

复 习 题

一、钢铁材料

1 合金元素在钢中有哪几种分布状态？

- 1) 溶解于固体中；
- 2) 溶于渗碳体中形成合金渗碳体或单独与碳、氮等作用形成碳、氮化合物；
- 3) 形成金属间化合物；
- 4) 形成氧化物、硫化物等夹杂物；
- 5) 以纯金属相存在，如 Cu、Pb 等。

2 马氏体转变有何特点？

- 1) 无扩散 Fe 和 C 原子都不进行扩散，M 是体心正方的 C 过饱和的 F，固溶强化显著。
- 2) 瞬时性 M 的形成速度很快，温度↓则转变量↑
- 3) 不彻底 M 转变总要残留少量 A，A 中的 C%↑ 则 MS、Mf↓，残余 A 含量↑
- 4) M 形成时体积↑，造成很大内应力。

3 扩大 γ 相区元素的作用是什么？主要有哪几种？缩小 γ 相区元素的作用是什么？主要有哪几种？

扩大 γ 相区元素：它们使 A4 点上升，A3 点下降，奥氏体相稳定存在的温区扩大，促进奥氏体形成。具有这一类影响的元素有 Ni、Mn、Co（无限互溶）及 C、N、Cu（有限互溶）等。

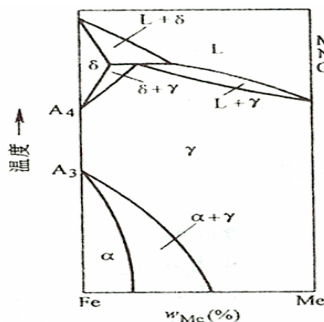


图 2-71 扩大 γ 区并与 γ -Fe 无限互溶的 Fe—Me 状态图

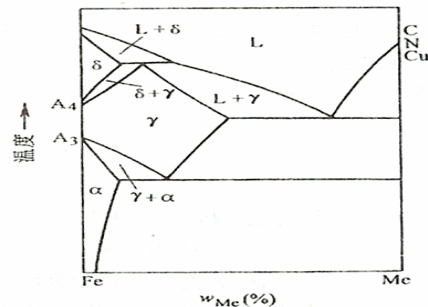


图 2-72 扩大 γ 区并与 γ -Fe 有限互溶的 Fe—Me 状态图

缩小 γ 相区

元素：它们使 A4 点下降；A3 点上升，缩小了 γ 相的存在范围，促进铁素体形成。具有这一类影响的元素有 Cr、V（无限互溶）及 Mo、W、Ti、Si、Al、P、B、Nb（有限互溶）等。

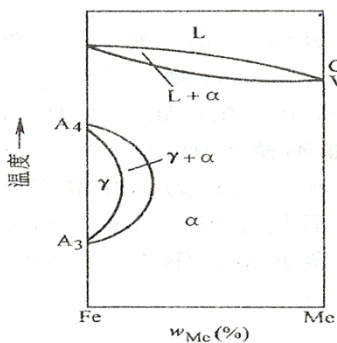


图 2-73 封闭 γ 区并与 α -Fe 无限互溶的 Fe—Me 状态图

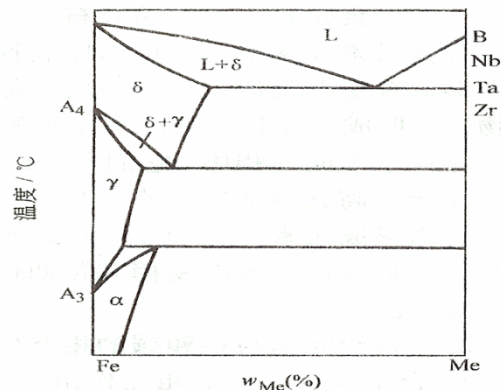


图 2-74 缩小 γ 区的 Fe—Me 状态图

4 合金钢中比较重要的金属间化合物相有哪几种？

钢中合金元素之间和合金元素与铁之间相互作用，可以形成各种金属间化合物。合金钢中比较重要的金属间化合物有 σ 相、AB₂ 相（拉维斯相）及 AB₃ 相（有序相）。

- 1) σ 相：在高铬不锈钢、铬镍及铬锰奥氏体不锈钢、高合金耐热钢及耐热合金中，都会出现 σ 相。
 σ 相具有高硬度，伴随着 σ 相的析出，钢和合金的塑性和韧性显著下降，脆性增加。在二元系中，形成 σ 相的条件是：1) 原子尺寸差别不大，尺寸最大的 W-Co 系 σ 相，其原子半径差为 12%；2) 钢和合金的“平均族数”（或 s+d 层电子浓度）在 5.7~7.6 范围。形成 σ 相与组元之间的尺寸因素和电子因素都有关。在 Fe-Cr 合金中 σ 相的硬度为 1100kg/mm²。 σ 相属于正方晶系，单位晶胞中有 30 个原子，其点阵常数 $a=b \neq c$ ，点阵常数 $a=8.808$ 埃， $c=4.568$ 埃。
- 2) AB₂ 相（拉维斯相）：含钨、钼、铌和钛的复杂成分耐热钢和耐热合金中，均存在 AB₂ 相它是现代耐热钢和合金中的一种强化相。其组元 A 的原子直径 d_A 和第二组元 B 的原子直径 d_B 之比 $d_A:d_B=1.2:1$ 。AB₂ 相是尺寸因素起主导作用的化合物，但它具有哪一种点阵，则受电子浓度的影响。在 AB₂ 相点阵中，尺寸小的 B 原子组成四面体，尺寸大的 A 原子位于四面体中心。AB₂ 相的晶体结构有三种类型：MgCu₂ 型复杂立方点阵、MgZn₂ 型复杂六方点阵和 MgNi₂ 型复杂六方点阵。
- 3) AB₃ 相（有序相）：钢和合金中使用着多种有序结构的相，它们各组元之间尚不能形成稳定的化合物，处于固溶体和化合物之间的过渡状态其中一部分有序相的有序无序转变温度较低，超过了就形成无序固溶体，如 Ni₃Fe、Ni₃Mn 等；另一部分其有序状态可保持到熔点，更接近金属间化合物，如 Ni₃Al、Ni₃Ti、Ni₃Nb。 γ / - Ni₃Al 为 L1₂ 型结构，属面心立方结构，在复杂成分耐热钢和耐热合金中， γ / - Ni₃Al 是重要的强化相。

