

学习情境一

金属的性能

情境导入

- 在金工实习的时候有些细心的同学产生了这样的疑问，要加工的零件是钢铁材料，而在车床上用来切削的车刀也是钢铁，为什么车刀就能切动很硬的钢铁材料？另外，车床是由很多金属零件构成的，比如主轴、卡盘、床身、导轨、床头箱、油盘等，由于这些零件的功能各不相同，因此对性能的要求也就不一样。它们是用什么材料制成的，在选用材料的时候是依据什么性能指标来确定的？你能帮助这些同学解决疑问吗？

学习导航

工程材料是指具有一定性能、在特定条件下能够承担某种功能、被用来制造零件和工具的材料。工程材料的种类很多，按成分可分为四类：金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。钢铁、陶瓷、塑料和玻璃钢分别为这四类材料的典型代表，其中金属材料是应用最广泛的材料，目前仍占据材料工业的主导地位。合理地使用金属材料，充分发挥其作用，就必须了解各种金属材料的性能。金属材料的性能是指金属材料在不同条件下表现出来的属性，一般可分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在工作条件下所具备的性能，包括力学性能（机械性能）、物理性能和化学性能。工艺性能指材料适应切削、铸造、锻造、焊接、热处理等冷热加工方法的能力。

合理地选择和使用金属材料，充分发挥其作用，需要掌握的相关知识有：

- 金属材料的力学性能；
- 金属材料的物理化学性能；
- 金属材料的工艺性能。

单元一：金属的力学性能

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、疲劳强度等。

技能目标

能够根据材料的特点判断其类别。

基础知识

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基础物质。从日常生活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其加工的零件组装而成的。金属材料的力学性能是指金属材料在外力（载荷）作用下所表现出来的特性，是金属材料最主要的使用性能，包括强度、塑性、硬度、韧性以及疲劳强度等。根据载荷作用性质不同，可将载荷分为静载荷、冲击载荷和交变（循环）载荷等。

①静载荷。大小不变（恒载）或变化缓慢以致可以略去惯性力作用的载荷。

②冲击载荷。短时间快速增加的载荷。

③交变载荷。大小、方向或大小和方向随时间发生周期性变化或非周期性变化的载荷。

载荷作用在材料上的方式主要有拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转等，在不同载荷作用方式下材料产生的变形也不相同，如图 1-1 所示。

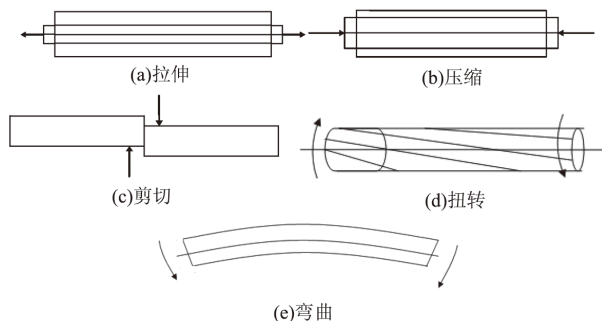


图 1-1 金属材料受载荷变形示意图

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。

1. 强度

金属材料抵抗永久变形和断裂的能力称为强度，金属材料的强度越高，抵抗变形和断裂的能力就越大。根据载荷作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度和抗剪强度等。常被用来表示材料强度指标的是抗拉强度 σ_b 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (或 σ_s)，单位都是 MPa。

拉伸试验是常用来判定金属材料强度的测定方法。拉伸试验是将被测材料按 GB/T 228—2010 要求制成标准拉伸试样，装在拉伸试验机上，用静拉伸力对试样进行轴向的拉伸，测量力和相应的试样伸长量，一般至拉断为止，测量其力学性能。标准圆形拉伸试样如图 1-2 所示，图中 d_0 为试样直径， L_0 为标距长度，即计算试验结果时试样的有效长度。试样有长试样 ($L_0=10 d_0$) 和短试样 ($L_0=5 d_0$) 之分，一般采用的试样直径 $d_0=10 \text{ mm}$ 。

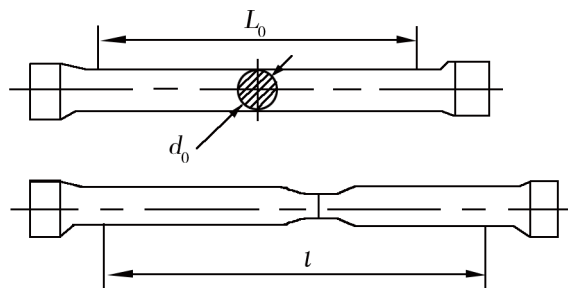


图 1-2 标准圆形拉伸试样

图 1-3 就是低碳钢在拉伸试验机上缓慢加载直至拉断后得到的应力—应变关系曲线，即拉伸曲线。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。

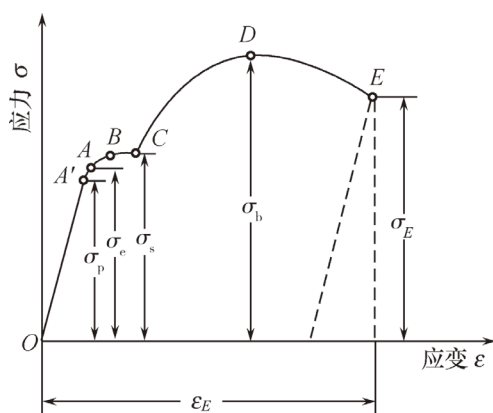


图 1-3 低碳钢拉伸的应力—应变曲线

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

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 $E = \sigma / \varepsilon$ ，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就愈大，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。 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）对它影响很小。



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。

(1) 屈服强度。

在图 1-3 中，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。

(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。在图 1-3 中的 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；但其值太小，材料强度的有效利用率降低。因此，屈强比一般取值为 0.65 ~ 0.75。



小提示

一般的机械零件或工具在使用时，是不允许发生塑性变形的。若能保证零件材料的工作应力低于材料的屈服点，就能保证零件不会因塑性变形而失效。故屈服点 σ_s 是机械设计强度计算的主要依据， σ_s 越大，材料允许的工作应力也就越高；抗拉强度代表材料抵抗拉断的能力，抗拉强度值越大，表示材料抗拉能力越强。若应力大于抗拉强度，则会发生断裂而造成事故。

