

GONG CHENG CAI LIAO XUE

*Shi Jiang lan
zhubian*

工程材料学

施江澜 主编

东南大学出版社

PDG

91023

4741

高等学校试用教材

工程材料学

施江澜 主编

东南大学出版社

内 容 提 要

本书共五章，内容包括：材料的微观结构及强化本质；金属的强化途径；常用金属材料及其强化方法；非金属材料；工程材料及其强化方法的选择。

本书可作为高等学校机械制造专业的教材，也可供中等专业学校、职业中学、技工学校的教师以及工程技术人员参考。

责任编辑 赵小东

工 程 材 料 学

施江澜 主编

东南大学出版社出版发行

南京四牌楼2号

华东工学院印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12.625 字数 299 千

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7—81023—462—5

TG·2

定价：4.50元

前 言

本书是根据国家教育委员会《工程材料及机械制造基础》课程教学指导小组制订的机械类专业《工程材料》课的教学基本要求，结合编者的教学和教改实践编写而成。该书有如下几个特点：

1. 全书以材料强化为核心，以选择常用材料、常用强化方法、掌握一般零件在生产过程中安排强化工序位置的“两选一安排”为基点来组织教材内容。力求做到体系思路清晰，主题突出，系统性、整体性强，各部分内容有机联系。克服头绪多、内容杂、结构散的缺点。

2. 把金属材料与非金属材料置于统一的工程材料体系进行阐述。

3. 理论阐述力求简明、扼要，针对性、应用性强。对材料种类与强化方法注意加强横向比较，克服单纯孤立论述、过多纵向深入的倾向，使读者能够建立比较明确的横向评判概念，以利于合理选材和用材。

4. 本书通过揭示问题的实质与关键，引导学生从探索中求知识，以加强学生的开拓性思维与提高分析问题的能力，做到触类旁通。

本书由常州技术师范学院施江澜主编，张伯言参与了第三章的编写，东南大学韩克筠、戴枝荣主审。

此书以校内试用与校际交流讲义《工程材料及其强化》（1989年）为基础，在编写过程中，常州工业技术学院胡宗祺、江苏省金工学会《工程材料》教学研讨会（1988年）全体与会者，以及其他许多同志提出了宝贵意见，给予了热忱的关心和无私帮助。该书的编写与出版得到了江苏省教育委员会高校教学处、江苏省金工学会、金工信息站的大力支持、帮助与鼓励，还得到常州市勤丰灯具配件厂、常州五星钢化玻璃厂、常州帆布厂的支持，谨在此一并深表感谢。

由于编者水平有限，书中肯定存在许多考虑不周、安排不妥、尚需商榷之处，缺点与错误也一定不少，敬请广大读者批评指正。

编 者

1991年3月

目 录

第一章 材料的微观结构及强化本质	1
§ 1-1 材料的机械性能及强化的涵义.....	1
一、材料的机械性能.....	1
二、材料强化的涵义.....	9
§ 1-2 材料的微观结构.....	9
一、原子间结合键.....	10
二、固体相结构.....	14
§ 1-3 金属强化的本质.....	19
一、金属单晶体的塑性变形.....	19
二、实际金属的强化机制.....	21
第二章 金属的强化途径	27
§ 2-1 纯金属的结晶及其晶粒细化.....	27
一、纯金属的结晶.....	27
二、金属结晶时晶粒的细化.....	28
三、晶粒形状及对金属性能的影响.....	30
§ 2-2 金属的合金化.....	30
一、合金中的相.....	31
二、二元合金及其相图.....	32
三、铁碳合金及其相图.....	40
四、钢的合金化.....	48
§ 2-3 形变强化.....	50
一、冷形变强化.....	50
二、再结晶及其晶粒细化.....	52
三、热形变强化.....	54
§ 2-4 钢的热处理强化原理.....	56
一、钢在加热时的组织转变.....	58
二、过冷奥氏体的转变.....	59
三、淬火的回火转变.....	68
四、钢的淬硬性、淬透性与回火稳定性.....	72

第三章 常用金属材料及其强化方法	76
§ 3-1 钢的强化方法	76
一、钢的整体热处理方法.....	76
二、钢的表面强化方法.....	87
§ 3-2 常用碳钢与合金钢	94
一、概述.....	94
二、碳素结构钢与低合金结构钢.....	98
三、优质结构钢.....	100
四、工具钢.....	109
五、特殊性能钢.....	118
§ 3-3 铸铁	120
一、铸铁的强化.....	120
二、常用铸铁.....	124
三、特殊性能铸铁.....	128
§ 3-4 有色合金	129
一、铜合金.....	129
二、铝合金.....	134
三、滑动轴承合金.....	138
四、钛及其合金.....	140
第四章 非金属材料	142
§ 4-1 有机合成高分子材料	142
一、概述.....	142
二、工程塑料.....	147
三、合成橡胶.....	154
§ 4-2 特种陶瓷材料	155
一、概述.....	155
二、常用特种陶瓷.....	158
§ 4-3 复合材料	160
一、概述.....	160
二、常用纤维复合材料.....	163
第五章 工程材料及其强化方法的选择	166
§ 5-1 概述	166
一、材料与强化方法选择在机械设计中的重要意义.....	166
二、制造工艺对材料组织与性能的影响.....	167

