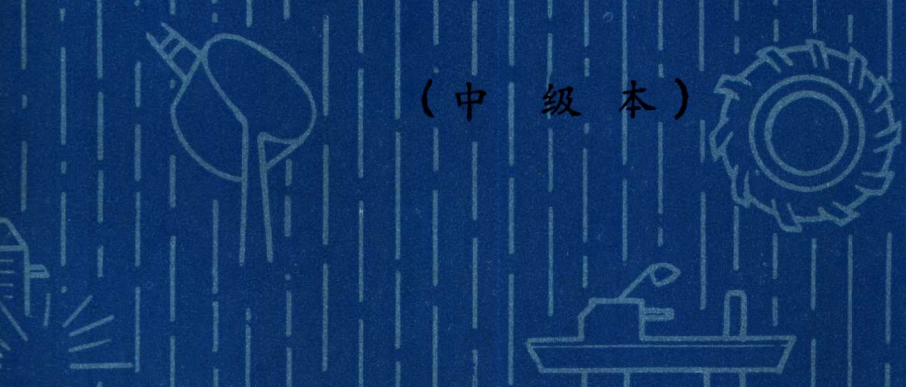




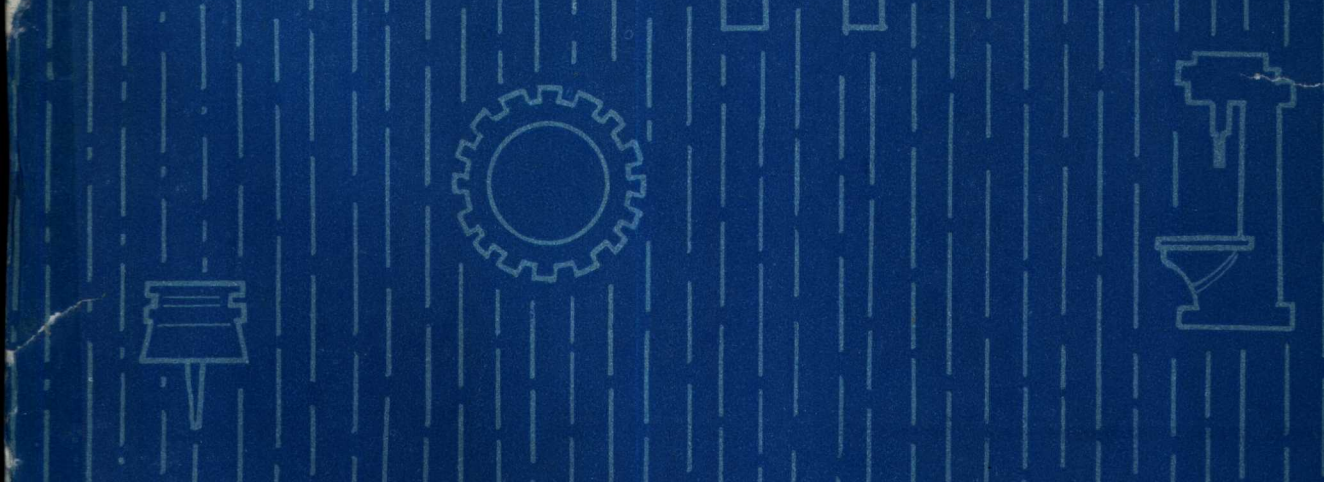
中华人民共和国机械工业部统编

机械工人技术培训教材

模锻工工艺学



(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

模 锻 工 工 艺 学

(中 级 本)

科 学 普 及 出 版 社

本书是中华人民共和国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》和教学大纲而编写的。主要内容包
括：金属塑性变形基本原理、模锻和切边设备、模锻用金属材料及备料、
金属材料的加热及加热设备、模型锻造的工艺及模具设计（锤上模锻、热
模锻压力机上模锻、平锻机上模锻、摩擦压力机上模锻）、特种模锻、锻
件的切边、校正、精压、冷却、热处理、清理、检验、模锻安全技术等。

本书是4～6级模锻工技术培训教材，也可供有关技术人员和工人参
考。

本书由卢文秀、林道孚、陈渝生同志编写；由谢懿、曾稚存、张有明
同志审稿。

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

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
北京怀柔平义分印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24¹/₂ 字数：584千字

