

///
m

新世纪“材料科学与工程”系列教材

CAILIAOKEXUEJICHU

材料科学基础

郑子樵 主编

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/郑子樵主编. —长沙:中南大学出版社,2005.5
ISBN 7-81105-100-1

I. 材... II. 郑... III. 材料科学 IV. TB3
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 047898 号

材料科学基础

郑子樵 主编

-
- 责任编辑 周兴武
责任印制 汤庶平
出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
印 装 湖南省地质测绘印刷厂
-

- 开 本 730×960 1/16 印张 33.25 字数 602千字
版 次 2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷
书 号 ISBN 7-81105-100-1/TF·006
定 价 40.00元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

随着材料科学的发展以及我国高等教育和教学改革的深入,为适应专业调整和高素质人才培养的需要,材料科学与工程专业的学生除了必须掌握金属材料的基础知识之外,还需掌握无机非金属材料、高分子材料以及复合材料的基础知识;除了了解结构材料之外,还应了解功能材料。我们在多次研讨的基础上组织编写了《材料科学基础》一书,作为材料类专业本科教学通用教材,以取代本校主编的仅以金属材料为研究对象的《物理冶金基础》(冶金工业出版社,1985年、1997年版)教材。

《材料科学基础》是材料科学与工程专业本科生的一门重要专业基础课。目前国内出版的这类教材版本虽然很多,但由于各个高校的专业背景和教改进程的差异,所以编入书中的内容侧重点也各不相同。本书力求将金属材料、无机非金属材料、高分子材料紧密结合,从材料的组织结构出发,揭示材料性能与材料结构和制备工艺之间的关系,全面阐述各种材料的共性基础知识及个性特征。由于各种材料的分支学科的学术背景不尽相同,诸分支学科的融合也有一个历史过程,不能一蹴而就;而金属材料的理论体系相对于其他材料来说更为成熟和严密,其理论和研究方法也正在向其他材料学科移植和渗透;同时由于教学时数限制,因此,本教材的主体仍是金属材料,同时兼顾无机非金属材料和高分子材料以及复合材料。

本书共分12章。其中,绪论,第9、10、12章由郑子樵教授编写;第1章1~5节和第4、8章由柏振海副教授编写;第2章由罗兵辉教授编写;第3、11章由余志明教授编写;第5、6章由夏长清教授编写;第1章6~8节和第7章由余琨副教授编写。全书由郑子樵教授主编。

在本书编写过程中,唐仁政教授、丁道云教授、刘锦文教授等人审阅了本书初稿,并提出了许多宝贵意见,谢先娇高级工程师为本书制备了金相图片,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,编入本书的内容难免有错漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

绪 论

材料的重要性及其分类

在人类历史发展的进程中，“材料”一直占有十分重要的地位。每一种重要材料的发现和广泛使用，都会使人类支配和改造自然的能力提高到一个新水平，给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化，把人类的物质文明和精神文明向前推进一步。历史学家曾用材料来划分时代，如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代。在科学技术十分发达的今天，材料仍然是现代文明的一个重要标志，可以说，现在没有哪一个工业技术部门不牵涉到材料，当今高新技术的发展也必须要有新型材料作为物质基础。例如没有半导体材料的工业化生产，便不可能有目前的计算机技术；没有现代耐高温、高比强的结构材料，便没有今天的航空航天工业；没有低损耗的光导纤维，便不可能实现光信息的长距离传输，也就没有今天的光通讯。因此，材料、能源、信息被誉为现代文明的三大支柱。

虽然“材料”这个名词早已存在，但至今仍然很难给它下一个确切的定义。一般认为，材料是具有一定性能的物质，可以用来制造机器、器件、结构和产品。随着科学技术的进步，材料自身的内容也在不断丰富和变化，人们可以对它有不同的理解。

