

航空金属材料学

航空金属材料学

陆漱逸 王于林 编



30326285



航空金属材料学
陆漱逸 王于林 编

国防工业出版社
地址：北京

国防工业出版社

433961

内 容 简 介

本书系统、全面地阐述了金属学、热处理、航空金属材料 and 金属机械性能等金属材料的知识。内容由浅入深，简明扼要，注意理论联系实际。

为提高使用价值，编入了常用金属材料的牌号、成分、状态、性能及其应用的附录，并附有部分金属材料牌号的国内外对照。

本书为航空机械类工艺与设计专业的教材，并对科研、生产也有一定参考价值。

航空金属材料学

陆漱逸 王于林 编

*

国防工业出版社 出版

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

*

787×1092¹/₁₆ 印张17 391千字

1979年12月第一版 1981年8月第二次印刷 印数：8,501—14,500册

统一书号：N15034·1962 定价：1.75元

158861

前 言

本教材适用于航空机械类工艺专业的教学，兼顾设计专业的教学。

为了更好地掌握金属材料性能的本质和性能变化的规律，适当加强了金属学的基础知识；热处理部分以介绍基本概念和作用为主，适当压缩了热处理工艺的具体方法；金属材料部分照顾了各个专业的需要，以常用航空材料为主，同时对一些相应的国外材料以及选材方法，也作了一定的反映。教材最后附有常用材料的牌号、成分、状态、性能及其应用的附录，可作为课堂教学的补充。教材中部分参考内容用“*”标出，可选择讲解。

本教材由南京航空学院主编，一至五章由陆漱逸编写，六至十一章由王于林编写，朱彬桢参加了附录的部分编写工作。

北京航空学院和西北工业大学共同审阅了初稿，修改稿由西北工业大学周鹿宾、胡德林等同志主审。另外，南昌航空学院、西安航空专科学校、沈阳航空学院等院校参加了制订大纲和审阅工作。

由于编写时间比较仓促，调查研究不够，加上我们业务水平及教学经验不足，难免存在缺点、错误，诚恳希望广大师生和读者提出批评指正。编写过程中得到了一些单位和许多同志的热情帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

编 者

真情象草原广阔
层层风雨不解阻隔

目 录

绪论	1
第一章 纯金属的结构与结晶	3
§ 1-1 纯金属的晶体结构	3
一、金属原子的结合方式及金属特性	3
二、金属晶体的基本概念	4
三、常见金属的晶格类型	5
四、晶面和晶向的概念	7
五、实际金属的内部结构	7
§ 1-2 纯金属的结晶	13
一、金属结晶的基本规律	13
二、晶核的形成与长大	14
三、影响生核与核长大的因素	16
四、金属的同素异构转变	17
第二章 合金的结构与二元合金 状态图	19
§ 2-1 合金的结构	19
一、概述	19
二、合金的相结构	19
三、合金的组织	23
§ 2-2 二元合金状态图	23
一、概述	23
二、二元合金状态图的建立	23
三、匀晶状态图	25
四、共晶状态图	27
五、包晶状态图*	31
六、具有稳定化合物的二元合金状态图	34
七、杠杆定律及其应用*	35
§ 2-3 状态图与合金性能的关系	35
一、合金机械性能与状态图的关系	35
二、合金的铸造性与状态图的关系	36
§ 2-4 铸造组织与性能	37
第三章 金属的塑性变形与再结晶	39
§ 3-1 金属的塑性变形	39
一、概述	39
二、单晶体的塑性变形	39
三、多晶体的塑性变形	43
四、合金的塑性变形与强化	44
五、塑性变形对金属组织和性能的影响	46
§ 3-2 变形金属加热时的再结晶 和性能变化	49

一、回复	50
二、再结晶	50
三、晶粒长大	51
四、影响再结晶后晶粒大小的因素	51
§ 3-3 金属的热变形加工	52
一、金属的热加工与冷加工	52
二、热压加工对材料组织和性能的影响	53
第四章 金属的机械性能	55
§ 4-1 机械性能指标	55
一、强度与塑性	55
二、硬度	58
三、冲击韧性(α_K)	59
四、疲劳强度	60
五、断裂韧性概念	62
§ 4-2 应用性能数据时应注意的 几个问题	64
第五章 铁-碳合金	65
§ 5-1 铁-碳合金状态图	65
一、Fe-Fe ₃ C 状态图分析	65
二、典型合金结晶过程分析	67
§ 5-2 碳钢	72
一、含碳量对钢的组织与性能的影响	72
二、杂质对碳钢性能的影响	73
三、碳钢的分类、编号和应用	73
§ 5-3 铸铁	78
一、白口铸铁	78
二、灰口铸铁	78
三、球墨铸铁	79
第六章 钢的热处理	81
§ 6-1 概述	81
§ 6-2 钢的热处理原理	81
一、钢加热时的组织转变	81
二、钢在冷却时的组织转变	83
§ 6-3 钢的热处理工艺	92
一、退火	92
二、正火(常化)	93
三、淬火	94
四、回火	97
§ 6-4 表面淬火*	101
一、高频淬火原理	101

