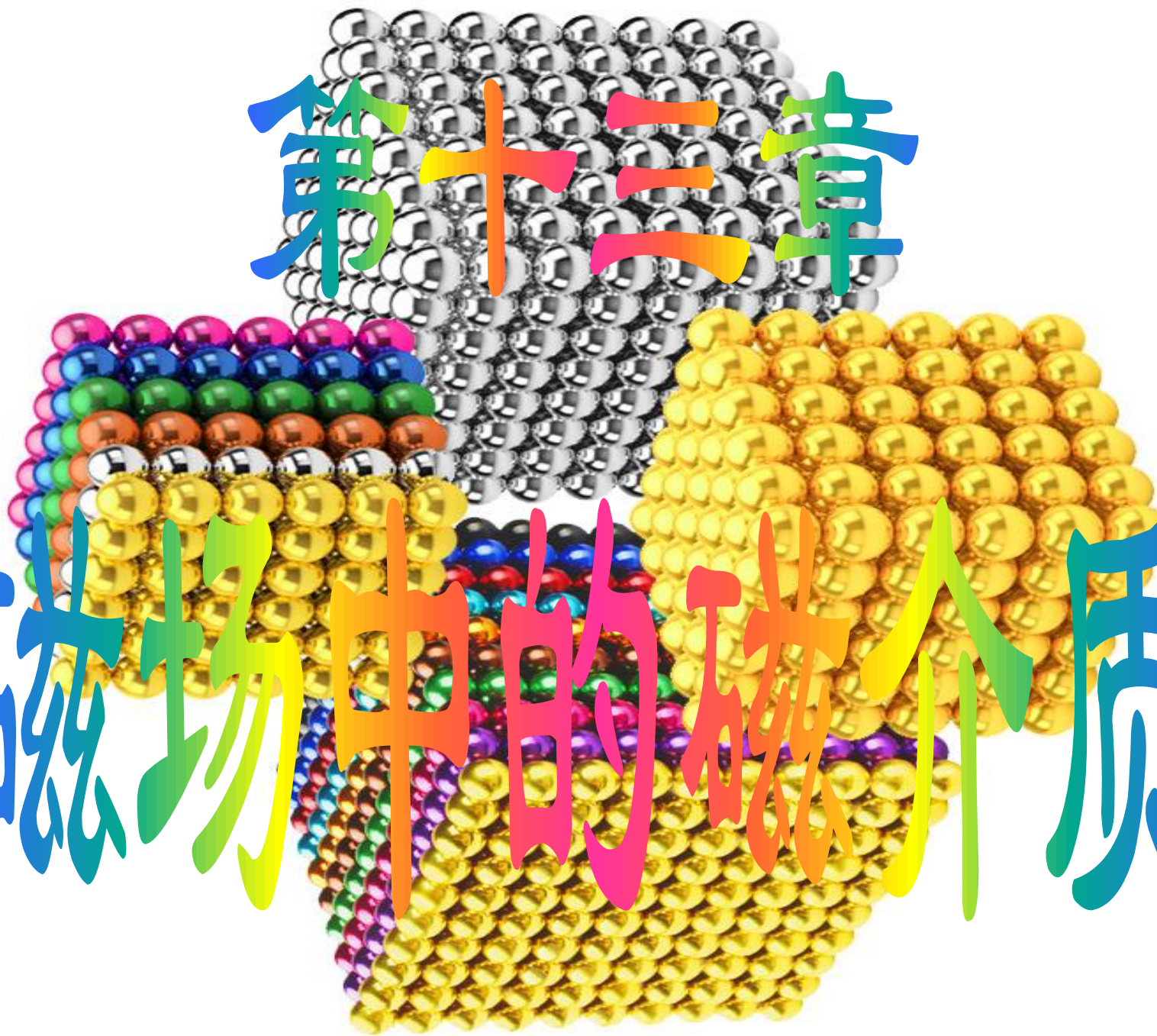


第十三章

磁场中的磁介质



13-1&2 磁介质

一、磁介质的分类

磁介质——能与磁场产生相互作用的物质

磁 化——磁介质在磁场作用下所发生的变化

磁导率——描述不同磁介质磁化后对原外磁场的影响

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad \vec{B}': \text{附加磁场}$$

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad \mu_r: \text{相对磁导率}$$

根据 \vec{B}' 的大小和方向对磁介质进行分类:

(1) 顺磁质 $B > B_0$ 如: O_2 、Al、Mn、N

(2) 抗磁质 $B < B_0$ 如: Cu、 H_2 、Hg、S

(3) 铁磁质 $B \gg B_0$ 如: Fe、Co、Ni

(4) 超导体 I型超导体 $B = 0$, II型超导体 $B \neq 0$

① 弱磁质: 顺磁质 & 抗磁质

② 强磁质: 铁磁质

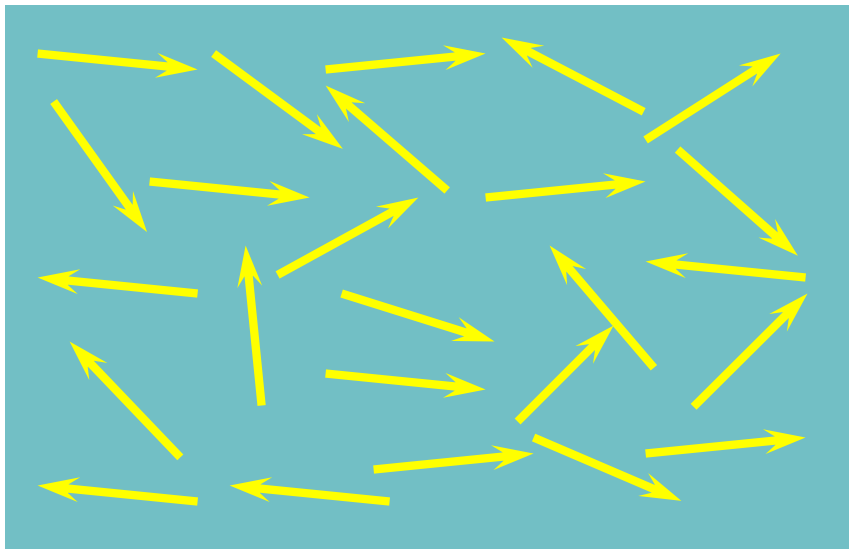
二、顺磁质与抗磁质的磁化

分子电流——等效于圆电流

分子固有磁矩(电子的轨道磁矩和自旋磁矩、核磁矩)

1、顺磁质的磁化

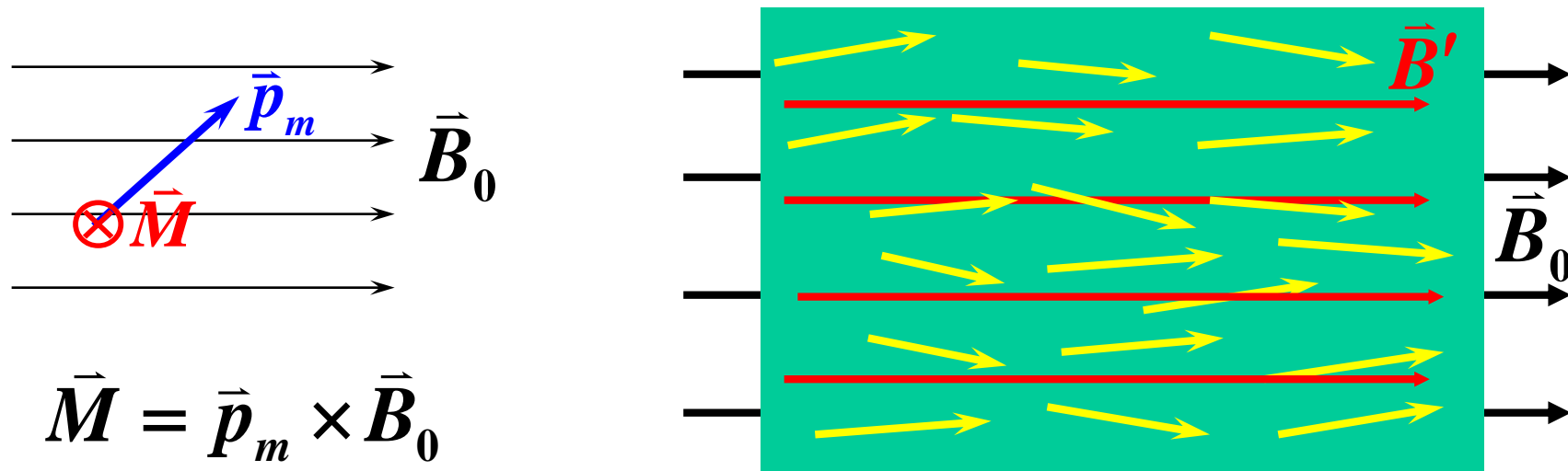
分子的固有磁矩 $\vec{p}_m \neq 0$



无外磁场作用时，由于分子的热运动，分子磁矩取向各不相同，整个介质不显磁性。

$$\sum \vec{p}_m = 0$$

有外磁场时，分子磁矩要受到一个力矩的作用，使分子磁矩转向外磁场的方向。



分子磁矩产生的附加磁场方向和外磁场方向一致，顺磁质磁化的结果，使介质内部磁场增强。

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

2、抗磁质及其磁化

抗磁质分子的固有磁矩为零 $\sum \vec{p}_m = 0$

在外磁场作用下，抗磁质分子会产生附加磁矩 $\Delta \vec{p}_m$

$\Delta \vec{p}_m$ 总与外磁场 \vec{B}_0 反向，其附加磁场 \vec{B}' 与 \vec{B}_0 亦反向，故抗磁质内部磁感应强度 $B = B_0 - B' < B_0$

在外磁场中，电子绕核运动产生的附加磁矩总是与外磁场反向，削弱外磁场的作用。这种附加磁矩是所有物质都有的，故抗磁性是一切磁介质共同具有的特性。

电介质

无极分子

有极分子

分子电偶极矩 \vec{p}_e

无外场 $\vec{p}_e = 0$

无外场 $\vec{p}_e \neq 0$

位移极化

转向极化为主
包含位移极化

极化电荷

附加电场

内部电场减弱

磁介质

抗磁质

顺磁质

分子磁矩 \vec{p}_m

无外场 $\vec{p}_m = 0$

无外场 $\vec{p}_m \neq 0$

附加磁矩 $\Delta\vec{p}_m$

取向磁化为主
包含抗磁性

磁化电流

附加磁场

内部磁场减弱

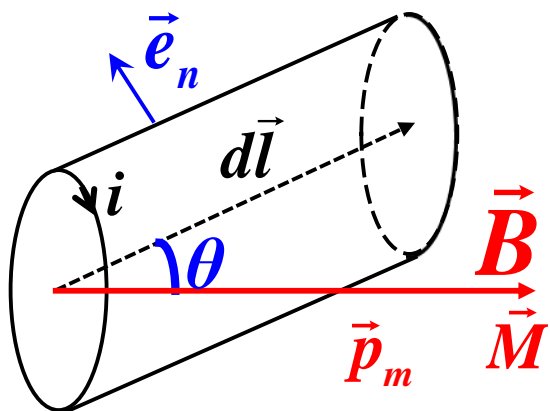
内部磁场加强

三、磁化强度

1. 磁化强度 $\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} \quad A \cdot m^{-1}$

