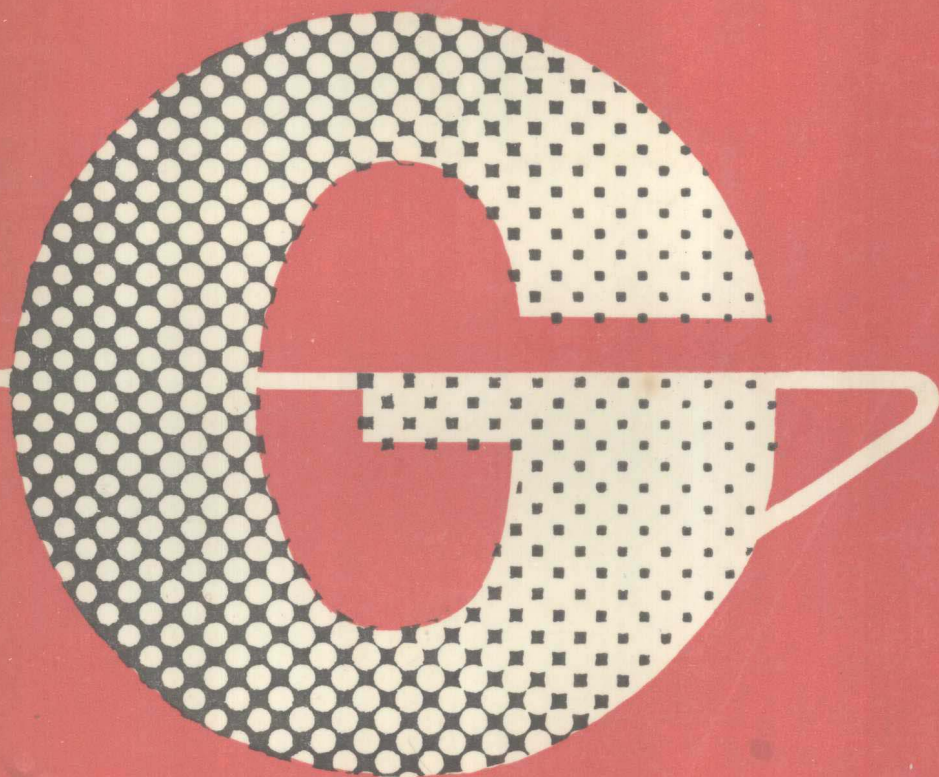


高等专科学校试用教材

# 机械工程材料



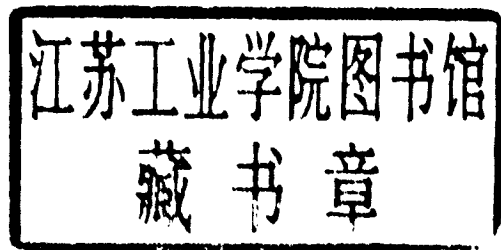
上海机械专科学校 王运炎 主编

机械工业出版社

高等专科学校试用教材

# 机械工程材料

上海机械专科学校 王运炎 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

全书共分十一章,主要阐述了金属与合金的结晶、晶体结构;铁碳合金相图;金属材料的力学性能;钢的热处理;金属塑性变形及再结晶;碳素钢与合金钢;铸铁、有色金属及粉末冶金材料、非金属材料;机械制造中零件材料的选择。

本书可作为高等工业专科学校机械类专业的教学用书,也可供职工大学、业余大学及中专校选用,还可供有关的技术人员参考。

## 机械 工 程 材 料

上海机械专科学校 王运炎 主编

\*

责任编辑:常燕宾 版式设计:王 颖

封面设计:刘 代 责任校对:熊天荣

责任印制:尹德伦

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 18·字数 440 千字

1992年5月北京第1版·1992年5月北京第1次印刷

印数 00,001—17,000·定价:5.05元

\*

ISBN 7-111-03095-8/TG·679 (课)

## 前 言

本书是根据1989年机电工业部高等工程专科学校机制专业教材编审委员会审定的机械类专业《工程材料》教学大纲和1990年国家教委批准的高等工程专科学校机械类专业《机械工程材料》教学基本要求，在原高专教材《金属材料与热处理》(王运炎主编)基础上修订改编的。本教材可与机械工业出版社出版的《金属材料及热处理实验》(王运炎主编)、《金属工艺学》(盛善权主编)配套使用。

