

钢 铁 金 相 学 与 热 处 理 常 识

李 惠 忠 编

钢铁金相学与热处理常识

李惠忠 编

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张 8 字数 176 千字

1975年11月第一版 1975年11月第一次印刷

印数00,001~51,000册

统一书号: 15062·3192 定价(科二) 0.56元

编 者 的 话

在毛主席无产阶级革命路线指引下，在批林批孔运动推动下，我国社会主义革命和社会主义建设正在前进，形势大好。

工业战线技术革新的群众运动，在各地迅速发展。广大工农兵为了在“抓革命，促生产”中作出更大的贡献，迫切需要掌握科学技术知识，对科技普及读物提出了多方面的和更高的要求。

作者所编的《金相学与热处理常识》一书一九七二年重印后，收到不少读者来信。广大工农兵对技术书籍迫切需要的愿望，对作者不仅起了鼓励和鞭策的作用，同时，使作者感到必须努力修改好这本书，使它更好地为工农兵服务。正是本着这种愿望作者对原书进行了改写。

改写后，定名为《钢铁金相学与热处理常识》。书中主要介绍了金属和合金的内部构造，外部因素（冷却条件、变形条件）对金属、合金内部结构影响的一般规律，金属机械性能的一般知识，碳钢的成分、组织和性能，钢的热处理基本原理及其热处理方法，以及合金钢和铸铁的基本知识。

本书可供从事钢铁热处理和热加工工作的工人以及有关人员阅读。

由于作者水平有限，书中可能有不少缺点和错误，恳请广大工农兵读者批评指正。

编 者

1975.1.

目 录

一、什么叫金相学.....	1
二、金属内部构造.....	4
三、金属的结晶和同素异型转变.....	18
四、金属的机械性能.....	27
五、金属的塑性变形和再结晶.....	38
六、合金的构造.....	56
七、碳素钢的成分、组织和性能.....	64
八、钢的热处理基本原理.....	91
九、钢的热处理方法.....	117
十、钢的化学热处理.....	159
十一、合金钢基本知识.....	167
十二、铸铁基本知识.....	227

一、什么叫金相学

在没有回答什么是金相学这一问题前，让我们先了解以下一些现象，有助于我们认识化学元素及其组成对金属和合金的性能起着何等重要的作用。

在纯金属方面，钨的熔点高达 3380°C ，水银的熔点却在零下 39°C ；金在潮湿空气下经久不锈，而铁表面则锈蚀斑斑；银的电阻系数只有 1.50×10^{-6} 欧姆·厘米，锰的电阻系数却高达 185×10^{-6} 欧姆·厘米；镁的比重只有 1.74克/厘米^3 ，白金的密度为 21.45克/厘米^3 ；钨的硬度为HB264，锡的硬度仅HB5左右。上述数例说明不同的金属元素，具有完全不同的物理、化学和机械性能。

在合金方面，含有2.0% 铍的铜合金，其强度要比纯铜高三倍多；向钢中加入20% 锰，磁铁就对它完全失去吸引作用；纯铁中若含万分之几的硫，在 $1000 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 锤锻时，就碎裂成块。这些实例也说明各种化学元素的组成，对合金的性能起着深刻的影响。

就拿最熟悉的由铁和碳组成的钢铁材料来说，也能发现含碳量多少对铁碳合金的性能表现极明显的差异。譬如，含碳量为0.3%的铁碳合金（钢），具有良好的改变形状而不破裂的能力，可以通过锻造或轧压方法来制成不同形状的工件；含碳量为3.0%的铁碳合金（生铁），不论在高温或室温，都不能承受任何压力加工以改变其形状，而只能采用铸造方法来浇注成件。含碳量为0.1%的铁碳合金（低碳钢），硬度较低，塑性较高，是制造冷压深冲制品的主要材料；含碳量为1.0%的铁碳合金（高碳钢），硬度高，耐磨损，是制

