

高等学校通用教材

工程材料

范悦 主编



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

工 程 材 料

范 悦 主 编

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书是作者结合近年来的教学经验和材料领域的最新发展,参照近年来最新颁布的有关材料方面的国家标准编写而成的。内容包括工程材料的性能、材料的结构与性能间的关系、材料的强化、常用材料分析介绍、材料的选用及选用实例。

为了使學生能够获得关于工程材料的理论及实际选用工程材料的综合知识,本书力图将上述内容有机地结合起来,以体现综合、系统、全新、实用的特点。

本书可作为高等工科院校(含电大、函大、网络大学等)机械类和近机械类专业的教材,也可作为生产及科研部门有关科技人员的参考书或自学读物。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/范悦主编. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.8

ISBN 7-81077-249-X

I. 工… II. 范… III. 工程材料—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 050541 号

工程材料

范悦 主编

责任编辑 刘宝俊

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpess@263.net

北京松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:237 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-81077-249-X 定价:11.00 元

前 言

本书是根据国家教委课程指导小组有关机械类专业《工程材料》课程教学的基本要求,结合工程技术与管理的发展,在总结近年来的教学经验和材料领域的最新发展基础上,参照近年来最新颁布的有关材料方面的国家标准编写而成的。内容包括工程材料的性能、材料的结构与性能间的关系、材料的强化、常用材料分析介绍、材料的选用及选用实例。

为了增强教材的实用性、先进性及全面性,本书在加强金属材料、非金属材料内容的基础上,又适当地增加了功能材料内容,并且所有材料都参照最新的国家标准进行了修订。

本书金属部分主要由范悦编写,非金属部分主要由杨伟群编写,王卫林负责新标准查阅,并参加了部分内容的改编修订工作。在编写中参阅了多方面的书刊资料。在本书出版之际,谨向支持、帮助过本书出版的有关人士致谢;谨向所有对本书内容有贡献的各位参考文献的作者致谢。

由于水平有限,书中的不妥当之处在所难免,期待读者和专家指正。

编 者

2003.6

目 录

第一章 工程材料的性能	1
1.1 强度与塑性	1
1.1.1 强度及刚度	1
1.1.2 塑性	3
1.2 硬度	3
1.2.1 布氏硬度(HB)	4
1.2.2 洛氏硬度(HR)	4
1.2.3 维氏硬度(HV)	5
1.3 冲击韧度	6
1.4 疲劳断裂和疲劳强度	7
1.5 材料高温性能	8
1.5.1 蠕变	8
1.5.2 持久强度	9
1.5.3 高温疲劳	9
1.6 材料的物理及化学性能	9
1.6.1 金属的物理、化学性能	9
1.6.2 高分子材料的物理、化学性能	12
1.6.3 陶瓷的物理和化学性能	13
习题与思考题	13
第二章 材料的结构与变形	15
2.1 金属的结构与结晶	15
2.1.1 金属常见晶体结构	15
2.1.2 金属的晶体缺陷及其对性能的影响	16
2.1.3 金属的结晶与同素异构转变	18
2.1.4 合金的结构	20
2.2 金属的变形和强化	22
2.2.1 金属的塑性变形及其对金属组织性能的影响	22
2.2.2 再结晶	24
2.3 高分子材料的结构和性能	25
2.3.1 高聚物的相对分子质量	25
2.3.2 高分子链形状	28
2.3.3 高分子的聚集态结构	29

2.3.4 高聚物的玻璃化温度和熔融温度·····	31
2.4 复合材料的结构和性能·····	33
2.4.1 复合材料的定义·····	33
2.4.2 复合材料的种类·····	34
2.4.3 复合材料的基本性能·····	35
2.5 陶瓷结构和性能·····	35
2.5.1 玻 璃·····	36
2.5.2 玻璃陶瓷·····	36
2.5.3 氧化物陶瓷·····	36
2.5.4 非氧化物陶瓷·····	36
习题与思考题 ·····	37
第三章 材料改性方法 ·····	38
3.1 金属热处理·····	38
3.1.1 铁—碳合金状态图·····	38
3.1.2 热处理原理·····	42
3.1.3 热处理工艺·····	47
3.1.4 热处理工序安排·····	54
3.1.5 淬火变形及零件的结构工艺性·····	56
3.2 金属的表面处理·····	57
3.2.1 表面防护·····	57
3.2.2 金属的表面改性·····	62
3.3 塑料及陶瓷的强化·····	64
3.3.1 塑料的强化·····	64
3.3.2 陶瓷的增韧强化·····	66
习题与思考题 ·····	67
第四章 常用工程材料 ·····	69
4.1 碳钢和铸铁·····	69
4.1.1 碳钢的分类·····	69
4.1.2 碳素结构钢·····	69
4.1.3 碳素工具钢·····	71
4.1.4 铸 铁·····	72
4.2 合金钢·····	75
4.2.1 合金钢的分类与牌号·····	75
4.2.2 合金结构钢·····	75
4.2.3 合金工具钢·····	78
4.2.4 不锈钢·····	79
4.2.5 高温合金·····	81

