

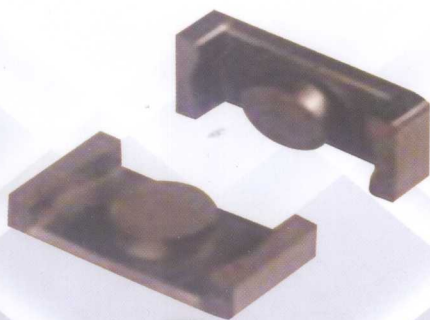
· 科学出版社“十二五”规划教材 ·

电子材料及其应用技术系列规划教材

软磁铁氧体器件 设计及应用

RUANCI TIEYANGTI QIJIAN
SHEJI JI YINGYONG

苏 桦 唐晓莉 张怀武 编著



科学出版社

014035836

TM277
10

科学出版社“十二五”规划教材

电子材料及其应用技术系列规划教材

内 容 简 介

软磁铁氧体器件设计及应用

苏 桦 唐晓莉 张怀武 编著



科学出版社

北京



北航

C1723124

内 容 简 介

本书是“电子材料及其应用技术系列规划教材”丛书之一。全书共7章,第1章介绍软磁铁氧体材料的基本特性;第2章介绍软磁器件磁芯和绕组的共性特征;第3章至第7章系统介绍当前主要应用的各种软磁铁氧体器件,包括电感器、低功率线性变压器、功率变压器、抗EMI(电磁干扰)滤波器以及LTCC(低温共烧陶瓷)磁性器件的结构特征、工作机理、设计方法以及应用需求等,并附有相应的设计实例。其中,前两章是软磁铁氧体材料及应用的理论基础,篇幅较多,只有掌握了这些内容,才能灵活地设计和应用各类软磁器件。

本书的特点是,内容具有很强的工程性和实践性,同时又保证了足够的理论深度,充分做到了理论结合实际。

本书可作为磁性材料及器件相关专业的本科生和研究生教材,同时也可作为从事磁性材料和器件研发、生产和应用的企业及研究所的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

软磁铁氧体器件设计及应用 / 苏桦, 唐晓莉, 张怀武编著. —北京: 科学出版社, 2014.3
电子材料及其应用技术系列规划教材
ISBN 978-7-03-039765-2

I. ①软… II. ①苏… ②唐… ③张… III. ①软磁材料-铁氧体-元器件-教材 IV. ①TM277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 026694 号

责任编辑: 杨 岭 黄明冀 / 责任校对: 杨悦蕾 李 杰
责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014年3月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 230千字

定价: 39.00元

前言

电子信息产业是我国经济社会发展的战略性、基础性、先导性和支柱性产业，现已成为国民经济第一大支柱产业，在构筑现代产业体系竞争中处于主导地位。而电子材料与元器件技术则是现代电子信息技术得以飞速发展的基础，其研发和应用水平的高低不仅直接影响到整个电子信息产业的发展，而且对于发展信息技术、改造传统产业、提高现代化装备水平、促进科技进步都具有十分重要的意义。

本书系统介绍了电子信息材料与元器件中的重要分支——软磁铁氧体材料及器件的基本概念、设计原理和应用方法。为了使读者对软磁铁氧体器件的特征、结构、应用以及各种铁氧体器件与材料性能的关系有较全面的掌握，同时对在软磁铁氧体器件研究和生产过程中必须掌握的基础理论、经常遇到的问题和解决问题的基本方法以及新器件和新应用等方面有较全面的了解，本书从软磁材料及铁氧体磁芯设计的基础理论着手，逐步拓展到对当前实际工程应用中涉及的各种软磁铁氧体器件的设计和应用原理的阐述。本书涉及的内容有很强的工程性和实践性，同时又保证了足够的理论深度，充分做到了理论结合实际。其中，第1章介绍软磁铁氧体材料的基本特性，主要从器件应用的角度分析相应的材料参数特征及其影响因素，以及材料参数与器件参数之间的相互转化关系等。第2章介绍软磁器件的磁芯和绕组的共性特征。由于所有的软磁器件都可看成是由磁芯和绕组两部分共同组成，虽然不同的软磁器件在设计机理和应用领域上大不相同，但其磁芯和绕组的设计也满足一定的共性规律。第2章就是主要讨论所有软磁器件在磁芯和绕组两方面所具有的共性特征以及设计的基本原理，为后面章节中开展各种具体磁性器件的设计和应用打下理论基础。第3章~第7章系统介绍了当前主要应用的各种软磁铁氧体器件，包括电感器、低功率线性变压器、功率变压器、抗EMI（电磁干扰）滤波器以及LTCC（低温共烧陶瓷）磁性器件的结构特征、工作机理、设计方法以及应用需求等，并附有相应的设计实例，尽可能地做到图文并茂，理论结合实际。整体而言，本书前两章偏理论，后五章偏应用。但前两章内容是后五章中进行各种具体磁性器件设计和应用的基础。通过对本书内容的学习和掌握，可以使读者对各种软磁铁氧体器件的设计原理和应用方法有比较全面和深入的了解，能够结合具体的应用需求选择合适的磁芯材料，进行合理的器件结构设计，并且能够在磁性器件不能满足应用需求时，知道该从什么地方加以改进，以满足特定的要求。本书可作为磁性材料及器件相关专业的本科生和研究生的教材，同时也可作为从事磁性材料和器件研发、生产和应用的企业及研究所的