全书内容主要包括：金属材料的力学性能；金属学基础；热处理基本原理和常用方法；常用的金属材料、非金属材料 and 复合材料等。本书是高等工程专科学校机械类专业的教材，同时适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用。并可供有关的工人和技术人员参考。

本书在内容处理上主要有以下几点说明：①按机电工业部高等工程专科学校机制专业教学计划规定，本课程安排在金工教学实习和金属工艺学课程后进行教学，故本书是在这一基础上编写的。②考虑到现代机械工程中，非金属材料的使用日益增多，故专门增加一章非金属材料，主要介绍高分子合成材料、陶瓷材料和复合材料。③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。④对主要内容都有适当的说理分析，避免只讲现象与结论。并注意到前后内容上呼应与衔接。⑤全书统一采用法定计量单位制，并以国际代号表示，如强度指标的单位一律用MPa( $1\text{MPa}\approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ )；冲击韧度值的单位用 $\text{J}/\text{cm}^2$  ( $1\text{J}/\text{cm}^2\approx 0.1\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ )。⑥各种材料的分类、牌号以及所有工程术语等均采用最新国家标准。⑦全书有近百张显微组织照片，图面清晰、典型、规格一致，并有 $12\times$ 放大照片可供应，以利教学。⑧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，巩固知识，培养分析、解决实际问题的能力。

本书由上海机械专科学校王运炎副教授主编；上海交通大学李鹏兴教授主审。叶尚川编写第七、九、十一章并任副主编；吴其荣编写第十章；王运炎编写绪论、第一至六、八章。

参加本书审稿会议的有：吴善元、余存惠、肖玉珂、张继世、萧振荣、朱琴心、李筱涛、杨国英等同志，上海机械专科学校吴凯令同志为本书提供部分金相照片，在此一并表示衷心感谢。

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

1991年1月于上海

# 目 录

绪论 .....	1	§ 2-3 合金的晶体结构 .....	26
一、材料的分类及其在工程技术中的 应用 .....	1	一、合金的基本概念 .....	26
二、材料的发展及材料科学的形成 .....	2	二、合金的相结构 .....	27
三、本课程的目的任务和学习方法 .....	3	§ 2-4 实际金属的晶体结构 .....	30
第一章 金属材料的力学性能 .....	4	一、多晶体和亚组织 .....	30
§ 1-1 强度、刚度、弹性及塑性 .....	4	二、晶体的缺陷 .....	31
一、拉伸曲线与应力-应变曲线 .....	4	习题与思考题 .....	33
二、刚度和弹性 .....	5	第三章 金属与合金的结晶 .....	34
三、强度 .....	6	§ 3-1 纯金属的结晶 .....	34
四、塑性 .....	7	一、纯金属的冷却曲线和过冷现象 .....	34
§ 1-2 硬度 .....	8	二、纯金属的结晶过程 .....	35
一、布氏硬度 .....	8	三、金属结晶后的晶粒大小 .....	36
二、洛氏硬度 .....	10	四、金属的同素异晶转变 .....	37
三、维氏硬度 .....	11	§ 3-2 合金的结晶 .....	38
§ 1-3 冲击韧度 .....	12	一、二元合金相图的基本知识 .....	38
一、冲击试验方法与原理 .....	12	二、二元匀晶相图 .....	39
二、冲击试验的应用 .....	13	三、二元共晶相图 .....	42
§ 1-4 断裂韧度 .....	14	四、合金性能与相图间的关系 .....	47
一、裂纹扩展的基本形式 .....	14	习题与思考题 .....	48
二、应力场强度因子 $K_{I}$ .....	15	第四章 铁碳合金相图 .....	50
三、断裂韧度 $K_{Ic}$ 及其应用 .....	15	§ 4-1 铁碳合金的基本相 .....	51
§ 1-5 疲劳 .....	16	一、铁素体 .....	51
一、疲劳现象 .....	16	二、奥氏体 .....	51
二、疲劳曲线与疲劳极限 .....	16	三、渗碳体 .....	52
三、提高疲劳极限的途径 .....	17	§ 4-2 铁-渗碳体相图分析 .....	52
四、其他疲劳 .....	17	一、上半部分图形-由液态变为固态 的一次结晶 .....	52
习题与思考题 .....	19	二、下半部分图形-固态下的相变 .....	53
第二章 金属与合金的晶体结构 .....	21	三、铁-渗碳体相图中各点、线含 义的小结 .....	55
§ 2-1 晶体的基本知识 .....	21	四、铁-渗碳体相图中铁碳合金的分类 .....	55
一、晶体与非晶体 .....	21	§ 4-3 典型铁碳合金的结晶过程及 其组织 .....	56
二、晶格、晶胞和晶格常数 .....	21	一、合金 I (共析钢) .....	57
§ 2-2 金属的晶体结构 .....	22	二、合金 II (亚共析钢) .....	57
一、金属的特性和金属键 .....	22	三、合金 III (过共析钢) .....	58
二、金属中常见的晶格 .....	23	四、合金 IV (共晶白口铸铁) .....	59
三、晶体结构的致密度 .....	24		
四、晶面与晶向 .....	25		

