

# 金属学 及热处理

陈思政 主编



版社  
ECHULI

# 金属学及热处理

陈思政 主编

华中工学院出版社

## 内 容 简 介

本书主要阐述有关金属学的基本原理，钢的热处理原理与工艺，以及各种钢、铸铁、非铁金属及其合金等内容。本书力求做到重点突出，文字简练，深度适中，联系实际，以体现三个“面向”和专科特点。

本书可以作为高等工程专科学校的铸造、锻压、焊接和冶炼等、各专业的教材，也适用于电视大学、夜大学和职工大学等相应专业，还可供从事有关实际工作的技术人员学习参考。

## 金属学及热处理

陈 思 政 主 编

责任编辑 叶翠华

\*

华中工学院出版社出版发行

(武汉·湖北)

新华书店湖北发行所经销

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

\*

开本：787×1092 1/16 印张：22 插页：1 字数：488 000

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

印数：1—3 000

ISBN 7-5609-0113-1/TG·2

定价：3.70元

# 前 言

本书是在校内讲义经过多次试用，并广泛听取了有关方面意见的基础上，经反复修改后编写而成的。

本书内容包括金属与合金的晶体结构、晶体缺陷、结晶、塑性变形与再结晶，钢与铸铁及其热处理，非铁金属及其合金等。全书采用法定计量单位。

本书可以作为高等工程专科学校机械类、冶金类热加工和冶炼等各专业的试用教材，也适用于电视大学、夜大学和职工大学等相应专业，还可供从事有关实际工作的人员学习参考。

本书共分十章，第一、二、三、四章为陈思政编写，第五、六、七章为唐殿福编写，第八、九、十章为吴成国编写。全书由陈思政主编，杨惠文主审。

由于编者水平有限，经验不多，缺点和错误在所难免，殷切希望读者批评指正。

编 者 于沈阳冶金机械专科学校

# 目 录

绪 论	( 1 )
第一章 金属与合金的晶体结构	( 3 )
§ 1-1 金属与合金	( 3 )
一、金属与合金的概念	( 3 )
二、金属与合金的特性	( 3 )
三、金属原子的结构特点	( 3 )
四、金属键	( 5 )
五、金属的结合能	( 5 )
§ 1-2 金属的晶体结构	( 7 )
一、晶体结构的基本知识	( 7 )
二、金属中常见的晶体结构	( 10 )
三、晶体结构中的间隙	( 13 )
四、晶体中原子的堆垛方式	( 15 )
五、金属的多晶性转变	( 16 )
六、晶面指数与晶向指数	( 17 )
§ 1-3 合金相的结构	( 20 )
一、固溶体	( 21 )
二、金属间化合物	( 26 )
三、合金的相组成	( 20 )
§ 1-4 金属与合金中的扩散	( 31 )
一、概述	( 31 )
二、固态扩散的方式与类型	( 31 )
三、扩散定律	( 33 )
四、影响扩散的因素	( 35 )
第二章 金属与合金的晶体缺陷	( 37 )
§ 2-1 晶体中的位错	( 37 )
一、位错概念的引入	( 37 )
二、位错模型与柏氏矢量	( 38 )
三、位错的运动	( 42 )
四、位错的形成与增殖	( 44 )
五、位错与强度的关系	( 47 )
§ 2-2 晶体中的点缺陷	( 43 )
一、点阵空位与间隙原子	( 43 )
二、固溶强化	( 49 )
§ 2-3 晶体中的界面	( 51 )
一、外表面	( 51 )
二、晶界	( 51 )

三、相界面	( 54 )
四、其它界面	( 55 )
五、界面能	( 55 )
六、晶界强化	( 55 )
<b>第三章 金属与合金的结晶</b>	<b>( 57 )</b>
§ 3-1 液态金属的结构与结晶	( 57 )
一、液态金属的结构	( 57 )
二、过冷与结晶	( 57 )
三、金属结晶的热力学条件	( 59 )
§ 3-2 晶核的形成与生长	( 60 )
一、晶核的形成	( 60 )
二、晶核的生长	( 65 )
§ 3-3 晶粒大小及其控制	( 68 )
一、晶粒度概念	( 68 )
二、影响晶粒大小的因素	( 70 )
三、细化晶粒的方法	( 70 )
§ 3-4 二元合金相图的基本知识	( 71 )
一、相图的坐标与建立	( 71 )
二、杠杆定律	( 72 )
三、相律	( 73 )
四、二元合金相图的基本类型	( 74 )
§ 3-5 匀晶相图及固溶体的结晶	( 74 )
一、相图分析	( 74 )
二、合金的平衡结晶与组织	( 75 )
三、合金的不平衡结晶及组织	( 75 )
四、成分过冷与晶体长大	( 78 )
§ 3-6 共晶相图及典型合金的结晶	( 79 )
一、概述	( 79 )
二、相图分析	( 80 )
三、典型合金的平衡结晶及组织	( 81 )
四、合金的不平衡结晶及组织	( 83 )
五、共晶组织的形态	( 81 )
§ 3-7 包晶相图及典型合金的结晶	( 86 )
一、概述	( 86 )
二、相图分析	( 86 )
三、合金的平衡结晶及组织	( 86 )
§ 3-8 其它类型的相图	( 89 )
一、熔晶、偏晶和合晶相图	( 89 )
二、两组元形成化合物的相图	( 89 )
三、具有固态转变的相图	( 91 )
§ 3-9 相图的构成规律及相图与合金性能的关系	( 92 )
一、二元合金相图的构成规律	( 92 )
二、二元合金结晶过程分析法	( 93 )

