

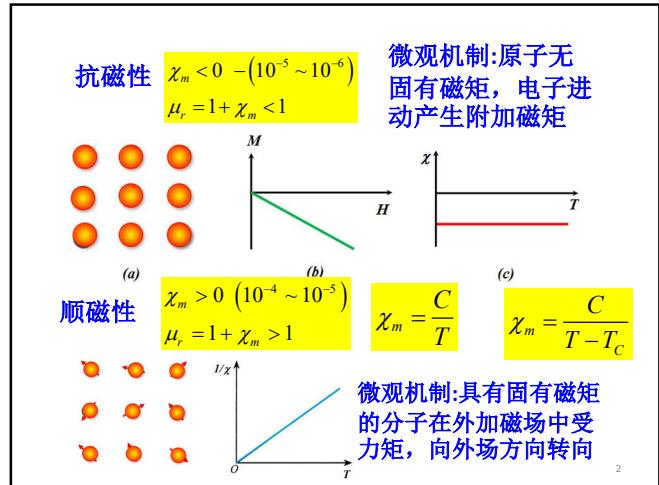
上节课主要内容

- 边值关系**
$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$(\bar{H}_1 - \bar{H}_2) \times \bar{n} = i_0, H_{1t} = H_{2t} \quad [\text{when } i_0 = 0]$$

$$\tan \theta_1 / \tan \theta_2 = \mu_1 / \mu_2$$
- 磁介质充满整个磁场空间**
$$\bar{B}(r) = \mu_r \bar{B}_0(r), \bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\bar{B}_0}{\mu_0} = \bar{H}_0$$

$$\bar{M} = \chi_m \bar{H} = (\mu_r - 1) \frac{\bar{B}_0}{\mu_0}, \bar{i}' = (\mu_r - 1) \bar{i}_0$$
- 介质分界面与 B 平行(重合)**
$$H = H_t, \bar{H} = \frac{\bar{B}_0}{\mu_0}, \bar{B} = \mu_0 \mu_r \bar{H} = \mu_r \bar{B}_0$$
- 介质分界面与 B 垂直**
$$B = B_n, M = M_n, i' = 0, \bar{B} = \alpha \bar{B}_0$$



4. 铁磁性材料

铁磁性材料

以铁、钴、镍和一些稀土元素(钆、镝、钬)以及它们的合金及氧化物为材料构成的介质,在磁场中显示出很强的磁性。

铁磁性材料的特点

M与H的关系不是线性关系,若仍用 $\bar{M} = \chi_m \bar{H}$

则 $\chi_m = \chi_m(H)$

函数关系相当复杂,通常由实验方法测定。

3

铁磁性材料中的磁畴

- 铁磁性物质中,由于原子之间自旋的强烈耦合,在铁磁质中会形成许多已经磁化的、磁场很强的小区域,这些磁化的小区域称为“磁畴”。各个磁畴间的交界面称为磁畴壁,磁畴的体积约 10^{-12} m^3 。
- 每个磁畴含大量原子,这些原子的磁矩排列整齐,但不同区域间的原子磁矩排列方向不同。
- 无外磁场时,热运动使各磁畴的磁矩方向各不相同,整个物体的磁矩的矢量和为零,铁磁质不显示磁性。

4

原子(Fe, Co, Ni)外层的一些电子,其自旋磁矩排列在同一方向,使原子呈现磁矩。邻近原子磁矩平行排列时能量较低,故铁磁体未加外场时就有磁畴。

纳米尺度磁畴的高分辨扫描透射电子显微像

5

铁磁性材料的磁化机制

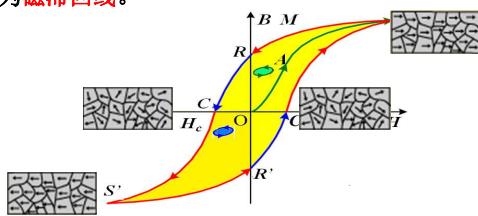
各磁畴沿外磁场转向

饱和状态, μ_r 很大

6

■ 磁滞现象和磁滞回线

- 当外磁场减小或撤掉时，由于掺杂和内应力等的作用，磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，在居里温度以下，外磁场中的磁化过程是不可逆的，表现出磁滞现象。
- 反复磁化时，磁化强度和磁场的关系是一闭合曲线，称为磁滞回线。



7

➤ OAS段称为起始磁化曲线。

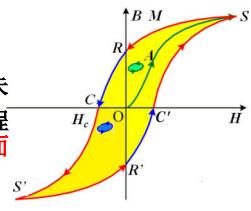
➤ 去掉外磁场($H=0$)仍保持剩余磁感应强度($M \neq 0$)和剩余磁感应强度($B \neq 0$)

➤ 当 $M(\text{or } B)=0$ 时， $H=H_c$ 称为矫顽力，软磁性与硬磁性材料由矫顽力而定

➤ 一个 H 值对应不只一个 B 或 M ，与磁化历史和过程有关 (记忆功能)

