

第一章 金属材料的性能

在机械工业中，应用最广泛的材料是金属。根据不同的使用目的和工作条件，对金属材料在性能上提出了不同的要求。为了在机械制造中能够合理地选择金属材料，正确地制定各种加工工艺过程，充分发挥金属材料的性能潜力，达到既节约金属材料又保证产品质量的目的，以及研制和发展新金属材料，就必须掌握金属材料的性能。

金属是具有金属光泽、可锻性及良好的导电性、导热性的物质。但仅了解这些，对于我们要达到合理使用和充分发挥材料性能潜力的要求是远远不够的。实际上金属的性能是多方面的，根据工程技术上对金属材料性能要求的不同，可将金属的性能分为使用性能和工艺性能两大类。

金属材料在使用条件下所表现的性能称作使用性能。

金属材料在加工工艺过程中所表现的性能称作工艺性能。

金属材料的使用性能，包括机械性能（又称力学性能）如强度、硬度、塑性、韧性等；物理性能如密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性及磁性等；化学性能如抗氧化性、抗腐蚀性等；以及其它使用性能如耐磨性、消振性、抗辐照性等。

金属材料的工艺性能包括铸造性、可锻性（压力加工性）、切削加工性、焊接性能和热处理性能等。

工程技术上不但要求金属材料具有良好的使用性能，且

且还要求具有良好的工艺性能。因为有时候工艺性能会成为决定某种金属材料的工业价值的关键因素，所以金属材料的这两大类性能都必须予以充分的重视和研究。

第一节 金属的物理性能

金属的物理性能包括的内容很多，如密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、导磁性及电阻温度系数等。它们可以作为使用性能，而且有些还同时成为工艺性能。这是金属性能中重要的部分。下面简单介绍其中常用的几种物理性能。

一、密度

金属的密度就是单位体积的金属质量（重量），它是金属质量与其体积的比值。每一种金属都有其固定的密度数值，用符号 ρ 来表示。密度的测定方法比较简单，只要测出某金属的体积和质量，用密度公式计算就可以得到。

密度的计算公式为：

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

式中 m —— 金属的质量 (kg)；

V —— 金属的体积 (m^3)；

ρ —— 金属的密度 (kg/m^3)。

金属的密度是机械工业中常用的一项重要性能数据。在选材时，必须考虑密度的因素。制造飞机、汽车、车辆及桥梁等构件的材料，在满足材料强度的条件下，要求自重尽量轻些，为此需要选择密度小的金属材料；在金属零件的加工过程中也常常要用到密度，例如需要用密度来算出铸造一个零件需要用多少质量的铸造合金，在日常工作中，常用密度

公式计算大型零件的质量；在科研工作中，用测定密度的方法来鉴别金属和确定某些金属铸件的致密程度等。

为了使用上的方便，一般将密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为轻金属，密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为重金属。表 1-1 所列的是常用金属的密度值。

表1-1 常用金属密度表

材 料	密 度 ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	材 料	密 度 ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)
金	19.3	银	10.5
铅	11.4	锡基轴承合金	7.4
铜	8.9	灰铸铁	7.2
钢	7.8	钛合金	4.5
铝	2.7	镁合金	1.8
镍	8.8	铜合金	1.8

二、熔点

金属或合金在加热过程中由固体熔化为液体的温度称为熔点，常用摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$) 来表示。对于每一种金属来说其熔点都是固定不变的，现将常用金属的熔点列于表 1-2。

表1-2 常用金属的熔点

材 料	熔点($^{\circ}\text{C}$)	材 料	熔点($^{\circ}\text{C}$)	材 料	熔点($^{\circ}\text{C}$)
钨	3380	铅	327	铜	1400~1500
钼	2625	锡	232	钢	1083
钛	1677	纯铁	1538	金	1064
钽	961	铸铁	1130~1350	铝	658

金属的熔点可以用热分析法精确测定。在常用金属材料中钨的熔点最高，即最难以熔解。锡、铅等金属熔点较低被称为低熔点金属。金属材料的选材和制造与熔点密切相关。

在金属和合金的铸造与焊接时温度都必须高于它的熔点，而热处理的温度则必须低于其熔点。熔点低的合金可用来制造焊锡、保险丝（铅、锡、铋、镉的合金）、铅字（铅与锑的合金）等，在制造机械零件、结构件及耐热零件时，都需根据使用条件的要求，选择熔点合适的金属或合金。

