

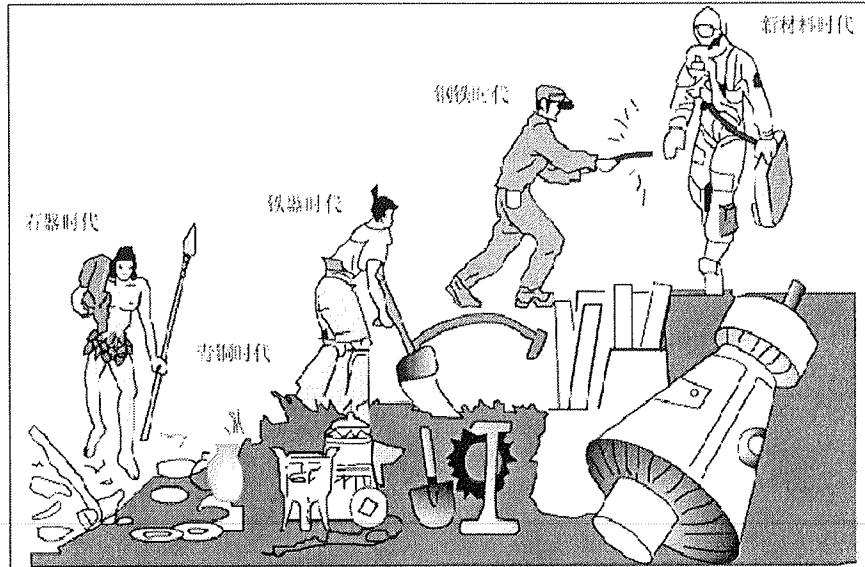
工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

一、材料与材料科学：

材料是人类生产和生活所必须的物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品，从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人，都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成。

人类社会的发展按材料分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、新材料时代。



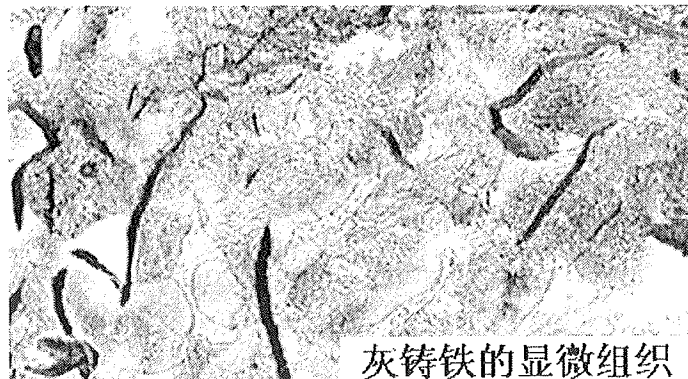
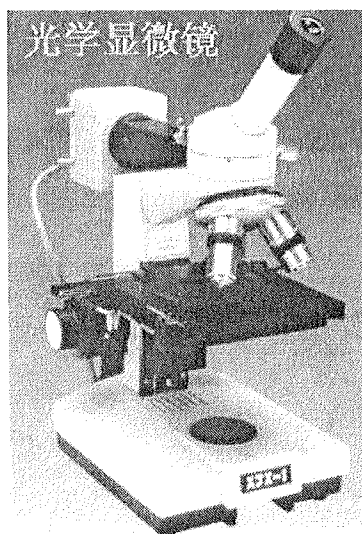
中国科学技术大学

工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

人类对材料的认识是逐步深入的：

1863年，光学显微镜首次应用于金属研究，诞生了金相学，使人们能够将材料的宏观性能与微观组织联系起来。

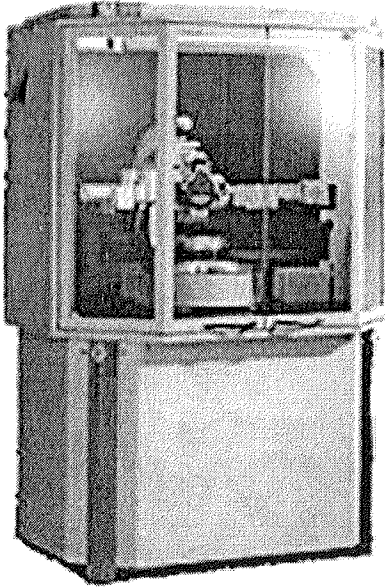


工程材料及成型技术基础

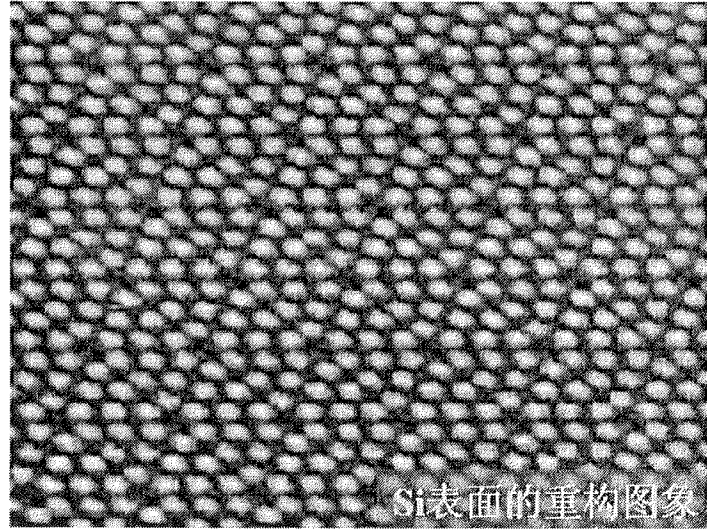
第一章 绪论

人类对材料的认识是逐步深入的：

1912年发现了X-射线对晶体的作用并在随后被用于晶体衍射分析，使人们对固体材料微观结构的认识从最初的假想到科学的现实。



X-射线衍射仪



Si表面的重构图象

中国科学技术大学

工程材料及成型技术基础

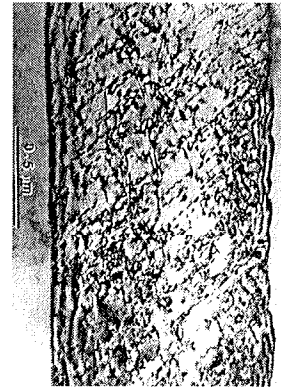
第一章 绪论

人类对材料的认识是逐步深入的：

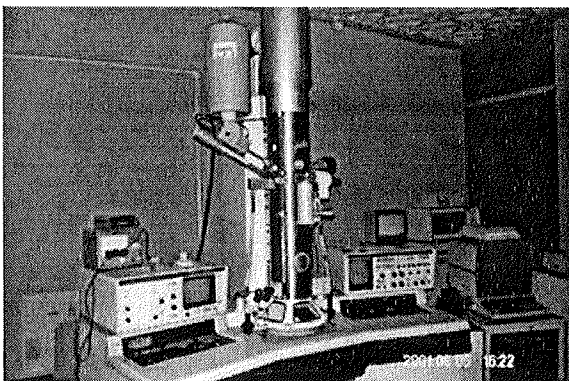
1932年发明了电子显微镜，把人们带到了微观世界的更深层次（ 10^{-7}m ）。



光镜



电镜



透射电子显微镜



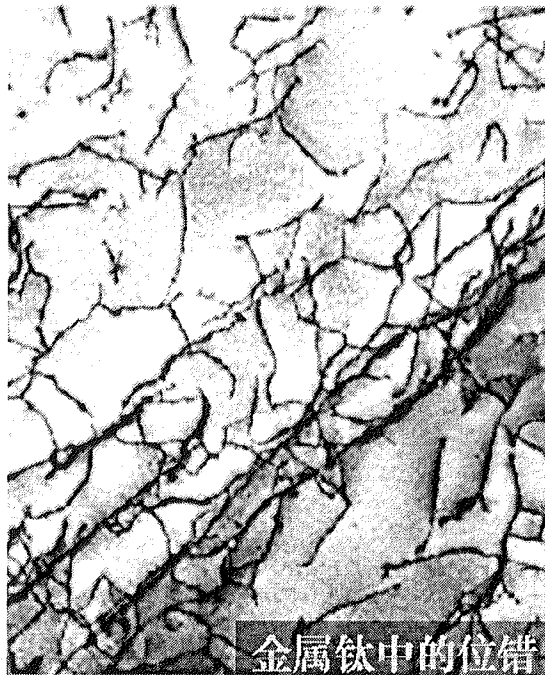
扫描电子显微镜

工程材料及成型技术基础

第一章 绪 论

人类对材料的认识是逐步深入的：

1934年位错理论的提出，解决了晶体理论计算强度与实验测得的实际强度之间存在的巨大差别的矛盾，对于人们认识材料的力学性能及设计高强度材料具有划时代的意义。



金属钛中的位错

中国科学技术大学

工程材料及成型技术基础

第一章 绪 论

材料科学：

材料科学是以材料为研究对象，研究材料的成分、组织、性能和应用之间的关系及其规律的一门科学，它包含四个基本要素：材料的成分组织结构、材料的制备合成与加工工艺、材料的固有性能和材料的使用行为。

主要研究内容：

- (1) 研究材料的化学组成、结构与性能的关系；
- (2) 研究材料的形成机理和制取方法；
- (3) 研究材料物理性能的测试方法和技术；
- (4) 分析材料的损坏机理；
- (5) 研究材料的合理加工方法和最佳使用方案

工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

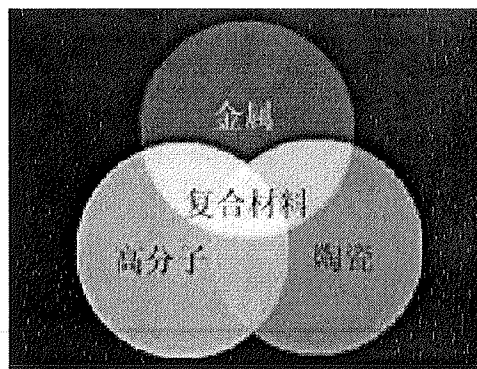
二、工程材料的分类：

工程材料是用于制造工程结构和机械零件并主要要求力学性能的材料。主要应用于机械制造、航空航天、化工、建筑与交通等部门。

按其应用领域分为机械工程材料、建筑工程材料、航空航天材料、能源材料等。

按其性能特点分为结构材料和功能材料

工程上按材料的组成与结合键将材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料四大类。



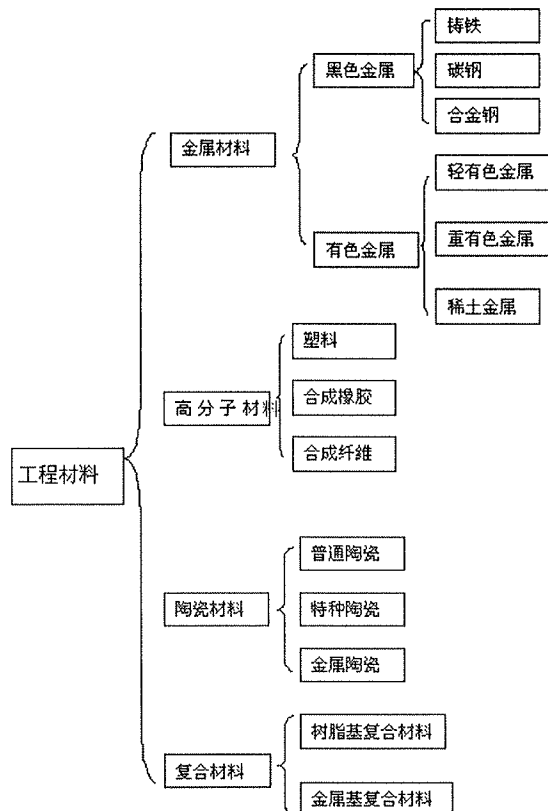
中国科学技术大学

工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

二、工程材料的分类：

按材料的组成与结合键划分





工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

二、工程材料的分类:

(一) 金属材料 用量最大、用途最广。

分为: 黑色金属和有色金属。

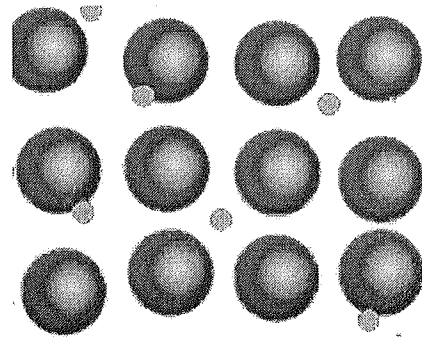
1. 黑色金属: 即钢铁材料, 占金属材料的**95%**以上。

2. 有色金属: 即非铁合金, 指除铁基合金以外的所有金属及其合金材料。分为轻金属(铝、镁、钛), 重金属(铅、铋), 贵金属(金、银、镍、铂)。

特点:

★以金属键结合为主

★良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽



中国科学技术大学

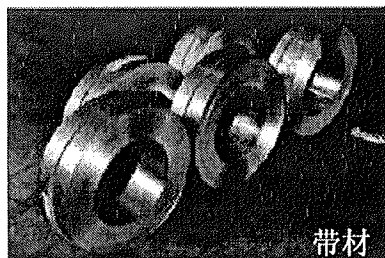


工程材料及成型技术基础

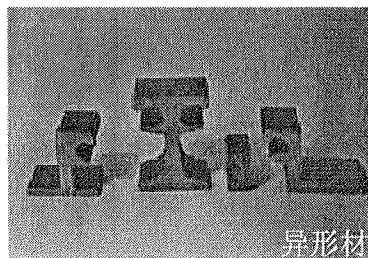
第一章 绪论

二、工程材料的分类:

铁及铁合金称为黑色金属, 即钢铁材料, 其世界年产量已达**10亿吨**, 在机械产品中的用量已占整个用材的**60%**以上。



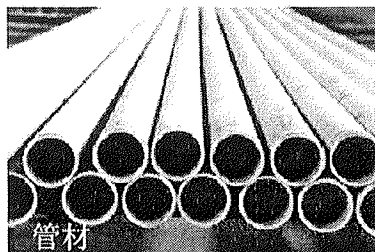
带材



异形材



板材



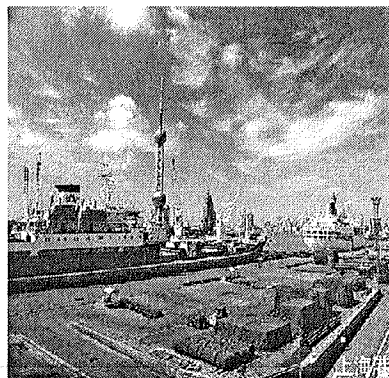
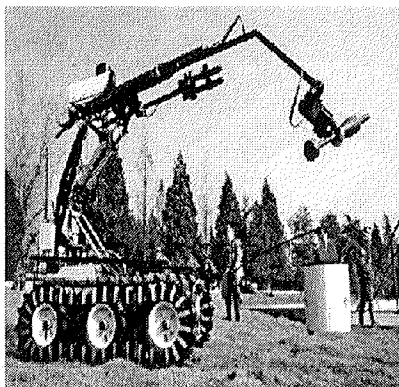
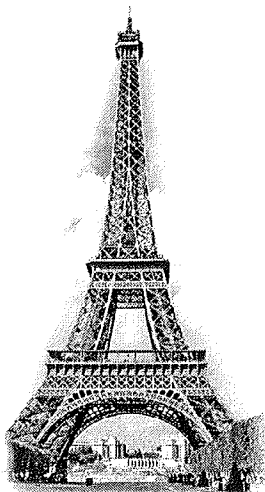
管材

第一章 绪论

二、工程材料的分类:

金属材料 {
 纯金属
 合金

- 建筑
- 桥梁
- 器械
- 车辆、飞机、舰艇
- 其它



中国科学技术大学

第一章 绪论

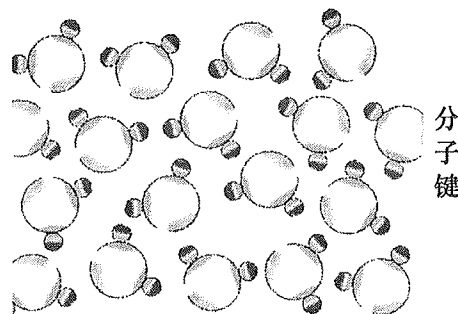
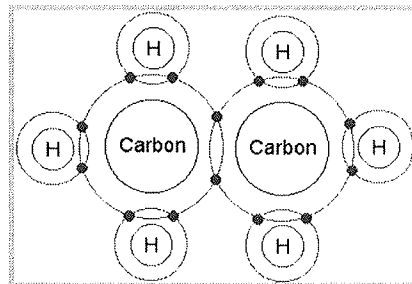
二、工程材料的分类:

(二) 高分子材料塑性、耐蚀性、电绝缘性、减振性好, 密度小

高分子材料又称聚合物, 是由相对分子质量很大的大分子组成, 其主要原料是石油化工产品。按其性能分为塑料、橡胶、合成纤维、涂料和胶粘剂。

塑料是最重要的高分子材料, 分为通用塑料和工程塑料。通用塑料占塑料生产的 70% 左右, 聚乙烯是典型代表。工程塑料指力学性能较高的聚合物。

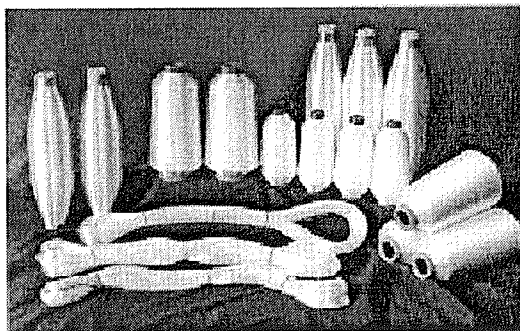
- 高分子材料以分子键和共价键为主



第一章 绪 论

二、工程材料的分类:

高分子材料在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中被广泛应用。



合成纤维及其服装制品

第一章 绪 论

二、工程材料的分类:

(三) 陶瓷材料

陶瓷材料是指硅酸盐、金属与非金属元素的化合物（主要是氧化物、氮化物、碳化物）

工业上分为三大类:

- 1.传统陶瓷又称普通陶瓷，由粘土、石英、长石组成，主要成分是天然硅、铝的氧化物及硅酸盐，常作建筑材料。
- 2.特种陶瓷又称精细陶瓷，主要成分是人工氧化物、碳化物、氮化物和硅化物等的烧结材料，常作工业上耐热、耐蚀、耐磨等零件。
- 3.金属陶瓷，金属粉末与陶瓷粉末的烧结材料，常作工具、模具等。

陶瓷材料优点：高硬度、高耐磨性、高的抗压强度、高耐热性和耐蚀性。

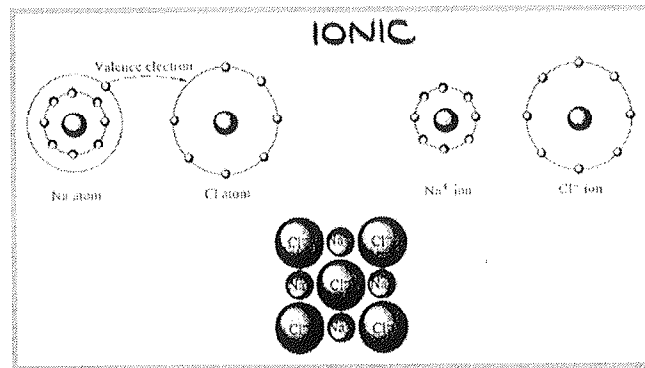
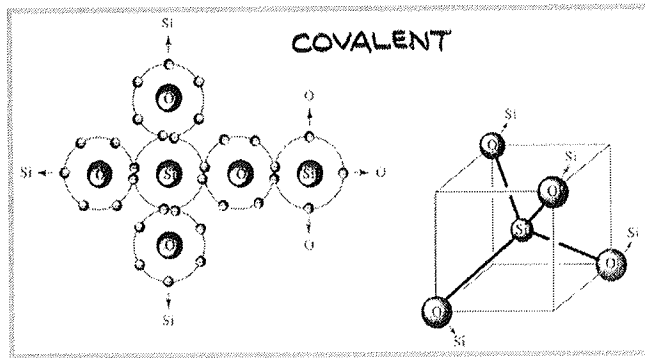
缺点：塑性低、易脆断、不易加工成形。

第一章 绪论

二、工程材料的分类:

(三) 陶瓷材料

以共价键和离子键为主

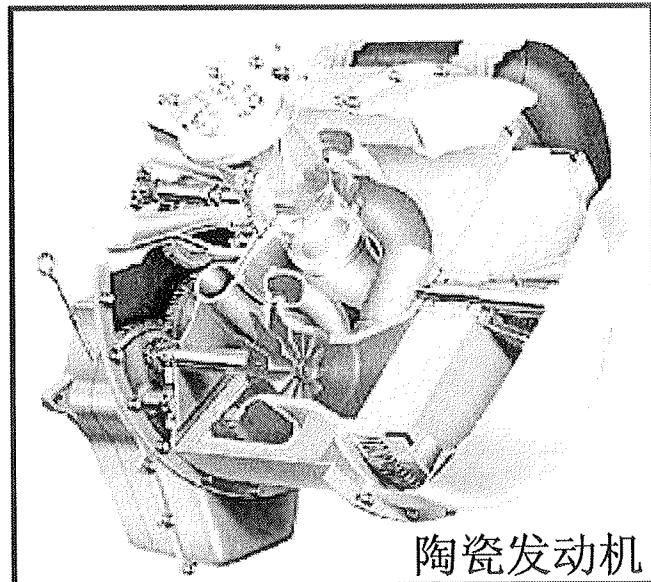
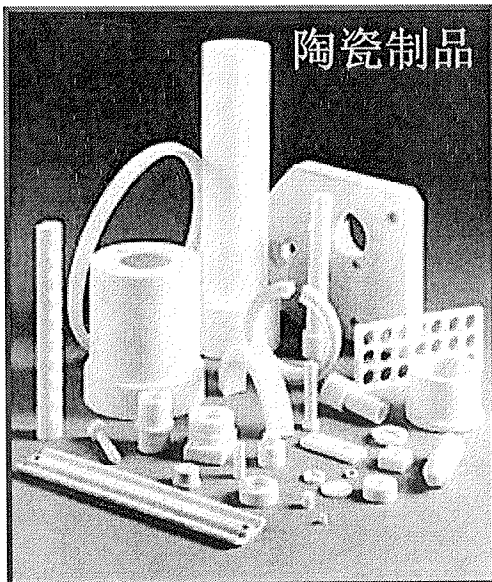


中国科学技术大学

第一章 绪论

二、工程材料的分类:

(三) 陶瓷材料



第一章 绪论

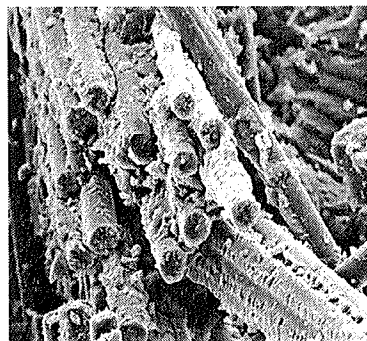
二、工程材料的分类

(四) 复合材料

金属、高分子、陶瓷材料各有优点，将两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起形成的材料，便是复合材料。各组成材料取长补短，是一种新型的优异材料。

按其基体不同可分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。

树脂基复合材料已处于成熟应用阶段，金属基复合材料和陶瓷基复合材料由于制造工艺复杂，成本高昂，尚处于研制开发阶段。



玻璃纤维增强高分子复合材料

中国科学技术大学

第一章 绪论

三、材料科学与机械工程

机械工程是一个极广的概念。发展方向将朝着大型及微型、高速、耐高低温、耐高压、耐恶劣环境影响等方向发展。

优质的机械产品是合理的材料、优良的设计和正确的加工这三者整体配合，而材料是基础。

(一) 材料与产品质量

大量事实说明，许多材料及其工艺问题是我国机械产品功能差、质量低寿命短的主要原因之一。

(二) 材料与机械设计

机械设计涉及广泛的学科领域，其中数学、材料科学、工程力学和工业造型是其重要的支柱，主要包括功能设计、结构与材料设计。



工程材料及成型技术基础

第一章 绪 论

三、材料科学与机械工程

(三) 材料与机械制造

机械制造是将材料经济地加工成最终产品的过程。可以分为改形工艺和改性工艺。

1. 改形工艺，保证结构形状与尺寸

切削成形（如车、铣、刨、磨、钻）

流动成形（铸造，塑性成形等）

连接成形（焊接、铆接、粘接）

2. 改性工艺，保证组织性能，包括材料整体处理工艺（退火、正火、淬火、回火、时效等）和材料表面改性处理工艺。

材料的表面改性是近代科学研究的重要内容之一，可以提高材料的疲劳性能、耐磨性、耐蚀性。

中国科学技术大学



工程材料及成型技术基础

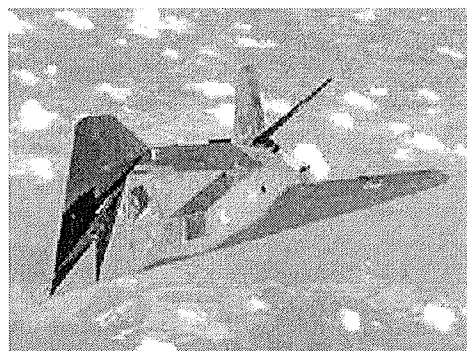
第一章 绪 论

四、工程材料的应用和发展

随着经济的飞速发展和科学技术的进步，对材料的要求越来越苛刻，结构材料向高比强、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照和多功能的方向发展。



国产东风4D-0088内燃机车



美国F-117隐身飞机



工程材料及成型技术基础

第一章 绪论

四、工程材料的应用和发展

新材料在不断地涌现。



中国科学技术大学

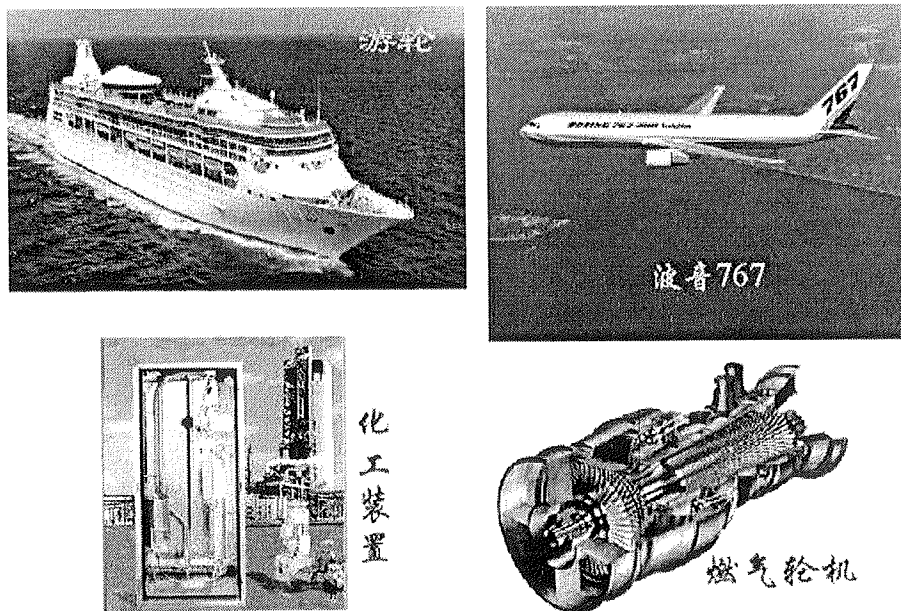


工程材料及成型技术基础

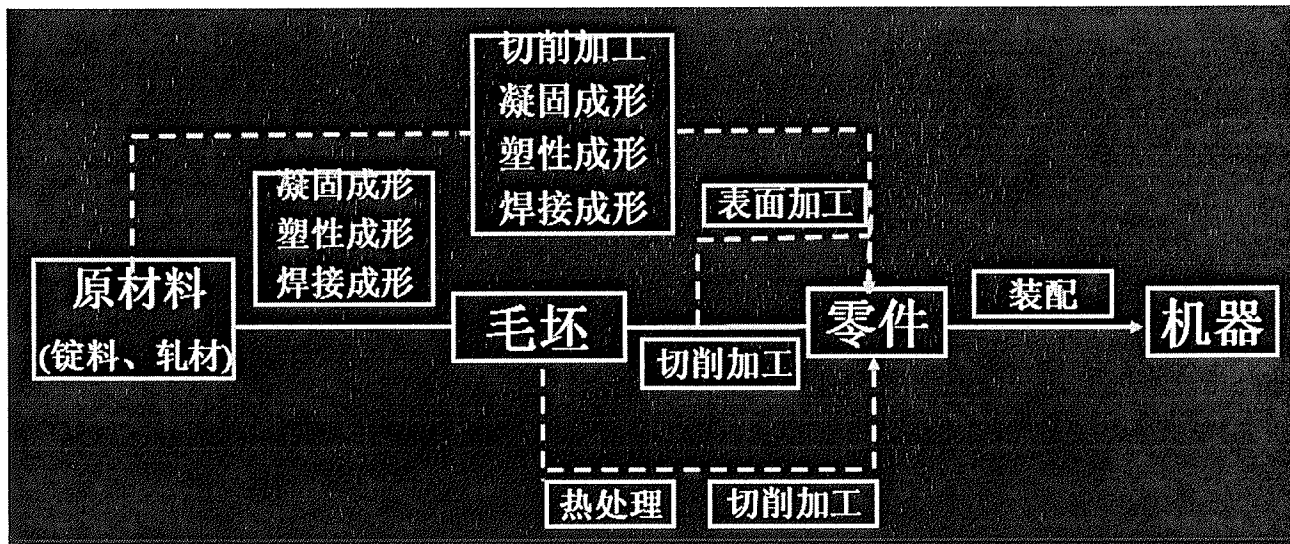
第一章 绪论

四、工程材料的应用和发展

机械工业是材料应用的重要领域。

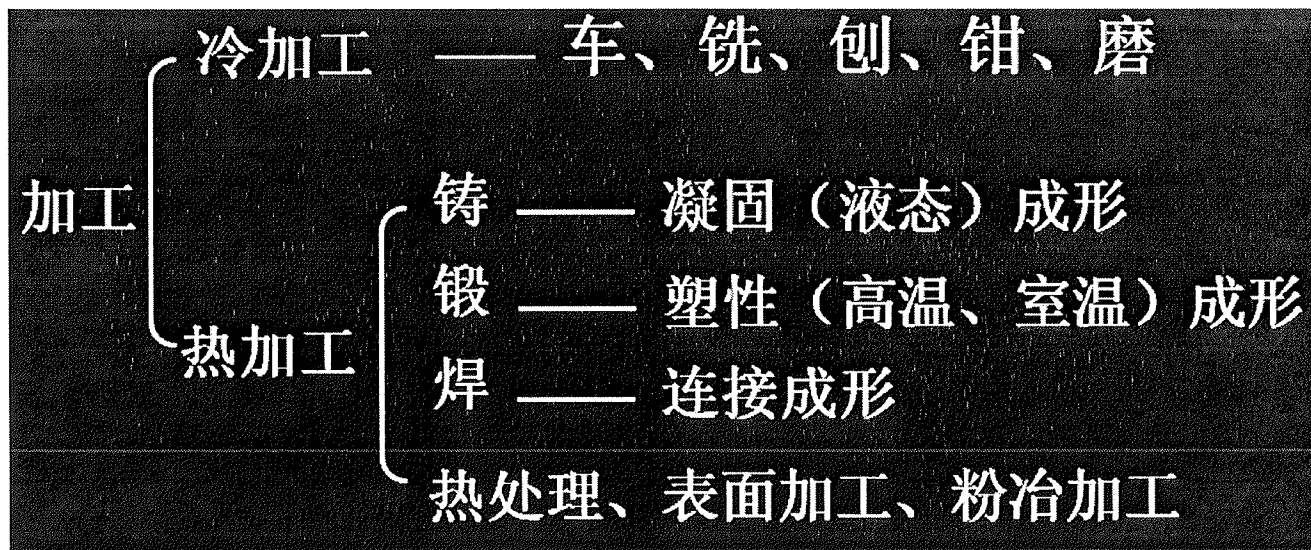


五、材料成形与制造业



五、材料成形与制造业

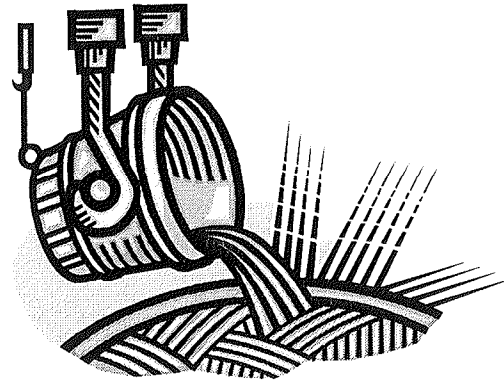
材料加工的主要方法



五、材料成形与制造业

材料加工的主要方法

[凝固成形]： 熔炼金属，并将熔融金属浇注、压射或吸入铸型型腔中，凝固成为一定形状和性能的铸件。

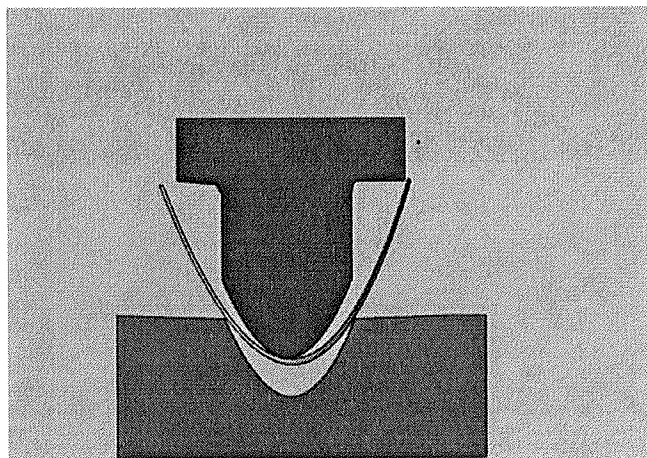


中国科学技术大学

五、材料成形与制造业

材料加工的主要方法

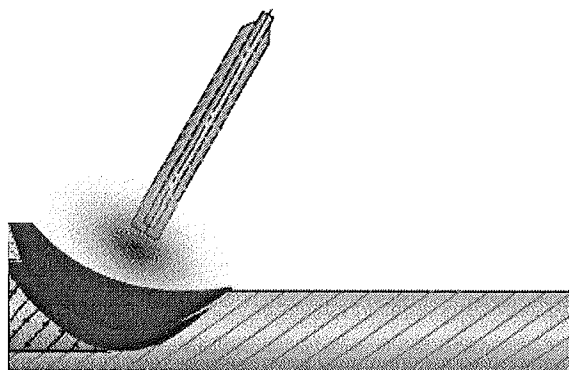
[塑性成形]： 利用金属能够产生塑性变形的能力，使金属在外力作用下，加工成一定形状的成形方法。



五、材料成形与制造业

材料加工的主要方法

[焊接]：通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子结合的一种加工方法。



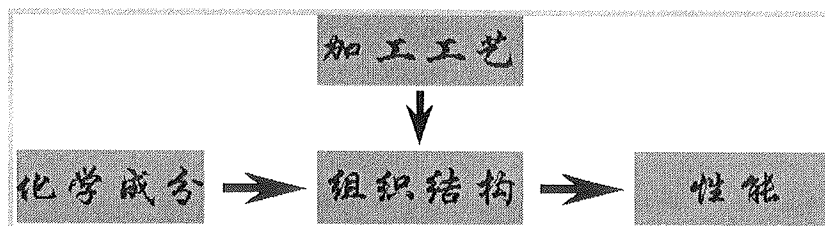
中国科学技术大学

六、课程的性质和任务

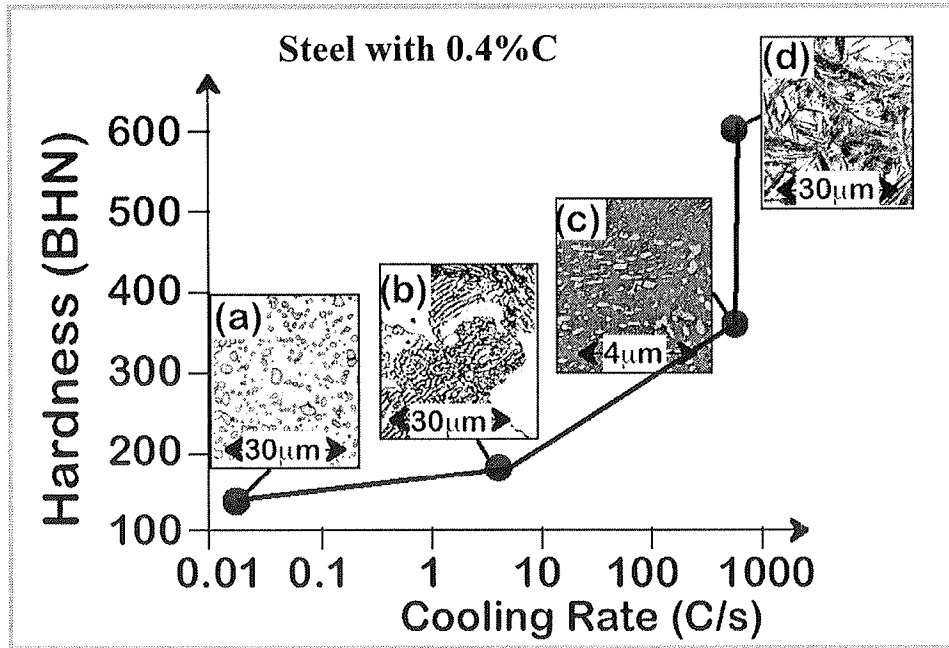
课程性质：是机械类和近机类各专业的技术基础课

课程任务：

- (1) 了解工程材料的一般知识；掌握常用材料的基本特性。
- (2) 建立化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系；了解材料的成分、结构、工艺及外界条件（如载荷、温度、环境介质等）改变时对其性能的影响。
- (3) 了解常用材料的用途和加工工艺。
- (4) 了解铸造、锻压和焊接等材料成型的基本工艺。
- (5) 初步具备合理选材、正确确定加工方法、妥善安排工艺路线的能力。



六、课程的性质和任务



工艺-组织-性能之间的关系

中国科学技术大学

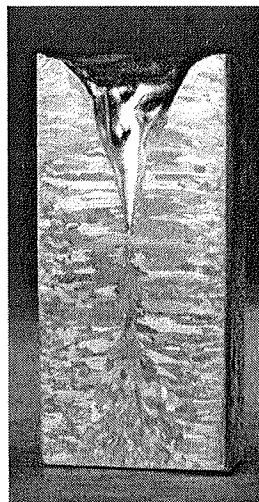
六、课程的性质和任务

- ① 化学成分(成分): 组成材料各元素在材料中的浓度。
- ② 组织: 用肉眼或借助于不同放大倍数的显微镜所观察到的金属内部的情景。

习惯上把用肉眼或几十倍放大镜观察到的组织称低倍组织或宏观组织。

放大100~2000倍的组织称高倍组织或显微组织。

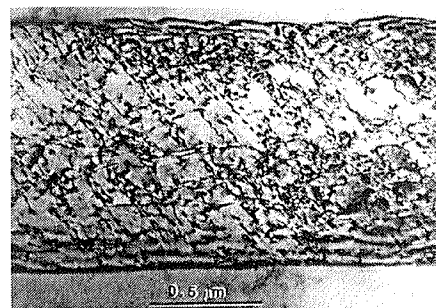
在电子显微镜下放大几千~几十万倍的组织称精细组织或电镜组织。



钢锭的宏观组织



显微组织



电镜组织



第二章 工程材料的性能

工程材料的性能包含工艺性能和使用性能。

使用性能：材料在使用过程中的性能。包括力学性能、物理性能和化学性能。

工艺性能：材料在加工过程中的性能。包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削性能等。

中国科学技术大学



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

力学性能：是指材料在外力作用时表现出来的性能。

外力形式：拉伸、压缩、弯曲、剪切、扭转等。

载荷形式：静载荷、冲击载荷、交变载荷等。

指标：强度、刚度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度等。

材料在外力的作用下将发生形状和尺寸变化，称为变形。

外力去除后能够恢复的变形称为弹性变形。

外力去除后不能恢复的变形称为塑性变形。

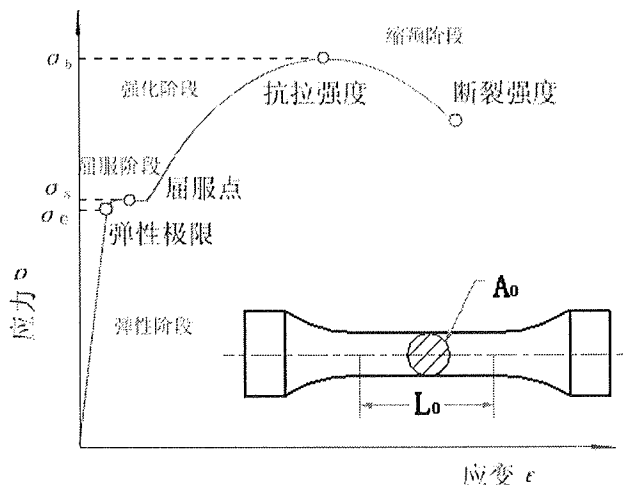
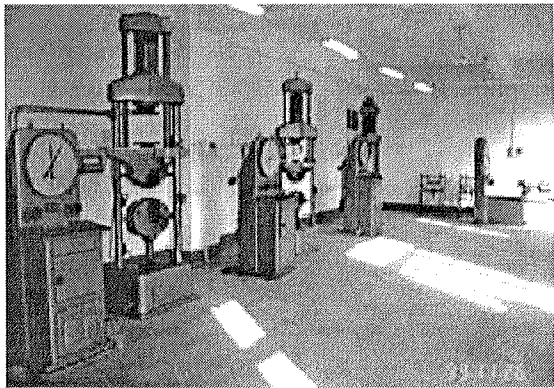
第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

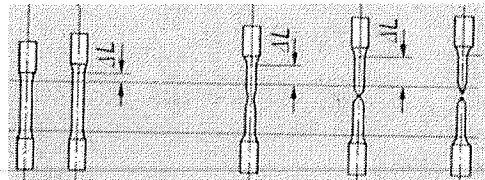
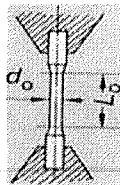
$$\text{应力 } \sigma = P / F_0$$

$$\text{应变 } \varepsilon = (l - l_0) / l_0$$



低碳钢的应力-应变曲线(动画)