材料的种类繁多，按照材料特性，可将材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料，以及复合材料几大类。按用途分类，又可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用其力学性质，要求在使用条件下能承受一定的载荷，例如制造飞机的铝合金、钛合金、高强度钢等；功能材料是指利用材料的光、电、磁、声等特性来实现特定功能的材料，如半导体材料、磁性材料、激光材料、储氢材料等。事实上，结构材料和功能材料之间也是很难严格区别的，一种材料可能既是结构材料又是功能材料。此外，把那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料称之为传统材料或基础材料，如钢铁、水泥、塑料等。而把那些正在发展，且具有优异性能和应用前景的一类材料称之为先进材料或新材料。传统材料通过采用新技术，提高性能可以成为新材料，新材料经过长期生产和应用之后也就成为传统材料。

材料性能与成分、结构以及制备、加工工艺的关系

材料作为有用的物质，其有用之处就因为它具有某种性能。如金属有好的

导电性,陶瓷材料则有高的硬度,塑料有良好的绝缘性,玻璃能透光等。通过不断的实践人们发现,材料的性能与它们的化学成分和组织结构密切相关。如钢中存在的碳原子对钢的性能起着关键作用,许多金属材料中的一些极微量的合金化元素也足以严重影响其性能,这说明了化学成分的重要性。然而人们也发现,由同一元素碳构成的石墨和金刚石,却有着不同的性能,有些高分子的化学成分完全相同而性能却大不一样,其原因是它们有着不同的内部结构。

材料的内部结构可分为不同层次,包括原子结构,原子的排列方式,以及显微组织和结构缺陷。20世纪中期材料的很大突破和日新月异的发展可以说从根本上得力于对成分和结构的科学认识和控制。人们认识到,像金属、陶瓷、半导体这些材料都是原子排列的晶体,玻璃、高分子则是非晶体。材料内的晶体可以形成很多晶粒,而同样的材料,只要把它的晶粒或是“相”的形态和分布加以改变,就可以大大地改善它的性质。结构向更细致的层次深入,那就是材料中的晶粒边界、晶内的原子级缺陷(像杂质的位置、空位、位错等),还有电子学上的缺陷和能级,如半导体掺杂造成的电子和空穴的载流子,正是对这些“缺陷”的科学认识出现了有声有色的荧光材料、激光材料、半导体二极管、离子导体等。可以说,无论是金属、陶瓷、半导体、高分子还是复合材料,它们的发展无一不与成分和结构密切相关。只有理解和控制材料的结构,才能得到人们所追求的材料性能。

材料的制备/合成和加工不仅赋予材料一定的尺寸和形状,而且是控制材料成分和结构的必要手段。钢材可以通过退火、淬火、回火等热处理来改变它们内部的结构而达到预期的性能,冷轧硅钢片经过复杂的加工工序能使晶粒按一定取向排列而大大减少铁损。飞机发动机的叶片可以通过铸造的凝固控制做成单晶体叶片,使之没有晶粒边界,大大提高它的使用温度和性能。一根光纤,不仅要拉成微米级的细丝,而且要控制光纤从内到外的折射率的分布,等等。有时候可以说没有一种合成加工上的新的突破,就没有某一种新材料。如正是有了一种快速冷却的加工方法,才有了非晶态的金属合金,而在这之前人们不知道金属还可以做成非晶态。

材料科学的形成与内涵

材料非常重要,发展也很快,但“材料科学”的提出是20世纪60年代初的事。1957年前苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了十余个材料研究中心。采用先进的科学理论与实验方法对材料进行深入的研究,取得重要成果。从此,“材料科学”这个名词便开始流行。

20世纪以前材料的制备、使用和发展,应该说主要是大量依靠人们的经

验、技巧、继承和积累,还没有对材料在科学上有深刻的认识和理解,缺乏科学的指导。材料科学不可能是孤立的,没有先进的自然科学理论和相关的先进技术,当然也谈不上材料科学。正是20世纪各个领域科学技术的巨大进步和发展,以及对各种材料的广泛需求促进了材料科学的形成。

首先,固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展,对物质结构和物性的深入研究,推动了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学的发展也使对材料本身的研究大大加强,从而对材料的制备、结构与性能,以及它们之间的相互关系的研究也愈来愈深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

