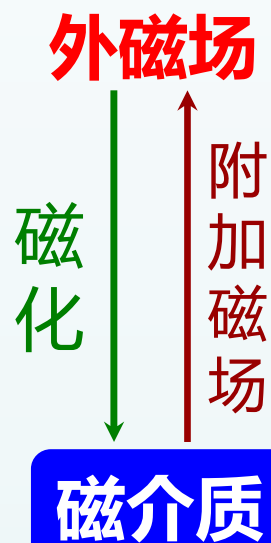


回顾



顺磁质

$\chi_m > 0$ $\mu_r > 1$ $\vec{P}_{m_i} \neq 0$ (分子固有磁矩)

顺磁质磁化后, 增强磁场

磁化微观解释: \vec{P}_{m_i} 排列整齐了

抗磁质

$\chi_m < 0$ $\mu_r < 1$ $\vec{P}_{m_i} = 0$

抗磁质磁化后, 减弱磁场

磁化微观解释: 感应磁矩 $\Delta\vec{P}_{m_i}$

铁磁质

$\chi_m \gg 0$ $\mu_r \gg 1$ $\vec{P}_{m_i} \neq 0$

铁磁质磁化后, 大大增强磁场

磁化微观解释: ??

磁介质和电介质的类比

磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I + \mu_0 \sum I'$$

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

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

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

电介质中的高斯定理

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sum q_{\text{自由}} + \sum q_{\text{束缚}})$$

$$\oint_s (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \sum q_{\text{自由}}$$

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

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_{\text{自由}}$$

磁介质和电介质的类比

\vec{B} , \vec{H} , \vec{M} 之间的关系

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

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \vec{B} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$$

$$\mu = \underbrace{\mu_r}_{\text{相对磁导率}} \mu_0 \quad \text{磁导率}$$

\vec{P} , \vec{D} , \vec{E} 之间的关系

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

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

$$\epsilon = \underbrace{\epsilon_r}_{\text{相对介电常数}} \epsilon_0 \quad \text{介电常数}$$

磁介质的磁效应

例. 半径为 R_1 无限长载流 I 磁介质圆柱体, 其相对磁导率为 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 , 两者间磁介质相对磁导率 μ_{r2} , 圆柱面外为真空, 且 $\mu_{r2} > \mu_{r1} > 1$, 求 B 和 H 的分布, 在 R_1 处的磁化电流 I' ?

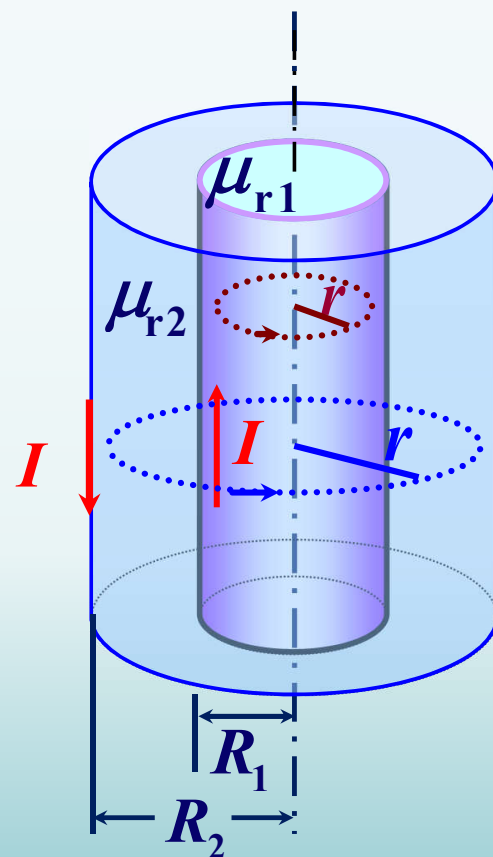
解: 根据对称性, 取圆形安培回路:

$$r < R_1 \quad 2\pi r H_1 = \frac{I}{\pi R_1^2} \pi r^2 \longrightarrow H_1 = \frac{I}{2\pi R_1^2} r$$

$$B_1 = \frac{\mu_{r1} \mu_0 I}{2\pi R_1^2} r \quad \leftarrow \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

$$R_1 < r < R_2 \quad H_2 = \frac{I}{2\pi r} \quad B_2 = \frac{\mu_{r2} \mu_0 I}{2\pi r}$$

$$r > R_2 \quad H_3 = 0 \quad B_3 = 0$$



磁介质的磁效应

解: $r < R_1$ $H_1 = \frac{I}{2\pi R_1^2} r \longrightarrow M_1 = \frac{(\mu_{r1} - 1)Ir}{2\pi R_1^2}$

