

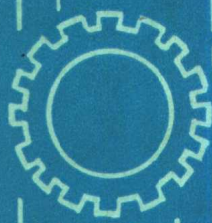


中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

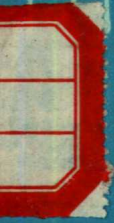
锻 工 工 艺 学



(中 级 本)



科学普及出版社



中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

锻 工 工 艺 学

(中 级 本)

科学普及出版社

本书是机械工业部统编的机械工人技术培训教材。它是根据原一机部《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。内容包括：金属塑性变形理论基础、锻造用钢及其火花鉴别、往复炉排和平焰烧嘴锻造加热炉、各种冷热坯料的加热规范、各种坯料的锻件冷却规范、锻件和锻工工具的热处理、自由锻设备及基本工序、大型锻件的锻造、自由锻造工艺流程、胎模锻造、高合金钢及有色金属的锻造、锻造操作机和装出料机，书末附有部分中外钢号对照表、锤上自由锻件通用技术条件、锻造余量和公差等资料。

本书是锻工技术培训中级教材，也可供锻压专业技术人员和院校学生参考。

本书由高兴晋同志编写，经谢懿、曾稚存、张有明等同志审查。在编写中还得到王太甲、盛仕伟、金宁生等同志的帮助。

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材
锻 工 工 艺 学
(中 级 本)

责任编辑：郭蕴玉

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
机械工业出版社印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：22 5/8 字数：541 千字

1984年11月第1版 1984年11月第1次印刷

印数：1—52500册 定价：3.25 元

统一书号：15051·1104 本社书号：0828

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

机械工业部第一副部长 杨 铎

一九八二年五月

前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要，现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅(局)和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是原一机部颁发的《工人技术等级标准》和当前机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工夹具、量具，按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工夹具、量具、结构原理、工艺理论、解决实际问题 and 从事技术革新的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据，这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进。在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排，从专业需要出发，适当地考虑到今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅(局)、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材中还难免存在不少缺点和错误，我们恳切地希望同志们试行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八二年五月

目 录

绪 论	1
第一章 金属塑性变形理论基础	2
第一节 金属结构、力与变形、变形抗力的概念	2
第二节 塑性变形的基本概念	6
第三节 金属的软化过程	12
第四节 金属塑性变形的基本定律	16
第五节 影响金属塑性的因素	19
第六节 摩擦对金属塑性变形过程的影响	25
第七节 金属在几种主要工序中的变形特点	25
第八节 热变形对金属组织和性能的影响	31
第二章 锻造用金属材料	38
第一节 钢及有色金属的种类	38
第二节 锻造用钢	47
第三节 钢的火花鉴别	53
第三章 锻造材料的加热	61
第一节 燃料及其燃烧	61
第二节 锻造加热炉	65
第三节 加热对钢的影响	74
第四节 加热产生的缺陷及其防止方法	80
第五节 锻造温度范围的确定	85
第六节 金属的加热规范	88
第四章 锻件的冷却与热处理	97
第一节 锻件的冷却	97
第二节 锻件及锻工工具的热处理	105
第五章 自由锻造	113
第一节 自由锻锤	113
第二节 自由锻造水压机	133
第三节 自由锻造的基本工序	147
第四节 自由锻典型工艺实例	166
第五节 大型锻件的锻造	179
第六节 自由锻造锻件的质量检查	193
第六章 自由锻造工艺规程	200
第一节 自由锻工艺规程的编制	200
第二节 锻造工艺规程编制示例	224
第七章 胎模锻造	234
第一节 胎模锻件的分类及胎模种类	234

第二节	胎模锻件图的制订	238
第三节	胎模锻工艺方案的选定	250
第四节	胎模锻设备吨位的选择	252
第五节	胎模设计	253
第六节	胎模的制造	273
第七节	胎模锻工艺实例	276
第八章	高合金钢和有色金属的锻造	288
第一节	高合金钢的锻造特点	288
第二节	高速钢锻造	290
第三节	不锈钢锻造	296
第四节	高温合金锻造	300
第五节	有色金属锻造	302
第九章	锻造车间辅助设备	310
第一节	锻造操作机	310
第二节	装出料机	318
附录		320
一、	部分中外钢号对照表	320
二、	钢锭规格	323
三、	热轧圆钢、方钢的尺寸及理论重量	325
四、	锤上自由锻件通用技术条件	325
五、	锤上自由锻造锻件的机械加工余量和公差	331
六、	水压机锻造的锻件之机械加工余量与公差	347

