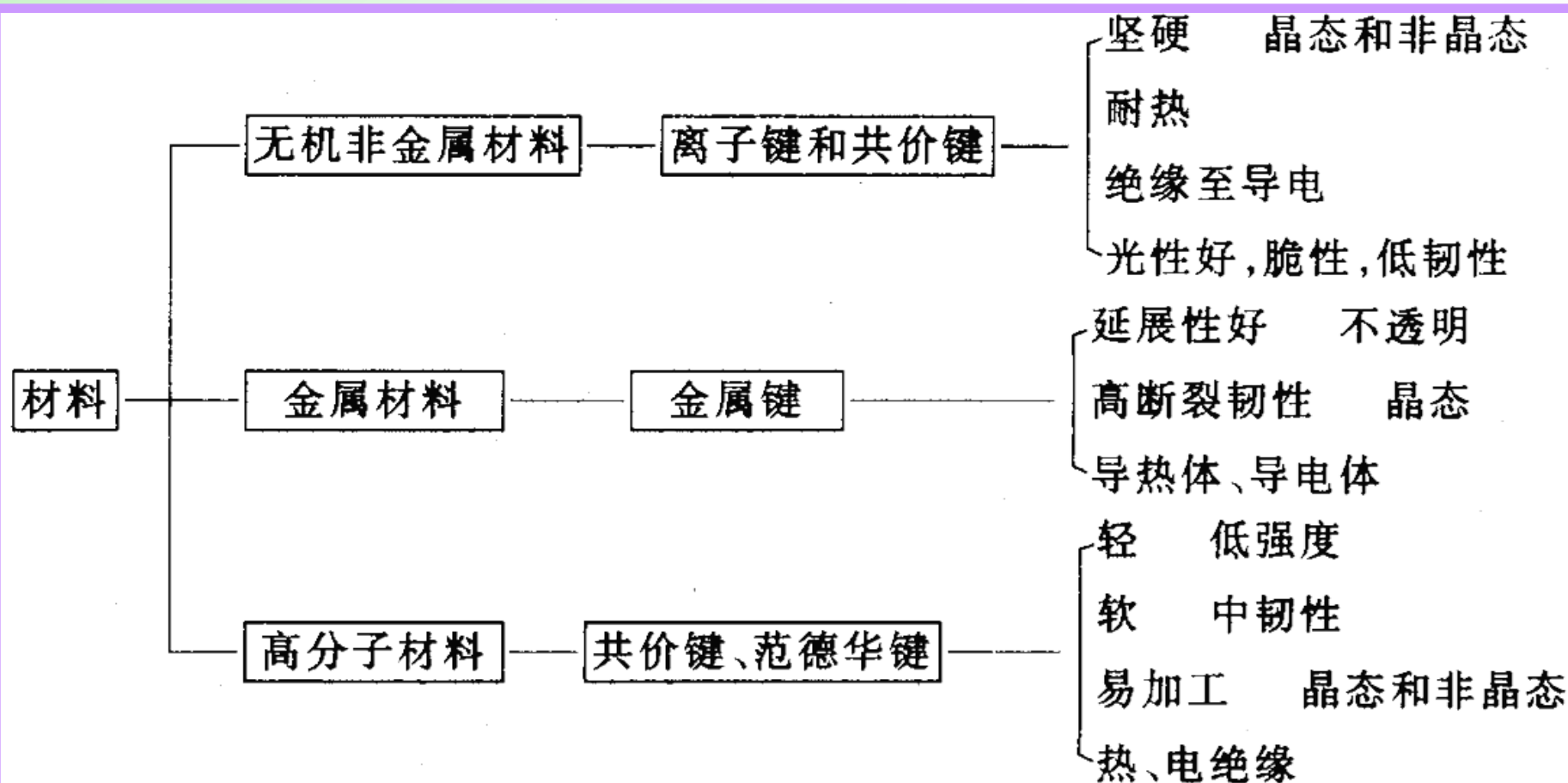


# 第三章 材料的性能

# 各类材料的一般特性



# 本章主要内容

## 材料的几类主要性能：

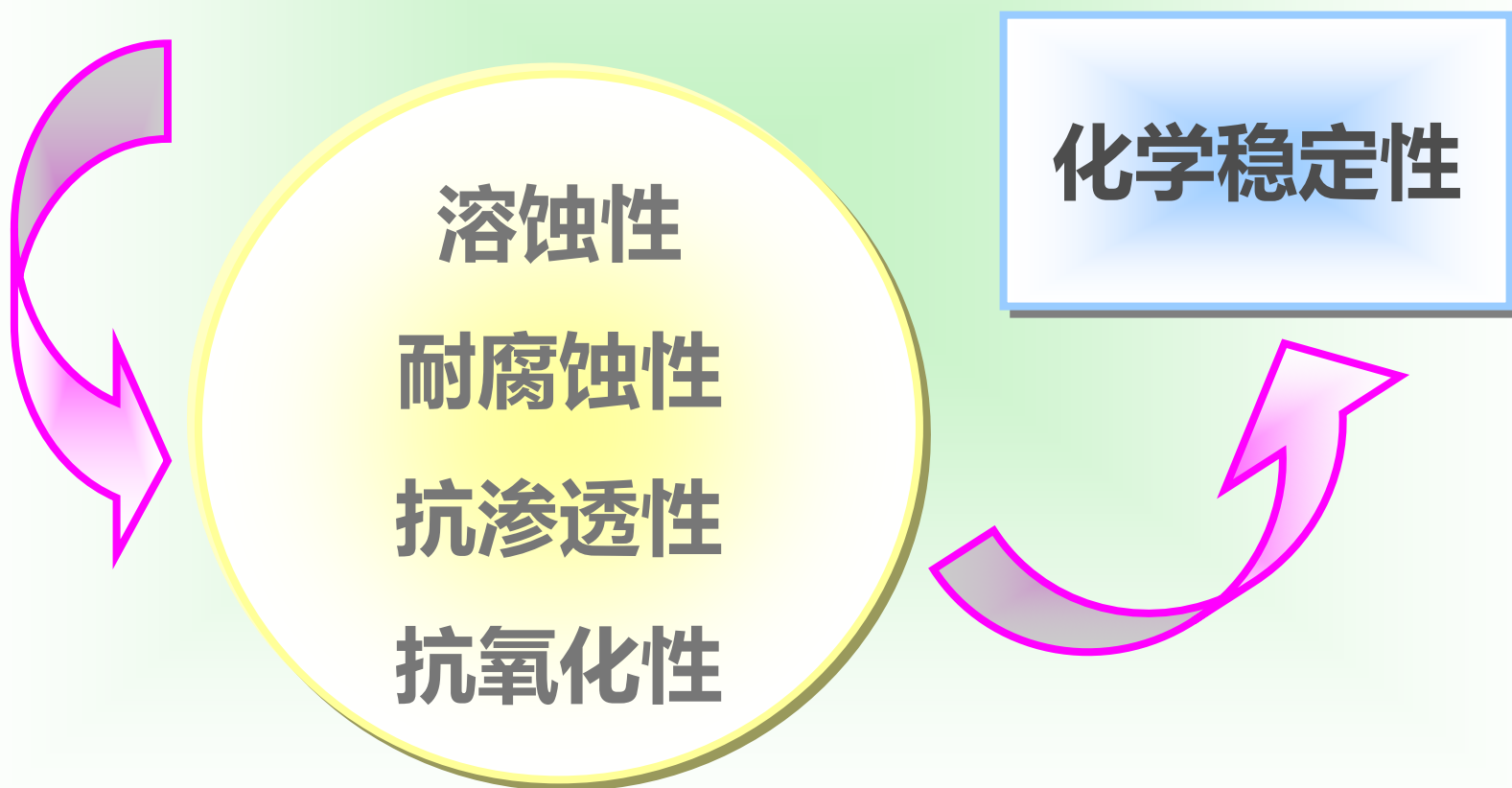
- 3.1 化学性能
- 3.2 力学性能
- 3.3 热性能
- 3.4 电性能
- 3.5 磁性
- 3.6 光学性能

