

磁记录材料及应用

过璧君

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书较系统地阐述了磁记录材料及磁头的设计原理、制造工艺和使用方法。对当前广泛应用的各种磁记录粉体的磁化特性及其在磁记录领域中的应用进行了全面的介绍和分析。对正在发展中的高密度连续膜介质也作了详细的讨论,书中最后部分还介绍了新型磁记录材料及发展动态。

本书是在总结科研、教学工作的基础上撰写而成的,汇集了国内外的最新研究成果及资料,可供有关专业的大学师生、研究生以及从事磁记录材料研制和应用的科技人员阅读、参考。

磁 记 录 材 料 及 应 用

过 璧 君

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段五号)

中国科学院光电技术研究所印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.75 版面字数 304千字

版次 1991年7月第一版 印次 1991年7月第一次印刷

印数 1—2300册

中国标准书号 ISBN 7—81016—312—4/TN·98

(15452·149) 定价: 4.30元

前 言

磁记录从音频记录、视频记录到数据流记录,发展十分迅速,其应用也日益广泛。磁记录材料包括磁记录介质材料和磁头材料。其中,磁记录介质包括磁带、硬磁盘以及软磁盘,它的产量大、产值高。早在二十年以前美国磁记录介质的年产值已达 280 亿美元,大大超过了电工钢片的产值。1985年,全世界单是磁盘这一项的产值就达到 154 亿美元,预计1990年将达到231亿美元。根据美国磁记录专家R. M. White的估计,从1985年到1994年这十年期间,美国的磁记录工业产值将增加 5 倍,并将有某些重大的技术突破,磁记录密度至少要提高一个数量级。

磁记录是一门综合性的技术,它的发展需要物理学、电子学、化学、光学以及精密机械等方面的支持。与此同时,从磁记录的发展历史又可以看出,磁记录与磁性材料、磁性应用的关系更为密切。它首先要依靠磁记录介质材料、磁头材料的发展以及相应的磁记录技术的改进,才会有所突破。没有性能高、厚度薄的磁记录介质,没有新型的磁头材料就谈不上磁记录的发展,附录五所提供的资料可以证明这点。

为了适应这种突飞猛进的形势,为国家现代化输送这方面的专业人才,从1984年开始,我们开出了《磁记录材料与物理》课程。先后为本专业的本科生开出了六次,效果良好。通过对这几个年级的教学实践,我们在原讲义的基础上修改、补充成本教材。

本书由电子科技大学过璧君教授主编,陈巧生教授主审。全书共分五章,主要讨论与磁记录材料、磁头材料有关的内容,其中第四章磁头及磁头材料是由深圳粤宝电子工业总公司过华威同志编写的。

通过对本教材的学习,可使读者掌握磁记录材料的特性和使用方法,并对它们的基本制备过程有全面的了解。同时,对影响磁记录过程的基本因素以及磁记录的发展方向,有一个明确的概念。

由于时间仓促,水平有限,错误及不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1990年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 磁记录的发展史、特点及应用.....	(1)
§ 1.2 磁性材料的本征特性及磁化过程.....	(3)
§ 1.3 磁记录与磁性材料.....	(11)
§ 1.4 退磁效应及其对磁化状况的影响.....	(17)
§ 1.5 磁性单位及其转换.....	(20)
第二章 颗粒涂布型磁记录介质	(23)
§ 2.1 磁记录介质的主要技术指标.....	(23)
§ 2.2 单畴粉体的磁化机构.....	(26)
§ 2.3 氧化物磁粉.....	(37)
§ 2.4 金属磁粉.....	(40)
§ 2.5 钡铁氧体磁粉.....	(43)
§ 2.6 磁粉颗粒的完整性对磁性能的影响.....	(50)
§ 2.7 磁层的涂布.....	(53)
§ 2.8 磁层的表面状态对噪声及摩擦特性的影响.....	(57)
§ 2.9 颗粒涂布型磁记录介质及其应用.....	(59)
第三章 高记录密度连续膜介质	(68)
§ 3.1 概述.....	(68)
§ 3.2 连续薄膜的特性.....	(68)
§ 3.3 化学镀法制备磁记录介质.....	(78)
§ 3.4 电镀法制备磁记录介质.....	(79)
§ 3.5 真空蒸镀法制备磁记录介质.....	(80)
§ 3.6 溅射法制备磁记录介质.....	(97)
§ 3.7 高记录密度连续膜介质及其应用.....	(107)
第四章 磁头及磁头材料	(115)
§ 4.1 环形磁头及溢出磁场.....	(115)
§ 4.2 磁头磁路的计算.....	(118)
§ 4.3 磁头的电特性.....	(125)
§ 4.4 磁头的设计.....	(130)
§ 4.5 磁芯材料.....	(139)
§ 4.6 磁芯的损耗.....	(146)
§ 4.7 叠片式金属磁头.....	(150)

§ 4.8 铁氧体磁头.....	(152)
§ 4.9 薄膜磁头.....	(157)
§ 4.10 磁阻磁头.....	(162)
§ 4.11 特殊磁头.....	(165)
第五章 新型磁记录材料及应用.....	(176)
§ 5.1 磁泡材料及应用.....	(176)
§ 5.2 磁光记录材料及应用.....	(181)
§ 5.3 垂直磁记录材料及应用.....	(187)
附录.....	(193)
附录一 磁性单位及转换.....	(193)
附录二 颗粒涂布型磁记录介质的典型特性.....	(193)
附录三 磁头用铁氧体材料的类型.....	(194)
附录四 录象磁头用铁氧体材料的特性.....	(194)
附录五 由于磁性材料的改进而使磁记录密度不断提高的发展过程.....	(195)
参考文献.....	(196)

第一章 绪 论

§ 1.1 磁记录的发展史、特点及应用

在当今信息时代，磁记录是一门受到高度重视并得到迅速发展的技术。磁记录的功能是将一切能转变成电信号的信息（例如声音、图象、数据以及文字等）通过电磁转换记录和存储在磁记录介质上，该信息可以随时重放。

磁记录的发展常常需要物理学、电子学、化学、光学以及机械工程方面的大力支持，因而它是一门综合性的技术。从它的发展史来看，磁记录技术与磁性材料、磁性应用的关系更为密切。它特别依赖于磁性材料的发展。

磁记录的发展已有将近九十多年的历史。第一次发现磁介质上可以记录信号是在1898年。1900年由丹麦人研制了第一台录音电话机，这种电话机可以用来记录和重放声音，记录介质是钢丝。因为当时没有放大器，这种微弱的记录信号只有通过耳机才能接受。

