

职工高等工业专科学校教材

金属材料及热处理

第3版

金属材料及热处理

第3版

赵忠 丁仁亮 周而康 主编

G15
36
37

社

机械工业出版社

TG15
Z36
(3)

430373

职工高等工业专科学校教材

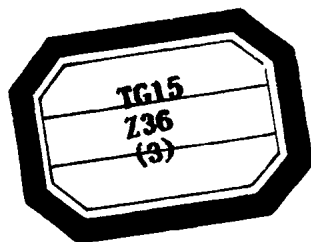
金属材料及热处理

第3版

主编	赵忠	丁仁亮	周而康
参编	赵忠义	赵斌	陈洪俊
	余雪梅	许清芬	曹严华
	袁淑敏		
主审	李再先	黄福炽	



00430373



机械工业出版社

DX02/62

本教材是为职工高等专科学校机制及相近专业编写的,并在第2版基础上进行修订而成的。在修订过程中,为方便各校教学,对原教材内容作了适当的调整和取舍,并更新和充实了教材的内容。

本书共分十四章,扼要地讲授金属学、金属材料及热处理方面的基本内容。内容包括金属力学性能、金属的结构和结晶、金属的塑性变形与再结晶、碳钢与合金钢、有色金属、非金属材料、机械零件材料及毛坯选择与质量检验。为加深理解和学用结合,每章列出思考题和习题,并附有实验指导书。

本书可作为职工高等专科学校、高等专科学校机械类专业教材,也可作为电大、中专机械类专业教材,并可供工程技术人员参考。

金属材料及热处理

第3版

赵忠 丁仁亮 周而康 主编

*

责任编辑:董连仁 版式设计:霍永明

封面设计:姚学峰 责任校对:张晓蓉

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787mm×1092mm 1/32·印张 16.75·字数 401 千字

1999年10月第3版第14次印刷

印数 142 801~150 800 定价:22.00元

*

ISBN 7-111-06231-0/TG·1204(课)

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)68993821、68326677-2527

第 2 版 说 明

1990 年机械电子工业部机械教材编辑室来函, 要求广泛征求意见, 对本书进行修订。为此我们对全国大、中、小城市不同行业的一些职工大学、职业大学发出征求意见表。承蒙各校领导和任课教师的支持, 收到很多意见。我们根据这些意见编写了修订提纲, 并于 1991 年 2 月末在沈阳飞机公司工学院召开了“金属材料及热处理”修订提纲讨论会。参加讨论会的老师有: 北京内燃机总厂内燃机学院赵惠臣, 重庆西南航天职工大学王晶, 大庆职工大学杨兆仁, 长春第一汽车制造厂职工大学张温林, 营口市职工大学李学琛, 沈阳黎明工学院侯玉山, 沈阳第一机床厂职工大学韩成志, 齐齐哈尔第二机床厂职工工学院孟庆文, 吉林铁路职工大学刘纲, 哈尔滨飞机公司工学院陶颖, 沈阳飞机公司工学院孙东杰, 由世芬。

本书是按讨论会的意见修订的, 与第 1 版相比, 书中作了较大的修改, 篇章和内容均有所不同。现作如下五点说明:

1. 根据一致意见, 删去了第 1 版中第十一章, 加入非金属材料内容 (共 5 学时)。各学校可根据自己的情况适当调整。

2. 根据常用金属材料新标准 (GB9439—88、GB1348—88、GB700—88、GB9440—88、GB699—88、GB1298—80、GB1591—88、GB3077—88、GB9943—88、GB2075—87、GB8731—88、GB1222—84、GB9943—88、GB2075—87、GB3203—82、GB1220—84、GB1221—84、GB5676—85、GB1176—87、GB3190—82、GB1173—80、GB175—82、JB403—87 等), 对材料牌号、成分等进行了修改, 但由于有的新标准改动很大, 而贯彻新标准有一个过程, 且 1990 年以前的科技图书和工厂使用的技术资料绝大多数是旧标准, 因此, 本书中部分采取了新、旧并列形式。如普通碳素钢, 除介绍新标准外, 还保持了旧标准内容; 又如国内外应用甚广的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 由于晶间腐蚀不如近期开发的超低碳不锈钢好, 国内外均已停用, 但在本书中仍保留了此牌号。

