

金属材料 及热加工

i n S h u

a i L i a o

i

e J i a G o n g

主 编：邹继生
副主编：章 跃

东南大学出版社

内 容 提 要

《金属材料及热加工》是高等学校工程类近机、非机专业和管理类专业的一门技术基础课,其任务是提供适当的知识和技能,使学生能正确了解并选择金属材料,正确了解并选择热加工工艺方法。着重讲述各种金属材料的性能和用途,而不深究其结晶过程;着重讲述各种热加工工艺方法的特点和适用范围,而不深究其工艺原理和工艺实施方法;每一章末尾,均对材料选择或工艺方法选择原则作一定的阐述;最后还对毛坯制造方法的综合选择原则作了总的阐述。本书对于结晶理论、工艺原理和各种工艺方法的新进展也作了适当的阐述,同时还以少许篇幅论及非金属材料,以助读者了解这方面的知识。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热加工/邹继生主著. - 南京:东南大学出版社,1999.9

ISBN 7-81050-528-9

I.金… II.邹… III.①金属材料-工艺 ②金属材料-基本知识 IV.TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 43332 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:洪焕兴

江苏省新华书店经销 南京京新印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15.5 字数:395 千
1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷
印数:1—1050 定价:28.00 元

前 言

《金属材料及热加工》对于近机类专业如机电工程、机械设备及自动化专业以及非机类专业如化学工程、土木工程等专业来说,是一门技术基础课,虽然它与原《金属工艺学》或《机械制造基础》的热加工部分均讲授金属材料及其主要的热加工工艺知识,但却有着明显的区别。

对于掌握了计算机学、电子学、机械学有关知识的机电工程师来说,他在企业的主要任务是如何保证先进的机电一体化设备的正常运行,并实施一定的改造。至于具体承担热、冷加工工艺工作、制造各种机械零部件,则是机械制造工艺工程师的任务。

基于这一考虑,本门课程的任务是教给学生适当的知识,使之能正确了解并选择金属材料,正确了解并选择热加工工艺方法。为此,本教材着重讲述各种金属材料的性能和用途,而不深究其结晶过程和构造;着重讲述各种热加工方法的特点和适用范围,而不深究其工艺原理和工艺实施方法。对于结晶理论和工艺原理也将给予适当的深入浅出的阐述。鉴于科学技术的飞速发展,本书对于相关的新工艺、新技术给予了应有的关注。

基于同样的考虑,本教材对于以培养化工工程师、食品工程师、土木工程师、轻工纺织工程师、管理类(如企业管理、设备管理、营销管理等)工程师为目标的各非机类高校专业来说,由于它们需要让学生对机械设备有一定了解,但又不具体承担制造零部件任务,故而也是适用的。

本教材大致的学时分配是:金属材料与热处理 24 学时,铸造 12 学时,锻压 12 学时,焊接 10 学时,毛坯制造方法选择 2 学时,合计 60 学时。

本教材由邹继生教授、王兴渤、章跃两位副教授和支前锋、丁红燕两位老师合编,由邹继生任主编、章跃任副主编。第一章由章跃、丁红燕编写;第二章、第五章由邹继生编写;第三章由王兴渤编写;第四章由支前锋编写。顾向阳和顾振华同志为本书出版给予了很多支持和帮助。

本书内容丰富实用,文字简明扼要,可供各有关本、专科院校作为教材,亦可供工矿企业技术人员、管理人员参阅。

本书自 1995 年起在校内使用,1999 年公开出版。

主 编

1999 年 1 月于江苏淮阴

目 录

第一章 金属材料及热处理

第一节 金属材料的力学性能	(1)
一、强度刚度及塑性	(1)
二、硬度	(4)
三、冲击韧度	(6)
四、疲劳极限	(7)
第二节 金属的结构与结晶	(9)
一、金属的晶体结构	(9)
二、纯金属的结晶	(11)
三、合金的结构与相图	(14)
第三节 铁碳合金	(17)
一、纯铁的同素异构转变	(17)
二、铁碳合金的基本相	(18)
三、铁碳合金相图分析	(19)
四、含碳量与铁碳合金力学性能的关系	(25)
五、Fe-Fe ₃ C 相图的应用	(26)
六、碳钢的分类及应用	(26)
第四节 钢的热处理	(31)
一、钢在加热时的转变	(31)
二、钢在冷却时的组织转变	(32)
三、钢的退火与正火	(37)
四、钢的淬火	(39)
五、钢的回火	(41)
六、钢的表面热处理	(43)
第五节 合金钢	(46)
一、合金元素在钢中的作用	(46)
二、合金结构钢	(47)
三、工具钢	(53)
四、特殊性能钢	(58)
第六节 铸铁	(61)
一、概 述	(61)
二、灰口铸铁	(62)
三、球墨铸铁	(63)
四、可锻铸铁	(65)

