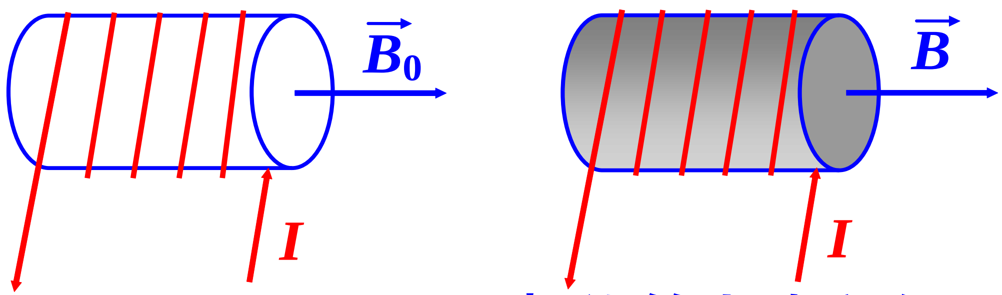
磁场中的磁介质

§ 16.1 磁介质　磁化强度

磁介质： 是指放在磁场中受磁场影响或反过来影响原来磁场的物质。

一、磁介质的分类



螺线管内为真空　　螺线管内填充介质

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

传导电流产生

介质磁化后的附加磁场

磁介质的<u>相对磁导率</u>μ_r：　$\mu_r = \dfrac{B}{B_0}$

三类磁介质

$\mu_r \le 1$，抗磁质 $B < B_0$

如 锌、铜、水银、铅等

$\mu_r \ge 1$，顺磁质 $B > B_0$

如 锰、铬、铂、氧等

弱磁性物质

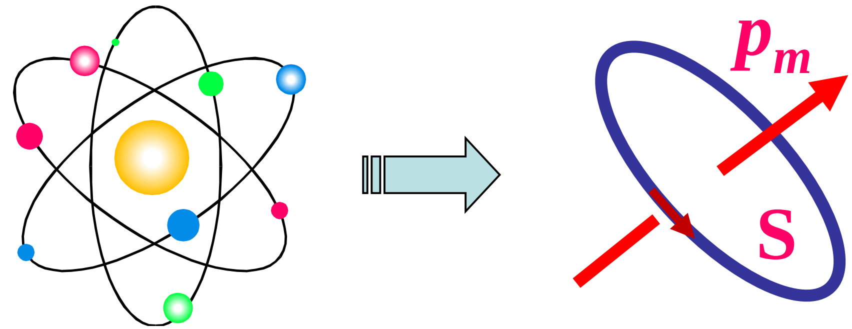
$\mu_r \approx 1$

$\mu_r >> 1$，铁磁质 $\boldsymbol{B} >> \boldsymbol{B}_0$ ----强磁性物质

$(10^2 \sim 10^4)$具有显著增强原磁场的性质

二、 磁介质的磁化 磁化电流

1. 分子电流 分子磁矩



电子的运动（轨道、自旋）-----磁效应

核（质子、中子）的运动 -----磁效应(可忽略)

