

普通高等教育规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU GUIHUA JIAOCAI

材料成形金属学

丁 桦 主编

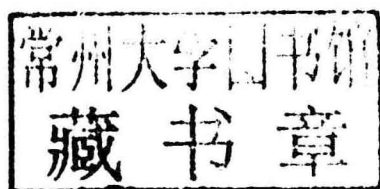


冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

普通高等教育规划教材

材料成形金属学

丁 桦 主编



北 京
冶金工业出版社
2016

内 容 提 要

本书系统介绍了材料的晶格缺陷,材料的塑性变形机制、强化机制、形变及再结晶规律,材料塑性变形的宏观规律、塑性变形抗力、塑性行为及断裂,并介绍了材料组织性能控制的方法。本书着重于材料组织性能控制的基本概念和基本理论,力图较为完整地介绍材料成形过程中的物理冶金知识,注重引导学生应用基本理论分析实际问题。

本书主要用于材料成型及控制工程专业本科生的教学,也可供材料加工工程学科的研究生和相关领域的工程技术人员及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形金属学/丁桦主编. —北京:冶金工业出版社,
2016. 12
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-5024-7417-1

I. ①材… II. ①丁… III. ①金属材料—成形—高等
学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 028948 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 卢 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7417-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016 年 12 月第 1 版,2016 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.75 印张; 307 千字; 192 页

35.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

材料成形不仅能使材料的形状和尺寸发生改变,更重要的是可以控制材料的组织性能。发掘传统材料的潜能和开发新的材料,都需要了解材料的微观组织和力学性能之间的关系,掌握材料组织性能的控制方法。因此,材料成形过程中的物理冶金学一直受到研究人员和企业界的高度重视,也是一个非常活跃的研究领域。

本教材力图将材料成形的宏观规律与微观现象相联系,揭示材料微观组织的演变规律,解释材料变形过程中的力学行为。教材首先介绍材料的晶格缺陷尤其是位错理论,然后依次介绍材料的塑性变形机制、强化机制、形变及再结晶规律;之后介绍材料塑性变形的宏观规律、材料的塑性变形抗力、材料的塑性行为及断裂;最后阐述材料组织性能控制的方法,并对材料的服役性能做以介绍。本教材着重于材料组织性能控制的基本概念和基本理论,力图较为完整地介绍材料成形过程中的物理冶金知识,注重引导学生应用基本理论分析实际问题。

本教材的编写人员全部从事材料成形与组织性能控制方面的研究,试图将科研工作融入教材的编写,做到科研和教学相互促进。在本教材中引入了一些例题,其中有的来自于编者在科研工作中所阅读的文献,也有的源于编者的科研工作。希望通过这些例题使读者能够结合实际学习材料组织性能控制的方法,为解决实际的工程问题奠定一定的基础。教材的每章之后给出了习题与思考题,以方便读者的进一步学习和思考。

本教材共分为10章。教材的编者有:丁桦(第1、2、5、9章)、李艳梅(第3、6章)、唐正友(第4、10章)和蔡明晖(第7、8章),全书由丁桦统稿。朱伏先教授对全文进行了审阅。编者的研究生对本书的文字和图表进行了

整理。东北大学对本教材的出版提供了支持和资助。

本书主要用于材料成型及控制工程专业本科生的教学，也可供材料加工工程学科的研究生和相关领域的工程技术人员及研究人员参考。

虽经反复揣摩，本书仍难免会有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016年11月于沈阳东北大学

