

中等专业学校试用教材

# 金属学及热处理

黑龙江机械制造学校主编

高等教育出版社

中等专业学校试用教材

金属学及热处理

黑龙江机械制造学校主编

\*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17 插页 1 字数 390,000

1978年12月第1版 1986年2月第7次印刷

印数 158,001—157,200

书号 15010·0104 定价 2.35元

## 编 者 的 话

本书是根据第一机械工业部一九七七年召开的中等专业学校教材座谈会的精神及一九七八年三月在山东召开的中等专业学校铸造专业教材会议通过的编写大纲编写的。

全书共分十三章。内容包括金属学基础、热处理原理以及各种碳钢、合金钢、铸铁、非铁金属等金属材料的热处理工艺和性能,着重阐述了金属材料的化学成分、组织与各种性能之间的基本规律,以及提高金属材料性能,充分挖掘材料潜力的途径。

本书可作为中等专业学校铸造、锻压、焊接专业的试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书由黑龙江机械制造学校主编、谭志具体负责。参加编写的还有北京机械学校杨全义、河北省机电学校汪守朴、咸阳机器制造学校周晓明。

黑龙江机械制造学校、吉林省工业学校、长春市工业学校、沈阳市机电学校、山东省机械工业学校等校有关教师参加了审稿工作。在编审过程中还得到了许多学校、工厂、科研单位的大力支持和热情帮助。在此一并表示衷心感谢。

由于编者业务水平有限,编写时间仓促,书中难免存在不少缺点和错误,诚恳地希望读者批评指正。

编 者

一九七八年十月

# 目 录

<p><b>常用符号表</b> ..... i</p> <p><b>第一章 金属材料的机械性能</b> ..... 1</p> <p>    § 1-1 强度、塑性及其测定 ..... 1</p> <p>    § 1-2 硬度及其测定 ..... 5</p> <p>    § 1-3 关于疲劳的概念 ..... 9</p> <p>    § 1-4 冲击韧性及其测定 ..... 10</p> <p><b>第二章 金属的晶体结构</b> ..... 15</p> <p>    § 2-1 一般概念 ..... 15</p> <p>    § 2-2 常见金属的晶体结构 ..... 17</p> <p>    § 2-3 实际金属的晶体结构 ..... 23</p> <p><b>第三章 金属的结晶</b> ..... 29</p> <p>    § 3-1 金属结晶的基本规律 ..... 29</p> <p>    § 3-2 结晶过程的理论分析 ..... 30</p> <p>    § 3-3 晶粒大小及其控制 ..... 37</p> <p>    § 3-4 铸锭的组织 ..... 38</p> <p>    § 3-5 金属的同素异构转变 ..... 40</p> <p><b>第四章 合金的固态相结构</b> ..... 42</p> <p>    § 4-1 固溶体 ..... 42</p> <p>    § 4-2 金属化合物 ..... 46</p> <p>    § 4-3 合金组织 ..... 49</p> <p><b>第五章 二元合金状态图</b> ..... 50</p> <p>    § 5-1 二元合金状态图的测定 ..... 50</p> <p>    § 5-2 匀晶状态图 ..... 51</p> <p>    § 5-3 共晶状态图 ..... 56</p> <p>    § 5-4 包晶状态图 ..... 63</p> <p>    § 5-5 其他类型状态图 ..... 66</p> <p>    § 5-6 二元合金状态图分析法 ..... 67</p> <p>    § 5-7 合金的性能与合金状态图的关系 ..... 70</p> <p><b>第六章 铁碳合金状态图</b> ..... 73</p> <p>    § 6-1 铁碳合金的基本相 ..... 73</p> <p>    § 6-2 铁碳合金状态图分析 ..... 75</p> <p>    § 6-3 典型合金的结晶过程及其组织 ..... 78</p> <p>    § 6-4 碳对铁碳合金组织和性能的影响 ..... 85</p>	<p>    § 6-5 铁碳合金状态图的应用和局限性 ..... 86</p> <p><b>第七章 碳素钢</b> ..... 89</p> <p>    § 7-1 钢中杂质对性能的影响 ..... 89</p> <p>    § 7-2 碳钢的分类、编号、性能和用途 ..... 92</p> <p><b>第八章 三元合金状态图简介</b> ..... 100</p> <p>    § 8-1 三元合金状态图中合金成分的表示方法 ..... 100</p> <p>    § 8-2 三元系中的直线定律和重心定律 ..... 101</p> <p>    § 8-3 三元共晶型状态图 ..... 103</p> <p>    § 8-4 一组元含量固定的三元合金状态图及在一定温度下的三元合金状态图 ..... 105</p> <p>    § 8-5 投影图的应用 ..... 107</p> <p><b>第九章 金属的塑性变形与再结晶</b> ..... 108</p> <p>    § 9-1 金属的塑性变形 ..... 108</p> <p>    § 9-2 冷变形金属在加热时组织和性能的变化 ..... 119</p> <p>    § 9-3 金属的热塑性变形(热变形加工) ..... 124</p> <p><b>第十章 钢的热处理</b> ..... 127</p> <p>    § 10-1 钢在加热时的组织转变 ..... 127</p> <p>    § 10-2 钢在冷却时的组织转变 ..... 133</p> <p>    § 10-3 钢的退火和正火 ..... 143</p> <p>    § 10-4 钢的淬火 ..... 147</p> <p>    § 10-5 钢的回火 ..... 156</p> <p>    § 10-6 钢的表面热处理 ..... 161</p> <p>    § 10-7 低碳钢淬火强化与形变热处理 ..... 168</p> <p><b>第十一章 合金钢</b> ..... 170</p> <p>    § 11-1 合金钢的分类与编号方法 ..... 170</p> <p>    § 11-2 合金元素在钢中的作用 ..... 172</p> <p>    § 11-3 合金结构钢 ..... 182</p> <p>    § 11-4 合金工具钢 ..... 198</p> <p>    § 11-5 特殊性能钢 ..... 206</p>
--	---



