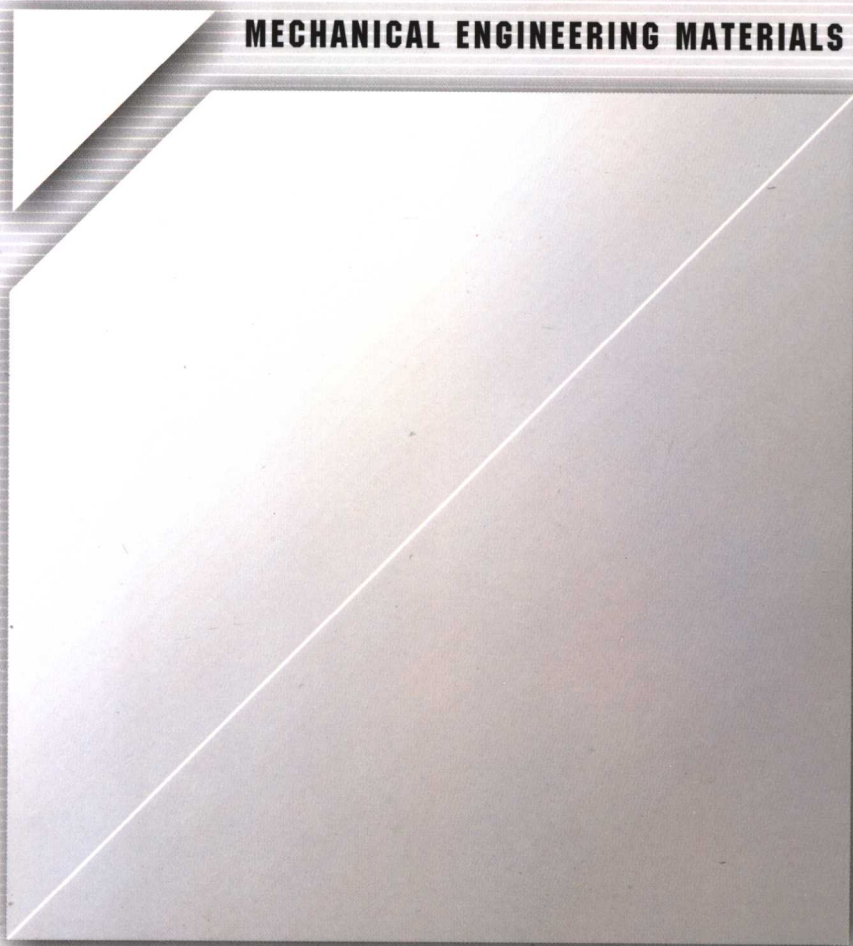


王 忠 编著
郑明新 主审

普通高等院校教材

机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS



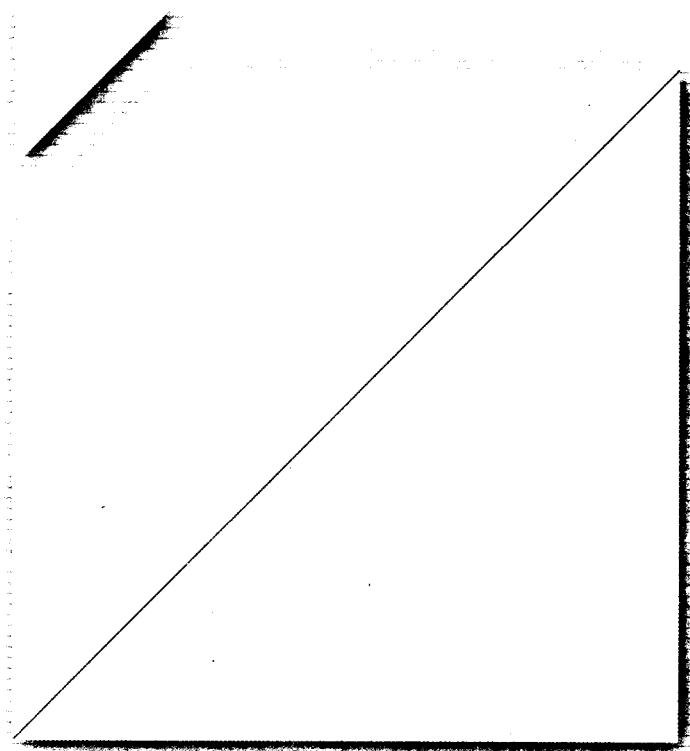
清华大学出版社

普通高等院校教材

机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS

王 忠 编著
郑明新 主审



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了机械工程常用的金属和非金属材料的基础理论,特别是金属材料的基本理论。书中第1~3章是全书的基础内容;第5章主要论述在不改变成分的条件下,用热处理的方法来提高和改善钢的性能;第4章及6~8章主要论述碳钢、合金钢、铸铁和有色金属及其合金等金属材料的成分、性能和用途;第9章讨论高分子材料、陶瓷材料和复合材料等非金属材料的化学组成和应用;第10章介绍电镀、化学镀、热喷涂、气相沉积技术和高能束表面改性的原理、性能和应用。

本书注重基本理论和基本概念的阐述,力求理论正确、概念清晰,同时又注重可读性和实用性。本书可作为高等工科院校机械类冷加工各专业本科、专科教学用书和有关工程人员的参考用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/王忠编著. —北京:清华大学出版社,2005.10

ISBN 7-302-11697-0

I. 机… II. 王… III. 机械工程材料 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098868 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编: 100084
社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 赵从棉

版式设计: 刘祎森

印 刷 者: 北京国马印刷厂

装 订 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 23.75 字 数: 519 千字

版 次: 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-11697-0/TH·179