目 录

1 晶体缺陷概述	1
1.1 点缺陷	1
1.1.1 空位	1
1.1.2 间隙原子	2
1.1.3 置换原子	2
1.2 线缺陷	2
1.2.1 刃型位错	2
1.2.2 螺型位错	2
1.2.3 混合位错	2
1.3 面缺陷	3
1.3.1 小角度晶界	3
1.3.2 大角度晶界	4
1.3.3 相界面	5
习题与思考题	6
2 位错理论基础	7
2.1 位错概念的引入	7
2.2 位错的柏氏矢量	8
2.2.1 柏氏矢量的确定	8
2.2.2 柏氏矢量与位错类型的关系	8
2.2.3 柏氏矢量的特性	9
2.2.4 柏氏矢量的表示方法	9
2.3 位错的实验观察	9
2.4 位错的应力场及应变能	11
2.4.1 位错的应力场	11
2.4.2 位错的应变能	13
2.4.3 位错的线张力	14
2.5 位错的运动及晶体的塑性变形	15
2.5.1 位错的滑移运动	15
2.5.2 刃型位错的攀移运动	17
2.5.3 位错运动与宏观应变的关系	18
2.6 位错在应力场中的受力	19

IV	
2.7	位错间的相互作用力..... 20
2.7.1	两个螺型位错间的相互作用力..... 21
2.7.2	两平行刃型位错间的相互作用力..... 22
2.7.3	螺型位错和刃型位错间的相互作用力..... 23
2.8	位错与溶质原子的交互作用..... 24
2.8.1	柯氏气团..... 24
2.8.2	斯诺克气团..... 24
2.9	位错的交割..... 24
2.9.1	两个柏氏矢量互相垂直的刃型位错交割..... 25
2.9.2	两个柏氏矢量互相平行的刃型位错交割..... 25
2.9.3	两个柏氏矢量互相垂直的螺型位错交割..... 26
2.9.4	两个柏氏矢量垂直的刃型位错和螺型位错的交割..... 26
2.9.5	带割阶位错的运动..... 26
2.10	位错的增殖与塞积..... 28
2.10.1	位错的增殖..... 28
2.10.2	位错的塞积..... 29
2.11	金属晶体中的位错..... 31
2.11.1	位错反应..... 31
2.11.2	堆垛层错..... 31
2.11.3	不全位错..... 33
2.12	面心立方晶体中的位错..... 34
2.12.1	扩展位错..... 34
2.12.2	面角位错..... 36
2.12.3	汤普森四面体..... 37
	习题与思考题..... 38
3	材料的塑性变形机制..... 40
3.1	滑移..... 40
3.1.1	滑移变形的特点..... 40
3.1.2	滑移时的临界分切应力..... 41
3.1.3	滑移时晶体的转动..... 42
3.1.4	多系滑移..... 43
3.2	孪生..... 44
3.2.1	孪生的形成与特点..... 44
3.2.2	孪生的位错机制..... 46
3.2.3	影响孪生的因素..... 46
3.3	多晶体塑性变形机制..... 47
3.3.1	多晶体塑性变形的特点..... 47
3.3.2	多晶体塑性变形机制..... 51

3.4 多晶体材料的不均匀塑性变形	51
3.4.1 扭折带	51
3.4.2 形变带	52
3.4.3 显微带	52
3.4.4 剪切带	52
3.5 高温变形机理	53
3.5.1 定向空位流机理	53
3.5.2 晶界滑动机理	54
3.6 变形机制图	55
习题与思考题	57
4 材料的强化机制	58
4.1 晶界强化	58
4.1.1 晶界强化原理	58
4.1.2 亚晶界及相界强化	59
4.2 形变强化	60
4.2.1 形变强化机理	60
4.2.2 形变强化的数学表达	60
4.3 固溶强化	63
4.4 第二相强化	66
4.4.1 位错与第二相质点运动方式	66
4.4.2 沉淀强化	66
4.4.3 弥散强化	69
4.5 相变强化	71
4.6 复合材料的强化	71
4.6.1 纤维增强复合材料的增强机制	72
4.6.2 粒子增强型复合材料的增强机制	73
习题与思考题	73
5 材料的变形和再结晶	74
5.1 冷变形对材料组织与性能的影响	74
5.1.1 显微组织演变	74
5.1.2 性能的变化	77
5.1.3 冷变形材料的储存能	78
5.2 材料的回复和再结晶	78
5.2.1 回复	78
5.2.2 再结晶	81
5.2.3 晶粒长大	84
5.2.4 再结晶退火后的组织	85