2. 塑性

固体金属在外力作用下能稳定地产生永久变形而不破坏其完整性的能力就被称为塑性。因此，塑性反映了材料产生塑性变形的能力。塑性的好坏或大小，可用金属在破坏前产生的最大变形程度来表示，并称其为“塑性极限”或“塑性指标”。

研究金属塑性的目的是为了探索金属塑性的变化规律，寻求改善金属塑性的途径，以便选择合理的加工方法，确定最适宜的工艺制度，为提高产品的质量提供理论依据。

为了便于比较各种材料的塑性性能和确定每种材料在一定变形条件下的加工性能,需要有一种度量指标,这种指标称为塑性指标,即金属在不同变形条件下允许的极限变形量。由于影响金属塑性的因素很多,所以很难采用一种通用指标来描述。目前常用的塑性指标有伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。伸长率和断面收缩率越高,表明金属材料塑性越好。



小提示

人们时常容易把金属的塑性与柔软性混淆起来,其实它们是有严格区别的两种概念。前者是指金属的流动性能,是对其是否易于变形而言;后者则是指金属抵抗变形的能力,是对其变形量的大小而言,即塑性好的金属不一定易于变形,因此变形抗力不一样。例如铜虽然塑性很好,但却不能像铅那样易于变形,这是因为铜的变形抗力较高;而铅的柔软性好,主要并非指它的塑性好,而是指它的变形抗力很小。虽然所有的金属在高温下变形抗力都很小,可以说具有很好的柔软性,但绝对不能肯定它们就必然有良好的塑性。因为温度过高往往使其产生过热或过烧,在变形时,就容易产生裂纹,即塑性变差。可见,金属的塑性与柔软性是完全不同的概念。

(1) 伸长率。

试样拉断后标距的伸长量与试样原始标距比值的百分率称为伸长率,计算方法如下:

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

式中 δ ——伸长率, %;

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。

(2) 断面收缩率。

试样拉断处截面积减小量与原始试样截面积之比的百分率称为断面收缩率。计算方法如下:

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

式中 ψ ——断面收缩率, %;

S_0 ——试样原始截面积, mm^2 ;

S_1 ——试样拉断处截面积, mm^2 。

对于同一种材料,用不同长度的标准试样测得的伸长率是不同的,故应注明试样尺寸比例。我们通常所说的 δ 指的是用长试样 ($L_0=10 d_0$) 测得的伸长率 δ_{10} 的简写;如用短试样 ($L_0=5 d_0$), 则用 δ_5 表示,对同一种材料而言, $\delta_5 > \delta_{10}$ 。金属材料的伸长率和断面收缩率数值越大,表示材料的塑性越好。塑性好的金属材料可以发生大量

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

的塑性变形而不被破坏，便于通过塑性变形加工形状复杂的零件。塑性好的金属材料制件工作过载时首先产生塑性变形而不至于发生突然断裂，安全性好。



小提示

金属材料塑性的好坏可根据断裂后断口外形大致判断。在静拉伸力作用下，若试样断面平齐且有金属光泽，没有颈缩，断口呈瓷状，则该材料塑性差，脆性高；反之，若断口呈纤维状，灰色无金属光泽，有明显颈缩，则材料塑性好。

3. 硬度

金属材料抵抗局部塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。

硬度试验方法大体上分为弹性回跳法（如肖氏硬度）、压入法（如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等）和划痕法（如莫氏硬度）三类。硬度是表征金属材料软硬程度的一种性能，其物理意义随试验方法不同而不同。如划痕法硬度值主要表征金属切断强度，回跳法硬度值主要表征金属弹性变形功的大小，压入法硬度值则表征金属塑性变形抗力及应变硬化能力。硬度试验由于设备简单，操作方便、迅速，同时又能敏感地反映出金属材料的化学成分和组织结构的差异，因而被广泛用于检查金属材料的性能、热加工工艺的质量或研究金属组织结构的变化。在此，我们介绍在工业生产中常用的压入法。

(1) 布氏硬度。

布氏硬度法是用一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，在规定载荷 P 的作用下，压入试件的表面并保持一定的时间，然后卸除载荷。在此过程中试件的表面会产生直径为 d 的局部塑性变形压痕。用压痕单位球面积 (S) 上承受的载荷大小作为所测金属的硬度值，称为布氏硬度，用 HBS (HBW) 表示，原理如图 1-4 所示。

布氏硬度值计算方法如下：

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

式中 HBS (HBW)——用钢球 (硬质合金) 实验时的布氏硬度值；

P ——实验力，N；

D ——球体直径，mm；

d ——压痕平均直径，mm。

由布氏硬度计算公式可知，当实验力 P 和压头球体直径 D 一定时，硬度值的大小只与压痕直径 d 有关。 d 越小，材料的硬度值越大； d 越大，则材料的硬度值就越小。在实际测试中，布氏硬度一般不计算，而是用专用的读数显微镜量出压痕直径 d ，根据压痕直径和施加的压力，从专门的硬度表中查出布氏硬度值。

布氏硬度用 HBS 或 HBW 表示。HBS 表示压头为淬硬钢球，用于测定布氏硬度值

在 450 以下的材料,如软钢、灰口铸铁和有色金属等;HBW 表示压头为硬质合金,用于测定布氏硬度值在 650 以下的材料。布氏硬度的表示方法: HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值,后面按顺序用数字表示试验条件,依次是压头的球体直径、试验载荷、试验载荷保持的时间(10~15 s 不标注)。

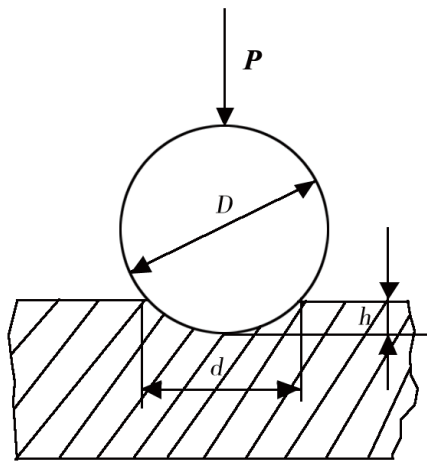


图 1-4 布氏硬度试验示意图

例如,170 HBS10/1 000/30 表示用直径 10 mm 的钢球,在 9 807 N 的试验载荷作用下,保持 30 s 时测得的布氏硬度值为 170。530 HBW5/750 表示用直径 5 mm 的硬质合金球,在 7 355 N 的试验载荷作用下,保持 10~15 s 时测得的布氏硬度值为 530。

