

高等学校教材

电厂金属材料

华中工学院 陶曾毅 主编

水利电力出版社

高等学校教材
电 厂 金 属 材 料
华中工学院 陶曾毅 主编

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 12.5 印张 275 千字
1986年5月第一版 1986年5月北京第一次印刷
印数 0001—8420册 定价1.85元
书号 15143·5947

内 容 提 要

本书是根据高等学校热能动力专业“电厂金属材料”教学大纲编写的，主要介绍了金属学基础知识、钢的热处理、常用金属材料、电厂用耐热钢以及锅炉、汽轮机主要零部件用钢和事故分析等。

本书除用作大学教材外，也可供电力设计和生产部门有关技术人员参考。

前 言

本书是根据1982年12月制订的高等学校热能动力专业“电厂金属材料”教学大纲编写的，主要目的是使学生掌握电厂设备零件的选材、用材和失效分析的基本知识。本书也可供电力设计和生产部门有关技术人员参考。

本书主要包括：金属学基础知识、钢的热处理、常用金属材料和电厂用耐热钢等四个方面。在编写过程中力图做到从教学要求出发，注意加强基本概念，反映新理论，密切结合电厂生产实际。在每章书后面都附有一定数量的习题和思考题，以便读者复习，搞清一些基本概念，巩固所学知识。

本书计量单位统一采用我国法定计量单位，如强度指标的单位一律用 MN/m^2 （百万牛顿/米²）表示，它同以往采用的单位 kgf/mm^2 （公斤力/毫米²）的关系为 $1\text{MN}/\text{m}^2 \approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ ；冲击韧性 a_k 的单位采用 J/cm^2 （焦耳/厘米²）表示，它同 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ （公斤力·米/厘米²）的关系为 $1\text{J}/\text{cm}^2 \approx 0.1\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ ；硬度值仍沿用 kgf/mm^2 （公斤力/毫米²）为单位，但通常不予标注。

本书由华中工学院和武汉水利电力学院合编。其中电厂用耐热钢一章由武汉水利电力学院编写，其余各章由华中工学院编写。具体分工为：陶曾毅编写第一、二、三章；郁孝妙编写第四、五章；漆文琰编写第六章；谭尚智编写第七章；王希琳编写第八章。全书由华中工学院陶曾毅主编，太原工学院侯增寿主审。

在编写过程中华中工学院刘光葵、周风云等同志为本书制备了许多图片，在此表示感谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中必然存在不少缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1984年9月

目 录

第一章 金属材料的常温机械性能	1
第一节 强度和塑性	1
一、拉伸曲线	1
二、拉伸曲线上的强度指标	2
三、塑性指标	3
第二节 硬度	4
一、布氏硬度	4
二、洛氏硬度	4
三、维氏硬度和显微硬度	5
第三节 冲击韧性	6
第四节 疲劳强度	7
习题与思考题	8
第二章 金属的晶体结构与结晶	9
第一节 金属的晶体结构	9
一、晶体的概念	9
二、晶面、晶向及其表示方法	9
三、金属中常见的三种晶格	11
第二节 实际金属中的晶体缺陷	14
一、多晶体与单晶体	14
二、点缺陷	14
三、线缺陷	15
四、面缺陷	16
第三节 金属的结晶	17
一、结晶的概念	17
二、结晶过程	19
三、结晶的热力学条件	19
四、晶核的形成	21
五、晶核的长大	22
六、金属结晶后的晶粒大小	23
第四节 铸锭的结构	25
一、铸锭的组织及形成	25
二、各区的组织和性能特点	25

