



中等职业教育“十一五”规划教材

# 金属材料与热处理

唐秀丽 主编

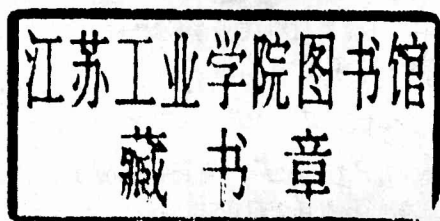
 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



中等职业教育“十一五”规划教材

# 金属材料与热处理

主 编 唐秀丽  
副主编 周立侠 李永力  
参 编 苏 伟 韩庆国 郭永红  
主 审 贾艳欣



机械工业出版社

本书共分十章,系统地阐述了金属的性能、金属学基础知识、非合金钢、钢的热处理、低合金钢与合金钢、铸铁、非铁金属材料与粉末冶金材料、非金属材料、金属表面处理技术简介、零件材料的选用及热处理。每章前有重点内容提示,章后有小结及复习题。此外,还增加了实验内容,以帮助学生更好地巩固理论知识。

本书主要适合于中等职业学校三年制机械制造与控制专业、数控技术应用专业及近机类专业基础课程的教学,也可作为有关技术人员和管理人员的培训教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理/唐秀丽主编. —北京:机械工业出版社,2008.1

中等职业教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-22701-4

I. 金… II. 唐… III. ①金属材料-专业学校-教材  
②热处理-专业学校-教材 IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 169037 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:崔占军 王海峰 责任编辑:齐志刚

责任校对:张晓蓉 封面设计:王奕文 责任印制:李妍

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 10.5 印张 · 257 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-22701-4

定价:16.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379193

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据2000年8月教育部颁布的中等职业学校《金属材料与热处理》课程教学大纲编写的,主要适合于中等职业学校三年制机械制造与控制专业、数控技术应用专业及近机类专业基础课程的教学。主要教学任务是:使学生掌握金属材料与热处理的基本理论和基本知识,初步了解金属材料的应用及零件的合理选材,初步掌握正确运用热处理工艺、合理安排零件工艺路线的方法。为学生学习后续专业课程,提高全面素质,增强职业应变能力打下一定的基础。

全书按58学时编写,其中包括实验指导。

本教材设计特点:

1) 充分体现专业特点,实例中多以机械中所用到的零件、刀具为主,研究零件及刀具所用材料类型、性能和热处理方法。

2) 充分考虑中等职业学校目前学生的基本素质和职业要求,以够用、实用为原则,其定位是:“是什么”,“怎么干”及工艺过程。

3) 除考虑知识目标的实现外,还考虑到能力目标的实现,设立与理论教学相对应的实验教学内容。

4) 在每章内容前加上“重点内容”说明,让学生知道这一章要学会什么。

5) 在每章后加上“小结”对本章主要知识点做总结;并在每章后配备一定量的复习题,对学生的学习情况进行初步检验。

知识教学目标:

1) 掌握金属材料的性能。

2) 理解金属学基础知识。

3) 掌握常用钢的热处理工艺方法。

4) 掌握常用的机械工程材料类型、牌号、力学性能及用途。

能力培养目标:

1) 具有查阅、检索相关技术资料的能力,掌握相关的技术标准。

2) 掌握金属材料的力学性能,能依据金属学基础知识来分析金属材料的性能和用途。

3) 具有正确选定一般零件的热处理方法及确定热处理工序的能力。

4) 掌握常用机械工程材料的牌号、力学性能及用途,具有合理选择工程材料的能力。

5) 获得一定的实验技能,具有分析问题和解决问题的能力。

本书由吉林航空工程学校唐秀丽(绪论、第一章、第二章、第四章、第五章)、苏伟(第三章)、李永力(第七章)、韩庆国(第十章)、长春市机械工业学校周立侠(第六章)、河

南机电学校郭永红(第八章、第九章、实验指导)编写。全书由天津石油职业技术学院贾艳欣审稿。

由于编者水平和经验有限,书中难免存在不足和错误,恳请广大读者批评指正。

编者



# 目 录

前言	1	一、Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的主要点、线、区	26
绪论	1	二、铁碳合金的分类	28
第一章 金属的性能	3	三、典型铁碳合金的结晶过程分析	29
第一节 金属的力学性能	3	四、铁碳合金相图的应用	31
一、强度	3	小结	33
二、塑性	5	复习与思考题	34
三、硬度	6	第三章 非合金钢(碳钢)	36
四、韧性	9	第一节 常存杂质元素对非合金钢性能的影响	36
五、疲劳强度	10	一、锰的影响	36
第二节 金属的物理性能与化学性能	11	二、硅的影响	36
一、金属的物理性能	11	三、硫的影响	36
二、金属的化学性能	13	四、磷的影响	37
小结	13	第二节 非合金钢的分类	37
复习与思考题	14	一、按钢中含碳量分类	37
第二章 金属学基础知识	16	二、按钢的质量分类	37
第一节 金属的晶体结构	16	三、按用途分类	37
一、晶体与非晶体	16	第三节 非合金钢的牌号、性能及用途	37
二、晶体结构的基本知识	16	一、碳素结构钢	37
三、金属的实际晶体结构	18	二、优质碳素结构钢	38
第二节 纯金属的结晶	19	三、碳素工具钢	40
一、纯金属的冷却曲线与过冷度	19	四、铸钢	41
二、金属的结晶过程	20	小结	42
三、金属结晶后的晶粒大小	20	复习与思考题	42
四、金属的同素异构转变	21	第四章 钢的热处理	44
第三节 合金的晶体结构与结晶	22	第一节 钢在加热时的组织转变	44
一、合金的基本概念	22	一、钢在加热和冷却时的相变温度	44
二、合金的相结构	23	二、加热时奥氏体的形成	45
第四节 铁碳合金的基本组织	24	三、奥氏体晶粒的长大及影响因素	46
一、铁素体	25	第二节 钢在冷却时的组织转变	46
二、奥氏体	25	一、过冷奥氏体等温转变曲线	47
三、渗碳体	25	二、过冷奥氏体等温转变产物的组织及性能	47
四、珠光体	25	三、过冷奥氏体的连续冷却转变	48
五、莱氏体	26		
第五节 铁碳合金相图	26		

第三节 钢的退火与正火 .....	51	第六节 特殊性能钢 .....	82
一、钢的退火 .....	51	一、不锈钢 .....	82
二、钢的正火 .....	52	二、耐热钢 .....	84
第四节 钢的淬火 .....	53	三、耐磨钢 .....	87
一、钢的淬火工艺 .....	53	小结 .....	87
二、钢的淬透性和淬硬性 .....	55	复习与思考题 .....	88
三、淬火缺陷 .....	56	<b>第六章 铸铁</b> .....	90
第五节 钢的回火 .....	57	第一节 铸铁概述 .....	90
一、淬火钢在回火时组织与性能的变化 .....	57	一、铸铁的特点和分类 .....	90
二、回火的种类及应用 .....	58	二、铸铁的石墨化及影响因素 .....	90
三、回火脆性 .....	59	第二节 常用铸铁 .....	91
第六节 钢的表面热处理与化学热处理 .....	59	一、灰铸铁 .....	91
一、表面热处理 .....	59	二、球墨铸铁 .....	93
二、化学热处理 .....	61	三、蠕墨铸铁 .....	95
三、表面热处理与化学热处理的区别 .....	62	四、可锻铸铁 .....	96
小结 .....	63	第三节 合金铸铁 .....	98
复习与思考题 .....	63	一、耐磨铸铁 .....	98
<b>第五章 低合金钢与合金钢</b> .....	66	二、耐热铸铁 .....	98
第一节 合金元素在钢中的作用 .....	66	三、耐蚀铸铁 .....	98
一、合金元素在钢中的存在形式及作用 .....	66	小结 .....	99
二、合金元素对钢的热处理和力学性能的影响 .....	67	复习与思考题 .....	99
第二节 低合金钢的分类与编号 .....	69	<b>第七章 非铁金属材料与粉末冶金材料</b> .....	101
一、低合金钢的分类 .....	69	第一节 铝及铝合金 .....	101
二、低合金高强度结构钢的编号 .....	69	一、工业纯铝 .....	101
三、常用低合金高强度结构钢 .....	70	二、铝合金的分类与编号 .....	101
第三节 合金钢的分类与编号 .....	71	三、铝合金的热处理 .....	102
一、合金钢的分类 .....	71	四、变形铝合金 .....	102
二、合金钢牌号表示方法 .....	72	五、铸造铝合金 .....	104
第四节 合金结构钢 .....	72	第二节 铜及铜合金 .....	106
一、合金渗碳钢 .....	72	一、工业纯铜 .....	106
二、合金调质钢 .....	74	二、铜合金 .....	106
三、合金弹簧钢 .....	74	第三节 滑动轴承合金 .....	109
四、滚动轴承钢 .....	76	一、对轴承合金的性能要求 .....	109
第五节 合金工具钢 .....	78	二、轴承合金的组织 .....	110
一、合金刀具钢 .....	78	三、常用轴承合金 .....	110
二、合金模具钢 .....	80	第四节 粉末冶金材料 .....	112
三、合金量具钢 .....	82	一、粉末冶金工艺 .....	112
		二、硬质合金 .....	112

