

§ 2-4 磁介质、铁磁质

一、磁介质及其分类

磁介质——在磁场作用下，其内部状态发生变化，并反过来影响磁场分布的物质

磁化——磁介质在磁场作用下所发生的变化

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

附加磁场

根据 \vec{B}' 的大小和方向可将磁介质分类

还可根据 $B/B_0 = \mu_r$ 来分类

μ_r ——相对磁导率，反映磁介质对原场的影响程度，只与磁介质的种类有关

磁介质的分类:

抗磁质 $\mu_r < 1$ $B < B_0$ 减弱原场

如 锌、铜、水银、铅、金、银、氯等

顺磁质 $\mu_r > 1$ $B > B_0$ 增强原场

如 锰、铬、铂、氧、氮等

弱
磁
性
物
质

顺磁质和抗磁质的相对磁导率都非常接近于1。

铁磁质 $\mu_r \gg 1$ ($10^2 \sim 10^4$) $B \gg B_0$ 通常不是常数

具有显著的增强原磁场的性质 —— 强磁性物质

如 铁、钴、镍等及它们的氧化物，还有铁氧体等

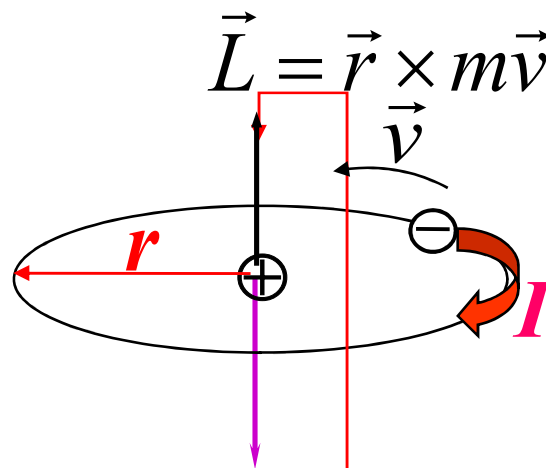
二、介质的磁化机理

1、电子的磁矩

(1) 轨道磁矩

电子以速率 v 运动 \rightarrow 载流线圈

电流强度 $I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$ 磁矩



$$\vec{m} = IS\vec{n}$$

$$|\vec{m}| = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{evr m_e}{2 m_e} = \frac{e}{2m_e} L$$

与量子力学结果相同。

(2) 自旋磁矩

$$m_{\text{自}} = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\hbar}{2}$$

电子自旋

$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$m_{\text{自}} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$$

玻尔磁子

除此外，还有核的自旋磁矩

2、“分子电流”模型

原子分子磁矩 $\vec{m}_{\text{总}} = \sum \vec{m}_i$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{电子轨道磁矩} \\ \text{电子自旋磁矩} \\ \text{核自旋磁矩} \end{array} \right.$ 小3个数量级（常略去）

讨论磁介质时，将原子分子等效于一个具有固有磁矩的圆电流，称为分子电流。

$$\vec{m} = I S \vec{n}$$

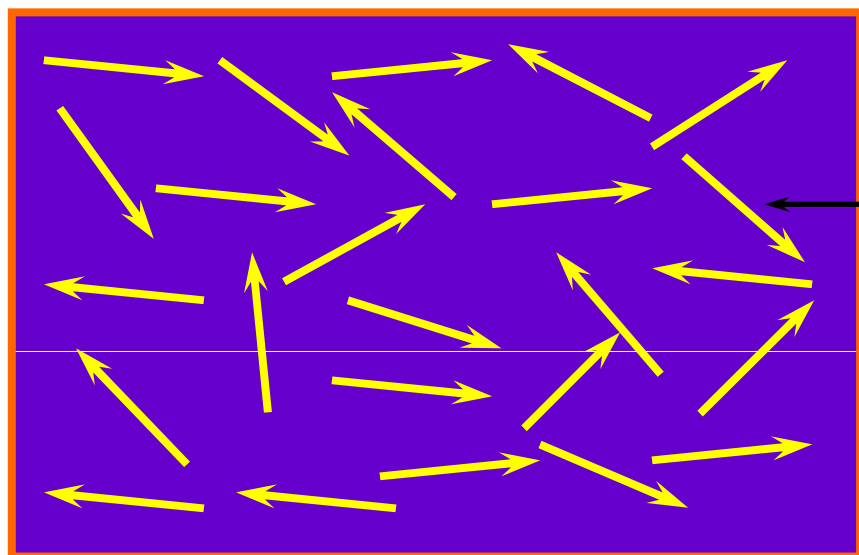
分子电流

原子	$\sum \vec{m}_i$	特点
He	0	满壳层
Ne	0	满壳层
H	9.27×10^{-24}	最外层1个电子
Na	9.27×10^{-24}	最外层1个电子
Fe、Co、Ni	20.4×10^{-24}	最外层2个电子