5.3 材料的热变形	87
5.3.1 热变形中的软化过程	88
5.3.2 热加工后的软化过程	90
5.3.3 热变形对材料组织性能的影响	91
习题与思考题	91
6 材料塑性变形的宏观规律	93
6.1 基本概念和研究方法	93
6.1.1 均匀变形与不均匀变形	93
6.1.2 基本应力与附加应力	94
6.1.3 研究变形分布的主要方法	96
6.2 影响材料变形行为的因素	99
6.2.1 接触摩擦	99
6.2.2 变形工具和坯料的轮廓形状	102
6.2.3 变形物体温度分布不均	102
6.2.4 变形材料材质不均	103
6.3 变形不均匀分布所引起的后果及防止措施	103
6.3.1 影响制品质量	103
6.3.2 降低塑性加工工艺性能	103
6.3.3 增加工具局部磨损	103
6.4 残余应力	104
6.4.1 残余应力的概念	104
6.4.2 变形条件对残余应力的影响	104
6.4.3 残余应力的影响	105
6.4.4 减小或消除残余应力的措施	105
6.4.5 研究残余应力的主要方法	107
习题与思考题	109
7 材料的塑性变形抗力	110
7.1 塑性变形抗力的基本概念	110
7.2 塑性变形抗力的测量方法	110
7.2.1 拉伸试验法	111
7.2.2 压缩试验法	111
7.2.3 扭转试验法	111
7.3 塑性变形抗力的数学模型	112
7.4 材料的化学成分及组织对塑性变形抗力的影响	115
7.4.1 化学成分的影响	115
7.4.2 组织的影响	116
7.5 变形条件对塑性变形抗力的影响	117

7.5.1 变形温度的影响	117
7.5.2 变形速率的影响	119
7.5.3 变形程度的影响	119
7.5.4 应力状态的影响	119
7.6 加工硬化曲线	120
7.7 包辛格效应	123
7.7.1 包辛格效应的定义	123
7.7.2 描述包辛格效应的模型	124
7.7.3 研究包辛格效应的意义及应用实例	125
习题与思考题	126
8 材料的塑性行为	127
8.1 材料塑性的基本概念	127
8.2 材料塑性指标及测定方法	127
8.2.1 塑性指标	127
8.2.2 材料塑性的测定方法	127
8.2.3 塑性状态图及其应用	133
8.3 塑性的影响因素	134
8.3.1 材料的自然属性对塑性的影响	134
8.3.2 变形温度-速度对塑性的影响	137
8.3.3 变形的力学条件对塑性的影响	139
8.4 提高材料塑性的主要途径	141
8.5 材料的超塑性	141
8.5.1 超塑性的类型	142
8.5.2 超塑性的力学特征	142
8.5.3 变形激活能 (Q)	143
8.5.4 超塑变形过程中的组织演变	146
8.5.5 超塑性变形机理	147
8.5.6 超塑性的应用	148
习题与思考题	149
9 材料的断裂	150
9.1 断裂类型	150
9.2 脆性断裂	152
9.2.1 理论断裂强度	152
9.2.2 Griffith 脆性断裂理论	153
9.3 韧性断裂	155
9.4 微裂纹形核的位错模型	157
9.5 影响断裂类型的因素	159

9.6 材料塑性加工时的断裂	161
9.6.1 锻造时的断裂	161
9.6.2 轧制时的断裂	162
9.6.3 挤压和拉拔时产生的裂纹	164
习题与思考题	165
10 材料的组织性能控制	166
10.1 钢的组织性能控制	166
10.2 铝合金的组织性能控制	169
10.3 其他合金的组织性能控制	171
10.3.1 钛合金	171
10.3.2 铜合金	171
10.3.3 高温合金	172
10.4 冲压性能的控制	173
10.4.1 冲压性能的特征	173
10.4.2 影响冲压性能的主要因素	176
10.5 服役性能的控制	178
10.5.1 蠕变性能	179
10.5.2 持久性能	181
10.5.3 疲劳性能	181
10.5.4 介质对材料强度的影响	182
习题与思考题	185
参考文献	187
中英文词汇对照表	189