3. 目前国内各工厂正在贯彻“金属热处理标准”。因此对热处理工艺名词和部分内容按参考文献〔28〕作了修订。

4. 热处理新工艺、新技术不断出现, 根据大多数教师的意见, 适当增加了新工艺方面内容简介。

5. 为了扩大使用范围, 使本书基本能适用于专业证书和职业高等教育, 对第 1 版各章内容作了适当增删。

内蒙古第一机械制造厂工学院李子璋、北京汽车工业学校张坚、南昌职业大学赵忠义、广州业余大学黄福炽、鞍山市职工大学白跃起、南京汽车制造厂职工大学张玉庭、沈阳有色冶金总厂李萍等老师, 对本书的修订提出很多宝贵意见, 在此表示衷心感谢。

由于编者受理论水平、生产实际和教学经验的限制, 本书仍难免有谬误或欠妥之处, 敬请各校任课教师和读者提出批评和建议, 共同搞好本门课程的教材建设工作。

编 者

1991.10

第 3 版 说 明

本书第 3 版是根据机械工业部教材编辑室的要求和近年来职工大学教学改革的需要,在总结多年来使用原教材的实践,并广泛地征求各职工大学的意见的基础上进行修订的。

为了便于教学,对第 2 版的结构作了部分调整,将原第七章合金钢分为三章,即合金结构钢、工具钢和特殊性能钢,并将粉末冶金与硬质合金另设一章。

根据征求的意见,本次修订在内容上作了更新和增补,使其尽量符合职工大学的特点(培养技艺型和工艺型人才),适当增加了与生产实践紧密相关的知识。并根据目前新理论、新材料、新技术、新工艺的发展,增加了与之有关的教学内容。此外,对第 2 版中叙述过于繁琐的部分作了删减。

本书采用了我国的法定计量单位和近年来颁布的有关国家标准。

编者试图在保持前版特色的基础上,尽量满足当前职工大学的改革发展和教学需要,使本教材能适用于职工大学各类型的教学和培训要求。

本书承东北大学李再先教授及广州业余大学黄福炽副教授细心审阅,提出了很多宝贵意见,在此表示衷心感谢,并聘任为本书主审。

参加第 3 版修订的有:武汉市机械局职工大学许清芬(第一、二章);韶钢集团职工大学余雪梅(第三、四章);杭州钢铁厂职工大学周而康(绪论及第五、十三章);沈飞集团公司陈洪俊(第六章);上海汽车工业培训中心曹严华(第七章);沈飞工学院丁仁亮(第八、十四章);南昌高等专科学校赵忠义(第九章、附录);沈飞工学院赵斌(第十、十一章);山东铝业公司职工大学袁淑敏(第十二章)。由赵忠、丁仁亮、周而康任主编。