三、合金性能与相图关系	( 94 )
§ 3-10 铸锭的组织与缺陷	( 95 )
一、铸锭的组织	( 95 )
二、铸锭的缺陷	( 96 )
三、铸锭组织的控制	( 98 )
第四章 铁碳合金	( 100 )
§ 4-1 铁碳合金的组元与基本相	( 100 )
一、铁碳合金的组元	( 100 )
二、铁碳合金中的基本相	( 101 )
§ 4-2 Fe-Fe <sub>3</sub> C相图	( 102 )
一、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图中的特点	( 102 )
二、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图中的特性线	( 102 )
三、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图中的相区	( 104 )
§ 4-3 典型合金的结晶过程分析	( 105 )
一、工业纯铁	( 105 )
二、共析钢	( 106 )
三、亚共析钢	( 108 )
四、过共析钢	( 109 )
五、共晶白口铸铁	( 110 )
六、亚共晶白口铸铁	( 111 )
七、过共晶白口铸铁	( 112 )
§ 4-4 碳素钢	( 111 )
一、碳对钢性能的影响	( 111 )
二、杂质对钢性能的影响	( 115 )
三、碳素钢的分类与牌号	( 117 )
四、碳素钢的特点与应用	( 120 )
第五章 三元合金相图	( 123 )
§ 5-1 三元合金相图的成分表示法	( 123 )
一、等边三角形法	( 123 )
二、等腰三角形法	( 124 )
三、直角三角形法	( 125 )
§ 5-2 直线定律和重心定律	( 125 )
一、直线定律	( 125 )
二、重心定律	( 126 )
§ 5-3 三元匀晶相图	( 127 )
一、相图分析	( 127 )
二、合金的结晶过程及组织	( 127 )
三、等温截面与投影图	( 128 )
四、变温截面	( 129 )
§ 5-4 固态互不溶解的三元共晶相图	( 129 )
一、相图分析	( 130 )
二、合金的结晶过程及组织	( 132 )
三、等温截面	( 133 )

四、变温截面	(134)
§ 5-5  固态有限溶解的三元共晶相图	(136)
§ 5-6  三元系截面图及投影图的应用举例	(139)
一、Fe-C-Si三元系变温截面图和等温截面图	(139)
二、三元系投影图的应用	(140)
<b>第六章 金属与合金的塑性变形及再结晶</b>	(143)
§ 6-1  金属变形概述	(143)
§ 6-2  单晶体的塑性变形	(144)
一、滑移变形	(145)
二、孪生变形	(148)
§ 6-3  多晶体的塑性变形	(150)
一、多晶体塑性变形的特点	(150)
二、晶界与第二相对变形的影响	(150)
§ 6-4  塑性变形对金属与合金的组织 and 性能的影响	(152)
一、塑性变形对金属与合金组织结构的影响	(152)
二、塑性变形对金属性能的影响	(153)
§ 6-5  回复与再结晶	(155)
一、概述	(155)
二、回复	(155)
三、再结晶	(156)
四、晶粒长大	(157)
五、再结晶退火后的组织	(157)
§ 6-6  金属与合金的热加工	(159)
一、动态回复与动态再结晶	(159)
二、热加工后的组织和性能	(160)
§ 6-7  金属与合金的断裂	(161)
一、断裂的基本形式	(162)
二、断口形态	(163)
三、断裂韧性	(165)
<b>第七章 钢的热处理原理与工艺</b>	(169)
§ 7-1  概述	(169)
一、热处理概念	(169)
二、钢的临界点	(169)
§ 7-2  钢在加热时的转变	(170)
一、奥氏体的形成	(170)
二、影响奥氏体形成的因素	(172)
三、奥氏体的晶粒度及其影响因素	(172)
四、钢的加热缺陷及其防止措施	(174)
§ 7-3  钢在冷却时的转变	(176)
一、钢的过冷奥氏体转变曲线	(176)
二、珠光体转变	(180)
三、贝氏体转变	(185)
四、马氏体转变	(188)