# 第一章 金属材料的机械性能

建国以来我国机械工业，在中国共产党的领导下，得到了迅速的发展，不仅产品品种和数量有了迅速的增加，而且产品的质量也有很大的提高。当前机械工业产品正朝着容量大、效能高、重量轻、寿命长的方向发展。机械产品能否做到轻巧耐用是表征生产技术水平的一个重要标志。而要减轻产品重量，延长使用寿命，必须从结构设计、材料选用、制造工艺等多方面进行研究。

为了正确选择和合理使用材料，必须从材料使用性能、工艺性能、经济效果等方面来考虑。对一般的机器零件，主要根据使用性能选择材料。材料的使用性能首先指它的机械性能。所谓材料的机械性能就是材料的力学性能，即材料抵抗外力作用的能力。常用的机械性能指标有：抗拉强度、屈服强度、延伸率、断面收缩率、硬度、冲击韧性、疲劳强度以及衡量材料断裂的新指标——断裂韧性等。材料的这些机械性能指标，是设计选材的重要依据。

金属的机械性能是以实验为根据的，对任何机械性能的研究或评定，都是对一定形状的试样，进行实验室的测试工作，以摸索其基本规律。下面分别进行介绍。

## § 1-1 强度、塑性及其测定

拉伸试验是工业上广泛采用的材料的机械性能试验方法之一。拉伸试验是在常温下缓慢地在试样两端施加载荷，使试样承受轴向拉力，引起试样轴向伸长。为了保证试样工作部分实现轴向应力均匀分布，要求试样具有一定的几何形状。圆形拉伸试样形状见图1-1。

用于拉伸试验的试样有标准试样和比例试样两种，还有长试样和短试样之分，其尺寸须符合表1-1的规定。标准试样  $D_0$  为 20mm，当  $L_0/D_0 = 10$  时称为标准圆形长试样，亦称 10 倍试样，符号记作  $\delta_{10}$ 。当  $L_0/D_0 = 5$  时称为标准圆形短试样或称为 5 倍试样，符号记作  $\delta_5$ 。而比例试样的  $D_0$  可以任意选定，但必须满足： $L_0 = 11.3\sqrt{F_0}$ （长试样），或  $L_0 = 5.65\sqrt{F_0}$ （短试样）。

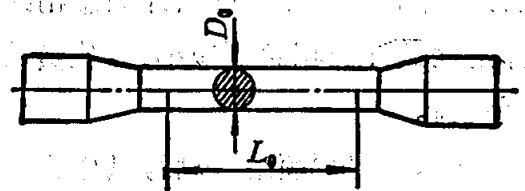


图 1-1 圆形拉伸试样

表 1-1 拉伸试样

试样		标距长 $L_0$ mm	横截面积 $F_0$ mm <sup>2</sup>	圆柱试样直径 $D_0$ mm	试样倍数的表示记号
标准的	长	200	314	20	$\delta_{10}$
	短	100			$\delta_5$
比例的	长	$11.3\sqrt{F_0}$	任意的	任意的	$\delta_{10}$
	短	$5.65\sqrt{F_0}$			$\delta_5$

## 一、拉伸图(负荷-伸长曲线)

拉伸试验过程中随着负荷的均匀增加,试样不断地由弹性伸长过渡到塑性伸长直至断裂。一般试验机都具有自动记录装置,可以把作用在试样上的力和所引起的伸长,描绘出负荷-伸长曲线,即拉伸图。

图 1-2 是退火低碳钢的拉伸图。图中纵坐标是负荷  $P(N)$ <sup>⊖</sup>, 横坐标是伸长  $\Delta L(mm)$ 。由图 1-2 可看出,金属试样在负荷作用下要改变它的形状,即发生变形。

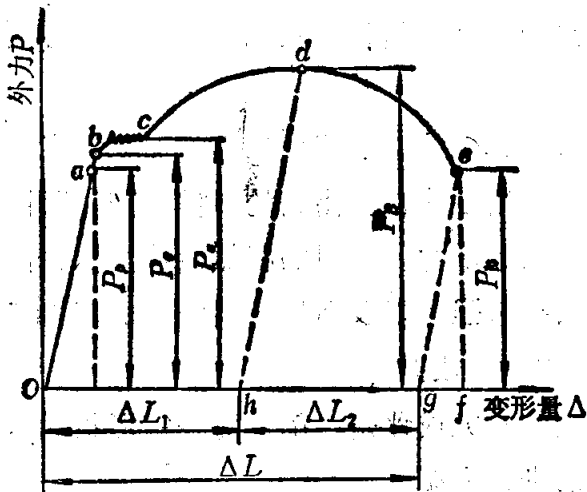


图 1-2 退火低碳钢的拉伸图

当负荷较小时( $oa$ 阶段),试样的伸长跟负荷成比例地增加,如果卸除负荷试样能立刻恢复原来的形状。这是试样的弹性变形阶段,负荷跟伸长之间保持直线关系,符合虎克定律。当负荷增加到高于某一负荷( $a$ 点)后,拉伸曲线开始偏离直线。 $a$ 点的负荷定为 $P_s$ 。

负荷继续增加,试样的伸长亦继续增加,直至 $b$ 点,此时若卸除负荷,试样将恢复原有尺寸。 $b$ 点的负荷定为 $P_b$ 。

当负荷自 $b$ 点增加到某一值(达到 $c$ 点)时,负荷指示器上的指针停止转动或开始回转,这表明在负荷不增加甚至减小的情况下变形还是继续增加,这种现象叫做屈服现象。这一负荷叫做屈服负荷 $P_s$ ,此时试样开始产生明显的塑性变形,在试样表面上开始出现与轴线约成 $45^\circ$ 的滑移线。