五、蠕墨铸铁	(66)
六、其他铸铁简介	(66)
第七节 有色金属及合金	(67)
一、铝及铝合金	(67)
二、铜及铜合金	(71)
三、滑动轴承合金	(73)
第八节 粉末冶金材料与硬质合金	(74)
一、粉末冶金材料	(75)
二、硬质合金	(75)
第九节 非金属材料	(76)
一、工程塑料	(76)
二、陶瓷材料	(78)
三、复合材料	(79)
第十节 零件的选材及热处理	(80)
一、机械零件材料的选用及毛坯选择	(80)
二、热处理技术条件的标注及工序位置	(84)
三、热处理与切削加工性的关系	(85)
四、典型零件材料选用及工艺分析	(86)
复习思考题	(89)

第二章 铸 造

第一节 砂型铸造	(92)
一、造型材料	(92)
二、各种造型方法的特点及应用	(92)
三、制芯及合箱	(96)
四、铸造工艺设计	(96)
第二节 特种铸造	(103)
一、金属型铸造	(103)
二、压力铸造	(104)
三、低压铸造	(106)
四、离心铸造	(107)
五、熔模铸造	(108)
第三节 常用铸造合金的工艺特点	(109)
一、合金的铸造性能	(109)
二、常用铸造合金的生产特点	(116)
第四节 铸造方法的选择	(118)
第五节 铸件质量与技术检验	(121)
一、铸件缺陷及其产生原因	(121)
二、铸件检验	(121)
三、铸件的修补	(122)

第六节 铸件结构设计	(123)
一、铸件外形的设计	(123)
二、铸件内腔的设计	(126)
三、铸件壁的设计	(127)
四、特种铸造方法对铸件结构的要求	(130)
五、组合铸件	(132)
第七节 铸造技术新进展	(133)
一、造型技术的发展	(133)
二、凝固理论研究对铸造技术的推动	(133)
三、铸件的轻量化和优质化	(135)
四、铸造金属基复合材料的研究	(135)
五、计算机在铸造中的应用	(136)
复习思考题	(137)

第三章 锻 压

第一节 金属的塑性变形	(143)
一、金属塑性变形的实质	(143)
二、塑性变形后金属的组织 and 性能	(144)
三、金属的可锻性	(146)
第二节 自由锻造	(148)
一、自由锻造设备	(148)
二、自由锻造基本工序	(151)
三、自由锻造的工艺规程	(153)
四、自由锻件的结构工艺性	(156)
第三节 模型锻造	(157)
一、模锻锤上模锻	(158)
二、胎模锻	(163)
三、热模锻压力机上模锻	(165)
四、摩擦压力机上模锻	(167)
五、平锻机上模锻	(168)
第四节 板料冲压	(169)
一、冲压设备	(170)
二、分离工序	(171)
三、变形工序	(174)
四、冲模的分类和构造	(177)
五、板料冲压件结构工艺性	(179)
第五节 先进锻压技术简介	(182)
一、精密模锻	(182)
二、零件的轧制	(183)
三、零件的挤压	(184)

四、摆动辗压	(186)
五、高速锤成形	(186)
第六节 常用锻压加工方法比较	(188)
复习思考题	(189)

第四章 焊 接

第一节 概 述	(191)
第二节 焊接方法	(192)
一、手工电弧焊	(192)
二、埋弧自动焊	(194)
三、氩弧焊	(195)
四、CO ₂ 气体保护焊	(196)
五、电渣焊	(197)
六、电阻焊	(197)
七、焊接电源及其发展概况	(199)
第三节 焊接结构	(199)
一、焊接接头金属组织与性能的变化	(199)
二、焊接应力与变形	(201)
三、焊接接头设计	(203)
第四节 常用金属材料的焊接	(207)
一、金属材料的焊接性	(207)
二、碳钢的焊接	(208)
三、合金结构钢的焊接	(209)
四、铸铁的焊补	(211)
五、有色金属的焊接	(212)
第五节 焊接接头缺陷及其检验	(213)
一、焊接缺陷及产生原因	(213)
二、焊接质量检验	(214)
复习思考题	(216)

第五章 机械零件毛坯制造方法的选择

第一节 毛坯制造方法选择的原则	(218)
第二节 毛坯常用制造方法选择	(219)
一、毛坯常用制造方法的种类与特点	(219)
二、选择毛坯制造方法时应考虑的因素	(220)
三、常用机械零件毛坯制造方法的选择	(220)
四、毛坯制造方法选择举例	(221)
复习思考题	(222)

实验指导书

 实验一 金属材料的硬度实验..... (223)

 实验二 铁碳合金平衡组织分析..... (227)

 实验三 钢的热处理..... (229)

附录..... (232)

参考文献..... (236)

第一章 金属材料及热处理

第一节 金属材料的力学性能

在机械制造业中,大多数机械零件和构件是由金属材料制成的。这些机器零件和构件在使用过程中最主要的功能是传递各种力和能。因此,在进行设计、选材和工艺评定时,工程中最关心的是材料受力时的行为,即材料的力学性能。

金属材料在外力作用下引起的变形过程一般可分为三个阶段:

(1) 弹性变形阶段。即在应力不大的情况下,变形量随应力增加而增加,当应力去除后变形完全消失。

(2) 塑性变形阶段。即金属材料所受应力超过一定数值后,再去除应力,这时材料的变形不能完全消失,而有残留变形存在,这部分残留变形即塑性变形。此阶段的变形通常都是由弹性变形和塑性变形两部分所组成。

(3) 断裂。当应力继续增大,金属在大量塑性变形之后即发生断裂。脆性材料在断裂之前往往没有明显的塑性变形阶段,这种断裂称为脆性断裂。而经大量的塑性变形之后发生的断裂,称为韧性断裂。

金属材料常有的力学性能包括:强度、硬度、刚度、塑性、冲击韧度和疲劳强度等。下面对这些力学性能加以讨论。

一、强度、刚度及塑性

首先介绍在进行材料力学性能研究时的一个重要的试验——拉伸试验,因为金属材料的强度、刚度、塑性等指标均可通过拉伸试验获得。

(一) 拉伸试验

金属材料的拉伸试验按 GB228 - 87 规定进行:按照国家标准规定加工出一定形状和尺寸的试样,如图 1-1(a)所示。其中试样和原始直径 d_0 和原始标距长度 l_0 是两个最主要的尺寸。将试样装夹在拉伸试验机上,然后对试样逐渐施加拉伸载荷,直到把试样拉断为止。再根据试样在拉伸过程中承受的载荷和原始标距长度 l_0 产生的变形量之间的关系,测绘出该金属的拉伸曲线。

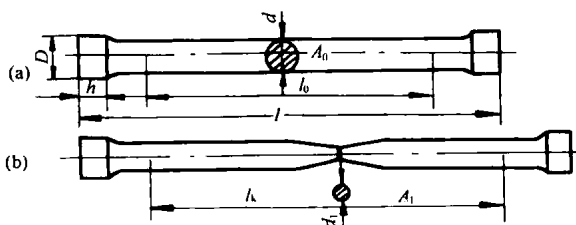


图 1-1 圆形拉伸试样

(a) 拉伸前 (b) 拉伸后

图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线。由图可见,低碳钢试样拉伸过程,可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷不超过 P_p 时,拉伸曲线 O_p 为一直线,即试样的伸长量与载荷成正比例增加,试样处于弹性变形阶段。载荷在 $P_p \sim P_e$ 间,试样的伸长量与载荷已不再成正比关系,拉伸曲线不成直线,但试样仍处于弹性变形阶段。

载荷超过 P_e 后,试样开始有塑性变形产生。当载荷达到 P_s 时,试样开始产生明显的塑性变形,在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段,这种现象称为“屈服”。试样屈服以后,随着载荷 P 的增加试样塑性变形的量也增加,塑性变形在试样各处均匀地进行。

当载荷继续增加到某一最大值 P_b 时,试样的局部截面缩小,即此时塑性变形集中在试样某一局部区域,产生所谓“缩颈”现象(图 1-1(b))。由于试样局部截面的逐渐减少,试样承载力也降低,表现为载荷也逐渐降低,当达到拉伸曲线上 k 点时,试样随即断裂。

将拉断以后的试样再紧密地对接在一起,发现原标距 l_0 由于塑性变形变成 l_k (图 1-1(b)),记 $\Delta l_k = l_k - l_0$,则 Δl_k 为拉伸过程中的塑性变形的量。

由拉伸曲线图 1-2 可见,断裂时试样总伸长 Of 中 gf 是弹性变形, $Og(\Delta l_k)$ 是塑性变形。塑性变形中 $Oh(\Delta l_b)$ 是试样产生缩颈前的均匀塑性变形, $hg(\Delta l_u)$ 是颈部的局部塑性变形或集中塑性变形。

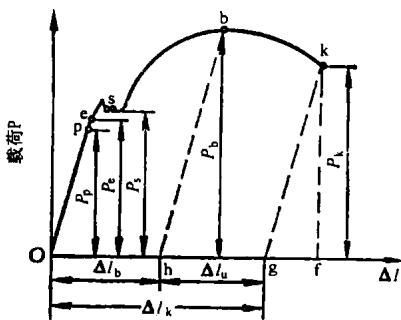


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

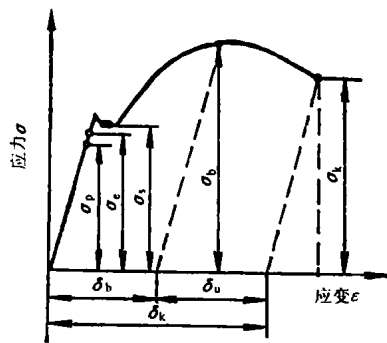


图 1-3 低碳钢的应力-应变曲线

低碳钢在断裂前有明显的塑性变形,所以它的断裂是韧性断裂。

由于拉伸曲线上的载荷 P 与伸长量 Δl 不仅与试验的材料性能有关,还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响,需采用应力-应变曲线。