1984年5月第1版 1984年5月第1次印刷

印数：1—36,000册 定价：2.70元

统一书号：15051·1100 本社书号：0769

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**
一九八二年元月

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

一九八一年十二月

目 录

绪 论	1
第一章 金属塑性变形基本原理	4
第一节 金属的晶体结构	4
第二节 金属的结晶	8
第三节 合金的相结构与钢的组织	10
第四节 金属塑性变形的基本原理	13
第五节 金属塑性变形的的基本定律	21
第六节 影响变形金属流动的因素	24
第七节 金属的加工硬化和软化过程	26
第八节 金属塑性变形的分类	30
第九节 影响金属塑性的因素及提高塑性的措施	32
第十节 热变形对金属组织与性能的影响	35
第二章 模锻和切边设备	40
第一节 设备发展概况及分类	40
第二节 蒸汽——空气模锻锤	42
第三节 热模锻压力机	56
第四节 平锻机	67
第五节 摩擦压力机	77
第六节 其他模锻设备简介	84
第七节 切边设备	97
第八节 模锻设备的维护保养方法	103
第三章 模锻用金属材料及准备	105
第一节 钢的分类、成分和性能	105
第二节 钢材的种类及常见缺陷	113
第三节 模锻用有色金属及其合金	118
第四节 材料计算	124
第五节 模锻用金属材料的准备	131
第四章 金属材料的加热	140
第一节 概述	140
第二节 燃料及其燃烧	142
第三节 加热对钢的组织 and 性能的影响	150
第四节 金属加热时产生的缺陷和防止方法	158
第五节 钢的锻造温度范围	164
第六节 钢的加热规范	168
第七节 锻造加热炉	172

第八节	锻造加热技术的改进	193
第九节	几种特殊的加热方法	205
第十节	加热温度的测定	212
第五章	模型锻造	218
第一节	锤上模锻工艺及模具设计	218
第二节	热模锻压力机模锻工艺及模具设计	269
第三节	平锻机上模锻工艺及模具设计	284
第四节	摩擦压力机模锻工艺及模具设计	315
第五节	模锻件的锻后工序	332
第六节	锻模材料和模具制造、检验、维修以及使用寿命	344
第七节	模锻件缺陷及修正方法	354
第八节	模锻工艺规程的编制	356
第六章	特种模锻	359
第一节	精密模锻	359
第二节	高速锤锻造	361
第三节	挤压	363
第四节	辊锻	366
第五节	环形件辗压	369
第六节	斜轧和横轧	370
第七节	径向锻造	371
第八节	多向模锻	373
第九节	摆动辗压	374
第十节	液态模锻	375
第七章	模锻安全技术	376
第一节	模锻车间的安全技术	376
第二节	模锻车间安全事故分析	379
第三节	模锻车间的安全操作规则	380

绪 论

一、模锻的特点、分类及在工业生产中的作用

(一) 概述

模锻是模型锻造的简称。模锻就是把加热后的金属毛坯，放入固定于模锻设备上的锻模内，施加压力，迫使金属毛坯沿模壁流动，直至充满模槽，从而得到所要求的形状和尺寸的模锻件。这种锻造方法称为模锻。它是属于压力加工方法中的一种，也是在现代金属加工工业中，制造机械零件和金属制件的先进方法之一。

(二) 模锻的特点

模锻与自由锻或胎模锻相比，具有以下优点：①可进行成批、大量生产，生产效率高；②锻件尺寸精度比自由锻件高，当采用精密模锻等特种模锻方法时，能获得较好的精度和光洁度，甚至不需要再进行机加工。这样就能大量地节约金属材料 and 机加工工时；③用模锻成形时能获得较理想的金属流线和致密的组织，从而提高零件的机械性能，延长零件的使用寿命；④模锻生产易于实现工艺过程的机械化和自动化，操作简单，劳动强度比自由锻和胎模锻低。

(三) 模锻生产的分类

模锻按使用的模锻设备可以分为六类。

1. **锤上模锻** 它包括有砧座锤上模锻和无砧座锤上模锻。有砧座锤上模锻适用于生产成批、大量的中小型模锻件。无砧座锤上模锻适用于大、中、小型模锻件的单模槽模锻。若进行多工步模锻时，则需要配备专门的制坯设备。

2. **热模锻压力机上模锻** 它适用于大中批的中小型模锻件生产。

3. **平锻机上模锻** 它适用于大批大量生产中小型带法兰的杆件和带孔的锻件。

4. **摩擦压力机上模锻** 它适用于大、中批中小型模锻件的生产，一般是单模槽模锻，同时也可进行精密模锻。

5. **其它设备上特种模锻** 它包括：高速锤上精密模锻；冷挤压机和液压机上挤压；辊锻机上辊锻；扩孔机上扩孔；特种轧制（横轧、斜轧）；精锻机上进行径向锻造；多向模锻水压机上模锻；摆动辗压等。

6. **联合模锻** 对于某些锻件需要采用联合模锻的方法。如在辊锻机上制坯后，再在热模锻压力机上终锻；在平锻机上制坯后，再在热模锻压力机上终锻；采用在两台相同类型设备上联合模锻，如在10吨锤上制坯后，再在16吨锤上终锻等。

