

学习情境一

金属材料的性能

情境导入

- 小王目前在一家汽车 4S 店实习，主要学习汽车维修和钣金方面的知识。某日公司接收到一部事故车辆，该车辆车头外壳损毁严重，需进行填补。在进行这些工作时，必须先了解汽车该部分的材料类型，才能选用相应的填补材料。小王对汽车组成的材料了解得不够详细，请你为他仔细讲解一下。请你仔细观察、分析一下身边的一辆汽车，看看它主要是由哪些材料制成的，并想一想为什么会选用这些材料。

学习导航

要知道汽车零件是由哪些材料制成的，为什么会用这些材料，需要掌握的相关知识有：

- 机械工程材料的分类；
- 金属材料的力学性能；
- 金属材料的化学性能；
- 金属材料的工艺性能。

单元一：机械工程材料的分类

知识目标

掌握机械工程材料的种类及各自的特点，熟悉各种材料的应用场合。

技能目标

能够根据材料的特点判断其类别。

基础知识

1. 材料的作用及地位

材料是指那些能够用于制造结构、器件或其他有用产品的物质，是人类生产和生活所必需的物质基础。从日常生活中用的器具到高技术产品，从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人，都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成的。

材料同时又是人类技术与文明进步的基石和先导。历史学家按照人类所使用材料的种类将人类历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。现代工业技术与人类文明的发展，同样与材料特别是新型材料紧密相关。20世纪70年代以来，人们把材料、能源和信息技术列为现代科学技术发展的三大支柱，而材料又是后两者的基础。

中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。早在公元前6000年~公元前5000年的新石器时代，中华民族的先人就能用黏土烧制陶器，到东汉时期又出现了瓷器，并流传到海外。在公元前2000多年的夏代，我国就掌握了青铜冶炼术，到距今3000多年前的殷商、西周时期，该技术达到了当时的世界高峰，用青铜制造的生产工具、生活用具、兵器和马饰，也得到了普遍应用。河南安阳武官村发掘出来的重达875 kg的祭器司母戊大方鼎，不仅体积庞大，而且花纹精巧，造型美观。湖北江陵楚墓中发现的埋藏2000多年的越王勾践的宝剑至今仍锋利异常，是我国青铜器中的杰作。春秋战国时期，我国开始大量使用铁器。公元1637年，明代科学家宋应星编著了闻名世界的《天工开物》，详细记载了冶铁、铸造、锻铁、淬火等各种金属加工制造的方法，是最早涉及工程材料及成形技术的著作之一。在陶瓷及天然高分子材料(如丝绸)方面，我国也曾为世界文明作出过巨大贡献。

2. 工程材料的分类

现代材料种类繁多，据粗略统计，目前世界上的材料种类总和已达40余万种，并且每年还在以约5%的速度增加。

工程材料是指在机械、船舶、化工、建筑、车辆、仪表和航空航天等工程领域中

用于制造工程构件和机械零件的材料。按照材料的组成、结合键的特点，可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类。

金属材料是以金属键结合为主的材料，具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两类，铁及铁合金称为黑色金属，即钢铁材料；有色金属的种类很多，根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属和稀有金属等。

陶瓷材料是以共价键和离子键结合为主的材料，其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三类。传统陶瓷又称普通陶瓷，是以天然材料（如黏土、石英、长石等）为原料的陶瓷，主要用作建筑材料；特种陶瓷又称精细陶瓷，是以人工合成材料为原料的陶瓷，常用作工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件；金属陶瓷是金属与化合物粉末的烧结体，主要用作工具和模具。

高分子材料是以分子键和共价键结合为主的材料，具有塑性、耐蚀性、电绝缘性、减振性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等，在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中都有广泛应用。

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料，通过这种组合可达到进一步提高材料性能的目的。复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料。如现代航空发动机燃烧室中耐热温度最高的材料，就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高级游艇、赛艇及体育器械等都是由碳纤维复合材料制成的，它们具有密度低、弹性好和强度高优点。

学习案例

羽毛球运动不仅是一项重要的体育比赛项目，也是深受广大群众喜爱的健身运动项目。它老少皆宜，可以自娱自乐，能全面地锻炼身体，增强体质，培养顽强的毅力和良好的道德风尚。喜爱羽毛球运动的人都很清楚球拍的重要性，它就好像战场上士兵手中的武器一样，往往可以决定战斗最后的输赢。那么，你知不知道羽毛球拍是由什么材料制成的呢？

20世纪70年代以前，羽毛球拍基本使用木材和钢管制造；70年代开始采用了铝合金；现在在中高档的球拍开始大量使用新材料，如碳纤维、钛合金和高强度碳纤维等。

案例分析

羽毛球运动要求球拍能对球有良好的控制性，这就要求球拍的重量要轻，球拍框要硬，球拍杆要有一定的弹性。由于碳纤维、钛合金和高强度碳纤维等材料更轻、更强、

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

更耐用，也能吸收更多的振动与震荡。同时由于其工艺性能较好，可以让球拍制造商在球拍的硬度、球感和击球性能的设计上有更大的发挥空间，所以应用得越来越多。

单元二：金属材料的力学性能

知识目标

掌握金属材料的常用力学性能：强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

技能目标

能够根据零件的工况条件选择合理的力学性能评判指标。

基础知识

金属材料的性能通常可分为两类：使用性能和工艺性能。使用性能是指机械零件在正常工作情况下应具备的性能，包括力学性能和物理、化学性能等；工艺性能是指机械零件在冷、热加工的制造过程中应具备的性能，它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能。