三、铸锭组织的控制.....	26
四、铸锭中的缺陷.....	26
习题与思考题.....	27
第三章 金属的塑性变形和再结晶.....	29
第一节 金属的塑性变形.....	29
一、金属变形的基本形式.....	29
二、单晶体的塑性变形.....	30
三、多晶体的塑性变形.....	34
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响.....	35
一、晶粒变形.....	35
二、产生形变织构.....	35
三、位错密度增加,产生加工硬化.....	37
四、产生残余应力.....	37
第三节 回复与再结晶.....	38
一、回复.....	38
二、再结晶.....	39
三、晶粒长大.....	39
四、再结晶温度与晶粒度.....	40
五、影响再结晶后晶粒大小的因素.....	42
第四节 金属的热加工.....	43
一、热加工与冷加工的区别.....	43
二、热加工对金属组织和性能的影响.....	44
第五节 金属的断裂.....	45
一、断裂的一般过程.....	45
二、断裂的分类.....	45
三、影响断裂类型的因素.....	46
习题与思考题.....	47
第四章 合金的相结构与相图.....	49
第一节 固态合金的相结构.....	49
一、固溶体.....	49
二、金属化合物.....	51
第二节 二元合金相图基础.....	53
一、相图中的一些基本名词.....	53
二、相图的表示方法.....	53
三、相图的测定.....	54
四、二元合金相图的应用.....	55
五、杠杆定律.....	56
习题与思考题.....	57
第五章 铁碳合金相图.....	58
第一节 铁碳合金中的相.....	58
一、铁素体.....	58
二、奥氏体.....	59

三、渗碳体	59
第二节 铁-渗碳体相图分析	59
一、Fe-Fe ₃ C相图中的三类基本相图	60
二、Fe-Fe ₃ C相图中重要的点和线	62
三、Fe-Fe ₃ C相图中的相区	63
第三节 典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织	63
一、共析钢 (C 0.77%)	64
二、亚共析钢 (C 0.0218% ~ 0.77%)	64
三、过共析钢 (C 0.77% ~ 2.11%)	66
四、共晶白口铸铁 (C 0.43%)	68
五、亚共晶白口铸铁 (C 2.11% ~ 4.3%)	69
六、过共晶白口铸铁 (C 4.3% ~ 6.69%)	70
第四节 Fe-Fe ₃ C相图的应用	73
一、选材方面的应用	73
二、制定热加工工艺方面的应用	73
三、铁碳合金相图应用的局限性	73
习题与思考题	74
第六章 钢的热处理	75
第一节 钢在加热时的转变	75
一、转变温度	75
二、奥氏体的形成	76
三、奥氏体晶粒的长大及其影响因素	78
第二节 钢在冷却时的转变	79
一、过冷奥氏体等温转变曲线 (简称C曲线或TTT曲线)	80
二、过冷奥氏体转变产物的形成过程、形态和性能	82
三、过冷奥氏体连续冷却转变曲线 (CCT曲线)	90
第三节 钢的退火与正火	92
一、钢的退火	92
二、钢的正火	94
第四节 钢的淬火	95
一、淬火工艺	96
二、钢的淬透性	99
第五节 钢的回火	101
一、回火的目的	101
三、回火时钢的组织转变	102
三、回火工艺	104
第六节 钢的表面热处理	104
一、表面淬火	104
二、化学热处理	106
习题与思考题	108
第七章 常用金属材料	111
第一节 碳钢	111

一、常存杂质元素对碳钢性能的影响	111
二、碳钢的分类与编号	112
第二节 铸铁	114
一、概述	114
二、铸铁的石墨化过程	116
三、铸铁的组织、性能与用途	118
第三节 合金钢	123
一、合金元素在钢中的作用	123
二、合金钢的分类与编号	128
三、常用合金结构钢简介	129
第四节 铜合金及轴承合金	132
一、铜合金	132
二、轴承合金	137
习题与思考题	139
第八章 电厂用耐热钢	140
第一节 金属材料的高温性能	141
一、金属的高温机械性能	141
二、钢在高温下的氧化与腐蚀	149
三、耐热钢的组织稳定性	154
第二节 耐热钢中的合金元素及其作用	156
一、耐热钢的强化原理	156
二、耐热钢中碳与合金元素的作用	158
第三节 锅炉和汽轮机主要零部件用钢及事故分析	160
一、锅炉受热面管子和蒸汽管道用钢	160
二、汽轮机主要零部件用钢及事故分析	166
习题与思考题	188

