

工程材料及成型技术基础

陈希章 薛 伟 主 编
张 健 钟 蓉 副主编



科学出版社

工程材料及成型技术基础

陈希章 薛 伟 主 编

张 健 钟 蓉 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从机械工程需求和性能出发,引入材料的晶体结构,以铁-碳相图为核心,基于相变,深入浅出地讲解了金属热处理原理和工艺以及热加工工艺,并对非金属材料及新型材料的加工工艺作了介绍。本书共十章,内容包括工程材料性能、金属的晶体结构与结晶、铁碳合金、金属热处理及工艺、工业用钢、有色金属及其合金、非金属材料及新型材料加工工艺、铸造、金属压力加工、焊接。作者撰写时注重前后贯通,并结合了最新行业和国家标准,旨在更好地培养出具有工程应用能力的人才。

本书可作为普通高校机械类、材料类等工科专业本科生教材,也可供大专生和相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成型技术基础/陈希章,薛伟主编. —北京:科学出版社,2016.1
ISBN 978-7-03-046959-5

I. ①工… II. ①陈… ②薛… III. ①工程材料-成型 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第006692号

责任编辑:胡凯 许蕾 周丹/责任校对:韩杨

责任印制:张倩/责任设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:400 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

《工程材料及成型技术基础》是根据教育部“工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求”编写而成的，是高等院校大机械类专业的专业基础课程。本书立足机械加工类制造工艺对材料的应用需求，为适应新形势下的机械工程类专业教学改革而编写。本书根据授课团队多年的教学经验，在教学讲义的基础上编撰而成，并根据国内国际标准，更新了工程材料的标准体系，力求在保证工程材料理论体系和应用的基础上反映当前工程材料的最新发展。本课程内容繁杂，涉及较多，本书重点在结构体系上进行建设，注重前后贯通，以原理为轴线，贯穿于各热加工工艺中；更新了相关行业和国家标准，部分结合了最新的国际标准和国际工程师培养体系方法。针对全国高等教育工程化人才培养的需求，编写过程力求理论联系实际、原理与工艺密切结合，能使学生对材料科学原理和热加工工艺有较为深入的了解，为后续专业课程奠定扎实的基础。

本书主要包含三大知识模块：第一部分是材料科学基础部分，第二部分是工程材料基础部分，第三部分是材料的热加工工艺部分。本书共 10 章。陈希章、薛伟、张健、钟蓉等共同编写了全部内容，全书由陈希章统稿。在本书的编写过程中，曹红岩、胡科、王鹏飞、郑怀忠、赵景奇等对全书进行了校对和图表的绘制及编辑；授课老师曹宇副教授对部分章节进行了润色，提出了宝贵建议和意见。本书成稿后不仅请本专业专家进行阅读，还分别请机械、工业工程、材料、模具等专业的本科毕业生和研究生进行了通读，从学生的理解角度对书籍进行了语言编排和原理解释。

本书可作为“工程材料及成型技术基础”课程教材，该课程是面向工业工程、机械设计类学生开设的一门重要的技术基础课，课程的主要目的是培养学生具备常用工程材料及零件热加工工艺的知识和工程应用能力。

由于编者水平有限，对于书中存在的缺点及错误，诚恳地希望各位读者批评指正，我们将在后续版本中进行修改和完善。

编 者

2015 年 12 月 7 日

目 录

前言

第一章 工程材料性能	1
第一节 静载时材料的力学性能	1
第二节 动载时材料的力学性能	5
第三节 工程材料的工艺性能	7
习题	8
第二章 金属的晶体结构与结晶	9
第一节 金属的晶体结构	9
第二节 金属的结晶	14
第三节 合金与合金的相结构	18
第四节 二元合金相图	20
习题	24
第三章 铁碳合金	25
第一节 铁碳合金的组元及基本相	25
第二节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	26
第三节 铁碳合金平衡结晶过程及组织	29
第四节 碳的质量分数对铁碳合金组织与性能的影响	34
习题	35
第四章 金属的热处理	36
第一节 钢在加热时的组织转变	36
第二节 钢在冷却时的组织转变	38
第三节 钢的普通热处理	45
第四节 钢的表面热处理	52
第五节 钢的化学热处理	54
第六节 钢的热处理新技术	56
习题	59
第五章 工业用钢	60
第一节 钢中常存杂质对其性能的影响	60
第二节 合金元素在钢中的主要作用	62
第三节 钢的分类和编号原则	67
第四节 结构钢	69
第五节 工具钢	83
第六节 特殊性能钢	93