在出现屈服或形成屈服平台以后,负荷继续增加( $cd$ 阶段),变形(包括弹性和塑性)也继续进行,变形抗力也不断增加,这种现象叫加工硬化。负荷最后达到一个最大值 $P_b$ ( $d$ 点)。在 $P_b$ 以后,试样的某一部分截面开始急剧缩小,出现了“颈缩”。以后的变形主要集中在颈部上。由于颈部附近试样面积急剧减小,致使负荷下降,当达到 $P_e$ ( $e$ 点)时试样发生断裂。这个负荷叫做断裂负荷。

开始产生“颈缩”以后,试样的伸长主要发生在颈部的一段长度内,其他部分不再伸长,即试样由均匀变形过渡到集中变形。断裂时试样总伸长为 $of$ ,其中 $gf$ 是弹性变形, $og$ 是塑性变形。塑性变形中 $oh$ 是均匀变形, $hg$ 是缩颈处的集中变形。

工业上使用的金属材料中有些是没有屈服现象的,如图 1-3a)是塑性材料拉伸图,如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等。图 1-3b)是脆性材料的拉伸图,如灰铸铁,这种材料不仅没有屈服现象,而且也不产生“颈缩”。

⊖根据国际单位制的规定,力的单位是牛顿,代号牛(N)。1公斤力(kgf)=9.80665牛(N),功和能的单位是焦耳,代号焦(J)。1公斤力·米(kgf·m)=9.80665焦(J)。

本书中用到的力、应力和冲击值单位一律按下列关系换算成国际制单位:

力(P): 1公斤力(kgf)=9.8牛(N),

应力( $\sigma$ ): 1公斤力/毫米<sup>2</sup>(kgf/mm<sup>2</sup>)=9.8牛/毫米<sup>2</sup>(N/mm<sup>2</sup>),

冲击值( $\alpha_k$ ): 1公斤力·米/厘米<sup>2</sup>(kgf·m/cm<sup>2</sup>)=9.8焦/厘米<sup>2</sup>(J/cm<sup>2</sup>),

硬度单位仍沿用公制单位。

## 二、应力-应变图

若用试样的原始横截面积  $F_0$  去除拉力  $P$ ，则得到试样所受的应力  $\sigma$ ，即

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

用试样的原始标距长度  $L_0$  除其相应的伸长  $\Delta L$  (绝对伸长) 得到相对伸长  $\varepsilon$  (即应变)，即

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

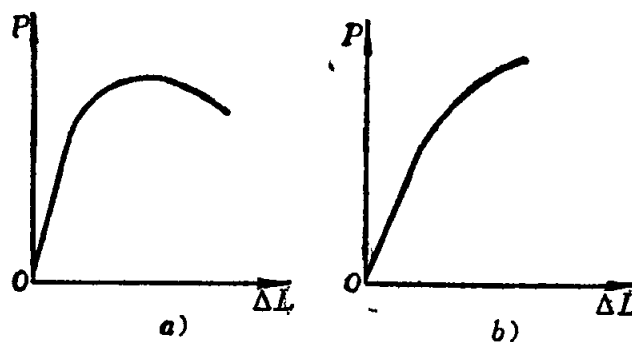


图 1-3 塑性材料及脆性材料拉伸图

以  $\sigma$  与  $\varepsilon$  为坐标绘出应力-应变的关系曲线叫做应力-应变图。应力-应变图的形状与拉伸图是完全一致的，只是坐标不同。它不受试样尺寸的影响，可以直接看出材料的一些机械性能。

### (一) 弹性变形及弹性模数

外力去除后能立刻恢复的变形叫弹性变形。金属的弹性变形就是施加外力时引起晶格中原子距离呈弹性改变的结果。这是因为外力破坏了原子间相互作用的吸力和斥力的平衡，使原子移动一定距离后建立了吸力、斥力和外力之间的新平衡。当外力去除以后，这种新的平衡又遭到破坏，靠原子间的作用力使其又能恢复到原来的平衡位置。所以在宏观上表现为：加上外力引起变形；除去外力恢复到原来的形状。因此可以说，金属对弹性变形的抗力决定于原子间结合力的大小。用弹性模数表征金属对弹性变形的抗力。大部分金属与合金在弹性变形阶段遵循虎克定律，应力与应变间成正比关系。即

$$\sigma = E\varepsilon, \quad \text{或} \quad \frac{P}{F_0} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

式中： $\sigma$ ——引起变形的正应力， $\text{N/mm}^2$ ，其值为  $\frac{P}{F_0}$ ；

$\varepsilon$ ——相对伸长，其值为  $\frac{\Delta L}{L_0}$ ；

$E$ ——弹性模数， $\text{N/mm}^2$ 。

从公式可见，弹性模数  $E$  直接表示出弹性变形阶段应力与应变的关系，是这段应力-应变曲线的正切值。弹性模数代表金属对弹性变形的抗力，技术上用以表示金属的刚度，即弹性模数  $E$  愈大，则刚度愈大，在一定应力作用下产生的弹性变形就愈小。

常用金属的弹性模数为：铁  $209720 \text{ N/mm}^2$ ；铜  $109760 \text{ N/mm}^2$ ；铝  $70560 \text{ N/mm}^2$ 。

金属的弹性模数是一个对成分、组织均不敏感的性能指标，因此热处理、合金化及塑性变形等对弹性模数影响甚微。

### (二) 比例极限 $\sigma_p$

比例极限是应力与伸长成比例关系时的最大应力值，即在拉伸图上开始偏离直线时 ( $\sigma_p$  点) 的应力。



$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $P_p$ ——比例极限的负荷, N;

$F_0$ ——试样的原始截面积, 下同,  $\text{mm}^2$ 。

### (三) 弹性极限 $\sigma_e$

弹性极限  $\sigma_e$  为材料所能承受的、不产生塑性变形的最大应力。它是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形的标志。应力超过弹性极限后, 便开始产生塑性变形。由于此点实测困难, 因此技术上规定  $\sigma_e$  是在产生极微小塑性变形的前提下, 材料所能承受的最大应力。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

