

火力发电厂 高温金属监督

西安热工研究所 吴非文

西北电业管理局

第二篇 锅炉金属材料 and 金属监督

西安热工研究所

吴非文 高级工程师

目 录

第一章 金属基础知识

第一节 引言	(1)
第二节 金属的晶体结构	(2)
第三节 塑性变形及再结晶	(9)
第四节 钢中的基本组织及其性质	(13)
第五节 铁碳平衡图	(23)

第二章 热处理

第一节 热处理基础	(30)
第二节 退火	(46)
第三节 常化(正火)	(49)
第四节 淬火	(49)
第五节 回火	(53)
第六节 表面处理	(53)
第七节 热处理所产生的缺陷以及钢的脆性	(58)

第三章 钢号表示方法

第一节 钢的分类和用途	(62)
第二节 碳素钢钢号表示方法	(64)
第三节 合金钢钢号表示方法	(66)
第四节 捷克和西德的钢号表示方法	(69)
第五节 其它国家对钢号的表示方法	(73)

第四章 金属的力学性能(机械性能)

第一节 静力试验下的力学性能	(76)
第二节 动力试验下的力学性能	(84)
第三节 高温短时力学性能	(86)

第五章 金属的蠕变和松弛

第一节 金属的蠕变	(88)
-----------	------

第二节	金属的持久强度	(93)
第三节	持久塑性	(97)
第四节	蠕变与温度和应力的关系	(99)
第五节	金属的松弛	(101)

第六章 金属在长期运行中组织性质的变化和其它损坏

第一节	珠光体球化和碳化物的聚集	(106)
第二节	石墨化	(121)
第三节	时效和新相的形成	(125)
第四节	热脆性	(126)
第五节	合金元素在固溶体和碳化物相之间的重新分配	(130)
第六节	金属在高温下的氧化和腐蚀	(136)

第七章 锅炉和蒸汽管道钢管用钢

第一节	过热器管和蒸汽管道钢管用钢	(141)
第二节	水冷壁管和省煤器管用钢	(172)
第三节	汽包及联箱用钢	(174)
第四节	受热面吊架用钢和铸铁及吹灰器用钢	(178)
第五节	磨煤机主要零件用钢	(181)
第六节	锅炉钢生产过程和缺陷	(183)

第八章 锅炉爆管现象分析

第一节	超温、过热的概念与错用钢材（拉尔森—米列尔公式在火力发电厂的具体应用）	(187)
第二节	长期过热爆管分析	(190)
第三节	短期过热爆管分析	(198)
第四节	水冷壁管的氢损坏爆管	(203)

第九章 过热管和主蒸汽管道金属监督

第一节	过热器管的监督方法	(208)
第二节	低碳钢过热器管石墨化监督	(216)
第三节	蒸汽管道的金属监督	(221)

第十章 电站金属事故脆断和金相分析

第一节	金属事故的分析程序	(237)
第二节	断口分析	(238)
第三节	宏观分析方法	(247)
第四节	金相分析方法	(249)
第五节	用于金相和断口分析的设备	(255)

锅炉金属材料 and 金属监督

第一章 金属基础知识

第一节 引言

金属和合金的性质是由其内部组织决定的。例如银、铜等纯金属具有良好的导电和导热性能，是与它们的内部组织构造密切相关的；而对合金（所谓合金是由两个或更多个元素熔合而成的物质），其性质主要决定于合金的成分、冶炼条件、冷加工条件和热处理状况等。金属学就是研究金属和合金的性质与它们内部构造之间的关系，以及影响金属与合金组织和性质的因素的一门科学。利用金属学的知识，就可以回答：为什么这种钢比那种钢好，这个零件只能用这种钢而不能用那种钢，等等诸如此类的问题。我们知道，在组织相同时，合金钢的强度一般都要比与之相同含碳量的碳素钢为高，这从金属学上来说，就是合金的性质与合金的成分有关；热处理过的钢的性能一般要比未经热处理的好，这从金属学上来说，其性能决定于钢的内部组织，等等。

金属和合金的性能，大致可以归纳为以下几方面：

- (1) 力学性能，也称机械性能，如强度、塑性、硬度及韧性等；
- (2) 化学性能，如抗腐蚀性等；
- (3) 物理性能，如磁性、导电性和导热性等；
- (4) 工艺性能，如切削加工性、可焊性、淬透性及冷加工性等；
- (5) 其它性能，如耐热性等。

人们使用金属和合金主要是用它们的性质。性质是由组织决定的，并受很多因素的影响。掌握了金属学就可以用改变金属组织的方法以获得人们所需要的性质。诚然，象其它科学一样，我们仅能利用客观规律来改变金属的组织性质，而不能脱离客观规律来凭空得到我们要想得到的组织性质。

金属学是不能脱离试验的，它本身是一门试验性的科学。

在我国早期历史上可以清楚地看到我们祖先在金属科学方面的成就和贡献。例如，《史记》中记载“黄帝采铜首山”，说明我国劳动人民很早就使用了金属铜。在商代，我国已有了大量精美的青铜器作为兵器、生产工具、日用品和装饰品等。又如《周礼考工记》中记载有“六分其金而锡居其一，谓之钟鼎之齐；五分其金而锡居其一，谓之斧斤之齐；四分其金而锡居其一，谓之戈戟之齐；三分其金而锡居其一，谓之大刃之齐；五分其金而锡居其二，谓之杀矢之齐；金锡半，谓之鑿燧之齐”。这是一个很朴素的合金学，文中的齐即指合金，金是指铜，锡是指锡、铅、锌等。这说明我国劳动人民很早就知道了铜合金的成分和它的性能间的关系，不同成分的铜合金可作不同的用途。这和现今的铜合金

的知识是很相符合的。其它的例子很多，例如我国很早就知道用检查金属制品的宏观组织的方法来区别它们的好坏，以及知道用表里不一的办法来制造好的刀剑，这些例子在明朝的《格古要论》和《天工开物》中均有详细记载。可惜，这些成就在长期的封建统治和半封建半殖民地社会中并未得到发展。只有在解放后，我国的金属学才获得了飞速的发展。