3、介质的磁化机理

顺磁质及其磁化

每个分子的固有磁矩不为零 $\vec{m} \neq 0$

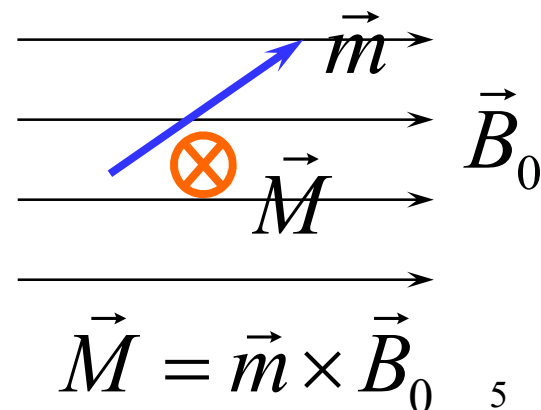


分子
磁矩

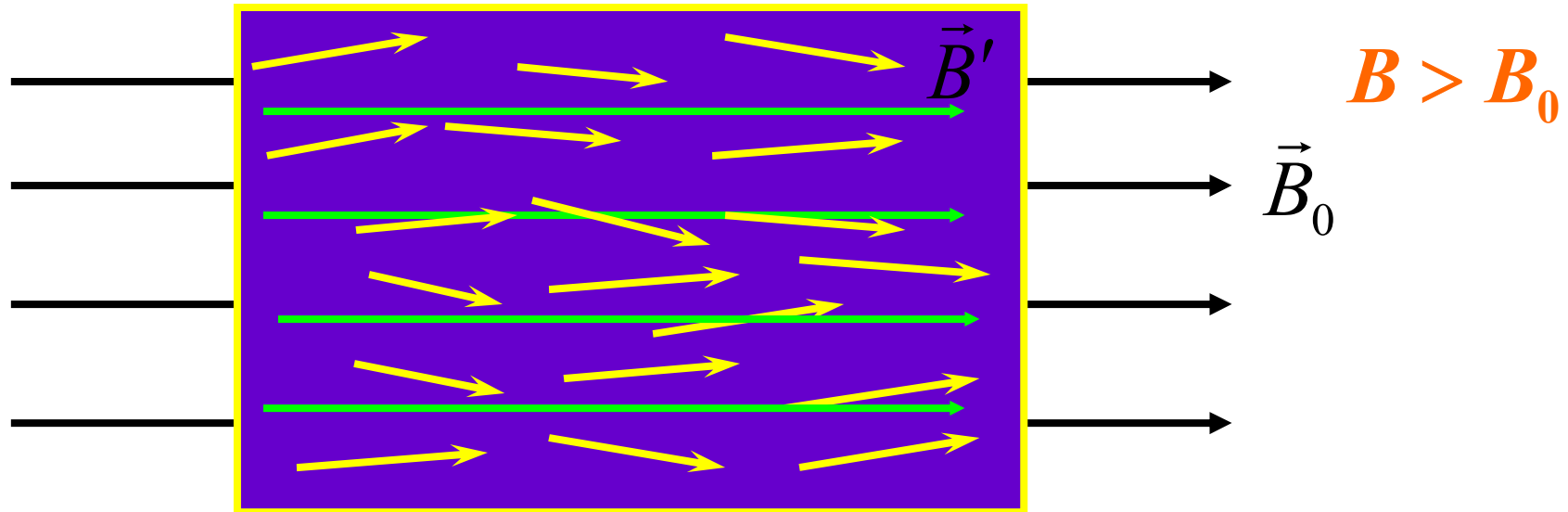
无外磁场作用时，由于分子的热运动，分子磁矩取向各不相同，整个介质不显磁性。

$$\sum \vec{m} = 0$$

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。



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



说明：分子转向，穿过圆电流的正向磁通量增加，
会产生反向感应电流，引起反向磁场，但，
这种影响只是 B' 的万分之一。

抗磁质及其磁化

分子的固有磁矩为零

$$\sum \vec{m} = 0$$

在外磁场中，抗磁质分子会产生附加磁矩

外磁场作用下产生
附加磁矩



总与外磁场
方向反向

电子的附加磁矩总是削弱外磁场的作用。

$$B < B_0$$

抗磁性是一切磁介质共同具有的特性。

三、有磁介质时的安培环路定理

1. 束缚电流

定义：磁化强度

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m} + \sum \Delta \vec{m}}{\Delta V}$$

