

普通高等教育机械工程学科“十二五”规划教材



# 机械

# 工程材料

主编 徐婷 刘斌



国防工业出版社

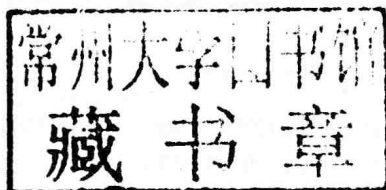
National Defense Industry Press

普通高等教育机械工程学科“十二五”规划教材

# 机械工程材料

主 编 徐 婷 刘 斌

参 编 焦玉民 何晓晖 王 强 周建钊 刘 晴



国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书系普通高等教育机械工程学科“十二五”规划教材,根据高等学校教育培养目标和教学特点,结合当前教学和教材改革的精神精心编写而成。全书分为机械零部件对工程材料的要求,机械工程材料的结构、组织和性能,机械工程材料的改性处理,常用机械工程材料,机械工程材料的选用五章。重点讲解零部件对其材料的性能要求,工程材料的基本理论知识,工程材料的成分、组织与冷热加工工艺及性能特点和应用范围,并以实例说明如何根据零部件的使用条件和性能要求进行合理选材。本教材在编写顺序上,按照由浅入深、再深入浅出、循序渐进、便于教学的思路,注重学生获取知识、分析问题与解决工程技术问题能力的培养,以及学生工程素质与创新思维能力的提高。

本书可作为高等工科院校机械类及近机械类专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/徐婷,刘斌主编. —北京:国防工业出版社,2017.2  
ISBN 978-7-118-11182-8

I. ①机… II. ①徐…②刘… III. ①机械制造材料  
—高等学校—教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 029353 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 396 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

机械工程材料为材料科学的重要分支之一,主要包括工程材料的组织、性能、改性处理、选用等核心内容;材料与能源、信息一起成为现代工业社会的三大支柱。教材内容充满了辩证唯物主义的科学分析方法,内涵丰富,理论完善。教材的编写着力培养机械类专业学生必备的工程素养,提升工程意识,建立工程思维,拓展工程背景知识,开阔视野和思路角度,提高发现、分析、解决问题和实践动手能力。

近几年来,作者结合自身教学实践经验,深入开展和研究课程教学改革和教材改革工作,积累了一些成果,在此基础上编写了本书。书中内容充分体现了教学改革的要求,以适应当前教育发展的需要。本书具有以下特点:

(1)注重把握“机械工程材料”课程知识点之间的联系,避免冗长的阐述;注重理解材料组织和力学性能之间的内在联系,避免对教学内容的死记硬背;注重培养面对工程装备使用、维修中如何选择和使用材料方面的问题,列举分析工程应用范例,加强“机械工程材料”理论知识对实践的指导作用。

(2)重点充实具有军事特色的教学内容,强调要时时处处将理论教学中的研讨与分析引申、联系到军事应用。结合军事工程领域材料应用情况,增加了伪装、电子和兵器材料等延伸阅读内容,拓宽了学生的知识面。

(3)本书是机械工程材料立体化教材的组成部分,教学资源建设上,将丰富的图片、图形、视频、文本、试题库、试卷库等资料有机糅合在一起,建构运行了“机械工程材料”SPOC 在线教学平台,为课程学习提供丰富、便捷的信息化教学资源和硬件保障。

全书共分为机械零部件对工程材料的要求,机械工程材料的结构、组织和性能,机械工程材料的改性处理,常用机械工程材料,机械工程材料的选用五章。可作为机械类各专业的学习教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

本教材由徐婷、刘斌主编。焦玉民、何晓晖、王强、周建钊、刘晴等参与了编写工作。在编写时参考了大量的文献资料,在此向文献资料的作者致以诚挚的感谢。对于本书中存在的疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2016年3月

