

# 微波铁氧体 线性器件原理

向仁生 编



科学出版社

# 微波铁氧体 线性器件原理

向仁生 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

铁氧体器件于五十年代初开始在微波领域出现,以后微波铁氧体器件发展迅速,应用日广,已成为微波技术中一个相当重要的组成部分。本书系统地讲述微波铁氧体器件的原理,着重实际上大量应用的线性器件。本书分为三部分:1.论述铁氧体的物理效应;2.描述各类线性器件;3.讨论器件的整体分析。本书可供微波、磁学、雷达、通信等专业的有关人员参考,也可供搞材料工作和器件工作的人员参考。

## 微波铁氧体线性器件原理

向仁生 编著

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1979年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1979年7月第一次印刷 印张:6 5/8

印数:0001—17,440 字数:149,000

统一书号:15031·220

本社书号:1345·15-7

定 价: 0.70 元

## 前 言

铁氧体属于平常所说的非金属磁性材料，具有很高的电阻率。高电阻率是使铁氧体用在交变电流或交变电磁场下的有利条件，频率愈高愈明显，其原因是频率愈高时涡流损失及趋肤效应愈厉害，而高电阻率可使此二者大大减弱以至实际上消除。铁氧体同时受交变磁场及静磁场作用时会有旋磁性，多种多样铁氧体微波器件基本上都是应用旋磁性而制成的。旋磁性的出现是由于物质的磁性是由电子的旋转运动、尤其是自旋运动而产生的。

铁氧体作为磁性材料，从二十世纪三十年代起才受到重视，开始制出某些人为成分的铁氧体系列。到四十年代末，铁氧体的许多基本特性已弄得相当清楚，在无线电的中波和短波频率范围内已有重要应用。微波铁氧体器件于五十年代初开始出现，其发展极为迅速，在五十年代出现了多种线性器件。从五十年代后期起铁氧体在高微波功率下的效应即非线性效应也基本弄清，并出现了非线性器件。六十、七十年代内，线性器件（及某些非线性器件）继续发展，并广泛地应用于雷达及其他微波系统中。微波铁氧体器件较突出的特性是其非互易性。现在，对于微波这门科学技术来说，铁氧体器件已形成成为一个必不可少的重要部分。

本书主要论述铁氧体的物理效应，介绍各类铁氧体微波线性器件，扼要讨论器件的整体分析。阅读本书最好先有一些电磁场、微波技术、数学等方面的基本知识。本书可供微波、磁学、雷达、通信等专业的工人、科技人员、教师和学员参

考。

书中一般采用 MKSA 单位制, 若遇例外, 均已注明。磁学量单位有时也采用 CGSM 制。书末附录收入作者以前发表的一篇文章, 原刊于《中国科学技术大学学报》第 4 卷(1964 年)。书中专门术语, 只要可能, 均以《英汉物理学词汇》(科学出版社, 1975)年、《英汉数学词汇》(科学出版社, 1974 年)和《日英汉无线电技术辞典》(国防工业出版社, 1971 年)为准。

由于作者水平有限, 特别是缺乏生产经验, 书中会有缺点甚至错误之处, 希读者批评指正。

向仁生

1976 年 6 月

# 目 录

一、物理基础 .....	1
1. 磁性材料与磁性 .....	1
2. 铁氧体的化学特性 .....	6
A. 尖晶石型 .....	6
B. 磁铅石型 .....	8
C. 石榴石型 .....	8
3. 电子自旋与磁共振 .....	11
4. 旋磁介质 .....	14
5. 无限大旋磁介质中电磁波的传播 .....	21
6. 有损耗的旋磁介质 .....	28
7. 内磁场、高功率、温度等效应 .....	39
8. 微波铁氧体综述 .....	47
二、各类器件的基本工作原理 .....	53
9. 利用法拉第旋转的波导器件 .....	55
A. 隔离器 .....	57
B. 环形器 .....	58
C. 相移器 .....	60
D. 开关 .....	63
10. 利用场移的波导器件 .....	65
A. 场移相移效应 .....	65
B. 隔离器 .....	72
C. 差相移器 .....	73
D. 差相移环形器 .....	74
E. 开关 .....	76
11. 波导共振吸收隔离器 .....	77
12. 波导结环行器 .....	81