此外,感谢沈飞工学院梁宽正同志协助部分修订和统稿工作。承蒙沈飞工学院和杭州钢铁厂职工大学教职员工的熱情支持和帮助,使本书得以顺利出版。

殷切希望广大读者在使用过程中对本书的错误和欠妥之处提出批评和建议。

编 者

1997 年 11 月

目 录

第2版说明	
第3版说明	
绪论	1
一、材料的发展与社会进步	1
二、本教材的内容、学习目的和任务	2
第一章 金属材料的性能	3
第一节 金属材料的力学性能	3
一、强度指标	4
二、刚度指标	6
三、塑性指标	7
四、硬度指标	8
五、韧性指标	11
第二节 金属材料的物理和化学性能	13
一、金属材料的物理性能	13
二、金属材料的化学性能	14
思考题和习题	14
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
一、晶体结构的基本概念	16
二、常见金属的晶格类型	17
三、配位数和致密度	19
四、晶面指数和晶向指数	19
第二节 实际金属的结构	20
第三节 纯金属的结晶	23
一、金属结晶的基本规律	23
二、晶核的形成与长大	24
三、晶粒大小对金属力学性能的影响	25
四、影响形核和长大的因素及晶粒尺寸控制	25
第四节 金属铸锭的组织	26
一、铸锭的组织	26
二、定向结晶和单晶	27
思考题和习题	27
第三章 金属的塑性变形与再结晶	28
第一节 金属的塑性变形	28
一、金属的变形与断裂	28
二、单晶体的塑性变形	29
三、多晶体的塑性变形	32
四、合金的塑性变形	33
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	33
一、冷塑性变形对金属组织结构的影响	33
二、冷塑性变形对金属性能的影响	35
三、冷塑性变形与内应力	36
第三节 回复与再结晶	37
一、冷塑性变形金属在加热时组织和性能的变化	37
二、再结晶温度和影响再结晶晶粒大小的因素	39
第四节 金属的热变形	40
一、冷变形与热变形的区别	40
二、热变形对金属组织和性能的影响	41
思考题和习题	43
第四章 合金的结构和结晶	44
第一节 合金中的相结构	44
一、合金和相的基本概念	44
二、合金中相结构的基本类型	44
三、合金的组织与结构	47
第二节 二元合金相图	48
一、二元合金相图的建立	48
二、基本相图	49
第三节 相图与合金性能的关系	56
一、力学性能与相图的关系	56
二、合金铸造性能与相图的关系	57
思考题和习题	58
第五章 铁碳合金相图和碳钢	60
第一节 纯铁、铁碳合金的相结构及其性能	60
一、纯铁及其同素异构转变	60
二、Fe—Fe ₃ C合金的相结构及其性能	61

第二节 Fe—Fe ₃ C 相图分析	62	一、合金渗碳钢	127
一、Fe—Fe ₃ C 相图的特性点 与特性线	62	二、合金调质钢与非调质钢	129
二、碳钢的组织转变过程	65	三、合金弹簧钢	130
三、白口铸铁的结晶过程	67	四、滚动轴承钢	132
四、Fe—Fe ₃ C 相图的应用	69	五、易切削钢	134
第三节 碳钢	70	六、超高强度钢	135
一、含碳量对钢组织和力学 性能的影响	70	思考题和习题	136
二、常存杂质元素对钢性能的影响	71	第八章 工具钢	137
三、碳钢的分类	72	第一节 工具钢的分类及编号	137
四、碳钢的牌号、主要性能及用途	73	一、工具钢的分类	137
思考题和习题	77	二、工具钢的编号	137
第六章 钢的热处理	78	第二节 刀具钢	137
第一节 钢的热处理原理	78	一、刀具钢的性能要求	137
一、钢在加热时的组织转变	78	二、碳素刀具钢	138
二、钢在冷却时的组织转变	82	三、低合金刀具钢	138
第二节 钢的热处理工艺	90	四、高速钢	140
一、钢的退火和正火	90	第三节 模具钢	144
二、钢的淬火和回火	93	一、冷作模具钢	144
三、钢的冷处理	103	二、热作模具钢	146
四、金属的时效	103	第四节 量具钢	148
五、表面热处理	105	思考题和习题	148
第三节 热处理新工艺简介	114	第九章 特殊性能钢	149
一、可控气氛热处理	114	第一节 不锈钢	149
二、真空热处理	114	一、金属材料的腐蚀与防护	149
三、形变热处理	114	二、常用不锈钢	152
四、强韧化处理	115	第二节 耐热钢与高温合金	154
五、流动化热处理	116	一、高温强度及其指标	154
六、循环热处理	116	二、提高钢高温性能的途径	156
思考题和习题	117	三、耐热钢	156
第七章 合金结构钢	119	四、高温合金	159
第一节 概述	119	第三节 耐磨钢	163
第二节 合金元素在钢中的作用	119	思考题和习题	163
一、合金元素对钢中基本相的影响	119	第十章 粉末冶金与硬质合金	165
二、合金元素对 Fe—Fe ₃ C 相图 的影响	120	第一节 粉末冶金	165
三、合金元素对钢热处理的影响	121	一、粉末冶金的生产工艺	165
第三节 低合金结构钢	124	二、常用粉末冶金材料	166
一、低合金高强度结构钢	124	第二节 硬质合金	167
二、低合金耐候钢	126	一、硬质合金的特性	168
三、低合金专业用钢	126	二、常用硬质合金	168
第四节 机械结构用合金钢	127	三、钢结硬质合金	170
		思考题和习题	170
		第十一章 铸铁	171

