

高等学校教材

机械制造概论

许本枢 主编



16
54



机械工业出版社
China Machine Press

本书是高等院校非机械类专业学习机械制造技术的教学用书。全书共分七章,主要内容有工程材料、液态材料的成形——铸造工艺,颗粒材料的成形——粉末冶金,固态材料的质量不变工艺——锻压工艺,固态材料的连接工艺——焊接和粘接,固态材料的质量减少工艺——切削加工和特种加工以及机械制造系统等。本书以材料成形为主线,着重介绍了各种制造工艺的特点和应用,并从材料工艺形态学的角度,对各种制造工艺进行了归纳、分类。本书还以典型零件为例,对机械制造的全过程做了较详尽的描述,给读者提供了一个全新的、完整的机械制造系统观念。同时,简要介绍了机械制造业的现状及其发展趋势。

本书可作为高等院校非机械类专业用教材,也可作为职工大学短期培训教材和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造概论/许本权主编. —北京:机械工业出版社, 2000.9
高等学校教材
ISBN 7-111-08181-6

Ⅰ. 机… Ⅱ. 许… Ⅲ. 机械制造-高等学校-教材 I. 11116

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第66095号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:吴天培 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣
封面设计:方 芬 责任印制:路 琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2001年6月第1版·第2次印刷
87mm×1092mm^{1/32}·9印张·222千字
00 000册
定价:14.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话:(010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书汲取了国内外同类教科书的优点,结合多年《金工》教学和教改经验编写而成。它突破了传统《金属工艺学》的框架,充实了新的教学内容,并对其体系作了较大幅度的调整。本书将《金属工艺学》更名为《机械制造概论》,使之更加“名副其实”,并适于非机械类的教学要求。

本书共分七章,内容包括工程材料,液态材料的成形——铸造工艺,颗粒材料的成形——粉末冶金,固态材料的质量不变工艺——锻压工艺,固态材料的连接工艺——焊接和粘接,固态材料的质量减少工艺——切削加工和特种加工及机械制造系统等。

本书根据非机械类专业较多的特点,编写了部分选学内容,内容覆盖面宽,授课时应结合专业特点灵活选用。

为适应社会主义现代化建设对人才培养的要求,本书在编写时注意到以下几点:

1. 注重了基本原理、基本概念、基本方法的传授,使学生获得机械制造的基本知识,为后续课程打下扎实的基础。

2. 以材料成形为主线,介绍了各种材料成形工艺的特点及应用,同时对各种制造工艺进行了综合阐述,提供了一个全新的、完整的机械制造系统概念。

3. 紧跟科学技术进步的时代潮流,增加了新材料、新工艺、新设备、新技术的内容介绍。

4. 注重素质教育,将素质教育融入专业知识教学之中。各章编写时注意与科学技术发展史的结合,并着重介绍我国古代劳动人民取得的辉煌成就。

5. 注重培养学生的技术经济观点,使之更能适应市场经济的需要。

6. 主要专业术语加注对应的英文词汇,有利于培养适于“三个面向”的国际经济竞争人才。

本书由许本枢任主编,常春、张景德、毕见强任副主编。参加编写人员及分工是:许本枢(前言、绪论、第六章、第七章第一节);常春(第一章第一、二、三、四节、第三章);张景德(第二章第一、二节、第四章);毕见强(第五章);霍启辉(第一章第五、六节);曹庆锋(第二章第三、四节);许振宇(第七章第二、三节)。

本书由陈寿祖教授、辛有玉教授主审,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,错误及不足之处,恳请读者批评和指正。

编者

2000年3月

目 录

前言		
绪论	1	
第一章 工程材料	3	
第一节 材料发展与人类的文明	3	
第二节 工程材料的性质	5	
第三节 金属材料及钢的热处理	8	
第四节 高分子材料	19	
第五节 陶瓷材料	22	
第六节 复合材料	23	
复习思考题	24	
第二章 液态材料的成形 铸造工艺	26	
第一节 概述	26	
第二节 铸造工艺的工艺特点	28	
第三节 砂型铸造	33	
第四节 特种铸造	37	
复习思考题	41	
第三章 颗粒材料的成形 粉末冶金	42	
第一节 概述	42	
第二节 粉末冶金的特点与生产过程	43	
第三节 粉末冶金的应用	45	
复习思考题	46	
第四章 固态材料的质量不变工艺		
锻压工艺	47	
第一节 概述	47	
第二节 固态材料的质量不变工艺的特点	47	
第三节 锻造工艺	51	
第四节 板料冲压	57	
复习思考题	62	
第五章 固态材料的连接工艺 焊接和粘接		
第一节 概述	63	
第二节 固体材料连接工艺的特点	65	
第三节 焊接	66	
第四节 粘接	73	
第五节 装配	76	
第六节 连接件的结构工艺性	79	
复习思考题	81	
第六章 固态材料的质量减少工艺		
切削加工和特种加工	83	
第一节 概述	84	
第二节 切削刀具	86	
第三节 切削加工的工艺特点	88	
第四节 切削工艺	93	
第五节 特种加工	100	
复习思考题	108	
第七章 机械制造系统	110	
第一节 机械加工工艺过程	110	
第二节 机械制造自动化	126	
第三节 机械制造业的发展趋势	134	
复习思考题	139	
参考文献	140	

绪 论

机械制造概论是一门研究机械制造系统和机械制造方法的综合性技术基础课。机械制造是将设计输出的指令和信息输入机械制造系统,加工出合乎设计要求的产品的过程。机械制造科学是研究机械制造系统、机械制造过程和制造方法的科学。在机械制造过程中,通常是先用铸造、锻压或焊接等工艺方法将材料制成毛坯,再进行切削加工,然后得到所需零件。为了改善材料的工艺性能和提高零件的使用性能,还要经过热处理,最后将制成的各种零件加以装配,即成为机器。随着科学技术的迅猛发展,新材料、新技术、新工艺和新设备不断出现,使越来越多的零件的传统加工工艺发生了变化。各种先进制造技术的应用,不但简化了零件的制造过程,而且使各种传统的加工方法的界限更加模糊。

本书以材料成形为主线,着重介绍了各种制造工艺的特点和应用,并从材料工艺形态学的角度,对各种制造工艺进行了归纳、分类,见表0-1。这样更能够揭示各种制造工艺方法的实质,便于读者理解、掌握。

