

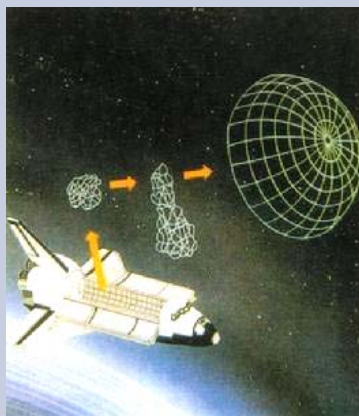
西安交通大学



材料科学与工程学院

## 第十章 功能材料

# FUNCTIONAL MATERIALS



SCHOOL OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 第一节 概述

## 一、什么是功能材料

——以特殊的电、磁、声、光、热、力、化学及生物学等性能作为主要性能指标的材料

## 二、功能材料的分类

### 按化学成分

金 陶 高 复  
属 瓷 分 合  
功 功 子 功  
能 能 功 能  
材 材 能 材  
料 料 材 料  
料 料 料 料

### 按应用领域

电 能 信 光 仪 航  
工 源 息 学 器 空  
材 材 材 材 仪 航  
料 料 料 料 表 天  
料 料 料 料 材 材  
料 料 料 料 料 料

### 按使用性能

电 磁 光 声 热 隐  
功 功 功 功 功 形  
能 能 能 能 能 材  
材 材 材 材 材  
料 料 料 料 料 料

THE END

## 第二节 电功能材料

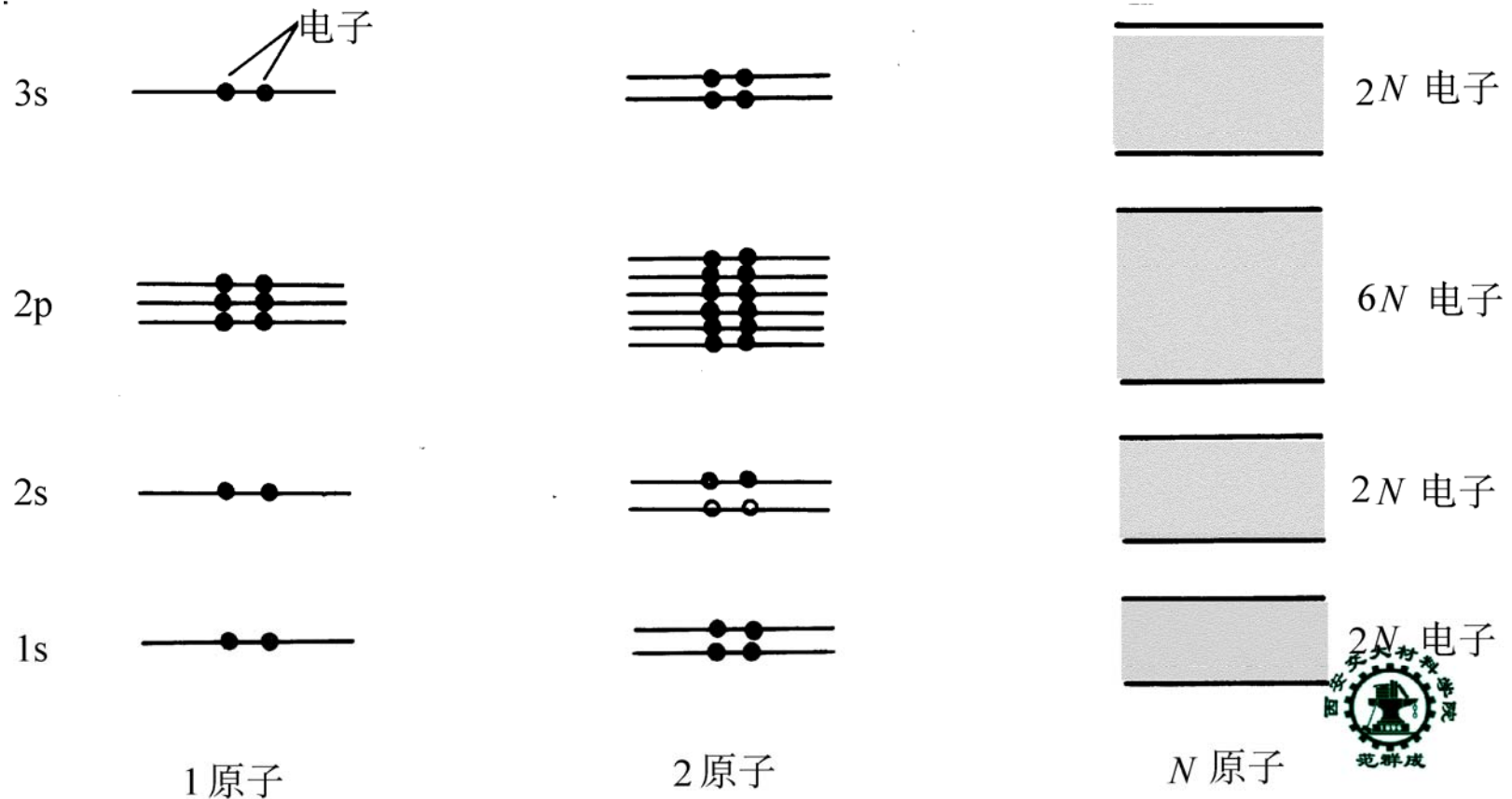
——利用其电学性能或各种电效应的材料

### 一、固体的能带理论简介

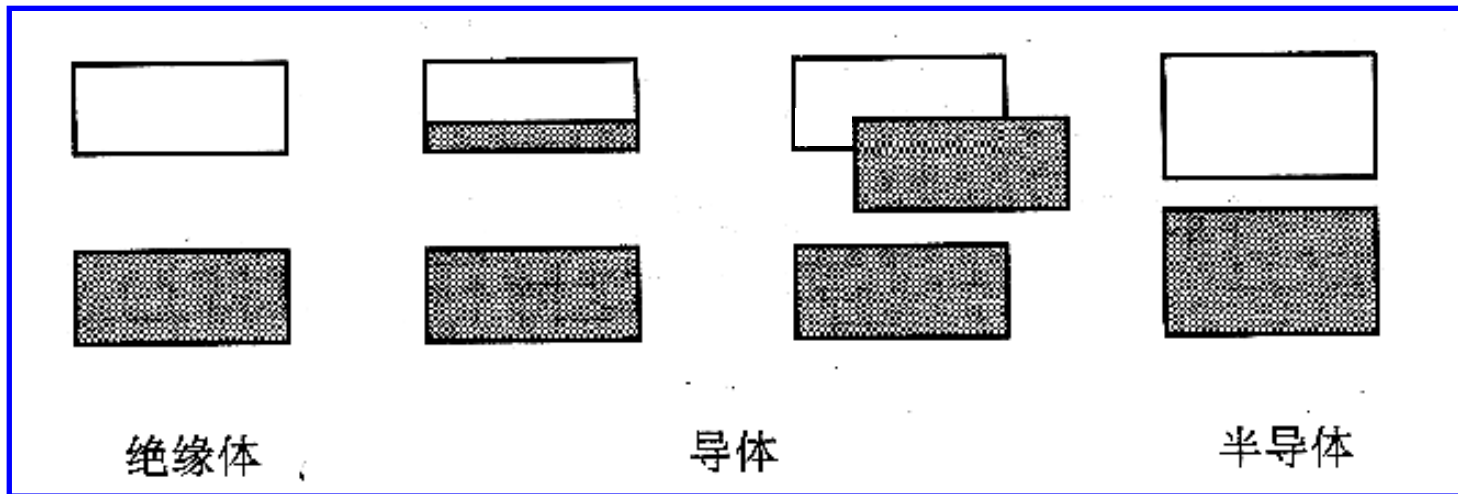
#### 1. 能带的形成

大量原子组成晶体时，各个原子的电子云重叠而使能级分裂。由 $N$ 个原子组成的晶体， $N$ 个相同能级构成一个连续的能量带——能带

THE END



## 2. 绝缘体、导体、半导体的能带结构比较



**能隙——价带与导带之间的能量间隙称为能隙，也称禁带宽度，其大小用  $E_g$  表示。**

- 绝缘体：能隙较大
- 导体：能隙为零
- 半导体：能隙较小

THE END

## 二、半导体

半导体 { 本征半导体  
掺杂半导体

### 1. 本征半导体

——高纯度的不掺有杂质的半导体. 如Si、Ge

#### 1) 本征半导体的载流子

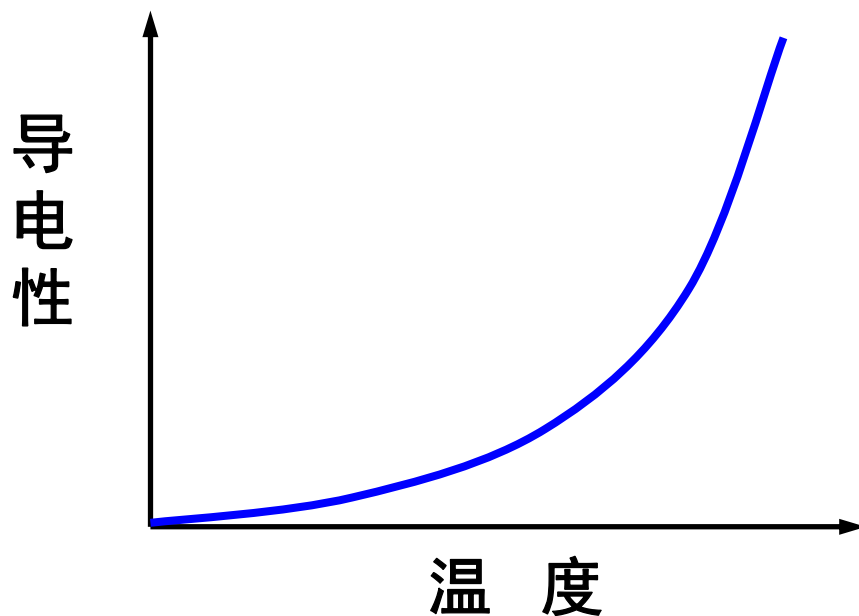
跃迁至导带的电子（浓度为  $n_e$ ）

价带中产生的空穴（浓度为  $n_h$ ）

$$n_e = n_h \propto e^{-E_g / 2kT} \quad (10-1)$$

## 2) 本征半导体的电导率随温度的变化

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / 2kT} \quad (10-2)$$