力学性能是指材料在载荷（外力）作用下所表现出的抵抗产生塑性变形或断裂的能力。通过不同的试验标准测定的相关参量的临界值或规定值，即可作为力学性能指标。力学性能的类型依据载荷特性的不同而不同，若按加载方式的不同则可分为拉伸、压缩、弯曲、扭转与剪切等性能；若按载荷的变化特性不同又可分为静载荷力学性能和动载荷力学性能等。不论何种情况，材料在外力作用下均会产生形状与尺寸的变化——即变形。依照外力去除后变形能否恢复，变形可分为弹性变形（可恢复的变形）和塑性变形（不可恢复的残余变形）。当变形达到一定程度而无法继续进行，材料便发生断裂现象。断裂前有明显宏观塑性变形的称为韧性断裂，反之则称为脆性断裂。

衡量材料机械性能的主要指标有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度、断裂韧性和耐磨性等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的主要依据。

1. 弹性和刚度

金属材料受外力作用时产生变形，当外力去掉后能恢复其原来形状的性能称为弹性。这种随外力消除而消除的变形，称为弹性变形。

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《金属材料拉伸实验第一部分：室温试验方法》（GB/T 228.1—2010）要求制成标准的拉伸试样（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横截面积上所受的力 (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。

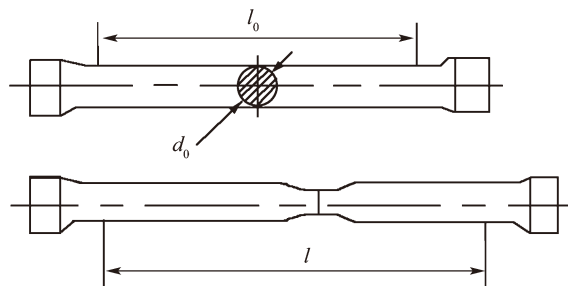


图 1-1 标准拉伸试样

如图 1-2 所示为低碳钢拉伸的应力 - 应变曲线。图中 A 点对应的应力 σ_e 为不产生永久变形的最大应力, 称为弹性极限。 OA' 段为直线, 这部分应力与应变成比例, 所以 A' 所对应的应力 σ_p 称为比例极限。由于 A 点和 A' 点很接近, 一般不作区分。

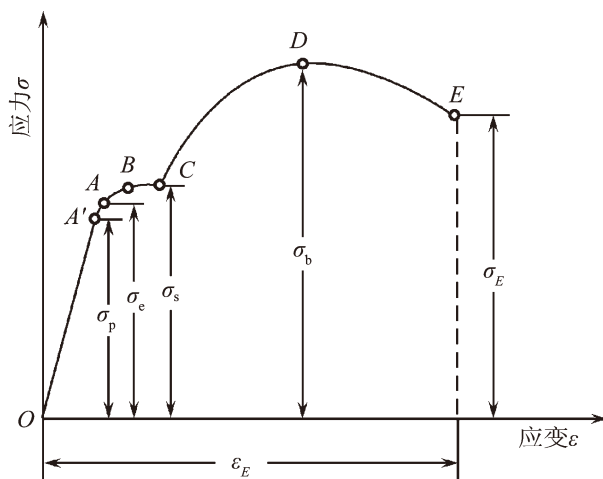


图 1-2 低碳钢拉伸的应力 - 应变曲线

材料在弹性范围内, 应力与应变成正比, 其比值称为弹性模量 E , 即 $E = \sigma / \epsilon$, 单位为 MPa。弹性模量 E 标志着材料抵抗弹性变形的能力, 用来表示材料的刚度。其值愈大, 材料产生一定量的弹性变形所需的应力愈大, 表明材料愈不易产生弹性变形, 即材料的刚度愈大。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。 E 值的大小主要取决于各种材料的本性, 一些处理方法 (如热处理、合金化、冷热加工等)

chapter
01

chapter
02

chapter
03

chapter
04

chapter
05

chapter
06

chapter
07

chapter
08

对它的影响很小。



小提示

材料的刚度不等于零件的刚度。零件的刚度除取决于材料的弹性模量外，还与零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其刚度。



知识链接

常见金属的弹性模量如表 1-1 所示。

表 1-1 常见金属的弹性模量

金属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
铁 (Fe)	214 000	84 000
镍 (Ni)	210 000	84 000
钛 (Ti)	118 010	44 670
铝 (Al)	72 000	27 000
铜 (Cu)	132 400	49 270
镁 (Mg)	45 000	18 000

2. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力称为强度。根据外力加载方式的不同，强度指标可分为许多种，如屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。其中以拉伸试验测得的屈服强度和抗拉强度两个指标应用最多。

(1) 屈服强度。

如图 1-2 所示，当曲线超过 A 点后，若卸去外加载荷，则试样会留下不能恢复的残余变形，这种不能随载荷的去除而消失的残余变形称为塑性变形。当曲线达到 B 点时，曲线出现应变增加而应力不变的现象称为屈服。屈服时的应力称为屈服强度，记为 σ_s ，单位为 MPa。

对没有明显的屈服现象的材料，国家标准规定用试样标距长度产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为该材料的屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

