

非晶纳米晶合金 及其软磁性能研究

刘海顺 卢爱红 杨卫明 胡苗苗 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

非晶纳米晶合金及其软磁性能研究

刘海顺 卢爱红 编著
杨卫明 胡苗苗

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了磁性材料的发展与趋势,系统探讨了非晶与纳米晶合金的形成与结构,研究了与非晶和纳米晶合金相关的磁学理论和磁性测量技术;重点研究了非晶和纳米晶合金的磁学特征,系统讨论了结构的演变、元素替代、退火及外界条件对软磁性能的影响;并通过新型纳米晶软磁合金研制进行了深入研究,总结展望了非晶态和纳米晶软磁合金的应用。

本书可供从事磁学和磁性材料领域的研究和工程技术人员参考,也可作为物理类、材料类及相关专业大学生的参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

非晶纳米晶合金及其软磁性能研究/刘海顺等编著.

徐州:中国矿业大学出版社,2009.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0327 - 4

I. 非… II. 刘… III. 非晶态合金—纳米材料:磁性材料—研究 IV. TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 196673 号

书 名 非晶纳米晶合金及其软磁性能研究
编 著 刘海顺 卢爱红 杨卫明 胡苗苗
责任编辑 章 毅 付继娟
责任校对 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 徐州中矿大印发科技有限公司排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 188 千字
版次印次 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

磁性材料是现代信息技术及电力电子领域重要的物质基础。近年来,随着非晶和纳米晶软磁合金的出现,磁性材料在降低成本、提高效率、促进电子设备的小型化方面的作用越来越明显,并在电力电子、信息、能源、交通等领域得到越来越广泛的应用,关于非晶纳米晶软磁材料的理论研究也日益增多。然而,国内目前还没有见到非晶和纳米晶软磁材料方面的专著。

本书从非晶与纳米晶软磁合金的形成出发,从理论和技术两个方面讨论了其磁学理论基础、软磁性能及影响因素。全书共分七章。第一章简述了磁性材料的发展历史与趋势,给出了非晶与纳米晶软磁材料的研究路线。第二章讨论了非晶与纳米晶合金的结构,非晶形成与晶化的热力学和动力学及其制备技术。第三章对非晶与纳米晶合金的磁学理论进行了系统的讨论与总结,包括铁磁性理论,非晶和纳米晶合金的随机各向异性模型及其应用。第四章研究了磁性材料静态和动态磁学量的测量技术。第五章总结了非晶与纳米晶合金的基本磁学特征,对其种类、磁学性能进行了系统而深入的探讨,研究了其结构的演变、元素替代、退火及外界条件对软磁性能的影响。第六章通过新型纳米晶软磁合金的研制,系统研究了 Al 含量、外加磁场、退火条件等对其磁导率、涡流及磁损耗等的影响。第七章总结、展望了非晶与纳米晶软磁合金的应用。

本书把相应合金的材料制备、物理基础、磁性测量、材料应用等内容紧密联系起来,通过分析、比较非晶与纳米晶合金的形成、结构与性能,研究与之相关的磁学理论,探讨它们具有优异磁学或

力学性能的原因,为研制性能更加优异的软磁材料打好坚实的基础。

本书力争做到内容丰富,系统全面,论述深入浅出,图文并茂,为磁学和磁性材料领域研究人员和工程技术人员提供有价值的参考,也可作为物理类、材料类及相关专业大学生的参考书。

本书由刘海顺、卢爱红任主编,负责全书的统稿。本书在写作过程中,得到了南京大学都有为院士在纳米晶软磁方面有益而高屋建瓴的指导;同时,还得到了中国矿业大学出版社、理学院及科技处多位领导和老师的理解和支持,在此一并表示衷心感谢。

本书得到了国家重点研究发展计划(973)(2010CB226800)和煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金(08KF06)的资助。

在本书的编著过程中,参考了国内外大量研究者的最新学术成果,在此,对前人的辛勤工作表示敬意和感谢。

由于编著者学术视野和学术水平的局限,本书难免会有错误和不妥之处,敬请广大读者,特别是同仁批评指正。

谨以此书献给中国矿业大学百年校庆。

作 者

2009年9月于中国矿业大学

目 录

1 磁性材料的发展历史	1
1.1 磁性材料的发展历史	1
1.2 软磁材料概述	2
1.3 非晶与纳米晶软磁材料的研究思路	10
参考文献	11
2 非晶态与纳米晶合金的形成与结构	14
2.1 非晶态合金的结构与定义	14
2.2 非晶态形成的热力学与动力学	24
2.3 非晶态与纳米晶合金的制备技术	37
2.4 块体非晶	42
2.5 非晶态合金的晶化	48
2.6 晶粒尺寸的计算	52
参考文献	54
3 非晶态与纳米晶合金的磁学理论	61
3.1 铁磁性理论	61
3.2 磁化过程	73
3.3 非晶的随机各向异性模型	82
3.4 纳米晶合金的随机各向异性模型	84
3.5 磁学单位制及相关问题	100
参考文献	108