本征半导体的导电性随温度的变化示意图



## 2. 掺杂半导体

——向本征半导体中掺入少量特定杂质的半导体。

掺杂半导体  $\begin{cases} \text{n 型半导体} \\ \text{p 型半导体} \end{cases}$

### 1) n 型半导体

——向本征半导体中掺入少量 V A 族（P、As、Sb）杂质的半导体。杂质被称为施主。

- n 型半导体的载流子：

$$n_{\text{总}} = n_e (\text{施主}) + n_e (\text{本征}) + n_h (\text{本征})$$

$$n_e > n_h$$

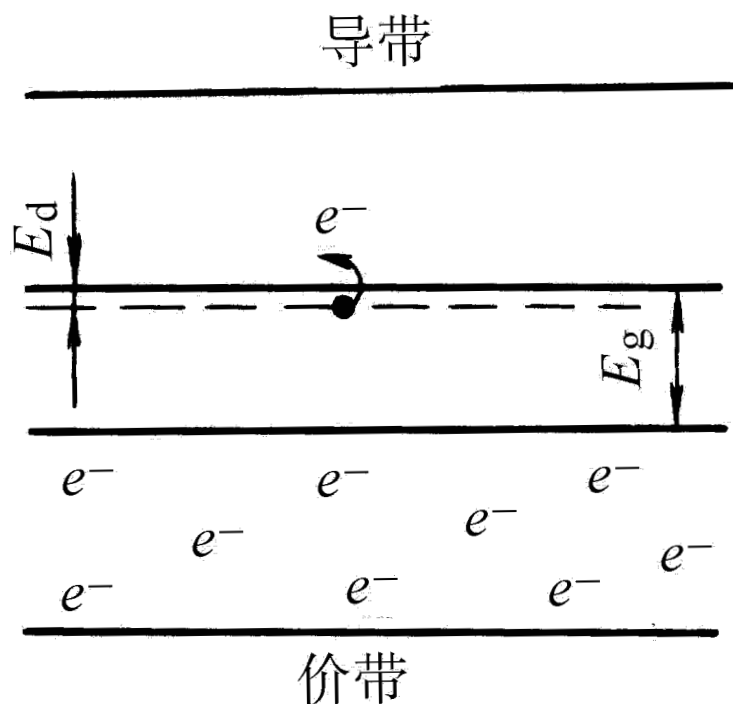
THE END



- n 型半导体的能带结构

施主能隙  $E_d$  比本征能隙  $E_g$  小得多

即  $E_d \ll E_g$



n 型 半导体的能带结构

THE END

# • n 型半导体电导率随温度的变化

低温时，本征电子很难跃迁，电导率主要由施主贡献

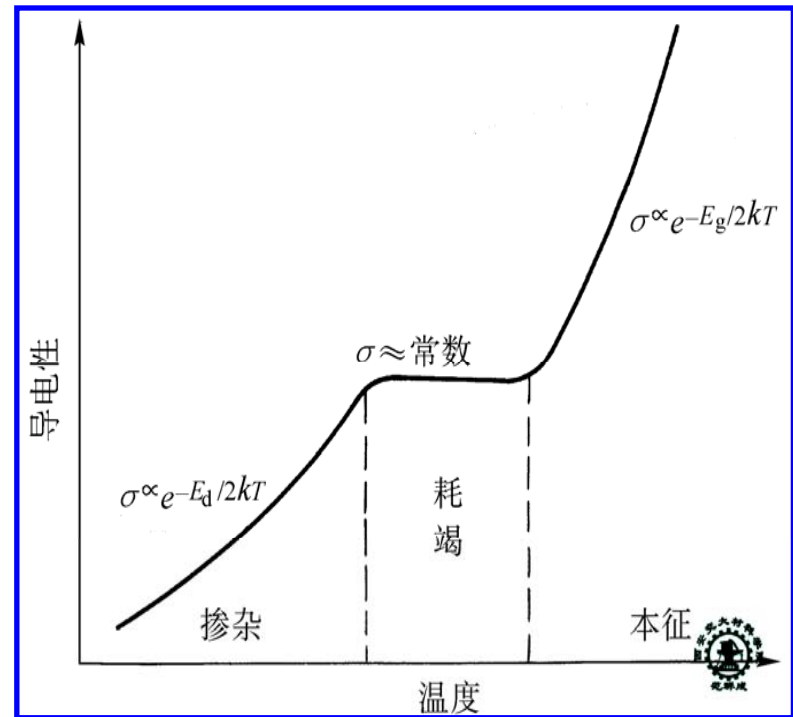
$$\sigma \propto e^{-E_d / 2kT}$$

升高到某温度时，施主电子全部跃迁（耗尽），本征电子仍尚未跃迁，

$$\sigma = q\mu_e n_d \approx \text{常数}$$

更高温度时，本征电子跃迁

$$\sigma \propto e^{-E_g / 2kT}$$



n 型半导体的导电性随温度的变化示意图

## 2) p 型半导体

——向本征半导体中掺入少量IIIA族（B、Al、Ga、In）杂质的半导体。杂质被称为受主。

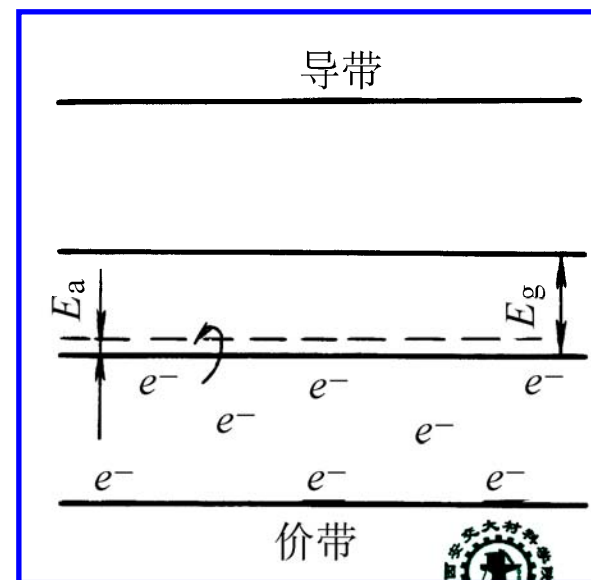
- p 型半导体的载流子：

$$n_{\text{总}} = n_h(\text{受主}) + n_e(\text{本征}) + n_h(\text{本征})$$

$$n_e < n_h$$

- p 型半导体的能带结构  
施主能隙  $E_a$  比本征能隙  $E_g$  小得多

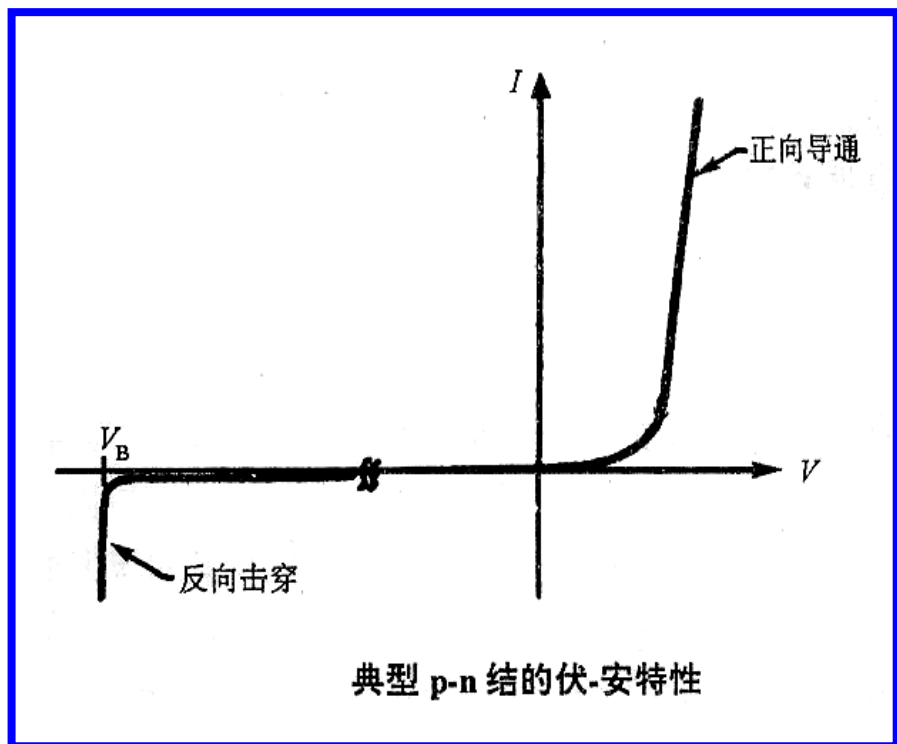
即  $E_a \ll E_g$



p 型 半导体的能带

- p 型半导体电导率随温度的变化  
与 n 型半导体的相似

3) p-n 结  
p 型或 n 型半导体  
不能直接用来制造  
