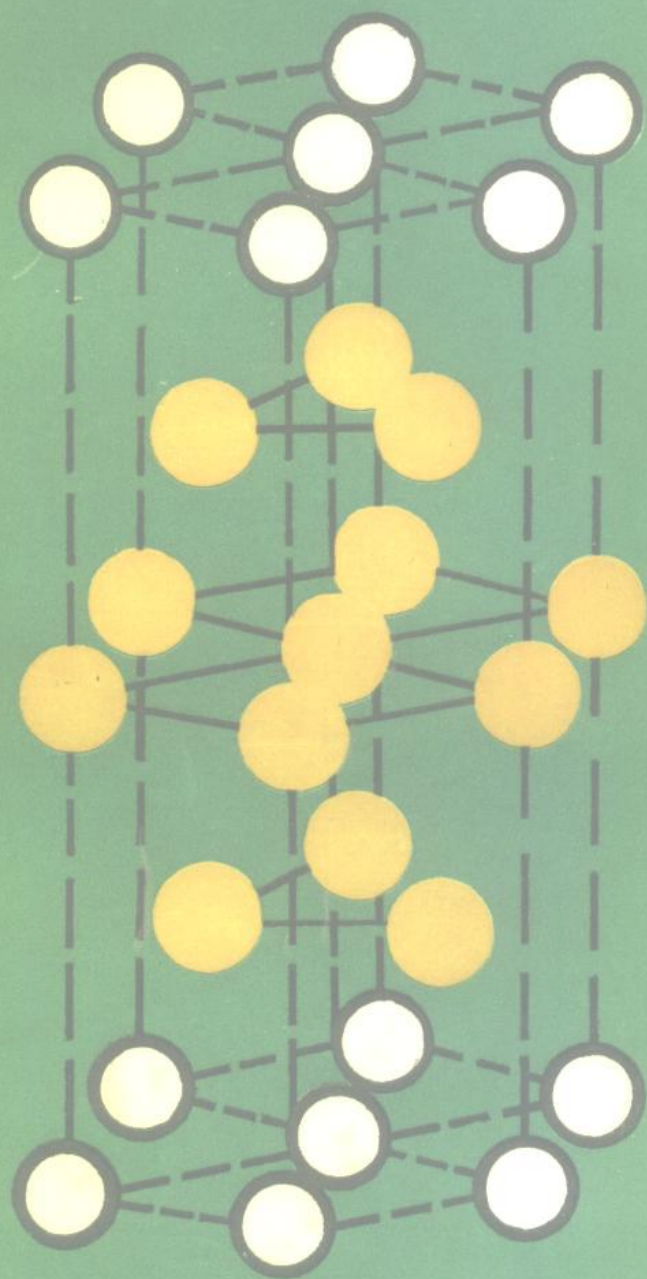


JINSHUXUE YU RECHULI

金属学与热处理

主编 刘毅 副主编 宏永峰 等



冶金工业出版社

TG
L76

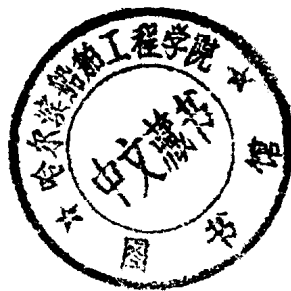
190624

金属学与热处理

主 编 刘 毅

副主编 宏永峰 张成兴
段晓军 鲁烈琴

主 审 兰州大学 王雅儒
培黎石油学校 马文惠



北 京
冶 金 工 业 出 版 社

1995

内容简介

本书是根据 1995 年全国中等专业学校《金属学与热处理》教学大纲编写,供学校招收高中毕业生使用的教材。

本书系统地介绍了金属学与热处理的基本理论和工艺。全书共分十二章,内容包括:金属、合金的结构与结晶;相图;金属的塑性变形与再结晶;钢的热处理原理与工艺;合金钢、铸铁;有色金属及合金等。

本书可作为冶金,机械,石油化工,矿山,电力等专业的中专和大专教材,也可作为职工教育和热处理技术工作者的参考书。

DW40/32 12

图书在版编目(CIP)数据

金属学与热处理/刘毅主编. —北京:冶金工业出版社,1996.8(重印)

ISBN 7—5024—1811—3

I. 金… II. 刘… III. ①金属学②热处理 IV. ①TG1②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 22226 号



出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

河北固安印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1996 年 1 月第 1 版·1996 年 8 月第 2 次印刷

787mm×1092mm 1/16;19.5 印张;475 千字;304 页;2001~3600 册

32.00 元

前 言

本书是根据国家教育委员会 1995 年制订的全国中等专业学校教育计划和教学大纲编写的,供冶金、机械、机电、铸造、焊接、热处理、汽修等专业教学使用。各专业可根据教学要求选择适合本专业的内容进行重点教学。

为了适应教学改革的要求和中专教学的实际情况及五天工作制的新教时,在编写本书时,力求降低理论知识的深度,加强理论联系实际的应用,并重点培养学生分析和解决生产实际问题的能力。

为了适应当前科学技术的发展,便于学生毕业后进行具体的生产工作,编写时参阅了目前国内外较新的资料,补充了当前金属科研的新内容,并对个别理论和概念作了新的系统的解释,为金属材料工作者提供了实用的学习参考资料。

另外,为了便于自学和课堂教学,本书采用先总述后分述,先提出本章节所要解决的问题,然后再分述的方法,并对章节重点难点内容进行了系统条理化归纳,有利于学员对本章节内容的深入掌握。

本书附录比较全面地概括了有关金属学与热处理的主要常用知识,可作为资料在实际工作中查阅。

本书第一、十、十一章由培黎石油学校宏永锋编写,第七、八、九章由甘肃冶金工业学校张成兴编写,第五、六、十二章由段晓军编写,第二、三、四章及附录由鲁烈琴编写,全书由刘毅撰写,鲁烈琴校对。

