

中等专业学校试用教材

金 属 学

山东机器制造学校 主编

机械工业出版社

第一章 金属的机械性能

在现代工业生产中使用的金属材料种类很多,为了合理地使用和充分发挥其性能潜力,以达到节省材料提高产品质量的目的。为此,了解金属材料的使用性能与工艺性能是十分必要的。所谓使用性能是指机械零件在正常工作情况下材料所具备的能力。它包括机械性能和物理、化学性能等。所谓工艺性能,是指机械零件在加工制造过程中,材料所具备的适应能力(如:铸造、锻造、焊接、热处理、切削加工等)。

对于机械制造业来说,一般的机械零件,在设计和选择材料时,大多以机械性能指标作为主要依据。所谓机械性能(或称力学性能)是指材料在力或能的机械作用下的抵抗能力。金属机械性能包括:弹性、塑性、强度、硬度、冲击韧性等等。设计零件时所依据的机械性能指标,一般是通过实验获得的可靠数据。下面将分别加以介绍。

§1-1 强度、塑性及其测定

测定金属材料强度、塑性的主要方法是进行拉力试验。

拉力试验是工业上广泛采用的机械性能试验方法之一。在这节里所讨论的是在常温下、轴向、静拉所测得的机械性能指标。所谓“常温”“轴向”“静拉”就是测定机械性能时的三个外在条件——温度、受力形式和受力性质。因为金属材料的机械性能不但与金属本身(内因)有关,而且还受外界条件的影响。

金属材料的拉力试验方法在国标 GB 228-63 中已详加规定,所用试样的切取部位在冶标 YB15-64 中也已规定,在取样及进行试验时,应严格遵守。

一、拉力试样

在国标 GB228-63 中对圆形、板状试样的形状及尺寸均有明确规定。拉力试样形状见图 1-1 所示。

拉力试样有标准的和比例的两种,见表 1-1。所谓标准试样是指直径为 20 毫米的试样,而其它直径的则为比例试样。用于拉力试验的试样(不同截面形状)必须符合表 1-1 的规定。

所谓标距长度是指试样计算时的有效长度 l_0 。根据标距长度 l_0 与直径 d_0 之比,又可分为长试样($\frac{l_0}{d_0} = 10$)或称 10 倍试样;短试样($\frac{l_0}{d_0} = 5$)或称 5 倍试样。

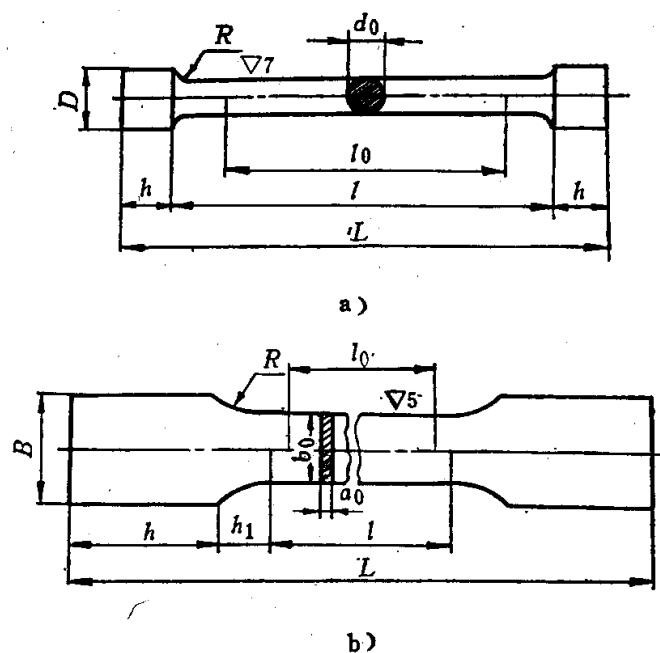


图1-1 拉力试样
a) 圆试样 b) 板状试样

表1-1 拉力试样规范

试 样		标 距 长 度 l_0 (毫米)	横 截 面 积 F_0 (毫米 ²)	圆 试 样 直 径 d_0 (毫米)	试 样 倍 数 的 表 示 记 号
标准的	长	200	314	20	δ_{10}
	短	100			δ_5
比例的	长	$11.3\sqrt{F_0}$	任 意 的	任 意 的	δ_{10}
	短	$5.65\sqrt{F_0}$			δ_5

① 表中规定一般适用于直径不小于5毫米的条材，但在有关技术条件中有特殊规定时则不受此限。

② 也允许采用标距长度与直径或截面积间成其它比例关系的试样（例对钢铸件可以采用标距长度为2.5倍直径的试样），但比值应在证明书中注明。

对比例试样，直径虽然可以任意选择，但试样的标距长度必须符合表1-1的规定。对长试样为 $l_0 = 11.3\sqrt{F_0}$ ；短试样为 $l_0 = 5.65\sqrt{F_0}$ 。式中 F_0 是试样的横截面积。

二、低碳钢的拉伸图

用低碳钢制成拉力试样，经拉力试验，根据试验过程中的自动记录，可以获得拉伸图，如图1-2所示。它表明了低碳钢试样在拉力试验过程中受力与伸长量的关系。

拉伸图的分析：按拉伸过程中的变形情况，可分为五个阶段。

1. oe ——弹性变形阶段 材料在力的作用下发生形状的改变称为变形。而具有恢复变形的能力称为弹性。当试样开始受力，直至外力到达 P_e 时，材料受力后发生了变形，外力去除后变形即随之消失，这种变形称为弹性变形。

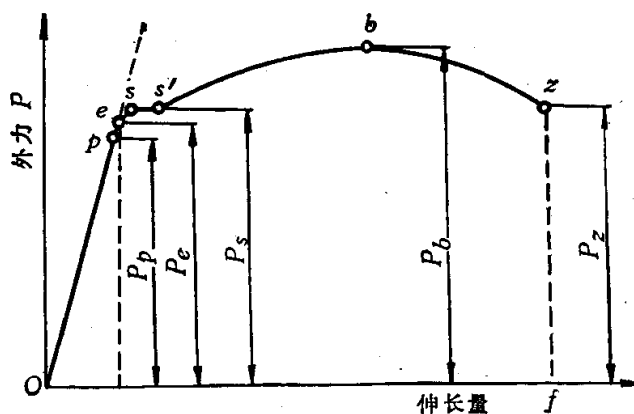


图1-2 低碳钢的拉伸图

弹性变形阶段又可分为两种情况：

op 为一直线，这说明试样的伸长与外力的增加成正比关系（符合虎克定律）， P_p 是能够保持正比关系的最大外力； pe 已不成直线而略有弯曲，这说明当外力超过 P_p 以后，试样的伸长不再与外力成正比关系，但还属于弹性变形阶段，即当外力去除后变形立即消失。

2. es ——微量塑性变形阶段 外力增加超过 P_e 后，试样进一步发生变形，此时若去除外力，弹性变形消失，而另一部分变形不能消失，即试样形状不能恢复到原来的形状，这种不能恢复的变形称为塑性变形或称永久变形。

3. ss' ——屈服阶段 这个阶段的特点是，在外力不增加或增加很少甚至略有下降的情况下变形大量产生。这种现象称为“屈服”。在拉伸图上出现锯齿形或水平线。

4. $s'b$ ——大量塑性变形阶段 外力超过 P_s 后，即开始大量塑性变形，要使试样进一步变形，必须增加外力，外力的增加量虽不大，但试样变形量却很大，直到 b 点。 b 点时的外力 P_b 为最大外力。在 b 点以前，由外力引起的变形，基本上是沿着整个试样标距上均匀发生的。

