

高等学校教学参考书

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE CANKAOSHU

金属学及热处理

石霖 編 著



机械工业出版社

高等学校教学参考书



金属学及热处理

(冷加工各专业用)

石霖 编 著

机械工业出版社

本书根据1963年6月修訂的机械制造专业“金属学及热处理教学大纲”的规定内容，并在原“金属学简明教程”的基础上編写的。

本书由以下三个部分組成：

1. 基本理論：金属的结构和結晶；合金的构造和結晶；金属的塑性变形及再結晶。

2. 鋼鉄材料：鋼的热处理原理；鋼的热处理工艺；鋼中的杂质及合金元素；结构鋼；工具鋼；特殊性能的鋼及合金；鑄鉄。

3. 有色金属材料：鋁及其合金；銅及其合金；軸承合金。

金属学及热处理

(冷加工各专业用)

石霖編著

*

第一机械工业部教材編审委员会編輯（北京复兴門外三里河第一机械工业部）

机械工业出版社出版（北京苏州胡同141号）

（北京市书刊出版业营业許可証出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $15^{1/4}$ ·字数345千字

1965年10月北京第一版·1965年10月北京第一次印刷

印数00,001—20,000·定价（科五）1.70元

*

統一书号：K15033·3977

序

金属学及热处理一书的编写工作是受“金属学及热处理教材编审委员会”的委托,根据1963年6月所制定的机械制造专业用“金属学及热处理教学大纲”的规定内容,在原来“金属学简明教程”的基础上进行的。

编写的目的,一方面是为了吸取最近几年来教学改革的经验,更好地贯彻“少而精”和“学以致用”的原则;另一方面也是为编写一本符合我国情况的理论联系实际的教材作初步的尝试。

本书的初稿是在1964年5~6月份陆续完成并交请哈尔滨工业大学张吉人同志进行审阅。考虑到本书的使用面较广,影响面较宽,故在审阅人审查意见的基础上,于1964年8月中旬在北京又由教材编审委员会副主任委员徐纪楠同志召集了一次小组审查会议。参加会议的计有西安交通大学王小同同志、大连工学院冯根源同志、天津大学苏德达同志、北京机械学院陈仁悟同志、太原工学院侯增寿同志、第一机械工业部教材编辑室张士廉同志,以及审阅人和编写人等。在审查过程中,首先针对机制专业的金属学及热处理教学大纲一年来在使用中遇到的问题进行了讨论,并对大纲内容及说明书作了较细致的修改与补充,使大纲的内容更符合本课的任务,从而为本教材的修订工作准备了良好的条件。其次,根据“少而精”“学以致用”的精神,审查小组对本书各章节作了比较系统而深入的审阅。明确地指出:应该把培养学生具有初步选用金属材料的能力作为本课程的主要目标。并要求在编写中,在教材内容的取舍及层次系统的安排上都应以“如何选用金属材料”为中心,务求使本书在内容和份量上符合机制专业对本课的要求,并且在难易程度上切合学生的水平。

根据审阅人和审查小组提出的意见,由编写人对初稿进行了修订。在编写中,改动较大的有如下几方面。首先,大大压缩了那些对机制专业学生艰深难懂而对掌握金属材料知识无关紧要的概念和理论。如,自由能、相律等概念以及位错理论、相变机理等。但是对于学习金属材料所必需的理论基础,仍保证了必要的份量。其次,加强了钢材选用和热处理规范制定等内容在教材中所占的地位,并尽量使所讲的金相热处理原理内容能有助于理解金属材料的各项组织及性能变化,以取得前后联系、理论与实践密切配合的效果。最后,在修订中也注意到如何使本书更多地反映出以我为主的精神。例如,全部的金属材料都尽量采用我国的规格和编号。对于钢的组织名称代号,根据审查小组的意见,认为应该建立我国自己的表示方法,因此初步尝试利用我国汉语拼音符号代替目前在国内外流行的外国符号。当然,这乃是一个创议,希望通过使用,取得经验,逐步改进。

尽管在修订过程中力求使教材的内容、观点和精神更符合党所提出的“少而精”“学以致用”的原则,但由于我们的教学及实践经验不足,在编写及修订过程中必定会产生不少问题甚至错误,敬请使用本书的同志提出意见,以便今后改正,使本书发挥应有的作用。