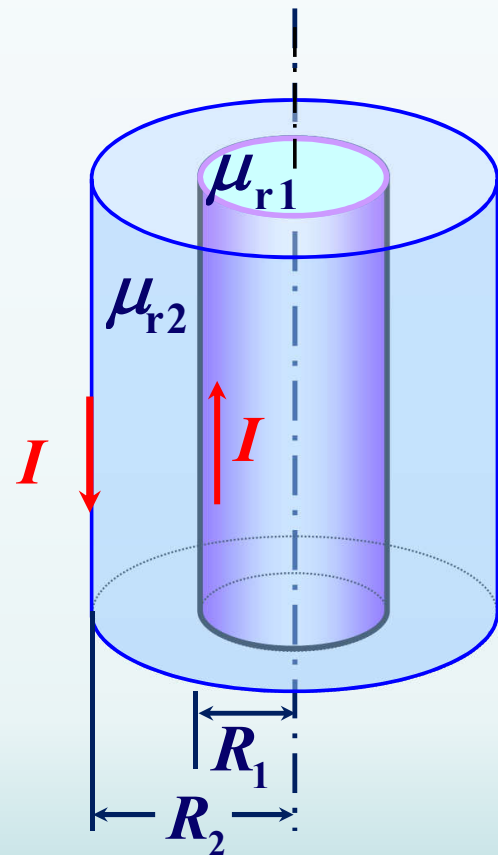
$R_1 < r < R_2$ $H_2 = \frac{I}{2\pi r} \longrightarrow M_2 = \frac{(\mu_{r2} - 1)I}{2\pi r}$

求 R_1 面上的磁化电流 I'

R_1 面为不同磁介质的交界面 $\begin{cases} \text{内侧 } \mu_{r1} \\ \text{外侧 } \mu_{r2} \end{cases}$

内侧磁化电流密度 $\vec{i}'_1 = \vec{M}_1 \times \vec{e}_{n1} = -\frac{(\mu_{r1} - 1)I}{2\pi R_1} \vec{k}$

外侧磁化电流密度 $\vec{i}'_2 = \vec{M}_2 \times \vec{e}_{n2} = \frac{(\mu_{r2} - 1)I}{2\pi R_1} \vec{k}$



磁介质的磁效应

解：内侧磁化电流密度 $\vec{i}'_1 = \vec{M}_1 \times \vec{e}_{n1} = -\frac{(\mu_{r1}-1)I}{2\pi R_1} \vec{k}$

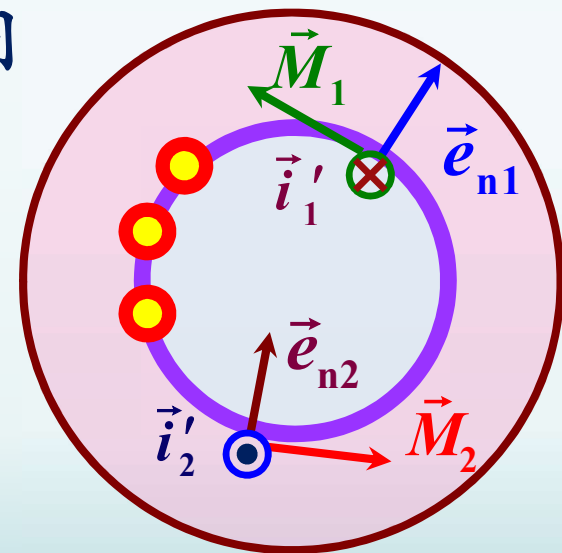
外侧磁化电流密度 $\vec{i}'_2 = \vec{M}_2 \times \vec{e}_{n2} = -\frac{(\mu_{r2}-1)I}{2\pi R_2} \vec{k}$

