

金属学与热处理总结

上坡扩散；溶质原子从低浓度向高浓度处扩散的过程称为上坡扩散。

表明扩散的驱动力是化学位梯度而非浓度梯度。

金属键：自由电子与原子核之间静电作用产生的键合力。

滑移系：晶体中一个滑移面及该面上一个滑移方向的组合称一个滑移系。

形核率：单位时间、单位体积液体中形成的晶核数量。用 N 表示。

过冷度：液体材料的理论结晶温度 (T_m) 与其实际温度之差

反应扩散：伴随有化学反应而形成新相的扩散称为反应扩散。

相：材料中结构相同、成分和性能均一的组成部分。（如单相、两相、多相合金。

过冷度：理论结晶温度与实际结晶温度的差称为过冷度。

细化晶粒的方法：增加过冷度、变质处理、振动与搅拌。

塑性变形的方式：以滑移和孪晶为主。

滑移：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。

体心结构的滑移系数为 12, 滑移面： $\{110\}$, 方向 $\langle 111 \rangle$ 。面心结构的滑移系数为 12, 滑移面： $\{111\}$, 方向 $\langle 110 \rangle$ 。

金属塑性变形后的组织与性能：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。

七、金属及合金的回复与再结晶

影响再结晶的主要因素：再结晶退火温度：退火温度越高（保温时间一定时），再结晶后的晶粒越粗大；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恒定；原始晶粒尺寸：原始晶粒越细，再结晶晶粒也越细；微量溶质与杂质原子，一般均起细化晶粒的作用；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；形变温度，形变温度越高，再结晶温度越高，晶粒粗化；加热速度，加热速度过快或过慢，都可能使再结晶温度升高。

