



高等院校应用型特色规划教材

塑性成形原理

闫 洪 周天瑞 编著



清华大学出版社

高等院校应用型特色规划教材

塑性成形原理

闫 洪 周天瑞 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统论述金属塑性成形的基本理论,在介绍金属塑性变形金属学原理的基础上,重点讲解了塑性变形力学分析的基础知识,并进而对塑性加工工序分析中常用的主应力、滑移线及上限法进行了较详细的介绍,这些都是制订和优化塑性加工工艺参数的必备知识。全书共分5章,每章都有习题和思考题,最后还有实验选编及部分该课程硕士研究生入学试题选编。

本书主要作为普通高等院校及大专院校相关专业及模具设计制造培训班的教材,也可供工厂企业、科研单位的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

塑性成形原理/闫洪,周天瑞编著. —北京:清华大学出版社,2006.2

(高等院校应用型特色规划教材)

ISBN 7-302-12181-8

I. 塑… II. ①闫…②周… III. 金属—塑性变形—高等学校—教材 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 141539 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 刘建龙

文稿编辑: 桑任松

排版人员: 李 欣

印 装 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 13.5 字数: 321 千字

版 次: 2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-12181-8/TH·186

印 数: 1~4000

定 价: 19.00 元

前 言

金属塑性成形就是利用金属的塑性,在工具及模具的外力作用下来加工制件的少切削或无切削的工艺方法。由于工艺本身的特点,它虽然有很长的发展历史却又在不断的研究和创新之中,新工艺、新方法层出不穷。这些研究和创新的基本目的不外乎增加材料塑性、提高成形零件的精度及性能、降低变形力、增加模具使用寿命和节约能源等。而“塑性成形原理”正是实现这些目的的基础理论知识;学习该课程的先修课程主要是“材料力学”和“金属学”。

本书以编者多年从事该门学科的教学和科研为基础,结合学科的新近研究成果并参考有关教材编写而成。全书共分5章,另有绪论和附录。主要内容介绍如下:在绪论中讲述了金属塑性成形的特点及其在国民经济中的作用,金属塑性加工的分类,金属塑性成形原理课程的目的和任务,金属塑性成形理论的发展概况;第1章讲述金属塑性成形的物理基础;第2章在介绍塑性成形过程中应力分析、应变分析、屈服条件及应力、应变关系的同时,还对摩擦和润滑做了较详细的介绍;第3章主要介绍主应力法和工程计算法的基本原理和解题步骤;第4章对滑移线场理论做了较为详细的论述,并结合实例介绍滑移线法的应用;第5章在介绍界限法基本概念的基础上,着重阐述上限原理及其应用。为满足教学及自学读者自测的需要,每章都有习题和思考题,书末还附有金属塑性成形原理实验选编及部分该课程硕士研究生入学试题选编。本书主要作为普通高等院校及大专院校相关专业及模具设计制造培训班的教材,也可供工厂企业、科研单位的工程技术人员参考。

本书绪论及第1章、第2章由闫洪教授编写,第3章、第4章、第5章及附录由周天瑞教授编写。本书由南昌航空工业学院王高潮教授主审。在编写过程中,得到了南昌大学杨雪春、邱映辉等教授的支持和帮助,在此深表感谢!

由于编者水平所限,书中的错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 金属塑性成形的物理基础	6
1.1 金属的晶体结构	6
1.1.1 三种典型的晶胞结构	6
1.1.2 实际金属的晶体结构	8
1.2 单晶体的塑性变形	10
1.2.1 滑移	10
1.2.2 孪生	12
1.3 位错理论的基本概念	13
1.3.1 理想晶体的剪切强度——位错概念的提出	13
1.3.2 柏氏矢量	15
1.3.3 位错的运动	16
1.3.4 位错增殖	18
1.4 多晶体的塑性变形	19
1.4.1 多晶体的变形方式	19
1.4.2 多晶体的变形特点	20
1.4.3 多晶体变形后的组织和性能	20
1.5 加工硬化	21
1.5.1 单晶体的加工硬化	21
1.5.2 多晶体的加工硬化	22
1.6 回复和再结晶	22
1.6.1 冷变形金属的静态回复和静态再结晶	22
1.6.2 动态回复和动态再结晶	24
1.6.3 再结晶图	25
1.7 金属的塑性和影响因素	25
1.7.1 塑性和塑性指标	26
1.7.2 化学成分和组织结构对塑性的影响	27
1.7.3 变形温度对塑性的影响	29
1.7.4 变形速度对塑性的影响	30
1.7.5 应力状态对塑性的影响	31
1.7.6 提高金属塑性的途径	33
1.7.7 金属的超塑性	33

