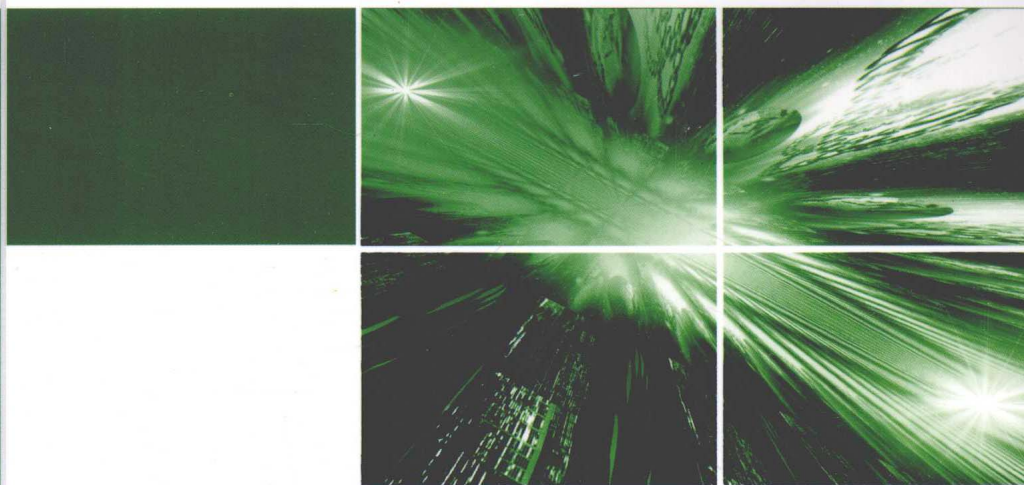


普通高等教育“十二五”规划教材



金属塑性 成形原理

董湘怀 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

金属塑性成形原理

主 编 董湘怀
副主编 陈拂晓
参 编 刘守荣 申 昱 郭俊卿
 周六如 于宝义 闫 洪
主 审 刘全坤



机械工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学

朱世根 东华大学

邢建东 西安交通大学

李永堂 太原科技大学

聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学

许并社 太原理工大学

李大勇 哈尔滨理工大学

周 荣 昆明理工大学

葛继平 大连交通大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学

王卫卫 哈尔滨工业大学(威海)

邓子玉 沈阳理工大学

刘金合 西北工业大学

毕大森 天津理工大学

闫久春 哈尔滨工业大学

张建勋 西安交通大学

李 桓 天津大学

李亚江 山东大学

周文龙 大连理工大学

侯英玮 大连交通大学

赵 军 燕山大学

黄 放 贵州大学

薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学

计伟志 上海工程技术大学

刘永长 天津大学

华 林 武汉理工大学

许映秋 东南大学

何国球 同济大学

李 尧 江汉大学

李 强 福州大学

邹家生 江苏科技大学

武晓雷 中国科学院

姜启川 吉林大学

梁 伟 太原理工大学

蒋百灵 西安理工大学

戴 虹 西南交通大学

秘 书 长 袁晓光 沈阳工业大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

塑性成形及模具教材编委会

顾问

王仲仁 哈尔滨工业大学
聂绍民 燕山大学

俞新陆 清华大学

主任委员 李永堂 太原科技大学

副主任委员(按姓氏笔画排序)

邓子玉 沈阳理工大学
华林 武汉理工大学
陈拂晓 河南科技大学
赵军 燕山大学

刘建生 太原科技大学
许映秋 东南大学
周文龙 大连理工大学
薛克敏 合肥工业大学

委员(按姓氏笔画排序)

于宝义 沈阳工业大学
王雷刚 江苏大学
石连升 哈尔滨理工大学
刘守荣 中国农业大学
毕大森 天津理工大学
闫洪 南昌大学
侯英伟 大连交通大学
郝滨海 山东大学
曹建国 四川大学
董湘怀 上海交通大学

王群 湖南大学
冯再新 中北大学
刘全坤 合肥工业大学
吕琳 重庆理工大学
池成忠 太原理工大学
李国祿 河北工业大学
姚兴军 华东理工大学
袁子洲 兰州理工大学
梅益 贵州大学
霍晓阳 河南理工大学