表0-1 各种制造工艺的基本过程

工艺类型	材料状态	基本过程	典型工艺举例
质量不变工艺	液态	流动	铸造
	颗粒	流动与塑变	粉末冶金
	固态	塑性变形	锻压
质量减少工艺	固态	塑性、脆性断裂	切削加工
		熔化和汽化	电火花加工、激光加工
		分解	电解加工
连接工艺 原子结合 粘接	固态	塑性变形	摩擦焊
	液态(焊缝)	流动	熔焊
		扩散	粘接

机械制造工业是国民经济发展的重要基础和有力支柱,在国民经济中占有十分重要的地位。近年来,计算机技术、信息技术、网络技术与机械制造技术的深度结合,使机械制造工业得到了飞速的发展。数控机床、加工中心、柔性制造系统、集成制造系统、快速原型制造技术、并行工程、敏捷制造、绿色制造等不断出现的新的先进制造技术和新的先进制造模式增强了企业的生产能力和市场适应性,迅速改变着传统制造业的面貌。目前,我国机械工业产品的生产已具有相当大的规模,形成了门类齐全、布局合理的机械制造工业体系。

本书以典型零件为例,对机械制造的全过程做了较详尽的阐述。同时,简要介绍了机械制造业的现状及其发展趋势,给读者提供了一个全新的、完整的机械制造系统概念,见图0-1。

本课程的基本要求是:

- 1) 了解工程材料的一般性质及应用范围。
- 2) 了解材料成形基本方法的基本原理、工艺特点和应用范围。
- 3) 了解零件结构工艺性的基本知识。
- 4) 了解机械制造系统的基本知识。

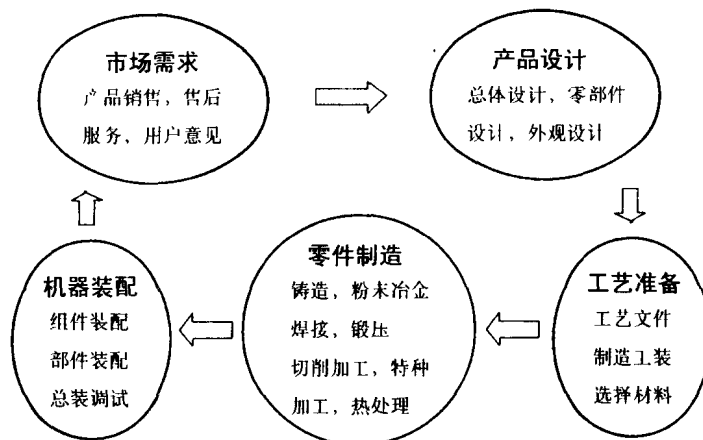


图 0-1 机械制造系统

5) 了解机械制造学科的前沿及发展趋势。

学好本课程将为后续课程的学习以及进行课程设计、毕业设计和从事技术工作打下必要的工艺基础。机械制造概论是一门实践性很强的技术基础课, 在教学过程中, 应注意与工程训练(或金工实习)密切配合, 必须在工程训练(或金工实习)获得感性认识的基础上进行课堂教学才能收到较好的教学效果。

第一章 工程材料

第一节 材料发展与人类的文明

材料是社会进步的物质基础,综观人类利用材料的历史,可以发现每一种新材料的应用,人类的科学技术都会提高到一个新的水平,每一次材料科学的重大突破,都会对社会产生巨大的影响。人类历史的发展划分为石器时代,青铜器时代,铁器时代。目前我们正处在新型材料的发展时期,各种高分子材料,先进陶瓷,纳米材料,复合材料不断涌现出来。

在石器时代,原始人利用石片作为切割刀具,使人类拥有了最初的工具。在新石器时代的仰韶文化和龙山文化时期,我们的祖先学会了制陶,但这时的烧成温度较低,制品的强度较差。在殷周时期又发明了彩陶,东汉时期开始有了瓷器。瓷器在 9 世纪开始向世界传播,瓷器的发展对人类文明有着巨大的影响。

在青铜器时代,人类采用青铜制作各种工具、器皿、兵器和装饰品,人们掌握了开矿、冶炼、铸造和锻造技术。春秋战国时期《周礼·考工记》中便有关于青铜的科学论述,当时人们已经认识到青铜的成分与性能的关系。河南安阳商代遗址出土的司母戊鼎重 875kg,尺寸为 113mm×780mm×110mm,是迄今世界上最大型的古老青铜制品。越王勾践的宝剑至今还十分锋利,可见当时青铜器制作技术的精湛。

铁器时代是人类进步的极为重要时代。我国大约从公元前 7 世纪起便开始大量使用铁器。铁器的发明促进了农业的发展,同时也大量用于军事装备。后来又发展了钢的生产技术,当时生产钢的方法有两种,一种是以熟铁作原料,采用原始的渗碳技术增加铁中的含碳量成为钢材。另一种是采用生铁作原料,把生铁充分脱碳而得到钢。

近代钢铁材料对社会发展的作用更加突出,各种机械,运输车辆,航运船舶和各种构件大量采用了钢铁材料。没有钢铁材料,就不会有疾驶的车辆,拔地而起的摩天大楼。目前钢铁材料工业已经发展成为品种繁多和规模庞大的基础工业,从铁矿的开采、冶炼到加工成形,生产技术十分完备。我国的钢铁总产量很高,但钢铁产品的品种和规格与发达国家有一定差距,这种差距正逐步缩小。

除了发展钢铁材料以外,人们还进一步发展了金、银、铜、钛、镁、钼、铝、钨等有色金属及其合金材料。如果没有铝等轻金属材料,飞机难以在天空中飞翔。没有金、铜、铝等良导体则难以制造出今天的大规模集成电路和计算机,就不会有今天的输电线路和发电设备,也就不可能有利用电能的现代文明生活。

近些年来高分子材料的发展很快,使我们的科技和生活产生了重大变化。从 1907 年第一座小型酚醛树脂厂的建立,到 1927 年左右热塑性聚乙烯塑料产品的出现并商品化后,1930 年建立了高分子的概念。从 1940 年到 1957 年先后研究成功了合成橡胶,合成纤维,聚丙烯腈等材料。人们早就使用的树木、皮毛、丝、棉和麻等材料都属于高分子材料,但在真正认识这些高分子材料时却十分周折。德国物理化学家斯陶丁格经过近 10 年的研究,认为人们早已使用的这些材料和实验室中合成的高分子物质的结构相同。1928 年在一次学术会议上宣布他

