

无损检测培训参考教材

电 磁 检 测

中国无损检测学会编译

机械工业出版社

内 容 简 介

本书系根据西德U.斯特姆霍夫所著的电磁检验培训教材,并结合我国国情进行了一定的补充、修改编译而成的。

内容包括基础知识、电磁探伤、覆层测厚及材质分选等。

可供Ⅱ级无损检测人员学习、使用,亦可供Ⅰ级、Ⅲ级无损检测人员参考。

无损检测培训参考教材

电 磁 检 测

中国无损检测学会 编译

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 $1/32$ ·印张 3 $1/4$ ·字数 82 千字
1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 0,001—4,200·定价 1.05 元

统一书号: 15033·5759

目 录

第一章 基础.....	1
1. 磁性.....	1
2. 磁场的感应作用.....	15
3. 通电导体.....	21
第二章 电磁探伤.....	25
1. 应用概况.....	25
2. 漏磁探伤法.....	25
3. 涡流探伤法.....	63
4. 裂缝测深.....	77
第三章 覆层测厚.....	84
1. 应用概况.....	84
2. 覆层厚度测量.....	84
第四章 材质分选.....	93
1. 应用概况.....	93
2. 材质分选的磁测方法.....	94
3. 材质分选感应方法（涡流法）.....	95

第一章 基 础

1. 磁 性

1.1 磁的基本现象

能吸引铁制物体的金属体称为磁体。按照磁体的形状，又可分为磁棒、磁针等各种类型。棒状的磁体称为磁棒；针状的磁体称为磁针；弯成马蹄形的称为马蹄形磁体。磁体能够吸引铁制物体的性能，称为磁性。在正常使用中能够保持磁性不变的磁体，称为恒磁体或永磁体。

事实上，磁体不但能够吸引铁制物体，而且还能够吸引其它一些金属物体（例如含有镍、钴元素的物体）。凡是能够被磁体吸引的物体，称为铁磁体。

把一根磁棒放在铁屑中，然后提起来，就会有一部分铁屑被吸附在棒的两端，而棒的中间部分却一点也没有。这种现象表明磁棒的两端具有较强的磁性。

磁体上具有较强磁性的部位，称为磁体的磁极。每个磁体上有两个磁极。如果将磁棒悬挂起来并让它在水平方向可以自由运动，它静止之后的位置，总是指着地理上的南方和北方。指向北方的磁极称为北极，用符号“N”表示；指向南方的磁极称为南极，用符号“S”表示。

悬挂着的磁棒，在静止时总是指着地理上的南、北方向，是因为地球本身就是一个具有南、北极的大磁体。

将一根磁棒的北极去靠近另一根磁棒的北极，或者将一根磁棒的南极去靠近另一根磁棒的南极，我们可以马上发现，两个同性极之间存在着相斥的现象。反之，若将一根磁棒的北极去靠近另一根磁棒的南极，或者将一根磁棒的南极去靠近另一根磁棒的北极，我们又可以发现，两个异性极之间存在着相吸的现象。相斥

和相吸时产生的力称为磁力。磁力的大小和方向是可以度量的。

除了磁体本身具有吸引铁磁体的能力，表现有磁性之外，任何一个铁磁体在磁体的磁力作用下，也会具有吸引铁磁体的能力，表现有磁性。

用一块普通的铁块去靠近铁屑，铁块无法吸引铁屑。如果在铁块靠近铁屑的同时，用磁棒的一端去靠近铁块，不但磁棒会吸引铁块，而且铁块也能够吸引铁屑。

一个铁磁体在磁力的作用下也表现有磁性的现象，称为磁化。在磁棒远离铁块后，如果铁块能够继续吸引铁屑的话，我们就可以认为铁块经过磁化后变成了磁体。

铁磁体经过磁化而成为磁体之后具有的磁性称为剩磁。

1.2 磁场和磁力线

磁性的作用区域称为磁场。如果在磁棒的磁场内放置一根磁针，这根磁针能在磁场的各个位置上给出各个特定的指示方向

(见图1)。根据磁针在磁场内各个位置上的指示方向，可以人为地画出一些从北极流向南极的连续曲线。事实上就是这些曲线为我们指出了磁场中每个位置上的磁力的方向，因此这些曲线被称为磁力线。