在实际晶体中，原子的排列是不规则的，常出现各种偏离理想结构的情形。原子的不规则排列产生晶体缺陷。晶体缺陷在材料组织控制（如扩散、相变）和性能控制（如材料强化）中具有重要的作用。

根据晶体缺陷的几何特征，可以将晶体缺陷分为以下三类：

- (1) 点缺陷：在三维空间各方向上尺寸都很小的缺陷，如空位、间隙原子、异类原子等。
- (2) 线缺陷：在两个方向上尺寸很小，而另一个方向上尺寸较大的缺陷，主要是位错。
- (3) 面缺陷：在一个方向上尺寸很小，在另外两个方向上尺寸较大的缺陷，如晶界、相界、表面等。

1.1 点缺陷

点缺陷是在晶格结点上或邻近的微观区域内偏离晶体结构正常排列的一种缺陷。点缺陷包括空位、间隙原子、杂质或溶质原子（图 1-1）。

1.1.1 空位

在理想晶体晶格结点处失去原子，形成了原子的空位，这种缺陷称为空位。受热、变形和辐照都会迫使晶体中的原子离开晶格点阵位置产生空位。空位周围的原子将偏离平衡位置。在一定的条件下，空位可以聚集成空位对、空位团，或通过迁移而消失于晶界或晶体表面。空位也能和溶质原子一起形成空位-溶质原子对。

空位分为两种：(1) 肖脱基空位，离位原子进入其他空位或迁移至晶界或表面；(2) 弗兰克尔空位，离位原子进入晶体间隙。

根据热力学和统计物理学计算，在给定温度下，空位的平衡浓度由下式近似给出：

$$C_0 = A \exp\left(-\frac{Q_i}{RT}\right) \quad (1-1)$$

式中 Q_i ——形成 1mol 空位所需做的功；

R ——摩尔气体常数。

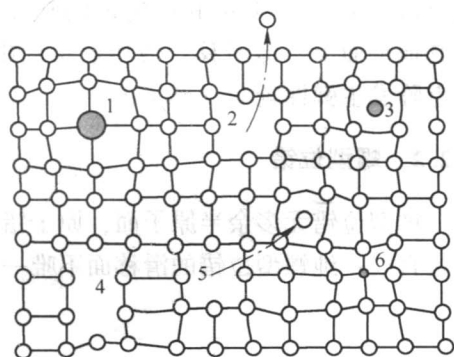


图 1-1 点缺陷示意图

- 1—大的置换原子；2—肖脱基空位；
3—异类间隙原子；4—复合空位；
5—弗兰克尔空位；6—小的置换原子

1.1.2 间隙原子

进入晶体点阵间隙位置的原子称为间隙原子。间隙原子可以是自间隙原子，也可以是尺寸较小的溶质原子。例如，氮、氢、碳等原子的体积小，在晶体中一般以间隙原子形式存在。如晶体被高能粒子辐照，原子在进入间隙位置形成间隙原子的同时，还形成一个空位。

1.1.3 置换原子

位于晶体点阵位置的异类原子也可以看做是形成了点缺陷。异类原子与基体原子（或间隙位置）的体积一般是有差别的，因此这些原子的存在会使晶格发生畸变。

1.2 线缺陷

位错是晶体中原子错排而造成的一种晶体缺陷。位错线是晶体中已滑移区和未滑移区的边界线，但并不是一条实体线。位错区域只有几个原子间距宽，因此称之为线缺陷。按晶体内原子错排特点的不同，位错可以分为刃型位错、螺型位错和混合位错三种类型。

1.2.1 刃型位错

刃型位错的特征是有一个多余的半原子面，不一定是直线；滑移面必须是同时包含有位错线和滑移矢量的平面，在其他平面上不能滑移；刃型位错周围的点阵发生弹性畸变（图 1-2）。

