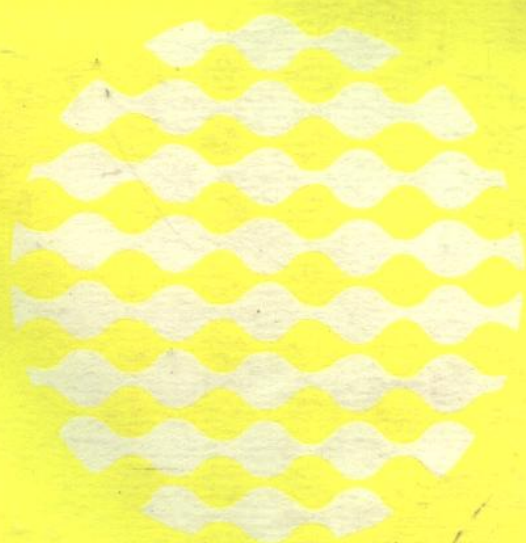


现代工程材料手册

胡德昌 胡小舟 编著



宇航出版社

7k22073

394

现代工程材料手册

胡 德 昌 编 著
胡 小 舟

2k542/23



(京)新登字181号

内 容 简 介

本书是系统地介绍现代工程技术和高科技领域选用新材料的工具书。它综述与对比了中、美、苏、日、英、德等国的现代工程材料的牌号、成分、性能，以便读者选材、用材。

本书的读者对象是科技人员及大专院校师生。

现代工程材料手册

胡 德 昌 编 著
胡 小 舟

责任编辑：林茂燕

•
宇航出版社出版

地址：北京和平里滨河路1号 邮政编码：100018

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

•
开本：787×1092 1/16 印张：25.5 字数：636千字

1992年2月第1版第1次印刷 印数：1—5500册

ISBN7-80034-401-0/TU·004 定价：15.80元

序 言

现代工程材料是研究工程技术中常用的金属与合金、复合材料、高分子材料、精细陶瓷等新型材料的基本理论及其成分、组织结构、性能与内在规律的一门科学。它是材料科学的重要组成部分，是人类社会发展的极为重要的物质基础之一。现代工程材料具有两个显著的特点：第一是综合性，即它涉及广泛的学科领域；第二是实用性，即它有很强的应用背景，与生产实践有极其密切的联系。

材料的发展将导致时代的变迁，推进人类的物质文明。由青铜过渡到铁器的应用是生产工具的重大发展，推动了奴隶社会向封建社会的过渡。青铜曾对古代文明起过非常重要的作用，而钢铁又在近代文明中占着特殊重要的地位。长期以来，金属与合金是工程技术中采用的主要材料。本世纪中叶，高分子材料、复合材料、精细陶瓷等新型材料不断涌现，每年以14%左右的速度增加，预测进入21世纪，它们可能占国民经济所需结构材料的70%~85%〔1〕。它们具有比强度、比刚度高、耐热、耐磨、抗蚀、抗疲劳等优异性能，因而有很强的生命力与发展潜力，并与传统的金属材料相竞争，不断冲击着金属材料在宇航、航空、海洋、石油、化工、原子能、冶金、机械工业中的垄断地位。由于科学技术日新月异，各种产品要求在极为复杂的条件下（如高温、高压、低温、腐蚀、振动、辐照……）服役，因而对材料性能和产品质量与可靠性提出了更高、更严的要求，这就导致了现代工程材料这门新学科的诞生与发展。当今，金属与非金属相互渗透，相互结合，组成一完整的材料体系，《现代工程材料》就在金属学、复合材料学、高分子科学、陶瓷学的基础上应运而生，迅速发展。

材料、能源、信息是现代文明的三大支柱。材料科学技术被列为我国重点发展的带头学科之一，材料历来是人类进化的重要里程碑，历史上的石器时代、铜器时代、铁器时代都是以材料作为标志的。至今材料和工艺仍然是决定产品质量、寿命以及生产成本的重要因素，其中材料的使用性能和加工性能又成为设计、选材和制订工艺的依据。许多高性能的产品和武器装备，都是在解决了关键性能的材料及其加工才得以生产应用的。假如没有超高温、超高强度结构材料，便不可能有今天的火箭和航天飞机；没有半导体材料的工业化生产，便不可能有当前的计算机；没有低损耗的光导纤维，也就没有当今世界蓬勃发展的光通讯。相反，有很多新技术，由于材料不过关，便难以实现。例如太阳能是取之不尽、用之不竭的无污染能源，其辐射能在地表约为1度电量·米⁻²·小时⁻¹，但由于没有光电转换效率高的材料，因而太阳能的利用极其有限。

实践表明，合理选用材料，妥善安排工艺路线，使材料具有良好的性能，对提高产品质量与可靠性、降低生产成本、充分发挥材料潜力等方面起着重大的作用。在工程技术中往往由于材料选用不合理或加工工艺不当，使产品的使用性能达不到技术规范的要求，从而导致机件在服役中的早期失效。毋庸置疑，材料的研制、发展与合理选用，以及现代工程材料知识的储备，是实现我国工业和科学技术腾飞的关键。

