

第8篇 磁性材料

主编单位:

桂林电器科学研究所

编写单位:

第四机械工业部第四研究所

冶金工业部钢铁研究院

主 编:

孙友信

编写人:

黄顺亲 唐泽显 关卓民

杨膺善

3K528/5102

常用符号表

B ——磁感应强度	M ——磁化强度
B_d ——最大磁能积点磁感应强度	M_r ——剩余磁化强度
B_r ——剩磁(剩余磁感应强度)	M_s ——饱和磁化强度
B_s ——饱和磁感应强度	N ——退磁因数
B_w ——工作磁感应强度	P ——铁损
$(BH)_{\max}$ ——最大磁能积	P_{μ} ——比磁滞损耗
$(B_p H_p)_{\max}$ ——最大回复磁能积	R_m ——磁心损耗等效电阻
B_r/B_s ——剩磁化	T_C ——居里温度
d ——密度	t ——温度
DA ——减落	$\operatorname{tg} \delta/\mu_i$ ——比损耗系数
DF ——减落系数	α_B ——磁感应温度系数
E_D ——退磁能	α_{μ_i/μ_i} ——磁导率比温度系数
E_H ——静磁能	η_H ——比磁滞损耗系数
E_K ——磁晶各向异性能	λ_s ——饱和磁致伸缩系数
E_c ——磁弹性能	μ ——磁导率
f ——频率	μ_0 ——真空磁导率
H ——磁场强度	μ_d ——微分磁导率
$H_C(BH_C)$ ——矫顽力(磁感应矫顽力)	μ_i ——初始磁导率
μH_C ——内禀矫顽力	μ_m ——最大磁导率
H_D ——退磁场	μ_p ——峰值磁导率
H_d ——最大磁能积点磁场强度	μ_{rec} ——回复磁导率
H_w ——工作磁场强度	ρ ——电阻率
J ——磁极化强度	σ ——应力
K ——磁晶各向异性常数	ϕ ——磁感应衰减率
K_{μ} ——能量系数(凸度系数)	ω ——角频率
L ——磁心等效电感	

第1章 概述

1 磁性材料的分类和特点

磁性是物质的基本属性之一。在外磁场作用下,各种物质都呈现出不同的磁性。物质按照在外磁场中表现出来的磁性,可分为抗磁性物质、顺磁性物质、铁磁性物质、反铁磁性物质和亚铁磁性物质。铁磁性物质和亚铁磁性物质为强磁性物质;其它的均为弱磁性物质。在工程上常用的磁性材料是属于强磁性物质。

磁性材料按其特性、结构和用途通常可分为软磁材料、永磁材料、磁记录材料、磁记忆材料、旋磁材料和非晶态软磁材料等。磁性材料的种类很多,本篇重点介绍电机工程常用的和一些新发展的磁性材料。

软磁材料磁性能的主要特点是磁导率高,矫顽力低。属于软磁材料的品种有电工用纯铁、硅钢片、铁镍合金、铁铝合金、软磁铁氧体、铁钴合金等。它们主要是作传递和转换能量的磁性零部件或器件。

永磁材料磁性能的主要特点是矫顽力高。属于永磁材料的品种有铝镍钴、稀土钴、硬磁铁氧体等。它主要是用在能够产生恒定磁通的磁路中,在一定空间内提供恒定的磁场,作为磁场源。

磁记录材料和磁记忆材料主要是用作记录、存储和再生信息的元件。其中有些品种具有软磁特性,有些品种具有永磁特性。但是,当磁记录材料和磁记忆材料用作记录、存储和再生信息的元件时,要求具有高的速度和容量密度,以便提高机器的工作能力和缩小机体体积。

非晶态软磁材料,在结构上与晶态软磁材料是截然不同的。它的原子结构在三维空间中是无规则非周期排列。它的性能在某些方面比晶态软磁材料优越。同时,有些品种还具有磁记录材料和磁记忆材料的特性,用途极广,是正在发展中的材料。

磁性材料有各向同性和各向异性之分。各向异性材料的磁性依方向不同而异。因此,在使用各向异性材料时,要特别注意其磁性的方向性。

2 磁性材料的基本磁性能

磁化曲线和磁滞回线是反映磁性材料基本磁性能的特性曲线。在磁化曲线和磁滞回线上可分别确定材料的磁导率 μ 、饱和磁感应强度 B_s 、矫顽力 H_c 、剩磁 B_r 以及铁损 P 等参量。同一类材料由于使用情况不同,对其磁特性参量的要求与侧重点往往也有所不同。

2.1 基本磁化曲线、磁导率和饱和磁感应强度

基本磁化曲线是表征磁性材料在反复磁化下,以中性状态为出发点,磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的规律的曲线,通常简称为磁化曲线,如图8-1-1所示的 $B-H$ 曲线。它是确定软磁材料工作点的依据。 B 和 H 的关系如下式:

$$B = \mu_0(H + M) \quad \text{Wb/m}^2 \quad (8.1-1)$$

式中 μ_0 ——真空磁导率 H/m

H ——磁场强度 A/m

M ——磁化强度 A/m

磁化曲线清楚地显示了在膝点以上材料渐近饱和的现象,见图8-1-1。图有 B_s 称为饱和磁感应强度,其相应的磁化磁场强度为 H_s 。通常要求磁性材料有高的 B_s 值。

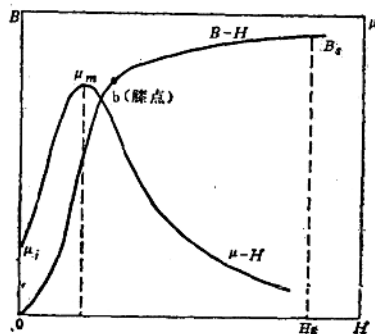


图 8-1-1 磁感应强度、磁导率与
磁场强度的关系

在磁化曲线上任何一点的 B 与 H 之比就是磁导率 μ , 由于 $\mu = B/H$, 根据 $B-H$ 曲线可以绘制出 $\mu-H$ 曲线, 如图 8-1-1 所示。 μ_m 和 μ_i 分别称为最大磁导率和初始磁导率。软磁材料一般要求有高的 μ 值。在一定磁场强度下, μ 值越高, 传递等量磁通所需要的材料愈少。 μ_i 是在低磁场下使用的软磁材料的一个重要参量。当磁场极低时, μ_i 更能恰当地反映出材料在工作情况下的磁性。

2.2 磁滞回线、剩磁、矫顽力、剩磁比和铁损

若磁性材料在强度为 H_1 的磁场磁化至 a' 点时(图 8-1-2), 再减小磁场, 磁感应强度 B 不是沿着 Oa' 曲线下降, 而是沿另一曲线 $a'b'$ 下降, 如图 8-1-2 所示。显然 B 的变化滞后于 H , 这个现象称为磁滞。由于磁滞引起的损耗, 称为磁滞损耗。若 H_1 由 $H_1 \rightarrow 0 \rightarrow -H_1 \rightarrow 0 \rightarrow H_1$ 缓慢地变化一周时, 由于磁滞的原因, B 随 H 的变化为一闭合曲线 $a'b'c'd'e'f'a'$, 称为磁滞回线。在磁化曲线 Oa' 上任意点所对应的磁场强度变化一周, 都可以得到相应的磁滞回线。随着磁场强度增加, 磁滞回线的面积也随着增大。当磁化到饱和时, 再增大磁场, 磁滞回线的面积基本上不变, 这时的磁滞回线称为极限磁滞回线, 如图 8-1-2 中的 $abcdefa$ 回线。由极限磁滞回线可以看出, 当 H_s 降为零时, 磁感应强度并不回到零, 而下降到 b 点, B_r 称为剩余磁感应强度, 简称剩磁。从式 8-1-1 可以看出, 当 $H=0$, $B_r = \mu_0 M_r$ 。若要将 B_r 降为零, 必须加一反向磁场, 这个反向磁场强度的绝对值称为磁感应矫顽力, H_c , 通常简称矫顽力 H_c 。同样, 要将剩余磁感应强度 B_r

