

中等专业学校教材

金属学与热处理

〔热加工(非热处理)各专业适用〕

譚达吾、許正名、陈惠民、張福臻合編



国防工业出版社

中等专业学校教材

金属学与热处理

〔热加工(非热处理)各专业适用〕

譚达吾、許正名、陈惠民、張福臻 合編



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本教材內容由两部分組成，第一部分讲述金屬学的理論基础，其中包括金屬的晶体結構与結晶、塑性变形与再結晶、合金理論、鉄碳合金平衡图、鋼的热处理等。第二部分介紹了工业常用金屬材料（碳鋼、鑄鉄、合金鋼、有色金屬及合金）的牌号、成分、热处理、組織、性能及其应用。本书貫徹了“少而精”，根据专业培养目标和学生实际水平精选內容、强調主次、突出了重点，文字通順易懂，概念清晰。

它适用于中等专业学校机械类热加工（鑄造、鍛冲及焊接等）各专业，并可供一般工程技術人員参考。

金 屬 学 与 热 处 理

〔热加工(非热处理)各专业适用〕

譚达吾、許正名、陈惠民、張福臻合編

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可證出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張 8 $\frac{1}{8}$ 187 千字

1965年10月第一版 1965年10月第一次印刷 印数：00,001—13,080册

統一书号：K15034·1011 定价：（科四）0.90元

前 言

本教材是根据 1964 年在上海召开“金属学与热处理”教材会议所制订的“金属学与热处理教学大纲（草案）”编写的。

在编写过程中，虽然我们在贯彻“少而精”及理论联系实际的原则、精选教材内容等方面作了一些努力，但是，由于我们对毛主席的教育思想和党的教育方针学习的还很不够，我们的教学水平有限，经验也不足，书中难免有缺点和错误，我们热情希望使用本教材的同志们，提出宝贵的意见和批评。

本教材内容包括金属的晶体结构与结晶、塑性变形与再结晶、合金理论、铁碳合金平衡图、钢的热处理、碳素钢、合金钢及铸铁、以及有色金属及其合金等十二章。其中金属组织与性能的试验方法规定在实验课中讲授，将另编入实验指导书中，在此删去；另外为适应各专业的特殊需要，在个别章节前标有“*”号者，各校可根据具体情况进行取舍。

本书的绪论、第三、七章由谭达吾同志编写，第一、二、八章由张福臻同志编写，第五、六章由许正名同志编写，第四、九至十二章由陈惠民同志编写，全书由谭达吾同志负责主编，彭心平同志担任主审。

最后，我们感谢南昌航校、上海船校、沈阳冶金机校及武汉船校的领导对本书编审工作的支持和关怀，感谢协助我们完成这份教材的所有同志。

编 者

一九六五年二月于南昌

目 录

前言	3
緒論	5
第一章 金屬的晶体結構与結晶	7
第一节 金屬的晶体結構	7
第二节 純金屬的結晶	12
第三节 金屬的同素异构轉变	17
第二章 金屬的塑性变形与再結晶	19
第一节 金屬的塑性变形	19
第二节 冷变形金屬在加热时的变化	22
第三节 金屬的热变形(热压力加工)	24
第三章 合金理論	25
第一节 合金在固态时的相結構和合金組織	25
第二节 二元合金平衡图	28
* 第三节 三元合金平衡图的概念	38
第四章 鉄碳合金平衡图	41
第一节 鉄碳合金的基本相	41
第二节 Fe-Fe ₃ C 平衡图分析	42
第三节 Fe-Fe ₃ C 系合金結晶过程分析	43
第五章 鋼的热处理	48
第一节 鋼的热处理概念	48
第二节 鋼在加热时的轉变	49
第三节 鋼在冷却时的轉变	51
第四节 鋼的热处理方法	56
第六章 碳鋼	64
第一节 碳及杂质元素对鋼的組織和性能的影响	64
第二节 鋼中常見的显微缺陷	65
* 第三节 低碳鋼的时效	66
第四节 碳鋼的分类、牌号及用途	67
第七章 合金鋼	71
第一节 概述	71
第二节 合金元素在鋼中的作用	71
第三节 合金鋼的分类及編号	77
第四节 合金結構鋼	79
第五节 合金工具鋼	85
第六节 特殊物理、化学性能的鋼及合金	90
第八章 鑄鉄	101
第一节 概述	101
第二节 灰口鑄鉄	103
第三节 球墨鑄鉄	105
第四节 可鍛鑄鉄	107
* 第五节 鑄鉄的热处理	108
第九章 銅及銅合金	109
第一节 純銅	109
第二节 黃銅	110
第三节 青銅	112
第十章 鋁及鋁合金	117
第一节 純鋁	117
第二节 鋁合金的分类及鋁合金热处理原理	117
第三节 形变鋁合金	120
* 第四节 鑄造鋁合金	124
* 第十一章 鎂及鎂合金	126
第一节 純鎂	126
第二节 鎂合金	126
* 第十二章 軸承合金	129

