

'91国优教材

高等学校试用教材

金属学与热处理

(铸造、焊接专业用)

哈尔滨工业大学 崔忠圻 主编

机械工业出版社



高等学校试用教材

金属学与热处理

(铸造、焊接专业用)

哈尔滨工业大学 崔忠圻 主编



机械工业出版社

本书内容包括金属学、热处理原理和工艺以及金属材料三部分,比较全面系统地介绍了金属与合金的晶体结构、金属与合金的相图和结晶、塑性变形与再结晶、固态金属中的扩散和相变的基本理论、强化材料的基本工艺方法以及常用的金属材料。对于不同种类金属材料的合金化问题也分别进行了介绍,并指出了提高材料强韧性的途径。各章均附有一定量的习题和作业,并提供了进一步阅读的参考文献。

本书是高等工业学校铸造、焊接专业的“金属学与热处理”课程教学用书,也可供其它专业师生和从事这方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属学与热处理/崔忠圻主编. —北京:机械工业出版社, 2000

高等学校试用教材. 铸造、焊接专业用

ISBN 7-111-01796-X

I. 金… II. 崔… III. ①金属学-高等学校-教材
②热处理-高等学校-教材 IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 82519 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:杨燕 王霄飞 张祖凤 版式设计:吴静霞 责任校对:熊天荣

封面设计:郭景云

责任印制:洪汉军

北京中兴印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版第 14 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·28 印张·686 千字

定价:34.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据1984年4月高等工业学校机械工程材料和物理化学教材编审小组于南京召开的编委扩大会议制订的“金属学与热处理”（铸造、焊接专业用）教学大纲编写的。

“金属学与热处理”是铸造、焊接专业的技术基础课，着重阐述金属与合金的化学成分、结构、组织与性能之间的内在联系以及在各种条件下的变化规律，比较全面系统地介绍金属与合金的晶体结构、金属与合金的相图与结晶、塑性变形与再结晶、固态金属相变与扩散的基本理论，强化材料的基本工艺方法以及常用的金属材料。本书结合实例，从组织结构角度出发来阐明问题，重点放在与金属材料科学有关的基本现象、基本概念、基本规律和基本方法上，以便为合理选择使用金属材料和制订热加工工艺规程、获得优质零构件打好必要的理论基础，并为从事金属与合金的研究提供理论依据和线索。

本书内容分三部分，即金属学、热处理原理和工艺以及金属材料。金属学部分包括第一章金属的晶体结构，第二章至第五章金属与合金的相图和结晶，第六章和第七章塑性变形与再结晶以及第八章扩散等内容。由于金属学是这门课程的基础，它对于生产、使用和发展金属材料起着重要的指导作用，因此在教材内容上作了必要的充实和更新。第九章和第十章是钢的热处理原理和工艺部分，着重阐述钢在不同工艺条件下的组织转变规律，介绍基本的、成熟的和有用的相变理论。金属材料部分包括第十一章工业用钢、第十二章铸铁和第十三章有色金属及合金，注意运用金属学与热处理原理等方面的基本知识，分析、认识和研究金属材料发展的内在规律，指出提高材料强韧性的途径，并对不同种类材料的合金化问题分别进行了阐述，目的在于使学生掌握如何根据零构件的服役条件和对性能的要求，正确地选择材料和合理地制订工艺。对于一些难以理解的基本概念和基本理论，在教材编写时注意讲清问题的来龙去脉，指明思路，并进行归纳总结，叙述上力求由浅入深，深广适中，循序渐进，便于教学，注意理论联系实际，阐明各种现象的物理本质，避免作过多的数学推导。为了使学生会总结归纳所学知识并训练学生分析问题和解决问题的能力，各章均安排了一定量的习题和作业，书末提供了进一步学习的参考文献。本书第十一、十二、十三章中的一些表格和数据仍沿用旧标准，由于时间关系未作改动，请读者查阅更新国标。例如 GB221—79、GB700—79、GB5676—85、GB1348—88。

根据教学大纲的规定，本教材的讲课时数为100学时，实验20学时，课堂讨论6学时。考虑到各院校对本课程的具体学时安排不尽相同，在使用本教材时可对有关内容根据实际情况作适当的增删和调整。

本教材共十三章，其中第九章、第十章、第十一章的第五节和第六节、第十二章和第十三章由李仁顺编写，铸钢由欧阳社旺编写，其余部分由崔忠圻编写，金相照片由张玉兰摄制并整理。全书由崔忠圻主编，河北工学院王健安教授和西安交通大学饶启昌副教授主审。在成稿和修改的全过程中，始终得到了两位老师的具体指导和帮助。参加本书审稿工作的还有南京工学院戴枝荣副教授和洛阳工学院吴磊讲师。本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学金属材料及工艺系，尤其是金属学、金属材料和热处理两教研室很多教师的关怀和指导，其

IV

中特别是张吉人教授，没有他的帮助、鼓励和鞭策，本书就不可能按时脱稿并出版，姚枚教授对部分章节的编写大纲提出了十分有益的意见，并对断裂部分的初稿进行了修改。此外，洛阳工学院吴磊同志、东北重型机器厂陈启堂、齐齐哈尔钢厂吕世春和关晋峰高级工程师、长春第一汽车制造厂陈言立等同志提供了许多珍贵资料和照片。对这些同志的热忱支持和帮助，在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在某些缺点和错误，敬希读者批评指正。

