

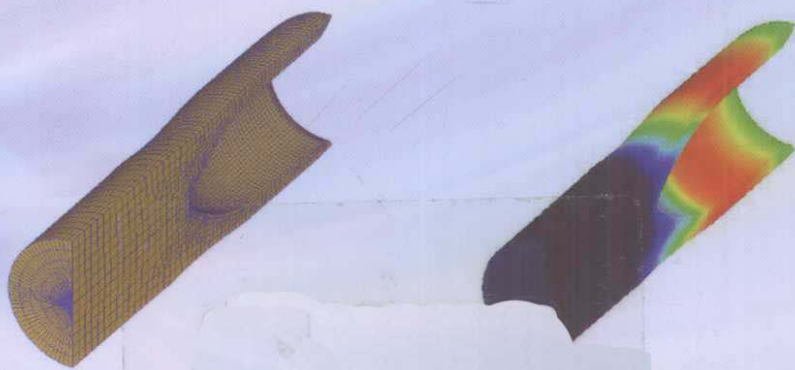



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

金属塑性成形原理

运新兵 主编



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

金属塑性成形原理

运新兵 主编

北京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书系统阐述了金属塑性成形的基本理论。全书共分八章,主要内容包括金属塑性变形的物理基础;金属的塑性和塑性变形;应力和应变;屈服准则;塑性应力应变关系;真实应力-应变曲线;金属塑性成形问题的传统解法(包括主应力法、滑移线法、上限法、变形功法);金属塑性成形问题的有限元法及应用。为了便于学生自学,每章末附有习题与思考题。

本书既可作为材料成型及控制工程专业的本科生教材,也可供研究生、相关专业教师及现场工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形原理/运新兵主编. —北京:冶金工业出版社,
2012.3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5860-7

I. ①金… II. ①运… III. ①金属压力加工—塑性变形—
高等学校—教材 IV. ①TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 020264 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5860-7

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 3 月第 1 版,2012 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;12 印张;288 千字;181 页

26.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

金属塑性成形原理是材料成型及控制工程专业的专业理论课,它为后续工艺课程学习提供理论基础。本书根据材料成型及控制工程专业教学大纲,在参考了已有的众多教材的基础上进行编写,其特点是“强调基础、深度适中、注重应用”。本教材可供大学本科材料成型及控制工程专业教学使用,也可供研究生、相关专业教师以及现场工程技术人员参考。

本教材共分八章,第一章从微观角度阐述金属塑性变形的机理、塑性变形对金属组织和性能的影响以及金属的超塑性变形。第二章主要阐述金属的塑性和变形抗力及其影响因素,分析了塑性成形时金属的变形与流动及其影响因素,包括最小阻力定律、变形的不均匀性、附加应力、残余应力、金属的断裂,介绍了金属塑性成形中的摩擦与润滑问题。第三章至第六章主要阐述金属塑性变形时的力学基础理论,包括应力、应变分析、屈服准则、应力-应变关系以及真实应力-应变关系曲线。第七章介绍了塑性成形问题的几种传统解法,包括主应力法、滑移线法、上限法、变形功法。第八章阐述了塑性成形问题的有限元解法,重点介绍了刚塑性有限元法的基本原理,并通过实例介绍了采用 DEFORM 软件解决塑性成形问题的过程。

本教材内容全面、丰富,理论与实际相结合,有一定的深度和广度。在编写过程中编著者注意深入浅出、循序渐进,强调概念,阐述清晰,通过例题讲解加深对概念的理解与应用。对力学问题注重理论结合实际阐明物理意义,对复杂问题注意适当简化。

本书由大连交通大学运新兵教授主编,大连理工大学张立文教授主审。其中大连交通大学运新兵编写绪论、第二章、第三章和第五章;内蒙古工业大学黄东男编写第一章第一节和第三节;内蒙古工业大学贾园编写第一章的第二节;大连交通大学詹红编写第四章;大连交通大学王晶编写第六章;天津理工大学褚亮

