



四川省高等教育“质量工程”子项目“《工程材料》优秀教材建设”成果之一

工程材料(第2版)

GONGCHENG CAILIAO

主编 贺毅 向军 胡志华



西南交通大学出版社

工 程 材 料

(第2版)

主 编 贺 毅 向 军 胡志华

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

工程材料 / 贺毅, 向军, 胡志华主编. —2 版. —
成都: 西南交通大学出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5643-3606-6

I. ①工… II. ①贺… ②向… ③胡… III. ①工程材
料—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 299941 号

工 程 材 料
(第 2 版)

主 编 贺 毅
向 军
胡志华

责任编辑 孟苏成
助理编辑 姜锡伟
装帧设计 何东琳设计工作室

印张 19.25 字数 482千

成品尺寸 185 mm × 260 mm

版本 2015年1月第2版

印次 2015年1月第2次

出版 西南交通大学出版社

地址 四川省成都市金牛区交大路146号

印刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

邮政编码 610031

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

发行部电话 028-87600564 028-87600533

书号: ISBN 978-7-5643-3606-6

定价: 39.00元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第 2 版前言

本书是为机械类、近机械类和材料成型及控制专业编写的一本重要技术基础课教材。本书编写是在“材料科学与工程四川省级特色专业”和“材料科学与工程卓越工程师试点专业”项目的资助下完成的，是四川省教育厅四川省高等教育“质量工程”项目《工程材料》优秀教材建设内容之一。

本书根据高等工业学校机械工程材料及物理化学课程教学指导小组制订的教学大纲和教学要求编定。从机械工程的应用角度出发，阐明机械工程材料的基本理论，介绍材料的成分、加工工艺、组织结构与性能的关系，了解常用机械工程材料及其应用等基本知识，具备合理选择、正确使用材料的能力。本书可作为高等院校学生学习“工程材料”课程的教材，也可供有关工程技术人员学习、参考。

本书是在西南交通大学出版社出版的张崇才教授和贺毅副教授主编的《工程材料》(2012年)的基础上重编的。本书根据教师和学生使用情况，在章节和内容上进行了调整和增删。由于张崇才教授退休，经与其协商和沟通，张崇才教授不再担任《工程材料》(第2版)的主编，只参与其中第10章的编写，全体编写者对张崇才教授一直以来对本书编写的指导和支持表示衷心的感谢。

本书由西华大学材料科学与工程学院刘胜明博士(第1章)、向军副教授(第2、9章)、向朝进副教授(第3、4章)、胡志华副教授(第3、7章)、贺毅副教授(第5章)、刘锦云教授(第6、8章)和张崇才教授(第10章)编写。全书由贺毅、向军和胡志华担任主编。

限于编者的学识水平，缺点和不足在所难免，希望读者不吝赐教和批评指正。

编 者

2014 年 11 月

第 1 版前言

本书是为机械类、近机械类和材料成型及控制专业编写的一本重要的技术基础课教材。

在编写本书时，四川省教育厅批准了四川省高等教育“质量工程”子项目——《工程材料》优秀教材建设。本书的编写，坚持以科学发展观为指导，努力适应 21 世纪高校“推进素质教育，培养创新人才”的需要，正确把握教学改革方向，充分总结和吸纳高校教育教学经验和科研成果、博采和借鉴不同版本教材之优、之长，努力将培养学生创新意识和创新能力渗透到整个教材中，各章节尽量深入浅出，力争编写出有一定特色和新意的《工程材料》教材。

作为一名主要从事机械设计、机械制造的工程技术人员，只有较好地掌握了工程材料基本理论，工程上常用的各类材料的成分，微观组织和机械性能之间的变化规律以及各类材料的工艺性能，典型牌号及用途等知识，在工作中才能创造性地选择和使用材料，才能创造性地正确编制机械零件制造工艺。

当前，材料作为现代技术三大支柱（材料、能源与信息）之一，得到了快速的发展，新材料层出不穷。但是，迄今为止，金属材料仍是各种机械产品、工程构件应用最为广泛的材料。因此，本书着重阐述金属材料的知识，同时兼顾非金属材料，并扼要介绍了工程材料的选用和典型零件的工艺路线分析。

本书由西华大学材料科学与工程学院张崇才教授（第 1、12 章）、向军副教授（第 2、3、11 章）、向朝进副教授（第 4、6 章）、胡志华副教授（第 5、9 章）、贺毅副教授（第 7 章）和刘锦云教授（第 8、10 章）编写，全书由张崇才、贺毅担任主编。