把试样承受的载荷除以试样的原始横截面积 A_0 ,则得到试样所受的应力为 σ ,即

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \tag{1-1}$$

把试样的伸长量 Δl 除以试样的原始标距长度 l_0 ,则得到试样的相对伸长,即应变 ϵ ,即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{1-2}$$

以 σ 与 ϵ 为坐标,绘出应力-应变的关系曲线,叫做应力-应变曲线。图 1-3 为低碳钢的应力-应变曲线示意图。应力-应变曲线的形状与拉伸曲线完全相似,只是坐标与数值不同。但它不受试样尺寸的影响,可以直接看出金属材料的一些力学性能。

(二) 材料的弹性模量和刚度

由图 1-3 所示的应力-应变曲线中的弹性变形阶段可测出材料的弹性模量(E),并依此确定该材料的刚度。

弹性模量 E 是指金属材料在弹性状态下的应力与应变的比值,即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{1-3}$$

在应力-应变曲线上,弹性模量就是试样在弹性变形阶段应力-应变线段的斜率,它能够反

映出金属材料抵抗弹性变形的能力。

工程上将材料抵抗弹性变形的能力称为刚度。拉伸时的刚度常用试样的原始横截面积 A_0 与该材料的弹性模量 E 的乘积 ($A_0 E$) 表示。将式(1-1)与式(1-2)代入式(1-3), 经整理后, 可求得材料产生的弹性变形量 $\Delta l = Pl_0/EA_0$, 由此式可见, 当 P 与 l_0 一定时, 材料的刚度 (EA_0) 愈大, 产生弹性变形量 (Δl) 就愈小。

绝大多数的机械零件都是在弹性状态下进行工作的。工作过程中, 一般不允许有过量的弹性变形, 更不允许有明显的塑性变形, 故对刚度都有一定的要求。提高零件刚度的办法, 除了增加零件横截面积或改变截面形状外, 从金属材料性能上考虑, 就必须增加其弹性模量 E 。弹性模量 E 值主要取决于各种金属材料的本性, 而热处理和塑性变形等对它的影响很小, 它是一个对组织不敏感的力学性能指标。

(三) 强度

强度是指金属材料在静载荷作用下, 抵抗塑性变形和断裂的性能。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式, 所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。通过拉伸试验, 可确定材料的屈服强度和抗拉强度(强度极限)两项指标。

1) 屈服强度(又称屈服点)

屈服强度是材料抵抗塑性变形的能力, 屈服强度用 σ_s 表示, 在数值上, 是材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值, 即

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad (1-4)$$

式中: P_s ——试样发生屈服时的载荷, 即屈服载荷;

A_0 ——试样的原始横截面积。

工业上使用的某些金属材料(如高碳钢和某些经热处理后的钢等), 在拉伸试验中没有明显的屈服现象发生, 故无法确定其屈服点 σ_s 。按 GB228-87 规定, 可用屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 来表示该材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值。这时屈服强度为试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时的应力值, 即

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{A_0} \quad (1-5)$$

式中: $P_{0.2}$ ——试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时的载荷;

A_0 ——试样的原始横截面积。

一般机械零件不仅是在破断时形成失败, 而且往往是在发生少量塑性变形后, 零件精度降低或与其它零件的相对配合受到影响时就形成了失败。所以, 屈服点或屈服强度就成为零件设计时的主要依据, 同时也是评定金属材料强度的重要指标之一。

2) 强度极限(又称抗拉强度)

强度极限是受力时抵抗断裂的能力, 强度极限用 σ_b 表示:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0}$$

式中: P_b ——试样在破断前所承受的最大载荷;

A_0 ——试样的原始横截面积。

由于强度极限表示材料抵抗断裂能力, 在工程上它也是零件设计时的重要依据。同时也是评定金属材料强度的重要指标之一。

(四) 塑性

塑性是指金属材料在静载荷作用下,产生塑性变形而不被破坏的能力。延伸率 δ 和断面收缩率 φ 是表示材料塑性好坏的两个指标。

1) 延伸率

延伸率是指试样拉断后标距增长量与原始标距长度之比,即

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中: l_k ——试样断裂后的标距长度;

l_0 ——试样原始标距长度。

材料的延伸率 δ 越大,材料的塑性就越好。工程上,通常按 δ 的大小,把材料分为两大类: $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料,如低碳钢、黄铜等; $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料,如灰口铸铁等。

2) 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比,即

$$\varphi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中: A_k ——试样断裂处的最小横截面积;

A_0 ——试样的原始横截面积。

同样,材料的断面收缩率 φ 越大,其塑性越好。

虽然塑性指标通常不直接用于工程设计计算,但任何零件都要求材料具有一定塑性。因为零件使用过程中,偶然过载时,由于能发生一定的塑性变形而不致于突然脆断。同时,塑性变形还有缓和应力集中、削减应力峰的作用,在一定程度上保证了零件的工作安全。此外,各种成型加工(如锻压、轧制、冷冲压等)都要求材料具有一定的塑性。

