

锅炉金属材料讲义

(试用本)

上册

国家劳动总局锅炉安全监察局

一九八〇年十月

锅炉作为一种热力装置在国计民生中具有很重要的地位。在火力发电厂里，锅炉产生的蒸汽驱动汽轮发电机组发电；在工交系统内，锅炉产生的蒸汽可直接用来加热，或带动其它动力设备；在生活中，锅炉产生的蒸汽或热水还可供取暖、淋浴等用途。

锅炉很多元件内部都容纳着大量有压力的高温水或高温蒸汽。这些元件一旦破裂，后果是十分严重的。1905年，美国某鞋厂一台火管锅炉爆炸，造成58人死亡和117人受伤的重大事故。1979年4月5日，湖南某电厂阀门爆炸，一名工人当场死亡。锅炉事故国内外不断有所发生。锅炉事故除了锅炉本身，附近的人员、设备、厂房可能遭受破坏外，还由于热能、电能的突然中断，给其它行业带来的损失将更为严重。

锅炉基本上是由金属材料制造的，其中绝大多数是钢铁。实践表明，很多锅炉事故是与锅炉元件的材质不好、制造工艺不良等有直接关系的；就是那些运行维护不当的事故中，也有不少是由于对不良工况将给钢材性能带来什么不良影响、将导致什么后果不够了解所酿成的。因此，对于锅炉管理运行人员来讲，掌握一些锅炉金属材料的有关知识是十分必要的。

本着这一宗旨，讲义仅概述金属学和热处理的基本概念，简介一些试验方法，粗略地提及锅炉钢和锅炉元件的制造流程，集中篇幅着重阐述锅炉钢的特性和用钢情况，使学员在掌握基本概念的基础上，对锅炉用钢有较多的了解。这对于保证锅炉元件的安全运行，对于从金属材料的角度分析判断锅炉元件的运行事故，都是有益的。

最后介绍了锅炉主要元件的某些运行事故。这只不过是提供几个分析问题方法方面的参考实例，~~并不能以此作为其它事故的判断依据。~~由于水平有限，讲义中谬误之处在所难免，敬请指正。

目 录

第一章 金属学基本概念	1
第一节 金属的晶体结构	1
第二节 合金的基本结构	6
第三节 铁碳合金的基本组织结构	9
第四节 铁碳平衡图	10
第二章 钢的热处理基本概念	19
第一节 钢的加热转变	19
第二节 钢的冷却转变	21
第三节 钢的回火转变	28
第四节 热处理的基本类型	30
第五节 表面热处理	33
第三章 钢的机械性能	37
第一节 强度和塑性	37
第二节 硬度	38
第三节 冲击韧性	41
第四节 应变时效	45
第五节 韧—脆性转变温度	46
第六节 断裂韧性的概念	48
第七节 疲劳	50
第四章 锅炉钢的高温长期性能	55
第一节 蠕变	55
第二节 持久强度	60
第三节 应力松弛	65
第四节 氧化和腐蚀	67
第五节 组织稳定性	73

第一章 金属学基本概念

众所周知，金属具有良好的导电和导热性，并且有金属光泽。这些特性是由金属原子的金属键结构所决定的。例如在外电势的作用下，在金属各离子间作高速运动的公有自由电子（电子云）将作定向移动，就使金属具有了导电性能。

金属学正是研究金属组织结构的一门科学。掌握金属学的基本概念，重点了解钢的基本组织结构，是熟悉锅炉金属材料的基础。

第一节 金属的晶体结构

（一）晶格、晶格参数：

所有固体金属都属于晶体物质。晶体中的原子是按一定的规则和几何形状排列的。

为了便于分析各种晶体中原子排列的规律，可以用假想的线条将各原子的中心连接起来，构成一个空间格子。这种用来描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫晶格。