秘书长 宋建丽 太原科技大学
秘书 冯春生 机械工业出版社

前 言

2009年4月在洛阳召开了中国机械工业教育协会材料成形及控制工程(塑性成形)、金属材料工程(热处理)学科教学分委员会2009年工作会议。会议研讨了学科专业课程体系的改革与教材建设,决定组织编写适合于相关专业当前本科教学要求的系列教材。本书即是其中材料成形及控制工程(塑性成形及模具专业方向)专业的系列教材之一。

本书介绍了金属塑性成形涉及的材料学和力学基础理论,可供材料成形及控制工程及相关专业的本科生学习参考。第1章和第6章由上海交通大学董湘怀编写,第2章和第3章由中国农业大学刘守荣编写,第4章由上海交通大学申昱编写,第5章由河南科技大学郭俊卿编写,第7章由南昌大学周六如编写,第8章和第11章由河南科技大学陈拂晓编写,第9章由沈阳工业大学于宝义编写,第10章由南昌大学闫洪编写。全书由董湘怀统稿,主审为合肥工业大学刘全坤。

鉴于作者水平所限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言		
第1章 绪论	1	
1.1 金属塑性成形的特点	1	
1.2 金属塑性成形方法的分类	1	
1.3 金属塑性成形原理课程的内容 和要求	4	
1.4 金属塑性成形理论的发展 概述	4	
思考题	5	
第2章 金属塑性变形的材料学 原理	6	
2.1 金属的晶体结构	6	
2.2 金属的塑性变形机理	10	
2.3 金属塑性变形后的组织与 性能变化	23	
2.4 金属的冷、热、温塑性变形	29	
思考题	30	
第3章 金属的塑性	32	
3.1 塑性的概念及指标	32	
3.2 影响金属塑性的因素	35	
3.3 金属的超塑性	50	
思考题	58	
第4章 应力分析	59	
4.1 应力的基本概念	59	
4.2 点的应力状态	61	
4.3 应力张量	63	
4.4 应力平衡微分方程	73	
4.5 特殊应力状态	75	
思考题	78	
第5章 应变分析	80	
5.1 有关变形的一些基本概念	80	
5.2 小变形分析	81	
5.3 应变增量和应变速率张量	95	
5.4 平面变形问题和轴对称 问题	99	
5.5 应变的其他表示方法	101	
思考题	107	
第6章 屈服准则与本构方程	109	
6.1 屈服准则	109	
6.2 应力-应变曲线	124	
6.3 本构方程	132	
思考题	152	
第7章 金属塑性成形中的摩擦和 润滑	155	
7.1 金属塑性成形中摩擦的 特点和影响	155	
7.2 金属塑性成形中摩擦的 分类及机理	155	
7.3 描述接触表面上摩擦力的 数学表达式	157	
7.4 影响摩擦系数的主要因素	158	
7.5 金属塑性成形中的润滑	159	
7.6 不同塑性加工条件下的 摩擦系数	161	
思考题	163	
第8章 主应力法及其应用	164	
8.1 塑性成形问题的数学 解析法	164	



8.2 主应力法的基本原理	167	10.3 上、下限定理	236
8.3 墩粗的主应力法分析	168	10.4 上限法的应用	239
8.4 正挤压的主应力法分析	179	10.5 功平衡法	253
8.5 模锻的主应力法分析	185	10.6 数值模拟方法简介	255
8.6 圆筒件拉深的主应力法分析 ..	190	思考题	259
思考题	194	第11章 金属塑性成形试验	
第9章 塑性成形问题的滑移线		方法	262
解法	196	11.1 真实应力-应变曲线	262
9.1 滑移线的基本概念	196	11.2 用圆环墩粗法测定摩擦	
9.2 滑移线场的应力场理论	198	系数	267
9.3 滑移线场的建立	205	11.3 板料成形极限的测定	269
9.4 滑移线场的速度场理论	211	11.4 热/力模拟试验	273
9.5 滑移线理论在塑性加工中		11.5 金属塑性成形过程的实验	
的应用	217	模拟	277
思考题	233	思考题	286
第10章 上限法及其应用	235	附录	287
10.1 概述	235	附录 A	287
10.2 虚功原理和基本能量		附录 B	288
方程	235	参考文献	293