绪 论

锻造生产是一种具有悠久历史的生产方法,即使在机器制造工业高度发达的今天,它仍然是提供机械零件毛坯的主要途径之一。这是由于用锻造方法生产零件毛坯,不仅能获得所要求的形状和尺寸,而且能改善金属原来的组织,提高金属的机械性能和物理、化学性能。一般来说,对于受力大、工作条件特殊、机械性能和理化性能要求严格的重要零件的毛坯,大多采用锻造方法制造。例如,汽轮发电机组的转子、主轴、叶轮、护环,大型水压机的立柱、高压缸,各种轧机的冷、热轧辊,大型船用曲轴,机车、汽车和拖拉机的曲轴、连杆、齿轮等,都是用锻造方法制成的,此外,各种刀具、模具、农具、日常用手工工具等,也大多是由锻造制成的。因此,在各个工业部门,如国防工业、新兴的宇航和原子能工业、机床制造业、电力工业、交通运输工业、农业及日常用品中,锻造生产占据着重要的地位。

从某种意义上来看,锻件的年产量、模锻件在锻件总产量中所占的比例、精密锻件在模锻件总产量中所占的比例、锻压生产的机械化自动化程度以及锻压设备在加工机床总量中所占的比例和重型水压机的拥有量等指标,在一定程度上反映了一个国家的工业水平和国防力量。

在锻造生产的各种方法中,自由锻造主要应用于单件、小批生产,它的主要任务是经济地获得零件所需的形状、尺寸和内部质量。对于小型锻件,一般是以成形为主;对于大型锻件和特殊钢锻件,则以改善内部质量为主。模型锻造主要应用于大批大量生产,它的任务是减小零件的机械加工余量、降低材料消耗、简化操作、提高劳动生产率。

《锻工工艺学》是研究各种锻造方法的技术理论和工艺知识的。由于有关模型锻造和特种锻造方面的知识已经编入《模锻工工艺学》之中,这里就不再讲述,而着重研究锤上和水压机上自由锻造的技术理论和工艺知识。

《锻工工艺学》中级本的任务是:使我们学得四至六级锻工和水压机锻工应知的技术理论知识,以求达到在生产中指导实际操作,不断地提高技术水平的目的。

从《锻工工艺学》中级本中,可以学到以下的知识:

- (1) 金属塑性变形理论基础;
- (2) 自由锻加热设备及常用锻造材料的锻造温度、加热和冷却规范,锻件和锻工工具的热处理;
- (3) 自由锻设备的工作原理、主要结构、性能参数、常见故障的排除方法及调整试车知识;
- (4) 自由锻基本工序的操作规程和缺陷的预防及矫正,大型锻件的锻造;
- (5) 自由锻件的缺陷及其产生的原因,质量检验;
- (6) 自由锻造工艺规程的编制;
- (7) 胎模锻造及胎模设计;
- (8) 高合金钢和有色金属的锻造;
- (9) 自由锻造辅助设备。

第一章 金属塑性变形理论基础

包括锻造在内的压力加工方法虽然种类繁多,但就其工艺的本质而言,都是金属的塑性变形。因此,塑性变形是金属压力加工方法的基础。各种形状的锻件就是利用金属的塑性变形来制造的。只有学习并掌握金属塑性变形的理论知识,才能不断地改进操作方法,提高锻件质量,降低原材料和变形能量的消耗,创造出先进的锻造工艺方法。

第一节 金属结构、力与变形、变形抗力的概念

一、金属的结构

一切物质都是由原子组成的。根据原子在物体内部的排列方式,可以把固态物质分为晶体和非晶体两大类:物体内部的原子排列紊乱而无规则的固态物质称为非晶体物质,如玻璃、松香、赛璐珞等;物体内部的原子按照一定的几何形状作有规则排列的固态物质,称为晶体物质,如我们所熟悉的食盐(氯化钠)及近代工业上发展起来的单晶硅、激光器所用的红宝石以及绝大多数固态金属等。

(一) 晶 格

在实际晶体中,各原子都是紧密地堆砌在一起的,见图1-1(a)。但在研究晶体构造时,为了便于分析各种晶体内部原子的不同排列方式起见,可用一些假想的几何线条将各原子的中心连接起来,并将每个原子视为一个几何质点,这样就得到了一个抽象化了的几何空间格架,而各原子均位于空间格架的各个“结点”上,这种描述原子在晶体中排列的几何空间格架,称为结晶格子,简称晶格,见图1-1(b)。晶格中各方位密集的原子层称为晶面,如图1-1(c)中有阴影的平面即为晶面之一。