性

影响扩散的因素：

温度：温度越高，扩散速度越大；

晶体结构：体心结构的扩散系数大于面心结构的扩散系数；

固溶体类型：间隙原子的扩散速度大于置换原子的扩散速度；

晶体缺陷：晶体缺陷越多，原子的扩散速度越快；

化学成分：有些元素可以加快原子的扩散速度，有些可以减慢扩散速度。

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。

1. 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。

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。

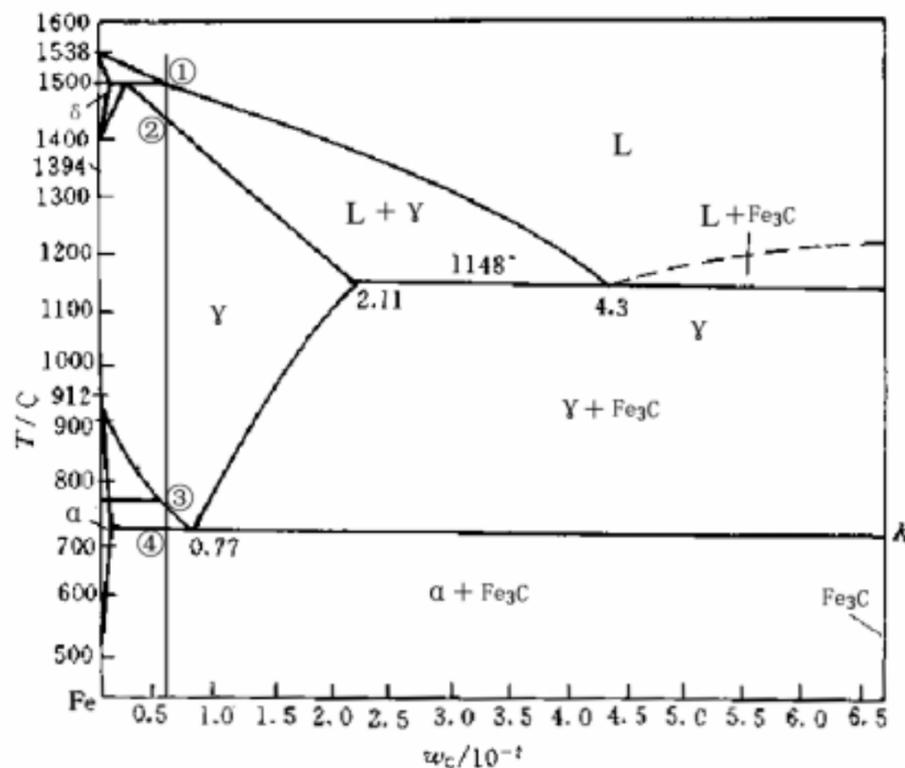
二、改善塑性和韧性的机理

晶粒越细小，晶粒内部和晶界附近的应变度差越小，变形越均匀，因应力集中引起的开裂的机会也越小。晶粒越细小，应力集中越小，不易产生裂纹；晶界越多，易使裂纹扩展方向发生变化，裂纹不易传播，所以韧性就好。

提高或改善金属材料韧性的途径：
 尽量减少钢中第二相的数量；
 提高基体组织的塑性；
 提高组织的均匀性；
 加入 Ni 及细化晶粒的元素；
 防止杂质在晶界偏聚及第二相沿晶界析出。

