



普通高等学校“十二五”规划教材

材料科学基础

Fundamentals of Materials Science (第2版)

郑子樵 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



普通高等学校“十二五”规划教材

材料科学基础

Fundamentals of Materials Science (第2版)

郑子樵 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/郑子樵主编. —2版. —长沙:中南大学出版社,
2013. 8

ISBN 978-7-5487-0948-0

I. 材... II. 郑... III. 材料科学 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 192401 号

材料科学基础
(第二版)

郑子樵 主编

责任编辑 周兴武

责任印制 周颖

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:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市华中印刷厂

开 本 730×960 1/16 印张 34.25 字数 666 千字

版 次 2013 年 8 月第 2 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0948-0

定 价 68.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

第二版说明

“材料科学基础”是材料科学与工程专业的主要理论基础课程。为适应我国高等教育改革和专业调整以及高素质人才培养的需要，我们于2005年在本校主编的《物理冶金基础》[冶金工业出版社，1985年版(曹明盛主编)和1997年版(唐仁政主编)]教材基础上组织编写了这本《材料科学基础》一书。本书在内容上尝试将金属材料、无机非金属材料、高分子材料结合在一起，同时兼顾结构材料和功能材料，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，阐述各种材料的共性基础知识及个性特征。本书出版发行以来重印多次，不仅作为本校材料科学与工程本科专业的教材，而且已被国内部分兄弟院校所采用，作为相关专业的教学用书。

本书这次修订，在保持第一版章节体系基本不变的前提下，适当补充了有关基础理论和实际应用的内容，从而使本书的内容体系更加完整。如第1章对非晶态的内容进行了少量修改；第2章增加了位错应力场的解析；第3章增加了复合材料的界面；第4章增加了气-固相变与薄膜生长；第5章补充了单元系相图的内容；将第8章材料的塑性变形改为“材料的变形与断裂”，增加了弹性变形和断裂两节内容；第10章增加了空位在脱溶过程中的作用以及脱溶物粗化——Ostwald熟化等内容。此外，删去了绪论以及固态相变和热加工方面的少量内容，同时对第一版中某些不太确切的描述和提法也进行了订正。

由于教学时数的限制，编入本书的内容不一定全部都在课堂上讲授，但通过课堂学习和课外自学掌握比较完整的材料科学基础理论知识，对于本专业的学生来说是必要的。

修订工作由原书各章编者共同讨论后，分别执笔完成。由于编者水平所限，修正后的本书在内容上仍难免有错漏和不妥之处，恳请读者继续批评指正。

编者
2013年8月

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章第6~第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

目 录

第 1 章 固体材料的结构	(1)
1.1 原子间的键合方式	(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 结合键与材料性能	(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 晶系和布拉菲点阵	(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	(85)
2.4 位错的运动	(86)
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	(89)

2.4.4 混合位错的运动	(90)
2.5 位错的应力场和应变能	(91)
2.5.1 位错的应力场	(91)
2.5.2 位错的应变能	(94)
2.6 位错的受力	(96)
2.6.1 作用在位错上的力	(96)
2.6.2 位错的线张力	(97)
2.7 位错与晶体缺陷的交互作用	(98)
2.7.1 位错与点缺陷之间的交互作用	(98)
2.7.2 位错之间的交互作用	(101)
2.7.3 位错的塞积	(105)
2.8 位错的萌生与增殖	(107)
2.8.1 晶体中位错的萌生	(107)
2.8.2 晶体中位错的增殖	(107)
2.9 实际晶体中的位错组态	(109)
2.9.1 fcc, bcc, hcp 晶体中单位位错的柏氏矢量	(109)
2.9.2 层错	(110)
2.9.3 不全位错	(111)
2.9.4 位错反应与扩展位错	(113)
2.9.5 位错的实际观察	(118)
习 题	(119)
第3章 材料的表面与界面	(121)
3.1 材料的表面	(121)
3.1.1 表面晶体学	(121)
3.1.2 表面热力学	(128)
3.1.3 实际表面	(132)
3.2 材料的界面	(135)
3.2.1 界面的定义和种类	(135)
3.2.2 晶界	(135)
3.2.3 相界	(142)
3.2.4 多晶材料中的界面	(144)
3.2.5 复合材料的界面	(146)
习 题	(148)