4.3 有色金属	83
4.3.1 铝合金的分类	83
4.3.2 变形铝合金	84
4.3.3 铸造铝合金	85
4.3.4 铝合金的热处理	86
4.3.5 纯钛和钛合金	87
4.3.6 镁合金	88
4.4 塑料和橡胶	88
4.4.1 高聚物的力学性能	89
4.4.2 通用塑料	91
4.4.3 工程塑料	94
4.4.4 特种塑料	97
4.4.5 橡胶的选用	98
4.5 陶瓷	100
4.5.1 陶瓷的力学性能	100
4.5.2 氧化铝(Al_2O_3)陶瓷	101
4.5.3 氮化硅(Si_3N_4)陶瓷	101
4.5.4 氮化硼(BN)	102
4.5.5 碳化硅(SiC)陶瓷	102
4.6 复合材料	102
4.6.1 聚合物基复合材料	102
4.6.2 金属基复合材料	106
4.6.3 陶瓷基复合材料	108
4.7 功能材料	108
4.7.1 形状记忆材料	108
4.7.2 智能材料	111
4.7.3 隐形材料	111
4.7.4 高分子液晶材料	112
4.7.5 磁性功能材料	112
附 录	114
习题与思考题	123
第五章 工程材料的选择	126
5.1 选材的原则	126
5.2 零件的使用性能与选材	126
5.2.1 使用性能要求分析	126
5.2.2 以综合力学性能为主的选材	128
5.2.3 以耐磨损为主要性能的选材	128
5.2.4 要求抗蚀性或热强度为主的选材	129

5.3 零件的工艺性能与选材	130
5.3.1 铸造性能	130
5.3.2 锻压性能	130
5.3.3 焊接性能	130
5.3.4 机械加工性能	131
5.3.5 热处理工艺性能	131
5.4 选材的经济性	131
5.5 零件材料选择的步骤	132
5.6 典型零件选材举例	132
5.6.1 轴类零件的选材	133
5.6.2 飞机起落架的选材	133
5.6.3 发动机涡轮轴的选材	135
5.6.4 冷冲模具的选材	136
习题与思考题	138
参考文献	140

第一章 工程材料的性能

工程上所用的各种金属材料、非金属材料 and 复合材料统称为工程材料。它的性能分为使用性能和工艺性能。使用性能是指零件在使用条件下材料所表现出来的性能。它包括物理性能、化学性能、力学性能等。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能,也就是加工的难易程度。它包括铸造性能、可锻性、可焊性、切削加工性和热处理工艺性等。材料使用性能的好坏,决定了它的使用范围与寿命。工艺性能的好坏,决定了它在加工中对成型的适应能力。

材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出的抵抗能力。由于载荷的形式不同,材料可表现出不同的力学性能,如强度、硬度、塑性、韧性、疲劳强度等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的主要依据。

1.1 强度与塑性

1.1.1 强度及刚度

强度是指在载荷作用下材料抵抗塑性变形和断裂的能力。机械零件在载荷作用下会产生变形或断裂。载荷较小时,产生弹性变形;载荷大时,材料产生塑性变形;载荷过大时,材料断裂。

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 σ_b 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 、抗剪强度 σ_r 等。在使用中一般多以抗拉强度作为基本的强度指标,常简称为强度。强度单位为 MPa(MN/m²)。

