



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料及热处理

谷莉 徐宏彤 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料及热处理

谷莉 徐宏彤 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书扼要讲述了金属学、金属材料及热处理方面的基本内容。主要内容有：金属材料的性能、金属的晶体结构与结晶、合金的相结构与相图、金属的塑性变形与再结晶、碳素钢、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、典型零件的选材及工艺路线设计、非金属材料及复合材料共十一章。为便于学生归纳和总结所学知识，各章均安排了一定量的习题。

本书可作为普通高等院校的焊接、交通运输、机械等各专业的教学用书，也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

金属材料及热处理 / 谷莉, 徐宏彤编著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2011. 12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-9281-0

I. ①金… II. ①谷… ②徐… III. ①金属材料—高等学校—教材②热处理—高等学校—教材 IV. ①TG14②TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第265924号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 金属材料及热处理
作 者	谷莉 徐宏彤 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，是根据《教育部关于“十二五”期间普通高等教育教材建设与改革意见》的精神编写的。

本书编写的指导思想是，突出金属材料的性能与成分、组织、结构及加工工艺之间的关系，强调热处理原理、工艺方法及其在生产中的地位和作用。全书以金属的成分、组织、结构、性能、应用为主线，培养学生具有合理选用金属材料、正确制定热处理工艺的能力。通过对常用金属材料的学习，使学生初步具备制定典型零件加工工艺路线的能力。

本书共十一章。第一章介绍金属材料的性能；第二章至第四章分别介绍金属的晶体结构与结晶、合金的相结构与相图、金属的塑性变形与再结晶；第五章介绍碳素钢；第六章介绍钢的热处理；第七章介绍合金钢；第八章介绍铸铁；第九章介绍有色金属及其合金；第十章介绍典型零件的选材及工艺路线设计；第十一章介绍非金属材料及复合材料。为便于学生归纳和总结所学知识，各章均安排了一定量的习题。

本书由谷莉、徐宏彤编著，由于水平有限，书中难免存在疏漏和错误，敬请广大读者批评指正。

编者

2011年6月

目 录

前言

绪论	1
第一章 金属材料的性能	4
第一节 金属的力学性能	4
第二节 金属的物理化学性能	15
第三节 金属的工艺性能	16
思考与练习	17
第二章 金属的晶体结构与结晶	20
第一节 金属的理想晶体结构	20
第二节 金属的实际晶体结构	25
第三节 纯金属的结晶	27
思考与练习	33
第三章 合金的相结构与相图	35
第一节 基本概念	35
第二节 合金的相结构	35
第三节 二元合金相图的建立	39
第四节 二元匀晶相图	41
第五节 二元共晶相图	43
第六节 二元包晶相图	45
第七节 具有共析反应的二元合金相图	48
第八节 合金的性能与相图的关系	49
第九节 铁碳合金相图	50
思考与练习	61
第四章 金属的塑性变形与再结晶	64
第一节 金属的塑性变形	64
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	69
第三节 冷变形金属在加热时的变化	71
第四节 金属的热加工	75

思考与练习	78
第五章 碳素钢	79
第一节 钢中常存杂质元素对钢性能的影响	79
第二节 碳素钢的分类	80
第三节 我国钢铁产品牌号表示方法及原则	80
第四节 碳素钢的牌号、性能和用途	82
思考与练习	88
第六章 钢的热处理	89
第一节 概述	89
第二节 钢在加热时的转变	90
第三节 钢在冷却时的转变	93
第四节 钢的退火与正火	101
第五节 钢的淬火	105
第六节 钢的淬透性	109
第七节 钢的回火	114
第八节 钢的表面淬火与化学热处理	118
第九节 热处理新技术简介	121
思考与练习	123
第七章 合金钢	126
第一节 合金元素在钢中的作用	126
第二节 合金结构钢	131
第三节 合金工具钢	141
第四节 特殊性能钢	148
思考与练习	158
第八章 铸铁	162
第一节 概述	162
第二节 灰口铸铁	165
第三节 可锻铸铁	168
第四节 球墨铸铁	170
第五节 特殊性能铸铁	174
思考与练习	176
第九章 有色金属及其合金	178
第一节 铝及其合金	178
第二节 铜及其合金	186
第三节 轴承合金	197
思考与练习	201
第十章 典型零件的选材及工艺路线设计	203
第一节 零件的失效形式及选材的基本原则	203

