

磁场中的磁介质



13-1 磁介质的磁化 *magnetization*

一、磁介质的分类

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

* 相对磁导率:
$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

实验表明，不同的磁介质在磁场中产生的附加磁场是各不相同的，可按其附加磁场分为三大类：

1. 顺磁质 \bar{B}' 与 \bar{B}_0 同方向, $B' \ll B_0$ $B = B_0 + B'$ $\mu_r > 1$

2. 抗磁质 \bar{B}' 与 \bar{B}_0 反方向, $B' \ll B_0$ $B = B_0 - B'$ $\mu_r < 1$

3. 铁磁质 \bar{B}' 与 \bar{B}_0 同方向且 $B' \gg B_0$ $\bar{B} \gg \bar{B}_0$ $\mu_r \gg 1$

二、顺磁质和抗磁质的磁化

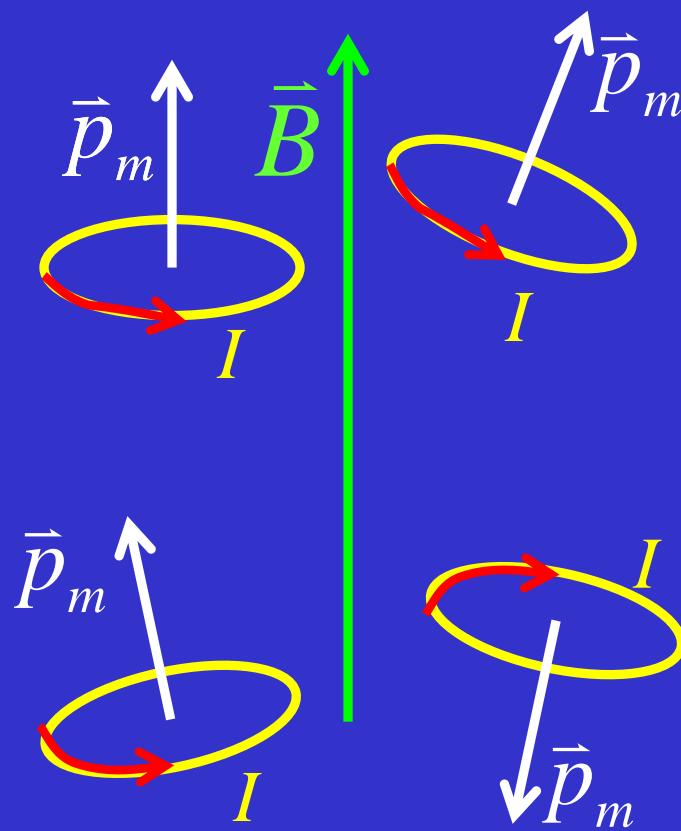
* 分子电流和分子磁矩

原子中电子参与两种运动：
自旋及绕核的轨道运动，对
应有电子磁矩。

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，称为分子电流、
分子磁矩。

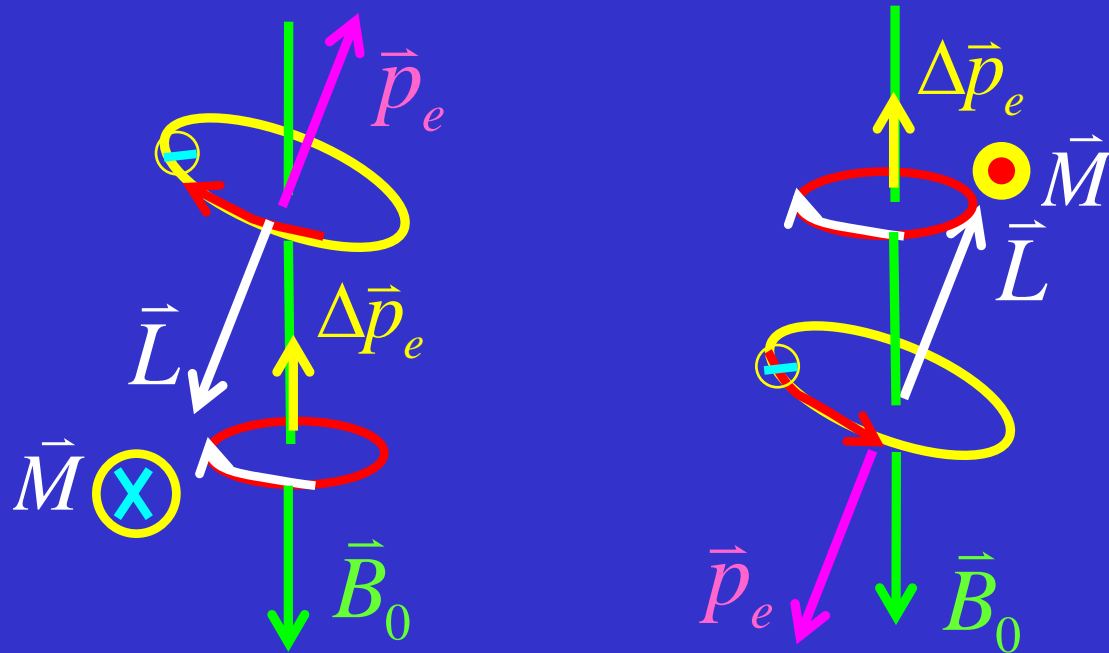
$$\vec{p}_m \stackrel{\text{def}}{=} IS \hat{n}$$

