



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



第2版

金属学与热处理

哈尔滨工业大学 崔忠圻 覃耀春 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

金属学与热处理

第2版

哈尔滨工业大学 崔忠圻 覃耀春 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。

本书是热加工专业的技术基础课教材, 主要对象是高等学校的材料成形及控制工程、焊接技术与工程、材料加工工程专业的学生, 也可供非材料专业(如机械制造、化工)的学生以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属学与热处理/崔忠圻, 覃耀春主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2007.5 (2011.6重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-01796-7

I. 金… II. ①崔…②覃… III. ①金属学②热处理 IV. TG1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第049619号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 冯春生

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

责任印制: 乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2011年6月第2版第10次印刷

184mm×260mm·26.25印张·651千字

标准书号: ISBN 978-7-111-01796-7

定价: 43.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”，第1版为‘91国优教材。本书自1989年出版以来，由于内容丰富全面，叙述简洁流畅，便于教和学，一直深受广大读者的欢迎，但随着教学改革以及科技的不断发展，内容有待进一步更新与完善，特进行本次修订。

本书的修订内容主要为：更新了示意图和显微照片；“金属材料”部分的表格和数据采用最新的国家标准；重新编写了“金属的断裂”、“扩散机制”、“屈服现象”及“奥氏体晶粒度”。其他部分只是在原书基础上作了局部的改动与调整，基本保持了原书的结构与风格。

本书由哈尔滨工业大学崔忠圻、覃耀春担任主编，哈尔滨工业大学刘北兴教授、燕山大学崔占全教授担任主审。本书在修订过程中，哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室的高景祥工程师、孙淑华老师和何松工程师在金相照片的翻拍和搜集方面提供了帮助，在此一并表示感谢。

本书是热加工专业的技术基础课教材，主要对象是高等学校的材料成形及控制工程、焊接技术与工程、材料加工工程专业的学生，也可供非材料专业（如机械制造、化工）的学生以及工程技术人员参考。

由于水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

第 1 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。为了使学生学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

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、第一重型机器厂陈启堂、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。

目 录

第2版前言	二、铸锭组织的控制	56
第1版前言	三、铸锭缺陷	57
第一章 金属的晶体结构	习题	59
第一节 金属	第三章 二元合金的相结构与结晶	60
一、金属原子的结构特点	第一节 合金中的相	60
二、金属键	第二节 合金的相结构	61
三、结合力与结合能	一、固溶体	61
第二节 金属的晶体结构	二、金属化合物	66
一、晶体的特性	第三节 二元合金相图的建立	69
二、晶体结构与空间点阵	一、二元相图的表示方法	69
三、3种典型的金属晶体结构	二、二元合金相图的测定方法	70
四、晶向指数和晶面指数	三、相律及杠杆定律	70
五、晶体的各向异性	第四节 匀晶相图及固溶体的结晶	72
六、多晶型性	一、相图分析	73
第三节 实际金属的晶体结构	二、固溶体合金的平衡结晶过程	73
一、点缺陷	三、固溶体的不平衡结晶	76
二、线缺陷	四、区域偏析和区域提纯	78
三、面缺陷	五、成分过冷及其对晶体成长形状和铸锭组织的影响	80
习题	第五节 共晶相图及其合金的结晶	84
第二章 纯金属的结晶	一、相图分析	84
第一节 金属结晶的现象	二、典型合金的平衡结晶及其组织	84
一、结晶过程的宏观现象	三、不平衡结晶及其组织	90
二、金属结晶的微观过程	四、比重偏析和区域偏析	92
第二节 金属结晶的热力学条件	第六节 包晶相图及其合金的结晶	93
第三节 金属结晶的结构条件	一、相图分析	94
第四节 晶核的形成	二、典型合金的平衡结晶过程及其组织	94
一、均匀形核	三、不平衡结晶及其组织	96
二、非均匀形核	四、包晶转变的实际应用	96
第五节 晶核长大	第七节 其他类型的二元合金相图	97
一、固液界面的微观结构	一、组元间形成化合物的相图	97
二、晶体长大机制	二、偏晶、熔晶和合晶相图	99
三、固液界面前沿液体中的温度梯度	三、具有固态转变的二元合金相图	101
四、晶体生长的界面形状——晶体形态	第八节 二元相图的分析和使用	102
五、长大速度	一、相图分析步骤	102
六、晶粒大小的控制	二、应用相图时要注意的问题	104
第六节 金属铸锭的宏观组织与缺陷	三、根据相图判断合金的性能	104
一、铸锭三晶区的形成		