2. 磁化强度与磁化电流的关系

(1) 磁化面电流密度等于磁化强度沿介质表面的分量。



i : 分子电流

a : 分子电流半径

n : 分子数密度

\vec{e}_n : 外法线方向单位矢量

环绕 $d\vec{l}$ 的分子电流

$$dI' = n \cdot \pi a^2 dl \cos \theta \cdot i = n p_m dl \cos \theta = M \cos \theta \cdot dl = M_l dl$$

在磁介质表面，分子电流形成磁化面电流。

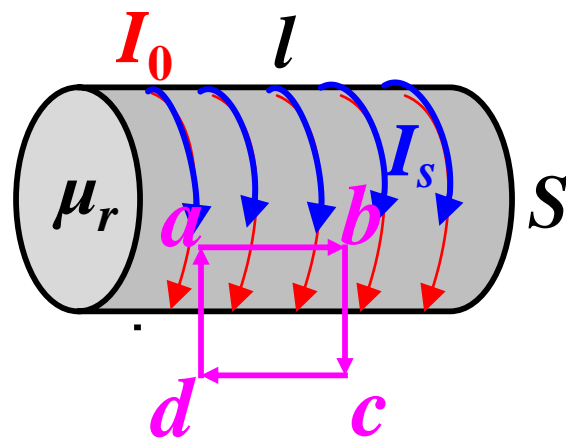
$$j_s = \frac{dI_s}{dl} = M_l \qquad \vec{j}_s = \vec{M} \times \vec{e}_n$$

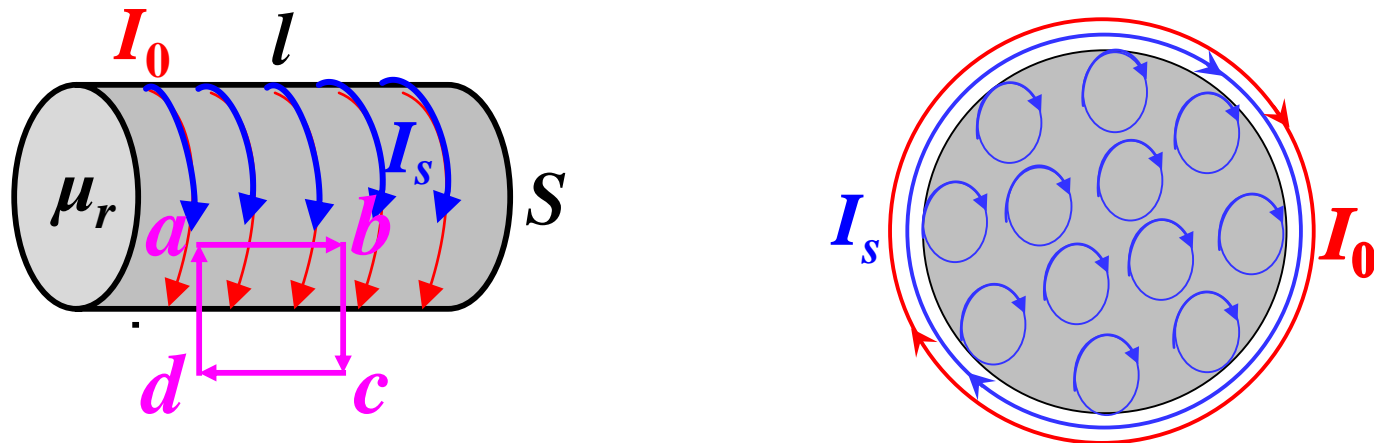
j_s ：沿轴线单位长度上的磁化电流

(2) 磁化强度对闭合回路 L 的线积分，等于穿过以 L 为周界的任意曲面的磁化电流的代数和。

以长直螺线管为例，做一说明。

螺线管长 l ，截面 S ，通电流 I_0 ，内部填充均匀顺磁质，取如图所示的积分环路 $abcd$ 。





顺磁质被磁化后，分子磁矩与外磁场趋于一致，故分子电流与 I_0 同向，在顺磁质表面形成顺时针方向的磁化电流。

$$\left| \sum \vec{p}_m \right| = j_s l S \quad M = |\vec{M}| = \frac{\left| \sum \vec{p}_m \right|}{\Delta V} = \frac{j_s l S}{l S} = j_s$$

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = M \overline{ab} = j_s \overline{ab} = \sum I_s$$

13-3 磁介质中的磁场 磁场强度

一、磁介质中的高斯定理

传导电流和磁化电流产生的磁感应线都是无头无尾的闭合曲线，所以对任意闭合曲面 S 有

$$\oint_S \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} = 0, \quad \oint_S \vec{B}' \cdot d\vec{S} = 0$$

在有介质存在的情况下，磁场中的高斯定理表示为：

$$\oint_S (\vec{B}_0 + \vec{B}') \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

