

高等学校教材

机械工程基础

► 冯鹤敏 陈彩凤 主 编
黄一晴 洪 琢 副主编



化学工业出版社

教材出版中心

高等学校教材

机械工 程 基 础

冯鹤敏 陈彩凤 主 编
黄一晴 洪 琢 副主编
戈晓岚 主 审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

机械工程基础/冯鹤敏, 陈彩凤主编. —北
京: 化学工业出版社, 2005. 4
高等学校教材
ISBN 7-5025-6954-5

I. 机… II. ①冯…②陈… III. 机械工程-高等学
校-教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 032414 号

高等学校教材

机械工程基础

冯鹤敏 陈彩凤 主 编

黄一晴 洪 琢 副主编

戈晓岚 主 审

责任编辑: 程树珍

文字编辑: 刘维大

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 517 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6954-5

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

机械工程基础是高等工科院校非机类和近机类专业的一门主要技术基础课。目的是开拓专业知识,进行跨专业、跨学科的教学,培养知识面广、一专多能的复合型人才。其任务是了解机械产品的设计及制造方法,掌握各种常用机构及零部件的特点、应用及各种典型和先进的机械制造技术。

进入 21 世纪,创新教育及实践教育已提到了极为重要的位置。本教材是建立在创新和实践的立意上进行编写。坚持以应用为目的、以必需够用为度和少而精、浅而广的原则。全书具有很强的系统性。全书从三个角度进行编写:通过机械工程中常用材料的组织及性能控制、材料成形、机械加工三个方面,分别叙述传统的机械制造过程及常规制造方法;通过常用机械传动装置、液压传动及气动技术三方面,了解机械产品的设计过程;尽可能全面地介绍机械制造中的新工艺、新技术、新方法及其发展趋势,以扩大学生的知识面,使高校培养的学生能适应时代对工程技术人员的要求。各章节均有实例分析并附有复习思考题。书中所有名词术语全部采用国家标准,计量单位也采用法定计量单位。

本书可以满足教学计划在 48~80 课时的教学需要。是高等工科院校近机械工程类和非机械工程类的基本教材,也可供高职、电大、职大、夜大学、自学考试等学生作为教材或参考书,也可供工程技术人员参考。

全书分为四篇二十二章,主要内容包括:工程材料及热处理、热加工基础、机械设计基础、液压与气压传动、公差配合与检测、金属切削基本知识、金属切削机床和机械制造技术等。参加本书编写的有陈彩凤(第二、三、四章),黄一晴(第五、六、七章),王新华(第八、九、十、二十二章),董海森(第十一章),冯鹤敏(第十二、十三、十四、十九、二十、二十一章),徐志林(第十五、十六章),潘恒沧(第十七章),洪琢(第一、十八章)。本书由冯鹤敏、陈彩凤任主编,黄一晴和洪琢任副主编。

本教材承江苏大学戈晓岚教授任主审;上海理工大学盛善权教授对教材的编写提出了许多具体的指导;李郝林教授和麦云飞副教授在本书的编写过程中的给予了热情支持与帮助,在此表示诚挚的谢意!各位编者在编写过程中,参阅了大量的文献资料及教材,无法在此一一列出,谨此一并向原作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请批评指正。

编者

2005 年 1 月

内 容 提 要

本书分为五篇二十二章，主要包括工程材料及热加工基础、常用机械传动装置、液压与气压传动、公差配合及其检测、机械制造技术等。本书对机械工程基础课程的传统教材内容和体系进行了较大的改革，全书涵盖了机械设计和制造的主要基础知识，全书坚持以应用为目的，以必须够用为度和少而精、浅而广的原则。全书具有很强的系统性，各章节均有实例分析并附有复习思考题。书中所有名词术语全部采用国家标准，计量单位也采用法定计量单位。