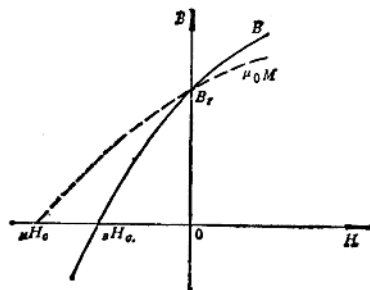


图 8-1-3 BH_c 和 MH_c 的示意图

点所对应的 M_r 降为零, 所需要磁场强度的绝对值称为内禀矫顽力 MH_c 。 MH_c 是高磁能永磁材料的一个重要参量。 MH_c 总是大于 BH_c , 见图 8-1-3。材料的矫顽力愈高, 两者的差别愈大。剩磁 B_r 与饱和磁感应强度 B_s 之比称为剩磁比(或称开关矩形比), 即 B_r/B_s 。它是表征矩磁材料磁滞回线接近矩形的程度。

磁滞回线的面积与磁性材料的损耗有关系。单位重量的磁性材料在交变磁场磁化下, 所消耗的功率称为铁损 P , 它包括磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。

磁滞回线的形状和面积直接表征磁性材料的主要磁特性。软磁材料的磁滞回线窄, 故其矫顽力低, 损耗也低。用软磁材料制成的器件, 工作稳定, 效率高。若磁滞回线面积窄而接近矩形, 这种软磁材料不仅矫顽力 H_c 低而且 B_r/B_s 值也高, 适宜作记忆元件和开关元件, 这种材料也称为矩磁材料。永磁材料的磁滞回线的面积宽, B_r 和 H_c 值也高, 因此磁滞回线的面积大。所以永磁材料经饱和磁化后, 储存磁能量大。

2.3 退磁曲线、最大磁能积和回复磁导率

退磁曲线是指极限磁滞回线在第二象限的部分, 它是说明永磁材料特性的曲线, 如图 8-1-4 中的 B_r, mH_c 线段。在退磁曲线上, 任何一点对应的 B 与 H 的乘积是永磁材料在这一点上单位体积所具有的能量, 其中有一点对应的 B 与 H 的乘积具有最大值, 称为最大磁能积 $(BH)_{max}$, 这一点称为最大磁能积点。最大磁能积点可用等磁能曲线来求得。图 8-1-4 中的虚线 G_1, G_2, G_3 称为等磁能曲线族(等磁

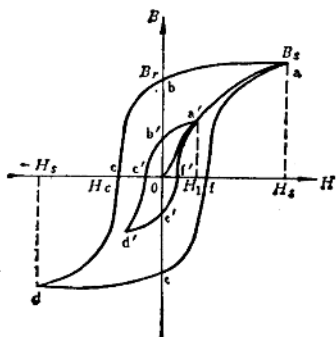


图 8-1-2 磁滞回线

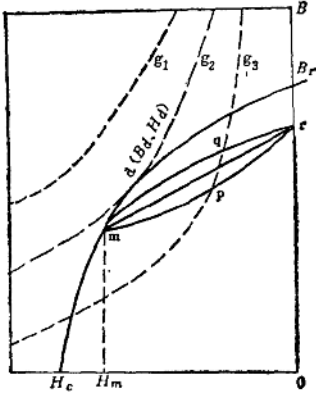


图 8.1-4 永磁材料的特性曲线

能曲线是由以不同的 B 、 H 作坐标点，将 B 、 H 乘积相等的各点连成的)。其中有一条等磁能曲线与退磁曲线相切，这切点就是最大磁能积点，如图中的 $d(B_d, H_d)$ 点。所以 $(BH)_{\max} = B_d H_d$ 。显然， $(BH)_{\max}$ 值愈高，永磁材料的特性愈好。因此，在作磁路设计时，应尽可能将永磁体的工作点与 $(BH)_{\max}$ 点接近。

当永磁材料的磁状态处于退磁曲线上任意点 m 时，受到一个与磁化方向相同的磁场 H_m 的作用，磁状态的改变不是沿退磁曲线上上升，而是沿 mpr 曲线回升，如图 8.1-4 所示。当 H_m 消失时，磁状态的改变是沿 rqm 曲线回到 m 点，形成 $mprqm$ 回线，称为回复回线。由于回复回线的两分支非常接近，可近似地用直线 mr 代替 $mprqm$ 回线， mr 称为回复线，它的斜率称为回复磁导率 μ_{rec} 。一般永磁体的回复磁导率 μ_{rec} 可用退磁曲线上 B_r 点切线的斜率来近似表示。通常给出的 μ_{rec} 是指在退磁曲线上从最大磁能积点开始，一直到 $H=0$ 时的回复线的斜率。所以当永磁体处在 m 点工作时，受到一个变化磁场 H_m 的作用，它的工作点将在回复线上变动。 μ_{rec} 是永磁材料动态工作时的重要参量。一般 μ_{rec} 小，则永磁体动态特性好。

2.4 比损耗系数、磁导率比温度系数、比磁滞损耗系数、减落系数和开关时间

a. 比损耗系数是损耗系数与初始磁导率之比，即 $\lg \delta / \mu_0$ 。损耗系数 $\lg \delta$ 由下式决定：

式中 R_m ——磁心损耗等效电阻
 ω ——角频率 ($\omega = 2\pi f$)
 L ——磁心等效电感

所以

$$\lg \delta / \mu_0 = R_m / \omega L \cdot \mu_0 \quad (8.1-2)$$

这个比值愈小，铁氧体软磁材料在高频下的损耗愈低，特性愈好。

b. 磁导率比温度系数是磁导率平均温度系数 α_{μ_0} 与初始磁导率 μ_0 之比，即 α_{μ_0} / μ_0 。 α_{μ_0} 由下式决定：

$$\alpha_{\mu_0} = (L_2 - L_1) / L_1 (t_2 - t_1)$$

式中 t_2 、 t_1 ——测试温度；

L_2 、 L_1 ——表示在 t_2 、 t_1 下测出的磁心的电感值。

所以

$$\frac{\alpha_{\mu_0}}{\mu_0} = \frac{L_2 - L_1}{L_1 (t_2 - t_1)} \cdot \frac{1}{\mu_0} \quad (8.1-3)$$

这个系数愈小，铁氧体软磁材料的磁导率受温度的影响愈小。

c. 比磁滞损耗系数 η_H 是衡量软磁铁氧体材料特性的一个参量。

$$\eta_H = (\lg \delta_{H_2} - \lg \delta_{H_1}) / \mu_0^2 (\hat{H}_2 - \hat{H}_1) \quad (8.1-4)$$

式中 $\hat{H}_2$ 、 $\hat{H}_1$ ——分别表示两种测试磁场强度峰值。

一般 η_H 愈低，材料的性能愈好。

d. 减落 DA 是指磁导率对于时间的稳定性。

$$DA = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\lg \frac{\tau_2}{\tau_1}} \cdot \frac{1}{\mu_1} \quad (\tau_2 > \tau_1)$$

式中 μ_1 ——磁中性化后，在时间 τ_1 (秒) 测得的初始磁导率；

μ_2 ——磁中性化后，在时间 τ_2 (秒) 测得的初始磁导率；

所以减落系数

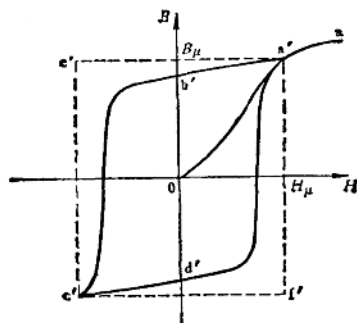
$$D.F. = \frac{DA}{\mu_1} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\lg \frac{\tau_2}{\tau_1}} \cdot \frac{1}{\mu_1^2} \quad (\tau_2 > \tau_1) \quad (8.1-5)$$