第一章 金属材料的常温机械性能

在火力发电厂中，常用的金属材料有数十种，如何正确选择材料或评定某一零部件所用的材料是否合理，是电厂工作者常常需要解决的问题。

选择材料时必须综合考虑材料的使用性能、工艺性能和经济合理性等。对一般机器零件，主要考虑材料的使用性能。

材料的使用性能包括机械性能、物理性能和化学性能。

常温下金属材料的主要机械性能指标有：抗拉强度、屈服强度、延伸率、断面收缩率、硬度、冲击韧性、疲劳强度等。

第一节 强度和塑性

强度是指材料受力时，抵抗塑性变形或破坏的能力。

塑性是指材料受力时，能产生显著塑性变形而不致破坏的能力。

一、拉伸曲线

工程中多数情况下，采用拉伸试验测定材料的强度和塑性。

进行拉伸试验时，需将材料加工成一定形状和尺寸的试样，然后置于拉伸试验机上，在试样两端缓慢地施加载荷，使其承受轴向拉力从而引起伸长，当载荷增加到一定值时，试样某处会发生缩颈，若再增加载荷，最后在缩颈处断裂，如图 1-1 所示。将试样拉伸时所承受的载荷 P 和伸长量 Δl 的对应关系描绘成载荷—伸长量曲线，称为拉伸曲线，如图 1-2 所示。

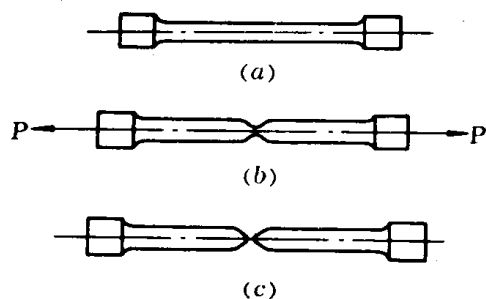


图 1-1 试样拉伸过程示意图

(a) 未加载荷；(b) 加载后逐渐变形并产生缩颈；(c) 断裂

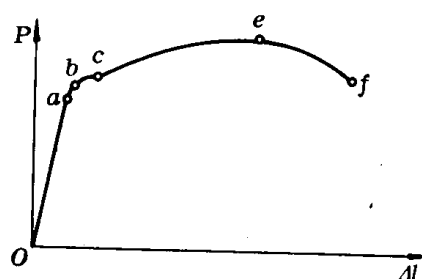


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

试样所能承受的载荷和伸长量与其截面积大小和长度有关，显然，在相同的载荷作用下，试样截面积 A_0 愈小或试样长度 l_0 愈长，则所获得的伸长量 Δl 也愈大。为了避免试

样尺寸大小的影响，工程上用试样原始截面积 A_0 除载荷 P ，求得试样单位截面积所承受的力，称为应力，以 σ 表示，即：

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (\text{MN} / \text{m}^2)$$

用试样原始标距长度 l_0 除其伸长量 Δl ，求得单位长度的伸长量，称为伸长率或应变，以 ε 表示，即

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (\%)$$

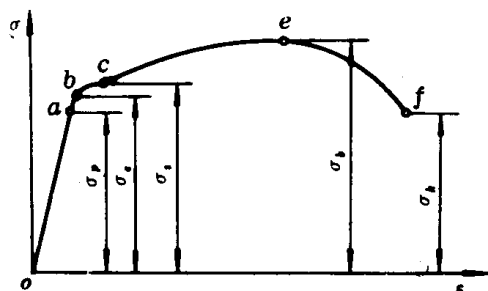


图 1 - 3 低碳钢的应力-应变曲线

以应力值 σ 为纵坐标和以应变 ε 为横坐标绘制的应力与应变关系的曲线，称为应力-应变曲线，如图 1 - 3 所示。

应力-应变曲线与拉伸曲线完全一致，仅坐标不同，它不受试样尺寸的影响，可以直接反映材料的许多性能指标。

二、拉伸曲线上的强度指标

从图 1 - 3 低碳钢的应力-应变曲线上可以看出以下特性点：

1. 比例极限

当应力值较小时，试样的延伸率与应力保持直线关系（曲线的 oa 线段）。当应力超过一定值后，延伸率与应力偏离直线关系。与 a 点对应的应力值称为比例极限，用 σ_p 表示。