在布氏硬度试验时,压头球体的直径 D 、试验载荷 P 及载荷保持的时间 t ,应根据被试金属材料的种类、硬度值的范围及厚度进行选择。常用的压头直径有 1 mm、2 mm、2.5 mm、5 mm 和 10 mm 五种。试验载荷可从 9.807 N~29.42 kN 范围内改变。载荷保持的时间,一般黑色金属为 10~15 s,有色金属为 30 s,布氏硬度值小于 35 时为 60 s。



小提示

布氏硬度的优点是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,试验数据稳定,重复性强。其缺点是测试不同材料需要更换压头直径和改变试验力,压痕直径的测量也比较麻烦,用于自动检测受到限制,另外当压痕直径较大时不宜在成品上进行试验。

布氏硬度和强度有一定的内在联系,因为硬度大小取决于材料的抗塑性变形能力,而材料强度越高其抗塑性变形能力就越强,同时硬度也越高。常用材料的二者之间的关系如下面经验公式所示。

灰口铸铁: $\sigma_b \approx 0.1 \text{ HBS}$

调制合金钢: $\sigma_b \approx 0.325 \text{ HBS}$

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

高碳钢: $\sigma_b \approx 0.34 \text{ HBS}$

低碳钢: $\sigma_b \approx 0.36 \text{ HBS}$



小提示

布氏硬度虽有单位, 但实际使用时只标明硬度数值, 而不标明单位。

(2) 洛氏硬度法。

洛氏硬度原理和布氏硬度原理相似, 测量的是压痕的深度, 原理如图 1-5 所示。将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或钢球压入试样表面, 经规定保持时间后卸除载荷, 通过测量残余压痕深度增量来计算硬度。洛氏硬度值用 HR 表示, 计算公式如下:

$$\text{HR} = K - e$$

式中 HR——洛氏硬度值;

K ——常数, 用金刚石压头进行试验时 K 为 100; 用钢球压头时 K 为 130;

e ——残余压痕深度。

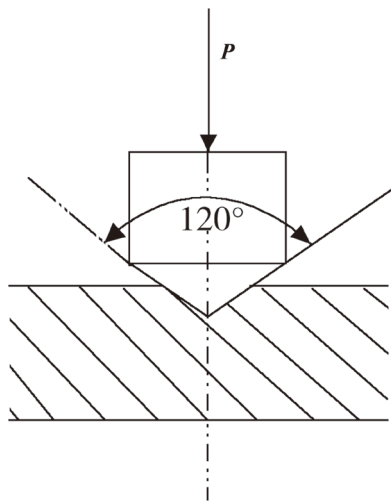


图 1-5 洛氏硬度试验示意图

测量较硬的材料(如淬火后的钢件和硬质合金)时用金刚石压头; 测量退火钢、有色金属、铜合金等相对较软的金属时, 采用淬火钢球压头。

洛氏硬度的数值可直接从硬度计上的刻度盘上读出。刻度盘上的数值越大, 说明压痕越浅, 材料硬度越高; 刻度盘上数值越小, 说明压痕越深, 材料硬度越低。为了能使一台硬度计能测量更大的硬度范围, 可采用更大的实验载荷和不同的压头。常用的有三种标尺的洛氏硬度, 分别是 HRA、HRB 和 HRC, 应用最多的是 HRC。A 标尺用的是 120° 金刚石压头, 总试验载荷为 588.4 N, 测量范围是 20 ~ 88 HRA; B 标尺用的是淬火钢球压头, 总试验载荷为 980.7 N, 测量范围是 20 ~ 100 HRB; C 标尺用的是 120° 的金刚石压头, 总试验载荷为 1 471 N, 测量范围是 20 ~ 70 HRC。

洛氏硬度表示方法是在硬度符号前注明硬度数值，如 46 HRC，表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 46，75 HRA 表示用 A 标尺测定的洛氏硬度值为 75。

小提示

洛氏硬度的优点是操作简便、迅速，硬度可直接读出，压痕较小，可在工件上进行试验，采用不同标尺可测定各种软硬不同的金属和厚薄不一的试样的硬度，因而广泛用于热处理质量检验。洛氏硬度的缺点是压痕较小，代表性差。若材料中有偏析及组织不均匀等缺陷，则所测硬度值重复性差，分散度大，故一般在被测试样的不同部位测量三点及以上，取平均值。此外，用不同标尺测得的硬度值彼此没有联系，不能直接比较。

(3) 维氏硬度法。

维氏硬度原理和布氏硬度相同，也是以压痕单位面积上的平均压力作为硬度值，但压头改为 136° 的金刚石正四棱锥体，如图 1-6 所示。压头在试验力 F 作用下将试样表面压出一个四方锥形的压痕，经一定保持时间后卸除试验力，测量压痕对角线平均长度 d ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$)，进而可以计算压痕面积 S (mm^2)，试验力大小 F 除以压痕表面积 S 所得的商即为维氏硬度值。

维氏硬度试验常用试验力范围为：49.03 ~ 980.7 N，如果维氏硬度试验时选用的试验力较小，达到 0.098 ~ 1.961 N，则可测定金属箔、极薄的表面层的硬度以及合金中各种组成相的硬度。因为压痕尺寸较小，为了提高测量精度，需要配用显微放大装置，这就是显微维氏硬度（显微硬度）。维氏硬度用符号 HV 表示，计算公式如下：

$$\text{HV} = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中 F ——载荷，N；

S ——压痕的表面积， mm^2 ；

d ——压痕两对角线的算术平均长度，mm。

试验后根据测得的 d 和 F ，代入上式，即可得到 HV 值。在实际应用中，维氏硬度一般不计算出，只需要根据 d 值查维氏硬度表即可求出硬度值。维氏硬度表示方法与布氏硬度相同，如 620 HV30/30，表示在试验压力 294 N 持压 30 s 的情况下测得的维氏硬度值为 620。

