

中国矿业大学新世纪教材建设工程资助教材

材料概论

Cailiao Gailun

主编 孙 智 欧雪梅

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

材料概论

孙 智 欧雪梅 主编

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书是高等院校材料类通识课程的教材。全书共七章,分为三个部分:材料科学基础知识、各类材料及其特性与应用、材料科学与新材料发展概况,有的内容是单独成章,有的则是融合在不同章节之中。

本书可作为高等院校非材料专业学生的教材或教学参考书,也可供有关科技工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料概论/孙智,欧雪梅主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2008.11

ISBN 978 -7 - 5646 - 0118 - 8

I. 材… II. ①孙…②欧… III. 材料—理论—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 177455 号

书 名 材料概论
主 编 孙 智 欧雪梅
责任编辑 杨传良
责任校对 何晓惠 仓小金
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×960 1/16 印张 14.5 字数 278 千字
版次印次 2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷
定 价 20.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

材料是社会发展的物质基础。20世纪60年代,人们把材料、能源、信息并称为现代技术和现代文明的三大支柱;70年代又把新型材料、信息技术和生物技术列为新技术革命的主要标志。可以说,材料工业是国民经济建设中的重要工业,也是非常重要的研究方向;材料是所有工业的基础,材料技术成为不同工程领域产业化的共性关键技术。当代每一项重大新技术的出现都有赖于新材料的发展。人们已经强烈地认识到材料科学与材料工程对社会发展的作用。无论是专门从事材料研究的科技人员,还是经济学家、金融银行家、企业界巨头以及国家领导人,都密切注意材料研究的动向和发展趋势,以便及时把握住时机作出正确决策,在世界经济发展的竞争中占有一席之地。

在非材料类专业中开设材料类通识课程,其目的是使非材料类专业学生对材料科学与材料工程的基本知识、材料的发展状态有一个基本的认识,能够在今后各自从事的技术领域中更好地利用材料发展的成果。

为了“材料概论”课程教学的需要,我们编写了这本教材。全书可以分为三个部分:材料科学基础知识、各类材料及其特性与应用、材料科学与新材料发展概况,有些内容是单独成章,有些内容是融合在不同章节之中。在教学组织和教材使用过程中,应根据不同专业领域的学生实际情况有所侧重。

本书由中国矿业大学孙智、欧雪梅主编,孙智编写第一、第二、第七章,张绪平编写第三章,赵宇龙编写第四章,欧雪梅编写第五、第六章。全书由孙智教授统稿,强颖怀教授主审。

在编写过程中,作者参考和引用了许多专著和论文,在此向专著和论文的作者表示衷心的感谢!

感谢中国矿业大学教材出版基金资助,感谢教务处领导和学校课程建设委员会专家,感谢中国矿业大学出版社的杨传良编辑,他们的支持和辛勤工作给作者带来了很大的写作动力,促成了该教材的出版。

材料科学与工程是一级学科,其基础知识面很宽,各类材料及其性能更是纷繁复杂,要在很少的课时内让学生有一个概念性的认识,在体系和内容的把握上难度很大。对于书中疏漏和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年8月

目 录

第一章 材料科学基础知识	1
第一节 绪论.....	1
第二节 材料中的晶体结构.....	3
第三节 高分子材料的结构	11
第四节 材料力学性能	14
第五节 相变与热处理	21
第六节 固体材料的物理性能	35
思考题	41
第二章 钢铁材料及其应用	42
第一节 绪论	42
第二节 工程构件用钢	46
第三节 机器零件用钢	53
第四节 工模具用钢	61
第五节 不锈钢	68
第六节 耐热钢	73
第七节 铸铁与铸钢	77
思考题	81
第三章 有色金属及其合金	83
第一节 铝及铝合金	83
第二节 铜及铜合金	91
第三节 钛合金概述.....	100
第四节 镁合金概述.....	106
思考题.....	109
第四章 无机非金属材料	111
第一节 矿物材料.....	111

第二节	陶瓷材料	117
第三节	玻璃材料	138
第四节	胶凝材料	142
	思考题	147
第五章	高分子材料	148
第一节	绪论	148
第二节	塑料	149
第三节	合成橡胶	159
第四节	合成纤维	162
第五节	胶粘剂	167
第六节	涂料	171
第七节	高分子功能材料	173
第八节	高分子材料的应用	183
	思考题	190
第六章	复合材料	191
第一节	绪论	191
第二节	聚合物基复合材料	194
第三节	金属基复合材料	197
第四节	陶瓷基复合材料	203
第五节	碳/碳复合材料	206
	思考题	208
第七章	新型材料概述	209
第一节	信息功能材料	209
第二节	能源材料	212
第三节	生物材料和器件	216
第四节	环境材料	217
第五节	纳米材料	218
第六节	新型结构材料	219
参考文献		222