材料的强度、塑性可以通过拉伸试验测定。

按 GB6397—86 的规定,标准拉伸试样可制成圆形试样和板形试样两种,如图 1.1 所示。圆形试样因夹紧时易于对中,应优先使用。圆形试样有长试样和短试样两种,长试样 $l_0 = 10d_0$,短试样 $l_0 = 5d_0$ (d_0 为试样直径, l_0 为试样标距)。试验按 GB228—87 金属拉伸试验方法进行。将试样夹在拉伸试验机上缓慢加载拉伸,直至拉断为止。图 1.2 所示为用低碳钢试样做拉伸试验时测得的拉力(F)和伸长量(Δl)的关系曲线,称为低碳钢拉伸曲线。

由图 1.2 可知,在载荷较小的 oe 段,试样的伸长量随载荷增加而增加,外力去除后试样恢复原状。这种变形称为弹性变形。超过 e 点后则进入“弹—塑”性变形阶段,在这一阶段若除去外力,试样不能完全恢复原状。当载荷增加到 F_s 时,拉伸曲线在 s 点后出现了水平段,表示载荷保持不变时,试样继续明显伸长,这种现象称为屈服。屈服现象过后,试样又随载荷的增加而伸长,称为强化阶段。当载荷增加到 F_b ,拉伸曲线在 b 点时,试样出现局部变细的缩颈现象。 b 点以后,所需载荷逐渐减小,变形主要集中于颈部。当载荷达到 F_k 时,试样在缩颈处断裂。试样在拉伸过程中,经历了弹性变形、屈服、强化、颈缩和断裂几个阶段。

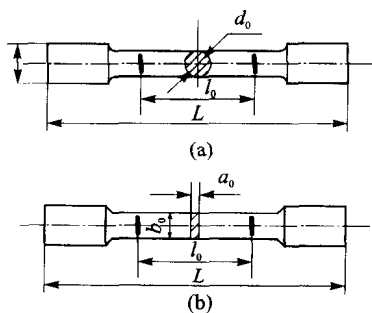


图 1.1 拉伸试样

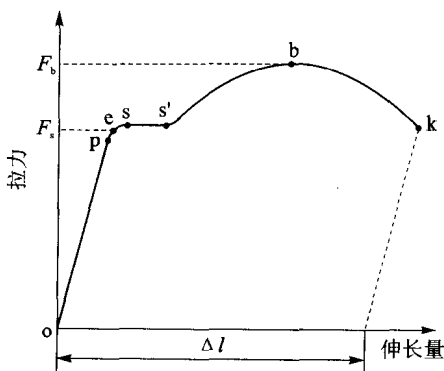


图 1.2 低碳钢拉伸曲线

当材料受载荷作用时,其内部会产生与外力相平衡的内力。单位面积上的内力称为应力(σ)。强度的大小是以材料所能承受的应力数值来表示的,即

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

当材料受载荷作用时,其长度会伸长。伸长量(Δl)与原长度(l_0)的比值称为应变(ϵ),即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

1. 屈服强度

屈服强度是指材料产生屈服时的最小应力。它表达了材料抗塑性变形的能力,用 σ_s 表示:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1.3)$$

式中: F_s ——s 点的最小载荷,单位为 N; A_0 ——试样原始横截面积,单位为 mm^2 。

由于工业中使用的大多数材料(如合金钢、铜合金、铝合金等)没有明显的屈服点,很难准确测定 σ_s 。因此国家标准中规定,残余应变量为 0.2% 时的应力值作为这些材料的屈服强度,称为条件屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

2. 抗拉强度

抗拉强度是指材料所能承受的最大应力。它表征了材料抵抗断裂的能力,用 σ_b 表示:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1.4)$$

式中: F_b ——试样在断裂前的最大载荷,单位为 N; A_0 ——试样原始横截面积,单位为 mm^2 。

材料的抗拉强度容易测定,数值也比较准确。 σ_s 和 σ_b 是选材的两个重要强度指标。在设计零件及构件时,若不允许产生塑性变形,应以 σ_s 来校核强度,如空气压缩机机匣螺栓等;若只要求使用时不断裂,则以 σ_b 来校核强度,如一般机械上的连接螺栓等。用 σ_b 作为强度指标时,应采用较大的安全系数。对于脆性材料必须用 σ_b 作为强度指标。

3. 刚度与弹性模量

刚度是指零件或构件抵抗弹性变形的能力。在构件形状、尺寸不变的情况下,其刚度决定于材料的弹性模量。弹性模量是指在比例极限(σ_p)范围内,应力与应变之比:

$$E = \sigma/\epsilon, \quad E = \frac{Fl_0}{A_0 \Delta l} \quad (1.5)$$

式中: Δl ——试样在比例极限范围内的变形量,单位为 mm;

