

# 磁学基础

- 1、基本磁学量
- 2、物质磁性分类及其特征
- 3、表征磁性材料的两种曲线

## 单位制问题：

电磁学的单位由于历史的原因曾有过多种，有静电制 (CGSE)，静磁制 (CGSM)，高斯制 (CGS)，以及目前规定通用的国际单位制 (SI)，加之历史上对磁性起源有过不同的认识，至目前为止，磁学量单位的使用上仍存在着一些混乱，较早的文献多使用高斯制，目前虽然多数文献都采用了国际单位制，但仍不时有使用高斯单位制出现的情况。因此必须熟悉两种单位制之间的换算。

附表 主要磁学量在两种单位制中的换算关系

磁学量	符号	SI		CGS		由 SI 单位 换算成 CGS 单位时的 相乘因数
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
磁场强度	$H$	安培/米	A/m	奥斯特	Oe	$4\pi \times 10^{-3}$
磁感应强度 (磁通量密度)	$B$	特斯拉	T	高斯	Gs	$10^4$
磁化强度	$M$	安培/米	A/m	高斯	Gs	$10^{-3}$
磁极化强度	$J$	特斯拉	T	高斯	Gs	$10^4$
磁极强度	$m$	韦伯	Wb	电磁单位		$10^8/4\pi$
磁通量	$\Phi$	韦伯	Wb	麦克斯韦	Mx	$10^8$
磁偶极矩	$j_m$	韦伯·米	Wb·m	电磁单位		$10^{10}/4\pi$
磁矩	$\mu$	安培平方米	A·m <sup>2</sup>	电磁单位		$10^3$
磁化率(相对)	$\chi$			应为: $\frac{1}{4\pi} \times 10^4$		$1/4\pi$
磁导率(相对)	$\mu$					1
真空磁导率	$\mu_0$	亨利/米	H/m			$10^7/4\pi$

宛德福、马兴隆著，**磁性物理学**，电子工业出版社，P566

# 第一章 磁学基础

## 1、基本磁学量

## 2、物质磁性分类及其特征

## 3、表征磁性材料的两种曲线

磁矩 $\mu_m$

磁化强度 $M$

磁场强度 $H$

磁感应强度 $B$

磁化率 $\chi$

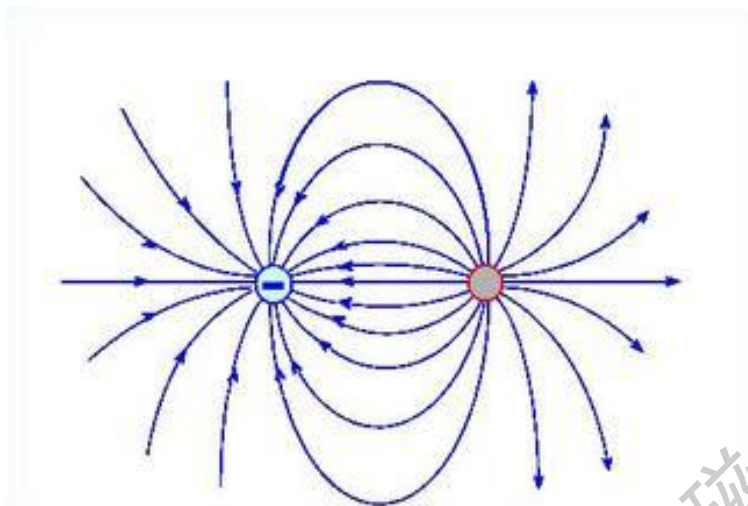
磁导率 $\mu$

静磁能 $F$

退磁场 $H_d$

# 1.1 磁矩 $\mu_m$ (Magnetic moment)

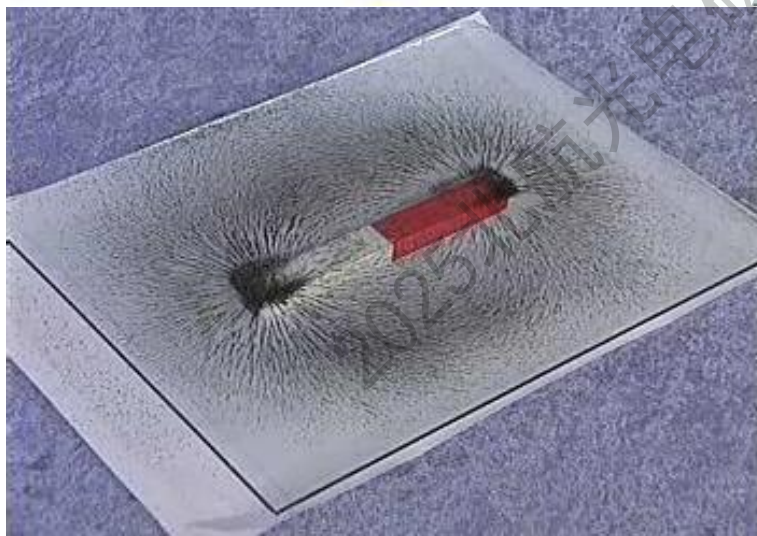
电



电极  
Electric pole

正极 负极

磁



磁极  
Magnetic pole

N极 S极

## 1.1 磁矩 $\mu_m$ (Magnetic moment)

电

电荷  $q$   
Electric charge

电偶极子  
Electric dipole

电偶极矩  
Electric moment  
 $\vec{p} = q\vec{l}$

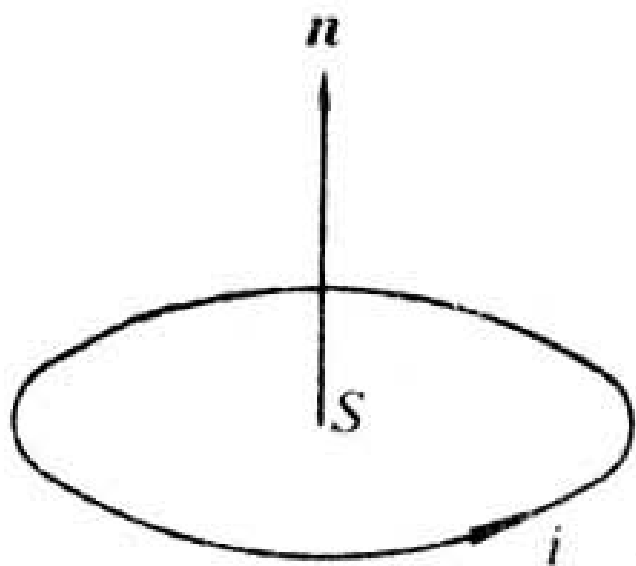
磁

磁荷  $q$   
Magnetic charge

磁偶极子  
Magnetic dipole

磁偶极矩  
Magnetic moment  
 $\vec{j} = m\vec{l}$

## 1.1 磁矩 $\mu_m$ (Magnetic moment)



$$\vec{\mu}_m = i\vec{S} \quad \text{单位: } \text{A}\cdot\text{m}^2$$

磁偶极矩和磁矩的物理意义：  
磁偶极子磁性强弱和方向；  
是矢量！

## 1.2 磁化强度 $M$ (Magnetization)

**物理意义：** 描述**宏观磁体**磁性强弱的物理量

**定义：** **单位体积**磁体内磁矩**矢量和**； **是矢量！**

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_m}{\Delta V}$$

单位：  $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$



## 1.2 磁化强度 $M$ (Magnetization)

(Vibrating Sample Magnetometer)

利用样品在交变磁场中的磁化率变化来测量磁化强度。



VSM)

时的磁感变化。它

与外磁场无关，只取决于样品的磁化强度。

## 1.3 磁场强度 $H$ (Magnetic field)

**物理意义：**描述空间任意一点的磁场参量

**定义：**单位点磁荷在该处所受磁场力的大小

$$H = \frac{F}{m} \quad F = \frac{m_1 \bullet m_2}{r^3} r$$

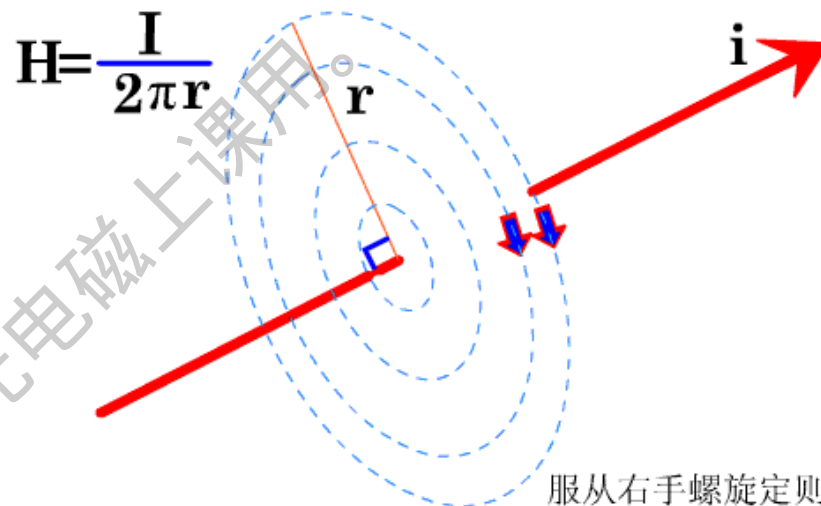
实际应用中，往往用**电流产生磁场**，有**三种**常见的电流产生磁场的形式：**无限长载流直导线**、**直流环行线圈**、**无限长直流螺线管**。

# 1.3 磁场强度 $H$ (Magnetic field)

(1) 无限长载流直导线:

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

方向是切于与导线垂直的且以导线为轴的圆周。

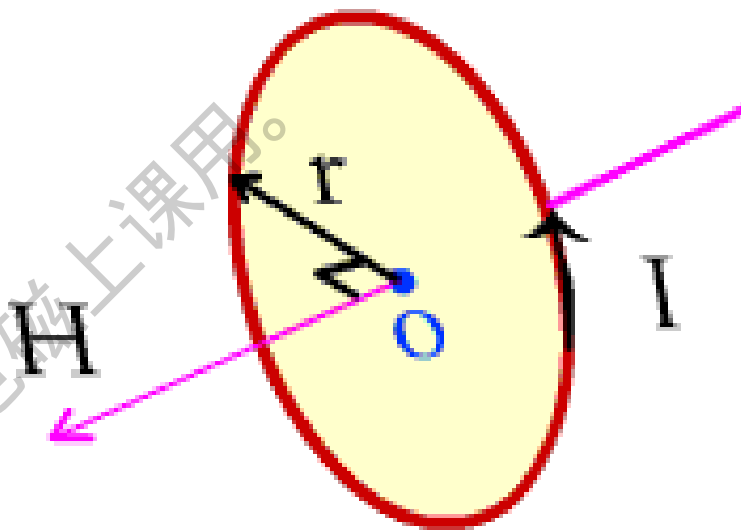


## 1.3 磁场强度 $H$ (Magnetic field)

(2) 直流环形线圈圆心:

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

$r$ 为环形圆圈半径，方向由右手螺旋法则确定。

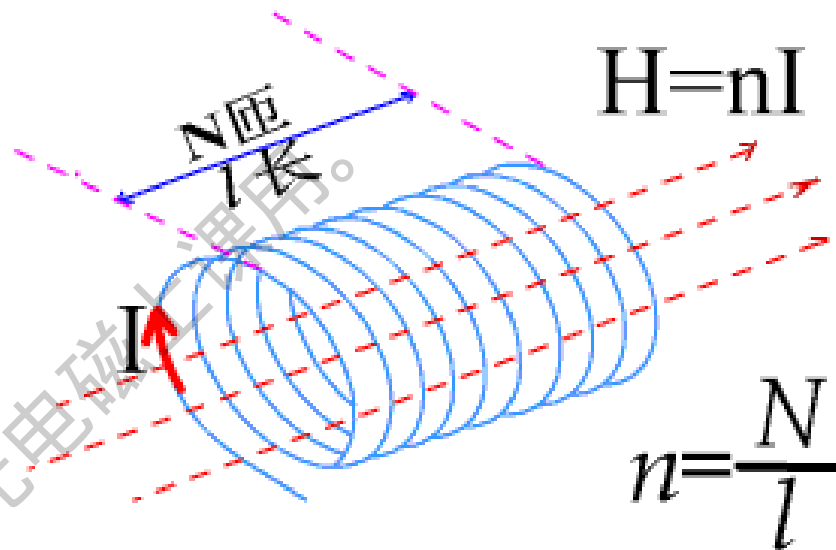


## 1.3 磁场强度 $H$ (Magnetic field)

(3) 无限长直流螺线管：

$$H = nI$$

$n$ ：单位长度的线圈匝数，  
方向沿螺线管的轴线方向。



## 1.3 磁场强度 $H$ (Magnetic field)

**测量：霍尔效应磁强计**

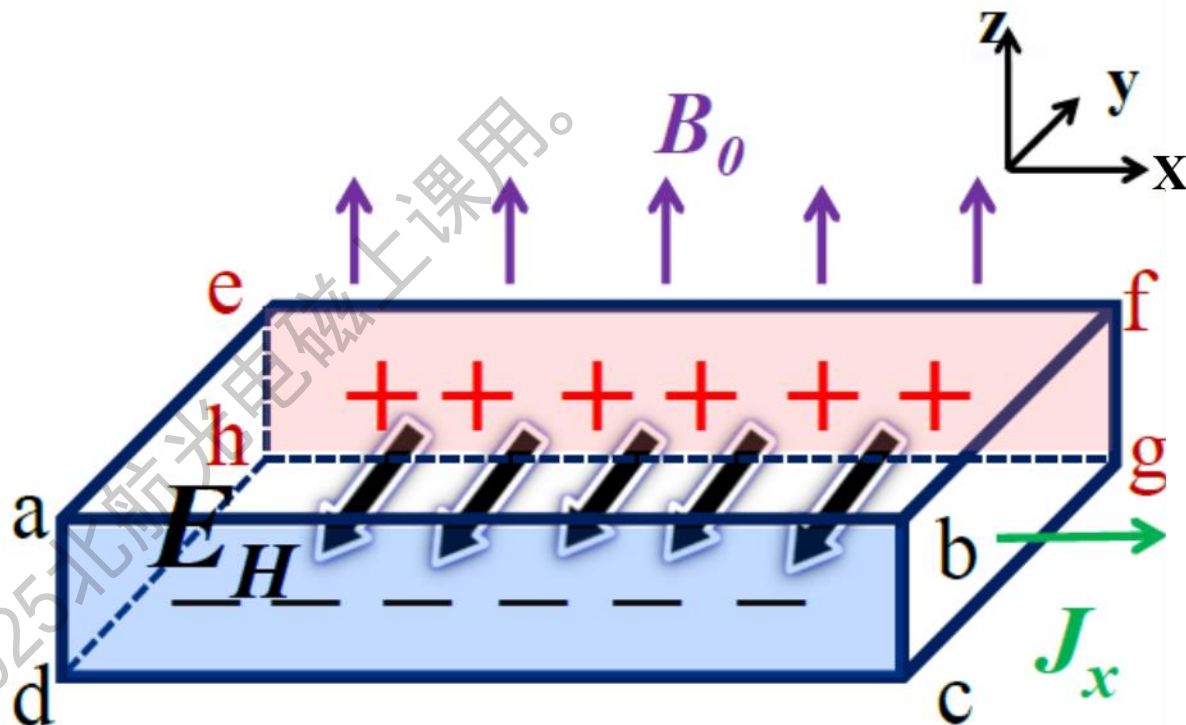
**(Hall Effect Magnetometer, VSM)**

当电流通过一个位于磁场中的导体的时候，磁场会对导体中的电子产生一个垂直于电子运动方向上的作用力，从而在垂直于导体与磁感线的两个方向上产生电势差。利用霍尔效应制成的磁强计，可测量1微特到10特范围内的磁通密度值。误差为0.1~5%。霍尔片能做得薄而小，可伸入狭窄间隙中进行测量，也可用以测量非均匀磁场。

# 霍尔效应

## 霍尔效应：

将金属导体放在与它通过的电流方向垂直的磁场内，则在横跨样品的两面产生一个与电流和磁场都垂直的电场。



磁与电的相互作用！

## 1.4 磁感应强度 $B$ (Magnetic flux density)

**物理意义：** 描述空间任意一点的磁场参量

### **B与H的区别？**

H只是一个辅助量，通常用来计算电流的磁效应，涉及磁场与其它物理量的相互作用时，一般需要使用磁感应强度B。

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

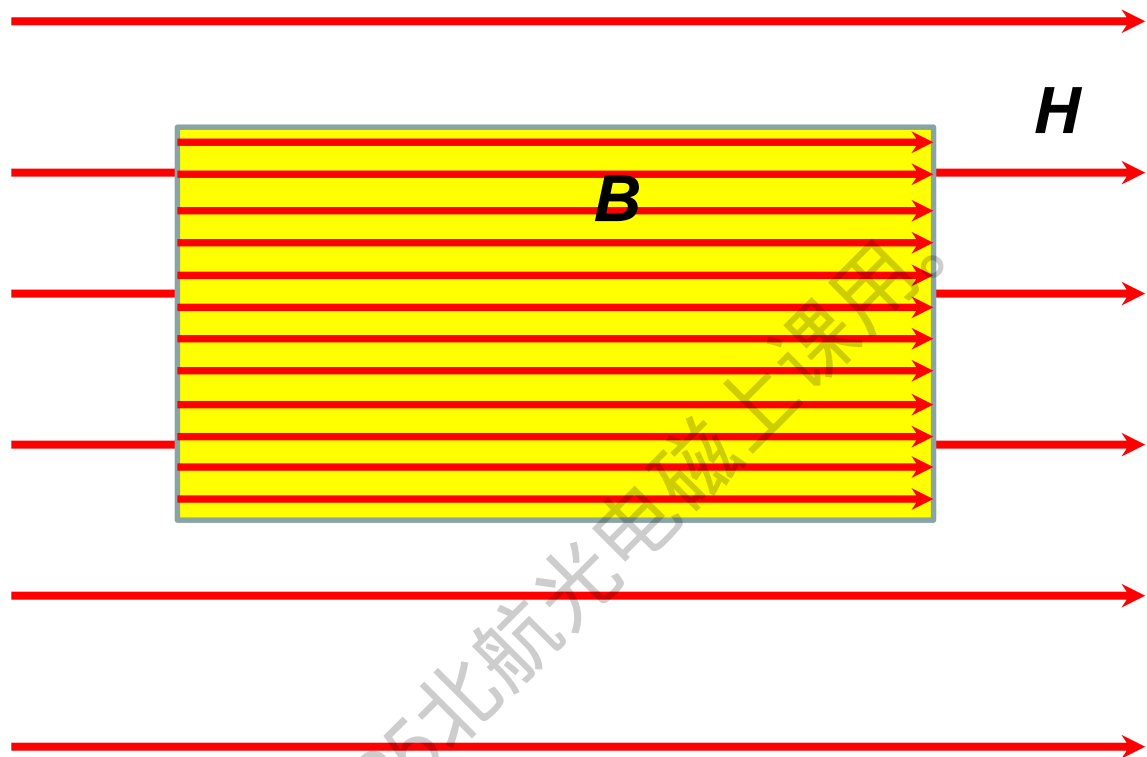
**考虑介质种类！**

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

**真空中**

$\mu_0$ : 真空磁导率



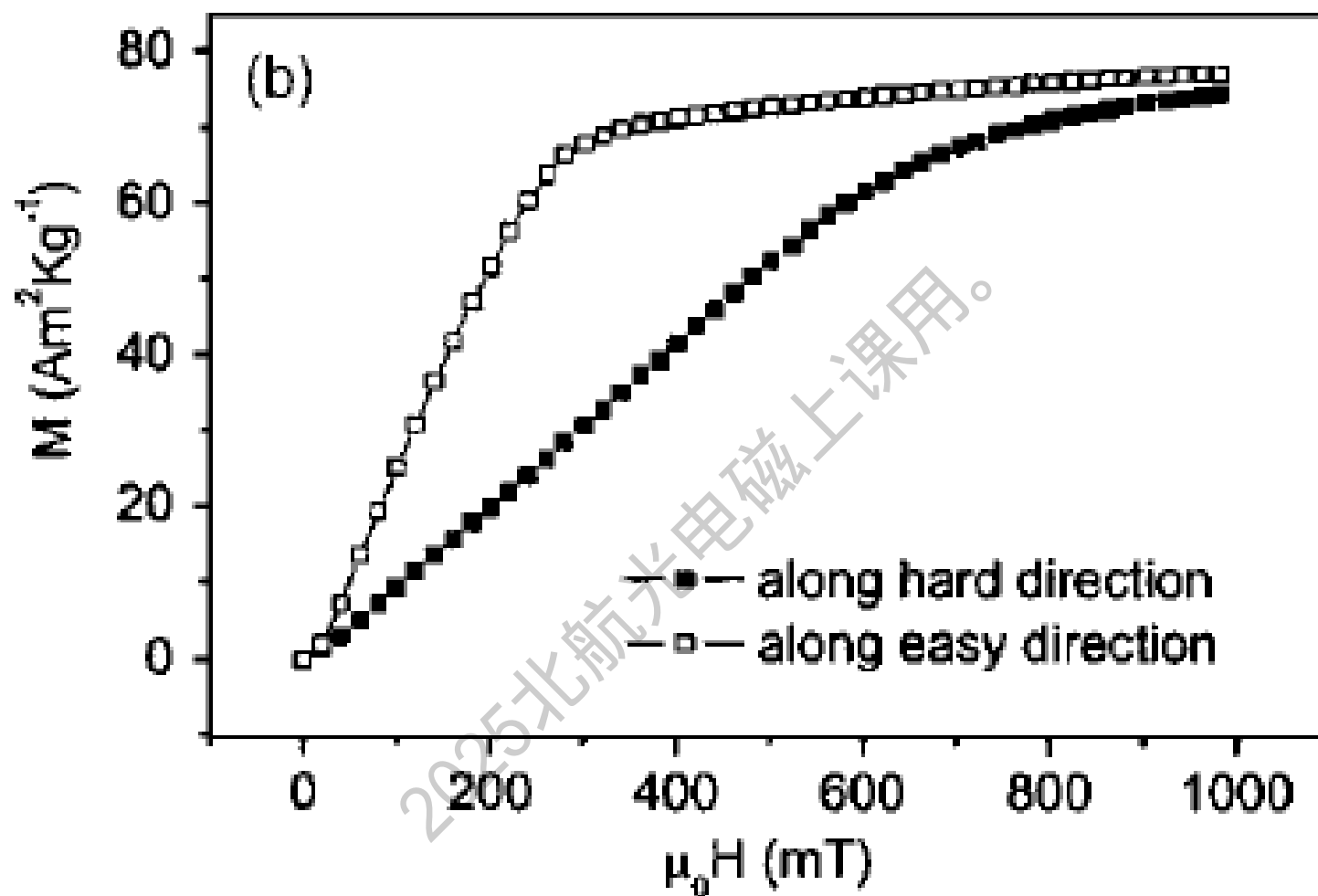


## 1.5 磁化率 $\chi$ (susceptibility)

**定义：** 单位磁场强度在磁体中所感生的磁化强度

**物理意义：** 表征材料磁化难易程度

$$M = \chi H, \quad \chi = \frac{M}{H}$$



## 1.6 磁导率 $\mu$ (permeability)

**物理意义：** 表征材料导通磁力线的能力

$$\because B = \mu_0(H + M) \quad \therefore B = \mu_0(H + \chi \cdot H) = (1 + \chi)\mu_0 H$$

