

紧固件专业工人技术理论培训教材

冷 镦 工 工 艺 学

紧固件专业工人技术理论培训教材编审组 编



机械工业出版社

ISBN 7-111-03512-X\TG·812

前 言

大力加强技术工人培训和职业技术培训,提高技术工人队伍的素质,对于提高职工队伍素质,提高企业整体素质,解决影响机电工业发展的素质性矛盾,从而实现机电工业的发展任务具有特殊的战略意义。

为适应机械电子工业部在技工培训方面加强行业管理和突出行业特点的需要,根据部颁《工人技术等级标准》,部教育司于1989年组织制定并颁布了《紧固件类工种工人技术理论培训计划、培训大纲(初、中、高级)》,并根据需要,增设了铣槽工部分(只含初、中级)。为便于组织教学,在该培训计划中规定:除各工种专门工艺学课程外,其余课程均采用部统编通用技术工种的培训教材。为此,我们委托部基础件行业劳动学会紧固件分会,根据部颁培训大纲,组织编写冷镦、攻螺纹、木螺钉、弹簧垫、开口销和铣槽等六个工种的初、中、高级专门工艺学教材。承担具体编写任务的有上海、沈阳等地标准件公司、企业和研究所的工程技术人员、富有经验的老工人及长期从事职工教育的同志。他们在资料匮乏、无可借鉴和本职工作繁忙的困难情况下,通过广泛调查研究,积极探索和相互请教,历时两年多才完成了这一艰巨任务,为紧固件行业广大技术工人编著出了第一代技术培训教材。

今年4月,在无锡召开了审定会议,由上海、天津、杭州等地标准件公司和企业以及第二汽车制造厂等单位的代表对书稿进行了最后的审定工作。这套教材的编写,体现了国务院批转的《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神;在内容编排上,注意了从工人岗位生产技术的需要出发,突出了针对性和实用性,努力做到理论联系实际。在写作方法上,力求重点突出,简明扼要,通俗易懂,以便于在职工人学习,运用,达到提高业务能力和操作水平的培训目的。因此,这套教材既具有在职工人培训教材的特色,也可作为技工学校和职业学校相关工种的教材。尤其是将初、中、高级分为三篇合编在一册书中,起到了承上启下、三级之间合理衔接的作用,更便于组织教学内容和工人同志自学。

在这套教材行将出版之际,谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员,特别是为编审出版作了大量组织和服务工作的上海标准件公司热心技工培训事业的同志们致以深切的谢意!同时,也要感谢机械工业出版社的大力支持。新问世的这套教材,会存在一些不足之处,各书中的错误和疏漏也在所难免,恳切希望读者们提出宝贵意见,以便再版时修订,使之更臻完善和实用,更好地为振兴紧固件行业发挥作用。

机械电子工业部
技工培训教材编审组

1992年6月

目 录

前言

初 级 篇

绪论	1
第一章 金属塑性变形的基本原理	3
第一节 金属结构	3
第二节 金属的塑性变形	6
第三节 金属塑性变形的基本定律和 变形力简单计算	10
第四节 金属的再结晶	13
第五节 金属塑性变形对金属组织和 性能的影响	17
复习题	18
第二章 曲柄压力机和冷镦机	19
第一节 曲柄压力机的工作原理和技 术参数	19
第二节 常用自动冷镦机的种类及特 点	21
第三节 常用自动冷镦机的基本结构 和各部件的作用	25
复习题	45
第三章 冷镦常用金属材料及材料 准备	47
第一节 金属材料的分类和性能	47
第二节 冷镦用钢的分类、牌号和性 能	49
第三节 钢材的缺陷及对产品的影响	57
第四节 材料的准备	58
复习题	61
第四章 冷镦工艺和典型工件镦锻	62
第一节 国内常见的冷镦加工方法及 特点	62
第二节 典型的螺纹紧固件镦锻工艺	69
第三节 国内外先进冷镦工艺	75
复习题	79
第五章 常用模具结构及其材料	80

录

第一节 常用模具材料的特性	80
第二节 常用模具材料的牌号及性能	81
第三节 各工序的模具特点及结构形 式	84
第四节 模具对产品质量的影响	91
复习题	92
第六章 冷镦紧固件的质量及安全 操作知识	93
第一节 紧固件的测量	93
第二节 冷镦机的安全操作规程	100
第三节 冲压设备的安全操作规程	102
第四节 起重运输机械的安全操作规 程	103
复习题	104
中 级 篇	
第一章 金属塑性变形	107
第一节 金属的结构与变形	107
第二节 塑性变形的分类和基本概念	111
第三节 影响塑性变形的各种因素	113
第四节 塑性变形后材料性能的变化	115
第五节 塑性变形时力、功和功率的 一般计算	116
复习题	122
第二章 冷镦用材料	123
第一节 冷镦用钢的分类、牌号及性 能	123
第二节 材料的加工方法及尺寸要求	128
第三节 材料消耗定额计算	134
第四节 冷镦用有色金属的分类、牌 号及性能	136
第五节 冷镦材料的检验	137
复习题	139
第三章 紧固件分类及螺纹的基本 概念	140
第一节 紧固件分类	140

第二节 国家标准规定的普通螺纹.....	142
第三节 普通螺纹的标注方法.....	149
第四节 普通螺纹的参数及检测方法.....	150
复习题.....	156
第四章 紧固件的冷镦工艺.....	157
第一节 螺栓的冷镦工艺.....	157
第二节 螺钉的冷镦工艺.....	164
第三节 螺母的普通冷镦工艺.....	167
第四节 螺母的大料小变形冷镦工艺.....	174
第五节 铆钉、销子的冷镦工艺.....	177
复习题.....	178
第五章 紧固件的螺纹加工及热处理工艺.....	179
第一节 外螺纹的加工工艺.....	179
第二节 内螺纹的加工工艺.....	186
第三节 金属学基础及合金元素在钢中的作用知识.....	188
第四节 钢的常规热处理工艺知识.....	192
第五节 结构钢紧固件的热处理.....	195
第六节 有色金属的热处理.....	198
第七节 特殊钢的热处理.....	199
第八节 热处理的工艺规程.....	201
复习题.....	203
第六章 冷镦用工、夹、模具.....	204
第一节 冷镦用工、夹、模具的作用及要求.....	204
第二节 冷镦用工、夹、模具的结构.....	210
第三节 冷镦用工、夹、模具的加工工艺.....	222
第四节 冷镦用工、夹、模具用钢.....	229
第五节 热压用工、夹、模具用钢.....	234
第六节 冷镦用工、夹、模具的热处理及其精整加工.....	237
第七节 硬质合金工、模具的性能、结构及其使用.....	242
复习题.....	246
第七章 冷镦锻设备.....	247
第一节 自动冷镦机的分类.....	247
第二节 自动冷镦机的类型.....	248
第三节 自动冷镦机的特点及主要参数.....	251
第四节 多工位自动冷镦机工艺和设计中的计算.....	253