磁化强度越强，反映
磁介质磁化程度越强

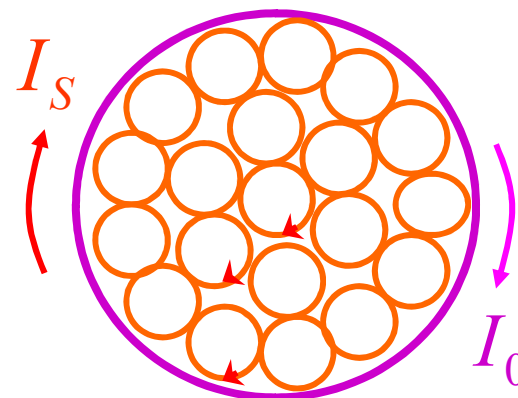
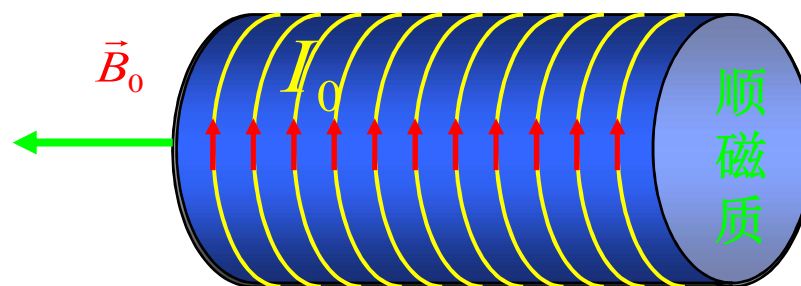
在磁介质内部的任一小区域：

相邻的分子环流的方向相反

在磁介质表面处各点：分子环流未被抵消

形成沿表面流动的面电流 I_S ——束缚电流（磁化面电流）

以无限长螺线管为例



可证明:

$$M = \frac{\sum m}{\Delta V} = i_s \quad \text{——束缚电流密度}$$

即单位长度上的电流

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

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

结论：磁介质中的磁场是由传导电流和束缚电流共同产生的。

$$\text{磁场规律} \begin{cases} \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I \\ \phantom{\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l}} = \mu_0 \sum (I_0 + I_s) \end{cases}$$

2、磁介质中的安培环路定理

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

$$\because \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_s \quad \therefore \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

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

定义**磁场强度** $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 单位: 安培/米(A/m)

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

磁场强度沿任一闭合路径的环流等于该闭合路径所包围的自由电流的代数和。

对于均匀各向同性介质，在外磁场不太强的情况下

磁场强度、磁感应强度、磁化强度的关系

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad \chi_m \text{ — 介质的磁化率}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad \mu_0 \mu_r = \mu \quad \text{介质的磁导率}$$

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

一定条件下，可用安培环路定理求解磁场强度，然后再求解磁感应强度。

磁介质中的 安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \sum_L I_s$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

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

$$\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

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

电介质中的 高斯定理

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S (q_i + q_i')$$

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S q_i - \frac{1}{\epsilon_0} \oiint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$$\oiint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \sum_S q_i$$

$$\vec{D} \equiv \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\boxed{\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho_e dV}$$

$\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$ 之间的关系

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

$$\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

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

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

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

μ_r 称为相对磁导率

$\mu = \mu_0 \mu_r$ 磁导率

$\vec{P}, \vec{D}, \vec{E}$ 之间的关系

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{D} \equiv \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\epsilon_r = (1 + \chi_e)$$