5 钢的强化方法有哪几种？简述机理。

- 1) 位错强化（加工硬化）：位错→增殖并相互作用→阻碍位错运动→强化。
- 2) 固溶强化：溶质原子→晶格畸变→与位错相互作用→阻碍位错运动→强化。
- 3) 沉淀强化：第二相粒子→阻碍位错运动→强化。
- 4) 细晶粒强化（晶界强化）：晶界→阻碍位错运动→强化。

6 碳素工程结构钢按国家标准分为哪五级？

碳素工程结构钢：国家标准规定，碳素工程结构钢按屈服强度分为五级，即 Q195、Q215、Q235、Q255 和 Q275，其中 Q 表示屈服强度，其后的数字表示屈服强度值，单位为 MPa。

7 什么是钢的低温回火脆性？简述消除措施。

淬火钢回火时的冲击韧度不总是随回火温度的升高单调地增大，有些钢在一定得温度范围内回火时，其冲击韧度显著下降。这种脆化现象叫回火脆性。在 250-400℃ 内出现的回火脆性叫低温回火脆性。在 450-600℃ 内出现的回火脆性叫高温回火脆性。

引起低温回火脆性有两个方面原因：一是 ϵ -Fe_{2.4}C 转变为连续薄片状 Fe₃C，在晶界析出，350℃ 以上 Fe₃C 开始球化，韧性又开始恢复增长；二是杂质元素在晶界的偏聚。两者叠加起来就会产生低温回火脆性。

防止低温回火脆性的措施是：

- 1) 避免在 250~350 °C 温度范围内回火；
- 2) 生产高纯钢，降低磷、锡、锑等杂质元素含量；
- 3) 加入硅推迟脆化温度范围，使钢的回火温度可提高到 320 °C。

8 什么是钢的高温回火脆性？简述消除措施。

合金调质钢的一个特殊问题是高温回火脆性，高温回火后的冷却速度严重影响到钢的韧脆转化温度，冷速越慢，室温冲击韧性越低，脆性越大。

杂质元素磷、锡、锑、砷等在晶界偏聚引起晶界脆化，是产生高温回火脆性的直接因素。

合金元素铬、锰、镍、硅强烈促进高温回火脆性，合金元素 Mo、W、Ti 可减轻回火脆性，碳素结构钢对回火脆性不敏感。稀土元素能和杂质元素形成稳定的化合物，大大降低甚至消除回火脆性，若和钼联合使用效果更佳。

9 高速钢中有哪些组成相？

高速钢可分为三类：钨系高速钢，钼系高速钢和钨钼系高速钢。

- 1) 在普通型钨系和钼系高速钢中，含有高钨、钼和铬、钒等元素，平衡态下存在合金铁素体和合金碳化物。合金碳化物为 M_6C 、 $M_{23}C_6$ 及 MC 三种类型。
- 2) M_6C 是以钨或钼为主含铁的碳化物，其成分为 $Fe_2W_4C \sim Fe_4W_2C$ 或 $Fe_2Mo_4C \sim Fe_4Mo_2C$ ，在 W-Mo 系中为 $Fe_2(W, Mo)_4C \sim Fe_4(W, Mo)_2C$ ，钨钼可以互换，并溶有一定量铬、钒、钴等元素。
- 3) $M_{23}C_6$ 是以铬、钨、钼为主，并溶有铁等元素的 $(Cr, Fe, Mo, W, V)_{23}C_6$ 。
- 4) MC 是以钒为主的 VC，也能溶解少量钨、钼、铬等元素。在热处理过程中，还存在含钼、钨的 M_2C 介稳碳化物，即 W_2C 或 Mo_2C 。

10 简述高速钢中各合金元素的作用。

钨和钼的作用：

钨是高速钢中获得热硬性的主要元素，在钢中形成 M_6C ，是共晶碳化物的主要组成，它还以二次碳化物由奥氏体中析出。溶在奥氏体中约 7~8% 的 W 淬火后保留在马氏体中，提高马氏体抗回火稳定性。在 560 回火时析出 W_2C ，产生弥散强化。

钼和钨属于同族，可互相取代，1%Mo 可取代 1.5%W。含钼共晶碳化物由粗鱼骨状变为细鸟巢状。钼系高速钢 Mo8Cr4V 热硬性逊于钨系，但钼系高速钢的抗弯强度和冲击韧性远高于钨系。钨钼系高速钢 W6Mo5Cr4V2 具有钨系和钼系的优点，又克服两者的缺点，其使用量已超过 W18Cr4V。