按锻件成形特点，模锻也可分为以下二类。

1. **开式模锻** 它是带毛边的模锻，模锻后要进行切边工序。

2. **闭式模锻** 它是不带毛边的模锻，模锻后只需打磨毛刺。

（四）模锻在工业生产中的地位和作用

模锻生产在航空工业、国防工业、电力工业、汽车、拖拉机工业、交通运输及日常生活中具有重要作用。例如，按重量计算，锻压件在飞机制造中占85%，坦克制造中占70%，电机制造占60~70%，汽车制造中占80%，机车制造中占60%等。在上述锻压件中，模锻件又占相当大的比重，这就足以说明模锻生产在机械制造业中的重要地位和作用。

二、模锻工艺流程及模锻车间生产概况

（一）模锻生产的工艺流程

模锻件的生产过程，一般包括以下工序：①切断钢材（或钢坯）至一定尺寸；②加热坯料；③模锻；④切边；⑤热校正；⑥锻件冷却；⑦打磨毛刺；⑧锻件热处理；⑨清理锻件的氧化皮；⑩冷校正（或精压）；⑪检验等。

对于重要零件（曲轴、连杆、活塞、叶片、涡轮盘等），由于使用上的特殊技术条件要求，锻件尚需进行金相的低倍或高倍及机械性能试验等。

上述工艺过程，并非所有模锻件都必须全部采用，除①~④以及⑪为任何模锻过程所不可缺少的环节外，其余工序的采用，则应按锻件的具体要求而定。

（二）模锻车间生产过程的概况

模锻车间按模锻的生产工艺流程，一般分为四个工部（或工段）。

1.制坯工部 它包括工序①的下料和制坯，对于形状简单的锻件只需按规格尺寸切断原材料，然而对于形状复杂、截面变化大的大型模锻件（多为航空锻件），需要在自由锻锤上打荒（即用自由锻锤锻出接近于模锻件外形的荒坯称为打荒），打荒工序也应在此工部完成。

2.模锻工部 它包括工序②、③。通过这两道工序直接改变原坯料的形状，以得到所要求的形状、尺寸的模锻件；同时还包括④、⑤、⑥、⑩各工序，这些工序对锻件不会有多大变形，只是在基本工序不能达到要求的形状、尺寸时，才借助这些工序来进一步达到。

3.热处理、清理工部 它包括工序⑦、⑧、⑨通常由模锻工步将锻件转入本工部进行热处理、清理与精整锻件。目的在于清除模锻后的缺陷（折叠、裂纹、毛刺等）和热处理后的氧化皮。

4.检验工部 即工序⑪，质量检查部门对成品锻件进行技术检验，清除不合格的锻件或废品。

三、模锻生产发展概况

我国的锻造技术，虽然已有三千多年的历史，但在解放前，由于长期的封建统治和帝国主义的剥削掠夺，工业生产十分落后，模锻技术更是如此。当时只有少数军工厂有简单的夹板锤、皮带落锤，采用单模槽模锻，工艺落后，设备陈旧，而且劳动条件也很差。

解放后，随着国民经济的恢复和发展，模锻生产也相应地发展起来。全国许多工厂都建立或改建了模锻车间，装配了较先进的模锻设备和加热设备，采用了部分机械操作来代替繁重的人工体力劳动，建立了模锻生产自动线，从而改善了工人的劳动条件。

但是,随着社会主义建设的不断发展,特别是汽车、拖拉机、电站设备、造船、重型机械、兵器、航空以及原子能和航天技术的发展,对模锻生产提出了更高的要求,因而模锻技术必将获得进一步的发展。

为了适应现代化大生产的要求,在机加工中应该逐步提高模锻件的比重,大力推广少、无切削加工的新工艺,使锻件的形状和尺寸更接近于成品,逐步提高机械化和自动化的水平。

为了节约能源,改善劳动条件,应当改造现有的模锻设备,发展高能量、高效率、高精度、无震动、低噪音的模锻设备,发展燃煤、煤气、油、天然气、电加热等方面的先进技术。

为了满足特大模锻件的需要,应该研究新的成形方法和新技术。

为了提高模锻件的质量、降低生产成本,应该改进生产管理,走专业化的道路,节约原材料,研究提高模具寿命的方法和途径。

第一章 金属塑性变形基本原理

在机械零件制造过程中,广泛采用锻造、冲压、挤压等压力加工工艺。热模锻是其中常见的一种。它利用模具使金属材料产生塑性变形而达到预期的目的。它不仅使金属成形,得到一定几何形状和尺寸的模锻件,而且改善金属材料的组织、提高金属的机械性能,从而达到提高劳动生产率、节约原材料、减轻机械的重量、增加零件负荷能力、延长使用寿命的目的。由于热模锻具有上述优点,因此愈来愈广泛地应用于各类零件的生产。

为了达到上述要求,就要了解金属塑性变形的基本原理、了解塑性变形对金属组织和性能的影响,使工艺制定和生产操作都能合乎塑性变形的客观规律,并且具有先进性,从而保证模锻件全面质量的不断提高。