造切削金属刀具的主要材料。这些例子也说明不同的化学成分（含碳量），铁碳合金也表现不同的性能。

现在我们把某一金属或合金的成分固定，用改变它们生产工艺条件的方法，看看会发生什么情况。

例如，同一化学成分的生铁铁水，一个浇注在砂模中，让铁水缓慢凝固和冷却，另一个浇注在金属模内，快速凝固和冷却，发现前者的断口呈暗灰色，后者呈银白色；前者脆性较小，不易摔断，后者脆性很大，容易碎裂；前者硬度较低，能进行切削加工，后者硬度很高，很难进行切削。

又如，含碳量同为0.8%的两块钢，一块加热到高温（800°C左右）后，在炉中缓慢冷却下来，另一块加到同样温度后，在水中急冷，结果后者的硬度可以比前者高三~四倍。

再如，纯铜的线材，在室温经冷拔后，可以把强度提高一倍多。

从上述的几个实例可以看出，单以化学成分就不足以说明性能差异的理由，这就要求我们更深入地考虑除化学成分外，还有什么因素影响金属和合金性能。探讨金属或合金的内部构造，便成为考虑这一问题的主要途径。

金属和合金的内部构造，按其研究范畴由微观到宏观，可分为：原子结构，晶体结构，显微组织和宏观组织。所谓原子结构是指组成元素的原子是由那些更为微细的质点组成的，而这些质点又是怎样分布在原子内部的；晶体结构是指原子按什么方式结合在一起，以及原子在金属和合金内部排列成那些样式；显微组织又称高倍组织，是指金属和合金内部在放大率为30~1600倍显微镜观察下，各种晶体的不同形状、大小、数量以及它们之间的分布样式（近三十多年来，

已采用放大率为几千到几十万倍的电子显微镜来观察金属和合金内部更细致的组织)；宏观组织又称低倍组织，是指用肉眼或在不大于十倍放大镜下，观察金属和合金磨面或断口上晶体的特征。

什么叫金相学呢？现在就来回答这个问题。

金相学就是研究金属和合金的各种晶体结构和显微组织，影响它们形成的外部条件（如温度变化、加工变形、浇注条件等）和内部因素（化学成分），以及它们与性能之间关系的一门科学。唯有当我们结合生产实践，了解金属和合金的结构组织以及它们变化的基本规律，才能切实控制和改善金属或合金的性能，才能正确对金属和合金进行加工处理，才能针对实际应用需要合理选择和使用金属材料。

本书将以铁碳合金为主来介绍金相学基本内容，并结合钢铁热处理来介绍钢铁的化学成分、组织结构以及与性能之间关系的基本知识。

二、金属内部构造

(一) 金属原子结构特点和原子结合方式

在自然界中迄今已发现 103 种元素，其中金属占四分之三多些。一般来说，金属元素具有下列特性：良好的导电性、导热性和可锻性。金属之所以有这些特性，是与金属原子结构特点和原子结合方式密切联系的。

1. 金属原子结构特点

金属与非金属都是由许许多多原子结合而成的。每个原子乃是由一个体积很小带正电荷的原子核和一个至若干个带负电荷的电子所组成。电子分布在原子核外的各电子层中，并围绕原子核作高速旋转运动。这样，也可以把原子看作是小宇宙中的行星围绕太阳旋转一样。每个电子带有一定的负电荷，电子数总和所带的负电荷数等于原子核所带的正电荷数，所以整个原子不显电性，即呈中性。各种元素的原子核带有不同的正电荷数，由此各元素的电子数目也相异。例如铜原子的核电荷数为28，核外有28个电子；氯原子的核电荷数为17，核外有17个电子。

金属原子结构不同于非金属之点，只在于金属原子最外层的电子数目很少，一般只有1~2个，少数金属是3~4个，而非金属原子最外层电子数目为4~8个。图 1 表示钠和氯的原子结构，钠是金属元素，氯是非金属元素。

2. 金属原子结合方式

对金属原子来说，最外层电子因与原子核结合力较弱，容易脱离最外电子层轨道在金属内部作自由运动，构成所谓

“电子气”。原子丢失最外层电子后，电荷失去平衡变成正离子。电子气中的任一电子并不属于某个原子所有，而是为整个金属中的正离子所共有。因此，可以把金属看作为一个大分子，它是由带正电荷的离子与电子气构成的，如图2所示。金属原子相互之间结合得如此牢固，就是依靠正离子与电子气之间的结合力。