三、热膨胀性

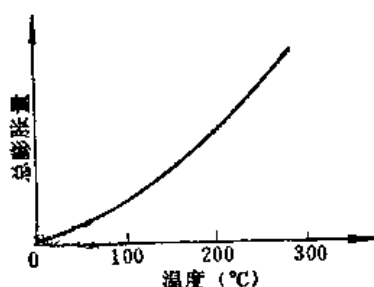
固态金属或合金在温度变化时体积和长度会发生相应变化，一般说来受热时体积增大，冷却时体积缩小，金属的这种随着温度而热胀冷缩的特性称为热膨胀性。金属热膨胀性的大小用线膨胀系数（符号为 α_l ）和体膨胀系数（符号为 α_v ）来表示，它们的近似关系为：

$$\alpha_v \approx 3\alpha_l$$

线膨胀系数可以用各种型号的膨胀仪来测定。图 1-1 是从膨胀仪上测得的线膨胀系数图象。

根据下列公式可求得 α 值：

$$\alpha_l = \frac{L_t - L_0}{L_0 t}$$



式中 L_0 ——试样膨胀前原始长度(mm)；

图1-1 线膨胀系数曲线示意图

L_t ——试样膨胀后长度 (mm)；

t ——升高的温度 (°C)；

α_l ——线胀系数 (K^{-1})。

表 1-3 所列是常用金属和合金的线胀系数值，可知铝的 α 值一般在 $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ 的数量级范围内，必须指出表中的数据是在 273~373 K 的温度范围内的线胀系数 α_l 。

表1-3 常用金属的线膨胀系数

名 称	线胀系数 (10^{-6}K^{-1})	名 称	线胀系数 (10^{-6}K^{-1})
银	19.7	钴	12.7
铝	23.6	铂	9.0
铜	17.0	45钢	11.59
铁	11.76	1Cr18Ni3Ti	16.6
铬	6.2	15Mn	12.3
镍	13.4	锡基轴承合金	23.0

注：线胀系数为273~373 K下测得。

值，随着温度升高， α_t 位略有不同，并非是一个常数。

在实际工作中，对于热膨胀的影响应引起高度重视。例如活塞在缸套间（既不能漏气又不能卡住）运动以及转动，轴与轴瓦之间都要用膨胀系数值来控制其间隙尺寸；在铸造机械零件时，为了确保零件尺寸，减少和避免缩孔及疏松等铸造缺陷，必须考虑材料的热膨胀影响；在零件热处理及铸件冷却时局部体积收缩可能会引起开裂，精密量具受温度变化会引起读数误差等。

四、导热性

金属在加热或冷却时能够传导热能的性质称为导热性。金属导热性的大小用金属的热导率来表示，符号为 λ ，单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

热导率 λ 的数值可以用热导仪测定，其方法繁多，大致分为动态法和静态法两大类，一般以静态法为准。

从表 1-4 可以知道所有金属中银的导热性最好，铜其次，纯金属的导热性比合金要好。在导热过程中，热导率标志温度变化的速度，因此掌握热导率概念对热处理极为重要。例如，当制定金属或合金热处理规范时，加热速度的确

表1-4 常用金属热导率

名 称	热 导 率 λ W/(m·K)	名 称	热 导 率 λ W/(m·K)
银	419	镍	92
铜	393	灰铸铁	~63
铝	222	碳钢	67①
铁	75	18-8不锈钢	17①

① 指在373 K时的 λ 值。

定，要考虑到 λ 值。合金钢的导热性比碳钢差，加热速度要相应慢些；在淬火冷却时，工件的温度是心部高而表面的温度低，导热性差的钢种内外温差比较大，淬火时容易产生变形甚至开裂，因此合金钢淬火时往往用油冷。可见，钢件热导率对热处理是十分重要的。一般说来，导热性好的金属散热性也好，因此在制作散热器、热交换器与活塞等零件时，要注意挑选热导率大的金属或合金。