习题	102
第六章 有色金属及其合金	103
第一节 铝及铝合金	103
第二节 铜及铜合金	109
第三节 镁及镁合金	114
第四节 钛及钛合金	116
习题	119
第七章 非金属材料及新型材料加工工艺	120
第一节 高分子材料	120
第二节 陶瓷材料及加工工艺	131
第三节 复合材料及加工工艺	138
第四节 纳米材料	143
第五节 超塑性材料	148
第六节 贮氢合金材料	152
第七节 形状记忆合金材料	154
第八节 非晶态合金材料	156
习题	159
第八章 铸造	160
第一节 合金的铸造性能	160
第二节 铸造工艺的制定原则及结构工艺性	170
第三节 砂型铸造	176
第四节 特种铸造	179
习题	185
第九章 金属压力加工	187
第一节 金属塑性成形	187
第二节 锻造	207
第三节 板料冲压	224
第四节 其他塑性成形方法	234
习题	245
第十章 焊接	246
第一节 金属熔焊	246
第二节 电弧焊	254
第三节 其他焊接方法	262
第四节 常用金属材料的焊接	270
第五节 焊接结构设计	277
习题	282
主要参考文献	284

第一章 工程材料性能

要正确地选择和使用工程材料，首先需了解材料的性能。材料的性能主要包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料的力学性能、物理性能和化学性能，其中力学性能是选择材料的主要依据，同时需要兼顾物理性能和化学性能；工艺性能是指材料在加工过程中所反映出来的适应性能。

材料的力学性能是材料在承受各种载荷时的行为。按照不同状态载荷可以分为静载荷和动载荷。其中静载荷是指试验时对试样缓慢加载，缓慢到可以认为试样所承受的外力不随时间而变化，而试样本身各点的状态也不随时间而改变，即试样各质点没有加速度，例如加载变化缓慢以致可以略去惯性力作用的准静载（如锅炉压力）等。如果整个试样或某些部分在外力作用下速度有了明显改变，即产生了较大的加速度，此时的应力和变形问题就是动载荷问题，例如短时间快速作用的冲击载荷（如空气锤）、随时间作周期性变化的周期载荷（如空气压缩机曲轴）和非周期变化的随机载荷（如汽车发动机曲轴）等。

第一节 静载时材料的力学性能

一、强度和塑性

GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第1部分：室温试验方法》规定了金属材料的强度和塑性拉伸试验方法的原理与要求。

拉伸试验过程：准备试样（见图 1-1），定义施力前的试样原始标距为 L_0 ，断后标距为 L_u 。在拉伸试验机上加载，试样在载荷作用下发生弹性变形、塑性变形直到最后断裂。在拉伸过程中，试验机会自动记录每一瞬间的载荷和延伸率之间的关系，并绘出拉伸曲线图（纵坐标为载荷，横坐标为延伸率）（见图 1-2）。由计算机控制的具有数据采集系统的试验机可以直接获得强度和塑性的试验数据。

图 1-2 所示为退火低碳钢单向静载拉伸应力-应变曲线图。其中 $abcd$ 段为屈服变形阶段， dB 为均匀强化阶段， B 为试样屈服后所能承受的最大受力（ R_m ）点， Bk 是缩颈断裂阶段。材料的强度与塑性的性能高低可直接从图 1-2 的曲线中反映出来。

