

材料科学与工程导论

Engineering

Science

Welcome to Materials World

第三章 结构材料

本章主要内容:

- ◆ 钢铁材料
- ◆ 有色金属材料
- ◆ 陶瓷材料
- ◆ 玻璃材料
- ◆ 水泥材料
- ◆ 高分子材料
- ◆ 复合材料



材料的分类

按使用性能划分:

结构材料、功能材料

按用途划分:

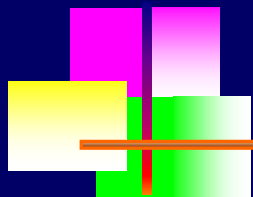
电子信息材料、航空航天材料、能源材料.....

按组成与结构划分:

金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料

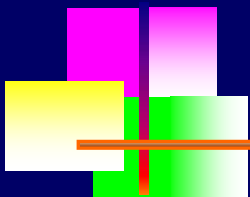
按应用与发展划分:

传统材料、新材料



什么是“结构材料”？

结构材料是主要利用材料的强度、韧性、弹性等力学性能，用于制造在不同环境下工作时承受载荷的各种结构件和零部件的一类材料，即机械结构材料和建筑结构材料。



结构材料

概述

结构材料:



结构材料

钢铁材料

纯铁

工业纯铁强度低、硬度低、塑性好，一般不用于结构材料。

铸铁

C 质量分数
大于**2.11%**
的铁碳合金

含C量

3000年

钢

碳钢

合金钢

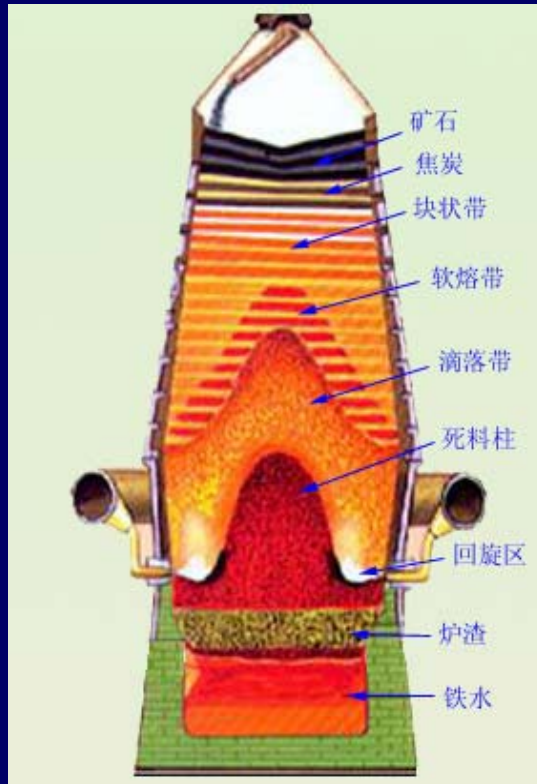
成分、结构与性能的关系

结构材料

钢铁材料

钢铁是怎样炼成的？

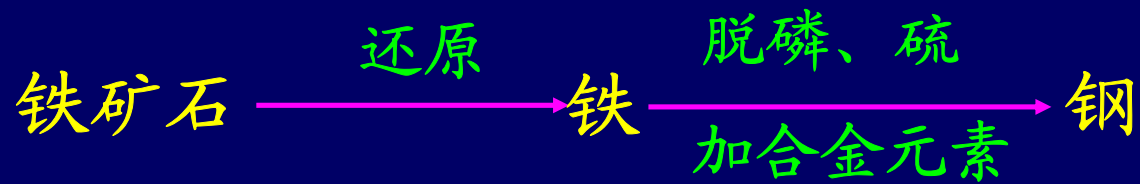
炼铁高炉



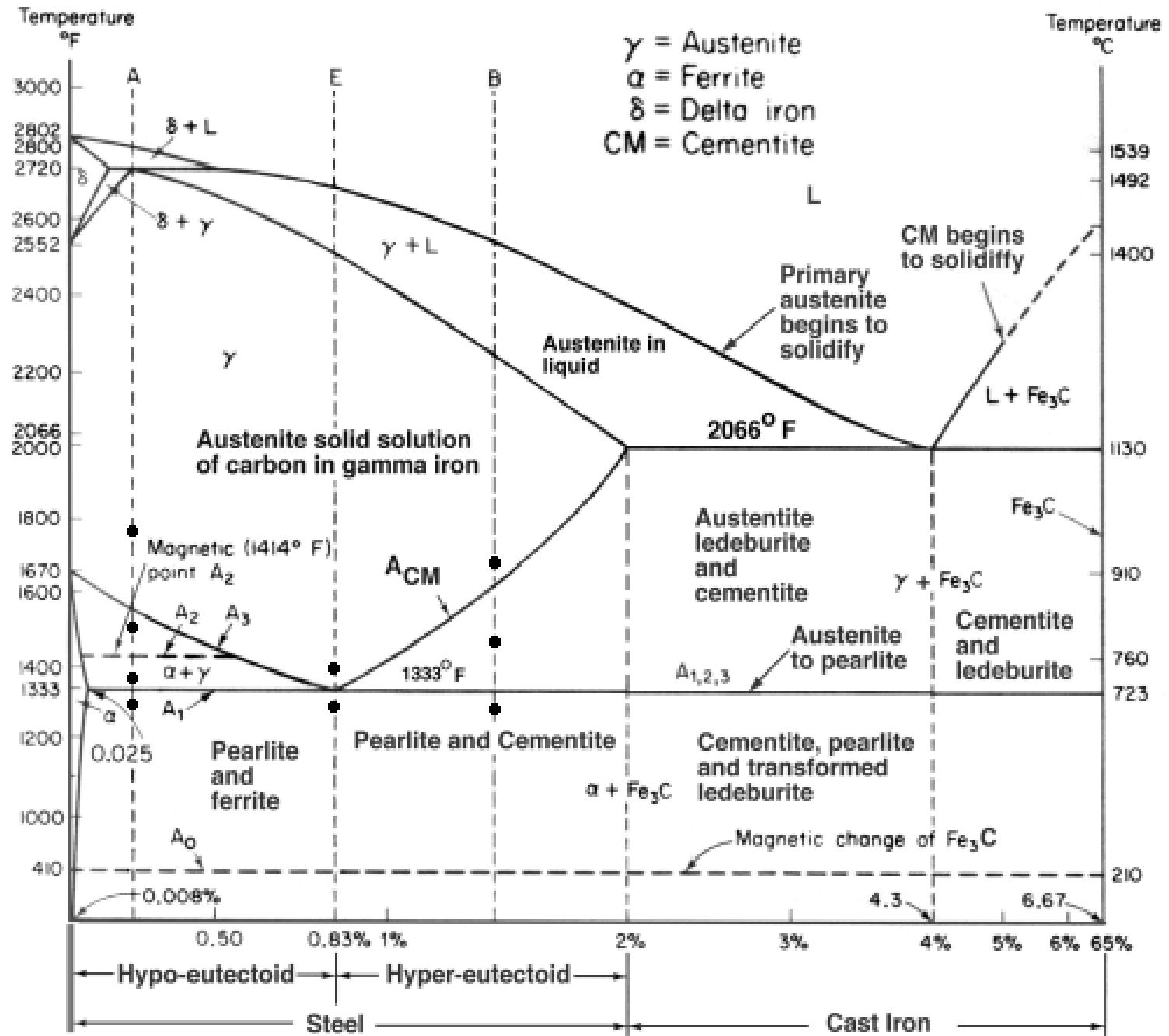
转炉
吹氧
炼钢



铸坯



铁碳相图



结构材料

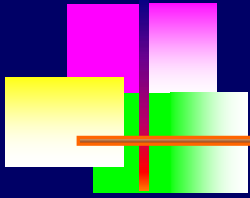
钢铁材料

铸铁

铸铁 碳的质量分数大于2.11%的铁碳合金称之为**铸铁**，通常还含有较多的Si、Mn、S、P等元素。

铸铁是工程上最常用的金属材料，广泛应用于机械制造、冶金、矿上、石油化工。铸铁的生产设备和工艺简单，价格便宜。





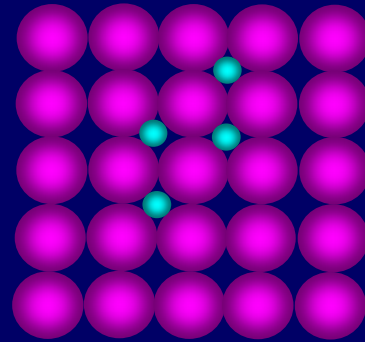
结构材料

钢铁材料

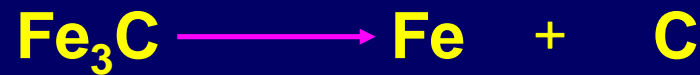
C在铁碳合金中的存在形式

铸铁

间隙固溶

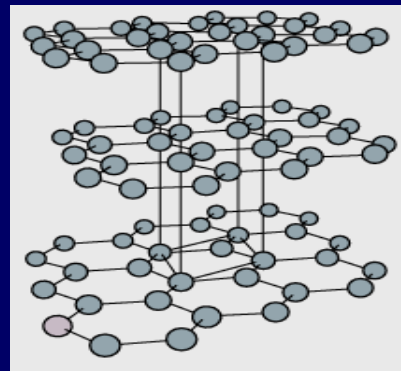


化合态的渗碳体



亚稳态，在一定条件下分解为铁和石墨

游离态的石墨



稳定态，可以从铸铁溶液中析出，也可以从奥氏体中析出

铸铁

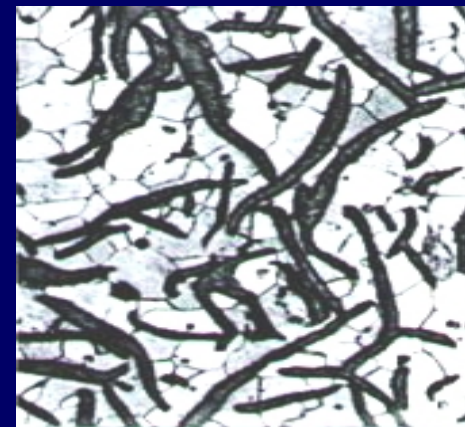
根据石墨化程度的不同，铸铁的类型和组织也不同。

白口 铸铁

完全按照Fe-Fe₃C相图进行结晶而得到的铸铁。其中碳全部以渗碳体(Fe₃C)形式存在，断口呈银白色。

灰口 铸铁

其中碳主要以片状石墨形状存在，断口为暗灰色，常见的铸铁件多数是灰口铸铁。



结构材料

钢铁材料

铸铁

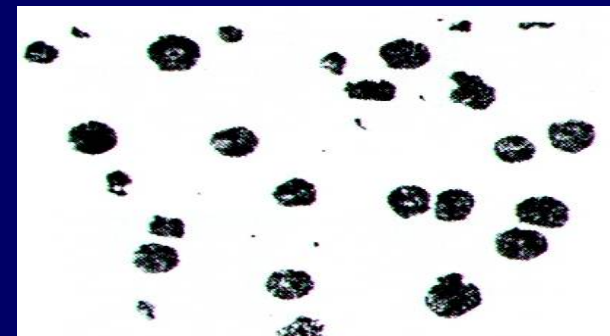
可锻铸铁

由一定成分的铁经石墨化退火处理而获得，其中碳大部分或全部以团状石墨形式存在，由于具有较灰口铸铁高得多的塑性和韧性，习惯上称为可锻铸铁，实际上并不可锻。



球墨铸铁

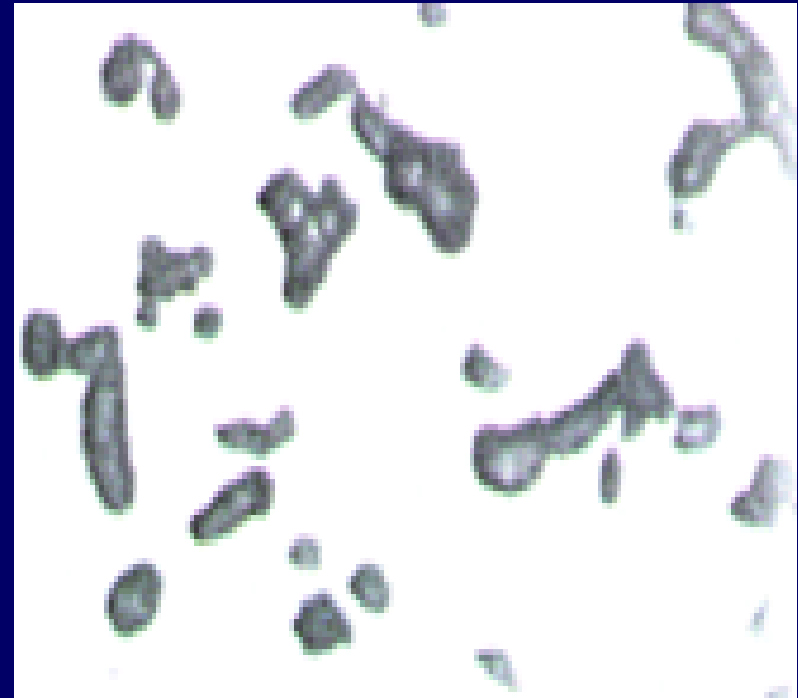
铁水在浇注前经球化处理，其中碳大部分或全部以球状石墨形式存在，机械性能高，生产工艺比可锻铸铁简单，近年来日益得到广泛的应用。

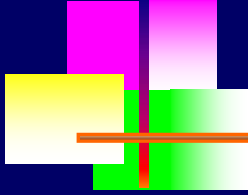


铸铁

蠕墨铸铁

碳以蠕虫状石墨形式存在，介于片状和球状石墨之间此外，为了满足一些特殊要求，向铸铁中加入一些合金元素，如Cr、Cu、Al、B等，可得到耐蚀、耐热及耐磨等特性的合金铸铁。





结构材料

钢铁材料

铸铁

切削加工性能优异

铸造性能良好

石墨对铸铁的作用

具有耐磨性

良好的减振性

对缺口不敏感

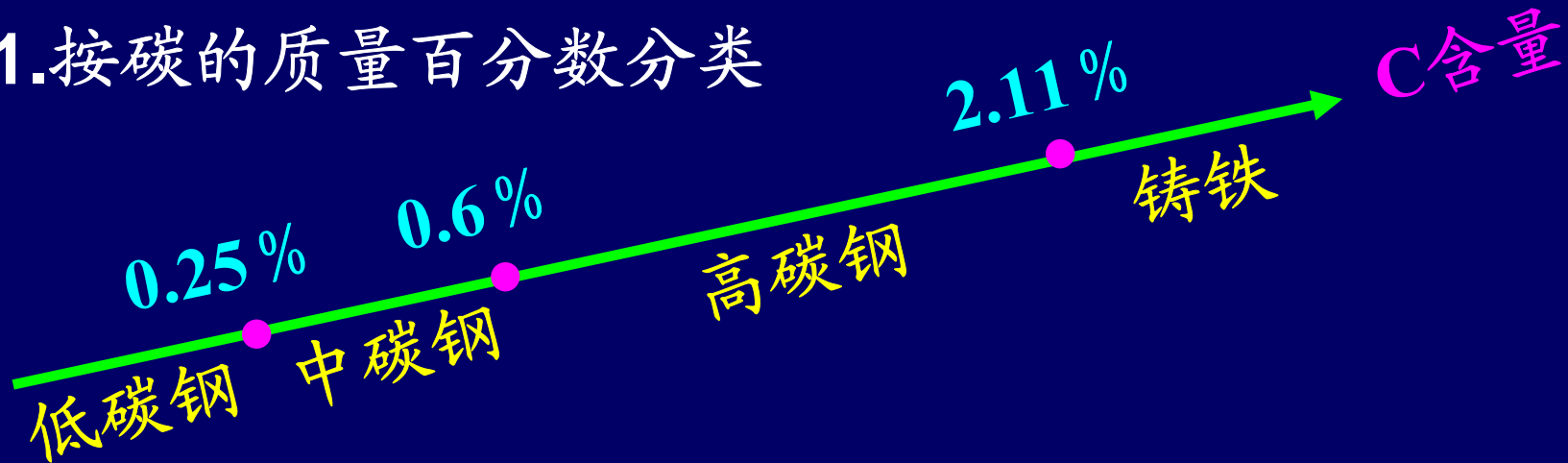
结构材料

钢铁材料

碳钢

碳钢

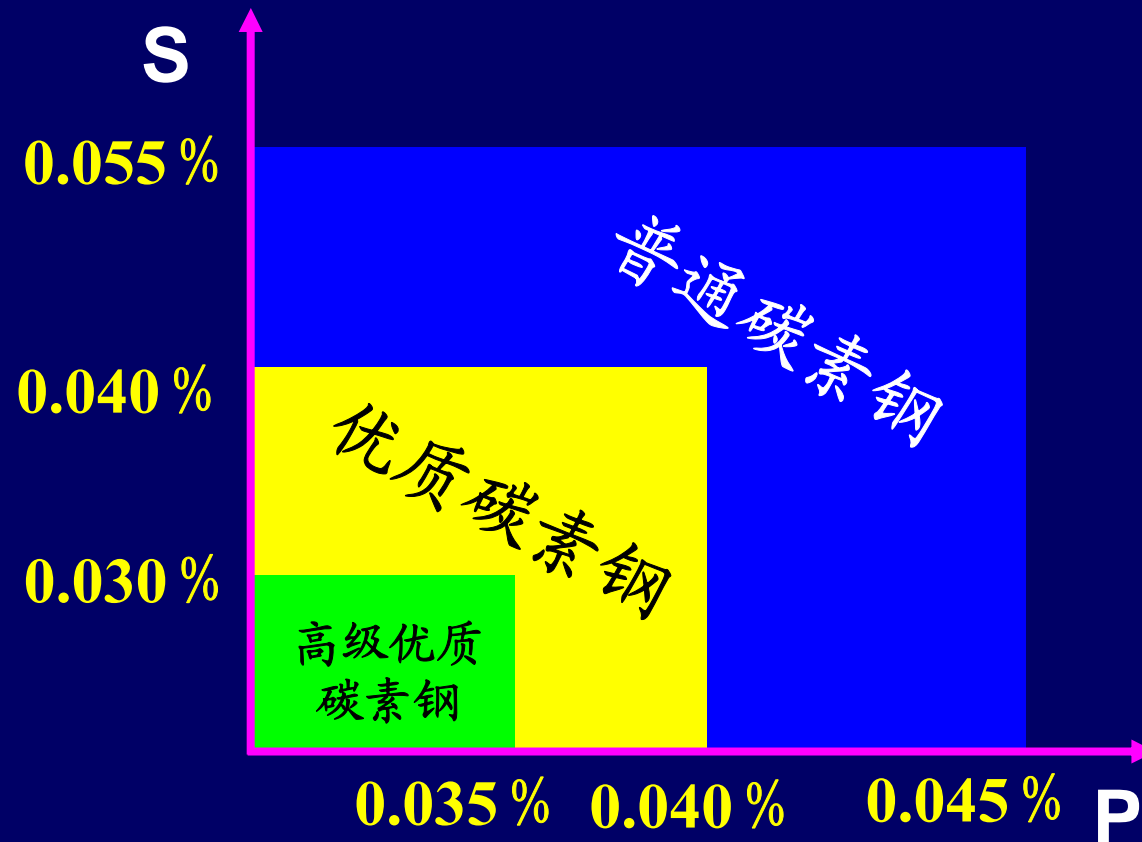
1. 按碳的质量百分数分类



含碳量越高，硬度、强度越高，
但塑性降低。

碳钢

2. 按钢的质量分类(主要是杂质硫、磷的含量)



结构材料

钢铁材料

3.按用途分类

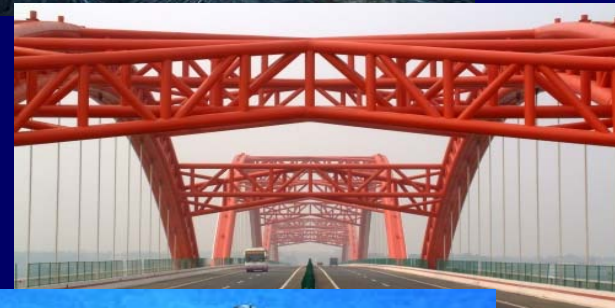
碳素结构钢

主要用于桥梁、船舶、建筑构件、机器零件等

碳素工具钢

主要用于刀具、模具、量具等

碳钢



结构材料

钢铁材料

牌号及用途

普通碳素结构钢

碳钢

Q195、Q215、Q235、Q255、Q275等。

数字表示最低屈服强度。

塑性好，可轧制成钢板、
钢筋、钢管等。

可轧制成型钢、钢板等。



结构材料

钢铁材料

牌号及用途

优质碳素结构钢

碳钢

钢号以碳的平均质量万分数表示。
如20#、45#等。20#表示含C:
0.20% (万分之20)。

主要用于制造
各种机器零件

碳素工具钢

钢号以碳的平均质量千分数表示，并在前冠
以T。如T9、T12等。T9表示含C: 0.9% (千
分之9)。

主要用于制造各种刀具、量具、模具等

结构材料

钢铁材料

牌号及用途

碳钢

铸钢

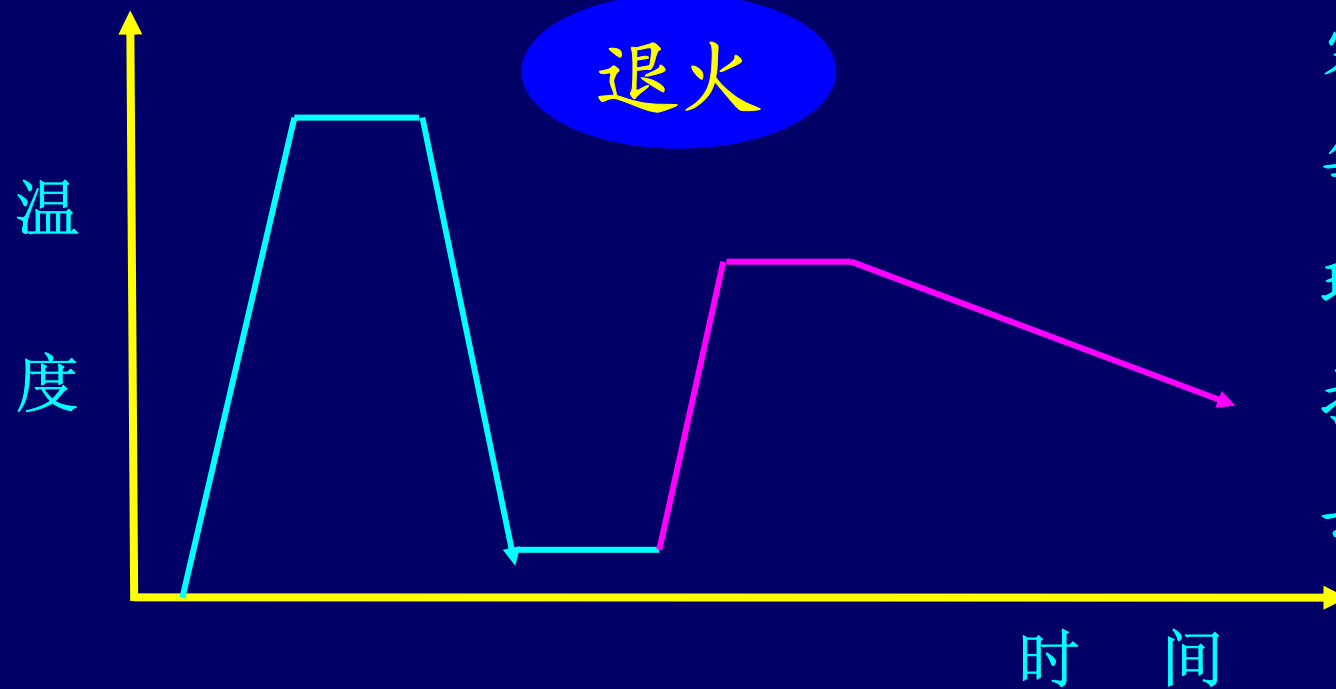
铸钢牌号是在数字前冠以**ZG**，数字代表钢中平均质量分数（以万分数表示）。如**ZG25**，表示含C: **0.25%**。

主要用于制造形状复杂并需要一定强度、塑性和韧性的零件，如齿轮、联轴器等。



碳钢的常规热处理

碳钢



完全退火

等温退火

球化退火

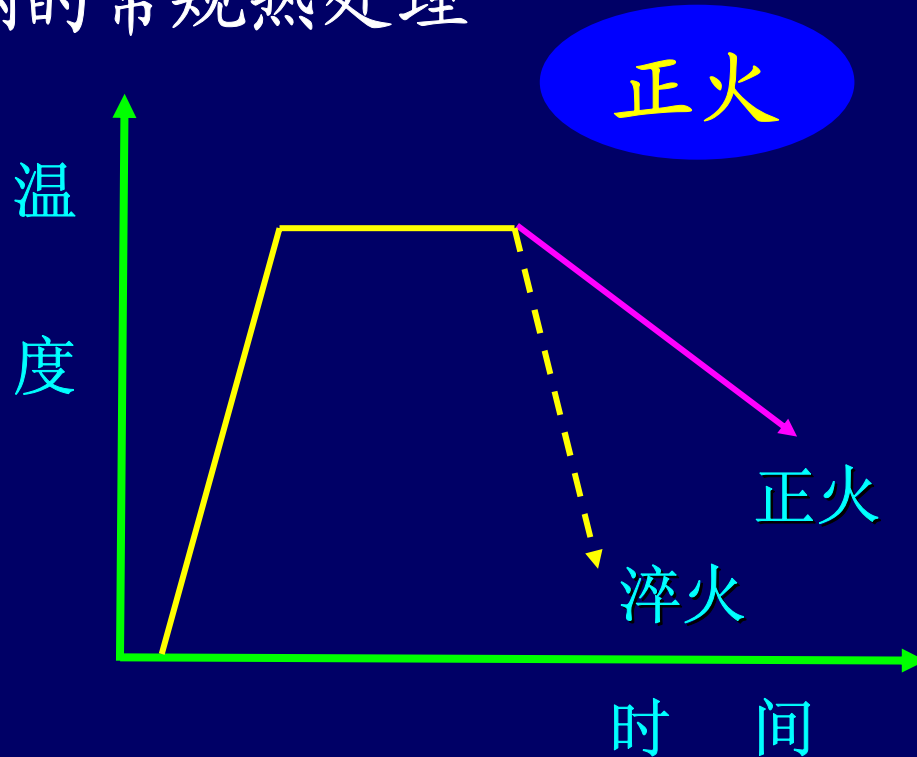
扩散退火

去应力退火

将钢加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却（随炉冷却），以获得接近于平衡状态组织的热处理工艺。

碳钢的常规热处理

碳钢



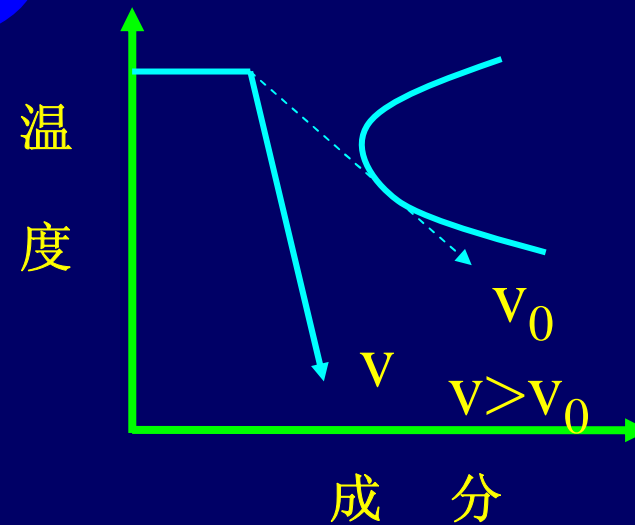
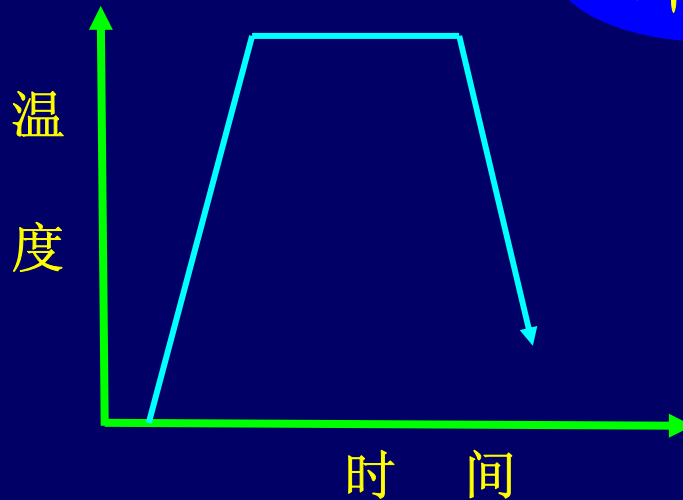
将钢件加热到 A_{C3} 和 A_{cm} 以上 $30-50$ 度，保持适当时间后，在空气中冷却，得到珠光体类组织的热处理工艺。

在奥氏体状态下，空气或保护气体冷却获得珠光体均匀组织，提高强度，改善韧性。

碳钢的常规热处理

淬火

碳钢



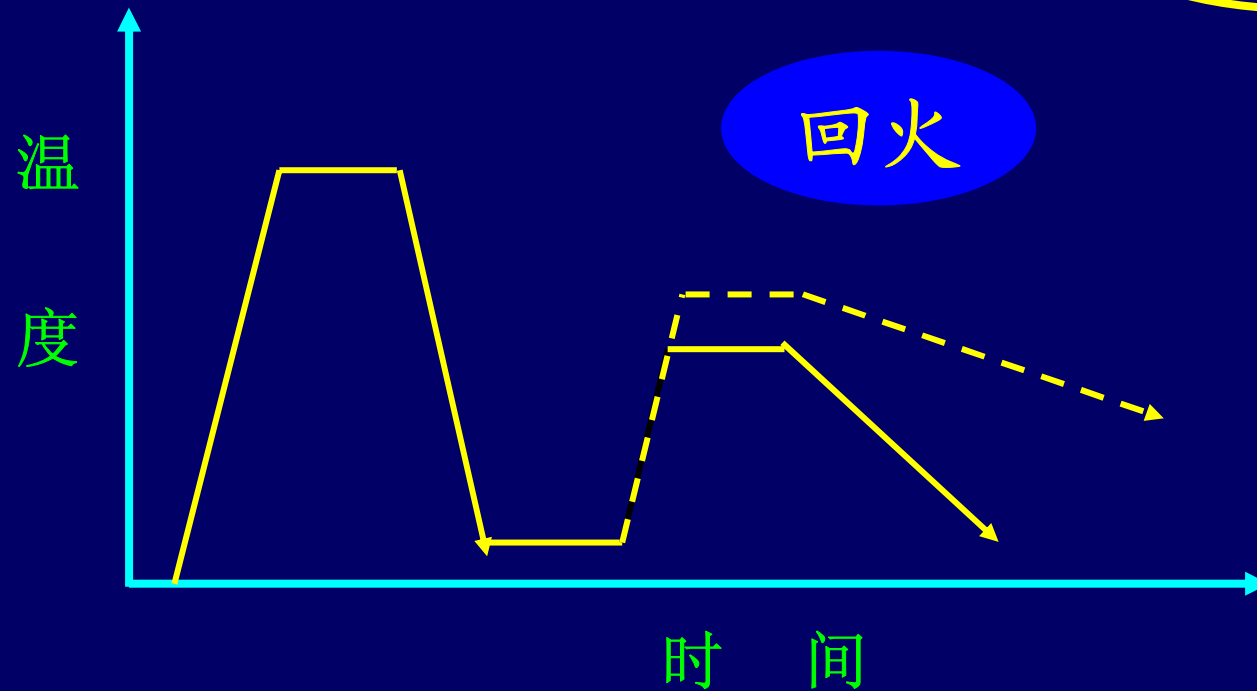
将钢件加热到奥氏体化后，快速冷却，使组织转变为马氏体的热处理工艺。所得的马氏体的形态与钢的成分、原始奥氏体晶粒的大小以及形成条件有密切关系。奥氏体晶粒越小，马氏体越细。

结构材料

钢铁材料

碳钢的常规热处理

碳钢



淬火或正火的材料重新加热,可以松懈淬火应力和使组织向稳态过度,改善材料的延展性和韧性。

结构材料

钢铁材料

合金钢

合金钢

=

碳钢

+

一种或多种合金元素

分类

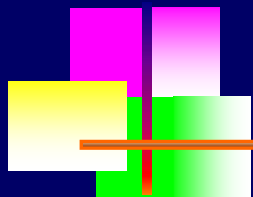
一、按所含合金元素的多少分

合金钢

低合金钢 (总质量分数低于5%)

中合金钢 (总质量分数5% - 10%)

高合金钢 (总质量分数高于10%)



结构材料

钢铁材料

合金钢

二、按主要合金元素种类分

铬钢

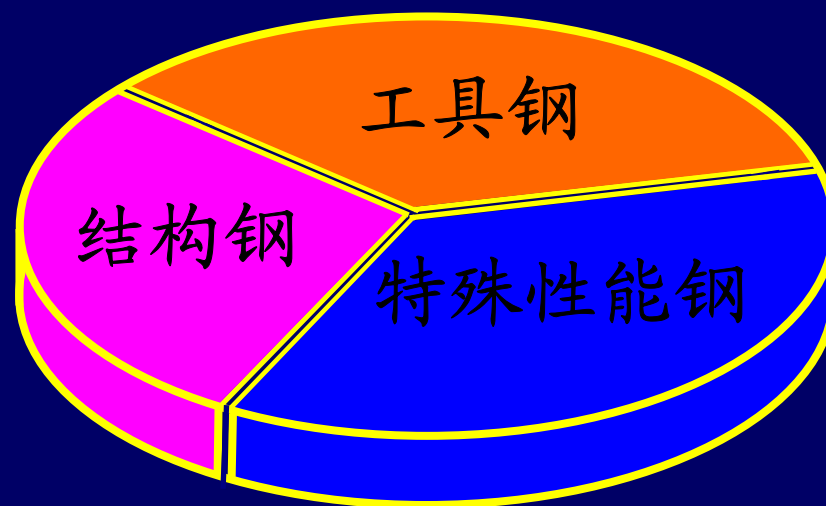
锰钢

铬镍钢

硅锰钢



三、按用途分



合金元素的作用

1. 合金元素与铁的作用

合金元素加入钢中，首先溶于铁形成固溶体，超过溶解度极限时与碳形成化合物。合金元素溶于铁，形成合金铁素体或合金奥氏体。合金元素溶于铁素体会使钢的室温强度提高，这种作用称为固溶强化。

2. 合金元素与碳的作用

对于与碳的亲合力较弱的合金元素，不与碳发生作用，只溶于铁素体或奥氏体中；对于与碳的亲合力较强的合金元素，当质量分数较低时，与铁形成合金渗碳体，当质量分数较高时，形成合金碳化物。

结构材料

钢铁材料

合金钢

不锈钢

能在大气和一般腐蚀性介质中具有很高的耐腐蚀性的钢种。

用途

主要用来制造在各种腐蚀性介质中工作并具有较高抗腐蚀能力的零件或结构件。广泛用于石油、化工、原子能、海洋开发、国防和一些先端科学技术领域。

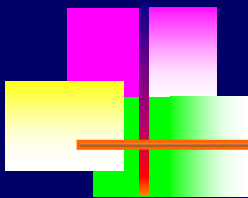


不锈钢中合金元素的作用

1. 耐腐蚀性要求越高，碳的质量分数应越低；
2. 加入主要的合金元素Cr。Cr能提高基体的电极电位。在氧化性介质中极易钝化，形成致密的氧化膜，提高耐腐蚀性；
3. 加入合金元素Ni。可获得单项的奥氏体组织，显著提高耐腐蚀性并改善钢的塑性，通过热处理还可以改善钢的强度；