二、高频淬火的应用	102
§ 6-5 化学热处理	102
一、渗碳	102
二、氮化(渗氮)	105
三、碳氮共渗	106
四、其他渗入法*	107
§ 6-6 热处理新工艺*	108
一、无氧化加热	108
二、强韧化处理	108
三、形变热处理	109
四、化学热处理	111
第七章 合金钢	112
§ 7-1 合金元素的作用	112
一、概述	112
二、合金元素与铁和碳的作用	112
三、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 状态图的影响*	113
四、合金元素对奥氏体晶粒长大的影响	114
五、合金元素对 C-曲线的影响	114
六、合金元素对淬火钢回火转变的影响	114
§ 7-2 合金钢的分类和编号	115
一、合金钢的分类	115
二、合金钢的编号	116
§ 7-3 合金结构钢	116
一、渗碳钢	116
二、调质钢	119
三、超高强度钢	125
四、弹簧钢	128
五、轴承钢*	129
§ 7-4 合金工具钢	130
一、工具的工作条件, 工具钢的要求与分类	130
二、低合金工具钢	131
三、高合金工具钢	133
四、高速钢	134
〔附〕 硬质合金与钢结合金	136
第八章 不锈钢与高温合金	138
§ 8-1 金属的腐蚀	138
一、腐蚀及其类型	138
二、腐蚀形式	139
三、提高金属抗蚀性的途径	140
§ 8-2 不锈钢	140
一、概述	140
二、马氏体不锈钢	141
三、奥氏体不锈钢	144
四、过渡型不锈钢*	146
§ 8-3 高温合金	147
一、概述	147
二、铁基或铁镍基高温合金	152
三、变形镍基高温合金	155
四、铸造高温合金	159
五、其他高温合金*	161
第九章 轻合金	164

§ 9-1 概述	164
§ 9-2 铝及铝合金	164
一、概述	164
二、变形铝合金	168
三、铸造铝合金	172
§ 9-3 镁及镁合金	175
一、概述	175
二、变形镁合金	176
三、铸造镁合金	178
§ 9-4 钛及钛合金	179
一、钛及其合金的特性	179
二、钛合金的类型与热处理	180
三、常用钛合金	181
第十章 铜及铜合金	184
§ 10-1 铜	184
§ 10-2 黄铜	184
一、普通黄铜	185
二、特殊黄铜	186
§ 10-3 青铜	187
一、锡青铜	187
二、铍青铜	187
三、铝青铜	188
第十一章 选材原则与典型零件的分析	190
§ 11-1 选材一般原则	190
一、满足零件性能要求	190
二、考虑材料的工艺性	192
三、注意经济性	192
§ 11-2 调整金属材料使用性与工艺性的方法	193
一、调整使用性能的方法	193
二、改善工艺性的方法	193
§ 11-3 典型零件分析	194
一、飞机起落架	194
二、发动机涡轮轴	196
三、机床齿轮	198
附录	200
附录一 黑色金属硬度与强度换算表	200
附录二 金属材料及其状态的代号	202
附录三 常用金属材料的成分、性能 和主要用途	203
一、合金钢	203
二、部分硬质合金的成分、性能与主要 应用范围	215
三、不锈钢与高温合金	217
四、轻合金	239
五、铜及铜合金	253
附录四 部分金属材料牌号的国内外 对照	256

绪 论

在国民经济中,金属材料的作用是很大的。工业、农业、交通运输以及国防等方面的建设,都离不开应用金属材料。而且,随着国民经济的发展,要求生产出更多更好的金属材料。

航空工业和金属材料之间的关系更是十分密切的。众所周知,早先的飞机是木质结构,最快的时速不过几十公里。只是在生产出比重小并具有一定强度的铝及其合金,并将其应用于飞机结构以后,飞机的时速才增加到了几百公里。近代超音速飞机的生产,更离不开金属材料的相应发展。例如当飞机的速度超过音速的三倍时,由于空气与飞机表面的摩擦热,将使飞机的表面温度达到 300°C 以上,这时铝合金的强度已明显降低,不能继续工作。因此必须发展新材料,如钛合金、不锈钢等。

为提高飞机性能,航空发动机的功率不断增加,因而压气机和涡轮的工作温度相应增高,尤其是新型发动机的涡轮叶片,其工作温度高达 1000°C 以上。可以设想,如果不相应发展高温合金,即使有了先进的结构设计,发动机也是制造不出来的。

飞机、发动机的结构重量越小,越有利于其性能的提高。这就要求发展强度高而比重小的金属材料。此外,航空技术还不断要求发展和提高某些具有特殊性能的金属材料。

因此,航空工业的不断发展,对金属材料的要求就越来越高,从而促进了金属材料的发展;而金属材料的发展,又使飞机、发动机性能得到提高,加速了国防现代化的建设。

金属材料与航空技术的关系之所以如此密切,是因为金属材料具有:(1)高的机械性能,如高的强度和塑性等;(2)优异的物理性能,如高的导电、导热性等;(3)良好的工艺性,如可以铸造、锻造、焊接等。这些性能取决于金属材料的化学成分和内部结构,同时也受其他因素影响。热处理可以改变金属的化学成分和内部结构,从而成为改善金属材料性能的十分重要的工艺方法。

由于航空技术与金属材料的关系密切,航空生产到处都遇到金属材料问题。所以作为一个航空技术人员,必须了解金属材料及其性能,并了解决定和影响性能的有关因素,以便能正确地使用金属材料来为社会主义建设服务。例如生产一个零件,应当选用什么材料?其性能如何?怎样改善性能?以及如何考虑零件的制造工艺等,是设计和生产中必须解决的问题。因此有关工程技术人员,就需要学习并掌握金属材料学中的有关知识。

《航空金属材料学》是一门研究航空金属材料的成分、内部结构和性能之间关系的课程,其主要内容是:

(1) 金属材料学的有关基础知识。如金属与合金的晶体结构、结晶、塑性变形与再结晶的基本规律、机械性能、铁-碳合金以及热处理基本知识等。

(2) 航空常用金属材料(包括合金结构钢、超高强度钢、不锈钢、高温合金和轻合金等)的成分、热处理、组织、性能和用途,以及热处理在零件制造工艺流程中的位置和作用。

(3) 选用金属材料的一般原则。

通过以上内容的学习,对航空设计与生产中常见金属材料的成分、热处理、组织、性能和用途之间的关系;对合理选用金属材料的一般原则;对热处理在零件制造工艺流程中的位置和作用有一梗概的了解。为后续课程的顺利学习;为设计与生产中的选材;为培养使用金属材料时的分析和解决问题的能力打下一定的基础。

