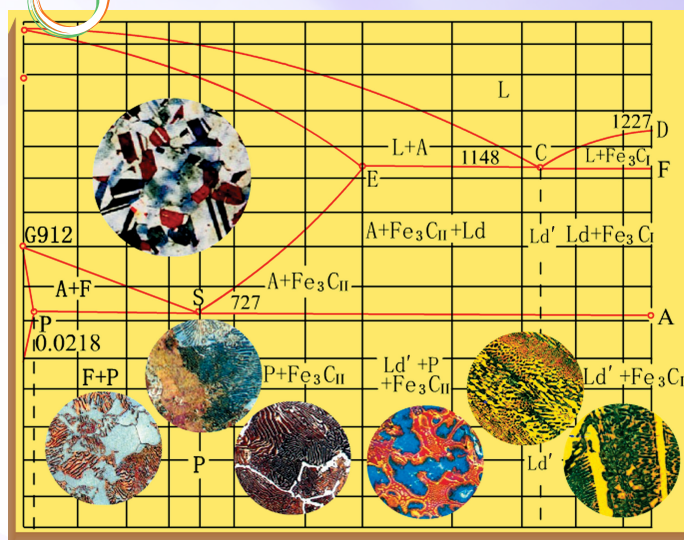


第三章

铁碳合金

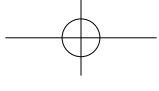


学习要求

- 了解合金组织的基本知识；
- 掌握铁碳合金基本组织的结构、性能特点；
- 明确 Fe-Fe₃C 相图特征点、线的意义，掌握各区域组织和应用，掌握含碳量对钢组织和性能的影响；
- 明确钢的实际加热临界温度。

学习重点

- 铁碳合金基本组织的性能特点；
- Fe-Fe₃C 相图特征点、线，各区域组织和应用，含碳量对钢组织和性能的影响。



第一节 合金的组织

通过第一章的学习和讨论,我们已经知道人类使用的金属材料绝大多数是合金。合金是一种金属跟其他金属(或非金属)熔合制成的具有金属特性的物质。

组成合金最基本的独立的物质称为组元。组元可以是金属元素、非金属元素,也可以是稳定的化合物。根据合金中组元的多少,合金可分为二元合金、三元合金和多元合金。

合金中成分、结构及性能相同的均匀组成部分称为相。相与相之间具有明显的界面。合金的性能是由组成合金的各相本身的结构、性能和各相的组合情况决定的。

根据晶体结构,合金组织可分为三种基本类型:固溶体、金属化合物和机械混合物。



固溶体

合金的组元相互溶解形成的均匀固相称为固溶体。固溶体中一般含量多者为溶剂,含量少者是溶质。固溶体的结构特点是它仍然保持溶剂组元的晶体结构,溶质原子则分布在溶剂晶格之中。例如,单相黄铜就是锌(Zn)溶解在铜(Cu)中的固溶体。其中,铜是溶剂,锌是溶质,黄铜保持了铜的面心立方晶格,如图3-1所示。根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置,可将固溶体分为置换固溶体(如图3-2(a)所示)和间隙固溶体(如图3-2(b)所示)两类。

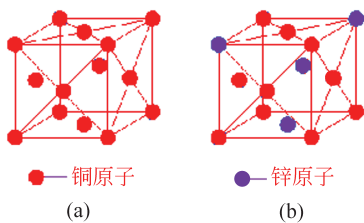


图 3-1 纯铜与黄铜的晶体结构示意图

(a) 纯铜; (b) 黄铜

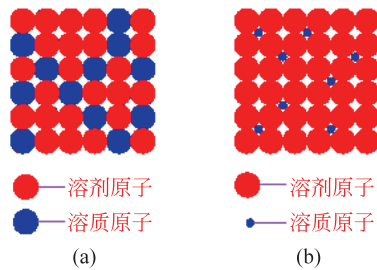


图 3-2 固溶体结构示意图

(a) 置换固溶体; (b) 间隙固溶体

无论是置换固溶体还是间隙固溶体,由于溶质原子与溶剂原子直径大小不同,因此溶质原子的溶入都会使溶剂晶格发生畸变(如图3-3所示),从而使合金的塑性变形抗力增加。这种通过溶入溶质元素形成固溶体,使金属材料强度、硬度提高的现象称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