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$



分子磁矩在外磁场中受到磁力矩，使它向磁场方向偏转，且按统计规律取向

除此之外，电子磁矩在外磁场中还有绕磁场的进动。



绕磁场进动附加一磁矩 $\Delta\vec{p}_m$ 与外场 \vec{B}_0 反向。

顺磁质

由具有分子磁矩的分子组成。

在外场中分子磁矩按统计规律重新取向分布。
同时产生附加磁矩，但前者大五个数量级。

抗磁质

电子磁矩完全抵消，分子磁矩为零

在外场中拉莫进动生成附加磁矩（感应磁矩）

分子磁矩 \bar{P}_m 是顺磁质产生磁效应的主要因素

附加磁矩 $\Delta\bar{p}_m$ 是抗磁质产生磁效应的唯一因素

三、磁化强度矢量

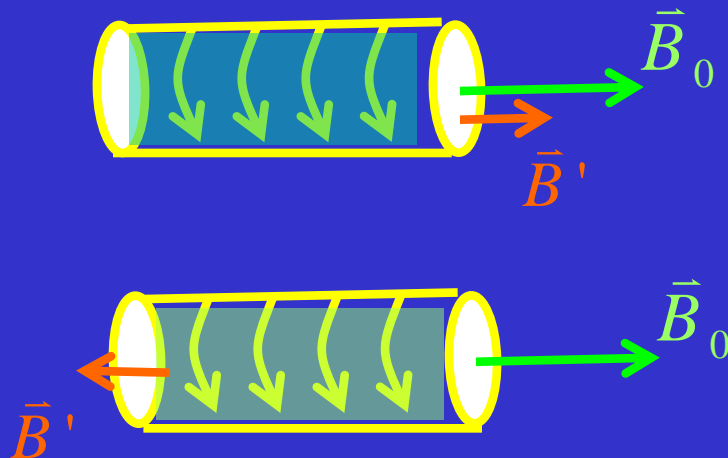
符号

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{\Delta V}$$

单位：安培/米 (A/m)

顺磁质 \vec{M} 与 \vec{B}_0 同向，
所以 \vec{B} 与 \vec{B}_0 同方向

抗磁质 \vec{M} 与 \vec{B}_0 反向，
所以 \vec{B} 与 \vec{B}_0 反方向，
(\because 只有附加磁矩)