三、机械零件失效涉及的材料问题·····	169
四、各类材料的性能、应用特点·····	173
§ 5-2 选材的一般原则·····	174
一、材料的使用性能·····	174
二、材料的工艺性能·····	177
三、材料的经济性·····	180
§ 5-3 材料及强化方法选择实例分析·····	182
一、机床与汽车零件用材概况·····	182
二、提高疲劳强度与耐磨性的选材·····	184
三、齿轮类与轴类零件的选材·····	187
参考文献 ·····	192

第一章 材料的微观结构及强化本质

§ 1-1 材料的机械性能及强化的涵义

机械零件在使用过程中要承受或传递载荷，彼此间往往有相对运动，有的还要受到高温、低温或腐蚀介质的作用。为保证零件正常工作，材料必须具备相应的使用性能，它包括强度、硬度、塑性、韧性等机械性能，密度、熔点、热膨胀系数、热导率、电导率、磁导率等物理性能，以及耐蚀性、抗氧化性等化学性能。此外，为适应零件制造过程中各种加工工艺的需要，材料还应具有良好的工艺性能，如铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

由于机械零件通常在受力条件下工作，故首先要求材料具有在外力作用下抵抗变形和断裂的能力，即具有良好的机械性能。

一、材料的机械性能

随外加载荷性质的不同，衡量材料机械性能的指标也不同，常用有强度、塑性、硬度、冲击性能、疲劳强度和断裂韧性等。

(一) 强度与塑性

强度与塑性是材料最重要、最基本的机械性能指标，可通过拉伸试验来测定。将如图 1-1 所示的标准拉伸试样装在拉伸试验机上，缓慢施加拉力，试样逐渐伸长，直至拉断。在拉伸试验过程中，利用试验机自动记录装置可描绘出载荷 F 与试样伸长量 ΔL 的关系曲线——拉伸曲线。将载荷 F 除以试样原始横截面积 A_0 ，得应力 $\sigma (\sigma = F/A_0)$ ；将伸长量 ΔL 除以试样原始标距长度 L_0 ，得应变 $\epsilon (\epsilon = \Delta L/L_0)$ ，便可作出应力-应变曲线。此曲线已消除试样尺寸因素的影响，从而能直接反映材料的性能。

图 1-2 为低碳钢的应力-应变曲线。曲线中， oe 为一直线段，应力与应变成正比

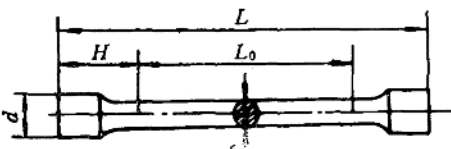


图 1-1 标准拉伸试样示意图

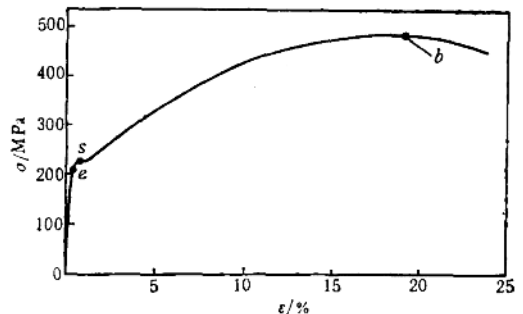


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

比地增加,如果卸除载荷,试样立刻恢复原状,即处于弹性变形阶段。此阶段应力和应变的比值 $E = \sigma / \epsilon$ 称为材料的弹性模量,是衡量材料抵抗弹性变形能力的指标,工程上称其为材料的刚度。 E 愈大,材料的刚度愈大,材料抵抗弹性变形的能力愈大,在一定应力作用下产生的弹性变形就愈小。超过 e 点,在卸除载荷后,试样的伸长不能完全消失,即开始出现塑性变形。曲线在 s 点附近出现水平线段,表明在应力基本不变的情况下,应变仍在增加,这种现象称为“屈服”。材料“屈服”后进入均匀塑性变形阶段,随应变增加,应力不断提高,至 b 点,应力达最大值。自此开始,试样出现局部截面变细的“颈缩”现象,随后的变形主要集中于颈部,最后在颈缩处断裂。由于颈缩处截面急剧减小,导致试样承载能力降低,故 b 点后,应力逐渐减小。由拉伸试验测得的强度和塑性的主要指标见表 1-1。