习题	106	第四节 三元共晶相图	139
第四章 铁碳合金	108	一、组元在固态完全不溶的共晶相图	139
第一节 铁碳合金的组元及基本相	108	二、组元在固态有限溶解, 具有共晶转变的相图	145
一、纯铁	108	第五节 三元相图总结	151
二、渗碳体	109	一、三元系的两相平衡	151
第二节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	110	二、三元系的三相平衡	151
一、相图中的点、线、区及其意义	110	三、三元系的四相平衡	152
二、包晶转变 (水平线 <i>HJB</i>)	110	四、相区接触法则	154
三、共晶转变 (水平线 <i>ECF</i>)	111	第六节 三元合金相图应用举例	155
四、共析转变 (水平线 <i>PSK</i>)	111	一、Fe-C-Si 三元系变温截面	155
五、三条重要的特性曲线	113	二、Fe-C-Cr 三元系等温截面	156
第三节 铁碳合金的平衡结晶过程及其组织	113	三、Al-Cu-Mg 三元系液相面投影图	157
一、 $w_c = 0.01\%$ 的工业纯铁	113	习题	158
二、共析钢	114	第六章 金属及合金的塑性变形与断裂	161
三、亚共析钢	114	第一节 金属的变形特性	161
四、过共析钢	116	一、工程应力-应变曲线	161
五、共晶白口铁	117	二、真应力-真应变曲线	162
六、亚共晶白口铁	118	三、金属的弹性变形	163
七、过共晶白口铁	118	第二节 单晶体的塑性变形	164
第四节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	119	一、滑移	164
一、对平衡组织的影响	119	二、孪生	172
二、对力学性能的影响	120	第三节 多晶体的塑性变形	174
三、对工艺性能的影响	121	一、多晶体的塑性变形过程	174
第五节 钢中的杂质元素及钢锭组织	123	二、晶粒大小对塑性变形的影响	175
一、钢中的杂质元素及其影响	123	第四节 合金的塑性变形	176
二、钢锭的宏观组织及其缺陷	126	一、单相固溶体合金的塑性变形	176
习题	130	二、多相合金的塑性变形	177
第五章 三元合金相图	131	第五节 塑性变形对金属组织和性能的影响	180
第一节 三元合金相图的表示方法	131	一、塑性变形对组织结构的影响	180
一、成分三角形	131	二、塑性变形对金属性能的影响	183
二、在成分三角形中具有特定意义的直线	132	三、残留应力	184
第二节 三元系平衡相的定量法则	133	第六节 金属的断裂	185
一、直线法则和杠杆定律	133	一、塑性断裂	185
二、重心法则	134	二、脆性断裂	186
第三节 三元匀晶相图	135	三、影响材料断裂的基本因素	188
一、相图分析	135	四、断裂韧度及其应用	190
二、三元固溶体合金的结晶过程	135	习题	192
三、等温截面 (水平截面)	136	第七章 金属及合金的回复与再结晶	194
四、变温截面 (垂直截面)	137		
五、投影图	138		