编写第七章;大连交通大学赵颖编写第八章。

本书在编写过程中得到了兄弟院校的大力支持和帮助,主审张立文教授对书稿进行了认真、细致的审查,并提出许多宝贵的修改意见,在此表示深深的谢意。

作者在编写过程中,参阅了大量的文献资料,在此对这些文献资料的作者一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中的不足和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2011年9月

目 录

绪论	1
一、金属塑性成形方法的特点	1
二、金属塑性成形方法的分类	1
三、金属塑性成形理论的发展概况	3
四、本课程的任务	4
第一章 金属塑性变形的物理基础	5
第一节 塑性变形的机理	5
一、滑移	5
二、孪生	7
三、扩散	9
四、晶间变形	10
五、合金的塑性变形	10
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响	13
一、塑性变形的分类	13
二、冷变形对金属组织和性能的影响	14
三、热变形对金属组织和性能的影响	17
四、温塑性变形对金属组织和性能的影响	20
第三节 金属的超塑性变形	21
一、超塑性的分类	21
二、超塑性变形机理	22
三、超塑性变形的力学特征	22
四、超塑性变形对金属材料组织结构的影响	24
习题与思考题	25
第二章 金属的塑性和塑性变形	26
第一节 金属的塑性、变形抗力及其影响因素	26
一、塑性和变形抗力的概念	26
二、化学成分和组织对塑性和变形抗力的影响	28
三、变形温度对塑性和变形抗力的影响	32
四、变形速度对塑性和变形抗力的影响	32
五、应力状态对塑性和变形抗力的影响	34

六、提高金属塑性和降低变形抗力的主要途径·····	37
第二节 金属的流动及其影响因素·····	38
一、金属的塑性变形与流动·····	39
二、金属的不均匀变形、附加应力和残余应力·····	42
三、金属的断裂·····	46
第三节 金属塑性成形中的摩擦和润滑·····	46
一、塑性成形时摩擦的特点·····	47
二、塑性成形时摩擦的分类·····	47
三、塑性成形时接触表面摩擦力的计算·····	48
四、影响摩擦系数的因素·····	49
五、塑性成形时的润滑·····	50
习题与思考题·····	52
第三章 应力和应变·····	53
第一节 求和约定及张量·····	53
一、求和约定·····	53
二、张量·····	55
第二节 应力分析·····	56
一、外力·····	56
二、应力·····	56
三、直角坐标系中一点的应力状态·····	57
四、应力平衡微分方程·····	64
五、应力莫尔圆·····	66
六、平面问题的应力状态和轴对称应力状态·····	66
第三节 应变分析·····	70
一、点的应变状态及应变张量·····	70
二、几何方程·····	72
三、变形连续方程·····	72
四、体积不变条件·····	73
五、主应变、应变张量的不变量、主剪应变和最大剪应变·····	74
六、应变偏张量和球张量、八面体应变和等效应变·····	74
七、应变增量和应变速率张量·····	75
八、平面变形问题和轴对称问题·····	77
习题与思考题·····	78
第四章 屈服准则·····	80
第一节 屈雷斯加屈服准则·····	80
第二节 米塞斯屈服准则·····	81
第三节 屈服准则的几何表达·····	82

一、两向应力状态的屈服轨迹	82
二、主应力空间中的屈服表面	83
三、 π 平面上的屈服轨迹	85
第四节 中间主应力的影响	85
第五节 屈服准则的实验验证	86
第六节 应变硬化材料的屈服准则	87
第七节 各向异性材料的屈服准则	88
第八节 屈服准则在塑性加工中的应用	90
一、屈服准则的正确选用	90
二、控制变形产生的部位	90
三、应用实例	92
习题与思考题	93
第五章 塑性应力应变关系	95
第一节 塑性应力应变关系	95
一、弹性应力应变关系	95
二、塑性应力应变关系的特点	96
第二节 塑性变形的增量理论	97
一、列维-米塞斯方程	97
二、圣维南塑性流动方程	98
三、普朗特-劳斯方程	99
第三节 塑性变形的全量理论	99
第四节 应力应变顺序对应规律	100
第五节 屈服图形上的应力分区及其与塑性成形时工件尺寸变化的关系	103
第六节 应力张量及应力偏张量不变量的物理意义	106
一、应力张量第一不变量的物理意义	107
二、应力张量及应力偏张量第二不变量的物理意义	108
三、应力张量及应力偏张量第三不变量的物理意义	108
习题与思考题	110
第六章 真实应力-应变曲线	111
第一节 拉伸试验曲线	111
一、拉伸图和条件应力-应变曲线	111
二、包申格效应	112
三、拉伸时的真实应力-应变曲线	113
四、拉伸真实应力-应变曲线塑性失稳点的特性	116
五、真实应力-应变曲线的简化形式	116
六、抛物线形真实应力-应变曲线的经验方程	117
第二节 压缩试验曲线	118

