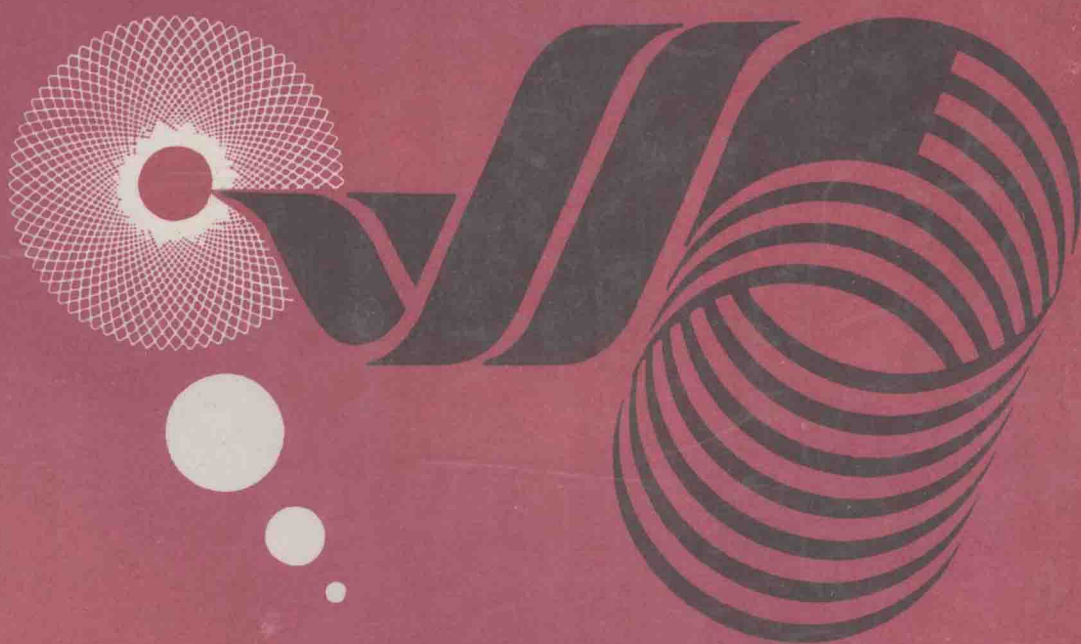




全国技工学校机械类通用教材

锻工工艺学

('96新版)



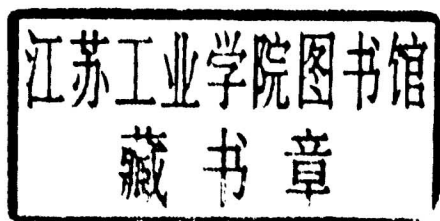
中国劳动出版社

全国技工学校机械类通用教材

锻 工 工 艺 学

'96 新版

劳动部教材办公室组织编写



中国劳动出版社

图书在版编目(CIP)数据

锻工工艺学: '96 新版/周宛如, 于怀君编著。—北京: 中国劳动出版社, 1996

技工学校机械类通用教材

ISBN 7-5045-1833-6

I. 锻… II. ①周… ②于… III. 锻造-工艺-技工学校-教材 IV. TG316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 06995 号

本书是由劳动部教材办公室组织编写, 供技工学校招收初中毕业生使用的机械类通用教材。主要包括: 金属塑性变形的基本原理、锻造材料、锻造设备、锻造工艺、锻造模具、模锻、合金钢及有色金属锻造、锻造新工艺新技术等。

本书也适用于职业学校机械专业及职工培训、自学等。

本书由周宛如、于怀君、刘应隆编写, 周宛如主编; 刘临功、范胜臣审稿, 刘临功主审。

锻工工艺学

'96 新版

劳动部教材办公室组织编写

责任编辑 薛连通

中国劳动出版社出版

(100029 北京市惠新东街 1 号)

北京顺义板桥印刷厂印刷 新华书店总店北京发行所发行

1996 年 6 月北京第 1 版 1996 年 3 月北京'96 新版

1996 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24

字数: 599 千字 印数: 5000

定价: 22.70 元

’96 新版教材说明

为适应我国社会主义市场经济发展的新形势，贯彻党中央提出的科教兴国的战略，全面提高劳动者素质的方针，我们按照劳动部新颁发的技工学校专业目录，对劳动部原培训司组织编写的机械类通用教材进行修订。为了便于区别不同版本的教材，凡按新标准修订的教材，一律称为’96 新版教材。

