



中国机械工程学会无损检测分会 MT培训讲义

本讲义由学会常务委员 晏荣明 编写
(仅供参考)

中国机械工程学会无损检测分会 深圳市无损检测人员培训中心

电话：021-65550277

电话：13538291001

邮箱：chsndt2008@163.com

邮箱：yanrongming@126.com

第二章 磁粉检测基础

CHAPTER 2 FOUNDATIONS OF MPI

内容 Contents

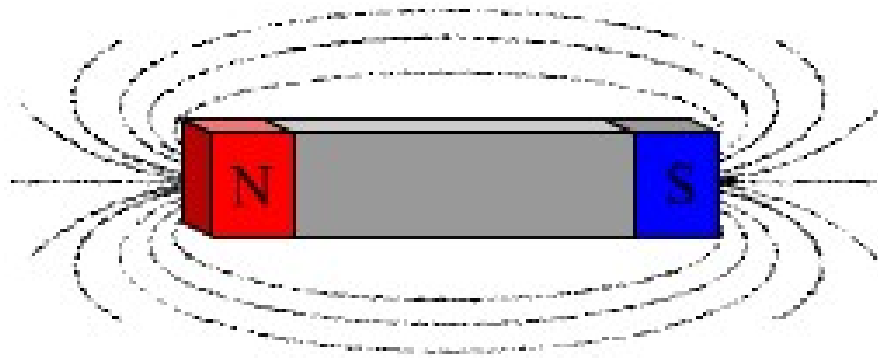
- **磁学理论 Theory of Magnetism**
- **磁介质 Magnetic Materials**
- **电流感应磁场
Electrically Induced Magnetic Fields**
- **磁滞回线 Hysteresis Loop**
- **退磁理论 Theory of Demagnetization**

磁学理论 Theory of Magnetism

- **磁极 Magnetic Poles**
- **磁力线 Lines of Force**
- **磁场 Magnetic field**
- **矢量场 Vector Field**
- **退磁场 Reluctance**
- **漏磁场 Leakage Field**

磁极

- 磁极：南极和北极。



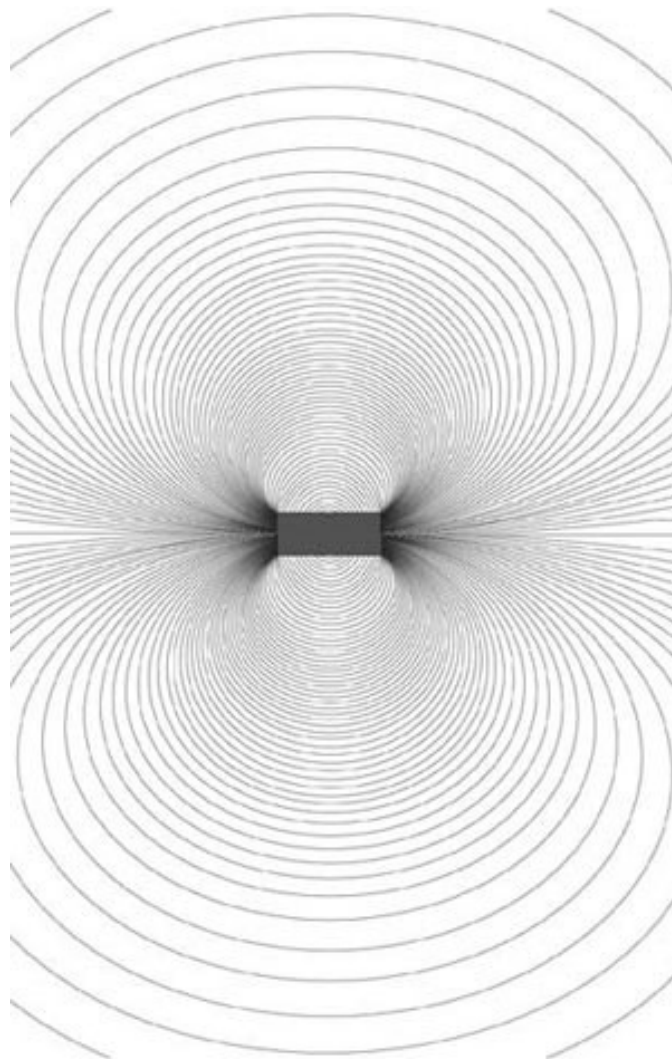
磁力线

- 定义:

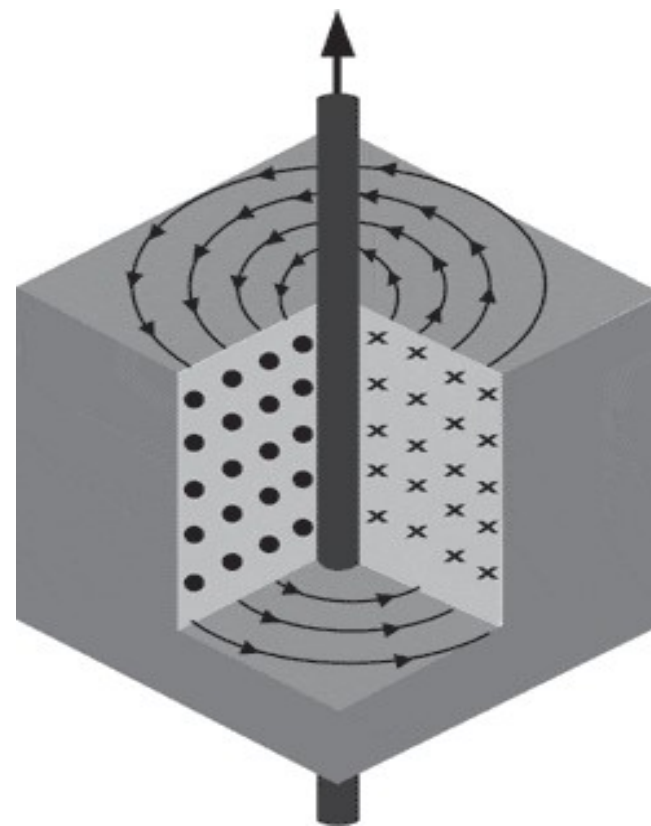
表示磁场大小、
方向和分布的
假想连续曲线

- 特点:

疏密表示大小
某点的切线表示方向
永不相交



磁力线



磁场

- 磁场

磁体或通电导体周围具有磁力作用的空间。

磁场

- 磁通量Magnetic Flux (Φ)

$$\Phi = \int_s B_z ds$$

含义：通过磁场中某区域的磁力线的总数。

单位：韦伯 (Wb) ; 麦克斯韦 (Mx)