不锈钢中合金元素的作用

4. 加入合金元素Mo、Cu等：提高钢在非氧化性酸中的耐腐蚀能力。
5. 加入合金元素Ti、Nb等：能优先同C形成稳定的碳化物，使Cr保留在基体中，避免晶界贫Cr，提高钢的耐腐蚀性。
6. 加入合金元素Mn、N等：部分替代Ni以获得奥氏体组织，并能提高铬不锈钢在有机酸中的耐腐蚀性。



结构材料

有色金属材料

主要内容:

铝及铝合金



镁及镁合金



钛及钛合金



铜及铜合金



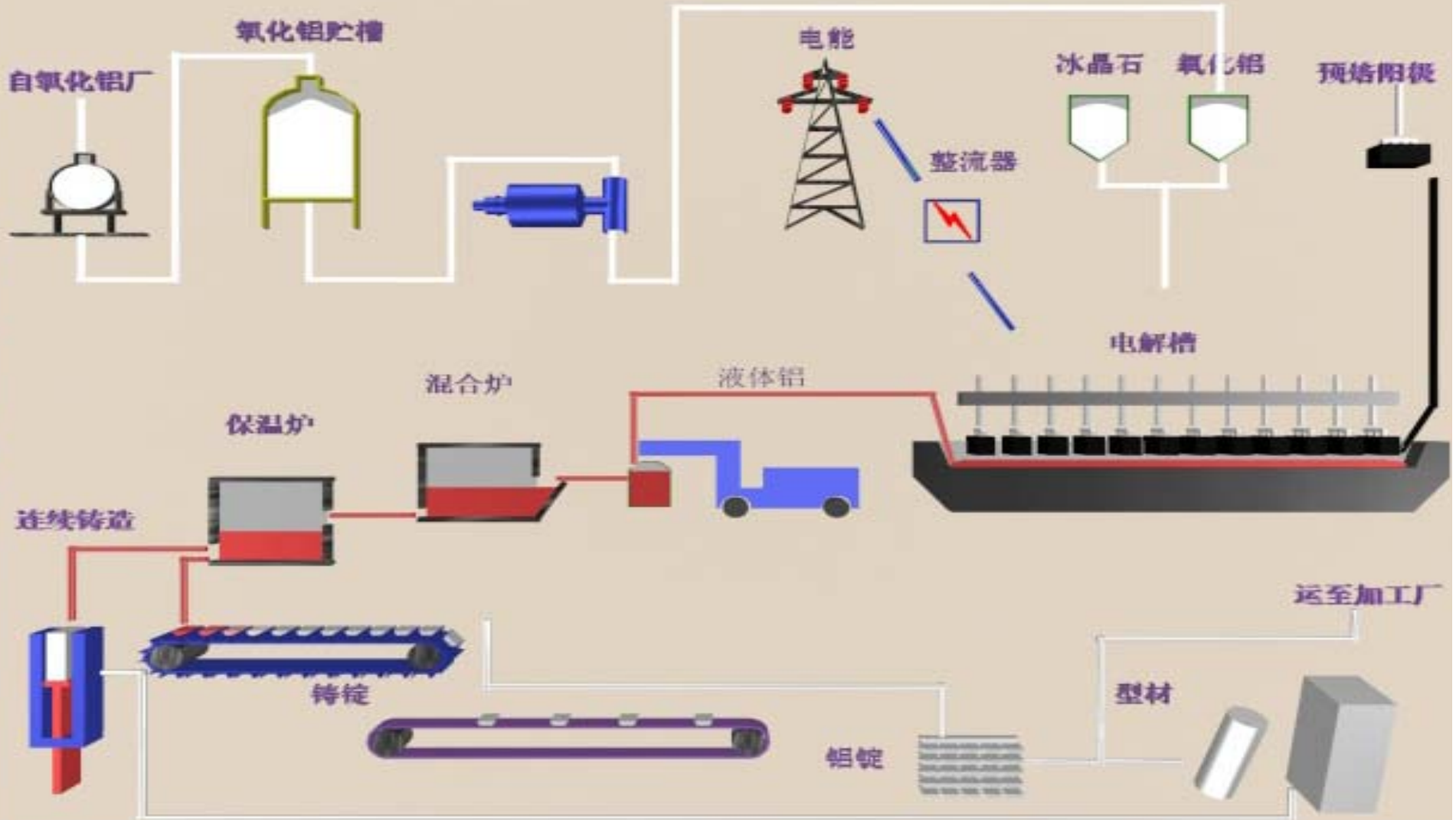
铝及铝合金

铝及铝合金特点:

- ✓ 密度低、比强度高。纯铝的密度为 2700kg/m^3 ，约为铁的 $1/3$ 。
- ✓ 优良的物理、化学性能。导电性能好、磁化率低、耐腐蚀等。
- ✓ 加工性能好。铸造性能好、易于塑性变形，经热处理后还具有很高的强度。

铝的生产过程

铝及铝合金



结构材料

有色金属材料

纯铝

铝及铝合金

纯铝中含有Fe、Si、Zn等元素时，会使性能下降

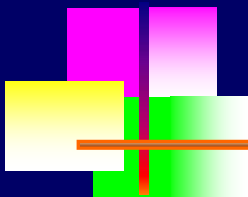
名称	纯度	用途
高纯铝	99.93%-99.99%	科学研究、制作电器
工业高纯铝	98.85%-99.9%	铝箔、铝合金原料
工业纯铝	98.0%-99.0%	电线、电缆、配置合金

纯铝强度很低，不能用作结构材料

合金化



铝合金



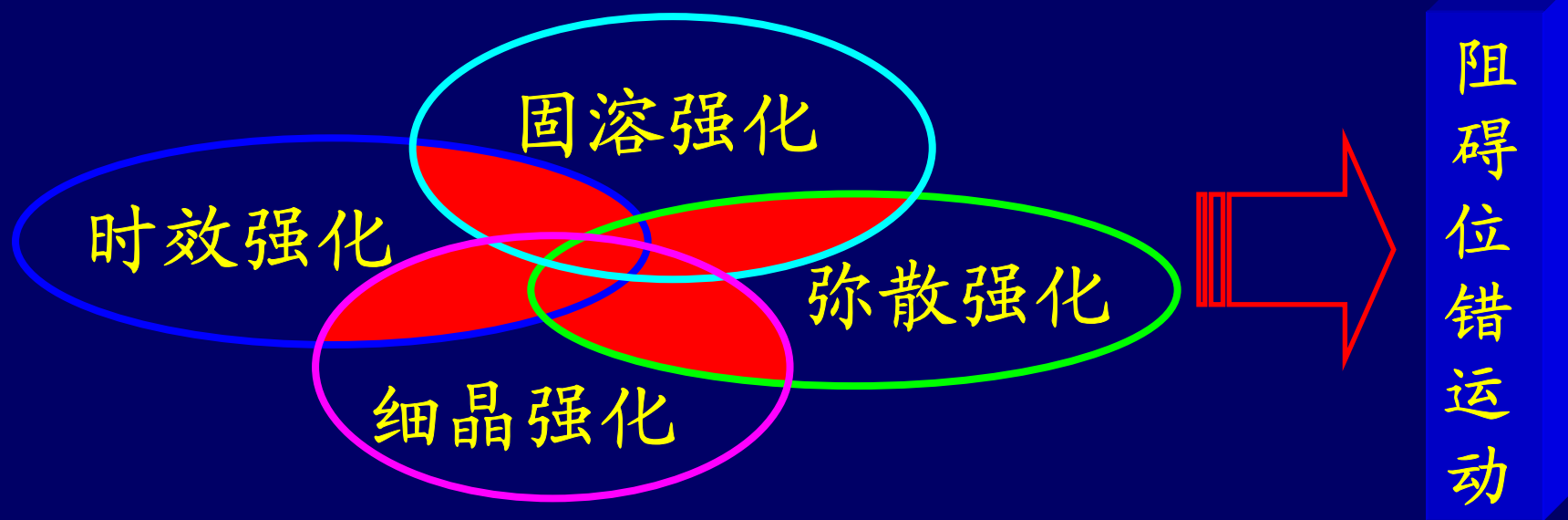
结构材料

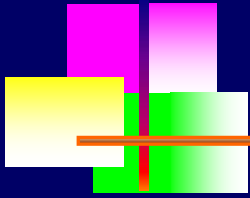
有色金属材料

铝及铝合金

合金元素的作用

铝中加入合金元素后，可提高合金的强度，并保持良好的加工性能。





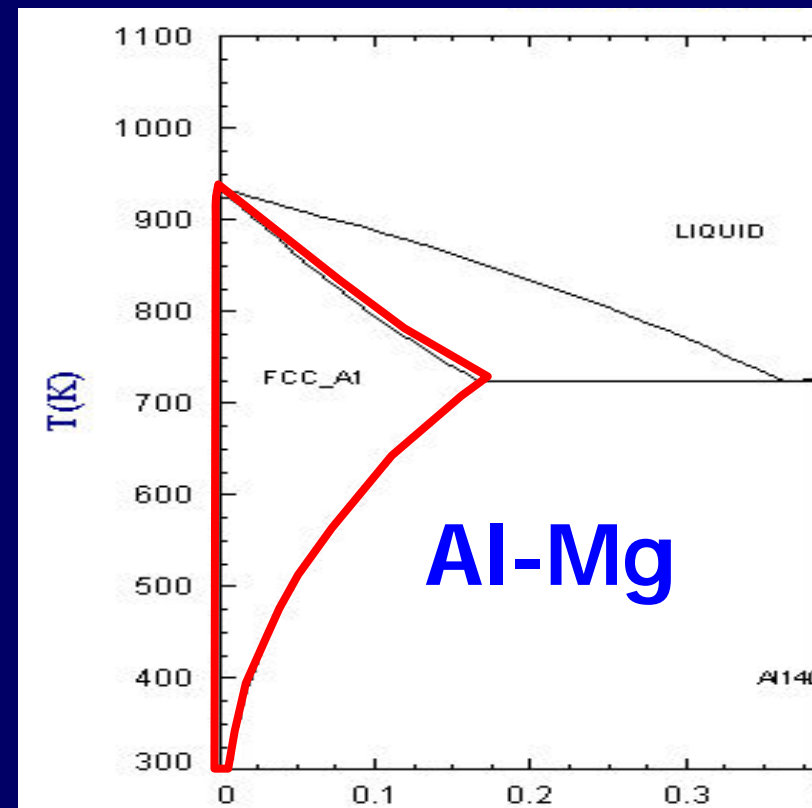
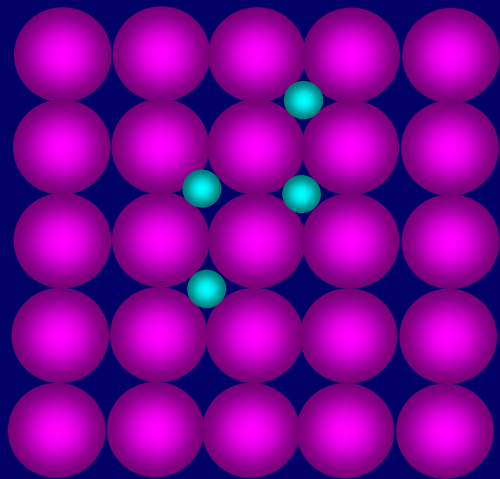
结构材料

有色金属材料

铝及铝合金

合金元素的作用

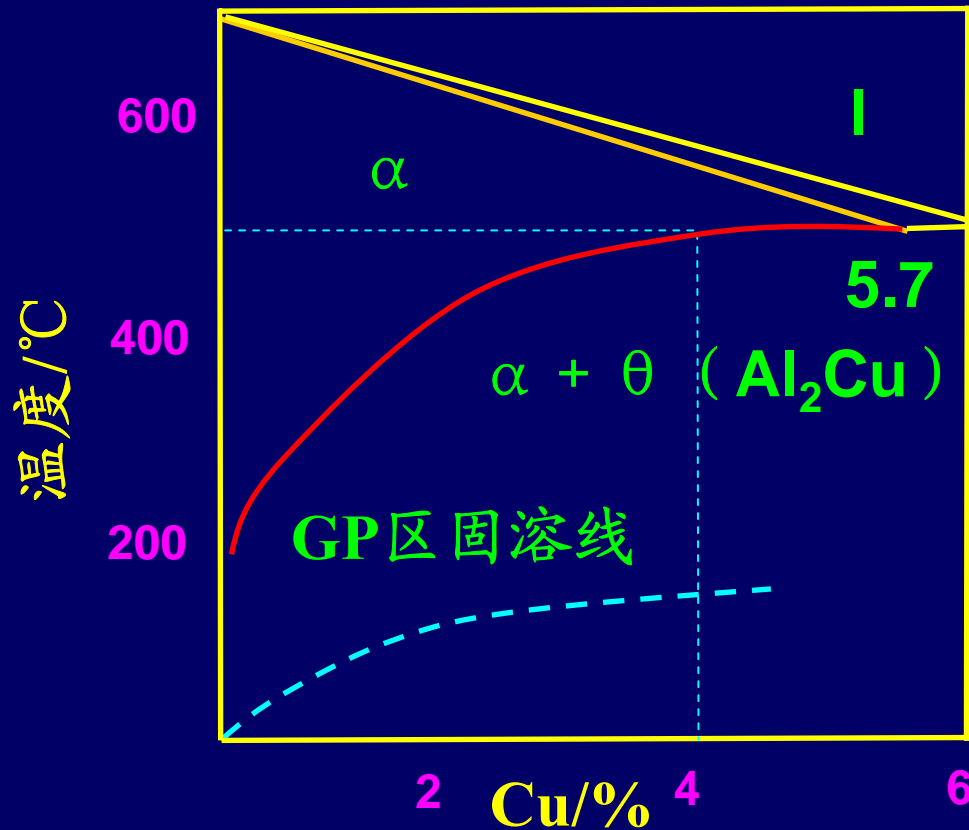
固溶强化



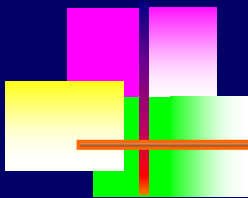
铝及铝合金

合金元素的作用

时效强化



Cu在Al中的固溶度随温度降低而降低。500°C时将有4%的Cu固溶在Al中，将含4%的Al冷却到室温，绝大部分的Cu将以GP区和过渡相等形式析出。



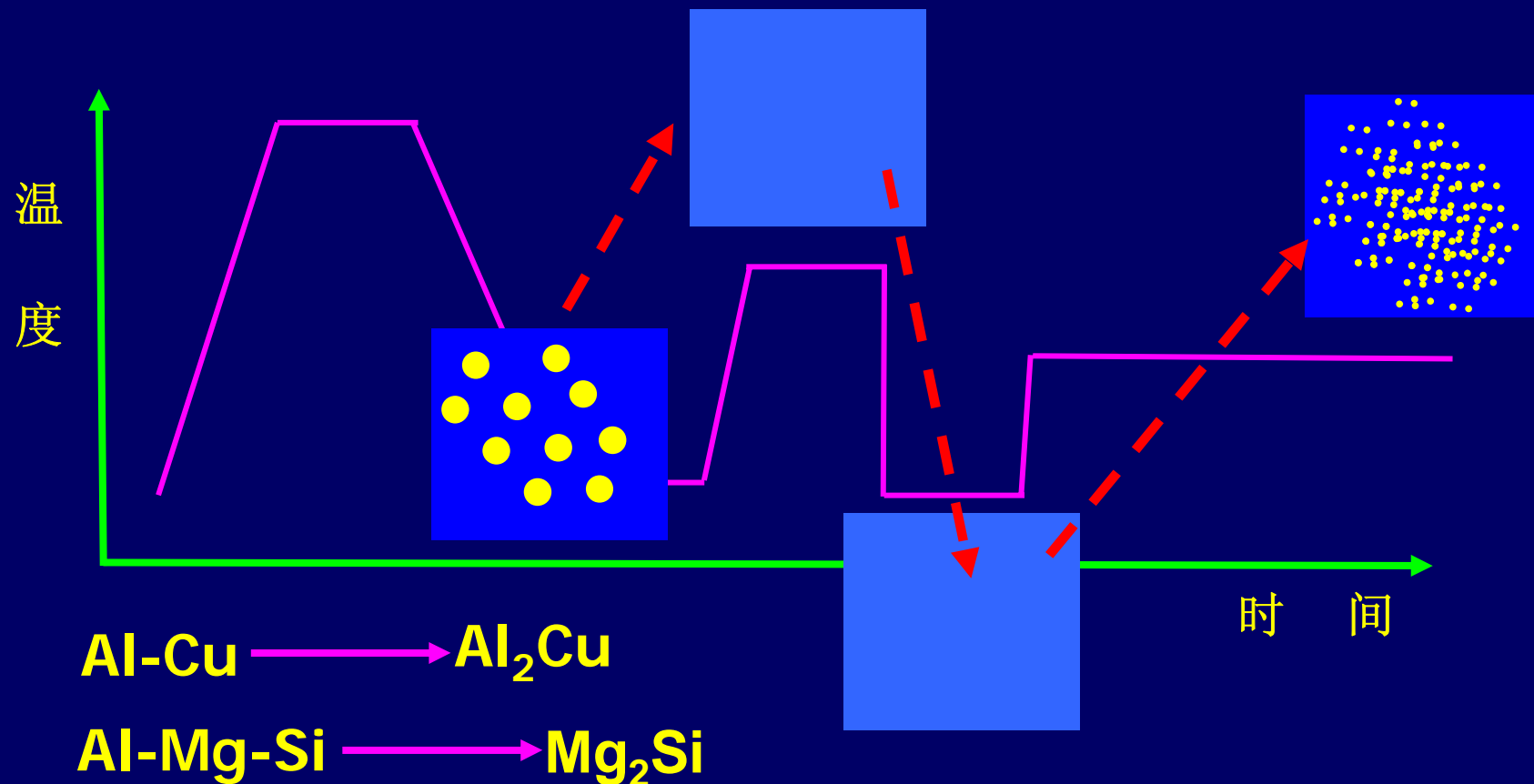
结构材料

有色金属材料

铝及铝合金

合金元素的作用

时效强化



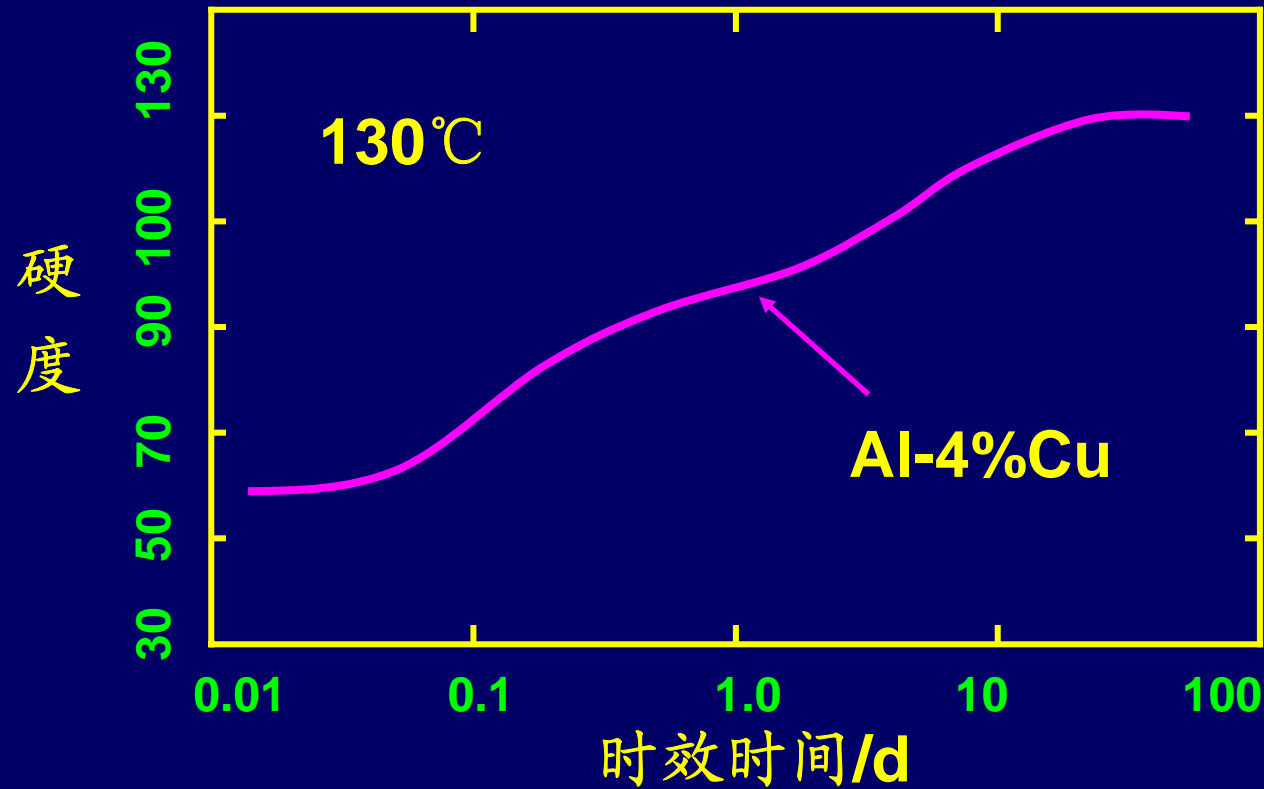
结构材料

有色金属材料

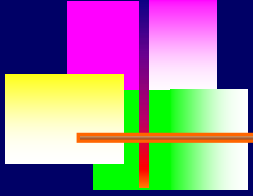
合金元素的作用

时效强化

铝及铝合金



时效处理时间
对Al-4%Cu及
合金硬度的影响



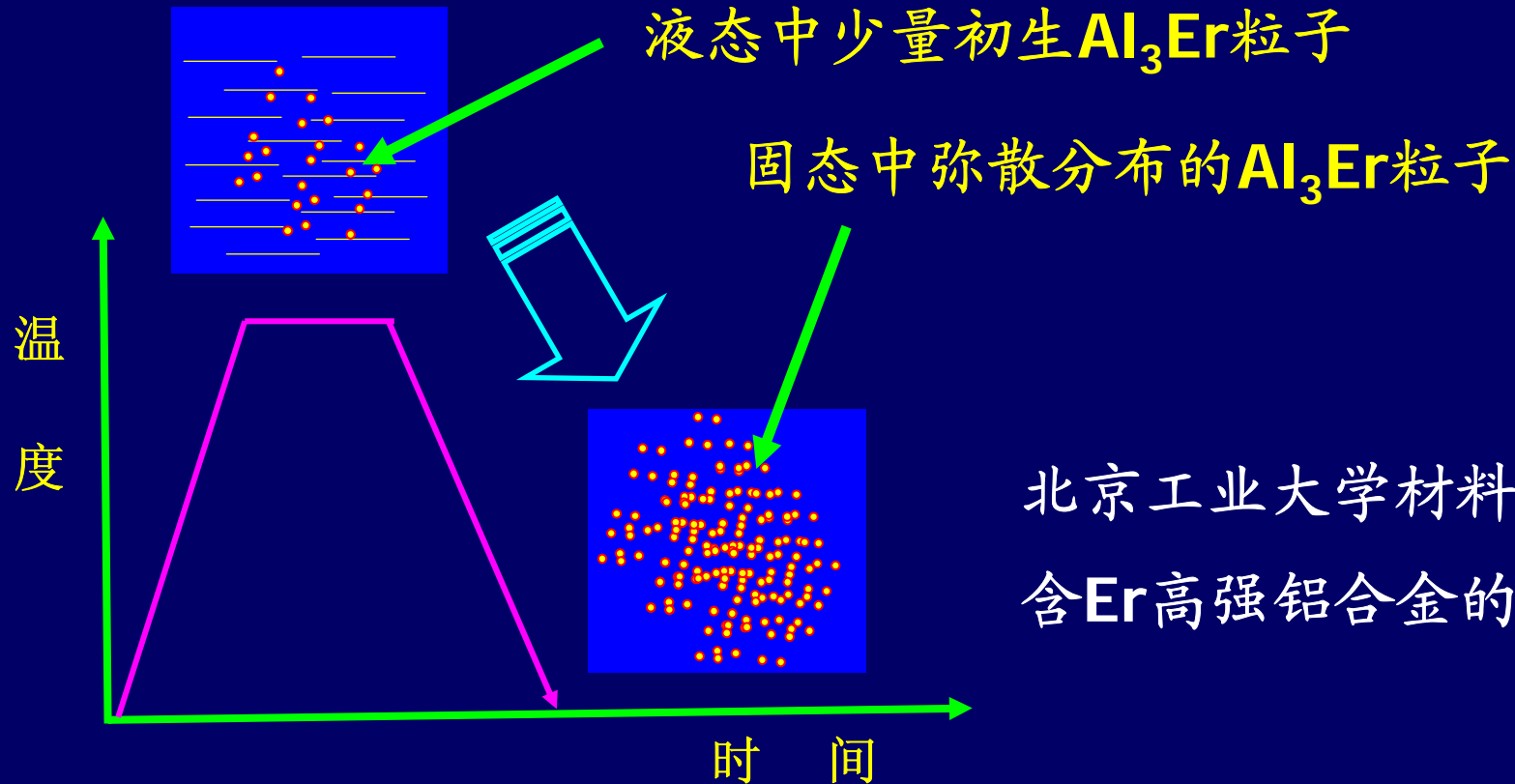
结构材料

有色金属材料

铝及铝合金

合金元素的作用

弥散强化



北京工业大学材料学院
含Er高强铝合金的开发

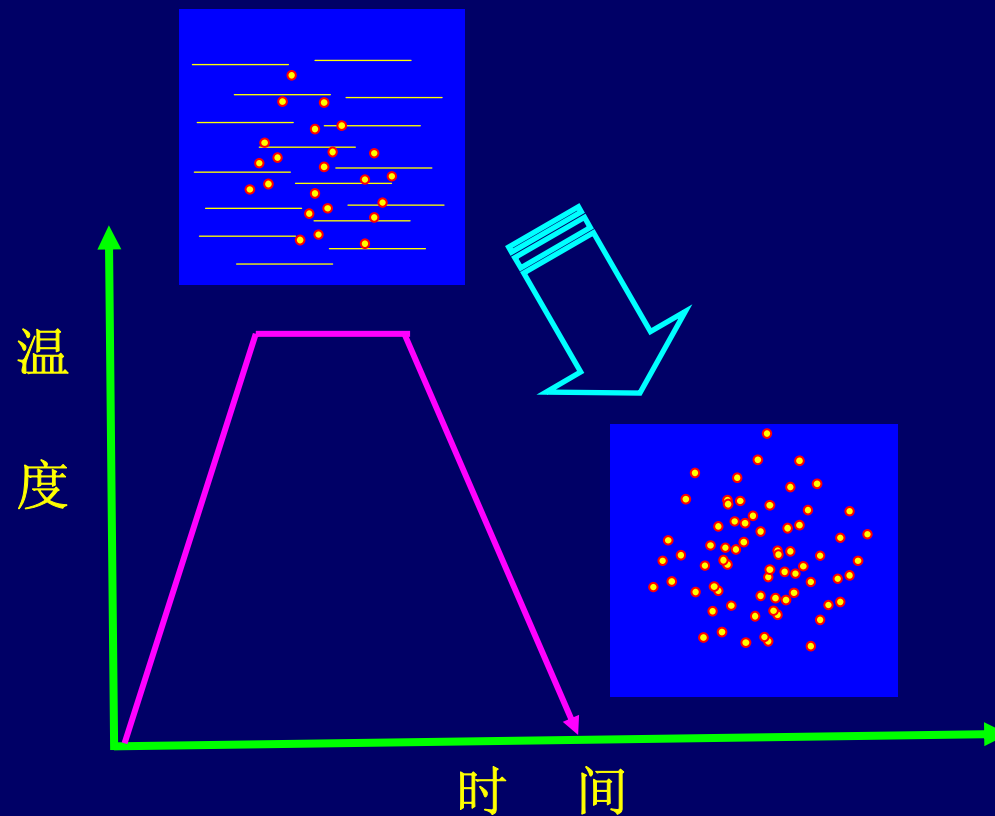
结构材料

有色金属材料

铝及铝合金

合金元素的作用

细晶强化



液态中初生 Al_3Er 粒子成为基体 Al 的形核核心，减少基体晶粒长大的孕育期，从而细化晶粒。

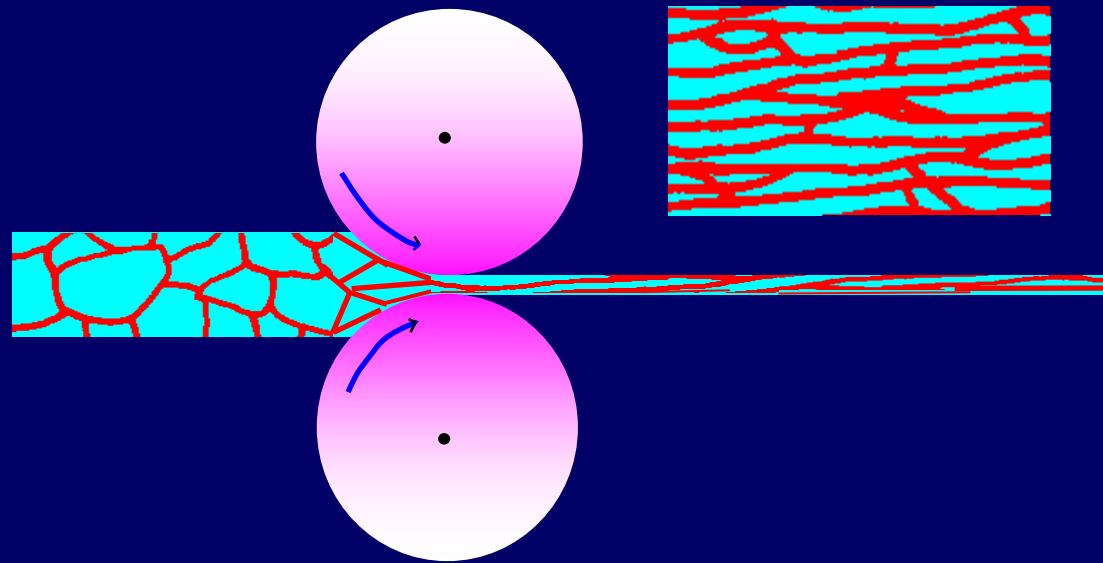
结构材料

有色金属材料

合金元素的作用

细晶强化

铝及铝合金



铝合金随塑性加工量的增大，组织结构发生明显的变化：

等轴晶——带状组织——细晶组织

分类

铝及铝合金

变形铝合金

非热处理型

纯铝: 1×××系列

Al-Mn系: 3×××系列

Al-Si系: 4×××系列

热处理型

Al-Mg系: 5×××系列

Al-Cu系: 2×××系列

Al-Mg-Si系: 6×××系列

Al-Zn-Mg-Cu系: 7×××系列

Al-Li系: 8×××系列

铸造铝合金

非热处理型

纯铝:

Al-Mg系: 如ZL103

Al-Si系: 如ZL102

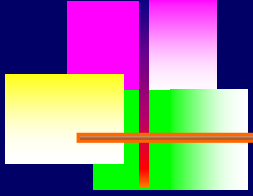
热处理型

Al-Mg系: 如ZL107

Al-Cu系: 如ZL110

Al-Mg-Si系: 如ZL104

Al-Zn-Mg-Cu系: 如ZL305



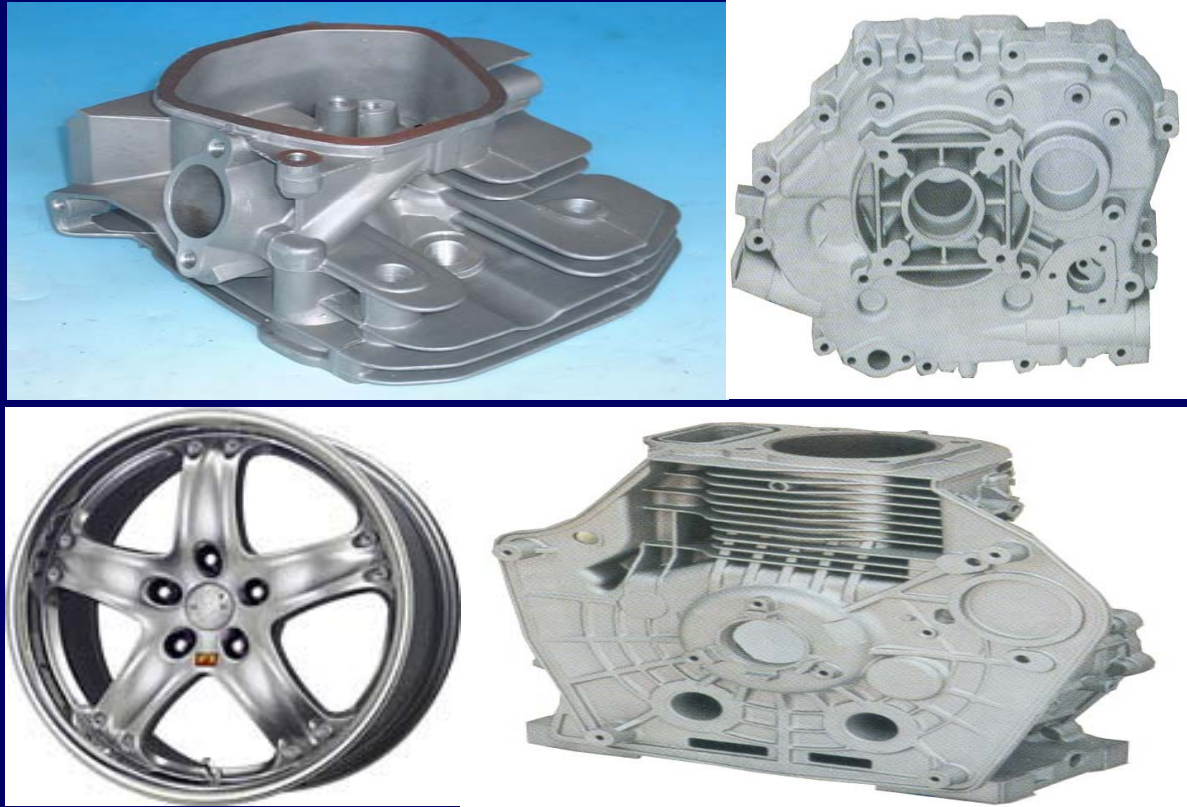
结构材料

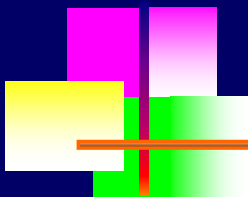
有色金属材料

铝合金的应用

铝及铝合金

铸造铝合金





结构材料

有色金属材料

铝合金的应用

铝及铝合金

变形 铝合金





结构材料

有色金属材料

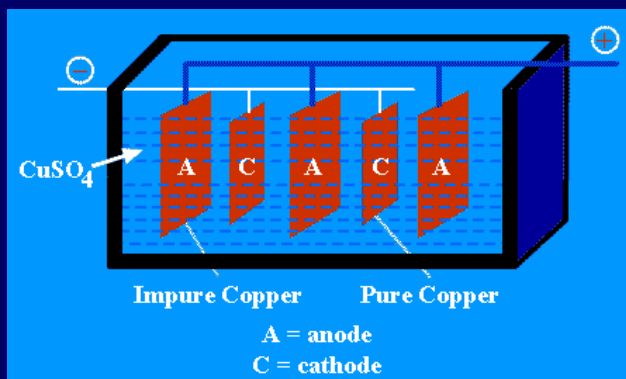
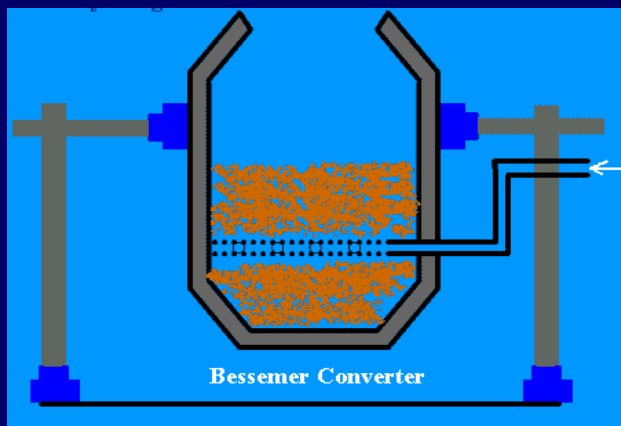
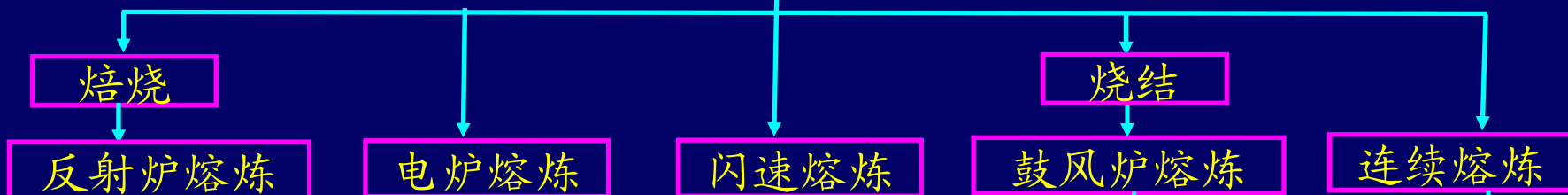
铜及铜合金