通常取晶格中一个最基本的单元来简便地描述晶体结构。这种能代表晶格结构特征的单元叫晶胞（图1-1）。

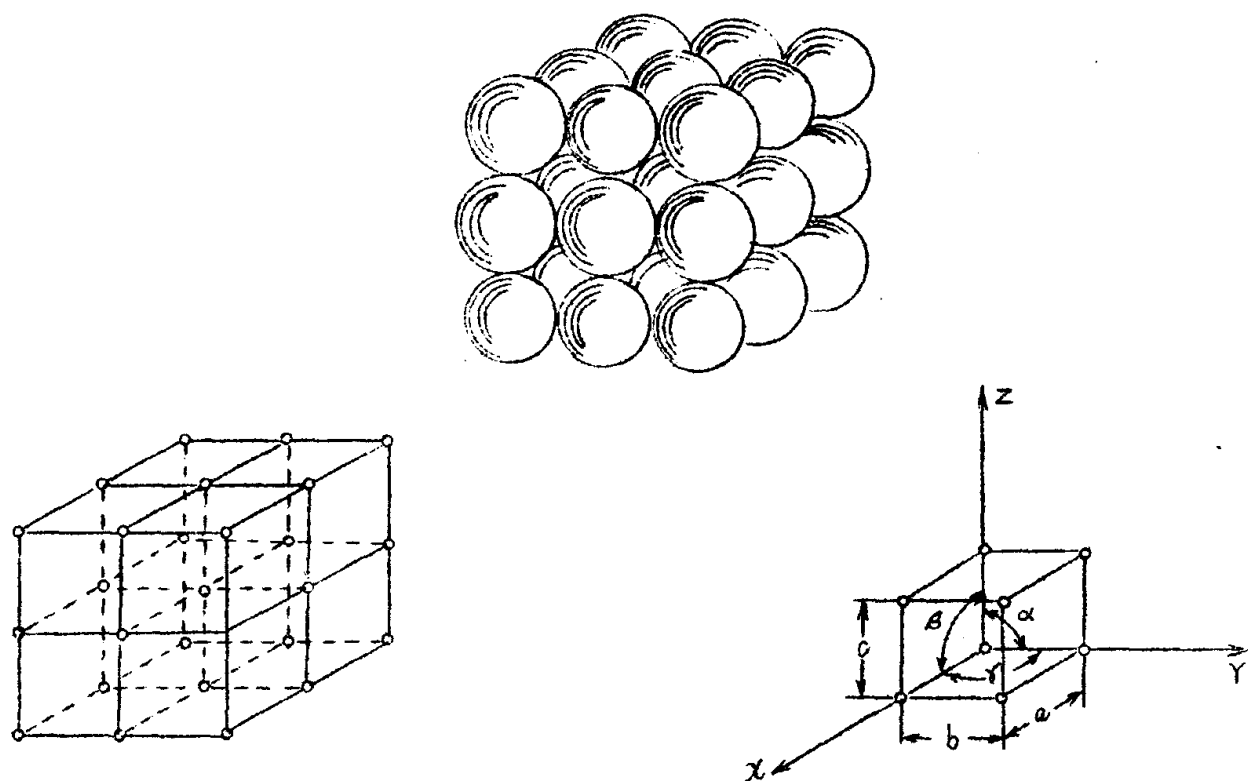


图 1-1 简单立方晶体的描述

为了研究晶体结构，在结晶学中规定用晶格参数来表示晶胞的几何形状和尺寸。晶格参数是指晶胞三个坐标的边长尺寸，用 a 、 b 、 c 表示，其单位为埃（ $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-8}$ 厘米）；还包括三个晶轴间的夹角，以 α 、 β 、 γ 表示，单位为度。

（二）体心立方晶格和面心立方晶格：

不同的金属晶体有不同的晶格类型，最常见的有如下二种：

（1）体心立方晶格 它的晶胞是一个正六面体，晶格参数 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。立方体的八个顶角都有一个原子，中心有一个原子。由于各顶角上的原子都属于该原子周围的八个晶胞公有，因此每个体心立方晶胞实际上只拥有 2 个原子（ $1/8 \times 8 + 1$ ）（见图

1-2)。属于体心立方晶格的金属元素有： α 铁(α -Fe)、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)、铌(Nb)等。

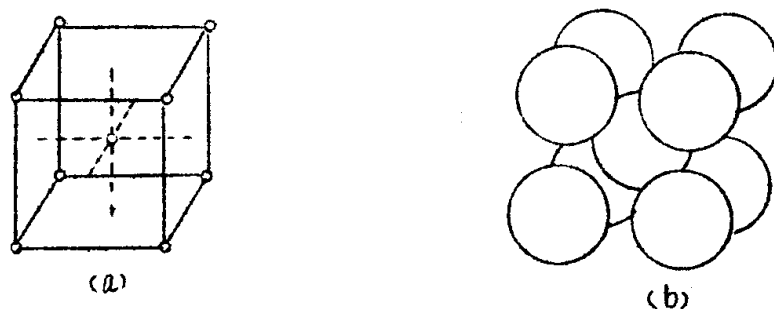


图 1-2 体心立方晶格

(2) 面心立方晶格 它的晶胞也是一个正六面体。立方体的八个顶角上各有一个原子，六个表面的中心处各有一个原子。每个面心立方晶胞实际上包含的原子数为 4 ($1/8 \times 8 + 1/2 \times 6$) (见图 1-3)。属于面心立方晶格的金属元素有： γ 铁(γ -Fe)、镍(Ni)、铜(Cu)、铝(Al)等。