分子对外界磁效应的总和可用一个等效的圆电流来代替，称为分子电流，其磁矩称为分子磁矩 $\vec{p}_m$

$$\vec{p}_m = \vec{p}_{ml} + \vec{p}_{ms}$$

轨道磁矩　　自旋磁矩

$$\vec{p}_m \begin{cases} \neq 0 & \text{顺磁质} \\ = 0 & \text{抗磁质} \end{cases}$$

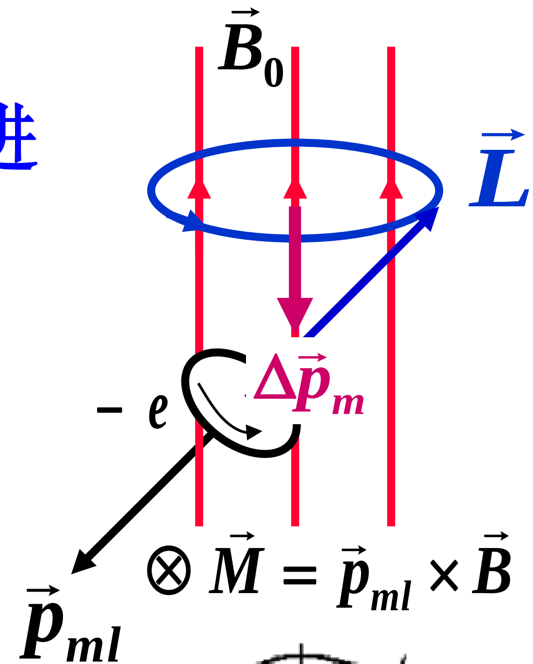
2. 磁化的微观解释

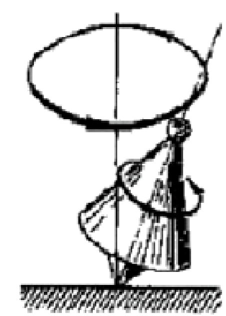
1）抗磁质

轨道磁矩　自旋磁矩

无外场： $\vec{p}_m = \vec{p}_{ml} + \vec{p}_{ms} = 0$ 　不显示磁性。

有外场：分子中的电子轨道角动量进动:轨道角动量绕磁场旋进





进动产生一个与外场方向相反的附加轨道磁矩 $\Delta\vec{p}_m$

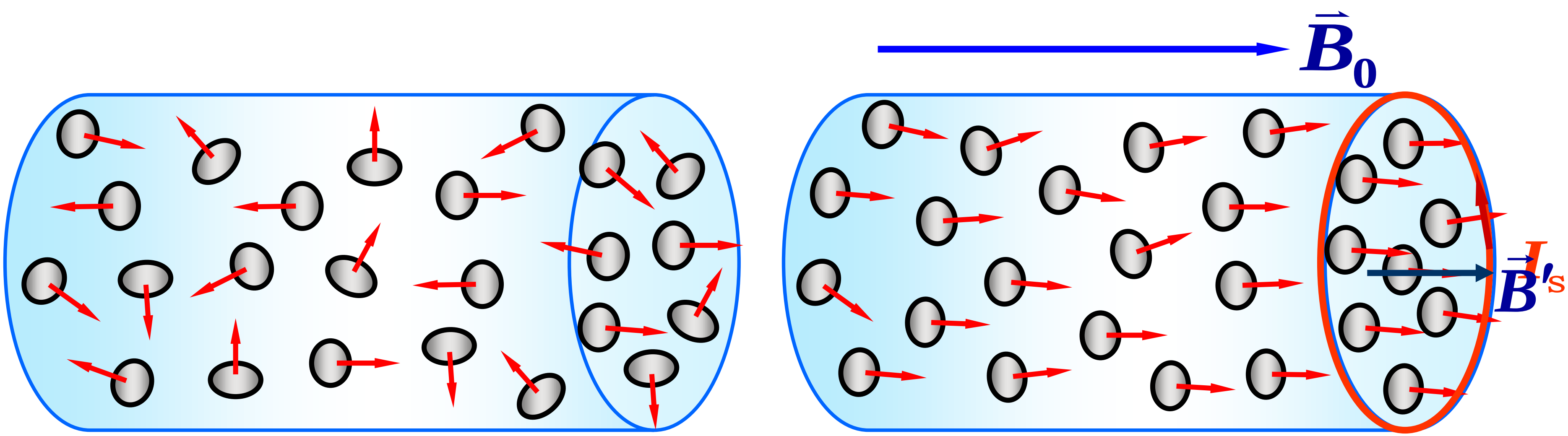
磁化： $\vec{B}'$方向与$\vec{B}_0$方向相反

介质内的磁场 $B = B_0 - B'$ 减弱

2）顺磁性

无外场：$\vec{p}_m = \vec{p}_{ml} + \vec{p}_{ms} \neq 0$　　取向无规则，不显示磁性。

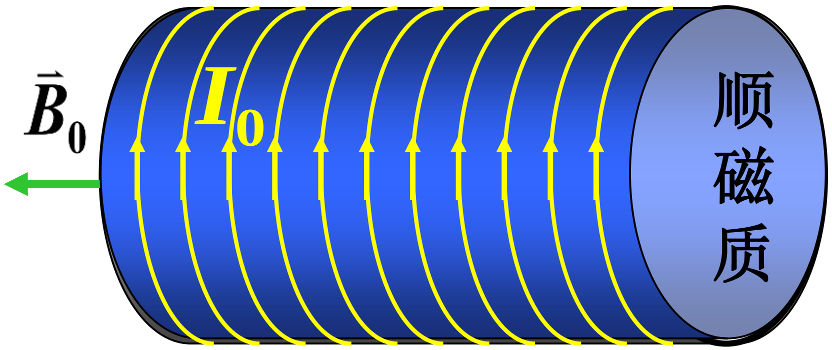
有外场：
- 抗磁性：$\Delta\vec{p}_m$（可忽略）
- 分子磁矩转向，发生磁化 ⟶ 磁化电流

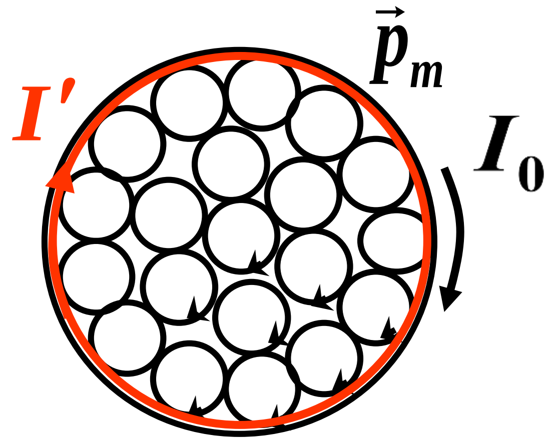


介质内的磁场 $B = B_0 + B'$ 增强。

转向磁化 ⇨ 磁化电流（束缚电流）

如 载流长直螺线管内部充满均匀各向同性介质





磁化电流 ⇨ $\boldsymbol{B'}$　　$\vec{\boldsymbol{B}}'$方向与 $\vec{\boldsymbol{B}}_0$方向相同

由于分子磁矩的取向一致 相对应的分子电流在介质内部相互抵消，最外层分子电流的表面部分未被抵消，其宏观效果相当于一个沿介质表面流动的大环形表面电流，称为磁化面电流。

磁化程度？

三、 磁化强度

电介质极化强度

1. 磁化强度 $\vec{M}$

$$\boxed{\vec{M} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{\Delta V}}$$

单位：A/m

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\sum_i \vec{p}_{ei}}{\Delta V}$$

单位体积内分子磁矩的矢量和。

若各点 $\vec{M}$相同，则是均匀磁化

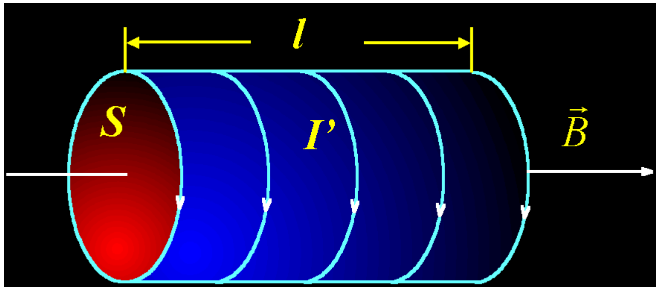
2.磁化强度M 与磁化电流I'（磁化电流密度j'）的关系

•磁化面电流线密度j' ----大小为通过垂直电流方向单位长度上的磁化电流。

讨论特例：充满均匀各向同性磁介质载流长直螺线管

特例：充满均匀各向同性磁介质的载流长直螺线管

根据定义：$M = \dfrac{\Sigma P_{mi}}{V}$

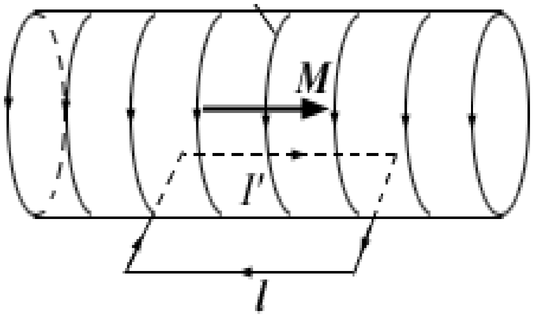


计算在体积$V = ls$内的ΣP_{mi}

$$\Sigma P_{mi} = I'S = j'lS = j'V$$

磁化面电流线密度 j'