机械零件在使用时，一般不允许发生塑性变形，所以屈服强度是大多数机械零件在设计时选材的主要依据，也是评定金属材料承载能力大小的重要力学性能指标。

(2) 抗拉强度。

材料在断裂前所承受的最大应力值称为抗拉强度或强度极限，用 σ_b 表示，单位为 MPa。如图 1-2 所示的 D 点所对应的应力值即为 σ_b 。屈服强度与抗拉强度的比值 σ_s/σ_b 称为屈强比。其值越大，越能发挥材料的潜力，减小结构的自重；其值越小，

零件工作时的可靠性越高；其值太小，材料强度的有效利用率就会降低。因此，屈强比一般取值为 0.65~0.75。

3. 塑性

塑性是指材料在断裂前发生不可逆永久变形的能力。常用的性能指标有断后伸长率和断面收缩率，可在拉伸试验中，把试样拉断后将其对接起来进行测量而得到。

(1) 断后伸长率。

断后伸长率是指试样拉断后标距长度的伸长量与原始标距长度的百分比。用符号 δ 表示，即：

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

式中， L_0 ——试样原始标距长度，mm；

L_1 ——试样拉断后对接的标距长度，mm。



小提示

断后伸长率的数值和试样标距长度有关。长试样的断后伸长率用符号 δ_{10} 表示，短试样的断后伸长率用符号 δ_5 表示。同一种材料的 δ_5 大于 δ_{10} ，所以相同符号的断后伸长率才能进行比较。

(2) 断面收缩率。

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，用符号 ψ 表示，即

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

式中， S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 ；

S_1 ——试样拉断后缩颈处的最小横截面积， mm^2 。

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

一方面，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，材料具有一定的塑性，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轴所包围区域的面积。

4. 硬度

硬度是反映材料软硬程度的一种性能指标，它表示材料表面局部区域内抵抗其他物体压入的能力。测定硬度的试验方法有多种，但基本上可分为压入法和刻划法两大类，其中压入法较为常用。常用的压入法测量硬度的指标有布氏硬度、洛氏硬度和维

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

氏硬度等。



小提示

用各种方法所测得的硬度值不能直接比较，可通过硬度对照表换算。

硬度试验设备简单，操作迅速方便，一般不需要破坏零件或构件，而且对于大多数的金属材料，硬度与其他的力学性能（如强度、耐磨性）以及工艺性能（如切削加工性、可焊性等）之间存在着一定的对应关系。因此，在工程上，硬度被广泛地用以检验原材料和热处理件的质量、鉴定热处理工艺的合理性以及作为评定工艺性能的参考依据。

(1) 布氏硬度。

布氏硬度的测量方法如图 1-3 所示。用一定载荷 P ，将直径为 D 的球体（淬火钢球或硬质合金球），压入被测材料的表面，保持一定时间后卸去载荷，测量被测试样表面上所形成的压痕直径 d ，由此计算压痕的球缺面积 F ，其单位面积上所受的载荷称为布氏硬度。布氏硬度值 $HB=P/S$ 。在测定材料的布氏硬度时，应根据材料的种类和试样的厚度，选择球体材质、球体直径 D 、施加载荷 P 和载荷保持时间 t 等。

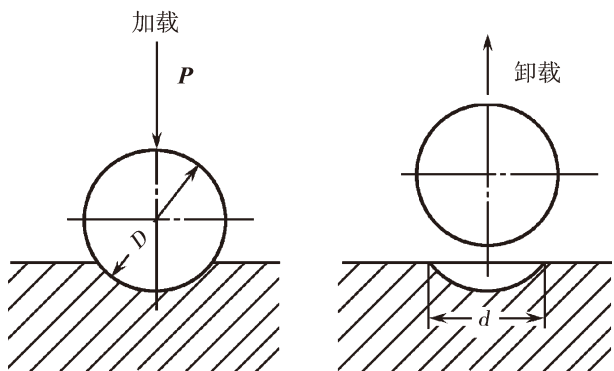


图 1-3 布氏硬度的测量方法

布氏硬度用符号 HB 表示。使用淬火钢球压头时用 HBS 表示，适合于测定布氏硬度值在 450 以下的材料；使用硬质合金球压头时用 HBW 表示，适合于测定布氏硬度值在 450 以上的材料，最高可测 650 HBW。

材料的 σ_b 与 HB 之间的经验关系为：

低碳钢， σ_b (MPa) ≈ 3.6 HB；

高碳钢， σ_b (MPa) ≈ 3.4 HB；

灰铸铁， σ_b (MPa) ≈ 1 HB 或 σ_b (MPa) ≈ 0.6 HB。

(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），

在一定的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，洛氏硬度值就愈小。

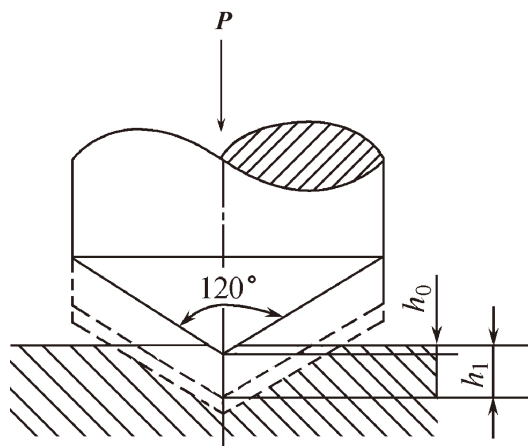


图 1-4 洛氏硬度的测量方法



知识链接

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 1-2 所列。HRA 用于测量高硬度材料，如硬质合金、表层和渗碳层；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 之间比的关系约为 1:10。

