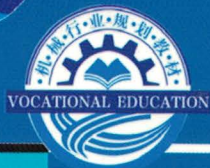




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

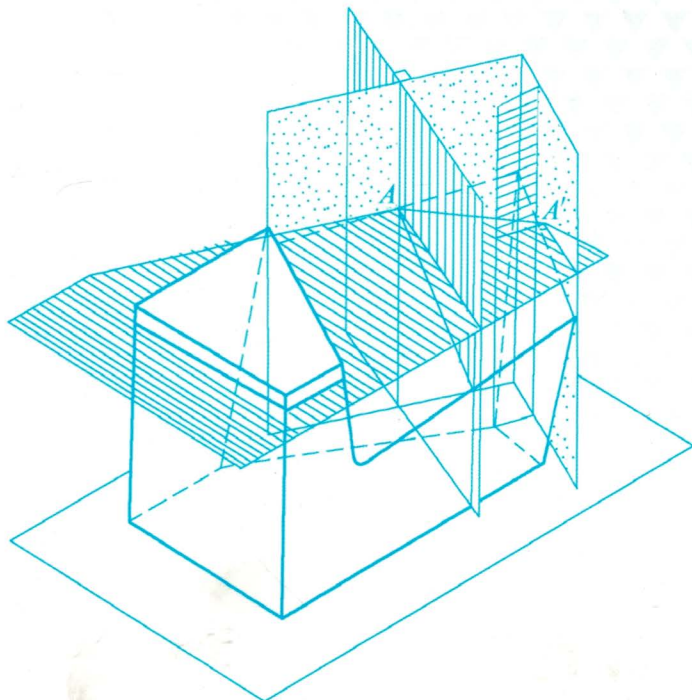


全国机械行业职业教育优质规划教材(高职高专)
经全国机械职业教育教学指导委员会审定

第2版

机械制造技术基础

王靖东 主编



www.cmpedu.com

配电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国机械行业职业教育优质规划教材（高职高专）
经全国机械职业教育教学指导委员会审定

机械制造技术基础

第 2 版

主 编 王靖东
副主编 赵建平 徐正武
参 编 盛永平 张宠元 张桂霞
主 审 王茂元



机械工业出版社

本教材是按照全国机械行业职业教育优质规划教材立项建设要求,根据部分高职院校教师的建议,针对数控技术专业而编写的。编者吸收了近年来高职教育教学改革的成功经验,把“工程材料与热成形工艺”“金属切削原理与刀具”“金属切削机床”“机械制造工艺学”“机床夹具设计”等课程的内容有机地结合在一起,编成一本书,形成一种新的教材体系。本教材在介绍机械制造技术基本知识的基础上,特别突出了知识的综合性与实用性,具有鲜明的职业教育特色。本书适用于机械类和近机械类高职高专有关专业教学使用,也可供一般技术人员参考。

本教材配有电子课件,凡使用本教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网(<http://www.cmpedu.com>),注册后免费下载。咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造技术基础/王靖东主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2018.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 全国机械行业职业教育优质规划教材(高职高专) 经全国机械职业教育教学指导委员会审定

ISBN 978-7-111-60494-5

I. ①机… II. ①王… III. ①机械制造工艺-高等职业教育-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第160150号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王英杰 责任编辑:王英杰 责任校对:王延

责任印制:常天培

北京铭城印刷有限公司印刷

2018年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·496千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60494-5

定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

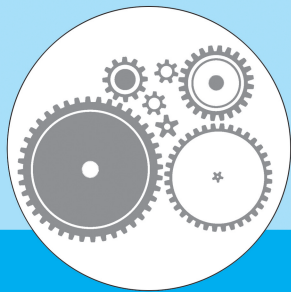
网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com



前 言

本教材第1版自2007年出版以来多次重印，教材内容与编写质量受到诸多高职院校师生肯定。本教材被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，2009年荣获内蒙古自治区高等教育教学成果二等奖。在第2版修订过程中，本教材申报了首批全国机械行业职业教育优质规划教材立项建设项目，并成功入选，可以说本教材为全国职业教育教学做出了一定的贡献。

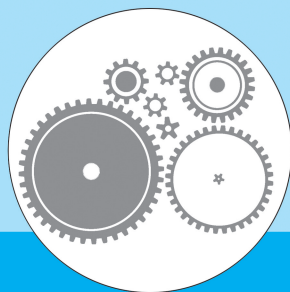
根据全国机械行业职业教育优质规划教材立项建设要求，机械工业出版社编辑和部分高职院校教师建议，以及近年来高职教育教学改革经验，教材编写组对教材进行了修订，特别是对教材中的相关标准进行了全部更新，使教材更加适应高职教育教学需要。

本教材由王靖东担任主编，赵建平、徐正武担任副主编。编写人员及分工如下：盛永平（第一章）、王靖东（绪论、第二章、第四章）、赵建平（第三章）、徐正武（第五章、第八章）、张宠元（第六章）、张桂霞（第七章、第九章）。本教材由王茂元担任主审。