我们可以用铁屑来获得更直观一些的磁场方向分布图。将一块厚纸板放在磁棒上面，再在厚纸板上撒上一些铁屑，小心地叩击厚纸板，让铁屑在厚纸板上发生轻微的震动，铁屑就会按图2的形式排列。从图2可以看到，磁力线到达两极时紧密相聚，而在两极的中间部位比较疏散。由于磁体的两极具有最强的磁力，因此可以认为，磁力线的密度与磁力的大小之间存在

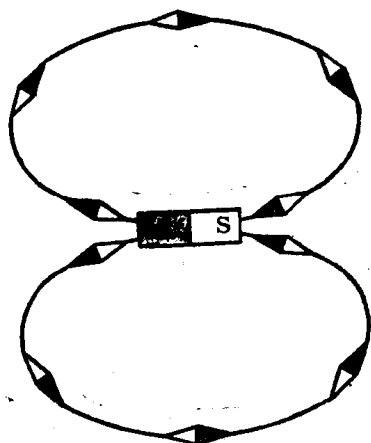


图1 在磁棒的磁场作用范围内，磁针的偏转情况

磁力线到达两极时紧密相聚，而在两极的中间部位比较疏散。由于磁体的两极具有最强的磁力，因此可以认为，磁力线的密度与磁力的大小之间存在

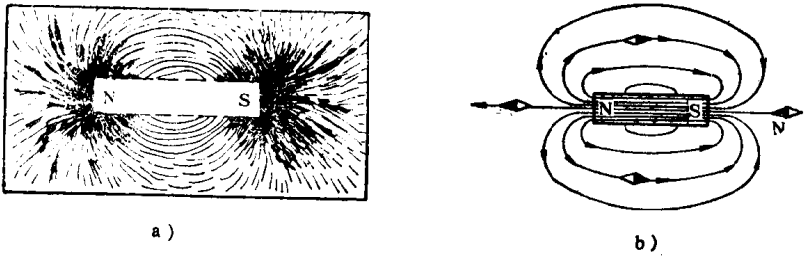


图2 棒形磁铁的磁场
a) 铁屑显示图 b) 示意图

着正比关系。

人为规定，磁体外部的磁力线是从北极流向南极（即N极流向S极）。而在磁体内部则是从南极流向北极，所以磁力线并不终止于两极，而是贯穿整个磁体，磁体内部也存在磁场。

利用铁屑显示的磁场图形，还可以观察到磁极之间同性相斥、异性相吸的情况。图3a显示了异性相吸的情况，图3b显示了同性相斥的情况。

如果在两个异性极中间放置一个条形铁块，则图3a所示的磁力线图形就会变成图4所示的情况，大部分磁力线被这个铁块吸引了过去，形成一组密集的磁力线束。

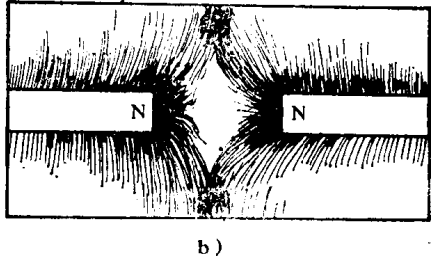
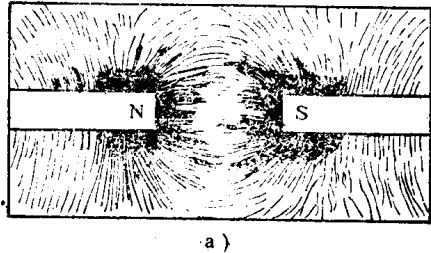


图3 两极间磁力线的分布
a) 异性极 b) 同性极

1.3 磁化原理

从外表看，一根磁棒的中部是没有磁性的，但是在你将它从中间断开时，却不能把磁棒的两个极分开，而是变成了两根各具有南北极的磁体。再分割下去，情况依然如此

(见图5)。由此可见，在自然界中磁体的南北极是不会单独存在的。

在一根玻璃试管中装进一些铁屑，并通过磁化使之成为磁体。但是，只要摇动试管让铁屑发生一阵无规则的翻动之后，铁屑就会立即失去磁性。从而引起人们提出了这样的假设：磁体和铁磁体是由无数称为基本磁体的微粒组成，当基本磁体呈杂乱的排列时

