

课题一

金属材料的性能



学习目标

- 掌握基本金属材料的力学性能的概念；
- 了解金属材料力学性能的评价指标和评价方法；
- 了解金属材料常用加工方法及其工艺性；
- 掌握布氏硬度和洛氏硬度的测定方法。



相关知识

金属材料由于具有许多良好的性能而被广泛地用于机械制造和生活用品的生产领域。为了能够合理地选用金属材料,从而设计、制造出具有竞争力的产品,必须了解和掌握金属材料的性能。

金属材料的性能分为使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用条件下所表现出来的性能,它包括力学性能、物理性能、化学性能;工艺性能是指金属材料在制造加工过程中反映出来的各种性能,如铸造性能、锻造性能等。

学习情境一 金属的力学性能

金属的力学性能是指金属在力的作用下所显示的与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能。弹性是指物体在外力作用下改变其形状和尺寸,当外力卸除后物体又恢复到其原始形状和尺寸的特性。应力是指物体受外力作用后所导致物体内部之间相互作用的力(称为内力)与截面积的比值。应变是指由外力所引起的物体原始尺寸或形状的相对变化,通常以百分数(%)表示。

金属的力学性能是设计和制造机械零件或工具的主要依据,也是评定金属材料质量的重要依据。选用各种金属材料除对其成分范围作规定外,还要对其力学性能作必要的规定。制造各类构件的金属材料都必须达到规定的性能指标。因此,熟悉和掌握金属的力学性能是非常重要的。

金属受力的性质不同,将表现出各种不同的反应,显示出各种不同的力学性能。金属的力学性能主要有强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度等。

一、强度

金属材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。载荷根据作用性质的不同,可以分为静载荷、冲击载荷及循环载荷等。静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。金属在静载荷作用下,抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切、扭转等形式,所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。一般情况下多以抗拉强度作为判别金属强度高低的依据。

金属的抗拉强度和塑性是通过拉伸实验测定的。拉伸实验的方法是将一定形状和尺寸的被测金属试样装夹在拉伸实验机上,缓慢施加轴向拉伸载荷,同时连续测量拉伸力和相应的伸长量直至试样断裂,根据测得的数据,即可计算出有关的力学性能。

1. 拉伸试样

在国家标准中,对拉伸试样的形状、尺寸及加工要求均有明确的规定,通常采用圆柱形拉伸试样,如图 1-1 所示。

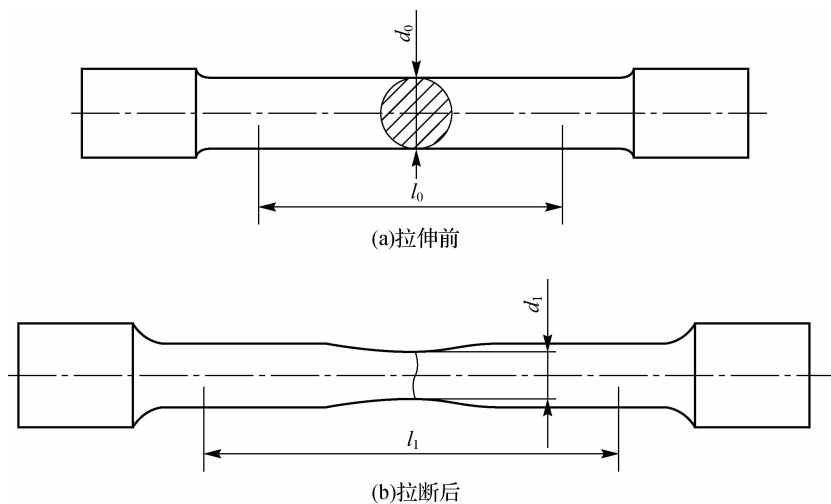


图 1-1 圆柱形拉伸试样

图中 d_0 为标准试样的原始直径; l_0 为标准试样的原始标距长度。根据标距长度与直径之间的关系, 拉伸试样可分为长试样 ($l_0 = 10d_0$) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$) 两种。

