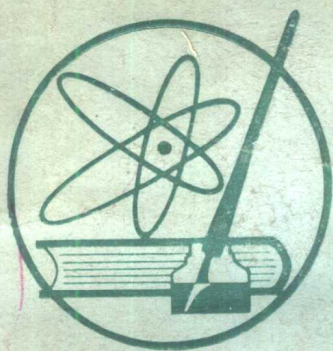




高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海化工学院等合编

麻启承 主编

化学工业出版社

高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海化工学院等合编

麻启承 主编

化学工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍金属材料的性能与其化学成分、内部构造之间的关系,探讨金属的晶体结构、结晶过程、固态转变过程以及塑性变形过程对其性能的影响,还介绍如何利用金属内部组织的转变规律来改善材料性能的各种方法。同时,也介绍了化机、塑橡机械工程上常用的金属材料如碳钢、合金钢、有色金属和合金的规格、性能、特点及主要应用范围。

本书为高等院校化工机械、塑橡机械的专业教材,也可供有关方面的技术人员参考。

本书由上海化工学院麻启承、成都科学技术大学傅守默、北京化工学院邹懿珠编写。

高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海化工学院等合编

麻启承 主编

*

化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092\frac{1}{16}$ 印张16字数399千字印数1-16,650

1980年7月北京第1版1980年7月北京第1次印刷

书号15063·3168(K-207)定价1.65元

前 言

本教材是根据1978年2月“化工高校专业教材编写工作会议”精神而拟订的大纲，在过去化机专业应用的《金属学》讲义的基础上，又增添了新的内容。本教材拟作为化工机械、塑橡机械专业的《金属材料及热处理》课程的教材。在编写过程中曾向全国各地有关科研单位、工厂和兄弟院校作了调查研究，并得到了大力支持与热情的帮助。我们根据兄弟院校的意见，对本教材的内容、系统等重新进行了深入分析研究，并根据昆明审稿会的精神作了修改和补充，最后编写成文。

《金属材料及热处理》是一门技术基础课，为制造维修化工机械、塑橡机械和正确选择与应用金属材料打下金属学和热处理基础。为此，在编写过程中，在加强基本理论，即加强金属材料的强化原理、热处理原理、合金钢原理和腐蚀理论的同时，又注意专业的需要，突出化工、塑橡机械用钢的特点，对化工机械广泛应用的不锈钢、耐热钢（抗氢钢）、压力容器用钢和低温用钢，收集国内外的新近资料，单独设立章节予以专门论述。对塑橡机械专业需要的模具钢和氮化的化学热处理也予以重点介绍。在编写时，我们力争教材内容少而精，在突出说明化工金属材料特性中的普遍规律的同时，删去与专业无关的、陈旧的内容，并对一些重要的基本概念，重点突出，讲深讲透，进行必要的微观解释。各章节内容的深广度，既考虑当前的实际，也顾及长远的需要，并力争反映最新的科学水平。但是由于我们的水平低，收集资料有限，调查研究也不够，加之时间匆促，本书内容所论及或引述的观点，难免有偏见和错误之处，全书的科学性和逻辑性也存在不少问题，因此殷切希望有关读者批评指正。

参加本教材执笔的同志有成都科学技术大学傅守默（编写第一章和第五章）、北京化工学院邹懿珠（编写第六、七章）和上海化工学院麻启承（编写绪论、第二至四章、第八至十四章及附录等），并由麻启承负责主编。此外，参加本书编写的还有北京化工学院林功成和上海化工学院王席漆。三所院校有关教研组同志协助整理和图表绘制工作。在此，我们对供给资料、照片和热情支持我们的单位和同志们表示诚挚的感谢。

本教材经化工部聘请大连工学院曹智本（主审）和上海化工设计院竺基梅审查并提出修改意见。北京钢铁学院金相热处理教研组、金属腐蚀教研组及上海交通大学徐祖耀对本书部分章节提出修改意见，在这里一并表示谢意。

编者 1978.12.