新版教材以劳动部、机械工业部 1995 年联合颁发的《机械工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》为依据，广泛听取有关省、市、自治区劳动厅（局）教学管理部门及技工学校的意见，注意反映科技进步和文化发展的新成果，进一步突出专业操作技能，促进理论与实践的紧密结合，增强教材的实用性与适应性。

这次修订工作得到了北京、上海、天津、辽宁、湖南、湖北、广东、广西、河南、河北、陕西、四川等省、市、自治区劳动厅（局）的大力支持和协助，对此我们表示衷心的感谢。

欢迎广大师生和读者对新版教材提出意见。

劳动部教材办公室

一九九六年一月

目 录

绪 论	1
第一章 金属塑性成形的基本原理	5
§ 1—1 塑性变形时力和变形的概念	5
§ 1—2 塑性变形的基本定律	10
§ 1—3 金属的加工硬化和软化	11
§ 1—4 金属塑性和变形抗力	14
§ 1—5 金属在锻造、拔长和冲孔时的变形	20
§ 1—6 热变形时金属组织和性能的影响	24
§ 1—7 锻造比的选择与计算	26
习题	28
第二章 锻造用钢及其准备	29
§ 2—1 钢锭的结构、缺陷和规格	29
§ 2—2 钢的分类及牌号表示方法	31
§ 2—3 钢坯的种类及其缺陷	38
§ 2—4 锻造材料表面缺陷的清理和下料方法	40
习题	45
第三章 锻造金属的加热	46
§ 3—1 加热对钢的影响	46
§ 3—2 加热产生的缺陷及其防止方法	49
§ 3—3 钢的锻造温度范围	53
§ 3—4 钢的加热规范	56
§ 3—5 加热温度的测定	61
§ 3—6 燃料及其燃烧	64
§ 3—7 锻造加热设备及其使用	65
习题	80
第四章 锻造设备与辅助设备	82
§ 4—1 空气锤	82
§ 4—2 蒸汽—空气自由锻锤	88
§ 4—3 自由锻造水压机	94
§ 4—4 蒸汽—空气模锻锤	98

§ 4—5	热模锻压力机	101
§ 4—6	平锻机	104
§ 4—7	摩擦压力机	108
§ 4—8	新型高能螺旋压力机	111
§ 4—9	锻造车间的辅助设备	112
习题		120
第五章 自由锻造工艺规程		122
§ 5—1	自由锻造工艺规程的内容	122
§ 5—2	锻件图的绘制	123
§ 5—3	确定钢锭和坯料的重量与规格	126
§ 5—4	合理选用锻造工艺方案	139
§ 5—5	选择锻造设备与工序	142
§ 5—6	确定火次、加热、锻后冷却及热处理规范	144
§ 5—7	确定锻件类别、制定工时定额、填写工艺卡片	145
§ 5—8	编制锻造工艺规程示例	153
习题		162
第六章 胎模锻造		163
§ 6—1	胎模锻造的特点及应用	163
§ 6—2	胎模的种类	164
§ 6—3	胎模锻件图的制定	167
§ 6—4	胎模设计	175
§ 6—5	胎模材料的选择	186
§ 6—6	设备吨位的选择	187
§ 6—7	胎模锻造工艺举例	188
习题		195
第七章 锤上模锻		196
§ 7—1	锤上模锻特点	196
§ 7—2	模锻件分类	199
§ 7—3	锻件图设计	200
§ 7—4	终锻模膛设计	214
§ 7—5	预锻模膛设计	219
§ 7—6	制坯工步的选择	221
§ 7—7	各类制坯模膛	229
§ 7—8	锤锻模结构及材料	234
§ 7—9	毛坯体积计算与尺寸确定	243
§ 7—10	锻锤吨位的确定	244
§ 7—11	锤上模锻件设计实例	245
习题		251
第八章 在各种压力机上模锻		253