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第一章 机械零部件对工程材料的要求 .....            | 1  |
| 1.1 零部件所受的各种负荷 .....               | 1  |
| 1.1.1 力学负荷 .....                   | 1  |
| 1.1.2 热负荷 .....                    | 2  |
| 1.1.3 环境介质的作用 .....                | 2  |
| 1.2 机械工程材料的性能 .....                | 3  |
| 1.2.1 工程材料的力学性能 .....              | 3  |
| 1.2.2 工程材料的物理性能 .....              | 23 |
| 1.2.3 工程材料的化学性能 .....              | 25 |
| 1.2.4 工程材料的工艺性能 .....              | 26 |
| 1.3 机械工程材料的类型和性能特征 .....           | 27 |
| 1.3.1 工程材料的分类 .....                | 27 |
| 1.3.2 各类材料的性能特征 .....              | 29 |
| 思考题 .....                          | 32 |
| 第二章 机械工程材料的结构、组织和性能 .....          | 33 |
| 2.1 材料的内部结构 .....                  | 33 |
| 2.1.1 金属材料的内部结构 .....              | 33 |
| 2.1.2 陶瓷材料的内部结构 .....              | 47 |
| 2.1.3 高分子材料的内部结构 .....             | 50 |
| 2.2 晶体材料的相图与组织形成 .....             | 55 |
| 2.2.1 纯金属的结晶 .....                 | 55 |
| 2.2.2 合金的结晶 .....                  | 60 |
| 2.2.3 铁碳合金相图 .....                 | 69 |
| 2.2.4 材料的组织与性能 .....               | 81 |
| 思考题 .....                          | 85 |
| 第三章 机械工程材料的改性处理 .....              | 86 |
| 3.1 金属的塑性变形与再结晶 .....              | 86 |
| 3.1.1 金属塑性变形的本质 .....              | 86 |
| 3.1.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响 .....       | 90 |
| 3.1.3 冷塑性变形后金属在加热过程中组织和性能的变化 ..... | 95 |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 3.1.4      | 金属的热塑性加工 .....        | 101        |
| 3.2        | 钢的热处理 .....           | 103        |
| 3.2.1      | 钢在加热时的组织转变 .....      | 104        |
| 3.2.2      | 钢在冷却时的组织转变 .....      | 108        |
| 3.2.3      | 钢的普通热处理工艺 .....       | 121        |
| 3.3        | 材料的表面改性处理 .....       | 134        |
| 3.3.1      | 表面淬火 .....            | 135        |
| 3.3.2      | 化学热处理 .....           | 138        |
|            | 思考题 .....             | 143        |
| <b>第四章</b> | <b>常用机械工程材料 .....</b> | <b>145</b> |
| 4.1        | 工业用钢 .....            | 145        |
| 4.1.1      | 碳钢 .....              | 145        |
| 4.1.2      | 合金钢 .....             | 147        |
| 4.2        | 铸铁 .....              | 159        |
| 4.2.1      | 铸铁的石墨化 .....          | 159        |
| 4.2.2      | 铸铁的组织、性能和分类 .....     | 161        |
| 4.3        | 有色金属及其合金 .....        | 168        |
| 4.3.1      | 铝及铝合金 .....           | 169        |
| 4.3.2      | 铜及铜合金 .....           | 172        |
| 4.3.3      | 其他有色金属及其合金 .....      | 174        |
| 4.3.4      | 滑动轴承合金 .....          | 176        |
| 4.4        | 高分子材料 .....           | 179        |
| 4.4.1      | 高分子材料的制备 .....        | 179        |
| 4.4.2      | 高分子材料的性能 .....        | 183        |
| 4.4.3      | 常用高分子材料 .....         | 187        |
| 4.5        | 陶瓷材料 .....            | 191        |
| 4.5.1      | 陶瓷材料的制备 .....         | 191        |
| 4.5.2      | 陶瓷材料的结构 .....         | 192        |
| 4.5.3      | 陶瓷材料的性能 .....         | 192        |
| 4.5.4      | 常用特种陶瓷 .....          | 195        |
| 4.5.5      | 金属陶瓷 .....            | 197        |
| 4.6        | 复合材料 .....            | 198        |
| 4.6.1      | 复合材料的分类和特性 .....      | 199        |
| 4.6.2      | 树脂基复合材料 .....         | 201        |
| 4.6.3      | 金属基复合材料 .....         | 204        |
| 4.7        | 新型军事工程材料 .....        | 207        |
| 4.7.1      | 伪装材料 .....            | 207        |
| 4.7.2      | 电子材料 .....            | 210        |
| 4.7.3      | 兵器材料 .....            | 216        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 思考题 .....                  | 225        |
| <b>第五章 机械工程材料的选用 .....</b> | <b>227</b> |
| 5.1 机械零件的失效概述 .....        | 227        |
| 5.1.1 失效的概念 .....          | 227        |
| 5.1.2 失效的形式 .....          | 227        |
| 5.1.3 失效的原因与分析 .....       | 229        |
| 5.2 材料选用的基本原则 .....        | 230        |
| 5.2.1 使用性能原则 .....         | 230        |
| 5.2.2 工艺性能原则 .....         | 231        |
| 5.2.3 经济性原则 .....          | 234        |
| 5.2.4 材料选择的方法与步骤 .....     | 234        |
| 5.3 典型机械零件的选材及工艺 .....     | 236        |
| 5.3.1 轴类零件材料选择 .....       | 236        |
| 5.3.2 齿轮类零件材料选择 .....      | 239        |
| 5.3.3 箱体支承类零件材料选择 .....    | 242        |
| 5.3.4 其他零部件材料选择 .....      | 244        |
| 思考题 .....                  | 245        |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>247</b> |

# 第一章 机械零部件对工程材料的要求

工程材料制成的机械零部件在使用过程中要受到各种形式的载荷作用,包括力学负荷、热负荷或环境介质的作用,有时只受到一种负荷作用,更多的时候会受到两种或两种以上负荷的同时作用。任何机器零件或结构件都具有一定功能,如在载荷、温度、介质等作用下保持一定几何形状和尺寸,实现规定的机械运动、传递力和能等。零件若失去设计要求的效能即为失效。例如:在力学负荷作用条件下,零件将产生变形,甚至出现断裂;在热负荷作用下,将产生尺寸和体积的改变,并产生热应力,同时随温度的升高,零件的承载能力下降;在环境介质的作用下,零件表面往往会造成化学腐蚀、电化学腐蚀及摩擦磨损等现象。对于机械设计者来说,为了满足零部件对机械工程材料的要求、预防零件失效,必须做到设计正确、选材恰当和工艺合理。要掌握零部件所受的负荷类型及其失效衡量指标,为制定技术条件、正确选材和制定合理工艺提供依据。