其次,在材料科学这个名词出现以前,金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前复合材料也获得广泛应用,其研究也逐步深入。但它们之间存在着颇多相似之处,对不同类型材料的研究可以相互借鉴,从而促进学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础;但在 ZrO_2 陶瓷中也发现了马氏体相变现象,利用 ZrO_2 的马氏体相变,可作为陶瓷增韧的一种有效手段。形状记忆效应是在TiNi合金和铜合金中发现的,20世纪80年代末日本报导了某些树脂也有形状记忆效应,并开展了树脂的组成、结构和性能之间关系及应用的研究。可见金属材料、无机非金属材料和高分子材料具有共性,一些基础理论可以互相借鉴。

第三,许多不同类型的材料可以相互替代和补充,从而更充分发挥各种材料的优越性,达到物尽其用的目的。但长期以来,金属、高分子及无机非金属材料自成体系,缺乏沟通。由于互不了解,不利于发展创新,对复合材料的发展也极为不利。

第四,各类材料的研究设备与生产手段有许多共同之处。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置,但许多方面是相同或相近的,如光学显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中,许多加工装置也是通用的。如挤压机,对金属材料可以用来成型及加工以提高强度;而某些高分子材料,在采用挤压成丝工艺以后,可使有机纤维的比强度和比钢度大幅度提高。研究设备与生产装备的通用不但节约资金,更重要的是相互得到启发和借鉴,加速材料的发展。

正是在这种背景下,一门新的综合性学科——材料科学诞生了。

材料科学有以下几个特点:①材料科学是多学科交叉的新兴学科。材料科学不仅继承了各类材料本身的学科专门知识和基础理论中的精粹部分,而且与许多基础学科有不可分割的关系,如固体物理学、电子学、光学、声学、量子化学、有机化学、无机化学、胶体化学、数学与计算科学等。作为正在发展中的生

物材料,当然离不开生物学,乃至医学。② 材料科学与材料工程有不可分割的关系。材料科学是自然科学的一个分支,它所包括的内容往往被理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,这属于基础研究。另一方面,材料科学是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与发展材料的目的在于应用,而材料也必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来,通过批量生产才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出现后不久,就提出了“材料科学与工程”。材料工程主要是研究材料在制备过程中的工艺和工程技术问题。其目的在于经济地而又能为社会所接受地控制材料的结构、性能和形状。材料科学为材料工程指明方向,提供理论依据,另一方面材料工程所涉及的先进合成和加工方法,可以不断创制出许多新材料或改变和精确控制许多传统材料的成分和结构,不仅进一步发掘和提高了这些材料的性能,而且也丰富了材料科学的理论。③ 材料科学是一门正在发展中的科学,不像物理学、化学已经有一个很成熟的体系,材料科学将随各有关学科的发展而得到充实和完善。

材料检测技术与材料设计

材料科学的发展依赖于其他基础科学的发展,也依赖于其他技术学科的发展,特别是依赖于新科学仪器的不断发明和材料分析检测技术的进步。以电子光学仪器为例,1863年金属材料研究首先应用光学显微镜。几十年后出现了电子显微镜(TEM)、扫描电镜(SEM)、高分辨电镜(HREM),其分辨率达0.2 nm,足以观察到原子。后又有扫描透射电镜(STEM),不但可以观察到原子,而且可以分析微小区域的化学组成和结构。20世纪80年代初出现的扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM),为人们了解材料的表面甚至对表面原子层的测量提供了新工具。

除显微结构以外,材料的晶体结构分析开始于劳厄(Laue)。他于1912年发现X射线通过晶体产生衍射花样,随后又推广到电子衍射与中子衍射,成为探明材料原子结构的重要手段,而后又出现了基于不同原理的多种谱仪,成为分析表征材料结构与性能的有力装置。材料科学工作者不仅要学好材料科学的基本理论,还要掌握这些先进分析检验技术的原理和方法,直到会利用这些先进仪器设备,使材料科学研究和材料开发,提高到一个崭新的水平。