§ 7-4 钢的退火与正火	(197)
一、退火	(197)
二、正火	(199)
三、退火与正火工艺举例	(200)
§ 7-5 钢的淬火	(203)
一、钢的淬火工艺	(203)
二、钢的淬透性	(206)
三、淬火变形与开裂	(209)
§ 7-6 钢的回火	(211)
一、淬火钢回火时的组织转变	(211)
二、钢的回火组织与机械性能	(213)
三、回火脆性	(215)
四、钢的回火工艺	(216)
§ 7-7 钢的表面热处理	(217)
一、表面淬火	(217)
二、钢的化学热处理	(220)
§ 7-8 钢的特种热处理	(224)
一、钢的形变热处理	(224)
二、真空热处理	(225)
三、激光热处理	(226)
§ 7-9 典型零件的热处理	(227)
一、齿轮	(227)
二、传动轴	(229)
第八章 合金钢	(231)
§ 8-1 合金元素在钢中的作用	(231)
一、合金元素与铁及碳的相互作用	(231)
二、合金元素对铁碳相图的影响	(234)
三、合金元素在钢中的分布	(235)
四、合金元素对固态相变的影响	(236)
五、硼和稀土元素的作用	(239)
§ 8-2 钢的冶金质量	(240)
一、钢的低倍缺陷	(240)
二、钢的高倍缺陷	(242)
§ 8-3 钢的分类与编号	(244)
一、钢的分类	(244)
二、钢的编号	(244)
§ 8-4 合金结构钢	(245)
一、普通低合金钢	(245)
二、优质合金结构钢	(249)
三、其它合金结构钢	(261)
§ 8-5 合金工具钢	(267)
一、刀具钢	(267)
二、模具钢	(273)

三、量具钢	( 279 )
§ 8-6 特殊性能钢	( 280 )
一、不锈钢	( 280 )
二、耐热钢	( 282 )
三、耐磨钢	( 286 )
第九章 铸 铁	( 288 )
§ 9-1 灰口铸铁	( 288 )
一、铸铁的石墨化	( 288 )
二、影响石墨化的因素	( 290 )
三、灰口铸铁的成分、组织和性能	( 291 )
四、灰口铸铁的孕育处理	( 293 )
五、灰口铸铁的热处理	( 293 )
§ 9-2 可锻铸铁	( 294 )
一、可锻铸铁的成分、组织、性能及应用	( 294 )
二、可锻铸铁的热处理	( 295 )
§ 9-3 球墨铸铁	( 296 )
一、球墨铸铁的成分与组织	( 296 )
二、球化处理与球化原理	( 298 )
三、球墨铸铁的性能及应用	( 299 )
四、球墨铸铁的热处理	( 301 )
§ 9-4 特殊性能铸铁	( 302 )
一、耐磨铸铁	( 302 )
二、耐热铸铁	( 302 )
三、耐蚀铸铁	( 303 )
第十章 非铁金属及其合金	( 305 )
§ 10-1 铝及铝合金	( 305 )
一、纯铝	( 305 )
二、铝合金的种类及热处理原理	( 305 )
三、形变铝合金	( 310 )
四、铸造铝合金	( 311 )
§ 10-2 铜及铜合金	( 315 )
一、纯铜	( 315 )
二、铜合金的种类及牌号	( 317 )
三、黄铜	( 317 )
四、青铜	( 321 )
§ 10-3 轴承合金与硬质合金	( 325 )
一、轴承合金	( 325 )
二、硬质合金	( 327 )
§ 10-4 其它非铁金属及合金	( 329 )
一、镁及镁合金	( 329 )
二、钛及钛合金	( 329 )
附录	
附录一 几种常见的机械性能指标	( 333 )



附录二	原子内电子的分布表.....	( 334 )
附录三	各种硬度与强度换算表.....	( 336 )
附录四	国内外常用钢号对照表.....	( 338 )

## 绪 论

金属材料广泛应用于人类生产与生活之中，是现代工业和科学技术等方面不可缺少的重要材料。它之所以得到广泛应用，不仅由于它具有优良的使用性能，而且还由于它具有良好的各种工艺性能，以便制成需要的零件和产品。