$$\therefore\ M = \frac{\Sigma P_{mi}}{V} = \frac{j'V}{V} = j'$$



1） $M = j'$

$\boxed{M_l = j'}$

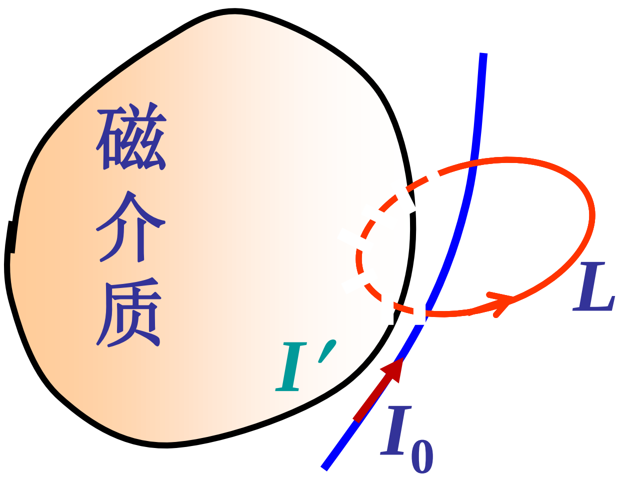
$$\oint_l \vec{M} \cdot d\vec{l} = Ml = j'l = I'$$

2） $I' = \oint_l \vec{M} \cdot d\vec{l}$

介质内通过以l为边界的任一曲面的磁化电流

§ 16.2 磁介质中的安培环路定理 磁场强度

一、有介质时的安培环路定理



真空中 $\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_{内}$

介质存在时：

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0内} + I'_{内})$$

$$= \mu_0 \sum I_{0内} + \mu_0 \oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

I_0— 传导电流

I' — 磁化电流

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot d\vec{l} = \sum I_{0内}$$

定义 $\boxed{\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}$ 磁场强度

单位:A/m

介质中的安培环路定理

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

- $\vec{H}$ 只是辅助量，但其同时描述了空间磁场的状态和磁介质的磁化状态

- $\oint_l \vec{H}\cdot d\vec{l} = \Sigma I_0$ 无论场中有无磁介质，此定理普遍适用

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。因此，对任意闭合曲面S

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

- $\oiint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$ ***磁场高斯定理普遍适用***

二、磁介质的磁化规律（$\vec{B}$ $\vec{M}$ $\vec{H}$ 的关系）

各向同性线性磁介质

$$\boxed{\vec{M} = \chi_m \vec{H} = (\mu_r - 1)\vec{H}}$$

χ_m ··· 介质的磁化率

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

将 $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 代入，得：

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

令 $\mu = \mu_0 \mu_r$ — 磁导率

各向同性线性电介质

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\vec{E}$$

χ_e ··· 极化率

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

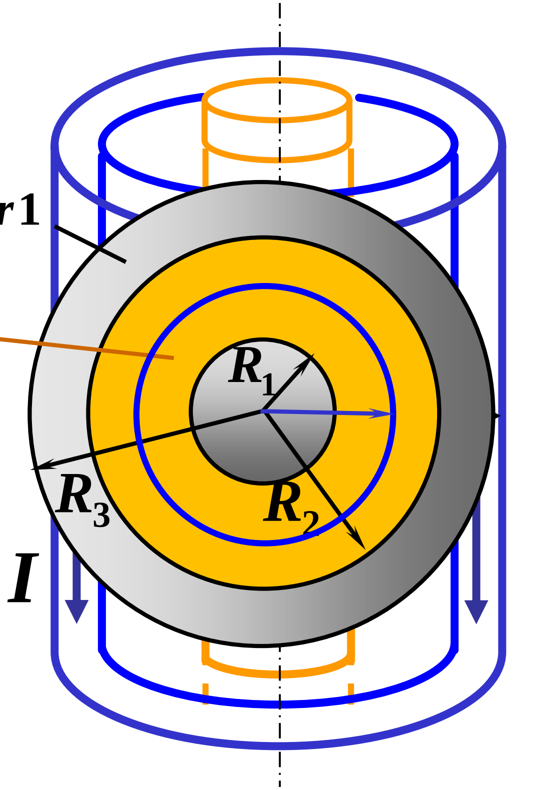
$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon \vec{E}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

例：同轴电缆由两同心导体组成，内层是半径为R_1的导体圆柱，外层是半径分别为R_2、R_3的导体圆筒。两导体内电流等量而反向，均匀分布在横截面上，导体的相对磁导率为μ_{r1}，两导体间充满相对磁导率为μ_{r2}的不导电的均匀磁介质。试求在各区域中的B分布。

解：自由电流和介质的分布都有轴对称性，所以介质中的磁场也有轴对称性.

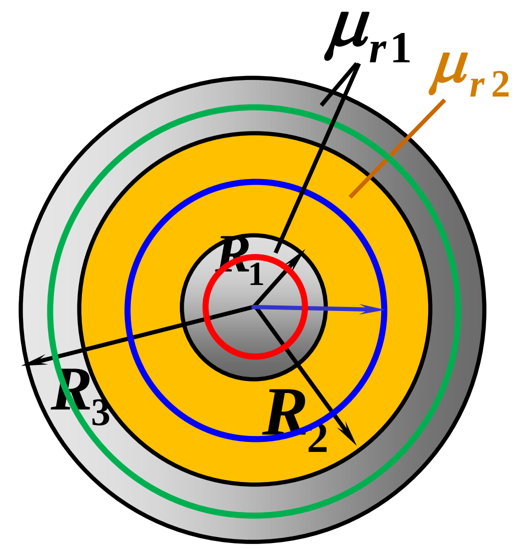
由安培环路定理，取半径为r的环路：



$$\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = H\cdot 2\pi r = \sum I_{0内}$$

$$H = \frac{\sum I_{0内}}{2\pi r} \qquad B = \mu_0\mu_r H$$

$$H=\frac{\sum I_{0内}}{2\pi r} \qquad B=\mu_0\mu_r H$$



$$r>R_3: \quad \sum I_{0内}=0 \quad \therefore H=0 \quad B=0$$

$$r<R_1: \quad \sum I_{0内}=\frac{I}{\pi R_1^2}\pi r^2$$

$$\therefore H=\frac{Ir}{2\pi R_1^2} \qquad B=\frac{\mu_{r1}\mu_0 Ir}{2\pi R_1^2}$$

