

## 重庆大学材料科学与工程学院考研答疑

# 《金属学及热处理》

课程名称：834 材料科学与工程基础

专业书籍：金属学及热处理 哈尔滨工业大学 崔忠岐 机械工业出版社出版

### 第一章：金属的晶体结构

**基本内容：**金属键，位错，晶体的概念；面心立方，体心立方金属晶体结构的配位数，致密度，原子半径，八面体，四面体间隙个数；晶向指数，晶面指数。

**金属键：**失去外层价电子的正离子与弥漫其间的自由电子的静电作用而结合起来，这种结合方式称为金属键。

**重点内容：**

**晶体，位错的概念：**

晶体：材料在固态下原子或分子在空间呈有序排列。

位错：晶体中原子的排列在一定范围内发生有规律的律动的一种特殊结构组态。

**面心立方，体心立方金属晶体结构配位数，致密度，八面体，四面体间隙：**

| 晶体类型 | 晶胞中的原子数 | 配位数 | 致密度 |
|------|---------|-----|-----|
| 体心立方 | 2       | 8   | 68% |
| 面心立方 | 4       | 12  | 74% |

| 晶格类型       | 面心立方                             |                           | 体心立方                             |                           |
|------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 间隙类型       | 正四面体                             | 正八面体                      | 四面体                              | 扁八面体                      |
| 间隙个数       | 8                                | 4                         | 12                               | 6                         |
| 原子半径 $r_A$ | $\frac{\sqrt{2}}{4} a$           |                           | $\frac{\sqrt{3}}{4} a$           |                           |
| 间隙半径 $r_B$ | $(\sqrt{3}-\sqrt{2})\frac{a}{4}$ | $(2-\sqrt{2})\frac{a}{4}$ | $(\sqrt{5}-\sqrt{3})\frac{a}{4}$ | $(2-\sqrt{3})\frac{a}{4}$ |

**晶向指数、晶面指数标定：**

**晶面指数求法：**

建立坐标——求截距——取倒数——化整——加（）

**晶面指数作法：**

建立坐标——取倒数——求截距——连线，画剖面线

**晶向指数的求法：**

定原点——建立坐标——求坐标——化最小整数——加[ ]

**晶向指数的作法：**

定原点——建立坐标——以[hkl]中最大数字作为分母，化为小于或等于1的分数，作出重点——始、终点连线

### 第二章：纯金属的结晶

**重点内容：**

**过冷度：**理论结晶温度与实际结晶温度的差称为过冷度。

**变质处理：**在浇铸前往液态金属中加入形核剂，促使形成大量的非均匀晶核，以细化晶粒的方法。

**过冷度与液态金属结晶的关系：**液态金属结晶的过程是形核与晶核的长大过程，从热力学的角度上看，没有过冷度结晶就没有趋动力。根据  $R_k \propto 1/\Delta r$  可知当过冷度  $\Delta T$  为零的临界晶核半径  $R_k$  为无穷大，临界形核功 ( $\Delta G \propto 1/\Delta T^2$ ) 也为无穷大。临界晶核半径  $R_k$  与临界形核功为无穷大时，无法形核，所以液态金属不能结晶，晶体的成长也需要过冷度，所以液态金属结晶需要过冷度。

