

第14章 磁介质的磁化

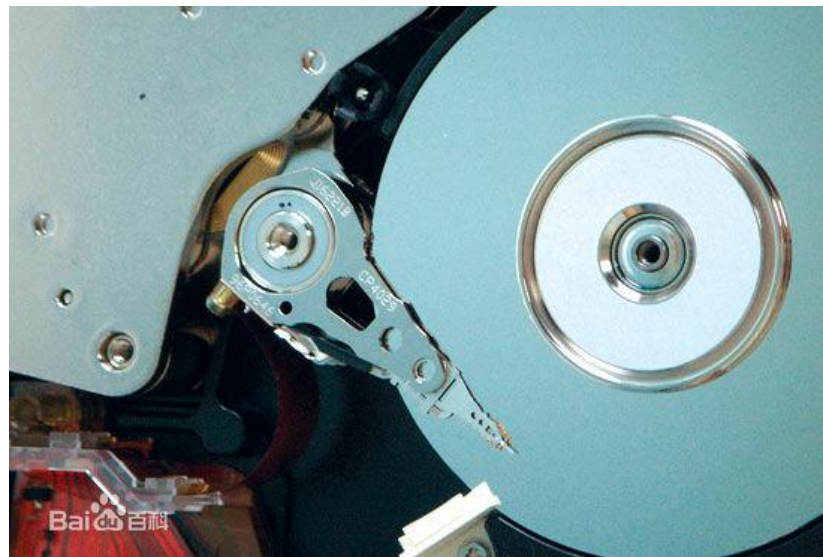
§ 14.1 磁介质的磁化 磁化强度矢量

§ 14.2 磁场强度 有磁介质时的安培环路定理

§ 14.3 铁磁质

§ 14.4 *磁路定理（略）

作业：练习册

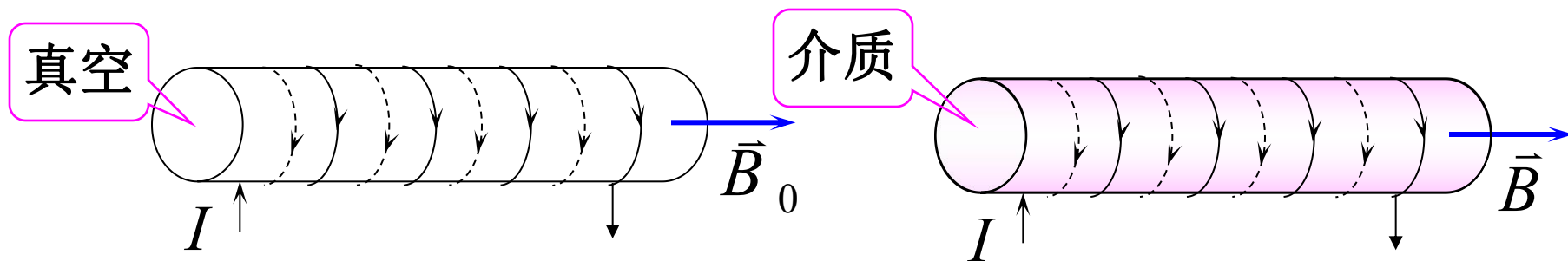


§ 1 磁介质的磁化 磁化强度矢量

一、磁介质对磁场的影响

1.磁介质:实体物质在磁场作用下呈现磁性,该物体称磁介质。

2.磁化:磁介质在磁场中呈现磁性的现象称为磁化。



实验表明: $\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$ μ_r ——磁介质的相对磁导率;

$\mu = \mu_0 \mu_r$ ——磁介质的绝对磁导率, 简称磁导率

注意: μ_r ——与磁介质的种类和状态有关

3.磁介质分类:

(1) 顺磁质:

$\mu_r > 1$, $\mu = \mu_r \mu_0 > \mu_0$, 如:铝、氧等 ($\mu_r = 1 + 10^{-5}$)

(2) 抗磁质:

$\mu_r < 1$, $\mu < \mu_0$, 如:汞、铜、氢等 ($\mu_r = 1 - 10^{-5}$)

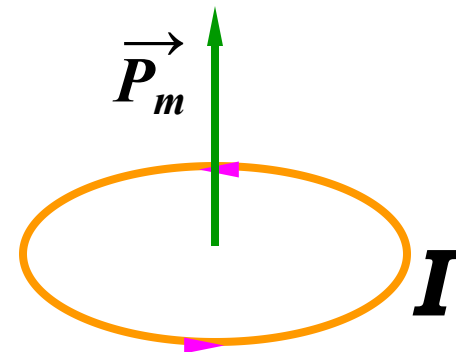
顺磁质和抗磁质,磁化后产生的磁性都很弱,属于弱磁材料

(3) 铁磁质,磁化后能产生极强的磁性, 如铁、钴、镍等,
是强磁性材料。 如:纯铁、硅钢、坡莫合金。

$\mu_r \gg 1$, ($\mu_{rmax} = 5 \times 10^3$)