材料的研制从以经验为主过渡到以科学设计为主,从而进入“设计材料”(materials by design)时代,是材料科学技术工作者追求的目标。计算机辅助材料设计始于20世纪50年代末到60年代初,是从研究有机材料开始的。随着相关学科的发展,设计材料愈来愈受到重视。材料设计可以分为几个层次,最基础的是量子设计(quantum design),这是由于电子运动而引起的多种现象,如光

学,这是功能材料的基础。其次为原子设计(atomic design),这是纳米技术的基础。原子排列是决定材料力学性质与化学性质的基础,原子操纵可能是下一代芯片的一种技术。第三个层次是微观设计(micro-design),即微米级结构的设计,金属的相变、晶界的控制都属于这一范畴。第四个层次是宏观设计(macro-design),以毫米到厘米为对象,像金属在凝固过程的结构与偏析便属于此。

材料设计的最终目标是根据最终需求,设计出合理成分,制订最佳生产流程,而后生产出符合要求的材料。应该指出,材料设计十分复杂,如模型的建立往往是基于平衡态,而实际材料多处于非平衡态,如凝固过程的偏析和相变等。材料的力学性质往往对结构十分敏感,因此,结构的任何微小变化,都会使性能发生明显变化,何况有些性质,如脆性、裂纹的萌生与扩展等还很不清楚,因此,要想得到确切真实的结构决非易事。

可以肯定,随着科学技术的进步和各学科的发展以及对材料的了解日益深入,计算机日益巨型化和智能化,一个更加科学化发展新材料的时期将会到来。要做到这一点,最关键的是建立完善的数据库与知识库,发展符合实际的物理模型,这就要求应用数学家、物理学家、化学家、材料科学家与工程师等各方面人员密切合作。

当今世界新技术革命风起云涌,信息技术、生物技术、新能源技术、新材料技术等都在飞速发展,这必将刺激和推动材料科学的迅速发展,同时也需要大量基础理论扎实,专业知识宽广的高素质人才投身这一领域。本教材正是为培养材料科学与工程类专业类人才而编写的一本专业基础课教材。

目 录

| | |
|-------------------------------|--------|
| 绪 论 | (I) |
| 第 1 章 材料的结构 | (1) |
| 1.1 材料的键合方式 | (1) |
| 1.1.1 离子键 | (2) |
| 1.1.2 共价键 | (2) |
| 1.1.3 金属键 | (3) |
| 1.1.4 二次键 | (4) |
| 1.1.5 混合键 | (6) |
| 1.1.6 材料的结合键与性能 | (7) |
| 1.2 晶体学基本知识 | (9) |
| 1.2.1 晶体的特征 | (9) |
| 1.2.2 空间点阵与晶胞 | (10) |
| 1.2.3 晶系和布拉非点阵 | (11) |
| 1.2.4 空间点阵与晶体结构的关系 | (13) |
| 1.2.5 晶体的对称性概念 | (15) |
| 1.2.6 晶面指数和晶向指数 | (19) |
| 1.2.7 晶面间距 | (23) |
| 1.2.8 晶面及晶向间的夹角 | (24) |
| 1.2.9 晶带 | (25) |
| 1.3 纯金属的晶体结构 | (26) |
| 1.3.1 典型纯金属的晶体结构 | (26) |
| 1.3.2 点阵常数与原子半径 r 的关系 | (27) |
| 1.3.3 配位数和致密度 | (28) |
| 1.3.4 晶体中原子堆垛方式 | (29) |
| 1.3.5 晶体结构中的间隙 | (31) |
| 1.3.6 同素异构现象 | (34) |
| 1.3.7 原子半径 | (34) |
| 1.3.8 其他晶体结构 | (36) |