5. bz ——颈缩阶段 随着变形量的增加，在试样局部地区截面迅速减小，产生所谓颈

缩现象，于是抵抗外力的能力下降，直到 z 点发生断裂。

金属材料进行拉力试验时的受力变形，一般可分为上述五个阶段，但并非所有的金属材料都具有这几个阶段，如铸铁无明显的塑性变形阶段就已产生断裂。

三、强度的衡量指标

根据拉伸图上各特殊点的外力与原截面的关系，可以测得材料的强度指标。

所谓强度，是指材料抵抗塑性变形或断裂的抗力。为了便于比较各种材料的强度，常用材料单位面积上的抗力来表示，称为应力，即

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (\text{公斤力/毫米}^2) \ominus$$

式中 σ ——应力 (公斤力/毫米²)；

P ——外力 (公斤力)；

F ——材料横截面积 (毫米²)。

图 1-3 表示拉应力示意图。

现将拉伸图上各特殊点的强度计算如下：

1. 比例极限——材料承受外力与变形成正比时的最大应力。即

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 σ_p ——比例极限 (公斤力/毫米²)；

P_p —— p 点时的外力，即外力与变形成正比时的最大外力 (公斤力/毫米²)；

F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

2. 弹性极限——材料在外力作用下产生弹性变形时所能承受的最大应力，即

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 σ_e ——弹性极限 (公斤力/毫米²)；

P_e —— e 点时的外力 (公斤力/毫米²)；

F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

弹性极限较比例极限稍大一些，但两者颇为接近，所以国家标准 GB228-63 中，只规定有比例极限，而没有弹性极限。

3. 屈服强度——材料产生屈服时的最小应力，即

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 σ_s ——屈服强度 (公斤力/毫米²)；

P_s ——屈服时的外力 (公斤力)；

F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

屈服点的测定比较简单，在拉力试验过程中，当表示外力的指针停止转动或反向回转后的外力读数就是 P_s 。在屈服点以后，金属就开始有明显的塑性变形。

除退火状态下的低碳或中碳钢以及某些低合金钢有明显的屈服现象外，高碳钢及其它一些钢则无明显的屈服现象。因此，对这些钢规定，产生 0.2% l_0 (图 1-4) 塑性变形时的应

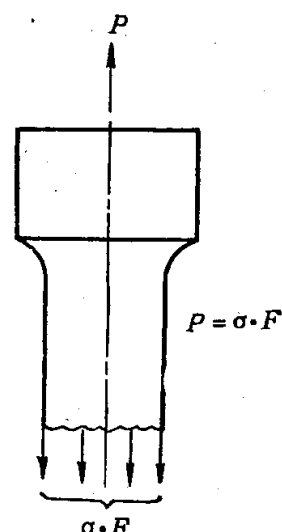


图1-3 拉应力示意图

⊖ 按国际单位制规定：力的单位为牛顿，代号牛(N)。1公斤力 = 9.80665牛顿。

力为条件屈服强度, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示。即

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 $P_{0.2}$ ——产生 0.2% l_0 塑性变形时的外力 (公斤力);
 F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

大多数机器零件和工程结构的构件, 常因过量的塑性变形而失效。所以一般零件都不允许产生塑性变形, 因此, 材料的屈服强度是进行设计时的主要依据。屈服强度也是评定金属材料质量的重要机械性能指标。

4. 抗拉强度——材料抵抗最大外力时的应力。即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 σ_b ——抗拉强度 (公斤力/毫米²);
 P_b ——试样承受的最大外力 (公斤力);
 F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

抗拉强度的测定是比较容易的, 在拉力试验时, 可直接从外力指示针读得 P_b 值, 代入上式即可求得抗拉强度。

上述几种特殊点的应力是以试样原始截面积 F_0 , 除各相应的外力所求得的。但实际上在拉力试验过程中试样截面积是减小的, 所以在变形过程中, 实际应力应该等于各个瞬时试样截面除当时的外力, 这样所得应力叫做真实应力, 以 S 表示, 即

$$S = \frac{P}{F} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 P ——瞬时外力 (公斤力);
 F ——瞬时试样截面积 (毫米²)。

根据真实应力所求得材料的断裂强度 S_r , 将比前述的抗拉强度 σ_b 为大, 所以产生断裂。

抗拉强度在技术上是重要的, 因为它表示材料在拉伸条件下能负担的最大外力。所以它是设计零件时的主要依据之一。

四、塑性的衡量指标

塑性就是材料承受变形而不破坏的能力, 即材料产生塑性变形而不破坏的能力。在拉力试验时, 金属材料的塑性, 可用伸长率和断面收缩率来表示。

1. 伸长率的计算 伸长率就是试样拉断后标距增长量与原标距长度之比, 即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 δ ——伸长率 (%);
 l_1 ——试样断后的标距长度 (毫米);
 l_0 ——试样原始的标距长度 (毫米)。

强度指标的测定, 不受试样长短的影响, 而伸长率, 则随标距的增加而减小, 所以对同一材料, 短试样 ($l_0 = 5d_0$) 所测得的伸长率, 比长试样 ($l_0 = 10d_0$) 测得的要稍大一些, 其

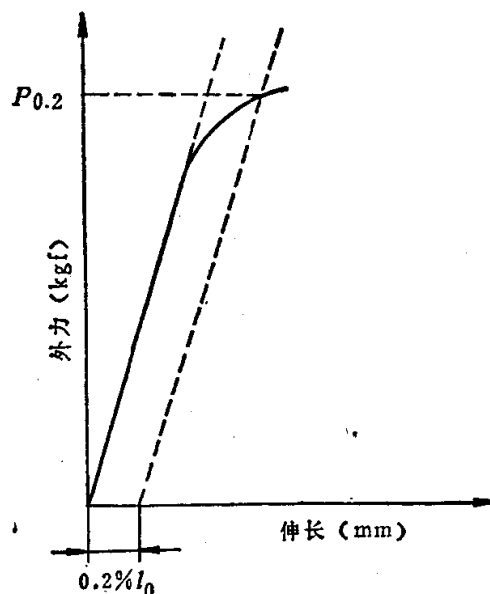


图1-4 条件屈服点的求法

值因钢种不同而异。因为长试样、短试样拉断后都有一颈缩部分，把颈缩部分平均到短试样中，比在长试样中占有较大的比例。因此，对于伸长率，必须注明是短试样 (δ_5)，还是长试样 (δ_{10})，若不加注明，则是指长试样的伸长率。

2. 断面收缩率的计算 断面收缩率是试样截面的缩减量与原截面之比，即

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中 ψ ——断面收缩率 (%)；

F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)；

F_1 ——试样断后截面积 (毫米²)。

根据金属材料的伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 的大小，就很容易确定各种材料的塑性好坏。

δ 、 ψ 的数值越大，表示材料塑性越好。例如：工业纯铁 $\delta_5 \approx 40\%$ ， $\psi \approx 80\%$ ；而 45 钢的 $\delta_5 \approx 20\%$ ， $\psi \approx 60\%$ ，从这些数据明显地看出工业纯铁的塑性比 45 钢要好。

§1-2 硬度及其测定

硬度是衡量金属材料软硬的一个指标。

硬度的含义，随着试验方法的不同而异。因此，硬度这一概念，没有全面而确切的定义。在生产实际中，用得最多的是压入硬度法。根据此法，硬度的含义是材料表面抵抗硬物压入时所引起塑性变形的抗力。若用同样大小的外力（或称负荷），将同样大小的硬物，分别压入铁和铜的表面，则发现铁的压痕比铜的小，这说明铁对塑性变形的抗力比铜大，也就是铁比铜硬度高。