重要参考资料。

本书由电子科技大学苏桦、唐晓莉和张怀武编著。在本书编著过程中，得到了电子科技大学过壁君教授的帮助和支持，在此表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了国家自然科学基金委项目（项目编号：51372031，61171047）、四川省科技厅以及教育部“新世纪优秀人才支持计划”的支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

编者

本书由电子科技大学苏桦、唐晓莉和张怀武编著。在本书编著过程中，得到了电子科技大学过壁君教授的帮助和支持，在此表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了国家自然科学基金委项目（项目编号：51372031，61171047）、四川省科技厅以及教育部“新世纪优秀人才支持计划”的支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 软磁铁氧体材料的基本特性	1
1.1 基于磁学的材料分类及特征	1
1.2 磁性材料的分类及应用	3
1.3 软磁铁氧体材料分类及应用	8
1.4 软磁铁氧体材料磁化特性和磁导率	12
1.5 起始磁导率的影响因素及提高方法	15
1.6 软磁材料的线性和非线性特性	20
1.7 软磁材料的损耗特性	26
1.8 退磁场对软磁材料磁化状态的影响	29
1.9 磁性参数与电气参数的转换	32
第 2 章 软磁器件的磁芯和绕组特性	37
2.1 磁芯的等效参数	37
2.2 短气隙磁芯的特性	43
2.3 软磁磁芯的形状及特征	46
2.4 绕组的结构和特性	52
第 3 章 电感器设计及应用	59
3.1 电感器类型及要求	59
3.2 匝数因子和电感因子	64
3.3 电感量的调整及稳定性的提高	66
3.4 电感器的损耗	69
3.5 电感器的设计	73
第 4 章 低功率线性变压器	76
4.1 低功率线性变压器的特征及传输特性	76
4.2 变压器等效电路及传输特性计算	80
4.3 低功率线性变压器的典型应用	88
4.4 磁芯磁导率及形状对变压器性能的影响	96
4.5 低功率线性变压器的设计举例	98
第 5 章 功率变压器磁芯及应用	102
5.1 功率变压器的工作原理	103
5.2 功率变压器磁芯材料的选择	105
5.3 对称驱动和单向驱动	111

5.4	功率变压器的损耗及温升	113
5.5	AP 法设计功率变压器	118
第 6 章	铁氧体抗 EMI 器件	123
6.1	铁氧体磁芯的高频阻抗特性	123
6.2	吸收式抗 EMI 器件	125
6.3	反射式抗 EMI 器件	131
第 7 章	LTCC 技术及在磁性器件中的应用	136
7.1	LTCC 技术特点	136
7.2	LTCC 片式感性器件的发展与需求	145
7.3	LTCC 技术的工艺流程	154
7.4	LTCC 片式电感的设计过程	159
7.5	LTCC 技术的不足及发展趋势	169
	参考文献	173

第 1 章 软磁铁氧体材料的基本特性

1.1 基于磁学的材料分类及特征

物质的分类方式有很多种,如根据元素组成,可分为化合物和单质两大类,根据有无固定组成,可分为纯净物和混合物两大类,根据物质所处的状态,可分为固态物质、液态物质和气态物质等。如果从磁学的角度来分类,物质可分为抗磁性物质、顺磁性物质、反铁磁性物质、铁磁性物质以及亚铁磁性物质 5 大类。

任何物质放置在外加磁场中时都会被磁化,其被磁化的强弱称为磁化强度 M 。 M 和外加磁场 H 的关系可由公式 $M=\chi H$ 来衡量,其中 χ 称为磁化率。而从磁学的角度来对物质进行分类,本质上就是体现在不同类型磁性物质其磁化率 χ 的大小和方向的差别上。

