

高等专科学校试用教材

金属学

陆善智 编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

金属学

陆景贤 编



机械工业出版社

金 属 学

陆 景 贤 编

•
责任印制：卢子祥

•
机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•
开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $15^{3/4}$ · 字数 379 千字
1984 年 11 月北京第一版 · 1988 年 11 月北京第五次印刷

印数 18,601—21,100 · 定价：3.20 元

•
ISBN 7-111-00892-8/TG · 213 (课)

前 言

本书是高等专科学校热处理专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生、学制为三年的教学大纲组织编写的。

本书也适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

本书的主要内容为：金属及合金的结晶与结构、固态金属及合金中的扩散、合金相图、金属的塑性变形与再结晶、常用金属材料的基本知识等。本书运用位错学说的基本物理概念解释了金属塑性变形等机制。全书采用国际单位制。

本书由陆景贤编写，由黄宗清主审。参加审稿的还有肖重民、林可洪、金雪芷、席志刚、李彰荣等同志。本书在编写过程中，参考和引用了一些著作的部分内容，在此向作者表示谢意。

由于修订者水平所限，书中必然存在不少缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

1983年5月

目 录

绪论	1	一、间隙扩散	52
第一章 固态金属的结构	3	二、空位扩散	53
§ 1-1 金属的概念	3	三、换位扩散	53
一、金属的特性	3	四、位错扩散	54
二、金属的结合	3	§ 2-5 反应扩散概述	54
§ 1-2 金属的晶体结构	5	第三章 金属的结晶	56
一、晶体结构的基本知识	5	§ 3-1 金属结晶的基本规律	56
二、金属中常见的三种晶体结构和同素 异晶转变	8	一、热分析实验与冷却曲线	56
三、表示晶体结构特征的几个参数	10	二、过冷现象	57
四、晶面指数与晶向指数	15	三、结晶的一般规律	57
五、原子的堆垛方式	21	§ 3-2 金属结晶的理论分析	58
§ 1-3 实际金属的晶体结构	21	一、结晶的能量条件	58
一、点缺陷——空位和间隙原子	22	二、结晶的结构条件	59
二、线缺陷——位错	23	三、晶核的形成	59
三、面缺陷——晶界及亚晶界	28	四、晶核的长大	62
§ 1-4 合金的相结构	30	§ 3-3 金属结晶后的晶粒大小	65
一、固溶体	31	一、晶粒大小与性能的关系	65
二、金属化合物（中间相）	37	二、晶粒大小的控制	66
第二章 固态金属及合金中的扩散	42	§ 3-4 铸锭的组织	67
§ 2-1 扩散概述	42	一、铸锭的组织及形成	67
一、扩散现象	42	二、铸锭中三层组织的性能	68
二、扩散本质	42	三、铸锭组织的控制	68
三、固态扩散的条件	42	第四章 二元合金相图	69
四、固态扩散的分类	44	§ 4-1 合金相图的一般知识	69
§ 2-2 扩散定律	45	一、组元	69
一、扩散第一定律（菲克第一定律）	45	二、系	69
二、扩散第二定律（菲克第二定律）	46	三、相图	69
三、扩散第二定律的应用举例	47	四、相律	69
§ 2-3 影响扩散的因素	49	五、二元合金相图基本类型	70
一、温度	49	§ 4-2 二元合金相图的测定	70
二、固溶体类型	49	一、单元合金相图的表示法	70
三、晶体结构	50	二、二元合金相图的表示法	70
四、合金元素	51	三、二元合金相图的测定方法	72
五、缺陷	51	§ 4-3 匀晶相图	73
六、其它因素	52	一、Cu-Ni 合金相图的相区分析	73
§ 2-4 扩散机制	52	二、合金的平衡结晶	74
		三、杠杆定律	74

四、典型合金的不平衡结晶.....75	三、碳素工具钢123
五、固溶体的成分过冷及其铸造组织形态...77	四、易切结构钢125
六、其它类型的匀晶相图.....79	五、铸钢125
§ 4-4 共晶相图80	第七章 三元合金相图127
一、相图分析.....80	§ 7-1 三元合金的成分表示法.....127
二、典型合金的平衡结晶及其组织.....82	一、用直角坐标表示成分127
三、共晶组织和初晶的形态.....85	二、用三角形表示成分127
四、不平衡结晶及其组织.....87	§ 7-2 三元系中的杠杆定律.....129
五、比重偏析.....89	一、直线定律129
§ 4-5 包晶相图89	二、重心定律130
一、相图分析.....89	§ 7-3 三元匀晶相图.....131
二、典型合金的平衡结晶及其组织.....89	一、相图分析131
三、包晶合金的不平衡结晶.....92	二、等温截面132
四、利用包晶转变细化晶粒.....92	三、变温截面134
五、包晶转变与共晶转变的比较.....93	§ 7-4 三元共晶相图.....134
§ 4-6 其它类型的相图93	一、组元在固态互不溶解的三元共晶 相图134
一、二组元形成化合物的相图.....93	二、组元在固态有限溶解的三元共晶 相图142
二、具有固态转变的二元合金相图.....94	§ 7-5 三元相图实例.....147
三、熔晶相图.....96	一、锡-铅-铋合金相图147
四、偏晶相图.....96	二、铁-碳-硅三元系的变温截面148
§ 4-7 相图的规律和使用97	三、铁-铬-碳三元系的变温截面150
一、二元合金相图遵循的规律.....97	四、铁-钨-铬-碳系的变温截面.....151
二、二元合金相图的分析方法.....97	第八章 金属的塑性变形与再结晶154
三、根据相图分析合金热处理的可能性.....99	§ 8-1 单晶体的塑性变形.....154
四、根据相图判断合金的性能100	一、单晶体的弹性变形154
五、应用相图时要注意的几个问题101	二、单晶体的塑性变形154
第五章 铁碳合金相图102	§ 8-2 多晶体的塑性变形.....166
§ 5-1 铁碳合金的基本相.....102	一、晶界的影响166
一、铁素体102	二、晶粒间位向差别的影响167
二、奥氏体103	§ 8-3 合金的塑性变形.....168
三、渗碳体103	一、固溶体合金的塑性变形特点168
§ 5-2 相图分析.....104	二、两相合金的塑性变形特点168
§ 5-3 典型合金的结晶过程及其组织.....107	§ 8-4 冷塑性变形对金属组织和性能 的影响.....170
一、结晶过程分析108	一、对组织结构的影响170
二、按组织分区的铁碳合金相图115	二、对机械性能的影响171
第六章 碳素钢116	三、产生内应力172
§ 6-1 碳与杂质对钢性能的影响.....116	§ 8-5 回复与再结晶.....173
一、碳的影响116	一、回复174
二、杂质的影响117	二、再结晶175
§ 6-2 碳素钢.....118	
一、普通碳素结构钢119	
二、优质碳素结构钢121	

