



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家数控技能型紧缺人才培养培训工程系列教材
高职高专数控专业规划教材

机械制造 技术基础

Jixie Zhizao Jishu Jichu

王茂元 主编



 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
国家数控技能型紧缺人才培养培训工程系列教材

高职高专数控专业规划教材

机械制造技术基础

主 编 王茂元

副主编 赵云霞

王靖东

参 编 赵建平

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第004698号

机械工业出版社(北京百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:汪光旭 李淑欣 李淑欣 李淑欣
责任校对:刘志文 封面设计:张 静
责任印制:杨 康

北京机工印刷厂印刷

2007年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·32印张·217千字

0 001—4 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-30728-3

定价: 33.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、页码错误,请寄回本社调换。
邮购部电话:(010) 88379811
发行部电话:(010) 88379836
编辑部电话:(010) 88379841
地址:北京百万庄大街22号 机械工业出版社

机械工业出版社

本教材是根据教育部等国家部委关于技能型紧缺人才培养、培训工程的要求,针对数控技术应用专业而编写的。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》等教材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类高职高专有关专业教学使用,特别适合承担技能型紧缺人才培养任务的有关院校数控技术应用专业使用,也可供一般技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术基础/王茂元主编. —北京:机械工业出版社, 2007. 2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专数控专业规划教材 (国家数控技能型紧缺人才培养培训工程系列教材)

ISBN 978-7-111-20728-3

I. 机... II. 王... III. 机械制造工艺 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 004698 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: 汪光灿 责任编辑: 汪光灿 李欣欣 版式设计: 冉晓华

责任校对: 刘志文 封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22 印张 · 517 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-20728-3

定价: 33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379171

封面防伪标均为盗版

前 言

本教材是根据教育部等国家部委关于技能型紧缺人才培养、培训工程的要求，针对数控技术应用专业而编写的。编者吸收了近年来高职教育教学改革的成功经验，把原来的《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》等教材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。

本教材在内容取舍的把握上符合职业教育的特点。在编写过程中，特别注意了基本知识在实际生产中的应用，以及运用基本知识解决实际问题能力的培养。全书采用最新国家标准。

本教材适用于机械类和近机类高职高专有关专业教学使用，特别适合承担技能型紧缺人才培养任务的有关院校数控技术应用专业使用，也可供一般技术人员参考。

本教材由包头职业技术学院王茂元担任主编，天津机电职业技术学院赵云霞、包头职业技术学院王靖东担任副主编。参加编写的有天津机电职业技术学院赵云霞（第一章）、包头职业技术学院王茂元（绪论、第四章、第五章、第六章）、王靖东（第二章、第三章）、赵建平（第三章第四节、第七章、第八章、第九章）。全书由朱国桓担任主审。

本教材在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，也得到了有关院校领导和同行的大力支持，特别是得到了包头职业技术学院张海军老师的大力协助，在此表示衷心感谢！

由于我们水平有限，书中难免有欠妥之处，敬请各兄弟院校师生和广大读者批评指正。

编 者

2005年8月

目 录

前言	222
绪论	1
第一章 工程材料与热加工基础	2
第一节 金属材料的力学性能	2
第二节 材料的结构与凝固	6
第三节 材料的强化与热处理	17
第四节 常用的工程材料及选用	22
第五节 铸造成形工艺	44
第六节 锻压成形工艺	51
第七节 焊接与胶接成形工艺	56
习题与思考题	62
第二章 金属切削的基本知识	63
第一节 刀具的几何角度及切削要素	63
第二节 刀具材料	69
第三节 金属切削过程	74
第四节 提高切削效益的途径	81
习题与思考题	95
第三章 金属切削加工方法与设备	97
第一节 金属切削机床的基本知识	97
第二节 车削加工	105
第三节 铣削加工	120
第四节 钻削与镗削加工	137
第五节 磨削加工	150
第六节 圆柱齿轮加工	163
第七节 刨削与拉削加工	173
习题与思考题	184
第四章 工件的定位与夹紧	185
第一节 工件的定位	185
第二节 工件的夹紧	211
习题与思考题	222
第五章 机械加工工艺规程制订	226
第一节 基础知识及术语	226
第二节 零件的工艺分析	237
第三节 毛坯的选择	239
第四节 工艺路线的拟定	241
第五节 加工余量的确定	249
第六节 工序尺寸及其公差确定	252
第七节 工艺卡片的填写	261
习题与思考题	263
第六章 典型零件加工	265
第一节 轴类零件加工	265
第二节 套类零件加工	273
第三节 箱体类零件加工	281
习题与思考题	288
第七章 机床专用夹具	290
第一节 概述	290
第二节 各类机床专用夹具	292
习题与思考题	310
第八章 机械加工质量分析	311
第一节 机械加工精度	311
第二节 机械加工表面质量	334
习题与思考题	338
第九章 机械装配工艺基础	340
第一节 概述	340
第二节 保证装配精度的方法	343
习题与思考题	346
参考文献	347

