

高等工科院校工程材料及机械制造基础系列教材

GONGCHENG

(修订版)

工程材料

CAILIAO

GONGCHENG

东南大学出版社

主 编 戈晓岚 王特典
副主编 张远明 潘一凡

高等工科院校
工程材料及机械制造基础系列教材

工 程 材 料

(修 订 版)

主 编 戈晓岚 王特典
副主编 张远明 潘一凡
主 审 卫家楣

东南大学出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部新的专业设置要求,参考原国家教委高教司 1995 年 82 号通知颁布的高等学校工科本科《工程材料及机械制造基础教学基本要求》,结合新专业目录中相关专业的培养目标及高等学校工科教学的实际所编写的教材。全书共八章,包括材料的基础知识、力学行为、相变基础知识、改性、金属材料、非金属材料、选材和新材料等内容,每章后附有有利于培养学生分析、解决问题能力的习题。

本书以选材为主线,尽可能将非金属材料与金属材料的基本理论结合在一起,对传统内容作了较大的删简和必要的充实,尤其在金属材料的介绍中作了些新尝试;本书增加了非金属材料的比例,新添了新材料的内容,以适应时代发展的需要,也为教师的教学组织了较为丰富的内容以供针对性的选用;此外,本书在定量选材方面作了一定探索,力求具有可操作性,并在名词术语、材料牌号及计量单位等方面均采用了最新标准。

本书是高等工科院校机械工程类专业的基本教材,亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/戈晓岚,王特典主编,一2版(修订本),一南京:东南大学出版社,2000.1

高等工科院校工程材料及机械制造基础系列教材

ISBN 7-81050-130-5

I. 工… II. ①戈…②王… III. 工程材料—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 68214 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 江苏省地质测绘院印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:11.5 字数:287 千字

2000 年 1 月第 2 版 2004 年 1 月第 8 次印刷

印数:32001-35000 定价:15.00 元

工程材料及机械制造基础系列教材

编 委 名 单

主任委员：邱坤荣

副主任委员：王晓天 骆志斌 张恩生 卫家楣

委 员：黄英萍 赵小东 贺锡生 夏德荣
戈晓岚 王特典 张启芳 王辰宝
陆文周 程伟炯 李玉琴 吴 绯

修 订 前 言

本书结合教育部新的专业设置要求及高等学校工科教学的实际,参照原国家教委高教司[1995]82号通知颁布的高等学校工科本科《工程材料及机械制造基础教学基本要求》,对由王特典主编的《工程材料》进行了重新修订。

修订后的教材除保留了原教材金属与非金属材料相结合;名词术语,材料牌号及计量单位标准化;引入选材定量方法等特色外,在内容的选择上作了必要的变动,铁碳合金及金属材料等章节的编排也作了一些新的尝试,并增加了“新材料”一章;注意理论与实践应用的结合,强调能力与素质的培养。

本教材由南京林业大学赵茂程、潘一凡,东南大学张远明,南京化工大学丁毅,江苏理工大学戈晓岚编写。由戈晓岚、王特典任主编,张远明、潘一凡任副主编,由卫家楣任主审。在编写过程中,“金工信息交流站”的同志为本书的出版做了大量的工作,在此深表谢意。