第一节 金属的晶体结构

铁、铝、铜、镍、铬、钨、银等是常见的金属元素。由单一的金属元素组成的金属称为纯金属。但工业上所用的金属材料绝大多数是合金。金属和合金的性能主要决定于它内部的组织结构。也就是说,不同化学成分的金属材料,具有不同的组织结构,因而也具有不同的性能。但是,同一化学成分的金属材料,采用不同的加工方法(包括不同条件下的塑性变形和热处理),可以改变其内部的组织状态,从而也改变了它的性能。因此,了解金属材料的内部组织结构及其变化规律,对于合理地选用金属材料、正确地制定加工方法,具有十分重要的意义。

一、晶体与非晶体

一切物质,都是由原子构成的。根据原子在物质内部的排列情况,固态物质分为晶体和非晶体两大类。凡是原子在物质内部作有规律、有秩序排列的物质,称为晶体。绝大多数固态金属是晶体(现已有非晶体金属,如 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{40}$)。凡是原子在物质内部处于杂乱无章状态的物质,称为非晶体,如普通玻璃、松香、赛璐珞和白蜡等物质。由于原子结构上的本质区别,晶体和非晶体具有明显不同的特性。晶体一般都具有规则的外形,一定的熔点和各向异性;非晶体则与其相反,它没有固定的熔点并呈各向同性。

(一) 晶格与晶胞

金属和合金中原子规则排列的方式是多种多样的。通常多用空间几何图形来描述晶体中原子的规则排列方式。图1-1(a)是晶体中原子在空间作有规则排列的简单模型,为了形象地认识这种排列方式,人为地将原子看作一个点,再用假想的线条把各点连结起来,这样就把原子排列模型变成图1-1(b)所示的空间几何图形。描述晶体中原子排列方式的空间几何图形称为结晶格子或结晶点阵,简称晶格或点阵。

晶格中原子的排列具有周期性的特点。通常把完全能反映晶格特征的、构成晶格的基

本单元体称为晶胞，见图1-1(c)。整个晶格实际上就是由无数大小、形状和方向相同的晶胞在空间重复排列而成的。

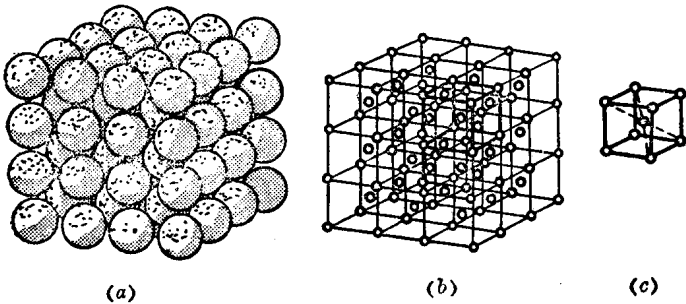


图 1-1 晶体中原子排列形式示意图
(a)原子排列模型，(b)结晶格子，(c)晶胞

(二) 晶面和晶向

晶格中各个方位上的原子层，也就是通过若干原子中心所组成的平面，称为晶面。如图1-2中平面 $ABCO$ 和平面 $ABDE$ 就是两个方位不同的晶面。晶格中某一原子中心到另一原子中心的指向，称为晶向，如图1-2中的 Oa 、 Ob 及 Oc ，即为三个指向不同的晶向。

比较图1-2中的各个晶面和晶向，可以看出，在晶体中不同晶面和晶向上，原子分布的情况是不同的。有的晶面或晶向上原子排列得比较紧密，相邻原子间的距离较近；有的则排列得比较稀疏，原子间距也较远。因此，同一晶体的不同晶面和晶向上，它的物理、化学和机械性能会出现明显的差别，这就是上面说到的晶体呈各向异性的原因。

(三) 常见的晶格类型

金属和合金的晶格结构有许多类型，常见的有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种基本类型，见图1-3。