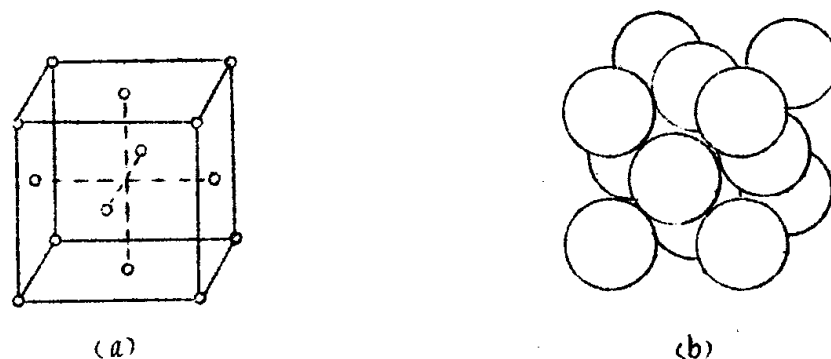


图 1-3 面心立方晶格

(三) 金属晶体的实际构造：

实际应用的金属绝大多数是多晶体，它由许多结晶方位相同的小晶体组成，这种小晶体称为晶粒。多晶体内存在许多缺陷，这对金属

的性能有很大的影响。

(1) 面缺陷

面缺陷通常是指晶界和嵌镶块。

晶界 是晶粒与晶粒之间由于结晶方位不同而形成的交界处。此处的原子排列不整齐，晶格歪扭畸变且常有杂质存在（见图1-4）。因此具有熔点较晶粒内部低，抗蚀性差，不易变形等特征。

嵌镶块 是晶粒内部晶格位向差很小的小晶块。若干这种小晶

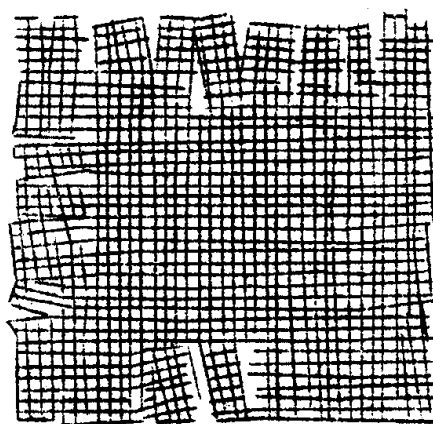
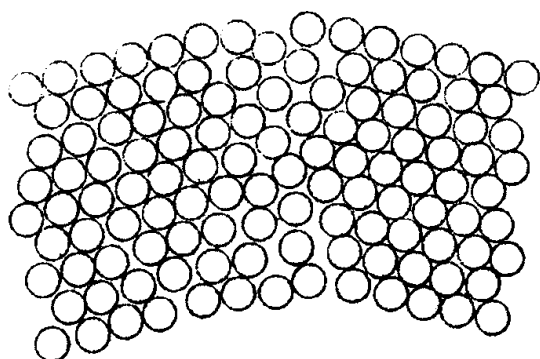


图1-4 晶界的过渡结构示意图 图1-5 嵌镶块结构示意图

块组成了晶粒。这些嵌镶块之间存在的分界简称**亚晶界**。亚晶界处的原子排列也存在着畸变。嵌镶块结构的细化，相邻嵌镶块间位向差的增大，都会提高晶体强度。嵌镶块结构示意图列于图1-5。

(2) 线缺陷

线缺陷的具体形式是各种类型的位错。位错就是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了某种有规则的错排现象。比较简单的一种线缺陷是刃型位错（见图1-6）。图中A B C原子平面上沿E F线插入了‘多余的’半个原子面，象刀刃切入一样，故得名刃型位错。位错可因外力作用而移动，也可通过原子扩散而移动，后者叫爬升或攀移。位错密度（每平方厘米的位错数）的增加可使金属的强度大大提高。