限于编者的水平,错误和不妥之处难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999年8月

目 录

绪论	1	3.1.1 固溶体	35
1 材料科学的基础知识	4	3.1.2 金属间化合物	36
1.1 固体材料中的原子排列	4	3.2 二元合金相图	36
1.1.1 晶体中的原子结合	4	3.2.1 相图的基本概念	37
1.1.2 晶体结构	5	3.2.2 相图的基本类型	37
1.1.3 晶体中的缺陷	7	3.2.3 相图和合金性能之间的关系	41
1.1.4 高聚物的结构	9	3.3 铁碳合金相变基础知识	43
1.1.5 陶瓷的组织结构	11	3.3.1 铁碳合金中的基本相	43
1.2 凝固	12	3.3.2 相图分析	44
1.2.1 凝固的基本概念	12	3.3.3 铁碳合金在平衡冷却时的转变	46
1.2.2 金属的结晶	14	3.3.4 含碳量对铁碳合金组织性能的影响	48
1.2.3 材料的同素异构现象	16	3.3.5 钢在加热时的转变	49
复习思考题	18	3.3.6 钢在非平衡冷却时的转变	51
2 材料的力学行为	19	复习思考题	59
2.1 工程材料的力学性能	19	4 材料的改性	61
2.1.1 强度和塑性	19	4.1 钢的普通热处理	61
2.1.2 硬度	21	4.1.1 钢的预备热处理	61
2.1.3 冲击性能	23	4.1.2 钢的最终热处理	62
2.1.4 疲劳强度	24	4.2 金属材料的表面处理	67
2.1.5 断裂韧性	24	4.2.1 钢的化学热处理	67
2.1.6 高低温性能	25	4.2.2 钢的表面淬火热处理	69
2.2 金属的塑性变形	26	4.2.3 化学气相沉积(CVD)	70
2.2.1 单晶体的塑性变形	26	4.2.4 物理气相沉积(PVD)	70
2.2.2 多晶体的塑性变形	27	4.2.5 离子注入	70
2.3 塑性变形对金属组织与性能的影响	28	4.3 金属材料的固溶处理及时效强化	71
2.4 塑性变形金属在加热时组织和性能的变化	30	4.3.1 铝合金的固溶时效强化	71
2.4.1 回复	30	4.3.2 铜合金的固溶时效强化	71
2.4.2 再结晶	30	4.3.3 不锈钢的固溶处理	72
2.4.3 晶粒长大	31	4.4 金属的合金化	72
2.5 高聚物的力学状态	32	4.4.1 合金强化	72
2.5.1 线型无定型高聚物的力学状态	32	4.4.2 其它改性	73
2.5.2 结晶与交联对高聚物力学性能的影响	33	4.5 高聚物的改性	74
复习思考题	34	4.5.1 化学改性	74
3 二元合金及相变基础知识	35	4.5.2 物理改性	75
3.1 合金的晶体结构	35	复习思考题	76
3.1.1 固溶体	35	5 金属材料	77
3.1.2 金属间化合物	36	5.1 工业用钢	77
3.2 二元合金相图	36		
3.2.1 相图的基本概念	37		
3.2.2 相图的基本类型	37		
3.2.3 相图和合金性能之间的关系	41		
3.3 铁碳合金相变基础知识	43		
3.3.1 铁碳合金中的基本相	43		
3.3.2 相图分析	44		
3.3.3 铁碳合金在平衡冷却时的转变	46		
3.3.4 含碳量对铁碳合金组织性能的影响	48		
3.3.5 钢在加热时的转变	49		
3.3.6 钢在非平衡冷却时的转变	51		
复习思考题	59		
4 材料的改性	61		
4.1 钢的普通热处理	61		
4.1.1 钢的预备热处理	61		
4.1.2 钢的最终热处理	62		
4.2 金属材料的表面处理	67		
4.2.1 钢的化学热处理	67		
4.2.2 钢的表面淬火热处理	69		
4.2.3 化学气相沉积(CVD)	70		
4.2.4 物理气相沉积(PVD)	70		
4.2.5 离子注入	70		
4.3 金属材料的固溶处理及时效强化	71		
4.3.1 铝合金的固溶时效强化	71		
4.3.2 铜合金的固溶时效强化	71		
4.3.3 不锈钢的固溶处理	72		
4.4 金属的合金化	72		
4.4.1 合金强化	72		
4.4.2 其它改性	73		
4.5 高聚物的改性	74		
4.5.1 化学改性	74		
4.5.2 物理改性	75		
复习思考题	76		
5 金属材料	77		
5.1 工业用钢	77		

5.1.1 钢的分类与编号	77	7.1.1 失效的概念	140
5.1.2 各种元素对钢性能的影响	79	7.1.2 零件失效的类型及原因	140
5.1.3 结构钢	80	7.1.3 失效分析方法	141
5.1.4 工具钢	88	7.2 材料的选用	141
5.1.5 特殊性能钢	94	7.2.1 使用性能与选材	141
5.2 铸铁	100	7.2.2 选材与材料工艺性能的关系	144
5.2.1 铸铁的石墨化	100	7.2.3 经济性与选材	145
5.2.2 常用铸铁	101	7.2.4 选材的一般方法	148
5.2.3 合金铸铁	105	7.3 选材的定量方法	149
5.3 有色金属及其合金	106	7.3.1 单位性质成本法	149
5.3.1 铝及其合金	106	7.3.2 选材中的模糊设计	150
5.3.2 铜及其合金	110	7.4 典型零件的选材	152
5.3.3 轴承合金	114	7.4.1 齿轮类零件的选材	152
5.3.4 其他有色金属及其合金	115	7.4.2 轴类零件的选材	154
复习思考题	117	复习思考题	158
6 非金属材料	118	8 新材料	159
6.1 高分子材料	118	8.1 三大功能材料	159
6.1.1 工程塑料	118	8.1.1 形状记忆材料	159
6.1.2 橡胶	122	8.1.2 减振合金	161
6.1.3 胶粘剂	123	8.1.3 材料的超塑性	162
6.1.4 涂料	125	8.2 发展中的金属间化合物及纳米材料	164
6.1.5 聚合物合金和互穿聚合物网络	128	8.2.1 发展中的金属间化合物	164
6.2 工业陶瓷	129	8.2.2 纳米材料	165
6.2.1 陶瓷材料的性能	129	8.3 磁性材料和超导材料	166
6.2.2 常用工业陶瓷	131	8.3.1 磁性材料	166
6.3 复合材料	136	8.3.2 超导材料	168
6.3.1 复合材料性能特点	136	8.4 其它新材料	169
6.3.2 复合材料的分类	137	8.4.1 非晶态金属	169
6.3.3 复合材料的发展	138	8.4.2 梯度功能材料	171
7 材料的选用	140	8.4.3 储氢合金	173
7.1 零件的失效分析	140	参考文献	175

绪 论

材料是人类生产和生活所必需的物质基础。从日常生活用具到高、精、尖的产品,从简单的手工工具到技术复杂的航天器、机器人,都是由不同种类、不同性能的材料加工成的零件组合装配而成。材料的利用情况标志着人类文明的发展水平,历史学家把人类的历史按人类所使用的材料种类来划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等,材料的利用和发展构成了人类文明史的里程碑。

材料的发展从低级到高级,从简单到复杂,从天然到合成。图 0-1 表明了材料发展的历程。可以看出,20 世纪中期是金属的黄金时代。今后的趋势是人工合成材料将得到大发展,成为金属、高分子、陶瓷及复合材料共存的时代。