在比例极限以内，材料的应力与应变成正比，即

$$\sigma = E \varepsilon$$

式中 σ ——正应力 (MN / m^2)；

E ——比例常数，通常称为正弹性模量 (MN / m^2)；

ε ——应变。

对一定的材料，弹性模量 E 是一个常数，材料的 E 值愈大，在一定应力作用下产生的弹性变形量愈小。钢在室温下的弹性模量 E 大致在 $204000 \sim 214200 \text{ MN} / \text{m}^2$ 范围内。金属材料的弹性模量随着温度的升高而降低。对于要求弹性变形小的零件，如汽轮机的主轴和叶片等，应选用弹性模量大的材料。

2. 弹性极限

当应力略高于 σ_p 时，试样仍处于弹性状态，即卸去载荷后，试样的变形可全部消除而恢复原状。当应力大于某一数值（曲线上的 b 点）时，卸去载荷后试样的伸长只能部分地消除，而保留一部分残余变形，此时试样已处于弹-塑性变形状态。与 b 点对应，开始产生塑性变形的应力，称为弹性极限，用 σ_e 表示。通常 σ_p 和 σ_e 是很接近的。

3. 屈服极限

当应力超过 σ_e 以后，再增加应力达 c 点时，在低碳钢的应力-应变曲线上会出现一段近于水平的线段，它表示这时的应力未增加或增加很小，甚至略有降低，而试样的应变还

在继续增加,并产生了明显的塑性变形,这种现象称为屈服, c 点称为屈服点。与 c 点对应,开始产生屈服的应力 σ_s 称为屈服极限。屈服极限是工程上的一个重要强度指标。

许多金属材料在拉伸时并不发生明显的屈服现象,因此,工程上规定把发生0.2%残余伸长的应力作为屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 表示, $\sigma_{0.2}$ 称为条件屈服极限。

4. 强度极限

试样产生屈服以后,在增加应力的同时,试样继续变形,这时的变形以塑性变形为主。随着塑性变形量的增大,试样变形抗力不断增加,即产生了所谓“加工硬化”现象。因此,为了继续变形需不断加大应力,当应力增大到一定值(曲线上的 e 点)时,试样某处的断面开始急剧缩小,通常称为出现“缩颈”,以后的变形主要集中在缩颈附近。继续变形时,缩颈处断面不断缩小,使试样继续变形所需的载荷愈来愈小,因此,名义应力值随之降低,最后在 f 点处发生断裂。

与拉伸曲线最高点 e 相对应的应力值,称为强度极限或拉伸强度,用 σ_b 表示。 σ_b 表示材料对最大均匀变形的抗力,它是工程设计和选择材料的主要依据之一。

三、塑性指标

材料的塑性,通常用拉伸试样的延伸率 δ 或断面收缩率 ψ 表示。

1. 延伸率

延伸率 δ 是拉伸试样在拉断以后,标距长度的伸长量 Δl_k 占原始标距长度的百分数,即

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

式中 Δl_k ——试样断裂后标距的伸长量 (mm);

l_k ——试样断裂后的标距长度 (mm);

l_0 ——试样的原始标距长度 (mm)。

2. 断面收缩率

断面收缩率 ψ 是试样拉断后其截面积的相对收缩值,它等于试样截面积的绝对收缩量除以原始截面积的百分数,即

$$\psi = \frac{\Delta A_K}{A_0} \times 100\% = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \times 100\%$$

式中 ΔA_K ——试样断裂后,截面积的绝对收缩量 (mm²);

A_K ——试样断裂后的最小截面积 (mm²);

A_0 ——试样的原始截面积 (mm²)。

屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 和延伸率 δ 是工程设计和选材的重要数据,其中屈服强度 σ_s 尤为重要,因为一般机器零件或工程构件在使用期间,是不允许发生塑性变形的,故设计时都把屈服极限 σ_s 作为材料的受载能力。其次,延伸率 δ 也很为人们所重视,因为塑性较高的材料不致产生突然断裂而造成灾难性事故。此外,塑性良好的材料使某些成型工艺(如冷冲压、冷轧、冷弯等)能够顺利进行,因此,需采用冷弯、冷轧等成型工艺的零件,必须选用具有一定塑性的材料。