机械绪论

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有关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。

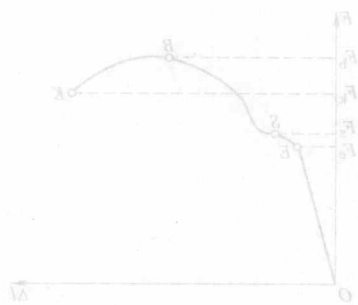


图 1-1 图

第一章 工程材料与热加工基础

工程材料是指工程技术上大量使用的材料，它包括金属材料、非金属材料（塑料、陶瓷、复合材料等）及新型材料。通过本章内容的学习，了解常用工程材料的成分、组织、结构、性能之间的关系以及改变材料性能需要采用的工艺手段等，并初步具备选择常用工程材料的能力，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、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载荷作用下其抵抗变形或破坏的能力，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

金属材料在载荷作用下抵抗弹性变形、塑性变形和断裂的能力称为强度。由于载荷作用方式不同，强度可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程上应用最普遍的是屈服强度和抗拉强度，这种强度指标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/T228—2002 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）。试样的伸长量随着载荷的增加而增加，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载荷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，当载荷 F 为零时，伸长量 Δl 为零。当载荷由零逐渐增大到 F_e 时，试样的伸长量与载荷成比例增加。此时卸除载荷，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。当载荷超过 F_e 时，试样除产生弹性变形外，还出现了塑性变形（或永久变形），即卸除载荷后，试样不能完全恢复到原来的形状和

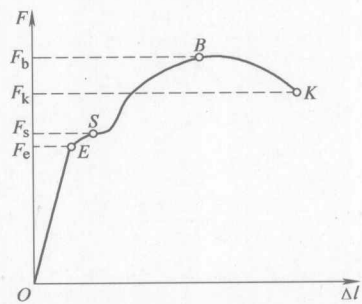


图 1-1 退火低碳钢的力-伸长曲线

尺寸。当载荷加到 F_s 时, 在曲线上开始出现水平(或锯齿形)线段, 这表示载荷不增加, 试样却继续伸长, 这种现象称为“屈服”, S 点称为材料的屈服点。当载荷超过 F_s 后, 试样的伸长量又随载荷的增加而增大, 此时试样已产生大量的塑性变形。当载荷继续增加到 F_b 时, 试样出现局部直径变细的现象, 通常称为“缩颈”现象。此时载荷逐渐降低到 F_k 时, 试样就在缩颈处被拉断。

金属材料受到载荷作用后其内部会产生一个与载荷相平衡的抵抗力(即内力), 此力的大小与外力相等, 方向相反。金属材料单位面积上的内力称为应力, 用 σ 表示。金属材料的强度就是用应力来度量的。

1. 屈服点和条件屈服强度

试样产生屈服现象时的最小应力称为屈服点, 用符号 σ_s (MPa) 表示,

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 F_s ——材料屈服时的最小载荷(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, 很难测出屈服点。在这种情况下, 工程上采用规定残余伸长应力来反应材料抗屈服的性能, 即试样卸除拉伸力后, 其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比时的应力。例如, 规定残余伸长率为 0.2% 时的应力以 $\sigma_{0.2}$ 表示, 称为条件屈服强度, 通常写作 $\sigma_{0.2}$ (MPa)。

式中 $F_{0.2}$ ——试样卸除拉伸力后, 标距部分的残余伸长为原标距长度的 0.2% 时的载荷(N)。

屈服点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点时, 仅有微量塑性变形产生; 超过屈服点时, 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 σ_b (MPa) 表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中 F_b ——试样断裂前所承受的最大载荷(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

金属材料在载荷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, 材料的塑性变形愈大, 表示它的塑性愈好。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