限于编者的学识水平，疏漏和不足之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

编 者

2011 年 12 月

目 录

1 金属材料的性能	1
1.1 材料在静载荷下的力学性能	1
1.2 材料在动载荷下的力学性能	7
1.3 材料的断裂韧性	11
本章小结	12
思考与练习	13
2 纯金属的结构与结晶	14
2.1 纯金属的晶体结构	14
2.2 实际金属的晶体结构	23
2.3 金属的结晶	27
本章小结	52
思考与练习	53
3 合金的结构与结晶	54
3.1 合金的结构	54
3.2 合金的相图与结晶	58
3.3 合金的性能与相图的关系	73
3.4 铁碳合金和铁碳相图	74
本章小结	93
思考与练习	93
4 金属的塑性变形及再结晶	95
4.1 金属的塑性变形	95
4.2 金属的回复与再结晶	105
4.3 金属的热加工	109
本章小结	111
思考与练习	112
5 钢的热处理	113
5.1 钢的热处理原理	114
5.2 钢的普通热处理	129
5.3 钢的表面热处理	141
本章小结	149
思考与练习	149

6 工业用钢	152
6.1 碳素钢	152
6.2 合金结构钢	157
6.3 合金工具钢	183
6.4 特殊性能钢	194
本章小结	208
思考与练习	209
7 铸 铁	212
7.1 铸铁概论	212
7.2 灰铸铁	216
7.3 可锻铸铁	218
7.4 球墨铸铁	220
7.5 合金铸铁简介	223
本章小结	224
思考与练习	225
8 有色金属	226
8.1 铝及铝合金	226
8.2 铜及铜合金	235
8.3 钛及钛合金	243
8.4 滑动轴承合金	251
本章小结	254
思考与练习	254
9 非金属材料	256
9.1 高分子材料	256
9.2 陶 瓷	272
9.3 复合材料	277
本章小结	281
思考与练习	282
10 工程材料的选用与典型零件的工艺路线分析	283
10.1 选择材料的一般原则和过程	283
10.2 典型零件选材及工艺路线	291
本章小结	299
思考与练习	299
参考文献	301

1 金属材料的性能

本章提要

材料的性能是一种参量，用于表征材料在给定外界条件下的行为。在不同的外界条件（应力、温度、化学介质）下，同一材料也会有不同的性能。材料力学性能是关于材料强度的一门学科，即关于材料在外加载荷（外力）作用下或载荷和环境因素（温度、介质和加载速度）联合作用下表现的变形、损伤与断裂的行为规律，及其物理本质和评定方法的学科。本章主要介绍材料在静载荷条件下的弹性变形、塑性变形、断裂过程及材料的硬度；材料在动载荷条件下的冲击韧性（冲击载荷）和疲劳强度（交变载荷）；材料的断裂韧性及其评定。

在选用材料时，首先必须考虑材料的有关性能，使之与构件的使用要求匹配。材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在使用过程中所表现出来的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指材料在加工过程中所表现出来的性能，包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。由于材料在载荷和环境因素下的性能是结构件选材的主要依据，因此本章主要介绍材料在外加载荷下的性能，对材料的物理性能、化学性能及工艺性能作简单介绍。

材料的力学性能，也称作机械性能，是材料使用性能的重要组成部分，也是作为结构材料应具备的最主要的性能。工程材料在外力作用下所表现出来的性能，称为力学性能，主要有强度、刚度、硬度、塑性、冲击韧性、疲劳强度、断裂韧性等。工程材料在各种外力作用下所表现出来的力学性能要通过各种不同的标准试验来测定，材料的力学性能可用来判断材料在实际服役环境下将表现出来的具体效能。因此，了解材料的力学性能可为工件的选材提供依据。

1.1 材料在静载荷下的力学性能

静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。静载荷时最常用的材料力学性能试验是拉伸试验和硬度试验。材料在静载荷下的力学性能主要有强度、塑性和硬度等。

1.1.1 拉伸试验

材料承受拉伸时的力学性能指标是通过拉伸试验测定的。其过程为：将被测材料按照 GB/T 228—2002 的要求制成标准拉伸试样（图 1.1），在拉伸试验机上夹紧试样两端，缓慢地对试样施加轴向拉伸力，使试样被铸件拉长，最后被拉断。通过试验可以得到拉伸力 F 与试样伸长量 ΔL 之间的关系曲线（称为拉伸曲线）。为消除试样几何尺寸对试验结果的影响，将

拉伸试验过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位截面面积上所受的力，称为应力，用 R 表示，即 $R = F/S_0$ ，单位为 MPa（即 N/mm^2 ）；试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量，称为应变，用 ε 表示，即 $\varepsilon = \Delta L/L_0$ ，从而得到 $R-\varepsilon$ 曲线，也称为应力-应变曲线，其形状与 $F-\Delta L$ 曲线完全一致。图 1.2 所示为退火低碳钢和铸铁的工程应力-应变曲线图。