所谓使用性能，就是金属材料制成工件后，在使用过程能适应或抵抗外界对它的力、化学、电磁、温度等作用而必须具有的能力。通常将使用性能分为以下几种：

1. 机械性能 包括各种强度、塑性、韧性、硬度以及断裂韧性等，其含义、所用符号及其单位见附录一。
2. 物理性能 包括比重、熔点、导电、导热、磁性以及膨胀系数等。
3. 化学性能 包括抗氧化、耐腐蚀性能等。
4. 其它性能 如消震性、抗辐照性等。

所谓工艺性能，就是从冶炼开始一直到制成工件时为止，中间要经过铸造、压力加工、机械加工、热处理以及钎焊等等一系列的工艺过程中，金属材料所能适应这些加工工艺的能力。金属材料的工艺性能，包括铸造性能，可锻性能、切削性能、焊接性能、淬透性与淬硬性等。

金属材料的性能，取决于它的化学成分及内部组织结构。我们知道，组成金属材料的主要元素是金属，而金属原子的结构特点是外层电子少甚至次外层电子不满，这就决定了金属原子的结合及其结合体的结构特点。这是金属材料的共性所在，但不同的金属或同种金属含有不同化学成分时，其性能又有很大差异。例如铁与铜两种金属的性能不同；铁中含碳量不同（如钢与铸铁），其性能差别也很大，等等。

金属材料的性能，除与其化学成分有关外，还与其“组织”和“结构”有关。

所谓组织是用肉眼或借助某种工具所观察到的金属材料的内部组成物。通常把用肉眼或放大镜（几倍、几十倍）观察到的组织称为低倍组织或宏观组织；用显微镜（放大100~2000倍）观察到的组织称为高倍组织或显微组织；用电子显微镜（放大几千倍至几十万倍）观察到的组织称为电子显微组织。组织的含义包括晶粒、亚晶以及合金相种类、大小、形状及其相对数量和分布等。

所谓结构一般是指晶体结构。金属材料中的原子都是按一定规律结合起来的，且可用严格的几何图案来表述。在晶体学中，将晶体原子的几何图案分成七大晶系十四种排列方式。不同的排列方式就形成了不同的晶体结构，而不同的晶体结构又将不同程度地使金属材料的性能发生差异。

《金属学及热处理》是研究金属材料的化学成分、组织结构与性能之间关系及其变化规律的学科。

《金属学及热处理》和其它学科一样，也是在社会生产实践中逐渐发展、完善的。我国是一个历史悠久的文明古国，历代劳动人民对科学技术的发展作出了重大贡献。我国是发现金属、应用金属材料最早的国家，远在新石器时代仰韶文化（距今约6000年）开始，我国已

会炼黄铜；商周时期（距今约3000多年），青铜的冶铸技术已达到很高水平，青铜工具和农具的使用促进了社会生产力的发展，从出土文物中反映了当时精巧的冶铸技术和丰富的古代文化，例如在安阳出土的司母戊大鼎，重875公斤，直径1米多，造型精致，美观瑰丽；西周的大盂鼎，铸有铭文，字迹清晰，春秋时期（距今约2600多年），已经普遍使用铁器，例如洛阳出土的铁铲，经金相分析，是迄今发现的最早的可锻铸铁；战国初（距今约2400多年），已能生产铸铁脱碳钢、快炼渗碳钢等钢铁材料，用于制作兵器、工具和农具。我国的钢铁生产技术大约比世界各国要早2000年左右。与此同时，我国劳动人民在长期的生产实践中总结出一套比较完整的金属生产及加工工艺经验。例如《周礼考工记》中，总结了铜锡合金的“六齐”规律，指出了合金的成分配比不同，其性能和用途也就不同；东汉班固著的《汉书》中记载了钢的“清水淬其锋”的热处理经验；宋代沈括著的《梦溪笔谈》中记载了“剑刃钢作，剑身铁制，刃锋体柔”；明代曹昭著的《格古要论》中详细阐述了金、银、铜、铁等金属及其合金的冶炼、铸造及检验方法；明末宋应星著的《天工开物》中进一步总结和阐述了冶炼、铸造和热处理成果，记载了从铁水直接炼成熟铁（低碳钢）的连续生产工艺，并以图解法详细表述了铸造设备和制造钟鼎、钱币和锅斧等的工艺，等等。可见，我国人民对金属及合金的生产和使用积累了极为丰富的经验，对《金属学及热处理》的发展作出了重大贡献。然而长期的封建统治和近百年帝国主义的侵略，使我国近代工业和科学技术长期停滞不前。

解放后，我国经济发展极为迅速。仅以钢的生产为例，解放前自1890年张之洞在大冶创办第一个钢铁厂起至1949年的五十九年间，累计生产钢760万吨，解放后经几年的努力，一年的产量就超过这个数字。1978年后，国民经济的发展更为迅速，例如1978年钢产量为3178万吨，1985年为4666万吨，七年钢净增1488万吨。今后，只要我们善于把远大的理想同现实的奋斗目标紧紧地结合起来，脚踏实地地干实事，我国的科技事业和经济的发展就一定会取得更大的成绩。