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

ϵ_r 称为相对电容率
或相对介电常数

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

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

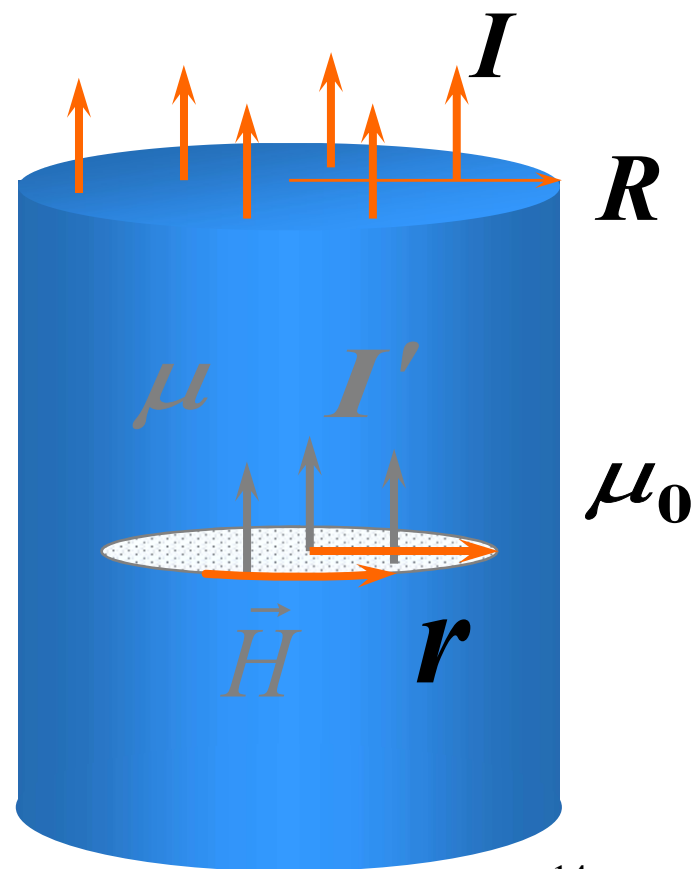
求：柱内外各区域的磁场强度和磁感应强度。

解： $r < R$

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

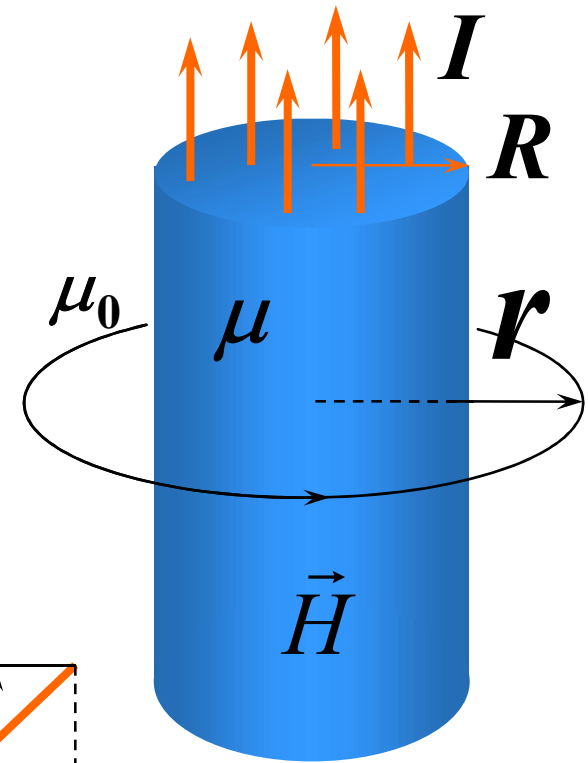
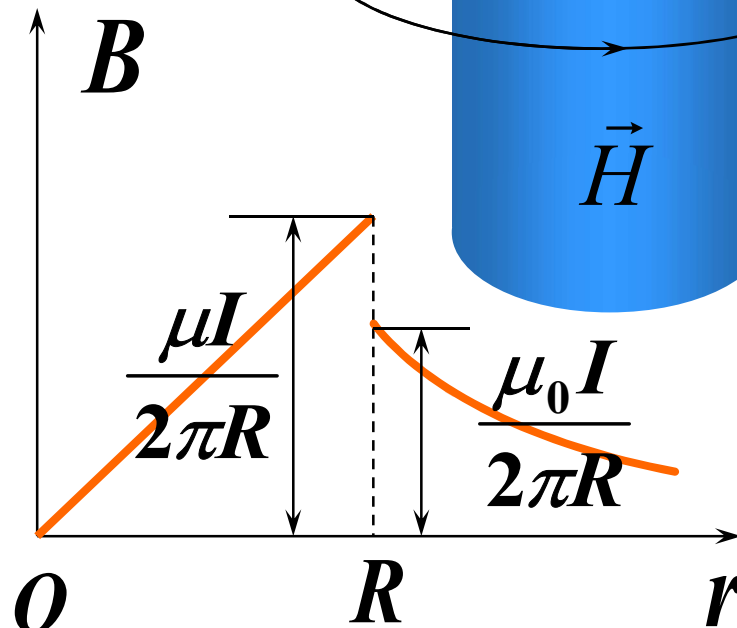
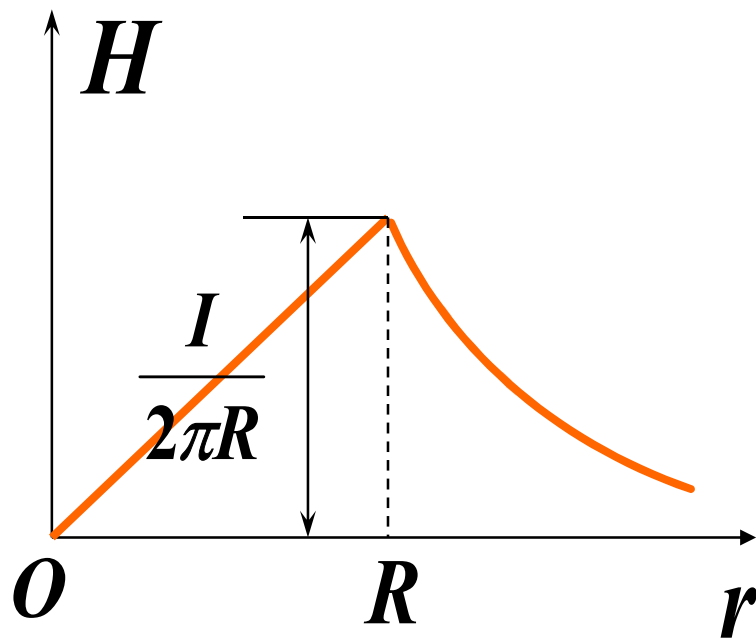
$$= \frac{r^2}{R^2} I$$