第二节 金属的机械性能

金属零件在使用过程中会受到诸如拉伸力、压缩力、剪切力等各种不同形式的外力作用，当这些力大到一定程度时会使零件发生变形，甚至断裂失效。金属材料抵抗外力作用的能力叫做机械性能。机械性能的基本指标是强度、塑性、硬度、韧性，下面将逐一介绍。

一、拉伸曲线图

金属材料的强度常以拉伸强度为最基本数据，用 σ 表示，单位为 MPa 或 N/mm²，可由拉伸试验求得。在试验前，先将被测材料加工成标准试样，称为拉伸试样又称抗拉试棒，其形状及尺寸如图 1-2 所示。图中尺寸的数值可查

有关手册得到。试验时，将试样两端夹在拉伸试验机上，缓慢地增加一拉伸力，记录其加力过程中产生的弹性和塑性变形，直至试样拉断为止，得出一张拉伸图称为拉力-伸长曲线图或应力-应变曲线图。

低碳钢的拉伸图（见图 1-3）比较典型，下面以它为例说明。

图 1-3 中线段 oab 基本上呈斜向右上方的直线，为弹性变形阶段。当作用在试样上的力在一定限度（ P_e 之内）时，力与伸长量成正比例，一旦外力去除即恢复试样原来的形状和尺寸。当外力在 P_e 和 P_s 之间时，试样的伸长不再与外力成正比关系，但当外力去除后变形也会消除，因此还是属于弹性变形阶段。

线段 $bcdB$ 为弹性-塑性变形阶段。其中， cd 线是平行于横坐标的直线段，它表示在外力不变的情况下试样继续在伸长，这是材料丧失了抵抗塑性变形能力的表现，力学上把这种现象称为材料的屈服现象。塑性变形产生后，由于金属内

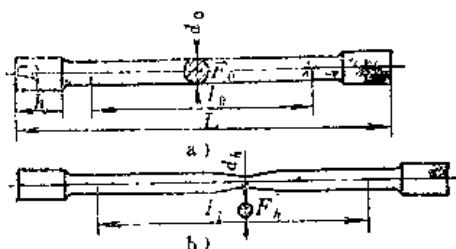


图 1-2 钢的标准拉伸试样示意图

a) 拉伸前 b) 拉伸后

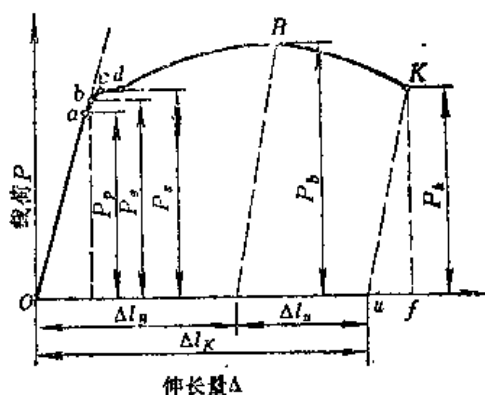


图 1-3 低碳钢拉伸图

部结构发生了变化，导致材料产生加工硬化作用，因此到达 d 点后必须继续增加拉力，试样才能继续伸长，所以 dB 呈向右上方延伸的曲线，当拉力到达 B 点时，试样上开始出现局部区域变细，这就是发生了金属的缩颈现象。

线段 BK 呈向下弯曲状态，这是金属达到了断裂阶段。缩颈出现后， B 点试样缩颈处的截面积急剧减小，变形增加，以致于达到了试样不能抵抗外力的破坏作用，终于在 K 点发生断裂。

通过以上分析可以看出，在拉伸图上比较全面地反映了金属材料在受到外界拉力的作用下，从受力开始直到发生断裂为止的整个过程中表现出来的特性。

二、强度

在受到外力的作用下，金属抵抗变形和破坏的能力称作金属的强度，符号为 σ ，单位为 MPa 或 N/mm^2 。

由图 1-3 曲线中各特定点的外力与拉伸前试样的原始截面积的关系，可以测定材料的强度指标。强度指标按重要性可分为：屈服极限、抗拉强度和比例极限。为了叙述方便，我们按拉伸曲线图中出现先后次序逐一介绍。

