磁性材料的基本特性与应用

宁波水表股份有限公司 姚灵

水表工作磁场、磁敏元件以及磁屏蔽等内容均与磁场基本概念和其相关物理量密切相关。因此了解磁性材料的基本特性对于正确选用磁性材料、做好磁敏传感器的设计等工作是非常重要的。为此本文对表征磁特性的主要物理量以及与磁性材料特性与应用有关的内容作出一些描述和介绍。

1.磁特性的主要物理量

1.1 磁感应强度

磁性材料对周围运动电荷有力的作用，它是通过一种特殊物质，即磁场来传递的。在磁场中的任何一点，都存在一特定方向。当电荷 q 沿着该方向运动时，并没有受到力的作用，当它垂直于该方向运动时，则要受到力 f 的作用。f 的大小正比于电荷 q 及它的运动速度 v,

$$f \propto q \cdot v \tag{1}$$

实验证明，在磁场中的同一点上，对于不同 q 和 v，比值 $f/q \cdot v$ 都相同，称之为磁感应强度 $\boldsymbol{B}$, 它的大小为

$$B = f/q \cdot v \tag{2}$$

$\boldsymbol{B}$ 有大小，又有方向，因此是一矢量。在国际单位制中，$\boldsymbol{B}$ 的单位为 T（特斯拉，1T＝Wb/A）。在工程计算中，过去习惯采用 Gs（高斯），它和特斯拉的换算关系为

$$1\mathrm{T} = 10^4\mathrm{Gs} \tag{3}$$

1.2 磁通量

通常用磁力线来形象地描述空间磁场的强弱和方向，磁力线上各点的方向与该点 $\boldsymbol{B}$ 的方向一致。$\boldsymbol{B}$ 的大小则用磁力线的疏密来表示。通过一个截面的磁力线总数称为磁通量，简称磁通，用 Φ 表示，

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{B} \cdot dS \tag{4}$$

在均匀磁场中，则有

$$\Phi = B \cdot S \tag{5}$$

式中　Φ—磁通量（韦伯，Wb）；S—截面积（m^2）。

磁通不是矢量，但有正负。当磁感应强度为 1T 时，通过垂直于磁场方向截面积为 $1m^2$ 的磁通量为 1Wb。磁通量与 Mx（麦克斯韦）的关系为

$$1\text{Mx} = 10^{-8}\ \text{Wb} \tag{6}$$

1.3 磁场强度

为了进一步描述磁场的性质，引入磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 这一物理量。$\boldsymbol{H}$ 的定义为

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{B} / \mu \tag{7}$$

式中 $\boldsymbol{H}$—磁场强度（A/m）；μ—磁导率。定义磁导率 $\mu = \mu_r' \cdot \mu_0$（μ_0 为真空中的磁导率，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A）。

磁场强度过去常用单位为 Oe（奥斯特），它与国际单位制 A/m（安培/米）之间的换算关系为

$$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe} = 0.0126\text{Oe} \tag{8}$$

由于真空中 μ_r'=1，因此在真空中（或近似于真空）的磁场强度为

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{B} \tag{9}$$

事实上，描述磁介质中磁场强度大小的物理量是磁感应强度 $\boldsymbol{B}$，而不是磁场强度 $\boldsymbol{H}$。磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 这个物理量在磁路计算时要用到，它只是作为一个重要辅助量出现的。

由电磁理论可知，磁路中的麦克斯韦方程为

$$\oint \boldsymbol{H} d\boldsymbol{L} = N\boldsymbol{I} \tag{10}$$

式中 $\boldsymbol{N}$—线积分路径所包围的导体数；$\boldsymbol{I}$—每根导体所流过的电流（A）；$\boldsymbol{L}$—线积分的长度（m）。

由式（3－21）可得一闭合的、各处截面磁场均匀的安培定律

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{I}N / \boldsymbol{L} \tag{11}$$

由此可知，磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的大小和磁介质无关，而和回路的安匝数成正比。安匝数 $\boldsymbol{I}N$ 又称磁动势，一般用 F 表示。

2. 永磁材料基本特性

水表工作磁场常用的永磁材料主要有：烧结钕铁硼磁性材料、铁氧体永磁材料、铝镍钴合金磁性材料和稀土钴永磁材料等。为了更好地理解永磁材料的基本特性，下面将有关基础知识作出介绍。