《航空金属材料学》是在生产实践基础上发展起来的,具有丰富的理论性和实践性。又由于与其他学科联系较广,加之材料种类繁多,因此很难一一记住各种材料的成分、性能和用途。所以应在掌握金属材料学基础知识的基础上,以材料性能为主干,将成分—组织—性能—用途加以有机联系,着重了解他们之间的规律性,了解各类材料的特性和主要用途。为此,要及时复习,并善于归纳和总结。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。金属材料学的研究对象是金属材料,包括金属材料的生产、加工、性能、组织、成分、用途等。金属材料学的研究方法是实验法、理论法和计算法。金属材料学的研究目的是为航空工业提供合格的金属材料,并为航空工业的生产、加工、性能、组织、成分、用途等提供理论依据。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。金属材料学的研究对象是金属材料,包括金属材料的生产、加工、性能、组织、成分、用途等。金属材料学的研究方法是实验法、理论法和计算法。金属材料学的研究目的是为航空工业提供合格的金属材料,并为航空工业的生产、加工、性能、组织、成分、用途等提供理论依据。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。金属材料学的研究对象是金属材料,包括金属材料的生产、加工、性能、组织、成分、用途等。金属材料学的研究方法是实验法、理论法和计算法。金属材料学的研究目的是为航空工业提供合格的金属材料,并为航空工业的生产、加工、性能、组织、成分、用途等提供理论依据。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。金属材料学的研究对象是金属材料,包括金属材料的生产、加工、性能、组织、成分、用途等。金属材料学的研究方法是实验法、理论法和计算法。金属材料学的研究目的是为航空工业提供合格的金属材料,并为航空工业的生产、加工、性能、组织、成分、用途等提供理论依据。

金属材料学是研究金属材料在航空工业中的应用,以及金属材料在航空工业中的性能、组织、成分、用途等问题的科学。金属材料学是航空工业的基础,也是航空工业的重要组成部分。金属材料学的研究对象是金属材料,包括金属材料的生产、加工、性能、组织、成分、用途等。金属材料学的研究方法是实验法、理论法和计算法。金属材料学的研究目的是为航空工业提供合格的金属材料,并为航空工业的生产、加工、性能、组织、成分、用途等提供理论依据。

第一章 纯金属的结构与结晶

§ 1-1 纯金属的晶体结构

固体物质，凡其内部原子是有规则排列的，这种物质就称为晶体。固体金属内部的原子是有规则排列的，所以固体金属都是晶体。

金属的晶体结构是指什么呢？金属的晶体结构是指晶体原子的排列方式。为什么要研究金属的晶体结构呢？因为金属的性能和性能变化是与金属的晶体结构密切相关的。例如铝、铜、金与镁、铋的晶体结构类型不同，即原子的排列方式不同，前三者具有很好的塑性，可以顺利地进行压力加工，甚至可辗压成极薄的金属箔；而后二者的性能很脆，难以进行压力加工。又如钢经过淬火，强度、硬度显著提高，塑性、韧性显著降低，就与钢在淬火前后的晶体结构发生了变化有关。

这一章只讨论纯金属的晶体结构，下一章再讨论合金的晶体结构。这样可以把问题简化，由浅入深地进行研究。

一、金属原子的结合方式及金属特性

金属原子的构造特点是围绕原子核运动的最外层电子数很少，绝大多数金属原子最外层只有1~2个价电子。这些价电子与原子核的结合较弱，很容易摆脱原子核的束缚。当金属原子结合成晶体时，它们将失去价电子而成为正离子。正离子按一定的几何规则排列，并在各自的一定位置上作热振动。脱离了原子核束缚的价电子成为自由电子，在各正离子之间不停地作高速运动。这些自由电子属于整个金属所共有，形成了所谓的“电子云”（或称“电子气”）。金属原子的这种结合方式，通常称为金属键结合。但是，事物是复杂的和运动着的。脱离了原子核束缚的自由电子，在某一瞬间又可能与某一正离子重新结合形成中性原子。当然这种重新结合是极个别的现象，而且结合也是暂时的。所以，实际金属晶体中绝大多数是正离子作有规则的排列，但也有极个别的金属原子存在。图1-1为金属晶体的金属键结合示意图。