第一节 概述	171	一、高分子材料基础知识	202
一、铸铁的石墨化及影响因素	171	二、常用高分子合成材料	207
二、铸铁的组织与性能	171	第二节 陶瓷材料	221
第二节 铸铁的分类	172	一、陶瓷分类和组织结构	221
一、按碳存在的形式分类	172	二、陶瓷的生产过程简介	221
二、按石墨的形态分类	173	三、常用陶瓷材料的性能、特点 及用途	222
三、按化学成分分类	173	第三节 复合材料	223
第三节 普通灰铸铁	173	一、复合材料分类及性能特点	223
一、灰铸铁的化学成分、组织、 性能及用途	173	二、复合材料制造方法	225
二、灰铸铁的孕育处理及孕育铸铁	175	三、常用复合材料	225
三、灰铸铁的热处理	175	思考题和习题	228
第四节 球墨铸铁	177	第十四章 机械零件材料及毛坯选择 与质量检验	230
一、球墨铸铁的化学成分	177	第一节 机械零件的失效	230
二、球墨铸铁的组织 and 性能	177	一、工作中引起的失效	230
三、球墨铸铁的牌号和用途	178	二、加工工艺引起的失效	232
四、球墨铸铁的热处理	178	第二节 机械零件材料及毛坯选择 的一般原则	233
第五节 可锻铸铁及蠕墨铸铁	179	一、满足使用性能要求	233
一、可锻铸铁	179	二、材料的工艺性能良好	234
二、蠕墨铸铁	181	三、充分考虑经济性	237
第六节 合金铸铁	183	四、考虑零件外形和尺寸特点	237
一、耐热铸铁	183	五、考虑生产批量	238
二、耐磨铸铁	183	第三节 典型零件的选材与工艺分析	238
三、耐蚀铸铁	184	一、齿轮类零件	238
思考题和习题	184	二、轴类零件	240
第十二章 有色金属	185	三、箱体类零件	241
第一节 铝及其合金	185	第四节 金属材料的质量检验	241
一、工业纯铝	185	一、成分分析	242
二、铝合金的分类及热处理	186	二、组织分析	244
三、变形铝合金	188	三、无损探伤	245
四、铸造铝合金	189	思考题和习题	247
第二节 铜及其合金	193	附录 金属材料及热处理实验指 导书	248
一、工业纯铜	193	实验一 金相显微镜的使用及磨片的 制备	248
二、铜合金	193	实验二 铁碳合金平衡组织的显微 分析	252
第三节 滑动轴承合金	198	实验三 钢铁热处理操作及硬度测量	253
一、对轴承合金性能的要求	198	参考文献	257
二、轴承合金的组织	198		
三、常用轴承合金	198		
思考题和习题	201		
第十三章 非金属材料	202		
第一节 高分子材料	202		

绪 论

一、材料的发展与社会进步

自从地球上有了人类，材料便成为人类社会最重要的物质文明的基础。人类最基本的活动就是学会制做与使用工具（设备），从事生产活动，不断改善自身的生存环境（空间）和生活质量，创造人类的物质和精神文明，而这些活动都离不开物质和材料。