一、直接消除摩擦的圆柱体压缩法	118
二、用外推法求压缩真实应力-应变曲线	119
第三节 变形温度、速度对真实应力-应变曲线的影响	120
一、变形温度对真实应力-应变曲线的影响	120
二、变形速度对真实应力-应变曲线的影响	120
习题与思考题	121
第七章 金属塑性成形问题的传统解法	122
第一节 主应力法及应用	122
一、主应力法的基本原理	122
二、主应力法求解变形力举例	123
第二节 滑移线法及应用	127
一、滑移线的基本概念	127
二、汉基(Hencky)应力方程	129
三、滑移线的几何性质	130
四、滑移线场的建立	131
五、滑移线场的速度场	135
六、滑移线场理论在塑性成形中的应用	138
第三节 上限法及应用	143
一、最大散逸功原理	143
二、上限法原理	145
三、上限法在平面变形问题中的应用	146
第四节 变形功法及应用	150
一、变形功法的基本原理	150
二、变形功法在塑性成形中的应用	151
习题与思考题	154
第八章 金属塑性成形问题的有限元法及应用	158
第一节 概述	158
第二节 有限元的基本原理	159
一、连续体的离散处理	159
二、单元的几何特征	160
三、合成总体刚度矩阵	167
第三节 刚塑性有限元法及应用	168
一、刚塑性有限元法	168
二、刚塑性有限元法在塑性成形中的应用	169
习题与思考题	180
参考文献	181

绪 论

金属塑性成形是金属加工方法之一，即在外力作用下，利用金属的塑性，使其产生塑性变形，从而加工成所需形状和尺寸的加工方法，也称为金属塑性加工或金属压力加工。

一、金属塑性成形方法的特点

(1) 有效改善和控制金属的组织与性能。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。例如铸锭须通过锻造、轧制或挤压等塑性变形，才能使其结构致密、组织改善、性能提高。

(2) 原材料消耗少。金属塑性成形主要是靠金属在塑性状况下的体积转移，其过程不需切除金属的体积，因而材料的利用率高，并且流线分布合理，从而提高了制件的强度。

(3) 尺寸精度高。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，不少零件已经达到较少切削、无切削的要求，即实现了近净成形甚至净成形。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采用磨削加工的精度。

(4) 生产效率高。塑性成形方法具有很高的生产率，这一点对于金属的轧制、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 120000kN 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，高速冲床的行程次数已经达到 1500 ~ 1800 次/min，拉丝机的拉拔速度达到 20m/s 以上。

由此可见，利用金属塑性成形方法，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、飞机、高速铁路、航空航天、船舶、军工、电器和日用品等行业中，塑性成形更是主要的加工方法。目前，机械制造工业零件粗加工的 75% 和精加工的 50% 都采用塑性成形的方式实现。

二、金属塑性成形方法的分类

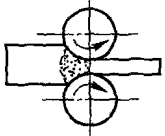

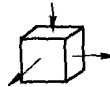
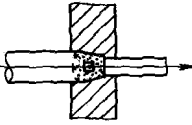
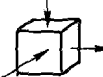

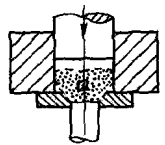


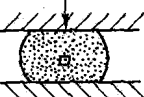


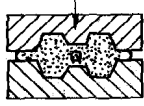


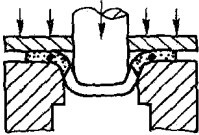


按照成形的特点，一般将金属的塑性成形分为体积成形和板料成形两大类。每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。