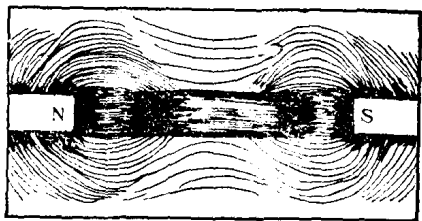


图4 在两个异性极之间安放了铁块之后的磁力线分布

(见图6a),由于基本磁体之间的磁作用相互抵消，因而对外不显示磁性。一旦受到某磁场的磁化作用，基本磁体就发生偏转，有秩序地沿着磁场方向排列成行，因而对外显示出

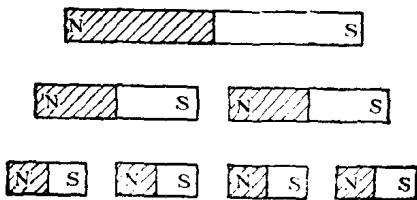


图5 磁体的分割

磁性(图6b)。但是，磁极只能出现在磁体的两端，因为中间的磁性仍旧互相抵消。

这种假设，首先由库仑提出。利用库仑的这种假设可以解释磁体为什么在两端磁性最强，磁极为什么不能单独存在，以及铁磁体为什么能磁化。但是，不能解释基本磁体为什么会具有磁性的问题。

在奥斯特发现了电流的磁效应后，安培又在库仑假设的基础上，进一步提出了磁性起源的假设。安培认为，基本磁体就是原子、分子团等物质微粒。它们之所以具有磁性，是由于在每个微粒里都具有川流不息的环形电流。基本磁体的磁场就是环形电流的磁场，基本磁体的两个磁极分在环形电流的两侧。在铁磁体不显示磁场时，各个物质微粒里的安培环形电流的旋转方向是杂乱

无章的，它们的磁作用在内部相互抵消（见图7a）。铁磁体被磁化后，各个物质微粒里的安培环形电流的旋转平面转至相互平行（见图7b），因此显示出磁性。

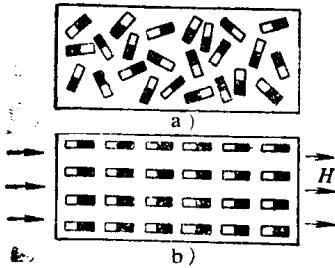


图6 用基本磁体概念解释磁性的示意图

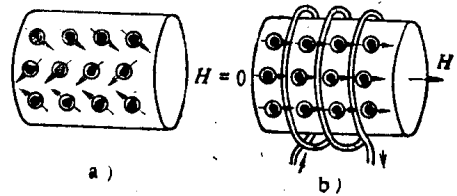


图7 用安培环形电流解释磁性的示意图

1.4 电与磁

如果在一根能自由运动的磁针旁边，平行地放一根金属导体，并通以直流电流，磁针就会从其静止位置产生偏转。若改变电流的极性，则磁针就朝相反方向偏转。切断电流后，磁针又立即恢复到它原来的静止位置。由磁针的偏转说明，当导体中有电流通过时，导线周围必定存在着磁场，并且这个磁场随着电流的消失而随之消失。

围绕通电导线的磁力线，是一些封闭的同心圆（见图8），以接近导线表面的磁场最强，向外离开导线表面后，磁场强度就迅速减弱。

如果将一根导线弯成环形并通以电流，就可得到图9所示的磁场分布（图中右侧导线中间的“·”表示电流的流向由远而近，图中左侧导线中间的“×”表示电流的流向由近而远）。把导线绕成连续排列的一连串圆环，使其成为一个线圈，通电后线圈上的大部分磁力线围绕着整个线圈，只有少数围绕单个闭合环（见图10）。