复习题.....	262
第八章 紧固件的检测.....	263
第一节 检测的作用及概念.....	263
第二节 紧固件的标准及标准化.....	264
第三节 紧固件的检测.....	266
第四节 紧固件的抽样与分等检查.....	267
第五节 紧固件的全面质量管理知识.....	270
复习题.....	272

高级篇

第一章 多工位自动冷镦机机构简介.....	273
第一节 自动冷镦机概述.....	273
第二节 自动冷镦机的工作循环图.....	283
第三节 自动冷镦机的传动系统.....	286
第四节 自动冷镦机的主滑块结构.....	290
第五节 自动冷镦机的送料机构.....	293
第六节 自动冷镦机的切料机构.....	296
第七节 自动冷镦机的夹钳传送机构.....	298
第八节 自动冷镦机的顶料机构.....	306
第九节 自动冷镦机的离合器与制动器.....	312
第十节 自动冷镦机的搓丝机构.....	315
复习题.....	317
第二章 冷镦紧固件的缺陷、检测与科学管理常识.....	318
第一节 冷镦紧固件的常见质量缺陷.....	318
第二节 冷镦紧固件的质量检验.....	320
第三节 微处理机的应用知识.....	321
复习题.....	329
第三章 冷镦机的噪声和机床精度的测试.....	330
第一节 噪声的来源与控制.....	330
第二节 冷镦机的精度测试方法.....	334
复习题.....	339
第四章 紧固件的力学性能试验简介.....	340
第一节 拉伸试验.....	340
第二节 保证载荷试验.....	341
第三节 螺钉、螺栓头部坚固性试验.....	342
第四节 紧固件的脱碳层检测.....	344
复习题.....	346

初 级 篇

绪 论

一、冷镦生产的特点和分类

冷镦是把“冷挤压”和“冷作加工”的优点综合起来，形成一种新的加工方法。这种加工方法已在紧固件行业中广泛采用。冷镦工艺是金属压力加工的分支，是一种少、无切屑加工工艺，是现代先进的加工方法。自动冷镦机则是一种高效率、自动化专用机床，是紧固件行业的重要生产设备。此外，冷镦工艺在汽车、拖拉机、轴承、自行车等行业中也广泛采用，不仅能够大大提高劳动生产率，大量节约钢材和有色金属，而且能够得到几何形状较复杂、强度高、表面质量及尺寸精度高的零件，同时还能完成切削加工和其它加工方法所不能完成的工作。因此，与切削加工及其它加工工艺相比，冷镦工艺有如下特点：

(1) 冷镦零件有较高的力学性能 在冷镦加工过程中，由于金属产生加工硬化，并使金属内部组织压实致密而得到强化，所以冷镦加工零件具有较高的力学性能。此外，还使金属纤维流向保持连续性。而切削加工的零件金属纤维流线则被切断了。如图0-1所示，例如用35钢生产的M10六角头螺栓，冷镦加工的比切削加工的抗拉强度 σ_b 提高10%左右。

(2) 劳动生产率高 采用冷镦工艺生产紧固件与切削加工生产紧固件相比，生产率大大提高。例如采用单击自动冷镦机、双击自动冷镦机、三冲二模自动冷镦机、多工位自动冷镦机、多工位自动冷镦联合机(实际上在大批量生产中已组成自动流水生产线)，进行大批量生产，可提高劳动生产率几十倍、甚至近百倍，同时还节省劳动力、电力、设备，减小占地面积。

(3) 材料利用率高 冷镦工艺是一种少、无切屑成形加工的先进工艺方法。采用切削加工工艺方法，材料利用率只有35%~40%，而采用冷镦工艺材料利用率可高达80%~90%。

(4) 可以加工几何形状复杂的零件 冷镦工艺与切削加工工艺不同，例如几何形状复杂的十二方法兰面螺栓支承面有齿形，无法切削加工，如图0-2所示，采用冷镦工艺就可以满足加工要求。

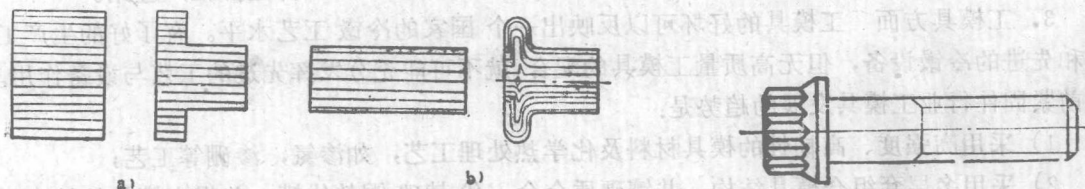


图0-1 冷镦与切削加工零件的金属纤维线

a) 切削零件 b) 冷镦零件

图0-2 十二方法兰面螺栓

(5) 改善尺寸精度与表面粗糙度 冷镦工艺使用冷拉金属材料, 其表面粗糙度 R_a 低于 $R_{a3.2}\mu\text{m}$, 若模具模孔的精度较高, 工件表面粗糙度 R_a 可降低到 $R_{a0.8}\mu\text{m}$ 以下, 再加上合理选用润滑剂, 加工出来的工件可得到较高的尺寸精度 (IT13 公差等级), 表面粗糙度可达 $R_{a6.3}\sim 3.2\mu\text{m}$ 。

冷镦工艺在应用过程中可分为少切屑加工和无切屑加工两种形式:

(1) 少切屑加工 如加工六角头螺栓, 它是先由圆形线材镦出扁圆头形, 然后用六角冲模切去扁圆头周边。又如加工六角、自攻螺钉和木螺钉等头部开槽的螺钉, 也都属于少切屑零件。

(2) 无切屑加工 如加工凹穴六角头螺栓、六角头凸缘螺栓、法兰面螺栓、十字槽机螺钉等, 都属于无切屑零件。

二、冷镦生产发展概况及前景

目前, 国内外冷镦工艺的发展, 是围绕着工艺、设备、工模具三个方面进行的。

1. 工艺方面 生产紧固件, 如螺栓、螺母、螺钉、铆钉等, 除了采用一般工艺生产外, 现在已普遍采用新的先进工艺。如螺栓生产采用多工位联合自动冷镦机, 使用粗料小变形工艺, 螺栓杆部采用两次到三次的缩径, 变形方法为镦挤复合工艺。螺母生产也采用粗料小变形工艺, 大大提高了工艺水平, 减少了生产难度。这种加工方法已被国内接受并推广应用。某些标准件厂还在这种加工方法的基础上, 逐步向异形件和较简单的轴类零件生产上推广应用。