第 1 章 绪 论

1.1 金属塑性成形的特点

在现代制造业中，人们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。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，金属塑性成形方法具有如下特点：

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，而不是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、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优点，因而钢总产量的 90% 以上及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、电力电信、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出高技术化、技术融合、精密化等发展趋势。

1.2 金属塑性成形方法的分类

金属塑性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。通常将塑性加工方法分为轧制、挤压、拉拔、锻造和冲压等基本工艺类型，其中每一类型又可以进一步细分。表 1-1 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；剪切依靠剪力的作用使金属产生剪切变形。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，是使金属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。

拉拔是将中等截面的坯料拉过有一定形状的模孔，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。自由锻一般是在锻锤或水压机上，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 1-1 中的墩粗即为一例。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 1-1 中所示的拉深为最典型的一种冲压工序。

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校直。

剪切依靠剪力的作用把板料或棒料剪断。

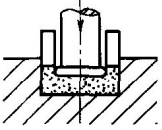
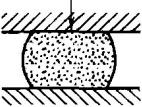
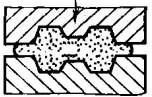
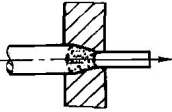
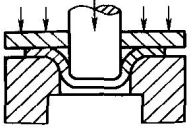


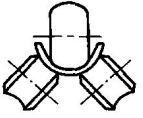
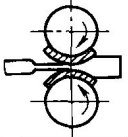
为了扩大产品的品种规格，提高生产率，运用新的科技手段相继研究出或正在研究由基本加工方法组合而成的各种新的塑性加工方法。如轧制和弯曲组合而成的辊弯成形，它使带材通过一系列的轧辊孔型达到弯曲成形，可生产各种断面的辊弯型材。又如轧制和锻造组合而成的辊锻方法，可生产变断面的零件。由此可见，各种基本塑性加工方式的组合可以产生新的塑性加工方法。不仅如此，还可以将塑性加工工艺与液态金属成形工艺等加工工艺结合起来，开发新的金属加工方法，如液态模锻、半固态成形、摩擦焊接等。

表 1-1 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



(续)

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	挤压	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	

各种塑性成形方法，除了具有上述生产上的特点以外，在变形区的应力状态、变形状态和金属流动性质等方面也各有特点，例如，虽然拉拔和正挤压的应变状态相同，均为沿轴向受拉，另外两向受压，但它们的应力状态各不相同：拉拔时沿轴向受拉，另外两向受压，而正挤压时则三向均受压。成形过程中变形区域不变的属于稳定塑性流动，变形区域随变形过程而变化的属于非稳定塑性流动。当然非稳定塑性流动过程比稳定塑性流动过程要复杂得多。

塑性加工按成形时工件的温度不同还可以分为热成形、冷成形和温成形三类。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。

1.3 金属塑性成形原理课程的内容和要求

虽然金属塑性加工的方法种类繁多，有着各自的特点，但是它们却有许多共同的理论基础，如都要在合适的温度、变形速率、外力等条件下提高被加工金属的塑性，改善其组织性能，在加工过程中均不可避免地受到外摩擦的影响等。其中外力、工件变形与外力的关系以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，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。

作为金属塑性加工方面的技术基础课程的教材，本书内容也包括力学和材料科学这两个方面。通过本课程的学习，要求学生掌握如下基本知识：

1) 塑性加工中温度、变形速率、应力状态等条件对金属的塑性、变形抗力和组织性能的影响规律，为提高塑性成形质量提供理论依据。

2) 塑性力学基础理论，其中包括应力与应变分析、屈服准则与应力应变的关系等。通过这些关系就能建立金属塑性加工过程的力学模型，为下一步学习塑性力学问题的解析方法以及将来学习和应用塑性成形过程数值模拟方法打下基础。

3) 计算变形力的解析方法，包括主应力法、滑移线理论法、上限法等，从而科学地确定变形体中的应力、应变分布和所需的变形力和功，为选择塑性加工设备吨位和设计模具提供理论依据。