目 录

前言		
绪论	1	
符号名称表	3	
第一篇 合金理论	5	
第一章 纯金属	5	
第一节 金属的晶体结构及其特性	5	
一、金属特性及金属键	5	
二、常见的金属晶体结构及其特征	6	
第二节 实际金属的晶体结构	8	
一、实际金属都是多晶体	8	
二、实际金属中的晶体缺陷	9	
第三节 金属的结晶	11	
一、金属凝固时的过冷现象	11	
二、金属结晶的能量条件	12	
三、金属结晶过程	13	
四、晶粒大小及其影响因素	14	
五、铸锭组织及其缺陷	15	
第四节 金属的同素异构转变	16	
参考文献	17	
第二章 二元合金	18	
第一节 合金结构	18	
一、固溶体	18	
二、金属化合物	20	
三、机械混合物	22	
第二节 二元合金的结晶及其组织——二元合金状态图	23	
一、二元合金状态图的建立	23	
二、简单共晶状态图	24	
(一) 状态图的分析	24	
(二) 组织中相的相对量确定——杠杆定律	27	
(三) 合金的性能与成分的关系	28	
三、固溶体状态图	28	
(一) 状态图的分析	28	
(二) 晶内偏析	29	
(三) 合金的性能与成分的关系	29	
四、一般的共晶状态图	29	
五、包晶状态图	31	
六、形成稳定化合物的合金状态图	32	
参考文献	33	
第二篇 铁碳合金	34	
第三章 铁碳合金状态图	34	
第一节 组元的性能和相的类型	34	
第二节 Fe-Fe ₃ C 合金状态图的分析	36	
一、点、线的物理意义	36	
二、铁碳合金的分类	37	
三、钢结晶过程分析	38	
四、铸铁结晶过程分析	40	
五、含碳量对铁碳合金组织和性能的影响	41	
六、铁碳合金状态图的应用	41	
参考文献	42	
第四章 碳钢	43	
第一节 钢铁生产与钢材的质量	43	
第二节 钢中常存杂质的影响	47	
一、锰	48	
二、硅	48	
三、硫	48	
四、磷	48	
五、氮与氧	48	
(一) 热时效	49	
(二) 应变时效	49	
六、氢	50	
第三节 碳钢的分类	50	
第四节 碳钢的牌号、性能和用途	51	
一、普通碳素结构钢	51	
二、优质碳素结构钢	52	
三、锅炉、容器用钢	53	
四、碳素工具钢	53	
五、铸钢	53	
参考文献	55	
第五章 金属的塑性变形和再结晶	56	
第一节 金属的变形过程	56	
一、钢的拉伸曲线	56	
二、金属的弹性变形	56	

三、金属的塑性变形.....57	第二节 淬火与回火.....94
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响.....61	一、钢的淬火.....94
一、加工硬化.....61	(一) 淬火加热温度的选择.....94
二、冷加工变形时金属组织结构的变化.....62	(二) 淬火加热中的氧化、脱碳.....94
三、内应力.....62	(三) 淬火冷却.....95
第三节 金属强度的本质及金属强化的基本方法.....63	(四) 淬火方法.....95
第四节 金属的断裂.....65	二、钢的回火.....97
一、金属的断裂过程.....65	三、钢的淬透性.....98
二、脆性断裂的特征及影响因素.....65	四、内应力与变形以及热处理零件的结构工艺性.....101
三、断口.....68	第三节 化学热处理.....103
第五节 冷塑性变形金属加热时组织与性能的变化.....69	一、钢的渗碳.....103
一、回复和再结晶.....69	二、钢的氮化.....105
二、再结晶温度和晶粒度.....70	(一) 氮化原理及工艺.....105
第六节 金属的热变形加工.....72	(二) 氮化处理特点.....105
参考文献.....73	(三) 氮化用钢与氮化处理技术条件.....106
第三篇 钢的热处理74	(四) 铁-氮状态图与氮化层组织.....107
第六章 钢的热处理原理.....76	(五) 氮化工艺因素对组织与性能的影响.....108
第一节 钢加热时的转变——A 的形成.....76	(六) 氮化工艺.....109
一、转变过程.....76	(七) 氮化新工艺.....110
二、奥氏体晶粒的长大及其影响因素.....77	三、渗金属.....111
第二节 奥氏体的分解.....79	参考文献.....113
一、转变机构和动力学(等温转变图).....79	第四篇 合金钢114
二、奥氏体等温转变产物的组织和性能.....81	第八章 合金钢概论.....114
三、影响C-曲线的因素.....82	第一节 合金元素在钢中的作用.....115
四、连续冷却时奥氏体的转变.....83	一、合金元素对钢组织和性能的影响.....115
第三节 马氏体转变.....84	二、合金元素对热处理的影响.....119
一、马氏体转变的基本特点.....84	第二节 合金钢的分类.....122
二、马氏体的组织.....86	一、按用途分类.....123
三、马氏体的性能.....87	二、按化学成分分类.....123
第四节 淬火钢在回火时的转变.....87	三、按金相组织分类.....123
一、回火转变过程.....88	第三节 合金钢的编号.....124
二、回火对钢组织和性能的影响.....90	参考文献.....124
参考文献.....91	第九章 机械制造用钢125
第七章 钢的热处理工艺92	第一节 合金结构钢.....125
第一节 退火与正火.....92	一、渗碳钢.....125
一、退火.....92	二、调质钢.....128
二、正火.....93	三、机器零件用钢及其热处理工艺的选择.....131
	四、弹簧钢.....133