### 第三章 二元合金的相结构与结晶

**基本内容：**相，匀晶，共晶，包晶相图的结晶过程及不同成分合金在室温下的显微组织；合金，成分过冷、非平衡结晶及枝晶偏析的基本概念。

**相：**合金中结构相同，成分和性能均一并以界面相互分开的组成部分。

**合金：**两种或两种以上的金属，或金属与非金属，经熔炼或烧结，或用其他方法组合而成的具有金属特性的物质。

**成分过冷：**由于界面前沿液相中的成分差别引起的过冷度叫做成分过冷。

**过冷度：**金属结晶前，温度连续下降，当液态金属冷却到理论结晶温度时，并未开始结晶，而是需要继续冷却到理论结晶温度以下某一温度，液态才开始结晶。金属的理论结晶温度与实际结晶温度之差，称为过冷度。

**非平衡结晶：**在实际冷却条件下合金以较大速度冷却，偏离平衡条件的结晶过程。

**枝晶偏析：**也就是晶内偏析，是在一个晶粒内部化学成分不均匀的现象，由于固溶体晶体通常呈树枝状，使枝干和枝间的化学成分不同，所以又称枝晶偏析。

**重点内容：**

**伪共晶：**在不平衡结晶条件下，成分在共晶点附近的亚共晶或过共晶合金也可能得到全部共晶组织，这种共晶组织称为伪共晶。

**偏析：**合金中成分的不均匀分布。

**杠杆定律及应用。组织组成物及相组成物的计算。**

### 第四章 铁碳合金

**基本内容：**铁碳合金的组元与基本相，铁碳相图，铁碳合金的结晶过程及室温下的平衡组织。

**重点内容：**

**铁素体与奥氏体：**

铁素体：碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。

奥氏体：碳在  $\gamma$ -Fe 中的固溶体。

**铁碳相图。**

**钢的含碳量对平衡组织及结晶过程的影响：**

例，含碳 0.4% 碳钢的结晶过程经过了匀晶转变，包晶转变，匀晶转变，单相冷却，同素异晶转变，共析转变等。

其室温组织相对量为：铁素体% =  $(0.8\% - 0.4\%) / 0.8\% = 50\%$

珠光体% =  $1 - 50\% = 50\%$

**相组织与组织组成的区别**

**典型钢在相图上的位置：**如，10 钢，40 钢，60 钢，T12 钢。

## 第五章 三元合金相图（不考）

### 第六章 金属及合金的塑性变形与断裂

**基本内容：**固溶体强化机理与强化规律，第二相的强化机理，单晶体塑性变形的方式，滑移的本质，金属塑性变形后的组织与性能。

**固溶体强化机理：**一是在固溶体中溶质与溶剂的原子半径差所引起的弹性畸变，与位错之间产生的弹性交互作用，对在滑移面上的运动着的位错有阻碍作用。二是在位错线上偏聚的溶质原子对位错的钉扎作用。

**强化规律：**1. 在固溶体的溶解度范围内，合金元素的质量分数越大，则强化作用越大。2. 溶质原子与溶剂原子的尺寸相差越大，则造成的晶格畸变越大，因而强化效果越大。3. 形成间隙固溶体的溶质元素的强化作用大于形成置换固溶体的元素。4. 溶质原子与溶剂原子的价电子数相差越大，则强化作用越大。

**第二相强化机理：**由塑性较好的固溶体基体及其上分布的硬脆的第二相所组成的多相合金。由于其第二相的存在而引起的强化，叫做第二相强化。强化的主要原因是由于弥散细小的第二相粒子与位错的交互作用，阻碍了位错的运动，从而提高了合金的塑性变形抗力。有两种强化机制：1. 位错绕过第二相粒子（弥散强化）。2. 位错且过第二相粒子（沉淀强化）。

**单晶体塑性变形的方式：**以滑移和孪生为主。

**滑移本质：**晶体的一部分沿着一定的晶面和晶向相对另一部分作相对的滑动。滑移的本质是位错的移动。

**重点内容：**

**金属塑性变形后的组织与性能：**

**组织：**显微组织出现纤维组织，杂质沿变形方向拉长为细带状或粉碎成链状，光学显微镜分辨不清晶粒和杂质。亚结构细化，出现形变织构。

**性能：**材料的强度、硬度升高，塑性、韧性下降；比电阻增加，导电系数和电阻温度系数下降，抗腐蚀能力降低等。

**冷变形使金属材料内部形成哪些内应力？这些内应力是如何形成的？它们的作用范围有多大？**

三种内应力：

- 1) 第一类内应力（宏观内应力）。由于不同部位变形不均匀造成，作用范围大。
- 2) 第二类内应力（微观内应力）。由于不同晶粒之间变形不均匀造成，作用范围在几个晶粒之间。
- 3) 第三类内应力（晶格畸变）。由于晶体缺陷大量增加造成，作用范围在原子尺度。