本书是高等工科院校近机械工程类和非机械工程类的基本教材，也可供高职、电大、职大、夜大学、自学考试等学生作为教材或参考书，也可供工程技术人员参考。

目 录

第一篇 工程材料及热加工基础

第一章 工程材料基础知识.....	1
第一节 工程材料的力学性能.....	1
第二节 工程材料的类型及其特征.....	5
复习思考题.....	6
第二章 铁碳合金及热处理.....	7
第一节 材料的结构、金属的结晶及其晶体结构.....	7
第二节 铁碳合金状态图	10
第三节 钢的热处理及表面改性	14
复习思考题	20
第三章 常用工程材料及现代结构材料	21
第一节 金属材料	21
第二节 非金属材料	26
第三节 现代结构材料	30
复习思考题	32
第四章 热加工基础	33
第一节 铸造生产	33
第二节 锻压生产	39
第三节 焊接生产	48
复习思考题	57

第二篇 常用机械传动装置

第五章 带传动和链传动	58
第一节 带传动	59
第二节 链传动	65
复习思考题	69
第六章 齿轮啮合传动	70
第一节 齿轮传动的特点及类型	70
第二节 齿廓啮合基本定律	71
第三节 渐开线齿廓	72
第四节 渐开线齿轮各部分的名称及尺寸	74
第五节 渐开线齿轮传动的啮合	76
第六节 斜齿圆柱齿轮传动	78

第七节 圆锥齿轮传动、蜗杆传动和轮系简介	82
复习思考题	87
第七章 常用零部件	88
第一节 螺纹及其联接件	88
第二节 轴-毂及其联接件	97
第三节 轴	102
第四节 滑动轴承	105
第五节 滚动轴承	109
第六节 联轴器与离合器	118
复习思考题	122

第三篇 液压与气压传动

第八章 液压传动概述	123
第一节 液压传动的原理、组成及特点	123
第二节 液压传动的基本参数	125
复习思考题	126
第九章 液压元件	127
第一节 液压泵与液压马达	127
第二节 液压缸	132
第三节 液压控制阀	135
第四节 液压辅件	143
复习思考题	147
第十章 液压基本回路	149
第一节 压力控制回路	149
第二节 速度控制回路	152
第三节 多缸配合控制回路及系统实例	156
复习思考题	158
第十一章 气压传动	160
第一节 概述	160
第二节 气源装置及气动元件	161
第三节 气动基本回路	166
复习思考题	168

第四篇 公差与配合

第十二章 尺寸的公差与配合	171
第一节 基本术语及定义	171
第二节 公差与配合的国家标准	174
第三节 公差与配合的选择	182

复习思考题	184
第十三章 形状和位置公差	186
第一节 基本概念	186
第二节 形状与位置公差带	190
复习思考题	199
第十四章 表面粗糙度	200
第一节 概述	200
第二节 表面粗糙度的评定	200
第三节 表面粗糙度的选择与标注	203
复习思考题	204

第五篇 机械制造技术

第十五章 金属切削基本知识	205
第一节 切削加工的基本概念	205
第二节 金属切削刀具	207
第三节 金属切削的基本规律	212
复习思考题	217
第十六章 金属切削机床	218
第一节 机床的分类和型号及基本要求	218
第二节 机床的传动系统	222
第三节 常用机床概述	226
第四节 数控机床概述	234
复习思考题	239
第十七章 切削加工方法	240
第一节 车削加工	240
第二节 铣削加工	243
第三节 刨削加工	246
第四节 钻削、镗削和拉削	246
第五节 磨削加工	251
复习思考题	255
第十八章 特种加工	256
第一节 电火花加工	256
第二节 电化学加工	257
第三节 激光加工	259
第四节 超声波加工	261
复习思考题	263
第十九章 夹具基本知识	264
第一节 机床夹具的作用和组成	264
第二节 工件的定位与夹紧	265

第三节 常用机床夹具简介·····	278
复习思考题·····	284
第二十章 机械加工工艺规程·····	287
第一节 基本概念·····	287
第二节 毛坯的选择·····	293
第三节 基准及其选择·····	295
第四节 工艺路线的拟定·····	297
复习思考题·····	305
第二十一章 机器装配工艺基础·····	306
第一节 装配内容和组织形式·····	306
第二节 装配精度·····	307
第三节 保证装配精度的工艺方法·····	308
第四节 装配工艺规程的制订·····	312
复习思考题·····	313
第二十二章 先进制造技术简述·····	315
第一节 柔性制造系统 (FMS) ·····	315
第二节 计算机辅助工程技术·····	316
第三节 计算机集成制造系统 (CIMS) ·····	318
第四节 其他先进制造技术·····	319
复习思考题·····	321
主要参考文献·····	322

