

Engineering Materials

工程材料

付广艳 主 编

郭北涛 副主编

宗 琳

于永泗 主 审

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/付广艳主编.
—北京:中国石化出版社,2007
ISBN 978-7-80229-209-3

I.工… II.付… 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(2006)第 133902 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 410 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前 言

“工程材料”课程是高等院校机械类和相关专业的一门十分重要的技术基础课，它能为学好后续课程和实际工作打下必要的基础。

本书以高等教育从精英教育向大众化教育转变为出发点，结合目前普通高等院校本科生的学习基础和将来适应社会的需要，注重实际应用，注重培养学生的实际工程技术能力，将原理与工程实例紧密结合，一方面提高学生的学习兴趣，另一方面便于学生理解。同时注重引入新材料、新技术及新工艺，选用材料的最新国家标准和牌号，确保学生学到的知识与时代同步。

近年来，为了培养学生的创新意识和工程实践能力，教学计划不断调整，理论教学学时逐渐减少，实践环节学时逐渐增加。为了适应这种形势，我们编写了这本字数较少，语言简洁，内容新颖，适用性强的《工程材料》教材。

本书第四章、第五章、第六章由付广艳编写，第二章、第三章、第七章由宗琳编写，第八章、第九章、第十一章由郭北涛编写，第十章及实验由刘群编写，第一章由郭树国编写。全书由付广艳教授组织并统编，大连理工大学于永泗教授主审。

本书的编写参考了部分国内外有关教材、科技著作、论文及材料金相图谱等，在此特向有关作者和单位致以深切的谢意。

由于编者水平有限，本书不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

1 材料的机械性能	(1)
1.1 材料的静载机械性能	(1)
1.2 材料的动载机械性能	(7)
1.3 材料的断裂韧性	(9)
1.4 材料的高、低温机械性能	(11)
1.5 材料的磨损性能	(12)
2 金属的结构与结晶	(14)
2.1 金属的晶体结构	(14)
2.2 金属的结晶	(21)
3 合金的结构与二元状态图	(26)
3.1 合金中的相结构	(26)
3.2 二元合金相图	(29)
4 铁碳合金	(41)
4.1 铁碳合金相图	(41)
4.2 典型铁碳合金的平衡结晶过程	(44)
4.3 碳钢	(53)
5 金属的塑性变形与再结晶	(62)
5.1 金属的塑性变形	(62)
5.2 回复与再结晶	(67)
5.3 金属的热加工	(69)
6 钢的热处理	(71)
6.1 钢在加热时的转变	(72)
6.2 钢的冷却转变	(76)
6.3 钢的普通热处理	(85)
6.4 钢的表面热处理	(94)
6.5 热处理缺陷及防止方法	(99)
7 合金钢	(103)
7.1 合金元素的作用及合金钢的分类	(103)

7.2	合金结构钢	(111)
7.3	合金工具钢	(129)
7.4	特殊性能钢	(142)
8	铸铁.....	(156)
8.1	铸铁的石墨化	(156)
8.2	铸铁的分类和牌号	(158)
8.3	灰铸铁	(159)
8.4	可锻铸铁	(161)
8.5	球墨铸铁	(162)
8.6	特殊性能铸铁(合金铸铁)	(164)
9	有色金属及合金	(167)
9.1	铝及铝合金	(167)
9.2	铜及铜合金	(174)
9.3	轴承合金	(180)
9.4	钛及钛合金	(182)
10	非金属材料.....	(186)
10.1	高分子材料	(186)
10.2	陶瓷材料	(197)
10.3	复合材料	(201)
11	机械零件的选材及工艺分析.....	(207)
11.1	选材的基本原则	(207)
11.2	热处理技术条件的标注	(209)
11.3	典型零部件选材及工艺分析	(211)
11.4	典型设备及装置的选材	(219)
☆	工程材料实验	(226)
实验一	金属的显微分析法.....	(226)
实验二	碳钢和铸铁在平衡状态下的显微组织.....	(233)
实验三	钢的热处理及其对组织和性能的影响.....	(236)
实验四	常用工程材料的显微组织观察与金相显微照相技术简介.....	(244)
附录 1	铝及铝合金新旧牌号及用途	(250)
附录 2	金属热处理工艺的分类及代号	(252)
	参考文献.....	(254)

1 材料的机械性能

材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两类。使用性能是指材料在使用过程中所表现出来的性能,主要包括机械性能、物理性能和化学性能;工艺性能是指材料在加工过程中所表现出来的性能,包括热处理性能、可锻性、可焊性和切削加工性等。

材料的机械性能(也称力学性能)是材料在一定环境(温度、介质)下,承受各种外加载荷(拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等)时所表现出的行为。通常表现为变形(材料受到载荷作用而产生的几何形状和尺寸的变化)与断裂。材料机械性能是工程设计的重要依据。

1.1 材料的静载机械性能

静载荷是指载荷大小不随时间的变化而发生变化。材料的静载机械性能指标主要有刚度、强度、塑性、硬度等。

1.1.1 拉伸曲线与应力应变曲线

1. 拉伸曲线

用拉伸试验可以测定金属的强度和塑性指标,GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》规定了拉伸试验的方法和拉伸试样的制作标准。在试验时,金属材料制作成一定的尺寸和形状(如图1-1所示),将拉伸试样装夹在拉伸试验机上,对试样施加拉力,在拉力不断增加的过程中,观察试样的变化,直至把试样拉断。

