

高等学校教学用书

金属材料及热处理

倪振尧 李 植 编



中国矿业大学出版社

TG14
66
3

高等学校教学用书

金属材料及热处理

倪振尧 编
李 植

BX72/13

中国矿业大学出版社



B

777430

内 容 简 介

全书共七章：金属学基础、铁碳合金、金属机械性能和塑性变形、钢的热处理及矿山机械设计和制造中常用的合金结构钢和结构钢的选用及除结构钢外的其它金属材料。鉴于非金属材料应用日多，故另立一章附后。每章后均有思考题及习题书后附有实验指导书和11个有关实用的资料附表。

本书注意到煤矿机械设备使用材料的特点和新材料、新工艺的发展方向。本教材适用于机械类和相近等专业，也可供机械工程技术人員参考。

责任编辑 安乃勇

责任校对 关湘雯

高等学校教学用书

金属材料及热处理

倪振尧 李 植 编

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国科学院开封印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张13.25 字数336千字

1991年1月第一版 1991年1月第一次印刷

印数：1—2000册

ISBN 7-81021-418-7

TH·4 定价：2.65元

前 言

本教材是为煤矿机械制造和设计类专业编写的,根据教学计划学时为50~60。

在矿山机械设计、制造和维修工作中离不开金属。为了能够正确合理地使用各种金属材料,必须对它们的性能以及可以改变金属性能的工艺方法——热处理,有所了解,这就是学习本课程的目的。已往的教材,多从金属材料热处理专业需要出发,着眼于理论的严密和系统性,内容偏于繁多,冲淡了本专业需要的基本内容,所以学生学完此门课程后,在实际工作中不能很好的应用,碰到有关金属材料热处理的问题,往往感到束手无策,甚至还会出现不应有的错误。我们认为对机械设计和制造类专业此门课程学时不多的情况下,应大量删减有关金属理论方面的内容,增强有关实用知识的部分,这就是编写本教材的指导思想。

本书共分七章,第一章金属学基础,简述金属和合金的组织构造、合金状态图。第二章铁碳合金状态图和碳素钢的成份、组织、类别性能和用途。第三章金属的机械性能和塑性变形,简要介绍金属的变形行为和机械性能意义和测试方法。第四章钢的热处理,主要讨论钢的组织转变规律以及如何利用这些规律使其性能向我们需要的方向转化。在矿山机械制造与设计中最常用的是合金结构钢,故本课程中以较多的篇幅,重点地讨论这部分(包括第五章合金结构钢及第六章结构钢的选用)。碳钢及合金钢以外的其他金属材料在第七章中作简要介绍。至于特殊性能材料,仅提供使用人员以信息,扩大选材思路,可不作讲授内容。鉴于非金属材料在机械制造工业中应用愈来愈多,另立一章作简要介绍。实验课的安排也附录于后,以便参考。

本书是在原教材的基础上修改补充而成的,在修改过程中,注意到煤矿机械设备使用材料的特点和新材料、新工艺的发展方向。本教材可适用于机制、设计、函授、专科及机制人员参考。

为了在工作中查寻数据方便,增添了有关图表,附录于书后,提供参考。

学习本课程必须遵照理论联系实际,着重培养分析和解决实际问题的能力。为了学习方便,每章末尾附思考题和习题。

在本教材修订过程中,得到西安矿院、焦作矿院、阜新矿院、山东矿院和黑龙江矿院等兄弟院校有关老师的热心帮助,提出宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢!

编者

89. 12.

目 录

前 言	()
第一章 金属学基础	(1)
第一节 金属的晶体构造	(1)
第二节 金属的结晶	(7)
第三节 合金的结构	(9)
第四节 合金状态图	(11)
思考题及习题	(17)
第二章 铁碳合金	(19)
第一节 铁碳合金状态图	(19)
第二节 碳素钢	(26)
思考题及习题	(32)
第三章 金属机械性能与塑性变形	(33)
第一节 金属的机械性能	(33)
第二节 金属的塑性变形与再结晶	(38)
思考题及习题	(42)
第四章 钢的热处理	(44)
第一节 概述	(44)
第二节 钢的加热	(45)
第三节 钢在冷却时的组织变化	(46)
第四节 退火与正火	(50)
第五节 淬火	(52)
第六节 钢的回火	(64)
第七节 钢的表面淬火	(68)
第八节 钢的化学热处理	(70)
思考题及习题	(76)
第五章 合金结构钢	(78)
第一节 概述	(78)
第二节 合金结构钢的分类与编号	(78)
第三节 合金元素对钢的影响	(79)
第四节 普通低合金钢	(86)
第五节 渗碳钢	(87)
第六节 调质钢	(89)
第七节 弹簧钢	(90)
第八节 结构钢的热处理	(93)
思考题及习题	(95)
第六章 结构钢的选用	(96)
第一节 零件失效分析	(96)

第二节 机械性能与钢材选用的关系	(98)
第三节 淬透性与钢材选用的关系	(105)
第四节 零件使用条件与钢材选用的关系	(110)
第五节 工艺性能与钢材选用的关系	(111)
第六节 钢材选用的灵活性与钢材代用	(113)
第七节 典型零件的钢材选择与热处理	(115)
思考题及习题	(122)
第七章 其他金属材料	(124)
第一节 合金工具钢	(124)
第二节 矿用钎钢	(129)
第三节 硬质合金	(130)
第四节 特殊性能的钢及合金	(132)
第五节 铸铁	(136)
第六节 常用有色合金	(140)
思考题及习题	(147)
附：第八章 非金属材料	(148)
第一节 工程聚合物	(148)
第二节 陶瓷材料	(159)
第三节 复合材料	(164)
思考题及习题	(168)
附：实验指导书	(169)
	× × ×
附录 1 钢铁的火花鉴别	(174)
附录 2 硬度的换算与对照	(178)
附录 3 钢材回火温度与硬度对照表	(180)
附录 4 常用钢材不同截面淬火后的硬度值 (HRC)	(181)
附录 5 常用结构钢截面尺寸对机械性能影响	(182)
附录 6 机床零件用钢的热处理工艺和应用举例	(188)
附录 7 热处理方法代号及在蓝图上的表示方法	(191)
附录 8 钳工及木工工具热处理	(192)
附录 9 金属材料相对比价表	(193)
附录 10 我国与其他国家常用钢号对照表	(194)
附录 11 按坯料截面与屈服强度选择结构钢号用表 (插表)	(199)