1.4 金属塑性成形理论的发展概述

金属塑性成形理论是在塑性成形的材料科学和塑性力学研究的基础上发展起来的一门工艺理论，20世纪40年代就设立了这门课程。

在金属塑性成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理作出了科学的解释。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理论，也是研究金属塑性成形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)提出了最大切应力屈服准则，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一个新的屈服准则——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)等人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,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应该是德国的卡尔曼,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状况提出了新的见解。

在实际的金属塑性加工过程中,模具形状可能十分复杂,由于摩擦的影响导致工件变形不均匀,且在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地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年代提出了小变形问题的弹塑性有限元法,70年代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20世纪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。本书的内容也为学习和应用数值模拟方法打下了必要的基础。

思考题

1. 试论述金属塑性成形方法的特点。
2. 选择日常所见的机械或零件,分析一下它所采用的加工方法,如果认为是塑性加工件,试分析其所用的成形方法。
3. 考虑表1-1所示的圆棒拉拔和正挤压工艺,为什么它们的应变状态相同,但应力状态各不相同?

第 2 章 金属塑性变形的材料学原理

金属的塑性变形行为与其材料学特性密切相关，本章将从金属的晶体结构、金属单晶体与多晶体的塑性变形、金属塑性变形后的组织与性能变化和金属的塑性变形方法等角度讨论金属塑性变形的材料学原理。

2.1 金属的晶体结构

固态物质按其原子的聚集状态可分为晶体与非晶体两大类。凡原子呈规则排列的物质称为晶体，如金刚石、食盐、一般固态金属及合金等；而原子呈无规则排列的物质称为非晶体，如塑料、橡胶、玻璃、木材等。

一般的固态金属都是晶体，晶体中原子规则排列的方式称为晶体结构。通过金属原子的中心画出许多空间直线，这些直线将形成空间格架，这种假想的格架称为晶格，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。

2.1.1 常见晶格结构

不同元素组成的金属晶体因其晶格形式不同，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种多样，但最常见和最典型的晶格类型有以下三种。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型如图 2-1 所示，其中 8 个原子分别处于立方体的各个角上，一个原子处于立方体的中心，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)、 α -铁 (α -Fe, $< 912^\circ\text{C}$) 等。

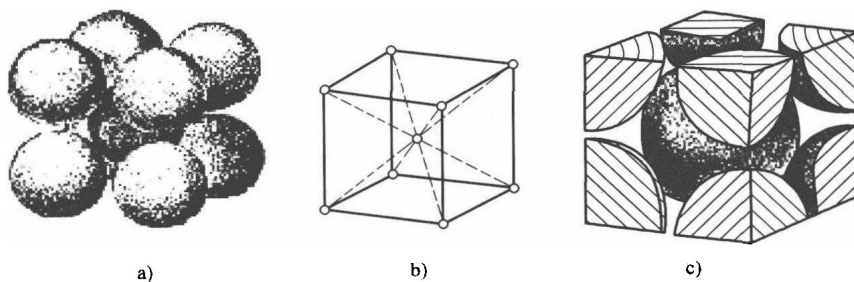


图 2-1 体心立方晶格

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 2-2 所示, 金属原子分布在立方体的 8 个角和 6 个面的中心, 面中心的原子与该面四个角上的原子紧靠。具有这种晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、金(Au)、银(Ag)、 γ -铁(γ -Fe, 912 ~ 1394 $^{\circ}$ C)等。

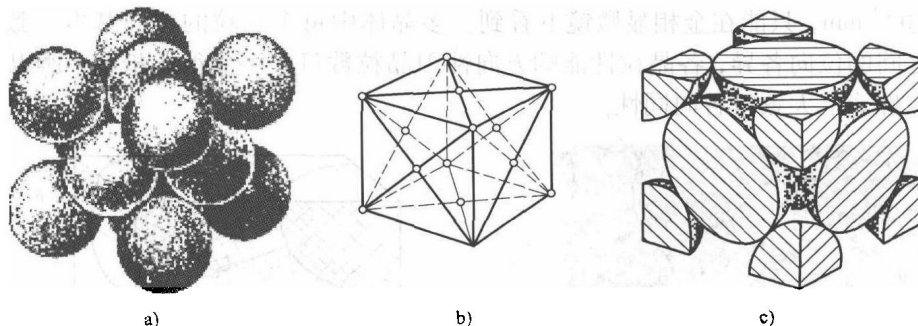


图 2-2 面心立方晶格

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 2-3 所示, 12 个金属原子分布在六方体的 12 个角上, 在上下底面的中心各分布一个原子, 上下底面之间均匀分布三个原子。具有这种晶格的金属有镁(Mg)、镉(Cd)、锌(Zn)、铍(Be)等。