4 磁性的测量技术	112
4.1 静态磁学量的测量	112
4.2 动态磁性的测量	124
4.3 软磁材料损耗的测量	132
参考文献	134
5 非晶与纳米晶合金的磁性	136
5.1 非晶纳米晶合金的基本磁特征	136
5.2 非晶态合金的磁性能	138
5.3 纳米晶软磁合金	152
5.4 影响纳米晶软磁合金性能的因素	176
参考文献	179
6 新型纳米晶合金的研究	189
6.1 样品制备	190
6.2 非晶态样品初始磁导率随 Al 含量的变化	193
6.3 磁导率谱及 Al 替代的影响	194
6.4 外加磁场幅值的影响	200
6.5 退火条件的影响	203
6.6 关于涡流	205
6.7 关于磁损耗	206
参考文献	209
7 非晶态与纳米晶软磁合金的应用	213
7.1 非晶态合金的应用	213
7.2 纳米晶合金	219
参考文献	225

1 软磁材料的发展历史与趋势

1.1 磁性材料的发展历史

磁性材料是历史悠久、应用广泛、种类繁多、与时俱进的一类功能材料^[1]。我国在远古时代就对磁性有一定的认识,古时的磁石为天然的磁铁矿,其主要成分为 Fe_3O_4 。磁性材料大致经历了以下几个历史阶段:铁器时代,意味着金属磁性材料的开端;18 世纪,金属镍、钴相继被提炼成功,开始了 3d 过渡族金属磁性材料生产与原始应用的阶段;20 世纪初期(1900~1932 年), FeSi 、 FeNi 、 FeCoNi 磁性合金人工制备成功并得到广泛应用,3d 过渡族金属磁性材料进入鼎盛时期;20 世纪 50 年代,3d 过渡族的磁性氧化物(铁氧体)逐步进入无线电、雷达等工业领域,磁性材料进入到铁氧体的历史阶段;1967 年, SmCo 合金问世,磁性材料进入到稀土—3d 过渡族化合物领域;1983 年,高磁能积的钕铁硼(Nd_2FeB)稀土永磁材料研制成功。 TbFe_2 巨磁致伸缩材料与稀土磁光材料的问世更丰富了稀土—3d 过渡族化合物磁性材料的内涵。1972 年的非晶磁性材料与 1988 年的纳米微晶材料的出现,磁性材料更添新风采。1988 年,磁电阻效应的发现拉开了自旋电子学的序幕。从 20 世纪后期至今,磁性材料进入了前所未有的兴旺发达时期,成为信息时代重要的基础性材料之一。

磁性材料同时也一直是科学研究的重要课题,1975~2005 年间,以磁性材料为关键词所发表的论文占 SCI 论文总数的百分比如图 1-1 所示。

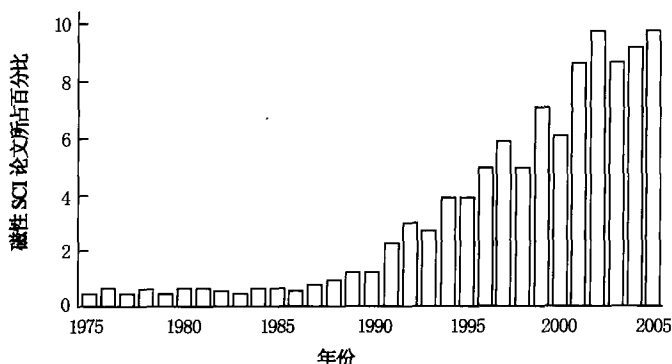


图 1-1 1975 年至 2005 年 10 月磁性材料的 SCI 论文所占百分比^[1]

很显然, 1990 年之后, 磁性材料越来越成为科学研究的重要课题。

1.2 软磁材料概述

软磁材料是磁性材料的重要组成部分, 也是应用广泛、种类最多的一类磁性材料。良好的软磁材料应具备以下特点: 高的饱和磁感应强度; 低的高频损耗; 高的初始磁导率; 高的居里温度和良好的温度稳定性; 环境稳定性好, 对应力不敏感。下面对几种常见的软磁材料进行比较。