➤ 居里温度 T_c : $T < T_c$ 材料是铁磁性的，有磁滞现象， $T > T_c$ 材料转变为顺磁性，磁滞消失

➤ 磁滞损耗：一个磁化循环过程消耗的能量，由磁滞回线的面积确定。



8

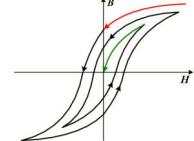
- 磁畴壁的位移是跳变式的、不连续的。铁磁性物质在外磁场中磁化实质上是它的磁畴区域逐渐变化的过程：与外场同向的磁畴不断扩大，不同向的磁畴逐渐减小。
- 在磁化曲线最陡区域，磁畴的移动会出现跃变，尤其硬磁材料更是如此。
- 无线电设备中，载流线圈中的铁芯在磁化时出现的磁畴跳动会造成一种噪声，这种现象称为巴克好森(H. Barkhausen)效应。



9

■ 去磁或退磁

➤ 外磁场反复变化法：根据铁磁性材料的磁化曲线，可通过外磁场反复变化其方向，同时使它的幅值逐渐变小，最后到零，使磁化物质去磁。录音机中磁带的交流抹音磁头就是利用这种方法



➤ 加热法：铁磁质温度升高到其居里温度以上时，磁性消失，由铁磁质变为顺磁质。原因是加热使磁介质中的分子、原子的振动加剧，提供了磁畴转向的能量，使铁磁质失去磁性。铁的居里温度为770°C。

➤ 敲击法：通过振动可提供磁畴转向的能量，使介质失去磁性。敲击永久磁铁会使磁铁磁性减小。

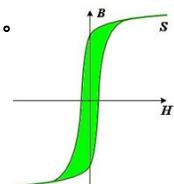
10

■ 铁磁性材料分类(根据矫顽力划分)

矫顽力： M (或 B)等于零时的 H

● 软磁性材料：

- 相对磁导率和饱和磁感应强度较大，但矫顽力小，磁滞回线面积窄而长，损耗小。
- 易磁化、易退磁、剩磁很小。
- 由于软磁材料磁滞损耗小，适合用在交变磁场中，如变压器铁芯，继电器、电动机转子、定子都是用软磁性材料制成。



软铁、坡莫合金、铁铝合金、铁镍合金

11

◆ 硬磁性材料

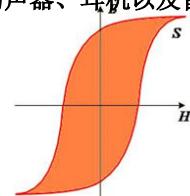
➤ 剩磁和矫顽力较大；

➤ 磁滞回线面积大，磁滞损耗大，磁滞特性非常显著，磁滞回线较粗，剩磁很大。

➤ 材料充磁后不易退磁，适合做永久磁铁。

➤ 硬磁性材料如碳钢、铝镍钴合金、铝钢等

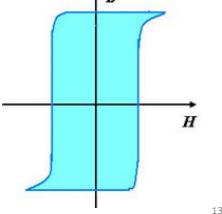
➤ 可用于磁电式电表、永磁扬声器、耳机以及雷达中的磁控管等。



12

◆ 矩磁性材料(非金属氧化物—铁氧体)

- > 剩磁和矫顽力较大;
- > 磁滞回线面积大, 磁滞损耗大, 磁滞特性非常显著。磁滞回线呈矩形;
- > 剩磁接近于磁饱和感应强度, 有高磁导率、高电阻率;
- > 它是由 Fe_2O_3 和其他二价的金属氧化物(如 NiO , ZnO)等粉末混合烧结而成;
- > 可作磁性记忆元件。



13

【例23】一半径为 R 、厚度为 d 的圆盘, 均匀磁化, 磁化强度 M 垂直于圆盘表面, 求(1)圆盘内、圆盘表面、圆盘侧面的磁化电流; (2)圆盘中心和圆盘两面外靠近中心(侧视图中1、2、3点)的磁场强度和磁感应强度。

【解】(1)设 M 方向为 z 方向, 均匀磁化

$$\text{圆盘内 } \bar{j}' = \nabla \times \bar{M} = 0$$

$$\text{圆盘表面 } \bar{i}' = (\bar{M}_1 - \bar{M}_2) \times \bar{n} = \bar{M} \times \bar{n}$$

$$\bar{M} = M \bar{e}_z, \bar{n} = \pm \bar{e}_z \quad \rightarrow \quad \bar{i}' = 0$$

$$\text{圆盘侧面 } \bar{i}' = \bar{M} \times \bar{n}, \bar{M} = M \bar{e}_z, \bar{n} = \bar{e}_r$$

$$\bar{i}' = M \bar{e}_z \times \bar{e}_r = M \bar{e}_r \quad \text{侧面有环绕的磁化面电流}$$

由毕-萨定律+叠加原理得半径为 R 的环电流 I 在圆心的磁感应强度为

$$I' = \frac{I}{d} \quad \bar{i}' = M \bar{e}_r \quad I = i' d = M d$$

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \bar{e}_z \quad \left. \begin{array}{l} \text{圆盘中心点2处} \\ \bar{B}_2 = \frac{\mu_0 M d}{2R} \bar{e}_z \end{array} \right\}$$