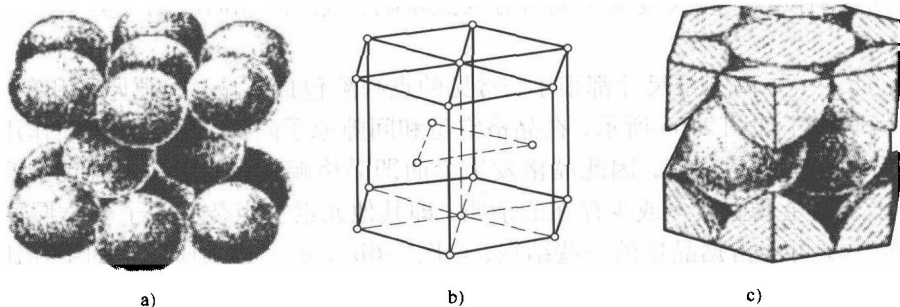


图 2-3 密排六方晶格

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, 但其原子排列的紧密程度完全相同, 在空间上是排列最紧密的两种形式。与它们相比, 体心立方晶格中原子排列的紧密程度要低些, 所以如 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, 表明其容纳小直径其他原子的能力要大。如 γ -Fe 中最多可容纳 2.11% (质量分数) 的碳原子, 而 α -Fe 中最多只能容纳 0.02% (质量分数) 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 制订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。

2.1.2 实际金属的晶体结构

实际金属原子不像完全呈规律排列的理想晶体那样整齐划一、完美无缺, 如用金相显微

镜观察图 2-4 所示的纯铁固体的断面时,可以看到许多小的颗粒。金属晶体中的这些小颗粒称为晶粒。晶粒是具有同一位向的单晶体,与相邻晶粒之间存在位向差别。晶粒与晶粒之间的过渡区称为晶界。所以,实际金属晶体如图 2-5 所示,是由许多处于不同位向的晶粒通过晶界结成的多晶体结构。多晶体中的晶粒尺寸因材料而异,钢铁材料中的晶粒尺寸很小,约为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm,只能在金相显微镜下看到。多晶体中每个晶粒的位向基本一致,但各个晶粒彼此之间的位向各异,各晶粒性能的方向性因晶粒数目繁多而彼此抵消,所以多晶体结构的金属在性能上大致呈各向同性。

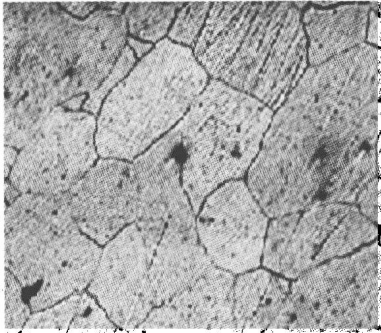


图 2-4 纯铁固体金相图

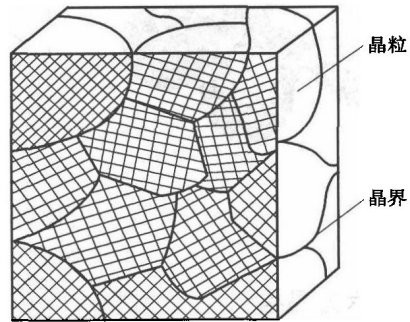


图 2-5 多晶体结构

实际金属内部因种种原因往往还存在着一系列缺陷,这些缺陷对金属的性能有很大影响。晶体中的缺陷按其三维尺度的不同可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

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。

空位与间隙原子如图 2-6a 所示,在晶格空位和间隙原子附近,由于原子间作用力的平衡被破坏,其周围原子发生偏离,因此晶格发生歪曲即晶格畸变,使金属的强度提高,塑性降低。杂质原子是指金属中或多或少存在的杂质,即其他元素。当杂质原子与金属原子的半径接近时,杂质原子可能占据晶格的一些结点,如图 2-6b 所示。当杂质原子的半径比金属原子的半径小得多时,则杂质原子位于晶格的空隙中,如图 2-6c 所示。它们都会导致附近晶格的畸变。