四、磁化强度和磁化电流

称为磁化电流或分子面电流 I_m

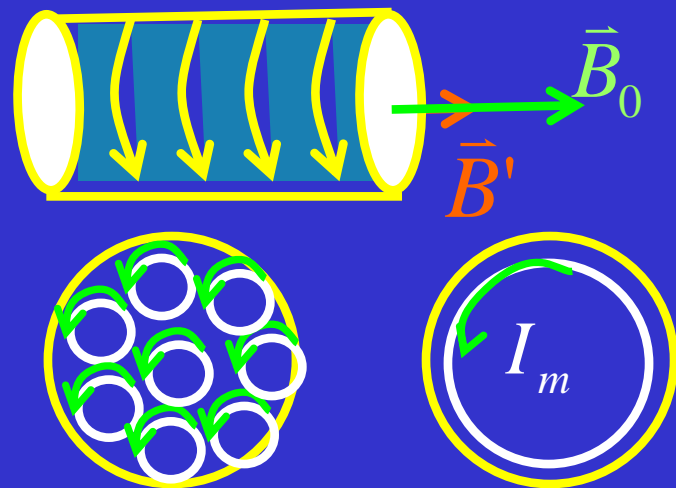
磁化电流线密度 j_m ：在垂直于电流流动方向上单位长度的磁化电流。

$$j_m = I_m / l$$

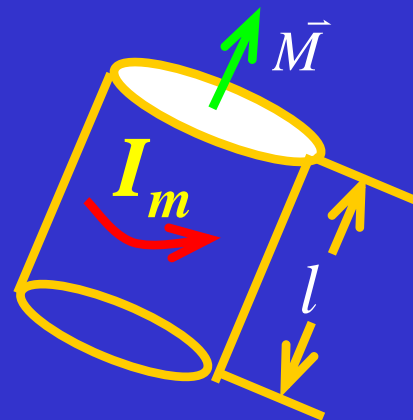
设介质的截面积 S ，则有：

$$|\vec{M}| = \frac{\sum p_{mi}}{\Delta V} = \frac{I_m S}{\Delta V} = \frac{j_m l S}{\Delta V} = j_m$$

\vec{M} 的方向和 I_m 的流向成右手螺旋关系



若在 l 长介质表面束缚分子面电流为 I_m 则其线密度为

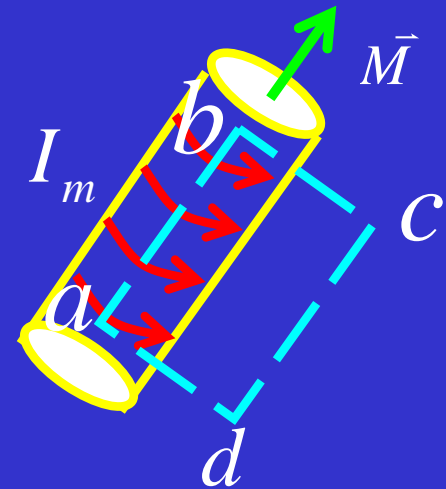


- 磁化强度的环流

以充满介质的螺旋管为例，
选如图回路，求环流

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

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



13-2 有介质时的高斯定理和安培环路定理

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

磁感应强度 \vec{B} 是外加磁场 \vec{B}_0 与介质内束缚电流产生的 \vec{B}' 的合场强.

- 磁介质中的高斯定理

$$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- 磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I + \mu_0 \sum_L I_m$$

束缚电流

有磁介质的总场

传导电流

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

$$\therefore \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I$$

定义磁场强度 $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 则有:

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

物理意义

沿任一闭合路径磁场强度的环流等于该闭合路径所包围的自由电流的代数和。

磁场强度 H 的单位: 安培/米(A/m) SI

• $\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$ 之间的关系

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

χ_m 为磁化率

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

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

$$\vec{H} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\mu_r = (1 + \chi_m)$$

μ_r 称为相对磁导率

$\mu = \mu_0 \mu_r$ 磁导率

今后求解有关磁场的问题一般都先求磁场强度，再求磁感应强度及磁化强度等

$$\begin{array}{ccccccc}
 I & \xrightarrow[\quad L \quad]{\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I} & \vec{H} & \xrightarrow{\vec{B} = \mu \vec{H}} & \vec{B} \\
 & \xrightarrow{\vec{M} = \chi_m \vec{H}} & \vec{M} & \xrightarrow{M = j_m} & j_m & \longrightarrow & I_m
 \end{array}$$

例题一：如图均匀通有电流**I**的载流无限长磁介质圆柱其磁导为 μ_{r1} ，外面有半径为 R_2 的无限长同轴圆柱面，该面也通有电流 I ，两者之间充满 μ_{r2} 的磁介质，求**B**和 **H**的分布。