思考题与习题	35
第2章 金属塑性成形的力学基础	36
2.1 应力分析的基本概念	36
2.1.1 外力	36
2.1.2 应力(内力)	36
2.1.3 应力状态	37
2.2 点的应力状态分析	38
2.2.1 直角坐标系中的应力分量和应力张量	38
2.2.2 任意斜面上的应力	39
2.2.3 主应力和应力不变量	41
2.2.4 主剪应力和最大剪应力	44
2.2.5 应力球张量和应力偏张量	46
2.2.6 八面体应力和等效应力	47
2.2.7 应力莫尔圆	49
2.2.8 应力平衡微分方程	50
2.2.9 特殊应力状态	52
2.3 点的应变状态分析	57
2.3.1 应变	57
2.3.2 点的应变状态及应变张量	59
2.3.3 位移分量和小变形几何方程	62
2.3.4 应变连续方程	63
2.3.5 塑性变形时的体积不变条件	65
2.3.6 应变张量的性质与特性	65
2.3.7 应变增量和应变速率	68
2.3.8 特殊应变状态	72
2.3.9 变形程度的三种表达方式	72
2.4 屈服条件	74
2.4.1 屈雷斯加屈服条件	75
2.4.2 米塞斯屈服条件	76
2.4.3 屈服条件的几何表达——屈服轨迹和屈服表面	77
2.4.4 中间主应力的影响和屈服条件的简化形式	82
2.4.5 屈服条件的实验验证	83
2.4.6 屈服条件简介	85
2.5 塑性应力应变关系	86
2.5.1 弹性应力应变关系	86
2.5.2 弹性应变能	87
2.5.3 塑性应力应变关系的特点	88
2.5.4 塑性变形的增量理论	90

2.5.5 塑性变形的全量理论(形变理论).....	93
2.5.6 最大塑性功(散逸功)原理.....	95
2.6 真实应力-应变曲线.....	97
2.6.1 拉伸试验曲线.....	98
2.6.2 压缩试验曲线.....	101
2.6.3 真实应力-应变曲线的简化形式.....	103
2.7 金属塑性成形中的摩擦和润滑.....	106
2.7.1 塑性成形时摩擦的特点及其影响.....	106
2.7.2 塑性成形时摩擦的分类及机理.....	107
2.7.3 塑性成形时摩擦力的表达式.....	109
2.7.4 影响摩擦系数的主要因素.....	109
2.7.5 摩擦系数的测定方法.....	111
2.7.6 塑性成形时的润滑.....	114
2.7.7 不同塑性加工条件下的摩擦系数.....	116
思考题与习题.....	117
第3章 金属塑性成形工序的力学分析及近似解析法.....	121
3.1 变形力与单位变形力.....	121
3.2 主应力法.....	124
3.2.1 主应力法的基本原理.....	124
3.2.2 平行模板间圆柱体镦粗.....	125
3.2.3 半圆型砧拔长.....	128
3.3 工程计算法.....	129
3.3.1 方法要点.....	129
3.3.2 结果分析.....	131
思考题与习题.....	132
第4章 滑移线场理论.....	133
4.1 理想刚塑性平面应变问题.....	133
4.1.1 平面应变状态下的应力状态.....	134
4.1.2 滑移线与滑移线场的概念.....	136
4.1.3 理想刚塑性平面应变问题的基本方程.....	137
4.2 滑移线的性质.....	138
4.2.1 亨基应力方程.....	138
4.2.2 亨基第一定理.....	139
4.2.3 亨基第二定理.....	139
4.3 常见的应力边界条件.....	140
4.4 常见的滑移线场.....	142
4.5 滑移线法解题实例.....	143