三、其他粉末冶金材料 .....	115	四、美术装饰漆膜 .....	129
小结 .....	116	第四节 金属表面处理新技术 .....	129
复习与思考题 .....	116	一、金属材料表面的非晶态处理 .....	129
<b>第八章 非金属材料</b> .....	119	二、陶瓷涂层的应用 .....	129
第一节 高分子材料 .....	119	三、金刚石薄膜的应用 .....	129
一、塑料 .....	119	四、激光冲击硬化 .....	129
二、橡胶 .....	120	小结 .....	130
三、胶粘剂 .....	121	复习与思考题 .....	130
第二节 陶瓷材料 .....	122	<b>第十章 零件材料的选用及热处理</b> .....	131
一、陶瓷的分类 .....	122	第一节 零件的失效分析 .....	131
二、陶瓷的性能 .....	122	一、失效的概念 .....	131
三、常用工程结构陶瓷的种类、 性能和用途 .....	122	二、零件的失效形式 .....	131
第三节 复合材料 .....	123	三、零件失效原因 .....	132
一、复合结构材料的组成和分类 .....	123	第二节 工程材料的选用原则及方法步骤 .....	132
二、复合材料的性能特点 .....	123	一、选材的原则 .....	132
三、常用复合材料的种类及应用 .....	124	二、选材的方法与步骤 .....	134
小结 .....	124	第三节 热处理技术条件的标注 及工序位置 .....	135
复习与思考题 .....	125	一、热处理的技术条件 .....	135
<b>第九章 金属表面处理技术简介</b> .....	126	二、热处理的工序位置 .....	136
第一节 金属表面强化处理 .....	126	第四节 典型零件的选材及热处理 工艺分析 .....	137
一、金属表面的覆盖层强化 .....	126	一、轴类零件的选材 .....	137
二、金属的表面热处理强化 .....	126	二、齿轮类零件的选材 .....	139
三、金属的表面冶金强化 .....	126	三、箱座类零件的选材 .....	141
四、金属的表面形变强化 .....	127	小结 .....	142
五、金属的表面复合强化 .....	127	复习与思考题 .....	142
第二节 金属表面防腐处理 .....	127	<b>实验指导</b> .....	143
一、金属的腐蚀 .....	127	实验一 拉伸、硬度及冲击试验 .....	143
二、金属腐蚀的防护方法 .....	127	实验二 铁碳合金平衡组织观察实验 .....	149
第三节 金属表面装饰处理 .....	128	实验三 钢的热处理及其硬度测定 .....	151
一、表面抛光 .....	128	<b>附录</b> .....	154
二、表面着色 .....	128	<b>参考文献</b> .....	160
三、光亮镀层 .....	129		



# 绪 论

材料、能源和信息是现代文明及人类社会进步的三大支柱。而能源和信息的发展，在一定程度上又依赖于材料的进步。因此，许多国家都把材料科学作为重点发展的学科之一。

## 一、金属材料与热处理的发展

我国是世界上使用金属材料最早的国家之一。根据大量出土文物考证，我国在公元前16世纪就开始使用金属材料。殷商时代(公元前16世纪至公元前1066年)，在生产工具、武器、生活用具等方面已大量使用青铜。如重达875kg的司母戊大方鼎，不仅体积庞大，而且花纹精巧，造型美观，说明当时人们已具有很高的铸造技术。我国还是生产铸铁最早的国家。公元前5世纪至公元前4世纪的春秋时期已出现了铸铁的铸造。特别在战国后期，铸铁件生产得到了迅速发展。与国外相比，我国铸铁生产比欧洲约早1000年。

在热处理技术方面，远在西汉时就有“水与火合为粹(同淬)”之说，东汉时则有“清水淬其锋”等有关热处理技术的记载。出土的文物如西汉的刀剑等，经金相检验，发现其内部组织接近于淬火马氏体和渗碳体组织。这说明我国在西汉时已相继采用各种热处理方法，并已具有相当高的水平。

目前，世界各国都在积极采取措施，研究和开发新材料，不断改进现有金属材料的加工工艺，提高其性能，充分发挥其潜力，从而达到节约金属材料的目的。如轻体汽车的设计，就是利用高强度钢材与非金属材料等，达到减轻汽车自重、节约金属材料和省油的目的。

20世纪中叶，随着科学技术的发展、社会环保意识的加强以及生产的需求，出现了许多的非金属材料。非金属材料的使用，不仅满足了机械制造工程中的特殊需求，而且还大大简化了机械制造的工艺过程，降低了成本，提高了产品的使用性能。其中比较突出的就是塑料、陶瓷和复合材料的广泛应用。

## 二、金属材料的应用

金属材料的发展与国民经济的发展有密切的关系，从日常生活用具到高、精、尖的产品，从简单的手工工具到复杂的飞机、机器人，都是由不同种类、性能的工程材料加工成的零件组合装配而成。

金属材料不仅具有优良的物理、化学和力学性能，能满足各种零件的使用要求，而且具有良好的加工工艺性能，适合制造各种产品，尤其是热处理工艺能改变金属材料表面及内部的组织结构与性能，可满足不同的使用要求。据统计，目前的机械工业部门所用的材料中有90%以上是金属材料。金属材料工业已成为我国现代农业、工业、国防及科学技术的重要物质基础，成为我国国民经济发展的支柱产业之一。