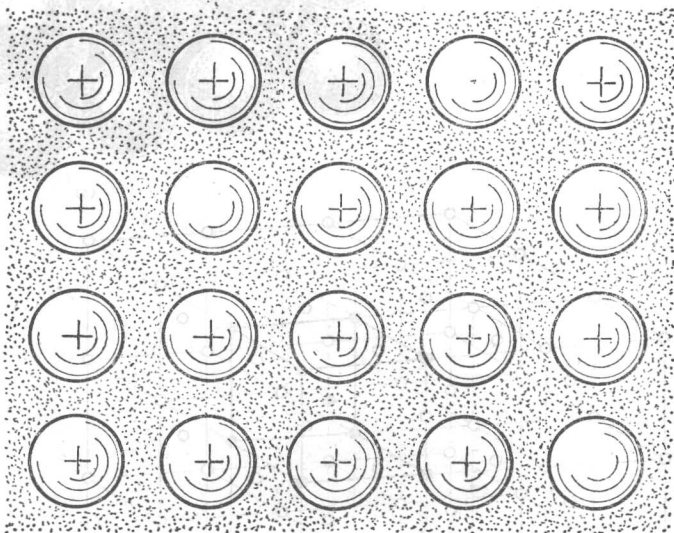


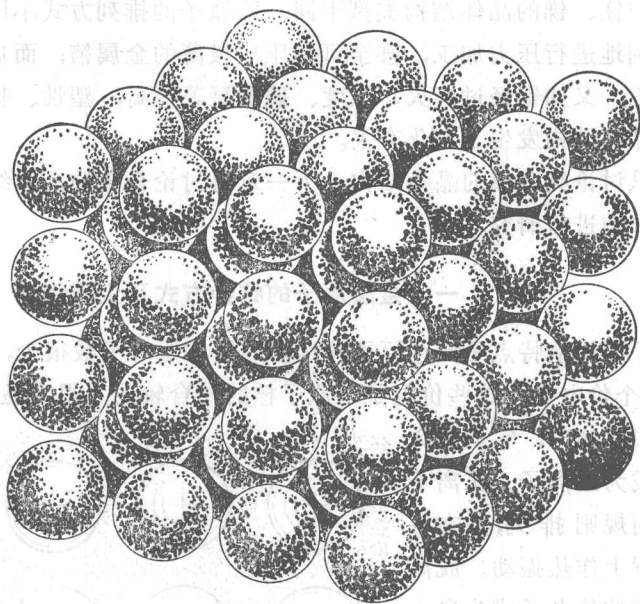
图1-1 金属键示意图

金属的特性是与金属键结合的性质密切相关的。由于金属键结合有自由电子存在，金

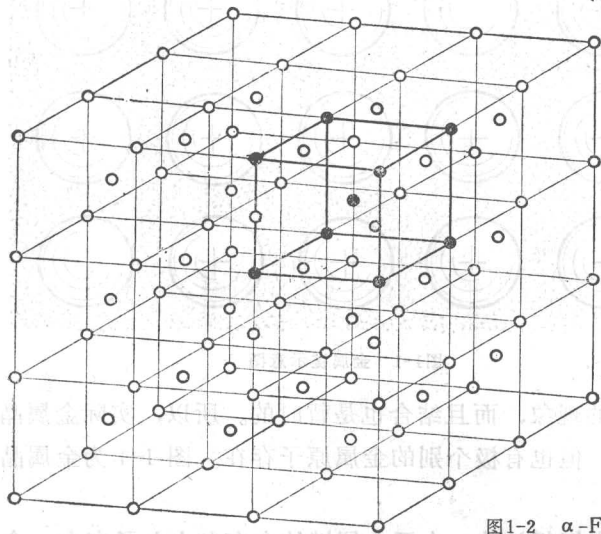
属在很小的外电场作用下，自由电子即可沿着电场方向流动，所以金属具有良好的导电性。此外，不仅正离子的热振动可以传导热能，自由电子的运动也可以传递热能，所以金属具有良好的导热性。金属在外力作用下，晶体中一部分正离子相对于另一部分正离子可以进行相对的位移，即发生塑性变形。塑性变形时自由电子也随之移动，塑性变形后仍保持原来正离子与自由电子之间的结合关系，即保持了正离子之间的牢固结合，故金属可以进行较大的塑性变形而不致破裂，即金属具有良好的塑性。

二、金属晶体的基本概念

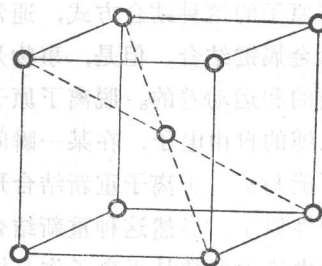
在研究金属的晶体结构即晶体的原子（为了简便，以后称原子，不再称正离子）排列规律时，为了把问题简化，我们通常将一个原子当作一个刚性小球，并把在不停地热振动



(a)



(b)



(c)

图1-2 α -Fe晶体中铁原子排列示意图

(a) 原子堆砌模型；(b) 晶格；(c) 晶胞。

的原子，当作是在它的平衡位置上静止不动的。这样晶体中原子的排列就可用许多刚性小球的堆砌来示意地表示，如图 1-2(a) 是 α -Fe 晶体原子堆砌排列的示意图。

这种原子堆砌模型，由于许多小球紧密地堆积在一起，仍很不容易看清楚原子排列的规则。为此，有必要进一步采取适当的办法来清楚地表示原子的排列规则，即用一些假想的几何线条在几个方向上把各原子的中心连接起来，并把一个原子视为一个几何质点，这样抽象地构成一个几何空间格架，原子处于几何线条的交点即空间格架的结点上。这种描述晶体原子排列规律的空间格架可简称为晶格（也可叫结晶格子）。图 1-2(b) 是 α -Fe 晶体的晶格。

用这种晶格来研究晶体的结构还是很很不方便的。因为晶格中的原子按照一定的规律排列，为了研究方便，我们只要在晶格中选取一个能够代表原子排列规律的最小几何单位，并把它取出来照原样画成一个图，这个最小几何单位即可代表晶体中原子排列的规律。这个代表晶体原子排列规律的最小几何单位称为晶胞。图 1-2(c) 是 α -Fe 晶体的晶胞，它就是图 1-2(b) α -Fe 晶格中用重线条表示出来的最小几何单位。

为了表示晶胞的形状和大小，常用如图 1-3 所示的晶胞的三条棱边长度 a 、 b 、 c 及三条棱轴间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示。这些参数称为晶格常数。棱边长度以 $\text{\AA}$ （埃， $1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米）作为度量单位。立方晶胞的三个棱边长相等，即 $a=b=c$ ，三个轴间夹角都是 90° （ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ），因此，这种晶胞的晶格常数只要用一个棱边长度 a 表示就可以了。