二、磁介质中的安培环路定理

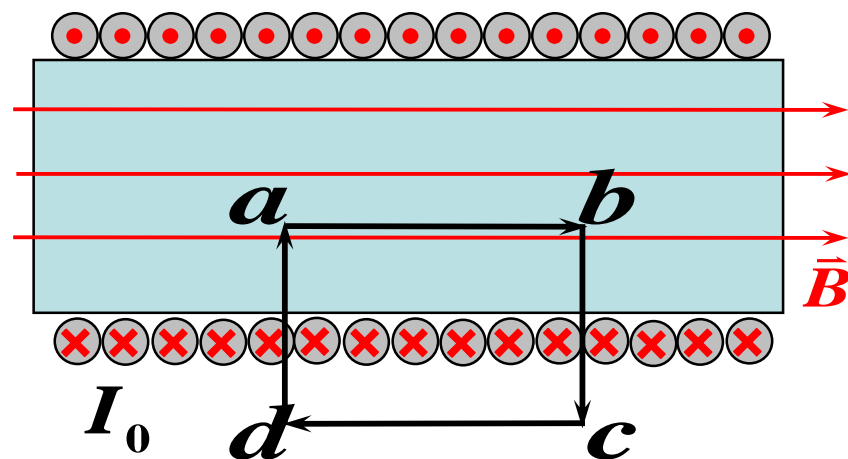
磁介质中
$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0i} + I_s)$$

以无限长直螺线管为例，管内顺磁质 μ_r ，通电流 I_0 ，单位长度有 n 匝，磁介质表面每单位长度的磁化电流为 nI_s ，取图示矩形回路，令 ab 为单位长度，则有：

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 n (I_0 + I_s)$$

$$\because B_0 = \mu_0 n I_0 \quad B' = \mu_0 n I_s$$

顺磁质： $B = B_0 + B' = \mu_r B_0$



$$\therefore \mu_0 n(I_0 + I_s) = \mu_r(\mu_0 n I_0) = \mu n I_0$$

$$\therefore \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 n(I_0 + I_s) = \mu_r(\mu_0 n I_0) = \mu n I_0$$

$$\text{令 } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \rightarrow \text{磁场强度}$$

$$\text{则 } \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0i}$$

恒定磁场中，磁场强度沿任一闭合路径的线积分（即磁场强度的环流）等于环路所包围的传导电流的代数和。
——磁介质中的安培环路定理

磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\sum I_{0i} + \sum I_s)$$

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

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0i}$$

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{j}_s = \vec{M} \times \vec{e}_n$$

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum I_s$$

电介质中的高斯定理

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum (q + q'_i)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_e dV$$

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\sigma' = \vec{P} \cdot \vec{e}_n$$

$$\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} = -\sum q'_i$$

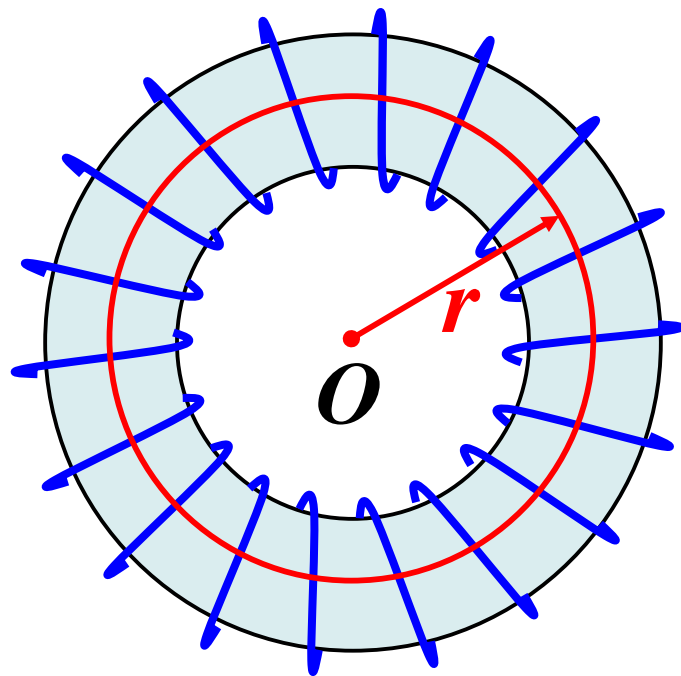
例1. 一环形螺线管内充满磁导率为 μ 的顺磁质，横截面半径远小于环的半径。单位长度上的导线匝数为 n 。