五、合金 V (亚共晶白口铸铁) .....	60	四、钢的碳氮共渗 .....	106
六、合金 VI (过共晶白口铸铁) .....	60	§ 5-9 表面气相沉积 .....	108
§ 4-4 铁碳合金的成分、组织、性能		一、表面气相沉积的方法 .....	108
间的关系 .....	61	二、表面气相沉积的应用 .....	109
一、含碳量与平衡组织间的关系 .....	61	§ 5-10 影响热处理件质量的因素 .....	110
二、含碳量与力学性能间的关系 .....	61	一、热处理工艺因素 .....	110
三、含碳量与工艺性能间的关系 .....	62	二、工件的结构因素 .....	111
习题与思考题 .....	62	§ 5-11 热处理技术条件的标注及	
第五章 钢的热处理 .....	64	工序位置的安排 .....	114
§ 5-1 钢在加热时的转变 .....	64	一、热处理技术条件的标注 .....	114
一、钢的奥氏体化 .....	65	二、热处理工序位置的安排 .....	115
二、奥氏体晶粒长大及其控制 .....	66	习题与思考题 .....	119
§ 5-2 钢在冷却时的转变 .....	68	第六章 金属的塑性变形及再结晶 .....	123
一、过冷奥氏体的等温转变 .....	68	§ 6-1 金属的塑性变形 .....	123
二、过冷奥氏体的连续冷却转变 .....	75	一、单晶体的塑性变形 .....	123
三、马氏体转变 .....	78	二、多晶体的塑性变形 .....	127
§ 5-3 钢的退火与正火 .....	81	§ 6-2 冷塑性变形对金属组织与性能的	
一、退火 .....	82	影响 .....	127
二、正火 .....	84	一、冷塑性变形对金属性能的影响 .....	127
§ 5-4 钢的淬火 .....	86	二、冷塑性变形对金属组织的影响 .....	128
一、淬火工艺 .....	86	三、产生残余应力 .....	130
二、淬火方法 .....	89	§ 6-3 冷变形金属在加热时的变化 .....	131
§ 5-5 钢的回火 .....	91	一、回复 .....	131
一、回火目的 .....	91	二、再结晶 .....	131
二、淬火钢的回火转变 .....	91	三、晶粒长大 .....	133
三、回火转变产物的组织与性能 .....	92	§ 6-4 金属的热塑性变形(热变形加工) .....	134
四、回火的种类及应用 .....	94	一、热变形加工与冷变形加工的区别 .....	134
五、回火脆性 .....	95	二、热变形加工对金属组织与性能的影响 .....	135
§ 5-6 钢的淬透性 .....	96	习题与思考题 .....	137
一、淬透性的概念 .....	96	第七章 碳素钢与合金钢 .....	138
二、淬透性对钢热处理后力学性能的影响 .....	96	§ 7-1 常存杂质元素对钢性能的影响 .....	138
三、影响淬透性及淬硬深度的因素 .....	97	一、锰的影响 .....	139
四、淬透性的测定与表示方法 .....	97	二、硅的影响 .....	139
§ 5-7 钢的表面淬火 .....	98	三、硫的影响 .....	139
一、感应加热的基本原理 .....	99	四、磷的影响 .....	139
二、感应加热表面淬火用钢及其应用 .....	99	五、非金属夹杂物的影响 .....	139
三、感应加热表面淬火的特点 .....	100	§ 7-2 合金元素在钢中的作用 .....	140
§ 5-8 钢的化学热处理 .....	100	一、合金元素在钢中存在形式 .....	140
一、概述 .....	100	二、合金元素对铁-渗碳体相图的影响 .....	141
二、钢的渗碳 .....	101	三、合金元素对钢热处理的影响 .....	143
三、钢的渗氮(氮化) .....	104	§ 7-3 结构钢 .....	146