人类的生活和生产活动是同材料的发展息息相关，并与之一起经历各个历史阶段。史学家是以材料的生产和使用作为文明进步的尺度来划分社会发展阶段的，如石器、陶器、青铜器、铁器时代以及正在进入的人工合成材料的新时代。

从石器时代到陶器时代是人类发展史上的第一次飞跃，因为人的智慧发展到将天然材料改造为人工材料及其制品；青铜时代，则是人类使用金属材料的第一个里程碑，它标志着人类征服自然、发展社会生产力方面又迈出了具有深远意义的一步。但是，只有在进入铁器时代，人们把铁（钢）制成工具、设备之后，才使社会经济和生活发生巨大变化，进入堪称近代文明的时代，这是生产力重大发展的时代，并延续至今将近三千年了。

据文物考古，中国在公元前 6 世纪已掌握铁的冶铸技术，春秋战国开始大量使用铁器，铸锻技术有很大提高并掌握了热处理，能制造出“干将”、“莫邪”之类的著名宝剑，而直到 18 世纪中叶才在英国出现这种冶铸技术。中国的“两步炼钢法”也比其它国家早一千六百余年。西汉时期已大量使用灰口铁，汉魏时期制造了类似现代球墨铸铁的镢和斧等工具，并发展了多种炼钢方法。从纯金属到合金，从铸锻到热处理工艺，其方法之多样，工艺之精湛，质量之优良，在世界古代冶金史上都留下光彩夺目的篇章。值得提到的是，我国天然高分子材料——丝绸及其制品的生产也有五千多年历史和辉煌成就。11 世纪时，中国丝绸就经海上及“丝绸之路”传入波斯、阿拉伯和埃及，直到 1470 年才传到威尼斯及欧洲各国。

但是，由于材料种类繁多，涉及多种基础学科，加之社会制度和环境等多种因素的制约，以至到 18~19 世纪工业革命时期，人类对材料的认识仍停留在非理性的、工匠或艺人的经验技术水平上。18 世纪后，随着现代工业迅速发展，对钢铁的需求急剧增长，才逐渐在化学、物理、力学及冶金等学科基础上产生一门新学科——金属学，它明确提出金属外在性能取决内部组织结构的概念，其主要任务是研究成分、组织结构与性能之间的关系和变化的规律。随着光学显微镜、X 射线技术、电子探针、电镜等新技术的发明和应用，又进一步促进了金属学的长足进步。

当今，材料、能源、信息和生物工程已成为当代技术的四大支柱，近一百多年来发展特别迅猛。从 60 年代至 70 年代，人工合成高分子材料年增长率为 14%，金属材料仅为 4%。目前，有机高分子材料的生产按体积计已超过钢产量，预计 2000 年可达钢体积的 4 倍，除了可代替一部分钢铁等金属材料之外，还研制和发展具有良好导电和耐高温等特殊性能的有机合成材料。陶瓷材料除具有某些特殊功能之外，其脆性及抗热震性已逐步改善，可望作为理想的高温结构材料。因此，工程材料科学就在金属学、高分子科学和陶瓷学等的基础上迅速建立起来，其主要任务是揭示固体材料的成分、组织结构、性能和应用之间的关系及其变

化的一般规律。

近四十多年来,我国在材料工业的生产和科研方面已取得了巨大成就。在金属材料生产方面已建立了符合我国资源特点的合金钢、低合金钢系列,其应用范围日益扩大,钢产量已跃居世界前列,研制出具有世界先进水平的稀土镁球墨铸铁;许多热处理新工艺、新技术得到应用和推广,各种有色金属和特殊性能合金在质量和品种上基本满足了国防和科学技术的需要。此外,复合材料的出现使结构材料的比强度大幅度提高;稀土元素的广泛应用,不仅改善了钢的力学性能,而且提高了某些功能材料的性能;多晶金刚石和立方氮化硼刀具的切削速度比高速钢提高几十倍。所有这些都大大促进了我国工业现代化的进程。