我国依靠自己的力量，用自己生产的金属材料，建成了长江大桥；成功地发射了跨进世界先进行列的运载火箭；掌握了卫星回收技术；制造相当数量的远洋巨轮、内燃机车等。机械产品不仅应用到国内各个生产领域，而且有相当数量的金属材料和机械产品远销世界许多

国家。年产量亿吨以上钢铁及数百万吨的非金属材料，为我国各行各业飞速发展提供了可靠的物质保证。这些成就充分反映了工程材料在国民经济中重要作用与地位。

### 三、本课程的基本内容

本课程主要介绍金属的力学性能和物理、化学性能；金属学基础知识(金属的晶体结构、结晶过程,铁碳合金的组织及铁碳合金相图)；钢的热处理原理(钢在加热、冷却时的组织转变)和热处理工艺(退火、正火、淬火、回火、表面热处理、化学热处理等)；碳素钢、合金钢、铸铁、非铁金属及硬质合金等金属材料的牌号、成分、组织、热处理、性能及用途；金属材料的应用及零件设计时的合理选材；正确运用热处理工艺、合理安排零件工艺路线；常用的非金属材料等。此外，本课程还增加了实验指导，以帮助学生更好地巩固理论知识。

### 四、本课程的特点及学习建议

- 1) 金属材料与热处理是一门从生产实践中发展起来，又直接为生产服务的专业基础课，具有很强的实践性。
- 2) 由于金属材料的种类繁多，其性能又千变万化，因此课程涉及的专业术语多，概念多，而且较抽象，学习起来有一定的难度。
- 3) 学习本课程时，在内容上既要注意理解基本概念和基本原理，按材料的成分、组织、性能和用途这一主线进行学习和记忆，逐步熟悉常用技术名词、符号和材料牌号。
- 4) 在学习中不仅要认真系统地学习理论知识，而且要重视习题课、实验课，适当安排钳工、金工实习等实践性教学环节。
- 5) 利用现代化教学手段，采用多媒体教学，结合日常生产、生活中材料的应用，用丰富的教学手段来激发学生们的学习兴趣。

### 五、学习本课程应达到的基本要求

学习本课程的基本要求是：

- 1) 掌握有关金属材料与热处理的基本理论和基本知识。
- 2) 掌握常用工程材料的牌号、性能、用途。
- 3) 了解金属材料的应用及零件设计时的合理选材。
- 4) 掌握正确运用热处理工艺、合理安排零件工艺路线的方法。

作为一名工程技术人员或管理人员，了解金属材料和非金属材料的种类、牌号、性能、应用及热处理工艺过程是非常重要的。另外，学习本课程的有关知识对于提高自身素质，更好地适应现代化生产具有很好的指导意义。

# 第一章 金属的性能

**重点内容** 金属的力学性能是判定材料优劣的主要指标，要通过各种实验进行测定。其测定原理只需作一般了解，重点是金属力学性能指标的表示方法和实际应用，同时还应初步掌握拉伸试验、冲击试验及布氏、洛氏、维氏硬度的测试方法。

金属材料是现代机械制造业的基本材料，广泛地应用于工业生产和制造生活用品。为了正确合理地使用金属材料，必须了解其性能。金属材料的性能分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指金属材料在使用过程中所表现出的性能，它包括物理性能(如密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、磁性等)、化学性能(如耐蚀性、抗氧化性、化学稳定性等)、力学性能(如强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等)。

工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出的性能，它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理工艺性能、切削加工性能。

## 第一节 金属的力学性能

机械零件或工具在使用过程中，都要受到不同力的作用，在产品设计和材料选择中也是把力学性能作为主要的依据，因此金属材料的力学性能非常重要。金属的力学性能是指金属在力作用下所显示的与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能。主要有强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等。

表征和判定金属力学性能所用的指标和依据，称为金属力学性能判据。判据的高低表征了金属抵抗各种损伤作用的能力，也是金属制件设计时选材和进行强度计算的主要依据。

### 一、强度

材料受到外力(载荷)作用时，引起尺寸与形状的改变称为变形。金属的变形一般分为弹性变形和塑性变形。物体在外力作用下产生变形后，当外力不大时，一旦去除外力，则物体又恢复到原始的形状和尺寸，这种变形称为弹性变形，若外力去除后物体不能恢复到原始的形状和尺寸，这种变形称为塑性变形(或永久变形)。

强度是指金属抵抗永久变形(塑性变形)和断裂的能力。强度的大小通常用应力来表示。金属受外力作用时，导致物体内部之间的相互作用力，称为内力，其大小和外力相等，方向相反。单位面积上的内力称为应力。用符号“ $\sigma$ ”表示。单位为 Pa(帕)，即  $\text{N}/\text{m}^2$ ，工程上常用 MPa(兆帕)， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ ，或  $1\text{MPa} = 1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