的研究结果时，却遭到多数同行的反对。又经过两年的实验，得到更为令人信服的实验结果。经历十余载的努力后，他提出的高分子概念才得以确立，1953年斯陶丁格被授予诺贝尔化学奖。现在科学家们已经研制合成了上千种高分子化合物，广泛地应用在我们的衣、食、住、行中，开创了合成材料的新纪元。

复合材料的应用也有相当长的历史，早期筑屋时在泥土中加入麦草，现在的钢筋混凝土等均属于复合材料。我国古代最令人瞩目的是漆器，在距今4000多年的夏朝时代就开始出现了漆器。战国时的著作《韩非子》中记述，舜和禹最先发明了漆器。漆器是以丝、麻等天然纤维作增强材料，用大漆即天然树脂作粘结剂制成的复合材料。湖南马王堆汉墓出土的漆器，是公元前196年西汉时期的文物，有鼎、酒壶、盆具、茶具等物品，形状多样而且工艺精巧，反映了当时的高超制作水平。当今复合材料已经有金属基复合材料，陶瓷基复合材料，碳基复合材料，树脂复合材料，高分子复合材料等等。玻璃纤维增强的树脂材料是复合材料中应用比较早的，1946年美国海军开始拥有一艘玻璃纤维聚酯增强塑料的扫雷艇，可以不受磁性水雷的威胁。我国的玻璃纤维及其复合材料的研究从20世纪50年代开始，很快应用在造船、电子、航天事业上，形成了完整的研究体系和较为完整的工业生产体系。

目前材料向着强度更高和特殊功能方向发展。金属材料朝着进一步的合金化和微晶化发展，以求获得更高强度的材料。非晶态金属材料的研究也正逐步走向应用，非晶态合金的出现可以使变压器的铁损减少70%，使输配电系统的效率大为提高。另外许多质量轻强度高的新型有色合金不断出现。强度更高和耐热性更好的有序化金属间化合物正在加紧研究之中。更耐高温的结构材料，性能独特的记忆合金，钕铁硼永磁材料等等，都是在传统金属材料的基础上研究和发展起来的新型材料。

高分子材料将紧紧围绕着充分而又合理地利用资源，节能和保护环境进行发展。材料的性能将向功能化、复合化和高性能化发展。高分子合成材料的性能将通过高分子链的化学结构的改变而实现耐高温、高强度和高韧性。今后将会合成出导电更好或绝缘性更高的高分子材料。一部分高分子材料将要满足生物体的功能要求，一部分高分子材料能够对声、光、电、力作出反映。另外，以高分子材料为基的复合材料将会更加发展。

复合材料将沿着无机复合材料和有机复合材料的方向发展。无机复合材料中的耐高温材料将是近期的发展热点，有机复合材料将会利用各种高性能纤维，以各种塑料为基础制成质量轻、强度高和具有特殊性能的新型复合材料。

由于现代材料在各个方面的作用，世界各国都极为重视，材料的科学研究和发展十分迅速。目前，结构材料趋向于复合化。由于单一性材料有许多局限性，如脆性、韧性、强度等性能指标，往往只是某一性能较高。而复合材料通过不同材料的不同配比调整，能够得到不同于原来材料的各自性能，呈现新的性能特点。复合材料的关键问题是不同材料之间界面的结合问题。功能材料呈迅速发展的趋势。各种功能材料，如电热材料、光电材料、传感器材料、高温材料等均发展迅速。近些年又发展了梯度功能材料，使不同性能的材料相互“混合”在一起时，使微观上的成分产生过渡，避免不同材料性能的突变，使材料的性能更加理想。

各种新材料的发展直接影响着人类的进步，新材料本身已成为高新技术的重要组成部分。人们对材料科学知识掌握和应用的程度，反映出科技水平的高低。目前世界各国对新材料的研究和开发，投入了越来越多的人力和财力，这预示着人类文明和科学技术将会以更高的速

度向前发展。

第二节 工程材料的性质

工程材料的性质主要有强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度等。

一、强度 (strength)

强度是工程材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。根据材料受力的不同,可以分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等,其中以抗拉强度应用最多。

材料的抗拉强度是采用标准拉伸试棒,由拉伸试验测定,拉伸试棒的形状如图 1-1 所示。材料单位面积上承受的负荷称为应力,以符号 σ 表示。材料单位长度上的伸长量称为应变,以符号 ϵ 表示。低碳钢受拉伸时的应力与应变关系曲线如图 1-2 所示,曲线上的 E 点为材料能产生最大弹性变形的点, E 点对应的应力 σ_e 为材料的弹性极限。超过 E 点,材料开始产生明显的塑性变形。在 S 点附近,曲线较为平坦,不需要进一步的增大外力,便可以产生明显的塑性变形,该现象称为材料的屈服现象, S 点称为屈服点, σ_s 为材料的屈服极限。经过一定的塑性变形后,必须进一步增加应力才能够继续使材料变形。当达到 B 点时, σ_b 为材料能够承受的最大外力,称为强度极限。超过 B 点后,试棒的局部迅速变细,产生缩颈现象,到达 K 点后断裂。

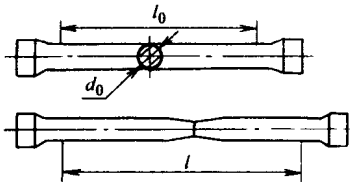


图 1-1 拉伸试棒

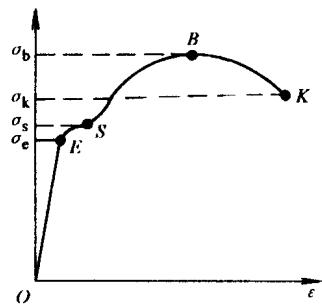


图 1-2 低碳钢的应力应变曲线

二、塑性 (plasticity)