2.1 永磁材料磁滞回线和去磁曲线

永磁材料种类很多，其磁性能也较复杂，但基本特性可用回线来描述，即可用 $B = f(H)$ 曲线来表示磁钢中磁感应强度 B 随磁场强度 H 改变的特性，见图 1。

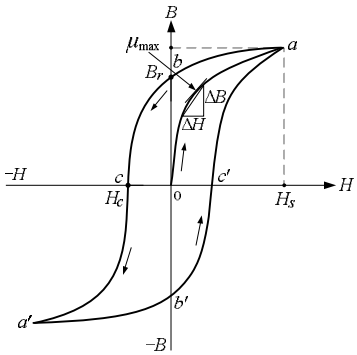

图 1 磁滞回线和起始磁化曲线

图 1 表明，一块未磁化的磁钢在磁化过程中，其磁化曲线首先从坐标原点 0 开始，磁感应强度 B 随着磁场强度 H 的增大而增加，并逐渐进入饱和状态 a 点。此后，如再增加外加磁场强度 H，则 B 基本保持不变，与 a 点相应的磁感应强度 B_s 称为饱和磁感应强度，此时的磁场强度 H_s 称为饱和磁场强度，曲线 $0a$ 称为起始磁化曲线。

当磁钢充磁达到饱和状态后，若逐渐减少外加磁场强度 H，磁钢中的磁感应强度 B 将随之减少，但 $B-H$ 关系不再按 $0a$ 曲线下降，而是按图 1 中另一条曲线 ab 下降。当外加磁场强度为零时，磁钢中的磁感应强度 B 不等于零，而是等于 $0b$，此时若改变外加磁场方向，并逐步向相反方向增加，则 $B-H$ 关系按图 1 所示曲线 bca' 变化，点达到负向的饱和状态。此后若在增加负向外加磁场强度 H，则其磁感应强度 B 基本不变。而当它逐渐减少到零，再逐渐向正值增加时，$B-H$ 关系将沿曲线 $a'b'c'a$ 变化。随着外加磁场的不断反复变化，磁钢中的 $B-H$ 关系将沿封闭曲线 $abca'b'c'a$ 重复变化。这样的封闭曲线称为磁滞回线。由于所谓永磁材料的“磁性适应”现象，一般磁滞回线要经过 2～3 磁反复磁化后才会完全重合。

在图 1 所示的磁滞回线中，其第二象限的 bc 段称为去磁曲线。由于永磁材料一般应用在无外励磁状况下，因而去磁曲线是表示永磁材料特性的主要特性曲线。

2.2 表征永磁材料特性的主要参数

永磁材料磁滞回线的形状和特性可用下列若干参数来表示。

1）饱和磁场强度

图 1 中表示，是磁感应强度 B 达到饱和值 B_s 的磁场强度称为饱和磁场强度 H_s。应当指出，磁钢充磁时应完全磁化，即充磁磁场强度 H 应达到，甚至超过 H_s 值，才能得到最大可能磁化的去磁曲线。这样的去磁曲线最稳定，显示出该材料的最优磁性能。若充磁磁场强度 H 值低于 H_s，它们的去磁曲线就会显得不够稳定，磁钢所表现出的磁性能也较低。

2）剩余磁感应强度和矫顽力

在图 1 中，磁滞回线与纵坐标的交点，即去磁曲线的起始点 b 点的 B 值，称为剩余磁感应强度，简称剩磁，用 B_r 来表示。它是在永久磁钢两端外磁路的磁阻可以忽略的条件下充磁后，外加磁场消失并在理想短路条件下存在于磁钢中的磁感应强度值。

在负向外加磁场的作用下，磁钢中的磁感应强度 B 随着去磁磁场增大而减少。使磁钢中的磁感应强度 B 达到零所需要的去磁磁场强度，称为磁感应矫顽力 H_c，简称矫顽力，如图 1 中的 c 点。