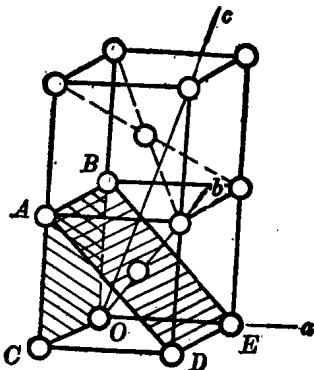


图 1-2 晶格中的晶面和晶向

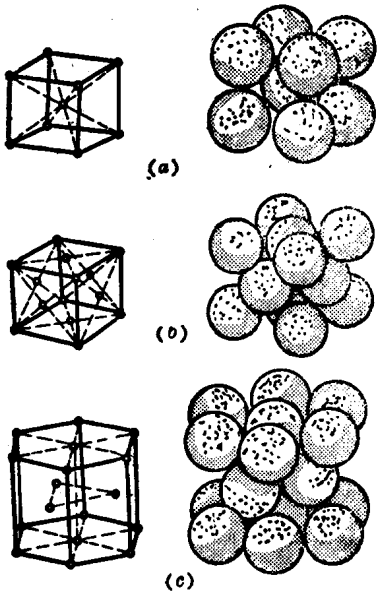


图 1-3 金属晶格的基本类型
(a)体心立方晶格，(b)面心立方晶格，(c)密排六方晶格

二、单晶体与多晶体

(一) 晶粒与晶界

用肉眼观察脆性金属（如生铁）的断口，可以看到明暗程度不同的闪光的小颗粒；在工业纯铁或低碳钢的断口上却看不出这种特征的小颗粒。但断口经过磨光浸蚀后，放在金相显微镜下观察，便可以看到明暗程度不同的小颗粒。这些小颗粒的外形呈不规则的多边形，见图1-4。晶体内的这些小颗粒称为晶粒。晶粒之间的交界面称为晶界。

金属材料的断口经加工、磨光和浸蚀后，在金相显微镜中所显示出来的晶粒结构，通常称为金相组织或显微组织。

(二) 单晶体

由一个晶粒构成的晶体称为单晶体。单晶体的晶格是整齐划一的，因为构成晶格的晶胞是按相同的方位排列起来的，见图1-5。

各向异性是单晶体的特征。例如，用人工方法制取的体心立方晶格的铁单晶体，在晶格棱边方向上的弹性模量为13500公斤力/毫米²，而在立方体对角线方向上的弹性模量则为29000公斤力/毫米²；单晶体的铜在不同方向上拉断时，所测得抗拉强度在14~35公斤力/毫米²之间。这就是因为各个晶面和晶向上，原子间的距离有远近之分，导致原子间的结合力有强弱的缘故。

(三) 多晶体

由许许多多的晶粒构成的晶体称为多晶体。在多晶体内，各晶粒的晶格位向互不相同（如图1-6所示），也就是说，原子排列最紧密的晶面或原子间距最小的晶向，在各个晶粒中所处的方向是任意的、各不相同的。因此，单晶体的各向异性而在多晶体中恰好互相抵消，呈现出各向同性，也称为假无向性。例如，多晶体铁的弹性模量约为21000公斤力/毫米²；多晶体铜的抗拉强度约为24公斤力/毫米²，分别为单晶体铁各个方向上的弹性模量和单晶体铜各个方向上的抗拉强度的平均值。

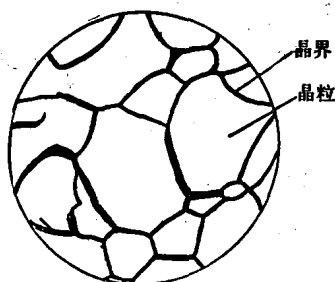


图 1-4 纯铁的晶粒和晶界

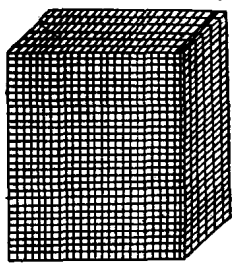


图 1-5 单晶体示意图

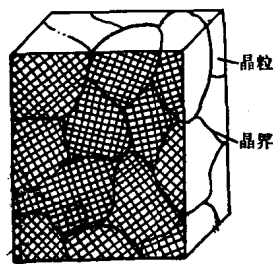


图1-6 多晶体示意图

三、实际金属的晶体结构

在金属晶体结构中，认为每个结点上都占有一个原子，这乃是理想的晶体结构。实验已经证实，原子在晶格中的规则排列并不是完整无缺的，而是存在各种缺陷，即所谓晶体缺陷。晶体缺陷对金属材料的机械性能和物理、化学性能都有显著的影响。根据晶体缺陷的几何特点，通常分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种。

(一) 点缺陷——空位和间隙原子

在晶体中,原子是在以晶格结点为中心的平衡位置振动着的,如果由于某种原因,原子获得足够大的振动能量,离开正常的平衡位置,而跑到结点之间的不平衡位置,原先的结点成了“空位”,进入结点之间的原子则称为“脱位原子”或“间隙原子”。这类的晶体缺陷称为点缺陷,见图1-7。无论形成空位或间隙原子,都使它们附近原子间的作用力失去平衡,晶格结构的规则性遭到破坏,从而导致晶格发生歪曲畸变。

(二) 线缺陷——位错

晶体中某处有一列或若干列原子,发生某种有规律的错排现象,称为位错。因为位错是晶体中某一平面上呈线状分布的缺陷,所以又称为线缺陷。位错有两种基本形式:刃型位错和螺型位错。图1-8为刃型位错的示意图,晶面 $ABCD$ 上下两部分的原子排列数目不一样,上部比下部多一层垂直方向的原子面 $EFGH$ (亦可视为半晶面),它宛如刀刃一样,故称刃型位错。刃型位错分为正负两种:当多余的半晶面位于晶体上方时,称为正号刃型位错,在示意图中以符号“ $\perp$ ”表示;当多余的半晶面位于晶体下方时,称为负号刃型位错,在示意图中以符号“ $\neg$ ”表示,见图1-9。在实际晶体中,这两种符号相反的位错常常是同时存在的,当晶体受力使它们发生位移至相遇时,便可彼此抵消,所以晶体中的位错数目(或称密度)将随着许多外界条件的变化而经常发生变化。位错在晶体中的存在和变化,对金属的内部结构的转变以及性能都将发生重要的影响。