第一章 材料科学基础知识

第一节 绪 论

一、材料与材料科学

材料是可以用来制造有用的构件、器件或物品的物质。根据材料的组成和结构特点,可分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料;根据材料的性能特征,可分为结构材料和功能材料两大类,前者以力学性能为主,后者以物理、化学特性为主;还可根据材料的用途,分为建筑材料、能源材料、航空材料、电子材料等。材料的发展由简单到复杂,由以经验为主到以科学知识为基础,逐步形成了材料科学与技术这一独立学科。

材料是早已存在的名词,但材料科学的提出只是 20 世纪 60 年代初的事。1957 年苏联人造卫星上天,使美国朝野震惊并认为材料落后是导致美国航天事业发展滞后于苏联的重要原因之一。从而自 1960 年开始,美国相继成立了十几个“材料研究中心”,在许多大学建立了“材料科学系”或“材料科学与工程系”。材料研究中心的成立,是把各类材料统一考虑的开始;材料科学系的建立,把材料的整体视为自然科学的一个分支,这标志着材料的发展有了一个质的飞跃。实际上,在此之前,多个学科已经在材料的多个分支进行了深入系统的研究,形成了各自的学科领域,如固体物理学、无机化学、有机化学和物理学等,尤其是冶金学、固态相变学、陶瓷与陶瓷增韧和有机高分子学等,都成为材料科学发展的基础。而材料科学把不同类材料统一考虑,既发挥了各类材料的优越性,又可以使各类材料领域的研究人员相互借鉴,对材料有一个比较全面的了解,更进一步促进了复合材料的发展。

材料科学研究材料的成分(结构)(composition or microstructure)、合成(工艺流程)(synthesis or processing)、性能(properties)和效能(performance)以及它们之间的关系,可以用一个四面体描述这四者的关系,如图 1-1 所示。材料的性能或性质取决于材料的成分(组分)和结构,而这些又取决于合成与制造工艺,但性能好的材料,在实际使用条件下不一定满足要求,因此,必须考虑材料的

实际使用效能。所谓效能或称之为使用性能或效果,是指材料在使用条件下表现出的特性,包括环境影响、受力状态、材料特征曲线以及寿命估计等。因此,材料科学就是有关材料成分、组织和工艺流程对于材料性能与用途的影响规律的知识与运用。

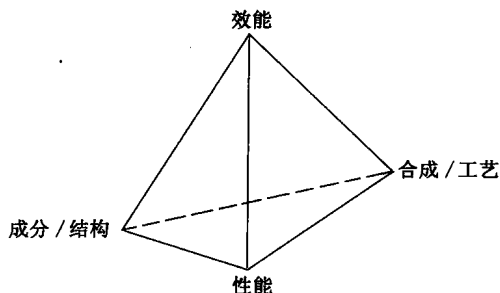


图 1-1 材料“四要素”

二、工程材料概述

工程材料是应用最为广泛的一类材料,主要指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域的材料。

工程材料种类很多,用途广泛,有许多不同的分类方法,通常按其组成和用途分类,按组成可以分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料;按用途可以分为主要利用其力学性能的结构材料和主要利用其物理、化学性能的功能材料。前者又可分为工程结构材料、机器用材料、工具材料以及特殊用途材料等,是应用量最大的工程材料,后者应用量虽小得多,但对社会进步起了重大作用,得到了迅速发展。随着机电一体化技术的发展,这两类材料的结合日益密切,形成新的结构功能材料。

1. 金属材料

金属材料是至今为止最重要的工程材料,包括钢铁(黑色金属)、有色金属(轻金属)及其合金。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能,生产工艺成熟,能采用比较简便和经济的工艺方法制成各种构件和零件,因此是目前应用最广泛的工程材料。

2. 无机非金属材料

无机非金属材料主要包括陶瓷、水泥、玻璃、耐火材料等。这类材料具有不可燃性、高耐热性、高化学稳定性、不老老化性以及高的硬度和良好的耐压性,且原材料丰富,日益受到工程行业的关注。

