,但是当退火时间延长至 40 min 或 60 min 以后,初始磁导率下降。实验结果表明,随着保温时间延长,非晶基体会晶化,生成较多的纳米晶粒,使得对畴壁的钉扎中心增多,从而降低初始磁导率。Kucuk 等^[21]研究发现,用 $\text{Mo}_{0.5}\text{W}_{0.5}$ 代替 $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Nb}_4$ 中的 Nb 不能提高合金的非晶形成能力和软磁性能;董振江等^[22]在研究 $[(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{0.72}\text{B}_{0.192}\text{Si}_{0.048}\text{Nb}_{0.04}]_{98}\text{Dy}_2$ 时,发现当 Fe : Co 比例为 5 : 5 时,合金的过冷液相区最大;稀土元素 Dy 的加入提高了合金的非晶形成能力,但降低了其饱和磁化强度。

2.2 纳米晶软磁合金

1988 年, Yoshizawa 等^[23]发明了性能优于非晶合金的 FeSiBNbCu 纳米软磁材料。研究发现,当晶粒尺寸 D 减小到一定的量级后, H_c 与 D 的六次方成正比,即 $H_c \propto D^6$, 软磁材料研究由此迈上了一个新的台阶,即为了达到最好的纳米量级综合性能,软磁材料的晶粒尺寸 D 应尽可能地小。纳米晶因为不存在非晶态合金的老化问题,所以很快得到广泛的应用。非晶、纳米晶材料与传统的材料不同,其突出特点是能够对其原子级的组织结构进行人工控制,从而获得所需的软磁性能。

纳米晶软磁合金是指在非晶合金的基础上通过热处理获得的纳米晶结构的软磁合金,具有更加优异的软磁性能。相关研究主要以对铁基纳米晶合金材料的研究为主。自 20 世纪 80 年代末采用 Mechanical Alloying(简称 MA)技术第一次合成纳米微晶结构的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 以来,采用该项技术制备各种纳米晶磁性材料的研究受到各国科研工作者的重视。1988 年, Yoshizawa 等^[24]首先发现,在 Fe-Si-B 非晶合金的基体中加入少量 Cu 和过渡族元素 Nb、Zr、Hf、Ta,在一定温度晶化退火后,可获得性能优异的具有体心立方(bcc)结构的 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 相和剩余非晶相组成的纳米晶软磁合金。

1990 年, Suzuki 等^[25]研究出 FeMB ($M = \text{Zr}$ 、Nb、Hf 等)合金,其典型成分为 $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_7\text{B}_3$, 性能为 $B_s = 1.63 \text{ T}$, $\mu_e(1 \text{ kHz}) = 2.2 \times 10^4$, $H_c = 5.8 \text{ A/m}$, 磁致伸缩系数 $\lambda_s = -1.1 \times 10^{-6}$ 。 $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_7\text{B}_3$ 合金最大的优势为 B_s 值较高,且 λ_s 值极小(趋近于 0),这显著降低其应力敏感性,但在矫顽力和铁损值方面, $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_7\text{B}_3$ 合金还是存在一定缺陷。1998 年,

Willard 等^[26]在 Nanoperm 合金的基础上,通过用 Co 部分替代 Fe 得到全新的 $(\text{Fe}, \text{Co})\text{-M-B}$ ($M = \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}$)铁基纳米晶合金。Co 的添加导致矫顽力升高,同时提高了居里温度,其工作温度可高达 600°C ,可应用于 550°C 高温,不足之处在于成本也随之提高。2008 年, Ma 等^[27]对 $(\text{Fe}_{0.65}\text{Co}_{0.35})_{78.4}\text{Si}_9\text{B}_9\text{Nb}_{2.6}\text{Cu}_1$ 合金的最佳退火温度范围进行研究,发现当退火温度 T_a 为 $460^\circ\text{C} \leq T_a \leq 610^\circ\text{C}$ 时,晶化体积分数(VFC)随温度升高而增大,合金饱和磁感应强度 B_s 亦随之增高;当 $T_a = 640^\circ\text{C}$ 时,硼化物相形成,饱和磁感应强度开始下降。Khajepour 等^[28]通过高能球磨方法获得成分为 $\text{Fe}_{50}(\text{Co}_{50})\text{-}6.5 \text{ wt}\%$ Si 的纳米晶,其晶粒大小达 12 nm,磁化强度达 188 emu/g。