第一章 金属学基础

第一节 金属的晶体构造

在化学元素周期表中，约有四分之三的元素是金属，其余是非金属。由于金属的优良性能，在国民经济中得到了广泛应用。所有金属在固态下都是晶体。

一、晶体与非晶体的区别

自然界绝大多数固态的无机物都是晶体，例如我们熟悉的食盐、雪花、单晶硅等都是晶体。只有玻璃、松香、沥青、橡胶、炼钢炉渣等少数物质是非晶体。

晶体与非晶体的区别在于内部原子排列不同。在晶体内部原子按一定规律排列得很整齐，而在非晶体内部，原子则是无规则散乱地分布着。

在固态下的金属组织也是由晶粒组成的。我们取一块纯铁，制成金相试样，放在显微镜下观察，可以清晰看到它是由许多小晶体所组成，这些小晶体叫做“晶粒”。用人工方法能够培植出相当大的单个金属晶粒。这种只有一个晶粒的晶体称为“单晶体”。普通金属是由许多晶粒所组成的多晶体，如图1-1所示。在单晶体中原子排列的方向相同，在多晶体的每个晶粒内部原子排列方向也是相同的，而在不同的晶粒内原子排列方向不同。晶粒间分界叫“晶界”。

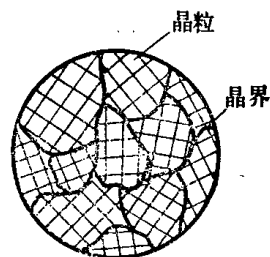


图1-1 多晶体晶粒
晶界示意图

晶体与非晶体由于内部结构不同，性能也不同。

晶体具有一定熔点，如纯铁熔点为 1538°C ，冰的熔点为 0°C ，而非晶体则没有固定的熔化温度，而是在一个温度范围内熔化。同时，金属单晶体的机械性能在各个方向上都不相同。如铁单晶体的弹性模数 E ，在某个方向上是 290000MPa ，在另一个方向上只有 135000MPa ，这种现象叫晶体的“有向性”。而非晶体则是各向同性。

晶体的最大特点是内部原子按一定规律整齐排列。本节所讲的晶体构造也就是研究金属内部原子排列的规律性。

二、常见金属的晶体结构

各种晶体物质，其内部原子按一定规律在空间一个挨着一个紧密堆积在一起，如图1-2a所示。为了便于分析各种晶体中原子排列的规律，用假想的几何线条将各原子的中心线连接起来，使之构成一个空间格子。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫做“晶格”，如图1-2b所示。同种物质由于排列方式不同，即晶格不同，其性能有很大差异。例如十分坚硬的金刚石和很软的石墨，都是由碳组成，仅仅是晶体结构不同。

为了简化分析，在晶格中取出一个能完全代表晶格的最小单位叫晶胞。用晶胞表示这种晶体中原子空间排列规律。

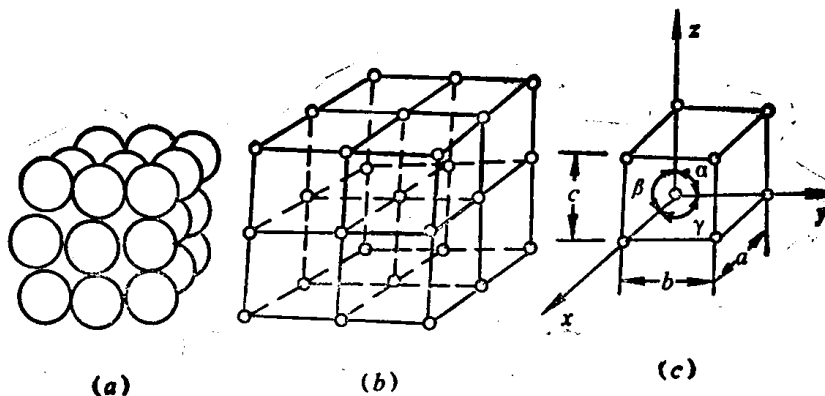


图1-2 晶体及晶格示意图

(a) 晶体中原子排列 (b) 晶格 (c) 晶胞

金属中常见的金属晶体结构形式有：体心立方晶格、面心立方晶格及密排六方晶格。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个正六面体（即立方体如图1-3所示），其棱边长 $a = b = c$ ，称为晶格常数，用 a 表示，其大小以埃（ $\text{\AA}$ ）来量度（1 埃 = 10^{-8} 厘米）。棱边夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

在立方体的每个顶角上都有一个原子，共有八个。但在顶角上的原子同时属于与其相邻的八个晶胞所共有，故对每个晶胞来说它只占 $1/8$ 个，只有立方体中心那个原子才完全属于该晶胞独有，所以它实际所包含的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ （个）。具有这种晶格形式的常见金属有：室温下的铁 912°C 以下的铁称 $\alpha\text{-Fe}$ ）、铬（Cr）、钨（W）、钼（Mo）、钒（V）