减落系数愈小，铁氧体软磁材料的初始磁导率随时间的稳定性愈好。

e. 矩磁材料由 $+B_r$ 改变到 $-B_r$ 所需要的时间，称为开关时间。这个时间愈短，电子计算机的运算速度愈快。

2.5 比磁滞损耗和能量系数

比磁滞损耗 P_H 和能量系数 K_H 是衡量磁滞材料的重要参量。如图 8-1-5 所示, 磁滞材料的工作点 H_μ 、 B_μ 分别是磁化曲线 Oa 上对应于最大磁导率 a' 点的磁场强度和磁感应强度。当两种磁滞材料的 H_μ 相同时, B_μ 较高的材料的特性较好。

图 8-1-5 能量系数 K_H 示意图

比磁滞损耗 P_H 就是磁场强度 H_μ 变化一周时, 单位体积的磁滞材料所消耗的能量。当 H_μ 一定时, P_H 愈大, 磁滞材料的性能愈好。

能量系数 K_H 又称凸度系数, 它是磁滞材料的工作点处在磁化曲线 Oa 上的 a' (H_μ 、 B_μ) 点时, 磁滞回线面积与边长为 $2H_\mu$ 、宽为 $2B_\mu$ 的矩形面积之比, 如图 8-1-5 所示。即:

$$K_H = \frac{\text{面积 } a'b'c'd'a'}{\text{面积 } a'e'c'f'a'} = \frac{P_H}{4H_\mu B_\mu} \quad (8-1-6)$$

式中 P_H ——对应于磁场强度为 H_μ 的磁滞回线的面积

当 K_H 趋近于 1 时, P_H 的形状接近于矩形, 此时 B 落后于 H 的磁滞角趋近于 $\pi/2$ 。当 K_H 趋近于零时, 面积 P_H 亦趋近于零, 磁滞角亦趋近于零。即不存在磁滞现象, 此时磁性材料已转变为弱磁性物质。所以 K_H 愈接近于 1, 磁滞材料的特性愈好。

2.6 磁致伸缩和饱和磁致伸缩系数

磁性材料在外磁场中磁化时, 在磁化方向上会发生伸长或缩短, 称为磁致伸缩。设原长为 l , 伸长或缩短量为 Δl , 磁致伸缩比 $\lambda = \Delta l/l$, 磁致伸缩比随磁场强度而变化, 通常磁场强度增加, 其绝对值增大。当磁场强度增大到一定值时, λ 趋于一个恒定

值, 此时的磁致伸缩比称为饱和磁致伸缩系数 λ_s 。对于绝大多数软磁材料要求 λ_s 值要低, 只有少数作磁致伸缩换能器元件用的软磁材料才要求 λ_s 值要高。

2.7 居里温度和磁感应温度系数

磁性材料的磁性温度有密切联系。磁性材料的饱和磁化强度 M_s 随温度升高而降低。当温度升高到某一数值时, M_s 降为零, 这个温度称为居里温度 (居里点) T_c , 如图 8-1-6 所示。通常磁性材料的 T_c 高, 允许使用的温度也高。但对一些特殊用途的软磁材料, 则要求 T_c 在常温附近。

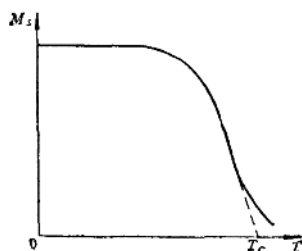


图 8-1-6 饱和磁化强度与温度的关系

磁感应温度系数 α_B 是用来衡量经饱和磁化后的永磁材料其磁感应强度随温度可逆变化的程度。当温度升高时, 磁感应强度下降。事实上, 须经数次反复地温度循环, 才能得到磁感应强度的完全可逆变化。磁感应温度系数 α_B 由下式决定:

$$\alpha_B = \frac{B_t - B_{t'}}{B_{t'}(t - t')} \times 100\% \quad (8-1-7)$$

式中 B_t 、 $B_{t'}$ —— t' 到 t 经过几次温度循环后, 分别对应于 t' 、 t 两个温度下的磁感应强度;

t' 、 t ——分别为温度下限和上限;

α_B ——指 t 到 t' 之间的平均系数。

α_B 值愈小, 永磁材料的温度稳定性愈好。

3 磁性材料磁化的一些基本概念

3.1 自发磁化和磁畴

磁性材料在不大的磁场作用下, 能获得很高的磁感应强度, 而且很快达到饱和, 这种现象的根源是因为磁性材料内部的原子磁矩, 在没有外磁场作用时, 已经在一个个小的区域内按某一方向平行排列

起来,使磁化达到饱和的程度,形成一个合磁矩。这样的磁化称为自发磁化,这种小区域称为磁畴,见图8-1-7。根据铁磁学论证,铁磁性和亚铁磁性物质中的原子或离子间有交换作用,存在着交换能,交换作用导致了自发磁化的产生,所以形成了磁畴。这是强磁性物质独有的特性。

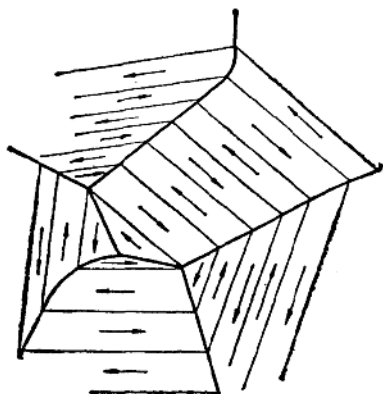


图 8-1-7 磁畴示意图

3.2 技术磁化和磁化能量

一块磁性材料可以分成许多磁畴,磁畴磁矩分别取各种不同方向,对外界的作用互相抵消,不呈现出宏观的磁性,如图8-1-8a所示。若将磁性材料置于外磁场中,外加磁场的作用是把已经高度自发磁化的许多磁畴的磁矩从各个不同方向改变到接近外加磁场方向或外加磁场方向(见图8-1-8b和c),则对外显出较强或很强的磁性。这一过程称为技术磁化,通常简称为磁化。

磁化是通过磁畴磁矩的转动和磁畴畴壁(相邻磁畴的分界面)的移动来完成的。磁畴磁矩转动和畴壁移动将受到阻力,要克服这种阻力,外界必须对

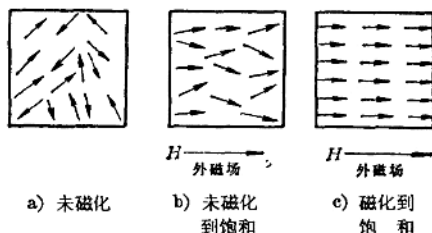


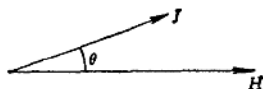
图 8-1-8 磁性材料在磁场中磁矩改变示意图

它作功,通常用能量来表示。若磁性材料磁化时需要的能量小,说明它容易磁化;反之就难磁化。所以磁化时需要能量的大小与磁性材料本身的磁性有密切联系。

a. 静磁能 磁性体在外磁场中磁化,这时外磁场对磁性体的合磁矩的作用,可以用一个势能来表示,或也称作静磁能。可以设想一个具有磁极化强度为 $J(J=\mu_0 M)$ 的磁性体,它与外磁场方向夹角为 θ ,如图8-1-9所示。这时的静磁能 E_H 为:

$$E_H = -JH \cos \theta = -\mu_0 M H \cos \theta \quad (8-1-8)$$

如果没有阻力, J 就会转到磁场方向上来,这时 $\theta=0$,静磁能最低,是磁矩最稳定方向。如果从磁场方向将 J 转动 θ 角,就需要外力作功,使磁性体在磁场中的能量增加,(8-1-8)式是对磁性体单位体积而言的静磁能。