$1\text{Wb}=10^8\text{Mx}$, $1\text{Mx}=1$ 根磁力线

磁场

- 磁感应强度 Flux Density (B)

含义：磁化物质中与磁力线垂直的单位面积上的磁力线数。

单位：特斯拉 T；高斯 G_S

$$1T=1Wb/m^2 \quad 1T=10^4G_S$$

磁场

- 磁场强度Magnetic Force (H)

含义：表示磁场大小和方向。

单位：安培/米A/m； 奥斯特 O_e

$$1\text{A/m}=4\pi\times 10^{-3}O_e, 1O_e\approx 80\text{A/m}$$

磁场

- 磁导率 Permeability (μ)

$$\mu = \mathbf{B} / \mathbf{H}$$

含义：表示材料被磁化的难易程度，即介质的导磁能力。

单位：亨利/米 (H/m)

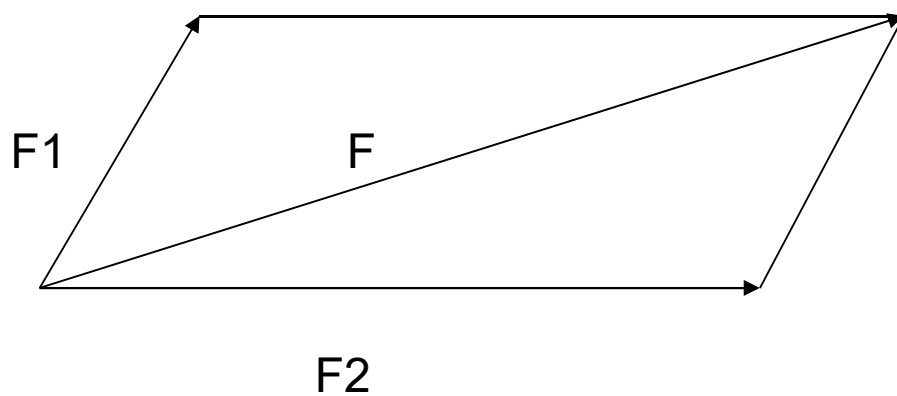
- 相对磁导率： $\mu_r = \mu / \mu_0$
真空中： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

磁场

- 材料的磁导率：当磁路完全处于磁路内部时所测得的 B/H 值，常用于周向磁化；
- 最大磁导率：从磁特性曲线中获得的最大值；
- 有效磁导率：又称表观磁导率，不仅与材料性质有关，还与材料的形状有关，对纵向磁化极为重要。

矢量场

- 磁场强度是矢量，两磁场合成。



退磁场

- 定义：磁棒在外加磁场 H_0 中磁化时，其端头出现了磁极，并形成附加磁场 ΔH ，即退磁场，方向与 H 相反，因而削弱了 H 对磁棒的磁化作用。

$$H = H_0 - \Delta H$$

- 注意：短工件磁化。

漏磁场——形成机理

- 磁力线的折射

当磁力线从一种介质通向另一介质时，将发生折射现象：

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

可见，当磁力线从高磁导率介质通向低磁导率介质（如钢到空气）时，磁力线偏向法线，且变得稀疏。

漏磁场——形成机理

- 工件表面缺陷处的漏磁场

当工件表面有裂纹时，用于钢铁与空气的磁导率差距很大，磁力线因磁阻的增加而产生折射，部分磁力线从裂纹下部的钢中通过，形成磁力线“压缩”；一部分直接从裂纹中通过，但很稀疏；一部分折射后从裂纹上方的空气中溢出再进入工件，形成漏磁场。

漏磁场——形成机理

- 漏磁场的强度和方向

漏磁场 —— 影响因素 —— 外加磁场

- 当外加磁场较小，工件未达到饱和磁化时，磁路中的磁导率较大，磁力线多数向缺陷下方压缩通过，漏磁场不明显；当工件接近饱和磁化时，磁导率下降，漏磁场迅速增加。

- 磁化： $B \uparrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow$ $B = 80\%B_a, B_{\text{leak}} \uparrow \uparrow$

漏磁场 —— 影响因素 —— 材料的磁性

- 在相同磁化条件下，不同材料磁性不同，磁阻也不同，通常，易于磁化的材料容易产生漏磁场。

漏磁场 —— 影响因素 —— 不连续性

- 不连续性高度：
在一定范围内 $h \uparrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow$
- 不连续性宽度： $w \downarrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow$
- 不连续性深度： $d \downarrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow$

漏磁场 —— 影响因素 —— 表面覆盖层

- 表面覆盖层厚度：

$$t \downarrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow$$

漏磁场 —— 影响因素 —— 磁化方向

- 不连续性与磁场夹角inclination

$$\alpha \uparrow \rightarrow B_{\text{leak}} \uparrow, \alpha = 90, B_{\text{leak}} \rightarrow \max$$

漏磁场 —— 影响因素 —— 磁化电流

- 交流电：表面缺陷的漏磁场大
- 直流电：表面下缺陷的漏磁场比交流电大

磁介质 Magnetic Materials

- **分类 Classification**
- **影响磁性的因素
Factors Affecting Magnetism**

分类

- 定义：能影响磁场的物质。

- 分类：

顺磁性材料（顺磁质）：轻微吸引， μ_r 略大于1
如Al, Cr, Mn

抗磁性材料（抗磁质）：轻微排斥， μ_r 略小于1
如, Au, Ag, Cu, Hg

铁磁性材料（铁磁质）：强烈吸引， $\mu_r \gg 1$
如Fe, Co, Ni及其合金

影响磁性的因素

——化学成分和杂质含量

- 碳素钢：含C量增加，磁性变硬；
- 合金钢：合金含量增加，磁性变硬；
合金元素Si, Mn, Ni, Mo,磁性变硬
杂质元素S, P, 磁性变硬

影响磁性的因素——组织结构

- 晶体结构：面心立方的 γ 铁：非铁磁性
体心立方 α 铁：铁磁性
体心立方：晶格平衡：磁性软
晶格歪扭：硬磁性

如奥氏体不锈钢（1Cr18Ni9Ti）在室温下就有稳定的面心立方结构，因而没有磁性；高铬不锈钢（1Cr13）在室温下主要成分为铁素体和马氏体，因而具有一定的磁性。