三、Fe—Fe₃C 相图，结晶过程分析及计算

1. 分析含碳 0.53 ~ 0.77% 的铁碳合金的结晶过程，并画出结晶示意图。



点之上为液相

； 点结晶完

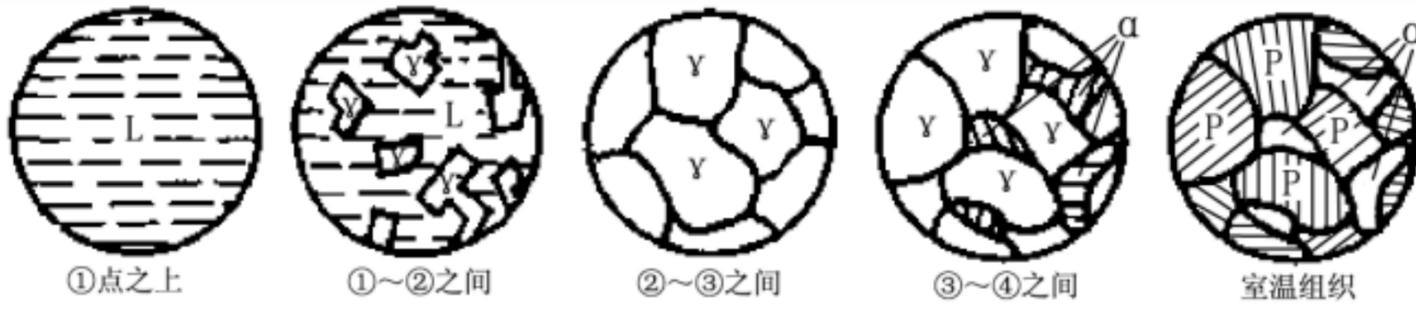
之间为单相

点开始 转变； 点开始 P 共析转变；室温下显微组织为 + P。

L； 点开始 L

毕； ~ 点

结晶示意图：



2. 计
算室
温下
亚共
析钢

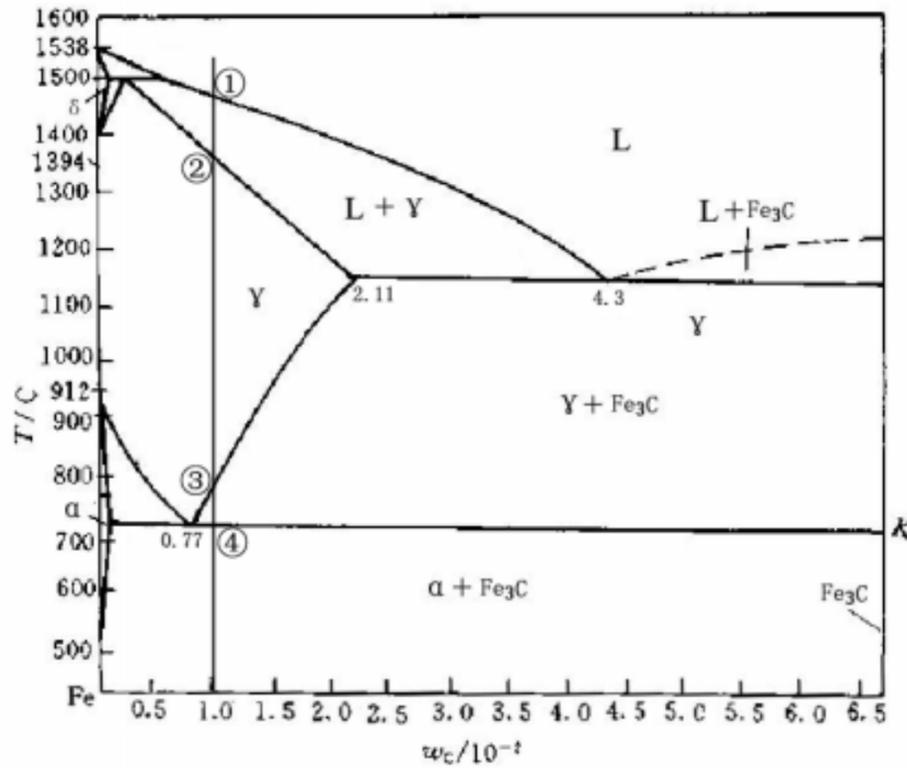
(含碳量为 x) 的组织组成物的相对量。

组织组成物为 α 、P，相对量为：

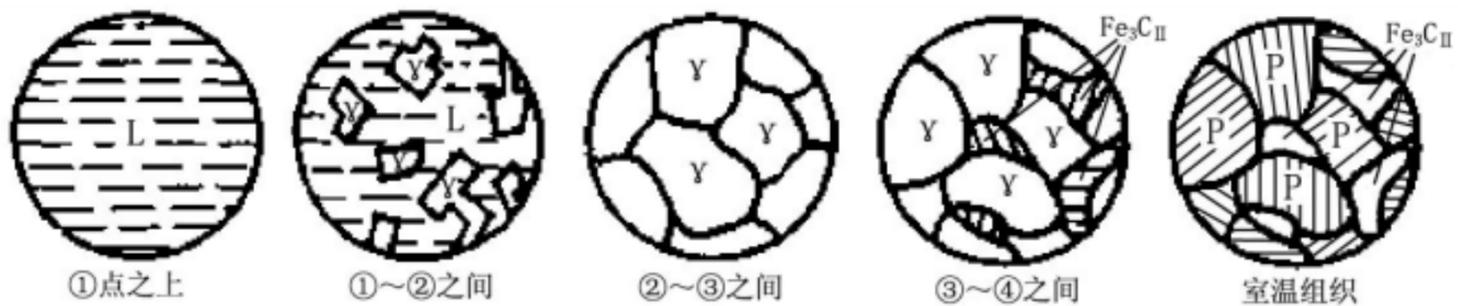
$$W_P = \frac{x - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% , \quad W_\alpha = 1 - W_P \text{ 或 } W_\alpha = \frac{0.77 - x}{0.77 - 0.0218} \times 100\%$$