强度的主要判据有屈服点、抗拉强度。

#### 1. 拉伸试验

强度指标一般可以通过金属拉伸试验来测定。试验前，将被测金属材料制成规定形状和

尺寸的标准试样,常用的圆形拉伸试样如图 1-1 所示。图中  $d_0$  为试样的原始直径(mm),  $L_0$  为试样的原始标距长度(mm)。根据国家标准规定,拉伸试样分为长试样( $L_0 = 10d_0$ )和短试样( $L_0 = 5d_0$ )两种。

拉伸试验时把标准试样装夹在拉伸试验机上,然后对试样缓慢施加拉力,使之不断伸长直到拉断为止。在此过程中,试验机自动绘制出拉伸力和试样伸长量的关系曲线,称为力-伸长曲线。

## 2. 力-伸长曲线

图 1-2 为低碳钢的力-伸长曲线,图中纵坐标表示拉伸力  $F$ ,单位为 N;横坐标表示伸长量  $\Delta L$ ,单位为 mm。

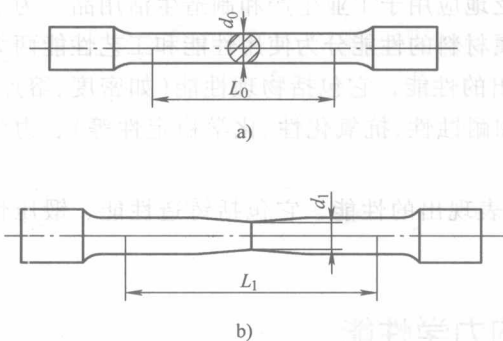


图 1-1 圆形拉伸试样简图

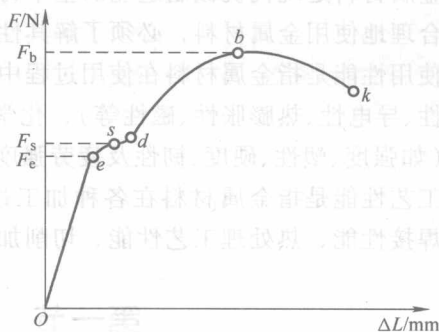


图 1-2 力-伸长曲线

从图中可以看出下面几个变形阶段:

(1)  $Oe$ ——弹性变形阶段 试样的伸长量与拉伸力成正比例关系,此时若卸载,试样能完全恢复原状。 $F_e$  为试样产生弹性变形的最大拉伸力。

(2)  $sd$ ——屈服阶段 拉伸力超过  $F_e$  时,试样开始产生塑性变形,当拉伸力增加到  $F_s$  时,力-伸长曲线在  $s$  点后出现平台或锯齿状,这种在拉伸力不增加,变形量却继续增加的现象称为屈服。

(3)  $db$ ——冷变形强化阶段 拉伸力超过  $F_s$  时,欲使试样继续伸长,必须不断增大拉伸力。随着塑性变形的增大,试样变形抗力也逐渐增加,这种现象称为冷变形强化。

(4)  $bk$ ——缩颈阶段 当拉伸力增加到  $F_b$  时,试样的局部截面开始收缩,即出现“缩颈”现象,由于截面积减小,所承受的拉伸力迅速减小, $k$  点时试样发生断裂。 $F_b$  是试样拉断前所能承受的最大拉伸力。

## 3. 强度指标

(1) 屈服点  $\sigma_s$  (或屈服强度  $\sigma_{r.0.2}$ ) 是指试样在拉伸试验过程中力不增加(保持恒定)仍能继续伸长(变形)时的应力。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中  $F_s$ ——产生屈服时的拉伸力(N);

$A_0$ ——试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

对于无明显屈服现象的金属材料(如高碳钢、铸铁),工程上常采用试样去除拉伸力后,其标距部分残余伸长量为 $0.2\%L_0$ 时的应力作为该材料的条件屈服点(屈服强度),用 $\sigma_{r,0.2}$ 表示,如图1-3所示。

$$\sigma_{r,0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

式中  $F_{0.2}$ ——残余伸长量为 $0.2\%L_0$ 时的拉伸力(N)。

$\sigma_s$  或  $\sigma_{r,0.2}$  表示了材料对微量塑性变形的抵抗能力,零件工作时,一般不允许产生塑性变形,因此,它是机械零件设计和选材时的主要依据,也是评定金属材料优劣的重要指标,例如,机械零件在工作时如受力过大,会因过量变形而失效。

(2) 抗拉强度  $\sigma_b$  是指试样在拉断前所能承受的最大拉应力。 $\sigma_b$  表示材料对最大均匀塑性变形和断裂的抵抗能力,也是设计机械零件和选材的主要依据。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中  $F_b$ ——试样断裂前所承受的最大拉伸力(N)。

## 二、塑性

塑性是指金属在断裂前材料发生不可逆永久变形的能力。其主要判据为断后伸长率和断面收缩率。

(1) 断后伸长率  $\delta$  是指试样拉断后的标距伸长量与原始标距的百分比。

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

式中  $L_0$ ——试样原始标距长度(mm);

