

金属工艺学

上册

华东纺织工学院

一九八一年一月

前 言

金属工艺学是工科近机类专业的一门综合性技术基础课。课程目的是使学生获得机械设计中所需要的材料选用,毛坯选择和零件加工方面的基本理论和工艺知识。

本教材是以与零件设计有关的选材及工艺知识为主线组织内容,并适当参考国外一些新教材和新资料编写的。

在教材编写中注意了以下一些问题:

一、对金属性能的了解是机械设计中选材的基础。这部分内容在教材中得到了加强。着重在各种机械性能指标的意义,以及与失效形式间的关系。加工工艺性能则分散在加工部分各章节中介绍。

二、第二章中着重介绍金属材料的成分、组织结构与性能的联系。由于金属材料的强化是充分发挥其潜在性能,节约金属材料的有效途径,在这一章中归纳介绍了各种强化方法。

三、本教材大量删减了实践性较强的内容,如设备结构,工艺操作等。对金工实习中学过的内容只作概括性的和总结性的介绍。对新工艺,新方法作了选择介绍,而在加工各章中加强了对加工工艺理论的分析,并将材料理论渗透到有关加工章节中,应用材料理论来阐述加工工艺对零件质量的影响。

四、在加工各章中有关零件结构工艺性的知识得到了一定程度的加强,为后继课程中进行机械设计打下一定的有关零件结构形状的知识基础。

五、材料与加工工艺两部分不是孤立的,而是相互关联的。选择材料时就要考虑到材料是否满足零件加工方法的要求。考虑加工方法时就要联系到零件材料的性能。如零件材料选择灰铸铁能满足机械性能要求时,就必须采用铸造生产的方法。又如零件形状需要设计得比较复杂,则必须采用铸造方法,由于灰铸铁铸造性能好应尽可能采用,但如机械性能要求不能满足则就必须采用铸钢。为了有利于对整个金工内容的融会贯通,培养学生灵活运用知识的能力,还编写了“材料及毛坯加工方式选择”一章,通过实例来介绍材料和毛坯选择知识的灵活运用。

本教材适用于大专院校工科,后继课不设“金属材料热处理”课的有关专业(如纺织、动力、化工、轻工等)。亦同样适用于职工大学、电视大学等相应专业,也可供机械设计人员参考。

本教材由陈应星教授担任主编。由蒋柏春编写第一及第十章部分内容,王宠武编写第二章、张重威编写第三、八章,陈锡琦编写第四章,李灵忻编写第五章,刘烈元编写第六章,胡铨编写第七章,方博武编写第九章及第十章部分内容。

本教材分上下两册,第一~五章为上册,第六~十章为下册。

本书计量单位未采用国际单位制(SI)而是采用一般沿用单位。如强度单位采用 kgf/mm^2 (公斤力/毫米²), $1\text{kgf}/\text{mm}^2 \approx 10\text{MN}/\text{m}^2$ (百万牛顿/米²)。在出版使用一年后修订时改正。

鉴于编者水平有限,编写时间仓促,其中一定有不少缺点和错误,望广大读者提出宝贵意见。

上册目录

前言

第一章 金属材料的性能	1
第一节 金属材料的机械性能	1
一、强度与塑性	1
二、硬度	7
三、冲击韧性	10
四、抗疲劳性能	12
五、抗蠕变性能	13
六、金属的磨损及耐磨性	14
第二节 金属的物理性能及化学性能	
一、导电性、磁性及耐蚀性	15
第二章 金属材料的组织结构和性能的提高	20
第一节 纯金属及合金的组织结构和结晶	20
一、纯金属的结晶	20
二、纯金属的组织结构	22
三、合金的组织结构	24
第二节 形变强化	25
一、塑性变形的实质	26
二、滑移的机理	26
三、冷塑性变形后金属组织和性能的变化	27
四、加热对冷变形金属组织和性能的影响	28
第三节 钢的固态转变	29
一、纯铁的同素异构转变	29
二、铁碳平衡图	30
三、奥氏体等温转变曲线	35
第四节 钢的热处理	39
一、退火与正火	39
二、淬火与回火	40
三、钢的表面热处理	45
四、热处理技术条件的标注	48
第五节 金属强化方法小结	49
第三章 钢	50
第一节 钢铁及型材的生产过程	50
第二节 钢的分类	50
第三节 碳素结构钢	52
一、碳及杂质对碳素钢性能的影响	53

二、普通碳素结构钢	54
三、优质碳素结构钢	56
第四节 合金结构钢	58
一、合金元素的作用	58
二、合金钢的编号	60
三、普通低合金钢	60
四、渗碳钢	60
五、调质钢	62
六、弹簧钢	62
七、滚珠轴承钢	63
第五节 工具钢	64
一、碳素工具钢	65
二、合金工具钢	65
三、高速钢	65
第六节 不锈钢	67
第四章 有色金属	71
第一节 铝及铝合金	71
一、纯铝	71
二、铝合金	72
三、形变铝合金	73
四、铸造铝合金	74
第二节 铜及其合金	76
一、纯铜	76
二、黄铜	76
三、青铜	77
第三节 轴承合金	78
第五章 塑料	79
第一节 高分子材料的基本知识	79
第二节 塑料的组成与分类	81
一、塑料的组成	81
二、塑料的分类	82
第三节 塑料的特性	82
第四节 塑料零件的成型与加工	88
第五节 常用塑料简介	90
一、热固性塑料	90
二、热塑性塑料	91
第六节 塑料零件的设计	94
一、关于塑料的选用	94
二、塑料零件结构设计	95

第一章 金属材料的性能

人们为了正确地使用和加工金属材料，必须了解其使用性能和工艺性能。所谓使用性能，是指为了保证机械零件(工具或构件)正常工作，材料所应具备的性能，它包括机械性能、物理性能和化学性能。当材料的性能不能符合使用要求时，零件就会发生某些变化，以致不能正常工作，称为失效。所谓工艺性能，是指在制造机械零件过程中，材料适应各种冷、热加工的性能。它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性等。