拉伸试样：圆形试样（断面为圆形），根据GB/T228—2002的规定，拉伸试样分为长比例试样或短比例试样。对圆形试样：长试样 $l=10d$ ；短试样 $l=5d$ 。



中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

1、弹性和刚度

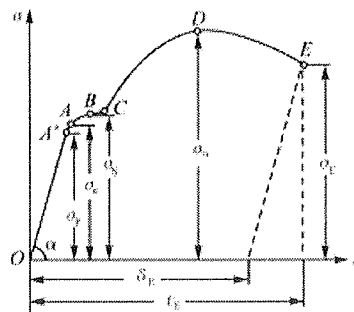
★ 弹性：指标为弹性极限 σ_e ，材料拉伸时保持弹性变形，不发生永久变形的最大应力。即材料承受最大弹性变形时的应力。

$$\text{弹性极限： } \sigma_e = P_e / F_0,$$

工程上， σ_p 、 σ_e 视为同一值。

$$\text{比例极限： } \sigma_p = P_p / F_0$$

应力—应变保持线性关系的极限应力值



$$E = \tan \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} (\text{MPa})$$

★ 刚度：材料受力时抵抗弹性变形的能力。指标为弹性模量E。

弹性模量的大小主要取决于材料的本性，除随温度升高而逐渐降低外，其他强化材料的手段如热处理、冷热加工、合金化等对弹性模量的影响很小。可以通过增加横截面积或改变截面形状来提高零件的刚度。



第二章 工程材料的性能

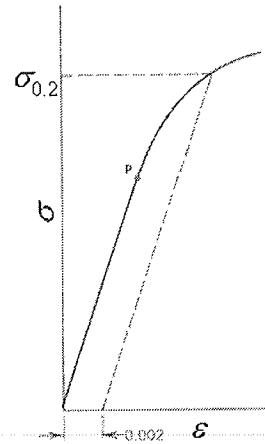
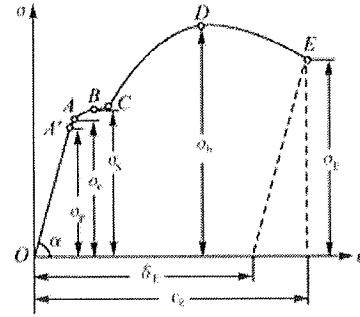
第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

2、强度与塑性

强度：材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。

- 屈服强度 σ_s ：材料发生微量塑性变形时的应力值。
- 条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ ：残余变形量为0.2%时的应力值。
- 抗拉强度 σ_b ：材料断裂前所承受的最大应力值。



中国科学技术大学



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

2、强度与塑性

塑性：材料受力破坏前可承受最大塑性变形的能力。

指标为：(1) 伸长率：
$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

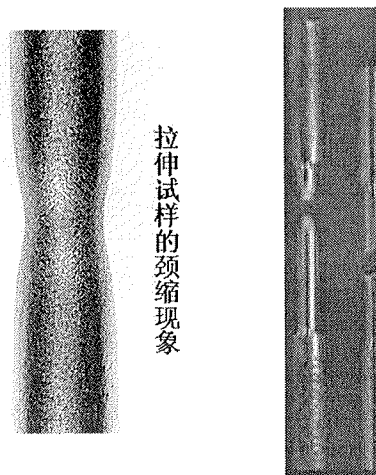
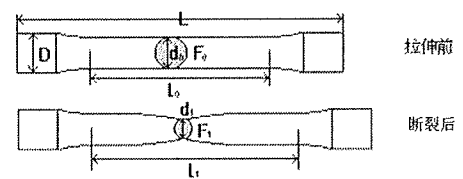
(2) 断面收缩率：
$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

说明：

① 直径 d_0 相同时， $l_0 \uparrow$ ， $\delta \downarrow$ 。只有当 l_0/d_0 为常数时，塑性值才有可比性。

② $\delta \geq \psi$ 时，无颈缩，为脆性材料表征

$\delta < \psi$ 时，有颈缩，为塑性材料表征



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

3、冲击韧性(A_k 或 a_k)

材料断裂前吸收变形能量的能力----韧度

冲击韧性 (A_k)：冲击载荷下材料抵抗变形和断裂的能力。 $A_k=mg(h_1-h_2)$

a_k =冲击破坏所消耗的功 A_k /标准试样断口截面积 F

单位为焦耳/厘米² (J/cm²) (通过冲击实验测得)

a_k 值低的材料叫做脆性材料，断裂时无明显变形，金属光泽，呈结晶状。

a_k 值高，明显塑变，断口呈灰色纤维状，无光泽，韧性材料。

中国科学技术大学

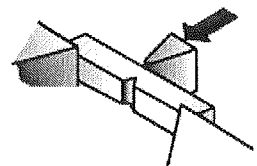
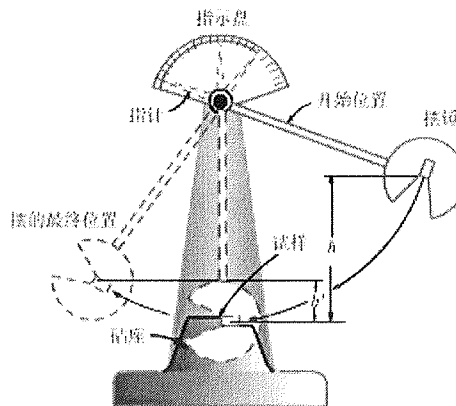
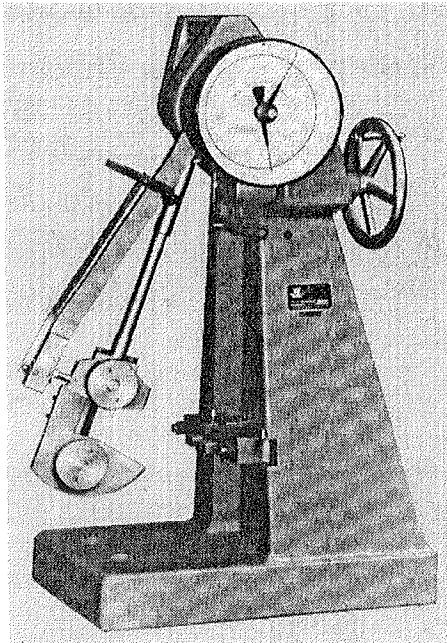
第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

3、冲击韧性(A_k 或 a_k)

冲击韧性实验(动画)

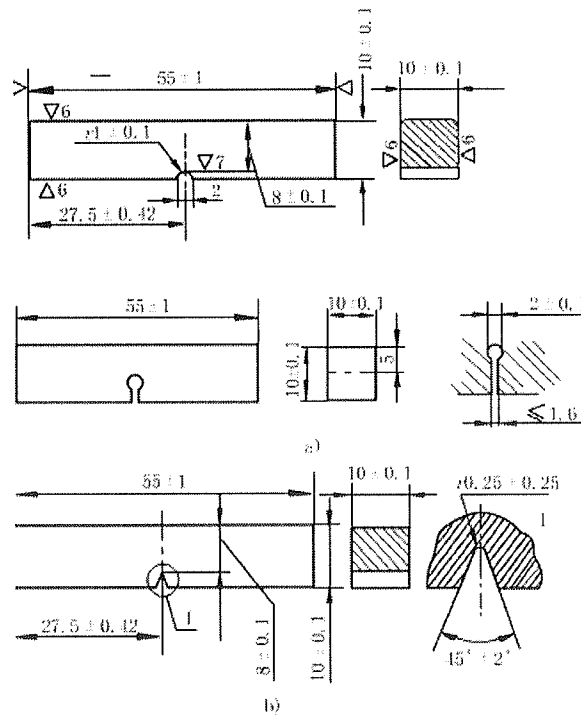


第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

3、冲击韧性(A_k 或 a_k)



冲击韧性的几种标准试样

中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

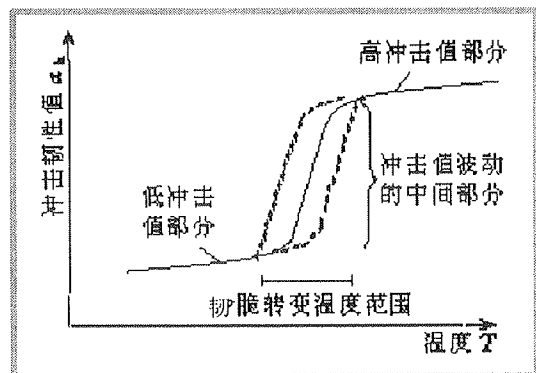
第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

3、冲击韧性(A_k 或 a_k)

韧脆转变温度：材料的冲击韧性随温度下降而下降。在某一温度范围内冲击韧性值急剧下降的现象称韧脆转变。发生韧脆转变的温度范围称韧脆转变温度。材料的使用温度应高于韧脆转变温度。

体心立方金属具有韧脆转变温度，而大多数面心立方金属没有。



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

4、疲劳

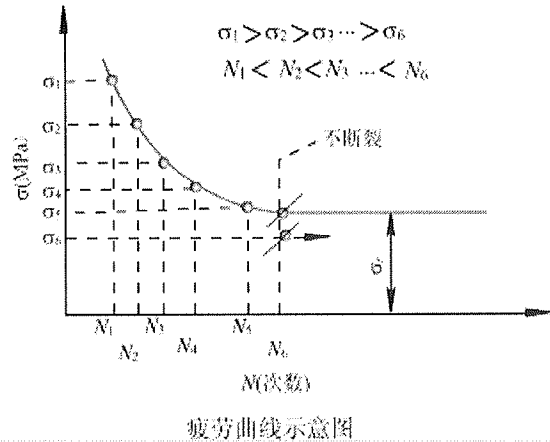
材料在低于 σ_s 的重复交变应力作用下发生断裂的现象。

材料在规定次数应力循环后仍不发生断裂时的最大应力称为疲劳极限。用 σ_{-1} 表示。

钢铁材料规定次数为 10^7 ，有色金属合金为 10^8 。

影响因素：循环应力特征、温度、材料成分

和组织、夹杂物、表面状态、残余应力等。



中国科学技术大学

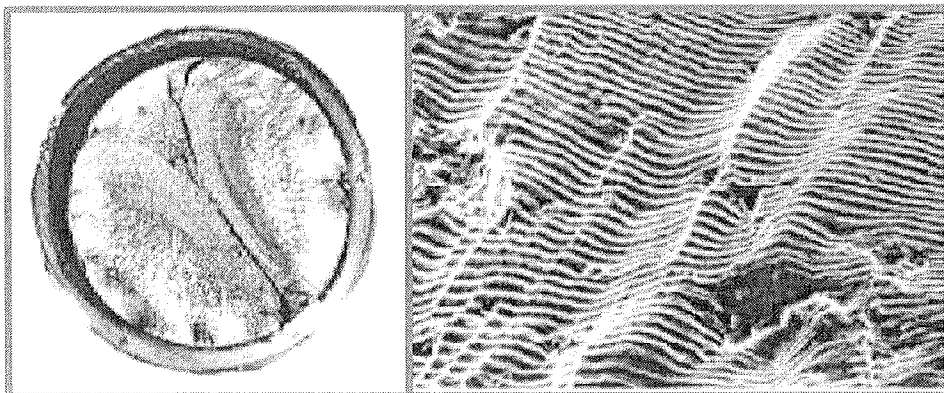
第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

4、疲劳

疲劳断口：



轴的疲劳断口

疲劳辉纹（扫描电镜照片）

通过改善材料的形状结构，减少表面缺陷，提高表面光洁度，进行表面强化等方法可提高材料抗疲劳抗力。

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

5、硬度

是金属材料表面在接触应力作用下抵抗塑性变形的一种能力，即材料抵抗另一硬物体压入其内的能力。硬度测量能够给出金属材料软硬程度的数量概念。

硬度试验简单易行，又无损于零件，而且可以近似的推算出材料的其它机械性能，因此在生产和科研中应用广泛。

硬度试验方法很多，机械工业普遍采用压入法来测定硬度，压入法又分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

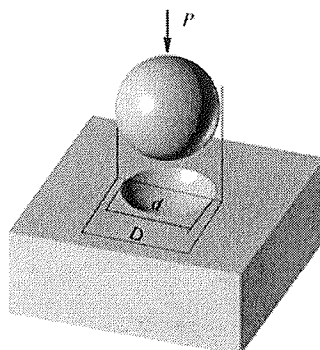
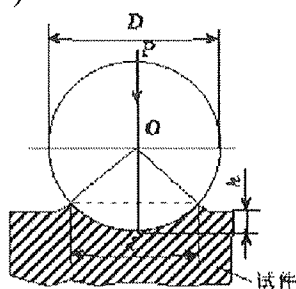
一、工程材料的力学性能：

5、硬度

① 布氏硬度（动画）

布氏硬度值HB是以试样压痕面积上的平均压力P/F表示。即单位面积所承受的压力。布氏硬度测定的原理：是把一定直径的淬火钢球，以规定的载荷P压入被测材料表面，保持一定时间后卸除载荷，测出压痕直径d，求出压痕面积F计算出平均应力值，以此为布氏硬度值的计量指标，并用符号HB表示。

$$HB = 0.102 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

5、硬度

① 布氏硬度

★压头为钢球时，布氏硬度用符号**HBS**表示，适用于布氏硬度值在**450**以下的材料。

★压头为硬质合金球时，用符号**HBW**表示，适用于布氏硬度在**650**以下的材料。

符号**HBS**或**HBW**之前的数字表示硬度值，符号后面的数字按顺序分别表示球体直径、载荷及载荷保持时间。如 **120HBS10/1000/30** 表示直径为**10mm**的钢球在**1000kgf** (**9.807kN**) 载荷作用下保持**30s**测得的布氏硬度值为**120**。

布氏硬度的优点：测量误差小，数据稳定。

缺点：压痕大，不能用于太薄件、成品件及比压头还硬的材料。

适于测量退火、正火、调质钢， 铸铁及有色金属的硬度。

材料的 σ_b 与HB之间的经验关系：

对于低碳钢： $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 3.6\text{HB}$

对于高碳钢： $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 3.4\text{HB}$

对于铸铁： $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 1\text{HB}$ 或 $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 0.6(\text{HB}-40)$

中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

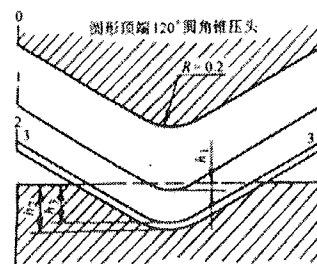
5、硬度

②洛氏硬度 (HR) (动画)

基本原理—洛氏硬度属压入法，洛氏硬度测定时需要先后施加二次载荷（予载荷 P_1 和主载荷 P_2 ）预加载荷的目的是使压头与试样表面接触良好以保证测量结果准确。洛氏硬度是以主载荷引起的残余压入深度（ $\Delta h = h_3 - h_1$ 来表示）

如图所示，0—0为金刚石压头还没有和试样接触的位置。

1—1是在初试验力作用下压头所处的位置，压入深度为 h_1 ，目的是为了消除由于试样表面不光洁对试验结果的精确性造成的不良影响。图中2—2在总试验力（初试力+主试验力）作用下压头所处位置，压入深度为 h_2 。3—3是卸除主试验力后压头所处的位置，由于金属弹性变形得到恢复，此时压头实际压入深度为 h_3 。故由于主试验力所引起的塑性变形而使压头压入深度为 $\Delta h = h_3 - h_1$ 。洛氏硬度值由 Δh 的大小确定，压入深度



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

5、硬度

②洛氏硬度 (HR)

一般说来，按照人们习惯上的概念，数值越大，硬度越高。为了与习惯上数值越大硬度越高的概念相一致，采用一常数 (k) 减去 (h_3-h_1) 的差值表示硬度值。为了方便，又规定每0.002mm压入深度作为一个硬度单位 (即刻度盘上一小格。) 洛氏硬度值公式如下：

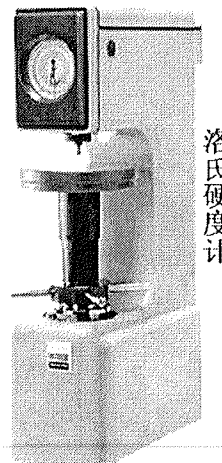
$$HR = \frac{k - (h_3 - h_1)}{0.002}$$

采用金刚石圆锥时k=0.2 (用于HRA, HRC)：

$$HRC(\text{或}HRA) = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0.002}$$

用钢球时k=0.26 (用于HRB)：

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0.002}$$



洛氏硬度计

中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

一、工程材料的力学性能：

5、硬度

②洛氏硬度 (HR)

●符号HR前面的数字为硬度值，后面为使用的标尺。

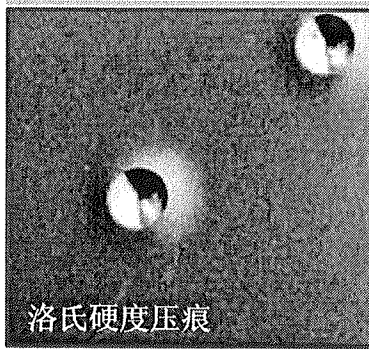
HRA用于测量高硬度材料，如硬质合金、表淬层和渗碳层。

HRB用于测量低硬度材料，如有色金属和退火、正火钢等。

HRC用于测量中等硬度材料，如调质钢、淬火钢等。

洛氏硬度的优点：操作简便，压痕小，适用范围广。

缺点：测量结果分散度大。



洛氏硬度压痕

硬度符号	压头	总载荷 (kgf)	表盘上刻度颜色	常用硬度值范围	使用范围
HRA	金刚石圆锥	60	黑色	70~85	碳化物、硬质合金表面淬火等
HRB	$\frac{1}{16}$ "或 $\frac{1}{8}$ "钢球	100	红色	25~100 HRB	有色金属、退火及正火钢等
HRC	金刚石圆锥	150	黑色	20~67	调质钢、淬火钢等

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

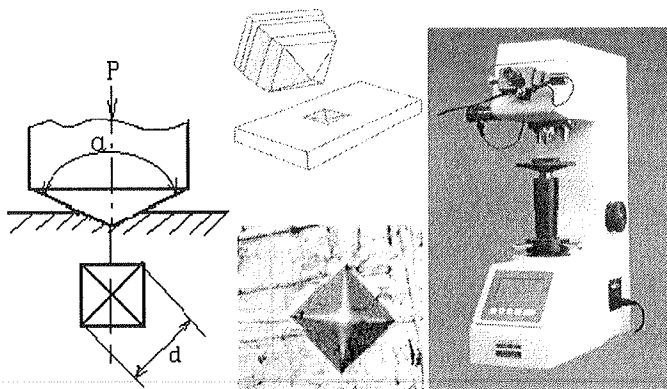
一、工程材料的力学性能：

5、硬度

③维氏硬度 (HV)

为了从软到硬的各种金属材料有一个连续一致的硬度标度，因而制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度试验法是压入试验法中较精确的一种，它与布氏硬度试验法相同，是用一种顶角为 136° 的金钢石角锥压头，在载荷 p (kgf) 作用下，试样表面压出一个四方锥形压痕，测量压痕对角线长度 d (mm) 供以计算压痕面积 F (mm^2) 以 P/F 的数值表示试样的硬度值。



维氏硬度试验原理

维氏硬度压痕

维氏硬度计

中国科学技术大学

第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

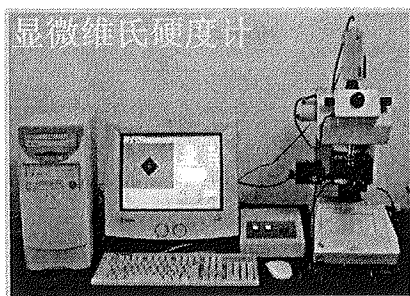
一、工程材料的力学性能：

5、硬度

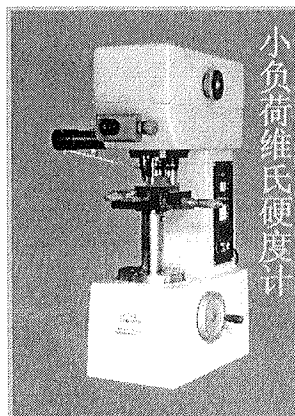
③维氏硬度 (HV)

根据载荷范围不同，规定了三种测定方法—维氏硬度试验、小负荷维氏硬度试验、显微维氏硬度试验。

维氏硬度保留了布氏硬度和洛氏硬度的优点。主要用来测定金属镀层、薄片金属以及化学热处理（如氮化、渗碳等）后的表面硬度。



显微维氏硬度计



小负荷维氏硬度计



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

二、工程材料的物理、化学性能：

(一)、工程材料的物理性能

1. 密度
2. 熔点
3. 导电性
4. 导热性
5. 热膨胀性
6. 磁性
7. 光学性能

中国科学技术大学



第二章 工程材料的性能

第一节 工程材料的使用性能

二、工程材料的物理、化学性能：

(二)、工程材料的化学性能

指金属材料与周围介质接触时抵抗发生化学或电化学反应的性能。

耐腐蚀性——指金属材料抵抗各种介质侵蚀的能力。

耐腐蚀性材料如：不锈钢、塑料、陶瓷、钛及其合金等等

抗氧化性——指金属材料在高温下，抵抗产生氧化皮的能力。

如：耐热钢、铬镍合金、铁铬合金等等

第二节 工程材料的工艺性能

工程材料的工艺性能:

工艺性能: 指材料承受各种加工、处理的能力的那些性能。

1. 铸造性能——指金属或合金是否适合铸造的一些工艺性能。包括: 流动性能、收缩性、偏析等。含碳量越高, 铸造性越好。
2. 焊接性能——指材料焊接时其工艺方法的难易程度及接口处是否能满足使用目的的特性。含碳量越高, 焊接性越差。
3. 锻造性能——金属材料在锻压加工中能承受塑性变形而不破裂的能力。含碳量越高, 锻造性越差。
4. 切削加工性——指材料被切削加工成合格零件的难易程度。包含: 刀具耐用度较高; 切削力较小, 切削温度较低。容易获得良好的表面加工质量。容易控制切屑的形状或容易断屑。含碳量太高, 切削性差。含碳量太低, 切削性也差。
5. 冲压性能——金属材料承受冲压变形加工而不破裂的能力。含碳量越高, 冲压性越差。
6. 热处理工艺性——指材料被热处理时达到性能等要求的难易程度。如: 淬硬性、淬透性。

第三章 工程材料的结构

物质由原子组成。原子的结合方式和排列方式决定了物质的性能。

原子、离子、分子之间的结合力称为结合键。它们的具体组合状态称为结构。

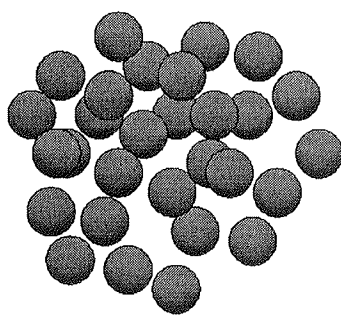
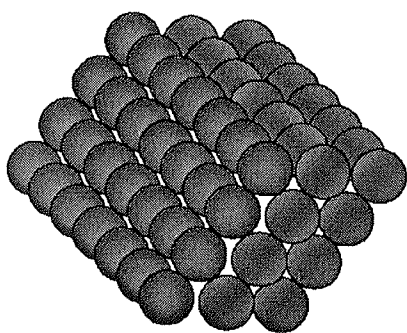
☆根据原子在物质内部的排列方式，可将固态物质分为两大类：

1) 晶体——内部原子呈规则排列的物质——长程有序。常态下金属主要以晶体形式存在。晶体具有各向异性。

2) 非晶体——内部原子无规则排列的物质，也称为“过冷液体”——短程有序。在一定条件下晶体和非晶体可互相转化。如松香、玻璃等。

晶体

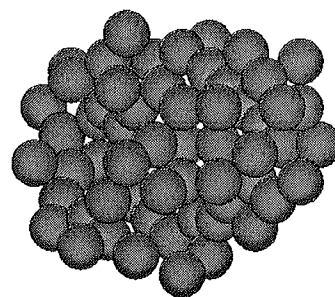
金刚石、NaCl、冰等。



液体

非晶体

蜂蜡、玻璃等。



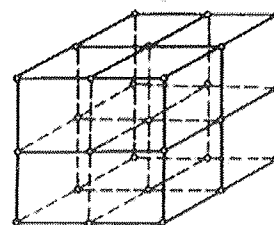
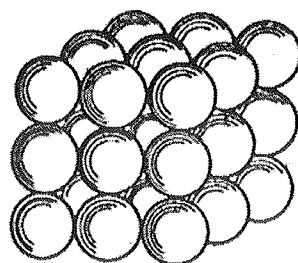
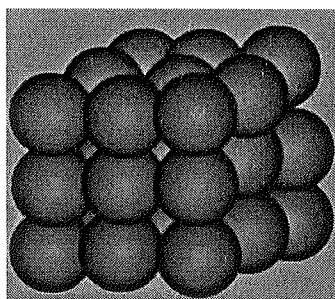
中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第一节 晶体结构的基本知识

1、晶格与晶胞(动画)

晶格：为了便于理解和描述晶体中原子排列的情况，可以近似地把晶体中的原子看成是固定不动的刚性小球，并用一些假想的几何线条将晶体中各原子的中心连接起来，即晶格是用假想的直线将原子中心连接起来所形成的三维空间格架。直线的交点（原子中心）称结点。由结点形成的空间点的阵列称空间点阵。



第三章 工程材料的结构

第一节 晶体结构的基本知识

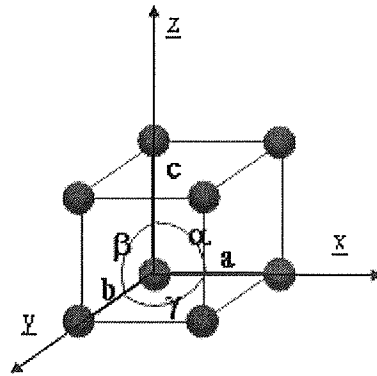
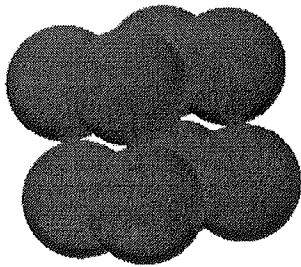
1、晶格与晶胞

晶胞：能代表晶格原子排列规律的最小几何单元。

晶体由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而形成。

晶格常数：晶胞各边的尺寸 a 、 b 、 c 。

各棱间的夹角用 α 、 β 、 γ 表示。



中国科学技术大学

34

第三章 工程材料的结构

第一节 晶体结构的基本知识

1、晶格与晶胞

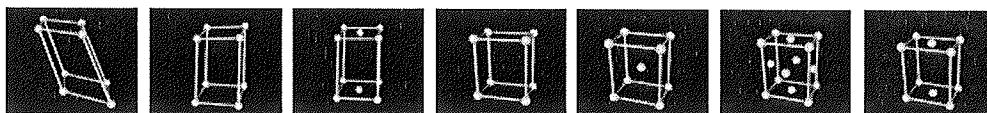
晶系：根据晶胞参数不同，将晶体分为七种晶系。

90%以上的金属具有立方晶系和六方晶系。

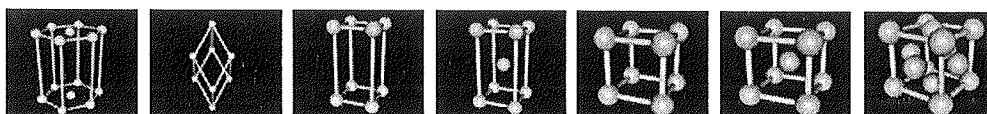
立方晶系： $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

六方晶系： $a_1=a_2=a_3 \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$

七大晶系，十四个空间点阵：



简单三斜 简单单斜 底心单斜 简单正交 体心正交 面心正交 底心正交



简单六方 简单菱方 简单正方 体心正方 简单立方 体心立方 面心立方



30

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

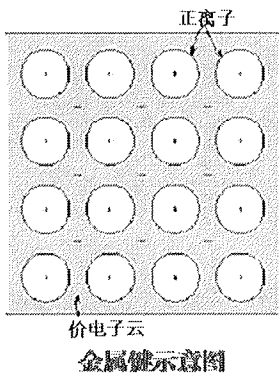
1、纯金属的晶体结构

金属原子是通过正离子与自由电子的相互作用而结合的，称为金属键。

金属原子趋向于紧密排列。

具有良好的导热性、导电性、延展性及金属光泽。

常见纯金属的晶格类型有体心立方(bcc)、面心立方(fcc)和密排六方(hcp)晶格。

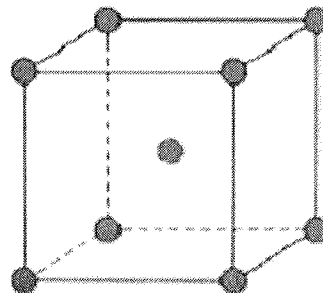
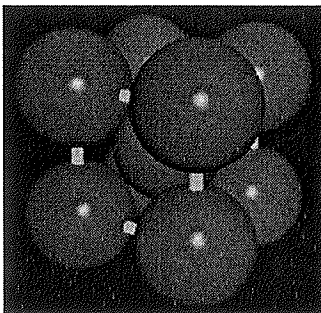
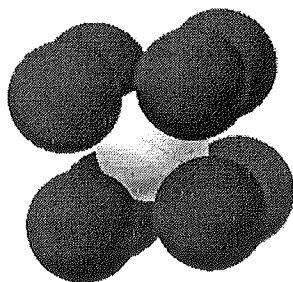


第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

(1) 体心立方晶格：在立方晶胞的八个顶角上各有一个原子，在体中心有一个原子，每个原子与空间点阵中的一个阵点相对应。



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

体心立方晶格的参数:

晶格常数: $a(a=b=c)$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

原子半径: $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$

原子个数: 2

配位数: 8

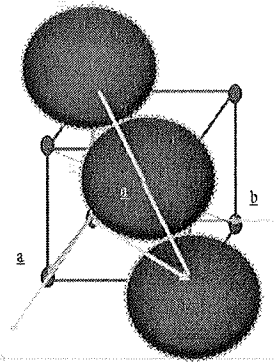
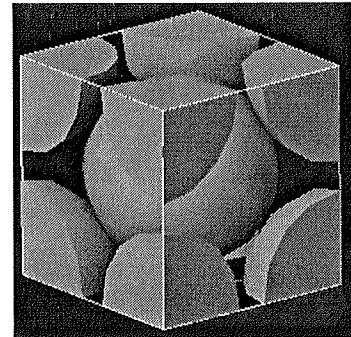
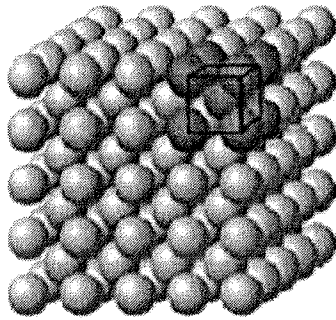
致密度: 0.68

常见金属: α -Fe、Cr、W、Mo、V、Nb等

致密度= V_a / V_c , 其中

V_c :晶胞体积 a^3

V_a :原子总体积 $2 \times \frac{4}{3}\pi r^3$



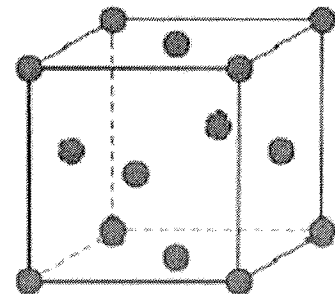
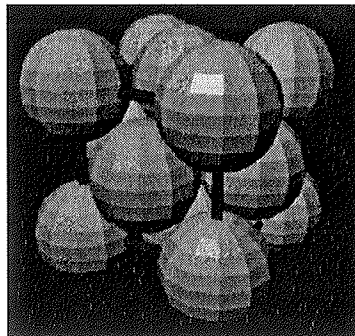
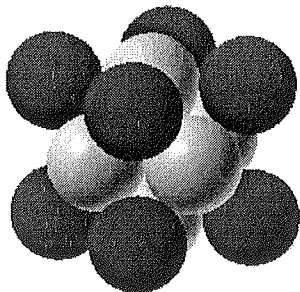
中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

(2) 面心立方晶格: 在立方晶胞的八个顶角和六个面的中心各有一个原子。



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

面心立方晶格的参数:

晶格常数: $a(a=b=c)$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

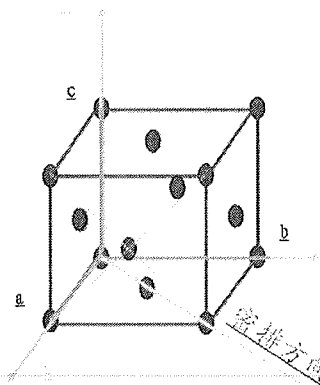
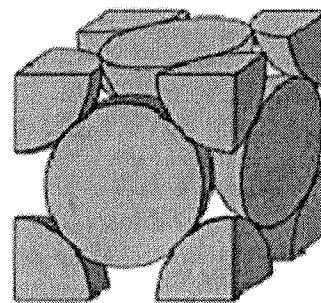
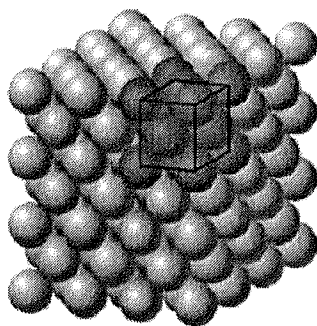
原子半径: $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$

原子个数: 4

配位数: 12

致密度: 0.74

常见金属: γ -Fe、Ni、Al、Cu、Pb、Au等



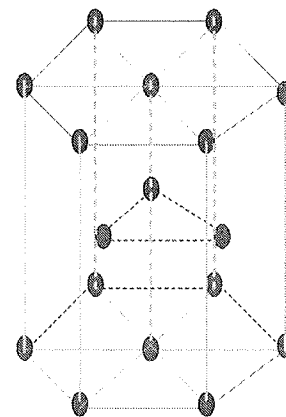
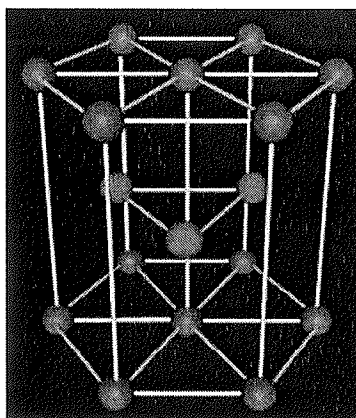
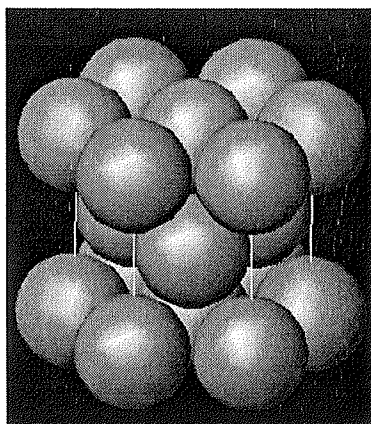
中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

(3) 密排六方晶格: 正六棱柱体, 除每个顶角和上下底面中心各有一个原子外, 在两底面之间还有三个原子。



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

密排六方晶格的参数：

晶格常数：底面边长 a 和高 c ， $c/a=1.633$

侧面间角 120° ， 侧面与底面夹角 90°

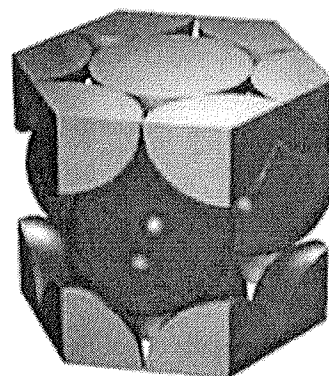
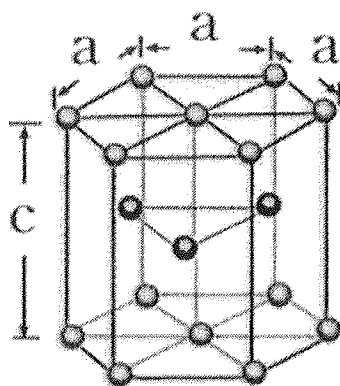
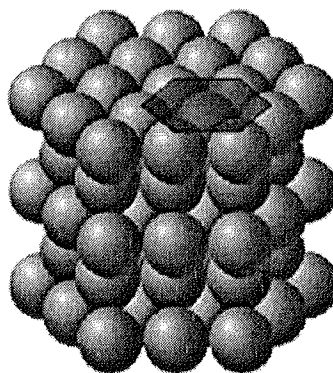
原子半径： $r = \frac{1}{2}a$

原子个数：6

配位数：12

致密度：0.74

常见金属：Mg、Zn、Be、Cd等



中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

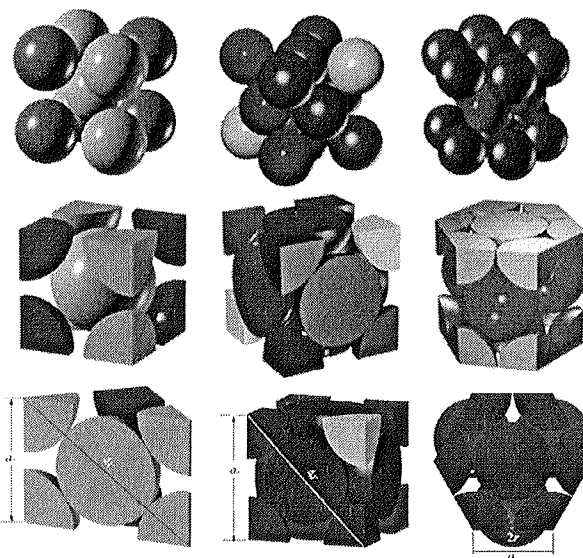
(4) 三种常见晶格的密排面和密排方向

单位面积晶面上的原子数称晶面原子密度。

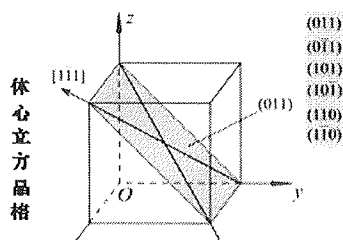
单位长度晶向上的原子数称晶向原子密度。

原子密度最大的晶面或晶向

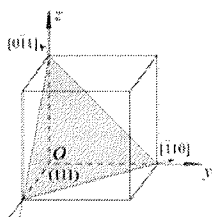
称密排面或密排方向。



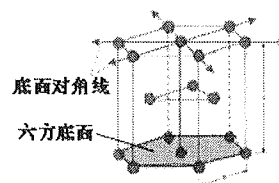
	密排面	数量	密排方向	数量
体心立方晶格	{110}	6	<111>	4
面心立方晶格	{111}	4	<110>	6
密排六方晶格	六方底面	1	底面对角线	3



面心立方晶格



{111}



密排六方晶格

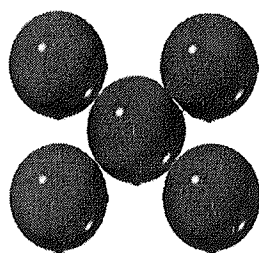
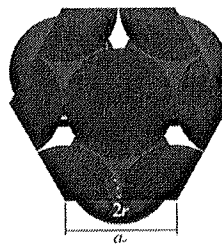
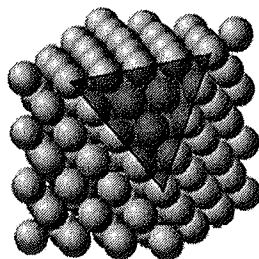
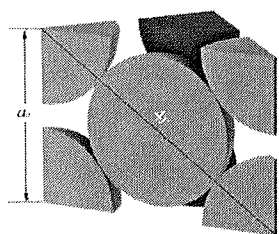


第三章 工程材料的结构

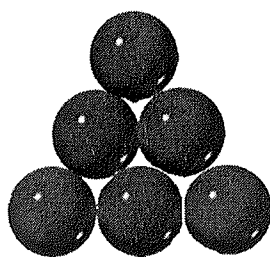
第二节 金属的晶体结构

1、纯金属的晶体结构

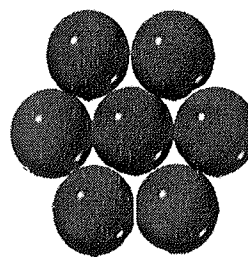
(4) 三种常见晶格的密排面和密排方向



体心立方(110)面



面心立方(111)面



密排六方底面



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

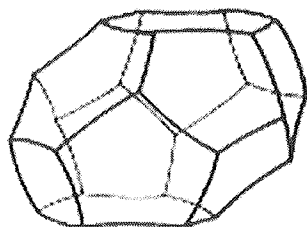
(1) 单晶体与多晶体

单晶体：其内部晶格方位完全一致的晶体。

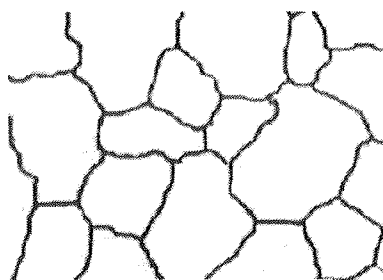
晶粒：实际使用的金属材料是由许多彼此方位不同、外形不规则的小晶体组成，这些小晶体称为晶粒。变形金属晶粒尺寸约1~100 μm ，铸造金属可达几mm。

晶界：晶粒之间的交界面。晶粒越细小，晶界面积越大。

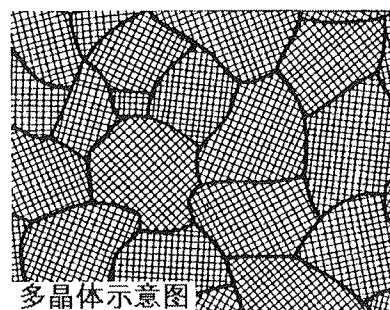
多晶体：晶体内晶格位向不相同，由多晶粒组成的晶体结构。



晶粒示意图



光学金相显示的纯铁晶界



多晶体示意图

第三章 工程材料的结构

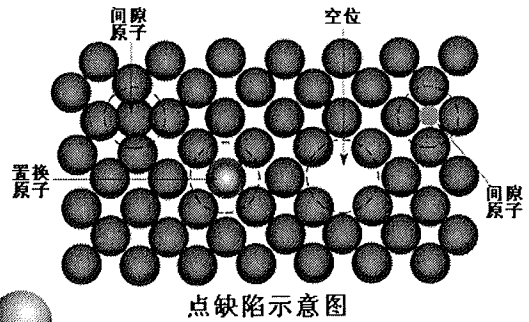
第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

