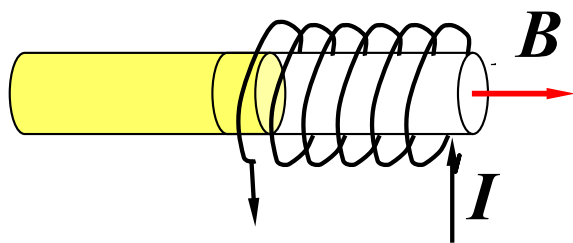


## § 6. 磁介质

### 一. 磁介质



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

实验发现：

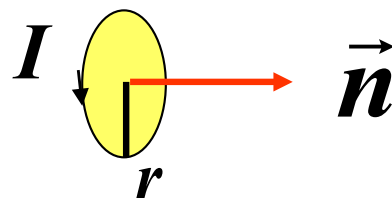
$$\frac{B}{B_0} = \mu_r = \begin{cases} < 1 & \text{抗磁质} & \text{金、银、铜} \\ > 1 & \text{顺磁质} & \text{锰、铬、铂} \\ >> 1 & \text{铁磁质} & \text{铁、钴、镍} \end{cases}$$

$\mu_r$  —— 磁介质的相对磁导率

## 二. 磁介质的磁化机理

### 1. 电子的磁矩

电子“轨道”运动 → 载流线圈



磁矩  $\vec{m} = IS\vec{n}$

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

$$m_l = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{evr}{2} \quad \text{轨道角动量: } L = m_e vr$$

$$= \frac{e}{2m_e} L \quad \rightarrow \quad \text{电子“轨道”磁矩}$$

此外，电子还有自旋磁矩： $m_s = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\hbar}{2}$

## 二. 磁介质的磁化机理

### 2. “分子电流” 模型

原子  
分子  
磁矩

$$\vec{m}_t = \sum \vec{m}_i$$

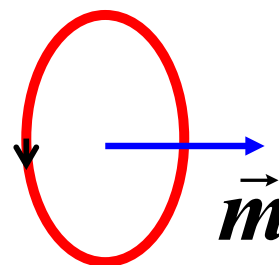
电子“轨道”磁矩  
电子自旋磁矩  
核磁矩—小3个数量级（常略去）

原子分子等效于一个载流线圈（分子电流），其磁矩为： $\vec{m} = \vec{m}_t$

分类

$$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{m} = 0 & \text{无矩分子} \\ \vec{m} \neq 0 & \text{有矩分子} \end{array} \right.$$

  
固有磁矩



## 二. 磁介质的磁化机理

### 2. “分子电流” 模型

#### 原子固有磁矩

原子	固有磁矩	特点
He	0	满壳层，惰性气体
Ne	0	满壳层，惰性气体
H	$9.27 \times 10^{-24}$	最外层1个电子
Na	$9.27 \times 10^{-24}$	最外层1个电子
Fe 、 Co、 Ni	$20.4 \times 10^{-24}$	最外层2个电子