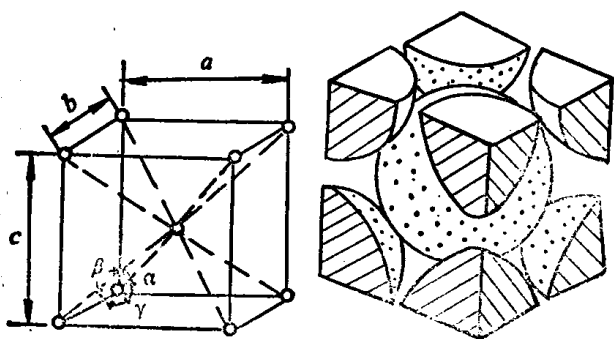


图1-3 体心立方晶胞

前面讲的单晶体铁在室温下是体心立方晶格。这种晶格的原子沿其对角线方向上比沿其一边方向上排列的密度大，原子间的距离小，故结合力大，使其弹性模数 E 也大，反之则小。但在多晶体金属中，因为各个晶粒排列方位不同，它们的各向异性彼此抵消，因而呈现各向同性。所以一般纯铁的弹性模数 E 在任何方向上都

是 210000MPa 。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体，如图1-4所示。在面心立方晶胞中，八个顶角上各有一个原子，但这个原子同时属于相邻的八个晶胞所共有，在六面体六个表面的中心处各有一个原子，这个原子也同时属于该面相邻的两个晶胞所共有，因此在面心立方晶格的一个晶胞中实际包含的原子数只有 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ （个）。

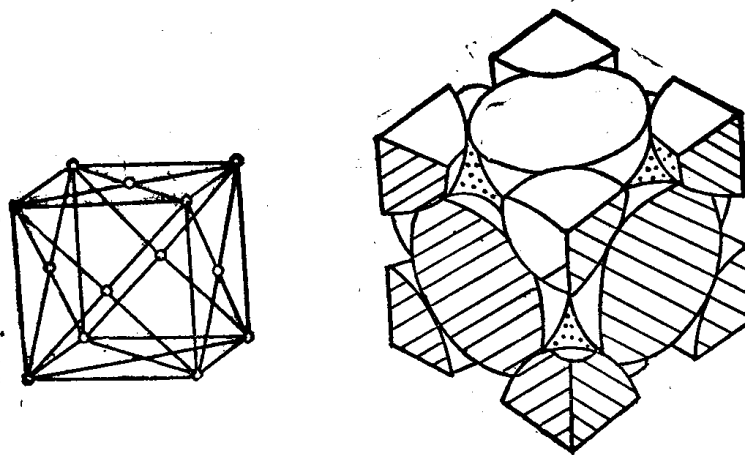


图1-4 面心立方晶胞

具有面心立方晶格的常见金属有：912~1394℃之间的纯铁（称 γ -Fe）以及铜（Cu）、铝（Al）、银（Ag）、镍（Ni）等，它们的共同特点是延展性好。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞的形状如图1-5所示。用 a 、 c 两个晶格常数表示。 a 是六方底面的边长， c 是两底面间的高度。只有当 $c/a=1.633$ 时，晶格内的原子才是真正密集地排列。通常的密排六方晶格的金属 c/a 比值在1.57~1.64之间，个别的如锌、镉等稍大。

在密排六方晶格的一个晶胞中每个顶角上的原子均同时属于相邻六个晶胞共有，上下底面中心的原子同时属于相邻的两个晶胞所共有，而另三个原子属于该晶胞所独有。因此，在一个密排六方晶格晶胞中实际所含原子数只有 $\frac{1}{6} \times 6 \times 2 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ （个）。

