

## 第二章 磁性材料基础

### 2-1 铁氧体的磁性能

铁氧体是一种非金属磁性材料。这种材料一般是由铁、锰、镁、铜等金属氧化物粉末按一定比例混合压制成型再在高温下烧结而成的。由于它的制造方法与陶瓷相似，所以它也叫磁性瓷。

这类材料属于亚铁磁性物质。也有磁畴结构。它的磁性在很多方面与铁磁性材料相似。它的  $B$ 、 $H$  关系曲线也是磁滞回线。

从磁特性上看，铁氧体的初始磁导率较高，但稳定性较差。饱和磁感应强度较低，一般在  $0.2 \sim 0.3\text{T}$  之间。 $H_c$  也较小，例

如锰锌铁氧体  $H_c = 80\text{A/m}$ ，所以一般讲，它属于软磁材料。不少铁氧体材料具有较好的矩磁特性，矩形比可做到  $0.85 \sim 0.95$ 。

铁氧体的居里点比常用的铁磁性材料低。一般允许在  $100^\circ\text{C}$  以下。

与铁磁性材料比较，铁氧体最大的特点是它的电性能好，即它的电阻率特别高，一般比铁磁材料大百万倍，所以它非常适于作在高频下工作的器件的铁心。它的矩磁特性也使它适于作逻辑元件，电子计算机存贮器的磁心就是用铁氧体做的。

### 2-2 铁氧体的物理参数

#### 1 参数表

符号	单位	定义
$A_e$	$\text{mm}^2$	磁芯有效截面积
$A_{\min}$	$\text{mm}^2$	磁芯最小截面积
$A_L$	nH	电感因数
$B$	T	磁通密度
$B_r$	T	剩余磁通密度
$B_s$	T	饱和磁通密度
$\hat{B}$	T	峰值磁通密度
$C$	F	电容
$D_F$	-	减落因数
$f$	Hz	频率
$G$	$\mu\text{m}$	气隙长度
$H$	$\text{A/m}$	磁场强度
$H_c$	$\text{A/m}$	矫顽力
$\hat{H}$	$\text{A/m}$	峰值磁场强度
$I$	A	电流
$l_e$	mm	有效磁路长度
$L$	H	电感
$N$	-	匝数
$P_V$	$\text{MW/cm}^3$	磁芯损耗

续表

符号	单位	定义
$Q$	-	品质因数
$T_c$	$^\circ\text{C}$	居里温度
$V_e$	$\text{mm}^3$	磁芯有效体积
$\alpha_F$	$\text{K}^{-1}$	磁导率温度系数
$\tan\delta/\mu_i$	-	损耗因数
$\eta_B$	$\text{T}^{-1}$	磁滞常数
$\mu$	-	绝对磁导率
$\mu_0$	$\text{Hm}^{-1}$	真空磁导率 $4\pi \times 10^{-7}$
$\mu'_s$	-	复数磁导率的实部
$\mu''_s$	-	复数磁导率的虚部
$\mu_a$	-	振幅磁导率
$\mu_e$	-	有效磁导率
$\mu_i$	-	初始磁导率
$\mu_r$	-	相对磁导率
$\mu_\Delta$	-	增量磁导率
$\rho$	$\Omega\text{m}$	电阻率
$\Sigma(1/A)$	$\text{mm}^{-1}$	磁芯常数

在磁性材料规格中,损耗因数  $\tan\delta/\mu_i$  通常用来描述磁芯损耗,其中包括剩余损耗和涡流损耗,但是不包括磁滞损耗。

对于滤波器中的电感,品质因数  $Q$  是衡量电感特性的重要参数。其定义式如下式所示:

$$\Omega = \frac{1}{\tan\delta} = \frac{\omega L}{R_{tot}} = \frac{\text{电抗}}{\text{总阻抗}}$$

其中总阻抗包括绕组在设计频率下有效阻抗。

(8) 磁滞常数  $\eta_B$

随着磁芯磁通密度的不断增加,磁滞损耗将会越来越显著。磁滞常数对磁芯总损耗的影响可以在 1.5mT 和 3mT 电感水平下测出。磁滞常数可以通过下式得出:

$$\eta_B = \frac{\Delta \tan\delta_m}{\mu_c \cdot \Delta B}$$

特定磁通水平下的磁滞损耗因数可能通过下式得出:

$$\frac{\tan\delta_h}{\mu_e} = \eta_B \cdot B$$

(9) 有效磁芯尺寸 ( $l/A$ ),  $A_e, I_e, V_e$

理想环形磁性的电抗如下式所示:

$$\frac{I_e}{\mu \cdot A_e}$$

对于非标准形状的磁芯,上式可以改写为:

$$\frac{1}{\mu_e} \cdot \sum \frac{1}{A}$$

磁芯电感可以通过下式计算得出:

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{\mu_e} = \frac{1.257 \times 10^{-9} N^2}{\mu_e} (H)$$

磁芯有效面积用来计算磁通密度,对于正弦波可用下式表示:

$$\hat{B} = \frac{U \sqrt{2} \cdot 10^9}{\omega A_e N} (mT) = \frac{2.25 U \cdot 10^8}{f N A_e} (mT)$$

其中:  $A_e$  是磁芯有效截面积,单位  $mm^2$ ;

$U$  是电压,单位 V;

$f$  是频率,单位 Hz;

$N$  是匝数。

(10) 电感因数  $A_L$

为了便于计算线圈的电感量,于是便引入了电感因数  $A_L$ 。

磁芯的电感量定义为:

$$L = N^2 A_L$$

$A_L$  可以通过磁芯常数和有效磁导率计算得出:

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_e \cdot 10^6}{\sum \frac{1}{A}} = \frac{1.257 \mu_e}{\sum \frac{1}{A}} (nH)$$

(11) 磁化曲线 ( $H_c, B_r, B_s$ )

在软磁材料上施加交变磁场就可以得到磁滞环路。随着磁场强度的增加,磁通密度也随之增大直至上升到最大值  $B_s$ ,即

饱和磁通密度。如果此时将磁场去除,磁芯中将保留一定的磁通密度,称为剩余磁通密度。如果加以一定强度的反向磁场,磁通将减小至零,此时的磁场强度称为矫顽力。如图 4 所示。

(12) 磁导率的温度特性 ( $T_C, \alpha_F$ )

铁氧体的磁导率是温度的函数。随着温度的上升,磁导率将逐渐上升至最大值,而后陡降为 1。这一时刻的温度值称为居里温度。

在滤波器应用中,必须充分考虑磁导率的温度特性,以使 LC 滤波器应当具有良好的温度稳定性。

温度系数  $T_C$  由下式决定:

$$T_C = \frac{(\mu_i)_{T_2} - (\mu_i)_{T_1}}{(\mu_i)_{T_1}} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

对于带气隙的磁路,磁导率受温度的影响会有所下降,如下式所示:

$$T_{C_{gapped}} = \frac{\mu_e}{(\mu_i)_{T_1}} \cdot \frac{(\mu_i)_{T_2} - (\mu_i)_{T_1}}{(\mu_i)_{T_1}^2} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} = \mu_0 \alpha_F, so$$

$$\alpha_F = \frac{(\mu_i)_{T_2} - (\mu_i)_{T_1}}{(\mu_i)_{T_1}^2} \cdot \frac{1}{T_1 - T_2}$$

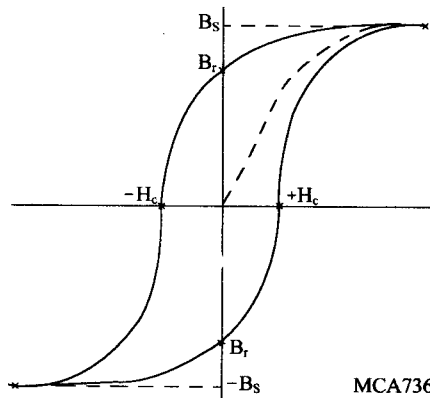


图 4 磁化曲线

(13)  $T_{IME}$  Stability

在软磁材料上施加磁场或使其温度发生变化,磁性材料的磁导率将突升而后缓慢下降,这一磁导率下降的现象可以定义为:

$$D = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1}$$

磁导率的下降与时间的对数关系成正比。因此,IEC 定义了磁导率下降系数:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \log_{10}(t_2/t_1)}$$

磁导率下降因数  $D_F$  定义为:

$$D_F = \frac{d}{\mu_i} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_i^2 \log_{10}(t_2/t_1)}$$

这样线圈电感量的变化可由下式表示:

$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} = \mu_e D_F$$

(14) 电阻率  $\rho$

MnZ 型铁氧体的 DC 电阻率为  $10^{-3}\Omega\text{m}$ , NiZn 型铁氧体的 DC 电阻率为  $30\Omega\text{m}$ 。由于铁氧体内的晶体之间的绝缘层,因此体电阻率都相当高。MnZn 型铁氧体的体电阻率达到了  $1-10\Omega\text{m}$ , NiZn 和 LiZn 型铁氧体的体电阻率达到了  $10^4-10^7\Omega\text{m}$ 。

电阻率的实际大小受温度的测量频率大小的影响,如表 1 和表 2 表示。由表中可知电阻率是温度的函数。

表 1 DC 电阻率和温度的关系 材质 3C80

表 1

温度(°C)	直流电阻率( $\Omega\text{m}$ )
-20	$\approx 10$
0	$\approx 7$
20	$\approx 4$
50	$\approx 2$
100	$\approx 1$

表 2 DC 电阻率和温度的关系 材质 4C6

表 2

温度(°C)	直流电阻率( $\Omega\text{m}$ )
0	$\approx 5 \cdot 10^7$
20	$\approx 10^7$
60	$\approx 10^6$
100	$\approx 10^5$

随着频率的升高,由于晶体间寄生电容的影响而形成短路,铁氧体的电阻率将迅速下降,如表 3 和表 4 所示。

表 3 DC 电阻率和频率的关系 MnZn 铁氧体

表 3

频率(MHz)	直流电阻率( $\Omega\text{m}$ )
0.1	$\approx 2$
1	$\approx 0.5$
10	$\approx 0.1$
100	$\approx 0.01$

表 4 DC 电阻率和频率的关系 NiZn 铁氧体

表 4

频率(MHz)	直流电阻率( $\Omega\text{m}$ )
0.1	$\approx 10^5$
1	$\approx 5 \cdot 10^4$
10	$\approx 10^4$
100	$\approx 10^3$

(15) 介电常数(permittivity)  $\epsilon$

表 5 和表 6 所示为介电常数和温度的关系。

表 5 介电常数和频率的关系 MnZn 铁氧体

表 5

频率(MHz)	介电常数( $\epsilon_r$ )
0.1	$\approx 2 \cdot 10^5$
1	$\approx 10^5$
10	$\approx 5 \cdot 10^4$
100	$\approx 10^4$