表 1-1 强度和塑性的主要指标

名称	符号	单位	指标值的确定方法	物理意义	工程意义
屈服强度	σ_s	MPa	应力-应变曲线上屈服段的应力值 $\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$	材料对开始明显塑性变形的抗力	塑性材料零件设计的主要依据
抗拉强度	σ_b	MPa	应力-应变曲线上的最大应力值 $\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$	材料对最大均匀塑性变形的抗力	脆性材料零件设计的主要依据
延伸率	δ		$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\%$ L_k 指试样拉断后的标距长度	材料断裂前产生塑性变形的能力,即材料的塑性	为避免零件脆断,材料应具有一定塑性
断面收缩率	ψ		$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$ A_k 指试样拉断后的最小截面积		

图 1-3 (a)、(b)分别为铜、灰口铸铁的应力-应变曲线。可见,铜在断裂前能发生大量塑性变形,是塑性材料,但曲线上不出现屈服段,而灰口铸铁不产生明显塑性变形,属于脆性材料。工程上规定,对于拉伸试验中无明显屈服现象发生的材料,把产生 0.2% 残余应变的应力值,作为其名义屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示,如图 1-3(a)所示。

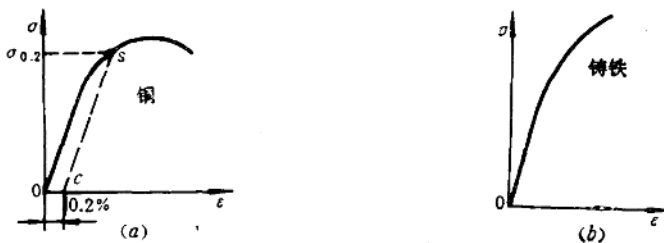


图 1-3 两类材料的应力-应变曲线

(a) 铜; (b) 灰口铸铁

图 1-4 给出了另几类材料的应力-应变曲线, 可见, 不同类型的材料, 其 σ - ε 曲线具有很大差异, 反映它们具有不同的性能特点, 现作如下分析:

(1) 橡胶在断裂前一直是弹性变形, 弹性应变可达百分之几百, 是典型的应力与应变呈非线性关系的高弹性体。

(2) Al_2O_3 陶瓷、石英玻璃、电木、有机玻璃的变形也是纯弹性的, 几乎不发生永久变形, 并在微量或少量弹性变形后就断裂, 为脆性材料。

(3) 聚乙烯在纯弹性变形后会发 生由粘性流动引起的大量永久变形, 其特点与塑性变形不同, 应变可在几乎恒定的应力下持续发生, 而不呈现应力随应变不断增加的现象。

(4) 电木、有机玻璃、聚乙烯及橡胶的弹性模量小、强度低。 Al_2O_3 陶瓷的弹性模量大、强度高。

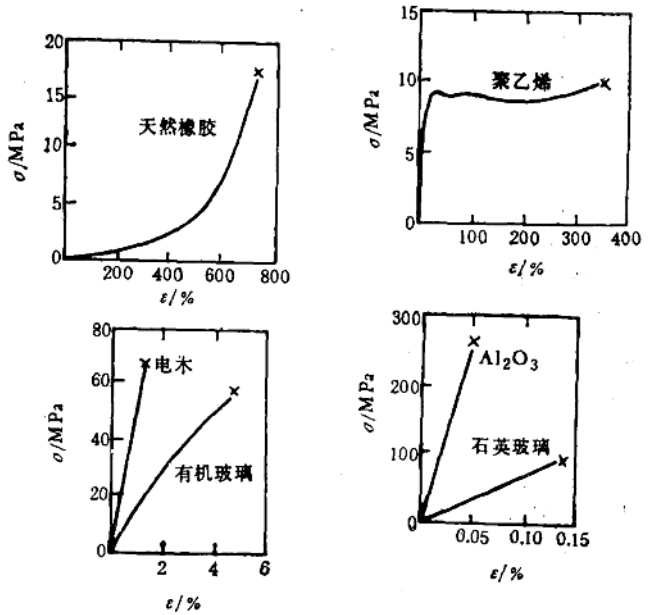


图 1-4 另几类材料的应力-应变曲线

(二) 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的性能指标, 它反映材料表面抵抗外物局部压入的能力。其试验设备简单, 操作方便、迅速, 不需破坏试件, 是一种简单易行的机械性能试验方法。而且硬度值和抗拉强度等其他机械性能指标之间存在一定关系。故在零件图上, 对机械性能的技术要求往往是标注硬度值, 生产中也常以硬度作为检验材料性能是否合格的主要依据, 并以材料硬度作为制定零件加工工艺的主要参考。

常用的硬度指标有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HRC)和维氏硬度(HV)等。

1. 布氏硬度(HB)