一般在设计机械设备时的材料选择中，大多以机械性能为主要依据，所以本章的内容以机械性能为主，而以物理、化学性能为辅，至于工艺性能则在以后各章中分别论述。

第一节 金属材料的机械性能

材料的机械性能又称力学性能是指材料在外力作用下表现出来的行为。如强度、硬度、塑性、韧性等。

任何材料受到外力以后都会发生变形。变形有两种：一种能随外力去除而消失，称为弹性变形。另一种不能随外力的去除而消失，称为塑性变形或永久变形。

金属材料在外力作用下引起的基本表现一般可分为三个阶段：

(1) **弹性变形** 受力在某一限度以下时，变形量与受力大小成正比增加。外力去除后，变形完全消失。

(2) **弹—塑性变形** 当外力超过某一限度时，外力去除后，一部分变形立即消失，此即弹性变形部分。而另一部分变形则永久不会消失，这就是塑性变形部分。不同的金属材料这一阶段的明显程度各有不同。

(3) **断裂** 当外力超过某一极限时，材料发生断裂。

金属材料在外力作用下的失效形式虽然各种各样，但都不外是上述基本表现的某一形式。常见的失效形式及有关的机械性能如下：

1. **断裂** 常见的断裂有静载拉断和冲击断裂二种。材料对于静拉断的抗力称为抗拉强度；材料抵抗冲断的能力常以冲击韧性来衡量。

2. **塑性变形** 机械零件一旦出现塑性变形，往往因为失去了工作的准确性而不能继续使用。材料对于出现明显塑性变形的抗力叫做屈服强度。

3. **过量弹性变形** 弹性变形是每个受力另件所无法避免的，但是对有些另件来说这种变形的数量不能过大，如果超过某一限值也会失去零件工作的准确性。零件抵抗弹性变形的能力除与尺寸形状有关外，还和材料的弹性模数有关。

4. **磨损** 这是常见的失效形式之一，它和材料的硬度和其他许多因素有关。

一、强度与塑性——拉伸试验

拉伸试验可以测定材料在常温、静载下的强度和塑性，是最常用的材料试验方法。

把材料制成如图 1—1 所示的试样，然后将试样两端夹在拉伸试验机的夹头上进行拉伸。作用在试样上的拉力从零逐渐增加，试样则逐渐拉长，直到断裂为止。将拉伸过程中的拉力 P 和试样伸长量 Δl 同时记录下来，可以绘成图 1—2 所示的拉伸曲线。



图 1—1 钢的标准拉伸试样及拉断后的试样

由图 1—2 可知当，拉力小于 p_e 时，试样变形量与拉力大小成正比，此时若将外力去除，试样即能恢复原状。可见，这阶段的变形为弹性变形，弹性变形量一般很小。在 p_e 线段内，变形与外力之间稍微偏离直线关系，但仍属弹性变形，由于 p_e 段的很短，工程上常将 p_p 与 p_e 合而为一。外力超过 p_p 后，试样除弹性变形外还发生微量塑性变形。当外力增大一些到达 p_s 时，即使不再加大外力，试样仍能继续变形。这一现象说明此时材料失去了抵抗继续变形的能力，这

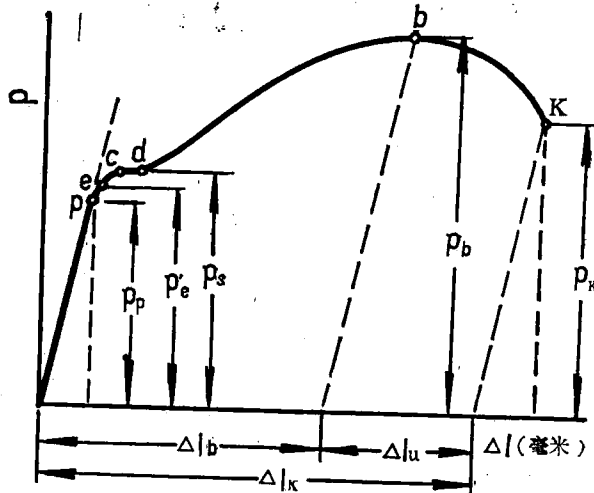


图 1—2 低碳钢的拉伸曲线

种现象称为“屈服”。屈服以后，材料不但有弹性变形，并且开始出现了明显的少量塑性变形，如 cd 段所示。若将外力去除，试样已经拉长一点，不能恢复到原有的长度了。 d 点以后，必须增大外力，变形才能继续进行。这时试样长度均匀地伸长，截面均匀地变细。外力达到 p_b 后，试样出现局部直径变细，称为“缩颈”现象。由于实际承载截面迅速减小，试样所能承受的总拉力开始下降，故 b 点为曲线的最高点。随后的变形主要集中在颈部，直至断裂。

1. 应力——应变曲线：

为了排除试样的尺寸因素，工程中将拉伸曲线变换为应力—应变曲线。

应力 材料受外力 P 作用时，内部相应产生与外力相平衡的内力 N 。单位面积上的内力称为应力。当材料单向受拉(或压)，所取截面 $m-m$ 垂直于作用力的方向时，应力可以从外力求得：

$$\sigma = \frac{N}{F_0} = \frac{P}{F_0} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (1-1)$$

F_0 ——试样拉伸前的原始截面积 (mm²)

应变 材料受外力作用或内部产生应力时会发生伸长(或缩短)。单位长度内的伸长量叫做应变 ϵ ，可从总伸长量求得

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100(\%) \quad (1-2)$$

L_0 ——试样拉伸前的原始长度 (mm)

Δl ——试样拉伸后的总伸长量 (mm)

可以从图1-2的拉伸曲线求得应力——

应变的关系曲线，如图1-4所示。由于式(1-1)，(1-2)中 F_0 、 L_0 为常数，所以两条曲线虽然坐标不同，但具有类似的形状。从应力——应变曲线可以直接求得材料的一些机械性能指标