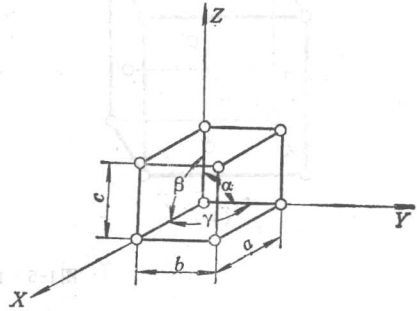


图1-3 晶胞及晶格常数的表示方法

三、常见金属的晶格类型

金属的种类虽然很多，但是，常见的金属晶格类型，即晶体的原子排列方式，则一般可归纳为三种类型。

1. 体心立方晶格

图 1-4 所示是体心立方晶格的晶胞。由图中可见晶胞的八个角上各有一个原子，晶胞

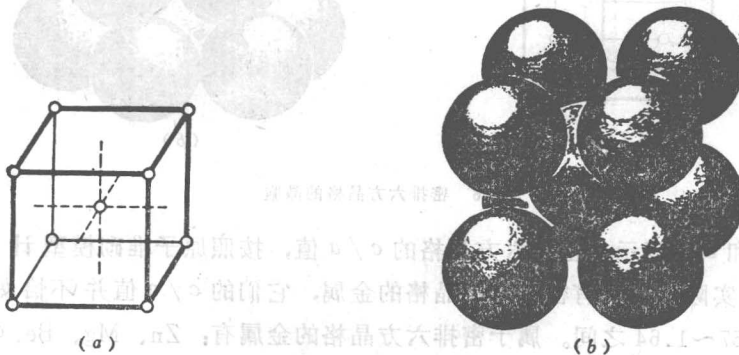


图1-4 体心立方晶格的晶胞

的中心还有一个原子。上面已经说过，立方晶胞的晶格常数可用晶胞的一个棱边长度 a 来表示。当然不同的金属，由于它们的原子直径不同，所以它们的晶格常数也是不同的。属于体心立方晶格的金属有： α -Fe (912°C以下的纯铁)、Cr、W、Mo、V、 β -Co、 β -Ti 等。

2. 面心立方晶格

图 1-5 所示为面心立方晶格的晶胞原子排列图，除在晶胞的八个角上各有一个原子外，在立方体六个面的中心还各有一个原子。它们的晶格常数也只要用晶胞的一个棱边长度 a 表示即可。同上面的道理一样，不同金属的晶格常数当然也是不一样的。属于面心立方晶格的金属有： γ -Fe (912~1394°C之间的纯铁)、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pb 等。

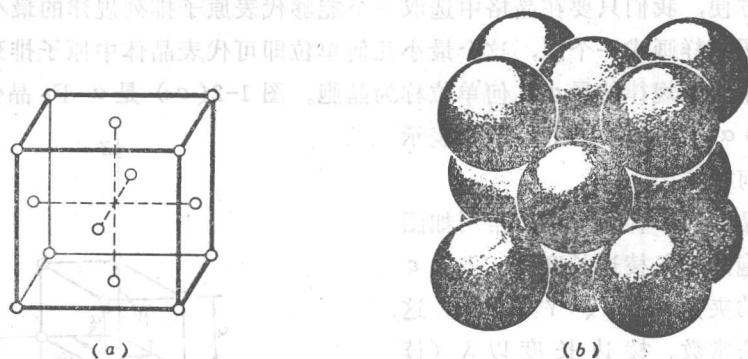


图1-5 面心立方晶格的晶胞

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞原子排列如图 1-6 所示。在晶胞六方柱体十二个角和上下六角形底面中心各有一个原子，晶胞的中间还另有三个原子。这种晶胞的晶格常数要用如图所示

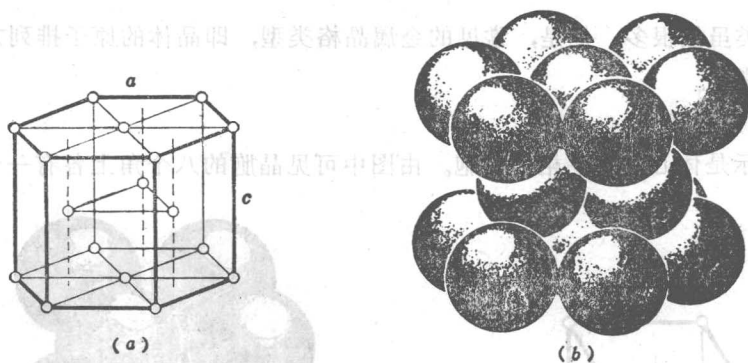


图1-6 密排六方晶格的晶胞

的棱边长度 a 和 c 来表示。密排六方晶格的 c/a 值，按照原子堆砌模型计算应当等于 1.633。但是，实际上，具有密排六方晶格的金属，它们的 c/a 值并不恰好等于 1.633，而一般介于 1.57~1.64 之间。属于密排六方晶格的金属有：Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

四、晶面和晶向的概念

晶体中任何一系列原子组成的原子平面叫晶面，任何两个原子连成的直线，它所指的方向叫晶向。不同晶面上的原子排列密度是不同的，如图 1-7 所示，晶面 A 的原子排列就比晶面 B 的原子排列紧密。同样，不同晶向上的原子排列密度也是不同的，如图 1-7 所示，晶向 a 的原子排列比晶向 b 的原子排列紧密。

一个晶体中的原子如果都按照一个规律和一致的位向排列，这个晶体就称为单晶体。单晶体的不同晶面和晶向上的原子排列密度不同，因此，单晶体在不同方向上的物理、化学和机械性能也不同。单晶体在不同方向上性能不同的现象叫做晶体的“各向异性”。例如，实验测定铁单晶体 (α -Fe) 的弹性模数 E ，在立方晶体的对角线方向 (即图 1-7 的晶向 a) 是 29000 公斤/毫米²，而沿棱边方向 (即图 1-7 的晶向 b) 只有 13500 公斤/毫米²。

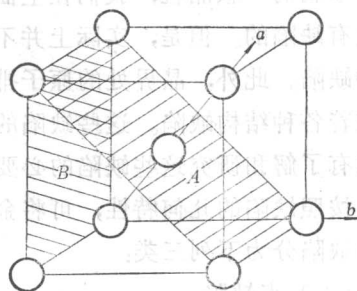


图1-7 不同晶面和晶向上原子排列密度的差异

五、实际金属的内部结构

1. 实际金属是多晶体

实际金属的内部结构是怎样的呢？我们只要把一块金属打断，用肉眼或放大镜观察就可以看到断面由许多小颗粒组成；如果进一步把断面磨平抛光并经适当腐蚀，把它放在显微镜下观察，则可以看到许多蜂窝状的颗粒。图 1-8 是纯铁的金相显微组织照片。金相显微镜下观察到的蜂窝状颗粒称为晶粒。进一步的实验分析证明，金属中各个晶粒的原子排列规律虽然相同，但是各个晶粒的原子排列位向却是各不相同的。如图 1-9 所示，如果箭头所指方向代表立方晶体的一个棱边方向，这样就可以看出各个晶粒的位向不同了。金属内部的一颗晶粒相当于一个单晶体。实际金属由许多晶粒组成，所以实际金属是多晶体。