图 8-1-9 J 和 H 方向的示意图

b. 退磁场和退磁能 一块磁性材料经外磁场 H 磁化后,如果出现磁极,材料内部就产生一种与外磁场 H 方向相反或接近相反的磁场。因它有减退磁化的作用,所以称为退磁场,如图8-1-10中的 H_D 是代表材料磁化后出现磁极而产生的退磁场。在磁性材料内部外磁场 H 的方向从S极到N极,退磁场的方向从N极到S极。对于被均匀磁化的磁性体,退磁场 H_D 可用下式表示:

$$H_D = -NM \quad (8-1-9)$$

式中 N ——退磁因数,它由材料的几何形状决定,

对于一椭球形的均匀材料, N 是常数

M ——磁化强度,

当有退磁场存在时,磁性体单位体积中的退磁能 E_D 为:

$$E_D = \frac{1}{2} \mu_0 N M^2 \quad (8-1-10)$$

式中 μ_0 ——真空磁导率

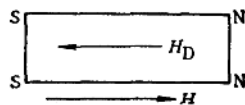


图 8-1-10 退磁场示意图

磁性材料如果有空隙或内部有夹杂物以及空洞,经磁化后这些地方都会出现磁极而产生退磁场,因而须增大外磁场以克服这些退磁场,这就降低了材料的磁导率。特别是在磁性材料用于开路(有间隙)的情况下,退磁场是一个很重要的影响因素。

c. 磁晶各向异性和磁致伸缩性能 磁性材料通常是不表现各向异性的多晶体。但一般单晶体就不是这样。由于构成一个晶体的原子在晶体各个方向上的排列情况不相同,造成晶体不同方向上力学、电学和磁学的性质也不相同,其中磁性在不同方向上的差异,称为磁晶各向异性。一个晶体有很多方向,图 8-1-11 是表示铁晶体(体心立方结构)的几个主轴方向。图中沿立方边的[100]、[010]和[001]方向是易磁化方向,[111]方向是难磁化方向,其他方向介于二者之间。更详细地说,把一个椭球晶体沿不同方向磁化到饱和所需要的能量是各不相同的。在易磁化方向磁化到饱和所需要的能量最低,令其值为 E_0 。在其它方向磁化到饱和所需要的能量值,其超越 E_0 的部分称为磁晶各向异性能 E_k 。对称性地考虑就可得到:

$$E_k = K(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K'\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \dots$$

$$\approx K(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) \quad (8.1-11)$$

式中 K ——磁晶各向异性常数;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ——磁化方向与三个立方边($\langle 100 \rangle$ 型)所作角的方向余弦,即 $\alpha_1 = \cos \theta_1; \alpha_2 = \cos \theta_2; \alpha_3 = \cos \theta_3$ 。

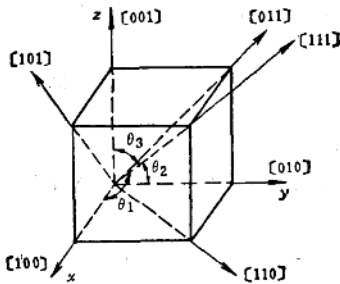


图 8-1-11 铁晶体的几种方向

纯金属铁、镍以及锰锌、镍锌等铁氧体都为立方晶系。(8.1-11)式中的 K 值可正可负,其绝对值标志材料的磁晶各向异性的程度。

b. 磁弹性能 磁性材料被外磁场磁化时,要发生磁致伸缩。如果材料受限制不能自由伸缩,就会

产生应力,改变材料的磁化状态。外施应力也可以产生同样的结果。这现象来源于磁性和弹性的耦合,通常也称为磁弹性效应。对一个多晶样品施以外应力 σ ,则引起一个单轴磁各向异性,其能量密度 E_σ 称为磁弹性能。

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (8.1-12)$$

式中 λ_s ——饱和磁致伸缩系数
 σ ——样品受到的应力
 θ ——磁化方向与应力方向之间的夹角
 这种各向异性也称为应力各向异性。

3.3 技术磁化过程

磁性材料在外磁场 H 中进行磁化直至饱和,这时磁感应强度 B 随 H 变化的关系,可用磁化曲线来表示。这条磁化曲线可分为四段,如图 8-1-12 所示。在不同阶段上磁化过程是不相同的。在磁化曲线的 Oa 阶段,对软磁材料而言称为可逆磁化阶段。在这个阶段上磁场强度退到零,磁感应强度也几乎完全退到零。磁化在这个阶段上主要是磁畴畴壁的可逆移动起作用,磁畴磁矩的可逆转动作用很小。对可逆畴壁移动和磁畴磁矩可逆转动起阻碍作用的是磁晶各向异性能和磁弹性能。根据计算结果表明,软磁材料的初始磁导率 μ_i 与磁晶各向异性常数 K 、饱和磁致伸缩系数 λ_s 和应力 σ 成反比,与饱和磁化强度 M_s 的平方成正比。因此,要使软磁材料获得高的初始磁导率,必须降低 K 、 λ_s 和 σ 的值,同时提高 M_s 值。

在图中的 ab 阶段上,对软磁材料而言,磁感应

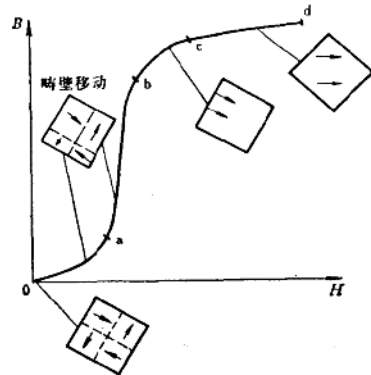


图 8-1-12 磁化时磁矩改变过程示意图

强度随磁场强度增加很快, 最大磁导率 μ_m 就出现在这个阶段上。这是不可逆磁化阶段, 主要是不可逆畴壁移动过程。这个阶段主要也是磁晶各向异性常数 K 、饱和磁致伸缩系数 λ_s 和应力 σ 以及杂质对畴壁移动过程起阻碍作用。所以在这个阶段上为了使软磁材料获得高的磁导率, 必须尽量将 K 、 λ_s 、 σ 的值降低和减少杂质的浓度。

对于永磁材料, 磁化在 Oa 、 ab 阶段上, 转动磁化也可能是主要的。

无论是软磁材料或永磁材料, 磁化在 bc 阶段上, 起主要作用的是磁畴磁矩的转动。在转动过程中磁畴磁矩在磁场作用下, 在晶体晶格中进行转动, 所以阻止磁畴磁矩转动的是磁晶各向异性性能和退磁能, 这两种能量的大小与材料的矫顽力 H_c 成正比。

最后一个磁化阶段是 cd 阶段, 称为磁化渐近饱和阶段, 这时磁畴磁矩已转到外磁场方向或接近外磁场方向, 使磁化趋于饱和。

3.4 反磁化过程

从图 8-1-13 中, 沿磁化曲线 Oa 将磁性材料磁化到 a 点达到饱和后, 这时若将磁场减到零, 然后把磁场在反方向上增加, 直至达到 b 点而饱和, 由 a 至 b , 这是相对于 a 点的一个反磁化过程。由 b 点再回到 a 点, 这是相对于 b 点的另一个反磁化过程。这样来回两个过程就构成了磁滞回线。

沿磁化曲线 Oa 将磁性材料磁化到 a 点达到饱和时, 所有不同方向的磁畴磁矩都集中在磁场方向上, 把磁场减小到零后(由 a 到 B_r 过程), 磁畴磁矩由于磁晶各向异性性能的作用转到离磁场方向最近的易磁化方向, 而不是回到磁化前各自的方向上。因