1. 强度

强度是材料抵抗塑性变形和破坏的能力，按照外力的作用方式不同，可以分为抗拉强度、抗压强度和抗剪强度等。当承受拉力时，强度特性指标主要是屈服强度和抗拉强度。

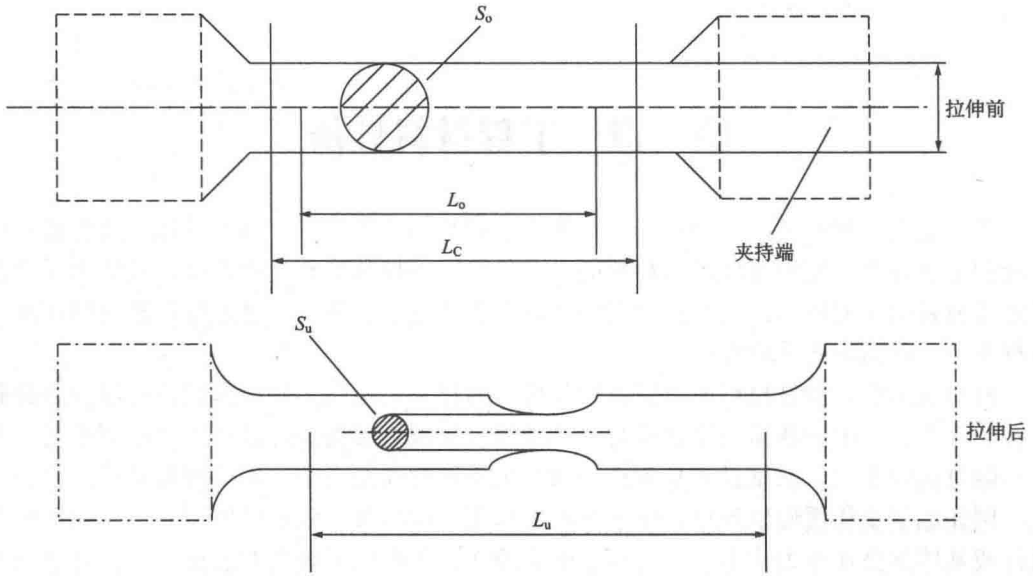


图 1-1 拉伸试样图

1) 屈服强度

屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点。应力分为上屈服强度和下屈服强度。

测定上屈服强度用的力是试验时在拉伸曲线上读取的曲线首次下降前的最大应力。测定下屈服强度用的力是试样屈服时，不计初始瞬时效应时的最小应力（见图 1-2）。

上屈服强度和下屈服强度都是用载荷（力）除以试样原始横截面积（ S_0 ）得到的值表示，其符号分别为 R_{eH} 和 R_{eL} （见图 1-2）。

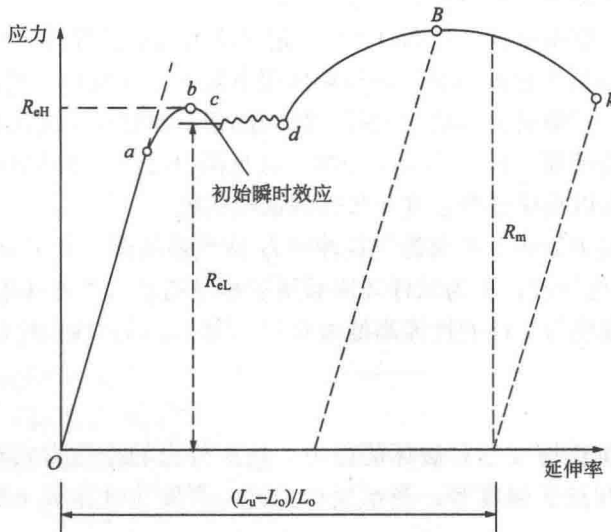


图 1-2 退火低碳钢拉伸曲线图

有些金属材料的拉伸曲线上没有明显的屈服现象，如高碳钢和脆性材料等，可采用规定塑性延伸强度 R_p 表示，如常规定塑性延伸率为 0.2% 时对应的应力值作为规定塑性延伸强度，用符号 $R_{p0.2}$ 表示。

2) 抗拉强度

抗拉强度是指试样被拉断前的最大承载能力 (F_m) 除以试样原始横截面积 (S_0) 得到的应力值，用符号 R_m 表示 (见图 1-2)。

屈服强度、抗拉强度是在选定金属材料及机械零件设计强度时的重要依据。

2. 塑性

材料在外力作用下，产生塑性变形而不断裂的性能称为塑性。塑性大小常用断后伸长率 (A) 和断面收缩率 (Z) 表示，即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： L_u ——试样拉断后的标距长度；

S_u ——试样拉断后的最小横截面积 (见图 1-1)。

A 和 Z 的值越大，材料的塑性越好。应当说明的是：仅当试样的标距长度、横截面的形状和面积均相同时，或当选取的比例试样的比例系数 k 相同时，断后伸长率的数值才具有可比性。