通电线圈的磁力线分布与磁棒产生的磁力线十分相似。在线圈内部，密集的磁力线之间保持等距离的磁场，称为均匀磁场。

由上述情况可知，为了得到必要的磁场，可以采用具有磁性的磁体，也可以采用通电的线圈。用以产生磁场的线圈，称为激

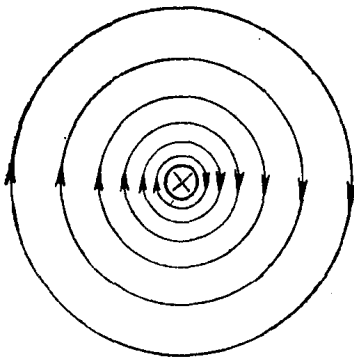


图8 通电导线周围的磁力线分布 (示意图)

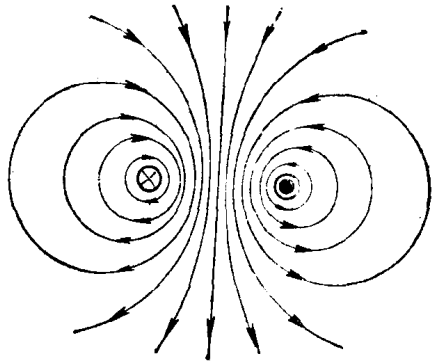


图9 通电导线环的磁力线分布图

励线圈。由激励线圈产生的磁场，称为激励磁场。

1.5 均匀电磁场中的某些数学表达式和基本定律

在通电线圈内部，磁力线的总数称为磁通量，它的符号为“ Φ ”。

磁通量的单位是伏·秒 ($V \cdot s$)。

如果知道了线圈在一定的试验条件下具有的磁力线数，就可以计算出线圈内部截面上每平方厘米所占的磁力线数（当然只是在假设磁力线均匀分布的情况下）。每平方厘米截面 A 上的磁力线数称为磁力线密度或者磁通量密度、磁感应强度。它的符号为“ B ”。按照定义，它的计算式为：

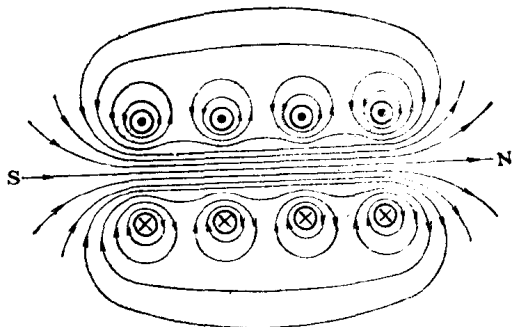


图10 通电线圈的磁力线分布示意图
(当各个绕组间距较远时的情况)

$$\text{磁感应强度 } B = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$

式中 Φ ——磁通量；

A ——面积。

磁感应强度的单位为 Vs/cm^2 ，亦即伏·秒/厘米²。

要想在圆柱形线圈中获得足够强的磁场，就必须在每平方厘米截面上产生尽可能多的磁力线数，即一个很高的磁力线密度。

通过许多实验得到证实，磁场强度与电流值、绕组匝数以及线圈长度有关，并且可以归纳成如下的结果：

a) 线圈内部的磁场强度与通过线圈的电流值成正比（电流加倍，磁场强度也加倍）。

b) 在线圈长度不变的情况下，增加绕组的匝数可以增大磁场强度。

c) 在线圈的绕组匝数、线圈长度和电流强度不变的情况下，磁场强度的变化与导线截面无关。

若用符号 H 表示磁场强度， I 表示电流强度， n 表示线圈匝数， l 表示线圈长度，通电长线圈内均匀磁场的强度可以用下式求得：

$$\text{磁场强度 } H = \frac{In}{l} \quad (2)$$

由于匝数是个无名数，所以磁场强度的单位是 A/m 或 A/cm ，即安培/米或安培/厘米。

例1 一个长度 $l = 20\text{cm}$ (0.2m)、匝数 $n = 40$ 的线圈，通以电流强度 $I = 5\text{A}$ 的电流时，其磁场强度为 $H = \frac{5 \times 40}{0.2} = 1000\text{A}/\text{m}$ 。