在国外，也有许多国家对《金属学及热处理》学科的发展作出了贡献，尤其在十八世纪工业革命前后，由于对金属材料的数量和质量的要求不断提高，因而在生产实践中相继总结了不少经验，促进了这门学科的发展。例如随着光学显微镜的应用，开始研究并逐渐确立了金属材料的组织与性能之间的关系；同时，还将热力学理论、物理及化学分析方法等应用于金属材料的研究，逐渐将有关金属材料的知识提高到理论并逐渐形成了《金属学及热处理》的学科；本世纪以来，随着电子显微镜、X射线、电子探针以及放射性同位素等技术的应用，《金属学及热处理》理论更为完善。

《金属学及热处理》课程主要阐述金属结构、合金相结构、金属与合金的结晶、塑性变形与再结晶、热处理原理与工艺以及钢、铸铁、有色金属及其合金等内容。目的是使学生获得有关金属材料的基本理论和知识，掌握金属材料的性能与成分、组织结构间关系，应能应用这一规律合理地选用金属材料，并为充分发挥金属材料潜力和正确制定热加工工艺打好基础。

《金属学及热处理》是以数学、物理、化学、力学、物理化学及金属工艺学等课程为基础的学科，在学习过程应联系上述课程的有关内容，以加深理解；本课程又是所学专业的重要技术基础课，它是从实践中总结发展起来，又直接为生产实际服务的科学，在学习过程不但要注意掌握理论知识，而且还要做到理论联系实际，重视在实践性教学环节中培养和提高自己的能力。

# 第一章 金属与合金的晶体结构

## § 1-1 金属与合金

### 一、金属与合金的概念

“金属”一词的含义，有时是指纯金属，但纯金属并不纯，多少含有一些杂质元素。根据杂质元素的含量不同，纯金属可分工业纯金属和超纯金属两种。前者的纯度一般为99.90%~99.99%之间，后者的纯度一般为99.999%以上。为了研究方便，我们所说的纯金属，往往不考虑杂质元素的影响。“金属”的另一个含义，往往泛指包括合金在内的所有金属材料。

目前生产和使用的金属材料，大多是由两种以上元素组成的合金。合金是指含有两种或两种以上元素的金属或金属与非金属所组成的具有金属特性的物质。例如钢和铸铁，一般都含有金属元素铁、锰和非金属元素碳、硅等，称为铁碳合金；黄铜是由金属元素铜和锌等组成，称为铜锌合金。

### 二、金属与合金的特性

固态物质可以分为晶体和非晶体两类。自然界中，除少数物质如玻璃、松香和石蜡等以外，绝大多数无机物质都是晶体。金属和合金都是晶体。晶体和非晶体的主要区别：一是晶体中的原子呈规则排列；二是晶体具有固定的熔点；三是晶体具有各向异性。所谓各向异性，即在同一晶体的不同方向上，具有不同的性能。例如 $\alpha$ -Fe单晶的弹性模量 $E$ 在I-I方向为 $1.3 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ ，在II-II方向为 $2.8 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ ，如图1-1所示。

金属和合金的物理性能是具有良好的导电性、导热性、不透明、有光泽以及具有正的电阻温度系数；金属的机械性能是具有较高的强度、硬度以及具有良好的延展性等等。

### 三、金属原子的结构特点

在门捷列夫元素周期表中，元素的一些性质随原子序数的递增而有规律地变化。从第一族金属特性最强的碱金属到最后一族不具备金属特性的惰性气体，其性能的变化是由原子结构的改变而引起的；在同一族中，由上至下，元素的金属性依次递增，也是由于元素的原子结构的改变所引起的。金属与非金属的界限，通常由硼到砷划一条斜线（见附录五中的粗实线）来大致区分；其左侧为金属元素，右侧为非金属元素，斜线附近的元素具有两重性。金属元素约占元素总数的五分之四。

金属和非金属的性能差别以及金属所具有的一系列特殊性能，都是由原子的结构特点及结合方式所决定的。

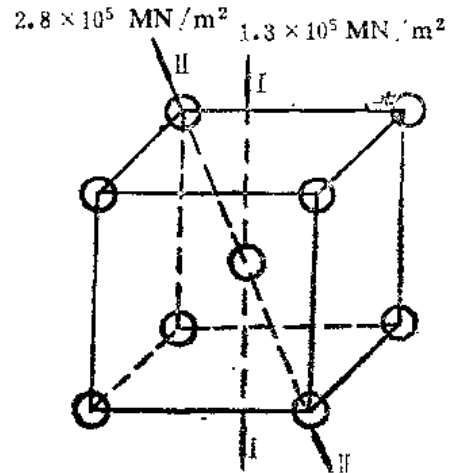


图1-1  $\alpha$ -Fe单晶体的各向异性

大家知道，原子是由带正电的原子核和带负电的电子所组成。电子按保里原理、能量最低原理和多轨道规则（洪特规则）分布在原子核外的各电子层上。例如第二周期的元素，其核外电子分布如图1-2所示。

