

## 一、名词解释

- 1、**致密度**: 表示晶胞中原子所占体积与晶胞体积的比值, 是衡量原子排列紧密程度的参数, 致密度越大, 晶体中原子排列越紧密, 晶体结构越致密。
- 2、**相**: 合金中具有同一聚集状态、同一晶体结构、成分基本相同、并有明确界面与其他部分相分开的均匀组成部分。
- 3、**固溶体**: 指以合金某一组元为溶剂, 在其晶格中溶入其他组元原子(溶质)后所形成的一种合金相, 其特征是仍保持溶剂晶格类型, 结点上或间隙中含有其他组元原子。
- 4、**离异共晶**: 成分点靠近共晶转变线两端的亚共晶和过共晶合金, 结晶后组织中初晶量多, 共晶体数量少, 而且共晶体中与初晶相同的一相与初晶结合在一起, 将共晶体中另一相推至晶界, 造成的共晶体两相分离的非平衡组织。
- 5、**平衡分配系数**: 固溶体合金在结晶过程中具有选分结晶的特点。因此在一定温度下平衡时, 固相成分与液相成分之比称为平衡分配系数。该参数反映了溶质在固液两相中的分配系数及溶质对合金熔点的影响程度。
- 6、**反应扩散**: 在固态扩散的过程中, 如果渗入元素在金属中溶解度有限, 随着扩散原子增多, 当渗入原子的浓度超过饱和溶解度时则形成不同于原相的固液体或中间相, 从而使金属表层分为出现新相和不出现新相的两层, 这种通过扩散而形成新相的过程称为反应扩散。
- 7、**固溶强化**: 当形成固溶体后, 溶剂晶格中因溶有溶质原子而产生晶格畸变, 溶质原子的应力场会与位错产生交互作用而阻碍位错运动, 增大了位错运动的阻力, 使得临界分切应力远比纯金属大, 滑移系开动比纯金属困难, 使材料的塑性变形抗力提高, 硬度、强度上升, 而塑性、韧性下降的现象称为固溶强化。
- 8、**退火**: 将金属及其合金加热至相变温度以上, 保温一段时间, 然后以较为缓慢的速度冷却, 以获得近于平衡组织的热处理工艺称为退火。
- 9、**淬透性**: 是钢在淬火时能获得马氏体组织的倾向(即钢被淬透的能力)。
- 10、**柏氏矢量**: 用来描述位错引起晶格畸变的物理量。该矢量的模是位错的强度, 表示晶格总畸变的大小, 其方向表示晶格点畸变的方向。一般情况下, 该矢量越大, 晶体畸变的程度越大。
- 11、**成分过冷**: 固溶体合金凝固时, 由于液相中溶质的分布发生变化, 合金熔点也发生变化, 即使实际温度分布不变, 固液界面前沿的过冷度也会发生变化。所以固溶体合金的过冷度是由变化着的合金的熔点与实际温度分布两个方面的因素共同决定的。这种因液相成分变化而形成的过冷称为成分过冷。
- 12、**配位数**: 是反映原子排列紧密程度的物理量之一, 指晶格中任一原子周围与其最近邻且等距离的原子数目。一般配位数越大, 晶体排列结构越致密。
- 13、**临界分切应力**: 晶体中的某个滑移系是否发生滑移, 决定于力在滑移面内沿滑移方向上的分切应力, 它是使滑移系开动的最小分切应力。材料的临界分切应力取决于材料的本身性质, 但和温度以及材料的纯度等也有关系。
- 14、**中间相**: 指合金组元间相互作用, 当超过固溶体的固溶极限时可形成晶格结构和特性完全不同于任一组元的具有金属特性的新相。由于在相图中往往处于中间部位, 因此又称为中间相。
- 15、**枝晶偏析**: 是材料的一种微观偏析, 即固溶体在非平衡冷却条件下, 匀晶转变后新得的固溶体晶粒内部的成分是不均匀的, 先结晶的内核含较多的高熔点的组元原子, 后结晶的外缘含较多的低熔点的组元原子, 而通常固溶体晶体以树枝晶方式长大, 这样, 枝干含高熔点组元较多, 枝间含低熔点组元原子多, 造成同一晶粒内部成分的不均匀现象。

- 16、**动态再结晶**：在金属塑性变形过程中发生的再结晶，即形变硬化与再结晶软化同时进行的过程。这样可以不断形成位错密度很低的新晶粒，得到的组织细小，综合力学性能好。

## 二填空

- 1、典型金属的晶体结构有（fcc）（bcc）和（hcp），其配位数相应为（12）（8）和（12）。
- 2、置换固溶体的溶解度与原子尺寸因素、（电负性）、电子浓度因素和（晶体结构）有关。
- 3、当过冷液体中出现一个晶胚时，总的自由能变化 $\Delta G$ 可写为（ $\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 + \sigma 4\pi r^2$ ），当 $d\Delta G/dr=0$ 时，所得的 $r$ 值称为（临界晶核半径）其大小决定于（过冷度）和（比表面能）， $r^*$ 变小意味着形核数目（增多）。
- 4、根据相律三元系最大平衡相数为（4）此时自由度为（零）在相图上表现为（平面）
- 5、位错在滑移面上的运动称为（滑移），作垂直滑移面的运动称为（攀移）螺旋位错不能进行（攀移）
- 6、面心立方金属的滑移面是（ $\{111\}$ ），滑移方向是（ $\langle 110 \rangle$ ）可组成（12）个滑移系。
- 7、扩散第一定律适用于稳态扩散，其数学表达式可写成（ $J=-Ddc/dx$ ）。扩散通量的单位是（ $1/cm^2 \cdot s$ ），符号为（负号）表示扩散由高浓度向低浓度方向进行。
- 8、溶质原子半径与溶剂原子半径相近的可形成（置换）固溶体，两者半径相差较大时是（间隙）固溶体，铁素体是一种（间隙）固溶体。
- 9、奥氏体形核时不仅需要（结构）起伏、（能量）起伏，此外还需要（成分）起伏。
- 10、晶体固液界面分为光滑界面和粗糙界面，按照长大速度由慢到快其长大方式依次为（二维晶核长大）（晶体缺陷长大）和（垂直长大）
- 11、马氏体是碳在（ $\alpha$ -Fe）中的过饱和固溶体，淬火钢中马氏体的金相形态有两种，它们是（板条马氏体）和（针状马氏体）。
- 12、位错的两种基本类型为（刃型位错）和（螺型位错），其中刃型位错的位错的位错线方向与柏氏矢量的关系为（垂直）。
- 13、马氏体型不锈钢的典型钢号是（1Cr13），奥氏体不锈钢的典型钢号是（1Cr18Ni9Ti），铁素体不锈钢是（1Cr17）。
- 14、上坡扩散是指扩散原子从（低浓度）向（高浓度）的扩散，产生上坡扩散的原因是合金系中存在着（化学势梯度）。
- 15、在均匀形核时，设晶核的形状为边长是 $a$ 的立方体，则临界晶核边长为（ $\frac{-4\sigma^3}{\Delta G^2 v}$ ），临

