



21世纪高等学校新理念教材建设工程

机械 工 程 材 料

主编 陈 扬 曹丽云



東北大學出版社
Northeastern University Press



21 世纪高等学校新理念教材建设工程

机 械 工 程 材 料

主 编 陈 扬 曹丽云

副主编 常 伟 岳旭东

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 陈 扬 曹丽云 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料 / 陈扬, 曹丽云主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2008.6

(21 世纪高等学校新理念教材建设工程)

ISBN 978-7-81102-531-6

I. 机… II. ①陈… ②曹… III. 机械制造材料 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 073730 号

内容简介

本书阐述了工程材料基本理论, 包括工程材料的性能, 金属材料的成分、加工工艺、组织和性能之间的关系及性能的调控; 介绍了常用工程材料, 包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料; 讨论了机械零件的失效与选材, 以及工程材料在机床、汽车等行业中的应用。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市第六印刷厂书画彩印中心

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm×260mm

印 张: 13.125

字 数: 344 千字

出版时间: 2008 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功

责任校对: 闻 艳

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-531-6

定 价: 25.00 元

前 言

本书由辽宁工业大学出版基金资助出版。

“机械工程材料”是机械类专业的一门技术基础课，其任务是从机械工程的应用角度出发，阐明机械工程材料的基础理论，分析材料的成分、加工工艺、组织与性能之间的关系，介绍常用机械工程材料及其应用等基础知识。本课程的教学目的是使学生在掌握机械工程材料基础理论的基础上，具备根据零件服役条件和性能要求，在设计过程中进行科学选材及合理制定加工工艺路线的初步能力。

根据机械专业和车辆工程专业的特点和实际需要，在本教材编写过程中注意了以下几点：

- ① 在内容安排上，着重阐述金属材料的基础理论、性能的调控方法以及常用的金属材料，其中以钢铁材料为主，适当介绍了非金属材料及复合材料；
- ② 用单独的章节专门介绍了机械和汽车制造业中常用的金属及非金属材料；
- ③ 强化了关于选材和加工工艺路线方面的内容。

全书共分10章。第1章、第2章及第3章由岳旭东副教授编写；第4章和第6章的6.1~6.7部分由曹丽云教授编写；第6章的6.8和6.9部分、第7章由常伟副教授编写；第5章、第8章、第9章和第10章由陈扬教授编写。全书由陈扬教授和曹丽云教授主编。

在本书的编写过程中，参考和引用了一些文献资料的有关内容，在此特向有关作者表示深切的谢意！

编者力图使本书更加符合机械专业和车辆工程专业的培养目标和实际需要。然而，这并非教材的一次编写所能达到的，还需要不断地修改和完善。

由于编者水平有限，错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2007年12月

目 录

第 1 章 材料的性能	1
1.1 材料的力学性能	1
1.2 材料的物理和化学性能	7
1.3 材料的工艺性能	8
第 2 章 材料结构	10
2.1 金属晶体结构	10
2.2 陶瓷的结构	18
2.3 高分子材料的结构	18
第 3 章 材料的凝固	20
3.1 纯金属的结晶	20
3.2 合金的结晶	23
3.3 铁碳合金相图	31
3.4 铸锭的组织及其控制	44
第 4 章 金属的塑性加工	47
4.1 金属的塑性变形	47
4.2 合金的塑性变形	50
4.3 塑性变形对金属组织与性能的影响	51
4.4 塑性变形金属加热时组织与性能的变化	53
4.5 金属的热塑性加工	55
第 5 章 钢的热处理	57
5.1 钢在加热时的转变	57
5.2 过冷奥氏体转变曲线	60
5.3 钢的普通热处理	68
5.4 钢的表面淬火与化学热处理	78

第6章 金属材料	84
6.1 钢铁材料的生产及铸锭组织	84
6.2 碳 钢	85
6.3 碳钢的牌号和用途	87
6.4 合金钢	90
6.5 合金结构钢	96
6.6 合金工具钢	107
6.7 特殊性能钢	115
6.8 铸 铁	123
6.9 有色金属及其合金	135
第7章 非金属材料	151
7.1 高分子材料	151
7.2 陶瓷材料	163
第8章 复合材料	167
8.1 复合材料的基本概念	167
8.2 复合材料的性能	168
8.3 常用复合材料	170
第9章 零件失效与选材	177
9.1 零件的失效形式与分析方法	177
9.2 选材的一般原则	180
9.3 选材的基本步骤	183
9.4 机械零件选材的一般方法	184
第10章 典型工件的选材及工程材料的应用	188
10.1 齿轮类零件的选材	188
10.2 轴类零件的选材	190
10.3 弹簧类零件的选材	192
10.4 汽车及机床主要零件用材	194