| | |
|--------------------------|-------------|
| 1.4 合金相结构 | (37) |
| 1.4.1 固溶体 | (38) |
| 1.4.2 金属间化合物 | (45) |
| 1.5 陶瓷材料的晶体相结构 | (50) |
| 1.5.1 离子键结合的陶瓷晶体结构 | (51) |
| 1.5.2 共价键结合的陶瓷晶体结构 | (54) |
| 1.6 非晶态金属(金属玻璃) | (55) |
| 1.6.1 金属玻璃的获得与分类 | (55) |
| 1.6.2 金属玻璃结构模型 | (59) |
| 1.7 准晶体 | (63) |
| 1.7.1 准晶体的结构模型 | (64) |
| 1.7.2 准晶的稳定性 | (67) |
| 1.8 高分子材料的结构 | (68) |
| 1.8.1 高分子链结构 | (68) |
| 1.8.2 高分子的聚集态结构 | (69) |
| 习 题 | (74) |
| 第2章 空位与位错 | (75) |
| 2.1 空位 | (75) |
| 2.1.1 空位的热力学分析 | (76) |
| 2.1.2 空位的迁移 | (77) |
| 2.1.3 材料中空位的实际意义 | (78) |
| 2.2 位错的基本类型及特征 | (79) |
| 2.2.1 刃型位错 | (79) |
| 2.2.2 螺型位错 | (81) |
| 2.2.3 混合位错 | (82) |
| 2.3 柏氏矢量 | (83) |
| 2.3.1 确定柏氏矢量的方法 | (83) |
| 2.3.2 柏氏矢量的特征和意义 | (84) |
| 2.4 位错的运动 | (85) |
| 2.4.1 位错滑移的晶格阻力 | (86) |
| 2.4.2 刃型位错的运动 | (87) |
| 2.4.3 螺型位错的运动 | (88) |
| 2.4.4 混合位错的运动 | (89) |
| 2.5 位错的应变场和应力能 | (90) |

| | |
|--|--------------|
| 2.5.1 位错的应变能 | (90) |
| 2.5.2 位错的应力场 | (92) |
| 2.6 位错的受力 | (93) |
| 2.6.1 作用在位错上的力 | (93) |
| 2.6.2 位错的线张力 | (95) |
| 2.7 位错与晶体缺陷的交互作用 | (96) |
| 2.7.1 位错与点缺陷之间的交互作用 | (96) |
| 2.7.2 位错之间的交互作用 | (98) |
| 2.7.3 位错的塞积 | (101) |
| 2.8 位错的萌生与增殖 | (103) |
| 2.8.1 晶体中位错的萌生 | (103) |
| 2.8.2 晶体中位错的增殖 | (103) |
| 2.9 实际晶体中的位错组态 | (105) |
| 2.9.1 fcc, bcc, hcp 晶体中单位位错的柏氏矢量 | (105) |
| 2.9.2 层错 | (106) |
| 2.9.3 不全位错 | (107) |
| 2.9.4 位错反应与扩展位错 | (109) |
| 2.9.5 位错的实际观察 | (114) |
| 习 题 | (115) |
| 第3章 材料的表面与界面 | (117) |
| 3.1 材料的表面 | (117) |
| 3.1.1 表面晶体学 | (117) |
| 3.1.2 表面热力学 | (124) |
| 3.1.3 实际表面 | (128) |
| 3.2 材料的界面 | (131) |
| 3.2.1 界面的定义和种类 | (131) |
| 3.2.2 晶界 | (131) |
| 3.2.3 相界 | (138) |
| 3.2.4 多晶材料中的界面 | (140) |
| 习 题 | (143) |
| 第4章 材料的凝固 | (144) |
| 4.1 金属液态结构与性能特点 | (144) |
| 4.1.1 液态金属与固态金属的比较 | (145) |
| 4.1.2 金属液态结构 | (147) |