4.5.1 受内压无限长厚壁筒问题	143
4.5.2 平冲头压入半无限体问题	145
4.6 建立滑移线场的电子计算机方法	146
4.6.1 滑移线方程的数学意义	146
4.6.2 数值积分法及三类边值问题	147
4.6.3 图解法	151
4.6.4 计算机辅助建立滑移线场	156
思考题与习题	159
第 5 章 上限法	161
5.1 极值原理及上限法	161
5.2 速度间断面及其速度特性	163
5.2.1 速度间断面	163
5.2.2 速端图及速度间断量的计算	164
5.3 Johnson 上限模式及应用	166
5.4 Avitzur 上限模式及应用	169
5.4.1 直角坐标平面应变问题——考虑侧鼓时板坯的平锤压缩	170
5.4.2 极坐标平面应变问题——宽板的平辊轧制	173
5.4.3 圆柱坐标轴对称问题——圆盘的镦粗	177
5.4.4 球坐标轴对称问题——圆棒的拉拔或挤压	178
5.5 变形功法	181
5.5.1 变形功法的基本原理	182
5.5.2 计算举例	183
思考题与习题	184
附录 A 金属塑性成形原理实验选编	187
附录 B 研究生入学考试(金属塑性加工原理)试题选编	196
参考文献	206

绪 论

一、金属塑性成形的特点及其在国民经济中的作用

金属塑性成形是金属加工方法之一。它是利用金属的塑性——金属产生塑性变形的能力，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。

常见的金属压力加工方法，如轧制、挤压拉拔、锻造、冲压等，都是利用金属的塑性而进行成形加工的。通常，轧制、拉拔、挤压是生产型材、板材、管材和线材等金属材料的加工方法，属于冶金工业领域，而锻造、冲压则通常是利用金属轧材来制造机器零件的加工方法，属于机械制造工业领域。

金属塑性加工方法的主要优点有：

- (1) 金属材料经过相应的塑性加工后，其组织、性能都能得到改善和提高，特别是对于铸造组织，效果更为显著。例如铸锭必须通过锻造、轧制或挤压，才能使其结构致密、组织改善、性能提高。
- (2) 金属塑性加工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。近年来，应用先进的技术和设备，不少零件已达到少、无切削的要求。例如，精密锻造的伞齿轮，其齿形部分精度可不经切削加工直接使用，精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度。
- (4) 塑性成形方法具有很高的生产率。这一点对于金属材料的轧制、拉丝、挤压等工艺尤其明显。随着锻压生产机械化的发展，机械零件的生产情况也是如此。例如，在 $12000 \times 10\text{kN}$ 机械压力机上锻造汽车用的六拐曲轴仅需 40s；在曲柄压力机上压制一个汽车覆盖件仅需几秒钟。

由此可见，利用金属塑性加工方法，不但能获得强度高、性能好、形状复杂和精度高的工件，而且具有生产率高、材料消耗少等优点，因而在国民经济中得到广泛的应用。特别是在汽车、拖拉机、宇航、船舶、军工、电器和日用品等工业部门中，塑性成形更是主要的加工方法。

二、金属塑性加工的分类

将金属塑性加工进行分类，是为了便于对它们进行分析和研究。但是，至今尚无统一的分类方法。

按照加工的特点，一般将塑性加工分为块料成形(又称体积成形)和板料成形两大类，每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。

1. 块料成形

块料成形是在塑性加工过程中靠体积转移和分配来实现的。这类成形又可分为一次加工和二次加工。

一次加工是属冶金工业领域内的原材料生产的加工方法,可提供型材、板材、管材和线材等。其加工方法包括轧制、挤压和拉拔。在这类成形过程中,变形区的形状是不随时间变化的,属稳定的变形过程,适于连续的大批量生产。

(1) 轧制。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。这是由大截面坯料变为小截面材料常用的加工方法。轧制可分纵轧(图 0.1(a))、横轧和斜轧。利用轧制方法可生产出型材、板材和管材。

(2) 挤压。挤压是在大截面坯料的后端施加一定的压力,将金属坯料通过一定形状和尺寸的模孔使其产生塑性变形,以获得符合模孔截面形状的小截面坯料或零件的塑性成形方法。挤压又分正挤压(图 0.1(b))、反挤压和正反复合挤压。因为挤压是在很强的三向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、管材或零件。

(3) 拉拔。拉拔是在金属坯料的前端施加一定的拉力,将金属坯料通过一定形状、尺寸的模孔使其产生塑性变形,以获得与模孔形状、尺寸相同的小截面坯料的塑性成形方法(图 0.1(c))。用拉拔方法可以获得各种截面的棒材、管材和线材。

二次加工是为机械制造工业领域内提供零件或坯料的加工方法。这类加工方法包括自由锻和模锻,统称为锻造。在锻造过程中,变形区是随时间不断变化的,属非稳定性塑性变形过程,适于间歇生产。