维氏硬度值具有连续性（10 ~ 1 000 HV），可测硬度范围很大，但金刚石压头价格高，一般不用于普通件的硬度测量。维氏硬度的优点是不存在布氏硬度试验时要求试验力 F 与压头直径 D 之间所规定条件的约束，也不存在洛氏硬度试验时不同标尺的硬度值之间无法统一的弊端。试验载荷可以很小，故压痕小，可用于较薄材料，渗氮、渗碳层的硬度测定。维氏硬度的缺点是硬度值需要通过测量压痕对角线长度后才能进行计算或查表，工作效率比洛氏硬度法低得多。

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

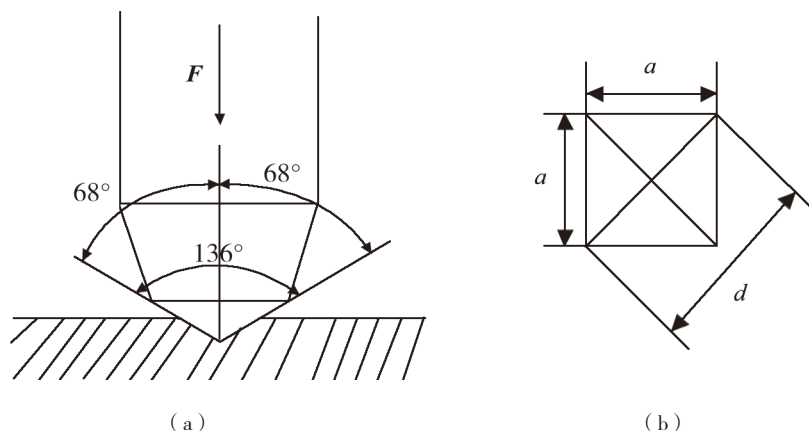


图 1-6 维氏硬度试验示意图

上述各种硬度测量法，相互间没有理论换算关系，故试验结果不能直接进行比较，应查阅硬度换算表进行比较。



小提示

硬度能综合反映材料的强度等其他力学性能。硬度与耐磨性具有直接关系，硬度越高，耐磨性越好。机械制造中所用的刀具、量具、模具要保证使用性能和寿命，都应具有足够的硬度。硬度测量具有简便、快捷、不破坏试样（非破坏性试验）等特点，所以，硬度测量应用极为广泛，常把硬度标注于图纸上，作为零件检验、验收的主要依据。

4. 韧性

在拉伸和硬度试验中，试样所受的载荷都是从零逐渐增大的，称为静载荷。在实际生产中，许多零件会受到冲击力作用，如活塞销、冲模等，此时不能再静载荷下的性能来描述冲击载荷作用下的性能。因为有些金属在静载荷下强度较高，但承受冲击载荷时却非常脆弱；相反，有些金属材料在冲击载荷下表现出较高的韧性，而在静载荷下的承载能力弱。故对工作中受冲击载荷的构件应考虑其韧性，而冲击韧性是衡量金属韧性的常用判断依据。

金属材料抵抗冲击载荷（动载荷）作用而不被破坏的能力称为冲击韧度，用符号 a_k 表示，单位为 J/cm^2 。冲击韧度值是在摆锤冲击试验机上测得的，见图 1-7b。

试验时首先把被测材料制成图 1-8 所示的试样，把试样放在图 1-7a 所示的工作台上，试样缺口背向摆锤冲击方向。将一定重量 G 的摆锤升到一定高度 H 后自由落下，冲断试样后，摆锤上升高度为 h 。故试样折断时所吸收的功为：

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

式中 A_k ——冲击吸收功，J；

G ——摆锤的重力大小，N， $G=mg$ ；

H_1 ——摆锤举起高度，m；

H_2 ——摆锤冲击试样后回升高度，m。
故冲击韧度值的计算公式为：

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

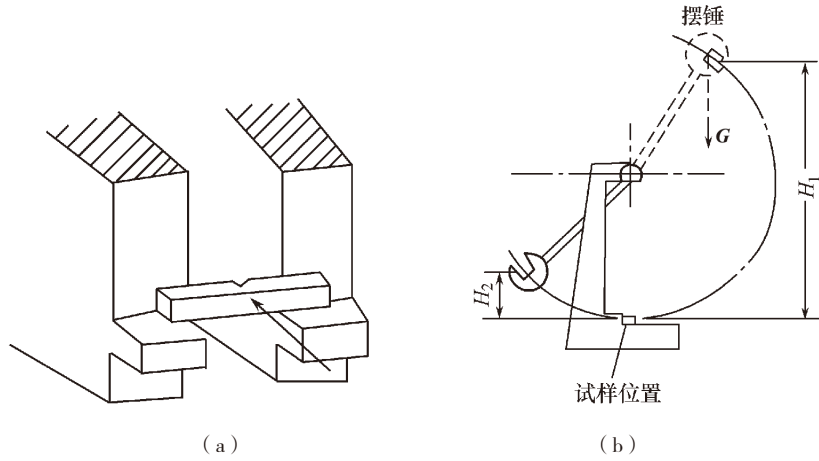


图 1-7 冲击试验示意图

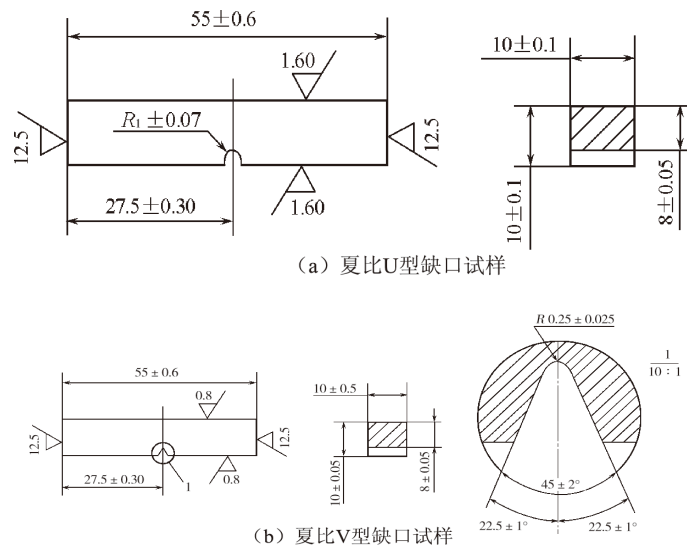


图 1-8 冲击韧性标准试样

冲击韧度值越高，材料韧性越好；反之，韧性则越差。在实际工作中，零件的破坏是多次能量冲击导致。试验表明：材料的多次冲击抗力由强度和塑性综合性能决定。冲击能量小时，取决于材料的强度；冲击能量大时，取决于材料的塑性。此外，材料的韧性还和温度有关，脆性转变的温度越低的材料，低温下承受冲击的能力就越强。