第二节 金属的晶体结构

一、金属的结晶结构

自然界中有很多种化学元素，它们可以分成金属和非金属两大类。金属在自然界所有元素中占大部分。元素名称上带有“金”偏旁的即属于金属。

金属和非金属有很大的区别。金属的特点是，有金属光泽并具有可塑的性质。金属还有良好的导电性和导热性。

从结构上来说，所有的金属在固态时都是晶体。

什么是晶体？

物质都是由细小的质点即原子、分子、离子等组成的。当构成物质的这些细小的质点在空间按一定次序作有规则的排列时，这就构成了晶体的结构。这种排列的特点，可以象图2—1—1中那样示意地表示出来。图2—1—1中所表示的仅是一个单位晶格，晶体的结构就是由这种单位晶格在空间无限重复堆积而成。因此，所谓晶体就是其质点按一定次序作有规则排列的物体。而所谓非晶体是指构成物质的质点在空间是无规则而杂乱地堆积着的物体。从打断的断口看，沥青、玻璃、松香等属于非晶体，它们的断口是光滑、发亮的，而属于晶体的钢、生铁、冰、盐等，它们的断口是粗糙的，而且可看到颗粒的结构。

在力学和物理性能上，晶体有自己的特点：

(1) 有固定的熔点 晶体在一定的温度下熔化，例如金属就有固定的熔点。不同金属的熔化温度也不同，如铝的熔点是 658°C ，而铜的熔点则是 1083°C 等等。熔点在温度和时间的曲线图上表现为水平线，如图2—1—2是晶体的温度和时间的曲线图。所示的水平线段 ab 为该晶体的熔点。图2—1—3是非晶体的温度和时间的曲线图，它就没有水平线段，而是随着时间的推移，温度慢慢升高，非晶体变软，渐渐熔化，不能看到有固定的熔化温度。

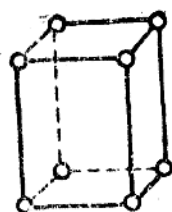


图2—1—1 晶体的空间晶格（正方晶格示意图）

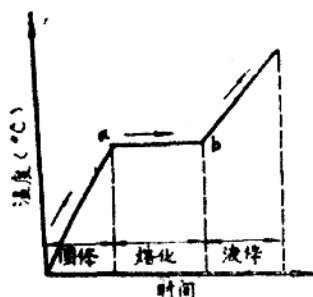


图2—1—2 晶体的温度-时间曲线

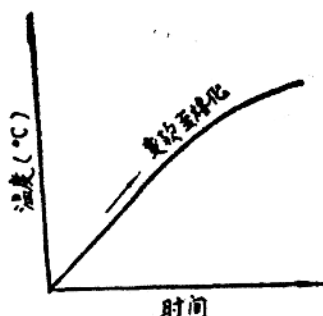


图2—1—3 非晶体的温度-时间曲线

(2) 晶体具有各向异性的性质 晶体在各个不同的方向上,其力学和物理性能上存在着差异。例如,当对单晶体铜在各个方向上进行拉力试验时,其各个方向上的强度极限值 σ_1 分别为14和35公斤/毫米²;延伸率数值分别为10%和50%。这个现象就是晶体的各向异性的性质。晶体的各向异性是由于在各个方向上原子排列的密度有所不同而造成的。非晶体由于原子排列紊乱,不规则,因此就不能表现出各向异性的性质。

应当知道,并不是只有金属才是晶体。在自然界中有一些非金属也都是晶体,如石墨、石英等。由于它们是晶体,因此也同样具有晶体的结构和性质上的特点。

金属学的研究对象是金属,因此,我们所感兴趣的是金属晶体的构造。通常,金属的

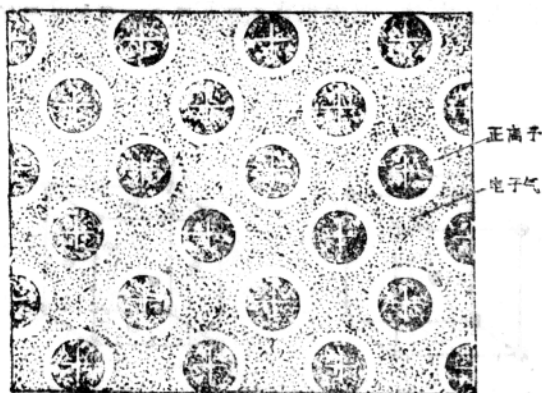


图2—1—4 金属的结晶构造示意图

结晶构造可以如示意图2—1—4那样来表示:金属的晶格由正离子组成,由于金属元素很容易失去价电子,所以认为在金属的晶格中的电子不属于任何一个质点(即正离子),而是属于整个晶格。处于这种状态的电子是很自由的,像气体一样充满着金属的晶格,这就是所谓的“电子气”。因此金属的晶格就是这样的由正离子在空间按一定顺序排列,构成晶格,而“电子气”充塞其间。在金属晶格中存在着几种作用力:自由电

子与正离子之间的吸引力,正离子和正离子之间、电子和电子之间存在着相互的排斥力。这些吸引力和排斥力是互相平衡的,这种结合方式就称为金属键。

金属的一些特性,可以简单地用这种金属键的结合方式来解释。例如,金属之所以具有金属的光泽是由于光线被自由的“电子气”所反射的缘故。金属之所以具有较高的塑性是因为在外力的作用下,金属晶格的原子平面发生相对移动,即产生变形后,金属晶体中的离子和“电子气”之间又会恢复原来的相对关系,“电子气”可认为是晶格原子平面相对移动时的“润滑剂”;因此,金属表现出可塑的特点。金属之所以具有良好的导电性是因为在外电场的作用下,“电子气”的定向流动形成了电流,金属的导热性也同样由于“电子气”在温度场作用下运动的结果。金属的电阻随温度升高而增大的现象也同样可用金属的结晶构造的结合方式来解释:当温度升高,金属中正离子的振动振幅随温度升高而增大,增加了“电子气”在外电场作用下定向流动的阻力,因而表现出了金属电阻增加。总之,金属所具有的一些主要特性都与金属键的结合方式密切相关。