界形核功为（ $\frac{32\sigma^3}{\Delta G^2 v}$ ）（已知 $\sigma$   $\Delta G v$ ）

- 16、多晶体塑性变形的特点是（不等时）性、（协调）性和（不均匀）性。
- 17、多晶体中的晶界有大角与小角晶界之分，通常大角与小角晶界的鉴定角度是（ $10^\circ$ ），其角度的含义是（相邻晶粒的位向差）。对于小晶界按其特征又划分为（扭转）（倾侧）和（重合）等多种类型。
- 18、根据相律，三元系最大平衡相数为（4），此时自由度（0），在相图上表现为（水平面）。
- 19、扩散第一定律只适合于（稳态）条件，第一定律所表达的基本含义是：在（ $\frac{dc}{dt}=0$ ）的条件下，浓度梯度存在就会有扩散发生，而且扩散通量与浓度梯度成（正比）变化。扩散流动方向是由（高）浓度向（低）浓度。

20、固溶体合金结晶过程中遵循形核和核长大规律，但它不同于纯金属的是形核时还额外需要（成分）起伏，它也是在（变温）过程中进行的，同时在结晶过程中海始终伴随着（异质原子/溶质原子）的扩散。

21、晶体长大方式与（界面结构）有关，而晶体长大形态与（界面结构）有关，同时也与界面前沿的（温度梯度）分布有关。

22、单晶体在发生塑性变形时，常见的方式有（滑移）、（孪生）和（扭折）。

23、动态回复与动态再结晶是指在高温下进行形变，即变形过程中（形变硬化与软化）同时进行。

24、冷变形后，再结晶后晶粒度大小的控制与（冷变形度）、原始晶粒尺寸、（再结晶温度）和杂质等有关。

25、晶体在外力作用下内部运动着的位错会产生交截现象，即产生割阶与就这，其长度与相交截位错的（柏氏矢量的模）相同，而如果割阶的滑移与主位错线的滑移不一致，主位错线会拖拽割阶产生攀移运动，从而产生（割阶硬化）。

26、（11）金属塑性变形过程中发生孪生后，孪晶面两边的晶体位向呈现（对称关系），并且晶体是（均匀）切变的。

27、（13）冷塑变金属低温回复时，主要是（点缺陷的消失），高温回复时，主要是发生（多边形化）。

28、（15）动态回复与动态再结晶是指在变形过程中（软化与形变硬化）同时进行

### 三判断

1、层错是由于晶体点阵中局部存在多余的半原子面的结果。

2、位错属于晶体缺陷，又属于线缺陷。✓

3、通常晶体中原子的扩散激活能愈高，其扩散系数愈大，扩散速度愉快。

4、具有不同晶体点阵的材料具有不同的滑移系，因此其可形变的倾向也不同。✓

5、位错密度愈高，相应位错的柏氏矢量愈大。

6、包晶转变是指液相与一个固相相互作用，包覆原有固相形成的另一个新固相的转变。非平衡结晶时指在实际冷却条件下，合金以较大速度冷却，偏离平衡条件的结晶，在非平衡条件下匀晶转变后新得的固溶体内部的成分是不均匀的。✓

7、金属凝固时通过固相形核和核长大两个过程进行的，在晶核长大过程中一般纯金属（如Fe、Ni、Cu、Au等）的固液界面均保持光滑状态。✓

8、含碳量低于Fe-C相图中S点成分的钢，无论在何种成分及何种条件下均不可能获得完全的珠光体组织。

9、晶体由于在不同方向上原子规则排列的紧密程度不同，导致原子间距和原子间的结合力不同，因而在不同方向上具有不同的性能。所以大多数金属及合金亦都表现出具有各向异性的特征。

### 四选择

1、钢种的奥氏体：(1)可表示为溶有碳原子的 $\gamma$ -固溶体。(2)可表示为溶有碳原子 $\alpha$ -固溶体。(3)无论在室温还是高温下均具有良好的可塑性。(4)又有铁磁性。(5)具有顺磁性。135

2、铁碳合金平衡相图：(1)含有包晶转变。(2)含有共晶转变。(3)含有匀晶转变。(4)含有包共晶转变。(5)含有固溶体的脱溶析出转变。1235

3、金属断裂的断口特征：(1)脆性断裂的一种断口形式是穿晶解理。(2)解理断口主要表现为河流状花样。(3)依河流的走向可判断微区裂纹的扩展方向，即河流的汇集方向为裂纹的扩展方向。(4)有的材料齐韧性断裂的断口则呈现为舌形花样。(5)韧性断裂主要表现为沿晶韧窝断口形式。235

4、固态扩散：(1)钢种铁原子的扩散属于异扩散，在不存在化学梯度时，则与浓度梯度有关。

(2)钢种合金元素的扩散属于异扩散,在不存在化学梯度时,则与浓度梯度有关。(3)扩散第一定律只适合于稳态扩散条件,因此用其不能处理钢在渗碳过程中碳的扩散系数的准确测定。(4)上坡扩散仅与扩散元素的化学梯度相关,而与浓度梯度无关。(5)位错的增值是通过原子扩散运动实现的。145

五简答

### 1、结晶、重结晶和再结晶三者概念上有何区别?

解答:结晶—金属由液态转变为固态的过程称为凝固,由于固态金属是晶体故又把凝固称为结晶。

重结晶—指在固态状态下,物质由一种结构转变成另一种结构,这是一种固态相变过程。

再结晶—将冷压力加工以后的金属加热到一定温度后,在变形的组织中重新产生新的无畸变的等轴晶粒、性能恢复到冷压力加工前的软化状态的过程。在此过程中,仍然属于固态过程。

三者的区别与联系:结晶、重结晶发生相变过程,再结晶没有;结晶、重结晶和再结晶都是形核与长大的过程。发生结晶与重结晶的驱动力为反应相与生成相的自由能差,再结晶为储存能。再结晶后强度、硬度下降而塑性提高,而重结晶则属于同素异构转变。

### 2、何谓成分过冷?成分过冷对晶体生长形态有何影响?

解答:固溶体合金凝固时,由于液相中溶质的分布发生变化,合金熔点也发生变化,即使实际温度分布不变,固液界面前方的过冷度也会发生变化。所以固溶体合金的过冷度是由变化着的合金熔点与实际温度分布两方面的因素共同决定的。这种因液相成分变化而形成的过冷称为成分过冷。

固溶体结晶时,由于出现成分过冷对晶体生长的形态有很大影响,即使在正温度梯度下也会生成出胞状组织甚至出现树枝晶。即无成分过冷时,界面呈平直状向前推移;较小成分过冷时,界面呈胞状;较大成分过冷时,界面呈树枝状。

### 3、试说明多晶体金属塑性变形时,晶粒越小强度越高、塑性越好的原因。

解答:多晶体金属塑性变形时,晶粒越小强度越高,塑性越好的原因是:由于晶粒细小,各晶粒中可供塞积位错的滑移面较短,塞积位错的数量  $n$  也少,由位错塞积引起的应力集中小而数目很多,在相同外力作用下,处于滑移有利方位的晶粒数量也会增多,使众多的晶粒参加滑移,滑移量分散在各个晶粒中,应力集中小,这样在金属变形时引起开裂的机会小,直至断裂之前,能获得较大的塑性变形量。