式中  $P_e$ ——弹性极限的负荷, N。

弹性极限的物理意义是表征金属在开始产生极微小塑性变形时的抗力, 它是对成分、组织极敏感的性能, 可以通过合金化、热处理及冷热加工方法在很大范围内变化。对于在工作中不允许有微量塑性变形的零件, 设计时弹性极限则是选材的依据。

### (四) 屈服强度

在拉伸过程中, 当负荷不增加甚至有所降低时, 试样仍继续产生变形, 此时的最小应力叫屈服点, 以  $\sigma_s$  表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

式中  $P_s$ ——屈服负荷, N。

在屈服点以后, 金属开始产生明显的塑性变形, 严格的说屈服点是开始产生明显塑性变形时的抗力。除退火的或热轧状态下的低碳或中碳钢以及某些低合金高强度钢有屈服现象外, 高碳的和一些调质的合金钢, 并无屈服现象。因此规定产生 0.2% 塑性变形的应力作为屈服强度(条件屈服极限), 以  $\sigma_{0.2}$  表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

式中  $P_{0.2}$ ——产生 0.2% 塑性变形时的负荷, N。

大多数机器零件和工程构件常因过量的塑性变形而失效, 所以一般都不允许产生塑性变形。因此, 屈服强度是设计的主要依据, 是最重要的机械性能指标之一。屈服极限和弹性极限一样, 都是对组织、成分敏感的性能。可以通过热处理、合金化以及塑性变形等方法在很大范围内变化。提高材料的屈服强度往往是热处理、合金化以及塑性变形的目的之一。

### (五) 强度极限 $\sigma_b$

强度极限是试样在拉断前所承受的最大负荷与原始截面积之比:

$$\sigma_b = \frac{P_B}{F_0} \quad \text{N/mm}^2$$

式中  $P_b$ ——试样在拉断前所承受的最大负荷, N。

由拉伸图可见,对塑性材料来说,在  $P_b$  以前试样均匀变形,而在  $P_b$  以后变形将集中在颈部。强度极限表征材料对最大均匀塑性变形的抗力,它在技术上非常重要,工程上称为抗拉强度。抗拉强度是设计的主要依据之一,是材料的主要机械性能指标之一。

对低塑性材料,一般不产生颈缩,因此断裂前最大负荷  $P_b$  就是断裂负荷  $P_k$ ,即  $P_b = P_k$ ,因此强度极限  $\sigma_b$  是表征材料对断裂的抗力,即常把  $\sigma_b$  作为断裂强度。

### 三、塑性指标的意义

在分析拉伸图时已经知道,外力超过屈服极限时即发生塑性变形,外力继续增加时塑性变形量也随之增大。金属材料在破断前的塑性变形能力的大小称为塑性。

在拉伸试验时,金属塑性可用延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  表示。

#### (一) 延伸率 $\delta$

延伸率  $\delta$  是试样在断裂时的相对伸长。

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

式中:  $L_k$ ——断裂后试样的计算长度, mm;

$L_0$ ——试样原始计算长度, mm。

#### (二) 断面收缩率 $\psi$

断面收缩率  $\psi$  是断裂后试样横截面积的减小量  $\Delta F = F_0 - F_k$  与试样原始横截面积  $F_0$  之比,以百分比表示。

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

式中  $F_k$ ——断裂后试样的最小截面积。

$\delta$ 、 $\psi$  的大小表示材料塑性的好坏。例如某金属  $\delta_{10} = 25\%$ ,  $\psi = 65\%$ , 而另一金属的  $\delta_{10} = 12\%$ ,  $\psi = 30\%$ , 很明显前者具有良好的塑性,可进行冷加工,而后者塑性差,冷加工时易产生裂纹,故不能进行冷加工。

长试样和短试样的延伸率分别用  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  表示。因为延伸率随计算标距长短不同而有所不同,所以  $\delta$  必须说明是长试样的还是短试样的。

同时,延伸率还和试样的原始截面  $F_0$  有关。为了使拉伸时所得到的相对伸长不受试样尺寸的影响,必须使  $\frac{L_0}{\sqrt{F_0}} = \text{常数}$ 。因此对于  $L_0 = 10D_0$  的拉伸试样,  $\frac{L_0}{\sqrt{F_0}} = 11.3$ ; 对于  $L_0 = 5D_0$

的拉伸试样,  $\frac{L_0}{\sqrt{F_0}} = 5.65$ 。

## § 1-2 硬度及其测定

硬度是衡量金属材料软硬的一个指标,它是指金属表面上不大的体积内抵抗压入变形或抵

抗刻划破裂的能力。它不是一个单纯的物理或力学量,而是代表着弹性、塑性、塑性变形强化率、强度和韧性等一系列不同物理量的综合性能指标。

硬度试验法比较简单易行,不必破坏零件,适用于成批检验零件,应用十分广泛。它是工程设计、产品质量检验及制定合理工艺的重要试验方法之一。硬度测定的方法很多,如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度及显微硬度等。

### 一、布氏硬度

布氏硬度的测定方法是:以负荷为  $P$  的力把直径为  $D$  的钢球压入试样表面并保持一定时间,然后卸除负荷,测量钢球在试样表面上所形成的压痕直径  $d$  (见图 1-4)。以压痕表面积  $F$  除

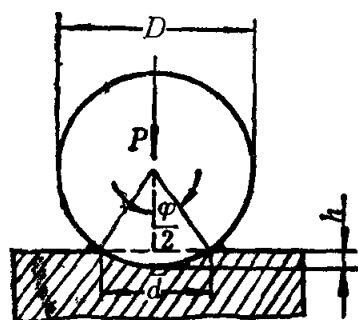


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

负荷  $P$ , 所得应力值  $\frac{P}{F}$  即为布氏硬度, 以符号 HB 表示。

如压痕深度为  $h$ , 则压痕表面积为:

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

试样硬度值为:

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

如  $P$  以 kgf 计,  $D$  及  $d$  以 mm 计, 则其单位为 kgf/mm<sup>2</sup>。式中只有  $d$  是变数, 只要测量出压痕直径  $d$  即可计算出 HB 值(见附录一)。