本书初稿中的第一、三、五章由席聚奎同志编写,第二、十章由吴培英同志编写,第

IV

四、十一、十三章由沈达钧同志编写，其余各章由修订人编写。

本书的插图和照片是由伊秀珍同志和封文珍同志、王华英同志绘制的。

对于供给编写资料 and 提供宝贵意见的院校和同志们，一并在此致谢。

编写人 石 霖

目 录

序		I 引言	116
绪论	1	I 鋼中杂质对鋼材质量的影响	117
		II 合金元素对鋼的組織和性能的影响	120
		IV 鋼的分类及編号	124
第一篇 基本理論		第七章 结构鋼	125
第一章 金属的结构和结晶	4	I 普通結構鋼	126
I 金属的概念	4	I 优质結構鋼	135
I 金属的晶体結構	6	II 选用鋼材的一般原則和方法	154
II 金属的結晶过程及理論	12	第八章 工具鋼	162
IV 金属的同素异构轉变	13	I 概論	162
第二章 合金的构造和结晶	19	I 刀具鋼	164
I 合金中的相	19	II 模具鋼	173
I 合金的結晶过程——相图	24	IV 量具鋼	176
II Fe—Fe ₃ C 相图及其分析	39	第九章 特殊性能的鋼及合金	178
第三章 金属及合金的塑性变形和再结晶	48	I 不銹鋼	178
I 金属及合金的塑性变形	48	I 耐热鋼及耐热合金	184
I 冷加工金属在加热时的組織和性能的变化	59	II 磁鋼及磁合金	193
II 金属在高温下的塑性变形	64	第十章 鑄铁	198
		I 概論	198
		I 常用的鑄鉄	202
		II 鑄鉄的热处理	209
第二篇 鋼鉄材料		第三篇 有色金屬材料	
第四章 鋼的热处理原理	67	第十一章 鋁及其合金	213
I 热处理的定义和分类	67	I 概論	213
I 鋼的加热相变	68	I 形变鋁合金	219
II 过冷奥氏体的等温分解	70	II 鑄造鋁合金	222
IV 奥氏体在連續冷却中的相变	76	IV 耐热鋁合金	224
V 鋼在回火时的轉变	80	第十二章 銅及其合金	226
VI 热处理对鋼机械性能的影响	82	I 概論	226
VII 鋼中的时效現象及其意义	83	I 銅鋅合金(黃銅)	226
第五章 鋼的热处理工艺	84	II 銅錫合金(錫青銅)	230
I 鋼的加热	85	IV 鋁青銅	231
I 鋼的退火和正火	87	第十三章 軸承合金	232
II 鋼的淬火及回火	91	I 軸承合金的性能要求	232
IV 鋼的表面热处理	103	I 低熔点軸承合金	233
V 热处理工艺与其他加工工艺間的关系	115	II 高熔点軸承合金	236
第六章 鋼中的杂质及合金元素	116		

緒 論

金属材料在现代工农业中占有极重要的地位。不仅农机制造、国防工业、机器制造、化学、运输等国民经济的重要部门大量地使用金属，而且在人们日常生活的用品中也离不开金属。

金属材料之所以能获得如此广泛的应用是因为它不但具有优良的机械性能(高的强度、塑性和韧性)，而且还兼具优良的工艺性能(铸造性、鍛压性、焊接性、切削加工性)，易于采用不同的方法制成各种形式的零件和工具。此外，金属材料还具有其他材料所不及的优良物理性能(如，导电性、导热性、磁性等)。因之，金属学便成为生产、加工及使用金属材料者所必需具备的一项知识。

究竟什么是金属学？它研究那些问题、包含那些内容？

简单言之，金属学是研究金属材料的性能同其化学成分及内部构造之间关系的一门科学；是利用金属内部的组织转变规律改善材料性能，进而创造新型合金的一门科学。

本课的内容基本上由两部分组成。第一部分是金属学的理论基础，主要探讨金属的晶体结构、结晶过程，金属在固态下的转变过程(热处理等)以及金属的塑性变形等。这些问题显然同物理学、化学、材料力学等基础学科有着密切的关系。而研究这些问题所使用的实验工具：如显微镜、热分析装置、机械性能试验装置等也都是由物理学、材料力学等学科提供的。

金属学的理论基础是掌握金属材料内部构造的变化规律和理解金属材料之间性能差异的重要钥匙。很好地掌握这一原理，就能对工业合金材料(钢、铸铁、铝合金、铜合金等)在液态结晶中(铸造、焊接)、在固态转变过程中(热处理)以及在热态和冷态的变形过程中(鍛压、轧压、冲压)所发生的变化有一较为清楚的概念，就能比较正确地选用或制定出各项热加工工艺的规范，就能在合理安排各项工艺程序的条件下使金属材料的组织得到改善，性能得到提高。

由此可见，金属学的理论基础不仅是金属学这门科学本身的基础，同时也对其他金属工艺课程(如，铸造、焊接、压力加工等)有指导性的意义。

本课的第二部分是讲述工业用的各种金属材料。在这部分内容中主要是介绍钢铁材料(如结构钢、工具钢、特殊性能钢)和有色金属材料(铝、铜等合金)的品种规格、性能特点以及它们的主要使用范围等，以便使从事机械设计和制造的工作者在选用及加工金属材料时有所遵循。如果一个现代的机械设计人员或工艺人员缺乏必要的金属学知识，就可能在选材、用材以及在规定材料的加工工艺程序上犯错误，造成材料的浪费和损失。

由上述情况可知，金属学是既包含着丰富的理论知识又同生产实践有密切联系的一门课程，是建立在基础学科(物理学、化学、材料力学)的坚实理论上同工艺学科的丰富实践经验上的一门课程。

本课程是机械类各专业的基础技术课，其主要目的是使学生获得金属学基本理论的一

般知识,用以正确地理解常用金属材料的成分、组织、性能、热处理工艺以及它们之间的相互关系。学生在学习本课后,应在常用金属材料的正确选择、合理使用方面,以及在主要热处理工艺方案的选用方面获得初步训练。

金属学是在生产实践中发展起来并在生产实践中逐渐趋于完善的一门科学。自从人类学会利用金属制造生产工具以后,社会的生产力便得到了较大的提高。我国劳动人民在这方面曾作出了不少的贡献。我国人民最早懂得铜中含有锡、铅等元素时其硬度、强度可以增加的道理,并掌握了这类铜合金的熔炼与铸造技术,开辟了世界上使用合金的纪元。他们利用不同含锡量的锡青铜其硬度不同的现象,制备出钟、鼎、矛、矢等性能各异的器械。

在人类进入铁器时代后,金属的冶炼规模和使用范围更加扩展,对其性能的要求也更多样。在这一时期内,我国劳动人民在世界上最早地掌握了铸铁的生产及铸造技术。同时还发明了利用熟铁经过渗炭而制钢的方法。此外,金属的冷加工硬化现象也在生产实践中得到了应用。更突出的则是对于应用热处理方法改变钢的性质这一工艺达到了极高的造诣。例如,在明代宋应星所著《天工开物》这一宝贵文献中对我国的热处理工艺作了如下生动的叙述:

“凡铁鏊(锉),纯钢为之。未健(淬火)之时,钢性亦软,以已健钢鏊划成纵斜文理,划时斜向入,则文方成焰(陷),划后烧红,微退冷,入水健。久用乖平,入火退去健性(退火),再用鏊划”。引文括号中是现今述语的注解。可见,当时不仅已完全掌握了退火及淬火对钢性能的影响规律,而且知道了利用预冷方法施行淬火。

近百年来由于封建制度的束缚和帝国主义的压迫,我国的科学技术受到极大的抑制,以致使高超的工艺技术长期停留在经验阶段,未能总结提高到理论的高度。

自十九世纪中叶,当人们开始应用显微镜来检验金属的显微组织之后,金属学才有了一个飞跃的发展。金属的显微组织同金属的各种性能有着密切的关系。化学成分相同而显微组织不同的钢,在机械性能方面(如强度、韧性等)往往显示出极大的差异。因此,掌握合金的显微组织的变化规律便成为金属学家重要的课题之一。

合金相图的出现是金属学发展中的又一个巨大的飞跃。相图揭示了合金内部组织转变的奥密,成为人们认识合金特点及改变合金性能的重要依据。相图的出现,也为合金的热处理奠定了基础,使热处理工艺建立在完全科学的基础之上。

最近几十年来,一方面由于基础科学(尤其是物理学)的迅速发展,为认识微观世界提供了更精密的仪器和更丰富的资料。另一方面,工业技术的高度发展也向金属学提出了更高的要求。如,要求制出强度特别高的材料,制出能耐极高温或耐极低温的材料,以及具有优异物理性能(如磁性)的材料等。因之,就必需对金属内部更细微的构造(晶体的结构、晶体缺陷等)进行探索,以期对许多新的现象有进一步的了解。所以,许多最先进的技术,如电子显微镜、X射线衍射、放射性同位素、超声波等在金属学的研究中都得到了相当广泛的应用。

我国自解放以来,在党和政府的英明领导下,发扬自力更生奋发图强的革命精神,在各项工业建设和科学技术的发展上取得了巨大的成就。在金属学和热处理这一学科方面也根本改变了解放前的旧面貌,取得了巨大的成绩。例如,建立了符合我国资源条件的合金钢系统,创造了许多新型的钢种。在机械工厂内均建立了设备完善的热处理车间或中央试

验室,对保证产品的质量起了很大的作用。在热处理工艺方面,目前我们不仅掌握了国外生产中所广泛采用的一些重要工艺,而且还根据我国的条件创造了不少新型工艺。更重要的是在解放后,我国金属学热处理的专业人材得到迅速的培养。在高等学校及中等技术学校内设有金属学专业,开设了内容丰富与生产实践联系密切的各种专业课程和实验,为工厂、研究机关输送了大批金属学技术干部。在科学研究方面,最近几年来,不论在研究水平或科学设备的水平方面都接近了国际先进标准。研究设备的国内自给率也不断提高。参加研究工作的人数增长很快。可以预料,在不久的将来,在金属学的领域内一定会作出优异的成绩。

总之,在党的领导下和社会主义总路线的光辉照耀下,金属学这门科学将在社会主义建设事业中发挥其重要的作用,并将得到进一步的发展。

第一篇 基本理論

第一章 金屬的結構和結晶

I 金屬的概念

金屬，一般來說，是在化學反應中呈現正離子特性的一類元素（除氫以外）。在全部的化學元素中，大約有四分之三是金屬元素（表 1-1 中黑線以左的元素）。金屬與非金屬物質的主要區別是：

金屬具有良好的導電性和導熱性，並具有良好的塑性和金屬光澤。

由於金屬都具有金屬光澤這一特點，所以一般人都可以很容易地從外觀上把它們與非金屬區別開來。

表 1-1 元素周期表

族 周期	I _a	II _a	III _a	IV _a	V _a	VI _a	VII _a		VIII		I _b	II _b	III _b	IV _b	V _b	VI _b	VII _b	0
1	(1 H) 氫		元素晶格代表符號 □ 面心立方 ◇ 六方 ▢ 體心立方 ⊙ 密排六方 ⊠ 金剛石立方型 □ 正方(四方晶體) ⊞ 複雜立方 ◇ 三方(菱面晶體)														1 H 氫	2 He 氦
2	3 Li 鋰	4 Be 鈹											5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
3	11 Na 鈉	12 Mg 鎂											13 Al 鋁	14 Si 矽	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氬
4	19 K 鉀	20 Ca 鈣	21 Sc 鈷	22 Ti 鈦	23 V 釩	24 Cr 鉻	25 Mn 錳	26 Fe 鐵	27 Co 鈷	28 Ni 鎳	29 Cu 銅	30 Zn 鋅	31 Ga 鎵	32 Ge 矽	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪
5	37 Rb 鉀	38 Sr 鈣	39 Y 鈷	40 Zr 鈦	41 Nb 鈮	42 Mo 鉬	43 Tc 錳	44 Ru 鈷	45 Rh 銲	46 Pd 鈀	47 Ag 銀	48 Cd 鎘	49 In 銦	50 Sn 錫	51 Sb 銻	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙
6	55 Cs 銫	56 Ba 鋇	57-71 稀土元素(鏷)	72 Hf 鈦	73 Ta 鉭	74 W 鎢	75 Re 銲	76 Os 銱	77 Ir 銲	78 Pt 鉑	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 鉍	82 Pb 鉛	83 Bi 鉍	84 Po 鉷	85 At 砒	86 Rn 氡
7	87 Fr 鈾	88 Ra 鐳	89 Ac 鏷	Актиноиды 90 Th 鈷 91 Pa 釷 92 U 鈾 93 Np 釷 94 Pu 鈾 95 Am 鋂 96 Cm 鋂 97 Bk 鋂 98 Cf 鋂 99 En 鋂 100 Fm 鋂 101 Mv 鋂														