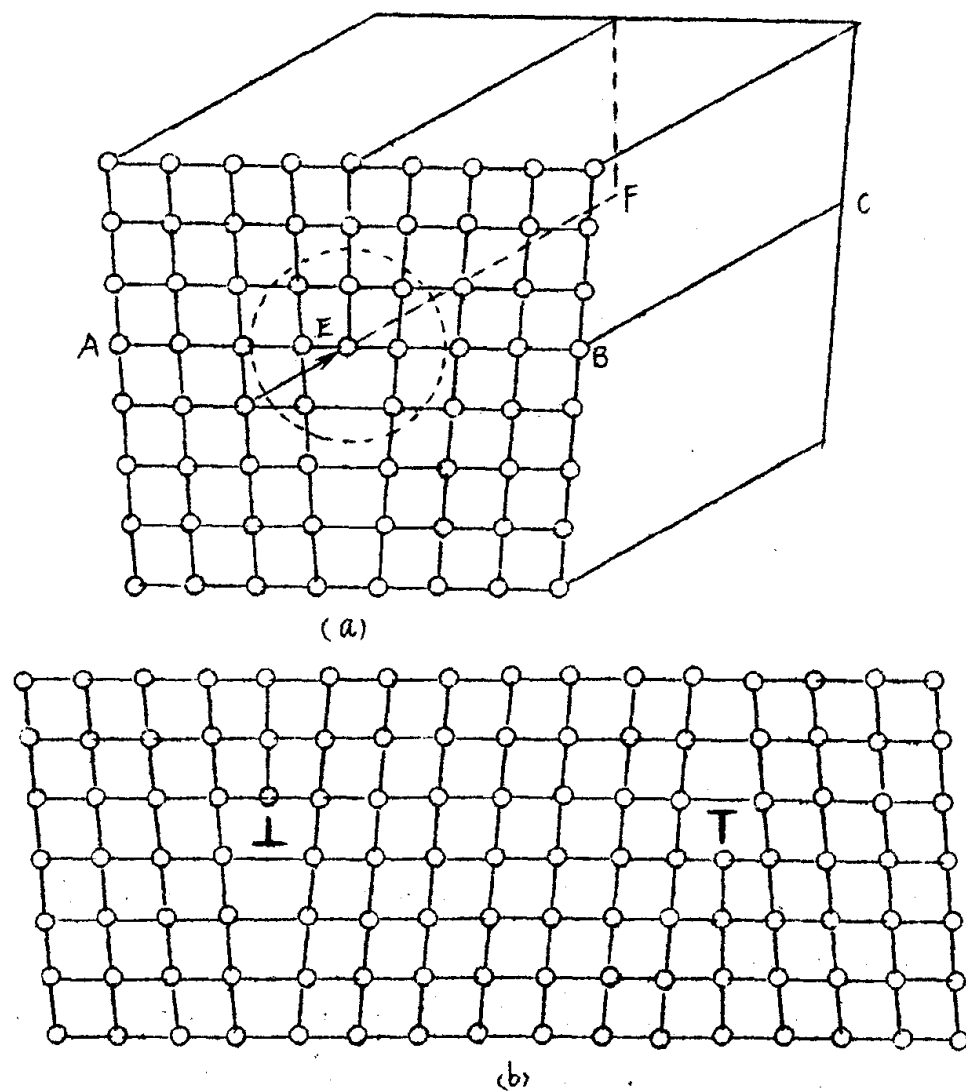


图 1-6 刃型位错示意图

(3) 点缺陷

点缺陷的主要形式是晶格空位及间隙原子(见图 1-7)。

空位处周围的原子相互靠拢,而间隙原子周围的原子则相互撑开。这两种情况将产生晶格畸变,使金属的强度提高。

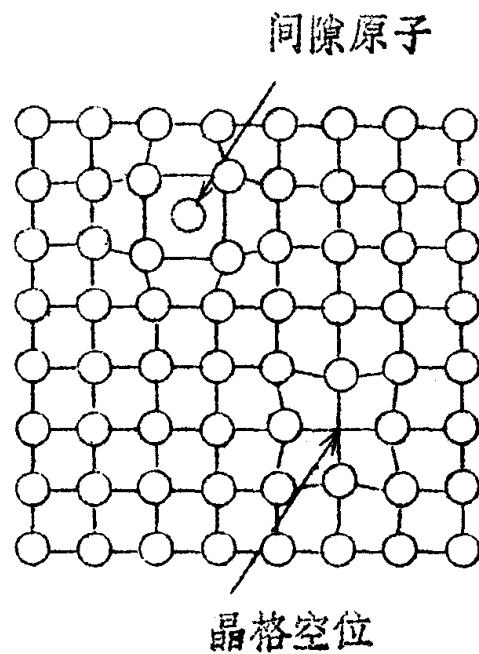


图 1-7 点缺陷示意图

第二节 合金的基本结构

由于纯金属的机械性能一般较低而且价格较高，因此，工业生产上大量使用的都是各种合金。

根据构成合金的各元素间相互作用的不同，可以形成以下三种合金的基本组成物：固溶体、化合物和机械混合物。

(一) 固溶体

几种金属元素（或金属与非金属元素）在液态时互相溶解，在固态时仍能互相溶解而形成单一、均匀的固相，这种固相物质称为固溶体。固溶体中基础金属称为溶剂，合金元素（含量较少的组元）称为溶质。固溶体的晶格类型与溶剂是一致的。