《现代工程材料手册》（以下简称《手册》）的中心内容是揭示材料的化学成分、组织

结构、性能和应用之间的关系与变化规律；论述各种现代工程材料在使用时的主要问题和解决的途径；简介国内外现代工程材料的状况和发展趋势。《手册》用相当大的篇幅讨论正在发展中的各类工程材料，以适应现代科学技术飞速发展的需要。《手册》综述与对比了中、美、苏、日、德、英等国的现代工程材料的牌号、成分、性能，以便于读者选用材料。作者希望本书能对我国民用工业和国防建设中正确选用现代工程材料有所帮助，对广大科技工作者和外贸人员开拓材料科学知识领域稍有裨益。

《手册》第一、二、十七章由胡小舟撰写；其余各章由胡德昌撰写，全书由胡德昌修改定稿。由于作者水平有限，仓促成书，缺点和错误在所难免，敬希读者不吝指正。

全书由华中理工大学朱孝谦教授审阅，谨致诚挚的谢意。曹军同志为本书绘制全部插图；金相图片则由曾国英同志摄制；宇航出版社副编审林茂燕同志为本书审校，保证了本书的出版，在此一并致谢。

胡德昌

1990年4月于湖南大学

(长沙岳麓山)

目 录

第一章 工程材料的力学性能 1	§7-4 奥氏体不锈钢.....115
§1-1 强度与塑性..... 1	§7-5 复相不锈钢.....130
§1-2 硬度..... 4	§7-6 沉淀硬化型不锈钢.....134
§1-3 韧性..... 6	§7-7 不锈钢的新进展.....138
§1-4 疲劳..... 12	第八章 低温钢142
§1-5 超塑性..... 16	§8-1 低温脆性断裂.....142
第二章 世界各国钢号表示方法 17	§8-2 低温脆断机理.....145
§2-1 中国国家标准(GB) 17	§8-3 钢材冷脆倾向的评定方法.....146
§2-2 美国钢号表示法..... 20	§8-4 低温钢.....147
§2-3 苏联钢号表示法..... 22	第九章 高温合金155
§2-4 日本钢号表示法..... 22	§9-1 金属的蠕变.....155
§2-5 德国钢号表示法..... 25	§9-2 高温合金的高温强度.....157
§2-6 英国钢号表示法..... 26	§9-3 高温合金的强化原理.....159
§2-7 国际标准..... 29	§9-4 铁基、铁镍基高温合金.....162
第三章 低合金高强度钢 31	§9-5 镍基高温合金.....172
§3-1 微合金化低碳高强度钢..... 31	§9-6 钴基高温合金.....186
§3-2 压力容器用钢..... 36	§9-7 抗热腐蚀高温合金.....190
§3-3 抗大气腐蚀钢..... 43	§9-8 高温合金的新进展.....192
§3-4 抗海水腐蚀钢..... 43	第十章 工具钢196
第四章 机械制造用合金结构钢 53	§10-1 碳素工具钢196
§4-1 渗碳钢..... 53	§10-2 合金刃具钢199
§4-2 调质钢..... 59	§10-3 高速钢203
§4-3 中碳微合金非调质钢..... 69	§10-4 模具钢215
第五章 超高强度钢 72	§10-5 量具钢224
§5-1 低合金超高强度钢..... 72	第十一章 铸铁227
§5-2 中合金超高强度钢..... 79	§11-1 铸铁的石墨化227
§5-3 高合金超高强度钢..... 80	§11-2 灰口铸铁229
§5-4 超高强度钢抗应力腐蚀断裂性能... 86	§11-3 球墨铸铁235
第六章 抗氢腐蚀钢 88	§11-4 蠕墨铸铁243
§6-1 氢腐蚀概论..... 88	§11-5 可锻铸铁245
§6-2 影响氢腐蚀的因素..... 89	§11-6 合金铸铁248
§6-3 抗氢腐蚀钢..... 92	第十二章 铝合金252
第七章 不锈钢 99	§12-1 概述252
§7-1 概论..... 99	§12-2 铝合金时效理论基础254
§7-2 铁素体不锈钢.....103	§12-3 形变铝合金258
§7-3 马氏体不锈钢.....111	§12-4 新型铝合金——Al-Li合金271

第十三章 钛合金	280	§16-2 聚合物基复合材料	328
§13-1 概论	280	§16-3 金属基复合材料	332
§13-2 钛的腐蚀特性	282	§16-4 其他复合材料	338
§13-3 钛合金化原理	283	第十七章 精细陶瓷	341
§13-4 钛合金的热处理	292	§17-1 概论	341
§13-5 钛合金的新进展	295	§17-2 陶瓷的显微组织结构	342
第十四章 形状记忆合金	300	§17-3 陶瓷材料的性能	346
§14-1 概述	300	§17-4 精细陶瓷的制造工艺	349
§14-2 形状记忆效应	300	§17-5 结构陶瓷材料	351
§14-3 形状记忆合金	302	§17-6 功能陶瓷材料	356
§14-4 形状记忆合金应用的新进展	307	第十八章 现代工程材料的失效分析	365
§14-5 形状记忆合金的研究方向	310	§18-1 概述	365
第十五章 非晶合金	311	§18-2 机件失效原因	367
§15-1 概述	311	§18-3 失效分析的基本环节	369
§15-2 非晶合金的形成及其稳定性	311	§18-4 机件失效类型	371
§15-3 非晶合金的制备方法	314	附录一 国际单位制(SI)	374
§15-4 非晶合金的抗蚀性能	316	附录二 弹簧钢	376
§15-5 非晶合金的力学性能和电学性能	318	附录三 滚动轴承钢	378
§15-6 非晶合金的应用及其展望	321	附录四 铜合金	380
§15-7 铝基非晶合金	324	附录五 轴承合金	388
第十六章 复合材料	327	附录六 铸造铝合金	390
§16-1 概论	327	附录七 美国铝合金编号方法	394
		参考文献	394