1920年，由于真空管放大器的发明，记录在钢丝上的信号得到放大，但与此同时噪声也被放大，影响了收听效果。1921年有人提出采用交流偏置方式进行磁记录，从而提高了信噪比。显然这就是现在采用的模拟记录方式，当时上述设想由于未受到人们的足够重视而未被正式采纳和推广。

在1927年以前，所有磁记录都是在钢丝或钢带上进行的。此后有人建议在纸带上涂布磁性液体，将其干燥后作磁记录介质使用。这种记录信号用的磁性纸带在交流偏置下大大提高了保真度和信噪比，于1940年得到了推广应用。第二次世界大战期间，德国人运用磁性录音很成功。战争结束以后，美国大量吸收了这方面的技术和经验，从而于1947年由3M公司正式建成了氧化铁录音带生产线，并利用这种录音方式和设备开始进行无线电广播。美国Ampex公司于1948年开始出售录音机，并于1956年试制成功四磁头录象机，用于广播电视中。

随着计算机的发明和应用，需要存储数据并根据需要随时选取特定地址上的信息。这种随机存取的工作方式是要求按指令去选择特定地址，进行记录和重放，而不是像磁带那样只能按照前后次序来确定地址。这种要求只有磁盘的记录方式才能满足。1955年，美国国际商用机器公司（IBM）制出了世界上第一台磁盘存储器。通过改进和完善，磁盘存储器和磁带存储器都成为电子计算机的主要外存储设备，这种状况一直持续到现在。

根据用于磁盘的基体材料的类型，可将磁盘分为硬盘和软盘两种。前者以硬质铝合金作基体，后者以软塑料作基体。最早使用的磁盘，工作时磁头与磁层要发生直接接触。而高质量的磁盘存储器要求快速存取，因而选取特定位置的时间极短。一台硬盘存储器，若每分钟旋转3600转，这样高的相对速度使空气流对磁头产生作用，它能使磁头悬浮在磁盘介质的上方而不与介质直接接触。这种设备由美国IBM公司于1973年首先推出，称为温彻斯特（Winchester）磁盘系统，与此相关的技术称为温彻斯特技术。

七十年代以来,人们对原有的磁记录装置,如录音机、录象机以及各种数字式磁记录设备,进行了大量的理论及实验研究,使各类整机性能都有了大幅度的提高。与此同时还改进了原有磁记录材料的特性,开拓了新型磁记录材料及磁头材料,发展了磁记录技术,确定了磁泡存储器(将在§5.1中讨论)作为具有中等容量的、性能稳定的存储器的地位。新的磁记录技术,例如垂直磁记录技术、磁光记录技术正受到人们的极大注意,发展极为迅速,预计不久即将成为商品。

与其它记录方法(如,唱片记录、照相机、印刷法)相比,磁性记录具有以下特点:

- (1) 记录密度高、存储容量大。
- (2) 信息的写入和输出速度快,可以立即重放和再现。
- (3) 记录的信息可以长期保存。例如已经记录的音频信号或图象信号,经过千百次的重放以后,信息仍可保存下来。
- (4) 如果不需要原先记录的信息,可以将其抹掉,重新记录。磁记录介质可以多次重复使用。
- (5) 可以实现多通道记录,尤其对数字记录,可以将多个磁头装配在一起,记录许多磁迹。这就是说,可以同时将上千个二进制信息记录在一条磁带上,而且能够保证这些信号至通道间保持精确的时间间隔和相位关系。
- (6) 记录和存储的信息稳定性高、不会挥发。
- (7) 成本低、维护简单,适于大量生产。

磁记录的应用领域相当广泛,电视、广播、教育、计算技术、航测、军事、空间技术、医学及科学研究都离不开磁记录。磁记录的应用日益扩大,磁记录产品逐年增长。单从磁带销售量的增长速度就可看出这一趋势。如1969年磁带的总销售量为3.06亿美元,到1971年总销售量增加到4.4亿美元。

下面简要介绍磁记录的典型应用。

(1) 在录音技术中的应用

磁记录的最早应用领域是录音技术。录音磁带和录音磁头早已进入千家万户,它们的使用量很大,至今方兴未艾。录音技术正在向着数字式方向发展,以便进一步提高保真度、信噪比和其它性能。

(2) 在计算机技术中的应用

磁盘存储器和磁带存储器作为计算机外存储设备具有容量大、成本低等优点。根据有关方面的统计,1985年世界磁盘产值达154亿美元。1990年预计达231亿美元。磁盘机在大、中、小及微型机的硬件价格中,分别占34~55%,甚至55%以上。随着计算机功能增加,上述比例仍在上升之中。

(3) 在录象技术中的应用

1956年前后,广播录象机试制成功不久,彩色录象机也成了商品。由于录象磁带可以直接快速显示,剪接加工与编辑等都比传统的制片方法效率高,而且它可以消磁以供重复使用,所以很快成为电视广播的关键设备之一。

录象技术不仅用于广播电视,在工业生产、军事、医学以及不少科学研究领域也成为不可缺少的检测和监视技术。

(4) 在科学研究中的应用

多速模拟记录装置可以将记录下来的信号进行时间放大或缩小工作,从而使数据处理更为方便灵活。例如电话线能传输音频范围30Hz左右的信号,而传输资料的频率可能高得多。对于频率相差很大的信号,要进行直接传输和重现比较困难,如果采用磁带记录器就可以方便地解决这类特殊问题。将高频信号预先记录在磁带上,然后以低速输还给电话线。在电话线的另一端也用一台磁带记录器以低速记录电话线的传输信号。如果需要重现信号,可以高速重放,使时标与原记录的时标相同,以此克服低频传输的限制。

(5) 磁记录技术与人们的日常生活关系密切,磁性卡片可用于存取款项、图书保存以及乘坐交通工具的票据等等。

由此可见,从尖端科学到日常生活都离不开磁记录,因而有关磁记录的应用领域正在不断扩大,产量产值也在迅速提高。

磁记录的发展方向是不断提高记录密度。从音频过渡到视频,记录密度是以指数函数的速度提高的。以数字记录为例,1954年由IBM生产的350磁盘机的位密度为100bpi,道密度为20tpi;到1988年,IBM生产的3380k磁盘机的位密度达到16000bpi,道密度达2400tpi。要实现这样高的记录密度,磁记录介质材料及磁头材料的研究和发展起到了决定性的作用。几十年来,人们对磁记录材料的 B_s 、 H_{c1} 、矩形比、颗粒尺寸以及记录磁层的超薄化等作了大量的研究,取得了突破性的进展,为磁记录的发展提供了坚实的基础。由此可见,磁性材料的发展是提高磁记录密度的基础。附录五列出的资料说明了由于磁性材料的发展使磁记录密度不断提高的发展过程。