解：根据轴对称性，以轴上一点为圆心在垂直于轴的平面内取圆为安培回路：

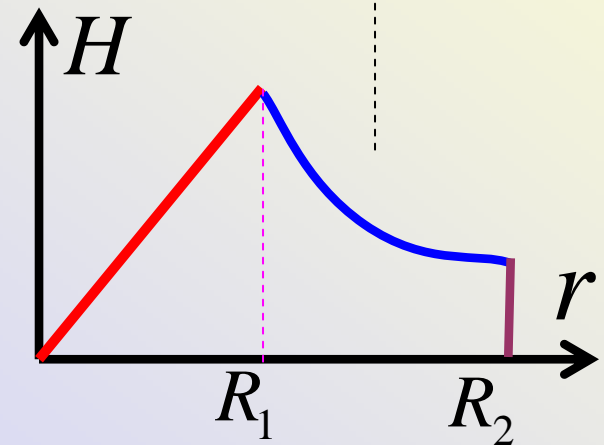
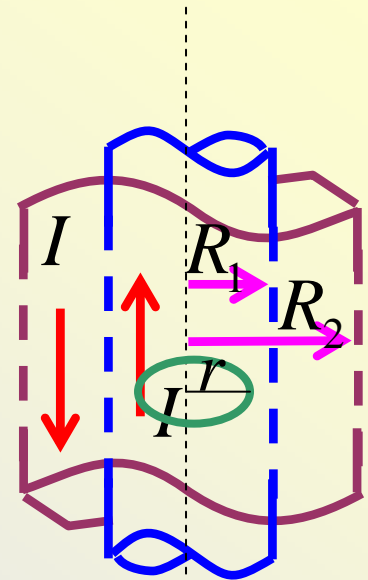
$$r \leq R_1 \quad \therefore 2\pi r H_1 = \frac{I}{\pi R_1^2} \pi r^2$$

$$\therefore H_1 = \frac{I}{2\pi R_1^2} r \quad \therefore B_1 = \frac{\mu_{r1} \mu_0 I}{2\pi R_1^2} r$$

同理 $R_1 < r < R_2$

$$\therefore H_2 = \frac{I}{2\pi r} \quad \therefore B_2 = \frac{\mu_{r2} \mu_0 I}{2\pi r}$$

$$R_2 \leq r \quad \therefore H_3 = 0 \quad \therefore B_3 = 0$$



例题二：计算充满磁介质（ μ_r ）的螺绕环内的磁感应强度 \vec{B} ，介质的磁化强度 \vec{M} ，磁化电流。已知线圈总匝数 N ，通有电流 I_0

解：取与环同心的半径为 R 的圆为环路

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

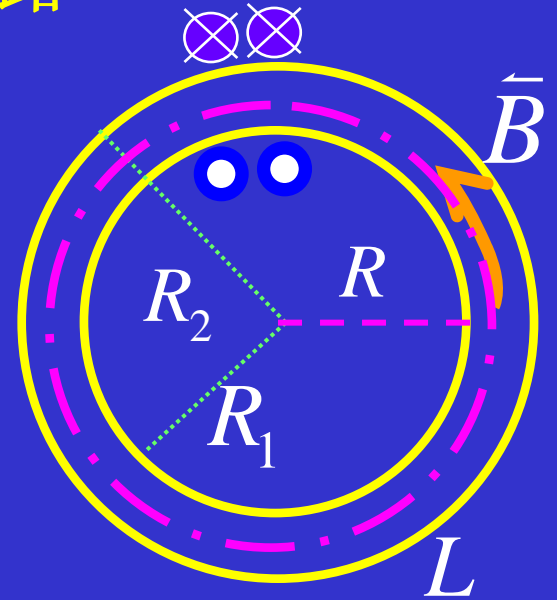
$$2\pi R H = N I_0 \quad \therefore H = \frac{N}{2\pi R} I_0$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{N I_0}{2\pi R}$$

$$M = \chi_m H = (\mu_r - 1) \frac{N I_0}{2\pi R}$$

$$I_m = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = (\mu_r - 1) \frac{N I_0}{2\pi R} \cdot 2\pi R = (\mu_r - 1) N I_0$$