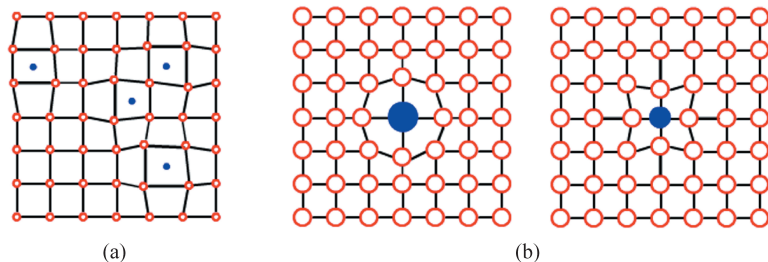
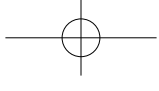


图 3-3 形成固溶体时的晶格畸变

(a) 间隙固溶体; (b) 置换固溶体



交流与讨论

如表3-1所示, 请比较加工硬化与固溶强化的异同。

表 3-1 加工硬化与固溶强化的不同点与相同点

	加工硬化	固溶强化
不同点		
相同点		



金属化合物

合金的组元相互发生化学作用形成一种具有金属特性的物质称为金属化合物。金属化合物的组成一般可用化学分子式表示。如碳钢中的渗碳体 (Fe_3C)、合金钢中的 Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6 等。

金属化合物的晶格类型不同于任一组元, 一般具有复杂的晶体结构。其性能特点是熔点较高, 硬度高, 脆性大。当合金组织中出现金属化合物时, 通常能提高合金的硬度和耐磨性, 但塑性和韧性会降低。金属化合物是许多合金的重要组成相。



机械混合物

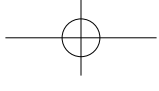
合金的组元相互混合形成多相组织称为机械混合物。它可以是两种或多种纯金属、固溶体、金属化合物各自组成的机械混合物, 也可以是它们之间组成的机械混合物。机械混合物中的各个组成相仍然保持了各自的晶体结构, 其性能介于组成相的性能之间。

工业上生产的大多数合金是机械混合物, 如焊锡、钢、生铁等。

拓展视野

劳斯莱斯汽车

劳斯莱斯汽车公司是1904年由英国亨利·罗易斯 (F.Henry Royce) 和贵族罗尔斯 (C.Rolls) 合作创建的。象征三个等级的银灵、银羽和银影劳斯莱斯尊贵、典雅、完美, 是专门为各国元首、皇室和贵族精心打造的顶级轿车, 工艺千锤百炼, 品质完美无瑕。劳斯莱斯年产量一般只有1000~2000辆。著名的飞女标志象征着喜悦的灵魂, 每部劳斯莱斯的发动机完全是由技术高超的八级钳工手工制造。车头散热器的格栅是由熟练工人不用任何丈量工具, 完全用手和眼来完成的。所有车身油漆都经过15次喷漆处理, 光可鉴人。每部劳斯莱斯的车门镶边、仪表盘、视听音响柜等都选用坚硬的胡桃木制作, 无论颜色及纹路都完全一致, 拼缝接口处几乎看不出接缝的痕迹, 再经工匠用最原始的方法封蜡打磨8次, 令表面光滑如镜, 天衣无缝。车内座椅全部用整张真皮手工缝制, 脚下的地毯选用优质耐用的著名英国品牌威尔顿 (Wilton) 纯羊毛手工织造, 熨贴得如时装般无可挑剔, 堪称完美的艺术杰作。劳斯莱斯品质的严谨程度堪称世界汽车生产商之冠。



劳斯莱斯汽车如图3-4所示。



图 3-4 劳斯莱斯汽车

练习与实践

一、填空题

1. 合金组织的基本类型有_____、_____和_____。
2. 根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置不同，可将固溶体分为_____和_____。
3. 固溶强化是指通过溶入溶质元素形成固溶体，使金属材料_____、_____提高的现象。