二、分子磁矩 分子电流

1. 载流线圈的磁偶极矩（磁矩）： $\vec{P}_m = I\vec{S}$



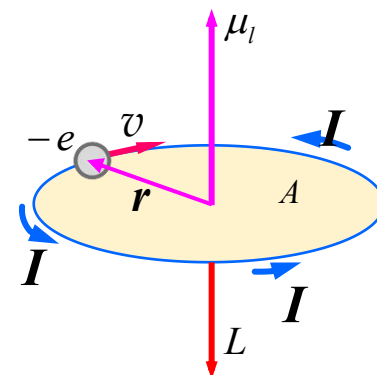
2. 电子的磁矩 假设电子以速率 v 运动

电子的轨道运动电流为： $I = \frac{ev}{2\pi r}$

轨道磁矩： $\mu_l = IS = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$

电子轨道运动角动量： $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$

电子轨道磁矩与 L 的关系： $\mu_l = \frac{eL}{2m}$



电子自旋磁矩和电子自旋角动量 S 的关系为： $\mu_s = \frac{e}{m} \cdot S$

电子轨道磁矩
 电子自旋磁矩
 原子核的磁矩

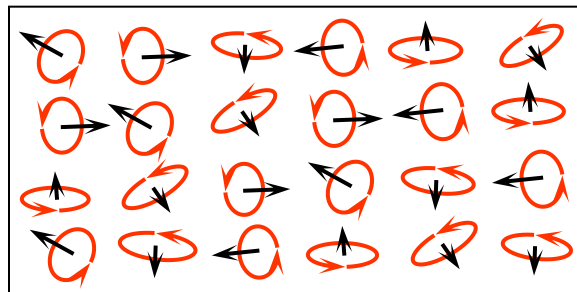
} 分子磁矩 \vec{P}_m

等效 \longrightarrow 分子电流 $i_{\text{分}}$

用等效的分子电流的磁效应来表示各个电子对外界磁效应的总合，称为分子固有磁矩。

顺磁质： \bar{P}_m

未加外磁场时： $\sum \bar{P}_m = 0$



抗磁质： $\bar{P}_m = 0$

在抗磁质中，原子或分子中所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩矢量和为零。

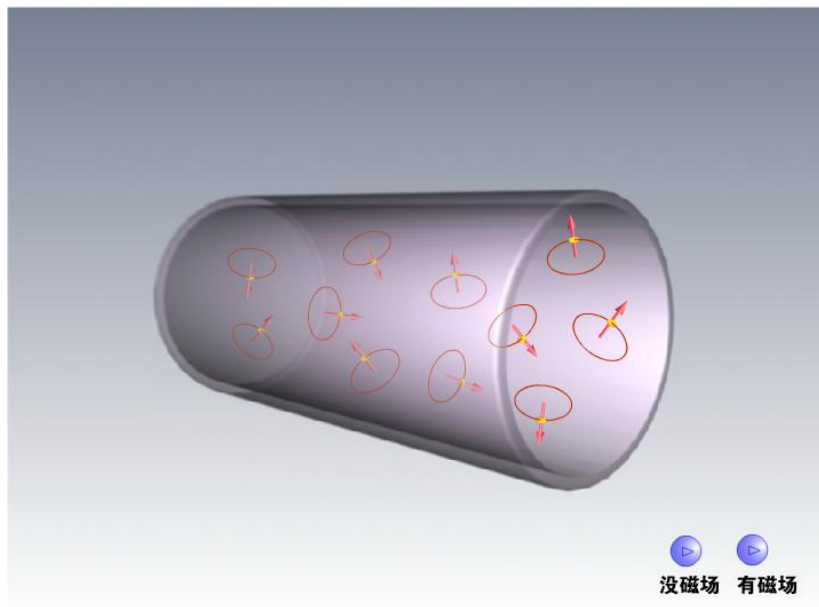
加外磁场时： $\bar{M} = \bar{P}_m \times \bar{B}$

类比：电介质的微观图象

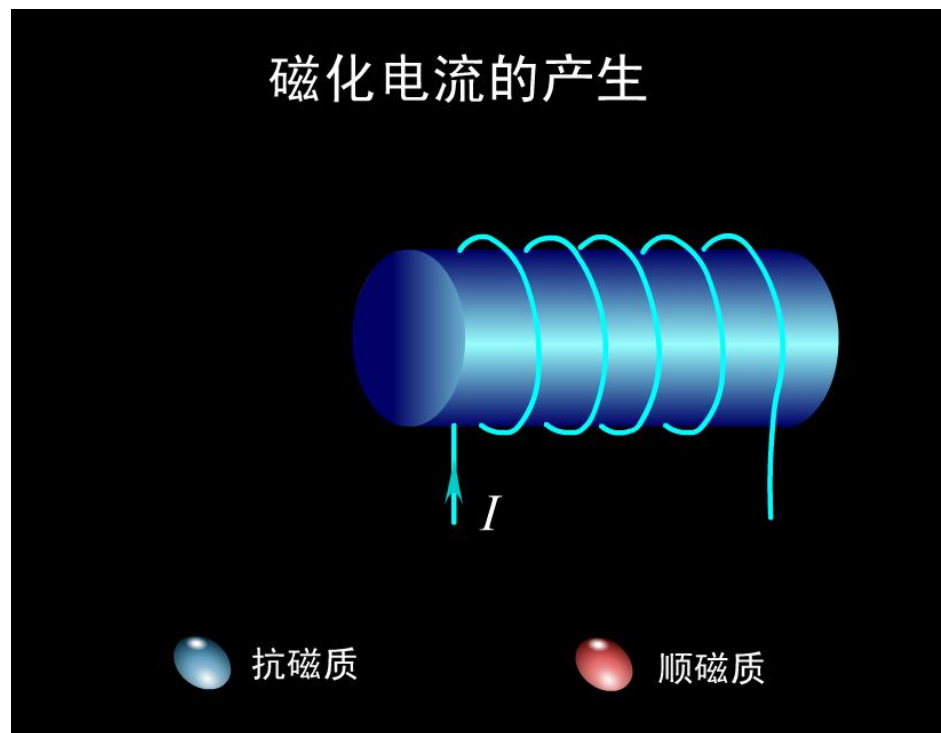
有极分子、无极分子。 电偶极子模型： $\bar{P}_e = q\vec{l}$

在外电场作用下，分别有取向极化、位移极化。

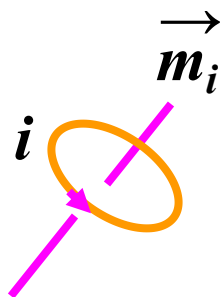
14-1 顺磁质



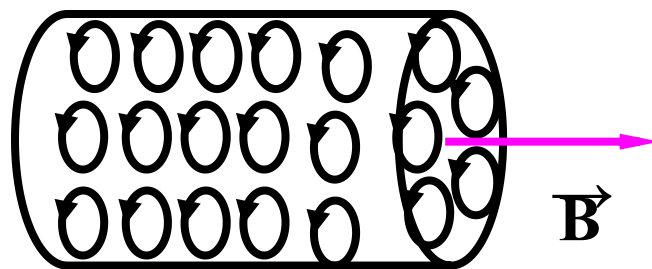
14-2 磁化电流的产生



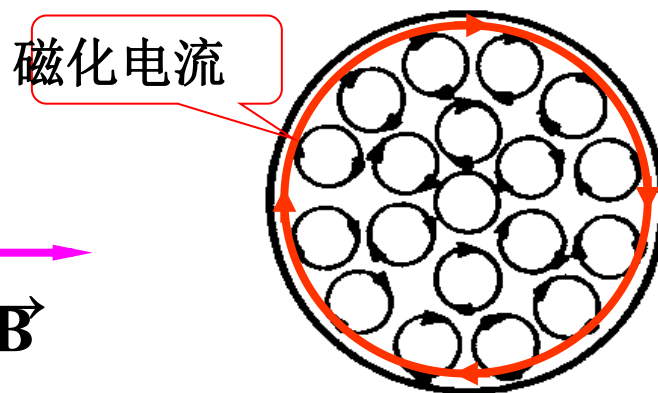
三、介质的磁化过程



(a)