緒 論

“金屬学与热处理”这门課程，主要是研究金屬及合金的成分、組織与性能間的相互关系，以及利用加热和冷却的方法来改善金屬及合金的性能。

本課程內容由两部分組成：

第一部分是金屬学的理論基础，其中包括金屬的晶体结构与结晶、塑性变形与再结晶、合金理論、鉄碳合金平衡图、鋼的热处理等。

第二部分是介紹工业上常用金屬材料（碳鋼、鑄鉄、合金鋼、有色金屬及合金）的牌号、成分、热处理、組織、性能及其应用。

金屬及其合金是现代农业、工业、国防工业及科学技术发展的重要基础，掌握了有关金屬材料的基本知識，才可能合理使用金屬，充分發揮它的作用。

金屬学是机械类热加工专业一門重要的基础課。根据毛主席关于認識客观規律在于能动地改造世界的教导，学习本課程的目的，不仅在于認識金屬及合金的成分、組織与性能間相互关系的規律性，更重要的是在这一認識的基础上，用它来指导生产。因为通过它的学习，可以帮助我們合理地选用金屬材料，正确地选择加工方法，制訂或改进現有的加工工艺，保証产品质量，提高劳动生产率，降低成本，有利于社会主义建設事业。

金屬学和其他科学一样，是在历代劳动人民长期进行生产斗争的基础上逐漸发展起来的一門科学。毛主席教导我們說：“人的認識，主要地依賴于物质的生产活动，逐漸地了解自然的現象、自然的性质、自然的規律性、人和自然的关系；”●金屬学的产生和发展，完全証实了主席的英明論断。

人类发现和使用金屬已有悠久的历史，但金屬学真正发展成为一門独立的科学是近百年的事。十九世紀后半期，由于生产力的迅速发展，大工业不断出現，对金屬及合金的使用日益广泛，要求也愈来愈高，从而促进了金屬科学的迅速发展，同时随着探索金屬内部組織及性能的仪器及試驗方法不断发现，遂确立了金屬的成分、組織与性能間的相互关系，各国科学家也在劳动人民生产經驗的基础上，先后提出来各种金屬学及热处理的理論，使这门科学的内容得到不断的充实、发展和提高。

在金屬及合金的发现和使用方面，我国古代劳动人民也有偉大的貢獻。如远在周代（公元前一千七百多年）就掌握了青銅的冶炼技术；之后发现了鉄，到春秋、战国时代人們已会使用鋼鉄来制造耕器、手工业器具和兵器如鋸、錐、凿、刀、劍等。后来，到明朝时对鋼鉄的性能已有进一步了解和研究。其中最有名的文献之一是明代宋应星著的“天工开物”一书，內載有冶鉄、炼鋼、鑄钟、鍛鉄、造炮及热处理等各种金屬的加工工艺。

但是，由于几千年来封建社会制度的束縛及近百年来帝国主义的掠夺和反动統治階級的压榨，使我国的科学技术未能得到充分发展，长期处于十分落后状态。

● 毛澤东选集第一卷（普及本）第二七一頁，人民出版社，1960年。

解放后，在党和毛主席的正确领导下，十五年来，战胜了重重困难，在社会主义革命和社会主义建设中都取得了一系列的重大胜利，工农业都获得了飞跃的发展。特别是1958年以来，党提出了鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义的总路线，全国人民在总路线的光辉照耀下，发扬了自力更生、奋发图强的革命精神，在阶级斗争、生产斗争、科学实验三大革命运动中取得了巨大成就。正如周总理在第三届全国人民代表大会第一次会议上作的政府工作报告中所说：“现在，我们已经能够完全依靠自己的力量，设计和建设许多重要的现代化的工业企业，设计和制造许多高级的、大型的、精密的机械设备，生产大批质量高、品种规格比较齐全的原料、材料、燃料。我们自己制造的成套设备是增加了”。“1964年10月16日爆炸成功的我国第一颗原子弹，是我们自己制造出来的。”●这充分说明我国已建立起独立自主的巩固的工业基础。

就钢材和有色金属及其合金的生产来说，不仅在数量，而且在质量和品种上都有显著的提高。1963年我国生产的钢、钢材、有色金属的品种比1957年增加了一倍以上，其中不少是高级合金钢。而1964年钢的产量又比1963年增长了20%以上。所有这些都是在短短的十多年中，做了前人所未做到的事业，这种惊人的发展速度，也是世界上所有资本主义国家不可能做到的。

“金属学与热处理”是一门深刻反映金属材料内部规律性的理论科学。同时，它和其他科学一样，都是在生产实践中发展起来的，因而它与生产实际是密切相结合的。因此，我们学习它，必须紧紧地遵循毛主席的教导，要理论与实际相结合，为以后学好专业和从事生产劳动打下良好的基础。

● 中华人民共和国第三届全国人民代表大会第一次会议主要文件，第9页，人民出版社，1965年1月。

第一章 金屬的晶体結構与結晶

第一节 金屬的晶体結構

- 目的: (1) 了解金屬及金屬鍵的概念;
(2) 熟悉金屬的常見晶格的三种类型;
(3) 掌握晶体、晶胞、晶粒、晶界的概念。

1. 金屬的概念

在已經知道的化学元素中, 約有四分之三是金屬。固态金屬具有如下的特殊性质: ①良好的导电性和导热性; ②正的电阻溫度系数, 即电阻随溫度的升高而增大; ③較好的塑性; ④特有的金屬光澤。可以认为, 凡是具备上述特性的物质都是金屬, 否則就是非金屬。

毛主席教导我們說, 每一事物所具有的特殊本质, 为它自己的特殊的矛盾所規定。可見, 金屬之所以具备上述特性, 显然与它的內部結構以及与其的原子間結合特点有关。

2. 金屬鍵

我們知道, 一切物质都由原子組成, 而原子又由帶正电的原子核和繞其运动的帶負电的电子构成。金屬原子构造的特点是它的最外层电子——价电子数目較少, 而且与原子核的联系很弱, 因而价电子很易脱离原子核而处于較自由的状态。