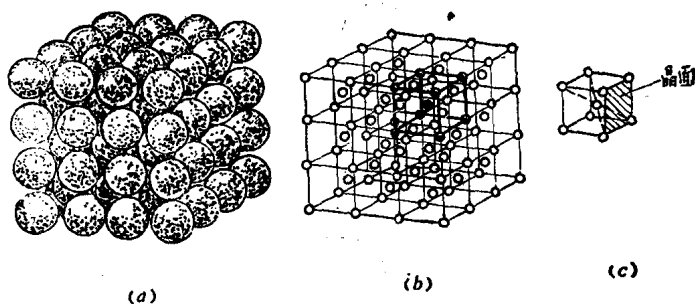


图 1-1 晶体中原子排列形式示意图

(a)原子堆砌模型; (b)结晶格子; (c)晶胞

由于晶体中各原子的紧密堆砌具有周期性的特点,因此可以从晶格中选取一个能代表晶格特征的最小单元来描述晶体中原子的排列规律,通常把晶格中的这种最小单元称为晶

胞, 见图1-1(b)中粗黑线所示部分, 或图1-1(c)。

最常见的金属晶格有以下三种类型:

1. 体心立方晶格 如图1-2(a)所示, 体心立方晶格的晶胞是一个立方体, 原子分布在立方体的各结点上和立方体的中心。属于这种晶格类型的金属有铬、钼、钨等, 它们具有较高的熔点、较大的强度和较好的塑性。

2. 面心立方晶格 如图1-2(b)所示, 面心立方晶格的晶胞也是一个立方体, 原子分布在立方体的各结点上 and 各个面的中心上。属于这一类的金属有铝、铜、镍等, 它们具有良好的塑性。

3. 密排六方晶格 如图1-2(c)所示, 密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体, 原子除分布在各结点及上下两面的中心位置之外, 在六方柱体中心还有三个原子。属于这一类的金属有锌、镁等, 它们的塑性较差。

应该指出, 晶格中的原子在结点附近是按一定的振幅在不停地振动着的, 当温度升高时, 振幅增大, 原子的活动能力也就增强。

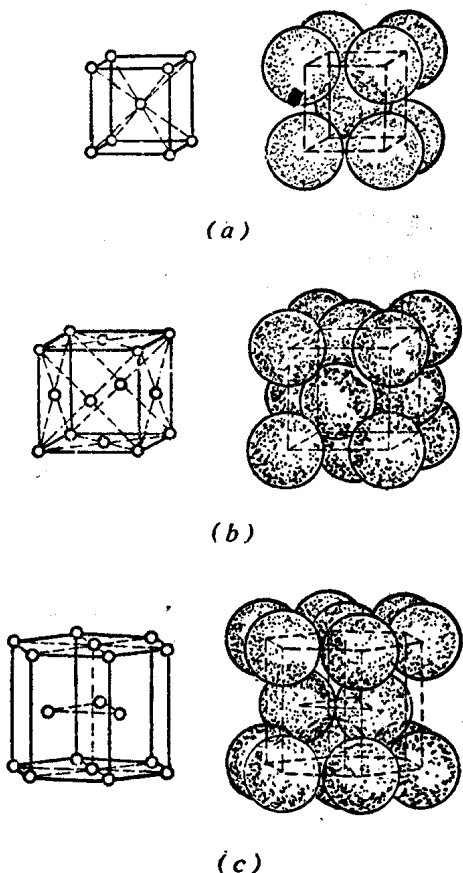


图 1-2 晶格的常见类型
(a)体心立方晶格; (b)面心立方晶格; (c)密排六方晶格

(二) 金属的晶体结构

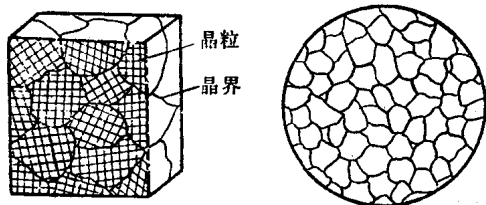


图 1-3 多晶体和显微组织示意图

如果我们把一小块金属制成一种专门的试片, 用金相分析方法在显微镜下观察, 就能清楚地看出金属是由许多外形不规则的颗粒组成的, 在颗粒与颗粒之间有着明显的界线。这些颗粒叫做晶粒。晶粒与晶粒之间的交界面叫做晶界, 如图1-3所示。

1. 单晶体 如果一个晶粒能占据金属的全部体积, 即由一个晶体构成金属块, 那末这种晶体就叫做单晶体。单晶体的性能特征是具有明显的方向性。

2. 金属的多晶体结构 金属及合金一般都是由许多外形很不规则、方位又不相同的晶粒所组成, 这种结构叫做金属的多晶体结构, 如图1-3所示。正因为金属是由多晶体组成, 所以金属在各个方向的性能也基本趋于一致。