1.2.1 传统软磁材料

(1) 纯铁

最早应用的一种经典的人工软磁材料, 实际上是一种含碳量极低、含铁量达 99.95% 以上的软钢。该材料有非常高的饱和磁通密度和较好的机械强度, 工业纯铁的初始磁导率约为 200~500, 最大磁导率约为 3 500~20 000^[18]。但工业纯铁只能在直流

或低频磁场下工作;在交变磁场下,尤其是在高频交变磁场下工作时,涡流损耗大,不适宜在高频下作为励磁元件使用。

(2) 硅钢

在纯铁中加入少量的硅(一般含硅量为 0.5%~4.5%)形成的铁硅系软磁合金。硅的加入提高了铁的电阻率和最大磁导率,降低了矫顽力、铁芯损耗(铁损)。该类铁芯具有高的饱和磁感应强度,较好的磁电性能,机械应力影响小,又易于大批生产,价格便宜,是软磁材料中产量和使用量最大的材料。特别是在低频、大功率条件下最为适用,但在高频率范围内其有效磁导率低,高频下损耗急剧增加,一般使用频率不超过 400 Hz。

(3) 铁氧体

磁性的三氧化二铁与其他一种或多种金属氧化物的复合氧化物(或正铁酸盐)。铁氧体的电阻率比金属磁性材料大得多,具有较高的介电性能,在高频时具有较高的磁导率(比金属磁性材料高),因而,铁氧体已成为高频弱电领域用途广泛的非金属磁性材料。但是,一般铁氧体的初始磁导率在 1 000 以内,同时铁氧体单位体积中储存的磁能较低,饱和磁化强度也较低,因而限制了它在要求较高磁能密度的低频强电和大功率领域的应用。

(4) 坡莫合金

镍含量在 30%~90%的铁镍系合金,也是应用广泛的软磁合金。坡莫合金具有较高的初始磁导率和低的矫顽力(H_c),磁性能稳定,具有面心立方晶体结构的坡莫合金具有很好的塑性,可以加工成 1 μm 的超薄带及各种使用形态,磁导率可以比硅钢高几十倍,铁损也比硅钢低 2~3 倍;但饱和磁感应强度(B_s)不够高,频率大于 10 kHz 时,损耗和有效磁导率不理想,价格较昂贵,加工和热处理复杂。

1.2.2 新型软磁材料

非晶态磁性材料是磁性材料发展史上重要的里程碑,它超越

了传统晶态软磁材料的范畴。从晶态到非晶态和纳米微晶态,大大地拓宽了软磁材料研究、生产与应用的领域。

(1) 非晶态软磁合金

20 世纪 70 年代问世的新型软磁材料,通常通过超急凝固技术制备,从钢液到薄带成品一次成型,比一般冷轧金属薄带制造工艺减少了许多中间工序。在超急凝固时原子来不及有序排列结晶,得到的固态合金原子排列组合具有短程有序、长程无序特点,没有晶态合金的晶粒、晶界存在,具有与传统材料不同的性能特点,如优异的软磁性能,很好的机械性能,高的耐蚀性、耐磨性、强度、硬度和韧性,高电阻率等。非晶态合金通常可归纳为三大类:① 过渡金属—类金属非晶合金, B、C、Si、P 等类金属加入过渡金属中更有利于生成非晶态合金。例如铁基非晶态合金, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 等,具有较高的饱和磁感应强度;铁镍基非晶态合金,如 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$, $\text{Fe}_{48}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$, 具有较高的磁导率;钴基非晶态合金,如 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5(\text{Si},\text{B})_{25}$ 、 $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5(\text{Si},\text{B})_{27}$ 等适宜作为高频开关电源变压器。② 稀土—过渡族非晶合金,如 TbFeCo 、 GdTbFe 等,可作磁光薄膜材料。③ 过渡金属—过渡金属非晶态合金,如 FeZr 、 CoZr 等,添加一定量的类金属元素可形成非晶态铁磁性合金,如铁镍基非晶铁芯具有中等偏低的饱和磁感应强度 ($B_s=0.75\text{ T}$),高磁导率,低矫顽力,耐磨耐蚀,稳定性好。常用于取代坡莫合金铁芯作为漏电开关中的零序电流互感器铁芯。钴基非晶合金在所有的非晶合金铁芯中具有最高的磁导率,低的矫顽力,在宽的频率范围内有低损耗,接近于零的饱和磁致伸缩系数,对应力不敏感,同时具有中等偏低的饱和磁感应强度 ($B_s=0.65\text{ T}$),但价格昂贵,可用于取代坡莫合金铁芯和铁氧体铁芯制作高频变压器。由于其性能优异,生产工艺简单,20 世纪 80 年代以来逐渐成为国内外材料科学界研究开发和应用的重点。