二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。目前生产中,测定硬度方法最常用的是压入硬度法,它是用一定几何形状的压头,在一定载荷下,压入被测试的金属表面,根据被压入程度来测定其硬度值。用同样的压头,在相同载荷作用下,压入金属材料表面时,若压入程度愈大,则材料的硬度值愈低;反之,硬度值就愈高。因此,压入法所表示的硬度是指材料表面抵抗更硬物体压入的能力。

硬度试验设备简单,操作迅速方便,又可直接在零件或工具上进行试验而不破坏工件,并且还可根据测得的硬度值估计出材料的近似强度极限和耐磨性(耐磨性是指材料抵抗磨损的能力)。此外,硬度与材料的冷成型性、切削加工性、可焊性等工艺性能间也存在着一定的联系,可作为选择加工工艺的参考。由于以上原因,硬度试验在实际生产中作为产品质量检查、制定合理加工工艺的最常用的重要试验方法。在产品图纸的技术条件中,硬度也是一项主要技术指标。

测定硬度的方法很多,生产中应用较多的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等试验方法。

(一) 布氏硬度

布氏硬度试验法是用一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球,在规定载荷 P 的作用下压入被测试金属的表面(如图 1-4 所示),停留一定时间后卸除载荷,测量被测试金属表面上所形成的压痕直径 d ,由此计算压痕的球缺面积 F ,然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力

(P/F), 以此作为被测试金属的布氏硬度值。

当压头为淬火钢球时, 硬度符号为 HBS, 适用于布氏硬度值低于 450 的金属材 料; 当压头为硬质合金球时, 硬度符号为 HBW, 适用于布氏硬度值为 450 ~ 650 的金属材 料。故布氏硬度值应为

$$HBS(或 HBW) = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-9)$$

式中载荷 P 的单位为牛[顿](N), 球体直径 D 与压痕直径 d 的单位为毫米(mm), 因此布氏硬度的单位为牛[顿]/毫米²(N/mm²), 但习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。

布氏硬度表示方法采用硬度符号 HBS 或 HBW 前面加硬度值, 如 120 HBS, 500 HBW 等。硬度数值越大, 表示硬度越高。

在进行布氏硬度试验时, 应根据被测试金属材料的种类和试样厚度, 选用不同大小的球体直径 D 、施加载荷 P 和载荷保持时间。按 GB231-84 规定, 球体直径有 10 mm、5 mm、2.5 mm、2 mm 和 1 mm 五种; 载荷与球体直径平方的比值(P/D^2)有 30、15、10、5、2.5、1.25 和 1 七种(可根据金属材料的种类和布氏硬度范围, 按表 1-1 选定 P/D^2 值); 载荷的保持时间, 黑色金属为 10 ~ 15 s, 有色金属为 30 s, 布氏硬度值小于 35 时为 60 s。

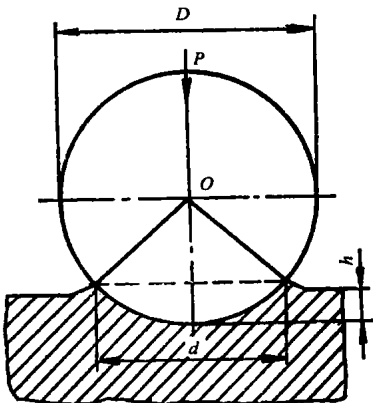


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

表 1-1 布氏硬度试验的 P/D^2 值的选择

材 料	布 氏 硬 度	P/D^2 ^①
钢及铸铁	< 140	10
	> 140	30
铜及其合金	< 35	5
	35 ~ 130	10
	> 130	30
轻金属及其合金	< 35	2.5(或 1.25)
	35 ~ 80	10(或 5, 15)
	> 80	10(或 15)
铅、锡		1.25(或 1)

① 试验条件允许时, 应尽量选用 10 mm 球和无括号的 P/D^2 值。

由式(1-9)可见, 当载荷 P 与球体直径 D 选定时, 硬度值只与压痕直径 d 有关。 d 愈大, 则布氏硬度值愈小; 反之, d 愈小, 硬度值愈大。在实际测试时, 硬度值不必用式(1-9)计算, 一般用刻度放大镜测出压痕直径 d , 然后根据 d 值查看事先做好的 d 与 HBS 对照表, 即可求得所测的硬度值。

布氏硬度试验法因压痕面积较大, 能反映出较大范围内被测试金属的平均硬度, 故试验结果较精确。但同时, 因压痕较大, 不宜测试成品或薄片金属的硬度。

(二) 洛氏硬度

洛氏硬度试验法是目前工厂中应用最广泛的试验方法。它是用一个锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体或一定直径的钢球为压头, 在规定载荷作用下压入被测试金属表面, 由压头在金属表

面所形成的压痕深度来确定其硬度值。

洛氏硬度 HR 的计算公式为

$$HR = \frac{k - h}{0.002} \quad (1-10)$$

式中, k 为常数, 用金刚石圆锥体作压头时, $k = 0.2 \text{ mm}$; 用钢球作压头时, $k = 0.26 \text{ mm}$ 。 h 为压痕深度 (mm), 在规定的载荷下均有 $k > h$ 。在实际操作中, 洛氏硬度的数值不用计算, 可在硬度计的指示器上直接读出。