§ 8—1 在热模板压力机上模锻·····	253
§ 8—2 在平锻机上模锻·····	261
§ 8—3 在螺旋压力机上模锻·····	269
习题·····	276
第九章 高合金钢和有色金属的锻造·····	277
§ 9—1 高合金钢的特点·····	277
§ 9—2 高速钢的锻造·····	279
§ 9—3 不锈钢锻造·····	285
§ 9—4 高温合金锻造·····	289
§ 9—5 铝合金锻造·····	292
§ 9—6 铜合金锻造·····	295
习题·····	299
第十章 锻造的后续工序·····	302
§ 10—1 后续工序类别与作用·····	302
§ 10—2 切边与冲孔·····	302
§ 10—3 锻件的冷却·····	314
§ 10—4 锻件热处理·····	318
§ 10—5 锻件的清理和校正·····	321
§ 10—6 横锻件的缺陷及检验方法·····	325
习题·····	331
第十一章 新工艺与新技术·····	333
§ 11—1 冷锻与温锻·····	333
§ 11—2 精密模锻·····	333
§ 11—3 辊轧·····	334
§ 11—4 挤压·····	339
§ 11—5 径向锻造·····	343
§ 11—6 粉末锻造·····	345
§ 11—7 超塑性模锻·····	346
§ 11—8 多向模锻·····	346
§ 11—9 余热处理·····	348
习题·····	350
附录	
表 1 台阶轴的台阶、凹档可锻出的最小高度与最小深度·····	351
表 2 台阶轴的台阶、凸档可锻出的最小长度·····	352
表 3 带法兰锻件法兰锻出的最小长度·····	354
表 4 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差(台阶轴类)·····	356
表 5 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差(圆盘类)·····	358
表 6 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差(带孔加孔圆盘类)·····	360
表 7 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差(套筒类)·····	362

表 8 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差（圆环类） 365

表 9 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差（光轴类） 368

表 10 锤上钢质自由锻件机械加工余量与公差（黑皮锻件） 371

附录 A 台阶和凹档的锻出条件 373

附录 B 法兰的最小锻出宽度 375

表 11 各种几何体横截面积和体积的计算公式 376

绪 论

锻造工艺学是应用金属塑性变形的规律，研究如何利用各种锻造方法，以保证获得各类锻件的一门技术科学。

锻造是一门历史悠久的金属加工方法。早在 3300 多年以前，我国已经使用锻造加工方法生产兵器。锻造生产已经成为现代工业生产技术的支柱。锻造生产能力及其工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的水平，影响很大。

1. 锻造生产的特点

锻造工艺获得如此广泛应用，是与其具有独特的优越性分不开的，如在生产率、金属材料利用率、产品的力学性能等重要技术经济指标方面，均比切削加工、铸造、焊接工艺占有明显的优势。一般说，锻件复杂程度不如铸件，但铸件的内部组织和力学性能却不能与锻件相提并论。经过热处理的锻件，无论冲击韧性、相对收缩率、疲劳强度等力学性能均有明显的优势。所以一切重要的受力大的零件都选用锻造方法生产。例如：各种机器上的齿轮、传动轴和各种发动机上的曲轴、连杆、变速叉、操纵杆，绝大多数采用锻件。发电设备上的主轴、叶轮、护环、转子四大件都是锻件。连日常生活中的许多用品，如锤子、钳子、刀子、剪刀等，也都是通过锻造制成的。

2. 锻造生产的分类

(1) 按锻造温度分类

根据金属锻造时温度不同，可分为热锻、温锻、冷锻和液态锻造四种。

热锻是目前应用最广泛的一种锻造方法，也是本书讲授的主要内容。与温锻、冷锻相比，热锻消耗材料较多，锻件尺寸精度差，表面较粗糙，应用范围在逐渐缩小。

冷锻、冷挤压的锻件尺寸精确、表面光洁、强度高、容易做到少切削或无切削，所以应用范围越来越广泛。这种工艺方法由于受到模具和锻压设备吨位的限制，因此温锻便应运而生了。

温锻又叫半热锻，是将钢材加热到 $300\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间进行锻造的一种新的锻造方法。这种方法所需的变形力和设备吨位比冷锻时要小得多，是一种很有前途的锻造方法。

液态下锻造成形的新工艺目前正在推广应用。

(2) 按作用力来源分类

根据作用力来源可分为手工锻造、机器锻造两种。

手工锻造是靠人力用手锻工具在铁砧上锻打成形的。这种生产方法已有数千年的历史，但因劳动强度大，效率低，质量差，现在已不多用，仅用于修理和生产日常用品及小农具。

机器锻造是靠各种锻造设备提供作用力来锻造成形的。根据所用设备和工具的不同又可细分为四类：

1) 自由锻造 在自由锻锤或自由锻水压机的上下砧之间或简单工具之间进行锻造成形。

2) 胎模锻造 在自由锻造设备上用模具(胎具)生产锻件的一种锻造方法。

3) 模型锻造 在固定于模锻设备上的模具内进行锻造成形。

4) 特种锻造 在专用锻造设备上或在特殊工具与模具内使金属坯料成形的一种特殊锻造方法。

3. 国内外锻造生产现状

工业发达国家锻件生产总重量相当于钢产量的5~8%，显然，都是数以百万吨计。我国的钢产量逐年上升，现已突破9千万吨，虽然缺少锻件产量的确切统计数字，但从已建立起来的整个工业体系来分析，锻造生产能力在世界上也是名列前茅的。