求：环内的磁场强度和磁感应强度。

解： $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = NI$

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

$$B = \mu H = \mu nI$$



例2 一无限长载流圆柱体，磁导率为 μ ，柱外为真空，
电流 I 均匀分布在整個横截面上。

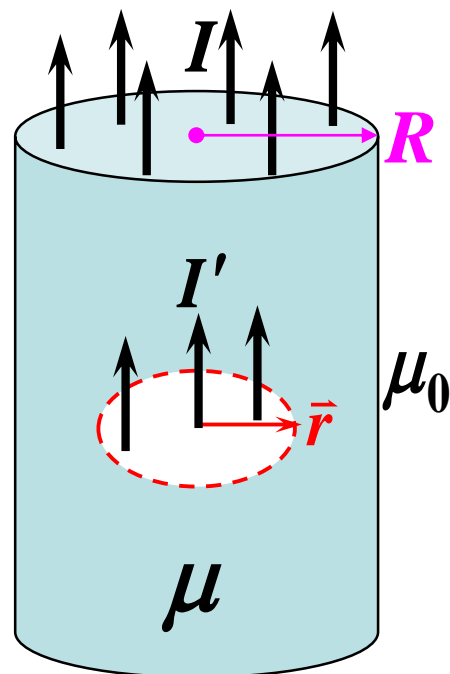
求：柱内外各区域的磁场强度和磁感应强度。

解： $r < R$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r$$

$$\sum I = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r^2$$

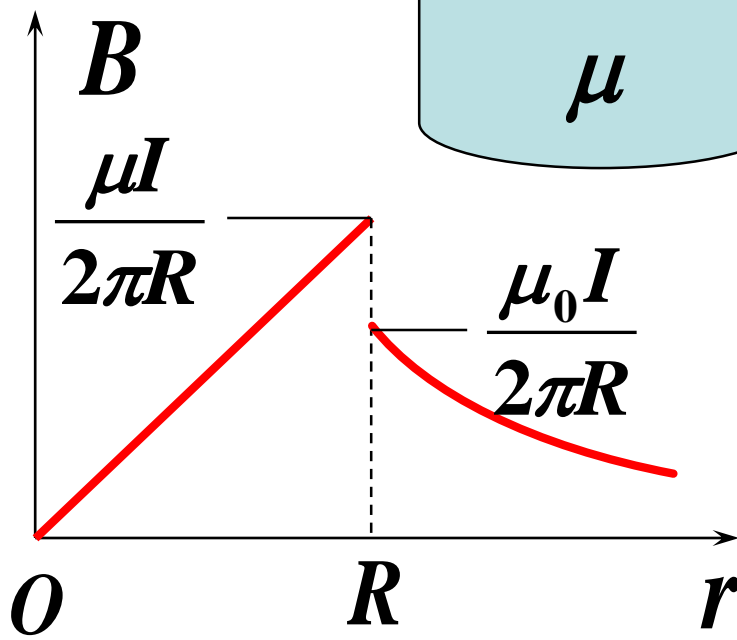
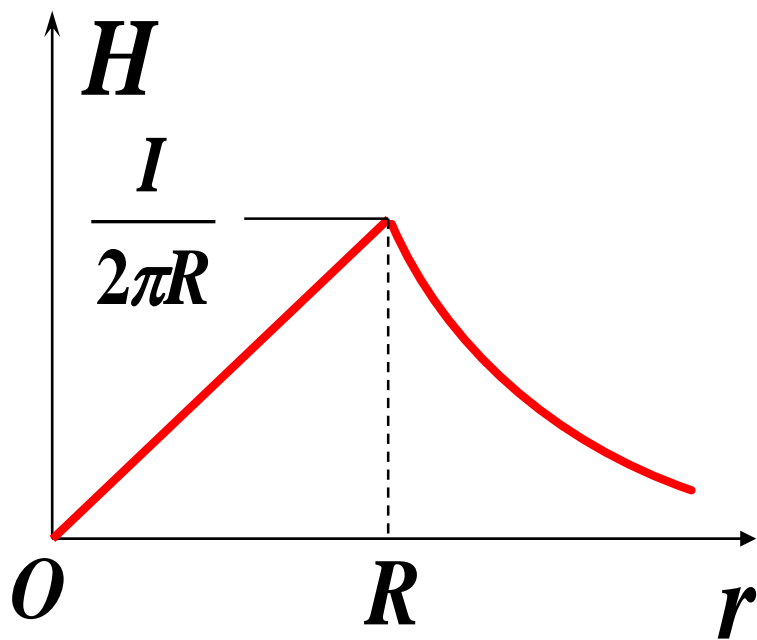
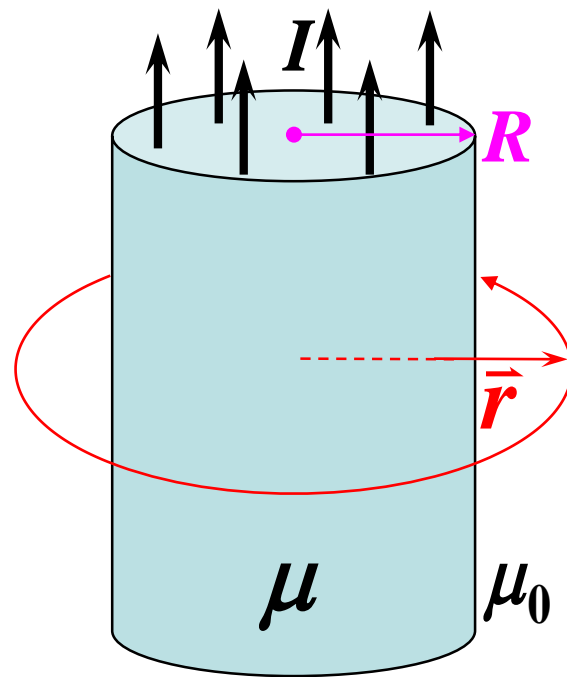
$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2} \quad B = \frac{\mu I r}{2\pi R^2}$$



$$r > R \quad H 2\pi r = I$$

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

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



在分界面上 H 连续, B 不连续

得分	
评卷人	

4. 一无限长圆柱形直铜导线，横截面积的半径为 R ，线外包有一层相对磁导率为 μ_r 的不导电的各向同性均匀磁介质，层厚为 d ，导线中通有电流 I ， I 均匀地分布在导线的横截面上，试求

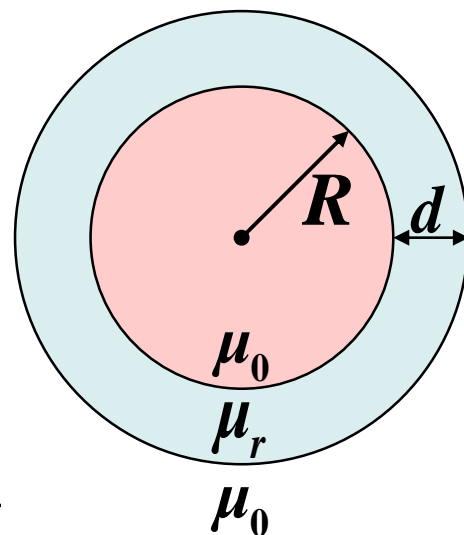
- (1) 离导线轴线为 r 处的 \vec{H} 和 \vec{B} 的大小；
- (2) 介质内表面的磁化电流面密度(设铜的相对磁导率为 1)。