表 6 介电常数和频率的关系 NiZn 铁氧体

表 6

频率(MHz)	介电常数( $\epsilon_r$ )
0.001	$\approx 100$
0.01	$\approx 50$
1	25
10	15
100	12

由于罐型磁芯包含气隙,因此方形和叉形磁芯  $A_L$  的取值仅受磁芯尺寸的影响。实际当中,  $A_L$  的取值已经标准化,并能够覆盖绝大多数应用场合。

如果磁芯的气隙不对称,则气隙应当在上半磁路中接地。

大多数预调节式磁芯都带有调节螺母。连续可调式磁芯可获得一系列所需的  $A_L$  值,其最大调节范围在 10%—30% 之间,具体数值取决于磁芯的型号。在滤波电感应用中推荐采用连续可调式磁芯。

(16)  $\alpha$  因数和  $A_L$  因数

$\alpha$  因数定义为使给定磁芯电感量达到 1mH 是所需的匝数。对于其他类型的磁芯,其电感量应为:

$$N = \alpha \sqrt{L}$$

其中,  $L$  的单位为  $10^{-3}\text{mH}$ 。

$A_L$  因数定义如下式所示:

其中,  $L$  的单位为  $\text{nH}(10^{-9}\text{H})$ 。

对于  $A_L$  因数较低的磁芯,杂散电感将对磁芯中线圈的位置以及匝数产生一定的影响。

(17)  $\mu_e$  与  $\alpha$  因数和  $A_L$  因数之间的转换关系

$\mu_e$  与  $\alpha$  因数和  $A_L$  因数之间的转换关系如图 5 至图 7 所示。

$$L = N^2 A_L$$

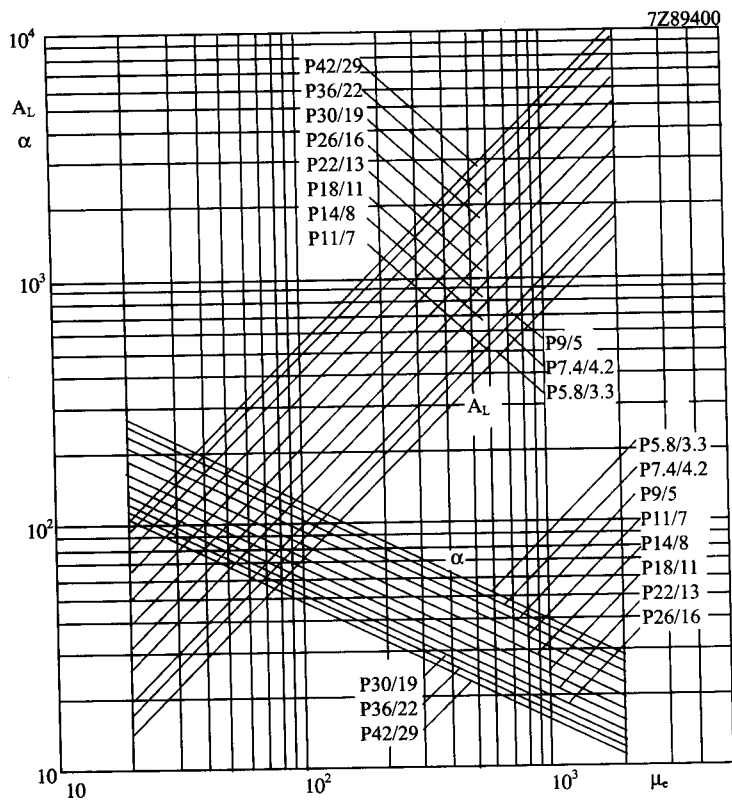


图 5 P型磁芯的转换关系

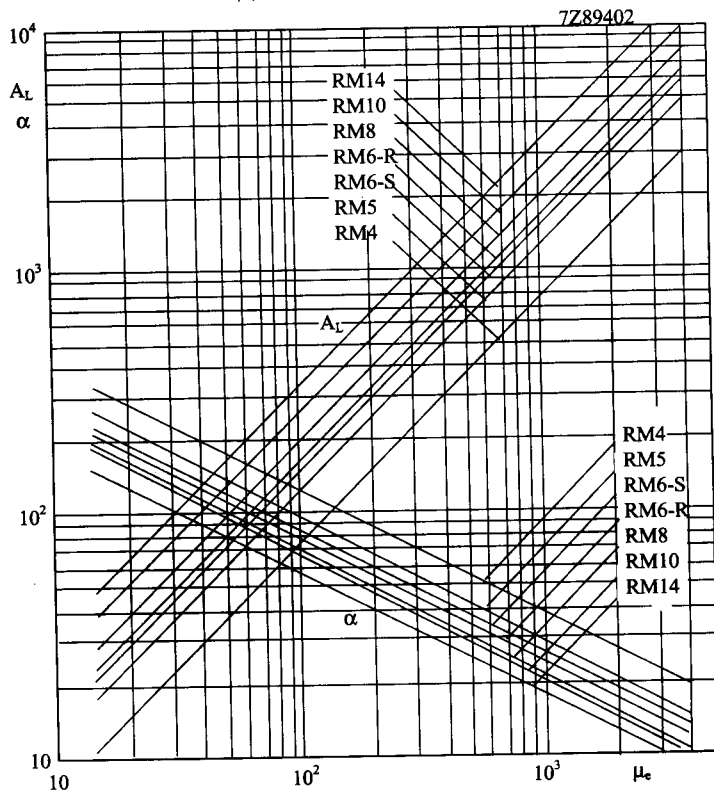


图 6 RM型磁芯的转换关系

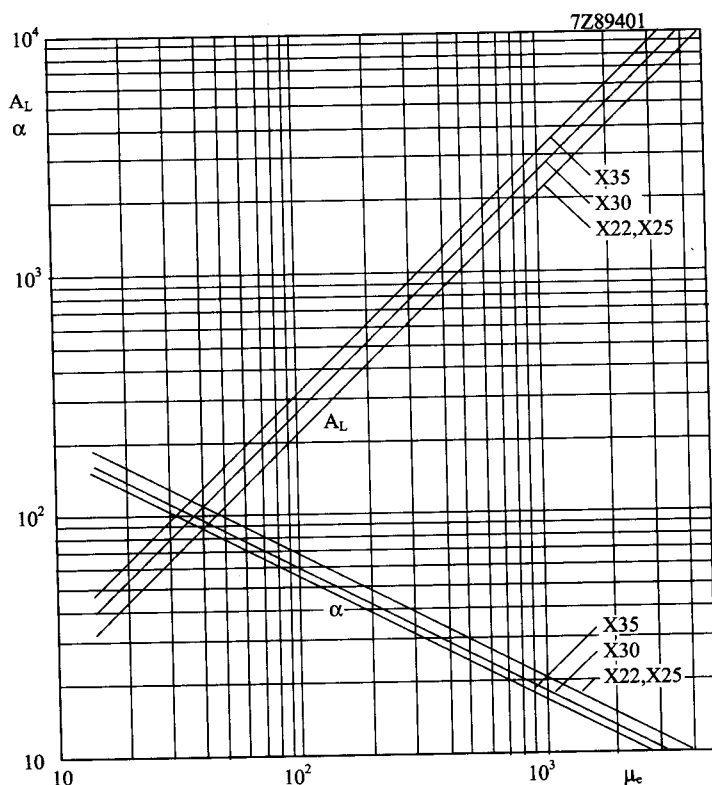


图7 X型磁芯的转换关系

## 2-3 铁氧体材料的几种功能类型

软磁铁氧体是一种功能材料,用它做成的元器件在电子工业、信息产业、家用电器、通信、计算机等领域有广泛的用途,起着其它元器件不能替代的作用,至今仍保持着旺盛的生命力。据著名铁氧体专家 M. Ruthner 对全球软磁铁氧体行业的评估,世界软磁铁氧体需求量的平均年增长率将继续保持在 10~15% 的水平,在 2000 年将达到 30 万吨。我国软磁铁氧体的产量,1997 年已达到 4 万吨,预计在 2000 年将达到 6 万吨,可能超过日本,占世界第一位。

其次,相关领域的发展,有时也会给处于山穷水尽境地的某种材料的发展带来柳暗花明的机遇。再者,我国工艺水平较低,产品档次不高,仍有许多工作要做,以适应电子产品向轻薄短小化、高频宽带化、高功率低损耗化的方向发展。下面评述一些前景看好的材料及其应用。

### 1 高 $\mu_i$ 铁氧体

高起始磁导率  $\mu_i$  铁氧体材料属于 MnZn 铁氧体系列,从 MnZn 铁氧体问世以来一直是研制人员和用户关注的一类材料。目前国外大批量生产水平  $\mu_i$  已达 10000,有些公司(例如日本 TDK、Tokin)已能批量生产  $\mu_i = 18000$  的产品;研制水平为

20000~23000。国内大批量生产水平为 7000~8000,个别工厂能生产  $\mu_i = 10000$  的产品;研制水平为 12000~13000,例如海宁市天通公司报道研制成功 TL13 材料(R13k),莱芜磁材厂报道已稳定生产 R12k 粉料。

对高  $\mu_i$  材料的性能要求是: $\mu_i$ 、居里温度  $T_c$  尽量高,损耗因数  $\text{tg}\delta/\mu_i$  和  $\mu_i$  的温度系数  $\alpha_{\mu_i}$  尽量低,饱和磁通密度  $B_s$  通常为 320~420mT。 $\mu_i$  值与频率有关,要求  $\mu_i \sim f$  曲线在宽频带内持平。 $T_c$  由配方决定,其余参数与工艺条件密切相关。

高  $\mu_i$  材料的制粉方法有氧化物法和共沉淀法,均可获得满意的结果。合适的配方是提高  $\mu_i$  的前提条件,通常选择在低  $K_1$  和  $\lambda_s$  成分区域( $K_1$  是磁晶各向异性常数, $\lambda_s$  是磁致伸缩系数),再配以有利于形成理想微结构的添加剂,例如  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  和  $\text{MoO}_3$  可增大晶粒尺寸。氧化物法用的氧化物原料纯度应在 99.5% 以上,并需严格控制  $\text{SiO}_2$  含量在 0.005% 以下。国内对共沉淀法有较多偏爱,水平也优于国外,使我国高  $\mu_i$  材料和元器件生产水平取得了突破性进展。共沉淀法制的粉料烧结活性好,杂质含量少(可通过提纯工序降低杂质含量),但用它制备的高  $\mu_i$  材料的高频特性稍差。