模锻件在全部锻件中所占的比重是衡量一个国家锻造生产水平的指标之一。工业发达国家模锻件已占全部锻件的80%左右，而我国仅占26%左右。

国外锻造厂已广泛采用电加热，并建立了数百条自动生产线。如意大利菲亚特公司下属的MIRAFIORI锻造厂，职工总数(包括模具制造)为720人，年产锻件7万吨。有三台高速墩锻机和辗环、焊环等自动线，16台热模锻压机中有生产连杆的自动线。每年用于加热的电约4400万kW。

我国锻造业的先进典型是第二汽车锻造厂。该厂引进了当时联邦德国奥姆柯(EUMUCO)公司专为其制造的世界最大吨位的120MN热模锻压力机自动生产线，全部采用锻压机生产，电感应加热。

4. 我国锻造生产的发展概况

锻造生产在我国已有悠久的历史，早在三千多年前，我国已能锻造兵器。1972年在河北藁城出土的商代铁刃就是证明。到了春秋时期，已能用渗碳、淬火等热处理方法生产许多宝刀、名剑等。在陕西秦始皇陵兵马俑坑的出土文物中，就有三把合金钢锻制的宝剑，其中一把至今仍光艳夺目，锋利如昔，令目睹者叹为观止。在北宋沈括所著《梦溪笔谈》中，已有青堂羌獐子甲的锻造方法的记载，其中“比元厚三分减二乃成”的变形定律，是世界上最早阐述金属锻造成形理论的著作。

解放前，我国锻造生产非常落后，基本上采用手工锻造，仅少数造船厂、兵工厂、机器制造厂装有小吨位的锻锤，只能生产一些简单的锻件。工人的劳动条件极为恶劣，劳动强度极大。在设备制造方面，仅能制造一些小吨位的简单锻造设备。

解放后，锻造生产发展起来了，安装了5000~120000kN的自由锻造水压机，60~5000kgf的自由锻锤，16000kgf以下模锻锤系列，300000kN模锻水压机，120000kN以下系列的热模锻压力机以及16000kN以下各种螺旋压力机……。我国第二重型机器厂与德国的奥姆柯公司合作，生产的120000kN热模锻压力机自动生产线已在第一汽车锻造厂调试生产。其他小型锻压设备的制造厂家，在全国星罗棋布。总之，我国现在基本上已能生产四化建设所需的各种锻件。

5. 我国锻造生产的发展方向与任务

长期以来，各类曲轴生产为锻造所垄断，但由于铸造技术的迅速发展，球墨铸铁的曲轴取代了一部分曲轴锻件。涡轮叶片从问世以来，人们几乎认为是非锻莫属。但现在美国越来越多地采用铸造涡轮叶片。只要铸件的力学性能能满足产品的要求，以铸代锻是更为廉价的工艺。这些促使锻造朝着更高的水平发展，齿轮、叶片、空心轴类件不也曾认为非切削加工不可吗？事实上今天这类件可直接锻造出来，而不需要切削加工了。随着锻造技术的日益发

展，锻造处于毛坯生产的现况不仅会得到改善，并且要向生产广度开发新领域了。

我国锻造生产的发展方向首先是实行专业化生产，提高锻件质量，增加锻件品种，降低成本，提高经济效益。

我国锻造行业目前的主要任务是：

- (1) 实行行业联合，实行专业化生产，提高模锻件生产的数量与比例。
- (2) 大力发展煤气加热，尽可能采用电加热等先进的无氧化、少氧化加热。
- (3) 大力推广精锻、冷锻、冷挤压、温锻、轧锻等少、无切削新工艺。
- (4) 进一步减轻锻工的劳动强度，改善劳动条件与环境。
- (5) 采用先进的机械化与自动化设备与仪表，推广电子计算机辅助设计和辅助制造。

6. 电子计算机辅助设计和辅助制造

美国、英国、德国、日本等不少工业发达国家，对计算机辅助设计和辅助制造锻件和锻模，给予了很大的重视，在模锻生产上广泛应用，并取得了明显的经济效果。我国在这方面处于起步阶段，正在缩短与国外的差距。因为我们已认识到电子计算机辅助设计和辅助制造具有最优化，最节省人力，节省时间，提高生产率，降低生产成本的优越性。这是一项有方向性的技术项目，势在必行。