位错是现代关于金属塑性变形和强度理论的基础。

(三) 面缺陷——晶界和嵌镶块边界

实际金属的晶界是一种重要的晶体缺陷。晶界上的原子排列和晶粒内不同,原子因同时受到相邻晶粒晶格位向不同的综合影响,排列是不规则的,呈现不同程度的晶格畸变,并常有杂质存在。故晶界在许多性能上显示出一定的特点。例如,晶界抗腐蚀性比晶粒内部差;晶界的熔点较晶粒内部低,等等。

在高倍的电子显微镜下可以清晰地观察到,多晶体金属的每个晶粒,实际上是由许许多多细碎的晶块拼凑组成的。这些细碎晶块的晶格方位并非完全一致,但位向差较小,一般在几十分到2度之间。这些互相嵌镶构成晶粒的位向差很小的细碎晶块,称为嵌镶块(又称为亚结构或亚晶)。两相邻嵌镶块的分界面,称为嵌镶块边界(或亚晶界)。嵌镶块内部的原子排列位向是一致的,但亚晶界的原子排列也有些不规则,晶格发生轻度的畸变,也是一种晶体缺陷。图1-10为嵌镶块示意图。

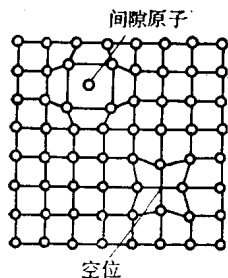


图 1-7 点缺陷示意图

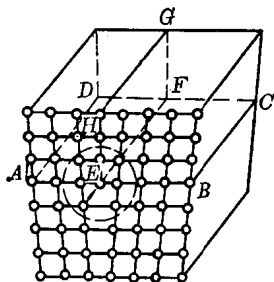


图 1-8 刃型位错的示意图

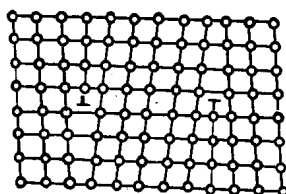


图 1-9 正号和负号刃型位错示意图

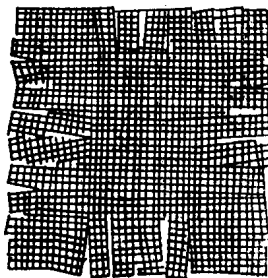


图 1-10 嵌镶块结构示意图

嵌镶块的存在及其大小对金属强度具有相当的影响,在晶粒大小一定时,嵌镶块愈细,其屈服强度也愈高。

因为晶界和亚晶界在晶体内是呈面状分布的缺陷,所以称为面缺陷。

实际金属晶体缺陷的存在及其数量的变化,是金属产生塑性变形的根据,也是金属物理、化学和机械性能发生变化的原因。

第二节 金属的结晶

一、金属的结晶过程

液态金属冷凝成固态金属的过程称为结晶。结晶的实质就是不规则排列的金属液原子过渡到规则排列而形成晶体。结晶过程对以后的压力加工和产品的组织与性能都有重要的影响。

(一) 冷却曲线

对温度均匀的液态金属进行极其缓慢的冷却时,根据温度和时间关系描绘出来的温度——时间曲线,称为冷却曲线。图1-11为纯金属的冷却曲线。

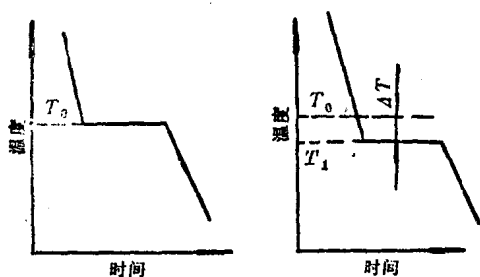


图 1-11 纯金属结晶时的冷却曲线

(a)以极缓慢的速度冷却, (b)在实际冷却条件下的冷却

冷却曲线中的水平线段(温度 T_0 时),表明金属液在此温度下开始结晶,由于在结晶过程中所放出的结晶潜热补偿了向外界散失的热量,所以温度保持不变。温度 T_0 称为该金属的理论结晶温度或平衡温度,亦即凝固点。各种金属的结晶温度是不同的,如纯铁为 1538°C ,铜为 1083°C ,铅为 327.3°C 等。

实际上冷却过程不可能是极其缓慢的,液态金属也不在 T_0 下结晶,而是在 T_1 (低于 T_0) 温度下结晶的。这种因冷却速度较快造成结晶滞后的现象,称为过冷。理论结晶温度和实际结晶温度之差,即 $T_0 - T_1 = \Delta T$,称为过冷度。冷却速度愈大,过冷度也愈大。