第1章 材料的性能

材料性能是指材料在外界因素作用下表现出来的行为。在选择材料时,必须考虑材料的相关性能,使之与所要求的性能相符合。材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类:使用性能是指材料所具备的在使用过程中能正常工作和有一定工作寿命的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指材料所具备的在加工过程中能顺利进行加工的性能,包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削加工性能等。

使用性能是机械零件材料选材的首要考虑因素。材料用于结构零件时,其力学性能是工程设计、选材的主要依据。在不同使用条件下,对材料力学性能的要求是不同的。本章主要讨论材料的力学性能。

1.1 材料的力学性能

材料在力的作用下所表现出的特性即为材料的力学性能。通常把力的作用称为载荷或负荷。材料的力学性能包括强度、硬度、塑性、韧性、疲劳特性、耐磨性等。材料在外力作用下发生的形状和尺寸变化称为变形,外力去除后能够恢复的变形称为弹性变形,外力去除后不能恢复的变形称为塑性变形。

1.1.1 弹性与刚度

评价材料力学性能的指标是通过拉伸试验测定的。将被测材料按 GB/T 228—2002 要求制成标准拉伸试样(见图 1-1),在拉伸试验机上夹紧试样两端,缓慢施加轴向载荷,使之发生变形直至断裂。通过试验可以得到拉伸力与试样伸长量之间的关系曲线(称为拉伸曲线)。为消除试样几何尺寸对实验结果的影响,将拉伸过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位截面积上所受的力(称为应力),试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量(称为应变),得到应力-应变曲线,其形状与拉伸曲线完全一致。图 1-2 所示为低碳钢的应力-应变曲线。在应力-应变曲线中,OA 段为直线,此时将外力去除后,试样将恢复到原来的尺寸,将 OA 段称为弹性变形阶段。A 点所对应的应力为材料承受最大弹性变形时的应力,称为弹性极限,用

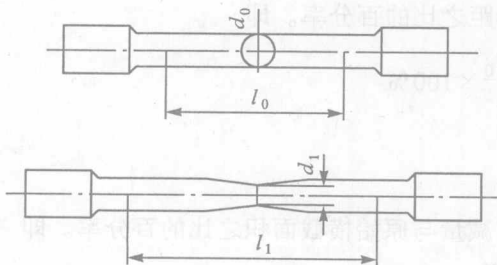


图 1-1 圆形标准拉伸试样

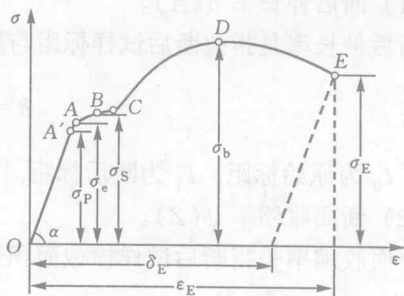


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

σ_e 表示。其中 OA' 段, 应力与应变成正比关系, 将 σ_p 称为比例极限。由于 A 点和 A' 点很接近, 一般不作区分。

在弹性范围内, 应力与应变的比值称为弹性模量 E , 即 $E = \sigma / \varepsilon$ 。在工程上, E 称为材料的刚度, 是材料的重要力学性能指标之一, 它表征材料受力时对弹性变形的抗力。其值愈大, 材料产生一定量的弹性变形所需的应力愈大, 表明材料不易产生弹性变形, 即材料的刚度大。如果材料的刚度不足, 则易发生过大的弹性变形而产生失效。

金属材料弹性模量的大小主要取决于基体金属的本性, 除随温度升高而逐渐降低外, 难以通过其他强化材料的方法(如合金化、热处理、冷热加工等)使之改变。工件的刚度除取决于材料的弹性模量外还与工件的形状和尺寸有关, 可以通过增加横截面积或改变截面形状来提高刚度。

1.1.2 强度与塑性

1. 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。常用的材料强度指标有屈服强度和抗拉强度等。

(1) 屈服强度。

材料在外力作用下发生塑性变形的最小应力称为屈服强度。在图 1-2 中, 应力超过 B 点后, 材料将发生塑性变形。在 BC 段, 负荷不增加而应变仍在增大, 这种现象称为屈服。 B 点所对应的应力就是屈服强度, 用 σ_s 表示。对于无明显屈服现象的材料, 则规定以拉伸时产生 0.2% 残余应变时的应力值作为屈服强度, 即条件屈服强度, 记作 $\sigma_{0.2}$ ($R_{0.2}$)。 σ_s 和 $\sigma_{0.2}$ 是机械零件设计和选材的重要依据。