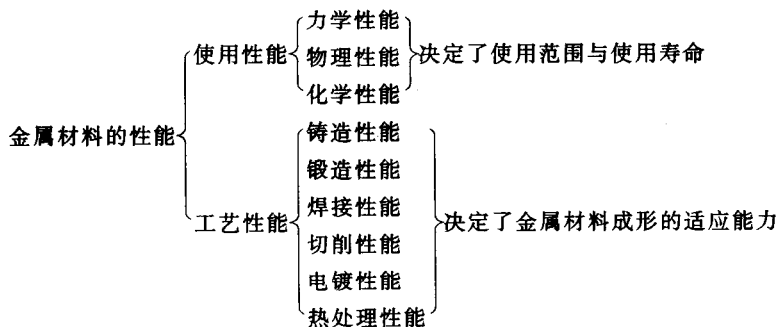
第一篇 工程材料及热加工基础

材料是人类用来制作各种产品的物质。如今，材料、能源、信息已成为现代人类文明的三大支柱，而材料又是能源与信息发展的物质基础。机械制造技术需要解决的主要问题是选材和如何加工，本篇介绍常用的工程材料和金属的热加工基础知识。

第一章 工程材料基础知识

第一节 工程材料的力学性能

为了正确使用和加工材料，必须了解材料的性能，金属材料的性能归纳如下：



其中力学性能是指材料在外力作用下表现出来的性能，主要有强度、硬度、塑性、冲击韧性、疲劳强度等；物理性能有密度、熔点、导电性、导热性、磁性等；化学性能有抗腐蚀性、抗氧化性等。

多数机械零件是在常温、常压、非强烈腐蚀介质中工作，且在使用过程中各机械零件将承受不同的力的作用，所以一般机械制造中选用材料和鉴定材料工艺质量时，常以力学性能指标为主要依据。

一、强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。抵抗变形和破坏的能力越大，则强度越高。根据受力状况的不同，材料的强度可分为抗拉、抗压、抗弯、抗扭和抗剪强度等。一般以抗拉强度作为最基本的强度指标。

材料的强度指标广泛采用拉伸试验来进行测定。拉伸试验是将按国家标准规定的形状和尺寸制作的金属试棒 [见图 1-1 (a)] 装夹在拉伸试验机上，对其两端慢慢增加轴向静拉力，试棒的标距长度将逐渐增加，直至被拉断 [见图 1-1 (b)]。

图 1-2 所示为低碳钢试验的拉伸曲线 (由拉伸试验机自动绘出)。曲线说明：当载荷 F 小于 F_e 时，变形与载荷成正比的线性关系，此时，若去除载荷，变形立即完全消失，试棒恢复原长，这种载荷去除后能自行恢复的变形称为弹性变形；当载荷大于 F_e 后，试棒除发生弹性变形外，还发生部分不能消失的永久变形，称为塑性变形；当载荷继续增大到 F_s 时，

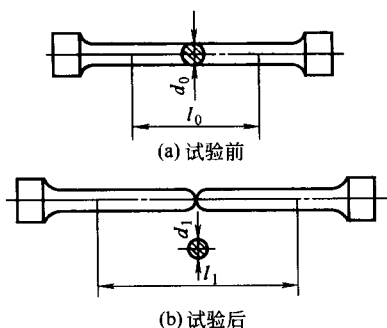


图 1-1 拉伸试验

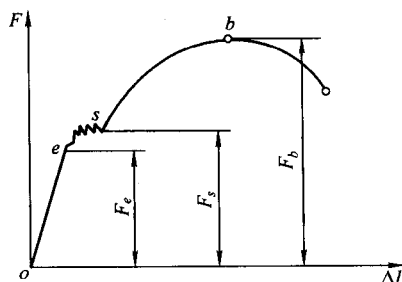


图 1-2 低碳钢试验的拉伸曲线

曲线出现水平（或波动）线段，这种现象称“屈服”。 F_s 称为屈服载荷，试棒屈服后，随载荷的增大，塑性变形急剧增加；当载荷增大到 F_b 后，试棒的某一部分急剧变细，此现象称为“颈缩”现象，最后在颈缩处断裂。