布氏硬度试验(图 1-5)是采用直径为 D 的淬硬钢球, 用一静压力 F 压入试样表面, 停留一定时间后, 卸除压力、移去压头, 测量试样表面残留的压痕(球冠形凹坑)直径 d , 得出压痕球冠面积。然后求出压痕单位面积上所受的力, 以此作为被测材料的布氏硬度值, 用符号 HB 来表示, 单位为 $kgf \cdot mm^{-2}$ 。习惯上, 布氏硬度只写明数值, 而不标出单位。

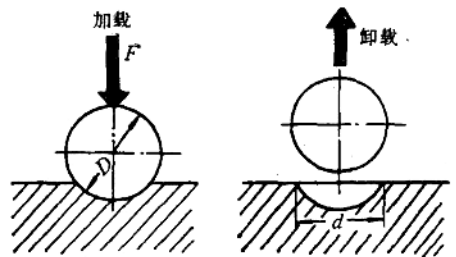


图 1-5 布氏硬度(HB)试验原理

布氏硬度试验数据稳定, 压痕大, 能反映材料

较大面积范围内的平均硬度。但较大压痕有损试样表面，不宜用于成品与表面薄层的硬度测试，而且测试较麻烦。此外，在测试硬度高于 HB 450 的材料时，会使压头变形而影响试验结果的准确性。故布氏硬度试验适用于退火、正火、调质钢件，以及铸铁、有色金属材料的硬度测定。

由于布氏硬度反映了材料表面抵抗局部塑性变形的能力，因此材料的强度愈高，塑性变形抗力愈高，硬度值也就愈高。布氏硬度和抗拉强度之间，存在某种近似关系：如退火低、中碳钢 $\sigma_b \approx 3.62 \text{ HB}$ ；调质中碳钢 $\sigma_b \approx 3.45 \text{ HB}$ ；调质合金钢 $\sigma_b \approx 3.25 \text{ HB}$ 等。

2. 洛氏硬度(HRC)

洛氏硬度(HRC)是目前应用最广的硬度指标。其试验原理如图 1-6 所示。用顶角 120° 的金钢石圆锥体为压头，先施加初载荷 10 kgf ，使压头压入深度 h_0 ，以保证压头与试样表面紧密接触。再施加主载荷 140 kgf ，待稳定后，卸除主载荷，因试样弹性变形的消失，压头的实际压入深度为 h_1 。则压头受主载荷作用在试样表面产生的永久压痕深度为 $h = h_1 - h_0 (\text{mm})$ ， h 愈小，表明材料硬度愈高。为了适应人们习惯上数值愈大硬度愈高的概念，人为规定，用一常数 0.2 mm 减去压痕深度 $h \text{ mm}$ ，并以每 0.002 mm 为一个洛氏硬度(HRC)单位，则

$$\text{HRC} = \frac{0.2 - h}{0.002}$$

为一无名数。其值可从硬度计表盘上直接读出，洛氏硬度(HRC)适用于测量淬火钢、深层表面硬化钢等较硬材料的硬度，测量范围为 HRC 20~67。

在同一洛氏硬度计上，采用不同的压头和载荷，还可构成其他洛氏硬度等级，以测定从软到硬的材料硬度。例如，HRA 用于测量浅层表面硬化钢、硬质合金等硬而薄工件的硬度；HRB 用于测量退火钢、有色金属等较软材料的硬度等。

洛氏硬度测量简便、迅速，压痕小，可测定较薄工件或表面较薄硬层的硬度，且压痕无损试样外观。其缺点是受材料内部组织不均匀的影响较大，试验数据不稳定。

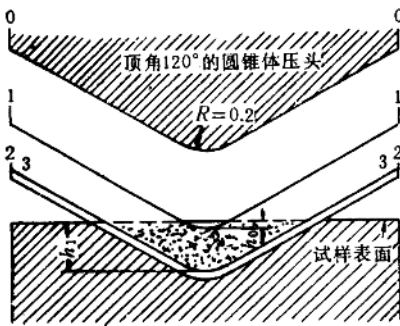


图 1-6 洛氏硬度(HRC)试验原理

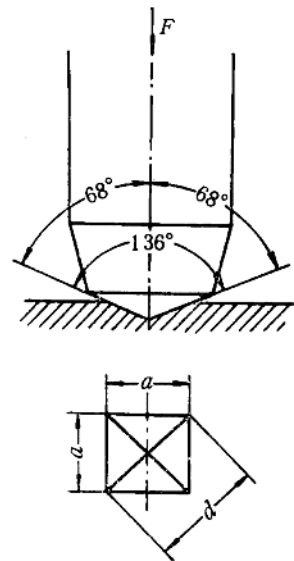


图 1-7 维氏硬度试验原理

3. 维氏硬度(HV)