B 的法线方向连续 $B_{1n} = B_{2n} = B_{3n}$

$$\bar{B}_1 = \bar{B}_2 = \bar{B}_3 = \frac{\mu_0 M d}{2R} \bar{e}_z$$

$$\bar{H}_1 = \frac{\bar{B}_1 - \bar{M}_1}{\mu_0} \xrightarrow{M_1=0} \frac{Md}{2R} \bar{e}_z$$

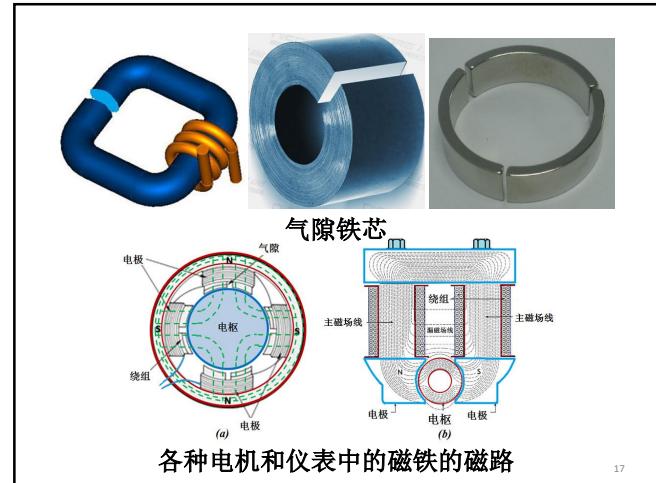
$$\bar{H}_2 = \frac{\bar{B}_2 - \bar{M}_2}{\mu_0} \xrightarrow{M_2=M} \left(\frac{d}{2R} - 1 \right) M \bar{e}_z$$

$$\bar{H}_3 = \frac{\bar{B}_3 - \bar{M}_3}{\mu_0} \xrightarrow{M_3=0} \frac{Md}{2R} \bar{e}_z$$

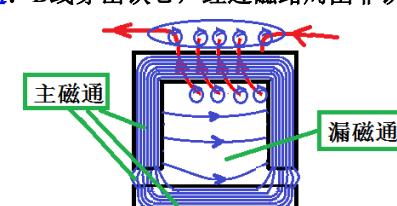
15

§ 5.2.2 磁路定理与磁屏蔽

- ◆ 很多电工设备中需要较强的磁场或较大的磁通。由于铁磁性物质的磁导率($\mu >> 1$)远比非铁磁性物质的磁导率大, 所以将铁磁性物质做成闭合或近似闭合的环路, 即所谓铁芯。
- ◆ 绕在铁芯上的线圈通以较小的电流(励磁电流)便能得到较强的磁场。
- ◆ 这种情况下的磁场差不多约束在限定的铁芯范围内, 周围非铁磁性物质(包括空气)中的磁场很微弱。
- ◆ 这种约束在限定铁芯范围内的磁场称为磁路。



- ◆ 磁路的磁通可以分为两部分: **主磁通**和**漏磁通**。
- ◆ **主磁通**: 磁感应线绝大部分是通过磁路(包括气隙);
- ◆ **漏磁通**: B 线穿出铁芯, 经过磁路周围非铁磁性物质。



为了减少漏磁通采取很多措施, 使漏磁通只占总磁通的很小一部分。所以对磁路的初步计算中常将漏磁通略去不计。

一、磁路定律

1. 磁路的基尔第一霍夫定律

由于磁通的连续性, 如果忽略漏磁通, 则:

$$\sum_i \Phi_i = 0$$

与电路的基尔霍夫第一定律对应

$$\Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_1 \quad \Phi = BS$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

$$\Phi \Leftrightarrow I \quad \sum_i I_i = 0$$

2. 磁路的基尔第二霍夫定律

磁位差 $U_m = Hl$ 磁动势 \mathcal{E}_m $\mathcal{E}_m = NI$

电位差 $U = El$

$$U_m \Leftrightarrow U$$

$$\mathcal{E}_m \Leftrightarrow \mathcal{E}$$

电动势 \mathcal{E}

$$\sum_i H_i l_i = \sum_j N_j I_j \rightarrow \sum U_m = \sum \mathcal{E}_m$$

安培环路定律应用于磁路 \rightarrow 磁路的基尔霍夫第二定律

$$H_i = \frac{B_i}{\mu_0 \mu_{ri}} = \frac{B_i S_i}{\mu_0 \mu_{ri} S_i} = \frac{\Phi_{mi}}{\mu_0 \mu_{ri} S_i}$$