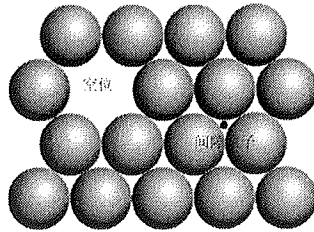
晶体缺陷：晶格的不完整部位称晶体缺陷。

实际金属中存在着大量的晶体缺陷，按形状可分三类，即点、线、面缺陷。



① 点缺陷 (动画)

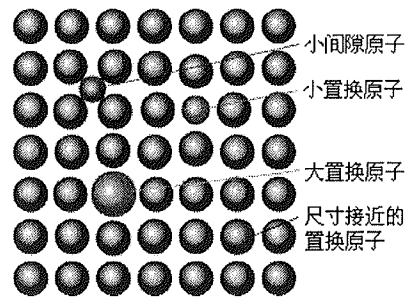
空间三维尺寸都很小的缺陷。



★空位：晶格中某些缺排原子的空结点。

★间隙原子：挤进晶格间隙中的原子。可以是基体金属原子，也可以是外来原子。

★置换原子：取代原来原子位置的外来原子称置换原子。



间隙原子和置换原子造成周围原子偏离平衡位置

中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

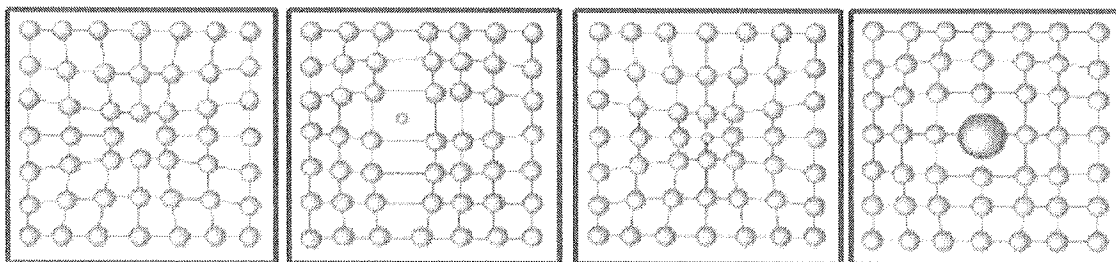
第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

① 点缺陷

点缺陷破坏了原子的平衡状态，使晶格发生扭曲，称晶格畸变。从而使强度、硬度提高，塑性、韧性下降。



空位

间隙原子

小置换原子

大置换原子

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

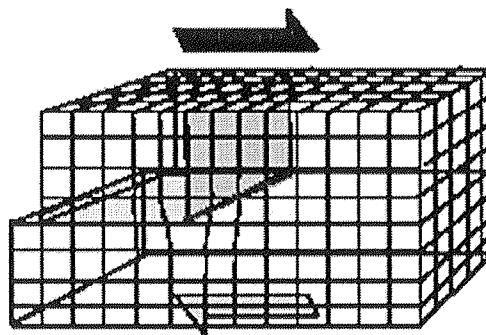
(2) 晶体缺陷

② 线缺陷

晶体中在一维方向上尺寸很大，而在另外二维方向上的尺寸很小的晶体缺陷，它的主要形式是位错。

位错：晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体发生局部滑移，滑移面上滑移区与未滑移区的交界线称作位错。

位错的类型：刃型位错、螺型位错



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

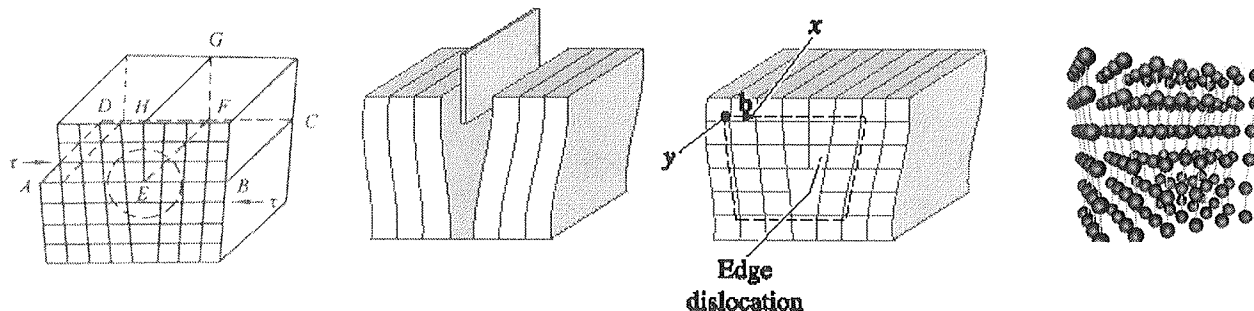
(2) 晶体缺陷

② 线缺陷

刃型位错：当一个完整晶体某晶面以上的某处多出半个原子面，该晶面象刀刃一样切入晶体，这个多余原子面的边缘就是刃型位错。

半原子面在滑移面以上的称正位错，用“ \perp ”表示。

半原子面在滑移面以下的称负位错，用“ \top ”表示。



第三章 工程材料的结构

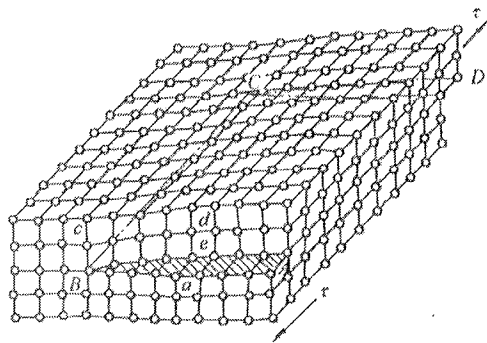
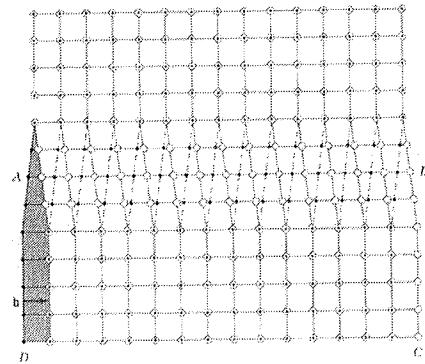
第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

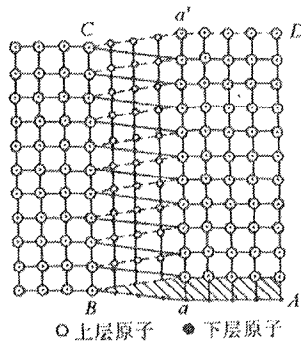
(2) 晶体缺陷

② 线缺陷 (动画)

螺型位错：由于剪切力的作用，使晶体相邻原子面发生一个原子间距的相对滑移，两层相邻原子发生了错排现象。

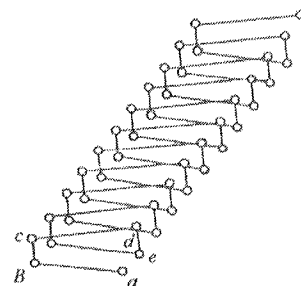


(a)



○ 上层原子 ● 下层原子

(b)



(c)

中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

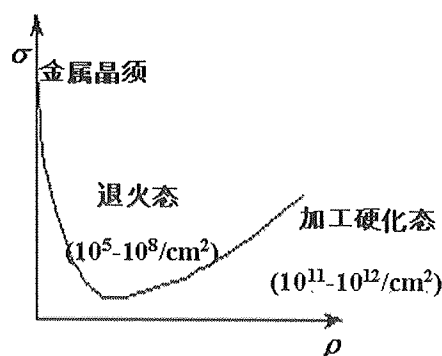
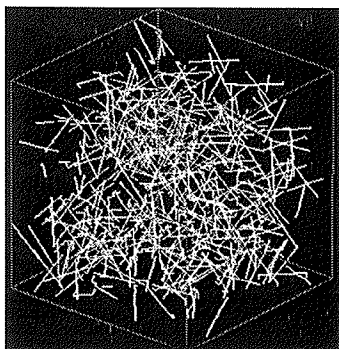
位错密度：单位体积内所包含的位错线总长度。

$$\rho = S/V(\text{cm/cm}^3 \text{或} 1/\text{cm}^2)$$

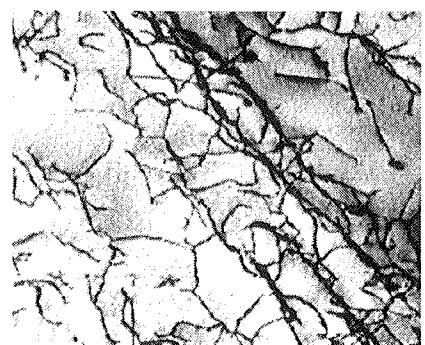
金属的位错密度为 $10^4 \sim 10^{12}/\text{cm}^2$

位错对性能的影响：金属的塑性变形主要由位错运动引起，因此阻碍位错运动是强化金属的主要途径 (动画)。

减少或增加位错密度都可以提高金属的强度。



透射电镜下钛合金中的位错线(黑线)



第三章 工程材料的结构

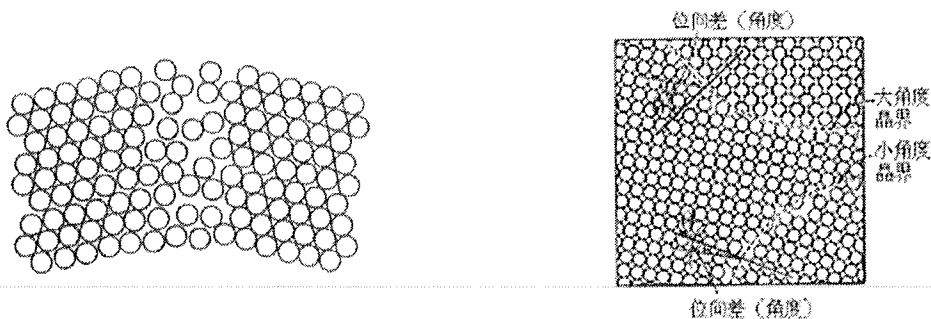
第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

③ 面缺陷：是指晶体中在二维方向上尺寸很大，而在另一维方向上尺寸很小的晶体缺陷。主要是晶界与亚晶界。

晶界：是多晶体中晶粒与晶粒之间的交界面，由于各晶粒中原子排列方式相同（如都是体心立方），只是晶格位向不同，因此晶界实际上是不同位向晶粒之间的过渡层。该过渡层有一定的厚度，宽度为5~10个原子间距；为了同时适应两侧不同位向晶粒的过渡，而使过渡层处的原子总是不能规则排列，产生晶格畸变，所以它是晶体中的一种重要的面缺陷。根据晶体中各晶粒之间的位向差 θ 不同，又可将晶界分为大角度晶界（ $\theta > 10^\circ$ ）和小角度晶界（ $\theta < 10^\circ$ ）两类。



中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

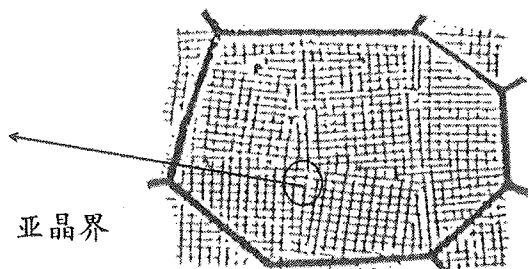
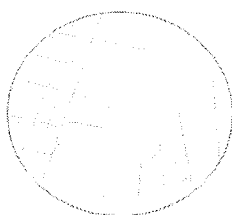
第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

③ 面缺陷：

大晶粒中的小晶粒称为亚晶粒。亚晶界是亚晶粒与亚晶粒之间的晶界，位向差 θ 一般为几十分到几度。亚晶界的两种特殊形式为对称倾侧晶界和扭转晶界。



亚晶界

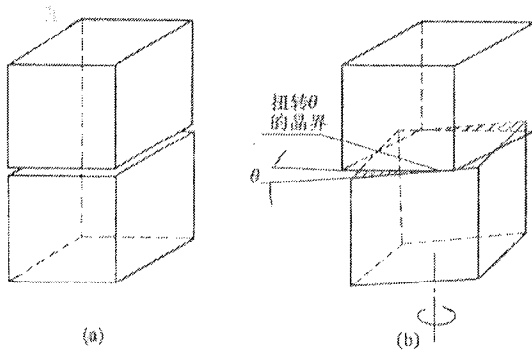
第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

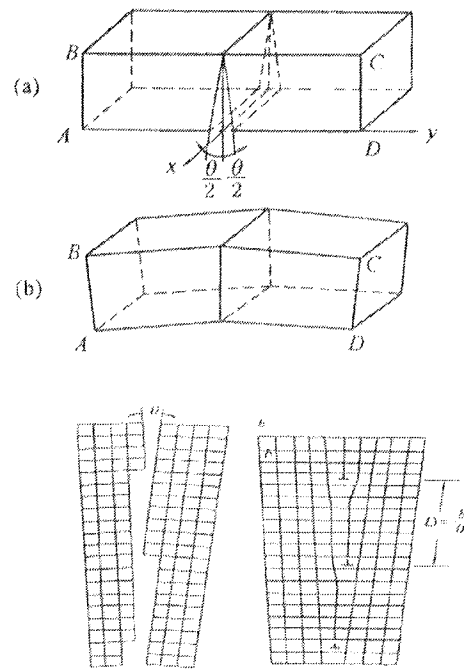
(2) 晶体缺陷

③ 面缺陷:



扭转晶界 (动画)

对称倾侧晶界



第三章 工程材料的结构

第二节 金属的晶体结构

2、实际金属的晶体结构

(2) 晶体缺陷

晶界的特点:

① 原子排列不规则。

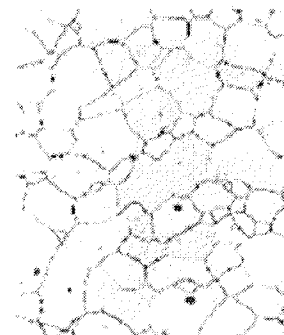
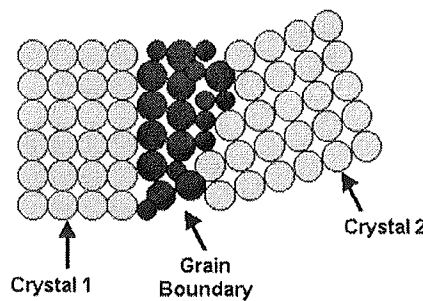
② 熔点低。

③ 耐蚀性差。

④ 易产生内吸附，外来原子易在晶界偏聚。

⑤ 阻碍位错运动，是强化部位，因而实际使用的金属力求获得细晶粒。

⑥ 是相变的优先形核部位。



显微组织的显示

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

合金：是指由两种或两种以上元素组成的具有金属特性的物质。

组成合金的元素可以全部是金属，也可是金属与非金属。

组成合金的元素相互作用可形成不同的相。

所谓相是指金属或合金中凡成分相同、结构相同，并与其它部分有界面分开的均匀组成部分。

显微组织实质上是指在显微镜下观察到的金属中各相或各晶粒的形态、数量、大小和分布的组合。

固态合金中的相分为固溶体和金属化合物两类。

中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

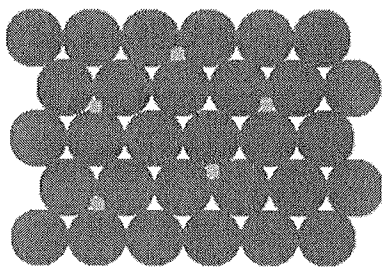
第三节 合金的晶体结构

1、固溶体

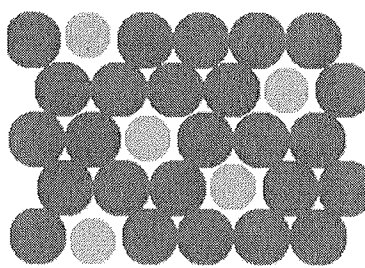
合金结晶成固态时，含量少的组元(溶质)原子分布在含量多的组元(溶剂)晶格中形成一种与溶剂有相同晶格的相，称为固溶体。习惯以 α 、 β 、 γ 表示。

与合金晶体结构相同的元素称溶剂。其它元素称溶质。

固溶体是合金的重要组成相，实际合金多是单相固溶体合金或以固溶体为基的合金。按溶质原子所处位置分为置换固溶体和间隙固溶体。



Fe-C间隙固溶体



Cu-Ni置换固溶体

第三章 工程材料的结构

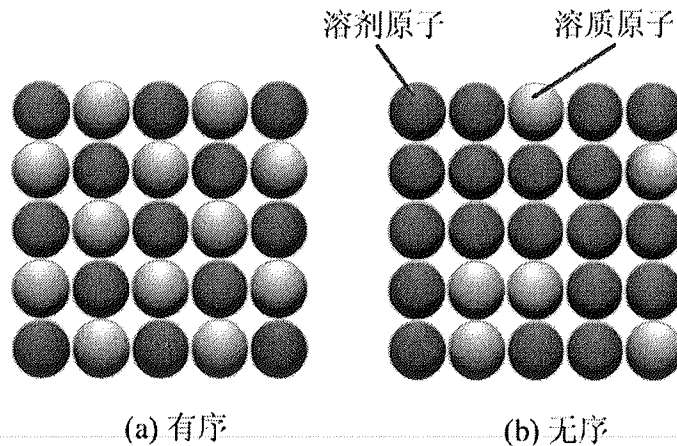
第三节 合金的晶体结构

1、固溶体

① 置换固溶体

溶质原子占据溶剂晶格某些结点位置所形成的固溶体。

溶质原子呈无序分布的称无序固溶体，呈有序分布的称有序固溶体。



中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

1、固溶体

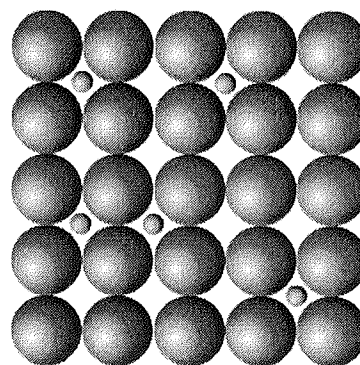
② 间隙固溶体

溶质原子嵌入溶剂晶格间隙所形成的固溶体。

形成间隙固溶体的溶质元素是原子半径较小的非金属元素，如C、N、B等，而溶剂元素一般是过渡族元素。

形成间隙固溶体的一般规律为 $r_{\text{质}}/r_{\text{剂}} < 0.59$ 。

间隙固溶体都是无序固溶体。



第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

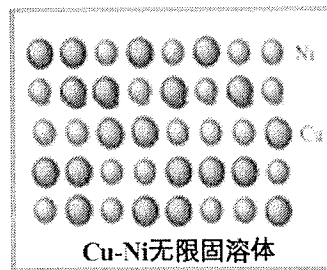
1、固溶体

③ 固溶体的溶解度

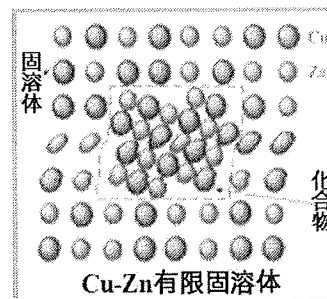
溶质原子在固溶体中的极限浓度。

溶解度有一定限度的固溶体称有限固溶体。

组成元素无限互溶的固溶体称无限固溶体。



组成元素原子半径、电化学特性相近，晶格类型相同的置换固溶体，才有可能形成无限固溶体。



间隙固溶体都是有限固溶体。

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

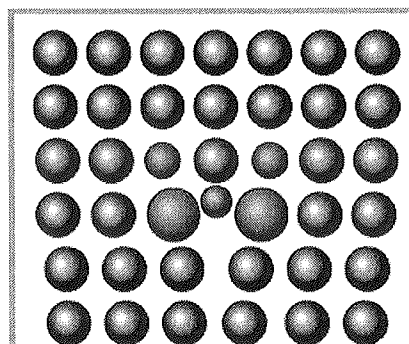
1、固溶体

④ 固溶体的性能

随溶质含量增加，固溶体的强度、硬度增加，塑性、韧性下降—固溶强化。

产生固溶强化的原因是溶质原子使晶格发生畸变及对位错的钉扎作用。

- 与纯金属相比，固溶体的强度、硬度高，塑性、韧性低。但与化合物相比，其硬度要低得多，而塑性和韧性则要高得多。



置换原子和间隙原子在刃位错区的富集

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

2、金属化合物

在合金中，当溶质组元的质量分数超过固溶体的溶解度将会产生新相。这个新相可能是以另一组元为溶剂的另一种固溶体。也可能产生一种晶格结构不同于任一组元的化合物。如钢中的 Fe_3C 、 FeS 、 MnS ；黄铜中的 β 相($CuZn$)等。若化合物的结合键中有一定程度的金属键，则该化合物就具有一定的金属性质。这种具有金属性质的化合物被称之为金属化合物。如： Fe_3C 、 $CuZn$ 就是金属化合物。而 FeS 、 MnS 主要是离子键结合，没有金属性质称为非金属化合物。在合金中，金属化合物若以细小的粒状均匀分布在固溶体相的基体上会使合金的强度、硬度进一步提高，这种现象称为第二相弥散强化。非金属化合物在合金中通常都会降低合金的性能，它们的存在愈少愈好。非金属化合物常被称为非金属夹杂物，简称夹杂。

金属化合物一般都具有复杂的晶格结构、熔点高、硬而脆。在合金中金属化合物的多少、形态、大小、分布的方式等对合金的性能有不同的影响。若弥散均匀分布可提高合金的强度，硬度和耐磨性，但会降低合金的塑性和韧性。若以网状或大块条状分布，则会严重降低合金的各种力学性能。通过热处理及锻造可以改变金属化合物在合金中的分布状况。

按照金属化合物形成的条件可分为三大类：正常价化合物、电子化合物、间隙化合物。

中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

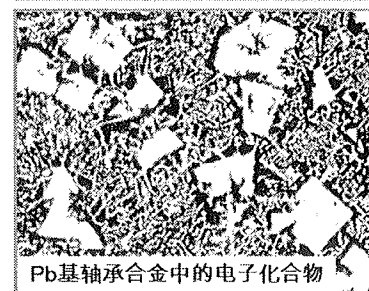
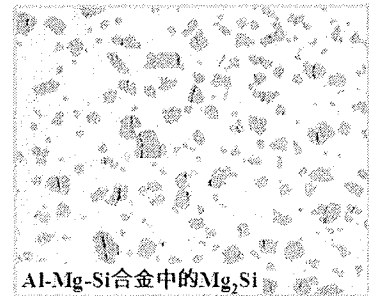
2、金属化合物

① 正常价化合物—符合正常原子价规律。如 Mg_2Si

② 电子化合物—符合电子浓度规律。如 Cu_3Sn 。

电子浓度为价电子数与原子数的比值。

③ 间隙化合物—由过渡族元素与C、N、B、H等小原子半径的非金属元素组成。可分为两类：间隙相、复杂结构的间隙化合物



合金中常见电子化合物及结构

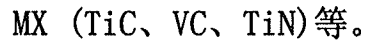
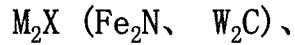
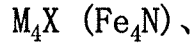
合金系	电子浓度		
	$\frac{3}{2} \left(\frac{21}{14} \right) \beta$ 相	$\frac{21}{13} \gamma$ 相	$\frac{7}{4} \left(\frac{21}{12} \right) \epsilon$ 相
	晶体结构		
	体心立方晶格	复杂立方晶格	密排六方晶格
Cu-Zn	$CuZn$	Cu_5Zn_8	$CuZn_3$
Cu-Sn	Cu_5Sn	$Cu_{31}Sn_8$	Cu_3Sn
Cu-Al	Cu_3Al	Cu_9Al_4	Cu_5Al_3
Cu-Si	Cu_5Si	$Cu_{31}Si_8$	Cu_3Si
Fe-Al	$FeAl$		
Ni-Al	$NiAl$		

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

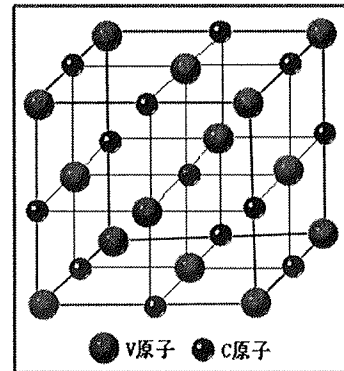
2、金属化合物

a. 间隙相： $r_{非}/r_{金} < 0.59$ 时形成的具有简单晶格结构的间隙化合物。如



间隙相具有金属特征和极高的硬度及熔点，非常稳定。

部分碳化物和所有氮化物属于间隙相。



VC
的
结
构



中国科学技术大学

第三章 工程材料的结构

第三节 合金的晶体结构

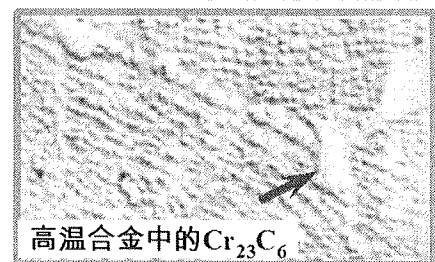
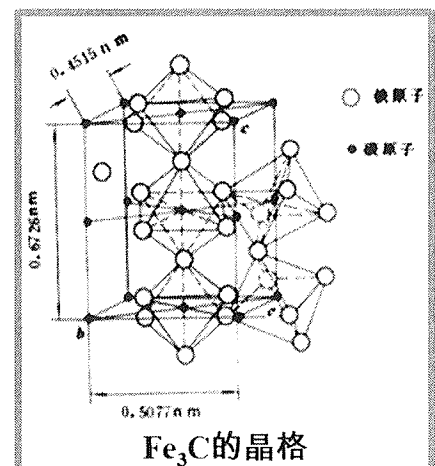
2、金属化合物

b. 具有复杂结构的间隙化合物

当 $r_{非}/r_{金} > 0.59$ 时形成复杂结构间隙化合物。

如 FeB 、 Fe_3C 、 $Cr_{23}C_6$ 等。 Fe_3C 称渗碳体，是钢中重要组成相，具有复杂斜方晶格。

化合物也可溶入其它元素原子，形成以化合物为基的固溶体。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

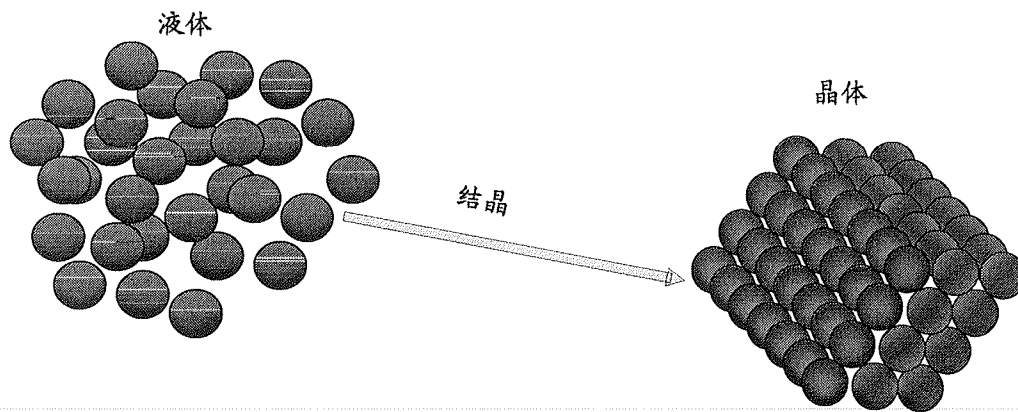
物质由液态转变为固态的过程称为**凝固**。

物质由液态转变为晶态的过程称为**结晶**。

物质由一个相转变为另一个相的过程称为**相变**。因而结晶过程是相变过程。

液体 --> 固体（晶体 或 非晶体）-- 凝固

液体 --> 晶体 -- 结晶



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

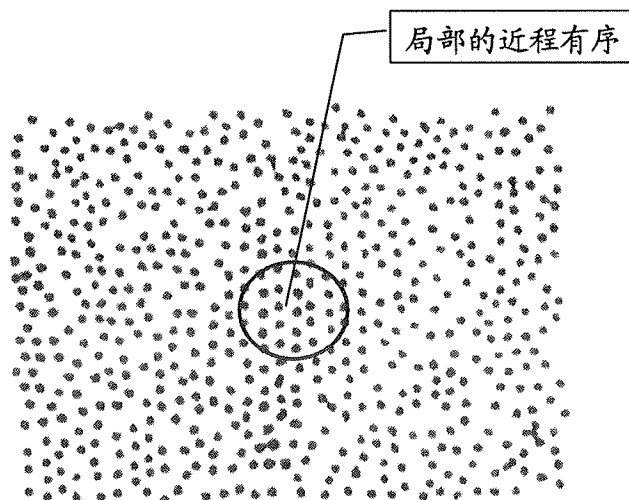
第一节 纯金属的结晶

一、液态金属的结构

经研究发现在略高于熔点时，液态金属的结构具有以下特点：

①是近程有序远程无序结构，见图；

②存在着能量起伏和结构起伏。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

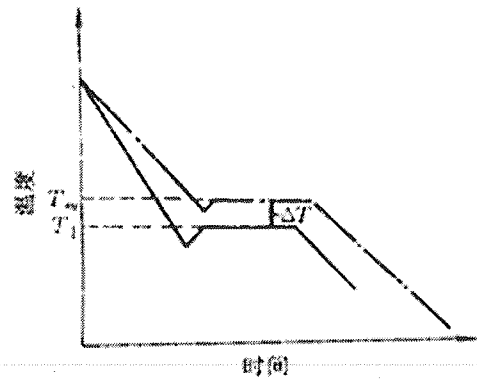
第一节 纯金属的结晶

二、冷却曲线与过冷

1、冷却曲线

金属结晶时温度与时间的关系曲线称冷却曲线。曲线上水平阶段所对应的温度称实际结晶温度 T_1 。

纯金属结晶是在恒温下完成的。即冷却曲线中有一个平台。这是因为纯金属结晶会释放出“潜热”。潜热刚好弥补了金属液再冷却过程中向周围环境散发的热量。从而使结晶过程处于一个温度的动平衡状态。(实际上,对于纯金属其冷却曲线出现平台之前,还有一个相应的过冷现象,它为开始结晶提供足够的动力。一旦结晶开始释放潜热,温度才回升到结晶温度平台上)。当结晶结束,潜热释放也就结束,凝固了的金属随着向环境不断散热,温度又逐渐下降。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

二、冷却曲线与过冷

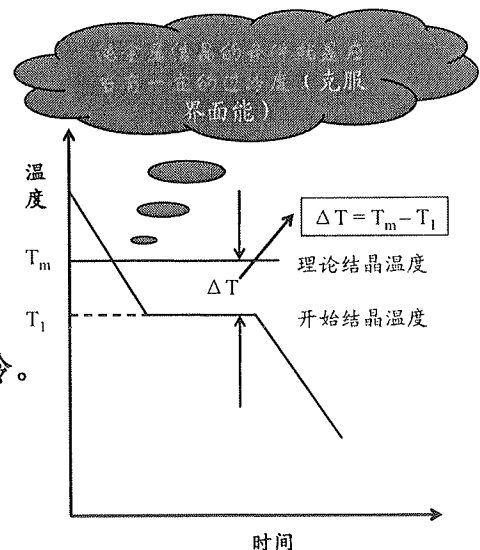
2、过冷与过冷度

纯金属都有一个理论结晶温度 T_m (熔点或平衡结晶温度)。在该温度下,液体和晶体处于动平衡状态。结晶只有在 T_m 以下的实际结晶温度下才能进行。

液态金属在理论结晶温度以下开始结晶的现象称过冷。

理论结晶温度与实际结晶温度的差 ΔT 称过冷度。

$$\Delta T = T_m - T_1$$



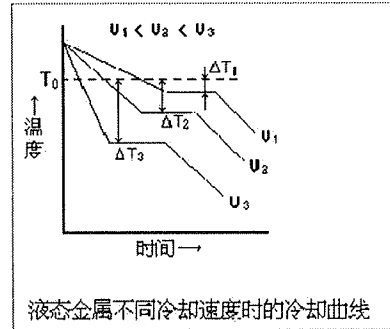
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

二、冷却曲线与过冷

3、影响过冷度大小的主要因素:

- 1) 金属液的冷却速度; 冷速越大, 过冷度越大。
- 2) 金属液中杂质含量。



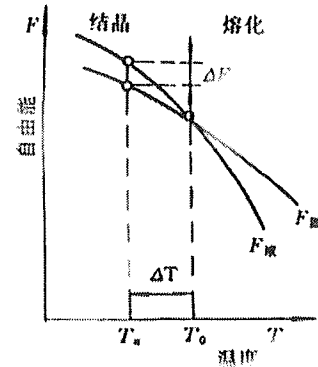
4、金属结晶的两个条件:

1) 动力学条件:

$$\Delta T > 0 \quad (\Delta F < 0)$$

2) 热力学条件: 一定的扩散能力。

只有当动力学条件与热力学条件都得到保证金属就会顺利的结晶。两者缺一不可。若金属液的冷却速度非常大, 使过冷度极大, 原子来不及扩散就会出现非晶金属。目前, 在工业上已据此制造出了非晶金属微粉和箔。



金属在聚集状态时自由能与温度关系的示意图

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

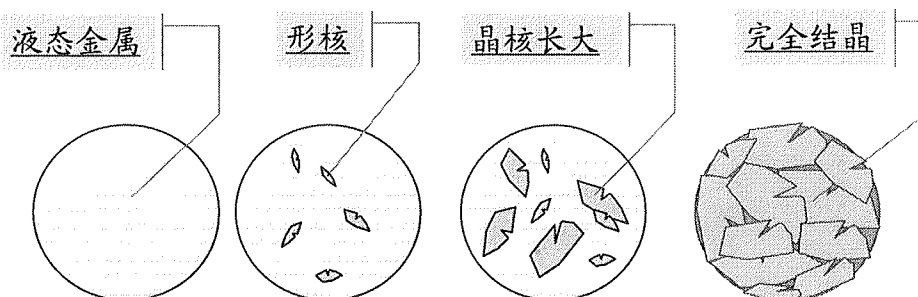
三、结晶的一般过程

1、结晶的基本过程

结晶由晶核的形成和晶核的长大两个基本过程组成; 这两个过程同时进行。

液态金属中存在着原子排列规则的小原子团, 它们时聚时散, 称为晶坯。在 T_m 以下, 经一段时间后(即孕育期), 一些大尺寸的晶坯将会长大, 称为晶核。

晶核形成后便向各方向生长, 同时又有新的晶核产生。晶核不断形成, 不断长大, 直到液体完全消失。每个晶核最终长成一个晶粒, 两晶粒接触后形成晶界。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

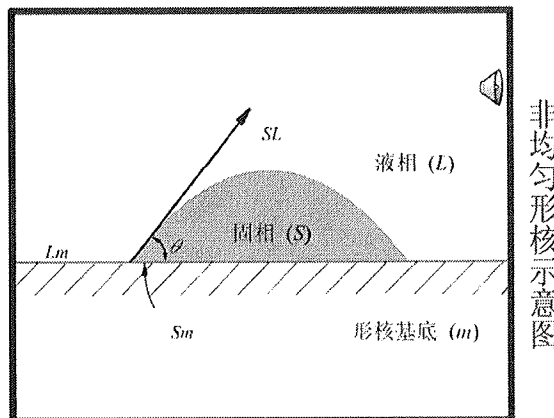
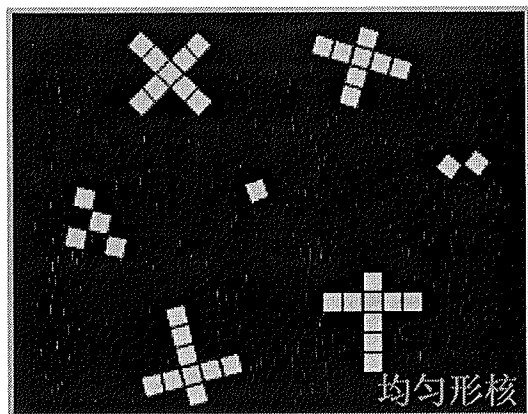
三、结晶的一般过程

2、晶核的形成方式

形核有两种方式，即均匀形核和非均匀形核。

由液体中排列规则的原子团形成晶核称均匀形核。

以液体中存在的固态杂质为核心形核称非均匀形核。非均匀形核更为普遍。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

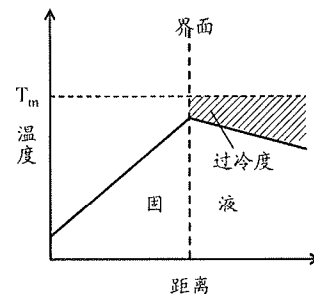
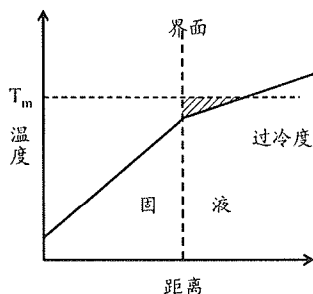
第一节 纯金属的结晶

三、结晶的一般过程

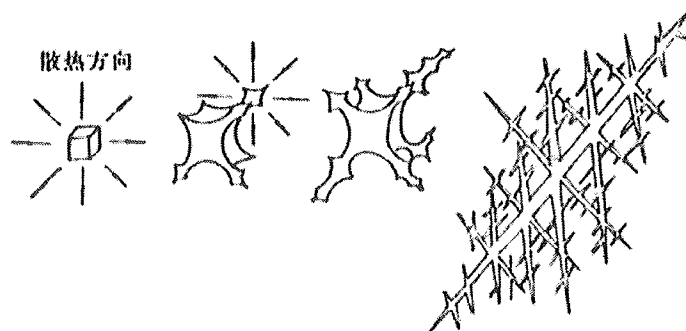
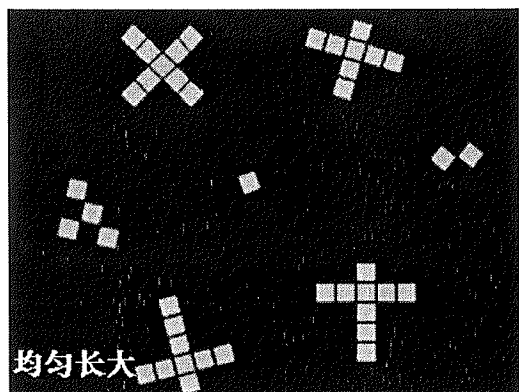
3、晶核的长大方式

晶核形成以后就会立刻长大，晶核长大的实质就是液态金属原子向晶核表面堆砌的过程，也是固液界面向液体中迁移的过程。

晶核的长大方式有两种，即均匀长大和树枝状长大。



固液界面正、负温度梯度



晶体树枝状长大示意图

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

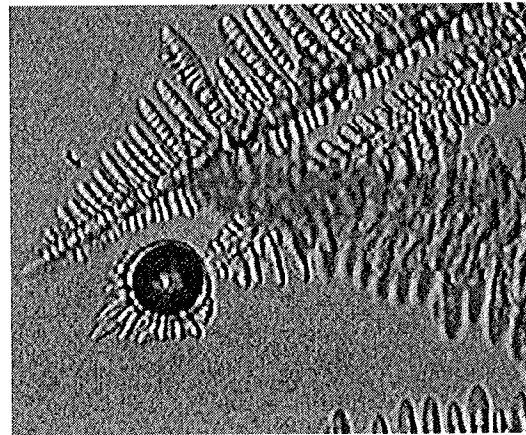
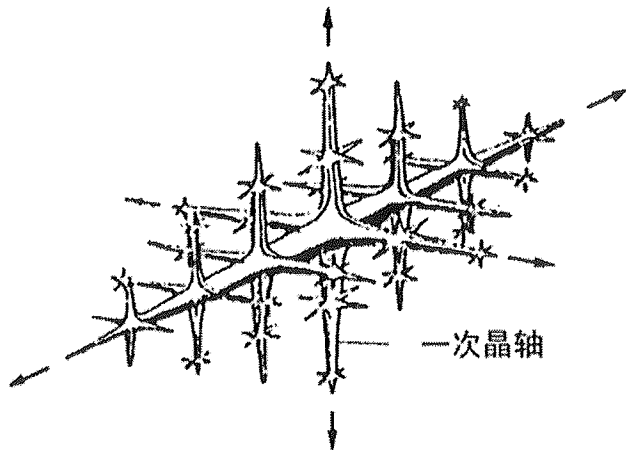
第一节 纯金属的结晶

三、结晶的一般过程

3、晶核的长大方式

实际金属结晶主要以树枝状长大。

这是由于存在负温度梯度，且晶核棱角处的散热条件好，生长快，先形成一次轴，一次轴又会产生二次轴...，树枝间最后被填充。



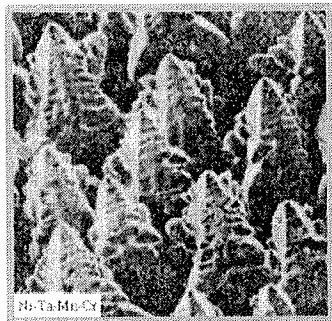
中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