3）磁导率

起始磁化曲线和磁滞回线上任意一点的斜率，即任意一点上的 B 和 H 的增量 ΔB 和 ΔH 之比，称为磁导率。它随运行点的不同而变化。

软磁材料的磁导率很大，如电工钢的磁导率可达 0.00875～0.01H/m（当 B=0.5T），而永久材料的磁导率恰很小，如铝镍合金（0.075～0.0875）×10^{-4}H/m（当 B=0.5T 时）。通常情况下，剩余磁感应强度 B_r 与 H_c 之比越小，磁导率就越小。磁导率小是永磁材料的一个特点。

4）磁能积和最大磁能积

永久磁钢去磁曲线上每一点的 BH 乘积称为磁能积。图 2 所示的永久磁钢的磁能积与磁感应强度 B 的关系曲线，称为磁能积曲线。图中的（B_r，0）点和（0，H_c）点上的磁能积都等于零。对于一块完全磁化的磁钢来说，（B_r, 0）点相当于磁钢两端理想短路，即两端外磁路的磁阻为零；（0，H_c）点相当于磁钢两端理想开路，即两端的磁阻为无穷大。由此可见，当磁钢两端为理想短路和理想开路时，磁钢本身没有磁能输出，磁钢对外不发生任何作用。

磁能积曲线上的最大点，表示磁钢能够向外界发出的最大磁能积（BH）$_{max}$，去磁曲线上对应于最大磁能积（BH）$_{max}$ 的工作点 d 的磁感应强度和磁场强度，分别以 B_d 和 H_d 来表示，即

$$(BH)_{\max} = B_d H_d \tag{12}$$

磁能积 BH 和最大磁能积（BH）$_{max}$ 的单位，用 J/m^3 表示。

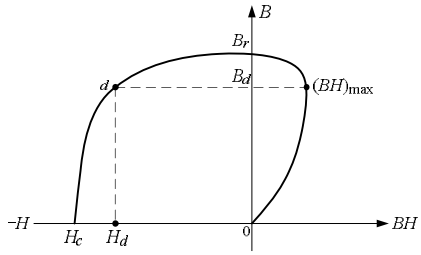

图 2 去磁曲线和磁能积曲线

2.3 几种常用永磁材料的特性

目前最常用永磁材料种类有：铝镍钴、铁氧体和稀土磁体等三种。其中稀土磁体又有第一代的钐钴 1:5、第二代的钐钴 2:17 以及第三代的钕铁硼。主要性能见表 1。

表 1 常用磁性材料的主要性能特性

牌号	磁 性 能			物 理 性 能			
	B_r	H_{cb}	$(BH)_{max}$	居里温度 T_c	最高工作温度	B_r 温度系数	H_{cj} 温度系数
	mT	kA/m³	kJ/m³	⁰C	⁰C	%/⁰C	%/⁰C
铸造铝镍钴	60～1350	30～140	9～72	757～907	250	-0.02	0.03
烧结铝镍钴	560～1100	40～136	12～48				
烧结铁氧体	200～430	125～300	6.5～35	450	180	-0.2	0.5
粘结铁氧体	63～270	50～195	0.8～14.5	450	120	-0.2	0.5
烧结稀土钐钴	600～1060	310～690	64～250	850	120	-0.03	-0.20
粘结稀土钐钴	550	380	60	850	120	-0.03	-0.20
烧结钕铁硼	1020～1380	677～910	191～398	312	120	-0.12	-0.60
粘结钕铁硼	540～800	160～480	36～96	305	125	-0.01	-0.40

1）铝镍钴合金永磁材料

铝镍钴合金是由铝镍铁合金发展而来的，目前有着广泛的使用用途。其剩磁 B 为 1～1.4T，矫顽力为 40000～160000A/m，温度系数低，最大磁能积可达 100kJ/m³。表 2 是我国铸造铝镍钴等永磁合金材料的牌号、成分和性能。

表 2 常用铝镍钴永磁材料的性能

牌号	成分（质量分数）（%）							永 磁 特 性		
	Al	Ni	Co	Cu	Ti	Si	Fe	B_r/T	H_c/(kA/m)	$(BH)_{max}$/(kJ/m³)
LNG34	8	14	24	3			余	1.2	47	34.2
LNG52	8	14	21	3			余	1.3	56	51.7
LNGJ32	7	15	34	3	5		余	0.8	100	31.8
LNGJ56	7	15	34	4	5		余	0.95	104	55.7
LNGJ72	7	15	34	4	5		余	1.05	107	71.6