应该强调，屈服标志着金属材料在外力的作用下发生明显的塑性变形， F_s 是材料出现明显塑性变形前所承受的最大载荷；颈缩预示着金属材料将要发生断裂， F_b 是材料在断裂前所承受的最大载荷。

利用拉伸曲线可以求得金属材料的强度指标。为了对不同的材料的强度进行比较，强度指标以应力表示。当材料受载荷作用而不被破坏时，其内部相应产生与载荷相平衡的抵抗力，称为内力，其数值大小与载荷大小相等。单位横截面积上所承受的内力称为应力，即

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中 σ ——应力， N/mm^2 或 MPa ；

F ——载荷， N ；

A ——试棒的横截面积， mm^2 。

拉伸曲线对应于 F_s 、 F_b 的应力分别称为材料的屈服点和抗拉强度，常作为金属材料的强度指标。

1. 屈服强度

屈服强度是指金属材料开始产生屈服时的应力，即拉伸曲线 s 点的应力，用 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中 σ_s ——应力， N/mm^2 或 MPa ；

F_s ——载荷， N ；

A_0 ——试棒的原始横截面积， mm^2 。

有些金属材料没有明显的屈服现象，也不产生颈缩现象，它们的屈服强度很难测量。按国标 GB 228—87 要求，用试棒产生 0.2% 的残余伸长率时的应力 $\sigma_{0.2}$ 来表示，称为规定残余伸长应力，其计算公式与 σ_s 类同。

2. 抗拉强度

抗拉强度是指金属材料在断裂前所能承受的最大拉应力，即拉伸曲线中的 b 点的应力，用 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

屈服强度和抗拉强度是机械设计、选择材料的重要依据。如果材料工作时的应力大于 σ_s ，零件会产生塑性变形而失效；如果材料工作时的应力大于 σ_b ，则将导致零件的断裂破坏。

二、塑性

塑性是材料在外力（静载）作用下产生永久变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率，分别用 δ 和 ψ 表示。计算公式如下：

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

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

式中 δ 、 ψ ——分别为伸长率和断面收缩率，%；

l_0 、 l_1 ——分别为试棒原始标定长度和拉断后的标定长度，mm；

A_0 、 A_1 ——分别为试棒原始横截面积和拉断后的横截面积，mm²。

标准试棒： $l_0 = 5d_0$ ——短试棒；用 δ_5 表示

$l_0 = 10d_0$ ——长试棒；用 δ_{10} 表示

δ 、 ψ 越大，材料塑性越好，也就是在外力作用下更容易产生永久变形。良好的塑性可以提高零件工作的可靠性，防止突然断裂，保证零件的安全工作。

低碳钢塑性好，利用压力加工实现塑性变形，达到成形加工的目的，如锻造、拉伸等。铸铁塑性差，脆性大，不能采用压力加工。

三、硬度

硬度是材料抵抗更硬物体压入的能力，是衡量材料软硬程度的指标。常用的硬度指标有布氏硬度（HB）、洛氏硬度（HR）和维氏硬度（HV）。

1. 布氏硬度（HB）

（1）测试原理 如图 1-3 所示，将一定直径的球体，以一定的压力压入材料表面，经规定的保持时间后卸载，用测量压痕的直径计算硬度。材料越软，压痕的直径越大，则布氏硬度越低。

（2）适用范围 用淬火钢球作为压头，测定值用 HBS 表示，测量布氏硬度值在 450HBS 以下的金属材料；用硬质合金球作为压头，测定值用 HBW 表示，用于测定布氏硬度值在 450 以上的较硬金属材料。如 210~240HBS，480~520HBW。