### 4、简述固溶体合金与纯金属在结晶过程中的区别。

解答:纯金属在结晶时其界面是粗糙的,在正温度梯度下进行长大。由于晶体长大时通过固相模壁散热,固液界面是等温的,若取得动态过冷度界面就向前移动。如果界面局部有小的凸起伸向过热的液相中,小凸起将被熔化,界面一直保持平直,晶体以平面状长大。

固溶体结晶时会出现成分过冷,在固液界面前出现成分过冷区,此时界面如有任一小的凸起将它伸入成分过冷区而获得过冷就能继续生长下去。界面不能保持平直稳定,会出现树枝晶。

### 5、分析回复与再结晶阶段空位与位错的变化及其对性能的影响。

解答:在低温回复阶段,主要表现为空位的消失。冷变形后所产生的大量空位,通过空位迁移至表面或晶界,空位与间隙原子重新重合,空位与位错发生交互作用,空位聚集成空位片等方式,使得空位数量急剧减少。

在中温回复阶段,温度升高,使位错容易滑移,同一滑移面上的异号位错相遇会相互吸引而抵消,不但使亚晶内部的位错数目减少,而且胞壁结位错的减少更为显著,重新调整排列规则,胞壁变得明晰,形成回复亚晶。即该阶段主要表现为位错的滑移,导致位错重新

结合，异号位错的汇聚而抵消以及亚晶的长大。

在高温回复阶段，位错运动的动力学条件更为充分，滑移同时也发生攀移，使得多层滑移面上的位错密度趋于相同，各位错之间的作用力使得同一滑移面上的位错分不均与，间距大体相等，形成规则排列的垂直于滑移面的位错墙，即多边形化的过程。多边形化构成的位错墙即是小角度晶界，它将原晶粒分隔成若干个亚晶粒。

#### 6、何为加工硬化？如何解决加工硬化给后续加工带来的困难？

解答：金属材料在塑性变形过程中，随着变形量的增加，强度和硬度不断上升，而塑性而韧性不断下降，这一现象称为“加工硬化”。该现象的原因是由于外力增加使得位错不断增值，位错之间相截、反应使得位错的运动变得困难。可以用再结晶退火处理消除加工硬化给后续加工带来的困难。

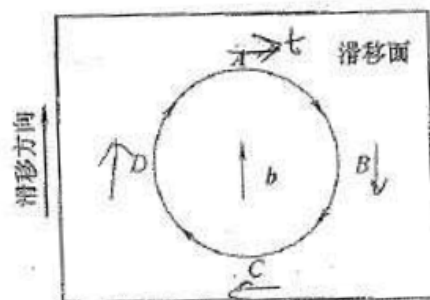
#### 7、说明第一类和第二类回火脆性的异同点。

解答：在 205~400℃ 间回火时出现的脆性叫低温回火脆性，也称第一类回火脆性；在 450~650℃ 间回火时出现的脆性称高温回火脆性，也称第二类回火脆性。第一类回火脆性为不可逆的回火脆性，第二类回火脆性为可逆的。第一类回火脆性是由于马氏体分解时沿马氏体条或片的界面析出断续的薄壳状碳化物，降低了晶界的断裂强度，使之成为裂纹扩展的路径，因而导致脆性断裂；第二类回火脆性产生的原因是 Sb、Sn、P、As 等杂质元素在回火处理时向原奥氏体晶界偏聚，减弱了奥氏体晶界上原子间的结合力，降低晶界断裂强度时产生第二类回火脆性的主要原因。

#### 8、有如图 36-1 所示的一个位错环。分析位错环各点上位错的属性，并综合论述刃型位错和螺旋位错的异同点。

解答：A:正刃；C: 负刃；B: 左螺；D 右螺

刃型位错和螺型位错的异同点：①刃型位错位错线垂直于柏氏矢量，螺型位错位错线平行于柏氏矢量；②刃型位错柏氏矢量平行于滑移运动方向，螺型位错柏氏矢量垂直于滑移运动方向；③刃型位错可作滑移也可作攀移运动且只有一个滑移面，螺型位错只可作滑移运动但有无数个滑移面；④两者都可用柏氏矢量表示。



#### 9、何谓平衡分配系数？其物理意义是什么？

解答：平衡分配系数：固溶体合金在结晶过程中具有选分结晶的特点。因此在一定温度下平衡时，固相成分与液相成分之比称为平衡分配系数。该参数反映了溶质在固液两相中的分配系数及溶质对合金熔点的影响程度。

#### 10、为什么金属滑移在最密排面与最密排晶向上进行？

解答：金属晶体的滑移是在外力的作用下，于原子排列最紧密的晶面和晶向上进行的，这是因为在密排面上原子间距最小，结合力最强，而相邻的两个密排晶面之间距离却最大、结合力最弱。可知在原子排列最紧密的晶面之间进行滑移阻力最小，需要的外力也最小。于是原子排列最紧的晶面和晶向就成了晶体进行滑移的滑移面和滑移方向。

#### 11、为什么渗碳选择 930℃ 附近的 $\gamma$ -Fe 中？

解答：①可形成较大的浓度梯度；②  $\gamma$ -Fe 中含碳量增加则扩散系数增加；③高温下随温度升高，扩散系数增加，所以选择高温。但温度过高会使奥氏体晶粒显著长大。

#### 12 分析材料发生塑性变形的机制及表现形式？

解答：材料发生塑性变形通常有三种方式，具体如下：

(1)滑移。晶体在切应力的作用下，沿着滑移方向在滑移面上发生相对运动。其位错机制为：由于晶体点阵结构的周期性，当位错沿着滑移面运动时，位错中心的能量也要发生周期性的

变化,从而使得位错运动遇到点阵阻力。但在实际晶体中,一定温度下,当位错线从能谷位置移向相邻能谷位置时,并不是沿其全长同时越过能峰,在热激活能的帮助下,可以部分先越过,同时位错线形成位错扭折,那么随后位错的运动,借助于扭折位错线会很容易地向旁边侧运动,结果使得整个位错线滑移所需的应力下降许多。

滑移过程中,除点阵阻力外,位错与位错的交互作用产生的阻力,位错运动交截后形成的扭折和割阶,位错与其他晶体缺陷交互作用产生的阻力,均会产生阻力,导致晶体滑移时还会产生晶体强化现象。

(2)孪生。是晶体在不能滑移时进行的一种塑性变形方式。它也是晶体在切应力的作用下,沿着孪生方向和孪生面发生相对运动。与滑移不同之处在于孪生是一种均匀切变,而且孪晶的两部分晶体形成晶面对称。

其位错机制在于晶体中一个不全位错滑动后,使得相互平行并且相邻晶面发生层错而产生孪晶。

(3)扭折。当晶体既不能滑移也不能进行孪生时,可以以扭折的方式进行塑变。其特点是扭折晶体的取向发生了不对称性的变化。位错机制是指在塑变过程中,其他区域位错运动过程中,同号刃型位错堆积在一起,位错的汇集处产生了弯曲应力,使得晶体点阵发生弯曲和扭折从而产生扭折区。