对整个闭合回路应用安培回路定理, 得

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{l} = \sum_{i=1}^N \int H_i dl_i = \sum_{i=1}^N \int \frac{\Phi_m dl_i}{\mu_0 \mu_{ri} S_i} = \Phi_m \sum_{i=1}^N R_{mi}$$

$$R_{mi} = \int \frac{dl_i}{\mu_0 \mu_i S_i} \quad R = \rho \int \frac{dl}{S}$$

磁阻 $R_m \Leftrightarrow R$ **电阻**

$$U_m = \Phi_m R_m \quad U = IR$$

磁路的欧姆定律

磁场垂直于介质界面

由安培环路定理

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{l} = \int \frac{1}{\mu_r \mu_0} \bar{B}_1 \cdot d\bar{l} + \int \frac{1}{\mu_0} \bar{B}_2 \cdot d\bar{l}$$

$$\left. \begin{aligned} B &= B_n \\ B_{ln} &= B_{2n} \end{aligned} \right\} B_1 = B_2 \quad \text{忽略漏磁, } B \text{ 近似相等}$$

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{l} = B \left(\frac{l}{\mu_r \mu_0} + \frac{l_0}{\mu_0} \right) = \Phi_m \left(\frac{l}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_0}{\mu_0 S} \right) = NI_0$$

令

$$r_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

$$R_m = \frac{l_0}{\mu_0 S}$$

$$\Phi_m (R_m + r_m) = \mathcal{E}_m$$

全磁路的欧姆定律

$$I(R + r) = \mathcal{E}$$

$$\Phi_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m + r_m} = \frac{NI_0}{\left(\frac{l}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_0}{\mu_0 S} \right)}$$

$$B = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{NI_0}{\left(\frac{l}{\mu_r \mu_0} + \frac{l_0}{\mu_0} \right)} = \frac{\mu_0 \mu_r NI_0}{(l + \mu_r l_0)}$$

由于 μ_r 值很大, 改变很小的 l_0 就可以改变整个 B !

【例24】求气隙中的 H

【解】用磁路的欧姆定律

$$\Phi_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sum_i R_{mi}} = \frac{(N_1 + N_2) I_0}{\frac{l_1}{\mu_1 \mu_0 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \mu_0 S_2} + \frac{l_3}{\mu_0 S_3}}$$

在气隙中 $\Phi_m = BS_3 = \mu_0 HS_3 \quad N = N_1 + N_2$

所以 $H = \frac{\Phi_m}{\mu_0 S_3} = \frac{NI_0 / S_3}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{S_3}}$

H 对气隙(l_3) 的改变很敏感

气隙对磁阻影响极大

磁阻较小 磁阻中等 磁阻较大

变压器铁芯通常用闭合磁铁

$$r_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}, \quad R_m = \frac{l_0}{\mu_0 S}$$

25

二、电磁铁

- 电磁铁由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。它是利用通电的铁芯线圈吸引衔铁或保持某种机械零件、工件位于固定位置的一种电器。
- 分两类：直流电磁铁和交流电磁铁。
- 当电源断开时，电磁铁的磁性消失，衔铁或其他零件即被释放。

26

- 直流电磁铁吸力大小：

$$F = \frac{B_0^2 S_0}{2 \mu_0} \quad B_0 \text{ 气隙中的磁感应强度, } S_0 \text{ 气隙截面积}$$

- 交流电磁铁磁感应强度为 $B_0 = B_m \sin \omega t$
- 交流电磁铁吸力瞬时值为：

$$f = \frac{1}{2} B_0^2 S_0 = \frac{1}{2} B_m^2 S_0 \sin^2 \omega t = F_m \sin^2 \omega t \quad F_m = \frac{B_m^2 S_0}{2 \mu_0}$$

- 交流电磁铁吸力平均值为： $F = \frac{1}{T} \int_0^T f dt = \frac{1}{2} F_m$

27

三、磁屏蔽

- 静磁屏蔽：利用高磁导率 μ 的铁磁材料做成的屏蔽罩来屏蔽外加的静磁场。

屏蔽罩常用高磁导率 μ 的铁磁材料如软铁、硅钢、坡莫合金等，故静磁屏蔽又称铁磁屏蔽

28

- 屏蔽系数 K ：腔内磁场强度 H_1 与外部磁场强度 H_0 的比值，即

$$K = \frac{H_1}{H_0} \quad K \text{ 值越小, 屏蔽效果越好}$$

- 对于二维磁场，用解析算法可获得长圆铁管（内外半径为 R_1 和 R_2 ）的屏蔽系数

$$K \approx \frac{4}{\mu_r \left[1 - (R_1 / R_2)^2 \right]} \quad \mu_r \text{ 为铁管的相对磁导率} \quad (\mu_r \gg 1)$$

- μ_r 越大，则 K 值越小，屏蔽效果越好
- 为了获得更好的屏蔽效果，常采用多层屏蔽的办法。

29

§ 5.2.3 特殊材料的磁性

一些材料，特别是在元素周期表中靠近铁磁性材料铁、钴、镍的元素，如铬和锰，它们不是铁磁性的，而是反铁磁性的或亚铁磁性的。

铁磁性 (Fe, Co, Ni)	反铁磁性 (FeO, CoO, NiO)	亚铁磁性 (Fe ₃ O ₄)
---------------------	-------------------------	---