$\because \mu_{r2} > \mu_{r1} > 1 \longrightarrow \vec{M}_1$ 和 \vec{M}_2 的方向与 \vec{H} 相同

$$i' = |\vec{i}'_2| - |\vec{i}'_1| = \frac{(\mu_{r2} - \mu_{r1})I}{2\pi R_1}$$

求 R_1 面上的磁化电流 I'

$$I' = i' \cdot 2\pi R_1 = (\mu_{r2} - \mu_{r1})I$$



\vec{i}'_1 与内柱传导电流反向

\vec{i}'_2 与内柱传导电流同向

磁介质的磁效应

□ 铁磁质的磁效应

- 磁化曲线 $\rightarrow \mu_r \sim H$ 曲线 $B \sim H$ 曲线

装置：环形螺绕环，用铁磁质填满环内空间

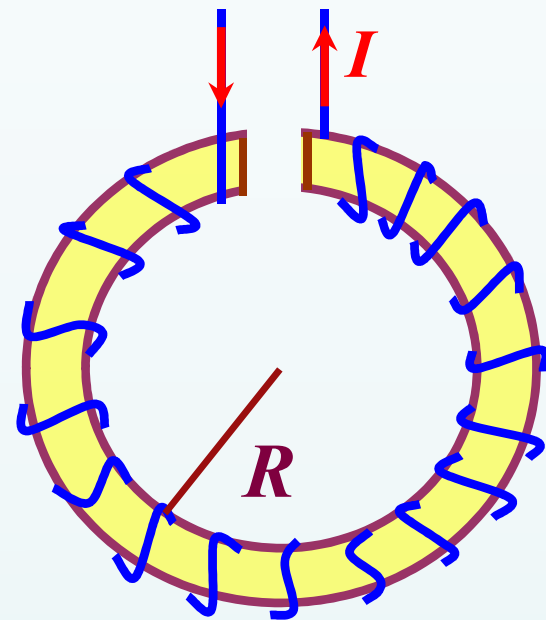
$Fe, Co, Ni \dots\dots$

加载励磁电流为 I ,

根据安培环路定理 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_i \rightarrow H = \frac{NI}{2\pi R}$