为了能用同一硬度计测定从极软到极硬材料的硬度, 可采用不同的压头和载荷, 组成几种不同的洛氏硬度标尺, 其中最常用的是 HRA、HRB、HRC 三种标尺, 表 1-2 为这三种标尺的试验条件和应用范围。

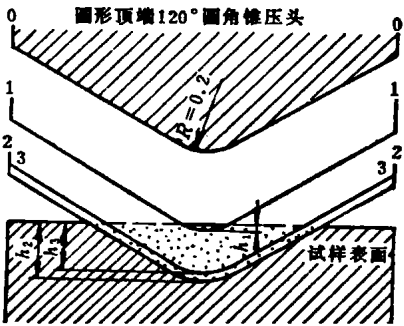


图 1-5 洛氏硬度试验原理示意图

表 1-2 常用洛氏硬度标尺的试验条件和应用

标尺符号	所用压头	总载荷/N	测量范围 HR	应用范围
HRA	金刚石圆锥	600	60 ~ 85	碳化物、硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢
HRB	1/16" (φ1.588 mm) 钢球	1 000	25 ~ 100	软钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
HRC	金刚石圆锥	1 500	20 ~ 67	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

洛氏硬度的表示方法为: 数字 + 洛氏硬度标尺符号, 如 50 HRC, 58 ~ 62 HRC 等。在同一个硬度标尺下, 硬度值越高, 表示材料的硬度越大。

洛氏硬度试验法的优点是操作迅速简便, 由于压痕较小, 故可在工件表面或较薄的金属上进行试验。同时, 采用不同标尺, 可测出从极软到极硬材料的硬度。其缺点是因压痕较小, 对组织比较粗大且不均匀的材料, 测得的硬度不够准确, 一般需测 3 ~ 5 次再取平均值。

硬度的测定还有其它方法, 但布氏硬度和洛氏硬度是两种最常用的方法。

(三) 两种硬度间的近似关系及强度与硬度的关系

由于各种硬度试验的条件不同, 因此相互间没有理论的换算关系。但根据试验结果, 可获得粗略换算公式如下:

当硬度在 200 ~ 600 HBS (或 HBW) 范围内 $1 \text{ HRC} \approx \frac{1}{10} \text{ HBS (或 HBW)}$

另外, 硬度和抗拉强度之间有近似正比关系:

$$\sigma_b = K \cdot \text{HBS} \times 10 \text{ (MPa)}$$

式中 K 为系数, 对不同材料和其不同的热处理状态 K 值不同, 如碳钢的 K 值为 0.36, 调质状态的合金钢为 0.34, 铸铝为 0.26。

三、冲击韧度

冲击韧度是金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力。以很大速度作用于工件上的载荷称为冲击载荷。

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、内燃机的活塞销与连杆、风动工具等。由于冲击载荷的加载速度高, 作用时间短, 使金属在受冲

击时,应力分布与变形很不均匀。故对承受冲击载荷的零件来说,仅具有足够的静载荷强度指标是不够的,还必须具有足够抵抗冲击载荷的能力。

金属材料的冲击韧度,一般采用一次冲击弯曲试验来加以评定。一次冲击弯曲试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行。为了使试验结果能相互比较,所用试样必须标准化。按 GB229-84 和 GB2106-80 规定,冲击试验标准试样有夏比 U 型缺口试样和夏比 V 型缺口试样两种。习惯上前者简称为梅氏试样,后者为夏氏试样。两种试样的尺寸及加工要求如图 1-6 及图 1-7 所示。

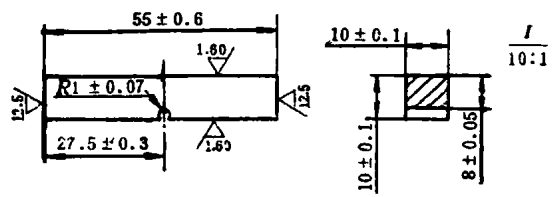


图 1-6 夏比 U 型缺口试样

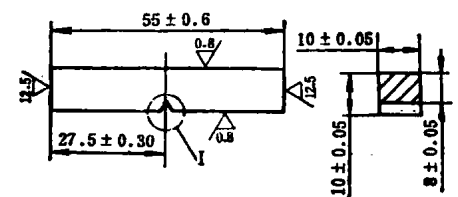


图 1-7 夏比 V 型缺口试样

试验时,将试样放在试验机两支座上(如图 1-8 所示),把质量为 G 的摆锤抬到 H 高度(如图 1-9 所示),使摆锤具有位能 GHg (g 为重力加速度)。然后释放摆锤,将试样冲断,并向另一方向升高到 h 高度,这时摆锤具有位能为 Ghg 。故摆锤冲断试样失去的位能为 $GHg-Ghg$,这就是试样变形和断裂所消耗的功,称为冲击吸收功。冲击吸收功用 A_k 表示,单位为焦耳(J)。冲击吸收功的值可从试验机的刻度盘上直接读得。冲击吸收功除以试样缺口底部横截面积 F ,即获得冲击韧度值 a_k ,单位为焦耳/厘米²(J/cm²)。即