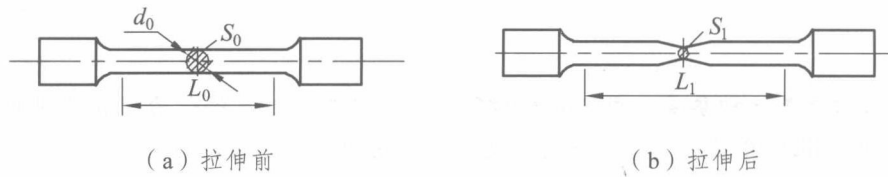


图 1.1 圆形拉伸试样

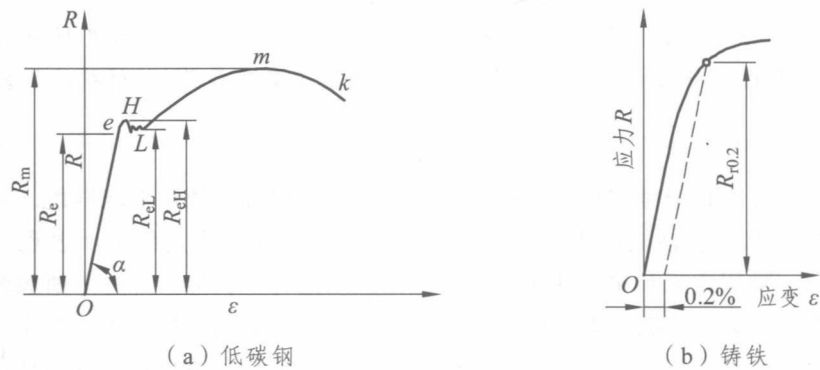


图 1.2 低碳钢和铸铁的应力-应变曲线

1.1.1.1 弹性与刚度

如图 1.2 (a) 所示，在试验时，若加载后的应力不超过 e 点，则卸载后试样会恢复原状，这种变形称为弹性变形，材料的这种不产生永久变形的能力称为弹性。不产生永久变形的最大应力，称为弹性极限，其单位是 MPa。

因此在图 1.2 (a) 中， Oe 曲线段为材料的弹性变形阶段。其中，曲线中开始的一段是直线，表示应力与应变成正比。保持这种比例关系的最大应力值，称为比例极限，其单位是 MPa。

弹性模量 E 是指工程材料在弹性状态下的应力与应变的比值，即 $E = R/\varepsilon$ ，它的单位也是 MPa。在图 1.2 (a) 中，直线部分的斜率即为低碳钢的弹性模量 E 。 E 越大，则使其产生一定弹性变形量的应力也越大。因此，弹性模量 E 是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标，工程上称为材料的刚度，表征材料对弹性变形的抗力。

弹性模量 E 与原子间的作用力有关，决定于金属原子的本性和晶格类型。合金化、热处理、冷塑性变形、加载速率等对其影响都不大。提高零件刚度的方法是增大横截面面积或改变截面形状。

1.1.1.2 强 度

材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力称为强度。材料的强度越大，材料所能承受的

外力就越大,使用越安全。根据外力的作用方式,有多种强度指标,如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度、抗扭强度等。其中拉伸试验所得的屈服强度 R_e 和抗拉强度 R_m 的应用最为广泛。

如图 1.2 (a) 所示,若加载应力超过 e 点,则卸载后,试样的变形不能完全消失,会保留一部分永久变形,这种不能恢复的永久变形称为塑性变形。塑性变形分为三个阶段:屈服阶段、均匀塑性变形阶段和不均匀塑性变形阶段。

1. 屈服强度

在图 1.2 (a) 中,当应力值超过 e 点时,试样将产生塑性变形;当应力增至 H 点时,试样开始产生明显的塑性变形,在曲线上出现了水平的波折线,表明即使外力不增加,试样仍继续塑性伸长,这种现象称为屈服。发生屈服所对应的应力值即为屈服强度,用 R_e 表示。屈服强度包括下屈服强度和上屈服强度。下屈服强度是指在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最低应力值,以 R_{eL} 表示。上屈服强度是指试样发生屈服而力首次下降前的最高应力值,以 R_{eH} 表示。对大多数零件而言,发生塑性变形就意味着零件脱离了设计尺寸和公差的要求。

屈服现象在低碳钢、中碳钢、低合金高强度结构钢和一些有色金属等材料中可观察到,具有一定的普遍性。但多数工程材料(如强度较大或含碳量较高的高碳钢、铸铁等)没有屈服现象发生。因此 GB 228—2010 规定残余伸长应力 R_t 。例如,规定残余伸长率为 0.2% 时,则残余应力用 $R_{t0.2}$ 表示,即表示在卸除载荷后,试样标距部分残留的伸长率为 0.2% 时所对应的拉伸时的应力值,如图 1.2 (b) 所示。对于没有明显屈服现象的金属材料,可测定其残余伸长应力 $R_{t0.2}$,以代替屈服强度。在生产上把 $R_{t0.2}$ 称为条件屈服强度。