## 学习目的：

1. 了解材料的各类性能；
2. 学习一些材料性能的特征及测试方法；
3. 加深理解材料结构与性能的关系。

## 3.1 化学性能

——材料对外界接触物的耐受性，即化学稳定性

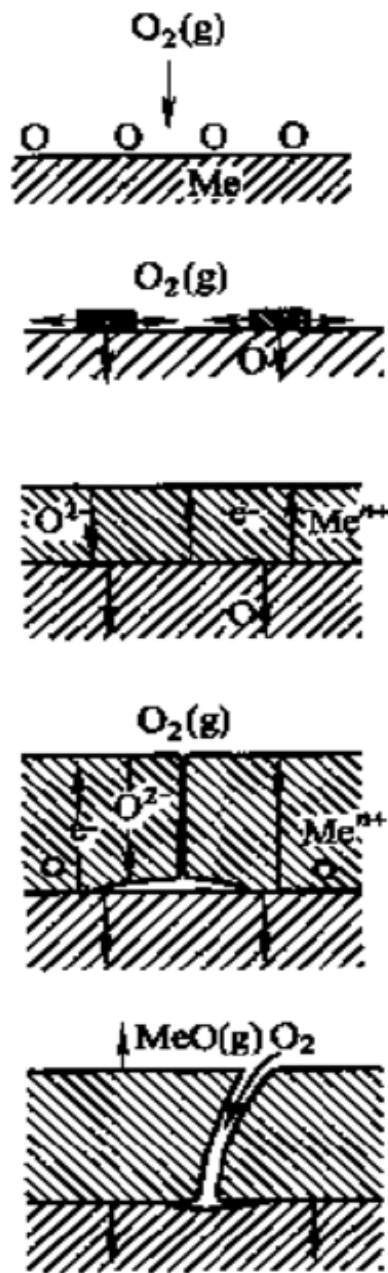


# 3.1.1 耐腐蚀性

## (1) 化学锈蚀

定义：金属与非电解质相接触时，介质中的分子被金属表面所吸附，然后与金属化合，生成锈蚀产物。

### 金属氧化反应的主要过程示意图



吸附氧气分子

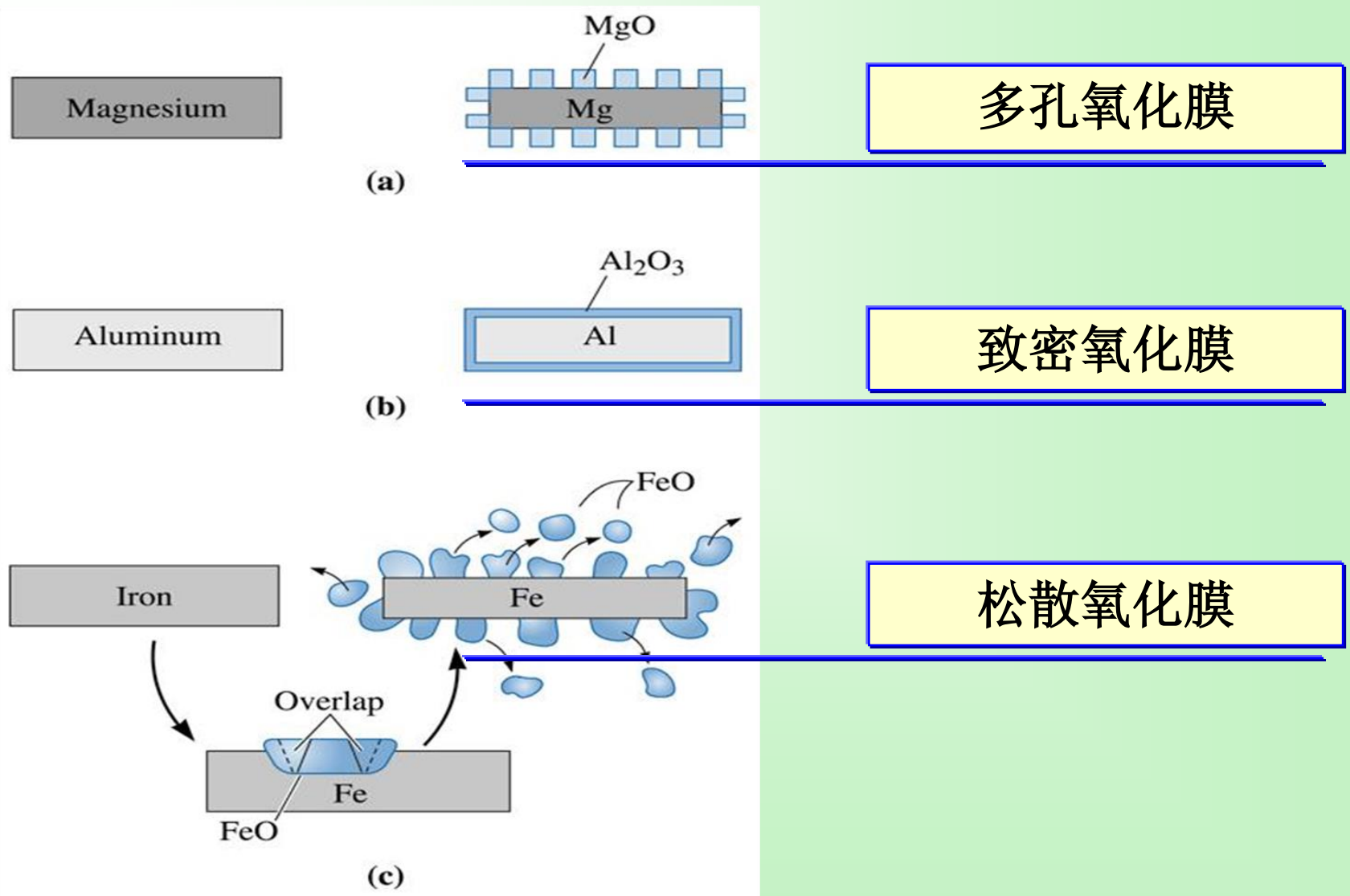
氧化物成核、生长生成氧化膜

氧化膜生长

缝隙  
孔洞  
微裂纹

宏观裂纹

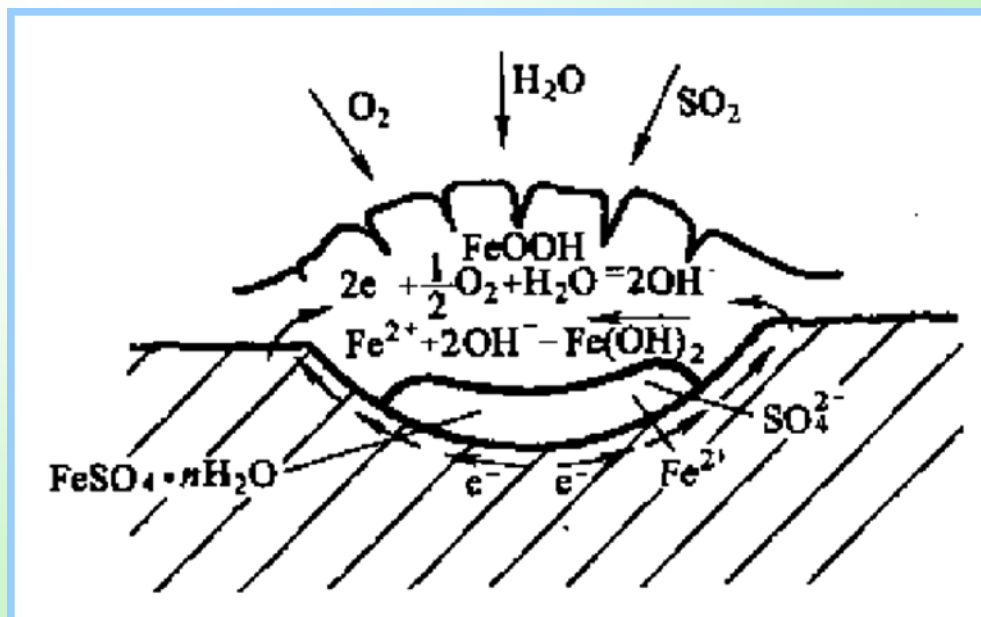
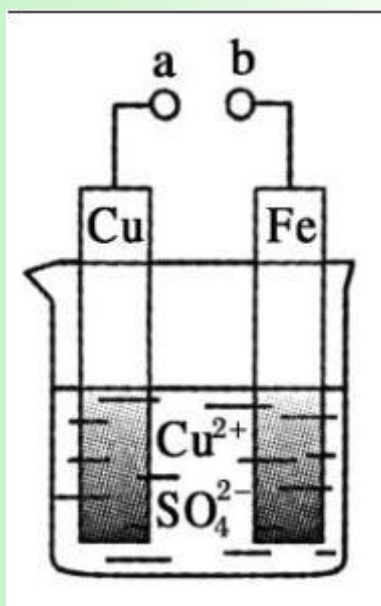
# 几种金属的表面氧化膜对比



## (2) 电化学腐蚀

当两种金属材料在电解质溶液中构成原电池时，作为原电池负极的金属就会锈蚀。

这种能导致金属锈蚀的原电池为**腐蚀电池**。



例：铁的电化学腐蚀过程如下表：

	析氢腐蚀	吸氧腐蚀
条件	水膜呈酸性。	水膜呈中性或酸性很弱。
电极反应	负极 Fe(-) : $\text{Fe}-2\text{e}^-=\text{Fe}^{2+}$ 正极 C(+): $2\text{H}^{++}2\text{e}^-=\text{H}_2\uparrow$ 总电极反应式: $\text{Fe} + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\uparrow$	$2\text{Fe}-4\text{e}^-=2\text{Fe}^{2+}$ $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-=4\text{OH}^-$ $2\text{Fe}+2\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2= 2 \text{Fe}(\text{OH})_2$ $4\text{Fe}(\text{OH})_2+2\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2=4\text{Fe}(\text{OH})_3$ $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	通常两种腐蚀同时存在，但后者更普遍。	



## 形成腐蚀电池必备的3个条件：

- 1) 有电位差存在。电位差越大，腐蚀越烈。
- 2) 有电解质溶液，两极材料共处于相连通的电解质溶液中。
- 3) 具有不同电位的两部分金属之间必须有导电连接或直接接触。

## 牺牲阳极法保护金属则是人为地构造腐蚀电池。

在腐蚀电池中，被侵蚀的是阳极，所以只要在金属材料上加较活泼的金属作为阳极，而金属材料作为阴极，发生电化学腐蚀时阳极被腐蚀，金属材料主体则得以保护。

## 3.1.2 耐酸碱性

耐酸材料

以酸性氧化物 $\text{SiO}_2$ 为主

大多数金属氧化物都是碱性氧化物，相应的材料表现出较强的耐碱性，而易受酸侵蚀或溶解。

耐碱材料

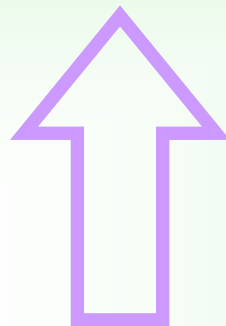
# 金属的耐酸碱碱性

- 主要是高温下浓碱液的腐蚀问题
- 镍铬铸铁中加入稀土，降低镍含量，可以降低材料成本，又可以保证合金铸铁良好的耐碱蚀性。

**耐蚀机理：**碱蚀后稀土高镍铬铸铁表面生成完整、致密的 $\gamma\text{-(Fe, Cr)}_2\text{O}_3$ 氧化膜和 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{FeCl}_3$ 等附着物，使材料本体受到保护。

# 高分子材料：

**化学稳定性好，耐酸耐碱**



- 主链原子以共价键结合
- 长分子链对反应基团的保护
- 电绝缘性，无电化学腐蚀

### 3.1.3 耐有机溶剂性

- 金属材料 and 无机非金属材料有好的耐有机溶剂性能；
- 热塑性高分子材料一般由线形高分子构成，很多有机溶剂都可以将其溶解；
- 交联型高分子在有机溶剂中不溶解，但能溶胀，使材料体积膨胀，性能变差；
- 不同的高分子材料，其分子链以及侧基不同，对各种有机溶剂表现出不同的耐受性；
- 组织结构对耐溶剂性也有较大影响。
  - 例如，作为结晶性聚合物，聚乙烯在大多数有机溶剂中都难溶，因而具有很好的耐溶剂性。

### 3.1.4 耐老化性



塑料老化

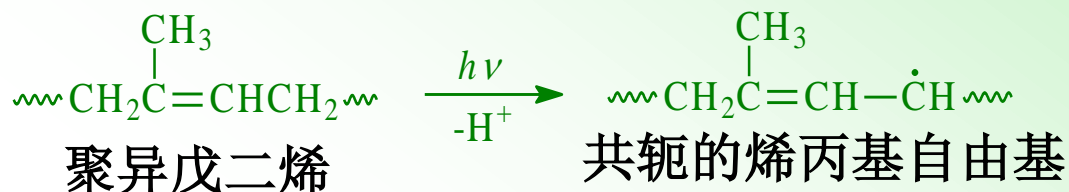


橡胶老化

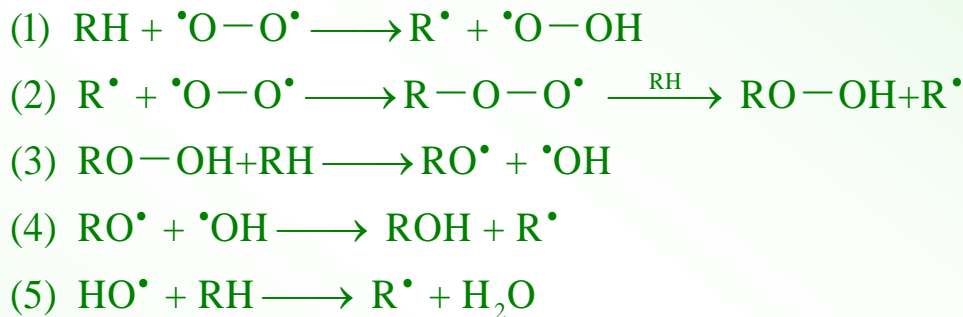
# 3.1.4.1老化及其影响因素

## ——耐老化性是高分子材料面临的问题

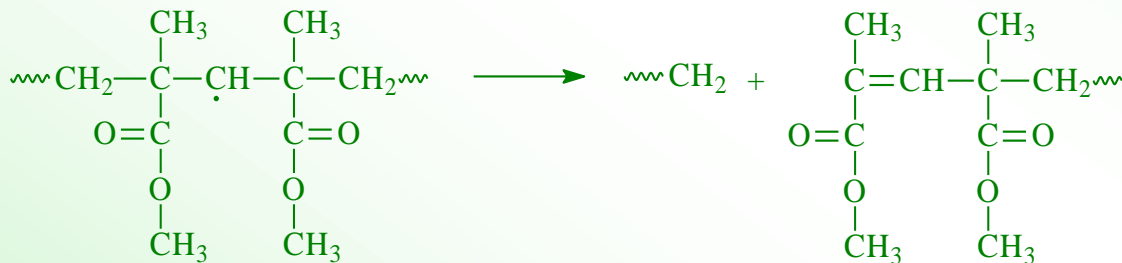
- 光照下形成自由基：



- 氧气的参与：



- R·自由基形成后导致链的断裂（降解）：



聚甲基丙烯酸甲酯

# 结构与耐老化性

- **羰基**容易吸收紫外光，因此含羰基的聚合物在太阳光照射下容易被氧化降解。
- **聚四氟乙烯**有极好的耐老化性能
  - 氟原子与碳原子形成牢固的化学键；
  - 氟原子的尺寸大小适中，一个紧挨一个，能把碳链紧紧包围住。
- 分子链中含有不饱和双键、聚酰氨的酰氨键、聚碳酸酯的酯键、聚砷的碳硫键、聚苯醚的苯环上的甲基等等，都会降低高分子材料的耐老化性。