- 晶粒尺寸：晶粒大，磁性软。

影响磁性的因素——组织结构

- 热处理：淬火后回火温度越高，磁性越软。

影响磁性的因素——加工工艺

- 冷加工：

导致表面硬化，磁性变硬，各向异性。

影响磁性的因素——工件的形状

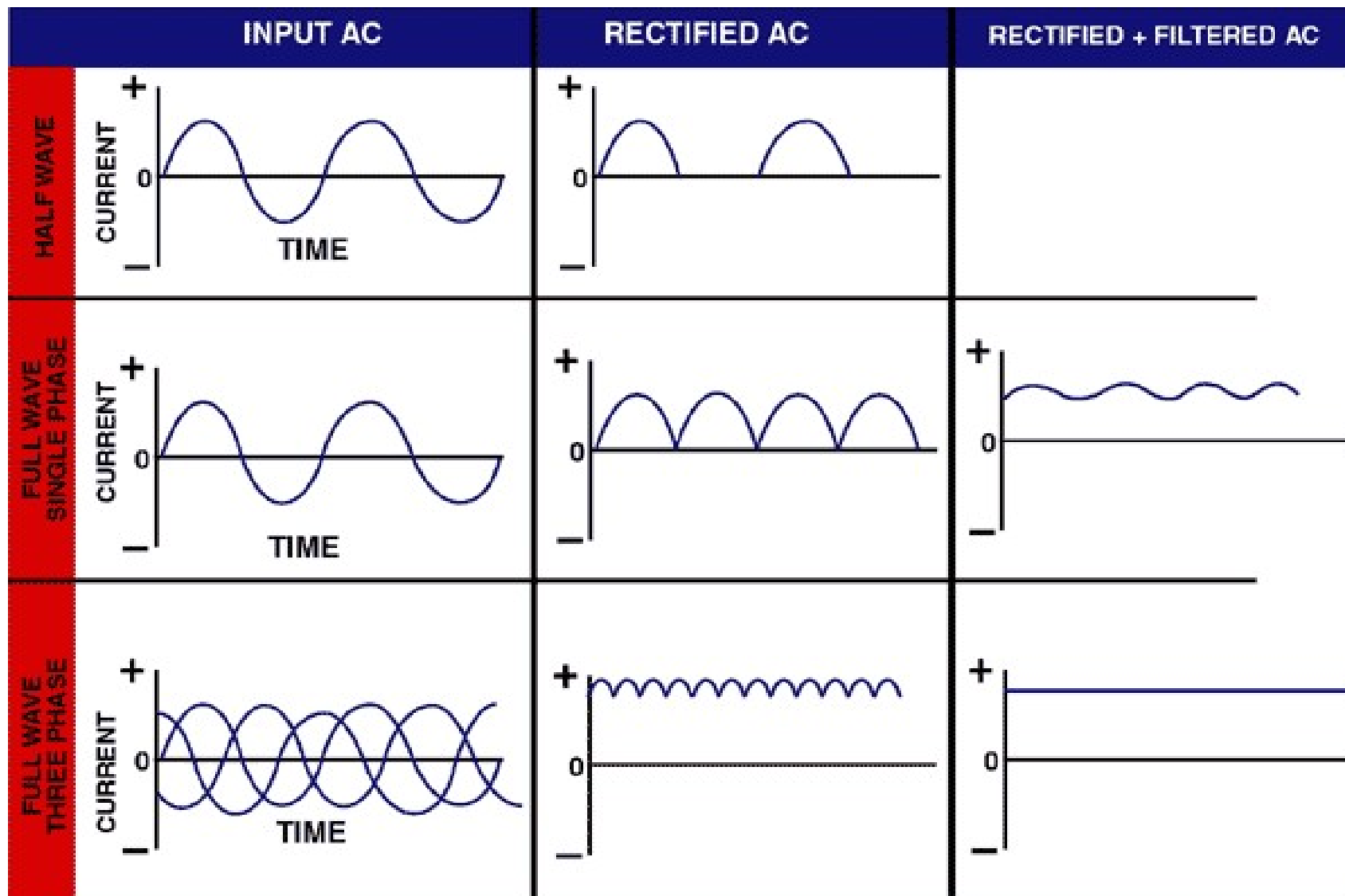
- 工件的形状：
影响退磁因子和退磁场。

电流感应磁场

Electrically Induced Magnetic Fields

- **磁化电流 Magnetizing Current**
- **右手定律 Right-Hand Rule**
- **安培环路定律 Ampere's Law**
- **通电圆柱体的磁场
Magnetic Fields of Cylinder Conductors**
- **通电螺线管的磁场 Magnetic Fields of Solenoid**
- **通电螺线环的磁场 Magnetic Fields of Whorls**