钒的作用：

钒在钢中主要是以 VC 存在。淬火加热时，VC 部分溶于奥氏体中，淬火后使马氏体抗回火稳定性增高，阻碍马氏体分解，并析出弥散 VC 产生次生硬化。淬火加热未溶的 VC 起阻止晶粒长大作用。高速钢中加钒是使钢具有良好热硬性的主要因素，含钒量的提高使热硬性有明显提高，如 W18Cr4V 钢中含钒的质量分数从 1.2% 提高到 1.9%，其热硬性由 610°C 提高到 628 °C。

高钒高速钢将钒含量提高 3~5%，属于高热硬性高耐磨高速钢，如 W12Cr4V4Mo，退火后 MC 、 M_6C 、 $M_{23}C_6$ 碳化物的体积分数分别为 10%、12% 和 10%，热处理后硬度在 HRC64~66。

铬的作用：

铬在高速钢中主要存在于 $M_{23}C_6$ ，淬火加热时，铬几乎全溶于奥氏体，主要起增加钢的淬透性作用。铬也增加高速钢耐蚀性和增大抗氧化能力，减少粘刀现象，改善刀具切削能力。

碳的作用：

碳对高速钢的硬度影响很大，是高速钢的主要强化元素。随着碳含量进一步增高，淬火后硬度和热硬性都增高。若碳和碳化物形成元素满足一下关系，可获得最大的次生硬化效应：

$$C=0.033W+0.063Mo+0.20V+0.060Cr \quad (\text{质量百分数})$$

但碳含量提高也有负面作用。碳含量增高，钢中碳化物总量增加，碳化物不均匀性加重；淬火后残留奥氏体量增多，需要多次回火才能消除。另外对钨系高速钢，碳含量增加使钢的抗弯强度和韧性明显下降，而钨钼系这种变化不大。

钴的作用：钴淬火后存在于马氏体，提高马氏体抗回火稳定性，加强次生硬化效果，有较好的热硬性。钴与钨、钼原子间结合力强，可减小钨钼原子扩散速率，减慢合金碳化物析出和聚集长大，增加热硬性。

微合金的作用：

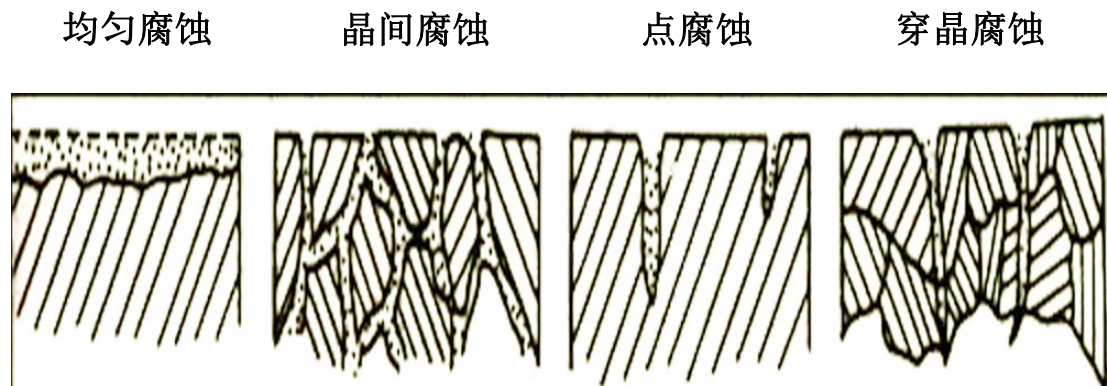
一般在高碳超硬高速钢中可加入 0.05~0.1% 的氮。氮可形成合金碳氮化物，使 M_6C 碳化物稳定性增高，减小聚集倾向。氮可细化奥氏体晶粒，提高晶界开始熔化温度，因而提高了淬火温度和合金元素含量，增加淬火回火硬度和热硬性，同时也提高了抗弯强度和挠度，改善了韧性。