印 数: 1~3000

定 价: 35.00 元

序

Preface

本书是王忠老师深入分析国内现行工程材料教材,结合自己长期的教学实践和体会撰写的一部新的机械工程材料教材。读后,觉得有一些特色。

第一,书的体系清楚、务实。过去我们的教材曾长期采用了金属学和热处理的原理、工艺和材料的经典三大块结构,现在国外工程材料普遍采用的是金属、陶瓷、高分子和复合材料四大部分结构,本书的体系汲取了它们的长处。本教材主次分明,概念清楚,尽量科学地体现材料整体以及各类具体材料的成分、工艺、组织、性能、应用的规律性。目前一些教材存在一种趋向,希望把所有材料从理论(组织与性能的关系)上简单地统一起来进行阐述。这是很牵强、很困难的,也没有必要,因为它会造成理论与应用相互脱节,使得讲理论复杂化,谈应用枯燥无味。可见,本书所采用的体系应该是一种比较好的安排或选择。

第二,书的内容强调基础性,重视概念的准确性。作为技术基础课,工程材料的基本理论、基本概念、基本知识和取材都必须是基础而且是成熟的。本教材充分体现了这一特点。教材的水平不完全在于讲解的理论多么高深和知识多么新颖,而主要在于满足教学的基本要求。现在有少数教材,偏重于讲一些新鲜的理论、尖端的技术或最高级的材料,但未给学生留下多少实际的基础知识。实际上,基础教材大可不必如此,激情完全可让教师在课堂上发挥。

第三,书中给出了大量必要的关于理论、工艺和材料的典型数据、资料和实例,而且主要是中国自己的。这对于培养学生理论联系实际,解决实际问题的能力是非常重要的,也是我国教材建设长期坚持的基本经验。美国的基础教材有许多优点,例如内容广、知识新、信息量大、思想活跃等,但存在着目的性不强和实践性太差的问题。本教材针对这些问题一一作了改进。

第四,本书绝大部分篇幅阐述金属材料,而对非金属材料的叙述较少,基本上反映了机械工程方面的实际用材情况。目前这样编写和如此程度重视金属材料的教材已不太多见。本书的编写基本上保持了我国主流教材严谨、求实、讲究水平的良好传统。

郑明新

2005年7月

前

言



机械工程材料是高等工科院校机械类各冷加工专业的技术基础课程,它为学好后续课程和今后的工作打下了必要的基础。

本书主要内容包括金属材料、非金属材料和表面技术。

第1~3章是全书的基础内容,讨论了金属的晶体结构和结晶、金属的塑性变形和再结晶、二元合金和相图,其中重点论述金属和合金的结构、结晶、变形和强度等基础理论以及成分改变时性能变化的规律。