现把电子计算机辅助设计锻件和辅助制造锻模的程序概述如下。锻件生产的首项任务是设计锻件图，内容包括：

- (1) 设计锻件形状并选择其分模线。
- (2) 规定锻件表面机械加工的余量和锻件的尺寸公差。
- (3) 选定模锻斜度和圆角半径。
- (4) 选定连皮尺寸。
- (5) 规定必要的技术条件。

把这些设计内容的指导原则，数据化的资料输入到计算机系统，作为最优化设计的依据。

锻件设计后，需把锻件转化为终锻模膛，终锻模膛的形状确定后，把它加入到模块或镶块上，便可得到锻模设计图。

终锻模膛和其它模膛的几何形数据可用于确定模具机械加工的刀具轨迹，转换成数控加工纸带，便得到了锻模制造的计算机数控程序。

7. 锻工工艺学的任务和学习方法

中级技工锻工工艺学的任务是使学生通过学习，掌握中级锻工应知的技术理论和工艺知识；具有对典型零件锻造工艺分析和必要的计算能力；明了自由锻锤、模锻锤、自由锻水压机和它们相应的辅助设备的性能、结构、传动关系，并懂得胎具、模具的结构、设计方法；会查阅有关技术手册、资料；有编制中等复杂程度锻件的变形工艺规程的知识；了解新工艺、新技术、新设备及锻造行业发展概况，并具有设计简单工艺装备的能力。

锻造工艺与生产实践有着十分密切的联系，它是直接为生产服务的一门学问，在讲授时应注意：

- (1) 应按教学要求掌握主要内容，突出重点，贯彻精讲多练的精神。
- (2) 根据教学内容的需要，组织现场教学和参观工厂。学锻造设备一章尤应到工厂看实物，增加感性知识。
- (3) 结合实际情况，经常对学生进行安全技术和文明生产的教育。

(4) 要考虑各学校的专业特点，而侧重工艺学某部分内容。例如：重机行业可侧重自由锻造的内容，汽车拖拉机行业应侧重模型锻造的内容。但基本知识均应保证。

第一章 金属塑性成形的基本原理

金属塑性成形也称为金属塑性加工或金属压力加工，它不仅改变金属坯料的形状、尺寸，而且改善其组织和性能，从而获得所要求的产品。

工业中常见的金属塑性成形方法，如轧制、拉拔、挤压、锻造、冲压等都是通过塑性变形来实现的，见图1—1。因此研究塑性变形的理论，了解塑性变形的规律，对改进操作方法，合理地设计工艺、选用设备、正确分析与解决生产中的问题，对提高生产效率和保证产品质量都有重要意义。

塑性变形理论涉及塑性力学、物理化学和金属学基础等方面的一系列理论。

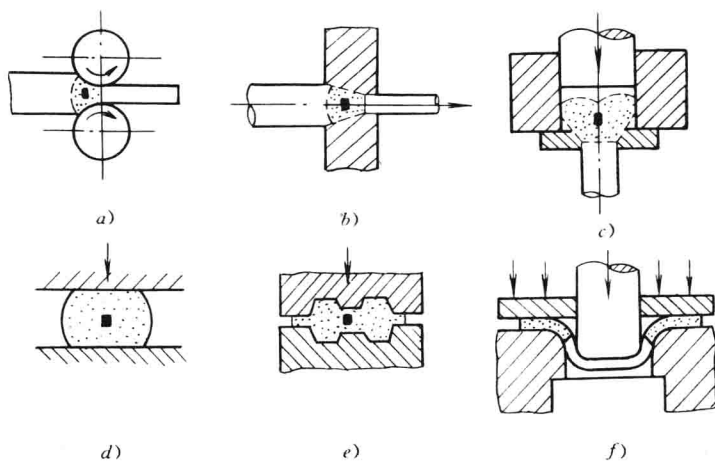


图 1—1 金属塑性成形方法简图

a) 轧制 (纵制) b) 拉拔 c) 挤压 (正挤) d) 镦粗 (锻造) e) 模锻 (开式模锻) f) 冲压 (拉伸)