具有密排六方晶格的常见金属有：镁（Mg）、锌（Zn）、铍（Be）、镉（Cd）以及室温下的钛（Ti）等，这类金属的延展性较差。

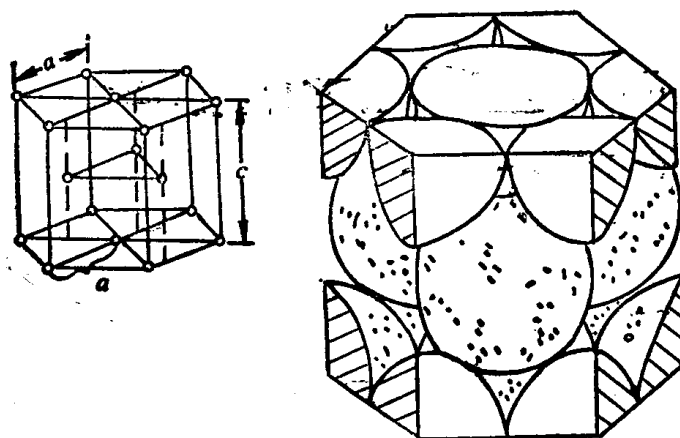


图1-5 密排六方晶胞

三、金属的同素异构转变

某些金属，如铁（Fe）、钴（Co）、钛（Ti）、锰（Mn）、锡（Sn）等在不同的温度下会发生晶体结构的变化，即从一种晶格转变为另一种晶格。金属在固态下由一种

晶格转变为另一种晶格的变化，称为“同素异构”转变。

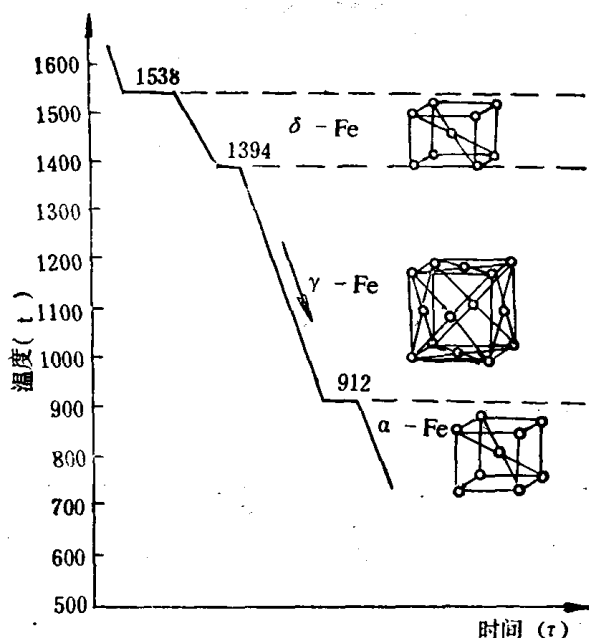


图1-6 纯铁的冷却曲线

纯铁在常温下为体心立方晶格，这种晶格的铁叫 α -Fe，当加热到912℃时，铁原子就要重新排列，而成面心立方晶格，这种铁叫做 γ -Fe，再继续加热到1394℃至1538℃之间，铁原子又要重新排列成体心立方晶格，叫 δ -Fe，它与 α -Fe的区别仅在于所处的温度不同。加热时 α -Fe变为 γ -Fe、 γ -Fe变为 δ -Fe或冷却时 δ -Fe变为 γ -Fe，都叫做同素异构转变。转变时的温度（例如铁在912℃、1394℃）叫做临界点。固态纯铁随着温度变化出现两次晶格转变。它的冷却曲线及各温度区所具有的晶格类型，如图1-6所示。

钢的成份绝大部分是铁，含碳很少，所以钢也存在这种同素异构转变。

这种转变极为重要，它是钢所以能进行热处理的基础。

四、实际金属的晶体结构

前面讲过：金属是多晶体，在多晶体中每个晶粒内的原子按一定规律排列得很整齐，这种晶体称为理想晶体。实际上晶粒内部存在着大量的缺陷，这些缺陷的存在对其性能尤其对机械性能发生着显著影响。

晶体的缺陷，按其几何形状一般分为如下三类：

1. 点缺陷

常见的点缺陷包括两种主要形式：晶格空位、间隙原子和异类原子溶入，如图1-7所示。

(1) 晶格空位及间隙原子

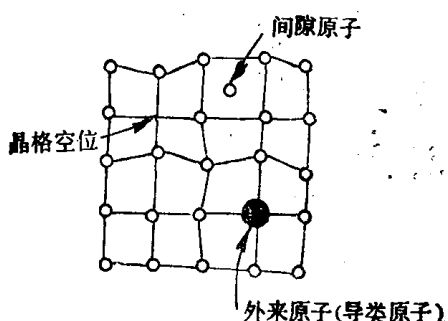


图1-7 点缺陷示意图

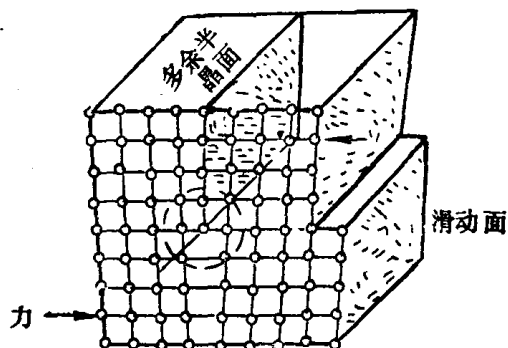


图1-8 刃型位错的示意图

这种缺陷是由于原子的热运动引起的，在晶体中原子以平衡位置（即结点）为中心，以高的频率振动着，温度越高，原子的平均振动能量越高。其中一些原子的动能高

于平均值,有些原子的动能低于平均值,这种现象叫能量起伏。因此,在某一瞬间,当某一原子具有足够大的能量时其振幅增大,它就能克服周围原子对它的牵制作用,脱离平衡位置而逃走,这就使结构中出现了空结点,即空位。离位原子大都跑到晶体表面和晶体其他缺陷处,在特殊情况下少数离位原子也可能跑到晶格的间隙位置形成“间隙原子”。

形成空位后,其周围的原子便靠拢,而处于间隙周围的原子晶格便会发生撑开现象。这种使正常晶格造成歪扭的变化称为晶格畸变。这种晶格畸变会使金属的物理、化学和机械性能改变。

(2) 异类原子

异类原子是指杂质原子或合金元素原子。异类原子占据金属结点时称为置换原子。当异类原子直径很小时,常存在于晶格间隙中,这也称间隙原子。与前面所说的间隙原子比较,前者是同类原子,性质相同,尺寸相当,它使间隙周围的晶格发生严重畸变,它的产生和扩散均较困难。而后者是异类原子,性质不同,尺寸相差悬殊,只使晶格局部产生畸变,容易产生也容易扩散。置换原子由于其大小与原来金属的原子不可能完全相同,其周围也发生晶格畸变。

在晶体中,空位和间隙原子不断的运动换位。如果间隙原子与空位相遇就会使这对点缺陷消失。这些缺陷的运动,在金属的扩散等过程中起极为重要的作用。

2. 线缺陷

线缺陷是在晶体中呈线状分布的一种缺陷。即在空间的一个尺寸方向上尺寸很大,其他两个方向上的尺寸很小的一种缺陷。这类缺陷的主要形式是各种类型的位错。所谓位错,就是在晶体中某处有一列或若干列原子发生某种有规律的错排现象。位错的形式很多,这里只介绍两种简单的,也是基本的位错。

(1) 刃型位错

如图1-8所示,可想像为晶体的上半部发生了局部滑动,右边原子向左移动了一个原子间距。在已滑动区与未滑动区之间出现一个多余的半原子面,象一片刀刃切入晶体,中止在内部。沿着半原子面的刃边,晶格发生了很大畸变,这就是一根刃型位错。刃型位错周围存在着弹性畸变。在多余的半原子面一边,原子受压;而在短少的原子面一边,原子受拉。离位错线越远,畸变越小。