五、滚动轴承钢.....	136	一、石油炼厂加热炉管用钢.....	181
第二节 塑橡模具钢.....	137	二、石油化工转化炉管用钢.....	182
一、塑橡模具的工作条件及其对工作性能的要求.....	137	第四节 高温高压下抗氢钢.....	184
二、对热固性塑料模具用钢的要求.....	138	一、氢腐蚀机理.....	184
三、塑橡模具用钢及其热处理.....	138	二、影响氢腐蚀因素.....	185
第三节 特殊耐磨钢——高锰钢.....	143	三、抗氢用钢.....	188
第十章 不锈钢.....	145	参考文献.....	188
第一节 概述.....	145	第十二章 压力容器用钢和低温用钢.....	189
第二节 金属腐蚀与耐腐蚀.....	146	第一节 概述.....	189
一、金属腐蚀的机理.....	146	一、压力容器用钢和低温用钢的性能要求.....	189
二、金属的钝化.....	148	二、可焊性.....	189
(一) 钝化理论.....	149	三、韧性.....	190
(二) 阳极极化曲线.....	150	第二节 压力容器用钢.....	196
(三) 介质及合金元素对钝化膜特性的影响.....	151	第三节 低温用钢.....	197
三、提高金属耐蚀性的合金化.....	152	参考文献.....	199
第三节 常用不锈钢的特性及其热处理.....	155	第五篇 铸铁及有色金属.....	200
一、铁素体类铬不锈钢.....	155	第十三章 铸铁及其热处理.....	200
(一) 韧性与脆性.....	156	第一节 铸铁的石墨化过程.....	200
(二) 耐蚀性.....	157	第二节 灰口铸铁及其热处理.....	203
二、马氏体类不锈钢.....	158	一、灰口铸铁的组织与性能.....	203
三、奥氏体类不锈钢.....	159	二、影响石墨化的因素.....	205
(一) 组织和机械性质.....	159	三、改善灰口铸铁性能的途径.....	206
(二) 耐蚀性.....	161	第三节 可锻铸铁.....	209
1. 晶间腐蚀.....	161	一、可锻铸铁的特点与用途.....	210
2. 点腐蚀.....	162	二、可锻铸铁件的生产.....	210
3. 应力腐蚀断裂.....	163	第四节 球墨铸铁.....	211
四、两(复)相不锈钢.....	164	一、球墨铸铁的特性与用途.....	212
第四节 尿素生产中不锈钢的应用.....	164	二、球墨铸铁的生产与热处理.....	213
附: 电位E-pH图.....	165	参考文献.....	215
参考文献.....	168	第十四章 有色金属及合金.....	216
第十一章 耐热钢和合金.....	169	第一节 铜及其合金.....	216
第一节 概论.....	169	一、铜的组织 and 性能.....	216
一、耐热的金属材料.....	169	二、黄铜.....	217
二、高温抗氧化性.....	170	三、青铜.....	219
三、蠕变断裂.....	171	第二节 铝及其合金.....	221
四、耐热金属材料的强化原理.....	175	一、铝的组织 and 性能.....	221
第二节 耐热钢和合金的特性与应用.....	178	二、铝合金.....	221
一、耐热钢.....	178	第三节 镍及其合金.....	222
二、耐热合金.....	180	一、镍的组织 and 性能.....	223
第三节 炉管用钢.....	181	二、镍合金.....	223
		第四节 钛及其合金.....	223

一、钛的组织 and 性能.....	223
二、钛合金.....	224
第五节 铝及其合金.....	227
第六节 滑动轴承材料.....	227
一、对轴承合金的要求.....	227
二、常用的轴承合金.....	228
参考文献.....	230

附录	231
一、金属材料的机械性能.....	231
二、无塑性转变(NDT)温度的测定—— 落锤试验.....	236
三、美、日、法、西德等国钢号表示 方法.....	237
索引	246

绪 论

金属材料，特别是钢铁，是现代工业的基础，是现代化工机器制造的基本材料。它愈来愈广泛地应用于机械、石油、化学工业和宇宙航行、原子能等尖端工业。因此，钢铁及其他各种金属材料，已经成为现代工业和科学技术的基础。例如，不锈钢、耐热钢的出现和发展，促进了许多工业的发展。硝酸、氮化工业以及高效化肥尿素的大量生产，在颇大程度上是由于发展了不锈钢的生产。新型耐热钢和合金的出现，可以提高化工反应温度和压力，促使化学反应速度的加快。抗氢钢的出现与应用，使氨的合成、甲醇生产、三大合成材料（合成橡胶、合成塑料和合成纤维）的生产以及石油炼制的加氢裂化和加氢脱硫等高温高压新工艺得以大型化。有时正是由于缺乏耐蚀的金属材料，许多新的生产工艺无法推广与发展。例如用实验方法可以在35%盐酸中使纤维糖化，但是由于找不到一种在高温高浓度的盐酸中能够耐蚀的金属材料，因此，就使这种方法不能工业化。由于缺乏便宜又能满足性能要求的耐热钢，造成锅炉蒸汽温度停留在540~570℃水平上。也由于同一原因，使石油化工的乙烯裂解温度及制氢温度停留在1050℃以下。

综上所述，我们可以看出，石油、化学工业以及整个国民经济的发展都要求生产更多、性能更优越、价钱更便宜的金属材料，而金属材料的不断发展，又促进国民经济建设的步伐加快。为了实现我国农业、工业、国防和科学技术的现代化，要求提供大量的先进的机械装备和技术装备，这就要求我们必须迅速发展各种各样优良性能的金属材料。因此，金属材料在国民经济发展中占有极其重要的地位。

金属材料之所以能获得如此广泛的应用是因为：（1）金属材料有优良的机械性能，既有高的强度，又有好的塑性和韧性。（2）金属材料具有优良的工艺性能（即铸造性、可锻性、可焊性、切削加工性等），易于采用不同方法制成各种形式的零件、机器设备和工具。

