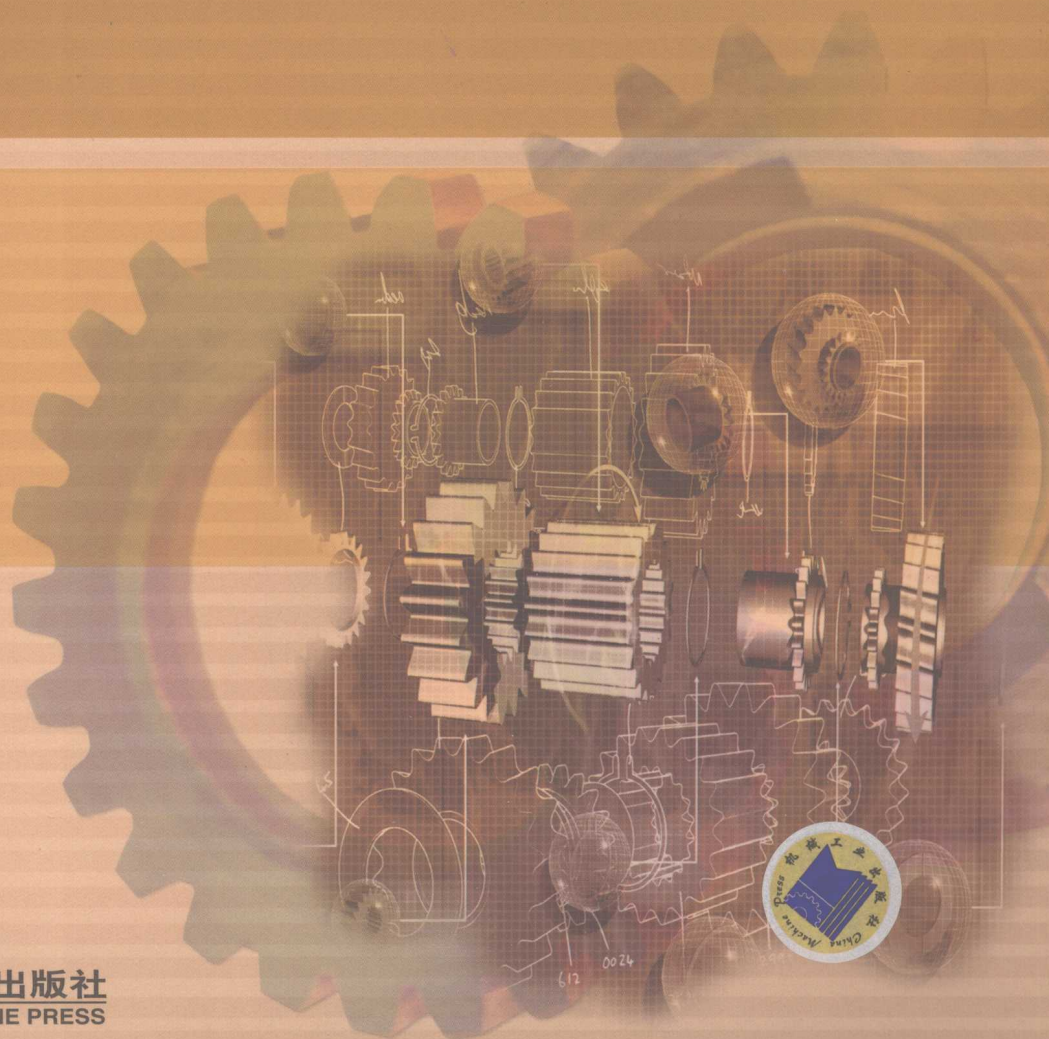




高职高专规划教材

工程材料

丁仁亮 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专规划教材

工 程 材 料

主编：丁仁亮

参编：赵 斌 李雅娜 李艳荣 杜月红



机械工业出版社

本教材是为高等职业技术学院机械制造及相近专业编写的。为了适应职业技术教育的教学,在编写过程中,充分突出了职业技术教育的特点,对教材的内容,尽量选择了与生产实践相关的题材。

本书共分12章,扼要地讲授金属学、金属材料及热处理方面的基本内容,并介绍了机械工业常用非金属材料。内容包括金属力学性能、金属的结构和结晶、金属的塑性变形与再结晶、铁碳合金、有色金属、非金属材料、机械零件材料及毛坯选择与质量检验。为加深理解和学用结合,每章都列出思考题和习题。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校机械类和近机械类专业教材,也可作为电大、中职中专机械类专业教材,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/丁仁亮主编. —北京:机械工业出版社,
2006.2

高职高专规划教材

ISBN 7-111-18414-9

I. 工… II. 丁… III. 工程材料-高等学校:技
术学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第005569号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王海峰

责任编辑:王海峰 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年3月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·14.25印张·348千字

0 001—4 000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据当前高等职业技术教育的需要以及多年来各校使用本类教材的实践，并在广泛征求有关职业技术学院意见的基础上编写而成的。

根据对教材征求的意见和教学实践，本次教材编写在内容上作了较大的更新和增补，使其尽量符合职业技术教育的特点，适当增加了与生产实践紧密相关的知识，并根据目前新理论、新材料、新技术、新工艺的发展，增加了与之有关的教学内容。

本书贯彻执行我国的法定计量单位和近年来颁布的有关国家标准。

编者试图在保持本书特色的基础上，尽量满足当前职业技术教育的改革发展和教学需要，使本教材能适用于职业技术教育各类型的教学和培训要求。使用本教材时，可根据本专业的教学需要，对教材内容作适当的组合，灵活选用教材的内容。