第 4 章 材料的凝固	(149)
4.1 金属液态结构与性能特点	(149)
4.1.1 液态金属与固态金属的比较	(150)
4.1.2 金属液态结构	(152)
4.2 金属结晶的基本规律	(153)
4.2.1 金属结晶的微观现象	(153)
4.2.2 金属结晶的宏观现象	(154)
4.3 晶核的长大	(167)
4.3.1 晶核长大的条件	(167)
4.3.2 液 - 固界面的微观结构	(168)
4.3.3 晶体长大的机制	(168)
4.3.4 纯金属长大的形态	(170)
4.4 结晶理论的应用	(174)
4.4.1 铸锭的组织及控制	(174)
4.4.2 单晶体的制备	(179)
4.4.3 定向凝固技术	(180)
4.4.4 急冷凝固	(181)
4.5 聚合物的凝固	(183)
4.6 气 - 固相变与薄膜生长	(184)
4.6.1 蒸发和凝聚的热力学条件	(184)
4.6.2 形核	(185)
4.6.3 薄膜的生长方式	(186)
习 题	(187)
第 5 章 单元系、二元系相图及合金的凝固组织	(188)
5.1 单元系相图	(188)
5.2 二元相图的表示方法	(191)
5.2.1 二元合金中存在的相	(191)
5.2.2 二元相图的表示、含义和杠杆定律	(193)
5.2.3 用实验方法测绘二元相图	(196)
5.3 匀晶相图及固溶体合金的凝固和组织	(198)
5.3.1 相图分析	(198)
5.3.2 固溶体合金的平衡凝固和组织	(199)

5.3.3	固溶体合金的非平衡凝固和组织	(200)
5.3.4	固溶体合金凝固过程中的溶质分布	(202)
5.3.5	区域熔炼	(207)
5.3.6	成分过冷及其对晶体成长形状和铸锭组织的影响	(208)
5.4	共晶相图及共晶系合金的凝固和组织	(212)
5.4.1	相图分析	(212)
5.4.2	共晶系合金的平衡凝固和组织	(213)
5.4.3	共晶组织及其形成机理	(216)
5.4.4	共晶系合金的非平衡凝固和组织	(222)
5.5	包晶相图及其合金的凝固和组织	(226)
5.5.1	相图分析	(226)
5.5.2	包晶系合金的平衡凝固和组织	(227)
5.5.3	包晶系合金的非平衡凝固和组织	(228)
5.5.4	包晶转变的实际应用	(229)
5.6	偏晶相图及其合金的凝固和组织	(229)
5.7	形成化合物的二元相图	(231)
5.7.1	形成稳定化合物的二元相图	(231)
5.7.2	形成不稳定化合物的二元相图	(231)
5.8	具有固态转变的二元相图	(232)
5.8.1	具有共析转变的相图	(232)
5.8.2	具有包析转变的相图	(233)
5.8.3	具有偏析转变的相图	(233)
5.8.4	具有熔晶转变的相图	(233)
5.8.5	具有无序-有序转变的相图	(234)
5.8.6	具有固溶度变化的相图	(234)
5.8.7	具有磁性转变的相图	(234)
5.9	如何分析和使用二元相图	(235)
5.9.1	相图中的线条和相区分析	(235)
5.9.2	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	(236)
5.9.3	Cu-Sn 合金系相图	(242)
5.9.4	Mg ₂ SiO ₄ -SiO ₂ 系相图	(243)
5.9.5	ZrO ₂ -SiO ₂ 系相图	(244)
5.10	相图热力学基础	(245)

5. 10. 1	吉布斯自由能与成分的关系	(245)
5. 10. 2	克劳修斯-克萊普隆方程	(247)
5. 10. 3	相平衡条件	(249)
5. 10. 4	吉布斯自由能曲线与相图	(252)
习 题		(255)
第 6 章	三元系相图	(258)
6. 1	三元相图的成分表示法	(258)
6. 2	三元相图的杠杆定律和重心法则	(260)
6. 2. 1	杠杆定律	(260)
6. 2. 2	重心法则	(260)
6. 3	匀晶三元相图	(261)
6. 3. 1	相图的空间模型	(261)
6. 3. 2	合金的凝固过程及组织	(262)
6. 3. 3	等温截面(或水平截面)	(262)
6. 3. 4	变温截面(或垂直截面)	(264)
6. 4	简单共晶三元相图	(265)
6. 4. 1	相图的空间模型	(265)
6. 4. 2	合金的凝固过程和组织	(267)
6. 4. 3	等温截面	(268)
6. 4. 4	变温截面	(268)
6. 5	固态有限溶解的三元共晶相图	(270)
6. 5. 1	相图的空间模型	(270)
6. 5. 2	合金的凝固过程和组织	(272)
6. 5. 3	等温截面	(275)
6. 5. 4	变温截面	(275)
6. 6	具有包共晶反应的三元相图	(277)
6. 6. 1	相图的空间模型	(277)
6. 6. 2	合金的凝固过程和组织	(278)
6. 6. 3	等温截面	(280)
6. 6. 4	变温截面	(280)
6. 6. 5	固相具有固溶度时的相区界面投影图	(281)
6. 7	具有三元包晶反应的三元相图	(282)
6. 8	形成稳定化合物的三元相图	(284)