稀土族元素(鏷)

89 Ce	90 Pr	91 Nd	92 Pm	93 Sm	94 Eu	95 Gd	96 Tb	97 Dy	98 Ho	99 Er	100 Yb	101 Lu
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

金屬在物理性能方面的最主要特點是它的良好導電性和導熱性。它的導電性不僅比非金屬大 $10^{20} \sim 10^{25}$ 倍（比電解液的導電性也很大很多倍），而且其數值隨着溫度的降低而增大，這是和所有的非金屬（以及半導體）恰恰相反的。所以若給金屬下個比較嚴格的定義，便應該說：**金屬就是具有良好導電性的並具有正的電阻溫度系數的物質。**

其次，金屬與非金屬在機械性能上也有明顯的區別。一般言之，金屬不僅具有遠較非

金属为优的塑性，而且还兼有相当高的强度。换言之，即金属一般都具有良好的“综合机械性能”。

此外，金属尚具有优良的铸造性、锻压性、切削性和焊接性等一系列的工艺性能。所以金属能在工业上获得广泛的应用。

金属为什么能具有如上的这些特性呢？显然应该从其内部的结构——原子与原子间的结合方式的特点上去加以分析。

从普通物理及化学的知识中我们知道，金属原子与非金属原子的主要不同是它们在价电子数目上的差别。金属原子的特点是它们的价电子数目较少（一般仅有1、2或3个），而且价电子与原子核之间的结合力很弱，极易与核脱离，即当金属原子与非金属原子相结合时，前者易于形成正离子。这种特征也表现在金属原子彼此之间的结合过程中。当各金属原子相互结合在一起而成为固体时，便会具有如下所述的特殊结合方式。

各金属原子都脱离掉其价电子变成正离子，正离子按照一定的几何形式规则地排列起来，在各固定的地点上作轻微的振动；而所有的价电子则都呈自由电子的形式在各离子间自由地作穿梭运动，为整个金属所公有，形成所谓“电子气”。金属固体就是依靠此公有化了的自由电子与各正离子之间的引力而结合形成的（如图1-1所示）。

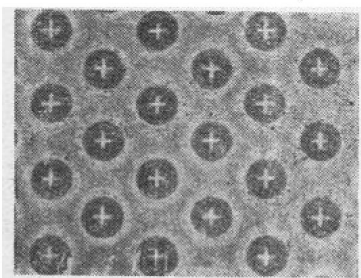


图1-1 金属的原子结合示意图。

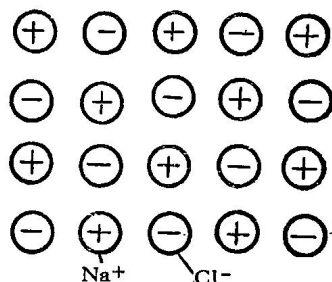


图1-2 氯化钠的离子结合的示意图。

金属原子的这种结合方式叫做“**金属键**”，它与各种非金属固体的原子结合方式（有离子键、共价键及极化键三种）有较大的不同，后者无自由电子存在。譬如，氯化钠是由离子键结合起来的，如图1-2所示。其中氯自钠的原子中夺取一个价电子后形成氯离子(Cl^-)，而钠则成为钠离子(Na^+)，二者之间通过静电引力而结合在一起，结果钠与氯两原子的全部价电子都被束缚在个别的氯离子上。正由于金属的这种电子气结合的特征，因而金属便具有了上述的一系列特性。

首先，由于金属中有电子气的存在，故只要在金属物体的两端造成不大的电位差时，其自由电子便会向正极流动而形成电流，这便是金属具有良好导电性的原因。同时，由于金属中的离子振动的振幅会随温度的升高而增大，阻碍自由电子的流动，所以金属的电阻便具有正的电阻温度系数。

其次，金属的导热现象不仅是通过其离子的振动而且还通过自由电子的运动来实现的，所以金属能具有较非金属为优的导热性。但由于导热性并不像导电性那样单独地由自由电子来完成，因而它在金属与非金属之间的差别就不像导电性那样的明显。

此外，金属键不仅使金属具有较高的强度，而且也是金属具有高塑性的重要前提。在

后面第三章中我们将会知道, 所谓晶体的塑性变形, 乃是晶体在受到外力时, 其晶体中的一部分与另一部分所发生的相对位移。如果在离子晶体 (如NaCl) 中发生这种位移, 则会使原来的正负离子间的引力发生破坏, 而带来相同离子间的斥力, 结果晶体便会发生破裂。而在金属中则否, 由于金属晶体中各离子是借电子气结合, 不会出现这种引力的破坏和斥力的产生, 所以金属便能发生变形, 具有良好的塑性。

最后, 当金属中的自由电子吸收可见光的能量而受到激发后, 被激发的电子回到它原来的低能级时就会发生辐射, 而使金属具有光泽。

综合上述可见, 金属的各主要特性都与它的金属键密切相关, 不仅如此, 当金属在形成固态的晶体时, 其晶体结构的特点也是与此相关。

II 金属的晶体结构

1. 晶体的概念

一切固态物质可以分为晶体与非晶体两大类。所谓**晶体**就是指其内部的原子 (更恰当些应说是离子) 具有**规则排列**的固体。如图 1-3 a 所示, 即为一最简单的晶体结构的范例。金属及绝大多数的非金属固态物质都属于晶体。