F ——试样所受拉力,单位为 N;

l_0 ——试样原标距长度,单位为 mm;

A_0 ——试样原始横截面积,单位为 mm^2 。

由低碳钢的拉伸曲线可知,op 段是载荷与伸长量 Δl 为成正比关系的直线段,p 点处的应力用 σ_p 表示,称为比例极限;pe 段虽非正比关系,但仍属纯弹性变形阶段,e 点处的应力用 σ_e 表示,称为弹性极限。故前者是指材料保持载荷与伸长成比例增长的最大应力,后者是指材料保持纯弹性变形时的最大应力。 E 为在比例极限范围内,应力 σ 与应变 ϵ 的比例常数。当 F 、 l_0 和 A_0 一定时, E 与 Δl 成反比,即某种材料的弹性模量越大,其弹性变形量就越小,而刚度就越大。弹性模量(E)主要取决于金属的本身性质,与晶格类型和原子间距有关,而热处理等强化手段对弹性模量影响极小。大部分机械零件都在弹性状态下工作,对刚度有一定要求,在工作时不允许产生过大的弹性变形。除选择具有较大弹性模量的材料外,增大横截面积或改进结构形式均可使零、构件的刚度增加。

1.1.2 塑性

塑性是指在外力作用下材料产生永久变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标是伸长率(δ)和断面收缩率(ψ):

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad \psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (1.6)$$

式中: l_0 ——试样原标距长度,单位为 mm;

l_1 ——试样拉断后标距长度,单位为 mm;

A_0 ——试样原始横截面积,单位为 mm^2 ;

A_1 ——试样断裂处的横截面积,单位为 mm^2 。

在测定材料的强度时,可以同时测定它们的塑性。长试样($l_0 = 10d_0$)测得的延伸率用 δ_{10} 表示;短试样($l_0 = 5d_0$)测得的延伸率用 δ_5 表示。延伸率值的大小与试样长度有关,对于同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。 ψ 与试样的尺寸无关,而且对材料的塑性改变更为敏感,所以能更可靠地反映材料的塑性。 δ 、 ψ 值越大,表示金属的塑性越好。

塑性指标在工程技术中具有重要的实用意义。它虽然不直接用于工程设计,但很多零件要求具有一定的塑性。良好的塑性可以使材料顺利地某些成型工艺,如翼肋、火焰筒的冷冲压及涡轮盘、涡轮轴的锻造等。良好的塑性还可以在在一定程度上保证零件的工作安全,在零件使用时万一超载,塑性变形引起的强化作用使零件不致于突然断裂。一般 δ 达到 5%, ψ 达到 10%,即能满足绝大多数零件的使用要求。过高地追求塑性,会降低材料的强度。

1.2 硬度

许多零件在使用过程中表面会产生划痕、凹坑,或长期使用后产生磨损。这是由于材料的硬度低而造成的。工程上用于测量材料硬度的方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。另

外,肖氏硬度用于测量橡胶。

1.2.1 布氏硬度(HB)

布氏硬度值用布氏硬度机测定。其原理如图 1.3 所示:将直径为 D 的球形压头 ($D=10、5、2.5、2、1\text{ mm}$) 在相应载荷 F 的作用下压入所测材料表面,经规定的保持时间后卸除载荷,得一直径为 d 的压坑。载荷除以压坑球面积所得的商,即为布氏硬度值。若测定布氏硬度值在 450 以下的材料,应选用普通淬火钢球,用 HBS 表示;若测定布氏硬度值在 450~650 的材料,应选用硬质合金球,用 HBW 表示。其计算公式为

$$\text{HBS(HBW)} = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.7)$$

由式(1.7)可以看出,布氏硬度值实质上是指材料压坑单位球面积上的抵抗力。其数值越大,则表示材料越硬。

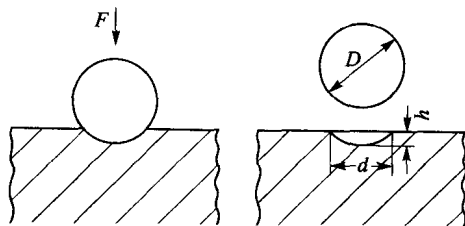


图 1.3 布氏硬度测量原理

布氏硬度测量压坑面积大,受材料不均匀度影响小,故测量误差小,硬度值准确、真实。但当材料太硬时(布氏硬度值大于 650),球形压头可能产生变形,则不宜采用布氏硬度。另外,由于布氏硬度压坑较大,也不宜用来检测成品、小件、薄件的硬度。