稀土元素加入高速钢，可明显改善其在 900~1150℃ 间的热塑性。当钢中加入稀土元素后，降低了硫在晶界的偏聚。由于有较高的热塑性，可适应刀具的热扭轧工艺。

11 金属电化学腐蚀有哪四种类型？

金属通常腐蚀破坏的方式：

1 均匀腐蚀②晶间腐蚀③点腐蚀④应力腐蚀（穿晶腐蚀）



12 什么是不锈钢，什么是耐蚀钢？

不锈钢耐蚀钢是具有美观的表面和耐腐蚀性能好，不必经过镀色等表面处理，而发挥不锈钢耐蚀钢所固有的表面性能，使用于多方面的钢铁的一种，通常称为不锈钢耐蚀钢。

不锈钢：指在大气及弱腐蚀介质中耐蚀的钢。腐蚀速度小于 0.01mm/a，完全耐蚀；腐蚀速度小于 0.1mm/a，耐蚀；腐蚀速度大于 0.1mm/a，不耐蚀。

耐蚀钢：指在各种强腐蚀介质中耐蚀的钢。腐蚀速度小于 0.1mm/a，完全耐蚀；腐蚀速度小于 1.0mm/a，耐蚀；腐蚀速度大于 1.0mm/a，不耐蚀。

13 如何提高钢的耐蚀性？

提高钢的耐蚀性途径：

提高基体的电极电位，来降低原电池电动势；
使钢具有单相组织，减少微电池的数量；
使钢表面生成稳定的表面保护膜，如钢中加硅、铝、铬等。

14 奥氏体不锈钢晶间腐蚀产生的原因是什么？如何消除？

- (1) 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀主要由钢中的碳所引起。钢中碳含量越高，晶间腐蚀越严重
 - 在 550-800℃ 范围内停留会引起晶间腐蚀，以 650℃ 左右最敏感。
 - 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀主要是晶界上析出连续网状富铬的 Cr_{23}C_6 碳化物引起晶界周围基体产生贫铬区，贫铬区的宽度约为 10-50nm，铬含量 $w(\text{Cr})$ 低于 12%，在许多介质中没有钝化能力，贫铬区成为微阳极而发生腐蚀。若在此敏化温度范围长期加热，通过铬的扩散消除贫铬区，则晶间腐蚀倾向就被消除。
- (2) σ 相在晶界析出也会造成晶间腐蚀：固溶的 Mo 和 Ti 促进 σ 相在晶界析出，在晶界产生贫铬区。
- (3) 钢中氮含量： $N > 0.16\%$ ，沿晶界析出 Cr_2N ，增加晶间腐蚀倾向。
- (4) 在氧化性介质中，奥氏体不锈钢经固溶处理也会发生晶间腐蚀：在热的浓硝酸加重铬酸盐溶液中，经 1050℃ 固溶处理后，杂质元素 P 和 Si 在晶界偏聚。

消除晶间腐蚀的方法

- (1) 在敏化温度范围长期加热，通过铬的扩散消除贫铬区。
- (2) 当 $w(\text{C})$ 小于等于 0.03%，就没有晶间腐蚀发生。所以，最有效解决奥氏体不锈钢晶间腐蚀倾向的方法是生产超低碳不锈钢，使钢中 $w(\text{C})$ 小于等于 0.03%，如 00Cr18Ni10 钢。
- (3) 加入强碳化物形成元素 Ti 和 Nb，形成稳定的 TiC 或 NbC 。
- (4) 钢中有 10-50% 体积的 δ 铁素体，可改善奥氏体不锈钢的晶间腐蚀倾向。

15 应力腐蚀的机理是什么？

不锈钢受张应力时，在某些介质中经过不长时间就会发生破坏。

影响应力腐蚀的因素是介质特点、附加应力和钢的化学成分。

应力也是重要的影响因素。只有张应力才会引发应力腐蚀。在温度恒定时，应力越大，则破坏时间越短。钢的屈服强度越高，抗应力腐蚀破坏的能力越高。钢的应力腐蚀敏感度取决于实际应力和钢的屈服强度之比，比值越高，应力腐蚀敏感度越高。

温度可影响化学反应速度和物质输送速度。在含 Cl^- 的水溶液中，80℃ 以上才会产生应力腐蚀。温度越高，应力腐蚀破断时间越短。

不锈钢的组织 and 成分对应力腐蚀有强烈的影响。铬含量 15~28% 的铁素体不锈钢对 Cl^- 引起的应力腐蚀不敏感，Cr18Ni9 型奥氏体不锈钢对应力腐蚀很敏感。含铁素体的复相不锈钢有低的应力腐蚀敏感度。在不稳定的奥氏体不锈钢中，形变引起的马氏体对应力腐蚀有害。（1 应力腐蚀是应力和电化学腐蚀共同作用的结果，是滑移溶解机制。2 张应力引起位错沿滑移面运动移出表面，形成滑移台阶，破坏了表面钝化膜，裸露的台阶若来不及修补成完整的钝化膜，就会发生阳极溶解，形成蚀坑，并继续发展，形成腐蚀裂缝，最后导致穿晶断裂。3 层错能影响位错滑移方式，从而影响力腐蚀敏感度。层错能高的钢易于交滑移，引起滑移台阶小，钝化膜不易破坏，应力腐蚀敏感度低。4 如 Ni 和 C，增高层错能。）

16 铬当量[Cr]—镍当量[Ni]图

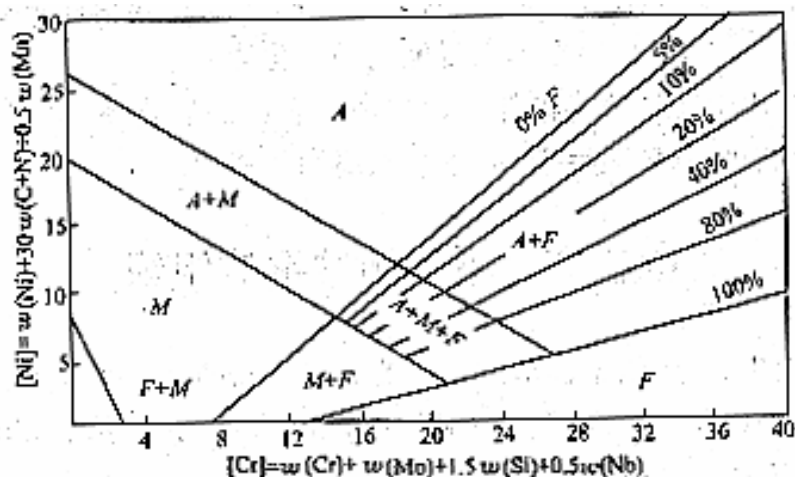


图 5-10 铬当量和镍当量状态图(焊后冷却)

为表明不锈钢的实际成分和所得到组织的关系，人们制成了铬当量[Cr]—镍当量[Ni]图，钢中铁素体形成元素折合成铬的作用，奥氏体形成元素折合成镍的作用，这张图适合于 Cr-Ni 系，其中：

镍当量 $[Ni] = w(Ni) + w(Co) + 0.5w(Mn) + 30w(C) + 25(N) + 0.3(Cu)$

铬当量 $[Cr] = w(Cr) + 1.5w(Mo) + 2.0w(Si) + 1.5w(Ti) + 1.75w(Nb) + 5.5w(Al) + 5w(V) + 0.75w(W)$