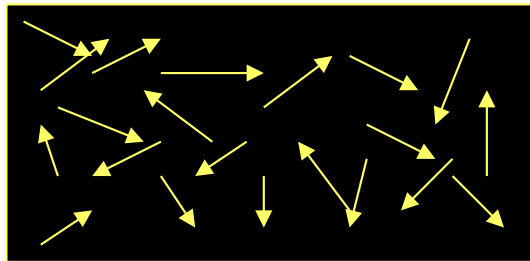
## 二. 磁介质的磁化机理

### 2. “分子电流”模型

$\vec{m} = 0$  无矩分子——分子内电子磁矩之和为零  
对外不显磁性

$\vec{m} \neq 0$  有矩分子——分子内电子磁矩之和不为零

**固有磁矩** 对大块介质，固有磁矩排列无序  
对外不显磁性！



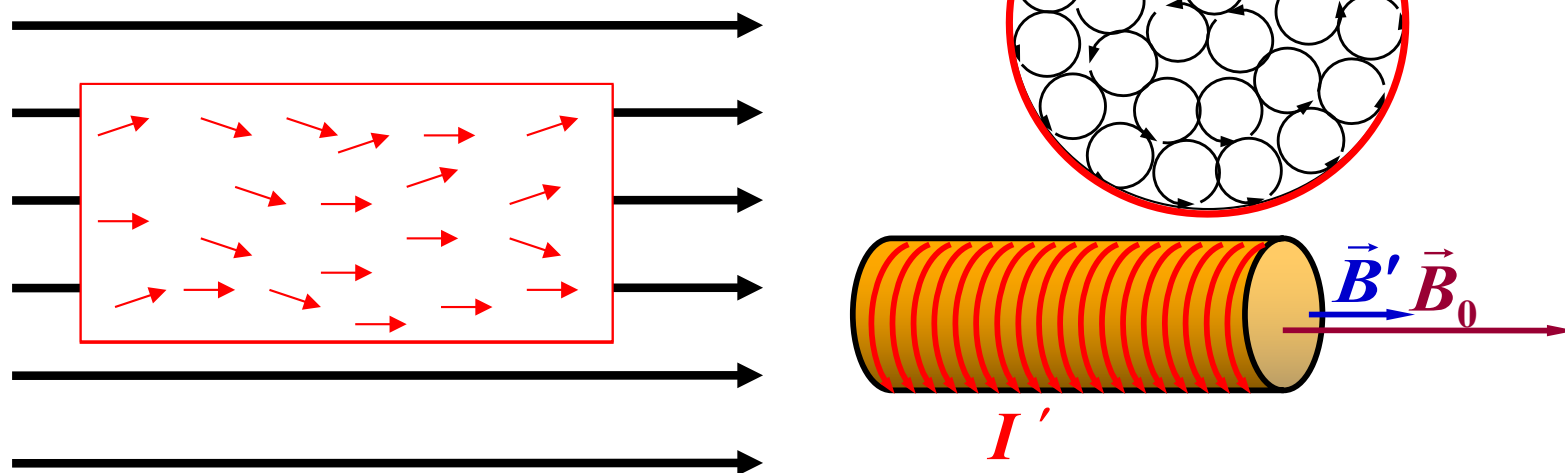
综上所述：无外磁场时，磁介质对外无磁性

## 二. 磁介质的磁化机理

3. 磁化机理 加外场时  $\vec{B}_0 \neq 0$

**有矩分子：** 磁矩在磁场中受磁力矩的作用

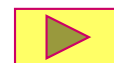
尽力朝外磁场方向排列对外产生磁效应



分子电流的总体效应, 等效于介质表面的**束缚电流(磁化电流)**  $I'$

总磁感应强度  $B = B_0 + B'$  顺磁质

**无矩分子：** 在磁场中由于电子的运动产生**附加磁矩**,  
其方向与外磁场方向相反



总磁感应强度  $B = B_0 - B''$  抗磁质

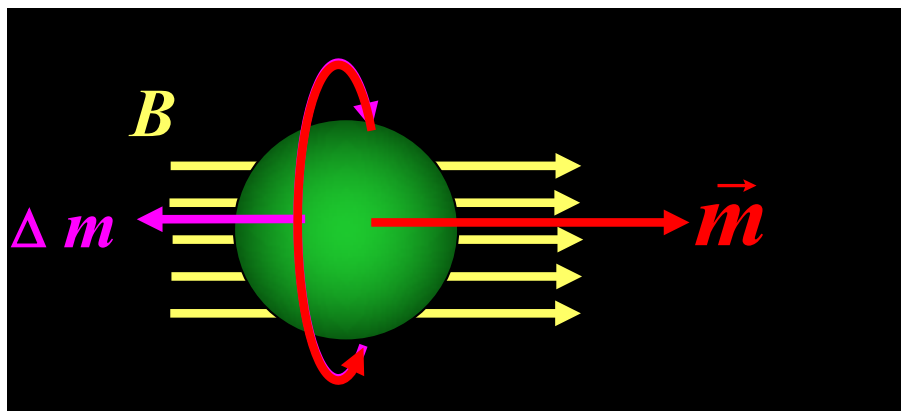
## 二. 磁介质的磁化机理

### 3. 磁化机理

加外场时

$$\vec{B}_0 \neq 0$$

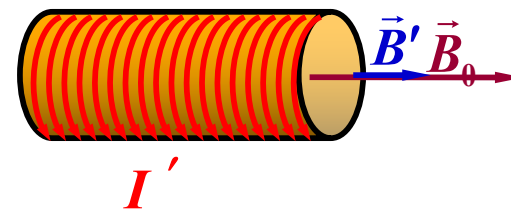
对任何物质都有附加磁矩



$$\frac{m}{\Delta m} = 10^5 \rightarrow \begin{cases} m = 0, \Delta m \text{ 起作用——抗磁质} \\ m \gg \Delta m, \Delta m \text{ 可忽略——顺磁质} \\ m \text{ 极大——铁磁质} \end{cases}$$

有外场时，磁介质对外显磁性

### 三. 磁化强度



分子电流的总效应等效于介质表面的**束缚电流**  $I'$  (**磁化电流**)  
(电荷宏观移动形成的传导电流称作自由电流)

**磁化强度：** 单位体积内分子磁矩的矢量和

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_i}{\Delta V} \begin{cases} \text{顺磁质 } \vec{M} \uparrow \uparrow \vec{B} \\ \text{抗磁质 } \vec{M} \downarrow \uparrow \vec{B} \end{cases}$$

单位： A/m

实验表明：  
各向同性  
磁介质有

$$\vec{M} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B}$$

可以证明：  $\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{r} = \sum I'$



## 四. $H$ 的安培环路定理

有磁介质时的恒定磁场  $\vec{B}$  由  $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由电流 } I_0 \\ \text{束缚电流 } I' \end{array} \right\}$  共同作用产生。 ?  $\vec{B}$   $I'$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \sum (I_0 + I') \quad \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{r} = \sum I'$$
$$= \mu_0 \sum I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{r}$$

$$\oint_L \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{r} = \sum I_0$$

磁场强度:  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \Rightarrow \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = \sum I_0$