国外已大量采用冷镦工艺生产形状复杂、强度要求高的零件, 如齿轮、偏心轴、球头销、轴头等轴类零件和各种不同的管接头异形零件。所加工的材料有中碳合金钢、低碳合金钢等。冷镦直径可达48mm, 单件重量可达3.3kg。国外还大量采用冷镦与挤压复合工艺生产一些形状复杂的零件。

由于冷镦材料品种不断增加, 特别是低碳、中碳、高碳合金钢以及不锈钢的使用, 其变形抗力较大, 必须增大设备的镦锻力, 设备的外形尺寸也相应增大。为了避免机床外形过大及变形等问题, 近年来又出现了温镦挤压工艺。这种工艺是吸取了冷镦和热镦的优点, 避免了两者的不足之处, 它一诞生就得到了迅猛发展, 被称为第三代金属成型工艺。

冷镦工艺发展的趋向是:

1) 冷镦零件品种向复杂大型化方向发展;

2) 温镦挤压复合工艺将逐步推广应用。

2. 设备方面 冷镦设备的发展趋势是向高速、高效联合自动化发展; 适应粗料小变形工艺的需要, 发展快速换模系统, 增加机效时间, 减少辅助时间; 温镦挤压设备逐步应用与推广。

近年来, 我国也在发展高速、高效多工位联合自动冷镦设备, 并逐步推广应用。

3. 工模具方面 工模具的好坏可以反映出一个国家的冷镦工艺水平。有了好的生产工艺和先进的冷镦设备, 但无高质量工模具的配合, 就不可能充分发挥先进的工艺与设备作用。目前紧固件行业工模具发展的趋势是:

1) 采用高强度、高韧性的模具材料及化学热处理工艺, 如渗氮, 渗硼等工艺;

2) 采用多层套组合模具结构, 并镶硬质合金, 代替碳钢整体模, 并提高模具的精度和降低表面粗糙度值, 以增加模具使用寿命;

3) 采用先进的加工方法, 如采用冷挤压工艺加工模具, 以降低表面粗糙度值;

4) 将淬火后的模具进行冷处理, 其温度根据材料而定, 一般在零下200~300℃。

第一章 金属塑性变形的基本原理

第一节 金属结构

金属材料的各种性能，是由金属的内部组织结构所决定的。我们平时所看到的同一类金属材料，表面上似乎没有什么区别，实际上各种金属的内部组织都是有着很大的差别。如果采用金相分析方法，在金相显微镜下就可以看到它们的组织。采用这种方法显示出来的组织，称为金属材料的显微组织，它是决定金属材料的力学性能的重要内在因素。

但是，金属的显微组织还不能深刻揭示金属性能变化的实质，为此还必须进一步了解金属晶体结构。实际上金属的晶体结构与金属的显微组织是一个统一的概念，我们在显微镜下所看到的一个个金属晶粒是由千千万万个金属原子排列而成的，这些原子的性质及其排列规律是决定这个晶粒性质的内在原因。

一、晶体结构的基本知识

自然界中的化学元素可以分为两大类：金属与非金属。其中，金属元素大约占3/4。工业上使用的金属材料大多数是固体状态的。一切固体金属都属于晶体物质。

用X射线分析研究晶体的内部结构，可以发现晶粒是由具有规则排列的原子组成的，这是晶体与非晶体的根本区别。非晶体内部的原子是无规则排列的。

实际晶体中的各类粒子（包括离子、电子等），虽然都是在不停的运动着，但是，通常在讨论晶体的一般结构时，为了简化问题的分析，仍然都是从“静态”出发，并且还常把构成晶体的原子都看成是一个个固定的小球，也就是说，晶体是由一个个原子的小球按一定的几何形式排列起来的。

实际晶体中各原子都是紧密地堆积在一起的。但是在研究晶体构造时，为了便于分析各种晶体中原子的不同排列方式，可用一些假想的几何线条将各原子的中心连结起来，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的几何空间格架。此时，各原子均位于空间格架的各个“结点”上。这种抽象的、用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格架，就叫做结晶格子，简称晶格。此外，还可以用另一种方法进行抽象，即把晶体中的原子、离子、分子视为质点，而不连结这些几何点之间的线条，这种用于描述各种晶体结构的几何点的阵列，通常称为空间点阵，简称点阵。晶格或点阵都是用于研究晶体结构的几何模型。但是在金属学中通常采用晶格的概念，见图1.1-1。

二、最常用的金属晶体结构与特点

金属晶体结构类型很多，这里只介绍常用冷锻材料的晶体结构：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1. 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞是一个正六面体（即立方体），其晶格常数 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，所以通常只用一个常数 a 表示即可表示该晶格的结构见图1.1-2。

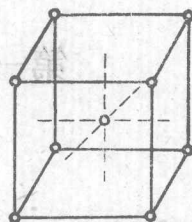
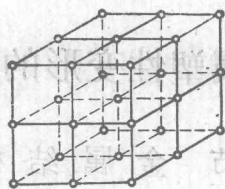
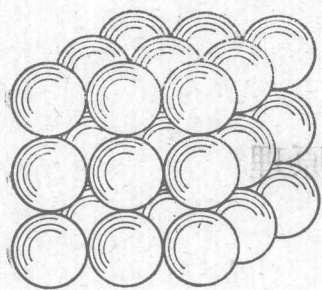


图1.1-1 晶体及晶格结构示意图

a) 晶体金属原子的排列 b) 金属的晶格

图1.1-2 体心立方晶格

由图可见，在一个体心立方晶胞中，立方体的每个顶角上都有1个原子，共8个顶角，有8个原子，而在立方体的中心还有1个原子，看来一个体心立方晶胞应有9个原子所组成。但是，仔细分析即可得知，在一个晶胞中实际上只包含两个原子。这是因为在每个顶角上的原子，实际上它是同时属于与其相邻的8个晶胞所共有，所以对每个晶胞来说，它只占有 $1/8$ 个，而只有该立方体中心那个原子才完全属于该晶胞所独有。所以，在体心立方晶格的一个晶胞中，实际所包含的原子（离子或分子团）数为 $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 个。