测量磁感应强度 \vec{B}

方法：感应电动势测量或用小线圈在缝口处测量



磁介质的磁效应

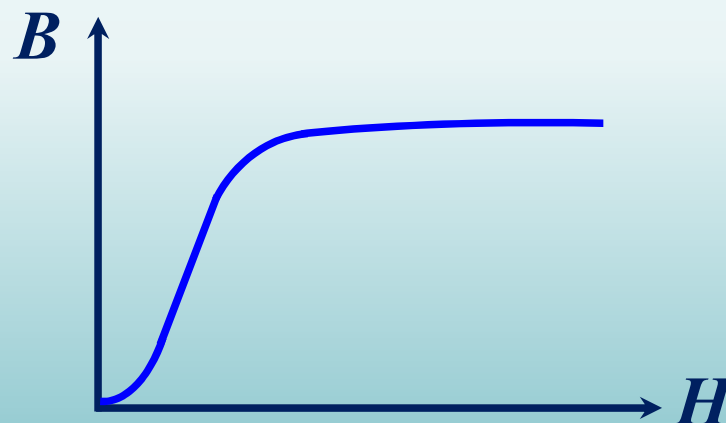
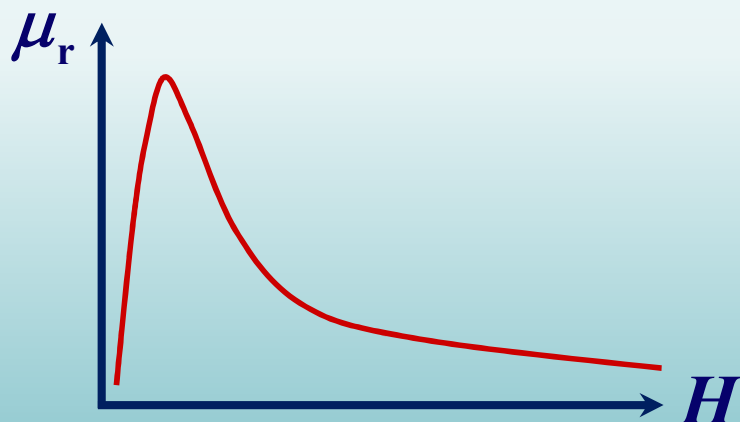
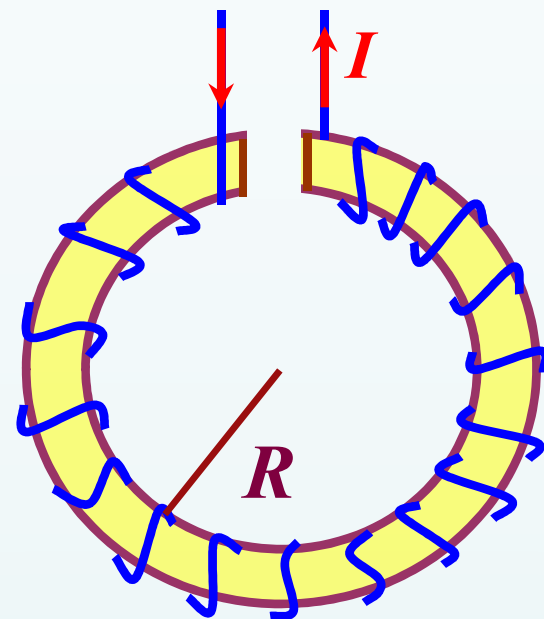
- 磁化曲线 $\rightarrow \mu_r \sim H$ 曲线 $B \sim H$ 曲线

加载励磁电流为 I , $\rightarrow H = \frac{NI}{2\pi R}$

测量磁感应强度 \vec{B}

$$\because \mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H} \rightarrow \begin{cases} \mu_r \sim H \text{ 曲线} \\ B \sim H \text{ 曲线} \end{cases}$$

注：铁磁质的 μ_r 不是常数 它是 H 的函数 $\mu_r(H)$

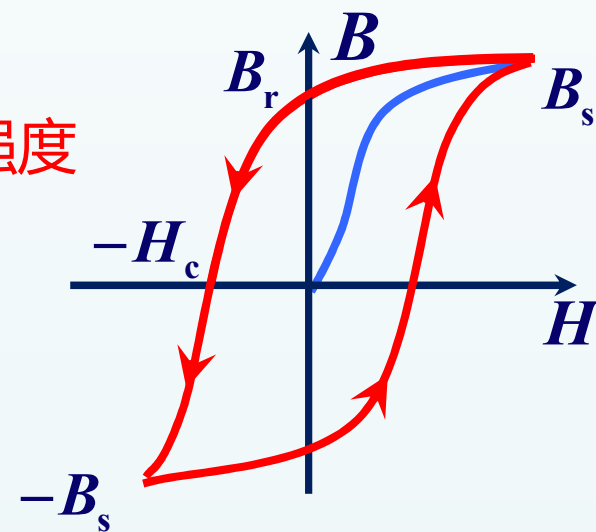


磁介质的磁效应

- 磁滞回线 → 不可逆过程

B 的变化滞后与 H → 传导电流对应产生的磁场强度

铁磁被磁化后实际的磁感应强度



几个概念：

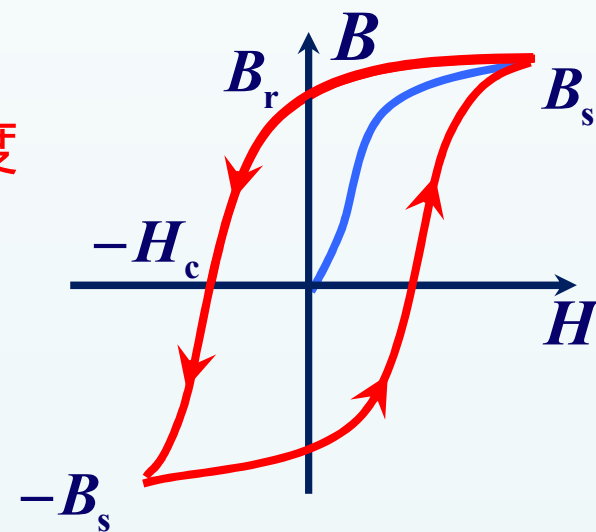
- 1) 起始磁化曲线
- 2) 饱和磁感应强度 B_s
- 3) 剩磁 B_r 介质被磁化，撤掉外磁场后，介质剩余的磁感应强度
- 4) 矫顽力 H_c 表征磁介质退磁的难易程度