第一章 工程材料的力学性能

力学性能是工程材料的重要特性，是设计、选材的主要依据，是控制材料质量的基本参数。本章将针对最常用的力学性能指标——强度、硬度、塑性、韧性、疲劳强度分别论述，并简介其测试方法。

§1-1 强度与塑性

材料在外力作用下都会发生变形，原子间结合力是材料抵抗变形的抗力，外力是使材料变形的推动力。材料抵抗变形或断裂的能力称为强度，原子结合力越大，其强度越高。

一、拉伸试验与拉伸曲线

通过静载试验能确定工程材料的强度和塑性，这些数据广泛应用于结构和机件的强度设计和刚度设计。静载试验方法有拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切等类型，但拉伸试验的应用最为普遍。

(一) 拉伸试样

试样如图1-1所示。设

l_0 ——试样的原始标距；

d_0 ——试样的原始直径；

F_0 ——试样的原横截面积；

当 $l_0 = 11.3\sqrt{F_0}$ 时，称为长试样 ($l_0 = 10d_0$)；

当 $l_0 = 5.65\sqrt{F_0}$ 时，称为短试样 ($l_0 = 5d_0$)。

(二) 拉伸曲线

材料受力时，其变形过程可分为三个阶段，即弹性变形，弹-塑性变形和断裂。现以低碳钢的拉伸试验说明，拉伸曲线如图1-2所示。它反映了试样在静拉伸力作用下的变形过程，可分五个阶段进行讨论。

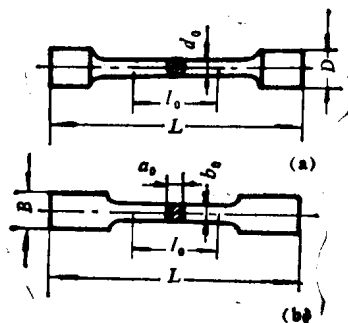


图1-1 标准拉伸试样的形状
(a)圆柱形试样；(b)板状试样

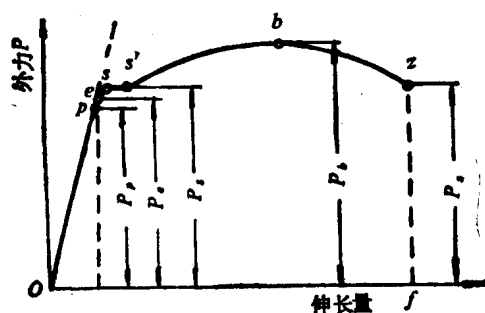


图1-2 低碳钢的拉伸曲线

1. 弹性变形阶段 (oe)：它遵守虎克定律。
2. 微量塑性变形阶段 (es)：外力超过 P_0 后，试样产生永久变形，即塑性变形。
3. 屈服阶段 (ss')：当外力不增加或略有下降时，试样继续变形，这种现象称为屈服，在拉伸曲线上出现锯齿形或水平线段，但大多数金属材料没有明显的屈服现象。
4. 均匀塑性变形阶段 ($s'b$)：外力超过 P_0 后，开始大量塑性变形， b 为最大拉力点。在此阶段，试样整体进行均匀的塑性变形。
5. 不均匀的塑性变形阶段 (bz)：载荷达到 P_b 时，试样局部截面急剧减小，产生“缩颈”现象，变形集中在局部进行。载荷达 P_z 时，试样断裂。

根据材料性质的不同，其拉伸曲线也发生变化。例如铸铁材料一般无明显的塑性变形而产生脆断。

二、应力-应变曲线和力学性能指标

(一) 应力与应变

用试样原始截面积 F_0 除拉力 P 得到应力 σ ，即 $\sigma = P/F_0$ (MPa)。以试样的原始标距 l_0 除绝对伸长 Δl ，得到应变 ε ，即 $\varepsilon = \Delta l/l_0$ 。若将图1-2中纵轴标以应力，横轴标以应变，则得到应力-应变曲线，如图1-3所示，它与拉伸曲线相似。

在应力-应变曲线上的各点，代表着各个变形阶段的抗力和相应的变形量，是工程材料的重要力学性能指标。

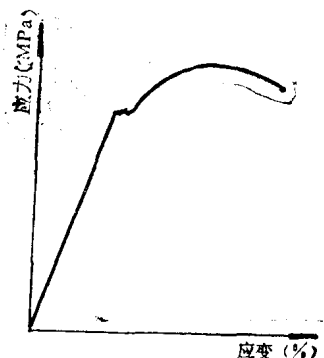


图1-3 低碳钢的应力-应变曲线

(二) 弹性极限和弹性模量

材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形的应力称为弹性极限，以 σ_e 表示。工作条件不允许产生微量塑性变形的零件，设计时应根据“规定弹性极限”数据来选材。例如选用弹簧材料，如果其“规定弹性极限” $\ominus$ 低，弹簧工作时就可能产生塑性变形，导致弹簧失效。