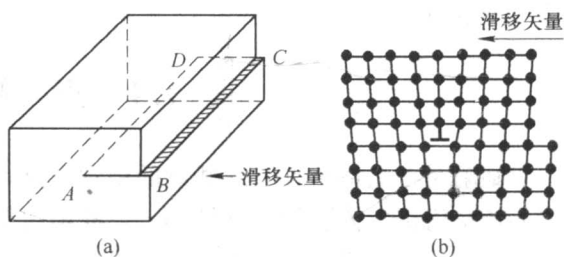


图 1-2 刃型位错示意图

(a) 位错的形成；(b) 原子排列

1.2.2 螺型位错

螺型位错无多余半原子面，原子错排呈轴对称；螺型位错线与滑移矢量平行，因此一定是直线；纯螺型位错的滑移面不唯一；螺型位错周围发生点阵畸变（图 1-3）。

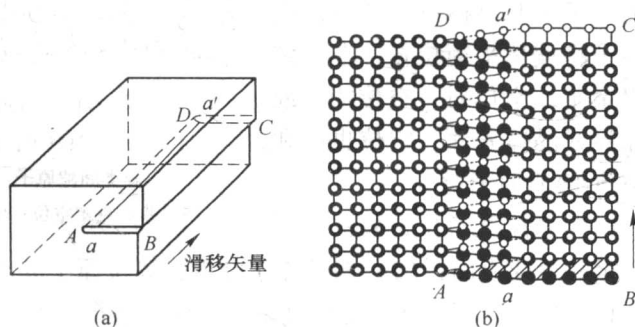


图 1-3 螺型位错示意图

(a) 位错的形成；(b) 原子排列

1.2.3 混合位错

刃型位错和螺型位错是位错的两种基本类型。混合位错的原子排列特点是既有多余半

原子面，又有螺旋面，也就是说混合位错是由刃型位错和螺型位错合成的。在混合位错中，既有刃型位错成分，又有螺型位错成分（如图 1-4 所示）。

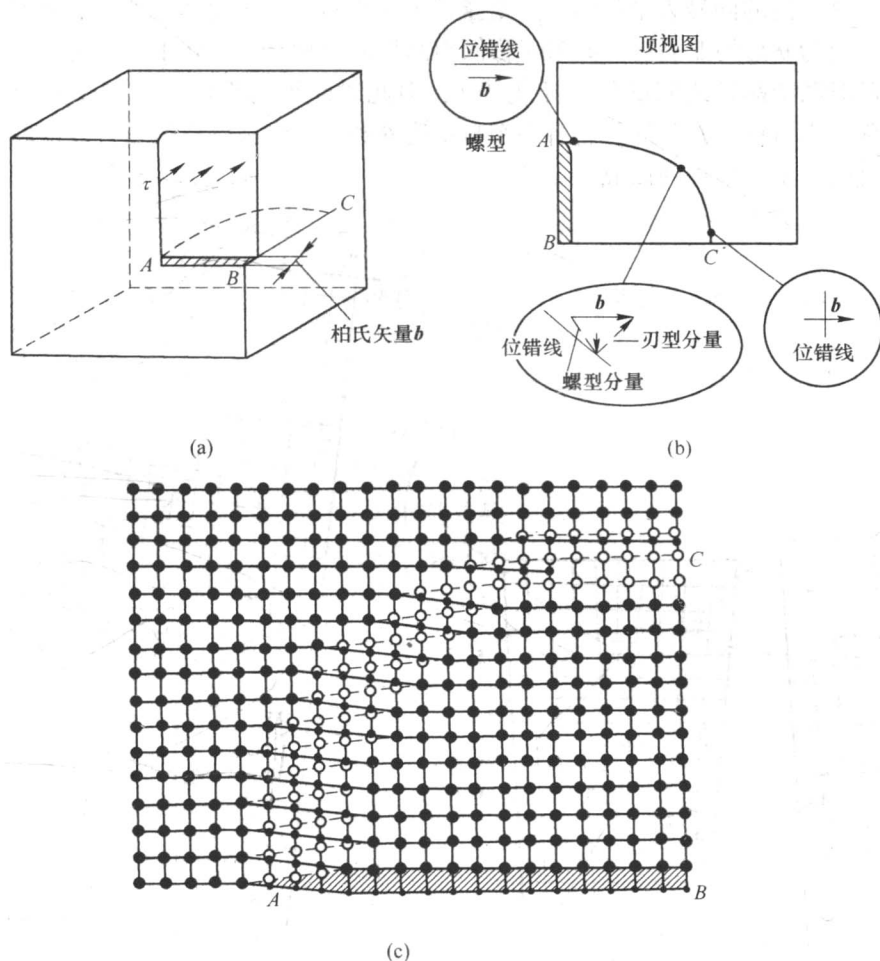


图 1-4 混合位错示意图

1.3 面 缺 陷

晶格的面缺陷包括晶体表面、晶界、亚晶界、相界、堆垛层错等。