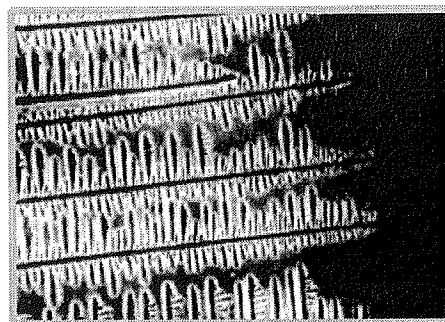
第一节 纯金属的结晶

三、结晶的一般过程

树枝状结晶



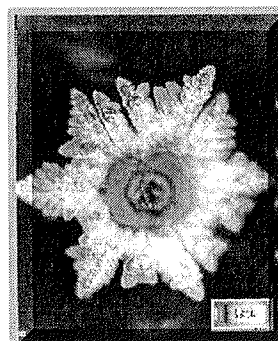
金属的树枝晶



金属的树枝晶



金属的树枝晶



冰的树枝晶

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

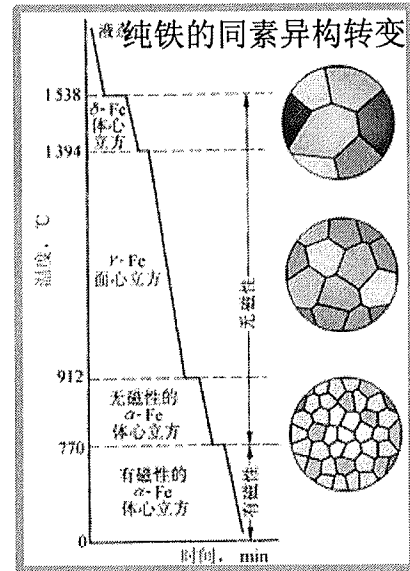
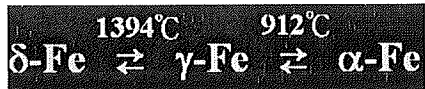
第一节 纯金属的结晶

四、同素异构转变

物质在固态下晶体结构随温度变化的现象称同素异构转变。同素异构转变属于相变之一——固态相变。

1、铁的同素异构转变

铁在固态冷却过程中有两次晶体结构变化，其变化为：



中国科学技术大学

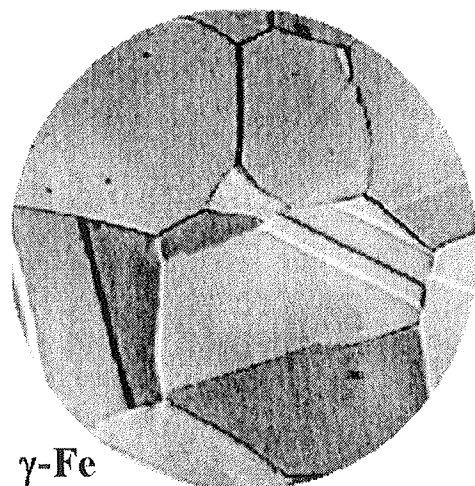
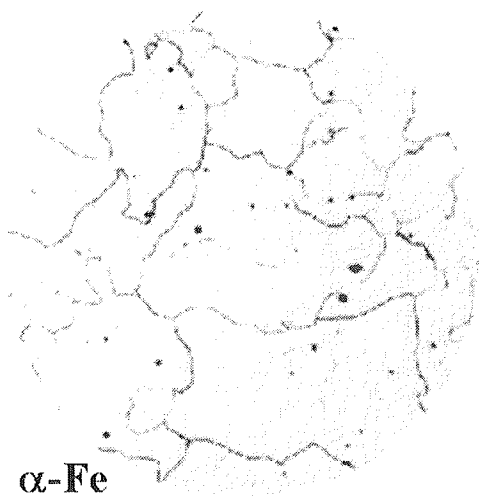
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

四、同素异构转变

1、铁的同素异构转变

$\delta\text{-Fe}$ 、 $\alpha\text{-Fe}$ 为体心立方结构(BCC)， $\gamma\text{-Fe}$ 为面心立方结构(FCC)。都是铁的同素异构体。



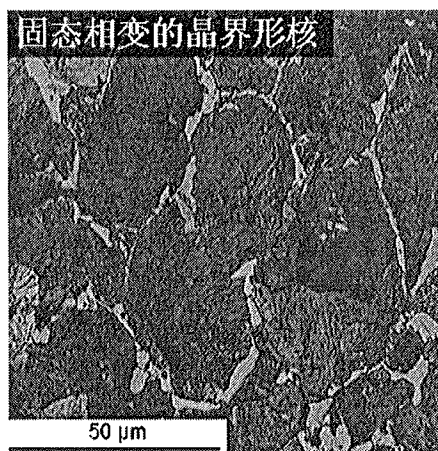
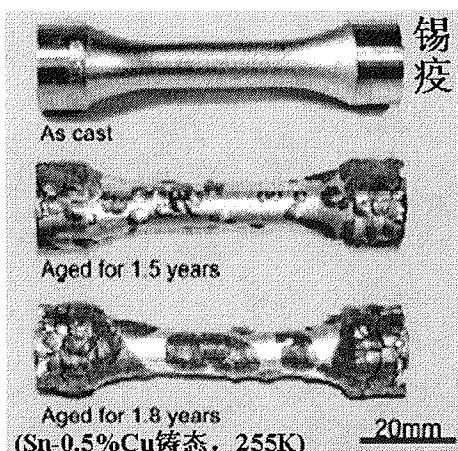
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第一节 纯金属的结晶

四、同素异构转变

2、固态转变的特点

- (1)形核一般在某些特定部位发生（如晶界、晶内缺陷、特定晶面等）。
- (2)由于固态下扩散困难，因而过冷倾向大。
- (3)固态转变伴随着体积变化，易造成很大内应力。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

合金：由金属元素与其他元素（这些元素可以是金属元素，也可以是非金属元素）组成的有金属特征的金属材料

合金结晶的基本规律与纯金属的结晶基本相同，也是在一定过冷度下成核和长大来完成结晶的。但是，其结晶过程更复杂：

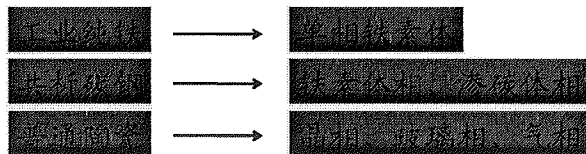
- ①组织可以是单相或是多相，既可是纯固溶体，也可是化合物或两相组成的机械混合物。
- ②具体成分的合金，显微组织可能是其中的一个相或一个基本组织，也可能是多个相及基本组织的组合。
- ③在不同温度下，同一化学成分合金的显微组织也可能不同。

因此，合金的结晶过程常用相图进行分析

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

相：具有相同结构，相同成分和性能（也可以是连续变化的）并以界面相互分开的均匀组成部分，如液相、固相是两个不同的相。



组织：用肉眼或显微镜观察到的材料内部形貌图像的统称（宏观组织、微观组织）。

组织是影响材料性能的重要因素。

相是组织的基本组成部分：

不同的相构成不同的组织！

相同的相，但当组成数量、大小、形态和分布不同时，其组织也不同！

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

★合金系：是指由两个或两个以上元素按不同比例配制的一系列不同成分的合金。

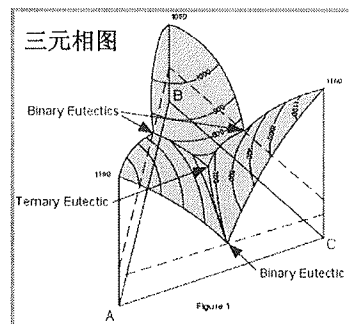
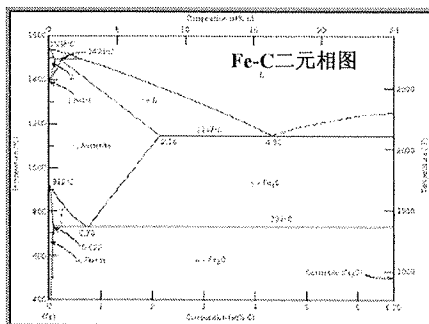
★组元：是指组成合金的最简单、最基本、能够独立存在的物质。

多数情况下组元是指组成合金的元素。但对于既不发生分解、又不发生任何反应的化合物也可看作组元，如Fe-C合金中的Fe₃C。

★相图：是表明合金系中各种合金相的平衡条件和相与相之间关系的一种简明示图，也称为平衡图或状态图。是合金体系中材料的状态与温度、成分间关系的简明图解。是制订熔炼、铸造、热加工及热处理工艺的重要依据。

根据组元数，分为二元相图、三元相图和多元相图，三元以上的合金通常是不能直接用相图来表述。

★平衡是指在一定条件下合金系中参与相变过程的各相的成分和质量分数不再变化所达到一种状态。此时合金系的状态稳定，不随时间而改变。合金在极其缓慢冷却的条件下的结晶过程，一般可以认为是平衡的结晶过程。

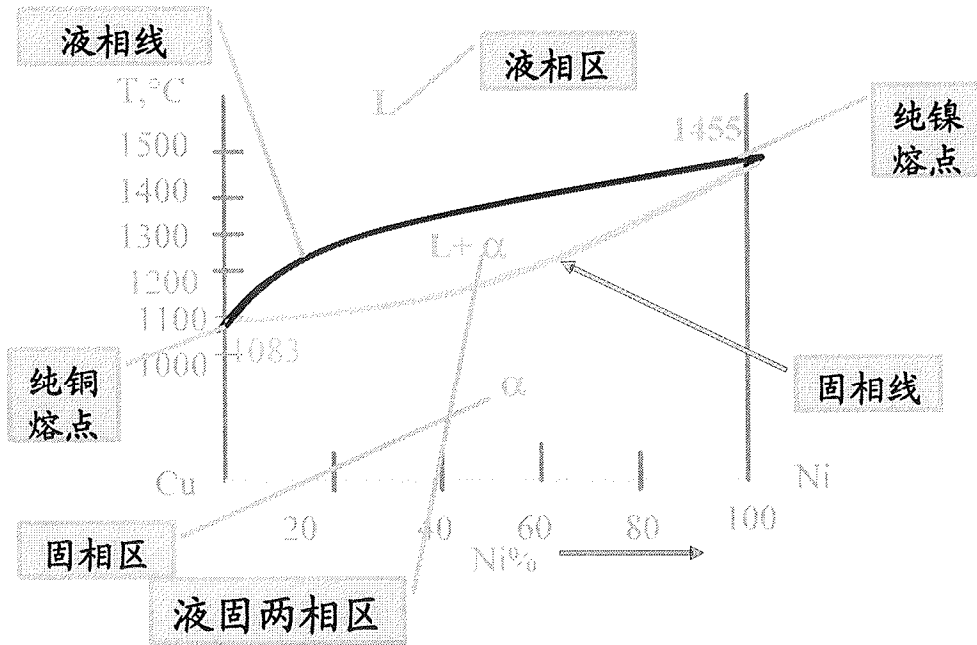


第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

一、二元相图的建立

相图中，结晶开始点的连线叫液相线。结晶终了点的连线叫固相线。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

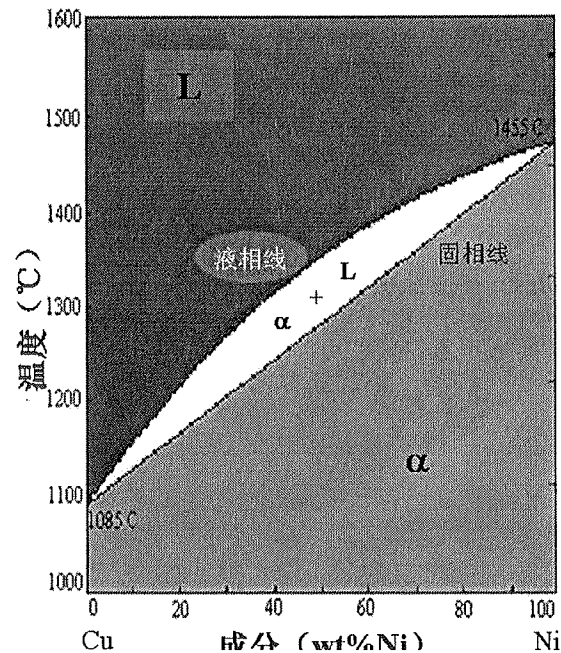
二、二元相图的基本类型与分析

1、二元匀晶相图

两组元在液态和固态下均无限互溶时所构成的相图称二元匀晶相图。

以Cu-Ni合金为例进行分析。

- 相图由两条线构成，上面是液相线，下面是固相线。
- 相图被两条线分为三个相区，液相线以上为液相区L，固相线以下为 α 固溶体区，两条线之间为两相共存的液固两相区($L+\alpha$)。



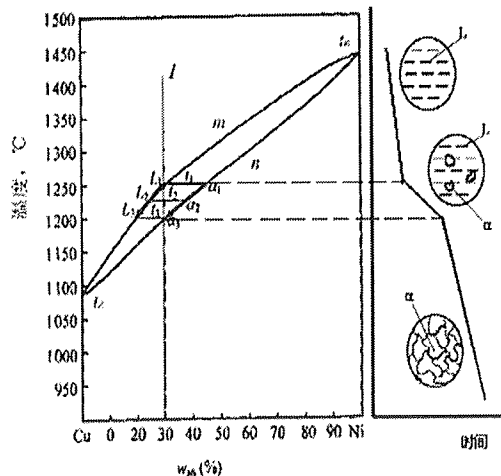
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

(1) 合金的结晶过程

- 除纯组元外，其它成分合金结晶过程相似，以I合金为例说明。
- 当液态金属自高温冷却到 t_1 温度时，开始结晶出成分为 α_1 的固溶体，其Ni含量高于合金平均成分。
- 这种从液相中结晶出单一固相的转变称为匀晶转变或匀晶反应。
- 随温度下降，固溶体重量增加，液相重量减少。同时，液相成分沿液相线变化，固相成分沿固相线变化。
- 成分变化是通过原子扩散完成的。当合金冷却到 t_3 时，最后一滴 L_3 成分的液体也转变为固溶体，此时固溶体的成分又变回到合金成分 α_3 上来。
- 液固相线不仅是相区分界线，也是结晶时两相的成分变化线；匀晶转变是变温转变。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

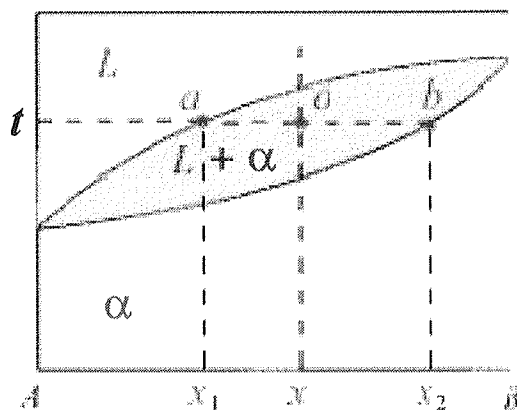
二、二元相图的基本类型与分析

(2) 杠杆定律

处于两相区的合金，不仅由相图可知道两平衡相的成分，还可用杠杆定律求出两平衡相的相对重量。

现以Cu-Ni合金为例推导杠杆定律：

- ① 确定两平衡相的成分：设合金成分为 x ，过 x 做成分垂线。在成分垂线相当于温度 t 的 o 点作水平线，其与液固相线交点 a 、 b 所对应的成分 x_1 、 x_2 即分别为液相和固相的成分。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

(2) 杠杆定律

② 确定两平衡相的相对重量

设合金的重量为1，液相重量为 Q_L ，固相重量为 Q_α 。

则 $Q_L + Q_\alpha = 1$

$$Q_L x_1 + Q_\alpha x_2 = x$$

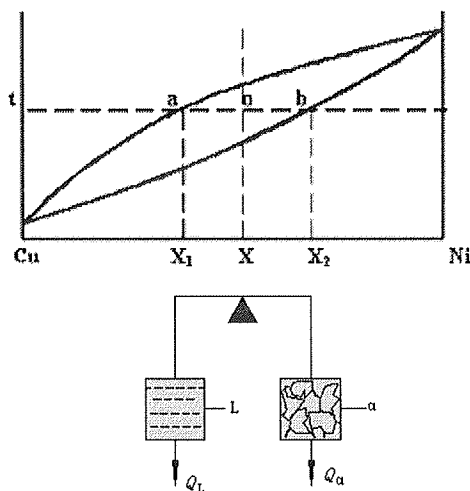
解方程组得

$$Q_L = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$$

$$Q_\alpha = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

●式中的 $x_2 - x$ 、 $x_2 - x_1$ 、 $x - x_1$ 即为相图中线

段 xx_2 (ob)、 x_1x_2 (ab)、 x_1x (ao)的长度。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

(2) 杠杆定律

② 确定两平衡相的相对重量

●因此两相的相对重量百分比为： $Q_L = \frac{xx_2}{x_1x_2} = \frac{ob}{ab}$

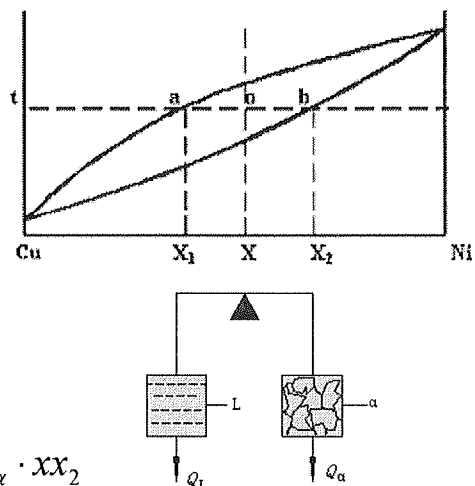
$$Q_\alpha = \frac{x_1x}{x_1x_2} = \frac{ao}{ab}$$

●两相的重量比为： $\frac{Q_L}{Q_\alpha} = \frac{xx_2}{x_1x} (= \frac{ob}{ao})$ 或 $Q_L \cdot x_1x = Q_\alpha \cdot xx_2$

上式与力学中的杠杆定律完全相似，因此称之为杠杆定律。即合金在某温度下两平衡相的重量比等于该温度下与各自相区距离较远的成分线段之比。

在杠杆定律中，杠杆的支点是合金的成分，杠杆的端点是所求的两平衡相（或两组织组成物）的成分。

■杠杆定律只适用于两相区。



00

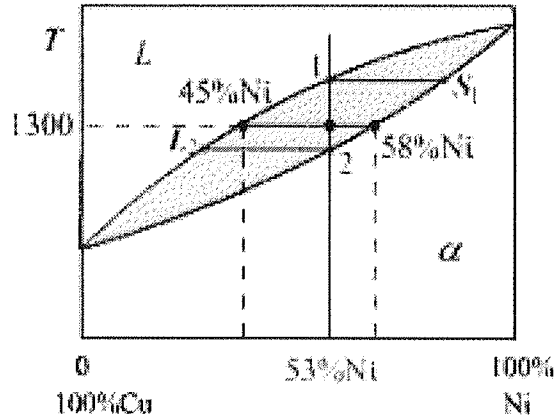
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

(2) 杠杆定律

例 (如图)



$$Q_L = \frac{0.58 - 0.53}{0.58 - 0.45} \times 100\% = 38.5\%$$

$$Q_\alpha = \frac{0.53 - 0.45}{0.58 - 0.45} \times 100\% = 61.5\%$$

中国科学技术大学

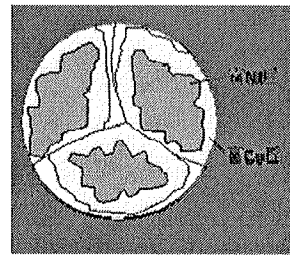
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

(3) 枝晶偏析

合金的结晶只有在缓慢冷却条件下才能得到成分均匀的固溶体。但实际冷速较快，结晶时固相中的原子来不及扩散，使先结晶出的枝晶轴含有较多的高熔点元素（如Cu-Ni合金中的Ni），后结晶的枝晶间含有较多的低熔点元素（如Cu-Ni合金中的Cu）。

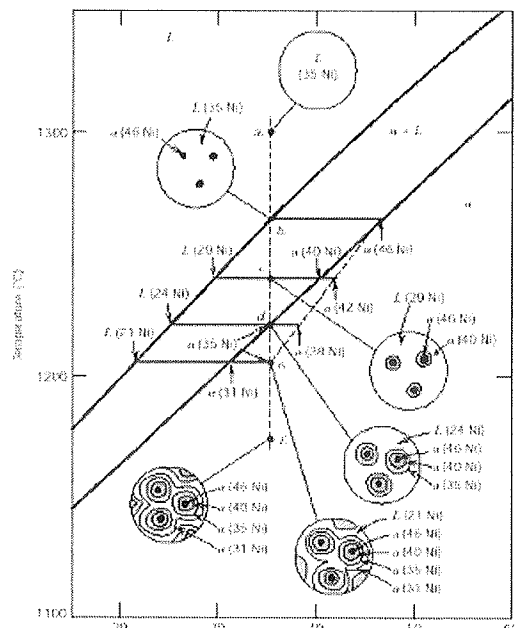


● 在一个枝晶范围内或一个晶粒范围内成分不均匀的现象称作枝晶偏析。

枝晶偏析不仅与冷速有关，而且与液固相线的间距有关。冷速越大，液固相线间距越大，枝晶偏析越严重。

● 枝晶偏析会影响合金的力学、耐蚀、加工等性能。

● 生产上常将铸件加热到固相线以下100-200°C长时间保温，以使原子充分扩散、成分均匀，消除枝晶偏析，这种热处理工艺称作扩散退火。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

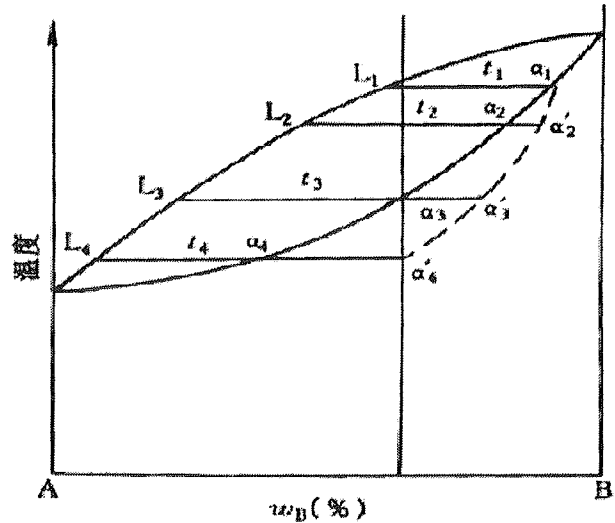
第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

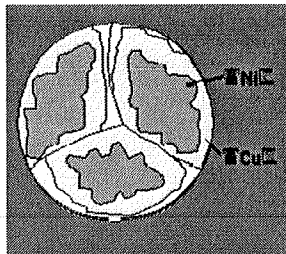
(1) 固相、液相的平均成分分别与固相线、液相线不同，有一定的偏离（固相成分按平均成分线变化），其偏离程度与冷却速度有关。冷却速度越大，其偏离程度越严重；冷却速度越小，偏离程度越小，越接近于平衡条件。

(2) 先结晶部分含有较多的高熔点组元(Ni)，后结晶部分含有较多的低熔点组元(Cu)。

(3) 非平衡结晶条件下，凝固的终止温度低于平衡结晶时的终止温度。



匀晶系合金的不平衡结晶



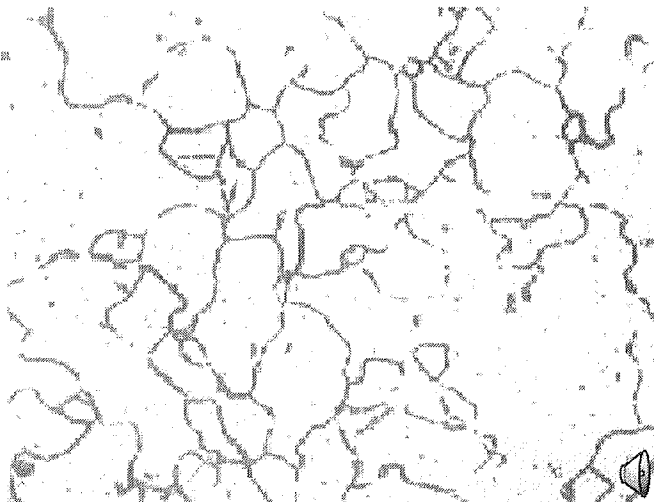
中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

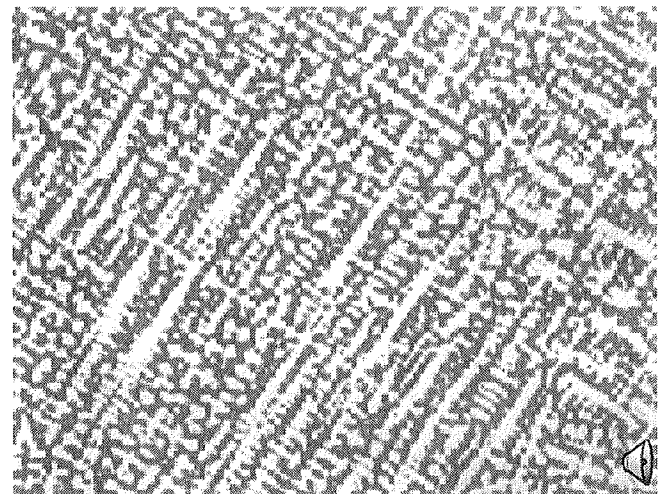
第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

Cu-Ni合金的平衡组织与枝晶偏析组织



平衡组织



枝晶偏析组织

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

2、二元共晶相图

共晶相图：液相组元无限互溶，固相组元有限溶解的合金系，当溶质超出固溶体溶解极限时，冷却过程中发生共晶转变，这类合金构成的相图称为共晶相图。

从一个液相中同时析出两个固相： $L \rightarrow \alpha + \beta$ ，即在一定温度下，由一定成分的液相同时结晶出两个成分和结构都不相同的新固相的转变称作共晶转变或共晶反应。

以 Pb-Sn 相图为例进行分析。

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

2、二元共晶相图

(1) 相图分析

① 相：相图中有L、 α 、 β 三种相， α 是溶质Sn在Pb中的固溶体， β 是溶质Pb在Sn中的固溶体。

② 相区：相图中有三个单相区：L、 α 、 β ；三个两相区： $L+\alpha$ 、 $L+\beta$ 、 $\alpha+\beta$ ；一个三相区：即水平线MEN。

③ 液固相线：液相线AEB，固相线AMENB。A、B分别为Pb、Sn的熔点。

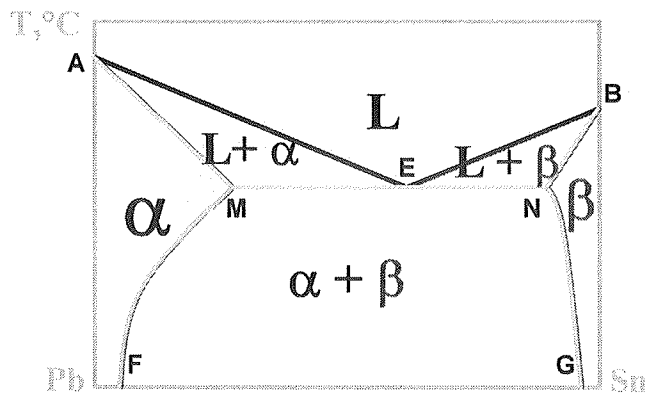
④ 固溶线：溶解度点的连线称固溶线。

相图中的MF、NG线分别为Sn在Pb中和Pb在Sn中的固溶线。

固溶体的溶解度随温度降低而下降。

⑤ 共晶线：水平线MEN叫做共晶线。

在共晶线对应的温度下（183℃），E点成分的合金同时结晶出M点成分的 α 固溶体和N点成分的 β 固溶体，形成这两个相的机械混合物



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

2、二元共晶相图

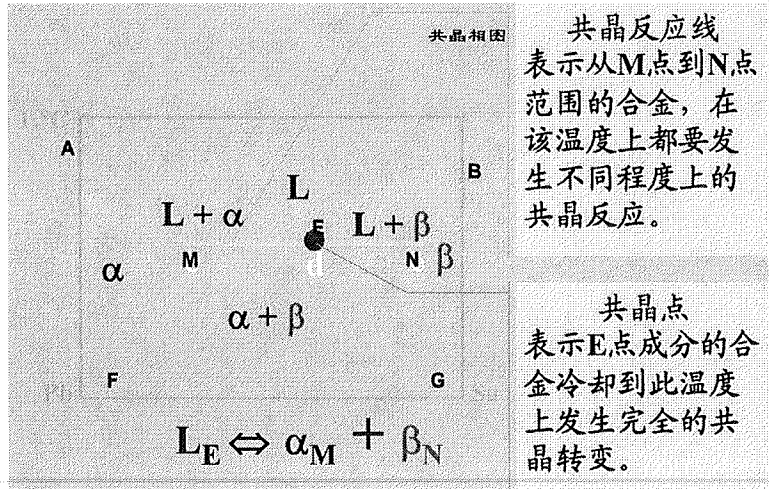
(1) 相图分析

▲共晶反应的产物，即两相的机械混合物称共晶体或共晶组织。发生共晶反应的温度称共晶温度。代表共晶温度和共晶成分的点称共晶点。

▲具有共晶成分合金称共晶合金。

在共晶线上，凡成分位于共晶点以左的合金称亚共晶合金，位于共晶点以右的合金称过共晶合金。

▲凡具有共晶线成分的合金液体冷却到共晶温度时都将发生共晶反应。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

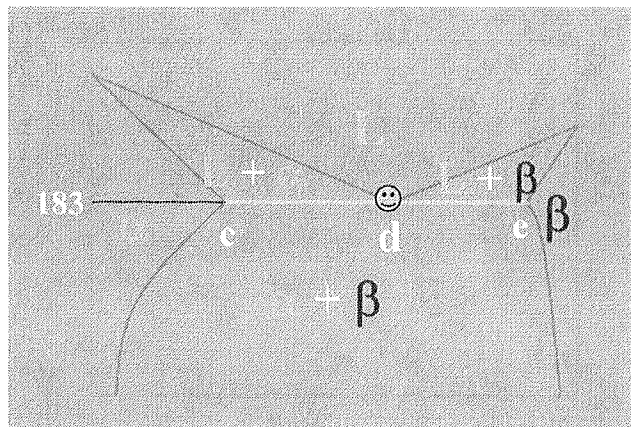
二、二元相图的基本类型与分析

2、二元共晶相图

(1) 相图分析

共晶转变要点：

- (一) 共晶转变在恒温下进行。
- (二) 转变结果是从一种液相中结晶出两个不同的固相。
- (三) 存在一个确定的共晶点。在该点凝固温度最低。
- (四) 成分在共晶线范围的合金都要经历共晶转变。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

3、二元包晶相图

当两组元在液态下完全互溶，在固态下有限互溶，并发生包晶反应时所构成的相图称作包晶相图。在一定温度下，由一个液相包着一个固相生成另一新固相的反应称包晶转变或包晶反应。 $L + \alpha \rightarrow \beta$

以Pt-Ag相图为例简要分析：

(1) 相图分析

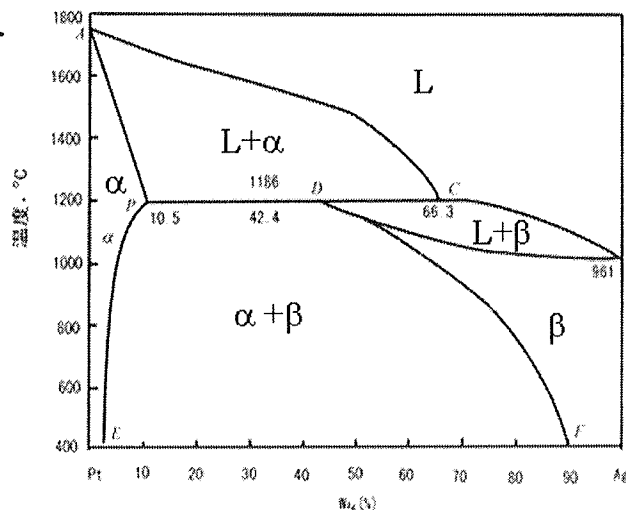
单相区： L 、 α 、 β

二相区： $L+\alpha$ 、 $L+\beta$ 、 $\alpha+\beta$

三相区： $L+\alpha+\beta$ （水平线PDC）

水平线PDC称包晶线，与该线成分对应的合金在该温度下发生包晶反应：

$L_C + \alpha_P \rightleftharpoons \beta_D$ 。该反应是液相L包着固相 α ，新相 β 在L与 α 的界面上形核，并向L和 α 两个方向长大。



中国科学技术大学

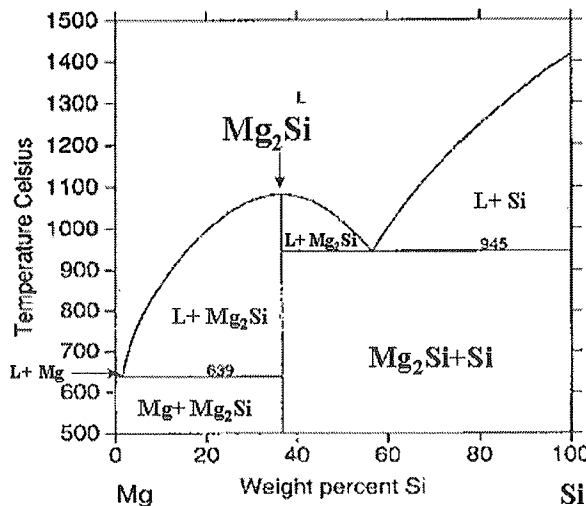
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

4、形成稳定化合物的二元相图

- 稳定化合物是指在熔化前不发生分解的化合物(如Mg-Si系的 Mg_2Si 和Fe-C系的 Fe_3C)。其成分固定，在相图中是一条垂线(代表一个单相区)。垂足是其成分，顶点是其熔点，结晶过程同纯金属。
- 分析这类相图时，可把稳定化合物当作纯组元看待，将相图分成几个部分进行分析。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

5、具有共析反应的二元相图

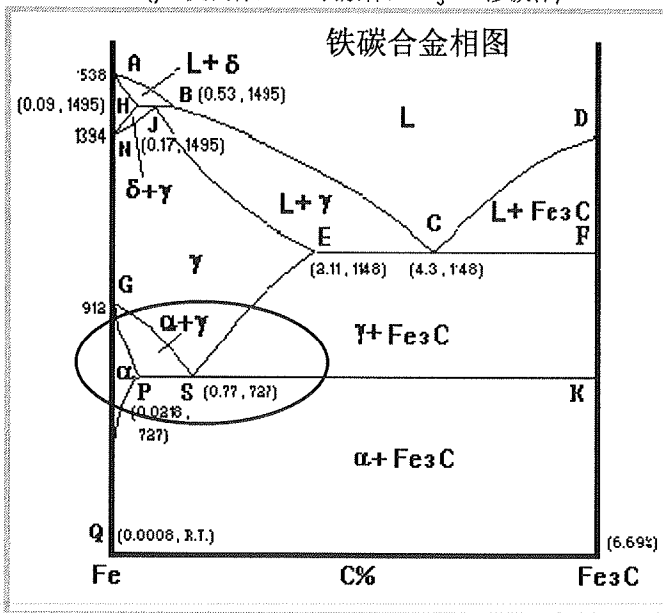
★共析反应(共析转变)是指在一定温度下,由一定成分的固相同时析出两个成分和结构完全不同的新固相的过程。共析转变也是固态相变。

★最常见的共析转变是铁碳合金中的珠光体转变: $\gamma_S \rightleftharpoons \alpha_P + Fe_3C$ 。

- 共析相图与共晶相图相似,对应的有共析线(PSK线)、共析点(S点)、共析温度、共析成分、共析合金(共析成分合金)、亚共析合金(共析线上共析点以左的合金)、过共析合金(共析线上共析点以右的合金)。

- 共析反应的产物是共析体(铁碳合金中的共析体称珠光体),也是两相的机械混合物(铁素体+渗碳体)。

(γ —奥氏体, α —铁素体, Fe_3C —渗碳体)



中国科学技术大学

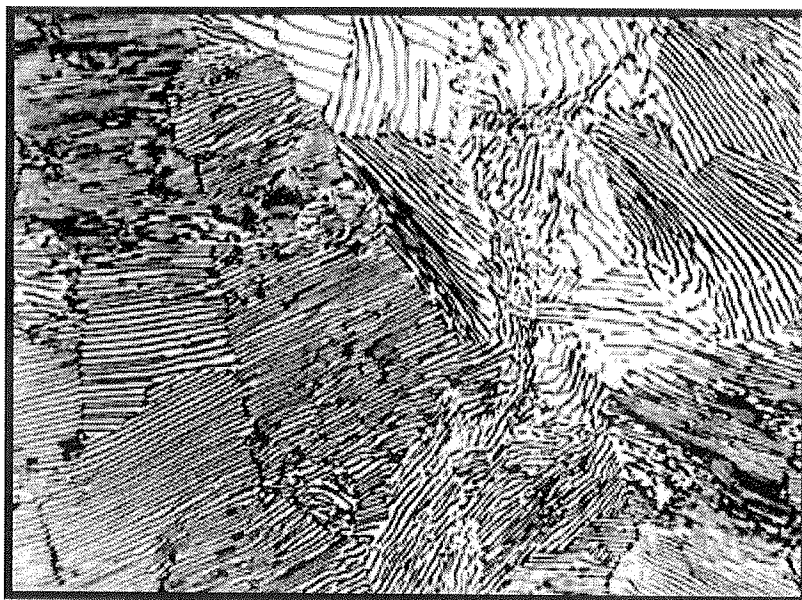
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

5、具有共析反应的二元相图

- 与共晶反应不同的是,共析反应的母相是固相,而不是液相。
- 另外,由于固态转变过冷度大,因而共析组织比共晶组织细。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

6、二元相图的分析步骤

实际二元相图往往比较复杂，

可按下列步骤进行分析。

(一) 分清相图中包括哪些基本类型相图

(二) 确定相区

(1) 相区接触法则

相邻两个相区的相数差为1。

(2) 单相区的确定

① 液相线以上为液相区；

② 靠纯组元的封闭区是以该组元为基的

单相固溶体区；

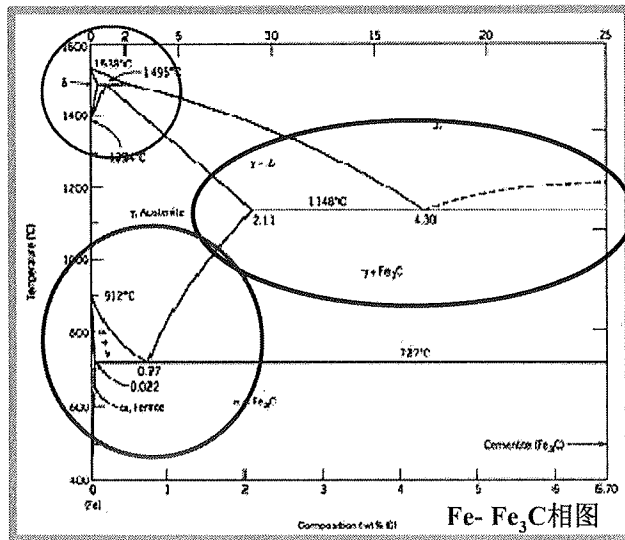
③ 相图中的垂线可能是稳定化合物（单相区），也可能是相区分界线；

④ 相图中部出现的成分可变的单相区是以化合物为基的单相固溶体区；

⑤ 相图中每一条水平线必定与三个单相区点接触。

(3) 两相区的确定：两个单相区之间夹有一个两相区，该两相区的相由两相邻单相区的相组成。

(4) 三相区的确定：二元相图中的水平线是三相区，其三个相由与该三相区点接触的三个单相区的相组成。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第二节 二元合金相图

二、二元相图的基本类型与分析

6、二元相图的分析步骤

反应名称	图形特征	反应式	说明
共晶反应		$L \rightleftharpoons \alpha + \beta$	恒温下由一个液相同时结晶出两个成分结构不同的新固相。
包晶反应		$L + \alpha \rightleftharpoons \beta$	恒温下由一个液相包着一个固相生成另一个新的固相。
共析反应		$\gamma \rightleftharpoons \alpha + \beta$	恒温下由一个固相同时析出两个成分结构不同的新固相。

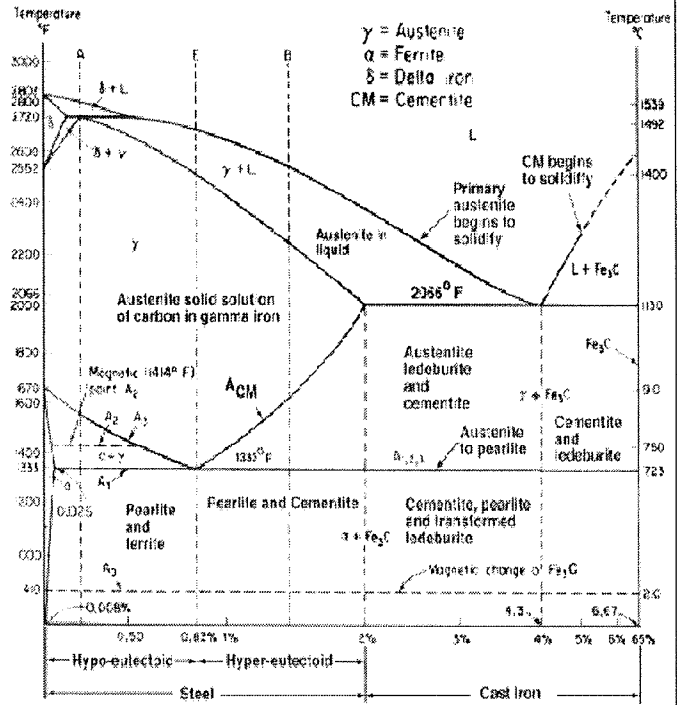
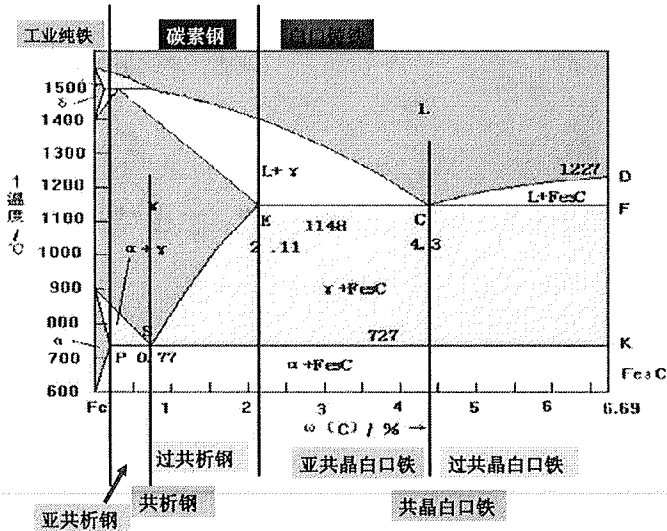
常见三相等温水平线上的反应