### 13 何为孪晶与退火孪晶? 解释其各自的形成机制。

解答:孪晶是指连个晶体(或一个晶体的两部分)沿一个共晶面构成界面对称的位向关系,这两部分晶体就叫做孪晶。孪晶依据其形成方式分为三种:变形孪晶(机械孪晶)、生长孪晶和退火孪晶。

退火孪晶是孪晶中的一种,它是指在某些面心立方金属,如 Cu、Ni 及镍合金、奥氏体钢等,在冷变形并再结晶退火后,在晶粒内部会形成具有平直界面的片状孪晶。这些孪晶的界面是{111}面。由于它们是在退火后才出现的,因而叫做退火孪晶。

孪晶的生成是由于孪生变形时,整个孪晶区发生均匀切变,其各层晶面的相对位移借助于一个不全位错运动造成的。以面心立方晶体为例,当形成孪晶时需要产生堆垛层错。例如面心立方晶体是以{111}面按 ABCABC...的顺序堆垛而形成的,可用  $\Delta \Delta \Delta \Delta \Delta \dots$  表示,如果从某一层开始,其堆垛顺序发生颠倒,称为 ABCACBACBA...,即  $\Delta \Delta \Delta \nabla \nabla \nabla \nabla \dots$ ,则上下两部分晶体就构成了镜面对称的孪晶关系。可以看出...CAC 处相当于堆垛层错,接着就按倒过来的顺序堆垛,仍属正常的 FCC 堆垛顺序,但与出现层错之前的那部分晶体顺序刚好相反,故形成对称关系。而这个过程中试借助于一个不全位错(肖克莱不全位错)运动造成的。

### 14、试证明:在同样过冷度下均匀形核时,球形晶核较立方晶核更易形成。

解答:由  $r^* = \frac{2\sigma}{\Delta G_v}$ , 得球形核胚的临界形核功

$$\Delta G_b^* = -\frac{4}{3}\pi \left(\frac{2\sigma}{\Delta G_v}\right)^3 \Delta G_v + 4\pi \left(\frac{2\sigma}{\Delta G_v}\right)^3 \sigma = \frac{16\pi \sigma^3}{3\Delta G_v^2}$$

边长为 a 的立方晶核的临界边长  $a^* = \frac{4\sigma}{\Delta G_v}$ , 则其临界形核功

$$\Delta G_l^* = -\left(\frac{4\sigma}{\Delta G_v}\right)^3 \Delta G_v + 6\left(\frac{4\sigma}{\Delta G_v}\right)^2 \sigma = \frac{32\sigma^3}{\Delta G_v^2}$$

将两式相比较  $\frac{\Delta G_b^*}{\Delta G_l^*} = \frac{\pi}{6} \approx \frac{1}{2}$

可见，形成球形晶核的临界形核功仅为形成立方形晶核的  $1/2$

15、为什么在正温度梯度下凝固时，纯金属以平面状方式生长，而固溶体合金却通常以树枝晶方式长大？两者在凝固过程中的异同点有哪些？

解答：纯金属在结晶时其界面是粗糙的，在正温度梯度下进行长大。由于晶体长大时通过固相模壁散热，固液界面是等温的。若取得动态过冷度界面就向前移动。如果界面局部有小的凸起伸向过热的液相中，小凸起将被熔化，故界面一直保持平直，晶体以平面状长大。

固溶体结晶时会出现成分过冷，在固液界面出现成分过冷区。此时界面如有任一小的凸起它将伸入成分过冷区而获得过冷就能继续生长下去，故界面不能保持平直稳定会出现树枝晶。

16、从材料塑性变形的机制来论述细晶强化理论。

解答：材料的强化理论中，细晶强化是唯一的既可提高材料强度，又可提高材料韧性的方法。具体解释如下：

由于晶粒细小，可供塞积位错的滑移面较短，塞积位错的数目较少，由位错塞积引起的应力集中分散于各个晶粒中，使其屈服强度升高。另一方面，由于晶粒细小，在相同的外力作用下，处于滑移有利方向的晶粒较多，应力分散在各晶粒中，即使在受到大的塑性变形时，仍然保持其较好的性能而不致开裂，从而提高材料的韧性。

综上所述，细晶强化可以提高材料的综合力学性能。

17、室温下对铅版进行弯折，越弯越硬，而隔一段时间后再行弯折，铅版又像最初一样软，为什么？试说明该现象。

解答：室温下，对铅版进行弯折，越弯越硬的原因是发生了加工硬化，从而使得铅版的强度、硬度提高。放置一段时间后，由于铅版的熔点较低，在室温下又发生再结晶软化，从而其硬度又下降。

18、简述纯金属晶体长大的机制及其与固/液界面微观结构的关系。

解答：纯金属晶体的固液界面一般为粗糙界面，因此对于纯金属晶体，在长大过程中，往往是按照粗糙界面的垂直长大方式长大，由于界面上有近 50% 的位置时空缺的，液相原子的添加不受位置的限制，因此有利于原子连续的填充，从而使得固液界面沿法线方向迅速长大。

22、依据反应温度由高到低，依次写出 Fe-Fe<sub>3</sub>C 合金系中三相平衡反应的反应式，并分别说明 Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub>、Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>、Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>、Fe<sub>3</sub>C<sub>共析</sub>和 Fe<sub>3</sub>C<sub>共晶</sub>的来源及形貌特征。

解答：
$$L_{0.53} + \delta_{0.09} \xrightarrow{1495^{\circ}\text{C}} \gamma_{0.17}$$

$$L_{4.3} \xrightarrow{1148^{\circ}\text{C}} (\gamma_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C})$$

$$\lambda_{0.77} \xrightarrow{727^{\circ}\text{C}} (\alpha_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C})$$

Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub>：来源于液相，是白色长条状。

Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>：来源于奥氏体脱溶反应，一般沿晶界呈网状分布。

Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>：来源于铁素体脱溶反应，一般沿晶界呈网状分布。

Fe<sub>3</sub>C<sub>共析</sub>：共析产物珠光体中的渗碳体，一般情况下为层片状分布。

Fe<sub>3</sub>C<sub>共晶</sub>：共析产物莱氏体中的渗碳体，一般情况下作为基体存在。

23、试述影响扩散系数的主要因素？

①温度的影响。温度越高，扩散越快。

②晶体结构的影响。结构不同，扩散系数不同。

③固溶体类型对扩散的影响。不同的固溶体，原子的扩散和机制不同。

④固溶体浓度对扩散的影响。浓度越大，扩散越容易。

⑤晶体缺陷的影响。晶界、位错、空位都会对扩散产生影响。

⑥化学成分对扩散的影响。加入化学元素对扩散会产生阻碍。

#### 24、试分析冷变形量对再结晶晶粒尺寸的影响。

解答：当冷变形度小于临界变形度时，再结晶后晶粒基本保持冷变形前的状态，因储存能很少，实际上再结晶并没有进行，因此冷变形储存能足以驱动再结晶的进行，但因整体变形度小且不均匀，只有少数变形度大的地方能够形成晶核并长大，此时因  $G \gg N$ ，仅有少数晶核形成又迅速长大，故再结晶后晶粒达到最大；超过临界变形度后，冷变形量与再结晶晶粒的尺寸成反比，当变形度达到一定的数量时，晶粒尺寸基本不变。