金属材料在外力作用下,产生永久变形而不致引起破坏的性能,称为塑性。塑性通常由伸长率和断面收缩率表示。

1. 伸长率

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 δ ——伸长率;

l_0 ——试棒原始标距长度 (mm);

l ——试棒受拉伸断裂后的标距长度 (mm)。

2. 断面收缩率

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

式中 ψ ——断面收缩率;

A_0 ——试棒原始截面积 (mm^2);

A ——试棒拉断后截面积 (mm^2)。

δ 或 ψ 值愈大,材料的塑性愈好。良好的塑性是金属材料能够进行塑性变形加工的必要条件。

三、硬度 (hardness)

金属材料抵抗更硬物体压入的能力称为硬度。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度等。

1. 布氏硬度 布氏硬度的测试原理如图 1-3 所示,在载荷 F 的作用下迫使钢球压向工件表面,并形成凹痕。布氏硬度值按下式计算

$$HB = \frac{\text{所加载荷}}{\text{压痕的表面积}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

布氏硬度试验适用于测量退火钢、正火钢及常见铸铁和有色金属等较软材料,有效值小于 450HB。布氏硬试验的压痕面积较大,测试结果的重复性较好。但操作较繁琐,且压痕较大。

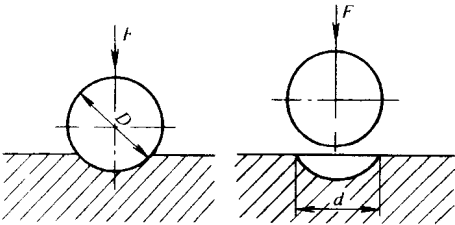
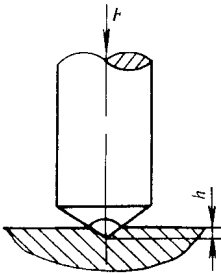
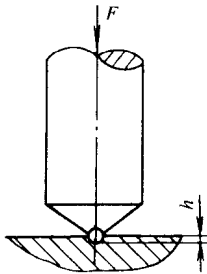
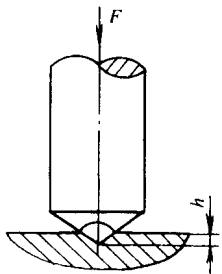


图 1 3 布氏硬度测试原理

2. 洛氏硬度 洛氏硬度也是以规定的载荷,将坚硬的压头垂直压向被测金属来测定硬度的。它由压痕深度计算硬度。实际测试时,直接从刻度盘上读值。

洛氏硬度试验因压头和载荷的不同,分别有 HRA、HRB 和 HRC 三种,其原理和应用范围见表 1-1。

表 1 1 洛氏硬度试验原理及应用范围

规 范	HRA	HRB	HRC
压 头	 120° 金刚石圆锥压头	 φ1 588mm 淬火钢球压头	 120° 金刚石圆锥压头
总载荷/N	$F = 60 \times 9.807$	$F = 100 \times 9.807$	$F = 150 \times 9.807$
测量范围值	60~85	25~100	20~67
适用材料	硬质合金材料、表面淬火钢等	软钢、退火钢、铜合金等	淬火钢、调质钢等

洛氏硬度试验测试方便,操作简捷;试验压痕较小;测试硬度值范围较宽,可测试硬度较高的材料。但由于压痕较小,测试值的重复性较差,必须进行多点测试,取平均值作为材料的硬度。

四、冲击韧度 (impact toughness)

有些机件工作时要受到冲击作用,如蒸汽锤的锤杆、柴油机曲轴、冲床的一些部件。由于瞬时冲击的破坏作用远大于静载荷的作用,在设计受冲击载荷件时必须考虑材料的抗冲击性能。材料抵抗冲击的性能称为冲击韧度。

材料的冲击韧度由摆锤冲击试验测定,原理如图 1-4 所示。冲击韧度是由摆锤将试样一次冲断后, 计算试样缺口处断面吸收功来确定的。

冲击韧度值可按卜式计算

$$\alpha_k = \frac{A_k}{A_0} = \frac{F(H_1 - H_2)}{A}$$

式中 α_k ——试样的冲击韧度值 (J/cm^2);

A_k ——冲断试样所消耗的冲击功 (J);

A_0 ——试样缺口处的原始截面积 (cm^2);

F ——摆锤的重力 (N);

H_1 ——摆锤的起始高度 (cm);

H_2 ——冲断试样后摆锤的高度 (cm)。

α_k 值愈大, 材料的冲击韧度愈好。应当指出, 冲击韧度是对材料一次性冲击破坏测得的。而实际应用中许多受冲件, 往往是受到较小冲击能量的多次冲击而破坏, 它受多因素的影响。由于冲击韧度的影响因素较多, 因而 α_k 值目前仅作为设计时的选材参考。

五、疲劳强度 (fatigue strength)

许多机械零件是在交变应力下工作的, 如机床主轴、齿轮和弹簧等。所谓交变应力, 是指零件所受应力的方向和大小随时间作周期性变化。例如受力发生弯曲的轴, 在转动时材料要反复受到拉应力和压应力, 属于对称交变应力循环。零件在交变应力作用下, 当交变应力值远低于材料的屈服强度时, 经较长时间运行后也会发生破坏, 这种破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏往往突然发生, 常常造成事故。

材料抵抗疲劳破坏的能力由疲劳试验获得。通过疲劳试验, 把被测材料承受交变应力与材料断裂前的应力循环次数的关系曲线称为疲劳曲线 (图 1-5)。材料能够承受无数次应力循环时的最大应力称为疲劳强度。对称应力循环时的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。由于无数次应力循环难以实现, 规定钢铁材料经受 10^7 循环, 有色金属经受 10^8 循环时的应力值确定为 σ_{-1} 。

一般认为, 产生疲劳破坏的原因是由于材料的某些缺陷, 如夹杂物、气孔和微观裂纹所致。交变应力下, 缺陷处首先形成微小裂纹, 裂纹逐步扩展, 导致零件的受力截面减小, 以致突然产生破坏。零件表面的机械加工刀痕和构件截面突然变化部位, 均会产生应力集中。交变应力下, 应力集中处易于产生显微裂纹, 也是产生疲劳破坏的重要原因。