由于铝镍钴的主要特点是高 B_r，低 H_c 的永磁材料，其相对磁导率在 3 以上，所以在具体应用时其磁极须做成长柱体或长棒形，以尽量减少退磁场作用。铝镍钴磁体本身矫顽力低，所以在使用过程中应严格禁止任何铁器接触铝镍钴永磁材料，以避免造成永磁体局部退磁而使磁路中磁通分布发生畸变。

铝镍钴磁体的优点是温度系数小，而且因温度变化而发生的永磁特性的退化也较小，但该材料硬而脆，加工困难。最近已研制成功了一种便于加工的合金磁性材料，克服了该缺点。

2）铁氧体永磁材料

铁氧体材料是目前应用非常广泛的永磁材料之一，其主要成分为 $MoFe_2O_3$。铁氧体永磁材料有各向同性和各向异性的钡铁氧体、锶铁氧体两大类。归纳起来，铁氧体有以下几个优点：

（1）矫顽力 H_c 大。铁氧体永磁材料的矫顽力介于铝镍钴和稀土钴永磁材料之间。由于其剩磁较低，一般可适合设计成扁平行状；

（2）原料来源丰富，价格便宜，耐氧化、耐腐蚀；

（3）退磁曲线近似为直线；

（4）电阻率高。$\rho=10^4\sim10^6\Omega\cdot m$。

铁氧体永磁材料的主要缺点是：剩磁较低，温度系数大，易碎。

铁氧体的原料为 FeO_3 和金属的盐类（碳酸盐、硫酸盐等）及添加剂（高岭土 CaO_3），经处理并经混合、预压、预热，粉碎成一定粒度的粉料。然后将粉料安放在金属模具内压制成一定的形状，并在磁场强度不低于 0.7T 的磁场中磁取向成形后，再在 1200～1240°C 温度下烧结 1～2h。表 3 是日本某公司铁氧体永磁材料的主要磁性能。

表 3 日本某公司铁氧体永磁材料主要性能

牌号	剩余磁感应强度 B_r/T	矫顽力 H_c /（kA/m）	磁能积（BH）$_{max}$ /（kJ/m^2）	使用温度范围 /°C
Y10T	>0.20	128～160	6.4～9.6	−40～+85
Y15	0.28～0.36	128～192	114.3～17.5	−40～+85
Y20	0.32～0.16	128～192	18.3～21.5	−40～+85
Y25	0.35～0.39	152～208	22.3～25.5	
Y30	0.38～0.42	160～216	26.3～29.5	
Y35	0.40～0.44	176～224	30.3～33.4	
Y15H	⩾0.32	232～248	>17.5	
Y20H	⩾0.34	248～268	>21.5	
Y25BH	0.36～0.39	176～216	23.9～27.1	
Y30BH	0.38～0.40	224～240	27.1～30.3	

我国目前大量生产的永磁铁氧体有钡铁氧体和锶铁氧体两种。市场上的钡铁氧体的（BH）$_{max}$最高的性能为 28.6～31.8kJ/m^3；H_c值只有 143～238kA/m。锶铁氧体最高的性能为 23.6～31.8 kJ/m^3，H_c值最高可达 276 kA/m。所以在外界退磁场较大时，环境温度在 -20^{0}C 以上的应用场合，一般使用锶铁氧体较合适。

永磁铁氧体的矫顽力比铝镍钴永磁材料高，而剩磁只有它的 1/3 左右。永磁铁氧体的剩磁温度系数是负的，温度升高，剩磁下降；而矫顽力温度系数则是正的，温度升高，矫顽力反而增加。

这种永磁材料也有各项同性和各项异性两个系列。各向异性系列是在模压成型时加外磁场得到。一般取外磁场方向和加工时所加压力方向一致，该方向上的磁性能最好。

永磁铁氧体剩磁虽然低，但其价格比较低廉，矫顽力也较高。只要精心设计磁路，空气隙磁感应强度亦有可能达到 1T 左右。

3）稀土永磁材料

常用的稀土永磁材料有 SmPrCo、SmCoPeCo、SmPrNdCo、CeCoCuFe、Sm2Co17 以及 NdFeB、PrNdCeFe 等多种。

这里指的稀土永磁材料主要是稀土钴永磁材料。目前稀土钴分为两大类：一类是通式 RCo5（R 为稀土元素，简称 1:5 材料），另一类是 R2Co17（简称 2:17 材料）。