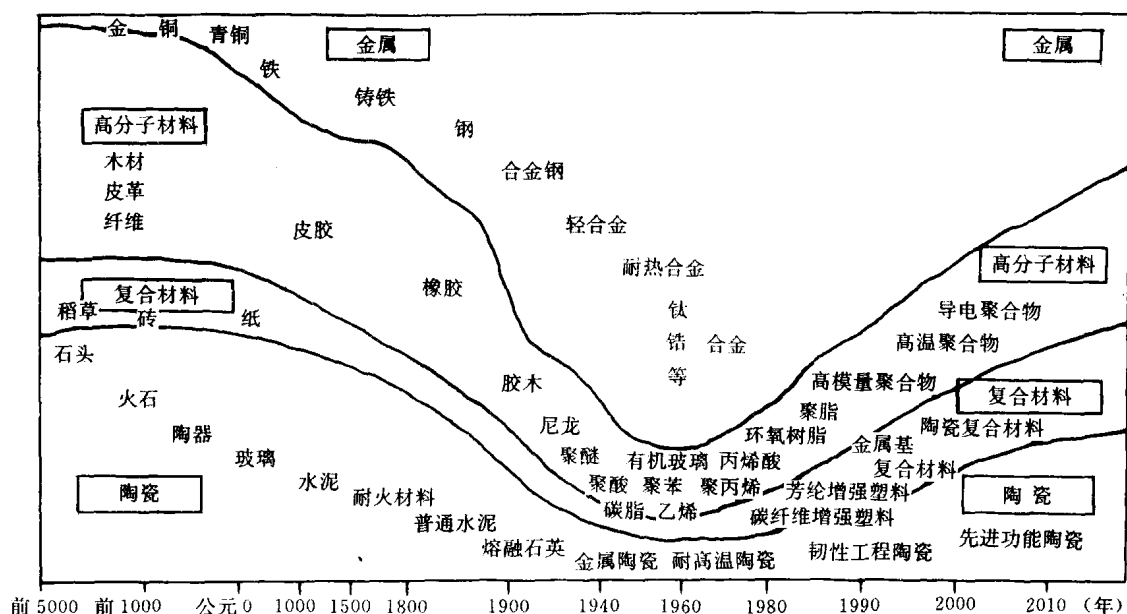


图 0-1 各类材料发展的历程(相对重要性的示意图,时间座标为非线性)

70 年代,人们把材料、能源、信息称为现代技术的三大支柱,而能源和信息的发展,在一定程度上又依赖于材料的进步。因此,许多国家都把材料科学作为重点发展学科之一,使之成为新技术革命提供坚实的基础。

人们对材料的认识是逐步深入的。1863 年第一台光学显微镜问世,导致了金相学的研究,使人们步入材料的微观世界,X 射线的发现,开始了晶体微观结构的研究。电子显微镜的发明以及后来出现的各种先进分析工具,又把人们带到了微观世界的更深层次。一些与材料有关的基础学科(如固体物理、量子力学、化学等)的发展,又有力地推动了材料研究的深化。所以,材料科学是研究材料的化学组成和微观结构与材料性能之间关系的一门科学。同时它

还研究制取材料和使用材料的有关知识。

我国的金属材料发展史可追溯至史前,早在 4000 年前,我国就开始使用青铜,例如殷商祭器司母戊大方鼎,其体积庞大,鼎重 875kg,花纹精巧,造型精美。这充分说明了远在商代(公元前 1562~1066 年),我国就有了高度发达的冶铸青铜技术。在春秋时期,我国发明了冶铁技术,开始用铸铁作农具,这比欧洲早 1800 多年。明代科学家宋应星所著《天工开物》一书,内有冶铁、炼钢、铸钟、锻铁、淬火等各种金属加工方法,它是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一,这充分反映了我国劳动人民在材料及金属加工方面的卓越成就。

在材料的生产和使用方面,我们的祖先有过辉煌的成就,为人类文明作出了巨大的贡献,直到 17 世纪,我国还一直处于领先地位。由于长期的封建统治,劳动人民的生产经验得不到应有的重视,不能及时总结提高,再加上百年来受到帝国主义的侵略及压迫,科学技术受到极大的抑制,我国的科学技术处于落后状态。

新中国成立后,我国工农业生产和材料工业得到了迅速发展,建立了矿山、冶金、机械制造、交通运输、石油化工、电子仪表、航空航天等许多现代工业,为国民经济进一步高速发展奠定了牢固的基础。目前,我国的钢铁、有色金属产品已能基本满足需要,钢的年生产能力已达一亿吨以上。非金属材料的产量也有了很大增长。所有这些成就,都与工程材料及其加工工艺的发展有着密切的关系。

工程材料是指工程上使用的材料,其种类繁多,有许多不同的分类方法。若按用途分,可分为建筑工程材料、机械工程材料、电工材料等;若按原子聚集状态分,可分为单晶体材料、多晶体材料和非晶体材料;若按材料的化学成分、结合键的特点分,可分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。

金属材料是目前应用最广泛的工程材料,它包括纯金属及其合金。在工业上,把金属材料分为两类:一类是黑色金属,它是指铁、锰、铬及其合金,其中以铁为基的合金(钢和铸铁)应用最广;另一类是有色金属,这是指除黑色金属以外的所有金属及其合金。按照特性的不同,有色金属又分为:轻金属、重金属、贵金属、稀有金属和放射性金属等多种。

非金属材料是近几十年来发展很快的工程材料,预料今后还会有更大的发展。非金属材料包括有机高分子材料和无机非金属材料两大类。有机高分子材料按其应用可分为塑料、橡胶、合成纤维;而无机非金属材料以陶瓷应用最广。