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



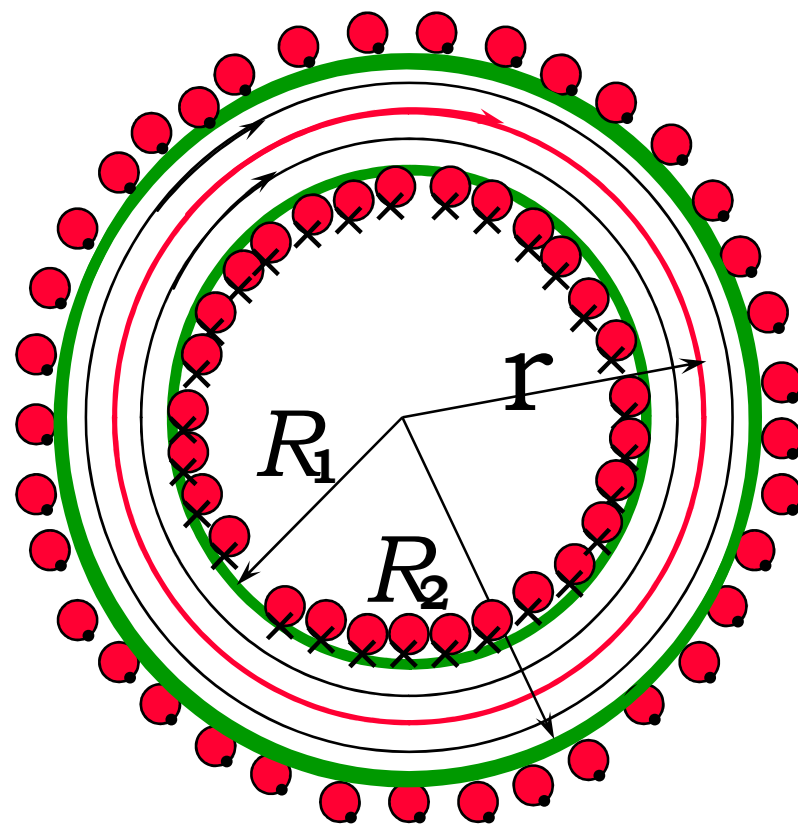
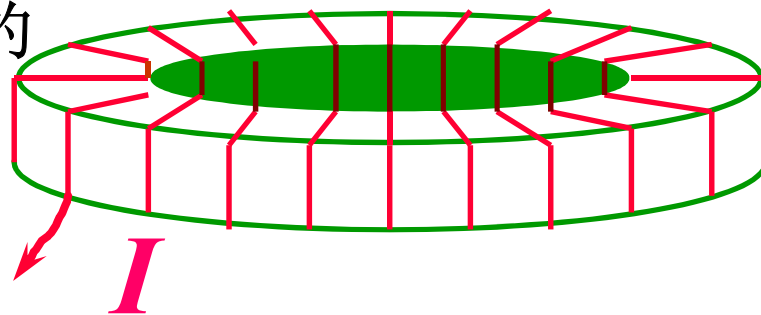
$$r > R \quad H 2\pi r = I$$

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



在分界面上 H 连续, B 不连续

例 在均匀密绕的螺绕环内充满均匀的顺磁质，已知螺绕环中的传导电流为 I ，单位长度内匝数为 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: $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = NI$

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

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

* 四、铁磁质

铁磁质的特性

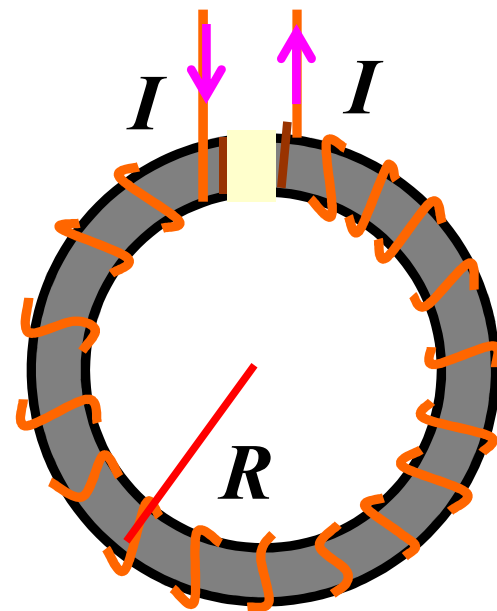
1. 磁导率 μ 不是一个常量，它的值不仅决定于原线圈中的电流，还决定于铁磁质样品磁化的历史。
 B 和 H 不是线性关系。
2. 有很大的磁导率。
放入磁场中时可以使磁场增强 $10^2 \sim 10^4$ 倍。
3. 有剩磁、磁饱和以及磁滞现象。
4. 温度超过居里点时，铁磁质转变为顺磁质。
5. 在不太强的磁场中，就可以磁化到饱和状态。

铁磁质的磁化规律

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

原理: 励磁电流 I ;