$$B' = B - B_0 = \mu_0 (\mu_r - 1) \frac{N I_0}{2\pi R}$$



13-3 铁磁质

● 磁化曲线

装置：环形螺绕环

原理：励磁电流 I ;
用安培定理得 H

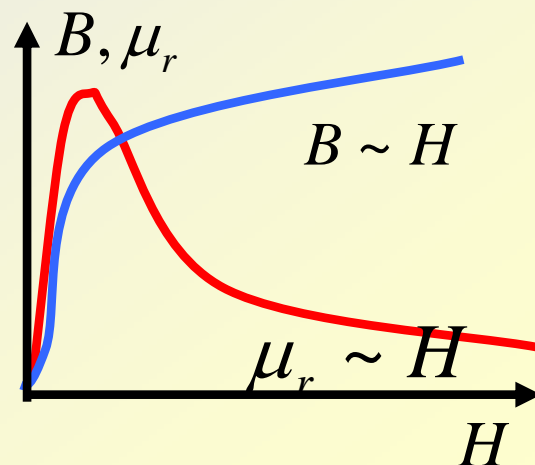
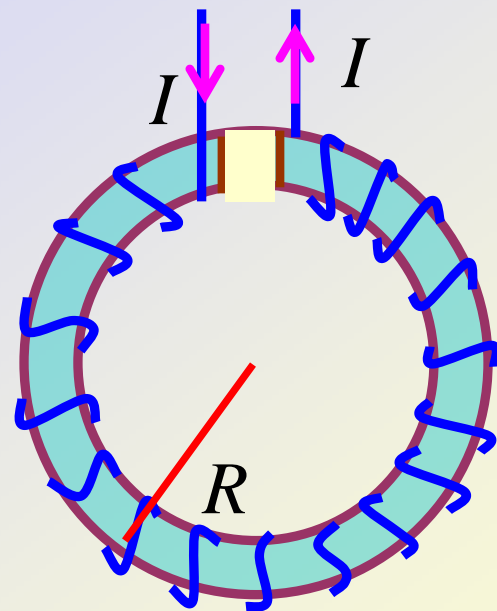
$$H = \frac{NI}{2\pi R}$$

实验测量 B

由 $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$ 得出 $\mu_r \sim H$ 曲线

结果一

铁磁质的 μ_r 不一定是个常数，
它是 H 的函数



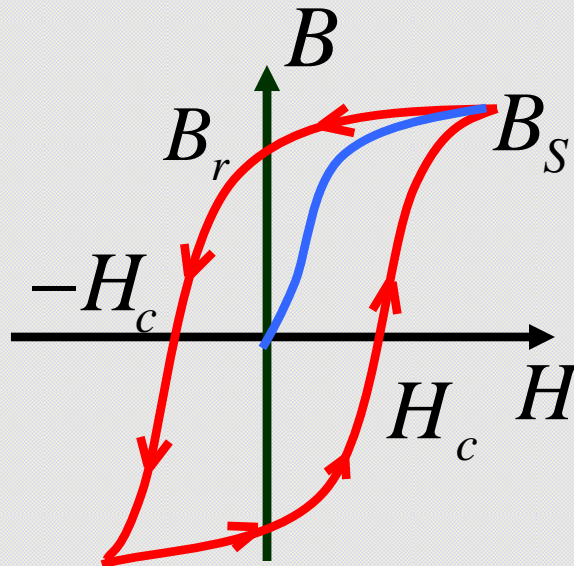
结果二

磁滞回线--不可逆过程
起始磁化曲线;