根据拉伸过程中载荷 F 与试样的伸长量 Δl 之间的关系,可以绘制出材料的拉伸曲线。如图1-2所示为低碳钢的拉伸曲线,由图可见,在开始的 Oe 阶段,试样的伸长量与载荷呈线性关系,卸除载荷,试样将恢复到原始长度,此阶段的变形称为弹性变形。载荷超过 F_e 后,试样的变形不能完全恢复而产生永久变形,这种永久变形称为塑性变形。当载荷增大到 F_s 后,载荷不增加或变化不大,试样仍继续伸长,出现明显的塑性变形,这种现象称为屈服现象。 s 点称为屈服点。屈服后试样产生均匀的塑性变形,当载荷超过 F_b 后,试样产生非均匀塑性变形,到 k 点时,试样发生断裂。

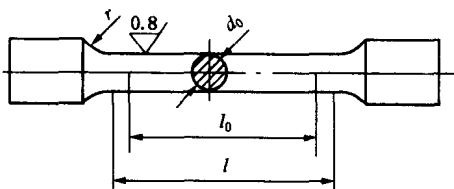


图 1-1 圆形拉伸试样示意图

2. 应力 - 应变曲线

应力 σ 是指试样单位截面积上承受的载荷,即

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1-1)$$

式中 F ——试样所承受的载荷, N;

S_0 ——试样的原始横截面积, mm^2 。

应变 ϵ 是指试样单位长度的伸长量, 即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

式中 Δl ——试样标距长度的伸长量, mm;

l_0 ——试样的原始标距长度, mm。

图 1-3 是低碳钢的应力—应变曲线, 即 $\sigma - \epsilon$ 曲线。应力—应变曲线的形状与拉伸曲线形状相同, 仅是坐标的含义不同, 但 $\sigma - \epsilon$ 曲线能直接读出机械性能指标。

不同材料的拉伸曲线形状有很大差别。像低碳钢等塑性材料在断裂前发生明显塑性变形的断裂称为韧性断裂; 而灰口铸铁等脆性材料在断裂前塑性变形量很小, 甚至不发生塑性变形的断裂称为脆性断裂。

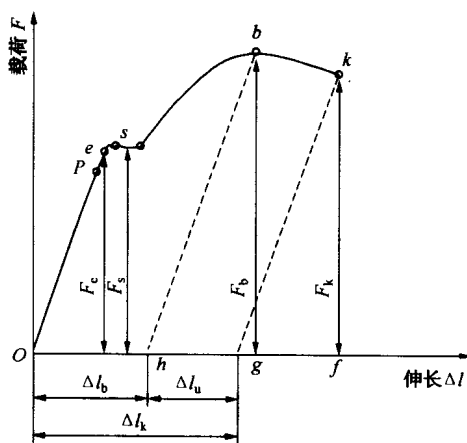


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

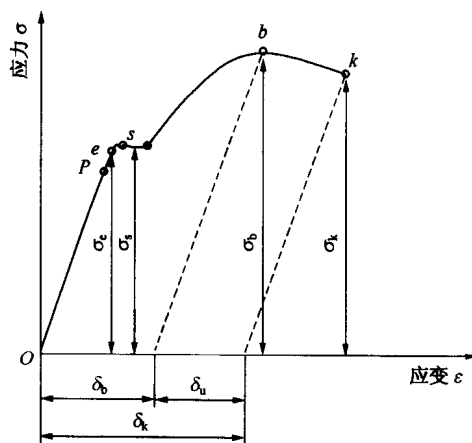


图 1-3 应力—应变曲线

1.1.2 刚度与强度

1. 刚度

刚度是指材料对弹性变形的抗力, 工程上弹性模量 E 称为材料的刚度。弹性模量指材料在完全弹性状态下的应力与应变的比值, 即

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

式中 σ ——试样承受的应力, N/mm^2 ;

ϵ ——试样的应变。

对于材料而言, 弹性模量 E 越大, 其刚度越大, 材料产生一定量的弹性变形所需要的应力越大。在机械工程中的一些零件或构件, 除了满足强度要求以外, 还应严格控制弹性变形量, 如锻模、镗床的镗杆, 为了保证高的加工精度, 要选刚度较大的材料。

实际工件的刚度首先取决于材料的弹性模量 E , 不同的材料, 其刚度差异很大。陶瓷材料的刚度最大, 金属材料 and 复合材料次之, 而高分子材料最低。此外, 实际工件的刚度还与零件的形状、截面尺寸有关。

2. 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能力。工程上常用的强度指标有屈服强度(屈服点)和抗拉强度。

(1) 屈服强度

屈服强度 σ_s 是指拉伸试样产生屈服现象时的应力, 即:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-4)$$

式中 F_s ——试样发生屈服现象时的载荷, N;

S_0 ——试样的原始横截面积, mm^2 。

对于许多没有明显屈服现象的材料, 工程上规定以试样产生 0.2% 塑性变形时的应力, 作为该材料的屈服点, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示, 通常记作 $\sigma_{0.2}$, 即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (1-5)$$

式中 $F_{0.2}$ ——试样标距发生 0.2% 残余伸长时的载荷, N;

S_0 ——试样的原始横截面积, mm^2 。

屈服强度 σ_s 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 通常是机器零件设计的主要强度指标, 也是评定金属材料强度的重要指标之一。工程上绝大多数零件, 如汽车连杆、紧固螺栓、机床丝杠等, 在工作时是不允许发生过量残余变形的。因此, 设计的许用应力以 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 来确定。