(1) 自由锻。自由锻是在锻锤或水压机上,利用简单的工具将金属锭料或坯料锻成所需形状和尺寸的加工方法(图 0.1(d))。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,主要用于单件、小批量生产或大锻件生产。

(2) 模锻。模锻是将金属坯料放在与成品形状、尺寸相同的模腔中使其产生塑性变形,从而获得与模腔形状、尺寸相同的坯料或零件的加工方法。模锻又分开式模锻(图 0.1(e))和闭式模锻(图 0.1(f))。由于金属的成形受模具控制,因而模锻件有相当精确的外形和尺寸,也有相当高的生产率,适合于大批量生产。

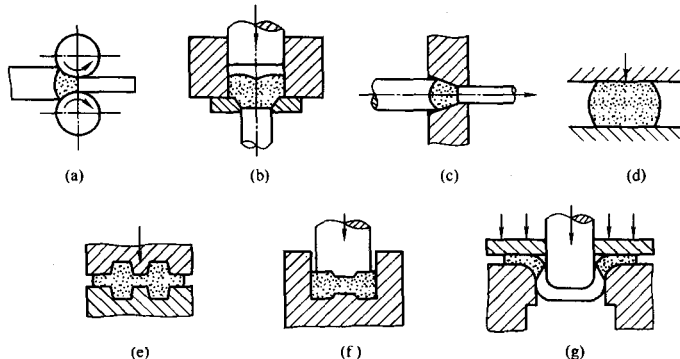


图 0.1 金属塑性成形方法的种类

(a) 轧制(纵轧); (b) 挤压(正挤压); (c) 拉拔; (d) 自由锻(锻粗);
(e) 开式模锻; (f) 闭式模锻; (g) 拉深

2. 板料成形

板料成形一般称为冲压。它是对厚度较小的板料,利用专门的模具,使金属板料通过一定模孔而产生塑性变形,从而获得所需的形状、尺寸的零件或坯料。冲压塑性加工方法可进一步分为分离工序和成形工序两类。分离工序用于使冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离,如冲裁、剪切等工序;成形工序用来使坯料在不破坏的条件下发生塑性变形,成为具有要求形状和尺寸的零件,如弯曲、拉深(图 0.1(g))等工序。

随着生产技术的发展,还不断产生新的塑性加工方法,例如连铸连轧、液态模锻、等温锻造和超塑性成形等,这些都进一步扩大了塑性成形应用范围。

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。

三、金属塑性成形原理课程的目的和任务

由上述介绍可知,金属塑性加工方法多种多样,具有各自的特点。但它们具有共同的特点,即都要利用金属的塑性,并都要借助于一定的外力使其产生塑性变形。而金属产生塑性变形时在金属学和力学等方面有着共同的基础和规律。因此,金属塑性成形原理课程的基本任务是阐明金属在塑性成形时的共同性,即金属塑性成形原理是研究和探讨金属在各种塑性加工过程中可遵循的基础和规律的一门学科。其目的在于科学地、系统地阐明这些基础和规律,为学习后续的工艺课程做理论准备,也为合理制订塑性成形工艺规范及选择设备、设计模具奠定理论基础。

对金属塑性成形工艺应提出如下要求:

- (1) 使金属具有良好的塑性;
- (2) 使变形抗力小;
- (3) 保证塑性成形件质量,即使成形件组织均匀、晶粒细小、强度高、残余应力小等;
- (4) 能了解变形力,以便为选择成形设备、设计模具提供理论依据。

为了达到上述要求,就要求《塑性成形原理》从塑性变形的力学基础、物理基础、塑性成形问题的工程解法、塑性成形件的质量分析等方面进行论述。因此,本课程的具体任务是:

(1) 阐明金属塑性变形的物理基础,即从微观上研究塑性变形的机理以及变形条件对金属塑性的影响,以便使工件在塑性成形时获得最佳的塑性状态、最高的变形效率和优质的力学性能。

(2) 阐明金属塑性变形的力学基础,即掌握金属塑性变形体内的应力场、应变场、应力-应变之间关系、塑性变形时的力学条件等塑性理论基础知识。在此基础上,分析研究塑性成形力学问题的各种工程解法及其在具体工艺中的应用,从而科学地确定变形体内的应力、应变分布规律及所需的变形力和变形功,为选择成形设备吨位和设计模具提供依据,并为降低变形力指明方向。