磁化电流

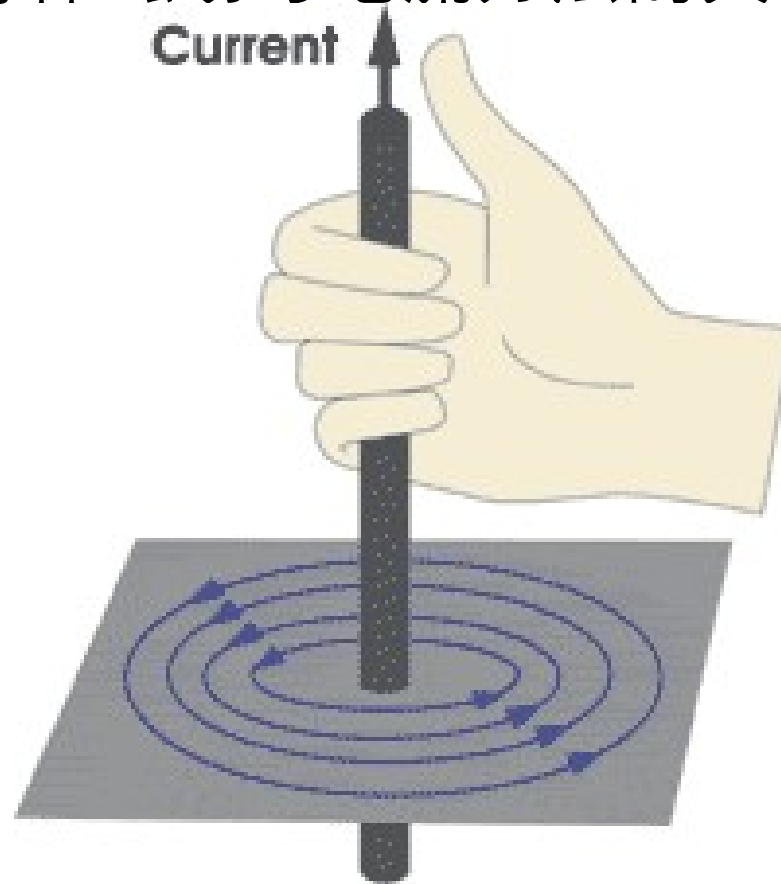


磁化电流——不同磁化电流的特点

- 直流电：穿透性最好，波动性最差
- 交流电：波动性最好，穿透性最差
- 半波整流电：介于直流电和交流电之间

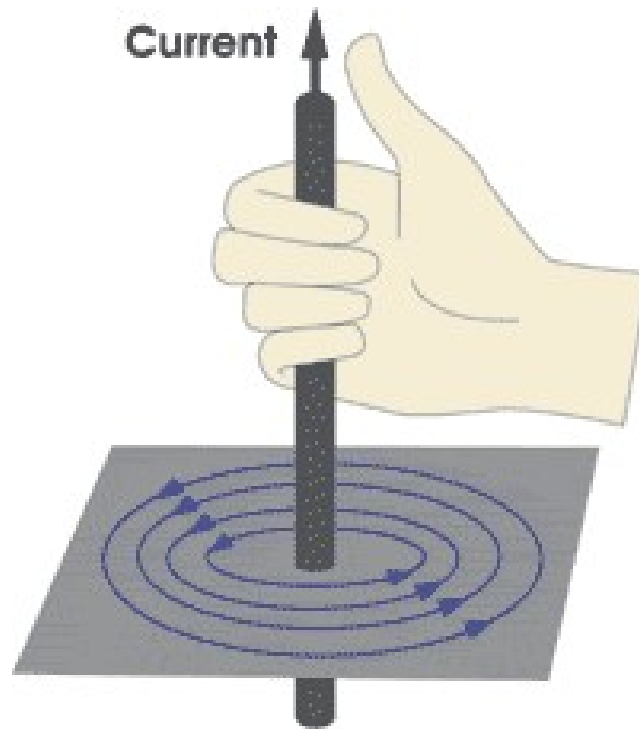
右手定律

- 确定通电导体磁场与电流方法的关系



安培环路定律

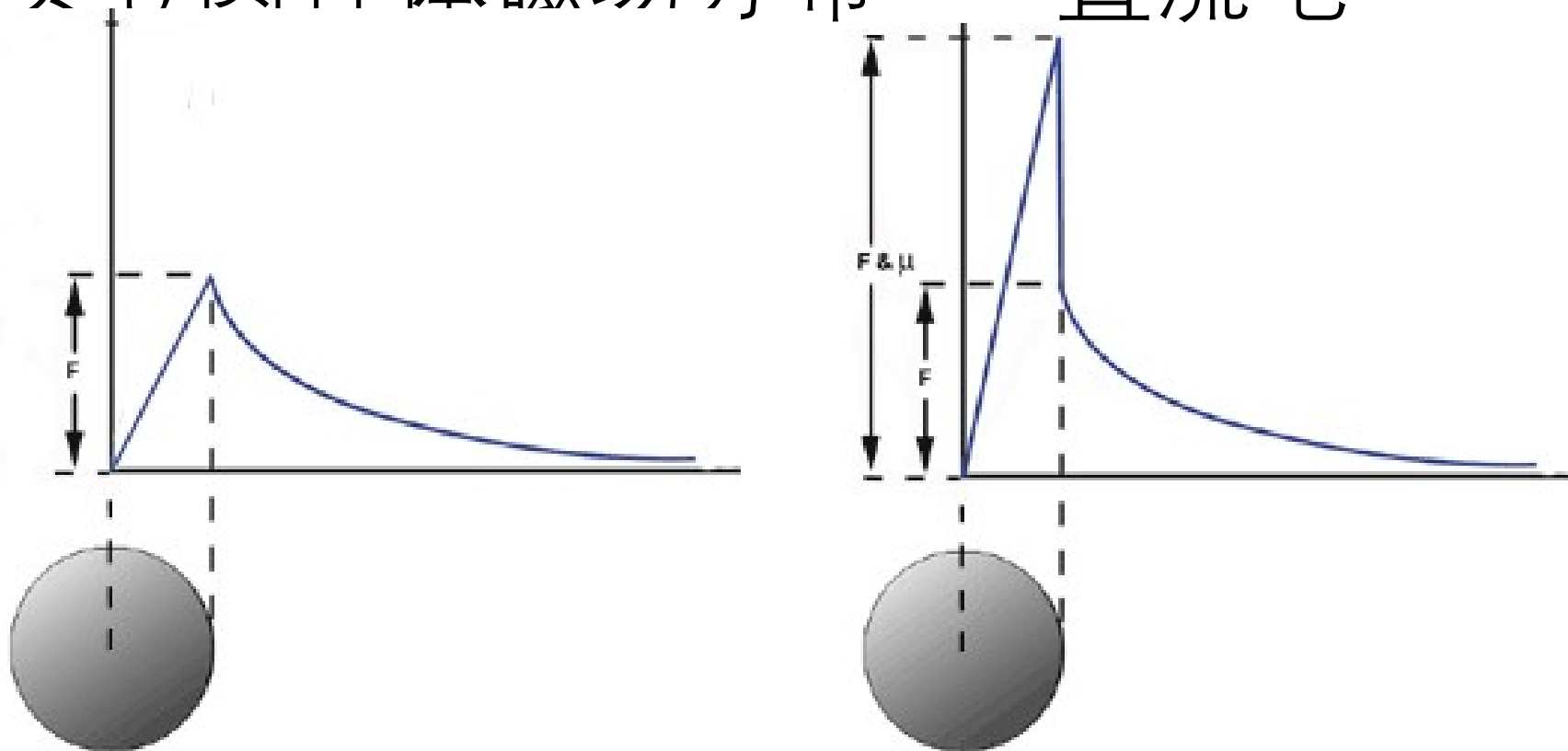
$$\oint \vec{H} dl = \Sigma I$$



通电圆柱体的磁场—— 实心圆柱体磁场分布——直流电

- 大小： $r < R$: $H = Ir/2\pi R^2$
 $r = R$: $H = I/2\pi R$
 $r > R$: $H = I/2\pi r$
- 方向：右手法则
- 例：圆柱导体直径为20CM，通以5000A的直流电，求与导体中心10CM,20CM,100CM,200CM处的磁场强度。