2. 洛氏硬度（HR）

（1）测试原理 以压痕的深度来计算硬度。先加初载荷以消除表面不平而引起的误差，然后再加载，经规定的保持时间后卸载，以压痕的深度来计算硬度，其值可以从洛氏刻度盘上直接读出。

（2）分类 根据压头和载荷的不同，试验机刻度盘上有 A、B、C 三种标尺，分别代表

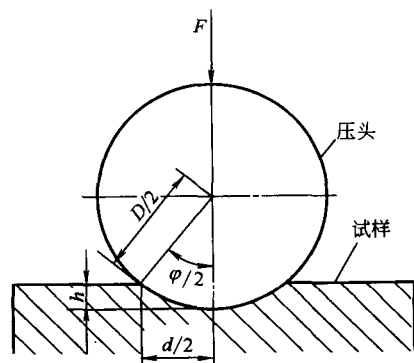


图 1-3 布氏硬度试验原理

不同的硬度大小，见表 1-1。

表 1-1 常用的洛氏硬度规范 (摘自 GB/T 230—91)

标尺种类	硬度符号	压头类型	初始载荷/N	总载荷/N	适 应 材 料
A	HRA	120°金刚石压锥	100	600	硬质合金、表面淬硬、渗碳、特硬材料
B	HRB	φ1.5875 钢球	100	1000	退火钢、正火钢,有色金属及较软材料
C	HRC	120°金刚石压锥	100	1500	淬火钢、调质钢

注：洛氏硬度无单位，但要表明硬度符号，如 50~55HRC。

四、冲击韧度

以上讨论的是静载荷下的力学性能指标，但机器中有很多零件要承受冲击载荷，不能用材料在静载荷下的性能来衡量其抵抗冲击的能力，冲击载荷比静载荷的破坏能力要大得多。

冲击韧度是指材料抵抗冲击的能力，用 α_k 表示，通常采用摆锤冲击试验进行测定（见图 1-4）。

试验原理：将带有缺口的试样安放在支座上，让摆锤（质量为 G ）从一定高度 h_1 落下，将试样冲断，随后摆锤继续上升至 h_2 ，显然所消耗的功为 $A_k = G(h_1 - h_2)$ 焦耳（J），则冲击韧度为试样单位截面积所消耗的冲击吸收功。该值可从试验机的刻度盘上直接读出。

$$\alpha_k = A_k / S \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

式中 S ——缺口处横截面积。

α_k 越大，材料的冲击韧性越好，受冲击越不易断裂。

五、疲劳强度

许多机器零件，如轴、齿轮等，在工作中承受的载荷不是静态的，而是反复改变大小或同时改变大小和方向的交变载荷。在这种载荷作用下，虽然零件所受的应力小于材料的抗拉强度，甚至低于屈服强度，但使用一段时间后，零件会突然断裂。这种现象称为疲劳破坏。

研究表明，疲劳破坏的原因是在零件的应力集中部位或内部某一薄弱部位首先产生裂纹，随后在应力循环作用下，裂纹不断地向纵深扩展，使零件有效的承载截面不断减少，当其减少到不能承受外加载荷的作用时，便突然断裂。疲劳断裂的断口如图 1-5 所示。