(1) 抗磁性物质。某些物质当受到外加磁场 H 作用后,感生出与 H 方向相反的磁化强度 M ,即磁化率 $\chi<0$,这样的物质称为抗磁性物质。对于抗磁性物质,不仅其磁化率 χ 为负数,而且 χ 的绝对值也很小,一般为 10^{-5} 量级,且其大小与磁场大小和温度高低无关。典型的抗磁性物质包括惰性气体、许多有机化合物、若干金属(如 Bi、Zn、Ag 等)和非金属(如 Si、P、S 等)。

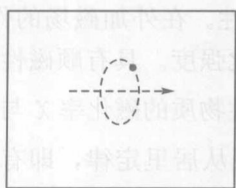
(2) 顺磁性物质。某些物质当受到外加磁场 H 作用后,感生出与外磁场同方向的磁化强度 M ,即磁化率 $\chi>0$,但磁化率 χ 的值很小,室温下一般只有 $10^{-3}\sim 10^{-6}$ 量级,这样的物质称为顺磁性物质。顺磁性物质有一个固有原子磁矩,但各个原子磁矩的方向混乱,对外不显示宏观磁性。在外加磁场的作用下,原子磁矩转向磁场方向感生出与外磁场方向一致的磁化强度。具有顺磁性的物质很多,典型的如稀土金属和铁族元素的盐类等。顺磁性物质的磁化率 χ 与温度有密切的关系,部分顺磁性物质的磁化率 χ 与温度 T 服从居里定律,即有 $\chi=C/T$,其中 C 为居里常数, T 为热力学温度。更多的顺磁性物质磁化率 χ 与温度 T 服从居里-外斯定律,即有 $\chi=C/(T-T_p)$,其中 T_p 为临界温度,也称为顺磁居里温度。

(3)反铁磁性物质。某些物质在受到外磁场 H 作用后,当温度达到某个临界值 T_N 以上时,其磁化率 χ 与温度的关系与正常的顺磁性物质相似,服从居里-外斯定律,但是其临界温度 T_p 通常小于零。当 $T < T_N$ 时,磁化率不是继续增大,而是降低,并逐渐趋于定值。因此,这类物质的磁化率在温度等于 T_N 时达到极大值, T_N 称为奈耳温度,这样的物质称为反铁磁性物质。其磁化率的值仍然非常小,与顺磁性物质类似。常见的反铁磁性物质包括有过渡族元素的盐类及化合物,如 MnO 、 CoO 、 $FeMn$ 等。反铁磁性物质在奈耳温度以下时,其内部磁结构按次晶格反平行排列,且每一次晶格的磁矩大小相等、方向相反,相互抵消,故它的宏观磁性等于零,只有在很强的外磁场作用下才能显示出微弱的磁性。

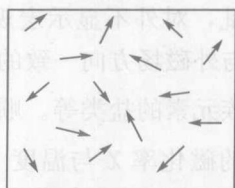
(4)铁磁性物质。某些物质只要在很小的外加磁性 H 作用下就能被磁化饱和,即其体内的磁矩全部取向于外加磁场方向。该类材料不但其磁化率 χ 为正值,而且数值很大,一般可达到 $10^1 \sim 10^6$ 量级,且磁化率 χ 与磁场强度 H 之间的关系为复杂的非线性函数关系。反复磁化时会出现磁滞现象,物质内部的原子磁矩是按区域自发平行取向的,这样的物质称为铁磁性物质。典型的铁磁性物质包括铁、钴、镍以及一些稀土元素晶体及其构成的合金等。当铁磁性物质的温度超过其临界居里温度 T_c 时,将变成顺磁性物质,此时其磁化率服从居里-外斯定律。

(5)亚铁磁性物质。某些物质与铁磁性物质类似,其磁化率为正值且数值较大,一般可达到 $10^0 \sim 10^4$ 量级,且磁化率 χ 与磁场强度 H 之间的关系为复杂的非线性函数关系,反复磁化时会出现磁滞现象。它们的内部磁结构与反铁磁性物质类似,只是相互反排列的磁矩不等量,所以亚铁磁性是未抵消反铁磁性结构而产生的铁磁性。典型的亚铁磁性物质就是铁氧体陶瓷。

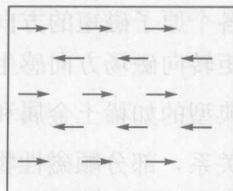
以上 5 类物质中前三类为弱磁性,一般只有用很精密的仪器才能测到其磁性,在工程技术上很少使用,而后两类为强磁性,在技术上有着十分重要和广泛的应用,具有铁磁性和亚铁磁性的材料才是我们俗称的磁性材料。5 种磁性的基本结构如图 1-1 所示。