屈服强度 R_e 或条件屈服强度 $R_{t0.2}$ 是材料开始产生微量塑性变形时的应力值。对于大多数零件而言,塑性变形就意味着零件的精度下降,因而会造成时效。因此工程上屈服强度或条件屈服强度指标常是塑性材料零件设计的依据。

屈服强度是工程上最重要的力学性能指标之一。其工程意义在于:① 绝大多数零件,如紧固螺栓、汽车连杆、机床丝杠等,在工作时都不允许产生明显的塑性变形,否则将丧失其自身精度或与其他零件的相对配合而受影响,因此屈服强度是防止材料因过量塑性变形而导致机件失效的设计和选材依据;② 根据屈服强度与抗拉强度之比(屈强比)的大小,衡量材料进一步产生塑性变形的倾向,作为金属材料冷塑性变形加工和确定机件缓解应力集中防止脆性断裂的参考依据。

2. 抗拉强度

如图 1.2 (a) 所示, m 点是拉伸曲线的最高点,对应的应力是材料在破断前所能承受的最大应力,称为抗拉强度,用 R_m 表示。

对于低碳钢等塑性材料,当应力超过屈服点时,整个试样发生均匀而显著的塑性变形,并且变形抗力逐渐增加。当应力到达 m 点时,整个试样开始产生不均匀塑性变形,即试样开始局部变细,出现缩颈现象。此后,应力下降,变形主要集中在颈部,直到最后到达 k 点时,在缩颈处断裂。可见 m 点也是均匀塑性变形和非均匀塑性变形的分界点,可看成是材料产生最大均匀塑性变形的抗力。它也是零件设计和材料评定时的重要指标。

3. 断裂强度

当应力超过 m 点后,缩颈处迅速伸长,应力明显下降,在 k 点出断裂。所对应的应力值

称为断裂强度，用 R_k 表示。对于灰铸铁一类的脆性材料，如图 1.2 (b) 所示，在拉伸过程中没有明显的塑性变形，不产生缩颈现象，因此这时的抗拉强度就是脆性材料在静载荷下抵抗断裂的能力，相当于断裂强度。

1.1.1.3 塑 性

塑性是指材料在外力作用下产生塑性变形而不断裂的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率

伸长率是指试样拉断后标距的增长量与原始标距长度之比的百分率，用 A 表示：

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中， L_0 为试样的原始标距长度； L_1 为试样拉断后的标距长度。

在材料手册中常有 A_5 和 A_{10} 两种伸长率符号（ A_{10} 常简写成 A ），它们分别表示 $L_0 = 5d_0$ 和 $L_0 = 10d_0$ 两种不同规格的试样测定的伸长率。由于试样拉断后的伸长，包括均匀塑性伸长和缩颈处的局部塑性伸长两部分。而缩颈处局部的相对伸长量在总伸长量中占的比例大。由此可以得出，同一材料所测得的 A_5 和 A_{10} 不一样大，其中 A_5 大，而 A_{10} 小。由此也可以得出，对于不同的材料，只有用同一种伸长率才能比较它们的塑性。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面面积的最大减缩量与原始横截面面积之比的百分率，用 Z 表示：

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中， S_0 为试样的原始截面面积； S_1 为试样断口处的最小截面面积。

断面收缩率 Z 不受试样标距长度的影响，因此它更能可靠地反映材料的塑性状况。

材料的断后伸长率和断面收缩率越大，材料的塑性越好，越有利于进行压力加工；也能起到通过塑性变形消耗能量，防止一旦超载材料产生断裂。但是塑性好的材料其强度通常会较低，使用过程中容易发生变形，导致失效。因此，对材料的强度和塑性的要求要综合考虑，不能顾此失彼。

1.1.2 硬度试验

材料抵抗表面局部塑性变形的能力称为硬度，是表征材料软硬程度的一个指标。硬度试验方法很多，大体上可分为压入法（如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等）、划痕法（如莫氏硬度）和弹性回跳法（如肖氏硬度）三类。生产中测量硬度常用的方法是静载压入法，它是用一定几何形状的压头在一定的静载荷下压入被测试的材料表面，并根据被压入的程度来测定硬度值。因此硬度是一个综合的物理量，它与强度指标和塑性指标均有一定的关系。

硬度试验所用设备简单，操作方便快捷；对大多数机件成品可直接进行检验，无须专门加工试样；一般仅在材料表面局部区域内造成很小的压痕，可视为无损检测；易于检查金属表面层的质量（如脱碳）、表面淬火和化学热处理后的表面性能。总之，硬度试验很有用处，它是产品质量检验和制定合理加工工艺的最简便的主要试验方法，是材料研究最常用的试验方法。