本书由刘毅主编,兰州大学王雅儒和培黎石油学校马文惠主审。在编写过程中得到了甘肃冶金工业学校杨庆福和培黎石油学校柳洪才等同志的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中缺点错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	第一节 合金的基本概念	40
第一章 金属的晶体结构与机械性能	3	第二节 合金的固态相结构	40
第一节 金属的概述	3	一、固溶体	41
一、金属的定义	3	二、金属化合物	43
二、金属的特性	4	第三节 二元合金相图的测定方法	45
三、金属原子的结构特点及其金属原子之间的结合方式	4	一、二元合金相图的表示方法	45
第二节 金属的晶体结构	5	二、二元合金相图的测定方法	46
一、原子及离子半径	5	第四节 相律和杠杆定律	47
二、晶体的基本概念	6	一、相律	47
三、典型的金属晶体结构	8	二、杠杆定律	49
四、立方晶格的晶向指数和晶面指数	16	第五节 匀晶相图	50
五、六方晶格的晶向指数和晶面指数	17	一、相图分析	50
六、晶体的各向异性	19	二、典型合金的平衡结晶及其组织	50
七、金属的同素异构转变	19	三、不平衡结晶及其组织	51
第三节 金属的实际晶体结构	19	四、枝晶偏析	52
一、点缺陷	19	五、成分过冷与晶体长大	53
二、线缺陷	20	六、合金的性能与成分的关系	55
三、面缺陷	21	第六节 共晶相图	56
第四节 金属的机械性能	23	一、相图分析	56
一、强度指标	23	二、典型合金的平衡结晶及其组织	57
二、塑性指标	25	三、不平衡结晶及其组织	60
三、韧性指标	27	四、比重偏析与区域偏析	60
四、硬度指标	28	五、合金的性能与成分之间的关系	61
习题	32	第七节 包晶相图	62
第二章 纯金属的结晶	33	一、相图分析	62
第一节 金属结晶的概念	33	二、典型合金的平衡结晶及其组织	62
一、结晶的条件	33	三、不平衡结晶	64
二、过冷度	33	第八节 具有金属化合物的相图	65
第二节 纯金属的结晶过程	34	一、形成稳定化合物的相图	65
一、形核	34	二、形成不稳定化合物的相图	65
二、晶核长大	34	第九节 具有固态相变的相图	66
第三节 晶体的晶粒度	34	一、具有同素异晶转变的相图	66
一、晶粒度及标准晶粒度	34	二、具有共析转变的相图	67
二、决定晶粒度的因素	38	三、具有包析转变的相图	67
三、控制晶粒度的方法	38	习题	68
四、晶粒度对金属性能的影响	39	第四章 铁碳合金相图	69
习题	39	第一节 铁碳合金的组元及基本相	69
第三章 二元合金的相结构与结晶	40	一、纯铁	69
		二、铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体及莱氏体	

.....	69	一、Sn—Pb—Bi 合金系的投影图	94
第二节 Fe—Fe ₃ C 相图分析	72	二、Fe—C—Si 三元系的变温截面	95
一、状态图中的特性点	73	习题	97
二、状态图中的特性线	73	第六章 金属的塑性变形与再结晶	98
三、状态图中的相区	74	第一节 金属铸锭和焊缝的组织	98
第三节 典型铁碳合金的结晶过程及其组织	74	一、金属铸锭的组织	98
一、含碳 0.01% 的工业纯铁	75	二、焊缝的组织	99
二、共析钢的平衡结晶过程	76	第二节 金属的弹性变形	99
三、亚共析钢	76	一、晶格受正应力作用时的弹性变形	100
四、过共析钢	77	二、晶格受切应力作用时的弹性变形	100
五、共晶白口铁	78	第三节 金属的塑性变形	101
六、亚共晶白口铁	79	一、单晶体的塑性变形	101
七、过共晶白口铁	79	二、多晶体的塑性变形	106
第四节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	79	三、合金的塑性变形	106
一、含碳量对平衡组织的影响	79	四、塑性变形对组织和性能的影响	107
二、含碳量对机械性能的影响	80	第四节 回复与再结晶	109
三、含碳量对工艺性能的影响	81	一、回复	109
第五节 铁碳合金相图的应用	81	二、再结晶	111
一、铁碳合金相图的应用	81	三、晶粒长大	112
二、应用铁碳合金相图应注意的问题	82	四、再结晶的温度	113
习题	82	五、再结晶后的晶粒度	113
第五章 三元合金相图	83	第五节 金属与合金的热加工	115
第一节 三元相图的表示方法	83	一、热变形加工与冷变形加工的本质区别	115
一、成分三角形	83	二、热变形加工对组织和性能的影响	115
二、两种特殊直线	84	习题	116
第二节 三元系中的直线法则、杠杆定律及重心法则	84	第七章 钢的热处理原理	117
一、直线法则和杠杆定律	85	第一节 概述	117
二、重心法则	85	一、热处理的实质、主要目的和原理	117
第三节 三元匀晶相图	86	二、热处理的分类及工艺曲线	117
一、相图分析	86	三、钢的临界温度	117
二、等温截面	86	第二节 固态金属中原子扩散的基本概念	118
三、固溶体结晶过程	88	一、固态金属中原子扩散的实质	118
四、变温截面	88	二、固定金属中原子扩散的机制	119
五、投影图	88	第三节 钢在加热时的转变	120
第四节 三元共晶相图	89	一、钢的奥氏体化过程	120
一、相图分析	89	二、影响奥氏体化的因素	122
二、等温截面	91	三、奥氏体晶粒的长大	124
三、变温截面	92	第四节 钢在冷却时的转变	126
四、投影图	93	一、冷却条件对钢性能的影响	126
第五节 实际三元合金相图举例	94	二、过冷奥氏体的等温转变	127
		三、过冷奥氏体在连续冷却时的转变	138
		四、过冷奥氏体转变图的应用	140