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

5. 疲劳强度

许多机械零件，如轴、齿轮、弹簧等，工作时的应力往往是随时间周期性变化的，这种应力称为交变应力。在多次交变应力作用下，金属发生破坏时的应力值比静载荷的屈服极限还低，这种现象称为金属的疲劳。这是由于零件中存在疲劳源（如裂纹、夹杂、刀痕等缺陷），在循环力或交变力作用下疲劳源处产生疲劳裂纹，并不断扩展，导致零件发生突然断裂。据统计，在机械零件失效中大约 60%~70% 属于疲劳破坏。无论是韧性材料还是脆性材料，在疲劳断裂时，事先无明显塑性变形的预兆，往往是突然发生的，因此具有很大的危险性，易造成重大事故，故设计时应充分考虑材料的疲劳断裂。

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。

疲劳按照应力状态不同可分为弯曲疲劳、扭转疲劳、拉压疲劳及复合疲劳；按照环境和接触情况不同可分为大气疲劳、腐蚀疲劳、高温疲劳、热疲劳、接触疲劳等；按照断裂寿命和应力高低不同可分为：高周疲劳和低周疲劳。疲劳强度是指材料在无限多次交变应力作用下，不发生破坏的最大应力，用符号 σ_{-1} 表示。实际上不可能做无限次交变载荷试验，一般规定黑色金属取 $10^6 \sim 10^7$ 次，有色金属取 $10^7 \sim 10^8$ 次。

机件在重复冲击载荷作用下发生的疲劳断裂称之为冲击疲劳。冲击疲劳抗力是一个取决于强度和塑性的综合力学性能，具有以下特点：

①与低周疲劳相似，冲击能量高时，材料的冲击疲劳抗力主要取决于塑性；冲击能量低时，冲击疲劳抗力则主要取决于强度。

②淬火回火钢的冲击疲劳抗力随回火温度不同不是单调变化的，与常规单一力学性能指标之间也不存在对应关系，而是在某一温度下有一个峰值，该峰值随冲击能量增加向高温方向移动。

③冲击韧度的影响，因材料强度不同而异。

影响疲劳强度的因素主要有以下几种：

①应力集中。机件表面的缺口应力集中，往往是引起疲劳破坏的主要原因。

②表面粗糙度。表面粗糙度越低，疲劳极限越高；表面粗糙度越高，疲劳极限越低。

③残余应力及表面强化。残余应力与外加工作应力叠加，构成合成总应力。叠加残余压应力，总应力减小；叠加残余拉应力，总应力增大。残余压应力提高疲劳强度，残余拉应力则降低疲劳强度。表面强化处理可在机件表面产生有利的残余压应力，同时还能提高机件表面的强度和硬度，都能有效提高疲劳强度。

**小提示**

为提高金属零件的疲劳强度，常对其表面进行精细加工、表面强化和喷丸等工艺处理。

6. 蠕变

在长期固定载荷作用下，即使载荷在屈服点以下，金属也会产生塑性变形的现象称为蠕变。蠕变是高温下金属力学行为的一个重要特点。

为保证在高温长时载荷作用下的机件不致产生过量蠕变，要求金属材料具有一定的蠕变极限，蠕变值是金属材料在高温长时载荷作用下的塑性变形抗力指标。各种材料的蠕变情况与强度有关，比如铝合金发生蠕变时的温度为 $100 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而钢材要到 $300 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 才会发生蠕变。蠕变极限一般有两种表达方式：一种是在规定温度 t 下，使试样在规定时间内产生的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}$ 不超过规定值的最大应力，以符号 $\sigma_{\dot{\epsilon}}^t$ 表示；另一种是在规定温度 t 下和在规定的试验时间 τ 内，使试样产生的蠕变总伸长率 δ 不超过规定值的最大应力，以符号 $\sigma_{\delta/\tau}^t$ 表示。材料的蠕变极限值越大，材料的使用可靠度就越高。温度越高或蠕变速度越小，蠕变极限就越小。

高温材料在高温长时载荷作用下的断裂强度即持久强度极限。该值是指在规定温度 t 下，达到规定的持续时间 τ 而不发生断裂的最大应力，以 σ_t^t 表示。例如某材料在 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 承受 500 N/mm^2 的应力值在 $1\,000 \text{ h}$ 后才断裂，就说这种材料在 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\,000 \text{ h}$ 的持久强度为 500 N/mm^2 ，用 $\sigma_{1000}^{800} = 500 \text{ N/mm}^2$ 表示。

**学习案例**

有两个同学在做实验时，分别对相同的材料进行了不同的热处理，一位同学通过布氏硬度计测量出经过退火后的试样硬度为 290 HBS ，另一位同学通过洛氏硬度计测量出经过正火后的试样硬度为 30 HRC ，于是他们得出相同材料退火后硬度比正火后硬度高的结论。你同意他们的结论吗？

案例分析

硬度是金属材料常用的力学性能指标，由于硬度能综合反映材料的强度等其他力学性能，并且测量具有简便、快捷、不破坏试样（非破坏性试验）等特点，所以硬度测量应用极为广泛。布氏硬度与洛氏硬度是测量材料硬度较为常见的方法，由于这两种方法原理不同，并且相互间没有理论换算关系，故试验结果不能直接进行比较，应查阅硬度换算表进行比较。所以，这两位同学得出的结论不正确。