1988年8月

目 录

第一章 金属的晶体结构	1	习题	61
§ 1-1 金属	1	第三章 二元合金的相结构与结晶	62
一、金属原子的结构特点	1	§ 3-1 合金中的相	62
二、金属键	2	一、相的分类	63
三、结合力与结合能	2	二、影响相结构的因素	63
§ 1-2 金属的晶体结构	4	§ 3-2 合金的相结构	64
一、晶体的特性	4	一、固溶体	64
二、晶格与晶胞	4	二、金属化合物	69
三、3种典型的金属晶体结构	5	§ 3-3 二元合金相图的建立	72
四、晶向指数和晶面指数	14	一、二元相图的表示方法	72
五、晶体的各向异性	18	二、二元合金相图的测定方法	72
六、多晶型性	19	三、相律及杠杆定律	73
§ 1-3 实际金属的晶体结构	19	§ 3-4 匀晶相图及固溶体的结晶	75
一、点缺陷	20	一、相图分析	75
二、线缺陷	21	二、固溶体合金的平衡结晶过程	75
三、面缺陷	27	三、固溶体的不平衡结晶	79
习题	31	四、区域偏析和区域提纯	80
第二章 纯金属的结晶	33	五、成分过冷及其对晶体成长形状和铸锭 组织的影响	83
§ 2-1 金属结晶的现象	33	§ 3-5 共晶相图及其合金的结晶	87
一、结晶过程的宏观现象	33	一、相图分析	87
二、金属结晶的微观过程	34	二、典型合金的平衡结晶及其组织	87
§ 2-2 金属结晶的热力学条件	35	三、不平衡结晶及组织	93
§ 2-3 金属结晶的结构条件	37	四、比重偏析和区域偏析	95
§ 2-4 晶核的形成	38	§ 3-6 包晶相图及其合金的结晶	96
一、均匀形核	38	一、相图分析	96
二、非均匀形核	42	二、典型合金的平衡结晶过程及组织	97
§ 2-5 晶核长大	46	三、不平衡结晶及组织	99
一、固液界面的微观结构	47	四、包晶转变的实际应用	99
二、晶体长大机制	48	§ 3-7 其它类型的二元合金相图	100
三、固液界面前沿液体中的温度梯度	49	一、组元间形成化合物的相图	100
四、晶体生长的界面形状——晶体形态	50	二、偏晶、熔晶和合晶相图	101
五、长大速度	53	三、具有固态转变的二元合金相图	103
六、晶粒大小的控制	54	§ 3-8 二元相图的分析和使用	105
§ 2-6 金属铸锭的组织与缺陷	56	一、相图分析步骤	105
一、铸锭三晶区的形成	56	二、应用相图时要注意的问题	106
二、铸锭组织的控制	58	三、根据相图判断合金的性能	107
三、铸锭缺陷	59	习题	109

第四章 铁碳合金	111	一、组元在固态完全不溶的共晶相图	143
§ 4-1 铁碳合金的组元及基本相	111	二、组元在固态有限溶解, 具有共晶转变 的相图	49
一、纯铁	111	§ 5-5 三元相图总结	15
二、渗碳体	113	一、三元系的两相平衡	155
1-2 Fe-Fe ₃ C相图分析	114	二、三元系的三相平衡	155
一、相图中的点、线、区及其意义	114	三、三元系的四相平衡	156
二、包晶转变(水平线 HJB)	114	四、相区接触法则	159
三、共晶转变(水平线 ECF)	115	§ 5-6 三元合金相图应用举例	159
四、共析转变(水平线 PSK)	115	一、Fe-C-Si 三元系变温截面	159
五、三条重要的特性曲线	116	二、Fe-C-Cr 三元系等温截面	160
§ 4-3 铁碳合金的平衡结晶过程及组织	117	三、Al-Cu-Mg 三元系液相面投影图	161
一、 $w_C = 0.01\%$ 的工业纯铁	118	习题	162
二、共析钢	118	第六章 金属及合金的塑性变形与 断裂	165
三、亚共析钢	119	§ 6-1 金属的变形特性	165
四、过共析钢	120	一、应力-应变曲线	165
五、共晶白口铁	121	二、真应力-真应变曲线	166
六、亚共晶白口铁	121	三、金属与合金的弹性变形	167
七、过共晶白口铁	122	§ 6-2 单晶体的塑性变形	169
§ 4-4 含碳量对铁碳合金平衡组织和 性能的影响	123	一、滑移	169
一、对平衡组织的影响	123	二、孪生	176
二、对机械性能的影响	124	§ 6-3 多晶体的塑性变形	178
三、对工艺性能的影响	125	一、多晶体的塑性变形过程	179
§ 4-5 钢中的杂质元素及钢锭组织	127	二、晶粒大小对塑性变形的影响	179
一、钢中的杂质元素及其影响	127	§ 6-4 合金的塑性变形	181
二、钢锭的组织及其宏观缺陷	129	一、单相固溶体的塑性变形	181
习题	133	二、多相合金的塑性变形	182
第五章 三元合金相图	135	§ 6-5 塑性变形对金属组织和性能的 影响	184
§ 5-1 三元合金相图的表示方法	135	一、塑性变形对组织结构的影响	184
一、成分三角形	135	二、塑性变形对金属性能的影响	187
二、在成分三角形中具有特定意义的 直线	136	三、残余应力	189
§ 5-2 三元系平衡相的定量法则	137	§ 6-6 金属的断裂	189
一、直线法则和杠杆定律	137	一、断裂分类	190
二、重心法则	138	二、微孔聚集型断裂	192
§ 5-3 三元匀晶相图	139	三、解理断裂	193
一、相图分析	139	四、沿晶断裂	194
二、三元固溶体合金的结晶过程	139	五、影响材料断裂的基本因素	194
三、等温截面(水平截面)	140	六、断裂韧性及其应用	196
四、变温截面(垂直截面)	141	习题	198
五、投影图	142	第七章 金属及合金的回复与再结晶	200
§ 5-4 三元共晶相图	143		