(a)抗磁性



(b)顺磁性



(c)反铁磁性

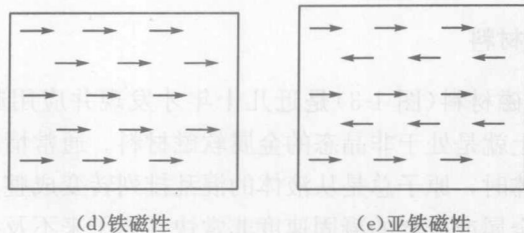


图 1-1 5 种磁性的基本磁结构

1.2 磁性材料的分类及应用

1.1 节所述的具有铁磁性或亚铁磁性的物质俗称为磁性材料。从应用的角度来看,磁性材料又可细分为软磁材料、硬磁材料、旋磁材料、矩磁材料和压磁材料 5 大类。

1.2.1 软磁材料

软磁材料是磁性材料中应用领域最为广泛的类型,一般是通过加工成磁芯来提高磁性器件的感量。常见的软磁材料包括金属软磁材料、非晶/纳米晶软磁材料、铁粉芯软磁材料以及铁氧体软磁材料等几大类。

1. 金属软磁材料

金属软磁材料是最早出现的软磁材料,具有磁导率高(磁导率等于磁化率加 1)、饱和磁感应强度大、居里温度高等优点,典型的金属软磁材料包括硅钢片(图 1-2)、坡莫合金等,在电力系统(如作为工频变压器、电感器、互感器磁芯等)中应用十分广泛。但由于金属软磁材料的磁性来源于铁磁性金属元素晶体或合金,因此其电阻率很低。采用该材料制备的磁性器件只适合应用于较低的频段,当频率升高以后,由于涡流损耗过大,将无法应用。

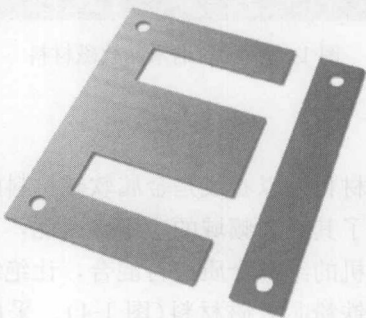


图 1-2 硅钢片金属软磁材料

2. 非晶/纳米晶软磁材料

非晶/纳米晶软磁材料(图 1-3)是近几十年才发现并应用起来的一类软磁材料。非晶软磁实际上就是处于非晶态的金属软磁材料。通常情况下,金属及合金在从液体凝固成固体时,原子总是从液体的混乱排列转变成整齐的排列,即成为晶体。但是,如果金属或合金的凝固速度非常快,原子来不及排列整齐便被冻结住了,最终的原子排列方式类似于液体,是混乱的,这样就构成了非晶合金。与金属软磁材料相比,非晶软磁材料由于处于非晶态,其电阻率可以提高几个数量级,有利于应用在更高频段,但是其磁性能较金属软磁有一些降低。而在 1988 年,日本日立公司的吉三尺克仁等在研究降低 Fe 基非晶材料磁致伸缩系数,以提高软磁性能时,发现了一种称为 Finemet 的新型材料,它几乎可以覆盖所有的非金属软磁材料的优点,这就是纳米晶软磁材料。为了获得纳米晶软磁材料,需要先采用熔体快淬法制备出非晶条带,然后将非晶条带在一定条件下进行退火处理,使得已晶化的晶粒尺寸控制在 10~20 nm 的范围内,而且这些晶粒在形态上是弥散地分布在残余的非晶相中,这样才能够得到纳米晶软磁材料。无论是非晶还是纳米晶软磁材料,都具有磁导率高、饱和磁感应强度大、损耗低、居里温度高、电阻率较大等优点,但非晶/纳米晶软磁材料在制备时需加工成丝带结构且韧性较差,因此对其加工磁芯有很大的限制。此外,这类软磁材料的成本也较高,这也大大限制了其推广和应用。

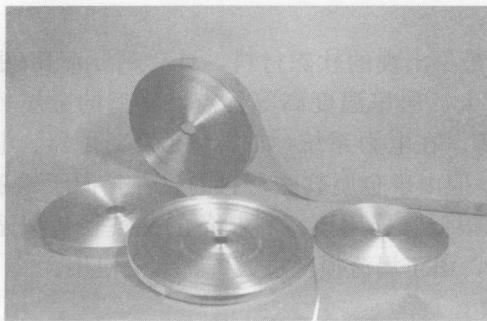


图 1-3 非晶/纳米晶软磁材料

3. 铁粉芯软磁材料

第三类的铁粉芯软磁材料可以看成是金属软磁材料的一种变形。由于金属软磁材料的电阻率低,限制了其在高频域的应用。因此,可以将金属软磁材料打磨成细小的颗粒,然后与有机的绝缘介质进行混合,让绝缘介质包覆在金属软磁颗粒的周围,这样就构成了铁粉芯软磁材料(图 1-4)。采用铁粉芯材料成型压制的磁芯具有很高的电阻率,也可应用到很高的频率范围内。但是,非磁性的有机绝