#### 25、根据凝固理论，试述细化晶粒的基本途径与基本原理。

解答：(1)提高过冷度。晶粒大小取决于形核率和核长大速度的相对关系。当过冷度很大时，会出现形核率的增长速度大于核长大的速度，因此提高过冷度使  $N > G$ ，并使两者差距增大，晶粒才会被细化。

(2)变质处理。即在浇注前向金属液中添加变质剂，以促进非均匀形核增加晶核数量来细化晶粒。

(3)振动、搅拌。振动和搅拌能向液体中输入额外能量以提供形核功，促进形核，另一方面能使已结晶的晶体在液流冲击下而碎化，增加核心的数量。

#### 26、简述碳钢的不同回火温度范围及其对应的回火组织类型。

解答：低温回火：150~250℃；组织：回火 M (F+ε-碳化物)；性能：残余应力消除，高硬度+高强度，较低的塑性和韧性。

中温回火：350~500℃；组织：回火 T (F+极细粒状渗碳体)；性能：较高的屈服强度，高弹性极限，较好的塑性和韧性。

高温回火：500~650℃；组织：回火 S (F+细粒状渗碳体)；性能：高的塑性和韧性，较低的屈服强度和硬度。

#### 27、某工厂对以大型零件进行淬火处理，经过 1100℃加热后，用冷拉钢丝绳吊挂，由起重吊车送往淬火水槽，行至途中钢丝突然发生断裂。该钢丝是新的，且没有瑕疵，试分析钢丝绳断裂的原因。

解答：这是因为冷拔钢丝在吊起加热后的零件时，与零件相接的部分温度较高，发生了局部再结晶，导致部分钢丝绳的硬度、强度下降而断裂。

#### 28、简述马氏体高硬度的本质原因。

解答：①马氏体的晶体结构为体心正方，不具备位错易动的密排滑移面，因而位错不易滑移  
②铁素体通常只含 0.03% 的碳原子，而马氏体中的含碳量和材料本身的含碳量相同，因此马氏体中有大量过饱和的碳原子，固溶强化是马氏体硬度高的主要机制之一。

③不论是板条状马氏体的板条还是片状马氏体的条片都很细小，晶界强化机制也起很大作用。

④马氏体转变时，在晶体内部造成晶格缺陷密度很高的亚结构，板条状马氏体的高密度位错网、片状马氏体的微细孪晶都将阻碍位错运动，从而通过相变引起强化。

⑤马氏体形成后，碳及合金元素的原子向位错或其他晶体缺陷处扩散偏聚或析出，钉扎位错，使位错难以运动，通过时效强化提高马氏体的硬度、强度。

#### 六计算

1、一个直径为 1mm 的圆柱形面心立方单晶体，拉伸轴的取向与晶体的[001]方向一致。

(1)试确定其等效滑移系。(2)若屈服时的拉力为 0.5N，求滑移系的分切应力各是多少。

解答：(1)当晶体为 FCC 时，力轴方向为[001]方向，那么 12 个滑移系中[110]晶向与力轴垂直，而其余与力轴夹角相等，4 个滑移系也与之相等。所以等效滑移系为 8 个。即(111)[ $\bar{1}$ 01]、



(111)[011]、 $(\bar{1}11)[101]$ 、 $(\bar{1}11)[011]$ 、 $(1\bar{1}1)[10\bar{1}]$ 、 $(1\bar{1}1)[011]$ 、 $(11\bar{1})[011]$ 、 $(11\bar{1})[101]$

$$(2) \text{ 因为 } \Omega = \cos\lambda \cos\phi = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{6}}{6}$$

$$\text{所以 } \tau = \frac{P}{A} \Omega = \frac{0.5}{\pi \left(\frac{1}{2}\right)^2} \times \frac{\sqrt{6}}{6} \text{ MPa} = 0.26 \text{ MPa}$$

2、铜单晶体拉伸时，若力轴为[001]方向，临界分切应力为 0.64MPa，问多大的拉伸应力能使晶体开始滑移？

解答：因为铜是面心立方所以滑移面是{111}滑移方向是<110>，又因为力轴为[001]，所以排除掉滑移方向为[110]和 $[\bar{1}10]$ 的 4 个，还有八个等效滑移系。

$$\lambda = 45^\circ \quad \cos\lambda = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\cos\phi = \frac{|1 \times 0 + 1 \times 0 + 1 \times 1|}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} \times \sqrt{0^2 + 0^2 + 1^2}} = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

$$\sigma = \frac{0.64}{\cos\lambda \cos\phi} = 1.57 \text{ MPa}$$

3、有一 70MPa 应力作用在 FCC 晶体的[001]方向上，求作用在 $(111)[10\bar{1}]$ 和 $(1\bar{1}1)[110]$ 滑移系上的分切应力，晶体中哪个滑移系先开动？

解答：代入公式计算： $\tau = \sigma \cos\phi \cos\lambda$

$$\text{其中 } \cos\lambda = \frac{|au + bv + cw|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}$$

$$\cos\phi = \frac{|ah + bk + cl|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

（其中，abc 分别为外力的晶向指数值）

对于 $(1\bar{1}1)[110]$ 滑移系，由于  $\cos\lambda = 0$ ，所以该滑移系在应力作用下不滑移。

$$\text{对于 } (111)[10\bar{1}] \text{ 滑移系，代入数值，则 } \tau = 70 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 28.58 \text{ MPa}$$

所以 $(111)[10\bar{1}]$ 滑移系开动，其上的分切应力为 28.58MPa。

## 七论述

1、分析三元共晶投影图的绘制方法，试利用三元共晶投影图，以任意一亚共晶成分的三元

系合金为例分析其结晶过程，并说明每一阶段所得结晶组织含量的计算方法。

解答：(1)以固态下互不固溶三元合金为例，如图：

①首先作出浓度三角形 ABC；

②选取空间图上各个特殊点：E、 $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ ，在成分三角形上作出投影；

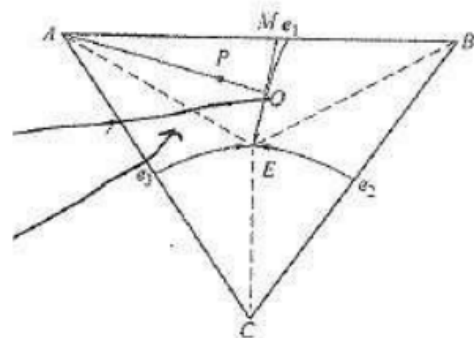
③连接 $e_1E$ 、 $e_2E$ 、 $e_3E$ 三条液相变温线，交点 E 则为三相共晶点；