$L_1$ ——试样拉断后的标距长度(mm)。

对于同一种材料,标距长度不同,其断后伸长率数值不同,而且不能直接比较。长试样的断后伸长率用符号  $\delta_{10}$  表示,通常写成  $\delta$ ;短试样用符号  $\delta_5$  表示。同一材料的  $\delta_5 > \delta_{10}$ 。因此,在比较不同材料的断后伸长率时,应采用同样尺寸规格的试样。

(2) 断面收缩率  $\psi$  是指试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比。

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

式中  $A_0$ ——试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ );

$A_1$ ——试样断口处横截面积( $\text{mm}^2$ )。

一般,  $\delta$  和  $\psi$  值越大,表示材料的塑性越好。断面收缩率与试样的尺寸因素无关。塑性

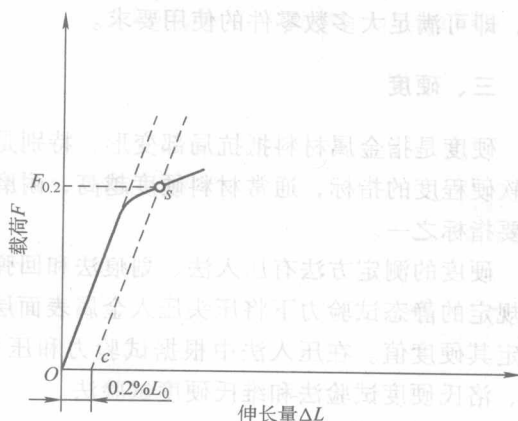


图1-3 屈服强度的测定

好的材料可用轧制、锻造、冲压等方法加工成形。另外，若零件使用中稍有超载，也会因其塑性变形而不致突然断裂，提高了工作的安全性。所以，大多数机械零件除要求具有足够的强度外，还必须具有一定的塑性。一般情况下，断后伸长率达5%或断面收缩率达10%的材料，即可满足大多数零件的使用要求。

### 三、硬度

硬度是指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。硬度是衡量材料软硬程度的指标，通常材料硬度越高，耐磨性越好，故常用硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标之一。

硬度的测定方法有压入法、划痕法和回弹高度法。其中压入法应用最为广泛。压入法是在规定的静态试验力下将压头压入金属表面层，用压痕深度的大小或压痕表面面积的大小来测定其硬度值。在压入法中根据试验力和压头不同，常用的硬度测试方法有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法。

#### 1. 布氏硬度

(1) 布氏硬度试验原理 采用直径为  $D$  的硬质合金球，在相应的试验力  $F$  的作用下，压入试件表面，保持一定时间后卸除试验力，测定压痕直径，求出球形压痕的表面积，压痕单位面积上所承受的平均压力 ( $F/A$ ) 即为布氏硬度值，如图 1-4 所示。布氏硬度用符号 HBW 表示。

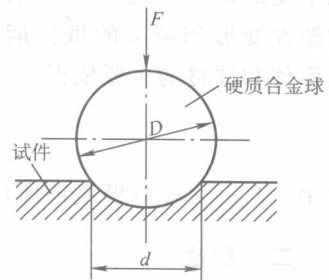


图 1-4 布氏硬度试验原理图

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

式中 HBW——布氏硬度；

$A_{\text{压}}$ ——压痕表面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$F$ ——试验力 (N)；

$D$ ——压头直径 (mm)；

$d$ ——压痕平均直径 (mm)。

由上式可以看出，当  $F$ 、 $D$  一定时，布氏硬度值仅与压痕直径  $d$  的大小有关。 $d$  越小，布氏硬度值越大，也就是材料硬度越高；反之，则说明材料较软。

在实际测试时，硬度值不必用上述公式计算，一般用刻度放大镜测出压痕直径  $d$ ，然后根据  $d$  值的大小查附表 1 即可求出所测得的硬度值。因各种材料软硬不同，工件薄厚、大小不同，布氏硬度试验时，应选用不同的试验力、不同的直径的压头和试验力保持时间。按国标规定，压头球体直径  $D$  有 1mm、2.5mm、5mm 和 10mm 四种，实践证明，当采用不同大小的试验力和不同直径压头进行试验时，只要能满足  $F/D^2$  值为一常数，且压痕直径控制在  $(0.24 \sim 0.6)D$  之间，则同一硬度材料所测得的布氏硬度值就会相同，不同硬度的材料所测得的硬度值就可以进行比较， $0.102 \times F/D^2$  的比值按规定分为六种：30、15、10、5、2.5 和 1。布氏硬度试验规范见表 1-1。



表 1-1 布氏硬度试验规范(摘自 GB 231.1—2002)

材 料	布氏硬度范围	$0.102F/D^2$	备 注
钢 铸铁	<140	10	$F$ 单位: N $D$ 单位: mm 压痕中心距试样边缘距离至少为压痕平均直径的 2.5 倍 两相邻压痕中心距离至少为压痕平均直径的 3 倍 试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍。 试验后, 试样支撑面应无可见变形痕迹
	$\geq 140$	30	
铜及其合金	<35	5	
	35~130	10	
	$\geq 130$	30	
轻金属及其合金	<35	2.5	
	35~80	5	
		10	
		15	
	>80	10	
15			
铅、锡		1	