稀土钴永磁材料性能优异，H_c 很大，可做成薄片永磁材料，以减少体积，节省材料。稀土钴永磁材料的价格较高。

表 4、表 5 是稀土钴材料的磁性能和物理性能表。

表 4 稀土钴永磁材料的磁性能

材料种类	剩余磁感应强度 B_r/mT	矫顽力 H_c/(kA/m)	磁化强度矫顽力 $_MH_c$/(kA/m)	最大磁能积 $(BH)_{max}$/(kJ/m^3)
XG80/36	600	310	340	64～88
XG96/40	700	350	400	38～104
XG112/96	520	520	960	104～120
XG128/120	780	560	1200	120～140
XG144/120	840	600	1200	140～150
XG144/156	840	520	560	140～150
XG160/120	880	640	1200	150～184
XG192/96	960	690	960	184～200
XG192/42	960	420	420	184～200
XG208/44	1000	420	440	200～224
XG240/46	1000	420	460	220～250

表 5 稀土钴永磁材料的物理性能

物理特性牌号	平均温度系数 / (%/^{0}C)	居里温度 T_c/^{0}C	密度 / (g/cm^3)	相对磁导率 μ_r'	韦氏硬度 HV	热膨胀系数 α / (10^{-8}/^{0}C)	电阻率 / $\times 10^{-6}$ Ω·cm
XG80/36	-0.09	450～500	7.8～8.0	1.1	450～500	10	5
XG96/40	-0.09	450～500	7.8～8.0	1.10	450～500	10	5
XG112/96	-0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5
XG128/120	-0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5
XG144/120	-0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5
XG144/156	-0.03	800～850	8.0～8.1	1.05～1.10	500～600	10	9
XG160/120	-0.03	700～780	8.0～8.3	1.05～1.10	400～500	10	5
XG192/96	-0.05	700～780	8.1～8.3	1.05～1.10	400～500	10	5
XG192/42	-0.03	800～850	8.3～8.5	1.05～1.10	500～600	10	9
XG208/44	-0.03	800～850	8.3～8.5	1.05～1.10	500～600	10	9
XG240/46	-0.03	800～850	8.3～8.5	1.05～1.10	500～600	10	9

4）钕铁硼永磁材料

钕铁硼永磁材料具有很高的剩磁、磁能积和矫顽力，它的磁能积是铁氧体的 12 倍，铝镍钴的 8 倍，钐钴稀土永磁的近 2 倍。钕铁硼按制造工艺不同可分为烧结钕铁硼和粘结钕铁硼两大类，从磁性能上看烧结钕铁硼要比粘结钕铁硼要好很多。粘结钕铁硼是钕铁硼和某种粘结剂混合后的制成品，其最大优点是加工方便，能制成各种复杂形状的零件。在采用注塑成形工艺时，其它零件可以同时装入模具内共同进行粘结磁体的注射。

钕铁硼材料的温度系数较大，居里点温度不高，因此使用普通钕铁硼材料时应特别注意其最高工作温度不要超过 120°C 以上。当然也有一些高温钕铁硼材料，其最高工作温度当前已经可以达到 200°C。

根据国家标准 GB/T 13560－2009《烧结钕铁硼永磁材料》规定，在温度范围为 298K～373K 时，钕铁硼材料的剩磁温度系数 α（B_r）应为－(0.1～0.12)%/K；磁极化强度矫顽力温度系数 α（B_r）应为－(0.4～0.6)%/K；居里温度 T_c 应达到(583～623)K。

另外，钕铁硼材料特别容易氧化生锈，表面需经有效涂覆处理。几种种牌号钕铁硼材料的物理性能见表 6、表 7 和表 8。

表 6 烧结钕铁硼物理性能(1)