表 1-2 常用洛氏硬度标尺（摘自 GB/T 230.1—2009）

洛氏硬度标尺	硬度符号	压头类型	硬度数 N	硬度单位 S/mm	初试验力 F_0/N	主试验力 F_1/N	总试验力 F/N	适用范围	表盘刻度颜色	典型应用
A	HRA	金刚石圆锥	100	0.002	98.07	490.3	588.4	20~88 HRA	黑	硬质合金、渗碳层、表面淬火层
B	HRB	直径 1.5875mm 的球	130	0.002	98.07	882.6	980.7	20~100 HRB	红	铜合金、铝合金、软钢、可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥	100	0.002	98.07	1373	1471	20~70 HRC	黑	淬火低温回火钢、钛合金

(3) 维氏硬度。

维氏硬度的测量原理与布氏硬度相同，不同之处是该压头为一相对面夹角为

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08

136° 的金刚石正四方棱锥体，所加负荷为 49.03 ~ 1 176.80 N。如图 1-5 所示为维氏硬度的测量方法。在用规定的压力 P 将金刚石压头压入被测试件表面并保持一定时间后卸去载荷，测量压痕投影的两条对角线的平均长度 d ，据此计算出压痕的表面积 S ，最后求出压痕表面积上的平均压力 (P/S)，以此作为被测材料的维氏硬度值。

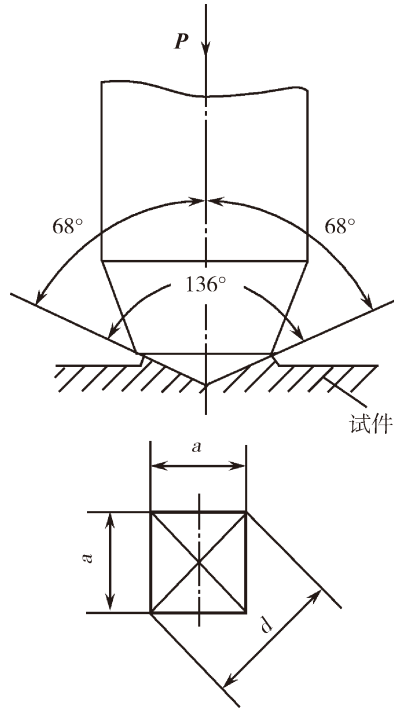


图 1-5 维氏硬度的测量示意图

课堂讨论

根据以上三种硬度测量方法的原理，想一想它们各有什么特点及应用的场合。

布氏硬度的优点是测量误差小，数据稳定，与强度之间有良好的对应关系；缺点是压痕大，不能用于太薄工件（试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍）、成品件及硬度大于 650 HBW 的材料，可用于硬度较低的退火钢、正火钢、调质钢、铸铁及有色金属的原料和半成品的硬度测量。

洛氏硬度实验操作简便、迅速，测量硬度值范围大，压痕小，可直接测成品和较薄工件。但由于实验载荷较大，不宜用来测定极薄工件及氮化层、金属镀层等的硬度。而且由于压痕小，对内部组织和硬度不均匀的材料，其测定结果波动较大，故需在不同位置测试多点的硬度值并取其算术平均值。洛氏硬度无单位，各标尺之间没有直接的对应关系。

维氏硬度实验时，对试样表面质量要求较高，测试方法较为麻烦。但因所施加的

试验载荷小, 压入深度较浅, 故可测定较薄或表面硬度值较大的材料的硬度, 测定很软到很硬的各种金属材料的硬度 (0~1000 HV), 且连续性好, 准确度高, 弥补了布氏硬度因压头变形不能测高硬度材料及洛氏硬度受试验载荷与压头直径比的约束而硬度值不能换算的不足。

5. 冲击韧性

上述强度、塑性和硬度都是在静载荷作用下测量的静态力学性能指标。许多零部件和工具在服役时都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。如锻压机的锤杆、冲床的冲头、汽车变速齿轮和飞机的起落架等。瞬时冲击引起的应力和应变要比静载荷引起的应力和应变大得多, 因此在选择制造该类机件的材料时, 必须考虑材料的抗冲击载荷能力。

材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性。为了讨论材料的冲击韧性 a_k 值, 常采用一次冲击弯曲试验法。由于在冲击载荷作用下材料的塑性变形得不到充分发展, 为了能灵敏地反映出材料的冲击韧性, 通常采用带缺口的试样进行试验。标准冲击试样有两种, 一种是夏比 U 形缺口试样, 另一种是夏比 V 形缺口试样。同一条件下同一材料制作的两种试样, 其 U 形试样的 a_k 值明显大于 V 形试样的值, 所以这两种试样的 a_k 值不能相互比较。如图 1-6、图 1-7 所示是国家标准规定的一次弯曲冲击试样的尺寸及加工要求。