在教材编写过程中，参考了兄弟院校老师编写的有关教材及其他资料，也得到了机械工业出版社和有关职业院校同行的大力支持，在此表示衷心感谢！

由于水平有限，书中难免有欠妥之处，敬请兄弟院校师生和广大读者批评指正。

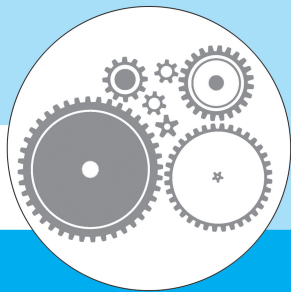
编 者
2017年12月



目 录

前言	习题与思考题	199
绪论	1	
第一章 金属材料及其热成形	2	
第一节 金属材料的力学性能	2	
第二节 金属的晶体结构与结晶	6	
第三节 钢的热处理	14	
第四节 常用的金属材料	17	
第五节 铸造成形	32	
第六节 锻压成形	35	
第七节 焊接成形	39	
习题与思考题	44	
第二章 金属切削的基本知识	46	
第一节 刀具的几何角度及切削要素	46	
第二节 刀具材料	52	
第三节 金属切削过程	57	
第四节 提高切削效益的途径	64	
习题与思考题	77	
第三章 金属切削加工方法与设备	79	
第一节 金属切削机床的分类和型号	79	
第二节 车削加工	87	
第三节 铣削加工	101	
第四节 钻削与镗削加工	118	
第五节 磨削加工	131	
第六节 圆柱齿轮加工	142	
第七节 刨削与拉削加工	151	
习题与思考题	162	
第四章 工件的定位与夹紧	164	
第一节 工件的定位	164	
第二节 工件的夹紧	188	
第五章 机械加工工艺流程制订	203	
第一节 基础知识及术语	203	
第二节 零件的工艺分析	214	
第三节 毛坯的选择	216	
第四节 工艺路线的拟订	218	
第五节 加工余量的确定	225	
第六节 工序尺寸及其公差确定	227	
第七节 工艺卡片的填写	236	
习题与思考题	238	
第六章 典型零件加工	241	
第一节 轴类零件加工	241	
第二节 套类零件加工	249	
第三节 箱体类零件加工	257	
习题与思考题	263	
第七章 机床专用夹具	265	
第一节 概述	265	
第二节 各类机床专用夹具	267	
习题与思考题	283	
第八章 机械加工质量分析	284	
第一节 机械加工精度	284	
第二节 机械加工表面质量	305	
习题与思考题	309	
第九章 机械装配工艺基础	310	
第一节 概述	310	
第二节 保证装配精度的方法	313	
习题与思考题	316	
参考文献	317	

绪 论



机械制造业是国民经济最重要的部门之一。它不仅能直接提供人民生活所需的消费品，而且为国民经济各部门提供技术装备，因此，是国民经济的重要基础产业和支柱产业。其发展规模和水平对国民经济的发展有很大的制约和直接影响，是一个国家经济实力和科学技术发展水平的重要标志，因而世界各国均把发展机械制造工业作为振兴和发展国民经济的战略重点之一。

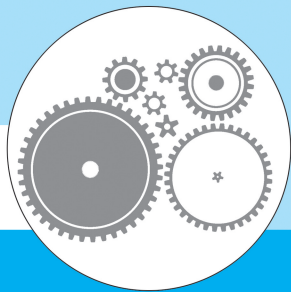
机械制造业的发展与进步，又在很大程度上取决于机械制造技术的水平和发展。在科学技术高度发展的今天，现代工业对机械制造技术提出了越来越高的要求，推动机械制造技术不断向前发展。科学技术的发展为机械制造技术的发展提供了机遇与条件，特别是计算机技术的发展，使得常规机械制造技术与精密检测技术、数控技术、传感技术的有机结合更易于进行，给机械制造领域带来许多新技术、新概念，使产品质量和生产效率大大提高。机械制造技术的发展又为其他高新技术的发展打下了坚实的基础、提供了可靠的保证，两者相互促进，共同提高，为社会和经济的快速发展做出了极大的贡献。

本课程是高职高专机械类专业的一门主干课程。它是通过对传统课程“工程材料与热成形工艺”“金属切削原理与刀具”“金属切削机床”“机械制造工艺学”和“机床夹具设计”的内容进行有机整合，所形成的一门新课程。

本课程具有实践性强、综合性强的特点。学习时要重视在实践教学环节中学习，如各种实习、实验和现场教学，要注意理论与实践相结合。这不仅有助于理解和掌握知识，更重要的是有利于培养综合运用所学的知识解决生产实际问题的能力。机械制造中的生产实际问题往往因生产的产品不同、批量不同、具体生产条件不同而千差万别。学习时要特别注意灵活运用所学知识，根据具体情况处理问题。切记不要死记硬背、生搬硬套。

第一章

金属材料及其热成形



金属材料是机械制造业中大量使用的材料，通过本章内容的学习，学生应了解常用金属材料的成分、结构、性能之间的关系以及改变金属材料性能需要采用的工艺手段等，并初步具备选择常用金属材料的能力，以及正确选择一般机械零件热处理方法的能力。

第一节 金属材料的力学性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指在使用过程中所表现出来的性能（如力学性能、物理性能、化学性能等）。工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出来的性能（如铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等）。

一般情况下，选用金属材料是以力学性能作为主要依据的。金属材料的力学性能是指金属材料在力作用下显示的与弹性和非弹性反应相关或包含应力-应变关系的性能，也就是金属材料在力作用下表现出来的抵抗能力，常用的力学性能有：强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度等。

一、强度和塑性

（一）强度

金属材料在力作用下抵抗变形和断裂的能力称为强度，通常是采用拉伸试验法来测定的。

试验前，将被测金属材料按标准 GB/T 228.1—2010 规定，制成一定形状和尺寸的拉伸试样。试验时，将标准试样装夹在拉伸试验机上，缓慢加载（静载荷）。试样的伸长量随着力的增加而增加，直至试样被拉断为止。试验机自动记录装置可将整个拉伸试验过程中的力大小与对应的伸长量之间的关系绘成力-伸长曲线图，图 1-1 所示为退火低碳钢的力-伸长曲线图。