由于被测金属材料的软硬、大小、厚薄不同, 在实际中进行布氏硬度实验时, 必须使用不同大小的负荷  $P$  和钢球直径  $D$ 。问题在于, 对同一种材料当采用不同的  $P$  和  $D$  进行试验时, 能否保证得到同一布氏硬度值。

从图 1-4 可以看出:  $\sin \frac{\varphi}{2} = d/2 : D/2$ , 即  $d = D \sin \frac{\varphi}{2}$ , 布氏硬度计算公式可写成:

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

可见要保证同一材料的布氏硬度值相同, 就要使压入角  $\varphi$  及  $\frac{P}{D^2}$  为常数。

因此, 不论采用多大的负荷和怎样直径的钢球, 只要能满足上述条件, 则对同一材料来说布氏硬度值是一样的, 而对不同材料来说, 所得布氏硬度值也是可以进行比较的。生产上常用的  $\frac{P}{D^2}$

的值有 30、10、2.5 三种。

如  $D = 10\text{mm}$ ,  $P = 3000\text{kgf}$ , 负荷保持时间 10 秒则所测得的硬度值表示为 HB450。其他试验条件下, 符号 HB 应以相应的指数注明钢球直径、负荷大小及负荷保持时间, 如  $HB_{5/25/30}100$ , 表示用  $D = 5\text{mm}$ ,  $P = 250\text{kgf}$ , 负荷保持时间为 30 秒测得布氏硬度值为 100。

钢球直径  $D$ 、负荷  $P$  与负荷保持时间应根据试样硬度和厚度按表 1-2 选择。

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 mm	负荷 $P$ 与钢球直径 $D$ 的相互关系	钢球直径 $D$ mm	负荷 $P$ kgf	负荷保持时间 s
钢	140~150	6~3	$P = 30D^2$	10.0	3000	10
		4~2		5.0	750	
		<2		2.5	187.5	
铸	<140	>6	$P = 10D^2$	10.0	1000	10
		6~3		5.0	250	
		<3		2.5	62.5	
非 铸 金 属	>130	6~3	$P = 30D^2$	10.0	3000	30
		4~2		5.0	750	
		<2		2.5	187.5	
	36~150	9~3	$P = 10D^2$	10.0	1000	30
		3~6		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	

试验后压痕直径  $d$  的大小应在  $0.25D < d < 0.6D$  范围内, 否则试验结果无效。因为  $d$  若太小, 灵敏度和准确性将随之降低;  $d$  若太大, 压痕的几何形状不能保持相似的关系, 影响试验结果的准确性。

布氏硬度与抗拉强度之间有着近似的比例关系, 所以不需要进行拉伸试验, 只需测出其布氏硬度值, 就能粗略地估计其抗拉强度。其经验换算公式为:

对低碳钢  $\sigma_s = 0.362HB$  (此处  $\sigma_s$  及 HB 的单位均为  $kgf/mm^2$ )

对高碳钢  $\sigma_s = 0.345HB$

对调质合金钢  $\sigma_s = 0.325HB$

对灰铸铁  $\sigma_s = \frac{HB - 40}{6}$

## 二、洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用广泛的试验方法之一, 和布氏硬度一样也属压痕硬度试验。但它不是测定压痕的面积, 而是测量压痕的深度并以深度的大小表示材料的硬度。它的特点是: 压痕很小, 几乎不伤工件表面; 对软硬材料均可测定; 因为有预加初负荷, 故试样表面的轻微不平度对结果的影响不大; 操作十分方便。

洛氏硬度试验原理, 可以用图 1-5 加以说明。洛

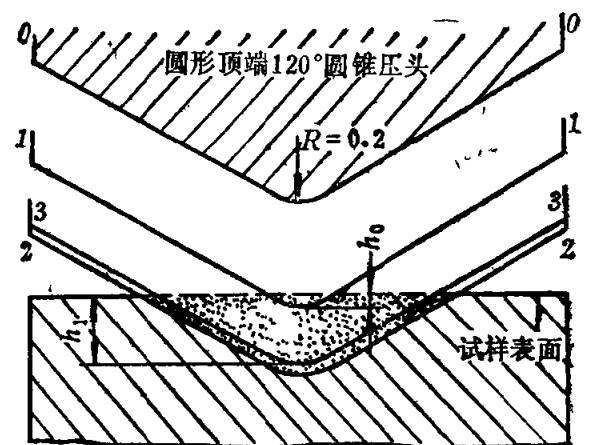


图 1-5 洛氏硬度试验原理示意图

氏硬度试验常用的是一个锥角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥或直径为  $1.588\text{mm}$  ( $\frac{1}{16}$ 英寸) 的钢球作为压头,先施以初负荷  $P_0$ ,再施以不同等级的主负荷  $P_1$ ,使压头垂直地压入试样表面,然后卸除  $P_1$ 。在保留  $P_0$  的情况下,测量由  $P_1$  产生的残余压入深度,并以规定的压入深度作为洛氏硬度的一个硬度单位。

在图 1-5 中,0-0 为金刚石压头在和试样接触前的位置;1-1 为压头和试样接触并受到初负荷  $P_0$  后压入试样深度为  $h_0$  的位置;2-2 为试样受到主负荷  $P_1$  后压头压入试样的位置;3-3 为卸除主负荷后压头由于试样弹性变形的恢复而略有提高后的位置。此时压头因主负荷而实际压入的深度为  $(h_1 - h_0)$ ,此值愈大,表示试样愈软。反之,则表示试样愈硬。为了照顾到习惯上的数值愈大硬度愈高的概念,采用自一常数  $k$  减去  $(h_1 - h_0)$  来表示硬度的高低,并用每  $0.002\text{mm}$  为一硬度单位,则所得的洛氏硬度用 HR 表示。

$$HR = \frac{k - (h_1 - h_0)}{0.002}$$

式中:  $h_0$  —— 在  $P_0$  作用下压头压入试样的深度, mm;

