

材料科学与工程学科教材系列

Principle of
Materials Processing

材料加工原理

下册

主编 王浩伟 顾剑锋 董湘怀



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

材料科学与工程学科教材系列

材料加工原理

(下册)

王浩伟
顾剑锋 主编
董湘怀



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书阐述了材料加工的主要工艺方法及加工过程的基本原理。全书共分三篇 18 章。第一篇:液态金属成形原理;第二篇:金属材料塑性成形原理;第三篇:固态相变原理。

本书的特点是将材料加工的基本原理、工艺方法与材料科学的前沿理论有机地结合在一起,并将材料科学应用中的最新技术融入其中。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工原理. 下/王浩伟,顾剑锋,董湘怀主编.

—上海:上海交通大学出版社,2019

ISBN 978-7-313-21216-0

I. ①材… II. ①王…②顾…③董… III. ①工程材料—加工 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 075153 号

材料加工原理(下册)

主 编:王浩伟 顾剑锋 董湘怀

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:上海景条印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:513 千字

版 次:2019 年 5 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-21216-0/TB

定 价:53.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:64071208

经 销:全国新华书店

印 张:21

印 次:2019 年 5 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-59815625

编委会名单

顾问委员会

- | | | |
|----|-----|----------|
| 主任 | 徐祖耀 | 上海交通大学 |
| 委员 | 周尧和 | 上海交通大学 |
| | 潘健生 | 上海交通大学 |
| | 吴人洁 | 上海交通大学 |
| | 涂善东 | 华东理工大学 |
| | 张立德 | 中科院固体物理所 |
| | 姜茂发 | 东北大学 |
| | 李春峰 | 哈尔滨工业大学 |

编委会

- | | | |
|-----|-----|---------|
| 主任 | 林栋樑 | 上海交通大学 |
| 副主任 | 吴毅雄 | 上海交通大学 |
| | 蔡珣 | 上海交通大学 |
| | 王敏 | 上海交通大学 |
| | 冯吉才 | 哈尔滨工业大学 |
| | 赵升吨 | 西安交通大学 |

委员(按姓氏笔画为序)

- | | |
|-----|---------|
| 王磊 | 东北大学 |
| 孔向阳 | 上海交通大学 |
| 李强 | 上海交通大学 |
| 李建国 | 上海交通大学 |
| 陈世朴 | 上海交通大学 |
| 戎咏华 | 上海交通大学 |
| 金学军 | 上海交通大学 |
| 金朝晖 | 上海交通大学 |
| 钱苗根 | 上海交通大学 |
| 黄永昌 | 上海交通大学 |
| 张建旗 | 内蒙古科技大学 |
| 顾剑锋 | 上海交通大学 |
| 赵震 | 上海交通大学 |
| 唐新华 | 上海交通大学 |

总 序

材料是当今社会物质文明进步的根本性支柱之一,是国民经济、国防及其他高新技术产业发展不可或缺的物质基础。材料科学与工程是关于材料成分、制备与加工、组织结构与性能,以及材料使用性能诸要素和他们之间相互关系的科学,是一门多学科交叉的综合性学科。材料科学的三大分支学科是材料物理与化学、材料学和材料加工工程。

材料科学与工程专业酝酿于 20 世纪 50 年代末,创建于 60 年代初,已历经半个世纪。半个世纪以来,材料的品种日益增多,不同效能的新材料不断涌现,原有材料的性能也更为改善与提高,力求满足多种使用要求。在材料科学发展过程中,为了改善材料的质量,提高其性能,扩大品种,研究开发新材料,必须加深对材料的认识,从理论上阐明其本质及规律,以物理、化学、力学、工程等领域学科为基础,应用现代材料科学理论和实验手段,从宏观现象到微观结构测试分析,从而使材料科学理论和实验手段迅速发展。