## 1.1 零部件所受的各种负荷

### 1.1.1 力学负荷

按载荷随时间变化而变化的情况,可把载荷分成静载荷和动载荷。若载荷缓慢地由零增加到某一定值以后保持不变或变化很不显著,即为静载荷。机器的重量对基础的作用便是静载荷。若载荷随时间的变化而变化,则为动载荷。按其随时间变化的方式,动载荷又可分为交变载荷与冲击载荷。交变强荷是随时间按周期性变化的载荷,如齿轮转动时作用于每一个齿上的力都是随时间按周期性变化的。冲击载荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的载荷,如急刹车时飞轮的轮轴、锻造时汽锤的锤杆等都受到冲击载荷的作用。

作用在机械零件上的静载荷分为拉伸、压缩、剪切、扭转、弯曲等几种基本形式,如图 1-1 所示。

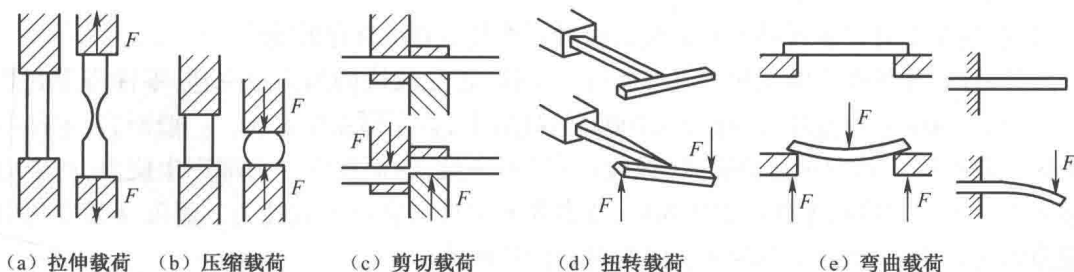


图 1-1 静载荷的基本形式

### 1. 拉伸和压缩载荷

拉伸载荷和压缩载荷是由大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的一对力引起的。

这类载荷使杆件的长度发生伸长或缩短。起吊重物的钢索、桁架的杆件、液压油缸的活塞杆等在工作时都受到拉伸载荷或压缩载荷的作用,有可能产生拉伸或压缩变形。

## 2. 剪切载荷

剪切载荷是由大小相等、方向相反、作用线垂直于杆轴且距离很近的一对力引起的。剪切载荷使受剪杆件的两部分沿外力作用力方向发生相对的错动。机械中常用的连接件(如键、销钉、螺栓等)都受剪切载荷作用,有可能产生剪切变形。

## 3. 扭转载荷

扭转载荷是由大小相等、方向相反、作用面垂直于杆轴的一对力偶引起的。扭转载荷使杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动。汽车的传动轴、电动机和水轮机的主轴等都受扭转载荷作用,有可能产生扭转变形。

## 4. 弯曲载荷

弯曲载荷是由垂直于杆件轴线的横向力,或者作用于包含杆轴的纵向平面内的一对大小相等、方向相反的力偶引起的。弯曲载荷使杆件轴线由直线变为曲线即发生弯曲。在工程中,杆件受弯曲载荷作用是最常遇到的情况之一。桥式吊车的大梁、各种心轴及车刀等都受弯曲载荷作用,有可能产生弯曲变形。

很多零件工作时同时承受几种载荷作用,如车床主轴工作时承受弯曲、扭转与压缩三种载荷作用,钻床立柱同时承受拉伸与弯曲两种载荷作用,此时将有可能产生组合变形。

### 1.1.2 热负荷

有些零件和结构是在高温条件下服役的,高温使材料的力学性能下降,并可能产生一系列的热影响。

首先,高温下材料的强度随温度升高而降低,高温下材料的强度随加载时间的延长而降低(在低温下材料的强度不受加载时间的影响)。例如,20 钢试样在  $450^{\circ}\text{C}$  的短时抗拉强度为  $330\text{ MPa}$ ,若试样仅承受  $230\text{ MPa}$  的应力,但在该温度下持续工作  $300\text{ h}$  就会发生断裂;如果将应力降至  $120\text{ MPa}$ ,则要持续  $10000\text{ h}$  才会发生断裂。在给定温度和规定的时间内使试样发生断裂的应力称为持久强度。

其次,材料在长时间的高温作用下,即使应力小于屈服强度也会慢慢地产生塑性变形,这种现象称为高温蠕变。一般来说,只有当温度超过  $0.3T_m$  ( $T_m$  为材料的熔点,以热力学温度  $\text{K}$  为单位)时才出现较明显的蠕变。

再次,高温下对许多材料尤其是金属材料要求其具有抗氧化的能力。

另外,许多零件在不断变化的温度条件下工作,若受较快的加热及冷却,零件将受到热冲击作用,如将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷管直接放入  $1200^{\circ}\text{C}$  的盐浴中,会立即发生爆裂。一般而言,零件各部分受热(或冷却)不均匀引起的膨胀(或收缩)量不一致,因而在零件内部产生应力,此应力称为热应力。热应力将使零件产生热变形,或者降低零件的实际承载能力。温度交替变化引起热应力的交替变化,交变的热应力会引起材料的热疲劳。