本书第4、9章由赵斌编写，第3、5章由李艳荣编写，第6、7、8章由李雅娜编写，第1、2、10章由杜月红编写，绪论、第11、12章由丁仁亮编写。本书由丁仁亮统稿审定。

沈阳航空职业技术学院教职员工对本书编写给予了热情的支持和帮助，使本书得以顺利出版，在此深表感谢。

限于编者的水平，殷切希望广大读者在使用过程中对本书的错误和欠妥之处提出批评和建议。

编 者

目 录

前言		第7章 工具钢与硬质合金	119
绪论	1	第1节 工具钢的分类及编号	119
第1章 工程材料的性能	2	第2节 刀具钢	119
第1节 工程材料的力学性能	2	第3节 模具钢	126
第2节 工程材料的物理、化学性能	11	第4节 量具钢	130
思考题与习题	13	第5节 硬质合金	130
第2章 常见金属的晶体结构与		思考题与习题	134
结晶	14	第8章 特殊性能钢	135
第1节 常见金属的晶体结构	14	第1节 不锈钢	135
第2节 金属晶体的结晶	19	第2节 耐热钢与高温合金	141
第3节 合金的相结构及二元合金相图	21	第3节 耐磨钢	147
第4节 合金的力学性能与相图的关系	27	思考题与习题	148
思考题与习题	28	第9章 铸铁	149
第3章 金属的塑性变形与		第1节 概述	149
再结晶	30	第2节 铸铁的分类	150
第1节 金属材料的塑性变形	30	第3节 普通灰铸铁	151
第2节 塑性变形对金属的组织 and		第4节 球墨铸铁	155
性能的影响	35	第5节 可锻铸铁及蠕墨铸铁	157
第3节 回复与再结晶	38	第6节 合金铸铁	160
第4节 金属材料的热变形	42	思考题与习题	161
思考题与习题	44	第10章 有色金属材料	163
第4章 铁碳合金相图	46	第1节 铝及其合金	163
第1节 铁碳合金基本组元、基本相	46	第2节 铜及其合金	171
第2节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	48	第3节 钛及其合金	175
第3节 碳钢	55	第4节 滑动轴承合金	177
思考题与习题	62	思考题与习题	180
第5章 钢的热处理	63	第11章 非金属材料	181
第1节 钢的热处理原理	63	第1节 高分子材料	181
第2节 钢常见热处理工艺	74	第2节 陶瓷材料	197
第3节 其他热处理工艺	94	第3节 复合材料	199
思考题与习题	97	思考题与习题	203
第6章 合金结构钢	99	第12章 机械零件常用材料的选择	
第1节 概述	99	与质量检验	205
第2节 合金元素在钢中的作用	99	第1节 机械零件对材料的一般要求	205
第3节 低合金结构钢	103	第2节 金属材料的质量检验	215
第4节 机械结构用合金钢	107	思考题与习题	220
思考题与习题	117	参考文献	221

绪论

材料是人类生产和生活的物质基础。材料的开发和利用是人类文明进步的标志。因此,人们常以人类对材料的应用和发展,来标记社会的发展阶段。从原始社会以来,人类经历了石器时代、青铜器时代和铁器时代。而我们当前所处的时代,正在进入人工合成材料的时代。在这个时代,人类不仅能开发和利用各种天然材料,还可以通过物理或化学的方法,合成各种新的材料,使材料的性能满足人类生产和生活的需要。

工程材料按其成分和特点,通常可分为金属材料和非金属材料两大类,而非金属材料还包括无机非金属材料和高分子材料两种。按材料的应用领域和范围,工程材料又可以分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用材料的力学性能来制造各种受力零件,而功能材料则主要是利用材料特殊的物理或化学性能,制造各种特殊用途的零件,如超导、激光、半导体等材料。

“工程材料课程”主要是研究结构材料。在目前应用最广泛的仍然是金属材料,其用量约占材料总用量的70%以上。这是由于金属材料具有比其他材料更优越的力学性能和良好的制造加工工艺性能。近年来,对非金属材料的研究和开发的不断深入,尤其是高分子材料,在机械工程中的应用越来越多,并逐渐显示出广阔的发展前景。本书主要研究金属材料,同时对非金属材料也作简要的介绍。

金属材料的内部组织结构决定了它的力学性能。因此,要研究材料的性能,就必须研究材料的组织结构。而材料的组织主要是指组成材料的晶粒的类型、大小和形状,以及各种晶粒的相对数量和分布情况等。在金属学中,观察材料组织有三种方法:用放大镜或肉眼观察到的组织,称为低倍组织或宏观组织;用显微镜放大100~2000倍观察到的组织,称为显微组织;用电子显微镜放大几千倍,甚至几十万倍观察到的组织,称为电镜组织或精细组织。而结构是指晶粒中各原子的具体结合方式。

本课程内容主要包括金属学基础及金属材料的热处理、机械工程中常用的金属材料和非金属材料,以及零件毛坯的选用。主要介绍工程构件和机械零件常用材料的化学成分、组织结构与性能之间的关系、变化规律和改变材料性能的途径等。

学习本课程前,应初步掌握物理、化学、工程力学、金属工艺学和金工实习等基本知识,这样对本课程的教学内容才能有深入的理解。

近年来,我国在材料工业的生产和科研方面取得了巨大的成就,在金属材料的生产方面,已经形成了符合我国国情的系列产品,并能够生产具有世界先进水平的产品。目前我国的钢产量已居世界首位。我国的材料工业正蓬勃发展,但应该看到,我国在材料的制造技术、工艺和新材料的开发应用方面与世界上的发达国家还有一定的差距,因此,我们应该努力学习,争取尽快赶超世界材料工业的先进水平。