饱和磁感应强度 B_S

剩磁 B_r

矫顽力 H_c



每个 H 对应不同的 B 与磁化的历史有关。

在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高

磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

结果三

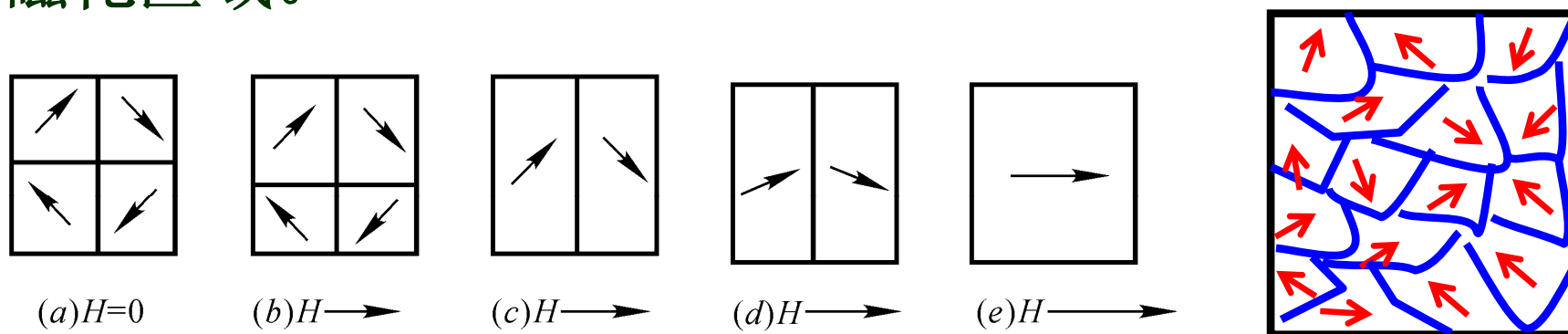
每种磁介质当温度升高到一定程度时，由高磁导率、磁滞、磁致伸缩等一系列特殊状态全部消失，而变为顺磁性。

这温度叫**临界温度**，或称铁磁质的**居里点**。
不同铁磁质具有不同的转变温度

如：铁为 **1040K**，钴为 **1390K**， 镍为 **630K**

● 铁磁质磁化的机制

* 磁畴(*magnetic domain*): 原子间电子交换耦合作用很强, 促使其自旋磁矩平行排列形成**磁畴**——自发的磁化区域。



在无外磁场的作用下磁畴取向平均抵消, 能量最低, 不显磁性。

在外磁场较弱时, 自发磁化方向与外磁场方向相同或相近的那些磁畴逐渐增大(畴壁位移), 在外磁场较强时, 磁畴自发磁化方向作为一个整体, 不同程度地转向外磁场方向。

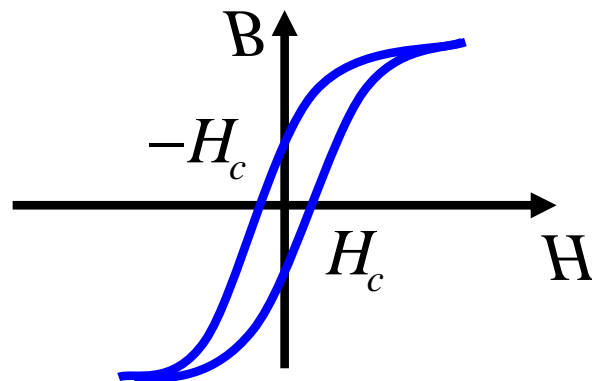
当全部磁畴都沿外磁场方向时，铁磁质的磁化就达到饱和状态。饱和磁化强度 M_s 等于每个磁畴中原来的磁化强度，该值很大，这就是铁磁质磁性 μ_r 大的原因。

磁滞 (*hysteresis*) 现象是由于掺杂和内应力等的作用，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，而表现出来。

当温度升高时，热运动会瓦解磁畴内磁矩的规则排列；在临界温度（相变温度 T_c ）时，铁磁质完全变成了顺磁质。**居里点 T_c (*Curie Point*)**

● 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。

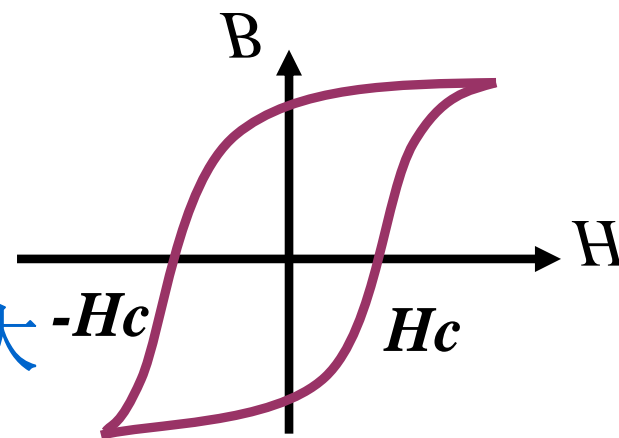


μ_r 大，易磁化、易退磁（起始磁化率大）。
饱和磁感应强度大，矫顽力(H_c)小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小（ HdB 面积小）。