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

铁碳合金—碳钢和铸铁，是工业应用最广的合金。含碳量为0.0218%~2.11%的称钢；含碳量为2.11%~6.69%的称铸铁。

铁碳合金相图是研究铁碳合金最基本的工具，是研究碳钢和铸铁的成分、温度、组织及性能之间关系的理论基础，是制定热加工、热处理、冶炼和铸造等工艺的依据。



中国科学技术大学

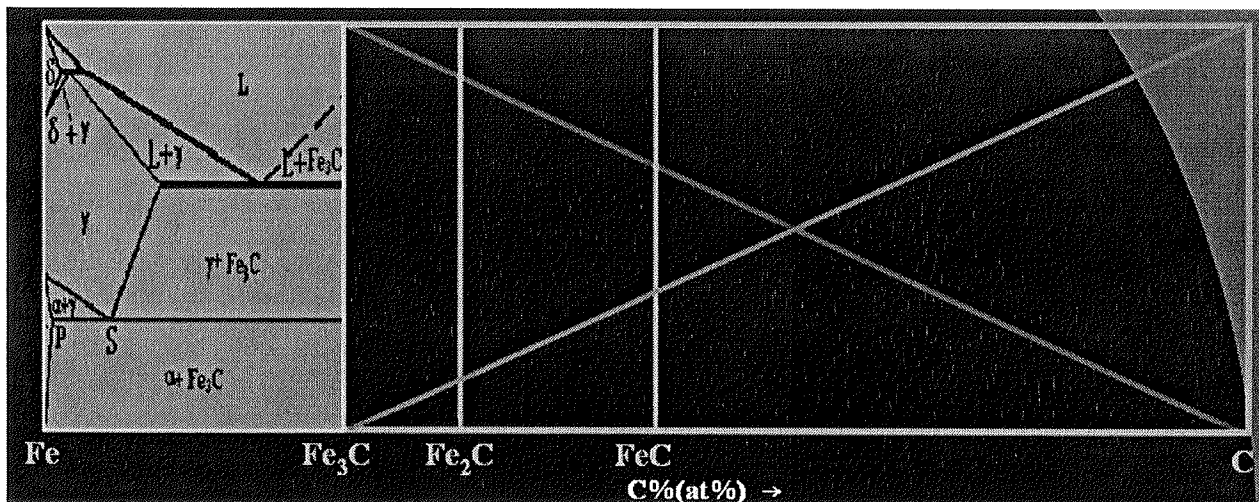
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

铁和碳可形成一系列稳定化合物： Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC ，它们都可以作为纯组元看待。

含碳量大于 Fe_3C 成分（6.69%）时，合金太脆，已无实用价值。

实际所讨论的铁碳合金相图是Fe- Fe_3C 相图。

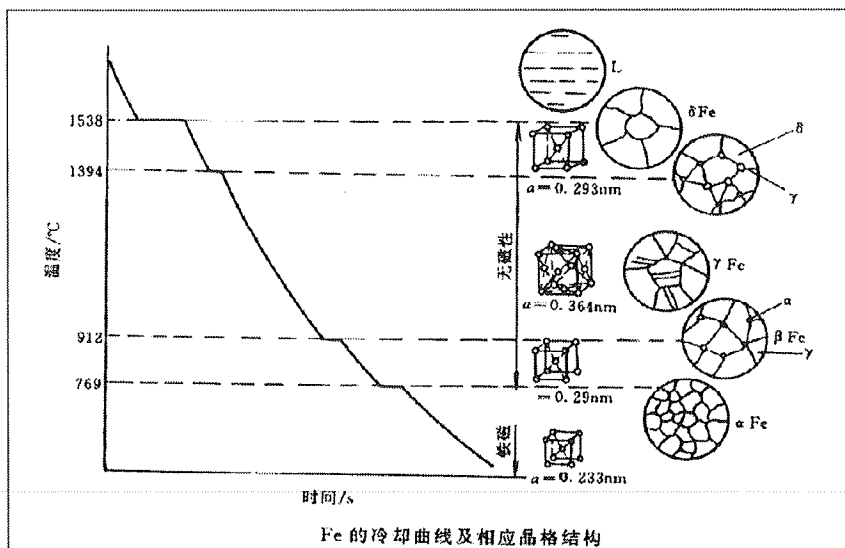
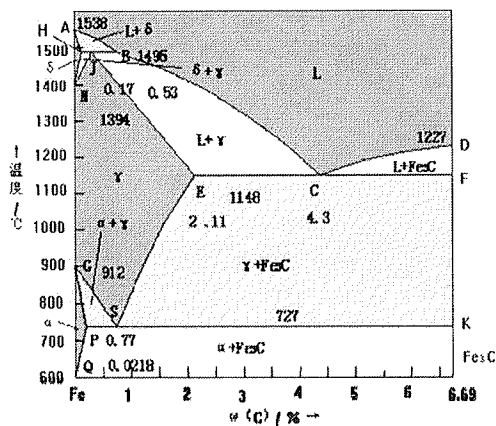


第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

Fe的冷却曲线及相应的晶体结构

少数金属在固态下随温度变化而发生晶格结构改变的现象称为同素异晶转变，也称为重结晶。与液态金属结晶相似，转变在恒温下进行，也是形核与长大的过程；也必须在一定的过冷度下才能完成转变。纯铁在769℃时发生磁性转变。769℃称为居里点，用A₂表示。



由于同素异晶转变是在固态下发生的，其原子扩散比较困难，转变时需要较大的过冷度；另外，由于转变时晶格的致密度改变，将引起晶体体积变化，在金属中引起较大的内应力。例如由 γ -Fe转变为 α -Fe时体积约增大1%。

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

1. 组元: Fe、Fe₃C

2. 相 (相组成物)

(1) 铁素体:

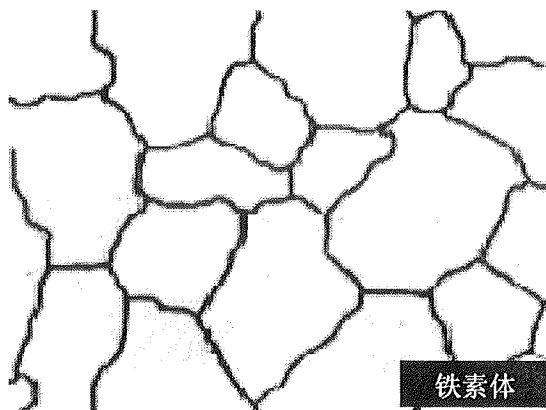
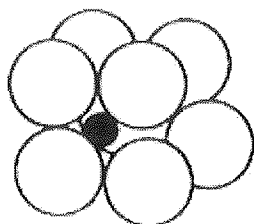
碳在 α -Fe中的间隙固溶体称铁素体，用F或 α 表示。碳在 δ -Fe中的固溶体称 δ -铁素体，用 δ 表示。都是体心立方间隙固溶体。

☆铁素体的溶碳能力很低，在727℃时最大为0.0218%，室温下仅为0.0008%。

☆铁素体的组织为多边形晶粒，性能与纯铁相似。

强度、硬度低；

塑性、韧性好。



铁素体

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

2. 相（相组成物）

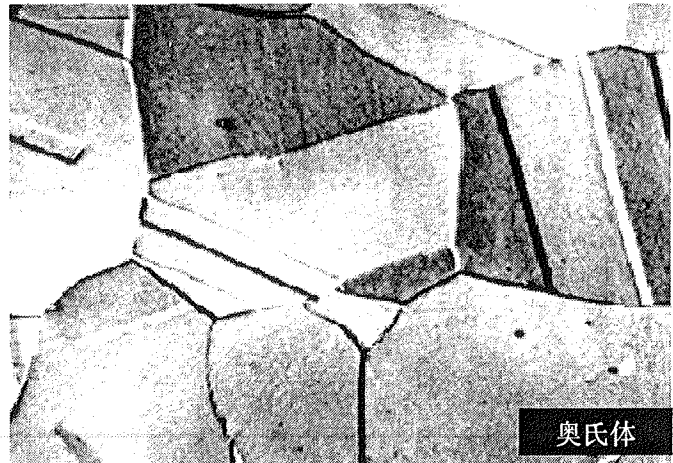
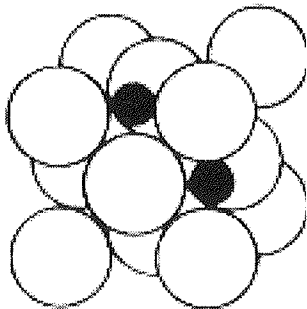
(2) 奥氏体:

★碳在 γ -Fe中的间隙固溶体称奥氏体。用A或 γ 表示。

★是面心立方晶格的间隙固溶体。溶碳能力比铁素体大，1148℃时最大为2.11%。

★组织为不规则多面体晶粒，晶界较直。强度低、塑性好，钢材热加工都在 γ 区进行。

★碳钢室温组织中无奥氏体。



奥氏体

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

2. 相（相组成物）

(3) 渗碳体：即 Fe_3C ，铁与碳形成的间隙化合物，含碳6.69%，用 Fe_3C 或 C_m 表示。

★ Fe_3C 硬度高、强度低($\sigma_b \approx 35\text{MPa}$)，脆性大，塑性几乎为零。

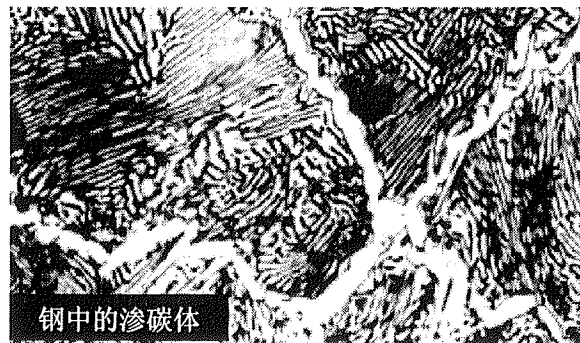
★ Fe_3C 是一个亚稳相，在一定条件下可发生分解： $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ (石墨)，该反应对铸铁有重要意义。

★由于碳在 α -Fe中的溶解度很小，因而常温下碳在铁碳合金中主要以 Fe_3C 或石墨的形式存在。

一次渗碳体 Fe_3C_I ：从液相直接结晶出来。

二次渗碳体 Fe_3C_{II} ：从A中析出。

三次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{III}$ ：从F中析出。



钢中的渗碳体



铸铁中的石墨

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

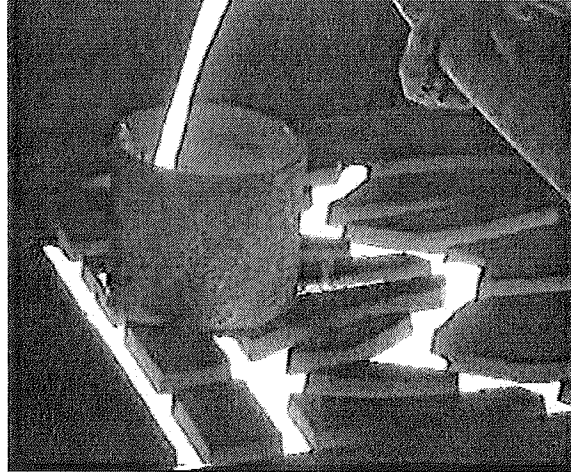
一、铁碳合金的组元和相

2. 相（相组成物）

(4) 石墨（G）

Fe-C合金中游离存在的碳

石墨的强度、塑性、硬度都很低



(5) 液相（L） 液态的铁碳合金

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

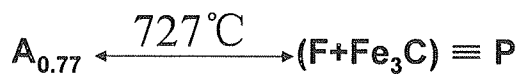
第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

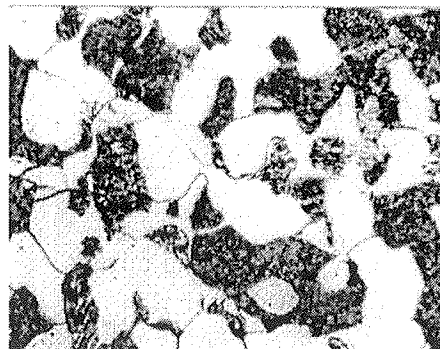
3. 基本组织（组织组成物）

(1) 珠光体（P）

共析转变：恒温下，一种固相同时析出两种不同成分固相的机械混合物（共析体）。



珠光体的力学性能介于F和 Fe_3C 之间，强度较高，硬度适中，有一定的塑性。



P的金相显微镜组织

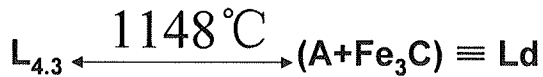
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

3.基本组织（组织组成物）

(2)高温莱氏体（Ld）



共晶转变

高温莱氏体是存在于727℃以上的一种基本组织，硬度很高，塑性很差。

(3)低温莱氏体（Ld'）

在727℃以下高温莱氏体中的奥氏体又发生共析转变成珠光体，这时的莱氏体就变成由P和Fe₃C组成，成为低温莱氏体。

低温莱氏体是室温下的一个基本组织

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

一、铁碳合金的组元和相

基本组织（相组成和组织组成物总结）

相组成：

L、A、F、Fe₃C、G；

组织组成：

F、A、Fe₃C_I、Fe₃C_{II}、Fe₃C_{III}、P、Ld、Ld'

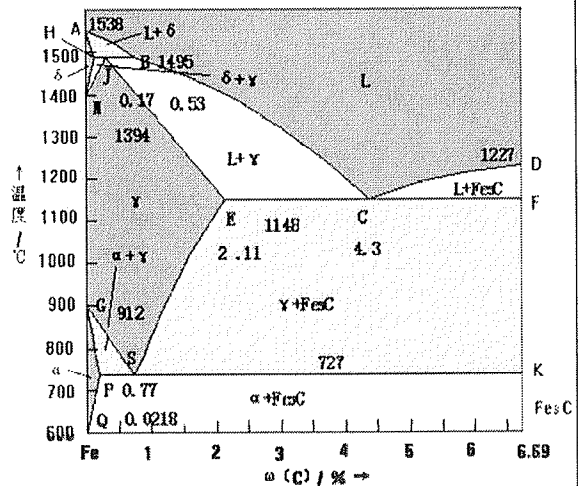
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

1. 特征点 (动画)

点	温度	碳量	含义
A	1538	0	纯铁熔点
B	1495	0.53	包晶转变时的液相成分
C	1148	4.3	共晶点 $L_C \rightleftharpoons (A_B + Fe_3C) \equiv L_d$
D	1227	6.69	Fe_3C 熔点
E	1148	2.11	C在 γ -Fe中的最大溶解度
F	1148	6.69	共晶 Fe_3C 成分点
G	912	0	γ -Fe \rightleftharpoons α -Fe同素异构转变点
H	1495	0.09	C在 δ -Fe中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶成分点 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons A_J$
K	727	6.69	共析 Fe_3C 成分点
N	1394	0	δ -Fe \rightleftharpoons γ -Fe同素异构转变点
P	727	0.0218	C在 α -Fe中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 $A_S \rightleftharpoons (F_P + Fe_3C) \equiv P$
Q	室温	0.0008	



中国科学技术大学

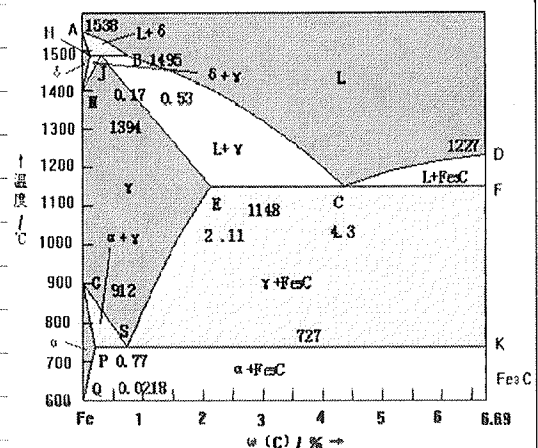
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

2. 特征线 (动画)

主要线	温度 (°C)	含义
ABCD	1538~1227	液相线
AHJECF	1538~1148	固相线
HJB	1495	包晶转变线
ECF	1148	共晶线
PSK	727	共析线 A_1
ES	1148~727	C在 γ -Fe中的溶解度线 A_{cm}
PQ	727~600	C在 α -Fe中的溶解度线
GS	912~727	A向F转变的开始线 A_3
GP	912~727	A向F转变的终了线



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

2. 特征线

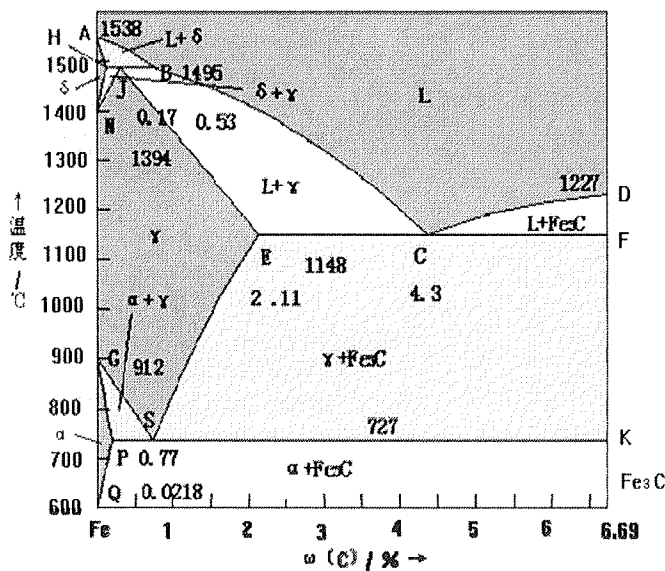
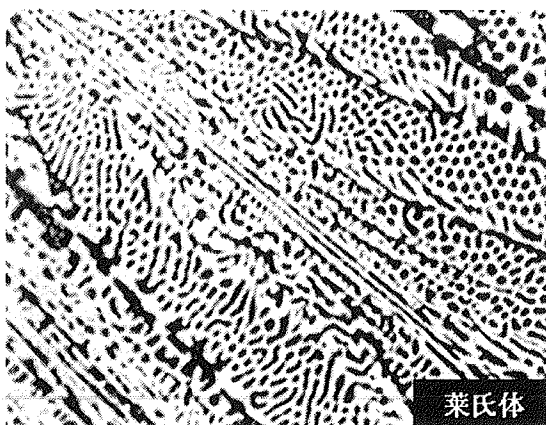
(1) 液相线—ABCD,

固相线—AHJECFD

(2) 三条水平线:

HJB: 包晶线 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons \gamma_J$

ECF: 共晶线 $L_C \rightleftharpoons \gamma_E + Fe_3C$



共晶产物是 γ 与 Fe_3C 的机械混合物, 称作莱氏体, 用Le表示。为蜂窝状, 以 Fe_3C 为基, 性能硬而脆。

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

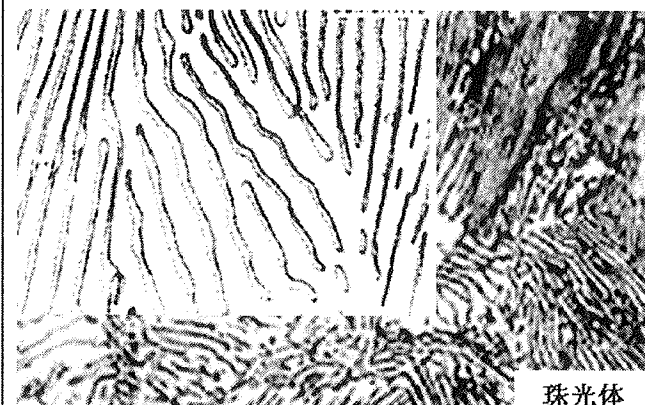
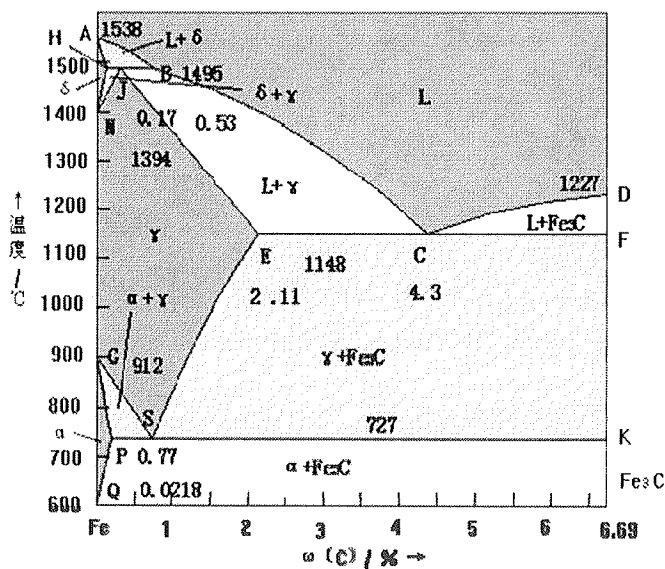
二、铁碳合金相图的分析

2. 特征线

PSK: 共析线

$\gamma_S \rightleftharpoons F_P + Fe_3C$

共析转变的产物是 α 与 Fe_3C 的机械混合物, 称作珠光体, 用P表示。



珠光体的组织特点是两相呈片层相间分布, 性能介于两相之间。PSK线又称A1线。

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

2. 特征线

(3) 其它相线

GS, GP— $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ 固溶体转变线,

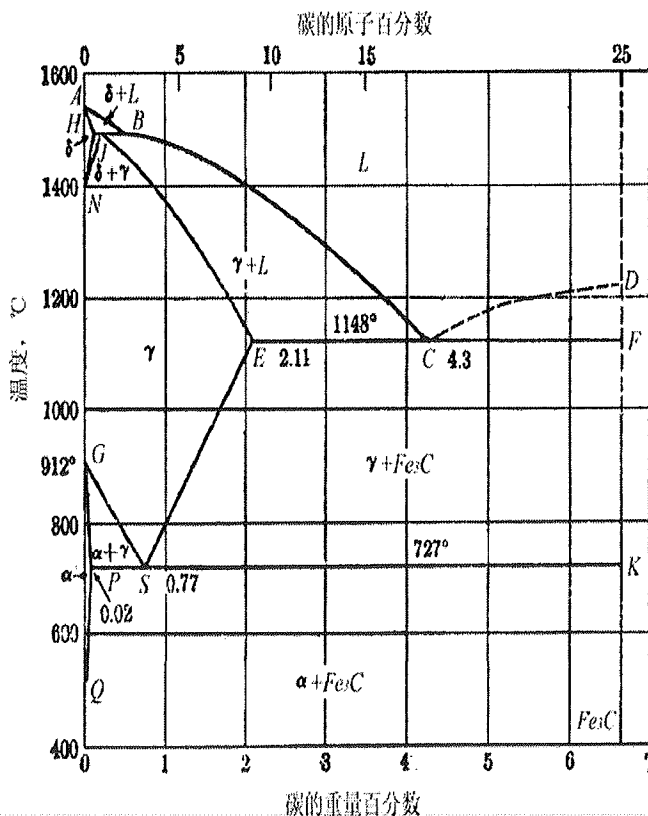
GS 又称 A3 线。

HN, JN— $\delta \rightleftharpoons \gamma$ 固溶体转变线,

ES—碳在 γ -Fe 中的固溶线。

又称 Acm 线。

PQ—碳在 α -Fe 中的固溶线。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

3. 相区

(1) 五个单相区:

L, δ , γ , α , Fe_3C

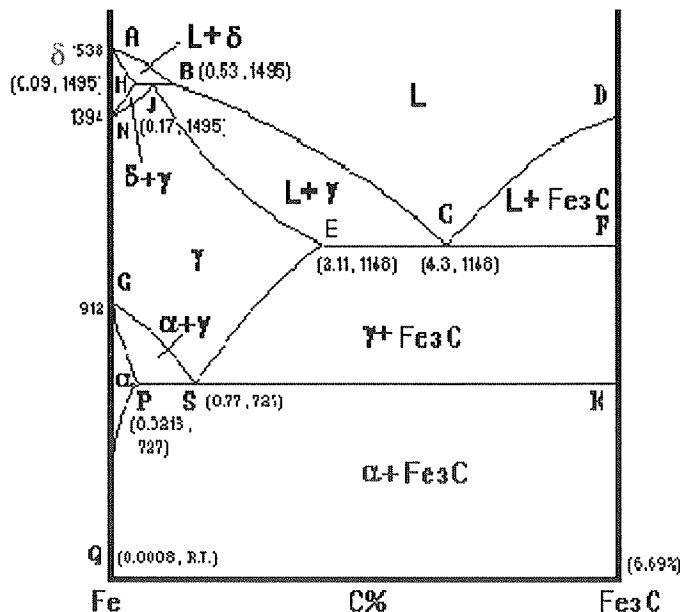
(2) 七个两相区: L+ δ , L+ γ , L+ Fe_3C ,

δ + γ , γ + Fe_3C , γ + α , α + Fe_3C

(3) 三个三相区: 即 HJB (L+ δ + γ),

ECF (L+ γ + Fe_3C), PSK (γ + α + Fe_3C)

三条水平线



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

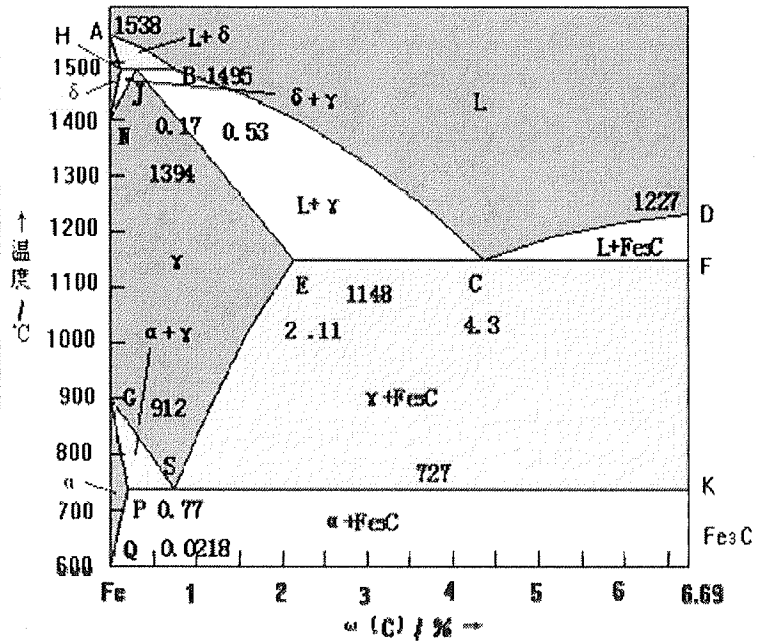
二、铁碳合金相图的分析

相图中的三个重要点

相图中的五个单相(区)

相图中的三条水平线

相图中的四条垂直线



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

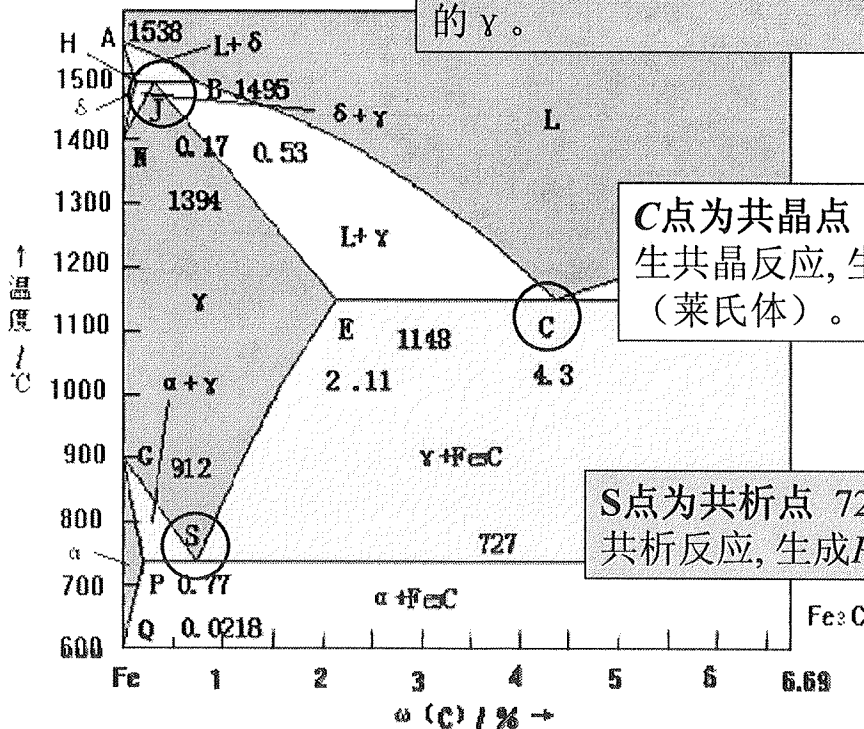
第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

J为包晶点: 1495 °C时, B点成分的L与H点成分的 δ 发生包晶反应, 生成J点成分的 γ 。

C点为共晶点 1148 °C时, C点成分的L发生共晶反应, 生成E点成分的 γ 和Fe₃C (莱氏体)。

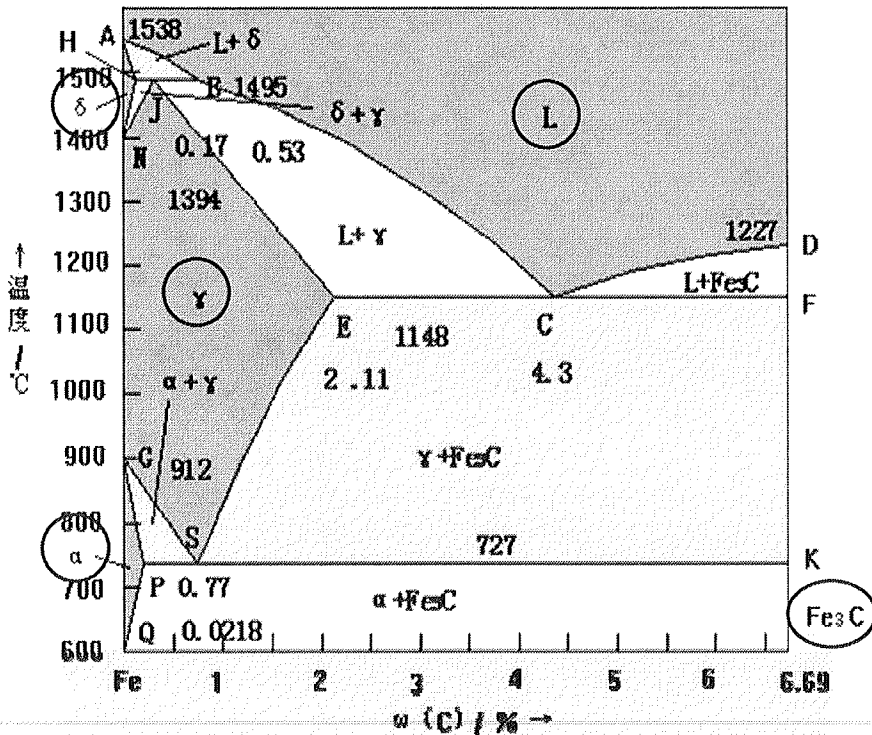
S点为共析点 727 °C时, S点成分的 γ 发生共析反应, 生成P点成分的 α 和Fe₃C (P)。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析

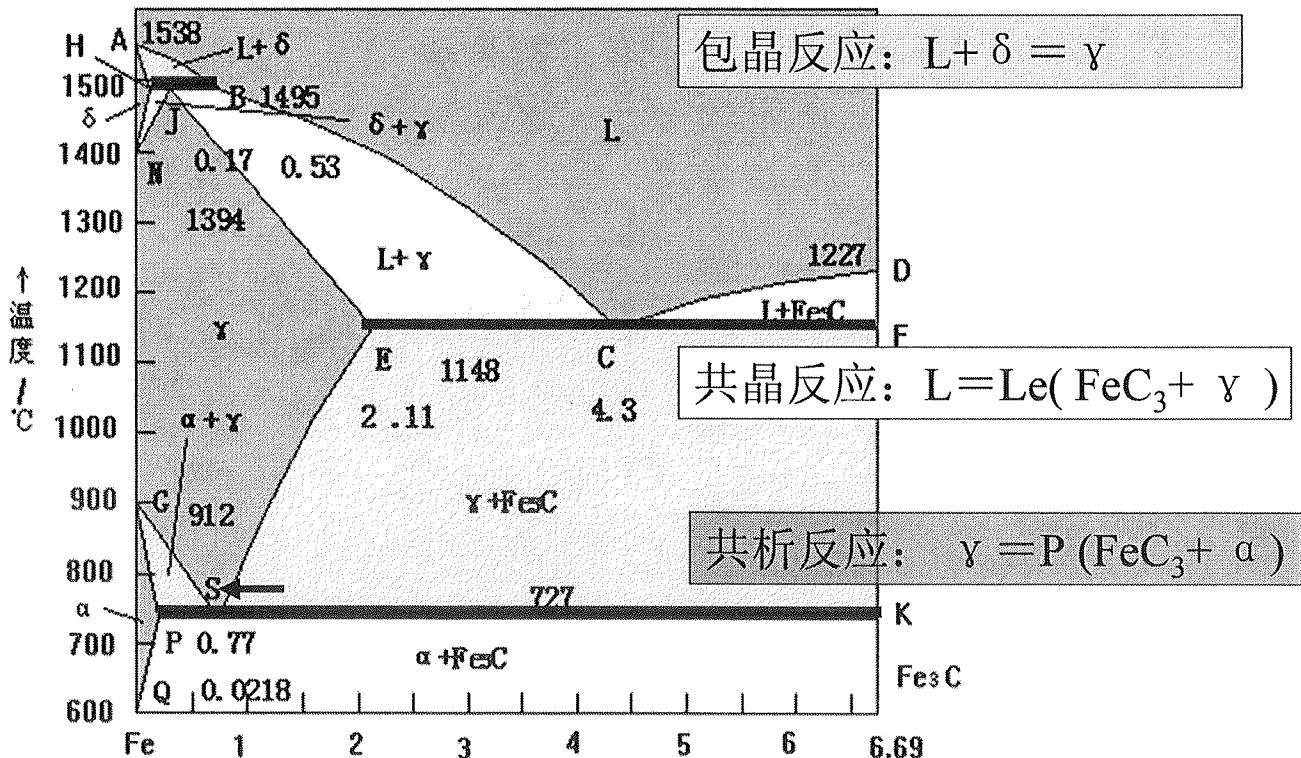


中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

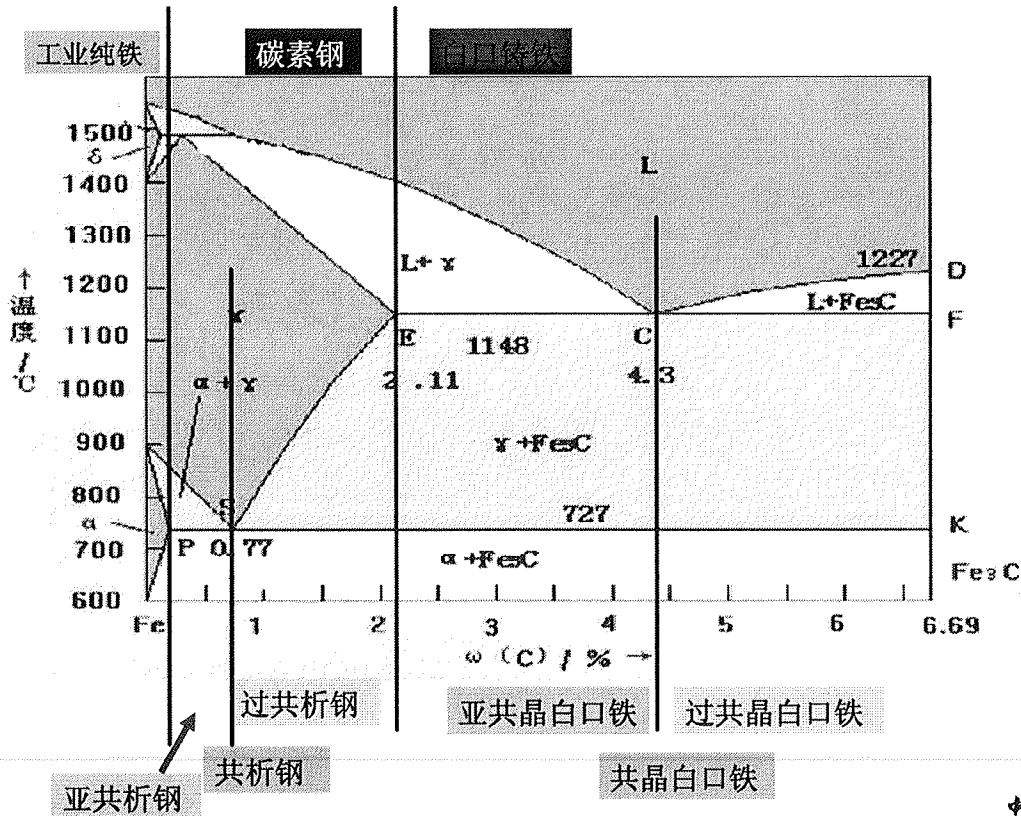
二、铁碳合金相图的分析



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

二、铁碳合金相图的分析



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

铁碳相图上的合金，按成分可分为三类：

(1) 工业纯铁 (<0.0218% C) 组织为单相铁素体。

(2) 钢 (0.0218~2.11% C) 高温组织为单相 γ

① 亚共析钢

(0.0218~0.77% C)

② 共析钢 (0.77% C)

③ 过共析钢

(0.77~2.11% C)

(3) 白口铸铁

(2.11~6.69% C)

铸造性能好，硬而脆

① 亚共晶白口铸铁

(2.11~4.3% C)

② 共晶白口铸铁 (4.3% C)

③ 过共晶白口铸铁

(4.3~6.69% C)

铁碳合金

工业纯铁 < 0.0218%

碳素钢
0.0218~2.11%

白口(铸)铁
2.11~6.69%

亚共析钢

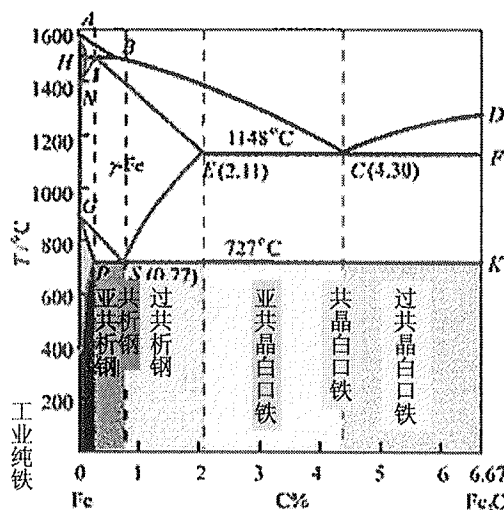
共析钢 0.77%

过共析钢

亚共晶白口铁

共晶白口铁 4.3%

过共晶白口铁



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

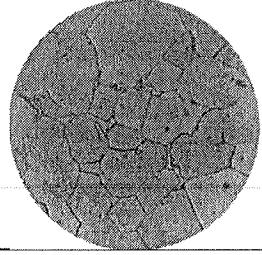
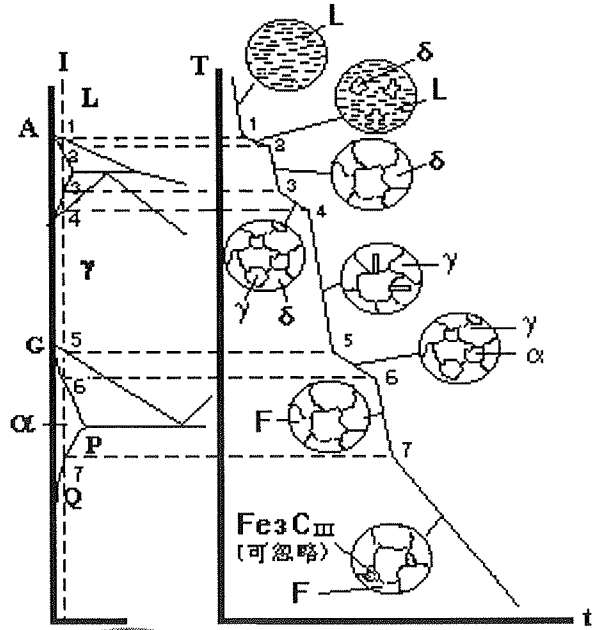
三、典型合金的平衡结晶过程

(一) 工业纯铁的结晶过程 (动画)

合金液体在1-2点间转变为 δ , 3-4点间 $\delta \rightarrow \gamma$, 5-6点间 $\gamma \rightarrow \alpha$ 。到7点, 从 α 中析出 Fe_3C 。

从铁素体中析出的渗碳体称三次渗碳体, 用 Fe_3C_{III} 表示。 Fe_3C_{III} 以不连续网状或片状分布于晶界。

随温度下降, Fe_3C_{III} 量不断增加, 合金的室温下组织为 $F + Fe_3C_{III}$ 。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(二) 共析钢的结晶过程 (动画)

合金液体在1-2点间转变为 γ 。到S点发生共析转变:



γ 全部转变为珠光体。

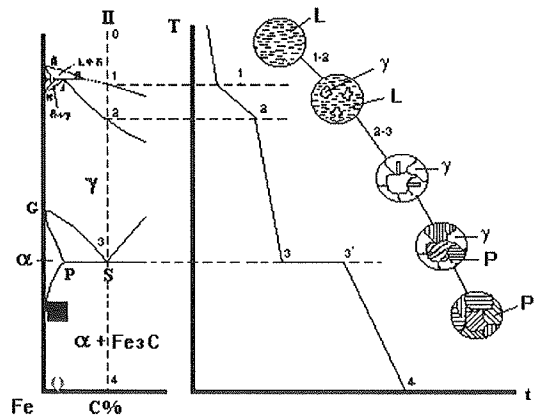
珠光体在光镜下呈指纹状。



珠光体

珠光体中的渗碳体称共析渗碳体。

S点以下, 共析 α 中析出 Fe_3C_{III} , 与共析 Fe_3C 结合不易分辨。室温组织为P。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

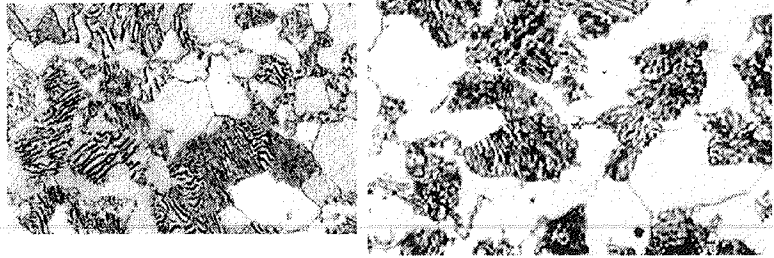
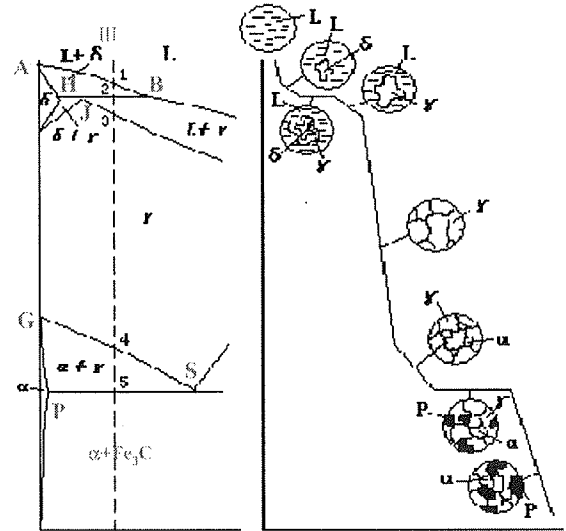
三、典型合金的平衡结晶过程

(二) 亚共析钢的结晶过程 (动画)

★0.09~0.53%C亚共析钢冷却时发生包晶反应.