§ 7-1 形变金属与合金在退火过程中的变化	200	第九章 钢的热处理原理	236
一、显微组织的变化	200	§ 9-1 概述	236
二、储存能及内应力的变化	201	一、热处理的作用	236
三、机械性能的变化	201	二、热处理与相图	236
四、其它性能的变化	201	三、固态相变的特点	238
五、亚晶粒尺寸	202	四、固态相变的类型	240
§ 7-2 回复	202	§ 9-2 钢在加热时的转变	240
一、退火温度和时间对回复过程的影响	202	一、共析钢奥氏体的形成过程	240
二、回复机理	202	二、影响奥氏体形成速度的因素	242
三、亚结构的变化	203	三、奥氏体晶粒大小及其影响因素	244
四、回复退火的应用	204	§ 9-3 钢在冷却时的转变	248
§ 7-3 再结晶	205	一、概述	248
一、再结晶晶核的形成与长大	205	二、共析钢过冷奥氏体的等温转变曲线	249
二、再结晶温度及其影响因素	206	三、影响过冷奥氏体等温转变的因素	251
三、再结晶晶粒大小的控制	208	四、珠光体转变	253
§ 7-4 晶粒长大	209	五、马氏体转变	259
一、晶粒的正常长大	209	六、贝氏体转变	270
二、晶粒的反常长大	212	七、过冷奥氏体连续冷却转变曲线及其应用	276
三、再结晶退火后的组织	213	§ 9-4 钢在回火时的转变	280
§ 7-5 金属的热加工	214	一、淬火钢的回火转变及组织	280
一、金属的热加工与冷加工	214	二、淬火钢在回火时性能的变化	285
二、动态回复与动态再结晶	215	三、回火脆性	286
三、热加工后的组织与性能	216	四、淬火后的回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较	288
习题	218	习题	289
第八章 扩散	219	第十章 钢的热处理工艺	290
§ 8-1 概述	219	§ 10-1 钢的退火与正火	290
一、扩散现象和本质	219	一、退火目的及工艺	290
二、扩散机理	221	二、正火目的及工艺	294
三、固态金属扩散的条件	223	三、退火和正火的选用	295
四、固态扩散的分类	224	§ 10-2 钢的淬火与回火	295
§ 8-2 扩散定律	226	一、钢的淬火	295
一、菲克第一定律	226	二、钢的回火	305
二、菲克第二定律	226	三、淬火加热缺陷及其防止	306
三、扩散应用举例	227	§ 10-3 其它类型热处理	308
§ 8-3 影响扩散的因素	231	一、钢的形变热处理	308
一、温度	231	二、钢的表面淬火	310
二、晶体结构	232	三、钢的化学热处理	312
三、固溶体类型	232	习题	317
四、晶体缺陷	233	第十一章 工业用钢	319
五、化学成分	234	§ 11-1 钢的分类和编号	319
习题	234		

一、钢的分类	319	§ 12-2 常用普通铸铁	393
二、钢的编号	320	一、灰铸铁	393
§ 11-2 合金元素在钢中的作用	322	二、可锻铸铁	396
一、合金元素在钢中的分布	322	三、球墨铸铁	399
二、合金元素与铁和碳的相互作用	322	四、蠕墨铸铁	402
三、合金元素对相变的影响	324	§ 12-3 特殊性能铸铁	404
四、合金元素对钢强韧性的影响	328	一、耐磨铸铁	404
§ 11-3 构件用钢	331	二、耐热铸铁	405
一、概述	331	三、耐蚀铸铁	406
二、构件用钢的机械性能特点	331	习题	407
三、合金元素对构件用钢性能的影响	333	第十三章 有色金属及合金	408
四、常用的构件用钢	335	§ 13-1 铝及铝合金	408
五、铸钢	338	一、铝及铝合金的性能特点及分类编号	408
§ 11-4 机器零件用钢	339	二、铝及铝合金的强化	409
一、概述	339	三、变形铝合金	412
二、机器零件用钢的合金化特点	340	四、铸造铝合金	416
三、渗碳钢	343	五、耐热铝合金	419
四、调质钢	346	§ 13-2 钛及钛合金	422
五、弹簧钢	350	一、纯钛	422
六、滚动轴承钢	354	二、钛的合金化	422
§ 11-5 工具钢	356	三、工业用钛合金	423
一、概述	356	四、钛合金的热处理	426
二、刀具钢	357	§ 13-3 铜及铜合金	428
三、模具钢	366	一、纯铜	428
四、量具钢	371	二、黄铜	429
§ 11-6 特殊性能钢	372	三、青铜	431
一、不锈钢	372	§ 13-4 轴承合金	433
二、耐热钢	379	一、轴承合金的性能要求	433
三、耐磨钢	384	二、锡基轴承合金	434
习题	385	三、铅基轴承合金	434
第十二章 铸铁	387	四、铝基轴承合金	435
§ 12-1 概述	387	习题	436
一、铸铁组织的形成	387	参考文献	436
二、石墨与基体对铸铁性能的影响	391		