2. 力-伸长曲线

力-伸长曲线是指拉伸实验中记录的拉伸力 F 与试样伸长量 Δl 之间的关系曲线,一般由拉伸实验机自动绘出。图 1-2 所示为低碳钢试样的力-伸长曲线,图中纵坐标表示力 F ,单位为 N;横坐标表示试样伸长量 Δl ,单位为 mm。

观察力-伸长曲线,明显地表现出下面几个变形阶段:

(1) O_e ——弹性变形阶段。在力-伸长曲线图中, O_e 段为一斜直线, 说明在该阶段试样的伸长量 Δl 与拉伸力 F 之间成正比例关系。当拉伸力 F 增加时, 试样的伸长量 Δl 随之增加, 去除拉伸力后试样完全恢复到原始的形状及尺寸, 表现为弹性变形。 F_e 为试样保持完全弹性变形的最大拉伸力。

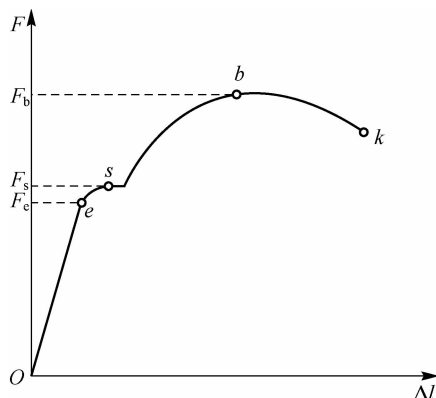


图 1-2 低碳钢试样的力-伸长曲线

(2) es ——屈服阶段。当拉伸力不断增加,超过 F_e 。再卸载时,弹性变形消失,一部分变形被保留下来,即试样不能恢复到原来的形状及尺寸,这种不能随拉伸力的去除而消失的变形称为塑性变形。当拉伸力继续增加到 F_s 时,力-伸长曲线出现平台,说明在拉伸力基本不变的情况下,试样的伸长量继续增加,这种现象称为屈服。 F_s 称为屈服拉伸力。

(3) sb ——冷变形强化阶段。屈服后,试样开始出现明显的塑性变形。随着塑性变形量的增加,试样抵抗变形的能力逐渐增加,这种现象称为冷变形强化。在力-伸长曲线上表现为一段上升曲线,该阶段试样的变形是均匀发生的。 F_b 为试样拉断前能承受的最大拉伸力。

(4) bk ——缩颈与断裂阶段。当拉伸力达到 F_b 时,试样上某个部位的截面发生局部收缩,产生“缩颈”现象。由于缩颈使试样局部截面减小,试样变形所需的拉伸力也随之降低,这时变形主要集中在缩颈部位,最终试样被拉断。缩颈现象在力-伸长曲线上表现为一段下降的曲线。

工程上使用的金属材料,大多没有明显的屈服现象。有些脆性材料,不仅没有屈服现象,而且也不产生“缩颈”现象,如高碳钢、铸铁等。图 1-3 所示为铸铁的力-伸长曲线。

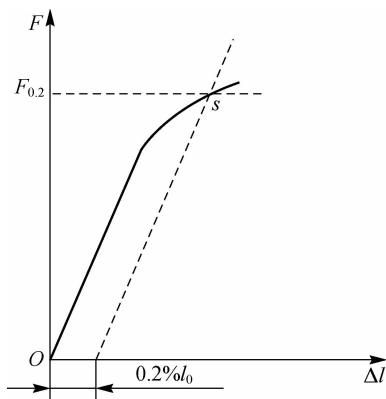


图 1-3 铸铁的力-伸长曲线

3. 强度指标

(1)屈服点。在拉伸实验过程中,拉伸力保持不变,试样仍然能继续伸长(变形)时的应力称为屈服点,用符号 σ_s 表示,单位为 MPa。计算公式为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中, F_s 为试样屈服时所承受的拉伸力, N; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

对于无明显屈服现象的金属材料,按国家标准的规定,可用屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 表示。 $\sigma_{0.2}$ 是指试样卸除拉伸力后,其标距部分的残余伸长率达到 0.2% 时的应力。计算公式为

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}$$

式中, $F_{0.2}$ 为残余伸长率达到 0.2% 时的拉伸力, N; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