第二节 硬 度

硬度是指材料抵抗其他更硬物体压入其表面的能力。常采用压痕的深度,或压痕单位面积所承受的载荷值作为硬度的指标。

硬度试验是金属材料机械性能试验中最简便的方法之一,通常不需要制备特殊的试样,可以直接在零件局部区域进行试验,而零件不受破坏。金属材料的硬度与强度之间有一定的关系,根据硬度值可以近似地估计出其强度。因此硬度试验在生产中得到了广泛应用。

根据压头的形状、尺寸和载荷的不同,硬度值可分为布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

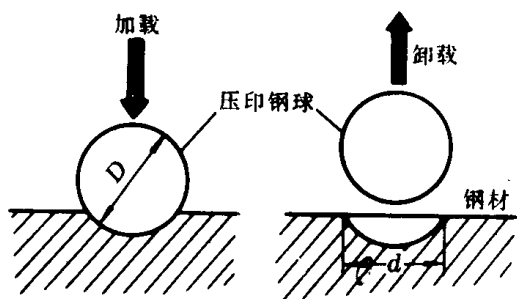


图1-4 布氏硬度试验原理图

一、布 氏 硬 度

布氏硬度的测定方法是用载荷为 P 的压力,把直径为 D 的钢球(通常称为压头)压入被测试件的表面,保持一定时间后,卸除载荷,测量试件表面压痕直径 d ,如图1-4所示。以压痕

面积 A 除载荷 P 得到单位面积上所受的应力,即为所测得的布氏硬度值,以符号HB表示。其计算公式如下:

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

式中 P ——所加载荷(kgf);
 A ——压痕面积(mm^2);
 D ——钢球直径(mm);
 d ——压痕直径(mm)。

为了保证所测材料硬度值的准确性,要求压痕与钢球的直径比 d/D 介于0.25~0.5之间。根据所测材料的性质不同,对载荷大小作如下规定:

钢铁材料 $P/D^2 = 30$

铜合金 $P/D^2 = 10$

铝合金 $P/D^2 = 2.5$

钢球直径 D 一般为10、5、2.5mm三种。

二、洛 氏 硬 度

洛氏硬度是目前应用最广的试验方法,同布氏硬度一样,它是一种压痕硬度试验法。试验时先加10kgf的预载荷,使压头与被测金属表面紧密接触,同时将试验机上刻度盘的指针对准零点,如图1-5(a)所示,然后再加上主载荷,使压头压入金属表面,如图1-5(b)所示。停留数秒钟后,卸去主载荷,材料回弹少许,如图1-5(c)所示。然后以总载荷所造成的压痕深度 h_2 减去预载荷的压痕深度 h_1 ,得主载荷所造成的压痕深度 h ,即

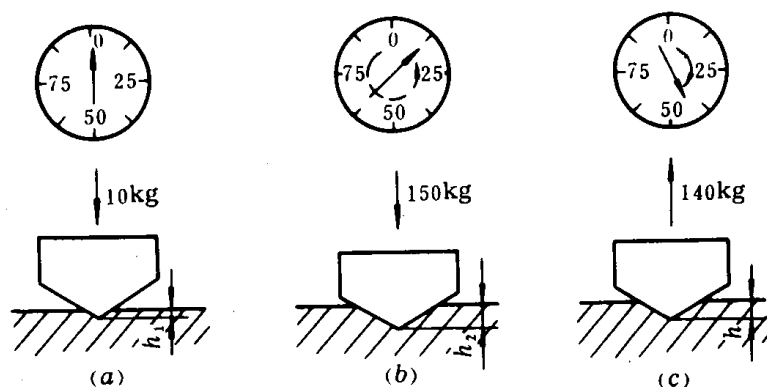


图 1-5 洛氏硬度试验示意图

$h = h_2 - h_1$, 此时表盘所反映的数值即为被测材料的硬度。图 1-5 表示洛氏硬度的测定过程。

由试验不难看出, 材料愈软, 则压痕 h 愈深。为了照顾人们习惯上数字愈大硬度愈高的概念, 此处规定用一常数 k 减去压痕深度 h 作为洛氏硬度值, 并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位, 用符号 HR 表示, 即

$$\text{HR} = \frac{k - h}{0.002}$$

为了使一台洛氏硬度计能测定从软到硬的各种金属材料, 采用了不同的压头和总载荷, 由此组成几种不同的洛氏硬度标度, 最常用的有 HRA 、 HRB 、 HRC 三种。它们的试验条件和应用范围列于表 1-1。