高 $\mu_i$ 材料的烧结方式是造成国内外差距的主要原因。MnZn铁氧体烧结工艺要求特定的气氛和温度曲线,控制烧结和冷却过程中的氧分压,使Fe和Mn达到合适的氧化—还原状态。烧结过程中Zn挥发会引起成分偏差,可采用同种料粉掩埋法、加盖板、匣钵内放置ZnO压制件等方法减少Zn挥发。晶粒尺寸主要由烧结温度和烧结时间决定,选取合适的烧结条件,并控制得好可达到理想的微结构:晶粒大而且均匀、内部气孔少、内应力小,从而有利于形成畴壁和畴壁位移,减少畴壁钉扎, $\mu_i$ 自然会提高。国外 $\mu_i$ 低于10000的材料在 $N_2$ 气窑中烧结; $\mu_i \geq 10000$ 的材料在钟罩炉中烧结。而国内普遍采用的仍是 $N_{12}$ 气窑, $\mu_i$ 难以达到10000;或者用真空烧结炉,产品一致性差;钟罩炉还没有推广使用,但据说已有国产品问世。据报道,德国Riedhammer公司最近推出的钟罩炉用于烧结高 $\mu_i$ 材料取得较好的效果。日立公司的使用报告称:温度均匀性: $\pm 4 \sim 5^\circ C$ ,气氛均匀性: $\pm 2\%$ 。用于烧结 $\mu_i = 15000 \pm 25\%$ 材料,结果为 $\mu_i = 14500 \sim 15900$ ;烧结 $\mu_i = 18000 \pm 25\%$ 材料,结果为 $\mu_i = 18000 \pm 5\%$ 。

高 $\mu_i$ 材料用于低频段,主要用途有:1)电源共模电磁干扰(EMI)滤波器,用来消除出入电源线-地和线-线间的电磁干扰,常做成低通滤波器形式;2)宽带变压器,用于综合业务数字网、局域网、宽域网等数字网络及通信系统中,起阻抗匹配、信号变换和隔直流等作用;3)电感磁心,用于通信系统等电子设备。

## 2 功率铁氧体

功率铁氧体(power ferrite)也称电源铁氧体,是一种高 $B_s$ 低损耗材料。主要用于高频开关电源中的主变压器磁心、高分辨率显示器和高清晰度彩电中的回扫变压器,作功率转换;还用于开关电源中的平滑扼流圈。其产量约占软磁铁氧体总量的30%~40%,近几年内其销售额平均年增长率在10%以上。随着工作频率的提高,其名称前又冠以“高频”二字。关于高频开关电源的最高实用工作频率可达到多少的问题,曾有人做过投票统计,约有75%的设计者认为应在1MHz以上,其中又以1~3MHz者居多。

这类材料也属于MnZn铁氧体系列。对它的性能要求,主要是高 $B_s$ 和低功耗 $P_c$ 。前者由配方决定,常温下约为500mT,100°C下约为400mT;后者与工艺条件密切相关,可采用添加剂和工艺控制进行调整。此外,功耗还与使用条件(频率、温度、最大工作磁通密度 $B_m$ )有关。对起始磁导率 $\mu_i$ 一般要求不高,在2500以下。日本的TDK是世界一流的软磁铁氧体公司,生产的PC30、40、44、50系列功率铁氧体已成为我国产品比照的大致标准。工作频率范围为20kHz~1MHz。国内天通公司的TP4型(相当于PC40)材料已投入批量生产;898厂、899厂、电子九所也已通过定型生产相当于PC40的材料;898厂还研制成功了

R1.4k材料(相当于PC50)。性能与日本同类产品相当,个别性能有些上下。以PC40为例,在100kHz、200mT、100°C以下, $P_c = 385 \sim 450 mW/cm^3$ 。

为了降低功耗,首先必须降低在高频下占主要地位的涡流损耗。为此,必须提高晶粒和晶粒边界的电阻率,这可通过添加剂来达到。另一方面,对铁氧体材料的微结构也有一定的要求,理想的微结构应是在确保有适当的 $\mu_i$ 的前提下减小晶粒尺寸,以增多晶界。晶界的电阻率比晶粒的高,对降低功耗更有利。例如,PC50材料的晶粒尺寸比PC40材料减小了2/3。这可以通过降低烧结温度这种传统的方法来达到。但晶粒降到5 $\mu m$ 后,已没有多大余地再进一步降低。因此,现在研究得较多的是添加剂对降低功耗的作用。传统的提高晶粒、晶界电阻率的方法是组合添加CaO-SiO<sub>2</sub>。但仅添加CaO-SiO<sub>2</sub>来降低功耗已到了极限,目前达到的最低功耗为100mW/cm<sup>3</sup>(在1MHz、50mT、60°C下),仅为普通低功耗材料的1/5,要进一步降低功耗应寻找新的添加剂。

一般说来,起始磁导率 $\mu_i$ 和功耗 $P_c$ 对粒径的要求是矛盾的。通过减少气孔使组织致密化,并使晶粒细化,可在某个粒径范围内同时使 $\mu_i$ 和 $P_c$ 得到改善。熔点在1000°C以下的添加物在铁氧体化学反应时熔融进入晶界,抑制晶粒长大,使晶粒细化。同时,存在于晶界的气孔也因进入晶界的添加物而减小,甚至消失。从而得到密度大的、细小而且均匀的微结构。添加物的阳离子半径接近Fe离子半径时,容易互相置换,可更有效地抑制晶界移动。大晶粒固然对提高 $\mu_i$ 有利,但如果小晶粒中的气孔率降低,使有效体积增大所起的效果超过晶粒细化的负面效果,也可提高 $\mu_i$ 。在氧化物添加剂熔点极高的情况下,即使在烧结温度(1350°C)下也很稳定,可起抑制晶粒长大的作用。

因此,为了进一步降低功耗,在配方上,除了添加传统的CaO-SiO<sub>2</sub>外,还应添加第三种、甚至第四、第五种添加剂。已知的有TiO<sub>2</sub>、SnO<sub>2</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、HfO<sub>2</sub>、ErO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等,它们都进入晶界,起抑制晶粒长大、增大晶界电阻率的作用。如果不添加CaO-SiO<sub>2</sub>,则添加ZrO<sub>2</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ErO<sub>2</sub>等也有较明显的效果。

关于功率铁氧体的制粉问题,目前普遍采用的是(共)喷雾焙烧法(Ruthner法)。国内宝钢磁业公司已有大批量生产。用这种粉料也可制作高 $\mu_i$ 材料。这种工艺是利用可热分解的金属氯化物溶液(FeCl<sub>3</sub>/FeCl<sub>2</sub>、MnCl<sub>2</sub>,前者可利用酸洗钢废液经提纯获得),经Ruthner喷雾焙烧炉得到氧化铁和氧化锰的混合物粉料。再加入单独制作的ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>粉料,即得到MnZn铁氧体粉料。个别厂家可用(共)喷雾焙烧法直接制得氧化铁、氧化锰和氧化锌三种氧化物的混合物粉料,但难度很大。(共)喷雾焙烧粉料的优点是粒度均匀,活性好,不需预烧,可利用洗钢废液作

原料。缺点是需要提纯设备,喷雾焙烧炉需配盐酸回收装置。因此,有人建议将共沉淀生成的复盐或氧化物湿混料浆经砂磨后送入 Ruthner 炉中,直接生产 MnZn 铁氧体粉料,可克服上述缺点。西门子公司已对共沉淀复盐做了试验。取得很好的效果。

现在先进的窑炉已问世。例如温度、气氛更均匀,冷却能力强,生产周期较短的升降窑、钟罩炉及大型真空炉(炉产 150~200kg)。采用硅钼棒后温度可达 1400℃ 以上,而且利于气氛控制。这些进步必将大大促进功率铁氧体和超高  $\mu_i$  铁氧体的生产。

除上述两种 MnZn 系铁氧体外,还有一种电阻率较高的高频低功耗 MgMnZn 铁氧体,用于高清晰度彩电和高分辨率彩显的偏转线圈,以适应其行扫描频率的提高,不需象 MnZn 系偏转磁心那样绕绝缘带。这也是一种需求量较多的材料。

### 射频频铁氧体

射频频铁氧体是指在射频频下使用的铁氧体,以 NiZn 系铁氧体为代表。它的电阻率  $\rho$  和截止频率  $f_c$  比 MnZn 系铁氧体的高。它的应用有两个方面:1)在截止频率以下,与上述两种 MnZn 铁氧体一样,做电感磁心,利用  $\mu'$  特性;2)在截止频率以上,用作抗 EMI 材料,利用  $\mu''$  和  $\epsilon''$  在高频下增大的特性,即其损耗特性起主要作用。

NiZn 铁氧体的制作不需 MnZn 铁氧体那样的烧结气氛控制,因此对窑炉的要求相对较低。对其微结构,也要求有细小而且均匀的晶粒。

#### (1) 射频电感磁心

这是上述的 1) 类用途,其材料有 NiZn、NiCuZn 等系列。要求其  $\mu'$  尽量高些,使用频率范围在 1~1000MHz。广泛用于闭路电视系统、音像电子设备、移动通信、寻呼机等。

还有一种 LiZn 软磁铁氧体,其截止频率比 NiZn 系铁氧体还高,直流叠加特性好,已部分取代 NiZn 系材料,例如用于共用天线电视系统中的双孔磁心、彩电电感磁心、计算机滤波器电感磁心等<sup>[13]</sup>。

#### (2) 抗 EMI 铁氧体

由于现代电子设备、通信设备、PC 机互联网等的迅猛发展,伴随产生了大量的电磁干扰(EMI)。这些干扰几乎无处不在,它们以传导和辐射方式影响人体健康、武器装备、各种电子设备、国家安全信息等多个方面,严重时会引起大事故。为了减小这种影响,需要使用具有高频损耗特性的抗 EMI 材料做成的 EMI 滤波器,以抑制传导的 EMI;用吸波材料进行电磁屏蔽,抑制辐射的 EMI。

软磁铁氧体的高频损耗特性可用其阻抗频率特性(图 1)来说明。在截止频率  $f_c$  以下,  $\mu' \gg \mu''$ , 磁心阻抗  $Z$  主要来源于其等效电抗  $X$ , 即  $Z \approx X = j\omega L_0 \mu'$ , 式中  $L_0$  是空心线圈电感