金属材料应具有一定塑性才能顺利地承受各种变形加工，且一定的塑性可以提高金属零件的使用可靠性，不致出现断裂。

二、弹性与刚度

在拉伸试验中，如果卸载后试样能即刻恢复原状，这种不产生永久变形的性能，称为弹性。在弹性变形范围内，施加的载荷与所引起的变形量成正比关系，其比例常数称为弹性模量，用 E 表示。弹性模量 E 是衡量材料产生弹性变形难易的指标， E 越大，材料抵抗弹性变形的应力也越大，在工程中称之为刚度。刚度表示材料弹性变形抗力的大小。

材料的刚度主要取决于结合键和原子间结合力，材料的成分和组织对它的影响不大。金属键的弹性模量适中，但由于各种金属原子间结合力不同，不同金属的刚度也会有很大的差别，例如铁的弹性模量为 210GPa，是铝的 3 倍。聚合物材料则具有高弹性，但弹性模量较低，在较小的应力作用下就可以发生很大的弹性变形，除去外力后，形变可迅速消失。

三、硬度

硬度是金属表面抵抗其他硬物压入的能力，或者说是材料对局部塑性变形的抗力。测定硬度的方法很多，常用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等（见图 1-3）。

1. 布氏硬度（HB）

按 GB/T 231.1—2009《金属材料布氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》的规定，测定布氏硬度的原理如图 1-3(a)所示。用直径为 D 的硬质合金球作压头，在规定载荷的作用下，压入被测金属表面，按规定的保持时间卸载后，用刻度放大镜测量被测金属表面上形成的压痕直径 d ，用载荷与压痕球形表面积之比作为布氏硬度值，用符号 HBW 表示。在实际应用中，布氏硬度不标注单位，也不计算，测出压痕平均直径 d 后，通过查布氏硬度表得出相应的 HBW 值。

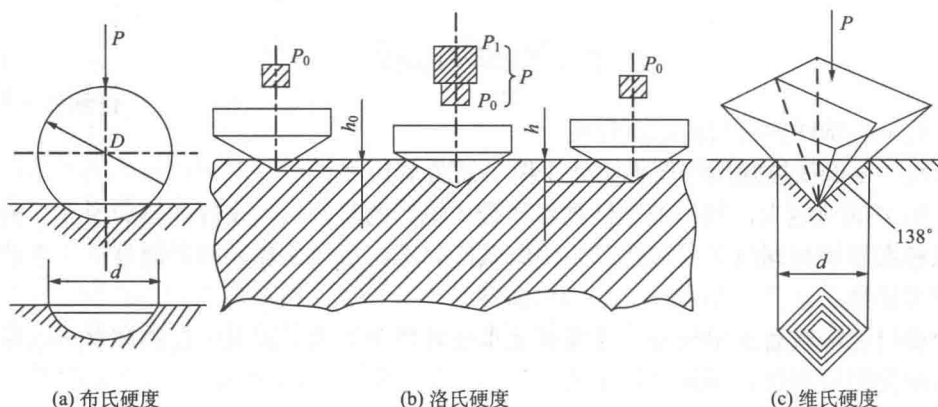


图 1-3 三种常见的硬度试验示意图

布氏硬度的表示方法是硬度数值位于符号前面，符号后面的数值依次是球体直径（mm）、载荷大小（kgf^①）和载荷保持时间（s）。例如，450HBW5/750/20 表示用直径 5mm 的硬质合金球，在 750kgf 载荷作用下保持 20s 测定的布氏硬度值为 450。

布氏硬度法测试值虽然稳定、准确，但测量费时，且压痕较大，不宜测试薄件或成品件，常用于测试 HBW 值小于 650 的材料，如灰铸铁，非铁合金及退火、正火或调质钢等。

2. 洛氏硬度（HR）

当 $HB > 450$ 或者试样过小时，不能采用布氏硬度试验而需改用洛氏硬度计量。洛氏硬度测定法是以一特定的压头加上一定的压力压入被测材料的表面，根据压痕塑

① kgf：千克力、公斤力，是工程单位制中力的主单位，意思是 1 千克的力。1 千克力（kgf） ≈ 9.8 牛[顿]（N）。

性变形深度来确定硬度值指标。它是用一个顶角 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.59mm 或 3.18mm 的钢球,在一定载荷下压入被测材料表面,由压痕的深度求出材料的硬度,以 0.002mm 作为一个硬度单位。根据试验材料硬度的不同,分以下三种不同的标度来表示。