当金屬成为固体时, 它的原子便按图 1-1 所示的方式結合起来。这时各原子失掉其价电子而成为正离子, 正离子按一定的次序在空間規則排列并圍繞各自的中心微微振动; 而所有脱离原子核的价电子都以自由电子的形式在各离子間自由地运动, 为整个金屬所共有, 形成所謂“电子气”。金屬原子便依靠正离子和电子气間的靜电引力而牢固地結合在一起。金屬的这种特有結合方式称为金屬鍵。

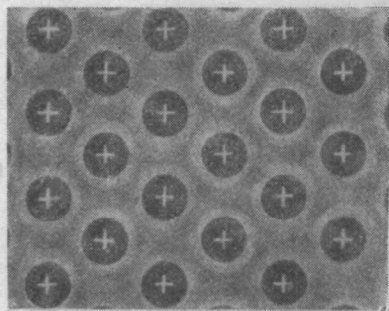


图1-1 金屬构造示意图

利用金屬鍵的概念可以解釋金屬所具备的某些性质。例如, 金屬两点間存在电位差时, 負的自由电子就将向正电位方向流动, 形成了电流, 所以金屬具有导电性; 再如, 在外力作用下, 金屬相邻原子层間发生相对滑动时, 正离子和电子气間仍保持着联系, 从而使金屬具有产生变形而不破坏的性能——塑性。

3. 金屬的晶体結構

从物理学中已經知道, 固体物质可分为晶体与非晶体。实验証明, 金屬及其合金在固态

下都是晶体。所谓晶体就是原子（或正离子）在空间按一定次序规则排列的物体，如图1-2所示。由于晶体中原子有规则的排列，使得在各方向上原子排列的密度不同，因而，金属晶体在不同的方向上具有不同的性质。金属晶体的这种特性称为各向异性。

为了深入研究金属晶体中原子排列的规律性，需要建立结晶格子的概念：

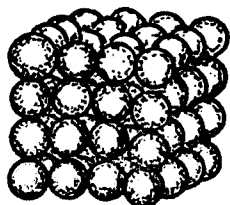


图1-2 晶体中原子排列示意图

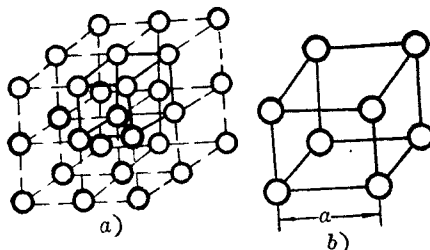


图1-3 金属结晶格子模型

a —晶格； b —晶胞。

1) **结晶格子** 为研究方便，常把金属晶体中的原子想像为几何点，并且用直线联接起来，而组成一空间格架，如图1-3a所示。我们就把这种空间格架称为结晶格子，简称晶格。

构成晶格的最基本的单元体称之为晶胞，如图1-3b所示。在一个晶胞里，原子排列的情况可以代表整个晶格的特征。也就是说，整个晶格是由许许多多大小、形状和位向相同的晶胞所组成。晶胞的大小用晶胞的棱长——晶格常数来表示，其测量单位用埃（ $\text{\AA}$ ， $1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米）。常见金属的晶格常数一般在 $2.86\sim 6.07\text{\AA}$ 范围内。例如，铜的晶格常数为 $3.6\text{\AA}$ ；铝的晶格常数为 $4.05\text{\AA}$ 。晶格常数除与金属类别和原子排列特点有关外，还随温度的升高而增大。

2) **常见金属的晶格类型** 金属具有许多种晶格类型，但常见的有三种：体心立方晶格、面心立方晶格和密堆六方晶格。

(a) **体心立方晶格** 体心立方晶格的晶胞具有如图1-4a所示的型式。就一个晶胞来看，它由9个原子组成，其中8个原子在立方体的顶角，1个位于立方体的中心。属于这种晶格类型的常见金属有： α -铁（ $\alpha\text{-Fe}$ ）、铬（Cr）、钨（W）、钼（Mo）和钒（V）等。

(b) **面心立方晶格** 面心立方晶格的晶胞如图1-4b所示。它由14个原子组成，其中8个位于立方体

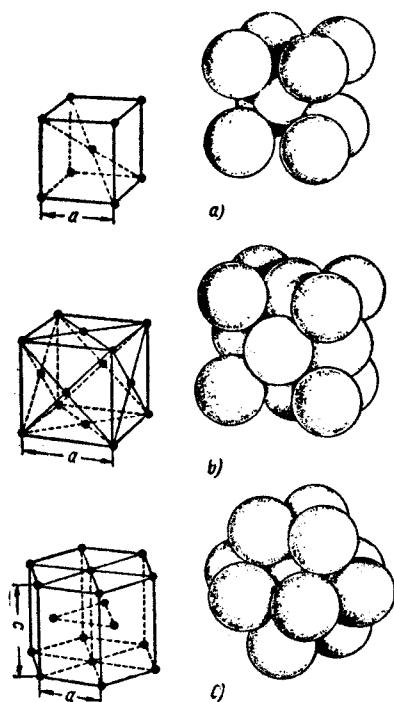


图1-4 最常见的金属晶格类型

a —体心立方晶格； b —面心立方晶格； c —密堆六方晶格。

的頂角，6个位于立方体六个面的中心。属于这种晶格类型的常見金屬有： γ -鉄 (γ -Fe)、鋁 (Al)、銅 (Cu)、金 (Au) 和 鎳 (Ni) 等。

(c) 密堆六方晶格 密堆六方晶格的晶胞如图 1-4 c 所示。它由 17 个原子組成，其中 12 个在六棱柱体的頂角，2 个在頂面和底面的中心，3 个在柱体的中心。属于这种晶格类型的常見金屬有：鎂 (Mg) 和 鋅 (Zn) 等。