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

单元二：金属的物理、化学性能和工艺性能

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

熟悉常见金属（如：铁、铜、铝、镁等）的物理化学性能。

基础知识

1. 物理性能

金属的物理性能是指金属固有的属性，包括密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性和磁性等。

(1) 密度。

物质单位体积内所具有的质量称为密度（体积质量），其计算公式为：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 ρ ——密度, g/cm^3 ;

m ——物质的质量, kg ;

V ——物质的体积, m^3 。

密度是金属材料的重要物理性能。一般将密度大于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属称为重金属，如铁、铜；密度小于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属称为轻金属，如铝、镁。常用金属材料的密度见表 1-1。金属材料的密度对选材具有重要的意义，比如，采用高强度的钛合金和铝镁合金代替钢材，可以减轻飞机自重，提高载重能力，同时降低油耗。在汽车工业中，为减少污染，降低油耗，越来越多的汽车零件采用铝合金或镁合金制造。此外，还可以计算大型零件质量，鉴别金属或检测金属铸件内部的致密度等。

表 1-1 常用金属的密度

金属名称	密度 $/(g/cm^3)$	金属名称	密度 $/(g/cm^3)$	金属名称	密度 $/(g/cm^3)$
镁	1.74	铜	8.96	灰口铸铁	6.8 ~ 7.4
铝	2.7	银	10.49	碳钢	7.8 ~ 7.9
锌	7.13	铅	11.34	青铜	7.4 ~ 9.2
锡	7.3	金	19.32	黄铜	8.5 ~ 8.6
铁	7.87	镁合金	1.75 ~ 1.85	铝合金	2.55 ~ 3

(2) 熔点。

金属和合金从固态向液态转变时的温度称为熔点。各种纯金属的熔点都是固定的；合金的熔点则因为化学成分的不同而不同，大多数是在一定温度范围内进行。例如，钢和生铁都是由铁和碳组成，但由于含碳量不同，其熔点并不同。根据熔点高低，金属分为难熔金属（如钨、钒、铬）和易熔金属（如锡、铅）。常用金属的熔点见表 1-2。

熔点对于金属和合金的冶炼、铸造、焊接都很重要。如高熔点的钨、钼可以用来制造耐高温的电炉加热元件、电灯丝等。

表 1-2 常用金属熔点

金属名称	熔点 /℃	金属名称	熔点 /℃	金属名称	熔点 /℃
银	960.8	铁	1 538	钼	2 625
铝	660.1	镁	650	镍	1 453
铜	1 083	锡	231.91	铅	327
铬	1 903	钨	3 380	钛	1 677

(3) 热膨胀性。

金属材料随着温度变化而膨胀、收缩的性能称为金属的热膨胀性。一般来说，金属材料都具有热胀冷缩的特性，但升高相同的温度，不同金属的膨胀程度却不相同。表示金属膨胀性能有线膨胀系数和体膨胀系数，体膨胀系数近似是线膨胀系数的三倍。热膨胀大小一般用线膨胀系数表示，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \Delta t}$$

式中 α —— 线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

L_1 —— 膨胀前长度，m；

L_2 —— 膨胀后长度，m；

Δt —— 升高的温度， $^\circ\text{C}$ 。

在实际工作中，很多地方都要考虑热膨胀性，例如焊接异种金属时要考虑两种金属的线膨胀系数是否接近，否则可能导致金属构件变形；轴与轴瓦之间要留有合适的间隙，防止轴热膨胀后和轴瓦卡死；测量零件时，要保持在室温或是恒温的条件下。

(4) 导热性。

金属传导热量的性能称为导热性，表现为金属在加热和冷却时传递热量的能力。金属导热能力的大小常用热导率表示，热导率越大，说明金属的导热性越好。金属材料都是热的良导体，导热能力远大于非金属材料。纯金属导热性优于合金，而且纯度越高，导热性越好。金属中银和铜的导热性最好，铁的导热性较差。

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



小提示

导热性是金属材料的重要性能之一,是热处理和热加工工艺经常要考虑的一个重要因素。例如热处理时,导热性的好坏直接决定着加热时间的长短;淬火处理时,若金属导热性很差,零件上会产生很大热应力,可能引起零件的开裂。

(5) 导电性。

金属能传导电流的性能称为导电性。常用导电率 γ 和电阻率 ρ 来衡量金属的导电性, $\gamma=1/\rho$ 。 γ 数值越大,材料的导电性就越好,通过电流时电能损失越小;反之,损失电流越大。

纯金属的导电性比合金好。银是所有金属中导电性最好的金属,其次是铜和铝。考虑到成本 and 安全性,常采用铜或铝作为导电材料。而导电性差的金属则可用于电热元件,如镍铬合金等。

(6) 磁性。

金属在磁场中被磁化而呈现磁性的性能称为磁性。在众多金属中,铁及其合金在外加磁场中,能被强烈磁化,钴、镍则相对弱得多。磁性材料是制造变压器、电动机以及仪表组件的材料,有软磁材料和硬磁材料之分。软磁材料指易于磁化并可反复磁化的材料,但当外磁场去除后磁性随之消失;硬磁材料指经磁化后,当外磁场去除后仍保留磁性,并具有高的剩磁和矫顽力。

2. 化学性能

化学性能是指金属在室温或高温时,抵抗周围介质对它侵蚀的能力。通常包括耐腐蚀性和抗氧化性两种。

(1) 耐腐蚀性。

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学物质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。金属的腐蚀既造成金属表面光泽的缺失和材料的损失,也造成一些隐蔽性和突发性的事故。金属材料中铬镍不锈钢可以耐含氧酸的腐蚀;铜及铜合金、铝及铝合金能耐大气的腐蚀。

对金属材料而言,其腐蚀形式主要有两种:一种是化学腐蚀,另一种是电化学腐蚀。化学腐蚀是金属直接与周围介质发生纯化学作用,例如钢的氧化反应。电化学腐蚀是金属在酸、碱、盐等电介质溶液中由于原电池的作用而引起的腐蚀。提高材料的耐腐蚀性的方法很多,如均匀化处理、表面处理等都可以提高材料的耐腐蚀性。