试样被拉断后标距的伸长量与原始标距的百分比称为断后伸长率，用符号 δ 表示。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_1 ——试样被拉断时的标距伸长量 (mm)；

l_0 ——试样的原始标距 (mm)。

2. 断面收缩率

试样拉断后，缩颈处横截面面积的最大缩减量与原始横截面面积的百分比称为断面收缩率，用符号 ψ 表示。

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_1 ——试样缩颈处的横截面面积 (mm^2)；

S_0 ——试样的原始横截面面积 (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硬物压入或划伤的能力，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，若压入后变形程度愈大，则材料的硬度值愈低；反之，硬度值愈高。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 ，用载荷与压痕球形表面积的比值作为布氏硬度值，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 7.355kN 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 1.588 mm 的淬火钢球压头，在初载荷与初、主载荷先后作用下，压入被测金属表面（见图 1-3），保持规定的时间后卸除主载荷，根据残余压痕深度增量来

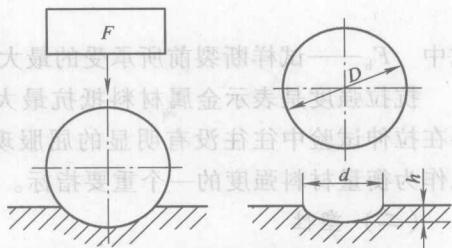


图 1-2 布氏硬度试验原理示意图

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 为在初载荷 98.07N (10kgf) 作用下, 压头压入深度 h_0 的位置; 2-2 为加入主载荷后, 压头压入深度 h_1 的位置; 卸除主载荷后, 被测金属弹性变形恢复, 使得压头向上回升 h_2 , 压头处于 3-3 位置。因此, 可以用压头受主载荷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 的大小来衡量被测金属的硬度。压痕深度值 h 愈大, 则被测金属的硬度愈低; 反之, 则愈高。为适应习惯上数值愈大, 硬度愈高的概念, 常用一常数 K 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。

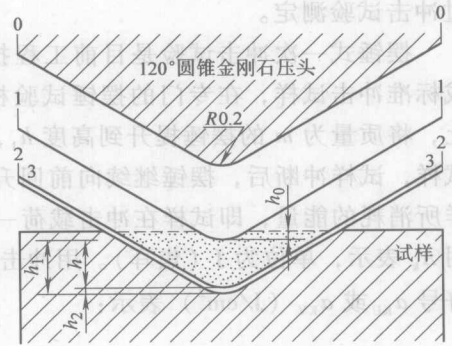


图 1-3 洛氏硬度试验原理示意图

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

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

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—2004)

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) 硬度与抗拉强度的关系

由于硬度反映了金属材料在局部范围内对塑性变形的抗力, 因此, 材料的硬度与强度之间有一定内在联系, 强度越高, 塑性变形抗力越大, 硬度值也越高。因此可以根据材料的硬度值大致估计材料的抗拉强度。其经验公式如下:

低碳钢 ($<176\text{HBW}$) $\sigma_b \approx 3.6 \times \text{HBW}$ (MPa)

高碳钢 ($>175\text{HBW}$) $\sigma_b \approx 3.45 \times \text{HBW}$ (MPa)

合金调质钢 $\sigma_b \approx 3.25 \times \text{HBW}$ (MPa)

灰铸铁 $\sigma_b \approx \text{HBW}$ (MPa)

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。有些零件, 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，即试样在冲击载荷一次作用下被冲断时所吸收的功，称为冲击吸收功，用 A_k 表示，单位为 J（焦耳）。用冲击吸收功除以试样底部横截面积就得到冲击韧度，用符号 a_{KU} 或 a_{KV} (J/cm^2) 表示：

$$a_{KU}(a_{KV}) = \frac{A_{KU}(A_{KV})}{S}$$

式中 S ——试样缺口底部横截面积 (cm^2)。冲击韧度愈大，则材料的韧性愈好；反之，则韧性愈差，即脆性愈大。

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点，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 次时的最大应力作为它的疲劳强度，且规定，对称循环应力的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。

第二节 材料的结构与凝固

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

一、材料的结合方式

(一) 金属的晶体结构

1. 晶体与非晶体

一切物质都是由原子组成的。根据原子排列的特征，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作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，且各向同性或等向性。

2. 晶体结构的基本概念

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：埃为非法定计量单位）， $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$ ）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。