固溶体有置换固溶体和间隙固溶体两种基本类型（见图 1-8）。

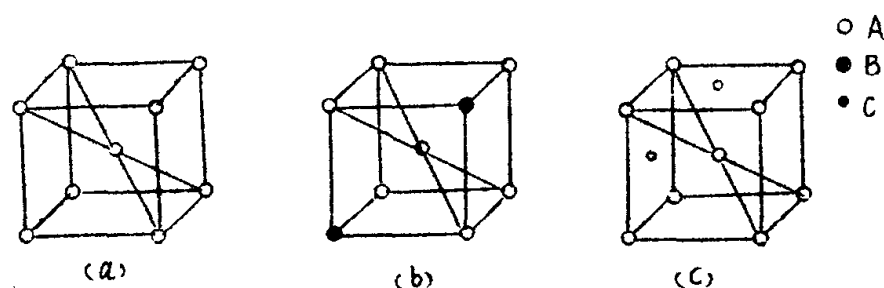


图 1-8 纯金属和固溶体晶胞对比
 (a) 纯金属 (b) 置换固溶体 (c) 间隙固溶体
 A—溶剂原子 B—溶质原子 C—间隙原子

(1) 置换固溶体

溶质原子完全随意地分布在溶剂晶格结点上的固溶体叫置换固溶体，也叫无序固溶体。

在置换固溶体中，由于异类原子的溶入，会造成晶格畸变和晶格参数的变化。随着溶质原子溶入浓度的增加，晶格畸变加大，使变形时位错移动困难，因而提高了合金的硬度、强度。溶质元素使固溶体强化的现象叫固溶强化。

在置换固溶体的结构中，同样会存在晶格空位、位错、嵌镶块和晶界等各种缺陷。

(2) 间隙固溶体

溶质原子浸入溶剂晶格的空隙而形成的固溶体叫间隙固溶体。

镍(Ni)、钴(Co)、铁(Fe)、锰(Mn)、铬(Cr)、钒(V)、钛(Ti)等过渡族金属元素和氢(H)、硼(B)、碳(C)、氮(N)、氧(O)等原子半径较小的非金属元素结合在一起能形成间隙固溶体。一般要求溶质原子直径与溶剂原子直径之比 ≤ 0.59 。

由于浸入晶格空隙的溶质原子远比空隙大，因此间隙固溶体的晶格参数总是大于溶剂的晶格参数。间隙原子同样导致合金晶格畸变，

造成固溶强化。

(二) 化合物

两种或两种以上元素按一定的原子数比例相互化合，形成具有与这些元素完全不同类型晶格的物质，叫做化合物。合金中常见的化合物有电子化合物和间隙相。

(1) 电子化合物

电子化合物是由金属元素化合成的，它是按照一定的电子浓度比例组成具有一定晶格类型的化合物。所谓电子浓度是指化合物中价电子数目与原子数目的比值。如铜锌合金中的 CuZn 即为此种电子化合物。

(2) 间隙相

间隙相是过渡族金属 (Ni 、 Co 、 Fe 、 Mn 、 Cr 、 V 、 Ti) 与类金属 (H 、 B 、 C 、 N) 形成的化合物。间隙相与间隙固溶体不同：前者是一种化合物，具有与组元完全不同的结晶构造；而后者却保持了溶剂元素的结晶构造。

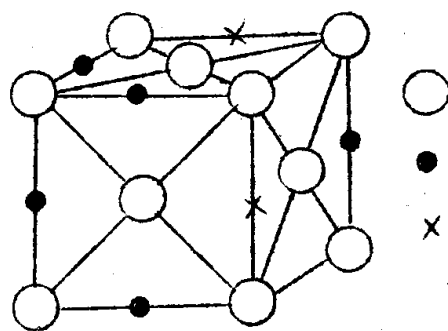


图 1-9 TiC 的缺位固溶体示意图

合金钢中一些碳化物、氮化物，如 Fe_3N 、 Mo_2C 、 WC 等属于间隙相。实际上，大多的间隙相的晶格空隙往往并不被填满，成为一个成份可变的相，相当于以间隙相为基的缺位固溶体，例如 TiC 、 NbC 、 VC 等（见图 1-9）。

此外，钢中常见的化合物如 Fe_3C 、 Mn_3C 、 Cr_7C_3 、 $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ 等既不符合电子化合物的化合条件，也不符合间隙相的形成规律，它们是结构比较复杂的化合物。