④由此可确定出各个面的投影，即：液相面为  $Ae_1Ee_3A$ 、

$Be_1Ee_2B$ 、 $Ce_2Ee_3C$ ；二相共晶开始面分别为

$Ae_1Ee_3A-Be_1Ee_2B$ ， $Ae_1Ee_3A-Ce_2Ee_3C$ ，

$Ce_2Ee_3C-Be_1Ee_2B$ ，ABC 为四相平衡平面。



由此作出了一个完整的投影图。

(2)以合金成分 P 为例分析：合金冷却到与液相面  $Ae_1Ee_3A$  相交时，析出初晶 A，此时进入两相区，液相成分沿 AP 延长线变化，随温度下降，液相不断减少，A 不断增加，当液相成分变到 $e_1E$ 线上的 O 点时，开始发生三相共晶  $L \rightarrow A+B$  反应。继续降温，液相成分沿 $e_1E$ 线变到 E 点，发生四相共晶反应  $L_g \rightarrow A+B+C$ ，液相全部耗尽。室温组织最终为：

$A_{\text{初晶}} + (A+B)_{\text{共晶}} + (A+B+C)_{\text{共晶}}$

组织计算：

在两相区时，液体与 A 两相平衡，因此当液体成分达到 O 点时，初晶的量达到最大，可得到  $A\% = OP/OA \times 100\%$ ，其余为剩余液相，也即三相共晶与二相共晶的总量。

继续冷却时，其时液体成分为 O 点，在三相区进行相变，当液体最终消失时，成分点位于三相共晶点 E，那么，二相共晶成分点应在 OE 线的延长线上，同时二相共晶为 (A+B)，因此，该合金成分点又应在 AB 线内，由此，确定出二相共晶点应为 OE 与 AB 的交点 M。

所以  $(A+B)\% = OE/ME \times (1 - OP/OA) \times 100\%$

$(A+B+C)\% = OM/ME \times (1 - OP/OA) \times 100\%$

## 2、试从结合键的角度讨论金属较无机非金属通常表现出较高的塑性或延展性的原因。

解答：金属材料的结合以金属键为主，过渡族金属的结合键为金属键和共价键的混合，无机非金属材料结合的主要方式为离子键和共价键。金属键的特点是电子共有化，自由电子可在整个晶体中运动，因此该键无饱和性和方向性。由于无饱和性和方向性，因而每个原子可能和更多的原子相结合，并趋于形成低能量的密堆结构。当金属受力变形而改变原子之间的相互位置时不至于使金属键破坏，这就使金属具有良好的延展性。

离子键是以离子为结合单元，其中的结合是依靠正负离子静电吸引力，结合力较强，因此很难产生自由运动的电子。而共价键是由两个或多个电负性相差不大的原子通过共用电子对而形成的化学键，各个键之间都有确定的方位，配位数比较小，结合牢固，相邻原子间

的共用电子对不能自由运动，具有方向性和饱和性，因此一般而言塑、韧性差。

### 3、分析加工硬化、细晶强化、固溶强化与第二相强化在本质上有什么异同。

解答：相同点：都是位错运动受阻，增加了位错滑动的阻力，使得材料得到强化。

不同点：①加工硬化：位错塞积、邻位错阻力和形成割阶消耗外力所作的功伟其可能机制；②细晶强化：增加了晶界，增加了位错塞积的范围；③固溶强化：溶质原子沿位错聚焦并钉扎位错；④第二相强化：分散的强化相颗粒迫使位错切过或绕过强化相颗粒而额外做功都是分散相强化的位错机制。

### 4、说明金属在冷变形、回复、再结晶及晶粒长大各阶段晶体缺陷的行为与表现以及材料相应的性能，并说明各阶段促使这些晶体缺陷运动的驱动力是什么。

解答：①冷变形：晶体缺陷包括点缺陷、线缺陷、面缺陷均大量增加，出现加工硬化现象、物化性能相应变活泼；驱动力为外界所加的分切应力。

②回复：线缺陷基本不变，点缺陷明显减少，力学性能不变，相应改变物化性能；驱动力为储存能。

③再结晶：线缺陷明显变少，材料出现软化现象；驱动力为储存能。

④晶粒长大：面缺陷明显变小；驱动力为总界面自由能。

### 5、默化 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图，填写相区，并回答：

- ① 奥氏体、铁素体、渗碳体各为何种结构？
- ② 分别由亚共析钢和过共析钢制成的两个式样，经组织分析确认其珠光体量约为 80%，试确定两种钢含碳量，并回答两种钢中共析渗碳体量是否相等，为什么？
- ③ 分析共晶白口铁的结晶过程，并用杠杆定理计算变态莱氏体中组织组成物的相对含量。
- ④ 说明 CD 线、ECF 线、ES 线、GS 线、PSK 线和 HJB 线的名称和物理意义。
- ⑤ 分析 45 钢比 T8 钢硬度低的原因。
- ⑥ 简述钢与白口铁在化学成分、显微组织和机械性能方面的主要差别。
- ⑦ 注出 P、S、E、C 各点的成分，说明各点的物理意义。
- ⑧ 说明相图中三条水平线上各发生什么转变，写出反应式，并指出什么是珠光体，什么是莱氏体？

解答：相图如图

- ① 奥氏体：碳在  $\gamma$ -Fe 中的间隙固溶体，为面心立方结构。

渗碳体：铁盒碳形成的间隙化合物，属于正交系。

- 铁素体：碳在  $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体，为体心立方结构。

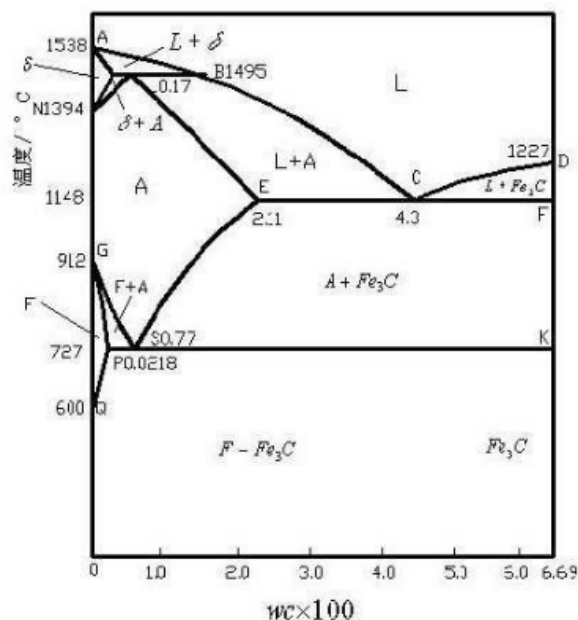
- ② 两种钢中共析渗碳体量相等。因为共析渗碳体只存在于珠光体中，而珠光体量相等，因此两种钢中共析渗碳体量是相等的。