由于硬度试验方法比较简单易行，不必破坏工件，适于成批检验零件，所以应用十分广泛。仅汽车工业中，就有四百多种零件要测定硬度。硬度试验是产品质量检查、制定合理工艺的重要试验方法之一。

测试硬度的方法很多，在工厂里大多数采用各种硬度试验机进行测定。常见的硬度试验方法有：布氏、洛氏、维氏和肖氏等等，其中工厂用得最多的是布氏法和洛氏法。下面将分别加以介绍。

一、布氏硬度

布氏硬度是应用很广泛的一种硬度试验法。

布氏硬度的测定原理：在一定直径 D 的钢球上，加上一定大小的负荷（外力） P ，压入被测金属表面，见图 1-5。根据金属表面压痕的表面积 F 所承受的平均应力，作为硬度的计算指标。布氏硬度的符号用 HB 表示，其单位为 公斤力/毫米²，一般可不标出。

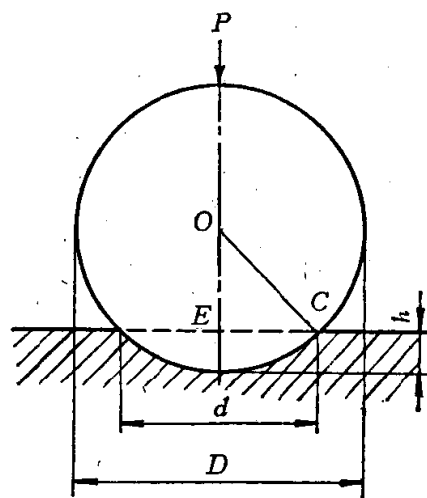


图1-5 布氏硬度试验原理图

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi D h} \quad (\text{公斤力/毫米}^2) \quad (1)$$

式中 P ——负荷（公斤力）；

F ——压痕表面积（毫米²）；

D ——钢球直径 (毫米);

h ——压痕深度 (毫米)。

由于测量深度 h 比较困难, 且测量的准确度也较差, 因此一般都测量压痕直径 d , 再算出压痕表面积, 以求得 HB 值。

从图 1-5 中, 根据直角三角形 OCE 的关系可求得 h 与 d 、 D 的关系:

$$\begin{aligned}\overline{OE}^2 &= \overline{OC}^2 - \overline{CE}^2 \\ \left(\frac{D}{2} - h\right)^2 &= \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \\ \frac{D}{2} - h &= \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2} \\ h &= \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}\end{aligned}\quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 即得

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{公斤力/毫米}^2) \quad (3)$$

从式 (3) 可以看出, 当负荷 P 、钢球直径 D 一定时, 压痕直径 d 越小 (即 h 越小), HB 值越大, 也就是硬度越高。相反, d 越大, 则 HB 值越小, 硬度越低。所以, 只要测量出压痕直径, 即可计算出 HB 值。由于计算比较麻烦, 在生产中可从表中查得 (见附表 1)。

在工业生产中遇到的金属有硬有软, 工件有薄有厚, 有大有小, 如果只采用一种负荷 P 和钢球直径 D , 就会出现对硬的材料合适, 而对软材料不合适, 因钢球压入太深, 可能影响硬度值的正确性; 对厚的材料合适, 对薄的材料可能发生压透的现象。因此在生产中应采用大小不同的负荷和钢球直径。问题在于, 对于同一材料, 当采用不同的负荷 P 和钢球直径 D 进行试验时如何能保证得到同一的布氏硬度值。要解决这个问题, 需要运用相似原理。

图 1-6 表示两个直径不同的钢球 D_1 和 D_2 在不同负荷 P_1 和 P_2 下压入金属表面的情况, 由图可知, 如果要得到相同的 HB 值, 则必须使 P 和 D 之间维持某一制约关系, 以保证所得到的压痕形状保持几何相似的关系, 也就是要保证所得的压入角 φ 都相等。 P 和 D 这一相互制约关系可以根据 φ 角保持不变的条件, 将 φ 代到公式 (2) 中求出。

从图 1-6 中可以看到 d 和 φ 的关系是

$$\frac{D}{2} \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d}{2} \quad \text{或} \quad d = D \sin \frac{\varphi}{2}$$

以此代入公式 (3), 得

$$HB = \frac{P}{D^2} \left[\frac{2}{\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] \quad (4)$$

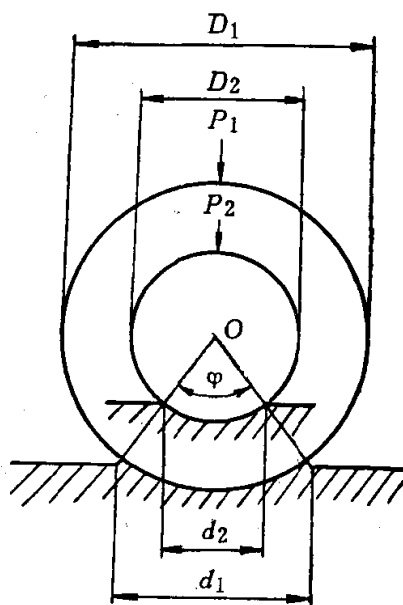


图1-6 压痕相似原理

公式(4)说明, 假若压入角 φ 为一常数, 则对于同一材料所得的 HB 值也为一常数。因此, $\frac{P}{D^2}$ 也应保持为常数。故以不同的 P_1 、 P_2 及 D_1 、 D_2 代入式(4)时, 得出

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \dots = \text{常数}$$

这就是 P 和 D 的制约关系。因此, 不论采用怎样大小的负荷和钢球, 只要能满足 $\frac{P}{D^2} = \text{常数}$ 时, 则对同一材料而言, 所得 HB 值是一样的; 对不同材料来说, 所得 HB 值是可以进行比较的。

布氏硬度试验用的钢球直径, 规定有 10 毫米、5 毫米和 2.5 毫米三种。 $\frac{P}{D^2}$ 的比值规定有 30、10 和 2.5 三种, 根据金属种类及硬度不同进行选择, 可参看表 1-2。

在试验时, 钢球压入试样表面后, 为了使塑性变形能够充分进行, 负荷必须保持一定时间。布氏硬度试验时, 钢球直径 D 、负荷 P 与负荷保持时间, 应根据试样材料的种类、硬度和厚度按国标 GB231-63 规定从表 1-2 中选择。

试验后压痕直径的大小应在 $0.25D < d < 0.6D$ 范围内, 否则试验结果无效, 应换其它负荷或钢球直径重作试验。

布氏硬度试验所测得的结果用 HB 表示。若 $D = 10$ 毫米, $P = 3000$ 公斤力, 负荷保持时间 10 秒, 所测得的硬度是 HB250, 这就表示硬度值为 250。

在其它试验条件下, 符号 HB 应以相应的数字注明球径、负荷大小和负荷保持时间, 例如 HB_{5/250/30}100, 表示用 $D = 5$ 毫米的钢球, $P = 250$ 公斤力, 负荷保持时间为 30 秒所测的布氏硬度值为 100。