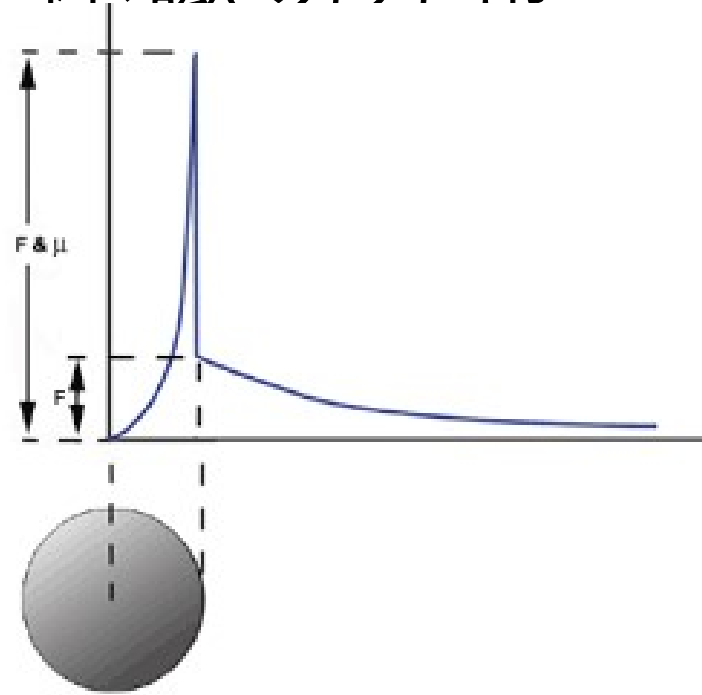
通电圆柱体的磁场—— 实心圆柱体磁场分布——直流电



非铁磁性、直流

铁磁性、直流

通电圆柱体的磁场—— 实心圆柱体磁场分布——直流电



铁磁性、交流电

通电圆柱体的磁场

——空心圆柱体磁场分布——直流电

- 大小:

$$r < R_1: \quad H = 0$$

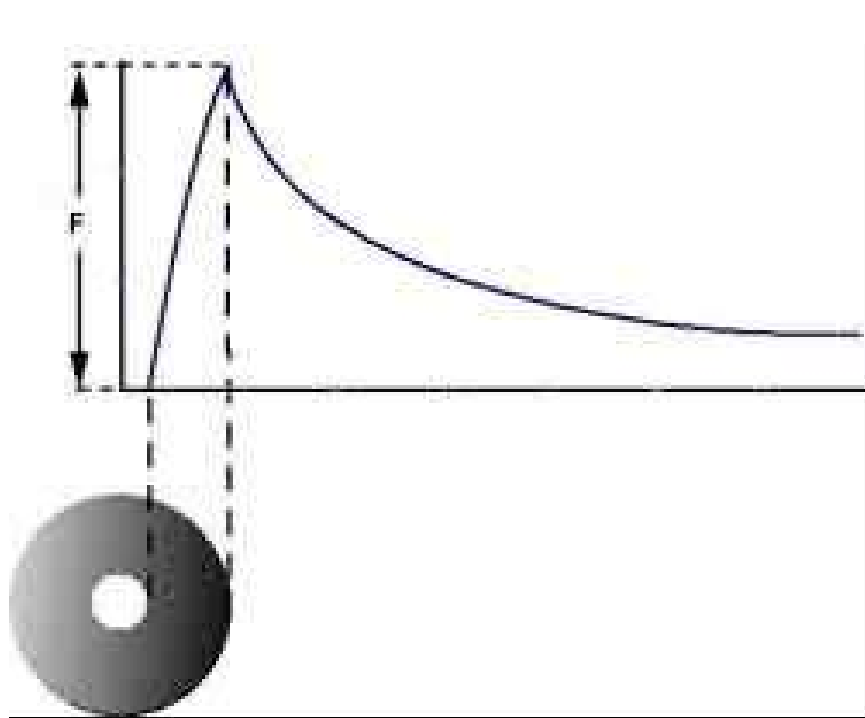
$$R_1 < r < R_2: \quad H = (I/2\pi r)(r^2 - R_1^2)/(R_2^2 - r^2)$$