(1) 由介质中的安培环路定理可求得

$$r < R \quad H = \frac{Ir}{2\pi R^2} \quad B = \frac{\mu_0 Ir}{2\pi R^2}$$

$$R < r < R + d \quad H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$

$$r > R + d \quad H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



$$(2) \quad \vec{j}_s = \vec{M} \times \vec{e}_n \quad \text{而} \quad \vec{M} = \chi_m \vec{H} = (\mu_r - 1) \vec{H}$$

$$\therefore \text{介质内表面 } j_s = M = (\mu_r - 1)H = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R}$$

方法二：

磁介质内表面有均匀的磁化面电流 I_s (均匀圆柱面电流)

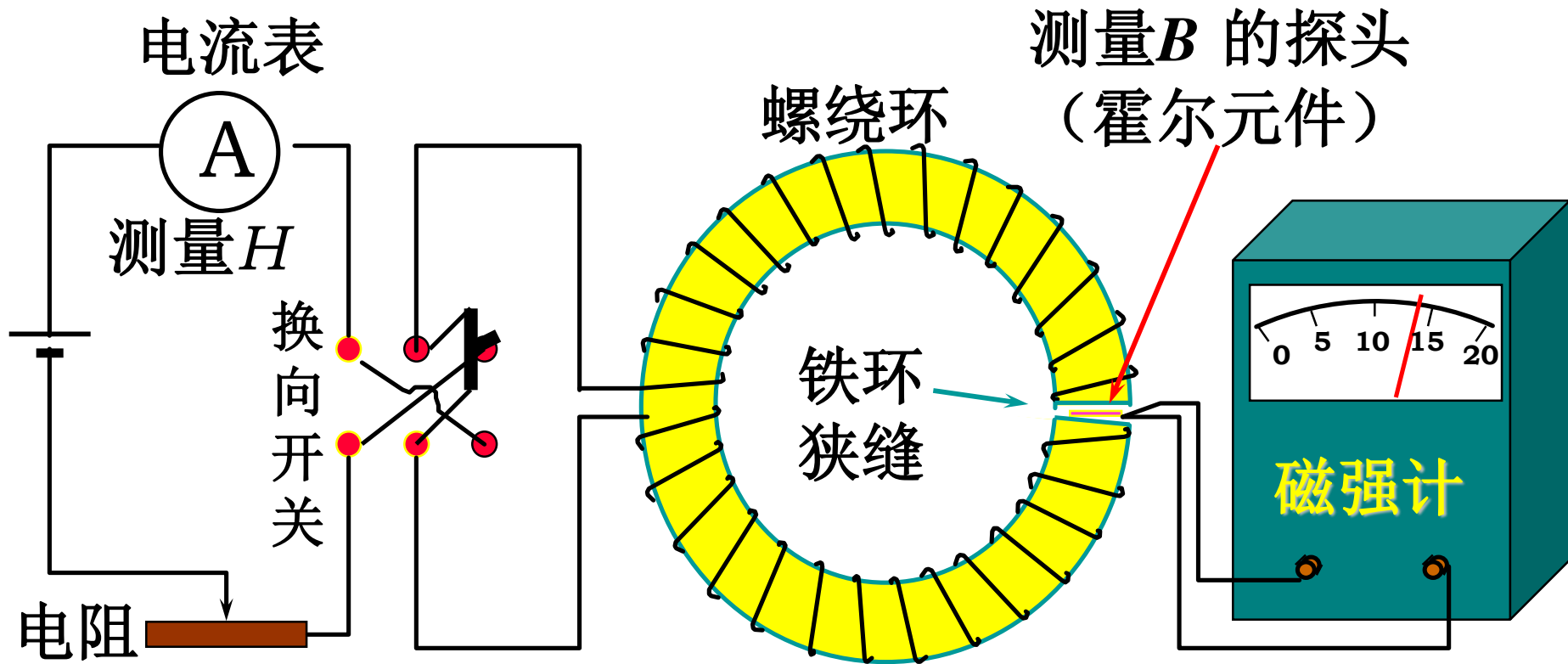
$$\text{磁介质内 } \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_s \quad \text{即} \quad \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} + \frac{\mu_0 I_s}{2\pi r}$$

$$\therefore \quad I_s = (\mu_r - 1)I$$

$$j_s = \frac{I_s}{2\pi R} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R}$$