复合材料是一种新型的、具有很大发展前途的工程材料,它是把两种或两种以上的不同性质或不同组织结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而构成的。它不仅保留了组成材料各自的优点,而且具有单一材料所没有的优异性能。

目前,机械工业正向着高速、自动、精密方向迅速发展,在产品设计与制造过程中,遇到的材料与材料加工的问题越来越多,机械工业的发展与“工程材料”这门课程之间的关系亦愈加密切。课程教学本身除解决正确地选择材料外,还涉及到部分的加工工艺问题,尤其是热处理工艺。正确地选用材料,并施以合适的热处理方法,就能充分发挥材料本身的性能潜力,显著提高产品的质量,更好地满足不同使用条件下的要求。

随着原子能、航空航天、电子、海洋开发等现代工业的发展,对材料提出更为严格的要求,将会出现相对密度更小、强度更高、加工性更好、能满足特殊性能要求的新材料。

工程材料课是机械类各专业的技术基础课,它的先修课程是物理、化学、材料力学、金工实习等。本课程的目的是使学生了解工程材料的一般知识,了解常用材料的成分、组织、性能与加工工艺之间的关系及其用途,使学生初步具有合理选用材料、正确确定加工方法及工艺的能力。

本课程是一门理论性和实践性很强的课程,而且叙述性的内容较多。大部分学生缺乏实际生产经验和感性知识。讲授时应注意教学方法,尽可能列举学生能接受的生产应用实例,辅以课堂讨论,强化实验,加深学生对课程内容的理解。学生应充分运用以前学过的知识,课后及时复习,认真完成实验和课外作业,尽力消化和理解工程材料的基本理论知识,达到能初步应用的目的。

1 材料科学的基础知识

1.1 固体材料中的原子排列

一切固态物质按其原子(也可以是离子、原子团、分子等)排列是否有序,分为晶体和非晶体两大类。在晶体中,原子(或分子)按一定的几何规律作周期性地排列。非晶体中这些质点无规则地堆积在一起。

1.1.1 晶体中的原子结合

原子间的结合性质主要取决于原子核外价电子的相互作用,构成晶体的原子间结合键分为结合力较强的金属键、离子键和共价键三种强键,以及在分子之间存在的较弱的结合键——分子键和氢键。

1) 金属键及金属晶体(图 1-1-1a))

金属原子间依靠金属键结合形成金属晶体。

在金属原子相互紧密接近时,由于原子间的相互作用,金属原子的价电子便从各个原子中脱离出来,为整个金属所共用,形成“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,形成金属晶体,这种结合方式称为金属键。

除铍、锑、锆、镓等亚金属为共价键结合外,绝大多数金属都是金属晶体。

2) 离子键及离子晶体(图 1-1-1b))

当正电性金属原子与负电性非金属原子形成化合物时,通过外层电子的重新分布和正、负离子间的静电作用而相互结合,从而形成离子晶体,这种结合键为离子键。大部分盐类、碱类和金属氧化物都属离子晶体,部分陶瓷材料(MgO 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等)及钢中的一些非金属夹杂物也以此键结合。

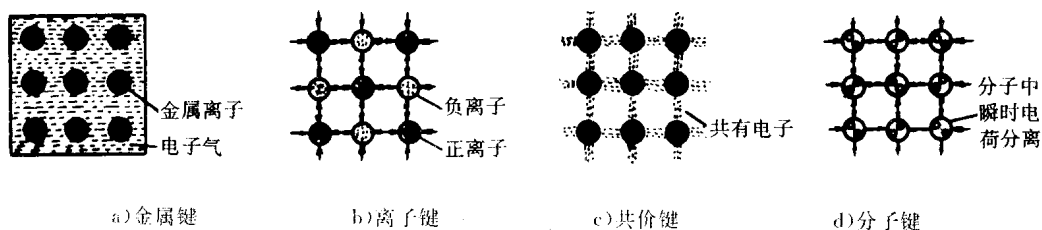


图 1-1-1 原子结合键的类型

3) 共价键及共价晶体(图 1-1-1c))

当两个相同的原子或性质相差不大的原子相互接近时,它们的原子间不会有电子转移。此时原子间借共用电子对所产生的力而结合,从而形成共价晶体,这种结合方式称为共价键。锡、锆、铅等亚金属及金刚石、 SiC 、 SiO_2 、 BN 等非金属材料都是共价晶体。

4) 分子键及分子晶体(图 1-1-1d))

自由原子状态已经形成稳定电子壳层的惰性气体 He 、 Ne 、 Ar 等和分子状态的 H_2 、 N_2 、

O₂ 等在低温时都能结合成液态和固态,在此结合过程中,并不给出或接受电子,这种存在于中性原子或分子之间的结合力称为分子键,也称范德华(Vander Waals)力。依靠分子键结合起来的晶体称分子晶体。

原子间结合键的种类不同,其结合力的强弱差异较大。即使同一性质的结合键也存在强弱之别,如一些弱共价键结合的固体也会具有一定的导电性。

实际上,大多数材料往往是几种键的混合结合,其中以一种结合键为主,表 1-1-1 列出了四大类工程材料的结合键的组成及由此而产生的材料性能特点。

表 1-1-1 四大类工程材料的原子间结合键及其性能特点

种类	结合键	熔点	弹性模量	强度硬度	塑性韧性	导电性 导热性	耐热性	耐腐蚀性	其他性能
金属材料	金属键为主	较高	较高	较高	良好(铸铁等脆性材料除外)	良好	较高	一般	密度大,不透明,有金属光泽
有机合成 高分子材料	分子内共价键 分子间分子键	较低	低	较低	变化大	绝缘,导热不良	较低	高	密度小,热膨胀系数大,抗蠕变性能低,易老化,减摩性好
陶瓷材料	离子键或共价键为主	高	高	抗压强度与硬度高,抗拉强度低	差	绝缘,导热不良	高	高	耐磨性好,热硬性高,抗热振性差
复合材料	取决于组成物的结合键	能克服单一材料的某些弱点,充分发挥材料的综合性能							