由图 1-1 可知，当力 F 为零时，伸长量 ΔL 为零。当力由零逐渐增大到 a 点时，试样的伸长量与力成比例增加。此时卸除力，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸，即试样处于弹性变形阶段。当力超过 a 点时，试样除产生弹性变形外，还出现了塑性变形（或称永久变

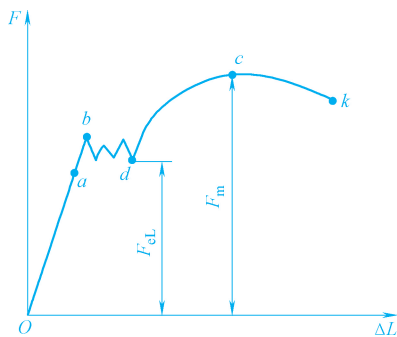


图 1-1 退火低碳钢的力-伸长曲线

形), 即卸除力后, 试样不能完全恢复到原来的形状和尺寸。当力加到 b 点后, 在曲线上开始出现水平 (或锯齿形) 线段, 这表示力不增加, 试样却继续伸长, 这种现象称为“屈服”。当力超过 d 点 (对应的力为 F_{eL}) 后, 试样的伸长量又随力的增加而增大, 此时试样已产生大量的塑性变形。当力继续增加到 c 点 (对应的力为 F_m) 时, 试样出现局部直径变细的现象, 通常称为“缩颈”现象。以后力逐渐降低到 K 点时, 试样就在缩颈处被拉断。

1. 屈服强度

金属材料呈现屈服现象时的最小应力称为屈服强度, 用符号 R_{eL} (MPa) 表示, 即

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

式中 F_{eL} ——材料屈服时所承受的最小力 (N);

S_0 ——试样的原始横截面面积 (mm^2)。

有些金属材料 (如高碳钢、铸铁等) 在拉伸试验中没有明显的屈服现象, 很难测出屈服强度。在这种情况下, 工程上采用规定残余延伸强度 R_r 来反应材料抗屈服的性能, 即试样卸除拉伸力后, 残余延伸率等于规定的引伸计标距百分比时对应的应力。例如, 规定残余延伸率为 0.2% 时的应力以 $R_{r0.2}$ 表示。

$$R_{r0.2} = \frac{F_{r0.2}}{S_0}$$

式中 $F_{r0.2}$ ——试样卸除拉伸力后, 残余延伸率为 0.2% 时所承受的力 (N)。

屈服强度是表示金属材料抵抗微量塑性变形的能力。当材料所受应力低于屈服强度时, 仅有微量塑性变形产生; 超过屈服强度时, 将产生明显的塑性变形。

2. 抗拉强度

试样被拉断前所能承受的最大拉应力称为抗拉强度, 用符号 R_m (MPa) 表示。

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中 F_m ——试样断裂前所承受的最大力 (N)。

抗拉强度是表示金属材料抵抗最大均匀塑性变形或断裂的能力。有些塑性较差的材料在拉伸试验中往往没有明显的屈服现象, 而抗拉强度比较容易测定, 因此, 抗拉强度也作为衡量材料强度的一个重要指标。

(二) 塑性

金属材料在力的作用下产生断裂前所能承受的最大塑性变形的能力称为塑性。在断裂之前, 材料的塑性变形越大, 表示它的塑性越好。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率, 它们也是通过对试样进行拉伸试验来测定的。

1. 断后伸长率

试样断后标距的残余伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率, 用符号 A 表示。

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_u ——试样断后标距 (mm);

L_0 ——试样原始标距 (mm)。

2. 断面收缩率

断裂后试样横截面面积的最大缩减量与试样原始横截面面积的百分比称为断面收缩率，用符号 Z 表示。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_u ——试样断后最小横截面积 (mm^2)；

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

断后伸长率与断面收缩率都是材料的重要性能指标。它们的数值越大，材料的塑性愈好。

二、硬度

硬度是指金属材料抵抗变形，特别是压痕或划痕形成的永久变形的能力，即抵抗局部塑性变形和破坏的能力。一般来说，硬度越高，耐磨性越好，强度也较高。

在目前生产中，测定硬度的方法最常用的是压入法硬度试验。它是用一定几何形状的压头，在一定载荷下，压入被测试的金属材料表面，根据被压入后变形程度的大小来测定其硬度值。用同样的压头，在相同载荷作用下，压入金属材料表面时，若压入后变形程度越大，则材料的硬度越低；反之，硬度越高。生产中应用最广泛的有布氏硬度和洛氏硬度测试法。

(一) 布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用一定直径 D 的硬质合金球作压头，在规定试验力 F 的作用下，压入被测金属表面（见图 1-2），保持规定的时间后卸除试验力，测量被测试金属表面上所形成的压痕直径 d ，用试验力与压痕球形表面积的比值再乘以一个常数 (0.102) 作为布氏硬度值，用符号 HBW 表示。布氏硬度试验范围上限为 650HBW。

布氏硬度值由硬度数值、硬度符号和试验条件（球体直径、试验力大小和保持时间）表示。例如，350HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球在 7.35kN 试验力下保持 10~15s 测定的布氏硬度值为 350。硬度值越大，表示被测材料硬度越高。

