

● 高等学校教学用书 ●

物理冶金基础

唐仁正 主编

GAODENG
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

物理冶金基础/唐仁正主编. —北京: 冶金工业出版社,

1997.8

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-2052-5

I. 物... 唐... 物理冶金-高等学校-教材 N.T
F19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 09205 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

河北省三河市印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 8 月第 1 版, 1997 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16: 21.5 印张; 522 千字; 331 页; 1-2000 册

26.80 元

前 言

本书是根据冶金高校教材编写出版规划编写的。

作为一门专业基础课，内容上既要有一定的深度和广度，尽可能反映本学科的最新成就，又要考虑目前授课学时减少，内容要求少而精的需要，同时还应注意贯彻由浅入深、循序渐进、便于教学的原则。本书在编写过程中对这些方面都作了相应的考虑。

本书主要阐述金属及合金的成分、组织结构与性能之间的内在联系以及在各种条件下的变化规律，重点放在与金属材料科学有关的基本现象、基本概念、基本规律上。着重阐述各种现象的物理本质，避免过多的数学推导，尽量做到理论联系实际，便于理解、自学。

本书适用于金属材料及热处理、金属塑性加工、粉末冶金等专业。讲授时间约110学时。根据教学计划安排，有关固态相变部分放在“金属热处理”课程中学习，故本书不再涉及。为了使读者更好地了解合金的成分、组织结构与性能之间的关系，本书最后一章“合金的成分、组织设计的初步概念”作了一个总结，以帮助学生提高分析和解决问题的能力。

本书共十一章。绪论及第1、5、8、9、11章由中南工业大学唐仁正编写，第2、3、4章由南方冶金学院陈本孝编写，第6、7、10章由昆明理工大学黄国钦编写。全书由唐仁正主编，整理定稿。刘国勋教授、黎祚坚教授、丁道云教授和蔡伟平副教授审阅了本书初稿，提出了许多宝贵意见。谢先娇等同志为本书制备了金相图片。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中必然还存在一些缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

2AC55104

目 录

绪论	(1)
1 金属的晶体结构	(4)
1.1 金属的通性与金属键	(4)
1.2 晶体学基础	(4)
1.2.1 晶体与非晶体	(4)
1.2.2 空间点阵与晶胞	(5)
1.2.3 七大晶系和十四种空间点阵	(6)
1.2.4 晶体的对称性概念	(8)
1.2.5 晶体结构与空间点阵	(10)
1.2.6 晶面指数和晶向指数	(10)
1.2.7 晶面及晶向间的夹角	(15)
1.2.8 晶带	(16)
1.2.9 晶面间距	(16)
1.3 金属的晶体结构	(17)
1.3.1 金属的三种典型晶体结构	(17)
1.3.2 晶体的原子堆垛方式和间隙	(20)
1.3.3 金属的其他类型结构	(25)
1.4 晶体的极射投影	(26)
1.4.1 球面投影	(27)
1.4.2 极射投影	(27)
1.4.3 吴氏网	(28)
1.4.4 标准极射投影图	(29)
习 题	(31)
2 纯金属的凝固	(32)
2.1 液态金属	(32)
2.1.1 液态金属的性质特点	(32)
2.1.2 液态金属的结构	(33)
2.2 液态金属的凝固	(33)
2.2.1 液态金属的凝固过程	(33)
2.2.2 金属凝固的热力学条件	(35)
2.3 晶核的形成	(36)
2.3.1 均匀形核	(36)
2.3.2 非均匀形核	(39)
2.4 晶核长大	(42)
2.4.1 液固相界面的微观结构	(42)
2.4.2 液固相界面沿液相中的温度梯度	(43)