(一) 体积成形

体积成形是在成形过程中靠体积转移和分配来实现的，包括轧制、挤压、拉拔、锻造等（见表 1）。

轧制是使金属锭料或坯料通过两个旋转轧辊间的特定空间（直线的或异型的），以获得一定截面形状工件的塑性成形方法。这是由大截面材料加工成小截面材料的常用加工过程。利用轧制方法可生产出型材、板材和管材等。

表 1 塑性成形方法的分类

序号	成形方法名称	工序简图	变形区域(阴影区)	变形区主应力图	变形区主变形图	变形区塑性流动性质
1	轧制		轧辊间			变形区不变 稳定流动
2	拉拔		模子锥形腔			变形区不变 稳定流动
3	挤压		接近凹模口			变形区不变 稳定流动
4	自由锻		全部体积			变形区变化 非稳定流动
5	模锻		全部体积			变形区变化 非稳定流动
6	拉深		压边圈 下板料			变形区变化 非稳定流动

拉拔是将中等截面的坯料拉过有一定形状模孔，以获得小截面工件的塑性成形方法。利用拉拔方法可以获得型材、管材和线材。

挤压是将筒体中的大截面坯料或铸锭一端加压，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，通常分为正挤压、反挤压和复合挤压。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。

锻造是利用锻压机械对金属坯料施加压力，使其产生塑性变形以获得具有一定力学性能、一定形状和尺寸锻件的加工方法。为使金属易于成形和具有较好的塑性，锻造多在热态下进行，所以锻造也常称为热锻。对于常温下塑性较好的材料也可进行冷锻。

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。如平砧下镦粗即为一例。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一个锻件的模具来进行。由于模锻时金属的成形由模具控制，因此模锻就有相当精确的外形和尺寸，也有很高的生产率。

(二) 板料成形

板料成形一般称为冲压，它是对厚度较小的板材，利用专门的模具，使金属产生塑性变形，从而获得所需要的形状与尺寸的零件或坯料的加工方法。冲压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沿一定的轮廓与板料分离，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、拉深等工序。

按照成形的特点，除了以上几种成形方法之外，还有一些其他的成形方法。例如：

(1) 柔性模成形，即用液体、橡胶或气体的压力代替刚性凸模或凹模使板料成形的方法；

(2) 摆动辗压，即上模的轴线与被辗压工件（放在模下）的轴线倾斜一个角度，模具一面绕轴心旋转，一面对坯料进行压缩的加工方法；

(3) 径向锻造，又称旋转锻造，是对轴向旋转送进的棒料或管料施加径向脉冲打击力，锻成沿轴向具有不同横截面制件的工艺方法；

(4) 粉末锻造，即金属粉末经压实后烧结，再用烧结体作为锻造毛坯的锻造方法，锻造设备一般采用压力机或高速锤；

(5) 液态模锻，即将定量的熔化金属倒入凹模模腔内，在金属即将凝固或未凝固状态下用冲头加压，使其凝固以得到所需形状锻件的加工方法。锻造设备可采用通用液压机或专用液压机；

(6) 超塑成形，即利用金属在特定条件（一定的温度条件、一定的变形速度条件、一定的组织条件）下具有的超塑性（高的塑性和低的变形抗力）来进行塑性加工的方法；

(7) 高能成形，即利用高能率的冲击波，通过介质使金属板料产生塑性变形而获得所需形状的加工方法。按能源不同，高能成形可分为爆炸成形、电液成形、电磁成形等类型。

塑性成形还可以按照加工时坯料的温度可分为热成形、冷成形和温成形。热成形是在充分进行再结晶的温度以上所进行的塑性加工，如热轧、热锻、热挤压等。冷成形是在再结晶的温度以下进行的塑性加工，如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等。温成形是在介于冷、热成形之间温度下进行的塑性加工，如温锻、温挤压等。

三、金属塑性成形理论的发展概况

金属塑性加工方法具有悠久的历史，早在两千多年前的青铜器时期，我国劳动人民就发现铜具有塑性变形的特性，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，已经赋予塑性加工技术以崭新的内容和含义。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 20 年代才逐步形成独立的学科。