1. 比例极限 材料承受外力的作用时，作用力（载荷）与变形成正比时的最大应力，称为比例极限（图 1-3 中的 a 点），符号为 σ_p ，单位为 MPa 或 N/mm^2 。

计算公式如下：

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$$

式中 P_p ——试样受载荷与变形成正比时能承受的最大载荷 (N)；

F_0 ——试样拉伸前横截面积 (mm^2)；

σ_p ——比例极限 (MPa 或 N/mm^2)。

2. 屈服强度 金属材料受拉时, 在载荷不增加的情况下仍能发生明显塑性变形时的应力称为屈服强度 (图 1-3 中 c 点), 用符号 σ_s 表示, 单位是 MPa 或 N/mm^2 。

计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$$

式中 P_s ——屈服时的载荷 (N);

F_0 ——拉伸前试样的横截面积 (mm^2);

σ_s ——屈服强度 (MPa 或 N/mm^2)。

机械零件所能承受的力, 原则上应小于屈服强度 σ_s 值, 否则将会产生明显的塑性变形。 σ_s 值在选用金属材料 and 设计机械零件中是必不可少的。但在许多金属或合金材料 (比如中碳钢、高碳钢等) 的拉伸曲线图中, 并无明显的屈服现象, 为了表明这些材料的屈服强度, 以产生一定的微量塑性变形时的应力, 具体的说是试样产生伸长量为试样长度的 0.2% 时的应力值作为“条件屈服强度”, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示, 用 $\sigma_{0.2}$ 代替 σ_s 值。

3. 抗拉强度 在拉伸时材料抵抗外加拉力而不致于断裂的最大应力称为抗拉强度。又称作强度极限 (图 1-3 中 B 点), 用 σ_b 表示, 其单位是 MPa 或 N/mm^2 。

计算公式如下:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$$

式中 P_b ——试样能承受的最大载荷 (N);

F_0 ——拉伸前试样的横截面积 (mm^2);

σ_b ——抗拉强度 (MPa 或 N/mm^2)。

从 σ_s 公式中可看出，材料的抗拉强度愈高，能承受的应力愈大， σ_s 的大小表示了机件运转过程中的安全可靠性。

三、塑性

金属材料在受力时能产生显著的变形而不断裂的性能称为塑性。常用拉伸试验时试棒的伸长量和断面收缩程度来衡量材料的塑性。

1. 伸长率 伸长率是试样拉断后标距增长量与试样拉伸前的原始标距长度之比，通常用百分数表示。符号为 δ ，单位是%。

计算公式如下：

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样拉伸前的标距长度 (mm)；

l_k ——试样拉断后的标距长度 (mm)；

δ ——伸长率 (%)。

其标准化的试样尺寸有两种：一种是试样计算长度规定为直径的 5 倍，称为 δ_5 ，另一种是为直径的 10 倍，称为 δ_{10} ，一般多采用 δ_{10} 。

2. 断面收缩率 断面收缩率是指试样断口面积的缩减量与拉伸前原始横截面积之比，用百分数表示。符号为 ψ ，单位是%。

计算公式如下：

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\%$$

式中 F_0 ——拉伸前试样的原始截面积 (mm²)；

F_k ——断裂后试样缩颈处最小截面积 (mm²)；

ψ ——断面收缩率 (%)。

3. 冷弯试验 工程技术中,有些零件和设备需要进行大量的弯曲和冲压等冷变形加工,因此常用冷弯试验来衡量金属在室温下的塑性。

在室温状况下,材料承受弯曲载荷的能力之试验称为冷弯试验。

对于淬硬的工具钢、硬质合金、铸铁等这一类脆性材料,不宜于做拉力试验,为了模拟日常使用要求,进行弯曲试验。一般在弹性变形范围内或仅产生少许塑性变形后即行断裂,因此可参考前面所提及的公式和方法来求得它们的各项抗弯性能。

对于普通碳素钢和普通低合金钢以及这些钢种制成的各种型材,对这些属于塑性材料的金属做冷弯试验是很需要的,但主要是比较它们在一定弯曲条件下的塑性变形性能。如图1-4为钢板的冷弯试验,在冷弯 180° 无裂纹的情况下,弯心直径 d 愈大,冷塑性变形的能力愈差,反之,直径愈小冷弯性能愈好。