2.4.3	液固相界面上原子迁移与动态过冷度	(44)
2.4.4	晶体长大机制	(44)
2.4.5	晶体长大后的界面形状	(45)
2.5	凝固理论的实际应用	(48)
2.5.1	铸态晶粒组织的控制	(48)
2.5.2	单晶及单向柱晶的制取	(50)
2.5.3	快速凝固技术与非晶态金属	(52)
习 题		(54)
3	二元合金相图及合金的凝固组织	(55)
3.1	二元合金中存在的相	(55)
3.1.1	相	(55)
3.1.2	合金相种类	(55)
3.1.3	相平衡条件与相律	(56)
3.2	二元相图的表示法及杠杆定律	(56)
3.2.1	相图的表示法	(56)
3.2.2	杠杆定律	(58)
3.3	二元相图的测绘	(58)
3.4	匀晶相图及固溶体合金的凝固与组织	(60)
3.4.1	相图分析	(60)
3.4.2	固溶体合金的平衡凝固及组织	(60)
3.4.3	固溶体合金的非平衡凝固及组织	(62)
3.4.4	固溶体合金凝固过程中溶质的再分配	(63)
3.4.5	区域熔炼提纯	(67)
3.4.6	成分过冷及其对晶体长大形状和铸锭组织的影响	(67)
3.5	共晶相图及共晶系合金的凝固组织	(71)
3.5.1	相图分析	(71)
3.5.2	共晶系合金的平衡凝固和组织	(71)
3.5.3	共晶组织形态及其形成机理	(74)
3.5.4	共晶合金的非平衡凝固和组织	(77)
3.6	包晶相图及包晶合金的凝固组织	(80)
3.6.1	相图分析	(80)
3.6.2	包晶系合金的平衡凝固和组织	(80)
3.6.3	包晶系合金的非平衡凝固和组织	(81)
3.6.4	包晶转变的实际应用	(82)
3.7	偏晶相图及其合金的凝固组织	(82)
3.8	具有合晶反应和熔晶反应的相图	(83)
3.8.1	合晶反应	(83)
3.8.2	熔晶反应	(83)
3.9	形成化合物的二元相图	(84)

3.9.1	形成稳定化合物的二元相图	(84)
3.9.2	形成不稳定化合物的二元相图	(84)
3.10	具有固态转变的二元相图	(85)
3.10.1	具有共析转变的相图	(85)
3.10.2	具有包析转变的相图	(85)
3.10.3	具有偏析转变的相图	(85)
3.10.4	具有无序-有序转变的相图	(86)
3.10.5	具有固溶度变化的相图	(86)
3.10.6	具有磁性转变的相图	(86)
3.11	建立二元相图的一些几何规则	(87)
3.12	Fe-C 相图及铁碳合金	(87)
3.12.1	Fe-C 相图	(88)
3.12.2	铁碳合金的平衡结晶过程和室温平衡组织	(90)
3.13	相图的热力学知识	(94)
3.13.1	固溶体的自由能	(95)
3.13.2	混合相的自由能	(98)
3.13.3	多相平衡的条件	(98)
3.13.4	由二元系各相的自由能曲线绘制相图	(101)
习 题		(104)
4	三元相图	(106)
4.1	三元相图的成分表示法	(106)
4.2	杠杆定律和重心法则	(107)
4.2.1	杠杆定律	(108)
4.2.2	重心法则	(108)
4.3	匀晶三元相图	(109)
4.3.1	相图的立体模型	(109)
4.3.2	合金凝固过程及组织	(109)
4.3.3	等温截面	(110)
4.3.4	变温截面	(111)
4.4	简单三元共晶相图	(112)
4.4.1	相图的立体模型	(112)
4.4.2	合金的凝固过程和组织	(113)
4.4.3	等温截面	(114)
4.4.4	变温截面	(114)
4.5	固态有限溶解的三元共晶相图	(116)
4.5.1	相图的立体模型	(116)
4.5.2	合金的凝固过程和组织	(116)
4.5.3	等温截面	(119)
4.5.4	变温截面	(120)

4.6	具有包共晶反应的三元相图	(121)
4.6.1	相图的立体模型	(121)
4.6.2	合金的凝固过程和组织	(122)
4.6.3	等温截面	(123)
4.6.4	变温截面	(124)
4.6.5	固相具有固溶度时的相区界面投影图	(124)
4.7	具有三元包晶反应的三元相图	(125)
4.8	形成稳定化合物的三元相图	(126)
4.8.1	形成一个稳定化合物的三元相图简化法	(126)
4.8.2	形成几个稳定化合物的三元相图简化法	(127)
4.9	三元相图分析方法总结	(127)
4.9.1	三元系的两相平衡	(128)
4.9.2	三元系的三相平衡	(128)
4.9.3	三元系的四相平衡	(130)
4.9.4	三元相图中的相区接触规则	(132)
4.10	三元相图实例	(132)
4.10.1	Pb-Sn-Bi 系	(132)
4.10.2	Al-Cu-Mg 系	(133)
4.10.3	W-C-Co 系	(135)
4.10.4	MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 系	(136)
4.10.5	Fe-Cr-C 系	(137)
习 题		(140)
5	合金相的结构及形成规律	(142)
5.1	固溶体	(142)
5.1.1	固溶体的类型	(142)
5.1.2	形成置换固溶体的一些经验规律	(142)
5.1.3	填隙固溶体	(146)
5.1.4	固溶体的微观不均匀性	(147)
5.1.5	长程有序固溶体(超结构)	(147)
5.1.6	固溶体的性质	(151)
5.2	金属间化合物(中间相)	(152)
5.2.1	正常价化合物	(153)
5.2.2	电子化合物	(153)
5.2.3	原子尺寸因素化合物	(154)
5.2.4	金属间化合物的特性与应用	(159)
习 题		(161)
6	空位与位错	(162)
6.1	空位	(162)
6.1.1	空位的热力学分析	(162)