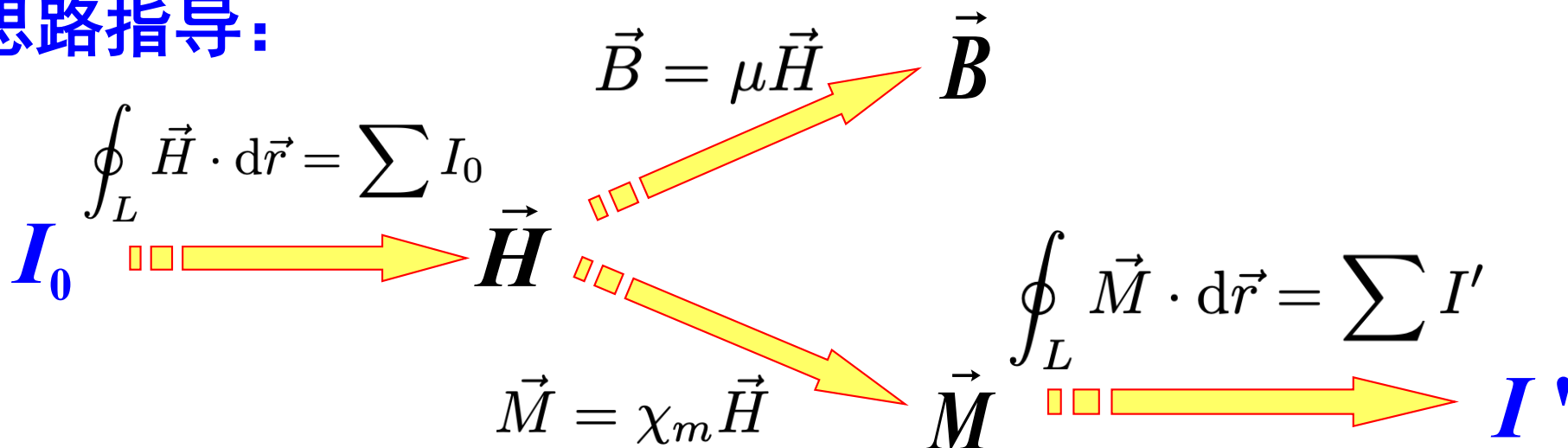
$H$  的安培环路定理

## 四. $H$ 的安培环路定理

$$\left. \begin{aligned} \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \\ \vec{M} &= \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \\ \mu &= \mu_0 \mu_r \text{ 介质磁导率} \end{aligned}$$

各向同性介质:  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$        $\chi_m = \mu_r - 1$  磁化率

思路指导:



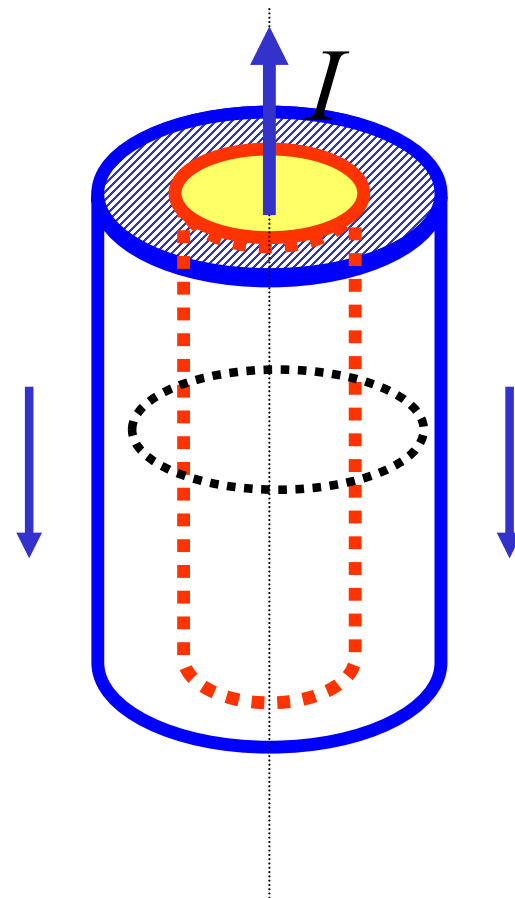
**例：** 电缆的芯是一根半径为 $R$ 的金属导体, 它和导电外壁之间充满相对磁导率为 $\mu_r$ 的均匀介质. 电流均匀地流过芯的横截面并沿外壁流回. 求介质中磁感应强度的分布。

**解：** 本题具有轴对称性, 如图选取环路。

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = 2\pi r H = I$$

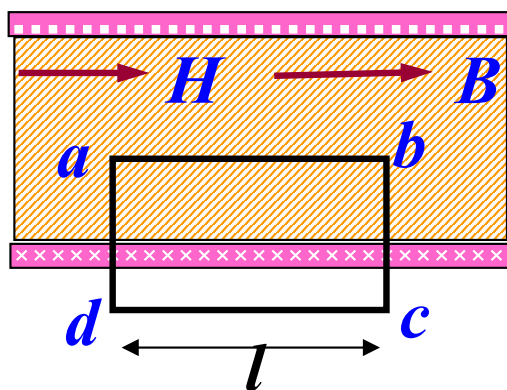
$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