在弹性极限内，应力与应变呈如下关系：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式中 E 为弹性模量，(1-1) 式为虎克定律，说明材料处于弹性状态下，其应力与应变成正比；这部分应力-应变曲线通常呈直线， E 是曲线的斜率。 E 值反映材料的刚度， E 值越大，则刚度越高，即在一定应力下所产生的弹性应变越小。在设计中 E 是一项重要的性质。一般机器零件都在弹性状态下工作，均有一定的刚度要求。如镗床的镗杆，假若刚度不足，所加工的内孔就会有锥度而影响加工精度。因此，在设计、选材时，除了设计足够的截面外，还应选用弹性模量高的钢铁材料。

然而，弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标，其大小主要取决于材料本性和原子间作用力，它与显微组织关系较小。因此，热处理、合金化、冷变形对其影响不大。

(三) 屈服极限 (σ_s 和 $\sigma_{0.2}$)

屈服点 σ_s 是材料产生屈服时的最小应力，

$$\text{即} \quad \sigma_s = P_s/F_0 \text{ (MPa)} \quad (1-2)$$

$\ominus$ 根据零件的工作条件要求，规定产生一定残余变形的应力作为“规定弹性极限”，国家标准中把弹性极限称为“规定残余伸长应力”。规定以残余伸长为0.01%的应力作为规定残余伸长应力，并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。

屈服点以后,材料开始明显的塑性变形。除退火或热轧的低(中)碳钢等少数合金有屈服现象外,大多数金属材料没有屈服点。因此,规定产生0.2%残余伸长的应力,作为屈服强度——条件屈服应力,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

$$\sigma_{0.2} = P_{0.2}/F_0 \text{ (MPa)} \quad (1-3)$$

式中 $P_{0.2}$ 为产生0.2%残余伸长的载荷。 σ_s 和 $\sigma_{0.2}$ 都是表征材料发生明显塑性变形的抗力。

机件经常因过量的塑性变形而失效;一般不允许发生塑性变形。但要求的严格程度不一,要求特别严的机件,应根据材料的弹性极限设计;其他机件则以材料的屈服强度作为设计和选材的主要依据。所以屈服强度被公认为是评定工程材料的重要力学性能指标。

(四)抗拉强度(强度极限)

强度极限表征材料在拉伸条件下所能承受的最大应力值,以 σ_b 表示。它是设计与选材的主要依据之一,是材料的重要力学性能指标。

$$\sigma_b = P_b/F_0 \text{ (MPa)} \quad (1-4)$$

(五)塑性指标

材料产生塑性变形的能力称为塑性,通常用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 表示。

延伸率是试样拉断后,标距长度的相对伸长值,它等于标距的绝对伸长 Δl 与试样的原始标距长度 l_0 之比,用百分数(%)表之,即

$$\delta = \Delta l/l_0 \times 100\% \quad (1-5)$$

断面收缩率是断裂后试样截面的相对收缩值,它等于截面的绝对收缩 ΔF 与试样的原始截面积 F_0 之比,并用百分数表示,即

$$\psi = \Delta F/F_0 \times 100\% \quad (1-6)$$

以上为工程材料的常规力学性能指标,是工程设计、选材的重要依据。

三、真应力-真应变曲线

在拉伸过程中,试样尺寸是不断变化的。因此,前述的应力和应变是名义应力和名义应变。真实应力应等于试样各瞬时截面积 F 除瞬时载荷 P ,即

$$S = P/F \quad (1-7)$$

式中 S 表示真应力。

同理,真实应变应是瞬时伸长 dl 与瞬时长度 l 之比的积分值。设 ϵ_T 表示真应变,则

$$\epsilon_T = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1-8)$$

真应变亦可用下式表示:

$$\epsilon_T = \int_{F_0}^F \frac{dF}{F} = \ln \frac{F}{F_0} \quad (1-9)$$

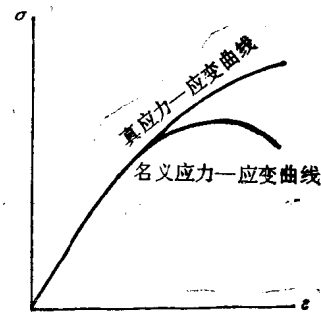


图1-4 真应力-真应变曲线

真应力-真应变曲线如图1-4所示,其特点是应力随应变的增加而升高。这种曲线又称为流变曲线,每一瞬间应力称为流变应力,初始的流变应力就是屈服应力。

真应力-真应变曲线说明材料在变形过程中的加工硬化现象,它能正确地反映材料的物理本性。在均匀塑性变形阶段,真应力与真应变之间的关系可用下列方程式表示:

$$S = K \epsilon_T^n \quad (1-10)$$

式中 K 为材料常数, n 为应变硬化指数, n 的大小反映材料抵抗继续塑性变形的能力。在极限

情况下, 当 $n=1$ 时, 材料处于理想弹性状态; 当 $n=0$ 时, 材料处于理想塑性状态。一般材料的 n 值都在 $0 \sim 1$ 之间。 n 值高, 表明在同样的应变值下, 材料的强度升高得更快。

§1-2 硬 度

在压应力作用下材料抵抗外物压入表面的能力称为硬度, 它是工程材料的重要力学性能指标。硬度试验是检验材料与产品质量的重要方法, 应用极为普遍。硬度表示法很多, 如布氏硬度(HB), 洛氏硬度(HRA、HRB、HRC), 维氏硬度(HV), 肖氏硬度(HS), 显微硬度(HM)……。兹将常用的布氏硬度和洛氏硬度试验方法简介如下。