6.1.2	过饱和空位	(164)
6.1.3	空位的迁移	(164)
6.1.4	空位对金属性能的影响	(165)
6.1.5	小结	(166)
6.2	位错的基本类型及特征	(167)
6.2.1	刃型位错	(167)
6.2.2	螺型位错	(168)
6.2.3	混合位错	(169)
6.3	柏氏矢量	(170)
6.3.1	确定柏氏矢量的方法	(170)
6.3.2	柏氏矢量的特征	(172)
6.4	位错的运动	(172)
6.4.1	位错滑移时的晶格阻力	(172)
6.4.2	刃型位错的运动	(173)
6.4.3	螺型位错的运动	(174)
6.4.4	混合位错的运动	(175)
6.4.5	位错运动的小结	(175)
6.5	位错的应力场	(176)
6.5.1	应力分量	(176)
6.5.2	螺型位错应力场	(177)
6.5.3	刃型位错应力场	(178)
6.6	位错的应变能	(180)
6.6.1	螺型位错的应变能	(180)
6.6.2	刃型位错的应变能	(180)
6.6.3	混合位错的应变能	(180)
6.7	位错的受力	(181)
6.7.1	位错的线张力	(181)
6.7.2	外力场中位错所受的力	(182)
6.8	位错与晶体缺陷的相互作用	(184)
6.8.1	位错之间的相互作用	(184)
6.8.2	位错的塞积	(188)
6.8.3	位错与点缺陷之间的交互作用	(190)
6.9	位错的萌生与增殖	(192)
6.9.1	晶体中位错的萌生	(192)
6.9.2	晶体中位错的增殖	(193)
6.10	实际晶体中的位错组态	(195)
6.10.1	常见的三种金属晶体结构中单位位错的柏氏矢量	(195)
6.10.2	层错	(195)
6.10.3	不全位错	(197)

6.10.4	位错反应与扩展位错	(198)
6.11	位错的观测	(205)
习 题		(207)
7	界面	(209)
7.1	表面	(209)
7.1.1	表面能	(209)
7.1.2	表面吸附	(210)
7.2	晶界与亚晶界	(211)
7.2.1	大角度晶界	(211)
7.2.2	小角度晶界	(212)
7.2.3	亚晶界	(214)
7.2.4	晶界能	(215)
7.2.5	晶界能的实际意义	(216)
7.3	晶界的偏聚	(218)
7.3.1	晶界的平衡偏聚	(218)
7.3.2	晶界的非平衡偏聚	(219)
7.3.3	晶界偏聚的实际意义	(219)
7.4	孪晶界	(220)
7.5	相界	(221)
7.5.1	共格相界	(221)
7.5.2	半共格相界	(221)
7.6	复合材料的界面问题	(222)
习 题		(224)
8	金属的塑性变形	(225)
8.1	单晶体金属的塑性变形	(225)
8.1.1	滑移	(225)
8.1.2	孪生	(234)
8.1.3	其他变形方式	(238)
8.2	多晶体的塑性变形	(238)
8.2.1	晶粒取向不同对塑性变形的影响	(239)
8.2.2	晶界对滑移的阻滞效应	(239)
8.2.3	晶粒大小对金属强度和塑性的影响	(240)
8.3	合金的塑性变形	(242)
8.3.1	单相固溶体合金塑性变形的特点	(242)
8.3.2	复相合金的塑性变形	(245)
8.4	金属塑性变形后的组织与性能	(248)
8.4.1	塑性变形对金属组织的影响	(248)
8.4.2	加工硬化	(250)
8.4.3	变形后金属中的残余应力	(254)