(2) 纳米晶软磁合金

20 世纪 80 年代末期,材料学者又在非晶化基础上研制出纳米晶软磁合金材料,该材料具有更优异的软磁性能。目前,非晶纳米晶软磁合金材料家族主要有铁基、铁镍基、钴基非晶和铁基纳米晶合金等 4 大类,非晶纳米晶合金材料用做磁性器件可以有效促进其小型化,与传统的软磁材料相比,具有明显的优势。1988 年,最先由 Yoshizawa 将含有 Cu、Nb 的 Fe-Si-B 非晶合金条带退火,得到非晶基体上均匀分布着无规取向的粒径为 10~15 nm 的 α -Fe(Si)晶粒。这种纳米晶软磁合金,后注册为 Finemet。目前,已经有多种纳米晶软磁合金面世,Fe-Si-B、Fe-M-B(M=Zr、Hf、Hb)和 Fe-Ni-P-B 系都是当前性能优异的软磁体系。Yoshizawa 等报道的 Fe-Si-B-Cu-Nb 纳米晶软磁合金,具有优异软磁性能;Suzuki 等报道的 Fe-M-B(M=Zr、Hf 和 Nb)非晶合金具有高磁导率和高饱和磁感应强度($B_s=1.5$ T);Fujii 等通过在 Fe-P-C 非晶合金中添加少量 Cu,将非晶在晶化温度以上退火后,组织为纳米尺寸的 bcc-Fe 晶粒散布在非晶基底中,软磁性能较优异。

典型纳米晶合金具有优异的综合磁性能,高的磁导率($\mu_0 \geq 100\,000$,硅钢和 FeSiAl 材料具有高的饱和磁感应值,但其有效磁导率值低,特别是在高频范围内; $\mu_m \geq 1\,000\,000$),高的饱和磁感($B_s=1.2$ T),低的损耗($P_{0.2/50\text{ kHz}}=15\text{ W/kg}$),可取代目前市场上所有的软磁材料,纳米晶合金的磁导率、矫顽力接近晶态高坡莫合金及钴基非晶,且饱和磁感 B_s 与中镍坡莫合金相当,热处理工艺简单,是一种理想的廉价高性能软磁材料;虽然纳米晶合金的 B_s 值低于铁基非晶和硅钢,但其在高磁感下的高频损耗远低于它们,并具有更好的耐蚀性和磁稳定性。纳米晶合金与铁氧体相比,在低于 50 kHz 时,损耗更低,同时,工作磁感提高了 2~3 倍,磁芯体积可缩小一半以上。

(3) 块体非晶软磁合金

1988 年后,块体非晶的研究获得了较大的突破^[3]。1993 年,

Diefenbach^[4]利用落管技术得到了 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 非晶;1995 年, Inoue 研究小组^[5]率先在 Fe 元素为主的 Fe-Al-Ga-P-B-C 体系获得了直径为 1 mm 的非晶柱体,随后,随着工艺的改进,非晶试样柱体的直径达到了 3 mm^[6]。其后,新的块体铁基非晶合金系列不断被发现,如 $(\text{Fe}, \text{Co})-(\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb})-\text{B}$ ^[7], Fe-Co-Ln-B ^[8], $\text{Fe}(\text{Nb}, \text{Mo})-(\text{Al}, \text{Ga})-(\text{P}, \text{B}, \text{C})$ ^[9] 等;1999 年,Shen 和 Schwarz^[10]在 $\text{Fe}(\text{Co}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ga}, \text{Sb})-\text{P-B-C}$ 体系内获得了直径为 4 mm 的非晶柱体;2000 年,Inoue 等在 $\text{Fe-Co}(\text{Zr}, \text{Nb}, \text{Ta})-(\text{Mo}, \text{W})-\text{B}$ 体系内用铜模铸造法获得了直径为 6 mm 的非晶柱体^[11]。