量。这时较磁铁氧体磁心作为能量传输和转换元件,以电感器和变压器的形式被广泛应用。在截止频率  $f_c$  以上,  $\mu'' \gg \mu'$ , 磁心阻抗  $Z$  主要来源于其等效电阻  $R$ , 即  $Z \approx R = \omega L_0 \mu''$ 。这时磁心的总阻抗  $Z = R + jX$  趋于最大值,已不再能做能量传输和转换元件,而是一个损耗元件,可用来抑制,吸收高频干扰信号。

抗 EMI 材料要求的磁导率  $\mu'$  不高,约为 1500 以下,但要求在宽频带内有很大的阻抗。电子九所研制的 NiCuZn 铁氧体系列 R30、R40、R50、R60、R70、R80 材料,比较适用做 EMI 材料。其主要性能是:  $\mu' = 55 \sim 1500$  ( $\pm 20\%$ ), 温度系数  $\alpha_{\mu'} = (2 \sim 35) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $B_s = 320 \sim 360\text{mT}$ ,  $T_c = 100 \sim 300^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 10^7 \Omega\text{m}$ <sup>[14]</sup>。

抗 EMI 材料做的扼流圈与电容器一起构成  $\pi$ 、L、T 型 EMI 滤波器,用途广泛,品种繁多。按不同用途,磁心可做成串珠形、环形、半圆形、U 型、圆形多孔、矩形多孔、板型等系列。做成有电流叠加的电源 EMI 滤波器和无电流叠加的信号线 EMI 滤波器。电子九所研制的信号线 EMI 滤波器的插损可达到 15~70dB,使用频率范围为 0.03MHz~10GHz;高损耗品种的插损为 15~90dB。

## 4 VHF/UHF 铁氧体

在移动电话等高频通信中,使用频率已逼近 1GHz。在这样的高频下,传统的尖晶石铁氧体受 Sneak 极限的限制已不能使用。即使是  $\text{Co}_2\text{Z}$  型磁铅石铁氧体,截止频率  $f_c$  (这时,  $Q = \mu'/\mu'' = 1$ ) 也仅为 1GHz。为了达到更高的使用频率,需提高其各向异性,从而提高共振频率。将  $\text{Co}_2\text{Z}$  中的 BaO 用 SrO 代换可达到这一目的。日本的本村修等选用  $2\text{CoO} \cdot 3\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{O} \cdot 10.8\text{Fe}_2\text{O}_3$  缺 Fe 配方,预烧条件为空气中 1200℃  $\times 1\text{h}$ ,采用氧气热压烧结(1100~1200℃)  $\times 30\text{min}$ ,或将 1150℃  $\times 30\text{min}$  的氧气热压烧结样品在氧气中退火(1170℃和 1200℃)  $\times 2\text{h}$ ,可得到如下性能:  $\mu'_{1\text{GHz}} = 4.4 \sim 12.5$ 、 $f_c = 1.6 \sim 2.9\text{GHz}$ 、 $f_r = 1.8 \sim 3.4\text{GHz}$ 、 $Q_{1\text{GHz}} = 8.9$ 。电子九所马兴明等采用  $2\text{CoO} \cdot 3\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4} \cdot 11.4\text{Fe}_2\text{O}_3$  缺 Fe 配方、掺入微量 Si,在空气中烧结(1170℃  $\times 1\text{h}$ ),得到的性能为  $\mu'_{1\text{GHz}} = 11.0$ 、 $Q_{1\text{GHz}} = 18$ 。用这种材料做成的  $\text{KS}3.3 \times 2.1 \times 2.4 \times 1$  型磁心,在 1GHz 下  $L = 4.6\text{nH}$ 、 $Q \geq 10$ ,工作频率范围为 65~1650MHz,优于美国同类产品。

## 5 电(磁)波吸收材料

电(磁)波吸收材料也用于抗 EMI,其材料系列涉及上述所有的系列。与 EMI 滤波器不同的是它不接入线路中,主要用于电波暗室、建筑物墙面、隐形技术、防止雷达假像、电磁波故障对策等。吸波材料应有宽的区配频段和薄的匹配厚度。

### (1) 单层铁氧体吸波体

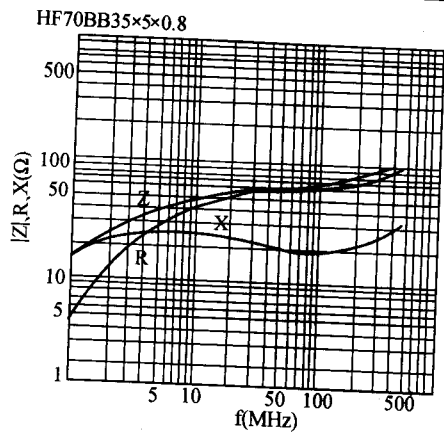


图1 铁氧体磁心的阻抗 Z、等效电抗 X、等效电阻 R 的频率特性

最简单的吸波体是单层铁氧体,通常是将铁氧体片贴在金属片上构成。其吸波作用基于其共振特性,与磁损耗( $tg\delta = \mu''/\mu'$ )有关。因此,在 $\mu'' > \mu'$ 的频段内才能有效地吸收电波。此外还需满足零反射条件:其归一化(对自由空间阻抗 $Z_0$ )输入阻抗

$$Z = Z_{in}/Z_0 = 1 \text{ (衰减为 } \infty \text{)}$$

$$Z = Z_{in}/Z_0 = \sqrt{\mu/\epsilon} \cdot \text{tgh}[j(2\pi/\lambda) \cdot \sqrt{\mu\epsilon}]$$

式中, $\lambda$ 是波长, $t$ 是铁氧体厚度, $\mu$ 是铁氧体的复数磁导率, $\epsilon$ 是铁氧体的复数介电常数。铁氧体的匹配频率是由上述参数决定的。对于给定 $\mu$ 、 $\epsilon$ 的一种铁氧体,存在满足 $Z=1$ 的匹配频率 $f_m$ 和匹配厚度 $t_m$ ,有的可有两个。通常 $Z \neq 1$ ,衰减(反射损耗 $RL$ )应在20dB左右, $RL$ 的表达式为:

$$RL = 20 \lg |(Z-1)/(Z+1)| \text{ [dB]}$$

表1示出了一些铁氧体吸波体的匹配频率和匹配厚度。

单层吸波体除用铁氧体制作外,还可用铁氧体、碳基铁、非

晶合金和橡胶、塑料等粘结剂做成复合体,通过改变它们的配比可调节 $f_m$ 和 $t_m$ 。

(2)多层和其它吸波体

研制一种新的吸波材料,费时费钱;利用原有的材料进行配合使用,也可展宽匹配频带或移动匹配频率,降低匹配厚度,方法有:

(1)叠片吸波体

它可以是铁氧体 A + 铁氧体 B 或铁氧体 + 碳基铁、电介质、复合体构成(铁氧体在外),可以是双层或多层。铁氧体 + 铁氧体叠层对匹配频带几乎没有影响,而匹配频率 $f_m$ 移向两铁氧体 $f_{mA}$ 和 $f_{mB}$ 之间,并且随厚度比 $t_2/(t_1+t_2)$ 的增大而增大。这一结果暗示着只要改变各层的厚度就能制得在 $f_{mA}$ 和 $f_{mB}$ 之间的某一频段的吸波体。

铁氧体 + 电介质叠层吸波体可增大高频段的输入阻抗,其衰减随电介质厚度 $d$ 增大而增大;而在低频段则不起作用。电介质在扩宽频带方面也是有效的,如表1所示。在某一频率下,电介质的区配厚度 $d_m$ ,随介电常数增大而减少,这对制作薄的吸波体有利。

(2)外加直流磁场可使匹配频带移向高频,降低匹配厚度;同时控制外加磁场和铁氧体厚度也可改变匹配频率特性。

(3)多铁氧体分布面吸波体

用两种以上性质各异的吸波材料按一定规律分布在金属片表面上构成。通过改变各材料的占有面积、分布规律、厚度、外加直流磁场等方法改变匹配频率特性。

(4)开孔铁氧体吸波体

这是改变铁氧体匹配频率的一种更简单的方法,而且原来不能匹配的材料经开孔后也可达到匹配。

表1 各种铁氧体的 $f_m$ 和 $t_m$

吸波材料	$f_{m1}$	$f_{m2}$	$t_{m1}$	$t_{m2}$
	GHz	GHz	mm	mm
$Ni_{0.2}Zn_{0.8}Fe_2O_4$	0.18		9	
$Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	0.59		4.0	
NiCuZn	(0.41)* <sup>1</sup>		(4.6)	
$(Nn_{0.2}Zn_{0.8}Fe)_2Y$	1.25		6	
$Ni_2Y$	1.2		4.5	
$Co_2Z$	5.7	15	2.8	2.3
MzZn - 橡胶 ( $\psi_{fer}^* = 0.26$ )	1.8		4.5	
MzZn - 橡胶 ( $\psi_{fer} = 0.40$ )	6.74		4.35	
NiZn - 橡胶	2.19	11.6	7.0	2.55
	10.5		3.35	



续表

材料	$f_{m1}$	$f_{m2}$	$t_{m1}$	$t_{m2}$
	GHz	GHz	mm	mm
	2.6	10.7	5.8	3.4
$Zn_{0.4}Co_{0.2}Fe_2O_4$ - 橡胶	6.43	11.4	3.9	2.9
$Zn_{0.3}Co_{0.4}Fe_2O_4$ - 橡胶	11.39		2.3	
Y - 橡胶	8.9		3.1	
ZnY - 橡胶	4.9	12.7	4.0	2.6
Y - 橡胶	3.0	11.8	5.9	2.7
基铁 - 橡胶	4.1		1.5	
基铁 - 橡胶 + 铁电材料	1.8		1.5 + 0.1	
基铁 - 橡胶 + 铁电材料	0.9		1.5 + 0.5	
CuZnCo 铁氧体	0.1 ~ 0.6 <sup>*3</sup>		8	
CuZnCo 铁氧体 + 电介质	0.13 ~ 0.7		8 + 3	
CuZnCo 铁氧体 + 电介质	0.15 ~ 0.95		8 + 6	

\*1 括内为  $N_2$  气中烧结的铁氧体;\*2  $\phi_{fer}$  为铁氧体的体积分数,其余的复合体均为铁氧体/橡胶(重量) = 4/1;

\*3 为匹配频带

出许多片式电感类器件,如片式磁珠、片式变压器、片式滤波器、片式斩波器、片式延迟线等,已商品化。

表 2 TDK 生产的片式电感器

型号	$L(\mu H)$	$Q$	测试频率(MHz)
	0.01 ~ 1000		
ACL	1	50	25.2
3225	10	60	7.96
	100	50	2.52Z
	0.047 ~ 220		
MLF	1	45	10
3216	10	50	2
	100	55	1