(2) 抗拉强度

抗拉强度 σ_b 是指材料在拉断前所能承受的最大应力, 即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-6)$$

式中 F_b ——试样拉断前承受的最大载荷, N;

S_0 ——试样的原始横截面积, mm^2 。

对于脆性材料和不形成颈缩的塑性材料, 其拉伸最高载荷就是断裂载荷。因此, 其抗拉强度也代表断裂抗力。对于形成颈缩的塑性材料, 其抗拉强度代表产生最大均匀变形的抗力, 也表示材料在静拉伸条件下的极限承载能力, 它是高分子材料和陶瓷材料选材的重要依据, 对塑性变形要求不严而仅要求不发生断裂的金属零件, 如钢丝绳、建筑结构件等, 为减轻自重, 抗拉强度也常作为其设计与选材依据。

1.1.3 塑性

塑性是材料产生塑性变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标有延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 。

1. 延伸率

延伸率 δ 是指拉断后标距的伸长量 ($l_1 - l_0$) 与原始标距 l_0 之比的百分率, 即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 l_1 ——试样拉断后的标距, mm;

l_0 ——试样的原始标距, mm。

必须指出, 材料延伸率 δ 的大小与试样原始标距 l_0 和原始横截面积 S_0 密切相关, 在 S_0 相同的情况下, l_0 越长则 δ 越小, 反之亦然。因而, 试验时应对所选定试样尺寸做出规定, 以便进行比较。如 $l_0 = 10d_0$ 时, 用 δ_{10} 或 δ 表示; $l_0 = 5d_0$ 时, 用 δ_5 表示。

2. 断面收缩率

断面收缩率 ψ 是指试样拉断处横截面积的减小量 ($s_0 - s_1$) 与原始横截面积 s_0 之比的百

分率，即

$$\psi = \frac{s_0 - s_1}{s_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 s_1 ——试样拉断后断裂处的最小横截面积， mm^2 ；

s_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 越大，材料的塑性越好。一般认为， $\delta > 5\%$ 的材料为塑性材料，而 $\delta < 5\%$ 的材料为脆性材料。

材料的塑性指标一般不直接用于机械设计计算，但材料具有一定的塑性，当零件遭受意外的过载或冲击时，可因塑性变形而不致于突然断裂。同时材料具有一定的塑性可以保证某些成形工艺(锻造、轧制、冷冲压等)的顺利进行。因此大多数机械零件除要求一定强度指标外，还要求一定塑性指标。

1.1.4 硬度

硬度是衡量材料软硬的指标，是机械性能中最常用的性能指标之一。材料在表面局部体积内抵抗变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。硬度测定的方法有很多，一般分为压入法、动力法和划痕法三类。生产中以压入法较常用，有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。此时，硬度的物理意义是指材料表面抵抗比它更硬的物体局部压入时所引起的塑性变形能力。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验按 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验第 1 部分：试验方法》进行，其布氏硬度试验测定原理如图 1-4 所示。对一定直径的硬质合金球施加试验力压入试样表面，经规定保持时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕的直径，根据表面压痕的直径计算出压痕球缺的面积，最后求出压痕单位面积上承受的平均压力，以此作为被测金属材料的布氏硬度值。

布氏硬度值(HBW)的计算公式为

$$\text{HBW} = \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-9)$$

式中 F ——载荷大小，N；

D ——压头的直径，mm；

d ——压痕表面的直径，mm；

S ——压痕的面积， mm^2 。

布氏硬度值的单位 N/mm^2 ，习惯上布氏硬度是不标单位的。

布氏硬度值的表示方法为：硬度值 + HBW + 压头直径 + 压力 + 保持时间。例如，350HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球在 7.355kN 试验力下保持 10s ~ 15s (保持时间为 10 ~ 15s 不加标注)测定的布氏硬度值为 350；又如，600HBW1/30/20 表示用压头直径 1mm 的硬质合金球在 294.2N 试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600。实际测定时利用刻度放大镜测出压痕直径 d ，根据测得的 d 按已知的 F 、 D 值查表求得硬度值。布氏硬度试验的具体规范见表 1-1。

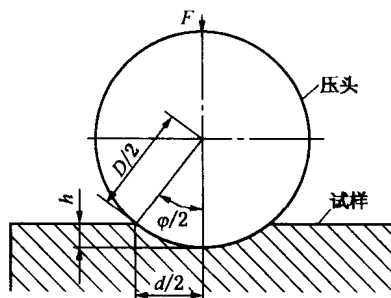


图 1-4 布氏硬度试验测定原理

表 1-1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度值 (HB)	试样厚度/ mm	直径/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F/N	保持时间/s
黑色金属	≥ 140	3~6	10	30	3000	10
		2~4	5		750	
		<2	2.5		187.5	
	< 140	>6	10	10	1000	10
		3~6	5		250	
		<3	2.5		62.5	
有色金属	≥ 130	3~6	10	30	3000	30
		2~4	5		750	
		<2	2.5		187.5	
	36~130	6~9	10	10	1000	30
		3~6	5		250	
		<3	2.5		62.5	
	< 35	>6	10	2.5	250	60
		3~6	5		62.5	
		<3	2.5		15.6	