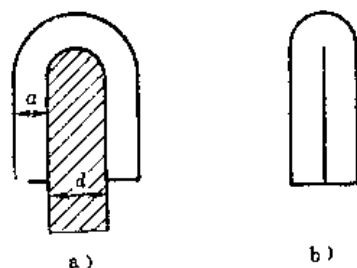


图1-4 180° 冷弯试验

a) $d = 1.5\lambda$ b) $d \rightarrow 0$

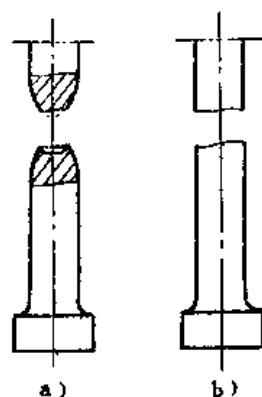


图1-5 典型的试样
断口示意图

a) 塑性杯锥状的

b) 脆性齐平形的

在静载荷情况下,试样断裂后断口可粗略分为两种类

型：脆断和韧断。脆性断口断面平齐，有金属光泽，没有缩颈，断口呈晶状或瓷状；韧性断口灰色无光泽，缩颈明显，断口呈纤维状，其中以杯锥状断口塑性为最好。其示意图见图 1-5。

四、硬度

金属表面抵抗硬物压入的能力叫硬度。它表示金属材料的坚硬程度，它不是表示一个单纯的物理量，而是代表着弹性、塑性、强度、韧性等一系列不同的物理量组成的一种综合性指标。它在试验过程中无破坏性，操作方便迅速，在科研和生产中，得到广泛的应用。

1. 布氏硬度 布氏硬度试验是以直径为 D (10、5、2 mm) 的淬火小钢球或硬质合金球，在一定试验力 F 作用 (对钢铁而言， $F = 30D^2$) 下压入被测试金属材料表面，保持一定时间 (约 10 s)，然后卸除试验力 F ，使金属表面留下一个压痕，如图 1-6 所示。根据压痕的面积大小就可求出其单位面积所受的力称为布氏硬度，其符号为 HBS，一般不标明单位。

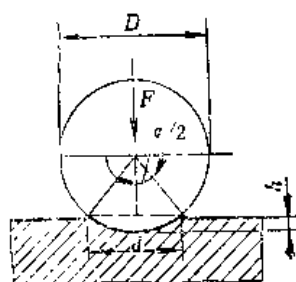


图1-6 计算布氏硬度
压痕面积示意图

压痕面积的计算公式如下：

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

式中 F ——试验力 (kgf) 或 (N)；

D ——钢球直径 (mm)；

d ——压痕直径 (mm)；

$$\odot 1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$$

HBS——布氏硬度值。

实际应用中求得 d 值后，一般可查找压痕直径与布氏硬度对照表，得到 HBS 值，而无须另行计算。

根据经验，布氏硬度与强度之间有如下近似关系：

$$\sigma_s \approx KHBS$$

式中 K 是个系数，它随着不同金属材料及热处理状态而异，低碳钢 $K = 0.36$ ，高碳钢 $K = 0.34$ ，调质合金钢 $K = 0.325$ ，灰铸铁 $K = 0.1$ ，铸铝 $K = 0.6$ ，退火黄铜 $K = 0.55$ 。

布氏硬度适宜于测定普通碳素钢、低合金高强度钢、灰铸铁、有色金属等硬度不高的金属 ($HBS < 450$)。它的压痕面积较大，因此测得的数据重复性比较好，但不能测太薄的试样，因其压痕大易损坏表面。

2. 洛氏硬度 与布氏硬度原理类同，也是一种压痕试验法，但测量的不是压痕的面积，而是压痕的深度，压痕愈深，则硬度愈低。

它的试验原理示意图如 1-7 所示。图中 $O-O$ 为金刚石锥形压头在没有和试样接触时的位置，1-1 为压头与试样接触并受到初载荷 10kgf (或 98N) 后压入试样深度为 h_0 的位置，2-2 为加上主载荷