缘介质类似于在软磁磁芯中开了许多的气隙,且由于退磁场的影响,铁粉芯磁芯的有效磁导率较低,一般只能做到100以下,因此在需要提供大感量的领域不太适用。但同样由于退磁场的影响,该类磁芯的抗饱和能力非常强,因此在大功率磁性器件以及大电流差模扼流圈中有广泛的应用。

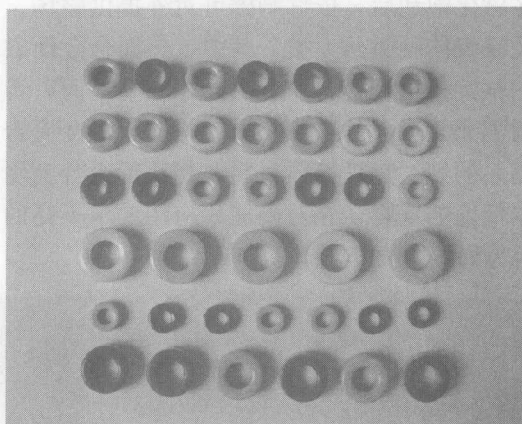


图 1-4 铁粉芯软磁材料

4. 铁氧体软磁材料

第四类铁氧体软磁材料(图 1-5),其磁性来源于亚铁磁性,相比金属和非晶/纳米晶软磁材料而言,其磁导率、饱和磁感应强度以及居里温度都偏低。但是,它有一个突出的优点,就是电阻率高,因此可以在很宽的频域范围内应用。此外,铁氧体软磁材料的磁性能,包括磁导率、饱和磁感应强度、损耗等都可以在很大范围内进行调节,且铁氧体的制备工艺成熟、成本低廉、成型方便,这些突出的优点使得铁氧体软磁材料成为种类最多、应用最广的一类软磁材料。

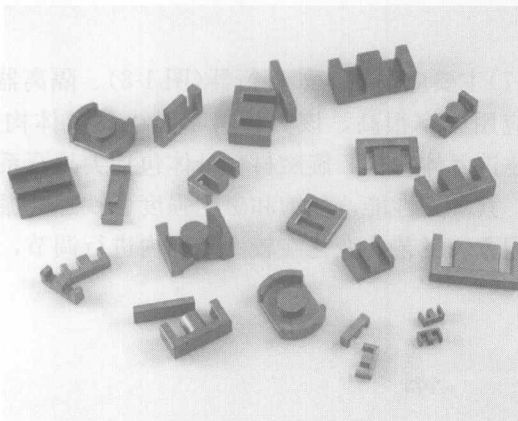


图 1-5 铁氧体软磁材料

1.2.2 硬磁材料

硬磁材料又称为永磁材料。与软磁材料的应用方式不同,这类材料具有很高的剩磁和矫顽力,在磁化饱和后,依靠剩磁可对外提供磁场。常见的硬磁材料包括金属合金硬磁以及铁氧体硬磁两大类。其中,金属合金硬磁一般为包含多种稀土元素的烧结合金和粘接稀土合金,前者磁能积较高,而后者更方便于进行各种成型。目前国际上稀土元素最大的应用领域就是加工成金属合金硬磁材料。铁氧体硬磁主要为六角晶系的钕、镨铁氧体材料,相比稀土合金硬磁而言磁能积要低很多,但其具有成本低廉的优势,在对磁能积应用要求不高的场合也具有较高的性价比。图 1-6 所示为稀土永磁材料。

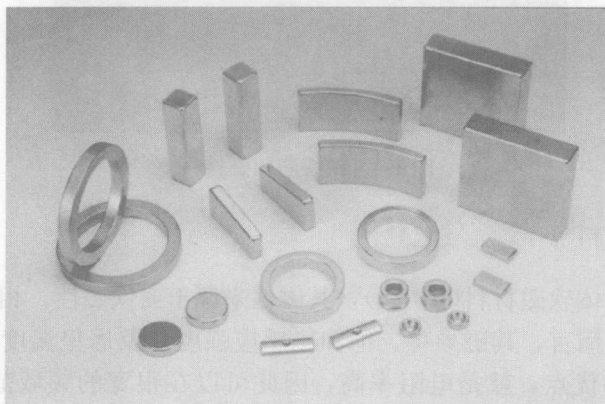


图 1-6 稀土永磁材料

1.2.3 旋磁材料

旋磁材料(图 1-7)主要应用在诸如环行器(图 1-8)、隔离器、移相器等微波旋磁器件中,由于其应用频率很高,该类材料都是由铁氧体构成且应用在微波频段,因此又称为微波铁氧体材料。旋磁材料具体包括尖晶石系、石榴石系和六角晶系的铁氧体材料,其旋磁性能,如饱和磁化强度、铁磁共振线宽、自旋波线宽等可随材料体系及配方、工艺的变化在较大范围内进行调节,以适应各种微波旋磁器件应用的需要。