可根据钢的实际化学成分，换算成铬当量和镍当量来估算钢的组织。要获得单相奥氏体组织，必须使这两类元素达到某种平衡，否则钢中就会出现一定量的铁素体，成为复相组织。

二、有色金属与合金

1 简述形变铝合金的分类，并针对每一种形变铝合金列举一种具体的合金系及其性能特点

(1) 防锈铝合金 LF

Al-Mn 系、Al-Mg 系

具有很高的塑性、较低或中等的强度、优良的耐蚀性能和良好的焊接性能。

(2) 硬铝合金 LY

Al-Cu-Mg 系和 Al-Cu-Mn 系两类

Al-Cu-Mg 系硬铝的性能：

焊接性和耐蚀性较差，对于板材可包覆一层高纯铝，通常还要进行阳极氧化处理和表面涂装，为提高其耐蚀性一般采用自然时效。部分 Al-Cu-Mg 系硬铝具有较高的耐热性，如 LY11、LY12，可在较高温度使用。

Al-Cu-Mn 系硬铝：为超耐热硬铝合金，具有较好的塑性和工艺性能，在 200℃ 以上具有很高的耐热性。

(3) 超硬铝合金 LC

Al-Zn-Mg-Cu 系合金：强度最高(588~686MPa)，常用 LC4、LC9 等；具有良好的热塑性，但疲劳性能较差，耐热性和耐蚀性也不高；

(4) 锻造铝合金 LD

Al-Cu-Mg-Si 系：热塑性好，可用锻压方法来制造形状较复杂的零件；一般在淬火加人工时效后使用；

Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系：

常用代号有 LD7、LD8、LD9 等，此类合金耐热性较好，主要用于 250℃ 温度下工作的零件，如叶片、超音速飞机蒙皮等。

2 简述 TC4 合金中合金元素的作用、合金的组织及性能特点

Ti6Al4V 合金— $\alpha+\beta$ 型：

Al：Al 是唯一 α 稳定元素，同时是最主要的强化元素，固溶强化作用显著。随 Al 量的增加，合金的强度提高，而塑性无明显降低，当 Al 的质量分数超过 7% 后，由于组织中出现脆性的 Ti_3Al 化合物，使塑性显著降低，故其质量分数不超过 7%。

V：钒与 β 钛属于同晶元素，具有 β 稳定化作用。钒在 β 钛中无限固溶，而在 α -Ti 中也有一定的固溶度。钒具有显著的固溶强化作用，提高合金强度同时，能保持良好的塑性，还能提高钛合金的热稳定性。

$\alpha+\beta$ 钛合金特点：1) 综合力学性能好 2) 强度高
3) 焊接性能好 4) 塑性高 5) 中等温度组织不稳定

3 Mg 合金主要包括哪些合金系？稀土在合金中的主要作用是什么？

Mg-Al/Mg-Zn/Mg-RE 合金系。（镁合金：纯镁中加入 Al、Zn、Mn、Zr 及稀土等元素，制成镁合金。主要有 Mg-Mn 系、Mg-Al-Zn 系、Mg-Zn-Zr 系和 Mg-RE-Zr 系等合金系。它们分为变形镁合金和铸造镁合金两大类。）

稀土元素的作用：

- 1) 改善铸造性能，在室温和高温下有固溶强化和沉淀强化作用，改善高温抗拉和蠕变性能，改善耐蚀性能；
- 2) 稀土元素可细化晶粒，提高合金耐热性，减少热裂倾向，改善焊接性能。

4 按照合金成分，Cu 合金哪三类？ZCuZn38 中的符号与数字代表什么意思？

铜合金分为黄铜、白铜和青铜三大类。黄铜是 Cu—Zn 合金；白铜是 Cu—Ni 合金；早期的青铜是铜与锡的合金。现代把除锌和镍以外的其它元素为主要合金元素的铜合金统称为青铜。

牌号表示：Z（铸造黄铜）+ 铜元素化学符号 + 主加元素的化学符号及平均质量分数（ $\% \times 100$ ）+ 其它元素的化学符号及平均质量分数（ $\% \times 100$ ），如 ZCuZn38 表示 $\%Zn38\%$ 、余量为铜的铸造普通黄铜。

5 铍青铜的强化方式主要哪两种？

铍在铜中的溶解度随温度降低而急剧减小，该合金是典型的时效强化型合金，通过热处理可提高强度、硬度和弹性；铍青铜是铜合金中性能最好的一种，唯一可固溶强化的铜合金（具有很高的强度、弹性、耐磨性、耐蚀性及耐低温性，良好的导电、导热性，无磁性、受冲击时不产生火花，还具有良好的冷、热加工和铸造性能；常用代号 QBe2、QBe1.9 等；）

6 钛合金主要分为哪几类？并简述主要合金化原理。

钛合金按退火状态下的相组成，分为 α 型钛合金、 β 型钛合金和 $\alpha + \beta$ 型钛合金三大类，以 TA、TB 和 TC 后加顺序号表示其牌号。

α 型钛合金：主要加入元素是 Al，其次是中性元素 Sn 和 Zr，起固溶强化作用。在退火状态下的室温组织是单相 α 固溶体。 α 型钛合金的牌号与工业纯钛相同，均划入 TA 系列。 α 型钛合金不能进行热处理强化，热处理对于它们只是为了消除应力或消除加工硬化。