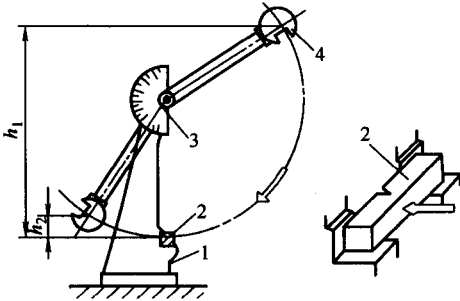


图 1-4 冲击试验原理图

1—支座；2—试样；3—指针；4—摆锤

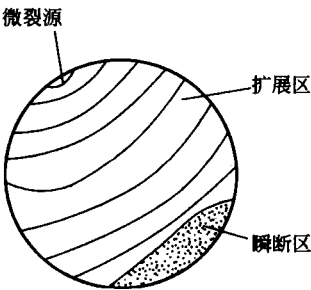


图 1-5 疲劳断口示意图

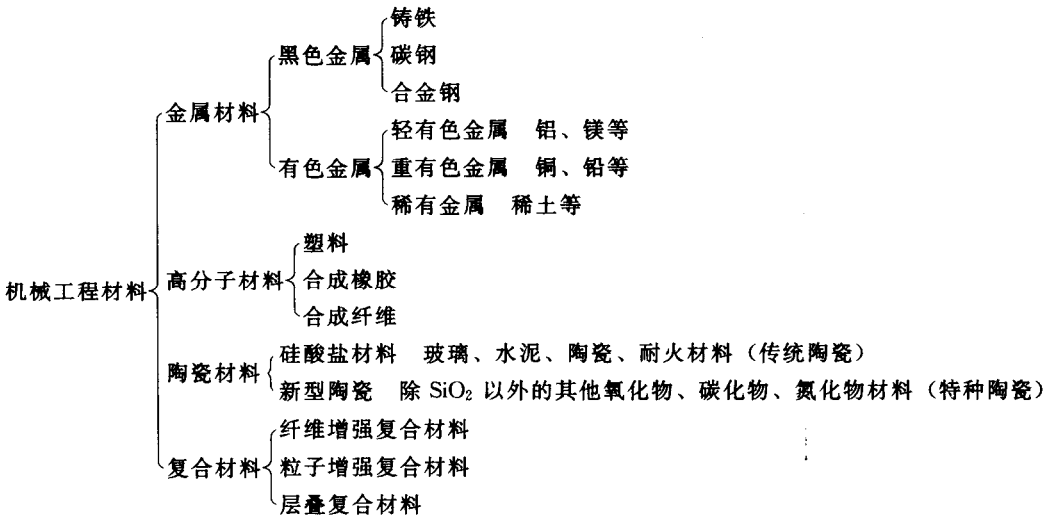
材料在无限次交变应力作用下而不被破坏的最大应力称为材料的疲劳强度。当应力是对称循环时，疲劳强度用 σ_{-1} 来表示。实际上，各种材料不可能进行无限次重复试验，所以，工程上规定：钢在经受 10^7 次，有色金属在经受 10^8 次交变应力的作用下而不发生破坏的能

力作为材料的疲劳强度。

第二节 工程材料的类型及其特征

一、工程材料的分类

现代材料种类繁多，据粗略统计，目前世界上的材料已达 40 余万种，并且每年约以 5% 的速率增加。材料有许多不同的分类方法，机械工程中使用的材料常按化学成分组成的不同分为四大类。



按零件在机械或机器中实现的功能，将制造零件的材料分为结构材料和功能材料。用于制造实现运动和传递动力的零件的材料称为结构材料，用于制造实现其他功能的零件的材料称为功能材料。功能材料是利用物质的各种物理和化学特性及其对外界环境敏感的反应，从而实现各种信息处理和能量转换，主要有弹性材料、膨胀材料、形状记忆合金和磁性材料等。机械工程中大量使用各类结构材料。

二、各类材料的特征

1. 金属材料的特征

金属材料具有良好的导电性、导热性、塑性和工艺性能等，因此，在工业中获得广泛的应用。金属中有自由电子存在，只要在金属两端施加很小的电压，就可使自由电子向正极流动，从而形成电流，这便是金属具有高导电性的原因，同样理由也使金属具有良好的导热性。金属能在一定外力作用下发生一定的永久变形而不致破裂，这就是金属具有高塑性的原因。

2. 高分子材料的特征

高分子材料是以相对分子质量大于 5000 的高分子化合物为主要组分的材料，其中每个分子可含几千、几万、甚至几十万个原子。高分子材料又分为有机高分子材料和无机高分子材料。

有机高分子材料由相对分子质量大于 10000 的以碳、氢元素为主的有机化合物组成（如塑料、橡胶、合成纤维等），具有高弹性、耐磨性、绝缘性、抗腐蚀性、质量轻等优良性能，而且易于成型，原料来源丰富，在机械、仪表、电机和电气等工业中得到广泛应用。有机高