典型的软磁性块体非晶合金主要有下面几种^[12]: $\text{Fe}(\text{Al}, \text{Ga})-(\text{P}, \text{C}, \text{B}, \text{Si}, \text{Ge})-(\text{Nb}, \text{Mo}, \text{Cr})$ ^[13]、 $\text{Fe}(\text{Co}, \text{Ni})-(\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Mo}, \text{W})-\text{B}$ ^[7,14]、 Fe-Co-Ln-B ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Dy}$)^[15]、 $\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Mo}, \text{Nb})-(\text{P}, \text{B}, \text{C})$ ^[16] 以及 $(\text{Fe}, \text{Si}, \text{B})-(\text{Zr}, \text{Nb})$ ^[17]。这些铁基块体非晶合金都具有良好的软磁性能,其饱和磁化强度为 0.8~1.5 T,矫顽力为 1~6 $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在 1 kHz,磁导率为 7 000~25 000 时具有很好的软磁特性。

非晶材料具有优良的力学性能,如 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 非晶的断裂强度达 3 629 MPa;组成为 $\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{31.5}$ 的块体非晶软磁材料具有优异的力学性质^[18],断裂强度可高达 5 185 MPa,杨氏模量为 268 GPa,具有甚高的比强度($6.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)与甚高的比杨氏模量($31 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$),同时它又具有甚高的磁导率(550 000);铁基非晶合金的维氏硬度可达 10 GPa,例如 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 合金的维氏硬度为 12.53 GPa。

软磁材料有效磁导率和饱和磁化强度的对比如图 1-2 所示,几种软磁合金在 kHz 频段的特性对比如图 1-3 所示,部分块体非晶软磁材料的特性如表 1-1 所列,常见软磁材料的磁性能如表 1-2 所列。

1 软磁材料的发展历史与趋势

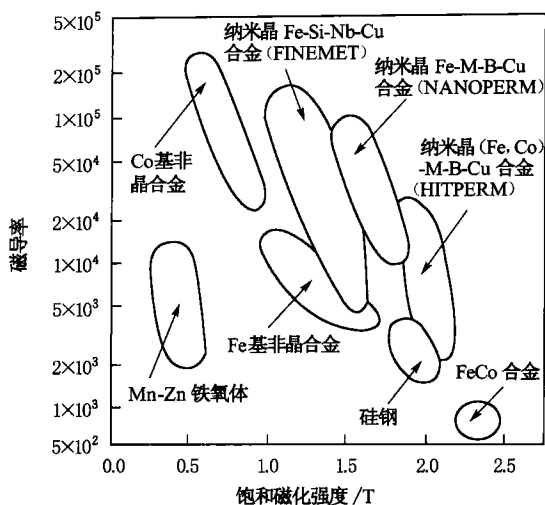


图 1-2 软磁材料有效磁导率和饱和磁化强度的比较^[1,2]

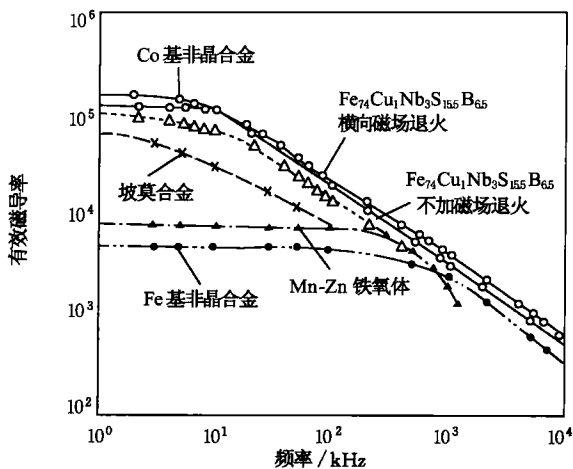


图 1-3 几种软磁合金在 kHz 频段的特性对比^[1]