§ 1—1 塑性变形时力和变形的概念

在金属塑性成形中，力是一个很重要因素。金属受一定力的作用，才能产生一定的变形。

一、外力、内力和应力

为使金属坯料塑性变形，必须施加一定的外力，如果在该力作用下，坯料运动受到阻碍，则其内部各部分之间，就会产生相互作用力，叫做内力。单位面积上的内力，叫做应力。

1. 外力 锻造时，金属坯料表面上所受到的外力有作用力、反作用力、摩擦力等。图1—2表示了镦粗时坯料受力情况。

(1) 作用力是锻压机器的运动, 通过工具、模具传给坯料的力, 如图 1—2 中 $P_{\text{作}}$ 。根据加压速度不同, 该力可分为冲击力和静压力两种, 例如锻锤对坯料的作用力为冲击力, 液压机对坯料的作用力则为静压力。锻压机器能力越大, 所产生的作用力也越大。

(2) 反作用力是由于下砧或锻模等阻碍金属运动或变形而产生的力, 如图 1—2 中的 $P_{\text{反}}$ 。反作用力的方向总是垂直于工具的工作表面而指向坯料的。

(3) 摩擦力是由于变形金属和工模具接触面之间摩擦作用而产生的力, 它和金属流动方向相反, 并作用于接触面切线方向的反作用力, 如图 1—2 中 $P_{\text{摩}}$ 。锻造时的摩擦力阻碍金属沿工具表面流动, 其大小与工具表面粗糙度及润滑情况有关。粗糙度越小, 润滑良好, 摩擦力小; 反之摩擦力大。

2. 内力和应力 金属在外力作用下, 晶格变形原子被迫离开平衡位置, 由于原子间相互作用, 在金属内部产生了与外力平衡的力, 即所谓内力。因此, 外力去除, 内力消失。

但是, 应当指出, 不仅外力作用在金属内部会产生内力, 而且, 不均匀加热与冷却、不均匀相变、不均匀变形等也会在金属内部产生相互作用的内力。

通常把单位面积上的内力称为应力。当在断面上应力分布均匀, 或者为了便于计算, 只计算应力平均值。平均应力由下式计算:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

式中 P ——作用于截面上的内力;

F ——受力截面积。

直接由外力作用引起的应力叫做基本应力。当外力去除, 基本应力即消失。由于变形时, 各处变形不均匀, 温度分布不均匀, 组织结构变化不均匀等, 导致变形体内各部分之间、晶粒之间、或者晶粒内部各处变形不均, 由此而引起的应力叫做附加应力。

二、变形的概念

金属在力作用下, 发生形状和尺寸改变的现象称为变形。

1. 弹性变形 将金属的变形力去除后, 变形立即消失, 金属仍能恢复到原先的形状和尺寸, 这种变形称为弹性变形。

金属弹性变形的实质是由于原子被迫离开其平衡位置, 晶格间距发生了变化, 如图 12-3 所示。当晶体受拉时, 原子间距离增大, 原子间吸引力迫使位移的原子复位。由于位移距离很小, 所以拉力除去后, 原子仍回到受力前的平衡位置, 金属弹性伸长消失。同理, 当金属受压或剪切应力作用, 晶格缩短或歪扭, 原子暂时偏离原来位置, 如图 1—3, 一旦变形力去除, 则原子回到原来平衡位置, 晶格复原, 弹性变形消失。

弹性变形时, 由于变形程度小, 金属微观组织中看不到变形痕迹。

机器零件, 如主轴、弹簧; 金属构件, 如钢轨、桥梁、锻模、工具, 都是在弹性范围内工作的。

2. 塑性变形 当引起金属变形的力去除后, 金属仍不能恢复到原来的形状和大小, 这种

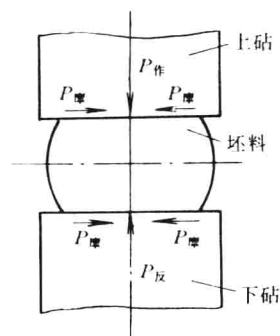


图 1—2 坯料在锻造时的受力情况

12Y-1

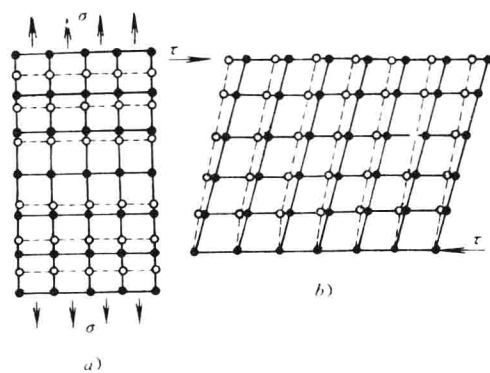


图 10-2 金属晶格在弹性变形时的变化

a—受正应力作用 b—受剪应力作用

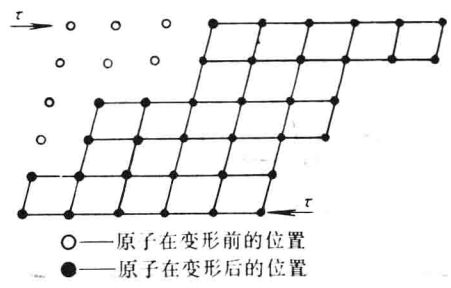


图 10-3 晶格塑性变形 (滑移)