(b)



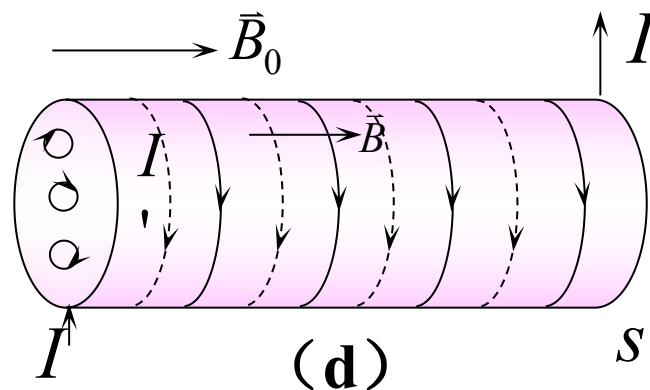
(c)

结果：

介质表面出现**磁化电流** I'

(或**束缚电流**)

金属中自由电子定向移动形成的传导电流，称为**自由电流**。



(d)

磁介质的磁化： 磁介质表面出现束缚电流的现象。

磁介质中的磁感应强度:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

总磁感强度

外加磁感强度

附加磁感强度

与电介质极化比较:

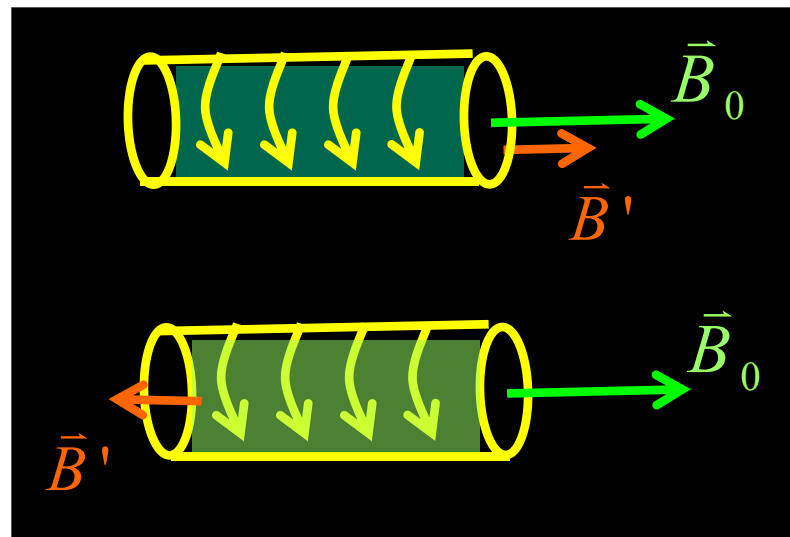
$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

(1) 顺磁质: \vec{B}_0 与 \vec{B}' 方向一致

(2) 抗磁质: \vec{B}_0 与 \vec{B}' 方向相反

顺磁质: $\vec{P}_m \neq 0$

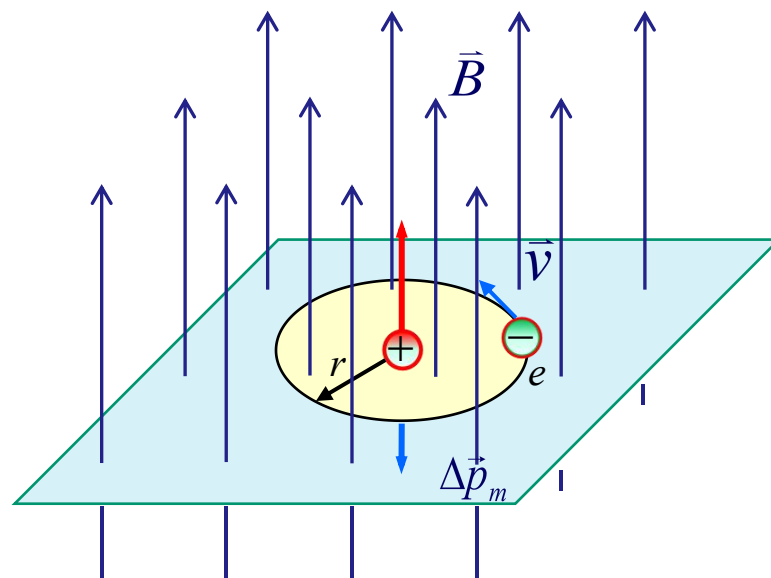
加外磁场时: $\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$



抗磁质的磁化

抗磁质固有磁矩为0，加外场后，由于电磁感应效应，在分子内部产生**感应电流**。

此感应电流所产生的附加磁场 \vec{B}' 总是**反抗**外场变化的，故 \vec{B}' 方向与外场 \vec{B}_0 **相反**，这就是抗磁性的起源。



与分子内部的感应电流对应的磁矩 $\Delta \vec{p}_m$ 称为附加磁矩。

四、磁化强度矢量

为了定量描述磁介质磁化状态（磁化程度和磁化方向），定义**磁化强度矢量**：

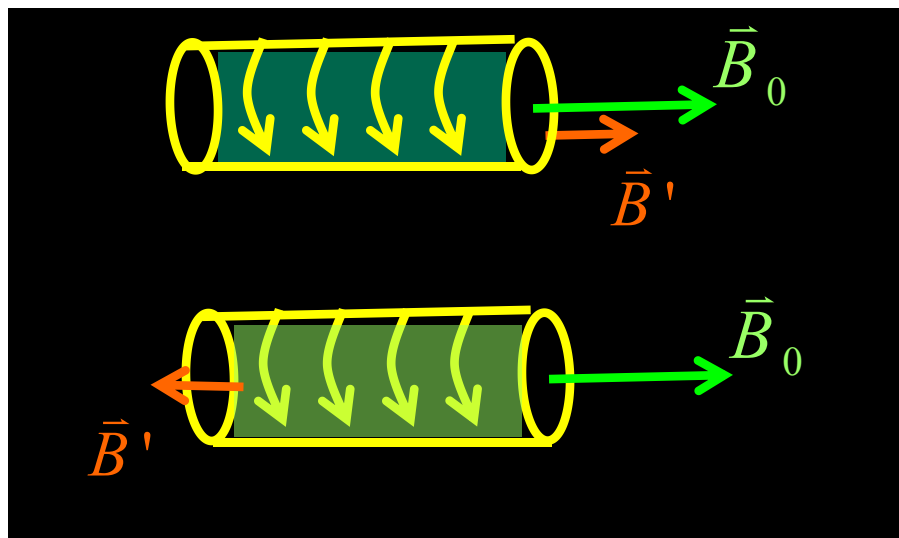
$$\vec{M} = \frac{\Delta \vec{P}_m}{\Delta V} \quad \text{单位体积内分子磁矩的矢量和。}$$