§ 1.2 磁性材料的本征特性及磁化过程

一、磁性材料的本征特性

1. 磁矩

所有的物质都是由原子组成的。原子包含有一定数量的运动着的电子。某些元素的原子并不形成合成磁矩,外磁场引起的电子进动所产生的原子磁矩的方向与外磁场的方向相反,引起了抗磁性。另外一些元素的原子磁矩主要由自旋磁矩贡献,外磁场使所有的原子磁矩与外磁场平行取向,材料得到磁化。材料具有的这种性能称为顺磁性。热扰动要破坏这种有序排列。顺磁性物质的合成磁感应强度随外磁场的增大而增加,当外磁场的数量级达 10^7Oe (约为 10^9A/m)时,才能达到饱和磁化。顺磁性物质和铁磁性物质的饱和磁感应强度有相近的数量级。但是,后者所需的外磁场只需几个奥(等于几百安/米数),甚至更小。为了说明这个现象,外斯(Weiss)在1907年提出了分子场理论。他认为,相邻原子中电子之间的相互作用力大于零时,自旋磁场平行取向。这种相互作用力决定于元素中相邻原子之间的距离与产生原子磁矩的电子所在轨道半径的比值,其规律如图1-1所

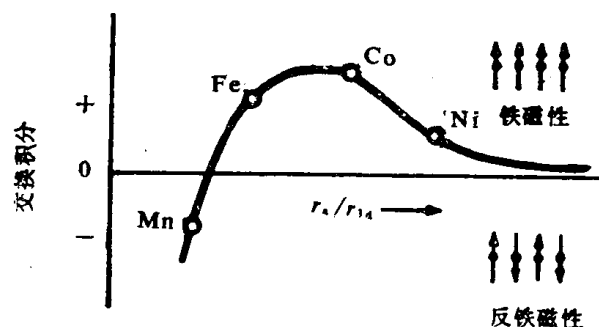


图 1-1 铁磁元素的交换积分

示。在所有的元素之中，只有 α -铁、镍、钴、镧的能量大于零。这些纯金属在常温下显示铁磁性。将锰（Mn）进行适当合金化以后，可使原子之间的距离增大，亦能显示铁磁性。

磁体磁化以后，单位体积内沿外磁场取向的磁矩数，称为磁化强度，用 $\mathbf{M}$ 表示。 $\mathbf{M}$ 有一定的大小和方向，可以表示为：

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{v}} \mu_m \quad (1-1)$$

式中， V 为磁体的体积； $\sum_{\mathbf{v}}$ 表示对整个磁体求矢量和； $\mathbf{M}$ 的单位是 emu/cm^3 （emu是表示磁矩的电磁单位）。

除磁化强度以外，还定义比磁化强度，用 σ 表示：

$$\sigma = \sum_{\mathbf{v}} \frac{\mu_m}{dV} = \frac{\mathbf{M}}{d} \quad (1-2)$$

式中， d 为磁体的密度； σ 的单位是（emu/g）。

磁体的环境温度愈高，热扰动能量愈大，分子场的作用相对降低。所有材料的饱和磁化强度 M_s 随环境温度的升高而降低，到达某一特定温度—— T_0 时，热扰动能量完全破坏磁矩的定向排列，使 M 的取向杂乱，合成磁矩为零。此特定温度 T_0 称为居里温度，是磁性材料的本征特性之一，主要决定于成分。

2. 磁畴

为什么顺磁物质磁化到饱和所需的外磁场高达 10^9A/m ，而将磁性材料磁化到饱和所需的外磁场则低得多呢？原因是磁性材料内部存在着分子场的作用，出现自发磁化，形成磁畴结构。在居里温度以下；磁体内部部分成亿万个小区域。每个小区域在分子场作用下都已经自发磁化到饱和，相当于一个微小的永磁体。没有外磁场时，这些永磁体沿各自的易磁化方向取向，合成磁矩为零。图1-2（a）表示两个磁体平行排列时，处于能量不稳定状态；如果按（b）所示的反平行排列，则磁极抵消，静磁能降低，处于能量的稳定状态。

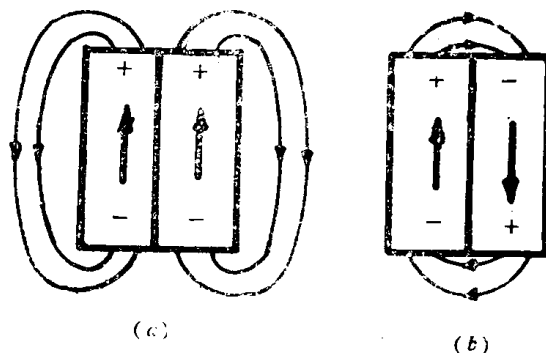


图 1-2

磁畴分割愈细，静磁能就愈低，图1-3表示磁畴及磁壁的模型。与此同时，愈细的磁畴使畴壁的数目增多。由于畴壁磁矩的取向是逐步过渡的，无论是磁晶各向异性或交换能都要增大。由此可见，从降低静磁能的观点出发，磁畴愈细愈好；从降低畴壁能的观点出发，磁畴又不宜分得太细，正是这两类能量的平衡，确定了磁畴的结构。

现在我们来讨论磁畴壁的状况。在畴壁内的磁化矢量是从一个磁畴方向逐步过渡到另一个磁畴方向，这种过渡方式有时是相当复杂的。图1-3表示两种最简单的磁畴壁：布洛赫（Bloch）壁和尼尔（Neel）壁。布洛赫壁中的磁化矢量是回绕磁畴壁平面的法线逐步过渡的。所以，在壁畴平面上并不出现磁荷。即 $\nabla \cdot \mathbf{M} = 0$ 。没有在磁体内部产生退磁场。但是，由图可见，在壁的中心位置附近，磁化矢量与磁体表面垂直，产生表面退磁场。尼尔壁中的

磁化矢量是以垂直于畴壁平面的方式逐步过渡的。从而在磁体内产生退磁场和静磁能。为了确定退磁场，先要确定磁化矢量的分布规律。这是一个相当复杂的问题。这种畴壁的能量随膜厚的变化如图 1-3 (b) 所示。由图可见，尼尔壁的能量随薄膜厚度的下降而迅速下降，所以对于很薄的膜，取尼尔壁有利。但是，尼尔壁的厚度要增大，甚至超过薄膜的厚度。

在磁畴壁中， $\mathbf{M}$ 的取向随坐标变化。在某些区域， $\mathbf{M}$ 的方向产生突变，形成“线”，称为布洛赫线或尼尔线，在这些线中包括布洛赫点或尼尔点。