一、布氏硬度

布氏硬度试验是用静载压入法测定材料硬度(参见图1-5)。试验时采用一定直径的压头 $\ominus$, 施加一定的静压力, 并且持续一定时间, 卸载以后, 根据试样表面压坑面积除所加压力, 即获得材料的硬度值HB。

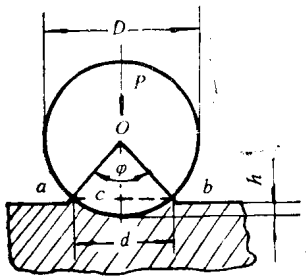


图1-5 布氏硬度试验示意图

$HB = P / F \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$ (1-11)

$F = \frac{1}{2} \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ (1-12)

式中:

- P ——载荷 (kgf);
- F ——压坑面积 (mm^2);
- D ——压头直径 (mm);
- d ——压痕直径 (mm)

试验时根据试样预期硬度按表 1-1 的规范选择压头直径 D 、载荷 P 及载荷持续时间。

表1-1 布氏硬度试验技术条件

金属类型	布氏硬度值 (HB)	试样厚度 (mm)	载荷 P 与压球直径 D 的关系	压球直径 D (mm)	载 荷 P (kgf)	载荷保持时间 (s)
黑色金属	140~450	6~3	$P = 30 D^2$	10	3000	10
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	<140	>6	$P = 10 D^2$	10	1000	10
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属	>130	6~3	$P = 30 D^2$	10	3000	30
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	36~130	9~3	$P = 10 D^2$	10	1000	30
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
	8~35	>6	$P = 2.5 D^2$	10	250	60
		6~3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

$\ominus$ 当材料硬度 $\leq$ HB450时, 采用钢球压头; 当材料硬度 $\leq$ HB650时, 则采用硬质合金球压头。

二、洛氏硬度

洛氏硬度是根据压痕深度大小表示材料的硬度值。洛氏硬度试验原理如图1-6所示。

试验时^①，根据材料硬度选择相应的压头^②，并施加一定载荷，以压痕深度衡量材料的硬度。因为材料越硬，压痕深度越小；材料越软，压痕深度越大。并规定每压下0.002mm作为一个洛氏硬度单位，其计算公式如下：

$$\text{HRC(或HRA)} = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (1-13)$$

$$\text{HRB} = 130 - \frac{h}{0.002} \quad (1-14)$$

式中 h ——压痕深度。

在图1-6中，0-0是未加载荷时压头位置；1-1是加初载荷 P_0 时压头位置；2-2是加总载荷 P 时压头位置；3-3是卸除主载荷 P_1 保留初载荷 P_0 时压头位置。试验时，硬度值可从试验机的刻度盘上直接读出。

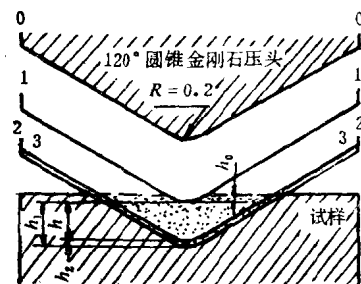


图1-6 洛氏硬度试验原理图

洛氏硬度试验法操作简便、迅速，不损坏零件，可检测成品的硬度，应用极为广泛。但由于压痕小，不能检测不均质的材料硬度（例如灰口铸铁）。常用的HRA、HRB、HRC洛氏硬度试验规范见表1-2。

表1-2 洛氏硬度试验规范

标 度	压 头 类 型	初载荷 (kgf)	总载荷(kgf)	应 用 范 围
HRA	120°金刚石圆锥	10	60	70~85
HRB	直径1.588mm钢球	10	100	25~100
HRC	120°金刚石圆锥	10	150	20~67

三、硬度与抗拉强度的换算

实验指出，金属材料的硬度与强度之间存在近似的对应关系，材料的强度高，硬度也高，其经验公式见表1-3。

四、硬度与钢中含碳量的经验公式^[2]

实验指出，硬度与钢中含碳量存在如下经验公式：

(一)碳钢

当含碳量为0.35%~0.65%C，则

$$\text{HRC} \approx 75 - 0.1T + 15C \quad (1-15)$$

对于45钢，则

$$\text{HRC} \approx 60 - \frac{T - 200}{11} \quad (1-16)$$

① 按GB230—83金属洛氏硬度试验法进行。

② 当测定淬火钢、回火钢、表面硬化钢的硬度时，应选用120°的金刚石圆锥作为压头。测定硬度值较低的材料（如软钢、铜、镍合金等）则选用直径为1.588mm (1/16 in) 的淬火钢压头。

表1-3 硬度与抗拉强度的换算

金 属	硬 度 范 围	抗拉强度与硬度的经验公式
未淬硬钢 (碳钢)	HB<175 HB>175 HRB<90	$\sigma_b \approx 0.362HB$ $\sigma_b \approx 0.345HB$ $\sigma_b \approx 2.64 \times 10^3 / (130 - HRB)$
碳 钢 (未经淬火)	HRC<10	$\sigma_b \approx 2.5HS$ $\sigma_b \approx 51.32 \times 10^4 / (100 - HRC)^2$
铸 钢 (碳钢铸件)	HRC<40 HRC>40	$\sigma_b \approx (0.3 \sim 0.4)HB$ $\sigma_b \approx 8.61 \times 10^3 / (100 - HRC)$
灰口铸铁	40>HRC>10	$\sigma_b \approx (HB - 40) / 6$ $\sigma_b \approx 48.86 \times 10^4 / (100 - HRC)^2$
高强铸铁		$\sigma_b \approx 0.304HB \pm 5$
铝		$\sigma_b \approx 0.27HB$
硬 铝		$\sigma_b \approx 0.36HB$
铝合金(ZL14)		$\sigma_b \approx 0.266HB$
铜		$\sigma_b \approx 0.55HB$
(H90) 黄铜 (H80) (H68)		$\sigma_b \approx 0.35HB$
黄铜(H62)		$\sigma_b \approx 0.43 \sim 0.46HB$
Cu-Zn-Al合金		$\sigma_b \approx 0.48HB$