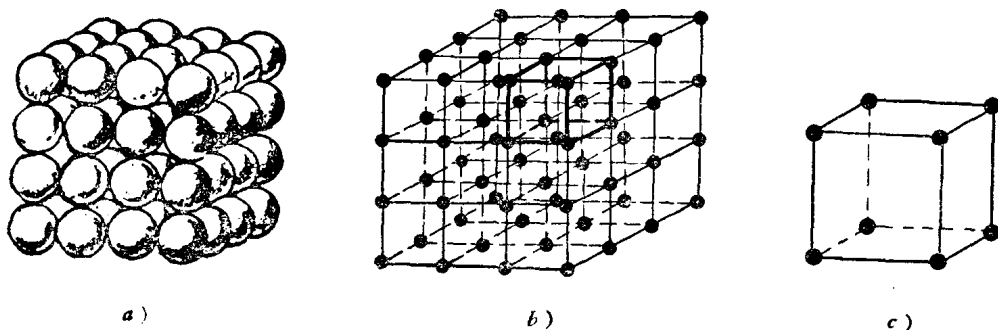


图1-3 简单立方晶格的描述:

a—晶体中的原子排列; b—晶格; c—晶胞。

为了便于分析各种晶体中原子 (离子) 排列的规律及几何形式起见, 可用线条将各原子的中心联接起来, 使之构成一个空间格子。如图 1-3 a 所示的晶体可描述为如图 1-3 b 所示的空间格子, 此时假想各原子 (离子) 都是位于该空间格子的各结点上。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**”。图 1-3 b 所示的是一种简单立方晶格。

晶格中各种方位的原子层叫做“**晶面**”。换言之, 晶体或晶格就是由层层晶面堆砌而成的。而晶面则又可以说是由一行行的原子列所组成。晶格中各种原子列的位向叫做“**晶向**”。

由于晶格实质上都是由一些最基本的几何排列形式重复堆砌而成的, 故为了简便起见, 通常只取其一个最基本的几何单元来进行分析便能找出整个晶格的排列规律。如图 1-3 c 即自图 1-3 b 的晶格中所取出的一个这种几何单元。晶格的最基本的几何排列形式或单元叫做“**晶胞**”。晶胞的各边尺寸—— a 、 b 、 c 谓之“**晶格常数**”, 其大小是以埃 ($1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-8}$ 厘米) 来量度。在立方晶格的情况下, 其晶格常数 $a = b = c$, 故只取一常数 a 便足以表征其尺寸。

晶体物质的物理与机械性能，除与上述的结合键的性质有关外，还同其晶格形式和晶格常数有密切的联系。金属与非金属晶体在许多性能上的重大区别便来源于此。

2. 金属的晶体结构及其分析

由于金属中原子之间的键力较强，且无方向性，所以在金属的晶体中，原子总具有趋于最紧密排列的倾向，这便使晶格的排列组合形式的数目大为减少，而且常形成具有高度对称性的比较简单的几何形式。即金属的种类虽多，但只有为数不多的几种简单形式的晶格。

(i) 金属中常见的三种晶格：从表 1-1 中可以看出，大多数金属的晶格都属于下列三种的形式。

A. 体心立方晶格(图1-4 a 及图 1-5 a)——如 α -Fe、Cr、W、Mo 等金属的晶体皆具有这种晶格形式。它的晶胞是由八个原子构成一立方体，而在立方体的体积中心尚有一个原子。

B. 面心立方晶格(图1-4 b 及图 1-5 b)——如 γ -Fe、Al、Cu、Ni 等金属的晶体皆具有这种晶格形式。它的晶胞是由八个原子构成一立方体，并且在其立方体的每一个面的中心尚有一个原子。

C. 密排六方晶格(图 1-4 c 及图 1-5 c)——具有这种晶格形式的金属计有 Mg、Zn 等。它的晶胞是各由七个原子构成其上下的两个六方底面，并在两六方底面的中间尚有三个原子。呈六方晶格结晶的各金属(如，Be、Mg、Zn、Cd、Ti 等)的晶格常数 c 和 a 的比值 c/a 大致在 1.58~1.89 之间。

有些金属在不同的温度范围内可以呈现不同的晶格形式，这种现象叫做“同素异构性”。例如，铁在 910°C 以下及在 1400~1535°C 之间呈体心立方晶格，称之为 α -Fe；铁在 910~1400°C 之间呈面心立方晶格，称之为 γ -Fe。钴在 430°C 以下呈密排六方晶格，而在 430°C 以上则呈面心立方晶格。锰、钛、锡、锆等金属都具有同素异构性。

上述三种晶格都是原子排列密度高的晶格形式。评断晶格中原子的排列密度的高低可以采用“配位数”的概念。所谓配位数就是指在晶格中的任一原子周围所紧邻的等近距离的原子数目。如在体心立方晶格中，任一原子(如体中心的那个原子)周围所紧邻的等近距离的原子数是 8，所以它的配位数便是 8。面心立方晶格的配位数是 12；密排六方晶格的配位数也是 12。而如图 1-3 所示的简单立方晶格的配位数则是 6。

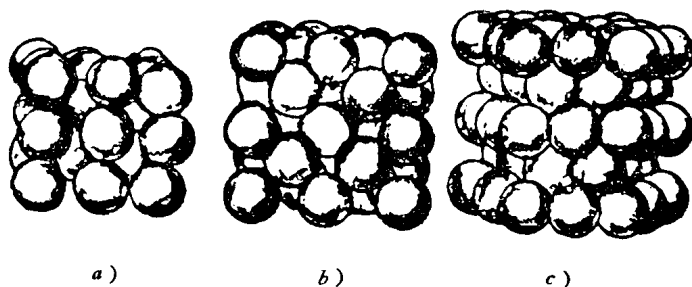


图1-4 三种常见晶格的模型:

a—体心立方晶格；b—面心立方晶格；c—密排六方晶格。

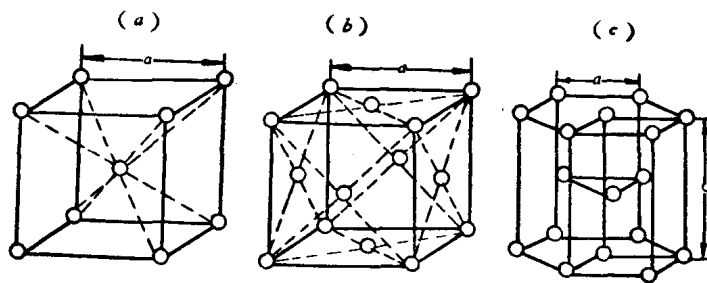


图1-5 三种常见晶格的晶胞:

a—体心立方晶胞；b—面心立方晶胞；c—密排六方晶胞。

配位数的数值愈大，则晶格中原子密排的程度便愈高。故从以上四种晶格的配位数便可以看出，其中以面心立方晶格及密排六方晶格的密排程度为最大，体心立方晶格次之，而简单立方晶格则最小。既然大多数金属的晶格形式都是属于面心立方、体心立方或密排六方的，那末可以说金属的晶格皆具有最密排列的特点。

(ii) 晶格中各晶面及晶向方位的表示法：在研究各种金属晶格的细节及其性能时，通常都需要去分析晶格中各种方位上的晶面和各种方向上的晶向中的原子分布特点。为此，有必要给予各种晶面及晶向以一定的符号。某种方位的晶面的符号叫做“**晶面指数**”；而某种方向的晶向的符号则叫做“**晶向指数**”。

晶面指数的表示法是由如下的三个步骤来求出：

A. 首先假定晶格中的某一结点（原子）为一三度座标的原点 O （注意原点不可设在所要表示的晶面上），以晶格的三个棱作为座标的 OX 、 OY 、 OZ 轴，以晶格常数值 a 、 b 、 c 分别作为三个相应的轴上的量度单位，求出所需表示的晶面在三个轴上的截距（参看图 1-6 举例）；

B. 将所得三截距之值变为其倒数；

C. 再将它们都化成为最小的整数（保持各值间的比例不变）；并将其括在一圆括号之内。

例：如图 1-6 中所示的晶面，其晶面指数的求法是：A. 它与 OX 、 OY 、 OZ 三轴的截距是 1、2、 ∞ ；B. 三截距的倒数是 1、 $1/2$ 、0；C. 化成为最小整数后的晶面指数为 (210) 。

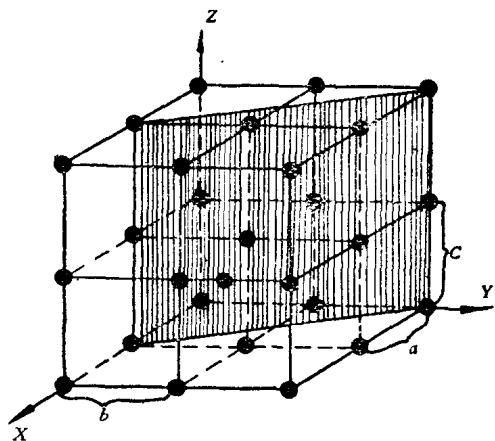


图1-6 晶面指数的求法举例〔影线面指数为 (210) 〕。

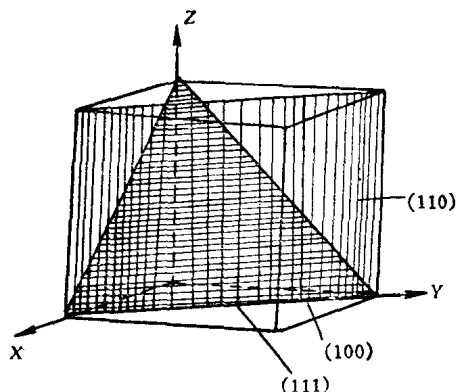


图1-7 立方晶格中的三种主要晶面。

从上例可以看出，通过第二步便可以消掉晶面符号中的 ∞ ，而通过第三步则可以消除其中的一些分数值，最后就可以得到一个完全由最小整数组成的符号。

在立方晶格中，具有最重要意义的是 (100) 、 (110) 和 (111) 三种晶面。如图 1-7 所示， (100) 晶面为正方形； (110) 晶面为矩形；而 (111) 晶面为等边三角形。

晶向指数的表示法是：在所表示的晶向（该晶向必须通过原点）上任选一点，求出该点的座标值（即由该点向三座标轴上的投影值），而后将其化简为最小整数，并用一方括号把它们括起来。如图 1-8 所示，沿 OX 轴的晶向指数为 $[100]$ ；立方体面对角线的晶向指

数为 $[110]$ ；而立方体对角线的晶向指数则是 $[111]$ 。

最后，还要注意，晶面指数及晶向指数都并不是指某一具体的晶面或晶向，而是代表着具有某种方位的一族晶面或晶向。譬如，在立方晶格中，如图 1-7 中的 (100) 这一晶面指数就代表着与正方面相平行的一族晶面。

(iii) 晶面与晶向原子密度及晶体的各向异性：凡晶体中，在各种晶面和晶向上的原子密度是不同的。各晶向上的原子密度可由该晶向上的原子间距或单位长度上所分布的原子数目来表征；而各晶面上的原子密度则可由该晶面中的单位面积中的原子数目来表达。