3. 分析含碳 0.77 ~ 2.11% 的铁碳合金的结晶过程。

点之上为液相 L；点开始 L；~ 之间为 L+；点结晶完毕；~ 点之间为单相；点开始 Fe₃C 转变；点开始 P 共析转变；室温下显微组织为 P + Fe₃C。



结晶过程示意图。



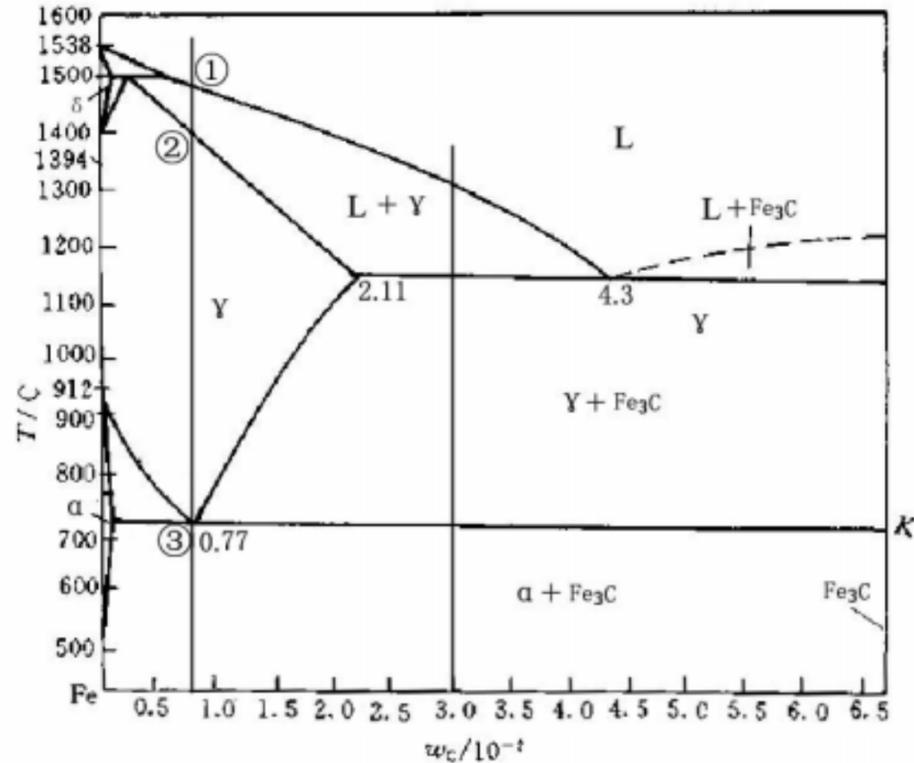
4. 计算室温下过共析钢 (含碳量为 X) 的组织组成物的相对量。

组织组成物为 P、Fe₃C，相对量为：

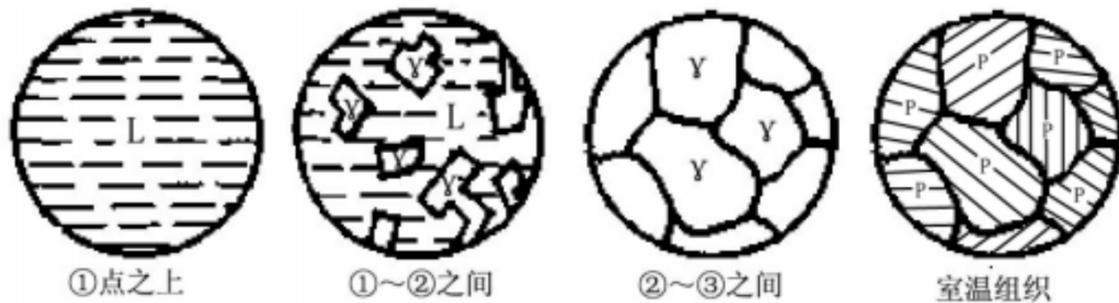
$$W_P = \frac{6.69 - x}{6.69 - 0.77} \times 100\% , \quad W_{Fe_3C} \text{ II} = 1 - W_P \text{ 或 } W_{Fe_3C} \text{ II} = \frac{x - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\%$$

5. 分析共析钢的结晶过程，并画出结晶示意图。

点之上为液相 L；点开始 L；点结晶完毕；~点之间为单相；点 P 共析转变；室温下显微组织为 P。



结晶示意图：



6. 计算含碳 3.0%铁碳合金室温下组织组成物及相组成物的相对量。

含碳 3.0%的亚共晶白口铁室温下组织组成物为 P、Fe₃C，相对量为：

$$W_{Ld} = \frac{3.0 - 2.11}{4.3 - 2.11} \times 100\% = 40.6\% , \quad W = 1 - W_{Ld} = 59.4\%$$

$$W_P = \frac{6.69 - 2.11}{6.69 - 0.77} \times W \times 100\% = 46.0\% , \quad W_{Fe_3C} = W - W_P = 13.4\%$$