8.4.4	变形织构	(256)
8.4.5	塑性变形对金属其他性能的影响	(257)
习 题		(258)
9	回复、再结晶与热加工	(259)
9.1	变形金属在加热时组织性能变化的特点	(259)
9.2	回复	(260)
9.2.1	回复动力学	(260)
9.2.2	回复时亚结构的变化与回复机制	(261)
9.2.3	回复退火的应用	(264)
9.3	再结晶	(265)
9.3.1	再结晶过程	(265)
9.3.2	再结晶动力学	(267)
9.3.3	再结晶温度	(267)
9.3.4	再结晶后的晶粒大小及再结晶全图	(270)
9.3.5	再结晶织构	(273)
9.3.6	退火孪晶	(275)
9.4	晶粒长大	(275)
9.4.1	正常晶粒长大	(275)
9.4.2	反常晶粒长大(二次再结晶)	(279)
9.5	金属的热加工	(281)
9.5.1	动态回复与动态再结晶	(281)
9.5.2	金属的热塑性	(285)
9.5.3	热加工对金属组织和性能的影响	(287)
9.6	超塑性	(288)
9.6.1	微晶超塑性的特征	(289)
9.6.2	微晶超塑性变形机制	(291)
习 题		(292)
10	固体金属中的扩散	(293)
10.1	扩散方程	(293)
10.1.1	菲克第一定律	(293)
10.1.2	扩散系数的测定	(295)
10.1.3	菲克第二定律	(295)
10.1.4	菲克第二定律的解	(296)
10.2	固溶体合金中的扩散	(299)
10.2.1	固溶体合金中的自扩散	(299)
10.2.2	固溶体合金中的互扩散——克肯达尔效应	(299)
10.3	扩散问题的热力学	(300)
10.3.1	扩散的驱动力	(300)
10.3.2	上坡扩散	(301)

10.4 扩散机制.....	(302)
10.4.1 间隙机制	(302)
10.4.2 空位机制	(303)
10.4.3 交换机制	(304)
10.5 影响扩散的因素.....	(305)
10.5.1 温度的影响	(305)
10.5.2 晶体缺陷的影响	(305)
10.5.3 晶体结构的影响	(307)
10.5.4 固溶体类型的影响	(308)
10.5.5 扩散元素性质的影响	(308)
10.5.6 扩散元素浓度的影响	(308)
10.5.7 第三元素(或杂质)的影响	(308)
10.6 反应扩散.....	(309)
10.6.1 反应扩散的概念	(309)
10.6.2 反应扩散的速率	(310)
10.7 金属材料中扩散问题的几个实例.....	(310)
10.7.1 铸锭均匀化	(310)
10.7.2 渗碳	(311)
10.7.3 金属表面氧化	(312)
10.7.4 金属的粘接	(314)
习 题.....	(316)
11 合金成分、组织设计的初步概念.....	(317)
11.1 合金成分选择与设计.....	(317)
11.1.1 结构材料的力学性能与成分、组织的关系	(317)
11.1.2 功能材料的成分与性能之间关系的实例	(324)
11.2 加工热处理工艺与合金组织性能的关系	(325)
11.2.1 加工热处理对合金组织、性能影响的实例	(325)
11.2.2 新技术、新工艺对新型材料发展的促进	(327)
参考文献.....	(331)

绪 论

在人类历史发展的进程中,“材料”一直占有十分重要的地位。历史学家曾用材料来划分时代,如石器时代、陶器时代、青铜时代、铁器时代。这些都是以材料作为人类进步的标志,作为历史发展的里程碑。到了科学技术十分发达的今天,材料也仍然是现代文明的一个重要标志,可以说,现在没有一个工业技术部门不牵涉到材料,当今高新技术的发展也必须要有新型材料作为物质基础。例如没有半导体材料的工业化生产,便不可能有目前的计算机技术;没有现代耐高温、高比强的结构材料,便没有今天的宇航工业;没有低损耗的光导纤维,便不可能实现光信息的长距离传输,也就没有今天的光通讯。因此,材料、能源、信息被誉为现代文明的三大支柱。

材料的种类繁多,目前一般将材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料,以及它们的复合材料几大类。按用途分类,又可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用其力学性质,要求在使用条件下能承受一定的载荷,例如制造飞机的铝合金、钛合金、高强度钢等;功能材料是指通过光、电、磁、声等特性而完成特定功能的材料,如半导体材料、磁性材料、激光材料、储氢材料等。

在这些材料中,金属材料已有几千年的历史,我国是世界上最早制造、使用金属材料的国家之一,对许多文物的分析研究表明,早在三千多年前我国铜合金、铸铁、钢等金属材料的制造技术,已达到惊人的水平。例如对辽阳三道壕出土的西汉宝剑进行金相分析,其显微组织和近代淬火钢的组织几乎没有多大区别。