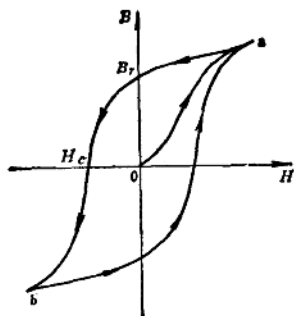


图 8-1-13 反磁化过程进行的方向

此, 在磁场方向上磁畴磁矩仍有分量, 这就是产生剩磁的原因, 也是引起磁滞的根源, 所以 B_r 就是表示剩磁的大小。由 B_r 到 H_c 过程, 畴壁的移动和磁畴磁矩的转动两种方式都存在。如果在这个阶段上磁感应强度大幅度地下降, 说明畴壁移动起主要作用, 因为畴壁移动是使磁化容易减退的途径, 这时磁性材料的矫顽力 H_c 低。如果要提高磁性材料的矫顽力, 必须增加畴壁移动的阻力。提高饱和磁致伸缩系数 λ_s 或使材料产生应力 σ 或增加材料杂质浓度都可以增加畴壁移动的阻力。但提高矫顽力最有效的途径是使畴壁不存在, 这样材料磁化或退磁都通过磁畴磁矩转动来完成。所以有些永磁材料由很小的颗粒组成, 颗粒足够小到在一个方向自发磁化到饱和成为单个磁畴, 这样的颗粒称为单畴颗粒。单畴颗粒就不存在畴壁, 不会有畴壁磁化过程, 这样降低了材料的磁导率, 提高了矫顽力, 构成了永磁材料。相反在软磁材料生产的过程中, 需要注意颗粒不宜太小, 以免形成单畴而降低了磁导率。

第2章 软磁材料

1 软磁材料的性能、品种和应用

1.1 对软磁材料的主要性能要求

在高磁场下使用的软磁材料, 对其磁性能的主要要求是在一定的频率和磁感应强度下具有低的铁损和在一定磁场强度下具有高的磁感应强度。铁损

低, 可降低产品的总损耗, 提高产品效率; 磁感应强度高, 可缩小铁心体积, 减轻产品重量, 或者可节约导线, 降低导体电阻引起的损耗。

在低磁场下使用的软磁材料, 要求具有高的磁导率和低的矫顽力等性能。磁导率高, 当线圈匝数一定时, 通以不大的激磁电流就能产生较高的磁感应强度, 从而可获得高的输出电压。材料的矫顽力

低,磁滞回线的面积小,则铁损亦小。因此,利用高磁导率、低矫顽力的材料制成的铁心有助于缩小产品的尺寸,提高灵敏度。

在高频或者较高频率下使用的软磁材料除要求磁导率高和矫顽力低外,还应有高的电阻率,以降低涡流损耗。

此外,在某些特殊场合使用的软磁材料,有的要

求具有矩形磁滞回线,有的要求在一定磁感应强度范围内磁导率保持基本不变,有的要求具有高的饱和磁感应强度或饱和磁致伸缩系数特性等,以满足某些特殊需要。

1.2 软磁材料的品种、主要特点和应用范围(见表 8.2-1)

表 8.2-1 软磁材料的品种、主要特点和应用范围

品 种		主 要 特 点	应 用 范 围
电工用纯铁		含碳量在 0.04% 以下,饱和磁感应强度高,冷加工性好。但电阻率低,铁损高,有磁时效现象	一般用于直流磁场
硅 钢 片		铁中加入 0.8~4.5% 的硅,就是硅钢。它和电工用纯铁相比,电阻率增高,铁损降低,磁时效基本消除。但导热系数降低,硬度提高,脆性增大	电机、变压器、继电器、互感器、开关等产品的铁心
铁 镍 合 金		和其他软磁材料相比,在低磁场下,磁导率高,矫顽力低,但对应力比较敏感	频率在一兆赫以下,低磁场中工作的器件
铁 铝 合 金		和铁镍合金相比,电阻率高,比重小,但磁导率低。随着含铝量增加,硬度和脆性增大,塑性变差	低和高磁场下工作的器件
软磁铁氧体		烧结体,电阻率非常高,但饱和磁感应强度低,温度稳定性也较差	高频或者较高频率范围内的电磁元件
其 他 软 磁 材 料	铁 钴 合 金	饱和磁感应强度特高,饱和磁致伸缩系数和居里温度高,但电阻率低	航空器件的铁心、电磁铁磁极、换能器元件
	恒导磁合金	在一定的磁感应强度、温度和频率范围内,磁导率基本不变	恒电感和脉冲变压器等的铁心
	磁 温 度 补 偿 合 金	居里温度低,在环境温度范围内磁感应强度随温度升高急剧地、近似线性地减少	磁温度补偿元件

2 电工用纯铁

电工用纯铁有原料纯铁(包括电铁1和电铁2,即DT1、DT2两个牌号)、电子管纯铁(包括电铁7、电铁8和电铁8高,即DT7、DT8和DT8A三个牌号)和电磁纯铁三种。本节重点介绍电磁纯铁。

铁具有高的饱和磁感应强度、高的磁导率和低的矫顽力。它的纯度愈高,磁性能愈好。如纯度为99.95%的电解铁(主要杂质有0.004% C、0.02% Mn、0.001% P和0.001% S等),其矫顽力 $H_c=7.2$ 安/米,初始磁导率 $\mu_i=0.0012$ 亨/米,最大磁

导率 $\mu_m=0.025$ 亨/米。它比电磁纯铁的磁性能有明显提高。但制备高纯度的铁,工艺复杂,成本较高。因此,在工程技术上广泛地采用电磁纯铁。

在冶炼电磁纯铁时,可以加入适量的铝或硅、铝以削弱碳、氮、氧等杂质对磁性的有害影响。根据冶炼工艺,将电磁纯铁分成铝镇静纯铁和硅铝镇静纯铁两类。其牌号、成分、用途和磁性能分别见表8-2-2和表8-2-3。

电磁纯铁加工成磁性元件后,由于存在应力,使磁性能降低。为了消除应力和提高磁性能,必须进行退火处理。其退火工艺见表8-2-24。

表 8-2-2 电磁纯铁的牌号、主要成分和用途

种 类	牌 号		主 要 成 分 %, 不 大 于					一 般 用 途
	名 称	代 号	碳	硅	磷	硫	铝	
铝 镇 静 纯 铁	电铁 3	DT3	0.04	0.20	0.020	0.020	0.50	不保证磁时效的一般电磁元件
	电铁 3 高	DT3A						
	电铁 4	DT4	0.03	0.20	0.020	0.020	0.15~0.50	在一定时效工艺下,保证无时效的电磁元件
	电铁 4 高	TD4A						
硅 铝 镇 静 纯 铁	电铁 4 特	DT4E						
	电铁 4 超	DT4C						
	电铁 5	DT5	0.04	0.20~0.50	0.020	0.020	0.30	不保证磁时效的一般电磁元件
	电铁 5 高	DT5A						
	电铁 6	DT6	0.03	0.30~0.50	0.020	0.020	0.30	在一定时效工艺下,保证无时效,磁性范围较稳定的电磁元件
	电铁 6 高	DT6A						
	电铁 6 特	DT6E						
	电铁 6 超	DT6C						

注: 1. 本表引自标准 YB200-75。

2. 代号中“DT”表示电工用纯铁,“DT”后面的数字为代号序号,序号后面的字母表示电磁性能等级,即“A”、“E”、“C”分别表示“高”、“特”、“超”级,未用字母表示“普”级。