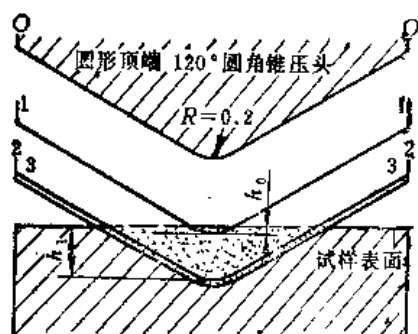


图 1-7 洛氏硬度试验原理示意图

后压头压入试样的位置，3-3 为除去主载荷后，压头由于试样弹性变形的恢复而略行提高的位置，此时压头实际压入试样深度为 h_1 。这时，可根据 $h = h_1 - h_0$ 的值就可计算出对应的洛氏硬度值，计算公式见表 1-5，并可从试验机的表盘

表1-5 洛氏硬度试验与适用范围

符号	压 头		载荷 kgf(N)		计算公式	适用范围
	类 型	大 小	预载荷	主载荷		
HRC	金刚石圆锥体	夹角120° 锥顶半径为 0.2mm	10 (98.1)	140 (1373)	$100 - \frac{h}{0.002}$	HRC 20~70 的硬金属, 如淬火回火处理的钢
HRB	钢球	直径1.59 mm	10 (98.1)	90 (882.6)	$130 - \frac{h}{0.002}$	HRB25~100 的软金属, 如铜合金、低碳钢、中碳钢

指示器上直接读出硬度值。

洛氏硬度压痕较小, 故可测小件、薄件, 但精度不如布氏硬度。根据试验时压头和加载的不同可将洛氏硬度分为 HRA、HRB、HRC 三种, 其中用得比较多的是 HRC 和 HRB, 因此表 1-5 列出两种洛氏硬度试验与适用范围。

当在 HRC25 左右时, HRC 与 HBS 有如下近似比例关系:

$$HRC \approx \frac{1}{10} HBS$$

3. 维氏硬度 它的试验原理和布氏硬度基本相同, 也是以压痕表面积上的平均应力作为硬度值。维氏硬度压头是顶角为 136° 的金刚石四棱锥角, 其压力一般可选用 1~120 kgf (或 9.8~117.6 N) 范围内, 也可选用 1 kgf (或 9.8 N) 以下 (一般为 5~100 kgf, 也就是 0.049~0.98 N) 的压力作为测定某一显微组织硬度的压力。其压头与压痕示意图如图 1-8 所示。在硬度试验机上附有显微测微计以测量方形压痕的对角线长度 d 值, 即可求得维氏硬度值 (HV)。如果用此种方法来测定金属或合金的显微组织中特定相的硬度时,

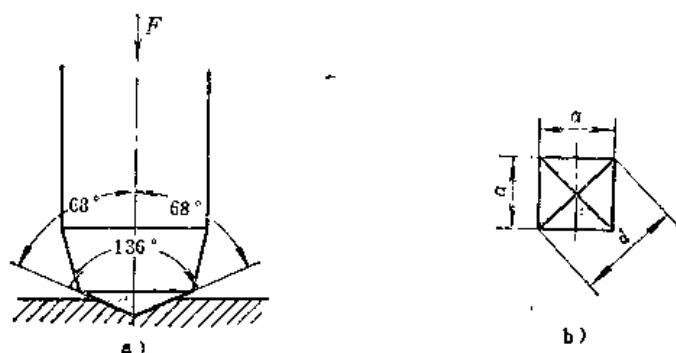


图1-8 维氏硬度的压头和压痕

a) 压头 b) 压痕

所得的维氏硬度值称为显微硬度值。

维氏硬度 HV 值或显微硬度值的计算公式如下：

$$HV = 1.8544 \times \frac{F}{d^2}$$

式中 F ——选用的试验力， $\text{kgf} \ominus (\text{N})$ ；

d ——压痕对角线长度 (mm)；

HV——维氏硬度（或显微硬度）值。

在实际应用中，可根据 d 值从一系列预先计算好的对照表中查得试样的 HV 值。

维氏硬度压痕较小，可测比较薄的材料，如可测量表面硬化层及表面渗层的硬度。

当 HBS 在 200~350 之间时，HV 与 HBS 值非常接近。

$$\begin{aligned} \ominus \text{ 当试验力的单位为牛顿时，用下式计算 } HV &= 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \\ &= 0.1891 \times \frac{F}{d^2} \end{aligned}$$