习题	141	五、蠕墨铸铁	226
第八章 钢的热处理工艺	142	第三节 铸铁的石墨化及影响因素	226
第一节 钢的退火与正火	142	一、铸铁的石墨化过程	226
一、钢的退火	142	二、影响石墨化的因素	227
二、钢的正火	146	第四节 灰口铸铁	228
三、正火与退火的选择	148	一、灰口铸铁的牌号和化学成分	228
第二节 钢的淬火与回火	148	二、灰口铸铁的组织 and 性能及用途	228
一、钢的淬火	148	三、灰口铸铁的热处理	229
二、钢的回火	161	第五节 球墨铸铁	231
第三节 钢的表面热处理	164	第六节 蠕墨铸铁	234
一、表面淬火	164	一、蠕墨铸铁的组织 and 性能	234
二、表面化学热处理	166	二、蠕墨铸铁的牌号及用途	234
第四节 钢的变形热处理	176	第七节 可锻铸铁	234
一、高温变形热处理	176	第八节 特殊性能铸铁简介	235
二、低温变形热处理	177	习题	236
第五节 新的热处理工艺简介	178	第十一章 有色金属及其合金	237
一、在保护气氛中的热处理	178	第一节 有色金属及其合金的分类、编号和用途	237
二、真空热处理	178	一、有色金属的分类及编号	237
三、强化热处理	179	二、有色合金的分类及编号	238
四、强化表面的新热处理	179	三、有色金属及合金的用途	238
第六节 热处理与其他冷热加工工艺的关系	180	第二节 铝及其合金	239
习题	180	一、工业纯铝	239
第九章 工业用钢	181	二、铝合金及热处理	240
第一节 碳素钢	181	第三节 铜及其合金	244
一、碳素钢中的常存杂质	181	一、工业纯铜(紫铜)	244
二、碳素钢的分类	183	二、铜合金	244
三、碳素钢的编号和用途	183	第四节 钛及其合金	250
第二节 合金钢	192	一、工业纯钛	250
一、合金元素在钢中的作用	192	二、钛合金	250
二、合金钢的分类	197	第五节 滑动轴承合金	252
三、合金钢的编号	198	一、滑动轴承的工作条件及对性能的要求	252
四、合金结构钢	199	二、轴承合金的组织	252
五、合金工具钢	211	三、常用轴承合金	253
六、特殊性能钢	217	第六节 硬质合金简介	256
习题	224	习题	258
第十章 铸铁	225	第十二章 典型零件选材与热处理及专业用钢简介	259
第一节 概述	225	第一节 如何选择材料	259
第二节 铸铁的分类	225	第二节 如何选择和安排热处理工艺	259
一、白口铸铁	225	一、热处理方案的选择	259
二、灰口铸铁	225		
三、可锻铸铁	225		
四、球墨铸铁	226		

二、热处理工艺的安排	259	第四节 专业用钢简介	264
第三节 典型零件选材及热处理技术条件标注举例	260	附录一 金属学与热处理实验指导书	284
一、曲轴	260	附录二 国外钢的牌号编法简介及国内外常用钢 牌号对照表	293
二、连杆	261	附录三 洛氏硬度与其它硬度和强度换算表	299
三、活塞销	261	附录四 各种热处理工艺代号及技术条件的标注 方法	303
四、汽车后半轴	261	参考文献	304
五、汽车齿轮	262		
六、机床主轴	263		

绪 论

金属材料是以金属元素或以金属元素为主而构成的并具有一般金属特性的材料。它是现代工业、农业、国防及科学技术的重要物质基础,各种机器和设备都需要使用大量的金属材料。据统计,目前机械工业部门所用的材料中,金属材料占90%以上。冶金部门所占比例则会更大。石油、化工、水利、电力、电子、热工、国防以及我们的日常生活到处可见金属材料。

那么,金属材料为什么能够被广泛应用呢?这是由于金属材料不但具有良好的使用性能(即机械、物理和化学性能),能满足各种设计和使用要求,而且还由于它具有良好的工艺性能,易采用各种加工方法制成各种形状的零件和工具。不但如此,若采用不同的热处理,还可以改变金属表面的化学成分和内部的组织结构,以满足各种不同的性能使用要求。尤其在机械制造业中,正确应用热处理方法,能够挖掘材料的潜力,提高产品质量,减轻自重,降低成本,延长使用寿命。因而热处理在机械制造业中占有十分重要的地位。

人类所用的各种材料的发现和发明,大大推动了社会生产力的发展,因此材料成了文明社会进步的重要标志,根据人类使用材料的进展,历史学家把人类社会的发展阶段分为石器时代、铜器时代和铁器时代。

公元前二千五百年进入青铜器时代,是人类使用金属材料的第一个里程碑。但是只有在进入了铁器时代后,人们把铁制成兵器和工具,经济和生活方式才发生了巨大变化,人类社会才步入了称得起文明的时代。