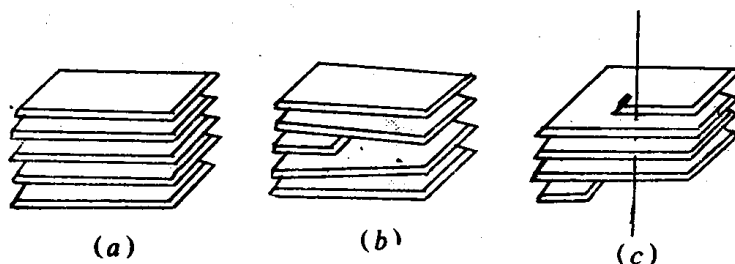


图1-9 晶体中原子面的示意图

(a) 完整晶体; (b) 含有刃型位错的晶体; (c) 含有螺旋位错的晶体;

(2) 螺旋位错

如图1-9所示,螺旋位错中并没有原子平面中断在晶体内部,而是原子平面沿着一根轴线(近似地和原子面垂直)螺旋上升,每绕轴线一周原子面上升一个晶面间距。又

如图1-10所示，可想像为晶体的上半部分发生了局部滑移，右边是已滑移区，原子向后移动了一个原子间距，左边是未滑移区。在已滑移区与未滑移区之间有一个很窄的过渡区，在这里晶格发生畸变，使原子平面变成一串螺旋面（如图1-9c所示），在螺旋面的轴心部分晶格畸变最大，这里就是一根螺旋位错。

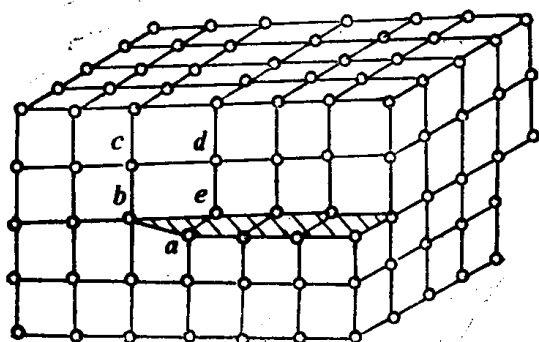


图1-10 螺旋型位错的示意图

起着极重要的作用。

3. 面缺陷

多晶体金属是由很多晶粒组成的，在不同的晶粒内原子排列的方位（结晶方位）不同，见图1-11。在晶界处原子受着相邻两个晶粒原子排列方位的影响，原子排列不整齐，晶格歪扭畸变，并常有杂质存在，在许多性能上显示出一定特点。例如，由于晶界抗蚀性比晶粒内部差，晶界的熔点较晶粒内部低，所以金属的腐蚀及热加工过程中的过热、过烧均从晶界处开始。又晶格歪扭畸变，使强度提高，细晶粒金属晶界比粗晶粒金属多，其强度也高。

除晶界外，在高倍放大下观察晶粒时可发现晶粒是由一些小晶块所组成。这些小晶块称为“嵌镶块”如图1-12所示。相邻的嵌镶块之间具有微小的位向差，一般不超过一度。两相邻的嵌镶块交界地带称为嵌镶边界。这里的原子排列也带有一定的歪曲畸变，因此也是一种面缺陷。

与晶界的作用相类似，嵌镶块边界对晶体的性质也起着重要作用。嵌镶结构的细

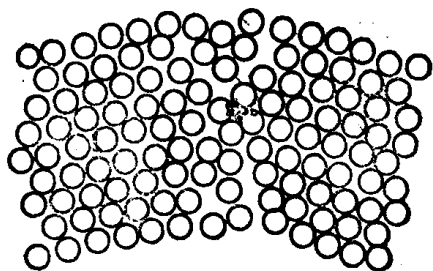


图1-11 晶界结构示意图

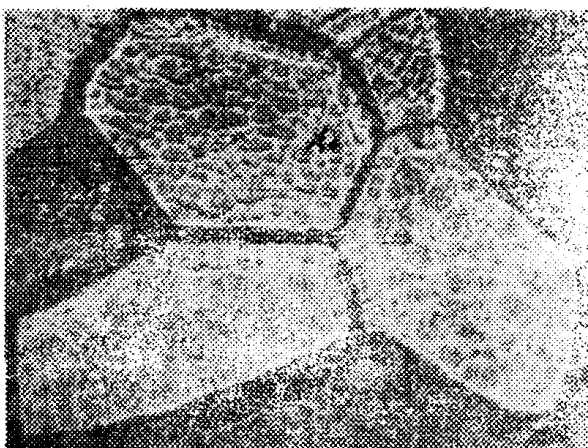


图1-12 金-镍合金中的嵌镶块组织

化, 相邻嵌镶块之间位向差增大, 都会提高晶体强度。

第二节 金属的结晶

工程上应用的金属材料, 大多数是在液态下冶炼, 经过铸造而成固态金属。金属由液态凝固成固态的过程, 称为金属的结晶。

在机械制造过程中, 铸件与焊件的机械性能都与金属在结晶过程中所形成的晶体形状、大小和分布情况有关, 尤其是铸件的质量还影响到随后的轧制、锻造、热处理等加工过程, 所以对金属组织形成规律的了解也是必要的。

一、晶核的形成与长大

金属在结晶时, 首先在液体中出现一个极微小的晶体, 然后以它为核心在液体中长大。这种最先出现的作为结晶核心的微小晶体称为晶核。结晶过程就是晶核的形成与长大的过程, 这是任何物质结晶的普遍规律。

从物质内部原子排列情况看, 结晶是从原子不规则排列的液态过渡到原子规则排列的固体状态。而晶粒的形成过程也就是在一个微小体积内, 原子由不规则排列变为规则排列, 并且稳定下来的过程。晶粒是怎样形成的呢? 这要从液态金属的构造谈起。