（3）金属材料具有其他材料所不能及的优良物理性能（导热性、导电性、磁性等）和特殊化学性能（耐蚀性等）以及耐热性。（4）大多数金属材料可以通过热处理方法，即将金属加热到预定的温度保温，然后以预定的速度冷却，使其性能进一步改善和提高，以满足设计、制造和使用的要求。

因之，金属材料及其热处理便成为生产、加工及使用金属者所必须具备的一项知识。

作为一个工程技术人员，在工作中到处都会遇到金属材料方面的问题。设计一个零件，选用那种材料呢？检修一台化工设备，制订一条工艺路线，热处理安排在那一道工序才合适呢？要强化某一化工过程操作，温度和压力允许提高到多少，才不会超过金属材料的许用范围呢？……这一切都涉及到金属材料及热处理方面的问题。如果我们在设计、制造和使用时，不了解金属材料的特性，不了解金属材料性能的变化规律，就会在品种繁多的金属材料面前处于盲目状态，就不能根据材料的固有规律性，充分发挥我们的主观能动性，从而促使所有金属材料都能做到“物尽其用”。

金属材料及热处理课程的基本内容有两部分：金属理论基础和工程上常用的金属材料——钢、铸铁和有色金属及合金。

（一）金属理论基础部分 这部分是研究金属材料及其热处理原理，即研究金属材料的

性能与其化学成分、内部构造之间的关系，探讨金属的晶体结构、结晶过程、金属的固态转变过程（热处理）、塑性变形过程对其性能的影响，以及如何利用金属内部的组织转变的规律来改善材料性能的各种方法。我们掌握这些原理，就能对工业的金属材料在液态结晶（铸造、焊接）、固态转变过程（热处理）以及热态和冷态变形过程（锻压、轧压、冲压）中所发生的变化有较为清楚的概念，就能在设计时，为比较正确地选用各种零件的毛坯和正确选择、使用金属材料提供理论依据。

（二）工程上常用的金属材料部分 这部分是研究机械工程上常用的金属材料如碳钢、合金钢（不锈钢、耐热钢、低温用钢、塑橡模具钢）、铸铁、有色金属和合金的规格、性能、特点以及它们的主要应用范围。掌握这部分内容就能对常用工程金属材料的特性有较全面的认识，这对于正确选择和使用金属材料，充分发挥材料本身性能的潜力，节约贵重金属，创造了有利的条件。

因此，金属材料及热处理是一门技术基础课，它是既包含丰富的理论又同生产实践有密切联系的一门课，是建立在基础学科——物理、化学、物理化学和材料力学的坚实理论上，又同工业学科——金属工艺学有密切联系的技术基础课。所以，学习这门课的基本目的是为使学生在正确选择和合理使用金属材料方面，以及在选用主要热处理工艺方案方面获得初步的知识。显然，金属材料及热处理对化机、塑橡机械专业来说是一门必不可少的技术基础课。

但是，金属材料的种类繁多，应用范围又十分广泛，为了便于教学，我们在内容安排方面除了突出叙述材料特性的同时，还采用“由特殊到一般，又由一般到特殊”的认识规律，首先叙述比较简单的纯金属，然后对合金进行分析，找出性能、组织与成分三者之间的大致依赖关系，再讨论热处理问题，最后研究石油、化工常用的金属材料的牌号、特性和应用。