牌号	剩磁 B_r/ T	矫顽力 H_{CB} /（kA/m）	内凛矫顽力 H_a/（kA/m）	最大磁能积 $(BH)_{max}$/ (kJ/m^3)	剩磁可逆温度系数 /(%/^{0}C)	居里温度 T_c/^{0}C	密度 ρ /(g/cm^3)
YLNF-175M	>0.93	>680	>1120	160～190	-0.12	310	>7.3
YLNF-175H	>0.93	>680	>1350	160～190	-0.11	310	>7.3
YLNF-175S	>0.93	>680	>1600	160～190	-0.10	310	>7.3
YLNF-200L	>1.0	>640	>720	190～215	-0.13	310	>7.3
YLNF-200M	>1.0	>720	>1120	190～215	-0.12	310	>7.3
YLNF-200H	>1.0	>720	>1350	190～215	-0.11	310	>7.3
YLNF-200S	>1.0	>720	>1600	190～215	-0.10	310	>7.3
YLNF-240L	>1.06	>640	>720	190～215	-0.13	310	>7.3
YLNF-240M	>1.06	>720	>1120	215～255	-0.12	310	>7.3
YLNF-240H	>1.06	>720	>1350	215～255	-0.11	310	>7.3
YLNF-280L	>1.16	>640	>720	215～255	-0.13	310	>7.3
YLNC-200	>1.0	>640	>720	190～215	-0.08	450	>7.3
YLNC-240	>1.06	>640	>720	215～255	-0.08	450	>7.3

表 7 烧结钕铁硼物理性能(2)

牌号	剩磁		矫顽力		内禀矫顽力		最大磁能积		居里温度	最高工作温度
					Force		Product Bhm		Temperature	Temperature
	Br		bHc		iHc		(BH)max		TC	TW
	T	KGs	KA/m	KOe	KA/m	KOe	KJ/m^3	MGOe	° C	° C
烧 结										
N-30	1.08-1.15	10.8-11.5	780-836	9.8-10.5	>=955	>=12	220-240	28-31	310	80-100
N-33	1.13-1.17	11.3-11.7	795-880	10.0-11.1	>=955	>=12	245-260	31-33	310	80-100
N-35	1.18-1.22	11.8-12.2	875-915	11.0-11.5	>=955	>=12	260-285	33-36	310	80-100
N-38	1.22-1.26	12.2-12.6	860-915	10.8-11.5	>=955	>=12	285-303	36-38	310	80-100
N-40	1.26-1.29	12.6-12.9	836-876	10.5-11.0	>=955	>=12	303-318	38-40	310	80-100
N-42	1.29-1.33	12.9-13.3	836-876	10.5-11.5	>=955	>=12	318-342	40-42	310	80-100
N-45	1.33-1.37	13.3-13.7	836-876	10.5-11.0	>=955	>=12	342-358	42-45	310	80-100
N-48	1.37-1.43	13.7-14.3	916-1114	11.5-14.0	>=955	>=12	358-364	46-49	310	80-100
N-27H	1.02-1.10	10.2-11.0	765-835	9.6-10.5	>=1353	>=17	195-220	25-28	340	120
N-30H	1.08-1.15	10.8-11.5	810-850	10.2-10.7	>=1353	>=17	220-245	28-31	340	120
N-33H	1.14-1.17	11.4-11.7	820-876	10.3-11.0	>=1353	>=17	247-263	31-33	340	120
N-35H	1.17-1.21	11.7-12.1	860-915	10.8-11.5	>=1353	>=17	263-279	33-35	340	120
N-38H	1.22-1.26	12.2-12.6	915-955	11.5-12.0	>=1353	>=17	287-303	36-38	340	120
N-40H	1.26-1.29	12.6-12.9	915-955	11.5-12.0	>=1353	>=17	303-318	38-40	340	120
N-42H	1.28-1.32	12.8-13.2	955-995	12-12.5	>=1353	>=17	318-342	40-43	340	120
N-45H	1.32-1.36	13.2-13.6	955-1034	12.5-13	>=1353	>=17	342-366	43-46	340	120