二、锻造时坯料的受力情况

锻造时，坯料所受的力可以分为两大类，即外力和内力。外力是指坯料受到的变形工具对它的作用力，包括坯料与工具之间的接触面上所产生的摩擦力。内力是指坯料内的某一部分与其它部分之间相互作用的力，也就是两部分间的作用力与反作用力。

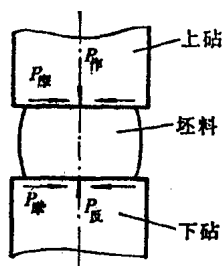


图 1-4 自由锻粗时坯料的受力情况

(一) 外 力

锻造时，使金属坯料发生变形的**外力**有作用力、反作用力和摩擦力。图1-4所示为自由锻粗时作用在坯料上的外力。

1. 作用力 是由锻造设备的机械动作产生的，借助于工具或模具传给金属坯料的打击力(冲击力或静压力)。在自由锻粗时，金属坯料受到作用力 $P_{作}$ 的作用后，将产生高度降低、直径增大的变形。由此可见，作用力是使金属坯料产生塑性变形的最主要原因。

作用力的大小是由锻造设备的能力决定的，锻造设备吨位越大，作用力就越大。

2. 反作用力 锻造时，由工具或模具对坯料产生的一种压力，叫做反作用力。在进行自由锻粗时，反作用力 $P_{反}$ 阻止坯料向下移动。由此可见，这种力是限制金属坯料运动或变形的。它的方向始终垂直于工具的工作表面而指向坯料。

3. 摩擦力 当坯料受外力作用发生变形时，由于金属和工具表面或模膛壁之间的摩擦作用而产生的力叫做摩擦力。在自由锻粗时， $P_{摩}$ 就是金属作径向流动时与砧面之间产生的摩擦力。

摩擦力作用于工具与坯料间接触面的切线方向，而与金属的流动方向相反。摩擦力对金属的变形过程有很大的影响，它将使变形抗力增大，并引起金属的不均匀性变形。

摩擦力的大小与砧面或模膛壁的光洁度有关，砧面或模膛壁越光洁，摩擦力就越小。

(二) 内 力 和 应 力

1. 内力 在外力的作用下，虽然金属内部(晶粒之间和晶粒内部)发生了变形，但它仍有恢复其原来形状的趋势，这种在金属内部对外力作用引起的变形所产生的抵抗力，叫做内力。

当外力去除后，金属恢复到原来的形状，内力也就随之消失。

除此之外，在物理变化或物理化学变化的过程中，只要引起了金属的不均匀性变形，就会产生内力。这种内力是由于变形金属为保持其完整性，对其各部分不均匀的变形产生阻碍作用而引起的。

如图1-5所示，金属棒在不均匀加热时，其右半部的温度比左半部的升高得快，因此左右两部分的热膨胀程度也不相同，右半部的长度比左半部的伸长得快，如图中虚线所示

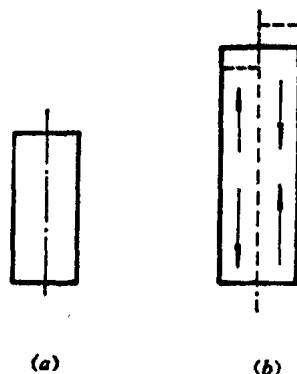


图 1-5 金属棒在不均匀加热时所产生的内力
(a) 加热前；(b) 加热后

示。但由于金属棒是一个整体，它阻碍左右两部分的自由伸长，迫使两边的伸长量接近相等，因而右半部金属棒的伸长受到限制，产生压缩内力；而左半部金属棒被迫延伸，产生拉伸内力，并且两者相互平衡。此时，如果把金属棒从中间切开，则右半部将伸长，而左半部将缩短。与此同时，原来存在于各部分中的内力也就随之消失。

锻造时，金属坯料在加热、冷却过程中，由于其温度的不均匀性变化和组织转变等而产生的内力，就是物理变化引起金属不均匀变形的结果。

2. 应力 单位面积上的内力叫做应力。它常用来表示材料的强度。应力的单位是公斤力/毫米²。

在一般情况下，应力的方向并不一定与所取的截面相垂直。因此，在研究应力与金属变形的关系时，常将一般方向的应力 P 分解成两个特定方向的应力，即：沿截面的法线方向的正应力，以符号 σ 表示；沿截面的切线方向的剪应力，以 τ 表示，如图1-6所示。正应力与剪应力对于金属的变形将起完全不同的作用，关于这一点，将在后面阐述。