1.2.2 洛氏硬度(HR)

洛氏硬度值使用洛氏硬度机测定。其原理如图 1.4 所示:先加初载荷 99 N,使顶角为 120° 的圆锥形金刚石(或 $\phi 1.588\text{ mm}$ 的淬火钢球)压头紧密接触材料表面,并压入深度 h_1 ;再加上主载荷(490 N 或 874 N 或 1 372 N)使压入深度达 h_2 ;经保持规定时间后,卸除主载荷、保留初载荷,由于材料弹性恢复,压入深度减小为 h_3 。以 $h_3 - h_1 = \Delta h$ 作为洛氏硬度值的计算深度。

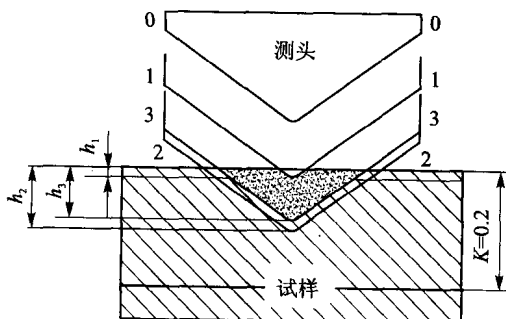


图 1.4 洛氏硬度测量原理

由于 Δh 数值很小,并且材料越硬数值越小,若用此值表示硬度则与习惯不符。故确定每 0.002 mm 深度为一个硬度单位,同时根据锥或球两类不同的压头各采用一个常数 K 。洛氏硬度按下式计算:

$$HR = \frac{K - \Delta h}{0.002} \quad (1.8)$$

根据材料硬度和厚度不同,可采用不同压头和载荷组成 15 种洛氏硬度标度。其中最常用的是 HRA、HRB、HRC 三种(GB1818—79),其硬度值可在洛氏硬度机的刻度盘上直接读出,不必再采用上式计算。表 1.1 所列为这三种标度的试验条件和应用举例。

表 1.1 常用洛氏硬度的三种标度

洛氏硬度	测头	载荷/N	刻度颜色	有效范围	应用
HRA	金刚石锥	588	黑	70~85	硬质合金、表面硬化层
HRB	钢球	980	红	25~100	有色金属、退火钢
HRC	金刚石锥	1 470	黑	20~67	淬火、回火钢

需要指出的是,若对同一材料采用不同标度测量,所得数值各不相同;反之,采用不同标度测量不同材料若得到相同数值,各材料的实际硬度并不相同。故上述三种标度之间不能用所测得的硬度值直接对比来比较材料的硬度高低。

洛氏硬度法测量简便迅速,可直接读数,表面压坑小,多用于较薄材料或成品检测。但由于压坑过小,测量误差稍大,常采用不同部位多点测量,取其平均值。

1.2.3 维氏硬度(HV)

维氏硬度测试原理如图 1.5 所示,基本上与布氏硬度法相同。不同的是所加载荷 F 较小,而且使用的是锥面间夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头,在被测材料上压坑为四方锥形。通过测量压坑投影两对角线的平均长度 d ,可计算出压坑表面积 A ,压坑单位面积上所产生的抗力即为维氏硬度值。

其计算式为:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1.8915F}{d^2}$$

$$d = (d_1 + d_2)/2 \quad (1.9)$$

同布氏硬度法一样,习惯上单位不予标出,所得数值越大,说明材料越硬。维氏硬度的载荷 F 分为六级(49、98、196、294、490、980 N),可根据材料硬度和厚度的不同来选择。压痕对角线长度单位为 mm。维氏硬度不随载荷变化,即不同载荷下的维氏硬度可以相互比较。在一般情况下,选用 294 N 载荷。测定表面薄层时,可用小载荷。维氏硬度的优点是测量精度高,测量的硬度范围宽(可高达 1 300 HV),应用广泛,特别适宜于测定工件表面硬化层、金属镀层及薄片金属的硬度。