研制中的片式磁性元件还有:夹层式薄膜电感器、闭磁路平面线圈电感器、薄膜变压器、编织型薄膜电感器、变压器、环联磁心电感器。都需采用薄膜工艺,适用于磁性集成电路。

## 微型磁性元件

随着电子装置的小型化,出现了与其相适应的表面组装技术(SMT)。它所采用的电子元器件也相应地小型化、集成化、高频化,通称片式(平面)元器件。片式元器件中,半导体集成电路等有源器件和电阻器、电容器等无源元件已有长足的发展;而磁性元件(例如电感器、变压器)则相对落后得多。这是因为小型元件要达到足够的电感量和品质因数很困难。另一方面,磁性元件中电路和磁路交织在一起,也给工艺造成不少困难。

最早出现的片式电感器是绕线型的,它是传统绕线电感器的小型化产物。后来又出现了叠层型片式电感器,采用厚膜电路工艺制作。现在所采用的差不多就是这两种。片式电感器采用的铁氧体材料是 NiCuZn 和 CuZnLiTi 系铁氧体,其特点是可以低温烧结,不会因与 Ag 电极共烧结而影响性能;高频特性也好。

表 2 列出了 TDK 公司生产的 ACL3225 绕线型和 MLF3216 叠层型片式电感器的主要性能。国内生产的片式电感器远不能满足要求,每年约需 2~3 亿只。由片式电感器生产技术可派生

## 2-4 铁氧体磁芯的损耗和实用工作频率

铁氧体磁芯变压器的传输功率正比于工作频率和磁通密度。所以工作频率提高后,对于给定的磁芯体积,可以增加功率传输量;对于给定的功率要求,可以缩小磁芯体积。这种关系可用下列公式表明:

$$P_{th} = W_d \times C_d \times f \times B$$

式中:

- $P_{th}$  = 传输功率;
- $W_d$  = 线圈设计参数;
- $C_d$  = 磁芯设计参数;
- $f$  = 开关频率;
- $B$  = 磁通密度。

随着功率 MOS 场效应管和多层膜陶瓷电容器等元器件的发展,开关电源(SMPS)的设计趋势是采用愈来愈高的工作频率,目前已超过 1MHz(参见图 1)。

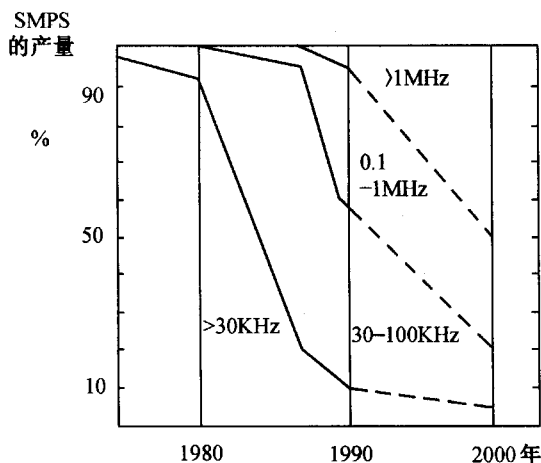


图 1 SMPS 工作频率变化趋势

然而,对现有的变压器磁芯而言,增加工作频率实质上加大了磁芯损耗。PC40 和 PC30 传输功率和频率的关系示于图 2,研究表明,在较低的频率下( $\leq 100\text{kHz}$ ),传输功率主要受磁芯的饱和值限制。然而,在更高的频率下,损耗的增加导致磁芯过热,从而限制了传输功率。所以高频应用时,最重要的技术问题是降低损耗。

变压器磁芯的主要损耗由下列三部分构成:

- (1)磁滞损耗
- (2)涡流损耗
- (3)剩余/共振损耗

磁滞损耗的产生机理是磁通密度  $B$  滞后于驱动磁场  $H$ 。

$B/H$  图是一个封闭的回线,每一周的磁滞损耗正比于回线面积。磁滞损耗可由下式表示:

传输功率

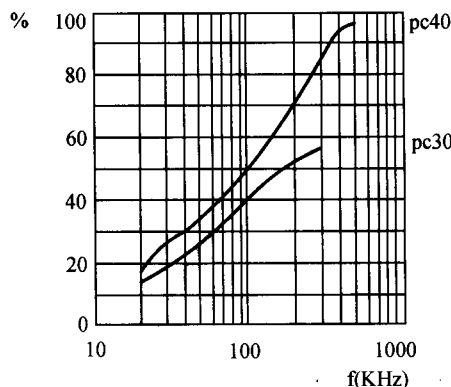


图 2 PC30, PC40 材料传输功率与工作频率的关系

$$P_{hyst} = C_a \times f^x \times B^y$$

- 式中:  $P_{hyst}$  = 磁滞损耗;  
 $C_a$  数;  
 $B$  = 磁通密度峰值;  
 $f$  = 频率;  
 $x$  和  $y$  由实验导出。

涡流损耗是由磁通在铁氧体中引起的小涡流造成的。这些小涡流以热的形式耗散,能量的损耗可表示为:

$$P_{ec} = \frac{C_b \times f^2 \times B^2 \times A_e}{\rho}$$

式中:

- $P_{ec}$  = 涡流损耗;
- $C_b$  = 常数;
- $A_e$  = 磁芯的有效截面积;
- $\rho$  = 电阻率

剩余/共振损耗是由于高频下材料磁畴取向的反转引起的。当驱动频率与磁畴反转的自然频率共振时,就会出现很大的功率吸收峰。剩余/共振损耗可表示为:

$$P_{res} = C_c \times f \times B^2 \times \frac{\tan \delta}{\mu}$$

式中:  $P_{res}$  = 剩余/共振损耗;

$C_c$  = 常数;

$$\tan \delta = \text{损耗角正切} = \frac{\mu''}{\mu'};$$

$$\mu = \text{复数磁导率} = \mu' + j\mu''.$$

PC40 铁氧体的三种主要损耗均显著下降。图 3 示出在 100kHz 和 100mT 条件下, PC30 和 PC40 材料各种损耗成份与温

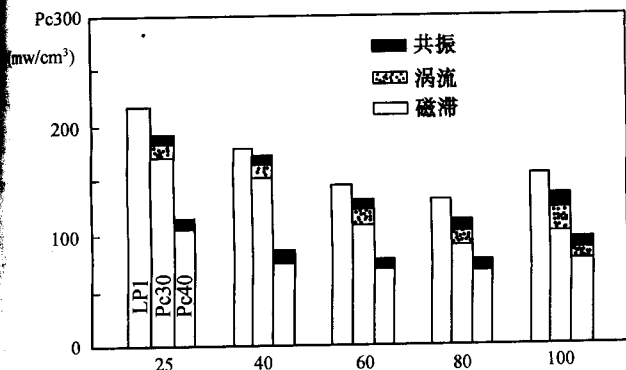


图 3 材料在 100kHz 和 100mT 时损耗与温度的关系

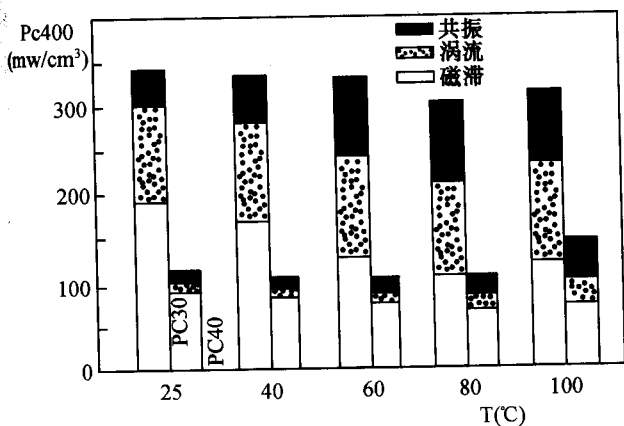


图 4 PC30 和 PC40 在 400kHz, 50mT 时损耗与温度的关系

度的关系。在更高的频率下, 例如 400kHz, 涡流损耗和共振损耗

已占支配地位。从图 4 中我们看到, PC40 的各种损耗均大大下降(约 PC30 的 60%), 尤其是涡流损耗和共振损耗下降更为明显。

另外, 从图 3、图 4 可以看出, 损耗的最低温度被控制在 80°C 附近, 换句话说, 从室温直到 80°C 损耗随温度的上升是逐渐下降的, 这一材料特性可防止出现过热现象, 所以十分适用于 SMPS。

图 5 则对给定的磁芯单位体积损耗值 200mW/cm³, (据信该值是变压器设计中最大磁芯损耗的典型取值) 示出两种材料 B/f 关系。可见在任何磁通下, PC40 的工作频率高于 PC30。例如, 在 100mT 时, PC40 可工作于 250kHz, 而 PC30 只能工作于 170kHz。综合各种因素, 我们建议在 SMPS 或 DC-DC 转换器

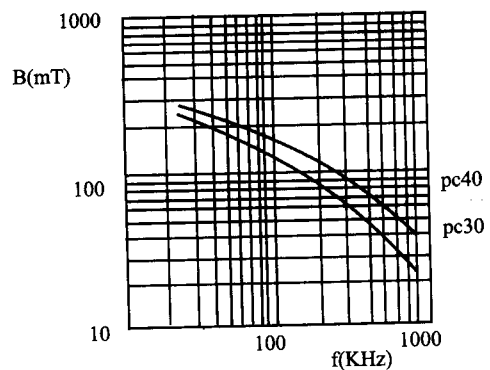


图 5 损耗为常数 200mW/cm³ 时, 三种材料的磁通密度与工作频率的关系

中这两种材料用转换变压器时, 最高实用频率分别为: PC30—200kHz、PC40—500kHz。

表 1 列出 PC40 铁氧体的主要电磁性能指标。

表 1 PC40 铁氧体材料电磁性能

名称	符号	单位	指标
初始磁导率	$\mu_i$		2300 ± 25%
振幅磁导率(200mT)	$\mu_a$		3000min
居里温度	$T_c$	°C	215min
饱和磁通密度(1194A/m)	$B_s$	mT	510
剩余磁通密度	$B_r$	mT	95
矫顽力	$H_c$	A/m	12
电阻率	$\rho$	$\Omega\text{m}$	6.5
密度	$d$	$\text{g}/\text{cm}^3$	4.8
功率损耗(100kHz200mT)	$P_c$	$\text{mW}/\text{cm}^3$	600 (25°C)
			500 (60°C)
			410 (100°C)