N-27SH	1.02-1.10	10.2-11.0	765-835	9.6-10.5	>=1595	>=20	195-220	25-28	350	150
N-30SH	1.08-1.12	10.8-11.2	812-852	10.2-10.7	>=1595	>=20	216-246	27-30	350	150
N-33SH	1.14-1.17	11.4-11.7	740-876	10.3-11.0	>=1595	>=20	247-263	31-33	350	150
N-35SH	1.17-1.21	11.7-12.1	860-915	10.8-11.0	>=1595	>=20	263-279	33-35	350	150
N-38SH	1.21-1.25	12.1-12.5	907-947	11.4-11.9	>=1591	>=20	287-302	36-38	350	150
N-40SH	1.24-1.28	12.4-12.8	948-928	11.8-12.3	>=1591	>=20	302-306	38-41	350	150
N-42SH	1.30-1.35	13.0-13.5	955-995	12.0-12.5	>=1591	>=20	410-342	39-43	350	150
N-25UH	0.98-1.02	9.8-10.2	732-764	9.2-9.6	>=1990	>=25	183-199	23-25	350	180
N-28UH	1.04-1.08	10.4-10.8	780-812	9.8-10.8	>=1990	>=25	183-223	23-25	350	180
N-30UH	1.08-1.12	10.8-11.2	804-844	10.1-10.6	>=1990	>=25	223-239	28-30	350	180
N-33UH	1.14-1.17	11.4-11.7	740-876	10.3-11.0	>=1990	>=25	247-263	31-33	350	180
N-25EH	0.98-1.02	9.8-10.2	732-764	9.2-9.6	>=2387	>=30	183-199	23-25	350	200
N-28EH	1.04-1.08	10.4-10.8	780-812	9.8-10.2	>=2387	>=30	207-223	26-28	350	200
N-30EH	1.08-1.13	10.8-11.3	811-851	10.2-10.7	>=2387	>=30	223-247	28-31	350	200
N-33EH	1.14-1.18	11.4-11.8	835-875	10.5-11	>=2387	>=30	247-270	31-34	350	200

表 8 粘结钕铁硼物理性能

型号	GPM-4	GPM-6	GPM-8	GPM-8H	GPM-10	GPM-10H	GPM-12	GPM-12D
剩余磁感应强度 B_r/ mT	400～500	500～600	600～670	560～580	660～700	660～700	700～800	700～800
矫顽力 H_{CB} /（kA/m）	320～360	320～360	360～440	440～646	400～440	440～480	416～480	448～480
内凛矫顽力 H_a/（kA/m)	560～720	560～720	640～880	960～1360	640～760	760～840	640～840	720～960
最大磁能积 $(BH)_{max}$/ (kJ/m^3)	32～40	40～56	64～72	60～72	72～80	72～80	80～96	80～96
平均可逆温度系数 /(%/^{0}C)	0.1	0.1	-0.1	-0.13	-0.1	-0.1	-0.1	-0.07
居里温度 T_c/^{0}C	≥400	≥400	≥400	≥305	≥360	≥360	≥360	≥470
最大工作温度（T_m）/^{0}C	150	150	140	120	120	130	130	140
饱和磁化场 /（kA/m）	1600	1600	2000	2800	1600	2000	1600	2000
密度 ρ /（g/cm^3）	4.5～5.0	5.3～5.6	5.8～6.0	5.8～6.0	6.0～6.2	6.0～6.2	6.2～6.6	6.2～6.6
硬度 HRB	40～50	40～55	35～38	35～38	35～38	35～38	35～38	35～38

3. 软磁材料的基本特性

软磁材料主要用于水表磁屏蔽场合。最常用的软磁材料有电工纯铁、铁镍合金、铁铝合金、硅钢片和软磁铁氧体等。

3.1 主要性能

磁性材料按其矫顽力 H_c 的大小可分为软磁和硬磁材料两大类。导磁用的屏蔽材料矫顽力 H_c 值都很小，故称软磁材料；硬磁材料主要指的是永磁材料。

在外磁场作用下，磁性材料内部磁结构变化的过程称为磁化过程。磁化过程中，材料内部的磁化强度 M 随磁场强度 H 变化的关系曲线称为磁化特性，而 M 与 H 的关系可表成

$$M = X \cdot H \tag{13}$$

式中　X—磁化系数（表示材料被磁化的能力）。

磁感应强度 B 与磁场强度和磁化强度有关。在各项同性介质中，B 与 H 是同方向的，两者之间的关系可以表达为

$$B = H + 4\pi M = (1 + 4\pi X) H = \mu H \tag{14}$$

式中磁导率

$$\mu = \frac{B}{H} = 1 + 4\pi X \quad \text{(H/m)} \tag{15}$$

B 与 H 的关系也可表成

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \text{(T)} \tag{16}$$

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）。

工程上常用的 $B-H$ 曲线，称为磁化曲线。磁化曲线上任一点的 B 与 H 的比值即为该点的磁导率 μ。因此已知曲线，可以绘出磁导率曲线 $\mu-H$，见图 3。

