

第一节铁氧体磁性材料概述

铁氧体磁性材料可用化学分子式 MFe_2O_4 表示。式中 M 代表锰、镍、锌、铜等二价金属离子。铁氧体磁性是通过烧结这些金属化合物的混合物而制造出来的。铁氧体磁性的主要特点是电阻率远大于金属磁性材料，这抑制了涡流的产生，使铁氧体磁性能应用于高频领域。

首先，按照预定的配方比重，把高纯、粉状的氧化物（如 Fe_2O_3 、 Mn_3O_4 、 ZnO 、 NiO 等）混合均匀，再经过煅烧、粉碎、造粒和模压成型，在高温（1000 ~ 1400 °C）下进行烧结。烧结出的铁氧体制品通过机械加工获得成品尺寸。上述各道工序均受到严格的控制，以使产品的所有特性符合规定的指标。

不同的用途要选择不同的铁氧体材料。有适用于低损耗、高频特性好的系列，有磁导率的线性材料。按照不同的适用频率范围分为：中低频段（20 ~ 150kHz）、中高频段（100 ~ 500kHz）、超高频段（500~1MHz）。

第二节铁氧体磁性材料的各项物理特性定义与计算公式

01) 初始磁导率 μ_i

初始磁导率是磁性材料的磁导率（B/H）在磁性曲线始端的极限值，即

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

式中 μ_0 ：真空磁导率（ $4 \times 10^{-7} \text{H/m}$ ）；

H：交流磁场强度（A/m）；

B：交流磁通密度（T）。

02) 有效磁导率 μ_e

在闭合磁路中（漏磁可以忽略），磁芯的有效磁导率可表示为：

$$\mu_e = \frac{L}{4\pi N^2} \times \frac{l_e}{A_e} \times 10^7$$

式中 L：装有磁芯的线圈的自感量；

N：线圈匝数；

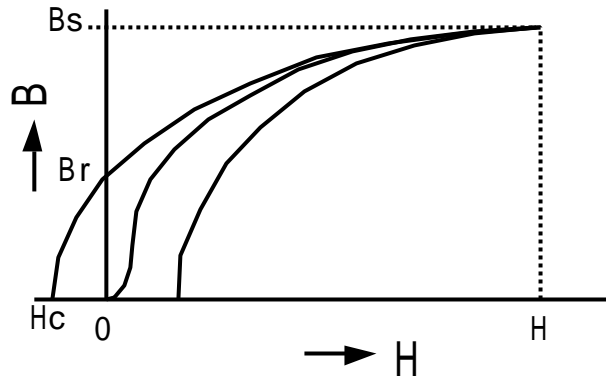
$$\frac{l_e}{A_e} = C_1 = \text{磁芯常数} (\text{mm}^{-1})$$

03) 饱和磁通密度 B_s

磁化到饱和状态的磁通密度。

04) 剩余磁通密度 B_r

从磁饱和状态去处磁场后，剩余的磁通密度。



05) 矫顽力 H_c

从饱和状态去处磁场后，磁芯继续被反向的磁场磁化，直至磁通密度减小到零，此时的磁场强度称为矫顽力，

06) 损耗因素 \tan

损耗因数是磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗三者之和：

$$\tan = \tan d_h + \tan d_e + \tan d_r$$

$$= h_1 \sqrt{\frac{L}{V}} i + e_1 f + r_1$$

损耗因数也可用电阻和电抗之比来表示：

$$\tan d = \frac{R_m}{\omega L} = \frac{R_{eff} - R_w}{\omega L}$$

式中： $\tan d_e$ ：涡流损耗因数；

$\tan d_r$ ：剩余损耗因数；

h_1 ：磁滞损耗因数；

L ：装有磁芯的线圈的自感量（H）；

V ：磁芯体积（ m^3 ）；

i ：电流（A）；

e_1 ：涡流损耗系数；

f ：频率（Hz）；

r_1 ：剩余损耗系数；

R_m ：磁芯损耗的等效电阻（ ）；

：角速度（ $2\pi f$, rad/s）；

R_{eff} ：包括磁芯损耗的总电阻（ ）；

R_w ：线圈的电阻（ ）；

其中 h_1 可用下式表示：

$$h_1 = \frac{1}{wL} \times \sqrt{\frac{V}{L}} \times \frac{R_2 - R_1}{i_2 - i_1} \times 10^3$$