注: 除注明外, 所有性能项目均在室温(25°C)下测量。

## 2-5 用于开关电源技术的铁氧体材料

### 1 软磁材料在开关电源技术中的应用

软磁材料是指矫顽磁力小,容易磁化的磁性材料,以软磁材料为主要材料制成的电磁器件是开关电源技术中应用的主要器件之一。

软磁材料制成的电磁器件在开关电源技术中的作用有:作为电压和功率变换用的变压器,包括高频电源变压器和脉冲变压器;驱动和触发半导体开关器件的驱动和触发变压器;整流滤波用的滤波电感器;帮助半导体开关器件换向的换向和谐振电感器;功率因数校正用的电感器;抑制电磁干扰和吸收噪声的电感器;调节电感的可控电感器;作为功率调节的饱和电感器;用作脉冲调制的磁开关;电流检测用的电流互感器……等等。

软磁铁氧体以前在1MHz以下使用时所隐藏的损耗机制不清问题,在高频电源技术中暴露出来,推动了软磁铁氧体的进一步改进。现在已经研制出来的软磁材料可以使用的工作频率推进到100MHz和1GHz。不是象以前那样落后于半导体器件的工作频率,而是远远领先于现在使用的半导体器件,从而推动半导体器件向更高的工作频率发展。

### 2 开关电源技术对软磁材料的要求

电源技术的主要研究对象是电源产品,作为产品的电源,自然带有商品的属性。对所有的电磁器件和软磁材料也自然要求象商品一样:能可靠使用、性能好、成本低,还要适合于规模批量生产:

软磁材料的直流参数:饱和磁通密度  $B_s$ 、矫顽磁力  $H_c$ 、初始磁导率  $\mu_i$ 、最大磁导率  $\mu_m$ ,可以代表磁材料性能的优劣,是软磁材料和电源技术研究工作者关心的主要参数。软磁材料在工作频率下的交流参数,更是电源技术工作者关心的主要参数。特别是在一定工作频率和一定工作磁通密度下的软磁材料的损耗,是电源技术中应用的软磁材料的一个共同关心的主要参数。软磁材料的损耗包括涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗,除了与材料的物理参数电阻率、材料使用的尺寸如宽度和厚度有关而外,还与磁通在软磁材料中的变化速度有关,也就是与电磁器件的工作磁通密度  $B_m$  和工作频率  $f$  有关。因此表示软磁材料的参数——单位重量(或体积)的损耗  $P_c$ ,都要标明使用的工作磁通密度  $B_m$  和工作频率  $f$ ,一般用  $P_c B_m / f$ 。  $B_m$  的单位用 T 或 0.1T (KGS),  $f$  的单位用 Hz 或 KHz。在一定工作频率下的电源技术中的电磁器件,为了使软磁材料的损耗限制在一定数值之下,因此电磁器件使用的软磁材料的工作磁通密度  $B_m$  不可能接近直流参数的饱和磁通密度  $B_s$  (除开作为磁性开关的电磁器件而

外),有可能比  $B_s$  小得多。电源技术中电磁器件的损耗,主要是软磁材料损耗,在整个电源产品损耗中(尤其是高频电源)占有相当大的比例。因此,电源技术中应用的软磁材料的发展过程,在很大程度上是在追求在同样工作频率  $f$  和工作磁通密度  $B_m$  下损耗逐步下降的过程。

在超过1MHz以上的工作频率下,由于测试电源和测试条件的限制,不能直接测损耗,而测磁导率,间接表示在这种工作频率下和磁通密度(磁场强度)下的软磁材料损耗。

软磁材料磁性发生变化的温度——居里温度  $T_c$ ,也是电源技术应用中一个重要参数。居里温度高,表示软磁材料的工作温度高。另外,也希望软磁材料生产单位能提供磁通密度、磁导率和损耗随温度变化的数据。特别是软磁铁氧体,一般都要给出25℃、60℃、100℃时的磁通密度、磁导率和损耗数据,因为这种软磁材料对温度比较敏感。

磁致伸缩系数  $\lambda_s$  也是电源技术中应用的软磁材料的一个重要参数,磁致伸缩系数  $\lambda_s$  的大小直接影响软磁材料工作时产生的可听噪声。在工作频率10Hz~20KHz声频范围内,产生的噪声大小,是电源技术中电磁器件一个重要指标,尤其是在重视包括减少可听噪声污染的环境保护的当今世界,更要注意,必要时采取措施来降低可听噪声。

电源技术中应用的软磁材料的性能一致性,对批量生产的电源产品有很重要的意义,特别是对稳定产品性能和降低成本有直接关系。

### 3 软磁铁氧体

20世纪40年代二次世界大战中发明了雷达,要求能在中高频和高频领域中工作的软磁材料,从而发明了锰锌软磁铁氧体和镍锌软磁铁氧体。由于软磁铁氧体具有电阻率高,批量生产容易、性能稳定,可利用模具制成各种形状的铁心,特别是成本低等特点,迅速推广到整个电源技术的中频和高频领域,到现在为止,仍然是这些领域中大量使用的软磁材料,尤其在大规模生产的家用电器的电源中,占绝对统治地位。但是,加工大型软磁铁氧体不容易,一个原因是大型热压机,另一个原因是产品易破碎,成品率低,因此软磁铁氧体的使用功率受到限制。

从20世纪40年代到现在,软磁铁氧体在不断的发展。其主要方向一是改变软磁铁氧体的成分。锰锌铁氧体已派生出锰锌铁氧体和锰铜铁氧体。镍锌铁氧体已派生出镍铜铁氧体。除了基本的氧化物而外,还添加  $CaO$ 、 $SiO_2$ 、 $Nb_2O_5$ 、 $ZrO_2$ 、 $Ta_2O_5$  等氧化物。一是改变工艺,使粉末细化,从而减少损耗和提高工作频率。

以用于电源变压器的锰锌铁氧体为例,已经有四次改进换代,IEC发布的分类标准 IEC1332-1995,中国国内也发布相应的标准,将它们按性能分为 PW1、PW2、PW3、PW4、PW5 五类(见表1)。PW1类是70年代以前的产品。PW2是70年代更新换代的第一代产品,如日本 TDK 的 H35,中国的 R2KD,用于100KHz左右的中高频领域。PW3是80年代初更新换代的第二代产品,如日本 TDK 的 H7CI(PC30),中国的 R2KBD,用于300KHz左右的高频领域。PW4是80年代后期更新换代的第三代产品,如日本 TDK 的 H7C4(PC40),中国的 R2KB1,用于500KHz左右的高频领域,PW5是90年代更新换代的第四代产品,如日本 TDK 的 H7F(PC50),中国的 R1.4K,用于500KHz以上的调频领域。日本 TDK 和德国西门子公司已开发出磁导率达  $1.5 \times 10^4$  的产品。国内高于  $1 \times 10^4$  高磁导率产品仍处于试制阶段。

有人认为软磁铁氧体电阻率高,从而得出在电源技术中频和高频领域中,软磁铁氧体损耗比其他软磁材料低的结论。但

是经过仔细的研究后,推翻了这种错误的认识。90年代初有人详细研究过一种添加 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 的锰锌铁氧体在 10MHz 以下的损耗机制,进行了仔细的测量和分析。在 Bmf 为 25000KHzmT 条件下, f 低于 1.1MHz 时,软磁铁氧体损耗决定于磁滞损耗,与频率 f 成反比,随 f 升高而逐渐下降,在 1.1MHz 时,达到最低点 60KW/m<sup>3</sup>,相当于 0.06W/cm<sup>3</sup>。超过 1.1MHz 到 3MHz,软磁铁氧体损耗决定于剩余损耗,随 f 升高而迅速上升。在 3MHz 以上,软磁铁氧体损耗决定于涡流损耗,但是这时软磁铁氧体由于磁性颗粒之间的绝缘体已被击穿或熔化,电阻率变得相当小,软磁铁氧体的损耗处在高水平 200KW/m<sup>3</sup>,相当于 0.2W/cm<sup>3</sup> 上,基本不变。这种锰锌铁氧体的最佳工作频率在 1MHz 左右,极限工作频率为 3MHz,相当于 PW5 类软磁铁氧体。今后,是不是开发工作频率更高的软磁铁氧体?已经成为一个争论的问题,因为薄膜磁性材料有可能更适合于 1MHz 以上的电源技术中的电磁器件。究竟哪一种性能价格比好?还需要通过一段时间研究才能作出结论。

表1 变压器用软磁铁氧体材料分类(取自 IEC1332—1995)

类别	极限频率 $f_{(max)}$ (KHz)	工作频率 f(KHz)	工作磁面 密度 B(mT)	100℃时幅值磁 导率 $\mu_a$ 在 B 和 f 条件下	性能因子(BXf) (mTXKHz)	100℃时在 (BXf)下损耗 KW/ $\mu\text{m}^3$	25℃初始 磁导率 $\mu_i$	
PW1	a	100	15	300	> 2500	4500(300 × 15)	≤ 300	2000
	b	100	15	300	> 2500	4500(300 × 15)	≤ 200	2000
PW2	a	200	25	200	> 2500	5000(200 × 25)	≤ 300	2000
	b	200	25	200	> 2500	5000(200 × 25)	≤ 150	2000
PW3	a	300	100	100	> 3000	10000(100 × 100)	≤ 300	2000
	b	300	100	100	> 3000	10000(100 × 100)	≤ 150	2000
PW4	a	1000	300	50	> 2000	15000(50 × 300)	≤ 300	1500
	b	1000	300	50	> 2000	15000(50 × 300)	≤ 150	1500
PW5	a	3000	1000	25	> 1000	25000(25 × 1000)	≤ 300	800
	b	3000	1000	25	> 1000	25000(25 × 1000)	≤ 150	800

有人认为有的软磁铁氧体(例如环形)没有气隙,工作在声频领域中时不会发生可听噪声,也是一种误解。软磁铁氧体的磁致系数比较大,在 10Hz ~ 20KHz 声频领域中作为电源技术的电磁器件,有比较大的可听噪声。有时,工作在高频领域的软磁

铁氧体也有可听噪声,那不是高频造成的,而是有声频范围内的载波造成的。消除了低于高频的声频载波(有时相当难),就可以消除可听噪声。

## 2-6 铁氧体商品铁芯材料的性能比较

铁氧体是铁和其他金属元素的复合氧化物,用作软磁材料的主要是锰锌(MnZn)、镍锌(NiZn)和镁锌(MgZn)几类铁氧体。

铁氧体的最大优点就是电阻率可以做得很高(高达 $10^5 \Omega \cdot m$ ),因此高频损耗小,所以工作频率高,可达几百 kHz,甚至几十

MHz。但是铁氧体也有几点明显的不足之处,一是 $B_s$ 小,一般为3000~5000Gs;二是居里温度低,只有120℃左右;三是力学性能脆弱,比较容易碎裂。国产铁氧体磁芯材料的类型和性能见表1。