表1-2 布氏硬度试验规范

金属种类	布氏硬度值 范 围 HB	试 样 厚 度 (毫米)	负荷 P 与钢 球直径 D 的 相 互 关 系	钢球直径 D (毫米)	负 荷 P (公斤力)	负 荷 保 持 时 间 (秒)
黑色金属	140~450	6~3	$P = 30D^2$	10.0	3000	10
		4~2		5.0	750	
		< 2		2.5	187.5	
	< 140	> 6	$P = 10D^2$	10.0	1000	10
		6~3		5.0	250	
		< 3		2.5	62.5	
有色金属	> 130	6~3	$P = 30D^2$	10.0	3000	30
		4~2		5.0	750	
		< 2		2.5	187.5	
	36~130	9~3	$P = 10D^2$	10.0	1000	30
		6~3		5.0	250	
		< 3		2.5	62.5	
	8~35	> 6	$P = 2.5D^2$	10.0	250	60
		6~3		5.0	62.5	
		< 3		2.5	15.6	

布氏硬度适用于测定 HB < 450 的金属材料, 如灰铸铁、有色金属和未经淬火的各种钢。

布氏硬度试验的优点: 因压痕面积较大, 能反映较大范围的平均硬度、具有很高的测量精度和试验数据稳定。

布氏硬度试验的缺点：操作较缓慢，压痕大，对大量逐件检验的产品不适用。由于钢球本身变形，不宜测定 $HB > 450$ 的材料。只有使用特殊材料制成的压头，比如 WC 的压头，才可以对 $HB > 450$ 的材料进行测试。

在工厂日常检验大锻件、大铸件和钢材时，为了避免切取试样的困难和钢材的浪费，多采用便携式轻便的布氏硬度试验器。应用较广的是锤击式简易布氏硬度试验器，见图 1-7 所示。

试验时用手锤敲击杆顶端一次，这样，钢球将在试样表面上及标准试块上同时各打上一个压痕，测量两个压痕的直径，根据标准块的已知布氏硬度值和两压痕的直径，可由下式算出工件 HB 值：

$$HB = HB_0 \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}}$$

式中 HB_0 ——标准试样的硬度；

D, d_0, d ——分别为钢球直径、标准试样及工件上压痕的直径。

一般可以从预制的表里查出试件的布氏硬度值。这一方法非常方便实用，不过试验的误差较大，最大误差可达 $\pm 7\%$ 。

二、洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前工厂应用最广泛的试验方法。

洛氏硬度试验方法与技术条件可按国标 GB230-63 进行。

洛氏硬度测定原理：以规定的钢球（ $\phi 1.588$ 毫米即 $\frac{1}{16}$ 英寸）或以锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体为压头，先加以初负荷 P_0 ，然后加以主负荷 P_1 ，垂直压入试样表面之后，卸除主负荷，在保留初负荷 P_0 的情况下，用所测得的主负荷所引起的残余压入深度来表示硬度，如图 1-8 所示。

图 1-8 是洛氏硬度试验过程示意图。 h_0 为初负荷作用下的压入深度。为了消除工件表面光洁度对硬度的影响，压头在 1-1 位置。 h_1 为初负荷和主负荷作用下的压入深度，压头在 A-B 位置。 h_2 为卸除主负荷后由于金属弹性变形而恢复的深度，压头在 2-2 位置。这样，在主负荷作用下经弹性恢复后的压入深度 $h = (h_1 - h_2 - h_0)$ 。由于洛氏硬度以压痕深度为计量硬度值的基础，所以金属越硬，压痕深度越浅；金属越软，压痕深度越深。为了照顾到习惯上数值越大，硬度越高的概念，采用自一常数 K 减去 h ，并规定每 0.002 毫米压痕深为一硬度单位，用符号 HR 表示。洛氏硬度值为：

$$HR = \frac{K - h}{C}$$

式中 K 为常数。用金刚石锥作压头时 $K = 0.2$ 毫米；用钢球做压头时 $K = 0.26$ 毫米。

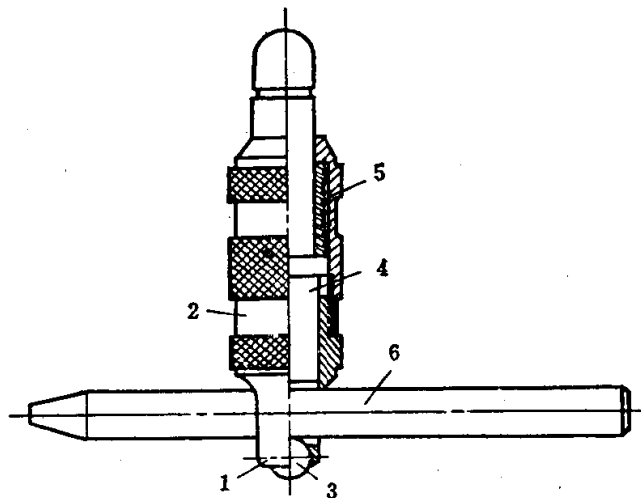


图1-7 锤击式简易布氏硬度试验器

1—球帽 2—握持器 3—钢球 4—锤击杆
5—弹簧 6—标准试样

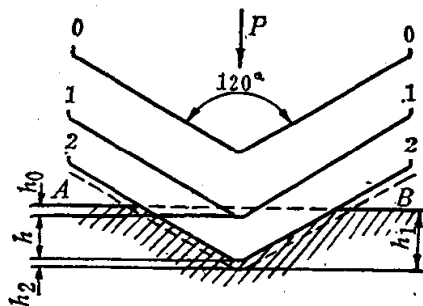


图1-8 洛氏硬度试验示意图

$C = 0.002$ 毫米。为了用同一试验机测定从极软到极硬材料的硬度，采用了不同的压头和总负荷，因而组成了不同洛氏硬度标尺，每种标尺用一个字母加在 HR 或 R 之后，如 HRA、HRB、HRC 或 RA、RB、RC。其中 HRB 和 HRC 两标尺为试验钢铁硬度时最常使用的。其计算公式只要将常数代入上式即得：

$$\text{HRA} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

$$\text{HRC} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

$$\text{HRB} = 130 - \frac{h}{0.002}$$

洛氏硬度试验时，其硬度值可直接从表盘指示器上直接读出，此值为一无名数。各种洛氏硬度值符号及试验条件和应用见表 1-3。

表1-3 洛氏硬度的硬度级规定

标尺符号	压头类型	总负荷 (公斤力)	应用范围	应用举例
HRA	金刚石锥	60	70~85	碳化物、硬质合金、表面淬火钢等
HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 钢球	100	25~100	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	金刚石锥	150	20~67	淬火钢、调质钢等

由于上述标准洛氏硬度所用负荷较大，不宜用来测极薄工件及氮化层、氰化层、金属镀层等的硬度。为了解决表面硬度的测定，应根据洛氏硬度原理设计制造出表面洛氏硬度机，其初负荷为 3 公斤力，总负荷为 15、30、45 公斤力三种，以每 0.001 毫米压痕深度为一个硬度单位。常数 K 为 0.1 毫米，根据压痕深度 h 代入公式

$$\text{HR} = \frac{K - h}{C}$$

则得

$$\text{HR}_{\text{表面}} = 100 - \frac{h}{0.001}$$

表面洛氏硬度标尺符号见表 1-4。

表1-4 表面洛氏硬度级别规定

HB 标尺符号 总负荷(公斤力)	压头及符号 120° 金 刚 石 圆 锥 N	$\phi 1.588\text{毫米}$ $\left(\frac{1}{16}\right)''$ 钢球 T
15	15-N	15-T
30	30-N	30-T
45	45-N	45-T