HRA: 采用 60kgf 载荷和钻石锥压入器求得的硬度,用于硬度极高的材料(如硬质合金等)。

HRB: 采用 100kgf 载荷和直径 1.58mm 的淬硬钢球求得的硬度,用于硬度较低的材料(如退火钢、铸铁等)。

HRC: 采用 150kgf 载荷和钻石锥压入器求得的硬度,用于硬度很高的材料(如淬火钢等)。

3. 维氏硬度 (HV)

与布氏硬度测定原理基本相同,维氏硬度也是以单位压痕面积上的力 F 作为硬度值计算。不同的是使用锥面夹角为 138° 的方锥形金刚石压头压入材料表面,保持规定时间后,测量出试样表面压痕对角线长度的平均值 d ,即可计算出压痕的面积 S , F/S 的数值即为维氏硬度值,用 HV 表示。

维氏硬度的标注方法与布氏硬度相同,硬度数值写在符号的前面,试验条件写在符号的后面。如: 500HV100/20 表示在试验载荷 100kgf 下保持 20s 测定的维氏硬度值为 500。

第二节 动载时材料的力学性能

许多机械零件是在动载荷下工作的。由于冲击载荷的加载速度快,作用时间短,材料在承受冲击时应力分布与变形很不均匀,更容易使零件或工具受到破坏。所以,材料对动载荷的抗力则不能按照前述性能指标来衡量。

一、冲击韧性

冲击韧性是指材料抵抗冲击载荷作用而不致破坏的能力,简称韧性。韧性的常用指标为冲击韧度,用符号 α_k 表示。

冲击韧度通常采用摆锤式冲击试验机测定,如图 1-4 所示。按 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》规定,将带 U 形缺口的标准冲击试样放在试验机支架上,然后将质量为 m (kg) 的摆锤举至高度 H_1 (m) 自由落下,冲断试样后摆锤升至高度 H_2 (m),并以试样缺口处单位横截面积 S (cm^2) 上的冲击吸收能量表示其冲击韧度 α_{ku} (J/cm^2) 即

$$\alpha_{ku} = \frac{mgH_1 - mgH_2}{S} \quad (1-3)$$

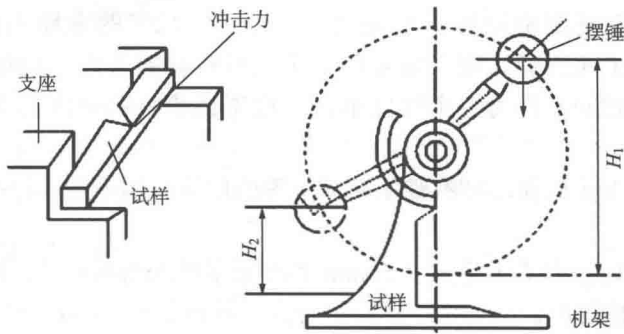


图 1-4 冲击试验机原理图

二、疲劳强度

疲劳强度是指材料经受无限多次交变载荷作用而不会产生破坏的最大应力，又称为疲劳极限。疲劳断口的宏观特征通常呈现为两个断裂区，即平滑区和粗粒状区。由于疲劳破坏的突然性，无论是脆性材料还是韧性材料，在破坏前都不出现明显的材料的“疲劳极限”。影响材料疲劳应力的因素非常多，除了材料本身的特性外，零件的尺寸和形状，零件表面的粗糙度，零件表层中内应力的性质和分布状态，零件所处的环境和介质，交变应力的幅度、性质及频率等都对疲劳应力有影响。材料的疲劳问题是目前材料力学性能方面的一个极为重要的研究领域。

疲劳应力的大小及方向均随时间而变化，而且其变化常常是很不规则的。但在进行疲劳试验时，往往使疲劳应力作规则性变化，因此，在此只涉及规则性的循环应力。图 1-5 是几种常见的循环应力。