第一章 金属的晶体结构

金属材料的化学成分不同，其性能也不同。但是对于同一种成分的金属材料，通过不同的加工处理工艺，改变材料内部的组织结构，也可以使其性能发生极大的变化。由此可以看出，除化学成分外，金属的内部结构和组织状态也是决定金属材料性能的重要因素。这就促使人们致力于金属及合金内部结构的研究，以寻求改善和发展金属材料的途径。

金属和合金在固态下通常都是晶体。要了解金属及合金的内部结构，首先必须了解晶体的结构，其中包括晶体中原子是如何相互作用并结合起来的，原子的排列方式和分布规律，各种晶体的特点及差异等。

§ 1-1 金 属

在着手研究金属时，首先应回答：什么是金属？传统的回答是：金属是具有良好的导电性、导热性、延展性（塑性）和金属光泽的物质。在化学元素周期表中，已发现的化学元素有 105 种，其中有 83 种是金属元素。在这些金属元素中，有些元素，例如铋，并不具有良好的延展性，铋、镉的导电性还不如某些非金属元素（例如石墨）好。显然这一定义没有揭示出金属与非金属之间差别的本质。比较严格的定义是：金属是具有正的电阻温度系数的物质，而所有的非金属的电阻都随着温度的升高而下降，其电阻温度系数为负值。为了搞清楚金属与非金属这一区别的本质，应当从金属的原子结构及原子间的结合方式入手进行研究。

一、金属原子的结构特点

原子结构理论指出，孤立的自由原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子所组成。原子的尺寸很小，为 10^{-8}cm 数量级，原子核的尺寸更小，为 10^{-12}cm 数量级。原子核中又包括质子和中子，质子与中子的质量相等。质子具有正电荷，每个质子所带电荷与一个电子所带电荷相等，但符号相反。每个原子中的质子数与核外电子数相等。核外电子按能级不同由低至高分层排列着。内层电子的能量低，最为稳定。最外层电子的能量高，与核结合得弱，这样的电子通常称为价电子。原子中的所有电子都按着量子力学规律运动着。

金属原子的结构特点是，其最外层的电子数很少，一般为 1~2 个，最多不超过 4 个。由于这些外层电子与原子核的结合力弱，所以很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子，此时的原子即变为正离子。因此，常将这些元素称为正电性元素。非金属元素的原子结构与此相反，其外层电子数较多，最多 7 个，最少 4 个，它易于获得电子，此时的原子即变为负离子。因此，非金属元素又称为负电性元素。过渡族金属元素，如钛、钒、铬、锰、铁、钴、镍等，它们的原子结构，除具有上述金属原子的特点外，还有一个特点，即在次外层尚未填满电子的情况下，最外层就先填充了电子。因此，过渡族金属的原子，不仅容易丢失最外层电子，而且还容易丢失次外层 1~2 个电子，这就出现过渡族金属化合价可变的现象。当过渡族金属的原子彼此相互结合时，不仅最外层电子参与结合，而且次外层电子也参与结合。因此，过渡族金属的原子间结合力特别强，宏观表现为熔点高、强度高。由此可见，原子外层

参与结合的电子数目，不仅决定着原子间结合键的本质，而且对其化学性能和强度等特性也具有重要影响。

二、金属键

由于金属与非金属的原子结构不同，因而使原子间的相互结合产生了很大差别。现以食盐（氯化钠）、金刚石（碳）和铜为例进行分析。当正电性元素钠和负电性元素氯相接触时，由于电子一失一得，使它们各自变成正离子和负离子，二者靠静电作用结合起来，氯化钠的这种结合方式称为离子键。碳的价电子数是4个，得失电子的机会近似，既可形成正离子，也可形成负离子。事实上，虽然它偶而也能与别的元素形成离子键，但它本身原子之间多以共价键方式结合。所谓共价键，即相邻原子共用它们外部的价电子，形成稳定的电子满壳层。金刚石中的碳原子之间即完全以共价键结合。铜原子之间的结合，既不同于离子键，也不同于共价键。根据近代物理和化学的观点，认为：处以集聚状态的金属原子，全部或大部将它们的价电子贡献出来，为其整个原子集体所公有，称之为电子云或电子气。这些价电子或自由电子，已不再只围绕自己的原子核转动，而是与所有的价电子一起在所有原子核周围按量子力学规律运动着。贡献出价电子的原子，则变为正离子，沉浸在电子云中，它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来，这种结合方式叫做金属键，它没有饱和性和方向性。图1-1示意地绘出了金属键模型。这种模型认为，在固态金属中，并非所有原子都变为正离子，而是绝大部分处于正离子状态，但仍有少部分原子处于中性原子状态。