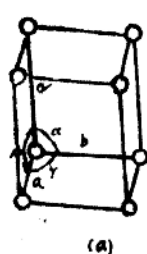
金属晶体中的原子是怎样按一定的规则排列呢?通常为了研究的方便,我们都从晶格上取下一个单位晶格,称为“晶胞”。晶胞可以代表该晶体结构排列的特征。在结晶学上,把晶胞的三个棱长称为晶格常数,标以 a 、 b 、 c ,晶格常数的单位为埃($\text{\AA}$), $1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米,三个棱的夹角依次称为 α 、 β 、 γ 如图2—1—5(a)所示。晶格中各方位的原子平面叫做“晶面”,晶格中由结点所组成的任何直线,代表晶体空间的一个方向,

称“晶向”，若 $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，这种晶格称为立方晶格，图 2—1—5 (b) 即为简单立方晶格的示意图，它也是一个简单立方晶胞的示意图。

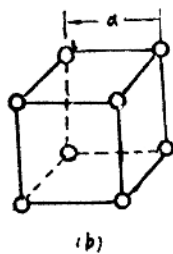
金属的晶格通常要比简单立方晶格复杂一些，按常见的有两类：

(1) 体心立方晶格，它的特征是除了 $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 以外，其立方体的结点上和立方体的中心各有一个原子（实际上是正离子，为简单起见，统称原子）。如图 2—1—6 所示。属于这一类的金属有：铬、钒、钼、钨、铌、 α 铁（即在温度 910°C 以下及温度在 $1390 \sim 1534^\circ\text{C}$ 之间的铁）等。

(2) 面心立方晶格，是立方体各结点上和立方体各个面中心（共有六个面）各有一个原子，如图 2—1—7 所示。属于这一类型的金属有：铝、铜、镍、金、银、 γ 铁（温度在 $910 \sim 1390^\circ\text{C}$ 之间的铁）。面心立方既是立方体，当然也有 $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 的关系。



(a)



(b)

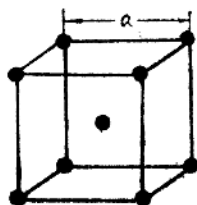


图 2—1—6 体心立方晶格

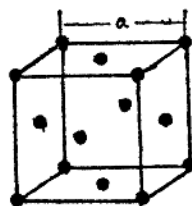


图 2—1—7 面心立方晶格

图 2—1—5 晶胞

(a) 简单三斜晶胞；(b) 简单立方晶胞

a, b, c —晶格常数； α, β, γ —晶面夹角

显而易见，对于简单立方、体心立方和面心立方等立方晶格，仅有一个晶格常数 a 。原子直径 d 与晶格常数 a 之间有下列关系：

$$\text{对于面心立方：} d = \frac{a\sqrt{2}}{2} ;$$

$$\text{对于体心立方：} d = \frac{a\sqrt{3}}{2} .$$

这关系从几何上可以很容易地推出来。

除此而外，还有六方晶格、正方晶格等。

二、金属晶体的实际构造

虽然有些金属的晶体是由原子有规则的排列成立方体的结构，但实际上金属晶体的外形并不成立方体，而具有不规则的外形。在日常生活中，往往有这样的经验：即当打断一块钢铁时，在断口上可以看见无数细小的颗粒，这样颗粒都没有规则的外形，在各颗粒之间，它们的原子在空间排列的方向（位向）是不一致的，而在每个颗粒内部，其原子排列的位向则基本上是一致的。这种颗粒我们就称为晶粒或小晶体。在显微镜下，晶粒可以很明显地看到。由于每一个晶粒都是一个晶体，由此可见，金属晶体的尺寸是不大的，通常

其直径只有 10^{-2} 厘米左右。因此,金属的工件是由大量的晶体构成,这就是多晶体的构造。

用特殊的方法,可以得到由一个晶体构成的金属块,这就是单晶体。单晶体在性能上表现出各向异性的特点,其原子在空间按相同方向排列。单晶体有时可以造得很大,可重达数百克以上。

但是,实际上看见的都是多晶体,它们由空间位向不同的晶粒堆成(图2—1—8)。晶粒之间是晶粒边界。因此多晶体是由晶粒和晶粒边界组成的。

但是,即使在一个晶体中,也不能认为晶格排列会像理想晶体那样整齐(图2—1—9a),在实际的晶体排列中有很多缺陷存在(图2—1—9b)。这些缺陷是原子偏离了完全规则排列的下述现象造成的:

1. 晶格空位和间隙原子

从缺陷存在的几何特点上看,这类缺陷叫点缺陷。在实际的晶体结构中,并不是所有的晶格结点都被原子占满,而是在某些结点处出现了空着的位置,这叫做晶格空位;同时在某些晶格空隙处又出现了多余的原子,这原子并不在正常的晶格结点上,这就叫做间隙原子。晶格空位和间隙原子如示意图2—1—10所示。晶格形成空位后,周围的其它原子便会发生靠拢现象;当晶格间隙中有间隙原子存在时,就会使周围的结晶晶格发生撑开现象。无论是靠拢还是撑开都使晶格产生歪扭,这种歪扭就称为晶格畸变。



图2—1—8 由不同空间位向晶粒构成的多晶体示意图

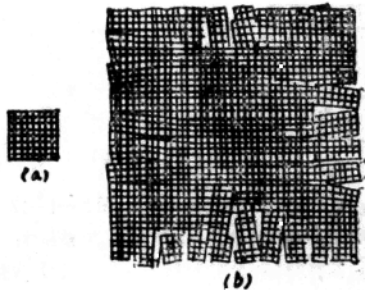


图2—1—9 晶体晶格示意图
(a) 理想晶体晶格; (b) 实际晶体晶格

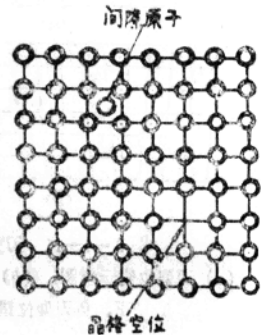


图2—1—10 晶格空位和间隙原子示意图

晶格空位和间隙原子的产生是原子热运动的结果。只要温度高于绝对零度,金属原子都是以晶格结点为平衡位置作热振动,由于温度增高,热振动的振幅和频率都会增大,就有可能在某些晶格结点上由于原子热运动的结果逃离晶格结点位置,就形成了晶格空位;离位的原子有可能跑到晶格的其它空位上,也可能跳到晶格的空隙位置上,形成了间隙原子。