它带来附加磁场 \vec{B}' 的贡献。

单位：安培/米 (A/m)

\vec{M} 是描述磁介质的宏观量

显然它与介质特性、
温度与统计规律有关。



磁化强度与磁化电流的关系

科学研究方法-模型法

设磁介质单位体积内有 n 个分子, 取一个长度元 $d\mathbf{l}$

则与 $d\mathbf{l}$ 较链的总分子电流为

$$dI_m = in\pi r^2 d\mathbf{l} \cos \theta$$

$$i\pi r^2 = p_m \quad \text{一个分子的磁矩}$$

np_m 单位体积内分子磁矩矢量和大小
即磁化强度的大小 M

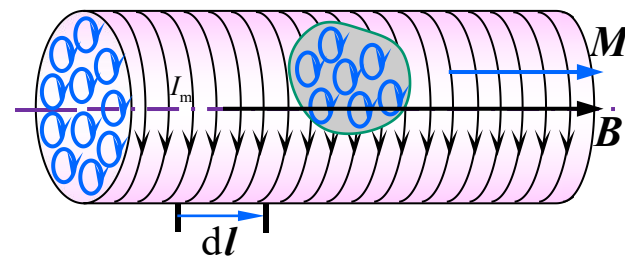
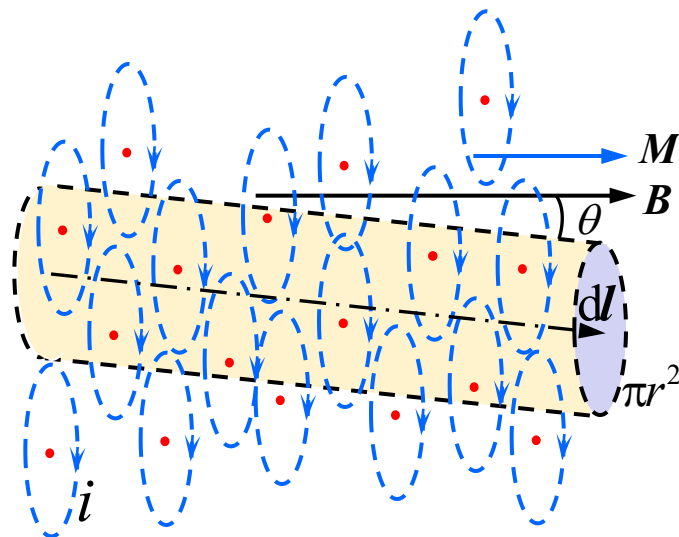
$$\text{因此有 } dI_m = M d\mathbf{l} \cos \theta = \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\text{磁化面电流密度 } j_m = \frac{dI_m}{d\mathbf{l}} = M \cos \theta$$

当 $\theta = 0^\circ$, 即 M 与表面平行时

$$j_m = M \quad \text{方向与} M \text{垂直}$$

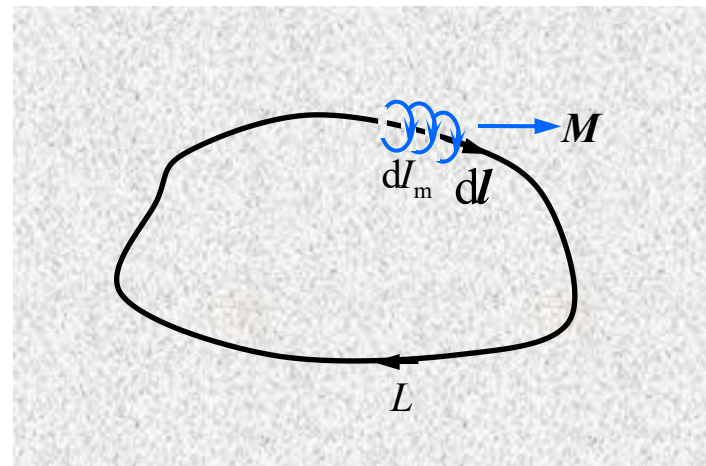
$$\boxed{\vec{j}_m = \vec{M} \times \vec{n}^0} \quad (\vec{n}^0 \text{ 为磁介质表面外法线方向的单位矢量})$$



$$dI_m = Mdl \cos \theta = \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

与闭合回路 L 较链的磁化电流:

$$I_m = \oint_L dI_m = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$



闭合回路 L 所包围的总磁化电流等于 \vec{M} 绕该闭合回路的线积分

$$\vec{j}_m = \vec{M} \times \vec{n}^0$$

上两式都是磁化强度与作为磁化结果的磁化电流之间的普遍关系式。

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_m$$

磁化强度

束缚面电流

物理意义

磁化强度沿任一回路的环流，等于穿过此回路的束缚电流 I_m 的代数和。 I_m 与 L 环绕方向成右旋者为正，反之为负。

与电介质中对比的公式

$$\oiint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} = -\sum_S q'$$

电极化强度

束缚电荷

§ 2 磁场强度矢量 有介质时的安培环路定理

无磁介质时

$$\oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{(L\text{内})} I_0$$

有磁介质时

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\sum I_0 + I_m)$$

$$\because I_m = \oint \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\therefore \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\sum I_0 + \oint \vec{M} \cdot d\vec{l})$$

$$\text{或 } \oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I_0 \quad \text{定义磁场强度 } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\boxed{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0}$$

磁介质中的安培环路定理：磁场强度沿任意闭合路径的线积分等于穿过该路径的所有传导电流的代数和，而与磁化电流无关。

$$\because \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \therefore \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