屈服点 σ_s 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 是工程上极为重要的力学性能指标,是大多数机械零件设计和选材的依据,是评定金属材料性能的重要参数。零件在工作中所承受的应力超过屈服点或屈服强度时,会因过量的塑性变形而失效。

(2)抗拉强度。试样在拉断前所承受的最大应力称为抗拉强度,用符号 σ_b 表示,单位为 MPa。计算公式为

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中, F_b 为试样拉断前所承受的最大拉伸力, N; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

零件在工作中所承受的应力,不应超过抗拉强度,否则会导致断裂。 σ_b 也是机械零件设计和选材的依据,是评定金属材料性能的重要参数。

二、塑性

塑性是指金属材料在断裂前产生塑性变形的能力。通常用伸长率和断面收缩率来表示。

1. 伸长率

试样拉断后,标距的伸长量与原始标距的百分比称为伸长率,用符号 δ 表示。 δ 值可用下式计算。

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

式中, l_1 为拉断试样对接后测出的标距长度, mm; l_0 为试样原始标距长度, mm。

必须说明,同一材料的试样长短不同,测得的伸长率数值是不相等的。长试样和短试样的伸长率分别用符号 δ_{10} 和 δ_5 表示,习惯上 δ_{10} 也写成 δ 。

2. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率。用符号 ψ 表示。 ψ 值可用下式计算。

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

式中, S_0 为试样原始横截面积, mm^2 ; S_1 为试样拉断后缩颈处最小横截面积, mm^2 。

金属材料的伸长率和断面收缩率数值越大,说明其塑性越好。塑性直接影响到零件的成形加工及使用。例如,低碳钢的塑性好,能通过锻压加工成形,而灰铸铁塑性差,不能进行压力加工。塑性好的材料,在受力过大时,首先产生塑性变形而不致发生突然断裂,所以大多数机械零件除要求具有较高的强度外,还必须具有一定的塑性。

三、硬度

硬度是衡量金属软硬程度的一种性能指标,是指金属抵抗局部变形,特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。

硬度是各种零件和工具必须具备的力学性能指标。机械制造业中所用的刀具、量具、模具等都应具备足够的硬度,才能保证使用性能和使用寿命。有些机械零件如齿轮、曲轴等,也要求具有一定的硬度,以保证足够的耐磨性和使用寿命。因此,硬度是金属材料重要的力学性能之一。

硬度是一项综合力学性能指标,其数值可以间接地反映金属的强度及金属在化学成分、显微组织和各种加工工艺上的差异。与拉伸实验相比,硬度实验简便易行,而且可以直接在工件上进行实验,并不破坏工件,因而在生产中被广泛应用。

测试硬度的方法很多,最常用的有布氏硬度实验法、洛氏硬度实验法和维氏硬度实验法三种。

1. 布氏硬度实验法

(1)测试原理。使用一定直径的硬质合金球,以规定的实验力压入试样表面,经规定的保持时间后,去除实验力,测量试样表面的压痕直径,然后计算其硬度值,如图 1-4 所示。

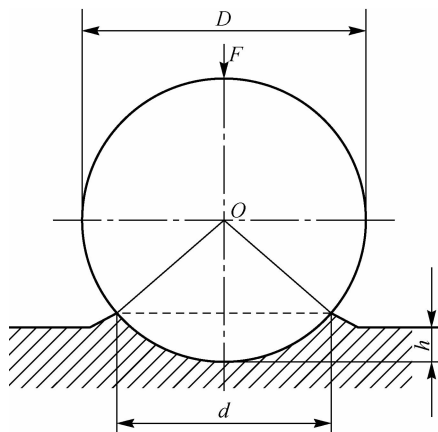


图 1-4 布氏硬度实验原理图

布氏硬度值是指球面压痕单位面积上所承受的平均压力,用符号 HBW 表示。布氏硬度值可用下式计算。

$$HBW = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中, F 为实验力,N; S 为球面压痕表面积, mm^2 ; D 为球体直径, mm ; d 为压痕平均直径, mm 。