(2) 抗拉强度。

抗拉强度反映材料产生最大均匀变形的抗力, 是工程上最重要的力学性能指标之一。图 1-2 中, CD 段为均匀塑性变形阶段, 在这一阶段, 应力随应变增加而增加, 即产生应变强化。超过 D 点后, 试样开始发生局部塑性变形, 即出现颈缩, 随着应变增加, 应力明显下降, 并迅速在 E 点断裂。 D 点所对应的应力为材料断裂前所承受的最大应力, 称为抗拉强度, 用 σ_b (R_m) 表示。

2. 塑性

塑性是指材料在外力作用下破坏前可承受最大塑性变形的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

(1) 断后伸长率 $\delta(A)$ 。

断后伸长率是指拉断后试样标距与原始标距之比的百分率。即

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

式中, l_0 为原始标距, l_1 为断后标距。

(2) 断面收缩率 $\psi(Z)$ 。

断面收缩率是指断后试样横截面积最大缩减量与原始横截面积之比的百分率。即

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中, F_0 为原始横截面积, F_1 为断后最小横截面积。

断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 越大, 材料的塑性越大。两者相比, 用断面收缩率表示塑性比伸长率更接近真实变形。

当 $\delta > \psi$ 时, 试样无颈缩, 为脆性材料表征; 当 $\delta < \psi$ 时, 试样有颈缩, 为塑性材料表征。

材料伸长率的大小与试样原始标距 l_0 和原始截面积 F_0 有关。在 F_0 相同的情况下, l_0 愈大 δ 愈小。因此, 对于不同材料的试样, 要得到可比较的塑性值, 必须有 l_0/d_0 为一常数。国家标准规定, 当 $l_0=10d_0$ ($l_0=11.3$) 时, 伸长率用 $\delta(A_{11.3})$ 表示; 当 $l_0=5d_0$ 时, 伸长率用 δ_5 表示, 显然, $\delta_5 > \delta$ 。

金属材料具有一定的塑性才能进行各种变形加工。另一方面, 材料具有一定塑性, 可以提高零件的使用可靠性, 防止零件突然断裂破坏。

材料从变形到断裂整个过程所吸收的能量称为材料的韧性, 具体地说就是拉伸曲线与横坐标所包围的面积。

必须指出, 图 1-2 所示的拉伸曲线是一种最典型的情况, 并非所有的材料都具有相同类型的拉伸曲线。铝、铜及其合金的拉伸曲线没有明显的屈服“平台”; 某些奥氏体钢断裂前虽产生一定量的塑性变形, 但不形成颈缩; 陶瓷、玻璃类材料只有弹性变形而没有明显的塑性变形; 橡胶类材料弹性变形量很大, 只有弹性变形而不产生或产生很微小的塑性变形; 高分子材料的拉伸曲线具有多种形式。

1.1.3 硬 度

硬度是指材料抵抗局部塑性变形的能力, 是表征材料性能的一个参量。硬度的测定方法很多, 现在多用压入法测定。根据测量方法的不同, 常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微硬度等。用各种方法所测量的硬度值不能直接相比较, 可以通过硬度对照表换算。

硬度试验所用设备简单, 操作方便快捷, 一般仅在材料表面局部区域产生很小的压痕, 可对大多数成品件直接检验, 无需专门加工试样。

1. 布氏硬度

布氏硬度(HB)应用最久、最广泛。布氏硬度的测试原理如图 1-3 所示, 在一定大小载荷 P 的作用下, 将直径为 D 的钢球或硬质合金球压入被测试样的表面, 保持规定的时间后卸除载荷, 所施加的载荷与压痕表面积的比值即为布氏硬度。布氏硬度值可通过用读数显微镜测量压痕平均直径 d 查表得到。材料愈软, 压痕直径愈大, 布氏硬度值愈小。

当压头为钢球时, 布氏硬度用符号 HBS 表示, 适用于布氏硬度值在 450 以下的材料; 压头为硬质合金时用符号 HBW 表示, 适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。

布氏硬度值的表示方法为: 硬度值(+)HBW(HBS)(+)球直径(mm)/载荷值(N)/时间(s)。例如: 180HBW10/1000/20 表示用直径为 10mm 的硬质合金球在 1000kgf(9.807kN)载荷作用下保持 20s 测得的布氏硬度值为 180。