A. Y 结环行器	82
B. X 结环行器	84
13. 波导转移开关	85
14. 闭锁式波导相移器	88
15. 同轴线器件	91
A. 隔离器	92
B. 相移器	93
C. 开关	95
16. 带传输线器件	97
A. 隔离器	98
B. 环行器	100
C. 相移器	103
D. 开关	106
17. 集中参数隔离器和环行器	107
A. 隔离器	107
B. 环行器	110
18. 螺旋线隔离器和相移器	113
19. 磁共振调谐器件	116
A. YIG 调谐滤波器	117
B. YIG 调谐振荡器	119
20. 微波铁氧体器件综述	129
三、用于研究器件的矩阵分析	134
21. 阻抗矩阵( $Z$ 矩阵)	135
22. 散射矩阵( $S$ 矩阵)	145
23. 有关三端环行器的定理	158
24. 转移矩阵( $T$ 矩阵)	162
参考文献	170
附录 关于铁氧体微波性能的测量	172
附录参考文献	205

# 一、物理基础

这一部分主要讨论铁氧体物理特性的各基本方面，这些是制造铁氧体微波器件的根据。这些特性除高功率特性以外，在铁氧体器件出现以前基本上已经发现了。

## 1. 磁性材料与磁性

铁氧体是磁性材料的一种，故先讲一点磁性材料的一般特性。

如果磁性材料中有磁场  $H$ ，就会出现相应的磁感应强度  $B$ 。如果起始时材料没有磁化，即起始时  $H=0$ ， $B=0$ ，以后  $H$  逐渐增加， $B$  也会逐渐增加，这样得到的描绘  $B-H$  关系的曲线叫磁化曲线，示于图 1.1。  $B$  与  $H$  的数量关系为

$$B = \mu_0 H + M, \quad (1.1)$$

式中  $\mu_0$  是真空的磁导率， $M$  是材料的磁化强度，即单位体积中的总磁矩（这里我们假定了  $B$ 、 $H$ 、 $M$  方向一致，

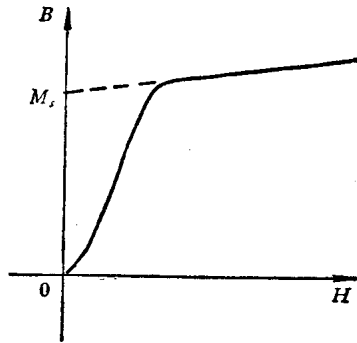


图 1.1 磁化曲线

故用标量表示)。当  $H$  足够大时， $M$  达到一定的值  $M_s$  以后即不再增加，于是  $B$  与  $H$  成线性关系， $B$  的增加完全由于  $H$  的增加， $M_s$  称为饱和磁化强度，亦示于图 1.1 中。材料的磁



导率  $\mu_m$  为

$$\mu_m = \frac{B}{H}. \quad (1.2)$$

$\mu_m$  亦可写成

$$\mu_m = \mu \mu_0, \quad (1.3)$$

式中  $\mu$  称为材料的相对磁导率, 是  $\mu_m$  与  $\mu_0$  的比值, 是一个没有量纲的值. 材料的磁化率  $\chi_m$  是

$$\chi_m = \frac{M}{H}, \quad (1.4)$$

$\chi_m$  亦可写成

$$\chi_m = \chi \mu_0, \quad (1.5)$$

$\chi$  称为材料的相对磁化率. 由式(1.1)、(1.2)、(1.4)可知

$$\mu_m = \mu_0 + \chi_m, \quad (1.6)$$

再由(1.3)、(1.5)可知

$$\mu = 1 + \chi, \quad (1.7)$$

以后这些关系会常用到<sup>1)</sup>. 由图 1.1 可推知  $\mu_m$  如何随  $H$  而变, 因而可知  $\mu-H$  的关系. 图 1.2 示出  $\mu-H$  的关系曲线.

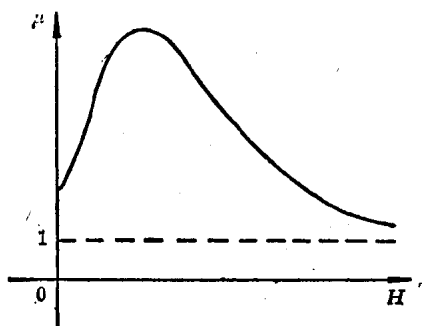


图 1.2  $\mu-H$  曲线

1) 式(1.1)至(1.7)的单位制是 MKSA 制. 同在 MKSA 制中, 有的书将式(1.1)表示成  $B = \mu_0(H + M)$ , 但我们没有采用. 在 CGSM 制中, 式(1.1)为  $B = H + 4\pi M$ , (1.7)为  $\mu = 1 + 4\pi\chi$ , 而且有  $\mu_0 = 1$ ,  $\mu_m = \mu$ ,  $\chi_m = \chi$ .  $\mu$  的数值在 MKSA 制及 CGSM 制中是一样的.