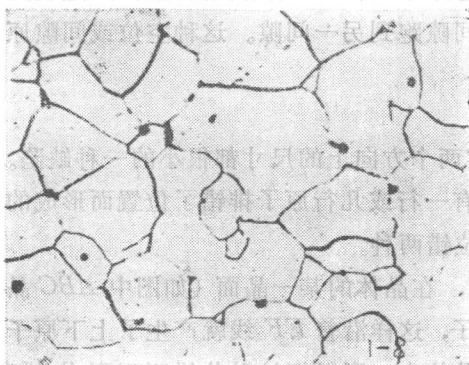


图1-8 纯铁的金相显微组织照片

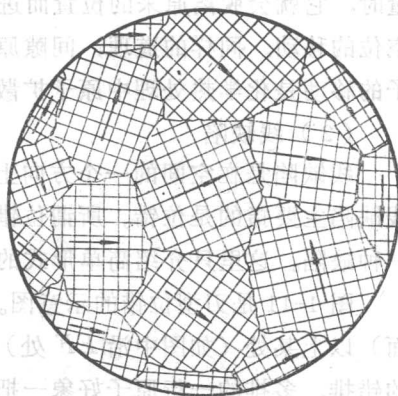


图1-9 晶粒位向示意图

晶粒与晶粒的交界处称为晶界。

上面讲到单晶体具有各向异性的特性。但是，测定实际金属的性能，在各个方向上却

是基本上一致的，显不出很大的差别。例如纯铁的弹性模数 E 在任何方向上测定大致都是 21000 公斤/毫米^2 。为什么实际金属没有各向异性的现象呢？因为实际金属是多晶体，由于各个晶粒的晶格位向不同，各个晶粒的各向异性现象，在各晶粒之间可以互相抵消和补充，所以实际金属显示出各向同性。这种实际金属的各向同性也可称为“伪等向性”。

2. 实际金属内部结构的缺陷

金属的一颗晶粒，我们在上面讲它相当于一个单晶体，好象它的原子排列完全整齐，是没有缺陷的。但是，实际上并不那样理想，而是在它的某些部位存在着某些原子错排的各种缺陷。此外，晶界处的原子排列是不规则的，这也是一种缺陷。所以，实际金属内部存在着各种结构缺陷。这些缺陷的存在对金属的性能和组织转变都有很大的影响，因此，我们了解和研究这些缺陷的必要。

按照缺陷的几何特性，可将金属内部的结构缺陷分为下列三类：

(1) 点缺陷

点缺陷是在空间长、宽、高三个尺寸方向上都很小的一种缺陷。

晶体中的原子在晶格结点上并不是静止不动的，而是以各自的结点为中心在作不停的热振动。在一定的温度下，各个原子的振动能量并不都一样，当某个原子在某一瞬间的振动能量特别高时，这个原子就可能脱离它的结点位置，而在此结点上形成一个“空位”。离开结点的原子可能跑到晶界处（或晶体表面的正常位置），也可能跑到晶格的间隙中形成间隙原子。图 1-10 为晶体中形成的空位和间隙原子示意图。

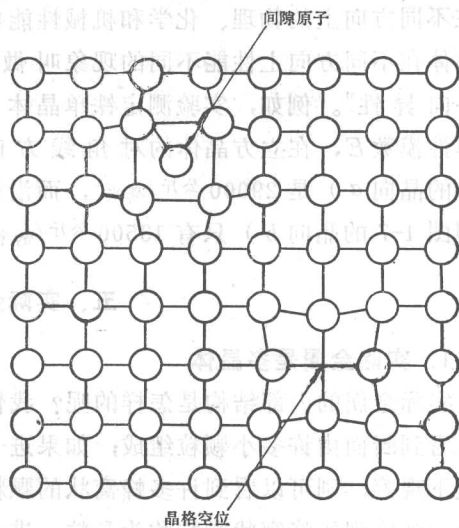


图1-10 点缺陷示意图

晶体中的空位和间隙原子不是固定不变的。当空位周围的某个原子获得足够的振动能量时，它就会脱离原来的位置而进入空位位置，在它原来的位置上形成新的空位，这就是空位的移动。同样的道理，间隙原子也可以从这一间隙跑到另一间隙。这种空位或间隙原子的移动是化学热处理中原子扩散的一种主要方式。

(2) 线缺陷

线缺陷是在空间的一个方向上尺寸较长，在其它两个方向上的尺寸都很小的一种缺陷。线缺陷主要指的是位错。所谓位错就是晶体中某处有一行或几行原子排错了位置而形成的一种缺陷。这里只介绍简单形式的刃型位错及螺型位错两种。

图 1-11 是刃型位错的示意图。由图中可以看到，在晶体的某一晶面（如图中 ABC 晶面）以上某处（如图中沿 EF 处）多插入了一排原子，这样沿着 EF 线就产生了上下原子的错排。多排的一行原子好象一把刀刃那样插入了晶体中，所以把这种位错叫刃型位错。 EF 线叫刃型位错的位错线。在位错线附近的晶格发生了弹性畸变（或称歪扭）。晶体的上半部由于多了一排原子，附近的原子被挤得靠紧起来，所以，在该处受压应力。晶体的下半部，相对来说，少了一排原子，附近的原子被拉开，所以，在该处受拉应力。这种晶