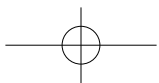
二、选择题

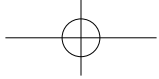
1. 组成合金最基本的、能独立存在的物质称为（ ）。
A. 组元 B. 相 C. 组织
2. 两组元组成固溶体，则固溶体的结构（ ）。
A. 与溶质相同 B. 与溶质、溶剂都不相同
C. 与溶剂相同 D. 是两组元各自结构的混合
3. 合金固溶强化的主要原因是（ ）。
A. 晶格类型发生了变化 B. 晶粒细化 C. 晶格畸变

三、简述与实践题

通过合金组织的学习，你认为合金组织的性能特点是怎样的？

合金组织	性能特点
固溶体	
金属化合物	
机械混合物	





第二节 铁碳合金的基本组织

钢和生铁都是铁碳合金。根据含碳量的不同,碳可以溶解在铁中形成固溶体,也可以反应形成金属化合物,或由固溶体与金属化合物组成机械混合物。因此,在铁碳合金中出现以下几种基本组织。

铁素体

铁素体是碳溶解在 α -Fe 中的间隙固溶体,用符号 F 表示。它仍保持 α -Fe 的体心立方晶格,如图 3-5 所示。由于体心立方晶格的 α -Fe 晶格间隙较小,所以铁素体溶碳能力很小,常温下仅能溶解 0.0008% 的碳,在 727°C 时最大的溶碳能力为 0.02%。由于铁素体含碳量很低,其性能与纯铁相似,塑性、韧性很好 (δ : 30% ~ 50%, A_k : 128 ~ 160J),强度、硬度低 (σ_b : 180 ~ 280MPa, HBS: 50 ~ 80)。铁素体有磁性。图 3-6 为铁素体的显微组织。

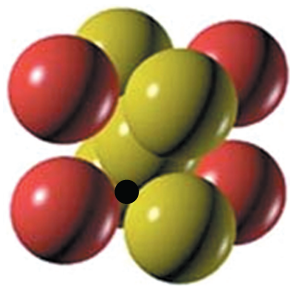


图 3-5 铁素体的晶格示意图



图 3-6 铁素体的显微组织

交流与讨论

表3-2为纯铁的力学性能指标,通过学习比较可以发现铁素体的力学性能与纯铁基本相同,请问你是如何看待这一问题的?

表 3-2 纯铁的力学性能指标

力学性能	抗拉强度 / σ_b	硬度 /HBS	伸长率 / δ	断面收缩率 / ψ	韧性 / A_k
力学性能 指标值	176 ~ 276 MPa	50 ~ 80	40% ~ 50%	70% ~ 80%	128 ~ 160J

奥氏体

奥氏体是碳溶解在 γ -Fe 中的间隙固溶体,用符号 A 表示。它仍保持 γ -Fe 的面心立方晶格,如图 3-7 所示。由于面心立方晶格的 γ -Fe 间隙较大,故奥氏体的溶碳能力较大,在 727°C 时溶碳为 0.77%, 1148°C 时可溶碳 2.11%。奥氏体是在大于 727°C 的高温下才能稳定存在的组织。奥氏体塑性、韧性好(伸

长率 δ : 45% ~ 60%), 强度、硬度不高 (σ_b : 400MPa, HBS: 160 ~ 200), 是绝大多数钢种在高温下进行压力加工时所要求的组织。奥氏体是没有磁性的。图 3-8 为奥氏体的显微组织。

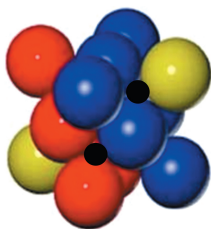


图 3-7 奥氏体的晶格示意图



图 3-8 奥氏体的显微组织

渗碳体

渗碳体是铁与碳反应形成的金属化合物,其化学式为 Fe_3C 。渗碳体的含碳量为 6.69%,熔点为 1227°C 。其晶格复杂,硬度很高(相当于 800HBS),塑性、韧性几乎为零,脆性很大。因此,渗碳体不能单独使用,一般在铁碳合金中与铁素体等组成机械混合物。