1.1.2.1 布氏硬度

布氏硬度试验是应用得最久、最广泛的压入法硬度试验之一。布氏硬度试验按照 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验第一部分：试验方法》进行，其试验测定原理如图 1.3 所示。用一直径为 D (mm) 的淬火钢球或硬质合金球，在规定载荷 F 的作用下压入被测材料表面，保持一定时间后，卸除载荷，在试样表面留下球形压痕。测量出材料表面压痕的平均直径 d (mm)，由此计算出压痕面积 S (mm²)。用载荷 F 除以压痕面积 S ，求得单位面积上所承受的平均应力值，即为布氏硬度，用 HB 表示。当试验压力的单位为牛顿 (N) 时，布氏硬度测试原理写成如下公式：

$$HB \text{ (HBS 或 HBW)} = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

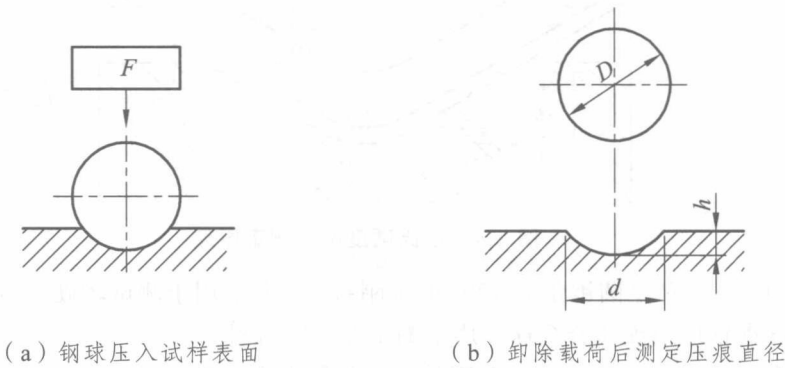


图 1.3 布氏硬度试验测定原理

须注意在硬度值后习惯上不标注单位。显然材料越软，压痕直径就越大，布氏硬度值就越低；反之布氏硬度值越高。

当压头为淬火钢球时，布氏硬度符号为 HBS，适合于测定布氏硬度值低于 450 的金属材 料；当压头为硬质合金球时，硬度符号为 HBW，适合于测定布氏硬度值在 650 以下的金属 材料。在实际测试时，硬度值不需上式计算，而根据载荷 F 及测出压痕直径 D 后查表，即可 得到布氏硬度值。

布氏硬度值的表示方法为：硬度值 + HBW (HBS) + 球直径 (mm) + 载荷 (kgf) + 保 压时间 (s，保压时间为 10 ~ 15 s 时不标注)。例如：120HBS10/1000/30 表示用直径为 10 mm 的 淬火钢球，在 9 807 N (1 000 kgf) 载荷作用下，保持 30 s，测得的布氏硬度值为 120； 500 HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球，在 7 355 N (750 kgf) 载荷作用下保持 10 ~ 15 s 测得布氏硬度值为 500。

布氏硬度试验的优点是压痕面积大，其硬度值能反映金属在较大范围内各组成相的平均

性能，而不受个别组成相及微小不均匀性的影响，实验数据稳定、重复性强。其缺点是，压痕面积大，不宜测试成品件或薄片件金属的硬度；测试过程烦琐，不宜大批量检验；此外不宜测量硬度大于 650 HBW 的材料。布氏硬度试验法主要用于测定铸铁，有色金属及其合金，低合金结构钢，各种退火、正火及调质钢的硬度。

1.1.2.2 洛氏硬度

洛氏硬度试验按照 GB/T 230.1—2004《金属洛氏硬度试验第 1 部分：试验方法》进行，其试验测定原理如图 1.4 所示。用一定规格的压头，在规定的载荷下压入被测试材料的表面，撤去载荷后，根据压痕的深度来衡量材料的硬度值，其值直接从硬度计的分度盘上读出。洛氏硬度不是以测定压痕的面积来计算硬度值，而是以测量压痕深度来表示材料的硬度。显然，材料愈软，压痕愈深，洛氏硬度值愈小；反之材料愈硬，压痕愈浅，洛氏硬度值愈大。