随着温度的升高,金属晶格中空位数目也增加。

2. 位错

从缺陷存在的几何特点上看,这种缺陷称为线缺陷。所谓晶体中的位错,就是在晶体中的某处有一列或若干列原子,发生了某种有规则的错排现象。假如把结晶格子放大来看,位错很象是一个具有一定宽度的通道,可以很容易想像,位错所在地区的晶格是有畸变的,也是一个应力的集中区域。

最简单的位错有刃型位错和螺型位错两种。

(1) 刃型位错 如图 2—1—11(a) 所示, 在一个完整晶体的某一个晶面, 如图中 ABC 面以上, 于某处 (如 E 处), 沿 EF 线被垂直的插入了半个原子面, 这个原子面在 ABC 面以下便没有了, 造成了 ABC 面上、下两部分晶体间结晶格子的错排现象。由于这半个原子平面像刀刃一样插入 ABC 面以上的上部晶体中, 因此就把这种位错称为刃型位错。产生位错的边缘线 EF 称为位错线。

刃型位错分为正、负两种, 当多出的半个原子平面位于晶体的上方时, 称为正号刃型位错, 在图上以符号 “ $\perp$ ” 代表; 反之, 若多出的半个原子面是处于晶体的下方时, 则称为负号刃型位错, 以符号 “ $\dashv$ ” 代表。图 2—1—11(b) 即画出了正、负两种刃型位错。

正、负刃型位错相遇时, 可以彼此抵消。

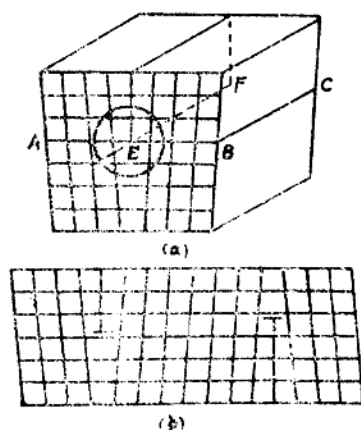


图 2—1—11 刃型位错示意图

(a) 刃型位错示意图; (b) 处于同一晶体中的正、负刃型位错

(2) 螺型位错 螺型位错的情形, 并不象刃型那样有半个原子平面处于晶体内部。图 2—1—12 是晶体中位错的示意图, (a) 表示完整晶体; (b) 为含有刃型位错的晶体; (c) 为含有螺型位错的晶体。由 (c) 可以看出, 螺型位错的情况是, 原子平面沿一根



图 2—1—12 晶体中位错示意图

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

近似和原子平面相垂直的轴线盘旋上升, 每绕一周, 原子面上升一个晶面间距, 这情形就很象一个盘旋上升的楼梯, 边缘的轴线处即是一个螺型位错线。图 2—1—13 为晶体中的螺型位错示意图。从图上可以明显看出, 平面 Q 使晶体分成两部分, 一部分晶体相对于另一部分晶体沿着 Q 平面在 CD 方向上错动了一个晶面距离。如图中圆形箭头所示, 出现了稍为弯曲的水平原子平面, 这些弯曲的水平原子平面连接起来, 就在晶体中形成了一个螺旋形状的联合原子面, 就是螺型位错。图中 CD 线就是螺型位错线。

显然, 螺型位错可以有右旋的和左旋的。

晶体中位错的存在, 目前已可用一些试验方法将其显露出来, 如用浸蚀法得到的位错腐蚀坑, 可显露其存在的踪迹等。

可用位错密度来表示晶体中存在位错的多少。位错密度的表示方法有二: 一种是位错的体密度, 它以单位体积中位错的总长度表示, 单位是厘米/厘米³; 另一种是位错的面密度, 它以单位面积的位错数目表示, 其单位是根/厘米²。

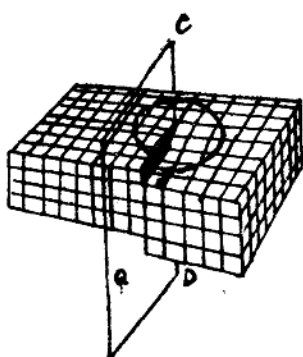


图 2—1—13 晶体结构中的螺旋位错示意图

位错在晶体中的存在及密度的变化，对金属的性能如强度、塑性和如蠕变、原子扩散、相变等许多结构变化起着重要的影响。

3. 嵌镶块（亚晶）、晶界、嵌镶块晶界（亚晶界）

(1) 嵌镶块 实际的晶粒内其原子位向排列并不是完全一致的。一个实际晶粒往往由很多相互位向差 $10' \sim 20'$ 的小块所组成，在这种小块中的晶格的排列方向是严格一致的。这种小块称为嵌镶块，又叫亚晶或亚结构。其尺寸大小约为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 厘米。图 2—1—14 为晶粒内嵌镶块的示意图。嵌镶块可以在电子显微镜下看到。

(2) 晶界和嵌镶块边界（亚晶界）这是晶体中的面缺陷，所谓面缺陷是指在空间平面的两个方向上尺寸比较大，而厚度方向上尺寸很小的缺陷。

在多晶体中，基本的组成是两部分：晶粒和晶界。晶界是晶粒与晶粒相互交接的部位。两个晶粒原子的排列方向是不同的，因此晶界作为一个有一定宽度的过渡带，必然要受到相邻两侧晶粒的影响。图 2—1—15 是两个排列方向不同的晶粒 I 和 II 的晶界示意图。通常认为，晶界处的原子是无规则排列的，并处于两晶粒的位向的折衷位置上。由于晶界的特殊构造，造成了晶界一些主要特性：