保留下来的永久变形，称为塑性变形。这是因为变形力不但改变了原子间的距离，而且破坏了原子间的联系，建立了新的联系。如图 10-3 所示，原子受切应力作用，位置达到一个原子间距的整数倍，进入新的平衡位置。

金属在塑性变形时，微观组织结构变化明显，而且力学性能也会发生一定的改变。

3. 变形程度 变形的大小可用绝对变形量和相对变形量来表示。

现以矩形坯料受压变形前后尺寸变化为例说明：

(1) 绝对变形量

$$\text{压下量 } \Delta h = H - h$$

$$\text{展宽量 } \Delta b = b - B$$

$$\text{伸长量 } \Delta l = l - L$$

(2) 相对变形量

$$\text{压缩变形程度 (相对压缩)} \epsilon_n = \frac{\Delta h}{H} 100\%$$

$$\text{展宽变形程度 (相对展宽)} \epsilon_b = \frac{\Delta b}{B} 100\%$$

$$\text{伸长变形程度 (相对伸长)} \epsilon_l = \frac{\Delta l}{L} 100\%$$

一般认为塑性变形前后，金属体积相等。由图 1-5 可知 $HBL = hbl$

三、单晶体的塑性变形

工业金属多为由单晶体组成的多晶体结构，为了研究金属塑性变形的本质，首先应该了解单晶体是怎样进行塑性变形的。

单晶体塑性变形有两种形式：滑移和孪晶。

1. 滑移 在外力作用下，内部切应力达到一定值后，晶粒一部分会沿原子排列最密的晶面相对另一部分作平行移动，这种变形过程称为滑移。由于切应力作用，使原子位移超过一个原子间距，到达新的平衡位置，所以，即使切应力去除，原子也不能恢复原位，于是单晶体就产生了塑性变形。如图 10-4 (12Y-2)

研究表明，晶体滑移总是沿一定的晶面和一定的晶向进行的。一般说，原子排列最密的面，总是滑移面。原子排列最密的方向，总是滑移方向。这是因为原子排列最密的面上原子结合力最强，而相邻面之间的间距大，结合力弱，因而容易成为滑移面。同样，原子最密的方向，滑移阻力最小，因而容易成为滑移方向。图 1—6 中阴影面为三种晶格滑移面的例子。

为了使晶体的晶面发生滑移，必须在滑移面上作用一定的平行而反向的切向应力。使晶体开始产生滑动的切应力，称为临界切应力。

许多晶面滑移组成滑移带，如图 1—7 所示，它可用显微镜观察到。滑移是单晶体塑性变形的主要方式。

2. 孪晶 孪晶也称双晶，是晶体塑性变形的另一种形式，如图

1—8 所示。当作用在晶体上切应力达到一定数值时，沿着一定的晶面 (MN 面)，晶体一部分晶格相对另一部分晶格发生转动，结果形成未变形部分与变形部分沿孪晶面相互对称的情况，这种变形方式称为孪晶。孪晶面总是成对发生的。因变形而产生的孪晶，称为形变孪晶。发生变形的那部分晶体，如图 1—8 两 MN 面间的区域，称为孪晶带。