在大多数材料中，无论是畴壁、线或点的尺寸都比畴壁的尺寸小得多，但是，它们的形成过程、运动过程以及与晶体内部缺陷的相互作用，对磁体的磁化状态却要产生重大影响。磁畴壁的状态是磁化过程的关键。目前，已经形成了所谓“磁畴物理学”，并引起了人们的广泛兴趣。

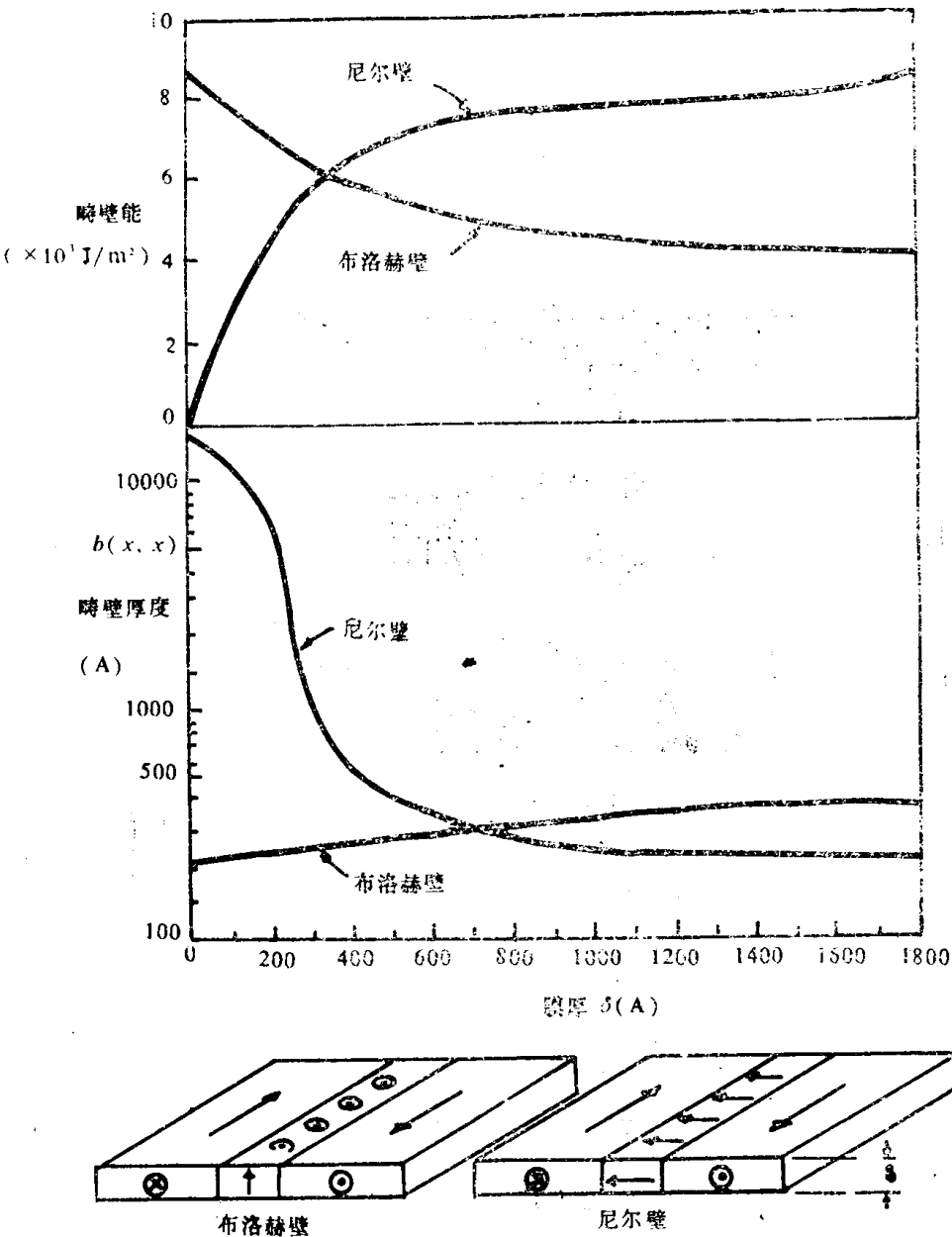


图 1-3 布洛赫壁和尼尔壁的能量及壁厚随膜厚的变化规律

3. 磁晶各向异性能

在晶体中，由于自旋-晶格的相互作用，产生易磁化轴。对于铁，在无外磁场时，磁化沿着六个 $\langle 100 \rangle$ 方向的任一个取向；对于镍，其易磁化方向在 $\langle 111 \rangle$ 方向。钴的易磁化方向与 c 轴平行。

磁化偏离易磁化轴时，产生磁晶各向异性能 E_K ， E_K 和 $\mathbf{M}$ 与晶体的对称性有关。立方晶体的 E_K 为：

$$E_K = K_1(\alpha^2\beta^2 + \beta^2\gamma^2 + \gamma^2\alpha^2) + K_2\alpha^2\beta^2\gamma^2 + \dots \quad (1-3)$$

式中， α 、 β 、 γ 表示 $\mathbf{M}$ 相对于立方轴的方向余弦； K_1 和 K_2 为磁晶各向异性能，一般忽略高次项。在室温下，铁的 $K_1 = 4.8 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ (K_2 忽略)，镍的 $K_1 = -4.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ ， $K_2 = 2.34 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ 。注意：铁的 $K_1 > 0$ ，易磁化轴沿 $\langle 100 \rangle$ ；镍的 $K_1 < 0$ ，易磁化轴沿 $\langle 111 \rangle$ ；YIG的 K_1 的范围从 50 J/m^3 到 10^3 J/m^3 ；对于六角晶体，令 θ 表示 $\mathbf{M}$ 与 c 轴的夹角，则：

$$E_K = K_{u1}\sin^2\theta + K_{u2}\sin^4\theta + \dots \quad (1-4)$$

钴的 $K_{u1} = 4.1 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ ； $K_{u2} = 1.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

4. 交换能

交换能是使磁体内产生自发磁化的原因。这种相互作用有静电的性质，是产生铁磁性的主要原因。铁磁体中相邻原子的自旋之间的交换能为：

$$E_{ex} = -2 \sum_{i < j} A_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (1-5)$$

式中 $\mathbf{S}_i$ 和 $\mathbf{S}_j$ 分别为第 i 个原子与相邻的第 j 个原子的总自旋矢量。它们的大小等于原子的总自旋量子数，即： $S_i = \sum \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j = \sum \mathbf{S}_j$ 。它们的方向沿着自发磁化方向。 A_{ij} 为邻近原子的交换积分。