## 3.1.4.2 老化的预防

- 改进聚合物分子结构

- 加入适当助剂

- 抗氧化剂

- 光稳定剂

- 光屏蔽剂**：聚乙烯的铝粉图层、橡胶中的碳黑。

- 紫外线吸收剂**：吸收并消散引发聚合物降解的紫外线辐射。

- 淬灭剂**：消散聚合物分子上的激发态能量。

### 3.1.4.3 耐老化性测试

- 模拟太阳光辐照条件；
- 测试样品置于老化试验箱中；
- 辐照一定时间后观察性能变化。

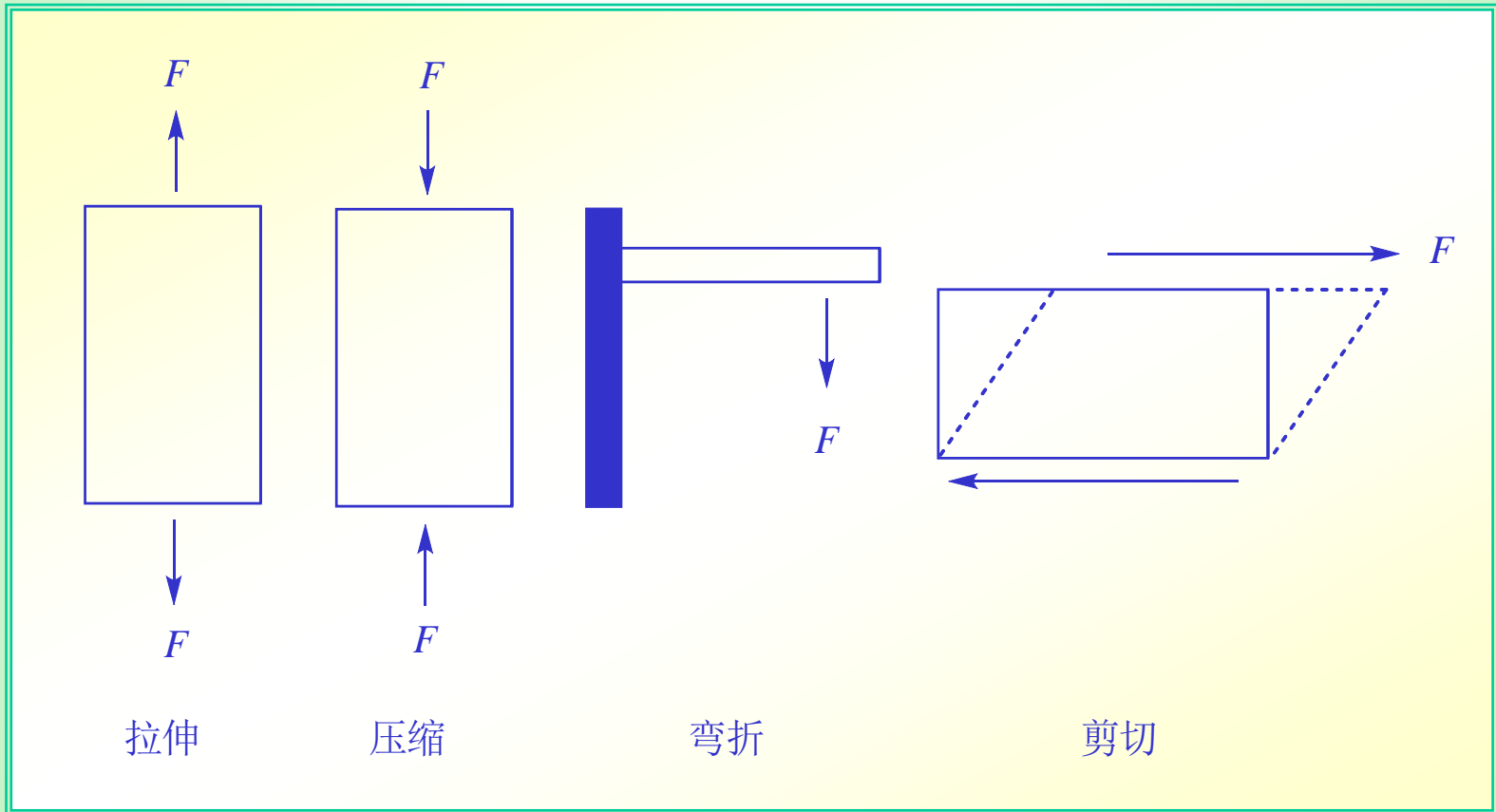


辐照光源：氙灯（含紫外光、可见光和红外光）；

## 3.2 力学性能

——材料抵受外力作用的能力。

表征：强度、韧性和硬度等。



## 3.2.1 材料的强度

- 通过测量材料受力时的形变情况，可以获得材料强度的数据。

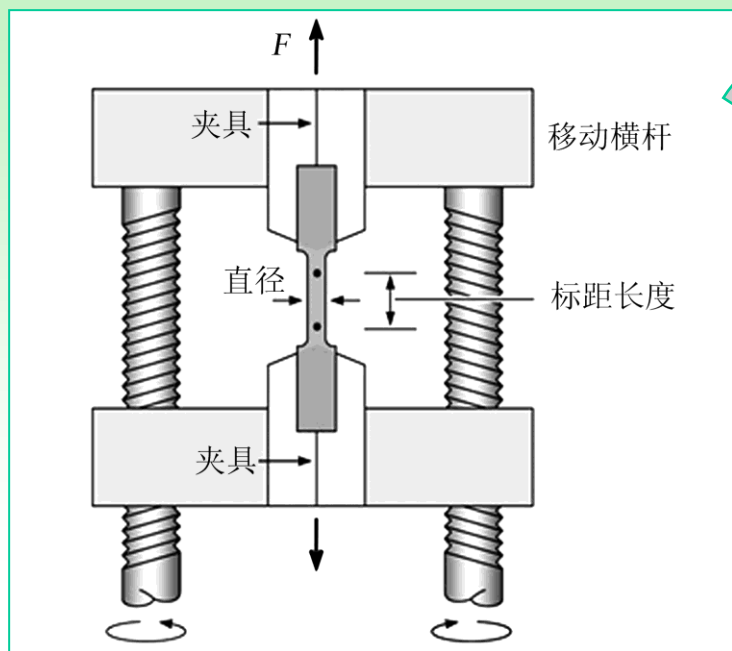
**应力 ( $\sigma$ )**：材料的受力，等于样品在单位横截面积上所承受的负荷 ( $F$ )。如果样品的原始横截面积为 $A_0$ ，则

$$\sigma = F / A_0$$

**应变 ( $\varepsilon$ )**：材料受力发生的形变，等于样品受力时的相对长度变化。

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0$$

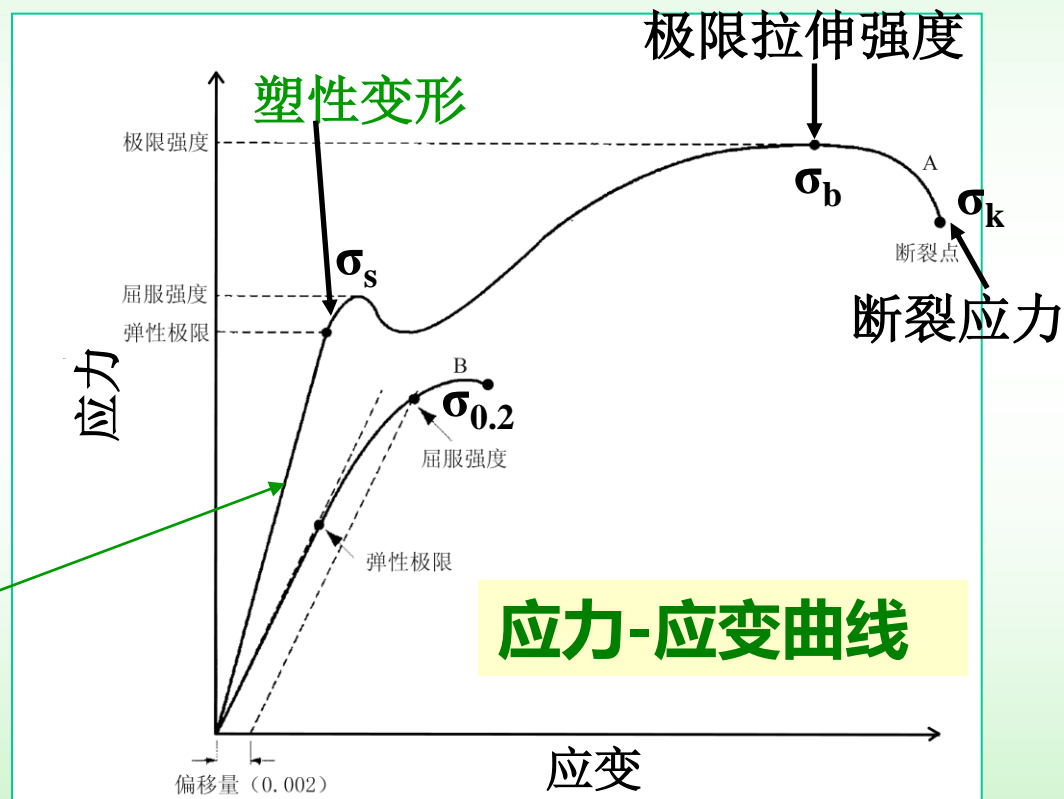
$l_0$ ：试样的原始标注长度； $l$ 为试样受力变形后的长度。



## 样品拉伸试验

弹性形变，属于非永久性形变  
 $\sigma = E \varepsilon$  (Hooke's Law)

$E$ : 弹性模量或杨氏模量，反映材料的坚硬程度或抵抗弹性形变的能力。



曲线A: 韧性较大的材料；曲线B: 韧性较小（即脆性）的材料。

# 延展性或塑性的表征——与材料断裂时的伸长程度有关

- 延伸率  $\delta$

$$\delta = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100\%$$

$\delta < 5\%$ :  
脆性材料

$l_f$ : 试样拉断后的最后标距长度。

- 断面收缩率  $\Psi$  : 试样拉断后横截面的相对收缩值

$$\Psi = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

$A_0$  为试样原始横截面积;  $A_f$  为断口处的横截面积。

## 材料的一些力学性能特点：

1. 很多金属材料既有高的强度，又有良好的延展性；
2. 多晶材料的强度高于单晶材料；
  - 这是因为多晶材料中的晶界可中断位错的滑移，改变滑移的方向。通过控制晶粒的生长，可以达到强化材料的目的。
3. 固溶体或合金的强度高于纯金属；
  - 杂质原子的存在对位错运动具有牵制作用。
4. 多数无机非金属材料延展性很差，屈服强度高。
  - 源于共价键的方向性，导致位错难以运动。

## 3.2.2 材料的硬度

——材料局部抵抗硬物压入其表面的能力的量度

- 材料抵抗弹性变形、塑性变形或破坏的能力；
- 材料抵抗残余变形和反破坏的能力。

**硬度**

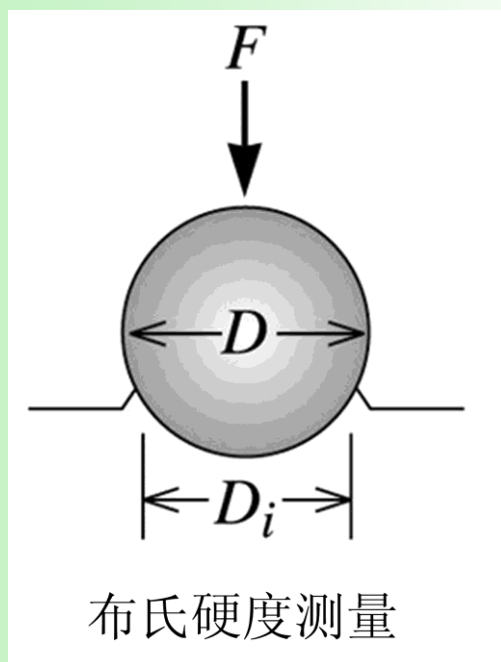
**材料弹性、塑性、  
强度和韧性等力学  
性能的综合指标**

**测试方法：布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度**



## 布氏硬度:

把直径为 $D$ （一般为10 mm）的硬球用力 $F$ 按在试样表面，保持规定时间，然后卸荷，测量被测量表面压痕直径 $D_i$ 。



## 布氏硬度数:

$$HB = \frac{F}{(\pi / 2) D (D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$$

### 特点:

1. 布氏硬度压痕较大，测量值准，
2. 不适用于测量硬度较高的材料。

## 洛氏硬度:

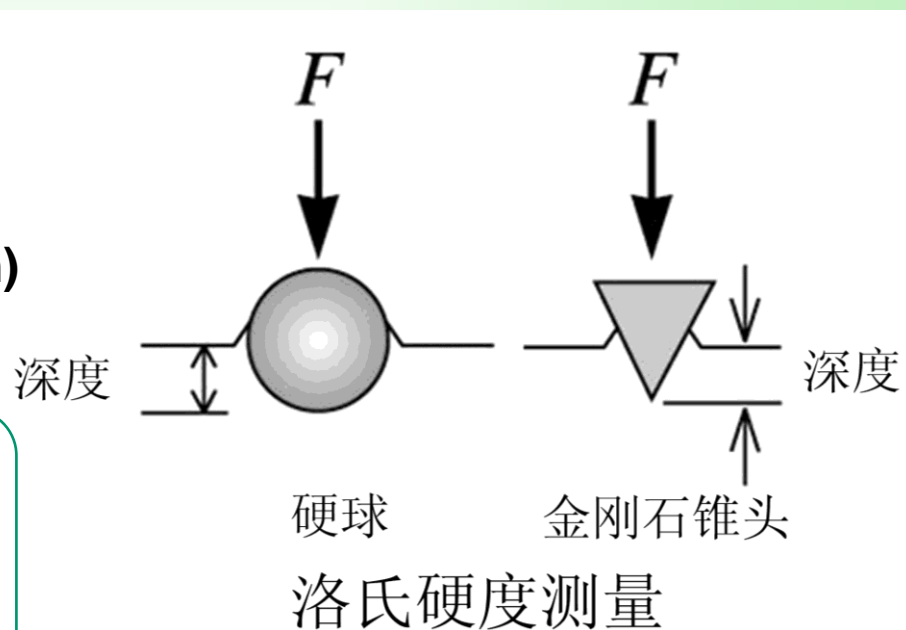
用一个顶角 $120^\circ$ 的金刚石圆锥体或直径为1.59、3.18 mm的钢球，在一定载荷 $F$ 下压入被测材料表面，由压痕的深度 $h$ 求出材料的硬度。

**洛氏硬度值:  $HR=(K-h)/0.002$**

$K$ :常数;  $h$ :压痕深度; 0.002:硬度单位(mm)

### 特点:

1. 压入深度 $h$ 越大，硬度越低;
2. 压入深度 $h$ 越小，硬度越高。



注意：洛氏硬度压痕很小，测量值有局限性，  
须测数点求平均值，适用成品和薄片。

根据试验材料的硬度不同，分HRA,HRB,HRC三种不同的标度。

分类	K值	测试方法	应用
HRA	K=0.2	采用60kg载荷和钻石锥压入器求得的硬度。	用于硬度极高的材料（如硬质合金等）
HRB	K=0.26	采用100kg载荷和直径1.58mm淬硬的钢球，求得的硬度。	用于硬度较低的材料（如退火钢、铸铁等）
HRC	K=0.2	采用150kg载荷和钻石锥压入器求得的硬度。	用于硬度很高的材料（如淬火钢等）

## 维氏硬度:

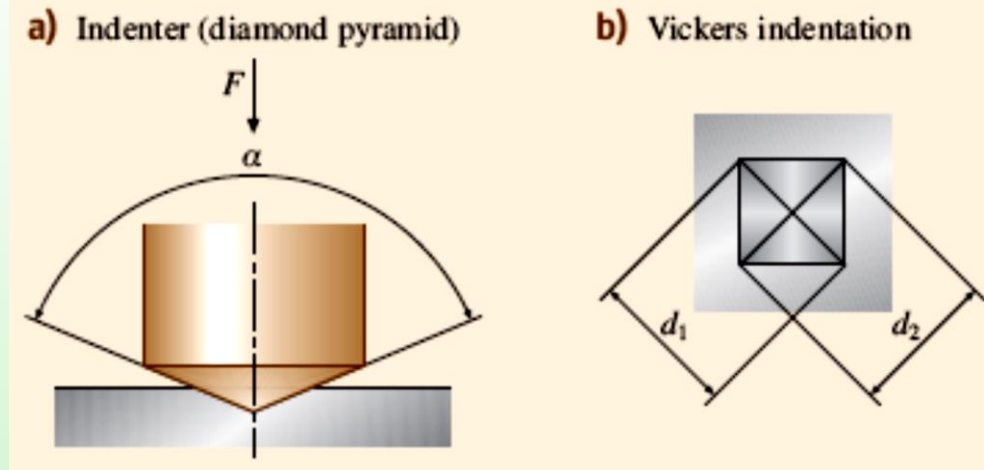
以49.03~980.7N的负荷，将相对面夹角为136°的方锥形金刚石压入器压材料表面，保持规定时间后，测量压痕对角线长度。

**硬度的大小:**  $HV=0.189F/d^2$

$F$ :作用在压头上的测验力(N);

$d$ :压痕两对角线长度的平均值(mm);

$HV$ 单位: $N/mm^2$



维氏硬度适用于较大工件和较深表面层的硬度测定。

## 维氏硬度分类：

分类	试验负荷	应用
维氏硬度	49.03~980.7 N	较大工件和较深表面层的硬度测定
小负荷维氏硬度	1.961~49.03 N	较薄工件、工具表面或镀层的硬度测定
显微维氏硬度	< 1.961 N	金属箔、极薄表面层的硬度测定