铁基纳米晶合金被广泛应用于开关电源变压器、互感器等领域。由于纳米晶合金的高导磁率、高饱和磁感及其灵活可调的频率特性等优势,其在抗共模干扰滤波器等领域越来越受重视。国外已经存在可以大批量供应的铁基纳米晶合金共模电感铁芯。

2.3 软磁复合材料

软磁复合材料(Soft Magnetic Composite Materials, SMCs)是在铁磁性粉末颗粒表面包裹绝缘介质后,采用粉末冶金工艺压制所需形状得到的体材料^[29],具有饱和磁感强度高、电阻率大的特点,在 kHz~MHz 范围具有低功率损耗。最早使用的 SMCs 是铁-树脂材料,因为树脂遇热软化,所以其热处理温度低,强度也低。在铁粉颗粒表面涂以 10~100 nm 厚的磷酸盐覆盖膜,可实现树脂和磷化膜的双层绝缘包覆,这种材料具有较好的磁学性能和机械性能。Rebyeyrat 等^[30]研究发现,磷酸盐涂层对铁粉表面氧化起到一定的抑制作用。Ishihara 等^[31]发现由金属氟化物构成的绝缘覆膜扩散率低,高温绝缘性好。Taghvaei 等^[32]研究表明,磷化物-硅烷双层覆膜及采用溶胶-凝胶(Sol-gel)法制备的 MgO 覆膜,能使材料的热处理温度分别达到 500°C 和 600°C 。我国中南大学、南昌大学、北京科技大学、兵器科学院等单位也纷纷开展以铁基纳米软磁材料为基础的 SMCs 研究^[12]。

纳米晶软磁材料的高强度使冷压成型很难获得高填充度。树脂或无机介电材料导致饱和磁感强度降低是 SMCs 存在的主要问题之一。在 SMCs 的制备过程中,存在 3 个矛盾问题:(1)为尽可能保证压坯密度而采用较大的成型压力导致内应力的增大;(2)为充分消除内应力而采用高退火温度易使有机物分解;(3)较大的致密度和填充密度易使电阻率下降,因此不得不在电阻率、内应力和压坯密度三者之间作出

选择性牺牲。

3 发展趋势

电子器件日益向小型化、高性能、高速化方向发展,因此对高频电感元件提出新的要求,并进一步要求改进和提高作为电感元件的铁氧体磁芯的性能,这对软磁材料及磁芯元件的要求就更高。良好的软磁材料应满足下述基本要求^[33]:(1)为了提高功能效率,初始磁导率和最大磁导率要高;(2)为了省资源,便于轻薄短小,迅速响应外磁场极性的反转,剩余磁通密度要低,饱和磁感应强度要高;(3)铁损低,提高功能效率;(4)矫顽力小,提高高频磁性能;(5)电阻率高,提高高频性能,减少涡流损失;(6)磁致伸缩系数低,降低噪声;(7)作为基本特性的磁各向异性系数 K 要低,在各个结晶方向都容易磁化。

从近几年各国软磁材料生产量的变化可以看出,世界软磁材料的生产格局已经发生了很大的变化。产量仍将有较大幅度的增长,但是竞争将会变得更为激烈。因此,如何降低成本、提高效率、提高产品档次及市场竞争力将成为竞争的关键。

目前需求量最大及对性能改进要求最为迫切的材料是高频低功率损耗铁氧体材料和高磁导率铁氧体材料。高频低功率损耗铁氧体材料主要用于各种高频小型化的开关电源及显示器、变压器等。高磁导率铁氧体材料则主要用于宽带变压器、脉冲变压器用抗电磁波干扰器件等。