3. 高分子材料

高分子材料因其具有原料丰富、成本低、加工方便等优点,发展极其迅速。工程上通常根据高分子材料的机械性能和使用状态将其分为塑料、橡胶和合成纤维三类。

工程塑料具有一系列优异的性能和很高的使用价值,能在较宽的温度范围内承受机械应力和在较苛刻的物理化学环境中使用;工程塑料易成型加工,可调节性和可配制性强,品种繁多。工程塑料正朝着高性能化、高功能化、多用途和低成本方向发展。

4. 复合材料

目前蓬勃发展的复合材料技术就是用原有的金属材料、无机非金属材料和高分子材料等作为组分,通过一定的工艺方法将它们复合在一起,制成既能保留原有材料组分的特征,又可以克服组分材料的不足,还能具有某些新性能的材料。

复合材料也可以分为结构复合材料和功能复合材料两大类,包括金属基复合材料、陶瓷基复合材料、树脂基复合材料以及碳/碳复合材料。复合材料具有性能可设计性、材料与构件制造的一致性和优异的物理化学性能,与传统材料相比具有无可比拟的优越性。

第二节 材料中的晶体结构

一、晶体学基础

1. 晶体与非晶体

固体材料按照原子(原子团、分子)的排列可分为晶体和非晶体两大类。晶体内部原子排列是有序的,即原子按某种特定方式在三维空间内周期性地规则重复排列;而非晶体内部原子的排列是无序的。原子排列方式的差异导致两者的性能具有不同特点。

晶体材料的性能表现为各向异性,有确定的熔点(凝固点);而非晶体各向性能基本相同,也没有确定的熔点。

通常金属及其合金、大部分陶瓷以及少数高分子材料属于晶体材料,而多数高分子材料及玻璃等原子或分子结构较为复杂的材料为非晶体材料。部分陶瓷和聚合物材料常常是晶体与非晶体的混合物,两者的比例取决于材料的组成与成形工艺。

实际晶体材料大都是多晶体,由很多晶粒组成。所谓材料的组织就是指各种晶粒的相对含量、尺寸大小、形状及分布等特征,是一个影响材料性能的极为

敏感而重要的结构因素。

2. 空间点阵和晶胞

实际晶体的原子排列可能有无限多种方式,图 1-2(a)所示为其中一种。为了便于研究晶体中原子的排列规律,把晶体中的原子抽象成几何结点,并把用直线将其中心连接起来所构成的空间格子称为“晶格”或“点阵”,如图 1-2(b)所示。显然,由于晶体中原子重复排列具有规律性,可以从晶格中选取一个能够代表其晶格特征的最小几何单元,称之为“晶胞”,如图 1-2(c)所示。晶胞的大小和形状通常用晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 六个参数表示,称为晶格常数。

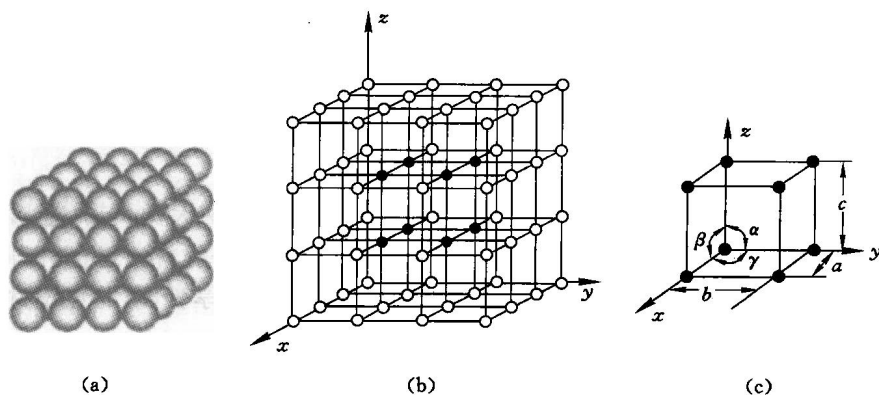


图 1-2 晶体中的原子排列示意图

根据晶胞的几何形状或自身的对称性,可把晶体结构分为 7 大晶系 14 种空间点阵,称为“布拉菲点阵”。

在讨论晶体的生长、变形和固态相变等问题时,必须考虑晶体中不同方向和不同平面的原子的排列。空间点阵中各阵点列的方向代表晶体中原子列的方向,称为晶向;通过空间点阵的任意一组阵点的平面代表晶体中的原子平面,称为晶面。通常用晶向指数和晶面指数来分别表示不同的晶向和晶面。