$h_1$  —— 试验时已卸除  $P_1$  但仍保留  $P_0$  时,压头压入试样表面的深度, mm;

$k$  —— 常数,在采用钢球时为 0.26,采用金刚石圆锥时为 0.2。

为了可以用一种试验机测定从极软到极硬的材料硬度,采用了由不同的压头和总负荷组合成的 15 种不同洛氏硬度标度,其中最常用的三种标度见表 1-3。

表 1-3 常用洛氏硬度值符号及试验条件和应用

标度符号	压头类型	初载+主载=总载荷 kgf	常用范围	应用举例
HRA	金刚石圆锥	10 + 50 = 60	70~85	碳化物、硬质合金、表面淬火钢等
HRB	钢球 $\phi 1.588\text{mm}$	10 + 90 = 100	25~100	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	金刚石圆锥	10 + 140 = 150	20~67	淬火钢、调质钢等

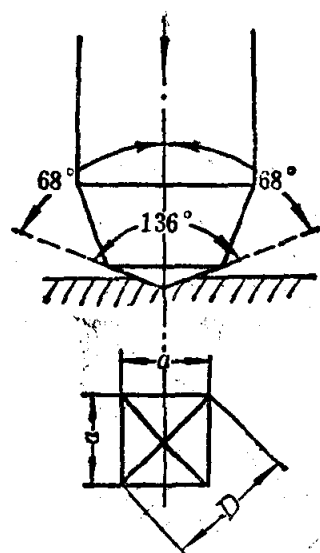


图 1-6 维氏硬度试验压头及压痕示意图

洛氏硬度所用的负荷较大,故不宜用来测定极薄材料或具有表面硬化层的材料的硬度。为了解决表面硬度的测量,以洛氏硬度试验原理为基础设计出一种表面洛氏硬度机,它比一般洛氏硬度机负荷小,其初负荷为  $3\text{kgf}$ ,总负荷分别为 15、30 和  $45\text{kgf}$ ,并以每  $0.001\text{mm}$  压痕深度为一硬度单位。试验时硬度值可以直接从表盘读出。

### 三、维氏硬度、显微硬度及肖氏硬度

布氏硬度只用来测定硬度小于 HB 450 的材料;洛氏硬度虽然可以用来测定由极软(用 HRB)到极硬(用 HRA)材料的硬度,但它采用不同的压头和总负荷,有很多标尺,彼此间没有联系不能换算。为了避免这些缺点,制定了维氏硬度试验法。

如图 1-6 所示,维氏硬度试验是以负荷  $P$  将一顶角为  $136^\circ$  的金刚石棱锥压入试样表面,以单位压痕表面积上所受的力表示维氏硬度值。

并用符号 HV 表示。

维氏硬度的计算公式如下：

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{D^2}{2 \sin 68^\circ}} = 2 \sin 68^\circ \frac{P}{D^2} = 1.8544 \frac{P}{D^2} \quad \text{kgf/mm}^2$$

式中：P —— 负荷，kgf；

D —— 试样表面压痕两对角线长度的平均值，mm。

常用的负荷有 5、10、20、30、50、100 和 120kgf 等几种。压痕对角线的测量用附在试验机上的显微镜测定，测得 D 值后，就可以算出维氏硬度值，也可在有关表格中查得。

维氏硬度试验可以测定钢铁、非铁金属、硬质合金及具有表面渗碳、渗氮层的材料的硬度。

从维氏硬度的试验特点知道，维氏硬度的负荷可以任意选择而不影响硬度值的大小。如果我们选用几克力(gf)、几十克力(gf)为负荷，则可测定一个极小范围内如铁素体晶粒或其他组织组成物的硬度。这就是显微硬度试验。显微硬度以符号 HM 表示。若负荷 P 以克力(gf)为单位，压痕对角线 D 以微米 ( $1\mu\text{m} = \frac{1}{1000}\text{mm}$ ) 为单位，则

$$HM = 1854.4 \frac{P}{D^2} \quad \text{kgf/mm}^2$$

肖氏硬度试验是利用弹性回跳测定金属的硬度，它是利用一个带有金刚石圆头的重锤从一定高度上自由落到金属试样的表面，根据钢球回跳的高度来衡量金属硬度的大小。因之也叫回跳硬度，以符号 HS 表示。

针对不同的要求，有不同的硬度测试方法。以上介绍的几种硬度试验，由于规定的试验条件各不相同，因之没有理论的换算关系。但有近似的经验公式可供参考，亦可由专门的表格进行各种硬度的换算，经验公式如下：

$$HRC \approx \frac{1}{10} HB \quad (\text{当 } HB \text{ 在 } 200 \sim 600 \text{ 时})$$

$$HV \approx HB \quad (\text{当 } HB < 400 \text{ 时})$$

$$HS \approx \frac{1}{6} HB$$

各种常用硬度及强度换算表见附录二。

### § 1-3 关于疲劳的概念

机器中多数零件如轴、齿轮、弹簧等都是 在变动负荷下工作的，在这种变化的动负荷长期作用下，有时虽然按照静强度许用应力的设计是安全的，但由于工作应力是变化的零件仍然会发生破坏，这种现象称为疲劳破坏(断裂)。疲劳断裂与静负荷断裂不同，无论是脆性材料还是塑性材料，疲劳断裂都是突然地发生的，事前没有明显的宏观塑性变形，很难事先观察到，故具有很大的危险性。

零件失效统计表明,约有 90% 的损坏是疲劳破坏。因此研究疲劳破坏规律,防止疲劳失效的产生,提高疲劳强度显得尤其重要。

疲劳破坏是一个裂纹发生和发展的过程,由于材料质量或加工过程存在的缺陷,在零件局部区域造成应力集中,产生裂纹。裂纹在变动应力反复作用下不断扩展,使材料承受负荷的有效断面不断减少,当减小到不能承受负荷的作用时,即在瞬时折断,断口齐平有晶状脆性断裂的特征。实验发现材料所受重复或交变应力  $\sigma$  与其断裂前所能经受的应力循环次数  $N$  有如图 1-7