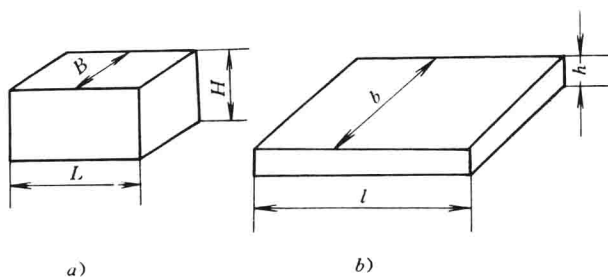


图 1—5 矩形坯料的变形

a) 变形前 b) 变形后

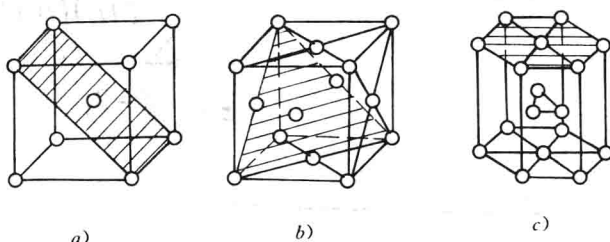


图 1—6 各种晶格的滑移面

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排立方晶格

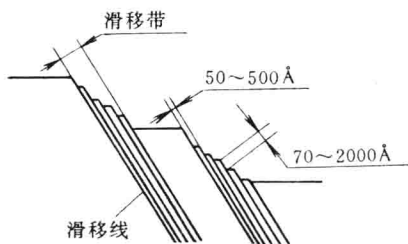


图 1—7 滑移带示意图

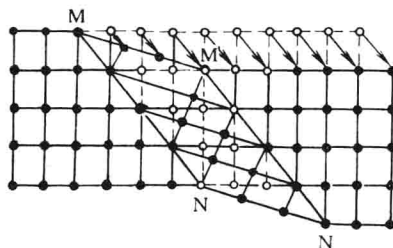


图 1—8 孪晶示意图

高的变形速度和低的变形温度，会促进孪晶发生。因为金属临界孪晶切应力比临界滑移切应力大得多，所以只有当滑移过程很困难时，才能出现孪晶变形，孪晶产生后，由于变形部分位向改变，可能变得有利滑移，所以，孪晶和滑移往往交替进行。孪晶不会引起很大的变形。

孪晶和滑移都能使晶体产生加工硬化现象。

综上所述，单晶体塑性变形的特点有：

(1) 塑性变形的应力条件是，在晶体一定晶面上，作用的切应力达到临界时，才开始塑性变形。

(2) 塑性变形的方式有滑移和孪晶两种。

(3) 塑性变形的实质是晶体中的原子相对移动到新的平衡位置，失去其恢复到原始状态的能力，并不是原子间距被拉长或缩短。

四、多晶体的塑性变形

1. 多晶体的结构特点 金属是多晶体结构，多晶体结构具有以下特点：

(1) 多晶体是由大量的形状、大小、晶格方位均不相同的晶粒所组成的。由于各个晶粒的无序排列，所以多晶体各个方向上的力学性能、物理性质大致相同，即所谓各向同性。而单晶体则表现为各向异性。

(2) 由于结晶时，晶粒拥挤，所以晶粒间形成犬牙交错的晶界，有一定的机械连锁作用。

(3) 晶界是两个位向不同的晶粒间的过渡层，这里杂质聚集，原子排列无序，故变形阻力较大。但在高温时杂质熔化，晶界变形阻力反而减小。由于上述这些组织结构方面的特点，多晶体的塑性变形比单晶体要复杂得多。

2. 多晶体变形特点

(1) 多晶体塑性变形分为晶内变形和晶间变形两种。由多晶体的晶粒内部滑移和孪晶引起的变形称为晶内变形。

晶内变形是多晶体塑性变形的形式。多晶体晶内滑移变形如图 1—9 所示，在晶粒方位杂乱无章的多晶体中，变形首先在这些位向最有利的晶粒中发生，如与作用力成 45° 角的滑移面上切应力最大，即最先到达临界值，而使质点沿着此面运动。至于那些暂时和外力方向不相适应的晶粒，其移动面上切应力还未达到临界值，所以处于弹性状态，不会产生塑性变形。只有外力进一步增大时，原先和外力不适应的晶粒，通过临近已经滑移的晶粒，把它们带到有利于滑动方向以后，才能发生塑性变形。由此可见，多晶体的塑性变形，除晶内滑移外，尚有晶粒之间的相对移动和转动组成的晶间变形，如图 1—10 所示。

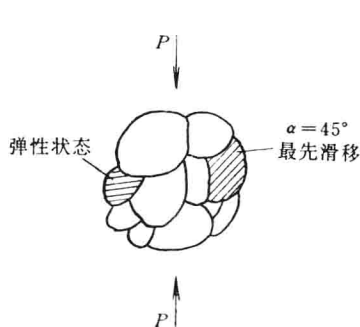


图 1—9 多晶体的晶粒滑移示意图

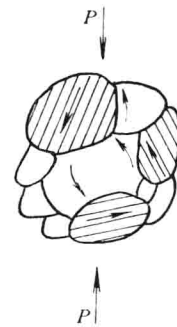


图 1—10 晶粒面转动和移动示意图

(2) 晶粒位向和晶界性质对多晶体塑性变形有较大影响，通常多晶体塑性变形首先在那