具有体心立方晶格结构的常见金属有：室温下的铁（ 910°C 以下称为 $\alpha\text{-Fe}$ ）、室温下的铬（Cr）、钨（W）、钼（Mo）、钒（V）等。

2. 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞也是一个立方体，其晶格常数为 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，所以只用一个常数 a 即可表示该晶格的结构，见图1.1-3。

由图可见，在一面心立方晶胞中，8个顶角上各有1个原子，在六面体的六个表面的中心处各有1个原子，这样看来一个面心立方晶胞似乎是由14个原子所组成的。实际上它只包含4个原子。因为每个顶角上的原子都是同时属于相邻的8个晶胞所共有，在六个面中心上的原子同时属于与该面相邻的两个晶胞所共有，因此，在面心立方晶格的一个晶胞中，实际包含的原子数只有 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 个。

具有面心立方晶格结构的常见金属有：温度处于 $910 \sim 1390^\circ\text{C}$ 之间的铁（称为 $\gamma\text{-Fe}$ ）、室温下的铜（Cu）、铝（Al）、金（Au）、银（Ag）、镍（Ni）等。

3. 密排六方晶格 如图1.1-4所示，其晶格的晶胞是个八面体，上下两个面呈六角形，六个侧面呈长方形。密排六方晶格的晶胞，通常需用两个晶格常数才能表示，一个是六方底面的边长 a ，另一个就是上下底面间的高度 c 。

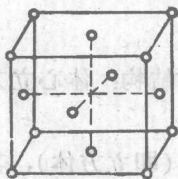


图1.1-3 面心立方晶格

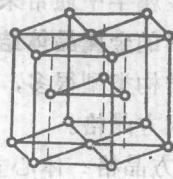


图1.1-4 密排六方晶格

分析表明,对密排六方晶格来说,只有当其轴比 $c/a=1.633$ 时,其晶格内的原子才是真正密集地排列着的。但是通常具有密排六方晶格的金属其轴比 c/a 值是在 $1.57\sim 1.64$ 之间,只有极少是正好等于 1.633 的,个别的如锌、镉等则特别大,甚至大到 1.89 。

由图1.1-4可以看出,在密排六方晶格的一个晶胞中,每个顶角上的原子均同时属于相邻的六个晶胞所共有,上下底面中心的原子则同时属于相邻的两个晶胞所共有,只有上下底面之间的那3个原子才是属于该晶胞所独有的。因此,在一个密排六方晶格的晶胞中,实际上所包含的原子数只有 $1/6 \times 6 \times 2 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ 个。

具有密排六方晶格结构的常见金属有:镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)以及室温下的钛(Ti)等。

4. 晶体中原子的排列密度(晶体结构的密度)在定性的评定晶体中原子排列的紧密程度时,常用配位数这一概念。所谓配位数,就是指在晶格中的任一原子,其周围所紧邻的(即靠近的)等距离原子数目。

显然,晶体的配位数越大,即说明晶体的原子密集程度越高,即排列越紧密。反之,则其排列越疏松。

(1) 体心立方晶格配位数如图1.1-5所示,取该立方体中心的原子(图中标以▲符号者)来看,在其周围和它最靠近的等距离原子就是各项角上的原子,共有8个,除此以外的其它原子都不与其紧靠而距离较远,所以体心立方晶格的配位数是8。

(2) 面心立方晶格配位数 如图1.1-6所示。取该立方体中一个面来看,面中心那个原子的周围,和它最靠近的是它周围顶角上4个原子,但通过这个面中心原子的共有三个互相垂直的面,其结构形式相同,所以与该原子最靠近的等距离原子共有 $4 \times 3 = 12$ 个,因此面心立方晶格的配位数是12。

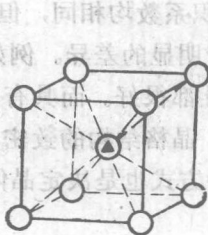


图1.1-5 体心立方晶格配位数示意图

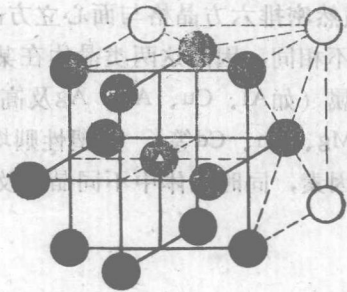


图1.1-6 面心立方晶格配位数示意图

(3) 密排六方晶格配位数 如图1.1-7所示取六方底面中心原子来看,在底面上和它最靠近的等距离原子就是其周围六个顶角上的6个原子,此外,还有在上下底面中间夹层的3个原子(上、下各3个)也是与该原子最紧靠的等距离原子,因此,在空间与该原子最靠近的等距离原子共有 $6 + 3 \times 2 = 12$ 个,所以密排六方晶格的配位数也是12。除了上述三种最基本的晶格类型外,在钢中还会遇到,正方系晶格(淬火马氏体)、斜方系晶格(渗碳体)等等。

图1.1-8所示为简单立方晶格,取立方体任一顶角上的原子来看,在周围与其最靠近的等距离原子只有6个,所以,简单立方晶格的配位数等于6。

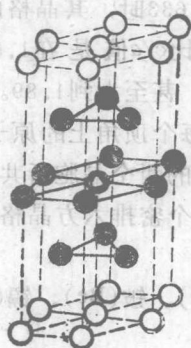


图1.1-7 密排六方晶格配位数示意图



图1.1-8 简单立方晶格配位数示意图

晶格的配位数，只能作为定性的评定晶体结构致密度的一个参数。在需要对晶体的结构致密度进行定量比较时，通常应用晶体的密积系数这一参数，它是指在该种晶胞中所包含的全部原子（将其视为球体）的体积的总和与该晶胞的体积之比。

从上述四种最基本类型的晶格与其配位数可以看出：

1) 面心立方晶格及密排六方晶格中原子排列得最紧密，体心立方晶格次之，简单立方晶格最低。而常见金属中并没有以简单立方晶格结构存在的。可见金属晶格中原子均趋于紧密堆积，这主要是由于金属键结合的本质所致。

2) 晶格中原子排列得越紧密，说明同样数量的原子所占有的空间体积越小。反之，则越大。由于面心立方晶格比体心立方晶格排列得紧密，所以，某一金属（例如Fe）当其晶格结构由面心立方晶格转变为体心立方晶格时，将伴随着体积的膨胀，这就是钢在淬火时因转变而发生体积变化的原因之一。