(二) 洛氏硬度

洛氏硬度的测定原理是用顶角为 120° 的金刚石圆锥压头或直径为 1.5875mm 的淬火钢球压头，在初试验力与初、主试验力先后作用下，压入被测金属表面（见图 1-3），保持规定的时间后卸除主试验力，根据残余压痕深度增量来确定金属材料的硬度。

在图 1-3 中，0-0 位置为圆锥压头的初始位置，即压头没有与被测金属表面接触时的位置；1-1 为在初试验力 98.07N (10kgf) 作用下，压头压入深度 h_0 的位置；2-2 为加入主试验力后，压头压入深度 h_1 的位置；卸除主试验力后，被测金属弹性变形恢复，使

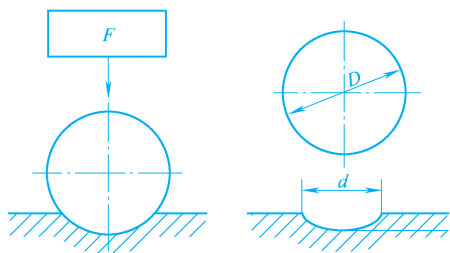


图 1-2 布氏硬度试验原理示意图

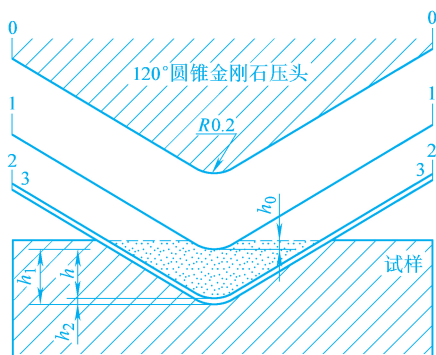


图 1-3 洛氏硬度试验原理示意图

得压头向上回升 h_2 ，压头处于 3-3 位置。因此，可以用压头受主试验力作用实际压入被测金属表面产生塑性变形的压痕深度值 h （残余压入深度）的大小来衡量被测金属的硬度。压痕深度值 h 越大，则被测金属的硬度越低；反之，则越高。为适应习惯上数值越大，硬度越高的概念，常用一常数 N 减去 $h/0.002$ 作为洛氏硬度值，用符号 HR 表示，洛氏硬度值可直接从硬度计表盘上读出。

$$HR = N - \frac{h}{0.002}$$

式中 N ——常数。当用金刚石作压头时， $N=100$ ；当用淬火钢球作压头时， $N=130$ 。

洛氏硬度表示的方法是在符号前写出硬度值，如 60HRC。常用洛氏硬度的试验条件及应用范围见表 1-1。

表 1-1 常用洛氏硬度的试验条件及应用范围（摘自 GB/T 230.1—2009）

硬度符号	压头类型	适用范围	初试验力/N	主试验力/N	总试验力/N	应用举例
HRA	金刚石圆锥	20~88HRA	98.07	490.3	588.4	硬质合金、表面淬火层、渗碳层等
HRB	直径 1.5875mm 球	20~100 HRB	98.07	882.6	980.7	有色金属、退火钢、正火钢等
HRC	金刚石圆锥	20~70HRC	98.07	1373	1471	调质钢、淬火钢等

三、冲击韧性

强度、塑性、硬度都是在静载荷作用下测量的力学性能指标。实际上，许多机器零件和工具常常都是在冲击载荷作用下工作的。此时，除了需要满足静载荷作用下的强度、塑性和硬度外，还必须具有足够的抵抗冲击载荷的能力。

金属抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧性，金属材料的冲击韧性可以通过冲击试验测定。

摆锤式一次冲击试验是目前工程技术上应用最普遍的一种方法，将被测金属材料制成标准冲击试样，在专门的摆锤试验机上进行测试。试验时，将试样放在试验机的支座上，将质量为 m 的摆锤提升到高度 h_1 ，使之获得一定的能量，然后让摆锤自由下落冲断试样，试样冲断后，摆锤继续向前回升到高度 h_2 。在此过程中摆锤的势能差就是冲断试样所消耗的能量，即冲击吸收能量，用 K 表示，单位为 J（焦耳）。

冲击吸收能量越大，则材料的冲击韧性越好；反之，则冲击韧性越差，即脆性越大。

四、疲劳强度

许多机械零件如发动机曲轴、连杆、齿轮、弹簧等，经常会受到大小和方向作周期性变化的载荷作用，这种载荷称为交变载荷。在交变载荷的作用下，零件所承受的最大应力值虽然远小于其屈服强度，但经过多次循环后，零件在无显著的外观变形情况下却会发生断裂，这种断裂称为疲劳断裂。断裂往往是突然发生的，因此具有很大的危险性，常常会造成严重事故。

金属材料经受无数次交变载荷作用而不引起断裂的最大应力值称为材料的疲劳强度。实际试验时不可能进行无数次的应力循环，因此规定，对于钢材，当应力循环次数达到 10^7 次

时,零件仍不断裂的最大应力作为它的疲劳强度;对于有色金属和某些超高强度钢,当应力循环次数为 10^8 次时零件仍不断裂的最大应力作为它的疲劳强度。

第二节 金属的晶体结构与结晶

金属材料的性能决定了它的应用场合,而金属材料的性能主要取决于其化学成分和内部组织结构。

一、金属的晶体结构

固态物质可分为晶体和非晶体两类,在自然界中,除了少数的一些物质(如普通玻璃、松香等)以外,绝大多数固体都是晶体。

晶体是指其内部原子按一定几何形状有规律排列的固态物质(见图 1-4a),金刚石、石墨、固态金属及其合金都是晶体。非晶体是指其内部原子无规律排列的固态物质,如塑料、沥青等。晶体与非晶体的主要区别是晶体具有固定的熔点和各向异性的特征,而非晶体没有固定的熔点,且各向同性。