(二) 结晶过程

金属的结晶过程见图1-12。当金属液冷却到凝固温度时,首先在液体中产生极微小的金属晶体,并先后按晶格类型排列成细小的晶核,即生核;接着各晶核向着不同方向呈树枝状地成长,这和北方冬季室内的水汽在玻璃上冰花的形成过程很相似。当成长的树枝晶相互接触而彼此阻碍成长时,晶体就向未凝固的部分扩展,直至全部凝固,形成许多互相接触的外形不规则的晶粒为止。由此可见,液态金属的结晶,是由晶核的形成(即生核)和晶核的成长(即核长大)两个基本过程组成的。

(三) 金属锭的构造

液态金属一般都通过各种型式的专用锭模浇注成金属锭。由于金属液在冷却过程中散热条件的不同,因此在结晶后金属锭的纵剖面上,形成了晶粒外形不同、粗细不等的几个结构带,见图1-13。最外层为球形的细晶粒带,接着为具有方向性的柱状晶带,中心附近

为近球形的粗晶粒带。此外，金属锭内部往往还存在有缩孔、疏松和气孔等缺陷。

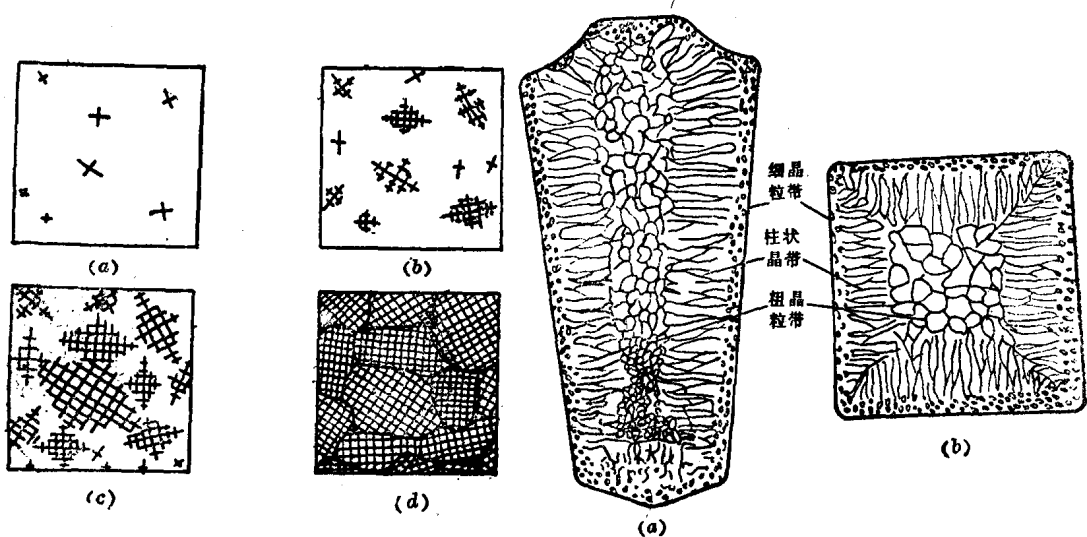


图 1-12 液体金属结晶过程示意图
(a)生核；(b)核长大；(c)核长大并互相接触；(d)形成晶粒

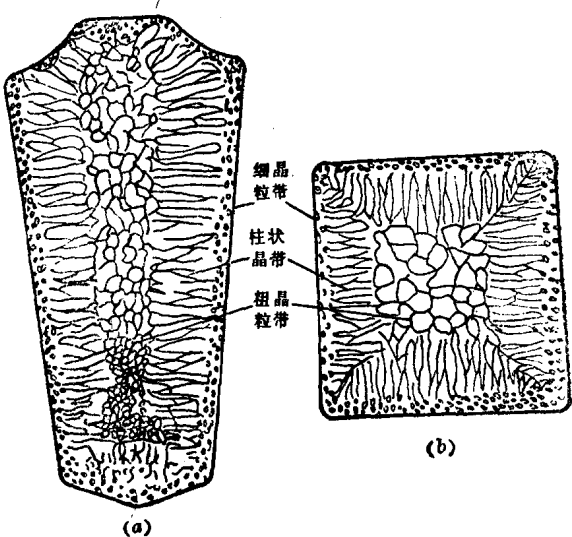


图 1-13 铸锭结晶构造示意图
(a)纵向剖面；(b)横向剖面

二、金属的同素异晶转变

大多数金属在结晶完成后，晶格类型不再发生变化。但有少数固态金属在不同温度下，具有不同的晶格结构，如铁、锡、锰、钴、钛等。一种金属元素在固态下晶格随温度而转变的现象，称为同素异晶转变。