二、本教材的内容、学习目的和任务

《金属材料及热处理》课程内容包括金属学基础及热处理、机械工程常用的金属材料、非金属材料(高分子材料、陶瓷材料和复合材料)及零件毛坯的选用。主要讲授工程构件和机器零件用材的成分、组织结构和性能之间关系、变化规律和改变材料性能的途径等。

学习本课程的目的使学生获得有关工程材料的基本理论和基本知识,初步掌握零件设计时的合理选材、用材,并具有正确运用热处理、妥善安排加工工艺路线及材料检测等方面的知识和能力。

本课程的名词概念较多,较为抽象和分散,使初学者颇难掌握。但是,只要认真弄清其基本理论及重要名词、概念,按照材料成分、工艺、组织结构及性能变化规律进行认真学习、记忆,注重理解、分析和综合应用,多联系生产实践,认真完成习题、实验等教学环节,那么入门也是不难的。学习本课程之前,学生应具备必要的专业基础知识和生产实践知识,所以本课程一般应在学完物理、化学、材料力学、金工实习及金属工艺学之后进行教学。

当代世界各国的科学技术都在迅速发展,特别是作为支柱产业之一的材料工业,新理论、新技术、新工艺、新的材料性能及其开发应用层出不穷。与发达国家比较,我国在材料科学技术方面的差距还很大,任重道远,为振兴中华我们必须认真学习和探索,努力赶超世界先进水平。

第一章 金属材料的性能

本课程所涉及的材料主要是金属材料及部分非金属材料，因非金属材料的性能指标及测试方法与金属材料大多是相同或相似的，所以本章主要以金属材料为例来阐述工程材料的一般性能及其主要指标。

迄今为止，金属材料仍然是现代工业、农业、国防以及科学技术各个领域应用最广泛的工程材料，这不仅是由于其材料来源丰富，生产工艺较简单且成熟，而且还因为其某些性能大大优于某些非金属材料所致。

金属材料的性能，是指用来表征材料在给定外界条件下的行为参量。当外界条件发生变化时，同一种材料的某些性能也会随之变化。通常所指金属材料的性能包括以下两个方面：

1. 使用性能 即为了保证零件、工程构件或工具等的正常工作，材料所应具备的性能，它包括力学、物理、化学等方面的性能。金属材料的使用性能决定了其应用范围、安全性和使用寿命等。

2. 工艺性能 即反映金属材料在被制成各种零件、构件和工具的过程中，材料适应各种冷、热加工的性能，主要包括铸造、压力加工、焊接、切削加工、热处理等方面的性能。这里仅简单介绍金属材料的力学、物理及化学性能，金属材料的工艺性能可参见本书第十四章或《金属工艺学》等相关教材。

第一节 金属材料的力学性能

金属材料在加工和使用过程中都要承受不同形式外力的作用，当外力达到或超过某一限度时，材料就会发生变形，以至断裂。材料在外力作用下所表现的一些性能（如强度、刚度、韧性等），称为材料的力学性能。

材料的力学性能，不仅是设计零（构）件、选择材料的重要依据，而且也是验收、鉴定材料性能的重要依据之一。对冶金产品的生产来说，金属（钢铁）材料的力学性能还是改进工艺、控制产品质量的重要参数之一。

根据载荷性质，零件受力情况可分为静载荷和动载荷两类。静载荷是指逐渐而缓慢地作用在工件上的力，如机床床头箱对床身的压力、钢索的拉力、梁的弯矩、轴的扭矩和剪切力等。动载荷包括冲击载荷和交变载荷等，如空气锤锤杆所受的冲击力；齿轮、曲轴、弹簧等零件所承受的大小与方向是随时间而变化的载荷等。

无论何种固体材料，其内部原子之间都存在相互平衡的原子结合力的相互作用。当工件材料受外力作用时，原来的平衡状态受到破坏，材料中任何一个小单元与其邻近的各小单元之间就诱发了新的力，称为内力。在单位截面上的内力，称为应力，以 σ 表示。材料在外力作用下引起形状和尺寸改变，称为变形，包括弹性变形（卸载后可恢复原来形状和尺寸）和塑性变形（卸载后不能完全恢复原来形状和尺寸）。