第一节 形变金属与合金在退火过程中的变化	194	第九章 钢的热处理原理	230
一、显微组织的变化	194	第一节 概述	230
二、储存能及内应力的变化	194	一、热处理的作用	230
三、力学性能的变化	195	二、热处理与相图	230
四、其他性能的变化	195	三、固态相变的特点	232
五、亚晶粒尺寸	196	四、固态相变的类型	233
第二节 回复	196	第二节 钢在加热时的转变	234
一、退火温度和时间对回复过程的影响	196	一、共析钢奥氏体的形成过程	234
二、回复机制	196	二、影响奥氏体形成速度的因素	236
三、亚结构的变化	197	三、奥氏体晶粒大小及其影响因素	237
四、回复退火的应用	198	第三节 钢在冷却时的转变	239
第三节 再结晶	199	一、概述	239
一、再结晶晶核的形成与长大	199	二、共析钢过冷奥氏体的等温转变图	240
二、再结晶温度及其影响因素	200	三、影响过冷奥氏体等温转变的因素	242
三、再结晶晶粒大小的控制	202	四、珠光体转变	244
第四节 晶粒长大	203	五、马氏体转变	248
一、晶粒的正常长大	203	六、贝氏体转变	259
二、晶粒的反常长大	206	七、过冷奥氏体连续冷却转变图及其应用	264
三、再结晶退火后的组织	207	第四节 钢在回火时的转变	268
第五节 金属的热加工	209	一、淬火钢的回火转变及其组织	268
一、金属的热加工与冷加工	209	二、淬火钢在回火时性能的变化	273
二、动态回复与动态再结晶	209	三、回火脆性	275
三、热加工后的组织与性能	210	四、淬火后的回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较	276
习题	213	习题	276
第八章 扩散	214	第十章 钢的热处理工艺	278
第一节 概述	214	第一节 钢的退火与正火	278
一、扩散现象和本质	214	一、退火目的及工艺	278
二、扩散机制	215	二、正火目的及工艺	281
三、固态金属扩散的条件	217	三、退火和正火的选用	282
四、固态扩散的分类	218	第二节 钢的淬火与回火	282
第二节 扩散定律	220	一、钢的淬火	283
一、菲克第一定律	220	二、钢的回火	292
二、菲克第二定律	220	三、淬火加热缺陷及其防止	294
三、扩散应用举例	221	第三节 其他类型热处理	295
第三节 影响扩散的因素	225	一、钢的形变热处理	295
一、温度	225	二、钢的表面淬火	296
二、键能和晶体结构	226	三、钢的化学热处理	299
三、固溶体类型	226	习题	303
四、晶体缺陷	227	第十一章 工业用钢	305
五、化学成分	227	第一节 钢的分类和编号	305
习题	228		

一、钢的分类	305	第二节 常用铸铁	369
二、钢的编号	306	一、灰铸铁	369
第二节 合金元素在钢中的作用	308	二、可锻铸铁	371
一、合金元素在钢中的分布	308	三、球墨铸铁	373
二、合金元素与铁和碳的相互作用	308	四、蠕墨铸铁	377
三、合金元素对相变的影响	310	第三节 特殊性能铸铁	378
第三节 工程结构用钢	313	一、耐磨铸铁	378
一、概述	313	二、耐热铸铁	379
二、工程结构用钢的力学性能特点	314	三、耐蚀铸铁	380
三、合金元素对工程结构用钢性能的 影响	315	习题	381
四、常用的工程结构用钢	317	第十三章 有色金属及合金	382
五、铸钢	319	第一节 铝及铝合金	382
第四节 机器零件用钢	320	一、铝及铝合金的性能特点及分类 编号	382
一、概述	320	二、铝合金的强化	384
二、机器零件用钢的合金化特点	321	三、变形铝合金	387
三、渗碳钢	324	四、铸造铝合金	390
四、调质钢	327	第二节 钛及钛合金	394
五、弹簧钢	331	一、纯钛	394
六、滚动轴承钢	334	二、钛的合金化	395
第五节 工具钢	336	三、工业用钛合金	396
一、概述	336	四、钛合金的热处理	398
二、刀具钢	337	第三节 铜及铜合金	400
三、模具钢	345	一、纯铜	400
四、量具钢	350	二、黄铜	400
第六节 特殊性能钢	351	三、青铜	402
一、不锈钢	351	第四节 轴承合金	404
二、耐热钢	356	一、轴承合金的性能要求	404
三、耐磨钢	360	二、锡基轴承合金	405
习题	361	三、铅基轴承合金	405
第十二章 铸铁	363	四、铝基轴承合金	406
第一节 概述	363	习题	407
一、铸铁组织的形成	363	参考文献	408
二、石墨与基体对铸铁性能的影响	367		