布氏硬度因压痕面积较大,其硬度值比较稳定,特别适合于测定像灰铸铁和轴承合金这样的具有粗大晶粒或粗大组成相的材料硬度。但同时由于测定布氏硬度时压痕较大,故不宜在零件表面上测定布氏硬度,也不能测定薄壁件或表面硬化层的布氏硬度。在大批量生产时,若要对产品进行逐件检验,则因测定压痕直径要有一定的时间,所以要耗费大量的人工,故也不适合于大批量生产的零件检验。

2. 洛氏硬度

金属洛氏硬度试验按 GB/T 230.1—2004《金属洛氏硬度试验第 1 部分: 试验方法》进行,其洛氏硬度试验测定原理如图 1-5 所示,将压头(金刚石圆锥、钢球或硬质合金球)按图 1-5 分两个步骤压入试样表面,经规定保持时间后,卸除主试验力,测量在初试验力下的残余压痕深度 h 。根据 h 值及常数 N 和 S ,用式(1-10)可计算为

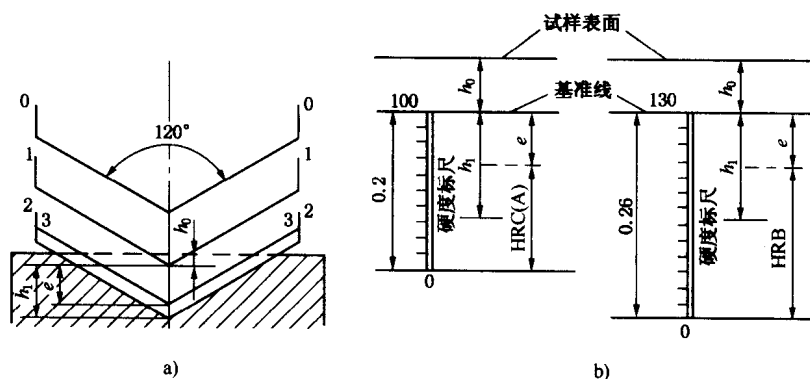


图 1-5 洛氏硬度试验测定原理

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{S} \quad (1-10)$$

式中 N ——给定标尺的硬度数；
 h ——残余压痕深度，mm；
 S ——给定标尺的单位，mm。

为使洛氏硬度计能测试从软到硬各种材料的硬度，需要不同的压头和载荷组成不同的洛氏硬度标尺，常用的是 A、B、C 三种标尺，分别记作 HRA、HRB、HRC。其中，HRC 在生产中应用最广。表 1-2 给出了三种标尺的试验规范及应用范围。

表 1-2 常用三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

标 尺	硬度符号	压头类型	总试验力 F/N	测量范围	应用范围
A	HRA	金刚石圆锥体	588.4	20 ~ 88 HRA	碳化物、硬质合金、表面淬化工件等
B	HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 钢球	980.7	20 ~ 100 HRB	低碳钢、退火钢或正火钢、有色金属等
C	HRC	金刚石圆锥体	1471	20 ~ 70 HRC	一般淬火钢、调质钢等

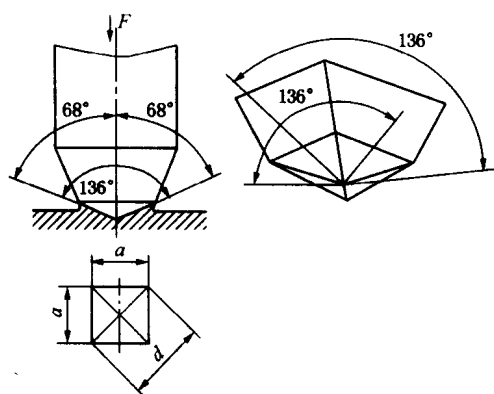


图 1-6 维氏硬度试验测定原理

洛氏硬度的表示方法为：硬度值 + 硬度符号。例如，59HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 59。

洛氏硬度试验操作简便、迅速，可直接从表盘上读出硬度值。由于压痕小，可用于成品及薄件检验。它的缺点是重复性差，因而不适用具有粗大、不均匀组织材料的硬度测定，测量结果也不及布氏硬度试验准确。

3. 维氏硬度

维氏硬度试验按 GB/T 4340.1—1999《金属维氏硬度试验第 1 部分：试验方法》进行，其维氏硬度试验测定原理如图 1-6 所示，将顶部两相对面具有规定角度的正四棱锥体金刚石压头用试验力压入试样表面，保持规定时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕对角线长度，维氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商。维氏硬度的符号为 HV。

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (1-11)$$

式中 F ——试验所加载荷，N；
 S ——压痕的面积， mm^2 ；
 d ——两对角线的平均长度，mm。

维氏硬度的面积 S 是通过测定压痕表面的对角线平均长度 d 来计算的。计算出的维氏硬度值有单位(N/mm^2)，但通常不标单位。

维氏硬度的表式方法为：硬度值 + HV + 压力 + 保持时间。例如，640HV30/20 表示在试

验力为 294.2N 作用下保持 20s 测定的维氏硬度为 640。

维氏硬度试验的载荷大小可以任意选择, 测量范围较宽, 软硬材料都可测试, 特别适用于测定薄工件或薄表面硬化层的硬度。维氏硬度试验的缺点是需要通过印痕测量后才可以计算(或查表)得到硬度值, 其工作效率低于洛氏硬度测试。