(三) 机械混合物

合金中两个组元在固态时互不溶解，不形成化合物，又有各自不同的晶格类型，由这两种组元组成的混合物，称为机械混合物。

机械混合物的种类很多，主要有两种形式：由两种固溶体组成的

机械混合物和由固溶体与金属化合物形成的机械混合物。例如，锡基巴氏合金是由锡基固溶体、锡锑化合物（ SbSn ）和锡铜化合物（ Cu_3Sn ）组成的机械混合物。

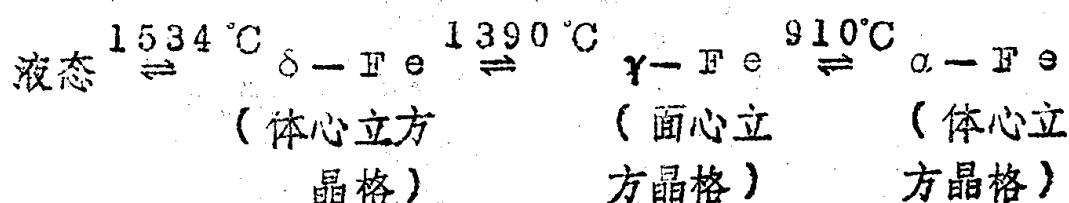
在机械混合物中，由于各种晶体保持自己的性质，所以合金的性能取决于它们各自的数量、形态、大小和分布情况。

第三节 铁碳合金的基本组织结构

工业上广泛应用的铁碳合金是钢和铸铁。它们的基本组元是纯铁和渗碳体。固态下，它们的平衡组织中有铁素体、奥氏体、珠光体、莱氏体。

（一）纯铁

纯铁软而韧。熔点为 1534°C ，磁性转变点为 769°C ，在 769°C 以上无磁性。固态下，纯铁有如下转变：



这种在固态下晶体构造随温度发生改变的现象称为同素异构转变。

（二）渗碳体

渗碳体硬而脆。熔点在 1600°C 左右、它的原子结构非常复杂，属斜方晶格。

渗碳体是铁和碳的化合物， Fe_3C 。在合金钢中，某些合金元素的原子会进入渗碳体代替其中的铁原子而成为一种以化合物为基的固溶体，叫做合金渗碳体，如 $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr} \dots)_3\text{C}$ 。

（三）铁素体（F）

铁素体是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体。很多合金元素如 Mn 、 Cr 、 Mo （钼）、 V 、 Ni 、 W （钨）、 Nb （铌）、 Ti 以及 P （磷）、 Si （硅）等都能溶于铁素体中。这种含有合金元素的铁素体称为合金铁素体。合金铁素体的强度大有提高，塑性、韧性常略有

降低。

铁素体的最大含碳量为 0.02% (温度为 723°C 时), 室温的最大含碳量为 0.008% 。一般, 铁素体在光学显微镜下呈白色多边形 (见图 1-10)。

(四) 奥氏体 (A)

奥氏体是碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体。 $\gamma\text{-Fe}$ 的晶格参数和晶格间隙比 $\alpha\text{-Fe}$ 要大, 因此奥氏体中的溶碳量比铁素体多得多。在 1147°C 时奥氏体中最大溶碳量为 2.06% , 而在 723°C 时仅溶 0.8% 。奥氏体中也可溶入很多合金元素。

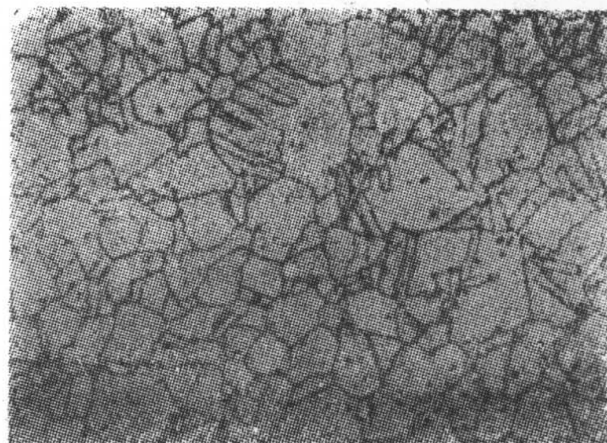
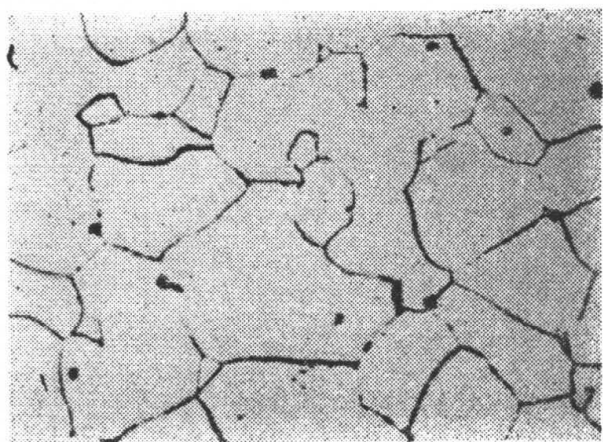


