

# 机械 工程 材料

郝建民 主 编

王利捷 副主编

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书共分十三章，内容包括：材料的性能、材料的结构、材料的凝固与结晶、铁碳合金、塑性变形和再结晶、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、材料的选用及国内外钢号对照附表。

本书可作为高等工科院校机械类、能源动力工程、化学工程、环境工程等专业的教材，亦可供从事机械零件设计和加工工艺的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料 郝建民主编. —西安：西北工业大学出版社，2003. 2  
ISBN 7 - 5612 - 1606 - 8

. 机... . 郝... . 机械制造材料-高等学校 . TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 010381 号

出版发行：西北工业大学出版社  
通信地址：西安市友谊西路 127 号  
邮 编：710072 电话：(029) —8493844 8491147  
网 址：<http://www.nwpup.com>  
印 刷 者：西安向阳印刷厂  
开 本：787 mm × 1 092 mm 1/16  
印 张：16  
字 数：387 千字  
版 次：2003 年 3 月 第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷  
印 数：1 ~ 3 000  
定 价：23.00 元

# 前 言

本书是根据全国高等学校“机械工程类专业教学指导委员会”对机械类专业《机械工程材料》的教学要求，并结合我们多年来的教学实践而编写的。本书以培养机电类各专业学生具有合理选用机械工程材料、正确确定材料加工工艺方法、妥善安排工艺路线的初步能力为主要目标。

本书主要内容包括：材料的性能、材料科学基础、材料加工方法、常用的机械工程材料。

本书的特点是：

(1) 紧密围绕机械类专业的需要，与物理、化学、工程力学、机械设计与制造等基础课紧密联系，力求目的明确，针对性强。

(2) 为了使学生易于掌握基本内容，在每章的前面提出了需要达到的目的、要求以及学习方法，并在每章后列出了一定数量的习题与思考题，旨在总结基本概念、巩固所学知识、培养分析和解决实际问题能力。

(3) 全书紧密结合教学基本要求，对主要内容都有一定的理论分析，避免只讲现象和结论。取材力求新颖，尽量做到深入浅出，循序渐进，并注意前后内容的衔接。另外，在理论分析的同时，列举实例加以分析，起到了理论联系实际的作用。

本书可作为高等工科院校机械类、能源动力工程、化学工程、环境工程等专业的教材，亦可供现场从事机械零件设计和加工工艺的工程技术人员参考。

本书由长安大学诸位教师编写，共十三章，其中郝建民编写绪论、第二章、第三章、第四章、第八章、第十章；王利捷编写第五章、第六章、第七章、第九章；张荣军编写第一章、第十二章、第十三章；陈宏编写第十一章、附录。全书由郝建民主编，王利捷副编。

本书在编写过程中，参考了部分国内外有关教材、科技著作及论文，并得到了有关单位和同志的大力支持，特别是叶育德同志为本书做了大量的图稿工作，在此一并致以诚挚的谢意。

由于我们水平有限，难免有疏漏和不妥之处，敬请读者指正。

编 者

2002年12月

# 目 录

绪 论.....	1
第一章 材料的性能.....	3
第一节 材料的机械性能.....	3
第二节 材料的物理、化学性能 .....	14
第三节 材料的工艺性能 .....	15
习题与思考题 .....	16
第二章 材料的结构 .....	17
第一节 材料的结合键 .....	17
第二节 材料的晶体结构 .....	19
第三节 实际金属的晶体结构及晶体缺陷 .....	24
第四节 合金的晶体结构 .....	26
第五节 非金属材料的结构 .....	29
习题与思考题 .....	34
第三章 材料的凝固与结晶 .....	36
第一节 凝固的概念 .....	36
第二节 金属的结晶和铸锭 .....	37
第三节 合金的结晶过程 .....	42
习题与思考题 .....	57
第四章 铁碳合金 .....	59
第一节 铁碳合金的相组成 .....	59
第二节 铁碳合金相图 .....	61
第三节 碳钢 .....	71
习题与思考题 .....	76
第五章 金属的塑性变形与再结晶 .....	78
第一节 金属的塑性变形 .....	78
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	83
第三节 回复与再结晶 .....	84

第四节 金属的热加工 .....	89
第五节 金属强化理论简介 .....	90
习题与思考题 .....	92
第六章 钢的热处理 .....	94
第一节 钢在加热时的转变 .....	94
第二节 钢在冷却时的转变 .....	98
第三节 钢的退火和正火.....	106
第四节 钢的淬火.....	108
第五节 钢的淬透性.....	114
第六节 钢的回火.....	116
第七节 钢的表面热处理和化学热处理.....	119
习题与思考题.....	127
第七章 合金钢.....	130
第一节 合金元素在钢中的作用.....	130
第二节 合金结构钢.....	137
第三节 合金工具钢.....	152
习题与思考题.....	177
第八章 铸铁.....	180
第一节 铸铁的石墨化.....	181
第二节 常用铸铁的特点与应用.....	184
习题与思考题.....	196
第九章 有色金属及其合金.....	197
第一节 铝及其合金.....	197
第二节 铜及其合金.....	202
第三节 轴承合金.....	206
第四节 其他有色金属及合金.....	209
习题与思考题.....	211
第十章 高分子合成材料.....	213
第一节 高分子合成材料的性能特点.....	213
第二节 高分子化合物的合成方法.....	215
第三节 几种常用的高分子合成材料.....	217
习题与思考题.....	223