金属塑性成形理论是在塑性变形的物理、物理化学和力学基础上发展起来的一门工程

应用技术理论。金属塑性变形的物理和物理化学基础属于金属学范畴。从20世纪30年代位错概念提出以来,人们对金属变形的微观机理有了科学的解释,对于金属的塑性——金属产生塑性变形而不破坏其完整性的能力,也有了更深刻的认识。塑性,作为金属的状态属性,不仅取决于金属材料本身(如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、变形速度和力学状态)。

金属塑性成形原理的另一重要方面是塑性成形力学,它是在塑性理论(或称塑性力学)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,由法国工程师(H. Tresca)首次提出最大剪应力屈服准则,距今已有一百多年的历史。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)在研究拉拔时提出了相似的求解办法——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求解方法:如滑移线法、工程计算法、变分法和变形功法、上限法、有限元法等。同时,还建立了理论解析与实验相结合的方法:如塑性变形材料力学法和直观塑性法(又称视塑性法)。

在国内,20世纪50年代以来有许多学者在塑性理论方面做了大量工作。王仲仁教授将塑性力学中一些抽象的概念或规律利用图形来描述,从物理的角度说明问题的实质,如利用莫尔圆移动法证明沿滑移线上正应力的变化规律;将屈服准则、塑性应力应变关系及工件尺寸变化趋势有机地联结起来,给出典型塑性成形工序在屈服图形上的位置;首次给出过一点不同切面上的正应力、剪应力以及全应力的三维分布图形,等等。刘叔仪教授提出了“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。

金属塑性成形理论是一门年轻的学科,生产中存在的大量问题还有待于进一步认识、研究总结,新的成形方法也有待于进一步开发。作为塑性成形理论本身也需要进一步发展和完善。例如:微观塑性理论和宏观塑性理论的有机结合和统一、塑性变形的基本方程——本构方程等问题都需要进一步研究和完善。

四、本课程的任务

金属塑性成形方法多种多样,每种方法都具有各自的特点,但它们有着共同的物理基础和变形规律。金属塑性成形原理课程的目的就在于科学地、系统地阐明这些物理基础和变形规律,为合理制订塑性成形工艺奠定理论基础。因此,本课程的任务是:

(1) 阐明金属塑性变形的物理基础,分析塑性变形的机理以及塑性变形对金属的组织性能的影响。阐述塑性成形时的金属流动规律和变形特点,分析影响金属塑性流动的各种因素,以便合理、准确地确定坯料尺寸和成形工艺。

(2) 阐明应力、应变以及应力应变之间关系和屈服准则等塑性理论基础知识,以便于对变形过程进行应力应变分析并寻找塑性变形体的应力、应变分布规律。

(3) 分析塑性成形力学问题的各种解法及其在具体工艺中的应用,以便科学地确定变形体中的应力应变分布规律和所需的变形力和变形功,为选择成形设备和设计模具提供依据。

金属塑性成形原理是一门专业理论课,在学习本课程时,要建立起准确的物理概念,掌握塑性变形的基本规律,注意理论联系实际,提高分析和解决塑性成形实际问题的能力。

第一章 金属塑性变形的物理基础

塑性变形是获得具有一定的形状、尺寸精度和组织性能的金属产品的一种常用加工方法。因此了解金属塑性变形的物理本质、变形机理及塑性变形对金属组织、性能的影响规律，是分析金属塑性成形的重要基础，也是获得高质量、低成本金属制品的保证。本章从微观角度分析塑性变形机理，阐述塑性变形对金属组织、性能的影响，介绍金属的超塑性变形。

第一节 塑性变形的机理

金属和合金绝大部分都是多晶体。金属多晶体由大量取向不同的单个晶粒组成。当外力作用于金属多晶体时，多晶体中的单个晶粒的塑性变形机理和单晶体金属的塑性变形完全一样。按其物理实质金属变形机理可以分为三类：剪切塑性变形机理、扩散塑性变形机理以及晶间塑性变形机理。其中剪切塑性变形机理主要有滑移和孪生。在金属塑性变形过程中，变形机理主要取决于金属的变形条件（变形温度、变形速度、应力状态等）与金属的本性（晶格排列、晶粒大小、合金成分等）。同时对于一定的金属，在一定的塑性变形条件下，塑性变形通常不是仅通过一种塑性变形机理来进行，而是同时由几种变形机理同时起作用，并通过其中较为占有优势的变形机理来进行。因此，研究复杂的塑性变形过程，首先了解基本的塑性变形机理是完全必要的。下面简述其常见的变形机理及所呈现的现象。