| | | |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 4.2 | 金属结晶的基本规律 | (148) |
| 4.2.1 | 金属结晶的微观现象 | (148) |
| 4.2.2 | 金属结晶的宏观现象 | (149) |
| 4.3 | 晶核的长大 | (162) |
| 4.3.1 | 晶核长大的条件 | (162) |
| 4.3.2 | 液-固界面的微观结构 | (163) |
| 4.3.3 | 晶体长大的机制 | (163) |
| 4.3.4 | 纯金属长大的形态 | (165) |
| 4.4 | 结晶理论的应用 | (169) |
| 4.4.1 | 铸锭的组织及控制 | (169) |
| 4.5 | 聚合物的凝固 | (178) |
| 习 题 | | (179) |
| 第5章 二元合金相图及合金的凝固和组织 | | (180) |
| 5.1 | 二元相图的表示方法 | (180) |
| 5.1.1 | 二元合金中存在的相 | (180) |
| 5.1.2 | 二元相图的表示、含义和杠杆定律 | (182) |
| 5.1.3 | 用实验方法测绘二元相图 | (185) |
| 5.2 | 匀晶相图及固溶体合金的凝固和组织 | (187) |
| 5.2.1 | 相图分析 | (187) |
| 5.2.2 | 固溶体合金的平衡凝固和组织 | (188) |
| 5.2.3 | 固溶体合金的非平衡凝固和组织 | (189) |
| 5.2.4 | 固溶体合金凝固过程中的溶质分布 | (191) |
| 5.2.5 | 区域熔炼 | (196) |
| 5.2.6 | 成分过冷及其对晶体成长形状和铸锭组织的影响 | (197) |
| 5.3 | 共晶相图及共晶系合金的凝固和组织 | (201) |
| 5.3.1 | 相图分析 | (201) |
| 5.3.2 | 共晶系合金的平衡凝固和组织 | (202) |
| 5.3.3 | 共晶组织及其形成机理 | (205) |
| 5.3.4 | 共晶系合金的非平衡凝固和组织 | (211) |
| 5.4 | 包晶相图及其合金的凝固和组织 | (215) |
| 5.4.1 | 相图分析 | (215) |
| 5.4.2 | 包晶系合金的平衡凝固和组织 | (216) |
| 5.4.3 | 包晶系合金的非平衡凝固和组织 | (217) |
| 5.4.4 | 包晶转变的实际应用 | (218) |

| | |
|---|--------------|
| 5.5 偏晶相图及其合金的凝固和组织 | (218) |
| 5.6 形成化合物的二元相图 | (220) |
| 5.6.1 形成稳定化合物的二元相图 | (220) |
| 5.6.2 形成不稳定化合物的二元相图 | (220) |
| 5.7 具有固态转变的二元相图 | (221) |
| 5.7.1 具有共析转变的相图 | (221) |
| 5.7.2 具有包析转变的相图 | (222) |
| 5.7.3 具有偏析转变的相图 | (222) |
| 5.7.4 具有熔晶转变的相图 | (222) |
| 5.7.5 具有无序 - 有序转变的相图 | (223) |
| 5.7.6 具有固溶度变化的相图 | (223) |
| 5.7.7 具有磁性转变的相图 | (223) |
| 5.8 如何分析和使用二元相图 | (224) |
| 5.8.1 相图中的线条和相区分析 | (224) |
| 5.8.2 结合 Fe - Fe ₃ C 相图分析合金的平衡凝固过程及其组织变化 | (225) |
| 5.8.3 Cu - Sn 合金系相图..... | (231) |
| 5.8.4 Mg ₂ SiO ₄ - SiO ₂ 系相图 | (232) |
| 5.8.5 ZrO ₂ - SiO ₂ 系相图 | (233) |
| 5.9 相图热力学基础 | (234) |
| 5.9.1 吉布斯自由能与成分的关系 | (234) |
| 5.9.2 克劳修斯 - 克莱普隆方程 | (236) |
| 5.9.3 相平衡条件 | (238) |
| 5.9.4 吉布斯自由能曲线与相图 | (241) |
| 习 题 | (244) |
| 第 6 章 三元相图及合金的凝固组织 | (247) |
| 6.1 三元相图的成分表示法 | (247) |
| 6.2 三元相图的杠杆定律和重心法则 | (249) |
| 6.2.1 杠杆定律 | (249) |
| 6.2.2 重心法则 | (249) |
| 6.3 匀晶三元相图 | (250) |
| 6.3.1 相图的空间模型 | (250) |
| 6.3.2 合金的凝固过程及组织 | (251) |
| 6.3.3 等温截面(或水平截面) | (251) |