设亚共析钢含碳量为  $x\%$ ，过共析钢含碳量为  $y\%$ ，则

$$\frac{x - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \% = 80\% \quad x = 0.62\%$$

$$\frac{6.69 - y}{6.69 - 0.77} \% = 80\% \quad y = 1.95\%$$

- ③ 结晶过程略。



室温组织为  $P + Fe_3C_{\text{共晶}} + Fe_3C_{II}$ ，其中

$$Fe_3C_{\text{共晶}} \% = \frac{EC}{EF} = \frac{4.3 - 2.11}{6.69 - 2.11} \times 100\% \approx 47.82\%$$

$$Fe_3C_{II} \% = \frac{CFSE}{EFSK} = \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 2.11} \times \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% \approx 11.81\%$$

$$P\% = \frac{CFFE}{EFSK} = \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 2.11} \times \frac{6.69 - 2.11}{6.69 - 0.77} \times 100\% \text{约等于} 40.37\%$$

④ CD—液相线

ECF—共晶转变线

ES—C 在 A 中饱和溶解度曲线

GS—A 中开始析出 F 转变线。

PSK—共析转变线

HJB—包晶转变线

⑤ 因为铁碳合金的硬度仅和其含碳量有关，T8 钢的含碳量比 45 钢高，所以 T8 钢比 45 钢的硬度高。

⑥ 钢的含碳量小于 2.11%，铁的含碳量大于 2.11%；钢的基本组织是珠光体，白口铸铁的基本组织是莱氏体；钢强韧性好，白口铸铁较脆，硬度高。

⑦ P：碳在  $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度。

S：共析点

E：碳在  $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度

C：共晶点

⑧包晶转变线 HJB  $L_{0.53} + \delta_{0.09} \xrightarrow{1495^\circ\text{C}} \gamma_{0.17}$

共晶转变线 ECF  $L_{4.3} \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} (\gamma_{2.11} + Fe_3C_{6.69})$

共析转变线 PSK  $\gamma_{0.77} \xrightarrow{727^\circ\text{C}} (\alpha_{0.0218} + Fe_3C_{6.69})$

铁素体和渗碳体的两相混合物称为珠光体。奥氏体与渗碳体的机械混合物称为莱氏体。

6、图 35-1 为固态下互不相溶解简单三元相图投影图，请完成下列各题。

① 分析 P、M、N 三个合金的结晶过程，写出平衡组织。

② 说明 P 合金的组织相对含量及相的相对含量的算法，并写出其值。

解答：①结晶过程略。

作辅助线：如图，延长 AP，交液相线于 O 点，交 BC 线于 Y 点，延长 EO 与 AB 交于 X 点。

P 点平衡组织为：A+(A+B)+(A+B+C)

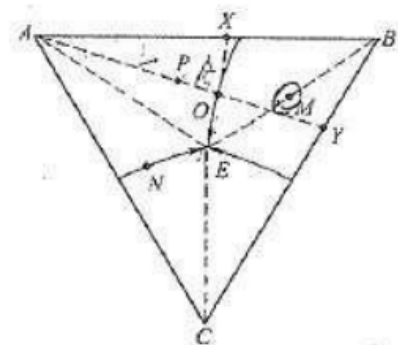
N 点平衡组织为：(A+C)+(A+B+C)

M 点平衡组织为：B+(A+B+C)

② 组织相对含量：A<sub>初晶</sub>% = OP/AO × 100%

$$(A+B)\% = OE/XE \times AP/AO \times 100\%$$

$$(A+B+C)\% = 1 - A_{\text{初晶}}\% - (A+B)\%$$



相的相对含量:  $A\% = PY / AY \times 100\%$

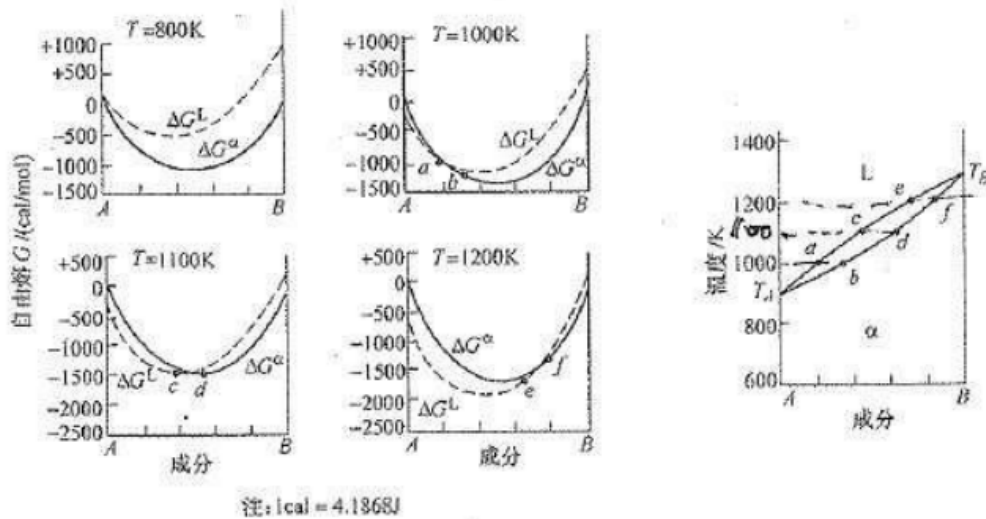
$B\% = (AP / AY) \times (CY / CB) \times 100\%$

$C\% = (AP / AY) \times (BY / CB) \times 100\%$

7、①试以图示说明用自由焓-成分曲线绘制二元匀晶相图的步骤, 并说明其依据。

②绘制一个 BCC 晶胞, 并于其中标示出下列晶向:  $\{001\}$ 、 $[010]$ 、 $[210]$ 、 $[\bar{1}01]$  及任意两个非平行的滑移面及其上的任意两个不同的滑移方向。

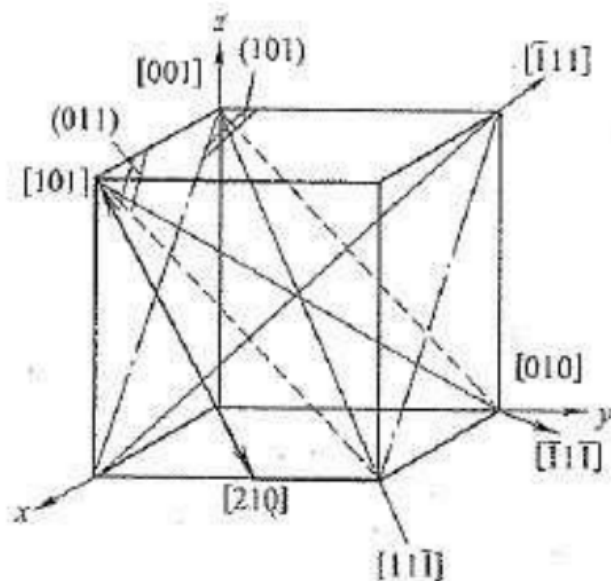
解答: ①如图, 作图步骤如下:



- 1) 建立不同温度下的各相的自由焓-成分曲线。
- 2) 利用公切线法则在每组曲线上找出各相稳定存在的成分区间和二平衡相成分点。
- 3) 将不同温度下所得的二平衡相成分点 a、b、c、d、e、f 标注到温度-成分坐标系中。
- 4) 将意义相同的成分点连接起来, 就形成了一个相图。