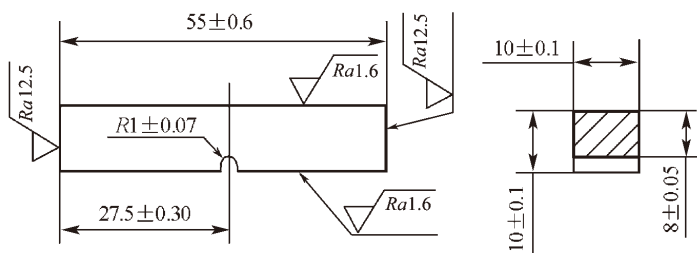


图 1-6 夏比 U 型缺口试样

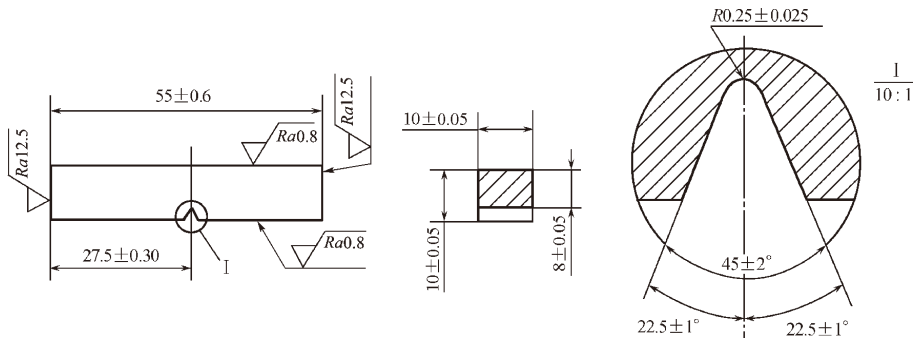


图 1-7 夏比 V 型缺口试样

chapter
01

chapter
02

chapter
03

chapter
04

chapter
05

chapter
06

chapter
07

chapter
08

试验时，将试样放在试验机两支座上，如图 1-8 所示。将一定重量 G 的摆锤升至一定高度 H_1 ，如图 1-9 所示，使它获得位能为 $G \cdot H_1$ ；再将摆锤释放，使其刀口冲向如图 1-8 所示箭头所指试样缺口的背面；冲断试样后摆锤在另一边的高度为 H_2 ，相应的位能为 $G \cdot H_2$ ，冲断试样前后的能量差即为摆锤冲断试样所消耗的功，或是试样变形和断裂所吸收的能量，称为冲击吸收功 A_k ，即 $A_k = G \cdot H_1 - G \cdot H_2$ ，单位为 J。试验时，冲击功的数值可从冲击试验机的刻度标盘上直接读出。冲击吸收功除以试样缺口底部处横截面积 F 获得冲击韧性值 a_k ，即 $a_k = A_k / F$ ，单位为 J/cm^2 。

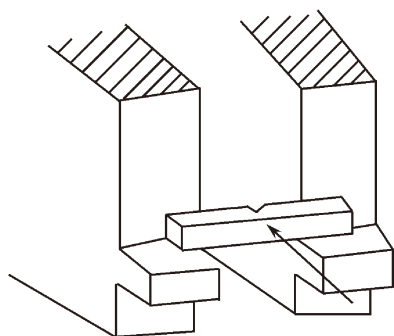


图 1-8 试样在试验机上的放置

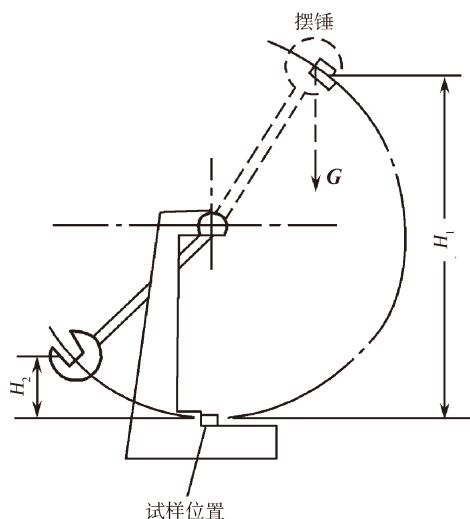


图 1-9 冲击试验原理图

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。

材料的 a_k 值愈大，韧性就愈好；材料的 a_k 值愈小，材料的脆性就愈大。



知识链接

研究表明，材料的 a_k 值随试验温度的降低而降低。当温度降至某一数值或范围时， a_k 值会急剧下降，材料则由韧性状态转变为脆性状态，这种转变称为冷脆转变，相应的温度称为冷脆转变温度。材料的冷脆转变温度越低，说明其低温冲击性能越好，允许使用的温度范围越大。因此对于寒冷地区的桥梁、车辆等机件用的材料，必须做低温（一般为 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ）冲击弯曲试验，以防止低温脆性断裂。

6. 疲劳

(1) 疲劳的概念。

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的变化而变化的载荷。在交变载荷的作用下，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。

疲劳断裂的过程是一个损伤积累的过程。起初，在零件的表面（有时在零件的内部）存在一些薄弱环节（如微裂纹），随着循环次数的增加，裂纹沿零件的某一截面向深处扩展，至某一时刻剩余截面承受不了所受的应力，便会突然断裂。即零件的疲劳断裂过程可分为裂纹产生、裂纹扩展和瞬间断裂三个阶段。