表 8-2-3 电磁纯铁的磁性能

磁性等级	牌 号 代 号	矫 顽 力 H_c 不 大 于		最 大 磁 导 率 μ_m 不 小 于		在 不 同 磁 场 强 度 下 的 磁 感 应 强 度 值 不 小 于									
		$\frac{A}{m}$	Oe	$\frac{H}{m}$	$\frac{G}{Oe}$	B_5		B_{10}		B_{25}		B_{50}		B_{100}	
						$\frac{Wb}{m^2}$	G	$\frac{Wb}{m^2}$	G	$\frac{Wb}{m^2}$	G	$\frac{Wb}{m^2}$	G	$\frac{Wb}{m^2}$	G
普级	DT3、DT4 DT5、DT6	96	1.2	0.0075	6000	1.40	14000	1.50	15000	1.62	16200	1.71	17100	1.80	18000
高级	DT3A、DT4A DT5A、DT6A	72	0.9	0.00875	7000										
特级	DT4E DT6E	48	0.6	0.0113	9000										
超级	DT4C DT6C	32	0.4	0.015	12000										

注: 1. 本表引自标准 YB200-75。

2. B_5 、 B_{10} 、 B_{25} 、 B_{50} 和 B_{100} 分别表示磁场强度为500、1000、2500、5000和10000安/米时的磁感应强度值,以后在不同磁场强度下,磁感应强度的表示法皆依此类推。

3 硅钢片

3.1 质量要求

衡量硅钢片的质量,首先是电磁性能。电磁性能好的硅钢片在一定频率和磁感应强度下具有低的铁损以及在一定磁场强度下具有高的磁感应强度。此外,加工性能、板形、尺寸公差和表面质量等也是衡量硅钢片质量的指标。

3.2 影响硅钢片性能的主要因素

3.2.1 含硅量和杂质

硅对硅钢片性能起决定的影响。铁中加入硅后,硅与铁形成固溶体型合金,因而电阻率提高,同时有助于将有害杂质碳分离出来;并能与氧结合成 SiO_2 ,避免氧原子渗杂在铁原子间形成固溶体,使铁的晶格畸变。因此,一般含杂质的铁加入了硅反而能提高磁导率,降低矫顽力和铁损。但随着含硅量的增加,硬度和脆性增高,比重下降,导热系数降低,对机械加工和散热不利。目前硅钢片其含硅量一般不超过4.5%。

关于硅钢片的铁损和磁感应强度、密度、电阻率与含硅量的关系分别见图8-2-1和图8-2-2。

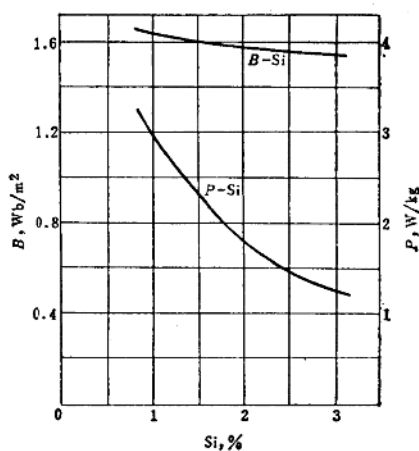


图 8-2-1 0.50 mm 厚冷轧无取向硅钢片的 B_m 、 $P_{10/50}$ 与含硅量的关系

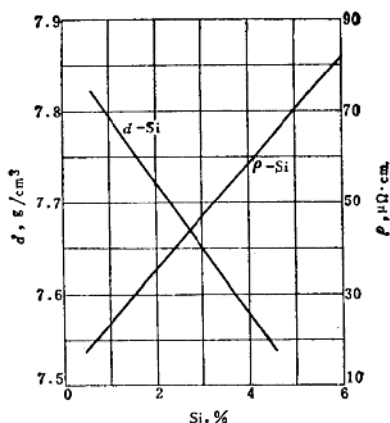


图 8-2-2 硅钢片的密度 d 、电阻率 ρ 与含硅量的关系

3.2.2 晶粒取向

硅钢是立方晶系的多晶体,每个晶粒有三个互相垂直的 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 易磁化方向,如图

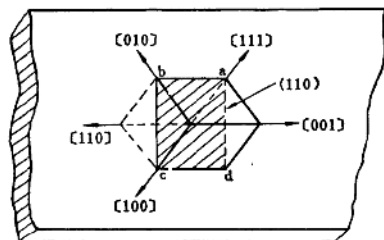


图 8-2-3 冷轧单取向硅钢片晶粒的排列

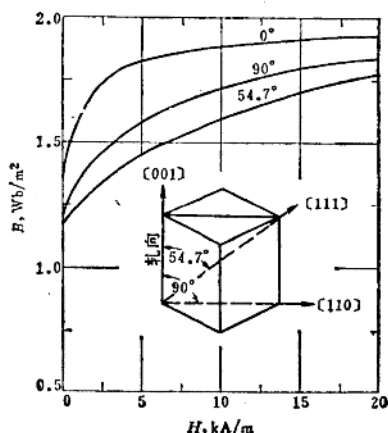


图 8-2-4 含硅 3% 冷轧单取向硅钢片在不同方向上的 $B-H$ 曲线

8-2-3 所示。但在多晶体中,晶粒的排列是零乱的,在材料制备过程中可采取工艺措施将硅钢晶粒的[001]轴沿同一方向排列,而[110]轴与钢片表面垂直,也就是(110)面,即图 8-2-3 中的 abcd 平面与硅钢片表面平行。易磁化方向[001]轴与硅钢片轧向一致,这种只有一个易磁化方向的材料称单取向硅钢,其磁性沿轧向最好,其他方向就差。图 8-2-4 是冷轧单取向硅钢片在不同方向上的 $B-H$ 曲线的差别。

此外,还有一种双取向硅钢片,它有两个互相垂直的、磁性接近的易磁化方向,且都在轧面内,其中一个方向与轧向平行。这种硅钢片虽然很适合制造电机的铁心,但制造工艺较复杂。

3.2.3 应力

高性能冷轧硅钢片的磁性对应力的影响比较敏感,在冲剪、叠装或卷绕成铁心的过程中,都会产生

应力,使磁性能恶化。必须采用退火处理以消除应力,恢复原来的磁性。其退火工艺见 8-2-1 节。

3.2-4 厚度

同一品种的硅钢片,其厚度愈大,涡流损耗愈高。为了降低涡流损耗,应将硅钢片的厚度减小。但是硅钢片的厚度减小,增加制造铁心的工作量,并导致叠装系数下降。

表 8-2-4 高速大型交流电动机
转子常用硅钢片的机械特性

牌 号	抗拉强度 kgf/mm ² 不小于		屈 服 点 kgf/mm ² 不小于		延 伸 率 % 不小于	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
W32	50	52	40	43	23	25
W33	51	53	49	42	26	28

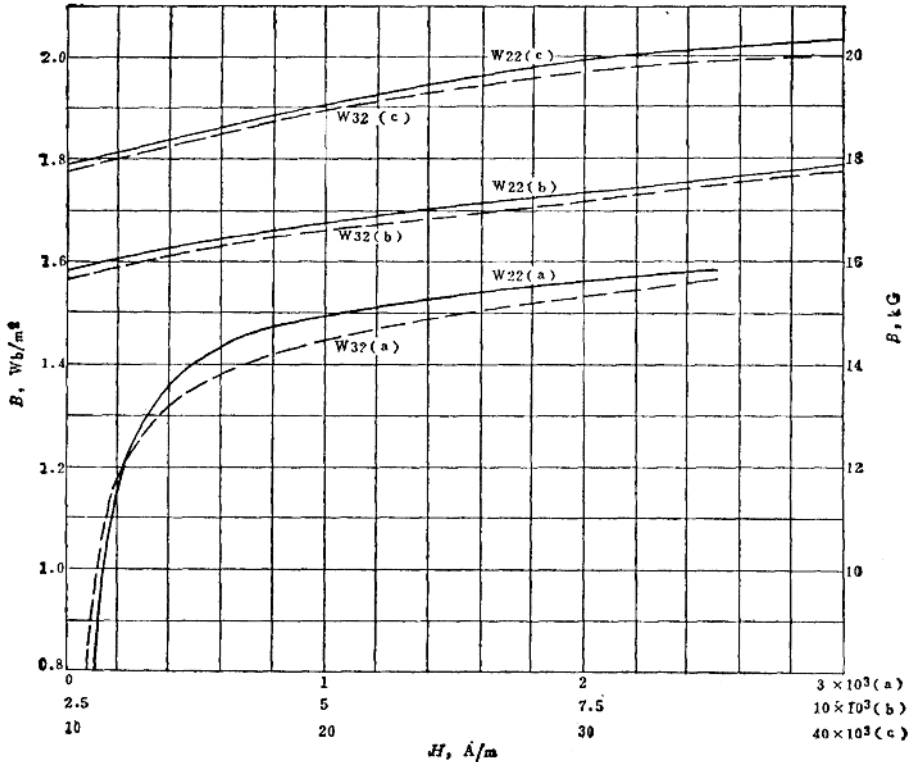


图 8.2-5 典型的 0.50 毫米厚冷轧无取向硅钢片的直流磁化曲线(任意取样,剪断后经 800°C 退火)