第 1 章 工程材料的性能

当制造机器设备或其他制件进行选材时,首先必须考虑的就是材料的相关性能。材料的性能,是指用来表征材料在给定外界条件下的行为参量,当外界条件发生变化时,同一种材料的某些性能也会随之变化。通常所指金属材料性能包括以下两个方面:

1. 使用性能

即为了保证零件、工程构件或工具等的正常工作,材料所应具备的性能。它包括力学、物理、化学等方面的性能。金属材料的使用性能决定了其应用范围、安全可靠性和使用寿命等。

2. 工艺性能

即反映材料在被制成各种零件、构件和工具的过程中,材料适应各种冷、热加工的性能。主要包括铸造、压力加工、焊接、切削加工、热处理等方面的性能。

第 1 节 工程材料的力学性能

材料的力学性能主要是指强度、刚度、塑性、韧性、硬度等。

一、强度

强度是指材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。根据外力的作用方式,有多种强度指标,如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等。其中以拉伸实验所得强度指标的应用最为广泛。它是把一定尺寸和形状的金属试样(图 1-1)装夹在试验机上,然后对试样逐渐施加拉伸载荷,直至把试样拉断为止,根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系,可测出该金属的拉伸曲线(图 1-2)。在拉伸曲线上可以确定以下性能指标。

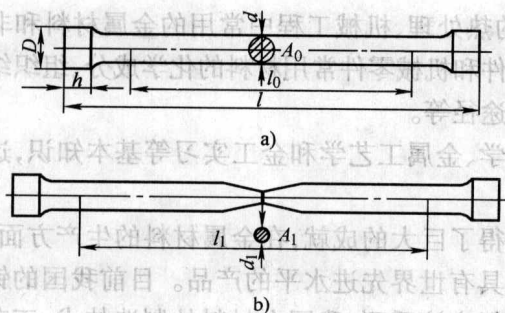


图 1-1 钢的标准拉伸试棒

a) 拉伸前 b) 拉伸后

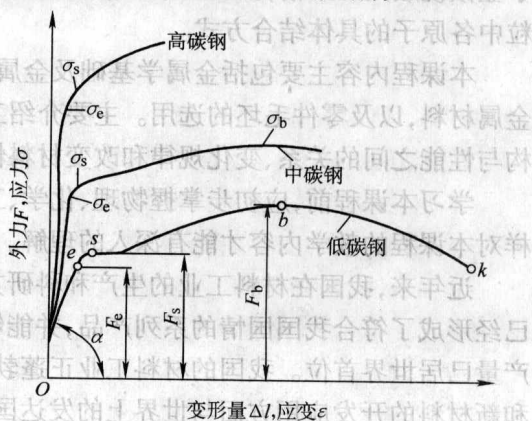


图 1-2 退火低碳、中碳和高碳钢的拉伸曲线

(外力 F —变形量 Δl 曲线与应力

σ —应变 ϵ 曲线形状相似,只是坐标不同)

1. 弹性极限

从图 1-2 可以看出, 不同性质材料的拉伸曲线形状是不相同的。拉伸曲线 Oe 线段是直线, 这一部分试棒变形量 Δl 与外力 F 成正比。当除去外力后, 试棒恢复到原来尺寸, 称这一阶段的变形为弹性变形。外力 F_e 是使试棒只产生弹性变形的最大载荷。

无论何种材料, 内部原子之间都具有相互平衡的原子力相互作用, 以保持其固定的形状。当受到外力时, 原来的平衡被破坏, 其中任何一个小单元都和邻近的各个小单元之间诱发了新的力 (内力), 材料单位截面上的这种力称为应力, 用符号 σ 表示。

弹性极限用符号 σ_e 表示, 单位为 MPa, 即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中 A_0 ——试棒的原始截面积;

F_e ——试样在力-伸长曲线 e 点所承受外力。

弹性极限 σ_e 是由试验得到的, 其值受测量精度影响很大, 故通常采取规定微量塑性伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 为弹性极限。

2. 屈服点

从拉伸曲线上可以看到, 当载荷增加至超过 F_e 后, 试样必定保留部分不能恢复的残余变形, 即塑性变形。在外力达到 F_s 时曲线出现一个小平台。此平台表明不增加载荷试棒仍继续变形, 好像材料已经失去抵抗外力能力而屈服了。我们称试棒屈服时的应力为材料的屈服点, 以 σ_s 表示, 单位为 MPa。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

很多金属材料, 如大多数合金钢、铜合金以及铝合金的拉伸曲线不出现平台, 脆性材料如普通铸铁、镁合金等, 甚至断裂之前也不发生塑性变形, 因此工程上规定试棒发生某一微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该材料的屈服点, 称为屈服强度或规定微量塑性伸长应力, 并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。要求严格时, 也可规定为 0.1%、0.05% 的变形量, 并相应以符号 $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$ 表示。

3. 抗拉强度

试棒在屈服时, 由于塑性变形而产生加工硬化, 所以只有载荷继续增大变形才能继续增加, 直到增到最大载荷 F_b 。拉伸曲线的这一阶段, 试棒沿整个长度均匀伸长, 当载荷达到 F_b 后, 试棒就在某个薄弱部分形成“缩颈”, 如图 1-1b 那样。此时不增加载荷试棒也会发生断裂。 F_b 是试棒承受的最大外力, 相应的应力即为材料的抗拉强度, 以 σ_b 表示, 单位为 MPa, 代表金属材料抵抗大量塑性变形的能力, 即