人类用金属制造生产工具、生活用具,已有悠久的历史。我中华民族自古以来在金属材料科学的发展历史长河中,就有过重大贡献。

我国是世界文明发展最早的国家之一,远在距今四千至三千年之间的黄帝和尧舜时期已知用铜,到夏朝就掌握了青铜的冶铸技术,殷商已是青铜的末期。例如夏代文化遗址发现的青铜渔、狩猎工具及饮酒器;周朝遗留下来的司母戊大鼎、四羊尊和龙虎尊等;春秋战国时代制造的“干将”、“莫邪”等著名宝剑,都充分证明了我国人民的聪明才智和文化发展。在周代初期,不但青铜的冶铸技术已经相当发达,而且已知用铁制作工具,到战国时期,冶铸技术又有显著发展,所谓白口铁、展性铸铁、麻口铁也相继出现。随后楚、韩两国首先发明了炼钢技术,并开始采用退火、淬火、正火和渗碳热处理方法,改善和提高钢和铸铁的性能。秦汉以后我国的冶铸和热处理技术达到了很高的水平,这比欧洲等国早2000多年。直到明朝,我国的金属冶炼技术和其它科学领域一样,在世界上还一直处于遥遥领先的地位。由此可看出,古代我国劳动人民已对人类社会的文明和进步做出了辉煌的成就和贡献。只是近百年来,由于封建统治和帝国主义的侵略和压迫,阻碍了我国各种科学和技术的发展,使我国的科学和技术在解放前处于极为落后的状态。

解放以后,我国在中国共产党的领导下,在生产技术、科学研究等方面都取得了很大成就。尤其是在金属材料的生产和科研工作中,建立了符合我国资源的合金钢系统,研制出了具有世界水平的稀土镁球墨铸铁,许多热处理新工艺、新技术正在应用和逐步推广,各种有色金属和特殊性能合金在质量和品种上逐步满足了国防和科学技术的需要。

本课程主要包括金属学、热处理和金属材料三大部分,是一门从生产实践中发展起来,而又直接为生产实践服务的技术科学。它具有丰富的理论性和实践性,名词概念多、又比较

抽象,因此入门比较难。但只要弄清楚重要的名词、概念和基本理论,按成分、工艺、组织和性能这一规律进行学习和记忆,认真去完成作业和实验就不难掌握。

金属学是研究金属材料的成分、组织结构和性能之间关系的科学。通过分析,将会看到金属的性能是由其内部的化学成分和组织结构所决定的。热处理是通过改变金属材料的组织或改变其表面的化学成分、使金属和合金的性能满足生产需要和使用要求的一种加工工艺。另外,本书还介绍了常用的一些有色金属及其合金的组织、性能及热处理方法。

学习本课程的主要目的是:使学生掌握金属的晶体结构和常用的合金相图,使同学们能合理的选用金属材料,正确地运用热处理的方法和工艺,为社会服务,为人类作贡献。

学习本课程的主要要求:

- (1)掌握金属晶体结构的基本知识,牢记金属内部的组织结构决定金属的宏观性能。
- (2)了解纯金属的结晶过程、金属的塑性变形和常用的有色金属及其合金,知道一些新型的金属材料。
- (3)掌握Fe—Fe₃C相图,学会合金相图的分析方法,明确Fe—Fe₃C相图是分析和研究钢铁材料的重要依据。
- (4)掌握钢的热处理原理和热处理工艺方法,并会利用简单的热处理工艺对典型工件进行正确的热处理作业。
- (5)明确工业生产中常用典型零件用钢及热处理方法。

第一章 金属的晶体结构与机械性能

金属材料内部的组织结构决定了它的性能。为了了解金属材料性能的本质,首先应该学习金属的内部情况,即金属的晶体结构。

第一节 金属的概述

一、金属的定义

(一) 金属在化学中的定义

广义地讲,金属是指这样一种元素,它与非金属元素发生化学反应时,能将其最外层的电子让给后者;狭义地讲,是指其氧化物或氢氧化合物具有碱性、与酸反应能形成盐的元素。例如,Fe 和 Cu 等就是金属。

在已发现的一百多种元素中,有五分之四是金属元素。常温下除汞为液体外,其余均为固体。在化学元素周期表中,如在硼和铍的位置划一条直线,则在此线左边的元素均为金属元素;如果在碳和氮的位置划一条直线,则在此线右边的元素均为非金属元素;在此二线之间的元素为类金属元素(半金属元素),如图 1-1 所示。作为金属工作者必须熟练掌握元素

化学元素周期表

金属																		非金属				
周期	IA	(A-主族 B-副族)																0				
1	1 H 氢	19K 钾																2 He 氦				
2	3 Li 锂	4 Be 铍	元素名称														5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
3	11 Na 钠	12 Mg 镁	II B	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VI	IB	I B	13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氩					
4	19 K 钾	20 Ca 钙	21 Sc 钪	22 Ti 钛	23 V 钒	24 Cr 铬	25 Mn 锰	26 Fe 铁	27 Co 钴	28 Ni 镍	29 Cu 铜	30 Zn 锌	31 Ga 镓	32 Ge 锗	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪				
5	37 Rb 铷	38 Sr 锶	39 Y 钇	40 Zr 锆	41 Nb 铌	42 Mo 钼	43 Tc 锝	44 Ru 钌	45 Rh 铑	46 Pd 钯	47 Ag 银	48 Cd 镉	49 In 铟	50 Sn 锡	51 Sb 锑	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙				
6	55 Cs 铯	56 Ba 钡	57-71 镧系元素	72 Hf 铪	73 Ta 钽	74 W 钨	75 Re 铼	76 Os 锇	77 Ir 铱	78 Pt 铂	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 铊	82 Pb 铅	83 Bi 铋	84 Po 钋	85 At 砹	86 Rn 氡				
7	87 Fr 钫	88 Ra 镭	89-103 锕系元素	104	105																	

57-71 镧系元素	57 La 镧	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 铈	68 Er 铒	69 Tm 铥	70 Yb 镱	71 Lu 镥
89-103 锕系元素	89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钚	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锿	99 Es 镄	100 Fm 镆	101 Md 镎	102 No 钆	103 Lr 铹