近一百多年来,人们对金属材料的生产和研究已取得了巨大成就,已能制造适应各工业部门发展所需的各种各样性能的结构材料和功能材料,积累了大量的经验资料,建立和发展了金属材料的许多基本理论。人们在实践中发现,材料的性能是与它们的化学成分和生产工艺条件有关,因为不同成分和生产工艺的金属材料,其内部组织(结构)是不同的,故其性能就会不同。例如我们很熟悉的碳钢,它的力学性能主要取决于它的主要化学成分,即碳含量的高低,碳含量增加其强度和硬度提高,塑性降低,这是由于合金成分的变化,其组织也随之发生变化之故(详见第3章)。表0-1为成分不同的碳钢在正火状态下的力学性能。

表 0-1 不同成分碳钢的力学性能(正火态)

牌 号	碳含量 $w_t^{\text{①}}$ (质量分数)	σ_b/MPa	δ	HB (HRC)
25	0.0025	451	24%	170
35	0.0035	519	21%	180
45	0.0045	608	17%	229
60	0.0060	705	12%	225
T8	0.0080	—	—	295 (31.7)

①根据 GB3101.8—93,化学成分采用质量分数 w 及摩尔分数 x 表示,过去使用的%(wt)及%(at)相应改变。10%(wt)相当于质量分数为0.1或10%,10%(at)相当于摩尔分数为0.1或10%。

同一成分的钢，如果加工热处理工艺不同，其性能变化也很大。例如 T8 高碳钢，其正火状态下的性能如表 0-1 所示。但淬火状态的硬度提高到 HRC62 以上，延伸率趋近于零。这两种不同工艺状态的显微组织（结构）差别也很大。由此可知，通过控制碳钢的成分和加工热处理工艺，可以获得不同性能的材料。最普通的切削工具如车刀、锯片等可以用淬火状态的 T8、T10 高碳钢制作，它的硬度很高，可以切削其他较软的金属；而制作罐头盒的软铁皮用的则是退火状态的低碳钢。

以上只是说明金属材料的性能和它的化学成分、加工工艺及组织（结构）之间关系的一个简单例子。人们对生产实践和科学实验中所积累的大量资料，经过分析、总结和系统化，并进一步验证提高，逐步建立和发展了一门独立的学科——金属学（或称物理冶金学），它的任务就是：研究金属与合金的化学成分、加工工艺及微观组织（结构）与性能之间的关系，并从这些关系中总结、概括为基本规律和基本理论；再用这些基本理论指导金属材料的生产和研究，以改进和提高金属材料的性能，创造出新合金。

物理冶金学属于工程技术科学，它和生产实践息息相关，它所研究的许多问题都是 from 生产实践中提出来的。例如金属材料的一个主要用途是用作结构材料，因此在金属材料的性能研究中，强度和塑性就成为人们最关心、最突出的问题，从而逐步建立了有关金属强化和变形的机制和理论；为了发展航空用耐高温材料，就推动了金属的高温强度、高温氧化及扩散的研究，建立了相应的理论。反过来，把这些成果应用到金属材料的生产和研究中去，发挥指导作用，又促进了生产和科研的发展。如金属强化机理的研究发展，不仅找出了强化金属的新途径，也改进了传统的金属强化工艺，提高了强化效果。通过实践—理论—实践的多次循环，日益加深了人们对自然规律的认识，促使金属学基本理论的逐步完善与深化。

物理冶金学是以固体物理、固体化学、晶体学、热力学等为基础，并结合冶金学来探讨金属材料的内部规律。所以金属学的进展和这些学科的成就和进展，特别是与物理学的实验技术的进展密切相关，例如 X 射线衍射技术、电子显微镜薄膜透射技术、电子探针微区分析技术、扫描电子显微技术以及俄歇电子谱仪的应用等，都促进了金属学的发展，为人们对金属材料的研究开辟了广阔的天地，并提高到一个崭新的水平。因此，我们从事金属材料的研究，除了必须掌握金属学的基本原理之外，对于这些先进的检测技术的原理和方法也应有所了解，并将设专门的课程学习。