如果考虑邻近原子间发生的相互交换作用，则可以认为第 i 个原子与其邻近原子的交换积分均相等，即： $A_{ij} = A$ 。对于同种原子的电子，所有原子的自旋量子数也相等，故 $S_i = S_j = S_0$ ，因此，式(1-5)可以写成：

$$E_{ex} = -2S^2A \sum_{i < j} \cos\phi_{ij} \quad (1-6)$$

式中， ϕ_{ij} 表示第 i 个原子与相邻的第 j 个原子自旋矢量间的夹角。由于此角一般很小，可以将 $\cos\phi_{ij}$ 展开成级数：

$$\cos\phi_{ij} = 1 - \frac{\phi_{ij}^2}{2!} + \frac{\phi_{ij}^4}{4!} - \frac{\phi_{ij}^6}{6!} + \dots$$

若略去高次项，根据式(1-6)，得到交换能的增量为：

$$\Delta E_{ex} = AS^2 \sum_{i < j} \phi_{ij}^2 \quad (1-7)$$

该式的物理意义是：当 $A > 0$ 时，只要铁磁体内原子间电子自旋不完全平行，就会引

起系统中交换能的增加。只有当 $\phi_{ij} = 0$ 时,才能使 $\Delta E_{ex} = 0$,所以,自发磁化完全平行时,交换能的增量为最低。

交换能使磁矩平行取向,磁晶各向异性能使磁矩沿着它的易磁化轴取向。这两种能量相当于有一个相应的磁场对磁矩起作用。所以,可以分别用交换场 H_{ex} 表示为了克服交换耦合所需的外加磁场;用各向异性场 H_K 表示为了克服各向异性所需的外加磁场,它们可以分别表示为:

$$H_{ex} = \frac{A}{M_s a^2}, \quad H_K = \frac{K_1}{M_s} \quad (1-8)$$

式中 a 为晶格点阵常数。

5. 磁弹性能

实际的铁磁晶体既是一个磁性体,又是一个弹性体。晶体的形变将产生弹性能。磁体从退磁状态开始磁化到饱和所出现的尺寸的相对变化,称为磁致伸缩, $\lambda = \delta l/l$ 。与磁致伸缩相联系的形变称为磁弹性能。因此,弹性晶体形变以后出现的磁晶各向异性,既与晶体的形变有关,又与 M_s 在晶体中的取向有关。在立方晶体中,由于磁化与应变之间的耦合所产生的磁弹性能密度为:

$$E_{me} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} e_{ij} + \beta_1 (e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + 2\beta_2 (e_{xy} e_{yz} + e_{yz} e_{zx} + e_{zx} e_{xy}) \quad (1-9)$$

式中 e_{ij} 表示应变; σ_{ij} 表示应力。 σ_{ij} 与 e_{ij} 的关系用虎克(Hooke)定律联系:

$$\sigma_{xx} = c_{12}(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}) + (c_{11} - c_{12})e_{xx} \\ \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = 2c_{44}e_{yz}$$

式中, c 为弹性模数; β_1 和 β_2 为磁致伸缩系数,它们与无量纲系数 λ_{100} 和 λ_{111} 的关系为:

$$\beta_1 = -\frac{3}{2}(c_{11} - c_{12})\lambda_{100} \\ \beta_2 = -3c_{44}c_{11} \quad (1-10)$$

磁致伸缩的典型值为:

$$\lambda_{100}(\text{Fe}) = 20.7 \times 10^{-6}, \quad \lambda_{111}(\text{Fe}) = -21.2 \times 10^{-6} \\ \lambda_{100}(\text{Ni}) = -45.9 \times 10^{-6}, \quad \lambda_{111}(\text{Ni}) = -24.3 \times 10^{-6}$$

对于多晶体,内部晶粒取向杂乱,其磁致伸缩系数为:

$$\lambda_s = (2/5)\lambda_{100} + (3/5)\lambda_{111} \quad (1-11)$$

Ni-Fe合金在含Ni80%时, $\lambda_s \rightarrow 0$,由于这种材料的各向异性和磁致伸缩都很小,含Ni78%的合金具有很高的磁导率。

应变随应力线性变化,它们可以通过弹性系数联系起来。其磁弹性能可以用外加应力表示。设磁体的磁致伸缩是各向同性的,即 $\lambda_{100} = \lambda_{111} = \lambda$,如果磁化矢量与应力之间的夹角为 θ ,则磁弹性密度为:

$$E_{ms} = -(3/2)\lambda\sigma\cos^2\theta \quad (1-12)$$

该式表示弹性密度具有单轴各向异性的特点。

6. 磁位能

外加磁场 H_a 所引起的磁位能密度为 $-\mathbf{H}_a \cdot \mathbf{M}$ 。干扰场 H_s 所引起的能量密度为 $(-1/2)\mathbf{H}_s \cdot \mathbf{M}$ 。在 $\mathbf{H}_a$ 和 $\mathbf{H}_s$ 的作用下的静磁能量密度为：

$$E_{ms} = -\mathbf{H}_a \cdot \mathbf{M} - (1/2)\mathbf{H}_s \cdot \mathbf{M} \quad (1-13)$$

计算磁位能的困难在于不易计算 H_s 。虽然从理论上可以根据 $\mathbf{H}_s = -\nabla\phi$ 推得，但是 ϕ 的分布复杂，只有在简单情况下才能有精确解。

磁体的本征特性是由它所含有的能量所确定的。这些能量包括交换能 E_{ex} ，磁晶各向异性能 E_K 、磁弹性能 E_{me} 和磁位能 E_{ms} ，磁体的总能量 E 为：

$$E = E_{ex} + E_K + E_{me} + E_{ms} \quad (1-14)$$

根据磁性物理，磁体的磁化决定于它具有的能量状态。磁体中磁化强度 $\mathbf{M}$ 的分布状态，对应于 E 为最小时的状态。

二、磁性材料的磁化过程

1. 磁化曲线

磁体中包含有亿万个磁畴。每个磁畴都自发磁化到饱和。磁体的磁化过程实际上就是磁畴矢量的重新取向过程。处于退磁状态的磁体在外磁场作用下，所有未与外场平行取向的磁畴的位能提高，这些磁畴要改变原来的分布状态，以便达到与外磁场平行取向。磁畴矢量要离开原来的易磁化轴而产生转动，要求有较高的能量，所以，这种过程只有在受到较强外磁场作用时才能实现。在较弱的磁场作用下，磁化过程是通过畴壁位移来实现的。畴壁位移过程使位能低的畴壁体积扩大，位能高的畴壁体积缩小。