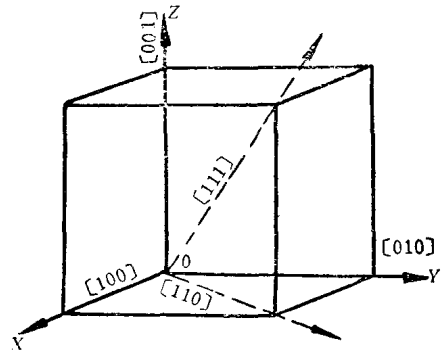


图1-8 立方晶格中的三种重要晶向指数。

面心立方晶格中的三个主要晶面上的原子排列密度如图 1-9 所示。

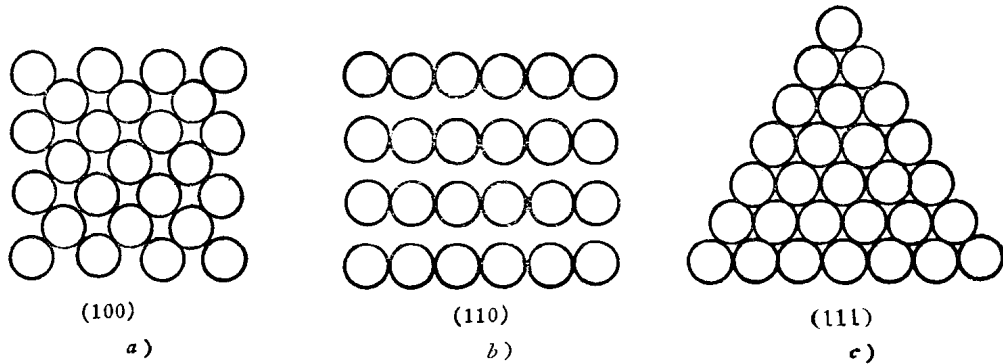


图1-9 面心立方晶格中的 (100) 、 (110) 、 (111) 三晶面的原子排列密度示意图。

从图中可以大致看出，在面心立方晶格的 (111) 晶面上，每个原子周围有6个原子与其紧靠；在 (100) 晶面上，每个原子周围有4个原子与其紧靠；而在 (110) 面上，则只有2个原子与之紧靠。因此，可以说，在面心立方晶格中以 (111) 晶面上的原子密度最大， (100) 面次之， (110) 面最小。而在 (111) 晶面的各晶向上的原子分布密度则是以 $[110]$ 方向为最大。在体心立方晶格中，则以 (110) 面上的原子排列密度为最大， (100) 面次之， (111) 面最小。在 (110) 面上，又以 $[111]$ 方向的原子密度最大。

在晶体中，由于各晶面和各晶向上的原子排列密度的不同，从而使晶体在不同方向上的性能出现差异，这种现象叫做“各向异性”。“各向异性”乃是区别晶体与非晶体的一个重要特征。非晶体是“各向同性”的，即在各个方向上的性能都是相同的。

晶体的各向异性不论在物理、化学或机械性能方面都会表现出来。这方面的实例很多。譬如铁的晶体（体心立方晶格）放在磁场中时，沿着 $[100]$ 晶向便远比 $[111]$ 晶向易于磁化。目前研究成功的供变压器使用的高级铁芯材料便是以铁的这一“各向异性”现象为根据的。又如铁的弹性模量 E ，在 $[111]$ 的方向上是29000公斤/毫米²，而在沿 $[100]$ 方向上则只等于13500公斤/毫米²。

但必须指出，我们在材料试验时所测得的纯铁的弹性模量却并不具有各向异性，而是

各向同性的，即不论什么方向上都是 $E = 21000 \text{ 公斤/毫米}^2$ 。这是什么原因呢？要解答这一问题，必须了解在普通金属的实际晶体结构与上述的晶体结构概念之间是有差别的。上述情况是针对金属单晶体而言的。所谓单晶体是指一块金属是由结晶方位完全一致的一个晶体所构成的。但在实际上，普通金属却是由多晶体组成的。金属的实际晶体结构如下所述。

3. 实际的金属结构

(i) 多晶体的概念：单晶体是一块具有完全一致的结晶方位的晶体（图 1-10 a）。金属的单晶体在自然界里基本上是不存在的。但是，用人工方法却可制备出大型金属单晶体。普通的金属都具有如图 1-10 b 及 c 所示的“多晶体”结构，即一块金属实际上是由很多的结晶方位不同的小晶体所构成。各个小晶体通常都具有不规则的多面体外形，我们叫它做“晶粒”。晶粒的尺寸因金属的制造及加工处理情况而不同。在个别尺寸较大的情况下，甚至用眼睛便可看得出；而在大多数的情况下，其尺寸则都在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 厘米的范围内，即在 1 立方厘米的体积内，可能包含数万到数十万个晶粒，此时只有在显微镜下才能识别其形态。由于晶粒与晶粒间的晶体方位不同（相差达 $20^\circ \sim 40^\circ$ ），故在晶粒与晶粒之间便形成交界处——叫做“晶粒界”或“晶界”。晶界是两种方位不同的晶体的过渡区，在该处的原子排列是不整齐的，并常有杂质原子汇集于此。

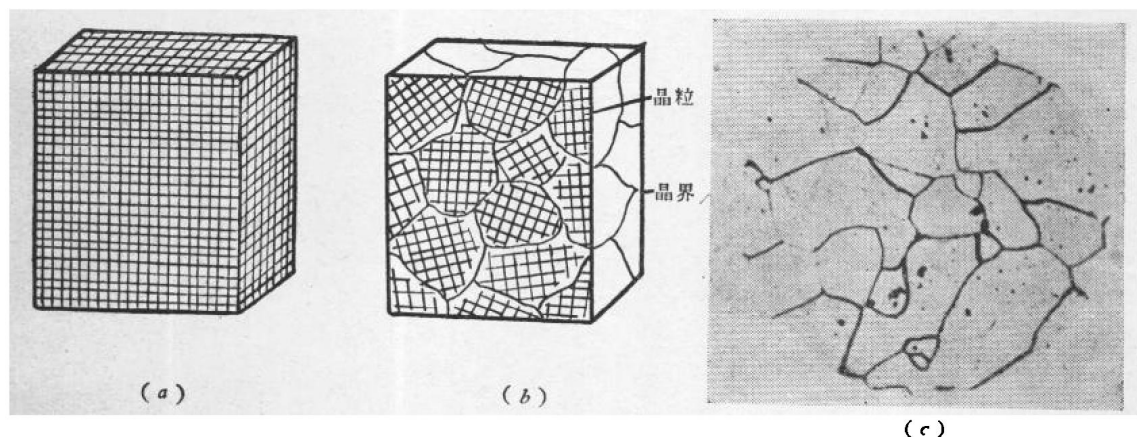


图1-10 单晶体与多晶体的结构：

a—单晶体示意图；b—多晶体示意图；c—多晶体纯铁在显微镜下的组织。

由于普通的金属都具有多晶体的构造，各晶粒的结晶方位各不相同，故虽然各个晶粒的本身都具有各向异性，但就金属的整体来说就显示不出各向异性的特征，因为各晶粒的各向异性彼此都相互抵消，所以金属总体所表现的则是各向同性。