符 号 名 称 表

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
A	1. 奥氏体 2. 冲击功	J (焦耳), kg-m (公斤-米)	F _{A+G}	奥氏体和石墨混合自由能	J (焦耳)
A _s	Fe ₃ C磁性转变点, 210℃		FAD	断裂分析图	
$\bar{A}$	晶格常数单位	埃, 10 ⁻⁸ cm (厘米)	FTE	弹性载荷破坏转折温度	
A ₁	奥氏体A $\rightleftharpoons$ 珠光体P转变临界温度, 723℃	℃	FTP	塑性载荷破坏转折温度	
A ₂	铁素体F磁性转变温度, 768℃	℃	fcc	面心立方晶格	
A ₃	α -Fe转变的临界温度, 910℃	℃	G	石 墨	
A ₄	γ -Fe $\rightleftharpoons$ δ -Fe转变的临界温度, 1390℃	℃	HB	布氏硬度	kg/mm ² (公斤/毫米 ²)
A _c	2mmV-型缺口试样、夏氏冲击功	J (焦耳), kg-m (公斤-米)	HRC	洛氏C标度硬度	
α_c	2mmV-型缺口试样、夏氏冲击韧性	MJ/m ² (兆焦耳/米 ²)	HS	肖氏硬度	
A _{C1}	加热时P $\rightarrow$ A转变温度	℃	HV	维氏硬度	GN/m ² (千兆牛顿/米 ²)
A _{C2}	加热时F $\rightarrow$ A转变温度	℃	i	电流密度	A/cm ² (安/厘米 ²), μ A/mm ² (微安/毫米 ²)
A _{cm}	Fe ₃ C $\rightleftharpoons$ A转变温度	℃	K	1. 腐蚀失重	g/m ² ·hr (克/米 ² ·小时)
A _{cem}	加热时Fe ₃ C $\rightleftharpoons$ A转变温度	℃		2. 致密度	
A _I	艾氏 (悬臂式) 冲击功	J (焦耳)		3. 碳化物	
A _k	2mmU-型缺口试样、梅氏冲击功	J (焦耳)	L	溶液	
α_k	2mmU-型缺口试样、梅氏冲击韧性	MJ/m ²	Le	莱氏体, 奥氏体和Fe ₃ C的共晶机械混合物	
A _{r1}	冷却时A $\rightarrow$ P的转变温度	℃	M	马氏体	
A _{r3}	冷却时A $\rightarrow$ F的转变温度	℃	M'	回火马氏体	
A _{rcm}	冷却时A $\rightarrow$ Fe ₃ C $\rightleftharpoons$ 的转变温度	℃	M _r	马氏体形成终止温度	℃
B	贝氏体		M _s	马氏体形成开始温度	℃
bcc	体心立方晶格		N	1. 形核速率	1/mm ³ ·s (1/毫米 ³ ·秒)
C	晶体成长速度	cm/s (厘米/秒)		2. 循环转数	rpm (转/分)
CAT	裂纹制止温度曲线		NDT	动载荷下无延性转变温度	℃
COD	临界裂缝张开位移	mm (毫米)	P	1. 珠光体, 铁素体和Fe ₃ C共析机械混合物	
C _E	碳当量	%		2. 载荷	N (牛顿)
D	扩散速度 (扩散系数)		P ₀	试样产生颈缩的最大载荷	N (牛顿)
D ₀	临界淬火直径	mm (毫米)	P _e	弹性极限载荷	N (牛顿)
d	1. 原子直径 2. 晶粒平均直径	$\bar{A}$ (埃) μ (微米)	P _s	屈服载荷	N (牛顿)
E	1. 弹性系数	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)	Q	重量	kg (公斤)
	2. 电极电位	V (伏), mV (毫伏)	r	原子半径	$\bar{A}$ (埃)
E ⁰	标准电极电位	V (伏)	S	1. 索氏体	
E _{cor}	自由腐蚀电位	V (伏)		2. 珠光体的片层间距	$\bar{A}$ (埃)
E _p	钝化电位	V (伏)		3. 嫡	J/℃ (焦耳/℃)
F	1. 铁素体 2. 自由能 3. 试样截面积	J (焦耳) m ² (米 ²)	S'	回火索氏体	
F'	富铬铁素体		S ₀	应力松弛稳定系数	
FL	液体 (溶液) 自由能	J (焦耳)	T	1. 温度	℃
F _{A+}	奥氏体和Fe ₃ C $\rightleftharpoons$ 的混合自由能	J (焦耳)	T'	2. 屈氏体	
Fe ₃ C $\rightleftharpoons$			T ₀	回火屈氏体	
			T _E	理论临界 (结晶) 温度	℃
				晶内强度与晶界强度相等的温度, 等强温度	℃

续表

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
T_m	熔点	℃	$\delta\text{-Fe}$	体心立方晶格的铁 (高温)	
T_n	实际结晶温度	℃	ε	固溶体, 以化合物(如 Fe_3O_4)为基的固溶体	
T_R	再结晶温度	℃	η	1. 应变 2. 固溶体, 以化合物(如 FeO)为基的固溶体	
$T_{r,20}$	缺口试样吸收冲击能量20J(15英尺-磅)的脆性转变温度	℃	ε_f	断裂时的应变值	
$T_{r,100}$	缺口试样断裂的脆性断口率为100%的脆性转变温度	℃	π	腐蚀速度	mm/y (毫米/年)
U	系统的内能	J (焦耳)	σ	应力 (主应力)	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
U_f	静载荷下断裂时单位面积吸收的能量	MJ/m ² (兆焦耳/米 ²)	σ_b	抗拉强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
V	冷却速度	℃/s (℃/秒)	σ_{bb}	抗弯强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
V_K	焯界冷却速度	℃/s (℃/秒)	σ_e	弹性极限	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
V_c	点腐蚀发生电位	V (伏)	σ_t	断裂强度 (断裂时的真实应力)	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
V_s	点腐蚀停止电位	V (伏)	σ_s	屈服强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
v	一个原子的体积	Å ³ (埃 ³)	$\sigma_{0.2}$	残余变形为0.2%时的屈服强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
ΔF	自由能差	J (焦耳)	σ_w	疲劳强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
ΔT	过冷度	℃	$\sigma_{1/10^6}$	十万小时蠕变值为1%时的蠕变强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
ΔV	体积变化		σ_{10^4}	一万小时的持久强度 (蠕变断裂强度)	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
α	固溶体		σ_{10^5}	十万小时的持久强度	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
$\alpha\text{-Fe}$	体心立方晶格的铁		τ	1. 剪应力	MN/m ² (兆牛顿/米 ²)
β	固溶体		ψ	2. 时间 断面收缩率	hr (小时) %
γ	1. 固溶体 2. 比重	g/cm ³ (克/厘米 ³)			
$\gamma\text{-Fe}$	面心立方晶格的铁				
γ'	B ₂ A有序金属化合物(B, A为组元)				
δ	延伸率	%			
δ_5	试样测量长度是其直径五倍时的延伸率	%			
δ_{10}	试样测量长度是其直径十倍时的延伸率	%			
δ_c	焯界裂缝张开位移值	mm (毫米)			