(3) 阐述金属塑性成形时的金属流动规律和变形特点, 以便确定合理的坯料尺寸和成形工序, 使工件顺利成形。

(4) 对成形件质量进行定性分析, 理论联系实际, 以便寻求提高成形件质量的途径。

四、金属塑性成形理论的发展概况

早在 2000 多年前的青铜器时期, 我国劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能, 并掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。随着近代科学技术的发展, 人们赋予了塑性加工技术以崭新的内容和涵义。但是, 作为这门技术的理论基础——金属塑性成形原理则发展得较晚, 直到 20 世纪 40 年代才逐步形成独立的学科。它是在塑性变形的物理、物理-化学和力学的基础上发展起来的一门新兴的工程应用技术理论学科。

金属塑性变形的物理及物理-化学基础属于金属学及金属物理范畴。20 世纪 30 年代提出的位错理论, 可以解释塑性变形过程中的很多现象, 特别是塑性变形的微观机理有了科学的解释。对于金属的塑性, 人们也有了更深刻的认识。塑性, 作为金属状态属性, 不仅取决于金属材料本身(如晶格类型、化学成分和组织结构等), 还取决于变形的外部条件, 如变形温度、变形速度及力学状态等, 从而使人们对塑性变形的物理本质有了充分的认识。

塑性变形的物理-化学方面, 主要研究金属的化学成分、组织结构与塑性变形之间的关系, 工具和工件接触表面之间的摩擦及其机理等内容。

塑性成形原理的另一个重要内容是塑性成形力学, 它是在塑性理论的发展和应用中逐渐形成的。塑性理论的发展历史可追溯到 1864 年, 法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)首次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)提出了应力-应变速率方程(塑性流动方程)。列维(M. Levy)于 1871 年提出了应力-应变增量关系。后来一段时间, 塑性理论发展缓慢, 直到 20 世纪初才有所进展。德国学者在这方面有很大贡献。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, 亨基(H. Hencky, 也译作汉基和亨奇, 本书统一译作亨基)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。至此, 塑性理论的基础已经奠定。到 20 世纪 40 年代以后, 由于工业生产的需要, 塑性理论在很多国家中相继发展, 利用塑性理论求解塑性成形问题的各种方法陆续问世, 塑性成形力学逐渐形成并不断得到充实。

最早将塑性理论用于金属塑性加工的是德国学者卡尔曼(Von-Karman), 他在 1925 年用初等方法建立了轧制时的应力分布规律。此后不久, 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, 即后来所称的主应力法。此后, 人们对塑性成形过程的应力、应变和变形力的求解逐步建立了许多理论和求解方法, 如滑移线法、工程计算法、变形功法、上限法、上限元法、有限元法、逐次单元分析法等。20 世纪 50 年代, 美国学者汤姆逊(E. G. Thomson)等提出了一种由理论解析与实验相结合的研究方法——视塑性法。利用这种方法, 可以根据实验确定的速度场求解变形体内的应力场和应变场。

在国内, 建国以来许多学者在塑性理论及其工程应用方面做了不少研究工作。近年来,

国内出版发行了一系列有关弹塑性理论及金属塑性加工力学方面的专著,且发表了不少有关文章。这些重要的著作和文章对于分析研究金属塑性成形过程提供了理论基础。

塑性成形一般是在屈服以后断裂以前这一变形范围内完成的,刘叔仪教授早在1954年就非常形象地提出了“理论断裂钟面与应力空间”理论,并指明三向拉应力下随着应力的增大必然出现断裂及流体静压力对提高塑性的作用,为寻求合理的加工方案指明方向。

王仲仁教授从便于工程应用的角度出发,吸取了增量理论的共同点,于1979年提出了“应力应变顺序对应规律”理论,这一理论将应力状态、应变状态、屈服准则三者之间的内在关系联系在一起。它根据应力、应变的变化可定性地判断出工件各部分尺寸的变化趋向,同时还给出了平面应力状态及三向应力状态下屈服图形上的应力分区。王仲仁教授还应用塑性成形理论发明了“无模胀球工艺”,这是一种变形效率较高的成形方式。