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。

第一节 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 109 种，其中有 87 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、锑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，其电阻随温度的升高而增加；而非金属的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^{-10} m 数量级，原子核的尺寸更小，为 10^{-14} m 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 3 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，常将金属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，这样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，虽然它偶尔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。近代物理学的观点认为，处于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。

金属及合金主要以金属键的方式结合，但也会出现金属键与共价键或离子键混合的情况。

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述及。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）为什么像图1-1所示的那样规则排列着，并往往趋于紧密地排列。

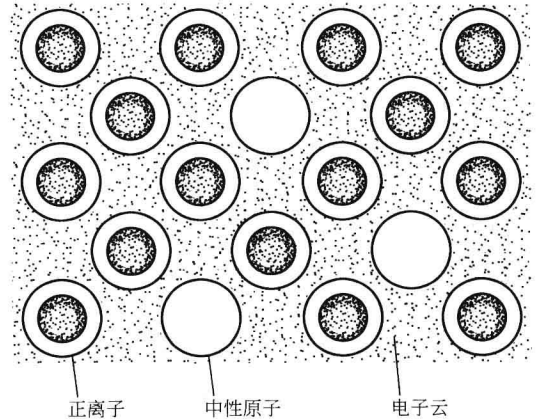


图1-1 金属键模型

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。图 1-2 的上半部分为 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，好像位于原子间距 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间距，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。该段曲线的斜率越大，将原子从平衡位置移开所需的力越大，金属的弹性模量越大。

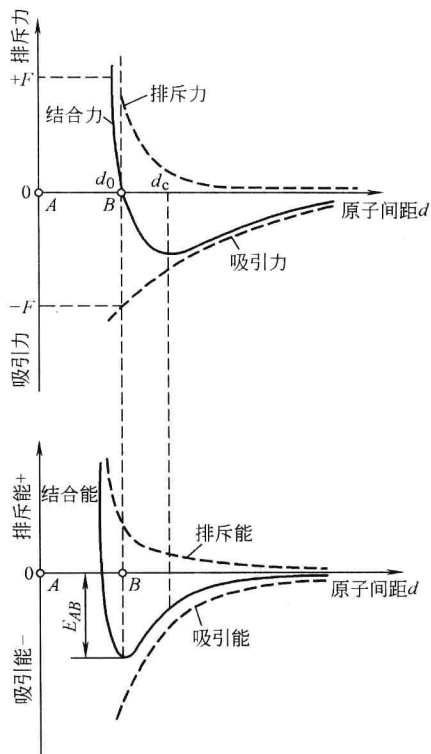


图 1-2 双原子作用模型

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，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。键能决定了金属的熔点和线膨胀系数，键能较高的金属具有较高的熔点和较小的线膨胀系数。

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，所需要做的功便越大。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。

第二节 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、钥匙以及汽车上各种金属构件等。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，但是研究证明，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地重复排列着，而所有的非晶体，如玻璃、木材、棉花等，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。而非晶体则不然，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。