相组成物为 F、Fe₃C，相对量为：

$$W_{Fe_3C} = \frac{3.0}{6.69} \times 100\% = 44.8\% , \quad F = 1 - W_{Fe_3C} = 55.2\%$$

7. 相图中共有几种渗碳体？说出各自的来源及形态。

相图中共有五种渗碳体：Fe₃C、Fe₃C、Fe₃C、Fe₃C共析、Fe₃C共晶；

Fe_3C : 由液相析出, 形态连续分布 (基体) ; Fe_3C : 由奥氏体中析出, 形态网状分布; Fe_3C : 由铁素体中析出, 形态网状、短棒状、粒状分布在铁素体的晶界上; $Fe_3C_{共析}$: 奥氏体共析转变得到, 片状; $Fe_3C_{共晶}$: 液相共晶转变得到, 粗大的条状。

8. 计算室温下含碳量为 x 合金相组成物的相对量。

相组成物为 α 、 Fe_3C , 相对量为:

$$W_{Fe_3C} = \frac{x}{6.69} \times 100\%, \quad W_{\alpha} = 1 - W_{Fe_3C}$$

9. Fe_3C_I 的相对量: $W_{Fe_3C_I} = \frac{x - 4.3}{6.69 - 4.3} \times 100\%$

当 $x=6.69$ 时 Fe_3C_I 含量最高, 最高百分量为: $W_{Fe_3C_I} = \frac{6.69}{6.69} \times 100\% = 100\%$

10. 过共析钢中 Fe_3C_{II} 的相对量: $W_{Fe_3C_{II}} = \frac{x - 0.77}{6.69 - 0.77} = 22.6\%$

当 $x=2.11$ 时 Fe_3C_{II} 含量最高, 最高百分量为: $W_{Fe_3C_{II}} = \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} = 22.6\%$

11. Fe_3C_{III} 的相对量计算: $W_{Fe_3C_{III}} = \frac{x}{6.69} \times 100\%$

当 $x=0.0218$ 时 Fe_3C_{III} 含量最高, 最高百分量为: $W_{Fe_3C_{III}} = \frac{0.0218}{6.69} \times 100\% = 0.33\%$

12. 共析渗碳体的相对百分量为: $W_{Fe_3C} = \frac{0.77 - 0.0218}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 11.2\%$

13. 共晶渗碳体的相对百分量为: $W_{Fe_3C} = \frac{4.30 - 2.11}{6.69 - 2.11} \times \% = 47.8\%$

14. 说出奥氏体与铁素体的异同点。

相同点: 都是铁与碳形成的间隙固溶体; 强度硬度低, 塑性韧性高。

不同点: 铁素体为体心结构, 奥氏体面心结构; 铁素体最高含碳量为 0.0218%, 奥氏体最高含碳量为

2.11%, 铁素体是由奥氏体直接转变或由奥氏体发生共析转变得到, 奥氏体是由包晶或由液相直接析出的;

存在的温度区间不同。

15. 说明三个恒温转变, 画出转变特征图

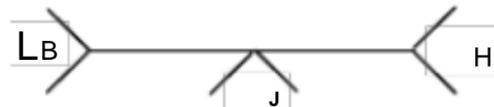
包晶转变 ($L_B + H \xrightleftharpoons{1495^\circ C} J$) 含碳量 0.09% ~ 0.53% 范围的铁碳合金, 于 HJB 水平线 (1495) 均将通过包晶转变, 形成单相奥氏体。

共晶转变 ($L_C \xrightleftharpoons{1148^\circ C} E + Fe_3C$) 含碳量 2.11% - 6.69% 范围的铁碳合金, 于 ECF 平线上 (1148) 均将通过共晶转变, 形成奥氏体和渗碳体两相混合的共晶体, 称为莱氏体 (L_d)。

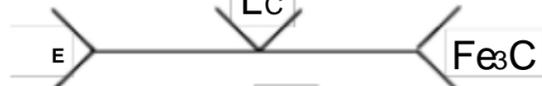
共析转变 ($S \xrightleftharpoons{727^\circ C} P + Fe_3C$); 含碳量超过 0.02% 的铁碳合金, 于 PSK 水平线上 (727) 均将通过共析转变, 形成铁素体和渗碳体两相混合的共析体, 称为珠光体 (P)。