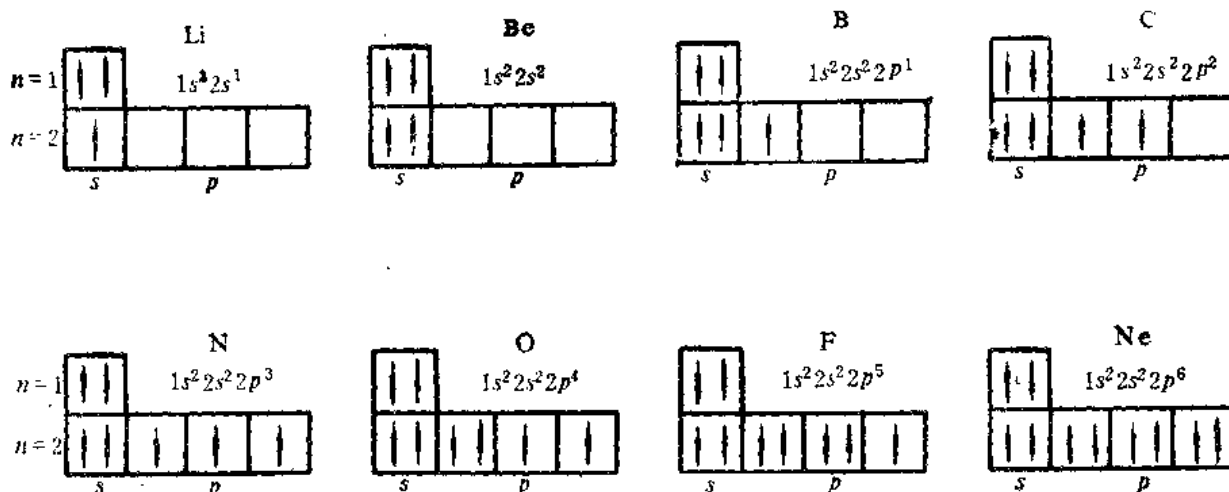


图1-2 第二周期元素的电子结构

又例如，第四周期的几个常见金属元素的外层电子分布如图1-3所示。

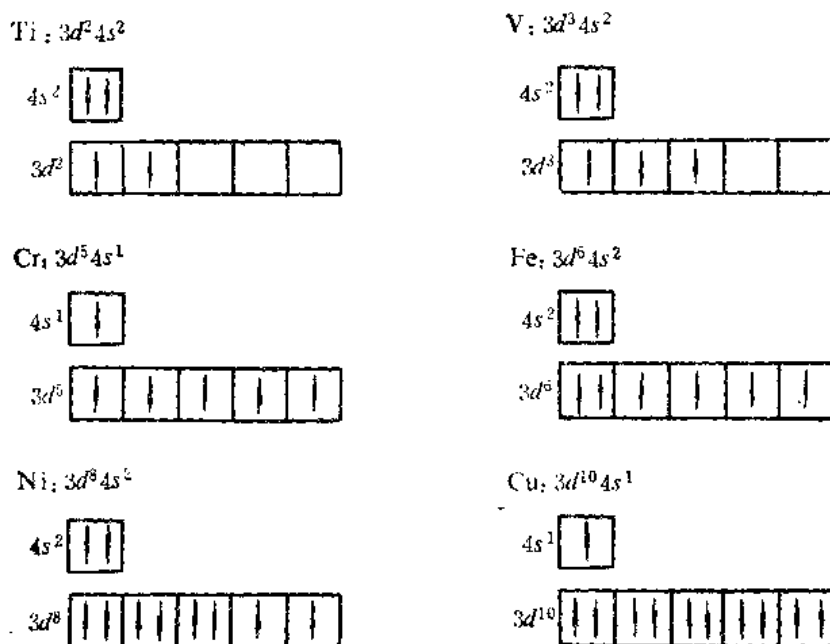


图1-3 几种金属元素的外层电子结构

金属原子的结构特点，是价电子数少（一般只有1~2个），而且它们与原子核的结合力很弱，因而金属原子易丢失电子而成为阳离子，也称正离子；非金属元素的外层电子数较多（一般5~8个），易获得电子而成为阴离子（也称负离子）。另外，过渡族金属原子的结构，除了具有上述金属原子特点以外，它们还有一个未填满的次外电子层。当过渡族金属原子互相结合时，最外层电子和次外层电子都可参与结合，因此过渡族金属的原子结合力强，熔点