$\alpha + \beta$ 型钛合金：退火组织为 $\alpha + \beta$ ，以 TC 加顺序号表示其合金的牌号。合金同时含有 β 相稳定元素和 α 相稳定元素。组织以 α 相为主， β 相的数量通常不超过 30%。合金可通过淬火及时效进行强化，多在退火状态下使用。 $\alpha + \beta$ 型钛合金的室温强度和塑性高于 α 型钛合金，生产工艺比较简单，通过改变成分和选择热处理制度又能在很宽的范围内改变合金的性能，应用比较广泛，尤以 TC4 用途最广、用量最多。

β 型钛合金以 TB 加顺序号表示其合金的牌号。合金加入了大量的多组元 β 相稳定元素，同时还加入 α 相稳定元素 Al。应用的 β 型钛合金主要为亚稳定的 β 钛合金，退火状态为 $\alpha + \beta$ 两相组织，将其加热到 β 单相区后淬火，因 α 相来不及析出而得到过饱和的 β 相，称为亚稳 β 相。

①该类合金塑性好，易于冷加工成形，成形后可通过时效处理，使强度提高；

②该类合金的淬透性高；

③化学成分偏析严重，这种类型的合金只有两个牌号，实际获得应用的仅有 TB2 一种。

三、高温合金及金属间化合物材料

1 什么是高温合金，有何特点。

高温合金：是指以铁、镍、钴为基，能在 600℃ 以上温度，一定应力条件下适应不同环境短时或长时使用的金属材料。通常，先进的高温合金的合金化程度很高，采用先进的制备工艺，英美称之为超合金（Superalloy）

1) 优良的高温性能

600℃ 以上的比强度高于 Al 合金、Ti 合金和结构钢等；从室温到高温：良好的塑性。

2) 承温能力强：使用温度：熔点的 0.5-0.9 范围内长期可靠工作。

3) 综合性能优越

优良的高温强度、良好的塑性；良好的抗高、低周疲劳；抗冷热疲劳，抗高温氧化、腐蚀。

4) 可采用多种强韧化途径改善合金性能

合金化（固溶强化、第二相强化、晶界强化；工艺强化（P/M，DS，SX）。

5) 高温下强度高，变形加工困难

2 高温合金中的主要组成相有哪些？

1) γ -Ni 基固溶体(FCC)；

2) γ' -Ni₃Al(FCC)实际合金中为(Ni,Co,Fe)₃(Al,Ti,Nb,Ta)；

3) 碳化物:MC,M₆C,M₂₃C₆,Cr₇C₃；

4) 硼化物:M₃B₂；

5) γ'' -Ni₃Nb (BCT) 在高 Nb 合金如 718 中存在；

6) σ 相 (BCT): (Cr,Mo)_x(Ni,Co)_y (x,y=1~7)针状相，对中、高温性能有害 ($N_v > 2.5$,中温长期时效)；

7) μ -A₇B₆ 相 (三角晶系): 高 W,Mo 合金中出现；

8) 不常见的相:Laves 相,R 相, δ 相。

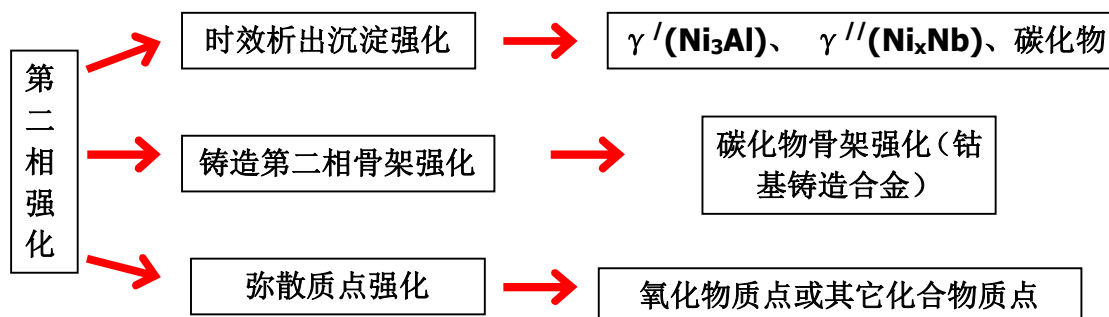
3 高温合金的主要强化方式有哪几种，简述机理。

固溶强化:

将一些合金元素加入到镍、铁或基高温合金中，使之形成合金化的单相奥氏体而得到强化。由于固溶元素可以提高原子间结合力，产生点阵畸变，降低堆垛层错能，产生短程有序及其它原子偏聚，阻止位错运动，降低固溶体中元素扩散系数，提高再结晶温度使合金得到强化。

第二相强化

高温合金主要依赖于第二相强化。



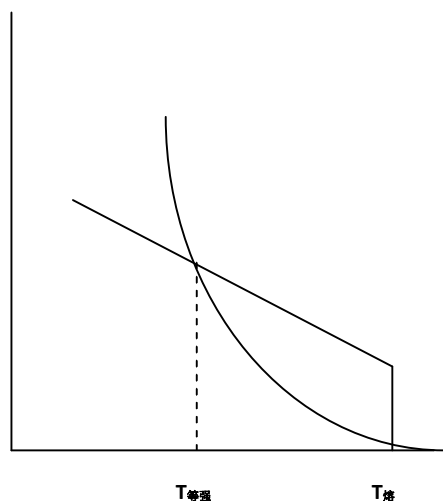
沉淀强化机理

- 1) γ/γ' 共格应变 (晶格常数差别)
- 2) γ/γ' 弹性模量差别
- 3) γ' 相的有序化
- 4) γ/γ' 堆垛层错能差
- 5) γ/γ' 之间产生的附加界面能
- 6) γ' 相的 R 现象