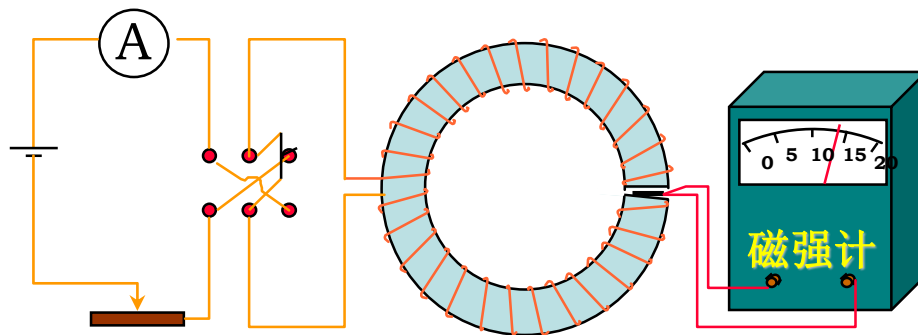
13-4 铁磁质

测量磁化曲线、磁滞回线的实验装置



一、磁化曲线

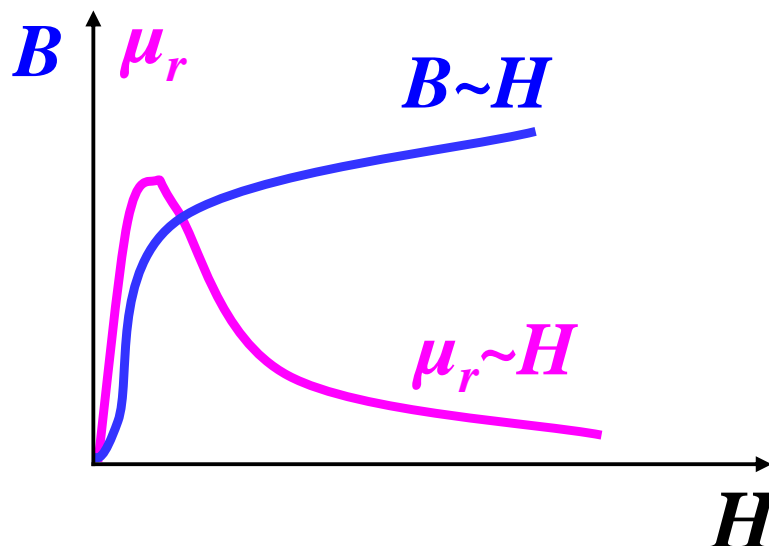
实验原理



设励磁电流为 I ，则 $H = \frac{NI}{2\pi R} = nI$

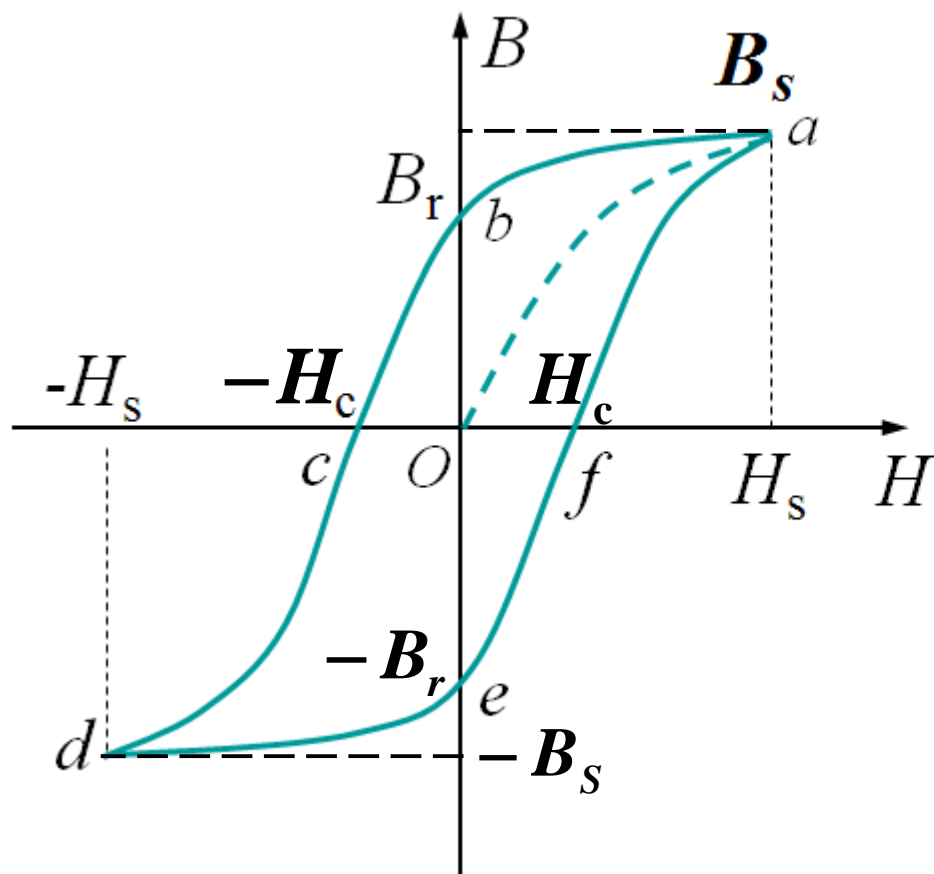
磁强计：用霍尔元件测量 B

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



铁磁质的 μ_r 不是常量，它是 H 的函数。

二、磁滞回线



Oa : 起始磁化曲线

B_s : 饱和磁感应强度

B_r : 剩余磁感应强度

H_c : 矫顽力

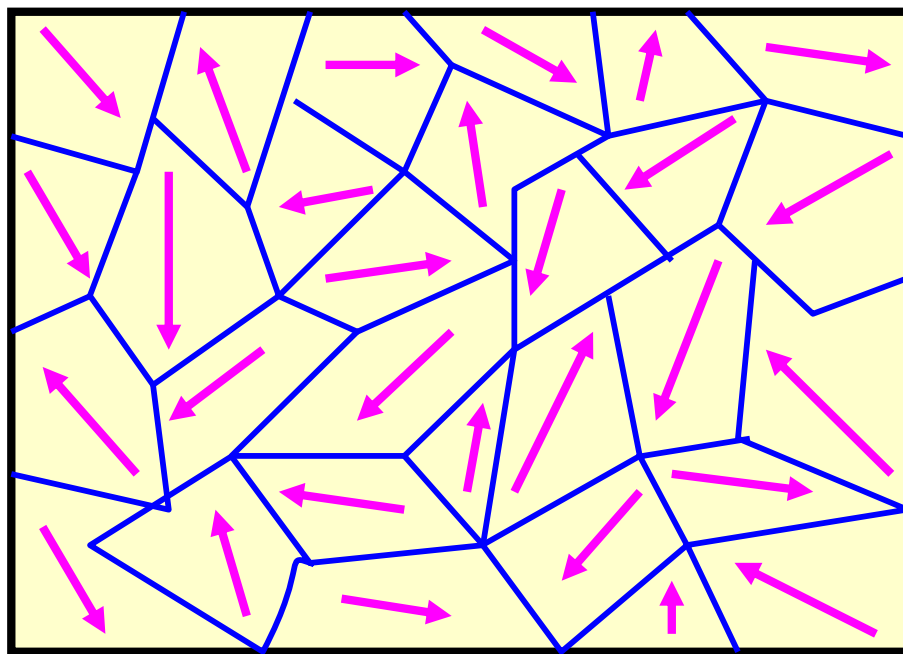
B 的变化落后于 H ，从而具有剩磁，即磁滞效应。

每个 H 对应不同的 B ，与磁化的历史有关。

三、磁畴

根据现代理论，铁磁质相邻原子的电子之间存在很强的“**交换耦合作用**”，使得在无外磁场作用时，电子自旋磁矩能在小区域内自发地平行排列，形成自发磁化达到饱和状态的微小区域。

这些小区域称为**磁畴**，体积约为 $10^{-10} \sim 10^{-8} m^3$ ，约有 $10^{17} \sim 10^{21}$ 个原子。



用磁畴理论可以解释铁磁质的磁化过程、磁滞现象、磁滞损耗以及居里点。

临界温度(铁磁质的居里点)

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。

不同铁磁质具有不同的转变温度，如：