★以0.45%C的钢为例

合金在4点以前通过匀晶—包晶—匀晶反应全部转变为 γ 。到4点， γ 成分沿GS线变到S点，由 γ 中析出 α 。到5点， γ 发生共析反应转变，变为珠光体。温度继续下降， α 中析出 Fe_3C_{III} ， Fe_3C_{III} 由于与共析 Fe_3C 结合，且量少，忽略不计。



中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

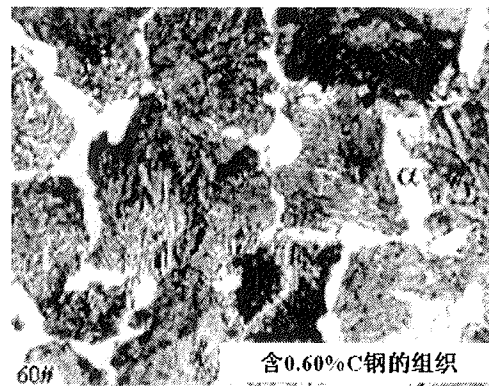
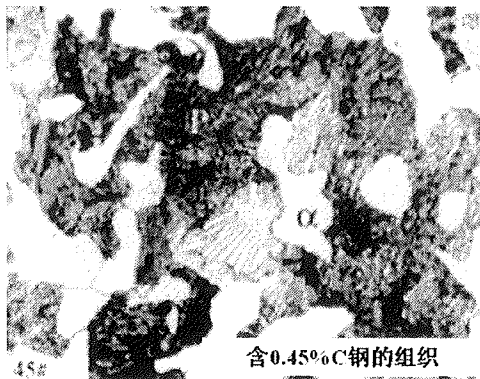
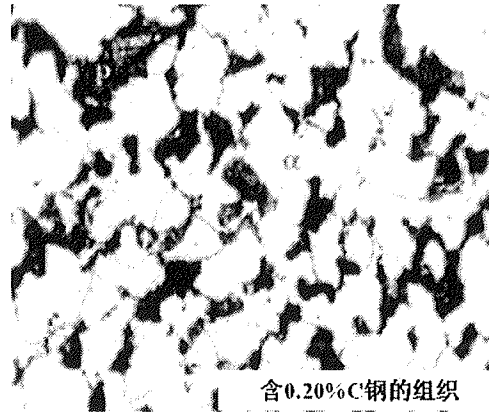
第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(二) 亚共析钢的结晶过程

★亚共析钢室温下的组织为F+P。

★在0.0218~0.77%C 范围内珠光体的量随含碳量增加而增加。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

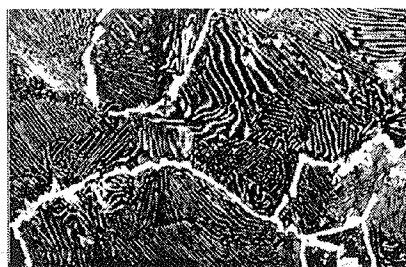
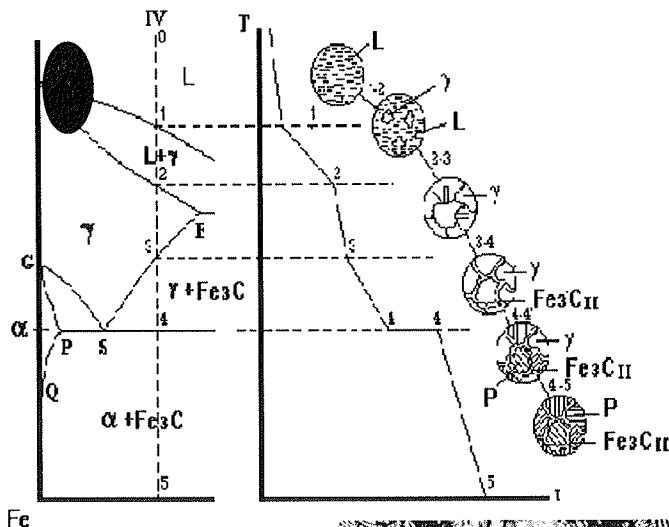
(四) 过共析钢的结晶过程 (动画)

★合金在1~2点转变为 γ ，到3点，开始析出 Fe_3C 。从奥氏体中析出的 Fe_3C 称二次渗碳体，用 Fe_3C_{II} 表示，其沿晶界呈网状分布。

★温度下降， Fe_3C_{II} 量增加， γ 成分沿ES线变化到S点，到4点，余下的 γ 转变为P。

★过共析钢室温组织为P+ Fe_3C_{II} 。

★ Fe_3C_{II} 量随含碳量而增加，含碳量为2.11%时， Fe_3C_{II} 量最大。



含1.4% C 钢的组织
中国科学技术大学

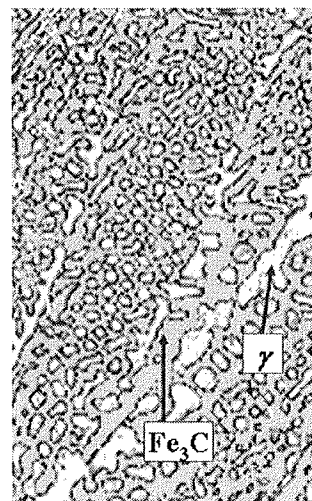
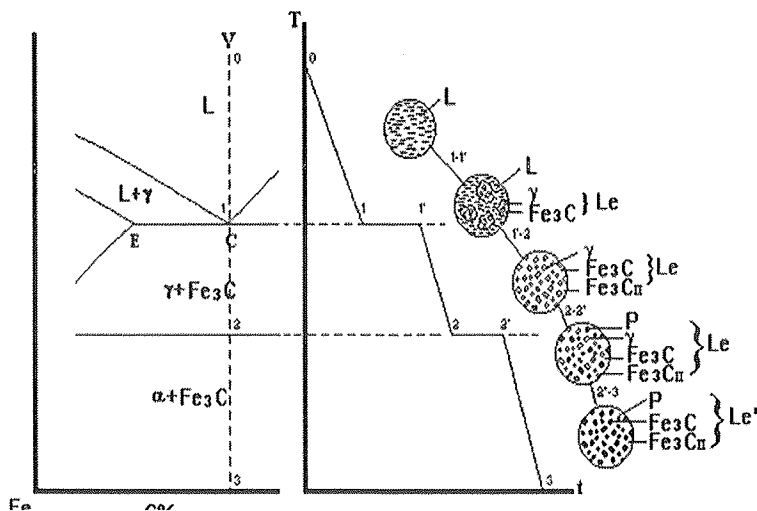
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(五) 共晶白口铁的结晶过程 (动画)

合金冷却到C点发生共晶反应全部转变为莱氏体(L_e),莱氏体是共晶 γ 与共晶 Fe_3C 的机械混合物,呈蜂窝状。



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

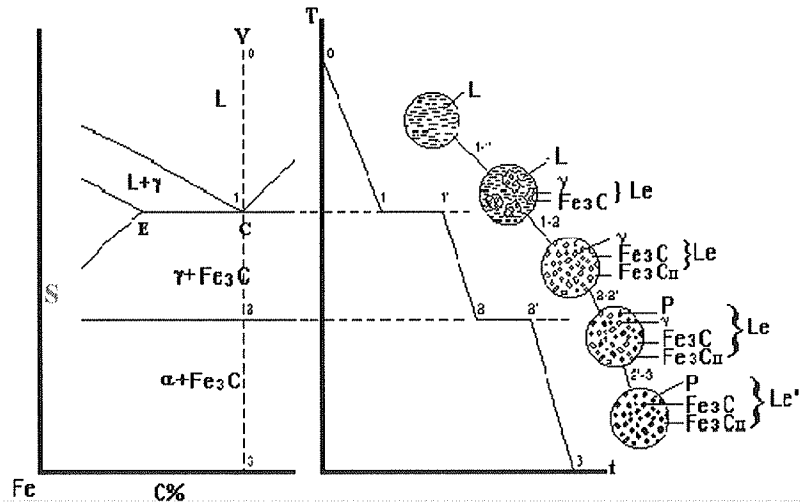
(五) 共晶白口铁的结晶过程

C点以下, γ 成分沿ES线变化, 共晶 γ 将析出 Fe_3C_{II} 。 Fe_3C_{II} 与共晶 Fe_3C 结合, 不易分辨。

温度降到2点, γ 成分达到0.77%

在2点, 共晶 γ 发生共析反应, 转变为珠光体, 这种由P与 Fe_3C 组成的共晶体称低温莱氏体, 用 Le' 表示。

2点以下, 共晶体中P的变化同共析钢。



中国科学技术大学

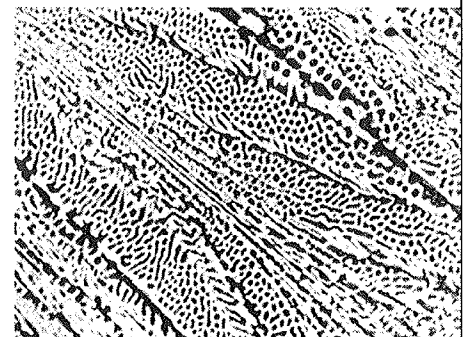
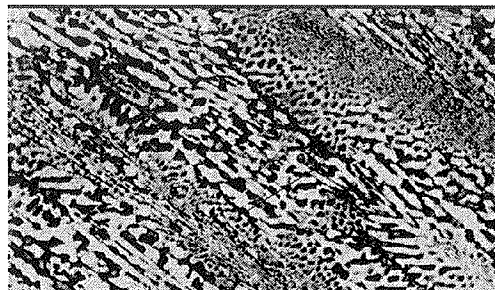
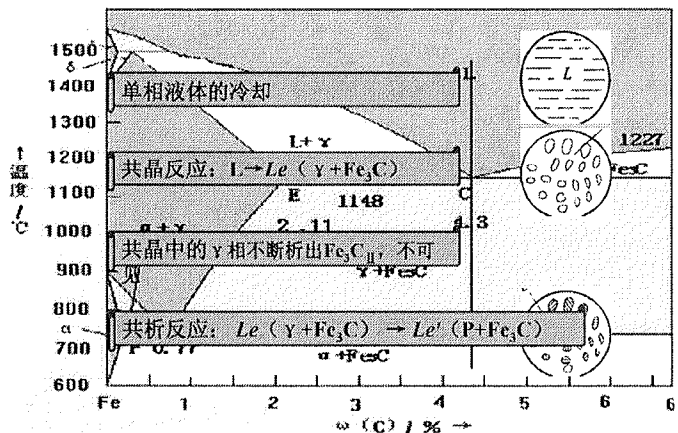
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(五) 共晶白口铁的结晶过程

共晶白口铁室温组织为 Le' ($P + Fe_3C$), 它保留了共晶转变产物的形态特征。



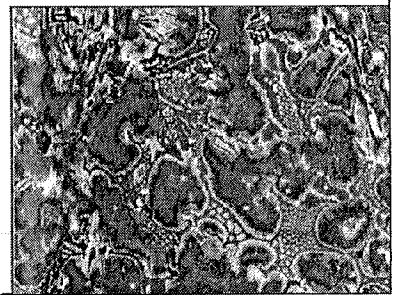
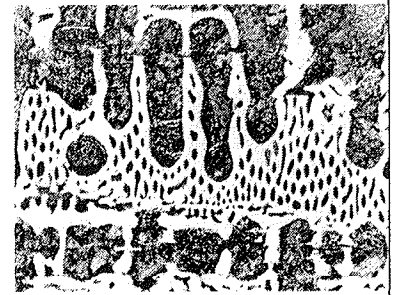
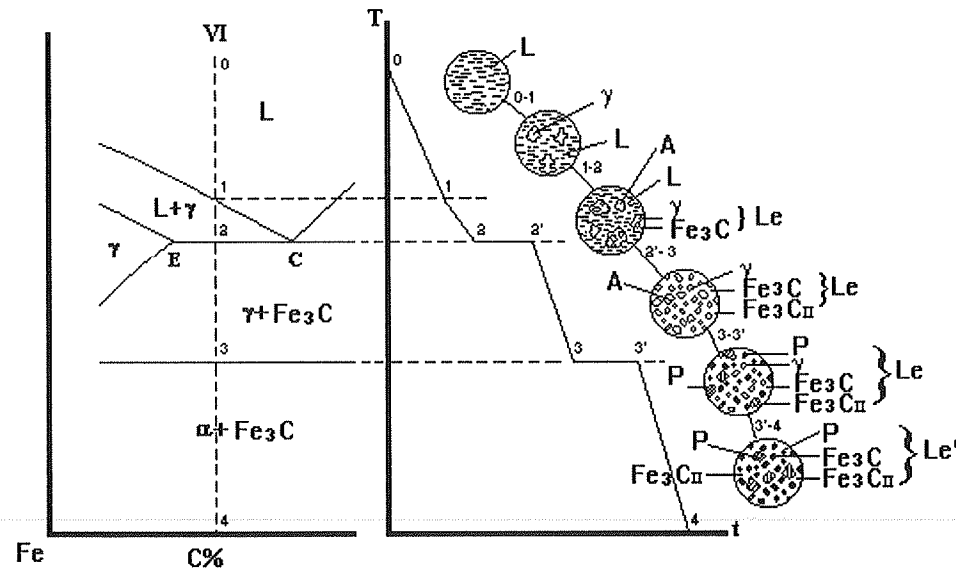
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(*) 亚共晶白口铁的结晶过程 (动画)

合金在1~2点间析出 γ 。到2点，液相成分变到C点，并转变为Le。2~3点间从 γ 中析出 Fe_3C_{II} ，到3点， γ 转变为P，共晶渗碳体在结晶过程中不变。



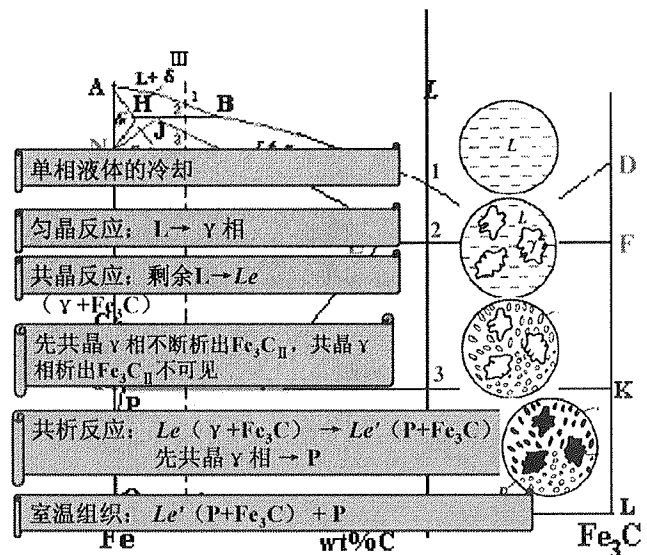
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(*) 亚共晶白口铁的结晶过程

亚共晶白口铁室温组织为 $P+Fe_3C_{II}+Le'$ 。



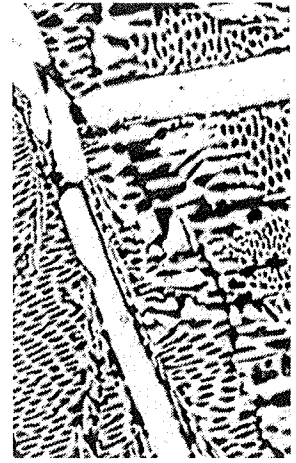
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

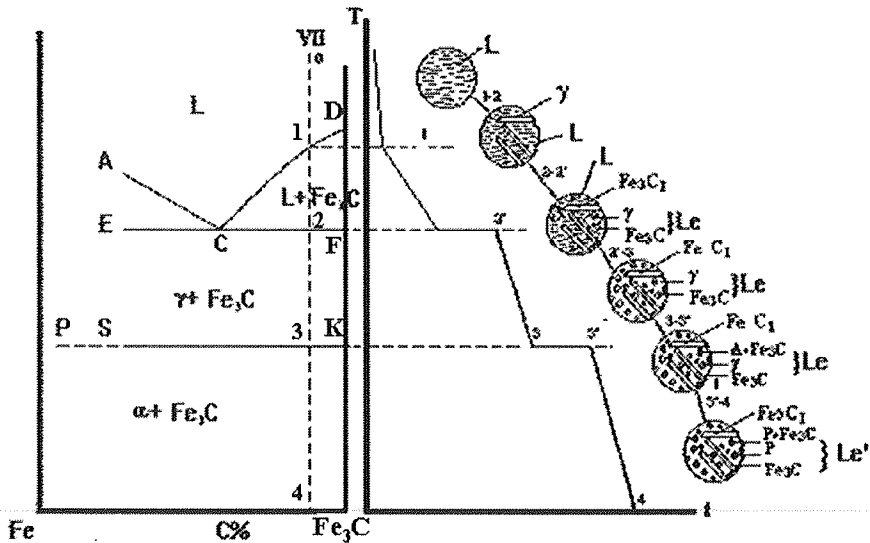
三、典型合金的平衡结晶过程

(b) 过共晶白口铁的结晶过程 (动画)

1~2点间从液相中析出 Fe_3C ，这种渗碳体称一次渗碳体，用 Fe_3C_I 表示，呈粗条片状。到2点，余下的液相成分变到C点并转变为Le。



中国科学技术大学



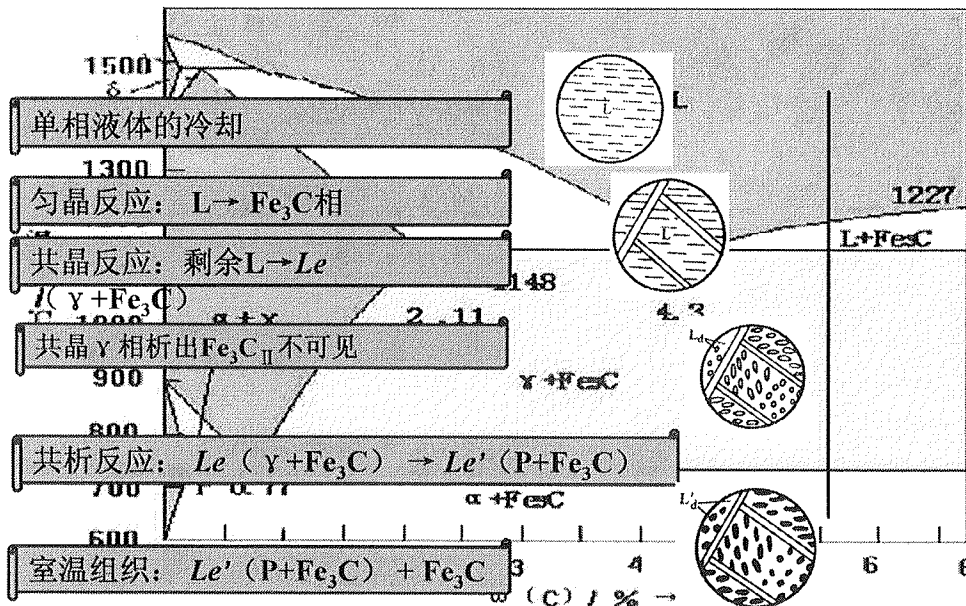
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(b) 过共晶白口铁的结晶过程

2点以下， Fe_3C_I 成分重量不再发生变化，Le变化同共晶合金，其室温组织为 $Fe_3C_I + Le'$ 。



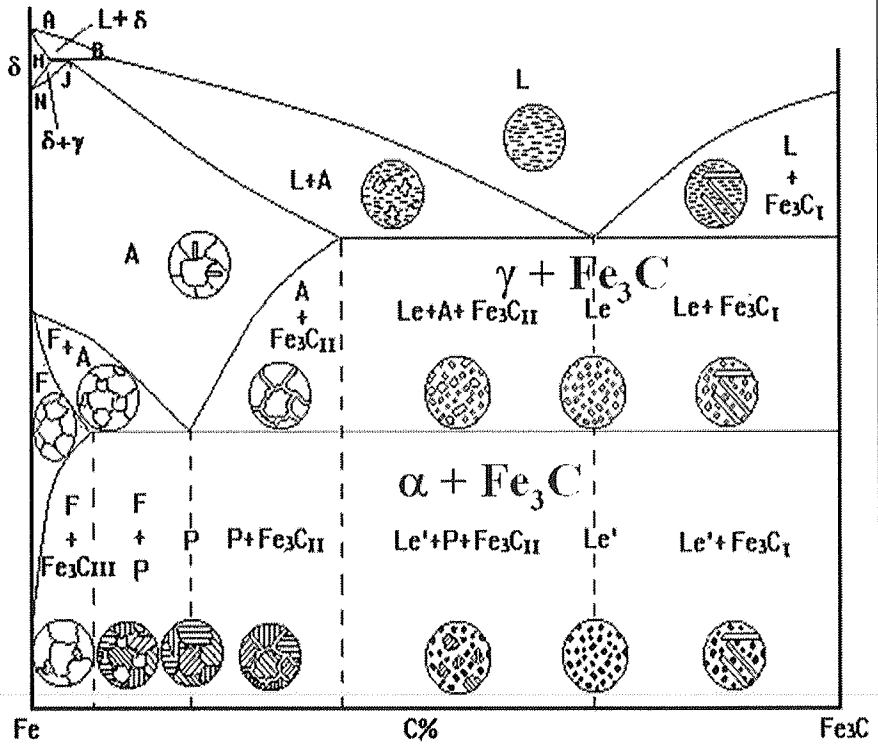
第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(A) 组织组成物在铁碳合金相图上的标注

组织组成物与相组成物标注区别主要在 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 和 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 两个相区。 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 相区中有四个组织组成物区， $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 相区中有七个组织组成物区。

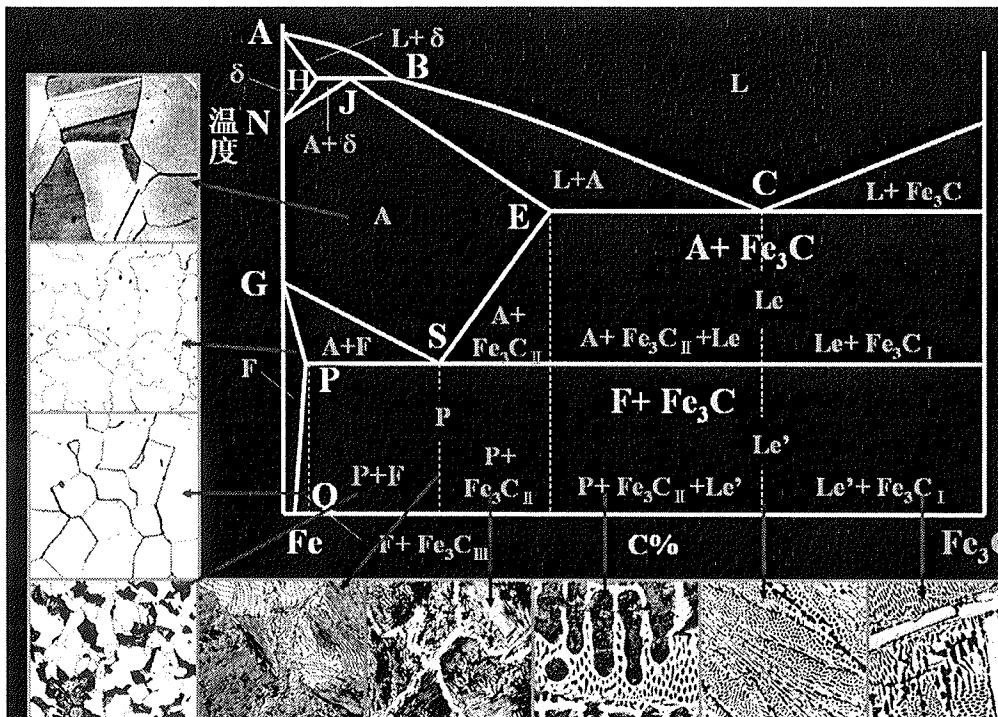


第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(A) 组织组成物在铁碳合金相图上的标注



第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

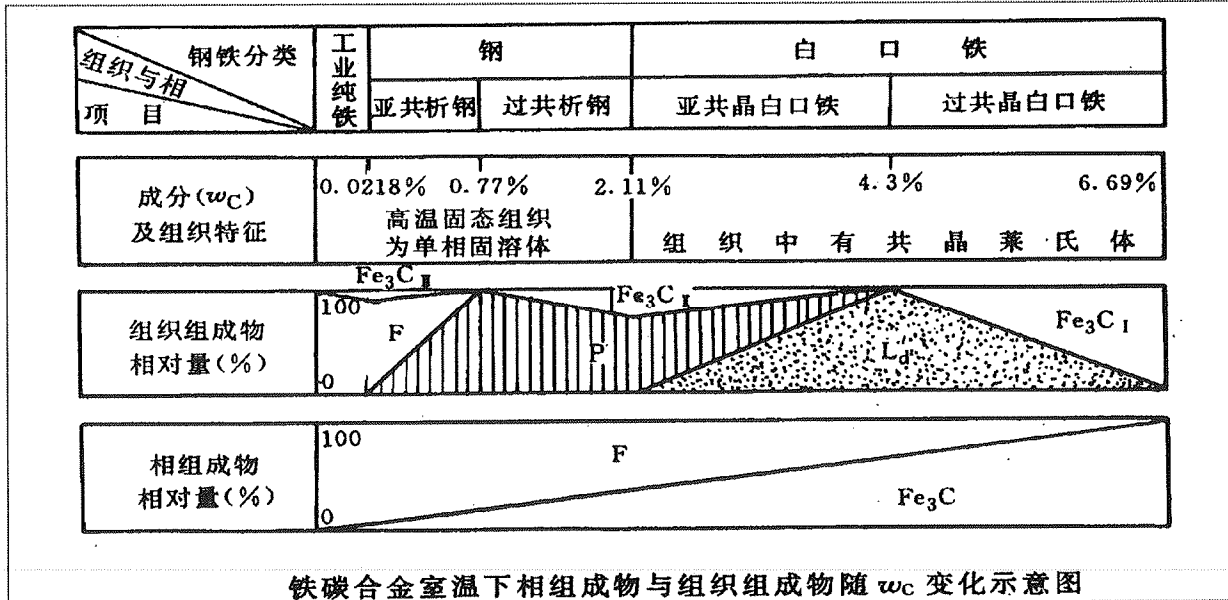
第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(九) 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响

1. 含碳量对室温平衡组织的影响

随着含碳量增加时，渗碳体不仅数量增加，形态和分布也发生了很大变化。（渗碳体分布在P内——网状分布在A晶界上——形成莱氏体时，渗碳体则成了基体。）



铁碳合金室温下相组成物与组织组成物随 w_C 变化示意图

中国科学技术大学

第四章 金属的结晶与铁碳合金相图

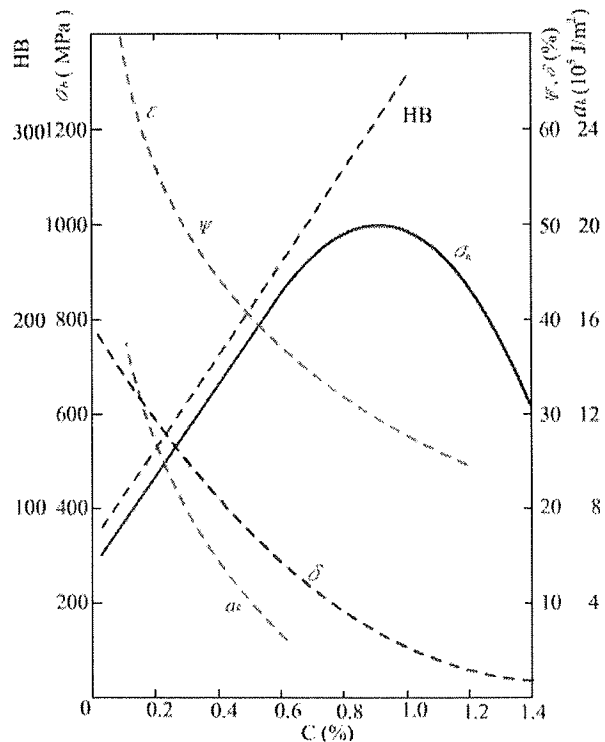
第三节 铁碳合金相图

三、典型合金的平衡结晶过程

(九) 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响

2. 含碳量对力学性能的影响

- 亚共析钢随含碳量增加，P量增加，钢的强度、硬度升高，塑性、韧性下降。
- 0.77%C时，组织为100% P，钢的性能即P的性能。
- >0.9%C，Fe₃C_{II}为晶界连续网状，强度下降，但硬度仍上升。
- >2.11%C，组织中有以Fe₃C为基的Le'，合金太脆。



(102)

第五章 钢的热处理

第一节 概述

1、热处理：是指将钢在固态下加热、保温和冷却，以改变钢的组织结构，获得所需要性能的一种工艺。

●为简明表示热处理的基本工艺过程，通常用温度—时间坐标绘出热处理工艺曲线（动画）。

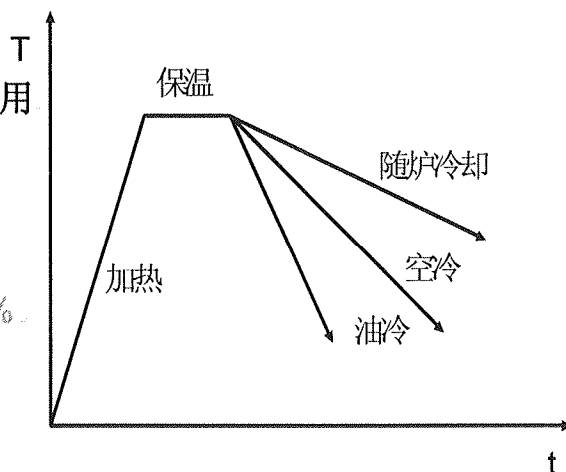
●热处理是一种重要的加工工艺，在制造业被广泛应用

●在机床制造中约60-70%的零件要经过热处理。

●在汽车、拖拉机制造业中需热处理的零件达70-80%。

●模具、滚动轴承100%需经过热处理。

●总之，重要零件都需适当热处理后才能使用。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第一节 概述

2、热处理特点：热处理区别于其他加工工艺如铸造、压力加工等的特点是只通过改变工件的组织来改变性能，而不改变其形状。

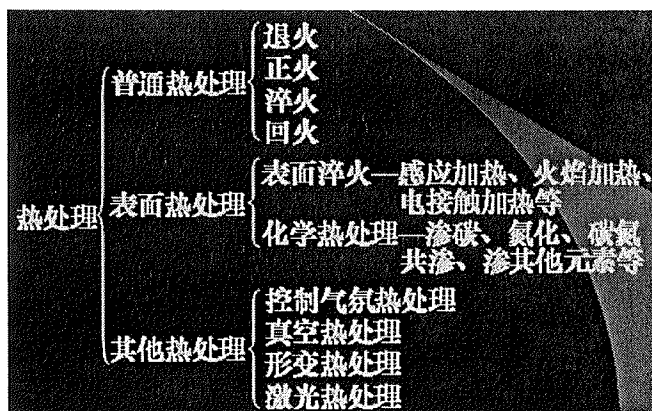
3、热处理适用范围：只适用于固态下发生相变的材料，不发生固态相变的材料不能用热处理强化。

4、热处理分类

●热处理原理：描述热处理时钢中组织转变的规律称热处理原理。

●热处理工艺：根据热处理原理制定的温度、时间、介质等参数称热处理工艺。

●根据加热、冷却方式及钢组织性能变化特点不同，将热处理工艺分类如右：



第五章 钢的热处理

第一节 概述

5、临界温度与实际转变温度（动画）

★铁碳相图中PSK、GS、ES线分别用 A_1 、 A_3 、 A_{cm} 表示。

★实际加热或冷却时存在着过冷或过热现象，因此将钢加热时的实际转变温度分别用

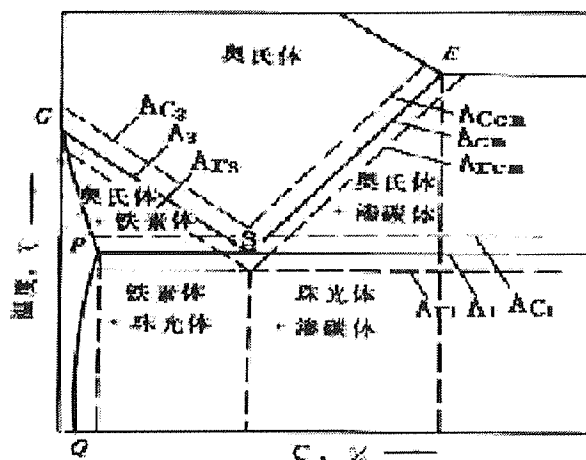
A_{c1} 、 A_{c3} 、 A_{ccm} 表示；冷却时的实际转变

温度分别用 A_{r1} 、 A_{r3} 、 A_{rcm} 表示。

★由于加热冷却速度直接影响转变温度，因

此一般手册中的数据是以 $30-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度

加热或冷却时测得的。



加热和冷却对临界转变温度的影响

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第二节 钢在加热时的转变

加热是热处理的第一道工序。加热分两种：一种是在 A_1 以下加热，不发生相变；另一种是在临界点以上加热，目的是获得均匀的奥氏体组织，称奥氏体化。

一、奥氏体的形成过程

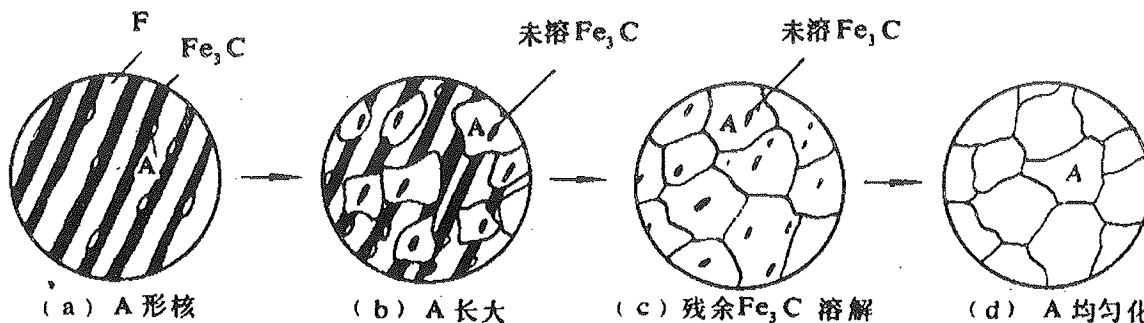
奥氏体化也是形核和长大的过程，分为四步。现以共析钢为例说明：

第一步 奥氏体晶核形成：首先在 α 与 Fe_3C 相界形核。

第二步 奥氏体晶核长大： γ 晶核通过碳原子的扩散向 α 和 Fe_3C 方向长大。

第三步 残余 Fe_3C 溶解：铁素体的成分、结构更接近于奥氏体，因而先消失。残余的 Fe_3C 随保温时间延长继续溶解直至消失。

第四步 奥氏体成分均匀化： Fe_3C 溶解后，其所在部位碳含量仍很高，通过长时间保温使奥氏体成分趋于均匀。



第五章 钢的热处理

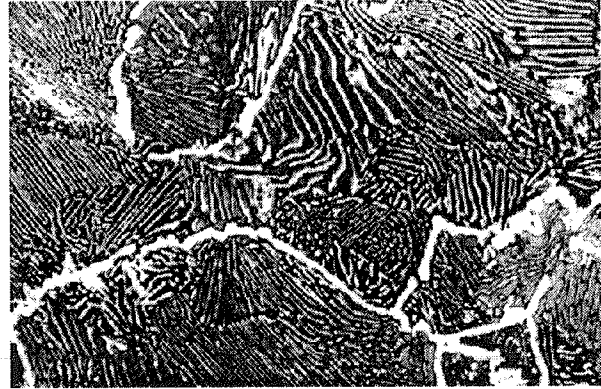
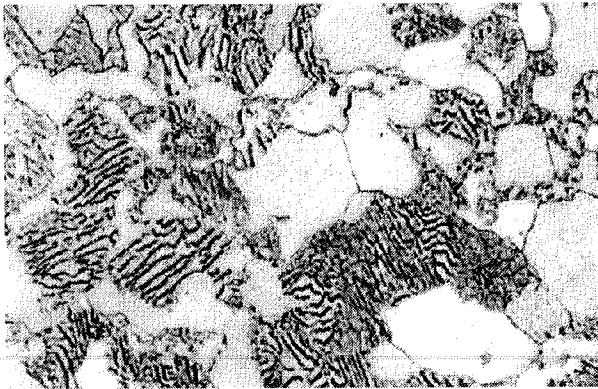
第二节 钢在加热时的转变

一、奥氏体的形成过程

亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程与共析钢基本相同。但由于先共析 α 或二次 Fe_3C 的存在，亚共析钢——加热到 Ac_3 以上；过共析钢——理论上应加热到 Ac_{cm} 以上，但实际上低于 Ac_{cm} 。因为加热到 Ac_{cm} 以上，渗碳体会全部溶解，奥氏体晶粒也会迅速长大，组织粗化，脆性增加。

亚共析钢的A化： $P \rightarrow A$ 后，先共析F溶解

过共析钢的A化： $P \rightarrow A$ 后， Fe_3C_{II} 溶解



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第二节 钢在加热时的转变

二、奥氏体晶粒长大及其影响因素

1、奥氏体晶粒长大

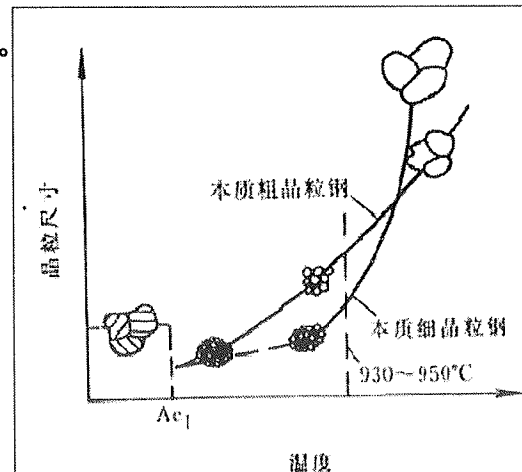
★奥氏体化刚结束时的晶粒度称起始晶粒度,此时晶粒细小均匀。

★随加热温度升高或保温时间延长，奥氏体晶粒将进一步长大，这也是一个自发的过程。奥氏体晶粒长大过程与再结晶晶粒长大过程相同。

★在给定温度下奥氏体的晶粒度称实际晶粒度。

★加热时奥氏体晶粒的长大倾向称本质晶粒度。

★常将钢加热到 $940 \pm 10^\circ C$ 奥氏体化后，设法把奥氏体晶粒保留到室温来判断。 γ 晶粒度为1-4级的是本质粗晶粒钢，5-8级的是本质细晶粒钢。前者晶粒长大倾向大，后者晶粒长大倾向小。



奥氏体晶粒随加热温度变化趋势示意图

第五章 钢的热处理

第二节 钢在加热时的转变

二、奥氏体晶粒长大及其影响因素

2、影响奥氏体晶粒长大的因素

(1)加热温度和保温时间: 加热温度高、保温时间长, γ 晶粒粗大.

(2)加热速度: 加热速度越快, 过热度越大, 形核率越高, 晶粒越细.