高，强度大。各元素原子内的电子分布详见附录二。

#### 四、金属键

当大量的金属原子聚合在一起构成金属晶体时，各原子的外层电子便为整个晶体所共有。这些公有化了的电子不再属哪个原子所固有，它们可以在金属晶体内自由运动而成为“电子气”。金属正离子与自由电子间的静电作用，使金属原子结合起来形成金属整体，这种结合方式称为金属键。金属键的示意图如图1-4所示。

用金属键可以粗略地解释金属的一些特性：由于金属晶体中存在大量公有化了的电子，因而在电场作用下，这些电子可以作定向移动，这就是金属具有良好导电性的原因；同时由于金属晶体借助自由电子与正离子间的引力结合，因而可以改变离子间的相对位置，因此金属具有良好的塑性；随着温度的升高，金属正离子振动加剧，对自由电子通过的阻碍作用加大，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；固态金属依靠正离子的振动和自由电子的运动来传递热能，故金属的导热性比非金属的好；因为金属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辐射出来，故表现出光泽。

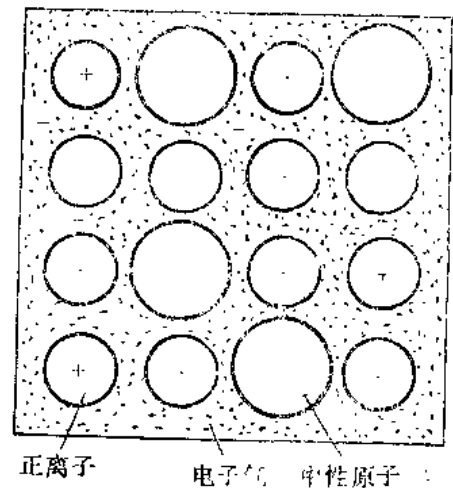


图1-4 金属键的示意图

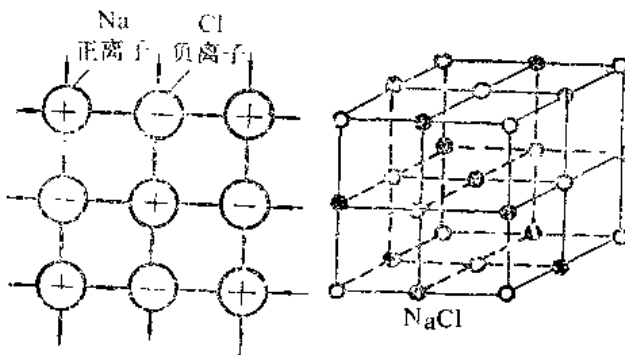


图1-5 离子键示意图

金属键与其它化学键不同，如以NaCl离子键为例，即可说明它们之间的根本区别。NaCl的离子键如图1-5所示。Na和Cl是依靠正、负离子间的静电作用结合起来的，价电子为每个Na和Cl所固有，静电引力强，电子被束缚得紧。外力作用时，具有离子键的NaCl不能象具有金属键的金属那样可以发生延展变形，而只能沿一定的原子平面解理（详见§6-7）；在电场作用下，其价电子也不能定向流动而形成电流。

显然，原子按共价键、极化键等化学键结合而成的晶体物质，也同样不具备金属特性。

#### 五、金属的结合能

金属的结合能由其正离子与自由电子间的吸引能以及离子与离子、电子与电子间的排斥能所决定。我们可以借助双原子作用模型来说明。设从晶体中取出两个原子，其自由电子瞬时分布位置如图1-6所示。箭头表示自由电子与正离子间的引力，它们沿连接正离子中心的轴线方向的分量都有使两个正离子相互靠拢的作用，构成原子间引力成分而使两原子相互吸引。这种引力随原子间距的缩小而增大，如图1-7中的曲线1所示；但是，随着两原子之间距离的减小，正离子间的斥力、电子之间的斥力以及由于距离减小使电子动能加大而形成的斥力均将明显增大，它们构成原子间斥力成分而使两原子相排斥，如图1-7中的曲线2所示。斥