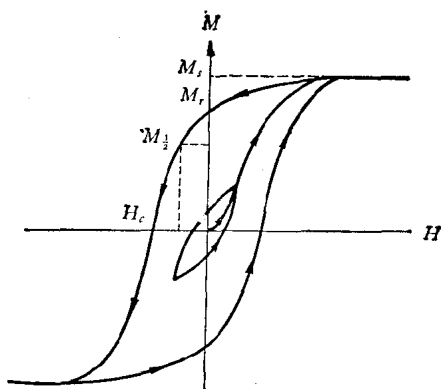


图 1.3 磁滞回线

如果  $H$  变大以后,再使  $H$  变小,直至零,然后在负方向变大到同样数值,再变小,直至变到正方向,如此反复磁化,便得到磁滞回线. 图 1.3 示  $M$  随  $H$  变化的磁滞回线( $B$  随  $H$  变化的磁滞回线形状类似,但磁化达饱和后的  $B$  值不是水平直线),图中也画了开始磁化时的磁化曲线. 图中的磁滞回线有两个,大的系反复磁化到饱和时所得,小的系反复磁化未达饱和时所得. 图中  $M_s$  是饱和磁化强度,  $M_r$  叫顽磁,也叫剩磁,  $H_c$  是  $M=0$  时的  $H$  值(反号),叫作矫顽力,  $M_{\frac{1}{2}}$  是  $H = -\frac{1}{2}H_c$  时的  $M$  值. 顽磁比  $R$  定义为

$$R = \frac{M_r}{M_s}. \quad (1.8)$$

方性比(squareness ratio)  $S$  定义为

$$S = \frac{M_{\frac{1}{2}}}{M_r}. \quad (1.9)$$

方性比也称矩形比. 铁氧体微波器件中也有特意利用铁氧体的磁滞回线特性的,这时大致希望  $R$  和  $S$  都较大,也就是希望磁滞回线尽可能是理想的矩形.

当磁场  $H$  是交变时,  $B-H$  的变化即沿磁滞回线进行。如  $H$  的振幅不大时, 磁滞回线与一个椭圆近似。对于椭圆来说, 当  $H$  为正弦变化时,  $B$  亦为正弦变化, 且落后一个相角。令

$$H = h_0 e^{j\omega t}, \quad (1.10)$$

此式表示  $H$  按正弦变化, 式中  $h_0$  是振幅,  $\omega$  是角频率,  $t$  是时间,  $j$  是  $\sqrt{-1}$ ,  $e$  是自然对数的底。于是

$$B = b_0 e^{j(\omega t - \theta)}, \quad (1.11)$$

此式表示  $B$  也按正弦变化, 相位落后  $H$  一个相角  $\theta$ 。令

$$b_0 = \mu_0 |\mu| h_0, \quad (1.12)$$

其中  $|\mu|$  指相对磁导率的绝对值, 于是

$$B = \mu_0 |\mu| e^{-j\theta} h_0 e^{j\omega t} = \mu_0 \mu H, \quad (1.13)$$

其中

$$\mu = |\mu| e^{-j\theta} = \mu' - j\mu'', \quad (1.14)$$

$$\mu' = |\mu| \cos \theta, \quad \mu'' = |\mu| \sin \theta. \quad (1.15)$$

由此可知, 在这种情况下  $\mu$  是复数。  $\mu'$ ,  $\mu''$  的物理意义可以这样看:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 (\mu' - j\mu'') H = \mu_0 (\mu' - j\mu'') h_0 e^{j\omega t} \\ &= \mu_0 \mu' h_0 e^{j\omega t} + \mu_0 \mu'' h_0 e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \end{aligned}$$