布氏硬度的优点是压痕面积大, 测量结果误差小, 数据稳定, 与强度之间有很好的对应

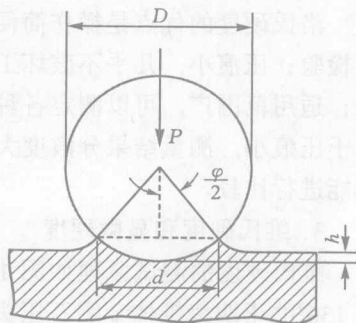


图 1-3 布氏硬度测试原理

关系。缺点是由于压痕大，不适于成品零件和薄而小的零件。最常用的钢球压头适于测定退火钢、正火钢、铸铁及有色金属的硬度。

材料的 σ_b 与 HB 之间的经验关系为：

- ① 低碳钢， $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 3.6\text{HB}$ ；
- ② 高碳钢， $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 3.4\text{HB}$ ；
- ③ 灰铸铁， $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 1\text{HB}$ 或 $\sigma_b(\text{MPa}) \approx 0.6(\text{HB} - 40)$ 。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度的测试原理如图 1-4 所示。将一定规格的压头（金刚石圆锥体或钢球），在一定载荷作用下压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，然后测定压痕的深度，计算硬度值，用符号 HR 表示。材料愈软，压痕愈深，洛氏硬度值愈小。

为了能用同一台硬度计测定不同材料的硬度，常采用不同的压头类型和载荷以获得不同的洛氏硬度标尺——共分为 9 个标尺。常用洛氏硬度标尺的符号、试验条件和应用范围如表 1-1 所列。HRA 用于测量高硬度材料，如硬质合金、表淬层和渗碳层。HRB 用于测量低硬度材料，如有色金属和退火、正火钢等。HRC 用于测量中等硬度材料，如调质钢、淬火钢等。HRC 应用最多，HRC 与 HBS 之间关系约为 1:10。

表 1-1

常用洛氏硬度标尺的符号、试验条件和应用

洛氏硬度标尺的符号	压头类型	总载荷/N	硬度范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	588.4	20~85	硬质合金、高硬度表面
HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 钢球	980.7	20~100	退火钢、有色金属
HRC	120°金刚石圆锥	1471	20~70	淬火钢、调质钢

洛氏硬度的表示方法为：硬度值(+)HR(+)使用的标尺。

例如：60HRA 表示用 A 标尺测定的洛氏硬度值为 60。实际检测时，HR 值可从洛氏硬度计的百分盘上直接读出。

洛氏硬度的优点是操作简便迅速，适用于大量生产中的成品检验；压痕小，几乎不破坏工件表面，可对工件直接进行检验；适用范围广，可以测定各种软硬不同材料的硬度。缺点是由于压痕小，测量结果分散度大。采用不同标尺测得的硬度值不能进行比较。

3. 维氏硬度和显微硬度

维氏硬度的测试原理如图 1-5 所示。将顶部两相对面夹角为 136° 的正四棱锥体金刚石压头在载荷 P 的作用下压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，根据压痕单位面积所承受的载荷得到的值即为维氏硬度。像测定布氏硬度值一样，由于维氏硬度测定时压痕为四方锥形，也可通过测量压痕对角线长度 d 查表得到。

维氏硬度值的表示方法为：硬度值(+)HV(+)载荷值/载荷保持时间。例如 640HV30/

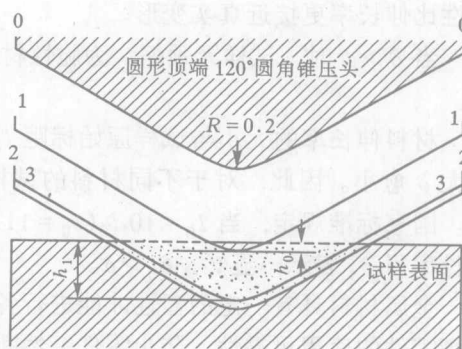


图 1-4 洛氏硬度测试原理

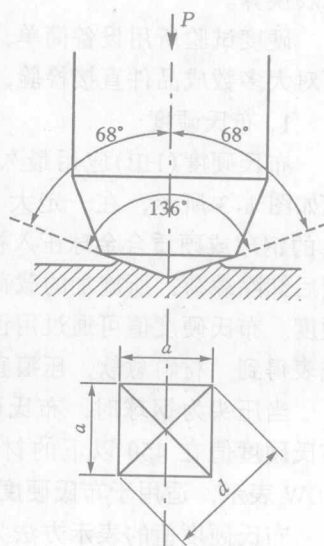


图 1-5 维氏硬度测试原理

20 表示在 30kg 载荷作用下，持续 20s 测得的维氏硬度值为 640。

维氏硬度具有布氏硬度和洛氏硬度的优点，载荷大小可以任意选择，适用范围广，可用于测量各种软硬材料的硬度。

显微硬度试验实质上就是小载荷的维氏硬度试验，试验载荷在 1000g 以下、压痕对角线长度以 μm 计时得到的维氏硬度值，同样用 HV 表示，可用于测量金相组织中不同相的硬度。