金属中原子间的作用力与距离的关系

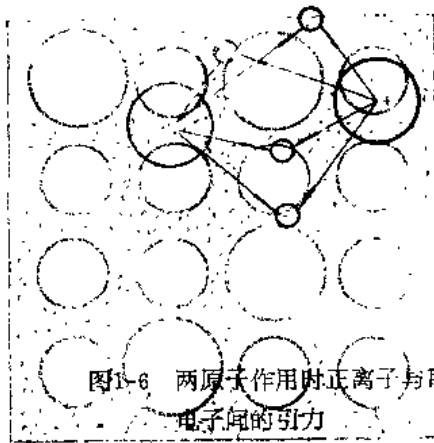


图1-6 两原子作用时正离子与自由电子间的引力

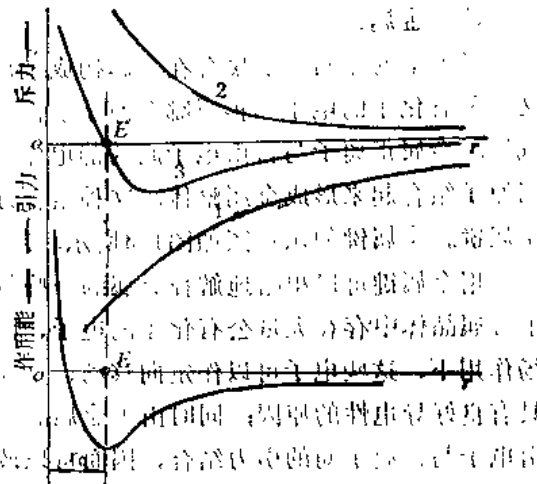


图1-7 两原子间的作用力与作用能(双原子作用模型)

力和引力组成的合力如图1-7中的曲线3所示。值得注意的是，在E点附近，合力与距离的关系是接近直线关系，两原子间的距离等于 $r_0$ 时，合力为零，势能最低，原子处于稳定状态，故 $r_0$ 为两原子间的平衡距离。若外力欲使两原子间的距离减小至小于 $r_0$ ，则将产生相斥抗力；若欲使两原子间的距离在 $r_0$ 基础上增大，则将产生相吸引力。由此可见，如果要使原子从平衡距离( $r_0$ )拉开或压近，都会引起能量升高，都需要做功。

将上述两原子作用模型推广到整个金属晶体，我们可以想象到：对于任一系列原子来说，同样存在着规律分布的周期势场及势能曲线，原子之间也一定有一个平衡距离 $R_0$ ，并在周期势场中按一定位置分布着，每个原子都处于周期势场的“势阱”中，如图1-8所示。金属

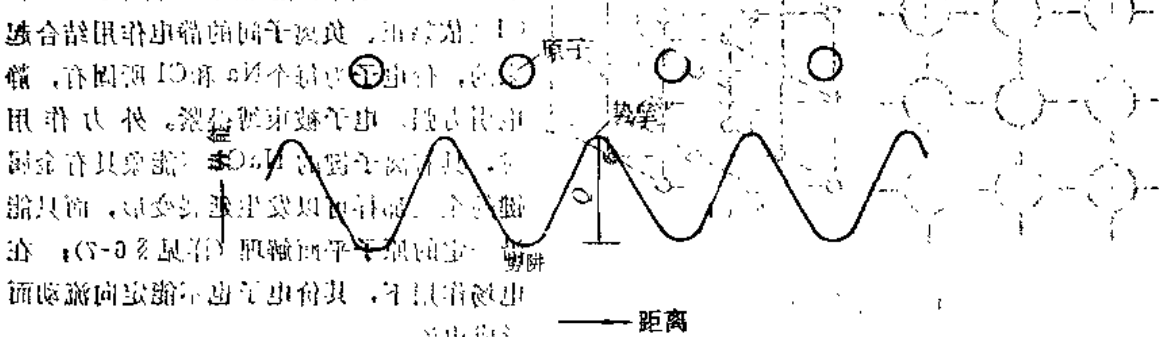


图1-8 金属中的周期势场

中各原子按此距离 $R_0$ 结合在一起，便形成原子规则排列的金属整体。另外我们还看到，在金属晶体中每个原子都处于相应的“势阱”位置，那么原子之间就应该相隔一个“势垒”，因而晶体中原子不会粘在一起，也很难超越“势垒”而任意离位。这就说明，固态金属原子在温度较低时精确平衡位置是比较困难的，只有在高温下原子动能较大，才可能越过势垒进入相邻的势阱中去。若按原子热运动的平均能量来说，是不可能越过势垒进入周围势阱中去运动的。但由于晶体中成分的不均匀性和存在晶体结构缺陷等因素，原子本身具有的能量是不平衡的。如果某些原子由于相邻原子间的热碰撞而偶然获得额外能量可以越过势垒进入新的位置。在实际金属中，时时刻刻都有某些微区的某些个别原子的能量高于平均能量，也有一