三、晶粒长大	176	§ 9-5 特殊性能铸铁	204
四、影响再结晶后晶粒大小的因素	177	一、耐磨铸铁	206
五、金属中的再结晶织构和退火孪晶	178	二、耐热铸铁	207
§ 8-6 金属的热塑性变形	179	三、耐蚀铸铁	208
一、金属的热加工与冷加工	179	第十章 非铁金属及其热处理	209
二、热加工对钢组织和性能的影响	179	§ 10-1 铝及其合金	209
第九章 铸铁	182	一、铝的性能特点	209
§ 9-1 铸铁的石墨化	183	二、铝合金的分类	210
一、铁-石墨相图	183	三、铝合金的热处理原理	210
二、石墨化过程	185	四、形变铝合金及其热处理	213
三、影响石墨化的因素	186	五、铸造铝合金及其热处理	219
§ 9-2 灰口铸铁	188	§ 10-2 铜及其合金	224
一、灰口铸铁的化学成分、组织和性能	188	一、纯铜	224
二、金相组织的分类和评级	189	二、黄铜	225
三、灰口铸铁的牌号和用途	195	三、青铜	230
四、灰口铸铁的孕育处理	196	§ 10-3 滑动轴承合金	238
§ 9-3 球墨铸铁	196	一、滑动轴承的工作条件及要求	238
一、球墨铸铁的组织和性能	196	二、锡基轴承合金	239
二、球墨铸铁的球化处理和孕育处理	198	三、铅基轴承合金	239
三、球墨铸铁金相组织的评级	200	四、铝基轴承合金	240
四、球墨铸铁化学成分、牌号和用途	200	主要参考书目	241
§ 9-4 可锻铸铁	202	化学元素周期表	242
一、可锻铸铁的化学成分、组织和性能	203		
二、可锻铸铁的牌号和用途	205		

绪 论

一、金属学研究的对象与任务

金属学是研究金属及合金的成分、组织和性能之间的关系及其变化规律的科学。

金属学的任务在于建立合金的成分、组织和性能之间的对应关系；建立组织的形成和变化与处理条件之间的对应关系，以利用这些规律来指导科学研究和生产实践。在这些规律的基础上，通过改变和控制合金的成分；选用各种适当的工艺手段，充分有效地发挥现有金属材料性能潜力，并进而按照给定性能要求研制新的合金，以满足国民经济各部门对金属材料品种及数量上的日益增长的要求。

二、金属学发展简史及我国在金属学方面的成就

金属学是由早期的金相学、物理化学以及材料力学等科学相结合而发展起来的一门独立的科学。人类在研制和应用金属材料的初期，就已开始积累有关金属材料的性能、成分、加工处理和质量检验等方面的知识，并逐步探索其相互间的联系和规律。例如，关于质量检验方面，最早人们是通过辨别声响；观察表面色泽和断口状况等简单方法来判别金属材料的性能和质量的，以后采用腐蚀的方法来观察表面或断口上所出现的纹理，并逐渐将它和金属材料的制造、加工及热处理等方法联系起来，探索其中规律，用以改进生产工艺。这些实验和鉴别金属材料的方法，其中有的至今仍不失为金属学的基本内容之一。到十九世纪，又将显微镜应用到金属材料的检验和研究上，并结合物理化学分析法逐步揭示了金属材料内部的一些秘密，开始迈进了现代金属学的新领域。进入二十世纪，特别是三十年代后，相继发明和应用了X射线术、电子显微镜。近年来又发展和应用了场离子显微镜，以及电子探针和电子扫描等新技术，显著地扩大了有关金属材料方面的研究领域，使金属材料由宏观到微观直至原子组态，甚至电子结构方面的秘密及其和性能方面的关系和规律，几乎都能够在不同程度上直接揭示出来，其中不少已达到定量的程度，金属学也因而更趋完善了。

人类使用金属材料制造生产工具及生活用具已有悠久的历史，我国古代劳动人民在生产及使用金属材料方面，创造和积累了许多经验。随着我国考古事业的发展，各地陆续出土的古代文物，显示了我国古代在生产和使用金属材料方面的辉煌成就。

从甘肃齐家文化遗址中发现的多件铜、青铜器物可以证明：远在四千年前，我们的祖先不但认识了金属铜，可以将天然存在的铜锻打成器或熔铸成小件器物，而且可以冶炼紫铜和青铜等铜合金。