金属材料一般为多晶体。多晶体由许多取向不同的小晶粒构成，晶粒与晶粒之间是晶界，晶界是一种重要的面缺陷。在一个晶粒内，有时还存在取向差较小的亚晶粒。分隔亚晶粒的界面称为亚晶界，它是一种小角度晶界。小角度晶界和大角度晶界一般以 $10^\circ \sim 15^\circ$ 为界限。在多相合金中，相界面也是一种面缺陷。不同结构的相界面对材料性能的影响很大。

1.3.1 小角度晶界

倾斜晶界与扭转晶界是小角度晶界的两种特殊形式。倾斜晶界又分为对称倾斜晶界和

不对称倾斜晶界。

图 1-5 为对称型倾斜晶界模型。这种晶界是由一系列刃型位错相隔一定距离垂直排列而成的。当晶粒内的同号刃型位错在一定条件下垂直排列形成这种晶界时，该晶粒便被分成两个取向差为 θ 角的亚晶粒。如果对称倾斜晶界的界面绕 x 轴转了一个角度 φ ，如图 1-6 所示，则此时两个晶粒之间的位向差仍为 θ ，但此时晶界的界面对于两个晶粒是不对称的，因此称为不对称倾斜晶界，它有两个自由度 θ 和 φ 。该晶界结构可看成由两组柏氏矢量相互垂直的刃型位错排列而成。