一、滑移

（一）滑移面和滑移方向

当金属处于一定的应力状态下会发生剪切塑性变形，剪切塑性变形的机理主要包括滑移和孪生，如图 1-1 所示。滑移和孪生只是在结晶体中（间）发生，而不取决于温度条

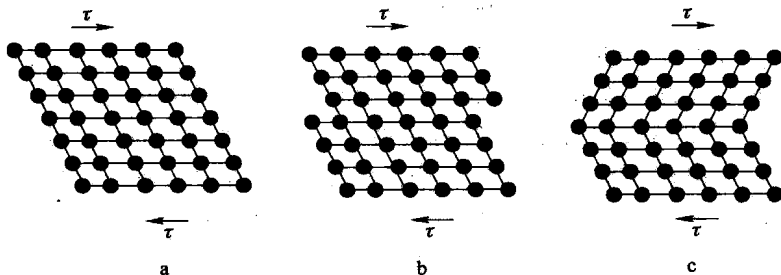


图 1-1 剪切变形的基本形式
a—未变形；b—滑移；c—孪生

件，故这类使物体产生塑性变形的机理也称为非热塑性变形机理。

滑移是指在剪应力的作用下，晶体（单晶体或构成多晶体的晶粒）的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面和晶向产生的移动。产生滑移的晶面和晶向，分别称为滑移面和滑移方向。通过滑移，晶体内的原子逐步从一个稳定位置移到另一个稳定的位置，在宏观上即晶体产生了塑性变形。

所谓的滑移面，即原子排列密度最大、包含有原子最多的晶面（密排面）。滑移方向为滑移面上原子排列线密度最大的晶向（密排方向）。因为密排面和密排方向上原子的结合力最强，同时其相邻密排面和密排方向间的间距最大，结合力最弱，因此滑移往往沿晶体的密排面和该面的密排方向进行。

对于图 1-2 中的晶格，其中 AA 面的原子排列最紧密，原子间距离最小，原子间结合力最强；但由于其晶面间的距离较大，所以晶面与晶面之间的结合力较弱，滑移阻力较小，故 AA 面最容易成为滑移面。而 BB 面原子间距大，结合力弱，晶面与晶面间距离小，结合力强，故难于产生滑移。同理可以解释，沿原子排列最紧密的晶向滑移阻力最小，容易成为滑移方向。

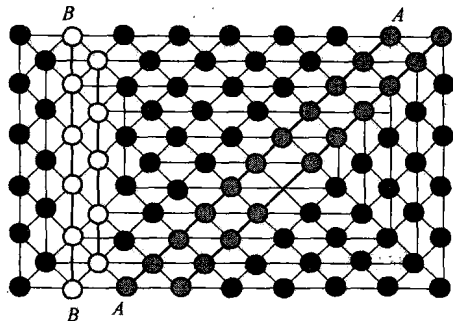


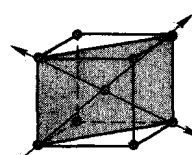
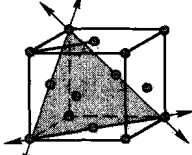
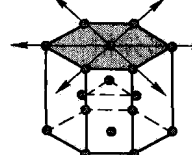
图 1-2 滑移面示意图

（二）滑移系

通常每个一种晶格同时存在几个滑移面，而每个滑移面同时存在几个滑移方向。其中每个滑移面和其面上的一个滑移方向就构成一个滑移系。而晶格中晶胞上的滑移面数和该面上滑移方向数的乘积为滑移系数数。每个滑移系表示金属晶体在进行滑移时可能采取的一个空间取向。