间后卸除主实验力,在保留初实验力的情况下,根据测量的压痕深度来计算洛氏硬度值,如图 1-5 所示。

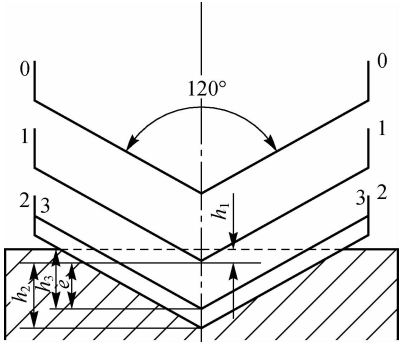


图 1-5 洛氏硬度实验原理图

进行洛氏硬度实验时,先加初实验力 F_0 ,压头压入试样表面,深度为 h_1 ,目的是消除因试样表面不平整而造成的误差。然后再加主实验力 F_1 ,在主实验力的作用下,压头压入深度为 h_2 。卸除主实验力,保持初实验力,由于金属弹性变形的恢复,使压头回升到压痕深度为 h_3 的位置,那么由主实验力所引起的塑性变形而使压头压入试样表面的深度 $e=h_3-h_1$,称为残余压痕深度增量。显然, e 值越大,则被测金属的硬度越低。为了符合数值越大,硬度越高的习惯,用一个常数 K 减去 e 来表示硬度值的大小,并以每 0.002 mm 压痕深度作为一个硬度单位,由此获得的硬度值称为洛氏硬度,用符号 HR 表示。计算公式为

$$\text{HR}=\frac{K-e}{0.002}$$

式中, K 为常数,用金刚石圆锥体压头进行实验时, K 为 0.2 mm,用淬火钢球压头进行实验时, K 为 0.26 mm; e 为残余压痕深度增量,mm。

- 洛氏硬度没有单位,实验时硬度值可直接从洛氏硬度计的刻度盘上读出。
- (2)常用洛氏硬度标尺及其适用范围。由于实验时选用的压头和总实验力的不同,洛氏硬度的测量尺度也就不同,常用的洛氏硬度标尺有 A、B、C 三种,其中 C 标尺应用较为广泛。三种洛氏硬度标尺的实验规范和应用范围见表 1-2。

表 1-2 三种洛氏硬度的实验条件和应用范围

标尺	硬度符号	压头	初实验力/N	主实验力/N	总实验力/N	测量范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	98.1	490.3	588.4	70~85	硬质合金、表面 淬火层、渗碳层等
B	HRB	钢球	98.1	882.6	980.7	25~100	退火或正火钢、 非铁金属等
C	HRC	金刚石圆锥	98.1	1 373	1 471.1	20~67	调质钢、淬火 钢等

(3)优缺点。洛氏硬度实验压痕较小,对试样表面损伤小,可用来测定成品、半成品或较薄工件的硬度;实验操作简便,可直接从刻度盘上读出硬度值;由于采用不同的硬度标尺,洛

氏硬度的测试范围大,能测量从极软到极硬各种金属的硬度。但是,由于压痕小,当材料的内部组织不均匀时,硬度数值波动较大,不能反映被测金属的平均硬度。因此,在进行洛氏硬度实验时,需要在不同部位测试数次,取其平均值来表示被测金属的硬度。

3. 维氏硬度实验法

维氏硬度的测试原理如图 1-6 所示。将相对面夹角为 136°的金刚石正四棱锥体压头按选定的实验力压入试样表面,经规定保持时间后卸除实验力,在试样表面形成一个正四棱锥形压痕。测量压痕两对角线的平均长度,计算压痕单位面积上承受的平均压力,以此作为被测金属的硬度值,称为维氏硬度,用符号 HV 来表示。维氏硬度可用下式计算。

$$HV=0.189\ 1\times\frac{F}{d^2}$$

式中, F 为实验力,N; d 为压痕两对角线长度的算术平均值,mm。

实验时,维氏硬度值像布氏硬度值一样,也可根据测得的压痕对角线平均长度,从表中直接查出。

维氏硬度实验所用的实验力可根据试样的大小、厚薄等条件进行选择,常用实验力的大小在 49. 03~980. 7 N 范围内。

维氏硬度值的表示方法与布氏硬度相同,硬度数值写在符号的前面,实验条件写在符号的后面。对于钢及铸铁,当实验力保持时间为 10~15 s 时,可以不标出。例如:

642HV30,表示用 294. 2 N 实验力保持 10~15 s 测定的维氏硬度值为 642;

642HV30/20,表示用 294. 2 N 实验力保持 20 s 测定的维氏硬度值为 642。

由于维氏硬度实验时所加实验力较小,压痕深度较浅,故可测量较薄工件的硬度,尤其适用于零件表面层硬度的测量,如化学热处理的渗层硬度测量,其结果精确可靠。因维氏硬度值具有连续性,范围为 5~1 000 HV,所以适用范围广,可测定从极软到极硬各种金属的硬度。但维氏硬度实验操作比较缓慢,而且对试样的表面质量要求较高。

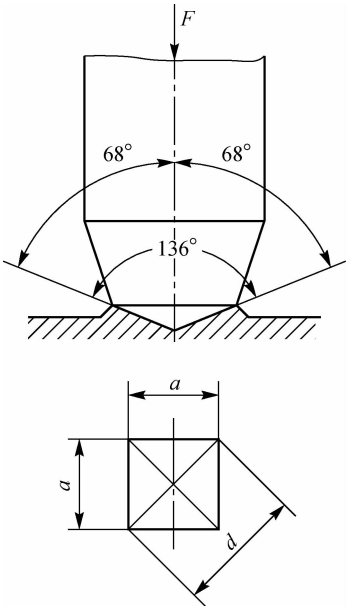


图 1-6 维氏硬度测试原理图

四、冲击韧度

强度、塑性、硬度等力学性能指标是在静载荷作用下测定的,而许多零件和工具在工作过程中,往往受到冲击载荷的作用,如冲床的冲头、锻锤的锤杆、风动工具等。冲击载荷是指在短时间内以很大速度作用于零件或工具上的载荷。对于承受冲击载荷作用的零件,除要求具有足够的静载荷作用下的力学性能指标外,还必须具有足够的抵抗冲击载荷的能力。

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为冲击韧度。为了测定金属的冲击韧度,通常要进行夏比冲击实验。

1. 测试原理

夏比冲击实验是在摆锤式冲击实验机上进行的,利用的是能量守恒原理。实验时,将被

测金属的冲击试样放在冲击实验机的支座上,缺口应背对摆锤的冲击方向,如图 1-7 所示。将重量为 G 的摆锤升高到 H 高度,使其具有一定的势能 GH ,然后让摆锤自由落下,将试样冲断,并继续向另一方向升高到 h 高度,此时摆锤具有的剩余势能为 Gh 。摆锤冲断试样所消耗的势能即摆锤冲击试样所做的功,称为冲击吸收功,用符号 A_K 表示。其计算公式为