磁畴位移过程要受到磁致伸缩或材料内部的不均匀性所造成的阻碍。因为磁化方向改变必然伴随磁体尺寸的改变，从而产生机械应变，阻止畴壁运动。同样，材料内部的杂质和其它不均匀性，亦要阻止畴壁离开平衡位置。

在弱磁场作用下的畴壁位移是可逆的。随着磁场的增大，出现畴壁不可逆位移，即巴克豪森（Barkhausen）跳跃，这是不可逆磁化过程。这种磁矩的不连续变化发生在磁化曲线的陡峭部分。图 1-4 表示畴壁运动、可逆磁化过程和不可逆磁化过程。在AB区，畴壁产生可逆运动，AB线的斜率称为可逆磁导率。磁场超过AB区，畴壁出现不可逆运动。例如，当达到B点，畴壁不可逆地跳跃到C点。材料内部不均匀性愈严重，产生畴壁的不可逆运动所需的临界场就愈大。此时，如果外磁场恢复到零，则只有部分磁矩是可逆变化的。使磁矩降低到零的反向磁场就是材料的矫顽力。实验证明：材料成分的纯度愈高，内部应力分布愈低，矫顽力就愈低，磁导率就愈高。

可以通过应力理论计算矫顽力。该理论说明畴壁运动的阻力是由材料内部应力起伏所引起。通过杂质理论计算矫顽力时，表示畴壁运动的阻力是由杂质所引起的。显然，实际材料内部含有不同程度的杂质，并存在一定程度的应力分布，所以材料的矫顽力决定于杂质及应力所引起的阻力。

当所有的磁畴矢量都沿着最接近外磁场的易磁化轴取向时，如果进一步增大外磁场，将迫使磁畴矢量离开易磁化轴，转向与外磁场平行取向，这是可逆转动磁化过程。

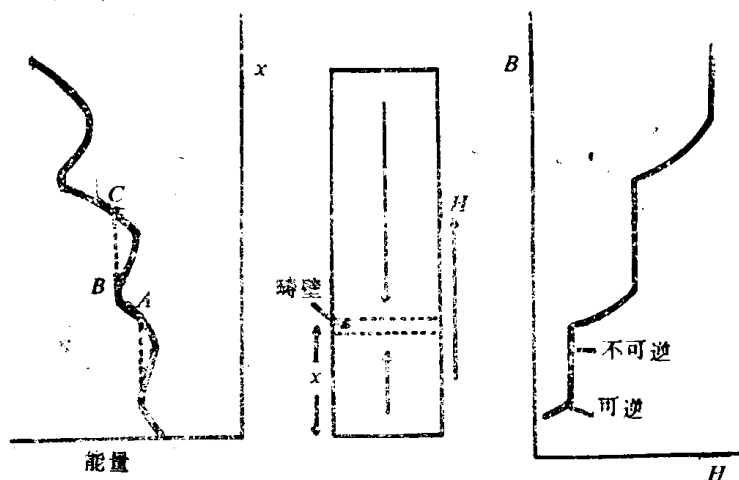


图 1-4 畴壁运动及可逆磁化过程、不可逆磁化过程

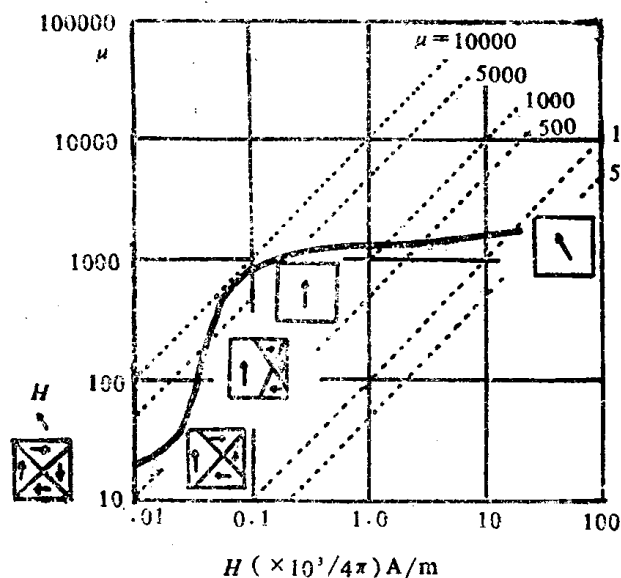


图 1-5 按照磁畴理论所表示的磁化过程

磁。如果将磁化线圈中的电流反向，即是使 H 反向，当方向相反的 H 达到材料的矫顽力 H_c 时， B 值降低到零，称此为磁感应强度矫顽力，用 H_{cB} 表示。使磁化强度 M 降低到零的反向磁场称为材料的本征矫顽力，用 H_{cI} 表示。

进一步增加反向磁场，材料沿相反的方向磁化到饱和，到达 $(-B_s)$ 。此时，重新改变磁化线圈中的电流方向，使 H 沿正方向逐渐增大，经过零值以后，继续增大磁场的振幅， B 从 $(-B_s)$ 经过 $(-B_r)$ 到达 $(+B_s)$ ，形成闭合回线，称此回线为主磁滞回线，简称磁滞回线。整个磁滞回线从坐标的第一象

图 1-5 表示按照磁畴理论产生的磁化过程。由图可见，在磁化曲线的起始部分是可逆畴壁位移过程，在磁化曲线的陡峭部分，主要是不可逆畴壁位移过程。在磁化曲线的膝点以后的磁化机构是磁畴矢量的可逆转动过程。

2. 主磁滞回线和局部磁滞回线

图 1-6 用 B (实线)和 M (虚线)分别表示磁感应强度和磁化强度随磁化场的变化规律。磁体磁化到饱和以后， M 不再随磁场而增加。而 B 要随外磁场继续增大。这是因为 H 属于 B 的一部分，只要 H 增大， B 就随着增加。材料到达正向饱和以后， H 降低到零， B 沿 $B_s B_r$ 曲线降低到 B_r ，称此为剩余磁感应强度，简称剩