硬度指标在生产中应用广泛。在产品设计的条件中,硬度是一项重要的技术指标。

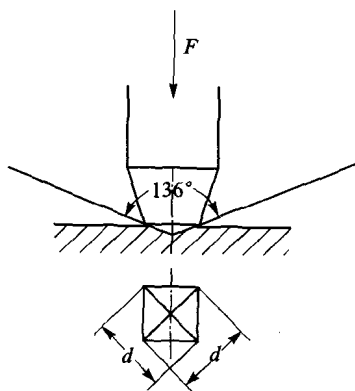


图 1.5 维氏硬度测量原理

对于工具、模具和有耐磨性要求的零件,硬度是直接的使用性能指标,如高速钢车刀要求硬度 $> \text{HRC}62$ 、热锻模要求硬度 $\text{HRC}35 \sim 47$ 。此外,硬度与强度之间存在着一定的内在联系,硬度测量迅速简便,又不破坏成品零件,常用零件的硬度来估算强度;对于低碳钢,也可采用硬度与强度换算表。

1.3 冲击韧性

冲击韧性是材料抵抗冲击载荷的能力。许多机械零件(如飞机起落架、发动机涡轮轴、汽车变速齿轮等)在工作中受到冲击载荷的作用,能引起材料断裂。因此,对此类零件进行设计时,不但要考虑前述的静态力学性能指标,还要考虑韧性等动态力学性能指标。在测定冲击韧度值时,不仅存在力的作用,而且伴随有力的作用速度,所以它是一种能量参数。

将材料制成带 V 型缺口或带 U 型缺口的标准试样,采用横梁式(见图 1.6a)或悬梁式(见图 1.6b)两种方法进行冲击试验。

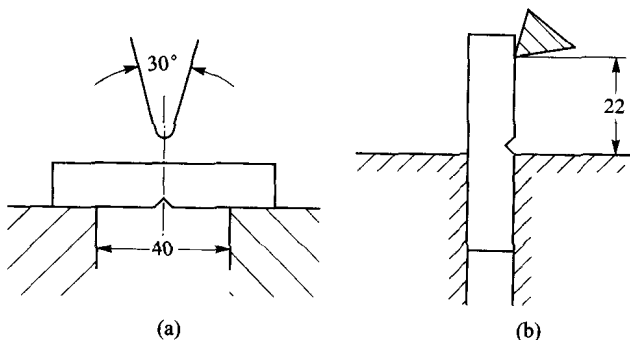


图 1.6 冲击韧度测量原理

横梁式冲击试验因试样装夹方便,更为常用。先将试样放在如图 1.7 所示的冲击试验机的支座上,并使试样缺口背向摆锤冲击方向与摆锤对正;然后将重量为 G 的摆锤提举到一定高度 H ;摆锤落下将试样冲断,此时摆锤高度为 h 。试样横截面单位面积上所消耗的功即为冲击韧度值 a_k ,即

$$a_k = \frac{A_k}{S} \quad (1.10)$$

式中: A_k ——冲击试样所消耗的功,单位为 J; S ——试样缺口处的横截面积,单位为 cm^2 。

用 U 型缺口试样测得的冲击韧度用 a_{kU} 表示,用 V 型缺口试样测得的冲击韧度值用 a_{kV} 表示。

金属材料的 a_k 值不能直接用于零件的设计计算,但对承受冲击载荷的零件,应当有一定的 a_k 值要求,以保证零件使用的安全性,如航空发动机轴 $a_k = 80 \sim 100 \text{ kJ/m}^2$;一般零件则要求 $a_k = 300 \sim 500 \text{ kJ/m}^2$ 便可满足要求。

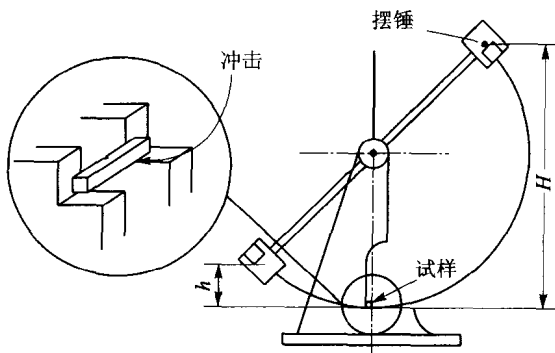


图 1.7 冲击试验机原理

1.4 疲劳断裂和疲劳强度

机械零件在交变载荷作用下,其工作应力远小于抗拉强度,甚至小于屈服强度时,在长时间工作后发生突然断裂的现象称为疲劳断裂。疲劳强度是指材料经无限多次应力循环仍不断裂时的最大应力。它表征了材料抵抗疲劳断裂的能力。