30

1. 反铁磁性

- 反铁磁性是一种特殊的磁性，其磁化率数值与弱磁性物质相当， χ_m 的数值为 10^{-5} 到 10^{-2} 。
- 与顺磁体不同的是，微观上反铁磁材料原子的自旋结构是有序化的，**磁矩有序排列**。
- 无外加磁场的情况下，反铁磁性是指**电子自旋反向平行排列**。
- 在同一子晶格中有自发磁化强度，电子磁矩是同向排列的；在不同子晶格中，电子磁矩反向排列。
- 两个子晶格中自发磁化强度大小相等，方向相反。**

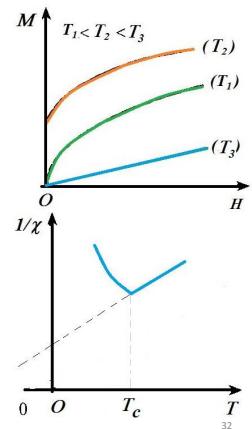
31

加磁场时，由于自旋间反平行耦合的作用，正负自旋转向磁场方向的转矩很小，因而**磁化率比顺磁磁化率小**。

随着温度升高，有序的自旋结构逐渐被破坏，磁化率增加，这与正常顺磁体情况相反。

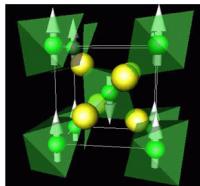
然而在某个临界温度(**奈尔温度** T_N)以上，自旋有序结构完全消失，**反铁磁体变成通常的顺磁体**。

磁化率在临界温度(奈尔温度)显示出一个尖锐的极大值。



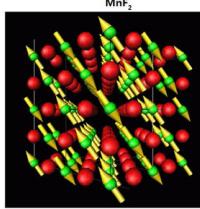
32

许多过渡元素的化合物具有反铁磁性，如 MnF_2 就是一种结构简单的反铁磁体，图中可看出原子的自旋是反向排列的。



33

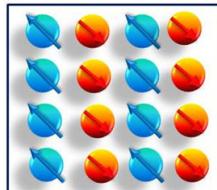
最著名的反铁磁体是 MnO ，它为C.G.Shull赢得了1994年度诺贝尔奖。C.G.Shull人用中子衍射方法测定了 MnO 的原子磁矩，从微观磁结构直接证实了，**不同子晶格上的原子磁矩具有反平行的取向**。



33

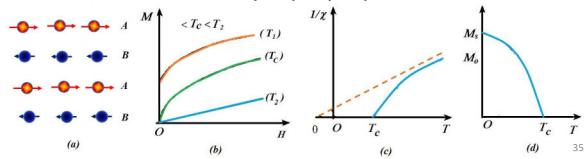
2. 亚铁磁性

- 在亚铁磁体中，A和B次晶格由不同的磁性原子占据，而且有时由不同数目的原子占据；
- A和B位中的磁性原子成反平行耦合，但**A晶格和B晶格离子磁矩大小不等**。
- 反铁磁的自旋排列导致一个**自旋未能完全抵消的自发磁化强度**，这样的磁性称为亚铁磁性。



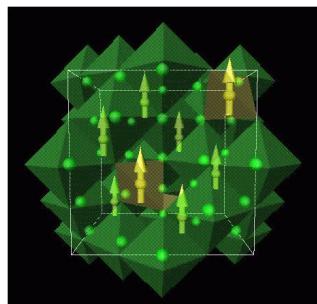
34

- 在居里温度以上，磁化率倒数随温度的变化也不同于铁磁性，具有**沿温度轴方向下凹的双曲线形式**，此双曲线从高温起的渐近线同温度轴相交于负的绝对温度值。
- 该现象在石榴石和稀土金属-过渡金属混合物中容易被观测到。
- 亚铁磁性常在有些具有尖晶石结构的氧化物中观察到，其分子式为 $MO\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，M代表某种二价金属，例如Zn, Cd, Fe, Ni, Co等。



35

Fe_3O_4 是常见的铁的氧化物，立方结构，有 Fe^{3+} 和 Fe^{4+} 两种化合价，分别取相反的自旋取向，磁矩为 $-3 \mu_B$ 和 $4 \mu_B$ 。

 Fe_3O_4

36

磁性石榴石 Garnet

- 化学成分较复杂的硅酸盐矿物，总是同时含有两种金属元素，展现亚铁磁性
- 中国古时称为紫鸦鸟或子牙鸟，石榴石也是一种结婚2周年的纪念宝石

石榴石(Garnet)

常见的石榴石为红色，但其颜色种类十分广阔，足以涵盖整个光谱的颜色。

37

§ 5.3 新型材料中的磁现象

§ 5.3.1 纳米材料中的磁性

- 鸽子、海豚、蝴蝶、蜜蜂等生物体中存在超微磁性颗粒，使这类生物在地磁场导航下能辨别方向，具有回归的本领。
- 纳米磁性材料指材料尺寸限度在纳米级，通常在1~100nm的准零维超细粉、一维超细纤维(丝)、二维超薄膜或由它们组成的固态或液态磁性材料。
- 尺寸为纳米量级的材料，表面和量子隧道等效应引发了结构和能态的变化，产生了许多独特的光、电、磁、力等物理化学性能，有极高的活性。