（2）疲劳强度。

在测定材料的疲劳强度时要用较多的试样，在不同的循环应力作用下进行试验，做出疲劳曲线（材料所受交变应力与其断裂前的应力循环次数的关系曲线），如图1-10所示。

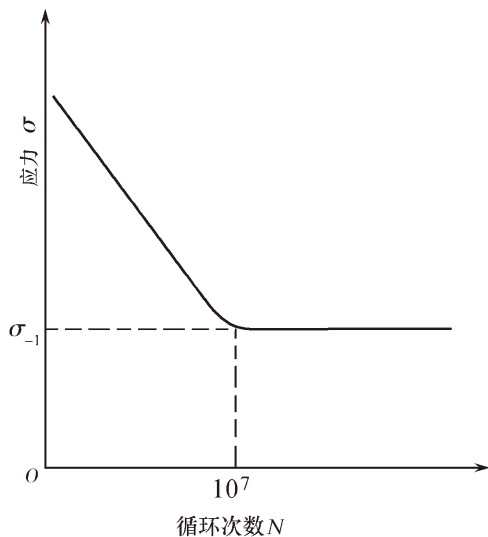


图 1-10 疲劳曲线示意图

由曲线可以看出，应力值越低，断裂前的循环次数越多；当应力降低到某一值后，曲线近乎于水平直线，这表示当应力低于此值时，材料可经受无数次的应力循环而不断裂。我们把试样承受无数次应力循环或达到规定的循环次数才断裂的最大应力作为材料的疲劳强度。在疲劳强度的试验中，不可能把循环次数作到无穷大，而是规定一定的循环次数作为基数，超过这个基数就认为不再发生疲劳破坏。常用钢材的循环基数为 10^7 ，有色金属和某些超高强度钢的循环基数为 10^8 。影响疲劳强度的因素很多。除设计时在结构上注意减小零件应力集中外，改善零件表面粗糙度和进行热处理（如高频淬火、表面形变强化、化学热处理以及各种表面复合强化等）也是提高疲劳强度的方法。钢的疲劳强度为抗拉强度的 40% ~ 50%，有色金属为其抗拉强度的 25% ~ 50%。

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

7. 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。裂纹可能是原材料在生产过程中产生的冶金缺陷（气孔、缩孔、缩松、非金属夹杂物等）又在使用过程中发展为裂纹，也可能是在加工过程中产生的裂纹，或在使用中产生的裂纹等。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。

材料中存在裂纹时，在裂纹尖端就会产生应力集中，从而形成裂纹尖端应力场，按断裂力学分析，应力场的大小可用应力强度因子 K_I 来描述，其单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，脚标 I 表示 I 型裂纹强度因子。 K_I 值的大小决定于裂纹尺寸（ $2a$ ）和外加应力场 σ ，它们之间的关系由下式表示：

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

式中， Y ——与裂纹形状、加载方式和试样几何尺寸有关的无量纲系数；

σ ——外加应力场，MPa；

a ——裂纹长度的一半，m。

由公式可见， K_I 随 σ 和 a 的增大而增大，故应力场的应力值也随之增大，造成裂纹自动扩展。当 K_I 达到某一临界值时，就能使裂纹尖端附加的内应力达到材料的断裂强度，裂纹将发生突然的失稳扩展，导致构件脆断。这时所对应的应力场强度因子 K_I 就称为材料的断裂韧性，用 K_{Ic} 表示。它表示材料抵抗裂纹失稳扩展（即抵抗脆性断裂）的能力。

断裂韧性是材料固有的力学性能指标，是强度和韧性的综合体现。它与裂纹的大小、形状和外加应力等无关，主要取决于材料的成分、内部组织和结构。常见工程材料的断裂韧性值参如表 1-3 所示。

表 1-3 常见工程材料的断裂韧性值 $K_{Ic}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

材料		K_{Ic}
金属材料	塑性纯金属	100~350
	低碳钢	140
	高强度钢	50~150
	铝合金	23~45
	铸铁	6~20

续表 1-3

材料		K_{Ic}
复合材料	玻璃纤维（环氧树脂基体）	42 ~ 60
	碳纤维增强聚合物	32 ~ 45
	普通木材（横向）	11 ~ 13
高分子材料	聚苯乙烯	2
	尼龙	3
	聚碳酸酯	1.0 ~ 2.6
	聚丙烯	3
	环氧树脂	0.3 ~ 0.5
陶瓷材料	Co/WC（金属陶瓷）	14 ~ 16
	SiC	3
	苏打玻璃	0.7 ~ 0.8

学习案例

2011年2月18日，某公司在进行集装箱装船作业时，发生了一起门机主钩钩体脱落事故。经事故调查组初步估算，目前事故造成的直接经济损失近40万元。在调查过程中发现，吊运操作过程正常，没有发生违规违章现象。

对拉脱的吊钩进行仔细检查分析发现：吊钩螺母的内圈螺纹已被全部剪切，原螺纹中下部表面锈蚀，为陈旧性损伤；顶部三牙螺纹处发亮，为新剪切损坏痕迹。吊钩柄上端外螺纹虽未剪切，但也存在牙尖损伤、腐蚀和变形。吊钩柄与横梁间的间隙达3~4 mm。

案例分析

从上述现象分析吊钩脱落的原因有：①该部件在设计上钩柄与横梁间的间隙过大（达到3 mm以上），使得在装卸过程中，吊钩与横梁间可以产生较大的摆动偏角，造成螺纹局部受力过大。②吊钩和螺母均采用20钢锻造的，所使用的材质是吊钩制造材料中等级最低、允用应力最小的。③厂家制造时，螺母与吊钩螺纹配合过松，吊钩与螺母间可产生相对移动和螺纹间进水，造成螺纹锈蚀和磨损。在上述因素反复作用下，螺母和钩柄螺纹从下端开始磨损、变形、腐蚀，并逐步发展，致使剩余部分强度不足，吊钩突然拉脱。