4. 显微硬度

布氏、洛氏及维氏三种硬度试验法由于测定载荷较大, 只能测得材料组织的平均硬度值。但是如果要测定极小范围内的物质, 例如某个晶粒、某个组成相或夹杂物的硬度, 或者研究扩散层组织、偏析相、硬化层深度以及极薄板等等, 上述三种硬度法就不适用。此外, 它们也不能测定像陶瓷等脆性材料的硬度, 因为陶瓷材料在这么大的测定载荷作用下容易破裂。显微硬度试验为这些领域的硬度测试创造了条件, 它在工业生产及科研中得到了广泛的应用。所谓显微硬度试验, 是指在显微镜下进行的一种硬度试验方法。所用的载荷很小, 一般小于 1.9614N, 试验后得到的压痕也很小。

在载荷作用下将 136° 的角锥四面体金刚石压头压入被测试样显微组织中某个相或预定显微区域, 保持一定时间, 在卸除载荷后, 测量出压痕对角线的长度(d), 计算出凹印面积, 进一步计算出单位面积上所受的应力, 或通过查表得出硬度值。

显微硬度试验的最大特点是载荷小, 因而产生的压痕极小, 几乎不损坏试件, 又便于测定微小区域内的硬度值, 显微硬度试验的灵敏度高, 特别适合于评定细线材的加工硬化程度, 研究磨削时烧伤情况和由于摩擦、磨损或者由于辐照、磁场和环境介质而引起的材料表面层性质的变化, 检查材料化学和组织结构上的不均匀性。此外, 还可利用显微硬度测定疲劳裂纹尖端塑性区。

1.2 材料的动载机械性能

动载荷是指由于运动而产生的作用在构件上的作用力。根据作用性质的不同分为冲击载荷和交变载荷等。材料的主要动载机械性能指标有冲击韧性和疲劳强度。

1.2.1 冲击韧性

材料不仅受静载荷的作用, 在工作中往往也受到冲击载荷(以很大的速度作用于工件上的载荷)的作用。例如锻锤、冲床、铆钉枪等, 因此这些零件和工具在设计和制造时, 不能只考虑静载荷强度指标, 必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。评价材料承受冲击载荷的能力, 常用材料的韧性指标。材料在塑性变形和断裂的全过程中吸收能量的能力, 称为材料的韧性。它是材料强度和塑性的综合表现。评定材料韧性的指标主要有冲击韧度和多冲抗力。

1. 冲击韧度

冲击韧度用一次摆锤进行冲击试验测定。

其原理如图 1-7 所示。测定时, 将标准试样放在试验机的支座上, 将具有一定质量 m 的摆锤抬升到一定高度 H_1 , 使其获得一定的位能 mgH_1 , 再将其释放, 冲断试样, 摆锤的剩余能量为 mgH_2 。摆锤的位能损失 $mgH_1 - mgH_2 = mg(H_1 - H_2)$ 就是冲断试样所需要的能量, 即是试样变形和断裂所消耗的功, 也称为冲击吸收功 A_K (单位 J)。冲击吸收功的大小直接由试验机的刻度盘上直接读出。试样缺口处单位截面积上所吸收的冲击功称为冲击韧度, 即

$$\alpha_K = \frac{A_K}{S} \quad (1-12)$$

式中 a_K ——冲击韧度, J/cm^2 ;
 A_K ——冲断试样所消耗的冲击功, J ;
 S ——表示试样缺口处的横截面积, cm^2 。

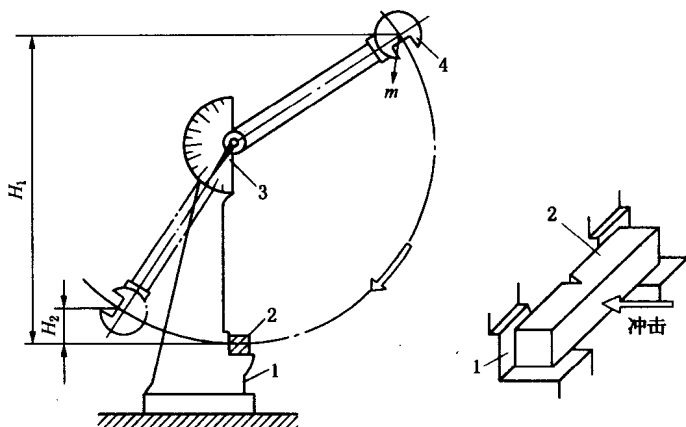


图 1-7 摆锤式冲击试验原理

冲击吸收功是一个由强度和塑性共同决定的综合性机械性能指标。在零件设计时, 虽不能直接计算, 但它是一个重要参考值。其工程意义在于通过测定冲击吸收功和对试样断口分析, 能揭示材料的内部缺陷, 如气孔、夹渣、偏析和严重分层等冶金缺陷和过热、过烧、回火脆性等锻造和热处理缺陷, 这些缺陷使材料的冲击吸收功明显下降。因此, 用冲击试验可以检验冶炼、热处理及各种热加工工艺和产品的质量。实践表明, 塑性、韧性越高, 材料抵抗大能量冲击的能力越强。但在小能量多次冲击的情况下, 决定材料抗冲击能力的主导作用是强度, 提高材料的冲击吸收功值并不能有效提高使用寿命。因此, 根据 A_K 值可评定材料对大能量冲击载荷的抵抗能力。

2. 多冲抗力

在实际生产中, 零件经过一次冲击即发生断裂的情况极少。许多零件总是在很多次冲击之后才会断裂, 且所承受的冲击能量也远小于一次冲断的能量。这种冲击称做多次冲击。所以, 用多冲抗力作为材料抵抗冲击载荷作用的机械性能指标就更切合实际。