图 1-1 金属元素在周期表中的位置

周期表。因为根据周期表不仅可阐述某些物质的物理、化学性能,而且对发现新元素、创制新

型合金具有重要的启示作用和参考价值。

(二) 金属在工程中的定义

工程技术中所谓的金属,是指具有一定金属性能的物质。这类物质在固态时具有金属光泽和可锻性,具有良好的导电性和导热性,如铁及其合金等。

不过,由金属的定义虽然可以区别金属与非金属,但有时会遇到不少困难和例外。如锑、铈、锆都是金属,但锑不可锻,铈和锆的导电性也并不比其他非金属好。为了更好地区分金属与非金属,人们做了大量的工作发现,所有金属的电阻随温度升高而增大,非金属的电阻随温度升高而减小。即金属具有正电阻温度系数,非金属具有负电阻温度系数,如图 1-2 所示。

由此可见,根据电阻温度系数来区别金属与非金属比根据某些性能来定义金属要严格和准确得多。

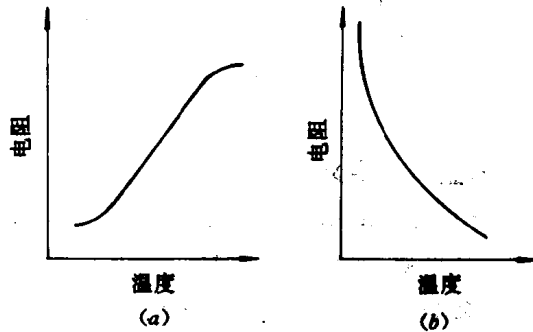


图 1-2 金属与非金属的电阻与温度之间的关系
a—金属; b—非金属

二、金属的特性

金属与其他物质相比,具有特殊的金属光泽和可锻性,不透明,并具有良好的导电性和导热性等特性。例如:纯铜呈玫瑰色,当表面形成氧化膜后又呈紫色,故又称为紫铜。它具有良好的导电性、导热性和抗磁性,因而广泛用于导电、导热和磁性仪器等。又如纯钛呈银白色,具有较高的热强性和优良的耐腐蚀能力,主要用于船舶、化工、海水淡化及医疗卫生等方面。

三、金属原子的结构特点及其金属原子之间的结合方式

(一) 金属原子的结构特点

分析元素周期表,可以发现金属元素的原子结构有以下两个特点:(1)金属原子最外层的电子数很少,一般只有 1 至 2 个,多也不超过 4 个;(2)其最外层的电子与核的结合力较弱,易形成自由电子。

(二) 金属原子之间的结合方式

由于金属原子的上述特点,使得金属晶体中的金属原子以金属键的方式结合在一起。那么,什么是金属键呢?当大量的金属原子聚集在一起构成金属晶体时,绝大多数金属原子会失去其最外层的价电子而变为金属正离子。脱离金属原子的价电子自由运动,为所有金属原子所共有,而成为共有自由电子,形成“电子气”。这样金属离子沉浸在电子气中,正离子和“电子气”之间产生强烈的静电引力,使全部原子在三维空间按一定的方式结合起来,形成金属晶体,把这种结合方式称为金属键。

利用金属键可以解释金属的一些特性。

(1)金属为什么具有良好的导电导热性?这正是由于金属中存在有大量的自由电子,在外加电场的作用下,会定向运动;当有温差时,电子运动又会传递能量,所以,金属具有良好的导电导热性能。不过,金属与非金属的导热性不象导电性那样悬殊。这是因为除电子外,原子热振动在导热时也起主要作用,而金属与非金属中都有着这种热振动存在。

(2) 金属为什么具有正的电阻温度系数?这是由于随温度升高,金属正离子振动加剧,阻碍了自由电子的运动,从而使电阻升高。

(3) 金属材料为什么一般具有良好的塑性?这是由于金属键无方向性和饱和性,在受力变形时金属键不易破坏,在断裂之前,可承受较大变形。

(4) 金属为什么不透明,又具有特殊的金属光泽?这是由于金属中自由电子能吸收可见光,所以金属是不透明的。而吸收了能量的电子在晶体中处于高能量的不稳定状态,它要跃回到稳定的低能量状态,这样入射的光波又几乎全部被反射出来,就成为金属光泽。而且,由于不同的金属对不同波长的光具有不同的反射能力,因而在白光下不同的金属具有不同的特殊光泽。

(5) 什么是超导现象?就是金属材料当温度降低到某一值时,电阻急剧减小的现象。目前,我国在超导研究方面处于国际领先地位。超导材料在发电机和精密仪器生产中已有重要应用。相信,不久关于超导现象的研究和应用将会日益广泛和深入。

(三) 原子之间的相互作用

晶体中的原子(分子和离子)为什么能够结合成规则排列的稳定晶体呢?这就是由于电子—原子核形成的原子之间相互作用的结果。

当两个原子接近时,原子核不发生变化,只是原子的外层电子重新排列。这种作用本质上是静电作用,它包括吸引作用和排斥作用。其中吸引作用产生于异性电荷之间的库仑引力,是一种长程力,在比原子间距大得多的距离处,它就起作用了。而排斥力产生于同性电荷之间的库仑力和原子相互接近时轨道电子云相互重叠所引起的斥力,它是一种短程力,只有原子之间的距离在接近原子间距时,才有明显的作用。这种关系可用图表示成如图 1-3 所示。

那么,什么是原子间距离呢?就是当 $f_{斥} = f_{吸}$ 时原子之间的距离,通常用“ D_0 ”表示,此时原子间的相互作用势能最低。欲将它们压近或者拉开,都要相应的对斥力或引力作功,并造成能量提高。因此,只有原子相距为平衡距离,作规则排列,形成晶体,对应于最低能量分布时,才处于稳定的状态。