在金属及合金中，主要是金属键，但有时也不同程度地混有其它键。

根据金属键的本质，可以解释固态金属的一些特性。例如，在外加电场作用下，金属中的自由电子能够沿着电场方向作定向运动，形成电流，从而显示出良好的导电性。自由电子的运动和正离子的振动使金属具有良好的导热性。随着温度的升高，正离子或原子本身振动的振幅加大，可阻碍电子的通过，使电阻升高，因而金属具有正的电阻温度系数。由于自由电子很容易吸收可见光的能量，而被激发到较高的能级，当它跳回到原来的能级时，就把吸收的可见光能量重新辐射出来，从而使金属不透明，具有金属光泽。由于金属键没有饱和性和方向性，所以当金属的两部分发生相对位移时，金属的正离子始终被包围在电子云中，从而保持着金属键结合。这样，金属就能经受变形而不断裂，使其具有延展性。

三、结合力与结合能

在固态金属中，众多的原子依靠金属键牢固地结合在一起。但是，原子的聚集状态如何，即金属中原子的排列方式如何尚未提及。下面进一步从原子间的结合力与结合能来说明，沉浸于电子云中的金属原子（或正离子）为什么象图1-1所示的那样规则排列着，并往往趋于紧密地排列。

为简便起见，首先分析两个原子之间的相互作用情况（即双原子作用模型）。当两个原子

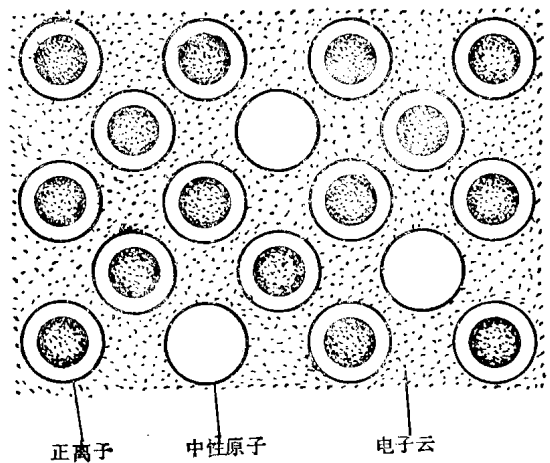


图1-1 金属键模型

相距很远时，它们之间实际上不发生相互作用，但当它们相互逐渐靠近时，其间的作用力就会随之显示出来。分析表明，固态金属中两原子之间的相互作用力包括：正离子与周围自由电子间的吸引力，正离子与正离子以及电子与电子之间的排斥力。吸引力力图使两原子靠近，而排斥力却力图使两原子分开，它们的大小都随原子间距离的变化而变化，如图 1-2 所示。上图为 A、B 两原子间的吸引力和排斥力曲线，两原子结合力为吸引力与排斥力的代数和。吸引力是一种长程力，排斥力是一种短程力，当两原子间距较大时，吸引力大于排斥力，两原子自动靠近。当两原子靠近至使其电子层发生重叠时，排斥力便急剧增长，一直到两原子距离为 d_0 时，吸引力与排斥力相等，即原子间结合力为零，好象位于原子间距 d_0 处的原子既不受吸引力，也不受排斥力一样。 d_0 即相当于原子的平衡位置，原子既不会自动靠近，也不会自动离开。任何对平衡位置的偏离，都立刻会受到一个力的作用，促使其回到平衡位置。例如当距离小于 d_0 时，排斥力大于吸引力，原子间要相互排斥；当距离大于 d_0 时，吸引力大于排斥力，两原子要相互吸引。如果把 B 原子拉开，远离其平衡位置，则必须施加外力，以克服原子间的吸引力。当把 B 原子拉至 d_c 位置时，外力达到原子结合力曲线上的最大值，超过 d_c 之后，所需的外力就越来越小。可见，原子间的最大结合力不是出现在平衡位置，而是在 d_c 位置上。这个最大结合力就对应着金属的理论抗拉强度。金属不同，则原子的最大结合力值也不同。此外，从图上可以看出，在 d_0 点附近，结合力与距离的关系接近直线关系。