目前,我国从事材料科学研究的队伍规模占世界首位,论文数目居世界第一,专利数目居世界第一。虽然我国的材料科学发展迅速,但与发达国家相比,差距还较大:论文原创性成果不多,国际影响处于中等水平;对国家高技术和国民经济关键科学问题关注不够;对传统科学问题关注不够,对新的科学问题研究不深入,等等。

在这一背景下,上海交通大学出版社组织召开了“材料科学及工程学科研讨暨教材编写大会”,历时两年组建编写队伍和评审委员会,希冀以“材料科学及工程学科”系列教材的出版带动专业教育紧跟科学发展和技术进步的形势。为保证此次编写能够体现我国科学发展水平及发展趋势,丛书编写、审阅人员汇集了全国重点高校众多知名专家、学者,其中不乏德高望重的院士、长江学者等。丛书不仅涵盖传统的材料科学与工程基础、材料热力学等基础课程教材,也包括材料强化、材料设计、材料结构表征等专业方向的教材,还包括适应现代材料科学研究需要的材料动力学、合金设计的电子理论和计算材料学等。

在参与本套教材编写的上海交通大学材料科学与工程学院教师和其他兄弟院校教师的共同努力下,本套教材的出版,必将促进材料专业的教学改革和教材建设事业的发展,对青年教师的成长有所助益。

林栋樑

前 言

“材料加工原理”是材料科学与工程专业的—门主干课程,也是该专业的主要技术基础课。本课程以“加工原理”为主线,分为“材料液态成形原理”、“材料塑性成形原理”和“材料固态相变原理”三大基本组成部分,力图融合主要工程材料加工过程中共性的、基本的原理,并突出各类材料加工过程中的特性。通过授课、讨论、实验和课外实践等各个教学环节,运用现代教学手段和方法,使学生掌握各类材料在各种加工过程中的物理冶金、化学冶金和力学冶金以及各种组织转变、传热、传质现象等基本概念、基本原理和基本计算方法。并结合材料加工的各种综合实验,了解材料加工制备的基本过程,加深理论认识,掌握实验技能,提高分析问题和解决问题的能力,为学生学习后续课程,从事工程技术工作和科学研究工作打下坚实的基础。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面的特色:

(1) 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。

(2) 结合现今国防军工、航空航天等国家战略领域对新材料的巨大需求,通过实际案例讲解、分析和讨论,旨在培育学生的“学科认同感”。

(3) 遵循由浅入深的认识规律,加强了对一些基本概念的叙述,注重阐述的系统性,以便于学生理解和自学。

(4) 在保留学科经典内容的同时,增加材料加工领域创新技术等相关内容,反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,充分体现教材内容的现代化。

(5) 在教材编写过程中,对国内外同类教材进行了对比分析和研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

参与本教材编写的都是工作在材料学科教学研究第一线的、既具有丰富教学经验又具有深厚科研功底的老师。我们希望通过本教材,解决学生对于“为什么要学习材料科学”“学好材料科学能做什么”和“怎么样才能学好材料科学”等核心问题的疑惑。

本教材由上海交通大学王浩伟教授、董湘怀教授和顾剑锋教授主编。第一篇《材料液态成形原理》由王浩伟教授和吴一博士编写,第二篇《材料塑性成形原理》由董湘怀教授、申昱副教授和董杰副教授编写,第三篇《材料固态相变原理》由顾剑锋教授编写。厉松春研究员对本教材进行了认真的审阅,在此表示由衷感谢。

本教材的编写是材料专业基础课程教材创新的初步尝试,由于水平有限,经验不足,时间仓促,必然存在很多缺点和错误,恳切希望读者提出宝贵意见。

目 录

第二篇 金属材料塑性成形原理

第 8 章 塑性成形的物理基础	3
8.1 塑性成形理论与应用概述	3
8.2 金属塑性变形的机制及其对组织与性能的影响	7
8.3 金属的塑性	32
第 9 章 塑性成形的力学基础	58
9.1 应力分析	58
9.2 应变分析	75
第 10 章 屈服准则与本构方程	96
10.1 屈服准则	96
10.2 应力—应变曲线	111
10.3 本构方程	119
第 11 章 塑性成形问题的理论分析方法	142
11.1 塑性成形问题的力学模型	142
11.2 主应力法	149
11.3 上限法	164