(2) 布氏硬度表示方法 布氏硬度值的单位为  $N/mm^2$ , 但习惯上只写明硬度值而不标单位。测定的硬度值应标注在硬度符号的前面。除了保持时间为 10~15s 的试验条件外, 在其他条件下试验测得的硬度值, 均应在硬度符号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: 150HBW10/1000/30 表示用直径为 10mm 的硬质合金球, 在 1000kgf(9807N) 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 150。

一般在零件图或工艺文件上标注材料要求的布氏硬度值时, 不规定试验条件, 只需标出要求的硬度值范围和硬度符号, 例如 200~230HBW。

(3) 应用范围及优缺点 布氏硬度适用于测定 HBW 值小于 650 的金属材料。主要用来测量灰铸铁、钢铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材等。布氏硬度试验压痕面积较大, 能较真实地反映出材料的平均性能, 具有较高的测量精度。但因压痕较大, 布氏硬度不适宜检验薄件或成品件。

## 2. 洛氏硬度

(1) 洛氏硬度试验原理 采用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头, 以规定的试验力使其压入试样表面。试验时, 先加初试验力, 然后加主试验力, 压入试样表面, 经规定的保持时间后, 卸除主试验力, 在保留初试验力的情况下, 用测量的残余压痕深度增量计算硬度值的一种压痕硬度试验方法, 如图 1-5 所示。

在图 1-5 中, 0-0 位置为金刚石压头还没有和试样接触的位置。1-1 位置是在初试验力作用下压头所处的位置, 压入深度为  $h_1$ , 2-2 位置是在总试验力(初试验力+主试验力)作用下压头所处的位置, 压入深度为  $h_2$ 。3-3 位置是卸除主试验力后压头所处的位置, 由于金属弹性变形得到恢复, 此时压头实际压入深度为  $h_3$ 。故由于主试验力所引起的塑性变形而使压头压

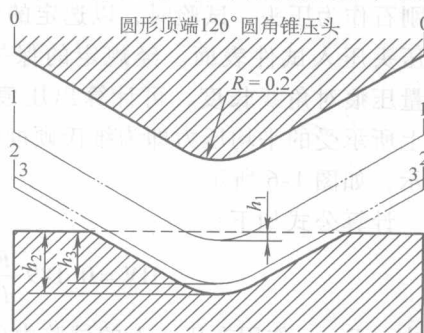


图 1-5 洛氏硬度试验原理图

入深度为  $h = h_3 - h_1$ 。 $h$  值称为残余压痕深度增量。洛氏硬度值由  $h$  的大小确定，压入深度  $h$  值越大，硬度越低；反之，则硬度越高。一般说来，按照人们习惯上的概念，数值越大，硬度越高。因此采用一个常数  $K$  减去  $h$  来作为硬度值。每  $0.002\text{mm}$  的压痕深度为一个硬度单位，可由硬度计表盘上直接读数。洛氏硬度用符号 HR 表示。计算公式如下：

$$\text{HR} = N - \frac{h}{0.002}$$

式中  $N$ ——金刚石作压头， $N$  取 100；淬火钢球作压头， $N$  取 130；

$h$ ——残余压痕深度增量 (mm)。

(2) 常用洛氏硬度标尺及适用范围 为使同一硬度计能测试不同硬度范围的试件，可采用不同的压头和试验力。根据压头类型和试验力的不同，具有不同的标尺。按国标规定有九种标尺，常用的有 HRA、HRB、HRC 三种。其中 HRC 应用最广。

洛氏硬度无单位，表示方法是将硬度值写在硬度符号前面。例如 75HRA、90HRB、60HRC 等。洛氏硬度各标尺间没有对应关系。洛氏硬度试验条件及应用范围见表 1-2。

表 1-2 常用洛氏硬度试验规范 (摘自 GB/T 230—1991)

硬度符号	压头类型	初试验力 $F_0/\text{N}$	主试验力 $F_1/\text{N}$	总试验力 $F/\text{N}$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	98.07	490.3	588.4	20~88	硬质合金，表面淬火件、渗碳钢等
HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 钢球	98.07	882.6	980.7	20~100	非铁金属、退火钢、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥	98.07	1373	1471	20~70	调质钢、淬火钢等

(3) 洛氏硬度试验优缺点 洛氏硬度方法操作简单、迅速，测试的硬度值范围较大，试样表面压痕较小，可以直接测量成品或较薄工件。但因压痕小，对于组织和硬度不均匀的材料，测得的数值不够准确。通常要在试件上不同部位测定三点取其平均值。