五、韧性

许多机械零件如锤头、冲模、锻模、齿轮、连杆等工作时受很大的冲击载荷，需要用动态力学试验来衡量它们的韧性，这些金属材料抵抗冲击载荷而不致断裂的性能称为冲击韧性。符号为 a_k ，单位为 J/cm^2 。

以常用的横梁式冲击试验为例来说明之，把被测试样按图 1-9 加工成冲击试样，把试样安放在试验机的两支点中间，使试样的缺口背向摆锤的冲击方向，然后把摆锤抬到一

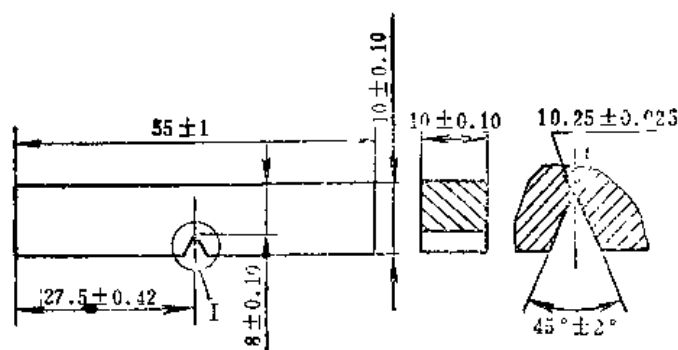


图1-9 V形缺口的冲击试样

定高度 H ，让具有一定动能和速度的由高处落下的摆锤将试样击断，并自由回升到高度 h ，如图 1-10 所示，那么就可以算出冲击试样所消耗的能量（即冲击功 A_k 值）

计算公式如下：

$$A_k = G(H - h)$$

式中 G ——摆锤质量 (N)；

H ——冲击前摆锤所置的高度 (m)；

h ——冲断试样后摆锤上升高度 (m)；

A_k ——冲击功 (J)。

冲击韧性 a_k 的计算则为:

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

F ——试样被冲断横截面面积 (cm^2)。

金属在低于某一温度时会突然从韧性状态 (a_k 值较高) 忽而转变成脆性状态 (a_k 值较低), 这个温度叫做脆性转变温度, 如图 1-11 所示。这个温度位置因钢种、显微组织和试验条件等差异而不同, 但很多处于室温上下。脆性转变温度愈低的金属, 愈能在低温下承受冲击载荷, 因此说脆性转变温度的高低也是金属材料的质最指标之一。在判断材料冲击韧性好坏时, 必须知道试验时的温度。

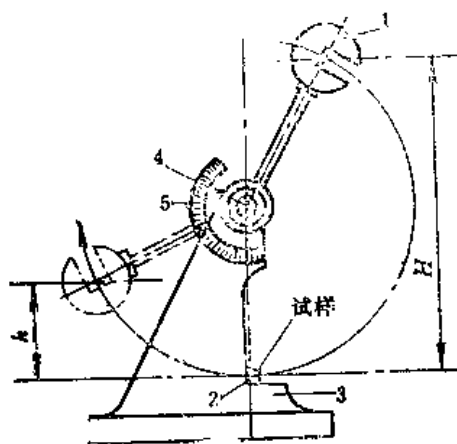


图1-10 冲击试验示意图

1—摆锤 2—试样 3—机架
4—指针 5—刻度盘

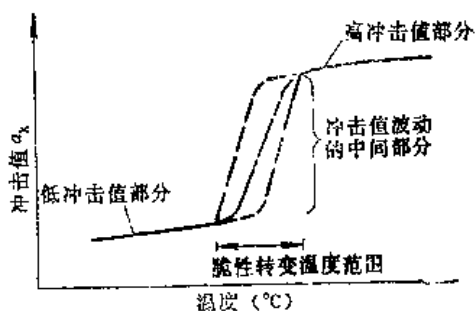


图1-11 冲击值-温度曲线示意图