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



**例：**一无限长直螺线管，单位长度上的匝数为 $n$ ，螺线管内充满相对磁导率为 $\mu_r$ 的均匀介质。导线内通电流 $I$ ，求管内磁感应强度及磁介质表面的磁化电流线密度。

解：



$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = \int_a^b \vec{H} \cdot d\vec{r} = Hl$$

由安培环路定理： $H = nI$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r nI \quad \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{r} = \sum I'$$

$$j' = \frac{dI'}{dr} = M = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} B = (\mu_r - 1)nI$$

对铁磁质  $\mu_r \sim 10^{2-5}$

磁场主要由铁磁质  
表面束缚电流产生

## § 7. 铁磁质

---

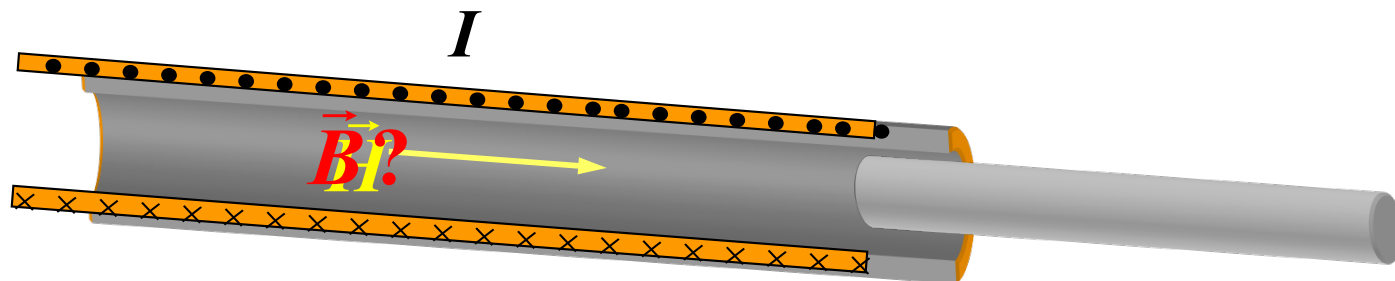
### 一、基本特点

- 1、  $\frac{B}{B_0} = \mu_r \gg 1$
- 2、  $\mu_r \sim B$  有关；
- 3、 磁滞效应；
- 4、 超过居里温度变为顺磁质；
- 5、 有饱和状态 。