### 3. 维氏硬度

(1) 维氏硬度试验原理 维氏硬度试验原理与布氏硬度试验原理相似，也是根据压痕单位面积上的试验力大小来计算硬度值，区别是采用两相对面夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥体金刚石作为压头。试验时，以选定的试验力 ( $49.03 \sim 980.7\text{N}$ ) 将压头压入试件表面。经规定的保持时间后，卸除试验力，测量压痕对角线长度，可计算出压痕表面积，压痕单位面积上所承受的平均压力即为维氏硬度值。维氏硬度用符号 HV 表示，如图 1-6 所示。

计算公式如下：

$$\text{HV} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

式中  $F$ ——作用在压头上的试验力 (N)；

$d$ ——压痕两条对角线长度算术平均值 (mm)。

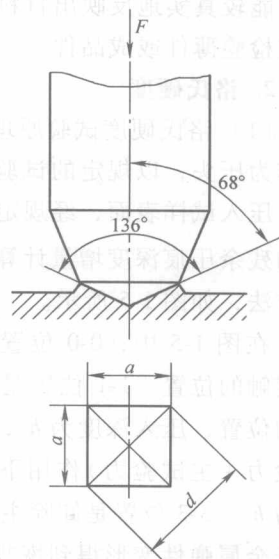


图 1-6 维氏硬度试验原理图

在实际测试时, 维氏硬度值不用计算, 而是用测微计测出压痕对角线的长度, 计算出平均值后, 经查表就可得出维氏硬度值。

(2) 维氏硬度的表示方法 维氏硬度的表示方法与布氏硬度相同, 在符号 HV 的前面写出硬度值, 试验条件写在符号的后面。若试验力保持时间为 10 ~ 15s 时, 可以不标出。如 640HV30/20 表示在 30kgf(292.4N) 试验力作用下, 保持 20s 测得的维氏硬度值为 640。

(3) 维氏硬度的应用范围及优缺点 维氏硬度的测量范围在 5 ~ 1000HV, 可以测量从极软到极硬的材料, 常用来测量薄片金属、金属镀层及零件表面硬化层的硬度。

维氏硬度试验力小, 压痕浅、轮廓清晰, 数值准确可靠。但需要测量对角线的长度, 然后经计算或查表确定, 故效率低。不适于大批测试。

#### 四、韧性

对于承受冲击载荷的零件, 如冲床的冲头、锻锤的锻杆、发动机曲轴等, 不仅要满足在静力作用下的强度、塑性、硬度等性能判据, 还必须具备足够的韧性。韧性是指金属在断裂前吸收变形能量的能力。

韧性的判据是通过冲击试验测定的。

##### 1. 摆锤式一次冲击试验

常用的摆锤式一次冲击试验是在专门的摆锤试验机上进行的。按 GB/T 229—1994 规定, 将被测材料制成标准冲击试样(U形或V形), 如图 1-7 所示。试验时, 将试样缺口背向摆锤冲击方向放在试验机支座上, 如图 1-8 所示。将摆锤举至  $h_1$  高度, 摆锤具有势能  $mgh_1$ , 然后让摆锤自由落下, 冲断试样后, 并反向摆至高度  $h_2$ , 此时摆锤具有的势能为  $mgh_2$ 。摆锤冲断试样所消耗的能量, 就是试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功, 称为冲击吸收功, 用  $A_K$  表示, 单位为焦耳, 符号为“J”。(U形试样用  $A_{KU}$  表示, V形试样用  $A_{KV}$  表示)。

$$A_K = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2)$$

$A_K$  值可由冲击试验机刻度盘上直接读出, 不需计算。国家标准现已规定采用  $A_K$  作为韧性判据,  $A_K$  值越大, 表示材料韧性越好。

##### 2. 冲击吸收功-温度关系曲线

冲击吸收功与温度有关, 由图 1-9 可知,  $A_K$  随温度降低而减小, 在某一温度区域, 冲击吸收功急剧下降, 这一温度区域称为韧脆转变温度。在韧脆转变温度以下, 金属由韧性断裂变为脆性断裂。韧脆转变温度越低, 材料的低温抗冲击性能越好。

非合金(碳素)结构钢的韧脆转变温度约为  $-20^{\circ}\text{C}$ , 因此在较寒冷地区使用的非合金(碳素)结构钢构件, 如车辆、桥梁、输油管道等, 在冬天易发生脆断现象。因此, 在选择材料时, 应使其工作条件的最低温度高于材料的韧脆转变温度。

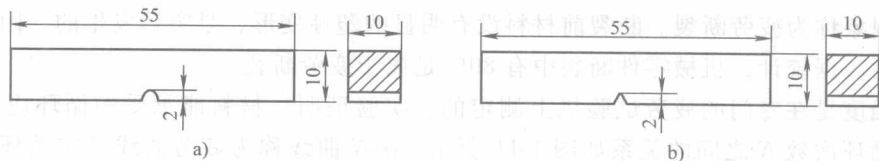


图 1-7 冲击试样

a) U形缺口 b) V形缺口