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

材料的 $\sigma_{0.2}$ (或 σ_s)、 σ_b 均可在材料手册或有关文献或资料中查得, 但 $\sigma_{0.01}$ 在手册中很少列出, 因为测量过程烦琐, 而且需要十分精确的设备, 所以只有在特别需要时才测定

它。

一般机器构件都是在弹性状态下工作的，不允许微小的塑性变形，所以在机械设计时应采用 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 作为强度指标，并加上适当的安全系数。由于抗拉强度 σ_b 测定较方便，而且数据也较准确，所以设计零件时有时也可以直接采用 σ_b 作为强度指标，但需使用较大的安全系数。

由上述可知，强度是表征金属材料抵抗过量塑性变形或断裂的物理性能。

σ_s/σ_b 的比值称为屈强比，是一个有意义的指标。比值越大，越能发挥材料的潜力，从而能够减小结构的自重。但为了使用安全，亦不宜过大，适合的比值在 0.65 ~ 0.75 之间。

4. 疲劳强度

某些机器零件，如轴、弹簧、齿轮、叶片等在交变载荷长期作用下工作，很多情况是在工作应力峰值低于弹性极限的情况下突然破坏的。在多次交变载荷作用下的破坏现象，称为疲劳。交变载荷可以是大小交变、方向交变，或同时改变大小和方向。

金属材料的疲劳破坏过程，首先是在其薄弱部位，如有应力集中或缺陷（划伤、夹渣、显微裂纹等）处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源，而且一般出现在零件表面上，形成疲劳扩展区。当此区达到某一临界尺寸时，零件就在甚至低于弹性极限的应力下突然脆断。最后的脆断区称为最终破断区。图 1-3a 是典型疲劳断口（汽车后轴）的宏观照片，而图 1-3b 是典型断口三个区域的示意图。

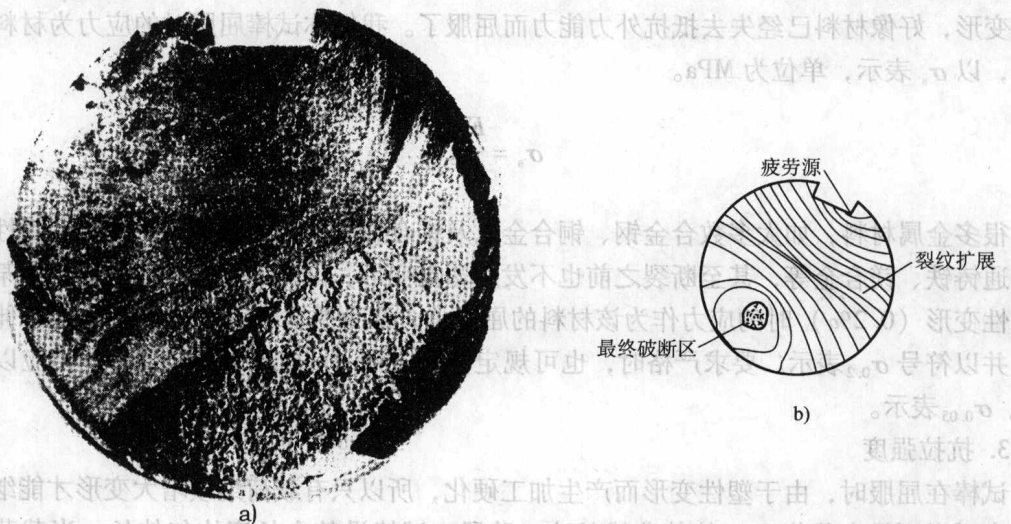


图 1-3 疲劳断口的特征

a) 汽车后轴的断口 b) 断口的示意图

测定材料的疲劳强度时，要用较多的试棒，在不同交变载荷下进行试验，作出疲劳曲线，如图 1-4 所示。从图中可以看出，循环数增加，应力降低。当应力降到某一值后，曲线变成水平直线，这就意味着材料可以经受无限次循环载荷而不发生疲劳断裂。把试样承受无限次应力循环或达到规定的循环次数才断裂的最大应力，作为材料的疲劳强度。对在弯曲循环载荷下测定的疲劳强度用符号 σ_{-1} 表示，而在剪切循环载荷下测定的疲劳强度用 τ_{-1} 表

示。

图 1-4 是钢铁材料的疲劳曲线, 在试验循环数达到 10^7 次时, 出现水平直线。所以对于钢铁材料, 把循环数达到 10^7 次时的最大应力作为疲劳强度。有色金属和合金的疲劳曲线不出现水平直线, 因此工程上规定将循环数到 10^7 次时的最大应力作为它们的疲劳强度。材料的 σ_{-1} 与 σ_b 是紧密相关的。对钢来说, 其关系为 $\sigma_{-1} = (0.45 \sim 0.55) \sigma_b$ 。可见材料的疲劳强度随其抗拉强度增高而增高。根据疲劳的特点和总的循环次数, 可以将疲劳分为高周疲劳 ($N \geq 10^4$) 和低周疲劳 ($N \leq 10^4$)。高周疲劳时, 重要的性能是疲劳强度。如果零件的工作应力低于材料的疲劳强度时, 则在理论上不会发生疲劳断裂, 而低周疲劳时, 材料的疲劳抗力不仅与强度有关, 而且与塑性有关。零件的疲劳强度除了决定于材料的成分及其内部组织外, 与零件的表面状态及其形状也有很大的影响。表面应力集中 (划伤、损伤、腐蚀斑点等) 会使疲劳寿命大大减低。提高零件寿命的方法是: ①设计上减小应力集中, 转接处避免锐角连接; ②使零件具有较小的表面粗糙度值; ③强化表面, 如渗碳、渗氮、表面滚压等, 在零件表面造成残余压应力, 抵消一部分拉应力, 降低零件表面实际拉应力峰值, 从而提高零件的疲劳强度。