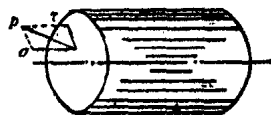


图 1-6 截面上的应力

在研究金属的塑性变形时，还必须区分以下几种应力的不同作用：

- (1) 基本应力——直接由于外力作用而引起的应力；
- (2) 附加应力——由于金属组织、化学成分以及温度等原因造成坯料不均匀性变形而引起的应力；
- (3) 残余应力——去掉外力后，仍然残留在坯料内的附加应力。残余应力的危害性极大，它会导致完工的锻件发生翘曲变形，甚至产生裂纹。

三、变形和变形程度

(一) 变 形

金属坯料在外力的作用下，其尺寸和形状都会发生改变，这种变化过程叫做变形。金属的变形一般可分为以下三种形式：

1. 弹性变形 将引起金属变形的作用力去除以后，变形立即消失，金属仍能恢复到原来的形状和尺寸，这种变形叫做弹性变形。
2. 塑性变形 将引起金属变形但不引起破坏的作用力去除以后，金属不能恢复到原来的形状和尺寸而残留下来的永久变形，叫做塑性变形。
3. 破裂 在外力作用下，金属的完整性受到破坏时所残留下来的变形叫做破裂。如形成各种裂纹、断裂等。

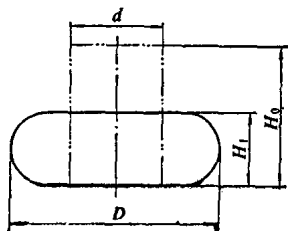


图 1-7 锻粗变形

(二) 变 形 程 度

金属材料变形的大小可用绝对变形 ΔH 来表示，但为了排除尺寸因素的影响，常用相对变形 ϵ 来表示，其值的大小表示金属的变形程度。如图1-7所示的圆柱体坯料，当经过一次锻压后，其尺寸由原来的 $d \times H_0$ 变为 $D \times H_1$ 时，坯料

在高度方向的相对变形为

$$\epsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$$

按照上式计算出来的 ϵ 值,即表示该圆柱体在这一次锻粗时的变形程度,通常用百分比表示。

四、塑性与变形抗力

塑性和变形抗力是锻造生产中考虑金属坯料成形过程中的两个重要指标。

金属产生塑性变形而不发生破坏的能力叫做金属的塑性。金属塑性的高低可用延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 、冲击韧性 α_k 以及许用的最大变形程度等指标间接或直接来表示。

金属对于产生塑性变形的外力之抵抗能力叫做变形抗力。金属的变形抗力,通常是指该金属材料的屈服强度 σ_s ,它一般由实验测定。金属材料的屈服强度表示金属材料产生屈服时的最小应力,即当金属内部所受的应力达到该值时便开始产生塑性变形。由此可见,金属材料的屈服强度越大,使材料开始产生塑性变形所需的作用力也就越大。

综上所述,如果金属材料的塑性越高,变形抗力越小,则表明该金属材料的可锻性越好,越有利于锻造生产。

第二节 塑性变形的基本概念

机器制造工业中所用的金属材料都是多晶体结构。实验证明,多晶体中单个晶粒的塑性变形过程,基本上与单晶体的塑性变形过程相同。因此,为了了解和初步掌握金属塑性变形的规律,首先必须弄清单晶体的变形本质。

一、单晶体的变形过程及其实质

单晶体与多晶体中的单个晶粒一样,是由按照一定几何规律整齐排列的原子晶格组成的,如图1-8所示。单晶体在外力作用下可能发生下列的变形。

(一) 弹性变形

单晶体弹性变形的产生是由于在外力的作用下,原子被迫暂时离开原来的平衡位置而作微量(小于一个原子间距)的移动,移动的距离与作用力成正比关系,见图1-9(b),当外力去除后,原子便立即回复到原来的平衡位置,见图1-9(a),单晶体也就恢复到原状。

由此可见,在外力作用下,单晶体的弹性变形具有以下的特点:

- (1) 原子离开平衡位置而产生微量(小于一个原子间距)的位移;
- (2) 位移的大小与作用力成正比关系(胡克定律);
- (3) 去除外力之后,单晶体立即恢复原状。