3) 虽然密排六方晶格与面心立方晶格的配位数与密积系数均相同，但是它们的原子排列方式并不相同，因而这两类晶体在某些性能方面存在着明显的差异。例如，具有面心立方晶格的金属（如Al、Cu、Au、Ag及高温下的Fe），其塑性都很好。而具有密排六方晶格的金属（如Mg、Zn、Cd等），其塑性则均较差。由此可见，晶格结构的致密度是决定晶体性能的重要因素，同时晶体中不同晶面及晶向上原子排列的方式也是决定晶体许多性能的重要因素。

第二节 金属的塑性变形

一、金属塑性

所谓金属塑性，是指在外力作用下发生永久变形而不损害其整体的性能。

许多零件在成型过程中要求材料有较好的塑性。在冷锻时零件有的部位变形量很大，如果材料的塑性不好将会发生开裂。

在工程中金属材料的塑性用伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 两个指标来表示，也就是以此衡量材料的塑性。 δ 和 ψ 的数值可由下列公式确定：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——拉伸试样原始标距长度；
 L_1 ——拉伸试样破断后标距间的长度。

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中 A_0 ——拉伸试样原始截面积；

A_1 ——拉伸试样破断处的截面积。

因此，伸长率和断面收缩率数值越大，表示塑性越好。良好的塑性材料，有利于进行锻压、冷冲、冷镦锻和冷拔等成型工艺。

二、金属塑性变形的基本概念

金属材料通过轧制、冷压等塑性变形加工，不仅可以得到零件所需要的形状尺寸，而且能提高硬度、强度和承载能力。所以，了解金属的塑性变形问题是极其重要的，它关系到正确掌握金属材料的加工工艺和充分发挥金属材料的强度潜力。

冷镦成型工艺是以金属塑性变形为基础的一种生产工艺。下面将与冷镦生产有关的金属塑性变形原理作一简单的介绍。

1. 单晶体金属的塑性变形 实际使用的金属材料都是多晶体，其塑性变形的过程比较复杂。为了便于了解塑性变形的实质，我们先从简化了的情况来分析塑性变形，即首先介绍单晶体的变形。

(1) 滑移变形的概念 将一个表面经过良好抛光的纯锌单晶体进行拉伸试验，当试样发生一定的塑性变形之后，在其表面上出现了许多互相平行的倾斜的线条状的痕迹。从拉伸后的锌单晶试样可以看出，锌单晶体塑性变形时是沿着某一结晶平面发生与位于晶面两侧晶体的相对滑移，滑移的结果造成了永久变形。拉伸时锌单晶表面上出现的互相平行的线条正是这些发生滑移的晶面与单晶表面相交的地方。图1.1-9为锌单晶体拉伸试验的示意图。进一步分析可知：锌单晶体发生滑移的面是其六方晶格的底面。

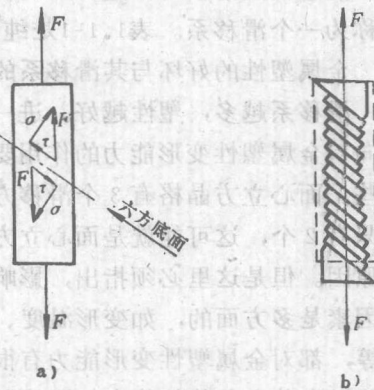


图1.1-9 锌晶体拉伸试验示意图

a) 变形前 b) 变形后

在对塑性变形现象进行大量实验和分析后，人们认识到只是切应力才造成晶体的塑性变形。当切应力较小时，晶格只产生弹性剪切变形，如图1.1-10所示。如果切应力继续增大，超过了受剪晶面的滑移抗力，则晶面两侧的两部分晶体将发生相对滑移，滑移面上每个原子移动一定距离之后，在新的位置上重新处于稳定状态（与其周围原子建立起平衡的结合力），图1.1-10表示在切应力作用下滑移面上的原子进行了一个原子间距的滑移。显然，这种滑移之后，整个单晶体仍保持其结晶方位的一致性。某一晶面发生一定量的滑移之后，由于加工硬化，该晶面的滑移抗力将增大而停止滑移。如应力继续增大，则晶体又可通过另外一些相似的晶面（对锌单晶体来说，就是一系列互相平行的六方底面）发生滑移，而使塑性变形继续发展下去。

(2) 滑移面和滑移方向 在晶体中，滑移总是发生在某些特定的晶面和晶向上。大量的实验观察表明：滑移主要是发生在那些原子排列最紧密或较紧密的晶面，并沿着该晶面上

原子排列最紧密（原子线密度最大）的方向上进行的。这可以用图1.1-11来说明：图中 I-I 晶面是一个原子排列最紧密的晶面，若与非紧密排列的晶面 II-II 相比，可以看出，在 I-I 晶面内部，原子间结合力较强，当晶体受到一定外力作用时，要横切此 I-I 晶面是比较困难的。而相邻两个 I-I 晶面间结合力较弱，若使相邻两个 I-I 晶面间发生相对滑移则比较容易。

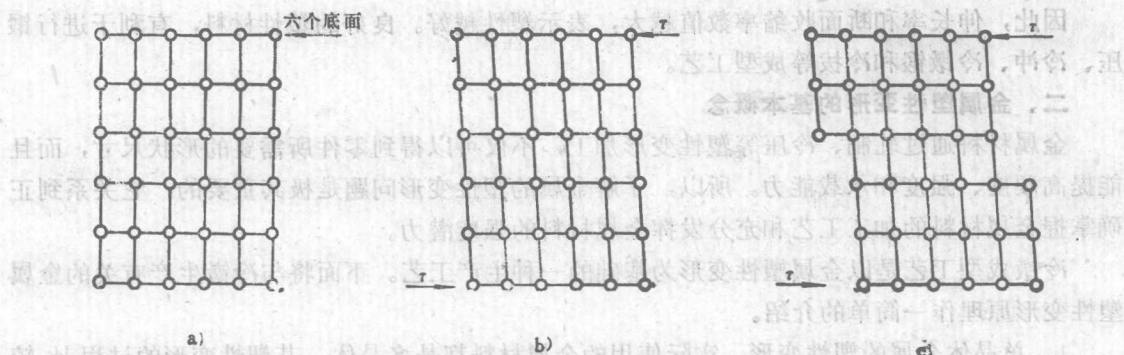


图1.1-10 晶体在切应力作用下变形

a) 变形前 b) 弹性变形 c) 塑性变形

能够发生滑移的晶面和晶向，称为滑移面和滑移方向。一个滑移面和其上的一个滑移方向合称为一个滑移系。表1.1-1是纯金属中常见的三种金属晶格在一般情况下的滑移系。

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，塑性越好。进一步分析认为，滑移方向对金属塑性变形能力的作用要比滑移面的作用更大些。面心立方晶格有3个滑移方向，而体心立方晶格只有2个，这可能就是面心立方晶格金属塑性较好的原因。但是这里必须指出，影响金属塑性变形能力的因素是多方面的，如变形温度、应力状态、晶粒大小等，都对金属塑性变形能力有很大的影响。因此，只能说在其它条件都基本相同的条件下，滑移系是决定金属塑性变形能力的主要因素。