第三篇 材料固态相变原理

第 12 章 固态相变基础	177
12.1 固态相变概论	177
12.2 固态相变热力学	185
12.3 固态相变形核与长大	186
12.4 固态相变动力学	195
第 13 章 逆共析相变	203
13.1 奥氏体及其形成条件	203
13.2 奥氏体的形成机制	205
13.3 奥氏体形成动力学	209
13.4 奥氏体晶粒长大及其控制	215
第 14 章 共析相变	221
14.1 珠光体的组织特征	221
14.2 珠光体转变机制	223
14.3 珠光体转变动力学	227

14.4	珠光体转变产物的力学性能	230
第 15 章	切变共格型相变	234
15.1	马氏体相变的基本特征	234
15.2	马氏体相变热力学及 M_s 点	237
15.3	马氏体相变晶体学模型	241
15.4	马氏体相变动力学	246
15.5	钢及铁合金中的马氏体的晶体结构及组织形态	249
15.6	奥氏体的稳定化	253
15.7	马氏体的力学性能	257
第 16 章	贝氏体相变	262
16.1	贝氏体相变的基本特征和组织形态	262
16.2	贝氏体相变机制	265
16.3	贝氏体相变动力学及其影响因素	269
16.4	钢中贝氏体的力学性能	272
第 17 章	脱溶沉淀型转变	275
17.1	脱溶沉淀与时效	275
17.2	脱溶沉淀和脱溶物结构	276
17.3	脱溶热力学和动力学	279
17.4	脱溶后的显微组织	283
17.5	脱溶时效时的性能变化	286
17.6	调幅分解	289
第 18 章	回火转变	290
18.1	淬火碳钢回火时的组织转变	290
18.2	合金元素对回火转变的影响	298
18.3	回火时力学性能的变化	302
思考题和习题(应力单位均为 MPa)		309
附录 A 下标符号及求和约定		315
附录 B 张量简介		317
参考文献		322

第二篇
金属材料塑性成形原理

第 8 章 塑性成形的物理基础

8.1 塑性成形理论与应用概述

8.1.1 金属塑性成形的特点和分类

1. 金属塑性成形的特点

在现代制造业中,广泛地利用金属材料生产各种零件和产品。金属加工的方法多种多样,包括成形、切削,等等。金属塑性成形是其中一种重要的加工方法。它是利用固态下金属的塑性,使金属在外力作用下成形的一种加工方法,因而也称为金属塑性加工或金属压力加工。

与其他金属加工方法相比,金属塑性成形方法有如下特点。

(1) 金属材料经过相应的塑性加工后,不仅形状发生改变,而且其组织、性能都能得到改善和提高。

(2) 金属塑性成形主要是靠金属在塑性状态下的体积转移,而不需靠部分地切除金属的体积,因而制件的材料利用率高,流线分布合理,从而也提高了制件的强度。

(3) 用塑性成形方法得到的工件可以达到较高的精度。应用先进的技术和设备,不少零件已达到少切削、无切削的要求,即净成形或近净成形。

(4) 塑性成形方法具有很高的生产率。例如,在曲柄压力机上压制一个汽车覆盖件仅需几秒钟,多工位冷锻机的生产节拍可达 200 件/min。

由于金属塑性加工具有以上的优点,因而钢总产量的 90% 以上,有色金属总产量的约 70% 需经过塑性加工成材,其产品品种规格繁多,广泛应用于交通运输、机械制造、电力电讯、化工、建材、仪器仪表、国防工业、航天技术,以及民用五金和家用电器等各个部门。它是制造业的一个重要组成部分,也是先进制造技术的一个重要领域。21 世纪的塑性加工技术呈现高技术化、技术融合、精密化等发展趋势。