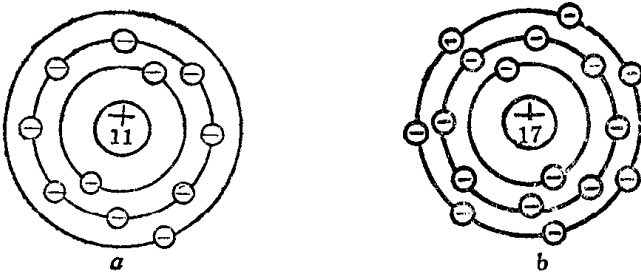


图 1 钠原子和氯原子结构图
a—钠原子； b—氯原子

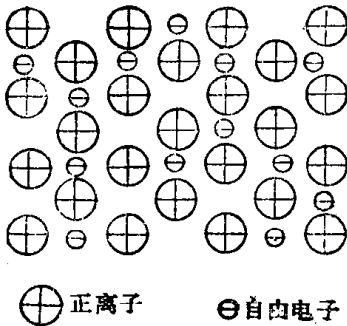


图 2 金属原子结合示意图

金属原子的上述结合方式，其性质不同于氯化钠(食盐)的结合。氯化钠是通过电子转移，即钠原子把最外层电子转移给氯原子后，以正离子（钠）和负离子（氯）方式结合的

(图3)。同样，也不同于硅或石墨等的结合方式，它们是通过每个原子互相共占最邻近原子的外层电子，以所谓共价方式结合在一起的。

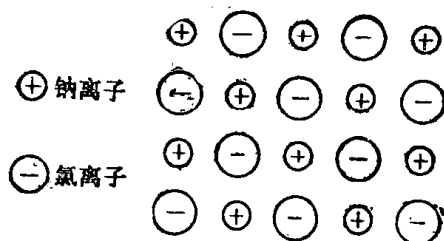


图 3 氯离子和钠离子结合示意图

3. 金属的物理特性

金属原子依靠正离子与电子气之间吸引力的这一结合方式，能简要地说明金属的一些特性。例如，在金属导线的两端存在电势差，自由电子就立即作一定方向的流动，这时就产生电流，这就是金属为什么具有良好导电性的原因。至于氯化钠——食盐，因为没有自由电子，导电性就很差。又如，在外力作用下，通过正离子层相互之间平移滑动，从而改变金属外形，但改变了本来位置的正离子依然与周围的自由电子保持联接，这就是为什么金属具有良好的可锻性。再拿食盐来说，当在外力作用下稍许改变正离子钠或负离子氯的相对位置，就会使它们同电性相同的离子相遇而互相排斥，表现为盐粒碎裂。

金属内部原子相互结合的这一方式，还可以使我们解释金属的其它性质，如导热性、热电性、金属光泽等，在这里不作一一介绍了。

必须指出，金属的上述物理特性只是表现在由大量原子堆积成固态的金属块上，而不能由单个金属原子显示出来。在固体状态下，金属原子怎样集合在一起，并结合成哪些形式，这就是下面要讨论的晶体结构的内容。

(二) 金属的晶体结构

1. 晶体与非晶体

在物质内部，凡是原子作散乱无序堆积的称为非晶体，例如普通玻璃、松香、树胶、蜡烛等，都属于非晶体。相反的，凡是原子作有次序有规则排列的称为晶体，例如冰、盐、石墨等。所有固态的金属和合金，都属于晶体。

原子为什么在晶体内部作有规则的排列呢？这显然与原子之间的作用力和距离有关。如果改变原子之间的距离，就将引起作用力性质的变化，例如当原子互相接近时，正离子与正离子之间以及电子层中的电子之间都将产生排斥力，力图使原子恢复到原来的平衡位置；反之，如果将原子分开，正离子与电子之间又将产生吸引力，力图使正离子回复到原来位置。