由于晶格类型和晶格常数的不同,不同的晶体表现出不同的物理、化学和力学性能。而由于不同晶向和晶面上的原子排列不同,同一晶体的不同方向上也表现出不同的性能,这就是单晶体各向异性的本质。

3. 纯金属的晶体结构

金属晶体是通过较强的金属键结合的,所以大多数金属晶体都具有排列紧密、对称性高的简单晶体结构,最常见的有体心立方、面心立方和密排六方三种晶格结构。

(1) 体心立方晶格

如图 1-3 所示,除了在立方体的 8 个顶点上各有 1 个原子位置(阵点)外,在体心处还有 1 个原子。每个晶胞有 2 个原子,原子半径为 $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。Cr、Mo、W、V、 α -Fe、 α -Ti 属于体心立方晶格。

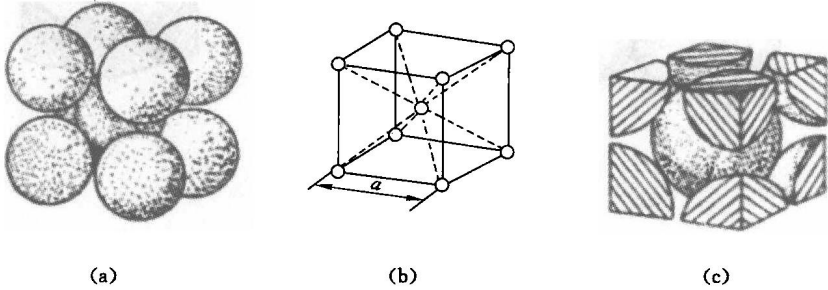


图 1-3 体心立方晶胞示意图

(2) 面心立方晶格

如图 1-4 所示,除了在立方体的 8 个顶点上各有 1 个原子位置(阵点)外,在 6 个面心处还各有 1 个原子。每个晶胞有 4 个原子,原子半径为 $\frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。Al、Cu、Ni、Pb、Ag、Au、 γ -Fe 属于面心立方晶格。

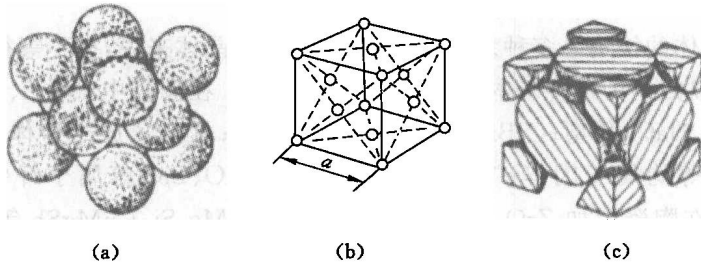


图 1-4 面心立方晶胞示意图

(3) 密排六方晶格

如图 1-5 所示,密排六方晶格属于六方晶系。在六棱柱晶胞 12 个角上和上下 2 个端面中心各有 1 个原子位置(阵点)外,在 2 个六边形面之间还有 3 个原子。晶格常数为:六边形面的边长为 a ,上下底面间距为 c , $c/a=1.633$ 。每个晶胞有 6 个原子,原子半径为 $\frac{1}{2}a$ 。Mg、Zn、Be、 γ -Ti、Cd 属于密排六方晶格。

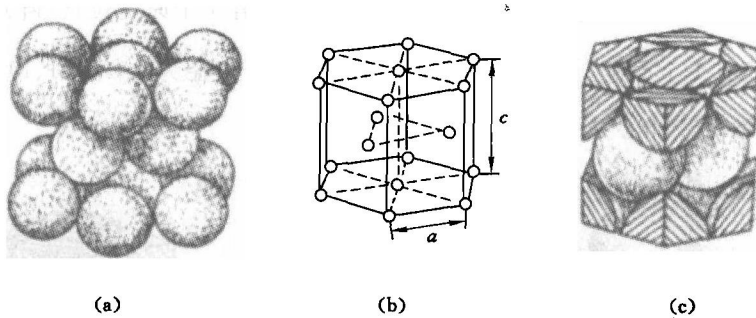


图 1-5 密排六方晶胞示意图

4. 离子晶体的结构

(1) 离子晶体的主要特点

陶瓷材料的晶相大多属于离子晶体。离子晶体是通过结合力很大的离子键结合的,所以离子晶体的硬度高、强度大、熔点和沸点较高、热膨胀系数较小,但脆性大。离子键的特性使得离子晶体都是良好的绝缘体,往往是无色透明的。