2. 金属塑性成形方法的分类

金属成形工艺的种类很多,可以从不同的角度进行分类,但并无统一的分类方法。常用的塑性加工方法有轧制、挤压、拉拔、锻造和冲压等基本的工艺类型。其中,每一类型又可以进一步细分。表 8-1 按照加工时工件的受力和变形方式对常用的塑性加工方法进行了分类。其中,轧制、挤压和锻造依靠压力的作用使金属产生塑性变形;拉拔和冲压依靠拉力的作用使金属产生塑性变形;弯曲依靠弯矩的作用使金属产生弯曲变形;剪切依靠剪力作用产生剪切变形。轧制、挤压和锻造大部分在热态下进行;拉拔、冲压、弯曲和剪切一般在室温下进行。

轧制是指将金属坯料通过两个旋转轧辊间的特定空间使其产生塑性变形,以获得一定截面形状材料的塑性成形方法。这是由大截面坯料变为小截面材料常用的加工方法。利用

轧制方法可生产出型材、板材和管材。

拉拔是指将中等截面的坯料拉过有一定形状模孔,以获得小截面坯料的塑性成形方法。利用拉拔方法可以获得棒材、管材和线材。

挤压是指将在筒体中的大截面坯料或锭料一端加压,使金属从模孔中挤出,以获得符合模孔截面形状的小截面坯料的塑性成形方法。因为挤压是在三向受较大的压应力状态下的成形过程,所以更适于生产低塑性材料的型材和管材。

锻造通常分为自由锻和模锻两大类。自由锻一般是在锤或水压机上,利用简单的工具将金属锭料或块料锻成特定形状和尺寸的加工方法。表 8-1 中的锻粗即为一例。进行自由锻时不使用专用模具,因而锻件的尺寸精度低,生产率也不高,所以自由锻主要用于单件、小批量生产或大锻件的生产。

模锻是适于大批量生产的锻造方法,锻件的成形要用适合于每个锻件的模具来进行。由于模锻时金属的成形由模具控制,因此模锻件就有相当精确的外形和尺寸,也有相当高的生产率。

冲压是指利用凸模将板料冲入凹模,生产薄壁空心零件的方法。板料冲压时厚度基本不发生变化。表 8-1 所示为最典型的一种冲压工序——拉深。

弯曲成形依靠弯矩的作用,使坯料发生弯曲变形或者通过反复的弯曲对坯料进行矫直。

剪切是靠剪力作用将板料或棒料剪断。

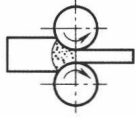

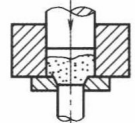
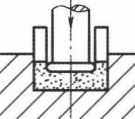
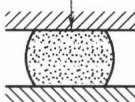
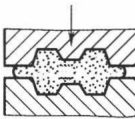
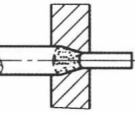
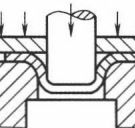
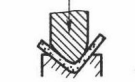


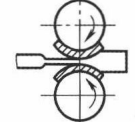
为了扩大产品的品种规格,提高生产率,随着科学技术的进步,相继研究出或正在研究由基本加工方法相组合的各种新的塑性加工方法,如轧制和弯曲组合而成的辊弯成形。它使带材通过一系列轧辊孔型达到弯曲成形,可生产各种断面的辊弯型材。又如锻造和轧制组合而成的辊锻方法,可生产变断面的零件。由此可见,各种基本塑性加工方式的组合,可以产生新的塑性加工方法。不仅如此,还可以将塑性加工工艺与液态金属成形工艺等加工工艺结合起来,开发新的金属加工方法,如液态模锻、半固态成形、摩擦焊接等。