表面洛氏硬度可用于测定氮化层、渗碳层、金属镀层和各种薄片材料，以及小面积试样或要求遗留压痕极小的试样。对于较硬的材料，可用金刚石压头，较软的材料如青铜、黄铜

等可用钢球压头。硬度值的表示法如下：从表 1-4 可知，若使用 $\phi 1.588$ 毫米钢球压头及 30 公斤力总负荷进行试验，所得硬度值为 60，则以符号 $HR_{30T}60$ 表示。

洛氏硬度试验如在小直径圆柱形或圆球形表面进行时，试验结果需要加以校正，校正可通过试验获得。图 1-9 为圆柱形试样洛氏 HRC 校正曲线。

例如在 $\phi 10$ 毫米圆柱形工件上测得 HRC 为 38，则从图 1-9 中横坐标为 38 处向上与线 6 相交，交点的纵坐标为 2.2，就是应加的校正数，则该硬度值应为 $38 + 2.2 = 40.2$ 即 HRC40.2。

洛氏硬度试验优点是操作迅速简便，压痕较小，可在工件表面进行试验，可测从极软到极硬的材料，也可测定较薄材料的硬度。其缺点是因为压痕较小，代表性差，所测硬度值的重复性差，即分散度较大，不适于测定灰铸铁的硬度；因不同标尺试验时压痕不成几何相似，所以硬度值不可相互比较。

三、维氏硬度、显微硬度

布氏硬度试验只可用来测定硬度小于 HB450

的材料。洛氏硬度试验虽可用来测定从极软到极硬材料的硬度。但不同标尺试验所得硬度值不能相互比较。为了可以测定从极软到极硬材料有一个连续一致的硬度标尺，因而制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度的测定原理基本上和布氏硬度相同，也是以压痕表面积上平均应力作为硬度值。所不同的是维氏硬度压头不是钢球，而是一个夹角 $\varphi = 136^\circ$ 的金刚石四棱锥体。维氏硬度试验压头及压痕如图 1-10 所示。试验时，在一定负荷 P 作用下压入被测材料，经一定时间后卸荷，然后测出压痕对角线长度 d ，计算出压痕表面积 F ，然后以单位面积上的应力值来表示维氏硬度值。即

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 HV——维氏硬度符号 (公斤力/毫米²)；

P ——负荷 (公斤力)；

F ——压痕表面积 (毫米²)；

d ——压痕对角线平均长度 (毫米)。

维氏硬度试验所用负荷 P 的大小，

从 1~120 公斤力内可根据试样大小、厚薄和其它条件不同进行选用。负荷的选择原则是根

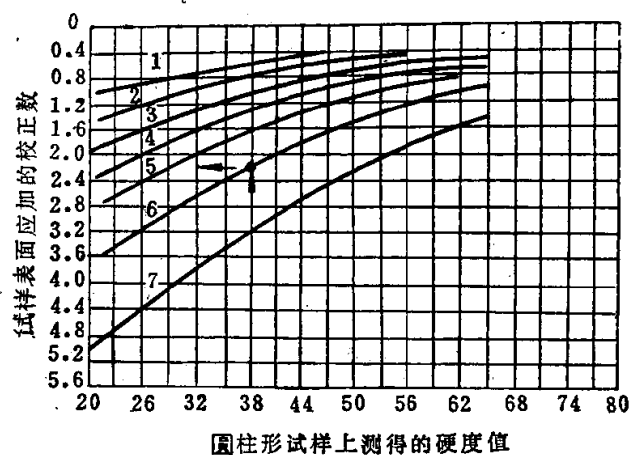


图1-9 圆柱形试样的HRC校正曲线

1—试样 $\phi 38$ 毫米 2—试样 $\phi 25$ 毫米 3—试样 $\phi 19$ 毫米 4—试样 $\phi 16$ 毫米 5—试样 $\phi 13$ 毫米 6—试样 $\phi 10$ 毫米 7—试样 $\phi 6.4$ 毫米

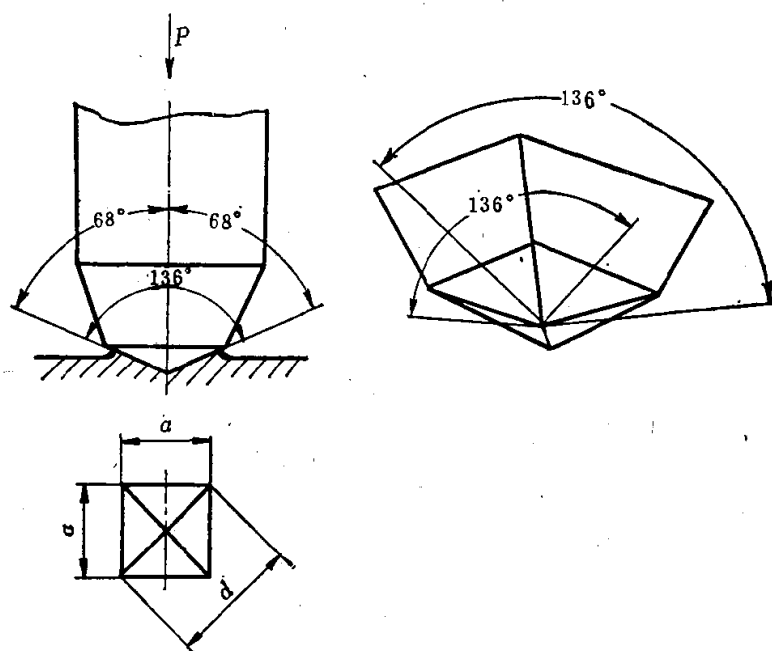


图1-10 维氏硬度试验压头及压痕示意图

据工件厚度、硬度层深度（如渗碳层、氮化层等）和材料预期硬度而尽可能选取较大的负荷，这是因为负荷选得太小时，一方面受工件表面因素影响较大，另一方面压痕太小，在测量上误差大，造成测定数值不可靠。但要注意，当试验硬度大于 HV500 以上的材料时，所加负荷不宜大于 50 公斤力，以保护金刚石压头。对于 0.05 毫米左右的氮化层或 0.05~0.1 毫米的渗碳层以采用 5~10 公斤力负荷为宜。通常用得最多的负荷是 5、10、20、30、50、100 公斤力等几种。压痕对角线长度是用附在试验机上的测微计测量的。测量时应测出压痕两根对角线，求其平均值作为压痕对角线长度 d ，单位为毫米。得出 d 后一般可以从已计算好的表中查得维氏硬度值（见附表 2），维氏硬度值范围可从 10~1000。

维氏硬度试验可以测定黑色金属、有色金属、硬质合金及表面渗碳、氮化层的硬度。

维氏硬度试验的缺点，是硬度值尚需通过测量压痕对角线后通过计算或查表获得，操作不如洛氏硬度计方便迅速。

当维氏硬度的负荷小于 1 公斤力时，可以用来测定金属显微组织中一个极小范围内的硬度，把这种硬度称为显微硬度，用符号 HM 表示。则

$$HM = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (\text{公斤力/毫米}^2)$$

式中 P ——负荷（克力）；

d ——压痕对角线平均长度（微米）。

显微硬度试验所用负荷在 2~200 克力范围内，一般使用的负荷为 2、5、10、20、50、100 及 200 克力几种。经试验后测出对角线长 d ，可用公式计算或根据负荷和 d 的长度从有关表中查得硬度值。