例2 一线圈具有相同长度 $l = 20\text{cm}$ ，但匝数 $n = 200$ ，电流强度 $I = 1\text{A}$ ，则磁场强度为 $H = \frac{1 \times 200}{0.2} = 1000\text{A}/\text{m}$ 。

电流强度 I 与匝数的乘积 (In)，称为磁化力，但在平时却常常把它称之为安匝数。

在无铁心的空气线圈中，磁场强度与磁感应强度之间存在着下述关系：

$$B_0 = \mu_0 H \quad (3)$$

系数 μ_0 称为感应常数或绝对导磁率，它的数值为：

$$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{V} \cdot \text{S}}{\text{Am}} \right]$$

由1.1节已知，铁磁体在磁场中能使磁力线聚集起来，因此，一个通电线圈的磁场不仅可以通过增大安匝数和减小线圈长度来提高磁场强度，还可以通过在线圈内放置铁心使之增强。线圈中放入铁心后，磁力线的方向仍维持不变（在均匀磁场中磁力线之间仍旧彼此平行），而磁力线密度却显著增大。

铁心或其它铁磁体对线圈磁场的增强作用可以用相对导磁率（符号为 μ_r ）来描述。相对导磁率的物理意义可以用下式表示：

$$\mu_r = \frac{\text{具有铁磁体的磁力线密度}}{\text{没有铁磁体的磁力线密度}} = \frac{B}{B_0} \quad (4)$$

由于没有铁磁体时（例如在空气中），磁感应强度 $B_0 = \mu_0 H$ ，因此

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5)$$

如果知道了某一铁磁体在磁场强度等于 H 时的相对导磁率 μ_r ，变换（5）式就可以得到磁感应强度的计算式：

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (6)$$

由于 μ_r 是一个比值，因此它没有计量单位。

1.6 物质的磁性

空气和真空的相对导磁率为1，它们不能增强磁场。在人们熟知的物质中，大多数物质与空气相类似。但是，仍旧可以根据相对导磁率是小于1或是大于1，而把它们分为逆磁性物质和顺磁性物质、铁磁性物质三种。

相对导磁率小于1的物质称为逆磁性物质。由于它们的相对导磁率小于1，所以，非但对磁场没有增强作用，而且还有削弱作用。相对导磁率略大于1的物质称为顺磁性物质。相对导磁率远大于1的物质称为铁磁性物质。由于它们的相对导磁率远大于1，所以对磁场有较大的增强作用。除了铁之外，例如钢、镍、钴、钎以及它们的合金，都是铁磁性物质。

表1列出了部分逆磁性物质、顺磁性物质和铁磁性物质的名称，以及它们的相对导磁率数值，可供参考。

**表1 部分逆磁性物质、顺磁性物质和铁磁性物质的名称
以及相对导磁率的数值**

物 质 名 称	相 对 导 磁 率
<u>逆磁性物质</u>	
铜	0.999993
铋	0.999847
玻璃	0.99999
<u>顺磁性物质</u>	
铝	1.000021
铂	1.000264
氧	1.0000018
硬橡胶	1.000014
奥氏体钢 (不含 δ 铁素体)	约1.001到1.1
奥氏体钢 (含5% δ 铁素体)	约1.3
<u>铁磁性物质</u>	
Fe—Co合金 I	2000~6000
工业纯铁	5000~7000
高纯度铁试样	(达280000(1450000))
Fe—Si合金	10000到20000
Fe—Ni合金	15000到300000
钴	245
电解镍	2400
铸铁 (片状石墨)	355
铸铁 (球状石墨, 珠光体)	554
铸铁 (球状石墨, 铁素体)	1400

铁磁性物质的磁性与温度之间有着密切的关系。随着温度的升高，磁性将逐渐下降，并在到达某一温度后，磁性完全消失。使磁性完全消失的临界温度称为铁磁性物质的居里点。居里点的数值与物质的成分有关，表2列出了一些铁磁性物质的居里点。