在离子晶体中,与某一离子邻接的异号离子的数目称为该离子的配位数,正负离子的配位数主要取决于正负离子的半径比 R^+/R^- 。

离子晶体的特性在很大程度上取决于离子的性质及其排列方式。

(2) 典型离子晶体的结构

离子晶体的结构是多种多样的,但对二元离子晶体来说,按不等径刚球密堆积理论,可以归纳为六种基本类型,如图 1-6 所示。在陶瓷中, MgO 、 CaO 、 FeO 、 NiO 等属于 $NaCl$ 晶型; $CsBr$ 、 CsI 属于 $CsCl$ 晶型; III~V 族半导体化合物,如 $GaAs$ 、 AlP 等均属于闪锌矿(立方 ZnS)晶型; ZnO 、 SiC 等属于纤锌矿(六方 ZnS)晶型;在陶瓷中如 ZrO_2 、 ThO_2 等,合金中如 Mg_2Si 、 $CuMgSb$ 等均属萤石(CaF_2)晶型; VO_2 、 NbO_2 、 MnO_2 、 SnO_2 、 PbO_2 等属于金红石(TiO_2)晶型。

5. 共价晶体的结构

共价晶体是由同种或异种非金属元素的原子以共价键结合而成的无限大分子。由于共价晶体中的粒子为中性原子,所以也称为原子晶体。

共价晶体具有强度高、硬度高、脆性大、熔点高、沸点高和挥发性低等特点,结构也比较稳定,导电能力较差,这些特性与其晶体结构密切相关。

典型共价键晶体的结构有金刚石型(单质型)、 ZnS 型(AB 型)和 SiO_2 型(AB_2 型)三种。与碳同一族的硅、锗、锡(灰锡)属于金刚石型, AgI 、铜的卤化物、金刚砂(SiC)等具有 ZnS 晶型结构。

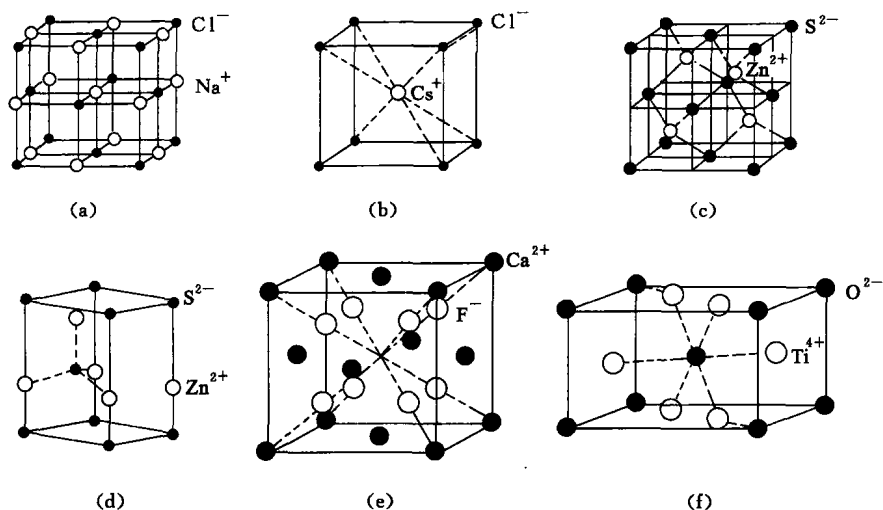


图 1-6 典型二元离子晶体的结构

(a) NaCl 型; (b) CsCl 型; (c) 立方 ZnS 型; (d) 六方 ZnS 型; (e) CaF₂ 型; (f) 金红石 TiO₂ 型

二、晶体缺陷

实际晶体与理想晶体最主要的差别就是存在晶体缺陷。晶体缺陷是指实际晶体中与理想的点阵发生偏差的区域。实际晶体中存在大量的缺陷,对材料的性质有十分重要的影响。根据缺陷在空间的几何特点可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