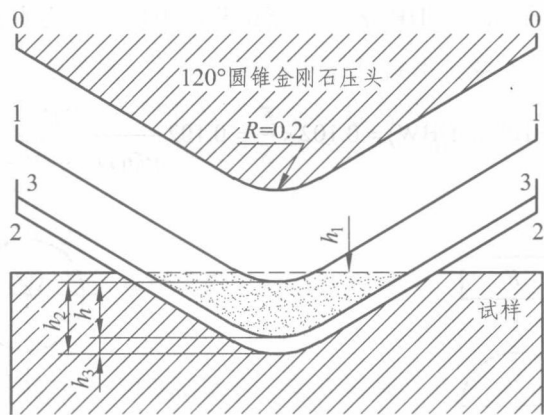


图 1.4 洛氏硬度试验测定原理

压头有两种：一种是圆锥角为 120° 的金刚石圆锥体，用于测试较硬的材料；另一种是一定直径的小淬火钢球或硬质合金球，用于测试较软的材料。

洛氏硬度符号用 HR 表示，HR 前面的数值为硬度值，HR 后面的字母为使用的标尺类型。例如 60HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 60。常用的洛氏硬度有 HRA、HRB、HRC 三种标尺，它们的测试条件及应用见表 1.1。

表 1.1 常用洛氏硬度试验的标尺、试验规范和应用

标尺	硬度符号	压头类型	初始试验力 $F_0(N)$	主试验力 $F_1(N)$	总试验力 $F(N)$	测量硬度范围	应用举例
A	HRA	120° 金刚石圆锥	98.7	490.3	588.4	20 ~ 88HRA	硬质合金、硬化薄钢板、表面薄层硬化钢
B	HRB	$\phi 1.588\text{ mm}$ 球		882.6	980.7	20 ~ 100HRB	低碳钢、铜合金、铁素体可锻铸铁
C	HRC	120° 金刚石圆锥		1373	1471	20 ~ 70HRC	淬火钢、高硬度铸件、珠光体可锻铸铁

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速，生产效率高，适用于大量生产中的成品检验；压痕小，几乎不损伤工件表面，可对工件直接进行检验；采用不同标尺，可测定各种软硬不同和薄厚不一试样的硬度。其缺点是由于压痕较小，代表性差；尤其是材料中存在的偏析及组织不均匀等情况，会使所测硬度值的重复性差、分散度大；用不同标尺测得的硬度值既不能直接进行比较，又不能彼此交换。

1.1.2.3 维氏硬度

维氏硬度试验按照 GB/T 4340.1—1999《金属维氏硬度试验第 1 部分：试验方法》进行。其原理与布氏硬度试验测定基本相似，同样是根据压痕面积所承受的载荷来计算硬度值。试验所用的压头是两对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体，压痕为一四方锥形，如图 1.5 所示。

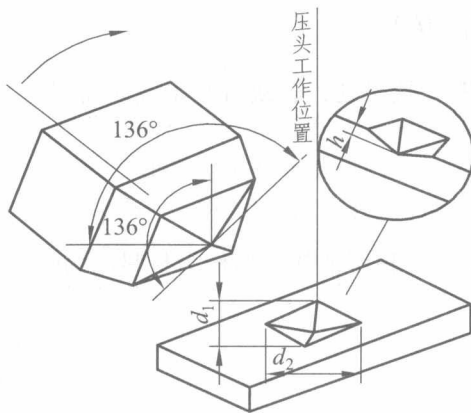


图 1.5 维氏硬度试验原理

维氏硬度的表示方法为：硬度值 + HV + 载荷 (kgf) + 保压时间 (s, 保压时间为 10 ~ 15 s 时不标注)。例如：640HV30/20 表示在试验力 294.3 N (30 kgf) 作用下，维持 20 s 测得的维氏硬度为 640。维氏硬度的单位为 N/mm^2 ，但一般不标出。

维氏硬度的特点是保留了布氏硬度和洛氏硬度各自的优点，负荷大小可任意选择，测定范围宽，即可测量由极软到极硬材料的硬度，又能相互比较；既可测量大块材料、表面硬化层的硬度，又可测量金相组织中不同相的硬度，测量精度高。缺点是需要显微镜下测量压痕尺寸，工作效率低。

1.2 材料在动载荷下的力学性能

许多零件在动载荷下工作。动载荷是指由于运动而产生的作用在构件上的作用力。动载的主要形式有两种：一种是冲击载荷，即以很大的初速度在短时间内迅速作用在零件上的载荷；另一种是交变载荷，即载荷的大小和方向做周期性的变化。材料对动载荷的抗力，不能简单地用静载荷下的力学性能指标来衡量，必须引入新的力学性能指标。

1.2.1 冲击试验

许多机械零件和工具，在使用过程中往往受到冲击载荷的作用，如冲床的冲头、锻锤的锤杆和破碎机等。材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为冲击韧性，简称韧性。为了评定材料的冲击韧性，需要进行冲击试验。