在塑性成形问题的力学分析方法(如滑移线法、上限法、有限元法等)的理论研究及应用方面,国内许多学者做了许多卓有成效的工作。例如:王仲仁及顾震隆提出了一种用莫尔圆求证亨基方程的方法;王仁较早地将滑移线理论用于分析平板间的塑性流问题;王仲仁也较早地将滑移线理论用于解考虑加工硬化的环形件应力计算问题;朱吉君将滑移线理论用于计算三辊仿形斜轧变形力问题;李双义利用基元矩形技术对平面应变正挤、反挤的优化上限解进行了简便而有效的分析;陈适先利用连续速度场分析计算了筒形件变薄旋压力;王仲仁和富大欣利用弹塑性有限元法求解了径向挤压的应力分布;王祖唐等利用有限元法分析了静液挤压的应力应变场等。

近年来,电子计算机技术的发展和普遍应用,对塑性成形问题的求解起了很大促进作用。特别是有限元法已能在考虑变形热效应以及工件与模具和周围介质热交换的情况下,确定变形体内的应力、应变和温度分布情况。有限元法所以能获得如此广泛的应用,与计算机技术的发展和应用密切相关。在其他解法中的一些求解过程,往往需经大量的计算工作,利用计算机,运用数值计算方法,可以快速地获得较精确的解答,极大地提高了解题的效率。可以相信,在今后金属塑性成形理论的发展中,计算机技术会愈来愈发挥它的作用。

第 1 章 金属塑性成形的物理基础

研究金属的变形机理及在各种状态下的变形行为，是分析金属塑性成形的重要基础。本章从微观角度出发阐述金属的结构，单晶体和多晶体的塑性变形机理，位错理论的基本概念，加工硬化现象，介绍冷变形金属加工时的软化机制——回复和再结晶，金属的塑性和影响因素，最后讨论金属的超塑性现象。

1.1 金属的晶体结构

所有固体金属都是晶体。固体物质中原子呈周期性有规则的排列的物质称为晶体。原子在晶体所占的空间内按照一定的几何规律作周期性的排列，称为空间点阵。为了描述晶体内部原子排列的状况，常以一些直线将晶体中各原子的中心连接起来使之构成一空间格子，这种空间格子简称晶格。通常从晶格中选取一个能反映晶格特征的最小几何单元来分析晶体中的原子排列规律，这一最小的几何单元称为晶胞。

1.1.1 三种典型的晶胞结构

各种金属的晶体结构并不完全相同。工业上使用的几十种金属中，最常见的晶格结构有下面三种。

(1) 面心立方晶胞 金属原子分布在立方晶胞的八个顶角上和六个面的中心 (图 1.1)。属于这类晶格类型的金属有 Al、Cu、Ni、 γ -Fe、Pd、Ag、Au、Pt、 β -Co 等 20 多种。

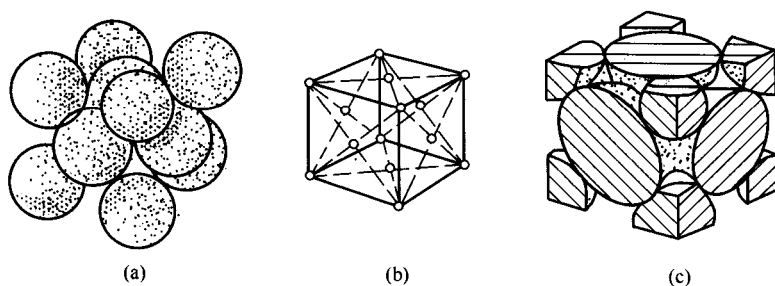


图 1.1 面心立方点阵

(a) 面心立方原子堆积方式；(b) 面心立方晶胞；(c) 一个晶胞内所占有的原子

(2) 体心立方晶胞 金属原子分布在立方晶胞的八个顶角上和晶胞的体中心(图 1.2)。具有这类晶格类型的金属有 Cr、V、Mo、Nb、W、Cs、Ta、 α -Fe、 β -Ti、 β -Zr 等 30 多