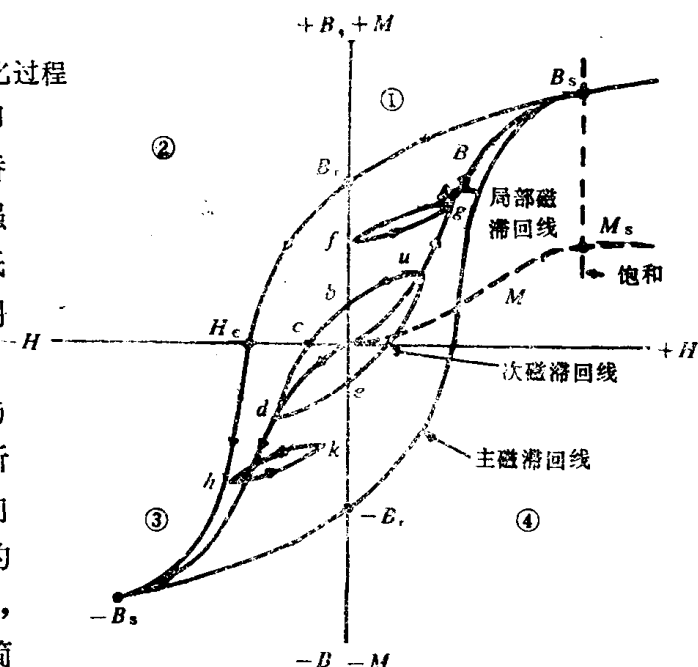


图 1-6 主磁滞回线和局部磁滞回线

限开始经过第二、第三和第四象限，在第一象限闭合。其中位于第二象限的那部分磁滞回线，称为退磁曲线，是表示永磁材料工作状态的曲线。

在外磁场逐渐增大的过程中，如果在某个中间点（例如图1-6中的a点），改变磁场的方向，则磁感应强度将沿着次磁滞回线abcdea变化。在主磁滞回线内可以形成无数个这种相对于原点对称的次磁滞回线。这些次磁滞回线的顶点联接成的曲线构成了磁化曲线。

如果材料同时受到直流偏置磁场和振幅较小的交变磁场的作用，则会形成一个不对称的磁滞回线，如图1-6中fg回线，称此为局部磁滞回线，此回线的斜率即为可逆磁导率。

磁滞回线的形状及面积，对磁性材料的工程应用十分重要。作为磁记录介质材料，尤其要考虑下列四个参数。第一个是饱和磁感应强度 B_s ，愈大愈好；第二个参数是剩余磁感应强度，愈大愈好；第三个是矫顽力，要有适当的值，如果 H_c 太小，就不可能可靠地保持信息；如果 H_c 太高，就不容易记录信息。典型的矫顽力约为 40kA/m (500 Oe)。第四个参数是磁滞回线的矩形度。矩形度愈好，保持信息的能力就愈强。尤其是采用数字记录等饱和磁记录方式，要求磁记录介质有良好的矩形度。将单畴微粒与粘合剂涂布成磁记录介质层时，需要采取磁场定向，以便改善矩形度，提高 B_r 。制备薄膜介质时，也可外加直流磁场，产生感生各向异性，以便达到同样的目的。

3. 无磁滞磁化过程

磁性材料内部的应力、杂质等不均匀性是畴壁位移及磁畴转动的障碍。在磁化过程中，除了信号磁场外，如果叠加一个幅度逐渐下降到零的交变磁场，以便帮助信号磁场克服上述障碍，就能减少磁滞，得到所谓的无磁滞的磁化过程。

最早进行无磁滞磁化的方法是将交流磁场 H_{ac} 与直流磁场 H_{dc} 叠加后的总磁场对材料磁化。如果衰减的交流磁场的起始振幅 H_{ac} 刚好能使材料饱和，则磁化状态完全由直流磁场决定，与材料原先的磁化历史无关。图1-7 (a) 表示 H_{ac} 与 H_{dc} 的关系；图 (b) 表示磁体的磁化状态。由图可见， H_{ac} 的起始振幅愈大，磁化曲线愈陡，线性范围变窄。但是，当 H_{ac} 超过某值时，磁化曲线形状不再变化，剩磁不再增大。图 (c) 表示在不同 H_{ac} 时， M 随 H_{dc} 的变化规律。

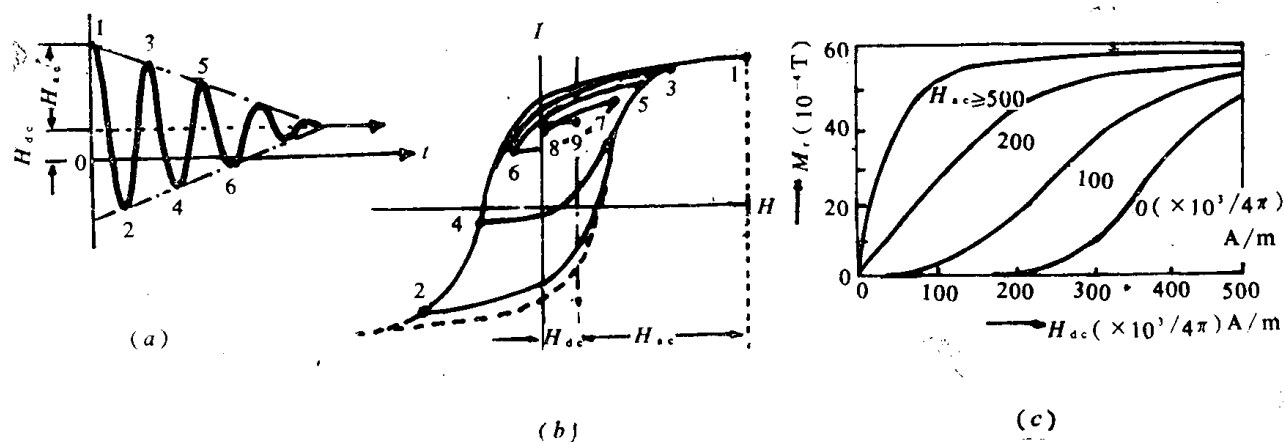


图1-7 理想无磁滞剩磁

理想无磁滞磁化虽然能较好地记录信息，但由于交流偏磁的作用，在一定程度上使信号随偏磁增减。这种增减并不是信号本身的变化规律，所以，必须对无磁滞剩磁进行修

正。这就要求使 H_{dc} 与 H_{ac} 之比保持恒定，即在 H_{ac} 减小的过程中， H_{dc} 也减小。所以，这种记录方式的剩磁比理想无磁滞的剩磁小。但是，它能更正确地反应信号的变化规律，称此为无磁滞剩磁。

§ 1.3 磁记录与磁性材料

如前所述，磁记录是一门综合性的技术，它的发展需要电子学、化学、精密机械等学科的大力支撑。而决定磁记录发展的关键，如磁记录介质、磁头等又完全依赖于磁性材料的发展，因而本节将从介绍磁记录的基本过程出发，着重介绍磁性材料在推动磁记录发展过程中所起的决定性作用。