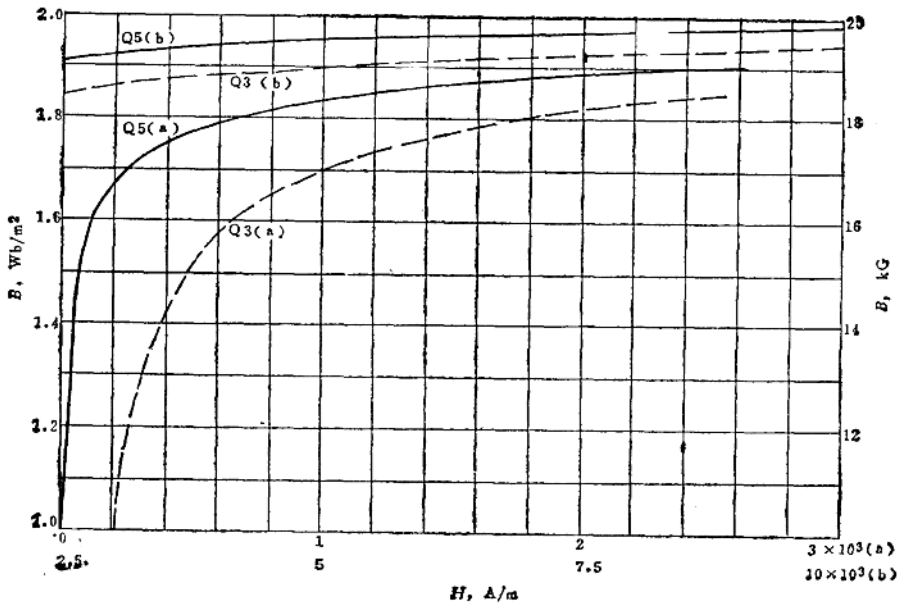


图 8-2-6 典型的 0.35 mm 厚冷轧单取向硅钢片的直流磁化曲线
(沿轧向取样, 剪断后经 800°C 退火)

3.3 硅钢片的特性及应用范围

硅钢片按照制造工艺不同, 可以分为热轧和冷轧两种; 冷轧又有取向和无取向之分。电机工业中大量使用的硅钢片其厚度为 0.35 和 0.50 毫米; 在电信工业中, 因使用频率高, 涡流损耗大, 通常采用厚度为 0.05~0.20 毫米厚的薄带硅钢。它们的磁性能分别见表 8-2-5 和表 8-2-6。应用范围见表 8-2-7。

高速旋转的大型电动机转子用的硅钢片, 因离心力大, 要求具有较高的抗拉强度等机械特性, 其常用的两种牌号的机械特性参数见表 8-2-4。

此外, 冷轧硅钢片常用品种的 $B-H$ 和 $P-B$ 曲线见图 8-2-5 至图 8-2-7。

4 铁镍合金

4.1 铁镍合金的主要特点

铁镍合金和其他软磁材料比较起来, 其优点是在低磁场下有极高的磁导率和很低的矫顽力。其中有些产品如 1J51 类, 还具有矩形磁滞回线, 可作特

殊用途。铁镍合金的加工性好, 可以制成各种形状复杂、尺寸要求精确的元件。但是, 铁镍合金中含有大量的稀缺金属镍, 成本高, 工艺因素的变动对磁性影响大, 使产品之间磁性能差别较大。此外, 它的电阻率不高, 一般只在一兆赫以下的频率范围内使用。

4.2 影响铁镍合金磁性能的主要因素

合金的成分配比和存在于合金中的气体及微量的碳、硫、磷等夹杂物对磁性影响很大。气体和夹杂物使初始磁导率和最大磁导率降低, 矫顽力增大。但对某些合金来说, 少量的氧含量对提高最大磁导率有利。合金饱和磁感应强度的最高值出现在 45~50% 镍含量处。随着镍含量增加和钨、铬、铜等元素的加入, 虽然使饱和磁感应强度下降, 但可提高磁导率和电阻率, 降低矫顽力。

铁镍合金的磁性对应力的影响比较敏感, 如果在冲击和振动条件下, 将导致磁导率下降, 矫顽力上升, 如图 8-2-8 所示。图中 H_{cl} 、 μ_{m1} 和 H_{cII} 、 μ_{mII} 分别表示加应力时的 H_c 值、 μ_m 值和去掉应力时的 H_c 值、 μ_m 值。试样冲成环状, 垂直钢片表面加压力。

表 8-2-5 电机工业中常用硅钢片的磁性能

硅钢品种	代号	厚度 mm	铁损 W/kg, 不 大 于			不同磁场强度下的磁感应强度值 不小于						叠装 系数 %	密 度 g/cm ³	弯 曲 次 数		
			P _{10/50}	P _{15/50}	P _{17/50}	B ₁₀		B ₁₅		B ₅₀					B ₁₀₀	
						Wb/m ²	G	Wb/m ²	G	Wb/m ²	G				Wb/m ²	G
热 轧 硅 钢 片	D21	0.50	2.5	6.1		—	—	1.48	14800	1.59	15900	1.73	17300	7.70	—	
	D22	0.50	2.2	5.3		—	—	1.51	15100	1.61	16100	1.74	17400	7.70	—	
	D23	0.50	2.1	5.1		—	—	1.54	15400	1.64	16400	1.76	17600	7.70	—	
	D32	0.50	1.8	4.0		—	—	1.50	15000	1.61	16100	1.74	17400	7.65	4	
	D32	0.35	1.4	3.2		—	—	1.50	15000	1.61	16100	1.74	17400	7.65	5	
	D42	0.50	1.35	3.15		—	—	1.45	14500	1.56	15600	1.68	16800	7.55	1	
	D43	0.50	1.20	2.90		—	—	1.44	14400	1.55	15500	1.67	16700	7.55	1	
	D42	0.35	1.15	2.80		—	—	1.45	14500	1.56	15600	1.68	16800	7.55	1.5	
D43	0.35	1.05	2.50		—	—	1.43	14300	1.54	15400	1.66	16600	7.55	1.5		
冷 轧 硅 钢 片	W21	0.50	2.3	5.3		—	—	1.54	15400	1.64	16400	—	—	7.75	—	
	W22	0.50	2.0	4.7		—	—	1.52	15200	1.62	16200	—	—	7.75	—	
	W32	0.50	1.6	3.6		—	—	1.50	15000	1.60	16000	—	—	7.65	5	
	W33	0.50	1.4	3.3		—	—	1.50	15000	1.60	16000	—	—	7.65	5	
	W32	0.35	1.25	3.1		—	—	1.48	14800	1.58	15800	—	—	7.65	5	
	W33	0.35	1.05	2.7		—	—	1.48	14800	1.58	15800	—	—	7.65	5	
	Q3	0.35	0.7	1.6	2.3	1.67	16700	1.80	18000	1.86	18600	—	—	7.65	3	
	Q4	0.35	0.6	1.4	2.0	1.72	17200	1.85	18500	1.90	19000	—	—	7.65	3	
单 取 向	Q5	0.35	0.55	1.2	1.7	1.76	17600	1.88	18800	1.92	19200	—	—	7.65	3	
	Q6	0.35	0.44	1.1	1.51	1.77	17700	1.92	19200	1.96	19600	—	—	7.65	3	