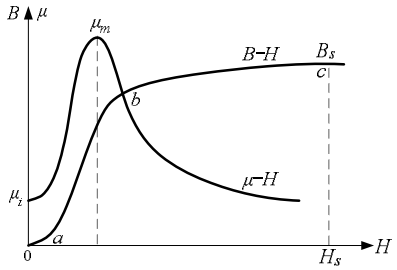

图 3　$B-H$ 和 $\mu-H$ 曲线

磁化曲线上的 B_s 值称为饱和磁感应强度。通常希望软磁材料有较高的 B_s 值，以提高材料的工作磁密。在常温下，化学纯铁的 B_s 值可达到 2.15T，是所有元素中最高的。

软磁材料的物理、机械性能主要包括材料的密度、电阻率、导热系数、机械强度、弹性、硬度和延伸率等。不同种类的软磁材料其物理、机械性能也有相当的差异，而且多数和材料的成分有关，有的还受材料的制造工艺等因素影响。

3.2 软磁材料的种类和选用

1）电工用纯铁

电工用纯铁有原料纯铁（电铁 DT1，DT2）和电磁纯铁（DT3，DT4，DT5，DT6 等）两

类。供料状态有直径不大于 250mm 的热轧、热锻及冷拉棒料和冷轧、热轧薄板。

纯度为 99.95%的电解铁矫顽力 H_c=7.2A/m，初始磁导率 μ_i=0.0012H/m,最大磁导率 μ_m=0.025H/m。纯度越高电磁性能越好，但制取高纯度的铁，工艺复杂，成本高。工程上广泛采用的是电磁纯铁。在冶炼中常适当加入铝和硅，以消除其它杂质对磁性能的不良影响。

2）铁铝合金

铁铝合金是以铁和铝（占 6%～16%）为主要成分、不含贵重元素的另一类高电磁性能软磁材料。常用的铁铝合金可以有冷轧带材或热轧带材，片厚 0.1～0.5mm。其主要特点是有高的电阻率和硬度，而密度较小（6.5～7.2g/mm^3）,抗振、抗冲击性能良好，其磁性能对应力不像铁镍合金那样敏感。常用的铁铝合金标号有 1J6、1J12、1J16 等。标号中最后数字为含铝量，随着含铝量的增加，材料的磁导率和电阻率变高，而饱和磁感应强度降低。

3）铁镍合金

含镍量在 45%～80%的铁镍合金，经高温处理后有极好的磁性能。在较低磁密下，磁导率比硅钢片高 10～20 倍。铁镍合金有冷轧带材、热轧扁材、冷拉丝材、棒材、热锻材等。以 0，05～1.0mm 厚的带（片）才应用最多。其主要特点是在较低磁场下有极高的磁导率和很低的矫顽力，加工性能好。其主要缺点是含贵重金属镍比例大，成本高，机加工应力和热处理规范等对磁性能影响较大，使产品之间磁性能差别较大。该材料电阻率不高（0.45μΩ·m），适用于 1～2kHz 以下频率使用。

4）硅钢片

硅钢片是铁硅合金钢片，是电气设备制造中应用最为广泛的一种软磁材料。硅钢片按制造工艺不同分为热轧和冷轧两大类，冷轧又有各向同性和各向异性两种，片厚范围 0.05～1.0mm。

冷轧硅钢片与热轧硅钢片相比有一系列的有点。在电磁性能方面，μ_m 值较高而铁损较低；在机械性能方面，冷轧硅钢片厚度均匀，表面平整光洁，冲剪性能好等等。

主要参考资料:

姚灵编著.电子水表传感与信号处理技术.北京：中国质检出版社，2012.3