第一篇 合金理论

第一章 纯金属

第一节 金属的晶体结构及其特性

一、金属特性及金属键

人类使用金属制造生产工具和生活用具已有悠久的历史。我国劳动人民远在殷商时代就已开始制造和应用青铜。人类在长期地生产和使用金属的实践中进行观察研究，逐步深化了对金属性能和结构的认识，并从一系列物理特性及物质结构的本质上将金属与非金属区别开来。金属与非金属相比，具有一系列物理特性：高的导电、导热性，可塑性，具有金属光泽和正的电阻温度系数。金属的这些特性是由固态金属特有的原子结合方式——金属键决定的。

从物理、化学中已知，金属原子结构的特点是价电子数少（一般是1~2个），且与原子核的结合力弱，很易摆脱原子核的束缚而变成自由电子。因此，当大量金属原子紧密聚集在一起形成金属晶体时，绝大部分金属原子在其周围其它原子的原子核影响下，将失去其价电子而形成正离子，正离子按一定的几何规律在空间排列起来，并在各自的位置上作热振动；所有价电子则不再属于某个原子或某些原子所专有，而为整个金属中的原子所共有，并以自由电子的形式在正离子之间自由地运动，好象一种气体充满其间，形成所谓“电子气”。金属晶体就是依靠各正离子与自由电子之间的相互作用而结合在一起的。通常把金属原子的这种结合方式称为金属键。图 1-1 为金属键的模型。

正是由于金属键的这一特点，就决定了金属具有上述的一系列物理特性。在微弱的电场作用下，金属中的“自由”电子可作定向加速运动，形成电流，因此，金属具有良好的导电性。金属中正离子热振动的振幅，随温度升高而增大，从而增大了自由电子在其间流动的阻力——电阻，使金属具有正的电阻温度系数。由于不仅依靠正离子的热振动，而且也依靠自由电子的运动来传递热能，所以，金属是热的良导体。至于金属具有可塑性和金属光泽也都与自由电子的存在有关。正是由于金属是依靠正离子与自由电子相互作用结合起来的，因而，当受

外力作用发生塑性变形时（即金属晶体中各层原子发生相对位移时），仍可保持金属键的结合力，使金属具有产生塑性变形而不致破坏的能力。最后，金属所以具有金属光泽，是由于自由电子容易被可见光所激发，跳到较高的能级，当它重新跳回原来的低能级时，就把所吸收的可见光的能量以电磁波的形式辐射出来，这在宏观上就表现为金属光泽。

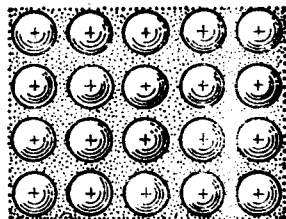


图 1-1 金属键示意图

二、常见的金属晶体结构及其特征

所有固体金属都属于晶体。X射线结构分析表明,晶体是由原子(正离子)按一定几何形式规则地排列起来的。假定把晶体中的原子看成为一个固定的小球,那么,晶体就是由这些小球规则地堆砌起来的(图1-2a)。为了便于描述和分析晶体原子排列的规律,可以用假想的线条将各原子中心连接起来,使之构成一空间格子,每个原子中心均位于空间格子的各个结点上。这种用以描绘原子在晶体中排列方式的空间格子称为“结晶格子”,简称“晶格”(图1-2b)。

用晶格来描述晶体结构还很不方便。为了简便起见,通常从晶格中选取一个能反映晶格特征的最小几何单元来描述各种晶体结构,这个最小几何单元称为“晶胞”(图1-2c)。晶胞的各边尺寸称为“晶格常数”。其大小以埃($\text{\AA}$)来量度($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)。

各种金属的晶体结构是不完全相同的。但工业上使用的金属元素中,除少数具有复杂晶格外,大都具有比较简单的晶格。其中,最常见的金属晶格有三种类型,即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。图1-3、图1-4和图1-5分别表示三种晶格的晶胞。

体心立方晶胞如图1-3所示,它是一个立方体,在立方体的每一个顶角上各有一个原子,而在立方体的中心又有一个原子。

体心立方晶胞看起来好像是由几个原子所组成,实际上由于体心立方晶胞顶角上的原子是同时属于八个晶胞所共有,对一个晶胞来讲,它只占有 $\frac{1}{8}$ 个,只有中心那个原子才完全属于该晶胞所独有,见图1-6a。所以,在体心立方晶胞中,实际上所含的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 个。