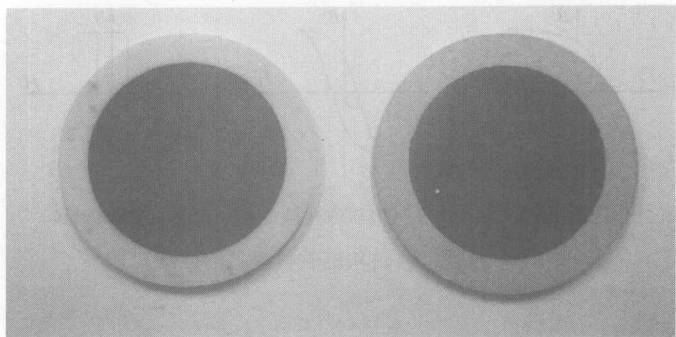


图 1-7 用作环行器/隔离器基片的旋磁材料

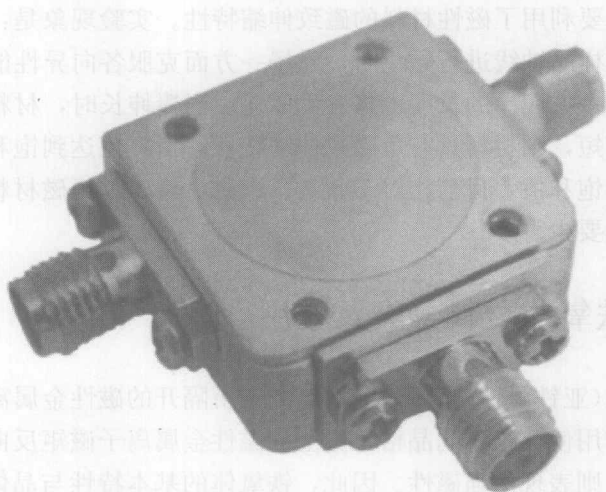


图 1-8 基于旋磁材料研制的环行器

1.2.4 矩磁材料

磁滞回线接近矩形的磁性材料称为矩磁材料。与硬磁材料类似,该类型材料要求剩磁越高越好,剩磁越高,越接近于饱和磁化强度,其矩形度越好。但与硬磁材料不同的是,硬磁材料还要求矫顽力越大越好,而矩磁材料则希望矫顽力较小,以利于两种不同剩磁状态的转换。由于矩磁材料磁滞回线上有 $+B_r$ 、 $-B_r$ 两个稳定状态,因此在计算技术中可用作磁性存储器,在自动控制中可作为开关元件、磁放大器等,在微波器件中用作固定相移量的锁式相移器等。对矩磁材料的总要求是磁滞回线为矩形,适宜的矫顽力,从正向磁化状态反转到反向磁化状态所需要的磁化反转时间短,足够高的居里温度。目前,由于其他存储技术的快速发展,矩磁材料的应用也已逐渐减少。图 1-9 所示为硬磁、软磁和矩磁材料磁滞回线的对比。

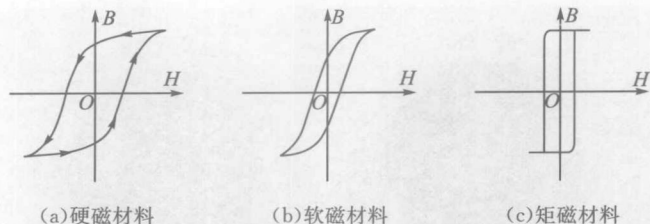


图 1-9 硬磁、软磁和矩磁材料磁滞回线对比

1.2.5 压磁材料

压磁材料主要利用了磁性材料的磁致伸缩特性。实验现象是：当有一外加磁场平行于一棒状样品轴线进行磁化时，磁场一方面克服各向异性将磁矩取向于外磁场方向，另一方面棒的长度也将发生变化。当棒伸长时，材料具有正磁致伸缩特性；若棒缩短，则材料具有负磁致伸缩特性。当磁化达到饱和时，其长度的相对变化也趋于饱和值。目前相对于软磁、永磁、旋磁和矩磁材料，压磁材料的应用领域和数量要少得多。