四、肖氏硬度

肖氏硬度又名回跳硬度，它是动力硬度试验方法之一。

肖氏硬度试验法，是用一定重量的标准冲头（底端镶有金刚石的圆柱体）或钢球，从一定高度自由落于被测金属表面，以冲头回跳的高度来测量硬度，冲头回跳越高，金属材料硬度越高。反之，冲头回跳越低，说明消耗于塑性变形的功愈大，则硬度越低。按其本质来说，肖氏硬度试验法是利用金属材料在一定负荷条件下的弹性变形能来决定硬度的，以符号 HS 表示。

肖氏硬度的刻度，是将冲头从一定高度落在淬火工具钢表面上回跳的高度定为 100，然后将此高度等分为 100 格，并将刻度延伸到 140 格，每一格为一个肖氏硬度单位。

肖氏硬度试验法有其独特的优点，它是一种轻便的手提式硬度试验机，使用方便，可以带到现场测量大件制品，并且不损坏表面。如大型冷轧辊等的验收标准就用 HS。其缺点是试验结果的准确性受操作者的影响颇大，所以仅在生产中用来测试大件的表面硬度，在研究工作中应用较少。

五、硬度与抗拉强度的换算

根据我国 1973 年发表的各种钢种的硬度和抗拉强度之间的换算公式，制定了我国的《黑色金属硬度及强度换算表》，附表 3 是部分摘录。

为了便于参考，下面引入一些较简单的硬度和强度之间的换算公式。

未淬硬钢： $\sigma_b = 0.362HB$ $HB < 175$

$\sigma_b = 0.345HB$ $HB > 175$

$$\sigma_b = 2.64 \times 10^3 / (130 - \text{HRB}) \quad \text{HRB} < 90$$

$$\sigma_b = 2.51 \times 10^3 / (130 - \text{HRB}) \quad 100 > \text{HRB} > 90$$

碳钢: $\sigma_b = 2.5 \text{HS}$

$$\sigma_b = 51.32 \times 10^4 / (100 - \text{HRC})^2 \quad \text{HRC} < 10$$

灰铸铁: $\sigma_b = (\text{HB} - 40) / 6$

铸钢: $\sigma_b = (0.3 \sim 0.4) \text{HB}$

$$\sigma_b = 8.61 \times 10^3 / (100 - \text{HRC}) \quad \text{HRC} > 40$$

现有的一些换算公式和对照表, 都只是根据对同类金属材料, 在相同状态下和一定硬度范围内进行比较试验, 经过分析比较而归纳出来的, 它们有一定的实用价值, 但要求准确数值时仍需通过试验测得。

§1-3 冲击韧性及其测定

机械零件在工作过程中, 往往要受到冲击负荷的作用。所谓冲击负荷就是以很大的速度作用于零件上的负荷。例如: 内燃机活塞与连杆之间的活塞销、锻锤的锤杆、冲床的冲头等在工作时所受的即冲击负荷。因此, 对这类零件的性能要求不能以强度指标来定, 而要求它们必须具有足够抵抗冲击负荷的能力, 即冲击韧性。

为了充分发挥材料承受冲击负荷的能力, 对材料的冲击性能进行了广泛的研究。目前应用最普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验。

一、冲击试样

国标 GB229-63 规定采用两支点式加荷, 并以梅氏试样为标准试样, 如图 1-11 所示。由于试样尺寸及缺口型式均影响到试验结果, 为了使结果可以互相比较, 试样必须严格标准化。

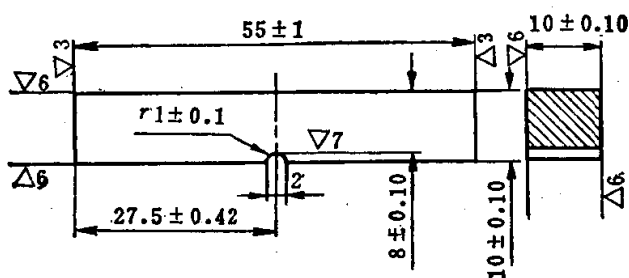


图1-11 冲击试样

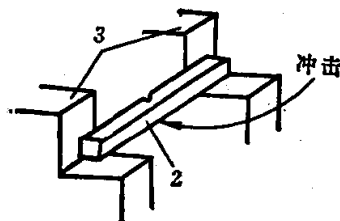


图1-12 试样安放

2—试样 3—试样支承面

二、冲击试验

目前摆锤冲击试验系将尺寸和缺口型式一定的标准试样置于冲击试验机支坐上, 如图 1-12 所示。然后将具有定位能的重锤释放, 将试样冲断, 如图 1-13。击断试样所作的功 A_K (公斤力·米) 除以缺口截面积 F_0 (厘米²), 所得之商称为冲击韧性值, 以符号 a_K 表示, 即

$$a_K = \frac{A_K}{F_0} = \frac{G(h_1 - h_2)}{F_0} \quad (\text{公斤力} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2)$$

式中 G ——重锤的重量 (公斤力);

h_1 ——摆锤举起的高度 (米);

h_2 ——冲断试样后摆锤回升的高度 (米)。

在试验时 A_K 值可直接从试验机的刻度盘上读出。代入上式即可求得 a_K 值。

工程技术界以前习惯地认为 a_K 值是材料韧、脆程度及承受冲击负荷的抗力指标。实际这一习惯看法很不确切。同一种材料进行冲击试验时消耗的功 A_K ，在很大程度上取决于参加塑性变形的金属体积，而不取决于缺口截面面积 F_0 ，故 A_K 除以 F_0 是不合适的。此外，缺口截面应力分布也是不均匀的，从这一角度看用 F_0 去平均 A_K 也不合适。取 $\frac{A_K}{F_0}$ 还会产生一种错误的印象：以为消耗的功和缺口的截面面积有比例关系，实际这是一个误解，但因有很多现成的数据不好改动，也就习惯地沿用下来。但现在有些国家已不再取 a_K ，而直接用 A_K 来表示试验结果，这样既简便又不至产生错觉。

对于承受大能量冲击的零件， a_K 值可以作为材料对冲击负荷的抗力指标，但处于这种工作条件的零件甚少。多数零件为承受小能量多次重复冲击，所以用 a_K 值来衡量其抗力指标是不适宜的。

那么大能量摆锤弯曲冲击试验有什么实际意义呢？长期生产实践表明， a_K 值对材料的品质、宏观缺陷和显微组织的差异十分敏感，因而 a_K 值可用来控制冶炼、压力加工、热处理、半成品及成品的质量；不同温度下作冲击试验可得 a_K 值对温度的关系曲线，以此可评定材料的冷脆性等。所以大能量冲击还得到广泛应用。

三、冲击韧性——温度曲线

在低温下，钢的冲击韧性显著降低，处于脆性状态，称为钢的冷脆现象。它在实用上有很大的意义，特别是对于寒冷地区和低温下工作的钢件。

冲击韧性随温度变化的情况可从图1-14看出，这种关系曲线分成明显的三部分：冲击值随温度变化不大，因而和横座标近乎平行的低冲击值部分和高冲击值部分，以及随温度的降低冲击值急剧降低的中间部分。冲击值高的部分的试样断口一般为韧性断口（有塑性变形的断口）；冲击值低的部分的试样则为脆性断口（无明显塑性变形的断口）。冲击值变化极大的中间部分的试样断口，部分为脆性的，部分为韧性的。因此这部分的温度叫做脆性转变温度范围。这一温度范围，因钢种、显微组织、试验条件等的不同而有很大的变动。脆性转变温度范围越低的金属，越能在低温下承受冲击负荷。因此，脆性转变温度的高低作为金属材料的质量指标之一。