三种典型晶格的滑移系如表 1-1 所示，表中阴影部位为滑移面，箭头表示滑移方向。由表可知，体心立方晶格的金属如：锂、钠、钾、钒、铬、 α -铁、钨等，有 6 个滑移面 $\{110\}$ ，2 个滑移方向 $\langle 111 \rangle$ ，滑移系数数为 12 个。面心立方晶格金属如：铝、铜、银、白金、黄金、 γ -铁等，有 4 个滑移面 $\{111\}$ ，3 个滑移方向 $\langle 110 \rangle$ ，滑移系数数为 12 个。密排六方晶格的金属如：铍、镁、钛、锌、镉等，仅有 1 个滑移面为基底面 $\{0001\}$ ，3 个滑移方向 $\langle 1120 \rangle$ ，滑移系数数仅为 3 个。其中一个滑移系表示金属晶体在滑移时可能选择的取向。在其他条件相同时，金属晶体中的滑移系数数越多，滑移时选择的取向越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。滑移时，滑移方向对滑移所起的作用大于滑移面，因此在滑移系数数相同的情况下，面心立方晶格金属比体心立方晶格金属的滑移方向多 1 个滑移方向，因此面心立方晶格金属比体心立方晶格金属塑性好，而密排六方晶格金属由于滑移系数数少，塑性较差。滑移面对温度具有敏感性。温度升高时，原子热振动的振幅加大，促使原子密度次大的晶面也参与滑移。例如，体心立方晶格金属在高温变形时，除 $\{110\}$ 滑移面外，还可能会增加新的滑移面 $\{112\}$ 和 $\{123\}$ 。面心立方晶格金属在高温变形时，除 $\{111\}$ 滑移面外，还可能会增加 $\{001\}$ 滑移面。正因为高温条件下出现新的滑移系，所以金属的塑性也相应地提高。

表 1-1 金属三种典型晶格的滑移系

晶格	体心立方晶格		面心立方晶格		密排六方晶格	
滑移面	{110} ×6		{111} ×4		{0001} ×1	
滑移方向	<111> ×2		<110> ×3		<1120> ×3	
滑移系	6 × 2 = 12		4 × 3 = 12		1 × 3 = 3	

(三) 滑移的临界剪应力

金属晶体在受到外力作用时，要产生滑移，沿滑移面和滑移方向的剪应力必须达到或超过某一临界值，即临界剪应力 τ_k 。设有一个圆柱形金属单晶体试件受到拉伸力 P 的作用，如图 1-3 所示。其中 A 为试件横截面积； B 为滑移面； φ 为滑移面 B 的法线 On 与拉伸力 P 轴的夹角； λ 为滑移方向 Os 与拉伸力 P 轴的夹角。则拉伸力 P 作用在滑移方向 Os 的剪应力 τ 为：

$$\tau = \frac{P}{B} \cos \lambda$$

将 $B = \frac{A}{\cos \varphi}$ ，代入上式可得

$$\tau = \frac{P}{A} \cos \lambda \cos \varphi \quad (1-1)$$

由于作用在 A 面上的正应力 $\sigma = \frac{P}{A}$ ，代入式(1-1)可得，

$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi \quad (1-2)$$

当外力 P 逐渐增大时， τ 也相应增大，当 τ 达到临界值 τ_k 时，金属晶体开始发生滑移，金属晶体产生塑性变形，开始屈服，此时正应力 σ 等于屈服强度 σ_s 。将其带入式(1-2)得，

$$\tau_k = \sigma_s \cos \lambda \cos \varphi \quad (1-3)$$

式中， τ_k 称为金属晶体的临界剪应力，取决于金属的本性、纯度、试验温度和加载速度，与加载方向、方式及大小无关； $\cos \lambda \cos \varphi$ 称为取向因子或施密特因子。

当 $\lambda = \varphi = \frac{\pi}{4}$ 时，金属的屈服强度 σ_s 最小，达到临界剪应力 τ_k 所需的力最小。易于发生滑移，产生塑性变形。此时取向因子最大，称为软取向。反之，当 λ 或 φ 为 $\frac{\pi}{2}$ 时，达到 τ_k 所需的 σ_s 趋于无穷大，难于滑移，即在外力的作用下金属不会产生塑性变形。此时取向因子最小，称为硬取向。