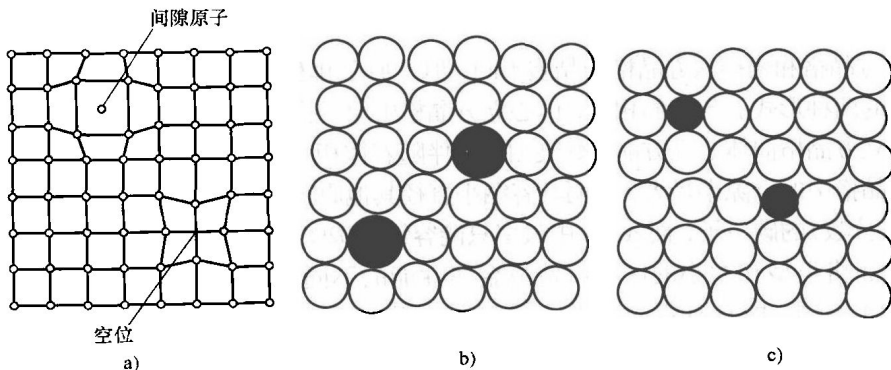


图 2-6 常见点缺陷结构

a) 空位与间隙原子 b) 杂质原子体积大 c) 杂质原子体积小



2. 线缺陷

线缺陷是指宽、高两维尺寸很小，而第三维长度方向尺寸很大的缺陷，亦称为位错，是由晶体中原子平面的错动引起的。如图 2-7 所示是衍射电镜下观察到的线缺陷，金相图中的黑色线段部分是位错线。最简单的位错是刃型位错和螺型位错。

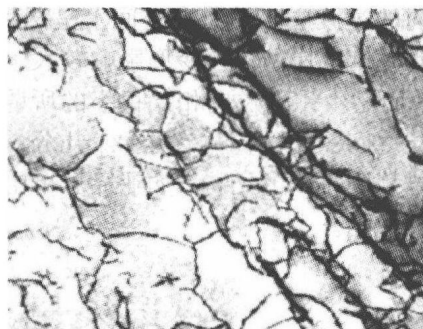


图 2-7 衍射电镜下观察到的线缺陷

如图 2-8 所示，刃型位错是在金属晶体中，由于某种原因，晶体的一部分相对于另一部分出现一个多余的半原子面，这个多余的半原子面犹如切入晶体的刀片，刀片的刃口线即为位错线，故称为刃型位错。刃型位错有正负之分。

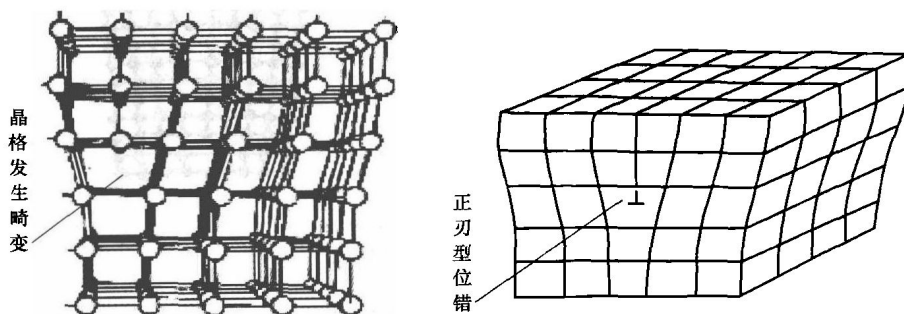


图 2-8 刃型位错示意图

如图 2-9 所示，螺型位错是晶体的一部分相对另一部分错动一个原子间距，若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋型管道状特征，故称为螺型位错。螺型位错按螺旋方向不同有左、右旋之分。