一、普通质量结构钢 .....	146	三、变形铝合金 .....	210
二、优质结构钢 .....	149	四、铸造铝合金 .....	212
三、其他结构钢 .....	162	§ 9-2 铜及其合金 .....	214
§ 7-4 工具钢 .....	165	一、工业纯铜 .....	214
一、刃具钢 .....	165	二、铜合金的分类及牌号表示方法 .....	215
二、模具钢 .....	172	三、黄铜 .....	215
三、量具用钢 .....	177	四、青铜 .....	218
§ 7-5 特殊性能钢 .....	177	§ 9-3 滑动轴承合金 .....	220
一、不锈钢耐酸钢 .....	177	一、对轴承合金性能的要求 .....	220
二、耐热钢 .....	181	二、轴承合金的组织特征 .....	221
三、耐磨钢 .....	183	三、常用的轴承合金 .....	221
习题与思考题 .....	184	§ 9-4 粉末冶金材料 .....	224
第八章 铸铁 .....	186	一、粉末冶金法及其应用 .....	224
§ 8-1 铸铁的石墨化 .....	186	二、机械制造中常用的粉末冶金材料 .....	225
一、铁碳合金双重相图 .....	186	习题与思考题 .....	228
二、石墨化过程 .....	187	第十章 非金属材料 .....	229
三、影响石墨化的因素 .....	188	§ 10-1 高分子材料 .....	229
§ 8-2 灰铸铁 .....	189	一、概述 .....	229
一、灰铸铁的化学成分、组织和性能 .....	189	二、高分子合成 .....	230
二、灰铸铁的孕育处理 .....	191	三、高聚物的分类和命名 .....	231
三、灰铸铁的牌号和应用 .....	192	四、高聚物结构的特点 .....	232
四、灰铸铁的热处理 .....	192	五、高聚物的物理状态(流变行为) .....	234
§ 8-3 球墨铸铁 .....	194	六、常用高聚物材料——塑料 .....	235
一、球墨铸铁的生产 .....	194	§ 10-2 陶瓷材料 .....	239
二、球墨铸铁的化学成分、组织和性能 .....	195	一、概述 .....	239
三、球墨铸铁的牌号和用途 .....	196	二、陶瓷的组成相及其结构 .....	239
四、球墨铸铁的热处理 .....	197	三、陶瓷的性能及应用 .....	241
§ 8-4 蠕墨铸铁 .....	200	§ 10-3 复合材料 .....	243
一、蠕墨铸铁的生产 .....	200	一、概述 .....	243
二、蠕墨铸铁的组织 and 性能 .....	200	二、复合材料的性能 .....	244
§ 8-5 可锻铸铁 .....	201	三、复合材料的种类和应用 .....	245
一、可锻铸铁的生产 .....	201	习题与思考题 .....	246
二、可锻铸铁的牌号、性能及用途 .....	202	第十一章 机械制造中零件材料的选择 .....	247
§ 8-6 合金铸铁 .....	203	§ 11-1 机械零件的失效概述 .....	247
一、耐磨铸铁 .....	203	一、失效的概念 .....	247
二、耐热铸铁 .....	204	二、零件的失效形式 .....	247
三、耐蚀铸铁 .....	205	三、零件的失效原因 .....	247
习题与思考题 .....	205	§ 11-2 机械零件的材料选择 .....	248
第九章 有色金属及粉末冶金材料 .....	208	一、选材的一般原则 .....	248
§ 9-1 铝及其合金 .....	208	二、选材的步骤及具体方法 .....	255
一、工业纯铝 .....	208	§ 11-3 典型零件的选材实例分析 .....	258
二、铝合金分类及时效强化 .....	208		