在实际应用中,通常根据工件所受应力状态和变形的特点将塑性成形工艺分为体积成形和板料成形两个主要类别。体积成形的典型工艺包括锻造、轧制、挤压等。在体积成形中工件受三向应力的作用,发生明显的体积转移。板料成形工艺主要是冲压,在板料成形中,工件所受沿厚度方向的应力与其面内所受应力相比很小,可以忽略,其变形特点是由平板变为空间薄壳结构,薄壁管材的成形也归于此类。

成形过程中变形区域不变的属稳定塑性流动,具有这种变形特点的成形工艺通常用于生产等截面的板材、型材、管材等还需后续加工的原材料,属于连续型的成形方式。变形区域随变形过程而变化的属非稳定塑性流动,具有这种变形特点的成形工艺通常用于零件或毛坯的逐件生产,属于离散型的成形方式。当然非稳定塑性流动过程比稳定塑性流动要复杂得多。

塑性加工按成形时工件的温度划分还可以分为热成形、冷成形和温成形 3 类。热成形是在充分进行再结晶的温度以上所完成的加工,如热轧、热锻、热挤压等;冷成形是在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工,如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等;温成形是在介于冷、热成形之间的温度下进行的加工,如温锻、温挤压等。

表 8-1 金属塑性加工按工件的受力和变形方式分类

加工方式	受力/组合方式	工艺名称		工序简图	流动性质
基本加工方式	压 力	轧制	纵轧		稳定流动
			横轧		非稳定流动
		挤压	正挤压		稳定流动
			反挤压		非稳定流动
		锻造	墩粗		非稳定流动
			模锻		非稳定流动
		拉力	拉拔		稳定流动
			拉深		非稳定流动
	弯矩	弯曲		非稳定流动	
	剪力	剪切		非稳定流动	
组合加工方式	轧制-弯曲	辊弯		稳定流动	
	轧制-锻造	辊锻		非稳定流动	

8.1.2 金属塑性成形理论的发展概述

金属塑性加工方法种类繁多,有各自的特点;但是它们却有许多共同的理论基础,如都要采用合适的温度、变形速率、外力等条件,提高被加工金属的塑性,改善其组织性能,加工过程中均不可避免地受到外摩擦的影响,等等。其中外力、工件变形与外力的关系及外摩擦等属于力学的范畴;金属的塑性、组织性能与工艺参数的关系等属于材料科学的范畴。应该指出的是,这两方面的研究工作并不是孤立的,而是相互渗透、相互影响、相互促进的。目前,这方面的研究正沿着阐明塑性变形材料的宏观力学性能与微观组织结构间的定量关系的方向向纵深发展。

在金属塑性变形的材料科学研究方面,20世纪30年代提出的位错理论从微观上对塑性变形的机制做出了科学的解释。材料科学中对位错、位错密度、晶粒大小、晶粒取向及其分布的检测和形成的理论,也是研究金属塑性成形对微观组织的影响和演化规律的实验和理论基础。

在塑性成形力学方面,1864年,法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)提出了最大剪应力屈服准则,即屈雷斯加屈服准则。1870年,圣维南(B. Saint-Venant)第一次利用屈雷斯加屈服准则求解了管子受弹塑性扭转和弯曲时的应力,随后又研究了平面应变方程式。同年,列维(M. Levy)按圣维南的观点提出了三维问题的方程式和平面问题的方程式的线性化方法。1913年,米塞斯(Von Mises)从纯数学角度提出了另一新的屈服准则——米塞斯屈服准则。1923年,汉基(H. Hencky)和普朗特(L. Prandtl)论述了平面塑性变形中滑移线的几何性质。1930年,劳斯(A. Reuss)根据普朗特的观点提出了考虑弹性应变增量的应力应变关系式。20世纪50年代,英国学者约翰逊(W. Johnson)和日本学者工藤(H. Kudo)等,根据极值原理提出了一个比滑移线法简单的求极限载荷的上限法。其后又发展出了上限单元法。也是在50年代,美国学者汤姆生(E. G. Thomson)等提出了视塑性法(visioplasticity)。该方法根据实验求得的速度场计算变形体内的应变场。该方法是一种由实验结果和理论计算相结合的方法,广泛地应用于塑性变形过程中应变的检测。