$$r > R_2: \quad H = I/2\pi r$$

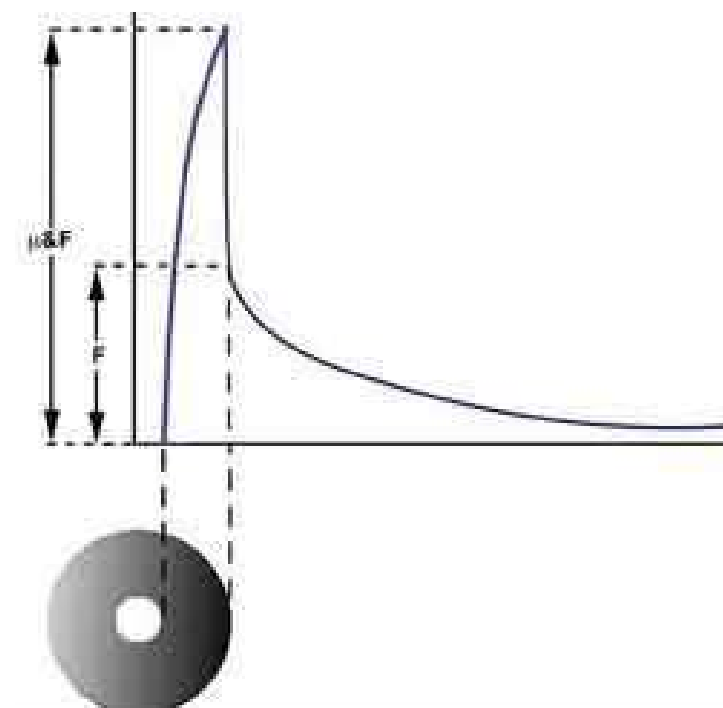
- 方向: 右手法则

通电圆柱体的磁场

——空心圆柱体磁场分布——直流电



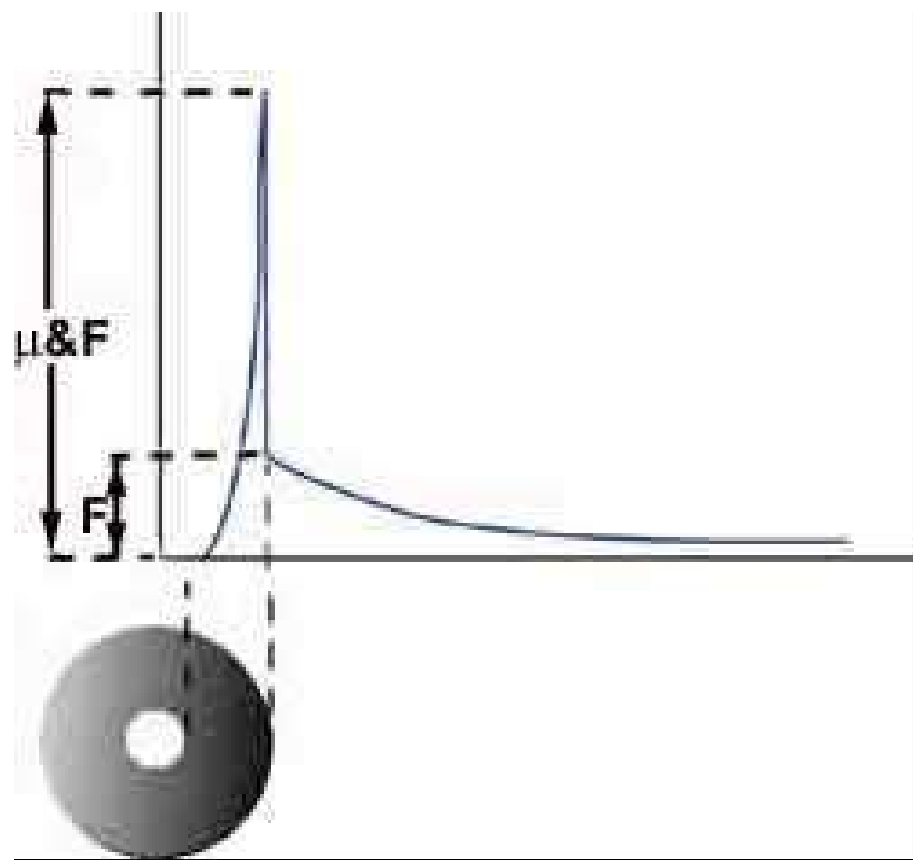
非铁磁性、直流



铁磁性、直流

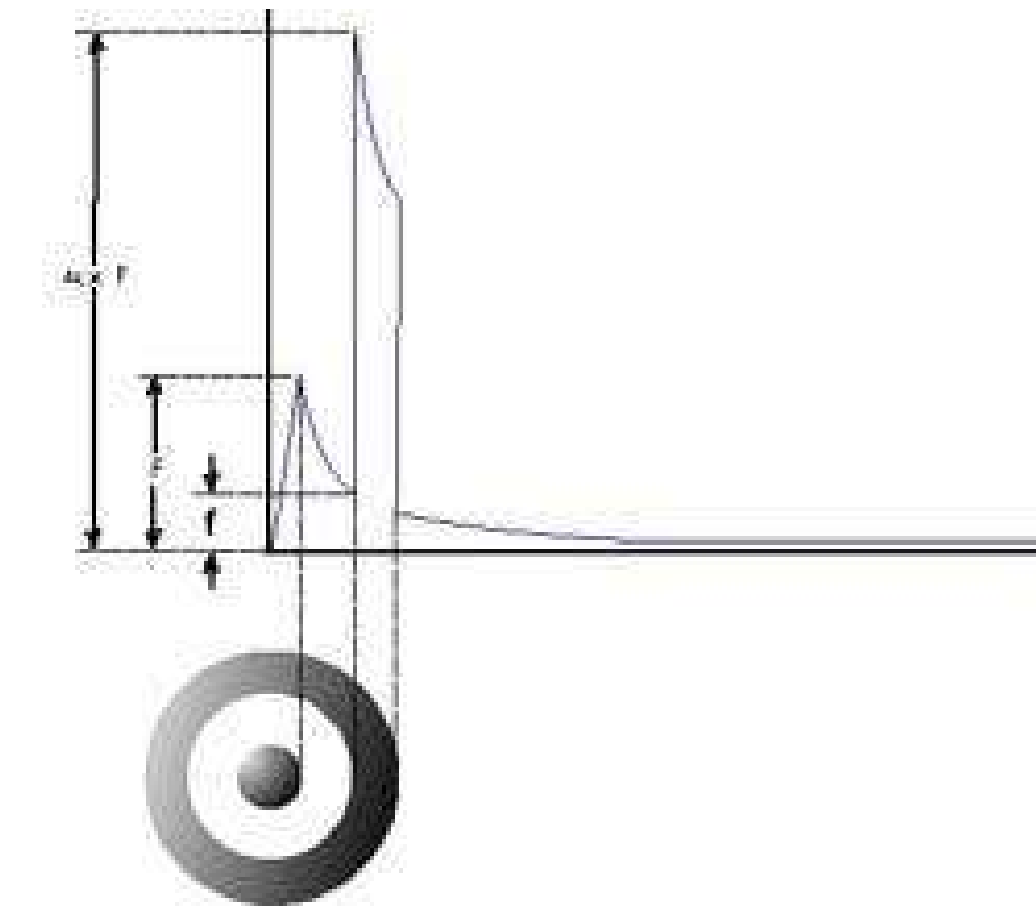
通电圆柱体的磁场

——空心圆柱体磁场分布——交流电



通电圆柱体的磁场 —— 中心导体

- 非磁性中心导体，铁磁性空心圆柱体磁场分布



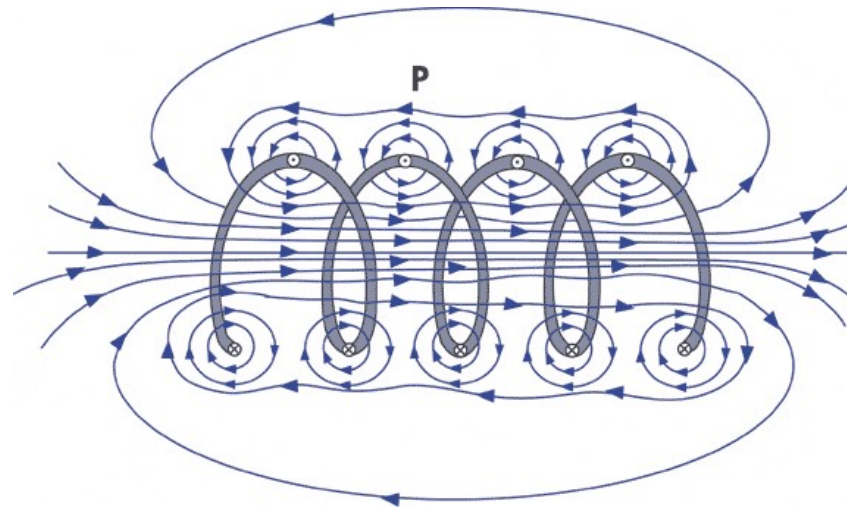
通电螺线管的磁场

- 轴线上

任意点: $H = \frac{NI}{2L} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$

中心点: $H = \frac{NI}{L} \cos \beta = \frac{NI}{\sqrt{L^2 + D^2}}$

端点: $H = \frac{NI}{L}$



通电螺线环的磁场

- 大小:

$$H = \frac{NI}{L} = \frac{NI}{2\pi R}$$

式中：L——螺旋环平均长度

R——螺旋环平均半径

- 方向：同心圆

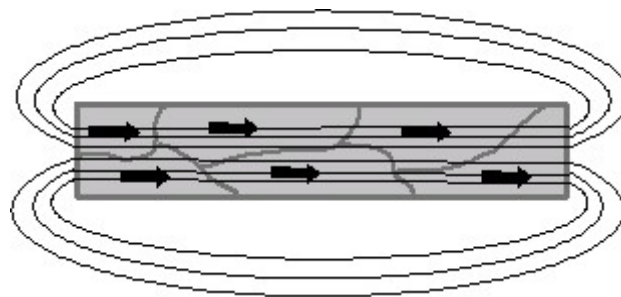
磁滞回线

- **概论 General introduction**
- **初始磁化曲线 Virgin Curve**
- **剩磁 Residual Magnetism**
- **矫顽力 Coercive Force**
- **磁滞回线特点 Curve Characteristics**