$$a_k = \frac{A_k}{F} \tag{1-11}$$

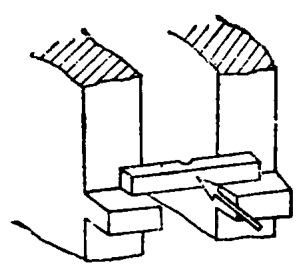


图 1-8 试样安放位置

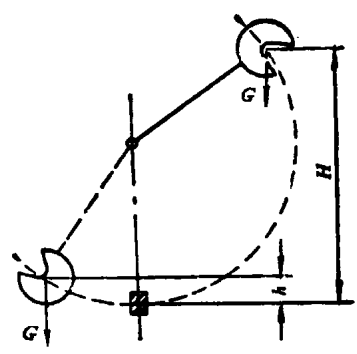


图 1-9 冲击试验原理图

一般把冲击韧度值低的材料称为脆性材料, a_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,断口较平整,呈晶状或瓷状,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,无光泽。

必须指出,冲击韧度值实际上是没有明确物理意义的,只能用来定性地分析材料的韧性和脆性。

四、疲劳极限

疲劳极限也是金属材料力学性能中一个很重要的指标。在介绍疲劳极限之前,首先介绍

金属材料疲劳的概念。

(一) 疲劳现象

工程中有许多零件,如发动机曲轴、齿轮、弹簧及滚动轴承等都是在循环载荷下工作的。根据循环载荷的作用方式不同,零件承受的应力可分为交变应力与重复应力两种,如图 1-10 所示。

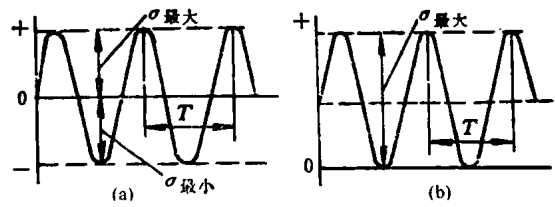


图 1-10 交变应力与重复应力示意图

(a) 交变应力 (b) 重复应力

承受交变应力或重复应力的零件,在工作过程中,往往在工作应力低于其屈服强度的情况下发生断裂,这种现象称为疲劳。疲劳断裂

与在静载荷作用下的断裂不同,不管是脆性材料还是韧性材料,疲劳断裂都是突然发生的,事先均无明显的塑性变形的预兆,很难觉察到,也属低应力脆断,故具有很大的危险性。

有统计表明,零件失效形式中,约有 80%是由于金属材料的疲劳造成的。

产生疲劳断裂的原因,一般认为是由于在零件应力高度集中的部位或材料本身强度较低的部位(例如原有裂纹、软点、脱碳、夹杂、刀痕等缺陷处),在交变或重复应力的反复作用下产生了疲劳裂纹,并随着应力循环周次的增加,疲劳裂纹不断扩展,使零件承受载荷的有效面积不断减小,最后当减小到不能承受外加载荷的作用时,零件即发生突然断裂。因此,零件的疲劳失效过程可分为疲劳裂纹产生、疲劳裂纹扩展和瞬时断裂三个阶段。疲劳宏观断口一般也具有三个区域,即疲劳裂纹源、裂纹扩展区和最终断裂区。图 1-11 为疲劳宏观断口的形貌示意图。

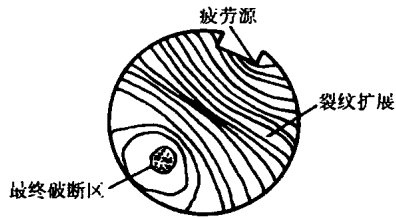


图 1-11 曲轴的疲劳宏观断口形貌示意图

(二) 疲劳曲线与疲劳极限

大量试验证明,金属材料所受的最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 愈大,则断裂前所经受的循环次数 N (定义为疲劳寿命)愈少,如图 1-12 所示。这种交变应力 $\sigma_{\max}$ 与疲劳寿命 N 的关系曲线称为疲劳曲线。

一般钢铁材料的疲劳曲线属于图 1-12 中曲线 1 的形式,其特征是当循环应力小于某一数值时,循环周次可以达到很大,甚至无限大,而试样仍不发生疲劳断裂,这就是试样不发生断裂的最大循环应力,该应力值称为疲劳极限。光滑试样的对称循环旋转弯曲的疲劳极限用 σ_{-1} 表示。按 GB4337 - 87 规定,一般钢铁材料取循环周次为 10^7 次时能承受的最大循环应力为疲劳极限。