6.8.1 形成一个稳定化合物的三元相图简化法	(284)
6.8.2 形成几个稳定化合物的三元相图简化法	(285)
6.9 三元相图总结	(286)
6.9.1 三元系的两相平衡	(286)
6.9.2 三元系的三相平衡	(286)
6.9.3 三元系的四相平衡	(287)
6.9.4 液相面投影图	(290)
6.9.5 三元相图中的相区相邻规则	(290)
6.10 三元相图实例分析	(292)
6.10.1 Pb - Sn - Bi 系	(292)
6.10.2 Al - Cu - Mg 系	(293)
6.10.3 W - C - Co 系	(295)
6.10.4 Fe - Cr - C 系	(297)
6.10.5 MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ 系	(299)
习 题	(300)
第7章 固体材料中的扩散	(303)
7.1 扩散方程	(303)
7.1.1 菲克第一定律	(303)
7.1.2 菲克第二定律	(305)
7.1.3 菲克第二方程的解	(307)
7.2 扩散的微观机制	(311)
7.2.1 交换机制	(311)
7.2.2 间隙机制	(312)
7.2.3 空位机制	(313)
7.2.4 其他扩散机制	(315)
7.3 扩散系数	(316)
7.3.1 扩散系数的测定方法	(316)
7.3.2 影响扩散系数的因素	(318)
7.4 扩散的热力学分析	(324)
7.4.1 扩散驱动力	(324)
7.4.2 上坡扩散	(325)
7.5 固溶体中的扩散	(326)
7.5.1 固溶体中的自扩散	(326)

7.5.2 固溶体中的互扩散——Kirkendall 效应	(326)
7.6 反应扩散	(327)
7.6.1 反应扩散的概念	(327)
7.6.2 反应扩散的速率	(328)
7.7 离子晶体中的扩散	(329)
7.8 非晶体中的扩散	(330)
7.8.1 长链聚合物中的扩散	(330)
7.8.2 无机玻璃中的扩散	(331)
7.9 材料中扩散问题的几个实例	(331)
7.9.1 粉体材料的烧结	(331)
7.9.2 渗碳	(333)
7.9.3 铸锭的均匀化	(335)
7.9.4 金属表面的氧化	(336)
习 题	(337)
第 8 章 材料的变形与断裂	(339)
8.1 材料的弹性变形	(339)
8.1.1 广义虎克定律及弹性常数	(339)
8.1.2 弹性的不完整性	(342)
8.2 单晶体金属的塑性变形	(343)
8.2.1 单晶体的滑移	(343)
8.2.2 扭折	(351)
8.2.3 孪生	(352)
8.3 多晶体的塑性变形	(355)
8.3.1 晶粒边界	(356)
8.3.2 晶界对多晶体塑性变形的影响	(356)
8.3.3 多晶体塑性变形的微观特点	(358)
8.4 单相固溶体合金塑性变形特点	(359)
8.4.1 屈服现象	(359)
8.4.2 应变时效	(360)
8.5 复相合金的塑性变形	(362)
8.6 金属冷加工后的组织与性能的变化	(363)
8.6.1 金属塑性变形后的组织变化	(363)
8.6.2 加工硬化	(366)