表 1-1

常用洛氏硬度的试验规范

标度	压头类型	初载荷 (kgf)	总载荷 (kgf)	试验范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	10	60	70~85	硬质合金, 表面淬火钢
HRB	1.588mm 直径钢球	10	100	25~100	软钢, 退火钢, 铜合金等
HRC	120°金刚石圆锥	10	150	20~67	淬火钢, 调质钢

三、维氏硬度和显微硬度

维氏硬度的测定方法是以载荷为 P 的压力, 将顶角为 136° 的金刚石四棱锥形压头压入被测试件表面, 卸去载荷后, 测量压痕对角线长度 d (见图 1-6), 计算出压痕的面积 A , 以单位面积上的载荷值表示硬度, 并用符号 HV 表示。

$$\text{HV} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}} = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2)$$

式中 P ——所加载荷 (kgf);
 A ——压痕面积 (mm^2);
 d ——压痕对角线长度 (mm);

α ——金钢石锥体的顶角(136°)。

维氏硬度试验的特点是可以根据材料的软硬程度或厚度的不同,选择不同的载荷,常用的载荷有 5、10、20、30、50 和 100kgf 六级。

显微硬度实质上就是小载荷的维氏硬度,其原理和维氏硬度试验一样,不同点是载荷以 gf (克力) 计量,压痕对角线以 μm (微米) 计量。显微硬度用符号 HM 表示。

显微硬度试验主要用于测量金相显微组织中某些组成相的硬度。显微硬度所用的载荷一般为 10、50、100、200 gf 等几种。

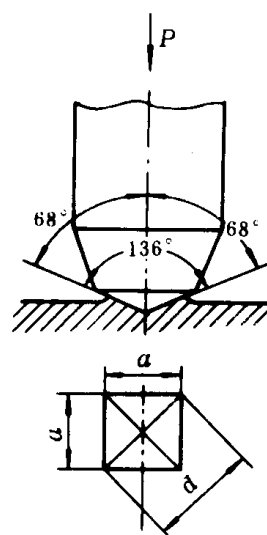


图1-6 维氏硬度试验压头及压痕示意图

第三节 冲击韧性

韧性是指材料承受冲击载荷的能力,常称为冲击韧性。许多机器零件或构件在使用过程中,往往受到冲击载荷的作用,为了防止由于冲击载荷而引起零件的突然破坏,在零件设计和选择材料时,不仅要考虑材料的强度,对其冲击韧性的好坏,也应予以充分的注意。

冲击韧性的测定方法,目前应用最普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验。试验用试样和装置原理如图 1-7 和图 1-8 所示。操作程序是:将试样放在试验机的支座上,使其缺口背向摆锤的冲击方向,然后将重量为 G 的摆锤举至一定的高度 h_1 ,使其由此高度下落,将试样冲断后又继续升至 h_2 的高度。冲断试样所消耗的能量 A_K 为

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

金属的冲击韧性值 a_k 为冲断试样时,在缺口处单位面积上所消耗的能量

$$a_k = \frac{A_K}{A} \quad (\text{J}/\text{cm}^2)$$

式中 A_K ——冲断试样时所消耗的冲击功 (J) ;