磁介质的磁效应

- **磁滞回线** → **不可逆过程**

B 的变化滞后与 **H** → 被磁化后应该有的磁场强度

铁磁被磁化后实际的磁感应强度



注意：

- ① 每个 H 对应的 B 不唯一，与磁化的历经过程有关。
- ② 在交变电流的励磁下反复磁化，介质温度会升高。磁滞损耗
- ③ 磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

为什么会出现这些现象 ?

磁介质的磁效应

□ 铁磁质的磁化**机制** → 微观解释

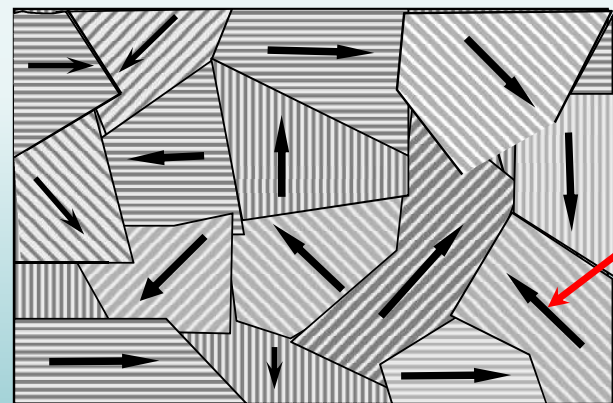
↓
磁畴 (铁磁质的微观结构)