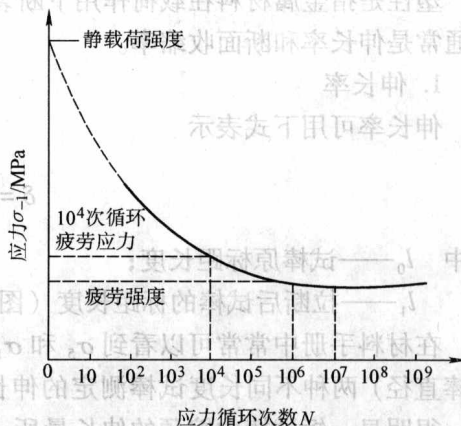


图 1-4 疲劳曲线

二、刚度

刚度是指材料在受力时抵抗弹性变形的能力, 它表征了材料弹性变形的难易程度。材料的刚度通常用弹性模量 E 来衡量。

材料在弹性范围内, 应力与应变 ε 的关系服从胡克定律: $\sigma = E\varepsilon$ (或 $\tau = G\gamma$)。 ε (或 γ) 为应变, 即单位长度的变形量, $\varepsilon = \Delta l/l$ 。

弹性模量 $E = \sigma/\varepsilon$, 由图 1-2 可以看出, 弹性模量是拉伸曲线上的斜率, 即 $\tan \alpha = E$, 斜率越大, 弹性模量越大, 弹性变形越不容易进行。因此 E 、 G 是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大, 材料的刚度越大, 即具有特定外形尺寸的零件或构件保持其原有形状与尺寸的能力也越大。

弹性模量的大小主要决定于金属键, 与显微组织的关系不大。合金化、热处理、冷变形等对它的影响很小。生产中一般不考虑也不检验它的大小, 基体金属一经确定, 其弹性模量值就基本上定了。在材料不变的情况下, 只有改变零件的截面尺寸或结构, 才能改变它的刚度。

在设计机械零件时, 要求刚度大的零件, 应选用具有高弹性模量的材料。钢铁材料的弹性模量较大, 所以对要求刚度大的零件, 通常选用钢铁材料。例如镗床的镗杆应有足够的刚度, 如果刚度不足, 当进给量大时, 镗杆的弹性变形就会大, 镗出的孔就会偏小, 因而影响加工精度。

要求在弹性范围内对能量有很大吸收能力的零件 (如仪表弹簧), 一般使用软弹簧材料铍青铜、磷青铜制造, 应具有极高的弹性极限和低的弹性模量。

表 1-1 中列出了常用金属的弹性模量。

表 1-1 常用金属的弹性模量

金 属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa	金 属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
铁	214000	84000	铝	72000	27000
镍	210000	84000	铜	132400	49270
钛	118010	44670	镁	45000	18000

三、塑性

塑性是指金属材料在载荷作用下断裂前发生不可逆永久变形的能力。评定材料塑性的指标通常是伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率

伸长率可用下式表示

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

式中 l_0 ——试棒原标距长度；

l_1 ——拉断后试棒的标距长度（图 1-1）。

在材料手册中常常可以看到 σ_5 和 σ_{10} 两种符号，它分别表示用 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ （ d 为试棒直径）两种不同长度试棒测定的伸长率。 l_1 是试棒的均匀伸长和产生缩颈后伸长的总和。很明显，短试棒中缩颈的伸长量所占的比例大，故同一材料所测得的 σ_5 和 σ_{10} 值是不同的， σ_5 的值较大，而 σ_{10} 的值较小，例如钢材的 σ_5 大约为 σ_{10} 的 1.2 倍。所以相同符号的伸长率才能进行相互比较。

2. 断面收缩率 ψ

断面收缩率用下式求得

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中 A_0 ——试棒原来的截面；

A_1 ——试棒拉断后缩颈处的截面积（图 1-1）。

断面收缩率不受试棒标距长度的影响，因此能更可靠地反映材料的塑性。

对必须承受强烈变形的材料，塑性指标具有重要的意义。塑性优良的材料冷压成形性好。此外，重要的受力零件也要求具有一定塑性，以防止超载时发生断裂。

必须指出，塑性指标不能直接用于零件的设计计算，只能根据经验来选定材料的塑性。一般来说，伸长率达 5% 或断面收缩率达 10% 的具有高收缩率的材料可承受高的冲击吸收功。

但对各种具体形状、尺寸和应力集中系数的零件来说，对塑性的要求是有一定限度的，并不是越大越好，否则会限制材料强度使用水平的提高，不能发挥材料强度的潜力，造成产品粗大笨重、浪费材料和缩短使用寿命。

四、韧性

（一）冲击韧度

机械零部件在服役过程中不仅受到静载荷或变动载荷作用，而且受到不同程度的冲击载荷作用，如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时。必须考虑所