第二节 典型零件的选材与工艺分析	207
思考与练习	219
第十一章 非金属材料及复合材料	221
第一节 高分子材料的结构	221
第二节 常用高分子材料	223
第三节 陶瓷材料	228
第四节 复合材料	231
思考与练习	238
参考文献	239

绪 论

一、金属材料及热处理在生产中的地位

随着科学技术的迅速发展，人们对材料的性能要求越来越高，特别是对钢铁材料的要求尤为突出。为了满足这一需要，热处理在机械制造业中被广泛地应用。如在机床制造中 60%~70% 的零件都要经过热处理；在汽车、拖拉机等制造中，70%~80% 的零件都要经过热处理；至于模具和轴承等，则要 100% 进行热处理。总之，重要的零件都必须经过适当的热处理才能使用。由此可见，热处理在机械制造中的重要地位和作用。

金属材料在现代工业生产中具有极其重要的地位。材料专家把其比作现代工业的骨架，不仅在机械制造、交通运输、国防科技等各个部门需要使用大量的金属材料，在人们的日常生活中也离不开金属材料，并且随着金属材料大规模生产及其消耗量的急剧上升，它极大地促进了社会经济和科学技术的飞速发展。如耐高温、高强度、比重轻的钛合金等金属材料的应用，促进了现代宇航工业的发展。

金属材料的品种繁多，常用的有钢铁材料、有色金属及其合金、粉末冶金等。各种材料成分不同，性能各异，而且通过加工，特别是热处理后性能变化很大。实践表明，合理选用金属材料，选择适当的热处理工艺，妥善安排零件的加工工艺路线，对充分发挥金属材料本身的性能潜力，保证材料具有良好的加工工艺性能，获得理想的使用性能，提高产品的使用寿命，节约金属材料，降低成本等方面有着重大的影响。实际工作中的很多构件，往往由于材料、热处理工艺选择不当，使产品的使用性能达不到规定的技术要求，而导致产品在使用过程中因变形、断裂、磨损等形式发生早期破坏。所以，机械工作者掌握金属材料及热处理的知识是非常必要的。

金属材料在使用过程中不仅应具有优良的使用性能，而且还应具有良好的工艺性能。一般机械零件在设计和选材时以力学性能指标作为主要依据，可是在很多情况下，加工工艺性能却成为决定某种材料能否被选用的关键性因素。如不能采用锻压成型的方法来制造灰铸铁零件，不能采用普通压力铸造的方法成形致密度要求较高的零件，不能采用锤上模锻的方法锻造铜合金等再结晶速度较低的材料，不能采用电渣焊的方法焊接薄壁构件等等。因此，材料的选用及加工工艺的选择也是提高产品质量的前提。

二、工程材料的分类

工程材料主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，用来制造工程构件、机械零件及各种工具等。工程材料可分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等四大类。

1. 金属材料

金属材料是最重要的工程材料，分为黑色金属和有色金属两部分。

(1) 黑色金属。铁和以铁为基的合金，包括钢和铸铁等。黑色金属占整个结构材料和工具材料的 90% 以上，性能好、价格较便宜，是目前应用最广泛的工程材料。

(2) 有色金属。黑色金属以外的所有金属及其合金，可分为轻金属、重金属、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀有金属和碱土金属等，是重要的特殊用途材料。

2. 高分子材料

高分子材料是有机合成材料，具有密度较低、耐蚀性较好等特点，很多高分子材料还具有很好的绝缘性，是工程上发展最快的一类新型结构材料。

(1) 塑料。主要指强度较高、韧性和耐磨性较好，可制造某些机器零件或构件的工程塑料。

(2) 橡胶。是经硫化处理的且弹性特别优良的聚合物。

(3) 合成纤维。是由单体聚合而成的、强度很高的聚合物，通过机械处理所获得的纤维材料。

(4) 胶结剂。是通过粘附作用使同质或异质材料连接在一起，并在胶接面上有一定强度的物质。

3. 陶瓷材料

陶瓷材料具有坚硬、稳定的特点，可制造各种工具，在一些特殊的情况下也可作为结构材料，是人类应用最早的材料之一。

(1) 普通陶瓷。即传统陶瓷，主要为硅、铝氧化物的硅酸盐材料。

(2) 特种陶瓷。即新型陶瓷，主要为高熔点的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等的烧结材料。

(3) 金属材料。主要指由金属和陶瓷性非金属组成的烧结材料。

4. 复合材料

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体组合材料，其性能优于它的组成材料。复合材料在强度、刚度及耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优良，是一类特殊的工程材料，具有广阔的发展前景。

三、学习本课程的内容和要求

金属材料及热处理课程是机械制造类冷加工各专业的一门技术基础课，主要内容有：金属的结构与结晶，金属的塑性变形与再结晶，合金的结构与相图，钢的热处理，工业用钢，铸铁，有色金属及其合金，典型零件的选材及工艺路线分析等内容。

学习本课程的主要目的是使学生获得有关金属学、热处理的基本理论及金属材料的一般知识，了解常用金属材料的成分、组织、性能、热处理工艺之间的关系，使在学习本课程之后具有合理选用金属材料、正确选定热处理工艺方法、妥善安排加工工艺路线等方面的初步能力。

金属材料及热处理这门学科的基本任务就是要建立材料的成分、内部组织结构、热处理工艺与性能之间的关系，找出其内在规律，以便通过控制金属材料的成分和冷、热加工

工艺过程来控制其组织，提高材料性能或创制具有某种性能的新材料。

学习本课程主要从以下三方面入手：

(1) 金属学方面。掌握金属和合金的组织结构、结晶过程、塑性变形与再结晶及二元合金相图的基本理论，为进一步学习热处理和金属材料打下基础。

(2) 热处理方面。掌握常用热处理方法的基本原理和工艺特点及热处理在机械零件加工过程中的地位和作用，以便能正确选用热处理方法，确定合理的加工工艺路线。

(3) 金属材料方面。掌握常用的碳素钢、铸铁、合金钢、铜合金、铝合金、轴承合金等金属材料的成分、组织、性能和用途的基本知识，以便能合理的选用金属材料。

这门课程的实践性和应用性很强，教学过程应紧密结合实习、实验。同学们在学习时要多讨论、多分析和多研究，特别是在实习中要多观察热处理、铸造、锻压、焊接等加工方法的特点，总结不同成分、不同性能的金属材料所适合的加工方法，进一步理解材料的用途，理论联系实际，这样才能更好地掌握教材中的基础知识，得到全面发展。

第一章 金属材料的性能

目前，机械产品正朝着容量大、效能高、重量轻、成本低、寿命长的方向发展。因金属材料具有许多良好的性能，被广泛用于制造各种构件、机器零件、工具和日常生活用具等。通常我们把金属材料的性能分为使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用条件下表现出的性能，主要包括力学性能（也叫机械性能）、物理性能（如比重、熔点、导电性、导热性、热膨胀性、磁性等）和化学性能（如耐腐蚀性、抗氧化性等），使用性能决定了应用范围；工艺性能是指材料在加工过程中表现出的性能，如锻造性能、铸造性能、切削性能、焊接性能、冷热压力加工性能、热处理等。只有充分掌握材料的性能，才能正确、经济、合理地使用金属材料。

机器零件、构件、机具等在使用时通常要传递力或能，在拉、压、弯、扭、剪切、摩擦、冲击等各种载荷作用下，常常会由于发生过量变形、表面损伤、尺寸改变或断裂而失效（失去原来设计的效能）。为了防止上述失效现象发生，需要从机件的工作条件和失效现象出发，研究金属在各种载荷作用下变形及破坏的规律，提出合理的力学性能指标，为机件的设计提供依据，并为合理选用材料和正确制定工艺指明方向。

第一节 金属的力学性能

金属在外力作用下，首先发生弹性变形；外力超过弹性极限时，除继续发生弹性变形外同时发生塑性变形；达到断裂强度后，发生断裂。金属材料的力学性能就是金属在力和能作用下的表现行为，主要有弹性、塑性、韧性、刚度、强度、硬度等。衡量金属材料机械性能的指标，最常用的有抗拉强度、屈服极限、硬度、塑性、冲击韧性和疲劳强度等。

外力卸除后，能立刻恢复（或在一定时间内恢复）的变形叫做弹性变形，外力卸除后保留下来的残余变形，叫做塑性变形。

一、强度与塑性

在静载荷作用下，材料抵抗变形与断裂的能力称为强度。静载荷是指载荷的大小由零缓慢增加到最大值或大小保持不变的载荷，如钢索的拉力。在静载荷作用下，材料产生塑性变形但不发生破坏的能力称为材料的塑性。金属材料的强度和塑性指标可以通过静拉伸试验测得。

（一）静拉伸试验

静拉伸试验是工业上最广泛使用的机械性能试验方法之一，是缓慢地在试样两端施加载荷，使试样在工作部分受轴向拉力，引起试样沿轴向伸长，试验一般进行到试样被拉断为止。测定试样对外加载荷的抗力，可以求出材料的强度指标；测定试样在破断后塑性变

形的大小，可以求出材料的塑性指标。

1. 拉伸试样

为了使金属材料的机械性能指标在测试时能排除因试样形状及尺寸不同所造成的影响，并便于分析比较，试样应按相关标准的规定制作。通常采用圆形试样，分为短试样和长试样两种。图 1-1 (a) 为标准试样拉断前的状态，图 1-1 (b) 为标准试样拉断后的状态。 d_0 为标准试样的原始直径， d_k 为试样断口处的直径， L_0 为标准试样的原始标距长度， L_k 为拉断试样对接后测出的标距长度。长试样 $L_0=10 d_0$ ，短试样 $L_0=5 d_0$ 。

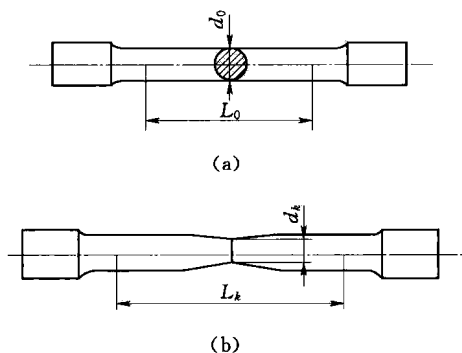


图 1-1 圆形拉伸试样

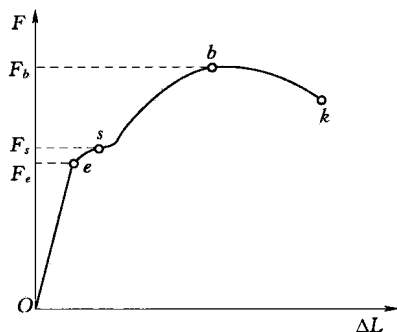


图 1-2 退火低碳钢拉伸曲线

2. 拉伸曲线及应力—应变曲线

在进行拉伸试验时，拉力 F 和试样绝对伸长量 ΔL 之间的关系曲线称为拉伸曲线。图 1-2 是退火低碳钢的拉伸曲线，纵坐标表示拉力 F ，单位是 N，横坐标表示绝对伸长量 ΔL ，单位是 mm。

拉伸试验的开始阶段，当拉力 F 增加时，试样伸长量 ΔL 也成正比增加，在拉伸曲线图中为一条斜直线 Oe ，当卸除载荷后试样立刻恢复原状，其变形规律符合胡克定律，表现为弹性变形。 F_e 是试样保持弹性变形的最大拉力。

当拉力超过 F_e 时，去除拉力后，试样的伸长只能部分地恢复，而保留一部分残余变形，卸载后的残余变形是塑性变形。当拉力继续增加到 F_s 时，拉伸试验机刻度盘的指针停止转动或开始往回转，拉伸曲线上出现了平台，即在拉力不再增加的情况下，试样也会明显伸长，这种现象叫做屈服。屈服后，金属开始产生明显的塑性变形，试样表面出现滑移带，拉力 F_s 称为屈服拉力。

在屈服阶段以后，试样抵抗变形的能力将会增加，在拉伸曲线上表现为一段上升的曲线 sb ，此现象为冷变形强化。当拉力达到最大值 F_b 后，试样的某一部位截面开始急剧缩小，出现了“缩颈”，以后的变形主要集中在缩颈附近。由于缩颈处试样截面的急剧缩小，致使负荷下降，在拉伸曲线上表现为一段下降的曲线 bk ， F_b 是试样被拉断前所能承受的最大拉力，称为极限拉力。

拉力达到 F_k 时，试样断裂，此拉力称为断裂负荷。

工业上使用的金属材料多数是没有屈服现象的，其拉伸曲线如图 1-3 所示。图 1-3 (a) 是塑性材料的拉伸曲线，如退火铝合金、调质处理的合金钢等。图 1-3 (b) 是低塑

性材料的拉伸曲线，它不仅没有屈服现象，而且也不产生缩颈，最大负荷就是断裂负荷，如球墨铸铁等。

综上所述，金属在外力作用下变形过程一般可分为三个阶段，即弹性变形、弹塑性变形和断裂。

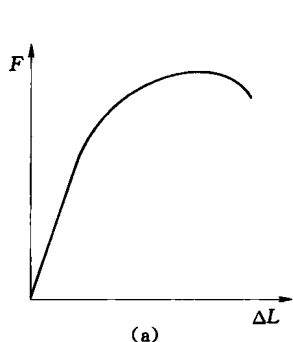


图 1-3 塑性材料、低塑性材料的拉伸曲线

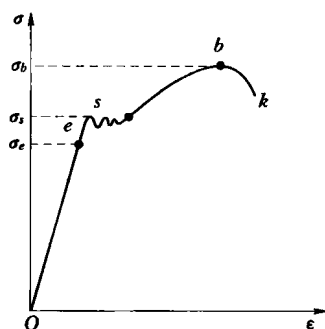
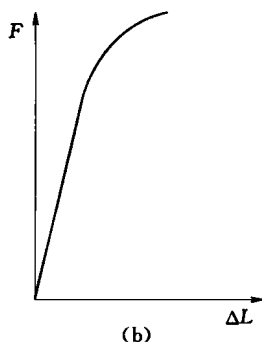


图 1-4 应力—应变曲线

以试样原始横截面积 A_0 来除拉力得到应力 σ ，即 $\sigma = \frac{F}{A_0}$ 。用试样的原始标距长度 L_0

除绝对伸长量 ΔL 得到相对伸长 ϵ ，即 $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \%$ 。应力与应变的关系曲线叫做应力—应变曲线，如图 1-4 所示。应力—应变曲线的形状与拉伸曲线相似，只是坐标不同。应力—应变曲线的纵坐标表示应力，单位为 MPa，横坐标表示相对伸长，单位是百分数。应力—应变曲线不受试样尺寸的影响，可以直接读出材料的一些力学性能指标，如弹性极限、屈服点、抗拉强度等。

(二) 强度指标

金属的强度用应力表示。

1. 弹性极限 σ_e

弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹—塑性变形的应力，应力超过弹性极限以后便开始发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_e ——试样保持弹性变形的最大拉力，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

工作条件下不允许产生微量塑性变形的零件，设计时应该根据弹性极限 σ_e 来选材。如选用弹簧材料的弹性极限低，弹簧工作时就可能产生塑性变形，尽管每次变形可能很小，但时间长了，弹簧的尺寸将发生明显的变化，导致弹簧失效。

2. 屈服极限

(1) 屈服点 σ_s 。在拉伸过程中，负荷不增加，试样还继续发生明显变形的最小应力，叫做屈服点，即：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_s ——拉力不增加，试样还继续伸长的最小应力，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。屈服点的负荷可借助于试验机的测力计刻度盘的指针或拉伸曲线上的纵坐标来确定。

1) 指针法。测力计刻度盘的指针停止转动或第一次往回转的最小负荷就是 F_s 。

2) 图示法。在拉伸曲线上找出屈服平台的恒定负荷 [图 1-5 (a)] 或第一次下降的最小负荷 [图 1-5 (b)] 就是 F_s 。

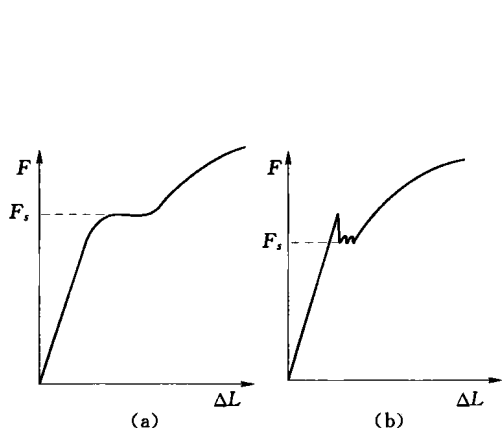


图 1-5 屈服点的测定

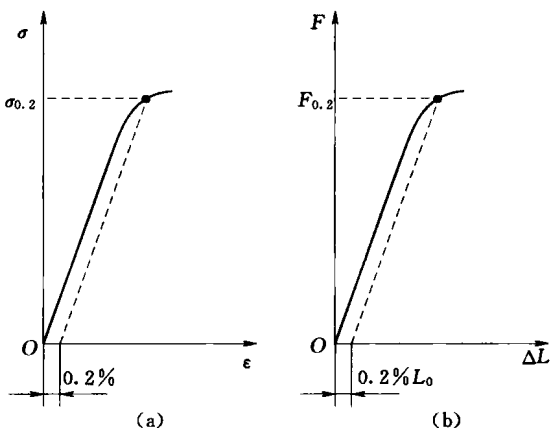


图 1-6 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、屈服拉力 $F_{0.2}$ 的测定

(a) 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的测定；(b) 屈服拉力 $F_{0.2}$ 的测定

(2) 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外，大多数金属合金没有屈服点。因此规定发生 0.2% 残余伸长的应力，作为屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示 (图 1-6)。

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0} \text{ (MPa)}$$

式中 $F_{0.2}$ ——试样产生 0.2% 残余伸长时的拉力，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

零件与结构经常因过量的塑性变形而失效，一般不允许发生塑性变形。但是要求的严格程度不一样，要求特别严的零件，应该根据材料的弹性极限设计，要求不十分严格的零件与结构，则要以材料的屈服强度 (屈服点) 作为设计和选材的主要依据。正因为这样，屈服强度 (屈服点) 是评定金属质量的重要力学性能指标。

3. 抗拉强度 σ_b

抗拉强度是试样被拉断前所能承受的最大应力。它是设计和选材的主要依据之一，也是金属材料主要力学性能指标之一。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \text{ (MPa)}$$

式中 F_b ——试样被拉断前所能承受的最大拉力，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

对塑性材料来说，在 F_b 以前试样为均匀变形，试样各部分的伸长基本上是一样的；在 F_b 以后，变形将集中于试样的某一部分，发生集中变形，出现缩颈，由于缩颈处截面积的急剧减少，所以按 A_0 计算出来的应力也随之减少。

塑性差的材料（脆性材料）一般不产生缩颈，拉断前的最大负荷 F_b 就是断裂时的负荷 F_k ，并且由于塑性变形小，试样截面积变化不大，因此抗拉强度就是断裂强度。在这种情况下，抗拉强度表征材料的断裂抗力，它是设计的主要依据，是重要的力学性能指标。

（三）刚度

大多数金属拉伸时，在弹性变形阶段遵守胡克定律，应力与应变成正比关系，即：

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中 σ ——外加的正应力，MPa；

ε ——相对伸长量，%；

E ——弹性模量，MPa。

E 是应力—应变曲线上的斜率，斜率愈大，弹性模量愈大，使其发生一定量弹性变形的应力值也愈大，弹性变形愈不易进行。因此弹性模量是衡量材料抵抗弹性变形的能力，弹性模量又称作材料的刚度。弹性模量愈大，在一定应力下产生的弹性变形就愈小，即零件或构件保持原有形状和尺寸的能力愈好。

机器零件一般都有刚度要求，在工作条件下不允许产生过量的弹性变形，否则将失去它的精度。如镗床的镗杆若刚度不足，当进刀量深、负荷较大时，镗杆本身要产生过量的弹性变形，镗出的孔出现偏小现象。刚度是零件和结构设计的重要问题之一。零件或结构的刚度，除由金属的弹性模量决定（材料的种类）外，也与零件或结构的尺寸和形状有关。要想提高金属制品的刚度，只能是更换金属材料、改变金属制品的结构形式或增加截面面积。

（四）塑性指标

金属材料的塑性可以用拉伸试样断裂后的塑性变形大小来表示，如伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。

1. 伸长率 δ

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

式中 L_k ——试样断裂后的标距长度，mm；

L_0 ——试样的原始标距长度，mm；

ΔL_k ——断裂后试样的绝对伸长，mm。

根据试样的塑性（残余）变形分布情况，缩颈处变形量最大，距离断裂位置愈远，变形量愈小。可见断裂位置对 δ 是有影响的，其中以断在正中的试样伸长率为最大。为了便于比较，规定以断在正中的试样伸长率为测定标准，断裂不在正中者，换算到相当于正中的伸长。

2. 断面收缩率 ψ

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

式中 A_0 ——试样的原始横截面积, mm^2 ;

A_k ——试样拉断后缩颈处横截面积, mm^2 。

金属材料的 δ 和 ψ 值越大, 表示材料的塑性越好。塑性为金属零件的成型提供了经济而有效的途径, 各种金属的板材、棒材、线材和型材都是通过轧制、锻造、挤压、冷拔、冲压等压力加工方法制造而成的, 而且通过塑性变形所伴随的硬化过程还能使材料强度得到提高, 所以塑性变形也是改善金属材料性能的一个重要手段。另一方面, 材料具有一定塑性可以提高零件使用的可靠性, 防止突然断裂。

二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬的一个指标。硬度值的物理意义随着实验方法的不同, 其含义也不同。如压入法的硬度值是材料表面抵抗另一物体压入时所引起的塑性变形能力; 刻划法硬度值表示金属抵抗表面局部破裂的能力; 而回跳法硬度值是代表金属弹性变形功的大小。因此, 硬度值实际上不是一个单纯的物理量, 它是表征着材料的弹性、塑性、形变强化率、强度和韧性等一系列不同物理量组合的一种综合性能指标。一般可认为, 硬度是指金属表面上不大体积内抵抗变形或破裂的能力。

尽管硬度这一概念没有全面而确切的定义, 但若掌握试验方法的原理和操作技术, 了解影响实验结果准确度的因素, 硬度值仍有很大的使用和参考价值。因为硬度试验方法比较简单易行, 不必破坏工件, 适用于成批检验零件, 已成为产品质量检查和制定合理工艺的重要试验方法之一。在生产上使用最为广泛的是静载荷压入法硬度试验, 有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验是用一定大小的压力 F , 将直径为 D 的淬火钢球 (压头) 压入被测金属的表面, 如图 1-7 所示, 保持一定时间后卸除载荷, 根据压痕的表面积 A 除压力所得的商值作为硬度的计算指标, 以 HB 表示。

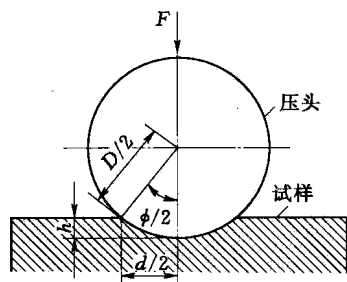


图 1-7 布氏硬度试验原理图

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D h} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

布氏硬度值的大小就是压痕单位面积上所承受的压力, 一般不标出单位。硬度值越高, 表示材料越硬。在实际试验时, 由于压痕深度 h 的测量比较困难, 而测量压痕直径 d 比较方便, 因此将上式中 h 换算成 d 的关系, 即:

$$HB = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{MPa})$$

式中 F ——试验力, N;

D ——钢球直径, mm;

d ——压痕直径, mm。

式中只有 d 是变数, 试验时只需测出压痕直径, 便可通过计算或查布氏硬度表即可得出 HB 值。

由于金属材料有软有硬，工件有厚有薄，如果只采用一种标准的载荷和钢球直径，就会出现若对硬的材料合适，对软的材料就会发生钢球陷入金属材料内的现象；若对厚的材料合适，对薄的材料就会发生压透的现象，因此在生产中要求能使用不同大小的载荷和钢球直径。当采用不同大小的试验力和不同直径的钢球进行布氏硬度试验时，只要能满足 P/D^2 为常数，则对同一材料来说布氏硬度值是相同的，而对不同材料所得布氏硬度值是可以进行比较的。

试验时， P/D^2 的比值为 30、10、2.5 三种，根据金属材料的种类、试件硬度范围和厚度的不同选择钢球直径 D 、试验力 F 及试验力保持时间，见表 1-1。试验后压痕直径应在 $(0.25 \sim 0.6) D$ 之间，否则试验结果无效。当选用的 P/D^2 比值不同时，布氏硬度值不能直接进行比较。

表 1-1 布氏硬度试验规范

金属类型	HB 范围 (kgf/mm ²)	试样厚度 (mm)	试验力 F 与钢球直径 D 的相互关系	钢球直径 (mm)	试验力 (kgf)	试验力保持时间 (s)
黑色 金属	140~450	6~3	$F=30D^2$	10	3000	10
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	<140	>6	$F=10D^2$	10	1000	10
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色 金属	>130	6~3	$F=30D^2$	10	3000	30
		4~2		5	750	
		<2		2.5	187.5	
	36~130	9~3	$F=10D^2$	10	1000	30
		6~3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
	8~35	>6	$F=2.5D^2$	10	250	60
		6~3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

布氏硬度值的标注方法，测定的硬度值应标注在硬度符号的前面。用淬火钢球为压头所测得的硬度值以 HBS 表示；用硬质合金球为压头所测得的硬度值以 HBW 表示。试验时，除了试验力保持时间为 10~15s 外，在其他试验条件下测得的硬度值，均应在硬度符号的后面用相应的数字注明压头直径、试验力大小和试验力保持时间。例如：

100HBS5/250/30 表示用直径为 5mm 的淬火钢球，在 250kgf 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 100。试验力保持时间为 10~15s 时，不需标明。

布氏硬度试验的优点是金属材料表面压痕大，能在较大范围内反映材料的平均硬度，测得的硬度值比较准确，数据重复性强。不足之处是由于压痕大，对金属表面的损伤较大，不适合成品检验及太薄的工件。

布氏硬度试验因其压头为淬火钢球，由于钢球本身的变形问题，使致不能试验太硬的材料。HBS 适用于测量退火、正火、调质钢及铸铁、有色合金等硬度小于 450HB 的较软的金属；HBW 适用于测量硬度值在 650HB 以下的材料。