1.1.2 晶体结构

晶体中原子(分子或离子)在空间的规则排列的方式称为晶体结构。为便于描述晶体结构,把每个原子抽象成一个点,把这些点用假想直线连接起来,构成空间格架,称为晶格,如图 1-1-2b)所示。晶格中的每个点称为结点,由一系列原子所组成的平面称为晶面,由任意两

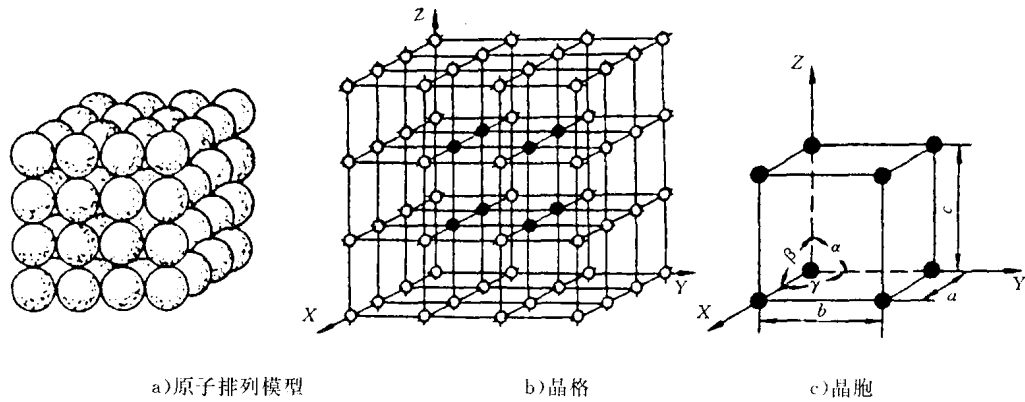


图 1-1-2 晶体中原子排列

个原子之间连线所指的方向称为晶向。组成晶格的最小几何组成单元称为晶胞,如图 1-1-2c)所示。晶胞的大小和形状可用晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示,如图 1-1-2c)所示,他们被称为晶格常数,其长度单位为 10^{-10}m 。

根据这六个晶格常数的不同可以把晶体分成七大晶系十四种空间点阵。

金属中由于原子间通过较强的金属键结合,原子趋于紧密排列,构成少数几种高对称性的简单晶体结构。在金属元素中,约有 90% 以上的金属晶体结构都属于下列三种晶格形式。

1) 体心立方晶格

如图 1-1-3 所示,晶胞呈立方体,晶格常数可用边长 a 表示。由图可见,在晶胞的每个角和中心各排列着一个原子。其对角线方向上的原子彼此紧密排列,显然对角线长度 $\sqrt{3}a$ 等于四个原子半径,故体心立方晶胞的原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}a}{4}$ 。体心立方晶胞每个角上的原子为相邻的八个晶胞所共有,因此实际上每个晶胞包含原子数为 $1/8 \times 8 + 1 = 2$ (个)。

晶胞中原子排列的紧密程度可用致密度来表示。致密度是指晶胞中原子所占的体积与该晶胞体积之比。对于体心立方晶格,可算出其致密度为 0.68,此值表明,在体心立方晶格金属中,有 68% 的体积被原子所占据,其余 32% 的体积为空隙。

属于体心立方晶格的金属有 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Cr 、 Mo 、 W 、 V 、 Nb 、 $\beta\text{-Ti}$ 等。

2) 面心立方晶格

面心立方晶格如图 1-1-4 所示。在晶胞每个角及每个面的中心各分布着一个原子,在各

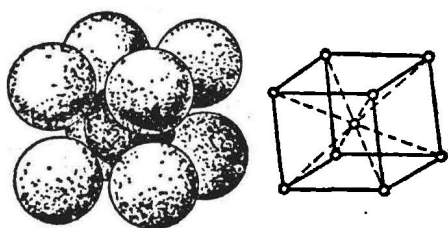


图 1-1-3 体心立方晶胞

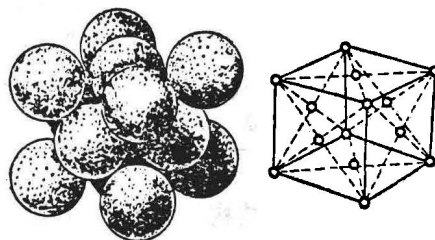


图 1-1-4 面心立方晶胞

个面的对角线上各原子彼此相互接触,紧密排列,其原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。每个面心位置的原子同时属于两个晶胞所共有,故每个面心立方晶胞中仅包含 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 个原子,其致密度为 0.74。

属于面心立方晶格的金属有 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cu 、 Al 、 Ni 、 Au 、 Ag 、 Pt 、 $\beta\text{-Co}$ 等。