用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验，其试验原理如图 1-5 所示。

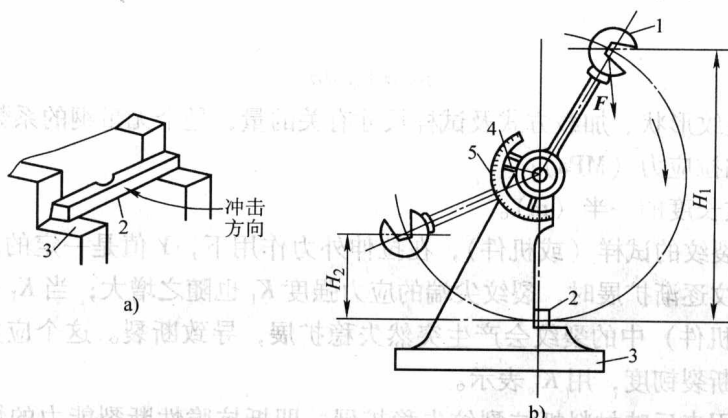


图 1-5 冲击试验原理图

1—摆锤 2—试样 3—机架 4—指针 5—刻度盘

欲测定的材料先加工成标准试样，然后放在试验机的机架上，试样缺口背向摆锤冲击方向（图 1-5），将具有一定重力 F 的摆锤举至一定高度 H_1 ，使其具有势能 (FH_1)，然后摆锤落下冲击试样；试样断裂后摆锤上摆到高度 H_2 ，在忽略摩擦和阻尼等条件下，摆锤冲断试样所做的功，称为冲击吸收功，以 A_K 表示，则有 $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在 GB/T229—1994 中，仅规定了冲击吸收功的概念。若用试样的断口处截面积 S_N 去除 A_K 即得到冲击韧度，用 α_K 表示，单位为 J/cm^2 。

$$\alpha_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说，所测冲击吸收功 A_K 越大，材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功 A_K 的组成比较复杂，所以有时测得的 A_K 值及计算出来的 α_K 值不能真正反映材料的韧脆性质。

长期生产实践证明 A_K 、 α_K 值对材料的组织缺陷十分敏感，能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化，因而冲击试验是生产上用来检验材料冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大，为了确定出材料由塑性状态向脆性状态转化趋势，可分别在一系列不同温度下进行冲击试验，测定出 A_K 值随试验温度的变化。实验表明， A_K 随温度的降低而下降；减小到某一温度范围，材料的 A_K 值急剧下降，表明材料由韧性状态向脆性状态转变，此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件，确定其韧脆转变温度有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

(二) 断裂韧度

前面几节讨论的力学性能，都是假定材料是均匀、连续、各向同性的。以这些假设为依据的设计方法称为常规设计方法。根据常规设计方法分析认为是安全的设计，有时会发生意外断裂事故。在研究这种在高强度金属材料中发生的低应力脆性断裂的过程中，发现前述假设是不成立的。实际上，材料的组织远非是均匀、各向同性的，组织中有微裂纹，还会有夹杂、气孔等宏观缺陷，这些缺陷可看成是材料中的裂纹。当材料受外力作用时，这些裂纹的

尖端附近便出现应力集中, 形成一个裂纹尖端的应力场。根据断裂力学对裂纹尖端应力场的分析, 裂纹前端附近应力场的强弱主要取决于一个力学参数, 即应力强度因子 K_I , 单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中 Y ——与裂纹形状、加载方式及试样尺寸有关的量, 是个无量纲的系数;

σ ——外加拉应力 (MPa);

a ——裂纹长度的一半 (m)。

对某一个有裂纹的试样 (或机件), 在拉伸外力作用下, Y 值是一定的。当外加拉应力逐渐增大, 或裂纹逐渐扩展时, 裂纹尖端的应力强度 K_I 也随之增大; 当 K_I 增大到某一临界值时, 试样 (或机件) 中的裂纹会产生突然失稳扩展, 导致断裂。这个应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧性, 用 K_{Ic} 表示。

断裂韧性是用来反映材料抵抗裂纹失稳扩展, 即抵抗脆性断裂能力的性能指标。当 $K_I < K_{Ic}$ 时, 裂纹扩展很慢或不扩展; 当 $K_I \geq K_{Ic}$ 时, 则材料发生失稳脆断。这是一项重要的判断依据, 可用来分析和计算一些实际问题。例如, 若已知材料的断裂韧性和裂纹尺寸, 便可以计算裂纹扩展以致断裂的临界应力, 即机件的承载能力; 或者已知材料的断裂韧性和工作应力, 就能确定材料中允许存在的最大裂纹尺寸。

断裂韧性是材料固有的力学性能指标, 是强度和韧性的综合体现。它与裂纹的大小、形状、外加应力等无关, 主要取决于材料的成分、内部组织和结构。

五、硬度

硬度是指材料抵抗局部变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度是材料的一个重要指标, 试验方法简便、迅速, 不需要破坏试件, 设备也比较简单, 而且对大多数金属材料, 可以从硬度值估算出它的抗拉强度, 因此在设计图样的技术条件中大多规定材料的硬度值。检验材料或工艺是否合格有时也需用硬度。因此, 硬度试验在生产中广泛应用。

材料的硬度值, 是按一定方法测出的数据, 不同方法在不同条件下测量的硬度值, 因含意不同, 其数据也不同, 因此一般不能进行相互比较。工业生产中经常采用的硬度试验方法有以下几种。

(一) 布氏硬度

布氏硬度试验方法是把规定直径的硬质合金球以一定的试验力压入所测材料表面 (图 1-6), 保持规定时间后, 测量表面压痕直径 (图 1-7), 然后按下式计算硬度

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

式中 HBW ——材料的布氏硬度值;

F ——试验力 (N);

A ——压痕表面积 (mm^2);

D ——球体直径 (mm);

d ——压痕平均直径 (mm)。

由于金属材料有软有硬, 被测工件有薄有厚, 尺寸有大有小, 如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D , 就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此, 在进行布氏硬度试