### 1.1.3 环境介质的作用

环境介质对金属零件的作用主要在腐蚀和摩擦磨损两个方面;环境介质对高分子材料零件的作用主要表现为老化。

### 1. 腐蚀作用

由于金属材料的化学性质相对活泼,容易受到环境介质的腐蚀作用。根据腐蚀的过程和腐蚀机理,可将腐蚀分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀三大类。化学腐蚀是指材料与周围介质直接发生化学反应,但反应过程中不产生微电流的腐蚀过程;电化学腐蚀是指金属与电解质溶液接触时发生电化学反应,反应过程中有微电流产生的腐蚀过程;物理腐蚀是指由于单纯的物理溶解而产生的腐蚀。

### 2. 摩擦磨损作用

机器运转时,任何在接触状态下发生相对运动的零件,如轴与轴承、活塞环与汽缸套、十字头与滑块、齿轮与齿轮等,彼此之间都会发生摩擦。零件在摩擦过程中表面发生尺寸变化和物质耗损的现象称为磨损。磨损的类型很多,最常见的有黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、接触疲劳四种。

### 3. 老化作用

高分子材料在加工、储存和使用过程中,由于受各种环境因素(如温度、日光、电、辐射、化学介质等)的作用而导致性能逐渐变坏,以致丧失使用价值的现象称为老化。例如:农用薄膜经日晒雨淋,发生变色、变脆和透明度下降;玻璃钢制品长期暴露在大气中,其表面逐渐露出玻璃纤维(起毛)、变色、失去光泽并且强度下降;汽车轮胎和自行车轮胎储存或使用中发生龟裂等均为老化现象。

## 1.2 机械工程材料的性能

在机械制造、交通运输、国防工业、石油化工等领域中,需要使用大量的工程材料,有时由于选材不当造成机械达不到使用要求或过早失效,因此了解和熟悉材料的性能成为合理选材、充分发挥工程材料内在性能潜力的重要依据。

材料的性能是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。通常所指材料的性能包括使用性能和工艺性能。

使用性能是指材料在使用过程中表现出来的性能。它包括力学性能和物理、化学性能等。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。工艺性能是指材料对各种加工工艺的适应能力。它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能、热处理工艺性能等。

### 1.2.1 工程材料的力学性能

由工程材料制成的机械零部件在使用过程中要受到各种形式的力,材料在这些力的作用下所表现出的特性称为材料的力学性能。材料的力学性能即抵抗各种外力的能力,是指材料在不同环境因素(如温度、介质等)下,承受外加载荷作用时所表现的行为。这种行为通常表现为材料的变形和断裂。因此,材料的力学性能也可以理解为材料抵抗外加载荷引起变形和断裂的能力。当外加载荷的性质、环境温度与介质等外在因素不同时,对材料的力学性能要求也不相同。室温下常用的力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧度、断裂韧度、疲劳极限和耐磨性等。

材料的力学性能不仅取决于材料本身的化学成分,而且还和材料的微观组织结构有关。

材料的力学性能是衡量工程材料性能优劣的主要指标,也是机械设计人员在设计过程中

选用材料的主要依据。材料的力学性能可以从设计手册中查到,也可以用力学性能试验方法获得。了解材料力学性能的测试条件、试验方法和性能指标的意义有助于了解工程材料的本性。

1.2.1.1 强度与塑性

材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力称为材料的强度。根据外力的作用方式,材料的强度分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。

材料在外力作用下表现出的抵抗塑性变形能力称为材料的塑性。  
材料的强度和塑性是材料最重要的力学性能指标之一,它可以通过拉伸试验获得。一次完整的拉伸试验记录还可以获得许多其他有关该材料性能的有用数据,如材料的弹性、刚度、屈服极限和材料破坏所需的功等。所以拉伸试验是材料试验中最为常用的一种试验方法。

1. 拉伸试验及拉伸曲线

拉伸试验设备为拉伸实验机。被测试材料按国标制成如图 1-2 所示的光滑圆柱形标准拉伸试样。试样中间截面均匀的部分作为测量延伸量的基本长度,称为标距  $L_0$ 。试样的两端置于拉伸实验机的夹头内夹紧。试验时,缓慢均匀地对试样施加轴向拉力,随着拉力的增加,试样被拉长直至拉断。拉伸实验机的自动记录系统会自动绘制出整个过程的应力应变曲线,也称  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线,如图 1-3 所示,即为低碳钢的  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线。纵横坐标的定义为

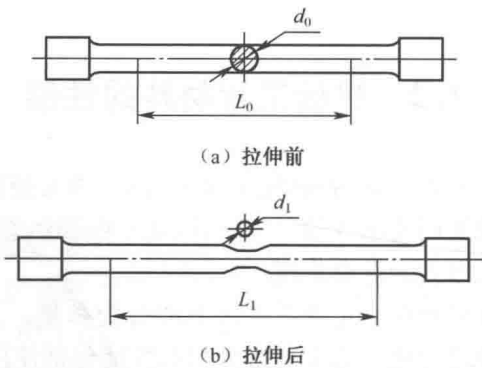


图 1-2 拉伸试样示意图

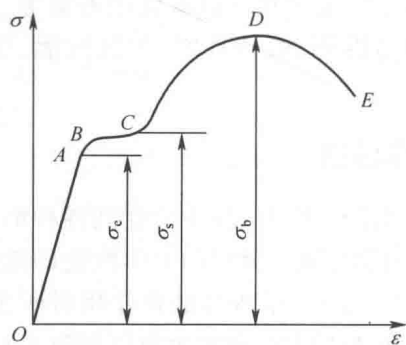


图 1-3 低碳钢的应力应变曲线( $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线)

$$\sigma = \frac{F}{S}$$
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

式中: $F$  为轴向拉力(N); $S$  为试样的横截面积( $\text{m}^2$ ); $L_0$  为试样标距长度(mm); $L_1$  为试样变形过程中和  $F$  对应的总伸长(mm)。