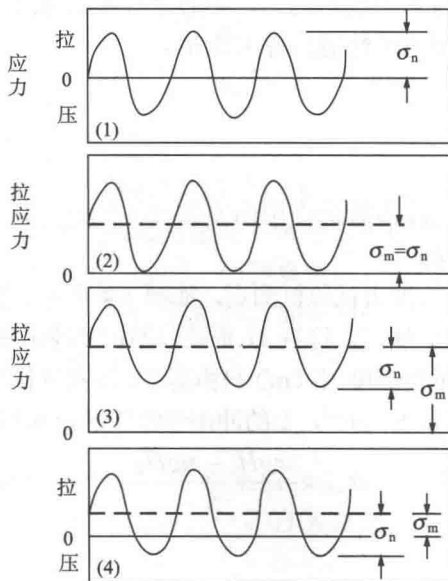


图 1-5 常见的几种循环应力

在给定应力条件下，使材料发生疲劳破坏所对应的应力循环周期数（或循环次数）称为疲劳寿命，常见的两种典型的应力与循环周期数的关系如图 1-6 所示。

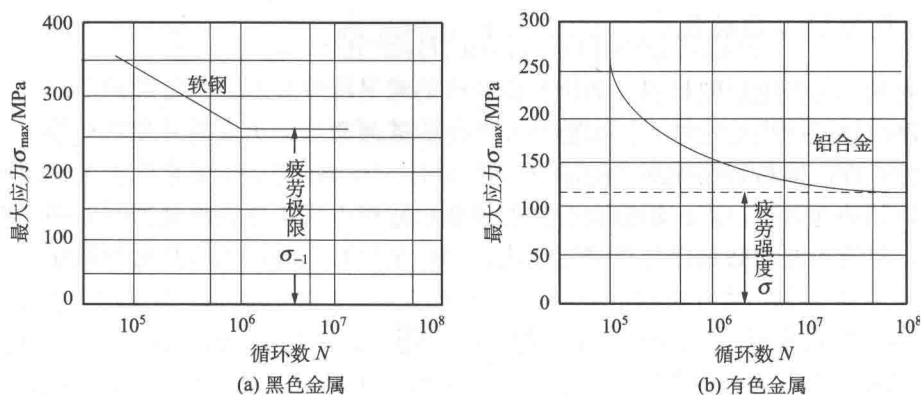


图 1-6 两种典型的应力与循环周期数的关系

第三节 工程材料的工艺性能

在铸造、锻压、焊接、热加工等加工前后过程中，一般还要进行不同类型的热处理。因此，一个由金属材料制得的零件其加工过程十分复杂。工艺性能直接影响零件加工成型的最终质量，是选材和制定零件加工工艺路线时应当考虑的因素之一。

1. 铸造性能

将熔炼好的金属液体浇注到与零件形状相适应的铸型空腔中，冷却凝固后获得铸件的方法称为铸造。金属材料铸造成形获得优良铸件的能力，即合金铸造时的工艺性能称为铸造性能，通常是指合金的流动性、收缩性、铸造应力、偏析和吸气倾向以及冷热裂纹倾向等。常用的铸造合金有铸铁、铸钢和铸造有色金属。

2. 锻造性能

金属材料用锻压加工方法成形的适应能力称锻造性。锻造性能主要取决于金属材料的塑性和变形抗力。塑性越好、变形抗力越小，金属的锻造性能越好。铜合金和铝合金在室温状态下就有良好的锻造性能；碳钢在加热状态下锻造性能较好，其中低碳钢最好，中碳钢次之，高碳钢较差；铸铁锻造性能差，不能锻造。

3. 焊接性能

焊接是一种连接金属的方法。金属材料对焊接加工的适应性称焊接性能，也就是在一定的焊接工艺条件下，获得优质焊接接头的难易程度。评价焊接性能的指标有两个：一是焊接接头产生缺陷的倾向性；二是焊接接头的使用可靠性。在机械工业中，焊接的主要对象是钢材。碳的质量分数（含碳量）是决定焊接性能好坏的主要因素。含碳量和

合金元素含量越高,焊接性能越差。低碳钢和含碳量低于 0.18%的合金钢有较好的焊接性能,含碳量大于 0.45%的碳钢和含碳量大于 0.35%的合金钢的焊接性能较差。

4. 热处理工艺性能

热处理工艺性能反映材料(如钢)热处理的难易程度和产生热处理缺陷的倾向,主要包括淬透性、回火稳定性、回火脆性及氧化脱碳倾向和淬火变形开裂倾向等,其中主要考虑淬透性,即材料接受淬火的能力。含 Mn、Cr、Ni 等合金元素的合金钢淬透性比较好,碳钢的淬透性较差;铝合金的热处理要求较严,它进行固溶处理时加热温度离熔点很近,温度的波动必须保持在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内;铜合金只有几种可以用热处理强化。

习 题

1. 以低碳钢拉伸应力-应变曲线为例,在曲线上指出材料的强度、塑性指标。
2. 哪些因素影响材料的强度?分析材料比强度(强度/密度)对结构设计有何实际意义。
3. 布氏硬度测定法和洛氏硬度测定法各有什么优缺点?
4. 什么是疲劳强度?如何防止零件产生疲劳破坏?
5. 甲、乙、丙、丁四种材料的硬度分别为 45HRC、75HRA、70HRB、300HBW,试比较这四种材料硬度的高低。
6. 将钟表发条拉直是弹性变形还是塑性变形?怎样判断它的变形性质?