即  $H$  产生的  $B$  有两部分, 一部分与  $H$  同相, 这部分与  $H$  的比是  $\mu_0 \mu'$ ; 另一部分相位较  $H$  落后  $90^\circ$ , 这部分与  $H$  的比是  $\mu_0 \mu''$ 。  $\mu''$  还另有一物理意义: 反复一周时, 材料的单位体积消耗的能量  $w$  为

$$w = \pi \mu_0 \mu'' h_0^2, \quad (1.16)$$

即  $w$  与  $\mu''$  成正比。

$B$  的相位落后于  $H$  表明  $M$  的相位也落后于  $H$ 。磁性材料中凡有一种损耗能量的机制, 都表现为一种  $M$  的相位落后。平常所说的磁滞损失是由于材料中磁畴的运动。除这种

损耗能量的机制以外,还有多种其他的机制,例如涡流损失就是一种。铁氧体的电阻率特高,简直就是绝缘体,涡流损失可以忽视不计,这是铁氧体可以用于高频的主要原因。后面将谈到的磁共振现象中,也有能量损耗,其来源还有几种不同的机制。关于能量损耗的机制问题,我们就不讨论了,这里只说明,复数磁导率的虚数部分表示材料的损耗。

磁性的根源,过去认为是由于所谓磁荷的存在。根据现代的观点,磁荷的存在被否定了,因在实验上从未找到磁荷这种东西(这种情况与电荷不同。人类在实验当中确实发现带电荷的质点,如电子、质子等)。根据现代的观点,磁性的根源是带电质点的旋转运动(旋转运动包括轨道运动与自旋运动)。单个带电质点的轨道运动产生轨道磁矩,自旋运动产生自旋磁矩。单个质子的自旋磁矩比单个电子的自旋磁矩小得多,小三个数量级,约为千分之一点五。单个原子的磁矩是其中所有电子、核子的各种磁矩的总矢量和(因核子磁矩比电子磁矩小得很多,故平常所说原子磁矩指其中电子磁矩的总矢量和)。原子磁矩等于零的原子叫非磁性原子(例如惰性气体原子),原子磁矩不等于零的原子叫磁性原子(例如铁、钴、镍等过渡族原子及稀土族原子)。

大量原子的集合体表现出来的磁性就是物质的宏观磁性。在原子集合体中,尤其在固体中,磁性原子的磁矩常几乎全来自其电子自旋磁矩,而其电子轨道磁矩几乎不起作用。如果集合体中有磁性原子,所有磁性原子之间无相互作用,都独立地与外磁场起作用,则宏观磁性为顺磁性。如果集合体中有磁性原子,磁性原子之间有相当强的相互作用使它们在某临界温度以下就同一方向取向,则宏观磁性为铁磁性。这临界温度叫居里(Curie)点。温度高于居里点时,铁磁物质表现顺磁性。温度低于居里点时,整块铁磁性物体可以表现出

有磁矩，也可以表现出没有磁矩。这是因为：整块铁磁物体分成许多小的区域，每个区域以内磁性原子是取向的，但区域间却不一定取向，结果，整块铁磁物体各区域磁矩的总矢量和可以不等于零，也可以等于零。这种小的区域叫磁畴。磁化铁磁物体就是使其磁畴的磁矩取向。磁畴内的磁化浓度（单位体积的磁矩）叫自发磁化浓度，也就是使整块铁磁物体磁化到饱和时的饱和磁化强度。如果集合体中有磁性原子，磁性原子之间有这样的相互作用使它们在某临界温度以下按相反的方向均等地取向，结果总磁矩等于零，则宏观磁性为反铁磁性。这临界温度叫奈耳（Neel）点。如果集合体中有磁性原子，磁性原子之间的相互作用（可能经过中介）使它们在某临界温度以下按相反的方向不均等地取向，结果总磁矩不等于零，则宏观磁性为亚铁磁性。亚铁磁物体也有磁畴。一般铁氧体就是亚铁磁物质。磁性材料一般是铁磁物质或亚铁磁物质。

## 2. 铁氧体的化学特性

什么是铁氧体？铁氧体是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与其他金属的氧化物化合而成的物质，是复合氧化物。故铁氧体一定含有铁，含有氧。铁氧体这个名词出现以前，曾叫“铁淦氧磁物”或“铁淦氧”，又叫“磁性瓷”。

就其化学特性上来说，现已用于微波的铁氧体有下述三种类型：

### A. 尖晶石型

尖晶石是一种矿物，分子式可写成  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ，也可写成  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，属立方晶系。如果以  $\text{M}^{++}\text{O}$  代换  $\text{MgO}$ ， $\text{M}^{++}$  代