实验证明：对于各向同性的介质，在磁介质中任意一点磁化强度和磁场强度成正比。

磁化率

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

相对磁导率

$$\text{令 } \mu_r = 1 + \chi_m$$

$$\longrightarrow \boxed{\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}} \quad (\text{磁导率 } \mu = \mu_0 \mu_r)$$

值得注意： \vec{H} 的引入为研究介质中的磁场提供了方便，但它不是反映磁场性质的基本物理量， \vec{B} 才是反映磁场性质的基本物理量。

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

H 的环流仅与传导电流 I 有关,与介质无关。
(当 I 相同时, 尽管介质不同, H 在同一点上也不相同, 然而环流却相同。因此可以用它求场量 \vec{H} , 就象求 \vec{D} 那样。

引进 \vec{H} 的意义: 在磁介质中, 求磁感应强度 B , 需要知道磁化电流, 而磁化电流一般是难以测定的;

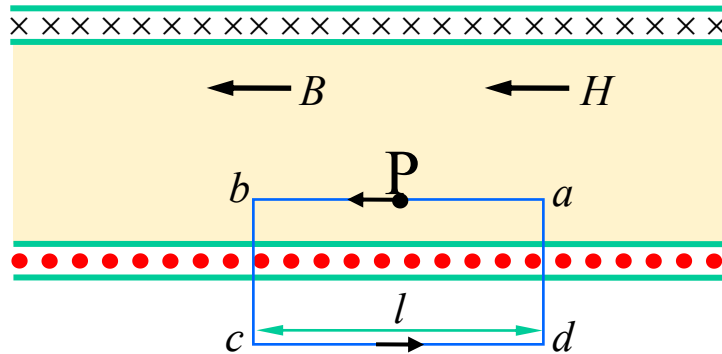
而通过 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_{\text{传导电流}}$ 先求 \vec{H} ,

再通过 $B = \mu_0 \mu_r H$ 求 B , 可以方便地处理介质中的磁场问题。

例：长直螺旋管内充满均匀磁介质 μ_r ，设电流 I_0 ，单位长度上的匝数为 n 。求管内的磁感应强度。

解：因管外磁场为零，
取如图所示安培回路

$$\therefore \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I$$



$$\begin{aligned} \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \int_a^b \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_b^c \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_c^d \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_d^a \vec{H} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_a^b H dl = lH = n l I_0 \end{aligned}$$

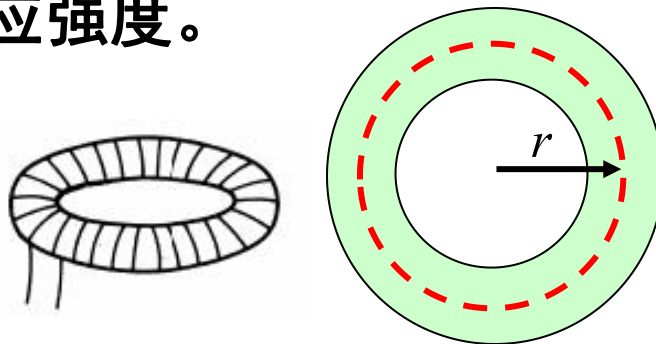
$$\therefore H = n I_0$$

$$\therefore B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r n I_0$$

例:在均匀密绕的螺绕环内充满均匀的顺磁介质, 已知螺绕环中的传导电流为 I , 单位长度内匝数 n , 环的横截面半径比环的平均半径小得多, 磁介质的相对磁导率和磁导率分别为 μ_r 和 μ , 求环内的磁场强度和磁感应强度。

解: 在环内任取一点, 过该点作一和环同心、半径为 r 的圆形回路。

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$



式中 N 为螺绕环上线圈的总匝数。由对称性可知, 在所取圆形回路上各点的磁感应强度的大小相等, 方向都沿切线。

$$\longrightarrow H 2\pi r = NI \quad \longrightarrow H = \frac{NI}{2\pi r} = nI$$

当环内充满均匀介质时

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

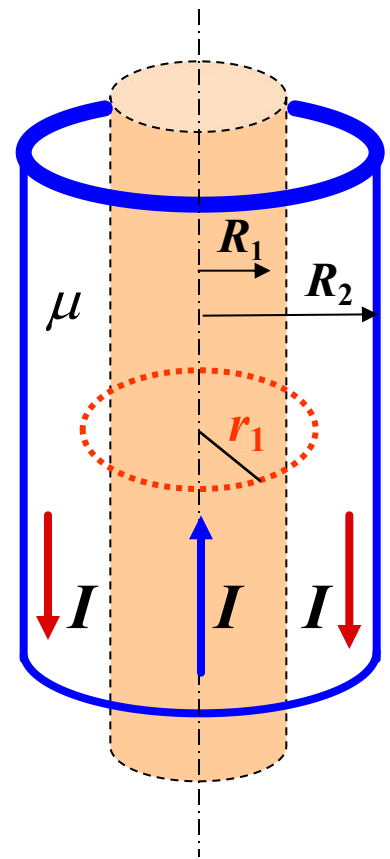
$$B = \mu_0 \mu_r nI$$

例：如图所示，一半径为 R_1 的无限长圆柱体（导体 $\mu \approx \mu_0$ ）中均匀地通有电流 I ，在它外面有半径为 R_2 的无限长同轴圆柱面，两者之间充满着磁导率为 μ 的均匀磁介质，在圆柱面上通有相反方向的电流 I 。试求（1）圆柱体外圆柱面内一点的磁场；（2）圆柱体内一点磁场；（3）圆柱面外一点的磁场；（4）介质内表面的磁化电流

解（1）无限长同轴圆柱体和圆柱面中有电流通过时，激发的磁场是轴对称分布，设圆柱体外圆柱面内一点到轴的垂直距离是 r_1 ，以 r_1 为半径作一圆，取此圆为积分回路，根据安培环路定理有

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \int_0^{2\pi r_1} dl = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r_1} \quad B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r_1} \quad (R_1 < r < R_2)$$



(2) 设在圆柱体内一点到轴的垂直距离是 r_2 ，则以 r_2 为半径作一圆，根据安培环路定理有

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \int_0^{2\pi r_2} dl = H 2\pi r_2 = I \frac{\pi r_2^2}{\pi R_1^2} = I \frac{r_2^2}{R_1^2}$$