液态金属的原子基本上也是围绕平衡位置振动, 只是在液态金属中原子热运动很激烈, 原子频繁地从一个平衡位置转移到另一个平衡位置。因此, 液态金属中原子的规则排列只限于许多微小的体积内, 称为“近程有序”。由于液态原子的热运动, 使这种近程有序的原子团时而出现, 时而解体, 此起彼伏地变化着, 其中某些原子团有可能变成晶核。这种近程有序的原子团转变成晶核的条件是温度, 纯金属结晶都是在一定温度下进行的。

在理论上讲, 金属的熔化和结晶应在同一温度下进行, 这个温度叫平衡结晶温度。在此温度下, 液体中原子结晶到晶体上的速度与晶体上的原子熔入液体中的速度相等, 此时既不结晶也不熔化, 晶体与液体处于平衡状态。只有冷却到平衡结晶温度以下才能有效地进行结晶, 这种现象叫做过冷。

把液态金属放在坩埚内缓慢冷却, 在冷却过程中不断测温, 将温度随时间变化的数据记录下来, 绘制成图1-13所示的冷却曲线。图中水平线表示结晶时放出的结晶潜热

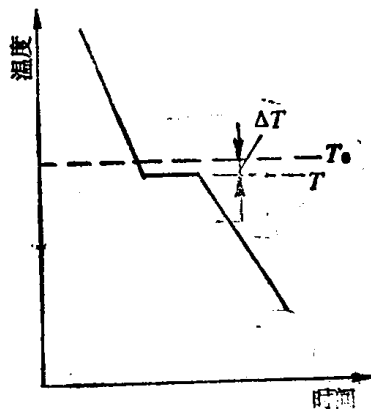


图1-13 热分析冷却曲线

补偿了向外散失的热量, 使温度保持不变。水平线所对应的温度就是实际结晶温度, 用 T_c 表示。 T_0 是纯金属的理论结晶温度(即平衡结晶温度)。 T_0 与 T_c 之差 ΔT 为过冷度。同一种金属从液态冷却时, 冷却速度愈大, 结晶过冷度也愈大。实际金属总是在过冷条件下结晶的, 所以过冷是金属结晶的必要条件。

如果将液态金属快速冷却到 T_c 以下某一温度, 并保持一段时间以后, 液态金属中便出现了第一批晶核如图1-14所示。晶核出现后便逐渐长大, 同时又有新的晶核形成并长大。这样, 新的晶核不断形成, 旧的晶核不断长大, 到所有长大着的晶粒彼此相遇, 液态金属耗尽, 结晶过程也就完成。由每个晶核所长成的晶体就是一个晶粒。由于晶核位向不同, 所以各晶粒的位向也不一样, 这样就结晶成一块多晶体金属。

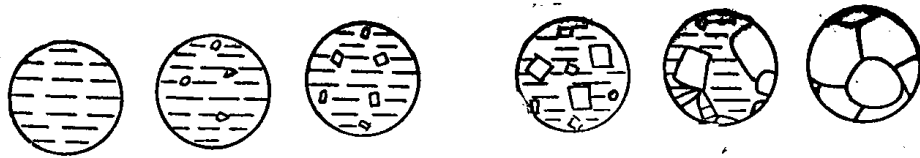


图1-14 等温结晶过程示意图

晶体的长大，主要决定于过冷度。冷却速度很小时，过冷度则很小，此时晶粒在长大过程中保持规则外形。当晶粒长大到互相接触时，规则的外形才破坏。冷却速度大，则过冷度大，晶体就呈树枝状长大。因为当过冷度较大时，晶体的长大主要受结晶前沿的液态金属热分布条件的控制。晶核在生长初期虽然可以有规则外形，但在此规则外形的棱角处具有最好的散热条件，使结晶潜热能迅速逸去；同时由于棱角处缺陷多，促进晶体长大，杂质少，杂质的阻碍作用小，所以得到了最有利的生长条件而优先长大，形成树枝的树干。与此同时又有树枝在树干的棱角处形成并长大。这样继续不断地成长，便形成一个树枝状晶体骨架，简称枝晶，如图1-15所示。

工业生产中金属的结晶都是以树枝晶方式长大的。在铸锭和厚大铸件的缩孔中经常可以看见未完全填满的树枝状晶。这是由于结晶时液态金属的体积收缩后，没有充分的液态金属去补充，使树枝晶轴间的体积不能被晶体填满，而留下了空隙，保留了树枝晶的形态。如果将一个金属铸锭沿纵向及横向剖开并加以浸蚀后，则如图1-16所示。在铸锭剖面上存在着具有不同特征的三层。