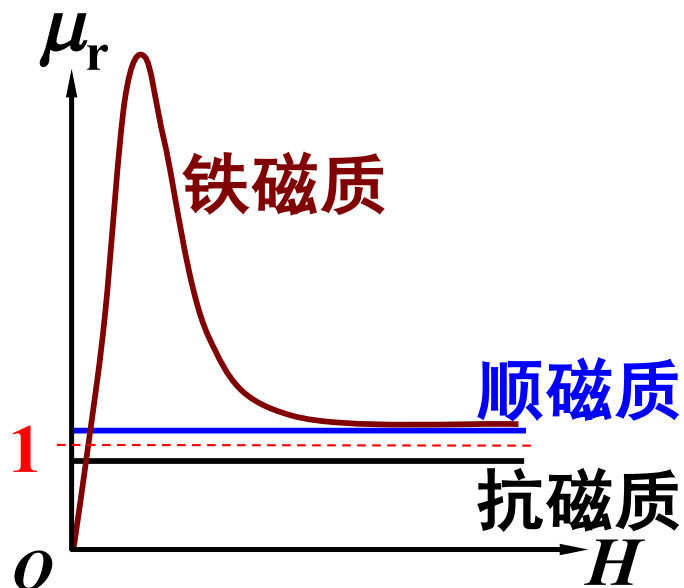
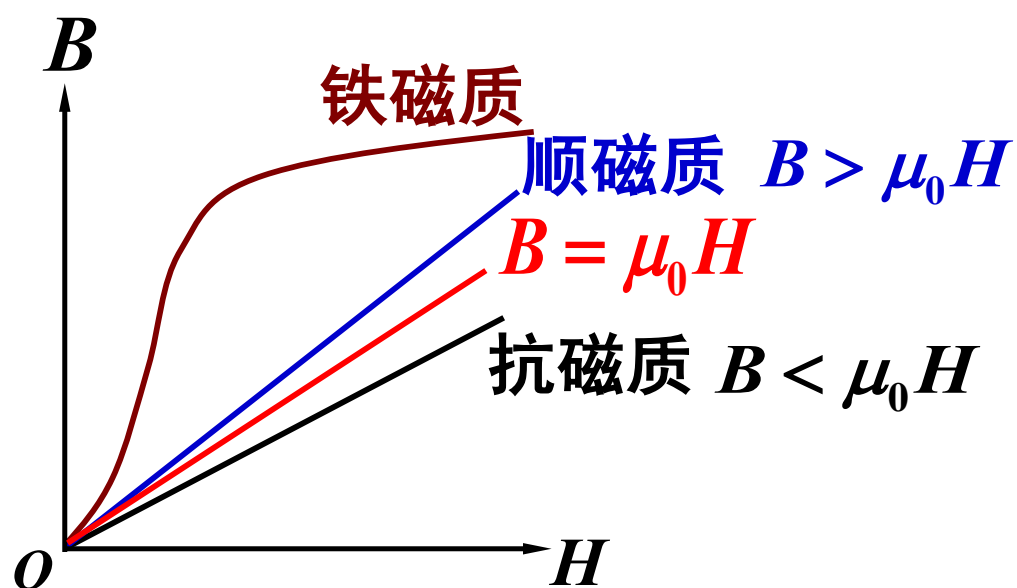
## 二、磁化曲线与磁滞回线