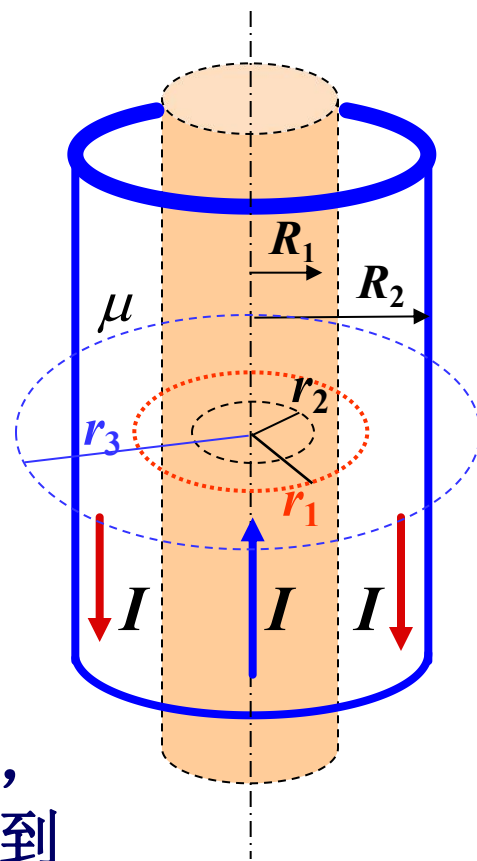
$$H = \frac{I r_2}{2\pi R_1^2} \quad (r < R_1)$$

由 $B = \mu H$ ，得 $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I r_2}{R_1^2} \quad (r < R_1)$

(3) 在圆柱面外取一点，它到轴的距离是 r_3 ，以 r_3 为半径作一圆，根据安培环路定理，考虑到环路中所包围电流的代数和为零，所以得

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \int_0^{2\pi r_3} dl = 0$$

即 $H = 0 \quad (R_2 < r) \quad \text{或} \quad B = 0 \quad (R_2 < r)$



(4) 介质内表面的磁化电流

介质内表面上 $B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi R_1}$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$

$$i' = M$$

$$= \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{\mu_r - 1}{2\pi R_1} I$$

$$I' = i' \cdot 2\pi R_1 = (\mu_r - 1)I$$

§ 3 铁磁质

(14-11)

一. 磁化曲线

装置：环形螺绕环；铁磁质 Fe, Co, Ni 及稀钷族元素的化合物，能被强烈地磁化

原理：励磁电流 I ；
用安培定理得 H

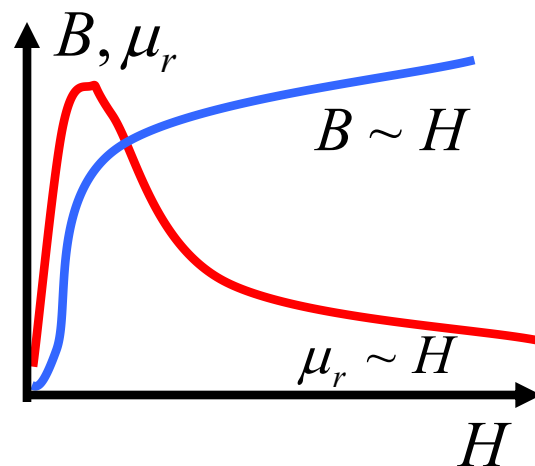
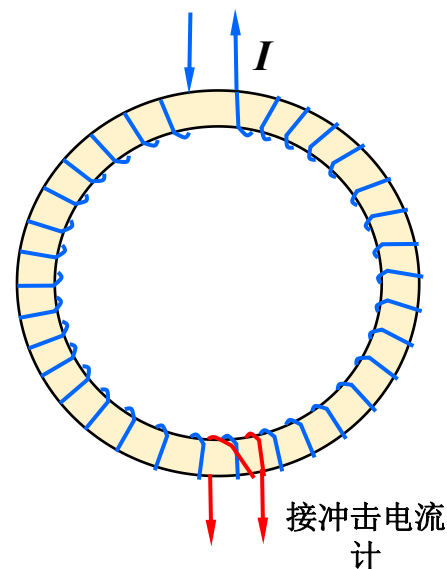
$$H = \frac{NI}{2\pi R}$$

实验测量 B ，由
得出 $\mu_r \sim H$ 曲线

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

铁磁质的 μ_r 不一定是个常数，
它是 H 的函数， μ_r 非线性；

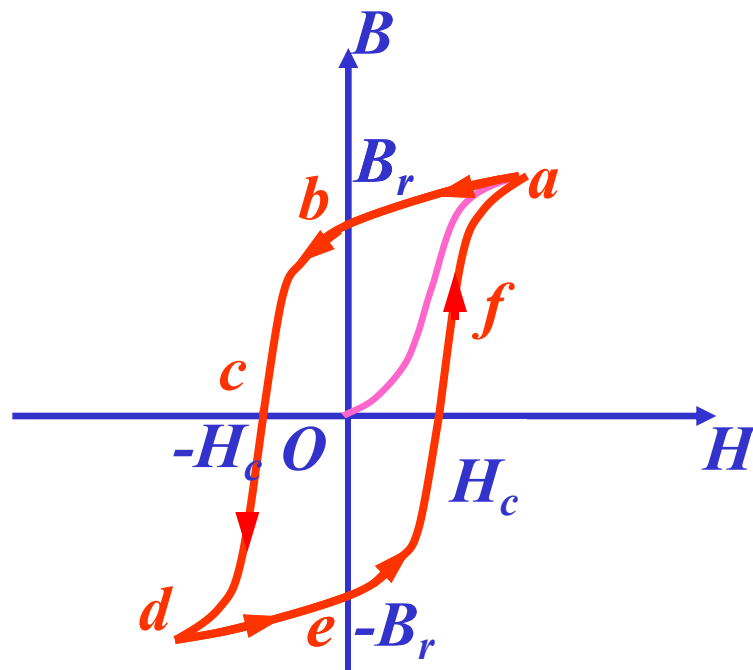
磁饱和现象，到一定程度， $I \uparrow$ ，
 $H \uparrow$ ，而 B 的增加极为缓慢。



二. 磁滞回线 (14-2)