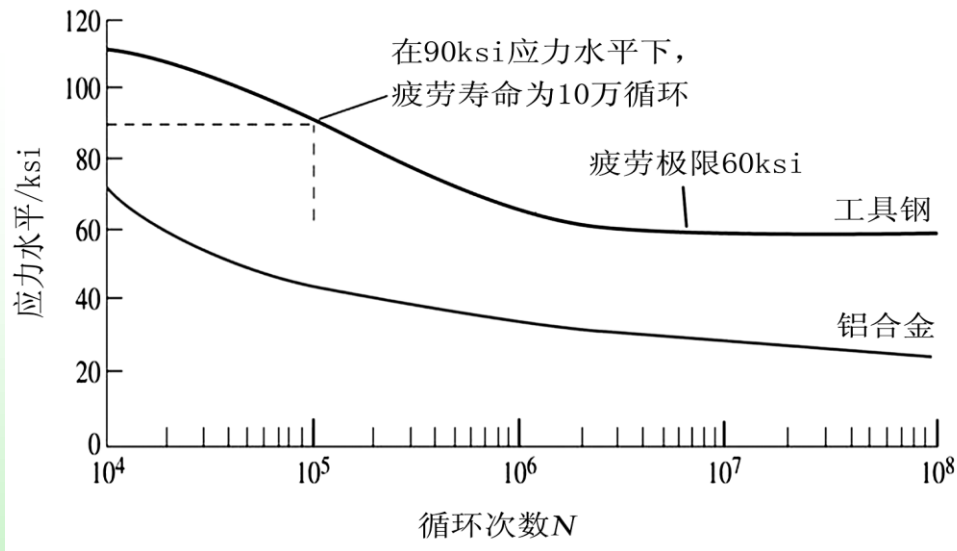
# 各种材料的硬度特征：

1. 由**共价键**结合的材料如**金刚石**具有**很高的硬度**，这是因为共价键的强度较高；
2. **无机非金属材料**有较高硬度
  - 离子键和共价键的强度均较高；
  - 当含有价态较高而半径较小的离子时，所形成的离子键强度较高（因静电引力较大），故材料的硬度更高。
3. **金属材料**形成**固溶体或合金**时可显著提高材料的硬度。
4. **高分子材料**硬度通常较低
  - 分子链之间主要以范德华力或氢键结合，键力较弱

## 3.2.3 疲劳性能

### ——材料抵抗疲劳破坏的能力

**疲劳：**材料在循环受力（拉伸、压缩、弯曲、剪切等）下，在某点或某些点产生局部的永久性损伤，并在一定循环次数后形成裂纹、或使裂纹进一步扩展直到完全断裂的现象。



疲劳试验S-N曲线

## 3.3 热性能

与材料中的原子振动有关，而导热性还涉及电子的能量转移。

- **热容**

- **热膨胀**

- **热传导**



### 3.3.1 热容

—1mol物质升高1K所需要的热量 (J/(mol K))

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

- **定压热容** $C_p$ :等压条件下测定的热容。
  - 晶体材料较高温度下, 热容为常数:
$$C_p = 3R = 24.9 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$
  - 室温下, 热容与此值接近
  - 极低温度下:  $C_p \propto T^3$
- **定容热容** $C_V$ :等容条件下测定的热容。

## 3.3.2 热膨胀

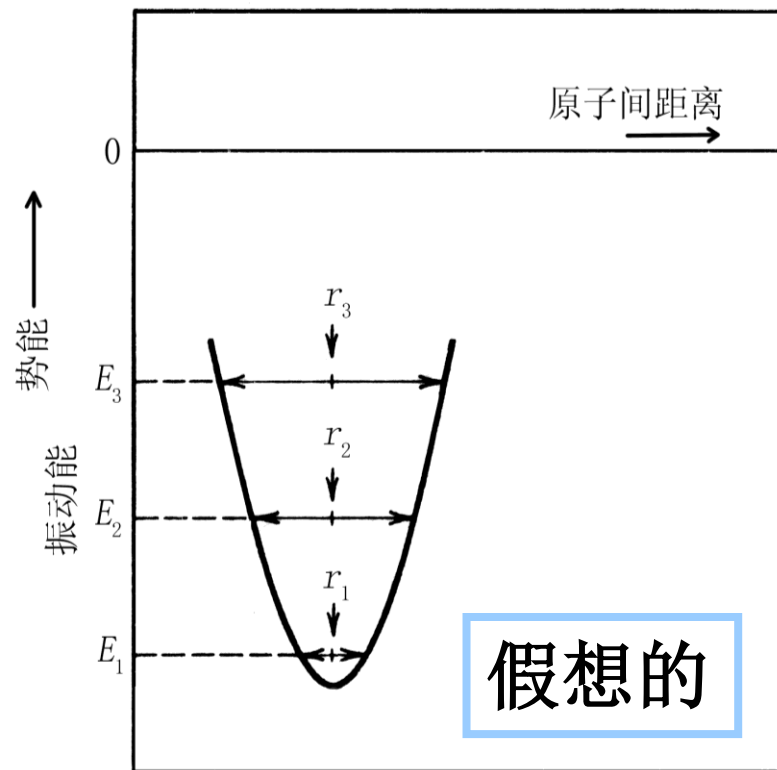
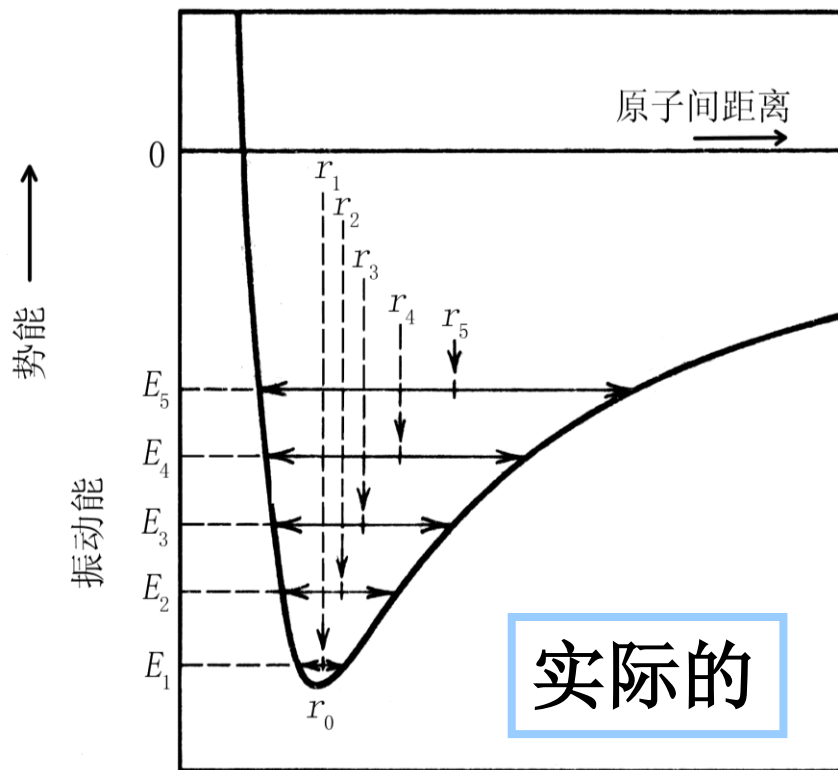
——材料的尺度随温度变化的现象。

- 膨胀系数 $\alpha$ ：温度变化1K时材料尺度的变化量。
- 线膨胀系数 $\alpha_l$ 和体积膨胀系数 $\alpha_V$

$$\alpha_l = \left( \frac{1}{l} \right) \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p$$

$$\alpha_V = \left( \frac{1}{V} \right) \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

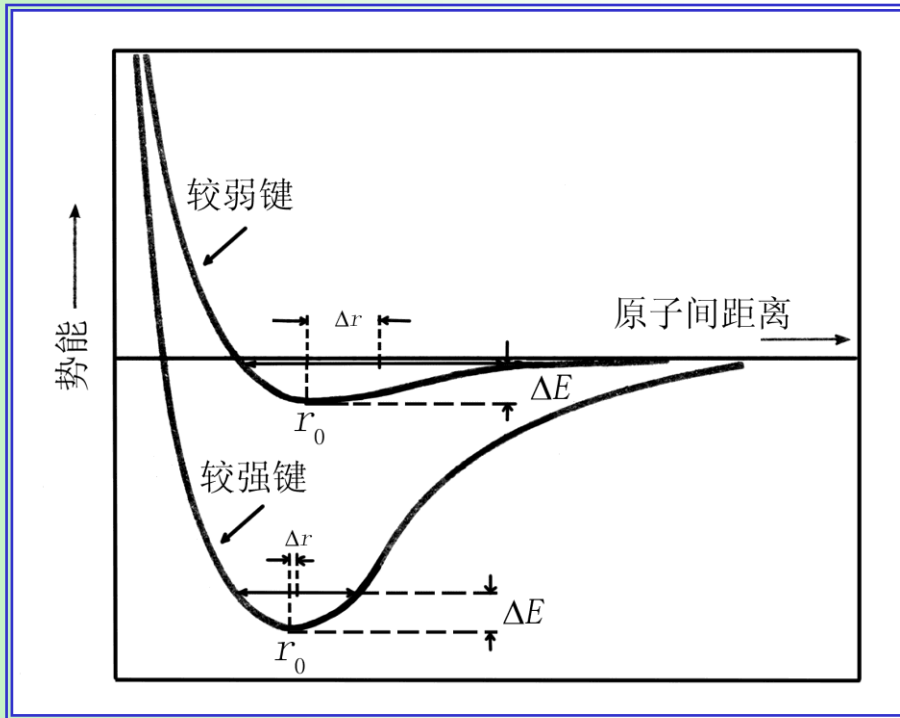
# 热膨胀现象解释



## 势能—原子间距离曲线

# 膨胀的差异

——原子间的键合力越强，则热膨胀系数越小。



## 键强与热膨胀

1. 金属和无机非金属材料的热膨胀系数较小；
2. 聚合物材料分子链间以范德华力结合，键合力较弱，则热膨胀系数较大。

## 材料结构对热膨胀系数的影响：

### 1. 结构紧密的固体，膨胀系数大。

例：氧离子紧密堆积结构的氧化物，相互热振动导致膨胀系数增大。 $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$

### 2. 固体结构疏松，膨胀系数小。

内部空隙较多，当温度升高，原子振幅加大，原子间距离增加时，部分被结构内部空隙所容纳，宏观膨胀就小。

### 3.3.3 热传导

——热量从系统的一部分传到另一部分  
或由一个系统传到另一个系统的现象。

只考虑一维热传导，并且温度分布不随时间而变，则当沿着 $x$ 坐标方向存在温度梯度 $dT/dx$ 时，

热量通量 $q$ 与温度梯度成正比：
$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

$T$ : 温度； $x$ : 热传导方向的坐标； $\lambda$ : 热导率；负号：热流方向与温度梯度方向相反

- **热导率 $\lambda$ ：表征物质热传导性能的物理量。**

- 单位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，或  $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

- $1 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 4.2 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

# 各种材料的热导率

- **金属材料有很高的热导率**

- 电子价带没有完全充满，自由电子在热传导中担当主要角色；
- 金属晶体中的晶格缺陷、微结构和制造工艺都对导热性有影响；
- 晶格振动阻碍电子迁移。

- **无机陶瓷或其它绝缘材料热导率较低**

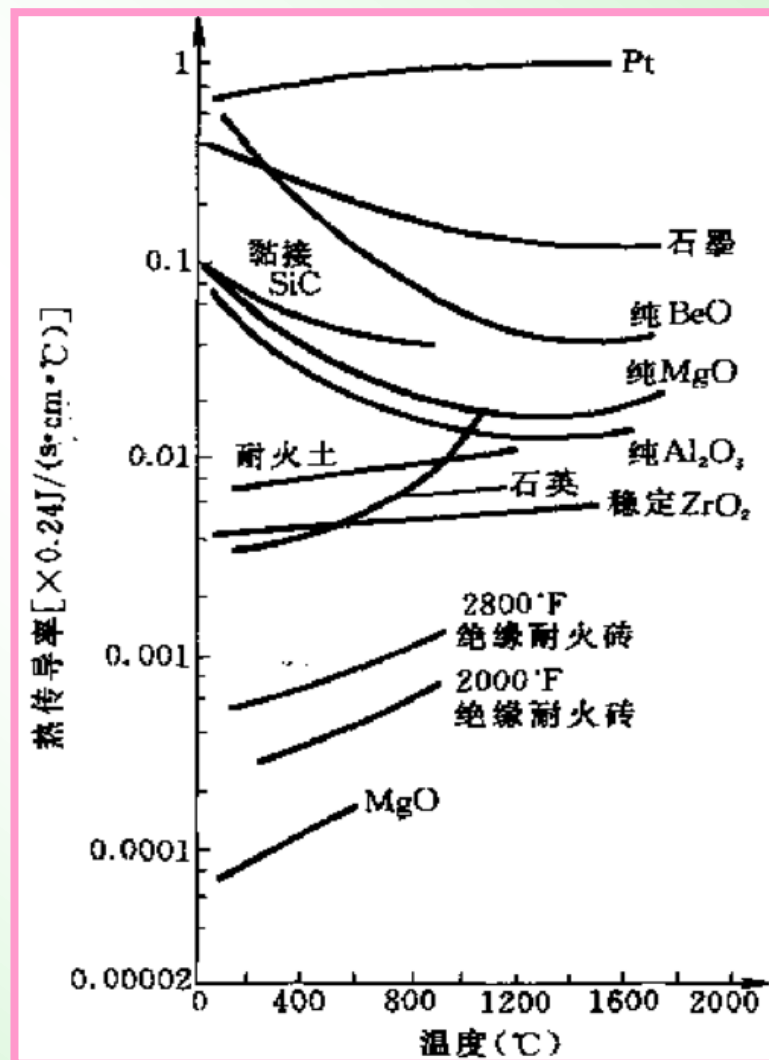
- 热传导依赖于晶格振动（声子）的转播；
- 高温处的晶格振动较剧烈，带动临近晶格振动加剧；
- 温度升高，声子能量增大，再加上电子运动的贡献增加，其热导率随温度升高而增大。