晶界强化:

低温下，晶界是位错运动的阻碍，起强化作用，细化晶粒是一种重要的强化手段。当温度升高时，晶界对位错运动的阻碍作用易被恢复，晶界区的塞积位错容易与晶界的缺陷产生交互作用而消失，并产生晶界滑动与迁移。这样高温下晶界就成为薄弱环节。

如右图所示，随温度升高，在一定温度时，晶界和晶内强度相等，这一温度就是“等强温度”，一般是一个温度区间。



(纯净化:

- 有些晶界偏聚的元素是低熔点的，并与基体生成低熔点的化合物或共晶体。它们使合金的热加工性及高温力学性能显著降低。

微合金化:

- ◆ 晶界强化元素 B、Zr、Mg、Hf 等
提高高温蠕变寿命和塑性

晶界控制:

- ◆ 大晶粒一般具有较高的持久强度与蠕变强度，较小的蠕变速率，小晶粒材料却表现出较高的抗拉强度与疲劳强度。消除横向（与应力垂直的方向）晶界能非常有效地提高高温强度。）

形变热处理强化: 通过形变与热处理的结合，优化合金的组织结构，提高合金的强度。

复相组织强化: 复相组织是指尺度相差不多的两个相的混和组织，定向共晶组织和纤维强化高温合金的组织属于这一类组织。一般一个是基体相（软的固溶体相），另一个是起增强作用的硬相。

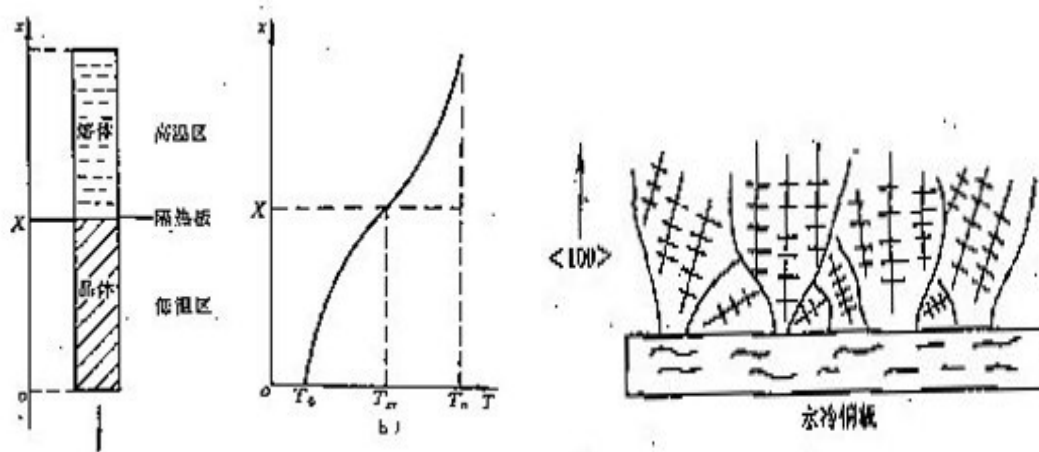
定向凝固与单晶

快速凝固

4 通过定向凝固得到完整连续的柱晶组织必须满足哪两个基本条件？请用简图描述。

通过定向凝固得到完整连续的柱晶组织,必须满足以下两个基本条件:

- 1) 固-液界面上的热流应保持单一方向流出,使固-液界面沿一个方向推进;
- 2) 结晶前沿区域必须维持正向温度梯度,以阻止其它新晶核的形成。



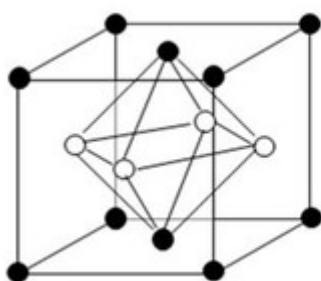
5 什么是金属间化合物？简述结构特点。

金属间化合物是由两种或两种以上金属元素或金属与类金属元素按照一定的原子比组成的化合物。由于其晶体的有序结构以及金属键与共价键共存，因而具有一系列独特的优异性能，如密度低、比刚度高；熔点高、高温强度好以及抗氧化性能优良等。

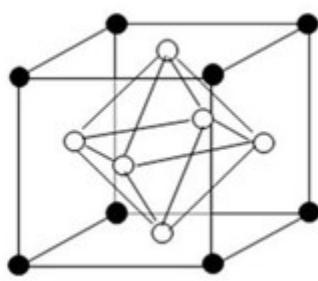
结构特点：1) 有序结构 2) 共价键与金属键共存
3) 空位与反位原子共存 4) 间隙与置换原子共存

结构特点导致物理化学和力学性能，成形、服役性能及热防护等特点与固溶体合金具有明显不同

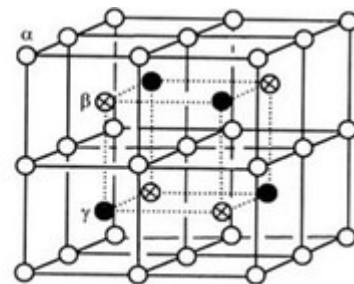
6 画出 fcc 衍生结构 $L1_0$ (TiAl)、 $L1_2$ (Ni_3Al) 和 bcc 衍生结构 DO_3 (Fe_3Al)、 $L2_1$ (Ni_2TiAl) 的结构示意图。