最后应当指出，各种金屬晶体結構的主要差別就是在于晶格类型和晶格常数的不同。

* 4. 晶面和晶向的表示法

在結晶格子中，通过原子中心所作的任一平面称为結晶平面，简称晶面；通过原子中心所作的任一直线，它代表晶体中一定的方向，这样的方向称为結晶方向，简称晶向。

金屬晶体是各向异性的，即在不同的晶面和晶向上具有不同的性质。因此，金屬学中通常采用一种特定的符号——晶面指数和晶向指数，来表示不同位向的晶面和晶向在空間的位置。

确定晶面指数的步骤如下：

(1) 在晶格中設一参考座标軸，如图 1-5 a 所示；

(2) 以晶格常数为量度单位，求出晶面在三軸上的截距；

(3) 求出三截距的倒数；

(4) 将三个倒数化为最简单的整数比；

(5) 将所得的各数放入圆括号 (h, k, l) 內，便組成了晶面指数。

例如，图 1-5 b 所示的晶面，在三軸上的截距分别为 1、1、 ∞ ，各截距的倒数为 $\frac{1}{1} = 1$ 、

$\frac{1}{1} = 1$ 、 $\frac{1}{\infty} = 0$ ，故所求晶面的晶面指数为 (1 1 0)；

图 1-5 c 所示的晶面，其截距为 1、 ∞ 、 ∞ ，晶面指数为 (1 0 0)；

图 1-5 d 所示的晶面，截距为 1、-1、 $\frac{1}{2}$ ，

其截距的倒数为 1、-1、2，故晶面指数为 ($\overline{1}$ 1 2)。

应当指出，晶面指数不只是代表某一个晶面，而是代表一族互相平行的晶面。这些晶面上的原子排列密度是相同的，因而它們具有相同的性质。

确定晶向指数的步骤为：

(1) 在晶格中設一参考座标軸，并把原点放置在欲测定的晶向直线上，如图 1-6 a 所示；

(2) 在晶向直线上任取一点，确定出它在三軸上的座标值；

(3) 将三个座标值化为简单的整数并放入方括号 [u, v, w] 內，便組成了晶向

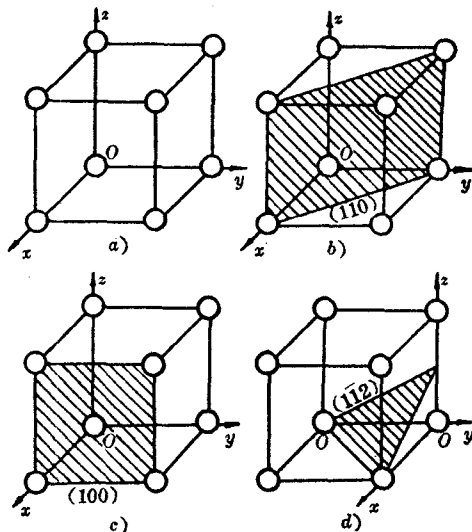


图1-5 立方晶格中的晶面
a—座标軸； b—(110)； c—(100)；
d—($\overline{1}$ 12)。

指数。

例如，图 1-6 b 所示的晶向，其上任意一点在三个轴上的座标值都相等，因而其晶向指数为 $[1\ 1\ 1]$ 。另一些晶向的晶向指数示于图 1-6 c 中。

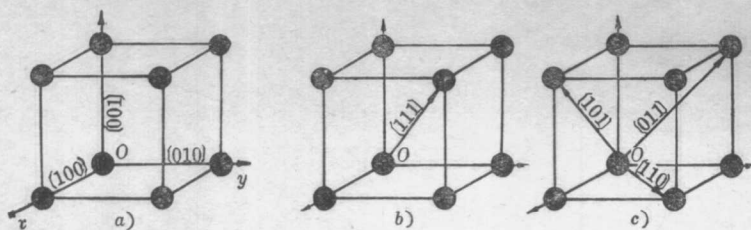


图1-3 立方晶格中的晶向

a—座标轴；b— $[111]$ ；c—另一些晶向指数。

5. 实际金属的晶体结构

前面讨论的晶体结构，是理想化了的。实际上，金属内部原子排列并不像理想情况那样规则，而是存在着各种结构不完善的地方。实际金属晶体与理想晶体的主要不同之处是：①实际金属都是多晶体；②具有镶嵌块；③存在着位错、空位和离位原子等缺陷。

1) 金属的多晶体结构 生产中应用的金属都是由许多小晶体所组成，如图 1-7 所示。其中每一小晶体称为晶粒，晶粒由许多位向相同的晶胞所组成，而晶粒与晶粒之间则存在较大的位向差，如图 1-8 所示。上述晶体，即由许多位向不同的晶粒所组成的聚集体，通常称为多晶体。如果整块金属仅包含一个晶粒，则称为单晶体。单晶体可以用特殊的方法制得，但工业生产中应用很少。