多晶体金属中由于每个晶粒的取向不同，则金属塑性变形将会在不同的晶粒中逐渐发生，从不均匀的变形过程逐步发展为比较均匀的变形过程，变形过程要比单晶体复杂得多。

二、孪生

孪晶的形成方式有两种，一种是晶体自然生长时形成的，称为自然孪晶。另一种是通

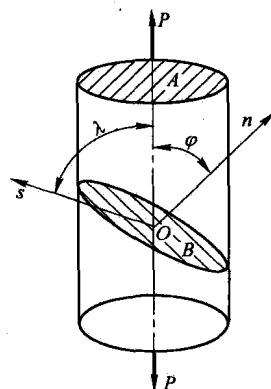


图 1-3 滑移变形过程的应力分解图

过变形形成的称为形变孪晶或机械孪晶。产生孪晶的过程称为孪生。孪生是塑性变形基本机理之一。这里只讨论机械孪晶。

孪生是在剪应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿一定的晶面（孪生面）和晶向（孪生方向）发生切变变形的过程。使得晶体的变形部分与未变形部分以孪晶面为对称面相互对称，如图 1-1c 所示。其中发生切变、取向改变（变形部分）的晶体称为孪晶。通常认为，孪生是一个发生在晶体内部的均匀切变过程，切变区的宽度较小，在金属显微镜下一般呈带状或透镜状，称为孪晶带，如图 1-4 所示。

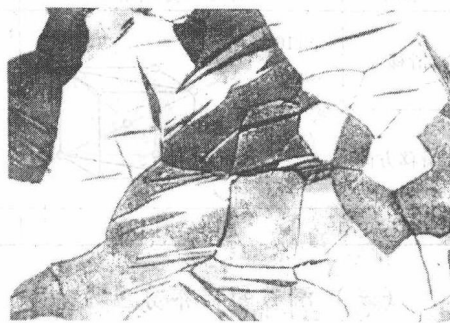


图 1-4 多晶体锌中的孪晶

孪生所需的临界剪应力比滑移大得多，孪生比滑移困难一些。通常情况下，金属晶体变形时首先发生滑移，当剪应力增加到一定数值时，才发生孪生现象。但密排六方晶格的金属，如锌、镁、铍、镭等由于滑移系少，在塑性变形时，常以孪生方式进行。体心立方晶格金属在变形温度较低以及变形速度比较大时塑性变形会以孪生方式进行。面心立方晶格金属不易产出孪生，只有在极低温度下才会以孪生方式进行，如图 1-5 所示。

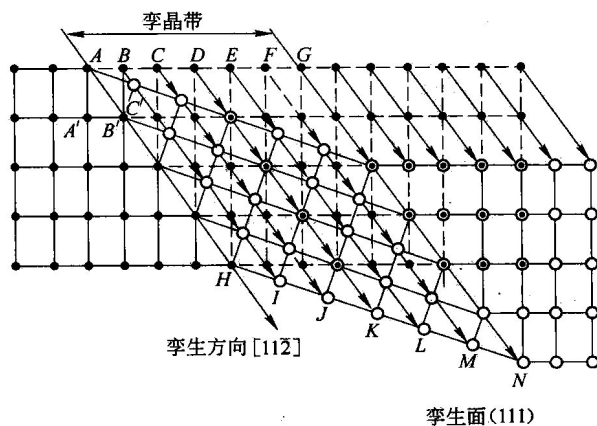


图 1-5 面心立方晶体孪生切变过程示意图

孪生的产生不仅与晶格的特征有关，而且与变形条件有关。高变形速度及低加工温度会促进孪生的产生，尤其当冲击作用及低温静压作用时较容易产生孪生。孪生产生的主要因素是：

- (1) 由于晶粒的滑移系相对于外力的取向不利时，使得发生孪生需要的应力比产生滑移所需的应力较早到达。
- (2) 在有些情况下，金属晶体中大多数晶粒发生滑移变形的同时，其他晶粒由于某种原因不能产生滑移而发生孪生。
- (3) 在个别晶粒中呈现利于发生孪生的局部应力集中。

单纯孪生通常不会促进塑性变形，金属晶体陷入此过程便完全失去塑性而产生脆性破