1.3 软磁铁氧体材料分类及应用

铁氧体磁性(亚铁磁性)来源于由被氧离子所隔开的磁性金属离子间产生的超交换作用，该作用使处于不同晶格位置上的磁性金属离子磁矩反向排列，若两者的磁矩不相等，则表现出强磁性。因此，铁氧体的基本特性与晶体结构、晶体化学(如离子键、共价键、晶体电场等)及金属离子的分布密切相关。常见的软磁铁氧体材料从晶型的角度可分为尖晶石系和六角晶系两大类。

1.3.1 尖晶石系铁氧体材料

尖晶石系的铁氧体材料，其单位晶胞由氧离子面心立方密堆而成，具有立方对称性。图 1-10 为尖晶石铁氧体晶胞及 A、B 位结构示意图，每个晶胞包括 8 个 MeFe_2O_4 分子式的离子数(Me 代表二价金属离子)。金属离子由于半径较小，故镶嵌在密堆的氧离子间隙中，形成两类间隙位置。一类是间隙较大的八面体位置(B 位置)，它被 6 个氧离子包围，其氧离子中心连线构成八面体；另一类是间隙较小的四面体位置(A 位置)，它被 4 个氧离子包围，其氧离子中心连线构成四面体。八面体与四面体的对称性仍为立方对称。在单位晶胞中，A 位置共 64 个，B 位置共 32 个，但实际占有金属离子的 A 位置只有 8 个，B 位置只有 16 个，其余位置都空着，这些空位为金属离子的扩散及掺杂改性提供了有利的条件，但同时

也容易引起成分偏离正分配方。

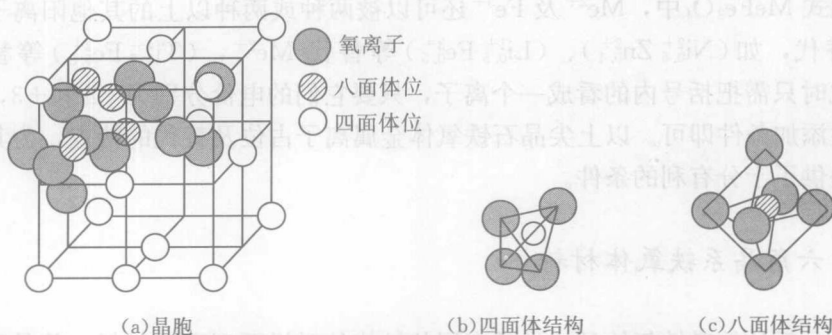


图 1-10 尖晶石铁氧体晶胞及 A、B 位结构示意图

尖晶石铁氧体的亚铁磁性是 A、B 位置上磁性金属离子磁矩反向排列而相互不能抵消所引起的，因此，哪种金属占 A 位或 B 位，与磁性能的关系非常密切。根据尖晶石铁氧体的分子式 MeFe_2O_4 ，金属离子分布的一般式可表示为

$$(\text{Me}_x^{2+}\text{Fe}_{1-x}^{3+})[\text{Me}_{1-x}^{2+}\text{Fe}_{1+x}^{3+}]\text{O}_4$$

其中，() 内的离子占 A 位；[] 内的离子占 B 位。

当 $x=1$ 时为 $(\text{Me}^{2+})[\text{Fe}_2^{3+}]\text{O}_4$ ，称为正尖晶石铁氧体；当 $x=0$ 时为 $(\text{Fe}^{3+})[\text{Me}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$ ，称为反尖晶石铁氧体；当 $0 < x < 1$ 时为 $(\text{Me}_x^{2+}\text{Fe}_{1-x}^{3+})[\text{Me}_{1-x}^{2+}\text{Fe}_{1+x}^{3+}]\text{O}_4$ ，称为混合型尖晶石铁氧体。