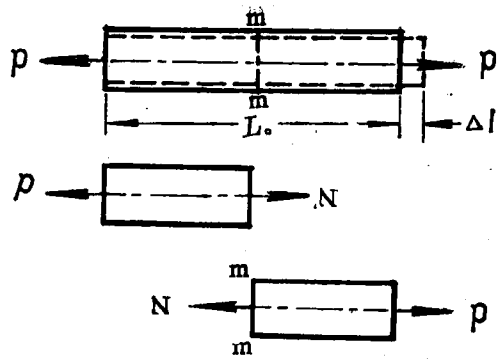


图1-3 材料所受的外力与内力

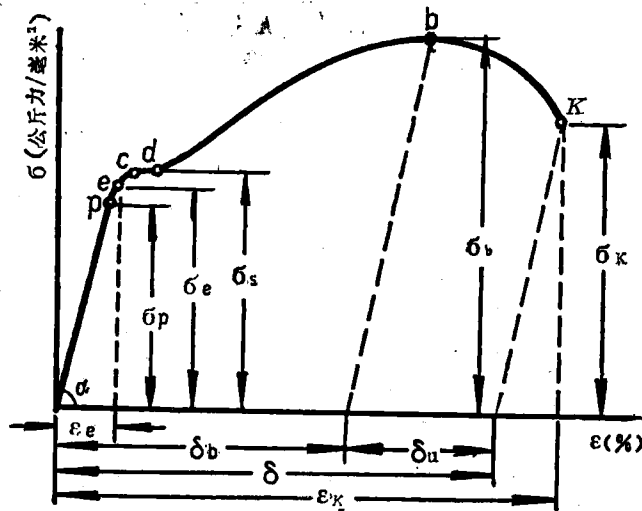


图1-4 低碳钢的应力—应变曲线

2. 刚度与弹性

在弹性范围内，应力与应变成正比关系，即服从虎克定律。比例常数 E 称为弹性模数

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{tg}\alpha \quad (1-3)$$

E 的物理意义是假想产生100%弹性应变时的应力大小。它可以作为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。

零件抵抗弹性变形的能力称为刚度，刚度大的零件受力后的弹性变形量较小。零件的刚度由其形状、尺寸和材料的弹性模数两个因素所决定，所以 E 是衡量材料刚度的指标， E 主要决定于材料原子间作用力的大小，它与原子本性、原子间距离密切相关。改变材料机械性能的一般手段：如合金化、热处理、冷热加工等，对原子间作用力的影响很小，因此 E 不能藉这些手段而发生明显的改变，它是材料最稳定的性能之一。由表

表1-1

材 料	E (kgf/mm ²)
镁	4500
铝	7200
锌	10000
铜	12100
铁	21000
碳 钢	21000
合金钢	21000
铸 铁	11500~16000
木 材	1000
钨	33000
钨	41000

1-1 的数据可知,各种钢的 E 都与纯铁相近,为 2.1×10^4 (kgf/mm²)。在常用金属材料中,钢的 E 最大。因此,当钢制零件的刚度不够时,不能靠更换钢材来解决,应该放大尺寸或改变结构形状。在特殊情况下,可以选用 Mo、W 等难熔金属。

弹性是金属材料发生弹性变形的能力。应力—应变曲线上的 σ_e 是材料不发生塑性变形所能承受的最大应力,称为弹性极限。对应于 σ_e 的应变值 ϵ_e 是衡量材料弹性大小的指标。

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$$

由上式可知,提高材料的弹性有两条途径:即提高材料的弹性极限 σ_e 和降低材料的弹性模数 E。由于 σ_e 可以采用合金化、热处理和冷、热加工等手段来改变,所以工业上往往通过提高钢的 σ_e 来提高弹性。在钢材之间比较时, σ_e 高就是弹性好。显然,受力大的硬弹簧一般都采用 σ_e 高的弹簧钢来制造。而对于受力不大但要求弹性变形量大的精密软弹簧来说,则采用弹性极限 σ_e 高而弹性模数 E 小的铍青铜和磷青铜来制造。

3. 强度

强度是金属在载荷作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。

拉伸试样开始产生少量塑性变形时的应力就是材料对少量塑性变形的抗力。 σ_s 和 σ_b 都属于这种抗力,两者数值接近,而后者容易测定,所以常用的是 σ_s ,称为屈服极限或屈服强度。

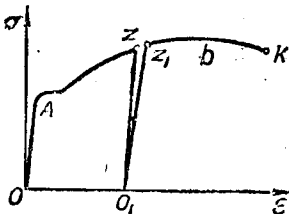


图 1-5 加工硬化现象

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

有些金属材料的屈服现象不明显(例如冷轧钢等),测定 σ_s 很困难。所以工程上一般规定以试样产生塑性变形 0.2% 时的应力作为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 般表示。

当试样拉伸超过屈服点以后,必须不断增大外力才能继续变形,如图 1-5 所示。如果在中途 Z 点卸除外力,则将沿 ZO₁ 斜线降到 O₁ 点。当再次加力时则沿 O₁Z₁ 线上升, O₁Z₁ 与 O₁Z 相重合,在应力达到 σ_z 以前,一直保持弹性变形,直到应力超过 σ_z 才再次发生塑性变形,也就是说,经过 Z 点以前这段塑性变形以后,材料的屈服强度从原来 σ_s 提高到 σ_z ,这种现象叫做加工硬化,它是工业生产中提高材料强度的方法之一。

试样拉断前所能承受的最大拉力为 P_b ,因此这时的应力 σ_b 直观地代表材料对拉断的抗力,叫做“抗拉强度”或“强度极限”。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