在河南安阳晚商（距今三千多年）遗址出土的司母戊鼎重达875公斤，是迄今世界上发现的最古老的大型青铜器。

1978年在湖北随县发掘了大约公元前433年的曾侯乙墓，出土了战国青铜编钟65件，总重2500公斤，最大的203公斤，最小的仅2.4公斤，铸造精巧，音律准确，音色之优美连最严格的现代声学家都为之惊叹。出土的青铜尊、盘纹饰繁美，玲珑透剔，综合地使用了当时的先进技术，是迄今为止传世和出土的青铜器中最复杂和最精致的。这充分证明了我们祖先在该时期铜合金的冶炼和铸造技术已达到很高的水平。商周的青铜器和埃及的金字塔同被

认为是古代社会科技水平的标志。

在春秋时期(公元前八世纪至公元前五世纪)青铜冶铸技术有了高度发展。我们祖先通过实践,认识了青铜成分、性能和用途之间的关系,在《考工记》中总结出了“六齐”规律:“金有六齐^①:六分其金而锡居一,谓之钟鼎之齐;五分其金而锡居一,谓之斧斤之齐;四分其金而锡居一,谓之戈戟之齐;三分其金而锡居一,谓之大刃之齐;五分其金而锡居二,谓之削杀之齐;金、锡半,谓之鉴燧^②之齐”。这一珍贵记述,与现代相同用途的青铜配比几乎完全一致。是世界上最早的合金配比规律。这进一步证明我们祖先对不同成分的合金具有不同的机械性能和用途已有明确的认识。

1418年铸成的永乐大钟高5.84米,直径3.3米,重达42吨,在钟上铸有十七部经文,共22万字,可见当时铸造水平之高。

在奴隶制崩溃和封建制产生的社会变革时期,铁器登上了历史舞台,作为生产力的标志的青铜器开始逐渐被铁器代替。我国冶铁兴起于春秋末期(距今约二千六百年)或更早一些,比欧洲早一千九百多年。在洛阳出土的春秋战国之交(距今约二千五百年)的铁铲,经金相检验,是迄今发现最早的可锻铸铁,比法国人莱翁缪尔在1722年研制成的可锻铸铁早二千二百多年。又如河南南阳汉代冶作坊遗址所出土的九件铁农具,有八件是黑心可锻铸铁,其质量与现代同类产品相当,可称技术史上的奇迹。尤其使人惊奇的是,早在西汉晚期(距今约一千八百年),铸铁中还出现了球状石墨。例如1978年,对河南巩县铁生沟出土的西汉铁镢进行检验,发现基体中石墨球化良好,比英国人莫洛于1947年研制成功的球铁早近二千年。

由此可见,我们祖先无论在早期金属材料及金属学方面,有过辉煌的成就,对人类作出了巨大的贡献。只是到了十八世纪,特别是十九世纪至二十世纪中,由于腐朽的封建统治,加之帝国主义的侵略和剥削,才使我国科学技术和生产发展受到严重的束缚和摧残,长期停滞不前。使科学技术落在西方资本主义发达国家的后面。

解放后,我国工农业生产获得了巨大的发展,钢铁和其它金属材料的生产也随之迅速发展起来,并取得了很大的成绩。原子弹、氢弹的爆炸成功;人造地球卫星的发射和回收等就是最好的证明。随着金属材料及其它科学的发展,金属学也得到了发展,无论在理论或实际应用方面,都已取得了巨大成绩。在党的正确领导下,在举国上下为实现“四化”,振兴中华的新长征中,金属学和其它科学一样,一定会得到更快的发展,为促进国民经济的发展做出更大的贡献。

三、金属学的有关内容与学习方法

金属学是一门理论性较强的专业理论课,其内容大致可概括为:金属及合金的结构、固态金属及合金的扩散、金属的结晶、合金相图、形变理论及常用金属材料等几部分。

金属学是以物理、化学、金属工艺学、物理化学和材料力学等为基础的一门科学。在学习时,应经常联系上述基础科学的有关部分,以加深理解。同时,金属学又是钢铁热处理、合金钢与热处理工艺学、金相分析等热处理专业课的基础。因此,在今后学习专业课时,也要经常联系与本课程有关的内容,作到理论联系实际。

金属学是一门从生产实践中发展起来的又直接为生产服务的科学。学习时,不但要注意学习系统的理论,而且要注意联系生产实际及实验室试验。

^① “金”指铜。“齐”为剂之假借。

^② 鉴燧指铜镜。

第一章 固态金属的结构

§ 1-1 金属的概念

一、金属的特性

在全部的化学元素中，约有四分之三是属于金属元素。

在工程技术中，所谓金属是指具有一定金属特性的物质。这种物质具有金属的光泽以及良好的导电性、导热性和塑性。

表1-1 一些金属与非金属的电阻率
(单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$)

金 属	银	1.50×10^{-6}	非 金 属	碳	1400×10^{-6}
	铜	1.55×10^{-6}		硅	85×10^{-8}
	金	2.06×10^{-6}		磷	1×10^3
	铝	2.62×10^{-6}		硫	1.9×10^{11}
	铅	21.9×10^{-6}			
	锰	71.0×10^{-6}			
	铋	106.8×10^{-6}			