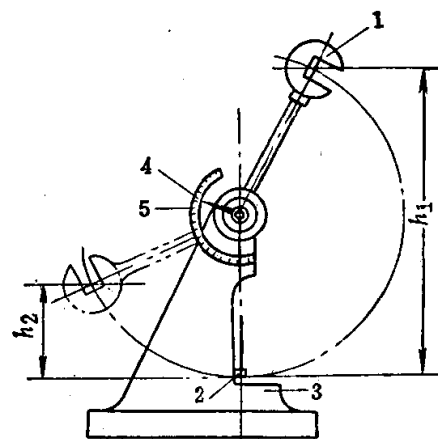


图1-13 冲击试验机

1—重锤 2—试样 3—支承面 4—指针 5—刻度盘

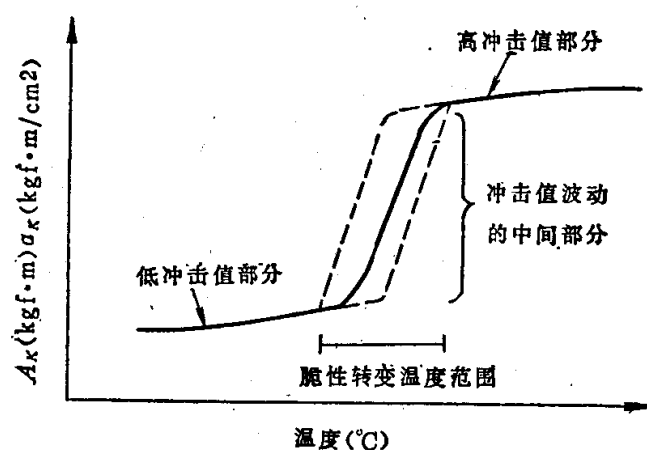


图1-14 冲击值——温度曲线示意图

四、小能量多冲简介

钢材在实际使用时，在冲击负荷下工作的结构和零件，很少因受一次超荷冲击而遭破坏的。绝大多数情况下所承受的冲击负荷是属于小能量多冲负荷。在此负荷下遭致破断时，其破断的过程是由于多次冲击损伤积累所导致的裂缝的发生和发展的过程，这与大能量一次冲击破断的过程是不相同的。因此，正确衡量材料承受冲击负荷的抗力指标，应该采用小能量多冲的抗力，而不该是一次冲击试验得出的冲击韧性值 a_K 。

小能量多冲试验采用连续试验机，如图 1-15 所示。试样一端由弹簧顶针顶住，另一端由橡皮与转轴相连。型号为 DC-150 型试验机的能量范围，一般为 14~150 公斤力·厘米，试验机冲击频率有 450 次/分及 600 次/分两种，每冲击一次后试样转动一个角度，转动的角度可按需要进行调节。对一定尺寸的试样进行多次冲击试验。每确定一个冲击能量 A ，就得到一个相应的冲击周次（冲击寿命） N 。如果系统地采用不同的冲击能量，就可以得到一系列相应的冲击周次，这样可绘制出所试材料的冲击能量 A ——破断周次 N 的曲线，如图 1-16 就是根据多次冲击试验所作的曲线。

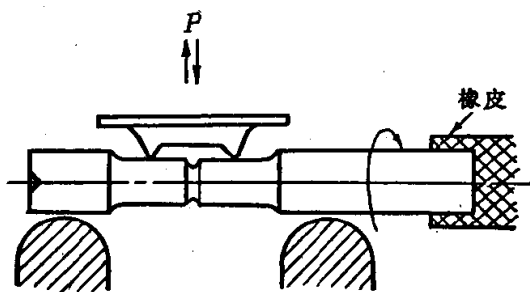


图1-15 试样安装示意图

由图 1-16 可知，冲击能量高时，材料的多冲抗力主要取决于材料的韧性和塑性，而当冲击能量低时，则材料的多冲抗力主要取决于材料的强度。

某厂的一吨模锻锤锤杆（直径 120 毫米，长 2 米）根据过去资料经热处理后硬度 HB227~238， $a_K = 13$ 公斤力·米/厘米²，在使用中常常折断。寿命仅一个月左右。根据小能量多冲原理，对锤杆的热处理工艺进行了改进，使锤杆硬度提高到 HRC45， a_K 降到 4 公斤力·米/厘米² 时，经使用寿命提高到八个月以上。黄河牌载重汽车后半轴调质硬度为 HRC37~40 时，行程十万公里，当调质硬度达 HRC40~44 时，行程可达四十万公里。这是由于锤杆、汽车后半轴承受的是小能量多次冲击，而小能量多次冲击抗力是以材料强度为主，要求一定的塑性和韧性，所以，适当提高强度、硬度后，虽然韧性、塑性有所下降，但使用寿命反而提高了。多次冲击破断抗力比较接近于多数零件实际工作条件下的破坏规律。

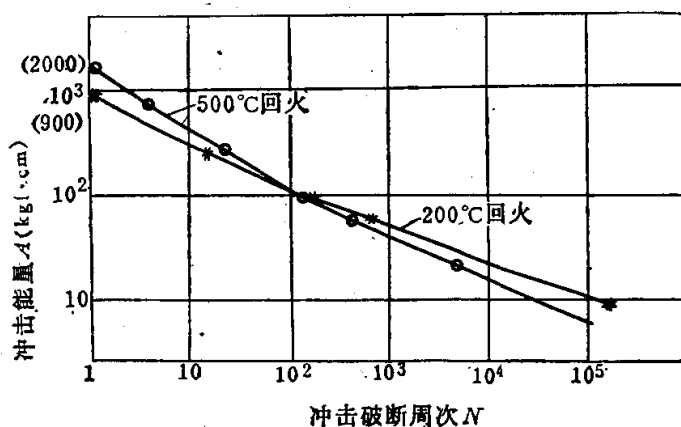


图1-16 典型的多次冲击能量 A ——冲击破断周次 N 曲线

第二章 金属的结晶

物质由液态转变为固态的过程称为“凝固”。

固态物质按其原子（或分子）的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。在晶体中，其原子（或分子）是按一定的几何规律作周期性的排列的，而非晶体就不具有这一特点。所有金属和合金在固态时一般都是晶体，所以液态金属冷至熔点以下时转变为固态晶体的凝固过程称为结晶。

金属制件，除了少量粉末冶金产品以外，都需要经过熔炼和浇注的工序。有的是将金属熔炼之后浇成铸锭，然后通过压力加工制成各种形状和尺寸的材料供给使用，或者进一步机械加工成零件。有的则是将金属熔炼或重熔后浇入铸型，直接铸成各种形状和尺寸的工件。因此，绝大多数的金属制件，都要经过由液态转变为固态的结晶过程。而金属由液态结晶时所形成的内部组织（铸态组织）与各种性能有密切的关系，它不仅影响铸件的性能，还影响各种锻（轧）件的工艺性能和使用性能。总之，铸态组织是金属的原始组织，此后金属可能经过一系列的使组织发生变化的加工过程，但它的内部组织仍与原始组织有一定的联系。为了获得良好的原始组织，必须了解金属从液态结晶为固态晶体的基本规律。