(2) 抗氧化性。

金属材料在高温条件下抗空气、水蒸气、燃气等氧化的能力称为抗氧化性。在高温下金属材料极易与氧结合,形成氧化皮,造成金属的损耗和浪费,因此高温下使用的工件,要求材料具有高温抗氧化的能力。如各种加热炉、锅炉、汽轮机、喷气发动

机以及石油化工设备等都在高温下工作，且直接接触各种气体介质，因此要选用抗氧化性良好的材料。材料中的耐热钢、高温合金、钛合金等都具有好的高温抗氧化性。



小提示

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

3. 工艺性能

金属的工艺性能指金属在加工过程中对不同加工方法的适应性，金属工艺性能的好坏影响到加工的难易程度，从而影响到零件加工后的质量、生产效率和加工成本。

金属的工艺性能主要有铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能。

(1) 铸造性能。

铸造是指将熔化后的金属液浇入铸型中，待凝固、冷却后获得具有一定形状和性能铸件的成形方法，铸造是获得零件毛坯的主要方法之一。金属的铸造性能是指铸造成形过程中获得外形准确、内部健全铸件的能力，即金属获得优质铸件的能力。影响铸造性能的因素有：流动性、收缩性和偏析。

流动性是指金属液本身的流动能力，流动性的好坏影响到金属液的充型能力。流动性好的金属，浇注时金属液容易充满铸型的型腔，能获得轮廓清晰、尺寸精确、薄而形状复杂的铸件，还有利于金属液中夹杂物和气体的上浮排除。相反，金属的流动性差，则铸件易出现冷隔、浇不足、气孔、夹渣等缺陷。金属的流动性好坏主要与金属材料化学成分、熔点高低和浇注温度有关。常用铸造合金中，灰口铸铁的流动性较好，制作形状复杂的铸件容易；铸钢的流动性较差，不易成型。流动性还与金属铸造时的工艺条件有关，温度越高，流动性越好。

铸造金属从液态凝固到冷却至室温的过程中体积和尺寸的收缩程度称为收缩性。收缩会使铸件产生缩孔、缩松、内应力，甚至变形、开裂等铸造缺陷。此外，收缩性影响金属材料焊接质量，收缩性小的金属焊接质量好。影响收缩性的因素主要有合金的种类和成分以及铸造工艺条件。常用金属中灰口铸铁与锡青铜的收缩率较小，而铸钢和黄铜具有较大的收缩率。

金属凝固后，铸件各个不同部位的化学成分并不均匀，这种现象称为偏析。偏析使铸件各个部分的强度、塑性不同，影响铸件质量，尤其是大尺寸铸件。产生偏析的原因有合金凝固温度范围大、浇注温度高、浇注和冷却速度快。

(2) 压力加工性能。

利用压力使金属产生塑性变形，使其改变形状、尺寸和改善性能，获得型材、棒材、板材、线材或锻压件的加工方法称压力加工。压力加工方法有锻造、轧制、挤压、拉拔、

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

冲压等。金属在压力加工时塑性成形的难易程度称为压力加工性能。

金属的压力加工性能主要决定于塑性和变形抗力。塑性越好，变形抗力越小，金属的压力加工性能就越好。低的塑性变形抗力使设备耗能少，优良的塑性使产品获得准确的外形而不遭破裂。一般纯金属的压力加工性能良好，含合金元素和杂质愈多，压力加工性能愈差。低碳钢的压力加工性能优于高碳钢，黄铜和铝合金的压力加工性能比钢好，而铸铁则不能进行压力加工。

(3) 焊接性能。

金属的焊接性能包括两方面的内容：其一是工艺焊接性能，即在一定的焊接工艺条件下，能否获得优质、无缺陷的焊接接头的的能力；其二是使用焊接性能，即焊接接头或整体结构满足技术要求所规定的各种使用性能的程度，包括力学性能及耐热、耐蚀等特殊性能。

焊接性能的好坏与材料的化学成分和采用的工艺有关。钢的焊接性能取决于碳及合金元素的含量。把钢中合金元素（包括碳）的含量按其作用换算成碳的相当含量称碳当量，用符号 w_{CE} 表示，碳钢和低合金结构钢常用碳当量来评定它的焊接性能。国际焊接学会使用的计算公式为：

$$w_{CE} = w_C + \frac{w_{Mn}}{6} + \frac{w_{Mn} + w_{Cr} + w_V}{5} + \frac{w_{Ni} + w_C}{15}$$

碳当量越高，钢的焊接性越差。当 $w_{CE} < 0.4\%$ 时，焊接性良好；当 $w_{CE} = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，焊接性能较差；当 $w_{CE} > 0.6\%$ 时，焊接性差，焊接时需要较高的预热温度和采取严格的工艺措施。如低碳钢和低碳的合金钢焊接性能良好，焊接质量容易保证；高碳钢和铸铁焊接性能差，焊接时需采用预热或气体保护，焊接工艺复杂，主要用来补焊机件。

(4) 切削加工性能。

切削加工性能是指金属材料受各种切削加工的难易程度。零件常采用毛坯进行切削加工而制成，如车削加工、铣削加工、刨削加工、磨削加工等。切削加工性能好的金属材料，刀具磨损小、切削速度快、加工表面粗糙度低。

影响切削加工性能的因素繁多，有化学成分、硬度、韧性、导热性、组织等，因此评价切削加工性能较复杂。一般认为主要因素是材料的硬度和组织状况，有利于切削加工的硬度在 170 ~ 230 HBS 之间。常用材料中，铸铁、铜合金、铝合金及经过恰当热处理的碳钢具有较好的切削加工性能，一些高合金钢的切削加工性能较差。

(5) 热处理工艺性能。

热处理是通过对固态下的材料进行加热、保温、冷却，从而获得所需要的组织和性能的工艺。金属材料的热处理性能是指金属材料通过热处理改变其内部组织和性能的难易程度。钢的热处理性能包括淬透性、氧化脱碳性、回火稳定性、变形与开裂倾向等。通过热处理，可以改善钢的切削加工性能，提高力学性能。热处理应用广泛，机械设备中的重要零件几乎都要经过热处理后才能达到使用要求。