(二) 塑性变形

从上述的力与应力的概念可知,物体在外力作用下,某一受力面上的应力可以分解为正应力和剪应力。通过大量的实验观察和分析,证明了作用在晶面上的正应力是不可能使

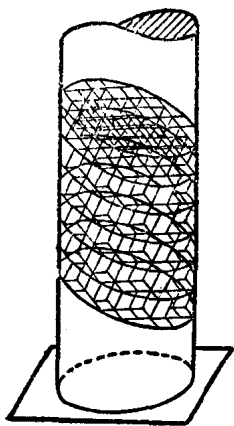


图 1-8 单晶体模型

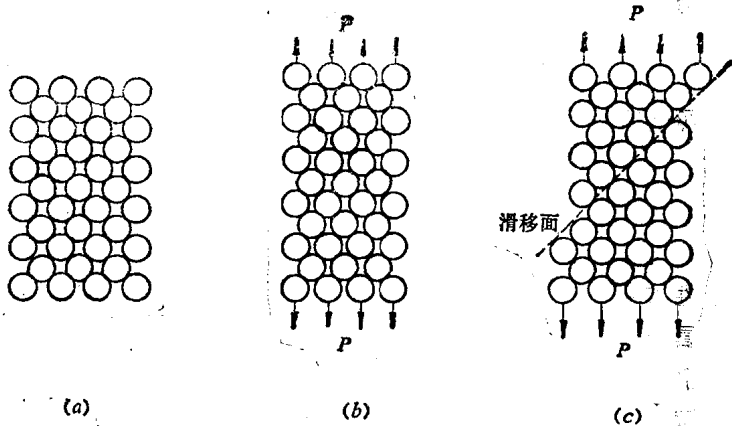


图 1-9 单晶体的弹性变形和滑移示意图

(a)变形前的晶体结构；(b)弹性变形的原子位移；(c)滑移

单晶体产生塑性变形的，只有当作用在晶面上的应力是剪应力时，才可能使单晶体产生塑性变形。单晶体的塑性变形方式有滑移和孪晶(双晶)两种。

1. 单晶体的滑移 当作用在晶面上的剪应力较小时，单晶体的原子晶格发生微量的弹性变形，在外力继续增大到一定值时，即作用在晶面上的剪应力增大到一定值时，原子就会移动一个或几个原子的间距而处于一个新的平衡稳定位置，如图1-9(c)所示。这时，即使剪应力消除以后，原子也不再回复到原来的平衡位置。这样，单晶体便产生了滑移式的塑性变形。

宏观上还可以由图1-10所示的滑移模型来说明，可以近似地把滑移看成是晶体层之间的相对滑动。

由此可知，只有当作用在晶面上的剪应力达到一定数值时，才能产生滑移变形。这个数值，叫做临界剪应力。剪应力继续作用，滑移距离也就增大，而且原子之间相对滑动的距离，必须是原子间距的整倍数，否则，部分变形仍表现为弹性变形。

临界剪应力的大小直接影响到单晶体发生滑移变形的难易程度，而临界剪应力的大小又在很大程度上与晶格结构这个因素有着密切的关系。

从晶格结构来看，沿着原子密度最大的晶面并朝着原子密度最大的方向滑移所需要的临界剪应力最小。因此，各种晶格都有一定的滑移面和滑移方向。一个滑移面和其上的一

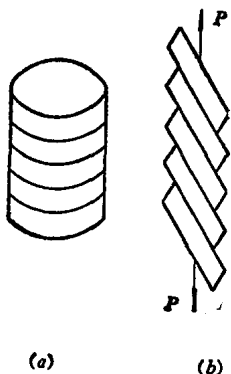


图 1-10 滑移时晶体层的滑动模型
(a)原始形状；(b)拉伸时的滑移变形

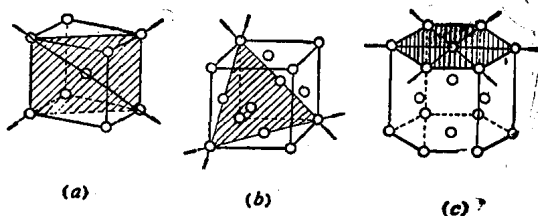


图 1-11 常见晶格的滑移面和滑移方向
(a)体心立方晶格；(b)面心立方晶格；(c)密排六方晶格

个滑移方向合称为一个滑移系。图1-11所示为常见晶格的滑移面及滑移方向示意图。

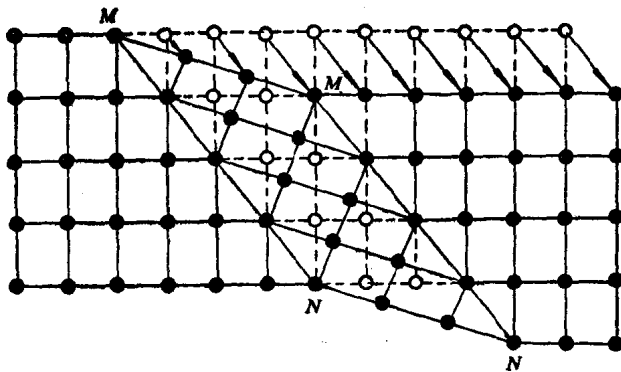


图 1-12 孪晶变形示意图

实验表明，金属塑性的好坏与其滑移系的多少有关。一般来说，滑移系越多，塑性就越好。

2. 单晶体的孪晶 单晶体塑性变形的另一种形式是孪晶，或称为双晶。图1-12所示为孪晶变形示意图。在剪应力的作用下，孪晶变形也是沿着原子密度最大的孪晶面（图1-12中的MN面），及孪晶方向发生的。孪晶变形发生时，原子的移动方向是相同的，但是各个原子移动的距离却不相同，