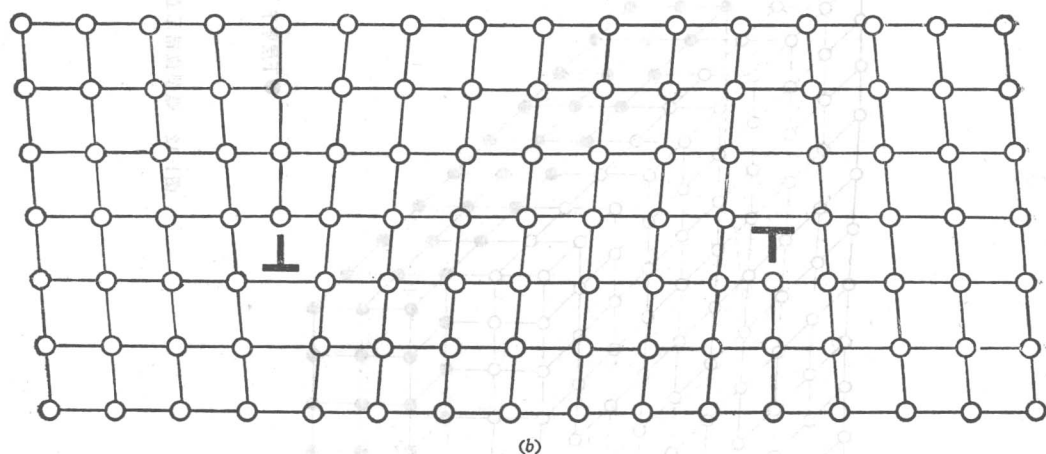
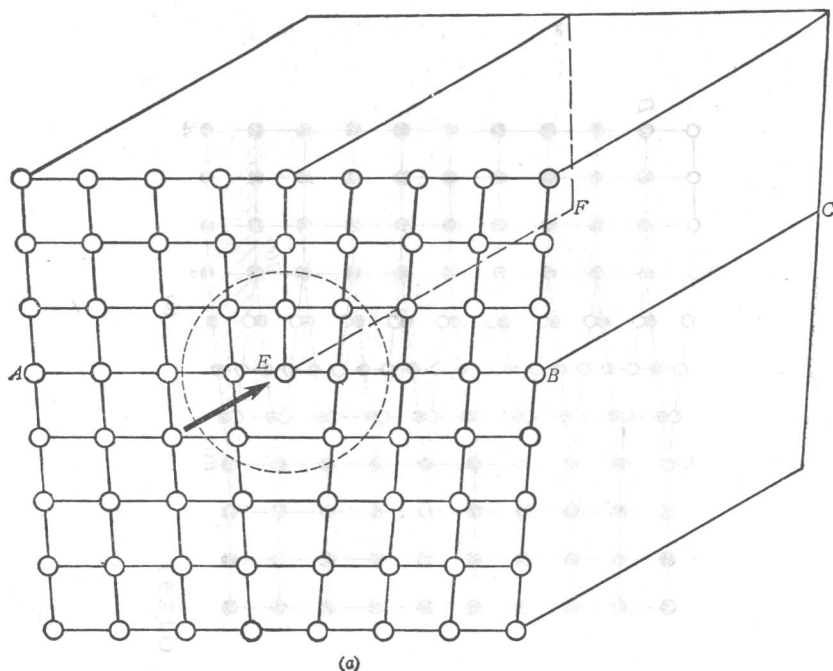
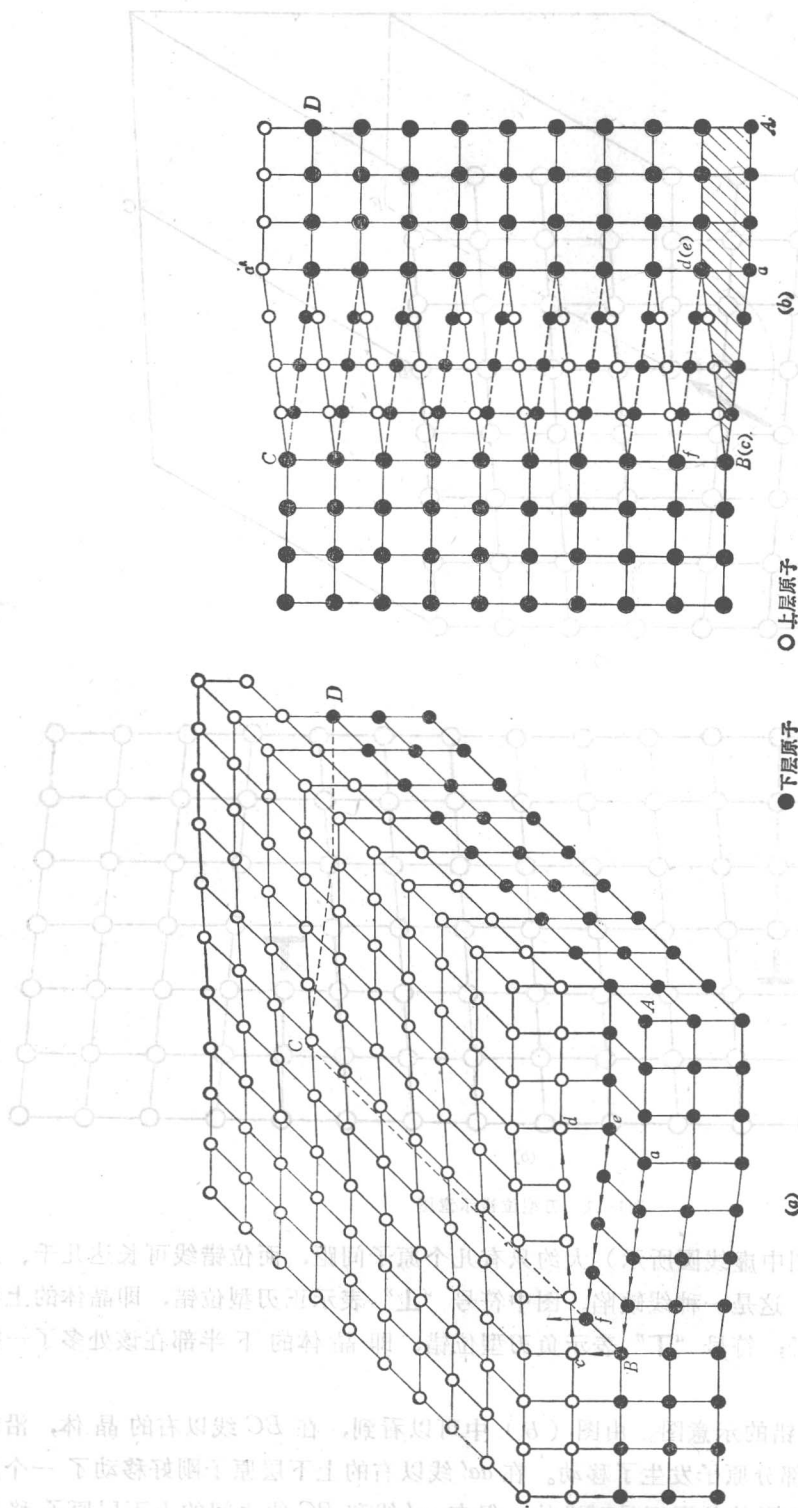