多次冲击试验是在落锤式多次冲击试验机上进行。冲击频率为 450 周次/min 和 600 周次/min, 在一定的冲击能量下, 将试样断裂前的冲击次数作为多冲抗力指标。

研究表明, 材料的冲击抗力取决于材料强度和塑性的综合性能指标。随着条件的不同, 强度和塑性的作用是不同的。大能量一次冲击时, 其冲击抗力主要取决于塑性; 而小能量多次冲击时, 其多冲抗力则主要取决于强度。

1.2.2 疲劳强度

疲劳断裂是指在交变载荷的作用下, 零件经过较长时间工作或多次应力循环后所发生的断裂现象。许多零件, 如弹簧、齿轮、曲轴、滚动轴承和连杆等, 都是在交变应力下工作的。据统计, 在机械零件的断裂失效中, 80% 以上是属于疲劳断裂。

所谓交变应力(如图 1-8 所示)是指应力的方向和大小随着时间发生周期性循环变化的应力。

疲劳断裂具有突然性, 危害很大。对于疲劳的研究, 已经有了很大的进展。疲劳断裂是

一种低应力脆断，断裂时的应力远低于材料的抗拉强度，甚至低于材料的屈服强度。无论是塑性材料还是脆性材料断裂前均无明显的塑性变形。疲劳断裂对材料的表面和内部缺陷非常敏感，疲劳裂纹常在表面缺口(如螺纹、刀痕、油孔等)、脱碳层、夹渣物、碳化物及孔洞等处形成。

产生疲劳的原因，一般认为是由于材料含有杂质、表面划痕及其他能引起应力集中的缺陷，导致产生微裂纹，这种微裂纹随应力循环周次的增加而逐渐扩展，致使零件有效截面逐步缩减，直至不能承受所加载荷而突然断裂。疲劳断口一般可明显地分成三个区域，即疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区，如图 1-9 所示。

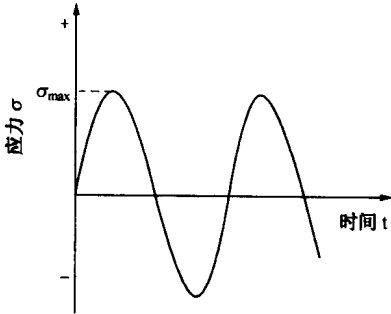


图 1-8 交变应力示意图

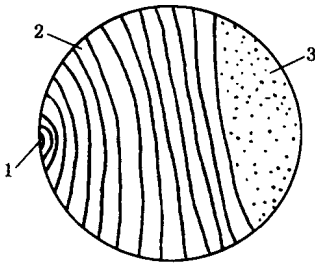


图 1-9 疲劳断口示意图

1—疲劳源；2—扩展区；3—瞬时断裂

大量实验表明，材料所受的交变应力的最大值 $\sigma_{\max}$ 越大，则疲劳断裂前所经历的应力循环次数 N 越低，反之越高。根据交变应力 $\sigma_{\max}$ 和应力循环次数 N 建立起来的曲线，称作疲劳曲线，或称 $\sigma-N$ 曲线，如图 1-10 所示。

疲劳强度是指材料经受无限次循环应力而不断裂的最大应力。当应力按正弦曲线对称循环时，疲劳强度记作 σ_{-1} 。实践表明，如果 10^7 周次应力循环下，仍不发生疲劳断裂，则在经过相当多次的应力循环后一般也不会疲劳断裂。GB 4337—84 规定，一般钢铁材料循环周次取 10^7 次时能承受的最大循环应力为疲劳强度。大多数有色金属及其合金和许多聚合物，其疲劳曲线上没有水平直线部分，工程上规定 $N = 10^8$ 次时对应的应力作为条件疲劳极限。

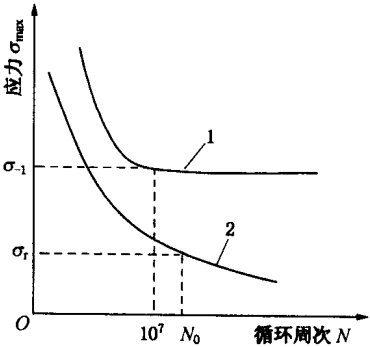


图 1-10 疲劳曲线示意图

1—低、中碳钢；2—非铁金属(有色金属)

材料的疲劳强度受到很多因素的影响，如材料本质、材料的表面质量、工作条件、零件的形状、尺寸及表面残余压应力等。因此，提高材料疲劳强度可通过控制材料内部质量改善零件的结构形状，避免应力集中，降低零件表面粗糙度和进行表面热处理等措施来实现。

1.3 材料的断裂韧性

为了防止零件发生断裂失效，传统方法是以材料的屈服强度为依据，即

$$\sigma < \frac{\sigma_{0.2}}{n} \quad (1-13)$$

式中 σ ——工作应力, MPa;

$\sigma_{0.2}$ ——材料的屈服强度, MPa;

n ——安全系数。

一般认为, 零件在工作时的应力小于许用应力, 就不会发生塑性变形而失效, 更不会发生断裂。然而某些高强度材料零件和中、低强度材料制造的大型件往往在工作应力远低于材料的屈服强度时就发生脆性断裂。这种低于材料屈服强度时发生的脆性断裂称为低应力脆断。