物理冶金学作为一门独立的学科，虽然有了一百多年历史，但它的体系还不象物理学、化学那样严密、完整、有许多理论和规律还停留在定性或半定量阶段，有的则只能在某种特定条件下才适用。例如形成置换式固溶体时，决定溶解度大小的因素，就只是半定量的经验规律，而且只有部分合金才较准确符合。还有一些问题的本质至今尚不十分清楚，同时有多种理论或观点，例如再结晶问题已经研究很久了，而再结晶形核机制却长期存在不同观点，Cottrell 等提出通过亚晶粒长大成核理论的设想，已为大量实验观察所证实，但亚晶粒究竟是如何长大的，问题还没有完全解决，目前还有不同的观点；又例如加工硬化现象是很早就被人们注意的重要问题，众多的学者对此进行了大量的研究，取得了重要的成果，但加工硬化的机制，至今仍然了解不够，加工硬化理论还在发展中，目前已发表的加工硬化理论不下十余种，它们都能解释某些实验现象，但哪一种观点是最全面的，现在还难以肯定。

经过一百多年来众多学者的努力,积累了丰富的知识,也留下了很多没有回答的问题。我们学习物理冶金学,要吸收、继承前人留下的宝贵知识财富,也要用发展的、辩证的观点去认识事物,努力探求新的规律,为发展物理冶金学作出贡献。

另一方面,金属和非金属材料之间存在许多相似之处,在物理冶金学的许多基本理论和规律,如相变、相图、断裂等理论,界面结构、形变再结晶规律等,同样也适用于无机非金属材料。例如金属与合金的马氏体相变理论也可以应用于发生马氏体相变的无机化合物(如 BaTiO_3 等),在合金发生马氏体相变时,会吸收能量使应力集中松弛而增加塑性,而含 ZrO_2 的陶瓷材料中利用 ZrO_2 的马氏体相变也可以阻碍裂纹的扩展而提高韧性。又如金属材料的晶粒大小和屈服强度之间存在一定联系,即符合著名的 Hall-Pitch 公式(详见第 8 章),而 Al_2O_3 (刚玉)棒的表面晶粒大小和弯曲强度之间也存在类似的关系。形状记忆效应是在 TiNi 合金和铜合金中发现的,80 年代末日本报导了某些树脂也具有形状记忆效应,并开展了树脂的组成、结构、性能之间的关系及其应用的研究。可见,金属材料、无机非金属材料、高分子材料具有共性,一些基础理论和规律可以互相借鉴。到 60 年代,正式提出了一门研究材料共性规律的学科——材料科学与工程学。材料科学与工程学是研究关于材料成分、结构、工艺和它们的性能之间有关知识的开发和应用的科学。当然,金属材料、无机非金属材料(陶瓷材料)、高分子材料都各自具有自己不同的特性,都有其独特的有关成分、组织结构和性质之间的变化规律,因此目前物理冶金学、陶瓷学、高分子物理学都还是三门独立的学科,但是它们之间相互交叉渗透的趋势越来越明显,有的材料的分类也逐渐地变得不明确,如陶瓷材料和高分子材料常常包括在电子材料中,至于复合材料则更是跨越了材料的所有部门。因此,金属学虽然主要是讨论金属材料的问题,但作为 21 世纪的材料学科的科技工作者,一方面要注意学会具体问题具体分析,同时也不要把自己的思维局限在一个狭小的范围内,应开拓思路,扩大知识领域,把自己培养成既有一定专长又了解各种材料的专家,才能适应材料学科不断发展的新形势,满足四化建设的需要。

当前,世界新技术革命正风起云涌,信息技术、生物技术、新能源技术、海洋开发技术、新材料技术等技术群体都在飞速发展,这必将刺激和推动材料科学(包括物理冶金学)的迅速发展,特别是近代物理理论和实验技术以及计算机技术正直接应用到物理冶金学理论中来,物理冶金学已开始由描述性(或解释性)的学科向预见性和定量计算性的学科发展。利用统计物理、固体物理和计算技术探讨电子状态和晶体结构的关系,以设计合金成分、预见合金的性能已为时不远了。尽管本书是作为大学生入门的物理冶金学课本,讨论微观结构的层次,只涉及到原子的排布规律,即晶体结构、晶体缺陷这一层次,但这是必要的入门,是最起码的基础知识。科学是发展的,学习也是无止境的,今后根据工作需要还必须不断更新和充实自己的知识领域。当然,一个人的知识和能力是有限的,材料科学的发展,需要众多研究人员的共同努力,这有待冶金学家、物理学家、化学家、数学家们携手合作,共同探求。因此,培养自己的群体意识和合作精神,也是一个要取得成就的材料科学工作者必备的素质。

长江后浪推前浪。我们相信,现在的大学生,跨世纪的材料科学工作者,必将为发展我国的材料科学事业,创造出辉煌的成绩。

1 金属的晶体结构

1.1 金属的通性与金属键

在我们日常接触的各种固体材料中，有的是金属，有的是非金属。通常多数金属都具有金属光泽、高的导电和导热性、较好的机械强度和塑性，但不能单凭这些特性区分金属与非金属。石墨是非金属，它也具有相当好的导电能力；锑是金属，但它的塑性极差。仔细研究发现，金属最有代表性的特性是具有正的电阻温度系数，而非金属却具有负的电阻温度系数。