第十一章 陶瓷材料.....	224
第一节 陶瓷材料的分类.....	224
第二节 陶瓷材料的性能.....	225
第三节 陶瓷材料制造工艺.....	226
第四节 常用陶瓷材料.....	227
习题与思考题.....	231
第十二章 复合材料.....	232
第一节 复合材料的特点和分类.....	232
第二节 常用复合材料.....	233
习题与思考题.....	235
第十三章 材料的选用.....	237
第一节 失效分析.....	237
第二节 选材的原则.....	239
第三节 典型零件选材实例及工艺分析.....	241
习题与思考题.....	244
附录 国内外常用钢号对照表.....	245
参考文献.....	248

# 绪 论

材料、能源和信息是现代科学技术的三大支柱。任何一项科学技术的进展,都需要解决相应的材料问题,材料的这种重要作用,正在日益为人们所认识。

用以制造各种机械设备、机械产品的结构件和零部件,以及各种加工用工模具的材料,统称为机械工程材料。在机械工程材料中,大致分为金属材料和非金属材料,其中金属材料占主要地位(约80%左右),但非金属材料的发展也十分迅速,金属与非金属并驾齐驱,争相发展,相互渗透与结合,形成了一个规模宏大的材料体系。

在实现工业、农业、国防和科学技术现代化的过程中,机械工业担负着艰巨的任务,必须为国民经济各部门提供大量的先进装备。任何先进的机械产品或成套设备除设计先进外,在很大程度上取决于所选用的工程材料的质量。材料质量不好,不仅产品粗笨,更重要的是零部件使用寿命不高,其结果是整机质量难以保证。只有采用性能优良的材料,才能保证在先进的设计参数、先进的加工制造技术下,获得质量优异的机械产品和机械设备。因此,对于从事机械设计、制造、使用、维护、管理工作的工程技术人员来说,掌握机械工程材料基本知识是非常重要的。在机械设计中,技术人员的工作内容之一,是根据机器零件的工作条件等因素,选择合适的材料,正确地决定热处理技术要求,从而使机械设备结构合理、功效良好、便于制造、成本低廉,使各个零件都能安全可靠地使用。在加工制造中,技术人员在审查图纸时,要分析零件的选材及热处理技术要求是否合理,当所选材料供应有困难时,还要考虑能否用其他材料代替;在编制工艺时,要确定热处理工序如何安排;在指导生产时,要采取措施使零件的性能达到设计要求。在机械设备的使用、维护、管理工作方面,技术人员要根据零件所用材料的性能特点,制订有关技术规程,使机械设备的使用寿命得到延长;在机械设备发生故障时,要根据零件失效的情况,分析零件损坏的原因,判断是属于选材不当、材质不良、热处理不正确,还是属于设计、制造、装配或、维护、使用等方面的问题。由此可见,工程材料是机械设计与制造的基础。

《机械工程材料》是高等学校机械类专业必修的技术基础课之一,其目的是使学生获得有关金属学、热处理的基本理论及工程材料的一般知识,用以了解常用金属材料的成分、组织、性能、热处理工艺之间关系及用途;了解常用非金属材料的分类、性能及用途,以便在学习本门课程之后,使学生具有合理选用机械工程材料,正确选定材料加工工艺方法,妥善安排工艺路线等方面的初步能力。

本课程的内容包括材料性能、金属学、热处理、常用机械工程材料四部分,基本要求如下:

(1) 关于材料性能,主要了解材料的主要机械性能指标:屈服强度、抗拉强度、延伸率、断面收缩率、冲击韧性、硬度、疲劳强度、断裂韧性、耐磨性等的测试原理和生产实际意义。

(2) 关于金属学,了解材料的组织结构、结晶过程、二元合金相图、塑性变形与再结晶的基本理论,为进一步学习热处理和材料选用奠定基础。

(3) 关于热处理,了解钢铁材料的热处理基本原理和工艺,以及热处理工艺在零件加工过程中的地位和作用,以便正确选用热处理工艺方法,合理安排工艺路线。

(4) 关于工程材料,掌握常用的碳钢、铸铁、合金钢、有色金属及其合金的成分、组织、性能和用途;掌握工程塑料、橡胶、陶瓷、复合材料等常用非金属材料的分类、性能和用途,以便合理选用工程材料。

《机械工程材料》是以物理、化学、材料力学、机械制造基础等课程为基础的一门技术基础课,同时它又是学习后续有关课程的基础。因此在学习中,不仅要在有关课程学习的基础上注意系统的理论学习,还要结合专业要求,使理论联系生产实际,重视实验环节,遵循实践 - 理论 - 再实践的认识规律来学习,以培养分析问题、解决问题的能力。

# 第一章 材料的性能

工农业生产中所使用的各种机械,大部分是由金属材料与非金属材料制成的。其中金属材料应用得更为广泛,主要是由于金属材料本身具有优良的性能,能够满足各种机械加工和使用要求。

材料的性能通常可分为两类:使用性能和工艺性能。使用性能是指机械零件在正常工作情况下应具备的性能,包括机械性能和物理、化学性能等;工艺性能是指机械零件在冷、热加工的制造过程中应具备的性能,它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能。

在机械制造中,一般机械零件是在常温、常压和非强烈腐蚀性介质中使用的,如汽车、拖拉机上的各类齿轮、轴等。但有一些机械零件却是在高温、高压和腐蚀介质中使用的,如化工机械、石油机械和锅炉中的容器、管道等。根据不同的使用要求,确定采用不同性能的材料,所以材料的性能是零件设计和选材的主要依据。