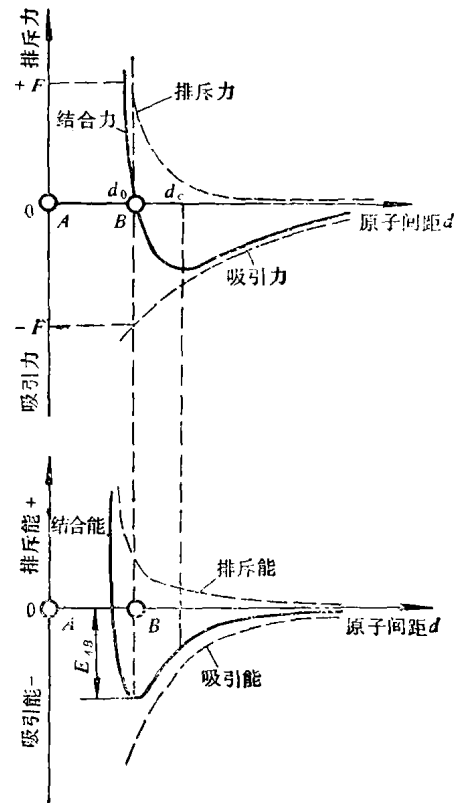


图 1-2 双原子作用模型

图 1-2 的下半部分是吸引能和排斥能与原子间距离的关系曲线，结合能是吸引能与排斥能的代数和。当形成原子集团比分散孤立的原子更稳定，即势能更低时，那么，在吸引力的作用下把远处的原子移近所做的功是使原子的势能降低，所以吸引能是负值。相反，排斥能是正值。当原子移至平衡距离 d_0 时，其结合能达到最低值，即此时原子的势能最低、最稳定。任何对 d_0 的偏离，都会使原子的势能增加，从而使原子处于不稳定状态，原子就有力图回到低能状态，即恢复到平衡距离的倾向。这里的 E_{AB} 称为原子间的结合能或键能。同样，金属不同，则其结合能的大小也不同。

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成固体时，为使固态金属具有最低的能量，以保持其稳定状态，大量原子之间也必须保持一定的平衡距离，这就是固态金属中的原子趋于规则排列的重要原因。

如果试图从固态金属中把某个原子从平衡位置拿走，就必须对它做功，以克服周围原子对它的作用力。显然，这个要被拿走的原子周围近邻的原子数越多，所需要作的功便越大。由此可见，原子周围最近邻的原子数越多，原子间的结合能（势能）越低。能量最低的状态是

最稳定的状态，而任何系统都有自发从高能状态向低能状态转化的趋势。因此，常见金属中的原子总是自发地趋于紧密的排列，以保持最稳定的状态。

当原子间以离子键或共价键结合时，原子达不到紧密排列状态，这是由于这些结合方式对原子周围的原子数有一定的限制之故。

最后，应当指出，所有的离子和原子在各自的平衡位置上并不是固定不动的，而是各自以其平衡位置为中心作微弱的热振动。温度越高，则热振动的振幅越大。

§ 1-2 金属的晶体结构

从双原子作用模型已经了解到，金属中原子的排列是有规则的，而不是杂乱无章的。人们将这种原子在三维空间作有规则的周期性重复排列的物质称为晶体，金属一般均为晶体。在晶体中，原子排列的规律不同，则其性能也不同，因而必须研究金属的晶体结构，即原子的实际排列情况。为了方便起见，首先把晶体当作没有缺陷的理想晶体来研究。

一、晶体的特性

谈到晶体，人们很容易联想到价格昂贵的钻石和晶莹剔透的各种宝石。这些的确是晶体，并且这些天然的晶体往往都具有规则的几何外形。事实上，在人们周围，各种晶体物质比比皆是，例如，人们吃的食盐，冬天河里结的冰，天上飞舞的雪花，各种金属制品如门锁、钥匙以及汽车、火车和飞机上各种金属构件等等。这些金属制品与天然晶体的主要差别是，它们一般都不具有规则的几何外形，但是经过人们深入细致的研究，证明这些金属制品内部的原子确实是呈规则排列着。可见，晶体与非晶体的区别不在外形，主要在于内部的原子排列情况。在晶体中，原子按一定的规律周期性的重复排列着，而所有的非晶体，如玻璃、木材、棉花等等，其内部的原子则是散乱分布着，至多有些局部的短程规则排列。

由于晶体中的原子呈一定规则重复排列着，这就造成晶体在性能上区别于非晶体的一些重要特点。首先，晶体具有一定的熔点（熔点就是晶体向非结晶状态的液体转变的临界温度），在熔点以上，晶体变为液体，处于非结晶状态。在熔点以下，液体又变为晶体，处于结晶状态。从晶体至液体或从液体至晶体的转变是突变的。而非金属则不然，它从固体至液体，或从液体至固体的转变是逐渐过渡的，没有确定的熔点或凝固点，所以可以把固态非晶体看成为过冷状态的液体，它只是在物理性质方面不同于通常的液体而已，玻璃就是一个典型的例子。故往往将非晶态的固体称做玻璃体。

晶体的另一个特点是在不同的方向上测量其性能（如导电性、导热性、热膨胀性、弹性和强度等）时，表现出或大或小的差异，称之为各向异性或异向性。非晶体在不同方向上的性能则是一样的，不因方向而异，称之为各向同性或等向性。

由此可见，晶体与非晶体之间存在着本质的差别，但这并不意味着两者之间必然存在着不可逾越的鸿沟。在一定条件下，可以将原子呈不规则排列的非晶体转变为原子呈规则排列的晶体，反之亦然。例如，玻璃经长时间高温加热后能形成晶态玻璃；用特殊的设备，使液态金属以极快的速度冷却下来，可以制出非晶态金属。当然，这些转变的结果，必然使其性能发生极大的变化。