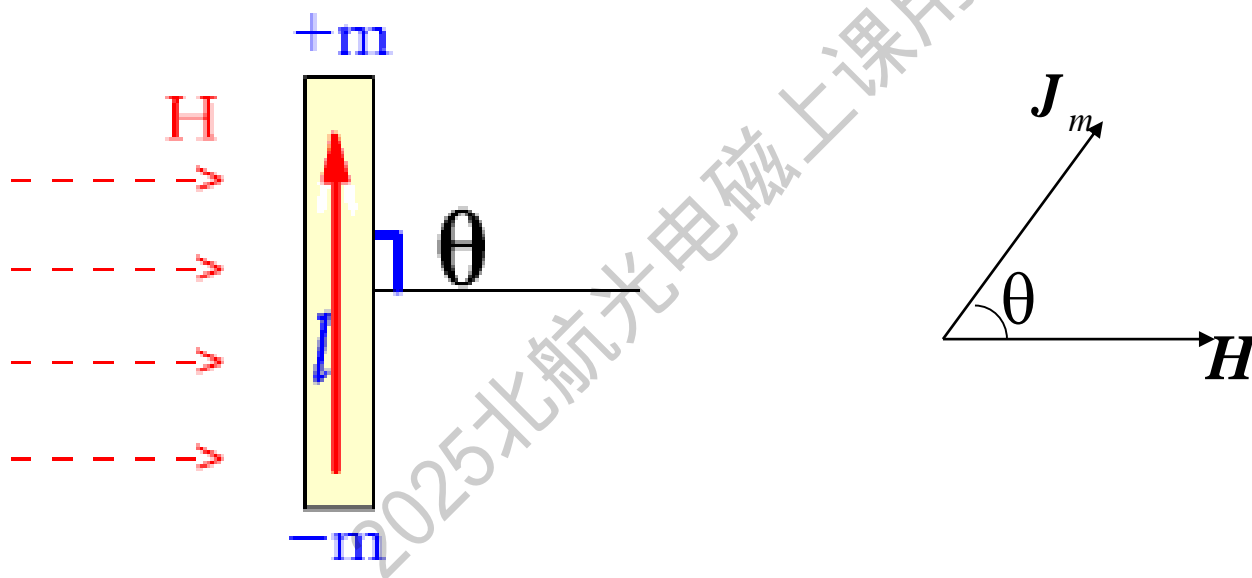
定义：  $\mu = (1 + \chi) = B/\mu_0 H$

(**相对磁导率**，表征磁体磁性、导磁性及磁化难易程度)

## 1.7 静磁能 $F$ (magnetostatic energy)

任何磁体被置于外磁场中，将处于磁化状态，并具有静磁能。

物理意义：外磁场对磁体做的功



磁体由于本身的磁偶极矩 $J_m$ 与 $H$ 间的相互作用，产生一力矩：

## 1.7 静磁能 $F$ (magnetostatic energy)

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= -\left( F \cdot \frac{l}{2} \sin \theta + F' \cdot \frac{l}{2} \sin \theta \right) \\ &= -F \cdot l \sin \theta = -mlH \sin \theta \quad (\text{逆时针方向为正}) \end{aligned}$$

$\theta = 0^\circ$  ,  $L$ 最小, 处于稳定状态

$\theta \neq 0$  ,  $L \neq 0$ , 不稳定, 会使磁体转到与 $\mathbf{H}$ 方向一致, 这就要做功, 相当于使磁体在 $\mathbf{H}$ 中位能降低。

即: 磁体在磁场中**磁位能**:

$$\begin{aligned} u &= W = -\int L d\theta \\ &= \int mlH \sin \theta d\theta \\ &= -mlH \cos \theta + c, (\text{取 } c = 0) \\ &= -\vec{\mathbf{j}}_m \cdot \vec{\mathbf{H}} \end{aligned}$$

## 1.7 静磁能 $F$ (magnetostatic energy)

∴ 单位体积中外磁场能，称为静磁能（即**磁场能量密度**）

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sum u}{\Delta V} \\ &= \frac{-\sum \vec{j}_m \cdot \vec{H}}{\Delta V} \\ &= -\vec{J} \cdot \vec{H} \\ &= -\mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H} \\ &= -\mu_0 M H \cos \theta \quad (\text{J/m}^3) \end{aligned}$$

$F_H$  是各向异性的能量

## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

有限几何尺寸的磁体在**外磁场**中被磁化后，表面将产生磁极，从而使**磁体内部**存在与磁化强度 $M$ 方向相反的一种磁场，起**减退磁化**的作用，称为**退磁场 $H_d$** 。

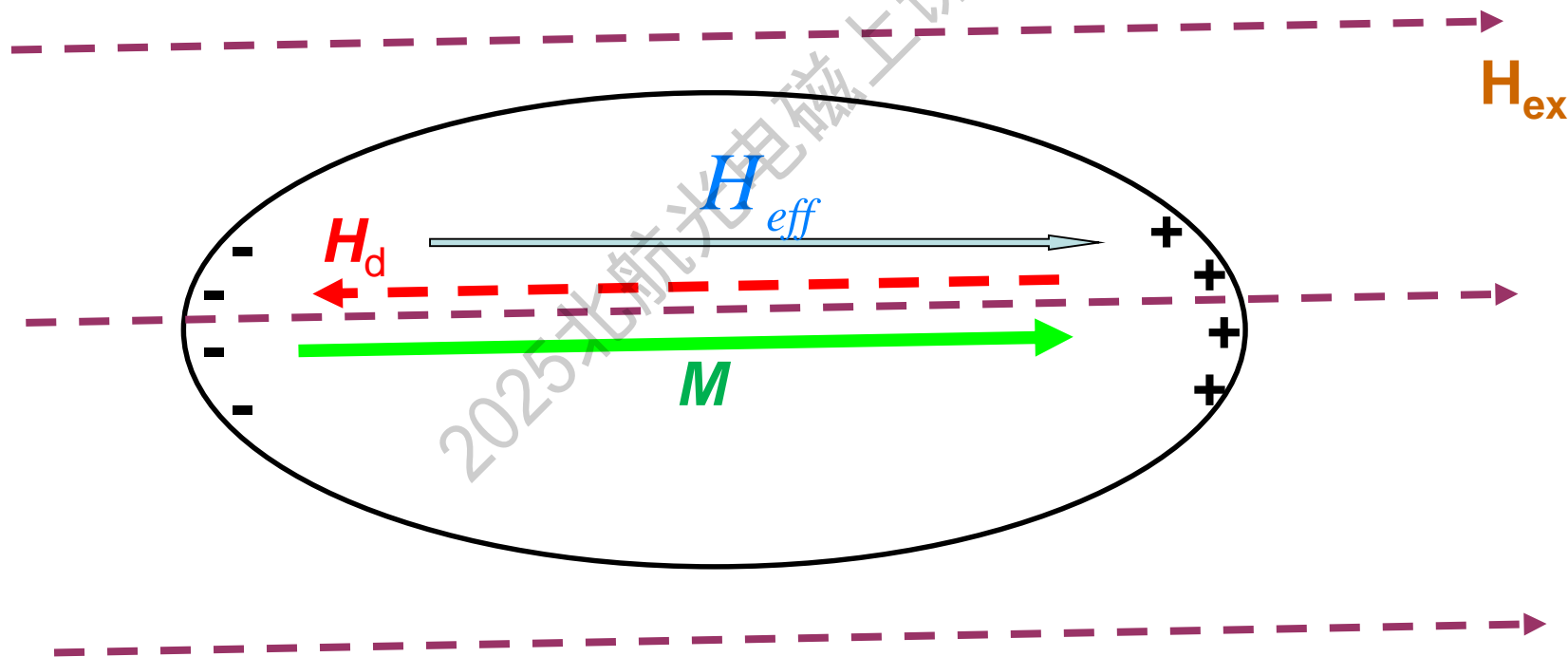
**物理意义：**表征材料反抗外磁场的能力



## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

均匀磁化的磁性体中**外磁场**、**退磁场**、**有效磁场**三者关系示意图

$$\vec{H}_{eff} = \vec{H}_{ex} + \vec{H}_d$$



## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

退磁场 $H_d$ 的大小与磁体形状及磁极强度有关。若磁化均匀，则 $H_d$ 也均匀，且与 $M$ 成正比：

$$H_d = -NM$$

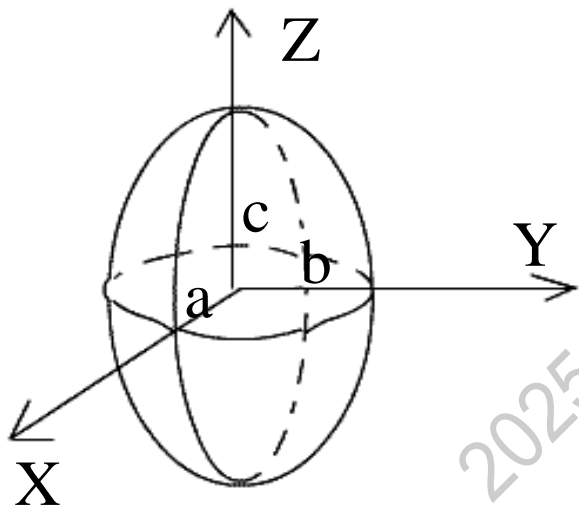
其中 $N$ 为退磁因子，只与磁体几何形状有关。

# 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

## 简单几何形状磁体的退磁因子 $N$

对于旋转椭球体，三个主轴方向退磁因子之和：

$$N_a + N_b + N_c = 1$$



由此可求出：

球 体： $N=1/3$

细长圆柱体： $N_a = N_b = 1/2, N_c = 0$

薄圆板体： $N_a = N_b = 0, N_c = 1$

## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

显然，磁性体在磁化过程中，也将受到自身退磁场的作用，产生**退磁场能**，它是在磁化强度逐步增加的过程中逐步积累起来的，

**退磁场能量 $F_d$** : 磁体在它自身的 $H_d$  中所具有的能量

$$\begin{aligned} F_d &= -\int_0^M \mu_0 \mathbf{H}_d d\mathbf{M} \\ &= \mu_0 \int_0^M \mathbf{NM} \cdot d\mathbf{M} \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{NM}^2 \end{aligned}$$

## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

对椭球体：

$$\left\{ \begin{array}{l} H_d = -(N_x M_x \vec{i} + N_y M_y \vec{j} + N_z M_z \vec{k}) \\ F_d = \frac{1}{2} \mu_0 (N_x M_x^2 + N_y M_y^2 + N_z M_z^2) \\ N_x + N_y + N_z = 1 \\ N_{\text{长轴}} = \frac{1}{k^2 - 1} \left[ \frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) - 1 \right] \\ k = \frac{\text{长半径}}{\text{短半径}} \end{array} \right.$$

## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

球体:  $F_d = (1/6)\mu_0 M^2$

细长圆柱体:  $F_d = (1/4)\mu_0 (M_x^2 + M_y^2)$

薄圆板片:  $F_d = (1/2)\mu_0 M_z^2$

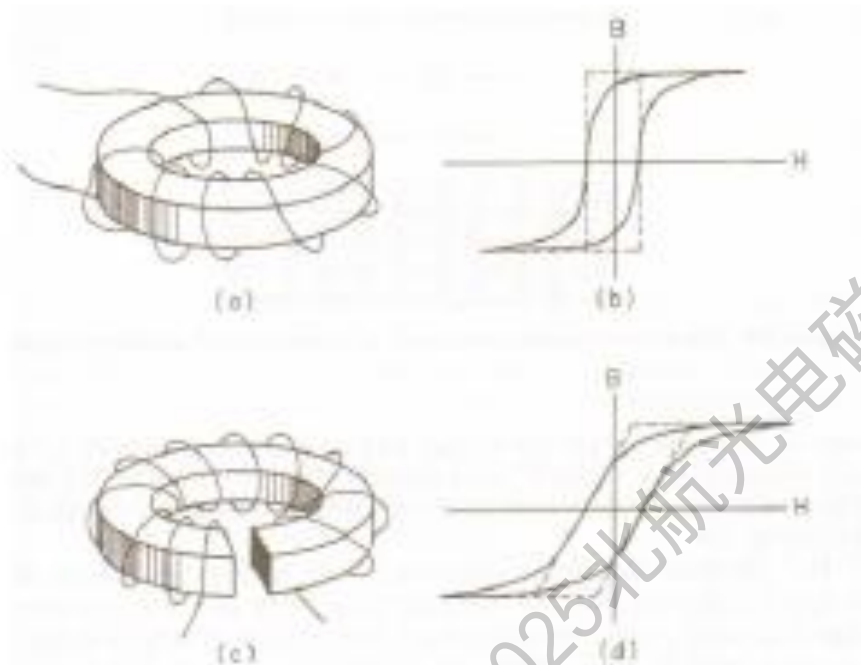
适用条件: 磁体内部均匀一致, 磁化均匀。

形状不同或沿不同的方向磁化时,  $F_d$ 也不同, 这种因形状不同而引起的能量各向异性的特征——**形状各向异性**。

**退磁能的存在是磁体出现磁畴的主要原因。**

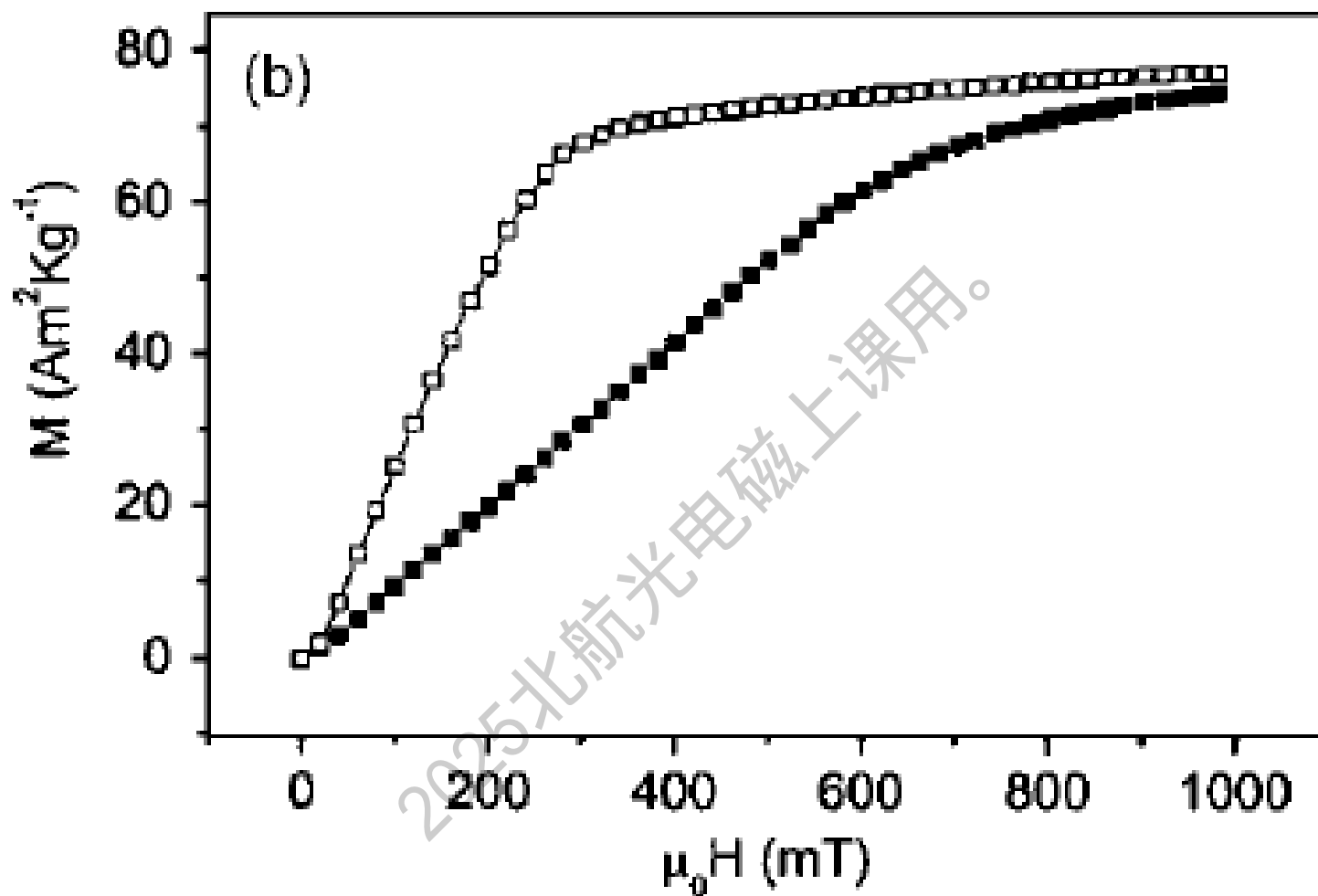
## 1.8 退磁场 $H_d$ (demagnetization field)

退磁场对样品磁性能的影响很大！



有退磁场：  
曲线倾斜

所有材料性能表给出的磁导率等数值都是针对有效磁场的数值，材料性能的实际测量中必须尽量克服退磁场的影响。





# 小 结

磁矩 $\mu_m$ :	表征磁偶极子磁性强弱和方向（微观量）
磁化强度 $M$ :	表征宏观磁性强弱和方向（宏观量）
磁场强度 $H$ :	描述空间任意一点的磁场（不考虑介质）
磁感应强度 $B$ :	描述空间任意一点的磁场（考虑介质）
磁化率 $\chi$ :	表征材料被磁化的难易程度
磁导率 $\mu$ :	表征材料导通磁力线的能力
静磁能 $F$ :	外磁场对磁体做的功
退磁场 $H_d$ :	表征材料反抗外磁场的的能力

# 第一章 磁学基础

1、基本磁学量

2、物质磁性分类及其特征

3、表征磁性材料的两种曲线

根据磁化率 $\chi=M/H$ 的大小、符号及其与温度的关系，物质的磁性可分为五种：

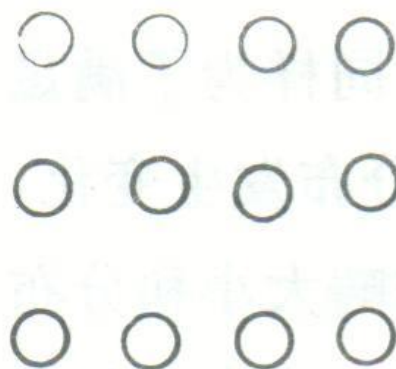
抗磁性 (diamagnetism)

顺磁性 (paramagnetism)

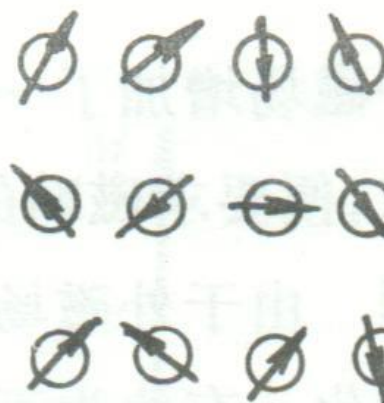
反铁磁性 (antiferromagnetism)

铁磁性 (ferromagnetism)

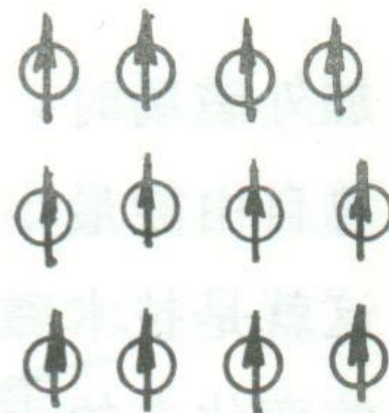
亚铁磁性 (ferrimagnetism)



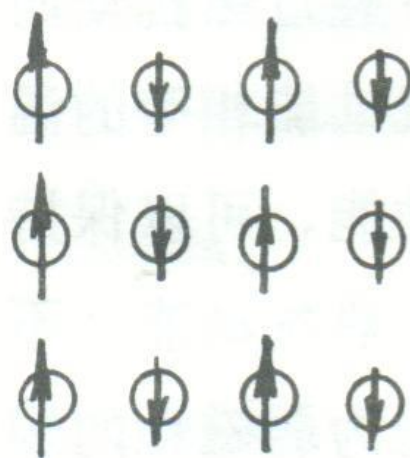
(a) 抗磁性



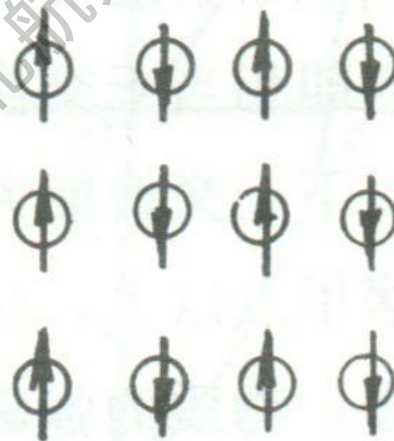
(b) 顺磁性



(c) 铁磁性

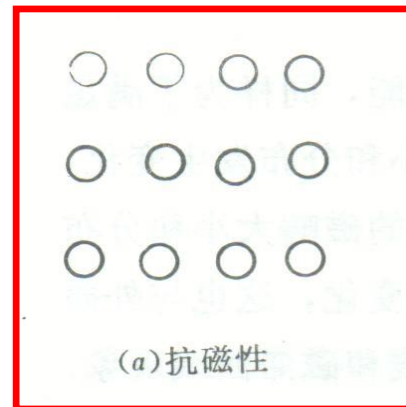


(d) 亚铁磁性



(e) 反铁磁性

# 抗磁性 (diamagnetism)



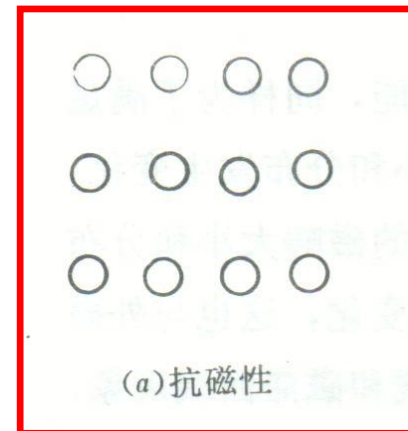
这是19世纪后半叶就已经发现并研究的一类弱磁性。

它的**最基本特征是磁化率为负值且绝对值很小**；

显示抗磁性的物质在外磁场中产生的磁化强度和磁场反向，在不均匀的磁场中被推向磁场减小的方向，所以又称**逆磁性**。

典型抗磁性物质的**磁化率是常数，不随温度、磁场而变化**。少数抗磁性物质的磁化率数值较大，且是温度和磁场的函数。

# 抗磁性 (diamagnetism)



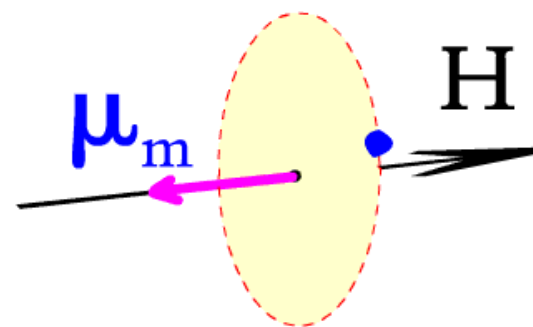
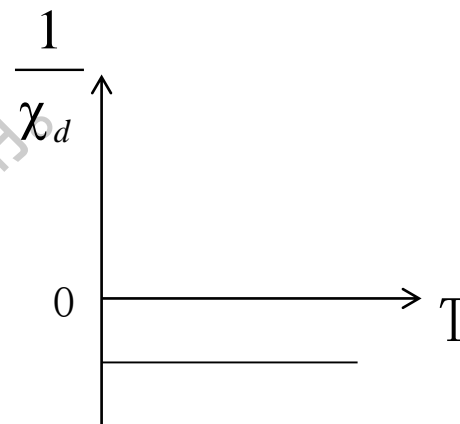
深入研究发现，典型抗磁性是轨道电子在外磁场中受到电磁作用而产生的，因而**所有物质都具有的一定的抗磁性**，但只是在构成原子（离子）或分子的磁距为零，不存在其它磁性的物质中，才会在外磁场中显示出这种抗磁性。**在外场中显示抗磁性的物质称作抗磁性物质。**

# 抗磁性 (diamagnetism)

## 楞次定律

对于电子壳层被填满的物质，其磁矩为零。在外磁场作用下，电子运动将产生一个附加的运动（由电磁感应定律而定），出现附加角动量，感生出与H反向的磁矩。因此： $\chi_d < 0$ ，且 $|\chi_d| \sim 10^{-5}$ ，与H、T无关。