铁磁性物质的相对导磁率与磁场强度之间的关系极为密切。任意挑选一个由铁磁性物质构成的物体放在强度不同的磁场中，得到的磁感应强度亦随之不同。

表2 一些铁磁性物质的居里点

铁	769℃
钴	1118~1124℃
纯镍 (99.98%)	353~358℃
钆	16℃
软磁铁氧体	50~600℃

可以用一个电流大小和方向都能改变的激励线圈取代各个强度不同的磁场。当周期性地改变线圈中电流的大小和方向，使之线圈内的磁场强度和方向发生相应变化时，必定得到如图11所示的测量结果。图中oa段曲线称为原始磁化曲线，首尾相重合的abcd和defa曲线称为磁滞回线。

从图11中不难看出，开始时，只要线圈中输入一个由小到大变化的正向磁场，相应地在铁磁性物质中磁感应强度随着磁场强度的增加而增加，初始阶段磁感应增

长的速度较慢，当磁场强度达到一定值后，磁感应强度迅速增加，再继续增大磁场强度时，磁感应强度的增加减慢，直至达到某一磁场强度值后，磁感应强度不再增大，此时达到饱和状态（见oa段曲线）。

由a的位置逐渐减小线圈的磁场强度，虽然铁磁性物质的磁感应强度随着磁场强度的降低而以非线性的关系降低，但是，并

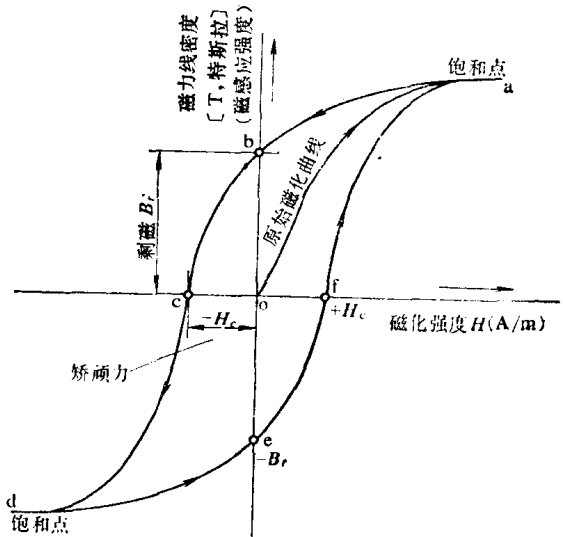


图11 磁化曲线和磁滞回线

不沿着原始磁化曲线进行，并在磁场强度降低到零时，磁感应强度不回到零的位置（见ab段曲线），留下了一部分剩余的磁感应强度，这就是前面已谈到过的、剩余在铁磁性物质中的剩磁。剩磁的符号用 B_r 表示。

当线圈的磁场强度沿反向逐渐增大到c的位置时，可以使剩磁降低到零（见bc段曲线），亦即消除了剩磁。使剩磁降低到零而需要的反向磁场强度，称为矫顽磁场强度或矫顽力。矫顽力的数值用 H_c 表示，但在这里应当取负值，即 $-H_c$ 。

继续增加反向磁场强度，磁感应强度就随之沿反向增加，并在反向磁场强度增加到一定数值之后开始饱和（见cd段曲线）。

由d的位置逐渐降低反向磁场强度，并使它等于零，则磁感应强度沿着与ab段曲线呈旋转对称的de段曲线降低，在e的位置上留下了反向剩磁 $-B_r$ 。

如果从e的位置沿正向逐渐增加磁场强度，必定在f的位置上使反向剩磁等于零，在a的位置上与原始磁化曲线重合，使得efa曲线与bcd曲线之间也出现旋转对称的关系。

磁滞回线是一根封闭的曲线。“磁滞”这个名称的来源，是由于在磁化过程中，磁感应强度的增加总是滞后于磁场强度所致。至于剩磁和矫顽力的成因，法国物理学家郎之万曾在安培假设的基础上，提出了这样的解释：在铁磁性物质里，原子分成了许多很小的自发磁化区域（尺寸约 10^{-9} 厘米³），在各个小区域里基本磁体能自发地磁化，排列成如图12所示的情况。在自发磁化区域改变方向时，内部有阻碍它运动的摩擦，所以在磁场强度消除后，摩擦作用使自发磁化区域的某种排列保留了下来，形成剩磁。去除剩磁要使用一定的反向磁场（矫顽力），也就是为了克服被摩擦作用破坏了的原有磁化区域的排列。