该门机在平时使用和事发运行时均没有发现违规操作、违章使用的现象，说明其主钩部件在设计和制造中存在相应问题，从而大大缩减了使用寿命。从事故分析可以

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

得出结论：设计不合理导致的钩体与螺母相对摆动、钩体及螺母材料强度和抗腐蚀能力较差，以及螺纹加工配合精度不良是造成吊钩使用寿命缩短，发生螺纹受损剪切，钩体脱落的主要原因。

单元三：金属的物理、化学和工艺性能

知识目标

熟悉金属材料常见的物理、化学性能指标，了解金属的工艺性能指标。

技能目标

能够分析常见金属（如铁、铜、铝、镁等）材料的物理、化学性能。

基础知识

1. 物理性能

工程材料的物理性能包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等，各种机械零件由于用途不同，对材料的物理性能要求也有所不同。

（1）密度。

材料单位体积内所具有的质量称为密度。密度是工程材料的特性之一，工程上通常用密度来计算零件毛坯的质量。材料的密度直接关系到由它所制成的零件或构件的重量或紧凑程度，这点对于要求减轻机件自重的航空和宇航工业制件来说具有特别重要的意义（例如飞机和火箭等）。用密度小的铝合金制作同样的零件，比钢材制造的零件重量可减轻 $1/3 \sim 1/4$ 。抗拉强度与密度之比称为比强度，这一概念也有着重要的意义。

（2）熔点。

材料由固态转变为液态时的熔化温度称为熔点。金属都有固定的熔点，而合金的熔点取决于其成分，例如，钢是铁和碳组成的合金，含碳量不同，熔点也不同。根据熔点的不同，金属材料又分为低熔点金属和高熔点金属。熔点高的金属称为难熔金属（如 W、Mo、V 等），可用来制造耐高温零件，例如，喷气发动机的燃烧室需用高熔点合金来制造。熔点低的金属称为易熔金属（如 Sn、Pb 等），可用来制造印刷铅字和电路上的熔丝等。对于热加工材料，熔点是制定热加工工艺的重要依据之一，例如，铸铁和铸铝的熔点不同，它们的熔炼工艺也有较大区别。

(3) 导热性。

材料传导热量的能力称为导热性。导热性能是工程上选择保温或热交换材料的重要依据之一，也是确定机件热处理保温时间的一个参数。如果热处理件所用材料的导热性差，则在加热或冷却时，机件表面与心部会产生较大的温差，造成不同程度的膨胀或收缩，导致机件破裂。一般来说，金属材料的导热性远高于非金属材料，而合金的导热性比纯金属差。例如，合金钢的导热性较差，当其进行锻造或热处理时，加热速度应慢一些，否则机件会形成较大的内应力而产生裂纹。

(4) 热膨胀性。

材料随着温度变化体积会发生膨胀或收缩的特性称为热膨胀性。一般材料都具有热胀和冷缩的特点。在工程实际中，许多场合要考虑热膨胀性。例如，相互配合的柴油机活塞和缸套之间的间隙很小，既要允许活塞在缸套内往复运动又要保证气密性，这就要求活塞与缸套材料的热膨胀性要相近，才能避免二者卡住或漏气；铺设铁轨时，两根钢轨的衔接处应留有一定空隙，让钢轨在长度方向有伸缩的余地；制定热加工工艺时，应考虑材料的热膨胀影响，尽量减小工件的变形和开裂等。

(5) 导电性。

材料的导电性常用电阻率表示。电阻率表示单位长度、单位面积导体的电阻，其单位为 $\Omega \cdot m$ 。电阻率越低，材料的导电性越好。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，即随着温度升高，电阻率会增大。含有杂质或受到冷变形会导致金属的电阻率上升。

(6) 磁性。

材料在磁场中能被磁化或导磁的能力称为导磁性或磁性。金属材料可分为铁磁性材料、抗磁性材料和顺磁性材料。铁磁性材料(如铁、钴等)在外磁场中能强烈地被磁化，可用于制造变压器、电动机、测量仪表等；抗磁性材料(如铜、锌等)能抗拒或削弱外磁场对材料本身的磁化作用，可用于制造要求避免电磁场干扰的零件和结构材料，如航海罗盘等；顺磁性材料(如锰、铬等)在外磁场中只能微弱地被磁化，多用于制造磁量子放大器和光量子放大器，在工业上应用极少。

2. 化学性能

金属及合金的化学性能主要指它们在室温或高温时抵抗各种介质化学侵蚀的能力，主要有耐腐蚀性和抗氧化性。

(1) 耐腐蚀性。

腐蚀是材料在外部介质的作用下发生失效现象的主要原因。材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。一般来说，非金属材料的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

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

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,阻碍氧化的进一步扩散,这类材料的氧化随时间的变化一般遵循抛物线规律,而形成多孔疏松或挥发性氧化物材料的氧化则遵循直线规律。

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。在高温下工作的热能设备(如锅炉、气轮机、喷气发动机等)上的零件应选择热稳定性好的材料制造;在海水、酸、碱等腐蚀环境中工作的零件,必须采用化学稳定性良好的材料,例如,化工设备通常采用不锈钢来制造。



小提示

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

3. 工艺性能

工艺性能是指材料适应加工工艺要求的能力。按加工方法的不同,可分为铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能及热处理工艺性能等。在设计零件和选择工艺方法时,都要考虑材料的工艺性能,以降低成本,获得质量优良的零件。