根据施加载荷范围的不同，规定了三种维氏硬度的测定方法，如表 1-2 所列。

表 1-2 维氏硬度的测定方法

载荷范围/N	硬度符号	试验名称
$P \geq 49.03$	$\geq \text{HV5}$	维氏硬度试验
$1.961 \leq P < 49.03$	HV0.2~HV5	小负荷维氏硬度试验
$0.09807 \leq P < 1.961$	HV0.01~HV0.2	显微维氏硬度试验

1.1.4 冲击韧性

许多零部件和工具在服役时要受到冲击载荷的作用，冲击载荷就是以很大的速度作用于工件上的载荷。在评价材料时，不能单用在静载荷作用下的指标来衡量，还必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性，以在冲击力作用下材料破坏时单位面积所吸收的能量 a_K 表示。在图 1-6 所示的摆锤式冲击实验机上用规定高度的摆锤对处于简支梁状态的缺口试样进行一次冲断，可测得冲击吸收功，从试验机上直接读出，用 A_k 表示。冲击吸收功与试样缺口处的截面积之比称为冲击韧性值，用 a_K 表示。冲击试验所用试样为标准夏比缺口试样，如图 1-7 所示。

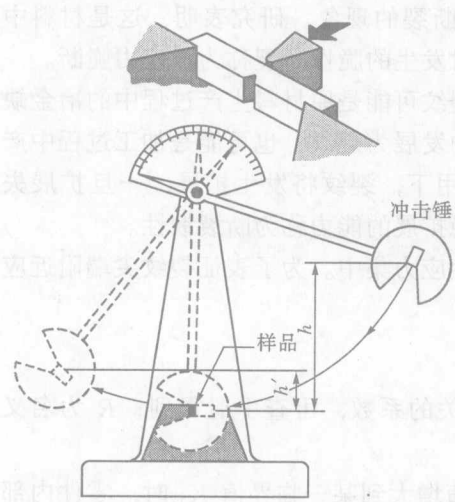


图 1-6 摆锤式冲击试验机示意图

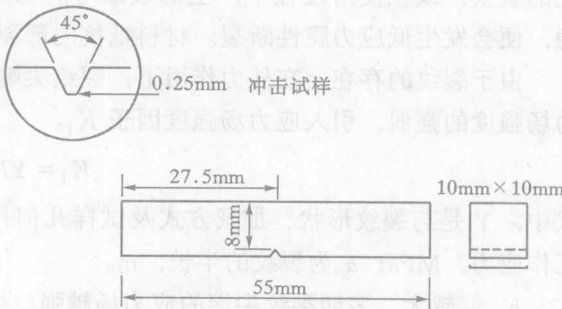


图 1-7 V 型缺口冲击试样

实践表明，冲击韧性对材料的一些缺陷很敏感，能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化，因而是生产上用来检验冶炼、热加工得到的半成品和成品质量的有效方法之一。

1.1.5 疲 劳

许多机械零件(齿轮、轴、弹簧)是在重复或交变载荷下工作的。所谓交变载荷,是指大小或方向随时间而变化的载荷。在交变载荷作用下,即使零件所承受的应力远低于其屈服强度,但长时间后也会产生裂纹或突然断裂,这种现象称为材料的疲劳。疲劳断裂一般突然发生,难以观察,危险性大。机械零件的失效,80%以上属于疲劳破坏。

材料承受的交变应力 σ 与断裂时应力循环次数 N 之间的关系可用疲劳曲线来描述(见图 1-8)。金属材料所受的交变应力愈大,断裂前所受的循环次数愈少,当应力低于某一定值后,曲线趋于水平,这说明当应力低于此值时,材料可经无限次应力循环而不断裂。材料经无数次应力循环后仍不发生断裂时的最大应力称为疲劳极限。对称循环交变应力的疲劳极限用 σ_{-1} 表示。实际上,作无限次应力循环的疲劳试验是不可能的。对于黑色金属,一般规定应力循环 10^7 周次而不断裂的最大应力为疲劳极限;有色金属、不锈钢等为 10^8 周次。

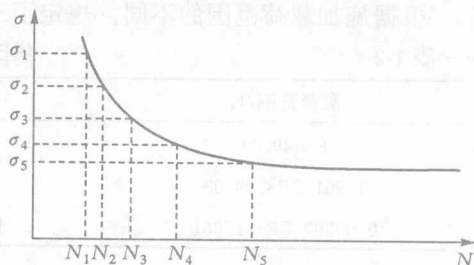


图 1-8 疲劳曲线示意图

提高零件的疲劳抗力,除应合理选材、细化晶粒、减少材料和零件的缺陷外,还应注意其结构设计,避免应力集中,提高表面光洁度和进行表面强化等。

1.1.6 断裂韧性

工程上有时会出现材料在远低于 σ_s 的情况下发生断裂的现象。研究表明,这是材料中存在微小裂纹并扩展所致。这种在低于材料屈服强度时发生的脆性断裂称为低应力脆断。

材料中存在缺陷是绝对的,常见的缺陷是裂纹。裂纹可能是原材料生产过程中的冶金缺陷(气孔、缩孔、缩松、非金属夹杂物等)在使用过程中发展为裂纹,也可能是加工过程中产生的裂纹,或在使用过程中产生的裂纹等。在应力作用下,裂纹将发生扩展,一旦扩展失稳,便会发生低应力脆性断裂。材料抵抗内部裂纹失稳扩展的能力称为断裂韧性。