A ——试样缺口处的截面积 (cm^2) 。

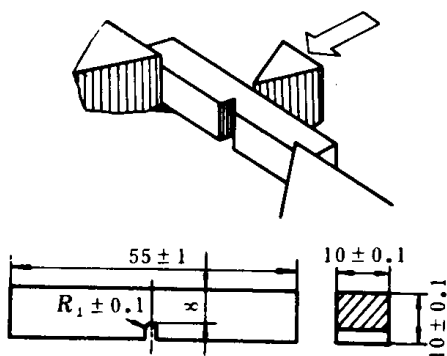


图 1-7 冲击试样

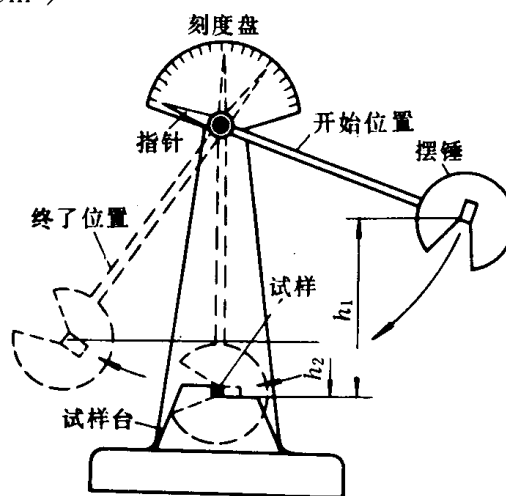


图1-8 冲击试验原理图

材料的冲击韧性同温度有关，有些材料在常温20℃左右具有较好的韧性，但在较低温度下则产生脆性，如图1-9所示。材料冲击韧性显著降低出现脆性的温度，称为“脆性临界转化温度”。此值愈低，材料的低温冲击韧性愈好。

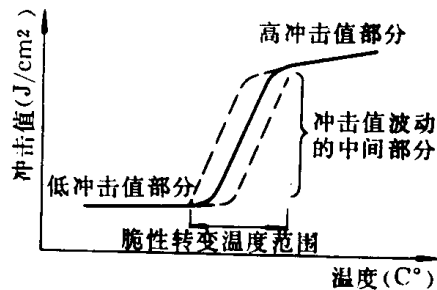


图 1-9 温度对冲击值的影响

第四节 疲 劳 强 度

许多机器的零部件，如汽轮机的轴、叶片和齿轮等都是在交变载荷下工作的，虽然它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服极限，可是在交变载荷作用下，经过较长时间的工作仍会发生断裂，这种在交变载荷作用下发生的断裂现象称为金属的疲劳。

试验研究表明，机件承受的最大交变应力 ($\sigma_{\max}$) 愈大，则断裂前应力循环次数 N 愈小；反之， $\sigma_{\max}$ 愈小，则 N 愈大。将最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 与断裂时的应力交变次数 N 的关系绘成曲线，称为疲劳曲线，如图1-10所示。由图可知，当应力低于某一数值时，曲线与横坐标平行，此时材料能经受无限次的交变载荷而不发生断裂，此应力称为材料的疲劳极限，通常用 σ_{-1} 表示。

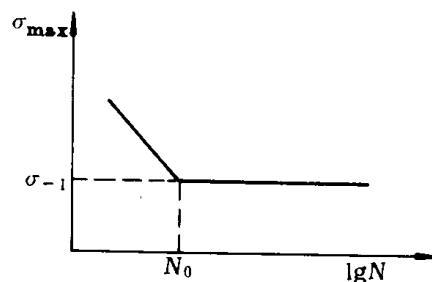


图 1-10 疲劳曲线

有些金属材料（部分有色金属和在高温下或在腐蚀介质中工作的钢件），它们的疲劳曲线没有明显的水平部分，如图1-11所示。在此种情况下，工程上根据机件使用寿命的要求，规定把一定 N 值时的应力作为条件疲劳极限或称有限疲劳极限。例如，火车轴取 $N = 12 \times 10^7$ 次，汽轮机叶片取 $N = 25 \times 10^6$ 次等。

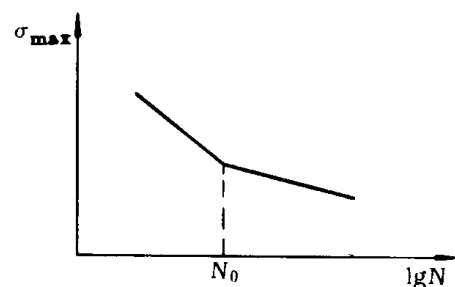


图1-11 铝合金疲劳曲线

影响材料疲劳抗力的因素很多，除了材料本

身的材质外,零件的尺寸、形状、表面质量、表层中内应力的性质和分布状态、所处的环境、介质以及交变应力的幅度、频率等对疲劳抗力都有影响。因此,欲提高零件的疲劳抗力应从多方面考虑。

习 题 与 思 考 题

1. 下列说法,哪些是对的,哪些不对,为什么?