试样处于 b 点位置时已有大量塑性变形,因此这时的应力又是代表材料对大量塑性变形的抗力。

σ_s 和 σ_b 都是材料的强度指标,是设计机械零件的重要依据。材料的强度高,零件

或结构的尺寸就可能减小，重量可以减轻。或者在较大的载荷下不致发生塑性变形或破坏，增加使用的可靠性。

σ_s 和 σ_b 都是材料对塑性变形的抗力，影响这些抗力的因素很多，不但与金属元素原子间的结合力有关，而且与化学成分、组织结构及变形程度等有关。因此可以利用合金化、热处理及冷热加工等方法显著地改变材料的 σ_s 和 σ_b ，以适应加工或使用的要求。图 1—6 所示是五种金属材料的拉伸曲线，由此可以看出金属原子本性 & 合金化对金属各项机械性能指标的影响。

最后需要说明，应力 σ 由试样原始截面积 F_0 除以外力 P 而求得，叫做条件应力。

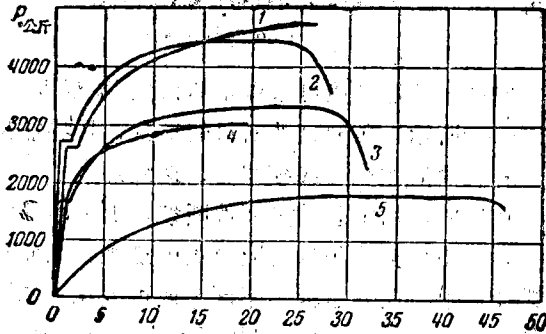


图 1—6 五种金属材料的拉伸曲线 1—铝青铜 2—含碳钢 0.35%的钢 3—含碳 0.15%的钢 4—硬铝 5—纯铜

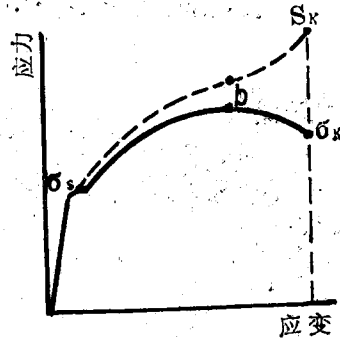


图 1—7 条件应力与真实应力

实际上，在拉伸过程中，试样的截面积 F 逐渐减小，实际的真实应力 S 该是试样的瞬时截面积除负荷 P ，即

$$S = \frac{P}{F} \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

在拉伸过程中，真实应力一直上升着，如图 1 虚线所示。最后断裂时，真实应力达到了最大值 S_k 。

4. 塑性

塑性是材料在外力作用下，断裂之前产生塑性变形的能力。材料在断裂前产生的塑性变形量越大，即表明其塑性越好。

塑性指标常以拉伸试验时的延伸率 δ 及断面收缩率 ψ 来表示。延伸率是试样拉断后，标距长度范围的伸长量 Δl 与原始标距长度 L_0 比值的百分率。

$$\delta = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100\% = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\%$$

断面收缩率是试样拉断处横截面积的减缩量 ΔF 与原始横截面积 F_0 比值的百分率。

$$\psi = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\% = \frac{F_0 - F_t}{F_0} \times 100\%$$

钢材优于其他材料的一个重要特征是它既有高强度又有很好的塑性，使它在制造过程中既能塑性成形，又不会丧失强度。材料的延伸率 δ 与断面收缩率 ψ 愈大，其塑性愈好，便于进行锻造、冲压、拉深与轧制等加工。一般低碳钢的断面收缩率可达 60%，延伸率可达 35%。而一般铸铁则两者几乎都等于零，因此它的毛坯成形只有铸造一种方法。

5. 断裂

断裂分韧性断裂和脆性断裂两种。经大量塑性变形之后而发生的断裂称为韧性断裂，其断口呈暗灰色的纤维状，如图 1—8 所示。未经明显塑性变形而发生的断裂称为脆性断裂，其典型断口是闪烁金属光泽的结晶状，如图 1—9 所示。

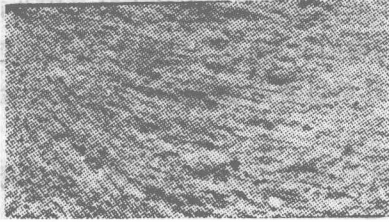


图 1—8 纤维状断口

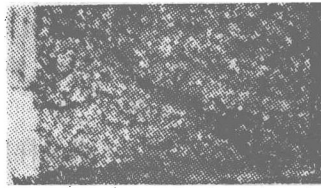


图 1—9 结晶状断口

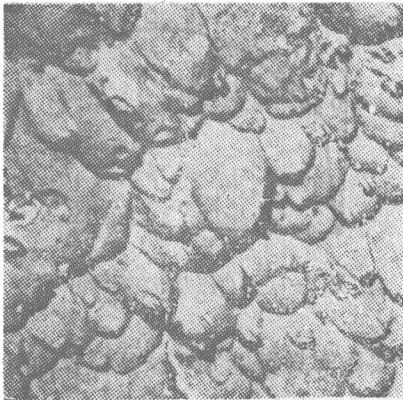


图 1—10 韧性断口的电子显微镜微观形貌

借助电子显微镜可以观察断口的微观形貌，图 1—10 所示为典型韧性断口的形貌，其特征是断口上有大量的微坑（或称韧窝、迭波）。

在实际使用中总希望韧性断裂，因为断前的塑性变形能使局部体积内的应力集中松弛，从而有可能避免断裂，防止事故。不同金属可表现为不同的断裂性质，即使同一种金属加载速度快、温度低也会引起脆断。此外变形的形式也有很大的影响。例如铸铁作单向拉伸时是脆性断裂，但作单向压缩时，能在断裂前产生一定的塑性变形。在三向压缩时。即使岩盐也能产生一定的塑性变形而不破裂。

其他静载试验

拉伸试验是常用的机械性能试验方法，对塑性材料能较正确地测定强度和塑性。但对于脆性材料却不能充分反映其各种性能。因此还需选用其他试验方法，如压缩，剪切，扭转，弯曲等。图 1—11、1—12、1—13、1—14 是几种基本的变形形式。