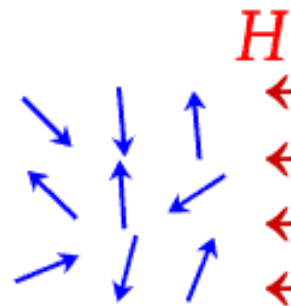
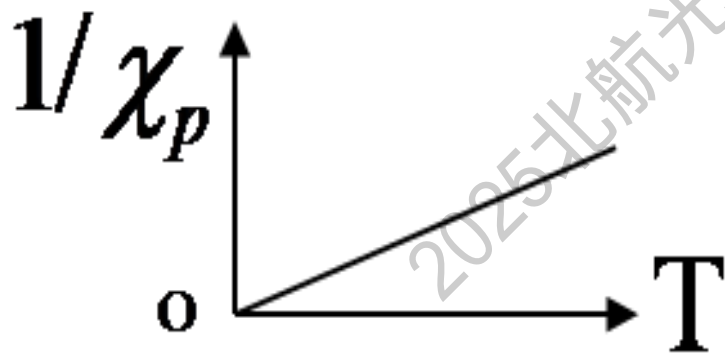
**实例：**惰性气体、许多有机化合物、某些金属（Bi、Zn、Ag、Mg）、非金属（如：Si、P、S）



## 顺磁性 (paramagnetism)

顺磁性物质具有一固有磁矩，但各原子磁矩取向混乱，对外不显示宏观磁性，在磁场作用下，原子磁矩转向H方向，感生出与H一致的M。所以， $\chi_p > 0$ ，但数值很小（显微弱磁性）。室温下 $\chi_p: 10^{-3} \sim 10^{-6}$ 。

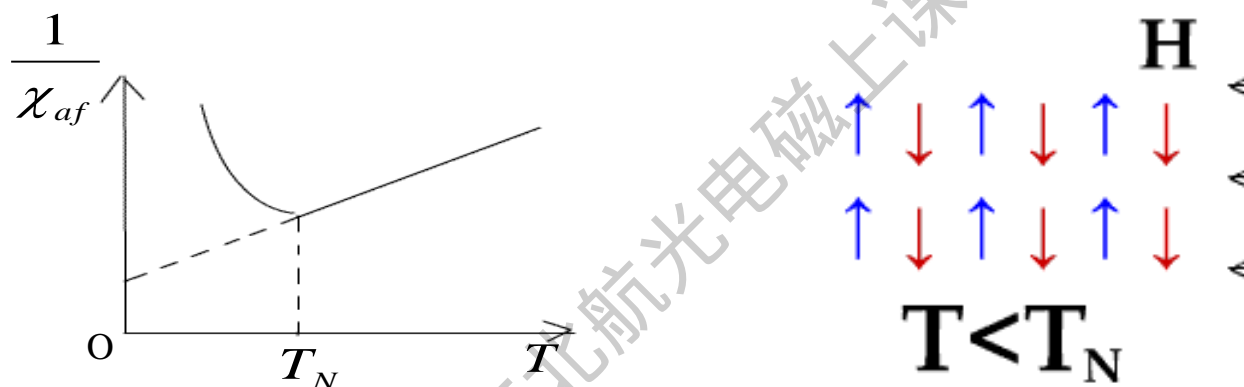
实例：稀土金属和铁族元素的盐。





# 反铁磁性 (antiferromagnetism)

1936年首先由法国科学家NeeI从理论上预言、1938年发现，1949年被中子实验证实的，它的基本特征是存在一个磁性转变温度，在此点磁化率温度关系出现峰值。



$T < T_N$ 时，其内部磁结构按次晶格自旋成反平行排列，每一次晶格的磁矩大小相等、方向相反，故它的宏观磁性等于零，只有在很强的外磁场作用下才能显示出微弱的磁性。

# 反铁磁性 (antiferromagnetism)

反铁磁物质主要是一些过渡族元素的氧化物、卤化物、硫化物，如：

$\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,

$\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeF}_2$ ,  $\text{MnF}_2$ ,

$\text{FeS}$ ,  $\text{MnS}$

右图是1938年测到的 $\text{MnO}$ 磁化率温度曲线，它是被发现的第一个反铁磁物质，转变温度 122K。

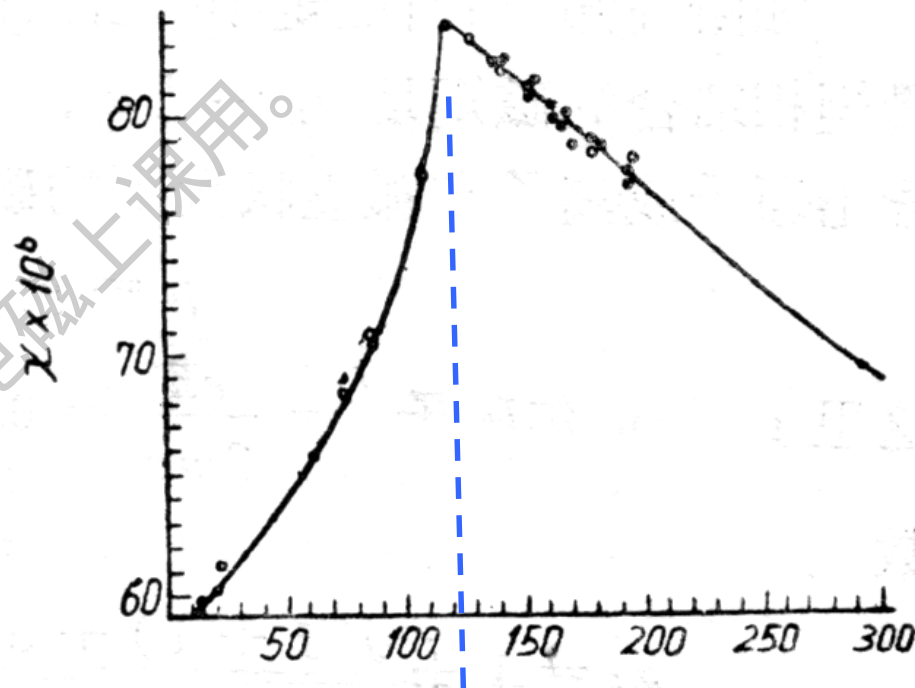


图 3.4  $\text{MnO}$  (粉末状样品)的磁化率对温度的实验曲线。

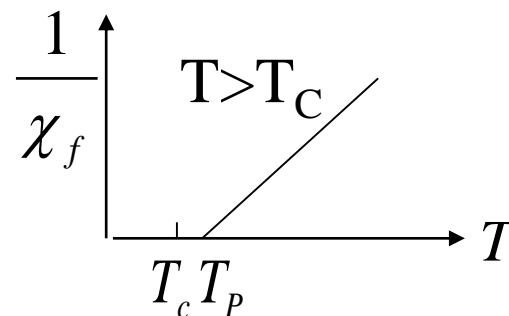
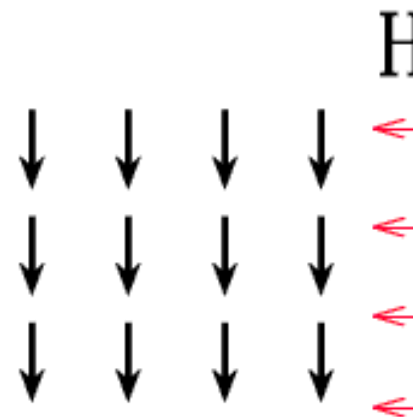
# 铁磁性 (ferromagnetism)

内部原子磁矩按磁畴自发平行取向，有宏观磁性，只要在很小的磁场作用下就能磁化到饱和。

其  $\chi_f > 0$  (约为  $10 \sim 10^6$ )，有磁滞现象。

当  $T > T_c$  时，铁磁性转变为顺磁性。

实例：3d金属Fe, Co, Ni, 4f金属铽、钬、铕、钆、铽、钆、铽等以及很多合金与化合物。



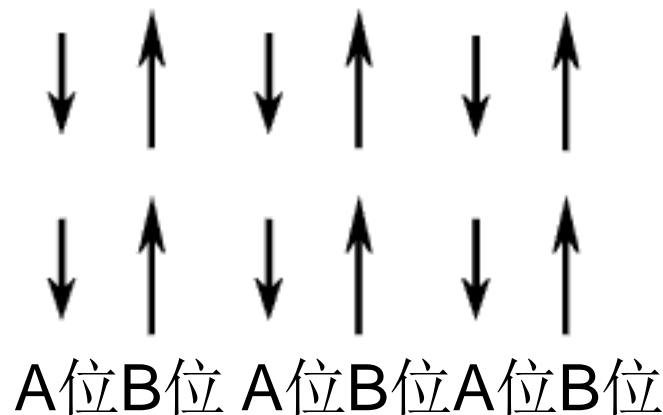
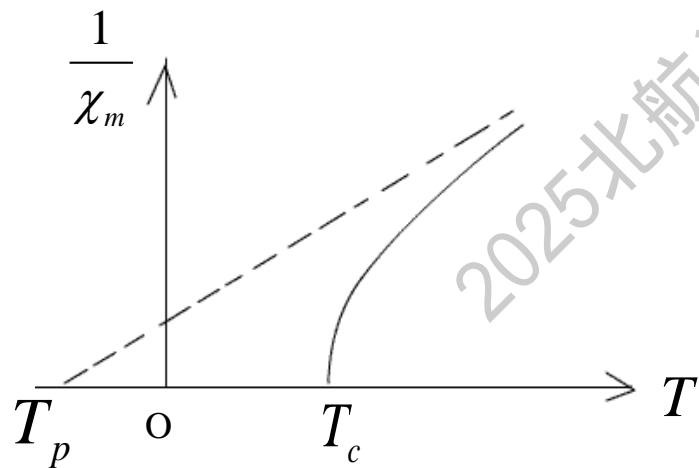
## 亚铁磁性 (ferrimagnetism)

人类最早发现和利用的强磁性物质天然磁石 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 就是亚铁磁性物质，上世纪30~40年代开始在此基础上人工合成了一些具有亚铁磁性的氧化物，但其宏观磁性质和铁磁物质相似，很长时间以来，人们并未意识到它的特殊性，1948年 Neel 在反铁磁理论的基础上创建了亚铁磁性理论后，人们才认识到这类物质的特殊性，**在磁结构的本质上它和反铁磁物质相似，但宏观表现上却更接近于铁磁物质。**对这类材料的研究和利用克服了金属铁磁材料电阻率低的缺点，极大地推动了磁性材料在高频和微波领域中的应用，成为今日磁性材料用于信息技术的主体。

## 亚铁磁性 (ferrimagnetism)

内部磁结构与反铁磁性相同，但相反排列的磁矩大小不等量。故亚铁磁性具有宏观磁性（未抵消的反铁磁性结构的铁磁性）。 $\chi_m > 0$ ，大小为 $1 \sim 10^3$

实例：铁氧体。



## 亚铁磁性 (ferrimagnetism)

亚铁磁物质主要是一些人工合成的含过渡族元素和稀土元素的某些特定结构的氧化物，例如：

尖晶石结构： $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

石榴石结构： $\text{A}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , ( $\text{A}=\text{Y}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Yb}$  )

磁铅石结构： $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,

钙钛矿结构： $\text{LaFeO}_3$ ,

上面几种磁有序结构，都是**共线**的，或**平行**，或**反平行**。20世纪70年代后，主要在稀土金属和合金里发现了一些非共线结构；在微粉和纳米磁性材料里，在非晶材料里，也都发现了一些新的结构类型，它们极大地丰富了我们对于物质磁性的认识。