| | |
|--|-------|
| 6.3.4 变温截面(或垂直截面) | (253) |
| 6.4 简单共晶三元相图 | (254) |
| 6.4.1 相图的空间模型 | (254) |
| 6.4.2 合金的凝固过程和组织 | (256) |
| 6.4.3 等温截面 | (257) |
| 6.4.4 变温截面 | (257) |
| 6.5 固态有限溶解的三元共晶相图 | (259) |
| 6.5.1 相图的空间模型 | (259) |
| 6.5.2 合金的凝固过程和组织 | (261) |
| 6.5.3 等温截面 | (264) |
| 6.5.4 变温截面 | (264) |
| 6.6 具有包共晶反应的三元相图 | (266) |
| 6.6.1 相图的空间模型 | (266) |
| 6.6.2 合金的凝固过程和组织 | (267) |
| 6.6.3 等温截面 | (269) |
| 6.6.4 变温截面 | (269) |
| 6.6.5 固相具有固溶度时的相区界面投影图 | (270) |
| 6.7 具有三元包晶反应的三元相图 | (271) |
| 6.8 形成稳定化合物的三元相图 | (273) |
| 6.8.1 形成一个稳定化合物的三元相图简化法 | (273) |
| 6.8.2 形成几个稳定化合物的三元相图简化法 | (274) |
| 6.9 三元相图总结 | (275) |
| 6.9.1 三元系的两相平衡 | (275) |
| 6.9.2 三元系的三相平衡 | (275) |
| 6.9.3 三元系的四相平衡 | (276) |
| 6.9.4 液相面投影图 | (279) |
| 6.9.5 三元相图中的相区相邻规则 | (279) |
| 6.10 三元相图实例分析 | (281) |
| 6.10.1 Pb - Sn - Bi 系 | (281) |
| 6.10.2 Al - Cu - Mg 系 | (282) |
| 6.10.3 W - C - Co 系 | (284) |
| 6.10.4 Fe - Cr - C 系 | (286) |
| 6.10.5 MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ 系 | (288) |
| 习 题 | (289) |

| | |
|-------------------------------------|-------|
| 第7章 固体材料中的扩散 | (292) |
| 7.1 扩散方程 | (292) |
| 7.1.1 菲克第一定律 | (292) |
| 7.1.2 菲克第二定律 | (294) |
| 7.1.3 菲克第二方程的解 | (296) |
| 7.2 扩散的微观机制 | (300) |
| 7.2.1 交换机制 | (300) |
| 7.2.2 间隙机制 | (301) |
| 7.2.3 空位机制 | (302) |
| 7.2.4 其他扩散机制 | (304) |
| 7.3 扩散系数 | (305) |
| 7.3.1 扩散系数的测定方法 | (305) |
| 7.3.2 影响扩散系数的因素 | (307) |
| 7.4 扩散的热力学分析 | (313) |
| 7.4.1 扩散驱动力 | (313) |
| 7.4.2 上坡扩散 | (314) |
| 7.5 固溶体中的扩散 | (315) |
| 7.5.1 固溶体中的自扩散 | (315) |
| 7.5.2 固溶体中的互扩散——Kirkendall 效应 | (315) |
| 7.6 反应扩散 | (316) |
| 7.6.1 反应扩散的概念 | (316) |
| 7.6.2 反应扩散的速率 | (317) |
| 7.7 离子晶体中的扩散 | (318) |
| 7.8 非晶体中的扩散 | (319) |
| 7.8.1 长链聚合物中的扩散 | (319) |
| 7.8.2 无机玻璃中的扩散 | (320) |
| 7.9 材料中扩散问题的几个实例 | (320) |
| 7.9.1 粉体材料的烧结 | (320) |
| 7.9.2 渗碳 | (322) |
| 7.9.3 铸锭的均匀化 | (324) |
| 7.9.4 金属表面的氧化 | (325) |
| 习 题 | (326) |
| 第8章 材料塑性变形 | (328) |
| 8.1 单晶体金属的塑性变形 | (328) |