## 第一节 材料的机械性能

材料的机械性能是指材料在各种形式的外力作用下,抵抗变形和断裂的能力。衡量材料机械性能的主要指标有强度、塑性、硬度、疲劳强度、冲击韧性、断裂韧性和耐磨性等。

### 一、强度、塑性及其测定

强度是指材料在静载荷作用下,抵抗产生塑性变形或断裂的能力。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等,所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪切强度等。各种强度间常有一定的联系,使用中一般多以抗拉强度作为最基本的强度指标。

塑性是指材料在载荷作用下,产生永久变形而不破坏的能力。

抗拉强度和塑性是依据国家标准(GB6397 - 1986)通过静拉伸试验测定的。它是把一定尺寸和形状的试样装夹在拉力试验机上,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大小,可以测定该材料的强度和塑性。

#### (一) 拉伸图与应力-应变曲线

##### 1. 拉伸图

试样进行拉伸试验时,随着载荷的逐渐增加,试样的伸长量也逐渐增加,通过自动记录仪随时记录载荷( $P$ )与伸长量( $L$ )的数值,直至试样被拉断为止,然后将记录数值绘在载荷为纵坐标、伸长量为横坐标的图上。连接各点所得的曲线即为拉伸曲线,该图称为拉伸图。

图 1-1 为低碳钢的拉伸图。由图可见,低碳钢试样在拉伸过程中,其载荷与变形关系有以下几个阶段。

(1) 当载荷不超过  $P_p$  时,拉伸曲线  $oa$  为一直线,即试样的伸长量与载荷成正比地增加,如果卸除载荷,试样立即恢复到原来的尺寸,试样属于弹性变形阶段,完全符合虎克定律。 $P_p$  是

符合虎克定律的最大载荷。

(2) 当载荷超过  $P_p$  后, 拉伸曲线开始偏离直线, 即试样的伸长量与载荷已不再成正比关系, 但若卸除载荷, 试样仍能恢复到原来的尺寸, 故仍属于弹性变形阶段。  $P_e$  是试样发生完全弹性变形的最大载荷。

(3) 当载荷超过  $P_e$  后, 试样将进一步伸长, 但此时若去除载荷, 弹性变形消失, 而另一部分变形被保留, 即试样不能恢复到原来的尺寸, 这种不能恢复的变形称为塑性变形或永久变形。

(4) 当载荷达到  $P_s$  时, 拉伸曲线出现了水平的或锯齿形的线段, 这表明在载荷基本不变的情况下, 试样却继续变形, 这种现象称为“屈服”。引起试样屈服的载荷称为屈服载荷。

(5) 当载荷超过  $P_s$  后, 试样的伸长量与载荷又将呈曲线关系上升, 但曲线的斜率比  $oa$  段的斜率小, 即载荷的增加量不大, 而试样的伸长量却很大。这表明在载荷超过  $P_s$  后, 试样已开始产生大量均匀的塑性变形。当载荷继续增加超过最大值  $P_b$  时, 试样的局部截面积缩小, 产生所谓“颈缩”现象。由于试样局部截面的逐渐减小, 承载能力也逐渐降低, 当达到拉伸曲线上  $K$  点时, 试样断裂。  $P_k$  为试样断裂时的载荷。

应该指出, 工业上使用的许多材料在进行静拉伸试验时, 其承受的载荷与变形量之间的关系, 并非都与上述低碳钢相同。某些脆性金属(如铸铁等) 在尚未产生明显塑性变形时已经断裂, 故不仅没有屈服现象, 而且也不产生缩颈现象。

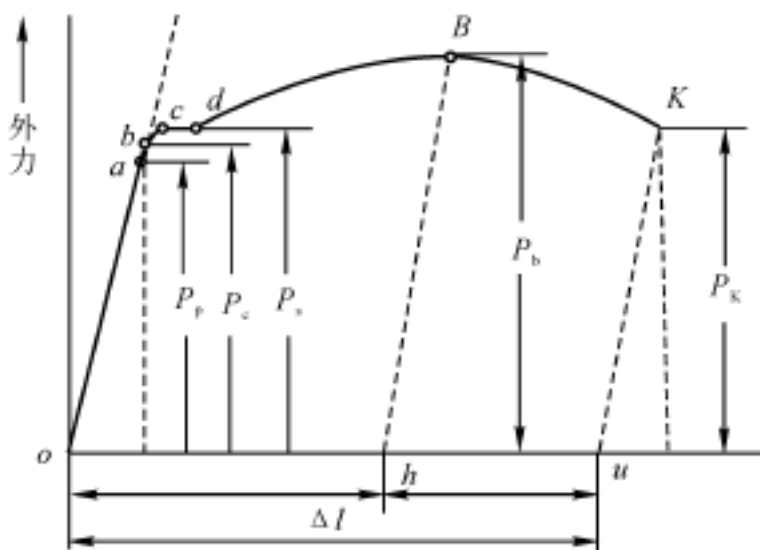


图 1-1 低碳钢的拉伸图

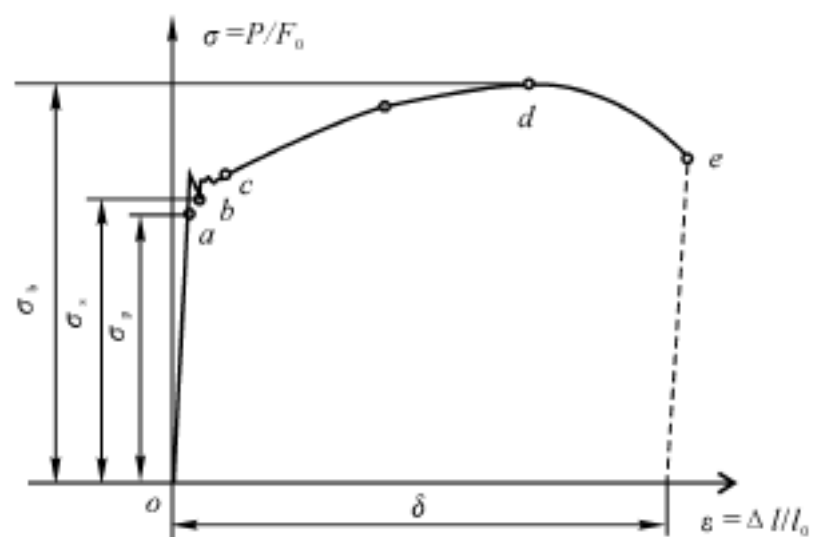


图 1-2 低碳钢的应力-应变示意图

## 2. 应力-应变曲线

由于拉伸图上的载荷  $P$  与伸长量  $L$ , 不仅与试验的材料性能有关, 而且还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸因素的影响, 用数学方法处理可得到应力-应变曲线。图 1-2 为低碳钢的应力-应变曲线。

试样承受的载荷  $P$  除以试样的原始截面积  $F_0$ , 得到试样所承受的应力  $\sigma$ , 即

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

试样的伸长量  $L$  除以试样的原始标距长度  $L_0$ , 得到试样的相对伸长, 即应变  $\epsilon$  (或  $\delta$ )

$$\epsilon = \frac{L}{L_0}$$

以  $\sigma$  与  $\epsilon$  为坐标绘出应力-应变的关系曲线,叫做应力-应变曲线。由于拉伸试样按国标 GB228-76 有统一规定,其原始截面积  $F_0$ 、原始标距长度  $L_0$  为常数,所以应力-应变曲线的形状与拉伸图相似,只是坐标与数值不同。但它不受试样尺寸的影响,可以直接看出材料的一些机械性能。

## (二) 静拉伸试验测定的各项指标及意义

### 1. 弹性模量

弹性模量  $E$  是指材料在弹性状态下的应力与应变的比值,即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

在应力-应变曲线上,弹性模量就是试样在弹性变形阶段线段的斜率,即引起单位弹性变形时所需的应力。因此,它表示材料抵抗弹性变形的能力。弹性模量  $E$  值愈大,则材料的刚度愈大,材料抵抗弹性变形的能力就愈强。

绝大多数的机械零件都是在弹性状态下进行工作的,在工作过程中一般不允许有过多的弹性变形,更不允许有明显的塑性变形。因此,对其刚度都有一定的要求。提高零件刚度的办法,除了增加零件的横截面积或改变横截面形状外,从材料性能上来考虑,就必须增加其弹性模量。弹性模量主要取决于各种材料本身的性质,热处理、微合金化及塑性变形等对它的影响很小。一般钢在室温下的弹性模量在  $1.9 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5$  MPa 范围内,而铸铁的弹性模量较低,一般为  $0.75 \times 10^5 \sim 1.45 \times 10^5$  MPa。

### 2. 比例极限与弹性极限

比例极限  $\sigma_p$  是应力与应变之间能保持正比例关系的最大应力值,即

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$$

式中  $P_p$  —— 载荷与变形能保持正比例关系的最大载荷;

$F_0$  —— 试样的原始横截面积。

弹性极限  $\sigma_e$  是材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值,即

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}$$

式中  $P_e$  —— 试样发生完全弹性变形的最大载荷;

$F_0$  —— 试样的原始横截面积。

由于弹性极限与比例极限在数值上非常接近,故一般不必严格区分。它们是表示材料在不产生塑性变形时能承受的最大应力值。对工作中不允许有微量塑性变形的零件(如精密的弹性元件、炮筒)等的设计与选材,比例极限( $\sigma_p$ )、弹性极限( $\sigma_e$ )是重要依据。

### 3. 屈服强度

屈服强度  $\sigma_s$  是材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值,即

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$$

式中  $P_s$  —— 试样发生屈服时的载荷,即屈服载荷;

$F_0$  —— 试样的原始横截面积。

工业上使用的某些材料(如高碳钢和某些经热处理后的钢等)在拉伸试验中没有明显的

屈服现象发生,故无法确定屈服强度  $\sigma_s$ 。国家标准规定,可用试样在拉伸过程中标距部分产生 0.2% 塑性变形量的应力值来表征材料对微量塑性变形的抗力,称为屈服强度,即所谓的“条件屈服强度”,记为  $\sigma_{0.2}$ 。

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}$$

式中  $P_{0.2}$  —— 试样标距部分产生 0.2% 塑性变形量时的载荷;  
 $F_0$  —— 试样的原始横截面积。

一般机械零件在发生少量塑性变形后,零件精度降低或与其他零件的相对配合受到影响而造成失效。所以,屈服强度就成为零件设计时的主要依据,同时也是评定材料强度的重要机械性能指标之一。

#### 4. 强度极限

强度极限  $\sigma_b$  是材料在断裂前所能承受的最大应力值,即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$$

式中  $P_b$  —— 试样在断裂前所能承受的最大载荷;  
 $F_0$  —— 试样的原始横截面积。

塑性材料在拉伸过程中,若承受的载荷小于  $P_b$ ,则试样产生均匀的塑性变形;当载荷超过  $P_b$  时将引起缩颈而产生集中变形。可见,强度极限  $\sigma_b$  是表示材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。低塑性材料在拉伸过程中,一般不产生缩颈现象,因此,强度极限  $\sigma_b$  就是材料的断裂强度,它表示材料抵抗断裂的能力。在工程上强度极限常称为抗拉强度,它是零件设计时的重要依据;同时也是评定材料强度的重要机械性能指标之一。

#### 5. 延伸率与断面收缩率

延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  是表示材料塑性好坏的指标。

(1) 延伸率是指试样拉断后标距增长量与原始标距长度之比,即

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

式中  $L_k$  —— 试样断裂后的标距长度;  
 $L_0$  —— 试样原始的标距长度。

(2) 断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比,即

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\%$$

式中  $F_k$  —— 试样拉断处的最小横截面积;  
 $F_0$  —— 试样的原始横截面积。

材料的延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  的数值越大,表示材料的塑性越好。由于断面收缩率比延伸率更接近材料的真实应变,因而在塑性指标中,用断面收缩率比延伸率更为合理,但现有的材料塑性指标往往仍较多地采用延伸率。

材料的塑性对要求进行冷塑性变形加工的工件有着重要的意义。此外,在工件使用中偶然过载时,由于能产生一定的塑性变形,而不致于突然破坏。同时,在工件的应力集中处,塑性能起到削减应力峰(即局部的最大应力)的作用,从而保证工件不致突然断裂,这就是大多数工件除要求高强度外,还要求具有一定塑性的道理。

## 二、硬度及其测定

硬度是衡量材料软硬程度的指标。目前生产中测定硬度的方法最常用的是压入硬度法,它是用一定几何形状的压头在一定载荷下压入被测试的材料表面,根据被压入程度来测定其硬度值。用同样的压头在相同大小载荷作用下压入材料表面时,若压入程度愈大,则材料的硬度值愈低;反之,硬度值就愈高。因此,压入法所表示的硬度是指材料表面抵抗更硬物体压入的能力。

由于硬度试验设备简单,操作迅速方便,又可直接在零件或工具上进行试验而不破坏工件,并且还可根据测得的硬度值估计出材料的强度和耐磨性。此外,硬度与材料的冷成型性、切削加工性、可焊性等工艺性能间也存在着一定联系,可作为选择加工工艺时的参考。所以硬度试验是实际生产中作为产品质量检查、制定合理加工工艺的最常用的试验方法。在产品图纸的技术条件中,硬度是一项主要技术指标。为了能获得正确的试验结果,被测材料表面不应有氧化皮、脱碳层和划痕、裂纹等缺陷。

测定硬度的方法很多,生产中应用较多的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等试验方法。

### 1. 布氏硬度

布氏硬度试验法是用一个直径为  $D$  的淬火钢球(或硬质合金球),在规定载荷  $P$  的作用下压入被测试材料的表面(图 1-3),停留一定时间,然后卸除载荷,测量钢球(或硬质合金球)在被测试材料表面上所形成的压痕直径  $d$ ,由此计算出压痕面积,进而得到所承受的平均应力值,以此作为被测试材料的硬度,称为布氏硬度值,记作 HBS。

$$HBS = \frac{P}{F} = \frac{2P}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

在布氏硬度试验中载荷  $P$  的单位为 N,压头直径与压痕直径  $d$  的单位为 mm,所以布氏硬度的单位为  $N/mm^2$ ,但习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。

在进行布氏硬度试验时,一方面应根据材料的软硬和工件厚度的不同,正确选择载荷  $P$  和压头直径  $D$ 。为使同一材料在不同  $P, D$  下测得相同的布氏硬度值,应使  $P/D^2$  为常数。另一方面,为保证测得布氏硬度的准确性,压痕直径  $d$  与压头直径  $D$  的比值在一定范围 ( $0.2D < d < 0.5D$ ),可以认为是可靠数据。

由于压头材料不同,因此布氏硬度用不同符号表示,以示区别。当压头为淬火钢球时用 HBS 表示,适用于布氏硬度低于 450 的材料,如:270 HBS;当压头为硬质合金球时用 HBW 表示,适用于布氏硬度大于 450 且小于 650 的材料,如:500 HBW。

布氏硬度试验法的优点:因压痕面积较大,能反映出较大范围内被测试材料的平均硬度,故试验结果较精确,特别是对于组织比较粗大且不均匀的材料(如铸铁、轴承合金等),更是其他硬度试验方法所不能代替的。

### 2. 洛氏硬度法

洛氏硬度试验是目前工厂中广泛应用的试验方法。它是用一个顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥

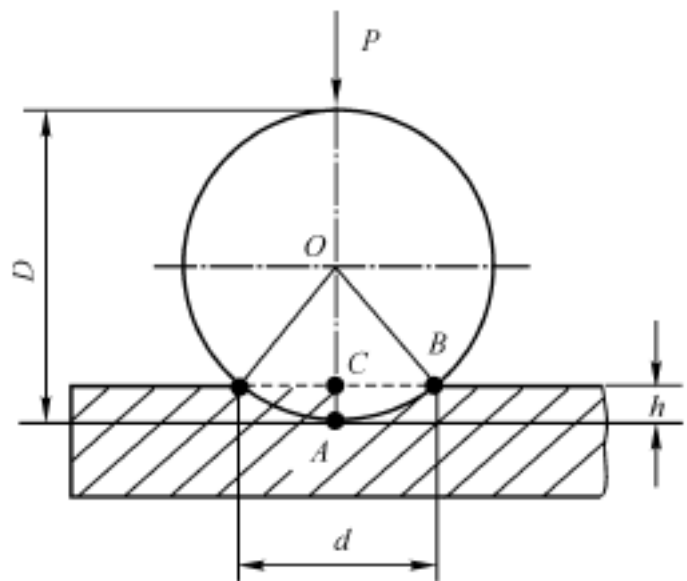


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

体或一定直径的钢球为压头,在规定载荷作用下压入被测试材料表面,通过测定压头压入的深度来确定其硬度值。

图 1-4 表示金刚石圆锥压头的洛氏硬度试验原理。图中 0-0 为圆锥体压头的初始位置; 1-1 为初载荷作用下的压头压入深度为  $h_1$  时的位置; 2-2 为总载荷(初载荷 + 主载荷)作用下压头压入深度为  $h_2$  时的位置;  $h_3$  为卸除主载荷后,由于弹性变形恢复,压头提高时的位置。这时,压头实际压入试样的深度为  $h_s$ 。故由于主载荷所引起的塑性变形而使压头压入深度为  $h = h_2 - h_3$ , 并以此来衡量被测试材料的硬度。显然,  $h$  愈大时,被测试材料的硬度愈低;反之,则愈高。为了照顾习惯上数值愈大,硬度愈高的概念,故采用一个常数  $K$  减去  $h$  来表示硬度大小,并规定每 0.002 mm 的压痕深度为一个硬度单位,由此获得的硬度值称为洛氏硬度值,用符号 HR 来表示。

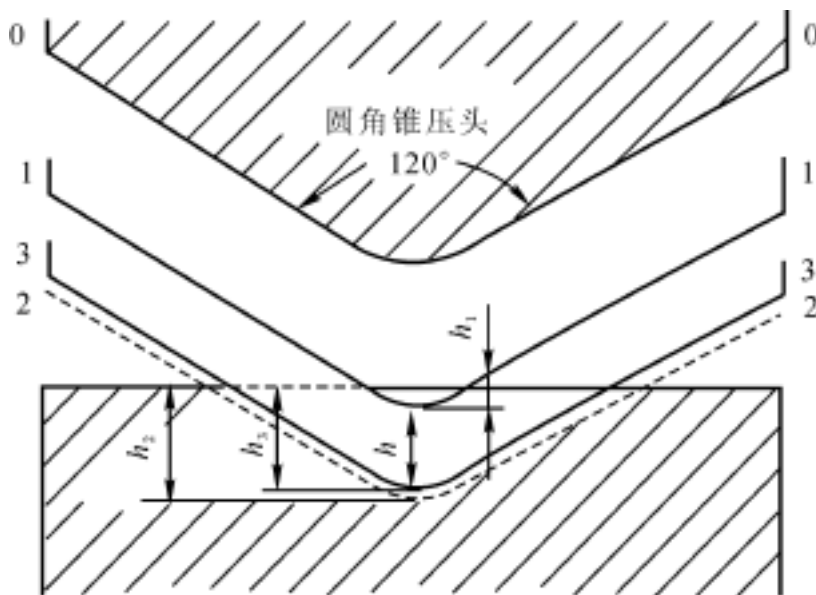


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

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

式中  $K$  为常数,用金刚石圆锥体作压头时  $K = 0.2 \text{ mm}$ ;用钢球作压头时  $K = 0.26 \text{ mm}$ 。由此得出的洛氏硬度值 HR 为一无名数,在试验时一般均由硬度计的指示器上直接读出。

为了能用同一硬度计测定从极软到极硬材料的硬度,采用了由不同的压头和载荷组合成 15 种不同的洛氏硬度标尺。其中常用 HRA, HRB, HRC 三种标尺,如:62 HRC, 70 HRA 等。表 1-1 为这三种常用标尺的试验条件和应用举例。

表 1-1 常用的三种洛氏硬度试验规范

符号	压头	载荷 / (N)	硬度值有效范围	使用范围
HRA	金刚石圆锥	600	> 70	适用于测量硬质合金、表面淬火层或渗碳层
HRB	(1/16) 钢球	980	25 ~ 100 (相当于 60 ~ 230 HBS)	适用于测量有色金属、退火、正火钢等
HRC	金刚石圆锥 120°	1 470	20 ~ 67 (相当于 230 ~ 700 HBS)	适用于调质钢、淬火钢等

洛氏硬度试验法的优点是操作迅速简便,由于压痕较小,故可在工件表面或较薄的材料上进行试验。同时,采用不同标尺,可测出从极软到极硬材料的硬度。其缺点是因压痕较小,对组织比较粗大且不均匀的材料,测得的结果不够准确。

### 3. 维氏硬度

维氏硬度的试验原理基本上同于布氏硬度试验法。它是用一个相对面间夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体压头,在规定载荷  $P$  作用下压入被测试材料表面,保持一定时间后卸除载荷。然后再测量压痕投影的两对角线的平均长度  $d$ ,进而计算出压痕的表面积  $F$ ,以压痕面积上平均压力( $P/F$ )作为被测材料的硬度值,称为维氏硬度,记作 HV。

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

维氏硬度单位为  $N/mm^2$ ,但通常不标。如:800 HV。

维氏硬度试验法的优点:因试验时所加载荷小,压入深度浅,故适于测试零件表面淬硬层及化学热处理的表面层(如渗碳层,渗氮层等);同时维氏硬度是一个连续一致的标尺,试验时载荷可以任意选择,而不影响其硬度值的大小,因此可以测定从极软到极硬的各种材料的硬度值。

### 4. 显微硬度

显微硬度试验原理与维氏硬度完全相同,仅是所加载荷比低载荷维氏硬度还要小得多,通常所加载荷小于 200 g,所得的压痕仅有几个微米到几十个微米( $\mu m$ ),因此,显微硬度是用于测试合金显微组织中的不同相、加工硬化层、镀层、金属箔等的硬度。

显微硬度值用 HM 表示。实际上显微硬度值和维氏硬度值完全相同,也可用 HV 表示。

## 三、疲劳

### (一) 疲劳的基本概念

许多机械零件如各种发动机曲轴、机床主轴、齿轮、弹簧、各种滚动轴承等都是在交变载荷下工作的,所谓交变载荷是指载荷大小、方向随时间发生周期性变化的载荷。零件在这种交变载荷下经过一定的时间发生的断裂现象,称为疲劳破坏。疲劳断裂与静载荷作用下的断裂不同,无论是脆性材料还是塑性材料,疲劳断裂都是突然发生的脆性断裂,而且往往工作应力低于其屈服强度,故具有很大的危险性。

产生疲劳断裂的原因一般认为是由于在零件应力集中的部位或材料本身强度较低的部位,如原有裂纹、软点、脱碳、夹杂、刀痕等缺陷,在交变应力的作用下产生了疲劳裂纹,随着应力循环周次的增加,疲劳裂纹不断扩展,使零件承受载荷的有效面积不断减小,当减小到不能承受外加载荷的作用时,零件即发生突然断裂。因此,疲劳断口是由以裂纹源(疲劳源)为中心逐渐向内扩展的若干弧线的光亮区和最后断裂的粗糙区(结晶状或纤维状)所组成的,如图 1-5 所示。

### (二) 疲劳抗力指标

大量试验证明,材料所受的交变或重复应力与断裂前循环周次  $N$  之间有如图 1-6 所示的曲线关系,该曲线称为  $\sigma-N$  曲线。由  $\sigma-N$  曲线可以测定材料的疲劳抗力指标。

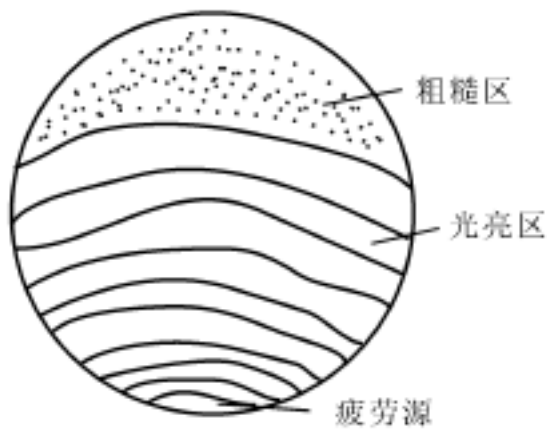


图 1-5 疲劳断口示意图

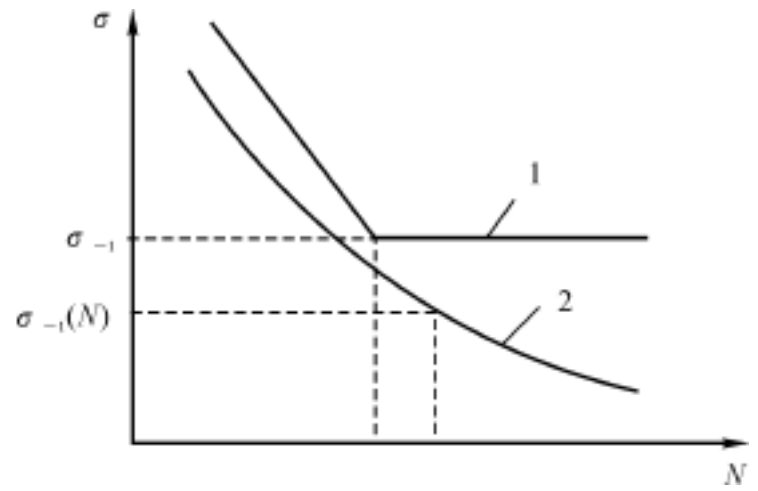


图 1-6 疲劳曲线示意图

### 1. 疲劳极限

一般钢铁材料的  $\sigma - N$  曲线属于图 1-6 中曲线 1 的形式,其特征是当循环应力小于某一数值时循环周次可以达到很大甚至无限大而试样仍不发生疲劳断裂,这就是试样不发生疲劳断裂的最大循环应力,该应力值称为疲劳极限,并用  $\sigma_{-1}$  表示光滑试样的对称弯曲疲劳极限。试验中,一般规定经  $10^7$  循环周次而不断裂的最大应力为疲劳极限,故可以用  $N = 10^7$  为基数来确定一般钢铁材料的疲劳极限。

### 2. 条件疲劳强度

一般有色金属、高强度钢及腐蚀介质作用下的钢铁材料的  $\sigma - N$  曲线属于图 1-6 中曲线 2 的形式,其特征是所受应力随着循环周次  $N$  的增加而不断降低,不存在曲线 1 所示的水平线段。这类材料只能以断裂前循环周次为  $N$  时所能承受的最大应力来表示,该应力值为疲劳寿命为  $N$  时的疲劳强度,称为“条件疲劳强度”。 $N$  的数值可根据使用目的及需要来确定,可以用  $N = 5 \times (10^7 \sim 10^8)$  为基数来确定其条件疲劳强度。

### (三) 提高疲劳抗力的途径

零件的疲劳抗力除与选用材料的本性有关外,还可以通过以下途径来提高其疲劳抗力。改善零件的结构形状以避免应力集中;提高零件表面加工光洁度;尽可能减少各种热处理缺陷(如脱碳、氧化、淬火裂纹等);采用表面强化处理,如化学热处理、表面淬火、表面喷丸和表面滚压等强化处理,使零件表面产生残余压应力,从而能显著提高零件的疲劳抗力。

## 四、冲击韧性及其测定

以很大速度作用于机件上的载荷称为冲击载荷。许多机器零件和工具在工作过程中,往往受到冲击载荷的作用,如汽车发动机的活塞销与连杆、变速箱中的轴及齿轮、锻锤的锤杆等。由于冲击载荷的加载速度高,作用时间短,使材料在受冲击时应力分布与变形很不均匀,脆化倾向性增大。所以对承受冲击载荷零件的性能要求,除要求具有足够的静载荷强度外,还必须要求材料具有足够抵抗冲击载荷的能力。

为了评定材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力,需进行一次冲击试验。一次冲击试验是一种动载荷的试验。下面介绍应用最普遍的一次冲击弯曲试验。

### 1. 冲击试验原理

一次冲击弯曲试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的。试验时将带有缺口的试样放在

试验机两支座上(图 1-7(a)),将质量为  $G$  的摆锤抬到  $H$  高度(图 1-7(b)),使摆锤具有位能  $GHg$  ( $g$  为重力加速度)。然后让摆锤由此高度下落将试样冲断,并向另一方向升高到  $h$  的高度,这时摆锤具有的位能为  $Ghg$ 。因而冲击试样消耗的能量(即冲击功  $A_K$ ) 为

$$A_K = G(H - h)g$$

在试验时,冲击功  $A_K$  值可以从试验机的刻度盘上直接读得。

冲击韧性就是将冲击功  $A_K$  除以试样断口处的横截面积,即

$$\alpha_K = \frac{A_K}{F}$$

式中  $\alpha_K$  —— 冲击韧性值,一般  $J/cm^2$  为单位;

$A_K$  —— 冲击功(J 即  $N \cdot m$ );

$F$  —— 试样断口处的横截面积( $cm^2$ )。

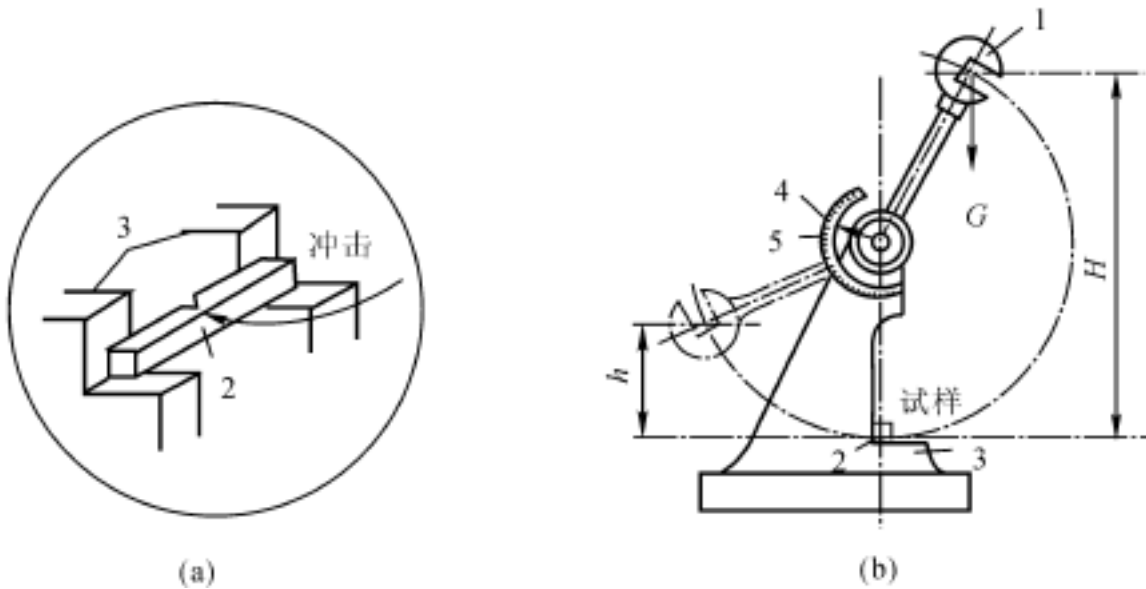


图 1-7 冲击试验

冲击功  $A_K$  或冲击韧性  $\alpha_K$  代表了在指定温度下,材料在缺口和冲击载荷共同作用下脆化的趋势及其程度,是一个对成分、组织、结构极敏感的参数。一般把冲击韧性值  $\alpha_K$  低的材料称为脆性材料, $\alpha_K$  值高的材料称为韧性材料。脆性材料在断裂前无明显的塑性变形,断口较平整,呈结晶状或瓷状,有金属光泽;韧性材料在断裂前有明显的塑性变形,断口呈纤维状,无光泽。

为了使试验结果能相互比较,必须使试样标准化。在特殊情况下,也可采用某些非标准试样。但需要注意,不同类型试样所得的冲击韧性值不能相互比较和换算。

## 2. 温度对冲击韧性值的影响

金属材料的冲击韧性值除了与其成分、组织、试样的形状、尺寸与表面质量有关外,冲击速度与温度对冲击韧性值也有影响,尤其是温度对冲击韧性值的影响具有更重要的意义。

实践证明,有些材料在室温时并不显示脆性,而在低温下则可能发生脆断,这一现象称为冷脆现象。表现为冲击韧性值随温度的降低而减小,当试验温度降低到某一温度范围时,其冲击韧性值急剧降低,试样的断口由韧性断口过渡为脆性断口。因此,这个温度范围称为冷脆转变温度范围。在这个温度范围内,通常以试样断口表面上出现 50% 脆性断口特征时的温度作为冷脆转变温度。

冷脆转变温度的高低是材料质量指标之一,冷脆转变温度越低,材料的低温冲击性能就越