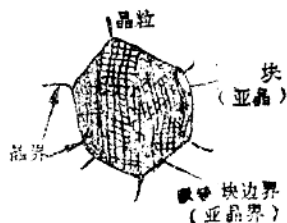


图 2—1—14 嵌镶块示意图

晶粒间界

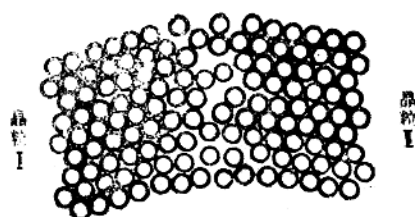


图 2—1—15 晶界示意图

- 1) 晶界比晶粒容易被腐蚀。例如，一些锅炉管表面的氧化往往从晶界开始；
- 2) 晶界的熔点比晶粒低；
- 3) 当金属内部发生相变时，晶界处是优先成核的位置；
- 4) 原子在晶界上扩散比晶内快；

5) 晶界对晶粒的滑移变形起阻碍作用，晶界不易产生塑性变形。在常温和中温下，晶界的强度和硬度均较晶内为高，而高温下晶界的硬度和强度均较晶内为低。晶粒和晶界的强度与温度的关系如示意图 2—1—16 所示。图中晶粒强度和晶界强度相等之温度 T_0 ，称为等强温度。晶粒强度与晶界强度随温度的变化关系，对于发电厂高温部件所用钢材在高温下长期运行的表现有很重要的意义。

(3) 晶界处容易聚集与晶粒元素不同的其它杂质元素的原子。

除了晶界以外，一个晶粒内部各嵌镶块之间有嵌镶块边界（亚晶界），嵌镶块的边界的原子排列存在着畸变。通常认为，嵌镶块的边界是由位错构成的，这已由试验所证实。嵌镶块边界的存在影响金属的性能。例如，嵌镶块的细化，可以提高金属的强度。

实际晶体中存在的晶界和嵌镶块边界这些面缺陷，对于高温下运行的金属组织性质的变化，以及金属在高温下的变形和断裂过程，都会产生很大的影响。

由于多晶体由很多位向不同的晶粒组成，因此实际的金属并不表现出单晶体那样的方向性。我们称多晶体的这种性质为“伪无向性”。

三、固态中的相变

随着温度不同，金属能以气态、液态和固态三种状态存在。

无论从液态变成固态，或是在固态中，金属从一种结构变成另一种结构都会发生结晶过程，我们把这种变化称为相变。

固态中的相变是在一定温度产生的，它在温度-时间曲线上表现为一段水平线段（图2—1—17中的 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ ）。当温度升高时， $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变在某一温度 T 发生；而在冷却时， $\beta \rightarrow \alpha$ 的转变在另一温度 T' 时发生。在理论上 $T = T'$ ，但在实际上 $T \neq T'$ ，其差值 $\Delta T = T - T'$ ，即被称为热滞。

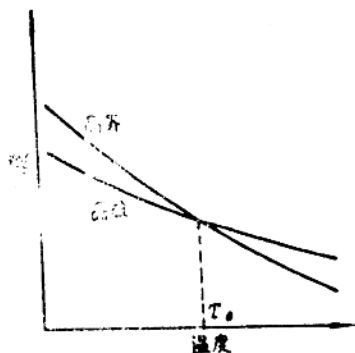


图2—1—16 晶粒强度和晶界强度随温度的变化

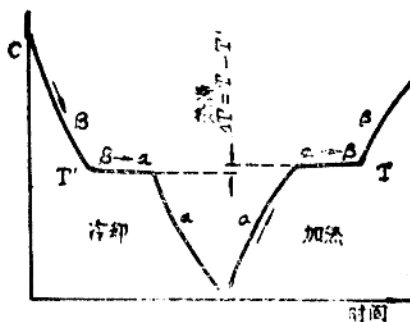


图2—1—17 固态相变时的加热和冷却曲线

当温度变化时，所以会发生固体中相变是由于某些金属具有不同的结晶结构，而每一种结构都是在某相应的温度范围中才是稳定的。例如，纯铁有 α -Fe、 β -Fe、 γ -Fe和 δ -Fe，按结晶构造来讲，属于体心立方的为 α -Fe、 β -Fe和 δ -Fe；属于面心立方为 γ -Fe。它们的存在的温度范围为： δ -Fe，1390~1534℃； γ -Fe，910~1390℃； α -Fe， $\leq 910^\circ\text{C}$ （769℃为磁性转变点，769℃以下为有磁性的 α 铁；769~910℃的 α 铁是无磁的，通常将这一部分 α 铁又称为 β 铁）。当纯铁在冷却时，其变化如图2—1—18所示。当温度到达1534℃时，纯铁由液体 L 转变为体心立方结构的 δ -Fe；温度到达1390℃，则由体心立方的 δ -Fe转变为面心立方的 γ -Fe；温度到达910℃，则由面心立方的 γ -Fe转变为体心立方的 α -Fe；到769℃，发生磁性转变，在769℃以下，纯铁有磁，而在769℃以上，纯铁是无磁的。由于铁有这种固态相变，我们才有可能用热处理的方法来改变钢铁的性能。

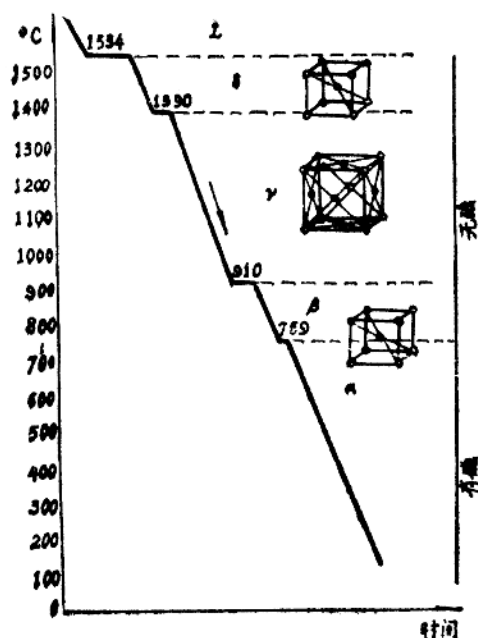


图2-1-18 纯铁的冷却曲线

第三节 塑性变形及再结晶

一、变形、塑性变形对金属组织和性能的影响

加外力会使金属物体的形状发生变化，这就是金属在受力后变形。可以将变形分为弹性变形和塑性变形两大类。凡加外力时金属发生变形，外力去掉后变形完全消失，这种变形称为弹性变形。如果在外力去掉后，在金属上仍然留下了残留变形，则这种变形称为塑性变形（也称范性形变）。只有塑性变形才给金属留下变形的痕迹，因此，也只有塑性变形才对金属的组织性质发生重大的影响。