转变特征图

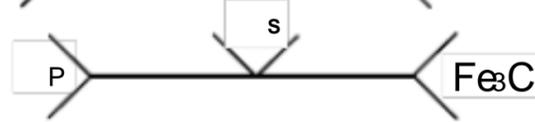
包晶转变：



共晶转变：



共析转变：

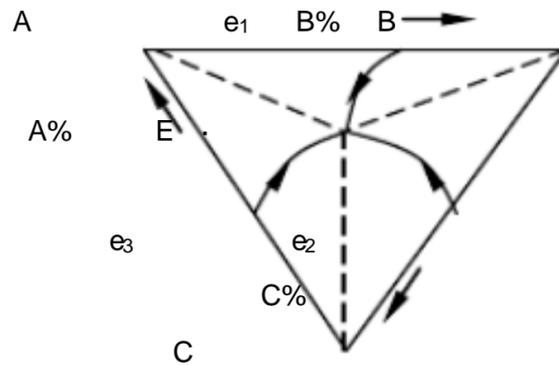


各点成分为 (C%): B : 0.53 ; H : 0.09 ; J : 0.17 ; C : 4.3 ; E : 2.11 S : 0.77 ; P : 0.0218。

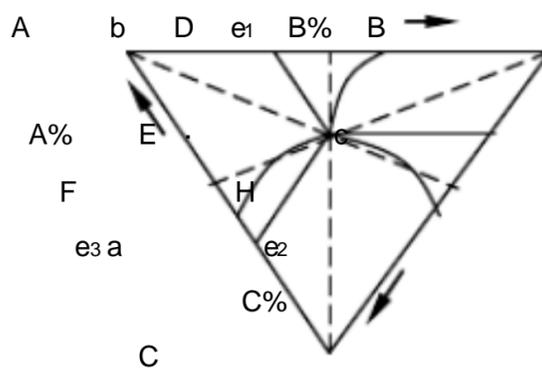
1. 分析 M 点合金的结晶过程。

先从液相中结晶出 B 组元，当液相成分为 K 时，发生二元共晶转变，转变产物为 (B + C)，当液相成分为 E 时，发生三元共晶转变，转变产物为 (A + B + C)。室温下的显微组织为： B + (B + C) + (A + B + C)。

六、固态下互不溶解的三元共晶相图的投影图如图所示。



1. 确定出 E 点合金 A、B、C 三个组元的化学成分。
2. 计算 E 点合金组织组成物的相对量
3. 计算 E 点合金相组成物的相对量
4. E 点合金的化学成分与相组成物相对量之间有什么关系？为什么？



- 1、 A、 B、 C 三个组元的化学成分为： $A=Ca\%$, $B=Ab\%$, $C=Bc\%$
- 2、 E 点合金组织组成物的相对量为： $W_{(A+B+C)}=100\%$

3、E点合金相组成物的相对量为： $W_A = \frac{EH}{AH} \times 100\%$ ， $W_B = \frac{EF}{BF} \times 100\%$ ，

$$W_C = \frac{ED}{CD} \times 100\%$$

4、E点合金的化学成分与相组成物相对量是相等的，即： $C_a = EH/AH$ ， $A_b = EF/BF$ ，

$B_c = ED/CD$ 。因为三个组元在固态下互不溶解，都已纯金属的形成存在，所以三个相（A、B、C）的相对量就应该等于其各自的化学成分。

九、影响扩散的因素有哪些？

温度：温度越高，扩散速度越大；

晶体结构：体心结构的扩散系数大于面心结构的扩散系数；

固溶体类型：间隙原子的扩散速度大于置换原子的扩散速度；

晶体缺陷：晶体缺陷越多，原子的扩散速度越快；

化学成分：有些元素可以加快原子的扩散速度，有些可以减慢扩散速度。

十四、晶界具有哪些特性？

晶界的能量较高，具有自发长大和使界面平直化，以减少晶界总面积的趋势；原子在晶界上的扩散速度高于晶内，熔点较低；相变时新相优先在晶界出形核；晶界处易于发生杂质或溶质原子的富集或偏聚；晶界易于腐蚀和氧化；常温下晶界可以阻止位错的运动，提高材料的强度。