为了防止或减少零件的疲劳破坏, 除应合理设计零件的结构防止应力集中外, 还要尽量减小零件表面粗糙度值, 采取表面强化处理等措施来提高材料的抗疲劳能力。

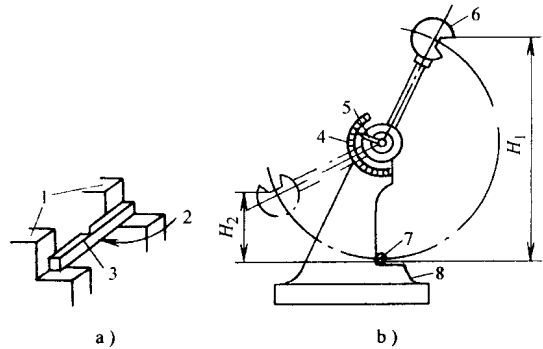


图 1-4 冲击韧度试验原理

a) 试样安装 b) 冲击试验机

1、8 支座 2 冲击点 3、7 试样

4 刻度盘 5 指针 6 摆锤

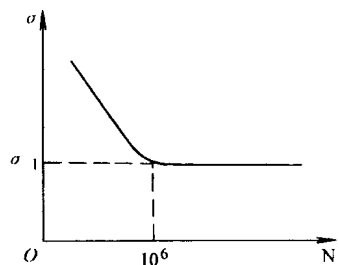


图 1-5 钢铁材料的疲劳曲线

第三节 金属材料及钢的热处理

一、金属的结晶

1. 金属的结晶 (crystallization of metal) 金属的结晶过程:

纯金属的结晶是在一定温度下进行的。如果液态金属冷却的极其缓慢，当到达理论结晶温度之后，稍有温度降低，便会开始结晶，结晶过程中有结晶潜热放出，补偿了温度的下降。在一般冷却条件下，液态金属总是具有一定冷却速度，致使实际结晶温度低于理论结晶温度，即 $T_1 < T_0$ ，这种现象叫过冷现象，见图 1-6。理论结晶温度与实际结晶温度之差，称为过冷度。冷却速度愈快，过冷度愈大。

液态金属中原子作不规则运动，随温度的降低，原子活动能力减弱。当到达结晶温度时，某些原子按一定规律排列聚集，形成结晶核心，称为晶核。晶核向液体中温度低的方向发展长大，如同树枝的生长，先生长出主干再形成分枝，最后液体耗尽，成为树枝状的晶体。金属结晶时先形成晶核，晶核长大后成为晶体的颗粒，简称晶粒。金属的结晶过程如图 1-7 所示。结晶过程中，冷却速度愈快，过冷度愈大，晶核的数量愈多，晶粒愈细小，金属的机械强度愈高。

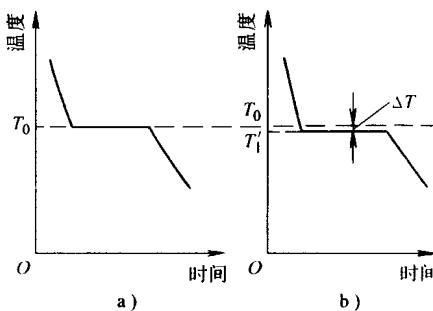


图 1-6 纯金属的冷却曲线

a) 极其缓慢冷却时 b) 实际冷却速度时

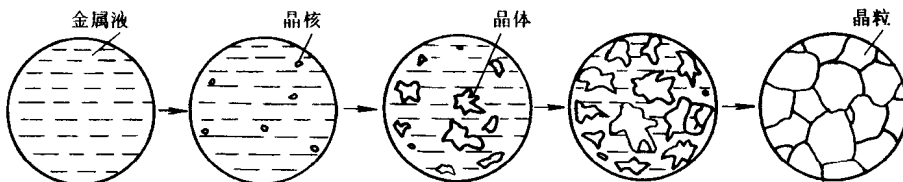


图 1-7 金属的结晶过程

金属结晶后原子的排列是有规律的，为了便于描述晶体中原子的排列规律，把每一个原子的核心视为一个几何点，用直线按一定的规律把这些几何点连接起来，形成空间格子，把这种假想的格子称为晶格。晶格所包含的原子数量相当多，不便于研究分析，将能够代表原子排列规律的最小单元体划分出来，这种最小的单元体称为晶胞，如图 1-8 所示。通过分析晶胞的结构可以了解金属的原子排列规律，判断金属的某些性能。

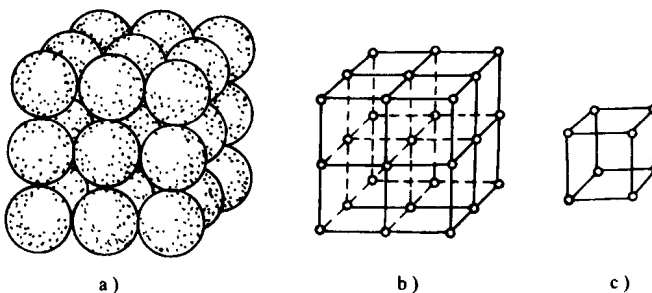


图 1-8 晶体的结构

a) 晶体中最简单的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

金属有许多晶胞类型，常见的晶体类型有体心立方晶胞、面心立方晶胞和密排六方晶胞。体心立方晶胞的

原子排列如图 1-9a 所示，属于这种晶胞类型的金属有 Cr、Mo、W 和 α -Fe 等。面心立方晶胞的原子排列如图 1-9b 所示，属于这种晶胞类型的金属有 Al、Cu、Ni 和 γ -Fe 等。密排六