维氏硬度试验原理(图 1-7)基本上和布氏硬度试验相同。它采用锥面间夹角为 136° 的

金刚石正四棱锥体压头，在载荷 F 作用下，在试样表面压出一个四方锥形压痕，通过测量压痕投影两对角线的平均长度 d ，计算出压痕表面积，以压痕单位面积上所受的力来计量被测材料的维氏硬度值，用符号 HV 表示，单位为 $\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$ (习惯上不予标出)。

维氏硬度试验可采用统一的硬度指标，测量从极软到极硬材料的硬度，测量范围为 HV 8~1000。因所加载荷小，压痕浅，特别适用于测定极薄试样或表面薄硬层的硬度。其缺点是测量麻烦。

各种硬度值之间存在着近似的换算关系，例如在 HB 200~600 范围内， $\text{HRC} \approx 0.1\text{HB}$ ；当 $\text{HB} < 450$ 时， $\text{HB} \approx \text{HV}$ 。表 1-2 为几种常用硬度间的换算表。

表 1-2 几种常用硬度的换算表

洛氏硬度 HRC	布氏硬度 HB	维氏硬度 HV	洛氏硬度 HRC	布氏硬度 HB	维氏硬度 HV
65	—	798	36	331	339
64	—	774	35	322	329
63	—	751	34	314	321
62	—	730	33	306	312
61	—	702	32	298	304
60	—	687	31	291	296
59	—	666	30	284	289
58	—	645	29	277	281
57	—	625	28	270	274
56	—	605	27	263	267
55	538	587	26	257	260
54	526	659	25	251	254
53	515	551	24	246	247
52	503	535	23	240	241
51	492	520	22	235	235
50	480	504	21	230	229
49	469	489	20	225	224
48	457	475	(19)	221	218
47	445	461	(18)	216	213
46	433	448	(17)	212	208
45	422	435	(16)	208	203
44	411	423	(15)	204	198
43	400	411	(14)	200	193
42	390	400	(13)	196	189
41	379	389	(12)	192	184
40	369	378	(11)	188	180
39	359	368	(10)	185	176
38	349	358	(9)	181	172
37	340	348	(8)	177	168

(三) 冲击性能

以较高速度作用在零件上的载荷称为冲击载荷。冲击性能则指材料在冲击载荷作用下，

抵抗破坏的能力。实际生产中，零件遭受的的冲击有一次或数次冲击便可导致断裂的大能量冲击，但更多情况下，零件是在经受许多次(一般 $> 10^3$ 次)冲击后才会发生断裂，且所受的冲击能量远小于一次冲断能量，即属于小能量多次冲击。对这两种冲击载荷，应采用两种指标来衡量材料的冲击性能，分别称为冲击韧性与多冲抗力。

1. 冲击韧性

冲击韧性是评定材料抵抗大能量冲击载荷能力的指标，通常采用一次摆锤冲击弯曲试验进行测定。将带有缺口的标准冲击试样。安放在冲击试验机的支座上(图 1-8, a)，把重量为 G 的摆锤从一定高度 H 落下，将试样冲断，然后，摆锤继续摆动升至高度 h (图 1-8, b)。冲断试样所消耗的功(冲击功)为 $A_k = G(H-h)$ 。将冲击功除以试样缺口处截面积 S ，即得材料的冲击韧性值，用符号 α_k 表示，即

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S} \quad (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$$

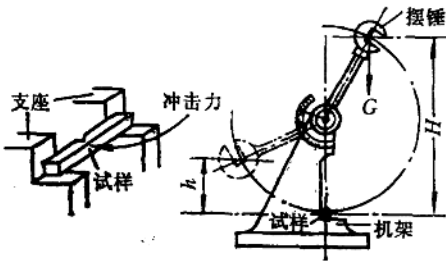


图 1-8 一次冲击试验示意图

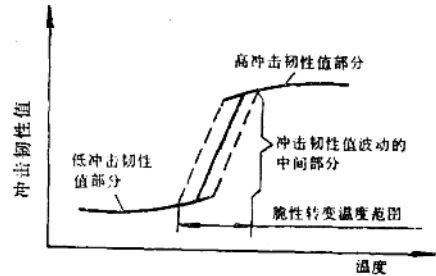


图 1-9 材料的温度-冲击韧性值关系曲线

材料的冲击韧性值主要取决于其塑性，并与温度有关。通过在不同温度下对材料进行一系列冲击试验，可测得材料的冲击韧性值与温度间的关系曲线(图 1-9)。由图可知，材料的冲击韧性值随温度的降低而减小，当试验温度降低到某一温度范围时，冲击韧性值急剧下降，材料由韧性状态转变为脆性状态。这种现象称为“冷脆”。该温度范围称为“冷脆转变温度范围”。其数值愈低，表示材料的低温冲击性能愈好。这对于在低温下工作的零件具有重要意义。