从根本上来说,材料的微观结构决定其宏观性质,因此应以磁性量子理论为指导,着手分析并改进材料的微观结构,以改善其宏观磁学性能。目前,对软磁材料的研究已由粗晶转变到纳米晶合金材料的制备及其成分设计。纳米材料的研究及材料设计科学正是基于这种宏观磁学性能思想而发展起来的,即从第一原理出发来进行材料设计,在磁性材料方面,随着现代科学技术的发展,量子理论对自旋有序材料的成功解释及量子理论与微磁学的结合,逐渐实现高饱和磁感应强度和低损耗软磁的目标。

纳米科技给传统磁性产业带来跨越式的发展。利用纳米材料的优异性能和特殊结构来全面提高传统软磁材料的综合性能的优点,是在不用对现有设备进行大的技术改造的前提下,就可以达到全面提高企业传统材料的技术含量及质量等级的目的。

总之,软磁材料的发展将沿着高饱和磁感应强度、高磁导率、高居里温度、低损耗、低矫顽力和高频化、小型化、薄型化方向发展。将软磁铁氧体材料进一步向高频、高磁导率和低损耗发展。非晶、纳米晶

软磁合金将研制开发新型、功能性的非晶纳米晶复合材料,拓宽非晶纳米晶复合材料的应用领域。

参考文献:

- [1] 陈玉安,王必本,廖其龙.现代功能材料[M].重庆:重庆大学出版社,2008.
Chen Y A, Wang B B, Liao Q L. The Modern Functional Material[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [2] 徐泽玮.电源技术中应用的软磁材料发展回顾和分析(一)[J].金属功能材料,2001,8(5):56-58.
Xu Z W. The review and analysis on development of soft magnetic materials applied in power supply technique(1)[J]. Metallic Functional Materials, 2001, 8(5): 56-58.
- [3] 赵义恒,张药西.软磁材料的技术进展及选择[J].电子元件应用,2009,11(3):75-76.
Zhao Y H, Zhang Y X. Progress of the technology of soft magnetic material choice[J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 11(3): 75-76.
- [4] Clement W, Willens R H, Duwez P. Non-crystalline structure in solidified goldsilicon alloys[J]. Nature, 1960, 187: 869-870.
- [5] Chen H S, Miller C E. A rapid quenching technique for the preparation of thin uniform films of amorphous solids[J]. Review of Scientific Instruments, 1970, 41: 1237-1238.
- [6] Liebermann H H, Graham C D. Production of alloy ribbons and effects of apparatus on ribbon dimensions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1976, 12: 921-923.
- [7] 赵占奎,邓娜,咎朝,等.高性能软磁材料的研究进展[J],长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(5):521-528.
Zhao Z K, Deng N, Zan Z, et al. Progress in research of high performance soft magnetic materials[J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 33(5): 521-528.
- [8] Inoue A, Shinohara Y, Cook J S. Thermal and magnetic properties of bulk Fe-based glassy alloys prepared by copper mold casting[J]. Materials Transactions, JIM, 1995, 36(12): 1427-1433.
- [9] Inoue A, Zhang T, Takeuchi A, et al. Hard magnetic bulk amorphous Nd-Fe-Al alloys of 12 mm in diameter bade by suction casting [J]. Materials Transactions, JIM, 1996, 37: 636-639.
- [10] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Mater, 2000, 48: 279-306.
- [11] Shen J, Chen Q J, Sun J F, et al. Exceptionally high glass-forming ability of an FeCoCrMoCBy alloy[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(15): 151907. 1-3.
- [12] 周磊.高Bs、低损耗软磁材料研究[D].包头:内蒙古科技大学,2007.
Zhou L. The Research of High Saturation Magnetic Flux Density Bs, Low Loss Soft Magnetic[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2007.