# 第一章 磁学基础

- 1、基本磁学量
- 2、物质磁性分类及其特征
- 3、表征磁性材料的两种曲线



## 磁化曲线 (Initial magnetization curve)

表示磁场强度 $H$ 与所感生的 $B$ 或 $M$ 之间的关系

0点： $H=0$ 、 $B=0$ 、 $M=0$ ，磁中性或原始退磁状态

OA段：近似线性，起始磁化阶段

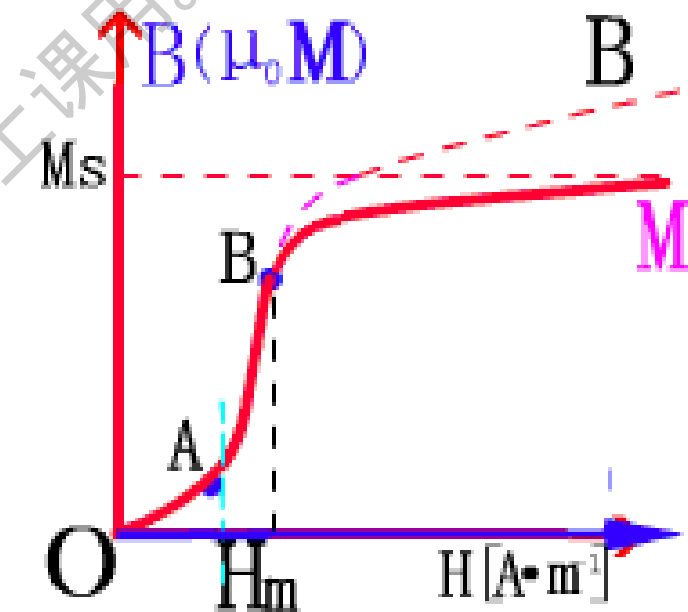
AB段：较陡峭，表明急剧磁化

$H < H_m$ 时，二曲线基本重合。

$H > H_m$ 后， $M$ 逐渐趋于一定值

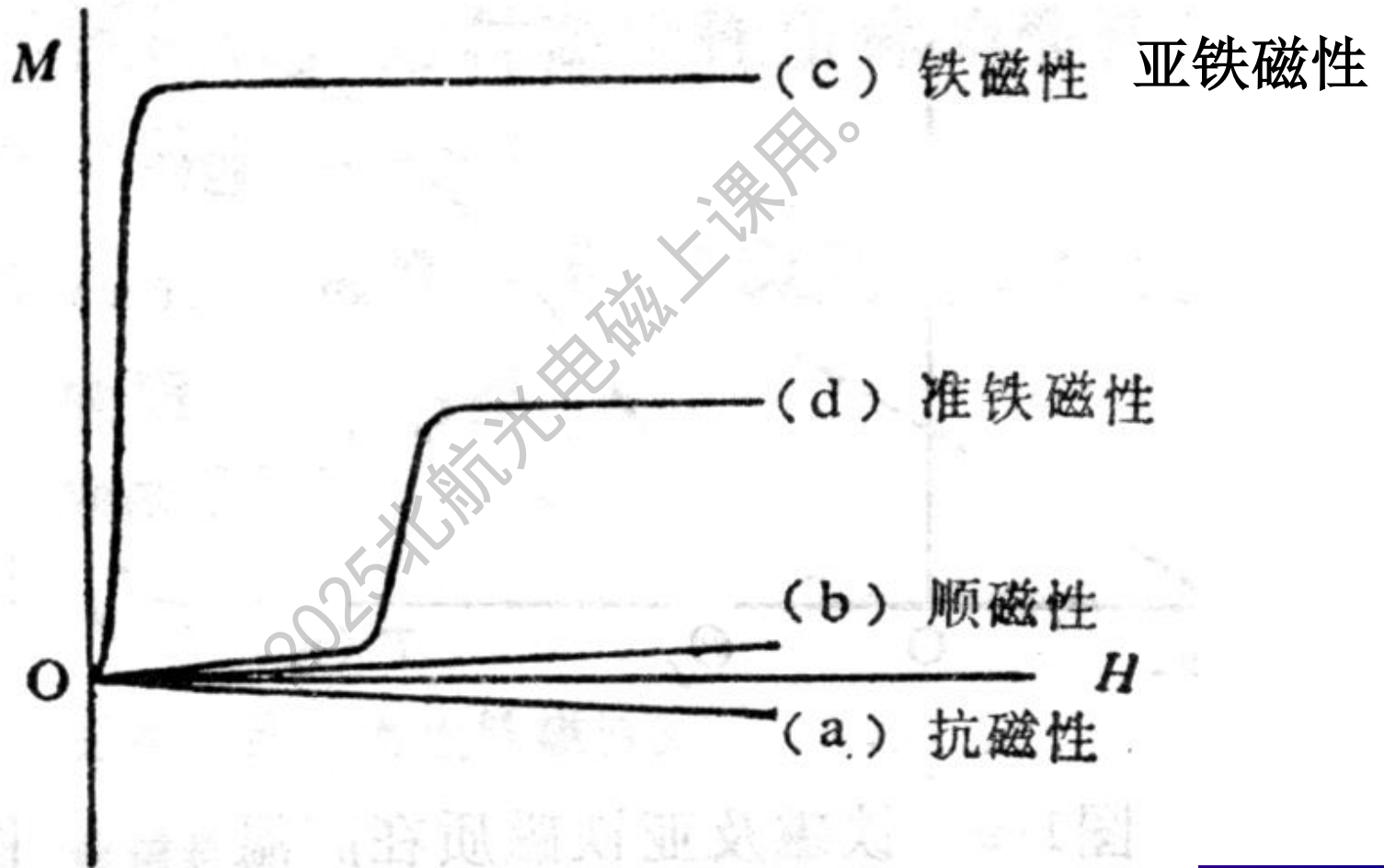
$M_s$ （饱和磁化强度），而 $B$ 则仍不断增大。

由 $B-H$  ( $M-H$ ) 曲线可求出  $\mu$  或  $\chi$



铝钴镍的两种磁化曲线

## 从在外磁场中磁化曲线的特征看几类磁性的特征：



# 磁滞回线 ( Hysteresis loop )

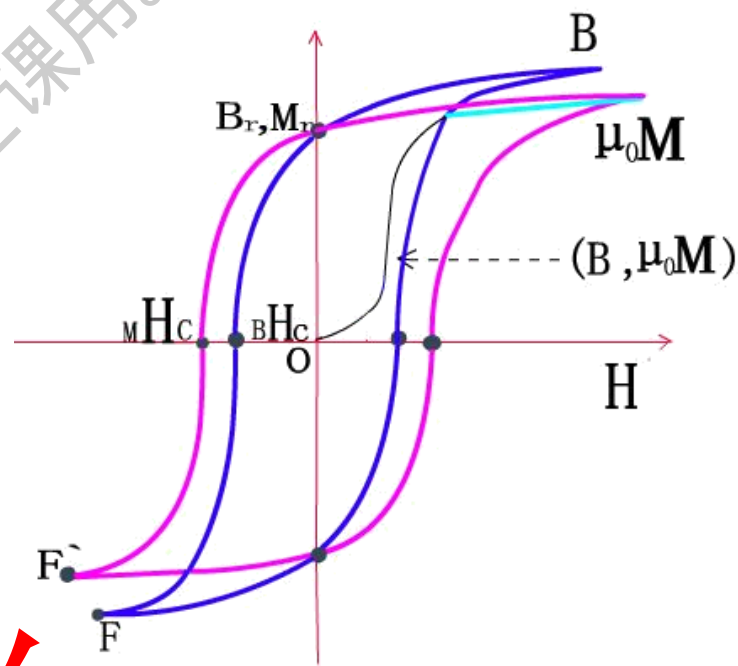
从饱和磁化状态开始，再使磁化场减小， $B$ 或 $M$ 不再沿原始曲线返回。当 $H=0$ 时，仍有一定的剩磁 $B_r$ 或 $M_r$ 。

为使 $B$  ( $M$ ) 趋于零，需反向加一磁场，此时 $H=H_c$ 称为矫顽力。

$BH_C$ : 使 $B=0$ 的 $H_c$ 。

$MH_C$ :  $M=0$ 时的 $H_c$  (内禀矫顽力)

一般  $|BH_C| < |MH_C|$  ? 作业



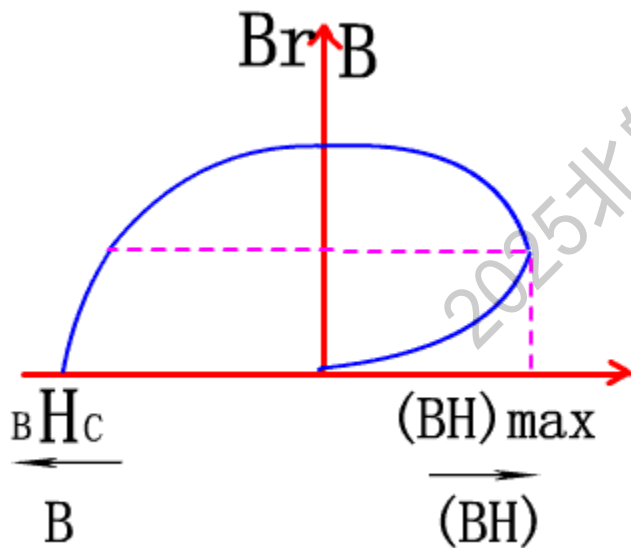
矫顽力（Coercivity） $H_c$ 是表征材料在磁化后保持磁化状态的能力。

通常以 $H_c$ 划分软磁、永磁、半永磁材料：

${}_B H_C < 8 \times 10 \sim 8 \times 10^2 A/m$  : 软磁 ( soft magnetism )  
 ${}_B H_C > 8 \times 10^3 \sim 8 \times 10^5 A/m$  : 硬磁 ( hard magnetism )  
介于  $10^3 \sim 10^5 A/m$  之间 : 半硬磁 ( half- hard magnetism )

磁滞回线的第二象限为退磁曲线（依据此考察硬磁材料性能）， $(BH)$  为磁能积，表征永磁材料中能量大小。 $(BH)_{\max}$  是永磁的重要特性参数之一。