一、磁记录的基本过程

1. 永磁体存储信息的性质

永久磁体在移走磁化场后具有明显的剩磁。这种保留磁性的特性可以用图 1-8 所示的磁滞回线来表示。磁滞回线是以磁化强度为纵坐标，外加磁场强度为横坐标构成的关系曲线。磁化强度不仅决定于磁场的大小和方向，而且与磁体的磁化历史有关。

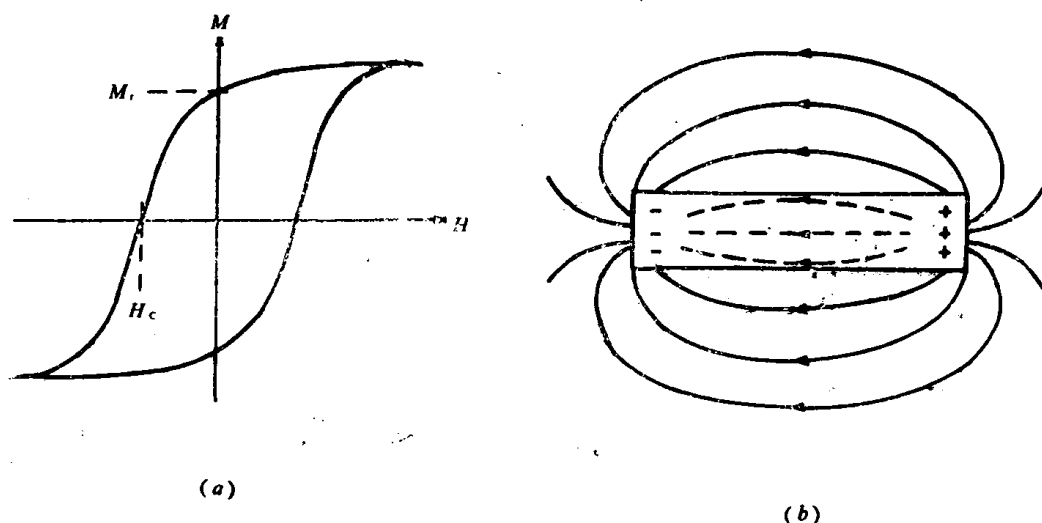
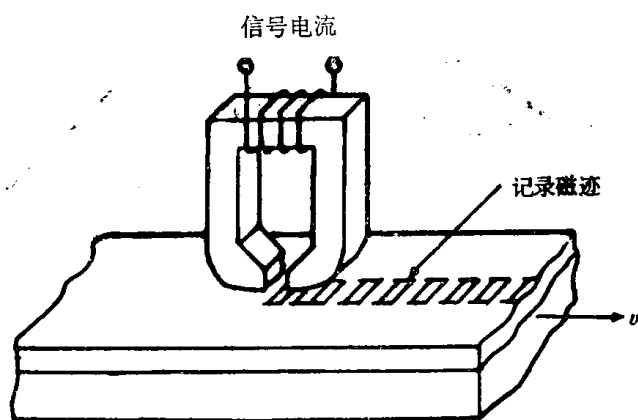


图 1-8 永久磁铁的基本特性
(a) 磁滞回线; (b) 磁棒的表面磁场分布

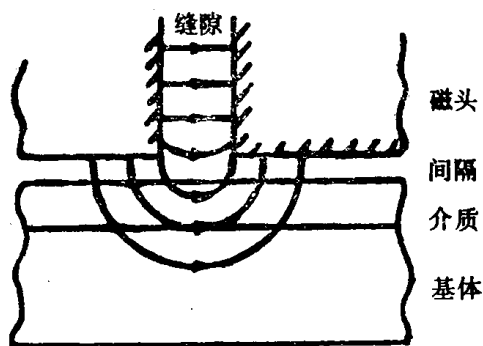
磁记录介质就是由具有这种磁化特征的、体积很小的永磁体组成的。磁化以后，可以在磁迹长度方向构成剩磁感应的分布图形。通过磁记录介质与磁头之间的相对运动，就可以按照记录信号，以相应的磁化矢量的取向把信号记录下来。图 1-9 表示了记录单个磁迹的过程。用来记录信号的磁性层是制作在非磁性的基体（如聚酯薄膜）上的。

记录磁头实际上是一个环形电磁铁，它的工作缝隙面对着介质。记录信号时，在磁头线圈中通入信号电流，就会立即在工作缝隙附近产生如图 1-9 (b) 所示的边缘场（溢出场）当介质通过磁头时，受到溢出场的作用，从而使介质磁化。如果介质与磁头的相对速度保持

不变，则剩磁沿着介质的长度方向上的变化规律就完全反映了磁化信号电流随时间的变化规律，这就是记录信号的基本过程。



(a)



(b)

图 1-9 单道磁迹记录过程的图解

(a)立体图；(b)磁头缝隙附近的磁场分布

O_3 。淀积型的金属膜是钴合金薄膜。钴合金薄膜的磁化强度高，因而可以减薄磁层的厚度。磁记录介质的矫顽力对它的工作特性有重大影响。随着磁记录密度的提高，要求相应地提高矫顽力。为了开拓性能优异的磁记录器件和缩短信号的记录波长，就一定要使用高矫顽力的材料作磁记录介质，以便克服较大的退磁场的作用。

磁记录介质有许多不同的结构，其中最为普遍的结构是磁带和软盘，此外，磁鼓和硬盘的应用也很广泛。磁带是用聚酯薄膜作为基体；而硬盘是用金属和陶瓷作基体，磁带的宽度在 4~50mm 范围，长度从 1m 至 3km。软盘直径从 75mm 至 200mm。硬盘直径从 75mm 至 360mm。实际的记录设备中可以在一个轴上同时安装多个硬盘，最多的情况可安装 12 个硬盘。

记录在介质上的磁化强度构成了一幅间隔不同，强度不等的剩磁分布图。如果将这种记录了信号的介质以记录信号时相同的速度通过磁头，则从介质表面发散的磁通将进入磁头磁芯，从而在磁头线圈中感应电压，该电压正比于磁道的变化速率。虽然线圈的感应电压不可能是记录信号的精确重复，但是经过适当的电路处理以后，就能重现记录信号。

如果介质保存适当，且不让它受强磁场的作用，则被记录的信号可以长期保存。当不再需要这些信号时，可以用消磁磁头使磁化强度的规则取向转变为混乱取向，通过消磁过程的介质可以重新记录新的信号。

2. 磁记录介质

磁记录介质是在非磁性基体上制作的磁性层。这种磁性层是由磁粉、粘合剂与分散剂等充分混合后涂布于基体上形成的。亦可以采用淀积方法获得金属磁性层。至今广泛使用的涂布型磁层其材料为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 或 $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。