热处理是充分发挥金属材料性能的一种重要方法,第5章主要论述在不改变成分的条件下,用热处理的方法来提高和改善钢的性能。

第4章及6~8章介绍机械工程中常用的碳钢、合金钢、铸铁和有色金属及其合金的成分、性能和实际用途。它们是上述基本理论的扩展和应用,有很强的实用性。

第9章介绍高分子材料、陶瓷材料和复合材料等非金属材料的化学组成、结构、性能及应用等一般知识。

第10章介绍电镀、化学镀、热喷涂、气相沉积技术和高能束表面改性的原理、性能和应用,这些表面技术的应用已日益广泛。

本书以金属材料的成分、结构、组织与性能的关系及其变化规律为主线进行论述和分析,对非金属材料和表面技术只作简单介绍。通过本书的学习,读者能够正确、合理地选用工程材料,并具有确定金属材料热处理工艺和妥善安排工艺路线的初步能力。

书中尽量选用金属材料的最新国家标准和牌号,所采用的以前制定的国家标准和牌号也已经国家有关部门审查和认定,并且正在使用。

在本书的编写过程中,长春工业大学刘文泉教授审阅和修改了第1章和第2章,吉林大学陆建培教授和陈伟常教授审阅和修改了第8章。

清华大学郑明新教授对全书进行了评审,并为本书作序。

本书是在吉林大学材料科学与工程学院材料系主任、博士生导师曹占义教授直接指导下完成的,本书的出版还得到了吉林大学教材科领导的关心和支持。在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不足,欢迎读者批评指正。

作 者

2005年6月于吉林大学

目 录



第 1 章 金属的晶体结构和结晶	1
1.1 金属键、金属晶体和金属特性	1
1.1.1 金属键	1
1.1.2 金属晶体	2
1.1.3 金属特性	2
1.2 金属的晶体结构	3
1.2.1 金属中常见的晶格类型	4
1.2.2 晶胞中的原子数	6
1.2.3 晶体的致密度	7
1.2.4 晶体的配位数	7
1.2.5 晶面和晶向	8
1.2.6 晶体的各向异性	9
1.2.7 金属晶体的特点	10
1.3 金属的结晶	10
1.3.1 液态金属的结构	10
1.3.2 金属结晶的热力学条件	11
1.3.3 金属结晶时的现象	11
1.3.4 金属结晶的过程	12
1.4 金属的实际晶体结构和缺陷	14
1.4.1 金属的实际晶体结构——多晶体	14
1.4.2 晶体的缺陷	15
1.5 金属的铸锭和铸件	17
1.5.1 金属铸锭组织	18
1.5.2 金属铸件组织	19
习题	21
第 2 章 金属的塑性变形和再结晶	23
2.1 金属的变形现象	23
2.1.1 弹性变形	24
2.1.2 塑性变形	24
2.2 金属的塑性变形	25
2.2.1 单晶体的塑性变形	25
2.2.2 多晶体的塑性变形	30
2.3 塑性变形对金属组织和性能的影响	31

2.3.1	对金属结构和组织的影响	31
2.3.2	对金属性能的影响	32
2.4	变形金属在加热时组织和性能的变化	35
2.4.1	回复	36
2.4.2	再结晶	36
2.4.3	二次再结晶——晶粒长大	37
2.4.4	影响再结晶后晶粒大小的因素	38
2.5	热加工	40
2.5.1	热加工和冷加工的区别	40
2.5.2	热加工对金属组织和性能的影响	41
	习题	42
第3章	二元合金和相图	44
3.1	合金及其种类	44
3.1.1	固溶体	44
3.1.2	金属化合物	47
3.2	二元合金相图和杠杆定理	49
3.2.1	二元合金相图的建立	49
3.2.2	相图分析	50
3.2.3	杠杆定理	50
3.3	匀晶相图	51
3.3.1	相图分析	52
3.3.2	结晶过程分析	52
3.3.3	晶内偏析及其消除	53
3.4	共晶相图	54
3.4.1	相图分析	54
3.4.2	结晶过程分析	55
3.4.3	相组成物和组织组成物	58
3.5	包晶相图	59
3.5.1	相图分析	60
3.5.2	结晶过程分析	60
3.6	具有共析转变的相图	61
3.7	合金的性能和相图之间的关系	62
3.7.1	合金的机械性能和相图的关系	62
3.7.2	合金的铸造性能和相图的关系	63