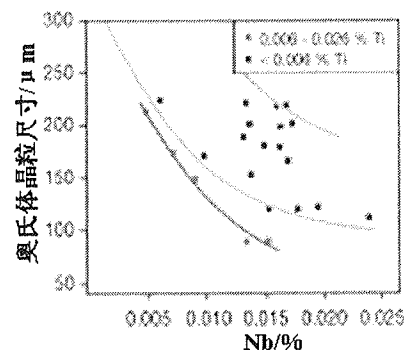
(3)合金元素:

●阻碍奥氏体晶粒长大的元素: Ti、V、Nb、Ta、Zr、W、Mo、Cr、Al等碳化物和氮化物形成元素。

●促进奥氏体晶粒长大的元素: Mn、P、C、N。

(4)原始组织: 平衡状态的组织有利于获得细晶粒。

奥氏体晶粒粗大, 冷却后的组织也粗大, 降低钢的常温力学性能, 尤其是塑性。因此加热得到细而均匀的奥氏体晶粒是热处理的关键问题之一。



Nb、Ti对奥氏体晶粒的影响

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

冷却是热处理更重要的工序。

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

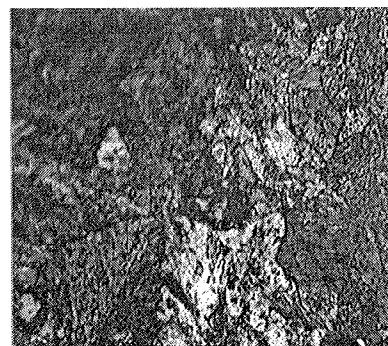
处于临界点 A_1 以下的奥氏体称过冷奥氏体 过冷奥氏体是非稳定组织, 迟早要发生转变。随过冷度不同, 过冷奥氏体将发生珠光体转变、贝氏体转变和 马氏体转变 三种类型转变。

现以共析钢为例说明:

(一) 珠光体转变

1、珠光体的组织形态及性能

过冷奥氏体在 A_1 到 550°C 间将转变为珠光体类型组织, 它是铁素体与渗碳体片层相间的机械混合物, 根据片层厚薄不同, 又细分为珠光体、索氏体和托氏体(屈氏体)



89

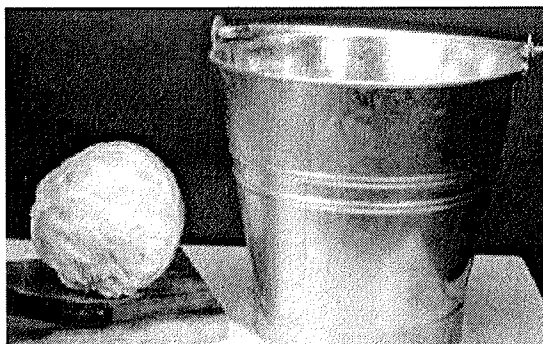
第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

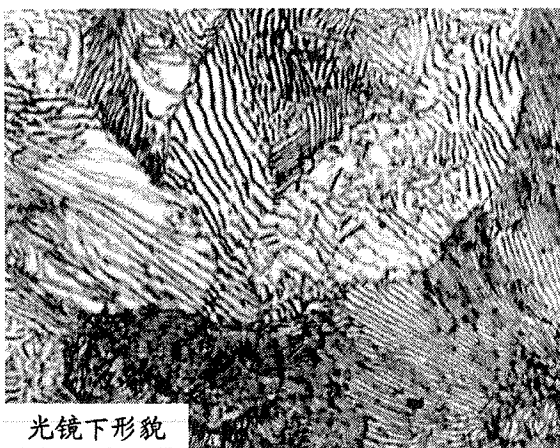
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(1) 珠光体:

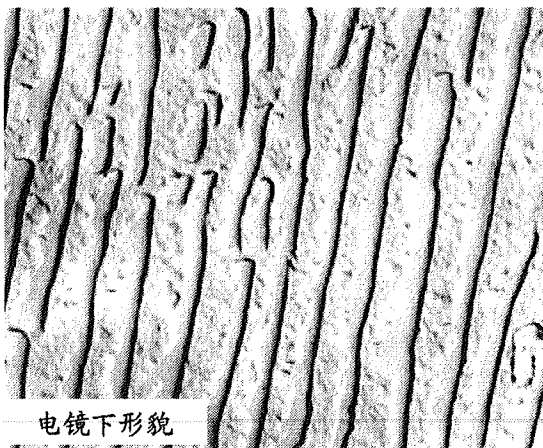
形成温度为 $A_1-650^{\circ}\text{C}$ ，片层较厚，
500倍光镜下可辨，用符号P表示。



三维珠光体如同放在水中的包心菜



光镜下形貌



电镜下形貌

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

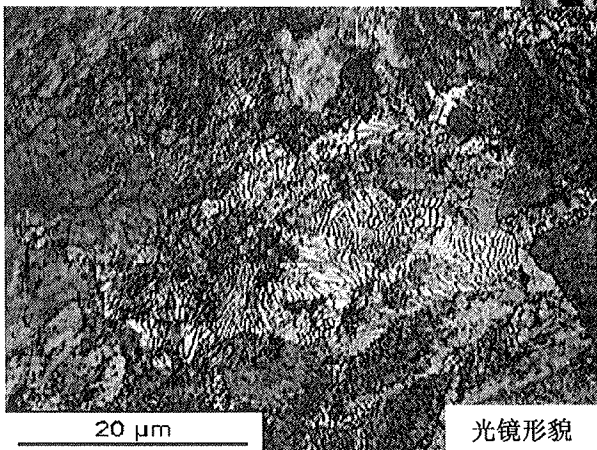
第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(2) 索氏体:



电镜形貌



光镜形貌

形成温度为 $650-600^{\circ}\text{C}$ ，片层较薄，
800-1000倍光镜下可辨，用符号S表示。

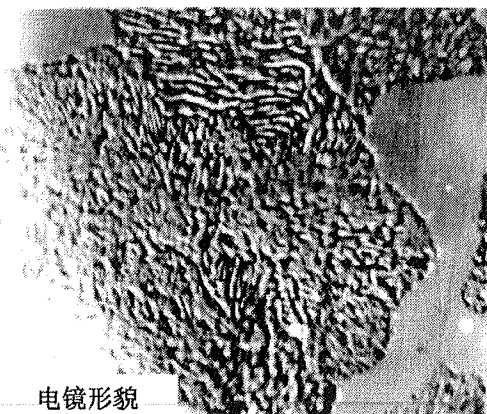
第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

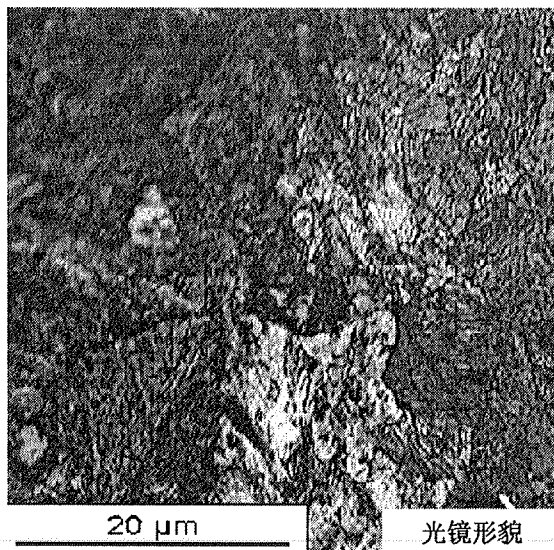
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(3) 托氏体

形成温度为600-550℃，片层极薄，电镜下可辨，用符号T表示。



电镜形貌



光镜形貌

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

珠光体、索氏体、屈氏体三种组织无本质区别，只是形态上的粗细之分，因此其界限也是相对的。

片间距越小，钢的强度、硬度越高，而塑性和韧性略有改善。



$\sigma_{0.2}$	520	680	810N/mm ²
σ_b	980	1130	1300N/mm ²
ψ	24	35	43%
布氏硬度	280	330	380HRB

产物名称	转变温度	层片间距	硬度 (HBS)
珠光体P	A ₁ ~600℃	> 0.4 μ m	~200
索氏体S	650℃~600℃	0.4~0.2	~300
托氏体T	600℃~550℃	<0.2 μ m	~400

第五章 钢的热处理

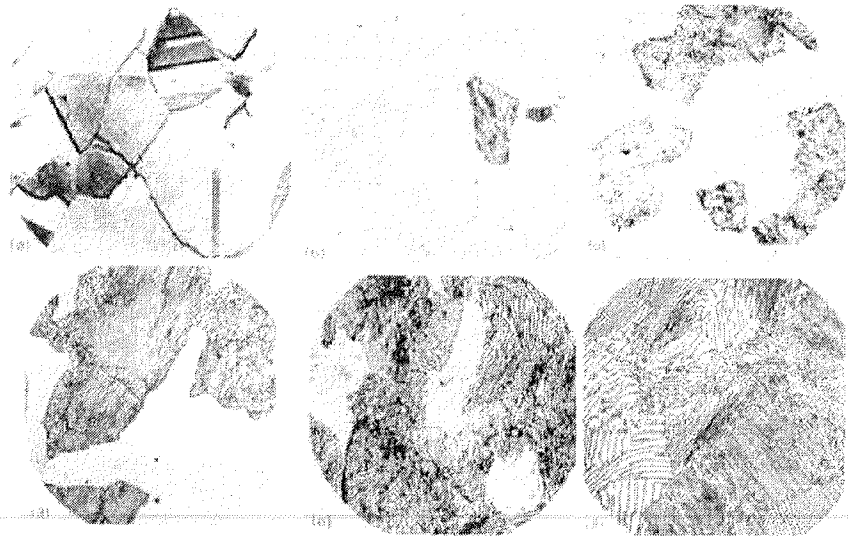
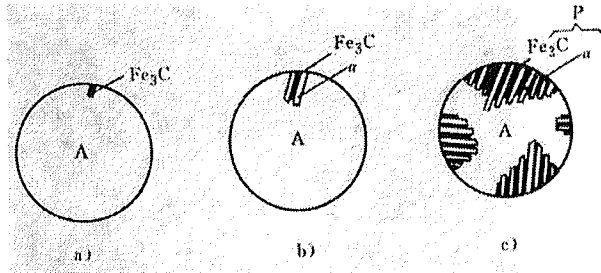
第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

2、珠光体转变过程（动画）

珠光体转变也是形核和长大的过程。渗碳体晶核首先在奥氏体晶界上形成，在长大过程中，其两侧奥氏体的含碳量下降，促进了铁素体形核，两者相间形核并长大，形成一个珠光体团。

珠光体转变是扩散型转变。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

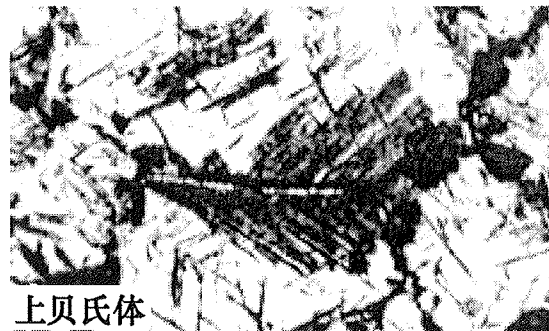
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(二) 贝氏体转变

1、贝氏体的组织形态及性能

过冷奥氏体在 250℃~350℃(Ms~Mf) 间将转变为贝氏体类型组织，贝氏体用符号 B 表示。

根据其组织形态不同，贝氏体又分为上贝氏体(B_上)和下贝氏体(B_下)。



上贝氏体



下贝氏体

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

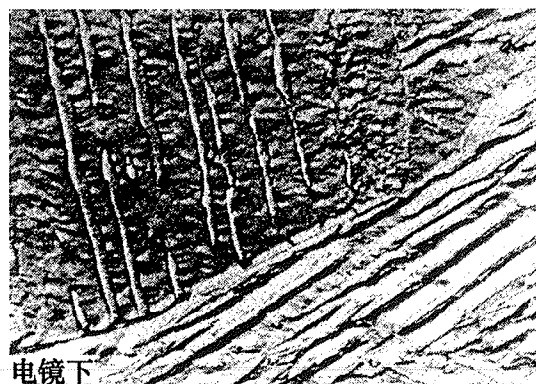
(一) 贝氏体转变

(1) 上贝氏体

形成温度为**550-350°C**。

在光镜下呈羽毛状。

在电镜下为不连续棒状的渗碳体分布于自奥氏体晶界向晶内平行生长的铁素体条之间。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

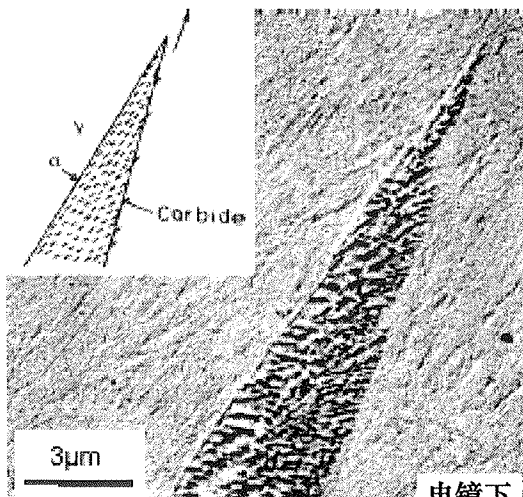
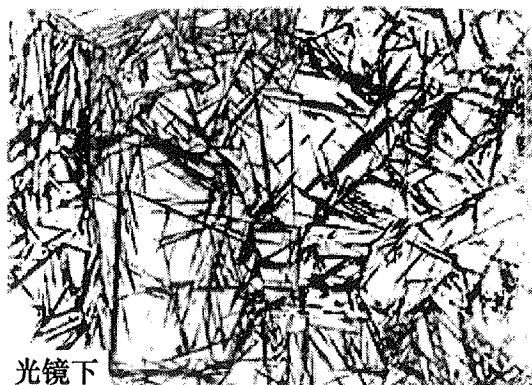
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(二) 贝氏体转变

(2) 下贝氏体

形成温度为**350°C-Ms**。

在光镜下呈竹叶状。



在电镜下为细片状碳化物分布于铁素体针内，并与铁素体针长轴方向呈**55-60°**角。

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(一) 贝氏体转变

★上贝氏体强度与塑性都较低，无实用价值。

★下贝氏体除了强度、硬度较高外，塑性、韧性也较好，即具有良好的综合力学性能，是生产上常用的强化组织之一。

产物名称	转变温度	组织形态
上贝氏体 $B_{上}$	550~350℃	F (过饱和) + Fe_3C (短棒状) 光学金相形貌为羽毛状
下贝氏体 $B_{下}$	350℃~ M_s	F (过饱和) + ϵ 碳化物 光学金相形貌为竹叶状

1) 550~350℃——上贝氏体 $B_{上}$ ——羽毛状——40~45HRC——脆性较大——基本上无实用价值；

2) 350℃~ M_s ——下贝氏体 $B_{下}$ ——黑色竹叶状——45~55HRC——优良的综合力学性能——常用。

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

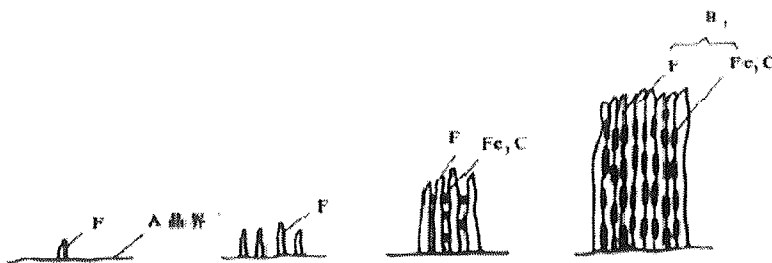
(一) 贝氏体转变

2、贝氏体转变过程

▲贝氏体转变也是形核和长大的过程。

▲发生贝氏体转变时,首先在奥氏体中的贫碳区形成铁素体晶核，其含碳量介于奥氏体与平衡铁素体之间，为过饱和铁素体。

●当转变温度较高 (550-350℃) 时，条片状铁素体从奥氏体晶界向晶内平行生长，随铁素体条伸长和变宽，其碳原子向条间奥氏体富集，最后在铁素体条间析出 Fe_3C 短棒，奥氏体消失，形成 $B_{上}$ 。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

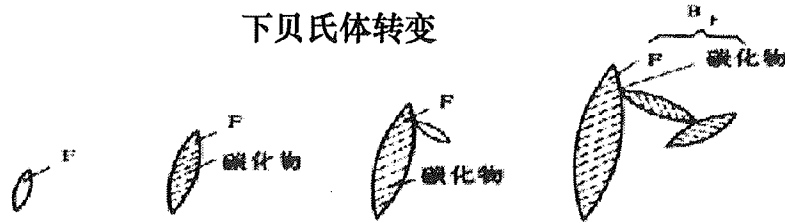
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(一) 贝氏体转变

2、贝氏体转变过程

当转变温度较低 (350- 230℃) 时, 铁素体在晶界或晶内某些晶面上长成针状, 由于碳原子扩散能力低, 其迁移不能逾越铁素体片的范围, 碳在铁素体的一定晶面上以断续碳化物小片的形式析出 (动画)。

下贝氏体转变



贝氏体转变属半扩散型转变, 即只有碳原子扩散而铁原子不扩散, 晶格类型改变是通过切变实现的。

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(二) 马氏体转变

★ 当奥氏体过冷到 M_s (对于共析钢为 230℃ 以下) 以下将转变为马氏体类型组织。

★ 马氏体转变是强化钢的重要途径之一。

1、马氏体的晶体结构

● 碳在 α -Fe 中的过饱和固溶体称马氏体, 用 M 表示。

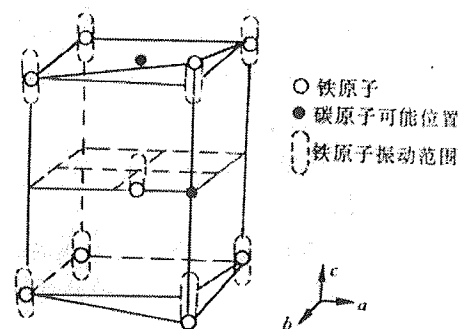
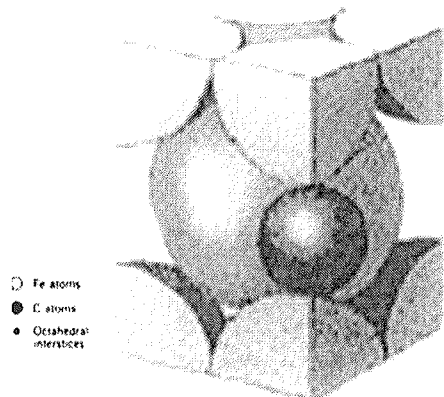
● 马氏体转变时, 奥氏体中的碳全部保留到马氏体中。

马氏体具有体心正方晶格 ($a=b \neq c$)

轴比 c/a 称马氏体的正方度。

C% 越高, 正方度越大, 正方畸变越严重。

当 $< 0.25\%C$ 时, $c/a=1$, 此时马氏体为体心立方晶格。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

2、马氏体的形态

马氏体的形态分板条和针状两类。

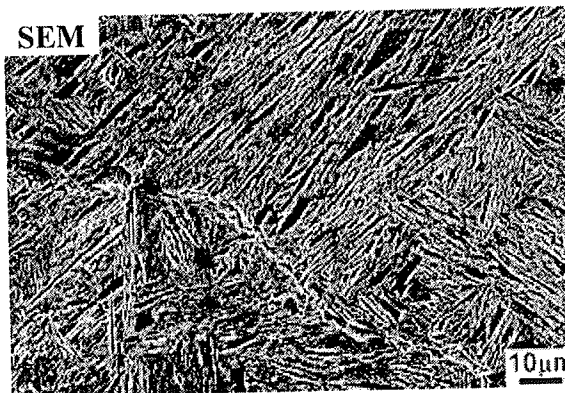
(1) 板条马氏体

● 立体形态为细长的扁棒状

● 在光镜下板条马氏体为一束束的细条组织。

● 每束内条与条之间尺寸大致相同并呈平行排列，一个奥氏体晶粒内可形成几个取向不同的马氏体束。

● 在电镜下，板条内的亚结构主要是高密度的位错， $\rho=10^{12}/\text{cm}^2$ ，又称位错马氏体。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

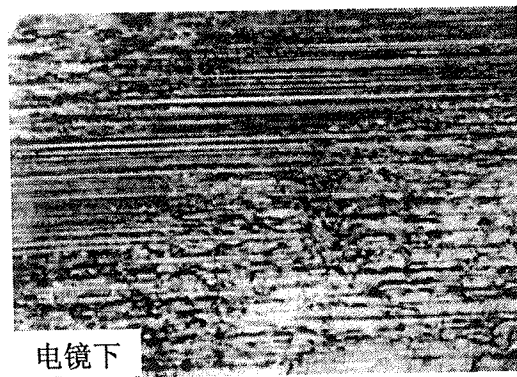
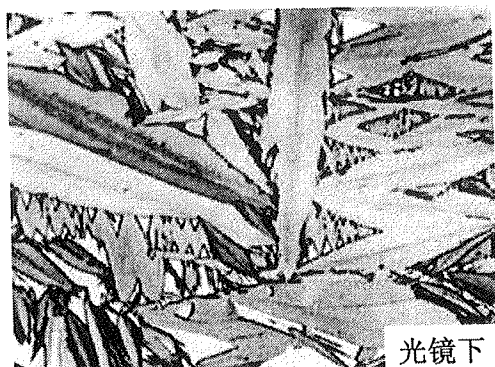
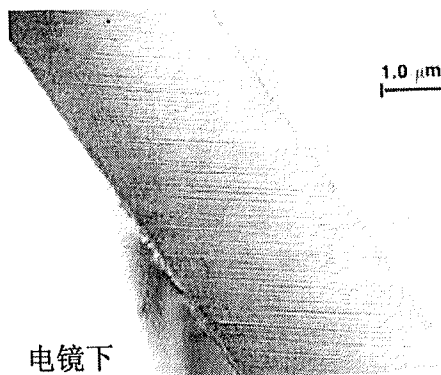
2、马氏体的形态

(2) 针状马氏体 (动画)

● 立体形态为双凸透镜形的片状。

显微组织为针状。

● 在电镜下，亚结构为孪晶，
又称孪晶马氏体。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(一) 马氏体转变

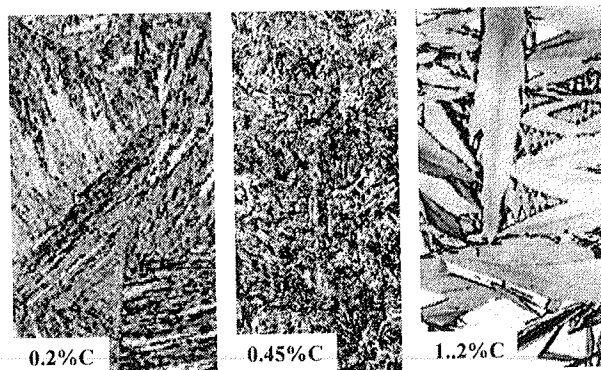
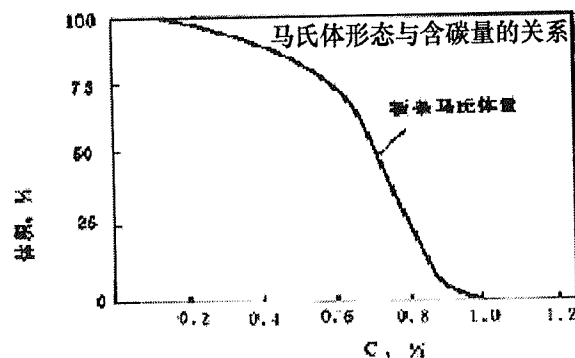
2、马氏体的形态

(3) 马氏体的形态主要取决于其含碳量

C%小于0.2%时，组织几乎全部是板条马氏体。

C%大于1.0%时，几乎全部是针状马氏体。

C%在0.2~1.0%之间为板条与针状的混合组织。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(一) 马氏体转变

2、马氏体的形态

(3) 马氏体的形态主要取决于其含碳量

▲先形成的马氏体片横贯整个奥氏体晶粒，

但不能穿过晶界和孪晶界。后形成的马氏体

片不能穿过先形成的马氏体片，所以越是后形成的马氏体片越细小。

▲原始奥氏体晶粒细，转变后的马氏体片也细。

▲最大马氏体片细到光镜下无法分辨时，该马氏体称**隐晶马氏体**。



45钢正常淬火组织

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

3、马氏体的性能

- ◆ 高硬度是马氏体性能的主要特点。
- ◆ 马氏体的硬度主要取决于其含碳量。

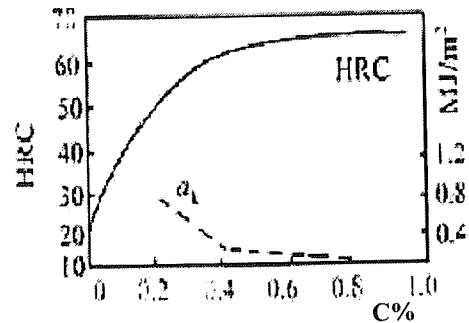
含碳量增加，其硬度增加。

★当含碳量大于0.6%时，其硬度趋于平缓。

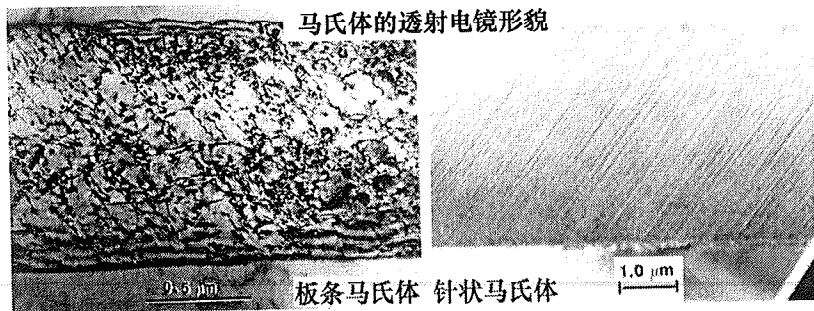
★合金元素对马氏体硬度的影响不大。

●马氏体强化的主要原因是过饱和碳引起的固溶强化。此外，马氏体转变产生的组织细化也有强化作用。

●马氏体的塑性和韧性主要取决于其亚结构的形式。针状马氏体脆性大，板条马氏体具有较好的塑性和韧性。



马氏体硬度、韧性与其含碳量的关系



中国科学技术大学

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

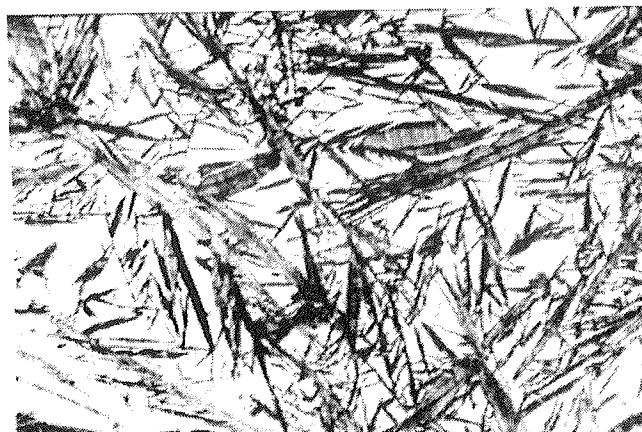
(三) 马氏体转变

4、马氏体转变的特点

马氏体转变也是形核和长大的过程。其主要特点是：

(1) 无扩散性

铁和碳原子都不扩散，因而马氏体的含碳量与奥氏体的含碳量相同。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

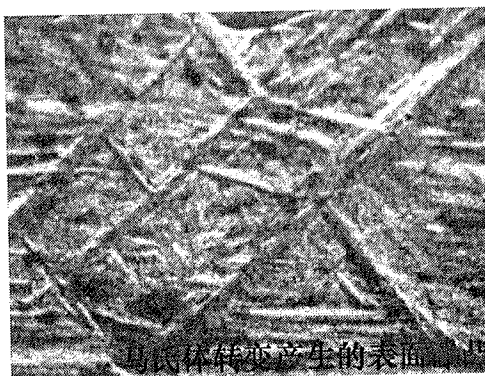
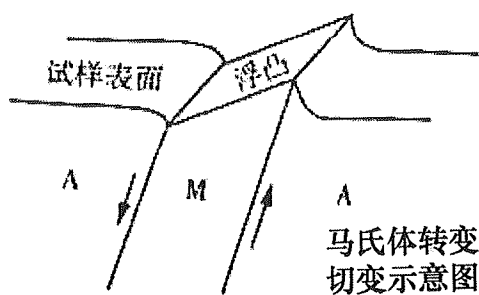
一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

4、马氏体转变的特点

(2) 共格切变性

由于无扩散，晶格转变是以切变机制进行的。使切变部分的形状和体积发生变化，引起相邻奥氏体随之变形，在预先抛光的表面上产生浮凸现象。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

4、马氏体转变的特点

(3) 降温形成

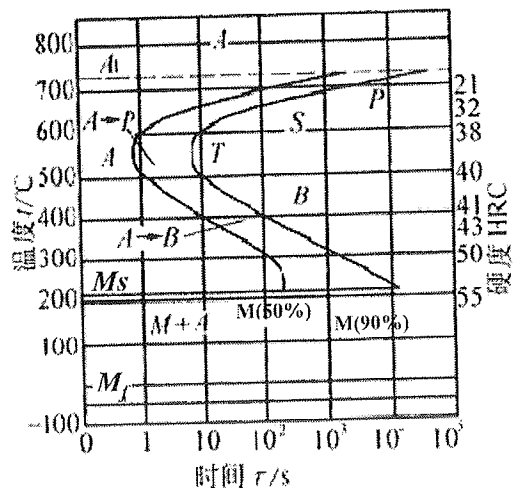
★马氏体转变开始的温度称上马氏体点，用 M_s 表示。马氏体转变终了温度称下马氏体点，用 M_f 表示。

★只要温度达到 M_s 以下即发生马氏体转变。

★在 M_s 以下，随温度下降，转变量增加，冷却中断，转变停止。

(4) 高速长大

●马氏体形成速度极快，瞬间形核，瞬间长大。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

(三) 马氏体转变

4、马氏体转变的特点

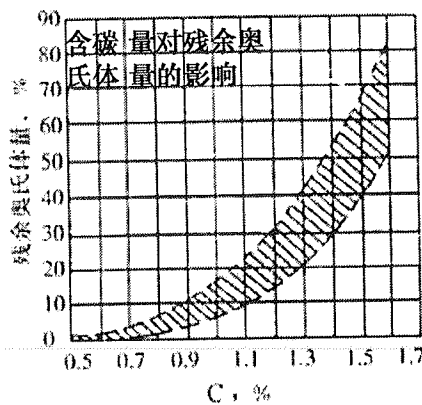
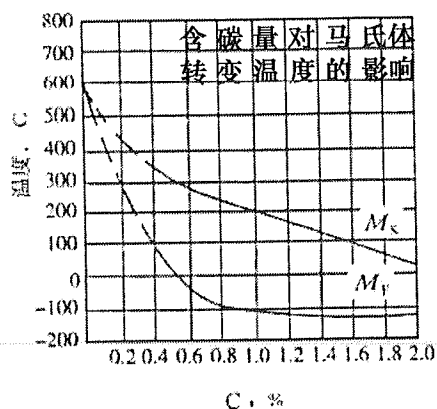
(5) 转变不完全

即使冷却到 M_f 点,也不可能获得100%的马氏体,总有部分奥氏体未能转变而残留下来,称残余奥氏体,用 A' 或 γ' 表示。



M_s 、 M_f 与冷速无关,主要取决于奥氏体中的合金元素含量(包括碳含量)。

马氏体转变后, A' 量随含碳量的增加而增加,当含碳量达0.5%后, A' 量才显著。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

一、过冷奥氏体的转变产物及转变过程

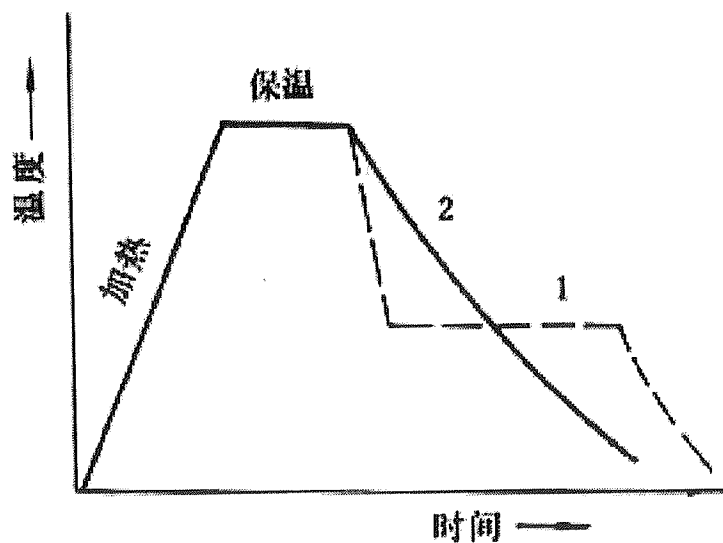
转变类型	转变产物	形成温度, °C	转变机制	显微组织特征	HRC	获得工艺
珠光体	P	$A_1 \sim 650$	扩散型	粗片状, F、 Fe_3C 相间分布	5-20	退火
	S	650~600		细片状, F、 Fe_3C 相间分布	20-30	正火
	T	600~550		极细片状, F、 Fe_3C 相间分布	30-40	等温处理
贝氏体	$B_{上}$	550~350	半扩散型	羽毛状, 短棒状 Fe_3C 分布于过饱和F条之间	40-50	等温处理
	$B_{下}$	350~ M_s		竹叶状, 细片状 Fe_3C 分布于过饱和F针上	50-60	等温淬火
马氏体	$M_{针}$	$M_s \sim M_f$	无扩散型	针状	60-65	淬火
	$M_{板条}^*$	$M_s \sim M_f$		板条状	50	淬火

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

过冷奥氏体的转变方式有等温转变和连续冷却转变两种。



两种冷却方式示意图

1——等温冷却

2——连续冷却

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

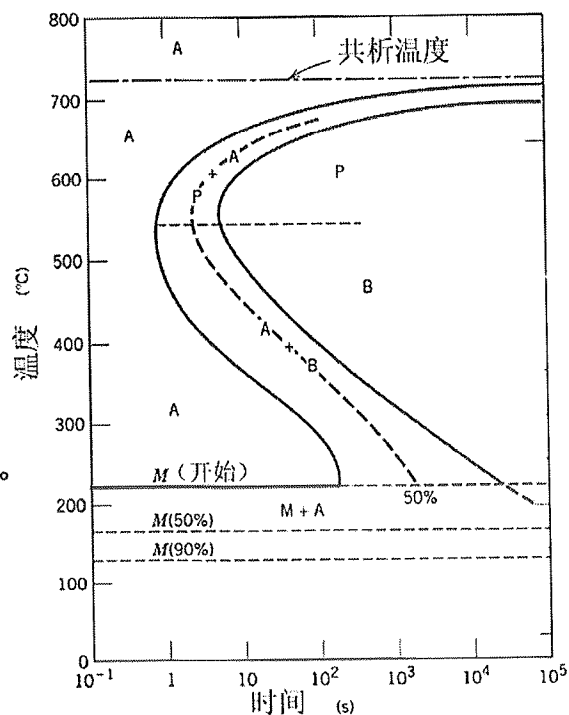
二、过冷奥氏体转变图

(一) 过冷奥氏体的等温转变图

过冷奥氏体的等温转变图是表示奥氏体急速冷却到临界点 A_1 以下在各不同温度下的保温过程中转变量与转变时间的关系曲线。

又称C 曲线、S 曲线或TTT曲线

(Time-Temperature-Transformation diagram)。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

(一) 过冷奥氏体的等温转变图

1、C 曲线的分析

(1) 转变开始线与纵坐标之间的距离为孕育期。

★孕育期越小，过冷奥氏体稳定性越小。

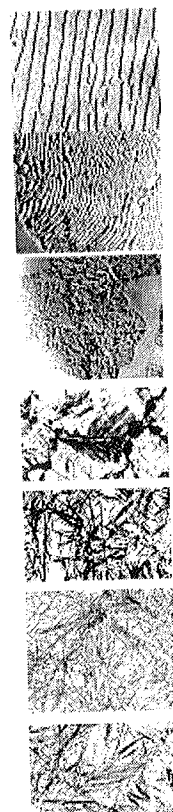
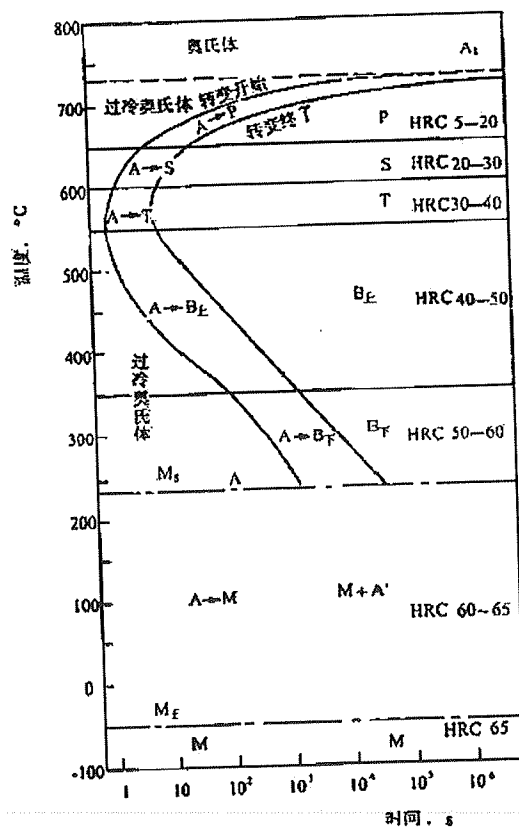
★孕育期最小处称C曲线的“鼻尖”。

碳钢鼻尖处的温度为550℃。

●在鼻尖以上，温度较高，相变驱动力小。

●在鼻尖以下，温度较低，扩散困难。从而使奥氏体稳定性增加。

(2) C曲线明确表示了过冷奥氏体在不同温度下的等温转变产物。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

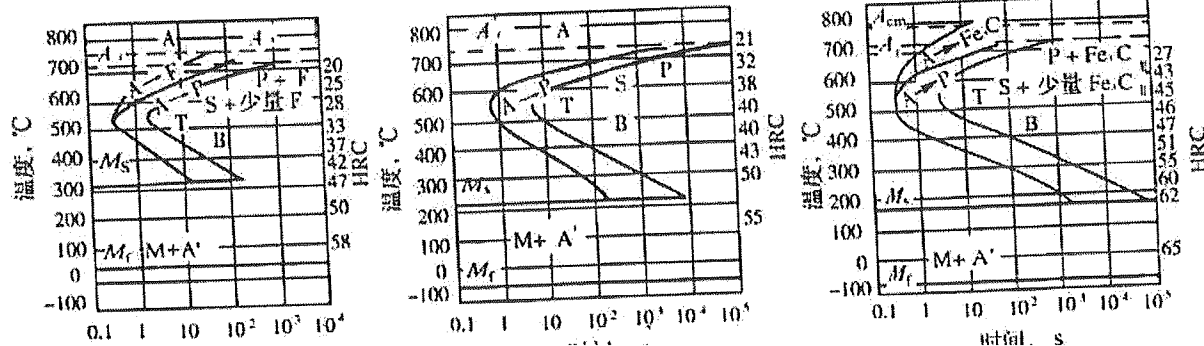
(一) 过冷奥氏体的等温转变图

2、影响C 曲线的因素

(1) 成分的影响

① 含碳量的影响：共析钢的过冷奥氏体最稳定，C曲线最靠右。Ms 与Mf 点随含碳量增加而下降。

与共析钢相比，亚共析钢和过共析钢C曲线的上部各多一条先共析相的析出线。



第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

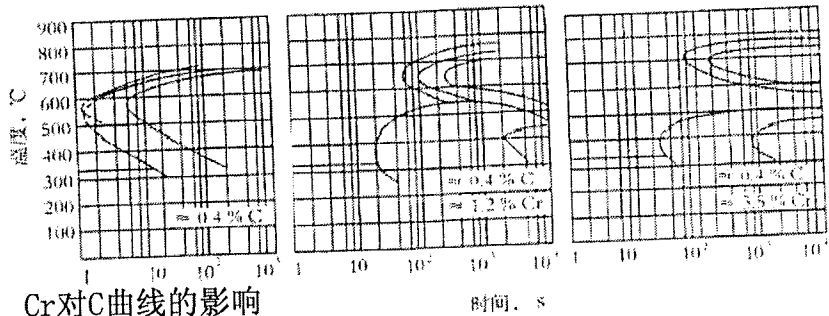
(一) 过冷奥氏体的等温转变图

2、影响C曲线的因素

(1) 成分的影响

② 合金元素的影响

▲除Co外,凡溶入奥氏体的合金元素都使C曲线右移。



Cr对C曲线的影响

▲除Co和Al外,所有合金元素都使 M_s 与 M_f 点下降。

(2) 奥氏体化条件的影响

奥氏体化温度提高和保温时间延长,使奥氏体成分均匀、晶粒粗大、未溶碳化物减少,增加了过冷奥氏体的稳定性,使C曲线右移。

使用C曲线时应注意奥氏体化条件及晶粒度的影响。

中国科学技术大学

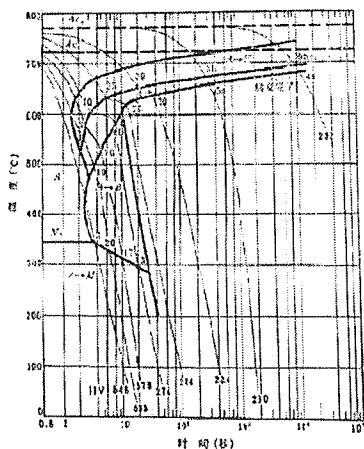
第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

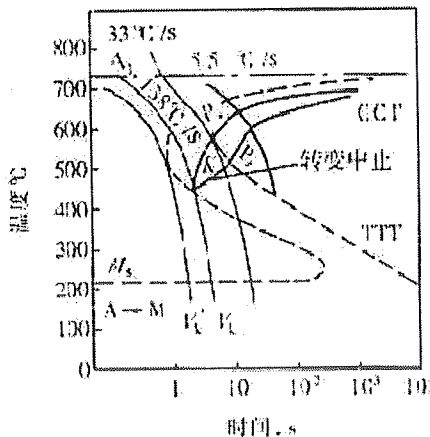
二、过冷奥氏体转变图

(二) 过冷奥氏体连续冷却转变图

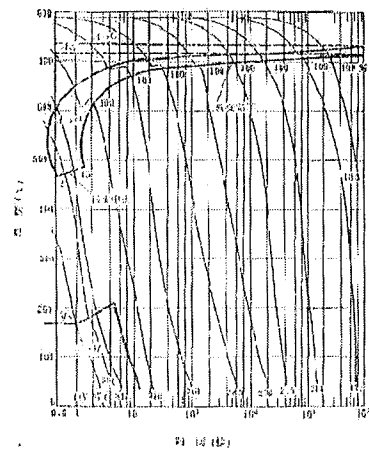
过冷奥氏体连续冷却转变图又称CCT(Continuous-Cooling-Transformation diagram)曲线,是通过测定不同冷速下过冷奥氏体的转变量获得的。