铜及铜合金特点

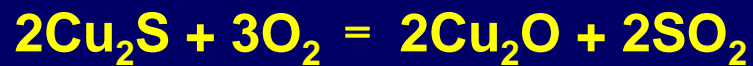
- ✓ 导电、导热性能好、耐腐蚀等，是抗磁材料。
- ✓ 加工性能好。容易冷热成形，铸造铜合金铸造性能好。
- ✓ 具有某些特殊力学性能。比如优良的减摩性和耐磨性高的弹性极限和疲劳强度。
- ✓ 色泽美观。

铜及铜合金

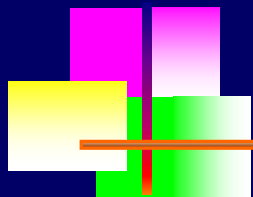
硫化铜精矿



冰铜
吹炼
粗铜
火法精炼
阳极板
电解精炼
电铜



铜的生产过程



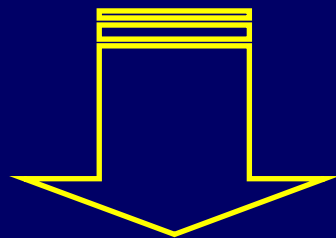
结构材料

有色金属材料

铜及铜合金

纯铜

纯铜为紫色，又称**紫铜**。主要用于制作电导体及配制合金。工业纯铜分为4种：T1、T2、T3、T4。编号越大，纯度越低。



纯铜的强度低，不宜用作结构材料

结构材料

有色金属材料

铜及铜合金

铜合金

铜中加入合金元素后，可提高合金的强度，并保持良好的加工性能。

铜合金的种类



黄铜



青铜



白铜



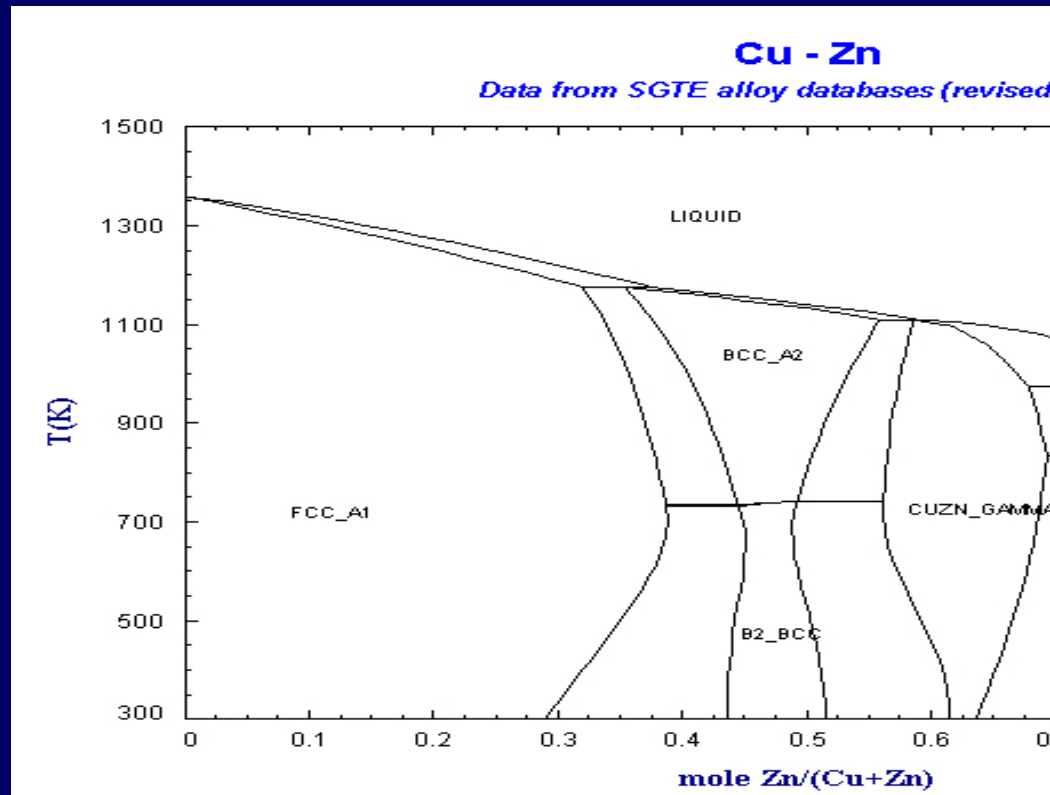
结构材料

有色金属材料

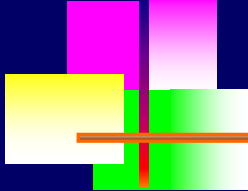
铜合金

黄铜

铜及铜合金



以Zn为主要合金元素。良好的加工性能，优良的铸造性能，耐腐蚀性能也好。



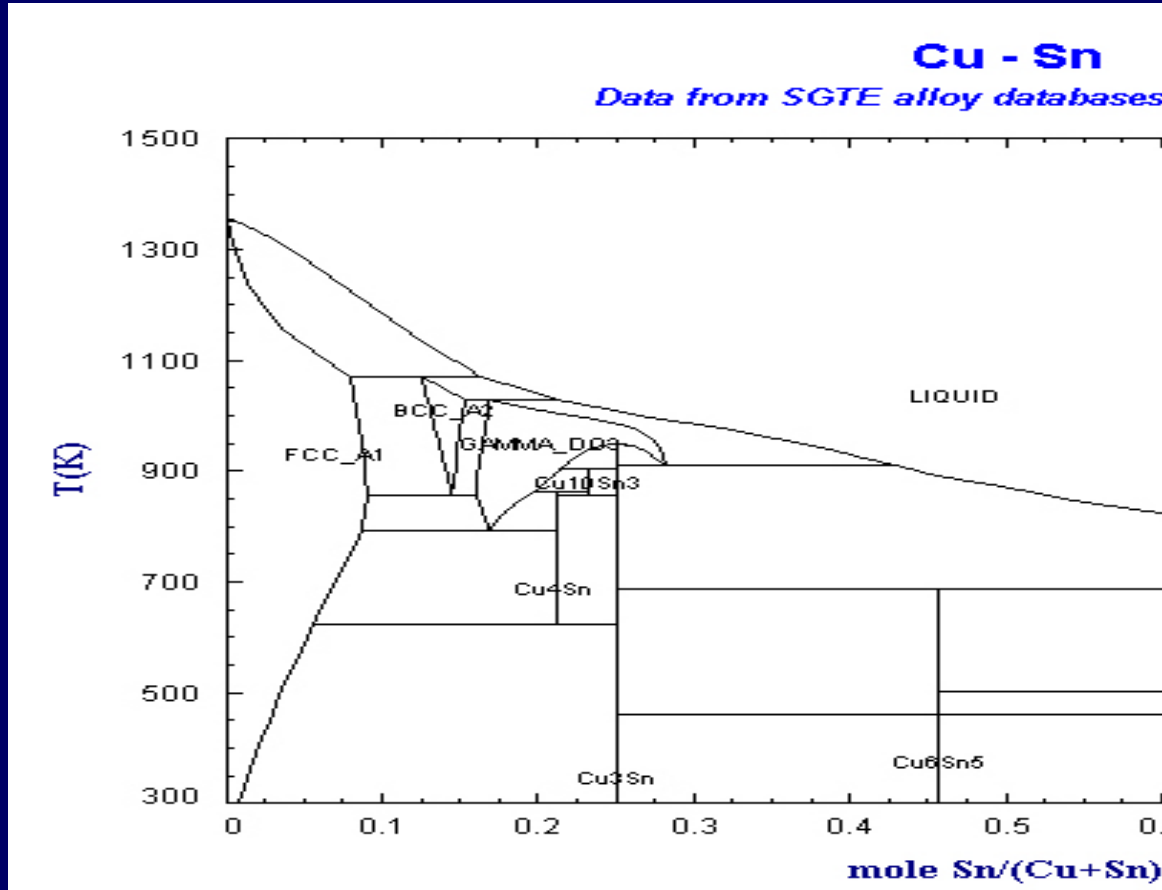
结构材料

有色金属材料

铜合金

青铜

铜及铜合金



以Sn为主要合金元素。用于铸造形状复杂的零件。抗腐蚀性比黄铜还好。

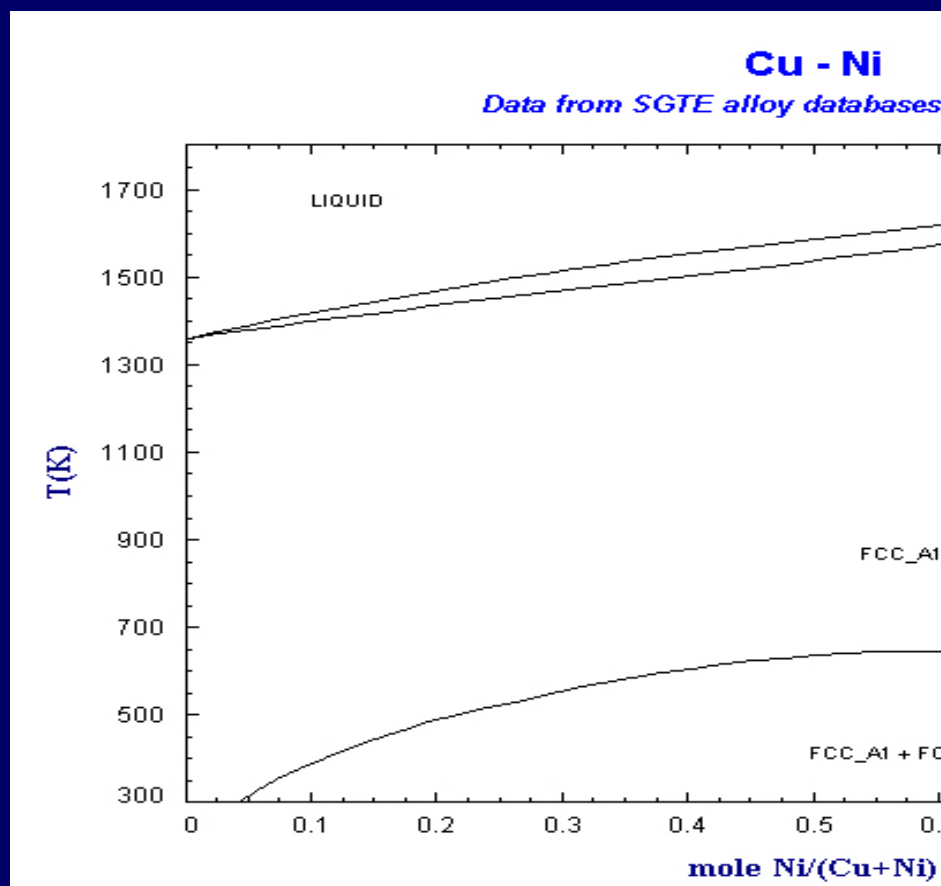
结构材料

有色金属材料

铜合金

白铜

铜及铜合金



以Ni为主要合金元素。

具有较好的强度和塑性，能进行冷加工变形，抗腐蚀性能也好。白铜线是国际上应用比较广泛的一种耐蚀性材料和装饰结构材料，在仪器仪表、机电、化工、卫生和日用五金等工业部门用于制作耐蚀、弹性元件、医疗器械和日用装饰品等。

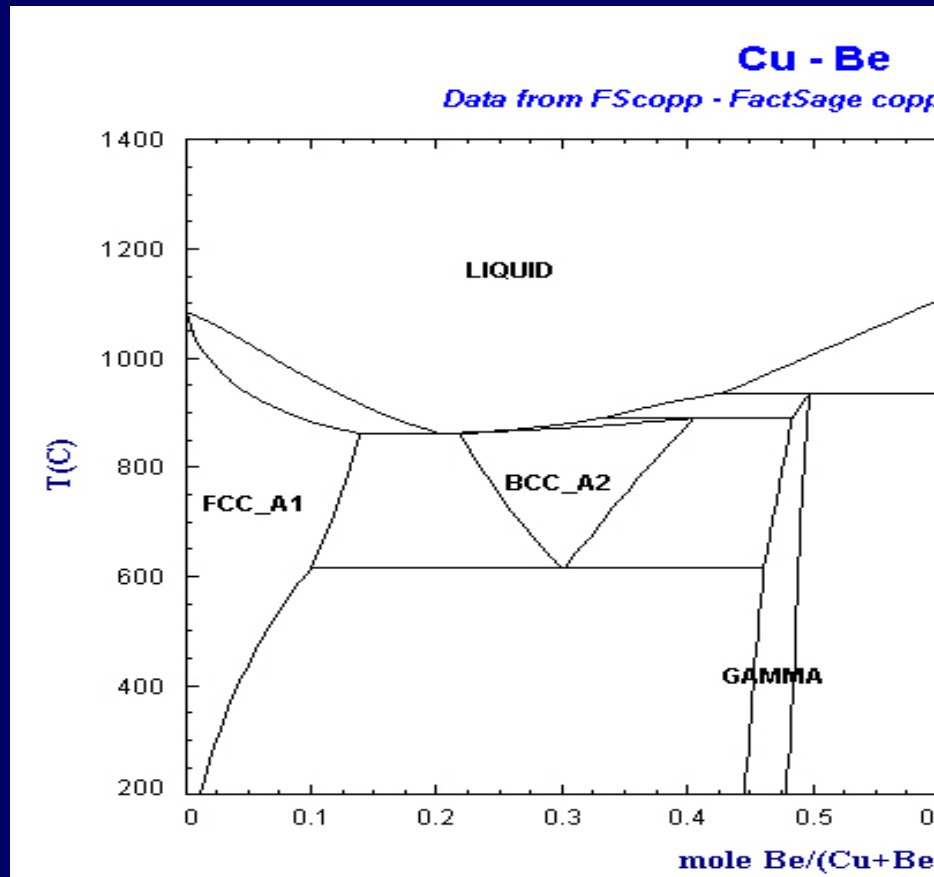
结构材料

有色金属材料

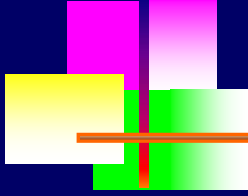
铜合金

铜铍合金

铜及铜合金



属时效析出强化的铜基合金，经淬火时效处理后具有高的强度、硬度、弹性极限，并且稳定性好，具有耐蚀、耐磨、耐疲劳、耐低温、无磁性、导电导热性好等一系列优点。

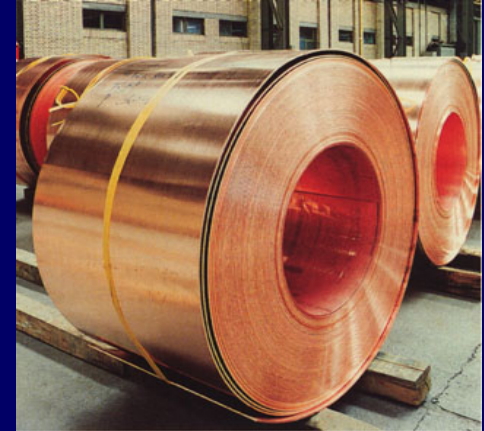


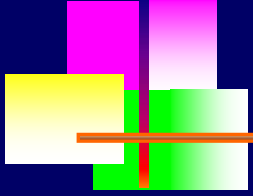
结构材料

有色金属材料

铜合金制品

铜及铜合金





结构材料

有色金属材料

钛及钛合金特点

钛及钛合金

High corrosive resistance

Bio compatible material

Non magnetic property

TITANIUM

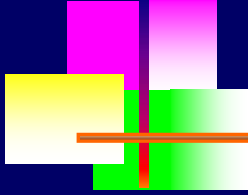
Low specific gravity

High specific strength

加工条件复杂，成本较高。



旋锻机

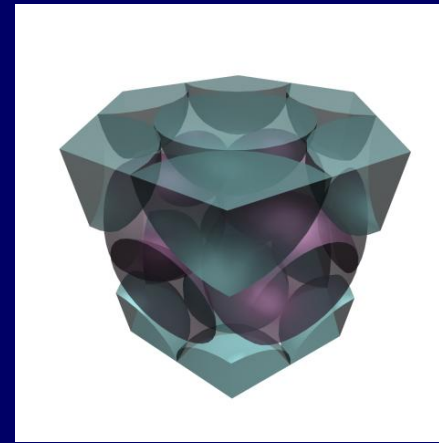
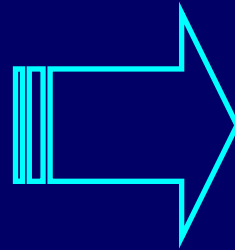
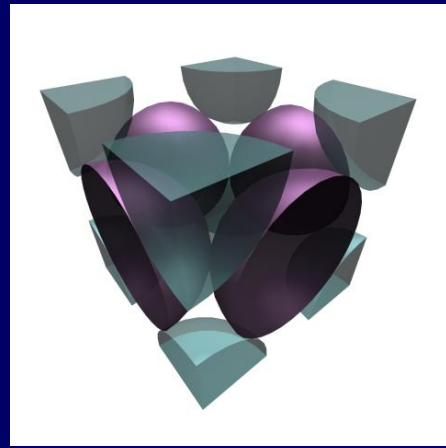


结构材料

有色金属材料

钛及钛合金

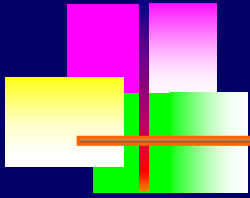
纯钛的晶体结构



$\beta - \text{Ti}$

882.5°C

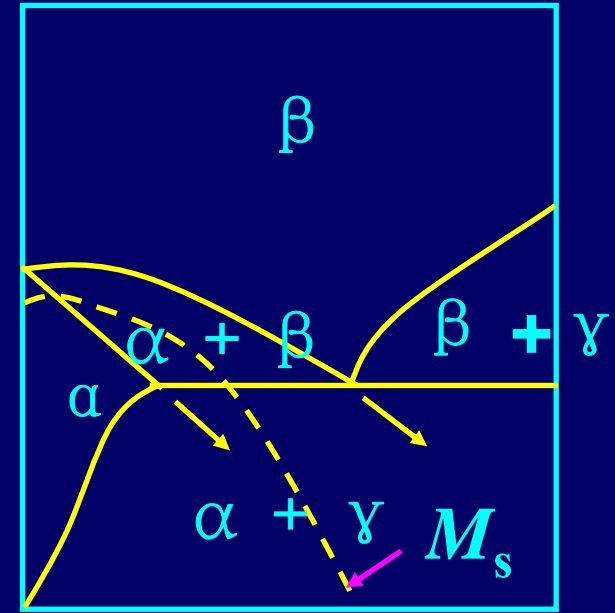
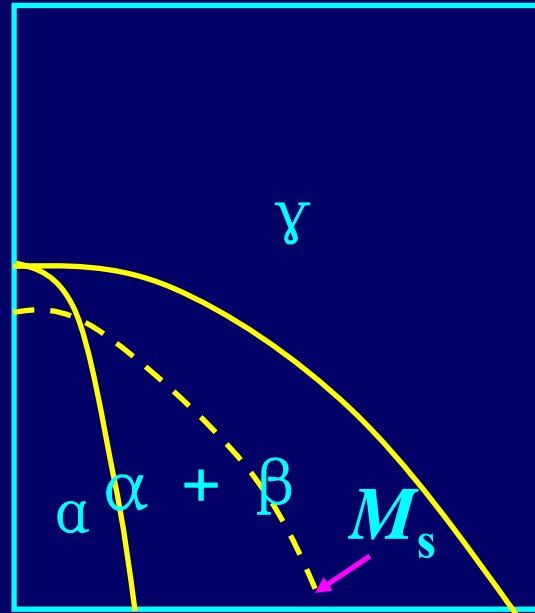
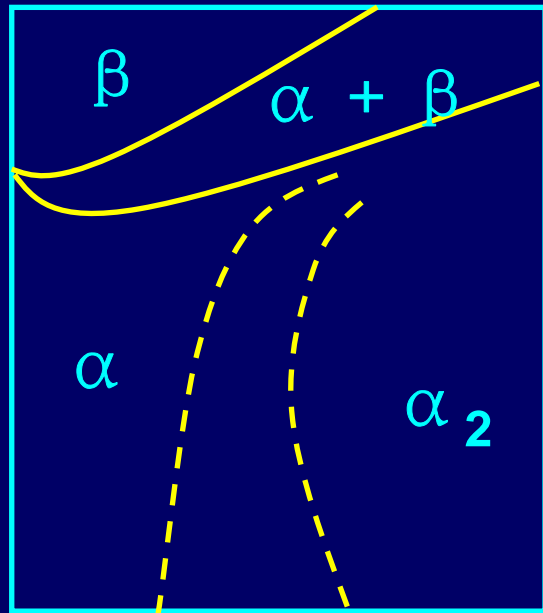
$\alpha - \text{Ti}$



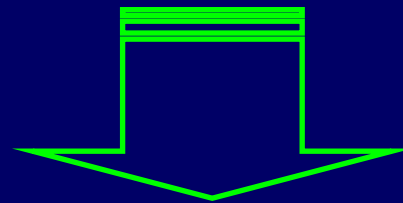
结构材料

有色金属材料

钛及钛合金

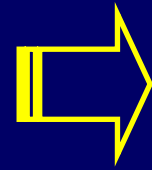


三种类型的钛合金相图 (M_s 为马氏体转变温度)



α 型

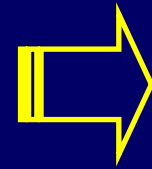
钛中加铝、硼等
 α 稳定元素获得
 $\alpha - \text{Ti}$ 合金。



室温强度较低，但高温强度
很高。抗氧化性、抗蠕变性
以及焊接性能良好。

β 型

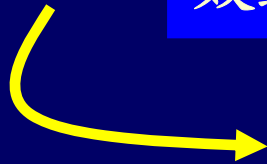
钛中加入钼、铬、
钒等元素后可获得
 $\beta - \text{Ti}$ 合金。



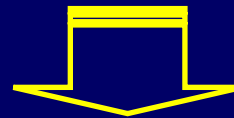
强度高，冲压性能好，
并可通过淬火和时效热处理
获得强化。

$\alpha + \beta$ 型

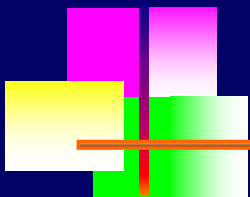
塑性好，容易锻造、压延和冲压，并可通过固溶和时
效进行强化。热处理后的强度可提高**50% - 100%**。



介于 α 和 β 两者之间，可通过热加工和热处理
较大范围内调整显微组织和结构



满足航空材料的使用要求



结构材料

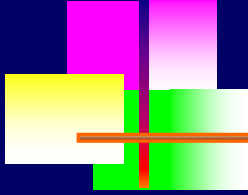
有色金属材料

钛及钛合金

为满足战斗机的使用要求，钛合金取代铝合金，成为机体结构材料的主体。

战斗机机体结构材料用材用量分布

代 机型 首飞 材料类别	第二代	第三代					第四代
	歼8III 1993	新歼 1998	苏-27CK 1977	F-15 1972	F-16 1976	F/A-18A/B 1978	F-22 1997
铝合金	55	85	60	37.3	64	49	15
钛合金	2	2	15	25.8	3	12	41
钢	24	10	10	5.5	3	15	5
其他	19	3	15	31.4	30	24	39



结构材料

有色金属材料

钛及钛合金

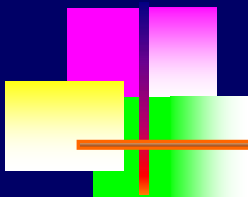
钛合金的应用



镁及镁合金特点

镁及镁合金

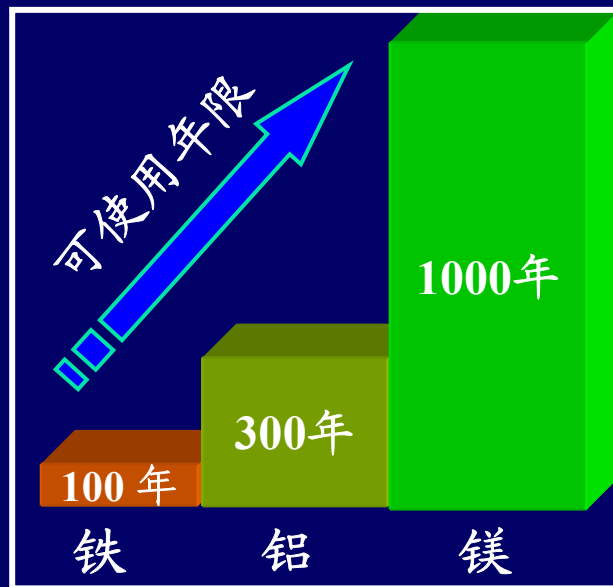
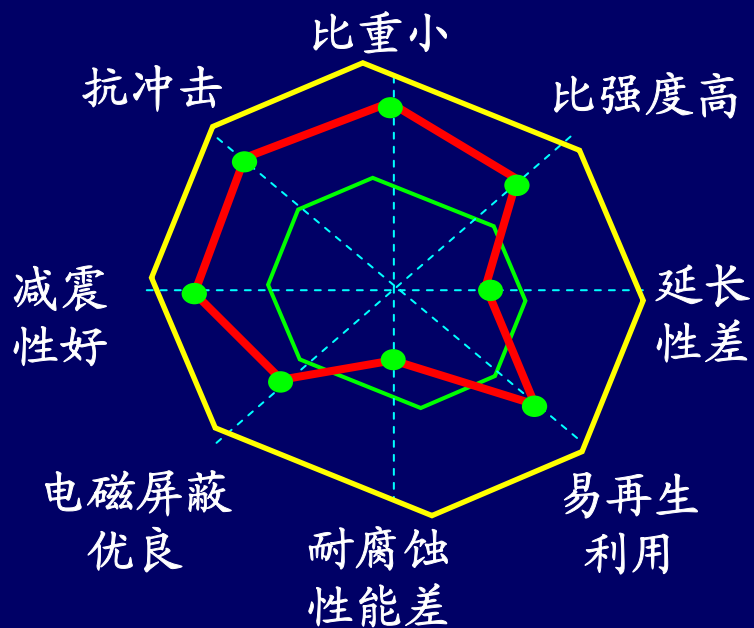
- 比重小：铝的 $\frac{2}{3}$ ，铁的 $\frac{1}{4}$
- 比强度高：比铝合金高50MPa，碳钢的2倍
- 减震性好：阻尼性优于铸铁
- 抗冲击：优于铝合金和软钢
- 切削性好：切削力为铝和软钢的 $\frac{1}{2}$
- 电磁屏蔽优良：可屏蔽频率范围较广
- 易再生利用：可节约资源、保护环境



结构材料

有色金属材料

镁及镁合金



21世纪的绿色工程材料

结构材料

有色金属材料

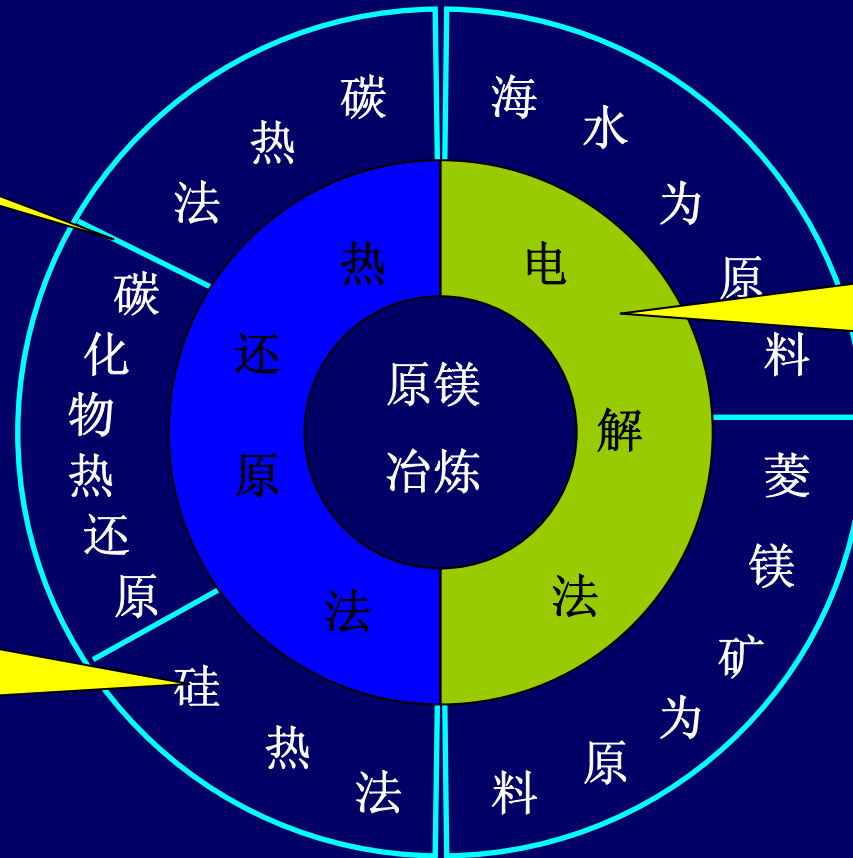
镁及镁合金

原镁冶炼

使用较少

使用广泛，以皮江法为代表

以DOW、I.G.Farben、Magnola工艺为代表

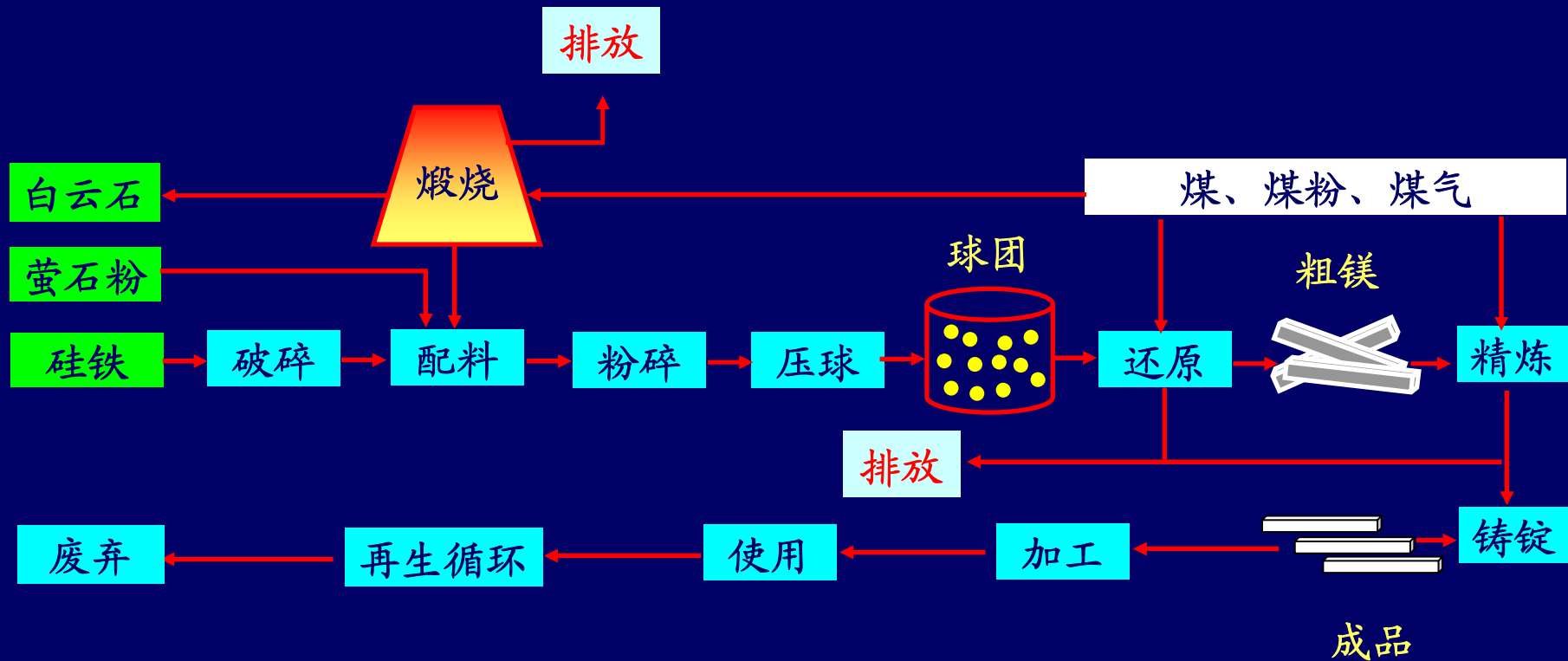


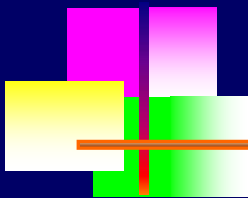
结构材料

有色金属材料

镁及镁合金

皮江法工艺流程





结构材料

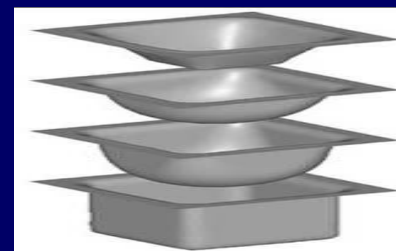
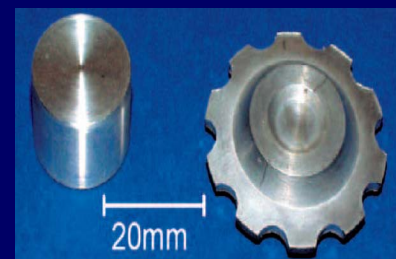
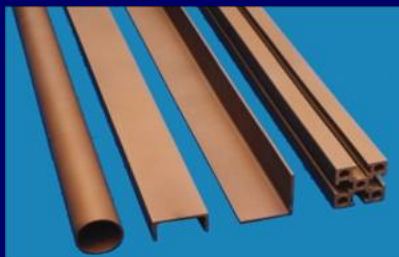
有色金属材料

镁合金的 成形与加工

镁及镁合金

铸造成形:
冷室压铸
热室压铸
重力铸造
低压铸造
.....