## VI

一、齿轮类零件的选材 .....	259	附录-2 黑色金属硬度及强度换算表(GB1172—74).....	272
二、机床主轴的选材 .....	262	附录-3 国内外常用钢钢号对照表 .....	275
三、手用丝锥的选材 .....	263	附录-4 国内外部分铝及其合金牌号对照表 .....	280
四、冷作模具的选材 .....	264	参考文献.....	281
习题与思考题 .....	266		
附录.....	268		
附录-1 布氏硬度换算表 .....	268		



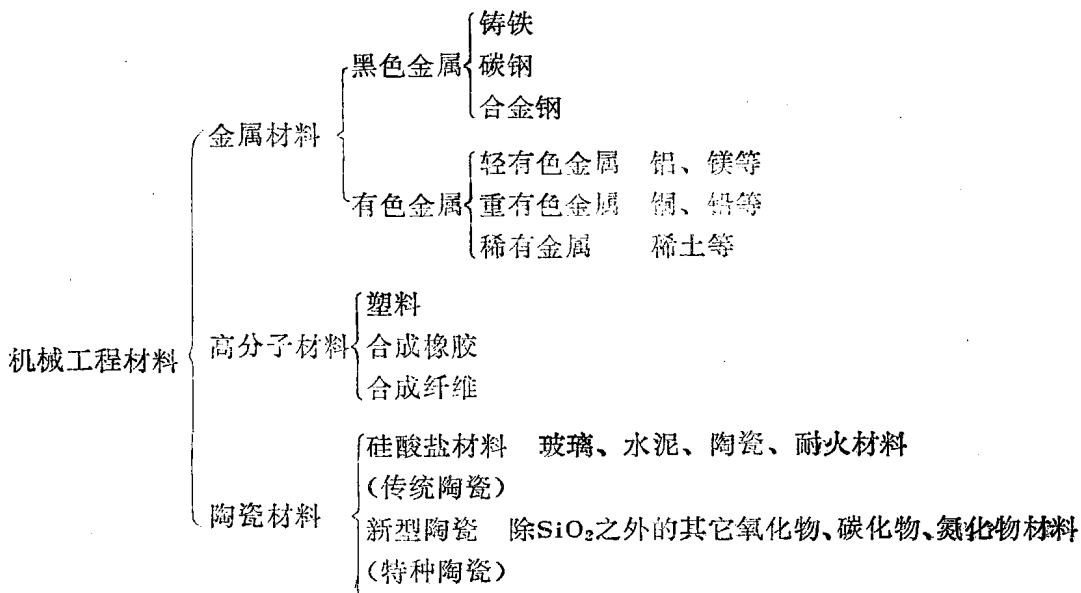
# 绪 论

## 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；高温合金和陶瓷在高温装置中应用；某些高聚物和金属材料在外科移植领域中应用；半导体材料在通讯、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、抗热震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施于技术应用，适用的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丝毫忽视的。

现代材料种类繁多，据粗略统计，目前世界上的材料总和已达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三大类：



目前，机械工业生产中应用最广的仍是金属材料，在各种机器设备所用材料中，金属材料约占90%以上。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。

虽然高分子材料和陶瓷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、耐高温(陶瓷材料)、质轻、原料来源丰富、价廉以及成型加工容易等优点，因而近年来发展较快。目前，它们不仅应用于人们的生活用品上，而且在工业生产中的应用也已日益广泛。

上述三大类工程材料在性能上各有其优缺点，因而近年来，人们为集中各类材料的优异性能于一体，从而能充分发挥各类材料的潜力，则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。