(3) 滑移时晶体的转动与旋转 单晶体在滑移变形时，除了两部分晶体的相对滑移外，还有晶体的转动和旋转发生。

1) 转动。图1.1-12为单晶体在拉伸和压缩时晶体的转动。当受拉时，如图1.1-12a，滑移面朝着与外力平行的方向转动。可以看出，如果滑移后滑移面不转动，将会使试样两端的力 F - F 不处于一条直线上，结果产生一个力偶而使滑移面转动。

2) 旋转。滑移变形时，滑移面上的滑移方向力图转向最大切应力方向，旋转的结果使滑移方向与滑移面的夹角减小。由此可看出，在外力一定的条件下，滑移面与外力成 45° 角，并且当滑移方向与滑移面上的最大切应力方向一致时，滑移方向上的切应力达到最大值，因

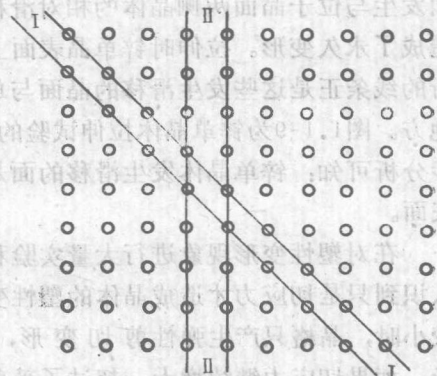


图1.1-11 滑移面示意图

此在此位向最容易滑移。这种位向称为软位向。反之，离这种位向越远（偏离 45° 的位置，滑移方向的夹角增大），则作用于滑移方向上的切应力越小。这种情况称为硬位向。

表1.1-1 三种常见金属晶格的滑移系

晶 格 类 型	体 心 立 方	面 心 立 方	密 排 六 方
滑移面	6	4	1
滑移方向	2	3	3
主要滑移数目	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$

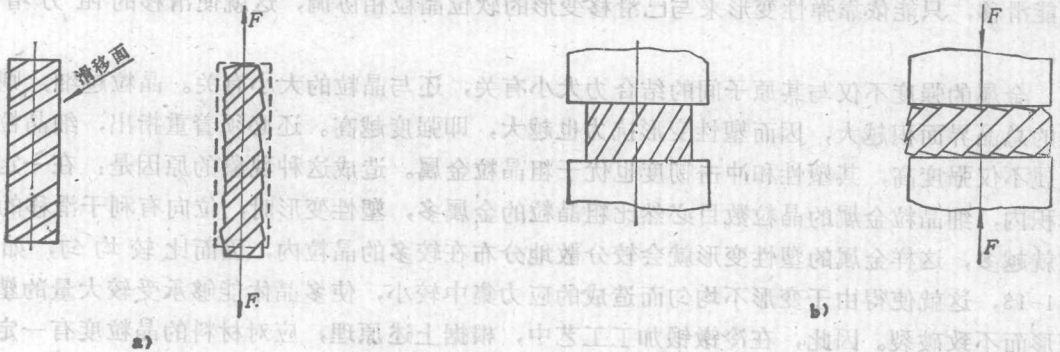


图1.1-12 单晶体滑移时的转动

a) 拉伸 b) 压缩

(4) 滑移塑性变形的特点 由上述的讨论，可以归纳滑移塑性变形有以下几个特点：

1) 滑移变形是在晶体中的某些晶面受到临界切应力的作用时发生的，沿此晶面两部分晶体产生相对移动，移动的距离是原子间的整数倍。相对滑移后的两部分晶体仍保持结晶方位的一致性。

2) 滑移变形总是沿着一定的晶面和晶向，即原子密度最大的晶面和晶向进行的。

3) 在滑移变形的同时，产生滑移面的转动（转向与拉伸力平行的方位）与旋转（滑移方向逐渐接近切应力方向）。

2. 多晶体金属的塑性变形 机械工业中使用的金属材料几乎都是多晶体。对于多晶体，就其中每个晶粒范围内的变形来说，基本上与单晶体的变形情况相似。但是，由于在多晶体中各个晶粒的晶格位向不同，并且有晶界存在，使得各个晶粒的塑性变形互相受到阻碍与制约。因此，就多晶体整体的塑性变形来说，要比单晶体的情况复杂得多，且变形抗力也高得多。

多晶体塑性变形的情况复杂，主要是晶格发生了畸变，在一个具有一定宽度的地带便是一个应力集中区，即形成了位错。位错就是在晶体中某处有一列或若干列原子，发生了某种有规律的错排现象。

位错在晶体中的存在及其密度的变化，对金属的性能，如强度、塑性、疲劳、蠕变以及原子扩散、相变等许多结构转化，都将起着重要的影响。因此，位错理论是研究晶体塑性变形的有效方法（位错理论这里不作介绍，将在金属材料与热处理基础课专门介绍）。

实验证明,在常温下晶界对塑性变形有较大的阻碍作用。晶界的这种特征,主要是由晶界处的结构特点所决定的。众所周知,晶界是相邻晶粒的过渡层,这里的原子排列比较紊乱并常有杂质聚集。当滑移变形时,位错移动到晶界附近,便会受到严重阻碍而停止前进,因而使位错在晶界前积累起来。若要使位错穿过晶界,则需要很大的外力。相邻晶粒的位向差越大。晶界处的原子排列越紊乱,滑移抗力就越大。多晶体的晶粒越细,则晶界越多,而塑性变形抗力也就越大。

在多晶体金属中,由于各个晶粒的位向不同,当受外力作用时,有的晶粒处于软位向,有的则处于硬位向。当某一处于软位向的晶粒要发生滑移时,必然要受到在它周围的与其位向不同的其它晶粒的影响和阻碍,因为它周围的晶粒一般均处于相对的较硬位向,此时还不能滑移,只能依靠弹性变形来与已滑移变形的软位晶粒相协调,这就使滑移的阻力增加了。