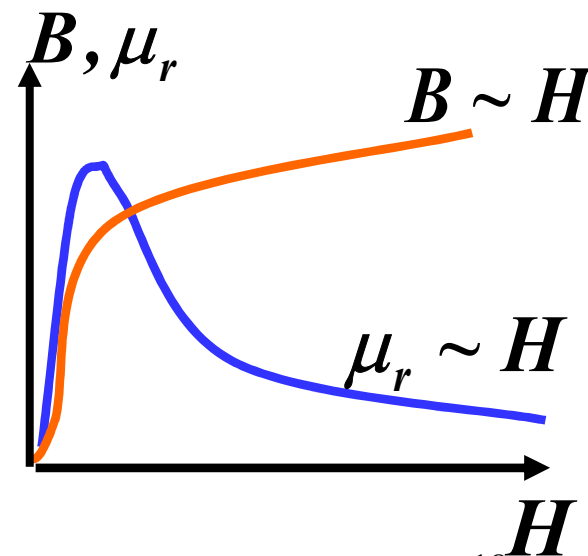
用安培环路定理得 H
$$H = \frac{NI}{2\pi R} = nI$$



实验测量 B , 如用感应电动势测量或用小线圈在缝口处测量;

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

铁磁质的 μ_r 不一定是个常数, 它是 \vec{H} 的函数

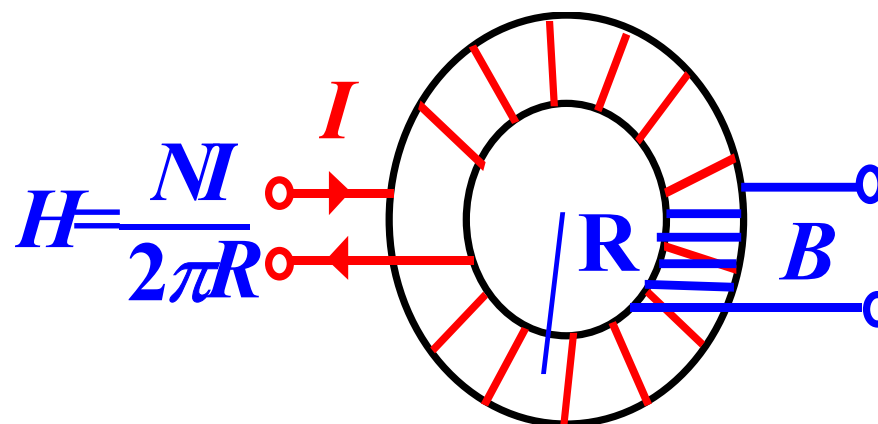
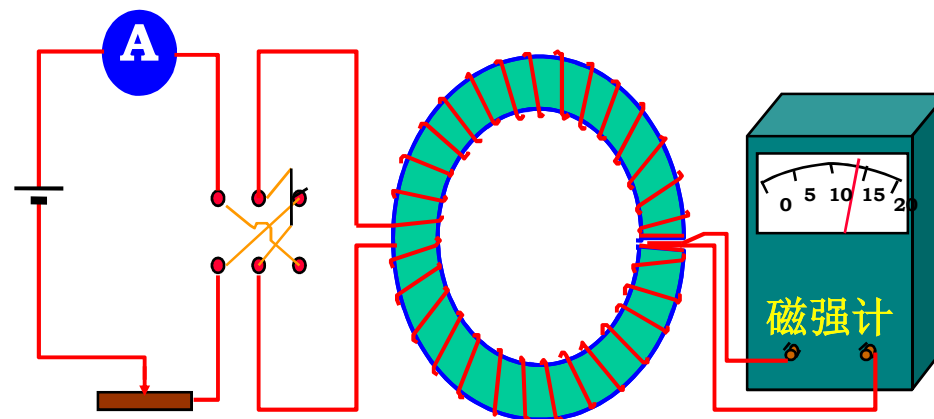