方晶胞的原子排列如图 1-9c 所示,属于这种晶胞的有 Mg、Zn、Ti 和石墨。材料的晶胞不同,性能也不相同。

一些材料在不同的温度范围有不同的晶胞类型,材料在固态下改变晶胞类型的过程称为同素异晶转变。纯铁的同素异晶转变如图 1-10 所示。

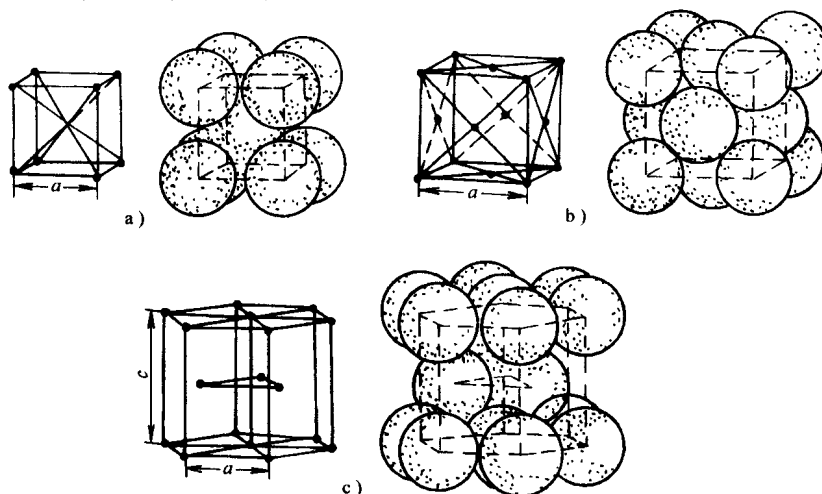


图 1-9 常见的金属晶胞类型

2. 合金的基本显微组织结构 固态的合金有固溶体、化合物和机械混合物三种基本显微组织结构 (microstructure), 它们既可以各自单独存在于固态合金中, 也可以共同存在于固态合金中。

(1) 固溶体 一些合金的组元在固态有相互溶解的能力, 例如碳原子可以溶解到铁的晶格中, 溶质原子溶入溶剂中而保持溶剂晶格类型的晶体称为固溶体。根据溶质原子所占据的位置, 可分为置换固溶体和间隙固溶体, 如图 1-11 和图 1-12 所示。

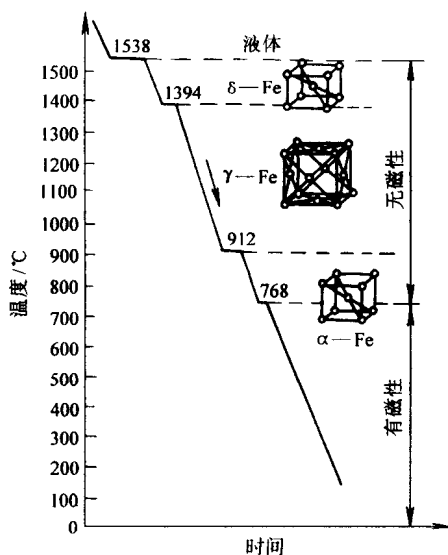


图 1-10 纯铁的同素异晶转变

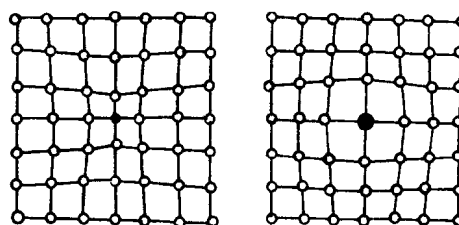


图 1-11 置换固溶体示意图

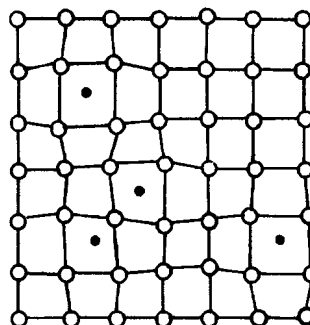


图 1-12 间隙固溶体示意图

由于固溶体溶质原子的半径和溶剂原子的半径不同,使溶剂晶格产生畸变,导致材料的变形抗力增加、硬度和强度增加,称为固溶强化现象。碳与 α -Fe形成的固体溶体称作铁素体,以符号F表示。

(2) 金属化合物 许多合金中含有金属化合物,如钢中的渗碳体(Fe_3C)。一般情况下,金属化合物的硬度较高,脆性较大。当金属化合物细小而均匀的分布在合金中时,可以提高合金的强度、硬度和耐磨性,但其塑性和韧性要降低。如果合金中金属化合物过多,会明显增加脆性。因而不能单纯通过增加金属化合物数量来提高合金的性能。

(3) 机械混合物 合金中的不同显微组织结构如果呈机械混合形态,称为机械混合物。图 1-13 示出了碳的质量分数为 0.77% 钢的组织结构。它是由铁素体和渗碳体片层相间的机械混合物组成,称为珠光体,以符号P表示。珠光体比铁素体的强度和硬度高,塑性比铁素体差。

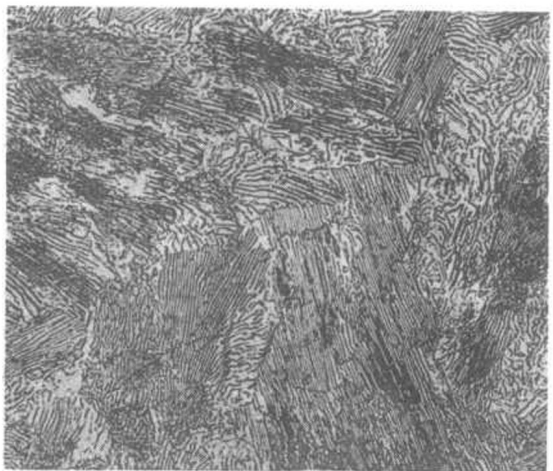


图 1-13 珠光体组织结构

二、铁碳合金状态图

1. 铁碳合金中的基本组织结构 由于化学成分不同,固态下的铁碳合金可以是固溶体、化合物或机械混合物。常见的组织结构如下:

(1) 铁素体 (ferrite) 碳溶解于 α -Fe铁中形成的固溶体称为铁素体。铁素体的溶碳能力很小,随温度的升高溶碳能力增加,727℃时溶碳能力最大,达到0.0218%。

铁素体的力学性能接近纯铁,强度、硬度很低,塑性和韧性很好,所以含有较多铁素体的铁碳合金(如低碳钢),易于进行冲压等塑性变形加工。

(2) 奥氏体 (austenite) 奥氏体是碳溶解在 γ -Fe铁中形成的固溶体,以符号“A”表示。奥氏体在1148℃时其溶碳能力最大,达到2.11%。在单纯铁碳合金中奥氏体存在于727℃以上。奥氏体的硬度不高,塑性极好。因此通常把钢加热到奥氏体状态进行锻造。