铁为 $1040K$ ，钴为 $1390K$ ， 镍为 $630K$

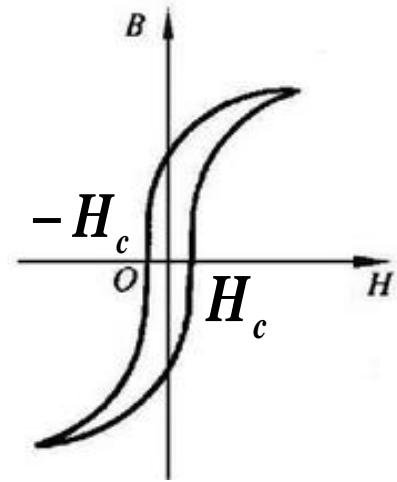
铁磁质的特性：

1. 磁导率 μ 不是一个常量，它的值不仅决定于原线圈中的电流，还决定于铁磁质样品磁化的历史。
 B 和 H 不是线性关系。
2. 相对磁导率很大，可以使磁场增强 $10^2 \sim 10^4$ 倍。
3. 有剩磁、磁饱和及磁滞现象。
4. 磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。
5. 温度超过居里点时，铁磁质转变为顺磁质。
6. 在交变磁场作用下，有磁致伸缩现象。

四、铁磁质的分类及其应用

(1) 软磁材料

纯铁、硅钢、坡莫合金、
超坡莫合金、铁氧体等

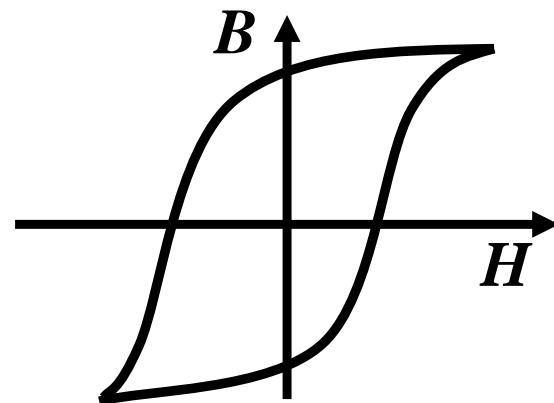


μ_r 大，易磁化、易退磁（起始磁化率大）。饱和磁感应强度大，矫顽力(H_c)小，磁滞回线的面积窄而长，磁滞损耗小（磁滞回线面积小）。

通常用作变压器、继电器、电磁铁的铁芯，还用作电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

(2)硬磁材料——作永久磁铁

钨钢，碳钢，铝镍钴合金
矫顽力(H_c)大，剩磁 B_r 大
磁滞回线的面积大，损耗大。

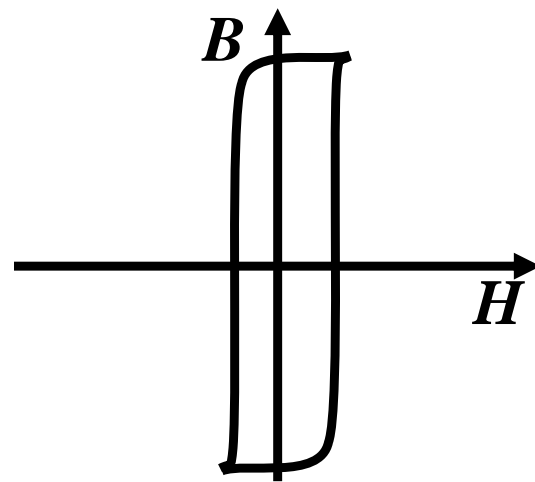


还用于磁电式电表中的永磁铁。
耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

(3)矩磁材料——作存储元件

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。