第一次将塑性理论用于金属塑性加工的学者可认为是德国的卡尔曼。他在1925年用初等方法分析了轧制时的应力分布,其后不久,萨克斯(G. Sachs)和齐别尔(E. Siebel)在研究拉丝过程中提出了相似的求解方法——切块法(slab method),即后来所称的主应力法。20世纪50年代,前苏联学者翁克索夫(УНКОВ)提出了一个实质上与主应力法相似的方法——近似平衡方程和近似塑性条件的联解法,并对镦粗时接触表面上的摩擦力分析提出了新见解。

实际的金属塑性加工问题,模具形状可能十分复杂,由于摩擦的影响工件变形不均匀,变形过程中伴随着温度和工件组织性能的演化,因此难以进行精确的分析。上述解析方法只能针对简单的工件与模具形状、并在简化的工艺条件下进行分析,得出的结果虽然能够定性表示各种材料和工艺参数与成形力的函数关系,但是定量上不够精确,也不能描述变形的全过程。随着电子计算机的发展,自20世纪60年代起,以有限元法为代表的数值模拟方法得到了迅猛的发展。其中,60年代研究者们提出了小变形问题的弹塑性有限元法,70年代又提出了大变形问题的弹塑性有限元法,以及针对大塑性变形问题的刚塑性有限元法。自90年代以来,金属塑性成形过程的数值模拟技术已在研究和设计中得到了广泛的应用。

采用数值模拟方法,能够综合地考虑各种影响因素、分析十分复杂的问题,分析结果也更精确,但是不能直接地表示出各种因素之间的函数关系。因此,在金属塑性成形工艺研究中,解析方法与数值方法是相辅相成、互为补充的。本书的内容也为读者学习和应用数值模拟方法打下必要的基础。

8.2 金属塑性变形的机制及其对组织与性能的影响

8.2.1 金属的晶体结构

固态物质按其原子排列特征可分为晶体与非晶体两大类。晶体中原子在空间呈有规则的周期性重复排列,如金属、金刚石、食盐等;而非晶体中原子呈无规则排列,如塑料、橡胶、玻璃、木材等。金属及其合金在固态下一般都是晶体,结合键都是金属键。金属中原子规则排列的方式称为晶体结构。为了研究方便,可将各个原子抽象成空间几何阵点,然后用许多平行的直线将所有阵点连接起来构成空间格子,这种假想的空间格子称为晶格,能反映该晶格特征的最小组成单元称为晶胞。晶胞在三维空间的重复排列构成晶格。

1. 常见晶体结构

不同元素组成的金属晶体因晶格形式的不同,表现出不同的物理、化学和力学性能。工程中常用的金属有几十种,其固态纯金属的晶格形式多样,但最常见和最典型的晶格类型有以下3种。

1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型如图8-1所示,8个金属原子分别位于立方体的8个顶角上,一个原子位于立方体的几何中心,角上8个原子与中心原子紧靠。具有体心立方晶格的金属有钼(Mo)、钨(W)、钒(V)和 α -铁(α -Fe, $<912^{\circ}\text{C}$)等。