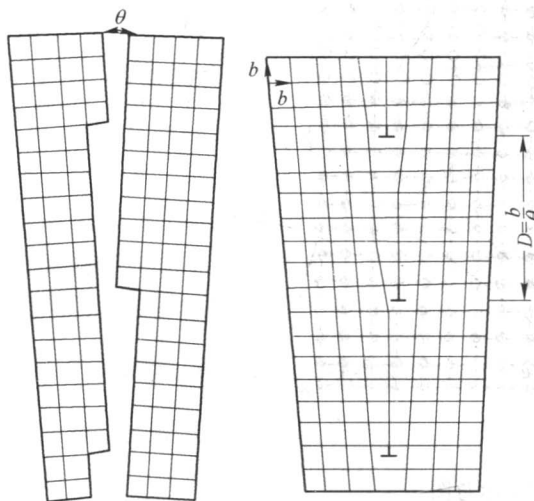


图 1-5 对称型倾斜晶界

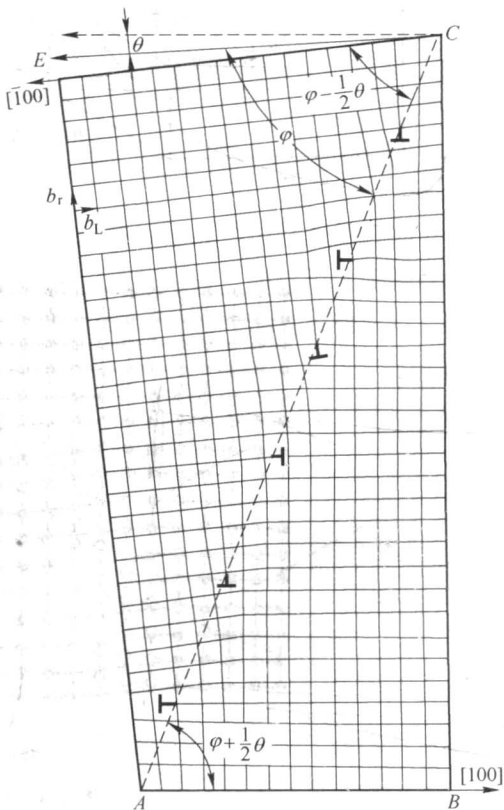


图 1-6 不对称倾斜晶界

扭转晶界可以看成是两部分晶体绕某一轴在一个共同的晶面上相对扭转一个 θ 角所构成的，扭转轴垂直于这一共同的晶面，如图 1-7 所示。它的自由度为 1。该晶界的结构可以看成由互相交叉的螺型位错所组成，如图 1-8 所示。

1.3.2 大角度晶界

多晶体材料中各晶粒之间的晶界通常为大角晶界。处于大角度晶界上的原子排列比较杂乱，难于用位错模型描述。

对于大角晶界，有多种模型。非晶态模型认为晶界处原子排列接近于过冷的液态和非晶态物质；小岛模型认为在晶界处有原子排列匹配良好的区域，它们散布在原子排列匹配不良的区域中，小岛直径约有数个原子间距；晶界无序群模型认为晶界中存在原子排列比较整齐的区域，也有比较疏松而杂乱的区域。

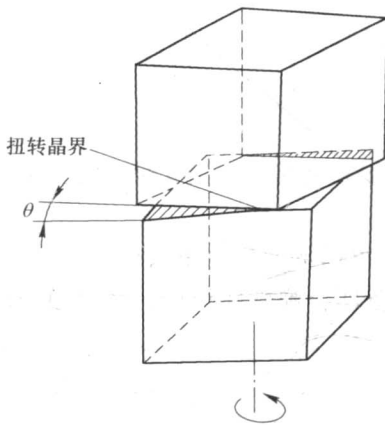


图 1-7 扭转晶界的形成

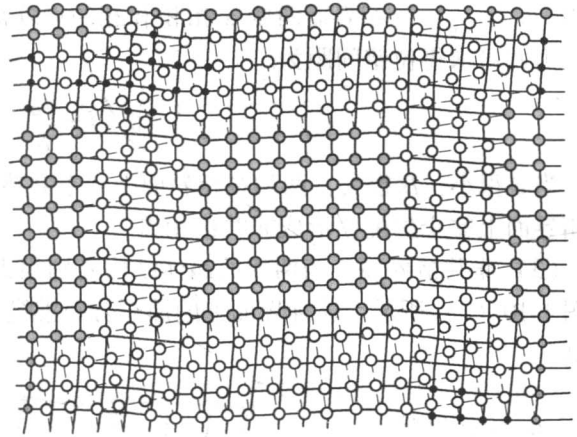


图 1-8 扭转晶界位错模型

图 1-9 示出了根据场离子显微镜研究结果提出的“重合位置点阵模型”。在二维正方点阵中, 设两个晶粒的位向差为 37° (相当于晶粒 2 相对晶粒 1 绕某固定轴旋转了 37°)。若两晶粒的点阵彼此通过晶界向对方延伸, 则其中的一些原子会出现有规律的重合。由这些原子重合位置所组成的新点阵称为重合位置点阵。在图中, 每五个原子中即有一个是重合位置, 故重合点阵密度为 $1/5$ 或称为 $1/5$ 重合位置点阵。当晶体结构及所选旋转轴与旋转角不同时可以出现不同重合位置密度的重合点阵。

1.3.3 相界面

相界面两侧是不同的相, 两相或结构不同, 或点阵参数不同。两个不同相之间的界面为相界面。按界面上错配度的不同, 可以将相界面分为共格界面、部分共格界面和非共格界面, 如图 1-10 所示。

(1) 共格界面。“共格”是指界面上的原子同时位于两相晶格的结点上, 共格相界面两边原子一一对应, 其界面能低。但是由于两相的晶格常数不同, 因此共格界面使晶格发生畸变, 产生较大的弹性能, 如图 1-10 (a) 所示。