2. 多冲抗力

实践表明，对于在小能量多次冲击载荷下工作的机械零件，如锻锤杆、凿岩机活塞、钎尾等，若仍采用 α_k 值来衡量材料的抗冲击能力并不理想，为防止冲击断裂而盲目追求高的 α_k 值，也并不见得有效。因此，应测定材料抵抗小能量多次冲击的能力，即多冲抗力。

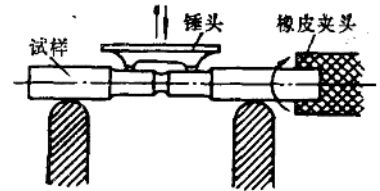


图 1-10 多次冲击试验示意图

多冲抗力一般采用凸轮落锤式连续冲击试验测定，其工作原理如图 1-10 所示，将缺口试样放在试验机上，使之受到锤头的小能量多次冲击，直至破断。

多冲抗力指标，可用一定冲击能量 A 下的冲断周次 N 表示，也可用一定的冲击工作寿

命 N 时的冲断能量 A 来表示。大量试验证明，小能量多冲抗力主要取决于材料的强度，但同时要求有适当塑性的配合。随着冲击能量的提高，配合的塑性也应愈高。

(四) 疲劳强度

许多机械零件，如主轴、齿轮、弹簧等，都在交变应力下工作，即工作应力的方向随时间呈周期性变化。若应力如图 1-11(a) 所示，即 $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ ，则称为对称循环交变应力。零件在交变应力的长期作用下，虽然应力通常低于材料的屈服强度，也会突然发生断裂，这种现象称为材料的疲劳。由于疲劳断裂事先没有明显塑性变形的预兆，很难事先觉察到，故具有很大的危险性。

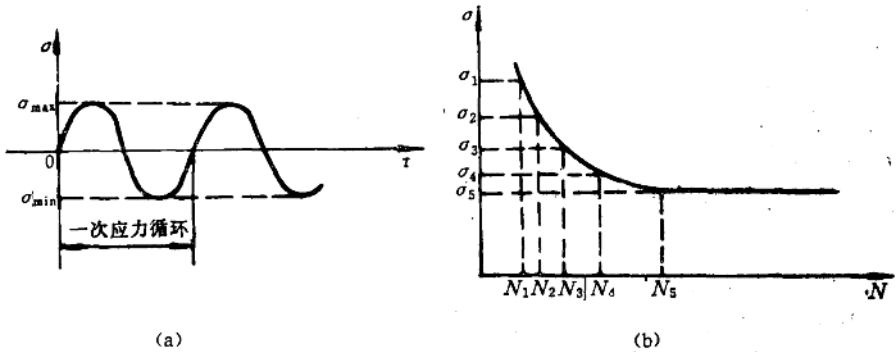


图 1-11 对称循环交变应力与疲劳曲线($\sigma-N$ 曲线)示意图

材料抵抗疲劳断裂的能力可通过疲劳试验进行测定。试验表明，材料所受的交变应力 σ 与断裂前的应力循环周次 N 之间有如图 1-11(b) 所示的曲线关系，该曲线称为疲劳曲线，即 $\sigma-N$ 曲线。由曲线可见， σ 愈低， N 愈大，当 σ 低于某一数值时，材料可经受无限周次应力循环而不发生疲劳断裂。工程上通常规定一个应力循环基数（一般对钢铁 $N = 10^7$ 次，对有色金属 $N = 10^8$ 次），把材料经受的应力循环次数达基数时不发生断裂的最大应力，作为材料的疲劳强度。材料承受对称循环交变应力时的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。图 1-12 为几种材料在对称循环交变应力作用下的实测疲劳曲线。

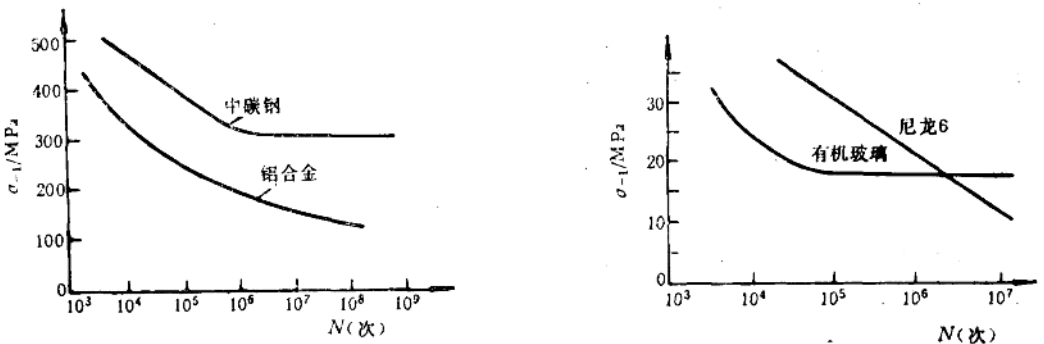


图 1-12 几种材料的实测疲劳曲线

材料的疲劳强度与其抗拉强度之间存在一定的经验关系，如碳钢 $\sigma_{-1} \approx 0.43 \sigma_b$ ，合金钢 $\sigma_{-1} \approx 0.35 \sigma_b + 12$ 。因此，在其他条件相同的情况下，材料的疲劳强度随抗拉强度的提高而增加。