亚共析钢CCT曲线



共析钢CCT曲线



过共析钢CCT曲线

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

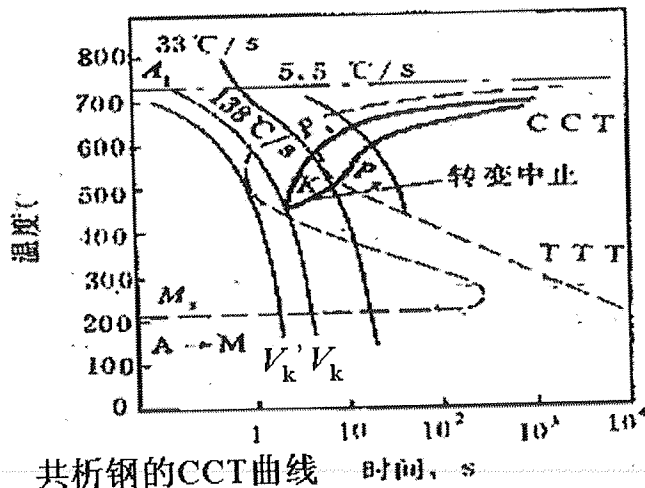
二、过冷奥氏体转变图

(一) 过冷奥氏体连续冷却转变图

1、共析钢的CCT曲线

共析钢的CCT曲线没有贝氏体转变区，在珠光体转变区之下多了一条转变中止线。

当连续冷却曲线碰到转变中止线时，珠光体转变中止，余下的奥氏体一直保持到 M_s 以下转变为马氏体。



共析钢的CCT曲线

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第三节 钢在冷却时的转变

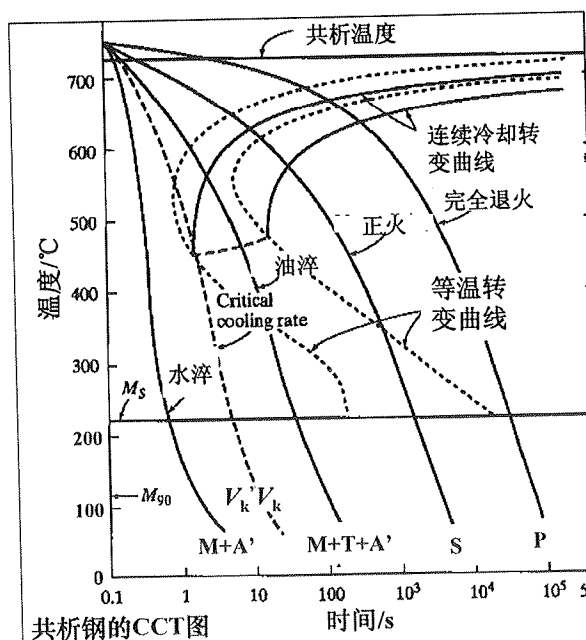
二、过冷奥氏体转变图

(一) 过冷奥氏体连续冷却转变图

图中的 V_k 为CCT曲线的临界冷却速度(获得马氏体的最小冷却速度)，即获得全部马氏体组织时的最小冷却速度。

V'_k 为TTT曲线的临界冷却速度。

$$V'_k \approx 1.5 V_k$$



共析钢的CCT图

时间/s

第五章 钢的热处理

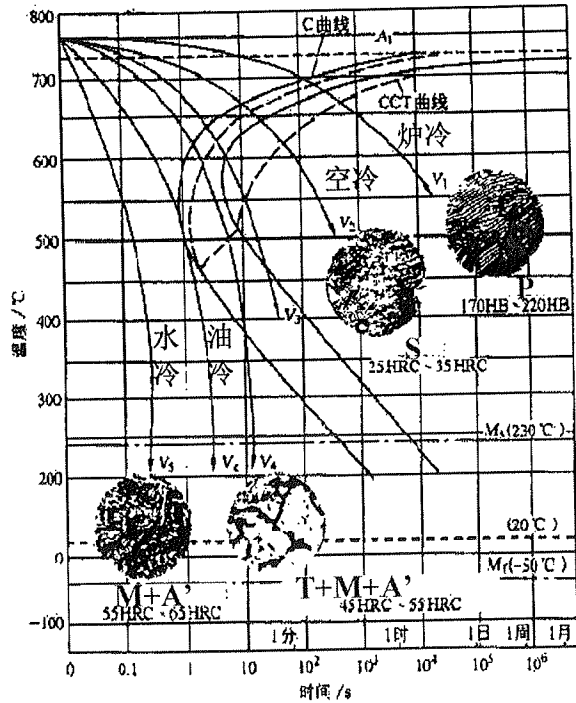
第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

(一) 过冷奥氏体连续冷却转变图

CCT曲线位于TTT曲线右下方。CCT曲线获得困难，TTT曲线容易测得。

可用TTT曲线定性说明连续冷却时的组织转变情况。方法是将连续冷却曲线绘在C曲线上，依其与C曲线交点的位置来说明最终转变产物。



用TTT曲线定性说明共析钢连续冷却时的组织转变

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

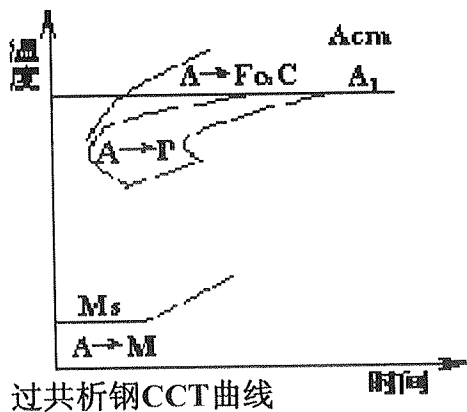
第三节 钢在冷却时的转变

二、过冷奥氏体转变图

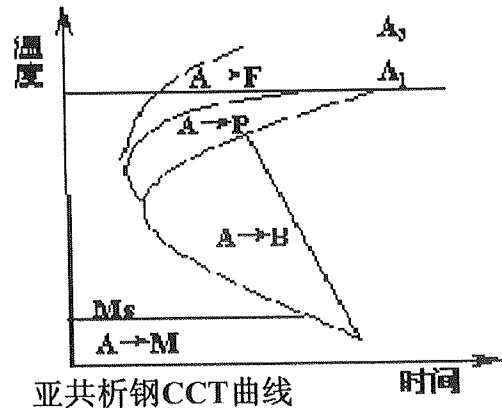
(一) 过冷奥氏体连续冷却转变图

2、过共析钢CCT曲线也无贝氏体转变区，但比共析钢CCT曲线多一条 $A \rightarrow Fe_3C$ 转变开始线。由于 Fe_3C 的析出，奥氏体中含碳量下降，因而 M_s 线右端升高。

3、亚共析钢CCT曲线有贝氏体转变区，还多 $A \rightarrow F$ 开始线，F析出使A含碳量升高，因而 M_s 线右端下降。



过共析钢CCT曲线



亚共析钢CCT曲线

第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

★机械零件的一般加工工艺为：毛坯（铸、锻）→预备热处理→机加工→最终热处理。

★退火与正火主要用于预备热处理，只有当工件性能要求不高时才作为最终热处理。

一、退火：

●将钢加热至适当温度保温，然后缓慢冷却（炉冷）的热处理工艺叫做退火。

1、退火目的

- (1)调整硬度，便于切削加工。适合加工的硬度为170-250HB。
- (2)消除内应力，防止加工中变形。
- (3)细化晶粒，为最终热处理作组织准备。

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

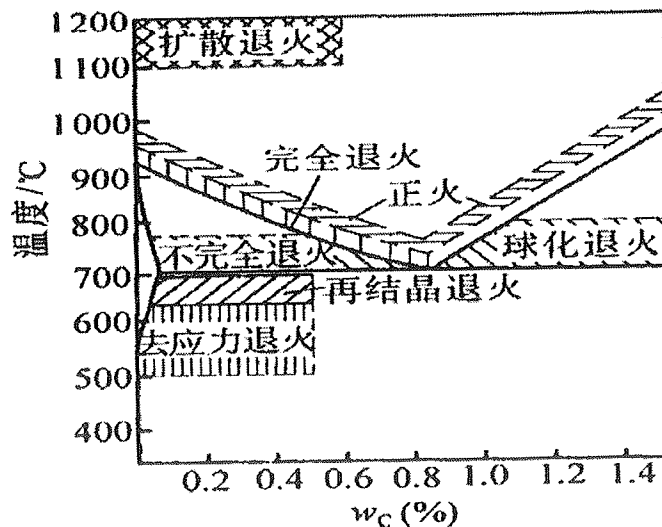
第四节 钢的退火与正火

2、退火工艺

退火的种类很多，常用的有完全退火、等温退火、球化退火、扩散退火、去应力退火、再结晶退火。

(1) 完全退火

将工件加热到 $A_{c3}+30\sim 50^{\circ}C$ 保温后缓冷的退火工艺，主要用于亚共析钢。



第五章 钢的热处理

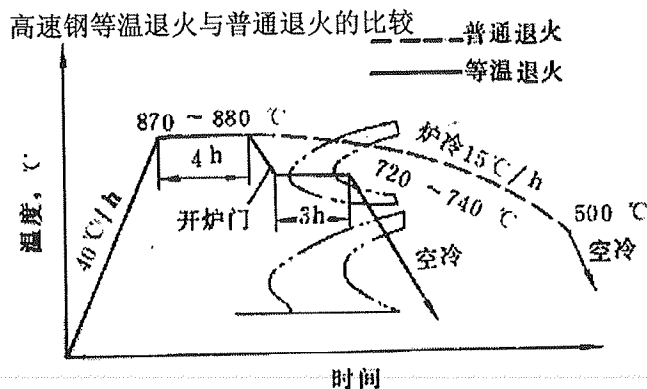
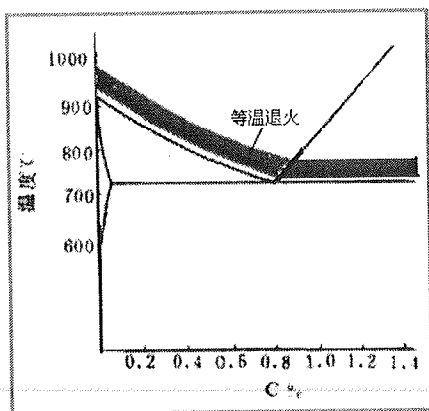
第四节 钢的退火与正火

一、退火：

2、退火工艺

(2) 等温退火

亚共析钢加热到 $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ，共析、过共析钢加热到 $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ，保温后快冷到 Ar_1 以下的某一温度下停留，待相变完成后出炉空冷。等温退火可缩短工件在炉内停留时间，更适合于孕育期长的合金钢。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

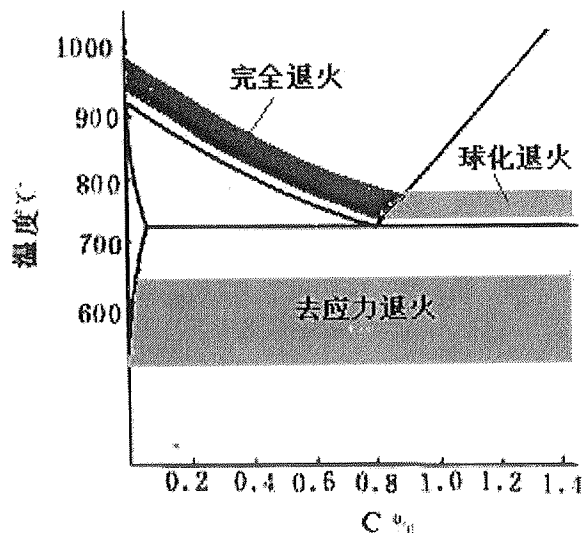
一、退火：

2、退火工艺

(3) 球化退火

球化退火是将钢中渗碳体球状化的退火工艺。

●它是将工件加热到 $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ 保温后缓冷，或者加热后冷却到略低于 Ar_1 的温度下保温，使珠光体中的渗碳体球化后出炉空冷。主要用于共析、过共析钢。



第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

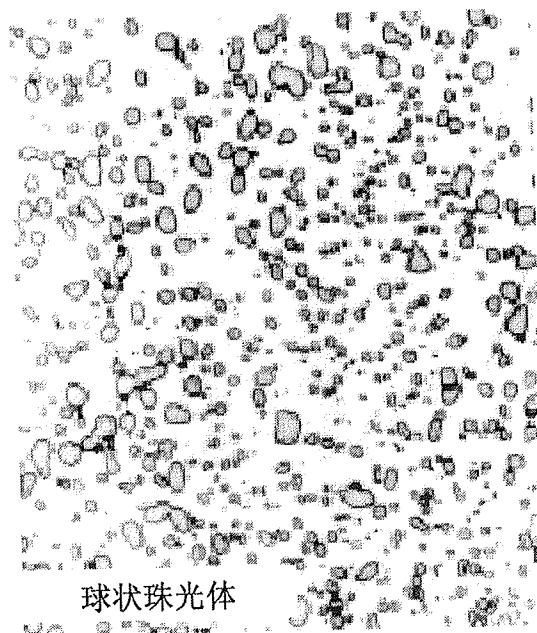
一、退火：

2、退火工艺

(3) 球化退火

●球化退火的组织为铁素体基体上分布着颗粒状渗碳体的组织，称球状珠光体，用 $P_{球}$ 表示。

●对于有网状二次渗碳体的过共析钢，球化退火前应先进行正火，以消除网状。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

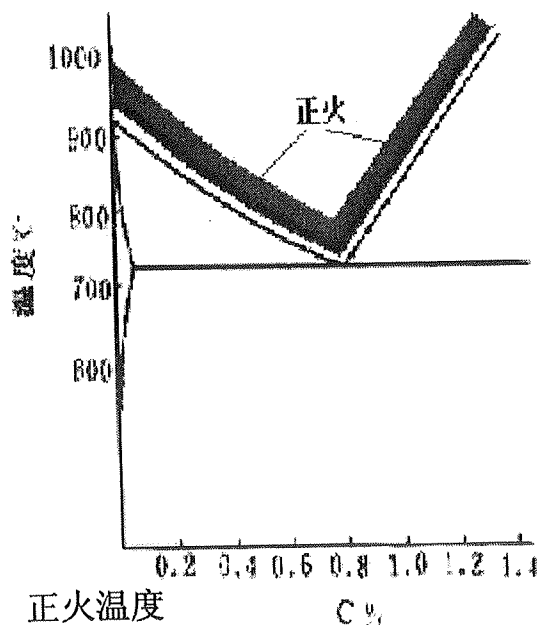
二、正火

正火是将亚共析钢加热到 $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ，共析钢加热到 $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ，过共析钢加热到 $Ac_{cm}+30\sim 50^\circ C$ 保温后空冷的工艺。

正火比退火冷却速度大。

1、正火后的组织：

- $<0.6\%C$ 时，组织为F+S；
- $\geq 0.6\%C$ 时，组织为S。



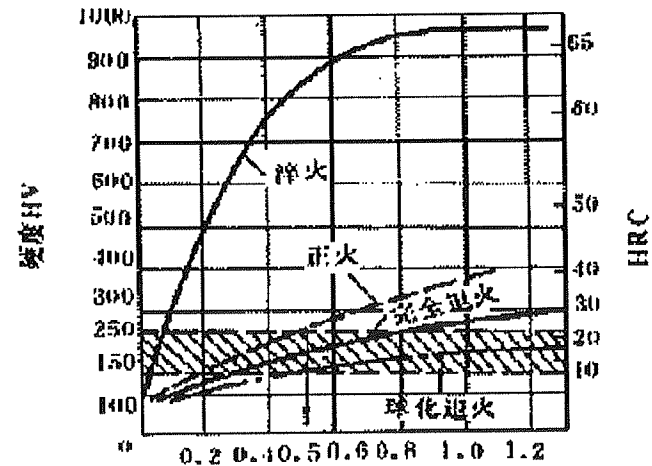
第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

二、正火

2、正火的目的

- (1) 对于低、中碳钢($\leq 0.6C\%$), 目的与退火的相同。
- (2) 对于过共析钢, 用于消除网状二次渗碳体, 为球化退火作组织准备。
- (3) 普通件最终热处理。



合适切削加工硬度 C. %
热处理与硬度关系

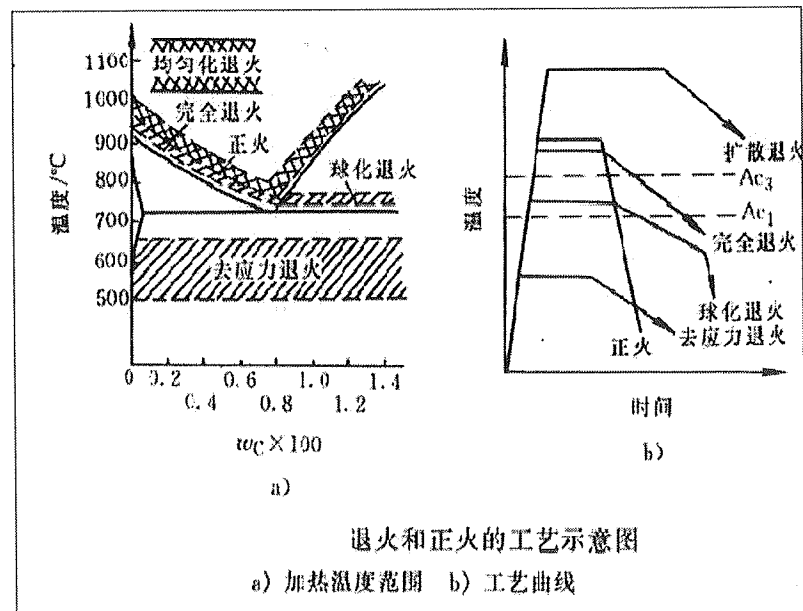
要改善切削性能, 低碳钢用正火,
中碳钢用退火或正火, 高碳钢用球化退火。

第五章 钢的热处理

第四节 钢的退火与正火

各种退火和正火加热温度比较:

- 1) 均匀化退火
 $Ac_3 + (150 \sim 200)^\circ C$
- 2) 正火
 Ac_3 或 $Ac_{cm} + (30 \sim 50)^\circ C$
- 3) 完全退火
 $Ac_3 + (20 \sim 50)^\circ C$
- 4) 球化退火
 $Ac_1 + (20 \sim 40)^\circ C$
- 5) 去应力退火
 $500^\circ C \sim 650^\circ C$



退火和正火的工艺示意图
a) 加热温度范围 b) 工艺曲线

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

▲淬火是将钢加热到临界点以上，保温后以大于 V_k 速度冷却，使奥氏体转变为马氏体的热处理工艺。

▲淬火是应用最广的热处理工艺之一。

▲淬火目的是为获得马氏体组织，提高钢的性能。

一、淬火温度

1、碳钢

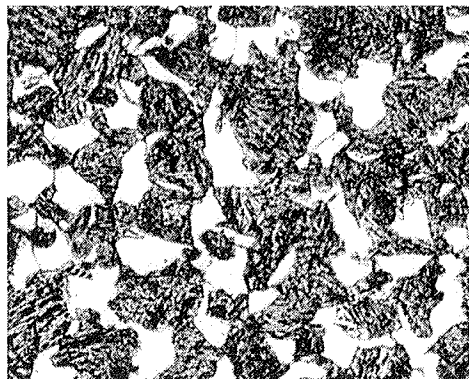
(1) 亚共析钢

★淬火温度为 $Ac_3+30-50^{\circ}C$ 。

★预备热处理组织为退火或正火组织。

●在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间的加热淬火称亚温淬火

●亚温淬火组织为F+M，强硬度低，但塑韧性好



35钢（含0.35%C）亚温淬火组织

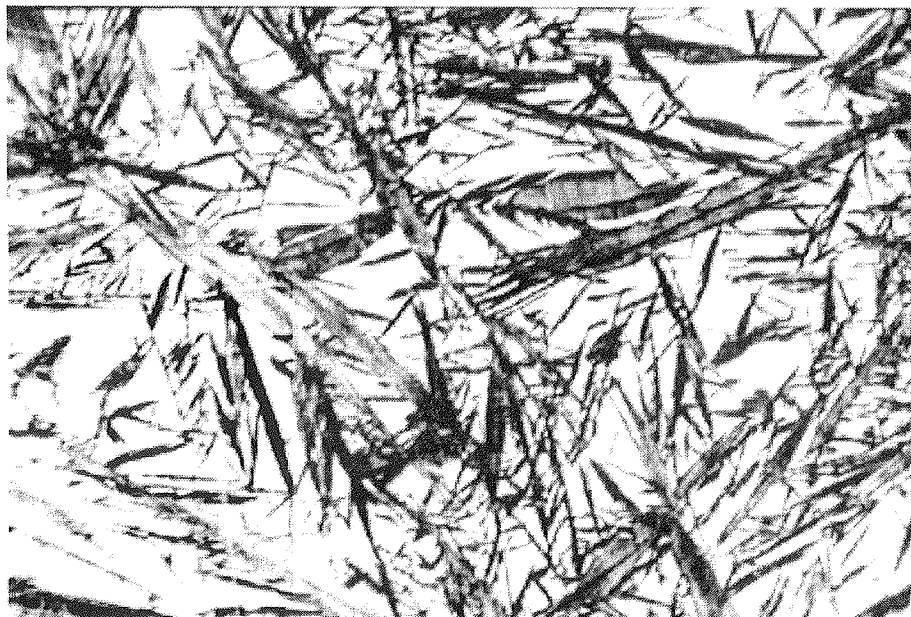
中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

(2) 共析钢

淬火温度为 $Ac_1+30-50^{\circ}C$ ；淬火组织为M+A'。



第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

(3) 过共析钢

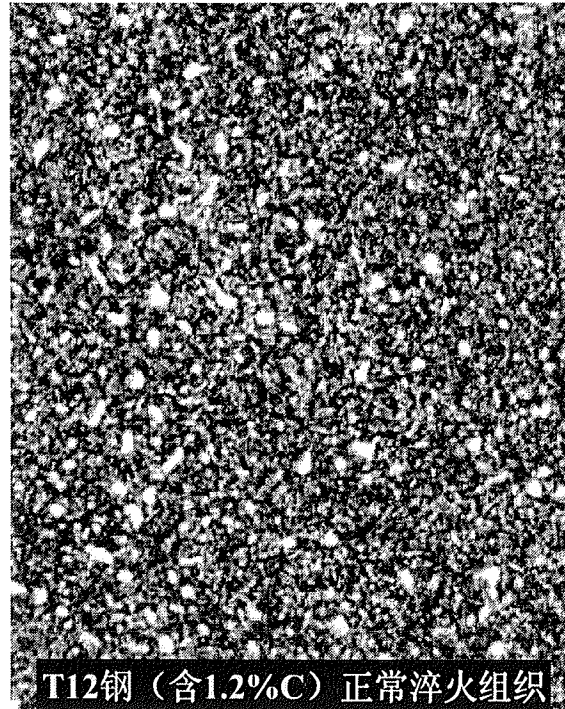
● 淬火温度: $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$ 。

● 温度高于 A_{cm} , 则奥氏体晶粒粗大、含碳量高, 淬火后马氏体晶粒粗大、 A' 量增多。

使钢硬度、耐磨性下降, 脆性、变形开裂倾向增加。

● 淬火组织: $M+Fe_3C$ 颗粒 + A' 。

(预备组织为 $P_{球}$)



T12钢 (含1.2%C) 正常淬火组织

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

2、合金钢

由于多数合金元素(Mn、P除外)对奥氏体晶粒长大有阻碍作用, 因而合金钢淬火温度比碳钢高。

(1) 亚共析钢淬火温度为 $A_{c3}+50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 共析钢、过共析钢淬火温度为 $A_{c1}+50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

二、淬火介质

理想的冷却曲线应只在C曲线鼻尖处快冷，而在 M_s 附近尽量缓冷，以达到既获得马氏体组织，又减小内应力的目的。但目前还没有找到理想的淬火介质。

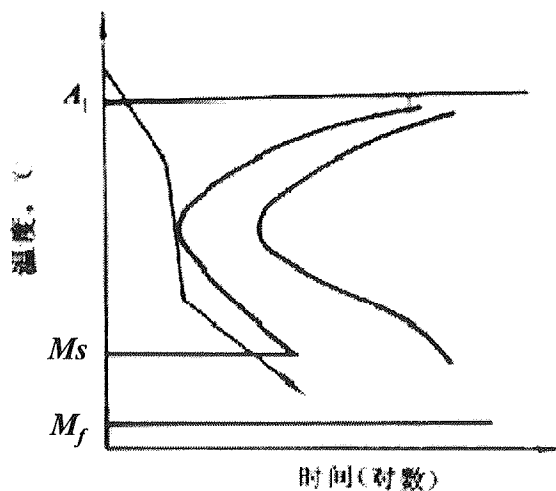
■常用淬火介质是水和油。

水的冷却能力强，但低温冷却能力太大，只适用于形状简单的碳钢件。

油在低温区冷却能力较理想，但高温区冷却能力太小，适用于合金钢和小尺寸的碳钢件。

熔盐作为淬火介质称盐浴，冷却能力在水和油之间，用于形状复杂件的分级淬火和等温淬火。

聚乙烯醇、硝盐水溶液等也是工业常用的淬火介质。



理想淬火曲线示意图

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

三、淬火方法

采用不同的淬火方法可弥补介质的不足。

1、单液淬火法

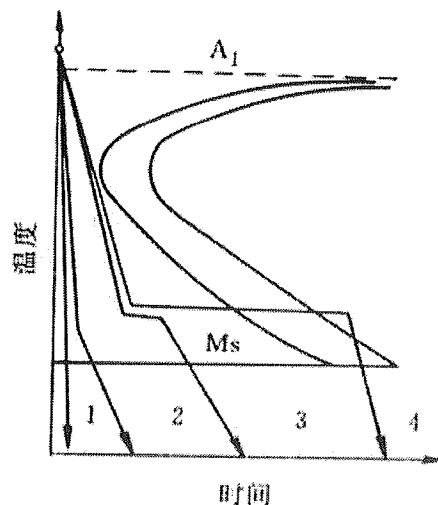
★加热工件在一种介质中连续冷却到室温的淬火方法。

★操作简单，易实现自动化。

2、双液淬火法

★工件先在一种冷却能力强的介质中冷，躲过鼻尖后，再在另一种冷却能力较弱的介质中发生马氏体转变的方法。如水淬油冷，油淬空冷。

★优点是冷却理想，缺点是不易掌握。用于形状复杂的碳钢件及大型合金钢件。



各种淬火方法示意图

- 1—单液淬火法
- 2—双液淬火法
- 3—分级淬火法
- 4—等温淬火法

第五章 钢的热处理

第五节 钢的淬火

三、淬火方法

3、分级淬火法

●在 M_s 附近的盐浴或碱浴中淬火，待内外温度均匀后再取出缓冷。

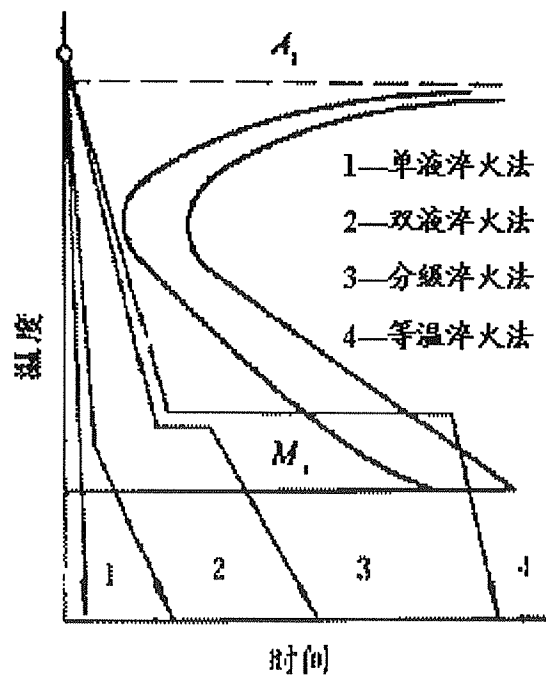
●可减少内应力，用于小尺寸工件。

4、等温淬火法

★将工件在稍高于 M_s 的盐浴或碱浴中保温足够长时间，从而获得下贝氏体组织的淬火方法。

★经等温淬火零件具有良好的综合力学性能，淬火应力小。

●适用于形状复杂及要求较高的小型件。



各种淬火方法示意图

中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

★淬透性是钢的主要热处理性能。

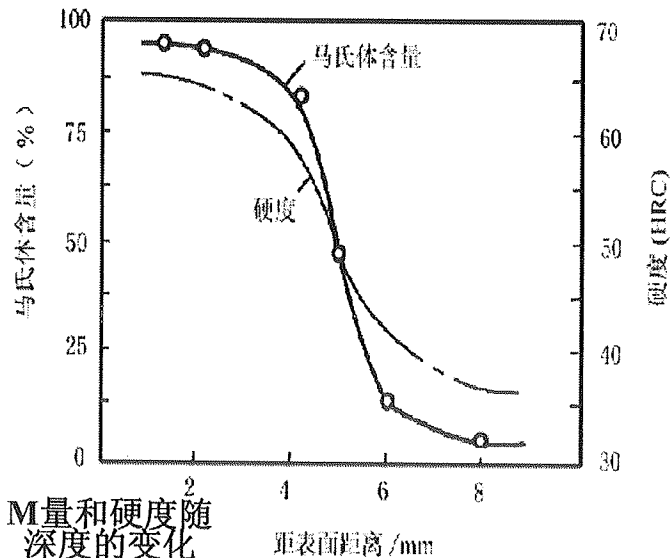
★是选材和制订热处理工艺的重要依据之一。

一、淬透性的概念

●淬透性是指钢在淬火时获得淬硬层深度的能力。其大小是用规定条件下淬硬层深度来表示。

●淬硬层深度是指由工件表面到半马氏体区(50%M + 50%P)的深度。

●淬硬性是指钢淬火后所能达到的最高硬度，即硬化能力。



M量和硬度随深度的变化

第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

二、淬透性与淬硬层深度的关系

★同一材料的淬硬层深度与工件尺寸、冷却介质有关。工件尺寸小、介质冷却能力强，淬硬层深。

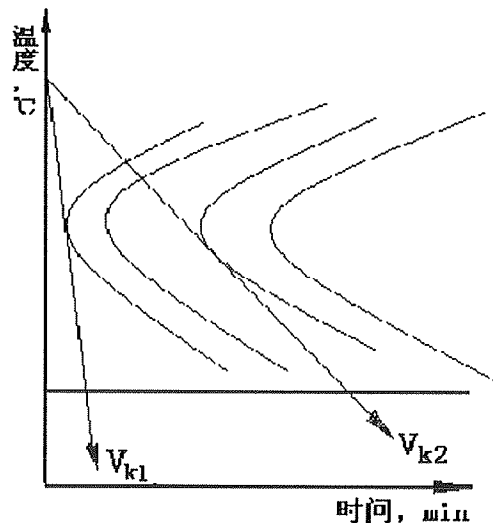
★淬透性与工件尺寸、冷却介质无关。它只用于不同材料之间的比较，是通过尺寸、冷却介质相同时的淬硬层深度来确定的。

三、影响淬透性的因素

●钢的淬透性取决于临界冷却速度 V_k ， V_k 越小，淬透性越高。

● V_k 取决于C曲线的位置，C曲线越靠右， V_k 越小。

●因而凡是影响C曲线的因素都是影响淬透性的因素。即除C₀外，凡溶入奥氏体的合金元素都使钢的淬透性提高；奥氏体化温度高、保温时间长也使钢的淬透性提高。



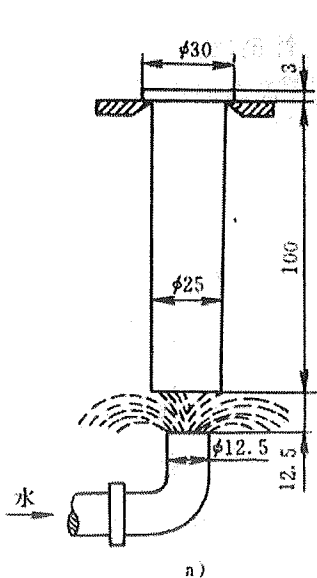
中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

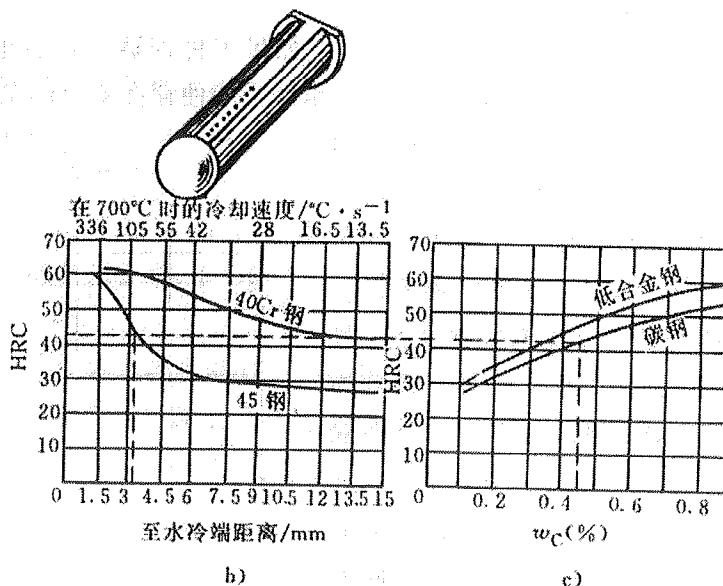
第六节 钢的淬透性

四、淬透性的测定及其表示方法

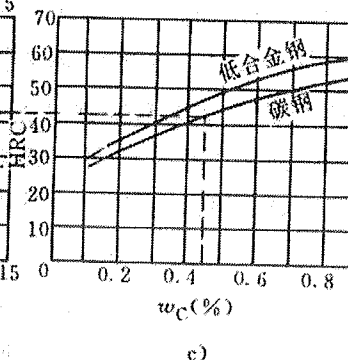
1、淬透性的测定常用末端淬火法 (GB225—88)



a)



b)



c)

末端淬火法

a) 喷水 b) 淬透性曲线举例 c) 钢的半马氏体区 (面积分数为 50%) 硬度与钢的碳质量分数的关系

第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

四、淬透性的测定及其表示方法

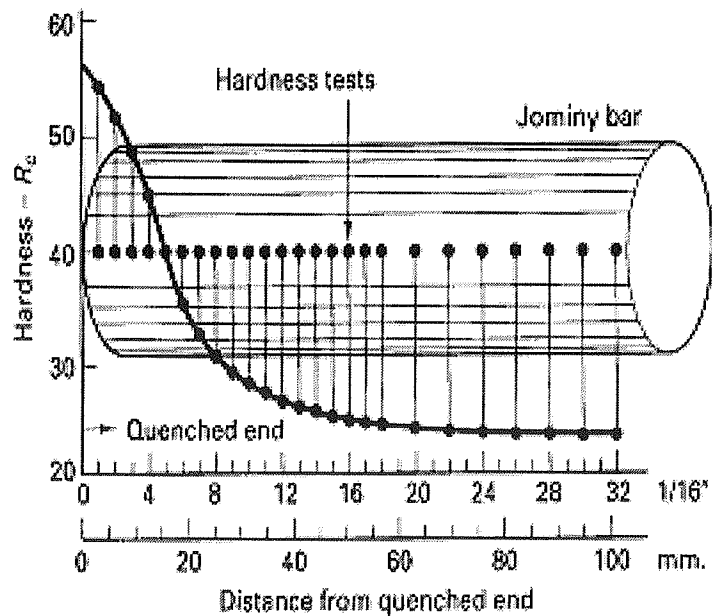
2、淬透性的表示方法

(1) 用淬透性曲线表示

即用 $J \frac{HRC}{d}$ 表示， J 表示末端淬透性， d 表示半马氏体区

到水冷端的距离，HRC 为半马氏体区的硬度。

氏体区的硬度。



中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

四、淬透性的测定及其表示方法

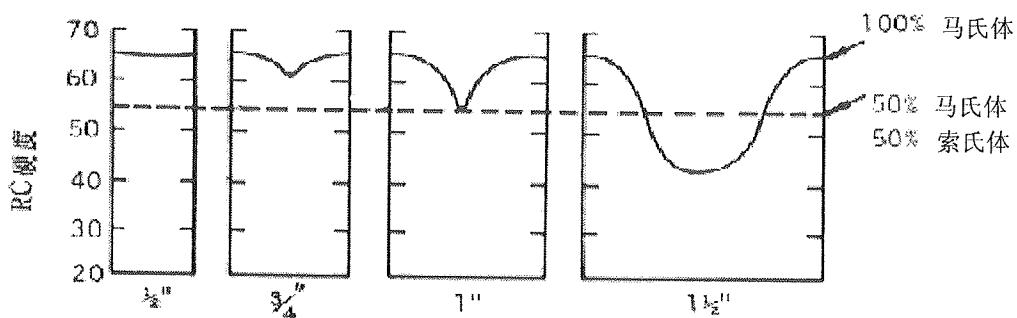
2、淬透性的表示方法

(2) 用临界淬透直径表示

■ 临界淬透直径是指圆形钢棒在介质中冷却，中心被淬成半马氏体的最大直径，用 D_0 表示。

■ D_0 与介质有关，如45钢 $D_{0水}=16mm$ ， $D_{0油}=8mm$ 。

■ 只有冷却条件相同时，才能进行不同材料淬透性比较，如45钢 $D_{0油}=8mm$ ，40Cr $D_{0油}=20mm$ 。

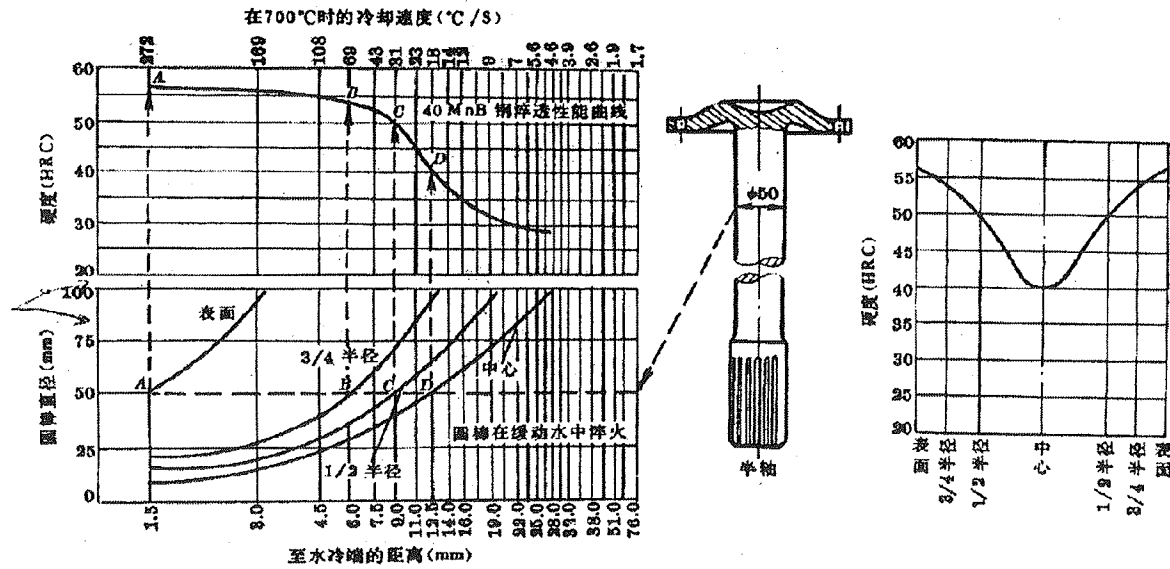


第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

五、淬透性的应用

1、利用淬透性曲线及圆棒冷速与端淬距离的关系曲线可以预测零件淬火后的硬度分布。下图为预测50mm直径40MnB钢轴淬火后断面的硬度分布。



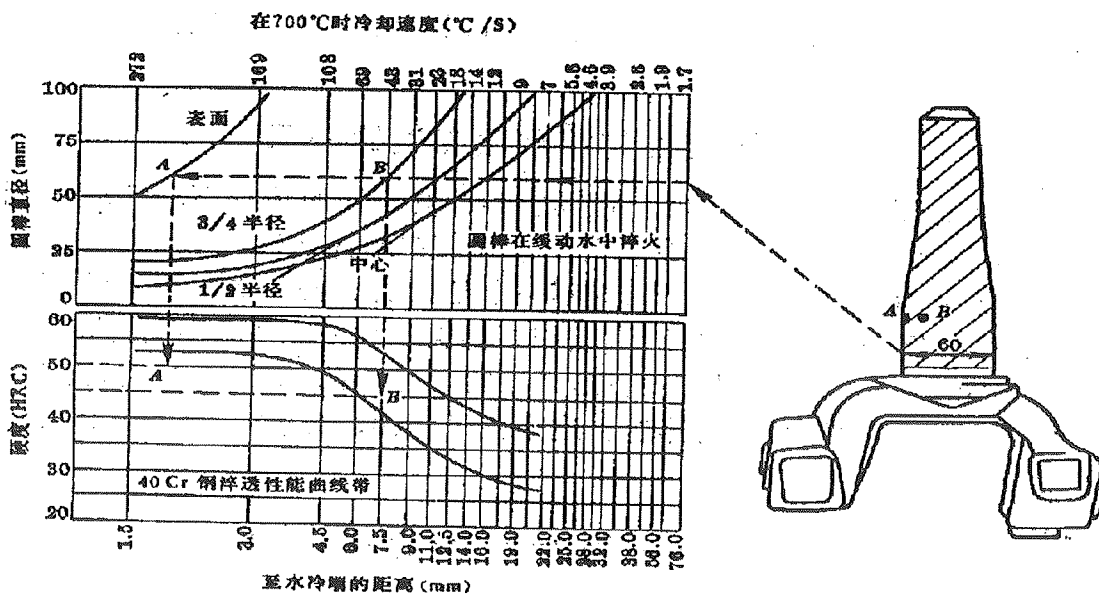
中国科学技术大学

第五章 钢的热处理

第六节 钢的淬透性

五、淬透性的应用

2、利用淬透性曲线进行选材。如要求厚60mm汽车转向节淬火后表面硬度超过HRC50，1/4半径处为HRC45。可按下图箭头所示程序进行选材分析。



116