将退磁曲线上的  $(BH)$  对  $B$  作用，可得  $(BH)$  对  $B$  的关系曲线。



磁化曲线与磁滞回线是磁性材料的重要特征，能反映许多磁特性，如：

$\mu$ 、 $M_s(B_s)$ 、 $M_r(B_r)$ 、 $BH_c$ 、 $(M H_c)$ 、 $(BH)_{\max}$  等。

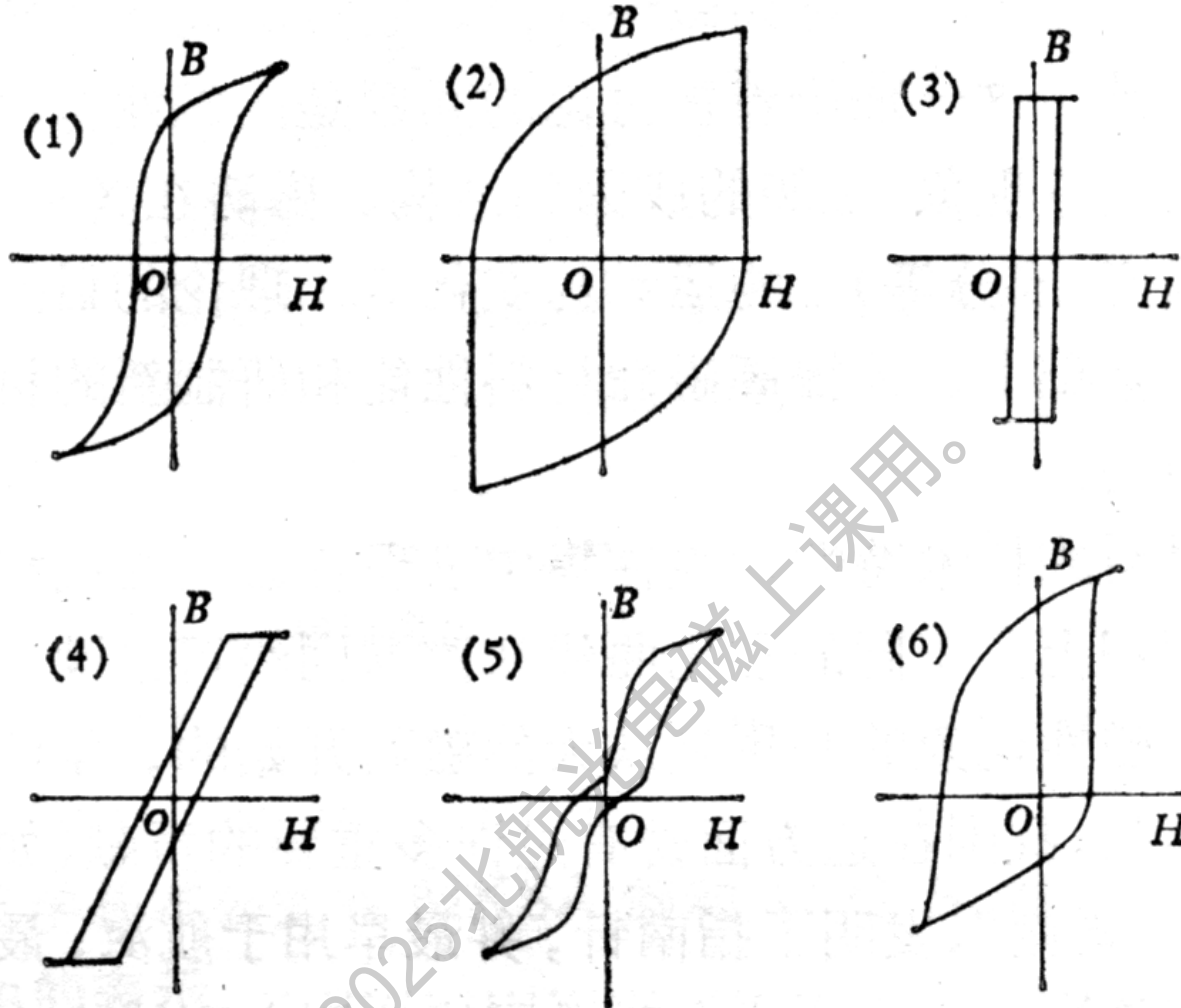


图1 六种不同类型的磁滞回线：  
 (1)狭长型；(2)肥胖型；(3)长方型；  
 (4)退化型；(5)蜂腰型；(6)不对称型。

**不同的回线形状反映了不同的磁性质。**

# 铁磁性物质

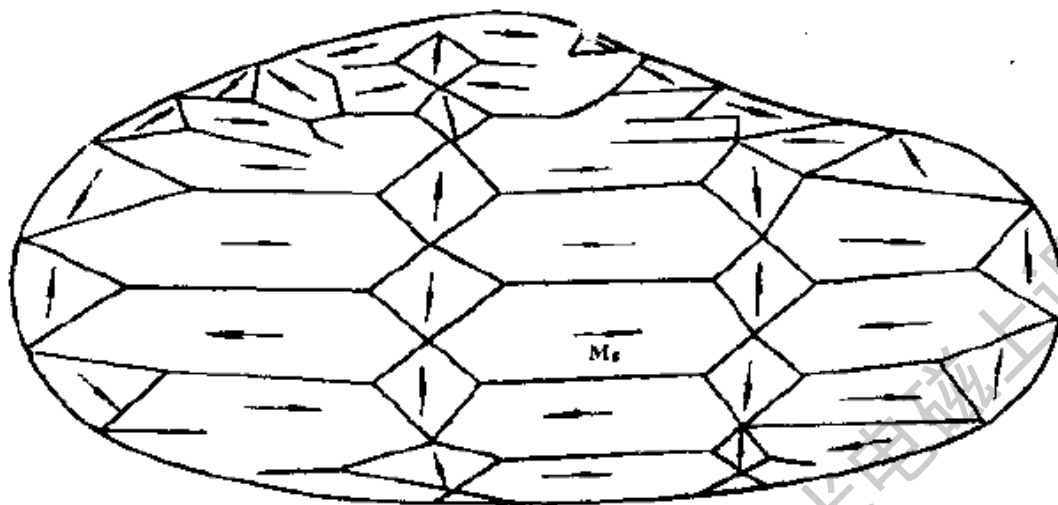
## 基本特征：

- 磁畴、自发磁化
- 高磁化率
- 磁滞
- 居里温度
- 磁各向异性
- 磁致伸缩

## 基本参数：

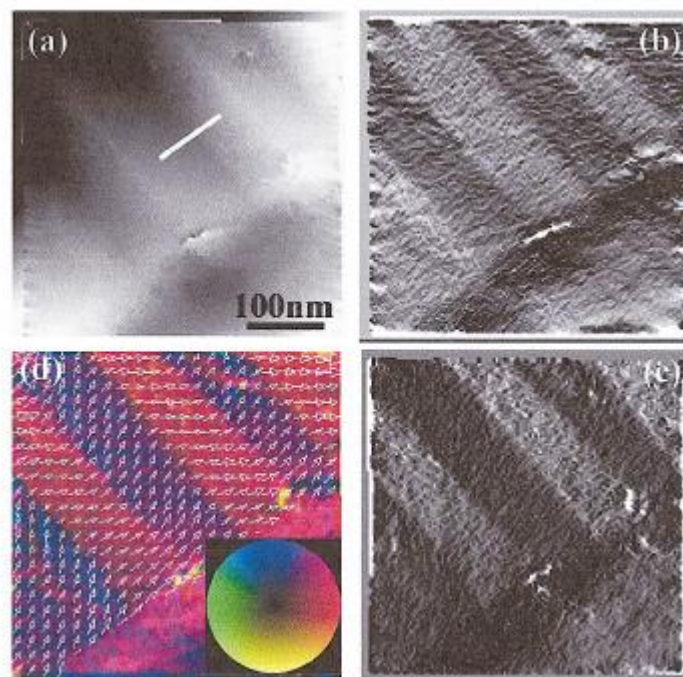
- 饱和磁化强度
- 居里温度
- 矫顽力
- 剩磁
- 磁导率

# 铁磁性物质的基本特征 (1) - 磁畴



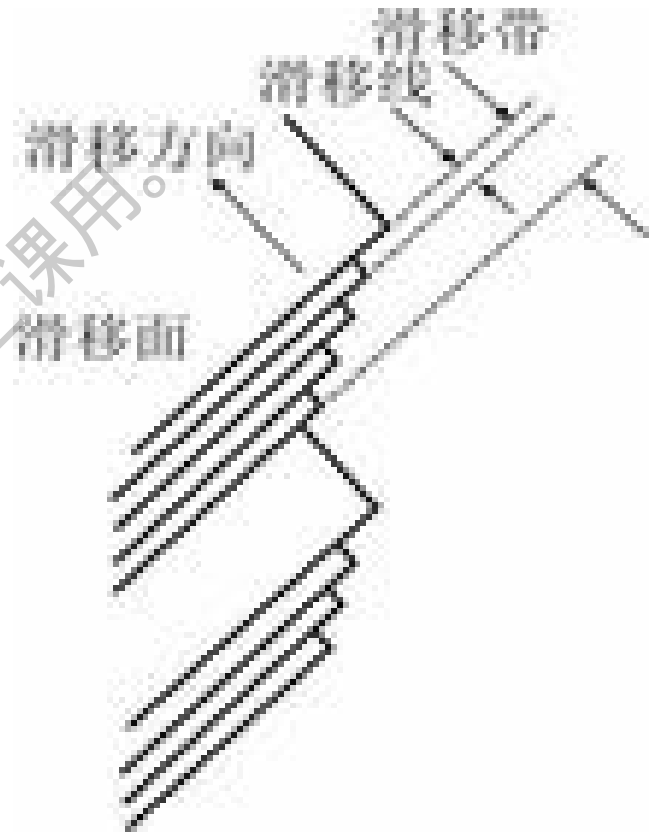
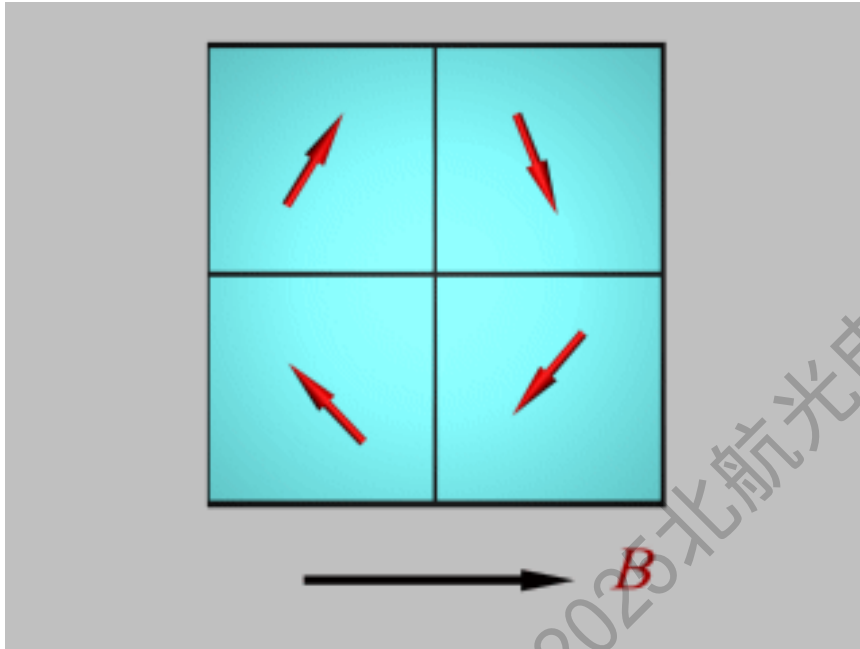
**概念：**磁畴、自发磁化

**畴：**普遍存在

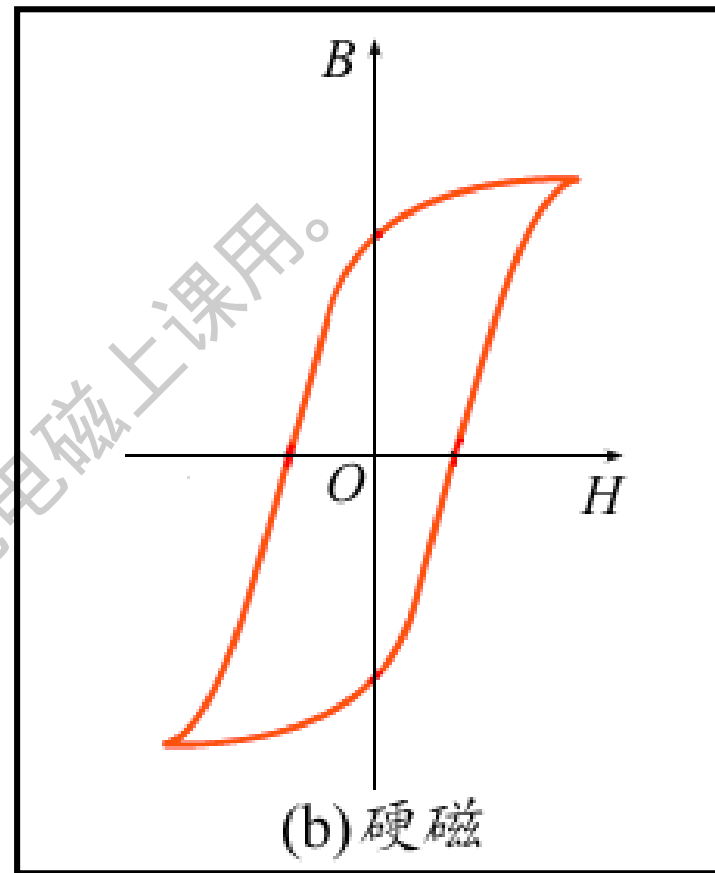
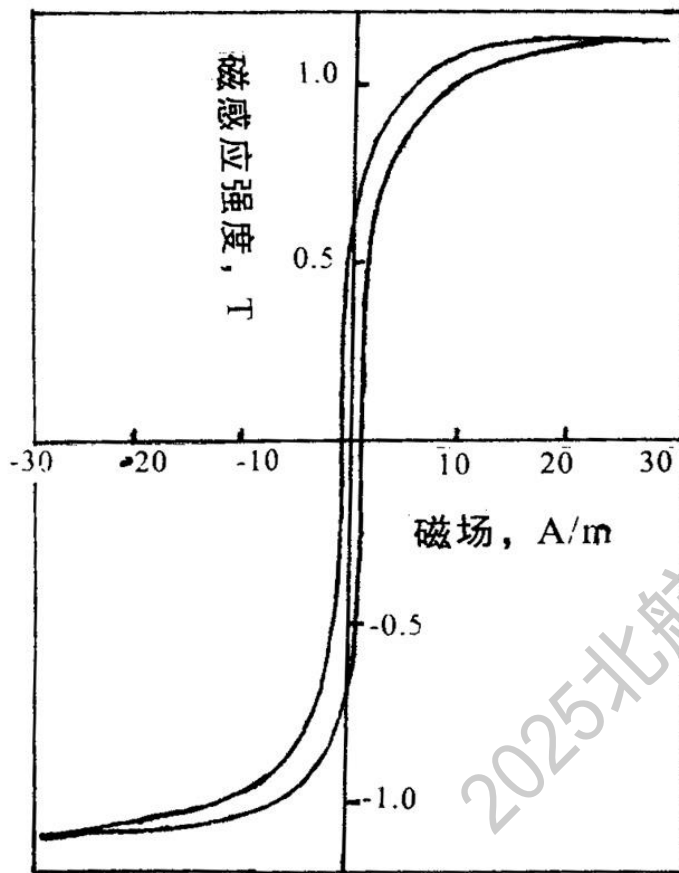