当载荷性质、环境温度与介质等外在因素改变时，对材料力学性能的要求也不同。金属

材料的力学性能主要是指强度、刚度、硬度、塑性和韧性等。

一、强度指标

金属的强度是金属抵抗永久变形和断裂的能力。它是按 GB228—87 规定，把一定尺寸和形状的金属试样（图 1-1）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（图 1-2）。在拉伸曲线上可以确定以下性能指标。

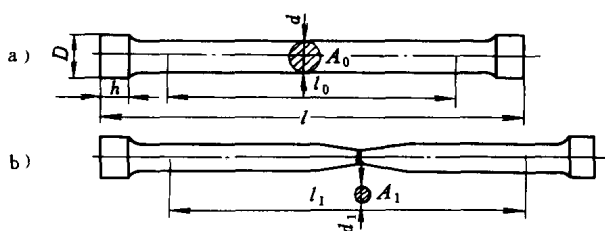


图 1-1 钢的标准拉伸试棒

a) 拉断前 b) 拉断后

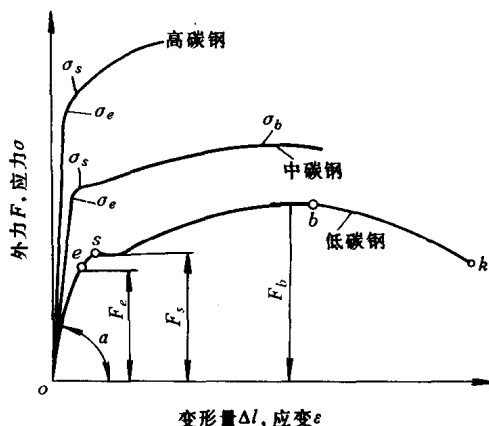


图 1-2 退火低碳、中碳和高碳钢的拉伸曲线

（外力 F —变形量 Δl 曲线与应力

σ —应变 ϵ 曲线形状相似，只是坐标不同）

1. 弹性极限 从图 1-2 可以看出，不同性质材料的拉伸曲线形状是不相同的。拉伸曲线的 oe 线段是直线，这一部分试棒变形量 Δl 与外力 F 成正比。当除去外力后，试棒恢复到原来尺寸，称这一阶段的变形为弹性变形。外力 F_e 是使试棒只产生弹性变形的最大载荷。

无论何种材料，内部原子之间都具有相互平衡的原子力相互作用，以保持其固定的形状。当受到外力时，原来的平衡被破坏，其中任何一个单元都和邻近的各个单元之间诱发了新的力（内力），材料单位截面上的这种力称为应力，用符号 σ 表示。

弹性极限用符号 σ_e 表示，单位为 MPa，即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中 A_0 ——试棒的原始截面积；

F_e ——试样 e 点所承受外力。

弹性极限 σ_e 是由试验得到的，其值受测量精度影响很大，故通常采取规定微量塑性伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 为弹性极限。

2. 屈服点 从拉伸曲线上可以看到，当载荷增加至超过 F_e 后，试样必定保留部分不能恢复的残余变形，即塑性变形。在外力达 F_s 时曲线出现一个小平台。此平台表明不增加载荷试样仍继续变形，好象材料已经失去抵抗外力能力而屈服了。我们称试样屈服时的应力为材料的屈服点，以 σ_s 表示，单位为 MPa。

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

很多金属材料,如大多数合金钢、铜合金以及铝合金的拉伸曲线不出现平台,脆性材料如普通铸铁、镁合金等,甚至断裂之前也不发生塑性变形,因此工程上规定试棒发生某一微量塑性变形(0.2%)时的应力作为该材料的屈服点,称为屈服强度或规定微量塑性伸长应力,并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。要求严格时,也可规定为0.1%、0.05%的变形量,并相应以符号 $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$ 表示。