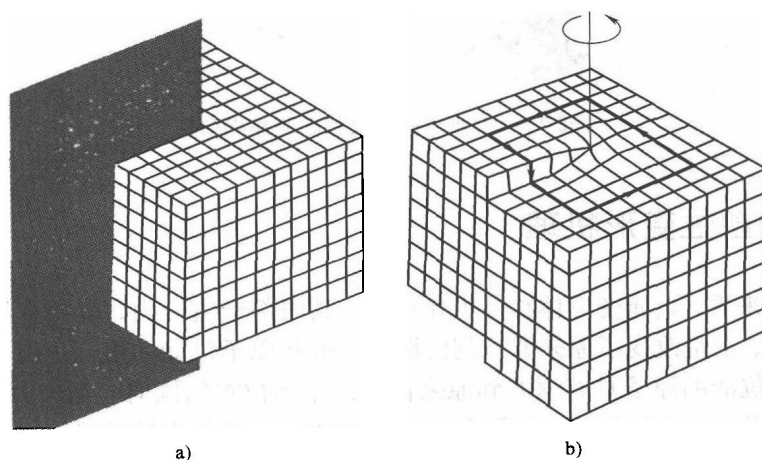


图 2-9 螺型位错示意图

3. 面缺陷

面缺陷是指长、宽两维尺寸很大，第三维高度方向尺寸很小而呈面状的缺陷，这类缺陷

主要指晶界和亚晶界。如图 2-10a 所示,晶界实际上是原子排列从一种位向过渡到另外一种位向的过渡层。晶界在空间上呈网状,晶界上原子排列的规则性较差,且晶界处有较高的强度和硬度,其对塑性变形影响较大。如图 2-10b 所示,单个晶粒内部也不是完全理想的单晶体,而是由许多位向相差很小的所谓亚晶粒组成的。晶粒内的亚晶粒又叫晶块或嵌镶块。亚晶粒之间的位向差只有几秒、几分,最长达 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。亚晶粒之间的边界叫亚晶界,亚晶界是位错规则排列的结构,如亚晶界可由位错垂直排列的位错墙而构成。亚晶界也是晶粒内的一种面缺陷。

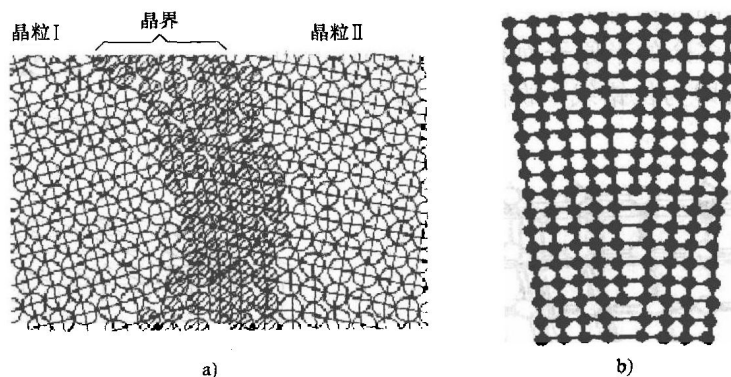


图 2-10 晶界与亚晶界

图 2-11 所示为工业纯铁在正火状态下的亚晶界结构。

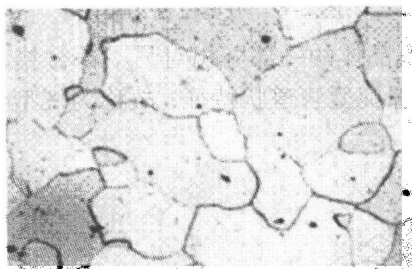


图2-11 工业纯铁正火状态亚晶界结构

2.2 金属的塑性变形机理

从微观角度来看,金属变形体在外力作用下,其内部产生应力,应力有使原子离开原来平衡位置的趋势,于是改变了原来原子间的距离,引起原子位能的增高,使金属在宏观上发生变形,处于高位能的原子具有返回到原来低位能平衡位置的倾向。当外力停止作用后,应力恢复为零,变形也随之消失,这就是金属的弹性变形。当外力持续增大,使金属内部的应力超过金属的屈服极限后,原子打破原有平衡而进入下一个低位能的平衡位置,此时即使外力撤去,原子已无返回到原来低位能平衡位置的倾向,所以宏观上体现为金属的变形没有消失。这种永久的、残余的、不可恢复的变形称为塑性变形。

下面从晶体角度讨论金属的塑性变形机理。