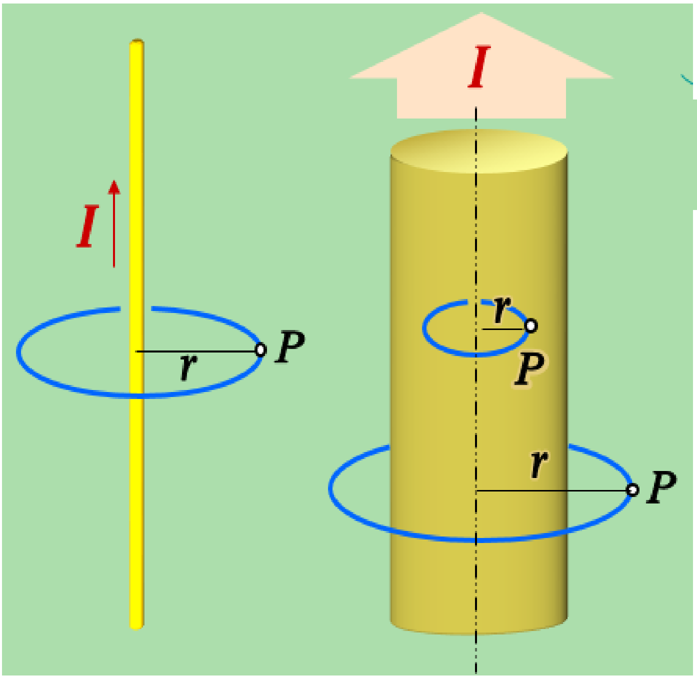
$$R_1<r<R_2: \quad \sum I_{0内}=I \qquad \therefore H=\frac{I}{2\pi r} \qquad B=\frac{\mu_{r2}\mu_0 I}{2\pi r}$$

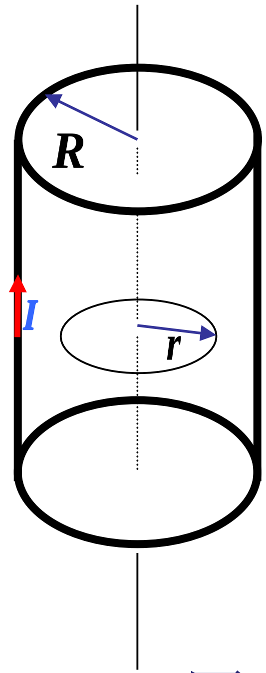
$$R_2<r<R_3: \quad \sum I_{0内}=I-\frac{\pi(r^2-R_2^2)}{\pi(R_3^2-R_2^2)}I$$

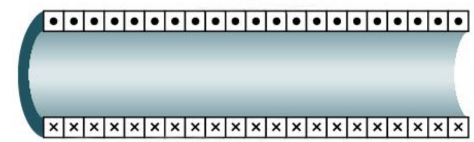
$$\therefore H=\frac{(R_3^2-r^2)I}{2\pi r(R_3^2-R_2^2)} \qquad B=\frac{\mu_{r1}\mu_0(R_3^2-r^2)I}{2\pi r(R_3^2-R_2^2)}$$

应用安培环路定理求磁感应强度的举例

无限长均匀载流直线、圆柱面、圆柱体







长直螺线管内

螺绕环、无限大载流平面

$$\boxed{B=\frac{\mu_o I_{内}}{2\pi r}}$$

圆柱面 $\begin{cases} 内 & B=0 \\ 外 & B=\dfrac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{cases}$

圆柱体 $\begin{cases} 内 & B=\dfrac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \\ 外 & B=\dfrac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{cases}$

$$B=\mu_o nI \qquad B=\frac{\mu_o j}{2}$$

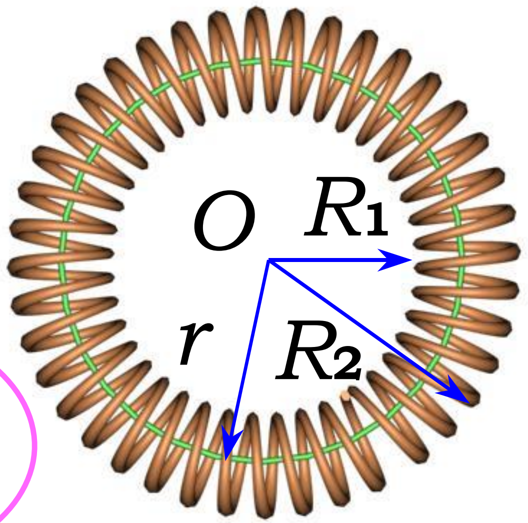
$$\boxed{\mu_o \rightarrow \mu_o\mu_r \text{ 或 } \mu}$$

例：一充满均匀磁介质的密绕细螺绕环，

$$n=10^3\text{匝}/\mathrm{m}\quad I=2\mathrm{A}\quad \mu=5\times10^{-4}\mathrm{T\cdot m/A}$$

求：（1）磁介质内的 $\vec{H},\vec{B},\vec{M}$

（2）磁介质的磁化电流线密度



解：设总匝数为N，取半径为r的圆环回路：

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

细螺绕环

$R_1=R_2=r$

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

$$H=nI$$

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

$$M=(\mu_r-1)H=(\mu_r-1)nI$$

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}=\frac{5\times10^{-4}}{4\pi\times10^{-7}}=398$$

代入数据 $M=7.94\times10^5\ \mathrm{A/m}$

（2）磁化面电流与传导电流的方向相同，磁化面电流产生的附加磁感应强度:

$$B' = \mu_0 nI' = B - B_0 = \mu nI - \mu_0 nI = (\mu - \mu_0) nI = \mu_0 j'$$

$nI' = j'$，就是磁化电流线密度

得 $$j' = (\frac{\mu}{\mu_0} - 1) nI = (\frac{5\times10^{-4}}{4\pi\times10^{-7}} - 1)\times 2\times10^3 = 7.9\times10^5 \text{ A/m}$$