铁磁性主要来源于电子的**自旋磁矩** → 量子效应

交换力: 电子之间的交换作用使其在
自旋平行排列时能量较低。 → 量子效应

磁畴: 原子间电子交换耦合作用很
强, 使其自旋磁矩 “自发地”
平行排列形成磁畴。

——自发的磁化区域

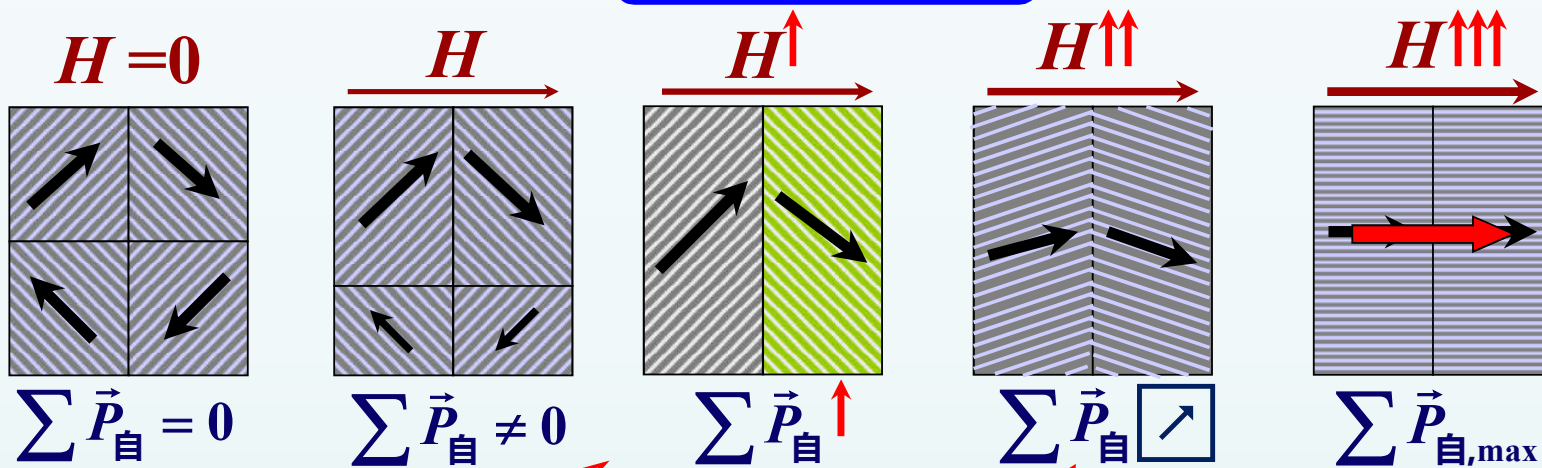


磁畴

磁介质的磁效应

磁畴的尺度： $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 其变化可用金相显微镜观测

磁畴的变化



各磁畴磁化方向杂乱无章，整体不显磁性。

方向与外磁场方向相近的磁畴扩大体积，磁畴壁移动，铁磁质的磁矩急剧增加（跳跃式突变）。

磁畴的自发磁化方向转向外磁场方向，磁矩继续增加。

全部磁畴均转向外磁场方向，达到磁饱和。

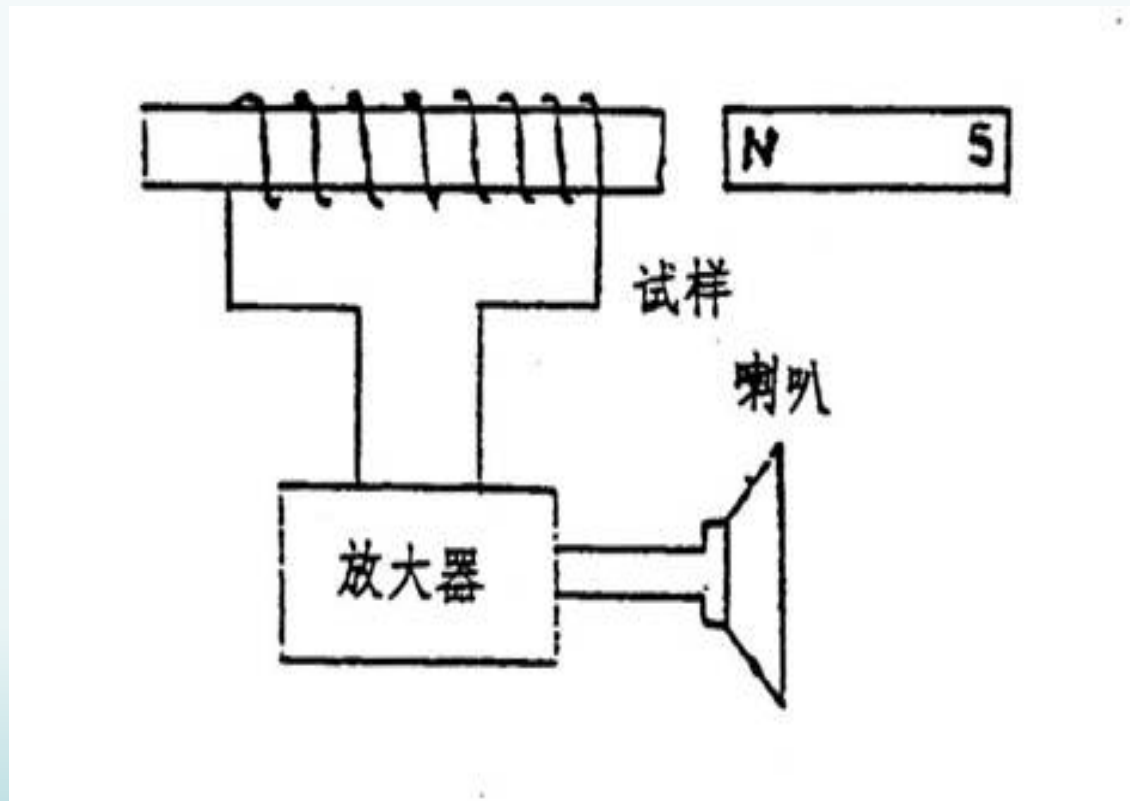
磁介质的磁效应

说明

1. 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。——铁磁质磁性 μ_r 大的原因。
2. 磁滞现象是由于材料有杂质和内应力等的作用，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状而造成的。
3. 当温度升高时，热运动会瓦解磁畴内磁矩的规则排列。
在临界温度时，铁磁质完全变成顺磁质。
↓
居里点 (T_c) 铁为 1040K, 钴为 1390K, 镍为 630K