$\sigma$ - $\varepsilon$  曲线显示了材料在单向拉应力的作用下,从开始变形直至断裂整个过程中的各种性质。由图 1-3 可见,钢在低于弹性极限  $\sigma_e$  的应力作用下发生弹性变形,此阶段内,应力与应变成正比,服从胡克定律,此时若卸掉载荷试样可恢复到原来的长度。当应力超过弹性极限  $\sigma_e$  后,在继续发生弹性变形的同时,开始发生塑性变形并出现屈服现象,即外力几乎不增加,但变形继续进行。发生塑性变形后,即使卸掉载荷,试样也不能恢复到原来的长度。当应力超过屈服点  $C$  后,随着应力增加,塑性变形逐渐增加并伴随加工硬化,即塑性变形需要不断增加外力才能继续进行,产生均匀塑性变形,直至应力达到最高点  $D$  后,均匀的塑性变形阶段结束,试样开始发生不均匀集中塑性变形,并产生缩颈,应力迅速下降,变形量继续增大至  $E$  点而发生断裂。由此可见,低碳钢在拉伸应力作用下的变形过程分为弹性变形( $O-A$ )、屈服塑性变形( $B-C$ )、均匀塑性变形( $C-D$ )、不均匀集中塑性变形( $D-E$ )、断裂( $E$ )五个阶段。

拉伸曲线所显示出的材料本性主要是由于材料内部微观结构的变化引起的,因此不同的材料在拉伸过程中会出现不同形式的  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线。

## 2. 拉伸曲线所确定的力学性能指标及意义

### 1) 刚度

刚度是指零构件在受力时抵抗弹性变形的能力,它等于材料弹性模量( $E$ )与零构件截面积( $A$ )的乘积。由胡克定律可知,单向拉伸时:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\varepsilon}, \text{ 即 } EA = \frac{F}{\varepsilon}$$

载荷一定时, $EA$  越大,则  $\varepsilon$  越小,即零构件越不易产生弹性变形。当零构件的截面积  $A$  一定时,弹性模量  $E$  就代表零构件的刚度。因此,弹性模量  $E$  是表征材料刚度的性能指标。弹性模量的大小主要取决于材料的本性,除随温度升高而逐渐降低外,其他强化材料的手段如热处理、冷热加工、合金化等对弹性模量的影响很小。可以通过增加横截面积或改变截面形状来提高零件的刚度。

### 2) 强度

强度是指材料抵抗变形和断裂的能力。低碳钢在静拉伸时的强度指标有弹性极限  $\sigma_e$ 、屈服强度  $\sigma_s$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、断裂强度  $\sigma_e$ ,它们的物理意义分别是:弹性极限  $\sigma_e$  是材料不产生塑性变形的最大应力;屈服强度  $\sigma_s$  是材料开始产生塑性变形的应力;抗拉强度  $\sigma_b$  是材料产生最大均匀塑性变形的应力;断裂强度  $\sigma_e$  是材料发生断裂的应力。

有的材料在拉伸过程中,并没有明显的负荷不增加而应变仍在增大的屈服现象,遂定义残余变形量为 0.2% 时的应力值为其条件屈服强度,用  $\sigma_{0.2}$  表示。

机械零部件或构件在使用过程中一般不允许发生塑性变形,所以材料的屈服强度是评价材料承载能力的重要力学性能指标。抗拉强度是零部件设计和材料评定时的重要强度指标。尤其是对于脆性材料,由于拉伸时没有明显的屈服现象,一旦达到最大载荷,材料迅即发生断裂,故  $\sigma_b$  也是其断裂抗力指标,这时一般用抗拉强度指标作为设计依据。

### 3) 塑性

塑性是指金属材料断裂前发生不可逆永久变形的能力。金属材料断裂前所产生的塑性变形由均匀塑性变形和集中塑性变形两部分构成。大多数拉伸时形成缩颈的韧性金属材料,均匀塑性变形量比集中塑性变形量要小得多,一般均不超过集中变形量的 50%。许多钢材(尤

其是高强度钢)均匀塑变量仅占集中塑变量的 5%~10%。这就是说,拉伸缩颈形成后,塑性变形主要集中于试样缩颈附近。

材料常用的塑性指标为断后伸长率和断面收缩率。

断后伸长率是试样拉断后标距的伸长与原始标距的百分比,用  $\delta$  表示。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中: $L_0$ 为试样原始标距长度(mm); $L_1$ 为试样断裂后的标距长度(mm)。

断面收缩率是试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比,用  $\psi$  表示。

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

式中: $A_0$ 为试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ ); $A_1$ 为缩颈处最小横截面积( $\text{mm}^2$ )。

根据  $\delta$  和  $\psi$  的相对大小,可以判断金属材料拉伸时是否形成缩颈,如果  $\psi > \delta$ ,金属拉伸形成缩颈,且  $\psi$  与  $\delta$  之差越大,缩颈越严重;如果  $\psi = \delta$  或  $\psi < \delta$ ,则金属不形成缩颈。