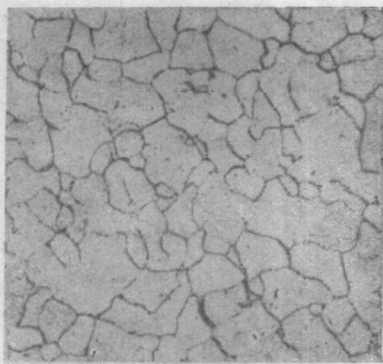


图1-7 纯金属的显微组织 (纯铁) $\times 250$

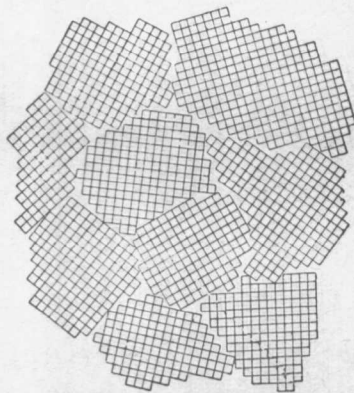


图1-8 多晶体金属结构示意图

晶粒与晶粒的边界称为晶界。由于相邻晶粒表面原子的相互作用，晶界处原子排列不是十分规则的，如图 1-9 所示。相邻晶粒间的位向差愈大，晶界处原子排列的规则性愈差。晶界的厚度与金属的纯度有关，纯金属的晶界厚度一般不超过几个原子间距离，但在工业合金中，因杂质集中于晶界，而使晶界厚度增至几千个原子间距离。由于晶界处原子排列不太规则，脱离了各自的平衡位置，因而晶界处原子具有较高的能量，晶界处易受

腐蝕。

前面所說的晶体具有各向异性，是对单晶体而言。在多晶体中，由于各晶粒位向不同，它們的各向异性被互相抵消，因此，在一般情况下整个晶体显示不出各向异性的特征。多晶体的这种各向同性，称为伪各向同性。

2) 鑲嵌块 对实际金属晶体进一步研究后发现，不論是单晶体还是多晶体的晶粒内部，晶格位向并不是完全一致的，而是由許多位向差极小（不到1度），尺寸极小（边长仅为 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 厘米）的小晶块組成，如图1-10 a 所示。这些小晶块称为鑲嵌块，金属的这种組織称为鑲嵌块組織。鑲嵌块組織可以在电子显微镜下观察到，如图1-10 b 所示。

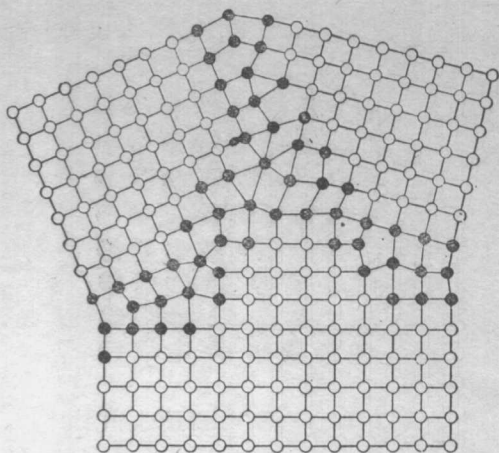
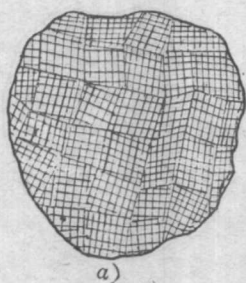
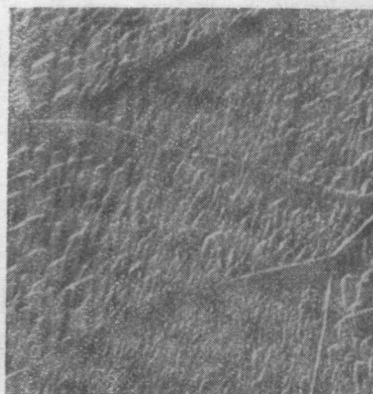


图1-9 晶界結構示意图



a)



b)

图1-10 金属中的鑲嵌块組織

a—示意图；b—电子显微镜下观察到的鑲嵌块組織。

3) 位錯 位錯是近几十年才被发现的一种晶体缺陷。最简单的一种位錯的模型如图1-11所示。从图中看到，晶体的上部分比下部分多了一个原子面 PQ （也可以是少一个），在多余原子面 PQ 的下边缘处造成了晶格歪扭，而形成一种綫状的晶体缺陷（宽度很小，只有几个原子間距离，而长度却可达几千个原子間距离）。通常把这样的晶体缺陷称为刃型位錯（或綫位錯）。

晶体中的位錯具有易动的性质，即在不大的应力作用下就可以使其移动。如图1-11所示的原子 Q ，在不大的切应力 τ 作用下就能向右移动和原子2結合起来，而使原子1处于位錯中心的位置，从而使位錯向右移动了一个原子間距离。如果切应力 τ 不去掉，位錯会继续向右移动。了解位錯的这一特性是很有意义的，因为金属中发生的許多轉变都与它有关，如金属的塑性变形就是通过位錯在晶面上的逐步移动而实现的。

(4) 空位和离位原子 世界上沒有离开物质的运动，也沒有不运动的物质。毛主席

教导我們說：“因为除了运动的物质以外，世界上什么也沒有。”^① 晶体中的原子就是如此，它以平衡位置为中心不断地振动着，温度愈高，振动愈剧烈。在一定温度下，原子有一平均动

