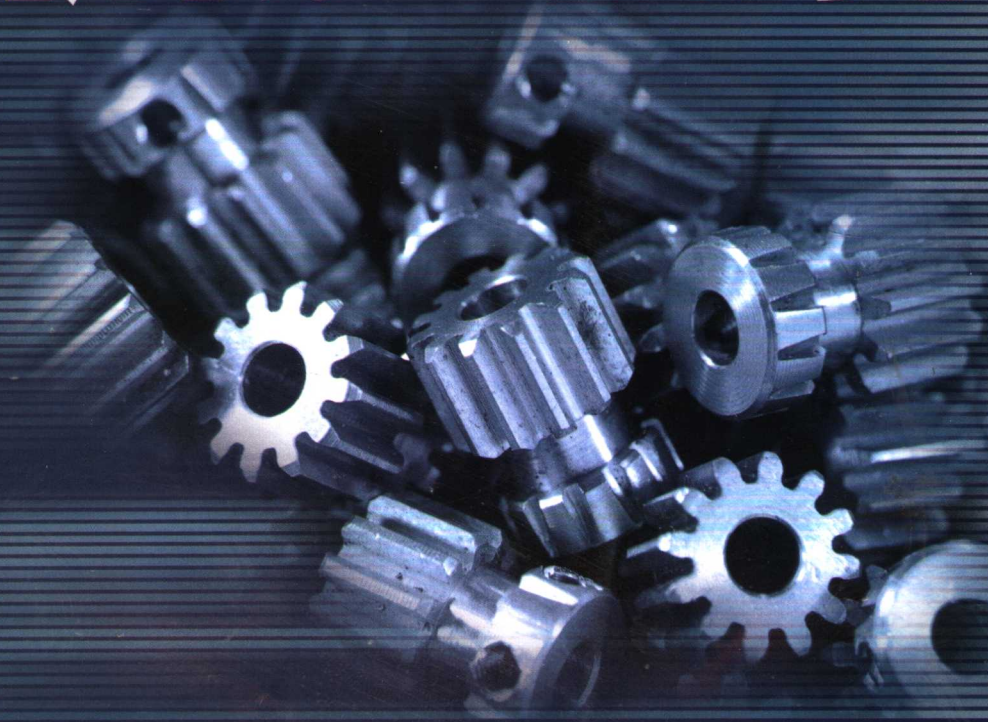





高职高专“十一五”规划教材

机电类

机械工程材料



朱怀忠 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以理论“必需、够用”的原则编写,编写内容以掌握概念、强化应用为教学重点,主要讲解了金属材料的性能、金属的晶体结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、铁碳合金相图、钢的热处理、碳素钢(非合金钢)、合金钢、铸铁、有色金属及硬质合金、非金属材料与复合材料、机械零件的选材及工艺路线分析、铸造、金属压力加工和焊接等内容。

本书是机械、机电、钢铁冶金、模具、汽车、数控、机修、铸造、锻造、焊接等专业系列教材之一,适合作为高职高专院校机械类相关专业教材使用,亦可作为有关工程技术人员、企业管理人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/朱怀忠主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007.8
高职高专“十一五”规划教材. 机电类
ISBN 978-7-5640-1222-9

I. 机… II. 朱… III. 机械制造材料-高等学校:技术学校-教材
IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 128954 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京市业和印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 18

字 数 / 403 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 33.00 元

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

为适应高等职业技术教育的发展，本着理论“必需、够用”的原则，编写了《机械工程材料》教材。本书是机械、机电、钢铁冶金、模具、汽车、数控、机修、铸造、锻造、焊接等专业系列教材之一，亦可作为有关工程技术人员、企业管理人员的参考用书。

本书在编写过程中以培养生产第一线应用技术型人才的专业培养为目标，坚持理论与实际的联系，以掌握概念、强化应用为教学重点。着重培养学生分析问题、解决问题的能力，进一步拓宽学生的专业知识面。考虑到高职院校学生的知识特点及培养目标，在编写内容上力求简单实用，对基本内容和重点内容讲明讲细，对非重点内容只作简单介绍。对实践性较强的内容列举生产中的典型事例，力求学生有针对性的学习。在编写顺序上按照知识点之间的衔接和过渡，循序渐进的原则进行。

本书由朱怀忠担任主编并负责统稿；李巧玉、牛同训、王恩海、刘温聚担任副主编；参与编写的人员还有：刘畅、巩桂洽、王鹏飞、马晓霞、付师星、王秀梅、史向坤、曹丽娜、赵海燕。本书由孔凡杰教授担任主审，他在百忙之中对本书进行了细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。

本书在编写过程中，得到了北京理工大学出版社、山东工业职业学院等有关领导和老师的大力支持，并参考了有关文献资料，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限以及时间仓促，本书中难免存在一些错误，在此恳请读者提出宝贵的意见。

编 者

目 录

绪论	1	4.2 二元合金相图	44
0.1 机械工程材料	1	4.3 铁碳合金的基本相与基本组织	47
0.2 钢铁材料的成形工艺	2	4.4 Fe-Fe ₃ C 相图分析	49
0.3 本课程基本内容和任务	2	4.5 含碳量对铁碳合金组织与性能的影响	57
第 1 章 金属材料的性能	3	4.6 铁碳合金相图的应用	59
1.1 金属材料的强度和塑性	3	习题	60
1.2 金属材料的硬度	8	第 5 章 钢的热处理	61
1.3 金属材料的韧性	12	5.1 钢在加热时的组织转变	62
1.4 金属的疲劳极限	15	5.2 钢在冷却时的组织转变	64
1.5 金属的物理性能和化学性能	16	5.3 钢的退火和正火	70
1.6 金属的工艺性能	17	5.4 钢的淬火	75
习题	18	5.5 钢的回火	81
第 2 章 金属的晶体结构与结晶	19	5.6 钢的表面热处理	85
2.1 金属的晶体结构	19	5.7 其他热处理方法简介	91
2.2 金属的同素异构转变	22	5.8 热处理工艺的应用	93
2.3 实际金属的晶体结构及其对性能的影响	23	习题	98
2.4 金属的结晶	25	第 6 章 碳素钢	100
习题	28	6.1 常存杂质元素对钢性能的影响	100
第 3 章 金属的塑性变形与再结晶	29	6.2 碳钢的分类、编号、性能和用途	101
3.1 金属的塑性变形	29	6.3 钢中非金属夹杂物和气体	107
3.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	33	6.4 碳素钢钢锭的组织 and 缺陷	109
3.3 冷塑性变形金属在加热时组织和性能的变化	35	习题	112
3.4 热塑性变形对金属组织和性能的影响	38	第 7 章 合金钢	113
习题	40	7.1 合金钢的分类	113
第 4 章 铁碳合金相图	42	7.2 合金元素在钢中的作用	113
4.1 固态合金的相结构	42	7.3 合金结构钢	118
		7.4 合金工具钢	127
		7.5 特殊性能钢	134
		7.6 金属材料的检验	136
		习题	141

第 8 章 铸铁	142	11.1 概述	194
8.1 概述	142	11.2 合金的铸造性能	195
8.2 灰铸铁	145	11.3 砂型铸造	199
8.3 球墨铸铁	148	11.4 铸造工艺设计	204
8.4 蠕墨铸铁	150	11.5 特种铸造	216
8.5 可锻铸铁	152	习题	224
8.6 合金铸铁	153	第 12 章 金属压力加工	225
习题	155	12.1 概述	225
第 9 章 有色金属及硬质合金	156	12.2 锻造加热和冷却	226
9.1 铝及其合金	156	12.3 自由锻	229
9.2 铜及其合金	159	12.4 模锻	237
9.3 滑动轴承合金	163	12.5 板料冲压	241
9.4 硬质合金	165	12.6 其他压力加工方法	248
习题	167	习题	250
第 10 章 非金属材料与复合材料	168	第 13 章 焊接	252
10.1 高分子材料	168	13.1 焊接方法的本质及分类	252
10.2 陶瓷	177	13.2 气焊及气割	253
10.3 复合材料	179	13.3 焊接电弧和弧焊电源	256
10.4 纳米材料	183	13.4 手工电弧焊	259
10.5 超导材料	186	13.5 埋弧焊	264
10.6 贮氢合金	188	13.6 气体保护电弧焊	265
10.7 形状记忆合金	190	13.7 电阻焊	268
10.8 非晶态合金	192	13.8 钎焊	270
习题	193	13.9 常用金属材料的焊接	272
第 11 章 铸造	194	13.10 焊接接头及焊接结构基础	275
		习题	279

绪 论

机械工程材料课程包括常用的机械工程材料及其毛坯零件热成形工艺两大部分内容。机械工程材料是构成机械设备的基础，也是各种机械加工的对象，它包括金属材料、非金属材料 and 复合材料等。材料热成形工艺包括各种材料的铸造、锻造、焊接等工艺。

0.1 机械工程材料

0.1.1 材料的简要发展过程

材料是人类文明生活的物质基础。它可以直接反映出人类社会的文明程度。综观人类利用材料的历史，可以清楚地看到每一次重要新材料的发现和应⤵用，都会引起生产技术的革命，并大大加速社会文明发展的进程。在人类发展的历史长河中就有石器时代、青铜器时代、铁器时代等以材料命名的时代。也正是由于材料的发展和使用，才使得人类社会不断发展到现代科学技术高度发达的今天。

在远古时代，人类的祖先是⤵以石器为主要工具的。他们在不断改进石器和寻找石料的过程中发现了天然铜块和铜矿石，并在用火烧制陶器的生产过程中发现了冶铜术，后来又发现把锡矿石加到红铜里一起熔炼，制成的物品更加坚韧耐磨，这就是青铜。公元前 5000 年人类进入青铜器时代。公元前 1200 年左右人类进入铁器时代，开始使用铸铁，后来制钢工业迅速发展，成为 18 世纪产业革命的重要内容和物质基础。所以也有人将 18 至 19 世纪称为“钢铁时代”。进入 20 世纪后半叶，新材料研制日新月异，出现了所谓高分子材料、半导体材料、先进陶瓷材料、复合材料、纳米材料、高温超导材料、激光材料、磁性材料、电子材料、形状记忆材料和生物材料等一系列新的材料。材料的发展进入了丰富多彩的新时代。材料科学技术的发展和应用，促进了机械制造业的飞跃。

0.1.2 工程材料的生产过程

炼铁：高炉炼铁的主要原料是铁矿石、焦炭和石灰石，主要设备是高炉。把配制好的炉料装入高炉内，同时向炉内吹高温热风，炉料在高温作用下发生反应，进入冶炼过程，铁矿石中的铁不断被还原出来，成为生铁，并以液体状态滴入炉缸。而炉渣则从排渣口排除。

炼钢：炼钢方法是以生铁为主要原料，首先把生铁熔化成液体，将它倾入高温的炼钢炉中，利用氧化作用将碳及其他元素去除到规定范围之内，就得到了钢。现代炼钢方法主要有转炉、电炉和平炉等。炼钢炉的炉衬根据耐火材料的不同，分为碱性炉衬和酸性炉衬两类，其吹氧方式可分为顶吹、底吹和侧吹。

高分子材料是由低分子化合物组成，是大量低分子的聚合物，简称高聚物。低分子有

机化合物经过加聚或缩聚反应,由单体结合而成高聚物,成为高分子化合物。例如,合成树脂的生产工艺流程包括:原料的制备、催化剂的配制、单体的聚合、分离、回收精制、后处理等。根据聚合方式的不同,合成树脂的生产工艺流程可分为本体聚合流程、悬浮聚合流程、乳液聚合流程、溶液聚合流程和气相聚合流程等。

所谓陶瓷是指以天然硅酸盐或人工合成化合物为原料,经过制粉、配料、成形、高温烧结而制成的无机非金属材料。陶瓷材料生产的一般工艺流程为:配置好的成分→混合→预烧合成→粉碎→造粒→成形→烧结→冷加工。

粉末冶金材料是用金属粉末或金属与非金属粉末作原料,通过配置、压制成形、烧结和后处理等工艺过程而形成的材料。

随着现代科学技术的快速发展,各种新型材料层出不穷。例如,新型的“生物钢”材料就是应用生物基因技术将蜘蛛丝的基因转接到一种绵羊的体内,然后从绵羊体内挤出的奶中提炼出大量的“蜘蛛丝”,再经过加工制成的网可以拦截美国“F-16”战斗机。

0.2 钢铁材料的成形工艺

把炼好的钢液浇注到锭模中凝固,形成钢锭,这种生产方式称为模铸(目前越来越多的半成品由连铸方式生产)。钢锭脱模后,多数又加热到一定温度,再轧制成棒坯、方坯或板坯等,称为半成品。随后半成品经各种压力加工工序,如热轧、冷轧、锻压、挤压和拉拔等,制成棒、板、钢轨、管材和线材等型材。除上述加工方法以外,还有许多其他加工方法。本书将讲述钢铁材料的铸、锻、焊成形过程。

近年来,机械产品更新换代的速度不断加快,对制造工艺提出了更高更新的要求;新能源、新材料、微电子、计算机等新技术的不断引入,为新型加工方法的出现提供了技术储备。因此,机械制造新型成形加工方法不断出现和发展。如计算机数值模拟技术和计算机辅助工艺设计(CAPP)在铸造、锻压、焊接等传统工艺中开始得到广泛应用。

0.3 本课程基本内容和任务

通过本课程的学习,使学生获得常用工程材料及其成形工艺的基础知识,建立对材料成分、组织结构、性能、加工使用相互之间关系与规律的认识,掌握常用工程材料的种类、成分、组织、性能、改性方法和用途,具有合理选材和改变材料性能方法的初步能力;具有综合运用工艺知识、选择毛坯种类、成形方法及工艺分析的初步能力,为学习其他有关课程和从事工业生产、技术及管理工作奠定必要的基础。

本课程具有知识面宽、综合性强、实用性强等特点,是一门专业基础课。学习中要注意归纳、总结,要注意理论联系实际,通过实验、实训和生产实践,开拓思路,提高水平和能力。

第 1 章 金属材料的性能

金属材料在工业、农业、国防及科学技术等各个领域得到了广泛应用，它是加快我国社会主义现代化步伐的重要物质基础。

金属材料之所以获得广泛的应用，主要是因为它具备很多可贵的性能。其性能包含使用性能和工艺性能两方面。使用性能是指金属材料在使用条件下所表现出来的性能，它包括物理性能、化学性能和力学性能等。工艺性能是指金属在制造加工过程中反映出来的各种性能，它包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能以及热处理性能等。优良的使用性能可满足生产和生活上的各种需要；优良的工艺性能则可使金属材料易于适用各种加工方法，制成各种形状、尺寸的零件或工具。此外，金属材料还可以通过不同分配制、不同加工工艺及热处理制度来改变其组织和性能，从而进一步扩大其应用范围。

1.1 金属材料的强度和塑性

金属材料在加工和使用过程中都要受到外力的作用，这种外力称为载荷。当载荷在某一极限范围内时，材料本身一般不发生明显的变形或断裂，说明金属材料对外力具有一定的抵抗能力。但是，当外力超过某一极限时，金属材料就会发生变形，甚至断裂。我们把金属材料在外力作用下所表现出来的抵抗能力称为金属的“力学性能”。常用的力学性能指标有：强度、硬度、塑性、韧性及疲劳强度等。

1.1.1 拉伸试验

材料的强度和塑性可由拉伸试验测定。预先将金属材料按 GB228—87 规定制成一定形状和尺寸的试样，常用的试样断面为圆形，称为圆形试样，如图 1-1 所示。图中 d_0 称为试样的直径， L_0 称为标距长度。所谓标距长度，是指试样计算时的有效长度。根据国家标准的规定，拉伸试样有长试样和短试样两种，长试样为 $L_0=10d_0$ ，短试样为 $L_0=5d_0$ 。在生产检验中采用的 d_0 为 10mm。

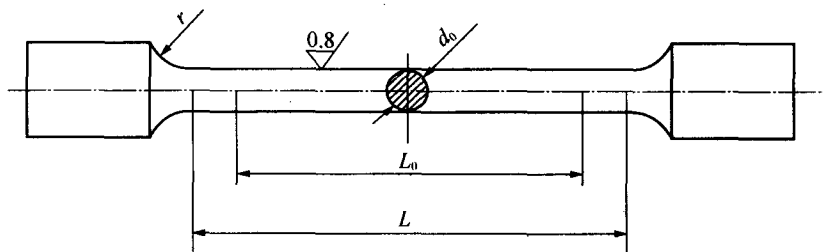


图 1-1 圆形拉伸试样

拉伸试验的过程通常是将加工好的金属试样装夹在拉伸试验机上，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。根据测得的数据可得出强度和塑性指标。

图 1-2 所示为低碳钢的拉伸曲线，此曲线明显地表现出下面几个变形阶段。

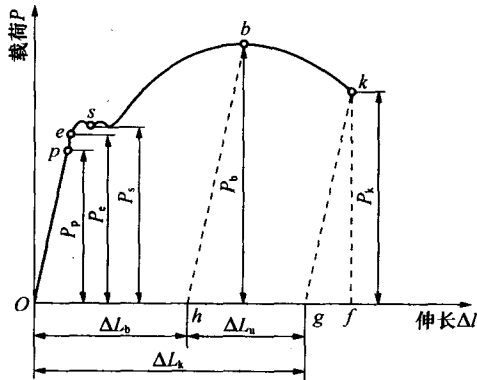


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

1. Oe ——弹性变形阶段

试样变形完全是弹性的，此时如果卸载，试样的变形将消失。这种随着载荷的去除而消失的变形称为弹性变形。

2. es ——屈服阶段

当载荷增加到 P_s 时，图上出现平台或锯齿状。这种载荷变化不大而变形显著增加的现象称为屈服现象。

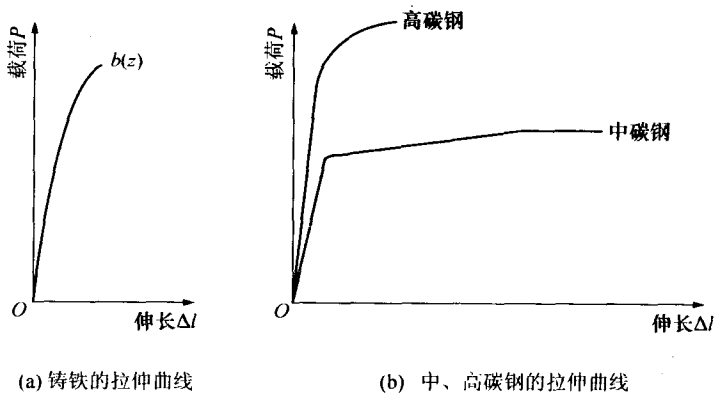
3. sb ——强化阶段

在屈服阶段以后，欲使试样继续伸长，必须加载。随着塑性变形的增加，试样变形抗力也逐渐增加，这种现象称为形变强化。

4. bk ——缩颈阶段

此阶段试样的直径发生局部收缩，称为“缩颈”。在 k 点处试样已被拉断。

工程上使用的金属材料，多数没有明显的屈服现象。有些脆性材料，不仅没有屈服现象，而且也不产生“缩颈”，如铸铁、高碳钢等。图 1-3(a)为铸铁的拉伸曲线，图 1-3(b)为中碳钢、高碳钢的拉伸曲线。



(a) 铸铁的拉伸曲线

(b) 中、高碳钢的拉伸曲线

图 1-3 铸铁与中、高碳钢的拉伸曲线

1.1.2 强度

强度是材料在静载荷作用下抵抗破坏的能力。根据载荷作用方式不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。其中以拉伸试验所得的强度指标应用最为广泛。在拉伸试验中可测得抗拉强度和屈服强度等指标。

1. 抗拉强度

材料在拉断前所能承受的最大应力值称为“抗拉强度”,用符号 σ_b 表示,其计算公式如下:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{S_0}$$

式中 σ_b —— 抗拉强度,单位:MPa;

P_b —— 试样拉断前承受的最大载荷,单位:N;

S_0 —— 试样原始横截面积,单位: mm^2 。

零件在工作中所承受的应力,不允许超过抗拉强度,否则会产生断裂。 σ_b 是机械零件设计和选材的重要依据。

2. 屈服强度

在拉伸试验中,屈服阶段所对应的最低应力值称为“屈服强度”,用符号 σ_s 表示。其计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{S_0}$$

式中 σ_s —— 屈服点,单位:MPa;

P_s —— 出现屈服现象时的最低载荷,单位:N;

S_0 —— 试样原始横截面积,单位: mm^2 。

对于无明显屈服现象的金属材料,国家标准规定,把试样产生的塑性变形量为原标距长度的0.2%时所对应的应力值作为该材料的屈服点,用符号 $\sigma_{0.2}$ 表示,称为“条件屈服强度”。

屈服强度也是材料强度的重要指标。机械零件在工作时如受力过大,材料将达到屈服阶段,因产生过量的塑性变形而失效, σ_s ($\sigma_{0.2}$)也是机械零件设计和选材的重要依据。

金属材料的屈服强度和抗拉强度的比值叫做屈强比。屈强比越小,构件的安全、可靠性越高,但材料强度的有效利用率越低;屈强比过大,说明材料的屈服强度接近抗拉强度,虽然材料强度的有效利用率高,但使用时容易发生突然断裂,安全、可靠性降低。因此选材时应选择适当的屈强比,以保证工件的安全性。如轴类零件一般选0.65 ~ 0.75较为理想。

1.1.3 塑性

金属材料在外力作用下产生永久变形而不被破坏的能力称为“塑性”。塑性指标也是

由拉伸试验测得的。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率

试样在拉断后，其标距部分内所增加的长度与原标距长度的百分比称为伸长率。其计算公式如下：

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

式中 l_0 ——试样原标距长度，单位：mm；

l_1 ——拉断后试样标距长度，单位：mm；

δ ——伸长率，单位：%。

标准试样有两种，长、短试样的伸长率分别用 δ_{10} 和 δ_5 表示，通常 δ_{10} 直接写成 δ 即可。同一材料的试样长短不同，测得的伸长率是不同的，即 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

2. 断面收缩率

试样拉断后缩颈处横截面积的缩减量与原横截面积的百分比称为断面收缩率，用符号 ψ 表示。其计算公式如下：

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中 ψ ——断面收缩率，单位：%；

S_0 ——试样原始横截面积，单位： mm^2 ；

S_1 ——试样拉断后缩颈处的横截面积，单位： mm^2 。

一般来说，金属的伸长率和断面收缩率越大，其塑性越好。塑性好的金属，可以采用多种压力加工方法进行加工，如轧制、锻造、冲压等。塑性差的金属一般不能进行塑性变形。例如工业纯铁的 δ 可以达到 50%， ψ 可以达到 80%，所以可以拉制细丝、轧制薄板等；而铸铁的 δ 几乎为零，所以不能进行塑性变形加工，只能采用铸造生产。

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，长试样的伸长率达 5%，或断面收缩率达 10% 的材料，即可满足绝大多数零件的要求。

拉伸试验是材料力学性能试验中常用的一种试验方法。它能够反映材料的基本属性，具有简单、快速和可靠的特点。

在工程结构和零部件设计时，只有知道材料的强度性能和变形性能等才能确定结构形式和零件尺寸；在材料的应用研究或研制过程中，最后决定取舍的判据往往就是材料拉伸性能指标。拉伸试验是材料出厂检验和用户验收都要进行的一种试验，有了拉伸性能指标，还可以根据经验关系判断该材料的硬度、疲劳极限及断裂韧性等其他力学性能指标。总之，拉伸试验在机械工程设计、材料生产研究和工艺选择等工作中具有很大的应用价值。

【例题 1.1】 某钢厂生产一批 40 钢，按国标规定，其力学性能指标不应低于下列数值： $\sigma_s=340 \text{ Mpa}$ 、 $\sigma_b=540 \text{ Mpa}$ 、 $\delta_5=19\%$ 、 $\psi=45\%$ 。现制取 $d_0=10 \text{ mm}$ 的短试样，通过拉伸试验测得 $P_s=28.26 \text{ kN}$ 、 $P_b=45.53 \text{ kN}$ ， $l_1=60.5 \text{ mm}$ 、 $d_1=7 \text{ mm}$ 。试判断这批钢材是否合

格。

解：先列出已知条件：

$$d_0=10\text{mm}, S_0=\frac{1}{4}\pi d_0^2=78.5\text{mm}^2, l_0=50\text{mm}, l_1=60.5\text{mm}, d_1=7\text{mm}$$

$$S_1=\frac{1}{4}\pi d_1^2=38.5\text{mm}^2, P_s=28.26\text{kN}=28260\text{N}, P_b=45.53\text{kN}=45530\text{N}$$

计算：

$$\sigma_s = \frac{P_s}{S_0} = \frac{28260}{78.5} = 360\text{MPa} > 340\text{MPa}$$

$$\sigma_b = \frac{P_b}{S_0} = \frac{45530}{78.5} = 580\text{MPa} > 540\text{MPa}$$

$$\delta_s = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{60.5 - 50}{50} \times 100\% = 21\% > 19\%$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% = \frac{78.5 - 38.5}{78.5} \times 100\% = 51\% > 45\%$$

答：此批 40 钢的四项力学性能指标均大于标准规定值，合格。

1.1.4 金属材料刚度指标

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度。材料刚度的大小，通常用弹性模量 E 来评定。

材料在弹性范围内，应力 σ 与应变 ε 的关系符合虎克定律，即 $\sigma = E\varepsilon$ 。由公式中可以看出，材料的弹性模量 E 越大，材料的刚度越大，则弹性变形越难进行。因此在设计机械零件时，要求刚度大的零件，应选用具有高弹性模量的材料。而钢铁材料的弹性模量较大，所以在机械工程等领域通常选择钢铁材料。例如镗床的镗杆应具有足够的刚度，如果刚度不足，当进刀量大时镗杆的弹性变形就会越大，镗出的孔就会偏小且尺寸不准，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)，应选择低弹性模量和极高的弹性极限的材料制造，如铍青铜、磷青铜等。

生产中一般不检验弹性模量 E 的大小，基本金属一经确定，其弹性模量值就基本上定了。材料的弹性模量可以查有关手册得到，见表 1-1。

表 1-1 常见金属的弹性模量

金 属	弹性模量 E/MPa
铁	214000
镍	210000
钛	118010
铝	72000
铜	132400
镁	45000

1.2 金属材料的硬度

硬度是材料抵抗局部变形、压痕或划痕的能力。

硬度也是金属材料力学性能的一个重要指标。在金属材料制成的半成品或成品的质量检验中，硬度是标志产品质量的重要依据之一。

硬度值又可间接地反映出金属材料在强度、化学成分、金相组织和热处理工艺上的差异，而与拉伸试验相比，硬度试验简便易行，因而硬度试验应用十分广泛。

常用的硬度试验方法有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和肖氏硬度 4 种。

1.2.1 布氏硬度

1. 布氏硬度试验法的原理

原理如图 1-4 所示。它是用规定的载荷，将一个直径为 D 的淬硬钢球或硬质合金球压入被测试件表面并停留一定时间，使塑性变形停留后，再卸除载荷。用读数显微镜测出试样表面上的压痕直径 d ，然后计算布氏硬度值。

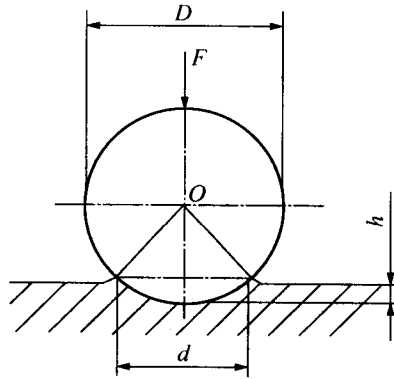


图 1-4 布氏硬度试验原理

计算公式如下：

$$\text{HBS(W)} = \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 HBS(W)——用淬火钢球(硬质合金球)试验时的布氏硬度值；

F ——试验力，单位：N；

S ——球面压痕表面积，单位： mm^2 ；

D ——压头球体直径，单位：mm；

d ——压痕直径，单位：mm。

在实际应用中，布氏硬度值无需计算，直接查表即可得出数据。

2. 布氏硬度的表示方法

在布氏硬度的表示方法中，符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值，符号后面依次用相应数值注明压头球体直径(mm)、试验力(kg)、试验力保持时间(s)(10s~15s 不标注)。例如，170HBS10/1000/30 表示直径 10mm 的钢球在 980N(1000kg)的试验力作用下，保持 30s 时测得的布氏硬度值为 170。

淬火钢球用于测定布氏硬度小于 450 的金属材料，其硬度值符号为 HBS；布氏硬度在 450~650 之间的材料，压头用硬质合金球，其硬度值符号为 HBW。布氏硬度适宜测量灰铸铁、有色金属及退火、正火后的钢材。

在进行布氏硬度试验时，应根据测试金属材料的种类、性质和试样厚度，选用不同大小的球体直径、施加载荷和载荷保持时间。具体选择方法见表 1-2。

表 1-2 布氏硬度试验规范

金属种类	布氏硬度值范围 HBS (HBW)	试样厚度 /mm	$K=0.102F/D^2$	球直径 D /mm	试验力 /kN (kgf)	试验力保持时间 /s
黑色金属	>140	6~3	30	10.0	29.42(3000)	10~15
		4~2		5.0	7.355(750)	
		<2		2.5	1.839(187.5)	
有色金属	<140	>6	10	10.0	9.807(1000)	10~15
		6~3		5.0	2.452(250)	
		6~3		5.0	2.452(250)	
有色金属	>130	6~3	30	10.0	29.42(3000)	30
		4~2		5.0	7.355(750)	
		<2		2.5	1.839(187.5)	
	36~130	9~3	10	10.0	9.807(1000)	30
		6~3		5.0	2.452(250)	
	8~35	>6	2.5	10.0	2.452(250)	60

按 GB231—84 规定，载荷的保持时间为：黑色金属 10s~15s，有色金属 30s，布氏硬度值小于 35 时为 60s；当条件允许时，压头应尽量选用 10 mm 球；载荷选择原则为 $P=KD^2$ 。

布氏硬度实验法的优点是：测定的数据准确、稳定。因其采用的试验力大，球体直径大，因而压痕直径也大，能较准确地反映金属材料的平均硬度。其缺点是：压痕较大，不宜测成品或薄片金属的硬度。此外，由于操作较缓慢，对大量逐件检验的产品不适用。在进行高硬度材料试验时，由于球体本身的变形会使测量结果不准确，因此布氏硬度主要用于测定硬度不是很高的材料。但由于布氏硬度与其他力学性能(如抗拉强度)之间存在一定的经验关系，因而得到了广泛的应用。

1.2.2 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广泛的硬度试验方法。

洛氏硬度的测试原理是采用金刚石圆锥体或淬火钢球为压头，选择一定的载荷压入金

属表面，按规定保持时间后卸除试验力，测量压痕深度，计算洛氏硬度值。

图 1-5 是洛氏硬度测试过程示意图。测量时，先加初试验力 F_0 ，压入深度为 h_1 ，然后再加主试验力 F_1 ，在总试验力 (F_1+F_0) 的作用下，压头深入深度为 h_2 。卸除试验力，由于金属弹性变形的恢复，使压头回升到 h_3 的位置。其值按下列公式计算：

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

式中 HR——洛氏硬度值；

K——常数。用金刚石为压头时选 0.2；用钢球为压头时选 0.26。

h——压痕深度，单位：mm。

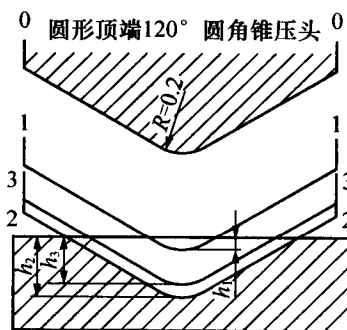


图 1-5 洛氏硬度试验原理

在实际应用中，洛氏硬度值无需计算，试验时硬度值直接从硬度计的表盘上读出。

根据金属材料的软硬程度，可选用不同的压头和载荷配合使用，测得的硬度值分别用不同的符号表示。国家标准规定有 15 种，下面将 3 种常用的洛氏硬度符号和试验条件列于表 1-3。

表 1-3 常用洛氏硬度试验规范

硬度符号	压头类型	总试验力 F_B /kgf(N)	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120° 金刚石圆锥体	60(588.4)	60~88	硬质合金、表面淬火、高硬度较薄件等
HRB	Φ1.588mm 淬火钢球	100(980.7)	20~100	有色金属、退火、正火钢等
HRC	120° 金刚石圆锥体	150(1471.1)	20~70	淬火钢、调质钢等

以上 3 种常用洛氏硬度值中，以 HRC 应用最广，一般经过淬火处理的钢零件或工具都用它。各种不同标尺的洛氏硬度值不能直接比较，但可用试验测定的换算表相互比较。

洛氏硬度值表示方法如下：符号 HR 前面的数字表示硬度值，HR 后面的字母表示不同洛氏硬度的标尺。例如 45HRC 表示用 C 标尺测量的洛氏硬度值为 45。

洛氏硬度实验法的优点是：操作简单迅速，能直接从刻度盘上读出硬度值；压痕较小，可以测定成品及较薄工件；测试的硬度值范围大，适于各种硬度的材料。但是，因为

压痕小, 对于内部组织和硬度不均匀的材料, 硬度值波动较大, 一般同一试件应测试三点以上, 取平均值。常见工具及钢材的洛氏硬度值见表 1-4。

表 1-4 常用工具和钢材的硬度

名称	一般硬度 (HRC)	名称	一般硬度 (HRC)
切削金属的刀具(如锉刀、钻头、钢车刀等)	60~65	菜刀、剪刀、斧头等的刀口部分	50~55
冷冲模的凸模、凹模	58~62 60~64	扳手、螺丝刀的工作部分、弹簧钢片	43~48
钳工榔头	52~56	钢材(材料供应状态)	大多 130~ 230HB (相当于 20HRC 以下)

1.2.3 维氏硬度

布氏硬度不适于检测较高硬度的材料, 洛氏硬度虽可检测不同硬度的材料, 但不同标尺的硬度值相互不能比较。维氏硬度克服了上述两种硬度试验的缺点, 可用统一标尺来测定从极软到极硬的材料。

维氏硬度的试验原理与布氏硬度试验相似。它是用一个顶角为 136° 的金刚石正四棱锥压头, 在规定载荷作用下, 压入试件表面, 保持一定时间后卸除载荷, 然后根据压痕对角线来确定试件硬度。如图 1-6 所示。

维氏硬度用符号 HV 表示。计算公式如下:

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

式中 HV——维氏硬度;

F ——试验力, 单位: N;

D ——压痕两对脚线长度算术平均数, 单位: mm。

维氏硬度值在实际工作中不用计算, 而是根据压痕对角线长度, 从表中直接查出。维氏硬度试验方法及技术条件可参阅国家标准 GB4340—84。

维氏硬度表示方法与布氏硬度相同。例如 640HV30/20 表示用 30kg(294.2N)试验力, 保持 20s(10s~15s 可省略不标), 测定的维氏硬度值为 640。

维氏硬度的优点是: 可测定从很软到很硬的材料, 且准确性高; 可测较薄材料和各种表面层。缺点是: 操作慢, 且对试件表面质量要求较高, 故不适用于成批生产的常规检验。

1.2.4 肖氏硬度

上述硬度测试都是采用静压入法, 其载荷是静载荷, 而肖氏硬度是一种动载荷试验法。其原理是: 用一定质量和规定形状的金钢石冲头, 从一定的高度自由下落到金属试样

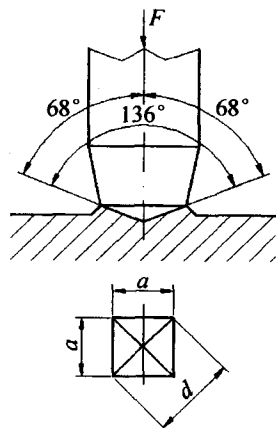


图 1-6 维氏硬度试验原理

的表面，根据冲头回弹的不同高度来衡量金属硬度值的大小。

肖氏硬度计有两种类型：一种是 C 型硬度计，它带有刻度尺，其冲头质量为 2.5g，落下高度 $h_0=254$ mm；另一种是 D 型硬度计，它带有一个圆盘刻度，冲头质量为 36.2g，落下高度 $h_0=19$ mm。

肖氏硬度也是一个无量纲的值。符号用 HSC 和 HSD 表示 C、D 两类，测得的数值写在该符号前面，如 25HSC，则表示 C 型肖氏硬度值为 25。肖氏硬度测量的数值误差较大，主要用于大型件上，如大型钢板、大轧辊等硬度的测量。

1.3 金属材料的韧性

1.3.1 金属材料的冲击韧性

在生产实践中，许多机器零件和工具是在冲击载荷作用下工作的，如活塞销、冲头、锤杆等。以很大速度作用于工件上的载荷叫做冲击载荷。由于冲击载荷的加载冲击力大，被冲击体很容易产生变形和断裂。因此，制造此类零件所用的材料，其性能指标不能单纯用静载荷作用下的指标来衡量，而必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。

金属材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性。材料的冲击韧性是材料塑性和强度的综合表现，与脆性是两个意义上完全相反的概念。材料韧性的好坏用冲击韧性值 α_k 表示。目前，常用摆锤式一次冲击试验来测定金属材料的冲击韧性。

1. 冲击试样

为了使试验结果可以相互比较，必须采用标准试样。按 GB229—84 和 GB2106—80 的规定需将金属材料制成一定形状和尺寸的试样。夏氏 U 型缺口试样(图 1-7 所示)习惯上称为梅氏试样；夏氏 V 型试样(图 1-8 所示)称为夏氏试样。

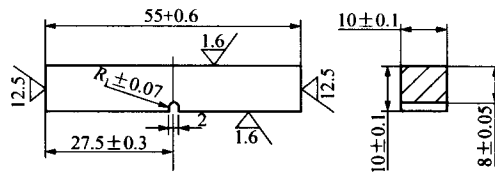


图 1-7 夏氏 U 型缺口试样

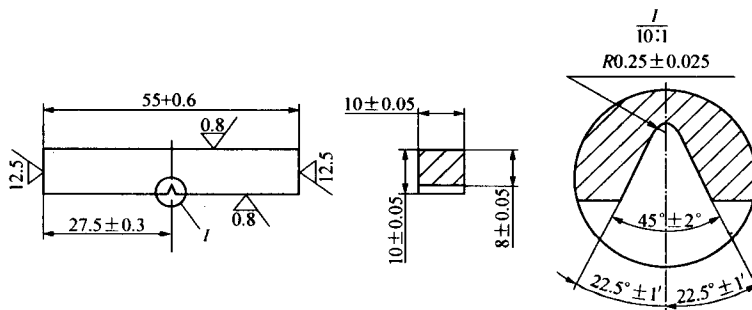


图 1-8 夏氏 V 型缺口试样