验时要求使用不同的试验力和压头直径，建立 F 和 D 的某种选配关系，以保证布氏硬度的不变性。

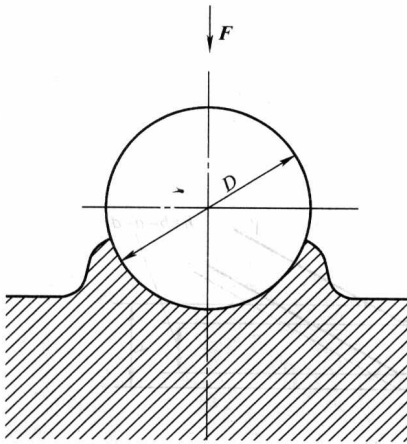


图 1-6 布氏硬度测量示意图

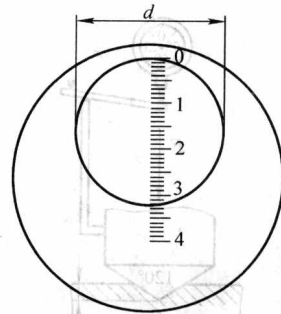


图 1-7 用读数显微镜测量压痕直径

根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同，按照表 1-2 的规范选择试验压头直径 D 、试验力 F 及保持时间。

符号 HBW 之前用数字标注硬度值，符号后面依次用数字注明压头直径 (mm)、试验力 (0.102N) 及试验力保持时间 (s) (10 ~ 15s 不标注)。例如，500HBW5/750，表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10 ~ 15s，测得的布氏硬度值为 500。

目前，布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材。

表 1-2 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围 (HBW)	球直径 D/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F/N	试验力保持时间 /s	备 注
钢、铸铁	≥ 140	10		29420	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍 试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。试验后试样支撑面应无可见变形痕迹
		5	30	7355		
		2.5		1839		
	< 140	10		9807	10 ~ 15	
		5	10	2452		
		2.5		613		
非铁金属材料	≥ 130	10		29420	30	
		5	30	7355		
		2.5		1839		
	35 ~ 130	10		9807	30	
		5	10	2452		
		2.5		613		
		10		2452		
	< 35	5	2.5	613	60	
		2.5		153		

(二) 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的硬度试验方法，它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

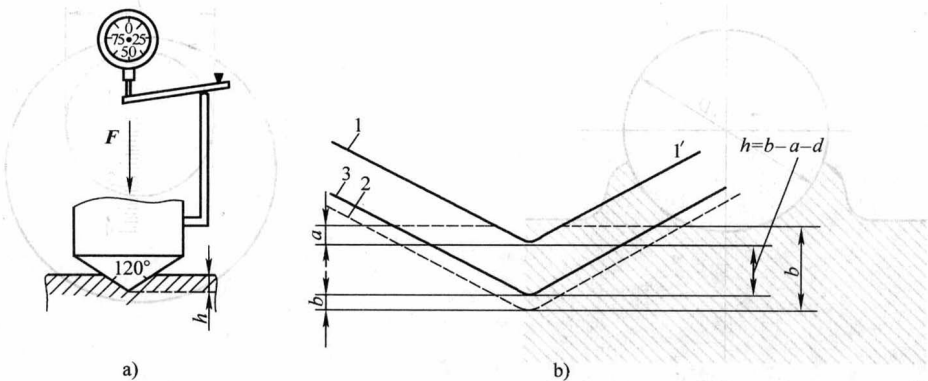


图 1-8 洛氏硬度实验原理

洛氏硬度试验原理如图 1-8 所示。它是用顶角为 120°金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16in) 的淬火钢球作压头，先施加的初始试验力 F_1 (98N)，再加上主试验力 F_2 ，其总试验力为 $F = F_1 + F_2$ (588N、980N、1471N)。图中 1 为压头受到初始试验力 F_1 后压入试样的位置；2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置且经规定的保持时间；卸除主试验力 F_2 ，仍保留初始试验力 F_1 ，试样弹性变形的恢复使压头上升到 3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为 h ，即 1 位置至 3 位置。金属越硬， h 值越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念。故人为地规定将一常数 K 减去压痕深度 h 的值作为洛氏硬度指标，并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位，用符号 HR 表示，则洛氏硬度值为

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$

由此可见，洛氏硬度值是一无量纲的材料性能指标，使用金刚石压头时，常数 K 为 0.2；使用钢球压头时，常数 K 为 0.26。

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度，采用了不同的压头和总试验力组成几种不同的洛氏硬度标度，每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后加以注明。我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种，试验条件 (GB/T 230—1991) 及应用范围见表 1-3。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值，例如 52HRC、70HRA 等。

表 1-3 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 F /kN	值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	0.5884	70 ~ 85HRA	硬质合金，表面淬硬层，渗碳层
HRB	φ1.588mm 钢球	0.9807	25 ~ 100HRB	非铁金属，退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	1.4711	20 ~ 67HRC	淬火钢，调质钢等

注：总试验力 = 初始试验力 + 主试验力；初始试验力为 98N。

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料, 操作简便迅速, 而且压痕很小, 几乎不损伤工件表面, 故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小, 硬度值代表性就差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况, 则所测硬度值的准确性差。故需在试样不同部位测定三点, 取其算术平均值。

(三) 维氏硬度

为了更准确测量金属零件的表面硬度或测量硬度很高的零件, 常采用维氏硬度, 其符号用 HV 表示。

维氏硬度试验也采用金刚石锥体, 不过为正棱角锥, 其测量原理见图 1-9。F 的大小, 可根据试样厚度和其他条件选用, 一般试验力可用 10~1000N。试验时试验力 F 在试件表面压出正方形压痕, 测量压痕两对角线平均长度 d (mm), 以下式求出硬度值 (式中 A_v 为压痕面积):

$$HV = \frac{0.102F}{A_v} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

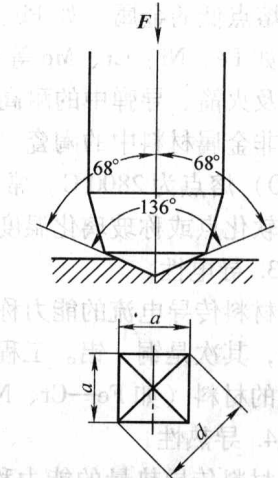


图 1-9 维氏硬度试验原理及压痕示意图

10N 试验力特别适用于测量热处理表面层 (如渗碳、渗氮层) 的硬度。当试验力小于 1.961N 时, 压痕非常小, 可用于测量金相组织中不同相的硬度, 测得的结果称为显微硬度, 多以符号 HM 表示。维氏硬度试验方法及技术条件可参阅国家标准 GB/T 4340—1999。