1.2.1.1 一次摆锤冲击试验

图 1.6 为一次摆锤冲击试验示意图，将被测试样制成如图 1.7 所示带缺口的标准试样安放在摆锤冲击试验机的支座上，见图 1.6 (a)。把具有重量 G 的摆锤提高到距试样高度为 H_1 的位置，见图 1.6 (b)，此时摆锤势能为 GH_1 ，然后使其下落，冲断试样后又上升到距原试样的高度为 H_2 处，摆锤剩余势能为 GH_2 。冲断试样所做的功 A_k 称为冲击吸收功，其值为：

$$A_k = G(H_1 - H_2)$$

其单位为焦 (J)。试样被冲断在缺口处，若缺口原始截面面积为 A ，则得冲击韧性 a_k 为

$$a_k = \frac{A_k}{S}$$

其单位为 J/cm^2 ，即把冲断单位面积所消耗的功作为材料的韧性指标。

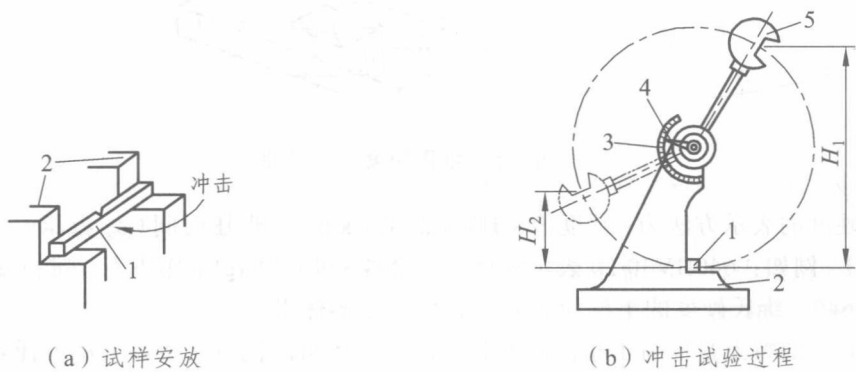


图 1.6 冲击试验测定原理

1—试样；2—试验机支座；3—分度盘；4—指针；5—摆锤

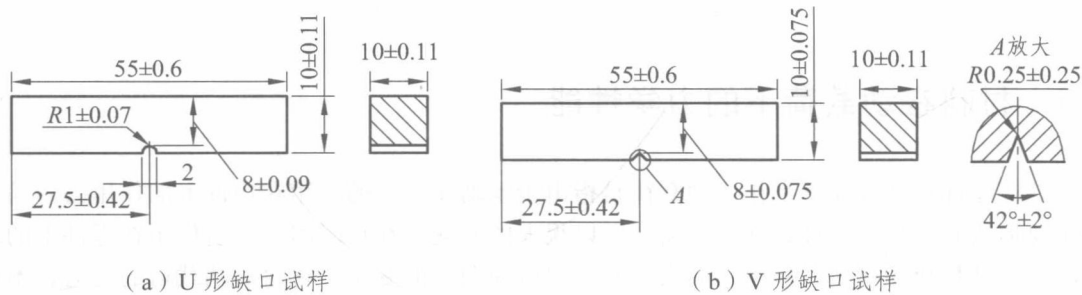


图 1.7 标准冲击试样 (单位: mm)

冲击韧性 a_k 值与材料的强度和塑性有一定关系。一般来说，强度塑性均较好的材料， a_k 值较大，反之只要强度和塑性其中之一很低，则 a_k 值也不会太大。一般把韧性值 a_k 高的材料称作韧性材料， a_k 值低的材料称为脆性材料。

这里需指出：

(1) 试样缺口的作用是在缺口附近造成应力集中，以保证试样在缺口处发生断裂。根据 GB/T 229—2007，标准试样有 U 形缺口试样和 V 形缺口试样两种，如图 1.7 所示。对于球墨铸铁和工具钢等材料，由于脆性大，常采用不带缺口的非标准试样来测定其冲击吸收功。

(2) 由于是用弯曲负荷冲断材料，缺口截面上的应力分布不均匀，使塑性变形主要集中在缺口附近，即试样所吸收的冲击功主要消耗在缺口附近，因而用缺口处截面面积来平分冲击吸收功没有确切的物理意义。因此 GB/T 229—1994 规定以标准试样的冲击吸收功直接表示材料的韧性。

(3) 不同种类和尺寸的试样的冲击韧性不能直接比较或换算。

1.2.1.2 小能量多次冲击试验

在实际生产中，大多数承受冲击载荷的零件都是在小能量多次冲击作用下破坏的，衡量零件抵抗小能量多次冲击能力的试验是在落锤试验机上进行的，如图 1.8 所示。带有双冲头的锤头以一定的冲击频率（如 400 次/min）冲击试样，直至冲断。多次冲击抗力指标，一般是用在一定冲击能量 A 的作用下开始出现裂纹和断裂的冲击次数 N 来表示，据此可作出材料的多冲抗力曲线，称 $A-N$ 曲线，如图 1.9 所示。