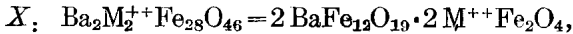
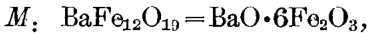
表任意的一种二价金属,以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  代换  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 则可人工制成一系列非金属磁性材料,或复合氧化物磁性材料,这就是尖晶石型铁氧体. 这类铁氧体的晶体结构与尖晶石的相同,普通的化学式可写成  $\text{M}^{++}\text{Fe}_2\text{O}_4$  或  $\text{M}^{++}\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{M}^{++}$  可以是 Mg、Cu、Zn、Ni、Mn、Co、Fe 等的任一种,但都要作为二价金属而存在. 磁铁矿,即  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 就是 Fe 铁氧体. 实用的材料常不是单纯的铁氧体而是复合铁氧体,即二价金属不是单纯的一种而是有二种或三种. MnZn 铁氧体, NiZn 铁氧体是射频频段常用的材料,微波中则多用 MgMn 铁氧体和 MgMnAl 铁氧体. 尖晶石型铁氧体是发展较早的材料,四十年代已有多种用途了,那时主要是作为取代铁粉芯的材料而使用的(化学式  $\text{M}^{++}\text{Fe}_2\text{O}_4$  是正规的形式,以后有变异).

固体中的原子一般是规则排列的,这种原子排列叫晶体结构. 在尖晶石或尖晶石型铁氧体中,氧原子成为带负电的二价离子,组成一个所谓面心立方格子;金属原子成为带正电的二价和三价离子,位于氧离子格子的间隙中. 面心立方格子的间隙有两种:一种是所谓四面体位置,即  $A$  位置,此处邻近有四个氧离子,形成一个正四面体(四个面都是全等的正三角形);一种是所谓八面体位置,即  $B$  位置,此处邻近有六个氧离子,形成一个正八面体(八个面都是全等的正三角形). 晶胞是原子排列的最小的单元,正象一块砖,用它可以叠成整个的宏观晶体. 尖晶石的晶胞有 8 个  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  这样的原子组成,其中适宜于被金属离子占据的  $A$  位置有 8 个,  $B$  位置有 16 个. 尖晶石型铁氧体中,磁性离子(主要是  $\text{Fe}^{+++}$ )常按一定的分配占据  $A$  位置和  $B$  位置.  $A$  位置和  $B$  位置中磁矩的排列可以有多种不同的情况,因而产生多种不同程度的亚铁磁性,即多种不同大小的饱和磁化强度. 由此可见,我们可以用改变磁性离子磁矩大小(即更换磁性离子的种类,或说换不

同的原子)的办法或改变位置分配的办法来改变饱和磁化强度的大小。这一点对研制铁氧体器件是很有用的,因不同的器件常要求有不同大小的饱和磁化强度。

## B. 磁铅石型

磁铅石也是一种矿物,属六角晶系。天然产磁铅石的成分大致是  $\text{Pb}(\text{Fe}_{7.5} \text{Mn}_{3.5} \text{Al}_{0.5} \text{Ti}_{0.5})\text{O}_{19}$ ,仿此可以人工制成具有同样晶体结构的  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ 、 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 、 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  等,其中以  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  的实用价值最高,即平常所说的钡铁氧体。钡铁氧体的矫顽力、剩余磁化强度都大,宜于作永磁材料,例如用作喇叭的永磁体。以钡铁氧体为基础,出现五种磁铅石型铁氧体,以  $M$ 、 $W$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  代表,它们是:



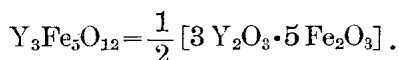
这系列材料常用  $\text{Zn}_2\text{Y}$ 、 $\text{CO}_2\text{Z}$  这一类符号表示。这类材料在微波中也颇有应用,并且常同时利用其剩余磁化强度所产生的静磁场。这类材料是在五十年代早期发展起来的。

这种铁氧体的晶体结构比较复杂,现只简单地说一点情况。钡铁氧体的晶胞含有 2 个  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,其中 24 铁离子占有 5 种不同的位置,称之为  $2a$ 、 $2b$ 、 $12b$ 、 $4f_1$  和  $4f_2$  (即  $a$  位置 2 个,  $b$  位置 2 个,余仿此)。最后的磁化强度是这 5 种位置上的铁离子(磁性离子)的磁矩所表现出来的亚铁磁性的总结果。