38

纳米磁性材料的特殊磁性能主要有：

- 量子尺寸效应
- 高矫顽力
- 超顺磁性
- 低居里温度
- 宏观量子隧道效应
- 磁有序颗粒的小尺寸效应
- 特异的表现磁性

39

高矫顽力：大块纯铁的矫顽力约为80A/m，而当颗粒减小到0.02μm以下时，其矫顽力可增加1000倍。利用高矫顽力的特性，已制成高贮存密度的磁记录磁粉，大量应用于磁盘、磁卡、磁钥匙等。

超顺磁性：当颗粒尺寸减小到一定尺寸，如α-Fe在16nm以下时，矫顽力反而降低到零，呈现出超顺磁性(外磁场作用下其顺磁性磁化率远高于一般顺磁材料的磁化率)。此时在不同温度下测量的磁化曲线是重合的，并且不会出现磁滞现象。利用超顺磁性可制成用途广泛的磁性液体。

磁性纳米粒子相互作用示意图

40

低居里温度：理论和实验研究表明，随着铁磁薄膜厚度的减小，居里温度下降。对于纳米颗粒，由于小尺寸效应和表面效应，导致纳米粒子的本征和内禀的磁性发生变化，因此具有较低的居里温度。

Material	Shape	(Atomic Number) ^{1/2}	Curie Temperature (K)
Co	Spherical	~1.8	~1400
Co	Cubic	~1.8	~1200
Fe	Spherical	~2.0	~1000
Fe	Cubic	~2.0	~900
Ni	Spherical	~2.5	~600
Ni	Cubic	~2.5	~500

金属Co, Fe和Ni纳米颗粒随尺寸的减少，对应的居里温度降低

41

磁流体中的纳米磁性粒子和磁流体艺术

42

§ 5.3.2 巨磁电阻材料

★ 磁阻效应：物质在一定磁场下电阻改变的现象。

$$MR = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_H - \rho_0}{\rho_0}$$

大多数金属中，电阻的变化是正的；多数过渡金属的合金及铁磁体中，其变化是负的。

★ “巨磁阻效应”(GMR)：在某种条件下，电阻率减小的幅度相当大，比通常磁性金属与合金材料的磁电阻值约高10余倍，称为GMR；

★ “超巨磁阻效应”(CMR)：在很强的磁场中某些绝缘体会突然变为导体，称为CMR。

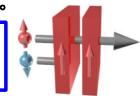
43

➤ 1986年德国科学家格林贝格小组有一重要的发现，就是在Fe/Cr/Fe三层膜中观察到两个铁层之间通过铬层产生耦合，实验结果显示电阻下降了1.5%。

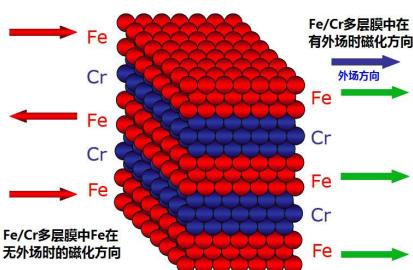
➤ 1988年法国科学家费尔小组在[Fe/Cr]周期性多层膜中，观察到当施加外磁场时，其电阻下降更加明显，变化率高达50%，因此称之为巨磁电阻效应。

➤ 基于GMR的发现，一个新的学科分支—磁电子学被提出来了。此后人们一直致力于将GMR技术转化为信息技术(IT)：1990年仅为0.1 Gbit/in²，1999年以GMR多层膜为磁头的硬盘驱动器(HDD)进入市场，其存储密度达到11 Gbit/in²，2012，达到1 Tbit/in²。

2007年费尔和格林贝格因“巨磁阻”现象而获得诺贝尔物理学奖



44

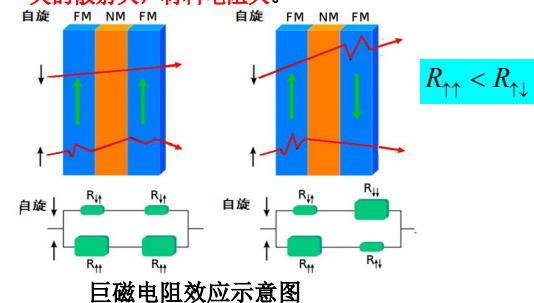


- Fe/Cr/Fe系统中，相邻铁层间存在耦合，随铬层厚度的增加，铁层磁矩从反平行取向到平行取向交替变化。
- 外磁场可使铁磁层中的反平行磁化状态发生变化。
- 通以电流时，这种磁化状态的变化以电阻变化的形式反映出来，这就是GMR现象的物理机制。