第二章 金属的晶体结构与结晶

金属材料的化学成分不同，其性能也不同。但是对于同一种成分的金属材料，通过不同的加工处理工艺，改变材料内部的组织结构，也可以使其性能发生很大的变化。由此可以看出，除化学成分外，金属内部结构和组织状态也是决定金属材料性能的重要因素。

固态物质按其原子（离子或分子）的聚集状态可以分为两大类：晶体与非晶体。原子（离子或分子）在三维空间有规则地周期性重复排列形成的物质称为晶体，如天然金刚石、水晶、氯化钠等。原子（离子或分子）在空间无规则排列形成的物质则称为非晶体，如松香、石蜡、玻璃等。由于金属由金属键结合，其内部的金属原子在空间有规则地排列，因此固态金属一般情况下均是晶体。

第一节 金属的晶体结构

一、晶体的特性

由于晶体中的原子呈按一定的规则重复排列的特点，所以造成了晶体在性能上有别于非晶体。首先，晶体具有一定的熔点（熔点就是晶体向非结晶状态的液态转变的临界温度）。在熔点以上，晶体变为液体，处于非结晶状态；在熔点以下，液体又变为晶体，处于结晶状态。其次，在不同方向上测量晶体性能（如导电性、导热性、弹性和强度等）时，所测得的性能表现出或大或小的差异，称之为各向异性或异向性；而非晶体的性能不因方向而异，称之为各向同性或等向性。

晶体与非晶体虽然存在本质的差别，但是在一定条件下，可以将原子呈不规则排列的非晶体转变为原子呈规则排列的晶体，反之亦然。例如，玻璃经过长时间的加热后可以形成晶态玻璃。

二、晶体结构与空间点阵

晶体结构是指晶体中原子在三维空间有规律的周期性的具体排列方式。通常人们为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的原子（或原子群）简化，而将其抽象为纯粹的几何点，称之为阵点。这些阵点可以是原子的中心也可以是彼此等同的原子群的中心，所有阵点的物理环境和几何环境都相同。由这些阵点有规则地周期性重复排列所形成的三维空间阵列称为空间点阵。为方便起见，常人为地将阵点用直线连接起来形成空间格子，称之为晶格。它的实质仍是空间点阵，通常不加以区分，如图 2-1 所示。

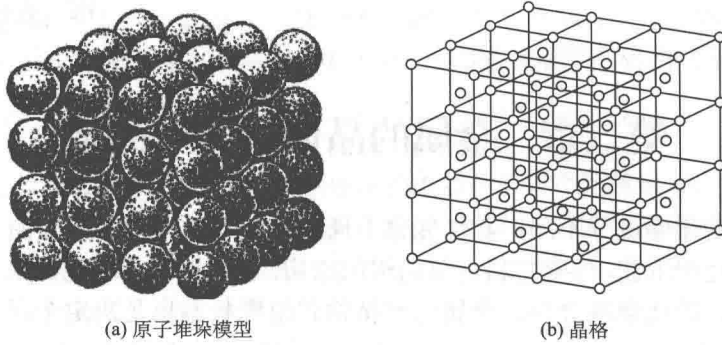


图 2-1 晶体中原子排列示意图

由于晶体中原子的规则排列具有周期性的特点，因此，为简便起见，通常只从晶格中选取一个能够完全反映晶格对称特征的最小几何单元来表征晶体中原子排列的规律，这个最小的几何单元称为晶胞，如图 2-2 所示。整个晶格就是由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而成的。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱间夹角 α 、 β 、 γ 来表示；通过晶胞角上某一结点沿其三条棱边作三个坐标轴 x 、 y 、 z ，称为晶轴，如图 2-3 所示。晶胞的棱边长度，称为晶格常数 (lattice constant) 或点阵常数，晶胞的棱间夹角又称为晶轴间夹角。习惯上，以原点 O 的前、右、上方为轴的正方向（反之为负方向）。

