



高职高专“十一五”规划教材

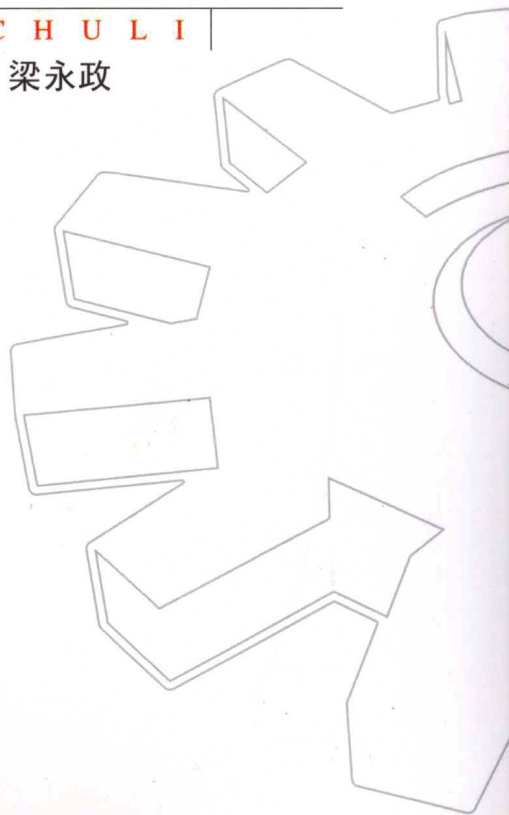


金属材料 与热处理

JINSHU CAILIAO

Y U R E C H U L I

主编 王志刚 梁永政



 吉林大学出版社

内容提要

本书根据教育部高职高专人才的培养目标,以及目前高等职业教育教学和改革的要求,并结合编者多年从事教学、生产实践的经验编写而成。

本书主要包括:金属的性能、金属的晶体结构与结晶、铁碳合金相图和碳钢、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属、粉末冶金、非金属材料、新材料、金属的腐蚀与防护、机械零件材料及毛坯的选择和实验指导。

本书可作为高职高专学校机械等专业的教材,也可作为各类相关培训机构的培训教材,同时还可以作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理/王志刚,梁永政主编. —长春:吉林大学出版社,2009.2

(高职高专“十一五”规划教材)

ISBN 978-7-5601-4118-3

I. 金… II. ①王… ②梁… III. ①金属材料—高等学校:技术学校—教材 ②热处理—高等学校:技术学校—教材
IV. TG14 TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第012236号

书 名: 高职高专“十一五”规划教材

金属材料与热处理

作 者: 王志刚 梁永政 主编

责任编辑、责任校对: 邵宇彤

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 17.75 字数: 429 千字

ISBN 978-7-5601-4118-3

封面设计: 超视觉工作室

北京市彩虹印刷有限责任公司 印刷

2009年2月 第1版

2009年2月 第1次印刷

定价: 32.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路421号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

出版说明

作为高等教育的重要组成部分，高等职业教育是以培养具有一定理论知识和较强实践能力，面向生产、面向服务和管理第一线职业岗位的实用型、技能型专门人才为目的的职业技术教育，是职业技术教育的高等阶段。目前，高等职业教育教学改革已经从专业建设、课程建设延伸到了教材建设层面。根据国家教育部关于要求发展高等职业技术教育，培养职业技术人才的大纲要求，我们组织编写了这套《高职高专“十一五”规划教材》。本系列教材坚持以就业为导向，以能力为本位，以服务学生职业生涯发展为指导思想，以与专业建设、课程建设、人才培养模式同步配套作为编写原则。

从专业建设角度，相对于普通高等教育的“学科性专业”，高等职业教育属于“技术性专业”。技术性专业的知识往往由与高新技术工作相关联的那些学科中的有关知识所构成，这种知识必须具有职业技术岗位的有效性、综合性和发展性。本套教材不但追求学科上的完整性、系统性和逻辑性，而且突出知识的实用性、综合性，把职业岗位所需要的知识和实践能力的培养融会于教材之中。

从课程建设角度，现有的高等职业教育教材从教育内容上需要改变“重理论轻实践”、“重原理轻案例”，教学方法上则需要改变“重传授轻参与”、“重课堂轻现场”，考核评价上则需改变“重知识的记忆轻能力的掌握”、“重终结性的考试轻形成性考核”的倾向。针对这些情况，本套教材力求在整体教材内容体系以及具体教学方法指导、练习与思考等栏目中融入足够的实训内容，加强实践性教学环节，注重案例教学，注重能力的培养，使职业能力的培养贯穿于教学的全过程。同时，使公共基础类教材突出职业化，强调通用能力、关键能力的培养，以推动学生综合素质的提高。

从人才培养模式角度，高等职业教育人才的培养模式的主要形式是产学结合、工学交替。因此，本教材为了满足有学就有练、学完就能练、边学边练的实际要求，纳入新技术引用、生产案例介绍等来满足师生教学需要。同时，为了适应学生将来因为岗位或职业的变动而需要不断学习的情况，教材的编写注重采用新知识、新工艺、新方法、新标准，同时注重对学生创造能力和自我学习能力的培养，力争实现学生毕业与就业上岗的零距离。

为了更好地落实指导思想和编写原则，本套教材的编写者既有一定的教学经验、懂得教学规律，又有较强的实践技能。同时，我们还聘请生产一线的技术专家来审稿，保证教材的实用性、先进性、技术性。总之，该套教材是所有参与编写者辛勤劳作和不懈努力的成果，希望本套教材能为职业教育的提高和发展作出贡献。

这就是我们编写这套教材的初衷。

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的若干意见》等文件，以及高职高专教育人才培养目标的要求而编写的。它是工科高等职业技术教育的通用教材。

全书共 11 章，主要阐述了金属材料与机械制造过程、金属的性能、金属的晶体结构与结晶、铁碳合金相图、碳钢及其热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、粉末冶金、新型材料、材料的选择与分析等。

本书具有以下特点：第一，注重在理论知识、素质、能力、技能等方面对学生进行全面的培养；第二，注重吸取现有相关教材的优点，充实了新知识、新工艺、新技术等内容，简化过多的理论介绍，并采用最新标准；第三，突出职业技术教育特色，做到图解直观形象，尽量联系现场实际；第四，通过教学活动培养学生的工程意识、经济意识、管理意识和环保意识；第五，语言文字叙述精练，通俗易懂，总结归纳提纲挈领。

本书前言和第五章由安阳工学院王志刚编写；第一章和第二章由安阳工学院梁永政编写；第三章和第九章由安阳工学院田龙编写；第四章由安阳工学院王振宁编写；第六章、第七章由安阳工学院王飞编写；第八章由安阳工学院秦保军编写；第十章由天津冶金职业技术学院材书彦编写；第十一章由安阳工学院赵慧利编写；实验由安阳工学院李占君编写。本书由王志刚、梁永政任主编。

本书在出版过程中得到了吉林大学出版社和安阳工学院机械系等单位的关心及大力支持，在这里一并表示最诚挚的感谢。

由于受个人视野和专业范围所限，又由于时间仓促，书中难免有错误和欠妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

目 录

第一章 金属的性能	1
第一节 金属的力学性能	1
第二节 金属的物理性能和化学性能	10
第三节 金属的工艺性能	13
思考题	15
第二章 金属的晶体结构与结晶	16
第一节 金属的晶体结构	16
第二节 纯金属的结晶	23
第三节 合金的相结构	26
第四节 合金的结晶	30
第五节 金属铸锭组织	35
第六节 金属的塑性变形与再结晶	37
思考题	44
第三章 铁碳合金和碳钢	46
第一节 铁碳合金相图	46
第二节 典型铁碳合金的平衡结晶过程	50
第三节 碳 钢	59
思考题	64
第四章 钢的热处理及表面处理	66
第一节 概 述	66
第二节 钢在加热时的转变	67
第三节 钢的冷却转变	71
第四节 钢的退火和正火	81
第五节 钢的淬火	85
第六节 钢的回火	92
第七节 钢的表面热处理	98
第八节 热处理零件的结构工艺性	108
思考题	110

第五章 合金钢	111
第一节 概 述	111
第二节 合金元素在钢中的作用	112
第三节 合金结构钢	119
第四节 合金工具钢	136
第五节 特殊性能钢	149
思考题	159
第六章 铸 铁	160
第一节 概 述	160
第二节 铸铁的石墨化过程及组织	160
第三节 铸铁的分类	162
第四节 灰口铸铁	163
第五节 球墨铸铁	165
第六节 可锻铸铁	167
第七节 蠕墨铸铁	169
第八节 合金铸铁	170
思考题	171
第七章 有色金属及其合金	172
第一节 概 述	172
第二节 铝及铝合金	172
第三节 铜及铜合金	177
第四节 钛及钛合金	181
第五节 镁及其合金	184
第六节 滑动轴承合金	187
思考题	189
第八章 粉末冶金	190
第一节 粉末冶金概述	190
第二节 硬质合金	192
第三节 其他常用粉末冶金材料	194
思考题	196
第九章 非金属材料	197
第一节 塑 料	197
第二节 橡 胶	201
第三节 陶 瓷	203



第四节	复合材料	207
思考题		212
第十章	新型材料	213
第一节	纳米材料	213
第二节	非晶态合金	214
第三节	梯度材料	217
第四节	储氢合金	217
第五节	超导材料	218
第六节	减振合金和形状记忆材料	221
思考题		225
第十一章	机械零件材料及毛坯的选择	226
第一节	机械零件的失效分析	226
第二节	机械零件材料及毛坯的选择	231
第三节	典型零件的选材及工艺分析	236
思考题		246
实 验 指 导		247
实验一	金属材料拉伸实验	247
实验二	硬度实验	250
实验三	冲击实验	254
实验四	金相显微镜的使用及金相试样的制备	256
实验五	铁碳合金显微组织的观察及分析	263
实验六	钢的热处理	269
参考文献		272

第一章 金属的性能

工程材料是指具有一定性能，在特定条件下能够承担某种功能、被用来制造零件和工具的材料。工程材料按成分可分为四类：金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。钢铁、陶瓷、塑料和玻璃钢分别为这四种材料的典型代表。其中，金属材料是应用最广泛的材料，目前仍占据材料工业的主导地位。从常用材料标准数据中，我们可以发现包括九大约 1 200 余种常用材料。为了能更合理地使用金属材料，充分发挥其作用，就必须了解各种金属材料的各种性能。

金属材料的性能是指金属材料在不同条件下表现出来的属性，一般可分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在工作条件下所具备的性能，包括力学性能（机械性能）、物理性能和化学性能。工艺性能指材料适应切削、铸造、锻造、焊接、热处理等冷热加工方法的能力。

第一节 金属的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在外力（载荷）作用下所表现出来的特性，是金属材料最主要的使用性能，包括强度、塑性、硬度、韧性以及疲劳强度等。根据载荷作用性质不同，可将载荷分为静载荷、冲击载荷和交变（循环）载荷等。

（1）静载荷。大小不变（恒载）或变化缓慢以至于可以略去惯性力作用的载荷。

（2）冲击载荷。短时间快速增加的载荷。

（3）交变载荷。大小、方向或大小和方向随时间发生周期性变化或非周期性变化的载荷。

载荷作用在材料上的方式主要有拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转等。在不同载荷作用方式下，材料产生的变形也不相同，如图 1-1 所示。

一、强度

金属材料抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。

金属材料的强度越高，抵抗变形和断裂的能力就越强。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、抗扭强度和抗剪强度等。常被用来表示材料强度指标

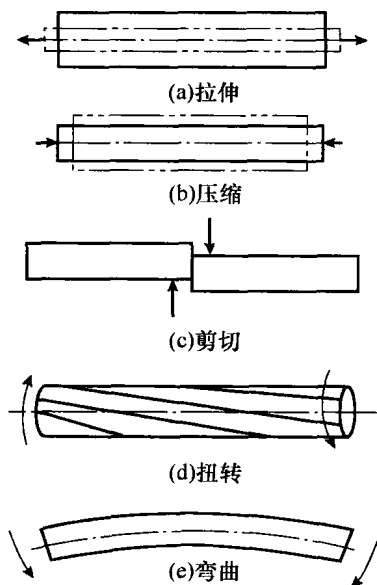


图 1-1 金属材料受载荷变形示意图

的是抗拉强度 σ_b 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (或 σ_s)，单位都是 MPa。

材料受到外力作用后发生变形导致材料内部之间相互作用的力称为内力。单位面积上承受的内力大小称为应力，单位是 MPa。应力计算公式如下

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

式中： σ ——应力 (MPa)；

F ——外力 (N)；

S_0 ——横截面积 (mm^2)。

1. 拉伸试验

拉伸试验是常用来判定金属材料强度的方法。拉伸试验是将被测材料做成标准试样，装在拉伸试验机上，用静拉伸力对试样进行轴向的拉伸，通过测量力和相应的试样伸长量（一般到拉断为止），测量材料的力学性能。标准圆形拉伸试样如图 1-2 所示。图中， d_0 为试样直径， l_0 为标距长度，即计算试验结果时试样的有效长度。试样有长试样 ($l_0 = 10d_0$) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$) 之分，一般采用的试样直径 $d_0 = 10 \text{ mm}$ 。

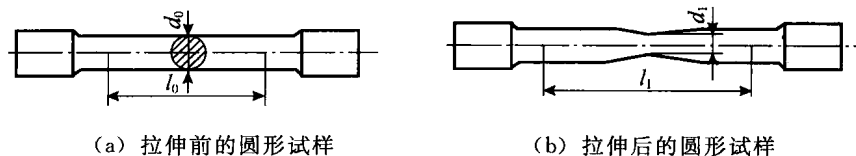


图 1-2 标准圆形拉伸试样

2. 拉伸曲线

以退火低碳钢为例，来研究金属材料在拉伸过程中的变形和断裂。首先，将实验材料制成标准的拉伸试样，正确地安装在拉伸试验机上，缓慢加载，直至拉断为止。这样，就可得到低碳钢的载荷—变形量关系曲线，即拉伸曲线，如图 1-3 (a) 所示。由图可见，当载荷小于 F_s 时，曲线是一条直线，这表明试样的伸长量和所施加的载荷是成正比关系的，试样在载荷作用下的伸长是均匀的。这时若去掉外来载荷，变形可完全消失，试样恢复原有形状和尺寸，即材料处于弹性变形阶段。当载荷超过 F_s 后，继续加大载荷，试样进一步伸长。此时若去掉载荷，就会发现绝大部分的变形会恢复，而剩余部分的变形不能恢复，这部分不能恢复的变形即塑性变形，试样进入了塑性变形阶段。曲线到达 s 点时，载荷为 F_s ，此时即使载荷不再增大，试样仍然继续被拉长，变形继续发生。这种现象称为屈服现象，点 s 为屈服点，屈服阶段在曲线上表现为 ss' 线段。屈服现象过后，试样进入了均匀变形阶段，随载荷的继续增大，试样在标距长度上发生大量均匀而显著的塑性变形。当载荷到达 F_b 后，试样在标距长度内发生局部的收缩，即“径缩”现象。此时虽然载荷减小，但试样继续变形伸长，此时的变形主要集中在径缩部位，直至到达 z 点时试样断裂。整个过程中， b 点是载荷最大点。

3. 强度判据

(1) 弹性极限。外力作用下，材料保持纯弹性变形所能承受的最大的应力即弹性极限，用 σ_e 表示。图 1-3 (a) 中， e 点所对应的应力值就是低碳钢的弹性极限。弹性极限计算方法如下



$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中： σ_e ——弹性极限 (MPa)；

F_e ——材料在弹性变形内能承受的最大拉力 (N)；

S_0 ——试样拉伸前的截面积 (mm^2)。

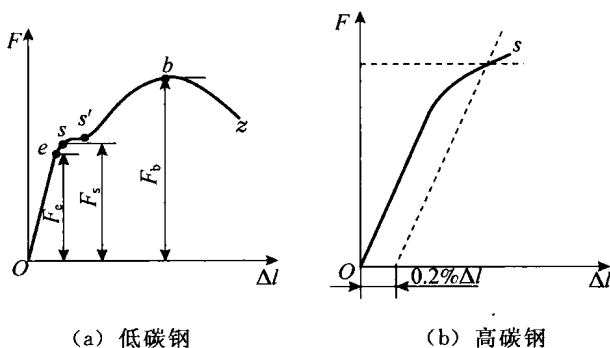


图 1-3 不同材料的拉伸曲线

(2) 屈服点。材料在拉伸过程中不增大力仍能继续伸长时的应力，称为屈服点，用 σ_s 表示，它亦表示材料发生明显塑性变形时的最低应力值。图 1-3 (a) 中 s 点对应的应力值就是低碳钢的屈服点。屈服点计算方法如下

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

式中： σ_s ——屈服点 (MPa)；

F_s ——材料屈服时的拉力 (N)；

S_0 ——试样拉伸前的截面积 (mm^2)。

有些金属材料如铸铁和高碳钢等，没有明显的屈服现象，很难测定其 σ_s 。为衡量它们的屈服特性，工程技术上一般规定以试样发生塑性变形 0.2% 时的应力作为材料的条件屈服极限，称为屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

(3) 抗拉强度。拉伸过程中，材料在拉断之前所能承受的最大应力，称为抗拉强度或强度极限，用 σ_b 表示。图 1-3 (a) 中 b 点对应的应力值就是低碳钢的抗拉强度。抗拉强度计算方法如下

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

式中： σ_b ——抗拉强度 (MPa)；

F_b ——试样拉断前的最大载荷 (N)；

S_0 ——试样拉伸前的截面积 (mm^2)。

一般的机械零件或工具在使用时，是不允许发生塑性变形的。若能保证零件材料的工作应力低于材料的屈服点，就能保证零件不会因塑性变形而失效。故屈服点 σ_s 是机械设计强度计算的主要依据， σ_s 越大，材料允许的工作应力也就越高。抗拉强度代表材料抵抗拉断的能力，抗拉强度值越大，表示材料抗拉能力越强。若应力大于抗拉强度，则会发生断裂而造成事故。工程上还通过计算屈服比 σ_s/σ_b ，即屈服点与抗拉强度的比值来判别材料

强度的利用率。屈强比越高，材料性能使用效率越高。一般材料的屈强比以 0.75 为宜。

二、塑性

固体金属在外力作用下能稳定地产生永久变形而不破坏其完整性的能力称为塑性。因此，塑性反映了材料产生塑性变形的能力。塑性的好坏或大小，可用金属在破坏前产生的最大变形程度来表示，我们称其为“塑性极限”或“塑性指标”。

人们时常容易把金属的塑性与柔软性混淆起来，其实它们是有严格区别的两种概念。前者是指金属的流动性能，针对是否易于变形而言；后者则是指金属抵抗变形的能力，针对变形量的大小而言。即塑性好的金属不一定易于变形，因此变形抗力不一样。例如铜虽然塑性很好，却不能像铅那样易于变形，这是因为铜的变形抗力较高；而铅的柔软性好，主要并非指它的塑性好，而是指它的变形抗力很小。虽然所有的金属在高温下变形抗力都很小，可以说具有很好的柔软性，但绝对不能肯定它们就必然有良好的塑性。因为温度过高往往使其产生过热或过烧，在变形时，就容易产生裂纹，即塑性变坏。可见，金属的塑性与柔软性是完全不同的概念。

研究金属塑性的目的是探索金属塑性的变化规律，寻求改善金属塑性的途径，以便选择合理的加工方法，确定最适宜的工艺制度，为提高产品的质量提供理论依据。

为了便于比较各种材料的塑性性能和确定每种材料在一定变形条件下的加工性能，需要有一种度量指标，这种指标称为塑性指标，即金属在不同变形条件下允许的极限变形量。由于影响金属塑性的因素很多，所以很难采用一种通用指标来描述。目前人们大量使用的仍是那些在某特定的变形条件下所测出的塑性指标，如拉伸试验时的断面收缩率及延伸率、冲击试验所得到的冲击韧性、锻造或压缩试验时第一条裂纹出现前的高向压缩率（最大压缩率）、扭转试验时出现的破坏前的扭转角（或扭转数）、弯曲试验时试样破坏前的弯曲角度等等。一般是采用拉伸试验来测量材料的塑性。

常用的塑性指标有伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。伸长率和断面收缩率越高，表明金属材料的塑性越好，它们也都是由拉伸试验测得的。

1. 伸长率

试样拉断后标距的伸长量与试样原始标距比值的百分率称为伸长率，计算方法如下

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

式中： δ ——伸长率（%）；

l_0 ——试样原始长度（mm）；

l_1 ——试样拉伸后的标距长度（mm）。

2. 断面收缩率

试样拉断处截面积减小量与原始试样截面积之比的百分率称为断面收缩率，计算方法如下

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

式中： ψ ——断面收缩率（%）；



S_0 ——试样原始截面积 (mm^2);

S_1 ——试样拉断处截面积 (mm^2)。

对于同一种材料,用不同长度的标准试样测得的伸长率是不同的,故应注明试样尺寸比例。我们通常所说的 δ 指的是用长试样 ($l_0=10d_0$) 测得的伸长率 δ_{10} 的简写;如用短试样 ($l_0=5d_0$),则用 δ_5 表示。对同一种材料而言, $\delta_5 > \delta$ 。金属材料的伸长率和断面收缩率数值越大,表示材料的塑性越好。塑性好的金属材料可以发生大量的塑性变形而不被破坏,便于通过塑性变形加工形状复杂的零件。塑性好的金属材料制件工作过载时首先产生塑性变形而不至于发生突然断裂,安全性好。

金属材料塑性的好坏可根据断裂后断口外形大致判断。在静拉伸力作用下,若试样断面平齐且有金属光泽,没有径缩,断口呈瓷状,则该材料塑性差,脆性高;反之,若断口呈纤维状,灰色无金属光泽,有明显径缩,则材料塑性好。

三、硬度

金属材料抵抗局部变形,特别是塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。硬度能综合反映材料的强度等其他力学性能。硬度与耐磨性具有直接关系,硬度越高,耐磨性越好。机械制造中所用的刀具、量具、模具要保证使用性能和寿命,都应具有足够的硬度。硬度测量具有简便、快捷、不破坏试样(非破坏性试验)等特点,所以硬度测量应用极为广泛,常把硬度标注于图纸上,作为零件检验、验收的主要依据。

硬度试验方法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。硬度是表征金属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。如划痕法硬度值主要表征金属切断强度,回跳法硬度值主要表征金属弹性变形功的大小,压入法硬度值则表征金属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金属材料的化学成分和组织结构的差异,因而被广泛用于检查金属材料的性能、热加工工艺的质量或研究金属组织结构的变化。最常使用的方法是压入法,常用的压入法有布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法。

1. 布氏硬度法

布氏硬度法是将一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球,在规定载荷 P 的作用下,压入试件的表面并保持一定的时间,然后卸除载荷。在此过程中,试件的表面会产生直径为 d 的局部塑性变形压痕。用压痕单位球面积上承受的载荷大小作为所测金属的硬度值,称为布氏硬度,用 HB 表示,原理如图 1-4 所示。布氏硬度值计算方法如下

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

式中: HBS (HBW) ——用钢球 (硬质合金球) 实验时的布氏硬度值;

P ——实验力 (N);

D ——球体直径 (mm);

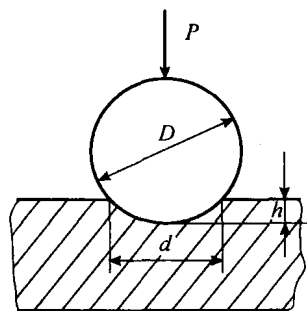


图 1-4 布氏硬度实验示意图

d ——压痕平均直径 (mm)。

布氏硬度虽有单位,但实际使用时只标明硬度数值,而不标明单位。

由布氏硬度计算公式可知,当实验力 P 和压头球体直径 D 一定时,硬度值的大小只与压痕直径 d 有关。 d 越小,材料的硬度值越大; d 越大,则材料的硬度值就越小。实际测试中,布氏硬度一般不计算,而是用专用的读数显微镜量出压痕直径 d ,根据压痕直径和施加的压力,从专门的硬度表中查出布氏硬度值。

布氏硬度用 HBS 或 HBW 表示。HBS 表示压头为淬硬钢球,用于测定布氏硬度值在 450 以下的材料,如软钢、灰铸铁和有色金属等;HBW 表示压头为硬质合金,用于测定布氏硬度值在 650 以下的材料。布氏硬度的表示方法为: HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值,后面按顺序用数字表示试验条件,依次是压头的球体直径、试验载荷、试验载荷保持的时间 (10~15 s 不标注)。

例如: 170HBS10/1000/30 表示用直径 10 mm 的钢球,在 9 807 N (1 000 kgf) 的试验载荷作用下,保持 30 s 时测得的布氏硬度值为 170; 530HBW5/750 表示用直径 5 mm 的硬质合金球,在 7 355 N (750 kgf) 的试验载荷作用下,保持 10~15 s 时测得的布氏硬度值为 530。

做布氏硬度试验时,压头球体的直径 D 、试验载荷 P 及载荷保持的时间 t ,应根据被试金属材料的种类、硬度值的范围及厚度进行选择。常用的压头直径有 1 mm, 2 mm, 2.5 mm, 5 mm 和 10 mm 五种。试验载荷可从 9.807 N (1 kgf) ~29.42 kN (3 000 kgf) 范围内改变。载荷保持的时间,一般黑色金属为 10~15 s,有色金属为 30 s,布氏硬度值小于 35 时为 60 s。

布氏硬度的优点是能反映金属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,试验数据稳定,重复性强。其缺点是测试不同材料需要更换压头直径和改变试验力,压痕直径的测量也比较麻烦,用于自动检测时受到限制,另外当压痕直径较大时不宜在成品上进行试验。

布氏硬度和强度有一定的内在联系,因为硬度大小取决于材料的抗塑性变形能力,而材料强度越高,其抗塑性变形能力就越强,同时硬度也就越高。常用材料的硬度和强度的关系如下面经验公式所示。

灰铸铁	$\sigma_b \approx 0.1 \text{ HBS}$
调质合金钢	$\sigma_b \approx 0.325 \text{ HBS}$
高碳钢	$\sigma_b \approx 0.34 \text{ HBS}$
低碳钢	$\sigma_b \approx 0.36 \text{ HBS}$

2. 洛氏硬度法

洛氏硬度原理和布氏硬度原理相似,测量的是压痕的深度,如图 1-5 所示。将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或钢球压入试样表面,经规定保持时间后卸除载荷,通过测量残余压痕深度增量来计算硬度。洛氏硬度值用 HR 表示,其计算公式如下

$$\text{HR} = K - e$$

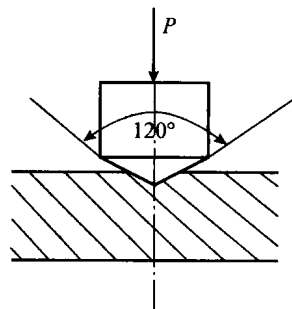


图 1-5 洛氏硬度实验示意图



式中：HR——洛氏硬度值；

K ——常数，用金刚石压头进行实验时 K 为 100，用钢球压头时 K 为 130；

e ——残余压痕深度。

测量较硬的材料，如淬火后的钢件和硬质合金时用金刚石压头；测量退火钢、有色金属、铜合金等相对较软的金属时，采用淬火钢球压头。

洛氏硬度的数值可直接从硬度计上的刻度盘上读出。刻度盘上的数值越大，说明压痕越浅，材料硬度越高；刻度盘上数值越小，说明压痕越深，材料硬度越低。为了能使一台硬度计能测量更大的硬度范围，可采用更大的实验载荷和不同的压头。常用的有三种标尺的洛氏硬度，分别是 HRA，HRB 和 HRC，应用最多的是 HRC。A 标尺用的是 120° 金刚石压头，总实验载荷为 588.4 N (60 kgf)，测量范围是 20~88HRA；B 标尺用的是淬火钢球压头，总实验载荷为 980.7 N (100 kgf)，测量范围是 20~100HRB；C 标尺用的是 120° 的金刚石压头，总实验载荷为 1471 N (150 kgf)，测量范围是 20~70HRC。

洛氏硬度表示方法是在硬度符号前注明硬度数值，如 46HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 46，75HRA 表示用 A 标尺测定的洛氏硬度值为 75。

洛氏硬度的优点是操作简便、迅速，硬度可直接读出，压痕较小，可在工件上进行试验，采用不同标尺可测定各种不同软硬的金属和厚薄不一的试样的硬度，因而广泛用于热处理质量检验。洛氏硬度的缺点是压痕较小，代表性差。若材料中有偏析及组织不均匀等缺陷，则所测硬度值重复性差，分散度大，故一般在被测试样的不同部位测量三点及以上，取平均值。此外，用不同标尺测得的硬度值彼此没有联系，不能直接比较。

3. 维氏硬度法

维氏硬度原理和布氏硬度相同，也是以压痕单位面积上的平均压力作为硬度值，但压头改为 136° 的金刚石正四棱锥体，如图 1-6 所示。压头在试验力 F 作用下将试样表面压出一个四方锥形的压痕，经一定保持时间后卸除试验力，测量压痕对角线平均长度 d ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$)，进而可以计算压痕面积 S ，试验力 F 除以压痕表面积 S 所得的商即为维氏硬度值。

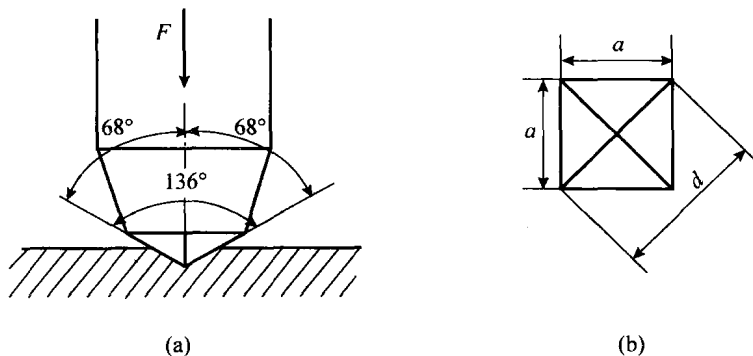


图 1-6 维氏硬度实验示意图

维氏硬度试验常用试验力范围为 49.03~980.7 N。如果维氏硬度试验时选用的试验力较小，达到 0.098~1.961 N，则可测定金属箔、极薄的表面层的硬度以及合金中各种

组成相的硬度。因为压痕尺寸较小，为了提高测量精度，需要配用显微放大装置，这就是显微维氏硬度（显微硬度）。维氏硬度用符号 HV 表示，计算公式如下

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中：F——载荷（N）；

S——压痕的表面积（mm²）；

d——压痕两对角线的算术平均长度（mm）。

试验后根据测得的 d 和 F，即可得到 HV 值。实际应用中，维氏硬度一般不计算出来，只需要根据 d 值查维氏硬度表即可求出硬度值。维氏硬度表示方法与布氏硬度相同，如 620HV30/30，表示在实验压力 30 kgf 持压 30 s 的情况下测得的维氏硬度值为 620。

维氏硬度值具有连续性（10~1 000HV），可测硬度范围很大，但金刚石压头价格高，一般不用于普通件的硬度测量。维氏硬度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之间无法统一的弊端；实验载荷可以很小，故压痕小，可用于较薄材料及渗氮、渗碳层的硬度测定。维氏硬度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，工作效率比洛氏硬度法低得多。

上述各种硬度测量法，相互间没有理论换算关系，故试验结果不能直接进行比较，应查阅硬度换算表进行比较。

四、韧性

拉伸和硬度试验中，试样所受的载荷都是从零逐渐增大的，称为静载荷。实际生产中，许多零件会受到冲击力作用，如活塞销、冲模等，此时不能再静载荷下的性能来描述冲击载荷作用下的性能。因为有些金属在静载荷下强度较高，但承受冲击载荷时却非常脆弱；相反，有些金属材料在冲击载荷下表现出较高的韧性，而在静载荷下的承载能力却很弱。故对工作中受冲击载荷的构件应考虑其韧性，而冲击韧性是衡量金属韧性的常用判据。

金属材料抵抗冲击载荷（动载荷）作用而不被破坏的能力称为冲击韧度，用符号 α_K 表示，单位为 J/cm²。冲击韧度值是在摆锤冲击试验机上测得的，见图 1-7（b）。

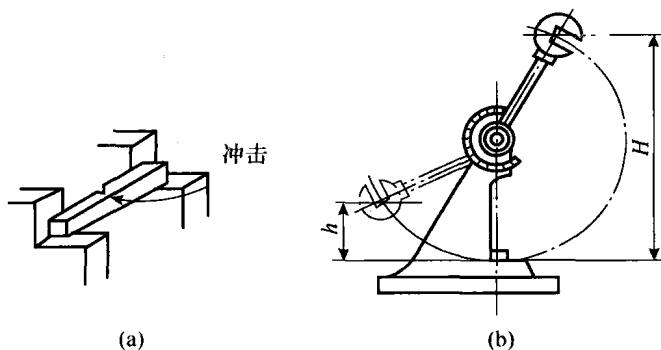


图 1-7 冲击试验示意图

实验时首先把被测材料制成图 1-8 所示的试样，把试样放在图 1-7（a）所示的工作



台上，试样缺口背向摆锤冲击方向。将一定重量 G 的摆锤升到一定高度 H 后自由落下，冲断试样后，摆锤上升高度为 h ，故试样折断时所吸收的功为

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

式中： A_K ——冲击吸收功 (J)；

G ——摆锤的重力 (N)， $G = mg$ ；

H ——摆锤举起高度 (m)；

h ——摆锤冲击试样后回升高度 (m)。

故冲击韧度值的计算公式为

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

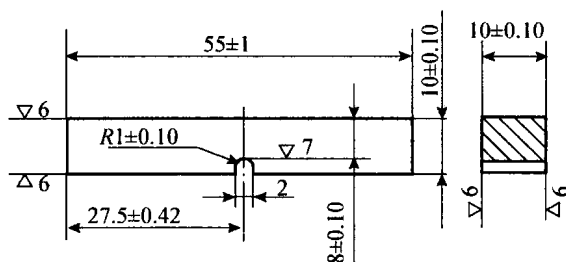


图 1-8 冲击韧性标准试样

冲击韧度值越高，材料韧性越好；反之，韧性则越差。实际工作中，零件的破坏是多次能量冲击导致的。实验表明：材料的多次冲击抗力由强度和塑性综合性能决定。冲击能量小时，取决于材料的强度；冲击能量大时，取决于材料的塑性。此外，材料的韧性还和温度有关，脆性转变温度越低的材料，低温下承受冲击的能力就越强。

五、疲劳强度

许多机械零件，如轴、齿轮、弹簧等，工作时的应力往往是随时间周期性变化，这种应力称为交变应力。在多次交变应力作用下，金属发生破坏时的应力值比静载荷时的屈服极限还低，这种现象称为金属的疲劳。这是由于零件中存在疲劳源（如裂纹、夹杂、刀痕等缺陷），在循环力或交变力作用下疲劳源处产生疲劳裂纹，并不断扩展，导致零件发生突然断裂。据统计，在机械零件失效中，大约 60%~70% 属于疲劳破坏。无论是韧性还是脆性材料，在疲劳断裂时，事先无明显塑性变形的预兆，往往是突然发生的，因此具有很大的危险性，易造成重大事故，故设计时应充分考虑材料的疲劳断裂。

疲劳按照应力状态不同可分为弯曲疲劳、扭转疲劳、拉压疲劳及复合疲劳；按照环境和接触情况不同可分为大气疲劳、腐蚀疲劳、高温疲劳、热疲劳、接触疲劳等；按照断裂寿命和应力高低不同可分为高周疲劳和低周疲劳。疲劳强度是指材料在无限多次交变应力作用下，不发生破坏的最大应力，用符号 σ_{-1} 表示。实际上不可能做无限次交变载荷实验，一般规定黑色金属取 $10^6 \sim 10^7$ 次，有色金属取 $10^7 \sim 10^8$ 次。

机件在重复冲击载荷作用下发生的疲劳断裂称为冲击疲劳。冲击疲劳抗力是一个取决于强度和塑性的综合力学性能，它具有以下特点：1) 与低周疲劳相似，冲击能量高时，材料的冲击疲劳抗力主要取决于塑性；冲击能量低时，冲击疲劳抗力则主要取决于强度。

2) 淬火回火钢的冲击疲劳抗力随回火温度不同不是单调变化的, 与常规单一力学性能指标之间也不存在对应关系, 而是在某一温度下有一个峰值, 该峰值随冲击能量增加向高温方向移动。3) 冲击韧度的影响, 因材料强度不同而异。

影响疲劳强度的因素主要有以下几种: 1) 应力集中。机件表面的缺口应力集中, 往往是引起疲劳破坏的主要原因。2) 表面粗糙度。表面粗糙度越低, 疲劳极限越高; 表面粗糙度越高, 疲劳极限越低。3) 残余应力及表面强化。残余应力与外加工作应力叠加, 构成合成总应力。叠加残余压应力, 总应力减小; 叠加残余拉应力, 总应力增大。残余压应力提高疲劳强度, 残余拉应力则降低疲劳强度。表面强化处理可在机件表面产生有利的残余压应力, 同时还能提高机件表面的强度和硬度, 都能有效提高疲劳强度。为提高金属零件的疲劳强度, 常对其表面进行精细加工、表面强化和喷丸等。

六、蠕变

在长期固定载荷作用下, 即使载荷在屈服点以下, 金属也会产生塑性变形的现象称为蠕变。蠕变是高温下金属力学性能的一个重要特点。

为保证在高温长时载荷作用下的机件不至于产生过量蠕变, 要求金属材料具有一定的蠕变极限。蠕变值是金属材料在高温长时载荷作用下的塑性变形抗力指标。各种材料的蠕变情况与强度有关, 比如铝合金发生蠕变时的温度约为 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而钢材要到 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上才会发生蠕变。蠕变极限一般有两种表达方式: 一种是在规定温度 t 下, 使试样在规定时间内产生的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}$ 不超过规定值的最大应力, 以符号 $\sigma_t^{\dot{\epsilon}}$ 表示; 另一种是在规定温度 t 下和在规定的试验时间 τ 内, 使试样产生的蠕变总伸长率 δ 不超过规定值的最大应力, 以符号 $\sigma_{\delta/\tau}$ 表示。材料的蠕变极限值越大, 材料的使用可靠度就越高; 温度越高或蠕变速度越小, 蠕变极限就越小。

高温材料在高温长时载荷作用下的断裂强度即持久强度极限。该值是指在规定温度 t 下, 达到规定的持续时间 τ 而不发生断裂的最大应力, 以 σ_t^{τ} 表示。例如某材料在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 承受 500 N/mm^2 的应力在 1000 h 后才断裂, 就说这种材料在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1000 h 的持久强度为 500 N/mm^2 , 用 $\sigma_{1000}^{800} = 500\text{ N/mm}^2$ 表示。

第二节 金属的物理性能和化学性能

一、物理性能

金属的物理性能是指金属固有的属性, 包括密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性和磁性等。

1. 密度

物质单位体积内所具有的质量称为密度 (体积质量), 其计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