研究表明, 低应力脆断是由于材料中宏观裂纹扩展引起的, 而传统设计是在假设材料中不存在宏观裂纹的基础上进行的, 但实际材料在冶炼、加工及零件使用工程中, 宏观裂纹往

往是不可避免的。零件工作时, 裂纹尖端处于应力集中状态, 尽管工作应力远小于屈服强度, 但裂纹尖端的应力处于相当高的水平, 当尖端应力超过原子间结合力时, 裂纹就会扩展, 从而导致低应力脆断。因此, 裂纹是否易于扩展, 就成为材料是否易于断裂的一种重要指标。

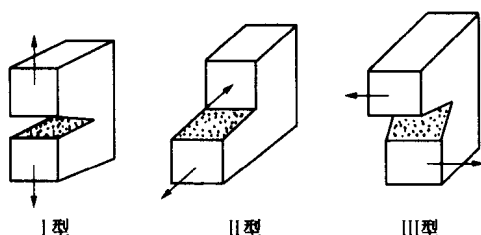


图 1-11 裂纹扩展的三种基本形式

根据应力与裂纹扩展面的相互关系, 裂纹扩展可分为三种基本形式(如图 1-11 所示): 张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。实际裂纹的扩展经常是几种方式的组合, 张开型(I型)最危险, 最容易扩展而发生脆性断裂。因此, 这里就以这种方式来讨论断裂韧性。

由于材料内部不可避免的存在各种缺陷(气孔、缩孔、非金属夹杂物等), 由于缺陷的存在, 使材料内部不连续, 可将此视作材料的裂纹, 在裂纹尖端前沿有应力集中产生, 形成一个裂纹尖端应力场。用来衡量应力场强弱的参数称为应力场强度因子, 即

$$K_I = Y\sigma a^{1/2} \quad (1-14)$$

式中 K_I ——应力场强度因子, $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$;

Y ——零件中裂纹的几何形状因子;

a ——裂纹长度的一半。

应力场强度因子 K_I 是一个与应力 σ 和裂纹半长 a 有关的复合参数。对于一个有裂纹的试样, 在拉伸载荷作用下, Y 值是一定的, 当外力逐渐增大, 或裂纹长度逐渐扩展时, 应力场强度因子 K_I 也不断增大, 当应力场强度因子 K_I 增大到某一临界值 K_{Ic} 时, 将导致裂纹突然失稳扩展而出现低应力脆性脆断。这个应力场强度因子的临界值, 称为材料的断裂韧性, 用 K_{Ic} 表示。它表明了材料有裂纹存在时抵抗脆性断裂的能力。

断裂韧性 K_{Ic} 可通过实验测得, 它是评价阻止裂纹失稳扩展能力的机械性能指标。断裂韧性 K_{Ic} 是材料的一种固有特性, 与外加载荷大小、裂纹本身的大小、试样尺寸等无关, 而与材料本身的成分、热处理及加工工艺有关。常用工程材料中, 金属材料的 K_{Ic} 值最高, 复合材料次之, 高分子材料和陶瓷材料最低。

断裂韧性是强度和韧性的综合体现, K_{Ic} 是工程安全设计中防止低应力脆断的重要依据, 同时为选材提供依据。

1.4 材料的高、低温机械性能

1.4.1 高温机械性能

有许多设备是在高温下工作的,如高压锅炉、蒸汽轮机、燃气轮机、航空发动机以及化工反应容器等。这些设备的性能要求不能以常温下的机械性能来衡量,因为材料在高温下的机械性能明显地不同于室温下的机械性能。材料在高温下机械性能的一个重要特点就是产生蠕变。蠕变是指材料在长时间的恒温、恒载荷作用下缓慢地产生塑性变形的现象。由于蠕变变形而最后导致金属材料的断裂称为蠕变断裂。

常用的材料蠕变性能指标为蠕变极限和持久强度极限。

蠕变极限是指在给定温度 T (单位 $^{\circ}\text{C}$)下和规定的试验时间 t (单位 h)内,使试样产生一定蠕变伸长量所能承受的最大应力。用符号 $R_{\sigma t}^T$ 表示。例如 $R_{1/10^5}^{500} = 100\text{MN/m}^2$,即表示材料在 500°C , 10^5h 内,产生的变形量为 1% 时所能承受的应力为 100MN/m^2 。材料蠕变极限中所指定的温度和时间,一般由设备的具体服役条件而定。

持久强度是指材料在给定温度 T (单位 $^{\circ}\text{C}$)和规定的持续时间 t (单位 h)内引起断裂的最大应力值,用符号 R_t^T 表示。例如 $R_{1 \times 10^3}^{700} = 300\text{MN/m}^2$,表示材料在 700°C 经 1000h 所能承受的断裂应力为 300MN/m^2 。

某些在高温下工作的设备,蠕变变形很小或对变形要求不严,只要求该设备在使用期内不发生断裂。在这种情况下,要用持久强度作为评价材料及设计设备的主要依据。例如锅炉中的过热蒸气管,对蠕变变形要求并不严格,主要是要求在使用期间不发生爆破,因此过热蒸气管在设计时主要以持久强度作依据,而蠕变极限作为校核使用。对那些严格限制其蠕变变形的高温零件,如蒸汽轮机和燃气轮机叶片,虽然在设计时以材料的蠕变极限作为主要参考,但也必须要有持久强度的数据,用它来衡量材料使用中的安全可靠程度。