由于裂纹的存在,在外力作用下,裂纹尖端会产生应力集中。为了表征裂纹尖端附近应力场强度的强弱,引入应力场强度因子 K_I 。

$$K_I = YR\sqrt{a}$$

式中, Y 是与裂纹形状、加载方式及试样几何尺寸有关的系数,可查手册得到; R 为名义工作应力, MPa; a 为裂纹的半长, m。

K_I 值越大,表明裂纹尖端的应力场越强。当 K_I 值增大到某一临界值 K_{Ic} 时,零件内部裂纹将发生失稳扩展而发生断裂。这个 K_I 的临界值 K_{Ic} 就称为断裂韧性。常用的工程材料中,金属材料的断裂韧性最高,高分子材料和陶瓷的断裂韧性最低。

1.1.7 热疲劳

一些在温度急剧反复变化条件下工作的零件,如喷气发动机的导向叶片,热锻模、玻璃模具等,承受着热循环引起的热应力或热应变,使材料受到疲劳损伤而破坏,这种现象称为

热疲劳。材料在交变温度条件下抵抗产生裂纹及变形的能力称为材料的抗热疲劳性能。

1.2 材料的物理和化学性能

物理、化学性能虽然不是结构件设计的主要参数,但在某些特定情况下却是必须加以考虑的因素。

1.2.1 材料的物理性能

1. 密度

单位体积材料的质量称为材料的密度。对于运动构件,材料的密度越小,消耗的能量越少,效率越高。材料的抗拉强度与密度之比称为比强度。密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为轻金属,如铝、镁、钛及它们的合金;密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为重金属,如铁、钨、铅等。

2. 熔点

金属从固态向液态转变时的温度称为熔点。一般来说,材料的熔点越高,在高温下保持高强度的能力越强。在设计高温条件下工作的构件时,需要考虑材料的熔点。熔点高的金属称为难熔金属,如钨、钼、钽等,一般制造高温零件;熔点低的金属称为易熔金属,如锡、铅等,常用于制造熔丝、安全阀等零件。

3. 导热性

材料的导热性常用热导率表示。热导率指单位温度梯度下,单位时间内通过垂直于热流方向单位截面积上的热流量,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。材料的热导率愈大,导热性愈好。材料的导热性越差,在加热和冷却时表面和内部的温差越大,内应力越大,越容易发生变形和开裂。在热加工和热处理时,必须考虑导热性。金属中,导热性最好的是银,铜和铝次之。合金的导热性比纯金属差。

4. 导电性

材料的导电性与材料的电阻密切相关,常用电导率表示。电导率愈大,金属材料的导电性愈好。金属通常具有较好的导电性,其中最好的是银,铜和铝次之。金属具有正的电阻温度系数,即随温度升高,电阻增大。合金的导电性比纯金属差。含有杂质或受到冷变形会导致金属的电阻上升。电导率大的金属,适于制造导电零件;电导率小的金属,适于制作电热元件。

5. 热膨胀性

金属材料随温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。材料的热膨胀性通常用线膨胀系数表示,它是指温度升高 1°C 时单位长度材料的伸长量。对于特别精密的仪器,应选择热膨胀系数低的材料,或在恒温条件下使用。在材料热加工过程中更要考虑其热膨胀行为。如果材料表面和内部热膨胀不一致,就会产生内应力,导致材料变形或开裂。

6. 磁性

根据材料在磁场中的行为可将其分为三类:能抗拒或削弱外磁场对材料的磁化作用的材料称为抗磁性材料,如铜、锌等;在外磁场中只能微弱地被磁化的材料称为顺磁性材料,如锰、铬等;在外磁场中能强烈地被磁化的材料称为铁磁性材料,如铁、钴等。铁磁性材料常用于制造变压器、电动机、仪器仪表等,抗磁性材料常用做磁屏蔽或防磁场干扰材料。当温

度升高到一定数值时,铁磁材料的磁畴被破坏,变为顺磁材料,这个温度称为居里点,铁的居里点为 770°C 。

1.2.2 材料的化学性能

1. 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。一般来说,非金属材料耐腐蚀性要高于金属材料。在金属材料中,碳钢、铸铁的耐腐蚀性较差,而不锈钢、铝合金、铜合金、钛及其合金的耐腐蚀性较好。