(五) 断裂韧性

前面讨论材料机械性能的前提，都是假定材料内部是均匀、完整的连续体。一般认为，机械零件在远低于材料屈服强度(对塑性材料)或抗拉强度(对脆性材料)的许用应力以下工作不会破断，但在生产实践中，却发生一些大型、重型或高强度材料零件或构件的突然脆断事故，如大型铁桥、万吨轮船、飞机机翼突然断裂和高压容器突然爆炸等。这种在材料所承受的应力低于许用应力的情况下，突然发生的无明显塑性变形的脆性断裂，称为低应力脆断。研究表明，低应力脆断总是由材料中宏观裂纹的扩展引起的。这种裂纹可能是气孔、缩松、夹杂物等冶金缺陷，也可能是在加工和使用过程中形成，因而是难以避免的。材料在外力作用下，其中裂纹长度达到某一临界尺寸时，会发生突然的失稳扩展，导致构件脆断。断裂韧性便是指材料抵抗裂纹失稳扩展即抵抗低应力脆断的能力。

在外力作用下，裂纹有不同的扩展方式，图 1-13(a) 为最常见而又最危险的裂纹扩展方式，称为张开型(或称为 I 型)。进一步研究表明，如果材料中有不同尺寸的裂纹存在，它能承受的应力大小也不一样。裂纹尺寸愈大，材料能承受的应力愈小。下面以张开型裂纹为例加以说明。

如图 1-13(b) 所示，平板上有一条长度为 $2a$ 的裂纹存在，因此在与裂纹方向垂直的外加拉应力 σ 作用下，裂纹尖端附近的应力 σ_r ，分布不再均匀，在裂纹尖端前沿存在应力集中，形成一个较大的裂纹尖端应力场，其大小可用应力强度因子 K_I 来描述，它与外加拉应力 σ 和裂纹半长度 a 有关，可表达为：

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ 。由该式可知，当平板所受的外加拉应力 σ 提高，或裂纹的半长度 a 逐渐增加，裂纹尖端附近的应力强度因子 K_I 相应增大。当 K_I 增大到某一临界值时，就会使裂纹尖端的应力场大到足以使裂纹失稳扩展，从而导致材料发生脆断。这个应力强度因子的临界值，称为材料的断裂韧性，用 K_{Ic} 表示，单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ ，可通过试验测定。对一定成分和组织状态的材料， K_{Ic} 是个定值，不随外加拉应力、裂纹长度、试样尺寸的大小而变化。带有裂纹的零构件在外力作用下，当 $K_I > K_{Ic}$ 时，会发生快速脆断。

由于材料中裂纹往往难以避免，故断裂韧性为安全设计提供了一个重要的机械性能指

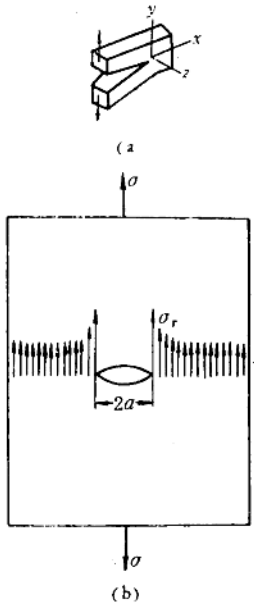


图 1-13 张开型裂纹及其尖端应力场示意图

标。若材料的 K_{Ic} 已知，一方面根据材料的工作应力，可确定材料中允许存在的、不会失稳扩展的最大裂纹长度；另一方面根据材料已存在的裂纹长度，可确定材料能够承受的不致脆断的最大应力。如果已知材料的工作应力和最大裂纹尺寸，就可算出应力强度因子 K_I ，将之与材料的断裂韧性值 K_{Ic} 比较，便可判断在使用期内发生低应力脆断的可能性。研究表明，材料的断裂韧性值往往随强度的提高而下降，因此在使用高强度材料时，要注意防止因断裂韧性值低而引起的低应力脆断。