这样看来，为了使原子所受的吸引力和排斥力相互抵消，唯有当原子之间互相保持一定的距离，作出规则性的排列，才能使原子保持稳定状态的平衡位置。任何改变原子间的距离，即大于或小于原子的平衡距离，都会使原子处于不稳定位置，也就是使晶体本身处于不稳定状态。

从能量观点来看晶体状态是处于低能状态，因为每个原子都处于能量最低的位置。如果施加外力，改变原子间距离，即对原子做功，这个功就用来增加原子的能量——位能，导致物体总能量增加，使物体本身处于不稳定状态。任

何固态物体内部总是力图使自身处于低能状态，这种趋向就象高原上的水自动向低处流那样，是自然界的基本法则。今后将会看到，钢内部组织结构的一些重大变化，其根由与原子力图降低到低能位置，以及金属力图使自身降低到稳定状态密切相关。

晶体在性质方面也表现出它固有的特色：最突出的是有一定的熔化温度，例如铁的熔点为 1535°C ，铜—— 1083°C ，铅—— 327°C 等，这说明要想破坏晶体中原子排列的规则性，非要加热到一定温度，使原子获得足够的活动力，才能摆脱规则排列的束缚；再有，晶体的性能随方向不同而改变，即晶体具有各向异性，例如天然的云母矿物沿一定面最容易裂开成片，说明裂开面之间的原子结合力要比其它面脆弱得多；单个晶体铜在不同方向拉断，所表现的强度可在 $14\sim 35$ 公斤/毫米²范围内波动，这也说明晶体在各个方向上，原子之间的距离有远近之分，原子间的结合力就有强弱之别。

至于非晶体，本质地说不算固态物体，只不过是凝稠的液体而已。它表现出完全不同于晶体的性质。最突出的是非晶体没有固定的熔化温度。在冬季将一块坚硬的树胶放在平台上，当夏天来临时，它就逐渐软化摊平，难以确定它的熔化温度。再如，非晶体的性能在各个方向上是相同的，即所谓各向同性。例如，将几块体积相同而且正在软化的圆形树胶，在不同的方向施加拉力，可以看到在断裂前，树胶向各方向伸长的长度几乎一样，并且拉断它们所需的力量也不相上下。

2. 金属的晶体结构

已经知道，晶体内部原子（离子，分子）都按一定规律堆积起来，但对于不同的物质，原子可以有规则地排列成不

同的样式。为了说明原子在各种晶体中的排列形式，可以用“结晶格子”（简称“晶格”）来作为对晶体结构的描述。图4表示最简单的立方晶格。晶格上网格之间的交点称为结点。晶体中的原子中心就安置在晶格的结点上。

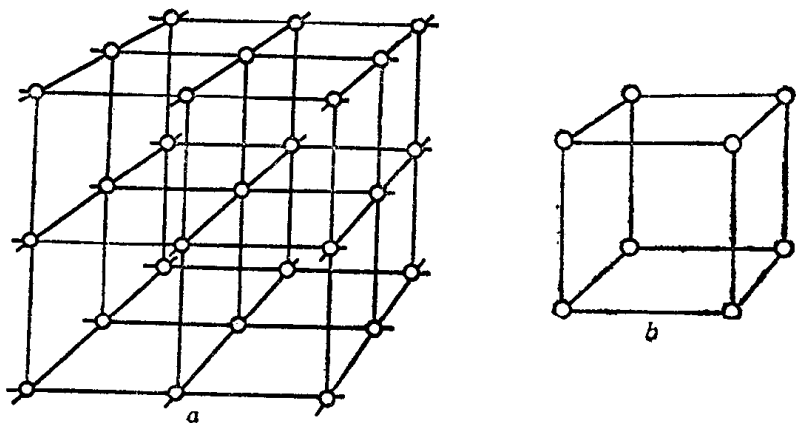


图 4 简单立方晶格和晶胞

a —简单立方晶格； b —晶胞

从整个晶格中取出一最基本的单元叫做单位晶格或晶胞。晶胞的形状和大小足以代表整个晶格的特征。图4, b 表示立方晶格的晶胞。立方晶格的特征是正六面体，它的各棱边长度相等，并互相垂直。