金属的强度不仅与其原子间的结合力大小有关,还与晶粒的大小有关。晶粒越细,则金属的总晶界面积越大,因而塑性变形抗力也越大,即强度越高。还必须着重指出,细晶粒的金属不仅强度高,其塑性和冲击韧度也优于粗晶粒金属。造成这种现象的原因是:在一定的体积内,细晶粒金属的晶粒数目必然比粗晶粒的金属多,塑性变形时,位向有利于滑移的晶粒就越多,这样金属的塑性变形就会较分散地分布在较多的晶粒内,因而比较均匀,如图1.1-13,这就使得由于变形不均匀而造成的应力集中较小,使多晶体能够承受较大量的塑性变形而不致破裂。因此,在冷锻锻加工工艺中,根据上述原理,应对材料的晶粒度有一定的要求。

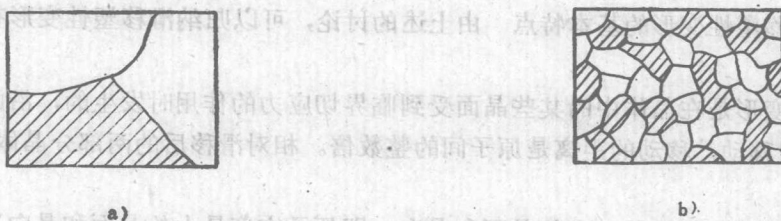


图1.1-13 晶粒大小对变形均匀性影响的示意图(假定有影线的晶粒是可以滑移)

a) 粗晶粒 b) 细晶粒

第三节 金属塑性变形的基本定律和变形力简单计算

一、金属塑性变形的的基本定律

在冷挤压、冷锻、热锻锻加工工艺中,最广泛应用的塑性变形基本定律是:体积不变定律和最小阻力定律。

1. 体积不变定律 在冷锻加工时,变形前的金属坯料等于变形后的工件的体积,称为体积不变定律。

当金属材料进入塑性变形时,只要材料内部不出现空洞,如缩孔、疏松现象,则其在变形过程中的体积和密度就是不变的。

实际上,由精密测量的结果表明,对于某些情况塑性变形有缩小体积的现象,其原因是由于金属内部的空洞、疏松和缩孔的消失所致。另外,有时还有增加体积的现象,其原因是由于晶体间及晶内发生了破坏所致。但是这些变化都是非常有限的,可以忽略不计。所以,我们在确定冷锻工件坯料时,一般是按体积不变定律的原则来计算的。

2. 最小阻力定律 当金属在外力作用下,发生塑性变形时,金属的晶粒会向各个不同方向流动,但总是沿着阻力最小的方向流动。称为最小阻力定律。

金属材料在冷锻或热锻加工时,只要掌握了最小阻力定律,就能得出金属在塑性变形状态下流动的普遍规律。例如,将一个圆柱体金属进行冷锻压扁试验,得到的是一个鼓形体,如图1.1-14所示。由图可见,金属圆柱体在自由锻锻时,由于圆柱体的两端和模具接触面产生了摩擦阻力,而圆柱体中间由于无模具接触,因此,圆柱体的两端部分金属流动比中间部分困难,圆柱体中间部分的阻力很小,金属晶粒可以较自由移动,接近模具两端的金属圆柱体部分,由于受两端面摩擦阻力的层层牵制,塑性变形的金属晶粒移动受到不同程度影响,所以在自由锻锻时形成了鼓形。

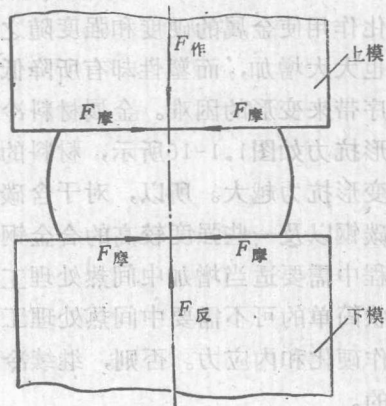


图1.1-14 圆柱体金属自由锻锻形状

从锻粗实验还可发现金属塑性变形时的另一个规律。金属塑性变形时,其晶粒总是以最短路线移动的,即由动点到周界的垂直方向移动。从图1.1-15的正方形金属锻粗可见,金属晶粒向着各边的垂直方向移动。如果在正方形的横截面上划出两条对角线,则金属晶粒将沿着箭头方向移动。而且越接近四边中点晶粒移动量越多。因此,在锻粗后,正方形金属的四边向外弯曲,形成了近似圆形。

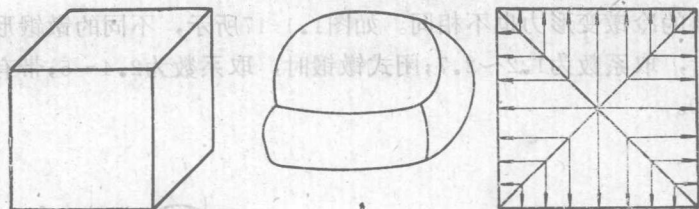


图1.1-15 锻粗正方形钢坯时金属晶粒移动方向

上述两个定律是冷锻、冷挤压、温(热)锻锻的理论基础。例如,在锻锻工艺中按体积不变定律计算零件的坯料体积。为了使零件的几何形状达到理想要求,应

符合最小阻力定律。这些是锻锻模具设计时必须考虑的问题之一。

二、变形力的简单计算

冷锻加工与冷锻变形力有着密切的关系。冷锻变形力是确定工艺参数、模具设计、机床设计和选择机床的重要依据。在正常生产中,一般情况下不需要经常进行变形力的计算,但是对于非标零件与几何形状复杂零件加工时,为便于合理地选用机床、设计工艺和模具等,必要时需要进行变形力计算,所以必须掌握变形力的计算方法。

1. 冷锻变形力的影响因素 冷锻变形力是根据锻锻金属的性质、变形度、锻锻体的形状、摩擦及其它一些因素决定的。所以,在计算变形力之前,还需要了解上述因素对变形力的影响。

(1) 力学性能对变形力的影响 强度和硬度较高的材料发生变形时, 所需要的变形力比较大, 变形力与材料的强度成正比。

目前已经能够采用冷镦的方法加工一些强度比较高的钢材, 如40Cr、30CrMnSi、40CrNiMo及不锈钢等合金钢材料, 最大的抗拉强度为1100MPa, 这使得冷镦工艺的加工范围有了很大发展。