在铁碳合金中的渗碳体有片状、球状(粒状)、网状等不同形态,其数量、形态与分布对铁碳合金的性能有很大的影响。渗碳体在适当的条件下,能分解为铁和石墨。



珠光体

珠光体是铁素体与渗碳体组成的机械混合物。用符号 P 表示。其形态为铁素体薄层和渗碳体薄层交替重叠的层状复相物,也称片状珠光体,显微组织如图 3-9 所示。珠光体的含碳量为 0.77%。其力学性能介于铁素体与渗碳体之间,强度较高,硬度适中 (σ_b : 800MPa, HBS: 160 ~ 280),有一定的塑性(伸长率 δ : 20% ~ 25%)。



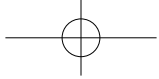
图 3-9 珠光体的显微组织

莱氏体



图 3-10 莱氏体的显微组织

莱氏体含碳量为 4.3%。当温度高于 727°C 时,莱氏体由奥氏体和渗碳体组成,用符号 Ld 表示,称为高温莱氏体。在低于 727°C 时,莱氏体是由珠光体和渗碳体组成,用符号 L'd 表示,称为低温莱氏体,显微组织如图 3-10 所示。因莱氏体的基体是硬而脆的渗碳体,所以硬度高(相当于 700HBS),塑性很差。



交流与讨论

在铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体中：
属于合金基本相的是_____，
属于机械混合物的是_____，
只能存在727℃以上的组织是_____。



练习与实践

一、填空题

1. 填空。

铁碳合金的组织名称	铁素体	奥氏体	珠光体	莱氏体	渗碳体
铁碳合金的组织符号					

2. _____称为铁素体，其符号为_____，晶格类型是_____，性能特点是强度、硬度_____，塑性、韧性_____。

3. _____称为奥氏体，其符号为_____，晶格类型是_____，性能特点是强度、硬度_____，塑性、韧性_____。

4. 渗碳体是_____和_____的化合物，其符号为_____，性能特点是硬度_____，脆性大，塑性、韧性_____。

二、选择题

- 铁碳合金组织有三种基本的相，它们是（ ）。
A. 铁素体、奥氏体、渗碳体
B. 铁素体、珠光体、渗碳体
C. 珠光体、奥氏体、渗碳体
D. 铁素体、奥氏体、莱氏体
- 铁素体的晶格类型是（ ）。
A. 体心立方晶格 B. 面心立方晶格 C. 密排六方晶格 D. 复杂
- 由铁素体与渗碳体组成的机械混合物称为（ ）。
A. 铁素体 B. 奥氏体 C. 珠光体 D. 莱氏体 E. 渗碳体
- 珠光体是一种（ ）。
A. 单相固溶体 B. 两相混合物 C. 铁碳化合物
- 塑性好，强度、硬度不高，只能存在于 727℃ 以上的铁碳合金组织是（ ）。
A. 铁素体 B. 奥氏体 C. 珠光体 D. 莱氏体 E. 渗碳体
- 铁素体的力学性能特点是（ ）。
A. 塑性好，强度高，硬度低
B. 塑性差，强度低，硬度低
C. 塑性好，强度低，硬度低
D. 塑性好，强度高，硬度高
- 渗碳体的力学性能特点是（ ）。
A. 硬而韧 B. 硬而脆 C. 软而韧 D. 软而脆

第三节 铁碳合金相图

铁碳合金相图是表示在极缓慢加热（或冷却）的情况下，不同成分的铁碳合金的状态或组织随温度变化的图形。铁碳合金中，铁和碳可以形成一系列的化合物，如 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 等，如图 3-11 所示。

由于含碳量大于 6.69% 的铁碳合金脆性很大，没有实用价值，因此，目前应用的铁碳合金相图仅研究含碳量从 0 ~ 6.69%，也就是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。图 3-12 为简化后的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。图中纵坐标为温度，横坐标为含碳量的质量百分数，从左向右表明含碳量从 0 增加到 6.69%。