种, 约占金属元素的一半。

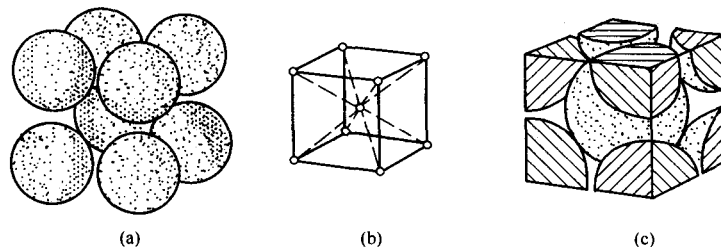


图 1.2 体心立方点阵

(a) 体心立方原子堆积方式; (b) 体心立方晶胞; (c) 一个晶胞内所包含的原子

(3) 密排六方晶胞 金属原子分布在六角晶胞的 12 个顶角上, 上下底面的中心和两底面之间三个均匀分布的空隙中 (图 1.3)。金属 Be、Mg、Zn、Cd、 α -Ti、 α -Co、 α -Zr 等具有密排六方结构。

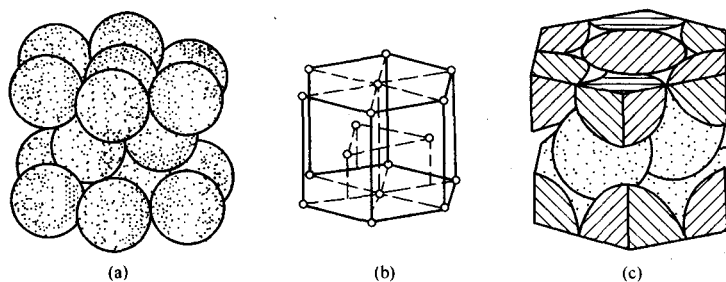


图 1.3 密排六方点阵

(a) 密排六方原子堆积方式; (b) 密排六方晶胞; (c) 一个晶胞内所包含的原子

密排六方结构和面心立方结构都属于最紧密结构, 但是二者的原子堆排方式不同。对密排六方结构而言, 原子排列最紧密的面是其底面。以底面作为第一层(A), 在第一层的原子空隙中心堆上第二层原子(B), 第三层原子中心又和第一层原子的中心重合, 因而其堆积方式是 $ABAB\cdots$, 如图 1.4 所示。对面心立方结构而言, 其密排面是垂直于立方体空间对角线的对角面 (图 1.5), 以密排面(C)为第一层原子, 第二层原子(B)堆积在第一层原子的空隙中心, 第三层原子(A)堆积在第二层原子的空隙中心, 同时又是第一层原子(C)的空隙中心, 因而它的堆积方式为 $ABCABC\cdots$ 。

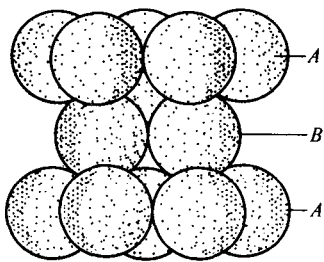


图 1.4 密排六方的堆垛方式

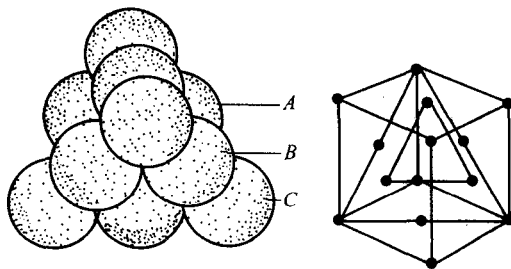


图 1.5 面心立方结构原子堆积模型

1.1.2 实际金属的晶体结构

位向相同的晶胞堆积在一起,就构成金属单晶体。单晶体由于原子在各个方向上排列的密集程度有差别,因此,在各个方向上所呈现的物理、化学和力学性能也不同,称为各向异性。

实际使用的金属是多晶体,由许多晶粒组成,而每一个晶粒都是具有一定位向的单晶体。由于晶粒间位向不一致,方向性互相抵消,因而在一般情况下,实际金属不呈显出方向性。实际金属由于种种原因,每一晶体内部原子的排列不可能像理想晶体那样规则和完整,存在着一系列缺陷。晶体中的缺陷通常可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三类。

1. 点缺陷

在晶体中,位于点阵结点上的原子不是静止的,而是以其平衡位置为中心做热振动,其振幅随温度而变。在一定的温度下,每一个原子的能量并不完全相等,在任何一个瞬间,总可能存在着一部分原子,其能量大到足以克服周围原子对它的束缚作用,而离开它的平衡位置,迁移到其他位置,则原来点阵的位置出现了一个空位。空位是最重要的点缺陷,由于空位的存在,使空位周围的原子失去作用力的平衡,从而也会偏离理想的位置,产生晶格的畸变,由于空位产生的晶格畸变区在三维方向上都很小,所以称之为点缺陷。离开平衡位置的原子有两个去处,一是迁移到晶体表面上去,这样形成的空位称为肖脱基(Schottky)空位(图 1.6(a));另一种可能是迁移到晶体点阵的间隙中(图 1.6(b)),这种空位称为弗兰克尔空位。显然,在后一种情况下,在形成一个空位的同时,也在晶体中产生一个间隙原子,间隙原子是另一种点缺陷。