这个距离不是原来原子间距的整倍数，而是与其距孪晶面的距离成正比。

孪晶变形的结果，造成晶体的一部分以孪晶面为对称面与另一部分晶体相对称。因此，孪晶面总是成对地发生，形成孪晶带（即变形的部分）。显然，原子处于这种新的位置仍然是稳定平衡的，即使去除剪应力之后，该部分晶格并不恢复到原位而形成孪晶塑性变形。

孪晶与滑移相似，变形也是沿着一定的晶面和晶向（即从晶格中某一原子中心到另一原子中心的指向）进行的，而且也必须在剪应力达到临界值时才会发生。

综上所述，单晶体的塑性变形具有如下的特点：

- (1) 只有当作用在晶面上的剪应力达到临界值时，材料才会发生塑性变形；
- (2) 单晶体塑性变形的方式有滑移和孪晶两种；
- (3) 原子的位移必须到达新的稳定平衡位置；
- (4) 晶格变形后不能恢复原状。

(三) 破 裂

晶体的变形并不是无止境地进行，而总是有一定的限度，当变形进行到某一程度时，晶体便会发生破裂。此时作用在晶面上的正应力和剪应力，便是引起晶体破裂的主要因素。单晶体的破裂分为解离和剪断两种方式。

1. 解离 当作用在晶面上的正应力超过了原子间的结合力时，晶体便在垂直于这个面的方向上断开，这种破裂叫做解离。

晶格的各种晶面在产生解离时的应力限度是各不相同的，最易破裂的晶面叫做解离面。引起解离的最小正应力，叫做临界正应力。

由于正应力是不能使晶体发生塑性变形的，因此，正应力所造成的破裂是没有任何塑性变形伴随产生的，这种破裂叫做脆性破裂。

2. 剪断 剪断是由剪应力造成的。当作用在晶面上的剪应力达到一定限度，且所有可以产生滑移的自由方向都消失，不能继续产生塑性变形时，晶体便会沿着某一滑移面发生破裂。由于剪断必然在塑性变形之后发生，所以这种破裂叫做塑性破裂。

综上所述，单晶体的变形方式有弹性变形、滑移、孪晶和破裂四种。在这些变形中，究竟哪一个过程发生得最早呢？除了弹性变形以外，其它要看哪一个面上的应力首先达到

临界值而定。例如，若滑移面上的剪应力首先达到临界值，就会首先发生滑移变形；若孪晶面上的剪应力首先达到了临界值，则首先发生的是孪晶变形；如果在解离面上的正应力首先达到了临界值，那么，单晶体在未发生塑性变形之前就破裂了。

必须指出，在塑性变形中，孪晶不可能引起很大的变形，并且孪晶变形所需要的剪应力要比滑移变形大得多，只有在滑移很难进行的条件下才可能发生孪晶变形。因此，单晶体产生塑性变形的方式，主要是滑移。

二、多晶体变形的方式和特点

(一) 多晶体结构的特点

我们知道，多晶体金属是由许多非常坚固地连接在一起的晶粒集合组成的。从晶粒间的联系和差异来看，多晶体的这种结构具有以下的特点：

(1) 晶粒大小不等，晶格方位互异。由于多晶体是由许多分布紊乱的晶粒组成的，因而，它所具有的机械-物理性能在各个方向上趋于一致，即所谓各向同性。而单晶体却表现为各向异性；

(2) 晶粒间衔接紧密，晶界呈犬牙交错状。在晶粒之间的联系，除原子间的吸引力作用之外，主要还有犬牙交错的机械连锁力的作用；

(3) 晶界处原子排列比较紊乱并常有低熔点杂质聚集于此。这对金属的塑性变形、性能和结构变化等都有很大的影响。例如，当金属处于低温时，由于晶间物质原子排列无序，引起变形抗力增大，而在高温时，由于晶间物质熔点较低，则易使晶间软化。

(二) 多晶体变形的方式

由于多晶体结构具有以上特点，使得各个晶粒的塑性变形互相受到阻碍与制约，而且多晶体存在着晶间物质，其结构和性质又与晶粒本身有很大的差异，因此，多晶体的整体塑性变形要比单晶体的情况复杂得多。按照发生变形的部位不同，多晶体的变形方式可以归纳为下列两类：