变形加工:
挤压
轧制
锻造
冲压
.....



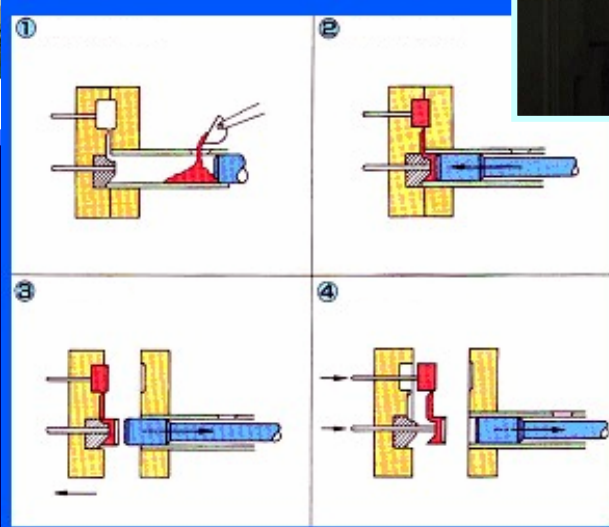
结构材料

有色金属材料

铸造成形

冷室压铸

镁及镁合金



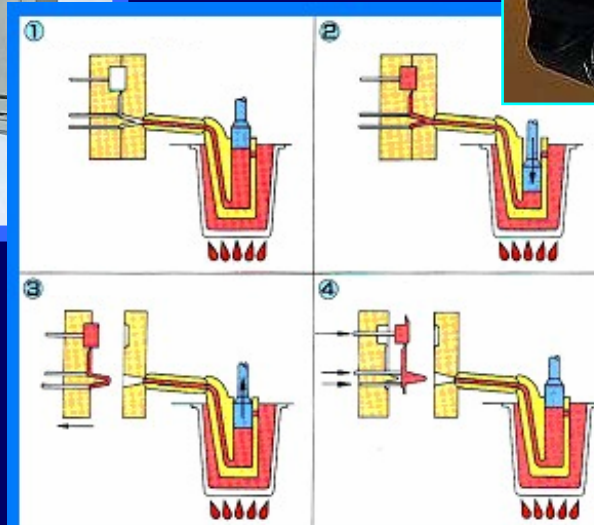
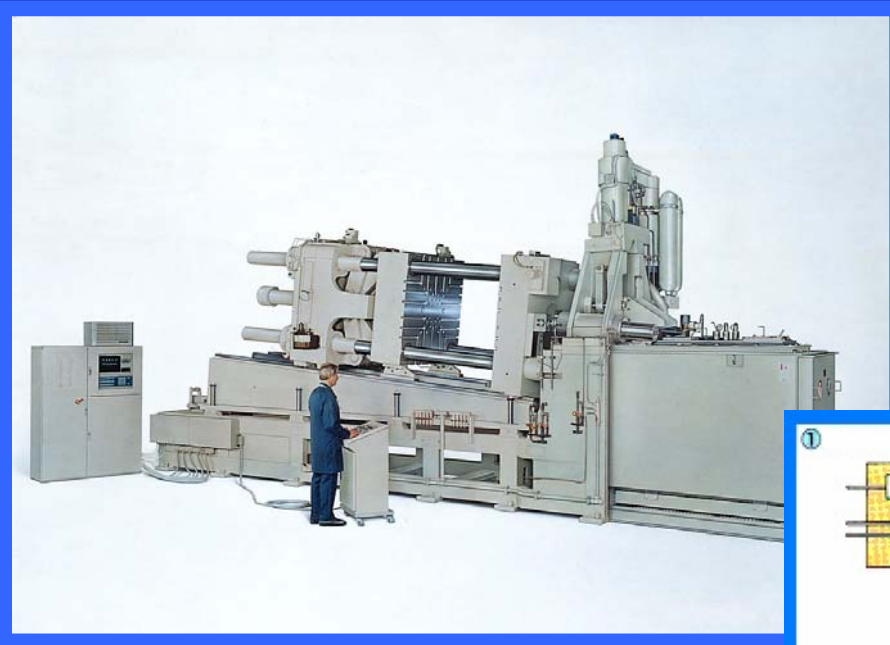
结构材料

有色金属材料

铸造成形

热室压铸

镁及镁合金



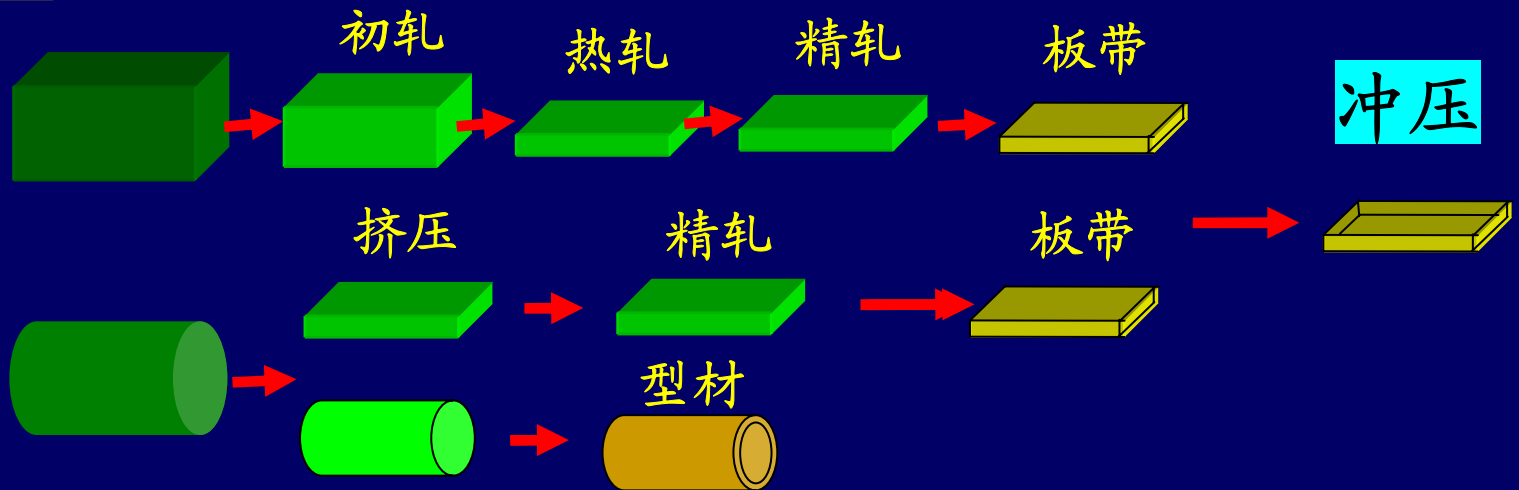
结构材料

有色金属材料

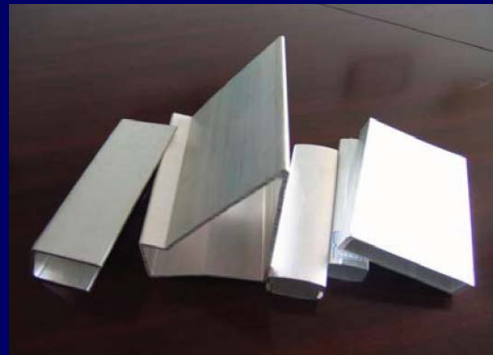
镁及镁合金

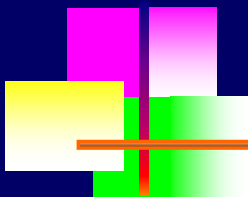
变形加工

轧制



挤压



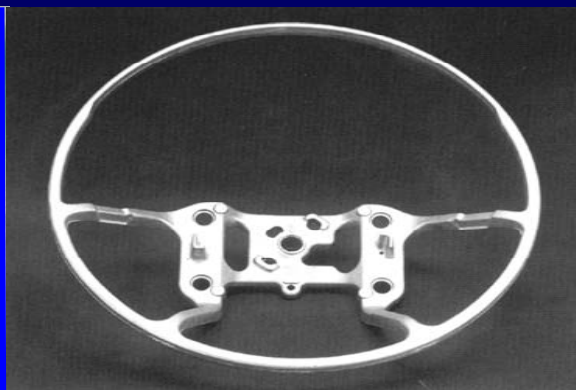


结构材料

有色金属材料

应用现状

镁及镁合金



结构材料

有色金属材料

发展方向

镁及镁合金

高温抗蠕变

Mg-Al、Mg-Zn、Mg-Zn-Al、
Mg-RE系列固溶、析出和弥散
及复合强化

高韧性

降低Al含量或添加适量Li
均可提高韧性

高强度

稀土强化、镁基复合强化
快速凝固粉末冶金
高挤压比及等通道角挤压

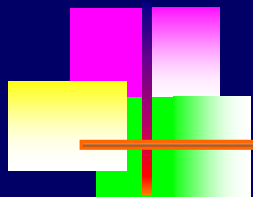
镁合金

强耐蚀性

控制成分，形成均匀组织
物理和化学方法进行表面处理
阳极氧化工艺

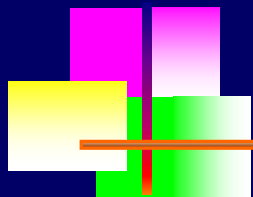
变形镁合金

常规、超轻、快速凝固三类
主要含有Al、Mn、RE、Y、Zr
和Zn等元素



主要内容:

- 陶瓷的物质结构
- 陶瓷的晶体缺陷
- 陶瓷的性能特点
- 陶瓷的加工方法
- 结构陶瓷的种类
- 陶瓷的应用



结构材料

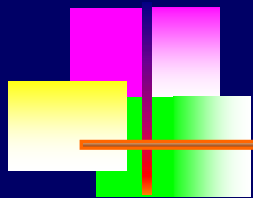
陶瓷材料

陶瓷的物质结构

陶瓷材料的相组成

——晶体相、玻璃相、气相（气孔）

晶体相是陶瓷材料最主要的组成相，主要是某些固溶体或化合物，其结构、形态、数量及分布决定了陶瓷材料的特性和应用。晶体相又分为主晶相、次晶相和第三相。陶瓷中晶体相主要有含氧酸盐（硅酸盐、钛酸盐等）、氧化物（ MgO 、 Al_2O_3 ）、非氧化物（ SiC ， Si_3N_4 ）等。



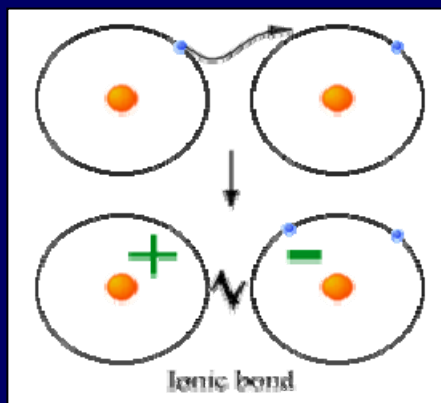
结构材料

陶瓷材料

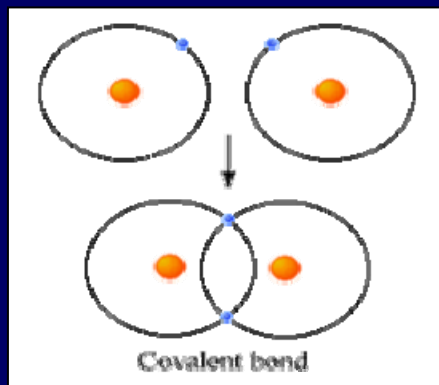
陶瓷的物质结构

陶瓷材料的结合键

陶瓷材料的组成相的结合键为**离子键**（ MgO 、 Al_2O_3 ）、**共价键**（金刚石、 Si_3N_4 ）以及离子键与共价键的**混合键**。



离子键



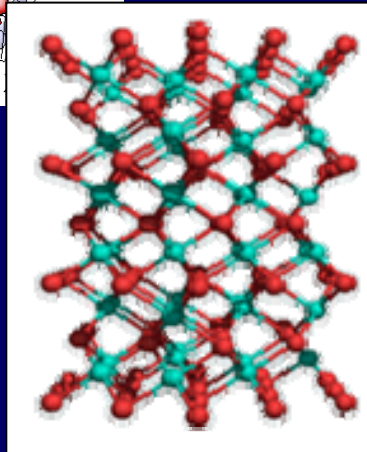
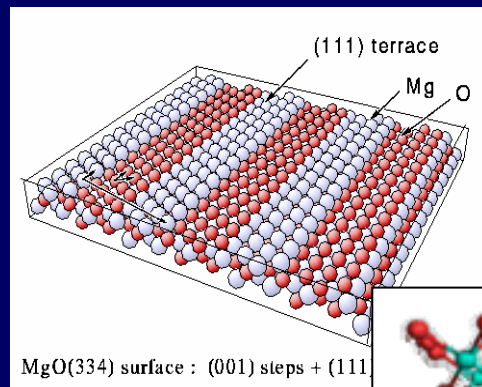
共价键

结构材料

陶瓷材料

陶瓷的物质结构

以离子键结合的晶体称为离子晶体。离子晶体在陶瓷材料中占有很重要的地位。



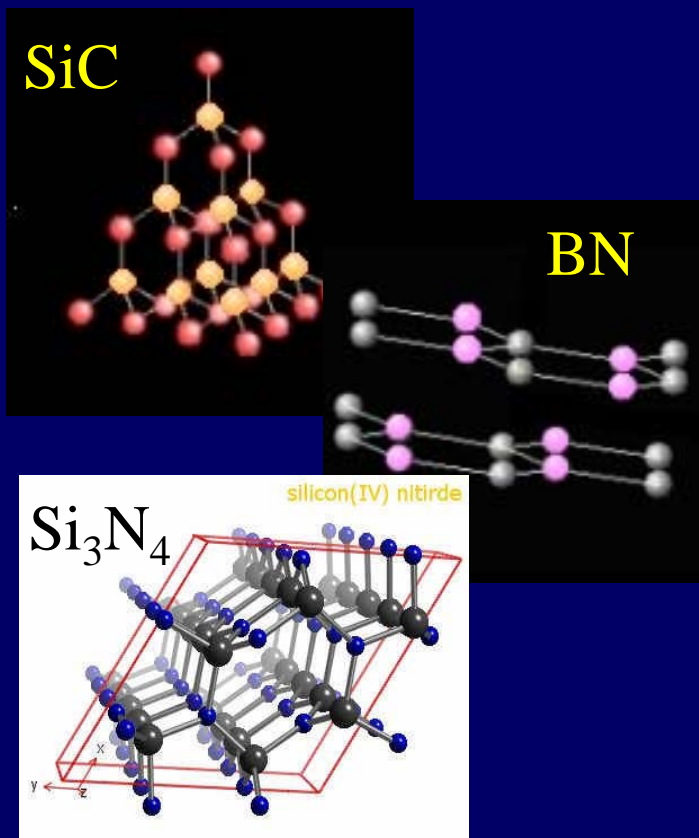
它具有强度高、硬度高、熔点高等特点。但这样的晶体脆性大，无延展性，热膨胀系数小，固态时绝缘，但熔融态可导电等特点。金属氧化物晶体主要以离子键结合，一般为透明体。

结构材料

陶瓷材料

陶瓷的物质结构

以共价键结合的晶体称为共价晶体。共价晶体具有方向性和饱和性，因而共价键晶体的原子堆积密度较低。

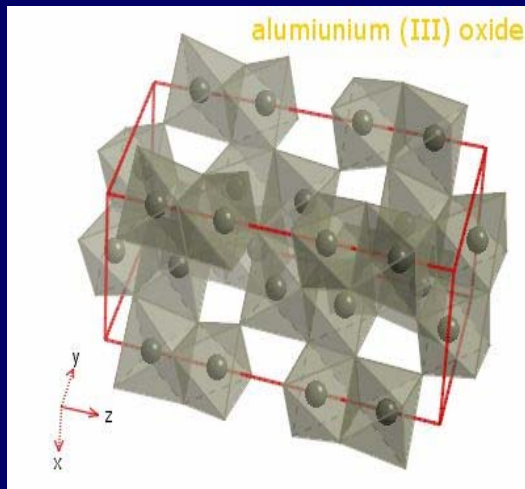


共价键晶体具有强度高、硬度高、熔点高、结构稳定等特点。但它脆性大，无延展性，热膨胀系数小，固态、熔融态时都绝缘。最硬的金刚石、SiC、Si₃N₄、BN等材料都属于共价晶体。

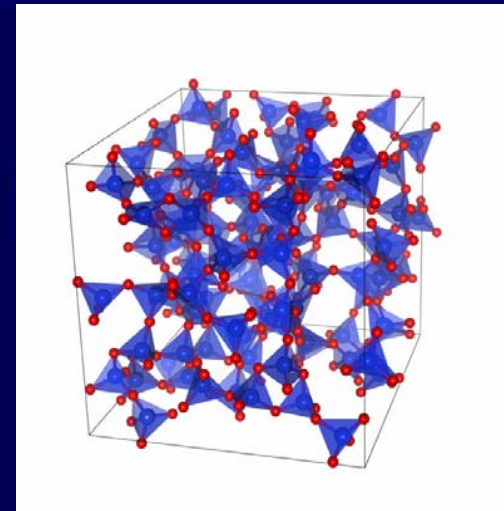
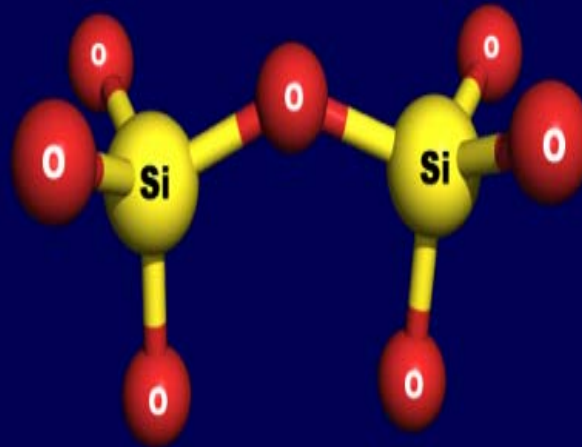
结构材料

陶瓷材料

陶瓷的物质结构



Al₂O₃结构



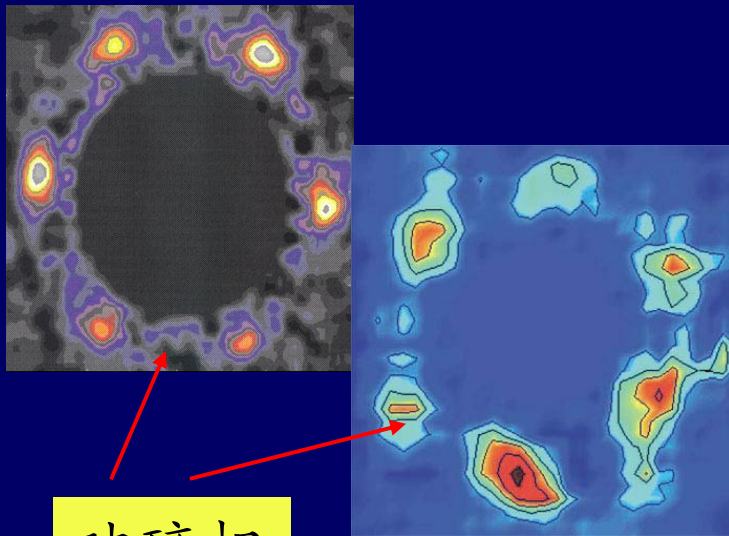
硅氧四面体是硅酸盐陶瓷中最基本的结构单元

结构材料

陶瓷材料

陶瓷的物质结构

玻璃相的作用是将分散的晶体相粘结起来，填充晶体之间的空隙，提高材料的致密度；降低烧成温度，加快烧结过程；阻止晶体转变、抑止晶粒长大。



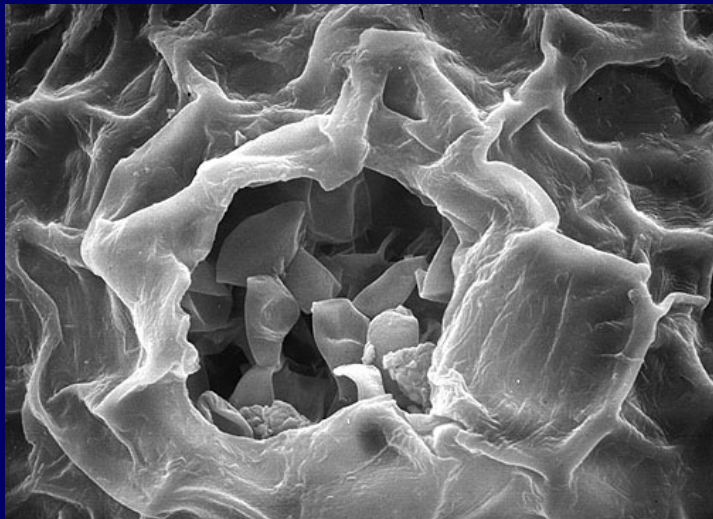
玻璃相

玻璃相是陶瓷材料中原子不规则排列的组成部分，其结构类似于玻璃。

玻璃相对陶瓷强度、介电常数、耐热性能是不利的。

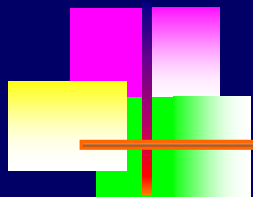
陶瓷的物质结构

气相（气孔）



陶瓷中气孔主要是坯体各成分在加热过程中单独或互相发生物理、化学作用所生成的空隙。这些空隙可由玻璃相来填充，还有少部分残留下来形成气孔。

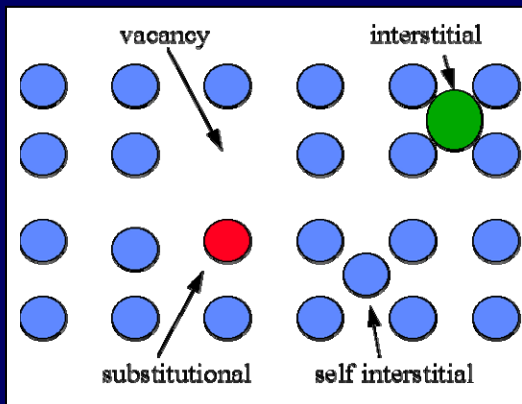
气孔对陶瓷的性能是不利的。它降低材料的强度，是造成裂纹的根源。



陶瓷材料的晶体缺陷

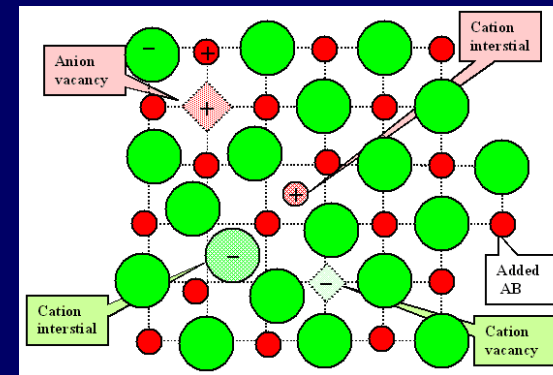
陶瓷材料主要是**离子键**和**共价键**。这两种结合键造成位错的可动性降低。当位错滑移时，离子键中同号离子相斥，导致离子键断裂；而共价键的方向性和饱和性，具有确定的键长和键角，位错的滑移也会导致共价键的破断。

点缺陷



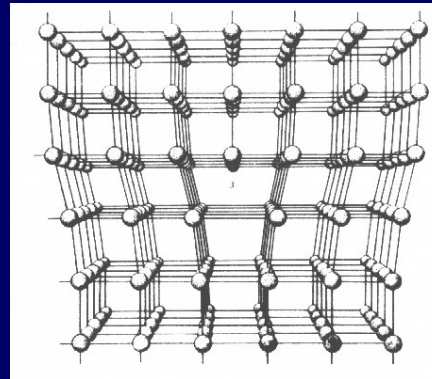
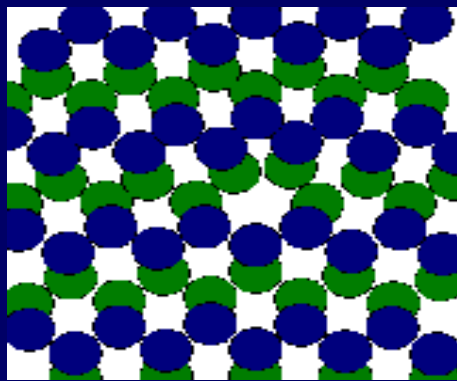
陶瓷材料晶体中存在的置换原子、间隙原子和空位等缺陷称之为**点缺陷**。陶瓷材料的很多性质如导电性与点缺陷有直接关系。

此外，陶瓷材料的烧结、扩散等物理、化学过程也与点缺陷有关。

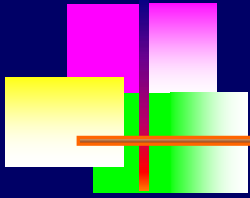


线缺陷

位错是陶瓷材料晶体中存在的线缺陷。陶瓷材料中位错形成所需要的能量较大，因此，不易形成位错。陶瓷材料中位错密度很低。



位错也是一种线缺陷



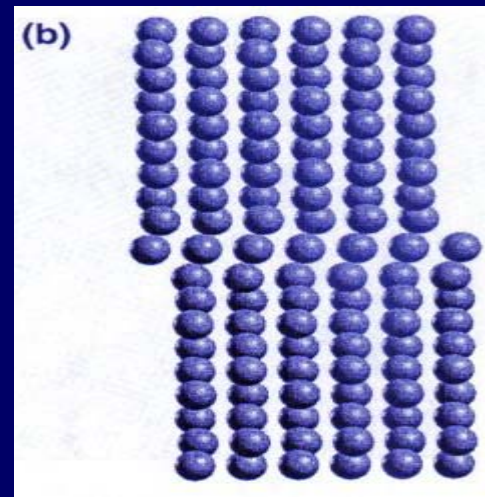
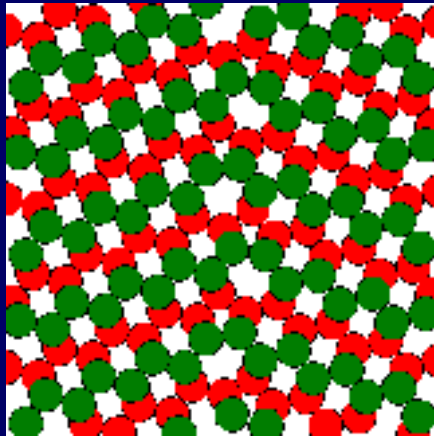
结构材料

陶瓷材料

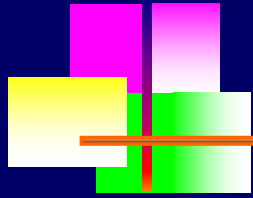
陶瓷的晶体缺陷

面缺陷

陶瓷材料一般是多晶材料。多晶材料中存在的**晶界**和**亚晶界**就陶瓷材料中的**面缺陷**。



面缺陷



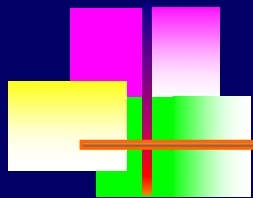
结构材料

陶瓷材料

陶瓷的晶体缺陷

我们知道晶粒细化可以提高材料的强度。晶界对金属材料 and 陶瓷材料强度的提高作用机理是不同的。

对金属材料来说，晶界阻碍位错的运动，从而强化了材料；而对陶瓷材料来说，利用晶界两侧晶粒取向的不同来阻止裂纹的扩展，提高强度。



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的性能特点

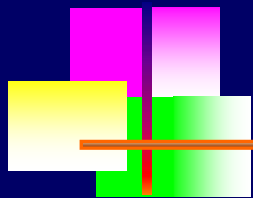
力学性能

硬度

陶瓷的硬度很高，多为 $1000\text{Hv} \sim 1500\text{Hv}$ （普通淬火钢的硬度 $500 \sim 800\text{Hv}$ ）。陶瓷硬度高的原因是离子晶体中离子堆积密度大、以及共价晶体中电子云的重叠程度高引起的。

刚度

陶瓷的刚度很高。刚度是由弹性模量衡量的，而弹性模量又反映其化学键的键能。离子键和共价键的键能都要高于金属键，因此陶瓷材料的弹性模量要高于金属材料。



结构材料

陶瓷材料

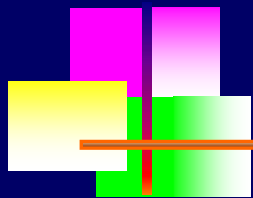
陶瓷的性能特点

力学性能

强度

陶瓷材料的强度取决于键的结合力，理论强度很高。但陶瓷中由于组织的不均匀性，内部杂质和各种缺陷的存在，使得陶瓷材料的实际强度要比理论强度低100多倍。

陶瓷材料的强度也受晶粒大小的影响。晶粒越细，强度越高。此外，陶瓷材料一般具有优于金属材料的高温强度，高温抗蠕变能力，且有很高的抗氧化性。常用于高温材料。



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的性能特点

力学性能

塑性与韧性

陶瓷材料的塑性和韧性较低，这是陶瓷材料最大的弱点。

陶瓷材料受到载荷时在不发生塑性变形的情况下，就发生断裂。断裂是裂纹形成和扩展的过程。陶瓷内部和表面所产生的微裂纹，由于裂纹尖端的应力集中，内部裂纹在受到外应力时扩展很快，这是导致陶瓷材料断裂的根本原因。

陶瓷的性能特点

热学性能

热容

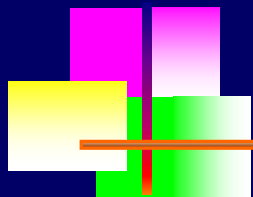
陶瓷材料在低温下热容小，在高温下热容增大。

熔点

陶瓷材料由离子键和共价键结合，因此具有较高的熔点。

热膨胀

陶瓷材料的热膨胀系数小，这是由晶体结构和化学键决定的。一般为 $10^{-5} \sim 10^{-6}/\text{K}$ 。



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的性能特点

电学性能

陶瓷材料是良好的绝缘体。可用于隔电的绝缘材料；陶瓷还具有介电特性，可作为电器的介质。陶瓷的介电损耗很小，可大量制造高频、高温下工作的器件。

光学性能

陶瓷材料由于晶界和气孔的存在，一般是不透明的。可以通过烧结方法的改变和控制晶粒的大小，制备出透明的氧化物陶瓷。

结构材料

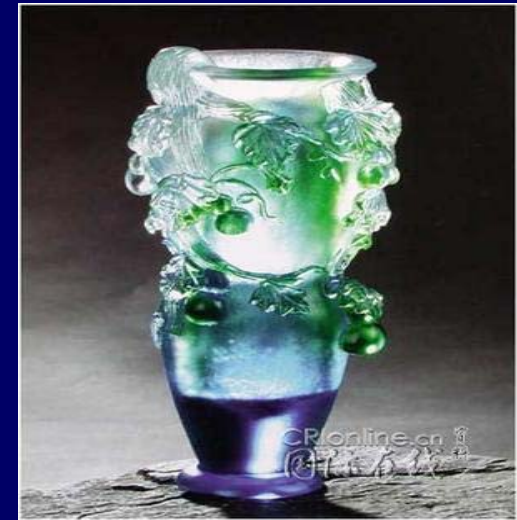
陶瓷材料

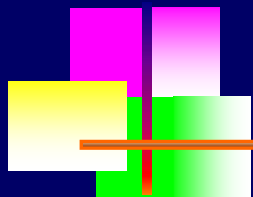
陶瓷的加工方法

配料

成形

煅烧





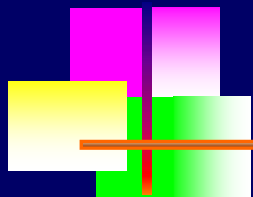
结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

结构陶瓷的种类

- ① 氧化物结构陶瓷
- ② 碳化物结构陶瓷
- ③ 氮化物结构陶瓷



结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

氧化物结构陶瓷

特点：化学稳定性好、抗氧化性强、熔融温度高、高温强度高。

Al_2O_3 陶瓷

ZrO_2 陶瓷

BeO 陶瓷

MgO 陶瓷

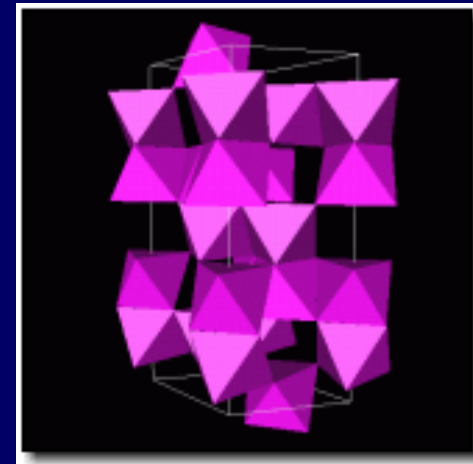
结构材料

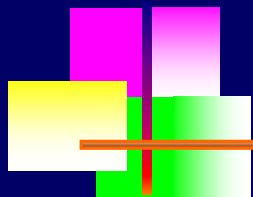
陶瓷材料

结构陶瓷的种类

Al_2O_3 陶瓷

Al_2O_3 陶瓷又称高铝陶瓷，主要成分是 Al_2O_3 和 SiO_2 。主晶相为刚玉（ $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ ），随着 SiO_2 质量百分数的增加，还会出现莫来石和玻璃相。根据陶瓷坯中主晶相的不同，分为刚玉瓷、刚玉-莫来石瓷和莫来石瓷。 Al_2O_3 有三种结晶形态，即 α 、 β 、 γ 型。 α 型是高温型，而 γ 型是低温型。





结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

Al_2O_3 陶瓷的性能及应用

1. 强度高
2. 硬度高：机械加工磨料、磨具、切削工具等
3. 熔点高、抗腐蚀：耐火材料、炉管、热电偶保护套等



结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

Al_2O_3 陶瓷的性能及应用

4. 化学稳定性好: 坩埚、人体关节、人工骨骼
5. 电绝缘性好: 基板、火花塞、电路外壳
6. 光学性能好: 制成透光材料、微波整流罩窗口、激光振荡元件等



坩埚



氧化铝陶瓷基板

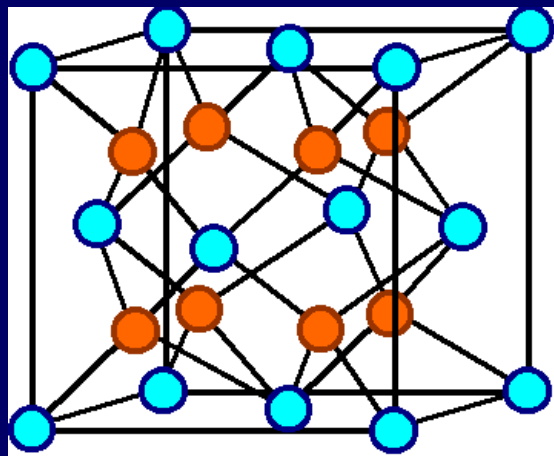
结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