## 铁磁性物质的基本特征（2）-高磁化率



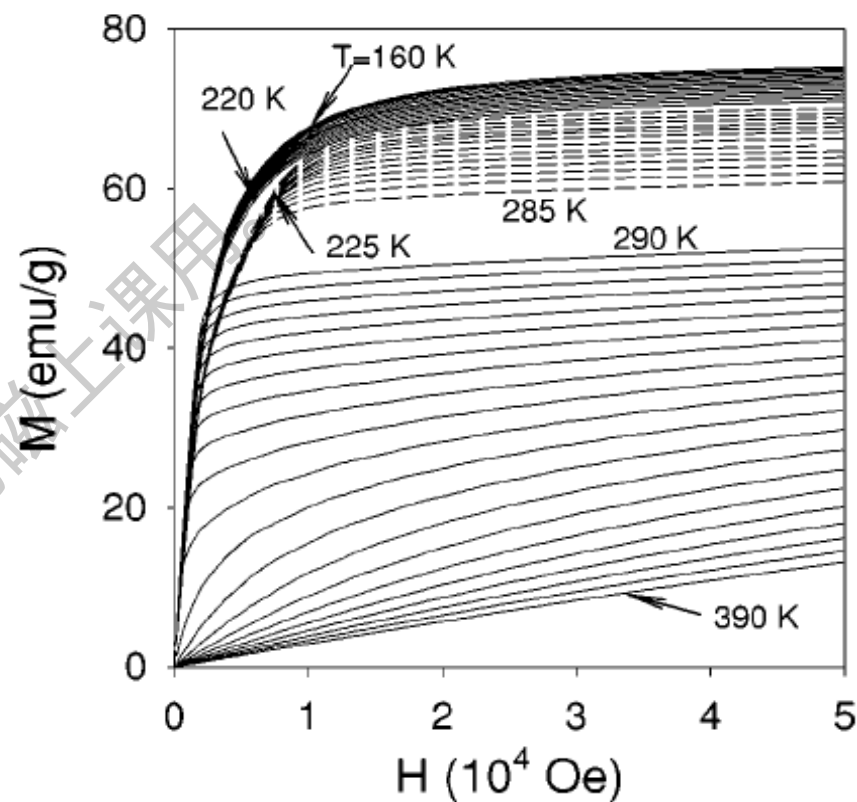
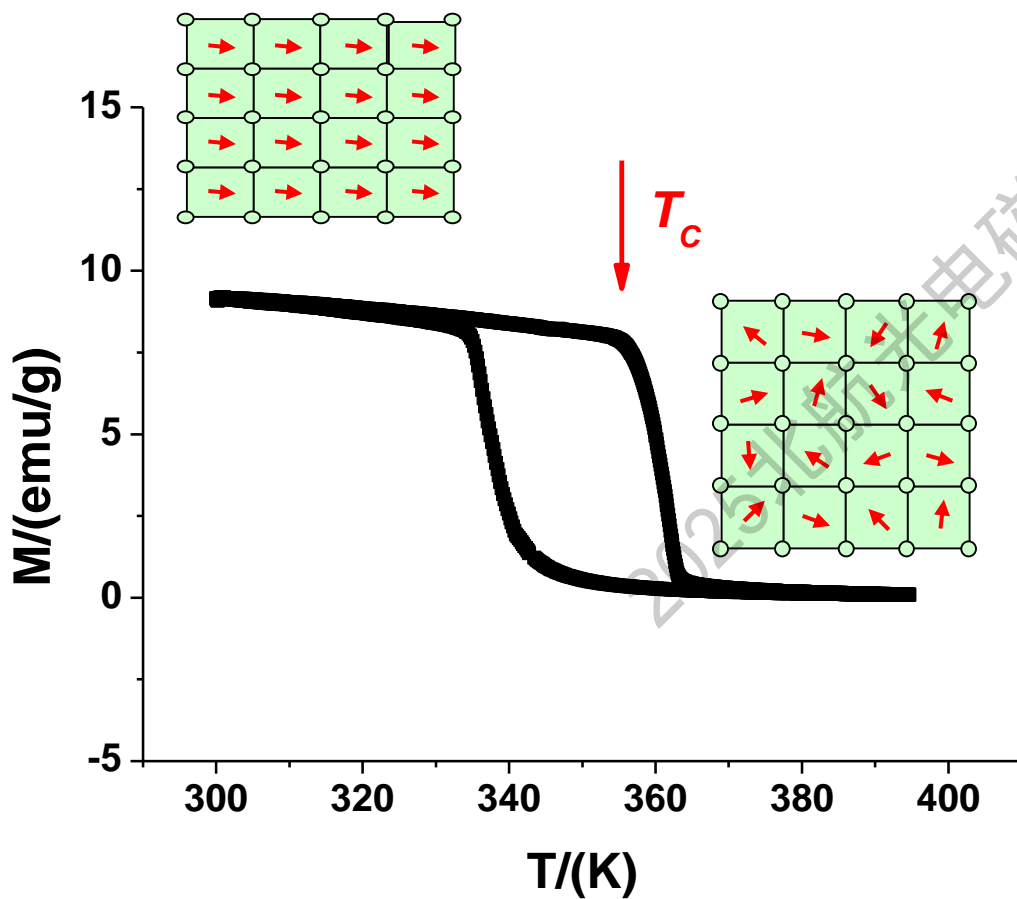
# 铁磁性物质的基本特征 (3) - 磁滞



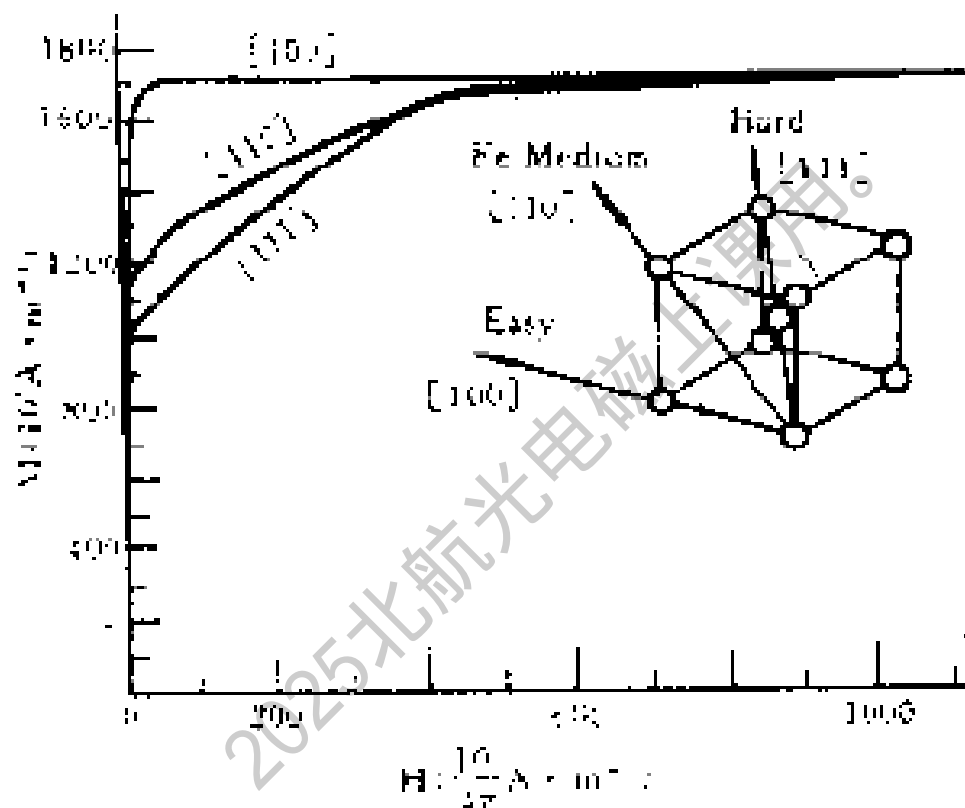
剩磁:  $M_r$

矫顽力:  $H_c$

# 铁磁性物质的基本特征 (4) - 居里温度 $T_C$

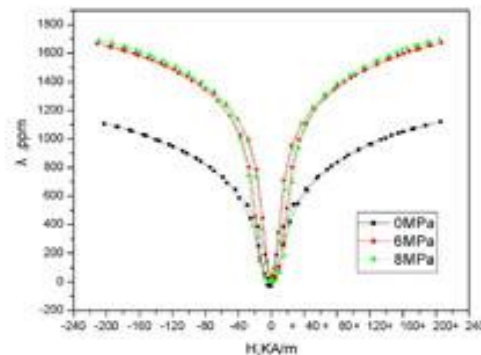
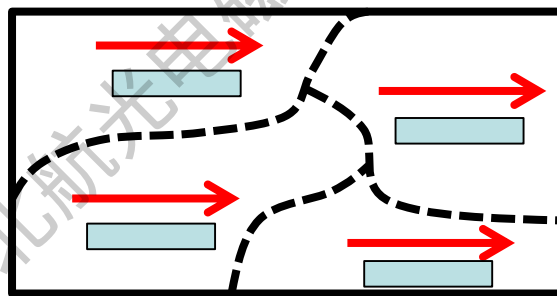
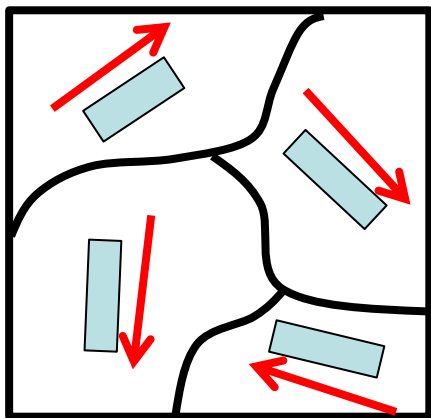
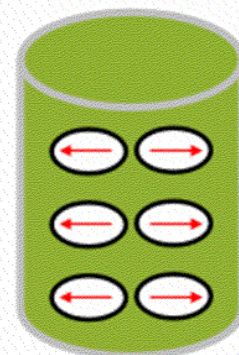
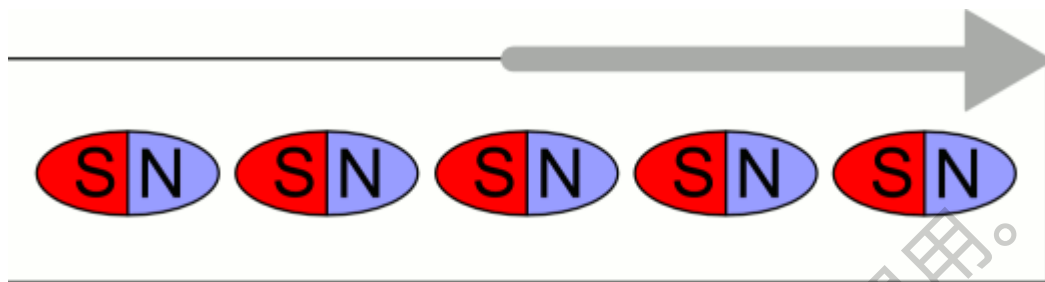


# 铁磁性物质的基本特征 (5) - 磁各向异性



晶体结构、样品形状、应力状态……

# 铁磁性物质的基本特征（6）—磁致伸缩



铁磁性材料的磁畴在外磁场取向作用下转动，改变了晶格间距，导致材料宏观上的形状改变。

# 铁磁性物质

## 基本特征：

- 磁畴、自发磁化
- 高磁化率
- 磁滞
- 居里温度
- 磁各向异性
- 磁致伸缩

## 基本参数：

- 饱和磁化强度
- 居里温度
- 矫顽力
- 剩磁
- 磁导率