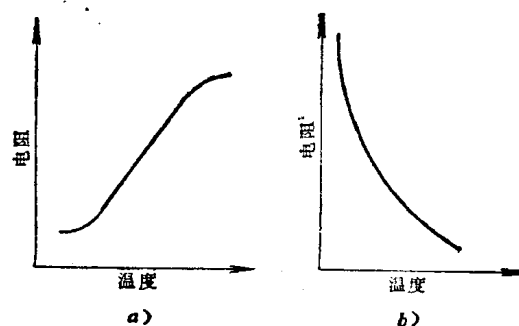


图1-1 金属和非金属的电阻与温度关系的示意图

a) 金属 b) 非金属

但是金属光泽和良好的塑性，并不能作为区别金属与非金属的基本标志，因为有些金属（如铋）在一般条件下不能锻造成形，而粉末金属也可能没有金属光泽。由于一般金属的电阻率远比非金属的电阻率要小。所以，曾经认为具有良好的导电性才是金属的基本特性。但从表 1-1 可以看出：某些金属（铋）的电阻率和某些非金属（碳）的电阻率较为接近。因此，单凭导电性的好坏来区别金属与非金属也是不够的。但是从导电性与温度的关系上，却可找到金属和非金属两者之间的根本区别。对所有金属（锗例外）来说，其电阻随温度的升高而增大，或者说，金属具有正的电阻温度系数，而对非金属来说，其电阻随温度的升高而降低，即具有负的电阻温度系数，如图 1-1 所示。

由此，可以对金属下这样的定义：金属是具有正的电阻温度系数的物质。

金属为什么具有上述特性呢？这是与金属原子内部结构以及原子间的结合方式有关的。

二、金属的结合

从物理学、化学中已知，各种元素的原子都是由带正电荷的原子核和绕核运动的带负电荷的一定数目的电子所构成的。电子的数目等于该元素的原子序数，并按一定规律分布在内外不同的电子层上。

在各元素原子构造中，最外层的价电子数目决定了该元素的各主要的物理与化学性能。金属元素原子构造的特点，就是它的价电子数目少（一般仅有 1~2 个，不超过 4 个），而且它们与原子核的结合力较小，很容易摆脱原子核的束缚而变成自由电子。因此，当大量的金属原子聚合在一起构成金属晶体时，相邻原子的价电子层发生交叠，每个金属原子的价电子层都变成很宽的彼此交叠的能带，成为所有自由电子的“公共通道”。每个原子的价电子，不

再只围绕自己的原子核运动，而是在所有原子之间运动，成为“公有化”的自由电子。价电子被公有化后的金属原子就成为正离子。绝大部分金属原子都将失去其价电子而变成正离子。正离子又按照一定的几何形状规则地排列起来，并在固定的位置上作高频率的热振动；而所有的价电子则都以自由电子的形式，在各正离子间自由地运动，它们为整个金属所共有，形成所谓“电子气”。金属就是依靠各正离子与公有的自由电子间的相互作用（吸引与排斥）而结合在一起。金属原子的这种结合方式称为“金属键”。图1-2为金属键的示意图。

非金属的固体，其原子是依靠离子键或共价键结合在一起的，故不存在公有的自由电子。而金属的原子却以金属键结合在一起，存在着大量的自由电子，这就使金属具有了上述一系列的金属特性。

譬如：金属具有良好的导电性，是由于在微小的电场作用下，金属中的自由电子便会沿着电场方向作定向运动而形成电流。而具有离子键或共价键结合的非金属固体，由于没有自由电子存在，故无这种特性。此外，因金属中正离子是以某一固定位置为中心作热振动，对自由电子的流通就有阻碍作用，这就是金属具有电阻的原因。随着温度的升高，正离子的振幅要加大，频率也增大，对自由电子通过的阻碍作用也加大，因而金属的电阻是随着温度的升高而增大的，即金属具有正的电阻温度系数。

金属具有良好的导热性。因为金属中热量的传递是依靠正离子的振动和自由电子的运动共同完成的，而自由电子的运动则是金属不同于非金属而独有的。

金属具有良好的塑性。这是因为当金属在一定外力作用下，发生了塑性变形（金属中两层原子发生了相对位移，即滑移）后，金属中的正离子和自由电子间又会恢复原来的相对关系，即仍能保持金属键的结合，使金属虽然发生塑性变形但仍不致断裂，因此金属具有塑性。

最后，因为金属中的自由电子能吸收可见光的能量，跳到较高的能级，故使金属具有不透明性。吸收能量而被激发的电子，当它重新跳回到原来低能级时，就把所吸收的可见光的能量以电磁波的形式辐射出来，所以在宏观上就表现为金属的光泽。

下面进一步从原子间的相互作用力和作用能来说明金属中的原子趋于有规则排列的原因。

为了简便起见，首先分析两个原子之间相互作用的情况，即双原子作用模型。不难理解，当两个原子相距很远时，它们实际上不发生相互作用，但当它们逐渐靠近时，其间的相互作用力便会显示出来。很明显，金属中两个原子间的相互作用力应包括：正离子与自由电子之间的吸引力；正离子与正离子之间以及电子与电子之间