式中： R_1 ：电流为 i_1 的损耗电阻；

R_2 ：电流为 i_2 的损耗电阻；

07) 相对损耗因素 $\tan \delta / \mu_i$

相对损耗因素是损耗因数和初始磁导率之比：

$\tan \delta / \mu_i$ （适用于材料）；

$\tan \delta / \mu_e$ （适用于磁路中含有空气隙的磁芯）

08) 品质因数 Q

品质因数为损耗因数的倒数：

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{wL}{R_m}$$

注：装有磁芯的线圈的品质因数可表示为

$$Q_e = \frac{wL}{R_{\text{eff}}}$$

09) 温度系数 μ

温度系数为温度在 T_1 至 T_2 范围内变化时，每 1 相应的磁导率的相对变化量：

$$a_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times \frac{1}{T_2 - T_1} \quad (T_2 > T_1)$$

式中 μ_1 ：温度为 T_1 时的初始磁导率；

μ_2 ：温度为 T_2 时的初始磁导率。

10) 相对温度系数 μ

这个系数为温度系数和磁导率之比，即

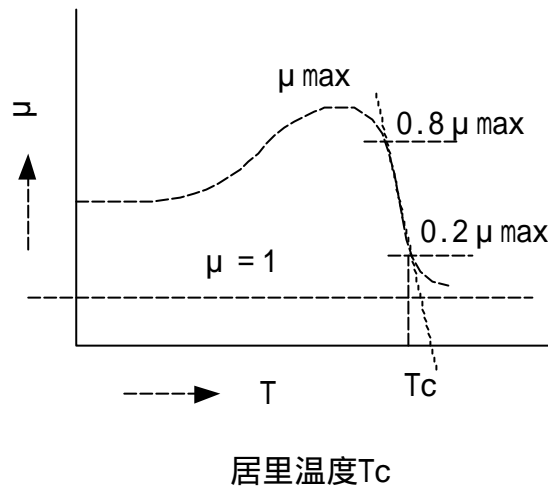
$$a_m = \frac{m_2 - m_1}{(m_1)^2} \times \frac{1}{T_2 - T_1} \quad (T_2 > T_1)$$

实际磁芯的温度系数可由下式得到：

$$a_m = a_m \times m_e$$

11) 居里温度 T_c

在该温度下磁芯的磁状态由铁磁性转变成顺磁性，如图：



12) 减落因数 D_F

在恒温条件下，完全退磁后的磁芯的初始磁导率随时间的衰减变化定义为减落因数：

$$D_F = \frac{m_1 - m_2}{\log \frac{T_2}{T_1}} \times \frac{1}{(m_1)^2} \quad (T_2 > T_1)$$

式中 μ_1 ：退磁后 t_1 分钟的初始磁导率；

μ_2 ：退磁后 t_2 分钟的初始磁导率。

通常 t_1 为 10 分钟， t_2 为 100 分钟。

13) 电阻率

具有单位截面积和单位长度的磁性材料的电阻。

14) 密度 d

密度定义为单位体积材料的重量，即

$$d = \frac{W}{V}$$

式中 W：磁性体的重量；

V：磁性体的体积。

15) 磁心损耗 P_c

磁芯在高磁通密度时的单位体积损耗。该磁通密度通常表示为

$$B_m = \frac{E}{4.44 f N A_e} \times 10^6 (mT)$$

式中 B_m ：磁通密度的峰值 (mT)；

E：线圈两端的电压 (V)；

f：频率 (kHz)；

N：线圈匝数；

A_e ：有效截面积 (mm^2)。

磁芯损耗的常用测量方法包括乘积电压表示法和波形记忆法等。

16) 电感因数 AL

电感因数定义为具有一定形状和尺寸的磁芯上每一匝线圈产生的自感量，即

$$AL = \frac{L}{N^2}$$

式中 L：装有磁芯的线圈的自感量 (H)；

N：线圈匝数。

电感因数常以 $10^{-9}H/N^2$ (nH/N^2) 为单位。