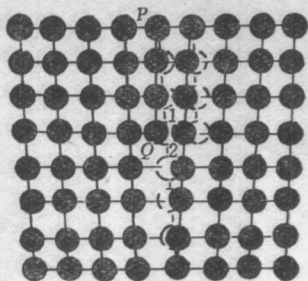


图1-11 刃型位错模型图

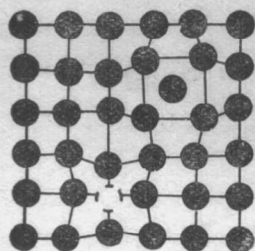


图1-12 空位与离位原子示意图

能，但也有少数原子的动能远高于平均动能。当某些原子具有足够高的动能时，就可能离开自己的平衡位置跳到晶格空隙中去，形成如图 1-12 所示的点状缺陷。通常把离开平衡位置而处于晶格空隙处的原子称为离位原子；原子离开后空下的平衡位置称为空位。

离位原子和空位的出现，造成附近晶格的歪扭，从而使周围原子具有较高的能量。

离位原子和空位不是静止不动的。离位原子能够从一个位置移到另一位置，或者跳入空位而消失；空位周围的某一原子也可能跳入空位，使其本身的平衡位置空起来，形成一个新的空位，从而造成了空位的移动。通常把上述金属原子由一个位置移动到另一位置的现象，称为自扩散。如果是异类原子在其中的移动，则称为异扩散。金属中发生的许多变化都与金属的扩散有关，因此，扩散是一个很重要的概念。

通过上面分析可以看出，实际金属中存在许多结构不完整的地区，如晶界、镶嵌界、空位和离位原子附近地区。这些地区的晶格是歪扭的，即它们的原子都离开了各自的平衡位置，因而具有较高的能量。以后将会看到，它们对金属的强度、塑性变形以及固态金属中所发生的其它转变都有极大的影响。

第二节 纯金属的结晶

- 目的：（1）掌握结晶、结晶温度、过冷和过冷度的概念；
（2）掌握金属的结晶过程（生核及长大）及影响晶粒大小的因素；
（3）熟悉铸锭结构的特点。

1. 结晶的概念

金属和其它物质一样，能以气体、液体和固体三种状态存在。金属在一定条件下，能发生三种状态间的互相转化。但最有实际意义的还是液体状态向固体状态的转变，因为工业上的许多制件，如钢锭、铸件和焊件等都是通过这种转变而制造出来的。通常把金属由液体状态转变为固体状态的过程，称为结晶。

① 毛泽东选集第一卷（普及本）第二九六页，人民出版社，1960年。

2. 結晶溫度和過冷現象

結晶進行的溫度稱為結晶溫度，有時稱為臨界點。金屬的結晶溫度可以通過熱分析法測定。所謂熱分析法，就是通過觀測金屬在冷卻（或加熱）過程中溫度的變化，來測定臨界點的實驗方法。如果，將通過熱分析法所測得的數據繪于溫度（ T ）-時間（ τ ）的座標圖中，便可得到所謂的冷卻曲線（或加熱曲線），如圖 1-13 所示。

從曲線中看到，液態金屬開始冷卻時，溫度均勻下降，當溫度冷到某一溫度 T_s 時，金屬便開始結晶，由於結晶時放出了大量結晶潛熱，補償了向外界散失的热量，使金屬溫度在很長一段時間內不大下降，因而在曲線上出現一水平綫台階，結晶完成后，金屬溫度又開始均勻下降。

顯然，曲線中水平台階所表示的溫度，就是金屬的結晶溫度。

但是應當指出，圖中的結晶溫度 T_s ，即物理常數表中所列的金屬熔點，是理論結晶溫度。而在實際冷卻條件下，液態金屬冷至這一溫度並不開始結晶，只有當冷至低於 T_s 的某一溫度 T^n 時，結晶才開始強烈地進行。 T^n 就是金屬的實際結晶溫度。

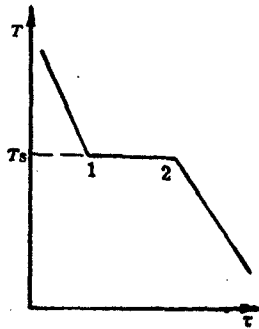


圖 1-13 純金屬的冷卻曲線

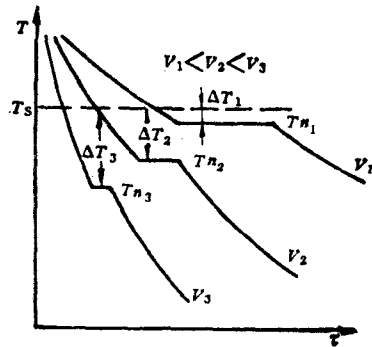


圖 1-14 不同冷卻速度下純金屬的冷卻曲線

液態金屬冷至理論結晶溫度下方能開始結晶的現象，稱為過冷現象。金屬過冷的程度用理論結晶溫度 T_s 與實際結晶溫度 T^n 之差，即所謂過冷度 ΔT 來表示， $\Delta T = T_s - T^n$ 。過冷度的大小與金屬的本性和液態金屬的冷卻速度有關，不同冷卻速度下的冷卻曲線如圖 1-14 所示。從圖中看到，冷卻速度愈大，則金屬的實際結晶溫度愈低，從而過冷度愈大。如果液態金屬極其緩慢冷卻，則結晶將在接近於理論結晶溫度下進行，即過冷度接近於零。