表1 国产铁氧体磁芯材料性能

材料号	磁导率 $\mu_i$	居里温度(℃)	电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	$B_s$ (mT)	$B_r$ (mT)	矫顽力(KA/m)	频率(MHz)
GTO-6	6	200		170	80	1.27	700
R20C	20	温升 25		250	150	1.11	50
R80C	80	温升 30		360	240	0.56	40
NXO-20	20	400	10—6	200	120	0.79	50
NXO-100	100	350	10—5	330	220	0.32	15
NXO-400	400	120		320	170	0.08	3
MXO-400	400	180	10—5	320	170	0.08	1.5
MXO-800	800	180	10—2	300	150	0.06	1
NXO-1000	1000	100		300	130	0.04	1.5
R2KB	2000	200	10—2	480	120	0.012	0.3
R4KB	4000	180		480	100	0.0116	0.3
MXO-2000	2000	120	10—2	400	140	0.024	0.5
MX-4000	4000	170	10—2	400	120	0.02	0.5

PHILIPS公司生产的铁氧体磁材的性能见表2。

表2 PHILIPS铁氧体磁材的性能表

铁氧体牌号	$\mu_i$ 25℃	$B_{sat}$ (mT)25℃ (3000A/m)	$T_c$ (℃)	$\rho(\Omega \cdot m)$ $10^5$	铁氧体材料	主要应用领域	可选铁芯形状
4C6	100	≈ 400	≥ 350	≈ 1	NiZn	滤波器 信号变压器 脉冲变压器	RM, P, PT, PTS, EP, H, E, ER, 环型 铁芯
3D3	750	≈ 400	≥ 200	≈ 2	MnZn		
3B7	2300	≈ 450	≥ 170	≈ 1	MnZn		
3B9	1800	≈ 400	≥ 145	≈ 1	MnZn		
3H1	100	≈ 400	≥ 130	≈ 1	MnZn		
3H3	750	≈ 400	≥ 160	≈ 2	MnZn		
3E1	2300	≈ 400	≥ 125	≈ 1	MnZn		
3E4	4700	≈ 400	≥ 125	≈ 1	MnZn		
3E5	10000	≈ 400	≥ 125	≈ 0.5	MnZn		
3E6	12000	≈ 400	≥ 130	≈ 0.1	MnZn		
3E7	15000	≈ 400	≥ 130	≈ 0.1	MnZn		
3E25	6000	≈ 400	≥ 125	≈ 0.5	MnZn		
3E27	6000	≈ 480	≥ 175	≈ 0.5	MnZn		

## 第二章 磁性材料基础

续表

铁氧体牌号	$\mu_i$ 25°C	$B_{sat}$ (mT) 25°C (3000A/m)	$T_c$ (°C)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) $10^5$	铁氧体材料	主要应用领域	可选铁芯形状
3B8	2300	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 1$	MnZn	功率 转换 变压器	E, EC, EFD, EP, ETD, ER, U, UR, I, RM, RM/1, P, P/1, PT, PTS, PQ, 环型
3C10	1800	$\approx 500$	$\geq 190$	$\approx 1$	MnZn		
3C15	1800	$\approx 500$	$\geq 190$	$\approx 1$	MnZn		
3C30	1800	$\approx 500$	$\geq 220$	$\approx 2$	MnZn		
3C80	2000	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 1$	MnZn		
3C81	2000	$\approx 450$	$\geq 210$	$\approx 1$	MnZn		
3C85	2000	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 2$	MnZn		
3C90	2000	$\approx 450$	$\geq 220$	$\approx 5$	MnZn		
3F3	1800	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 2$	MnZn		
3F4	900	$\approx 450$	$\geq 220$	$\approx 10$	MnZn		
4F1	80	$\approx 350$	$\geq 260$	$\approx 1$	NiZn		
3S1	4000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn	EMI-抑制	EMI 磁珠
3S3	3500	$\approx 350$	$\geq 225$	$\approx 0.1$	MnZn		
3S4	1700	$\approx 350$	$\geq 110$	$\approx 0.01$	MnZn		
4S2	700	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 1$	NiZn		
4C65	125	$\approx 400$	$\geq 350$	$\approx 1$	NiZn		
4A11	700	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 1$	NiZn		
4A15	1200	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 1$	NiZn		
3C11	4300	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn		
3E25	6000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 0.5$	MnZn		
3E27	6000	$\approx 480$	$\geq 175$	$\approx 0.5$	MnZn		
3C2	900	$\approx 400$	$\geq 150$	$\approx 0.1$	MnZn	偏转线圈	扼流圈
2A2	350	$\approx 250$	$\geq 135$	$\approx 10$	MgZn		
2B1	350	$\approx 250$	$\geq 125$	$\approx 10$	MgZn		
4E1	15	$\approx 200$	$\geq 500$	$\approx 1$	NiZn	EMI-抑制	棒,管
4D2	60	$\approx 240$	$\geq 400$	$\approx 1$	NiZn		
4B1	250	$\approx 350$	$\geq 250$	$\approx 1$	NiZn		
3B1	900	$\approx 400$	$\geq 150$	$\approx 0.2$	MnZn		
3R1	800	$\approx 450$	$\geq 230$	$\approx 0.01$	MnZn	磁调节器	环型

2-6 铁氧体商品铁芯材料的性能比较

不同厂家生产的铁氧体材料型号和性能对比见表 3:

表 3 不同厂家生产的铁氧体材料型号和性能对比

厂家	日本 TDK	日东金工*	西门子	飞利浦	798
牌号	H3T OA3 DA3B	2500B 3100B 5000B	N27 N41 N47	3C80 3C85 3C90	R2KD
初始 $\mu_i$	1900 2000 2500	2500 3100 5000		2000 2000 2000	2500
$B_s(T)25^\circ C$	0.5 0.49 0.48	0.49 0.49 0.5	0.47 0.47 0.43	0.45 0.45 0.45	0.47
$B_s(T)100^\circ C$	0.4 0.4 0.4	0.38 0.37 0.35			
$B_r(T)$	0.19 0.15 0.15	0.1 0.1 0.1	0.2 0.16 0.1		0.12
$H_c(KA/m)$	0.25 0.2 0.2	0.2 0.2 0.12	0.25 0.25 0.43		0.15
$P_c$ (W/kg)	20 $^\circ C$	14 12 9		12.2	10
	60 $^\circ C$	9 6.5 5			6
	100 $^\circ C$	8 5.4 4.5		11.1	10
$P_c$ (W/kg)	20 $^\circ C$	33 29 21	29 33 21	45 40 40	
	60 $^\circ C$	25 18 14	18.7 37.5 16.7	30 50 60	
	100 $^\circ C$	23.6 15.5 13	27 50 23	35 50 60	140# 110# 80#
$T_c(^\circ C)$	200 200 200	230 180 180	200 230 200	200 200 220	200
$\rho(\Omega cm)$	30 50 20	130 20 20	100 100 100	100 200 500	100

\*:全名为日本东北金属工业株式会社; #:这里的单位是  $mW/cm^3$ 。

铁氧体材料的特性和损耗特性曲线各不相同,下面给出两个例子。

PHILIPS 公司生产的 3C90 的 B-H 特性和损耗曲线见图 2:

日本 TDK 公司生产的 H5A 的 B-H 特性及损耗如图 1 所示:

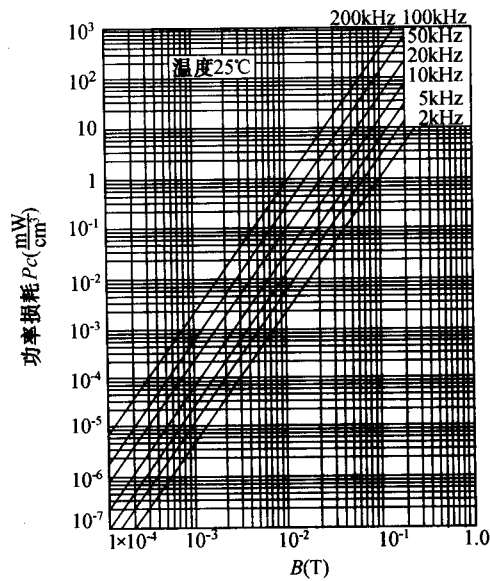
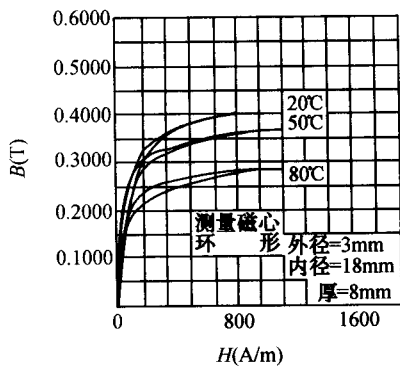


图 1 TDK 公司的 H5A 的 B-H 特性及损耗



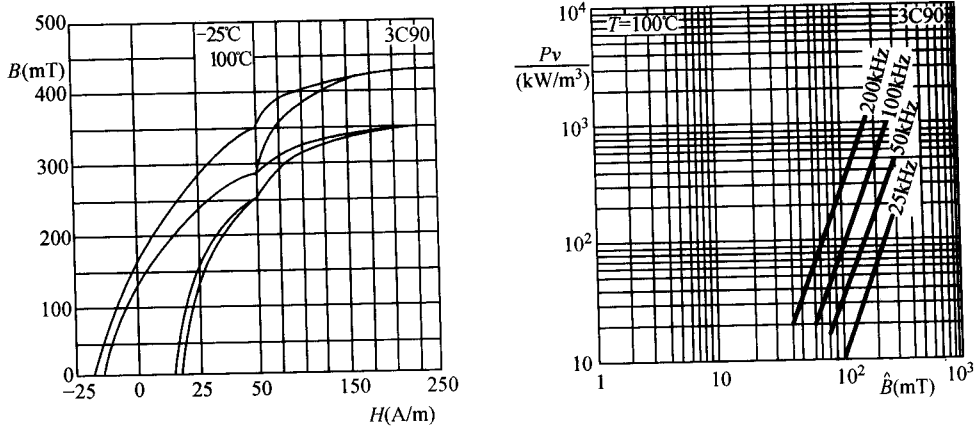


图2 PHILIPS公司3C90的B-H特性和损耗曲线

## 2-7 变换器磁件与磁芯结构、材质

### 1 变换器的选择

三种基本变换电路有不同的实现形式。在反激和正激变换器中,多采用单只或两只晶体管。如果采用两只晶体管,它们将同时开关。电路特性由所允许的集电极电压和集电极电流决定。如果采用双端式电路,变压器初级的接法可以有多种形式,如图1所示。根据变压器初级绕组驱动形式的不同,电路形式可以分为