(3) 渗碳体 (cementite) 渗碳体是铁和碳形成的金属化合物 Fe_3C 。渗碳体的碳的质量分数为6.69%,其硬度高,脆性大,塑性很差。因此,铁碳合金中的渗碳体量过多将导致材料力学性能变坏。一定量的渗碳体若呈细小而弥散分布于基体之上,可以提高材料的强度和硬度。

(4) 珠光体 (pearlite) 珠光体是铁素体和渗碳体两相组织的机械混合物,碳的质量分数为0.77%。常见的珠光体形态是铁素体渗碳体片层相间分布的。片层愈细密,强度愈高。

(5) 莱氏体 (ledeburite) 莱氏体是由奥氏体(或珠光体)和渗碳体组成的机械混合物,用符号“L_d”表示。莱氏体中的渗碳体较多,脆性大,硬度高,塑性很差。显微组织如图 1-14 所示。

铁素体、珠光体、渗碳体和莱氏体是铁碳合金状态图中的基本组织结构。它们的含碳量

不同，性能也各不相同。其力学性能见表 1-2。

表 1-2 铁碳合金室温下基本组织结构及其性能

名 称	符 号	σ_b/MPa	HB	δ (%)	$a_K/J_s \cdot \text{cm}^{-2}$
铁素体	F	200	80	50	200
珠光体	P	750	180	20~50	30~40
莱氏体	L_d	—	$>700^{(1)}$	—	—
渗碳体	Fe_3C	30	$800^{(1)}$	≈ 0	≈ 0

① 相当于布氏硬度值

2. 铁碳合金状态图分析 当铁碳合金中碳的质量分数达到 6.69% 形成渗碳体，其力学性能很差。因此铁碳合金状态图（图 1-15）中最大碳的质量分数达 6.69%，已满足对铁碳合金研究的需要，所以通常的“铁碳合金状态图”实际是 Fe— Fe_3C 状态图。状态图中各点、线的意义如下：