注: $P_{10/50}$ 、 $P_{15/50}$ 、 $P_{17/50}$ 表示频率为 50 赫, 磁感应强度分别为 1.0 韦/米²、1.5 韦/米²和 1.7 韦/米²时的铁损, 以后在不同频率和不同磁感应强度下铁损的表示法皆依此类推。

表 8-2-6 冷轧单向薄带硅钢的磁性能

代 号	厚 度 mm	铁 损 W/kg		在 不 同 磁 场 强 度 下 的 磁 感 应 值 不 小 于					
		不 大 于		$B_{0.4}$		$B_{0.8}$		B_2	
		$P_{10/400}$	$P_{15/400}$	Wb/m ²	G	Wb/m ²	G	Wb/m ²	G
G1	0.20	12.0	28.0	0.60	6000	0.90	9000	1.20	12000
G2	0.20	11.0	26.0	0.80	8000	1.00	10000	1.30	13000
G3	0.20	10.9	24.0	0.90	9000	1.10	11000	1.40	14000
G4	0.20	9.0	22.0	1.00	10000	1.20	12000	1.50	15000
G1	0.08	10.0	22.0	0.60	6000	0.90	9000	1.20	12000
G2	0.08	8.5	19.0	0.80	8000	1.00	10000	1.30	13000
G3	0.08	7.5	17.0	0.90	9000	1.10	11000	1.40	14000
G4	0.08	7.0	16.0	1.00	10000	1.20	12000	1.50	15000
G1	0.05	10.0	21.0	0.60	6000	0.90	9000	1.20	12000
G2	0.05	8.5	19.0	0.80	8000	1.00	10000	1.30	13000
G3	0.05	7.5	16.0	0.90	9000	1.10	11000	1.40	14000
G4	0.05	7.0	15.0	1.00	10000	1.20	12000	1.50	15000

代 号	厚 度 mm	在 不 同 磁 场 强 度 下 的 磁 感 应 值 不 小 于						矫 顽 力 H_c	
		B_4		B_{10}		B_{25}		A/m	Oe
		Wb/m ²	G	Wb/m ²	G	Wb/m ²	G		
G1	0.20	1.35	13500	1.55	15500	1.70	17000	—	—
G2	0.20	1.42	14200	1.60	16000	1.75	17500	—	—
G3	0.20	1.50	15000	1.66	16600	1.82	18200	—	—
G4	0.20	1.57	15700	1.70	17000	1.84	18400	—	—
G1	0.08	1.35	13500	1.55	15500	1.70	17000	36	0.45
G2	0.08	1.42	14200	1.60	16000	1.75	17500	32	0.40
G3	0.08	1.50	15000	1.66	16600	1.82	18200	28	0.35
G4	0.08	1.57	15700	1.70	17000	1.84	18400	26	0.325
G1	0.05	1.35	13500	1.55	15500	1.70	17000	36	0.45
G2	0.05	1.42	14200	1.60	16000	1.75	17500	34	0.425
G3	0.05	1.50	15000	1.66	16600	1.82	18200	32	0.40
G4	0.05	1.57	15700	1.70	17000	1.84	18400	32	0.40

表 8-2-7 常用硅钢片的主要应用范围

产 品 名 称	热 轧						冷 轧 无 取 向				冷 轧 单 取 向			
	D21	D22	D23	D32	D42	D43	W21	W22	W32	W33	Q3	Q4	Q5	Q6
大型交流发电机					○	○			○	○	○	○	○	○
大型交流电动机					○	○			○	○				
大型直流电机	○	○	○				○	○						
中型交流电动机	○	○	○	○			○	○						
中小型直流电机	○	○	○	○			○							
小型交流电动机	○	○	○				○	○						
间歇运转电动机	○	○	○	○										
驱动微电机	○													
控制微电机			○	○	○		○		○					
电力变压器					○	○			○	○	○	○	○	○
电焊变压器				○			○	○						
音频变压器											○	○	○	○
电抗器、磁放大器									○	○	○	○	○	○
互 感 器											○	○	○	○
继 电 器				○			○							
扼 流 圈	○	○		○			○	○						

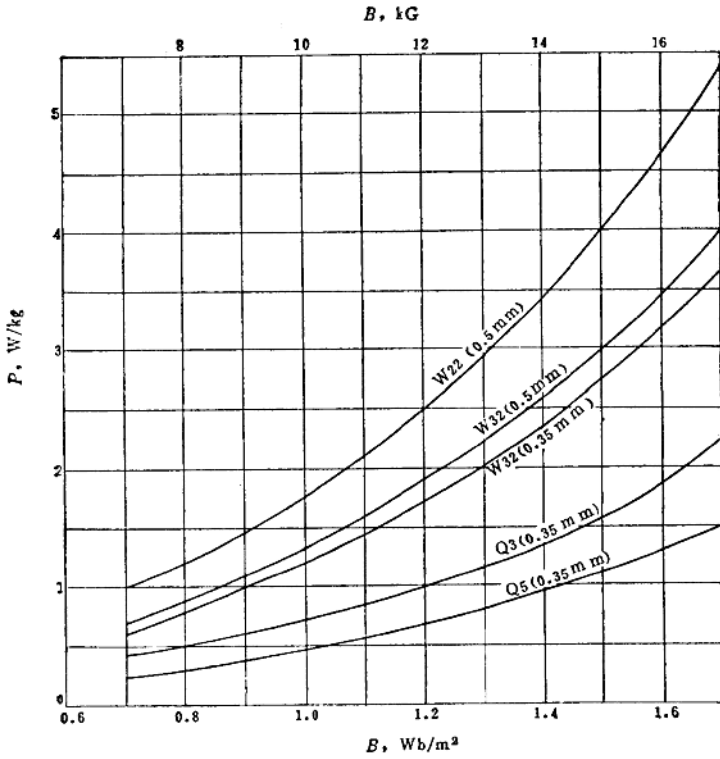


图 8-2-7 频率为 50 赫时,典型的冷轧硅钢片的铁损曲线
(单取向硅钢片沿轧向取样,无取向任意取样,剪断后均经 800°C 退火)

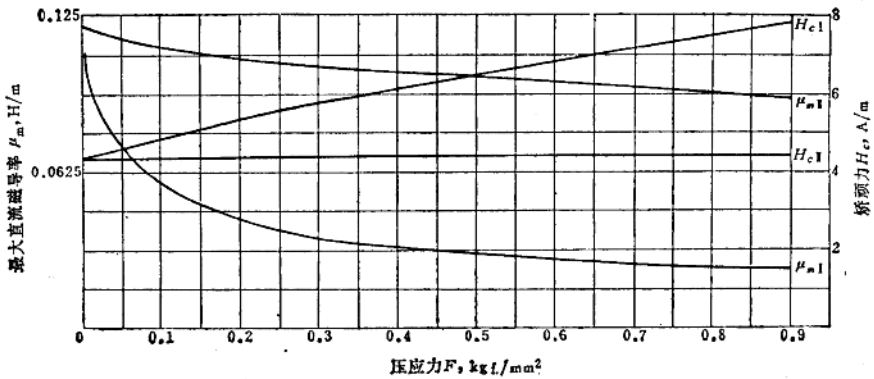


图 8-2-8 压应力对 0.35 mm 厚 1J50 合金的直流磁性的影响