(2) 半共格界面。当两相的晶格常数相差较大时, 则在相界面上不可能做到完全共格。为松弛更多的弹性能, 在界面上会产生一些位错, 形成部分共格界面, 如图 1-10 (b) 所示。部分共格的相界面比较分明, 界面能和弹性能都较高。

半共格相界上的位错间距取决于相界处两相匹配界面的错配度。错配度定义为

$$\delta = \frac{a_\alpha - a_\beta}{a_\alpha}$$

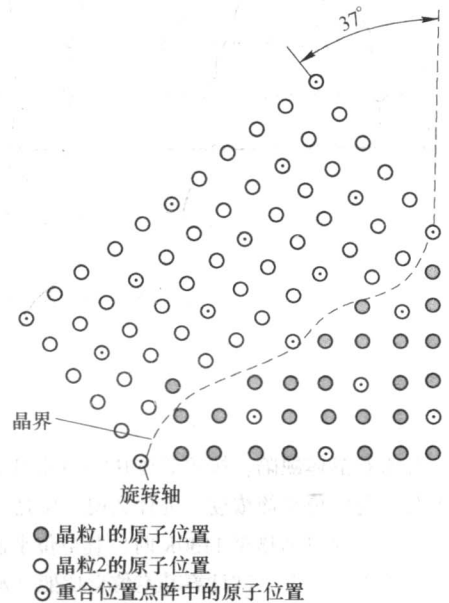


图 1-9 重合位置点阵示意图

式中 a_α, a_β ——相界面两侧 α 相和 β 相的点阵常数。

由此可求得位错间距为

$$D = \frac{a_\beta}{\delta}$$

当 δ 很小, D 很大, 两相在相界面上趋于共格, 即形成共格相界; 当 δ 很大时, 两相在相界面上完全失配, 形成非共格相界。

(3) 非共格界面。当两相的晶体结构差别很大时, 便可以形成完全不共格的相界面, 如图 1-10 (c) 所示。这种界面上的原子分布混乱, 界面分明, 弹性能很低, 而界面能却很高。

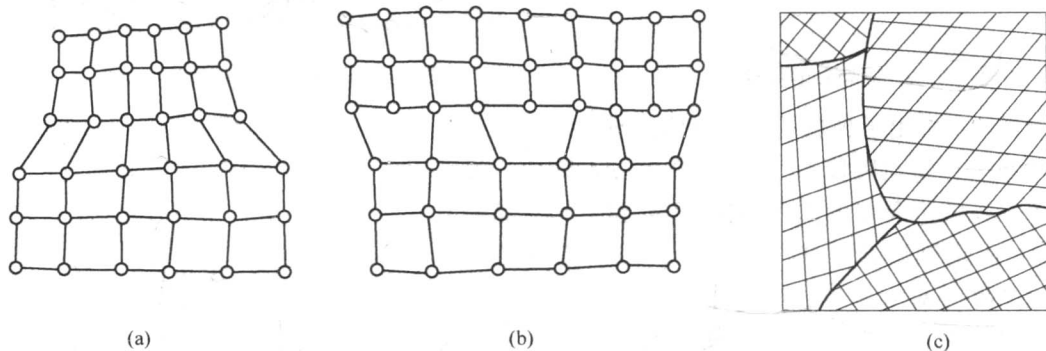


图 1-10 相界面

(a) 共格界面; (b) 部分共格界面; (c) 非共格界面

习题与思考题

- 1-1 什么是晶体缺陷? 按照晶体缺陷的几何组态, 晶体缺陷可分为几类?
- 1-2 什么是空位平衡浓度? 为什么说空位是一种热力学上平衡的缺陷?
- 1-3 若将某材料加热至 1130K 时, 其空位平衡浓度是其在 1000K 时的 5 倍, 设在 1000~1130K 之间时材料的密度不变, 试计算其空位形成能 ($R=8.32\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)。
- 1-4 相界面结构有几种形式? 其界面能的特点是什么?