1) 金属材料的弹性模量 E 愈大,产生塑性变形愈困难。

2) 金属材料的强度愈高,则冲击韧性愈低;塑性好的材料,冲击韧性也好;强度高、塑性好的材料,则冲击韧性好。

3) 硬度高的金属材料,屈服强度也高。

2. 某种材料的拉伸试样,其 $l_0 = 100\text{mm}$, $d_0 = 10\text{mm}$ 。拉伸时产生0.2%残余变形的载荷为65000N, $P_b = 85000\text{N}$, 拉断后对接起来测得 $l_k = 120\text{mm}$, $a_k = 6.4\text{mm}$, 试求该材料的 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 δ 、 ψ 。

3. 常用的洛氏硬度有几种? 它们的压头、载荷及适用范围有什么不同?

4. 解释下列名词:

比例极限; 条件屈服极限; 条件疲劳极限; 抗拉强度; 疲劳抗力。

5. 何谓脆性临界转变温度? 为什么此值愈低愈好?

第二章 金属的晶体结构与结晶

第一节 金属的晶体结构

一、晶体的概念

所有固体物质按其内部原子（或分子）的分布情况可分为晶体和非晶体两大类。

晶体是指其内部原子（或分子）在空间按一定几何形式规则排列的物质；非晶体是内部原子（或分子）在空间无规则地杂乱分布的物质。固态金属一般都是晶体。

粗浅地讲，可以认为金属晶体中所有原子在空间都是按一定形式有规则地排列，如图 2-1 (a) 所示。为了研究方便，把每个原子视为一个点，再把这些点用直线连接起来，形成一个三维空间格子，通常称为晶格，如图 2-1 (b) 所示。晶格的结点即为原子的平衡中心位置。

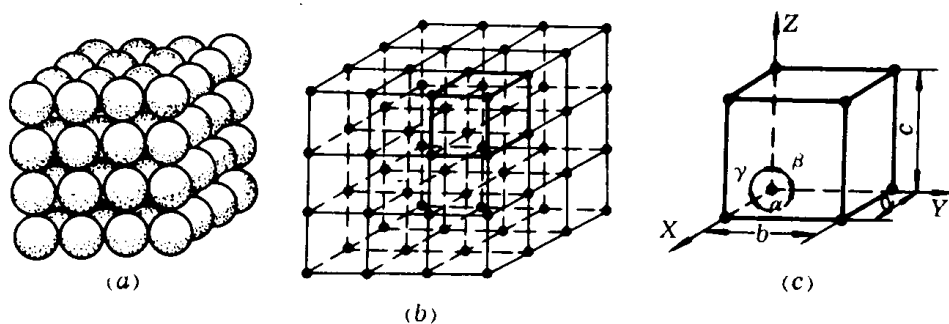


图 2-1 晶体、晶格、晶胞示意图
(a) 晶体；(b) 晶格；(c) 晶胞

晶格可视为由一种基本的几何单元在三维空间重复堆砌而成，这种组成晶格的基本单元称为晶胞，如图 2-1 (c) 所示。晶胞的各棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，各棱边之间的夹角分别以 α 、 β 、 γ 表示。根据晶胞各棱边长度和夹角的不同，可将晶格分为几种不同的类型。如图 2-1 (c) 所示晶胞 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，这种晶胞称为简单立方晶胞。具有这种晶胞的晶格称为简单立方晶格。

二、晶面、晶向及其表示方法

晶体中的任一平面都称为晶面，任一直线的指向都称为晶向。这里所讨论的晶面是指晶格中由一系列原子所组成的平面；晶向是指晶格中任意两原子之间连线所指的方向。这样晶体可以看成是由一层层晶面堆砌而成。图 2-2 为几种不同位向的晶面和晶向的示意图。由图可知，在同一晶体中，不同的晶向和晶面上的原子排列方式和原子密度都不同，由于这种结构上的差异，引起晶体在不同方向上的物理、化学、力学性能都存在差异，这