二、材料强化的涵义

由上所述可知，强度和硬度都反映材料抵抗塑性变形的能力，一般来说，强度、硬度高，表示材料的承载能力大。塑性反映材料在断裂前产生塑性变形的能力，其作用是使局部应力集中通过塑性变形得以松弛，并产生加工硬化提高材料的抗过载能力。韧性反映材料在外力作用下，因应力集中裂纹产生与扩展的难易程度，或材料受力变形至断裂消耗能量的大小。可以认为，塑性和韧性都反映材料的应力集中倾向。塑性、韧性高，表示材料的应力集中倾向小，裂纹难以形成与扩展，故可延缓断裂的发生，提高其安全可靠性。

材料强化旨在提高材料对载荷的承受能力，抵抗失效以延长其使用寿命。因此，作为具有实际意义的强化，不仅应提高材料的强度和硬度，还必须使材料有一定的韧性储备。也就是说，材料强化的涵义应是提高材料强度、硬度、塑性和韧性的综合效应。

然而，材料的强度、硬度与塑性、韧性往往呈现相互矛盾的现象，即提高强度常会使韧性降低，材料脆化，受力时容易过早断裂，反而难以发挥高强度优势；提高韧性又往往以牺牲强度为代价，从而限制材料强度潜力的发挥，使其承载能力降低。因此，一方面要防止盲目追求过多的韧性储备和盲目追求高强度这两种倾向，使材料的强度与韧性具有恰当的匹配；另一方面需要寻找在提高材料强度的同时，又能提高其韧性的方法，即提高材料的强韧性。

随着材料使用条件不同，其强度、硬度、塑性和韧性的匹配要求也不同。例如承受小能量多次冲击和在交变应力作用下的零件，材料应以提高强度为主，配合一定的韧性；对制作弹簧等弹性零件的材料，既要求高强度，又应具有较好的韧性；对承受冲击载荷的耐磨零件，则要求表面硬而心部韧；对截面尺寸变化大，有缺口的零件，其材料应有相当的韧性储备；等等。因此，应从实际需要出发，对材料采用不同的强化方法，以充分发挥其性能潜力。

§ 1-2 材料的微观结构

材料的机械性能取决于其微观结构。因此，深入研究材料的微观世界，掌握材料的微观结构，对了解和改造材料，实现材料强化的目的，十分必要。

为了解材料的微观结构，必须借助各种先进的仪器和测试手段。将专门制备的材料试样置于显微镜下观察，显现出的具有一定形貌或形态特征的组成物总称为显微组织。组织的基

本组成部分，称为“相”。图 1-14 为灰口铸铁的显微组织照片，其中白色基底为铁素体相，黑色片状夹杂物为石墨相。组成相的原子种类与配比称为相成分，原子的排列方式称为相结构。图 1-15 为石墨相的结构示意图。不同相的成分与结构不同，因此确切地说，相是材料中成分一致、结构相同、与其他部分有界面分开的均匀组成部分。组成相的原子之间存在着相互作用力，称为结合键。原子间结合键、相的成分与结构决定了相的性能，而材料的性能取决于由相所组成的组织。下面分别介绍原子间结合键和固体相结构。



图 1-14 灰口铸铁的显微组织

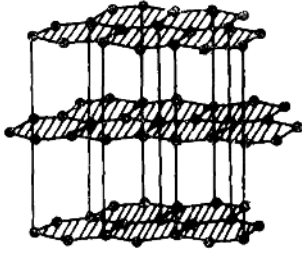


图 1-15 石墨相的碳原子排列

一、原子间结合键

原子间的结合性质主要取决于原子核外价电子的相互作用。据此可将原子间结合键分为结合力较强的金属键、离子键和共价键三种强键，以及在分子之间存在的一种较弱的结合键，称为分子键，为弱键。

(一) 金属键

金属原子间依靠金属键结合形成金属固体。

金属原子的价电子数较少，一般不超过 3 个，它们和原子核结合力较弱。当大量金属原子结合时，这些价电子容易脱离原子核，为全体原子所共有，称为“自由电子”，而丢失价电子的金属原子成为正离子，自由电子在正离子之间自由穿梭运动，形成所谓“自由电子气”，正离子则沉浸在电子气中。由于金属离子与周围弥漫着的电子气的相互吸引，使全部金属原子结合起来，这种结合键称为金属键(如图 1-16)。金属键中，金属离子(也可能有个别金属原子)犹似等径圆球堆积，趋于作紧密排列，形成空间密排结构。各种金属键的结合力相差颇大，对于键合力较强的金属来说，其熔点、强度、硬度较高，弹性模量较大，热膨胀系数较小。

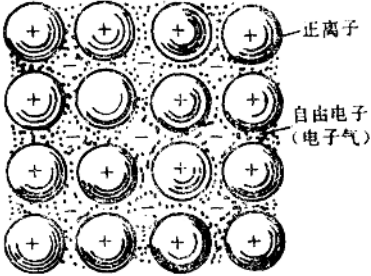


图 1-16 金属键模型