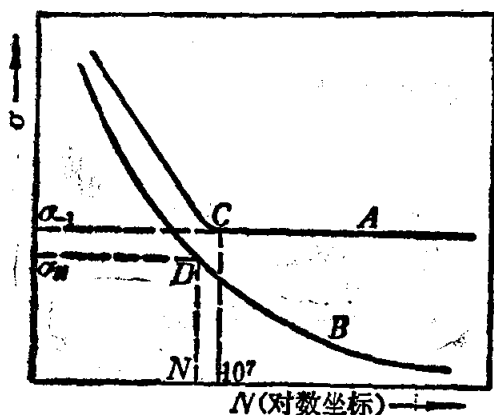


图 1-7 疲劳曲线示意图

所示的曲线关系。大多数非铁金属和合金的应力-循环次数曲线如曲线 B 所示。可以看出,这一类的金属和合金在疲劳断裂前的应力循环次数  $N$  随所受应力  $\sigma$  的降低而增加。因此,对具有如曲线 B 所示特征的金属和合金,只能说当应力循环  $N$  次断裂时,其所能承受的最大应力为  $\sigma_N$ ,如曲线上 D 点所示。 $\sigma_N$  叫做该材料在疲劳“寿命”为  $N$  时的疲劳强度。 $N$  的数值可根据使用目的及需要来确定,一般在  $(1\sim 10)\times 10^7$  范围之内。对钢铁来说,它们的应力-循环次数曲线如曲线 A 的形状,其特征为:当循环应力降低至某一定值(C 点)后,应力循环次数即使达到无限大仍不发生疲劳破坏。此应力值叫做疲劳极限,以符号  $\sigma_{-1}$  表示。可以用  $N = 10^7$  为基数,确定钢的疲劳极限。

影响材料及零件疲劳强度的因素是复杂的,欲提高其疲劳抗力须从多方面注意:在结构设计上要求尽可能做到等强度设计;在材料方面要尽可能减少缺陷;热处理和其他表面强化措施,往往可以改善零件的薄弱部位,显著提高零件的疲劳抗力。

影响材料及零件疲劳强度的因素是复杂的,欲提高其疲劳抗力须从多方面注意:在结构设计上要求尽可能做到等强度设计;在材料方面要尽可能减少缺陷;热处理和其他表面强化措施,往往可以改善零件的薄弱部位,显著提高零件的疲劳抗力。

#### § 1-4 冲击韧性及其测定

以很大速度作用于机件上的负荷称为冲击负荷。生产中许多机器零件及工具是在冲击负荷下工作的。例如内燃机的活塞杆、锻锤、冲床、凿岩机、铆钉枪等。金属零件对冲击负荷的抵抗能力不同于对静负荷的抵抗能力。冲击负荷的速度很高,作用时间甚短,被冲击体的表面常常因局部负荷产生局部变形和断裂。对于承受冲击负荷的零件,仅具有足够的强度是不够的,还必须具有相当大的冲击韧性。所谓冲击韧性就是材料抵抗冲击负荷的能力。为了确定材料的冲击韧性,需进行冲击试验。

##### 一、冲击试验

冲击试验是一种动态力学试验,它是把一定形状的试样,用拉、扭或弯曲的方法使之迅速断裂而测定断裂所需的功。它是试验材料的韧性的,所以也叫冲击韧性试验。

目前应用最普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验。试验用的标准试样为梅氏试样,如图 1-8 所示。将试样放在试验机的两个支承上,使其缺口背向摆锤的冲击方向,然后将重量为  $G$  的摆锤抬到  $h_1$  的高度,如图 1-9 所示。摆锤由此高度下落时将试样冲断,并升起到  $h_2$  的高度。因而,冲断试样所消耗的功为:

$$A_k = G(h_1 - h_2) \quad \text{J}$$

金属的冲击韧性  $a_k$  就是冲断试样时,在缺口处单位面积上所消耗的功。

$$a_k = \frac{A_k}{F} \quad \text{J/cm}^2$$

式中  $F$  ——试样缺口处横断面积,  $\text{cm}^2$ 。

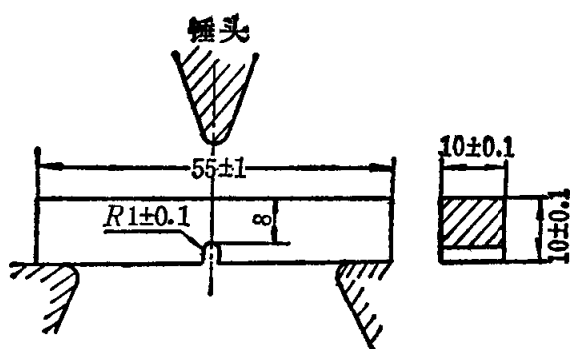


图 1-8 冲击试样

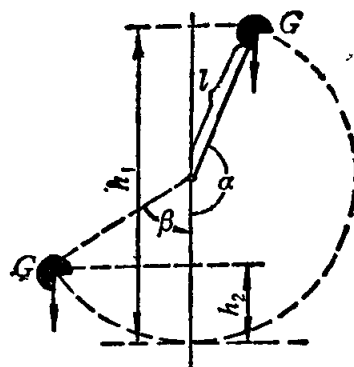


图 1-9 冲击试验原理图

冲击试验主要用于结构钢材,而对于脆性材料(如铸铁等)以及塑性很大的材料(如铜、低碳钢等)不适于进行冲击试验。因为前者脆性大,冲击韧性值极小,而后者又往往不能被击断。

冲击韧性与试验的温度有关。有一些材料在室温  $20^\circ\text{C}$  左右试验时并不显示脆性,在较低温度下则可能发生脆断。因此为了确定金属材料(特别是低温用材料)由塑性状态向脆性状态变化的规律,可在不同温度下测定冲击值  $a_k$ 。由图 1-10 可以看出  $a_k$  随温度的降低而减小,在某一温度下材料的  $a_k$  显著降低而呈现脆性,这个温度称为“脆性临界转变温度”。它的数值愈低,材料的低温冲击性能愈好。