1. 点缺陷

常见的点缺陷有三种,即晶格空位、间隙原子和置换原子,如图 1-7 所示。空位是指未被原子所占据的晶格结点;间隙原子是处在晶格间隙中的多余原子;置换原子是指占据晶格结点上的异类原子。点缺陷可以导致晶格畸变,使晶体内能升高,将影响材料的强度、电阻率等性能,加速晶体内原子的扩散过程。淬火、冷变形和辐照都可显著增加晶体中点缺陷的数量,当点缺陷超过其饱和浓度时,可导致材料脆性。

2. 线缺陷

线缺陷是指晶体中某一系列或若干列原子发生了有规律的错排现象,这在晶体学上通常被称为位错。

晶体中主要有刃型位错、螺型位错和混合位错。刃型位错是最简单的一种位错形式,如图 1-8 所示,由于图示右上部分相对于右下部分的局部滑移,结果在晶格的上半部挤出了一层多余原子面,好像在晶格中额外插入了半层原子面。

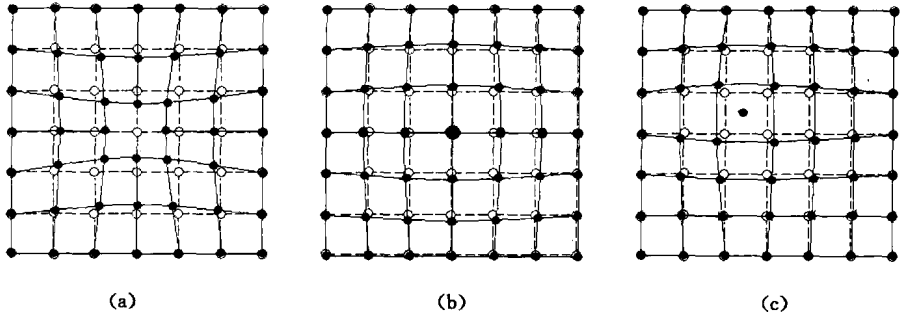


图 1-7 点缺陷示意图

(a) 空位; (b) 置换原子; (c) 间隙原子

(图中虚线所示为理想晶体形式, 实线所示为有缺陷晶体形式)

该半层原子面的边缘便成为位错线, 在其周围的晶格发生畸变。

在晶体中, 位错线往往大量存在, 相互连接成网状分布。位错滑移是金属产生塑性变形的物理本质; 位错又是金属强化的重要途径之一。淬火或大的冷变形可使位错大量增加, 而退火又可使位错密度降到最低值, 可以通过调整晶体中的位错密度来改变晶体材料的物理和力学性能。

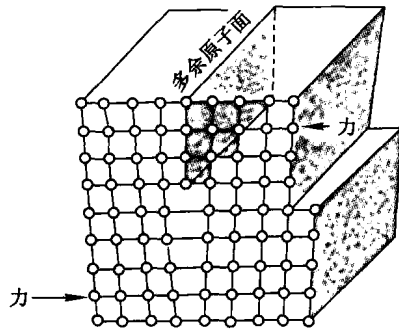


图 1-8 刃型位错示意图

3. 面缺陷

除了单晶体之外, 材料都是由多个晶粒组成的, 晶粒和晶粒之间必然存在界面, 即晶界。由于晶界处原子排列不规则(不同于晶内), 晶格畸变较大, 故晶界处能量较高, 具有与晶内不同的特性, 如晶界强度和硬度较高、熔点较低、耐腐蚀性较差、扩散系数较大、电阻率较高、相变时优先形核等。

三、相结构与相图

构成材料最基本的、独立的物质称为组元, 简称元。组元可以是纯元素, 如 Cu、Fe、C、Al 等, 也可以是化合物, 如 Fe_3C 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 ZrO 等。

材料可以由单一组元构成, 如纯金属、 Al_2O_3 晶体等, 也可以由多种组元构成, 如 Al-Cu-Mg 金属材料、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系陶瓷等。多组元金属材料称为合金, 两个组元构成的合金称为二元合金, 三个组元构成的合金称为三元合金,

依此类推。

1. 材料的相结构

相是合金中具有同一聚集状态、同一晶体结构和性质并以界面相互隔开的均匀组成部分。材料的性能与各组成相的性质、形态和数量直接相关。

不同的相具有不同的晶体结构,根据其特点可以归纳为两大类:固溶体与中间相。

(1) 固溶体

以合金中某一组元作为溶剂,其他组元为溶质,所形成的与溶剂有相同晶体结构、晶格常数稍有变化的固相称为固溶体。固溶体可在一定成分范围内存在,性能随成分变化而连续变化。