在尖晶石铁氧体相结构中，金属离子占 A、B 位的趋势有一定的倾向性，其顺序为： Zn^{2+} ， Cd^{2+} ， Mn^{2+} ， Fe^{3+} ， V^{5+} ， Co^{2+} ， Fe^{2+} ， Cu^{+} ， Mg^{2+} ， Li^{+} ， Al^{3+} ， Cu^{2+} ， Mn^{3+} ， Ti^{4+} ， Ni^{2+} ， Cr^{3+} 。越在前面的离子占 A 位的倾向性越强，如 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 特喜占 A 位；越在后面的离子占 B 位的倾向性越强，如 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 特喜占 B 位；中段是对 A、B 位倾向性不显著的离子，一般倾向于混合型分布。因此，有三种或三种以上的金属离子组成多元尖晶石铁氧体时，将按照它们占 A、B 位的倾向程度进行分布。特喜占 A 位或 B 位的金属离子进行离子置换，还可在很大程度上改变金属离子原来的分布。此外，还有一种特殊情况是，当铁氧体配方中 ZnO 含量增加时，特喜占 A 位的非磁性离子 Zn^{2+} 的加入，必然将 A 位上的磁性离子 Fe^{3+} 挤到 B 位，理论上可使 B 位的磁矩增加，A 位的磁矩减小，A、B 位之间的磁矩差距会增大，整个铁氧体材料的饱和磁化强度也会增强。但实际上，当 A 位的 Zn^{2+} 含量超过 0.5 以后，将会出现这样一些 B 位：由于原来与此 B 位离子产生超交换力的 A 位为 Zn^{2+} 所占据，因而处于这一 B 位的磁性离子将失去超交换力的对象，即 A、B 间的超交换作用消失。由于这一 B 位的磁性离子受到周围 B 位磁性离子的 B~B 交换作用，使得这一 B 位离子的磁矩与其他多数 B 位离子的磁矩反平行，相当于 B 位净的磁矩数下降，所以过多

Zn^{2+} 的加入反而会使饱和磁感应强度 B_s 下降。另外,随着 ZnO 含量的增加, A、B 间的超交换作用减弱,铁氧体的居里温度也会显著下降。此外,在尖晶石铁氧体通式 MeFe_2O_4 中, Me^{2+} 及 Fe^{3+} 还可以被两种或两种以上的其他阳离子的组合所替代,如 $(\text{Ni}_{0.6}^{2+}\text{Zn}_{0.4}^{2+})$ 、 $(\text{Li}_{0.5}^{+}\text{Fe}_{0.5}^{3+})$ 等替代 Me^{2+} , $(\text{Ti}_{0.5}^{+}\text{Fe}_{0.5}^{3+})$ 等替代 Fe^{3+} , 此时只需把括号内的看成一个离子,只要它们的电价分别为 +2 和 +3,满足电中性添加条件即可。以上尖晶石铁氧体金属离子占位及替代的特点,为其掺杂改性提供了十分有利的条件。

1.3.2 六角晶系铁氧体材料

六角晶系的软磁铁氧体是一类具有层状结构的磁铅石型磁性材料,其晶胞是由两类微观结构单元——尖晶石块和钡层通过一定的顺序堆垛而成。一般在常温范围内易磁化方向处于垂直于六角晶轴的平面内,晶体具有一定的各向异性,在固定方向的外加强磁场下成型时,能排列成一种扇状组织,其晶粒一般是扁平状,短轴为六角晶轴(C 轴),片状面即为从优平面。

根据堆垛方式和组成的不同,六角晶系铁氧体又可分为 M、X、Y、W、Z 和 U 型 6 种。各种结构的化学组成如图 1-11 所示,分子式分别为 $\text{B}=\text{BaFe}_2\text{O}_4$, $\text{M}=\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{S}=\text{MeFe}_2\text{O}_4$, $\text{T}=\text{BaFe}_4\text{O}_7$, $\text{W}=\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$, $\text{X}=\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$, $\text{U}=\text{Ba}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$, $\text{Y}=\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ 和 $\text{Z}=\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 。其中以 Z 型铁氧体的超高频软磁性能较好。其晶体结构如图 1-12 所示。其中的 R 结构是由钡层与其上下 2 个氧离子层所组成, S 结构是由 R 块之间纯属立方密堆的 2 个氧离子层组成, T 结构是由 2 个相邻的钡层与上下 2 个氧子层组成。R*、S*、T* 分别是 R、S、T 关于 C 轴镜面对称的结构。 CO_2Z 六角铁氧体的晶体结构就是由这些基本结构单元沿 C 轴方向堆砌而成的。

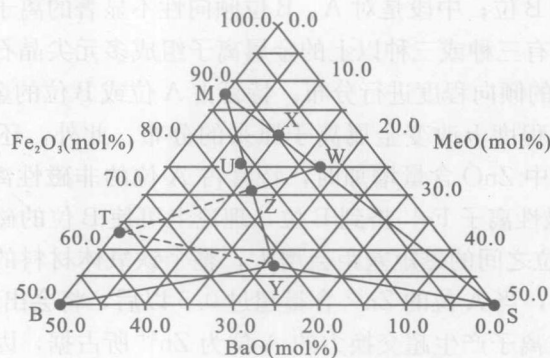


图 1-11 六角铁氧体物相组成图