ZrO₂陶瓷

ZrO₂陶瓷有三种晶型：常温下是单斜晶系，1000度以上为四方晶系，到2300度以上又转变成立方晶系。



由单斜向四方的转变是可逆的，并伴随有7%的体积变化。导致陶瓷在烧结时容易开裂，为此，要加入适量的稳定剂，如Y₂O₃。

结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

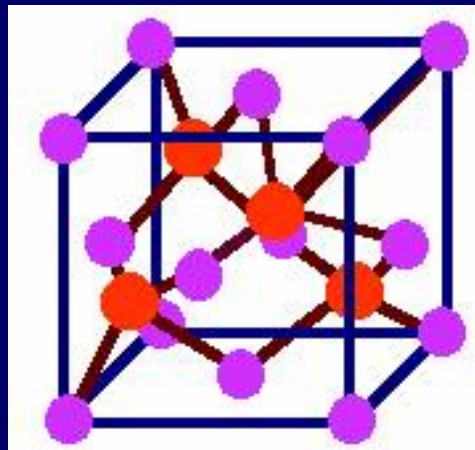
ZrO₂陶瓷的应用

ZrO₂陶瓷的特点是热导率小，是理想的高温绝热材料。化学稳定性好，能抵抗酸性或中性熔渣的侵蚀，可用作特种耐火材料；硬度高，可制作冷成型工具、整形模、切削工具、剪刀等；强度高、韧性好，可制作发动机构件等。



BeO陶瓷

BeO晶体无色，属六方晶系，在固态下无晶型转变，结构稳定。



BeO陶瓷的导热系数大，线膨胀系数不大，抗热震性高，高温电绝缘性好，电导率低，介电常数高；硬度与 Al_2O_3 差不多，化学稳定性好，是抵抗炭还原作用最强的一种氧化物。

结构材料

陶瓷材料

结构陶瓷的种类

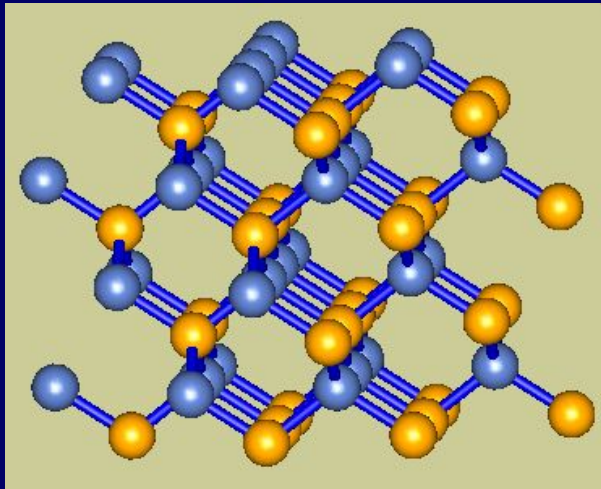
MgO陶瓷

耐高温，抗金属及碱性熔渣腐蚀，可以用作坩埚冶炼高纯度Fe、Mo、Cu、Mg等。也可用于高温热电偶保护套等。



碳化物结构陶瓷

特点：高耐火度、高硬度、高耐磨性。



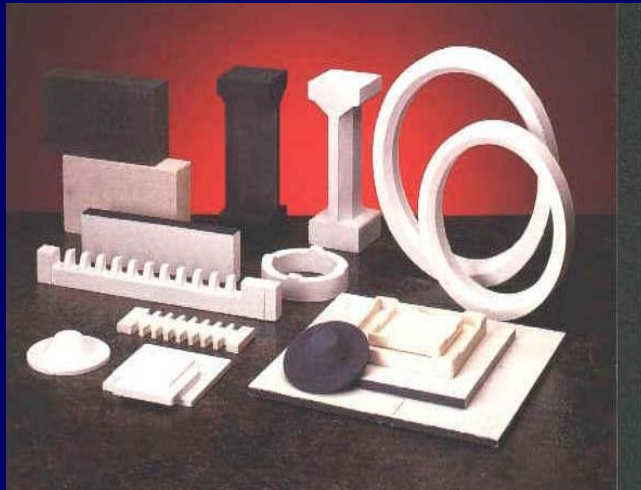
SiC陶瓷有两种晶体结构：
 α -SiC 和 β -SiC。前者属六方晶系，是高温稳定相；后者属等轴晶系，是低温稳定相。

结构材料

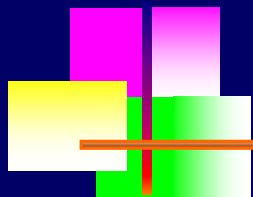
陶瓷材料

结构陶瓷的种类

SiC陶瓷的莫氏硬度13，在1400度的高温下仍能保持相当高的弯曲强度；SiC陶瓷有很高的热传导能力，抗蠕变性能好，对酸性熔体有很强的抵抗力，但不抗强碱。



SiC陶瓷主要用作高温结构材料。如火箭尾喷管的喷嘴，热电偶套管等高温零件。还可用于高温下热交换器。



结构材料

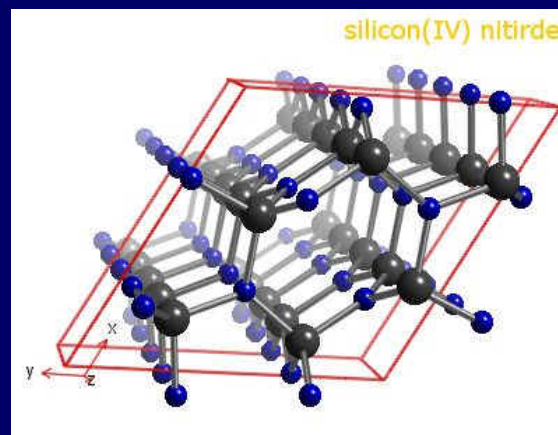
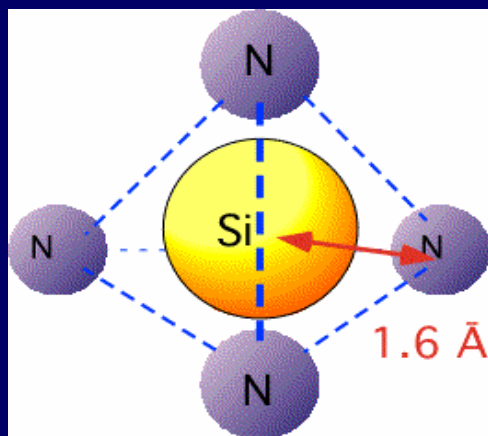
陶瓷材料

结构陶瓷的种类

氮化物结构陶瓷

特点：高耐火度、高硬度、高耐磨性。

Si_3N_4 陶瓷是强共价键材料，原子结合力强，属六方晶系。

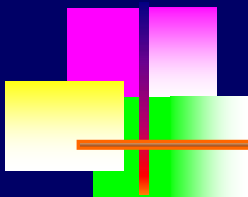


Si_3N_4 陶瓷的性能特点

Si_3N_4 陶瓷具有良好的化学稳定性，能抵抗除氢氟酸以外的各种酸、碱和熔融金属的侵蚀；



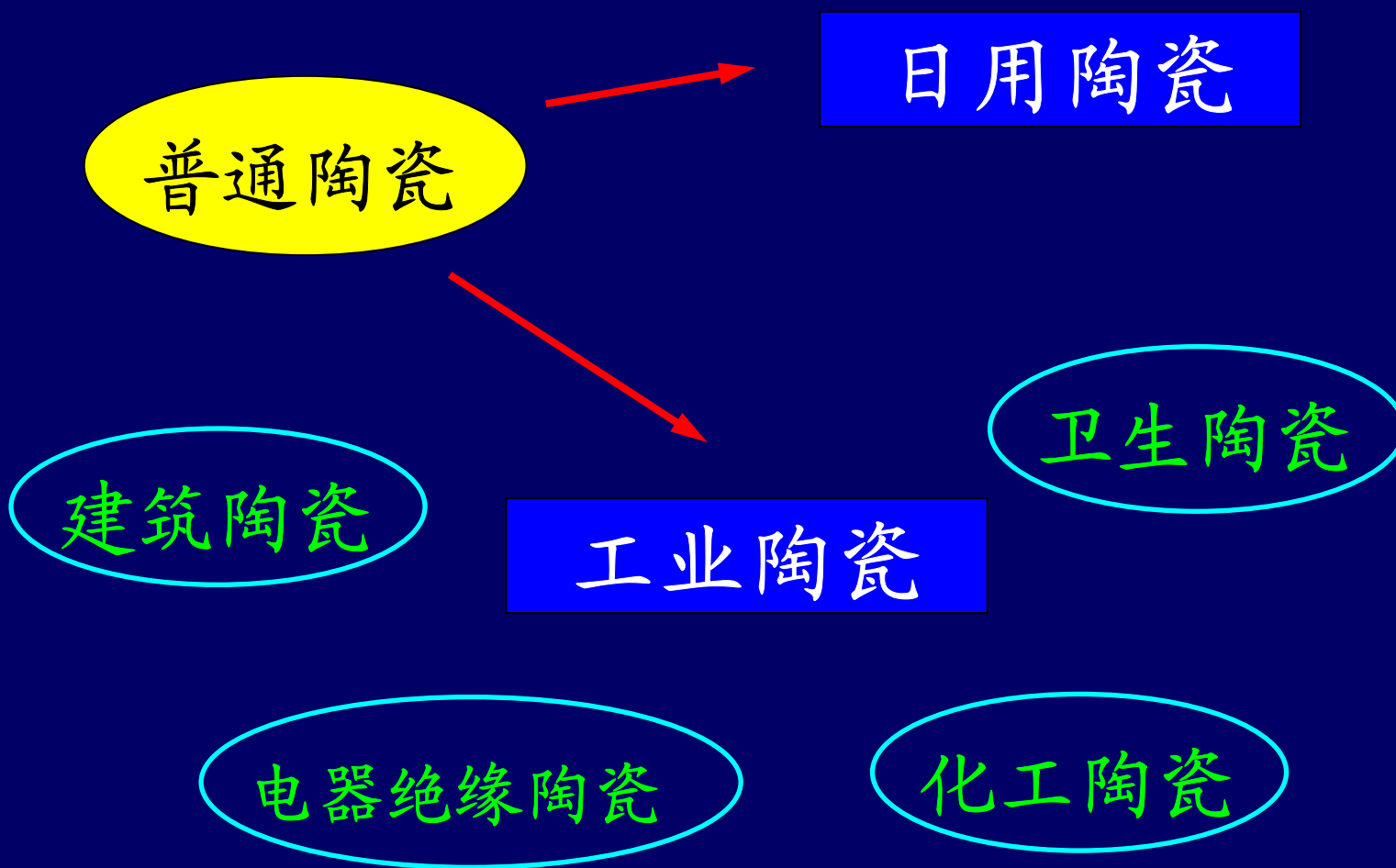
具有优异的绝缘性；硬度高，摩擦系数小，是一种优良的耐磨材料；线膨胀系数小，热导率高，抗热震性好；室温强度虽然不高，但高温强度较高。



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的应用



结构材料

陶瓷材料

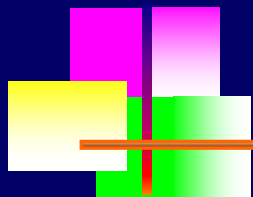
陶瓷的应用

日用陶瓷

一般应具有良好的白度、光泽度、透光性、热稳定性和强度。

日用陶瓷主要应用于茶具、餐具和工艺品。





结构材料

陶瓷材料

陶瓷的应用

普通工业陶瓷

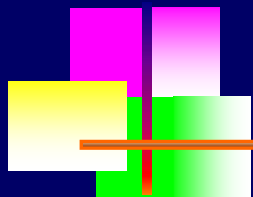
建筑陶瓷

—— 以黏土为主要原料而制得的用于建筑物的陶瓷

粗陶瓷 以难熔黏土为主要原料，包括砖、瓦、盆罐等

精陶瓷 以瓷土和高岭土为主要原料，包括釉面砖、建筑卫生陶瓷等

炻瓷 以陶土和黏土为主要原料，包括地砖、外墙砖、耐酸陶瓷等



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的应用

卫生陶瓷

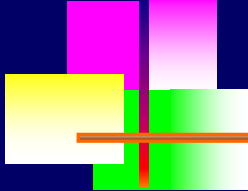
以高岭土为主要原料而制得的用于卫生设施的带釉陶瓷制品，有陶质、炻瓷质和瓷质等。

电器绝缘陶瓷

又称电瓷，是作为隔电、机械支撑及连接用的瓷质绝缘器件。分为低压电瓷、高压电瓷和超高压电瓷等。

化工陶瓷

要求耐酸、耐高温、具有一定强度。主要用于化学、化工、制药、食品等工业。



结构材料

陶瓷材料

陶瓷的应用

普通工业陶瓷应用



玻璃

什么是玻璃？凡熔融体通过一定方式冷却，因黏度逐渐增加而具有固体性质与一定结构特征的非晶态物质，都称为玻璃。

种类

钠钙玻璃

石英玻璃

铅玻璃

硼硅酸盐玻璃

钢化玻璃

变色玻璃

微晶玻璃

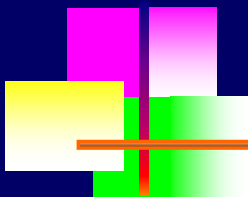
彩色玻璃

磨光玻璃

夹层玻璃

磨砂玻璃

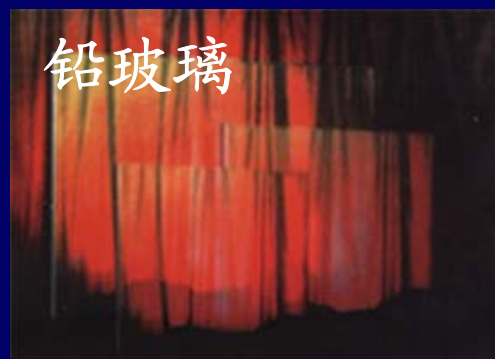
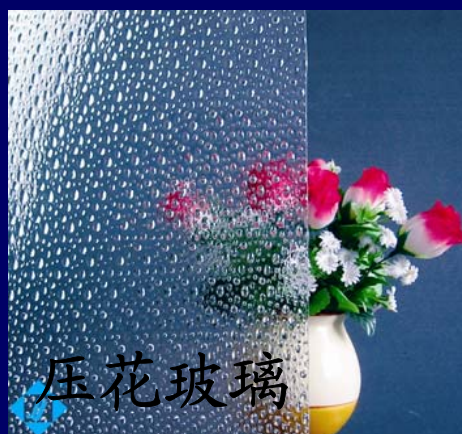
压花玻璃

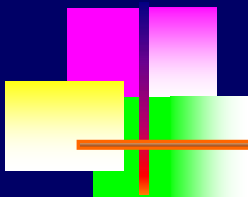


结构材料

玻璃材料

玻璃的种类

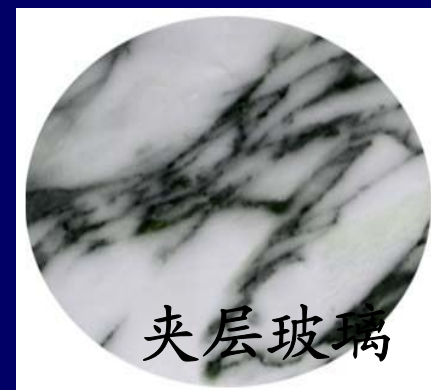
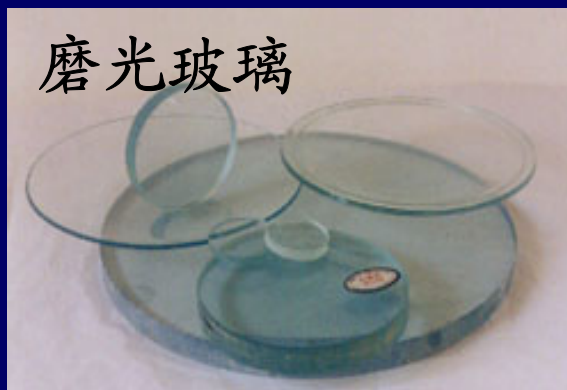
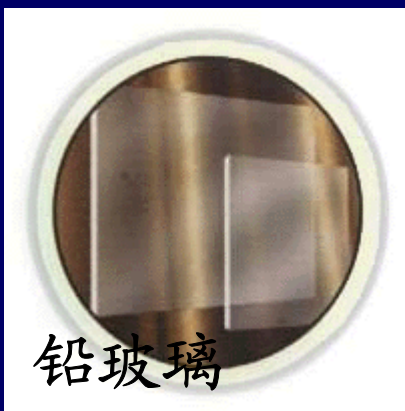


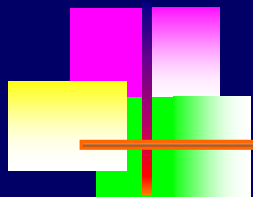


结构材料

玻璃材料

玻璃的种类





结构材料

玻璃材料

玻璃的性质

力学性质

理论强度高，实际强度低。抗压强度高，抗拉强度低。硬度高，脆性大。

物理性质

高度透明，具有很重要的光学性质。能透可见光和红外线。

化学性质

化学性质稳定，抗酸腐蚀，但不抗碱。

结构材料

玻璃材料

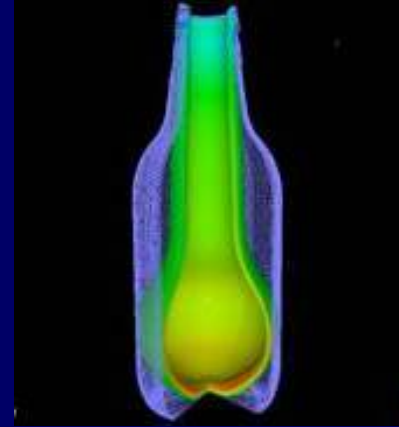
玻璃的生产方法



压制成形



拉制成形



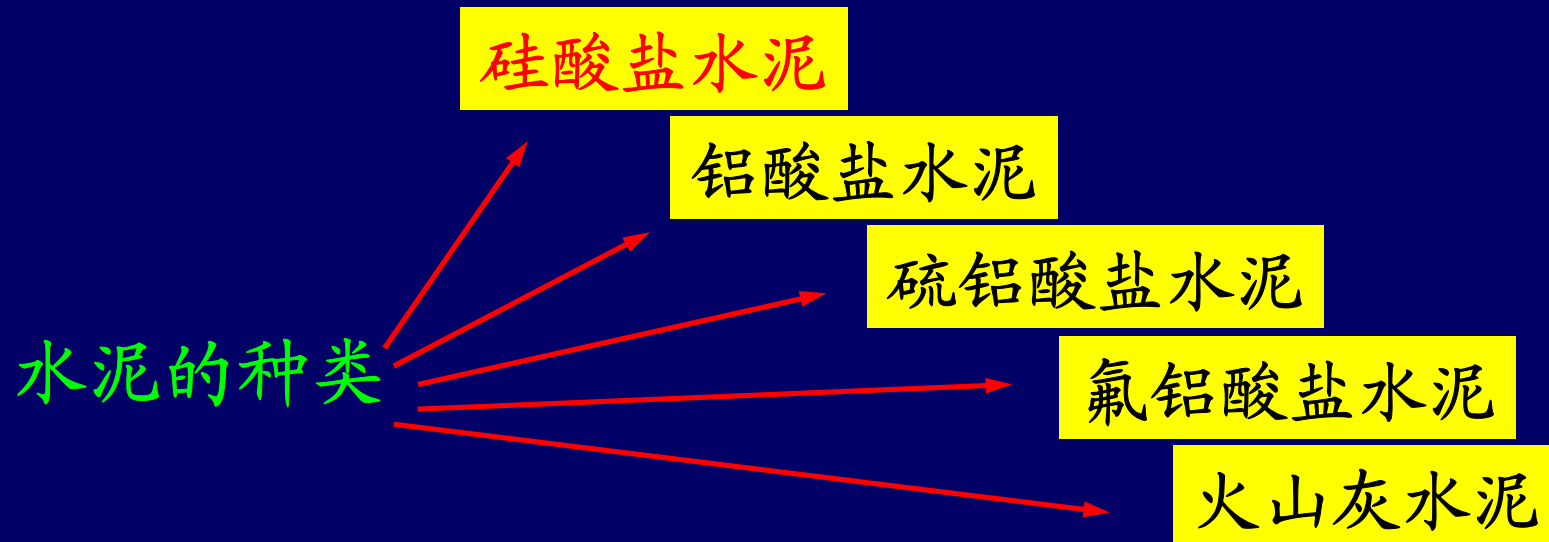
吹制成形



加工纤维

水泥

水泥是一种加入适量水后，成为塑性浆体的，既能在空气中硬化，又能在水中硬化的，并能把砂、石等材料牢固地胶结在一起的水硬性胶凝材料。



硅酸盐水泥

原料：石灰石、黏土、铁粉、煤粉、矿化剂等



硅酸盐水泥制备工艺

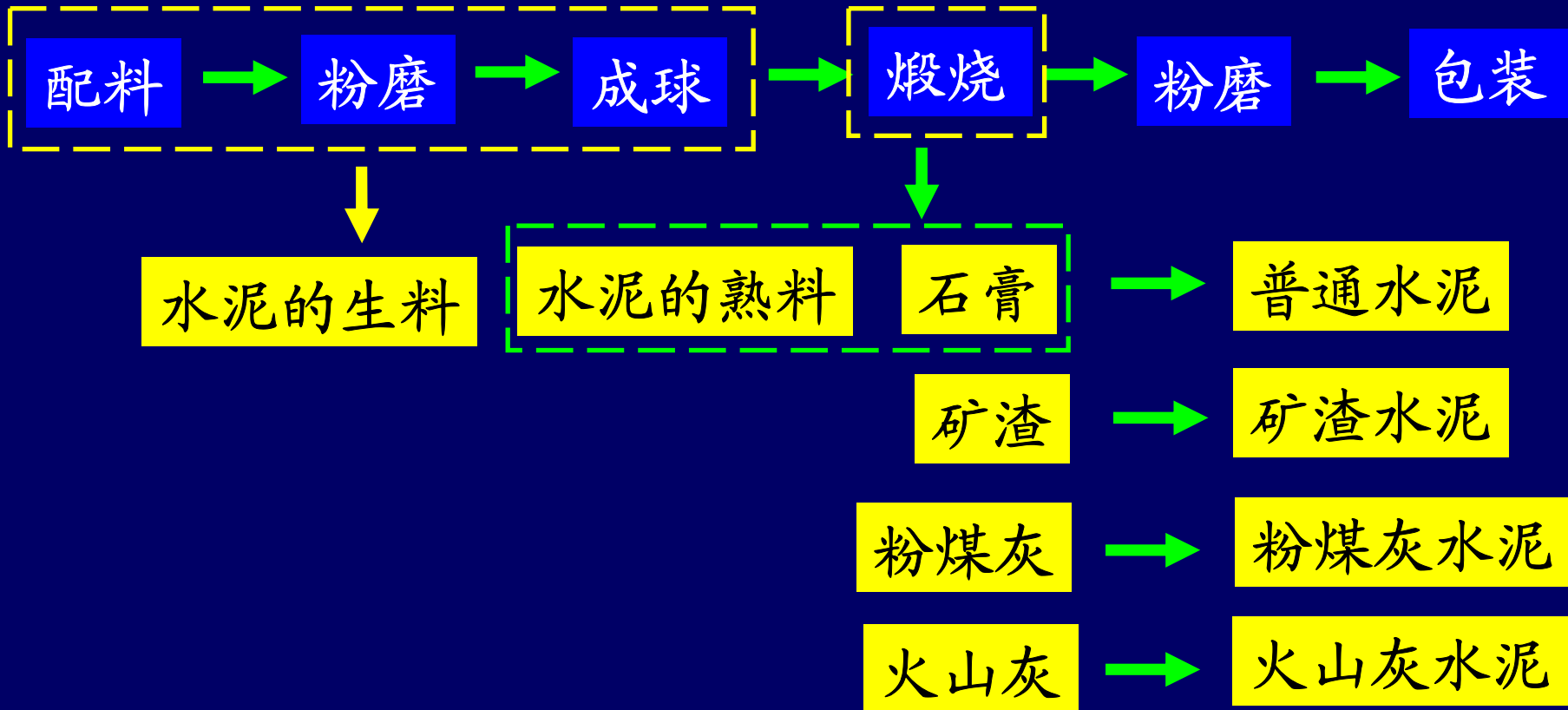


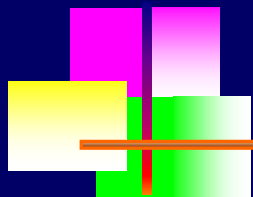
结构材料

水泥材料

工艺

1300 - 1450度

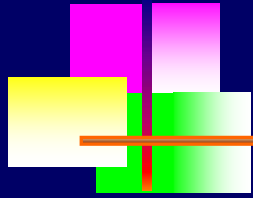




硅酸盐水泥

硅酸盐水泥的主要矿物成分:

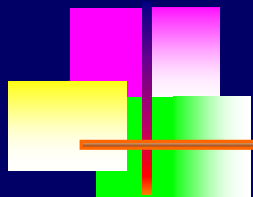
- ✓ 硅酸三钙 3CaO SiO_2 , C3S
- ✓ 硅酸二钙 2CaO SiO_2 , C2S
- ✓ 铝酸三钙 $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, C3A
- ✓ 铁铝酸四钙 $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$, C4AF



硅酸盐水泥

硅酸盐水泥的主要矿物成分对水泥性能的影响:

- ① 提高C3S可以提高水泥的强度，得到高强水泥
- ② 提高C3A、C3S，可以得到快硬水泥
- ③ 降低C3A和C3S，提高C2S，可以得到中低热水泥
- ④ 提高C4AF，降低C3A，可以得到道路水泥



结构材料

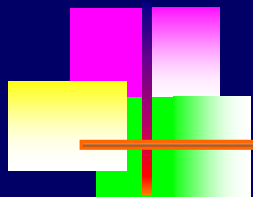
水泥材料

衡量水泥性质和质量的指标:

密度 标号 容重

细度 强度 水化热

需水性 安定性 凝结时间

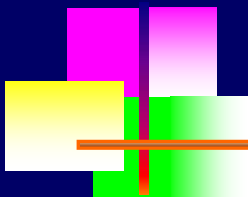


结构材料

高分子材料

主要内容:

- 高分子材料概述
- 高分子材料分类
- 典型高分子材料

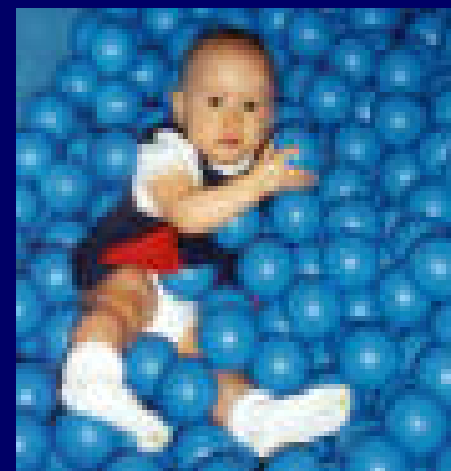


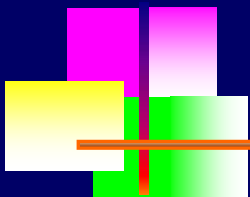
结构材料

高分子材料

多种多样的高分子材料

高分子材料概述

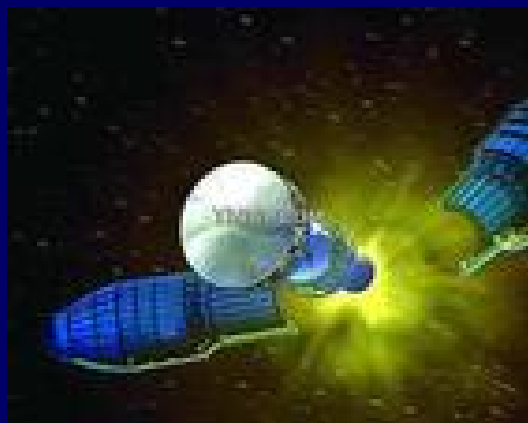




结构材料

高分子材料

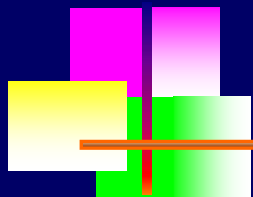
高分子材料概述



高比强度的降落伞绳索



防弹衣



结构材料

高分子材料

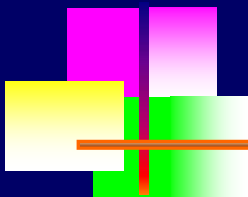
高分子材料概述

高分子的含义:

- 分子量很大 (10^4 - 10^7 , 甚至更大)。
- 分子似“一条链”, 由许多相同的结构单元组成。
- 以共价键的形式重复连接而成。

与小分子比较

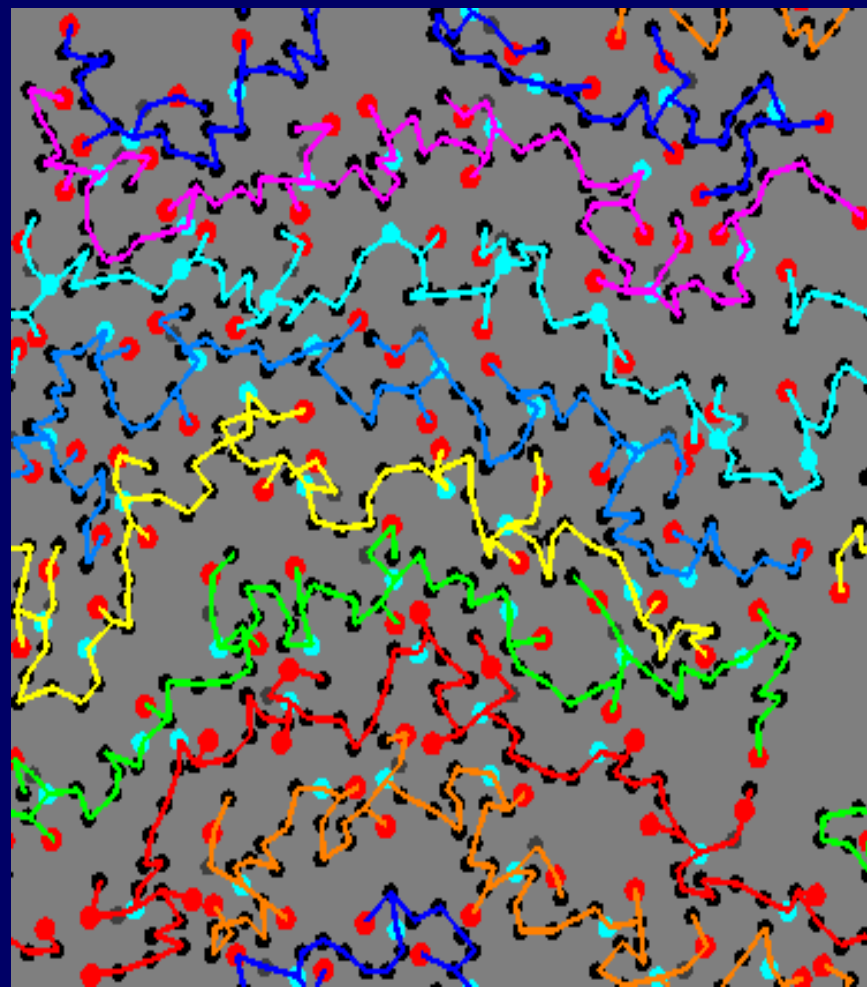
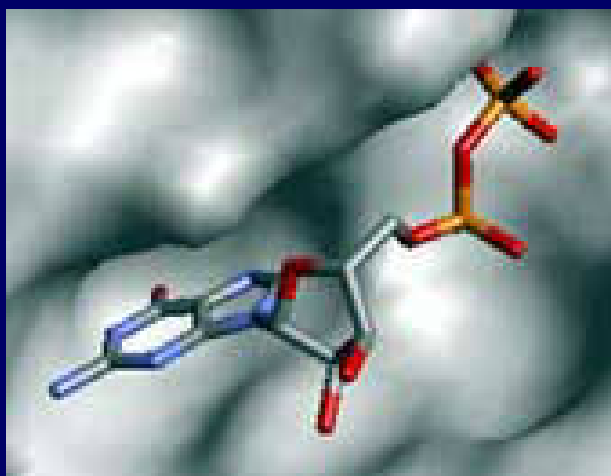
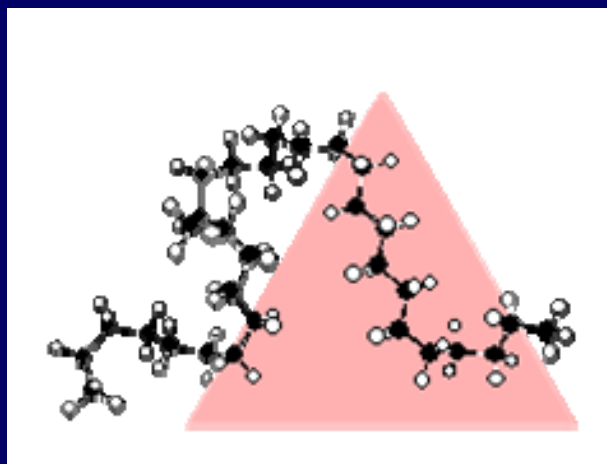
- 分子量不确定, 只有一定的范围, 是分子量不等的同系物的混合物;
- 没有固定熔点, 只有一段宽的温度范围;
- 分子间力很大, 没有沸点, 加热到 200°C - 300°C 以上, 材料破坏 (降解或交联)。