- **半导体材料的热传导**

- 电子与声子的共同贡献；
- 低温时，声子是热能传导的主要载体；
- 较高温度下电子能激发进入导带，所以导热性显著增大。

- **高分子材料热导率很低**

- 热传导是靠分子链节及链段运动的传递，其对能量传递的效果较差。





## 3.4 电性能

——材料被施加电场时所产生的响应行为

- 导电性
- 介电性
- 铁电性
- 压电性

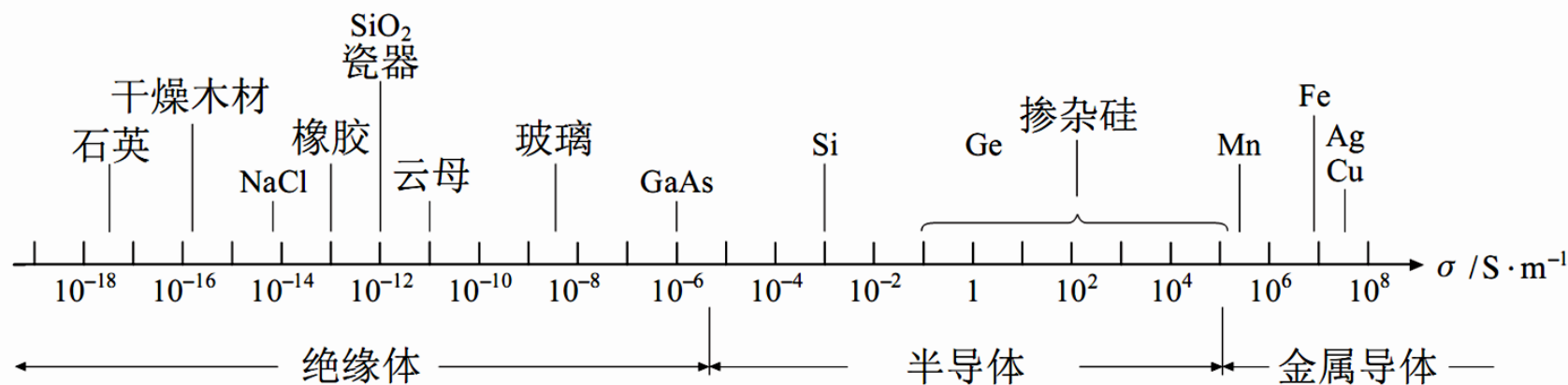
## 3.4.1 导电性能

金属：导体、半导体（半导体金属砷、碲等）

陶瓷：绝缘体、半导体

高分子材料：绝缘体、半导体、导体

其它：硅、锗（半导体），石墨（导体）



**欧姆定律:**  $V = IR$   $V$ : 电压(V);  $I$ : 电流(A);  $R$ : 电阻( $\Omega$ )

**电阻:**  $R = \rho \left( \frac{l}{A} \right)$   $l$ : 材料的长度;  $A$ : 材料的截面积;  
 $\rho$ : 材料的电阻率

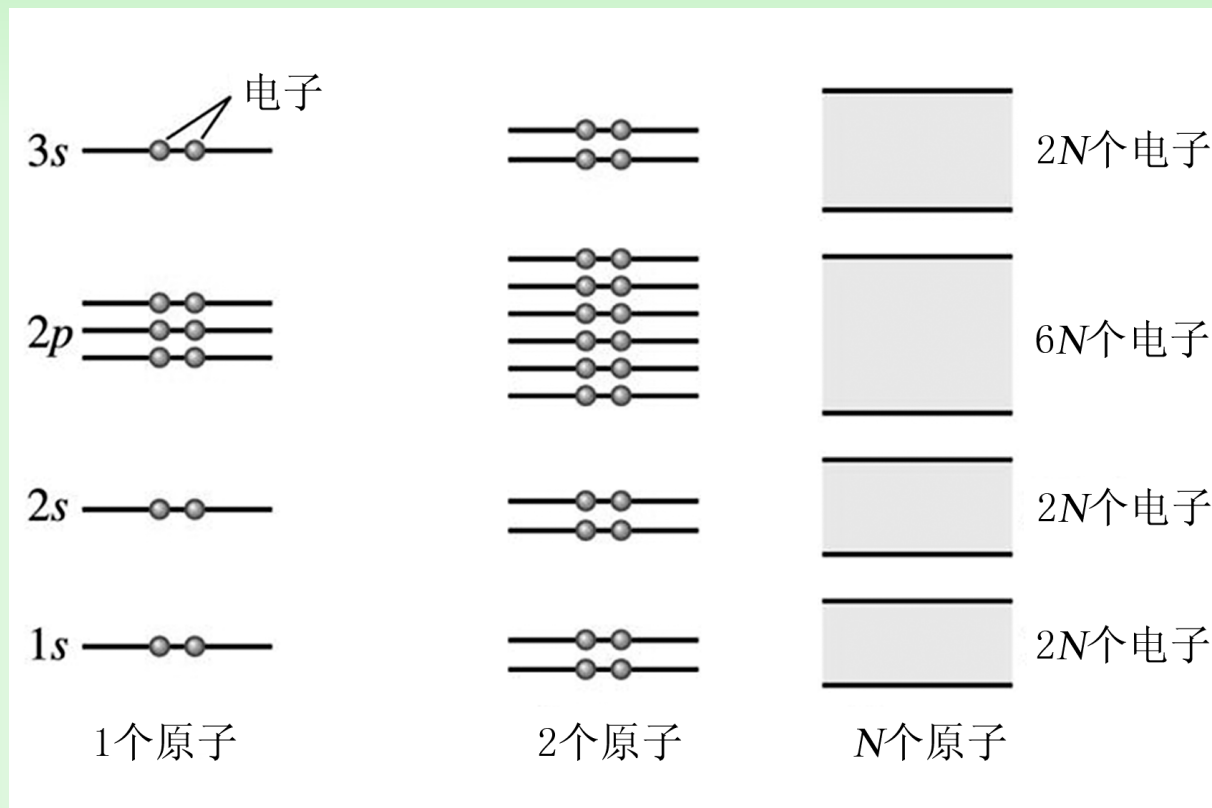
**电导率:**  $\sigma = 1/\rho$   $\sigma$ : S/m  $\sigma$ 越大, 导电性越好

$\sigma = nZ_e\mu$   $n$ : 载流子的密度;  $Z_e$ : 每个载流子的电荷数;  
 $\mu$ : 载流子迁移率

**要增加材料的导电性, 关键是增大单位体积内载流子的数目 ( $n$ ) 和使载流子更易于流动 (增大 $\mu$ 值)。**

# 能带理论 ——可解释不同种类材料在导电性上的差异。

## 能带形成示意



## 能带理论的基础:

1. 原子轨道组合成分子轨道，使能量降低。
2. 相邻分子轨道间的能级非常接近，连成一片，构成具有能量宽度的能带。

## 金属晶体能带结构

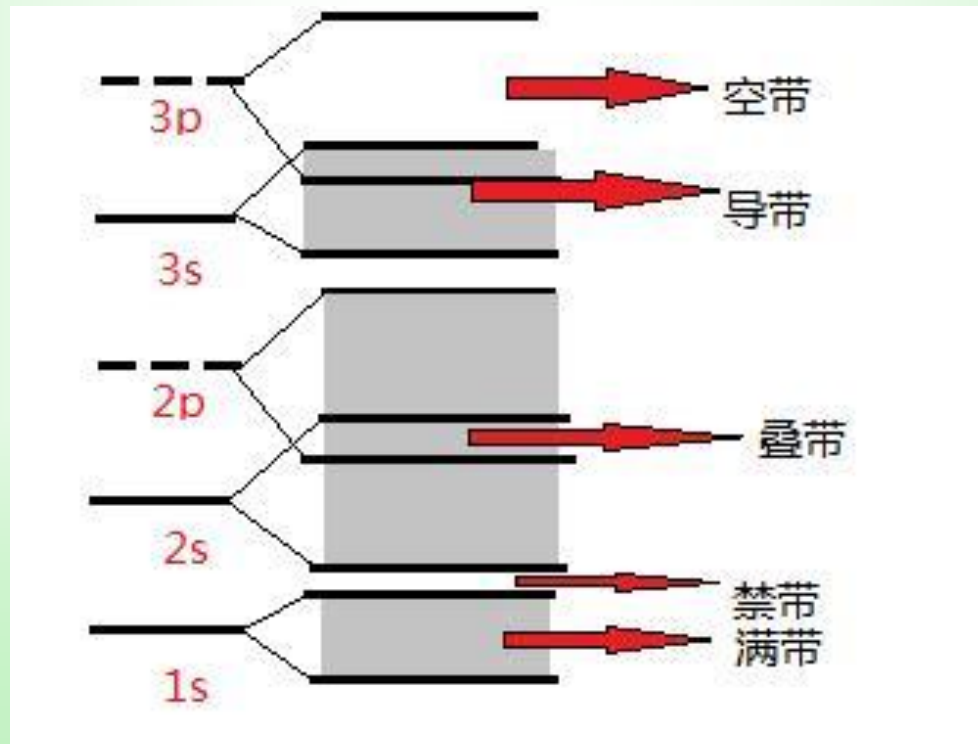
**满带：**已充满电子的能带，其中电子无法自由流动、跃迁。

**空带：**部分充满电子或全空的能带。

**导带：**空带获得电子后可参与导带过程。

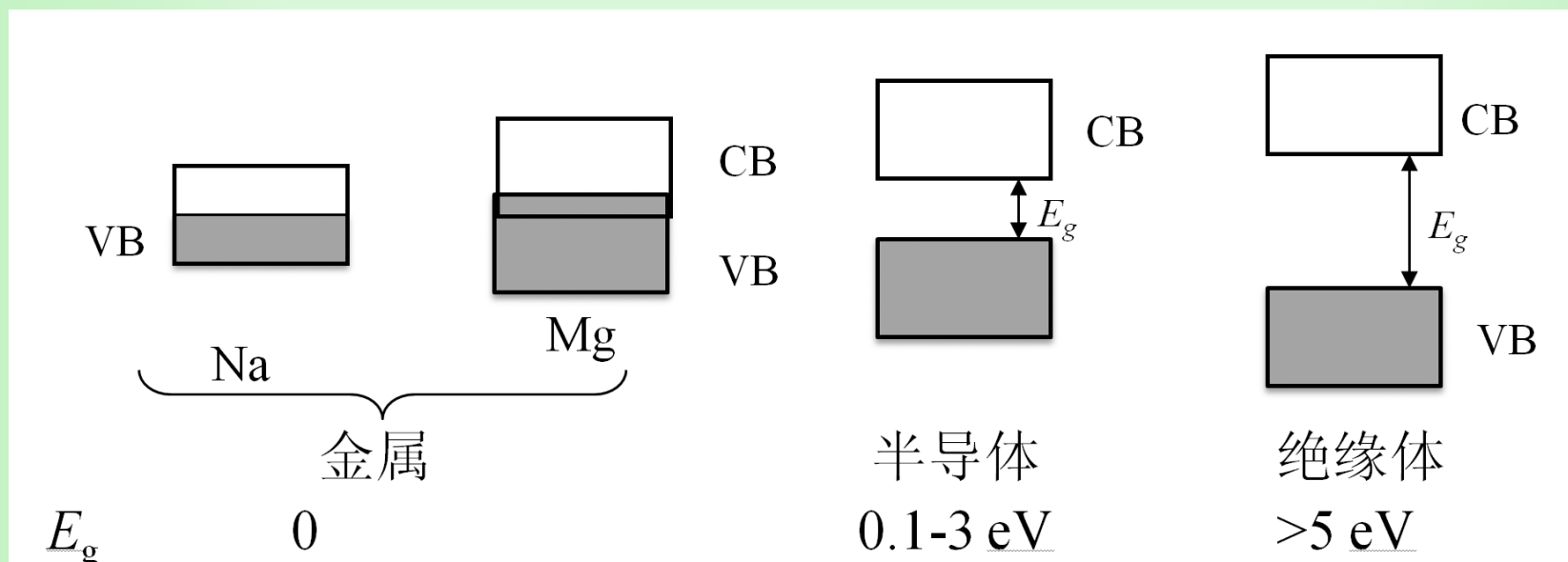
**价带：**价电子所填充的能带。

**禁带：**在半导体和绝缘体中，满带和导电之间还隔有一段空隙。



## 各种材料的能带结构

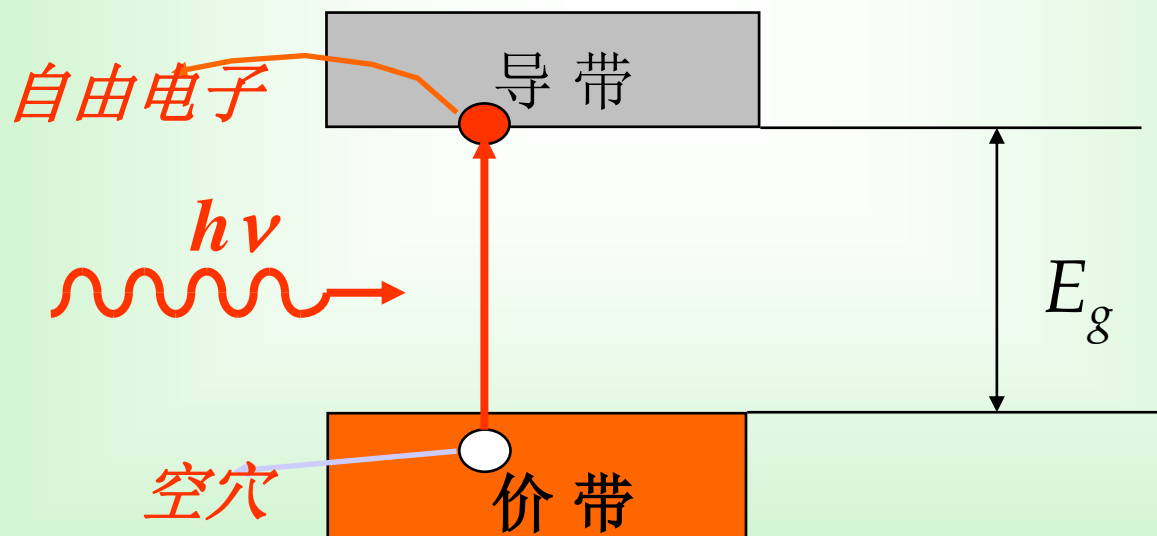
固体的导电性能由其能带结构决定。



1. 一价金属(**Na**)，价带是未满带，能导电。
2. 二价金属(**Mg**)，价带是满带，禁带宽度为零，价带与较高的空带相交叠，满带中的电子能占据空带，能导电。
3. 绝缘体和半导体，价带为满带，价带与导带之间存在禁带。