非晶纳米晶合金及其软磁性能研究

表 1-1 部分块体非晶软磁材料的特性

序号	成分(at%)	J_s/T	$H_c/A \cdot m^{-1}$	μ_m (DC)	μ_e (1 kHz)	$\lambda_s/\times 10^{-6}$	$\rho/\mu\Omega \cdot cm$	T_c/K	$\Delta T_x/K$
1	$Fe_{70}Al_5Ga_2P_{9.65}$ $C_{5.75}B_{4.6}Si_3$	1.2	1.00	180 000		20	160	600	60
2	$Fe_{73}Al_{15}Ga_2P_{10}B_6Si_4$	1.09	2.40		23 500	33			49
3	$Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4$ $P_{12}B_{5.5}C_5$	0.8	0.40	280 000					
4	$Fe_{78}Sn_3P_{12}B_{20}Si_4$	1.23	4.0	116 000	$(P_{1/50}$ 0.07 W/kg)		165	598	40
5	$Fe_{74}Co_4Ga_2P_{12}C_4B_4$	1.43	1.6					37	
6	$Fe_{58}Co_7Ni_7Zr_8B_{20}$	0.96	2.00		19 100	10		594	60
7	$Fe_{56}Co_7Ni_7Zr_8Nb_{20}$ B_{20}	0.75	1.10		25 000	13		531	86
8	$Fe_{56}Co_7Ni_7Zr_{7.5}$ $Nb_{2.5}B_{20}$	1.61	1.44	100 000	21 500				
9	$Fe_{58}Co_7Ni_7Zr_8$ B_{20}^{**}	0.98	4.8		15 000	16	198		78
10	$Fe_{52}Co_{10}Nb_8B_{30}^{**}$	0.63	2.10		21 000	7.4	232		87
11	$Fe_{71.5}Nd_3Dy_{0.5}B_{25}$	1.53	4.03		12 700	23.5			56
12	$Fe_{62}Co_{9.5}Nd_3$ $Dy_{0.5}B_{2.5}$	1.41	2.60		12 000	24			56
13	$Fe_{74.25}Zr_{1.1}B_{14.85}$ $Si_{9.9}$	1.53	2.80					688	52
14	$Fe_{74.25}Nb_{1.1}B_{14.85}$ $Si_{9.9}$	1.50	3.70					684	43
15	$Fe_{78}Si_9B_{13}\Delta$	1.56	2.40		15 000	27	130	688	
16	$Fe_{77}Cr_2Si_8B_{16}\Delta\Delta$	1.41	4.80	35 000	18 000	20	138	631	

注: * μ_e (1 MHz) $\sim 4\,400$; * * μ_e (1 MHz) $\sim 3\,700$; Δ 商业牌号 Metglas2605S2, μ_e (1 MHz) $\sim 1\,100$; $\Delta\Delta$ 商业牌号 Metglas2605S3A, μ_e (1 MHz) $\sim 1\,700$ 。

1 软磁材料的发展历史与趋势

表 1-2 常用软磁材料的磁性能

	冷轧硅钢	软磁铁 氧体	坡莫合金	铁基非 晶合金	纯铁	铁基纳米 晶合金
饱和磁感应强度/T	2.0	<0.5	0.5~1.5	>1.5	2.14	>1.2
居里温度/℃	730	<230	>400	>415	770	>560
晶化温度/℃				>550		>510
电阻率/ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	50	>106	55	140	10	90
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	7.65	4.8	8~8.8	7.18	7.9	7.25
饱和磁致伸缩系数/ $\times 10^{-6}$	27	14	0~25	20~30		1~2
初始磁导率	1 000	2 000	>10 000	>10 000	200~500	>80 000
最大磁导率	>10 000		>200 000	>200 000		>2 000 000
矫顽力/ $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	>8.0	20	>0.4	<3	48	<2.0
铁损/ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$P_{1/50} > 0.3$ $P_{1/400} = 5.8$	$P_{0.2/20k}$ <20	$P_{0.2/20k}$ =13	$P_{1/50} = 0.07$ $P_{1/400} = 1.2$		$P_{0.2/20k}$ <10

注:表中铁损的下标表示测量的频率和磁通密度,如 $P_{1/50}$ 表示频率为 50 Hz、磁通密度为 1 T 的铁损。

可以看出,铁基非晶和纳米晶合金同时具备较高的磁导率、饱和磁化强度以及电阻率,同时,又具有较高的居里温度和较低的饱和磁致伸缩系数等优异特性,已被广泛应用于电力、电子等相关领域,被称为“二十一世纪绿色电子材料”,可替代极薄硅钢用于恶劣工作环境下,广泛应用于电力电子工业及相关器件领域,用做电流互感器、开关电源、逆变电源和程控交换机的变压器、电抗器、滤波器以及抗 EMI 等器件,今后在电子、信息领域的应用将会越来越广,前景广阔,将大大促进电子变压器向高频、小型化、片式化方向发展。

自从 Duwez 制备成功非晶合金、Yashizawa 研制成功 Finemet 型纳米晶软磁合金之后,对非晶纳米晶软磁材料的研究日益增多,材料学家和物理学家也总结出了研究此类材料的一般过程和内容,图 1-4 为 Grenèche 总结的非晶与纳米晶软磁合金研究的内容和手段。

图 1-4 非晶与纳米晶软磁合金研究的内容和手段^[19]