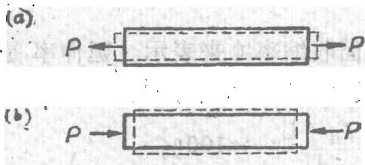


图 1—11 拉伸与压缩

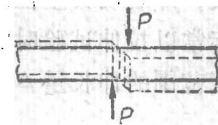


图 1—12 剪切

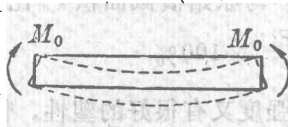


图 1—13 弯曲



图 1—14 扭转

1. 压缩试验

将低碳钢和铸铁试样做压缩试验所得的 $P-\Delta l$ 曲线变换成的 $\sigma-\epsilon$ 曲线，如图 1—15 所示。曲线表明，低碳钢在压缩时的 $\sigma-\epsilon$ 曲线在屈服极限以前与拉伸时基本相同。超过屈服极限以后，试样被压成鼓形，直径及横截面不断增大，条件应力 σ 迅速上升，

但试样不会发生断裂，所以不能测得压缩强度极限。

铸铁的 $\sigma - \epsilon$ 曲线没有直线部分，也没有屈服现象，在变形很小时，试样就发生破

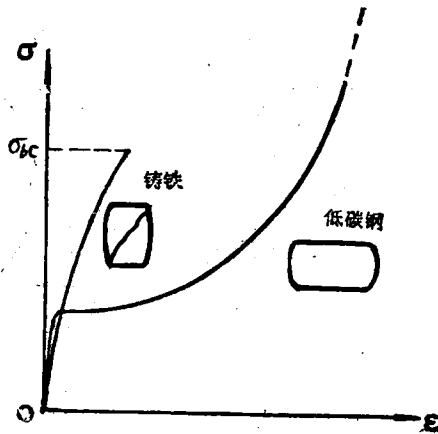


图 1-15 低碳钢与铸铁的压缩曲线

裂。因此可以测得压缩强度极限(或称抗压强度)，以 σ_{bc} 表示。铸铁的抗压强度约为抗拉强度的 4 倍左右。虽然铸铁的塑性很差，但用压缩试验却可以显示出不同铸铁的塑性差别。

2. 弯曲试验

铸铁、淬火钢等脆性和低塑性材料，常采用弯曲试验，测试抗弯强度极限 σ_{bb} 。在弯曲试验中，用弯曲挠度 f 来作为材料的塑性指标，它能将脆性材料的塑性明显地显示出来。

各种牌号的灰铸铁，其抗弯强度都比抗拉强度高，在 28~52 单位之间。弯曲挠度约在 2~9 单位之间。

二、硬 度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标，具有重要的实用价值。机械制造中所用的刀具和模具都应具有足够高的硬度，才能保证其使用性能和寿命。而被加工的工件，又必须具备足够低的硬度，才能顺利地加工。各种机器零件根据其工作条件的不同，常要求不同的硬度。

硬度试验是金属材料机械性能试验中最简单的一种，它无需制作专门的试样，可直接在工件上测试，但并不破坏工件，而且操作方法简单、迅速，所以应用广泛。

硬度值的物理意义随着试验方法的不同而有不同的含意，常用的压入法硬度值是指材料抵抗硬物压入的能力。在生产中广为应用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种。

1. 布氏硬度

布氏硬度的测定：用一定大小的载荷 P ，把直径为 D 的淬火钢球压入被测金属的表面，如图 1-16 (a) 所示。保持一定时间后卸除载荷，用压痕单位球面积上所承受的压力作为所测金属材料的硬度值，用符号 HB 表示，习惯上一般不标出单位。

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{F}{\pi Dh} = \frac{P}{\pi D \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

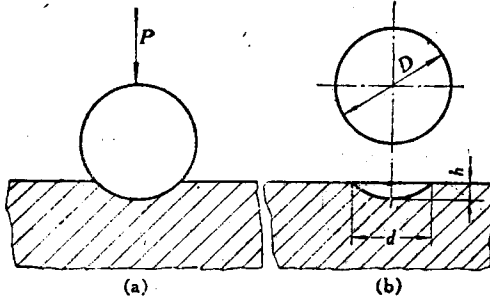


图 1—16 布氏硬度测定过程示意图

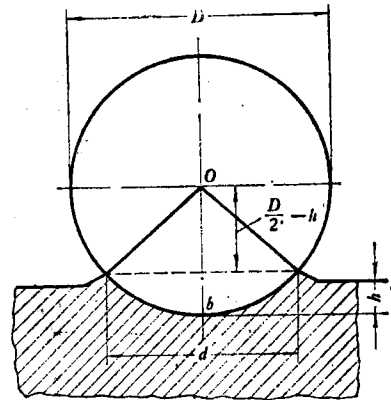


图 1—17 计算布氏硬度压痕面积示意图

布氏硬度试验时，钢球的直径和负荷 P 应根据被测金属的种类，性质和厚度按表 1—2 规定的标准选择。压出印痕以后，用专门的刻度放大镜测出压痕直径 d 的大小，再查布氏硬度值表，即可得到布氏硬度值。

表 1—2

金属种类	布氏硬度值范围 (HB)	试样厚度 (mm)	载荷 P 与钢球直径 D 的关系	钢球直径 D (mm)	载荷 P (kgf)	载荷保持时间 (S)
黑色金属	140~450	6~3	$P = 30D^2$	10	3000	10
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
黑色金属	<140	>6	$P = 10D^2$	10	1000	10
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属	>130	6~3	$P = 30D^2$	10	3000	30
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
有色金属	36~130	9~3	$P = 10D^2$	10	1000	30
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
金属	8~35	>6	$P = 2.5D^2$	10	250	60
		6~3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

计算证明，当采用不同的负荷与钢球直径时，只有满足 P/D^2 比值相同时，才能直

接进行比较。试验所得的压痕直径应在 $(0.25\sim 0.6)D$ 之内，若 $d < 0.25D$ ，或 $d > 0.6D$ ，灵敏度和准确性将随之降低。