式中

 T ——回火温度; C ——含碳量

(二)低合金钢

当 $\sigma_b = 500 \sim 600 \text{ MPa}$, 则焊缝热影响区的最高硬度值为:

$$HV_{\max} \approx (666 \times C_{\text{当}} + 40) \pm 40 \quad (1-17)$$

式中

HV——维氏硬度;

 $C_{\text{当}}$ ——碳当量

$$C_{\text{当}} = C + \frac{P}{2} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40}$$

§1-3 韧 性

一、金属的断裂〔8~4〕

在应力作用下,使材料分成两个或几个部分的现象称为断裂。断裂是裂纹运动的结果。工程材料的断裂过程大致可分成三个阶段,即微裂纹的成核、扩展和断裂。研究裂纹的生成、扩展、最后导致全面断裂的学科就是断裂力学。

(一)断裂类型

1. 根据断裂前所产生的塑性变形大小，金属的断裂有两种基本类型，即韧性断裂和脆性断裂。

韧性断裂的特征是断裂前发生明显的塑性变形，断口形貌呈暗灰色，纤维状。圆棒拉伸试样的断裂表面将具有如图1-7所示的特殊“杯-锥”形貌。

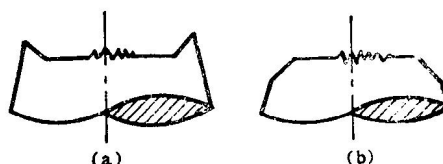


图1-7 杯-锥断口

(a)杯状断口 (b)锥型断口

脆性断裂是在断裂前基本上不产生塑性变形，它带来的破坏是突然的和灾难性的。历史上曾发生多次重大脆断失效，如油轮脆断沉没，铁桥断毁，核电站压力容器和大型锅炉爆炸^{〔8〕}，都与脆性断裂有关。脆性断裂有下列特点：

(1) 脆断时承受的工作应力较低，往往低于屈服应力，甚至低于设计应力，属于低应力破坏。例如1950年美国北极星导弹的固体燃料发动机壳体在发射时发生爆炸，发动机壳体材料为超高强度钢D6AC[⊖]， $\sigma_s \approx 1600 \text{ MPa}$ ；发射前材料经常规检验证明是合格的，而破坏时的平均应力不到700 MPa。

(2) 断裂起源于应力集中区域，如小裂纹。

(3) 往往在低温、厚截面、高变形速度条件下产生，脆断倾向增加。

(4) 脆性断口形貌较平齐，呈光亮的结晶状，常与正应力方向垂直，断口表面常常呈人字条纹或放射花样。

2. 根据断裂时裂纹扩展所取的途径则可分为穿晶断裂与沿晶断裂。

穿晶断裂的特点是裂纹穿过晶粒内部，它可以是韧性断裂，亦可是脆性断裂。

沿晶断裂的特点是裂纹沿晶界扩展，多属脆性断裂，断口往往呈冰糖状形态。

3. 根据断裂机制则分为解理断裂与剪切断裂。

解理断裂的断裂面是严格沿一定晶面（解理面）而分离，一般而言，解理断裂属于脆性断裂。解理断口的微观形貌呈河流花样（图1-8），这是解理断裂的重要特征。

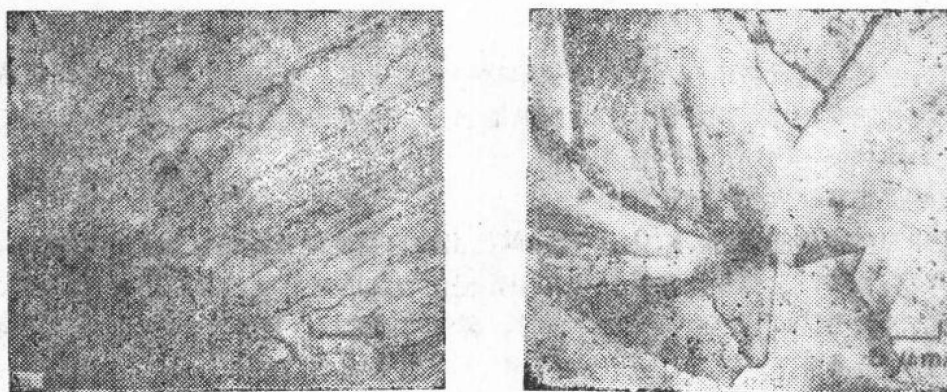


图1-8 解理断裂透射电镜照片
(a)河流花样；(b)解理台阶 (3000×)

剪切断裂又可分为

⊖ D6AC的化学成分：~0.45C，~0.75Mn，0.8~1.1Cr，0.12V，0.4~0.7Ni，~1.0Mo，Fe余量。

(1) 纯剪切断裂;