## 本征半导体

在半导体中，禁带不太宽，热能足以使满带中的电子被激发越过禁带而进入导带，从而在满带中留下空穴，而在导带中增加自由电子，它们都能导电。并且由于温度越高，电子激发到空带的机会越大，因而导电率越高。这类半导体属于本征半导体。



## 非本征半导体

在本征半导体中掺入杂质（掺杂剂），使电子结构发生变化，可使半导体的导电性发生显著变化。

(1) n-型半导体

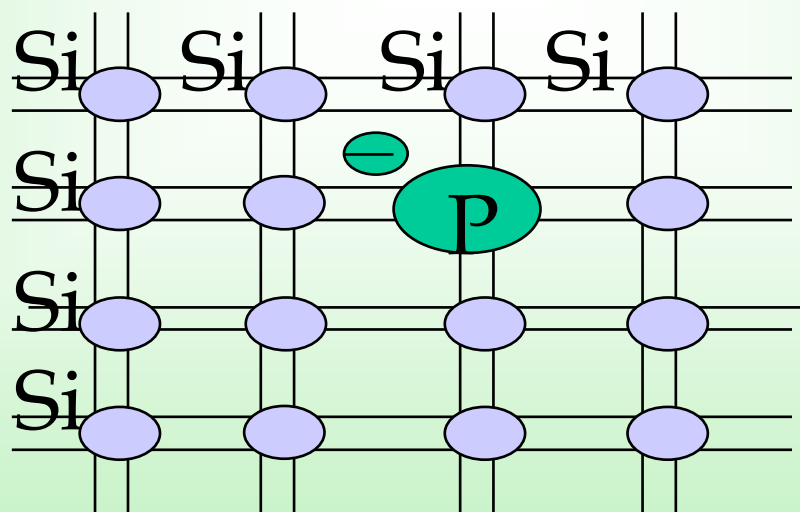
(2) p-型半导体



# n-型半导体

(1) 四价的本征半导体 Si、Ge等，掺杂五价的杂质元素（如P、As或Sb等），掺杂剂外层的5个价电子有4个参与形成共价键，剩余1个电子，脱离掺杂原子而流动，使材料的导电性增大。

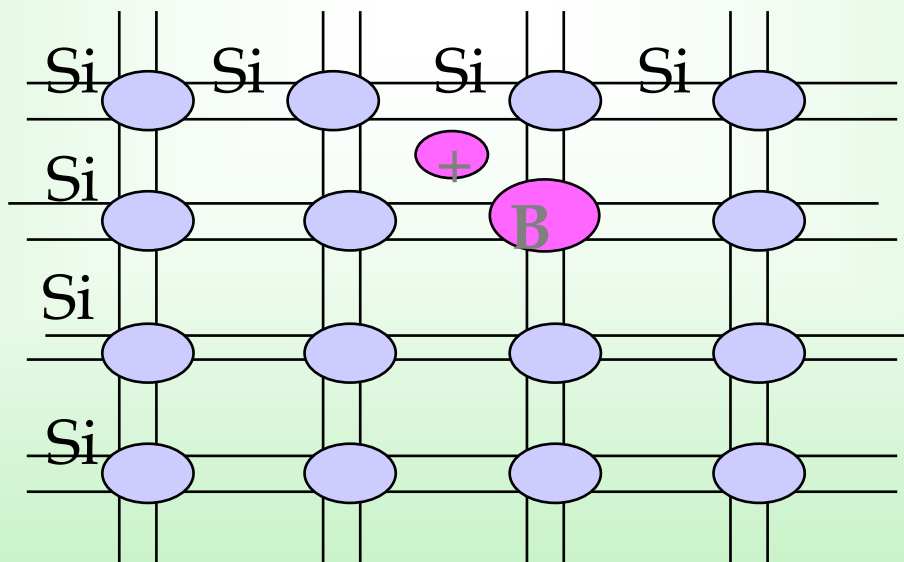
此类剩余电子的半导体称为n-型半导体。



# p-型半导体

(1) 四价的本征半导体Si、Ge等，掺入三价的杂质元素（如B、Al、Ga、In等）。由于只有3个价电子，在价键轨道上形成空穴，从而使导电性增大。

此类富余空穴的半导体称为p-型半导体。



## 3.4.2 介电性能

**介电性：**在电场作用下，材料表现出的对静电能的储蓄和损耗的性质。

**电极化：**在外电场作用下材料产生极化。

**电介质：**在电场作用下能建立极化的物质。

电极化的两种情形：

- 1) 在外电场作用下，材料内的质点（原子、分子、离子）正负电荷重心分离，使其转变成偶极子；
- 2) 正负电荷尽管可以逆向移动，但它们并不能挣脱彼此的束缚而形成电流，只能产生微观尺度的相对位移并使其转变成偶极子。

电容 $C$ ——电荷量 $q$ 与电压 $V$ 的比值:

$$C = q/V$$

平板电容计算:  $C = \varepsilon (A/L)$

$\varepsilon$ : 介电常数或电容率, 表征材料极化和储存电荷的能力, 单位F/m.

相对介电常数 $\varepsilon_r$ :

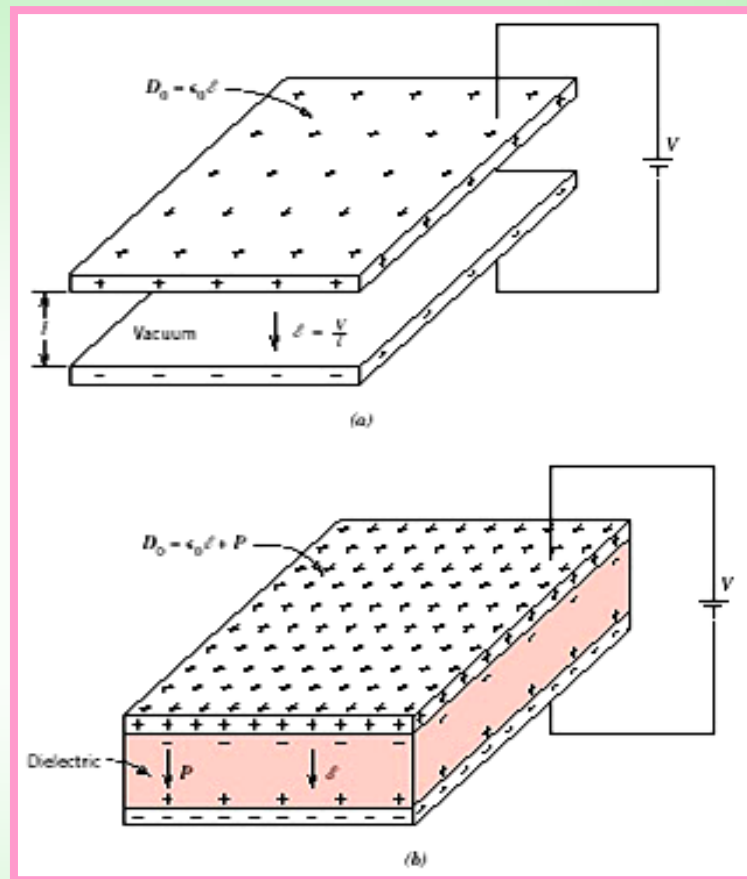
$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 \quad \varepsilon_0: 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

材料的介电常数测定方法:

首先在两块极板之间为空气的时候测试电容器的电容 $C_0$ 。

然后, 用同样的电容极板间距离但在极板间加入电介质后测得电容 $C_x$ 。

$$\varepsilon_r = C_x / C_0$$



衡量介电性能的另外两个指标：

**介电强度：**一定间隔的平板电容器可以维持的最大电场强度，也称击穿电压。

**介电损耗：**电介质在电压作用下所引起的能量损耗，它是由电荷运动而造成的能量损失。

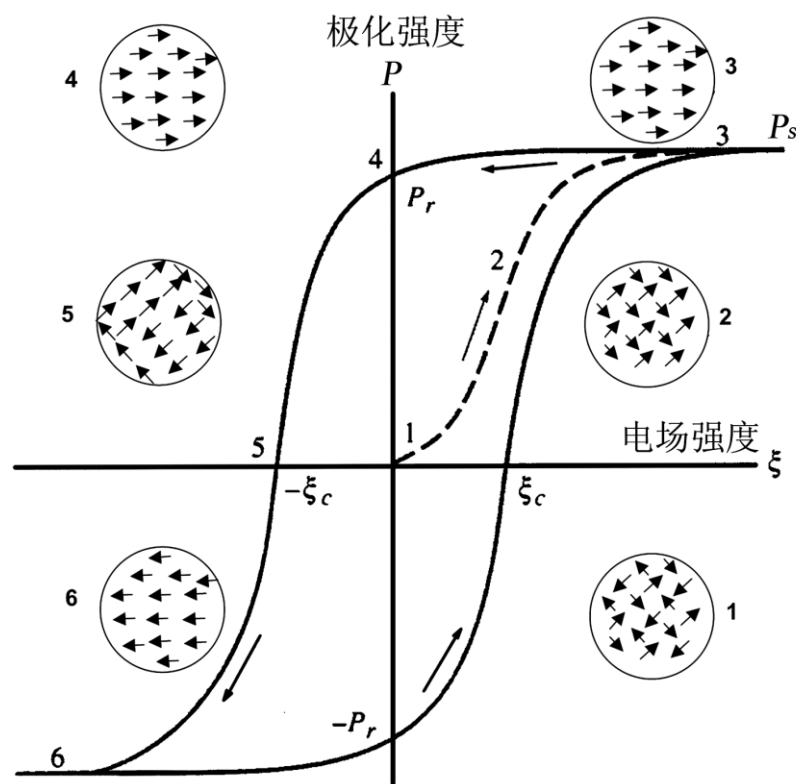
介电损耗越小，绝缘材料的质量越好，绝缘性能也越好。

## 某些介电材料的性能

材 料	介电常数 $\epsilon_r$		介电损耗 $\tan\delta$ ( $10^6\text{Hz}$ )	介电强度 $\times 10^6 /$ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
	60Hz	$10^6\text{Hz}$		
聚甲醛	7.5	4.7		12
聚乙烯	2.3	2.3	2.3	20
聚四氟乙烯	2.1	2.1	$< 2 \times 10^{-4}$	
聚苯乙烯	2.5	2.5	$1 \sim 3 \times 10^{-4}$	20
聚氯乙烯(无定形)	7	3.4	$0.04 \sim 0.14$	40
橡胶	4	3.2	$10^{-2}$	20
环氧树脂		3.6		
熔融氧化硅	3.8	3.8	$2 \times 10^{-4}$	
钠钙玻璃	7	7	$5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	10
氧化铝	9	6.5	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	6
钛酸钡		3000	$10^{-2}$	12
$\text{TiO}_2$		$14 \sim 110$	$2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$	8
云母		7		40

# 3.4.3 铁电性与压电性

**铁电性：** 外电场作用下电介质产生极化，而某些材料在去除外电场后仍然保持部分极化状态。这种现象称为铁电性。

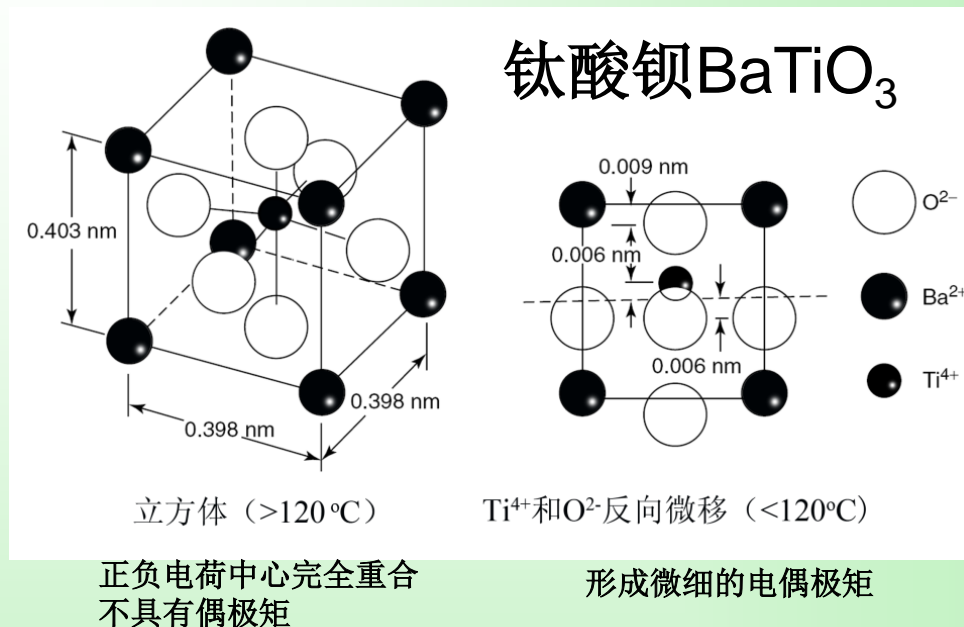
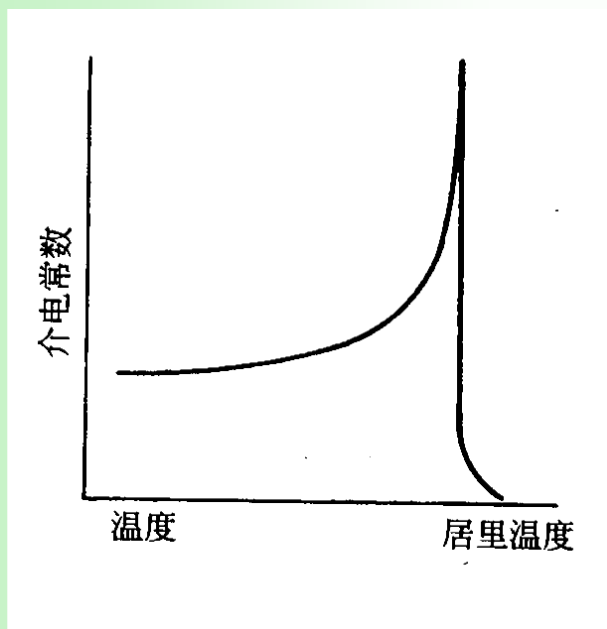