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

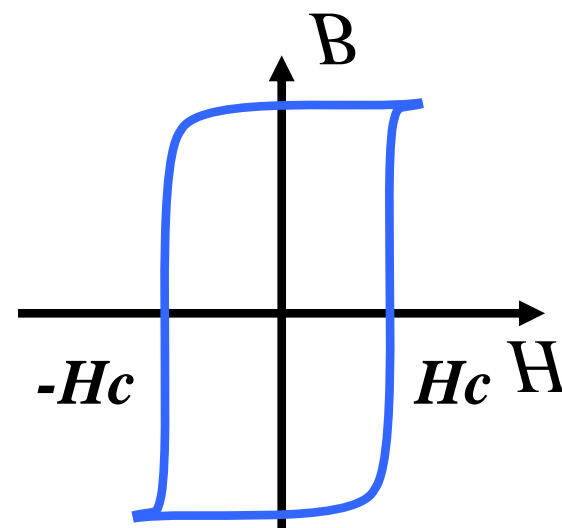
矫顽力(H_c)大 ($>10^2 \text{A/m}$), **剩磁 B_r** 大
磁滞回线的面积大, 损耗大。

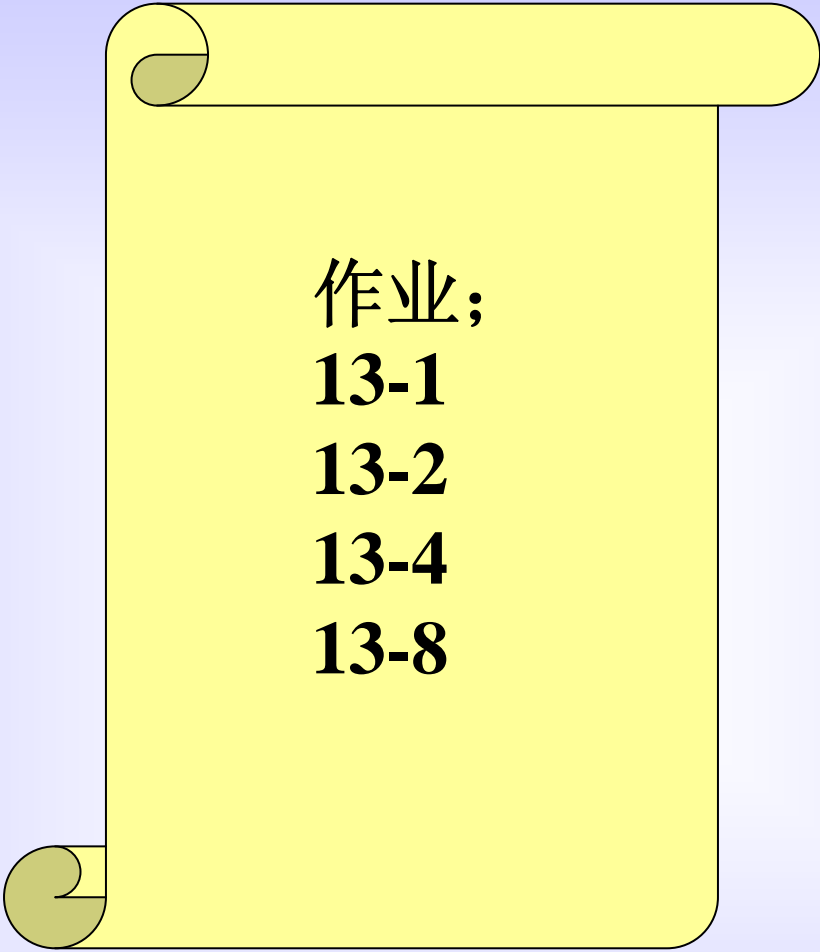


还用于磁电式电表中的永磁铁。耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

- 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。





作业;

13-1

13-2

13-4

13-8