2. 抗氧化性

材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性。抗氧化的金属材料常在表面形成一层致密的保护性氧化膜,阻碍氧的进一步扩散。一般,加入铬、硅、铝可提高抗氧化能力。

耐腐蚀性和抗氧化性统称为材料的化学稳定性。高温下的化学稳定性称为热化学稳定性。在高温下工作的设备或零部件,如锅炉、汽轮机和飞机发动机等,应选择热化学稳定性高的材料。

1.3 材料的工艺性能

选择材料时,不仅要考虑其使用性能,还要考虑其工艺性能。如果所选用的材料制备工艺复杂或难以加工,必然带来生产成本提高或材料无法使用的后果。

材料种类的不同,其加工工艺也大不相同。金属材料是机械工业中使用最多的材料,其工艺性能主要包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能、焊接性能和热处理性能等。

1.3.1 铸造性能

铸造性能是指浇注时,液体金属充满比较复杂的铸型并获得优质铸件的能力,包括流动性、收缩性和偏析等。对于需要铸造成型的零件,要求其材料具有良好的铸造性能。流动性好、易形成集中缩孔、偏析小等是铸造性能好的标志。

1.3.2 锻造性能

锻造性能是指金属材料易于锻压成型、不形成裂纹的能力。锻造不仅可使组织更加均匀、致密,也可初步形成与最终形状基本接近的毛坯。许多零件需要进行锻造成型。锻造性能主要取决于金属的塑性和变形抗力,塑性愈好,变形抗力愈小,金属的锻造性能愈好。

1.3.3 焊接性能

很多工程构件需要焊接成型。焊接性能是指材料易于被焊接到一起并获得优质焊缝的能力。在机械工业中,焊接的主要对象是钢材。碳和合金元素的含量是决定金属焊接性能的主要因素,含碳量越低,可焊性越好;合金元素含量高,焊接性能差。

1.3.4 切削加工性能

工程零部件多数需要加工成型。切削加工性能指材料容易被加工成型并得到精确的形状和高的表面光洁度的能力,与材料硬度、韧性等性能有关,一般用切削速度、加工表面粗糙

度、刀具使用寿命来衡量。灰铸铁的加工性能好，碳钢比高合金钢的切削加工性能好。

1.3.5 热处理性能

热处理是通过加热、保温和冷却，改变组织结构，从而获得所需性能的一种工艺，热处理性能与材料的化学成分有关。常用的热处理方法有退火、正火、淬火、回火及表面热处理等。

金属材料的热处理性能是指金属材料在热处理过程中，其组织结构和性能发生变化的难易程度。常用的热处理方法有退火、正火、淬火、回火及表面热处理等。

1.4 金属材料

1.4.1 金属材料的基本性能

金属材料的基本性能是指金属材料在常温下所具有的性能，包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能等。力学性能是指金属材料在受力作用下所表现出的性能，如强度、硬度、塑性和韧性等。物理性能是指金属材料在物理作用下所表现出的性能，如密度、熔点、热膨胀系数等。化学性能是指金属材料在化学作用下所表现出的性能，如耐腐蚀性等。工艺性能是指金属材料在加工过程中所表现出的性能，如铸造性、锻造性、焊接性等。



图 1-3 晶体的三维表示

金属材料的基本性能是指金属材料在常温下所具有的性能，包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能等。力学性能是指金属材料在受力作用下所表现出的性能，如强度、硬度、塑性和韧性等。物理性能是指金属材料在物理作用下所表现出的性能，如密度、熔点、热膨胀系数等。化学性能是指金属材料在化学作用下所表现出的性能，如耐腐蚀性等。工艺性能是指金属材料在加工过程中所表现出的性能，如铸造性、锻造性、焊接性等。

第2章 材料结构

材料结构指组成材料的原子、分子、离子的聚集状态。原子的结合方式和排列方式决定了物质的性能,以金属为例,原子在某种排列方式下,可以表现出较好的塑性;而在其他的排列方式下,可表现出很好的强度。

2.1 金属晶体结构

2.1.1 晶体结构的基本概念

根据其内部原子的空间排列是否有规律,固态物质分为晶体和非晶体两类。原子在三维空间作有规律的周期性重复排列的物质称为晶体,否则为非晶体。

1. 晶格与晶胞

构成晶体的原子(或分子、离子)在空间规律排列的方式称为晶体结构。为了研究原子的排列规律,假设理想晶体中的原子都是固定不动的钢球,那么晶体就是由这些刚性球体按一定规律周期性堆垛而成的,如图 2-1(a)所示。为了研究方便,将构成晶体的原子抽象为平衡中心位置的纯粹几何点,称为结点或阵点。用一些假想的空间直线将这些点连接起来,构成一个三维的空间格架,如图 2-1(b)所示,称为晶格或点阵。晶格直观地表示了晶体中原子(或离子、分子)的排列规律。