图 1-10 铁素体显微组织

图 1-11 奥氏体显微组织

奥氏体塑性好, 强度不高, 没有磁性。

一般, 奥氏体在光学显微镜下呈白色多边形 (见图 1-11)。

(五) 珠光体 (P)

珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物。在平衡状态下, 珠光体内铁素体约占 88% , 渗碳体约占 12% 。可见, 珠光体中铁素体是基体。

珠光体中铁素体和渗碳体成相同层状排列的形态。它的性能是由

铁素体和渗碳体两者共同决定的。珠光体的分散度（层片的厚薄和渗碳体的大小）和形状对力学性能起着决定性的作用。

典型的珠光体在光学显微镜下呈层片状，白亮的是铁素体，黑色的是渗碳体（见图 1—1 2）。

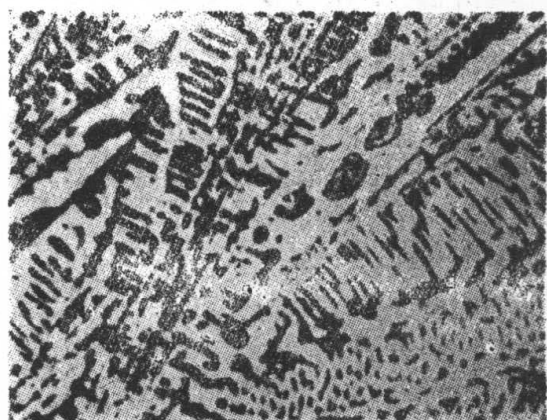
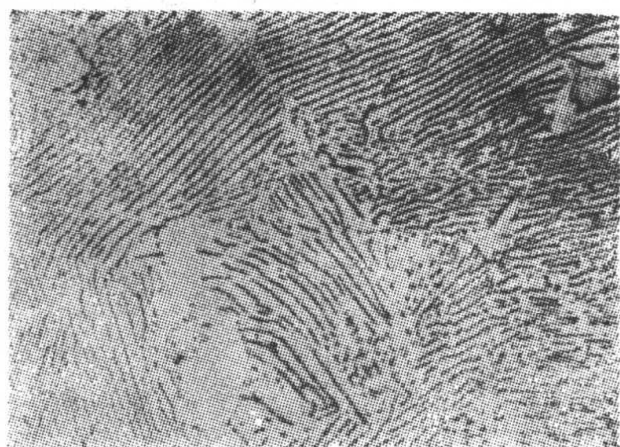


图 1—1 2 珠光体显微组织

图 1—1 3 莱氏体显微组织

(六) 莱氏体 (L)

莱氏体是一种机械混合物。在高温，它是由奥氏体和渗碳体组成；在室温，由于奥氏体转变成为珠光体，就由珠光体和渗碳体组成。

莱氏体极硬，性很脆。在光学显微镜下，莱氏体中白色的是渗碳体，黑色的是珠光体（见图 1—1 3）。

第四章 铁碳平衡图

严格地说，铁碳平衡图应当是铁和石墨的平衡图，但有实用价值的只是铁和渗碳体的平衡图。因此，通常习惯地称 Fe—Fe₃C 平衡图

为铁碳平衡图。

组成合金的独立的、最基本的单元称为组元，简称元。 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 平衡图是二元系平衡图，以纵座标表示温度，横座标表示铁碳合金的成份。

把各种不同成份的铁碳合金极缓慢地加热或冷却，每隔一定的时间间隔测量一次合金的温度，根据这些温度数据绘制成各种不同成份合金的加热或冷却曲线。由于相变会产生吸热或放热现象，使加热或冷却曲线出现明显转折或平台。把这些加热或冷却曲线综合在温度—成份座标系中，便绘制成 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 平衡图（见图1-14）。

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 平衡图反映了平衡条件下不同铁碳合金成份、温度与金相组织之间的相互关系，并描述了合金中的组成、相对量及其变化的情况。它是研究钢和铸铁的金相组织、性能以及热加工工艺的基础。