**冷变形对金属材料的性能有何影响？**

材料的强度、硬度升高，塑性、韧性下降；比电阻增加，导电系数和电阻温度系数下降，抗腐蚀能力降低等。

### 第七章 金属及合金的恢复与再结晶

**基本内容：**回复、再结晶的概念，变形金属加热时显微组织的变化，性能的变化，影响再结晶的主要因素性能的变化规律。

**回复：**冷塑性变形的金属在加热时，在光学显微组织发生改变前所产生的某些亚结构和性能的变化过程。

**再结晶：**冷变形后的金属加热到一定温度或者保温足够时间后，在原来的变形组织中产生了无畸变的新晶粒，位错密度显著降低，性能也发生显著变化，并恢复到冷变形前的水平。这个过程叫做再结晶。

影响再结晶的主要因素性能的变化规律：1. 再结晶退火温度：退火温度越高，再结晶后的晶粒越粗大；2. 冷变形量：一般冷变形量越大，完成再结晶的温度越低，变形量达到一定程度后，完成再结晶的温度趋于一定；3. 原始晶粒尺寸：原始晶粒越细，再结晶晶粒也越细；4. 微量溶质与杂质原子，一般均起细化晶粒的作用；5. 第二相粒子，粗大的第二相粒子有利于再结晶，弥散分布的细小的第二相粒子不利于再结晶；6. 形变温度，形变温度越高，再结晶温度越高，晶粒粗化；7. 加热速度，加热速度过快或过慢，都可能使再结晶温度升高。

#### 重点内容：

#### 塑性变形后的金属随加热温度的升高会发生的一些变化：

显微组织经过回复、再结晶、晶粒长大三个阶段由破碎的或纤维组织转变成等轴晶粒，亚晶尺寸增大；储存能降低，内应力松弛或被消除；各种结构缺陷减小；强度、硬度降低，塑形、韧性提高；电阻下降，应力腐蚀倾向显著减小。

### 第八章 扩散（不考）

### 第九章 钢的热处理原理

**基本内容：**冷却时转变产物（P、B、M）的特征、性能特点；热处理的概念，等温、连续C-曲线

**热处理：**将钢在固态下加热到预定的温度，并在该温度下保持一段时间，然后以一定的速度冷却下来，让其获得所需要的组织结构和性能的一种热加工工艺。

#### 重点内容：

**转变产物（P、B、M）特征，性能特点：**片状P体，片层间间距越小，强度越高，塑形、韧性也越好；粒状P体， $Fe_3C$ 颗粒越细小，分布越均匀，合金的强度越高。第二相的数量越多，对塑性的危害越大；片状与粒状相比，片状强度高，塑形、韧性差；上贝氏体为羽毛状，亚结构为位错，韧性差；下贝氏体为黑针状或竹叶状，亚结构为位错，位错密度高于上贝氏体，具有良好的综合机械性能；低碳马氏体为板条状，亚结构为位错，具有良好的机械性能；高碳马氏体为片状，亚结构为孪晶，强度硬度高，塑形和韧性差。

### 第十章 钢的热处理工艺

**基本内容：**淬透性，淬硬性，热应力，组织应力，回火脆性，回火稳定性的概念；退火，正火，淬火，回火的目的和工艺方法；淬火加热缺陷及其防止措施。

**淬透性：**是表征钢材淬火时获得马氏体的能力的特性。

**淬硬性：**指淬成马氏体可能得到的硬度。

**热应力：**工作在加热（或冷却）时，由于不同部位的温度差异，导致热胀（或冷缩）的不一致所引起的应力称为热应力。

**组织应力：**由于工作不同部位组织转变不同时性而引起的内应力。

**回火稳定性：**淬火钢对回火时发生软化过程的抵抗能力。

**退火目的：**均匀钢的化学成分及组织；细化晶粒；调整硬度，改善钢的成形及切削加工性能；消除内应力和加工硬化；为淬火做好组织准备。

**工艺方法：**完全退火（将钢件或钢材加热到 $Ac_3$ 以上 $20-30^{\circ}C$ ，经保温后缓慢冷却以获得近于平衡组织的热处理工艺），均匀化退火（将钢加热到 $Ac_3$ 或 $Accm$ 以上 $150-300^{\circ}C$ ），不完全退火（将钢加热到 $Ac_1-Ac_3$ 亚共析钢或 $Ac_1-Accm$ 过共析钢之间），球化退火（将钢加热到 $Ac_1$ 以上 $20-30^{\circ}C$ ），