3) 密排六方晶格

如图 1-1-5 所示,其晶胞是六方柱体,它是由六个呈长方形的侧面和两个呈六边形的底面组成。因此要用两个晶格常数表示,一个是上下底面间距 c 和六边形的边长 a ,在紧密排列情况下 $c/a = 1.633$ 。在密排六方晶胞的每个角上和上下底面的中心都排列着一个原子,另外在晶胞中间还有三个原子。密排六方晶胞每个角上的原子为相邻的六个晶胞所共有,上、下底面中心的原子为两个晶胞所共有,晶胞内部三个原子为该

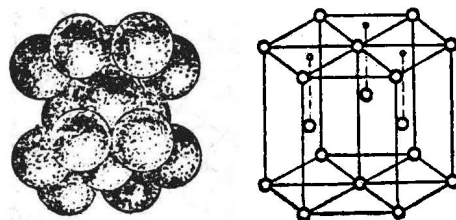


图 1-1-5 密排六方晶胞

晶胞独有,所以密排六方晶胞中原子数为 $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ (个),其致密度为 0.74。

属于密排六方晶胞的金属有 Be、Mg、Zn、Cd、 α -Co、 α -Ti 等。

晶体中不同晶向上的原子排列紧密程度及不同晶面间距是不相同的,所以不同方向上原子结合力也不同,晶体在不同方向上的物理、化学、力学间的性能也有一定的差异,此特性称为晶体的各向异性。

1.1.3 晶体中的缺陷

上述晶体结构是一种理想状态,可看成是晶胞的重复堆砌,这种晶体称为单晶体(如图 1-1-6a))。显然,单晶体是指原子排列的位向或方式均相同的晶体。由于多种因素的影响,实际工程上所用的材料并非都是单晶体,绝大多数是多晶体,它是由若干个小的单晶体组成,这些小的单晶体称为晶粒,每个晶粒的原子位向各不相同,如图 1-1-6b)。即使在一个晶粒内,实际晶体的结构与理想状态也存在着差异。这些与理想晶体的偏差称为晶体缺陷。按照晶体缺陷的几何尺寸,可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。

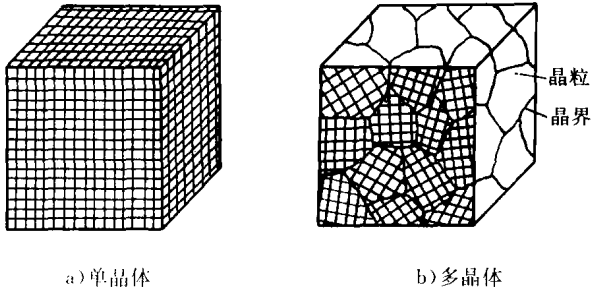


图 1-1-6 单晶体与多晶体

1) 点缺陷

点缺陷是一种在三维空间各个方向上尺寸都很小,尺寸范围约为一个或几个原子间距的缺陷,包括空位、间隙原子、置换原子等。晶格上没有原子的结点称为空位(图 1-1-7a)),在晶格结点以外位置上的原子称为间隙原子(图 1-1-7b)),占据正常结点的异类原子称置换原子(图 1-1-7c))。

点缺陷的形成主要是由于原子在以各自的平衡位置为中心不停地作热振动的结果。各个原子的热振动能量并不相同,而且每个原子的热振动能量在不同的瞬间也是不同的。当某些原子振动的能量高到足以克服周围原子的束缚时,它们便有可能脱离原来的平衡位置,跳到晶界或晶格间隙处,形成间隙原子,在原来的位置上形成空位。

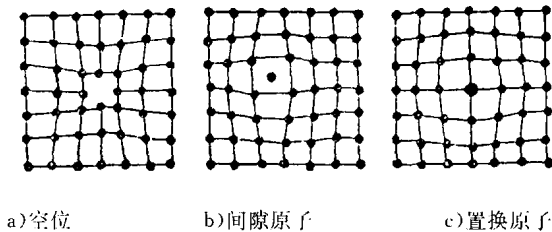


图 1-1-7 点缺陷

即使在很纯的金属中,也会存在一些异类原子,当异类原子尺寸很小时,容易挤入晶格的间隙中,成为异类间隙原子。当异类原子尺寸较大时,便会取代正常结点原子而形成置换原子。异类原子的这两种存在方式并不改变晶体的晶格类型,呈固体溶解状态(即为固溶体,将在第三章作详细介绍)。

由图 1-1-7 可知,在点缺陷附近,由于原子间作用力的平衡被破坏,使其周围的其它原子发生靠拢或撑开的不规则排列,这种变化称为晶格畸变。晶格畸变将使材料产生强度、硬度和电阻等力学性能及物理、化学性能的改变。

2) 线缺陷

线缺陷是指在三维空间中二维方向的尺寸较小,在另一维方向的尺寸相对较大的缺陷。

属于这类缺陷的就是各种类型的位错。

位错是晶格中的某处有一列或若干列原子发生了某些有规律的错排现象。位错最基本的形式有刃型位错和螺型位错。图 1-1-8 所示为刃型位错示意图。由图可见,晶体的上半部多出一个原子面(称为半原子面),它像刀刃一样切入晶体,其刃口即半原子面的边缘便为一条刃形位错线(符号 $\perp$ 所示处)。位错线周