习题	64
第 4 章 铁碳合金	66
4.1 铁碳合金相图	66
4.1.1 铁碳合金中的铁	67
4.1.2 Fe-Fe ₃ C 相图中的相区	68
4.1.3 Fe-Fe ₃ C 相图中的相线	69
4.2 典型铁碳合金结晶过程的分析	71
4.2.1 工业纯铁的结晶	71
4.2.2 共析钢的结晶	73
4.2.3 亚共析钢的结晶	75
4.2.4 过共析钢的结晶	77
4.2.5 共晶白口铸铁的结晶	79
4.2.6 亚共晶白口铸铁的结晶	81
4.2.7 过共晶白口铸铁的结晶	83
4.2.8 碳对铁碳合金的组织 and 性能的影响	84
4.3 Fe-Fe ₃ C 相图的应用	86
4.3.1 在选用材料方面的应用	86
4.3.2 在铸造工艺方面的应用	87
4.3.3 在锻造工艺方面的应用	87
4.3.4 在热处理工艺方面的应用	87
4.4 碳钢	87
4.4.1 碳钢中的常存杂质	87
4.4.2 碳钢的分类、编号和用途	88
习题	95
第 5 章 钢的热处理	97
5.1 钢的相变和临界点	97
5.2 钢在加热时的转变	98
5.2.1 P → A 转变过程(A 的形成)	99
5.2.2 A 晶粒的长大及其影响因素	100
5.3 钢在等温冷却时的转变	101
5.3.1 A 等温转变图的建立	102
5.3.2 A ₁ 等温转变过程和转变产物	103
5.3.3 等温转变的温度、结构、组织和性能	106

5.3.4	影响“C”曲线的因素	107
5.4	钢在连续冷却时的转变	108
5.4.1	冷却速度和转变产物	109
5.4.2	临界冷却速度	110
5.4.3	M转变的条件和过程	110
5.4.4	M转变的特点	110
5.4.5	M的结构和组织	111
5.4.6	M的性能	112
5.5	钢的退火和正火	113
5.5.1	完全退火(重结晶退火)	113
5.5.2	球化退火(不完全退火)	114
5.5.3	去应力退火(低温退火)	114
5.5.4	再结晶退火	114
5.5.5	扩散退火(均匀化退火)	114
5.5.6	正火	115
5.5.7	正火和退火的选择	115
5.6	钢的淬火	116
5.6.1	淬火加热温度的选择	116
5.6.2	冷却介质的确定	117
5.6.3	淬火方法	118
5.6.4	钢的淬硬性和淬透性	119
5.6.5	影响工件实际淬硬层深度的因素	121
5.7	淬火钢的回火	121
5.7.1	回火时组织的变化	122
5.7.2	回火时性能的变化	123
5.7.3	回火的分类和应用	125
5.8	钢的表面热处理	125
5.9	钢的化学热处理	129
5.9.1	渗碳	129
5.9.2	渗氮(氮化)	131
习题		133
第6章	合金钢	136
6.1	钢的合金化概论	136
6.1.1	合金元素对钢中基本相的影响	136

6.1.2	合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的影响	138
6.1.3	合金元素对钢热处理的影响	140
6.2	合金结构钢	143
6.2.1	工程结构钢	144
6.2.2	机械结构钢	147
6.3	合金工具钢	167
6.3.1	刀具钢	167
6.3.2	模具钢	179
6.3.3	量具钢	182
6.4	特殊性能钢	183
6.4.1	不锈钢	183
6.4.2	耐热钢	189
6.4.3	耐磨钢	193
	习题	195
第 7 章	铸铁	197
7.1	铸铁的石墨化和分类	197
7.1.1	铁碳合金的双重相图	197
7.1.2	铸铁石墨化的条件	199
7.1.3	影响石墨化的因素	200
7.1.4	铸铁的分类	200
7.2	灰口铸铁	202
7.2.1	灰口铸铁的牌号和化学成分	202
7.2.2	灰口铸铁的孕育处理	203
7.2.3	灰口铸铁的热处理	204
7.2.4	灰口铸铁的特性和用途	205
7.3	球墨铸铁	205
7.3.1	球墨铸铁的牌号和化学成分	205
7.3.2	球化处理	207
7.3.3	球墨铸铁的热处理	207
7.3.4	球墨铸铁的特性和用途	209
7.4	蠕墨铸铁	210
7.4.1	蠕墨铸铁的牌号和化学成分	210
7.4.2	蠕墨化处理	211
7.4.3	蠕墨铸铁的性能、特点和应用	211