3. 結晶過程

金屬的結晶過程是由兩個基本過程所組成：①形成結晶核心（簡稱生核）；②晶核的長大。而且，生核和核長大是同時並進的。

1) 晶核的形成 實驗研究證明，液態金屬中的原子並不像氣體金屬那樣處於無規則的運動狀態。液態金屬原子間距離較近，原子間仍保持着相當大的作用力，它的原子雖然不像固態金屬那樣有規則的排列，但在其中卻存在一些原子規則排列的小原子集團，它

时起时没。当液态金属的温度低于理论结晶温度的时候，其中一些较大的原子集团就可能稳定存在，成为结晶核心——晶核。这种从液态金属中直接产生的晶核，称为自发晶核。而较小的原子集团是不稳定的，出现后会再度消失。随过冷度的增大，即结晶温度的降低，则较小过冷度下不能成为晶核的小原子集团，也能稳定存在成为结晶的核心。因此，随过冷度的增大，晶核的数目增多。

实际上，金属液体不是很纯净的，其中往往存在一些杂质质点。如果这些杂质质点的结构与固态金属的结构类似时，便有可能以它们为基底形成晶核。这种方式形成的晶核称为非自发晶核。此外，钢锭模的模壁也可作为非自发晶核的基底。实践证明，结晶过程中，非自发晶核起极大的作用。

2) 晶核的长大 晶核的长大是一个复杂的过程，为简化起见，我们可以把晶核的长大看做是液体金属原子不断地向晶核表面堆集的过程。

不过，在实际生产条件下，由于各种因素的影响，晶核在各方面的长大速度是不同的。通常以树枝状结晶的方式长大，成长为所谓枝晶，如图1-15所示。枝晶的形成过程可以用图1-16来说明。晶核形成后，它便向生长速度最大的方向发展，形成晶体的主干 a ，称为一次轴；然后在主干的垂直方向生长出支干 b ，称为二次轴；随后又在二次轴上生长出三次轴，像树生枝一样，依次进行下去，最后尚未结晶的液体在轴间结晶。如果各轴间的金属液不足以填满轴间空隙，则在凝固后的金属中仍能保留着树枝状晶体。图1-15

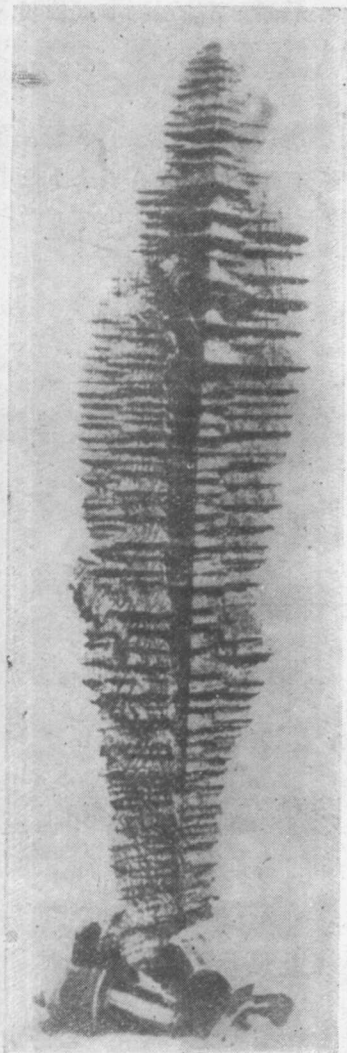


图1-15 树枝状晶体

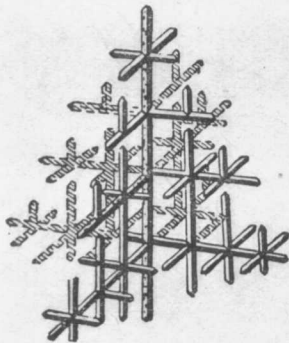


图1-16 枝晶示意图

所示的枝晶就是从大钢锭的缩孔中取出的。即使晶轴间被填满的金属，在经过特殊制备的试面上，也可能观察到枝晶组织，如图1-17所示。

金属的结晶过程可以用图1-18示意的描述。从图中可以看到，结晶初期，晶核可自

由地生长，保持着枝晶外形。但当生长中的晶体一旦互相接触，则晶体只能向有液体存在的地方长大使晶体的枝晶外形遭到了破坏，因此结晶结束后，金属便由许多不规则外形的小晶体所组成。显然金属中由每一晶核所生长成的小晶体，就是前面所说的晶粒。通过上述分析，也说明了实际金属在一般条件下都是多晶体的原因。