塑性指标通常不能直接用于机件的设计,因为塑性与材料服役行为之间并无直接联系,但对静载下工作的机件,都要求材料具有一定塑性,以防止机件偶然过载时产生突然破坏。材料的塑性常与其强度性能有关。当材料的断后伸长率与断面收缩率的数值较高时( $\psi, \delta > 10\% \sim 20\%$ ),则材料的塑性越高,其强度一般较低。良好的塑性是材料进行压力加工的必要条件。材料具有一定的塑性可保证某些成形工艺(如冷冲压、轧制、冷弯、校直、冷铆)和修复工艺(如汽车外壳或挡泥板受碰撞而凹陷)的顺利进行,对于金属材料,塑性指标还能反映材料冶金质量的好坏,是材料生产与加工质量的标志之一。

### 1.2.1.2 硬度

硬度试验方法很多,大体上分为弹性回跳法(如肖氏硬度)、压入法(如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等)和划痕法(如莫氏硬度)三类。

硬度是表征材料软硬程度的一种性能,其物理意义随试验方法不同而不同。例如:划痕法硬度值(如莫氏硬度)主要表征材料对切断的抗力;回跳法硬度值(如肖氏硬度)主要表征材料弹性变形功的大小;压入法硬度值(如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等)则表征材料的塑性变形抗力及应变硬化能力。

硬度试验由于设备简单,操作方便、迅速,同时又能敏感地反映出材料的化学成分和组织结构的差异,因而广泛用于检查材料的性能、热加工工艺的质量或研究材料组织结构的变化。目前工业生产上应用最广的是压入法,它是以硬质合金或金刚石锥体为压头,在一定载荷下压入材料表面的硬度试验方法。用这种方法测得的硬度分别表示为布氏硬度(HBW)、洛氏硬度(HRC)和维氏硬度(HV)。

#### 1. 布氏硬度

布氏硬度试验是用载荷为  $F$  的力把直径为  $D$  的硬质合金球压入试样的表面(图 1-4),保持一定时间后卸掉载荷,此时试样表面出现直径为  $d$  的压痕。用载荷  $F$  除以压痕表面积所得的商即为被测材料的布氏硬度值:

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

式中: $F$  为载荷(N); $A$  为压痕表面积( $\text{mm}^2$ ); $d$  为压痕直径(mm); $D$  为硬质合金球直径(mm)。

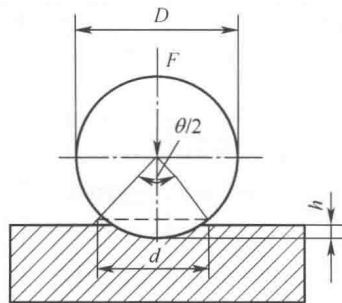


图 1-4 布氏硬度测量原理图

布氏硬度的单位为 MPa,但习惯上不标出单位。实际应用中一般不是直接计算 HBW,而是根据测量的  $d$  值在相关的表中直接查出布氏硬度值。

布氏硬度试验时一般采用直径较大的压头,因而所得压痕面积大。压痕面积大的一个优点是其硬度值能反映材料在较大范围内各组成相的平均性能,而不受个别组成相及微小不均匀性的影响。因此,布氏硬度试验特别适用于测定灰铸铁、轴承合金等具有粗大晶粒或组成相的金属材料的硬度。压痕较大的另一个优点是试验数据稳定,重复性强。布氏硬度试验的缺点是压痕大,不适合在成品上进行试验检验。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验测量原理如图 1-5 所示。用一个顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头,先施加一个初载荷,然后在规定的主载荷作用下将压头压入材料的表面。卸除主载荷后,根据压痕的深度  $h = h_1 - h_0$ ,确定被测材料的洛氏硬度。

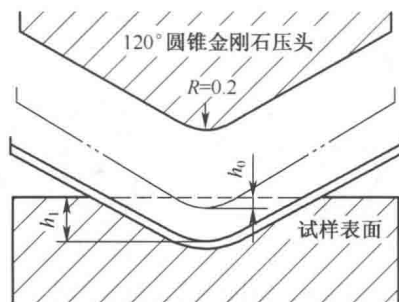


图 1-5 洛氏硬度测量原理图

洛氏硬度值就是以压痕深度  $h$  来计算的。 $h$  越大,硬度值越低;反之,则越高。一般用常数  $k$  减去  $h$  来计算硬度值,并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位。于是洛氏硬度值的计算式为

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

式中:HR 为洛氏硬度值的符号。

当使用金刚石圆锥体压头时, $k$  取 0.2mm;当使用淬火钢球压头时, $k$  取 0.26mm。实际洛氏硬度计上方测量压痕深度的百分表表盘上的刻度,已按上式换算为相应的硬度值,因此试验时洛氏硬度值可以直接从硬度计上的显示器上读出。

为了能在一台硬度计上测定不同软硬或厚薄试样的硬度,可采用不同的压头和试验力组合成几种不同的洛氏硬度标尺。用不同标尺测定的洛氏硬度符号在 HR 后面加标尺字母表示。常用的为 HRA、HRB、HRC 三种,其试验规范如表 1-1 所列。