- 2007.
- [13] 曹玲飞,汪明朴,李周,等. Fe 基纳米晶软磁材料热稳定性的研究[J]. 金属功能材料, 2005, 12(1): 27-29.
Cao L F, Wang M P, Li Z, et al. Study on thermal stability of Fe-based nanocrystalline soft magnetic materials[J]. *Metallic Functional Materials*, 2005, 12(1): 27-29.
- [14] Makino A, Inoue A, Masumoto T. Nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B(M=Zr, Hf, Nb) alloys produced by crystallization of amorphous phase [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1995, 36: 924-938.
- [15] 邱克强,塔娜,索忠源,等. 铁基非晶合金的形成能力与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 614-618.
Qiu K Q, Ta N, Suo Z Y, et al. Glass forming ability and mechanical properties of Fe-based amorphous alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(4): 614-618.
- [16] Leonhardt M, Löser W, Lindenkreuz H G. Solidification kinetics and phase formation of undercooled eutectic Ni-Nb melts[J]. *Acta Materialia*, 1999, 47(10): 2961-2968.
- [17] Choi-Yim H, Xu D, Johnson W L. Ni-based bulk metallic glass formation in the Ni-Nb-Sn and Ni-Nb-Sn-X (X=B, Fe, Cu) alloy systems[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(7): 1030-1032.
- [18] Chang H J, Park E S, Jung Y S, et al. The effect of Zr addition in glass forming ability of Ni-Nb alloy system [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 434: 156-159.
- [19] Quintana P, Amano E, Valenzuela R, et al. Effects of nanocrystallization upon the soft magnetic properties of Co-based amorphous alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(10): 6940-6942.
- [20] Quintana P, Amano E, Valenzuela R. Effects of crystallization on the magnetization dynamics of Vitrovac amorphous ribbons[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1994, 181: 978-981.
- [21] Kucuk I, Aykol M, Uzun O. Effect of (Mo, W) substitution for Nb on glass forming ability and magnetic properties of Fe-Co-based bulk amorphous alloys fabricated by centrifugal casting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(5): 2034-2037.
- [22] 董振江,杨元政,赖江凌,等. 微量稀土 Dy 及 Fe/Co 比例对 FeCoBSiNb 块体非晶合金玻璃形成能力和磁性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(22): 5-8.
Dong Z J, Yang Y Z, Lai J L, et al. Effects of Dy addition and Fe/Co ratio on glass forming ability and magnetic property of FeCoBSiNb bulk glass alloy[J]. *Material & Heat Treatment*, 2008, 37(22): 5-8.
- [23] 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.
- [24] Yoshizawa Y, Yamauchi K. Effects of magnetic-field annealing on magnetic-properties in ultrafine crystalline Fe-Cu-Nb-Si-B alloys[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, 25(5): 3324-3326.
- [25] Suzuki K, Kataoka N, Inoue A, et al. High saturation magnetization and soft magnetic properties of bcc Fe-Zr-B alloys with ultrafine grain structure[J]. *Materials Transactions, JIM*, 1990, 31(8): 743-746.
- [26] Willard M A, Laughlin D E, McHenry M E, et al. Structure and magnetic properties of $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(12): 6773-6777.
- [27] Ma X H, Wang Z, Han X T, et al. Microstructure and high-temperature soft magnetic properties of nanocrystalline $(\text{Fe}_{0.65}\text{Co}_{0.35})_{78.4}\text{Si}_9\text{B}_9\text{Nb}_{2.6}\text{Cu}_1$ alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 448(1-2): 216-220.
- [28] Khajepour M, Sharafi S. Structural and magnetic properties of nanostructured $\text{Fe}_{50}(\text{Co}_{50})-6.5 \text{ wt}\% \text{ Si}$ powder prepared by high energy ball milling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(29): 7729-7737.
- [29] Shokrollahi H, Janghorban K. Soft magnetic composition materials (SMCs)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189: 1-12.
- [30] Rebyeirat S, Grosseau-Poussard J L, Renault P O, et al. Structural characterisation of phosphated α -iron oxidised at 400°C [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 161: 144-149.
- [31] Ishihara C, Ishii A, Asaka K. Effects of resin, insulation treatment, and iron powder on the magnetic, electrical, and mechanical properties of powder cores according the frequency range that is used[J]. *Hitachi Powdered Metals Technical Report*, 2002, 12(1): 39-47.
- [32] Taghvaei A H, Shokrollahi H, Janghorban K. Properties of iron-based soft magnetic composite with iron phosphate-silane insulation coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481(1): 681-686.
- [33] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Tian M B. *Magnetic Material*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

(责任编辑: 陆雁)