不难想象，如果线圈上所加的不是直流电，而是交流电时，在交流电的每一个周期都要形成一条磁滞回线，从而使得铁磁材料内部的基本磁体，随之不断地改变它们的方向。由于每改变一次方向都要损耗一定的能量，所以，连续经过一定的时间之后，

铁磁材料就要发热。这种发热现象称为磁滞损耗。每一周期产生的损耗,可用磁滞回线所包围的面积来度量,因而在交变磁场下应用的铁磁材料,为了减少磁滞损耗,应当要求它具有很狭的磁滞回线。磁滞回线很狭的材料称为软磁材料。因为它们易于反复磁化,矫顽力很小。与之相对应的是具有高矫顽力的硬磁材料(见图13)。矫顽力也是度量外界磁场影响材料磁性的一个参数,它的

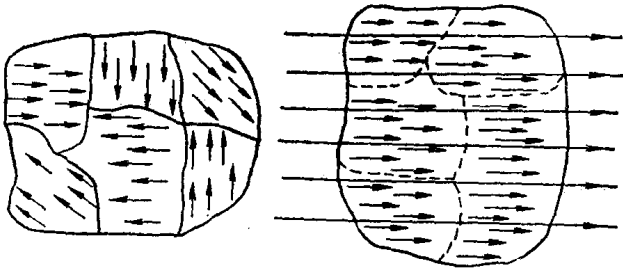


图12 由于自发磁化区而产生剩磁的示意图

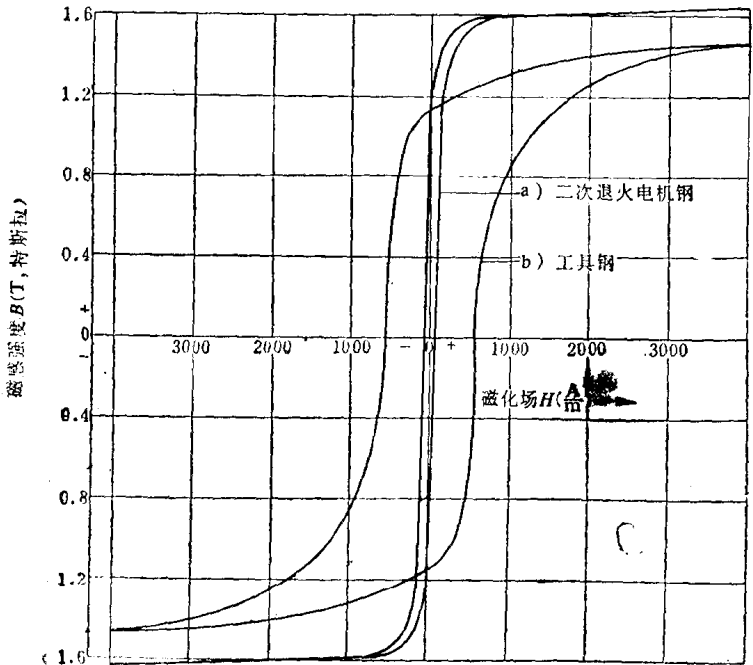


图13 软磁性钢a)和硬磁性钢b)的磁化曲线

数值分布范围很宽，电机用钢的 H_0 值一般在 1A/cm 以下，工具钢为 $4\sim 15\text{A/cm}$ ，永磁材料的 H_0 可达 100A/cm 以上。

从图14中一些材料的原始磁化曲线可以看出合金成分对磁化曲线形状的强烈影响。其它的影响因素还有组织状态、材料不纯度、弹性与塑性变形、内应力、热处理、温度、试样的形状与尺寸、线圈的结构与配置方式等。