1. 铁电材料
2. 置于较强的电场中
3. 永久偶极子增加并沿着电场方向取向排列最终偶极子平行于电场方向，达到饱和极化 $P_s$
4. 当外场撤去后，材料仍处于极化状态，剩余极化强度为 $P_r$
5. 该极化强度只有在施加反方向的电场并且电场强度达到某一数值才能完全消除
6. 继续增大反向电场的强度，则导致偶极子在反方向上平行取向，直至极化饱和。
7. 再把电场方向反转并达到饱和极化，则得到一个闭合的滞后回线。

铁电体在电场中的滞后环

# 居里温度 $T_c$

铁电体存在一临界温度，高于此温度，则铁电性消失，该温度称为居里温度。



非铁电性

铁电性

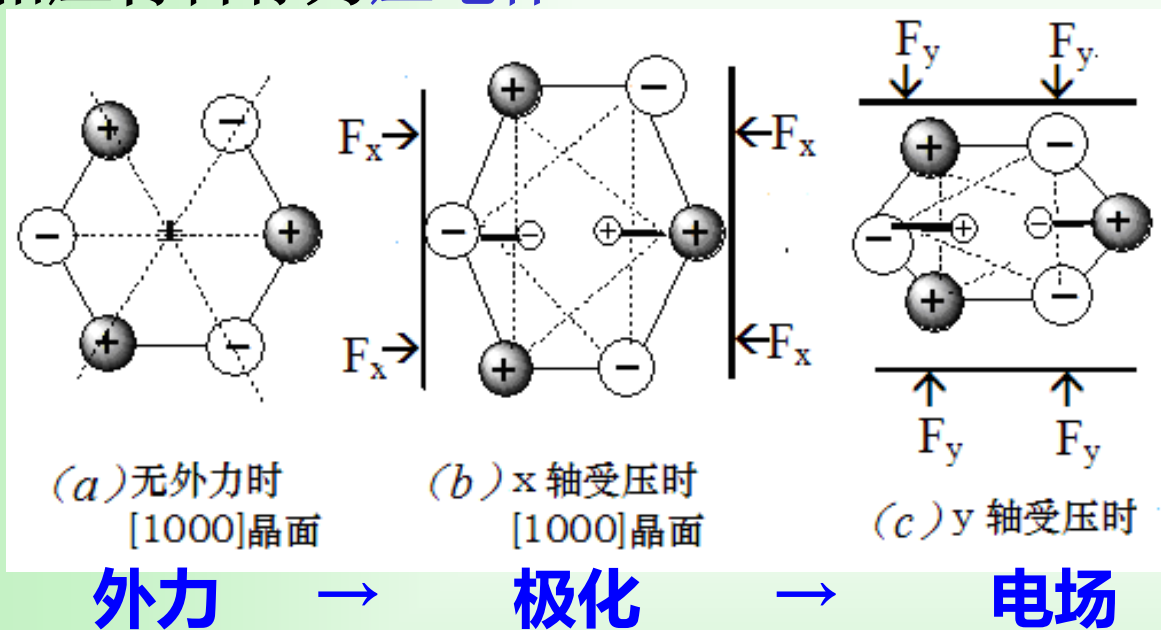
例如:  $\text{SrTiO}_3$ 的 $T_c$ :  $-120^\circ\text{C}$ ;  $\text{NaNbO}_3$ 的 $T_c$ :  $640^\circ\text{C}$



# 压电性 (压电效应)

对铁电材料施加压力，导致极化发生改变，从而在样品两侧产生小电压，这一现象称为**压电性或压电效应**。

相应材料称为**压电体**。



**常用的压电陶瓷：**  
 $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{PbTiO}_3$ 、 $\text{PbZrO}_3$

**逆压电效应(电致伸缩):**对压电体两侧施加电压，引起尺寸发生变化。对压电体薄膜施加交变电流，则薄膜产生振动而发出声音，可以制作音频发声器件，如扬声器、耳机、蜂鸣器等。

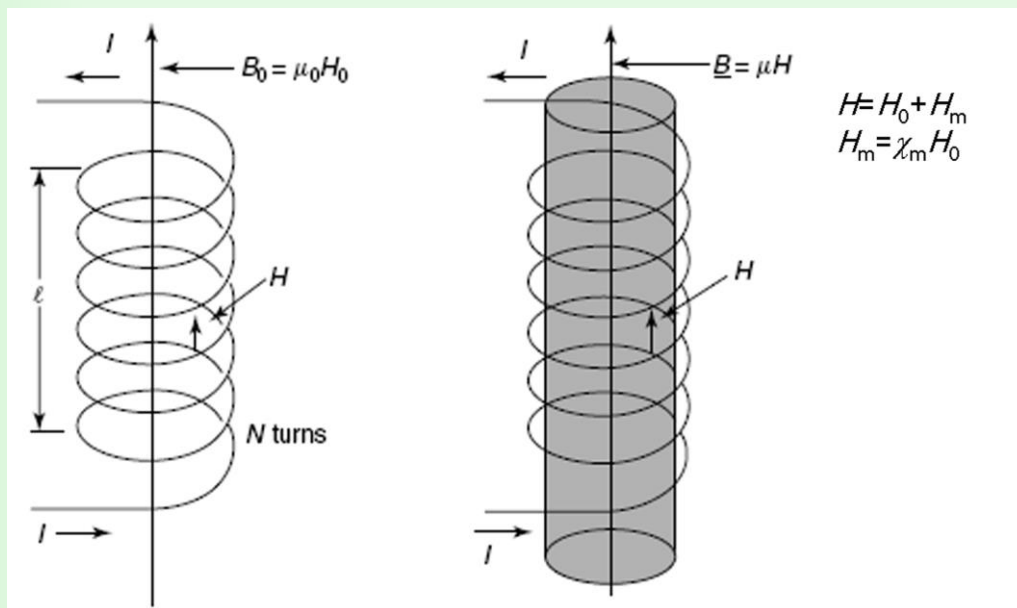
## 3.5 磁性

### 3.5.1 磁性基本概念

磁性是物质放在不均匀磁场中所受到磁力的作用。

- ✓ 任何物质都具有磁性，在不均匀磁场中都会受到磁力作用。
- ✓ 磁场本身受物质磁性的影响而增强或减弱。

例如：电流 $I$ 通过匝数为 $n$ 长度为 $l$ 的螺线管，在真空中产生的磁场强度为 $H_0=0.4 \pi n I / l$ ，磁感应强度为 $B_0=\mu_0 H_0$ ， $\mu_0$ 为真空磁导率。



当把磁介质插入螺线管中，磁场强度变为 $H=H_0+H_m$ ，

$H_m$ 为磁介质产生的磁场，称为磁化强度。

对多数物质来说，磁化强度直接正比于 $H_0$ ，即 $H_m = \chi_m H_0$ ， $\chi_m$ 为磁化率。

磁通量密度为 $B = \mu_0(H_0 + H_m) = \mu_0(1 + \chi_m) H_0$

## 3.5.2 磁性的种类

**(1) 反磁性：**当外磁场作用于材料中的原子时，将使其轨道电子产生轻微的不平衡，在原子内形成细小的磁偶极，其方向与外磁场方向方向相反。这一过程产生一个负的磁效应，当磁场撤去后磁效应可逆地消失，这就是反磁性。

反磁性表现为一个负的磁化率。  $\chi_m < 0$

例：具有反磁性的材料：

- 金属：Hg、Cu、Ag、Pb
- 非金属：金刚石、MgO、NaCl
- 绝大多数高分子材料
- 所有材料都具有反磁性效应，但很多材料中都被正磁性效应所淹没，从而表现出正的磁化率

**(2) 顺磁性：**感应磁化的方向与外磁场方向相同，即材料在磁场中沿磁场方向被微弱磁化，磁场撤去后又能可逆地消失，具有正的磁化率。

$$\chi_m > 0$$

顺磁性的两种情况：

1. 在含有非零角动量原子（例如过渡金属）的材料中可观察到顺磁性，此类顺磁性的磁化率与热力学温度 $T$ 成反比 $\chi_m \propto T^{-1}$ ，称为居里定理。
2. 一些非过渡金属（例如Al）也具有顺磁性，源于传导电子的自旋，但此类顺磁性 $\chi_m$ 与温度 $T$ 无关。

**(3) 铁磁性：**一些固体材料即使在没有外磁场的情况下也能自发磁化，而在外磁场作用下能沿磁场方向被强烈磁化。Fe最具有代表性，因此成为铁磁性。

例：Fe, Co, Ni和一些稀土金属（Sm和Nd）及其合金具有铁磁性。

铁磁性具有两个特征：

- 1) 在不太强的磁场中，就可以磁化到饱和状态，磁化强度就不再随磁场而增加。
- 2) 在某一温度以上时，铁磁性消失而变为正常的顺磁性，磁化强度满足居里定理，该转变温度为居里温度。