由测定过程可知，布氏硬度的实质是金属材料对于局部发生大量塑性变形的抗力，硬度越高，表明金属抵抗塑性变形的能力越大。这与 σ_s 的物理意义有共同之处，都是材料对于大量塑性变形的抗力，两者单位也相同，只是试验时的应力状态有所不同，所以硬度值与强度值之间具有一定的对应关系。通过实验，求得了如下的经验公式，可以进行简单的换算：

$$\begin{aligned} \text{非淬硬钢,} & \quad \text{当 HB} < 175 \text{ 时} & \quad \sigma_s \approx 0.36 \text{ HB} \\ & \quad \text{当 HB} > 175 \text{ 时} & \quad \sigma_s \approx 0.34 \text{ HB} \end{aligned}$$

布氏硬度的优点：(1)压痕较大，其硬度值较为准确。(2)和其他机械性能，特别与抗拉强度之间存在一定的对应关系。缺点：(1)压头为淬硬钢，不能测试太硬的材料，一般在 HB450 以上就不宜使用。(2)压痕直径大，不宜用于成品检验。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度是应用最广的硬度试验法。它也是一种压痕试验法，但它不是测定压痕面积的大小，而是根据压痕的深度来衡量硬度。

洛氏硬度试验的压头有两种：一种是锥角为 120° 的金刚石圆锥体；另一种是直径为 1.588mm ($\frac{1}{16}$ 英寸)的淬硬钢球。所加载荷根据被试金属的不同而不同，常用的三种以符号 HRA、HRB、HRC 表示，其试验范围见表 1—3。载荷 P 分两次施加，先加少量初载荷 P_1 ，再加主载荷 P_2 ， $P = P_1 + P_2$ 。

表 1—3 洛氏硬度的试验规范

标度	压头类型	初载荷 (kgf)	总载荷 (kgf)	硬度值有效范围	适用场合
HRA	120° 金刚石圆锥	10	60	HRA > 70	硬质合金 表面淬火钢
HRB	1.588mm 直径钢球	10	100	HRB25~100	软钢、退火钢 有色金属
HRC	120° 金刚石圆锥	10	150	HRC20~67	一般淬火钢

洛氏硬度试验原理可用图 1—18 说明。先加初载荷 P_1 ，使压头紧密接触试件表面，并压入到 h_0 的位置，以作为衡量压入深度的起点。再加主载荷 P_2 ，使压头继续压入深度 h_1 。然后卸除 P_2 而保留 P_1 ， h_2 是试样弹性变形的恢复高度，则 h 即为压头在主载荷作用下压入金属表面的塑性变形深度。与布氏硬度法相仿，这个压痕也是试样在压应力作用下，局部产生大量塑性变形的结果。 h 值的大小可以用来衡量被测材料对这种大量塑性变形的抗力，即衡量材料的软硬程度。材料越

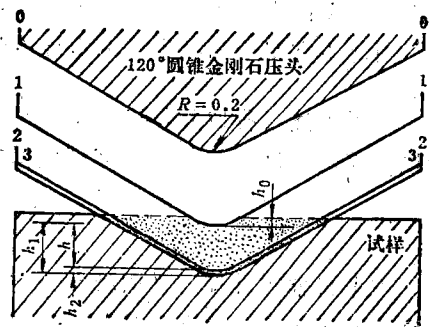


图 1—18 洛氏硬度试验原理图

软, h 值越大, 材料越硬, h_0 值越小。如果直接以深度 h 作为硬度值, 则将出现硬的材料 HR 值小, 软的材料 HR 值大的不正常现象。这与人们的习惯相反, 为了适应数值越大硬度越高的概念, 人为地规定, 以一个适当的常数 K 减去 h 的值作为洛氏硬度值的指标, 并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位(即表盘上一小格)

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$

用金刚石压头时, $K = 0.2\text{mm}$, 表盘上为 100 小格。用钢球压头时, $K = 0.26\text{mm}$, 表盘上为 130 小格。两者在表盘上的起点位置不同。

洛氏硬度值是一个没有单位的标量, 虽然它代表了材料对大量塑性变形的抗力, 但其具体数值却不是单位面积上的载荷, 因此不能像布氏硬度那样与抗拉强度建立简单的对应关系。这是它的一项缺点, 另一缺点是压痕太小, 对内部组织和硬度不均匀的材料, 硬度数据波动较大。但洛氏硬度有下列优点: (1) 操作迅速简便, 可从硬度计的表盘上直接读出硬度值。(2) 压痕较小, 可用于成品检验。(3) 测试的硬度范围大, 并可测定高硬度。

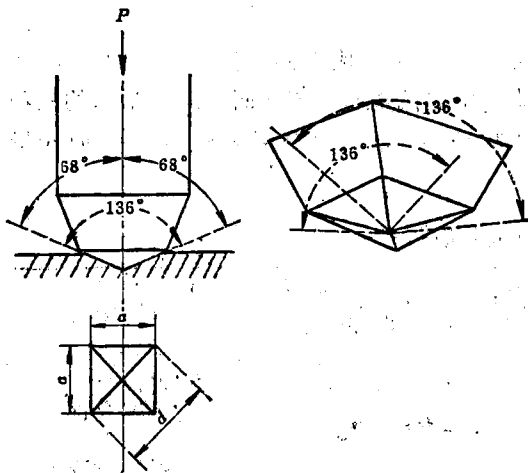


图 1—19 维氏硬度试验原理及其压头

显微硬度就是一种小载荷的维氏硬度, 一般使用的载荷为 $2 \sim 200\text{gf}$, 可测定金属内部不同组成物的硬度。(2) 角锥压痕轮廓清晰, 测量对角线精确度高, 故读数比布氏硬度更准确。缺点: 由于压痕小, 要准确测量对角线, 必须提高表面光洁度, 且测量操作较复杂, 因此不宜用于成批生产的常规检验。