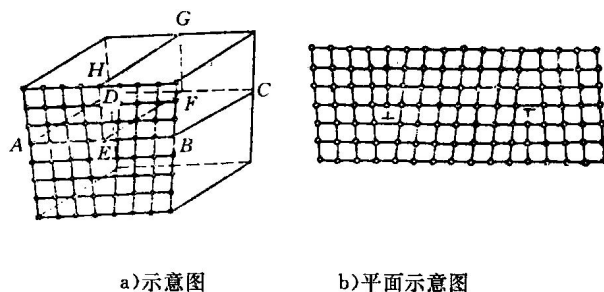


图 1-1-8 刃型位错

围会造成晶格畸变。畸变程度随离位错线的距离增大而逐渐减小,直至为 0。严重晶格畸变的范围约为几个原子间距。

晶体中的位错密度以单位体积中位错线的总长度来表示,单位是 cm/cm^3 (或 cm^{-2})。在退火金属中,位错密度一般为 10^6cm^{-2} 。在大量冷变形或淬火的金属中,位错密度可达 10^{12}cm^{-2} 。提高位错密度是金属强化的重要途径之一。

3) 面缺陷

面缺陷是指在三维空间中一维方向上尺寸很小,另外两维方向上尺寸较大的缺陷。最常见的面缺陷是晶体中的晶界和亚晶界。

在多晶体中,各晶粒的位向各不相同,晶粒间的过渡区称晶界。晶界处原子排列混乱,晶格畸变程度较大,如图 1-1-9 所示。多晶体中,晶粒间的位向差大多在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 左右,晶界宽度一般在几个原子间距到几百个原子间距内变动。

在每个晶粒内部,原子也不是完全理想的规则排列,而是存在着很多尺寸很小(边长约 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{cm}$),位向差也很小(小于 $1^\circ \sim 2^\circ$)的小晶块,这些小晶块称为亚晶粒。亚晶粒的交界为亚晶界,图 1-1-10 所示。它实际上由一系列刃形位错所构成,图 1-1-11 为金镍合金中的亚晶粒组织,图中亮白线条为亚晶界。

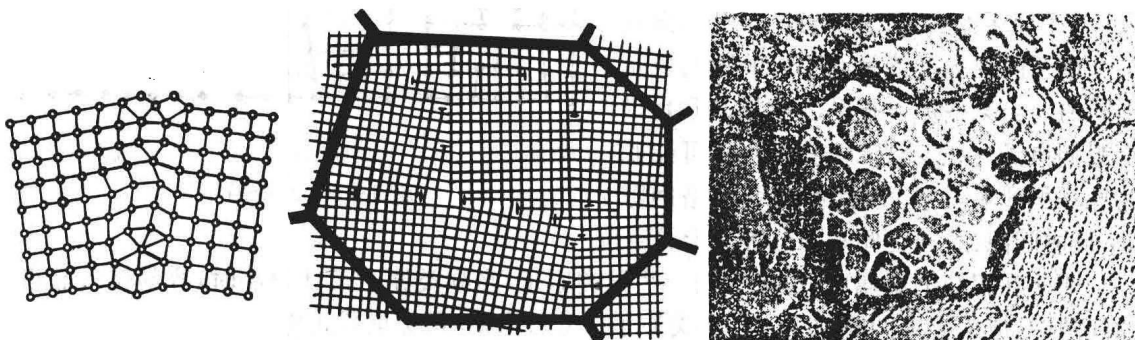


图 1-1-9 晶界

图 1-1-10 实际金属晶粒内的结构

图 1-1-11 金镍合金的亚晶粒

在实际晶体结构中,上述晶体缺陷并不是静止不变的,而是随着一定的温度和加工过程等各种条件的改变而不断变动。它们可以产生、运动和交互作用,而且能合并和消失。晶体缺陷对晶体的许多性能有很大的影响,特别对金属的塑性变形、固态相变以及扩散等过程都起着重要的作用。

1.1.4 高聚物的结构

高聚物也叫高分子化合物,是指许多由大分子组成的物质,其分子量高达 $10^4 \sim 10^6$ 。但其化学组成并不复杂,往往由许多相同结构单元通过共价键重复连接(聚合)而成。这种结构相同的重复单元称链节。例如聚乙烯 $[-CH_2-CH_2-]_n$ 的链节为 $-CH_2-CH_2-$ 。链节的重复数量称聚合度,聚合度是衡量高分子大小的指标。链节的分子量与聚合度的乘积即为大分子的分子量。由若干个链节所组成的具有独立运动能力的最小单元称链段。链段常包含几个甚至几十个链节。大分子链内各原子之间由共价键结合,而链与链间则通过分子键结合。大分子往往含有不同的取代基,例如乙烯类聚合物 $[CH_2-\underset{\substack{| \\ R}}{CH}]_n$ 中, R 即为取代基。取代

基 R 的种类及其在大分子链中的排列方式,对性能均有一定的影响。

高聚物的性能也取决于其组成与结构。高聚物的组织与结构的微观层次可分为两个,一是大分子链内结构,二是大分子链间结构。

1) 大分子链结构

高聚物的链结构形成,按其几何形状,可分为线型结构和体型结构,如图 1-1-12 所示。

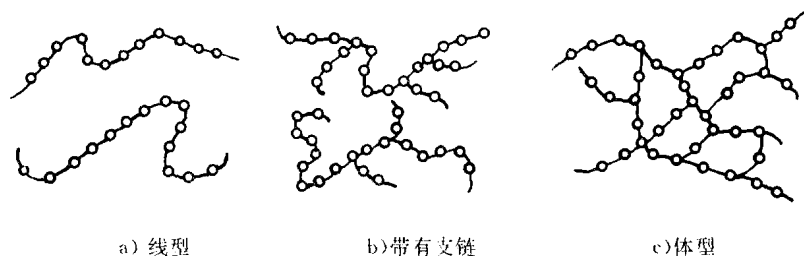


图 1-1-12 高聚物的结构示意图

(1) 线型结构(图 1-1-12a)、b))