半导体器件，必须  
制备成 p-n 结，才  
具有单向导电特性



### 3. 常用半导体材料

#### 1) 元素半导体

**Si、Ge、Se、Te...**

#### 2) 化合物半导体

**GaAs、AgGeTe<sub>2</sub>...**

#### 3) 固溶体半导体

**Bi-Sb**

### 4. 半导体材料应用举例

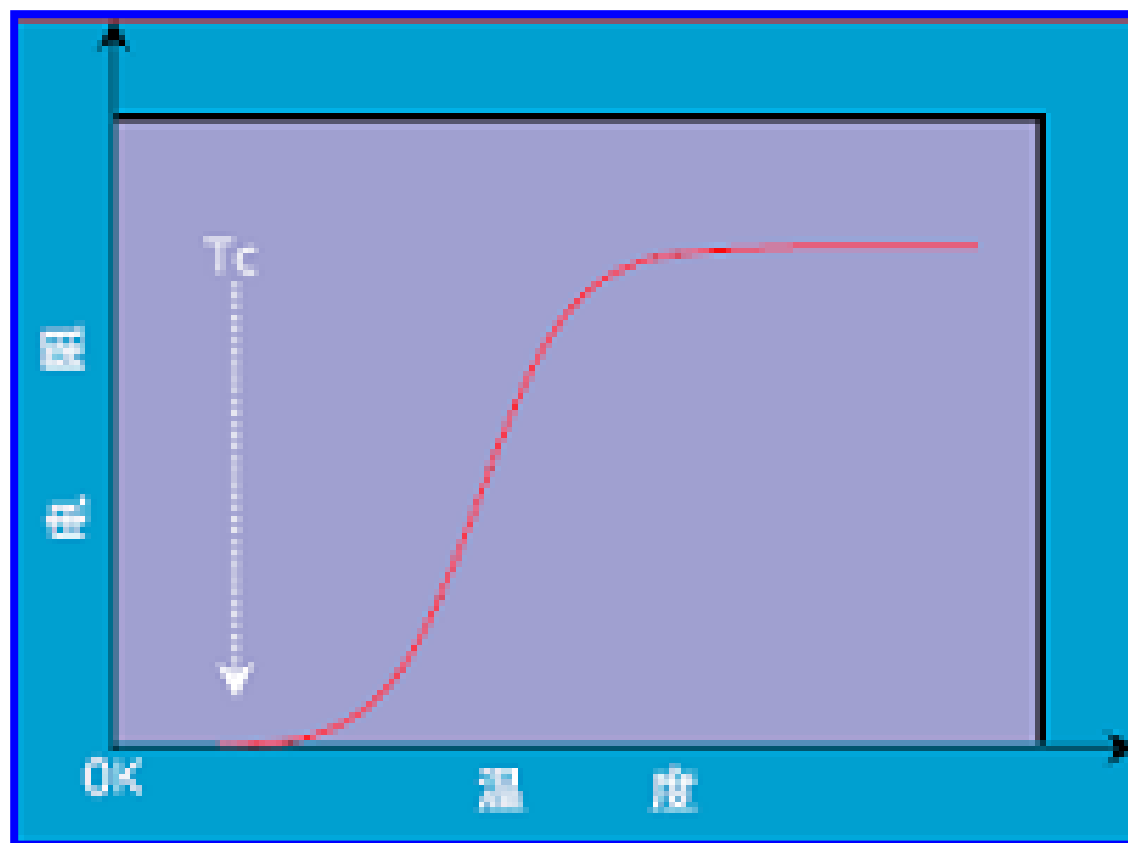
**双极型晶体管（开关），场效应晶体管，半导体激光器，光电二极管，有源微波二极管**

## 三、超导材料

### 1. 超导现象

——材料的电阻随温度降低而减小，并最终呈现零电阻

$T_c$ ——超导  
临界温度



## 2. 超导体的基本特性

### 1) 零电阻

闭合回路中电流永久流动

$J_C$ ——临界电流密度

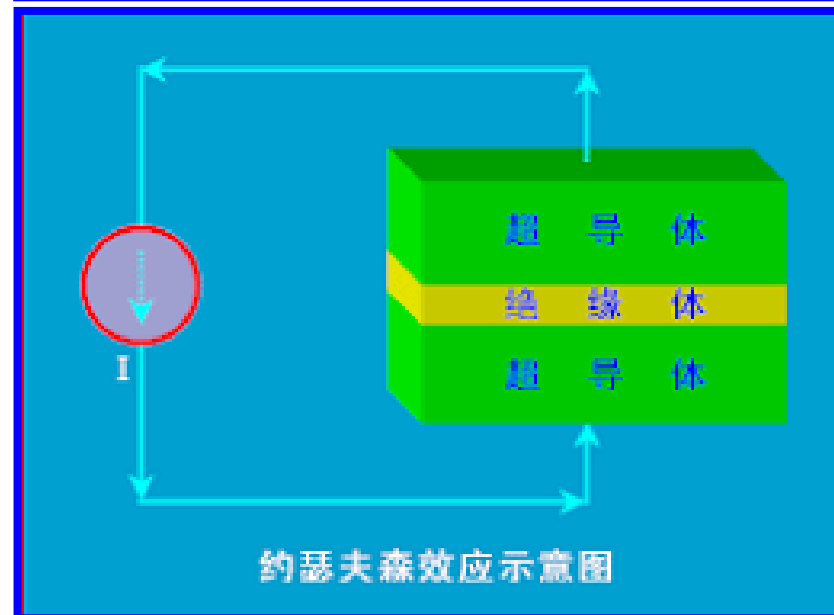
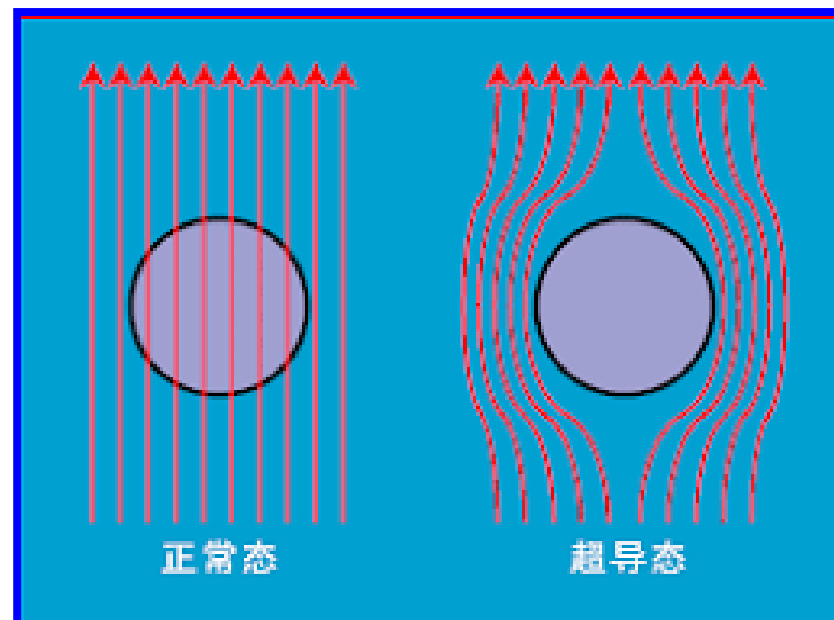
### 2) 抗磁性 (迈斯纳效应)

磁悬浮

$H_C$ ——临界磁场强度

### 3) 约瑟夫森效应

电子可穿过超导体中的绝缘体夹层(1nm)





### 3. 常用超导材料

#### 1) 元素超导体

- 共26种: Ti, Zr...
- $T_C$  太低 (最高的Nb,  $\sim 9.2K$ ), 无实用价值

#### 2) 合金超导体

- $GeNb_3$  (23.2K), Ti-Nb 系合金 (10K)
- 强度高,  $H_C$  低,  $J_C$  高, 早期应用

#### 3) 金属间化合物超导体

- $Nb_3Sn$  (18.3K),  $H_C$  比合金超导体高
- 脆性大, 不易加工成带材、线材

#### 4) 陶瓷超导体

- $\text{YBaCuO}$  (90K) ,  $\text{BiCrCoCuO}$  (110K) ,  $\text{TiBaCaCuO}$  (120K)
- 可在液氮温度 (77K) , 称为高温超导体
- 可望实用

#### 5) 高分子超导体

- 在数亿帕气压下, 可超导, 但  $T_c$  低 (10K)

### 4. 超导材料应用举例

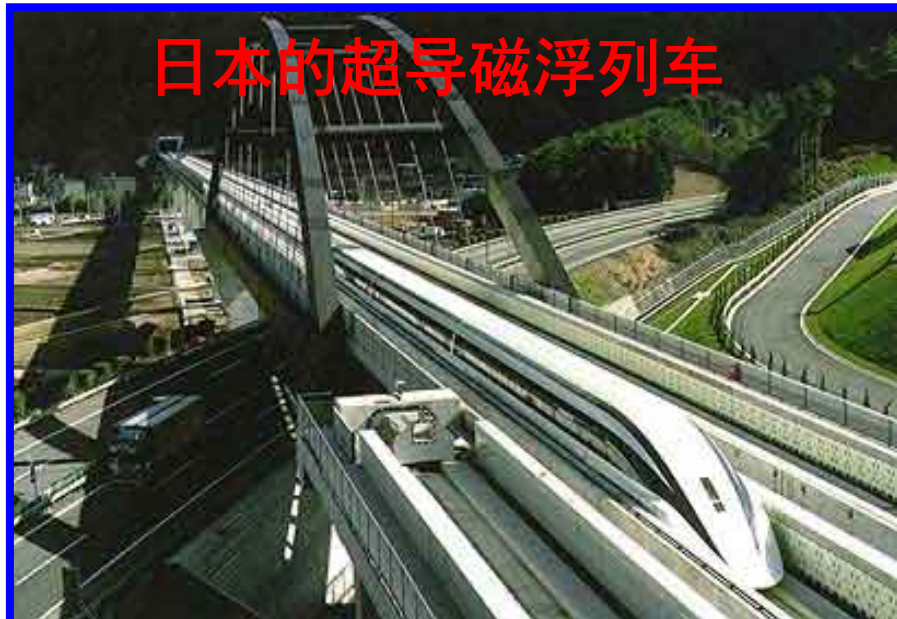


超导磁体的场强很强，成本和运转费用低，一个直径为3.5米，磁感强度为2特的超导磁体和常规铜线绕成磁体相比，超导体的建造和运转总费用是262万美元，常规的是638万美元。

THE END



德国的常导磁浮列车

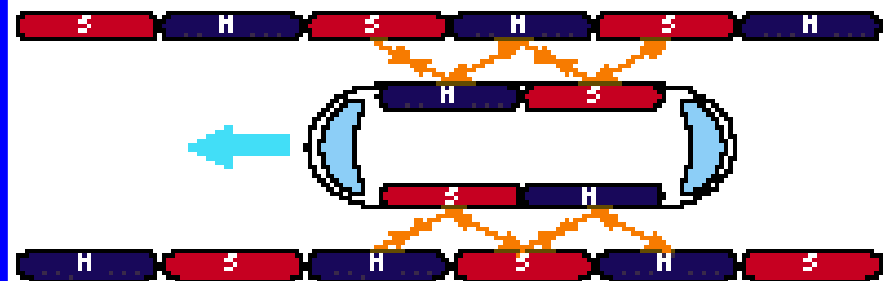


日本的超导磁浮列车

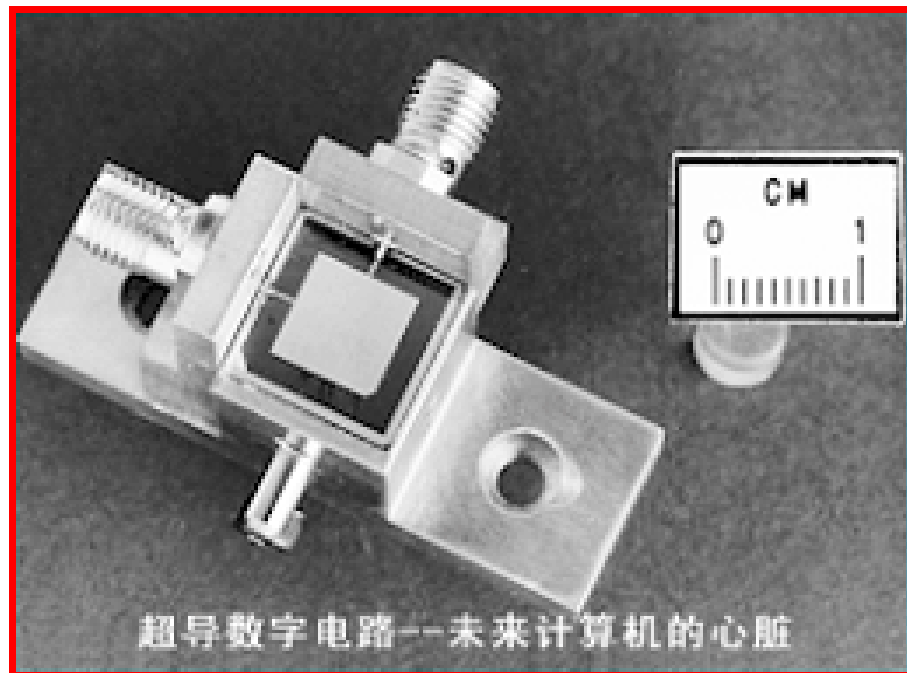


2004年我国自制的新原理超导磁浮列车

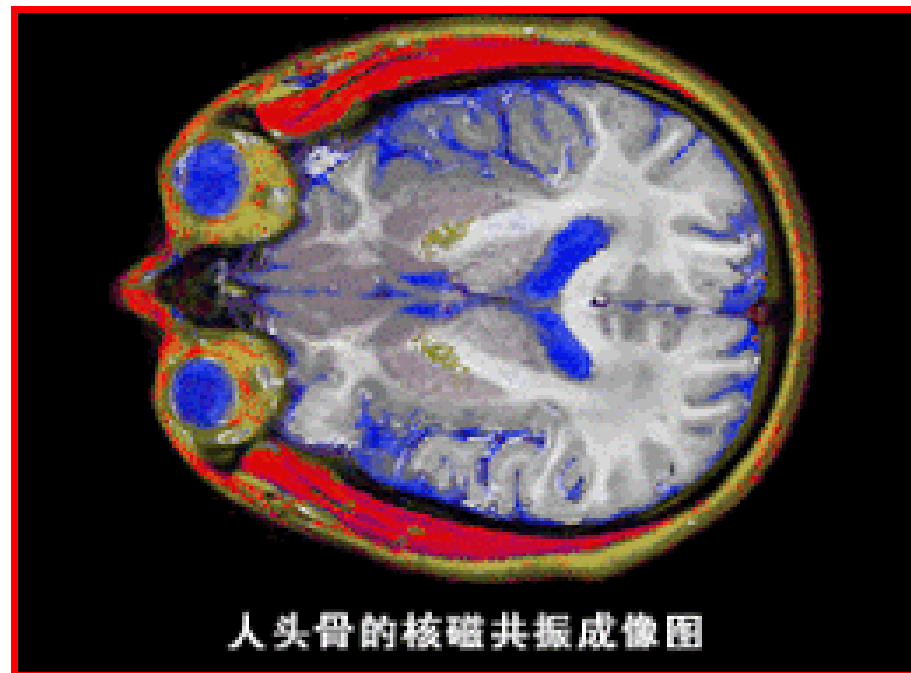
## 磁浮列车



## 超导数字电路

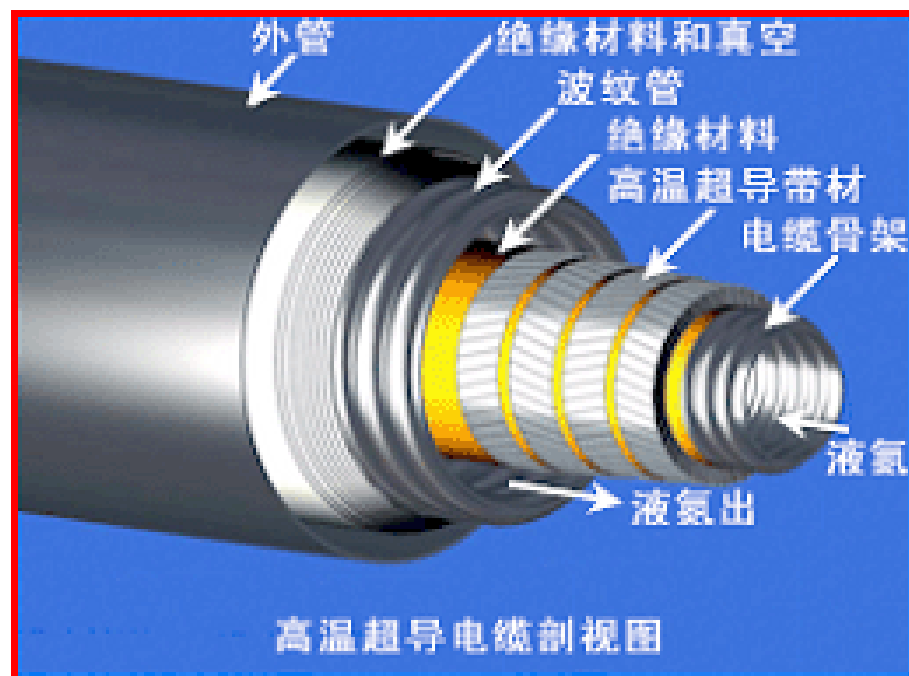


## 超导核磁共振

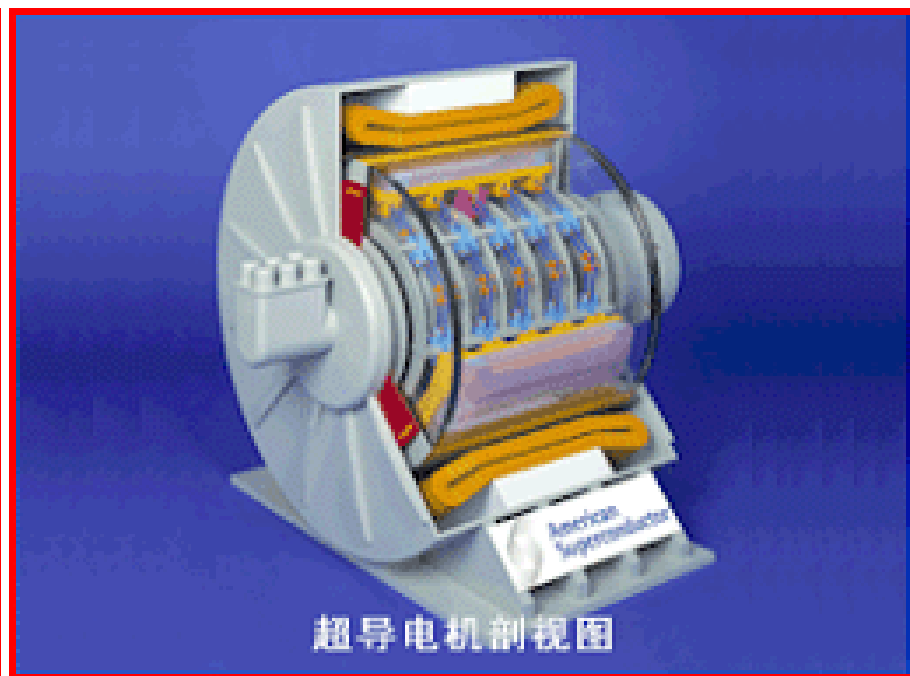


THE END

## 超导电缆



## 超导电机



THE END

## 超导磁分离装置



## 强磁场处理种子



THE END



## 在军事工业中的应用



THE END

高能  
粒子  
加速  
器

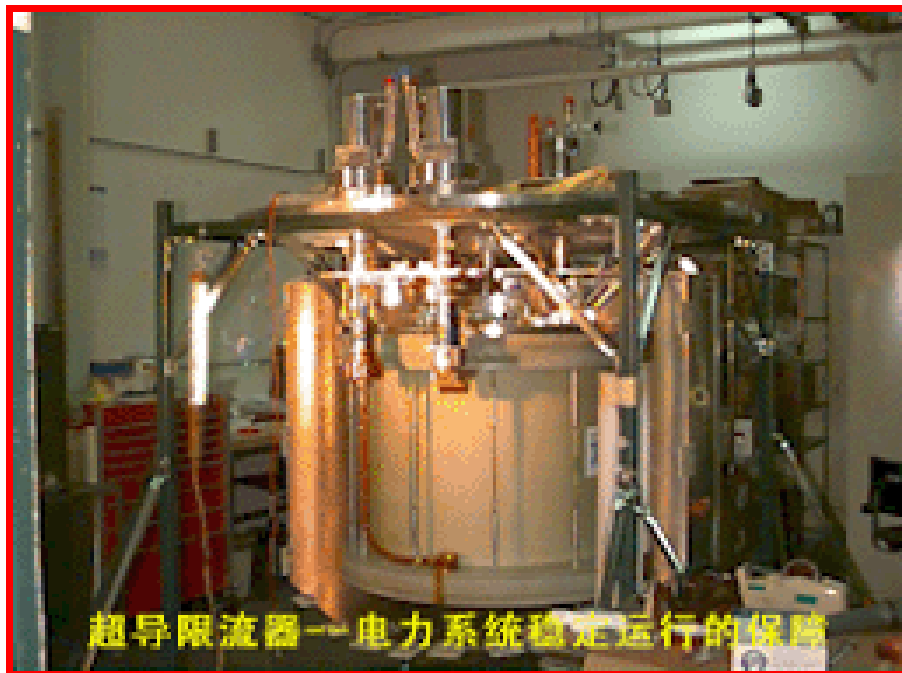


无  
绳  
电  
灯

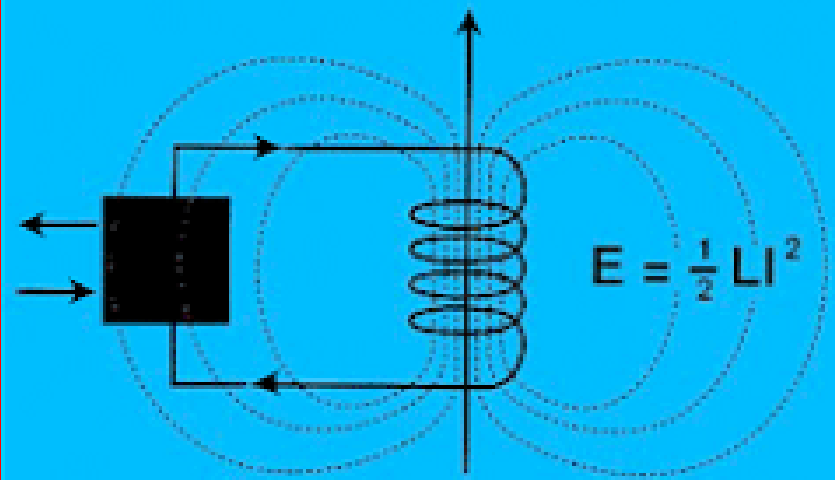


THE END

## 超导限流器

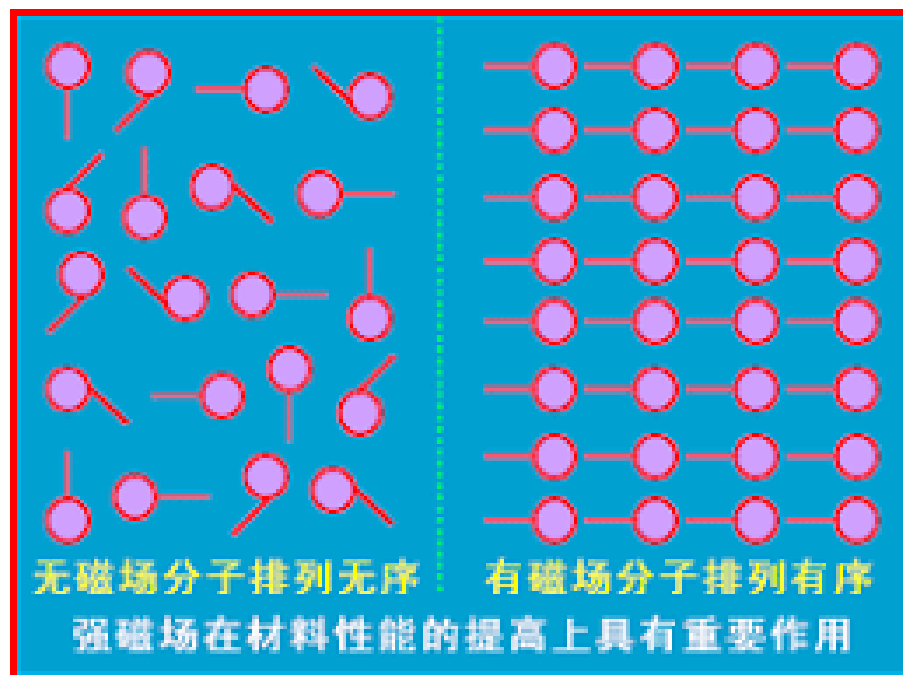


## 超导储能



超导储能原理示意图

## 在材料制备中的应用



THE END

## 第三节 磁功能材料

### 一、材料的磁感应

#### 1. 真空磁感应强度 $B_{\text{真}}$

$$B_{\text{真}} = \mu_0 H \quad (10-3)$$

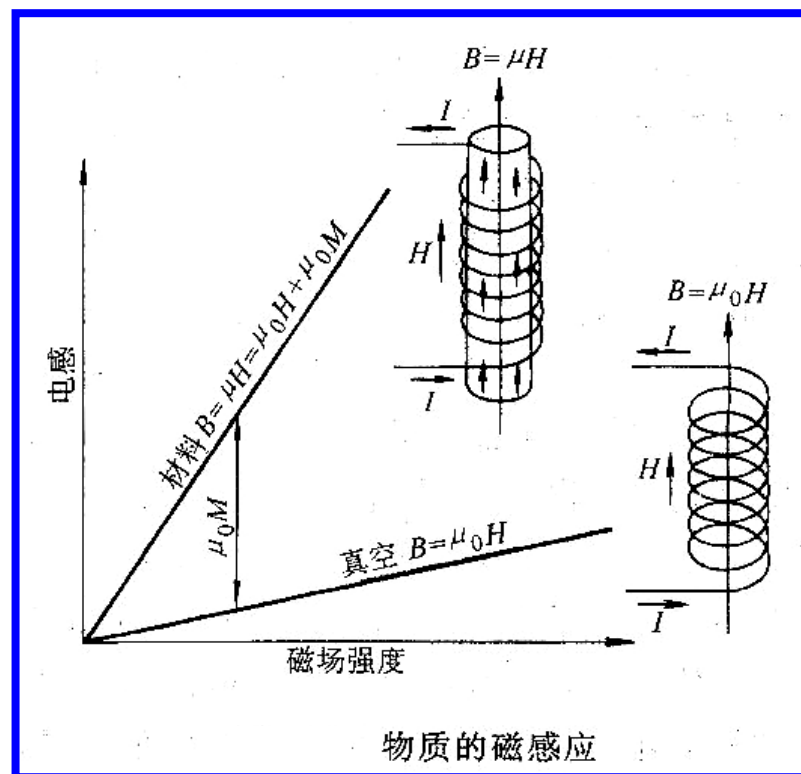
式中,  $H$  — 磁场强度

$\mu_0$  — 真空磁导率

#### 2. 材料的磁感应强度 $B_{\text{材}}$

$$B_{\text{材}} = \mu H \quad (10-4)$$

式中,  $\mu$  — 材料的磁导率



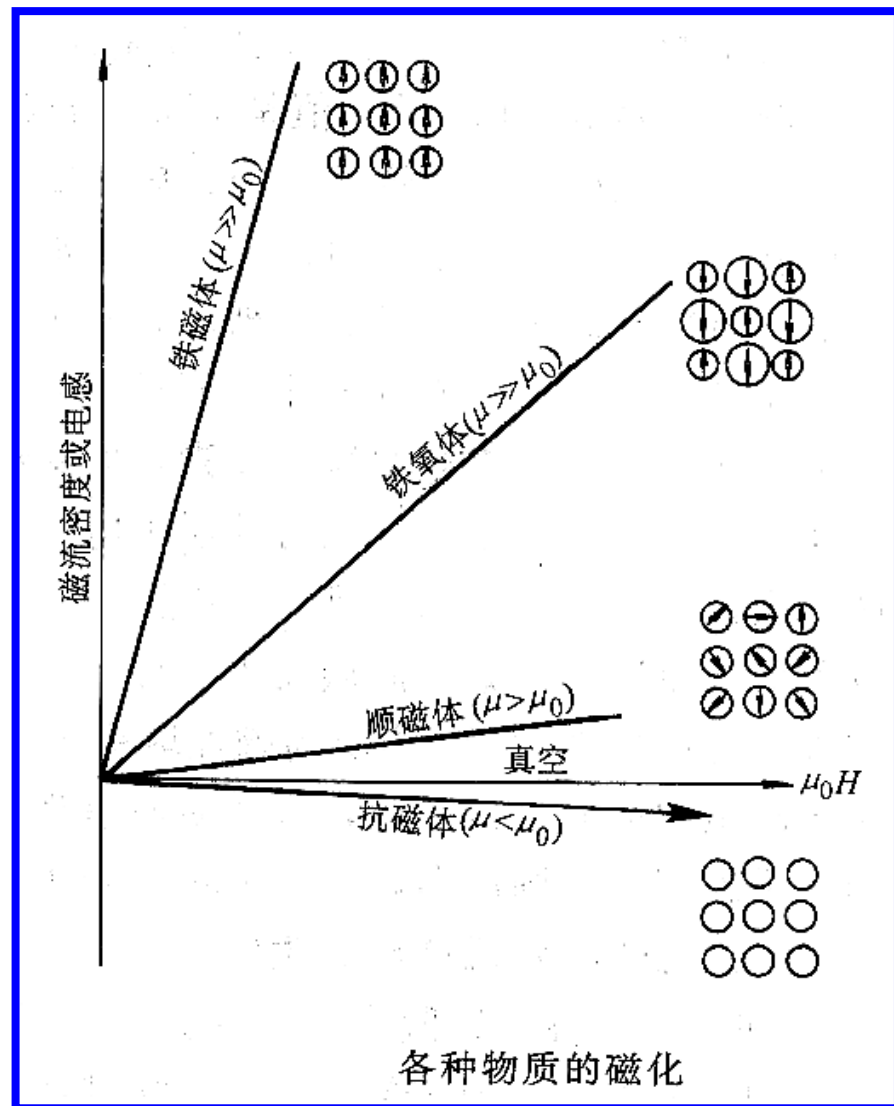
THE END

## 二、抗磁体、顺磁体、和铁磁体

1. 抗磁体 —— 内部磁矩削弱了外磁场的材料  
即  $\mu < \mu_0$

如惰性原子、一价碱金属离子、二价碱土金属离子

2. 顺磁体 —— 内部磁矩稍增强外磁场的材料  
即  $\mu > \mu_0$   
如大多数金属元素



### 3. 铁磁体 ——内部磁矩大大增强外磁场的材料

即  $\mu \gg \mu_0$

如 Fe、Co、Ni、Gd

### 4. 铁氧体 ——具有铁磁性的金属氧化物

如  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其中MO为金属氧化物，通常是MnO或ZnO

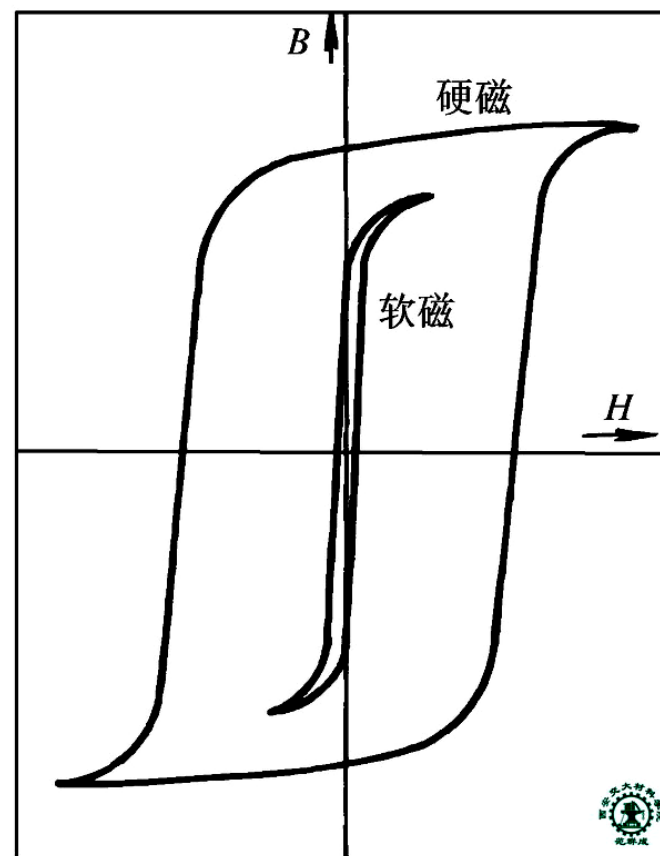


## 二、软磁材料

——在外磁场作用下很容易磁化，去掉外磁场时又很容易去磁的磁性材料。

### 1. 软磁材料的特性

- 高磁导率，低矫顽力



THE END

## 2. 常用软磁材料

### 1) 电工纯铁

$w_C = 0.04\%$  适用于直流变压器铁芯

### 2) 硅钢片

$w_{Si} = 0.5\% - 4.5\%$  适用于交流变压器铁芯

### 3) Fe-Al 合金

$w_{Al} = 6\% - 16\%$  适用于弱磁场变压器铁芯

### 4) 铁氧体软磁材料

以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主要成分的复相氧化物，广泛用于广播、通讯和电视工业，是制作磁性天线、中周变压器、增感线圈、电视聚集线圈的重要材料

THE END

## 三、硬磁材料

——在外磁场作用下不容易磁化，去掉外磁场时又不容易去磁的磁性材料。

### 1. 硬磁材料的特性

- 低磁导率，高矫顽力

### 2. 常用硬磁材料

#### 1) 铝镍钴系 (Fe-Ai-Ni-Co, 阿尔尼科)

良好的磁特性和热稳定性，剩磁高，磁能面积大，矫顽力适中。硬而脆，难加工。铸造或粉末烧结成形

THE END

## 2) 铁氧体硬磁材料 ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_9$ , 钡恒磁)

与金属因此材料相比, 电阻大、涡流损失小, 成本低, 耐化学腐蚀

## 3) 稀土系永磁 (钕铁硼永磁合金, 磁王)

稀土元素与过渡族金属Fe、Co、Cu、Zr等或非金属元素B、C、N等组成的化合物。

高矫顽力, 磁能面积最大, 而且体积小、重量轻、比功率大、效率高、成本较低

## 第四节 形状记忆合金

### 一、问题的提出

- 历史事件回放

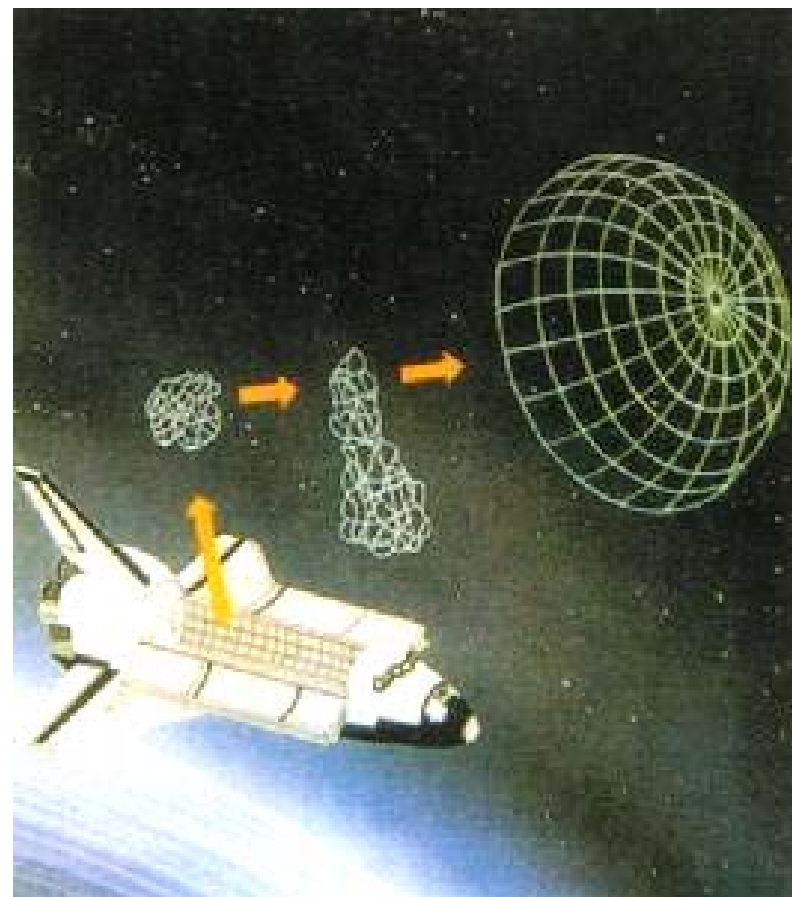
1969年7月20日晚上10时56分，全世界数以万计的科学家，数以亿计的公众凝视着电视屏幕，关注着那远在38万公里以外、乘坐“阿波罗”11号登月舱的美国宇航员阿姆斯特朗在月球上踏下的第一个人类的脚印，谛听着这位勇士从月宫里传回的富于哲理的声音：“对一个人来说，这是一小步；但对人类来说，这是跨了一大步”。

THE END

- 提两个问题

宇航员的形象和声音是怎么从月球上返回来的呢？

天线可是一个直径数米的庞然大物，怎么能够装在小小的登月舱送上太空呢？



THE END

- 本节主要内容

形状记忆现象（一个演示实验）

形状记忆效应

形状记忆原理简介

常用形状记忆合金

形状记忆合金应用举例

做一个工程设计练习

小结

一道课后思考题

THE END



## 二、形状记忆现象（演示实验）

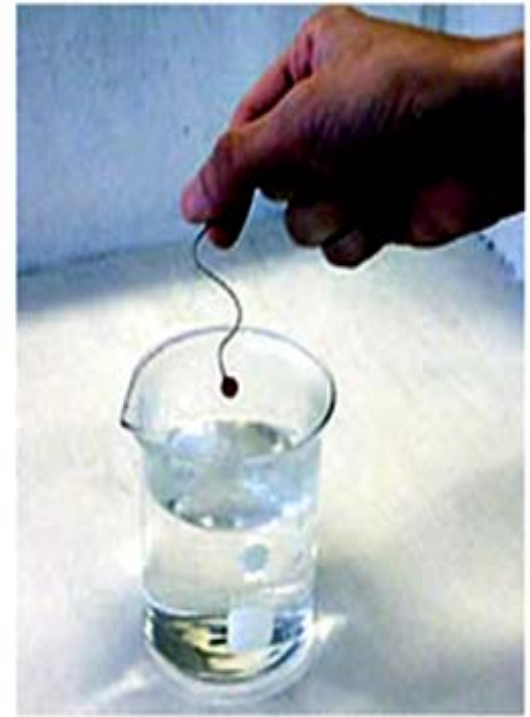
形状记忆现象  
演示实验



(a) 原始形状



(b) 拉直











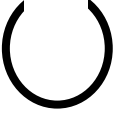

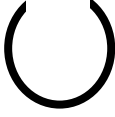

(c) 加热后恢复

形状记忆效应简易演示实验

THE END

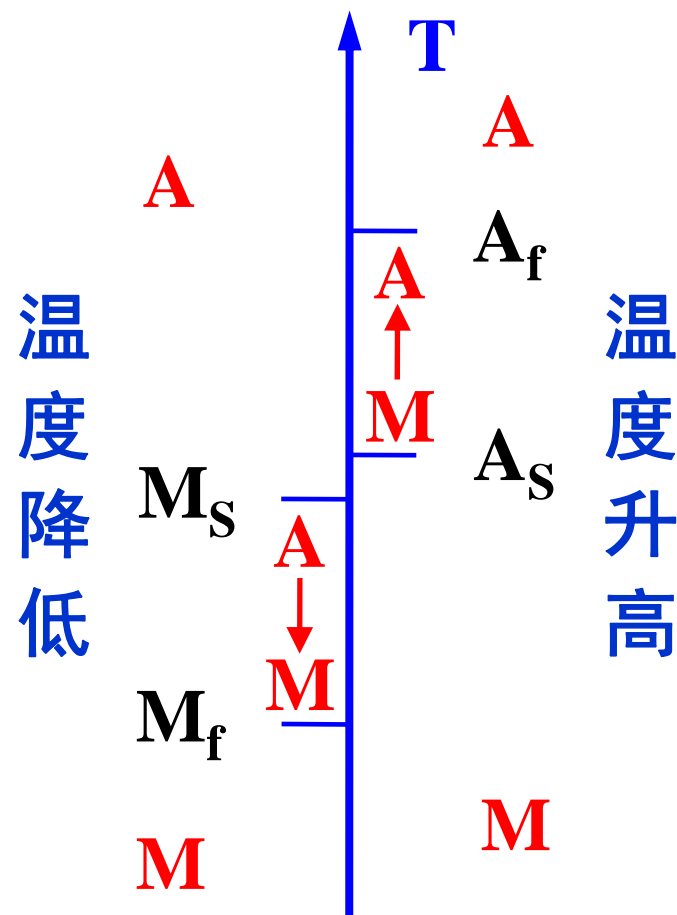
# 三、形状记忆效应

合金处于低温相时变形, 加热到临界温度 (逆相变点) 通过逆相变恢复其原始形状, 称之为形状记忆效应。包括单程记忆效应、双程记忆效应、全程记忆效应。

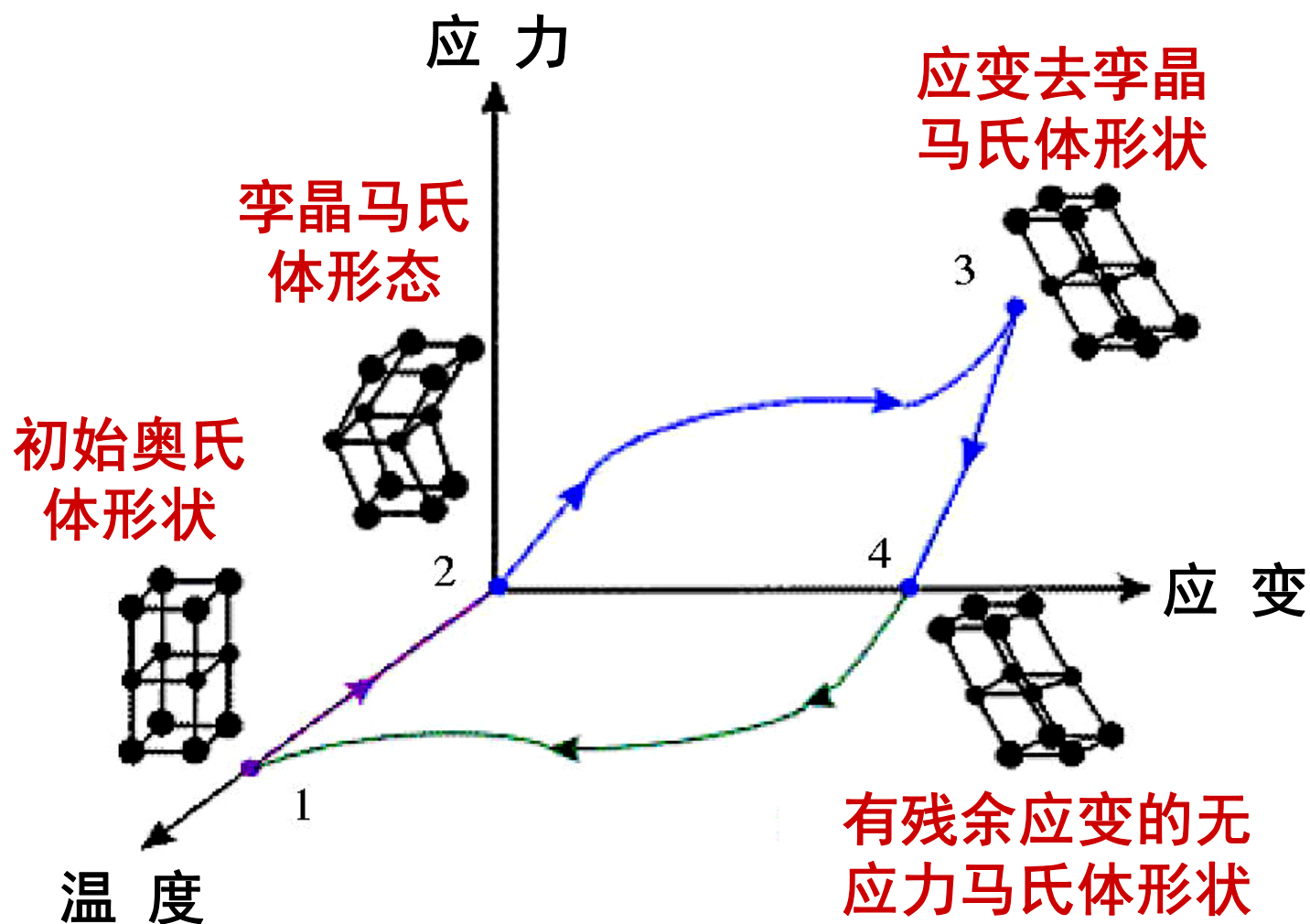
	初始状态	低温变形	加 热	冷 却
单 程				
双 程				
全 程				

## 四、形状记忆原理简介

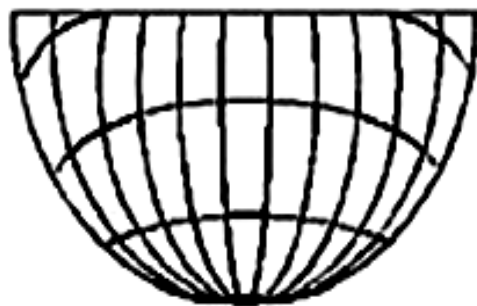
形状记忆合金中会形成一种特殊的马氏体片，它可以随温度的降低而长大，随温度的升高而弹性缩小，这种特殊的马氏体被称为**热弹性马氏体**。热弹性马氏体逆相变时能够完全地恢复到和相变前形状一样的母相状态。



THE END



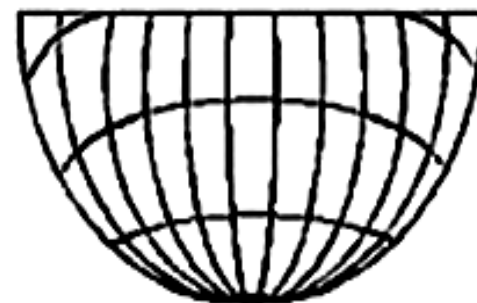
形状记忆原理示意图



(a) 原始形状

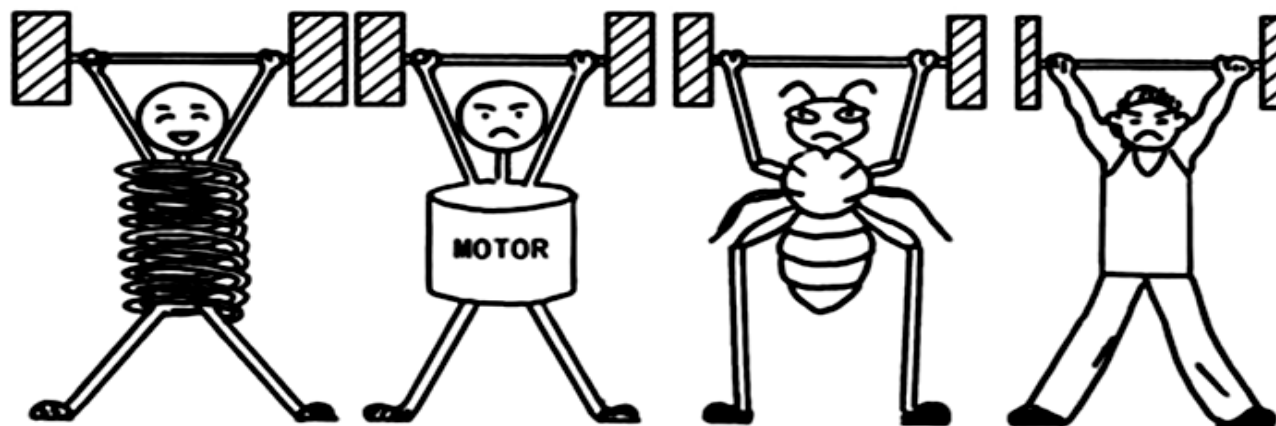


(b) 折成球形装入登月舱



(c) 太阳能加热后

月球上使用的形状记忆合金天线



(a) 记忆合金

(b) 马达

(c) 蚂蚁

(d) 人

形状记忆合金形状是名副其实的大力士

THE END

## 五、常用形状记忆合金

常用形状记忆合金 {  
Ti-Ni 系合金  
Cu 系合金  
Fe 系合金

### 1. Ti-Ni 系合金

$w_{Ni} = 54.08\% - 56.06\%$  的Ti-Ni 合金是最早成功应用的实用合金，也是目前用量最大的形状记忆合金。它具有很高的抗拉强度和疲劳强度及很好的耐蚀性，且密度较小。

Ti-Ni-Nb、Ti-Ni-Cu、Ti-Ni-Fe 等是新型的形状记忆合金。

Ti-Ni 系合金性能优良，但成本高、难加工

## 2. Cu 系合金

Cu-Zn-Al、Cu-Ni-Al 是比较实用的 Cu 系形状记忆合金。

与Ti-Ni 合金相比，Cu-Ni-Al 功能要差一些，但加工容易，成本低。

## 3. Fe 系合金

Fe 系形状记忆合金主要有 Fe-Pt、Fe-Pd、Fe-Ni-Co-Ti、Fe-Ni-C、Fe-Mn-Si 等系列合金

Fe 系形状记忆合金的成本比 Ti-Ni 系合金及 Cu 系合金低得多，且易于加工，具有明显的竞争优势。

有些高分子材料也具有形状记忆功能。



## 六、形状记忆合金应用举例

### “魔力水车”

中国科技馆里有一件展品，名叫“魔力水车”。你看，一个大大的轮子，没有任何驱动力，但它却在自动地、永不停息地旋转着。你一定会感到很奇怪，为什么它会无动力地自动旋转？

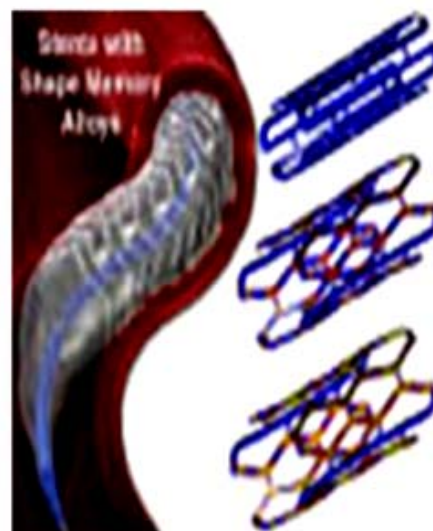


“魔力水车”的叶片是用有双程记忆功能的形状记忆合金片制作的，能记住自己两个温度时的形状。水槽里的水有 $60^{\circ}\text{C}$ 左右，叶片入水后，它要回到 $60^{\circ}\text{C}$ 温度时的形状。在形状变化的过程中，叶片对水有一个作用力，水对叶片的反作用力就使轮子旋转起来。当叶片出水冷却后，叶片会恢复到低温时的形状。叶片的形状在这两个温度之间循环变化，就使轮子自动地永不停息地旋转。

临床医学中的应用



(a) 消化道内支架



(b) 血管内支架

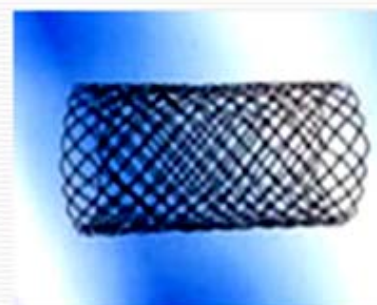


(c) 胆道内支架

腔内支架临床应用实例



(a) 预压缩



(b) 受热扩张后



(c) 植入腔道内效果

医用腔内支架的应用原理示意

## 日常生活中的应用



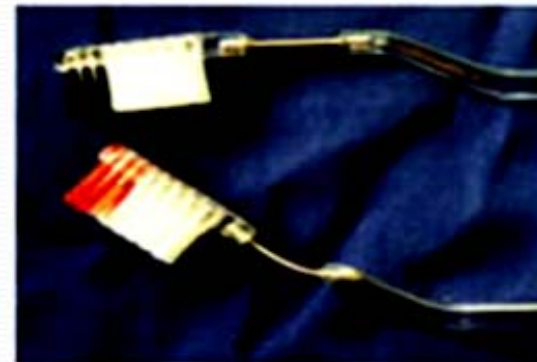
形状记忆合金眼镜架



(a) 智能水温调节器



(b) 移动电话天线



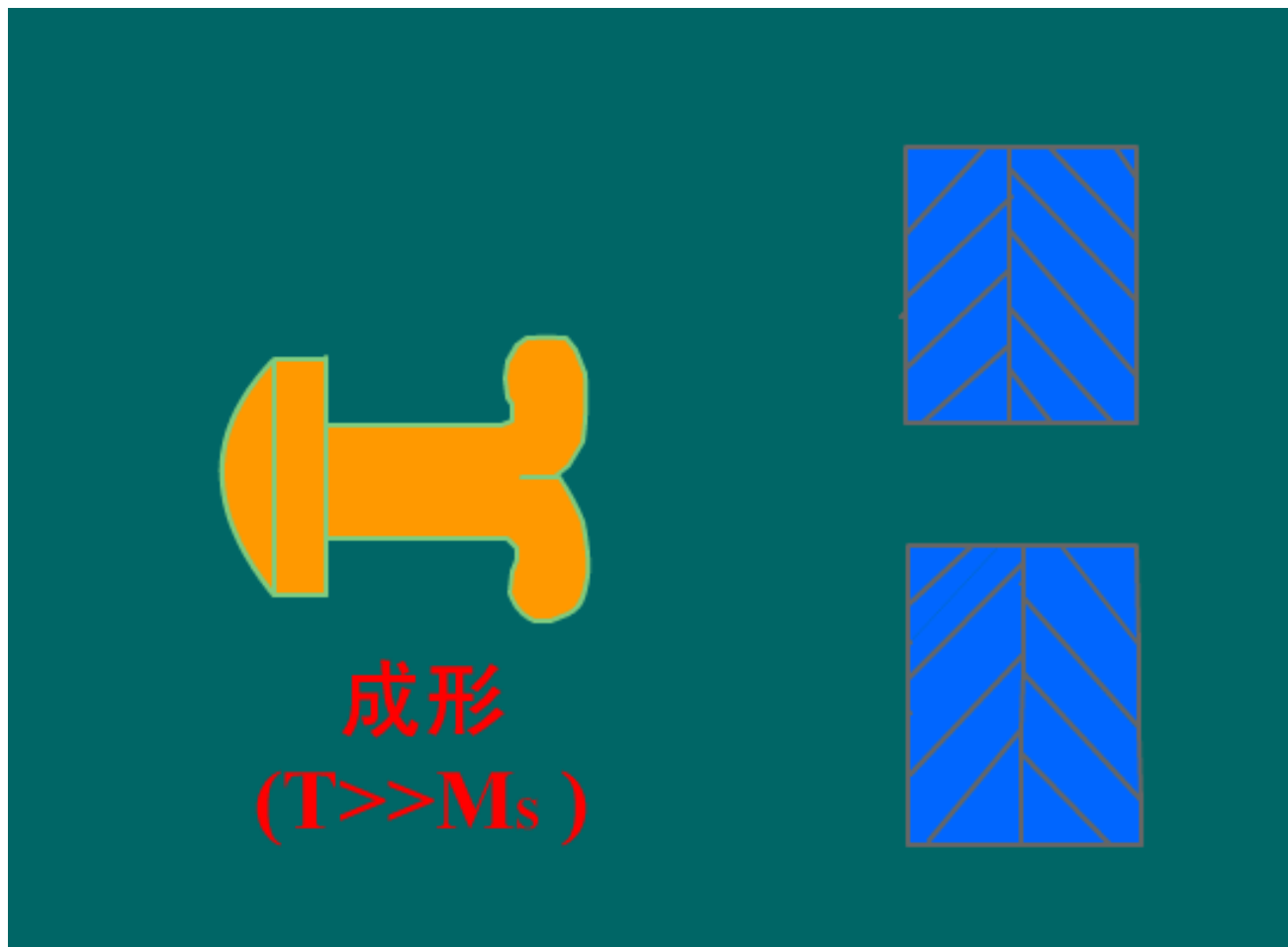
(c) 牙刷

形状记忆合金的应用实例



## 七、工程设计练习

怎样用形状记忆合金铆钉将两块板铆接？



## 八、本节小结

- **形状记忆效应**—合金处于低温相时变形, 加热到临界温度 (逆相变点) 通过逆相变恢复其原始形状, 称之为形状记忆效应。包括单程记忆效应、双程记忆效应、全程记忆效应。
- **形状记忆原理**—形状记忆合金中的马氏体片, 可以随温度的降低而长大, 随温度的升高而弹性缩小, 这种特殊的马氏体被称为热弹性马氏体。热弹性马氏体逆相变时能够完全地恢复到和相变前形状一样的母相状态
- **常用形状记忆合金**: Ti-Ni 系、Cu 系、Fe 系
- **应用**: 工程, 临床医学, 日常生活...

## 九、一道课后思考题

如何用形状记忆合金管接头连接两段管道？

THE END