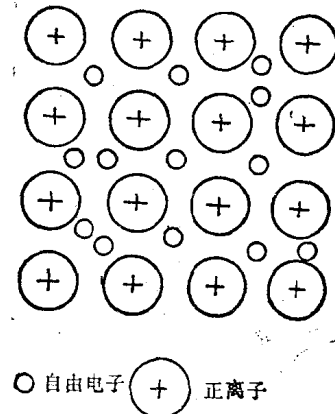


图1-2 金属键的示意图

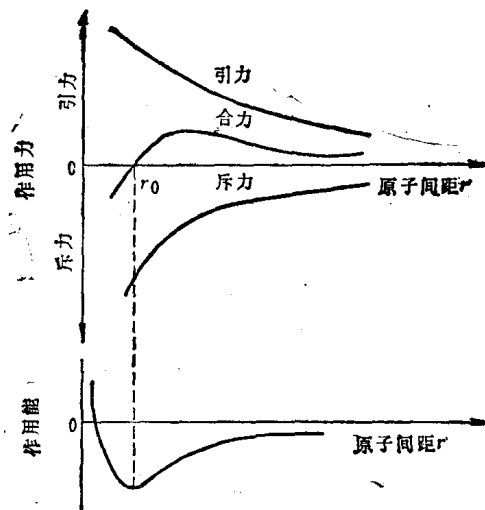


图1-3 双原子模型中作用力和作用能与原子间距的关系

的排斥力。吸引力，力图使两原子靠近；排斥力，力图使两原子分开。两者的大小与两原子间的距离（ r ）的关系，如图 1-3 上部曲线所示。图中合力曲线是两原子间斥力与引力的代数和。由图可知，当 $r < r_0$ 时，斥力大于引力，此时合力为斥力，因此两原子将分开；当 $r > r_0$ 时，引力大于斥力，此时合力为引力，因此两原子必然靠拢；当 $r = r_0$ 时，引力和斥力相等，合力为零，此时两原子既不分开也不靠近，而是相对稳定地存在于相距为 r_0 的地方。如果设想把这一对原子拉开或移近，就必须相应地施加拉力或压力，以克服两原子间的引力或斥力。这种为了改变原子间距而施加的外力所作的功，必然会增加原子的位能。原子间所具有的位能又称原子间的相互作用能（或结合能），它与原子间距的关系如图 1-3 下部曲线所示。由图可知，当 $r = r_0$ 时，两原子的位能最低，因而处于最稳定状态。 r_0 称为原子间的平衡距离。显然，对 r_0 的任何偏离，都要对原子施加外力，使原子的位能增加，从而使原子处于不稳定状态，这就使原子具有力图回到低能状态即恢复到平衡距离的倾向。

将上述双原子作用模型加以推广，不难理解，当大量金属原子结合时，为使金属本身具有最低的能量，以保持最稳定的状态，大量原子之间也必须保持一定的平衡距离 r_0 ，这就是金属中原子趋于有规则排列的重要原因。

平衡位置 r_0 处的能量值就是原子的结合能。

§ 1-2 金属的晶体结构

一、晶体结构的基本知识

1. 晶体与非晶体 自然界中的物质，按其内部粒子（原子、离子、分子、原子集团）排列情况可分为两大类：晶体与非晶体。所谓晶体就是指其内部粒子呈规则排列的物质，如水晶、食盐、金属等。由于晶体内的粒子呈规则排列，所以晶体具有下列特点：

（1）一般具有规则的外形，但晶体的外形不一定是规则的，这与晶体形成条件有关，如果条件不具备，其外形也就变得不规则。所以不能仅从外观来判断，而应从其内部粒子排列情况来确定是不是晶体；

（2）有固定的熔点，例如：铁（Fe）的熔点为 1538°C ；铜（Cu）的熔点为 1084.5°C ；铝（Al）的熔点为 660.37°C ；

（3）具有各向异性。所谓各向异性，就是在同一晶体的不同方向上，具有不同的性能。

非晶体内部粒子呈无规则的堆积，因此没有晶体的上述特点。玻璃是一个典型的非晶体例子，故往往将非晶体的固态物质（简称非晶态物质）称为玻璃体。

通常是晶态的物质，如果将它从液态以极快的速度冷却下来，也可得到非晶态的物质。近年来采用了特殊的制备方法，已能获得非晶态的金属；非晶体在一定条件下，也可转化为晶体。例如：玻璃经高温长时间加热后能形成晶态玻璃。

2. 点阵、晶格、晶胞 金属中的原子是以金属键的方式结合在一起的，其原子（正离子）又是按一定的几何规则作周期性排列的，所以金属一般都是晶体。为了分析问题方便，可把金属中的原子近似地看成是刚性小球，而不再细分为正离子与自由电子。这样，金属的晶体也可以看成是由刚性小球按一定几何规则排列的紧密堆积，如图 1-4 所示。由图可见，原子在晶体中是有规则的、周期性的排列的。这种排列的形式称为空间点阵，简称点阵。

为了便于理解和描述晶体中原子排列的情况，可用一些假想的几何线条将晶体中各原子

的中心连接起来，使之构成一个空间格架，各原子的中心就处在格架的各个结点上，这种抽象的、用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格架，称为结晶格子，简称晶格。如图1-5所示。晶格和点阵都是用于研究晶体结构的几何模型，现在常用的是晶格的概念。

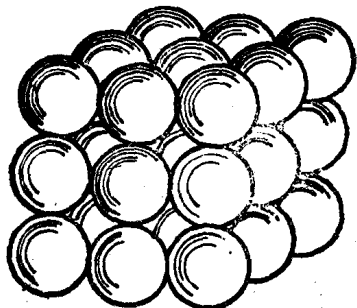


图1-4 金属晶体中原子的排列形式示意图

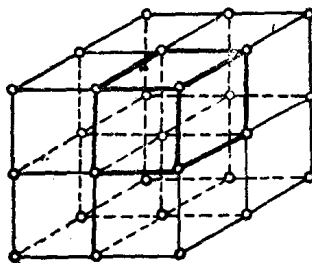


图1-5 金属的晶格

由于晶体中原子的有规则排列具有周期性的特点，因此，为了简便起见，通常只从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的、最小的几何单元来分析晶体中原子排列的规律，这个最小的几何单元称为晶胞，如图1-5中黑粗线所示。整个晶格就是由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而成的。但是在同一点阵中有可能选取出多种不同形状和大小的平行六面体作为晶胞，如图1-6所示。为了统一和方便，规定在选取晶胞时应满足下列条件：

- (1) 晶胞的几何形状应与宏观晶体具有同样的对称性；
- (2) 平行六面体内相等的棱和角的数目应该最多；
- (3) 当平行六面体的棱间存在直角时；直角的数目应最多；
- (4) 在满足上述条件的前提下，晶胞应具有最小的体积。

晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱间夹角 α 、 β 、 γ 来表示，如图1-7所示。图中通过晶胞角上某一结点沿其三条棱边作三个坐标轴 X 、 Y 、 Z ，称为晶轴。习惯上，以原点 O 的前、右、上方为轴的正方向（反之为负方向）。

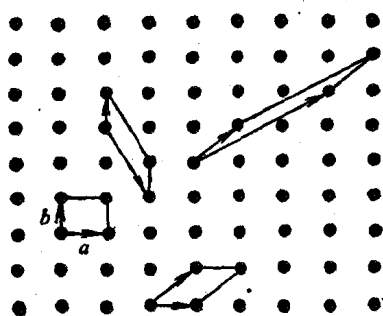


图1-6 在点阵中选取晶胞

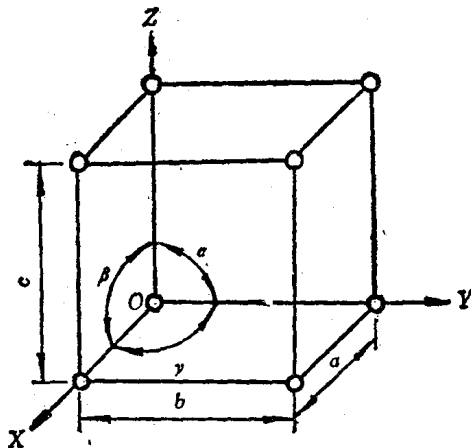


图1-7 晶轴及晶胞的六个参数

晶胞的棱边长度，称为晶格常数，其数量级为 10^{-10} m 。晶胞的棱间夹角又称为晶轴间夹角。如图1-7所示的立方晶格，其晶胞的三个棱边相等（即 $a = b = c$ ），三个晶轴间夹角

也相等 (即 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)。因此对立方晶格只需用一个晶格常数 a 就可表示晶胞的大小和形状。

3. 布拉菲点阵 自然界中, 以晶体形式存在的物质极其繁多, 晶体类型也各式各样, 结构很复杂, 法国晶体学家布拉菲按照它们各自主要结构特点, 予以归纳分类, 把所有具有相

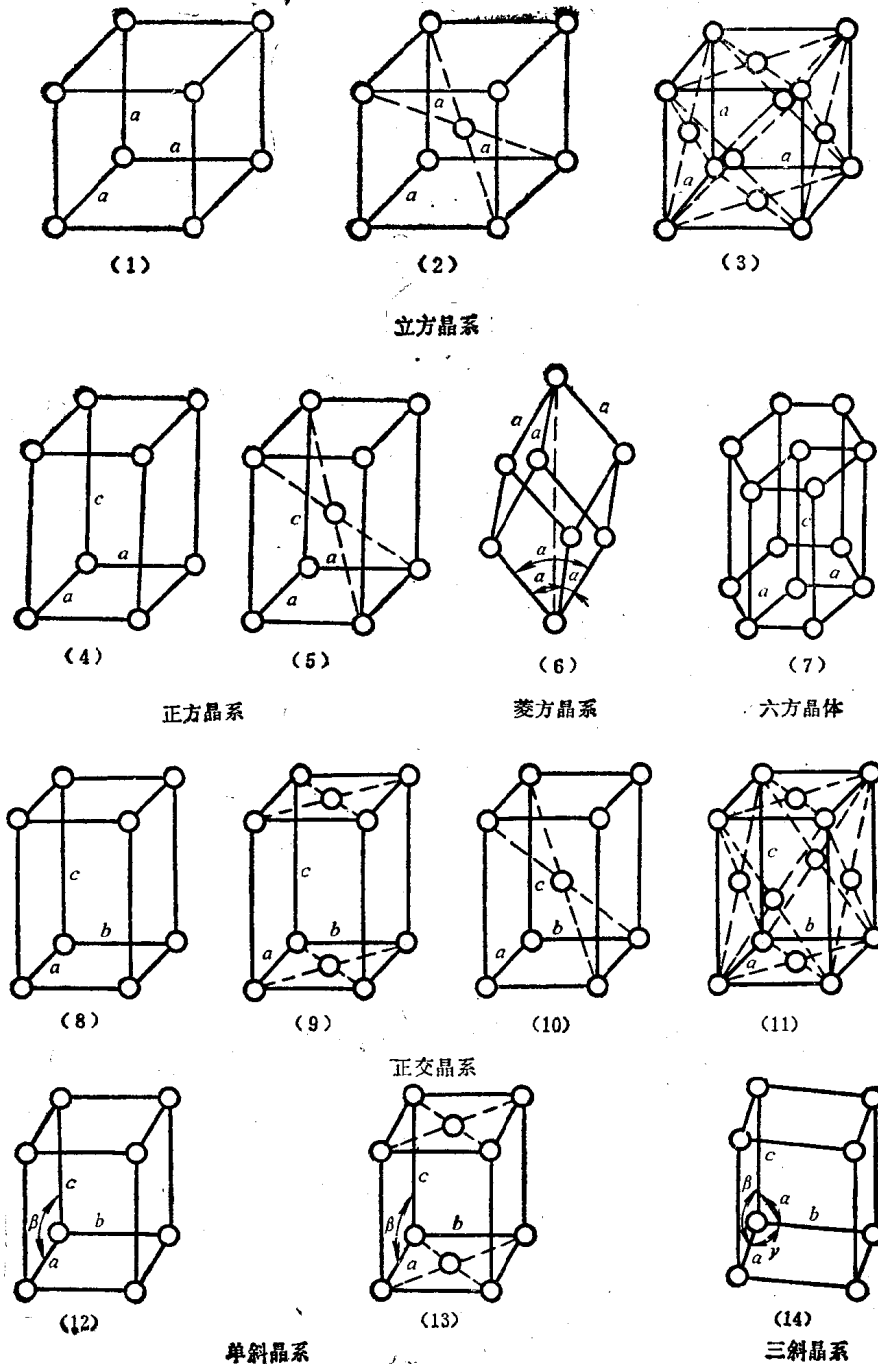


图1-8 14种空间点阵的晶胞

(1)简单立方 (2)体心立方 (3)面心立方 (4)简单正方 (5)体心正方 (6)简单菱方 (7)简单六方
(8)简单正交 (9)底心正交 (10)体心正交 (11)面心正交 (12)简单单斜 (13)底心单斜 (14)简单三斜