铁的同素异晶转变在热加工中具有重要的意义。纯铁的冷却曲线见图 1-14。在曲线上的几个水平线段，对应着一种晶格转变。铁在1538℃结晶后为体心立方晶格的 δ -Fe；冷却到1394℃时，便发生同素异晶转变，即由体心立方晶格的 δ -Fe转变为面心立方的 γ -Fe，继续冷却到912℃时，又一次发生晶格类型的转变，由面心立方的 γ -Fe变为体心立方的 α -Fe。再继续冷却，晶格结构不再发生变化。

冷却曲线中770℃平台，是纯铁的磁性转变温度，亦称为居里点。温度高于770℃时，纯铁无磁性；在低于770℃时，纯铁具有铁磁性。

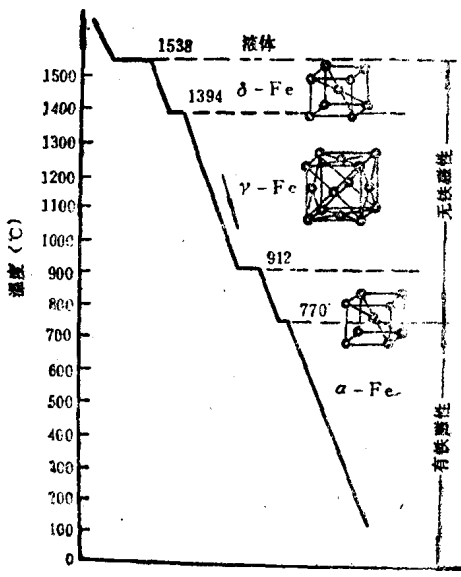


图 1-14 纯铁的冷却曲线和同素异晶转变

第三节 合金的相结构与钢的组织

一、合金的相结构

所谓纯金属只是相对而言，因为工业上应用的纯金属总是含有其它杂质的。例如，工业纯铁由于技术上的原因，仍含有磷等杂质约0.01%。

组成合金的最基本的、独立的物质，称为组元，简称元。一般情况，组元就是组成合金的元素，例如，钢是铁和碳的二元合金、黄铜是铜和锌的二元合金，硬铝则是铝、铜和镁的三元合金，等等。

合金中成分、结构以及性能相同的组成部分，称为相，亦称金相。相与相之间具有明显的界面。合金的相结构主要和组成合金的化学成分有关，此外，温度和热处理方法等也会影响相结构的变化。

合金中各组元的原子同纯金属一样，在合金内部也作有规律、有次序的排列。但合金的晶体结构与纯金属比较，要比纯金属复杂得多。同是两种组元，但相对含量不同的合金，却能得到完全不同的晶体结构。例如，铜和锌的合金，其中含锌为30%时，呈面心立方晶格；含锌48%时，呈体心立方晶格；含锌65%时，呈复杂的立方晶格。

合金的显微组织也比纯金属复杂得多。虽然同纯金属一样，由同一晶格类型的晶粒和晶界组成，但多数都是由多种晶格类型的晶粒，相互之间以不同大小、外形和分布状况，组成各种样式的显微组织。

如果把组成合金的组元，加热到熔融的液体状态，使其相互溶解为均匀溶液，经冷却凝固后，根据各组元之间的作用关系——溶解、化合或混合，可以得到以下三种结构的合金。

（一）固溶体

当一种物质以原子或分子形式溶解在另一种纯液体中时，就形成了所谓溶液，也可称作液溶体。固溶体的含意和液溶体相似，但它是在固态下，组成合金的一种组元以原子（或正离子）形式溶解在合金的另一组元中而形成固态溶体。组成固溶体的组元也有溶剂和溶质之分。以原子（或正离子）形式溶解于另一组之中，而本身晶格结构消失的组元就是溶质，溶有其它组元、而本身保持住晶格结构的组元就是溶剂。因此，溶剂的晶格结构就是固溶体的晶格结构。

根据溶质原子在溶剂晶格中分布情况，固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

1. 置换固溶体 它是指溶剂晶格上的原子被溶质原子所替代的固溶体。例如，含锌量少于39%的黄铜，就是在铜（溶剂）的面心立方晶格中有部分铜原子被锌（溶质）原子所替换（图1-15）。

在合金钢中，溶于 γ -Fe或 α -Fe的大多数合金元素，如硅、锰、铬和镍等，它们的原子都以置换铁晶格上铁原子形式溶于铁中。图1-16表示硅溶于 α -Fe的固溶体晶格结构。

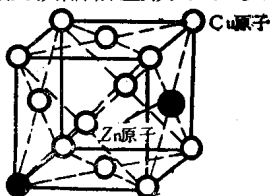


图 1-15 锌溶解于铜中的固溶体

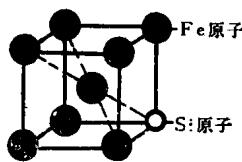


图 1-16 硅溶解于 α 铁中的固溶体