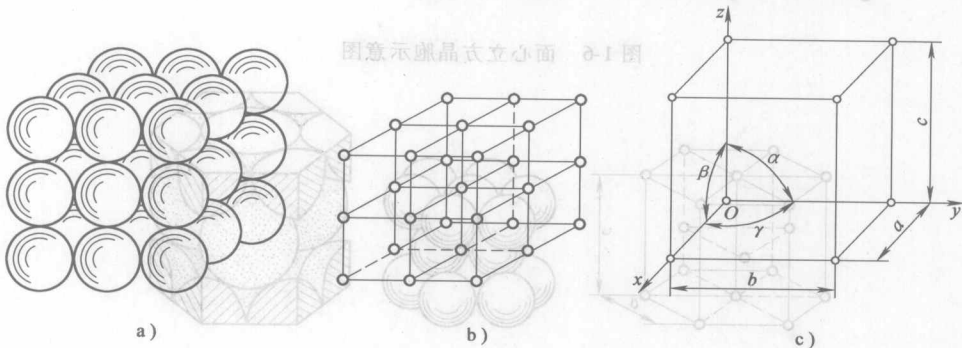


图 1-4 简单立方晶格与晶胞示意图

a) 晶体中的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

(二) 常见的晶体结构类型

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有一个原子，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。

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有一个原子，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。

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、下面的中心各有一个原子，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

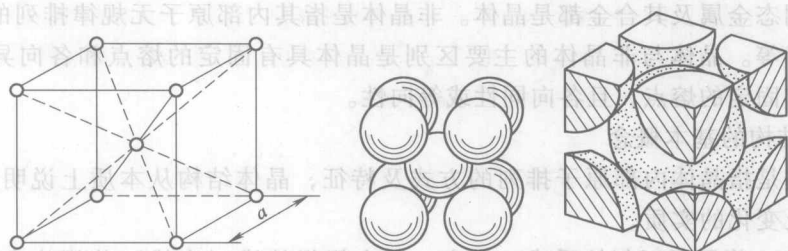


图 1-5 体心立方晶胞示意图



图 1-6 面心立方晶胞示意图

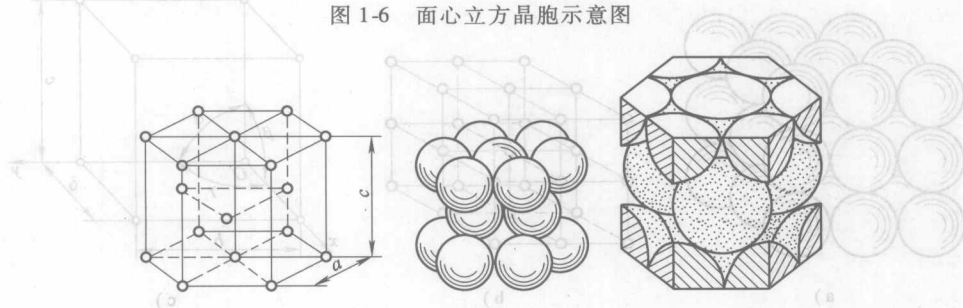


图 1-7 密排六方晶胞示意图

有：石墨、镁 (Mg)、锌 (Zn) 等。

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、材料的结构

(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. 晶体中的缺陷

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。

3. 晶体中的缺陷对金属材料力学性能的影响

综上所述,实际晶体内部存在各种缺陷,在缺陷处及其附近,晶格均处于畸变状态,直接影响金属的力学性能,表现为强度、硬度提高,塑性降低。

(二) 合金的晶体结构

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. 固态合金的相结构

由于组元之间相互作用的不同,固态合金的相结构可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元素的面心立方晶格。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。工业中,常常利用固溶强化来提高合金的力学性能。

(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,而是一种具有复杂结构的晶体晶格。金属化合物的熔点较高,性能硬而脆,是合金中的强化相。

(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、材料的凝固

物质从液体状态通过冷却变为固体状态的过程称为凝固。如果通过凝固能形成晶体结构,则称为结晶。由于固态金属大多是晶体,所以金属及合金从液体转变为固态的过程都是结晶过程。

(一) 金属结晶的基本规律

1. 冷却曲线和过冷度

纯金属的结晶是在一定温度下进行的,金属的结晶温度可用热分析等实验方法来测定。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,直到冷却到室温(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。

上述实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 $\Delta T = T_0 - T_1$ 。实验研究表明,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