45

➤ 当铁磁层的磁矩相互平行时，载流子与自旋相关的散射最小，材料有最小的电阻。

➤ 当铁磁层的磁矩相互反平行时，载流子与自旋相关的散射大，材料电阻大。



46

§ 5.3.3 超导体的磁性

1. 迈斯纳效应

- 1911年Kamerling Onnes发现超导电性。
- 1933年迈斯纳和奥森费尔德发现，超导体放入磁场中时，表面会产生超导电流，超导电流产生的磁场与外磁场抵消，使超导体内的磁感应强度完全为0，表现出完全抗磁性。
- 不管加磁场的次序如何，超导体内部的磁场总保持为0，与加磁场的历史无关，该效应称为迈斯纳效应。
- 由于无电阻，表面超导电流将一直持续下去。一般超导表面磁场透入深度为10⁻⁴~10⁻⁶ cm。

47

➤ 不管如何加磁场，超导体内部的磁场皆为零，即

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{M} + \bar{H}) = 0 \Rightarrow \bar{M} = -\bar{H} \quad \text{完全抗磁性}$$

$$\bar{B} = \mu_r \mu_0 \bar{H} \Rightarrow \mu_r = 0$$

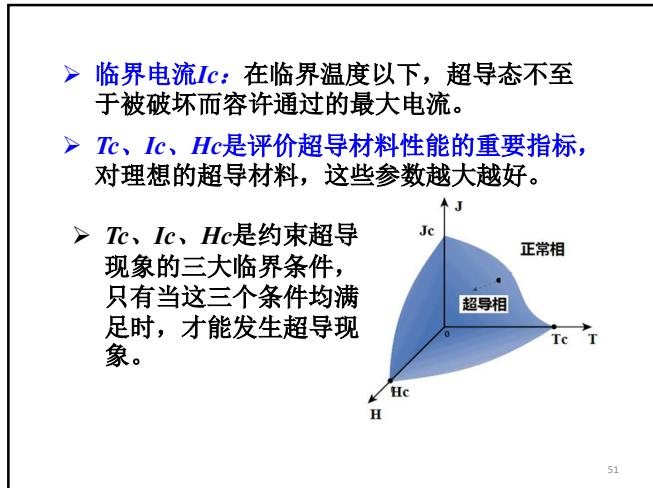
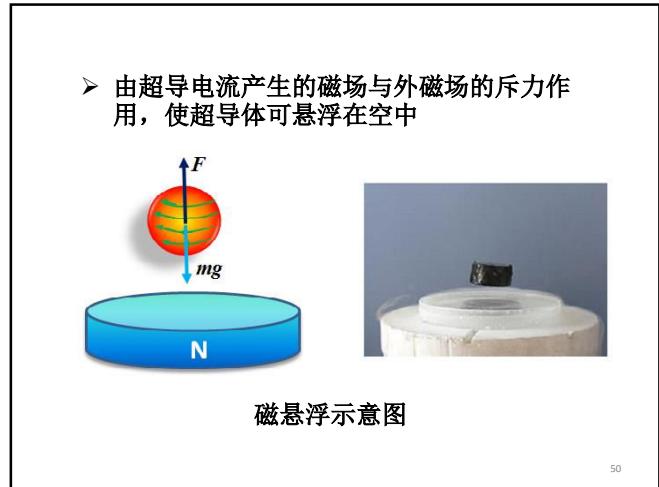
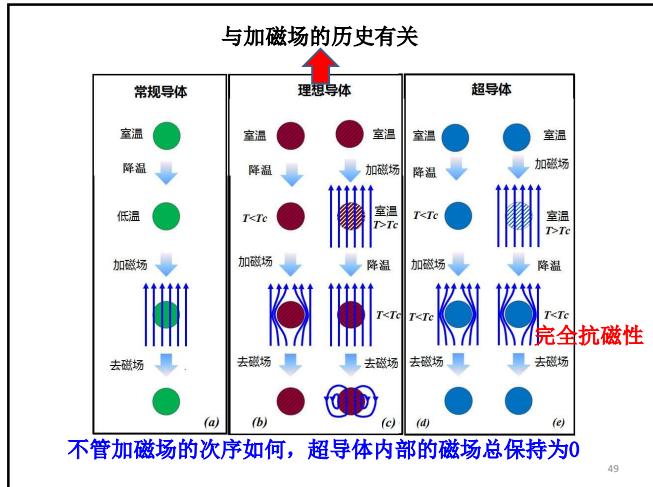
➤ 超导转变时，磁导率突变到0，内部磁通全部从超导体内排出，此过程体系对外做功。