金属的这些特性，只有在大量金属原子结合成大块集体后才显示出来，而且与金属间原子结合时的结合键有关。一般认为，大块金属中的原子是离子化了的，即金属的外层价电子从各个原子中脱离出来，为整个金属所共有，在整个金属中运动形成“电子气”如图1-1所示。金属正离子与自由电子之间的相互作用，使大量金属原子结合起来形成大块金属。这种正离子与自由电子静电引力的结合称为“金属键”。当然，金属中也可能有部分中性原子，金属的键合是包括中性原子间的共价键及金属键的复杂结合。有些亚金属还可能是以共价键结合为主，有的还有部分分子键结合。越是以金属键结合为主的，金属特性表现就越明显。

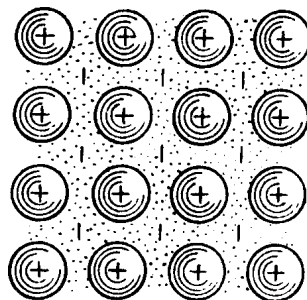


图 1-1 金属键模型

另外，金属的特性还与金属原子（离子）在空间的排列规律，即晶体结构有关。例如常见的金属锡就有“白锡”与“灰锡”之分，白锡（ β -Sn）具有正方晶体结构，有较好的塑性；而灰锡（ α -Sn）为金刚石型结构，性脆。当白锡转变成灰锡时，将发生约 27% 的体积膨胀，使之脆裂成灰色粉末，这就是通常所谓的“锡疫”。由此可见，要了解金属的特性，必须掌握其晶体结构情况。金属的晶体结构与金属的许多性能有直接关系，已成为研究金属材料的一个重要方面，许多问题的认识和解决都与它密切相关。

1.2 晶体学基础

1.2.1 晶体与非晶体

固体物质按其原子（或分子、离子）的聚集状态，分为“晶体”与“非晶体”两大类。一般晶体生长时满足一定的条件，它会形成具有规则外形的晶体，例如天然金刚石、结晶盐、水晶等，而非晶体则不具有规则外形。但是如果晶体形成时条件不具备，它的外形也会变得不规则。因此，不能根据物质的外形是否规则来区分晶体与非晶体。它们的本质区别是：晶体中的原子（或离子、分子）在三维空间作有规则的周期性重复排列，而非晶体则否。应用 X 射线衍射、电子衍射等实验方法可以确定出各种晶体中原子排列的具体方式，即其晶体结构的类型、原子间距以及其他许多重要参数。

液体原子也是处于紧密聚集状态的，但它不存在长程的有规则的周期性排列。固态的非晶体的原子排列类似液体，故可以说，固态非晶体是一种过冷态的液体，只是其若干物

理性质不同于普通液体，玻璃就是一个典型的例子。非晶体往往被称为玻璃体。非晶体从液态到固态的转变是逐渐过渡的，没有固定的凝固点（或熔点），而晶体由液态到固态之间的转变则存在一个固定的凝固点和熔点。另外，晶体（单晶体）是各向异性的，而非晶体则是各向同性的。晶体的各向异性是因为其原子排列规律在不同方向存在差异而造成的。表 1-1 列举了几种金属单晶体的机械性能的各向异性数据。

表 1-1 几种金属单晶体的异向性

金属类别	弹性模量 MPa		抗拉强度, MPa		延伸率	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
Cu	191000	66700	346	128	55%	16%
Al	293000	125000	225	128	30%	20%
Mg	50600	24900	840	284	220%	20%

非晶体在一定条件下可以转化为晶体。例如玻璃经高温长时间加热后能形成晶态玻璃。通常的晶体物质如果将它从液态快速冷却下来，也可能得到非晶体。金属由于其晶体结构比较简单，容易结晶成晶体，只有在极快的冷却速度下才可能获得某些非晶态的金属与合金。

1.2.2 空间点阵和晶胞

在对晶体中的原子（或离子、分子）的排列情况进行研究时，为了方便，常常将构成晶体的实际质点抽象成纯粹的几何点，称之为“阵点”或“结点”。这些周围环境完全相同的阵点在二维空间呈周期性的重复排列起来就构成晶体的“空间点阵”。为了形象描述空间点阵的几何图形，作许多平行的直线把阵点连接起来，就构成了一个三维的几何格架，如图 1-2 所示，也可以称这种三维格架为空间点阵。