二、晶格与晶胞

为了研究原子的排列规律，假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚球，那么晶体即由

这些刚球堆积而成，图 1-3 a 即为这种原子堆积模型，从中可以看出，原子在各个方向的排列都是很规则的。这种模型的优点是立体感强，很直观；缺点是每个刚球密密麻麻地堆集在一起，很难看清内部排列的规律和特点，不便于研究。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点（原子、离子或分子）忽略，而将它们抽象为纯粹的几何点，称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心，也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心，各个阵点的周围环境都相同。为了观察方便起见，可以做许多平行的直线将这些阵点连接起来，构成一个三维的空间格架，如图 1-3 b 所示，这种用以描述晶体中原子（离子或分子）排列规律的空间格架称为空间点阵，简称为点阵或晶格。

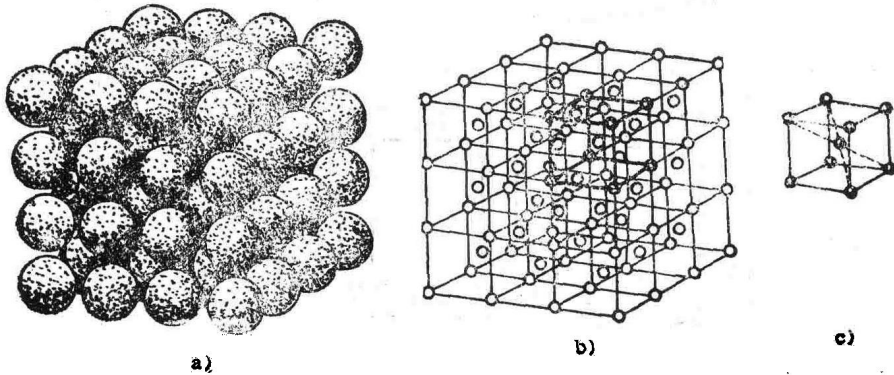


图 1-3 晶体中原子排列示意图

a) 原子堆积模型 b) 晶格 c) 晶胞

由于晶格中原子排列具有周期性的特点，因此，为了简便起见，可以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性，这个最小的几何单元称为晶胞（见图 1-3 c）。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 表示，如图 1-4 所示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边设置了三个坐标轴（或晶轴） X 、 Y 、 Z 。习惯上，以原点的前、右、上方为轴的正方向，反之为负方向。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数，在 X 、 Y 、 Z 轴上分别以 a 、 b 、 c 表示。晶胞的棱间夹角又称为轴间夹角，通常 $Y-Z$ 轴、 $Z-X$ 轴和 $X-Y$ 轴之间的夹角分别用 α 、 β 和 γ 表示。

三、3 种典型的金属晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种，它们的晶体结构各不相同，但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系对所有的晶体进行分析，则发现可把它们的空间点阵分为 14 种类型。若进一步根据空间点阵的基本特点进行归纳整理，又可将 14 种空间点阵归属于 7 个晶系，如表 1-1 所示。由于金属原子趋向于紧密排列，所以在工业上使用的金属元素中，除了少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数都具有比较简单的晶体结构，其中最典型、最常见的金属晶体结构有 3 种类型，即体心立方结构，面心立方结构和密排六方结构，

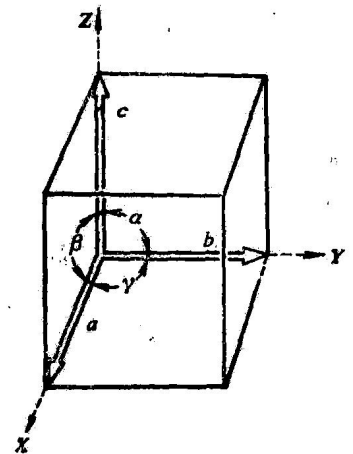
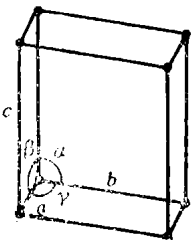
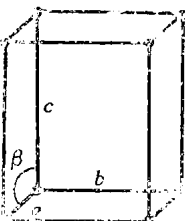
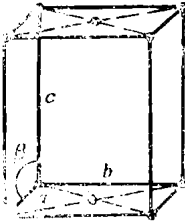
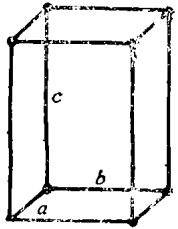
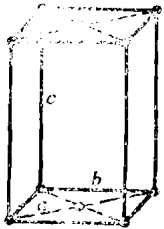
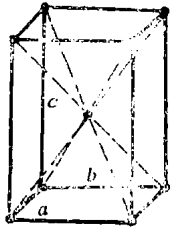
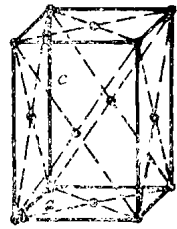
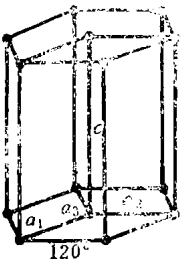
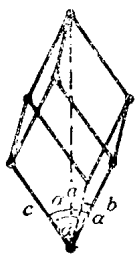
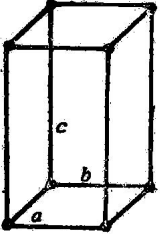
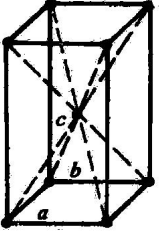
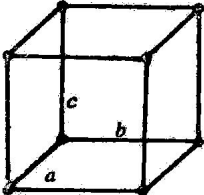
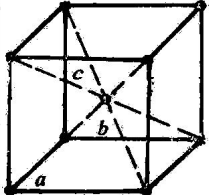
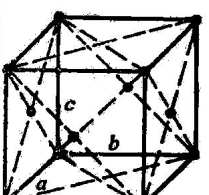