讨论：设想把这些磁化面电流也分成每米10^3匝，相当于分到每匝的电流强度为多少？

$$\frac{j'}{n} = \frac{7.94\times10^5}{10^3} = 794(\text{A}) >> 2(\text{A})$$ $\vec{B}' >> \vec{B}_0$ 或 $\vec{B} \cong \vec{B}'$

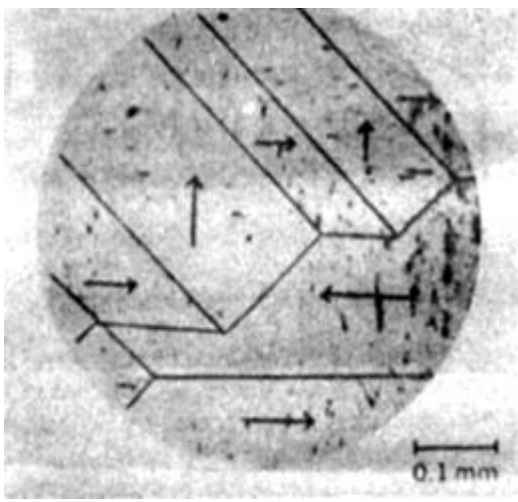
铁磁质

§ 16.3　铁磁质

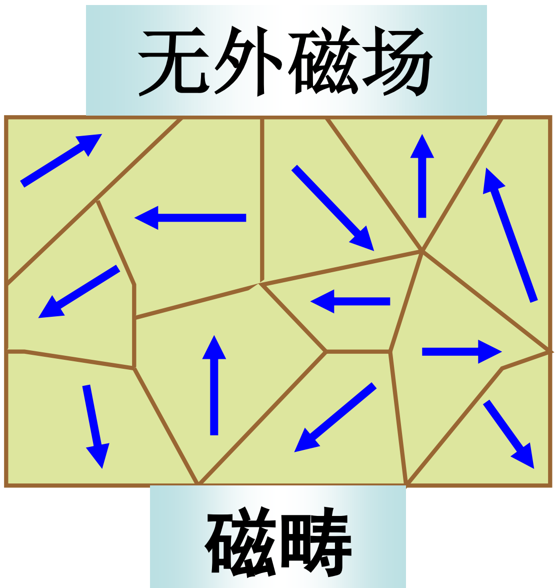
一、 铁磁质的磁化

1、铁磁质的微观结构 磁畴

无外磁场时，铁磁质的电子自旋磁矩能在线度大约为$10^{-12} - 10^{-8} m^3$小区域内自发地平行排列，形成自发磁化达到饱和状态，这些微小区域称为“磁畴”



Si-Fe单晶(001)面的磁畴结构

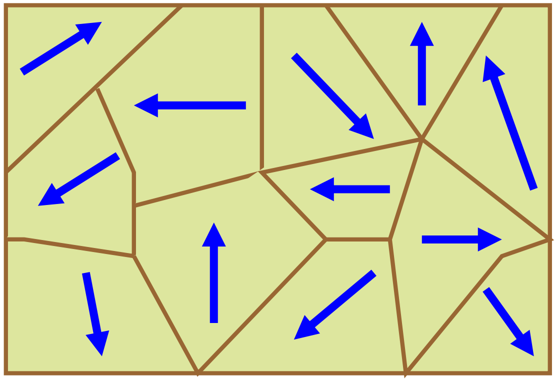


（未经磁化的铁磁质）

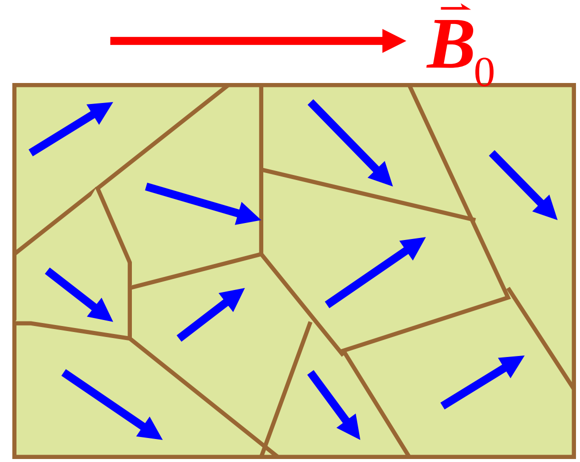
每一磁畴中，具有很强的磁性。但不同的磁畴排列方向彼此不同，所以没有外磁场时，各磁畴磁矩相互抵消，对外不显磁性.