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

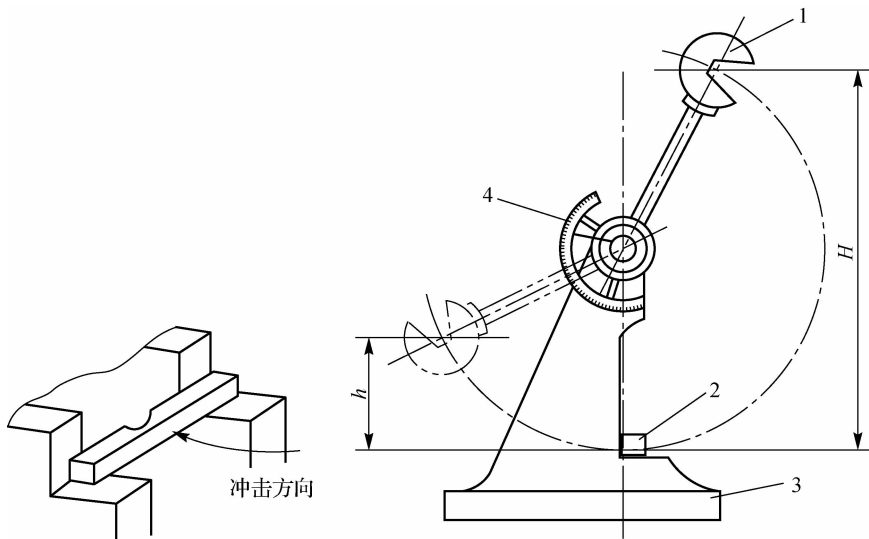


图 1-7 夏比冲击实验原理图

实验时, A_K 值可直接从实验机的刻度盘上读出。 A_K 值的大小就代表了被测金属韧性的高低,但习惯上采用冲击韧度来表示金属的韧性。冲击吸收功 A_K 除以试样缺口处的横截面积 S_0 ,即可得到被测金属的冲击韧度,用符号 α_K 表示。其计算公式为

$$\alpha_K = \frac{A_K}{S_0}$$

式中, α_K 为冲击韧度, J/cm^2 ; A_K 为冲击吸收功, J ; S_0 为试样缺口处横截面积, cm^2 。

一般将 α_K 值低的材料称为脆性材料, α_K 值高的材料称为韧性材料。脆性材料在断裂前无明显的塑性变形,断口比较平整,有金属光泽;韧性材料在断裂前有明显的塑性变形,断口呈纤维状,没有金属光泽。

2. 冲击试样

为了使夏比冲击实验的结果可以互相比,冲击试样必须按照国家标准制作,如图 1-8 所示。常用的冲击试样有夏比 U 形缺口试样和夏比 V 形缺口试样两种,其相应的冲击吸收功分别标为 A_{KU} 和 A_{KV} ,冲击韧度则标为 α_{KU} 和 α_{KV} 。

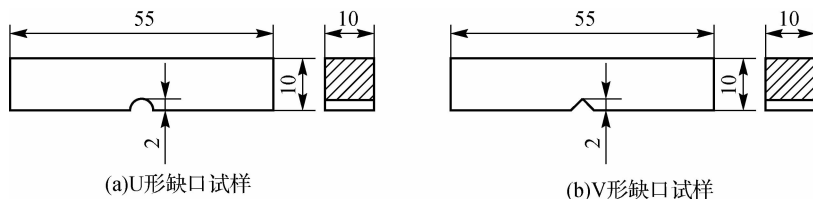


图 1-8 冲击试样

3. 韧脆转变温度

金属的冲击吸收功与冲击实验时的温度有关。同一种金属材料在一系列不同温度下的冲击实验中,测绘的冲击吸收功与实验温度之间的关系曲线,称为冲击吸收功-温度曲线,如图 1-9 所示。

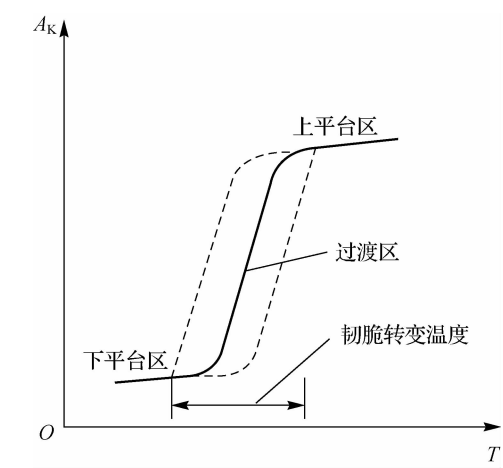


图 1-9 冲击吸收功-温度曲线

4. 多次冲击试样

在实际工作中,承受冲击载荷作用的零件或工具,经过一次冲击断裂的情况很少,大多数情况是在小能量多次冲击的作用下而破坏的。这种破坏是由于多次冲击损伤的累积导致裂纹的产生与扩展的结果,与大能量一次冲击的破坏过程有本质的区别。对于这样的零件和工具,已不能用冲击韧度来衡量其抵抗冲击载荷的能力,而应采用小能量多次冲击抗力指标。