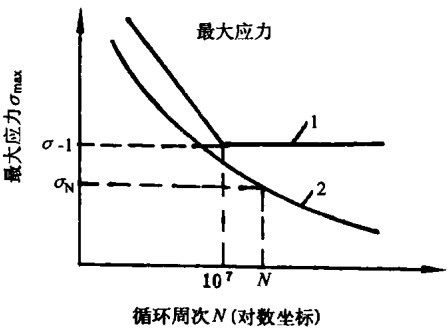


图 1-12 疲劳曲线示意图

一般有色金属、高强度钢及腐蚀介质作用下的钢铁材料的疲劳曲线属于图 1-12 中曲线 2 的形式,其特征是断裂前循环周次 N 随所受应力 σ 的降低而增加,不存在曲线 1 所示的水平线段。因此,对具有如曲线 2 所示特征的金属,只能以断裂前规定的循环周次为 N 时所能承受的最大应力来表示。材料的疲劳极限,称为条件疲劳极限,用 $\sigma_{R(N)}$ 表示。一般规定:有色金属 N 取 10^8 次,腐蚀介质作用下的 N 取 10^6 次。

由于测定方法不同,故金属疲劳极限与其抗拉强度之间没有确定的定量关系。但经验证明,在其他条件相同的情况下,材料抗拉强度愈高,其疲劳极限也愈高。当钢材抗拉强度 $\sigma_b < 1400 \text{ MPa}$ 时, σ_{-1} 与 σ_b 之比(称疲劳比)在0.4~0.6之间。为了防止疲劳断裂的产生,可通过提高材料的强度极限的方法来提高零件的疲劳极限,同时,零件设计时,合理设计零件尺寸,使零件承受的最大变交应力(或重复应力)低于疲劳极限 σ_{-1} ,此外,还可以通过正确设计零件结构,降低零件表面粗糙度,提高表面质量,采用表面强化处理如表面淬火、喷丸、滚压等方法提高零件抗疲劳的能力。

第二节 金属的结构与结晶

一、金属的晶体结构

金属在固态下通常都是晶体。为便于对金属材料的研究,先介绍一些有关晶体的一般概念。

(一) 晶体的概念

所谓“晶体”是指组成物质的原子(对金属是正离子)呈规则排列的物体。图 1-13(a)所示为一最简单的晶体结构示例。在自然界中,除了少数物质(如普通玻璃、松香及赛璐珞等)以外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。由于晶体内部原子排列的规律性,有时甚至可以见到某些物质的外形也具有规则的轮廓,如水晶、食盐及黄铁矿等,但金属晶体一般则看不到有这种规则的外形。

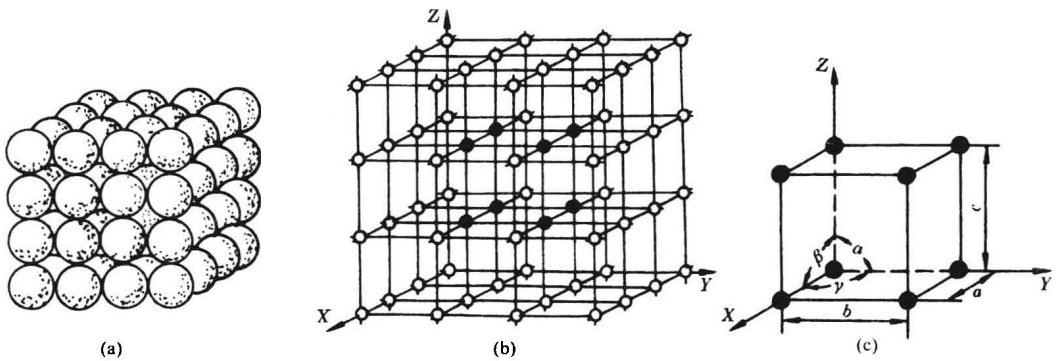


图 1-13 简单立方晶体(a)、晶格(b)及晶胞(c)的示意图

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律或形状,常以通过各原子(正离子)中心的一些假想连线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来,如图 1-13(b)所示。各联线的交点称为“结点”,在结点上的小圆圈(或黑点)表示各原子中心的位置,我们把这种表示晶体中原子排列形式的空间格子叫做“晶格”(或点阵)。显然,由于晶体中原子重复排列的规律性,我们可从其晶格中确定一个最基本的几何单元来表达其排列形式的特征,如图 1-13(c)所示。我们把组成晶格的这种最基本的几何单元叫做“晶胞”。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 叫“晶格常数”,其大小常以纳米(nm)为计量单位;晶胞各边之间的相互夹角常分别以 α 、 β 及 γ 表示。如图 1-13(c)所示的晶胞,其晶格常数 $a = b = c$,而 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$,这种晶胞叫做简单立方晶胞。具有简单立方晶胞的晶格叫做简单立方晶格。简单立方晶格只见于非金属晶体中,在金属中看不到。

各种晶体物质,或其晶格形式不同,或其晶格常数不同,主要与其原子构造、原子间的结合力(或称结合键)的性质有关。因晶格形式及晶格常数不同,于是不同晶体便表现出不同的物