2、 铁磁质的磁化

无外磁场



有外磁场



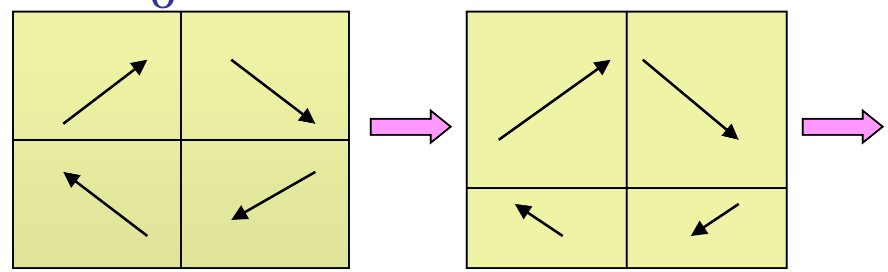
磁畴取向杂乱无章

整个铁磁质的

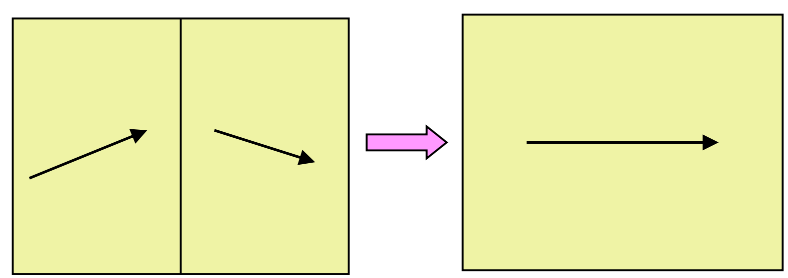
总磁矩为零

（未经磁化的铁磁质）

与$\vec{B}_0$同向的磁畴扩大



磁化方向转向$\vec{B}_0$的方向



二、 铁磁质的宏观性质

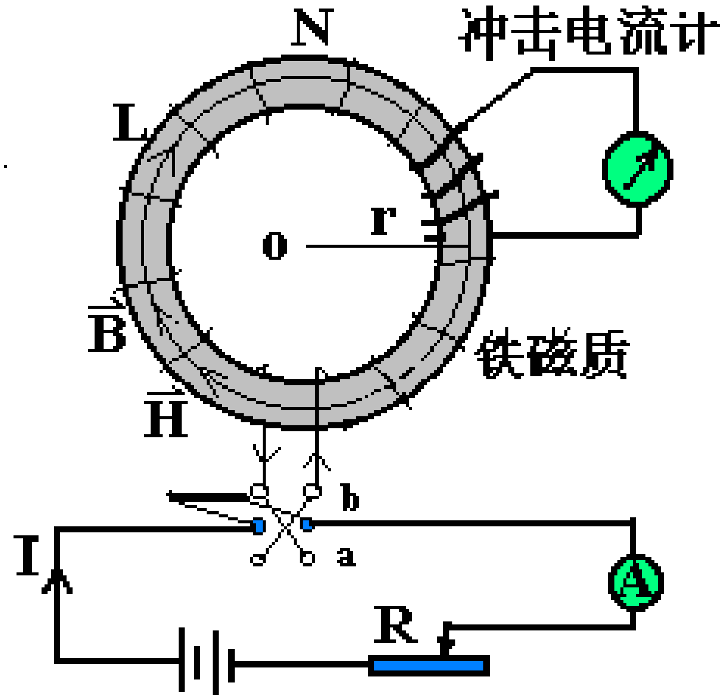
1. 磁化曲线（*B*随*H*变化的曲线）

铁磁质$\vec{H}$、$\vec{B}$测量原理

$$L_1:\ H = nI$$

$$L_2:\ q_i = \int_0^t I_i \mathrm{d}t = \int_0^t \frac{\mathrm{d}\Phi}{R_2}$$

$$= \frac{NSB}{R_2}$$



测量铁磁材料磁化后的$\vec{B} \sim \vec{H}$变化的规律

* $\vec{B} = \mu\vec{H}$，仅适用于非铁磁质;