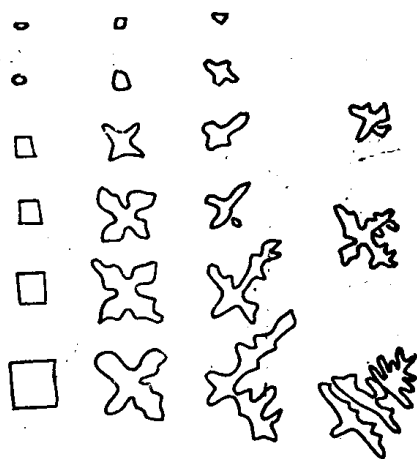


图1-15 晶体形状与冷却速度的关系

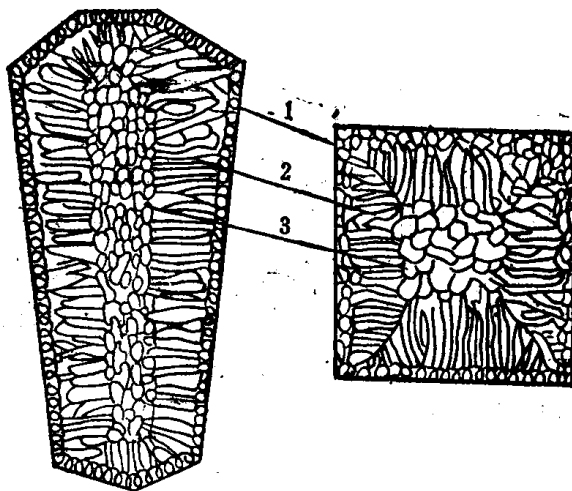


图1-16 铸锭组织示意图

表面结晶粒层：这是由于液体金属刚刚注入锭模时，模壁温度较低，表面层的金属液体遭到了剧烈冷却，在较大过冷度下结晶，得到了等轴结晶粒组织。

中间柱状晶粒层：在表面细晶粒层形成后，把液体金属与锭模隔开，这时锭模温度已经升高，散热减慢，而且散热出现了方向性，在垂直模壁的方向散热最快，并且此方向上存在内高外低的温度坡度。已凝固层沿此方向生长，形成了柱状晶层。

中心等轴晶粒层：结晶进行到接近铸锭中心时，液相内部内外温差小，锭模已成为一个高温外壳，加上结晶潜热放出，使液体散热减慢，内部温度趋于均匀，同时进入过冷状态，使铸锭中心部分形成了等轴的粗晶粒层。

表面细晶粒层，比较致密，机械性能好，但这一层往往很薄，只对某些薄壁铸件的

性能起一定作用。柱状晶粒区，在兩排相对生长的柱状晶粒相遇的结合面上存在着脆弱区。在此区常有低熔点杂质和非金属夹杂物聚结，锻压轧制时容易沿结合面裂开。

二、铸态金属晶粒的大小

因为细晶粒金属晶界多，在晶界处晶格歪扭畸变，提高了抵抗塑性变形的能力，使强度、硬度提高。同时，由于细晶粒金属晶粒数目多，变形可均匀分布在许多晶粒上，因此细晶粒金属不仅强度、硬度高，而且塑性和韧性好。通常是希望金属材料的晶粒越细越好。

每个晶粒都是在结晶时由晶核长成的，晶粒的大小决定于成核速率 N （成核数目/厘米³·秒）和生长速率 G （厘米/秒）。

如图1-17所示，成核速率 N 愈大，生长速率 G 越小，则晶粒越细。在过冷度不大的情况小，成核速率 N 与生长速率 G 都随过冷度的增加而增加。但是两者增长速度不同，成核率增长要快些，所以随着冷却速度的增加，过冷度增加，铸态金属的晶粒应该变细。但是，这对壁厚稍大的铸件，只有靠近铸型表面的一个薄层可以靠加速冷却使晶粒细化。当过冷度特别大时，成核速率与生长速率反而会下降，这是因为温度太低时原子扩散能力降低，从而限制了结晶速度。对于金属及合金来说，达不到那样大的过冷度，只有某些盐类结晶过程中有这种规律。但是，对于后面要讲的金属及合金的固态相变来说，这一规律是完全适用的。

凡能促进形核，抑制长大的因素都能细化晶粒。工业生产中细化晶粒的方法很多，其中变质处理是一种广泛采用的有效方法。变质处理就是在浇注时向液态金属中加入一定的变质剂以形成大量的非自发核心，均匀分布在液体各处，使铸件得到均匀细化的晶粒。

此外，在金属结晶时给予机械振动或通以超声波，或在结晶时液体金属与晶体作相对运动（如离心铸造）也都能促使晶核形成而使晶粒细化。

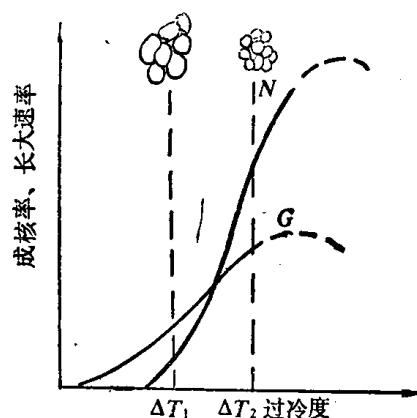


图1-17 成核率 N 及长大速率 G 与过冷度的关系

第三节 合金的结构

合金是由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)所形成的物质。组成合金最基本的独立物质叫组元。如工业上广泛使用的钢和铸铁,就是由铁和碳两种组分组成的合金。因为纯金属机械性能较低,所以除了要求导电性高的电器材料外,工业上很少使用纯金属。合金不但具有比较高的机械性能,而且常常可以得到纯金属不具备的特殊性能。合金的优良性能是由其内部组织及合金的相的结构、性能和各相的组合情况决定的。为了研究合金的性能,必须首先了解合金中的相结构。

合金中的相是指合金中具有同一化学成分,同一聚集状态,并且以界面互相分开的各个均匀的组成部分。如:在室温下的纯铁是由单相的 α -Fe组成。

根据合金元素之间的相互作用不同,合金中相结构大致可以分为固溶体和化合物两大基本类型。在合金中还经常存在两种晶体的混合物叫机械混合物。

一、固溶体

化学上说的物质互相溶解，就是它们的原子（或分子）均匀地混合在一起。如盐溶于水，就是盐和水的分子互相均匀混合。

熔化的铁（液态）能溶解碳，凝固后（固态）的铁仍能溶解一定量的碳。这种在固态下互相溶解所形成的物质叫“固溶体”。在这里铁的溶剂，碳是溶质。溶质原子溶入溶剂晶格以后，溶剂晶格类型不变。

工业上所用的合金大多数是单一固溶体或以固溶体为主的机械混合物。根据溶质原子在溶剂晶格里存在的位置，可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