电流的大小和方向
可以改变

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

磁强计
测量介质内
磁感应强度

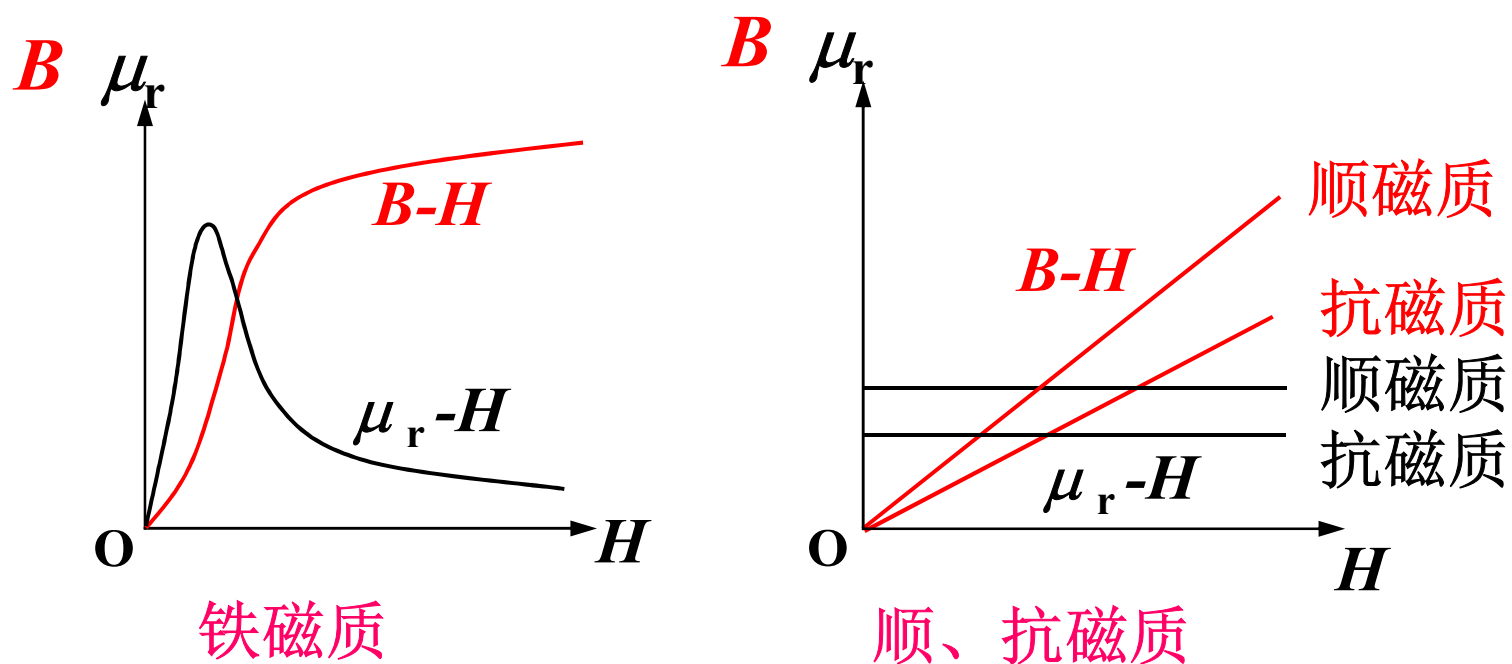
$$B = \mu_r \mu_0 H$$

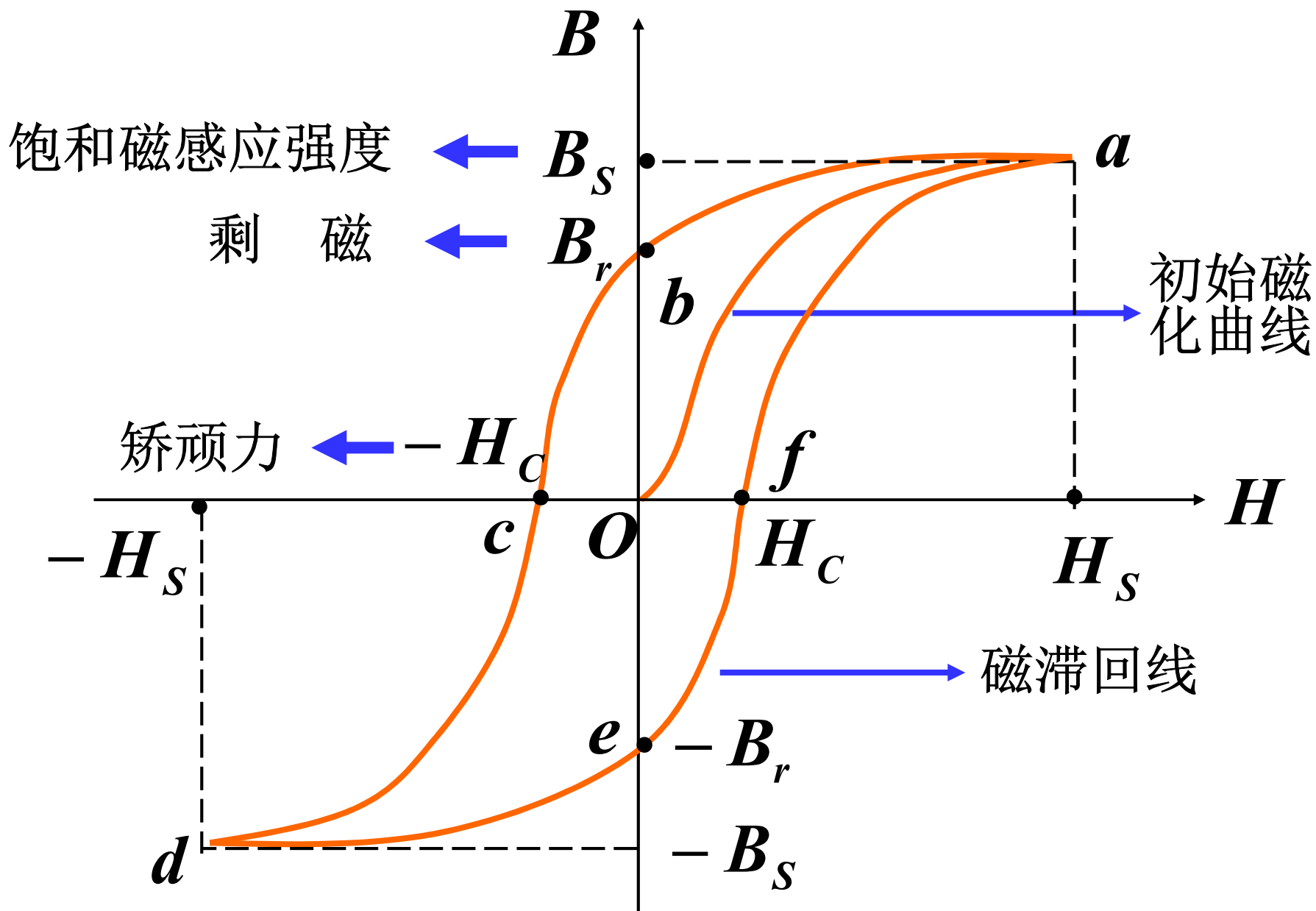


H 代表外加磁场

B 代表介质内磁场

由实验测量 B 和 I ， 得 $B-H$ 曲线。

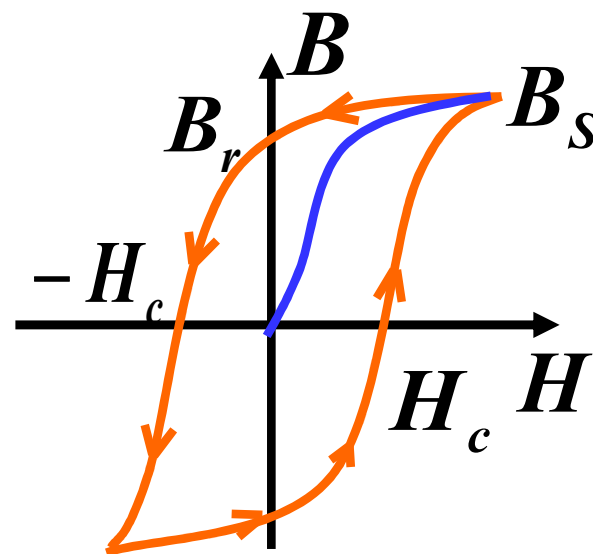




磁化曲线—— H - B 关系曲线，表示样品的磁化特点

磁滞回线—铁磁质的磁化过程是不可逆过程

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。



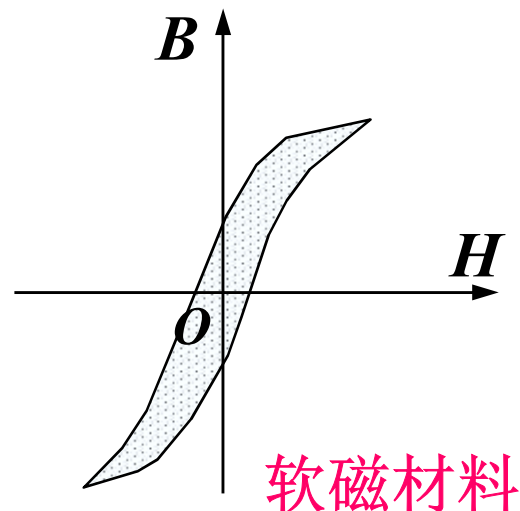
在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高的磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

铁磁体与铁电体类似；在交变场的作用下，它的形状会随之变化，称为磁致伸缩（ 10^{-5} 数量级）它可用做换能器，在超声及检测技术中大有作为。

铁磁质的应用

(1)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）。

还用于继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

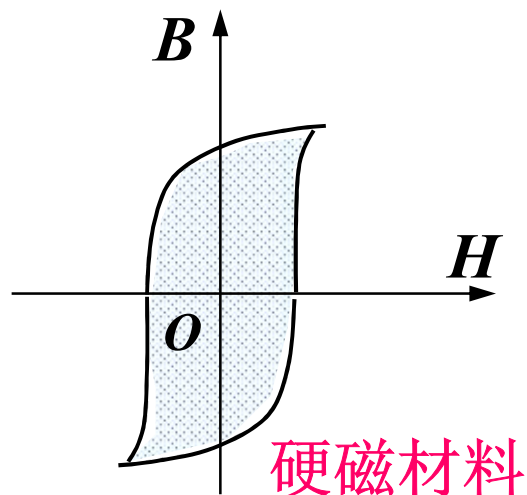
(2)作永久磁铁的硬磁材料

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。



(3)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。