同环境的粒子作为一个阵点，这样所有的空间点阵归纳起来只有 14 种，称为布拉菲点阵，其晶胞如图 1-8 所示。根据晶胞的棱边长度之间的关系和轴间夹角情况，又可将 14 种空间点阵归纳为 7 大晶系，如表 1-2 所列。

表1-2 晶系及空间点阵

晶 系	空 间 点 阵	棱 边 长 度 及 夹 角 关 系
立方晶系	简单立方 体心立方 面心立方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
正方(四角)晶系	简单正方 体心正方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
菱方(三方)晶系	简单菱方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
六方(六角)晶系	简单六方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
正交(斜方)晶系	简单正交 底心正交 体心正交 面心正交	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
单斜晶系	简单单斜 底心单斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
三斜晶系	简单三斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

晶体虽只有 14 种空间点阵，但由于每个阵点可以代表原子、离子、分子、原子集团、原子群，…，而且它们在阵点上的排列组合图案也可有多种形式，所以每种空间点阵可以包括很多种晶体结构，如图 1-9 中 a)、b)、c) 三种不同的晶体结构都属于一种空间点阵 d)。因此可能存在的晶体结构是无限的，但是各种晶体结构总能够按其原子或分子、离子（也可以是彼此等同的原子群或分子群）排列的周期性和对称性归属于 14 种空间点阵中的一种。

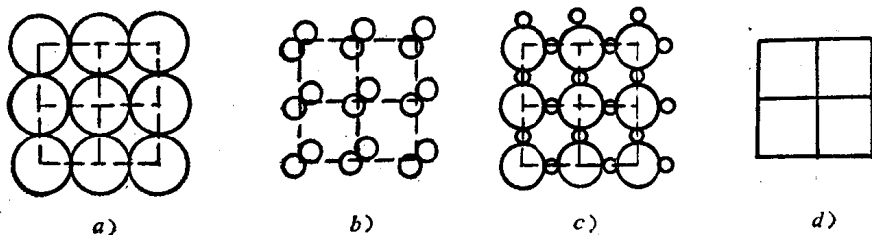


图1-9 三种不同的晶体结构同属于一种点阵

二、金属中常见的三种晶体结构和同素异晶转变

1. 常见的三种晶体结构 绝大多数金属的晶体结构属于体心立方、面心立方及密排六方三种类型。

体心立方晶胞：体心立方的晶胞如图1-10 a) 所示。其晶胞是一个立方体，晶格常数 $a = b = c$ ，晶轴间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，所以通常只用一个晶格常数 a 表示即可。在体心立方晶胞的每个角上和晶胞中心都有一个原子。

具有体心立方晶体结构的金属有 α -Fe、W、Mo、V、 β -Ti 等。

面心立方晶胞：面心立方的晶胞如图1-10 b) 所示。其晶胞也是一个立方体，晶格常数 $a = b = c$ ，晶轴间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，所以也只用一个晶格常数 a 表示即可。在面心立方晶胞的每个角上和晶胞的六个面的中心都有一个原子。

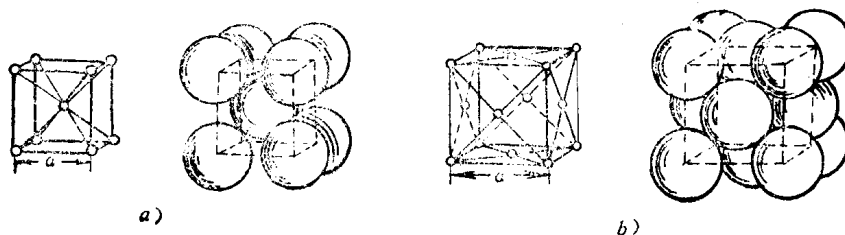


图1-10 立方晶胞

a) 体心立方 b) 面心立方

具有面心立方晶体结构的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ag、Au、Pb、Ni、 β -Co 等。

密排六方晶胞：密排六方晶胞如图 1-11 所示。它是由六个呈长方形的侧面和两个呈正六边形的底面所组成的一个六方柱体。因此，需要用两个晶格常数表示，一个是正六边形的边长 a ，另一个是柱体的高 c 。在密排六方晶胞的每个角上和上、下底面的中心都有一个原子，另外在中间还有三个原子。

具有密排六方晶体结构的金属有：Mg、Zn、Be、Cd、 α -Ti、 α -Co...等。

密排六方晶体结构，因其体内三个原子和其它原子的环境是不同的，故不能同时作为阵点，而是分别与另一个原子一起构成一个阵点，所以密排六方晶体结构属于简单六方点阵。

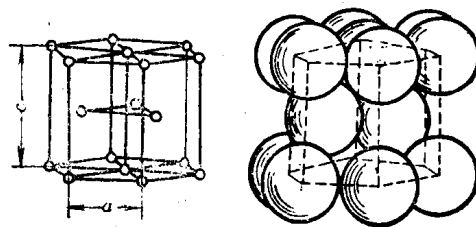


图1-11 密排六方结构

除上述常见的三种晶体结构以外，还有少数金属具有其它类型的晶体结构，见附表 1。

2. 金属的同素异晶转变 大多数金属由液态转变成固态后，在继续冷却的过程中，其晶体结构不再发生变化。但某些金属在固态下，因所处的温度不同而具有不同的晶体结构类型，例如：铁有体心立方的 α -Fe 和面心立方的 γ -Fe；钴有密排六方的 α -Co 和面心立方的 β -Co。金属在固态下随着温度的改变由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的这种变化，称为金属的同素异晶转变。由同素异晶转变所得到的不同晶体结构，称为同素异晶体。在常温下的同素异晶体一般用希腊字母 α 来表示，在较高温度下的同素异晶体依次用 β 、 γ 、 δ 等表示。几种常见金属的同素异晶体，如表 1-3 所列。