小能量多次冲击实验的原理如图 1-10 所示。在一定的冲击能量下,试样在冲锤的多次冲击下断裂时,经受的冲击次数 N 就代表了金属抵抗小能量多次冲击的能力。

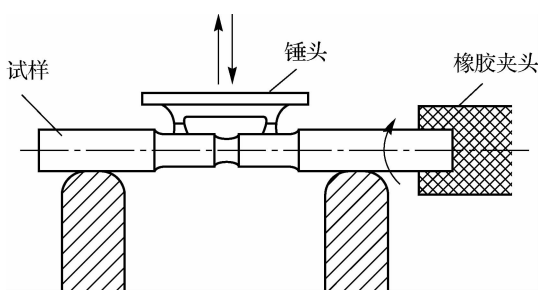


图 1-10 小能量多次冲击实验示意图

实践证明,冲击韧度高的金属材料,小能量多次冲击抗力不一定高。一般金属材料受大能量的冲击载荷作用时,其冲击抗力主要取决于金属的塑性;而在小能量多次冲击的情况下,其冲击抗力主要取决于金属的强度。

五、疲劳强度

1. 疲劳现象

许多机械零件都是在循环载荷的作用下工作的,如曲轴、齿轮、弹簧、各种滚动轴承等。循环载荷是指大小、方向都随时间发生周期性变化的载荷。承受循环载荷作用的零件,在工作过程中,常常在工作应力远低于制作材料的屈服点或屈服强度的情况下仍然会发生断裂,这种现象称为疲劳。疲劳断裂与静载荷作用下的断裂不同,不管是韧性材料还是脆性材料,疲劳断裂都是突然发生的,事先无明显的塑性变形预兆,故具有很大的危险性。

疲劳断裂是在零件应力集中的局部区域开始发生的,这些区域通常存在着各种缺陷,如划痕、夹杂、软点、显微裂纹等。在循环载荷的反复作用下,产生疲劳裂纹,并随应力循环周次的增加,疲劳裂纹不断扩展,使零件的有效承载面积不断减少,最后达到某一临界尺寸时,突然发生断裂。因此,疲劳破坏的宏观断口是由疲劳裂纹的策源地及其扩展区(光滑部分)和最后断裂区(粗糙部分)组成的,如图 1-11 所示。

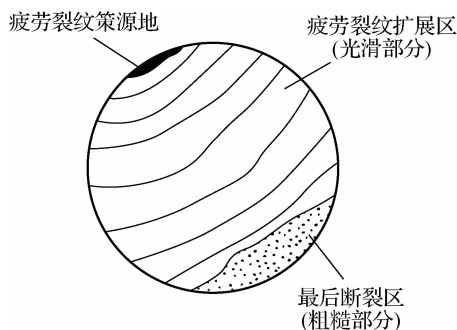


图 1-11 疲劳断口示意图

2. 疲劳强度

疲劳断裂是在循环应力作用下,经一定循环次数后发生的。在循环载荷作用下,金属所承受的循环应力 σ 和断裂时相应的应力循环周次数 N 之间的关系,可以用曲线来描述,这种曲线称为 σ - N 疲劳曲线,如图 1-12 所示。

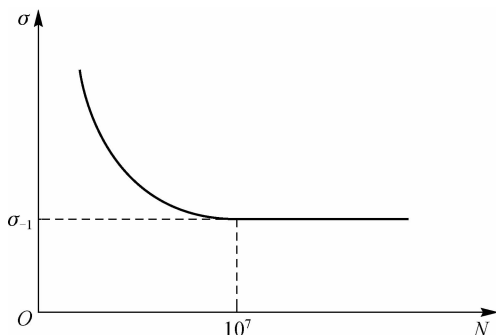


图 1-12 σ - N 疲劳曲线

金属在循环应力作用下能经受无限次循环而不断裂的最大应力值,称为金属的疲劳强度,对称循环应力的疲劳强度用符号 σ_{-1} 表示。显然 σ_{-1} 的数值越大,金属材料抵抗疲劳破坏的能力越强。

实际上,金属材料不可能作无数次循环应力实验,一般都是求疲劳极限,即对应于规定的循环基数,试样不发生断裂的最大应力值。对于铁金属,一般规定应力循环基数为 10^7 周次;对于非铁金属,则应力循环基数规定为 10^8 周次。