## 二、材料的发展及材料科学的形成

人类为了生存和生产，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，把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，把古代史划分为石器时代、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。大约二、三百万年前，最先使用的工具材料是天然石头。到了原始社会末期(约六、七千年之前)开始人工制作陶器，由此发展到东汉出现了瓷器，并先后传至世界各国，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。到公元前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，从出土的大量青铜礼器、生活用具、武器、工具，特别是重达875kg的司母戊大鼎，都说明了当时已具有高超的冶铸技术和艺术造诣。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<sup>①</sup>，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<sup>②</sup>。”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。我国不仅具有使用钢铁的悠久历史，而且当时的技术也很发达，如河北武安出土的战国期间的铁锄，经金相检验证明，该材料就是现今的可锻铸铁。图1为该铁锄的显微组织。

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。根据许多历史记载与出土文物，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<sup>③</sup>”；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，图2为该钢剑的显微组织。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

① 六齐即青铜各组成元素的六种配比。

② 鉴燧之齐是指制造铜镜和划打火石取火的青铜各组成元素的配比。

③ “焠”与“淬”其实为同一字。《史记·天官书》与《汉书·王褒传》都用“焠”字，但《汉书·天文志》用“淬”字，现在都用“淬”字。

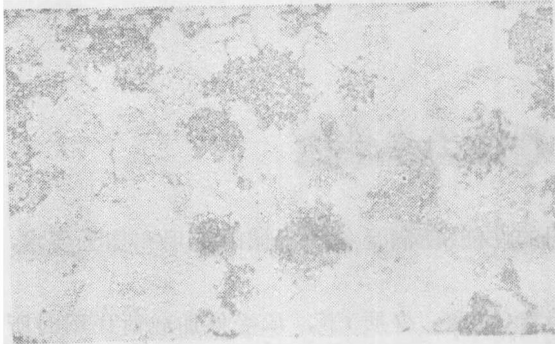


图1 战国时代铁剑的显微组织

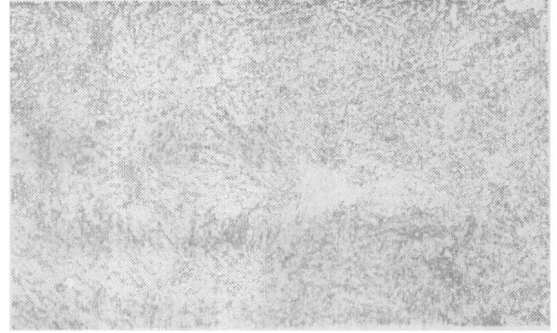


图2 西汉时代钢剑的显微组织

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的贡献。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用于研究金属，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年电子显微镜的发明以及后来出现的各种谱仪等分析工具，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。

近年来，我国在材料科学与工程方面的发展很快，成绩亦很大。原子弹、氢弹爆炸成功，空间发射技术和卫星回收技术等方面所取得的卓著成果，如果没有相应水平的材料科学与工程的支持是根本不可能的。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。故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和陶瓷材料的基本知识。

### 三、本课程的目的任务和学习方法

本课程是高等工程专科学校机械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、基本知识，为合理选用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、加工工艺、组织结构与性能间关系及其变化规律。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，并注意前后知识的综合应用；为了提高分析问题、解决问题的独立工作能力，在系统的理论学习外，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，故课程应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教学。

# 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成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在因素不同时,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。

## § 1-1 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GB228—87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。

### 一、拉伸曲线与应力-应变曲线

#### (一) 拉伸曲线

图1-2为低碳钢的拉伸曲线。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。

当载荷不超过 $P_e$ 时,拉伸曲线 $OP$ 为一直线,即试样的伸长量与载荷成正比地增加,完全符合虎克定律,试样处于弹性变形阶段。载荷在 $P_e \sim P_s$ 间,试样的伸长量与载荷已不再成正比关系,拉伸曲线不成直线,但试样仍处于弹性变形阶段。

载荷超过 $P_s$ 后,试样开始有塑性变形产生。当载荷达到 $P_b$ 时,试样开始产生明显的塑性变形,在拉伸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 $P_b$ 时,试样的局部截面缩小,产生所谓“缩颈”现象。由