交变载荷是指只有应力数值变化,没有方向变化的重复应力和既有应力数值变化,又有方向变化的交变应力。机床主轴、齿轮、弹簧、连杆等作旋转或往复运动的零件就是在上述应力作用下工作的。在交变载荷作用下,材料表面的刀痕、尖角等应力集中处和材料内部的夹渣、气孔、裂纹等缺陷处首先产生疲劳裂纹,并随应力循环周次的增加,疲劳裂纹不断扩展,直至零件的有效横截面面积不能承受外载荷时突然断裂。这就是疲劳断裂的机理。

疲劳试验方法很多,其中应用最广泛的是旋转弯曲疲劳试验,试验装置如图 1.8 所示。实验测得材料所受的交变应力 σ 与其断裂前应力循环次数 N 的关系曲线称为疲劳曲线,如图 1.9 所示。可以看出,施加载荷越小,即交变应力越小,则在断裂前能够承受的循环次数越多。当应力降低到某一数值时,曲线趋向水平,即表示在该应力作用下,材料经过无限多次应力循环而不断裂。工程上规定,材料的应力循环次数达到某一基数而不发生断裂时,其最大应力就作为该种材料的疲劳强度。一般钢铁的循环基数 N 取 10^7 次,有色金属的循环基数 N 取 10^8 次。材料承受对称循环交变应力时的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。钢材的 σ_{-1} 只有 σ_b 的 50% 左右。

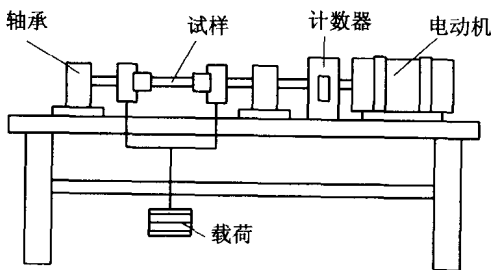


图 1.8 疲劳试验原理

机械零件的断裂有 80% 是因疲劳而造成的。由于疲劳断裂是突然发生的,常常会引起严重事故。采取改进设计(避免尖角连接、降低表面粗糙度值等)和采用表面强化工艺(表面淬

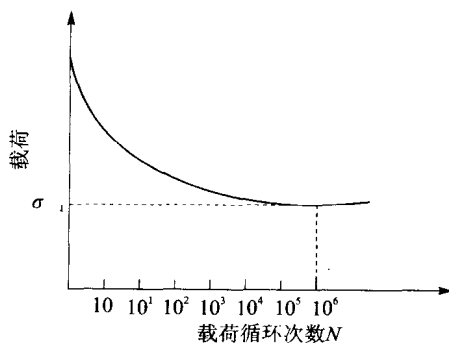


图 1.9 疲劳曲线

火、化学热处理、喷丸、滚压等)方法都可提高零件的疲劳强度。加强原材料和零件成品的内部缺陷检查也可减少或避免疲劳断裂。

1.5 材料高温性能

在汽轮机、蒸汽锅炉、化工炼油设备及航空发动机中,很多零件长期在高温下工作。温度对材料的力学性能影响很大,一般随温度的升高,金属材料的强度和弹性模量降低而塑性增加。但当高温长时负载时,金属材料的塑性却显著降低,往往出现脆性断裂现象。由此可见,对于高温材料的力学性能,不能使用常温下短时拉伸的应力—应变曲线来评定,还必须加入温度与时间两个因素。

这里所指的“高温”或“低温”是相对该金属的熔点而言,常采用约比温度,即 T/T_m (T 为试验或工作温度, T_m 为金属熔点,均为热力学温度)。当约比温度大于 0.5 时为高温,反之为低温。