* $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$，普遍适用

1）起始磁化曲线　饱和磁化

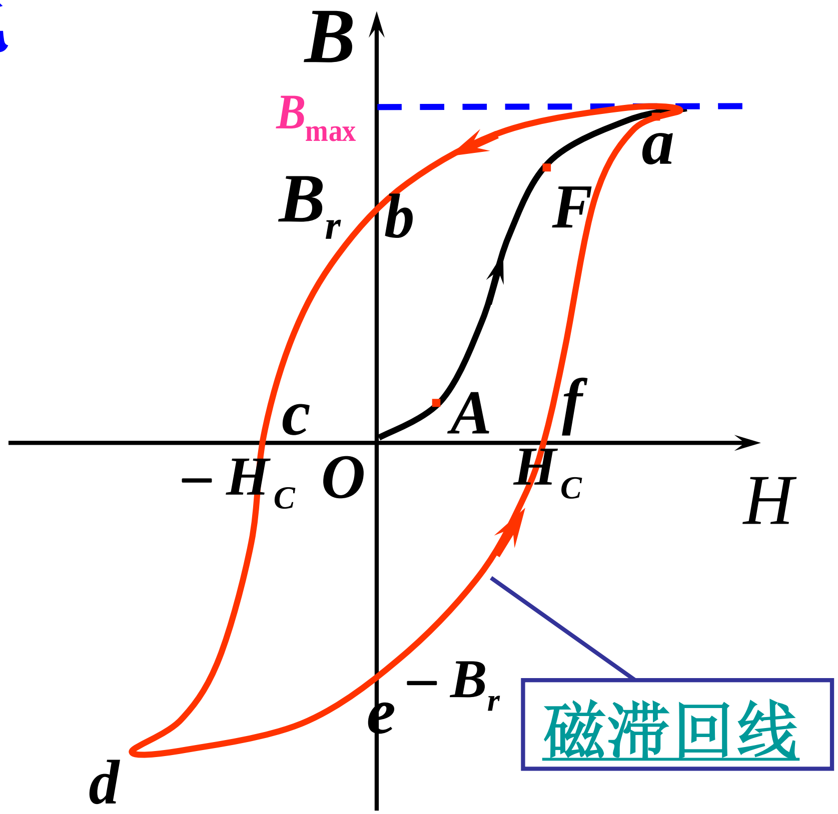
B_{max} :饱和磁感强度

*饱和后，若$I\downarrow\Rightarrow H\downarrow$，$B\downarrow$,

当$I=0$时,$H=0$，但$B\to B_r$。

*为使铁芯退磁,需加上反向磁场

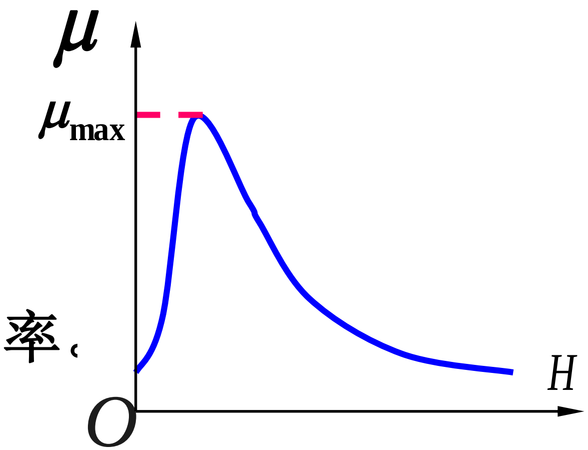
$B=0$时，$H=-H_c$



2）剩磁B_r　矫顽力H_c

3）磁滞回线

- B值的变化总落后于H值的变化
- B值与H值不具有一一对应关系
- 用起始磁化曲线按$\mu=\dfrac{B}{H}$定义铁磁质的磁导率。



2.铁磁质的宏观性质

高μ值	非线性	磁滞	居里温度

1） $\mu_r >> 1$，使原场大幅度增加

2） μ_r不是常数，随磁场强度变化而变化

3） 磁滞现象----外磁场撤去后,仍能保留部分磁性

4） 居里温度----对应于每一种铁磁物质都有一个临界温度（居里点），超过这个温度，磁畴瓦解，铁磁物质就变成了顺磁物质。

各种材料的居里点不同，如铁的居里温度为1034K。

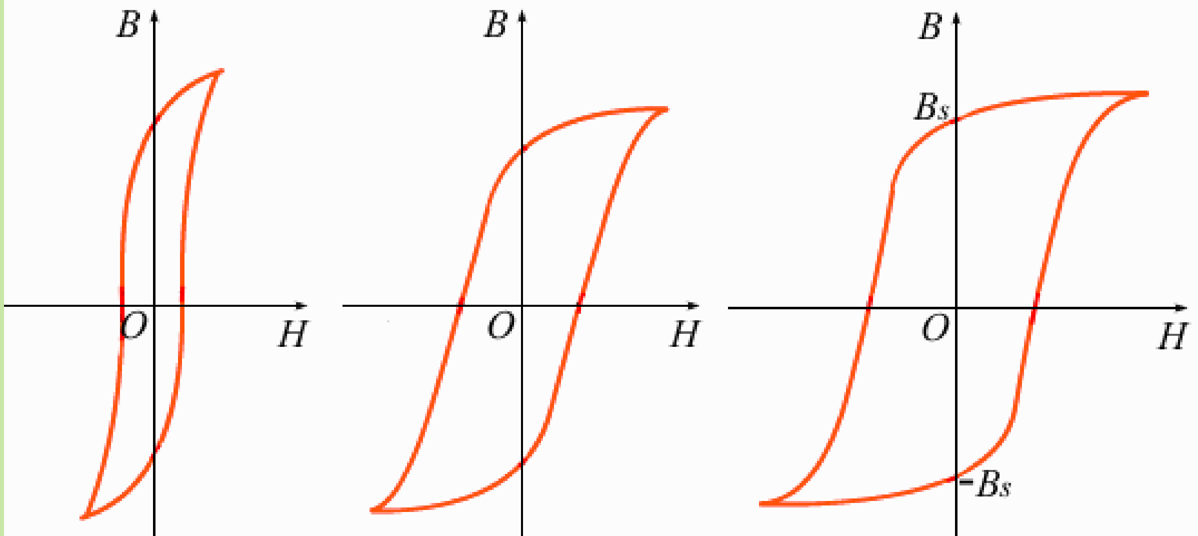
三、 磁滞损耗

铁磁材料在交变磁场作用下反复磁化时会发热，有能量损耗，称为磁滞损耗。

实验和理论都可以证明：

磁滞损耗和磁滞回线所包围的面积成正比。

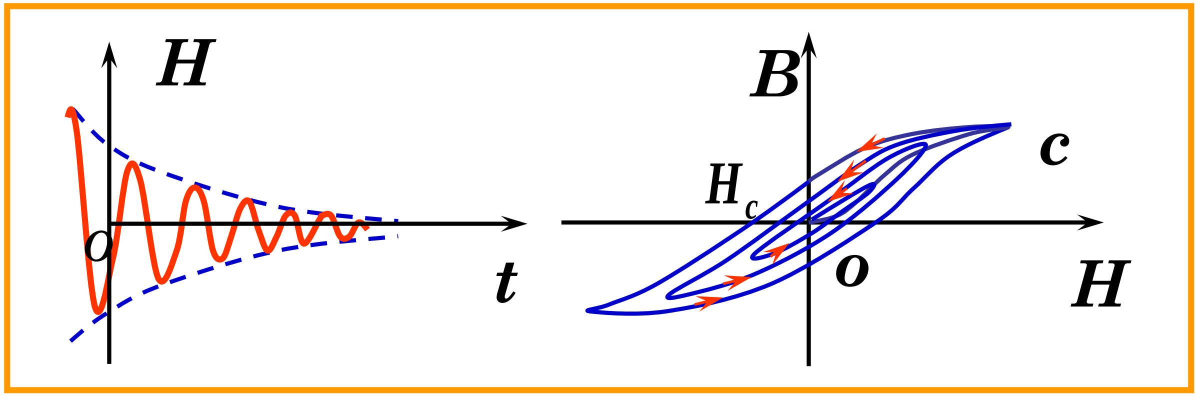
不同铁磁性物质的磁滞回线有很大差异。



(a)软磁 (b)硬磁 (c)矩磁

四、退磁方法

（1） 加交变衰减的磁场



使介质中的磁场逐渐衰减为０，应用在录音机中的交流抹音磁头中。

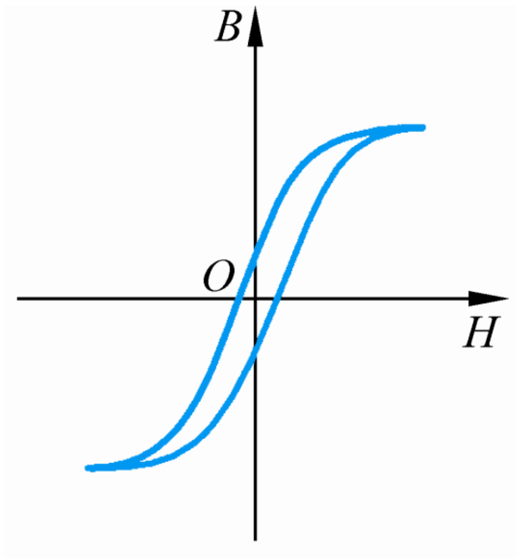
（2）加反向磁场：提供矫顽力。

（3）加热法：升高温度，达到居里点以上。

使磁畴瓦解。

（4）敲击法：通过振动提供使磁畴瓦解的能量。

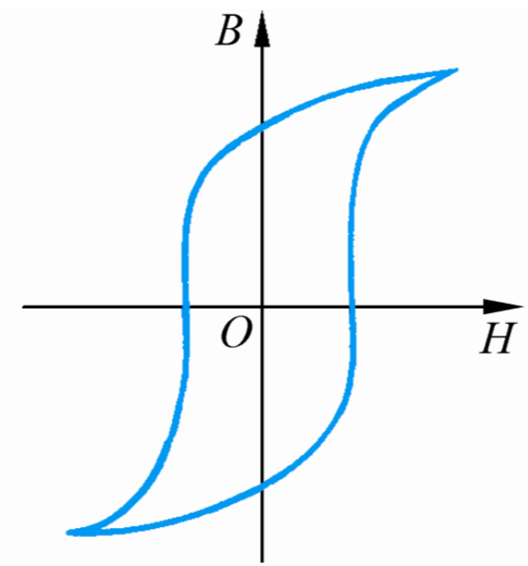
五、 铁磁性材料的分类及应用



软磁材料:

H_c 很小,剩磁很小，磁滞回线瘦,易磁化、易退磁。切断电源后无剩磁，如应用于变压器的铁心。

如软铁、坡莫合金、硒钢片、铁铝合金、铁镍合金等。



硬磁材料:

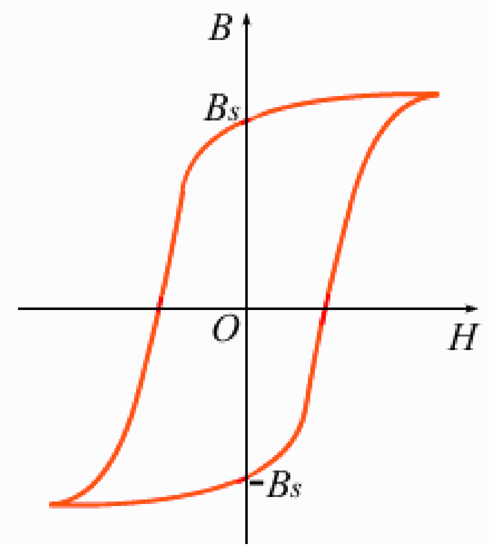
H_c 较大,剩磁很大，磁滞回线较胖,充磁后不易退磁，适合做永久磁铁芯

如碳钢、铝镍钴合金和铝钢等

五、 铁磁性材料的分类及应用

非金属氧化物----铁氧体
（矩磁材料）

磁滞回线呈矩形，剩磁接近于饱和磁感应强度，具有高磁导率、高电阻率。



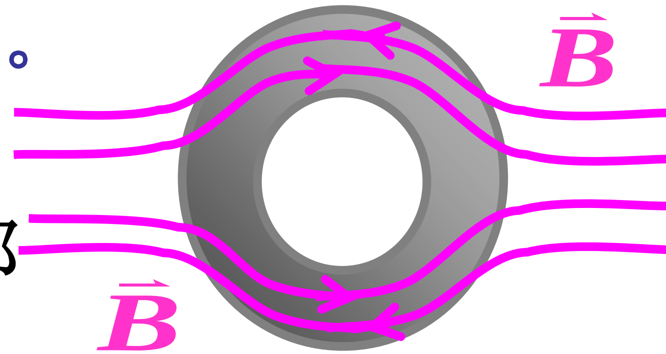
它是由Fe_2O_3和其他二价的金属氧化物（如NiO，ZnO等)粉末混合烧结而成。

在两个方向上的剩磁可用于表示二进制的“0”和“1”，可作磁性记忆元件。

六、 磁致伸缩　磁屏蔽

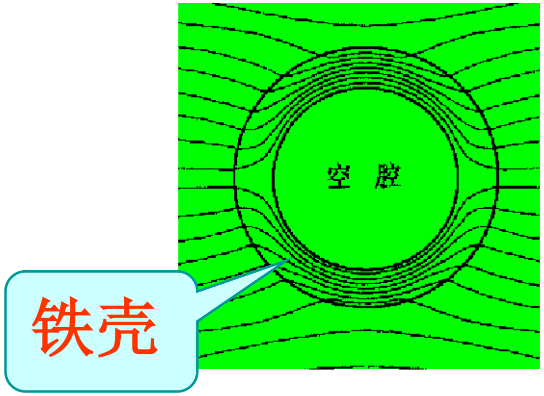
磁致伸缩： 畴壁位移和磁矩取向，
改变晶格间距（体积）。

磁屏蔽：



铁芯具有把磁感应线集中到自己内部的性质，提供了制造磁屏蔽的可能。

$\mu_{\text{铁}} >> \mu_{\text{空气}} \approx 1$，外磁场的磁感应通量中绝大部分将沿铁壳壁内“通过”，进入空腔内部的磁通量是很少，达到屏蔽作用。



用铁壳做的磁屏蔽没有金属导体壳做的静电屏蔽效果好，可采用多层铁壳的办法，把漏进空腔里的磁通一次次地屏蔽掉

磁介质与电介质的比较

无磁荷　基本场量 $\vec{B}$	有电荷　基本场量 $\vec{E}$
铁磁质　顺磁质　抗磁质	导　体　半导体　绝缘体
磁介质：磁化	电介质：极化
一般无磁屏蔽	有静电屏蔽
辅助量 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$	辅助量 $\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}$
$I_0 \Rightarrow \vec{H}$	$Q_0 \Rightarrow \vec{D}$

习、关于稳恒电流磁场的磁场强度，下列几种说法中哪个是正确的？　（ C　　　）

（A）$\vec{H}$ 仅与传导电流有关.　传导电流、束缚电流、位移电流

（B）若闭合曲线内没有包围传导电流，则曲线上各点的 $\vec{H}$ 必为零.

$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0 \nrightarrow \vec{H} = 0$$

（C）若闭合曲线上各点 $\vec{H}$ 均为零，则该曲线所包围传导电流的代数和为零.

$$\vec{H} = 0 \rightarrow \oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0 \rightarrow \sum I_{0内} = 0$$

（D）以闭合曲线 L 为边缘的任意曲面的 $\vec{H}$ 通量均相等.

$$\oint_S \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0 \rightarrow \int_{S_1} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = \int_{S_2} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\rightarrow \mu_1 \int_{S_1} \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = \mu_2 \int_{S_2} \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$