➤ 加大磁场时，也可以破坏超导态。

➤ 超导体在保持超导态不至于转变为正常态时所能承受外加磁场的最大强度H_c，称为超导体的临界磁场H_c(T)。临界磁场与温度有关

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

48



2. 伦敦方程

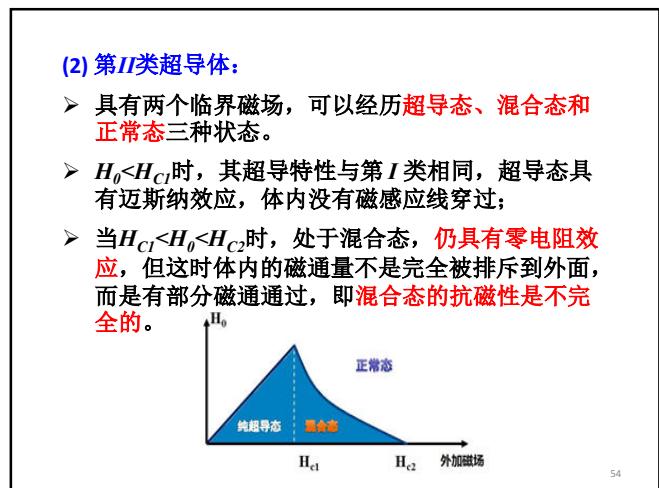
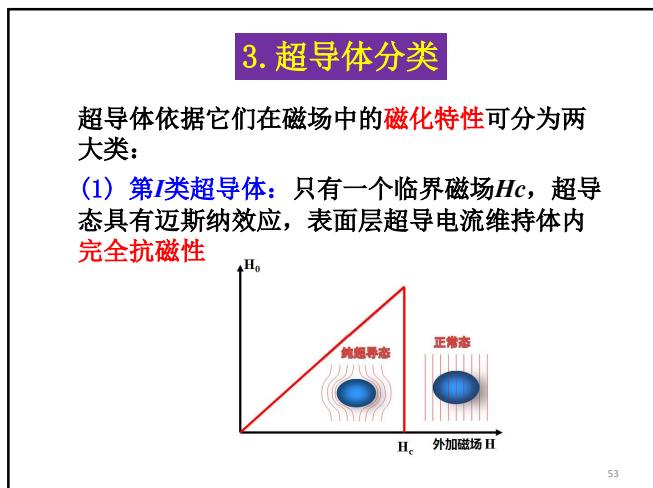
超导电流密度 J_s
$$\frac{d\bar{J}_s}{dt} = \frac{n_s e^2}{m^*} \vec{E} = \alpha \vec{E}$$
 伦敦第一方程

$\nabla \times \bar{J}_s = -\alpha \vec{B}$ 伦敦第二方程

$B = B_0 e^{-x/\lambda_s}$

B_0 是样品表面的磁感应强度, 即超导体表面的磁场随特征深度 λ_s 按指数衰减。其透入深度一般在 $10^{-6}\sim 10^{-5}$ m 之间。

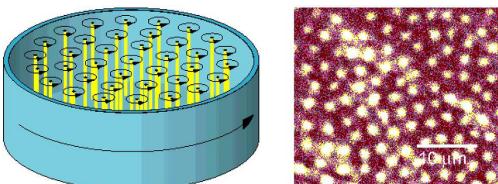
52



第II类超导体中，磁场其实是以量子化的量子磁通涡旋进入超导体内部的，一个磁通量子为 $\Phi_0=h/2e$ 。

低温低场下，量子磁通涡旋有序排列，这样可使超导体中电子运动的阻力消失，又可使磁场能够从点阵的通道通过。

第Ⅱ类超导体可以承受比第Ⅰ类超导体高达数十倍的磁场，因此第Ⅱ类超导体较有实用价值。高温超导陶瓷均属于第Ⅱ类超导体。迄今为止，具有高临界温度、高临界磁场和高临界电流密度的超导体都是第Ⅱ类超导体。



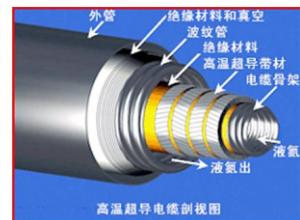
量子磁通涡旋阵列示意图和实验观测图

55

超导材料的应用



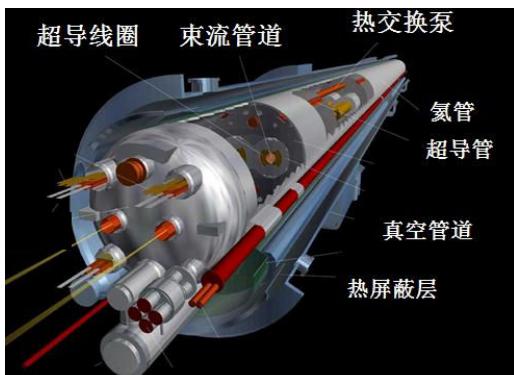
(a)



(b)

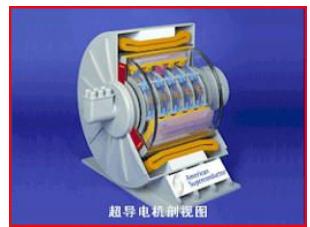
用超导材料制成的线材和电缆

56



目前最大的加速器对撞机LHC加速管道的超导管道结构

57



超导电机

58

问题

作业

- (1) 巨磁阻及其应用 5.17, 5.18, 5.19,
 - (2) 磁畴及其成因 5.20, 5.21
 - (3) 超导体的磁性及磁悬浮



Thank you!