ACD 线 为液相线，该线以上的合金为液态，合金冷却至该线以下便开始结晶。

AECF 线 为固相线，该线以下合金为固态。加热时温度达到该线后合金开始熔化。

C 点 为共晶点。从液体中同时结晶出两种以上固体的现象称为共晶现象或共晶反应。

S 点 为共析点。在固态下合金发生组织结构变化时，从一种固体组织结构中析出两种以上固体组织结构，这种现象称为共析反应，

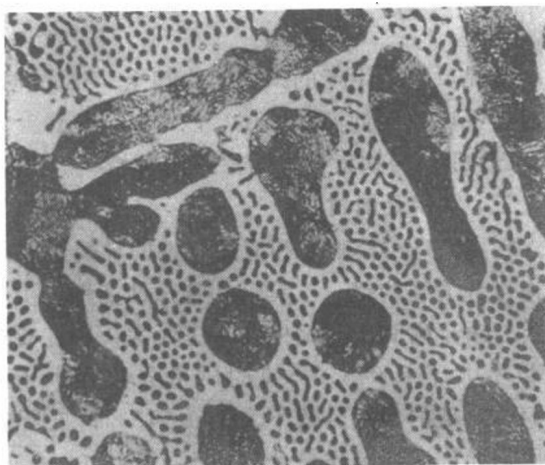


图 1-14 莱氏体显微组织

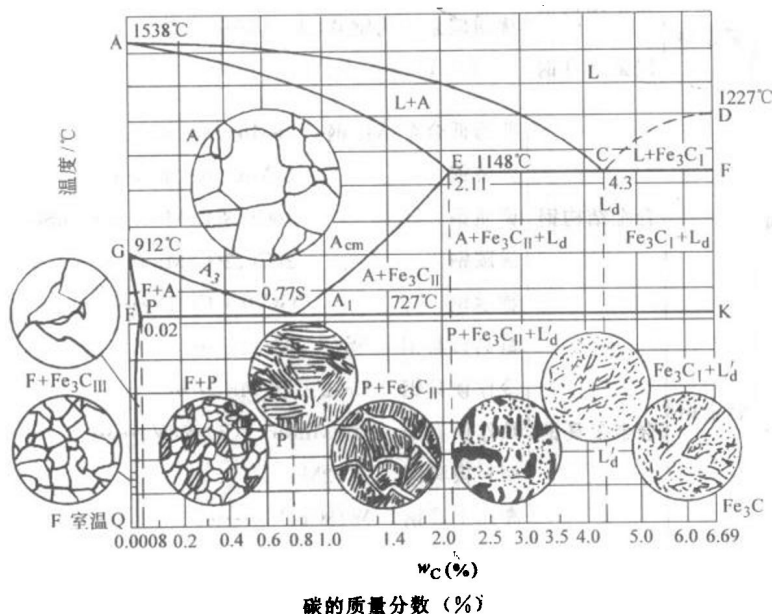


图 1-15 铁碳合金状态图

其反应产物为共析组织结构。碳的质量分数为 0.77% 的铁碳合金, 727℃ 时产生的共析组织为珠光体。

ECF 线 为共晶线, 碳的质量分数大于 2.11% 的铁碳合金当冷却到该线时, 液态合金均要产生共晶反应, 共晶组织结构为莱氏体。

GS 线 为铁素体开始析出线。奥氏体冷却到该线后, 开始析出铁素体。当冷至 PSK 时, 奥氏体停止单独析出铁素体。

ES 线 为奥氏体对碳的溶解度曲线, 奥氏体冷却到该线后, 开始析出渗碳体。当冷至 PSK 线时, 奥氏体停止单独析出渗碳体。

PSK 线 为共析线。当奥氏体冷却到该线时产生共析反应, 奥氏体转变为珠光体组织结构。

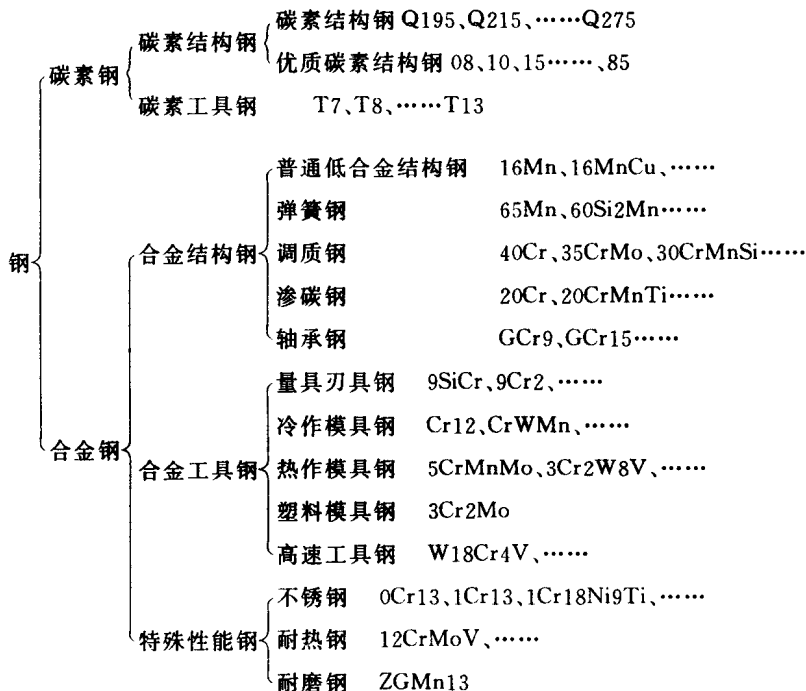
共晶反应所生产的莱氏体冷却至 PSK 线时, 内部的奥氏体要产生共析转变为成珠光体, 这时的莱氏体叫低温莱氏体, 以 “L₂” 表示。

PQ 线 为铁素体析出渗碳体开始线。当铁素体冷却到该线后将析出渗碳体。

三、常用金属材料

1. 钢的分类、牌号和应用 钢的种类繁多, 按化学成分可分为碳素钢和合金钢两大类; 按用途可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢三类; 按质量可分为普通钢、优质钢和高级优质钢三类。由于磷和硫是钢中的有害元素, 因此要规定钢中的磷、硫含量。普通钢允许磷的质量分数不大于 0.045%, 硫的质量分数不大于 0.055%; 优质钢允许磷的质量分数不大于 0.04%, 硫的质量分数不大于 0.045%; 工具钢允许磷、硫质量分数均不大于 0.04%; 高级优质钢允许磷、硫质量分数均不大于 0.03%。

钢的综合分类及牌号举例如下:



2. 碳素钢 (carbon steel) 碳素钢的碳的质量分数在 1.5% 以下, 其中还含有少量的硅、锰、硫、磷等杂质。碳的质量分数小于 0.25% 为低碳钢, 碳的质量分数在 0.30%~0.60% 之间为中碳钢, 碳的质量分数大于 0.60% 为高碳钢。碳的质量分数对钢的组织结构和力学性能有极大影响, 碳的质量分数愈高, 渗碳体愈多, 硬度愈高, 塑性愈差。图 1-16 表明了不同碳的质量分数对力学性能的影响。硅、锰、磷、硫等杂质对钢的组织结构和力学性能有一定影响, 其中磷和硫是有害杂质。磷可以提高钢的硬度, 但在低温时脆性显著增加, 称为冷脆现象, 而硫容易使钢在高温轧制时破裂, 称为热脆现象。

(1) 碳素结构钢 碳素结构钢的塑性和韧性较好, 但机械强度不高。碳素结构钢牌号的符号意义如下:

- Q —— 钢的屈服极限 (N/mm²);
- A、B、C、D —— 分别为质量等级。

如 Q235A 即表示屈服极限值为 235N/mm² 的 A 级碳素结构钢。(试样厚度 ≤ 16mm 时为 235N/mm², 若厚度增加, 其值相应减小。)

碳素结构钢的用途举例见表 1-3。

表 1-3 碳素结构钢的应用举例

牌 号	用 途 举 例
Q195、Q215A、Q215B	薄板、焊接钢管、铁丝、钉等
Q235A、Q235B、Q235C、Q235D	薄板、中板、钢筋、带钢、钢管、焊接件、铆钉、小轴、螺栓、连杆等
Q255A、Q255B、Q275	拉杆、连杆、键、轴、销钉、要求较高强度的某些零件

(2) 优质碳素结构钢 优质碳素结构钢的牌号用二位数字表示, 该二位数字为钢中平均碳的质量分数万分量。如 45 钢, 表示平均碳的质量分数为 0.45% 的优质碳素结构钢。

其中 08、10、15、20、25 钢属于低碳钢, 强度较低而塑性优良, 可焊性好。该类钢多用于冲压件和焊接构件, 可用于生产垫圈、螺钉和螺母等小零件。

30、35、40、45、50 钢属于中碳钢, 强度较高, 韧性和机械加工性能较好。应用时经常采用适当的热处理方法以提高其力学性能。该类钢多用于制造轴类、齿轮、丝杠、连杆等零件, 以 45 钢为多用。

65、70 钢属于高碳钢, 进行合理的热处理可以得到较高弹性, 可用于制造一般弹性零件, 如弹簧、弹性垫片等。

(3) 碳素工具钢 碳素工具钢的牌号为 T7、T8、……T13, 牌号后的数字表示钢中平均碳的质量分数千分量。如 T8 表示平均碳的质量分数为 0.8% 的碳素工具钢。硫、磷质量分数小于 0.03% 的碳素工具钢为高级优质碳素工具钢, 在牌号末尾加字母 “A”, 如 T10A。碳素工具钢由于碳的质量分数高, 经淬火热处理后可获得很高的硬度, 经常用于制造木工刀具和

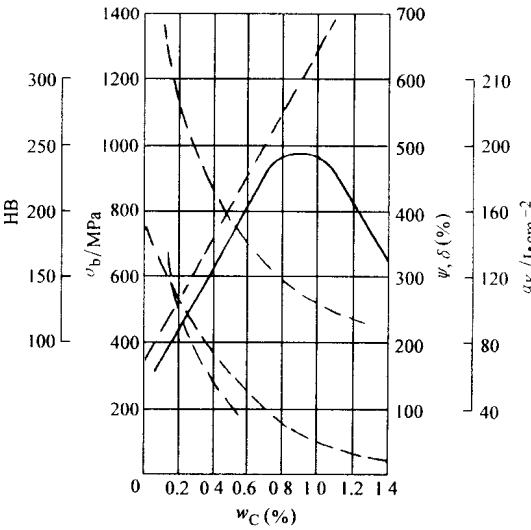


图 1-16 碳对钢力学性能的影响