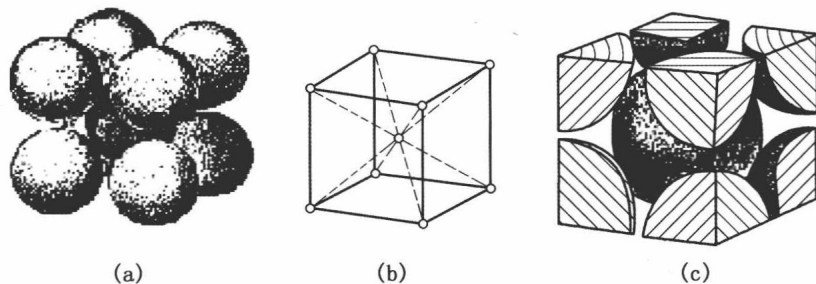


图8-1 体心立方晶格

(a) 模型;(b) 晶胞;(c) 晶胞原子数

2) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞模型如图8-2所示,8个金属原子分别处于立方体的8个顶角上,6个原子分别位于立方体6个面的几何中心。面中心的原子与该面4个顶角上的原子紧靠。具有这种晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、金(Au)、银(Ag)和 γ -铁(γ -Fe, $912\sim 1394^{\circ}\text{C}$)等。

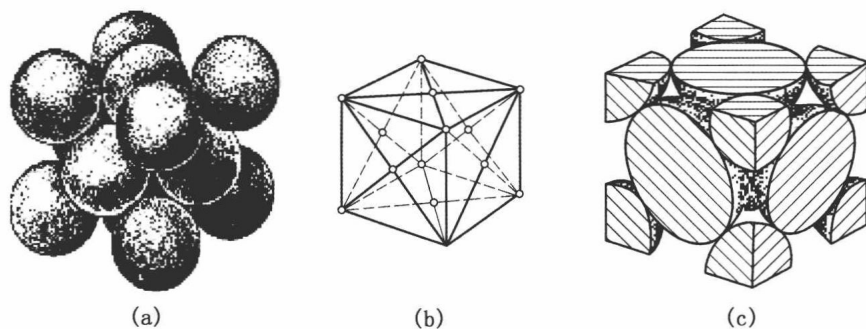


图 8-2 面心立方晶格

(a) 模型; (b) 晶胞; (c) 晶胞原子数

3) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞模型如图 8-3 所示, 12 个金属原子分别位于上下底面的正六边形的顶角上, 2 个原子分别位于上下底面的几何中心, 3 个原子均匀地分布在上下底面之间。具有这种晶格的金属有镁(Mg)、镉(Cd)、锌(Zn)、铍(Be)和 α -钛(α -Ti, $< 882^\circ\text{C}$) 等。

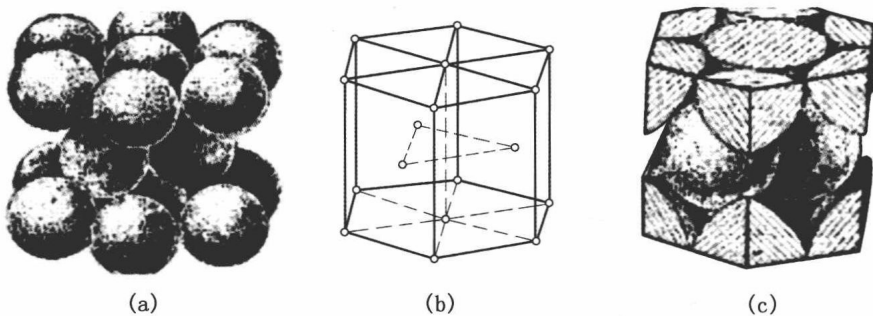


图 8-3 密排六方晶格

(a) 模型; (b) 晶胞; (c) 晶胞原子数

面心立方晶格和密排六方晶格的晶胞不同, 但其原子排列紧密程度完全相同, 在空间上是排列最紧密的两种形式。与前两者相比, 体心立方晶格中原子排列紧密程度要低些, 所以 Fe 等金属从面心立方晶格向体心立方晶格转变时, 将伴随着体积的膨胀。面心立方晶格中的空隙半径比体心立方晶格中的空隙半径大, 表示容纳小直径原子的能力比容纳其他原子的能力要大, 如 γ -Fe 中最多可容纳 2.11% 的碳原子, 而 α -Fe 中最多只能容纳 0.02% 的碳原子。