再结晶退火，去应力退火（不超过 $Ac_1$ 点，一般在 $500-600^{\circ}C$ ）。

正火目的：改善钢的切削加工性能；细化晶粒，消除热加工缺陷；消除过共析钢的网状碳化物，便于球化退火；提高普通结构零件的机械性能。

工艺方法：将钢加热到  $A_{c3}$  (或  $A_{ccm}$ ) 以上适当温度，保温以后在空气中冷却得到珠光体类组织。

淬火的目的是：使奥氏体化后的工件获得尽量多的马氏体，然后配以不同温度回火获得各种需要的性能。

工艺方法：将钢加热到临界点  $A_{c3}$  或  $A_{c1}$  以上一定温度，保温以后以大于临界冷却速度的速度冷却得到马氏体（或下贝氏体）。

回火目的：减少或消除淬火应力，保证相应的组织转变，提高钢的韧性和塑性，获得硬度、强度、塑性和韧性的适当配合，以满足各种用途工件的性能要求。

工艺方法：将淬火钢在  $A_1$  以下温度加热，使其转变为稳定的回火组织，并以适当方式冷却到室温的工艺过程。

**重点内容：**

**淬透性及影响因素：**

是表征材料淬火时获得马氏体的能力的特性。

例：合金元素的影响，Cr 的作用。

**回火脆性：**

钢在一定的温度范围内回火时，其冲击韧性显著下降，这种脆化现象叫做钢的回火脆性。

**球化退火工艺：**

球化退火是使钢中碳化物球化而进行的退火工艺。

将钢加热到  $A_{c1}$  以上  $20-30^{\circ}\text{C}$ ，保温一段时间，然后缓慢冷却，得到在铁素体基体上均匀分布的球状或颗粒状碳化物的组织。

例如，T10 钢制造的锉刀，采用的球化退火工艺为  $920^{\circ}\text{C}$  退火，正确吗？会出现什么问题？

## 第十一章 工业用钢

**基本内容：**材料强化方法；钢的分类和编号；典型零件的材料，成分，热处理工艺及组织。

**重点内容：**

**材料强化方法。**

形变强化：随变形程度的增加，材料的强度、硬度升高，塑性、韧性下降的现象叫形变强化或加工硬化。

机理：随塑性变形的进行，位错密度不断增加，因此位错在运动时的相互交割加剧，结果即产生固定的割阶、位错缠结等障碍，使位错运动的阻力增大，引起变形抗力增加，给继续塑性变形造成困难，从而提高金属的强度。

规律：变形程度增加，材料的强度、硬度升高，塑性、韧性下降，位错密度不断增加，根据公式  $\Delta \sigma = \alpha b G \rho^{1/2}$ ，可知强度与位错密度（ $\rho$ ）的二分之一一次方成正比，位错的柏氏矢量（ $b$ ）越大强化效果越显著。

方法：冷变形（挤压、滚压、喷丸等）。

形变强化的实际意义（利与弊）：形变强化是强化金属的有效方法，对一些不能用热处理强化的材料可以用形变强化的方法提高材料的强度，可使强度成倍的增加；是某些工件或半成品加工成形的重要因素，使金属均匀变形，使工件或半成品的成形成为可能，如冷拔钢丝、零件的冲压成形等；形变强化还可提高零件或构件在使用过程中的安全性，零件的某些部位出现应力集中或过载现象时，使该处产生塑性变形，因加工硬化使过载部位的变形停止从而提高了安全性。另一方面形变强化也给材料生产和使用带来麻烦，变形使强度升高、塑性降低，给继续变形带来困难，中间需要进行再结晶退火，增加生产成本。

## 固溶强化

随溶质原子含量的增加，固溶体的强度硬度升高，塑性韧性下降的现象称为固溶强化。强化机理：一是溶质原子的溶入，使固溶体的晶格发生畸变，对滑移面上运动的位错有阻碍作用；二是位错线上偏聚的溶质原子形成的柯氏气团对位错起钉扎作用，增加了位错运动的阻力；三是溶质原子在层错区的偏聚阻碍扩展位错的运动。所有阻止位错运动，增加位错移动阻力的因素都可使强度提高。