磁介质的磁效应

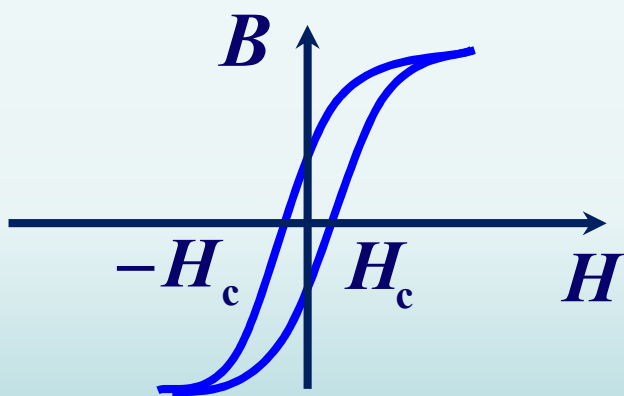
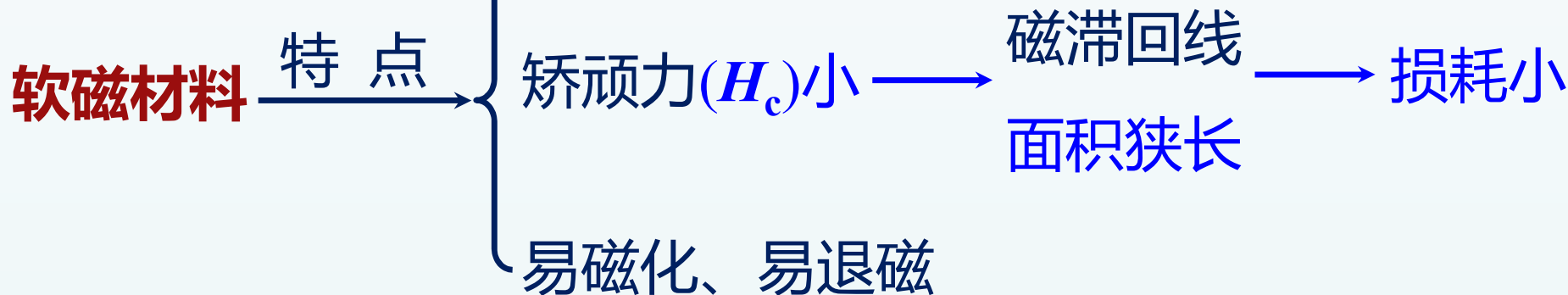
演示实验：巴克豪森效应 Barkhausen effect