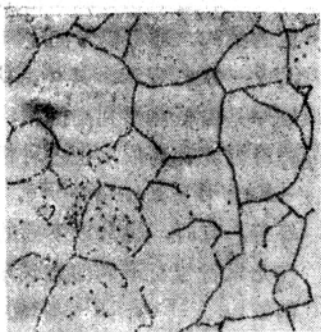
金属在塑性变形过程中，金属的晶粒就沿加工方向（即力的方向）被拉长，甚至当所加外力达到一定值时，变形晶粒会被分裂成许多碎块（这些碎块就是嵌镶块，它也可以在形变时产生），这些碎块顺着变形的方向转动；在金属中的夹杂物也被破碎或变形，并且沿着变形晶粒的界面排列。

大多数情况下，金属的塑性变形是以滑移的方式来进行的，金属在滑移后就会在金属的显微组织上留下滑移的痕迹——滑移线。图2-1-19即是铁在塑性变形前后的组织变化的示意图，图1-19(b)中晶粒组织上的斜线就是滑移线。

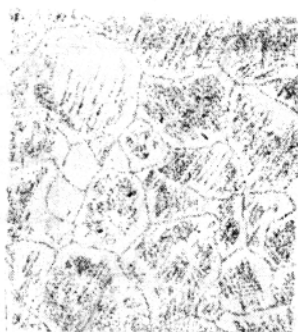
金属在塑性变形后，会使金属的强度和硬度升高，塑性韧性则反而降低（图2-1-20）。这种现象称为加工硬化（或冷作硬化）。性能的变化是由组织变化所引起的。一般认为加工硬化的引起是由于金属在塑性变形后晶面的平整性破坏，由于沿晶面析出一些异质的晶体而使晶面间继续滑移发生困难，因而在这种情况下，必须用更大的力才能使金属继续变形，亦即金属的强度升高，金属就发生了强化。

一种金属在各温度范围下最稳定的结构，通常以希腊字母 α 、 β 、 γ ... 等来表示。其 α 、 β 、 γ 的顺序是由低温相到高温相，例如 Fe 随着温度升高依次把各种相称为 α -Fe、 β -Fe、 γ -Fe、 δ -Fe 等等。有时，也常以下标的形式标在元素符号右下角的方式来表示，例如 Fe_α 、 Fe_β 、 Fe_γ 等等。

各个金属的相变都有自己的特点，其相变温度是各不相同的。例如锡 (Sn) 有两种晶格类型： β -Sn（正方体心晶格，也称白锡）和 α -Sn（金刚石型晶格，也称灰锡）， α -Sn $\rightleftharpoons$ β -Sn 的转变是在 18°C 温度发生的。



(a) 未经塑性变形之前



(b) 经塑性变形之后

图2-1-19 铁在塑性变形时组织的改变 (100×)

除了金属的力学性能发生变化之外,在变形过程中,金属的其它的性质也会发生改变。

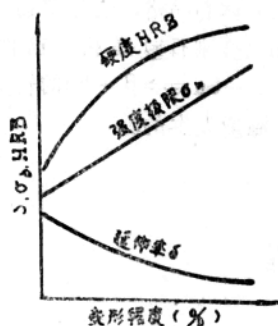


图2-1-20 低碳钢在冷加工时力学性能的变化

例如,金属在冷变形后,密度会随变形程度加大而降低,导电性及抗蚀性等物理和化学性能也随之降低等等。

二、再结晶对金属组织性质的影响

变形后的金属是处在一种不稳定的状态,其原子都处于非平衡的位置上,当金属原子有足够的活动能力时就要回到平衡位置上来。温度升高会促使原子活动能力增加。因此,当温度升高时,金属的结构就要由变形的不平衡状态向比较平衡的状态变化。

再结晶是这样一种过程:即当温度升高时,变形金属的冷变形组织(被拉长的晶粒)逐渐回复到原来的晶粒形状;这时,金属恢复到原来的性能。必须注意一点,即在再结晶时,只有晶粒形状及其相应的性能发生变化,而金属的结晶格子类型并不改变。例如,铁在常温下是体心立方结构的 α 铁,在冷变形后,原来的等轴晶粒组织被拉长,晶格发生了扭歪,原子就处于不平衡的位置上,当发生再结晶后(通过加热的方式),被拉长的晶粒恢复到原来的等轴晶粒的形状,晶格的歪扭被消除,原子回到了平衡位置,相应地发生了一些性能的变化,然而,在整个的变化过程中,仍然是体心立方的 α 铁,晶格类型在整个过程中并没有发生任何的变化。

按照加热温度的高低,再结晶可分为两个阶段:即回复(也称恢复)和再结晶两个阶段来进行的。

回复过程在较低的温度下进行,例如对铁当温度升高到 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时即将完成回复过程。在此过程中晶格的畸变程度会逐步被减轻,金属的力学性能会稍发生一些变化,例如其塑性会略有增高而强度及硬度则略有下降(约比原变形后的数值降低 $20\sim 30\%$)。但此时其显微组织不发生变化,即仍然是被拉长的变形金属的晶粒的组织。可以这样说,在回复阶段,变化只在晶格内部进行,即使其晶格畸变消除,其相应的力学性能的变化被认为