具有体心立方晶格的金属有 910°C 以下的铁(称为 $\alpha\text{-Fe}$)、室温下的铬、钨、钼、钒、铌等。

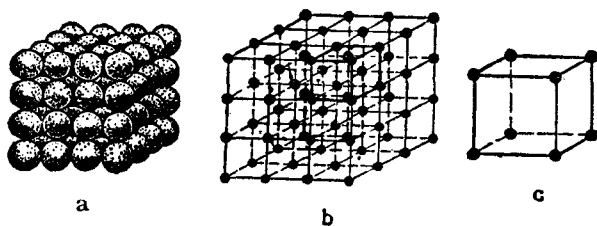


图 1-2 简单立方晶格原子排列的示意图

a—原子堆砌模型; b—简单立方晶格; c—晶胞

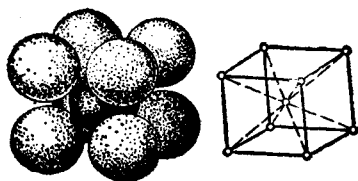


图 1-3 体心立方晶胞

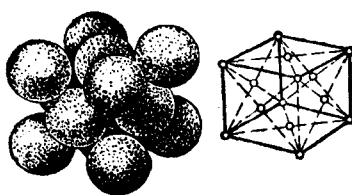


图 1-4 面心立方晶胞

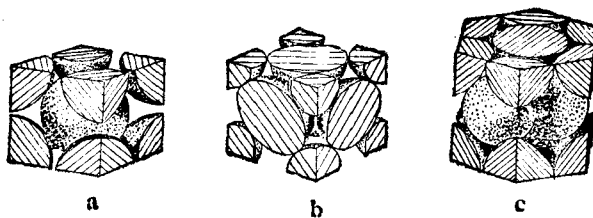


图 1-6 三种典型晶胞原子数计算示意图

a—体心立方晶胞；b—面心立方晶胞；c—密排六方晶胞

面心立方晶胞（图1-4）亦为一立方体，在立方体的八个顶角上亦各有一个原子，此外，在立方体的六个面的中心亦各有一个原子。

面心立方晶胞中的每个顶角原子各为八个晶胞所共有，对一个晶胞来讲，也只占 $\frac{1}{8}$ 个。

而在每个面中心的原子又同时属于两个晶胞所共有，一个晶胞只占 $\frac{1}{2}$ 个（图 1-6 b），因

此，每个面心立方晶胞中所含的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个。

具有面心立方晶格的常见金属有 910~1390℃之间的铁（称为 γ -Fe）、铜、铝、金、银、镍、铅等。

密排六方晶胞（图1-5）是一个正六方柱体，在六方柱体的每一个顶角上有一个原子，上下底面的中心也各有一个原子。此外，在六方柱体的中间还有三个原子。

在密排六方晶胞中，由于每个顶角上的原子是同时属于六个晶胞所共有，上下底面中心的原子又分别为两个晶胞所共有，只有六方体柱中间的三个原子才为密排六方晶胞所独有（见图1-6c）。所以，每个晶胞

所含的原子数为 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个。

具有密排六方晶格的常见金属有镁、锌、铍、镉以及室温下的钛。

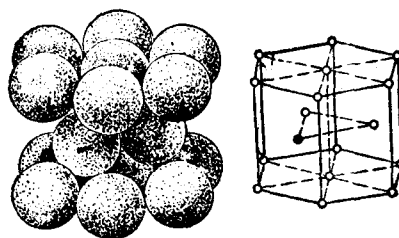


图 1-5 密排六方晶胞

上述三种不同晶格的晶体，其原子排列的紧密程度是不同的。晶体原子排列的紧密程度可用致密度这一参数表示。致密度是指晶胞中原子（视为刚性球）所占体积与晶胞总体积之比，并用下式表示：

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

式中 K——晶体结构的致密度；

n——一个晶胞实际上所包含的原子数；

v——一个原子（钢球）的体积，其值为 $\frac{4}{3}\pi r^3$ （r为原子半径）；

V——晶胞的总体积。

根据上式可计算出三种晶体结构的致密度。对体心立方晶格来说, 晶胞中实际所含的原子数 $n=2$, 晶胞棱边长度 (晶格常数) 为 a , 代入上式, 得

$$K = \frac{nv}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3}$$

假定体心立方晶胞中对角线上的原子是互相接触的, 根据简单几何关系, 得 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$,

代入上式, 可得体心立方晶格的致密度为:

$$K = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi \approx 0.68$$

同样可计算出面心立方结构和密排六方结构晶体的致密度均为0.74。

在同一金属中, 致密度越大, 晶体原子排列越紧密, 因之比容也越小; 反之, 致密度越小, 晶体的比容则越大。由于面心立方晶格比体心立方晶格的致密度大, 即比容较小, 当 γ -Fe (面心立方晶格的铁) 转变成 α -Fe (体心立方晶格的铁) 时, 要发生体积膨胀。这就是钢在淬火时, 因相变而发生体积变化的原因之一。

由于晶体结构的不同, 在晶体性能上也必然表现出某些不同的特性。一般来讲, 具有面心立方晶格的金属均具有良好的塑性和韧性, 特别是没有冷脆性 (冷脆性是指在低温下金属的塑性和韧性随温度降低而急剧降低的性能)。因此, 象铜、铝、金、银等面心立方结构的金属可轧成很薄的金属箔, 拉成很细的金属丝, 而且像铜、铝、镍等也是良好的低温材料; 具有体心立方晶格的金属均具有较高的硬度、强度和熔点, 但是塑性和韧性较低, 且具有冷脆性。因此, 象 α -铁、铬、钨、钼等体心立方结构的金属均可作为高强度、高温合金的基础; 具有密排六方晶格的金属不仅强度较低而且塑性和韧性也较差, 所以这类金属很少用作重要的结构材料。