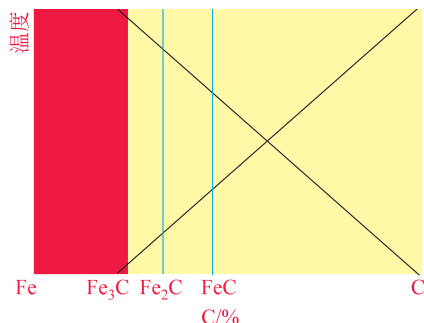


图 3-11 铁碳合金的组成

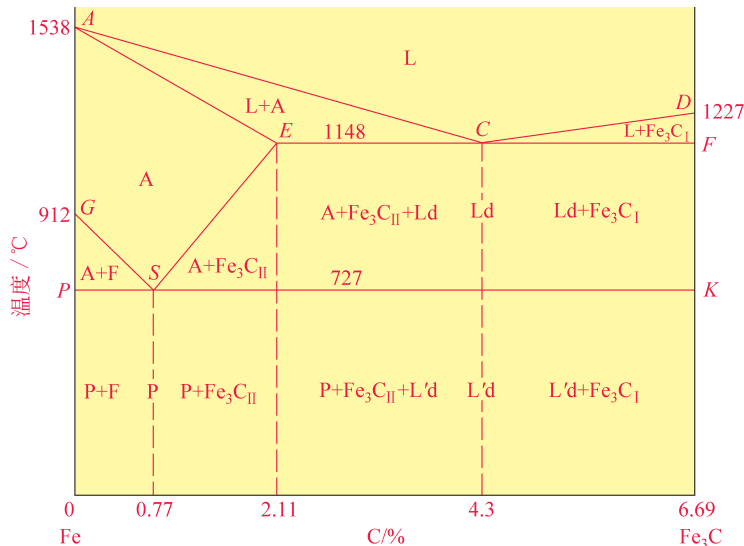
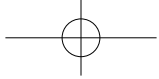


图 3-12 简化 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图



材料史话

世界上第一张铁碳合金相图是英国材料专家罗伯茨·奥斯汀（W.C.Roberts-Austen）于1899年测定绘制的。具有划时代意义的铁碳相图自诞生之日起，就为世界各国材料专家普遍接受，后经其他材料专家的不断修订，日臻完善。铁碳合金相图不仅极大地推动了金相学的发展，而且在生产实践中具有重要的现实意义。它为研究钢铁的组织，合理选用钢铁材料，科学制订钢铁材料铸造、锻造和热处理等热加工工艺提供了重要的科学依据。1900年，法国著名金相学家奥斯蒙（Floris Osmond）把他自己发现的碳在 γ 铁中的固溶体命名为奥氏体，以纪念罗伯茨·奥斯汀在铁碳合金相图研究中做出的巨大贡献，让人们永恒怀念这位伟大的科学家。



Fe-Fe₃C 相图特性点

相图中一些主要特性点的温度、成分及其意义见表 3-3。

表 3-3 Fe-Fe₃C 相图中的特性点

特性点符号	温度 $t/^\circ\text{C}$	C/%	含 义
A	1538	0	纯铁的熔点
C	1148	4.30	共晶点
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度
G	912	0	纯铁 $\alpha\text{-Fe} \longleftrightarrow \gamma\text{-Fe}$ 转变温度
S	727	0.77	共析点



Fe-Fe₃C 相图特性线

ACD 线——液相线。此线以上全部为液相，用 L 表示。铁碳合金冷却到此线开始结晶，在 AC 线以下从液相中结晶出奥氏体，在 CD 线以下结晶出一次渗碳体（Fe₃C_I）。

AECF 线——固相线。液态合金冷却到此线全部结晶为固相。

GS 线——冷却时奥氏体转变为铁素体的开始线，或加热时铁素体全部转变为奥氏体的终了线，常用 A₃ 表示。

ES 线——碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的溶解度曲线。此线以下开始从奥氏体中析出二次渗碳体（Fe₃C_{II}），常用 Acm 表示。

ECF 线——共晶线。含碳量在 2.11% ~ 6.69% 的合金冷却到此线时（1148℃）都发生共晶反应，同时结晶出奥氏体与渗碳体的混合物——莱氏体。

PSK 线——共析线。含碳量在 0.0218 ~ 6.69% 的合金冷却到此线时（727℃）都发生共析反应，同时析出铁素体与渗碳体的混合物——珠光体，常用 A₁ 表示。