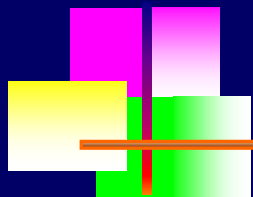


结构材料

高分子材料

高分子材料概述





结构材料

高分子材料

高分子材料概述

高分子材料发展简史

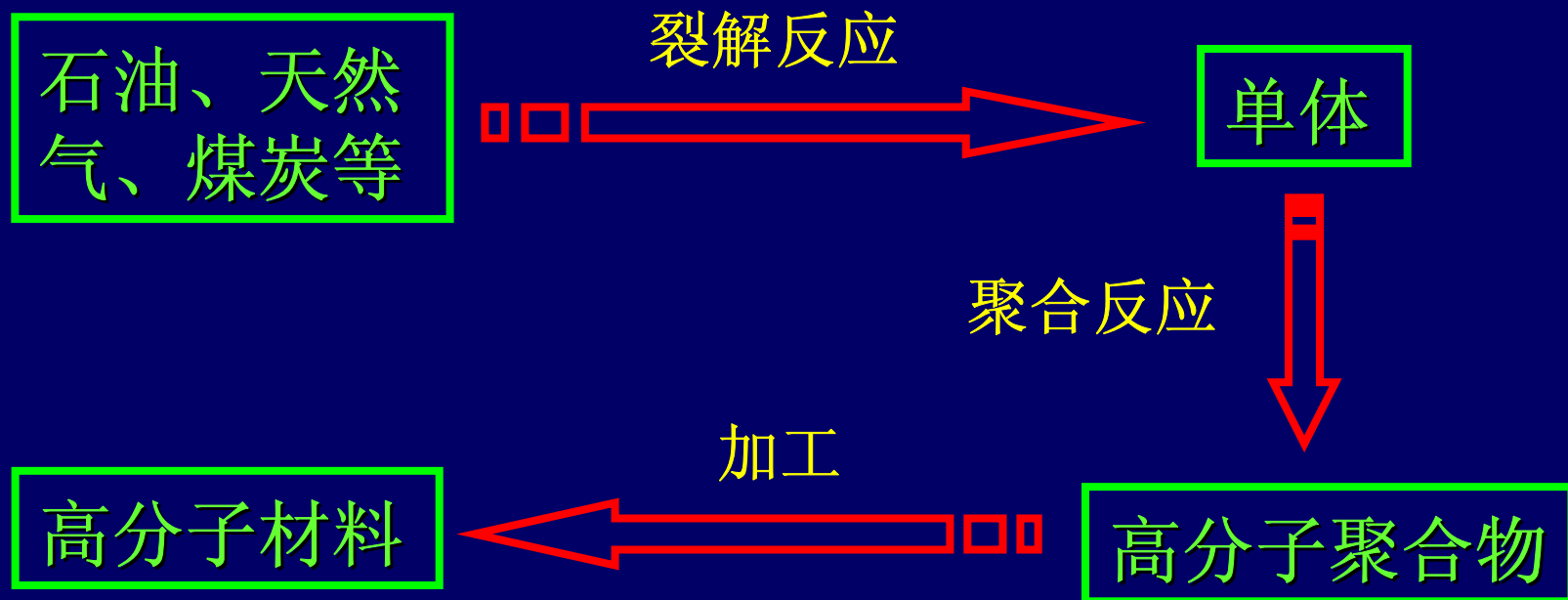
- 天然高分子的利用
- 天然高分子改性
 - 天然橡胶硫化（1839年）
 - 硝化纤维赛璐珞（1868年）
 - 粘胶纤维（1893~1898年）
- 合成高分子
 - 20世纪初，出现了酚醛树脂
 - 1920年，Staudinger提出高分子概念
 - 30年代、40年代，飞速发展
 - 70年代，特种性能的高分子

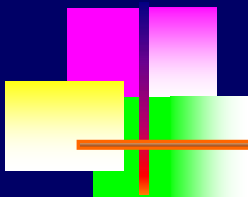
结构材料

高分子材料

高分子材料概述

高分子材料形成过程



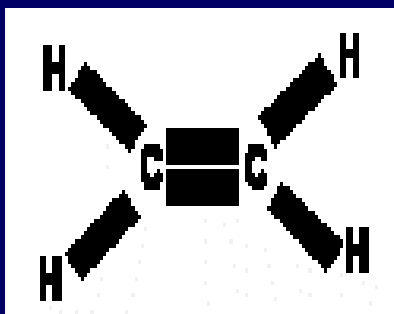
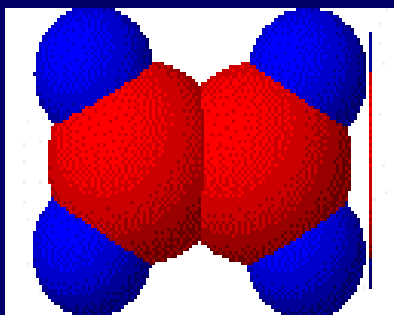


结构材料

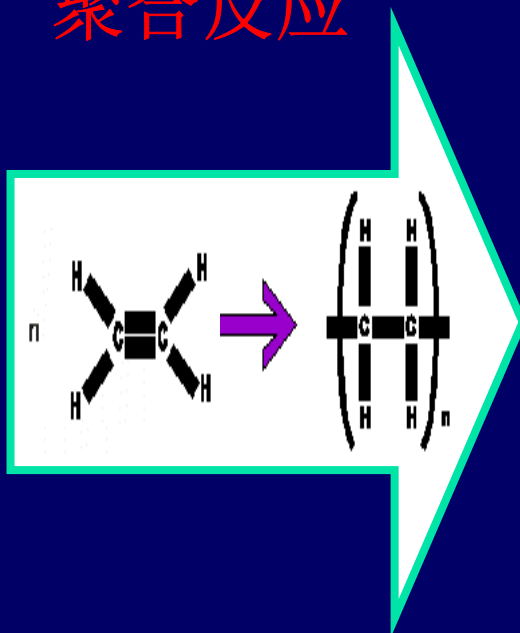
高分子材料

高分子材料概述

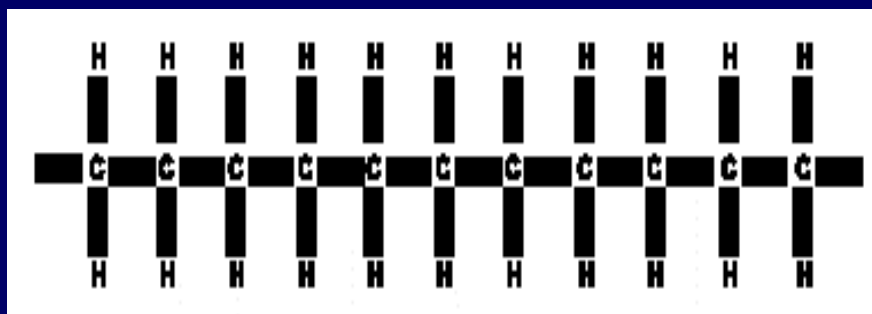
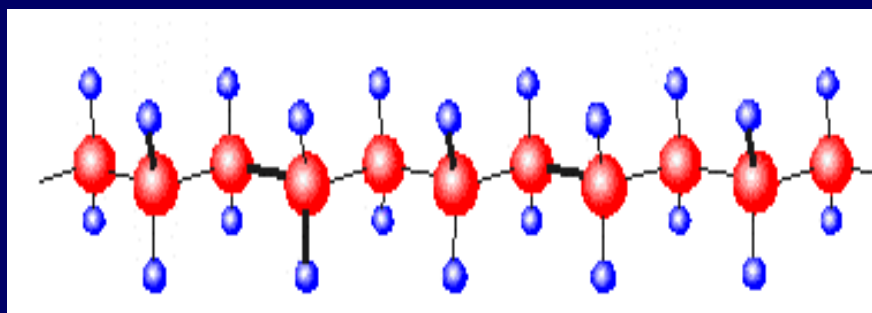
乙烯分子

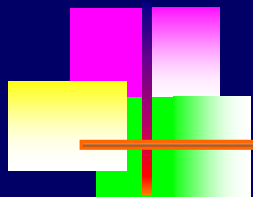


聚合反应



聚乙烯





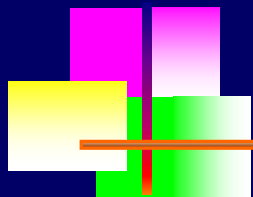
结构材料

高分子材料

高分子材料概述

热塑性与热固性

- 热塑性塑料：受热后软化，冷却后又变硬，可重复循环。
- 热固性塑料：由单体直接形成网状聚合物或通过交联线型预聚体而形成，一旦形成交联聚合物，受热后不能再回到可塑状态。制品不溶不熔。
- 优点：质轻、电绝缘、耐化学腐蚀、容易成形加工等；
- 缺点：力学性能比金属材料差，表面硬度低，大多数品种易燃，耐热性差。



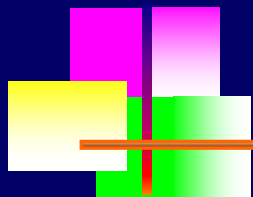
结构材料

高分子材料

高分子材料概述

聚合物分子运动特点

- 聚合物分子运动具有多重性。
 - 运动单元：侧基、支链、链节、链段及整个大分子等。
 - 运动方式：键长、键角的振动或扭曲；侧基、支链或链节的摇摆、旋转；分子内旋转及整个大分子的重心位移等。
- 聚合物分子运动具有明显的松弛特性。
 - 具有时间依赖性的过程称为松弛过程。
 - 分子运动是一个速度过程，要达到一定的运动状态，提高温度和延长时间具有相同的效果，这称为时-温等效原理，或时-温转化效应。



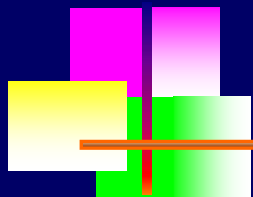
结构材料

高分子材料

高分子材料概述

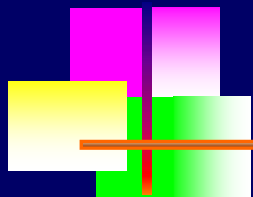
力学状态

- 玻璃态
 - 链段运动处于“冻结”状态，模量高形变小。具有虎克弹性行为，质硬而脆。
- 高弹态
 - 链段运动已充分发展。在较小应力下，即可迅速发生很大的形变，除去外力后，形变可迅速恢复。
- 粘流态
 - 由于链段的剧烈运动，整个大分子链重心发生相对位移，产生不可逆位移即粘性流动。
 - 交联聚合物无粘流态存在



玻璃化转变

- 聚合物的玻璃化转变是指从玻璃态到高弹态之间的转变。从分子运动的角度看，玻璃化温度 T_g 是大分子链段开始运动的温度。
- 玻璃化转变是一个松弛过程。
- 在时间尺度不变时，凡是加速链段运动速度的因素，如大分子链柔性的增大、分子间作用力减小等结构因素，都使 T_g 下降。



结构材料

高分子材料

高分子材料分类

高分子材料分类:

1、按材料来源分类

天然高分子
合成高分子

2、按材料性能和用途分类

塑料

橡胶

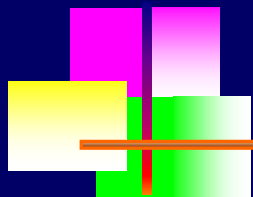
纤维

涂料

粘合剂

功能高分子

三大合成材料



结构材料

高分子材料

高分子材料分类

塑料、橡胶、纤维，称为三大合成材料，全世界产量有1亿多吨。

- 塑料主要品种有：聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯等
- 合成橡胶主要用途为制造轮胎，约占60%
- 合成纤维主要品种有：涤纶（PET）、尼龙、聚丙烯腈、聚丙烯等
- 合成纤维、天然纤维、人造纤维比例为2 : 3 : 1。

结构材料

高分子材料

高分子材料分类

三大高分子材料的比较

	纤维	塑料	橡胶
分子量	一般 1~7 万	一般 6~30 万	一般 15~30 万
加工方法	熔融纺丝	挤出、注塑、吹塑成型等	硫化交联
机械性能	高强度 ($>35000\text{N}/\text{cm}^2$) 高模量 ($>35000\text{N}/\text{cm}^2$) 低伸长率 ($<5\sim 50\%$)	介于两者之间	初始模量很低, 高弹性形变 (500-1000%)

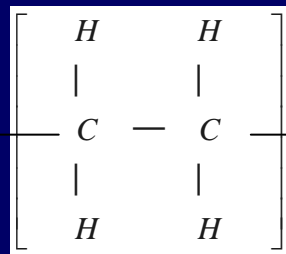
结构材料

高分子材料

高分子材料分类

3、按结构单元的化学组成分类

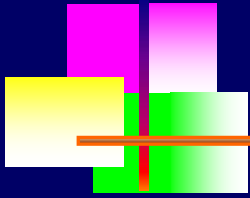
1) 碳链高分子



聚乙烯

主链以C原子间共价键相联结 加聚反应制得

如：聚乙烯，聚氯乙烯，聚丙烯，聚甲基丙烯酸甲酯，聚丙烯

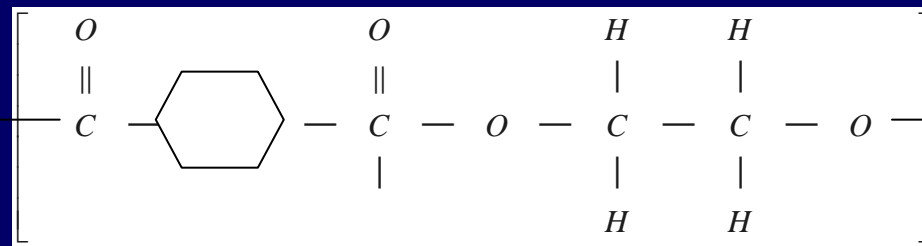


结构材料

高分子材料

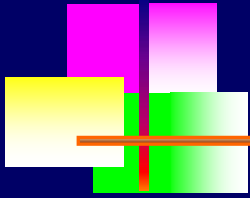
高分子材料分类

2) 杂链高分子



涤纶

主链除C原子外还有其它原子如O、N、S等，并以共价键联接，缩聚反应而得，如聚对苯二甲酸乙二酯（涤纶）聚酯聚胺、聚甲醛、聚苯醚、聚酚等

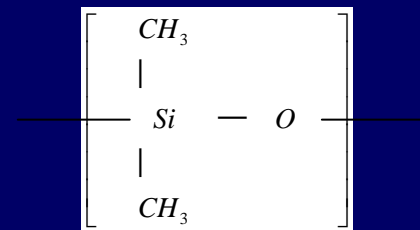


结构材料

高分子材料

高分子材料分类

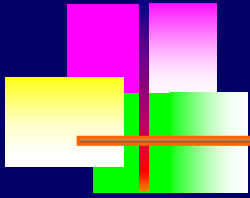
3) 元素有机高分子



硅橡胶

主链中不含C原子，而由Si、 B 、 P 、 Al、 Ti 、 As等元素与O组成，其侧链为有机基团；

兼有无机高分子和有机高分子的特性，既有很高耐热和耐寒性，又具有较高弹性和可塑性，如硅橡胶。

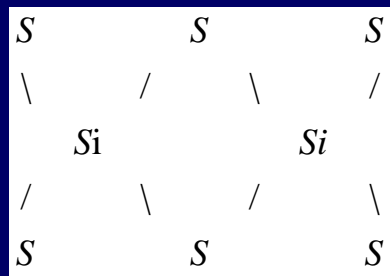


结构材料

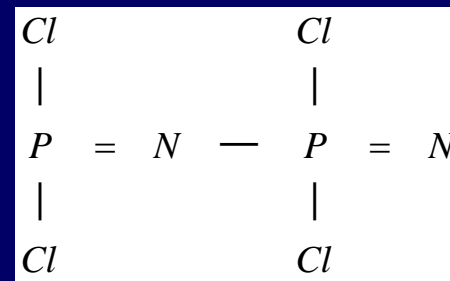
高分子材料

高分子材料分类

4) 无机高分子



二硫化硅



聚二氯一氮化磷

主链既不含C原子，也不含有机基团，而完全由其它元素所组成，这类元素的成链能力较弱，故聚合物分子量不高，并易水解。



结构材料

高分子材料

聚乙烯 (PE)

典型高分子材料

聚乙烯从1939年开始工业化生产，是目前产量最大，应用最广泛的品种。

➤ 低密度聚乙烯 (LDPE)

在各种聚乙烯中产量最大，主要用于生产薄膜（制造食品袋、垃圾袋、地膜、大棚膜等）；约10%用于生产注塑用品。

➤ 线型低密度聚乙烯 (LLDPE)

主要用于生产薄膜，厚度比低密度聚乙烯更薄，制品性能更好。还用于生产扁丝，制造编织袋。



结构材料

高分子材料

聚乙烯 (PE)

典型高分子材料

➤ 高密度聚乙烯

- 注塑制品：工业容器、家用器皿、玩具等。
- 中空吹塑制品：食品、药品、化妆品的包装瓶等。
- 薄膜制品（约占20%）：大量用于食品包装。

➤ 聚乙烯管材

- 应用领域主要有：生活用水和煤气管道、农业排灌用管道以及圆珠笔内的油墨管子等。
- 质轻、坚韧耐磨，力学性能良好，使用寿命长，施工安装简便，输送阻力小、安全可靠，铺设费用低。

结构材料

高分子材料

典型高分子材料

聚乙烯 (PE)



结构材料

高分子材料

聚乙烯 (PE)

典型高分子材料

- 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) —— 可作为工程塑料
 - 在汽车、机械、原子能以及宇宙飞行等领域得到重要应用。
 - 具有优异的耐冲击和自润滑性，耐腐蚀、抗磨损、不粘着等特性。可作齿轮、轴套、滑板、储罐衬里等。



结构材料

高分子材料

聚乙烯 (PE)

典型高分子材料



结构材料

高分子材料



聚乙烯生产线

聚丙烯 (PP)

典型高分子材料

- 性能：
密度 $0.90\sim 0.91\text{g/cm}^3$ ，耐热性好、优良的耐化学药品和耐水性，有较好的物理机械性能，突出的耐应力开裂性，耐磨性和成形性好。
- 应用
 - 汽车用树脂：保险杠（乙丙橡胶增韧PP）、仪表盘、电器元件、发动机风叶等；
 - 薄膜：有“包装皇后”之称。大量用于快餐食品、烟草的包装，还用于医用包装、各类封面及广告宣传画等。
 - 纤维级PP：地毯、无纺布、旅游制品、土工布，建筑材料等，发展前景广阔。

结构材料

高分子材料

聚氯乙烯 (PVC)

典型高分子材料





结构材料

高分子材料

聚氯乙烯 (PVC)

典型高分子材料

- **PVC**，是耗石油最少的热塑性树脂。具有阻燃及较高的机械强度。**PVC**可以兼有两种绝然不同的性能，从软质到硬质，具有不同的用途。
- 应用：
 - 农用塑料制品：农地膜、渔用单丝、绳缆等；
 - 包装材料，保鲜、防锈、防霉等，塑料编织袋、包装容器等；
 - 日用品，塑料鞋、塑料袋、人造革、塑料玩具等；
 - 化学建材，塑钢门窗、水管、电线穿线管等。

结构材料

高分子材料

聚苯乙烯 (PS)

典型高分子材料



PS保温板



PS光纤





结构材料

高分子材料

聚苯乙烯 (PS)

典型高分子材料

- **PS**，无色透明，相对密度**1.05**，电绝缘性能优异，耐热性好，吸湿性低、质硬、刚性强，耐化学性好，易被染色，有良好的加工性。
- 应用：
 - 世界市场上，**PS**主要用于包装，其次是电子、电器。发泡聚苯乙烯 (**EPS**) 质轻、隔热、防震、价廉，用于建筑和包装。
 - 国内最大的市场是家电行业。国内彩色电视机外壳有**60%** 使用高抗冲聚苯乙烯 (**HIPS**)。

结构材料

高分子材料

氟塑料

典型高分子材料

- **氟塑料**各种含氟塑料的总称。
- **聚四氟乙烯 (PTFE)**。1950年首先由杜邦公司投产。有“**塑料王**”之称。
- 高结晶度聚合物，无熔融态，分解温度 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可在 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下长期下使用，耐低温 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，力学性能优异。光滑不粘，摩擦系数极小，具有自润滑性。耐化学腐蚀性极强，耐强酸、强碱、有机溶剂，能耐王水及沸腾的氢氟酸。具有塑料中最好的电绝缘性能。
- 广泛用于化工机械和容器的防腐、耐磨密封、电绝缘等。

结构材料

高分子材料

氟塑料

典型高分子材料



结构材料

高分子材料

纤维

典型高分子材料

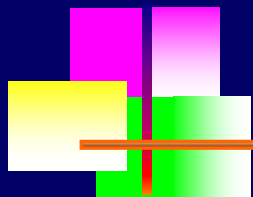
- 涤纶
- 尼龙（锦纶）
- 聚丙烯腈（腈纶、人造羊毛）



聚酰胺 (PA)

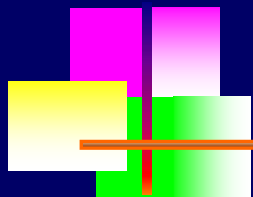
典型高分子材料

- 聚酰胺 (PA) 俗称尼龙 (Nylon)，是主链上含有酰胺基团 —NH—C(=O)— 的聚合物。
- 是开发最早的工程塑料，约占工程塑料总产量的1/3。
- 优异的力学性能、耐磨性及无润滑摩擦性能，较好的耐腐蚀性、耐油、耐溶剂性能，使用温度-40~100℃，良好的阻燃性。缺点是吸水性较大，影响其尺寸稳定性。



主要内容:

- 复合材料概述
- 复合材料的基本理论
- 金属基复合材料
- 陶瓷基复合材料



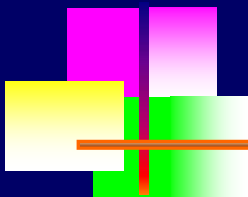
结构材料

复合材料

复合材料概述

什么是“复合材料”？

复合材料是由两种或两种以上物理、化学、力学性能不同的物质，经人工组合而成的多相固体材料。

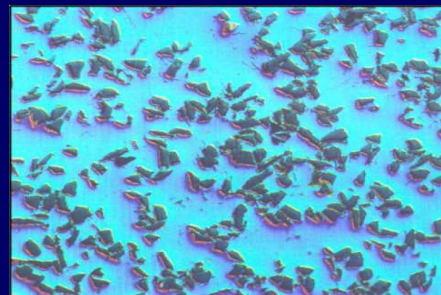
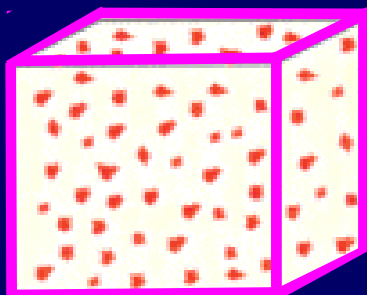


结构材料

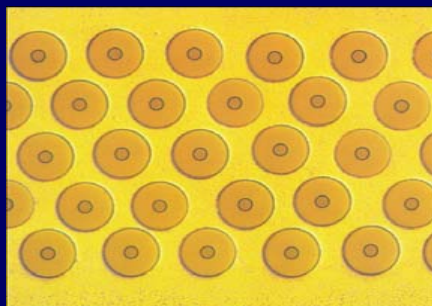
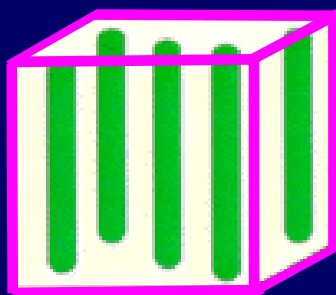
复合材料

复合材料概述

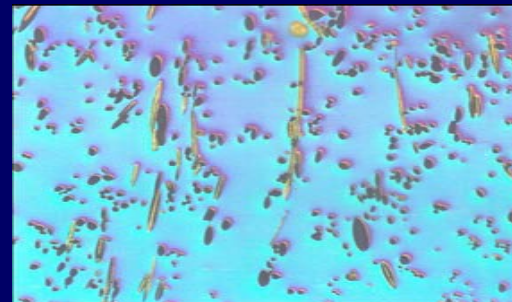
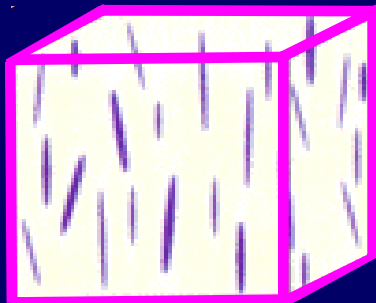
颗粒

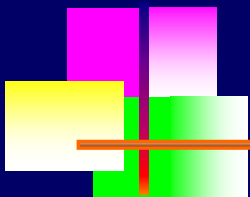


纤维



晶须





结构材料

复合材料

复合材料概述

复合材料的种类

复合材料

结构复合材料

功能复合材料

金属基复合材料

陶瓷基复合材料

树脂基复合材料

水泥基复合材料

导电导磁复合材料

阻尼吸声复合材料

屏蔽功能复合材料

摩擦磨损复合材料

结构材料

复合材料

复合材料的性能特点

复合材料概述

① 比强度和比弹性模量高

复合材料的比强度和比模量普遍高于常用金属材料的

材料	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性模量 E/MPa	比强度 σ_b/ρ	比弹性模量 E/ρ
硼纤维/环氧	2.1	1600	220	762	105
碳化硅/环氧	2.0	1500	130	750	65
石墨纤维/铝	2.2	800	231	364	105
钢	7.8	1400	210	179	27
铝合金	2.8	500	77	179	28
钛合金	4.5	1000	110	222	24

结构材料

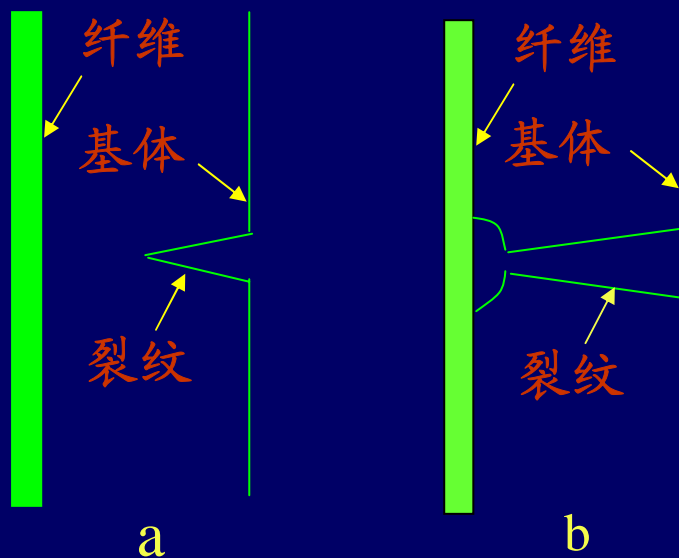
复合材料

复合材料的性能特点

② 抗疲劳与断裂安全性能好

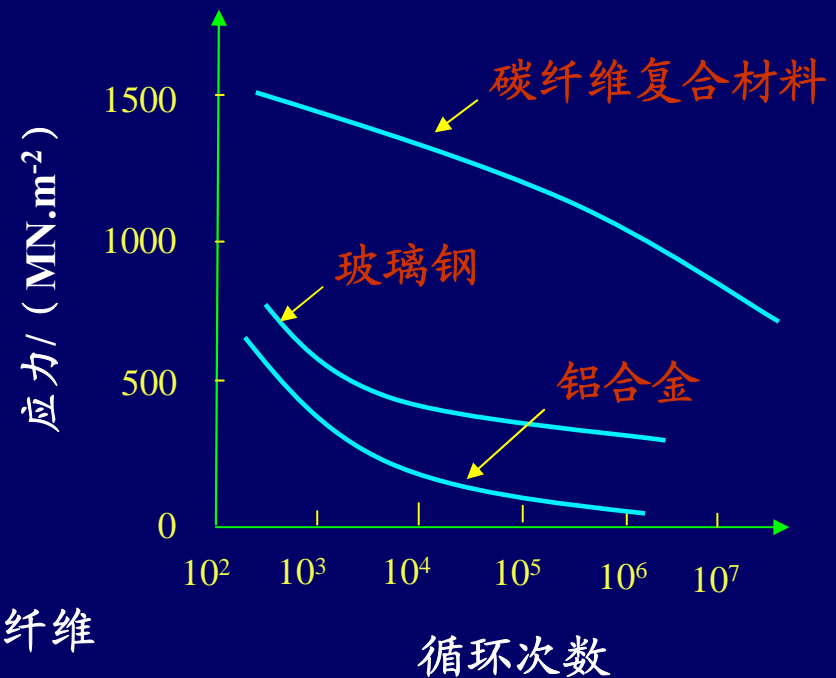
大量的增强纤维对裂纹的扩展起到阻碍作用。

复合材料概述



a 基体中初始裂纹 b 裂纹扩展受阻于增强纤维

纤维增强复合材料中疲劳裂纹扩展过程示意图

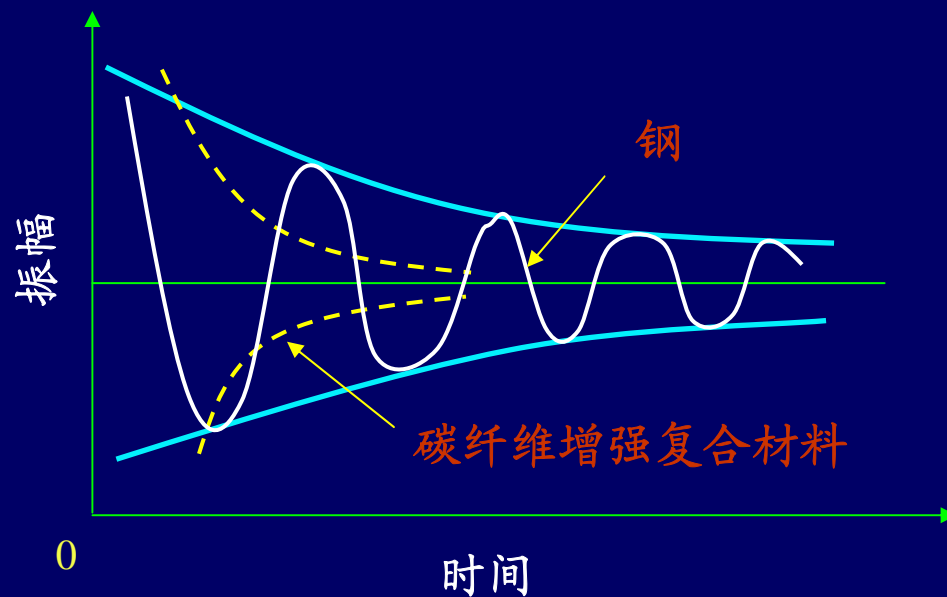


三种材料疲劳性能比较

复合材料的性能特点

复合材料概述

- ③ 良好的减震性能 纤维增强复合材料具有较高的自震频率，不易产生共振现象，具有一定的减震作用。

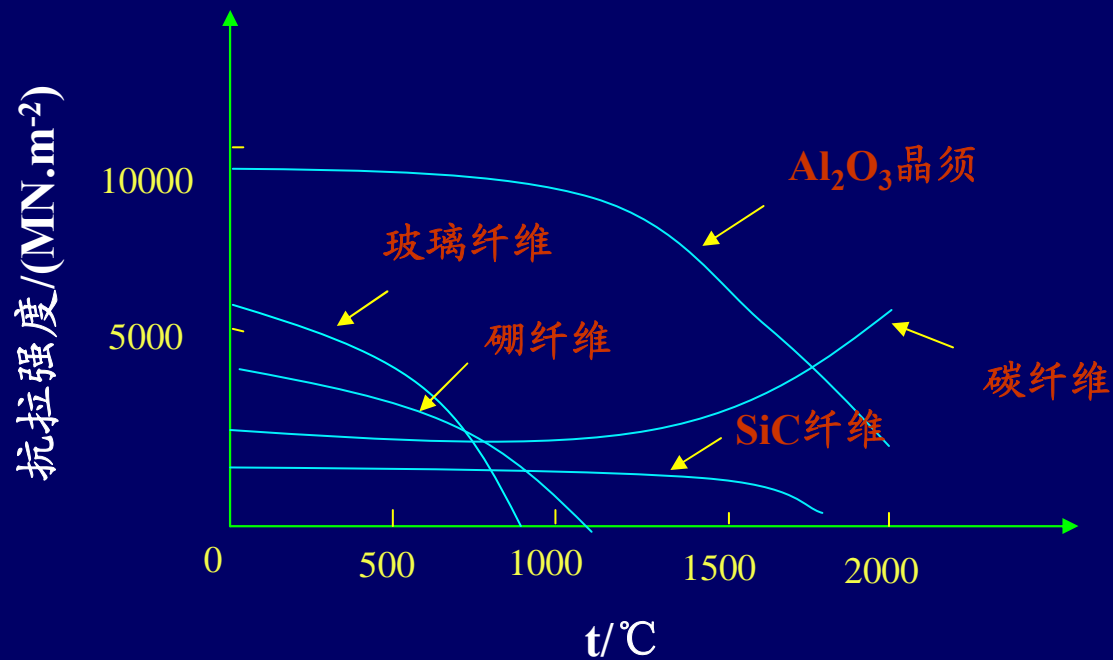


钢、碳纤维复合材料的振动衰减特性比较

复合材料的性能特点

复合材料概述

- ④ 良好的高温性能 增强纤维的熔点都很高，并且在高温下仍具有较高的强度。



几种纤维的高温强度

结构材料

复合材料

复合材料的发展趋势

复合材料概述

① 由宏观复合向微观复合发展

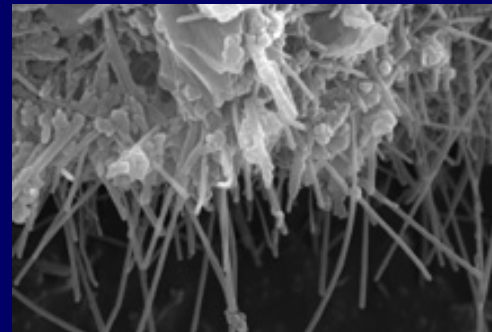
微纤增强复合材料、纳米复合材料、分子复合材料

② 向多元混杂复合和超混杂复合发展

例如两种纤维的复合应用，两种基体的复合应用等



Film coating
Keep food longer



nanotubes protruding from
a nano-composite material.