当然, 以上是就一般情况而言, 实际上并不是所有金属都符合这些规律, 例如室温下的钛虽为密排六方结构, 但其塑性和韧性均较好 ($\delta > 40\%$), 且无低温脆性, 是优良的低温材料 (在 -253°C 仍保持较好的韧性)。

第二节 实际金属的晶体结构

前面已经谈到, 晶体是由原子按一定几何形式规则地排列起来的。这种完全规则排列而位向相同的晶体叫做单晶体, 它是一种理想的情况, 实际使用的金属则与此不尽相同。首先, 实际金属不是单晶体而是多晶体, 其次, 在实际金属中存在着各种晶体缺陷。

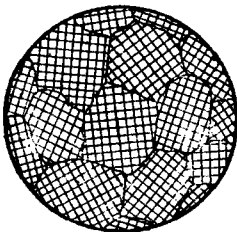


图 1-7 多晶体示意图

一、实际金属都是多晶体

自然生成的金属单晶体至今还没有发现, 只有用人工的方法, 可制得较小的金属单晶体。实际使用的金属材料大都为多晶体。从显微镜下可以观察到, 多晶体是由很多小的晶体组成的 (图5-10 a)。这些小晶体称为“晶粒”。晶粒与晶粒之间的交界面称为“晶界”。对纯金属多晶体来讲, 各个晶粒的结构是相

同的，但各晶粒彼此的空间位向是不同的（图1-7）。

二、实际金属中的晶体缺陷

实际金属晶体结构内部也不象理想晶体那样规则和完整，而是存在着各种晶体缺陷，如空位、间隙原子、位错、晶界等。这些晶体缺陷分布在晶体中，对金属材料的性能产生重大的影响。例如，实际金属中存在着位错，使其强度大为降低。还应指出，实际金属中存在的这些晶体缺陷不是永远固定的、不变的，它们在一定条件下，要发生运动和变化。这些晶体缺陷在一定条件下的运动和变化与晶体中发生许多物理、化学过程有着密切的关系。因此，有必要对其作一简要的介绍。

（一）空位和间隙原子

空位是一种“点型”缺陷，即长、宽、高尺寸都较小的一种缺陷。它的形成是由于原子热振动的结果。如前所述，晶体中的原子（正离子）都是以平衡位置为中心不断地进行热振动。原子热振动的能量与温度有关，温度愈高，热振动的能量亦愈大。而且，各个原子热振动能量也不是相同的、固定的，而是处于经常波动起伏的状态。因此，随温度的升高，某个能量较高的原子有可能克服周围原子对它的束缚作用，而跳离原来的平衡位置，使结构中形成空结点，即“空位”。而离开原来平衡位置的原子，可能跳到晶体表面的正常位置，也可能跳到晶体原子之间的间隙中，如果跳到原子之间的间隙中，即形成“间隙原子”。

在空位或间隙原子的周围，由于原子作用力的平衡遭到破坏，晶格发生歪扭，通常称为“晶格畸变”（图1-8）。晶格畸变将导致金属强度和硬度的提高。

空位和间隙原子在一定条件下，是运动和变化的。随着温度的升高，空位附近的原子由于热振动而获得足够能量时，有可能跳入该空位中，而在原来的位置上形成新的空位，这相当于空位的移动。间隙原子也可以从一个间隙跳到另一个间隙。空位与间隙原子的运动乃是金属中原子扩散的主要方式之一，它直接影响着金属在高温下进行的某些物理化学过程。例如，在热处理时的相变过程和化学热处理过程的进行，都是依赖于原子的扩散。

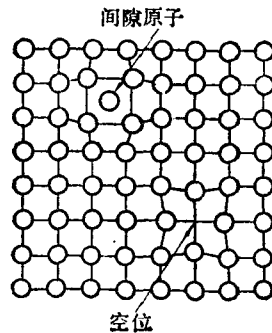


图 1-8 晶体中的空位和间隙原子

（二）位错

位错是一种“线型缺陷”，即沿一个方向呈线型分布的缺陷。它实际上是在晶体中的某处，有一列或数列原子发生有规律的错排现象。位错有许多类型，如刃型位错、螺型位错等。下面只简略地介绍其中一种最简单的位错——刃型位错。

如图 1-9 a 所示，在一个完整晶体的某个晶面上多出了半个原子面，这个多余的半个原子面象刀刃一样垂直地沿 EF 线插入，使位于 ABC 面上上下两部分晶体产生错排现象，因此称为“刃型位错”。EF 线称为“位错线”。在位错线附近，晶格发生畸变，形成一个应力集中区。在 ABC 面上方的一定范围内，原子受压应力；相反，在 ABC 面下方的一定范围内，原子受拉应力。

为了研究问题方便起见，把位错线上方多出半个原子面的刃型位错称为正刃型位错，并用“ $\perp$ ”符号表示；而把位错线下方多出半个原子面的刃型位错称为负刃型位错，并用“ $\neg$ ”符号表示。