8.6.3 变形后金属中的残余应力	(368)
8.6.4 多晶体材料的织构(择优取向)	(369)
8.7 陶瓷材料的塑性变形	(371)
8.8 聚合物的变形	(374)
8.8.1 热塑性聚合物的变形	(375)
8.8.2 热固性塑料的变形	(378)
8.9 晶体的断裂	(378)
8.9.1 断裂的分类	(378)
8.9.2 理论断裂强度和实际断裂强度	(379)
习 题	(382)
第9章 回复和再结晶	(384)
9.1 概述	(384)
9.2 冷变形金属的回复	(386)
9.2.1 回复动力学	(386)
9.2.2 回复过程的组织变化与回复机制	(387)
9.3 冷变形金属的再结晶	(390)
9.3.1 再结晶的形核	(390)
9.3.2 再结晶动力学	(392)
9.3.3 再结晶温度	(393)
9.3.4 再结晶后的晶粒大小及再结晶全图	(394)
9.3.5 再结晶织构	(396)
9.3.6 退火孪晶	(397)
9.4 晶粒长大	(397)
9.4.1 正常晶粒长大	(398)
9.4.2 反常晶粒长大(二次再结晶)	(400)
9.5 热加工过程的回复与再结晶	(401)
9.5.1 动态回复	(402)
9.5.2 动态再结晶	(403)
习 题	(404)
第10章 固态相变	(406)
10.1 固态相变概述	(406)
10.1.1 固态相变的分类	(406)

10.1.2	固态相变的特点	(409)
10.1.3	固态相变的热力学条件	(410)
10.1.4	固态相变的形核	(411)
10.1.5	新相的长大	(414)
10.1.6	相变动力学	(416)
10.2	过饱和固溶体的脱溶	(418)
10.2.1	脱溶的驱动力	(418)
10.2.2	脱溶顺序	(419)
10.2.3	空位在脱溶过程中的作用	(422)
10.2.4	脱溶方式及显微组织的变化	(424)
10.2.5	调幅分解	(426)
10.2.6	脱溶物粗化—Ostwald 粗化	(428)
10.3	共析转变	(431)
10.3.1	Fe - C 合金中的共析转变	(431)
10.3.2	珠光体的形成过程	(432)
10.3.3	珠光体的组织特点及力学性能	(434)
10.3.4	有色合金中的共析转变	(434)
10.4	马氏体转变	(437)
10.4.1	马氏体转变的特点	(437)
10.4.2	马氏体转变热力学	(439)
10.4.3	马氏体转变动力学	(441)
10.4.4	马氏体转变晶体学	(443)
10.4.5	热弹性马氏体和马氏体转变的可逆性	(445)
10.4.6	非金属材料中的马氏体转变	(446)
10.5	贝氏体转变	(448)
10.5.1	贝氏体转变的特点	(448)
10.5.2	贝氏体的类型与组织形态	(449)
10.5.3	贝氏体转变的机制	(451)
10.5.4	贝氏体的性能	(451)
10.6	块型转变	(451)
10.6.1	纯金属中的块型转变	(452)
10.6.2	二元合金置换式固体中的块型转变	(453)
10.6.3	块型转变机制	(453)
10.7	有序 - 无序转变	(454)

10.7.1 有序度参量	(454)
10.7.2 有序化过程	(455)
习 题	(457)
第 11 章 材料的电子结构与物理性能	(459)
11.1 固体电子理论简介	(459)
11.1.1 经典自由电子论	(459)
11.1.2 量子自由电子论	(460)
11.1.3 能带概念的引入	(462)
11.2 材料的电学性能	(465)
11.2.1 固体的导电性	(465)
11.2.2 半导体	(467)
11.2.3 电学材料	(472)
11.3 材料的磁学性能	(473)
11.3.1 物质的磁性与原子结构	(473)
11.3.2 物质磁性的分类	(475)
11.3.3 磁畴与技术磁化	(479)
11.3.4 磁性材料	(481)
11.4 材料的光学性能	(482)
11.4.1 光和颜色	(482)
11.4.2 光辐射原理	(483)
11.4.3 光学材料	(489)
习 题	(492)
第 12 章 材料的强化和韧化	(493)
12.1 金属材料的强韧化	(493)
12.1.1 金属材料的强化	(493)
12.1.2 金属材料的韧化	(502)
12.2 陶瓷材料的增韧	(507)
12.2.1 相变增韧	(508)
12.2.2 裂纹桥联增韧	(510)
12.2.3 裂纹偏转和微裂纹增韧	(511)
12.2.4 耦合增韧效应	(512)
12.3 高聚物的强韧化	(513)

12.3.1	高分子链结构的影响	(514)
12.3.2	高分子聚集态结构的影响	(516)
12.3.3	外界条件的影响	(519)
12.4	复合材料的强化和韧化	(520)
12.4.1	纤维的增强作用	(521)
12.4.2	纤维和晶须的增韧作用	(522)
习 题	(524)
参考文献	(526)