1.5.1 蠕变

蠕变就是金属材料长时间的在一定温度、一定应力作用下,即使应力小于 $\sigma_{0.2}$,也会缓慢地发生塑性变形的现象。这种变形最后导致材料断裂称为蠕变断裂。蠕变在低温下也会产生,但只有当约比温度大于 0.3 时才比较显著。如碳钢当温度超过 300℃、合金钢温度超过 400℃时,就必须考虑蠕变的影响。蠕变是高温下金属力学行为的一个重要特点。金属材料的蠕变过程可用如图 1.10 所示典型的蠕变曲线表示。曲线分为三个阶段。 ab 部分为第一阶段,包括瞬时变形 oa 和蠕变变形 ab , ab 部分称蠕变起始阶段。由于这部分的蠕变速度是逐渐减小的,故又称蠕变减速阶段。 bc 部分为第二阶段,这部分的蠕变变形与时间成线性关系,即蠕变速度维持恒定。在整个蠕变过程中,这部分的蠕变速度最小,故称为稳态蠕变阶段或最小蠕变速度阶段。 cd 部分为蠕变第三阶段,由于在这一部分蠕变变形速度逐渐增加,故这部分称为蠕变加速阶段,直至 d 点材料断裂。

蠕变强度是指材料在高温长时载荷作用下抵抗塑性变形的能力。有以下两种表示方法:

(1) 在规定时间内达到规定变形量的蠕变强度,记为 $\sigma_{\delta/t}^T$, 单位为 MPa。其中 T 为摄氏温度(℃), δ 为延伸率(%), t 为持续时间(h)。

例如 $\sigma_{0.2/1000}^{800} = 60 \text{ MPa}$, 表示试样在 800℃, 经过 1 000 小时, 发生 0.2% 变形量的应力为

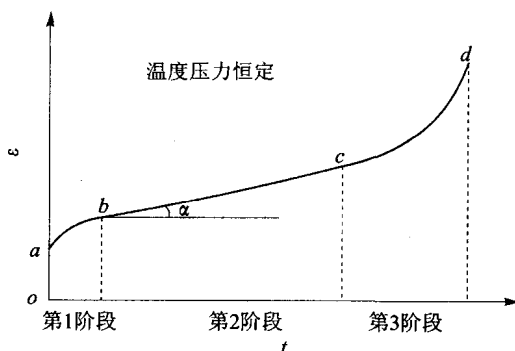


图 1.10 典型蠕变曲线

60 MPa。这种蠕变强度一般用于需要提供总蠕变变形的构件设计。

(2) 稳态蠕变速度达到规定值时的蠕变强度, 记为 σ_v^T , 单位为 MPa。其中 T 为摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$), v 为稳态蠕变速度 ($\%/h$)。例如 $\sigma_{1 \times 10^{-5}}^{600} = 60 \text{ MPa}$, 表示试样在 600°C , 稳态蠕变速度为 $1 \times 10^{-5} \%/h$ 时的蠕变强度为 60 MPa。这种蠕变强度一般用于受蠕变变形控制的, 工作时间较长的构件设计。

1.5.2 持久强度

持久强度是指材料在高温长时载荷作用下抵抗断裂的能力。其大小用给定温度 (T) 下, 恰好使材料经过规定时间 (t) 发生断裂的应力值表示, 记为 σ_t^T 。这里所指规定时间是以机组的设计寿命为依据的。锅炉、汽轮机等机组的设计寿命为数万至数十万小时, 而航空喷气发动机的寿命则为一千或几百小时。例如某材料在 700°C 条件下承受 30 MPa 的应力作用, 经 1 000 h 后断裂, 则称这种材料在 700°C 、1 000 h 的持久强度为 30 MPa, 写成 $\sigma_{1000}^{700} = 30 \text{ MPa}$ 。

对于设计某些在高温运转过程中不考虑变形量大小, 而只考虑在承受给定应力下使用寿命的零件来说, 金属材料的持久强度是极其重要的性能指标。

1.5.3 高温疲劳

金属材料在高温下的疲劳强度往往是疲劳与蠕变同时作用的结果, 因此也常称其为蠕变范围内的疲劳。一般地说, 当温度超过 $0.5T_m$ 时, 材料的疲劳强度会急剧下降。随着温度的升高, 疲劳强度逐渐下降。某试样若在 650°C 时, 应力为 40 MPa, 经 10^7 次对称循环后断裂, 记为 $\sigma_{-1}^{650} = 40 \text{ MPa}$ 。

1.6 材料的物理及化学性能

1.6.1 金属的物理、化学性能

1. 金属的物理性能

(1) 密度

单位体积物质的质量称为该物质的密度。其表达式为