图1-11 刃型位错示意图

格畸变区的半径（如图中虚线圆所示）大约只有几个原子间距，而位错线可长达几千、几万个原子间距，所以，这是一种线缺陷。图中符号“ $\perp$ ”表示正刃型位错，即晶体的上半部在该处多了一排原子；符号“ T ”表示负刃型位错，即晶体的下半部在该处多了一排原子。

图 1-12 是螺型位错的示意图。由图 (b) 中可以看到，在 BC 线以右的晶体，沿着 $ABCD$ 晶面的上下两部分原子发生了移动。在 aa' 线以右的上下层原子刚好移动了一个原子间距，所以上下层原子的位置还是对准的，但在 aa' 线和 BC 线之间的上下层原子移动的距离小于一个原子间距，所以在这个区域内就形成了上下层原子互相不对准的原子错排。这种原子错排如图 (a) 立体模型所示，上下层原子是按 $a \rightarrow B \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ 这样一



条螺旋线错排的，所以把这种位错叫做螺型位错。上下层原子不对准的地带称为位错区。位错区的晶格发生了畸变。图中 BC 线叫做螺型位错的位错线。

晶体中存在位错已为实验所证实。位错的存在对金属的性能及其塑性变形都有重要的影响。这在以后的塑性变形及有关章节中再作论述。

(3) 面缺陷

面缺陷是在空间的两个尺寸方向上都较大，而在第三个尺寸方向上很小的一种缺陷。面缺陷主要是晶界和亚晶界。

(a) 晶界。晶粒与晶粒的交界处称为晶界。由于相邻晶粒的原子排列位向不同，晶界处的原子为了适应相邻晶粒的不同位向，就处于一种不规则的过渡状态。根据相邻晶粒位向差的角度大小不同，晶界处原子的过渡状态也是不同的。相邻晶粒的位向差大于 15° 的晶界称为大角度晶界。大角度晶界处的原子为了适应相邻晶粒的不同位向，它们往往处在一种折衷的位置，如图 1-13(a) 所示。图 1-13(b) 为大角度晶界处原子处于折衷位置的一种过渡层模型。

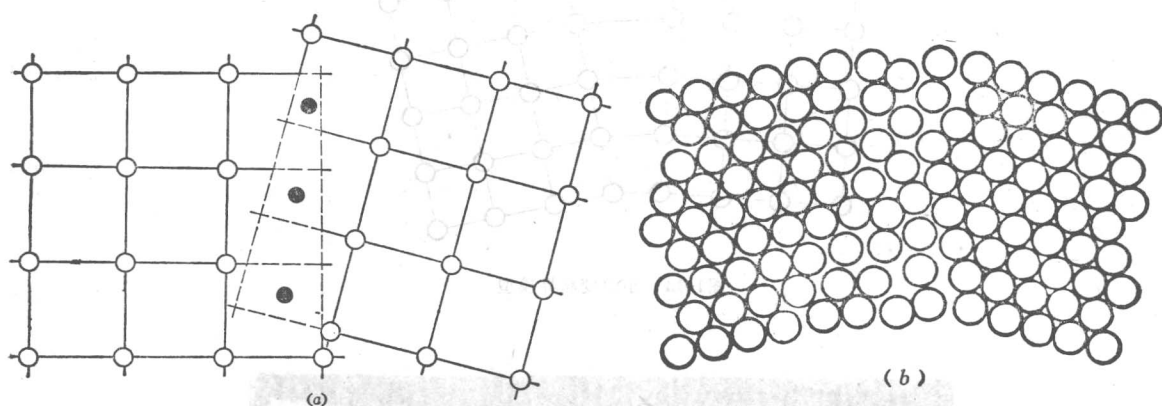


图1-13 大角度晶界原子示意图
(a) 原子的折衷位置；(b) 晶界的过渡结构模型。

相邻晶粒的位向差小于 15° 的晶界称为小角度晶界。小角度晶界可设想它是由许多刃型位错构成，如图 1-14 所示。

晶界处的原子是不规则的。晶界原子处于一种不稳定状态，晶界比晶粒内部具有高的能量，并因此而具有与晶粒内部不同的许多特性。这些特性非常重要，应加以重视。主要特性如下：

(i) 晶界处于较高的能量状态，因而在常温下，晶界对晶体内部原子的滑移起阻碍作用，这种阻碍作用即表现为晶界的强度较高。

(ii) 由于晶界具有较高的能量，因而当金属或合金发生晶体结构转变时，容易先在晶界发生。因为正如由高温向低温物体传热的自发过程一样，任何自发过程总是由高能量状态向低能量状态转变的，而且两种状态的能量差愈大，转变愈容易发生。晶界与新晶体结构能量差比晶粒内部与新晶体结构的能量差大，所以，容易在晶界先发生晶体结构转变。

(iii) 晶界具有较多的空位，则外来原子沿着晶界扩散的速度比在晶粒内部快。