概论

- 磁化:

铁磁性材料由磁畴（约0.001~0.1mm大小，每个磁畴有 $10^7\sim 10^{17}$ 原子）组成，在未受到外磁场影响时，磁畴取向混乱，无磁性；当受到外磁场影响时，磁畴与外磁场方向一致，呈现出磁性。



概论

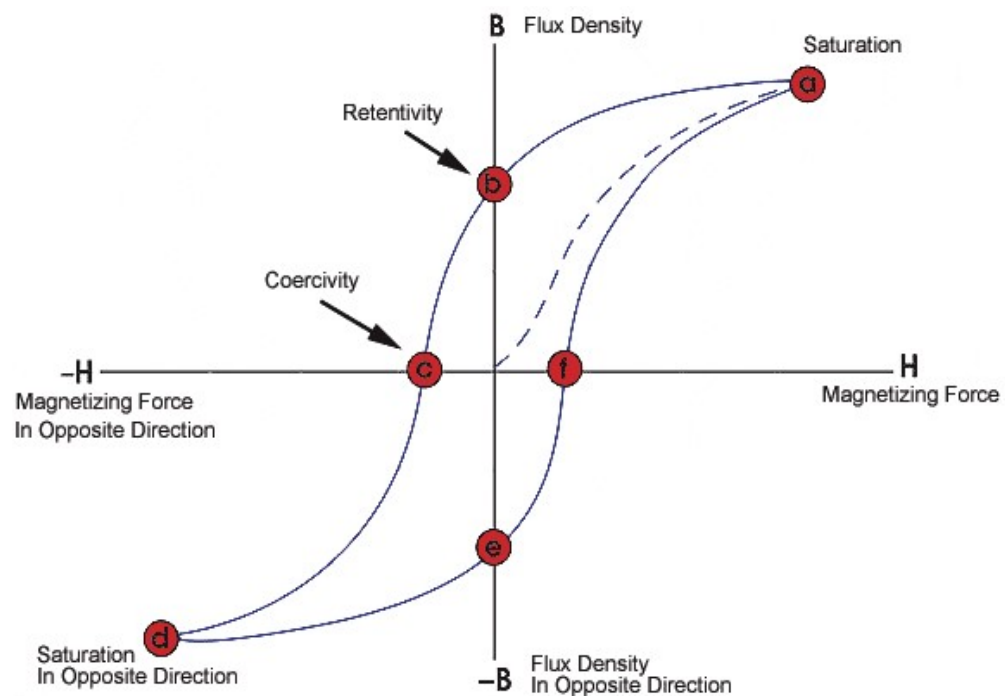
⑩居里点：温度升高时铁磁性材料内部的磁性逐渐减弱，当温度达到一定程度时，磁性消失成为顺磁质。纯铁为 770°C ，一般铁合金为 $650-870^{\circ}\text{C}$ 。

概论

- 磁化曲线：描写外加磁场强度与材料磁感应强度关系的曲线，分为初始磁化 (oa)、急剧磁化 (ab)、近饱和磁化 (bm) 以及饱和磁化 (m 以后) 四个阶段。
- 磁导率曲线：曲线的斜率 $\mu = B / H$ ，随磁场强度 H 变化的量。
- 磁滞回线：描写在外加交变磁场作用下磁场强度与材料磁感应强度关系的曲线。