当铁磁质达到饱和状态后，缓慢地减小 H ，铁磁质中的 B 并不按原来的曲线减小，并且 $H=0$ 时， B 不等于0，具有一定值，这种现象称为剩磁。

要完全消除剩磁 B_r ，必须加反向磁场 H ，当 $B=0$ 时磁场的值 H_c 为铁磁质的矫顽力。



当反向磁场 H 继续增加，铁磁质的磁化达到反向饱和。

反向磁场 H 减小到零，同样出现剩磁现象。

不断地正向或反向缓慢改变磁场，磁化曲线为一闭合曲线——磁滞回线。

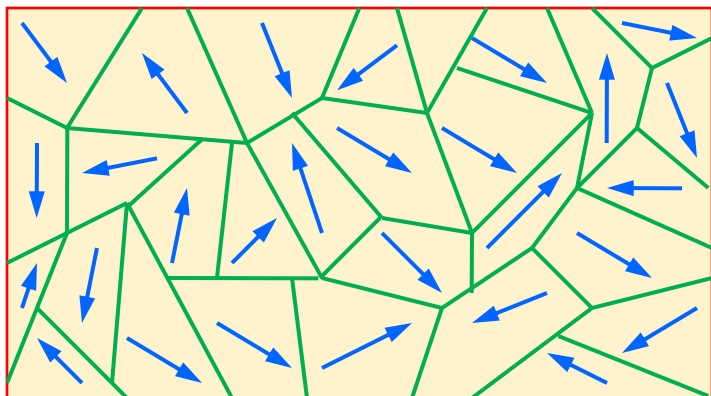
三. 铁磁质磁化的微观机理

1. 磁畴

铁磁质中起主要作用的是电子的自旋磁矩。

各电子的自旋磁矩靠交换偶合作用使方向一致，

从而形成自发的均匀磁化小区域——磁畴。



各种材料磁畴线度相差较大：

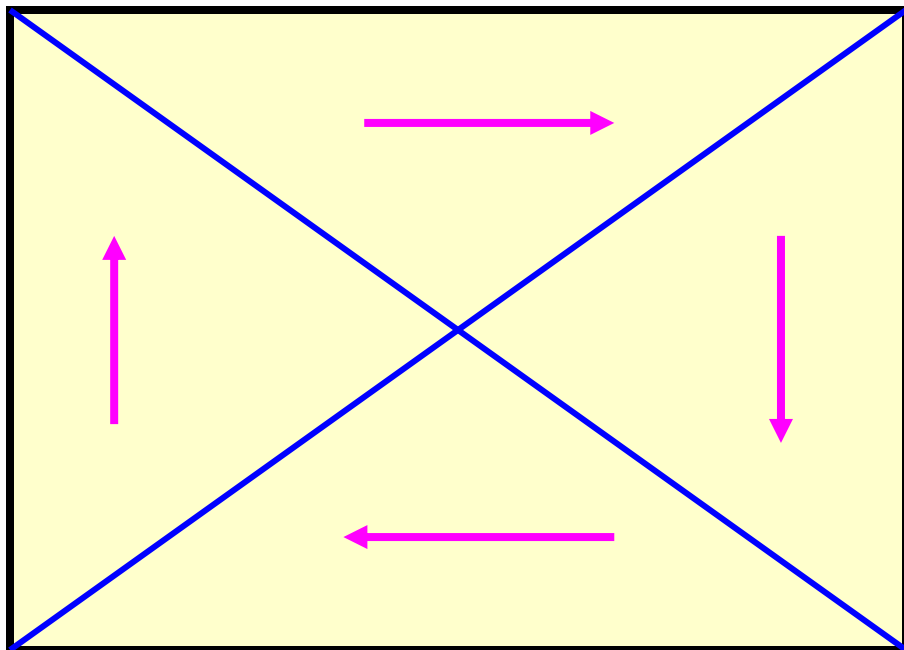
从 10^{-3}m 到 10^{-6}m ，

一般为 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{m}$ ，

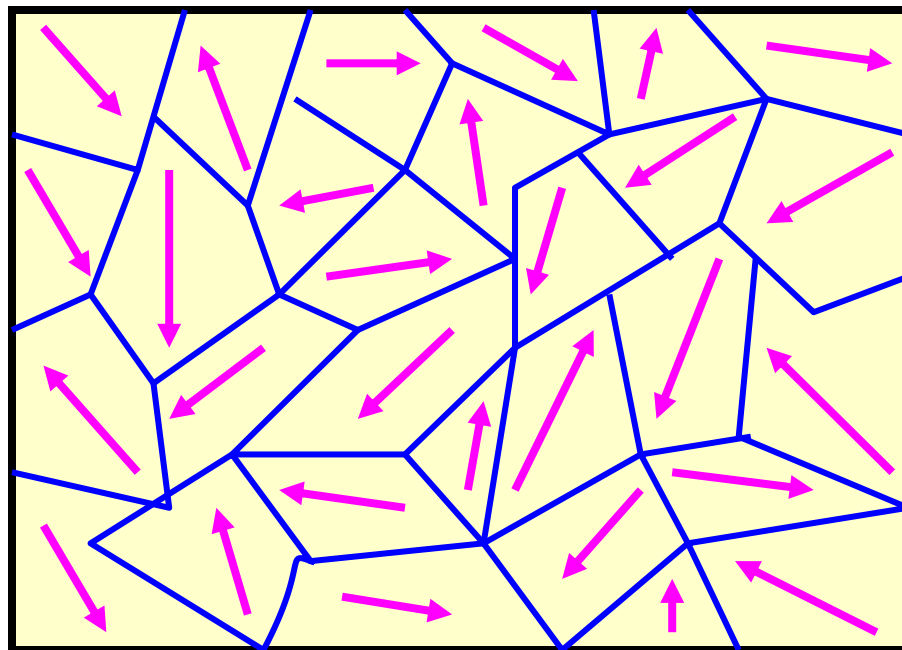
磁畴体积约为 $10^{-6}(\text{mm})^3$ ，

一个磁畴中约有 $10^{12}\sim 10^{15}$ 个原子。

单晶磁畴结构示意图



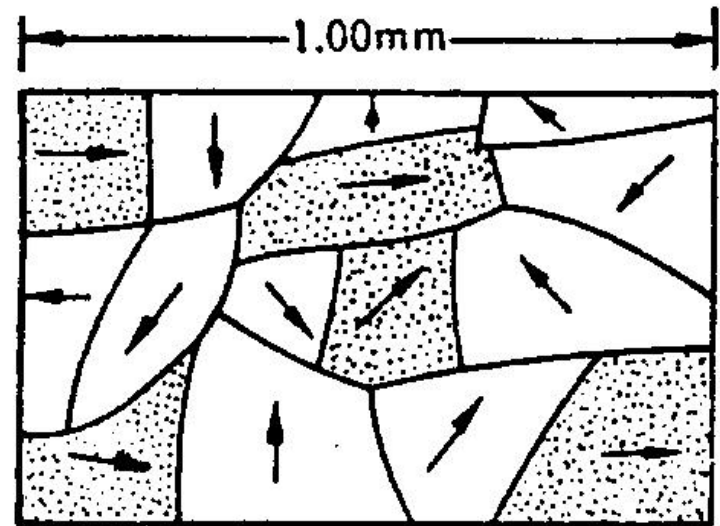
多晶磁畴结构示意图



2. 铁磁质的磁化

(1) 未加磁场时

- 各磁畴取向混乱
- 铁磁质宏观不显磁性



未加磁场

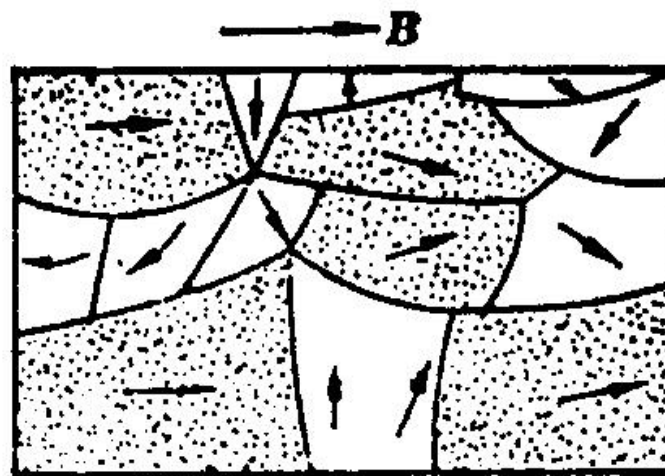
(2)加外磁场后

①磁畴壁发生移动，磁畴体积变化

(磁矩和 B_0 方向相近的磁畴体积增大，和 B_0 方向夹角大的磁畴体积减小)

②磁畴转向

·结果：铁磁质磁化



在磁场 B 中

(B_0 为一定值后，磁畴方向均指同一方向
——铁磁质达磁饱和)

居里点

$T \uparrow \rightarrow \vec{M}_{\text{磁畴}} \downarrow$ （自发磁化减弱）