线型结构是由许多链节用共价键连接起来的长链(图 1-1-12a)),其分子直径与长度之比可达到 $1:1000$ 以上。这种细而长的结构,通常卷曲成不规则的线团状,在拉伸时呈直线状。具有线型结构的高聚物在加工成型时,表现出良好的塑性和弹性。在适当的溶剂中能溶解或溶胀。加热可软化或熔化,冷却后变硬,并可反复进行。因此线型高聚物易于加工成形,并可反复使用。一些合成纤维和热塑性塑料(如聚氯乙烯、聚苯乙烯等),就属于此类结构。

有一些高聚物的大分子链还带有一些小的支链(图 1-1-12b)),这些支链的存在使线型高聚物性能发生变化,如熔点升高,粘度增加等。

(2) 体型结构(图 1-1-12c))

这种结构中,分子链与分子链之间有许多链节相互交联在一起,形成网状或立体结构。

具有体型结构的高聚物,硬度、强度高,弹性、塑性低,对溶剂和热的作用都比线型高聚物稳定,呈现不溶不熔的特点,具有良好的耐热性和强度,只能在形成网状结构前进行一次成形,固化后硬而脆,不能重复使用。热固性塑料(如酚醛塑料、环氧塑料等)就属于此类结构。

(3) 大分子链的构象及柔顺性

大分子链可以在保持共价键键长和键角不变的前提下进行自旋转,这称为单键的内旋转。图 1-1-13 是 C-C 键内旋转示意图。当单键 α 在保持键角 $\theta = 109^\circ 28'$ 不变情况下自旋时,

键 b 将沿以 C_2 为顶点的锥面旋转,即 C_3 可以在 C_2 为顶点的圆锥底边的任意位置出现;同样 C_4 又可能在以 C_3 为顶点的圆锥底边的任一位置出现,依次类推。

由于高分子含有成千上万个单键,众多单键的内旋转,使高分子的形态瞬息万变,因而分子链会出现许多不同的形象。这种由于单键内旋转引起的原子在空间占据不同位置所构成的分子链的各种形象,称为大分子链的构象。由于大分子链构象的频繁变化,使得大分子链既可扩张伸长,又可卷曲收缩。大分子这种能由构象变化获得不同卷曲程度的特性称为大分子链的柔顺性。

影响大分子链柔顺性的因素主要有主链结构和取代基两个方面。

① 主链结构 主链长,柔顺性好。当主链全部由单键组成时,分子链的柔顺性最好。在常见的三大类主链结构中,以 Si-O 最好,C-O 键次之,C-C 键再次之。

主链中含有芳杂环时,由于它不能内旋,故柔顺性下降而显示出刚性,能耐高温。

主链中含有孤立双键时,柔顺性好。例如聚氯丁二烯橡胶,因含有孤立双键而柔顺性增大。

② 取代基的性质 取代基的极性、体积和分布都影响柔顺性。极性越强,体积越大,分布的对称性越差,则柔顺性越低。

2) 高聚物的聚集态结构

高聚物的聚集态结构,是指高分子材料内部大分子链之间的几何排列和堆砌结构,也称为超分子结构,它是在加工成形过程中形成的。大分子链之间以范德华力和(或)氢键结合,键虽弱,但因分子链很长,故链间总作用力为各链节作用力与聚合度之积,故大大超过链内共价键。显然,大分子链的聚集态结构与高分子材料的性能有着直接关系。

高聚物按照大分子排列是否有序,分成结晶型和无定型(非结晶)两类。结晶型高聚物的分子排列规整有序,无定型高聚物的分子排列杂乱不规则。

结晶型高聚物(图 1-1-14)由晶区(分子作规则紧密排列的区域)和非晶区(分子处于无序状态的区域)所组成。由于分子链很长,在每个部分都呈现规则排列是很困难的,通常用结晶度来表示高聚物中晶区所占的重量百分数(或体积百分数)。一般结晶型高聚物的结晶度为 50%~80%。

无定型高聚物的结构,并非真正是大分子排列呈杂立交缠状态,实际上其结构只是大距离范围内无序,而小距离范围内有序,即远程无序,近程有序。

结晶型高聚物的分子排列紧密,分子间作用力很大,所以使高聚物的密度、强度、硬度、刚度、熔点、耐热性、耐化学性、抗液体及气体透过能力等性能有所提高,而依赖链运动的有关性能,如弹性、塑性和韧性则较低。

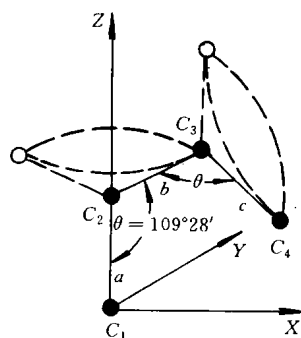


图 1-1-13 单键内旋转示意图

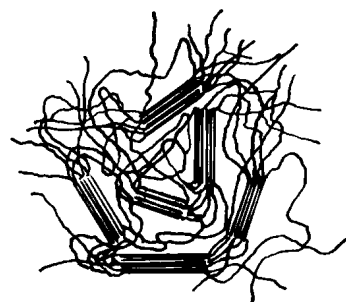


图 1-1-14 高聚物的晶区与非晶区示意图