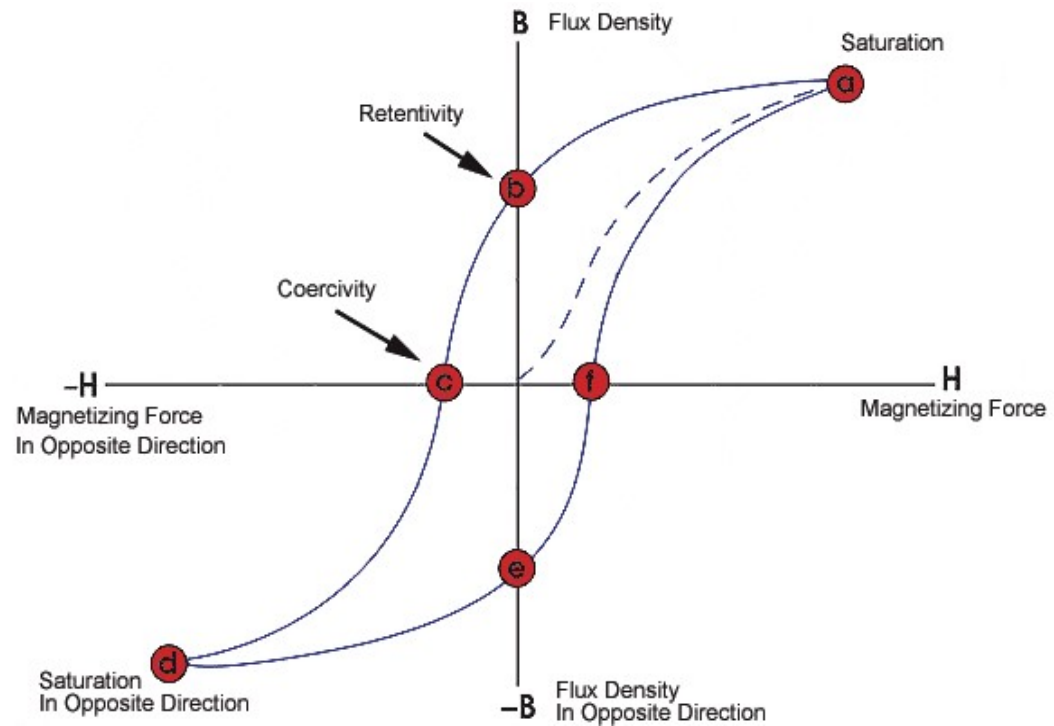
初始磁化曲线

- oa段：
外加磁场强度H从零开始到正向最大，材料磁感应强度B也从零到饱和



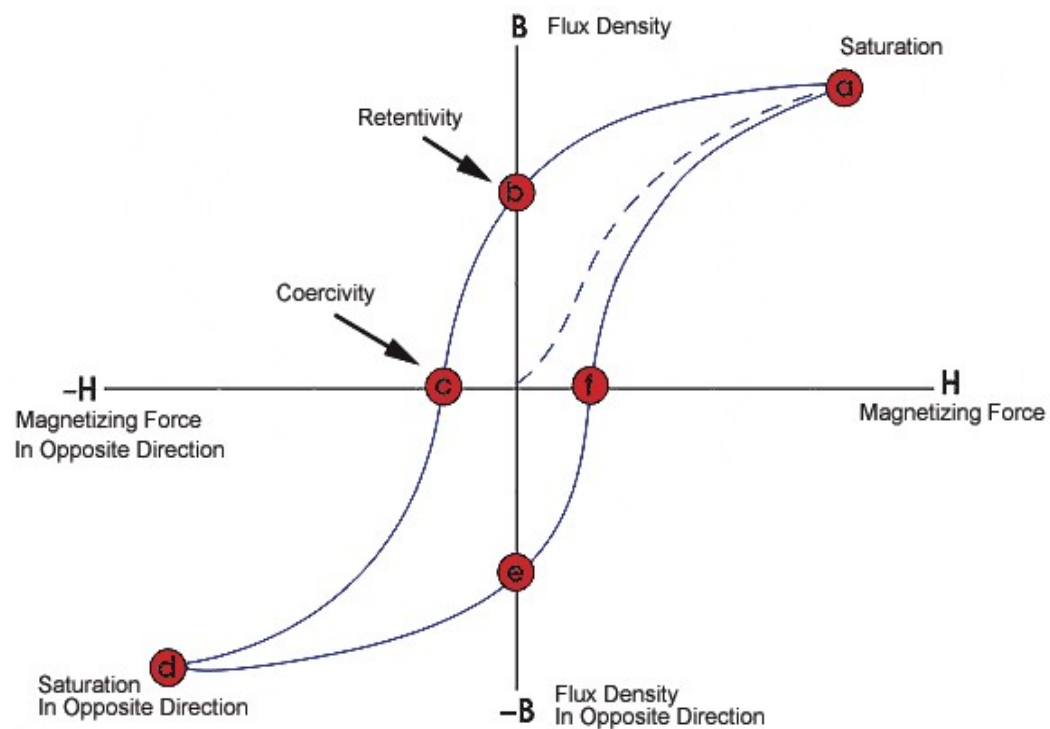
剩磁

- ob段 (B_r)
外加磁场强度降为零时材料中保留的磁感应强度



矫顽力

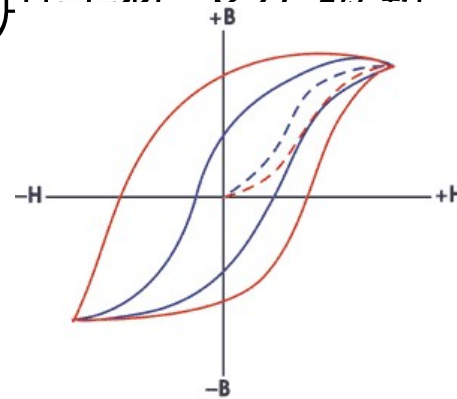
- oc段 (H_c)
用于消除剩磁
所需施加反方
向的磁场强度



磁滞回线特点

- 硬磁性材料

磁滞回线较宽、 μ 低、 H_c 较大， $H_c > 10^4$ A/m、 B_r 大、磁滞严重、退磁难，常用作永久磁体，如淬火高碳钢、钴钢。



- 软磁性材料

磁滞回线较窄、 μ 高、 H_c 较小， $< 10^2$ A/m、 B_r 小、磁滞不明显、退磁易，如电工纯铁、铁硅合金（硅钢）、铁镍合金。

退磁理论

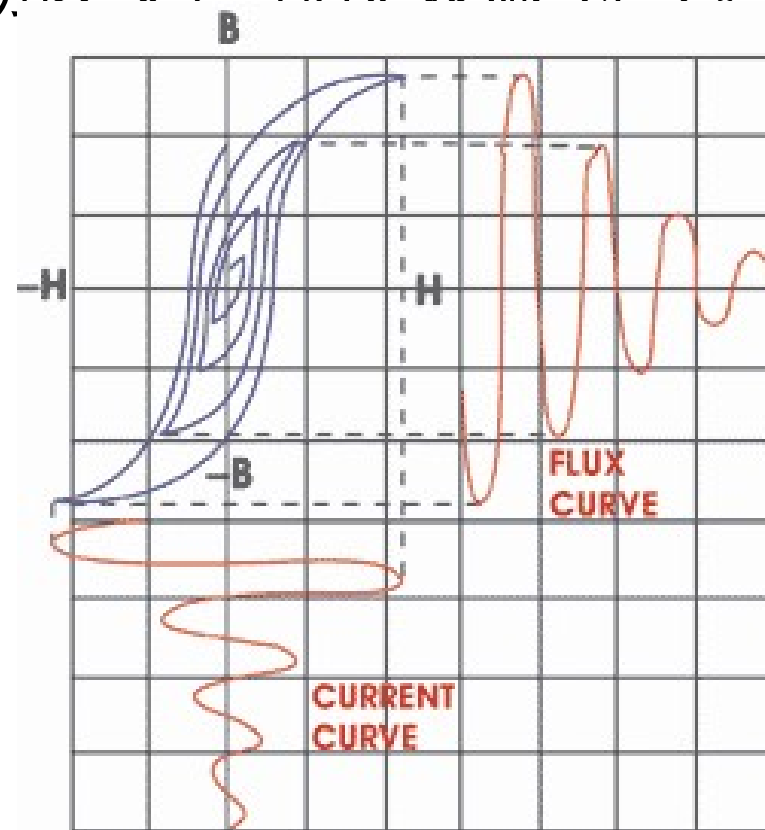
- **概论 General introduction**
- **交流电退磁 Alternative Current Demagnetization**
- **直流电退磁 Direct Current Demagnetization**
- **退磁效率 Efficiency of Demagnetization**

概论

- 剩磁：铁磁性材料在磁化结束后通常都会保留一定的磁性。
- 剩磁大小：取决于材质的磁导率、磁化磁场强度和大小。
- 退磁原因：剩磁可能影响零件的使用或后续的加工。
- 退磁程度：达到可接受的水平。

交流电退磁

- 方向自动改变，强度衰减为零。



直流电退磁

- 方向人为改变、强度衰减为零。

退磁效果

- 用磁场指示器测量