7.5 可锻铸铁	212
7.5.1 可锻铸铁的牌号和化学成分	212
7.5.2 可锻铸铁的石墨化退火	213
7.5.3 可锻铸铁的特性和用途	214
7.6 铸铁性能的特点	215
7.6.1 铸造性能	215
7.6.2 机械性能	215
7.6.3 切削加工性	216
7.6.4 减摩性	216
7.6.5 消振性	216
7.6.6 低的缺口敏感性	216
7.7 特殊性能铸铁	216
7.7.1 耐热铸铁	217
7.7.2 耐磨铸铁	219
7.7.3 耐蚀铸铁	221
习题	223
第8章 有色金属材料	224
8.1 铝及其合金	224
8.1.1 工业纯铝的主要特性及应用	224
8.1.2 铝合金及其热处理	225
8.1.3 常用铝合金	228
8.2 铜及其合金	240
8.2.1 纯铜	240
8.2.2 黄铜	241
8.2.3 青铜	246
8.3 钛及其合金	252
8.3.1 纯钛	252
8.3.2 钛合金	253
8.4 轴承合金	257
8.4.1 锡基轴承合金	258
8.4.2 铅基轴承合金	259
8.4.3 铜基轴承合金	260
8.4.4 铝基轴承合金	262
8.4.5 粉末冶金含油轴承	262

习题	263
第 9 章 非金属材料	264
9.1 高分子材料的基本知识	264
9.1.1 高分子材料的概念	264
9.1.2 高分子材料的组成	265
9.1.3 高分子链的结构	266
9.1.4 高分子链的形状	267
9.1.5 高分子链的构型和构象	268
9.1.6 高聚物的聚集态结构和性能	269
9.1.7 高聚物的物理状态和性能	270
9.1.8 高分子材料的化学反应	271
9.1.9 高分子化合物性能的特点和加工	273
9.1.10 高分子化合物的命名	274
9.2 常用高分子材料	274
9.2.1 塑料	274
9.2.2 橡胶	279
9.3 陶瓷材料	281
9.3.1 陶瓷的成分和结构	282
9.3.2 陶瓷的性能	283
9.3.3 常用的陶瓷材料	284
9.4 复合材料	286
9.4.1 复合材料提高机械性能的概念	286
9.4.2 复合材料的性能	287
9.4.3 常用复合材料及应用	288
习题	293
第 10 章 表面技术简介	294
10.1 固体材料表面的基础知识	295
10.1.1 固体的清洁表面结构	296
10.1.2 固体的实际表面结构	297
10.1.3 固体表面的吸附	299
10.1.4 固体表面的扩散	300
10.2 电镀和化学镀	300
10.2.1 电镀	300

10.2.2	化学镀	308
10.3	热喷涂	310
10.3.1	火焰喷涂	311
10.3.2	电弧喷涂	313
10.3.3	等离子喷涂	314
10.3.4	爆炸喷涂	315
10.3.5	超音速喷涂	316
10.4	气相沉积技术	316
10.4.1	物理气相沉积法	317
10.4.2	化学气相沉积法	321
10.5	高能束表面改性	322
10.5.1	激光表面处理	322
10.5.2	电子束表面处理	325
10.5.3	离子束表面处理	326
习题		328
第 11 章	机械工程材料的选用	329
11.1	选择材料的一般原则	329
11.1.1	使用性能	329
11.1.2	工艺性能	330
11.1.3	经济性	331
11.2	机械零件的失效	332
11.2.1	零件失效的类型	332
11.2.2	零件失效的原因	342
11.2.3	零件失效的一般分析方法	343
11.3	典型机械零件的选材	343
11.3.1	轴类零件	344
11.3.2	齿轮零件	352
习题		356
附录 A	常用钢种的临界温度	357
附录 B	硬度换算表	360
参考文献		365

金属的晶体结构和结晶

在科学技术突飞猛进的今天,材料的重要作用正在日益为人们所认识。在元素周期表的 109 种元素中,金属占 86 种,即金属占绝大部分。任何先进机器、成套设备和机械产品都缺少不了金属,特别是钢铁,当前仍然是机械工业的基本材料。性能优良的材料是整机的重要保证。正确选择好材料,并充分发挥材料性能的潜力,是每个工程技术人员的一项重要任务。为此,必须对金属材料的成分、结构、组织和性能之间的关系及其变化规律有深入的了解。下面从有关金属的基本概念开始研究和分析。

1.1 金属键、金属晶体和金属特性

自然界中所有固体物质的原子在空间的排列方式有两种:

(1) 原子在空间不规则排列所形成的物体称为非晶体。例如,玻璃、松香和沥青等固态物质均属于非晶体。

(2) 原子在空间规则排列所形成的物体称为晶体。在一般情况下,金属固体都是晶体。

下面分别介绍金属键、金属晶体和金属特性。

1.1.1 金属键

固态金属是金属原子的集合体,它是由许多金属原子组成的固体。金属原子的特点是价电子少,而且容易失去,使其变为金属正离子和自由电子。而自由电子也有可能进入金属正离子的外层轨道,使金属正离子变为金属原子。当金属原子组成金属固体时,其中金属原子状态是极少数,而绝大多数是以金属正离子和自由电子状态存在的。

根据量子力学研究确定,金属中原子的核外电子都是处于微观运动状态,并形成电子云,只是不同电子有不同的电子云图形。这表明了每个电子的运动都有一个电子云,自由电子的运动,也形成自由电子云。因此,金属原子组成金属固体时绝大多数是以金属正离

子和自由电子云状态存在。固态金属原子就是通过金属正离子和自由电子云的相互吸引而结合在一起,这种结合方式称为金属键。

由此可见“金属中,原子或离子是由自由电子云联结在一起的”^①,从而使其成为固态金属。金属键模型如图 1-1 所示。

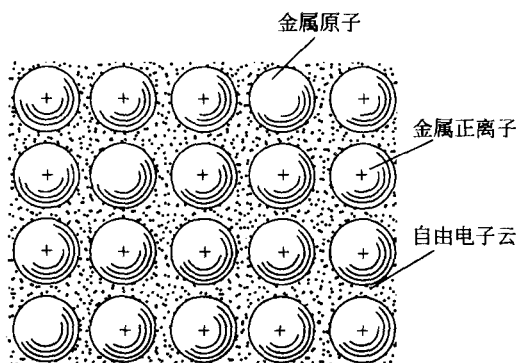


图 1-1 金属键模型

1.1.2 金属晶体

固态金属原子是以金属键的方式结合在一起,它是以正离子状态为主来实现的。金属正离子的结构是以原子核为中心,在其外面有电子呈壳层分布,从统计规律看,金属正离子的电荷在原子核周围的分布具有球面对称性质。由于金属正离子带正电荷,是带电体(+),这种带电体和它所形成的电场或电场力也具有球面对称性质,在球面对称电场力的作用下,必然使金属原子以对称的方式规则排列堆集,结果金属正离子在自由电子云中作简单的、周期性的、有规律的排列,形成了晶体,即金属原子在一般条件下形成的固体都是金属晶体。

1.1.3 金属特性

根据金属晶体的金属键的结合方式可以解释金属的一般特性。

(1) 金属导电性好 当金属原子组成晶体时,由于金属内有大量的自由电子存在,如果金属的两端存在着电势差或外加电场时则自由电子便会定向流动,形成电流。在宏观上金属具有良好的导电性能。

值得指出的是金属的导电性随它所处的温度的升高而降低,这是由于金属的导电性在受热后所产生的变化。原因是受热后金属的规则性被破坏,金属中离子热振动振幅增

^① 见《理论金属学概论》第 32 页。(苏)肖纪美等译.北京:中国工业出版社,1961

大和自由电子无规律的热运动增加,从而减弱了自由电子的定向运动,使电阻增加。因此,金属的电阻随温度的升高而增加,即金属具有正的电阻温度系数。它是金属独有的特性,其他绝大部分固体都没有这一特性。

(2) 金属导热性好 导热性是指传递热量的能力。当金属两端有温差时,金属通过正离子热交换,传递了热量,同时热端高能量电子通过运动把能量传递给冷端,使其能量增加,增高了温度。因此,金属具有良好的导热性能。

(3) 金属不透明 固态金属由于入射光束产生的交变电磁场作用,引起金属内电子振动,从而吸收了可见光所有波长的光能量,即金属能强烈地吸收可见光。即使是很薄的金属片,也不能透过可见光,因此金属是不透明的。

(4) 金属具有特殊光泽 金属因其电子吸收入射光的能量处于不稳定的高能量状态,当不稳定的高能量电子回到低能量状态时放射出能量产生辐射,即被光波辐射激发了的电子,当跳回较低能级时发出辐射,光线几乎全部被金属反射,使金属具有特殊的光泽。

(5) 金属塑性好 塑性是表示金属变形的能力。金属晶体变形时微观上是金属晶体内原子作相对的移动,而移动后的金属原子或正离子还是通过自由电子云连接在一起,即仍然保持着金属键结合。在宏观上使金属表现出一定的变形能力,即金属塑性好。