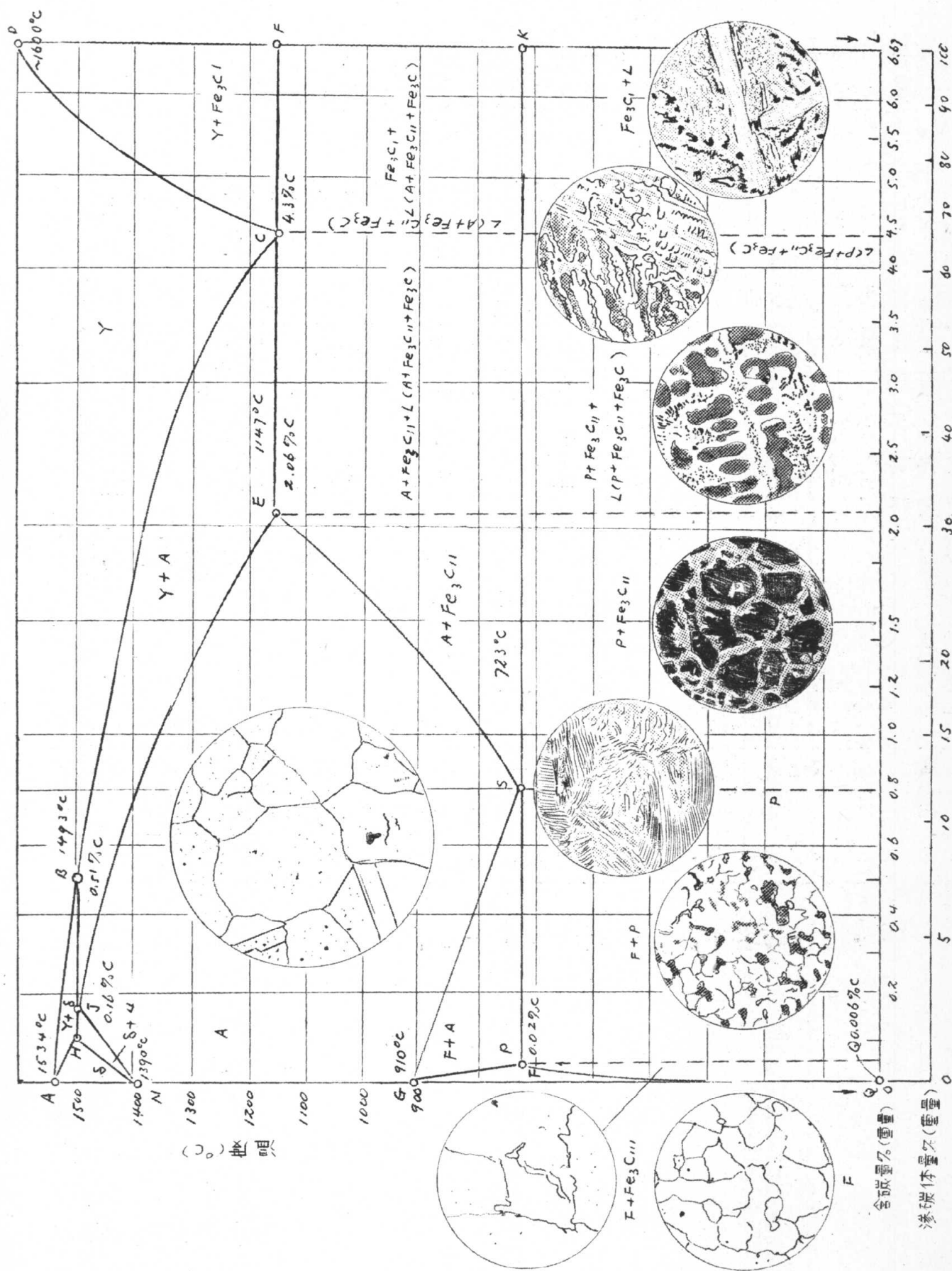


图 1-14 Fe-Fe₃C 平衡图

(一) Fe-Fe, C 平衡图中的主要特性点、线
各主要点的涵义、温度及含碳量列于表 1-1。

表 1-1 Fe-Fe, C 平衡图中各主要特性点

点的符号	温度 (°C)	含碳量 (%)	意义
A	1534	0	纯铁熔点
B	1493	0.51	包晶反应时液态合金的碳浓度
C	1147	4.3	共晶点, $\gamma_C \rightleftharpoons A_E + Fe, C$
D	1600	6.67	渗碳体的熔点
E	1147	2.06	碳在 $\gamma-Fe$ 中的最大溶解度
F	1147	6.67	渗碳体
G	910	0	$\alpha-Fe \rightleftharpoons \gamma-Fe$ 同素异构转变点 (A_1)
H	1493	0.10	碳在 $\delta-Fe$ 中的最大溶解度
J	1493	0.16	包晶点, $\gamma_B + \delta_H \rightleftharpoons A_J$
K	723	6.67	渗碳体
N	1390	0	$\gamma-Fe \rightleftharpoons \delta-Fe$ 同素异构转变点
P	723	0.02	碳在 $\alpha-Fe$ 中的最大溶解度
Q	0	0.006	室温下碳在 $\alpha-Fe$ 中的溶解度
S	723	0.8	共析点, $A_S \rightleftharpoons F_P + Fe, C$

各特性线的名字、意义列于表 1-2。