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、晶体结构与空间点阵

晶体结构是指晶体中原子在三维空间有规律的周期性的具体排列方式。组成晶体的原子种类不同或者排列规则不同，就可以形成各种各样的晶体结构，也就是说，实际存在的晶体结构可以有多种。由于金属键没有方向性和饱和性，可以假定金属晶体中的原子都是固定的刚球，晶体就由这些刚球堆垛而成，图 1-3a 所示即为这种原子堆垛模型。从图中可以看出，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；缺点是很难看清原子排列的规律和特点，不便于研究。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的原子（或原子群）忽略，而将其抽象为纯粹的几何点，称之为阵点。这些阵点可以是原子的中心，也可以是彼此等同的原子群的中心，所有阵点的物理环境和几何环境都相同。由这些阵点有规则地周期性重复排列所形成的三维空间阵列称为空间点阵。为了方便起见，常人为地将阵点用直线连接起来形成空间格子，称之为晶格（见图 1-3b）。它的实质仍是空间点阵，通常不加以区别。

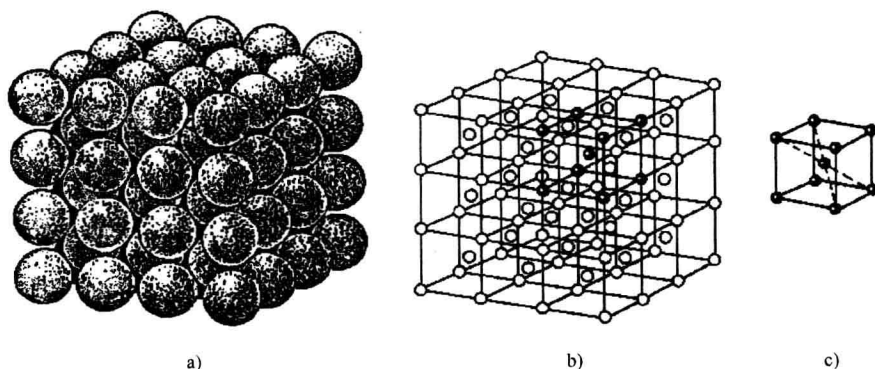


图 1-3 晶体中原子排列示意图
a) 原子堆垛模型 b) 晶格 c) 晶胞

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 1-3c）。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

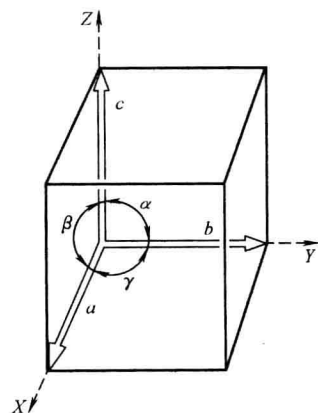


图 1-4 晶胞的晶格常数和轴间夹角表示法

现它们的空间点阵只有 14 种类型，称为布拉菲点阵。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。前两种属于立方晶系，后一种属于六方晶系。

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 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\alpha - S, Fe_3C$				
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, Ca, Ag				

(一) 体心立方结构

体心立方结构的晶胞模型如图 1-5 所示。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。

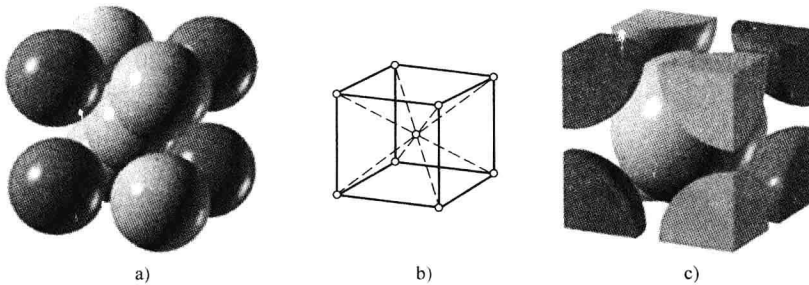


图 1-5 体心立方结构晶胞
 a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数

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 1-5a 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垛而成，因而晶胞每个角上的原子为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 $8 \times 1/8 + 1 = 2$ ，如图 1-5c 所示。