1.4.2 低温机械性能

材料在低温下同样具有与常温明显不同的性能和行为,除陶瓷材料外,许多金属材料和高分子材料的机械性能随温度的降低硬度和强度增加,而塑性和韧性下降。某些线性非晶态高聚物会由于大分子链段运动的完全冻结,成为刚硬的玻璃态而明显脆化,由此产生的最为严重的工程现象就是低温下使用的压力容器、管道、设备及其构件的脆性断裂(简称冷脆)。脆性断裂有以下特征:脆断都是属于低应力破坏,其破坏应力往往远低于材料的屈服极限;一般都发生在较低的温度,通常发生脆断时的材料的温度均在室温以下 20°C ;脆断发生前,无预兆,开裂速度快,为音速的 $1/3$;发生脆断的裂纹源是构件中的应力集中处。

体心立方金属及合金、某些密排六方金属及合金,尤其是工程上常用的中、低强度结构钢,当试验温度低于某一温度 T_k 时,材料由韧性状态变为脆性状态,冲击吸收功明显下降,断裂机理由微孔聚集型变为穿晶解理型,断口特征由纤维状变为结晶状,即低温脆性,转变温度 T_k 称为韧脆转变温度,亦称冷脆转变温度。

面心立方金属及其合金一般没有低温脆性现象,但在极低温度下,奥氏体钢及铝合金亦有低温脆性现象。高强度的体心立方合金(如高强钢及超高强钢)在很宽温度范围内,冲击吸收功均较低,故韧脆转变不明显。

评定材料低温脆性的最简便的试验方法是系列温度冲击试验。该试验采用标准夏比冲击试样,在从高温(通常为室温)到低温的一系列温度下进行冲击试验,测定材料冲击功随温度

的变化规律,揭示材料的低温脆性倾向,如图1-12所示。

韧脆转变温度 T_k 是从韧性角度选材的重要依据之一,可用于抗脆断设计,对于在低温服役的设备,依据韧脆转变温度 T_k 可以直接或间接估计它们的最低使用温度。

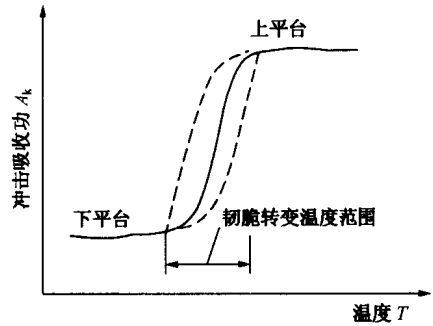


图 1-12 冲击吸收功-温度曲线

1.5 材料的磨损性能

运转中的零部件,如轴与轴承、活塞环与气缸套、齿轮与齿轮等之间发生相对运动(滑动、滚动、滑动+滚动)时,在接触面之间会产生摩擦,在摩擦作用下,物体相对运动表面分离出磨屑从而产生损伤表面的现象称为磨损。磨损是机械零件的主要失效形式之一。根据摩擦表面损伤和破坏的形式,磨损主要分为粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损(接触疲劳)和腐蚀磨损。

1.5.1 粘着磨损

粘着磨损又称擦伤、咬合磨损。零件表面某些接触点在高的局部压力下发生粘合,相互滑动时,粘着点又被剪切分开,接触面上有金属磨屑被拉拽出来,这种过程反复进行很多次,便导致了表面的损伤。如蜗轮与蜗杆啮合时常常出现这种情况。

粘着磨损的实质是实际材料表面不可能是完全平整的,总存在着可以检测的粗糙度。当两个相互作用的表面接触时,其真正的接触仅在少数几个孤立的微凸体顶尖上,出现了粘着→剪断→再粘着→再剪断的循环过程。因此,粘着磨损过程就是粘着点不断形成又不断被剪断的过程。

一般来说,对摩擦副材料进行表面覆盖层处理和化学热处理,是减少粘着磨损的有效措施。这些处理工艺可使表面层产生很薄的富有活性元素的化合物层或非金属涂层,避免同种金属相互间的摩擦。

1.5.2 磨料磨损

磨料磨损是指硬的磨粒或凸出物在零件表面摩擦过程中,使材料表面发生磨损的现象。这种磨粒或凸出物一般指石英、砂土、矿石等非金属磨料,也包括零件本身的磨损产物随润滑油进入摩擦面而形成的磨粒。生产中球磨机衬板与磨球的磨损,破碎式滚筒的磨损便属于这种类型。

磨料磨损量与接触压力、滑动距离成正比,与材料的硬度成反比。同时,与磨料或硬材料凸出部分尖端形状有关。实际上,影响磨料磨损的因素是十分复杂的,包括外部载荷、磨料硬度和颗粒大小、相对运动情况、环境介质以及材料的组织和性能等。

1.5.3 疲劳磨损

疲劳磨损是工件(如齿轮、滚动轴承、钢轨和轮箍、凿岩机活塞和钎尾的打击端部等)表面在接触压应力的长期不断反复作用下引起的一种表面疲劳破坏现象,表现为接触表面出现许多针状或痘状的凹坑,称为麻点,也叫点蚀或麻点磨损。在刚出现少数麻点时,一般仍能继续工作,但随着工作时间的延续,麻点剥落现象将不断增多和扩大,例如齿轮。此时,啮合情况恶化,磨损加剧,发生较大的附加冲击力,噪声增大,甚至引起齿根折断。

根据疲劳磨损的失效形式及过程来看,影响疲劳磨损的因素有材料的冶金质量、表面粗