学习案例

钢筋是建筑工程中常用的材料，如果钢筋选用不当，钢筋混凝土的力学性能就难以达到要求，最终导致房屋、桥梁垮塌等事故。因此在建筑施工前，必须根据载荷选定钢材料，才能进行施工。现有一根直径为 8 mm、长为 1 200 mm 的钢筋，受 6 000 N 的拉伸载荷作用后，会有多大的变形？已知钢筋的弹性模量 $E=20\ 500\ \text{MPa}$ 。

案例分析

根据受力大小和钢筋直径可计算其应力值为 $119.43\ \text{N/mm}^2$

$$\left(\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi d^2/4} = \frac{6\ 000}{3.14 \times 16} = 119.43 \right)。$$

假定钢筋的变形在弹性变形范围内，则由 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ 可得 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{119.43}{205\ 000} = 5.826 \times 10^{-4}$ ，又因为 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$ ，得 $\Delta l = l_0 \times \varepsilon = 1\ 200 \times 5.826 \times 10^{-4} = 0.699\ (\text{mm})$ 。

所以钢筋伸长了 0.699 mm。

拓展阅读

材料的发展

在工程实际中研究与开发新材料的目的是为了应用，因此对材料的设计所关注的是材料的性能参数。对功能材料而言最终得到满足要求的物理参数，例如弹性、热膨胀、热容、热传导、热辐射、电阻、热电势、磁性等；对结构材料来讲应得到较为满意的力学性能参数，如强度、硬度、延伸率、疲劳极限及特性等。因此，对材料的评价与检测技术是材料科学与技术科学中一个重要组成部分，它伴随着材料的发展而相应革新、不断完善，同时为新型材料和新材料的研究开发提供了科学的、可靠的保障。

由于新材料的种类繁多，相应的测试和评价技术涉及面很广。材料检测评价技术大致可分为性能测定、显微组织表征和无损检测等，而每一方面又包含各种不同的测试技术和标准试验方法。在多种材料和多种性能测试中，以力学性能为代表，力学性能是结构材料研究、生产、使用的最基本参数，其研究十分活跃。

材料的力学性能是指材料在规定的一些条件下，当某些条件发生变化时对材料所产生的响应。在多数情况下对材料的力学性能与多个参数关联。对材料力学性能的测定需要建立一个广义力与广义位移的关系，当这两者的关系为线性时，材料力学性能就可以由线性常数来表征。在其关系为非线性时，材料的力学性能需要由高阶的常数来表征。

人们对材料力学行为的认识是一个从简单到复杂、从表面现象到微观机理、从浅显到深入的过程。对材料力学行为的评价技术也是随着材料研究的不断深入和其他相关技术（如微电子技术、计算机技术、控制技术）的不断发展而逐渐完善的。

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

对材料力学性能的研究起始于欧洲工业革命，两次世界大战促进了材料测试与评价技术的发展，同时也对材料的性能提出了更高的要求。例如，需要重量更轻而强度又更高的材料来制造飞机、火箭及各种武器等。战后世界上的军备竞赛就一直没有停止，以后又发展到太空的竞争，航天科学技术的发展为材料性能研究开辟了更加崭新的领域。

材料科学的发展促进了对新材料的研究，进而又促进了材料试验与评价技术的革新。可以说，材料测试与评价技术源于材料科学的革新，反过来又促进了材料科学的进一步发展。

就实际工程而言，新产品，如高温燃气轮机、热核反应发电站、轻质航天飞机、火箭、卫星、轻质地面车辆、探井钻探及高压贮罐等；新材料，如超级合金、复合材料、聚合材料、陶瓷材料、薄膜材料、纳米材料等的研制，使得材料工作条件更加复杂、更加恶劣，因此对材料性能提出更高的要求，如超高压、超低温、超真空、超高纯、超高速冷、超高强、超辐射、耐腐蚀等，对材料试验技术提出更高的要求，即快速省力、准确可靠、安全经济。

以航空材料为例，航空材料要求较高的比强度和比刚度、较好的耐疲劳和耐腐蚀性能，以及可反复使用，并且长寿命、安全可靠。因此对航空材料性能测试研究也就复杂得多、严格得多。其中疲劳断裂是航空零部件最常见的失效形式，亦是限制飞机及其发动机寿命和可靠性的重要因素，航空零部件的破坏有90%以上是来源于疲劳，如飞机的梁、框、起落架、发动机的涡轮和叶片等均因工作中高应力和高温、复杂的环境介质、频繁的起动和停机以及零件的表面完整性和应力集中等而引起疲劳失效。

在飞机结构材料方面，正在研究材料在接近使用条件下疲劳断裂行为，包括过载效应、随机加载、多轴向加载以及温度、介质、表面状态的综合影响等。在发动机材料方面，着重研究材料的低周疲劳、热疲劳、蠕变/疲劳交互作用和腐蚀疲劳等。在试验技术方面，要采取宏观与微观相结合的形式探索材料中疲劳裂纹的萌生、扩展和断裂的全过程。不仅要解决工程中的疲劳失效问题，而且要做材料的定寿和零部件的延寿工作，以便在新机型设计、老机延寿与失效分析中发挥更大的作用。

由此可知，一方面，材料的力学性能对工程结构至关重要，而材料测试与评价技术是材料性能得以保证的前提。因此，材料测试技术与材料的质量密切相关。另一方面，材料测试在计算机进行材料模拟、有限元分析和建立大型材料数据库等方面都起着极其重要的作用。因此，没有材料评价技术的发展，也就没有诸多新材料的出现。材料测试技术在材料科学中，以及在国民经济中均起着相当重要的作用。

学习检测



名词解释

强度 塑性 硬度 疲劳 蠕变



填空题

- (1) 机械零件在工作过程中受到的载荷根据作用性质不同, 主要有: _____、_____、_____。
- (2) 根据载荷的作用方式不同, 材料的强度可分为: _____、_____、_____、_____、_____。
- (3) 常用的压入法表示硬度的方法有: _____、_____和 _____。
- (4) 金属的工艺性能主要包括: _____、_____、_____、_____、_____。



问答题

- (1) 什么是材料的力学性能? 力学性能主要包括哪些指标?
- (2) 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?
- (3) 什么是硬度? 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?
- (4) 什么是疲劳现象? 什么是疲劳强度?
- (5) 什么是材料的工艺性能? 包括哪几种?

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