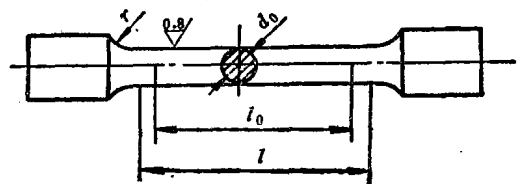


图1-1 圆形拉伸试样

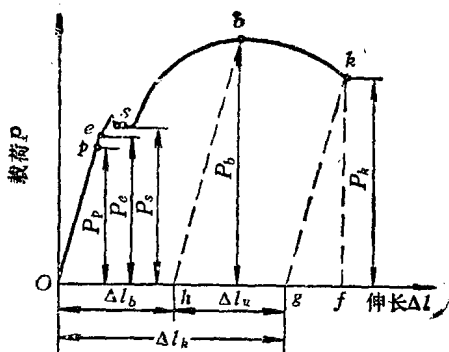


图1-2 低碳钢的拉伸曲线

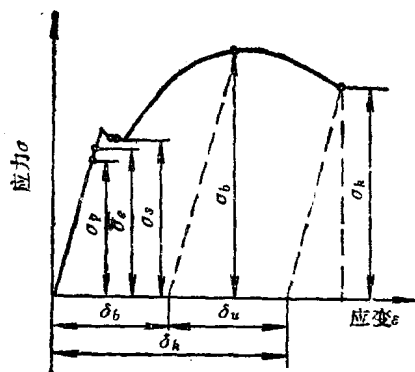


图1-3 低碳钢的应力-应变曲线

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。

由拉伸曲线可见，断裂时试样总伸长  $Oj$  中  $gf$  是弹性变形， $Og(\Delta l_e)$  是塑性变形。塑性变形中  $Oh(\Delta l_e)$  是试样产生缩颈前的均匀变形， $hg(\Delta l_e)$  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  $P$  与伸长量  $\Delta l$ ，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  $\sigma$ ，即

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

把试样的伸长量  $\Delta l$  除以试样的原始标距长度  $l_0$ ，则得到试样的相对伸长，即应变  $\epsilon$ （或  $\delta$ ），即

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

以  $\sigma$  与  $\epsilon$  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 ( $\sigma_e$ ) 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。拉伸时的刚度常用试样的原始横截面积 $A_0$ 与该材料的弹性模量 $E$ 的乘积( $A_0E$ )表示。将式(1-1)与式(1-2)代入式(1-3)，经整理后，可求得材料产生的弹性变形量 $\Delta l = Pl_0/E A_0$ ，故材料的刚度( $E A_0$ )愈大，产生弹性变形量( $\Delta l$ )就愈小。

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。提高零件刚度的办法，除了增加零件横截面积或改变截面形状外，从金属材料性能上考虑，就必须增加其弹性模量 $E$ 。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 $\sigma_e$ 是材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值 $\ominus$ 。即

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

式中  $P_e$ ——试样发生完全弹性变形的最大载荷；

$A_0$ ——试样的原始横截面积。

由于弹性极限是表示金属材料在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：

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

由式(1-5)可见，提高弹性极限 $\sigma_e$ 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，主要起缓冲减震和贮存能量的作用，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 $\sigma_e$ ，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 $\sigma_e$ 较高，故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，可确定材料的下列强度指标。

$\ominus$  GB228—87规定，试样产生微量残余变形的应力，作为“规定弹性极限”。因此，弹性极限又称为“规定残余伸长应力”。例如， $\sigma_{0.01}$ 表示规定残余伸长率为0.01%时的应力。

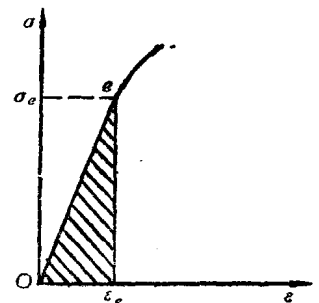


图1-4 弹性比功的图解算法

表1-1 几种工程材料的刚度与弹性指标

材 料	$E/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\sigma_e/\text{MPa}$
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	34①	0.345
丁 苯 橡 胶	2	2①	1.034

① 该值为材料的屈服强度。

### (一) 屈服点与屈服强度

屈服点  $\sigma_s$  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

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

式中  $P_s$ ——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。

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  $\sigma_s$ 。按 GB228—87 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