交流与讨论



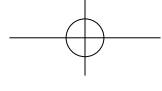
通过 Fe-Fe₃C 相图特性点、特性线的学习和讨论，你对掌握和记忆 Fe-Fe₃C 相图各区域组织总结出哪些规律？



铁碳合金的分类

根据组织转变的特点和室温组织的不同，铁碳合金可分为钢和白口铸铁两类^①。

^① 含碳量小于 0.0218% 的铁碳合金钢称为工业铸铁。



1. 钢

含碳量小于 2.11% 的铁碳合金称为钢。根据含碳量和室温组织的不同, 又可分为:

- (1) 亚共析钢 ($C < 0.77\%$) 室温组织由铁素体和珠光体组成。
- (2) 共析钢 ($C = 0.77\%$) 室温组织全部是珠光体。
- (3) 过共析钢 ($C > 0.77\%$) 室温组织由珠光体和二次渗碳体组成。

2. 白口铸铁

含碳量在 2.11% ~ 6.69% 的铁碳合金称为白口铸铁。根据含碳量和室温组织的不同, 又可分为:

- (1) 亚共晶白口铸铁 ($C < 4.3\%$) 室温组织由珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体组成。
- (2) 共晶白口铸铁 ($C = 4.3\%$) 室温组织全部是低温莱氏体。
- (3) 过共晶白口铸铁 ($C > 4.3\%$) 室温组织由一次渗碳体和低温莱氏体组成。



含碳量对钢组织和性能的影响

1. 含碳量对钢组织的影响

不同成分的液态合金, 在冷却过程中发生的组织变化是不同的, 因此, 最后在室温下得到的组织也不同。并且, 随着含碳量的增加, 在同一类型的铁碳合金中, 其组织之间的相对量也是不同的。那么含碳量增加对组织有何影响呢?

图 3-13 (a) 反映了含碳量对钢组织的影响。由图 3-13 (a) 可见, 随着含碳量的增加, 在亚共析钢中铁素体逐渐减少, 珠光体逐渐增多; 到共析钢时, 其显微组织全部是珠光体; 含碳量超过 0.77% 的过共析钢, 珠光体减少, 而二次渗碳体逐渐增加。

2. 含碳量对钢性能的影响

钢的组织发生改变, 必然引起其性能的变化。图 3-13 (b) 反映了含碳量对钢性能的影响。由图 3-12 (b)

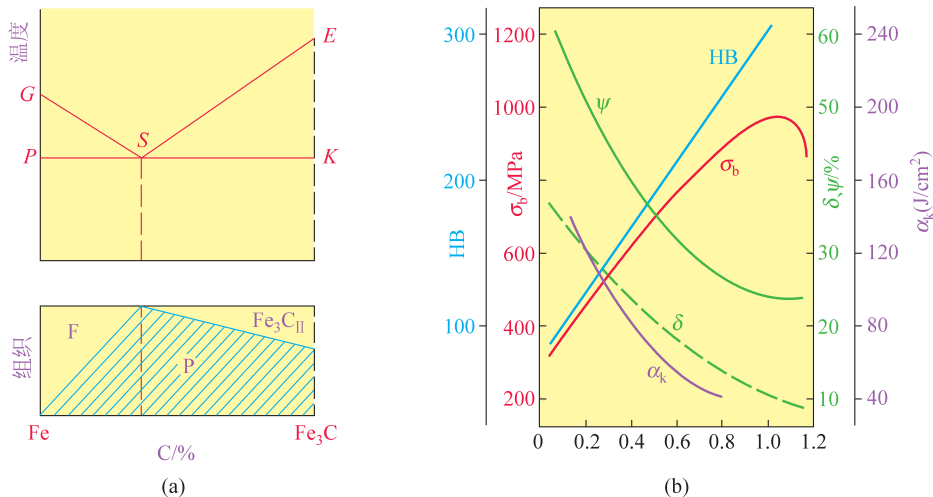


图 3-13 含碳量对钢组织和性能的影响

(a) 含碳量对钢组织的影响; (b) 含碳量对钢性能的影响