金属的疲劳极限受很多因素的影响,如工作条件、材料成分及组织、零件表面状态等。改善零件的结构形状、降低零件表面粗糙度、采取各种表面强化方法、尽可能减少各种热处理缺陷等都可以提高零件的疲劳极限。

学习情境二 金属的工艺性能

工艺性能是指金属在制造成各种机械零件或工具的过程中,对各种不同加工方法的适应能力,即金属采用某种加工方法制成成品的难易程度,它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能等。例如,某种金属材料用铸造成型的方法容易得到合格的铸件,则该种材料的铸造性能好。工艺性能直接影响零件的制造工艺和质量,是选择金属材料时必须考虑的因素之一。

一、铸造性能

金属在铸造成型过程中获得外形准确、内部健全的铸件的能力称为铸造性能。铸造性能包括流动性、收缩性和偏析等。流动性是指熔融金属的流动能力,它主要受金属的化学成分和浇注温度的影响,流动性好的金属容易充满铸型,从而获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件;收缩性是指铸件在凝固和冷却过程中体积和尺寸减小的现象,收缩不仅影响铸件的尺寸精度,还会使铸件产生缩孔、疏松、内应力、变形及开裂等缺陷,所以用于铸造的金属,其收缩率越小越好;偏析是指铸件凝固后其内部化学成分不均匀的现象,偏析严重时将造成铸件各部分的组织和力学性能相差很大,降低铸件的质量。

二、锻造性能

金属利用锻压加工方法成型的难易程度称为锻造性能。锻造性能的好坏主要取决于金属的塑性和变形抗力。塑性越好、变形抗力越小,金属的锻造性能就越好。例如,碳钢在加热的状态下有较好的锻造性能,铸铁则不能进行锻造。

三、焊接性能

焊接性能是指金属对焊接加工的适应能力,即在限定的施工条件下被焊接成按规定设计要求的构件,并满足预定使用要求的能力。焊接性能好的金属可以获得没有裂缝、气孔等缺陷的焊缝,焊接质量好,并且焊接接头具有一定的力学性能。如低碳钢具有良好的焊接性能,而高碳钢、铸铁的焊接性能较差。

四、切削加工性能

切削加工性能是指金属在切削加工时的难易程度。切削加工性能好的金属对使用的刀具磨损小,零件表面粗糙度低。影响切削加工性能的因素主要有金属的化学成分、组织状态、硬度、导热性、冷变形强化等。一般认为金属的硬度在 170~260 HBW 范围内时最易切削加工。如铸铁、铜合金、铝合金具有良好的切削加工性能,而高合金钢的切削加工性能较差。对金属进行适当的热处理,是改善其切削加工性能的重要途径。



课后练习

1. 画出低碳钢的拉伸曲线,并简述拉伸变形的几个阶段。
2. 有一低碳钢试样,原始标距长度为 100 mm,直径为 10 mm。在实验力达到 18 840 N 时试样产生屈服现象,实验力达到 36 110 N 时出现缩颈现象,然后被拉断。将已断裂的试样对接起来测量,标距长度为 133 mm,断裂处最小直径为 6 mm。试计算该材料的 σ_s 、 σ_b 、 δ 、 ψ 。
3. 现有标准圆形长、短试样各一根,经拉伸实验测得其伸长率均为 20%。问两试样中哪一根的塑性好?为什么?
4. 将 6 500 N 的拉伸力施加于直径为 10 mm、屈服强度为 520 MPa 的钢棒上,试计算并说明钢棒是否会产生塑性变形。
5. 布氏硬度实验法有哪些优缺点?它主要适用于何种场合的测试?
6. 指出下列硬度值表示方法上的错误。
12~15 HRC、800 HBW、550 N/mm² HBW、70~75 HRC。
7. 下列几种工件的硬度适宜哪种硬度法测量?
淬硬的钢件、灰铸铁毛坯件、硬质合金刀片、渗碳处理后的钢件表面渗碳层的硬度。
8. 什么是金属的疲劳断裂?生产中如何提高零件的抗疲劳能力?
9. 金属材料的冲击韧性与温度有什么关系?在选材时如何注意?
10. 提高金属材料的强度有什么实际工程意义?