(2) 微孔聚集型断裂[⊖], 工程材料多属这种断裂。如低碳钢拉断时所形成的杯-锥断口, 它是一种典型的韧性断裂, 其微观断口特征是有大量微坑覆盖断面, 这些微坑称为“韧窝”(图1-9)。

(二) 断口三要素

分析断口的宏观形貌, 可初步找出裂纹源位置和裂纹扩展路径, 探索断裂原因、性质和机理, 为改进设计、加工工艺, 合理选用材料指出方向。光滑圆柱形拉伸试样断口可分为三

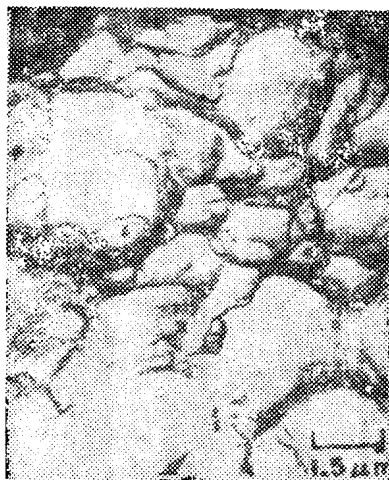


图1-9 韧窝形貌 (透射电镜, 6500×)

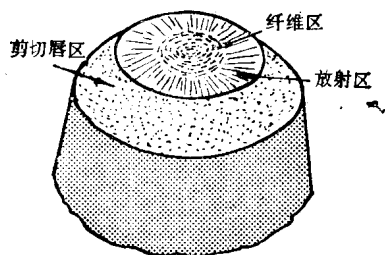


图1-10 光滑圆柱试样拉伸断口三个区域示意图

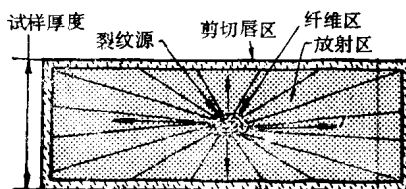


图1-11 矩形拉伸试样断口形态示意图

个不同区域: 即纤维区、放射区和剪切唇区, 如图1-10所示。通常将这三个区域的断口宏观形貌标记称为断口三要素。图1-11为矩形截面试样宏观拉伸断口的示意图。根据断口三要素的分布类型、面积大小及形状等情况, 可以推测机件在断裂时所受的应力大小、应力状态、环境温度、材质等条件。

二、断裂韧性^[5~7]

断裂力学是根据材料中存在裂纹等缺陷这一客观情况, 研究裂纹扩展的规律, 确定能反映材料抗裂性能的指标, 探讨防止机件脆断的途径。断裂韧性就是断裂力学认为能反映材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标。

(一) 格里菲斯缺口强度理论简介

早在1920年格里菲斯(A.A.Griffith)就提出缺口强度理论。他认为材料中都存在一些缺陷, 如微裂纹等。这些缺陷导致应力集中, 促使裂纹迅速扩展而断裂。对于一定尺寸的裂口, 有一临界应力值 σ_c , 当外应力 $\sigma < \sigma_c$ 时, 裂纹不能扩展; 只有当 $\sigma > \sigma_c$ 时, 裂纹将迅速扩展, 最后导致断裂。

格里菲斯从能量平衡的观点计算了裂纹自动扩展时的应力值, 即计算了带裂纹体的弹性板的强度。他认为一旦裂纹出现就会形成一个新的自由表面, 这需要一定的表面能, 它由材料释放的弹性应变能提供。如果裂纹增长所降低的弹性能等于或超过裂纹扩展所需的能量,

[⊖] 在切应力作用下, 因强烈滑移、位错堆积, 在局部地方(如缩颈处)产生许多显微空洞, 并不断长大, 聚集连接, 同时产生新的空洞, 最后导致材料的断裂。

裂纹就会扩展，并导致脆性断裂。经简单的推导，可建立下列公式：

对于平面应力 $\ominus$ 的情况，则

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1-18)$$

对于平面应变 $\ominus$ 的情况，则为

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad (1-19)$$

式中

σ_c ——裂纹扩展所需的临界应力；

a ——裂纹长度的1/2；

γ_s ——比表面能（即表面张力）；

E ——弹性模量；

ν ——泊松比

格里菲斯判据对于理想脆性材料是有效的。对于断裂前产生塑性变形的金属材料，欧罗万（Orowan）对公式进行了修正，使它包含断裂过程的塑性变形能，于是

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (1-20)$$

式中 γ_p 为塑性变形能，并有 $\gamma_p \gg \gamma_s$ ，故可用下式进行计算：

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_p}{\pi a}} \quad (1-21)$$

（二）断裂过程中裂纹扩展的三种类型

I 型（张开型）：裂纹表面直接分开，是工程中最常见最危险的断裂类型。因此人们对确定 I 型的应力-裂纹长度关系的理论与实验方法都非常注意。I 型如图1-12(a)所示。