半桥、推挽和全桥三种形式,分别如图1a、1b和1c所示。

在变换器设计中,首先应当确定采用何种形式的电路。为了便于选择适宜的电路形式,根据所需的输出电压和功率大小,可参考图2进行选择。图中考虑了线母绝缘、纹波、总的效率以及是否需要多路输出等特性。

表1 对变换器设计中的显著特点进行了归纳,指出了三种

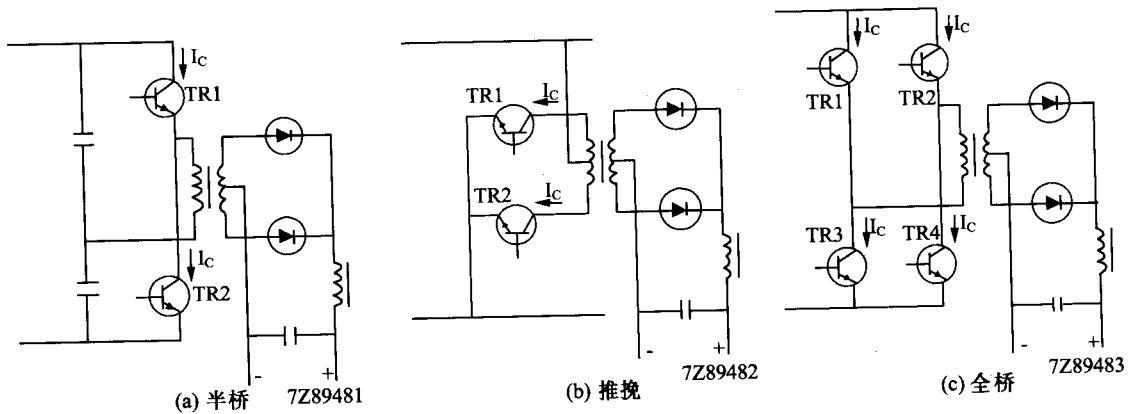


图1 变压器初级接法

表1 变换器设计选择表

功能	电路形式		
	反激	正激	推挽
电路结构复杂程度	简单	一般	复杂
元件数量	较少	一般	多
驱动电路复杂程度	简单	一般	复杂
输出纹波电压	较大	一般	较小

续表

功能	电路形式		
	反激	正激	推挽
扼流圈体积	不需要	一般	较大
变压器体积	较小	一般	较大
主电路绝缘要求	高	低	高
功率水平	小	一般	高
输出电压水平	高	一般	一般
多路输出	适宜	一般	一般

## 2 参数名词定义

### (1) 磁导率(permeability)

磁通密度和磁场强度的比称为绝对磁导率,通常将绝对磁导率用真空磁导率和相对磁导率的乘积来表示,如下式所示:

$$\frac{B}{H} = \mu = \mu_0 \mu_r$$

其中: $\mu$  是绝对磁导率;

$\mu_0$  是真空磁导率;

$\mu_r$  是相对磁导率。

### (2) 初始磁导率 $\mu_i$

初始磁导率取决于温度和频率。

### (3) 有效磁导率 $\mu_e$

有效磁导率取决于软磁材料的初始磁导率以有气隙和有效磁路长度。

$$\mu_e = \frac{\mu_i}{1 + (G/I_C \cdot \mu)}$$

其中: $G$  是气隙长度;

$I_C$  是有效磁路长度。

### (4) 振幅磁导率 $\mu_a$

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}}{\hat{H}}$$

由于 B-H 曲线是非线性的,因此振幅磁导率主要取决于所施加的峰值磁场力的大小。

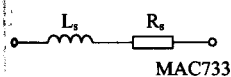
### (5) 增量磁导率 $\mu_\Delta$

在静态偏置磁场  $H_{DC}$  中施加交变磁场后所得到的磁导率称为增量磁导率。

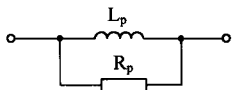
$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left[ \frac{\Delta B}{\Delta H} \right] H_{DC}$$

### (6) 复数磁导率

磁芯绕上线圈构成电感线圈后其特性并不是纯感性的,其等效电路图如图 1 和图 2 所示。



MAC733



MAC733

图 1 串联等效电路

图 2 并联等效电路

对于图 1 所示的串联等效电路: $\bar{Z} = j\omega L_s + R_s$

对于图 2 所示的并联等效电路: $\bar{Z} = \frac{1}{1/j\omega L_p + 1/R_p}$

磁场损耗的原因是由于阻抗的出现,如下式所示:

$$\mu = \mu'_s - j\mu''_s$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu'_s} - \frac{j}{\mu''_s}$$

其相移表达式如下式所示:

$$\tan \delta_m = \frac{R_s}{\omega L_s} = \frac{\mu''_s}{\mu'_s}$$

$$\tan \delta_m = \frac{\omega L_p}{R_p} = \frac{\mu''_p}{\mu'_p}$$

在计算电感量的大小,尤其是铁氧体材料,通常采用串联表达式;而在信号变压器等应用中采用并联表达式则更为方便。两者之间的关系如下式所示:

$$\mu'_p = \mu'_s (1 + \tan^2 \delta)$$

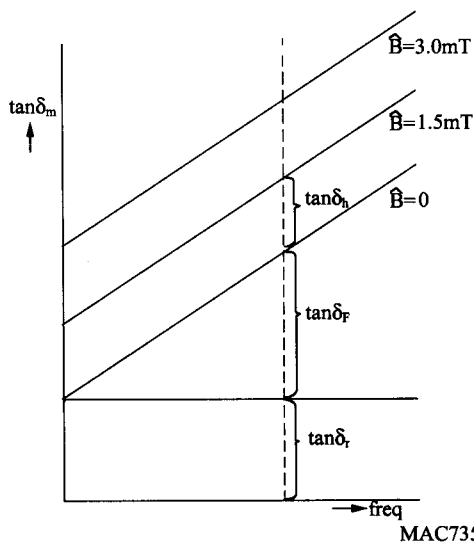
$$\mu''_p = \mu''_s \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}\right)$$

### (7) 损耗因数 $\tan \delta / \mu_i$

磁场损耗由三部分组成:①磁滞损耗;②涡流损耗;③剩余损耗。如下式所示:

$$\tan \mu_m = \tan \mu_h + \tan \mu_F + \tan \mu_r$$

图 3 所示为磁场损耗与频率的关系图。



MAC735

图 3 磁场损耗与频率的关系

磁滞损耗在低场力场中将消失。涡流损耗将随着频率的增加而增加,在低频条件下则可以忽略。其余损耗统称为剩余损耗。带气隙的磁路符合以下关系式:

$$\frac{(\tan \delta_m)_{gapped}}{\mu_e - 1} = \frac{\tan \delta_m}{\mu_i - 1}$$

由于  $\mu_i$  和  $\mu_e$  都远远大于 1,上式可以近似为:

$$\frac{(\tan \delta_m)_{gapped}}{\mu_e} = \frac{\tan \delta_m}{\mu_i}$$

由此可以导出:

$$(\tan \delta_m)_{gapped} = \frac{\tan \delta_m}{\mu_i} \mu_e$$

通常,在讨论磁性材料特性时,上式中的下角标  $m$  可以省略,如下式所示:

$$(\tan \delta)_{gapped} = \frac{\tan \delta}{\mu_i} \mu_e$$

## 第二章 磁性材料基础

### 2-1 铁氧体的磁性能

铁氧体是一种非金属磁性材料。这种材料一般是由铁、锰、镁、铜等金属氧化物粉末按一定比例混合压制成型再在高温下烧结而成的。由于它的制造方法与陶瓷相似，所以它也叫磁性瓷。

这类材料属于亚铁磁性物质。也有磁畴结构。它的磁性在很多方面与铁磁性材料相似。它的  $B$ 、 $H$  关系曲线也是磁滞回线。

从磁特性上看，铁氧体的初始磁导率较高，但稳定性较差。饱和磁感应强度较低，一般在  $0.2 \sim 0.3\text{T}$  之间。 $H_c$  也较小，例

如锰锌铁氧体  $H_c = 80\text{A/m}$ ，所以一般讲，它属于软磁材料。不少铁氧体材料具有较好的矩磁特性，矩形比可做到  $0.85 \sim 0.95$ 。

铁氧体的居里点比常用的铁磁性材料低。一般允许在  $100^\circ\text{C}$  以下。

与铁磁性材料比较，铁氧体最大的特点是它的电性能好，即它的电阻率特别高，一般比铁磁材料大百万倍，所以它非常适于作在高频下工作的器件的铁心。它的矩磁特性也使它适于作逻辑元件，电子计算机存储器的磁心就是用铁氧体做的。

### 2-2 铁氧体的物理参数

#### 1 参数表

符号	单位	定义
$A_e$	$\text{mm}^2$	磁芯有效截面积
$A_{\min}$	$\text{mm}^2$	磁芯最小截面积
$A_L$	nH	电感因数
$B$	T	磁通密度
$B_r$	T	剩余磁通密度
$B_s$	T	饱和磁通密度
$\hat{B}$	T	峰值磁通密度
$C$	F	电容
$D_F$	-	减落因数
$f$	Hz	频率
$G$	$\mu\text{m}$	气隙长度
$H$	A/m	磁场强度
$H_c$	A/m	矫顽力
$\hat{H}$	A/m	峰值磁场强度
$I$	A	电流
$I_e$	mm	有效磁路长度
$L$	H	电感
$N$	-	匝数
$P_V$	$\text{MW/cm}^3$	磁芯损耗

续表

符号	单位	定义
$Q$	-	品质因数
$T_c$	$^\circ\text{C}$	居里温度
$V_e$	$\text{mm}^3$	磁芯有效体积
$\alpha_F$	$\text{K}^{-1}$	磁导率温度系数
$\tan\delta/\mu_i$	-	损耗因数
$\eta_B$	$\text{T}^{-1}$	磁滞常数
$\mu$	-	绝对磁导率
$\mu_0$	$\text{Hm}^{-1}$	真空磁导率 $4\pi \times 10^{-7}$
$\mu'_s$	-	复数磁导率的实部
$\mu''_s$	-	复数磁导率的虚部
$\mu_a$	-	振幅磁导率
$\mu_e$	-	有效磁导率
$\mu_i$	-	初始磁导率
$\mu_r$	-	相对磁导率
$\mu_\Delta$	-	增量磁导率
$\rho$	$\Omega\text{m}$	电阻率
$\Sigma(1/A)$	$\text{mm}^{-1}$	磁芯常数