(一) 基本概念

晶体结构是指晶体内部原子排列的方式及特征,晶体结构从本质上说明了金属材料性能的差异及变化的实质。

(1) 晶格 将原子近似地看成一个点,并由假想的线(直线)将视为点的原子连接起来而构成的空间框格称为晶格,如图 1-4b 所示。

(2) 晶胞 晶体中原子排列具有周期性,代表晶格特征的最小几何单元称为晶胞,如图 1-4c 所示。

(3) 晶格常数 晶胞的大小和形状可用晶胞的三条棱边长度 a 、 b 、 c ,单位为 \AA (注: \AA 为非法定计量单位, $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$) 及三棱边夹角 α 、 β 和 γ 来描述,其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数。当 $a=b=c$,且 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 时,这种晶胞称为简单立方晶胞。

各种晶体物质,由于晶格类型与晶格常数不同,表现出不同的物理性能、化学性能和力学性能。

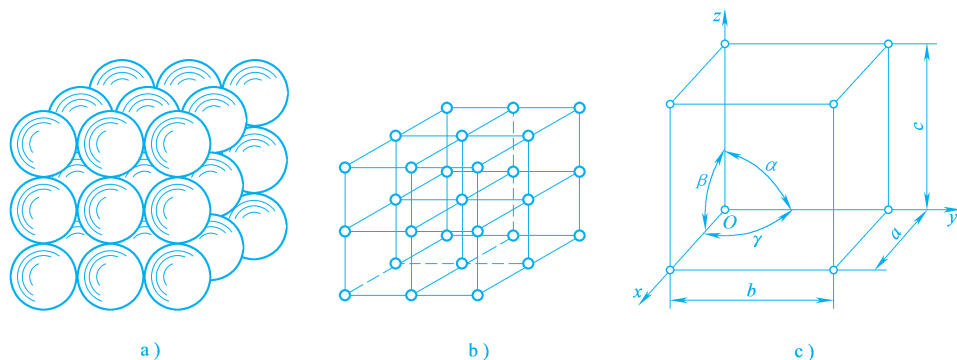


图 1-4 简单立方晶格与晶胞示意图

a) 晶体中的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

(二) 常见的金属晶格类型

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体，在立方体的八个顶角和立方体的中心各占据一个原子，如图 1-5 所示。属于这种晶格结构的金属有： α -铁、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钨 (W) 等。



图 1-5 体心立方晶胞示意图

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体，在立方体的八个顶角和六个面的中心各占据一个原子，如图 1-6 所示。属于这种晶格结构的金属有： γ -铁、铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni) 等。

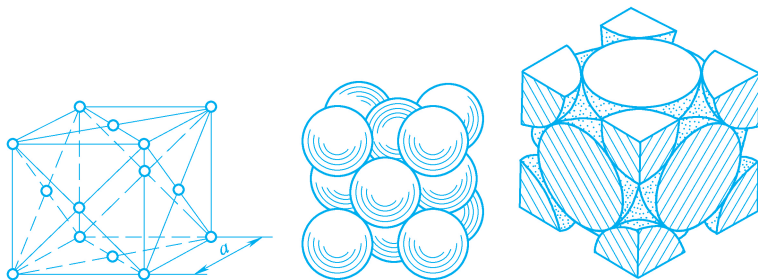


图 1-6 面心立方晶胞示意图

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体，在六方体的十二个顶角和上、下面的中心各占据一个原子，六方柱体的中间还有三个原子，如图 1-7 所示。属于这种晶格结构的金属有：石墨、镁 (Mg)、锌 (Zn) 等。

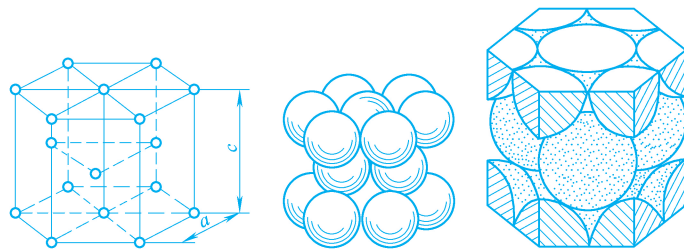


图 1-7 密排六方晶胞示意图

晶格类型不同，原子排列的致密度（晶胞中原子所占体积与晶胞体积的比值）也不同。体心立方晶格的致密度为 68%，而面心立方晶格和密排六方晶格的致密度均为 74%。晶格



结构发生变化,将引起金属体积和性能的变化。

二、实际金属的晶体结构

(一) 纯金属的晶体结构

1. 多晶体结构

单晶体是指其晶体内部的晶格位向(原子排列方向)完全一致的晶体,在工业生产中,只有通过特殊的制作方法才能获得单晶体。实际使用的金属材料,晶体通常是由许多单晶体组成的多晶体。即使是体积很小实际金属,其内部仍然包含许多小晶体(单晶体)。由于这些晶格位向一致的小晶体外形不规则,呈颗粒状,所以又称之为“晶粒”。

2. 晶体缺陷

实际金属材料的晶体结构不仅是多晶体,而且原子的排列也不像理想晶体那样规则和完整,这种金属晶体内部原子排列的不完整性称为晶体缺陷。这些缺陷对金属材料的物理性能、化学性能和力学性能有较大的影响。根据晶体缺陷的几何特征,可把它们分成以下三类:

(1) 点缺陷 点缺陷是指在晶体所有方向上尺寸都很小的一种晶体缺陷,属于这类缺陷的有晶格空位和间隙原子。结晶时晶格上应被原子占据的结点未被占据,形成空位;也可能有的原子占据了原子之间的空隙,形成间隙原子。

(2) 线缺陷 线缺陷是指在三维空间的两个方向上尺寸都很小的晶体缺陷。常见的线缺陷有各种类型的位错。所谓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。

(3) 面缺陷 面缺陷是指在三维空间的一个方向上尺寸很小的晶体缺陷,面缺陷常见的形式为晶界和亚晶界。

(二) 合金的相结构

纯金属虽有很多优点,但其提炼困难,且强度、硬度一般较低,所以在工业中使用的金属材料一般都是不同成分的合金,如碳钢、合金钢、黄铜、硬质合金等。

1. 基本概念

(1) 合金 由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)组成的具有金属特性的物质,如铁碳合金。

(2) 组元 组成合金最基本的独立单元(物质)称为组元,如铁碳合金的组元是铁和碳。

(3) 合金系 由相同组元按不同比例配制的不同成分的合金系列。

(4) 相 在合金中具有相同的晶体结构、相同的化学成分、相同的物理和化学性能,并与其他部分由界面分开的独立均匀的部分。

(5) 组织 泛指用金相观察方法看到的由形态、尺寸不同和分布方式不同的一种或多种相构成的总体。组织是决定合金性能的根本因素,不同的组织会表现出不同的性能。因此,在工业生产中,控制和改变合金的组织具有重要的意义。

2. 合金的相结构

由于组元之间相互作用的不同,合金的相结构主要分为固溶体和金属化合物两大类。

(1) 固溶体 一种组元(溶质)均匀地溶解在另一组元(溶剂)中形成的晶体,其晶

格结构与溶剂的晶格结构相同。例如，黄铜是铜和锌元素组成的二元合金，在固态下黄铜保持着铜的面心立方晶格。由于溶质原子的溶入都将导致溶剂晶格发生畸变，增加位错运动阻力，使合金的塑性变形抗力增加，强度、硬度提高。这种因形成固溶体而引起合金强度、硬度提高的现象称为固溶强化。

(2) 金属化合物 合金组元相互作用而形成的具有金属特性的一种新相称为金属化合物。金属化合物的晶格结构不同于组成它的任一组元，它具有复杂的晶格结构。例如，铁碳合金中铁与碳组成的金属化合物 Fe_3C ，晶格既不同于铁的体心立方晶格，也不同于石墨的六方晶格，而是一种具有复杂斜方结构的晶体晶格。金属化合物的熔点较高，性能硬而脆。当金属化合物呈细小颗粒状且均匀分布在固溶体上时，将使合金的强度、硬度明显提高，这一现象称为弥散强化。

(3) 机械混合物 工业中有些合金是由固溶体与少量金属化合物组成的，称为机械混合物，因此机械混合物是由两相或多相按一定比例构成的组织。在机械混合物中，各组成相仍然保持原有的晶格和性能，从而可以获得良好的综合力学性能，以满足不同的需要。

三、纯金属的结晶

金属及合金从液体转变为固态的过程都是结晶过程。

(一) 纯金属结晶的基本规律

纯金属的结晶是在一定温度下进行的，其结晶温度可用热分析等试验方法来测定。将纯金属加热熔化，然后让液态金属缓慢冷却，在冷却过程中，每隔一定的时间测一次温度，直至冷却到室温（结晶完毕）为止。从而得到一系列时间与温度相对应的数据，将这些数据绘制在以温度为纵坐标、时间为横坐标的坐标系中，即得温度与时间的关系曲线（见图 1-8a），这种曲线称为冷却曲线。

由纯金属的冷却曲线可以看出，液态金属随冷却时间的增长，温度不断下降，但当冷却到某一温度时，温度却不随冷却时间的增长而下降，在冷却曲线上出现了一条水平线段，这是由于结晶过程中有大量潜热放出，补偿了散失在空气中的热量。这条水平线段所对应的温度就是纯金属的理论结晶温度 T_0 ，这说明纯金属的结晶是在恒定的温度下进行的。当结晶终了后，不再有潜热补偿向外散失的热量，所以温度继续下降。

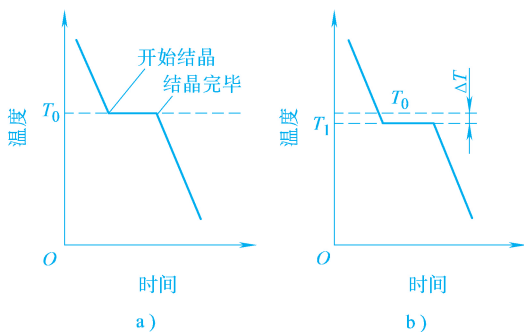


图 1-8 纯金属的冷却曲线

上述试验是在极其缓慢的冷却条件（即平衡条件）下进行的。在实际生产中，金属结晶的冷却速度是非常快的，所以液态金属的实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 ，这种现象称为过冷现象，两者之差称为过冷度，用符号 ΔT 表示（见图 1-8b），即

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

试验研究表明，金属结晶时的过冷度并不是一个恒定值，与其冷却速度有关，冷却速度越大，金属的实际结晶温度就越低，过冷度就越大。在实际生产中，金属都是在过冷情况下结晶的，因此，过冷是金属结晶的必要条件。

金属结晶过程的实质是金属原子由不规则排列过渡到规则排列而形成晶体的过程，也是液态金属不断地形成晶核和晶核不断长大的过程。这是物质进行结晶的普遍规律。

金属结晶后的晶粒大小对金属材料的力学性能有很大的影响。晶粒大小通常用单位体积内晶粒的数目或晶粒的平均直径来表示，一般在常温下，金属材料的晶粒越细小，其综合的力学性能就越好。细化晶粒是提高金属材料力学性能的有效途径。

(二) 纯铁的同素异构转变

有些金属在固态下随温度的变化，晶格会从一种结构转变为另一种结构，这种现象称为金属的同素异构转变。同素异构转变所得到的不同晶格类型的晶体，称为同素异构体。例如，纯铁在不同温度下，其晶格有不同的结构，如图 1-9 所示。

由图 1-9 看出，纯铁在 1538℃ 结晶成固体后为体心立方晶格，称为 δ -Fe；继续冷却至 1394℃ 时，转变为面心立方晶格，称为 γ -Fe；再继续冷却至 912℃ 时，又转变为体心立方晶格，称为 α -Fe；912℃ 以下再继续冷却，晶格的结构不再发生变化。

金属的同素异构转变过程与液态金属的结晶过程相似，晶格结构的转变会引起晶体体积的变化，从而会产生较大的内应力。

同素异构转变是钢铁材料的一个重要特性，是钢铁材料能采用热处理的方法来改变其性能的内因和依据，也是钢铁材料的性能多种多样、用途广泛的主要原因之一。

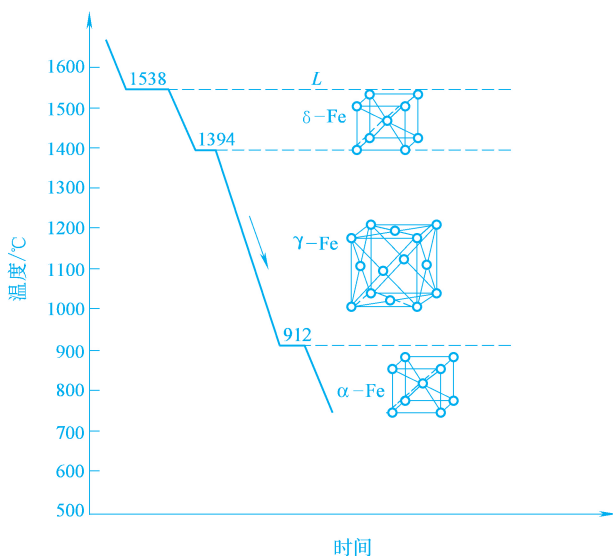


图 1-9 纯铁的同素异构转变示意图

四、铁碳相图

钢铁材料是现代工业中应用最广泛的金属材料，主要由铁和碳两种元素组成，统称为铁碳合金。不同成分的铁碳合金，在不同温度下具有不同的组织，表现出的性能也不同。

铁碳相图是指在平衡（极其缓慢冷却）条件下，不同成分的铁碳合金，在不同温度所处的状态或组织的图形。该图反映了在平衡条件下，铁碳合金的成分、温度和组织三者之间的关系，它是合理选材，制订热处理工艺与冷、热加工工艺的主要理论基础。为了熟悉铁碳合金的结构及相图，我们首先应了解铁碳合金的基本组织。

(一) 铁碳合金的组织

铁碳合金的基本组元是铁和碳，它们在液态时可以无限互溶，在固态下，碳能溶解于铁的晶格中形成间隙固溶体，当含碳量超过固态铁的溶解度时，多余的碳与铁形成金属化合物，如 Fe_3C 。此外还可以形成由固溶体与金属化合物组成的机械混合物。

1. 铁素体

铁素体为碳溶于 α -Fe 中形成的固溶体，常用符号 F 表示。由于体心立方晶格的间隙很

小，因此碳在 α -Fe 中的溶解度很小，在 727℃ 时，达到最大溶解度为 0.0218%，在室温时仅为 0.0008%。由于铁素体的溶解度很小（其显微组织与纯铁一样），所以它的性能几乎与工业纯铁接近，强度和硬度低，塑性和韧性好。

2. 奥氏体

奥氏体为碳溶于 γ -Fe 中形成的固溶体，常用符号 A 表示。由于面心立方晶格的间隙较大，因此它的溶碳能力比 α -Fe 大，在 727℃ 时其溶碳量为 0.77%，随着温度的升高溶碳量逐渐增大，到 1148℃ 时，其溶碳量最大，可达 2.11%。奥氏体具有一定的强度和硬度，塑性也很好，没有磁性，一般奥氏体的硬度为 170~220HBW，塑性较高，断后伸长率为 40%~50%，所以奥氏体是多种钢材在高温下进行压力加工时所要求的组织。

3. 渗碳体

渗碳体是碳与铁按一定比例形成的具有复杂晶格的金属化合物，常用符号 Fe_3C 表示。渗碳体中碳的质量分数为 6.69%，熔点约为 1227℃，在固态下，无同素异构转变。渗碳体的结构决定了它有极硬和极脆（塑性和韧性几乎为零）的性质，是铁碳合金中的主要强化相，它的形态、大小、数量和分布对铁碳合金的性能有很大的影响。

4. 珠光体

珠光体是由铁素体与渗碳体组成的机械混合物，常用符号 P 表示。珠光体中碳的质量分数为 0.77%，其强度高于铁素体和渗碳体（抗拉强度约为 750MPa），塑性和韧性介于铁素体与渗碳体之间（约为 20%~35%），硬度适中（约为 80~200HBW）。

5. 莱氏体

莱氏体是一种机械混合物。在 1148~727℃ 由奥氏体与渗碳体组成的机械混合物称为高温莱氏体，用符号 L_d 表示；在 727℃ 以下由珠光体与渗碳体组成的机械混合物称为低温莱氏体，用符号 L_d' 表示。莱氏体的含碳量较高，因而其硬度高，塑性差，脆性大，是组成白口铸铁的基本组织。

综上所述，在铁碳合金相图中有五种固相组织，其中奥氏体、铁素体、渗碳体是单相组织，称为基本相，而珠光体、莱氏体则是由基本相混合组成的混合组织。

（二）铁碳相图

铁碳相图是指在极其缓慢冷却的条件下，铁碳合金的组织状态随温度变化的图解。由于碳的质量分数高于 6.69% 的铁碳合金，其脆性极大，工艺性能不好，在工业中没有实用价值，而渗碳体（ Fe_3C ）是一种稳定的化合物，可以作为一个独立的组元，所以我们研究的铁碳相图实际上是 Fe- Fe_3C 相图，简化后的 Fe- Fe_3C 相图如图 1-10 所示。

1. 铁碳相图中的主要特性点、线、区

(1) 主要特性点（见表 1-2）

(2) 主要特性线

1) ACD 线为液相线。在此线以上铁碳合金处于液体状态（L），冷却到此线时，碳的质量分数小于 4.3% 的铁碳合金在 AC 线下开始结晶出奥氏体（A）；碳的质量分数大于 4.3% 的铁碳合金在 CD 线下开始结晶出渗碳体（ Fe_3C ），称为一次渗碳体，用 Fe_3C_I 表示。

2) $AECF$ 线为固相线。在此线以下铁碳合金均呈固体状态。

3) ECF 线是一条水平线（对应的温度为 1148℃），称为共晶线。在此线上，液态合金将发生共晶转变，形成奥氏体和渗碳体组成的机械混合物，称为高温莱氏体。所谓共晶转变

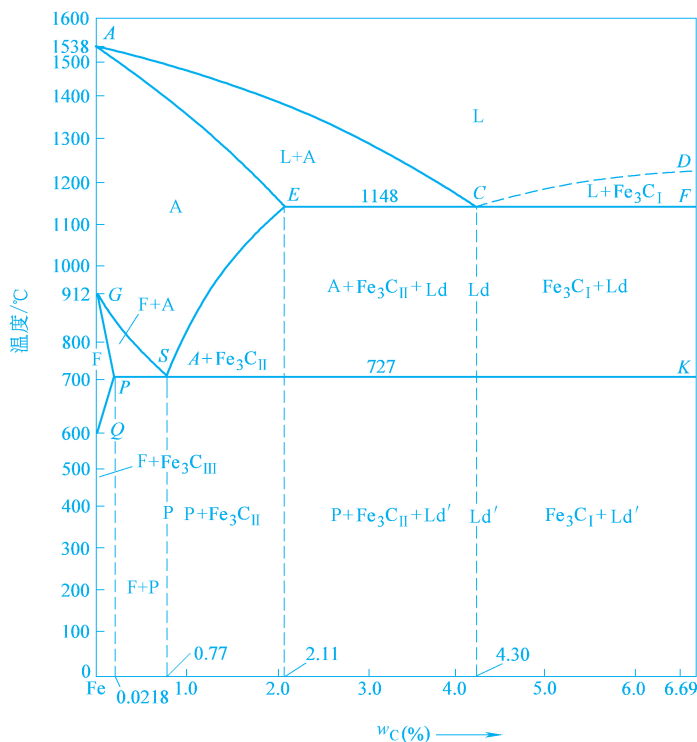
图 1-10 简化后的 Fe-Fe₃C 相图

表 1-2 铁碳相图中的主要特点

特点点	温度/°C	w _C (%)	含义
A	1538	0	纯铁的熔点
C	1148	4.3	共晶点,有共晶转变发生
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ-Fe 中的最大溶解度,钢与铁的分界点
F	1148	6.69	共晶渗碳体的成分点
G	912	0	纯铁的同素异构转变点(α-Fe⇌γ-Fe)
P	727	0.0218	碳在 α-Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点,有共析转变发生
K	727	6.69	共析渗碳体的成分点
Q	600	0.006	碳在 α-Fe 中的溶解度

是指在恒温下,从液态合金中同时结晶出两种晶体的转变过程,碳的质量分数在 2.11%~6.69%之间的铁碳合金均会发生共晶转变。

4) *PSK* 线是一条水平线(对应的温度为 727°C),称为共析转变线,也称 A_1 线。在此线上,固态奥氏体将发生共析转变,形成了铁素体和渗碳体组成的机械混合物,称为珠光体(P)。所谓共析转变是指在恒温下,从固相中同时析出两种不同成分晶体的转变过程,碳的质量分数大于 0.0218%的铁碳合金在 *PSK* 线上都会发生共析转变。

5) *ES* 线是固溶线,通常称为 A_{cm} 线。它是碳在奥氏体中的溶解度随温度变化的曲线。