1. 置换固溶体

置换固溶体就是溶质原子占据了溶剂晶格的一些结点，在这些结点上溶剂原子被溶质原子置换了。合金钢中的锰、铬、镍、硅、铝等很多元素都能与铁形成置换固溶体。

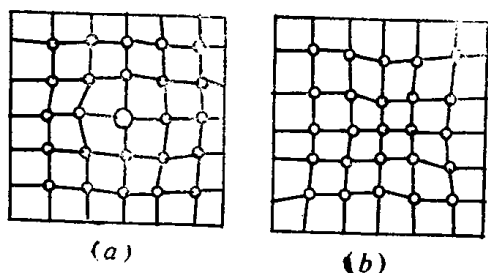


图1-18 置换固溶体中的晶格畸变

a—溶质原子半径大于溶剂原子半径

b—溶质原子半径小于溶剂原子半径

图1-18a、b表示形成置换固溶体后，产生的晶格畸变，这种畸变使合金的强度及电阻升高。当固溶体中溶质元素浓度增加，固溶体的强度、硬度也随之提高。这是因为第二种元素浓度增高，晶格畸变加大，使变形时位错移动困难，因而提高了合金的强度和硬度。这种溶质元素使固溶体硬度和强度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是提高材料机械性能的重要途径之一。例如我国普通低合金钢就是利用锰（Mn）、硅（Si）

等元素使钢材机械性能提高的。

根据组元相互之间的溶解能力，可形成无限固溶体，也可形成有限固溶体。所谓“组元”就是指组成合金最基本的独立物质。只有当组元之间原子能够无限地相互代替时才能形成无限固溶体。因此形成无限固溶体主要决定于下列条件：晶格类型相同，原子大小相近，周期表中位置相邻近。例如铜和镍都是面心立方晶格，铜原子半径为 $1.28\text{\AA}$ ，镍原子半径为 $1.24\text{\AA}$ ，它们的原子半径差为3.2%，是同一周期，并且相邻，所以无限固溶。

2. 间隙固溶体

溶质原子进入溶剂原子的间隙而形成的固溶体叫做间隙固溶体。过渡族金属元素（如铁、钴、镍、锰、铬、钼）和氢、硼、碳、氧、氮等原子半径较小的非金属元素结合在一起，能够形成间隙固溶体。形成间隙固溶体时，溶剂与溶质原子直径一般为 $d_{\text{溶质}}/d_{\text{溶剂}} \leq 0.59$ 。由于溶剂晶格中空隙的位置是有限的，因此上述元素在过渡族金属中只能有限地溶解。

间隙原子同样导致合金晶格畸变，因此，随着间隙原子数量的增加，固溶体的硬度、强度和电阻也随之升高。

二、化合物

两元素形成化合物的倾向，决定于它们在元素周期表中的位置，相距愈远，电学性能相差愈大，则愈容易形成化合物。化合物的性质与其组元的性质完全不同。金属化合物在合金组织中是一个有效的强化相。因此，合金中化合物的出现及其数量与分布对

合金性能发生很大影响。合金组织中的化合物一般都具有较高的硬度和较大的脆性，它使合金的硬度、强度提高，同时导致合金的韧性下降。例如钢中的 Fe_3C 可使钢的强度、硬度提高而塑性降低。

三、机械混合物

在液态下组元互溶的合金凝固后，可能形成单相固溶体或单相金属化合物，还可能是两种固溶体的混合物或固溶体加金属化合物。后者通称机械混合物。

两种固溶体或固溶体与化合物的混合物组成的合金，其性质决定于两种固溶体或固溶体与化合物的性质及它们各自的形状、大小、数量及分布。例如碳钢退火状态下的组织就是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体（铁素体）与化合物渗碳体（ Fe_3C ）的混合物。铁素体软而韧，渗碳体（ Fe_3C ）硬而脆。不同含碳量的钢，渗碳体的数量不同，其性能有很大的差别。

混合物的机械性能，根据两相的相对数量，大致可用算术平均值估算，但其形状、大小、分布状态对性能也有很大影响。

第四节 合金状态图

合金状态图是用图解的方法表示不同温度及成分下合金系中各相的平衡关系。所以又称平衡图或相图。

利用状态图可以知道不同成分的合金，在不同温度有哪些相，它们的相对含量和成分。掌握了这些变化规律就可以知道合金的组织状态，并能预测合金的性能，也可以按要求研制新合金。在生产实践中，状态图可作为制定合金铸造、锻造及热处理工艺的重要依据。

现以二元合金状态图为例，了解合金组织与性能的关系，为学习本课程打下一定的理论基础。

一、状态图的建立

为了绘制状态图，必须通过实验测定一系列不同成分的合金状态变化的温度（临界点），然后依此数据绘出状态图中所有的线条。合金状态变化的临界点可用热分析法、X射线晶体结构分析法、显微分析法、膨胀法，电阻法等方法测定。

热分析法是最基本、最常用的方法。这种方法是将不同成分的合金极缓慢地加热或冷却。每经过相等的时间间隔测量一次合金的温度，根据这些温度数据绘出合金的加热或冷却曲线，如图1-19a所示。由于合金从一种状态转变成另一种状态时会发生吸热或放热现象，而使加热（或冷却）曲线发生明显的转折或呈水平。用加热或冷却曲线确定了合金的临界点，再将各临界点表示到温度-成分坐标系中相应的位置上，把各相同意义的临界点连接起来，就得到如图1-19b所示的合金状态图。

二、匀晶状态图

两组元组成的合金系，在液态时无限互溶，在固态也无限互溶时便形成匀晶状态图。例如Cu-Ni、Au-Ag、W-Mo、Cr-Fe等合金都形成这类状态图，它是基本相图中最简单的一种，仅由两条线（液相线和固相线）所分隔开的两个单相区和一个双相区（液相和固相并存区）组成。

1. 铜镍合金状态图相区分析