固溶强化规律：①在固溶体溶解度范围内，合金元素的质量分数越大，则强化作用越大；②溶质原子与溶剂原子的尺寸差越大，强化效果越显著；③形成间隙固溶体的溶质元素的强化作用大于形成置换固溶体的元素；④溶质原子与溶剂原子的价电子数差越大，则强化作用越大。

方法：合金化，即加入合金元素。

## 3、第二相强化

钢中第二相的形态主要有三种，即网状、片状和粒状。

①网状特别是沿晶界析出的连续网状 Fe<sub>3</sub>C，降低的钢机械性能，塑性、韧性急剧下降，强度也随之下落；

②第二相为片状分布时，片层间距越小，强度越高，塑性、韧性也越好。符合  $\sigma_s = \sigma_0 + K S_0^{-1/2}$  的规律，S<sub>0</sub> 片层间距。

③第二相为粒状分布时，颗粒越细小，分布越均匀，合金的强度越高，符合  $\tau = \frac{Gb}{\lambda}$  的规律， $\lambda$  粒子之间的平均距离。第二相的数量越多，对塑性的危害越大；

④片状与粒状相比，片状强度高，塑性、韧性差；

⑤沿晶界析出时，不论什么形态都降低晶界强度，使钢的机械性能下降。

第二相无论是片状还是粒状都阻止位错的移动。

方法：合金化，即加入合金元素，通过热处理或变形改变第二相的形态及分布。

## 4、细晶强化

细晶强化：随晶粒尺寸的减小，材料的强度硬度升高，塑性、韧性也得到改善的现象称为细晶强化。

细化晶粒不但可以提高强度又可改善钢的塑性和韧性，是一种较好的强化材料的方法。

机理：晶粒越细小，位错塞集群中位错个数（n）越小，根据  $\tau = n\tau_0$ ，应力集中越小，所以材料的强度越高。

细晶强化的强化规律：晶界越多，晶粒越细，根据霍尔-配奇关系式  $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$  晶粒的平均直径（d）越小，材料的屈服强度（ $\sigma_s$ ）越高。

细化晶粒的方法：结晶过程中可以通过增加过冷度，变质处理，振动及搅拌的方法增加形核率细化晶粒。对于冷变形的金属可以通过控制变形度、退火温度来细化晶粒。可以通过正火、退火的热处理方法细化晶粒；在钢中加入强碳化物形成元素。

## 典型零件的材料，成分，热处理工艺及组织：

例：齿轮、连杆、弹簧、滚动轴承、车刀、铣刀、冷冲压模具、机床床身。

齿轮：20CrMnLi，渗碳钢，C%=0.2%，Cr%<1.5%，Ti=微量，预备处理是正火，最终热处理是渗碳后淬火加低温回火，其最终组织为表层是回火马氏体，心部是托氏体。

连杆：40Cr，调质钢，C%=0.4%，Cr%<1.5%，预备热处理是退火，最终热处理是淬火加高温回火，其最终组织是回火索氏体。

弹簧：65Mn，弹簧钢，C%=0.65%，Mn %<1.5%，预备热处理是退火，最终热处理是淬火加中温回火，其最终组织是回火托氏体。

滚动轴承：GCr15，滚动轴承钢，C%=1.0%，Cr%=1.5%，预备热处理是球化退火，最终热处理是淬火加低温回火，其最终组织是回火马氏体。（GCr18 就是 Cr%=1.8%）

车刀：W18Cr4V，高速钢，W%=17.5~18.5%，Cr%=3.5~4.5%，V%<1.5%，预备热处理是退火，最终热处理是淬火后加 560℃ 三次回火，其最终组织是回火马氏体加颗粒状碳化物。

铰刀：T10，碳素工具钢，C%=1.0%，预备热处理是球化退火，最终热处理是淬火加低温回火，最终组织是回火马氏体。

冷冲压模具：Cr12MoV，冷作模具钢，C%>1.0%，Cr%=11.5~12.5%，Mo%、V%<1.5%，预备热处理是球化退火，最终热处理是淬火加低温回火，最终组织是回火马氏体。

机床床身：HT250，灰口铸铁，浇注后不进行热处理。

制作人：馨辰

联系方式：Email: [juliadandan@126.com](mailto:juliadandan@126.com)

QQ: 80196349