按溶质原子在溶剂晶格中所处位置,可以分为置换固溶体和间隙固溶体。

置换固溶体是指溶质原子占据溶剂晶格某些结点位置形成的固溶体,如图 1-9(a)所示,在合金中,如 Mn、Cr、Si、Ni、Mo 等元素都能与 Fe 形成置换固溶体。

间隙固溶体是指溶质原子进入溶剂晶格的间隙中形成的固溶体[图 1-9(b)]。由于晶格的间隙通常很小,所以一般都是由原子半径较小的($<0.1 \text{ nm}$)非金属元素(如 C、N、H、B、O)溶入过渡族金属中。

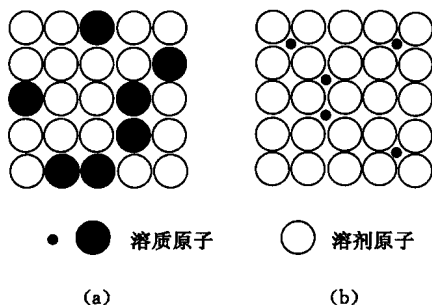


图 1-9 固溶体晶体结构示意图
(a) 置换固溶体; (b) 间隙固溶体

固溶体形成时都会导致晶格畸变,溶质量越大,畸变越大,对材料的性能影响越显著。

(2) 中间相(金属间化合物)

如前所述,固溶体的溶解有一个限度,当溶质含量超过这一限度后便会形成一种新相,称为中间相。中间相的晶体结构和性能完全不同于其构成组元中的任一组元。由于以金属键为主导的中间相具有一定的金属性,所以也称为金属

间化合物；而主要以离子键结合的化合物，如 FeS、MnS 等，没有金属性，常作为非金属夹杂处理。

金属间化合物一般具有高的熔点及硬度，可使合金的强度、硬度、耐磨性及耐热性提高。有些中间相还具有某些特殊的物理、化学性能，其中不少正在开发应用中，如性能远远优于硅半导体材料的 GaAs，具有形状记忆效应的 NiTi、CuZn 合金，新一代能源的储氢材料 LaNi₅ 等。

2. 二元相图

相图是描述系统的状态、温度、压力和成分之间关系的一种图形。利用相图可以知道不同成分的材料在不同温度下存在哪些相、各相的相对量、成分及温度变化时所可能发生的变化。

二元合金有些典型的基本相图，如匀晶相图、共晶相图、包晶相图等，而更多的是复杂相图，但也都是由这几类基本相图组合而成，如 Fe-C 合金相图。典型相图如图 1-10 所示。

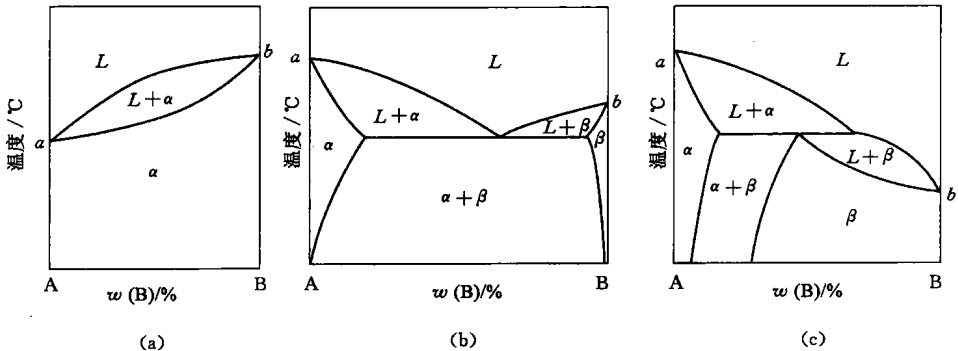


图 1-10 典型的基本相图

(a) 匀晶相图；(b) 共晶相图；(c) 包晶相图

相图反映的规律只在热力学平衡条件下成立，不能反映各平衡相的结构、分布状态及其具体形貌。

3. 相图与性能的关系

具有匀晶相图和共晶相图合金的力学性能、物理性能随成分变化的规律如图 1-11 所示。

合金的工艺性能与相图也有密切关系，图 1-12 所示为合金铸造性能与相图的关系。合金的流动性和缩孔性能均以纯组元和共晶成分的合金为最好，相图中液相线和固相线之间距离越小，合金凝固的温度范围越窄，对浇铸和铸造质量越有利。