(4) **反铁磁性**：一些材料出现另一类型的磁性，就是反铁磁性。

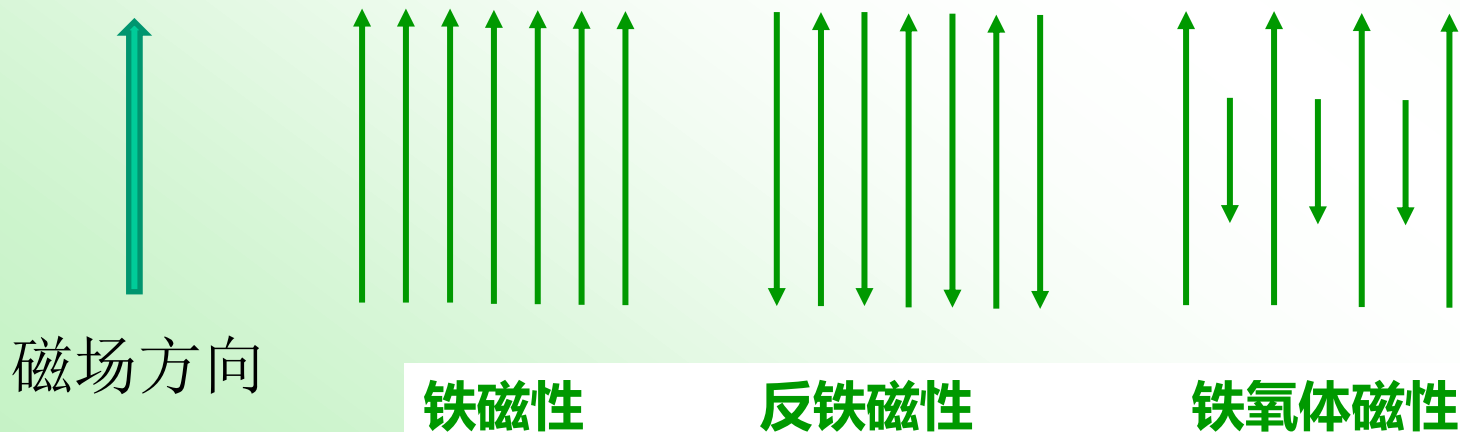
特征：施加外磁场时，反铁磁性的原子磁偶极沿着外磁场的反方向排列。

- Mn和Cr在室温下具有反铁磁性。

(5) **铁氧体磁性**：不同离子具有不同磁矩行为，当不同的磁矩反平行排列时，在一个方向呈现出净磁矩，这就是铁氧体磁性，也称亚铁磁性。

具有铁氧体磁性的材料统称为铁氧体。

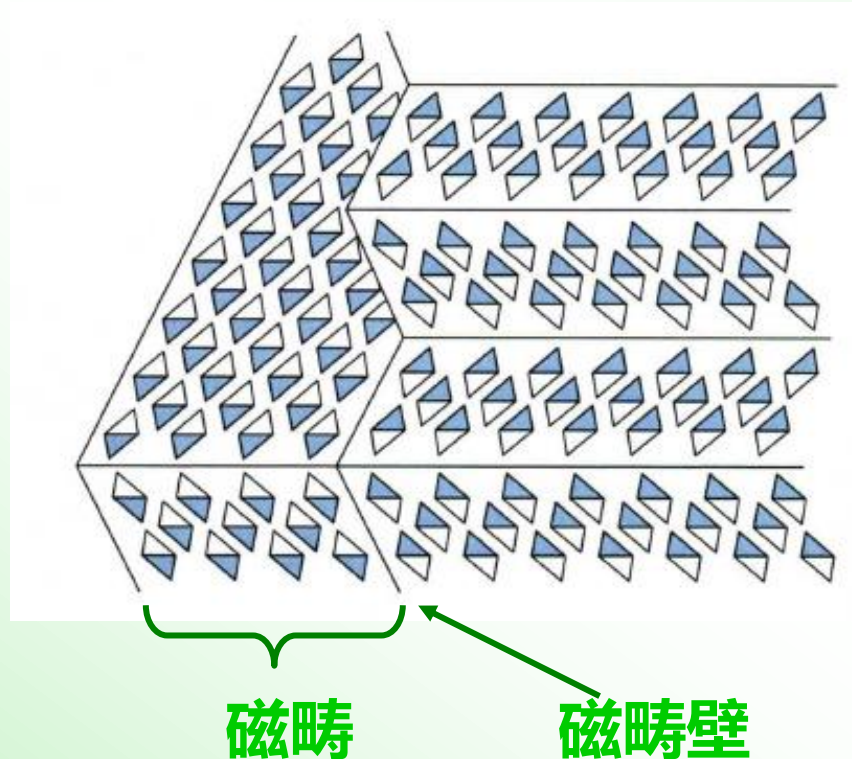
- 代表：磁铁矿 $\text{Fe}_3\text{O}_4$



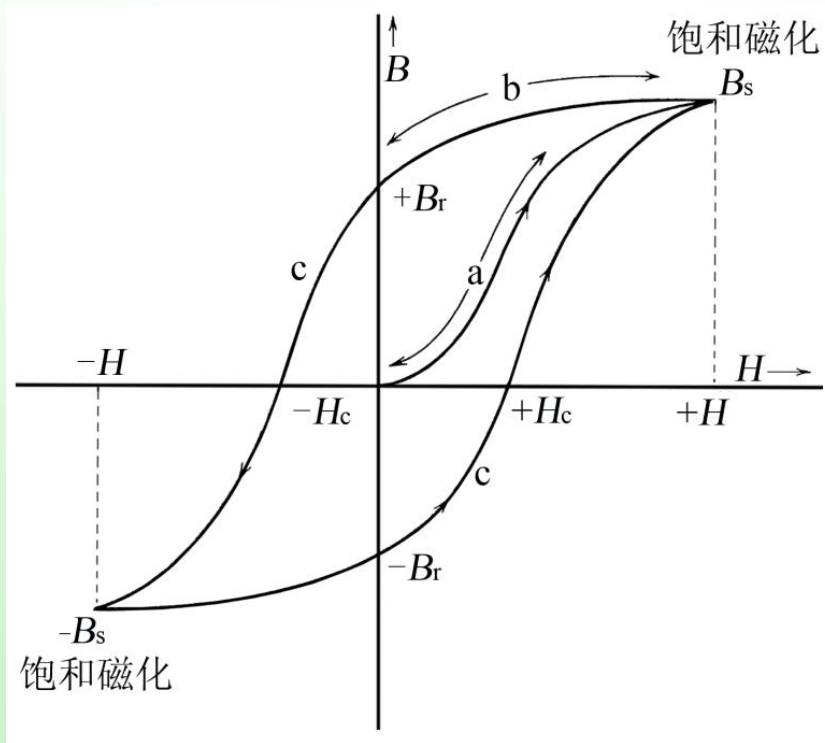


### 3.5.3 磁畴和磁化曲线

磁畴——在居里温度以下，铁磁质中相邻电子之间存在着一种很强的“交换耦合”，在无外磁场时，它们的自旋磁矩在一个个微小区域内“自发地”整齐排列起来而形成的磁化小区域。

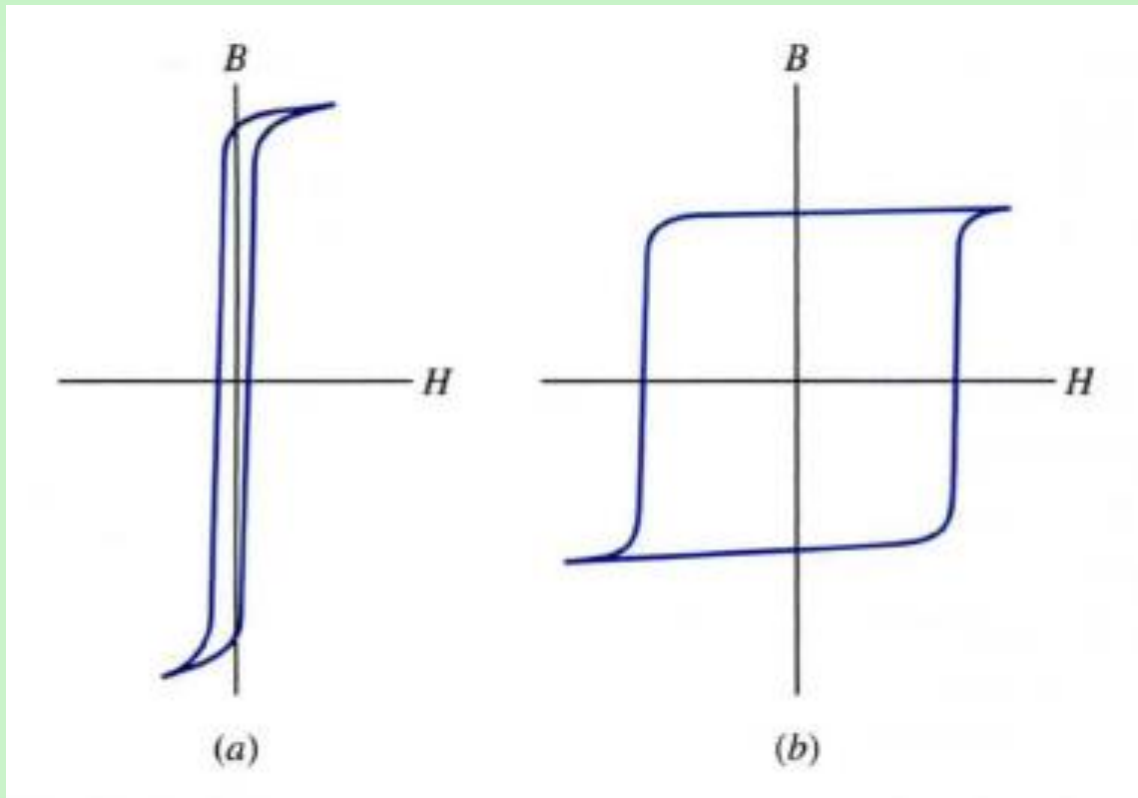






## 磁滞回线

1. 当外磁场强度增加到一定程度时，所有磁畴中磁矩的磁化方向才能全部与外磁场方向取向完全一致。此时，铁磁体就达到饱和状态，即成饱和磁化。饱和磁化值称为**饱和磁感应强度 ( $B_s$ )**。
2. 一旦达到饱和磁化后，即使磁场减小到零，磁矩也不会回到零，残留下一些磁化效应 (b)。这种残留值称为**残余磁感应强度 ( $B_r$ )**。
3. 若加上反向磁场，使剩余磁感应强度回到零，则此时的磁场强度称为**矫顽磁场强度或矫顽力 ( $H_c$ )**。
4. 反向磁场继续加强直至在反方向上达到磁饱和，然后反向重复上述磁场变化过程 (c)，得到一闭合磁化曲线，称**磁滞回线**。



**软磁材料**

**硬磁材料**

## 3.6 光学性能

- 光的吸收和透过
- 光的反射和折射
- 材料的颜色

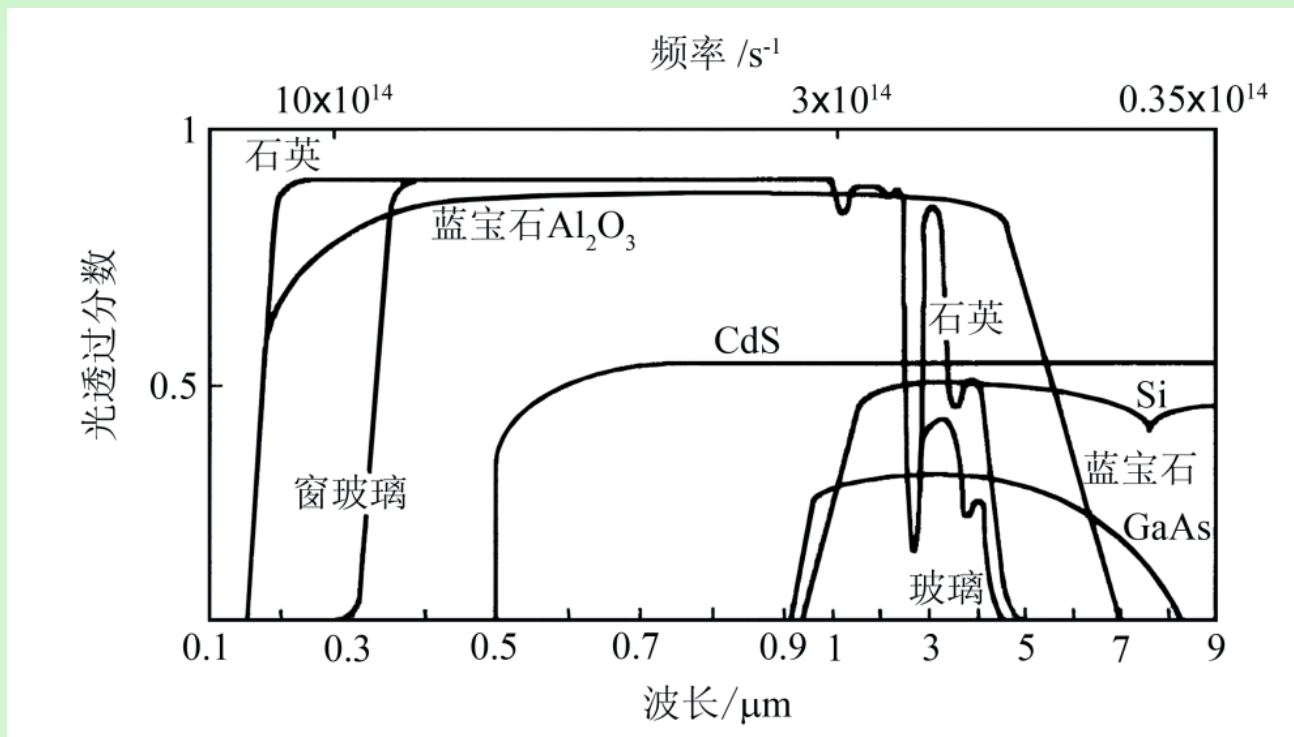
## 3.6.1 光的吸收和透过

- 金属材料：不透明；
- 半导体和其它非金属材料：取决于能隙  $E_g$ ；

$$E(\text{eV}) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.62 \times 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}) \times 3 \times 10^8 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})}{\lambda(\text{nm}) \times 10^{-9}} \times 6.242 \times 10^{18} (\text{eV} \cdot \text{J}^{-1}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

$$380\text{nm} \Leftrightarrow 3.26\text{eV}$$

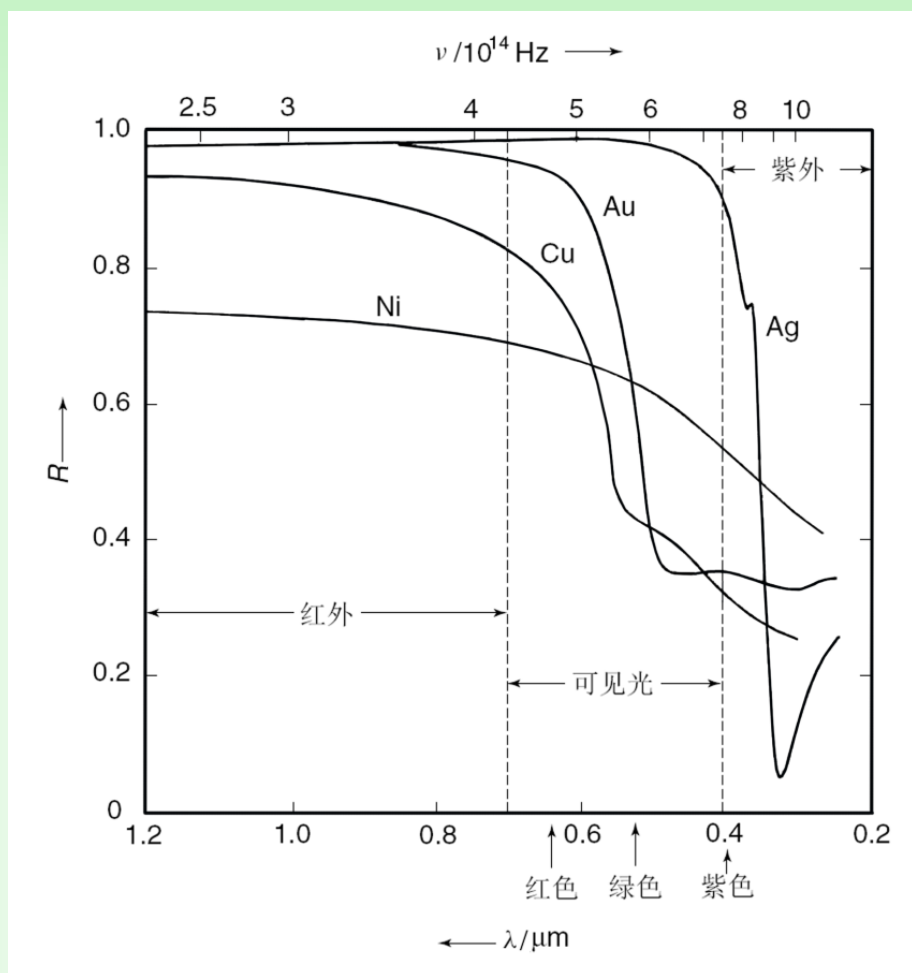
- 晶格热振动：对长波区的可见光和红外光产生吸收；
- 高分子材料：无定形透明，结晶影响透明性（晶粒对光的散射）



## 几种无机材料的光透过曲线

## 3.6.2 光的反射和折射

- **金属材料：强反射（金属光泽）；**
  - 电子吸收光能后激发到较高能态，随即又以光波的形式释放出能量回到低能态
- **无机非金属材料：主要受介质的折射率差影响；**
  - 当光线从一种介质入射另一种介质时，介质的折射率差别越大，反射就越强。
- **材料的折射率受其结构影响**
  - 单位体积中原子的数目越多，或结构越紧密，则光波传播受影响越大，从而折射率越大。
  - 原子半径越大(极化率大)，折射率就越大。



几种金属材料的反射率随光波波长变化曲线

## 3.6.2 材料的颜色

- 金属材料：颜色取决于其反射光的波长；
- 无机非金属材料：颜色通常与光吸收特性有关；