材料的屈服点在多数情况下可用 HV 近似地估算:

$$\sigma_s = HV (0.1)^{1/3}$$

式中 n ——材料加工硬化系数。

对高强度材料, 可以近似认为 $n=0$, $\sigma_s = HV/3$ 。

第 2 节 工程材料的物理、化学性能

一、物理性能

材料的物理性能是指在重力、电磁场、热力 (温度) 等物理因素作用下, 材料所表现的性能或固有属性。机械零件及工程构件在制造中所涉及的金属材料的物理性能主要包括密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性、磁性等。

1. 密度

同一温度下单位体积物质的质量称为密度 (g/cm^3 或 kg/m^3), 与水密度之比叫做相对密度。根据相对密度的大小, 可将金属分为轻金属 (相对密度小于 4.5) 和重金属 (相对密度大于 4.5)。Al、Mg 等及其合金属于轻金属; Cu、Fe、Pb、Zn、Sn 等及其合金属于重金属。在机械制造业中, 某些高速运转的零件、车辆、飞机、导弹以及航天器等, 常要求在满足力学性能的条件下尽量减轻材料质量, 因而常采用铝合金、钛合金等轻金属。常用的金属材料的相对密度差别很大, 如铜为 8.9, 铁为 7.8, 钛为 4.5, 铝为 2.7 等。在非金属材料中, 陶瓷的密度较大, 塑料的密度较小, 常用的聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等塑料的相对密度为 0.9~1.1。

2. 熔点

材料在缓慢加热时由固态转变为液态并有一定潜热吸收或放出时的转变温度,称为熔点。熔点低的金属(如 Pb、Sn 等)可以用来制造钎焊的钎料、熔体和铅字等;熔点高的金属(如 Fe、Ni、Cr、Mo 等)可以用来制造高温零件,如加热炉构件、电热元件、喷气机叶片以及火箭、导弹中的耐高温零件。

非金属材料中的陶瓷(金属陶瓷)有较高熔点,如石英(SiO_2)熔点为 1670°C ,若石(MgO)熔点为 2800°C ,常用作耐火材料;而塑料和一般玻璃等非晶态材料,则没有熔点,只有软化点或称玻璃化温度。

3. 导电性

材料传导电流的能力称为导电性。以电导率 γ (单位 S/m) 表示。纯金属中银的导电性最好,其次是铜、铝。工程中为减少电能损耗,常采用纯铜或纯铝作为输电导体;采用导电性差的材料(如 Fe—Cr、Ni—Cr、Fe—Cr—Al 等合金、碳硅棒等)作为加热元件。

4. 导热性

材料传导热量的能力称为导热性,用热导率 λ (单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 表示。热导率越大,导热性越好。纯金属的导热性比合金好,银、铜的导热性最好。铝次之。非金属中,碳(金刚石)的导热性最好。

合金钢的导热性比碳钢差,因此合金钢在进行热处理加热时的加热速度应缓慢,以保证工件或坯料内外温差小,减少变形和开裂倾向。另外,导热性差的金属材料切削加工也较困难。

5. 热膨胀性

材料因温度改变而引起的体积变化现象称为热膨胀性,一般用线膨胀系数来表示。

常温下工作的普通机械零件(构件)可不考虑热膨胀性,但在一些特殊场合就必须考虑其影响。例如工作在温差较大场合的长零(构)件(如火车导轨等)、精密仪器仪表的关键零件热膨胀系数均要小。工程中也常利用材料的热膨胀性来装配或拆卸配合过盈量较大的机械零件。

6. 磁性

在磁场中能被磁化或导磁的能力称为导磁性或磁性。通常用磁导率 μ (单位 H/m) 来表示。具有显著磁性的材料称为磁性材料。目前应用的磁性材料有金属和陶瓷两类。金属磁性材料也称为铁磁材料,常用的有 Fe、Co、Ni 等金属及其合金;陶瓷磁性材料通称为铁氧体。工程中常利用材料的磁性制造机械及电气零件。

二、化学性能

材料的化学性能是指材料抵抗其周围介质侵蚀的能力,主要包括耐蚀性和热稳定性等。

1. 耐蚀性

金属材料在常温下抵抗周围介质侵蚀的能力称为耐蚀性,包括化学腐蚀和电化学腐蚀两种类型。化学腐蚀一般是在干燥气体及非电解液中进行的,腐蚀时没有电流产生;电化学腐蚀是在电解液中进行,腐蚀时有微电流产生。

根据介质侵蚀能力的强弱,对于不同介质中工作的金属材料的耐蚀性要求也不相同。如海洋设备及船舶用钢,须耐海水和海洋大气腐蚀;而贮存和运输酸类的容器、管道等,则应具有较高的耐酸性能。一种金属材料在某种介质、某种条件下是耐蚀的,而在另一种介质或条件下就可能不耐蚀。如镍铬不锈钢在稀酸中耐蚀,而在盐酸中则不耐蚀;铜及铜合金在一