同素异晶转变往往要产生较大的内应力。这是由于转变时晶体结构的变化引起了体积的变化。例如，由 γ -Fe 转变到 α -Fe 时体积约膨胀 1%。值得注意的是，因为这是在较低温度的固态下发生的，因此，少量的体积变化就可能引起明显的内应力，这是造成零件的变形甚至开裂的原因之一。

图 1-12 为纯铁由液态缓慢冷却时的温度与时间曲线，称为冷却曲线。由图可见，液态纯铁在 1538°C 时结晶成具有体心立方晶格的 δ -Fe，继续冷却到 1394°C 时发生同素异晶转变，体心立方晶格的 δ -Fe 转变为面心立方晶格的 γ -Fe，再继续冷却到 912°C 时又发生同素异晶转变，面心立方晶格的 γ -Fe 转变为体心立方晶格的 α -Fe。如再继续冷却时，晶格的类型不

表1-3 常见金属的同素异晶体

金 属	同素异晶体的符号	稳定状态的温度范围	晶 体 结 构
铁	α -Fe	$\leq 912^{\circ}\text{C}$	体心立方
	γ -Fe	$912\sim 1394^{\circ}\text{C}$	面心立方
	δ -Fe	$1394\sim 1538^{\circ}\text{C}$	体心立方
钴	α -Co	$\leq 450^{\circ}\text{C}$	密排六方
	β -Co	$450\sim 1490^{\circ}\text{C}$	面心立方
钛	α -Ti	$\leq 885^{\circ}\text{C}$	密排六方
	β -Ti	$885\sim 1720^{\circ}\text{C}$	体心立方
锡	α -Sn	$\leq 18^{\circ}\text{C}$	金刚石
	β -Sn	$18\sim 232^{\circ}\text{C}$	体心正方
锰	α -Mn	$\leq 742^{\circ}\text{C}$	多原子的复杂立方
	β -Mn	$742\sim 1192^{\circ}\text{C}$	面心立方
	γ -Mn	$1192\sim 1250^{\circ}\text{C}$	体心立方

再发生变化。

必须指出：正是由于纯铁能够发生同素异晶转变，生产中才有可能对钢和铸铁进行各种热处理来改变其组织与性能。

在纯铁的冷却曲线中还可以看到：在 770°C 时冷却曲线中又出现了一个平台（即温度保持不变），但在该温度下纯铁的晶格并没有起变化，因此，它不是同素异晶转变。实验表明：在 770°C 以上，纯铁将失去铁磁性，在 770°C 以下纯铁将具有铁磁性。因此，在温度 770°C 时的转变，称为磁性转变。

三、表示晶体结构特征的几个参数

晶胞是能够反映晶体结构特征的最小的几何单元。而各晶胞的特征，除晶格常数和晶轴间夹角以外，还必须由以下几方面的参数来反映。

1. 晶胞中的原子数

（1）体心立方结构：由于晶体是由许多晶胞堆积而成的，因此，体心立方晶胞八个角上的每个原子都是同属于与其相邻的八个晶胞所共有，每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子，如图 1-13 a) 所示。但立方体中心那个原子却为该晶胞所独有，所以，体心立方晶胞中的原子数应为：

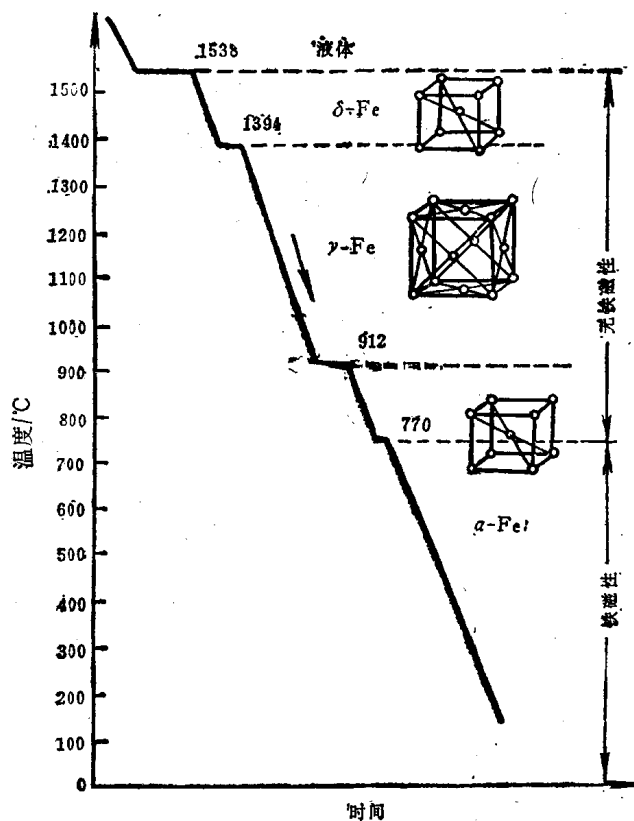


图1-12 纯铁的冷却曲线