II 型（滑移型）：两个裂纹表面在垂直于裂纹前缘的方向上相对滑动(图1-12b)。

III 型（撕裂型）：两个裂纹表面在平行于裂纹前缘的方向上相对滑动(图1-12c)。

三、断裂韧性的基本概念

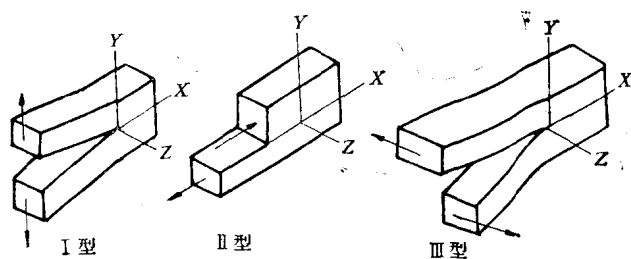


图1-12 裂纹扩展的三种类型
(a) I 型；(b) II 型；(c) III 型

大量含裂纹试样的拉伸试验指出，其断裂应力 σ_c 与裂纹尺寸的平方根 $\sqrt{a}$ 的乘积为一常数，故得到：

$$\sigma_c \sqrt{a} = K \quad (1-22)$$

式中的 K 值在一定实验条件下，对某一种材料仅与试样的几何因素有关。利用 (1-22) 式，原则上能在已知金属 K 值及裂纹尺寸后，对工程设计提供精确的和

防止脆断的安全使用应力。早期的格里菲斯理论也揭示了 $\sigma_c \sqrt{a} = \text{常数}$ 这一规律，现分析 (1-22) 式的力学根源。

对于图1-13所示的无限大板的贯穿裂纹，弹性理论计算表明：

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-23)$$

$\ominus$ 平面应力是指只有 σ_x 、 σ_y 、 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ，而 $\sigma_z = 0$ 的状态。

$\ominus$ 平面应变是指只有 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 ε_x 、 ε_y ，而 $\varepsilon_z = 0$ 的状态。

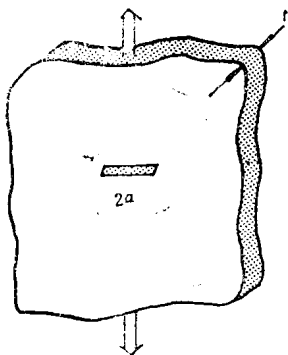


图1-13 张开型贯穿裂纹及其应力强度因子

式中 a 为裂纹半长， σ 为平均应力， K_I 表示裂纹前端附近应力场的强弱。它的大小就确定了裂纹前端各点的应力大小，所以 K_I 简称应力强度因子。

一个有裂纹的机件上的应力逐渐加大，或裂纹逐渐扩展时，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之逐渐加大；当 K_I 达到临界值时，裂纹突然失稳扩展，引起断裂，这个应力强度因子 K_I 的临界值，称为临界应力强度因子，它代表了材料的断裂韧性。I型（张开型）是机件脆断最危险最常见的裂纹扩展形式，因此工程上采用 K_{Ic} 作为断裂韧性指标。它表征了材料阻止裂纹扩展的能力，是材料抵抗脆性断裂的一个韧性指标。当裂纹尺寸一定时， K_{Ic} 值愈大，裂纹失稳扩展所

需的临界应力 σ_c 就愈大；反之，在给定 σ 一定时，如果 K_{Ic} 值愈高，则裂纹达到失稳扩展时的临界尺寸就愈大。

断裂韧性 K_{Ic} 是应力强度因子 K_I 的临界值，两者之间既有联系、又有明显区别，不能将 K_I 与 K_{Ic} 等同或混淆起来。 K_I 是描述裂纹前端应力场的强弱，它与零件及裂纹的几何参量（大小、形状）、外加应力等有关。断裂韧性 K_{Ic} 是表征材料阻止裂纹失稳扩展的能力，是材料固有的力学性能指标。 K_{Ic} 值主要取决于材料的成分及组织结构。因此，适当调整成分，合理进行冶炼、加工及热处理以获得最佳组织，就可能大幅度提高材料的断裂韧性，从而提高了含裂纹构件的承载能力。

（四）断裂韧性与设计原则

材料性质（如 K_{Ic} ）和设计应力、裂纹尺寸的相互制约决定了机件的断裂条件。从图1-13可知，含有裂纹的无限大板的断裂条件可用下式表示：

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-24)$$

$\swarrow$ $\downarrow$ $\searrow$
 材料选择 设计应力 允许的裂纹尺寸

这个关系式能够以不同方式用于机件的抗断裂设计，为选材与设计提供依据。例如：要建造一个在液态金属环境中工作的系统（如某些核反应堆），主要关心的是选择一种合适的抗腐蚀材料。材料一经选定， K_{Ic} 基本上就定了。此外，如果允许较大的稳定裂纹存在，那么设计应力也就确定了，它必须小于 $K_{Ic}/\sqrt{\pi a}$ 。

根据传统的设计方法，为了提高机件的安全性，总是加大安全系数，这样势必提高材料的强度等级。对于高强度钢来说，往往造成低应力脆断。现在断裂力学提出了新的设计思想，为了保证机件安全，采用较小的安全系数，适当降低材料强度等级，增大材料的断裂韧性。

四、冲击韧性

（一）冲击韧性及其在工程中的应用〔9〕

材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧性。工程技术上常用一次摆锤冲击弯曲试验来测定金属抵抗冲击载荷的能力，其试验方法与原理如图1-14所示。该试验按国家标准GB229—84 U形缺口（图1-15）冲击试验法以及GB2106—80 V形缺口（图1-16）冲击试验法进行。试样开缺口的主要目的是使冲击能在缺口附近的体积内高度集中，造成应力集中和三向应力状态，使材