分子化合物是由低分子化合物聚合而成的，故又称高聚物。

3. 陶瓷材料的特征

陶瓷是一种无机非金属材料，是由金属和非金属元素形成的化合物。由于它的熔点高、硬度高、化学稳定性高，具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、绝缘等优点，在现代工业中已得到越来越广泛的应用。在有些情况下，陶瓷为惟一能选用的材料，例如内燃机的火花塞，引爆时瞬间温度可达 2500°C ，并要求绝缘和耐化学腐蚀，显然金属材料和高分子材料都不能满足要求，只有陶瓷最为合适。

4. 复合材料

复合材料是由两种或两种以上材料复合而成的一种多相材料，它们保留了组成材料各自的优点，从而获得单一材料无法具备的优良综合性质，是一种很有发展前途的材料。

复习思考题

- 1.1 什么是金属材料的强度、塑性、硬度，它们各有哪些主要指标？
- 1.2 什么是材料的冲击韧度，怎样衡量其大小？
- 1.3 有一紧固螺栓使用后发现有塑性变形（伸长），试分析该零件材料的哪些性能指标达不到要求？
- 1.4 下列硬度指标标注方法是否正确，如何改正？

HBS210~240 180~210HRC HRC29~25 450~480HBS

第二章 铁碳合金及热处理

第一节 材料的结构、金属的结晶及其晶体结构

一、材料的结构

1. 晶体与非晶体

固体可分为晶体和非晶体两类。晶体中原子按一定规则排列，如图 2-1 (a) 所示，金属及其合金及大多数矿物都是晶体。非晶体的原子排列较不规则，最普通的非晶体是玻璃，非晶体的结构比晶体结构更难确定。

如果把所有具有相同环境的原子或原子群作为一个质点，则晶体结构可以抽象为这些质点在空间上周期性规则排列的空间点阵，如图 2-1 (b) 所示。

在空间点阵中取一单位体积（通常为六面体）作为点阵的最小组成单元，称为晶胞，如图 2-1 (c) 所示。

2. 金属的晶体结构

金属材料包括纯金属和合金，在一般情况下都是晶体。最常见的金属晶体结构有三种，如图 2-2 所示。

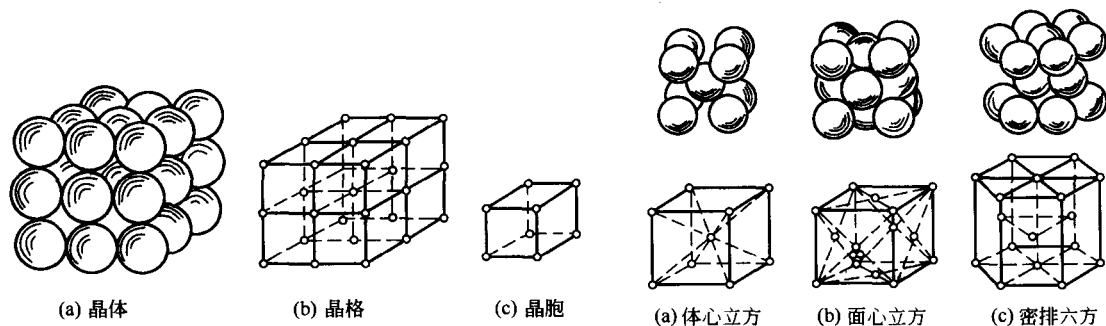


图 2-1 晶体中原子的排列与晶格示意

图 2-2 金属的晶胞

3. 材料的晶体缺陷

在实际晶体中，或多或少存在偏离理想结构的区域，称为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的许多性能有极其重要的影响，与晶体的凝固、固态相变、扩散等过程都有重大关系，特别是对塑性变形、强度和断裂等方面起着决定性的作用。