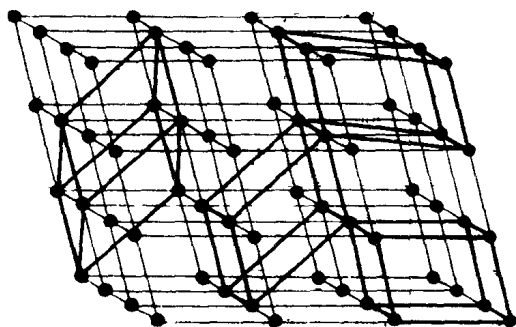


图 1-2 空间点阵及晶胞的不同取法

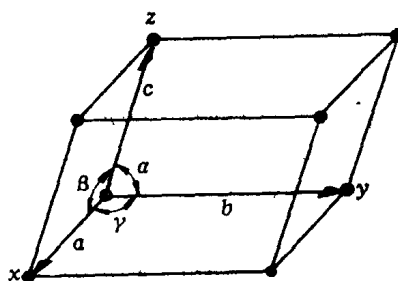


图 1-3 晶胞及其六个参数

从图 1-2 可以看出，研究空间点阵结构特点，只需要在其中选取一个小的六面体基本单元作代表就可以了。这种能代表空间点阵结构特点的单元六面体称为“晶胞”，将晶胞作三维重复堆砌就构成了空间点阵。但是从图 1-2 中也看到，同一点阵中可以划出多种不同形状的六面体作晶胞。究竟怎样选取晶胞才是正确的呢？应使所选取的晶胞能反映该点阵的对称性，在此前提下取尽可能多的直角，并具有最小体积。

为了描述晶胞的形状和大小，可通过晶胞角上的一阵点作为坐标原点，相交于原点的

三个棱边为 x 、 y 、 z 三个坐标轴（称为晶轴），则此晶胞可由三个棱边的边长 a 、 b 、 c 及晶轴之间的夹角 α 、 β 、 γ 这六个参数完全表达出来，如图 1-3 所示。这六个参数称为“晶格常数”（或“点阵常数”）。实际上，采用三个点阵矢量 a 、 b 、 c 来描述晶胞也很方便，这三个点阵矢量也完全可以确定晶胞的形状和大小，且确定了借这些矢量的平移而形成的整个点阵。也就是说只要选定一个阵点为原点，以这三个矢量作平移，就可以确定空间点阵中任何一个阵点的位置。

$$r_{uvw} = ua + vb + wc \quad (1-1)$$

式中 r_{uvw} 是从原点到某一阵点的矢量， u 、 v 、 w 分别表示沿三个点阵矢量的平移量，亦即该点的坐标。

1.2.3 七大晶系和十四种空间点阵

根据六个点阵参数的相互关系，即只考虑晶胞棱边长 a 、 b 、 c 是否相等，晶轴间夹角 α 、 β 、 γ 是否相等以及是否是直角，可以将空间点阵归属为 7 种类型，称为七大晶系。所有晶体都可归纳在这七个晶系中。

根据阵点的周围环境相同的要求，除了晶胞的每个顶角上放一个阵点之外，还可以在晶胞的其他位置上安放阵点，例如在简单立方点阵的每个晶胞中心放置一个阵点就构成体心立方点阵，或在每个表面中心各放置一个阵点就构成面心立方点阵。体心立方和面心立方中每个阵点都能满足具有相同环境的要求。法国晶体学家布拉菲（A. Bravais）曾用数学方法证明，只可能形成 14 种点阵，后来就把这 14 种点阵称为“布拉菲点阵”。七大晶系与 14 种布拉菲点阵列于表 1-2。14 种晶胞示于图 1-4。

表 1-2 7 种晶系和 14 种布拉菲点阵

晶 系	晶轴长度和夹角	布拉菲点阵和符号	阵 点 坐 标
立方系	$a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	简单 (P)	000
		体心 (I)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$
		面心 (F)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$
正方系 (四方)	$a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	简单 (P)	000
		体心 (I)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$
正交系 (斜方)	$a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	简单 (P)	000
		体心 (I)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$
		底心 (C)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$
		面心 (F)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$
菱方系 (三角)	$a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	简单 (R)	000
六方系	$a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	简单 (P)	000
单斜系	$a \neq b \neq c, \alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$	简单 (P)	000
		底心 (C)	000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$
三斜系	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	简单 (P)	000