其中, ace 为液相成分点构成液相线, 其上方为液相区, bdf 为固相成分点, 构成固相线, 其下方为  $\alpha$  固溶体区, ace 与 bdf 之间为固液共存的二相区。

②见图:



8、图 39-1 为锡青铜的平衡状态图。

- ① 结合此图所示，识别其中有几个包晶转变、几个共晶转变、几个共析转变、集中类型的固溶体？并举例说明各是何种类型的固溶体？
- ② 分析含锡为 20% 的锡青铜的平衡结晶及其在随后的冷却至室温的过程中各经历了哪几种相的转变？其室温下的平衡组织是什么？并绘制其组织示意图、计算组织中的基本组成相的含量各是多少？

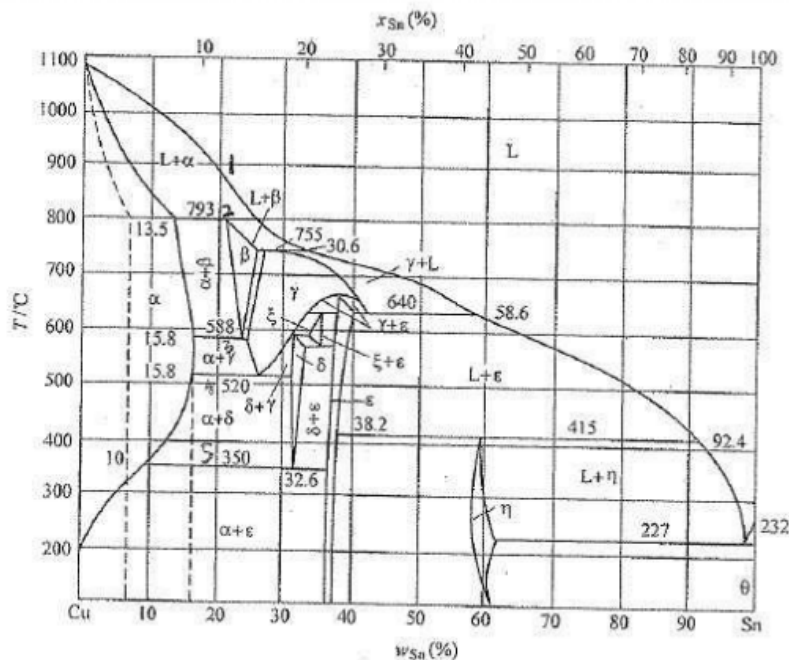
解答：①包晶转变：  $\alpha + L \xrightarrow{793^\circ\text{C}} \beta$ ；  $\beta + L \xrightarrow{755^\circ\text{C}} \gamma$ ；  $\epsilon + L \xrightarrow{415^\circ\text{C}} \eta$

共晶转变：  $L \xrightarrow{227^\circ\text{C}} \theta + \eta$

共析转变：  $\beta \xrightarrow{588^\circ\text{C}} \alpha + \gamma$ ；  $\xi \xrightarrow{582^\circ\text{C}} \delta + \epsilon$

$\gamma \xrightarrow{520^\circ\text{C}} \alpha + \delta$ ；  $\delta \xrightarrow{350^\circ\text{C}} \alpha + \epsilon$

相图中有两大类型的固溶体，其中有以纯金属为基的第一类固溶体。例如： $\alpha$ 、 $\theta$  等，还有以化合物为基的第二类固溶体，例如  $\gamma$  ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ )、 $\delta$  ( $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ) 等。



②，成分为 20% 的锡青铜在平衡结晶过程中先后发生匀晶反应、包晶反应以及不同温度下的共析反应等，具体平衡结晶过程如下所示：

$L \xrightarrow[890 \rightarrow 793]{L \rightarrow \alpha} L + \alpha \xrightarrow[793 \rightarrow 588]{L + \alpha \rightleftharpoons \beta} \alpha + \beta \xrightarrow[793 \rightarrow 588]{\beta \rightarrow \alpha} \alpha + \beta$  ( $\beta$  相减少)

$\xrightarrow[588]{\beta \rightleftharpoons (\alpha + \gamma)} \alpha + \gamma \xrightarrow[588 \rightarrow 520]{\gamma \rightarrow \alpha} \alpha + \gamma$  ( $\alpha$  相增多)  $\xrightarrow[520]{\gamma \rightleftharpoons (\alpha + \delta)} \alpha + \delta$

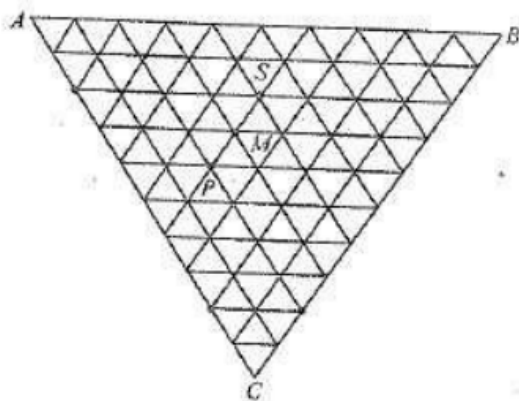
$\xrightarrow[520 \rightarrow 350]{\alpha \rightarrow \delta} \alpha + \delta$  ( $\delta$  相增多)  $\xrightarrow[350]{\delta \rightleftharpoons (\alpha + \epsilon)} \alpha + \epsilon \xrightarrow[T < 350]{\alpha \rightarrow \epsilon} \alpha + \epsilon$

所以，最终组织为 ( $\alpha + \epsilon$ )。其中，相组成物相对含量：

$$\alpha\% = \frac{38.2 - 20}{38.2} \times 100\% = 47.64\% \quad \varepsilon\% = 1 - \alpha\% = 52.36\%$$

9、图中所示成分三角形中，确定用 10kgP 成分合金与 10kgS 成分合金熔化混合后的合金 M 的成分，并再图中标出 M。

解答：M 点位于 P、S 两点连线的中点，如图所示。所以，M 点到 A 的含量为 40%，B 的含量为 30%，C 的含量为 30%



10、二元合金相图如图。

①分析 5.5%Cu 合金和 5.8%Cu 合金在平衡结晶和快速冷却不平衡结晶时的组织特点。

②Al 为 fcc 结构，图中的  $\alpha$  相位何种晶体结构？

③ 设 X 合金平衡凝固完毕时的组织为  $\alpha_{\text{初晶}} + (\alpha + \theta)_{\text{共晶}}$ ，其中  $\alpha_{\text{初晶}}$  占 80%，则此

合金中 Cu 组元的含量是多少？

解答：①5.5%Cu 合金，平衡结晶时为

$\alpha + \theta_{\text{II}}$ ，非平衡时除此外还出现共晶相

$\alpha + \theta$ ；5.8%Cu 合金，平衡结晶为  $\alpha + (\alpha + \theta)$ ，非平衡时出现明显的离异共晶特点： $\alpha + \theta$ 。

②FCC 结构

$$\textcircled{3} k = \frac{5.65}{33.2} = 0.176$$

$$\textcircled{4} \frac{33.2 - x}{33.2 - 5.65} \times 100\% = 80\% \\ x = 11.32\%$$