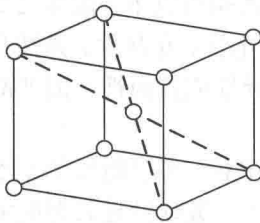


图 2-2 晶胞

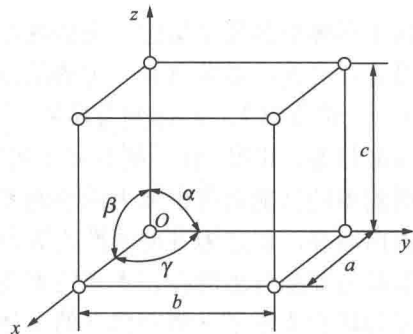


图 2-3 晶轴及晶胞的六个参数

三、三种典型的金属晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种，它们的晶体结构各不相同，但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系对所有的晶体进行分析，则发现空间点阵只有 14 种类型，称为布拉维点阵。由于金属原子趋向于紧密排列，所以在工业上使用的金属中，除了少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数金属具有面心立方 (fcc)、体心立方 (bcc) 和密排六方 (hcp) 三种典型的晶体结构。

1. 体心立方晶格

体心立方晶体的晶胞如图 2-4 所示。其晶胞是一个立方体，晶格常数 $a=b=c$ ，晶轴间夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，所以通常只用一个晶格常数 a 表示即可。在体心立方晶胞的每个角上和晶胞中心都有一个原子。在顶角上的原子为相邻八个晶胞所共有，故每个晶胞只占 $1/8$ ，只有立方体中心的那个原子才完全属于该晶胞所独有，所以实际上每个体心立方晶胞所包含的原子数为 $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 个。

具有体心立方晶体结构的金属有 α -Fe、W、Mo、V、 β -Ti 等。

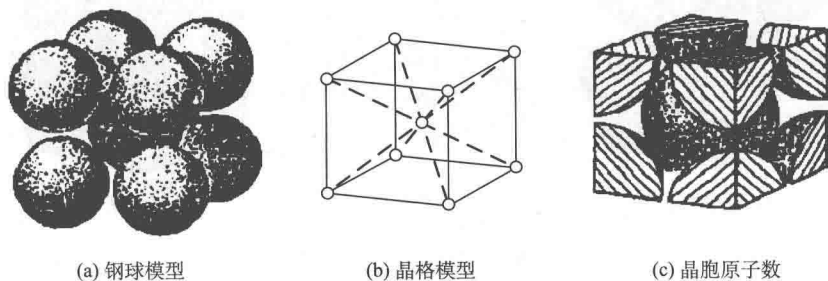


图 2-4 体心立方晶格的晶胞

2. 面心立方晶格

面心立方晶体的晶胞如图 2-5 所示。其晶胞也是一个立方体，晶格常数 $a=b=c$ ，晶轴间夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，所以也只用一个晶格常数 a 表示即可。在面心立方晶胞的每个角上和晶胞的六个面的中心都有一个原子。面心立方晶胞所包含的原子数为 $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$ 个。

具有面心立方晶体结构的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ag、Au、Pb、Ni、 β -Co 等。

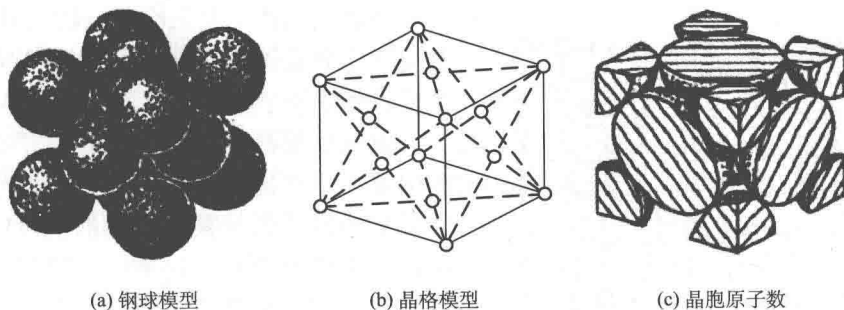


图 2-5 面心立方晶格的晶胞

3. 密排六方晶胞

密排六方晶体的晶胞如图 2-6 所示。它是由六个呈长方形的侧面和两个呈正六边形