金属的晶格类型和大小的区别将造成金属性能的不同, 同一种晶格类型在不同方向上的性能也会有所不同, 即具有各向异性。因此, 在选用金属材料 and 制定塑性成形工艺过程中, 要充分考虑这个特性, 以保证成形零件的质量。

2. 实际金属的晶体结构

实际金属中原子的排列并不像理想晶体那样整齐划一、完美无缺, 而是存在一系列缺陷, 这些晶体缺陷对金属的性能产生非常大的影响。图 8-4 是固态纯镁的二维金相显微组织照片, 从中可以观察到许多由黑线划分的形状和大小不同的小区域, 这些小区域称为晶粒。单个晶粒就是一个具有一定位向的单晶体, 相邻晶粒位向不同, 过渡区称为晶界。所以

实际金属就是由许多处于不同位向的晶粒通过晶界结成的多晶体,其三维示意图如图 8-5 所示。晶粒的尺寸因材料而异,一般在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$,肉眼难以观察到。晶界是一类晶体缺陷。

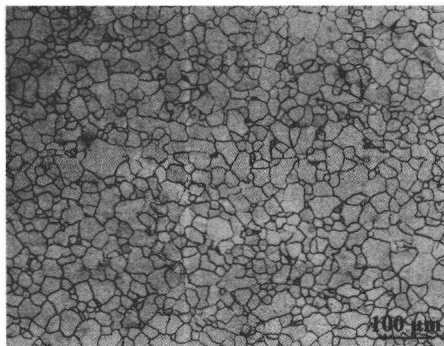


图 8-4 固态纯镁金相组织

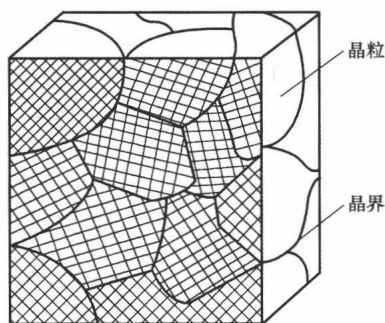


图 8-5 多晶体三维结构

晶体中的缺陷按其三维尺度的不同可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷 3 类。

1) 点缺陷

点缺陷的长、宽、高三维尺寸都很小,常见的点缺陷包括空位、间隙原子和杂质原子。

图 8-6(a)所示为空位与间隙原子示意图。在晶格空位和间隙原子附近,原子间作用力的平衡被破坏,晶格发生歪曲,即晶格发生畸变,使金属的强度提高、塑性降低。

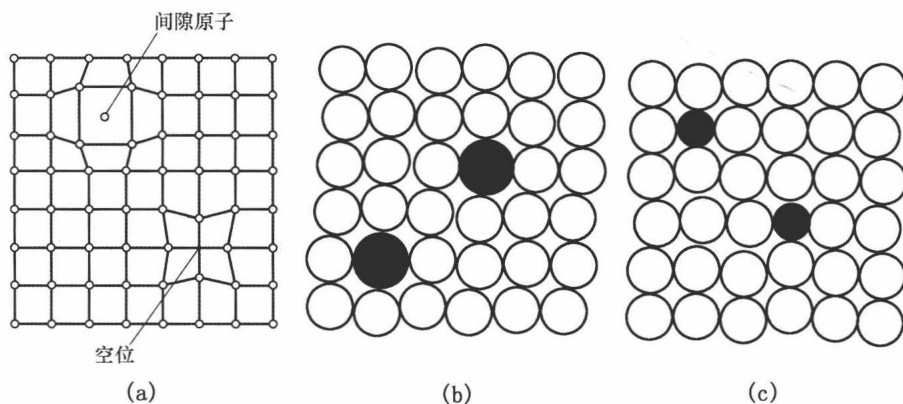


图 8-6 常见点缺陷结构

(a) 空位与间隙原子;(b) 杂质原子体积大;(c) 杂质原子体积小