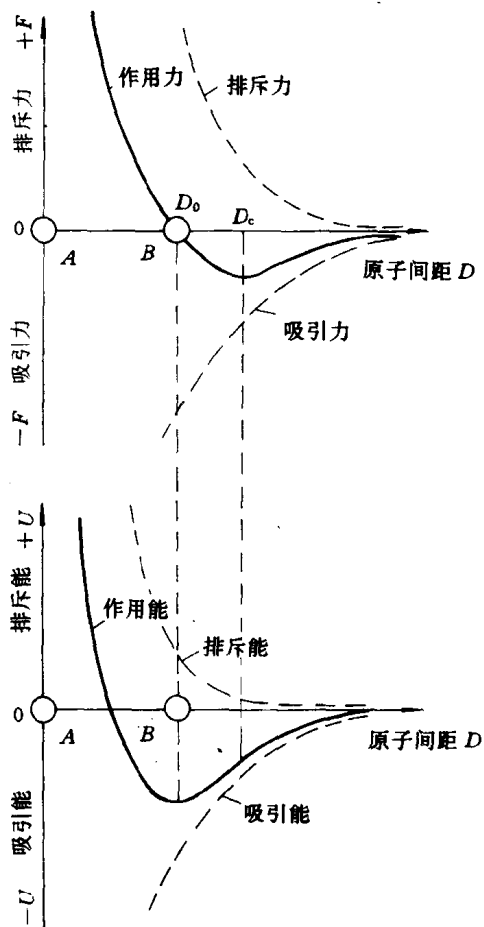


图 1-3 双原子作用模型

第二节 金属的晶体结构

一、原子及离子半径

原子(离子)半径的大小影响着热处理时原子的热扩散及原子在合金中形成的合金相,所以了解原子(离子)半径大小的规律性很有必要。

(一) 原子半径的变化规律

原子半径随所占电子层数的增加而增大；在电子层数相同的条件下，随电子数的增加而减小。例如同一族元素，Li(0.68 Å)—Na(0.98 Å)—K(1.33 Å)—Rb(1.48 Å)—Cs(1.67 Å)—Fr(1.75 Å)半径由小到大；而同一周期的元素，Li(0.68 Å)—Be(1.06 Å)—B(0.88 Å)—C(0.77 Å)—N(0.70 Å)—O(0.66 Å)—F(0.64 Å)—Ne(1.58 Å)从左到右半径由大变小。

原子半径在很大程度上决定了元素在合金中的地位及合金性能，还影响纯金属的性能。例如，从碱金属到碱土金属熔点升高，IB族金属较IA族金属有较高的熔点等。

(二) 影响原子(离子)半径的因素

影响原子半径的因素很多，概括起来主要有以下几点：

(1) 温度：由于总能量曲线的非对称性，温度升高会使原子间的平均距离增加。

(2) 离子价：一般是负离子的半径 > 原子半径 > 正离子半径。例如铁原子的半径是 1.24 Å；正二价铁离子的半径是 0.74 Å；正三价铁离子的半径是 0.64 Å。

(3) 配位数：什么是配位数？就是每个原子周围的最近邻原子数。配位数越多，原子半径将会增大。这是由于有更多的近邻原子电子排斥该原子所致。例如铁在 912°C 以下时为体心立方，配位数为 8，铁原子的半径是 1.24 Å；在 912°C 以上时为面心立方，配位数为 12，铁原子的半径是 1.27 Å。

二、晶体的基本概念

(一) 晶体

自然界中的固态物质，根据其内部原子排列的情况，可以分为晶体和非晶体两大类。其中晶体中原子或者分子是按一定的几何规律在三维空间作周期性的重复排列，而非晶体中原子则是杂乱无章地分布着，至多是有些局部的短程的规则排列。例如，液态金属的原子排列无周期规律性，是非晶体，但当冷却凝固成固态后，原子却呈周期性规律排列，所以变成了晶体。另外，某些金属合金，在极快冷却后会得到固态非晶体，并保留了液态原子的排列方式。因此非晶体又称为“过冷液”或“金属玻璃”。

注意，晶体物质并不一定都具有规则的几何外形。

由于晶体与非晶体中原子排列不同，因此性能也不相同。如晶体具有一定的熔点，而非晶体则没有明显的熔点，却存在一个软化温度；晶体的性能具有各向异性，而非晶体则是各向同性等。可见，物质的性质是由其内部原子分布和排列的情况来决定的。

对于晶体来说，原子是有规律排列的，原子的这种排列叫做晶体结构。不同的晶体有不同的结构，即是同一物质，也可以有不同的晶体结构，这就决定了它们的性质各不相同。例如铜和铁，室温时铜为面心立方而铁为体心立方。又如金刚石和石墨，都由碳原子构成，但性能相差很大。

(二) 晶格

为了研究方便，通常把组成晶体的原子或者原子团当成一个刚性球来处理。这样，一个理想的晶体就是由相同的结构单元在空间无限重复而构成的。最简单的晶体如铜、银、铁等，它们的结构单元是单个原子；有的结构单元往往含有好几个原子或分子，无机物晶体中的结构单元可达上百个，而有机物晶体中的结构单元可达上万个。

为了清楚说明原子在空间排列的规律，有必要将原子或原子团(即结构单元)抽象成为

一个点,代表原子的振动中心。这样原子在空间的规律排列,就成为一系列点在空间的规则排列,称为空间点阵。

所有晶体的结构都是用点阵来描述的。这种点阵的每个阵点上都附有一群原子。这样一个原子群称为基元。基元在空间重复就形成了晶体结构。由此可见,它们之间的逻辑关系为:点阵+基元=晶体结构。