$T \geq T_c \rightarrow \vec{M}_{\text{磁畴}} = 0$ （磁畴瓦解，表现顺磁性）

T_c 是失去铁磁性的临界温度，称“居里点”。

当 $T < T_c$ 时，又恢复铁磁性。

Fe : $T_c = 767^\circ\text{C}$

Ni : $T_c = 357^\circ\text{C}$

Co : $T_c = 1117^\circ\text{C}$



居 里

4. 铁磁质的应用

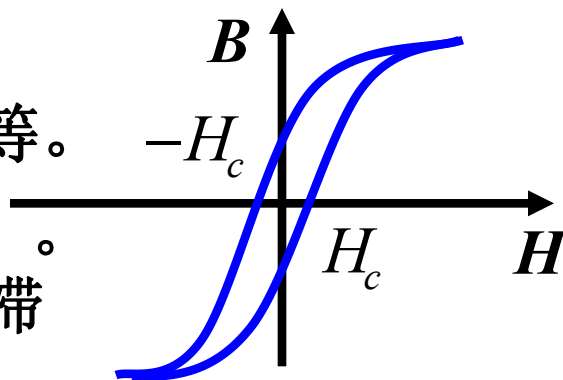
作变压器的软磁材料。

纯铁，硅钢坡莫合金 (Fe, Ni)，铁氧体等。

μ_r 大，易磁化、易退磁（起始磁化率大）。

饱和磁感应强度大，矫顽力 (H_c) 小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小。

用于继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。



作永久磁铁的硬磁材料

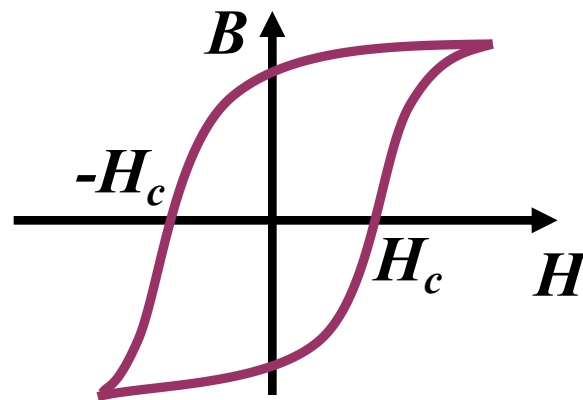
钨钢，碳钢，铝镍钴合金

矫顽力 (H_c) 大 ($>10^2 \text{ A/m}$)，剩磁 B_r

大磁滞回线的面积大，损耗大。

用于磁电式电表中的永磁铁。

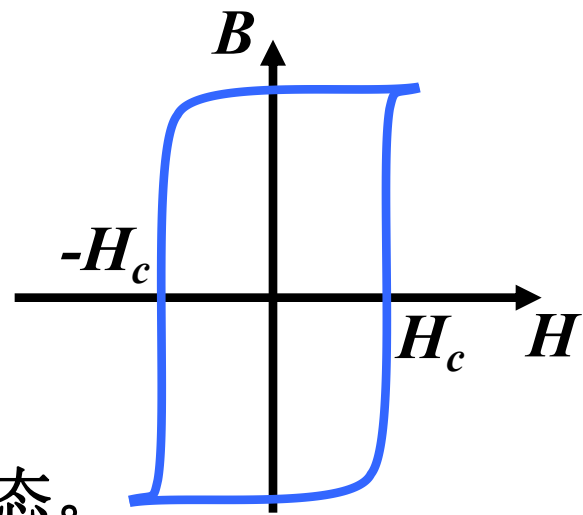
耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。



作存储元件的矩磁材料

锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r = B_S$ ， H_c 不大，磁滞回线是矩形。
用于记忆元件，当+脉冲产生 $H > H_c$
使磁芯呈+ B 态，则-脉冲产生 $H < -H_c$
使磁芯呈- B 态，可做为二进制的两个态。



铁磁体在交变磁化磁场的作用下，它的形状随之改变，叫做磁致伸缩效应。

压磁材料具有较强的磁致伸缩效应，常用于制造超声波发生器。