(1) 铸造性。

铸造性是指浇注铸件时,材料能充满比较复杂的铸型并获得优质铸件的能力。

对金属材料而言,评价铸造性能好坏的主要指标有流动性、收缩率、偏析倾向等。流动性好、收缩率小、偏析倾向小的材料其铸造性也好。一般来说,共晶成分的合金铸造性好。

(2) 可锻性。

可锻性是指材料是否易于进行压力加工的性能。可锻性的好坏主要以材料的塑性和变形抗力来衡量。

(3) 焊接性。

焊接性是指材料是否易于焊接在一起并能保证焊缝质量的性能,一般用焊接处出现各种缺陷的倾向来衡量。

低碳钢具有优良的焊接性,而铸铁和铝合金的焊接性就很差。

(4) 切削加工性。

切削加工性是指材料是否易于切削加工的性能。它与材料的种类、成分、硬度、韧性、导热性及内部的组织状态等许多因素有关。有利于切削的材料硬度为160~230 HB。切削加工性好的材料,切削容易,刀具磨损小,加工表面光洁。

学习案例

某小区供暖锅炉是以燃煤为主，背靠背钢结构，固态排渣，室内布置。自投入使用后，水冷壁中同一根炉管的同一部位，发生两起爆破事故。

案例分析

经过对锅炉的损坏情况进行全面检查发现，除了局部过热、结垢、燃料等方面的原因外，所用钢材本身的缺陷以及焊接质量也是造成事故发生的非常重要的因素。破坏口断面及附近有比较明显的划痕、缺口等，经过对焊缝部分的金相分析发现，并没有完全焊透。

拓展阅读

材料的发展

材料是人类生存和生活必不可少的部分，是人类文明的物质基础和先导，是直接推动社会发展的动力。材料的发展及其应用是人类社会文明和进步的重要里程碑。没有材料科学的发展，就不会有人类社会的进步和经济的繁荣。

按照人类所使用的材料来划分，人类社会先后经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代和先进材料时代。从公元前 30 万年人类就开始使用燧石这种容易制成工具的石头，开始了制陶业的发展。人类从公元前 5500 年开始使用金属，如用天然金和铜制作工具与武器。公元前 5000 年，人类开始熔炼和锤击改变铜的性能并由此开始了材料科学的新发展。公元前 4000 年，金属铸造工艺诞生，人们可以制作不同形状的材料。公元前 3500 年，人类开始从矿石中提炼铜，由此出现了冶金业的萌芽。公元前 3000 年，人类开始制造合金，青铜是第一种人工合成材料。青铜不仅易加工，而且具有很好的硬度，从而广泛应用于生产工具的制作、武器的制作中。公元前 1450 年，人们发现并开始提炼铁，出现了铁制车轮。公元 1500 年，炼铁的需要促使了鼓风机与熔炉的发明，从此铁器时代开始了。1855 年亨利·贝塞姆拥有了钢铁冶炼的专利，标志着当代钢铁冶炼的出现。进入 20 世纪 90 年代，人类不断发现和研制新材料，这些新材料具有一般传统材料所不可比拟的优异性能或特定性能，是发展信息、航天、能源、生物、海洋开发等高新技术的重要基础，也是整个科学技术进步的突破口。人类社会从此进入了新材料时代。新材料按其不同高新技术领域中的用途可分为三大类，即信息材料、新能源材料，以及在特殊条件下使用的结构材料和功能材料。如砷化镓等新的化合物半导体材料，用于信息探测传感器的碲镉汞、铋化镉、硫化铅等敏感类材料，石英型

chapter
01chapter
02chapter
03chapter
04chapter
05chapter
06chapter
07chapter
08

光导纤维材料, 铬钴合金光存储记录材料, 非晶体太阳能电池材料, 超导材料, 高温陶瓷材料, 高性能复合结构材料, 高分子功能材料, 特别是纳米材料等。新材料的广泛使用给社会带来了有目共睹的巨大进步。

21世纪科学技术的进步、人类生活水平的提高对材料科学技术将提出更高的要求, 特别是由于世界人口迅速增加, 资源迅速枯竭, 生态环境不断恶化, 对材料的开发与有效利用提出了许多新要求。在这种背景下, 知识经济的蓬勃发展与信息网络化正促进着材料科学技术突飞猛进地发展。以半导体材料和光电子材料为代表的信息功能材料仍是最活跃的领域; 可再生能源的加速开发、核能的新发展、最重要的节能材料——超导材料的室温化、作为能源使用的磁性材料的继续发展、对贮能材料的高度重视、提高燃效减少污染的燃料电池的开发等, 将使能源功能材料取得突破性的进展; 以医用生物材料、仿生材料和工业生产中的生物模拟为代表的生物材料在生命科学的带动下将有很大发展; 智能材料与智能系统将受到更大重视。

学习检测



名词解释

强度 刚度 塑性 硬度 疲劳



填空题

- (1) 工程材料按其性能和结合键的特点可分为: _____、_____、_____和_____。
- (2) 评判金属材料塑性的指标有: _____和_____。
- (3) 压入法测定硬度的方法有: _____、_____和_____。
- (4) 金属材料的工艺性能包括: _____、_____、_____和_____。



问答题

- (1) 什么是强度? 什么是塑性? 衡量这两种性能的指标有哪些? 各用什么符号表示?
- (2) HBS、HBW、HRA、HRB、HRC 各代表用什么方法测出的硬度? 各种硬度测试方法的特点有何不同?
- (3) 什么是疲劳现象? 什么是疲劳强度?
- (4) 什么是材料的工艺性能?