十七、与滑移相比孪晶有什么特点？

孪晶是一部分晶体沿孪晶面对另一部分晶体做切变，切变时原子移动的距离不是孪晶方向原子间距的整数倍；孪晶面两边晶体的位相不同，成镜面对称；由于孪晶改变了晶体的取向，因此孪晶抛光后仍能重现；孪晶是一种均匀的切变。

十八、影响再结晶的主要因素有哪些？

再结晶退火温度：退火温度越高（保温时间一定时），再结晶后的晶粒越粗大；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恒定；原始晶粒尺寸：原始晶粒越细，再结晶晶粒也越细；微量溶质与杂质原子，一般均起细化晶粒的作用；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；形变温度，形变温度越高，再结晶温度越高，晶粒粗化；加热速度，加热速度过快或过慢，都可能使再结晶温度升高。

二十、什么是再结晶温度？影响再结晶温度的因素有哪些？

再结晶温度：经过严重冷变形（变形度在70%以上）的金属，在约1小时的保温时间内能够完成再结晶（>95%转变量）的温度。再结晶温度并不是一个物理常数，这是因为再结晶前后的晶格类型不变，化学成

分不变，所以再结晶不是相变。

影响再结晶温度的因素：纯度越高 $T_{再}$ 越低；变形度越大 $T_{再}$ 越低；加热速度越小 $T_{再}$ 越高。

二十一、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；各种结构缺陷减少；强度、硬度降低，塑性、韧性提高；电阻下降，应力腐蚀倾向显著减小。

二十二、什么是晶面间距？计算低指数晶面的晶面间距。

晶面间距 (d): 两个平行晶面之间的垂直距离。通常，低指数的晶面间距较大，而高指数晶面间距较小。

晶面间距越大，则该晶面上原子排列越密集。

对于简单立方点阵 $d_{hkl} = a (h^2 + k^2 + l^2)^{-1/2}$

$$\text{fcc: } d_{100} = \frac{a}{2}, d_{110} = \frac{\sqrt{2}}{4} a, d_{111} = \frac{\sqrt{3}}{3} a$$

$$\text{bcc: } d_{100} = \frac{a}{2}, d_{110} = \frac{\sqrt{2}}{2} a$$

二十三、什么是过冷度？为什么金属结晶一定要有冷度？

过冷度：理论结晶温度与实际结晶温度的差称为过冷度。

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驱动力。

根据 $R_k \propto \frac{1}{\Delta T}$ 可知当过冷度 ΔT 为零时临界晶核半径 R_k 为无穷大，临界形核功 ($\Delta G \propto \frac{1}{\Delta T^2}$)

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。晶体的长大也需要过冷度，所以液态金属结晶需要过冷度。

二十四、简述铸锭三个晶区的形成机理。

表面细晶区：当高温液体倒入铸模后，结晶先从模壁开始，靠近模壁一层的液体产生极大的过冷，加上模壁可以作为非均质形核的基底，因此在此薄层中立即形成大量的晶核，并同时向各个方向生长，形成表面细晶区。柱状晶区：在表面细晶区形成的同时，铸模温度迅速升高，液态金属冷却速度减慢，结晶前沿过冷都很小，不能生成新的晶核。垂直模壁方向散热最快，因而晶体沿相反方向生长成柱状晶。中心等轴晶区：随着柱状晶的生长，中心部位的液体实际温度分布区域平缓，由于溶质原子的重新分配，在固液界面前沿出现成分过冷，成分过冷区的扩大，促使新的晶核形成长大形成等轴晶。由于液体的流动使表面层细晶一部分卷入液体之中或柱状晶的枝晶被冲刷脱落而进入前沿的液体中作为非自发生核的籽晶。