1. 晶体本身的变形（晶内变形） 多晶体的变形可以由其内部的某些晶粒的变形所促成。这些晶粒的变形完全遵循单晶体的变形规律，即根据这些晶粒内部的应力条件而产生弹性变形、滑移、孪晶或破裂。并且滑移仍然是晶粒塑性变形的的主要方式。

2. 晶粒之间的变形（晶间变形） 多晶体的变形可以由其内部的某些晶粒之间的相互位移和相互转动所促成。图1-13是在相邻晶粒作用下晶粒之间发生相互转动的示意图。

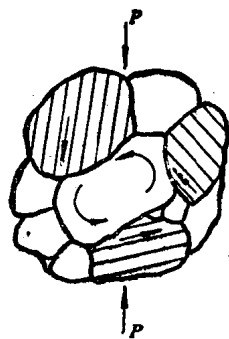


图 1-13 晶粒间的转动示意图

(三) 多晶体变形的特点

多晶体的变形可按上述的任一种形式进行，或者按两种变形方式同时进行。由于影响变形的因素较多，所以整个变形过程是错综复杂的。

1.多晶体中各晶粒方位差异的影响 在多晶体塑性变形时, 由于各晶粒的排列方位不同, 因此作用在各晶粒上的应力情况也不相同。这样便造成整个多晶体的应力呈不均匀状态分布。当外力作用时, 多晶体内只有部分方位最有利的晶粒首先产生滑移。如图1-14所示, 在外力 P 的作用下, 滑移面及滑移方向与外力 P 成 45° 方位的晶粒, 其剪应力首先达到临界值, 因而首先产生变形。

其后, 随着外力的增加, 作用在其它方位晶粒上的剪应力也增大到临界值, 于是也陆续产生滑移。同时, 由于某些晶粒的孪晶面上的剪应力达到了临界值, 也会产生孪晶变形。此外, 还可能由于变形晶粒的外形发生改变, 使原来方位不适宜的晶粒转动到有利的方位而产生变形, 特别是当晶界强度低于晶内强度时, 还可能产生晶间变形。

2.多晶体中晶界的影响 图1-15所示为由两个晶粒组成的试样在受拉伸时的变形情况。从图中可以看出, 在远离晶界的地方, 变形十分明显, 而在靠近晶界的地方, 变形却较小, 即变形结果出现了所谓的竹节现象。这个实验说明了晶界对塑性变形具有较大的阻碍作用, 这是由于晶界处的原子呈交错排列并且与杂质原子相互作用, 使原子滑动受到严重的阻碍。因此, 在多晶体内往往出现变形发生困难的区域, 如图1-16所示。这就增大了多晶体金属变形的抵抗力。为了使多晶体内的变形困难区域也发生滑移变形, 只有加大作用力, 使这些困难区域上的剪应力达到相应的临界值。

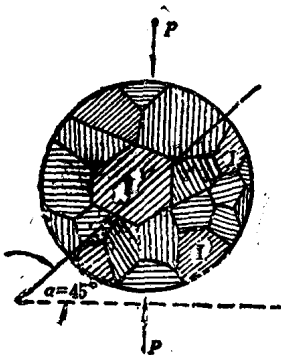


图 1-14 多晶体各晶粒位向对变形的影响

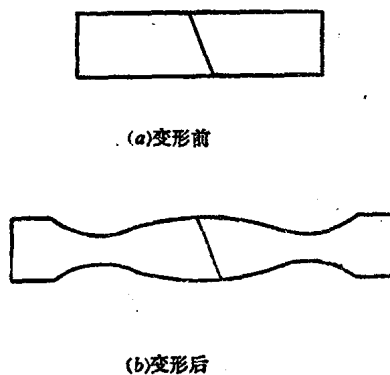


图 1-15 两个晶粒的试样在拉伸时的变形

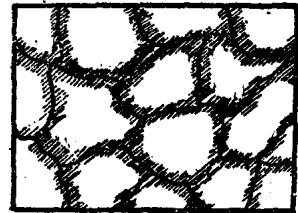


图 1-16 多晶体中变形发生困难的区域 (即晶界阴影部分)

此外, 晶格型式、晶粒大小、变形的温度和速度等因素都将影响多晶体金属的塑性变形过程。

概括起来, 多晶体变形具有以下的特点:

- (1) 影响变形的因素较多, 变形过程复杂;
- (2) 变形抗力比同种金属的单晶体大得多;
- (3) 变形的的主要方式是晶粒内部的滑移;
- (4) 变形性质表现为无方向性。