是由于晶格畸变被消除所造成的后果。

当温度再升高时，原子的活动能力更大，此时变形晶粒会再结晶成为新的等轴晶粒，显微组织发生了显著的变化。再结晶的过程首先是在变形晶粒的界面上产生新的“晶核”，从而长大成为新的等轴晶粒。再结晶后，金属的力学性能完全恢复到原来的水平，变形的影响完全被消除。

为便于说明起见，图 2—1—21 将加热时变形金属组织结构的变化（回复和再结晶过程）以示意图解的方式作了清楚的说明。

再结晶过程并不是随着温度升高而均匀地加速的。再结晶的温度要比回复的温度高，并且再结晶过程只有当加热超过某一定的温度时才会以显著的速度来进行。这个温度就是我们通常所称的“再结晶温度”。金属的再结晶温度与其本身的熔点有着固定的近似关系。

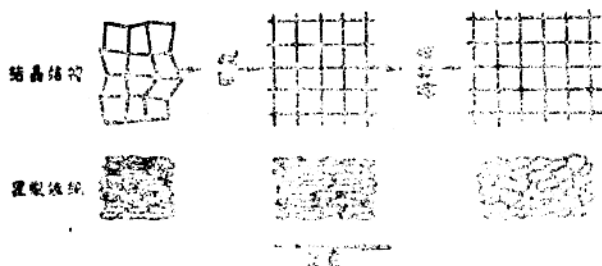


图2—1—21 冷加工（变形）后的金属在加热时其组织和结构的变化示意图

$$T_{\text{再}} \approx 0.4T_{\text{熔}}$$

(2-1-1)

式中 $T_{\text{再}}$ ——再结晶温度，K [绝对温度 K = 摄氏度 (°C) + 273]；

$T_{\text{熔}}$ ——该金属的熔化温度，K。

由此可以看出，金属的熔点愈高，则其再结晶温度愈高，再结晶温度高这一点在高温金属的使用上特别有利。

再结晶温度也与金属的塑性变形程度有关。变形程度愈大，则金属的再结晶温度愈低。图 2—1—22 即说明再结晶温度与变形程度之间的关系。

要说明一点，即按 $T_{\text{再}} \approx 0.4T_{\text{熔}}$ 所求得的金屬再结晶温度为最大塑性变形程度下的再结晶温度，即最低的再结晶温度。

一些金属的再结晶温度举例如下：

铁——约 450 °C；

铜——约 270 °C；

铝——约 100 °C；

锌、锡、铅等——低于室温。

由此可以看出，铁在 450 °C 以上开始再结晶，而锌、锡、铅等低熔点金属在室温即能进行再结晶。

在再结晶分为回复及再结晶两个阶段的基础上，在回复之后，再结晶又以初生再结晶和聚集式再结晶两个步骤来进行。其中初生再结晶是变形的晶粒经生核和长大成为细小的

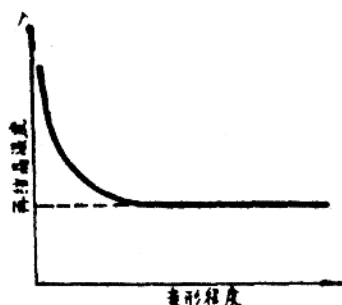


图 2—1—22 再结晶温度与变形程度间的关系的示意图

等轴晶，这一步骤是在再结晶温度以上的较低温度下进行；而聚集式再结晶是当温度再升高时小的等轴晶互相并吞聚合而成为大的等轴晶。再结晶后的最后的晶粒大小是由加热温度、在加热温度上的停留时间及变形程度三者来决定的。加热温度愈高，停留时间愈长，则再结晶后的晶粒愈大。而对变形程度来说，当加热温度和停留时间一定时，变形程度不同对再结晶后的晶粒大小有如图 2—1—23 的关系。图中的最高点处即为临界变形程度，各种金属的临界变形程度都很

小，大多在 5~10% 左右。在冷加工中，为了避免因再结晶后晶粒粗化而导致性能降低，应尽量避免以临界变形程度的变形量来冷加工金属。

在再结晶过程中，金属内的残余应力、力学性能和晶粒度的变化如图 2—1—24 所示。图中所示残余应力（即晶格扭曲）在回复过程中即已大部分消除；而力学性能（强度 σ_s 、硬度 HB、延伸率 δ 、断面收缩率 ψ ）仅在初生再结晶时才发生显著变化（ σ_s 、HB 降低，而 δ 、 ψ 升高），在其它两阶段变化很小；晶粒大小仅在聚集式再结晶时才发生显著

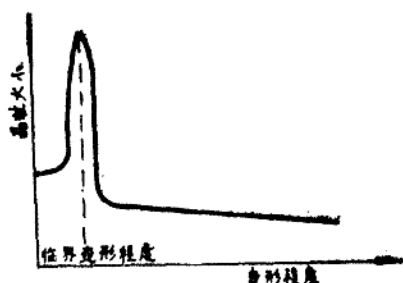


图 2—1—23 再结晶后的晶粒尺寸与预先塑性变形程度的关系

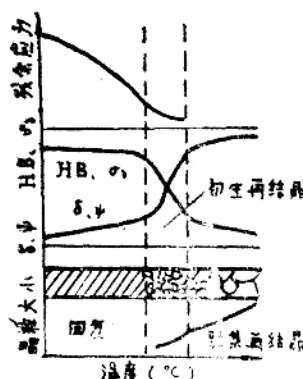


图 2—1—24 冷加工金属在加热时的组织和性能的变化示意图

增大。

由于金属具有变形及再结晶的能力，这就使我们有可能对金属进行变形程度极大的连续加工，这是现实生活中所必需的。譬如我们常常要将大的金属锭块加工成细丝，这就是通过这两个过程交替来进行的：当加工到一定程度，塑性减小而加工困难时，即进行加热，使其再结晶而恢复塑性，以便能够继续加工，这样交替直到达到我们所预定的变形量为止。

将变形金属加热到再结晶温度以上使其再结晶的操作，即称之为“再结晶退火”。通常，为加速再结晶过程，再结晶退火的温度一般要超过金属的再结晶温度 100~200°C 以上。