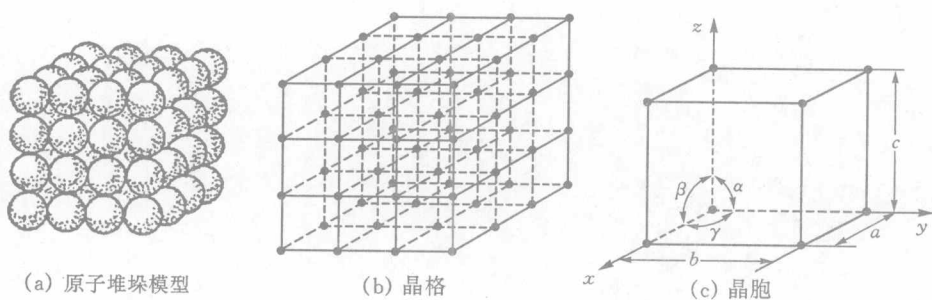


图 2-1 简单立方晶体示意图

晶体中原子的排列具有周期性的特点,为了简便起见,可从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元来分析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 2-1(c)所示。晶胞的大小和形状以晶胞的棱边长度 a , b , c 及棱边夹角 α , β , γ 表示,其中晶胞的棱边长度 a , b , c 一般称为晶格常数。根据晶胞的三个晶格常数和棱边夹角的相互关系,可将晶体结构分为许多类型,但工程上应用的金属材料通常为体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。

2. 致密度与配位数

晶胞中原子密度最大方向上相邻原子间距的一半称为原子半径,处于不同晶体结构中的

同种原子的半径是不相同的。一个晶胞内所包含的原子数目称为晶胞原子数。晶胞中原子本身所占有的体积与晶胞体积之比称为致密度，晶体结构中任一原子最近邻、等距离的原子数目称为配位数。致密度和配位数反映了原子排列的紧密程度。不同晶体结构的晶胞原子数、配位数和致密度均不相同，配位数越大的晶体致密度越高。

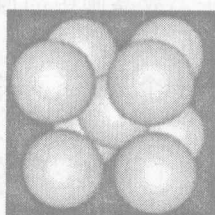
2.1.2 典型金属晶体结构

在工业上使用的金属元素中，除了少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数都具有比较简单的晶体结构，其中最常见最典型的晶体结构有体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构三种类型。

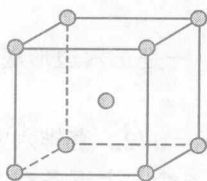
1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 2-2 所示，晶胞的三个棱边长度相等，三个轴间夹角均为 90° 。在立方体的 8 个顶角上各有一个与相邻晶胞共有的原子，立方体中心还有一个原子。由于晶格常数相等，因此只用一个参数 a 表示即可。原子半径为体对角线(原子排列最密的方向)上原子间距的一半，即

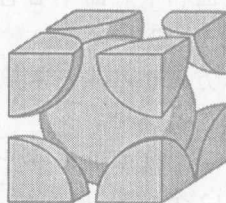
$$r = \sqrt{3}a/4$$



(a) 模型



(b) 晶胞



(c) 晶胞原子数

图 2-2 体心立方晶格的晶胞示意图

由于立方体顶角上的原子为 8 个晶胞所共有，而立方体中心的原子为该晶胞所独有，因而晶胞原子数为 $2(=8 \times 1/8 + 1)$ 。体心立方晶胞中的任一原子与 8 个原子接触且距离相等，因而体心立方晶格的配位数为 8。其致密度为

$$k = n \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 = 0.68$$

此值表明，在体心立方晶格中，有 68% 的体积为原子所占据，其余 32% 为间隙体积。具有体心立方结构的金属有 α -Fe, Cr, V, Nb, Mo, W 等 30 多种。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 2-3 所示，在晶胞的 8 个角上各有一个原子，在立方体 6 个面的中心各有一个原子。

与体心立方晶格一样，晶格常数也只用一个参数 a 表示即可。原子半径为面的对角线(原子排列最密的方向)上原子间距的一半，即

$$r = \sqrt{2}a/4$$

由于立方体顶角上的原子为 8 个晶胞所共有，每个晶胞实际占有该原子的八分之一，而位于 6 个面中心的原子为相邻的两个晶胞所共有，每个晶胞只分到面心原子的二分之一，因而晶胞原子数为 $4(=8 \times 1/8 + 6 \times 1/2)$ 。面心立方晶胞中原子，与之最相邻的是它周围顶角