样品（坡莫合金、矽钢片、铜片或铝片）

磁介质的磁效应

铁磁质的分类

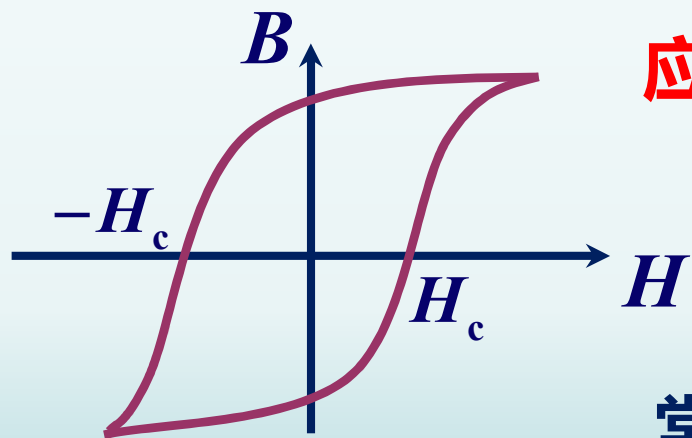
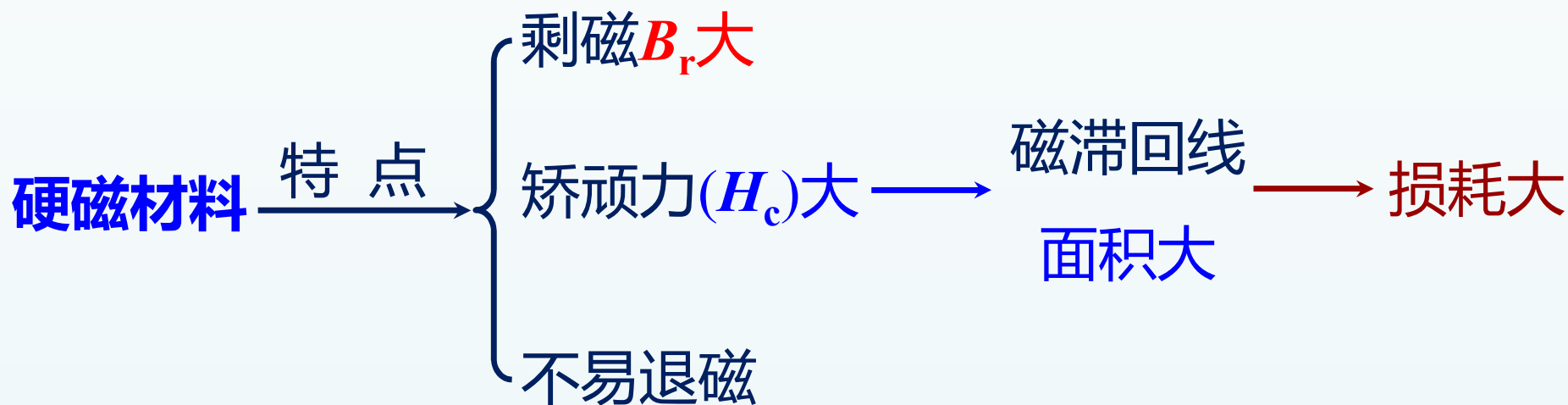


应用: 适用于变压器、继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。
(需要快速磁响应的电磁设备)

常见材料: 纯铁, 坡莫合金, 硅钢等。

“软磁就像墙头草, 哪儿有磁场往哪儿倒”

磁介质的磁效应



应用：适用于做永磁铁。

耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。
(需要长期保持磁性的设备)

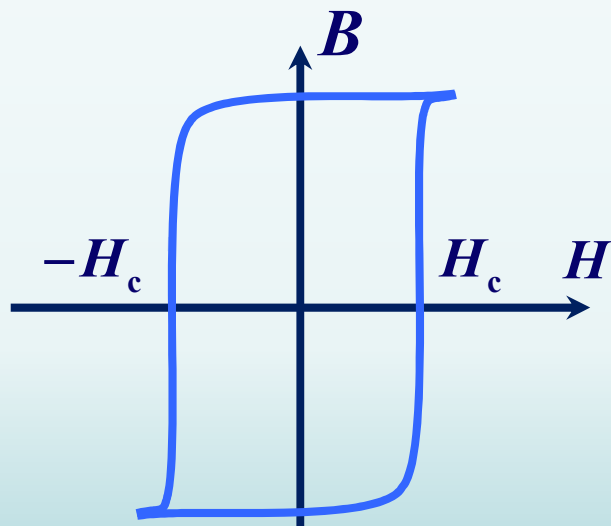
常见材料：钨钢，碳钢，铝镍钴合金等。

硬磁有“气节”，不为五斗米折腰，除非你给“六斗”

磁介质的磁效应

矩磁材料 特点

- $B_r = B_s$
- 矫顽力(H_c)不大 \longrightarrow 磁滞回线是矩形
- 有清晰可辨的两个状态 $+B$ 态 $-B$ 态



应用：用于记忆元件

($+B$ 态和 $-B$ 态可作为二进制的两个态)

常见材料：锰镁铁氧体，锂锰铁氧体等。

矩磁就像“大直男”，眼中只有“对与错”



作业：7T 剩下的

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周四交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。