### 1. 磁化曲线



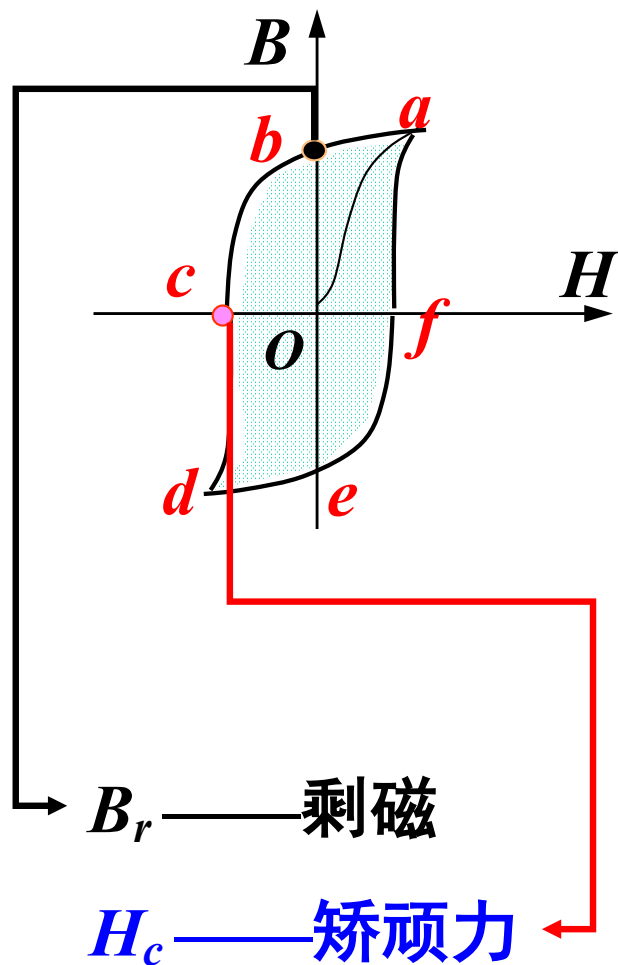
$$H = nI$$

由实验测量不同材料时的 $B$ ，作 $B-H$ 曲线。



## 二、磁化曲线与磁滞回线

### 2、磁滞回线和材料的磁性



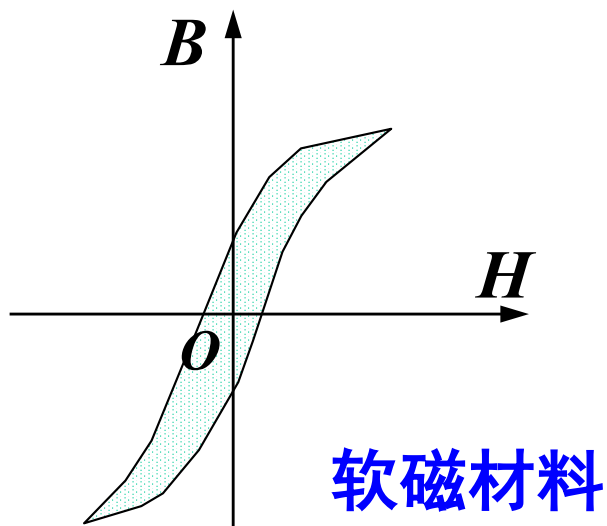
磁滞回线所围的面积与磁化能量成正比。

硬磁材料：

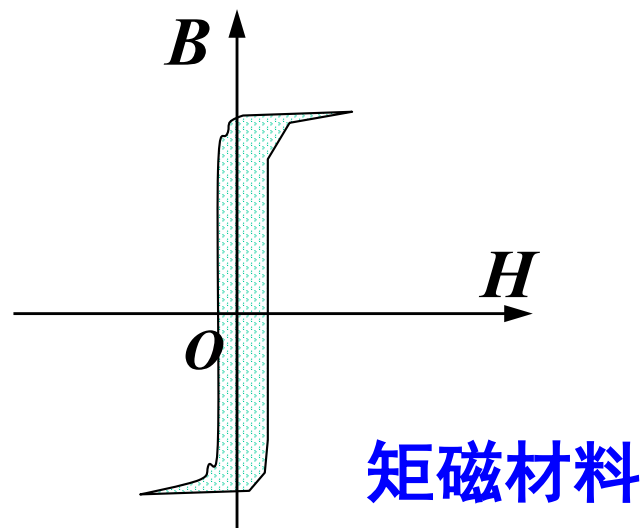
磁滞回线较粗，剩磁很大，这种材料充磁后不易退磁，适合做永久磁铁。

## 二、磁化曲线与磁滞回线

### 2、磁滞回线和材料的磁性



磁滞损耗小，适合用在交变磁场中，如变压器铁芯、继电器、电动机转子、定子

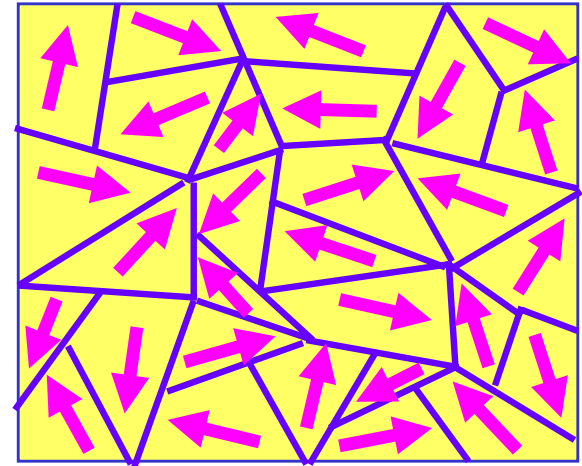


可作磁性记忆元件。



### 三、磁畴和铁磁质的磁化机制

**磁畴：**铁磁质中由于原子的强烈作用，在铁磁质中形成磁场很强的小区域。磁畴的体积约为  $10^{-12} \text{ m}^3$ 。



**无外磁场：**各磁畴磁化方向杂乱无章

**外加磁场：**

**磁场较弱：**自发磁化方向与外磁场方向相同或相近的磁畴的体积逐渐增大，反之则逐渐缩小（**畴壁运动**）

**磁场较强：**缩小着的磁畴消失，其它磁畴的磁化方向转向外场方向。外场越强，转向越充分。所有磁畴都沿外磁场方向排列时则达到饱和磁化状态

----**磁性很强**