金属多晶体的构造不仅隐蔽了它的晶体各向异性的特征，而且由于晶界的存在以及晶粒尺寸和其外形的不同，也对金属的性能（特别是机械性能）发生显著的影响。譬如，在晶粒粗大和不均匀的情况下，金属的塑性和强度都会降低（见第三章）。因此，对于金属的结构，通常应该从两方面去进行研究：即晶粒内部结构的分析和晶粒外形及尺寸的分析。后者通常叫做“显微组织分析”，它主要是借助于显微镜或电子显微镜来进行观察的；前者可简称为“晶体结构分析”，它主要是利用 X-射线在晶体中发生衍射的现象以进行研究。

近年来，通过 X-射线对金属晶体结构的分析证明，金属中的每一个晶粒的方位，实

实际上并不是完全一致的，而且晶粒内部的原子排列情况也不是完整无缺的。如图 1-11 所示，金属中的每一个晶粒实际上乃是由很多个尺寸为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 厘米的小晶块——所谓“嵌镶块”所组成，各嵌镶块的方位彼此只相差一不大的角度（通常为 $10' \sim 20'$ ，最大不到 $1^\circ \sim 2^\circ$ ）。故一般我们将其忽略而认为一个晶粒的方位基本上是一致的，但它确对金属的性能起着重要的作用，譬如嵌镶结构的细化便会引起金属强度的提高等。

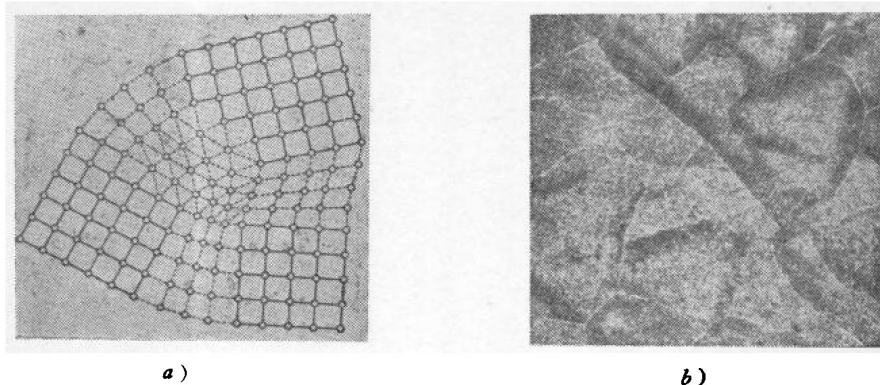


图1-11 晶粒内的嵌镶结构：
a—嵌镶块的示意图；b—显微照片。

(ii) 晶体结构的缺陷：实际的金属晶体，由于结晶条件的不同以及金属在压力加工过程中所受到的变形等因素的影响，使得其中经常出现大量的晶体缺陷。晶体缺陷的存在，会对金属的机械和物理性能发生显著的影响。其中对机械性能的影响尤其大。譬如，近年来曾发现，由于金属中晶体缺陷数量的改变，其强度值甚至可发生整个数量级的变化。

晶体缺陷，按其分布状况，一般可分为如下三类：

A. 点缺陷——即在晶体空间内占据体积很小的一些缺陷。属于这类缺陷的有：晶格空位、间隙原子及异类原子等，它们分布的示意图如图 1-12 所示。晶格空位即是晶格上某些结点缺排原子的现象；而间隙原子则是某些原子误排在晶格的间隙中而造成的；在这两种点缺陷周围的其他原子便会发生靠拢或撑开。异类原子通常是指杂质或合金元素的原子，它们的原子直径一般总是大于或小于基体金属的原子直径，所以将相应地使其周围的原子撑开或向其靠拢。不过如果这类元素的原子直径甚小时，它将不占据结点的位置，而会存在在晶格的间隙中。上述三种点缺陷的数量在金属中经常是很多的，譬如在铝中只要有十万分之一的杂质硅存在，则其异类原子的数量甚至便可达到 6×10^{14} Si 原子/毫米³。

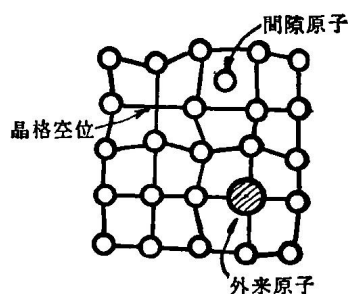


图1-12 点缺陷的示意图。

B. 线缺陷——即在晶体中呈线状分布的缺陷，这类缺陷的主要形式就是各种“位错”。为了便于理解什么是位错起见，我们可以这样设想，即当一个完整的晶体受到剪切应力的作用，在晶体的上半部与下半部之间发生了局部的滑动时，晶体中便出现了多余的半个晶面（晶体上半部），如图 1-13 a 所示，则沿该半层晶面之边缘线便叫做位错线。因此，可以说：在晶体中经过滑动的部分与尚未滑动部分的交界线就是位错线。如图所示，沿着该交