1) 金属的晶格类型 由于金属原子依靠正离子与电子气之间坚强的结合力，力求有按最紧密排列的倾向，这就使原子在空间排列的样式大为减少。如果把金属原子（实质上是正离子）当作坚实的球体，大多数金属主要有下列二种类型的晶格：

(1) 体心立方晶格 它的特征是在立方晶格八个顶角

上和立方体中心处各有一个原子，如图 5 所示。属于这一类型的金属有钒、铬、铌、钼、钨等。

(2) 面心立方晶格 它的特征是在立方晶格八个顶角上和立方体六个面的中心处各有一个原子，如图 6 所示。属于这一类型的有镍、铜、银、金、铝等。

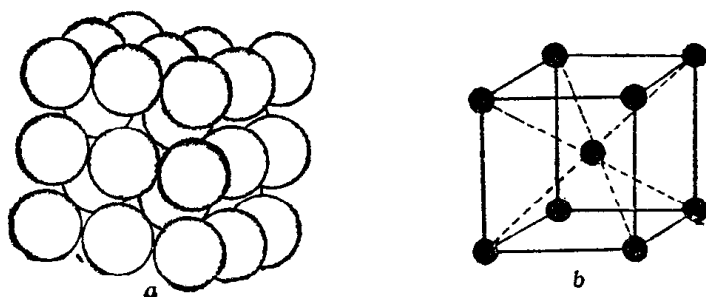


图 5 体心立方晶格和晶胞

a —体心立方晶格； b —晶胞

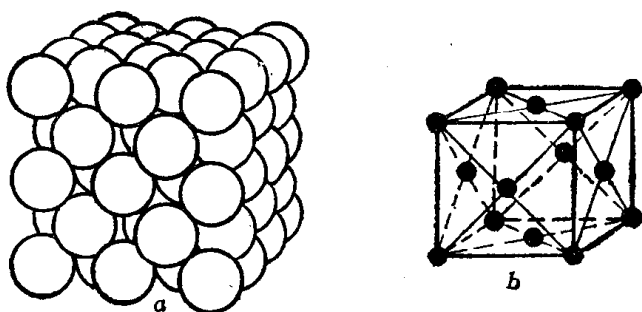


图 6 面心立方晶格和晶胞

a —面心立方晶格； b —晶胞

除上述两种立方晶格外，还有其它类型的晶格，如图 7 所示的密排六方晶格（锌、镁、铍等）以及图 8 所示的金刚石型晶格（锗、硅、碳等）。

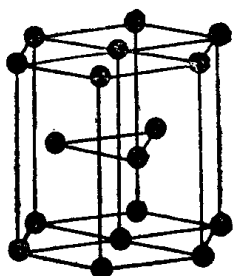


图 7 密排六方晶格

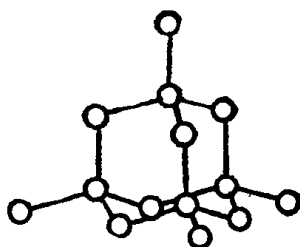


图 8 金刚石型晶格

最常见的金属元素铁是什么晶格呢？实际上铁有两种晶格，即在低于 910°C 和 $1400\sim 1535^{\circ}\text{C}$ 是体心立方晶格的铁，称为 α 铁；在 $910\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 是面心立方晶格的铁，称为 γ 铁。

应当指出，原子在晶格结点上并不是固定不动的，而是以结点为中心作高频率振动。随着温度升高，原子振动的幅度也增大。

2) 晶格常数 不要认为同一种类型晶格的不同金属，它们在晶体结构上就没有差别了。事实上，由于各种元素的原子直径大小不同，在组成晶格后，晶格的大小是不相同的。晶格的大小可用棱边长度来表示。对于立方晶格来说，晶格的边长用晶格常数 a (图 9) 来表示。对于非立方晶格，晶格的边长用 a 、 b 、 c 来表示。立方晶格的金属原子直径越大，晶格常数 a 也越大。

晶格常数的量度单位用 $\text{\AA}$ (读埃) 来表示。 $1\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米 ($1\text{\AA} = 0.00000001$ 厘米)，即相当于一亿分之一厘米。立方晶格金属的 a 值一般在 $2.8\sim 5.5\text{\AA}$ 范围内。

以铁为例，体心立方晶格在室温下的 a 值为 $2.86\text{\AA}$ 。如

果在每一边长为0.1毫米的立方体中，将有 4.28×10^{16} 个，即四万二千八百万亿个晶胞。这是多么巨大的一个数目！因此，晶格是不能用任何倍率的显微镜所观察到的。但是，把波长相当于几个埃的 x 射线透射到晶体中去，根据反射在照相底板上的线条，通过计算就可以确定晶格类型和晶格常数。这是 x 射线晶体分析的学科内容，在这里不作介绍。

晶格常数不仅随不同的金属或不同成分的合金而变化，即使同一种金属，或一定成分的合金，如果改变热处理或加工变形条件，晶格常数也会发生变化。因此测定晶体的晶格常数，是研究金属晶体结构的重要组成部分。

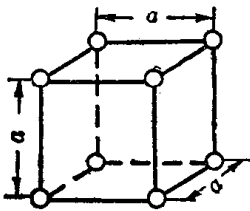


图 9 立方晶格的晶格常数

3) 晶面和晶向

图10表示立方晶格中几组常见的晶面和晶向。所谓晶面，就是通过晶格中若干原子中心而组成的平面；晶向就是从晶格中某一原子中心到另一原子中心所指的方向。

具有某一类型晶格的金属，在晶体的各种晶面或晶向上，原子分布状况是不相同的。有的晶面或晶向，原子排列最为紧密，或相邻原子间的距离最

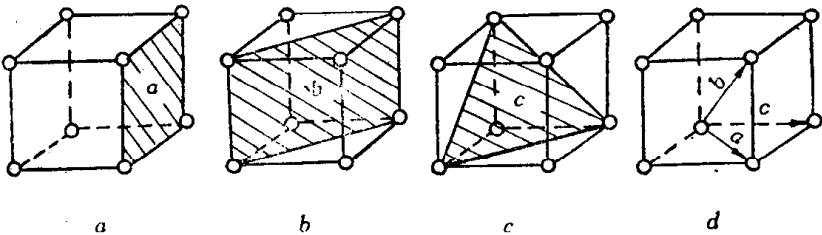


图 10 常见的几种晶面和晶向

a 、 b 、 c —常见的晶面； d —晶向

近；有的排列稀疏，原子间距离也长。因此，金属的物理、化学和机械性能，就在不同的晶面和晶向上显示出差别，这就是晶体的一种重要特性——各向异性的原因。

例如，体心立方铁的单晶体，在晶格的棱边方向上，原子作弹性伸长，仅需要13,500公斤/毫米²（弹性模量），而在立方体对角线方向上就需29,000公斤/毫米²。这说明单晶体铁在不同方向上其“刚性”是不相同的。又如单晶体铜在不同方向上拉断所表现的强度可以在14到35公斤/毫米²范围内改变。

（三）金属的显微组织

如果取一小块纯铁从中锯开，将其截面经过磨平、刨光，再在酸液（95%酒精+5%硝酸）中浸蚀后，用水洗净、吹干，就可放在大100~2000倍光学显微镜下观察其显微组织。图11是纯铁的显微组织。所谓金属和合金的显微组织，是指一种或多种晶体相互结合的形式在显微镜下所表现出来的特征，它比较本质地反映了金属和合金的内部构造及其与化学成分、性能之间的变化关系。近几十年来，虽然已有先进的实验技术装备，如x射线衍射仪、电子显微镜来揭示金属内部更为细微的构造，但用光学（金相）显微镜所观察到的组织，仍不失为标识金属和合金内部构造的重要组成部分。

纯金属的显微组织与纯铁相同（图11），是由许多外形不规则的多边形晶体集合而成。每个外形不规则的晶体称为晶粒；晶粒与晶粒之间相互接触的界面称为晶界。

晶粒的横截面尺寸一般在0.01~0.25毫米范围内。在特定条件下，例如铸造状态的组织或经高温长期加热后的组