$L1_0$
TiAl



$L1_2$
 Ni_3Al



$DO_3/L2_1$
 Fe_3Al/Ni_2TiAl

7 什么是金属间化合物的本征脆性和环境脆性？

1) 本征脆性：

一种固有脆性。金属间化合物具有特殊的晶体结构、电子结构和能带结构，所以具有优异性能的同时，也具有固有脆性的特性。本征脆性一是由于金属间化合物晶体中的共价键所致，二是由于其晶体结构复杂、对称性低、滑移系少、位错运动困难。

2) 环境脆性：

由环境介质造成的金属间化合物的脆性。原因是大气中的氧在 600℃-850℃ 易被吸附在试样表面，在应力作用下氧原子渗入晶界，导致晶界结合力降低，塑性下降。又如 FeAl 等在蒸气环境中进行拉伸实验，塑性趋于零，原因是水汽与铝作用而放出溶解氢进入合金造成氢脆。

8 部分金属间化合物的脆性问题已基本得到解决，请举两个例子说明。

1) 我国学者在 60 年代已证明单晶体 Ni₃Al 具有较高的塑性，但多晶体 Ni₃Al 呈脆性为了解决多晶体 Ni₃Al 的常温脆性，日本东北大学的和泉修等在 70 年代末通过加 0.02-0.03wt% B，可使室温拉伸延伸率由 0 提高至 40-50%。

2) 解决 Ti₃Al 的脆性主要是通过加入 β 相稳定元素 Nb、V、Mo，其中 Nb 的作用最为显著。通过 Nb 合金化形成 $\alpha_2+\beta$ 两相组织，提高了材料的塑性，此外 Nb 还降低马氏体转变温度 Ms，使 α_2 组织变细，减少滑移长度。

3) Fe₃Al 的室温脆性普遍认为是大气中水汽引起的环境脆性，通过 Cr、Ce 等元素的合金化对改善室温塑性有较大的作用，加入 5%~10%Cr 可使 Fe₃Al 合金的室温拉伸塑性提高至 5%。

(美国橡树岭国家实验室 C. T. Liu 发现了在六方结构的 Co₃V 中，用 Ni 和 Fe 取代部分 Co，可使其转变成面心立方 L1₂ 结构，使原来脆性的材料转变成具有良好塑性的材料。先后突破了 Ti₃Al、Fe₃Al、TiAl 等金属间化合物的脆性问题，使这些材料向工程实用跨出了关键性的一步。)

回火脆性的概念：

有些钢在某些温度范围内回火时，其冲击韧性比在较低温度回火时反而显著降低，这种脆化现象称为回火脆性。回火脆性可分为低温回火脆性和高温回火脆性。

1. 低温回火脆性

概念：碳钢和低合金钢在 250~400℃ 回火时出现的脆性称为低温回火脆性，或第一类回火脆性。

几乎所用淬火后形成马氏体组织的碳钢及合金钢，在 300℃ 左右温度回火时都会或多或少地发生这种脆性。

特点：在此温度范围内回火，无论采用何种回火方法或回火后采用何种冷却速度，都不可避免地使韧性降低。如果将这种已经产生脆性的工件在更高一些温度回火后，其脆性将消失。在置于 300℃ 左右温度重新回火时，脆性不再重复出现。

低温回火脆性产生的原因

回火脆性的机理目前不十分清楚。以往大多认为，低温回火脆性是韧性较高的残余奥氏体转变为脆性较大的马氏体造成的。

另一种观点认为，在低碳和中碳钢内，由于原奥氏体晶界在高温加热时溶有氮、碳和氧，低温回火时这些元素以化合物的形式析出，使脆性增大。

目前大多认为，低温回火脆性可能与马氏体分解初期析出的渗碳体具有特殊的形态有关。

影响低温回火脆性的因素及消除方法

钢的碳含量越高，脆化的程度越严重。

合金元素一般都不能抑制第一类回火脆性，但可改变脆性产生的温度范围。

目前无有效方法消除低温回火脆性。

- (1) 尽量避免在这一温度范围内回火是最好方法；
- (2) 用快速加热回火的方法可以减小脆性；
- (3) 用等温淬火的方法代替淬火；
- (4) Ti、Al、B 等元素对低温回火脆性有一定的抑制作用。

2. 高温回火脆性（第二类回火脆性）

概念：钢在 450~550℃或更高温度（650℃左右）回火时出现的脆性，称为高温回火脆性或第二类回火脆性。

特点：在上述温度范围内回火，如果快速冷却（水冷或油冷），韧性并不降低；反之，慢冷（空冷或炉冷）则韧性显著下降，冷却越慢，韧性降低的越显著。一般都是沿晶断裂。

高温回火脆性产生的原因

迄今无一致看法。

- (1) α 相中的氮、碳和氧，低温回火时这些元素以化合物的形式沿晶界析出，使脆性增大。
- (2) 碳化物从 α 相中析出导致体积变化，从而在原来的奥氏体晶界产生应力集中引起。
- (3) 晶界富集和偏析理论。合金元素或微量的杂质元素（P、Sb、Sn、As）偏聚到原来的奥氏体晶界上，减弱了原奥氏体晶界上原子间的结合力，使钢变脆。

防止和消除高温回火脆性的方法

- (1) 两次淬火法，第一次在正常的 Ac_3 点以上温度淬火，第二次是在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间不完全淬火；
- (2) 变形热处理，高温锻、轧后立即进行热处理；
- (3) 细化奥氏体晶粒；
- (4) 快速加热回火；
- (5) 缩短产生回火脆性温度下的保温时间。

最常用的方法：回火后快冷或向钢中加入 0.3~0.5%的钼。