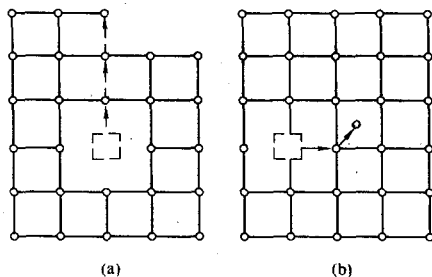


图 1.6 两种空位示意图

(a) 肖脱基空位; (b) 弗兰克尔空位

空位和间隙原子的迁移运动,构成金属晶体中原子的扩散。它直接影响金属的性能和在金属中发生的某些物理化学过程。例如金属的热处理、化学处理、蠕变和高温变形等都和原子的扩散有关。

2. 位错

位错是因原子错排在晶体中形成的一种线缺陷,通常可分为刃型位错和螺型位错,如图 1.7 和图 1.8 所示。

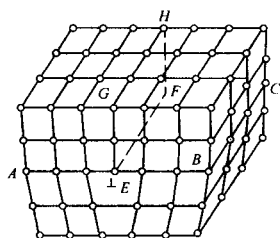


图 1.7 刃型位错示意图

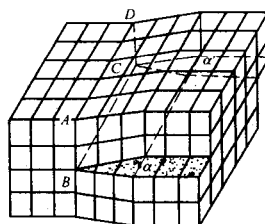


图 1.8 螺型位错示意图

由图 1.7 可知, 在晶体的某一水平面(ABC)上, 多出了一垂直于水平面(ABC)的原子面 EFHG, 它中断于 ABC 面上的 EF 处, 犹如插入的刀刃一样, 使位于 ABC 面上下两部分的晶体产生错排现象, 故称为刃型位错。EF 线称为刃型位错线。把在晶体上半部多出原子面的位错称为正刃型位错, 用 $\perp$ 表示; 在晶体下半部多出原子面的位错称为负刃型位错, 以 “ $\neg$ ” 表示。

另一种原子错排的形式如图 1.8 所示。由于剪应力的作用, 在晶体中 BC 线的右边, 晶体的上下两部分原子排列发生了错动, 上部相对于下部错动了一个原子间距, 结果在 BC 和 aa' 之间造成了上下层原子不正常的过渡地带, 此过渡地带即为螺型位错, BC 为螺型位错线。由图 1.8 可见, 螺型位错线附近的晶格发生了畸变。图示的螺型位错是右旋螺型位错, 如果错排区发生在 BC 线的左边, 则形成左旋螺型位错。

单位体积中所包含位错线的总长度称为位错密度。一般退火的多晶体中, 位错密度为 $10^6 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。经过强烈冷变形的金属, 位错密度可增至 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

位错的存在, 对金属的强度和变形都有重要的影响。金属中位错密度愈高, 金属就愈难于变形, 金属的强度也愈高。

3. 面缺陷

这里主要介绍三种面缺陷。

(1) 堆垛层错是在原子的堆积次序中出现了错排。如面心立方结构正常的堆垛顺序为 ABCABC..., 可能出现两种错排现象: 一种是 $ABC / BC / ABC \dots$, 这种错排现象相当于在正常的层序中抽出一层, 称为抽出型层错; 另一种是 $ABC / B / ABC \dots$, 相当于在正常次序中插入一层, 称为插入型层错。

堆垛层错在不同的金属中产生的难易程度有所差别。一些金属产生层错需要较多的能量, 因此, 产生层错的概率(旧称几率)就小, 如 Al、Ni 等, 称为高层错能金属; 有些金属产生层错所需的能量小, 则容易产生层错, 称为低层错能金属, 如不锈钢等。表 1.1 是一些面心立方金属的层错能。

表 1.1 一些面心立方金属的层错能

金属	Ag	Au	Cu	Ni	Al	奥氏体不锈钢
层错能 (10^{-7} J/cm^2)	25	30	40	80	200	13