## C. 石榴石型

石榴石也是一种矿物,属立方晶系,天然产的成分是( $\text{Fe}$ 、

$\text{Mn})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ 。用人工方法以  $\text{Fe}^{+++}$  取代其中的  $\text{Al}_2$  和  $\text{Si}$ ，以  $\text{Y}^{+++}$  取代其他金属，晶体结构不变，即得到



这种铁氧体是钇铁石榴石，平常简称 YIG。这种材料的特点是磁共振峰的线宽很窄，是微波应用中的一种贵重材料，是五十年代后期发展起来的。有时用其他稀土金属如 Sm、Gd 等取代一部分 Y 以改变饱和磁化强度的数值。有的微波器件用 YIG 小球。如果球是单晶，而且表面磨得极光滑，线宽可小至一个奥斯特以下。

YIG 的晶胞含有 8 个  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  化学式。金属离子所占位置有 3 种，称之为  $24c$ ， $16a$ ， $24d$ 。 $c$  位置由  $\text{Y}^{+++}$  离子占据，有 8 个氧离子近邻，其中 4 个距离稍近，4 个距离稍远。 $a$  位置是八面体位置，由晶胞中的 16 个  $\text{Fe}^{+++}$  占据。 $d$  位置是四面体位置，由晶胞中所余的 24  $\text{Fe}^{+++}$  离子占据。 $\text{Fe}^{+++}$  是磁性离子， $\text{Y}^{+++}$  是非磁性离子。

固体材料有单晶和多晶之分。在单晶中，整块晶体内原子排列都是规则的；在多晶中，整块晶体分成许多区域，每一区域是单晶，区域与区域之间取向是不规则的。这种区域叫晶粒。有时晶粒的大小也影响铁氧体器件的性能。单晶材料制备起来当然比较费事，单晶中在不同方向的性能常有不同，某些较贵重的铁氧体器件使用单晶材料，而且按其选定的取向使用。多晶材料宏观地看来是各向同性的，多数铁氧体器件使用多晶材料。铁氧体多晶材料的制备，常用的方法是所谓陶瓷工艺的方法，即把原料按一定比例混合（原料可以直接是所需金属的氧化物，也可以是碳酸盐、硫酸盐、硝酸盐等盐类，由它们提供所需金属的氧化物，其中的不需要的碳、硫、氮等的氧化物在烧结中成为气体跑掉），球磨，压制成所需要的



形状, 烧结。有时在压制成所需形状之前, 重复烧结、球磨一次甚至多次。烧结的温度、时间、气氛及升温降温过程对成品质量有很大影响。要想得到重复性好的产品, 须细致而严格地控制工艺细节。

铁氧体材料以至一般说来磁性材料, 如按其被使用的性能划分, 大致可以分成五类:

(1) 软磁材料 软磁材料即磁芯材料, 用作各种频率下的变压器或电感元件的芯子。使用时一般不加静磁场只有交变场。这种材料要求磁滞回线的面积小, 即磁滞损失小, 也要求电阻率高, 即涡流损失小。另外, 要求磁导率高。

(2) 永磁材料 永磁材料即硬磁材料, 作永磁体用。这种材料要求磁滞回线肥大, 亦即剩磁大、矫顽力大。就磁滞回线说, 这种材料的要求刚好与软磁材料的要求相反。

(3) 压磁材料 压磁材料即磁致伸缩材料, 利用其压磁效应。压磁效应即磁致伸缩效应。这效应可用来作超声波发生器。这种材料要求磁致伸缩效应大。电阻率大也有利, 可减少涡流损失。

(4) 矩磁材料 矩磁材料即矩形磁滞回线材料, 要求磁滞回线的矩形性愈强愈好, 可用作电子计算机的记忆元件。电阻率愈高对提高计算速度愈有利, 因计算速度愈高涡流损失便会愈大。由于电子计算机的需要, 这类材料近年来发展很快, 新的重要突破不断出现。

(5) 旋磁材料 旋磁材料是微波器件所使用的材料。被使用的性能是所谓旋磁性(关于旋磁性下面再讲)。使用时除有交变磁场外, 须另加静磁场。对这种材料的要求, 除要求于软磁材料的那些主要方面外(磁滞损失小, 电阻率高), 还有好些项目主要是饱和磁化强度和磁共振线宽, 对这些项目数值大小的要求, 不同的器件往往很不相同。以后会多次谈到