### 三、磁畴和铁磁质的磁化机制

#### 去除外磁场

分裂成许多磁畴。由于掺杂和内应力等原因，磁畴之间存在摩擦阻力，使磁畴不能恢复到磁化前的杂乱排列状态。

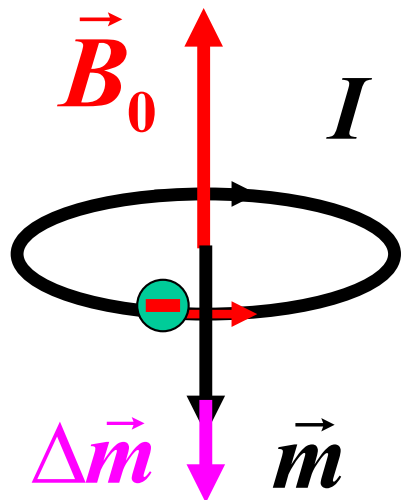
----表现出磁滞现象

#### 温度升高

分子热运动加剧。 $T > T_c$ 时，磁畴全部被破坏，铁磁质转为顺磁质

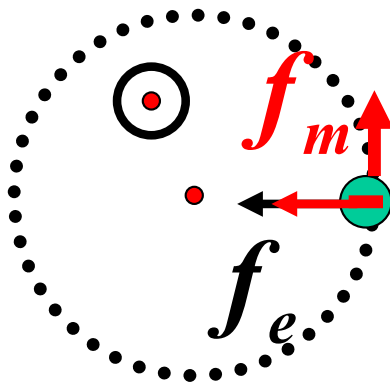
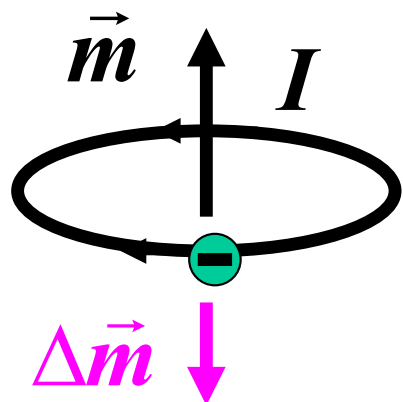
----存在居里点

# 电子在外磁场中运动时, 附加磁矩的形成



$$I = \frac{e\omega}{2\pi}$$

电子反向运动?



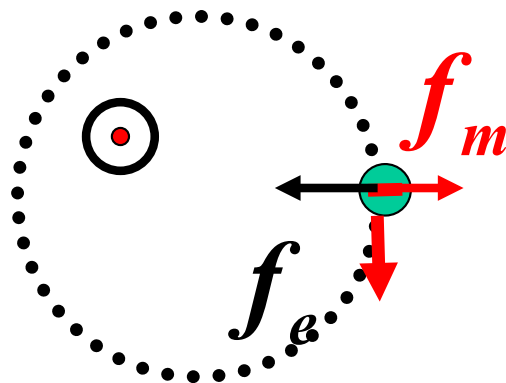
$$\vec{B}_0 = 0$$

$$f_e = m r \omega_0^2$$

$$\vec{B}_0 \neq 0$$

$$f_m + f_e = m r \omega^2$$

$$\omega > \omega_0 \quad I' > I$$



产生附加磁矩  $\Delta \vec{m}$

与外磁场方向相反

$$\omega < \omega_0 \quad I' < I$$