| | | |
|------------|-------------------------------|-------|
| 8.1.1 | 单晶体的滑移 | (328) |
| 8.1.2 | 扭折 | (336) |
| 8.1.3 | 孪生 | (337) |
| 8.2 | 多晶体的塑性变形 | (340) |
| 8.2.1 | 晶粒边界 | (341) |
| 8.2.2 | 晶界对多晶体塑性变形的影响 | (341) |
| 8.2.3 | 多晶体塑性变形的微观特点 | (343) |
| 8.3 | 单相固溶体合金塑性变形特点 | (344) |
| 8.3.1 | 屈服现象 | (344) |
| 8.3.2 | 应变时效 | (345) |
| 8.4 | 复相合金的塑性变形 | (347) |
| 8.5 | 金属冷加工后的组织与性能的变化 | (348) |
| 8.5.1 | 金属塑性变形后的组织变化 | (348) |
| 8.5.2 | 加工硬化 | (351) |
| 8.5.3 | 变形后金属中的残余应力 | (353) |
| 8.5.4 | 多晶体材料的织构(择优取向) | (354) |
| 8.6 | 陶瓷材料的塑性变形 | (356) |
| 8.7 | 聚合物的变形 | (359) |
| 8.7.1 | 热塑性聚合物的变形 | (360) |
| 8.7.2 | 热固性塑料的变形 | (363) |
| 习 题 | | (363) |
| 第9章 | 冷变形金属的回复、再结晶与热加工 | (365) |
| 9.1 | 概述 | (365) |
| 9.2 | 冷变形金属的回复 | (367) |
| 9.2.1 | 回复动力学 | (367) |
| 9.2.2 | 回复过程的组织变化与回复机制 | (368) |
| 9.3 | 冷变形金属的再结晶 | (371) |
| 9.3.1 | 再结晶的形核 | (371) |
| 9.3.2 | 再结晶动力学 | (373) |
| 9.3.3 | 再结晶温度 | (374) |
| 9.3.4 | 再结晶后的晶粒大小及再结晶全图 | (375) |
| 9.3.5 | 再结晶织构 | (377) |
| 9.3.6 | 退火孪晶 | (378) |
| 9.4 | 晶粒长大 | (378) |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| 9.4.1 正常晶粒长大 | (379) |
| 9.4.2 反常晶粒长大(二次再结晶) | (381) |
| 9.5 金属热加工 | (382) |
| 9.5.1 动态回复与动态再结晶 | (383) |
| 9.5.2 热加工后金属的组织与性能 | (385) |
| 9.5.3 超塑性 | (385) |
| 习 题 | (387) |
| 第10章 固态相变 | (390) |
| 10.1 固态相变概述 | (390) |
| 10.1.1 固态相变的分类 | (390) |
| 10.1.2 固态相变的特点 | (393) |
| 10.1.3 固态相变的热力学条件 | (394) |
| 10.1.4 固态相变的形核 | (395) |
| 10.1.5 新相的长大 | (398) |
| 10.1.6 相变动力学 | (400) |
| 10.2 过饱和固溶体的脱溶 | (402) |
| 10.2.1 脱溶的驱动力 | (402) |
| 10.2.2 脱溶顺序 | (403) |
| 10.2.3 脱溶方式及显微组织的变化 | (405) |
| 10.2.4 调幅分解 | (408) |
| 10.3 共析转变 | (410) |
| 10.3.1 Fe-C合金中的共析转变 | (410) |
| 10.3.2 珠光体的形成过程 | (411) |
| 10.3.3 珠光体的组织特点及力学性能 | (413) |
| 10.3.4 有色合金中的共析转变 | (413) |
| 10.4 马氏体转变 | (416) |
| 10.4.1 马氏体转变的特点 | (416) |
| 10.4.2 马氏体转变热力学 | (418) |
| 10.4.3 马氏体转变动力学 | (420) |
| 10.4.4 马氏体转变晶体学 | (422) |
| 10.4.5 热弹性马氏体和马氏体转变的可逆性 | (424) |
| 10.4.6 有色合金中的马氏体 | (425) |
| 10.4.7 非金属材料中的马氏体转变 | (427) |
| 10.5 贝氏体转变 | (429) |