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

式中  $P_{0.2}$ ——试样标距部分产生 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它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) 强度极限

强度极限  $\sigma_b$  是材料在破断前所承受的最大应力值，即

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

式中  $P_b$ ——试样在破断前所承受的最大载荷；

$A_0$ ——试样的原始横截面积。

由应力-应变曲线可见，强度极限  $\sigma_b$  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，强度极限  $\sigma_b$  就是材料的断裂强度，它是表示材料抵抗断裂的能力。在工程上强度极限常称为抗拉强度，它也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  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  是表示材料塑性好坏的指标。

### (一) 伸长率 (延伸率)

伸长率是指试样拉断后标距增长量与原始标距长度之比, 即

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

式中  $l_k$ ——试样断裂后的标距长度;

$l_0$ ——试样原始标距长度。

材料的伸长率是随标距长度的增加而减小的, 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  $\delta_{10}$  (或  $\delta$ ) 和  $\delta_5$  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之比, 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。

## § 1-2 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, 在一定载荷下, 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, 在相同载荷作用下, 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强度极限和耐磨性 (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、可焊性等工艺性能间也存在着一定联系, 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。在产品图纸的技术条件中, 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  $D$  的淬火钢球或硬质合金球, 在规定载荷  $P$  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  $F$ ，然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力  $(P/F)$ ，以此作为被测试金属的布氏硬度值。

当压头为淬火钢球时，硬度符号为 HBS，适用于布氏硬度值低于 450 的金属材料；当压头为硬质合金球时，硬度符号为 HBW，适用于布氏硬度值为 450~650 的金属材料。故布氏硬度值应为：

$$\text{HBS(或HBW)} = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-11)$$

式中载荷  $P$  的单位为公斤力(kgf)⊖，球体直径  $D$  与压痕直径  $d$  的单位为毫米(mm)，因此布氏硬度的单位为公斤力/毫米<sup>2</sup>(kgf/mm<sup>2</sup>)，但习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。一般硬度符号 HBS 或 HBW 前面的数值为硬度值，符号后面的数值依次表示球体直径、载荷大小及载荷保持时间（保持时间为 10~15 s 时不标注）。例如，120HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 钢球，在 1000kgf 载荷作用下保持 30 s，测得的布氏硬度值为 120。500HBW5/750 表示用直径 5 mm 硬质合金球，在 750kgf 载荷作用下保持 10~15 s，测得的布氏硬度值为 500。

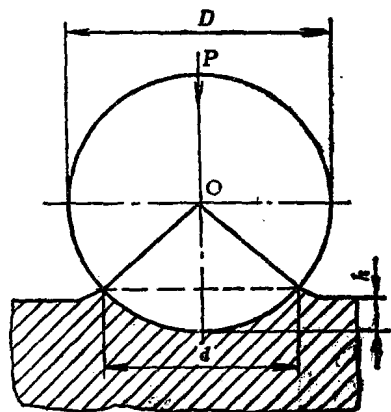


图1-5 布氏硬度试验原理示意图

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  $P$  和载荷保持时间。按 GB231—84 规定，球体直径有 10、5、2.5、2 和 1 mm 五种；载荷与球体直径平方的比值  $(P/D^2)$  有 30、15、10、5、2.5、1.25 和 1 七种（可根据金属材料的种类和布氏硬度范围，按表 1-2 选定  $P/D^2$  值）；载荷的保持时间为，黑色金属 10~15 s，有色金属 30 s，布氏硬度值小于 35 时为 60 s。

表 1-2 布氏硬度试验的  $P/D^2$  值的选择

材 料	布 氏 硬 度	$P/D^2$ ①
钢及铸铁	<140	10
	>140	30
铜及其合金	<35	5
	35~130	10
	>130	30
轻金属及其合金	<35	2.5(或1.25)
	35~80	10(或5、15)
	>80	10(或15)
铅、锡		1.25(或1)

① 试验条件允许时，应尽量选用 10mm 球和无括号的  $P/D^2$  值。

由式(1-11)可见，当载荷  $P$  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。在实际测试时，硬度值不需用式(1-11)计

⊖ kgf 为法定计量单位，此处暂保留，1 kgf = 10 N。