如果将点阵中的这些阵点用直线连接起来,就形成了空间的格子。这种用来描述基元在晶体中排列方式的空间格子就叫做晶体的晶格。它们之间的关系可用图 1-4 表示。

(三) 晶胞

由于晶格具有周期性的特点,因此可以从晶格中取出一个有代表性的几何单元来研究,这样的几何单元称为晶胞。整个晶格就是由晶胞在空间重复堆积而成。

对于一个给定的晶体,晶胞的选择有多种。其中体积最小的晶胞称为初级晶胞。而且对于所有的选择方式中,只有初级晶胞中的原子数目总是一样的。

例如,图 1-5 为一个二维点阵,可以采用多种方式来选择它的初级晶胞。因为晶胞中原子排列的规律能够完全代表整个晶格的原子排列规律,所以只要把一个晶格中的晶胞研究清楚了,则这种晶体也就搞清楚了。

因此,研究各种晶体的结构时,一般都选择它的一个晶胞来进行分析。

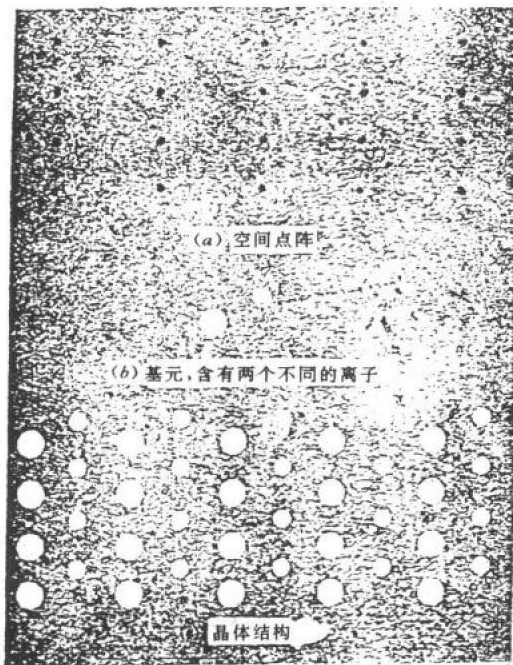


图 1-4 晶体结构与基元和点阵之间的关系 (晶体结构是这样形成的,即将基元(b)安置到点阵(a)的每个阵点上,观察(c),可以辨识基元,然后可引出空间点阵。相对于一个阵点,将基元放在何处是无关紧要的。)

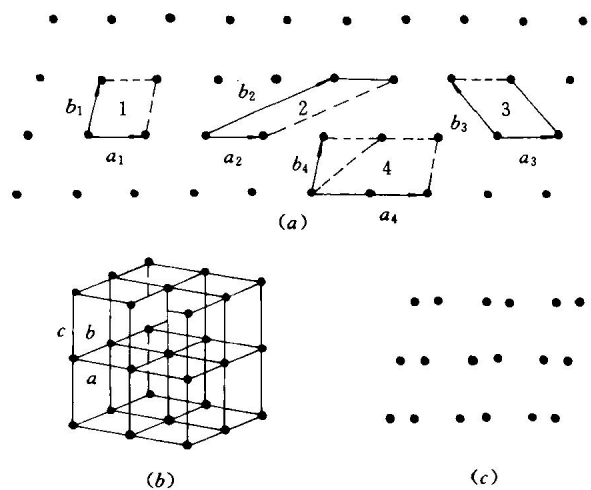


图 1-5 二维点阵的初基晶胞

(a)是一个二维点阵的阵点,成对的 a, b 矢量都是点阵平移矢量,但矢量 a_1, b_1 不是初基平移矢量,因为不可能从 a_1 和 b_1 的整数倍组合来构成点阵平移 T ,所其它成对的 a, b 矢量都可以取为点阵的初基平移矢量。平行四边形 1, 2, 3 面积相等,它们中的任一个都可取作初基晶胞,平行四边形 4 的面积是初基晶胞面积的两倍。(b)是三维空间点阵的初基晶胞。(c)假设这些点是全同的原子:请读者在图中画出一组阵点,选择初基轴和一个初基晶胞,以及与一个阵点相联系的原子基元。)

(四) 晶格参数

在研究晶体结构时,为了表示晶胞的大小和形状,通常选晶胞角上某一结点作为原点,选通过此结点的三条棱边作为三个坐标轴 x, y, z ,如图 1-6 所示。把三条坐标轴称为晶轴;三条棱边的长度 a, b, c 称为晶格常数;把三条棱之间的夹角 α, β, γ 称为晶轴夹角,这六个参数可以完全表示一个晶胞的几何形状和大小,称他们为晶格参数。

(五) 点阵类型

按照点阵在空间的分布情况,点阵可分为二维点阵和三维点阵。

1. 二维点阵类型(共有四种)

- (1) 正方点阵(图 1-7 a): $a=b, \varphi=90^\circ$;
- (2) 六角点阵(图 1-7 b): $a=b, \varphi=120^\circ$;
- (3) 长方点阵(图 1-7 c): $a \neq b, \varphi=90^\circ$;
- (4) 有心长方点阵(图 1-7 d): a, b 的长度任意, $\varphi=90^\circ$ 。