结构材料

复合材料

复合材料的发展趋势

复合材料概述

- ③ 由结构复合为主向结构复合与功能复合并重的方向发展

功能复合材料的开发与应用等

- ④ 由被动复合向主动复合材料发展

所谓被动就是指在外界作用下材料只能被动承受某种作用或作出某种反应。主动材料就是指具备能自诊断、自适应和自修补作用材料。

结构材料

复合材料

复合材料的发展趋势

复合材料概述

⑤ 由常规设计向仿生设计方向发展

仿生设计就是利用某种生物体的特征，设计材料。仿生设计可以参照生物体的功能机制设计出新的功能材料。



复合原理

复合材料的基本理论

1. 纤维增强复合材料的复合原理

① 外载荷与纤维方向一致

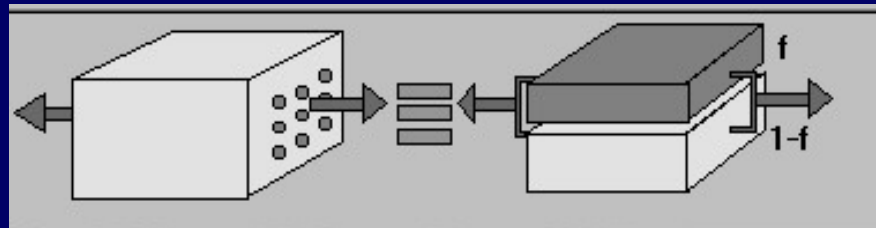
假设复合材料中基体是连续的、均匀的，纤维的性质和直径都是均匀的，且平行连续排列，同时纤维与基体间的结合为理想结合，在界面上不产生滑移。

则：在外载荷作用下纤维和基体处于等应变状态

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

复合原理

复合材料的基本理论



$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

复合材料上总力等于纤维和基体受力的和

$$F_c = F_f + F_m$$

则： $F_c = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \longrightarrow \quad E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

其中：c、f、m分别代表复合材料、增强纤维和基体

结构材料

复合材料

复合原理

复合材料的基本理论

一般复合材料的变形分为：

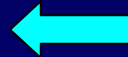
纤维和基体均
为线弹性变形



纤维继续线弹性变形，
基体非线性变形

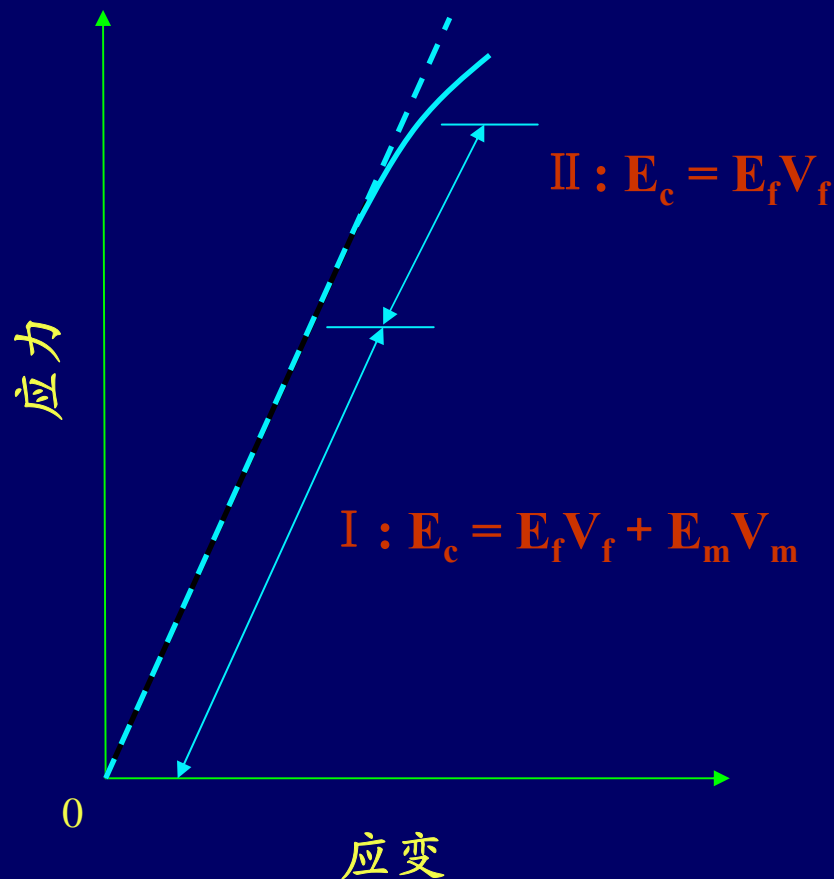


随纤维断裂，
复合材料断裂



纤维和基体都
是非线性变形

复合原理



单向连续纤维增强复合材料的应力-应变曲线

复合材料的基本理论

I: 单向连续纤维增强复合材料的应力-应变曲线弹性变形阶段，复合材料弹性模量所遵循的规律：

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

II: 外载荷很大，基体材料发生塑性变形时，复合材料的应力-应变曲线不再保持线性关系，此时，基体对复合材料刚度的贡献很小：

$$E_c = E_f V_f$$

1. 纤维增强复合材料的复合原理

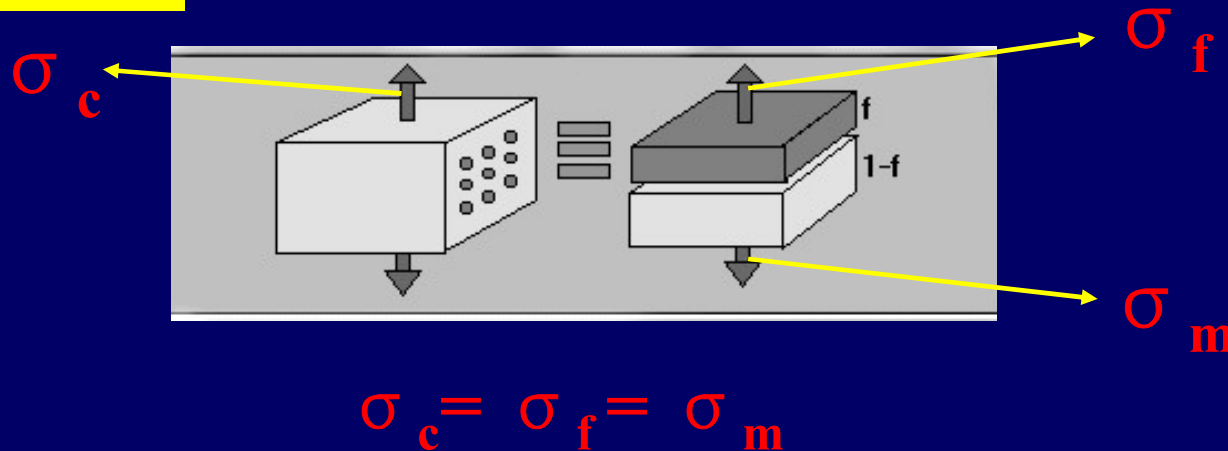
② 外载荷与纤维方向垂直

如果外载荷垂直于单相连续纤维增强复合材料的纤维方向
则复合材料、纤维、基体处于等应力状态。

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

复合原理

复合材料的基本理论



复合材料中应变等于各组分应变与体积分数乘积之和

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad \Rightarrow \quad 1/E_c = V_f/E_f + V_m/E_m$$

又： $\varepsilon = \sigma/E$

其中：c、f、m分别代表复合材料、增强纤维和基体

复合原理

复合材料的基本理论

2. 颗粒增强复合材料的复合原理

颗粒增强复合材料的密度可以利用混合定律表达为:

$$\rho_c = \rho_p V_p + \rho_m V_m$$

复合材料弹性模量的上限数值和下限数值

上限值 $E_c = E_p V_p + E_m V_m$

下限值 $E_c = E_p E_m / (E_p V_m + E_m V_p)$

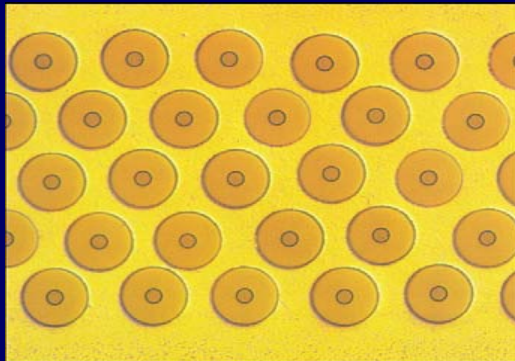
角标p 代表颗粒增强复合材料

增强机理

复合材料的基本理论

1. 纤维增强

纤维增强复合材料是指由高强度、高弹性模量的脆性纤维做增强体与韧性或脆性基体经一定工艺复合而成的多相材料。



设计纤维增强金属基复合材料的目标:

提高基体在室温下和高温下的强度和弹性模量。

增强机理

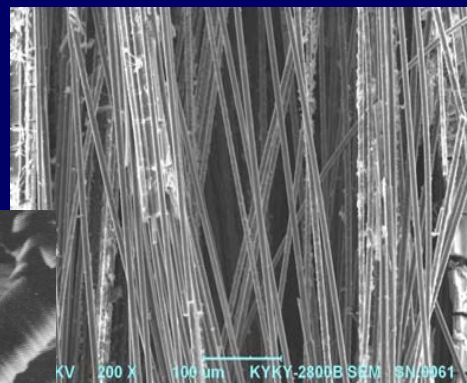
复合材料的基本理论

纤维增强复合材料中主要的新型纤维与晶须有：

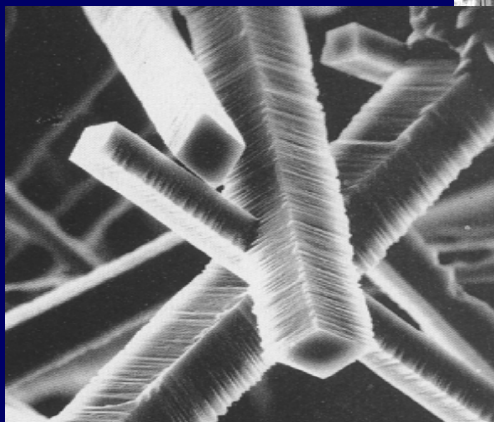
碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维以及碳化硅晶须、氧化铝晶须等。

这些纤维与晶须的主要特点是：

密度低、强度高、弹性模量高、线膨胀系数小等特点。



碳纤维



Si₃N₄晶须

增强机理

复合材料的基本理论

纤维增强复合材料的机理:

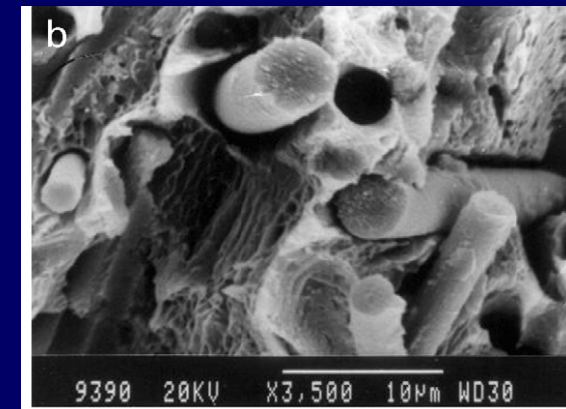
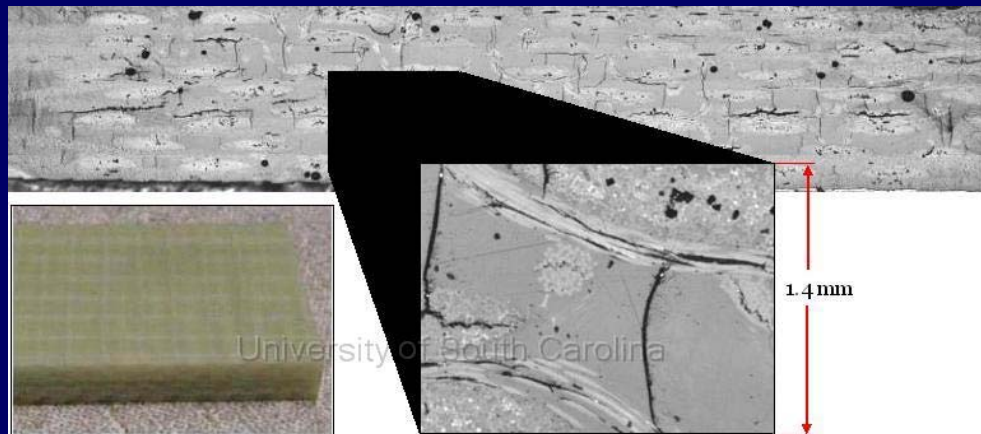
- ✓ 微细的增强纤维因直径较小，产生裂纹的几率降低。
- ✓ 纤维在基体中，彼此隔离，纤维表面受到基体的保护，不易受到损伤，不易在承载中产生裂纹，增大承载力。
- ✓ 复合材料受到较大应力时，一些有裂纹的纤维可能断裂，但塑性好和韧性好的基体能阻止裂纹扩展。
- ✓ 由于基体对纤维的粘结作用以及基体与纤维之间的摩擦力，使得复合材料的强度大大提高。

结构材料

复合材料

增强机理

复合材料的基本理论



The microcracks propagated through the matrix and were stopped by the fiber bundles. Both the inter- and intra-bundle porosities are substantial.

Al_2O_3 纤维增强 AM100 复合材料断口

增强机理

复合材料的基本理论

增强纤维起到强化基体作用必要条件:

- ① 增强纤维的强度和弹性模量应比基体材料的高。

增强纤维的弹性模量 E 越高，在相同应变量的条件下，所受应力越大。

- ② 基体与纤维之间要有一定的粘结力，并具有一定的强度。

结合强度小，纤维无法发挥主要承受载荷的作用；结合强度过大，会导致脆性断裂，降低强度。

增强机理

复合材料的基本理论

③ 纤维应有一定的含量、尺寸和分布。

纤维越细，则缺陷越小，材料强度越高；同时细纤维的比表面积大，有利于增强与基体的结合力。

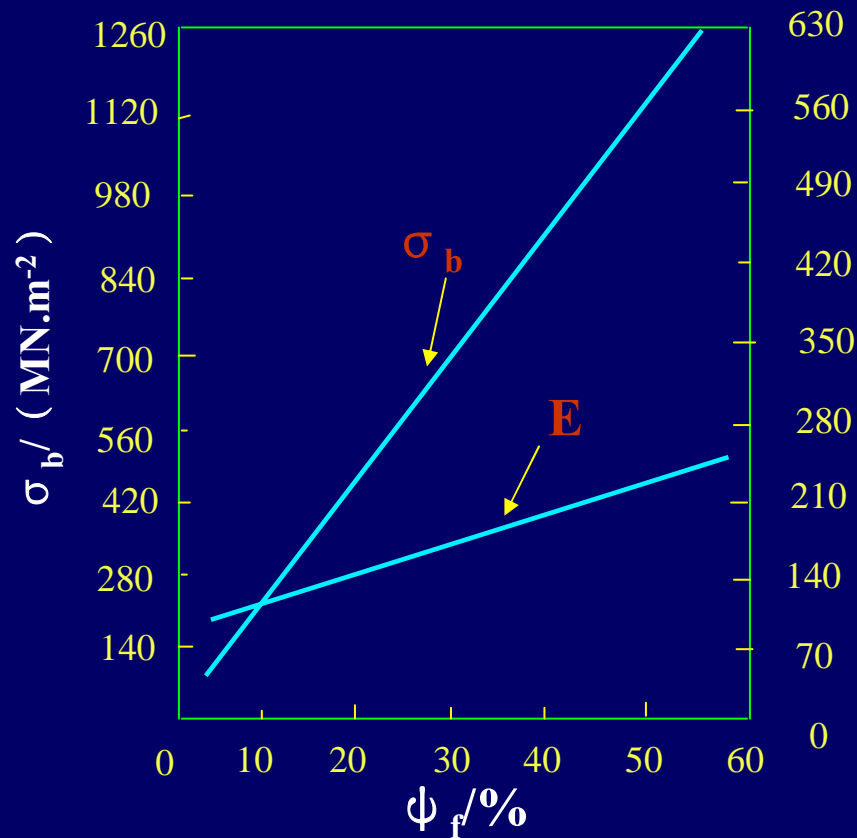
④ 纤维与基体之间的线膨胀系数相匹配。

对于韧性较低的基体，纤维的膨胀系数应略高于基体；对于韧性较好的基体，纤维的膨胀系数应略低于基体。

⑤ 纤维与基体之间有良好的相容性。

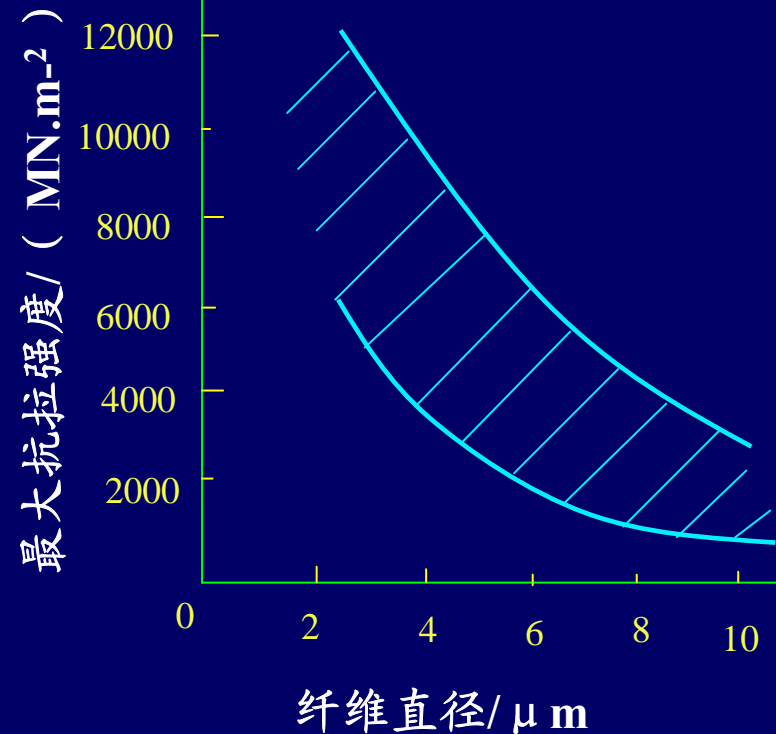
以便在高温作用下，纤维与基体之间不发生化学反应。

增强机理



硼纤维增强铝基复合材料的抗拉强度和弹性模量与纤维体积分数的关系

复合材料的基本理论



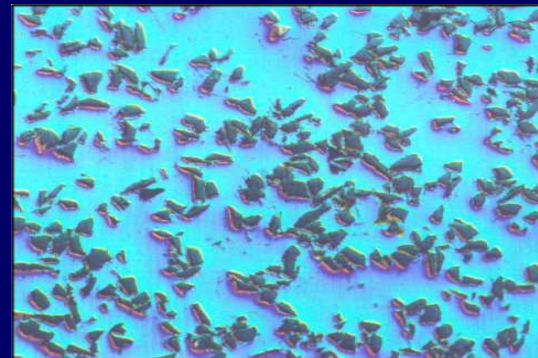
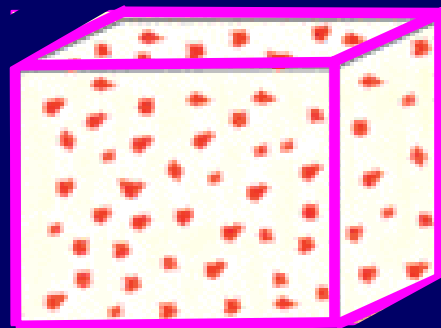
Si_3N_4 纤维的最大抗拉强度与直径关系 (纤维长625nm)

增强机理

复合材料的基本理论

2. 颗粒增强

颗粒增强复合材料是指由高强度、高弹性模量的脆性颗粒做增强体与韧性或脆性基体经一定工艺复合而成的多相材料。



颗粒增强复合材料的种类:

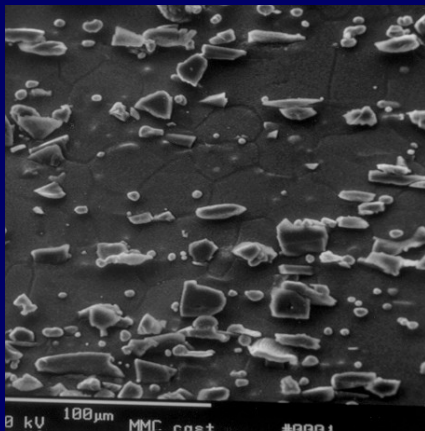
纳米微细硬颗粒弥散增强，微米颗粒增强。

增强机理

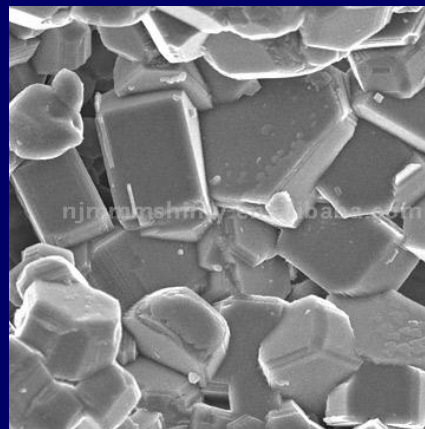
复合材料的基本理论

弥散强化复合材料中弥散颗粒种类：

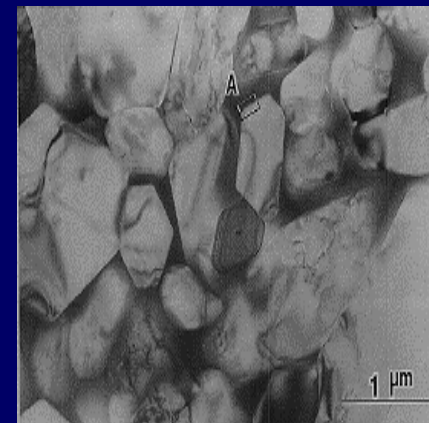
金属氧化物、碳化物、硼化物



SiC particles in magnesium alloy



boride



TEM image of Si₃N₄ particle structure

增强机理

复合材料的基本理论

颗粒增强复合材料的机理:

根据颗粒的尺寸大小,可分为弥散增强复合材料和真正颗粒增强复合材料。前者通常是指尺寸为埃米数量级的微细硬颗粒弥散分布在基体中;后者是指微米数量级的颗粒增强的复合材料。

纯颗粒增强

在这种复合材料中,颗粒不是通过阻碍位错运动使材料强化,而是借助于限制颗粒临近基体的运动,约束基体的变形来达到强化目的的。

增强机理

复合材料的基本理论

弥散强化

弥散分布在金属或合金基体中的硬颗粒可以有效地阻止位错运动，产生显著的强化作用。

这种复合强化机制类似于合金的析出强化机理，基体乃是承受载荷的主体。只是，这些细小弥散的硬颗粒并非借助于相变产生的硬颗粒，他们在温度升高时仍保持其原有尺寸。

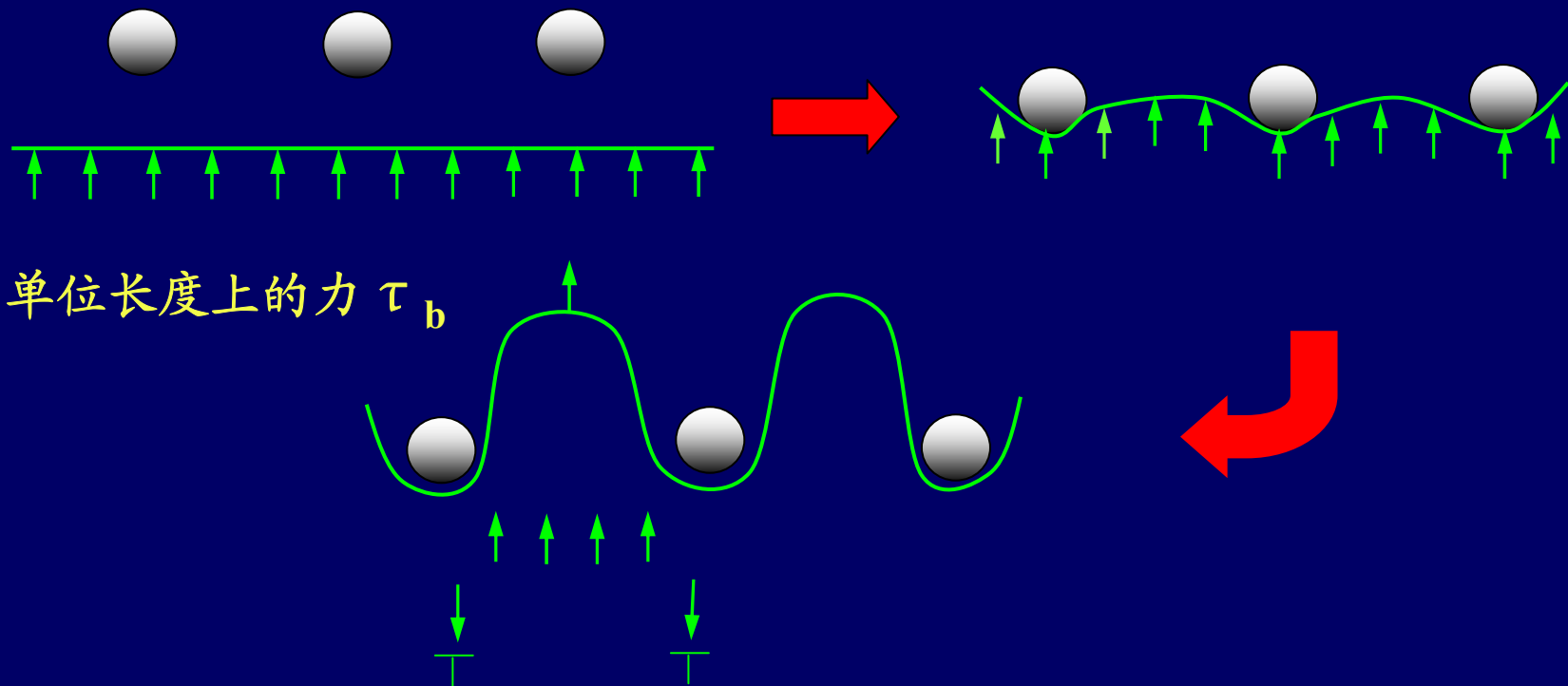
因而，增强效果可在高温下持续较长时间，使复合材料的抗蠕变性能明显优于金属或合金基体。

结构材料

复合材料

增强机理

复合材料的基本理论



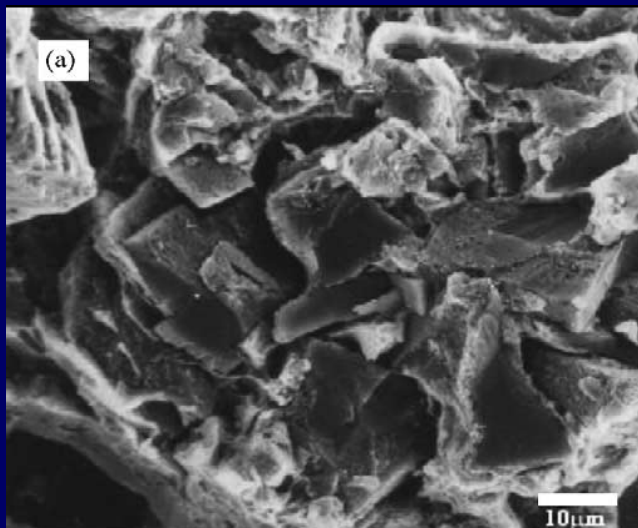
弥散增强原理图

结构材料

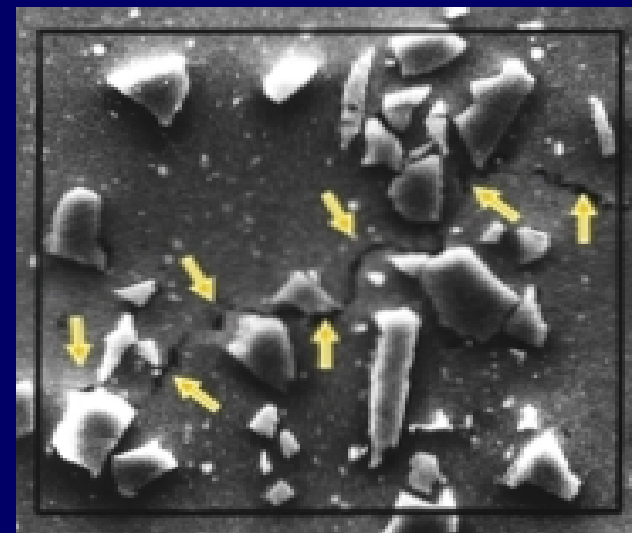
复合材料

增强机理

复合材料的基本理论



the tensile fracture surface
of the AZ92/SiC p

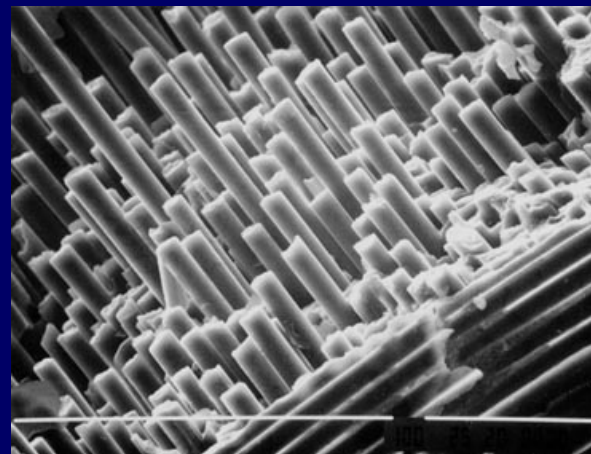
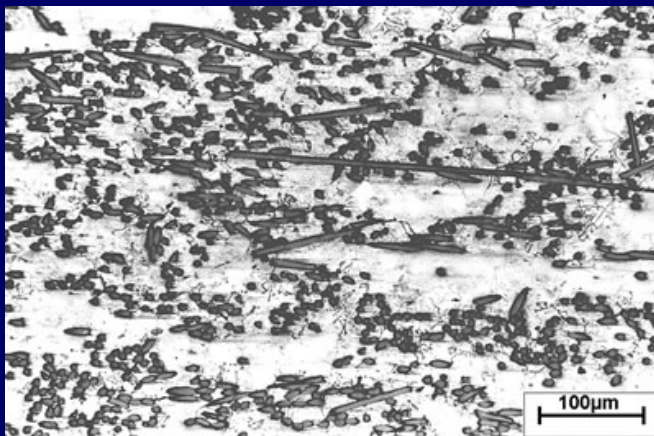


Experimentally observed
crack path in an Al/SiC
metal matrix composite

增韧机理

1. 纤维增韧

由于定向、取向或无序排布的纤维加入，使得复合材料的韧性得到显著提高。



① 单向排布长纤维增韧机理

单向排布长纤维增韧陶瓷基复合材料具有各向异性，沿纤维长度方向的纵向性能大大高于横向性能。

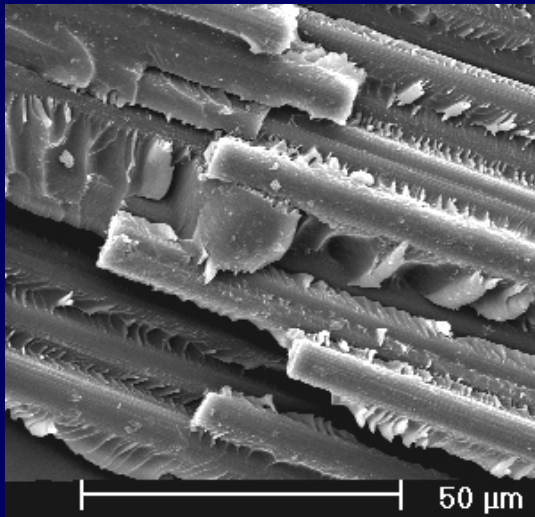
若材料中产生的裂纹平面垂直于纤维时，当裂纹扩展遇到纤维时，裂纹运动受阻，欲使裂纹继续运动，必须提高外加应力。应力继续增大，纤维与基体解离，纤维从基体中拔出、断裂或转向，从而使复合材料的韧性得到提高。

结构材料

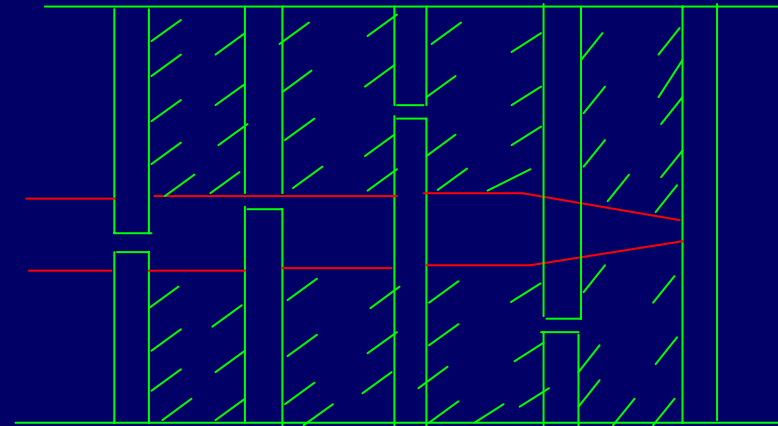
复合材料

增韧机理

复合材料的基本理论



Fractured carbon fibre reinforced composite



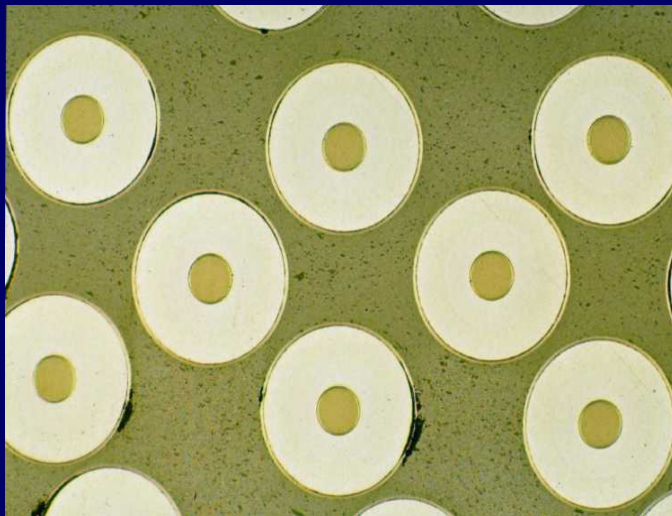
C_f/Si₃N₄复合材料中裂纹垂直于纤维方向扩展示意图

结构材料

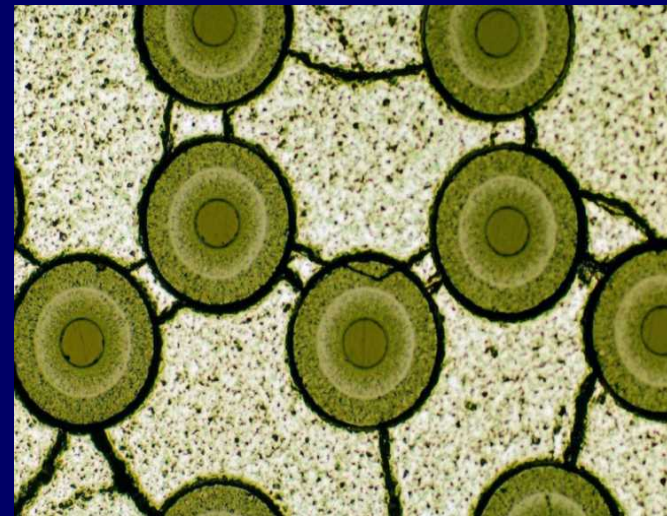
复合材料

增韧机理

复合材料的基本理论



SiC fibers in a Silicon Nitride matrix. As polished condition



Cracks in the SiC fibers /ceram composite

增韧机理

复合材料的基本理论

② 多维多向排布长纤维增韧

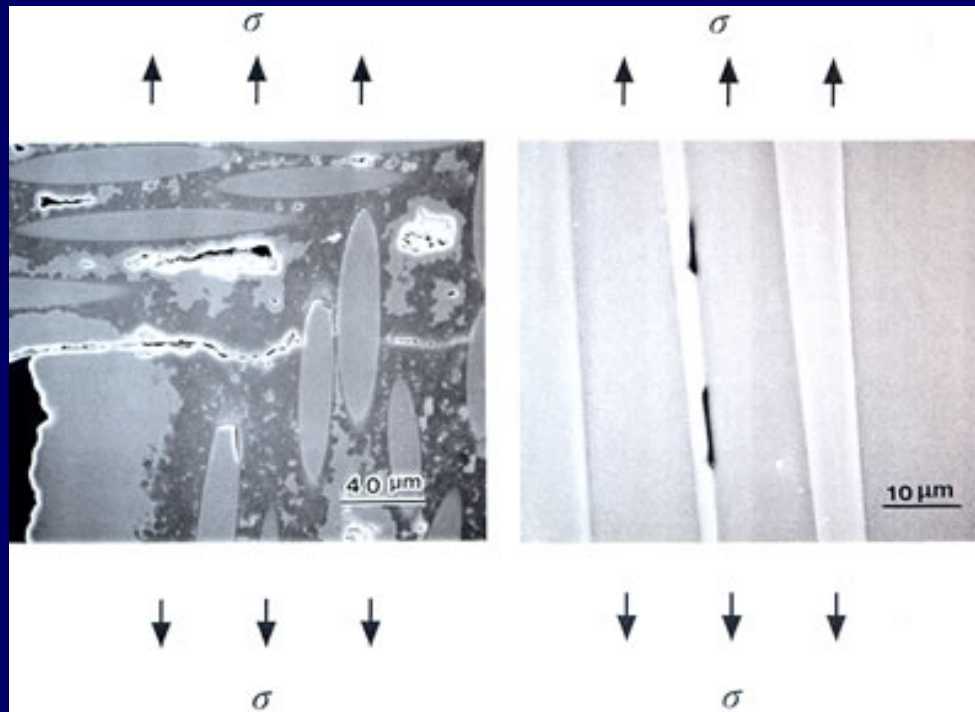
克服了单向长纤维只在一个方向上性能得到提高的弱点。多向长纤维可实现陶瓷等脆性材料在二维、三维方向上的性能提高。这种多维多向的排列方式有：

- ✓ 将纤维编织成纤维布；
- ✓ 纤维分层单向排布，层间纤维成一定角度。

多维长纤维增韧的机理与单向一样，主要是通过纤维的断裂、拔出或转向提高韧性。

增韧机理

复合材料的基本理论



Cracks in SiC/SiC composite at 1300° C

增韧机理

复合材料的基本理论

③ 短纤维增韧机理

短纤维增韧复合材料的制备工艺比长纤维的简便。

通常是将长纤维剪断 ($<3\text{mm}$)，再与基体粉体材料混合、热压制得。在热压时，短纤维沿压力方向择优取向，产生性能上的各向异性。

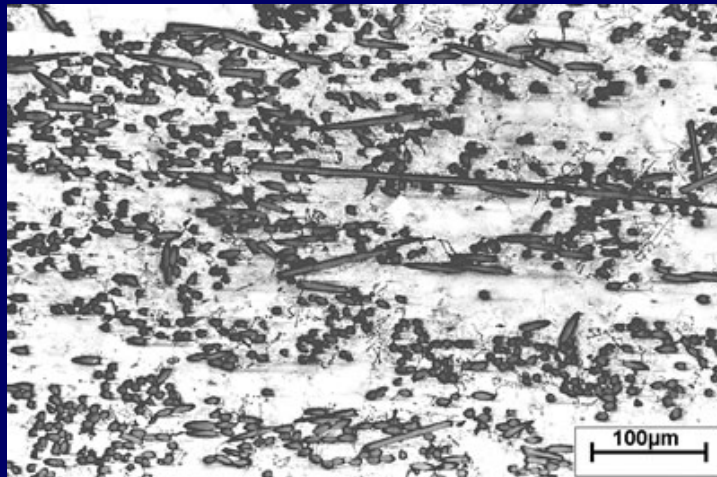
当短纤维的质量分数适当时，复合材料的断裂功显著提高，从而使断裂韧性得到提高。

结构材料

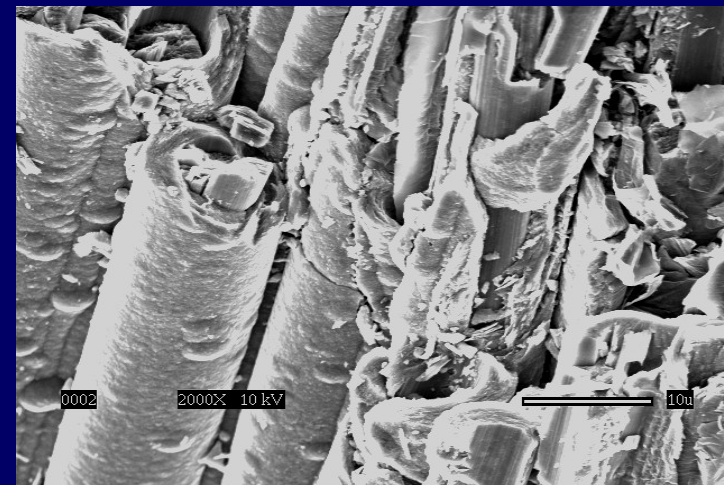
复合材料

增韧机理

复合材料的基本理论



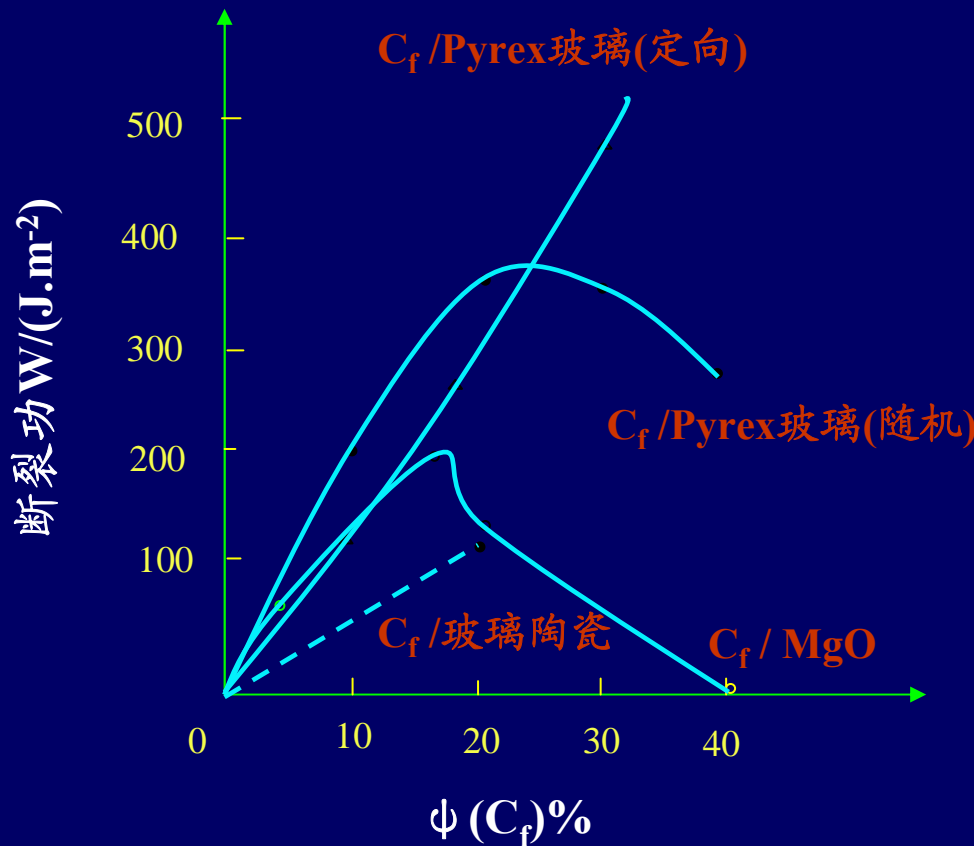
Micrograph of carbon fiber reinforced AS41



Short-carbon fiber composite

增韧机理

复合材料的基本理论



可以看出：纤维的质量分数适当时，复合材料的断裂功显著提高，断裂韧性提高；而无序分布时峰值减小，断裂韧性降低。

韧性提高来自：纤维拔出、纤维断裂、裂纹转向三方面贡献。

碳纤维含量对碳纤维增韧玻璃陶瓷复合材料断裂功的影响

增韧机理

复合材料的基本理论

④ 晶须增韧机理

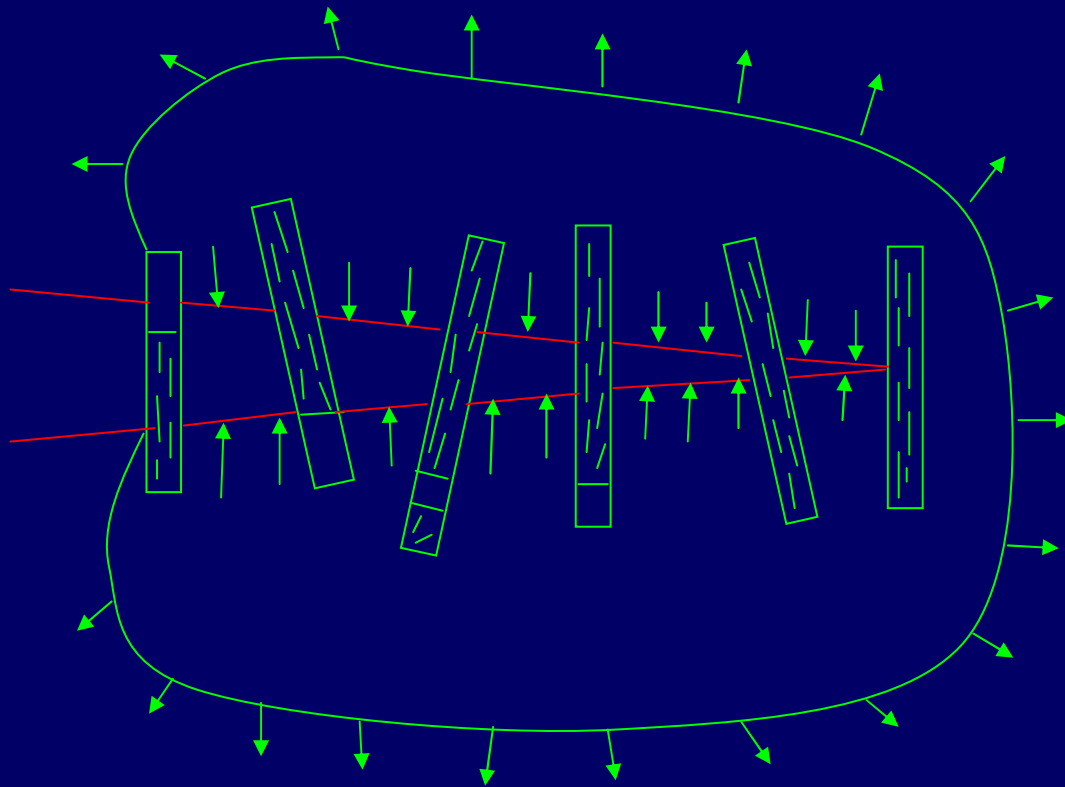
晶须的增韧机理与纤维增韧机理基本相同，即主要靠晶须拔出桥连与裂纹转向机制对韧性提高产生贡献。

研究表明，晶须与界面的强度直接影响复合材料的韧性。

界面强度过高，晶须与基体同时断裂，限制了晶须的拔出；而结合强度过低，晶须拔出功减小。这两种情况都对韧性的提高不利。

增韧机理

复合材料的基本理论



晶须的增韧机制

晶须桥连 晶须桥连增韧是指在基体出现裂纹后，晶须承受外界载荷并在基体裂纹相对的两边之间架桥，桥连晶须对基体产生一个使基体闭合的力，消耗外加载荷做功而使材料韧性增加。

影响晶须韧化行为的因素：

- ① 晶须的直径
- ② 晶须的强度
- ③ 晶须的化学表面特性
- ④ 体系组成
- ⑤ 基体的弹性模量
- ⑥ 晶须表面涂层
- ⑦ 晶须的分散性

2. 颗粒增韧

影响其增韧效果的主要因素是基体与增强颗粒的弹性模量和热膨胀系数之差以及两相的化学相容性。

增韧的机理主要包括:

- ✓ 相变增韧
- ✓ 裂纹转向与分叉增韧

增韧机理

① 相变增韧

通过相变产生的体积膨胀，产生压缩应力，从而抵消外加应力，阻止裂纹的扩展，达到增韧的目的。

相变增韧特征：

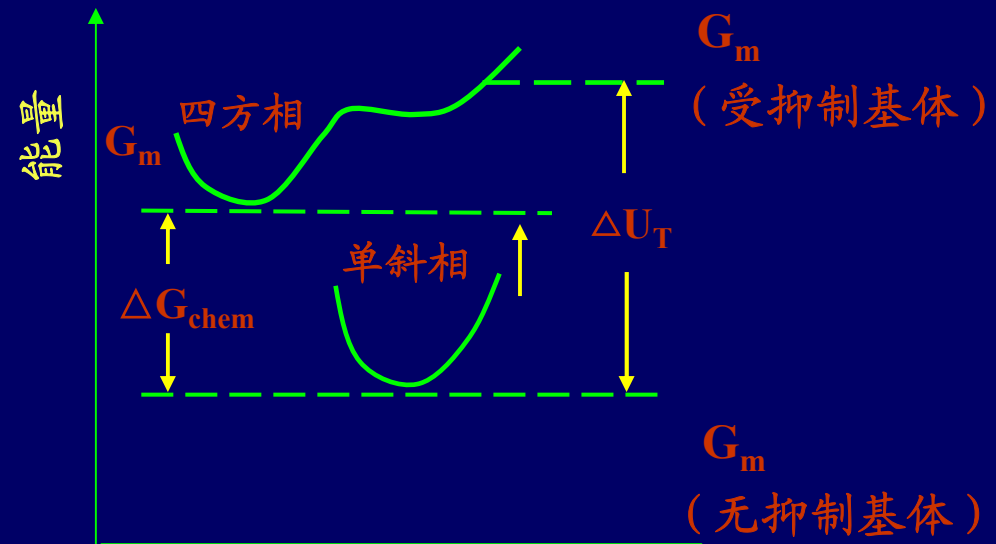
- a. 相变前后没有成分变化，具有无热、无扩散、相变激活能小、相变速度快的特点。
- b. 相变伴随有体积变化。
- c. 相变具有可逆性，因此相变发生在一个温度区间内而非一个特定的温度点上。

增韧机理

氧化锆增韧陶瓷就是利用 ZrO_2 马氏体相变达到增韧目的。

当基体对 ZrO_2 颗粒有足够的压应力，而 ZrO_2 的粒度又足够小时，则 ZrO_2 在室温时仍可保持四方相。

复合材料的基本理论



ΔU_T : 相变弹性应变能的变化 ΔG_{chem} : 两相之间化学自由能差

相变过程的能量变化

当材料受到外应力时，基体对 ZrO_2 的压抑作用得到松弛， ZrO_2 颗粒即发生四方相到单斜相的转变，并在基体中引起微裂纹，从而吸收了主裂纹扩展的能量，达到增加断裂韧性的效果。

② 裂纹转向与分叉增韧

裂纹在陶瓷材料中不断扩展，裂纹前沿遇到高强度的颗粒的阻碍，使扩展方向发生偏转和分叉，从而减小了裂纹尖端的应力强度因子，增加了材料的断裂韧度，达到了增韧的目的。由于裂纹转向和分叉不受温度的限制，这种增韧机理适用于高温结构陶瓷。

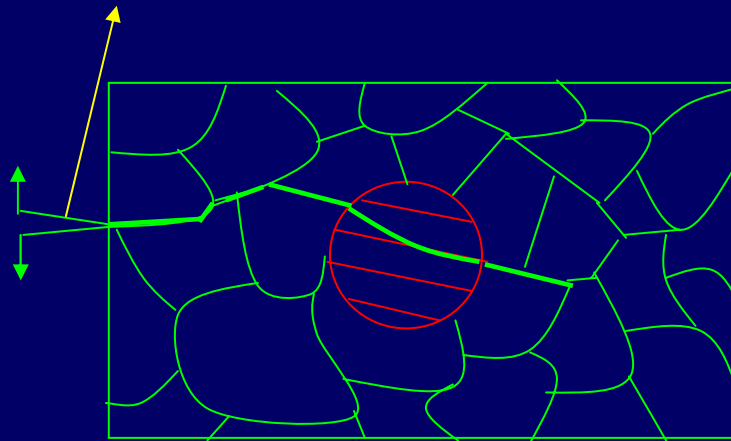
结构材料

复合材料

增韧机理

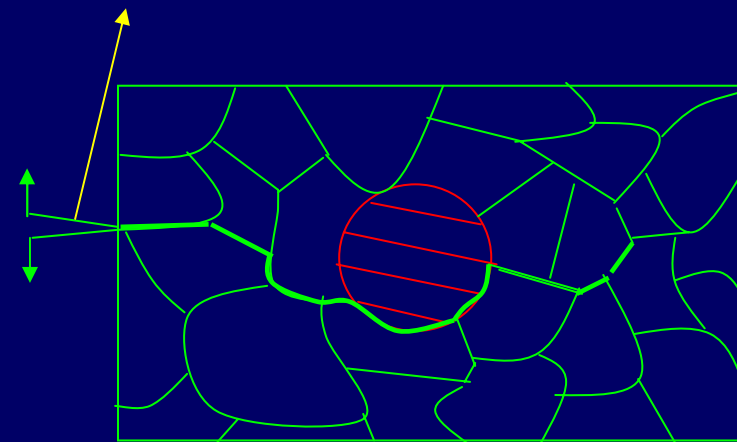
复合材料的基本理论

裂纹扩展路径



裂纹穿过颗粒扩展

裂纹扩展路径



裂纹沿颗粒晶界扩展

颗粒增强复合材料中裂纹扩展途径

复合材料的界面

复合材料的基本理论

什么是**界面**？

界面就是复合材料中基体与增强材料之间的结合面。这种结合面是基体和增强材之间发生相互作用、相互扩散而形成的。

界面的作用：

传递作用： 将外力传递给增强相。

阻断作用： 阻止裂纹扩展、减缓应力集中等作用。

保护作用： 防止基体与增强体反应，保护增强体。

复合材料的界面

复合材料的基本理论

金属基复合材料的界面:

在金属基复合材料界面区出现材料物理性质（弹性模量、热膨胀系数、热力学参数等）和化学性质的不连续性，使增强体和基体形成了热力学不平衡体系。

界面优化目标:

形成能有效传递载荷、调节应力分布、阻止裂纹扩展的稳定的界面结构。

复合材料的界面

复合材料的基本理论

纤维增强金属基复合材料界面的类型：

I. 纤维与基体互不反应、互不溶解的界面

如：SiC纤维/铝、B纤维/镁等

II. 纤维与基体不反应、但相互溶解的界面

如：碳纤维/镍、钨丝/镍等

III. 纤维与基体反应形成界面反应层

如：Al₂O₃纤维/钛、SiO₂纤维/铝

界面结合的类型

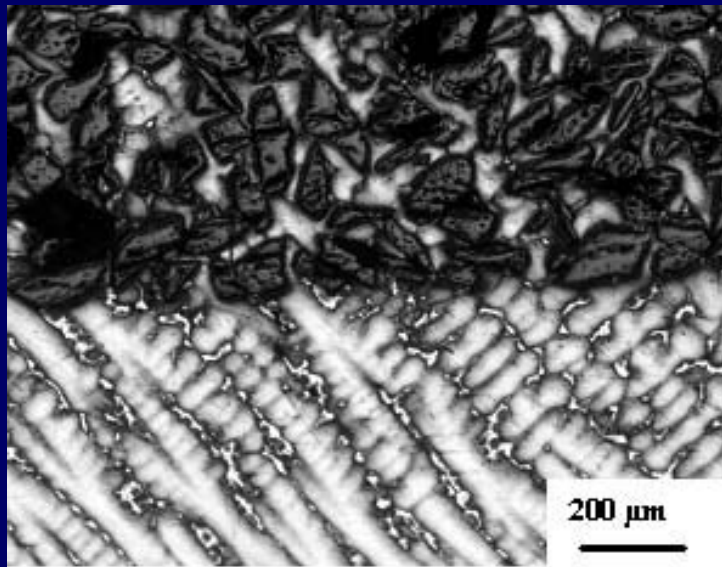
- I. **机械结合**: 借助增强纤维表面凹凸不平的形态而产生的机械铰合和基体与纤维之间的摩擦阻力形成。
- II. **溶解与浸润结合**: 液态金属对增强纤维的浸润, 而产生的作用力, 作用范围只有若干原子间距大小。
- III. **反应结合**: 基体与纤维之间形成界面反应层。
- IV. **混合结合**: 上述三种形式的混合结合方式。

结构材料

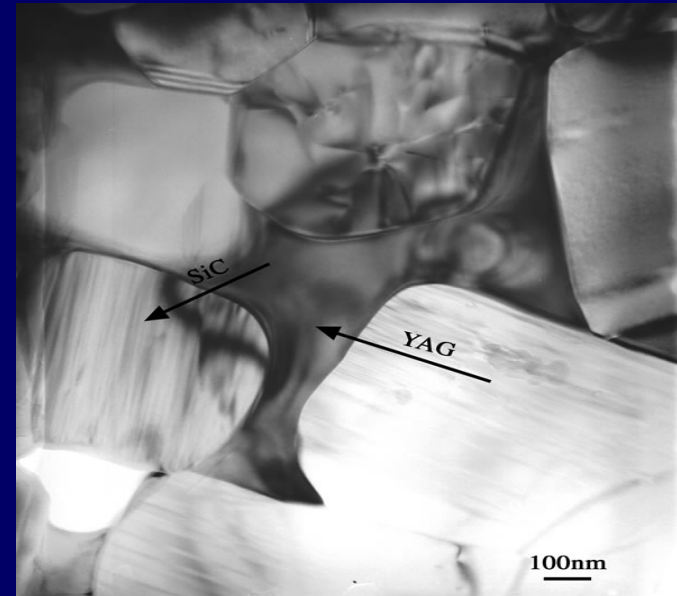
复合材料

复合材料的界面

复合材料的基本理论



The alloy-composite interface of the sample cooled at 30° C/min.



Metal-ceramic interface

陶瓷基复合材料的界面

在陶瓷基复合材料中，增强材料与基体之间的结合同样以机械结合、溶解与浸润结合、反应结合和混合结合的方式进行。界面的特性对复合材料的性能起到举足轻重的作用。

在复合材料承载过程中，界面解离可以有效地调节复合材料内部的应力分布，缓解基体裂纹端部的应力集中，阻止裂纹向增强体发展。

复合材料的界面

复合材料的基本理论

怎样通过控制界面特征对材料性能产生作用？

1. 改变增强材料表面性质。

采用这种方法的目的防止强化材料与基体间的反应，从而获得最佳界面力学特性。

2. 向基体内添加特定的元素。

3. 在增强材料的表面施加涂层。

用这种方法可以达到阻碍增强材料与基体间的化学扩散和界面的化学反应，提高界面剪切强度的目的

结构材料

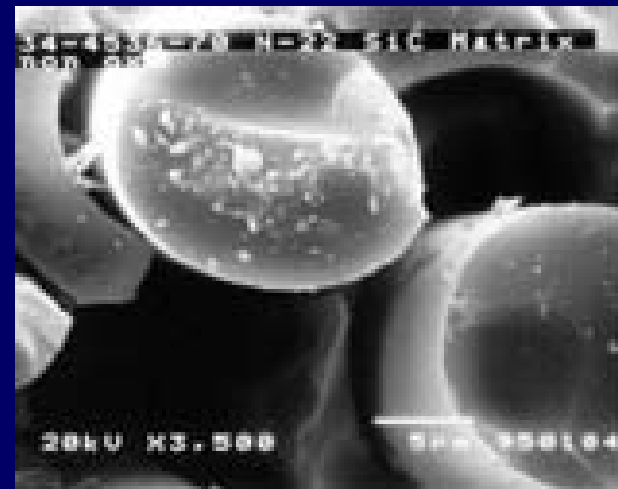
复合材料

复合材料的界面

复合材料的基本理论



TaC coated Nicalon fiber



SiC/SiC composite material
with TaC as interface



结构材料

复合材料

概述

金属基复合材料

金属基复合材料除具有与树脂基复合材料相同的高强度、高弹性模量和线膨胀系数小以外，还具有工作温度高、不易燃烧、导电、导热、热稳定性好等特点。但这类材料存在密度高、制作成本高、工艺复杂、增强材与基体间易发生化学反应等缺点。

金属基复合材料包括：长纤维增强、短纤维或晶须增强、颗粒增强以及原位复合增强等。



结构材料

复合材料

长纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

这类复合材料具有各向异性特征，其程度取决于纤维在基体中的数量、分布和排列情况。

1. 硼/铝复合材料

硼纤维高温强度高，1500度时蠕变速率低。但高温氧化后强度降低，所以一般在硼纤维表面涂覆一层SiC或 B_4C ，防止纤维表面氧化。

长纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

2. 石墨/铝复合材料

这种材料具有导电性高、摩擦系数小和耐腐蚀等特点。利用石墨纤维表面沉积Ti/Bi涂层技术，可改善石墨纤维与液态铝的湿润性，有效控制铝与纤维的表面反应，提高复合材料的性能。

主要应用于航天结构件、飞机蒙皮和涡发动机的压气机叶片等

3. 石墨/镁复合材料

这种材料密度低、线膨胀系数为零，尺寸的稳定性好，是金属基复合材料中具有最高比强度和比弹性模量的复合材料。可在石墨纤维表面沉积 TiB_2 ，提高石墨纤维的润湿性。

这种材料价格昂贵，主要应用于航天航空领域，如人造卫星10m直径的抛物面天线及其支架、航天飞机的大面积蜂窝结构蒙皮、飞机的天线支架等。

结构材料

复合材料

长纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

4. 碳化硅/钛复合材料

碳化硅纤维比强度高、比模量高，高温强度高，耐热、抗氧化，与金属的反应小，润湿性好。这种复合材料的高温强度高，主要应用于飞机发动机部件和涡轮叶片以及火箭发动机箱体材料。



飞机发动机涡轮



飞机发动机

结构材料

复合材料

长纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

5. 氧化铝/铝复合材料

氧化铝纤维在氧化气氛中稳定，能在高温下保持其强度、刚度，且硬度高，耐磨性好。这种复合材料具有高强度和高刚度，可用于汽车发动机活塞和其他发动机零件。



汽车发动机部件



汽车发动机活塞



结构材料

复合材料

短纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

这类复合材料具有比强度、比模量高，耐高温，耐磨，线膨胀系数小，且可用常规设备进行制备和二次加工。

① 氧化铝/铝复合材料

其高温强度、弹性模量明显优于基体的高温强度和弹性模量，且膨胀系数较低、耐磨性较高。用于汽车发动机零件等。



结构材料

复合材料

短纤维增强金属基复合材料

金属基复合材料

② 碳化硅/铝复合材料

这类复合材料具有良好的综合性能，比强度、比模量高，线膨胀系数低。主要应用于航空航天领域。

③ 氧化铝/镍复合材料

晶须于基体的线膨胀系数相差较大，复合时遇到困难，又晶须价格昂贵，使之发展缓慢，应用有限。



结构材料

复合材料

颗粒增强金属基复合材料

金属基复合材料

颗粒增强金属基复合材料是由一种或多种陶瓷或金属颗粒作为增强材料与金属基体组成的先进复合材料。

① 碳化硅/铝复合材料

这种复合材料的强度与钛合金相近，弹性模量高于钛合金；耐磨性比铝合金的高一倍，使用最高温度可达300-350℃。已批量用于汽车工业和机械工业。



结构材料

复合材料

颗粒增强金属基复合材料

金属基复合材料

② 碳化钛/钛复合材料

与基体合金相比这种复合材料强度、弹性模量及耐蠕变性能均明显提高，使用温度可达 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可用于制造导弹壳体、导弹尾翼等。

③ 颗粒增强金属间化合物基复合材料

这类复合材料主要有 TiB_2/NiAl 、 TiB_2/TiAl 等，使用温度高达 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，目前尚处于试验研究阶段。



结构材料

复合材料

原位复合金属基复合材料

金属基复合材料

什么是原位复合材料？

原位复合材料是采用定向凝固方法，使液态金属和合金在有规则的温度梯度场中进行冷却凝固，金属基体自身析出晶须或颗粒而得到的复合材料。也称自增强金属基复合材料。



结构材料

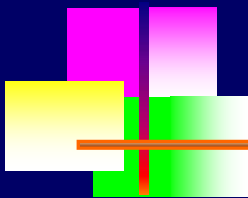
复合材料

原位复合金属基复合材料

金属基复合材料

原位复合材料的特点：

- ✓ 增强相在结晶凝固过程中析出，故界面结合牢固、强度高，同时避免了人工复合时润湿、化学反应、相容性等问题。
- ✓ 由于两相是在高温接近热平衡条件下缓慢生成的，因而具有良好的热稳定性。
- ✓ 材料易加工，能直接铸成所需结构。

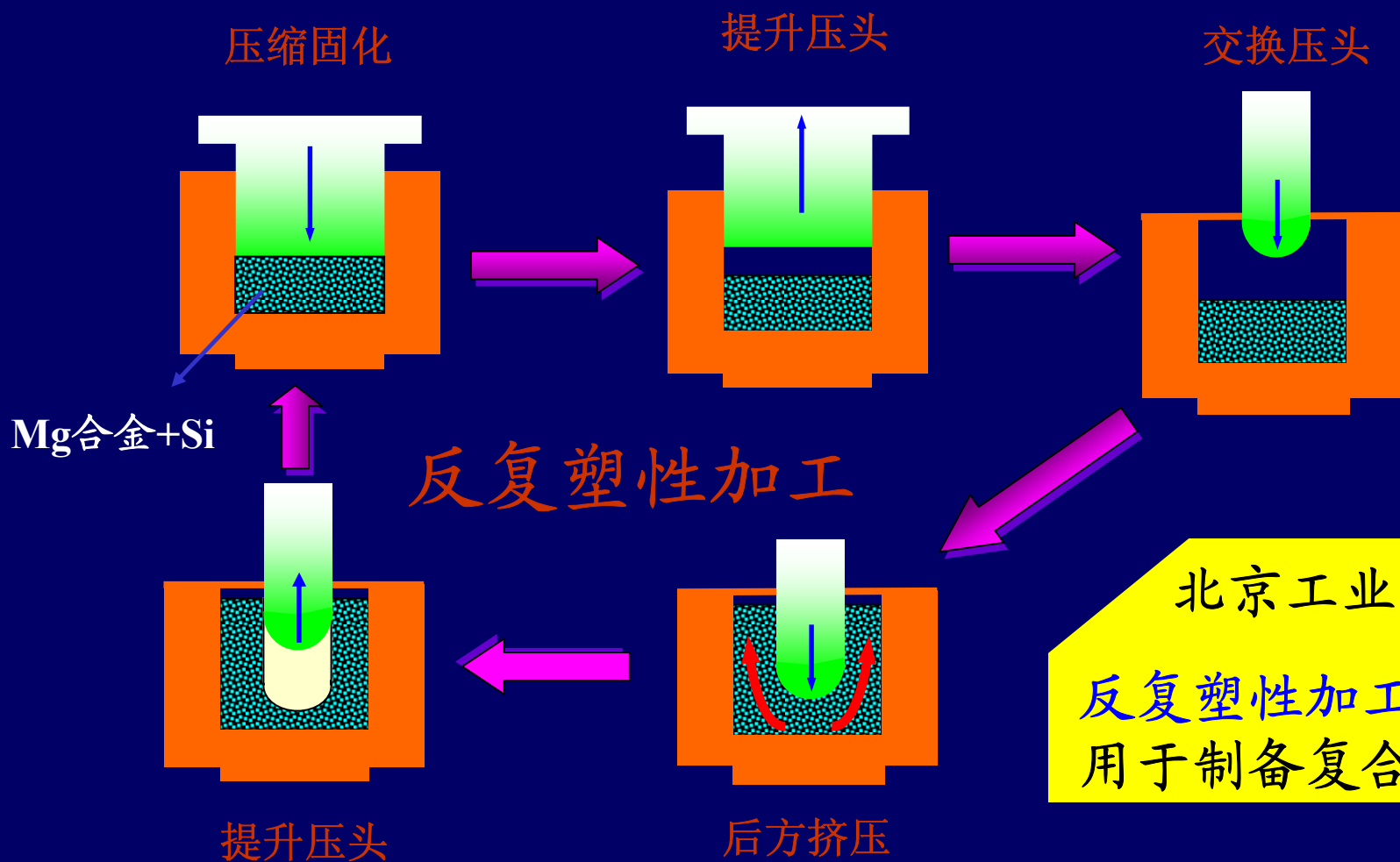


结构材料

复合材料

原位复合金属基复合材料

金属基复合材料



北京工业大学

反复塑性加工技术
用于制备复合材料

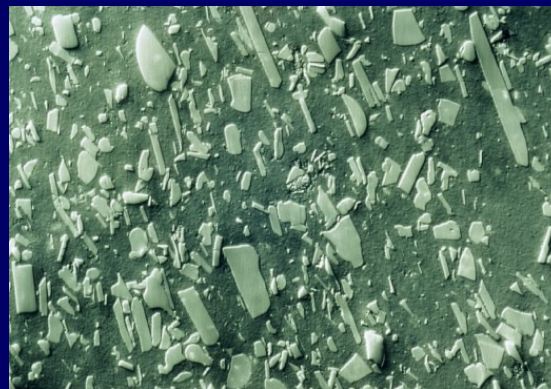
陶瓷基复合材料

什么是陶瓷基复合材料？

在陶瓷基体中添加碳纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维、碳化硅晶须、氧化铝晶须、碳化硅颗粒和碳化钛颗粒，所形成的复合材料称为**陶瓷基复合材料**。这些纤维的加入可以大大提高陶瓷材料的强度和韧性。



SiC(纤维)/Si₃N₄



SiCp/ZrB₂



结构材料

复合材料

长纤维增强陶瓷基复合材料

金属基复合材料

1. 碳/陶瓷基复合材料

这种复合材料具有很高的**高温强度**、**弹性模量**和**较高的韧性**。碳纤维增强的**氮化硅陶瓷**可在**1400度以上**的高温下长期工作；碳纤维增强的**石英陶瓷**复合材料，冲击韧性比烧结石英陶瓷高**40倍**、抗弯强度高**5-12倍**。可承受**1200-1500度**高温气流的冲击。主要用于制造喷气飞机的**涡轮叶片**。

2. 碳化硅/陶瓷基复合材料

碳化硅纤维可与多重陶瓷，如碳化硅陶瓷、氧化铝陶瓷、氧化锆陶瓷等复合。碳化硅纤维通常采用CVD制备。利用碳化硅纤维强化的碳化硅陶瓷，其断裂韧性提高5-6倍，抗弯强度提高50%以上，且基体与纤维之间的结合性能良好。已用于制造喷气发动机的喷嘴。



结构材料

复合材料

长纤维增强陶瓷基复合材料

金属基复合材料

3. 碳/碳复合材料

这种材料是将碳纤维用聚合物浸润，固化成型后，在无氧条件下，高温裂解树脂，得到碳/碳复合材料。碳/碳复合材料的强度和刚度都相当好，能承受极高的温度和极高的加热速度，高温力学性能比低温时还好，是目前使用温度最高的复合材料。



结构材料

复合材料

短纤维及晶须增强陶瓷基复合材料

金属基复合材料

① 碳/玻璃陶瓷基复合材料

利用短切碳纤维增强玻璃陶瓷可使这一复合材料的韧度大大提高，当碳纤维定向有序分布时可获得更高的断裂韧度。

② 晶须/陶瓷基复合材料

晶须： SiC 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 晶须。

基体： Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiO_2 、莫来石等。

颗粒增强陶瓷基复合材料

金属基复合材料

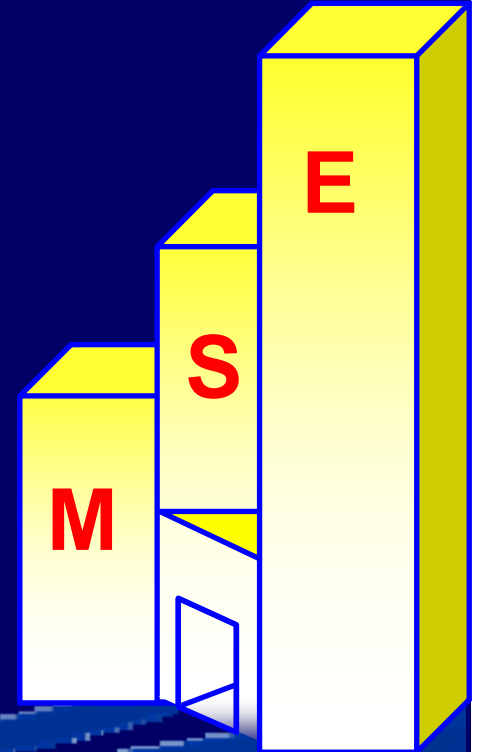
① 氧化锆/陶瓷基复合材料

利用 ZrO_2 相变增韧原理，提高陶瓷的断裂韧性。利用 ZrO_2 增韧的 Al_2O_3 陶瓷，其断裂韧性可提高1-1.4倍。

② 氧化钇/陶瓷基复合材料

在 ZrO_2 陶瓷中加入 Y_2O_3 微粒，可获得晶粒组织非常细小的高强度、高韧性复合陶瓷。

Thank You



opening

is

MSE

The door to