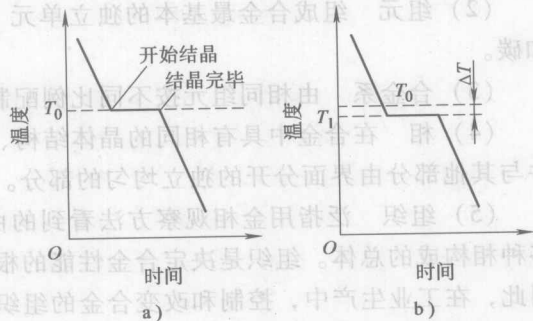


图 1-8 纯金属的冷却曲线

冷情况下结晶的，过冷是金属结晶的必要条件。

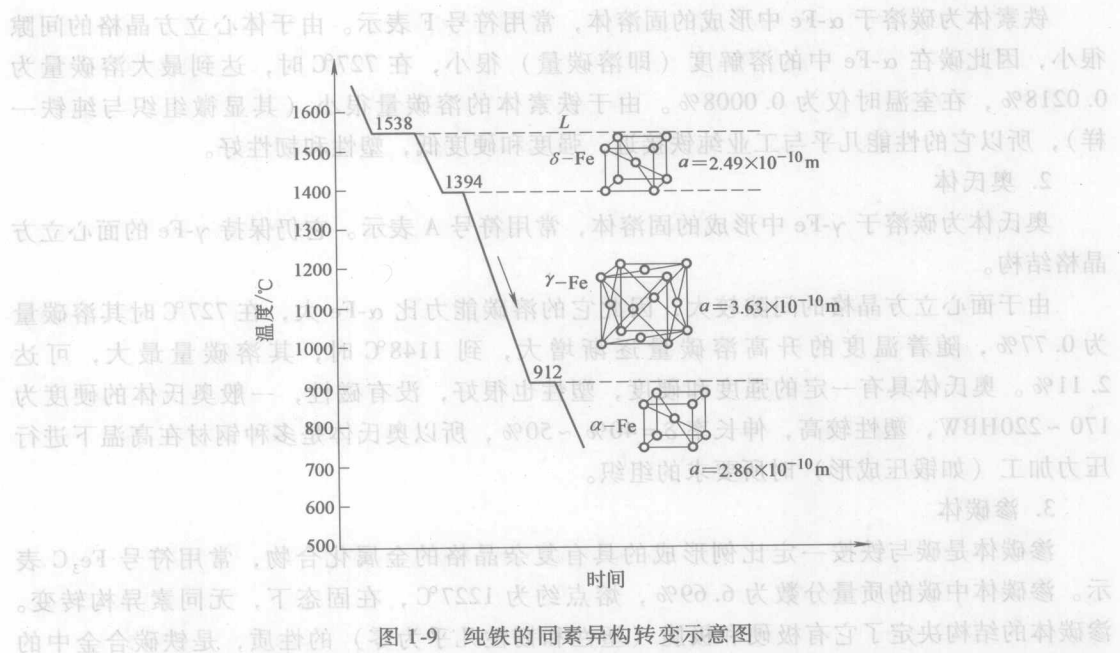
2. 结晶过程及其基本规律

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。它是物质进行结晶的普遍规律。

3. 晶粒大小对力学性能的影响
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，金属材料的晶粒愈细小，其综合的力学性能就愈好。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（或称同素异晶转变）。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°C 结晶成固体后为体心立方晶格，称为 δ -Fe；继续冷却至 1394°C 时，转变为面心立方晶格，称为 γ -Fe；再继续冷却至 912°C 时，又转变为体心立方晶格，称为 α -Fe；912°C 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。

四、铁碳合金相图

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。

铁碳合金相图是指在平衡（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，制定热处理工艺与冷、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 $\alpha\text{-Fe}$ 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 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度（即溶碳量）很小，在 727°C 时，达到最大溶碳量为 0.0218%，在室温时仅为 0.0008%。由于铁素体的溶碳量很小（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 $\gamma\text{-Fe}$ 中形成的固溶体，常用符号 A 表示。它仍保持 $\gamma\text{-Fe}$ 的面心立方晶格结构。

由于面心立方晶格的间隙较大，因此它的溶碳能力比 $\alpha\text{-Fe}$ 大，在 727°C 时其溶碳量为 0.77%，随着温度的升高溶碳量逐渐增大，到 1148°C 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，伸长率 $\delta = 40\% \sim 50\%$ ，所以奥氏体是多种钢材在高温下进行压力加工（如锻压成形）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°C ，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（ $\delta = 20\% \sim 35\%$ ），硬度适中（约为 80~200HBW）。

5. 莱氏体

莱氏体是一种机械混合物。在 $1148 \sim 727^\circ\text{C}$ 之间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°C 以下由珠光体与渗碳体组成的机械混合物称