在晶体中，缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着，而是随着各种条件的改变而不断地

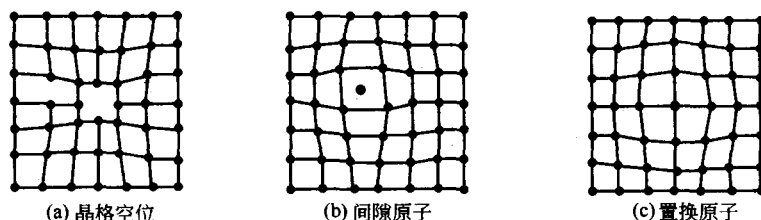


图 2-3 点缺陷示意

变动，它们可以产生、发展、运动和交互作用，有时则会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷（晶格空位、间隙原子和置换原子，如图 2-3 所示）、线缺陷（晶体中呈连续线状分布的位错，如图 2-4 所示）和面缺陷（晶界、亚晶界，如图 2-5 所示）三类。

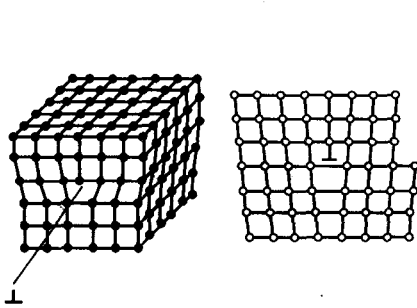


图 2-4 线缺陷示意

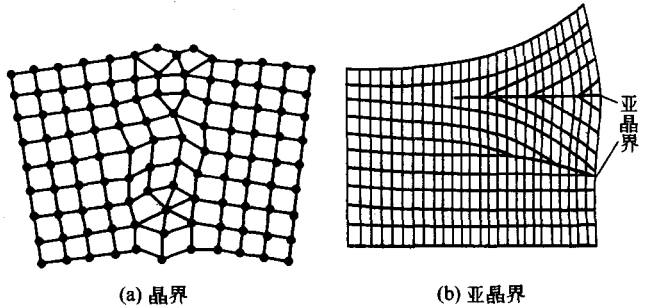


图 2-5 面缺陷示意

所有这些缺陷，都将导致周围的晶格发生明显的畸变，从而对金属的力学性能、化学性能产生显著的影响。

二、金属的结晶

1. 结晶的概念

金属溶液在凝固后一般都以晶质状态存在，即内部原子由不规则的排列转变到规则排列，形成晶体的过程，称为结晶过程。结晶形成的组织，直接影响金属内部的组织与性能。

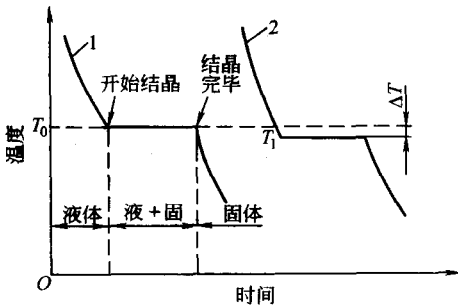


图 2-6 纯金属结晶时的冷却曲线

金属在结晶过程中，其结晶温度可以用热分析法测定。将液态金属放在炉中缓慢冷却，在冷却过程中测得温度随时间变化的数据，则得到如图 2-6 所示的冷却曲线 1。由于结晶时放出潜热，补偿了冷却散失的热量，所以冷却曲线出现水平台阶，即结晶在恒温下进行。在无限缓慢冷却条件下的平衡结晶温度 T_0 。称为理论结晶温度。曲线 2 表示实际的结晶过程。在实际结晶时，冷却速度不可能无限缓慢，因此实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 ，理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度，即 $T_0 - T_1 = \Delta T$ 。金属结晶的过冷度与冷却速度有关，冷却速度越快，过冷度就越大。

实际结晶时，冷却速度不可能无限缓慢，因此实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 ，理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度，即 $T_0 - T_1 = \Delta T$ 。金属结晶的过冷度与冷却速度有关，冷却速度越快，过冷度就越大。

2. 金属结晶过程

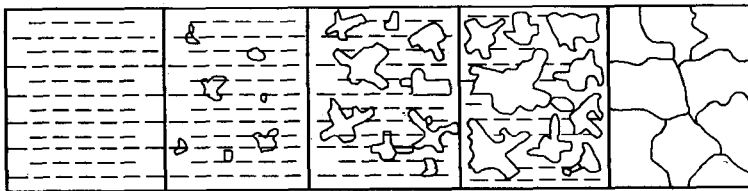


图 2-7 纯金属结晶过程示意