除了上述三种以外, 还有不少硬度试验法。例如, 肖氏硬度是根据落锥回跳高度来衡量金属的硬度值。莫氏硬度是根据 10 种矿石对比刻划来分划硬度等级的。

三、冲击韧性

许多机器零件在工作时要承受冲击载荷, 如锻锤、冲床, 还有车辆突然刹车或改变速度时, 不少零件都会受到冲击。由于测量动态应力——应变曲线比较困难, 因此工程上就用破断前单位体积内所吸收的能量来表征材料承受冲击载荷的能力, 称为冲击

3. 维氏硬度

维氏硬度的测定原理与布氏硬度基本相同, 也是以压痕单位面积上的载荷来计量硬度值。但维氏硬度是采用锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体为压头。如图 1—19 所示。载荷 P 除以四方锥形压痕的表面积 F , 即为维氏硬度值。

$$Hv = \frac{P}{F} (\text{kgf/mm}^2)$$

实际测试时, 用测微计测出压痕两条对角线的平均长度, 就可从表中查得试样的维氏硬度值。

维氏硬度法的优点: (1) 所加载荷小, 压入深度浅可用于成品检验和薄层检验。

韧性。

工业上常用弯曲摆锤冲击试验来测定金属承受冲击载荷的能力，其试验方法和原理如图 1—20、21 所示。

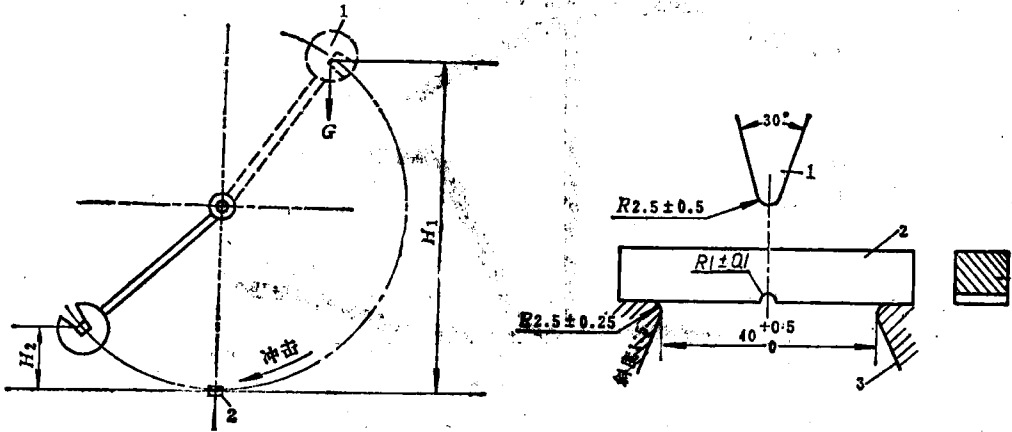


图 1—20 冲击试样的安放 1—摆锤 2—试样 图 1—21 冲击试验原理 1—摆锤 2—试样

把试样放在摆锤冲击试验机的支座上，将重量为 G 的摆锤举至高度 H_1 ，然后释放落下，冲断试样，并摆过支座回升到高度 H_2 ，则摆锤损失的势能即为冲断试样所作的功，称为冲击功 A_K 。

$$A_K = GH_1 - GH_2 \quad (\text{kgf} \cdot \text{m})$$

将 A_K 除以试样缺口处的截面积 F ，即得到冲击值 σ_K

$$\sigma_K = \frac{A_K}{F} = \frac{GH_1 - GH_2}{F} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2)$$

冲击值 σ_K 就是冲断试样时，在断面的单位面积上所消耗的能量，即冲击韧性。它作为材料抵抗冲击的一个参考机械性能指标，用来评定一般材料的韧脆程度和金属构件的可靠性。

冲击韧性对材料内在的和外界的变化因素很敏感。应当指出：温度对材料的 σ_K 值有很大影响。有些材料，在室温试验时并不显示脆性，但当温度降低时则可能发生脆性断裂，这种现象，叫做冷脆。材料由韧性状态向脆性状态转化的温度叫做冷脆转化温度，用 T_K ($^{\circ}\text{C}$) 表示。测定 T_K 的常用方法是系列冲击试验：

将待试钢种的许多冲击试样，在一段低温范围内进行试验，并将试验结果画成冲击值与温度的关系曲线，就会得出 S 型的曲线，如图 1—22 所示。一般取 $\sigma_K = 2 \text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ 相应的温度为 T_K 。

冷脆问题不但对于冷冻机、制氧机等低温设备密切相关，而且对于各种户外的设备与结构来说也甚为重要。四十年代国外数十条焊接船舶的开裂以及五十年代初期焊接桥梁的断裂等灾难性事故，其发生断裂的原因都是由于温度低于 T_K 。

近年的研究工作表明， σ_K 值作为机件承受冲击载荷的抗力指标，尚值得商讨。但这种一次摆锤冲击试验在检验金属材料内部结构的变化、脆性破坏情况以及鉴定热加工工艺规范的正确性方面，比其他试验方法敏感；试验过程也比较简便，故目前生产和科研中仍经常采用。

影响 σ_k 值和 T_k 值的因素很多,可分为内、外两类:(1)材料的化学成分和内部结构。

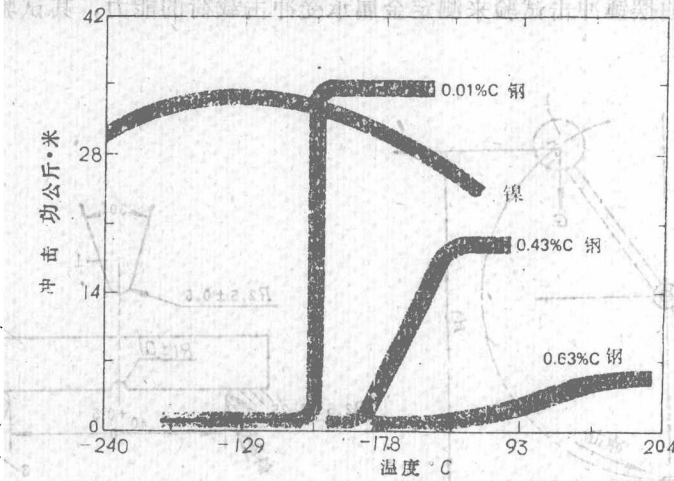


图 1—22 冲击功和试验温度的关系曲线

合金元素、晶粒大小、杂质和缺陷,以及强度和塑性都有明显的影响。碳钢的含碳量增加, σ_k 值下降, T_k 值升高,如图 1—22 所示。有不少金属元素,如 Ni、Cu、Al 等没有冷脆性。(2)外部因素,变形速度和试样缺口的尖锐程度也有很大影响。