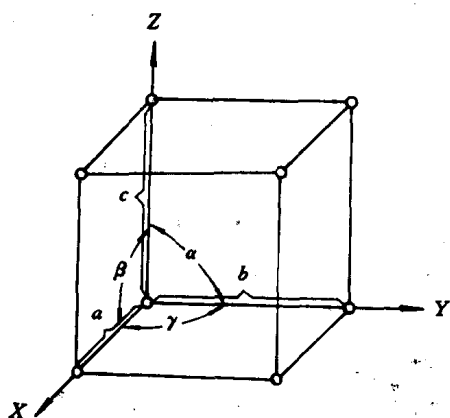


图 1-6 晶格参数表示法

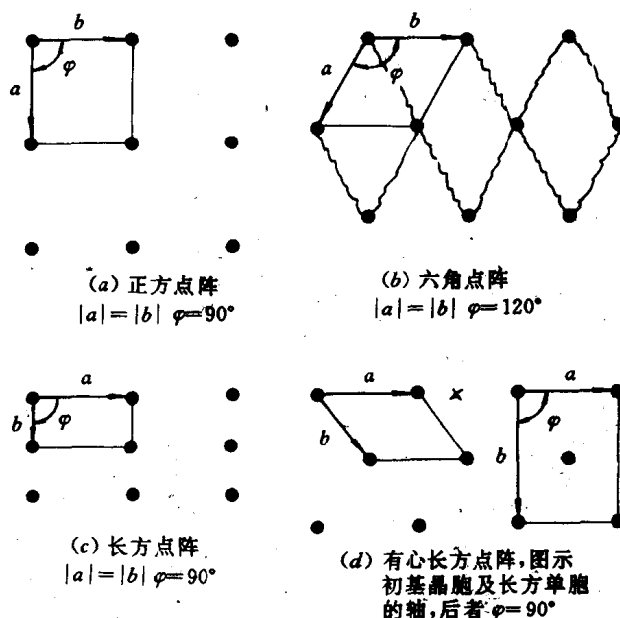


图 1-7 二维点阵类型

2. 三维点阵类型

共有 14 种,分为 7 大晶系。因为法国晶体学家布拉菲(Bravais)曾用数学方法证明,空间点阵仅可能有 14 种,而不会再多,所以,后来就把这 14 种点阵又称为布拉菲点阵。表 1-1 列出了七大晶系及其六个点阵参数之间的关系。这 14 种布拉菲点阵的晶胞如图 1-8 所示。

三、典型的金属晶体结构

在已知的 90 余种金属元素中,除少数十几种金属具有复杂的晶体结构外,大多数金属都具有比较简单的晶体结构。其中,最典型又最常见的金属晶体结构有三种,它们是体心立方、面心立方和密排六方晶格。这是由于金属键没有方向性和饱和性,并且结合方式的选择性也不强。所以,金属原子结合在一起时,总是趋于结合的最紧凑和最密集。而最密集的排

列方式是面心立方和密排六方晶格,其次为体心立方晶格。下面就着重分析这三种典型的金属晶体结构。

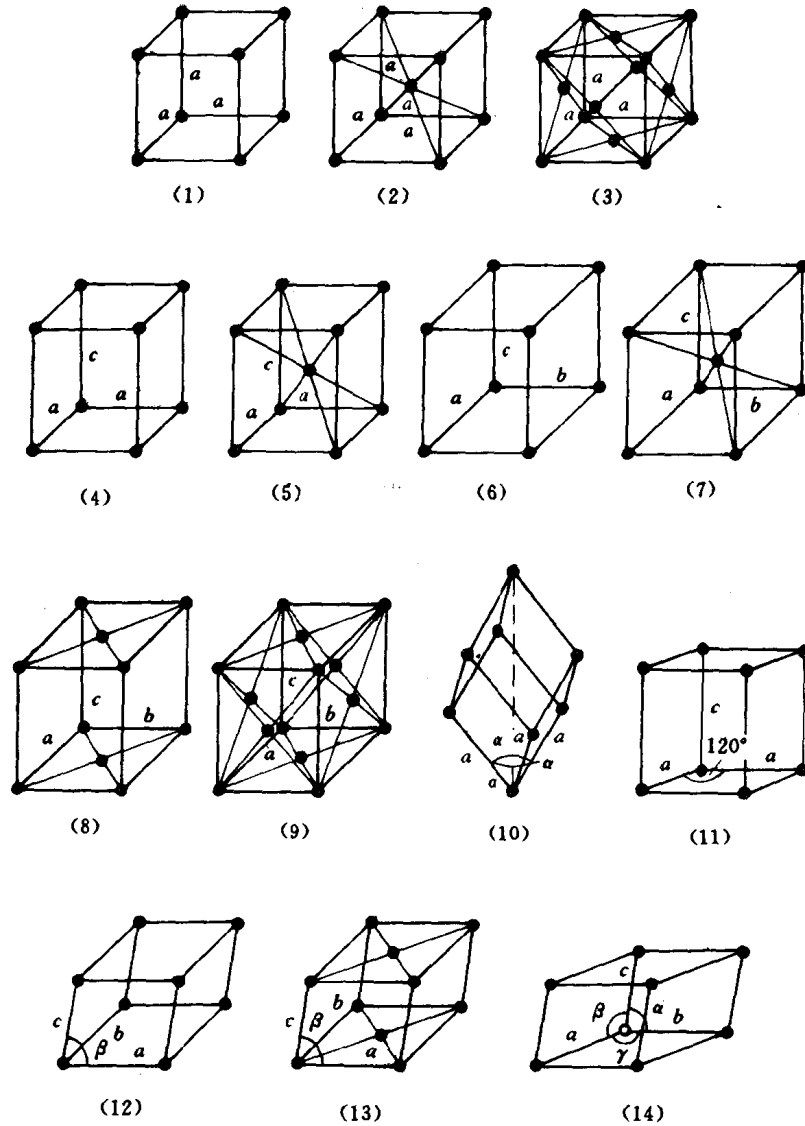


图 1-8 14 种布拉非点阵的晶胞

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-简单正交;7-体心正交;8-底心正交;9-面心正交;10-菱方;11-六方;12-简单单斜;13-底心单斜;14-三斜

(一) 体心立方晶格(bcc)

如图 1-9 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子,构成立方体,在体中心还有一个原子,所以称为体心立方晶格。其中 $a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。下面分析体心立方晶胞的几何参数: