



普通高等专科教育机电类规划教材
机械工业出版社精品教材

机械工程材料

● 朱 莉 王运炎 编



机械工业出
CHINA MACHINE P



普通高等专科教育机电类规划教材

机械工业出版社精品教材

机械 工 程 材 料

朱莉 王运炎 编



机械工业出版社

本书是为了适应新时期高专、高职院校教学改革的需要,并参阅了机械工业出版社出版的高等专科学校原规划教材《机械工程材料》(王运炎主编)编写的。

全书共分十一章,主要为金属材料的力学性能,金属学基础知识,钢的热处理,金属的塑性变形及再结晶,常用的金属材料、非金属材料 and 复合材料,机械制造中零件材料的选择等。在每章后面都附有可供选用的习题与思考题。

本书是高专、高职院校机械类、近机械类专业用教材,同时适用于职工大学、业余大学,中等专业学校也可选用,并可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/朱莉,王运炎编. —北京:机械工业出版社, 2005.8

普通高等专科学校教育机电类规划教材

ISBN 7-111-17170-5

I. 机… II. ①朱…②王… III. 机械制造材料—高等学校—教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 091017 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:王海峰 王世刚

责任编辑:王海峰 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧

封面设计:饶薇 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ 14.5 印张·353 千字

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

为适应新时期高专、高职院校教学改革需要，我们参阅机械工业出版社出版的高等专科学校原规划教材《机械工程材料》（王运炎主编）编写了本教材。本教材可与机械工业出版社出版的《机械工程材料实验》（王运炎编）和高等教育出版社出版的教学用书《金相图谱》（王运炎主编）配套使用。

全书共分十一章，主要为金属材料的力学性能，金属学基础知识，钢的热处理，金属的塑性变形及再结晶，常用的金属材料、非金属材料 and 复合材料，机械制造中零件材料的选择等。在每章后面都附有可供选用的习题与思考题。在全书最后备有四个附录，可供读者查阅。本书是高专、高职院校机械类、近机械类专业用教材，同时适用于职工大学、业余大学，中等专业学校也可选用，并可供有关技术人员参考。

本书在内容编排上主要有以下几点说明：①本课程适宜安排在金工教学实习和金属工艺学课程后进行教学。②全书在简述金属学基本知识的基础上，以成分—加工工艺—组织—性能间关系的规律为主线处理各章的内容，并在第十一章“机械制造中零件材料的选择”中综合应用，起归纳、总结、巩固、提高的作用。③全书统一采用法定计量单位制，单位统一用符号表示，如强度指标的单位一律用 MPa；冲击吸收功的单位用 J。④全书有近百张显微组织照片，图面清晰、典型，规格一致，以利教学。⑤每章都附有要求学生经过独立思考后才能完成的习题与思考题，教师可结合具体情况选择布置，以利学生掌握基本概念，巩固所学知识，培养分析、解决实际问题的能力。

本书由上海理工大学朱莉、王运炎编。上海理工大学吴凯令同志为本书提供部分金相照片，在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
一、材料的分类及其在工程技术中的应用	1
二、材料的发展及材料科学的形成	2
三、本课程的目的、任务和学习方法	3
第一章 金属材料的力学性能	4
第一节 强度、刚度、弹性及塑性	4
一、力-伸长曲线与应力-应变曲线	4
二、刚度和弹性	5
三、强度	6
四、塑性	7
第二节 硬度	8
一、布氏硬度	8
二、洛氏硬度	9
三、维氏硬度	10
第三节 冲击韧度	11
一、冲击试验方法与原理	11
二、冲击试验的应用	12
第四节 断裂韧度	13
一、裂纹扩展的基本形式	13
二、应力场强度因子 K_{I}	13
三、断裂韧度 K_{Ic} 及其应用	14
第五节 疲劳	14
一、疲劳现象	14
二、疲劳曲线与疲劳极限	15
三、提高疲劳极限的途径	16
习题与思考题	16
第二章 金属与合金的晶体结构	18
第一节 晶体的基本知识	18
一、晶体与非晶体	18
二、晶格、晶胞和晶格常数	18
第二节 金属的晶体结构	19
一、金属的特性和金属键	19
二、金属中常见的晶格	20
三、晶体结构的致密度	21
四、晶面与晶向	22
第三节 合金的晶体结构	22
一、合金的基本概念	22
二、合金的相结构	23
第四节 实际金属的晶体结构	25
一、多晶体与亚组织	25
二、晶体的缺陷	26
习题与思考题	28
第三章 金属与合金的结晶	29
第一节 纯金属的结晶	29
一、纯金属的冷却曲线和过冷现象	29
二、纯金属的结晶过程	30
三、金属结晶后的晶粒大小	31
四、金属的同素异构转变	32
第二节 合金的结晶	32
一、二元合金相图的基本知识	33
二、二元匀晶相图	34
三、二元共晶相图	36
四、合金性能与相图间的关系	39
习题与思考题	41
第四章 铁碳合金相图	43
第一节 铁碳合金的基本相	44
一、铁素体	44
二、奥氏体	44
三、渗碳体	44
第二节 铁-渗碳体相图分析	45
一、上半部分图形——由液态变为固态的一次结晶(912°C以上部分)	45
二、下半部分图形——固态下相变	46
三、铁-渗碳体相图中各点、线含义的小结	47
四、铁-渗碳体相图中铁碳合金的分类	48
第三节 典型铁碳合金的结晶过程及其组织	48
一、合金 I (共析钢)	48
二、合金 II (亚共析钢)	49

三、合金Ⅲ(过共析钢)	51	四、钢的碳氮共渗	89
四、合金Ⅳ(共晶白口铸铁)	51	第九节 表面气相沉积	91
五、合金Ⅴ(亚共晶白口铸铁)	51	一、表面气相沉积的方法	91
六、合金Ⅵ(过共晶白口铸铁)	53	二、表面气相沉积的应用	92
第四节 铁碳合金的成分、组织、性能间的关系	53	第十节 热处理技术条件的标注及工序位置的安排	92
一、含碳量与平衡组织间的关系	53	一、热处理技术条件的标注	92
二、含碳量与力学性能间的关系	54	二、热处理工序位置的安排	93
三、含碳量与工艺性能间的关系	54	习题与思考题	95
习题与思考题	55	第六章 金属的塑性变形及再结晶	98
第五章 钢的热处理	56	第一节 金属的塑性变形	98
第一节 钢在加热时的转变	56	一、单晶体的塑性变形	98
一、钢的奥氏体化	57	二、多晶体的塑性变形	102
二、奥氏体晶粒长大及其控制	58	第二节 冷塑性变形对金属组织与性能的影响	102
第二节 钢在冷却时的转变	59	一、冷塑性变形对金属性能的影响	102
一、过冷奥氏体的等温转变	60	二、冷塑性变形对金属组织的影响	103
二、过冷奥氏体的连续冷却转变	65	三、产生残余应力	105
三、马氏体转变	67	第三节 冷变形金属在加热时的变化	105
第三节 钢的退火与正火	70	一、回复	105
一、退火	71	二、再结晶	105
二、正火	72	三、晶粒长大	106
第四节 钢的淬火	74	第四节 金属的热塑性变形(热变形加工)	107
一、淬火工艺	74	一、热变形加工与冷变形加工的区别	107
二、淬火方法	76	二、热变形加工对金属组织与性能的影响	108
第五节 钢的回火	78	习题与思考题	109
一、回火目的	78	第七章 钢	111
二、淬火钢的回火转变	78	第一节 常存元素和杂质对钢性能的影响	111
三、回火的种类及应用	79	一、锰的影响	111
四、回火脆性	80	二、硅的影响	112
第六节 钢的淬透性	81	三、硫的影响	112
一、淬透性的概念	81	四、磷的影响	112
二、淬透性对钢热处理后力学性能的影响	81	五、非金属夹杂物的影响	112
三、影响淬透性及淬硬深度的因素	82	第二节 合金元素在钢中的作用	112
四、钢的临界直径	82	一、合金元素在钢中存在形式	112
第七节 钢的表面淬火	83	二、合金元素对铁-渗碳体相图的影响	113
一、感应加热的基本原理	83	三、合金元素对钢热处理的影响	114
二、感应加热表面淬火用钢及其应用	83	第三节 结构钢	115
三、感应加热表面淬火的特点	84	一、碳素结构钢	116
第八节 钢的化学热处理	85		
一、概述	85		
二、钢的渗碳	85		
三、钢的渗氮(氮化)	88		

二、低合金高强度结构钢	117	三、变形铝合金	165
三、优质碳素结构钢及合金结构钢	119	四、铸造铝合金	166
四、弹簧钢	127	第二节 铜及铜合金	169
五、滚动轴承钢	128	一、工业纯铜	169
第四节 工具钢	130	二、铜合金的分类及牌号表示方法	169
一、刀具钢	130	三、黄铜	170
二、模具钢	135	四、青铜	171
三、量具用钢	139	第三节 滑动轴承合金	173
第五节 特殊性能钢	140	一、对轴承合金性能的要求	173
一、不锈钢	140	二、轴承合金的组织特征	173
二、耐热钢	143	三、常用的轴承合金	174
三、耐磨钢	146	习题与思考题	176
习题与思考题	147	第十章 高分子材料、陶瓷材料 及复合材料	177
第八章 铸铁	149	第一节 高分子材料	177
第一节 铸铁的石墨化	149	一、基本概念	177
一、铁碳合金双重相图	149	二、高聚物的合成	178
二、石墨化过程	150	三、高聚物结构的特点	178
三、影响石墨化的因素	151	四、高聚物的物理状态(流变行为)	180
第二节 灰铸铁	151	五、高聚物的分类和命名	181
一、灰铸铁的化学成分、组织和性能	151	六、常用高聚物材料——塑料	182
二、灰铸铁的孕育处理	153	第二节 陶瓷材料	185
三、灰铸铁的牌号和应用	153	一、概述	185
四、灰铸铁的热处理	154	二、陶瓷的组成相及其结构	185
第三节 球墨铸铁	154	三、陶瓷的性能及应用	186
一、球墨铸铁的化学成分、组织和性能	155	第三节 复合材料	188
二、球墨铸铁的牌号和用途	155	一、概述	188
三、球墨铸铁的热处理	157	二、复合材料的性能	188
第四节 蠕墨铸铁	158	三、常用复合材料	188
一、蠕墨铸铁的化学成分	158	习题与思考题	190
二、蠕墨铸铁的组织与性能	158	第十一章 零件的选材及工艺路线	191
第五节 可锻铸铁	159	第一节 机械零件的失效概述	191
一、可锻铸铁的化学成分和组织	159	一、失效的概念	191
二、可锻铸铁的牌号、性能及用途	159	二、零件的失效形式	191
第六节 合金铸铁	161	三、零件的失效原因	191
一、耐磨铸铁	161	第二节 机械零件的材料选择	192
二、耐热铸铁	161	一、材料的使用性能应满足使用要求	192
三、耐蚀铸铁	162	二、材料的工艺性能应满足加工要求	194
习题与思考题	162	三、材料的价格和总成本应 经济、低廉	196
第九章 有色金属及其合金	163	第三节 典型零件的选材实例分析	196
第一节 铝及铝合金	163	一、齿轮类零件的选材	196
一、工业纯铝	163		
二、铝合金分类及时效强化	163		

二、轴的选材	199	附录 B 黑色金属硬度及强度换算表	209
三、手用丝锥的选材	200	附录 C 国内外常用钢钢号对照表	214
四、冷作模具的选材	200	附录 D 国内外部分铝及其合金 牌号对照表	219
习题与思考题	202	参考文献	221
附录	203		
附录 A 平均布氏硬度值计算表	203		

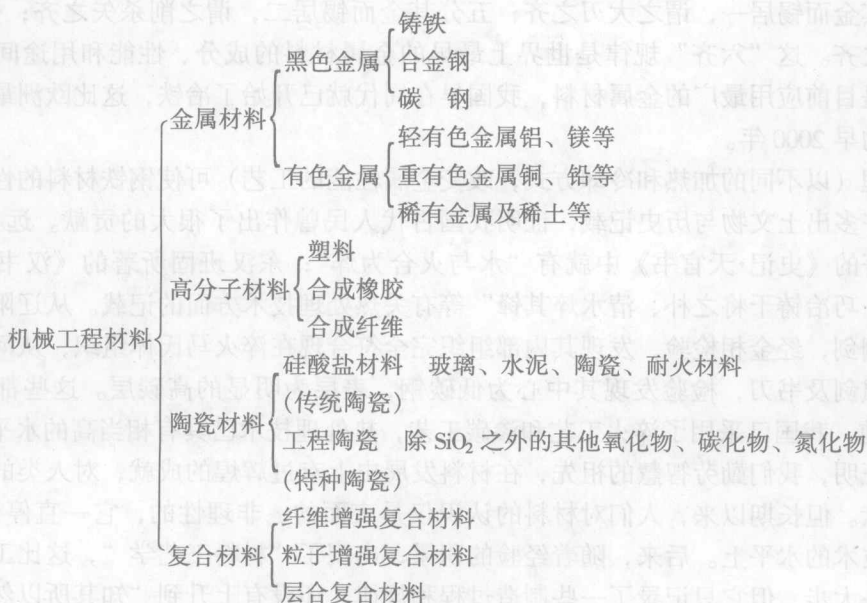
绪 论

一、材料的分类及其在工程技术中的应用

材料是人类用来制作各种产品的物质。人类生活与生产都离不开材料，它的品种、数量和质量是衡量一个国家现代化程度的重要标志。如今，材料、能源、信息已成为发展现代化社会生产的三大支柱，而材料又是能源与信息发展的物质基础。

材料的发展虽然离不开科学技术的进步，但科学技术的继续发展又依赖于工程材料的发展。在人们日常生活用具和现代工程技术的各个领域，工程材料的重要作用都是很明显的。例如，耐腐蚀、耐高压的材料在石油化工领域中应用；强度高、重量轻的材料在交通运输领域中应用；某些高聚物和金属材料在外科移植领域中应用；高温合金和陶瓷在高温装置中应用；半导体材料在通信、计算机、航天和日用电子器件等领域中应用；强度高、重量轻、耐高温、抗热振性好的材料在宇宙飞船、人造卫星等宇航领域中应用；在机械制造领域中，从简单的手工工具到复杂的智能机器人，都应用了现代工程材料。在工程技术发展史上，每一项创造发明能否推广应用于生产，每一个科学理论能否实现技术应用，其材料往往是解决问题的关键。因此，世界各国对材料的研究和发展都是非常重视的，它在工程技术中的作用是不容忽视的。

现代材料种类繁多，据粗略统计，目前世界上的材料种类已达 40 余万种，并且每年还以约 5% 的速率增加。材料有许多不同的分类方法，机械工程中使用的材料常按化学组成成分以下四大类：



目前，机械工业生产中应用最广的仍是金属材料。这是由于金属材料不仅来源丰富，而且还具有优良的使用性能与工艺性能。使用性能包括力学性能和物理、化学性能。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采用各种加工方法，制成各种形状、尺寸的零件和工具。金属材料还可通过不同成分配制、不同加工和热处理来改变其组织和性能，从而进一步扩大其使用范围。

高分子材料的某些力学性能不如金属材料，但它们具有金属材料不具备的某些特性，如耐腐蚀、电绝缘性、隔音、减振、重量轻、原料来源丰富、价廉以及成型加工容易等优点，因而近年来发展极快。目前，它们不仅用来制作人们的生活用品，而且在工业生产中已开始代替部分金属材料，将成为可与金属材料相匹敌的、具有强大生命力的材料。

新型陶瓷材料的塑性与韧性远低于金属材料，但它们具有高熔点、高硬度、耐高温以及特殊的物理性能，已成为发展高温材料和功能材料方面具有很大潜力的新型工程材料。

近年来，人们为集中各类材料的优异性能于一体，充分发挥各类材料的潜力，制成了各种复合材料。因而复合材料是一种很有发展前途的材料。目前，高的比强度和比弹性模量的复合材料已广泛地应用于航空、建筑、机械、交通运输以及国防工业等部门。

二、材料的发展及材料科学的形成

人类为了生存和发展，总是不断地探索、寻找制造生产工具的材料，每一新材料的发现和应 用，都会促使生产力向前发展，并给人类生活带来巨大的变革，将人类社会和物质文明推向一个新的阶段。所以，根据人类使用的材料，把古代划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代和铁器时代。当今，人类正跨入人工合成材料和复合材料的新时代。

我们的祖先对材料的发展作出了杰出的贡献，对世界文明产生了很大的影响。早在 4000 年前，我们的祖先已开始使用天然存在的红铜。至公元前 1000 多年的殷商时代，我国的青铜冶铸技术已达到很高的水平。到春秋时期，我国已能对青铜冶铸技术作出规律性的总结，如《周礼·考工》对青铜的成分和用途关系有如下的记载：“金有六齐，六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐；五分其金而锡居一，谓之斧斤之齐；四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金而锡居一，谓之大刃之齐；五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐；金、锡半，谓之鉴燧之齐。这“六齐”规律是世界上最早的金属材料的成分、性能和用途间关系的总结。钢铁是目前应用最广的金属材料，我国早在周代就已开始了冶铁，这比欧洲最早使用生铁的时间约早 2000 年。

热处理（以不同的加热和冷却方式，改变金属性能的工艺）可使钢铁材料的性能显著提高。根据许多出土文物与历史记载，证明我国古代人民曾作出了很大的贡献。远在西汉时，司马迁所著的《史记·天官书》中就有“水与火合为焠”；东汉班固所著的《汉书·王褒传》中有“……巧冶铸干将之朴、清水焠其锋”等有关热处理技术方面的记载。从辽阳三道壕出土的西汉钢剑，经金相检验，发现其内部组织完全符合现在淬火马氏体组织，从河北满城出土的西汉佩剑及书刀，检验发现其中心为低碳钢，表层为明显的高碳层。这些都证明早在 2000 年以前，我国已采用了淬火工艺和渗碳工艺，热处理技术已具有相当高的水平。

历史证明，我们勤劳智慧的祖先，在材料发展史上有过辉煌的成就，对人类的文明作出了巨大贡献。但长期以来，人们对材料的认识仅是表面的、非理性的，它一直停留在工匠、艺人经验技术的水平上。后来，随着经验的积累，出现了“材料工艺学”，这比工匠的经验又前进了一大步，但它只记录了一些制造过程和规律，还没有上升到“知其所以然”的理性认识水平。直到 1863 年光学显微镜第一次被利用研究金属，出现了“金相学”后，才使人们对材料的观察进入了微观领域，并上升到理性认识水平。1912 年采用 X 射线衍射技术研

究材料的晶体微观结构。1932年电子显微镜的问世以及后来出现的各种谱仪等先进分析工具,将已有的人类对材料微观世界的认识带入了更深的层次。此外,一些与材料有关的基础学科(如化学、物理化学、高分子化学、量子力学、固体物理等)的进展,又有力地推动了材料研究的深化。在此基础上,逐步形成了跨越多学科的材料科学。材料科学是研究材料的化学组成和微观结构与材料性能之间关系的一门科学。同时,它还研究制取材料和使用材料的有关知识。

新中国成立后,我国在工农业生产迅速发展的同时,作为其物质基础的材料工业也要求有相应的高速发展。目前我国各种金属材料产品的品种较齐全,已基本满足国民经济进一步发展的需要,钢产量已从1949年的17万t增至2003年的1.5亿t,名列世界前茅,而非金属材料的产量以更高于金属材料的速度增长着。近年来,我国汽车工业的发展、空间发射技术和卫星回收技术等方面所取得的显著成果,直到载人飞船的发射成功,如果没有相应水平的材料科学与工程技术的支撑也是根本不可能的。随着近代科学技术的发展,对工程材料的要求也越来越高。现今在发展高性能金属材料的同时,又迅速发展和应用了高性能的非金属材料。故工程技术人员应具备更加广泛的有关各种工程材料的知识。

机械工程材料是指机械工程中常用的材料,是材料科学的一个分支。目前,机械工业正朝着高速、自动、精密的方向发展,在机械产品设计及其制造与维修过程中,所遇到的工程材料的选用问题将日趋增多,使机械工业的发展与工程材料学科之间的关系更加密切。因此,机械技术人员不仅要了解传统的金属材料,也要了解高分子材料、陶瓷材料和复合材料的基本知识,以提高我国机械工业中材料的利用率和机械产品的质量。

三、本课程的目的、任务和学习方法

本课程是高专、高职院校机械类及近机类专业必修的技术基础课。其目的是使学生获得有关机械工程材料的基本理论和基础知识,为将来应用工程材料和学习有关课程奠定必要的基础。

本课程的具体任务是:①熟悉常用机械工程材料的成分、组织结构与性能间关系,以及有关的加工工艺对其影响;②初步掌握常用机械工程材料的性能和应用,并初步具备选用常用材料的能力;③初步具有正确选定一般机械零件的热处理方法及确定其工序位置的能力。

本课程具有较强的理论性和应用性,学习中应注重于分析、理解与运用,并注意前后知识的衔接与综合应用;为了提高分析问题、解决问题的能力,在理论学习外,还要注意密切联系生产实际,重视实验环节,认真完成作业;学习本课程之前,学生应具有必要的生产实践的感性认识和专业基础知识,故本课程应安排在金工教学实习和物理、化学、材料力学、金属工艺学等课程后进行;本课程设计的知识面较广,内容较丰富,在教学中应多采用直观教学、电化教学和启发式教学,并培养学生的自学能力,以增加课堂的信息量和课时的利用率,并应在后继课程和生产实习、课程设计、毕业设计等教学环节中反复练习、巩固提高。

第一章 金属材料的力学性能

由于金属材料的品种很多，并具有各种不同的性能，能满足各种机械的使用和加工要求，故生产上得到广泛应用。

金属材料的力学性能是指金属在不同环境因素（温度、介质）下，承受外加载荷作用时所表现的行为。这种行为通常表现为金属的变形和断裂。因此，金属材料的力学性能可以理解为金属抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。

在机械制造业中，大多数机械零件或构件都是用金属材料制成的，并在不同的载荷与环境条件下服役。如果金属材料对变形和断裂的抗力与服役条件不相适应，就会使机件失去预定的效能而损坏，即产生所谓“失效现象”。常见的失效形式有断裂、磨损、过量弹性变形和过量塑性变形等。从零件的服役条件和失效分析出发，找出各种失效抗力指标，就是该零件应具备的力学性能指标。显然，掌握材料的力学性能不仅是设计零件、选用材料时的重要依据，而且也是按验收技术标准来鉴定材料的依据，以及对产品的工艺进行质量控制的重要参数。

当外加载荷的性质、环境的温度与介质等外加因素不同时，对金属材料要求的力学性能也将不同。常用的力学性能有：强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧度、断裂韧度和疲劳等。下面分别讨论各种力学性能及其指标。

第一节 强度、刚度、弹性及塑性

金属的强度、刚度、弹性及塑性一般可以通过金属拉伸试验来测定。它是按 GB/T228 规定，把一定尺寸和形状的金属试样（如图 1-1 所示）装夹在试验机上，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，并由此测定该金属的强度、刚度、弹性及塑性。

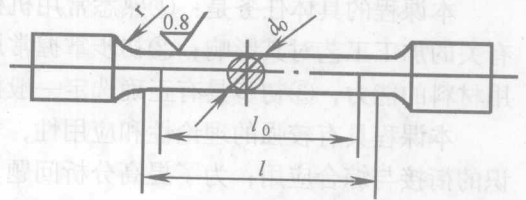


图 1-1 圆形拉伸试样

一、力-伸长曲线与应力-应变曲线

(一) 力-伸长曲线

图 1-2 为低碳钢的力-伸长曲线。由图可见，低碳钢试样在拉伸过程中，可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷不超 F_p 时，力-伸长曲线 O_p 为一直线，即试样的伸长量与载荷成正比地增加，完全符合胡克定律，试样处于弹性变形阶段。载荷在 $F_p \sim F_s$ 间，试样的伸长量与载荷已不再成正比关系，力-伸长曲线不成直线，但试样仍处于弹性变形阶段。

载荷超过 F_s 后，试样开始有塑性变形产生。当载荷达到 F_s 时，试样开始产生明显的塑性变形，在力-伸长曲线上出现了水平的或锯齿形的线段，这种现象称为“屈服”。

当载荷继续增加到某一最大值 F_b 时，试样的局部截面缩小，产生所谓“缩颈”现象。

由于试样局部截面的逐渐减小,故载荷也逐渐降低,当达到拉伸曲线上 k 点时,试样随即断裂。

由力-伸长曲线可见,断裂时试样总伸长 O_f 中 gf 是弹性变形, Og (Δl_k) 是塑性变形。塑性变形中 Oh (Δl_b) 是试样产生缩颈前的均匀变形, hg (Δl_u) 是颈部的集中变形。

应该指出,低碳钢这类塑性材料在断裂前有明显的塑性变形,这种断裂称为韧性断裂。某些脆性材料(如铸铁等)在尚未产生明显的塑性变形时已断裂,故不仅没有屈服现象,而且也不产生缩颈现象,这种断裂称为脆性断裂。

(二) 应力-应变曲线

由于拉伸曲线上的载荷 F 与伸长量 Δl , 不仅与试验的材料性能有关,还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响,需采用应力-应变曲线。

把试样承受的载荷除以试样的原始横截面积 A_0 , 则得到试样所受的应力 σ , 即

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1-1)$$

把试样的伸长量 Δl 除以试样的原始标距 l_0 , 则得到试样的相对伸长, 即应变 ϵ (或 δ), 即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

以 σ 和 ϵ 为坐标, 绘出应力-应变的关系曲线, 叫做应力-应变曲线。图 1-3 为低碳钢的应力-应变曲线示意图, 应力-应变曲线的形状与拉伸曲线完全相似, 只是坐标与数值不同。但它不受试样尺寸的影响, 可以直接看出金属材料的一些力学性能。

二、刚度和弹性

由图 1-3 所示的应力-应变曲线中的弹性变形阶段可测出材料的弹性模量 (E)、弹性极限 (σ_e) 及弹性比功 (a_e), 并依此确定该材料的刚度和弹性。

(一) 弹性模量

弹性模量 E 是指金属材料在弹性状态下的应力与应变的比值, 即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-3)$$

在应力-应变曲线上, 弹性模量就是试样在弹性变形阶段应力-应变线段的斜率, 即引起单位弹性变形所需的应力。因此, 它表示金属材料抵抗弹性变形的能力。工程上将材料抵抗弹性变形的能力称为刚度。

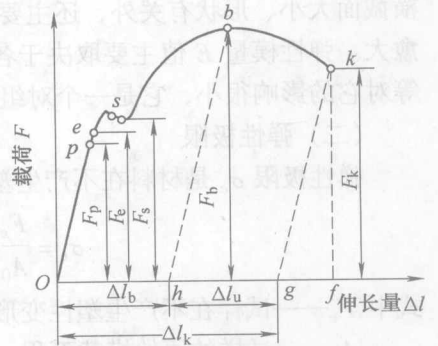


图 1-2 低碳钢的力-伸长曲线

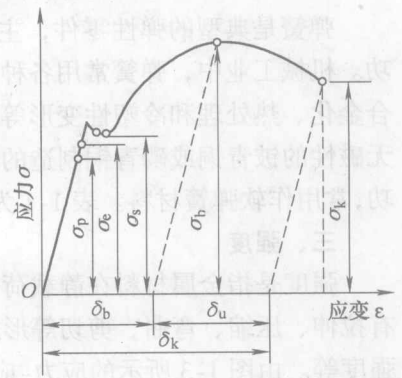


图 1-3 低碳钢的应力-应变曲线

绝大多数的机械零件都是在弹性状态下进行工作的，工作过程中，一般不允许有过量的弹性变形，更不允许有明显的塑性变形，故对刚度都有一定的要求。零件的刚度除了与零件横截面大小、形状有关外，还主要取决于材料的性能，即材料的弹性模量 E 。 E 愈大，刚度愈大。弹性模量 E 值主要取决于各种金属材料的本性，而热处理、微量合金化及塑性变形等对它的影响很小，它是一个对组织不敏感的力学性能指标。

(二) 弹性极限

弹性极限 σ_e 是材料在不产生塑性变形时所能承受的最大应力值。即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (1-4)$$

式中 F_e ——试样在不产生塑性变形时的最大载荷；

A_0 ——试样的原始横截面积。

由于弹性极限是表示金属材料不产生塑性变形时所能承受的最大应力值，故是工作中不允许有微量塑性变形零件（如精密的弹性元件、炮筒等）的设计与选材的重要依据。

(三) 弹性比功

弹性比功 a_e 又称弹性比能或应变能，它表示材料发生弹性变形时可吸收能量的能力，在卸载时，又能完全释放能量而使材料恢复原状。因此，金属拉伸时的弹性比功可用图 1-4 应力-应变曲线下影线面积表示，其值为

$$a_e = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可见，提高弹性极限 σ_e 或降低弹性模量 E ，均能提高材料的弹性比功 a_e 。

弹簧是典型的弹性零件，主要起缓冲和储存能量的作用，它要求材料具有大的弹性比功。机械工业中，弹簧常用各种弹簧钢制造，由于弹性模量 E 对组织不敏感，故只有通过合金化、热处理和冷塑性变形等方法来提高材料的弹性极限 σ_e ，从而提高其弹性比功。用无磁性的铍青铜或磷青铜制造的仪表弹簧，因材料的 E 较低而 σ_e 较高，也具有较高的弹性比功，常用作软弹簧材料。表 1-1 为几种常见工程材料的弹性模量、弹性极限和弹性比功值。

三、强度

强度是指金属材料在静载荷作用下，抵抗永久变形和断裂的性能。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。由图 1-3 所示的应力-应变曲线，可确定材料的弹性模量 E 、弹性极限 σ_e 和弹性比功 a_e 等强度指标。表 1-1 列出几种工程材料的刚度与弹性指标。

(一) 屈服点与屈服强度

屈服点 σ_s 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 是材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值，即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-6)$$

式中 F_s ——试样发生屈服时的载荷，即屈服载荷；

A_0 ——试样的原始横截面积。

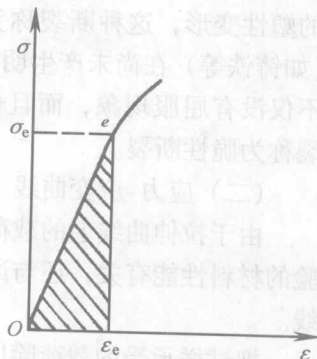


图 1-4 弹性比功的图解计算法

表 1-1 几种工程材料的刚度与弹性指标

材 料	E/MPa	σ_e/MPa	a_e/MPa
中碳钢	210000	310	0.228
弹簧钢	210000	965	2.217
硬铝	72400	125	0.108
铍青铜 QBe2	120000	588	1.44
磷青铜 QSn6.5-0.1	101000	450	1.0
ABS	1725	34 ^①	0.345
丁苯橡胶	2	2 ^①	1.034

① 该值为材料的屈服强度。

工业上使用的某些金属材料（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，故无法确定其屈服点 σ_s 。按 GB/T228 规定，可用屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 来表示该材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值。屈服强度为试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时的应力值，即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0} \quad (1-7)$$

式中 $F_{0.2}$ ——试样标距产生 0.2% 残余伸长时的载荷；
 A_0 ——试样的原始横截面积。

一般机械零件不仅是在破断时形成失效，而往往是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时就形成了失效。所以，屈服点或屈服强度就成为零件设计时的主要依据，同时也是评定金属材料强度的重要指标之一。

(二) 抗拉强度

抗拉强度 σ_b 是材料在破断前所承受的最大应力值，即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-8)$$

式中 F_b ——试样在破断前所承受的载荷；
 A_0 ——试样的原始横截面积。

由应力-应变曲线可见，抗拉强度 σ_b 是表示塑性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。脆性材料在拉伸过程中，一般不产生缩颈现象，因此，抗拉强度 σ_b 就是材料的断裂强度，它是表示材料抵抗断裂的能力。抗拉强度是零件设计时的重要依据，同时也是评定金属材料的强度重要指标之一。

四、塑性

塑性是指金属材料在静载荷作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 是表示材料塑性好坏的指标。

(一) 伸长率

伸长率是指试样拉断后标距增长量与原始标距的百分比，即

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 l_k ——试样断裂后的标距；
 l_0 ——试样原始标距。

材料的伸长率是随标距的增加而减小的, 所以同一材料的短试样 ($l_0/d_0 = 5$ 的试样) 要比长试样 ($l_0/d_0 = 10$ 的试样) 所测得的伸长率大 20% 左右, 对局部集中变形特别明显的材料, 甚至可大到 50%。因此, 用长、短两种试样求得的伸长率应分别以 δ_{10} (或 δ) 和 δ_5 表明。

(二) 断面收缩率

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的百分比, 即

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 A_k ——试样断裂处的最小横截面积;

A_0 ——试样的原始横截面积。

虽然塑性指标通常不直接用于工程设计计算, 但任何零件都要求材料具有一定塑性。因为零件使用过程中, 偶然过载时, 由于能发生一定的塑性变形而不致于突然脆断。同时, 塑性变形还有缓和应力集中、削减应力峰的作用, 在一定程度上保证了零件的工作安全。此外, 各种成型加工 (如锻压、轧制、冷冲压等) 都要求材料具有一定的塑性。

第二节 硬 度

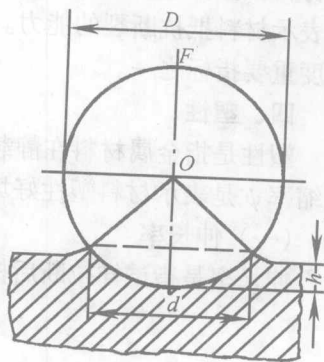
硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。目前生产中, 测定硬度方法最常用的是压入硬度法, 它是用一定几何形状的压头, 在一定试验力下, 压入被测试的金属表面, 根据被压入程度来测定其硬度值。用同样的压头, 在相同试验力作用下, 压入金属材料表面时, 若压入程度愈大, 则材料的硬度值愈低; 反之, 硬度值就愈高。因此, 压入法所表示的硬度是指材料表面抵抗更硬物体压入的能力。

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近似抗拉强度和耐磨性 (耐磨性是指材料抵抗磨损的能力)。此外, 硬度与材料的冷成型性、切削加工性、焊接性等工艺性能间也存在一定联系, 可作为选择加工工艺时的参考。由于以上原因, 所以硬度试验在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重要试验方法。在产品图样的技术条件中, 硬度也是一项主要技术指标。

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。

一、布氏硬度

布氏硬度试验法是用一直径为 D 的硬质合金球, 在规定试验力 F 的作用下压入被测试金属的表面 (如图 1-5 所示), 停留一定时间后卸除载荷, 测量被测试金属表面上所形成的压痕直径 d , 由此计算压痕的球缺面积 S , 然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力 (F/S), 以此作为被测试金属的布氏硬度值。



布氏硬度用符号 HBW 表示, 习惯上只写明硬度的数值 图 1-5 布氏硬度试验原理示意图

而不标出单位。一般硬度符号 HBW 前面的数值为硬度值, 符号后面数值表示试验条件的指标, 依次表示球体直径、试验力大小及试验力保持时间 (保持时间为 10~15s 时不标注)。例如, 600HBW1/30/20 表示用直径 1mm 的硬质合金球, 在 292.4N 试验力作用下保持 20s, 测得的布氏硬度值为 600。

在进行布氏硬度试验时, 应根据被测试金属材料的种类和试样厚度, 选用不同大小的球体直径 D , 施加载荷 F 和载荷保持时间。按 GB/T231.1—2002 规定, 球体直径有 10mm、5mm、2.5mm 和 1mm 四种; 试验力 (单位为 $\text{kgf}^{\text{①}}$) 与球体直径平方的比值 (F/D^2) 有 30、15、10、5、2.5 和 1 共 6 种 (可根据金属材料的种类和布氏硬度范围, 按表 1-2 选定 F/D^2 值); 试验力的保持时间为: 10~15s, 对于要求试验力保持较长时间的材料, 试验力保持时间允许误差为 $\pm 2\text{s}$ 。

表 1-2 布氏硬度试验的 F/D^2 值的选择

材 料	布氏硬度	F/D^2 ^①
钢、镍合金、钛合金		30
铸 铁	< 140	10
	> 140	30
铜及其合金	< 35	5
	35~200	10
	> 200	30
轻金属及其合金	< 35	2.5
	35~80	10(或 5、15)
	> 80	10(或 15)
铅、锡		1

① 试验条件允许时, 应尽量选用 10mm 球和无括号的 F/D^2 值。

当试验力 F 与球体直径 D 选定时, 硬度值只与压痕直径 d 有关。 d 愈大, 则布氏硬度值愈小; 反之, d 愈小, 硬度值愈大。实际测试时, 用刻度放大镜测出压痕直径 d , 然后根据 d 值查表, 即可求得所测的硬度值。

布氏硬度试验法因压痕面积较大, 能反映出较大范围内被测试金属的平均硬度, 故试验结果较精确。但因压痕较大, 所以不宜测试成品或薄片金属的硬度。

二、洛氏硬度

金属洛氏硬度试验是目前工厂中应用最广泛的试验方法。它是用一个锥顶角 120° 角的金刚石圆锥体或一定直径的钢球或硬质合金球为压头, 在规定试验力作用下压入被测试金属表面, 由压头在金属表面所形成的压痕深度来确定其硬度值。

图 1-6 表示金刚石圆锥压头的金属洛氏硬度试验原理。图中 0-0 为圆锥压头的初始位置, 1-1 为在初试验力作用下, 压头压入深度为 h_1 时的位置; 2-2 为在总试验力 (初试验力 + 主试验力) 作用下, 压头压入深度为 h_2 时的位置;

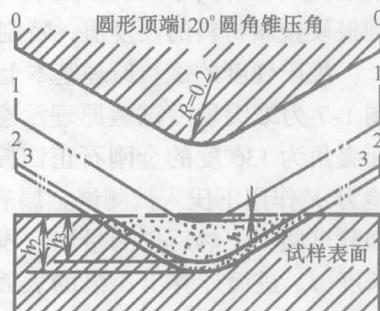


图 1-6 洛氏硬度试验原理示意图

① kgf 为非法定计量单位, 此处暂保留, $1\text{kgf} = 9.8\text{N}$ 。