(2) 变形程度对变形力的影响 在塑性变形过程中, 随着变形程度的增大, 由于冷作硬化作用使金属的硬度和强度随之增大, 变形抗力也大大增加, 而塑性却有所降低, 这将给后道工序带来变形的困难。金属材料冷作硬化后实际变形抗力如图1.1-16所示, 材料的含碳量越高, 其变形抗力越大。所以, 对于含碳量大于0.5%的碳钢以及一些强度较高的合金钢, 在冷镦加工过程中需要适当增加中间热处理工序(零件几何形状简单的可不需要中间热处理工序), 以消除冷作硬化和内应力。否则, 继续冷镦加工将是困难的。

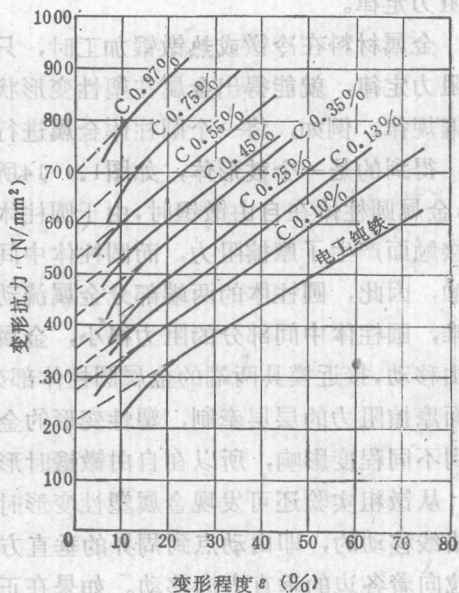


图1.1-16 金属材料冷作硬化后的实际变形抗力图

(3) 零件形状和模具形状对冷镦力的影响 由于零件与模具之间存在着摩擦, 在冲模和凹模间受压力作用而变形的坯料, 其塑性变形是不均匀的。工件坯料在变形时, 摩擦力会阻止金属流动, 因而在不同的部位金属的流动是不同的。特别是在棱角和边缘部位变形困难而缓慢。

所以, 当坯料在模具内受控制的情况不同时, 所需要的冷镦变形力也不相同。如图1.1-17所示, 不同的镦锻形式, 镦锻系数 K 不同。开式镦粗时, 取系数为1.2~2.7; 闭式镦锻时, 取系数为2.4~5; 带有反挤压的镦锻时, 取系数为4~9。

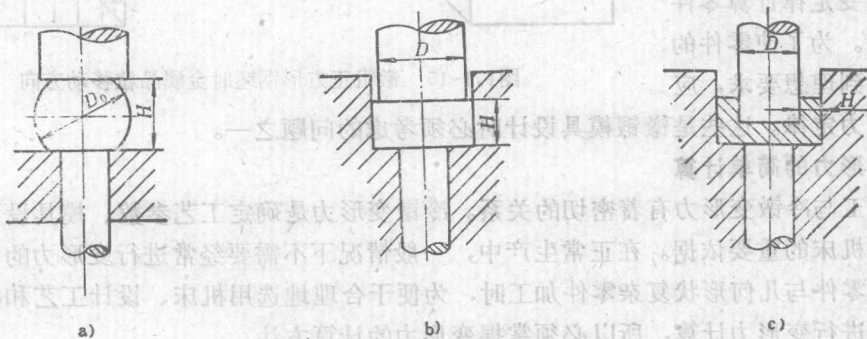


图1.1-17 根据不同的头部形状决定冷镦变形力系数 K

a) 开式镦锻(自由镦锻) b) 闭式镦锻 c) 反挤压镦锻

2. 冷锻变形力的计算方法 这里介绍一个经验公式, 此公式计算比较方便。

$$F = K\sigma_r A$$

式中 F ——冷锻变形力 (MPa);

K ——锻锻头部的形状系数, 一般螺钉、螺栓取2~2.4;

σ_r ——考虑到冷作硬化后的变形抗力;

$$\sigma_r = \sigma_b \ln \frac{A}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

σ_b ——金属材料的强度极限 (MPa);

A ——锻锻后头部的最大投影面积 (mm^2);

A_0 ——锻锻前坯料的断面积 (mm^2)。

第四节 金属的再结晶

金属在塑性变形时, 会发生加工硬化、强度、硬度升高而塑性降低。在冷变形加工之后, 为了恢复其塑性 (或其它性能), 一般需要进行退火。有时在冷变形加工过程中为了便于继续加工也需要进行中间退火。退火会使其性能朝着冷加工以前的方向转化, 即硬度、强度降低而塑性升高。

显然, 这种性能的变化是由内部组织结构的变化决定的。塑性变形使晶格畸变程度增大, 这使得变形金属的自由能升高而处于不稳定状态, 因此便有一种向冷变形前的稳定状态转化的自发趋势。但是, 在常温下, 由于金属中的原子扩散能力很小, 使冷变形金属的不稳定状态能够维持相当长的时间而不致于发生明显的变化, 即处于介稳状态 (在一定的条件下, 不稳定状态能够长时间地保持下来的情况, 称为介稳定状态)。如将冷变形金属加热到较高的温度, 使其原子具有一定的扩散能力, 就会发生一系列的组织和性能变化。随着加热温度的升高, 这个变化可经过下列三个阶段: 即回复——再结晶——晶粒长大 (也称聚集再结晶)。其变化过程如图1.1-18所示。

一、回复

当加热温度不太高时 (低于最低再结晶温度), 原子扩散能力较低, 这时从显微组织上看不到任何变化。但是可以观察到力学性能和物理、化学性能部分地恢复到变形前的情况。如强度、硬度稍有下降, 塑性略有升高, 而电阻和内应力则显著降低。应力腐蚀现象可基本消除。

造成回复阶段性能变化的原因, 在于冷变形金属的晶体结构因原子扩散而发生了某些变化。在回复过程中, 通过原子作短距离的扩散, 可使某些晶体缺陷互相抵消而使缺陷数量减少, 使晶格畸变程度减轻 (如某些异号位错的互相抵消等)。X射线结构分析及对位错露头的微观分析还证明, 冷变形时沿滑移面水平堆积的位错, 在回复阶段可通过原子扩散而在垂直于滑移面的方向上移动, 从而使位错在垂直方向排列成位错壁, 即小角度晶界 (亚晶界), 这个过程称为多边形化。因为这时晶体被位错壁分割为许多位向相差不大的原子排列基本上

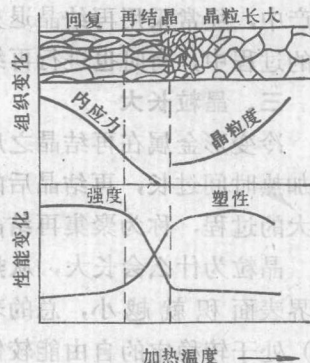


图1.1-18 加工硬化的金属在加热时组织和性能的变化