图 1-4 晶胞的晶格常数和轴间夹角表示法

表1-1 7个晶系和14种点阵

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
三斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ K_2CrO_7				
单斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $\beta-S$				
正交晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a-S, Fe_3C$				
六方晶系 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ Zn, Cd, Mg				
菱方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ As, Sb, Bi				

(续)

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\beta\text{-Sn, TiO}_2$				
立方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe, Cr, Cu, Ag				

前两种属于立方晶系，后一种属于六方晶系。

(一) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型见图 1-5。晶胞的三个棱边长度相等，三个轴间夹角均为 90° ，构成立方体。除了在晶胞的八个角上各有一个原子外，在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Cr 、 V 、 Nb 、 Mo 、 W 等约 30 多种。

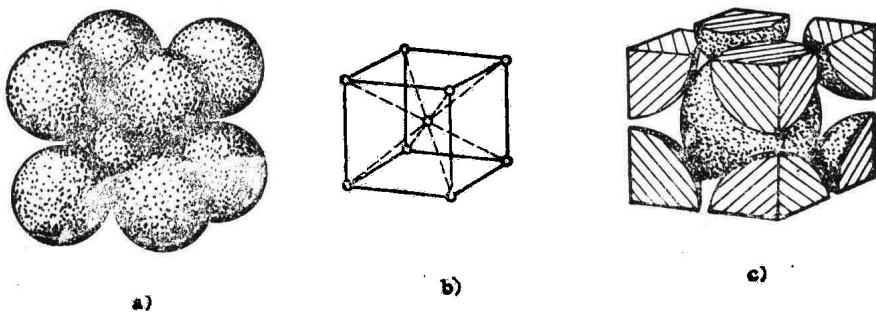


图1-5 体心立方晶胞

a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数

1. 原子半径

在体心立方晶胞中，原子沿立方体对角线紧密地接触着，如图 1-5 a 所示。设晶胞的点阵常数（或晶格常数）为 a ，则立方体对角线的长度为 $\sqrt{3}a$ ，等于 4 个原子半径，所以体心立方晶胞中的原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

2. 原子数

由于晶格是由大量晶胞堆积而成，因而晶胞每个角上的原子是同属于与其相邻的八个晶

胞所共有，故只有 $1/8$ 个原子属于这个晶胞，晶胞中心的原子完全属于这个晶胞，所以体心立方晶胞中的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ ，如图 1-5 c 所示。

3. 配位数和致密度

晶胞中原子排列的紧密程度也是反映晶体结构特征的一个重要因素，通常用两个参数来表征，一个是配位数，另一个是致密度。

(1) 配位数 所谓配位数是指晶体结构中，与任一个原子最近邻、等距离的原子数目。显然，配位数越大，晶体中的原子排列便越紧密。在体心立方晶格中，以立方体中心的原子来看，与其最近邻等距离的原子数有 8 个，所以体心立方晶格的配位数为 8。

(2) 致密度 若把原子看做刚性圆球，那么原子之间必然有空隙存在，原子排列的紧密程度可用原子所占体积与晶胞体积之比表示，称为致密度或密集系数，可用下式表示：

$$K = \frac{nV_1}{V}$$

式中， K 为晶体的致密度， n 为一个晶胞实际包含的原子数， V_1 为一个原子的体积， V 为晶胞的体积。

体心立方晶格的晶胞中包含有 2 个原子，晶胞的棱边长度（晶格常数）为 a ，原子半径为 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ ，其致密度为：

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} \approx 0.68$$

此值表明，在体心立方晶格中，有 68% 的体积为原子所占据，其余 32% 为间隙体积。

(二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-6 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子，构成立方体，在立方体六个面的中心各有一个原子。 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等约 20 种金属具有这种晶体结构。

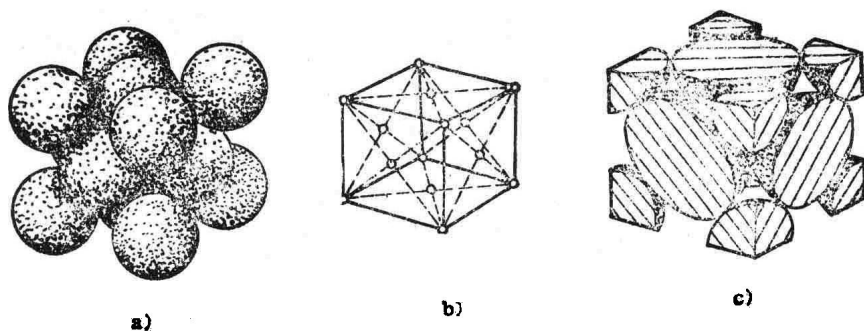


图1-6 面心立方晶胞

a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数

由图 1-6 c 可以看出，每个角上的原子属于 8 个晶胞所共有，每个晶胞实际占有该原子的 $1/8$ ，而位于六个面中心的原子同时属于相邻的两个晶胞所共有，所以每个晶胞只分到