表 1-1 常用洛氏硬度试验时的标尺、试验规范及应用

| 标尺 | 硬度符号 | 压头类型                     | 初始试验力<br>$F_0/\text{N}$ | 主试验力<br>$F_1/\text{N}$ | 总试验力<br>$F/\text{N}$ | 测量硬度范围 | 应用举例               |
|----|------|--------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|--------|--------------------|
| A  | HRA  | 金刚石圆锥                    | 98.07                   | 490.3                  | 588.4                | 20~88  | 硬质合金、硬化薄钢板、表面薄层硬化钢 |
| B  | HRB  | $\phi 1.588\text{mm}$ 钢球 |                         | 882.6                  | 980.7                | 20~100 | 低碳钢、铜合金、铁素体可锻铸铁    |
| C  | HRC  | 金刚石圆锥                    |                         | 1373                   | 1471                 | 20~70  | 淬火钢、高硬度铸件、珠光体可锻铸铁  |

洛氏硬度试验的优点是:测量迅速简便,压痕较小,可在成品零件上检测,也可测定较薄的工作或表面有较薄硬化层的硬度。其缺点是:由于压痕比较小,易受材料微区不均匀的影响,因而数据的重复性比较差。

3. 维氏硬度

维氏硬度的试验原理与布氏硬度相同,也是根据压痕单位面积所承受的试验力计算硬度值。所不同的是维氏硬度试验的压头不是球体,而是锥面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体,压痕是四方锥形(图 1-6)。测量压痕两对角线的平均长度  $d$ ,计算压痕的面积  $A_v$ ,维氏硬度的计算式为

$$HV = \frac{F}{A_v} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

(1.8)

式中: $F$  为载荷(N); $A_v$  为压痕表面积( $\text{mm}^2$ )。

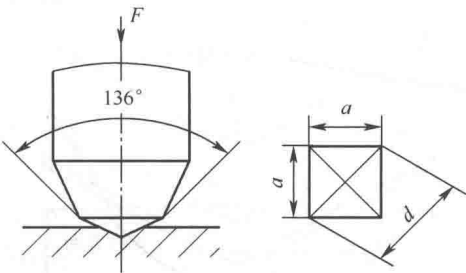


图 1-6 维氏硬度试验示意图

维氏硬度的单位为 MPa,一般不标。

维氏硬度试验的优点是不存在布氏硬度试验时要求试验力  $F$  与压头直径  $D$  之间所规定条件的约束,也不存在洛氏硬度试验时不同标尺的硬度值无法统一的弊端。维氏硬度试验时不仅试验力可以任意选取,而且压痕测量的精度较高,硬度值较为精确。唯一的缺点是硬度值需要通过测量压痕对角线长度后才能进行计算或查表,因此,工作效率比洛氏硬度法低。

为了测量一些特殊性能和特殊形状材料的硬度,也可以选择其他的硬度试验方法。如显微硬度法可用于测量一些薄的镀层、渗层或显微组织中的不同相的硬度;肖氏硬度适合在现场对大型试件(如机床床身、大型齿轮等)进行硬度测量;莫氏硬度用于测量陶瓷和矿物的硬度。

由于各种硬度的试验条件不同,因此它们之间没有直接的换算关系。标注某种材料的硬度值时必须说明它的硬度测试方法。在工程图纸上正确标注材料硬度的方法是硬度值加硬度测试方法代号,如 120HBW10/1000/30 表示直径为 10mm 的硬质合金球在 1000kgf(9.807kN) 载荷作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为  $120\text{N}/\text{mm}^2$  (MPa)。60HRC 表示用金刚石锥体压头

和总载荷为 1471N 下测得的洛氏硬度值为 60MPa。640HV30/20 表示用 30kgf(294.2N) 试验力保持 20s 测得的维氏硬度值为 640N/mm<sup>2</sup>(MPa)。

1.2.1.3 材料的冲击韧度和断裂韧度

材料的韧性是指材料在塑性变形和断裂的全过程中吸收能量的能力,它是材料塑性和强度的综合体现。根据材料断裂前所产生的宏观变形量大小,将断裂分为韧性断裂和脆性断裂。韧性断裂是断裂前发生明显宏观塑性变形,而脆性断裂是断裂前不发生塑性变形。

1. 冲击韧性及衡量指标

许多机器零件在服役时往往受到冲击载荷的作用,如汽车行驶通过道路上的凹坑,飞机起飞和降落及金属压力加工(锻造、模锻)等。还有许多特殊服役条件下的装备机件,例如装甲板、防护板、枪管、炮管、冷冲模、锤头等也都是在冲击载荷下工作的。为了评定材料传递冲击载荷的能力,揭示材料在冲击载荷作用下的力学行为,就需要进行相应的力学性能试验。冲击载荷和静载荷的主要区别是加载速率不同,前者加载速率高,后者加载速率低。由于冲击载荷加载速率提高,应变速率也随之增加,使材料变脆倾向增大,冲击韧性即可以用来评定材料在冲击载荷下的脆断倾向。