在此，我们必须区分热加工和冷加工。所谓热加工是指在再结晶温度以上的温度下加工，显然在热加工过程中进行着再结晶过程。因此，以日常的在加工时是否加热来区分冷、热加工是不对的。冷、热加工的区分必须由金属本身的再结晶温度来决定，铁的再结晶温度为450℃左右，当铁在600℃时加工即可称为热加工；对于再结晶温度较高的金属，如钨的再结晶温度为1200℃，即使将其加热到1000℃时加工也仍然是冷加工，因为钨在这个温度被加工时，并不产生再结晶过程；对于有些再结晶温度低于室温的金属，如铅、锡等，即使在室温加工也可称为热加工，因为它们在室温的加工过程中也有再结晶过程同时进行。

通常在热加工后并不是永远没有加工硬化现象的。虽然再结晶的速度是随温度而提高的，但当加工时再结晶使金属的软化速度低于加工而引起的硬化速度时，则在加工后仍然会保留一些加工硬化现象。为消除加工硬化则必需提高加工温度以使再结晶的软化速度足够补偿加工引起的硬化速度时，则加工后才不会出现硬化现象。

加工硬化可以提高金属强度这一现象往往被人们在生产上利用。例如，发电机的套箍则是通过冷加工使其加工硬化而提高材料的强度的；磨煤机用的高锰钢也由于在磨煤时金属材料产生了加工硬化提高了强度而耐磨。

第四节 钢中的基本组织及其性质

一、合金的基本结构

钢是铁和碳的合金。组成合金的独立的、最基本的单元称为“组元”或简称“元”。例如在铁碳合金中，铁和碳都是组元。

根据构成合金的各元素相互作用的不同，合金中可形成固溶体、化合物和机械混合物三种基本组成物，即三种基本结构。

（一）固溶体

两种或两种以上的组元（这些组元可以是金属和金属，也可以是金属和非金属）在液态时能互相溶解，在固态时仍然能互相溶解而成为单一均匀的固相。这种含有两种或两种以上组元的均匀单一的固相物质称为固溶体。固溶体中含量较多的组元称为溶剂或基体，含量较少的叫溶质。例如，钢中的铁素体就是碳在 α 铁中的固溶体，其中 α 铁称基体，碳称为溶质。

固溶体可分为置换固溶体、间隙固溶体和缺位固溶体三类：

1. 置换固溶体

图 2-1-25(b) 为置换固溶体示意图。与图 2-1-25(a) 比较便可以看出，所谓置换固溶体就是溶质原子（图中B）完全无意的分布在溶剂（或基体，图中为A）元素的晶格结点上。就是溶剂元素晶格结点上的某些溶剂原子A被溶质原子B所取代而成的固溶体。置换固溶体的晶格类型和溶剂元素是一致的。

置换固溶体的结晶结构中存在着畸变，这是由于溶剂原子和溶质原子直径不同的缘故。显而易见，当溶剂的原子直径比溶质原子直径小时，形成的置换固溶体的晶格就会在溶质原子附近被撑开，而当溶质原子直径小于溶剂元素的原子直径时，形成的置换固溶体的晶格就会在溶质原子附近靠拢。

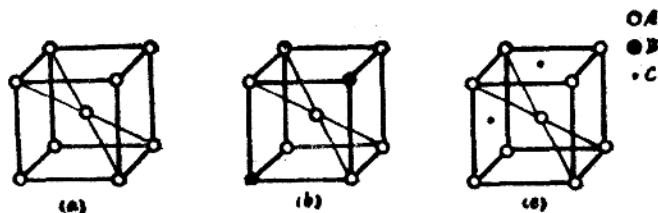


图 2—1—25 结晶结构图

(a) 纯金属; (b) 置换固溶体; (c) 间隙固溶体

A—溶剂元素晶格结点; B—溶质原子; C—间隙原子

由于晶格畸变置换固溶体的强度要比纯金属的强度高。而且, 溶入的溶质原子愈多, 则强度也就愈高。

在置换固溶体中, 同样会存在晶格空位、位错、嵌镶块晶界和晶界等缺陷。

2. 间隙固溶体

溶质原子侵入溶剂元素晶格的间隙而形成的固溶体称为间隙固溶体。如图 2—1—25 (c) 所示。图中溶质原子 C 即侵入溶剂元素 A 的晶格间隙中。形成间隙固溶体要求溶质原子的半径要小。一般要求溶质原子直径与溶剂原子直径的比值应为

$$\frac{d_{\text{溶质}}}{d_{\text{溶剂}}} \leq 0.59$$

时可形成间隙固溶体。

间隙固溶体由于晶格间隙处溶入溶质原子导致晶格畸变, 而且这种畸变总是使晶格撑开的畸变。因此, 随着间隙原子增加, 固溶体的强度、硬度均会升高。

通常, 过渡族元素 (如铁、铬、锰、镍、钒、钛等) 和原子直径较小的元素如氢、硼、碳、氮、氧等结合能形成间隙固溶体。例如铁素体就是碳在 α 铁中的间隙固溶体。

3. 缺位固溶体

其结晶格子往往以某种化合物为基础, 形成固溶体时, 在化合物的结晶格子上出现空位。

(二) 化合物

两种或两种以上元素按一定原子数比例相互化合, 并可以用一简单化学式表示的物质 (如 $A_m B_n$), 称为化合物。形成的化合物的晶格与这些化合的元素晶格完全不同。化合物具有自己的固定的熔点。化合物中由金属之间形成的化合物称为金属化合物。金属化合物一般都具有较高的硬度并较脆, 它存在于合金中, 可使合金的强度提高。金属中的化合物的种类很多, 其中主要有电子化合物和间隙相。

1. 电子化合物

这类化合物是由金属元素化合而成, 其特点是按照一定的电子浓度的比例组成具有一定晶格类型的化合物。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与原子半径较小的非金属元素如氢、氮、碳、硼等形成的化合物。它与间隙固溶体形成的要求条件是一样的。但它与间隙固溶体不同的是, 它是一种化