四、抗疲劳性能

1. 机件在交变应力下表现的行为特点

转轴、弹簧及齿轮的轮齿等不少机件,在工作过程中,内部应力的方向或大小随时间而作周期性改变,这种应力叫做交变应力,或称反复应力。长期经受交变应力的机件常常会在远低于 σ_s 的应力下发生突然断裂,这种现象叫做“疲劳”。疲劳断裂与静载荷下的断裂不同,无论是脆性材料或韧性材料,断裂时都不产生明显的塑性变形,而是没有预兆的突然断裂,因此具有很大的危险性,疲劳断裂有特殊的宏观断口,由比较平滑的疲劳断口和普通的结晶状断口两部分组成,如图 1—23 所示。

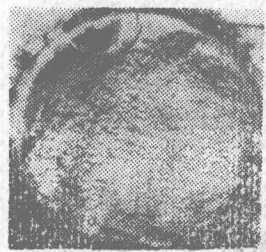


图 1—23 疲劳断裂的断口形貌

疲劳断裂的过程:一般认为,在交变应力作用下,其名义应力虽然远小于材料的抗拉强度。但是在表层的某些晶粒中,可能已经存在微裂纹;或者由于材料的内在缺陷(如显微裂纹、非金属夹杂物、脆性组织等),表面凹痕或缺口的应力集中而产生微裂纹,形成了疲劳裂纹的核心。在交变应力作用下,拉应力继续在裂纹尖端造成应力集中而使裂纹逐渐扩展。这样,机件的实际连接面积不断减小,而单位面积上的实际应力不断增大,最后实际连接面积上承受的应力大于材料的断裂强度,于是发生突然断裂。其断口即由疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区两部分所组成。

2. 疲劳性能的描述与测试

多年的研究发现,钢铁材料所受的交变应力 σ 与其断裂前的应力循环数 N 有如图 1—24 (a) 所示的曲线关系。这条曲线称为“疲劳曲线”或 $\sigma-N$ 曲线,由曲线可以看

出，交变应力的最大值 σ 愈低，则断裂前的循环次数 N 愈多。当 σ 降到某一数值后，疲劳曲线与横坐标轴平行，即表示应力低于此值时，材料可经受无限次应力循环而不断。这个应力值叫做疲劳极限，用 σ_{-1} 表示。

不同材料的疲劳曲线形状不同，大致可分为两类。常温下的钢铁材料，疲劳曲线上有明显的水平部分。有部分有色金属合金或高温下工作的钢材，其疲劳曲线上没有水平

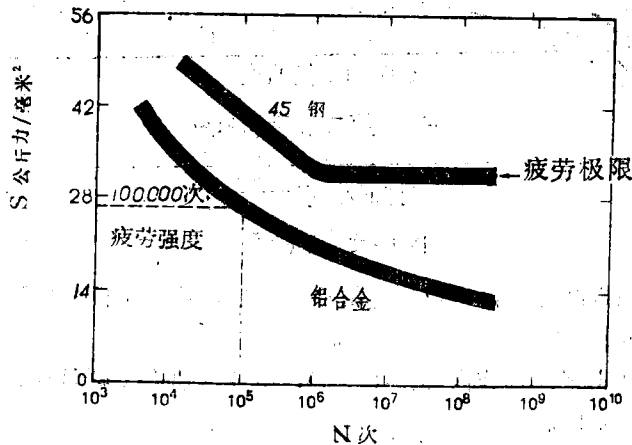


图 1-24 两类疲劳曲线

部分，如图 1-24 (b) 所示。对于这种材料，只得根据具体机件的工作条件和要求的使用寿命，人为地规定某一循环周次数，把所对应的应力值作为“条件疲劳极限”。例如，汽车发动机的曲轴取 $N_0 = 1.2 \times 10^8$ (次)，某种飞机发动机曲轴取 $N_0 = 1.8 \times 10^7$ 。

影响疲劳抗力的因素很多，不但与材料的化学成分、金相组织和内部缺陷密切相关，而且表面处理、工作条件以及零件的几何形状和表面光洁度都对它有显著影响。例如某种合金钢的粗车试样的 σ_{-1} 只有 30 kgf/mm^2 。经磨光后提高到 62 kgf/mm^2 ，若在中间钻一 $\phi 2$ 横孔， σ_{-1} 又降至 34，再经表面渗碳，则升到 44 kgf/mm^2 。尽量减少材料的内在缺陷和零件的表面损伤是减少疲劳损坏的途径之一。

五、抗蠕变性能

金属材料在常温下的机械性能与载荷持续时间关系不大，但在高温下则有很大影响。因此金属的高温机械性能不能简单地只用应力应变的关系来评定，还需加入温度与时间两个因素。评定高温机械性能的指标有数种，现介绍常用的抗蠕变性能。

金属材料在高于一定温度下受到应力作用，即使应力小于屈服强度，也会随着时间的增长而缓慢地产生塑性变形，这种现象称为蠕变。蠕变现象随温度升高而愈益显著。一般碳素钢当温度超过 $300-350^\circ\text{C}$ 以后，蠕变现象就较明显了。

蠕变现象可用蠕变曲线来描述，它是金属在一定温度和应力作用下，伸长率 ϵ 与时间的关系曲线，可通过蠕变试验来测定。其典型形状如图 1-25 中曲线 b 所示。按变形速度的变化情况可将此蠕变曲线分为三个阶段：

第一阶段 开始的变形速度很大，随后逐渐减小，趋向稳定。