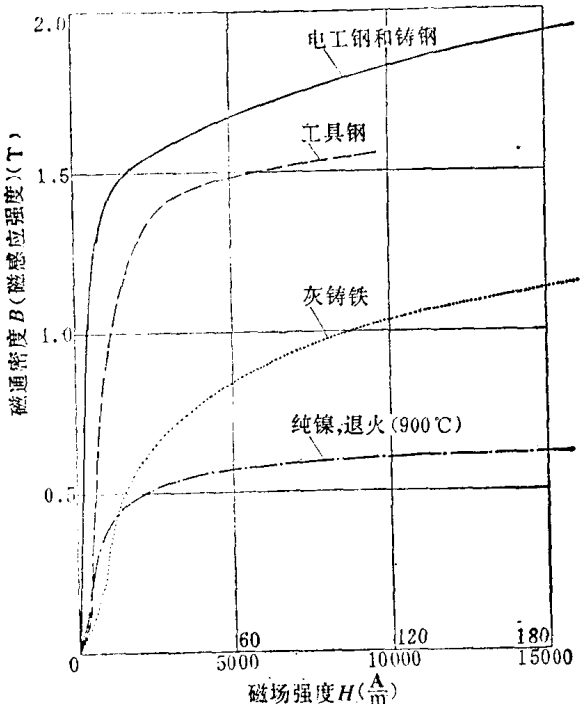


图14 各种材料的原始磁化曲线

根据铁磁材料的原始磁化曲线，把公式(6)里的 $\mu_0 \cdot \mu_r$ 用 μ_{i0i} 来代替，亦即令 $\mu_0 \cdot \mu_r = \mu_{i0i}$ 。可以使公式(6)简写成：

$$B = \mu_{i0i} H \text{ 或 } \mu_{i0i} = \frac{B}{H} \quad (7)$$

式中的 μ_{i0i} 称为总导磁率。

将已知的原始磁化曲线上各点相对应的 B 与 H 相除，就可以计算出曲线上每一个点的总导磁率 μ_{i0i} 的单位是 Vs/Am 。图15表

示了相对导磁率和总导磁率与磁场强度的关系。由图中可以看出，磁场强度对导磁率确实有很大影响。从原点作一直线和原始磁化曲线相切，则此切点具有最大的导磁率。而曲线起始点上的斜率则称为初始导磁率，用符号“ μ_0 ”表示。

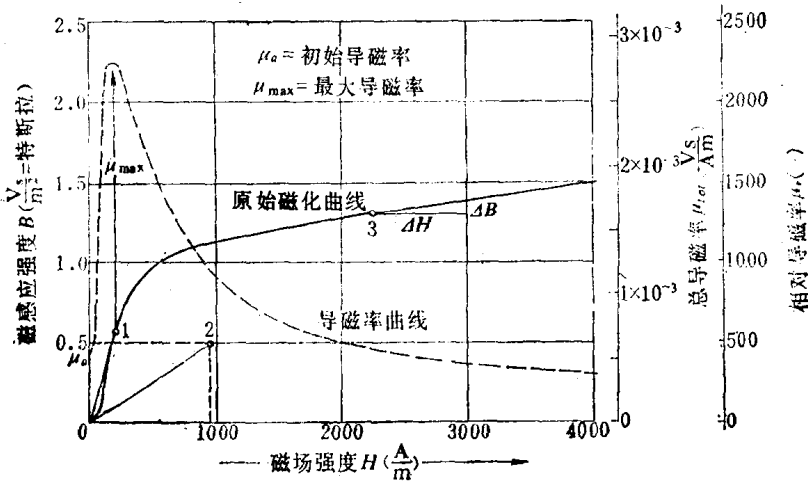


图15 某种钢的磁感强度、总导磁率及相对导磁率与磁场强度的关系

1.7 漏磁场

从图3a上两个异性极之间的磁力线分布图形可以看出，空气中部的磁力线处于向外逸出的状态，而且越是向外就越被逸出得厉害。进一步观察，还可以发现在两个磁极作用下的磁力线，不仅从磁棒的正前面通过，而且还从其侧面通过。现在如果把一个有锯槽的铁块放到两个异性极之间，沿着垂直于磁力线的方向形成人为间隙，在人为间隙处，同样也会出现类似于图3a的情况，即磁力线从人为间隙处被向外逸出。图16表示了间隙附近的磁力线分布图形，在铁块内的磁力线只有很少一部分继续保持原来的路径通过间隙，其大部分绕过了间隙从截面的其余部分通过。

从间隙处逸出的磁力线称为漏磁通。