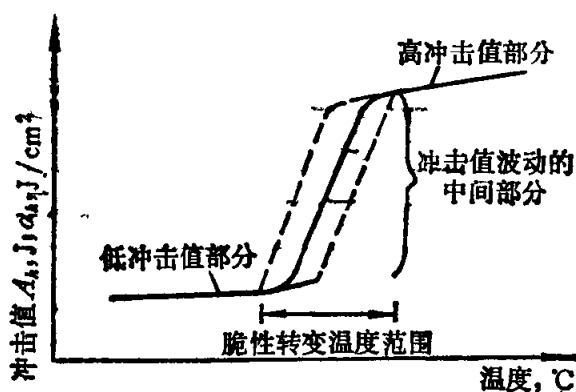


图 1-10 温度对冲击值的影响

## 二、多次重复冲击试验

冲击韧性  $a_k$  是大能量一次冲断标准试件所得到的数据,而实际零件却很少有承受这么大的能量(指单位体积承受的能量)以致一次或很少几次就冲击断裂的。大多数承受冲击负荷的零件都是承受上万次、几百万次以至更多冲击次数的小能量冲击后才断裂的。前者是一次冲击破断,不存在损伤的累积。而后者是由于小能量多次冲击的损伤积累导致裂纹的发生与发展的结果。二者破坏过程有本质的不同,这时用冲击值  $a_k$  来衡量其抗力就不合适,因为可以推想决定材料抵抗这两种冲击负荷的主导因素是不相同的。

研究结果表明,大能量冲击抗力取决于冲击韧性,而小能量多冲抗力取决于强度。如果用一种强度高而冲击韧性低的材料 I 和一种强度低而冲击韧性高的材料 II,在不同冲击能量下进行多次重复冲击试验,以每次冲击能量  $A$  为纵坐标,以相应的破断冲击次数  $N$  为横坐标,制成



$A-N$  曲线。其试验结果如图 1-11 所示。图中两条曲线有交点,交点左方(即冲击能量高的情况)是一个冲击韧性问题,交点右方(冲击能量较小的情况)是一个冲击疲劳(极端情况下)和多次冲击问题。

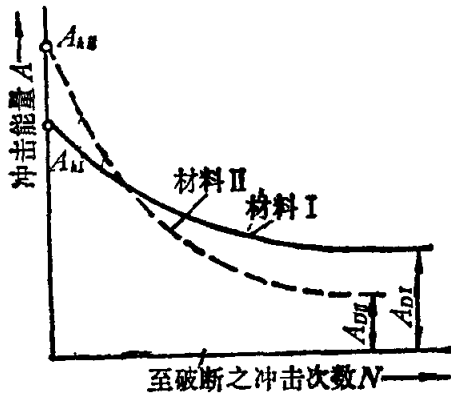


图 1-11  $A-N$  曲线示意图

多次冲击不同于疲劳,因为相应地说疲劳是一个反复载荷下的断裂现象。金属材料的疲劳抗力(以疲劳极限为代表)主要取决于材料的强度而不取决于宏观塑性;然而多次冲击是一个能量负荷,它包括加载速度的影响、体积因素和加载过程引起的振动的影响。材料的多次冲击抗力必须考虑断裂时所能吸收的塑性功,其主导因素取决于材料强度,但在一定限度内还取决于材料的宏观塑性。因此,多次冲击抗力是一个主要取决于强度的韧性问题,不像疲劳几乎

是一个纯强度问题。

多次重复冲击试验采用连续冲击试验机,一般为凸轮落锤式,型号为 DC150。能量范围一般为 1.37~14.7 J,试验机冲击频率有  $450\text{min}^{-1}$  及  $600\text{min}^{-1}$  两种,每次冲击后试样转动角度可以调节。试样如图 1-12 所示,缺口模拟梅氏缺口。试样安装在试验机上,其支座及冲头的位置如图 1-13 所示,试样一端由弹簧顶针顶住,另一端由橡皮与转轴相连。表 1-4 为三种典型材料缺口试样的多次冲击试验数据。

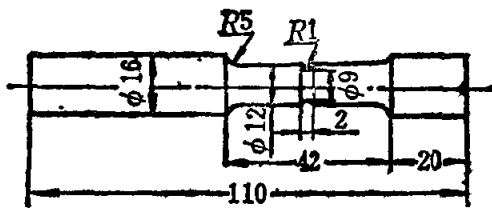


图 1-12 直径 9mm 的多冲缺口试样

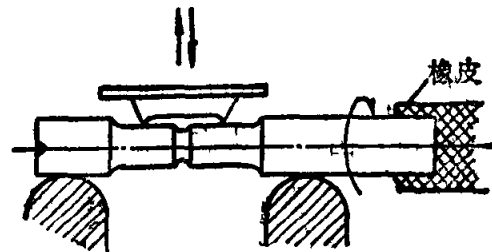


图 1-13 试样安装示意图

表 1-4 三种典型材料缺口试样的多次冲击试验数据

钢种及状态	在下列冲击能量下出现裂纹和最后破断的冲击次数									
	6.86 J		4.90 J		2.94 J		2.45 J		1.47 J	
	开裂	破断	开裂	破断	开裂	破断	开裂	破断	开裂	破断
25钢 920 °C 正火	50	205	80	330	100	930	300	1750	1000	4160
45钢 840 °C 水淬 600 °C 回火	100	277	350	611	1500	2440	—	3750	7000	12500
T8 钢 780 °C 油淬 200 °C 回火	—	215	—	416	—	6760	12000	13610	—	—

### 三、断裂韧性

机器零件最危险的一种失效方式是断裂。机件设计中必须考虑如何防止断裂事故发生,以保证机器安全运行。断裂有两种类型:一种是韧性断裂,即机件在受载过程中,经历弹性变形、