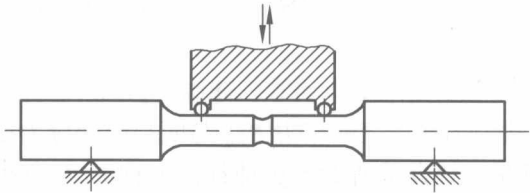


图 1.8 多次冲击弯曲试验示意图

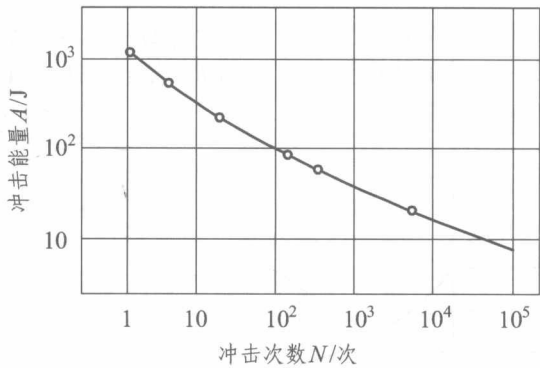


图 1.9 $A-N$ 曲线

需要指出的是：材料抵抗大能量一次冲击的能力主要取决于其塑性，而抵抗小能量多次冲击的能力主要取决于其强度。

1.2.2 疲劳强度

1.2.2.1 交变载荷与疲劳断裂

实际应用中，许多零件如弹簧、齿轮、曲轴、连杆等都是 在交变载荷作用下工作的。所谓交变载荷是指大小和方向随时间发生周期性循环变化的载荷，其在单位面积上的平均值称为交变应力。有规律周期性变化的交变应力，可称为循环应力，如图 1.10 所示。

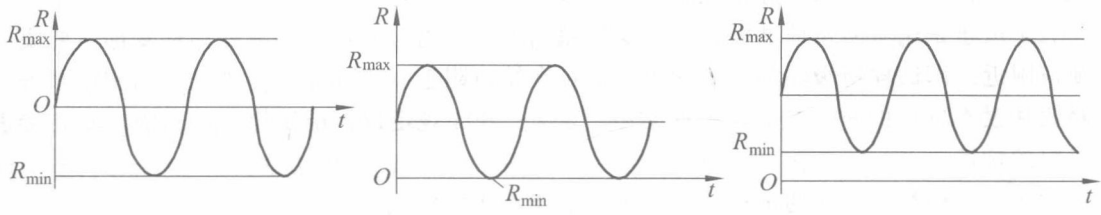


图 1.10 循环应力示意图

零件在交变载荷作用下发生断裂的现象称为疲劳断裂。疲劳断裂属于低应力脆断，其特点为：断裂时的应力远低于材料静载下的抗拉强度，甚至屈服强度；无论是韧性材料还是脆性材料，断裂前均无明显的塑性变形，是一种无预兆的、突然发生的脆性断裂，危险性极大。据统计，在机械零件的断裂失效中，80% 以上属于疲劳断裂。

零件之所以产生疲劳断裂，是由于材料表面或内部有缺陷（如表面划痕、夹渣、显微裂纹等）。这些地方的应力大于屈服强度，从而产生局部塑性变形而开裂。这些微裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展，使承受载荷的截面面积减小，最终断裂。

1.2.2.2 疲劳曲线与疲劳强度

大量实验证明，材料所受的最大交变应力 R_{max} 与断裂前的应力循环次数 N （亦称疲劳寿命）的关系，如图 1.11 所示。该曲线称为疲劳曲线，亦称 $R-N$ 曲线。当应力低于某一临界值时，曲线趋近于水平，表明试样经无限次应力循环也不会发生疲劳断裂，所对应的应力称为疲劳极限，也叫疲劳强度，用 R_f 表示。但是，实际测试时不可能做到无限次应力循环，并且对于某些材料，它们的疲劳曲线上也没有水平部分，通常就规定某一循环周次下不发生断裂的应力为条件疲劳极限，也叫条件疲劳强度，用 R_{-1} 表示。通常规定普通钢的循环周次为 10^7 ，有色金属、不锈钢等的循环周次为 10^8 。

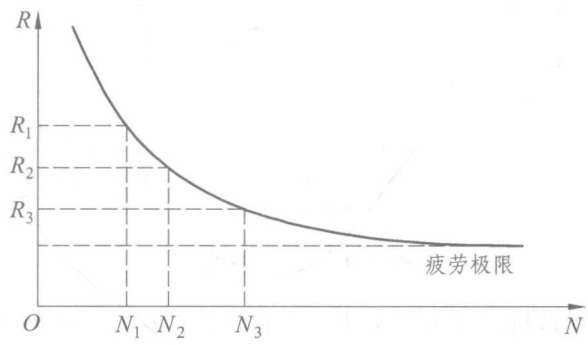


图 1.11 金属疲劳曲线