冲击韧度是指材料在冲击载荷的作用下,材料抵抗变形和断裂的能力。材料的冲击韧度值常用一次摆锤冲击试验方法测定,试验原理如图 1-7 所示。

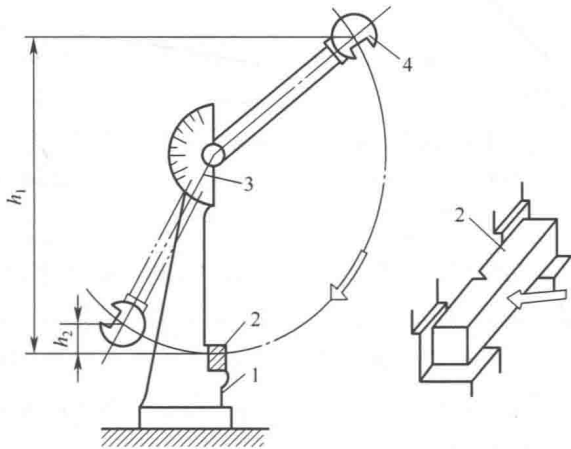


图 1-7 冲击试验原理

1—支座;2—试样;3—指针;4—摆锤。

冲击试验时,把有 U 形或 V 形缺口(脆性材料不开缺口)的标准冲击试样背向摆锤方向放在冲击实验机上,将质量为  $m$  的摆锤升高到规定的高度  $H$ ,然后摆锤自由落下将试样击断。在惯性的作用下,击断试样后的摆锤会继续上升到某一高度  $h$ 。根据功能原理,摆锤击断试样所消耗的功  $A_k = mg(H-h)$ 。 $A_k$  可以从冲击实验机上直接读出,称为冲击吸收功。 $A_k$  除以试样缺口处横截面积  $S$  的值则为该材料的冲击韧度值,用符号  $\alpha_k$  表示,单位为 J/cm<sup>2</sup>。

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S}$$

根据试样的缺口形式,U 形缺口和 V 形缺口试样的冲击韧度值分别以  $\alpha_{ku}$  和  $\alpha_{kv}$  表示。不同形式试样的冲击韧度值不能直接进行比较或换算。

工程材料的冲击吸收功通常是在室温下测得,若降低试验温度,在低温下不同温度进行冲

击试验(称为低温冲击试验或系列冲击试验),可以得到冲击吸收功  $A_k$  随温度的变化曲线,如图 1-8 所示。由图 1-8 可见,材料的冲击吸收功随试验温度降低而降低,当试验温度低于  $T_k$  时,冲击吸收功明显降低,材料由韧性状态变为脆性状态,这种现象称为低温脆性。将  $A_k-T$  曲线上冲击吸收功急剧变化的温度  $T_k$  称为韧脆转变温度。低温脆性是中、低强度结构钢经常遇到的现象,它对桥梁、船舶、低温压力容器以及在低温下工作的机器零件是十分有害的,容易引起低温脆性断裂。显然材料的  $A_k$  越高和  $T_k$  越低,其冲击韧性越好。材料的冲击韧度的大小除了与材料本身特性,如化学成分、显微组织和冶金质量等有关外,还受试样的尺寸、缺口形状、加工粗糙度和试验环境的影响,因而可以通过合金化、热处理等方法改变。

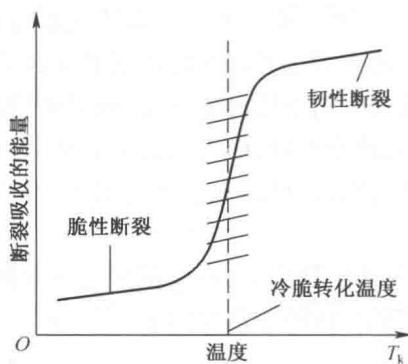


图 1-8 钢的脆性转化温度

2. 断裂韧性及衡量指标

断裂韧度是以断裂力学为基础的材料韧性指标。断裂力学是把材料的断裂过程与裂纹扩展时所需的功联系起来,它对评估材料的使用寿命和设计可靠运转的机件具有重要的指导意义。

为了防止断裂失效,在工程构件和机械零件设计中,通常都是用材料的屈服强度作为材料的许用应力 $[\sigma]$ ( $[\sigma]=\sigma_s/n, n>1$ )。一般认为,只要零件的工作应力小于或等于许用应力就不会发生塑性变形,更不会发生断裂。但是实际情况并非总是这样,对高强度、超高强度钢的机件,中低强度钢的大型、重型机件(如火箭壳体、大型转子、船舶、桥梁、压力容器等)却经常在屈服应力以下发生低应力脆性断裂。

实际中材料内部并不是完整连续的,而是不可避免会存在各种冶金或加工缺陷,这些缺陷相当于裂纹,或者它们在使用过程中扩展成为裂纹。大量断裂事例分析表明,上述机件的低应力脆断正是由这些宏观裂纹(工艺裂纹或使用裂纹)扩展引起的。一旦裂纹长度达到某一临界尺寸时,裂纹的扩展速度就会剧增,从而导致断裂。材料抵抗裂纹失稳扩展断裂的能力称为断裂韧度。

断裂韧度的表示式为  $K_{IC}$ ,单位为  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。断裂力学分析证明,裂纹尖端应力场强度因子  $K_I$ 、零件裂纹半长度  $a$  和零件工作应力  $\sigma$  之间存在如下关系:

$$K_I = Y\sigma a^{1/2}$$

式中, $Y=1\sim 2$ ,为零件中裂纹的几何形状因子。当  $K_I \geq K_{IC}$  时,零件发生低应力脆断;当  $K_I < K_{IC}$  时,零件安全可靠。因此  $K_I = K_{IC}$  是零件发生低应力脆断的临界条件,即  $K_I = Y\sigma a^{1/2} = K_{IC}$ 。

由此式可知,为了使零件不发生脆断,设计者可以控制三个参数,即材料的断裂韧度  $K_{IC}$ ,