工业上使用的绝大多数金属是合金。由于纯金属和合金的结晶过程基本上遵循着同样的规律，为了由浅入深地进行讨论，本章首先阐述纯金属的结晶。

§2-1 金属结晶的基本规律

一、热分析实验与冷却曲线

纯金属的结晶过程是在一个恒定温度——结晶点（或熔点）下进行的。金属的结晶点可用热分析实验来测定。

图 2-1 是热分析装置示意图。将纯金属加热熔化成液态，然后缓慢冷却。在冷却过程中

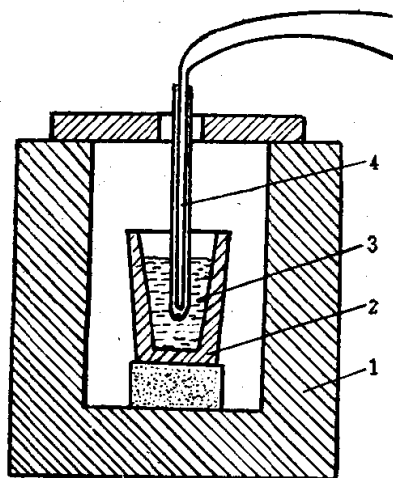


图2-1 热分析装置示意图

1—电炉 2—坩埚 3—金属 4—热电偶

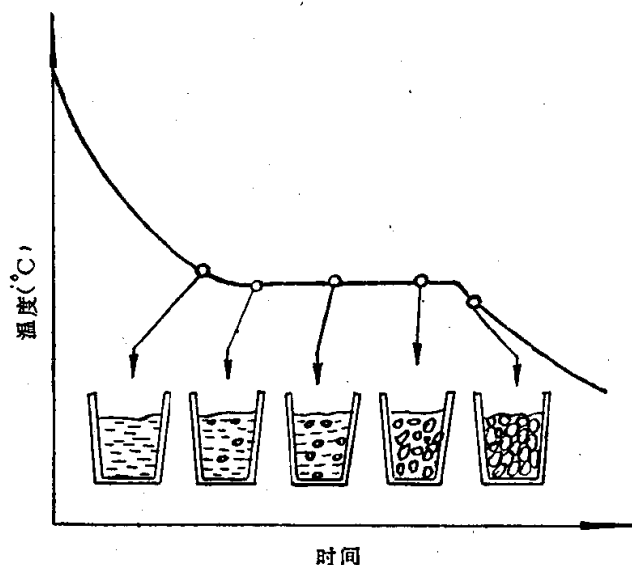


图2-2 纯金属冷却曲线的绘制

每隔一定的时间测量一次温度，最后将实验结果绘制在温度——时间座标中，便获得如图 2-2 所示的纯金属冷却曲线。

由冷却曲线可见，液态金属随着冷却时间的增长，温度将不断降低，但当冷却到某一温度时，冷却时间虽然增长，但温度并不下降，在曲线上出现了一个平台，这个平台所对应的温度就是纯金属进行结晶的温度（结晶点）。

纯金属结晶时，在冷却曲线上出现一个平台的原因，是由于金属在结晶过程中会释放出热量，这就是结晶潜热。因此，当液态金属结晶时，结晶潜热补偿了冷却时散失在空气中的热量，使温度并不随冷却时间的增长而下降，直到金属结晶终了后，温度才继续下降。

二、过冷现象

图 2-3 所示的曲线 a)，为纯金属理论结晶时的冷却曲线。 T_s 就是纯金属的理论结晶温度。

实验表明，纯金属的实际结晶温度 T_n 总是低于温度 T_s （如图 2-3 中曲线 b）所示），这种现象叫做过冷现象。 T_n 与 T_s 之间的差值 ΔT ，叫做过冷度，即 $\Delta T = T_s - T_n$ 。

实验测出，过冷度不是一个恒定值。同一金属从液态冷却时，冷却速度越大，结晶时的过冷度也越大。另外，它还与金属本性、纯度等许多因素有关。必须指出，实际上金属总是在过冷的情况下结晶的，故过冷是金属结晶的必要条件。

某些金属（如铋）的过冷度很大，因此一开始结晶就能放出大量的潜热，使温度上升接近于 T_s 温度，然后维持在恒温直至结晶终了，如图 2-3 中曲线 c）所示。

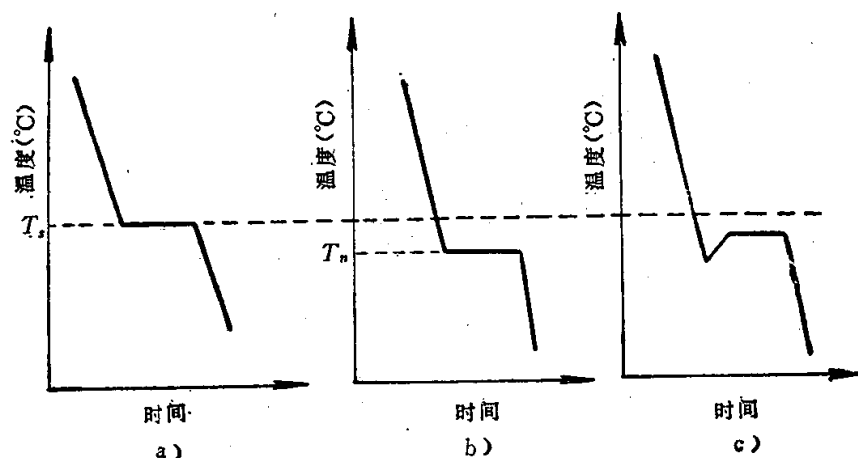


图2-3 结晶时的冷却曲线

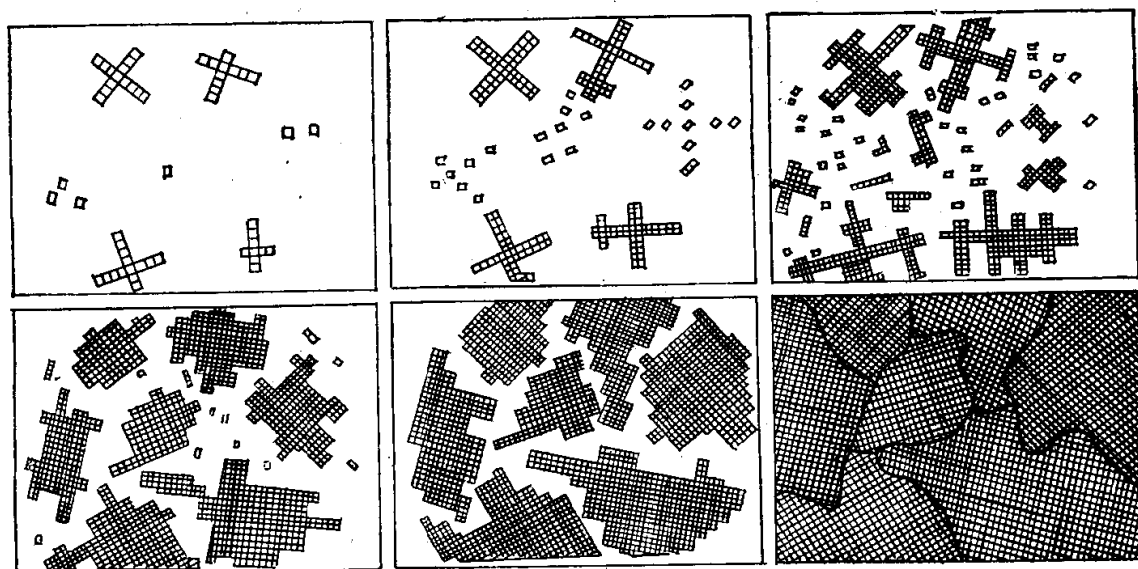


图2-4 金属的结晶过程示意图