1.2 金属的晶体结构

晶体中原子的分布和排列方式称为晶体结构,简称结构。它对金属材料的性能起着重要作用。金属晶体结构不同,性能也不同。若想了解金属材料的性能,必须深入研究金属的晶体结构。为便于理解和研究金属晶体中原子的分布和排列情况,需要说明几个基本概念。

晶格 组成晶体的原子作有规则排列所形成的空间格架称为晶格。晶格格架的交点称为结点。晶格和结点是人们为研究晶体结构,用几何观点抽象出来的,它表示金属内原子分布及排列的几何方式。晶格的主要特征是晶体中任意部位的原子分布和排列方式完全相同。

晶胞 组成晶格的最基本的几何单元称为晶胞。它代表着晶格的几何特征。可把晶格看作是在空间由许多相同大小、形状和位向的晶胞所组成,即晶格是由晶胞在空间作周期而重复的排列所构成的。

晶格常数 晶胞各边的尺寸称为晶格常数。它表示晶胞的大小。若晶胞各边长度用 a 、 b 、 c 表示,且 $a=b=c$,又相互间成 90° ,则晶胞形状为立方体,同时晶胞在三维空间各边的长度,即为立方晶胞的晶格常数,它们决定于金属晶体中原子的大小和排列方式。其测量单位用 $\text{\AA}$ (埃), $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ 。

1.2.1 金属中常见的晶格类型

若晶胞的形状为立方体,并在立方体的各个顶角上分别有一个原子,则这个晶胞称为简单立方晶胞,其中 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。由简单立方晶胞所组成的晶体和晶格分别称为简单立方晶体和简单立方晶格。图1-2为简单立方晶体、简单立方晶格和简单立方晶胞的示意图。

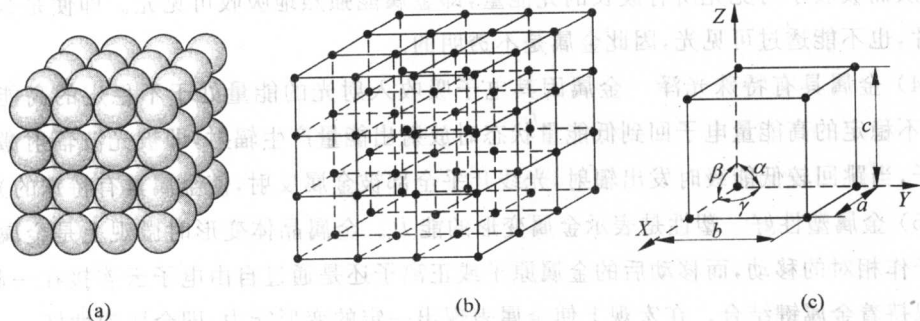


图 1-2 简单立方晶体示意图

(a) 简单立方原子排列; (b) 简单立方晶格; (c) 简单立方晶胞

在各种晶体物质中,由于其原子构造和原子间结合力的性质不同,组成了不同的晶体结构。由于非金属晶体的对称性低,一般组成的晶体的晶格类型都比较复杂。而金属晶体由于对称性很高,致使金属晶体的晶格类型十分简单。在金属元素中,约有90%以上的金属晶体都属于以下三种基本晶格类型。

(1) 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞如图1-3所示,它是个立方体。在体心立方晶胞的每个顶角和中心各有一个原子,故它称为体心立方晶胞。因为它的晶格常数为 $a=b=c$,因此可用 a 表示晶格常数。

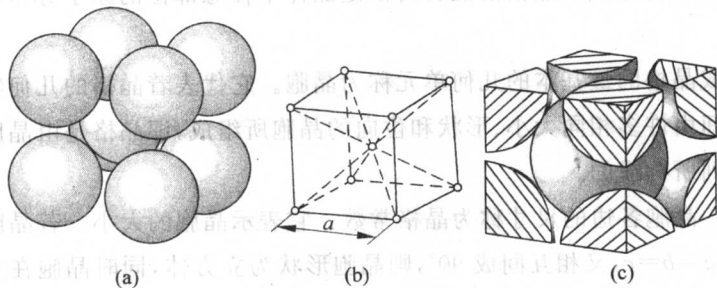


图 1-3 体心立方晶胞示意图

(a) 体心立方原子排列模型; (b) 晶胞; (c) 晶胞原子数