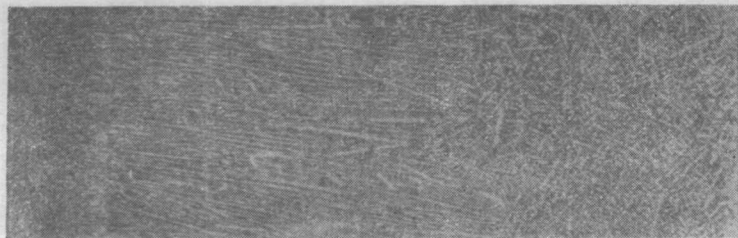


图1-17 金属的枝晶组织

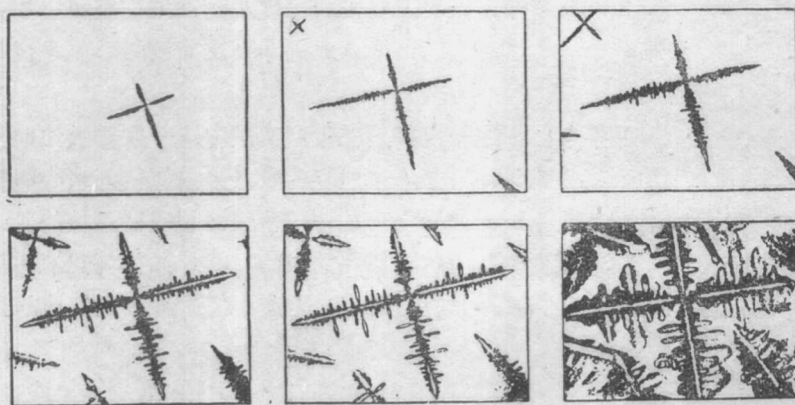


图1-18 结晶过程示意图

4. 晶粒大小及影响因素

结晶后，获得了由大量晶粒组成的固态金属。金属的晶粒大小对其性能有很大的影响，如细晶粒金属比粗晶粒的同样金属具有较高的强度、硬度和塑性，但是耐蚀性却较差。因而在生产中，控制晶粒的大小就成为改善金属性能的重要措施之一。

金属中晶粒大小可用单位体积内的晶粒数目 Z 表示。显然，单位体积内晶粒数目愈多，晶粒尺寸就愈小。由于结晶过程是由生核和核长大两个过程所组成，因而单位体积内的晶粒数目必然与此两个过程有关。由图 1-19 中可以看出，单位时间内生核数目愈多，晶核长大速度愈小，则结晶后单位体积内的晶粒数目将愈多，晶粒愈小。

计算表明，单位体积内的晶粒数目 Z 与生核率 n （单位时间单位体积内的生核数目）及晶核长大线速度 C 之间存在如下关系：

$$Z = K \sqrt{\frac{n}{C}}$$

式中 K ——比例系数。

从式中可以看出,凡是增大 n 与 C 之比值的因素,都能使晶粒数目 Z 增多,而使晶粒变细;反之,晶粒变粗。这同前面由图 1-18 所得出的结论是完全一致的。

掌握了晶粒大小与生核率 n 和晶核长大速度 C 之间的关系后,下面进一步研究影响晶粒大小的因素,从而找出控制晶粒大小的方法。实验研究表明,影响晶粒大小的因素主要有如下两个:

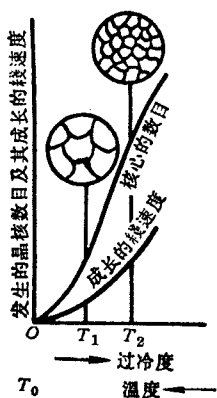


图1-19 过冷度对晶核生成率和晶核长大速度的影响

1) **过冷度** 过冷度愈大,生核率和晶核长大线速度也愈大,但生核率增加得更快,即随过冷度的增大 n 与 C 之比值也增大,如图 1-19 所示。因此,增大液体金属的过冷度,就能使结晶后单位体积内的晶粒数目增多和晶粒细化。由于增加冷却速度可以增大过冷度。因此,可以用快速冷却金属液的方法来细化金属的晶粒。不过,在生产中使金属得到很大的过冷是困难的,因而限制了这一方法的广泛应用。

2) **难熔杂质质点** 在前面已经说到,液态金属中往往存在很多难熔杂质质点,它们大都能促进非自发晶核的形成,增加生核率,从而使晶粒细化。

近年来已把这一规律用在生产实践中,一般在浇注前往液态金属中加入某些物质,增加难熔质点的数量,以使结晶核心的数目增多;或者在某些晶核的表面上形成一层薄膜,以阻碍晶核的长大,降低晶核的长大速度,从而达到细化晶粒的目的。如往纯铝液中加入少量的钛;往钢液中加入铝;铝硅合金中加入少量的钠等。生产中把这种细化晶粒的方法,称为变质处理。

* 5. 铸锭的结构

铸锭的结晶除受过冷度和杂质的影响之外,还受到其它因素的影响。因而,铸锭的结晶以及它的结构远比前面讨论过的情况复杂。

当液态金属注入锭模时,由于锭模(金属模)的强烈冷却作用,靠锭模表面的液体将产生强烈的过冷,加之模壁粗糙对形核的促进作用,因此,铸锭的表面层结晶成为细小的等轴晶粒,如图 1-20 中 1 所示。通常把这一薄层称为细晶粒层。

细晶粒层的形成以及锭模温度的升高,使铸锭表里温差缩小,液体金属冷却速度减慢。不过,此时内部液体的温度还不够低,还不足以在其中产生晶核。因此,结晶仍以细晶粒层为基底向心部继续发展。由于晶体在长大时横向间相互阻碍以及晶体迎着散热方向的优先生长,因而最后结晶成为垂直于模壁的柱状晶体,如图 1-20 中 2 所示。把这一层称为柱状晶层。柱状晶层的厚度能在很大的范围内变动,在某些条件下可能一直深入到锭心。如金属焊缝就是这种情况,如图 1-21 所示。

随着柱状晶层的形成,液体金属温度不断降低,沿铸锭截面各处温度趋于均匀。在这种情况下,就可能在未结晶的液体中各处形成晶核并向各方向长大。最后结晶成为粗大的等轴晶粒,形成所谓的中心等轴晶区,如图 1-20 中 3 所示。