3. 抗拉强度 试棒在屈服时,由于塑性变形而产生加工硬化,所以只有载荷继续增大变形才能继续增加,直到增到最大载荷 F_b 。拉伸曲线的这一阶段,试棒沿整个长度均匀伸长,当载荷达到 F_b 后,试棒就在某个薄弱部分形成“缩颈”,如图1-1b那样。此时不增加载荷试棒也会发生断裂。 F_b 是试棒承受的最大外力,相应的应力即为材料的抗拉强度,以 σ_b 表示,单位为MPa,代表金属材料抵抗大量塑性变形的能力,即

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

材料的 $\sigma_{0.2}$ (或 σ_s)、 σ_b 均可在材料手册或有关文献或资料中查得,但 $\sigma_{0.01}$ 在手册中很少列出,因为测量手续麻烦,而且需要十分精确的设备,只有在特别需要时才测定它。

一般机器构件都是在弹性状态下工作的,不允许微小的塑性变形,所以在机械设计时应采用 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 强度指标,并加上适当的安全系数。由于抗拉强度 σ_b 测定较方便,而且数据也较准确,所以设计零件时有时也可以直接采用强度指标 σ_b ,但需使用较大的安全系数。

由上述可知,强度是表征金属材料抵抗过量塑性变形或断裂的物理性能。

σ_s/σ_b 的比值称为屈强比,是一个有意义的指标。比值越大,越能发挥材料的潜力,减小结构的自重。但为了使用安全,亦不宜过大,适合的比值在0.65~0.75之间。

4. 疲劳强度 某些机器零件,如轴、弹簧、齿轮、叶片等在交变载荷长期作用下工作,很多情况是在工作应力峰值低于弹性极限的情况下突然破坏的。在多次交变载荷作用下的破坏现象,称为疲劳。交变载荷可以是大小交变、方向交变,或同时改变大小和方向。

金属材料的疲劳破坏过程,首先是在其薄弱部位,如有应力集中或缺陷(划伤、夹渣、显微裂纹等)处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源,而且一般出现在零件表面上,形成疲劳扩展区。当此区达到某一临界尺寸时,零件就在甚至低于弹性极限的应力下突然脆断。最后的脆断区称为最终破断区。图1-3a是典型疲劳断口(汽车后轴)的宏观照片,而图1-3b是典型断口三个区域的示意图。

测定材料的疲劳强度时,要用较多的试棒,在不同交变载荷下进行试验,作出疲劳曲线,如图1-4所示。从图可以看出,循环数增加,应力降低。当应力降到某一值后,曲线变成水平直线,这就意味着材料可以经受无限次循环载荷而不发生疲劳断裂。把试样承受无限次应力循环或达到规定的循环次数才断裂的最大应力,作为材料的疲劳强度。对在弯曲循环载荷下测定的疲劳强度用符号 σ_{-1} 表示,而在剪切循环载荷下测定的用 τ_{-1} 表示。

图1-4是钢铁材料的疲劳曲线,在试验循环数达到 10^7 次时,出现水平直线。所以对于钢铁材料,把循环数达到 10^7 次时的最大应力作为疲劳强度。有色金属和合金的疲劳曲线不出现水平直线,因此工程上规定循环数到 10^8 次时的最大应力作为它们的疲劳强度。

材料的 σ_{-1} 与 σ_b 是紧密相关的。对钢来说,其关系为 $\sigma_{-1}=0.45\sim0.55\sigma_b$ 。可见材料的疲劳强度随其抗拉强度增高而增高。

根据疲劳的特点和总的循环次数,可以分为高周疲劳($N\geq 10^4$)和低周疲劳($N\leq$

10^4)。高周疲劳时,重要的性能是疲劳强度。如果零件的工作应力低于材料的疲劳强度,则在理论上不会发生疲劳断裂。而低周疲劳时,材料的疲劳抗力不仅与强度有关,而且与塑性有关,即材料应有良好的强韧性配合。

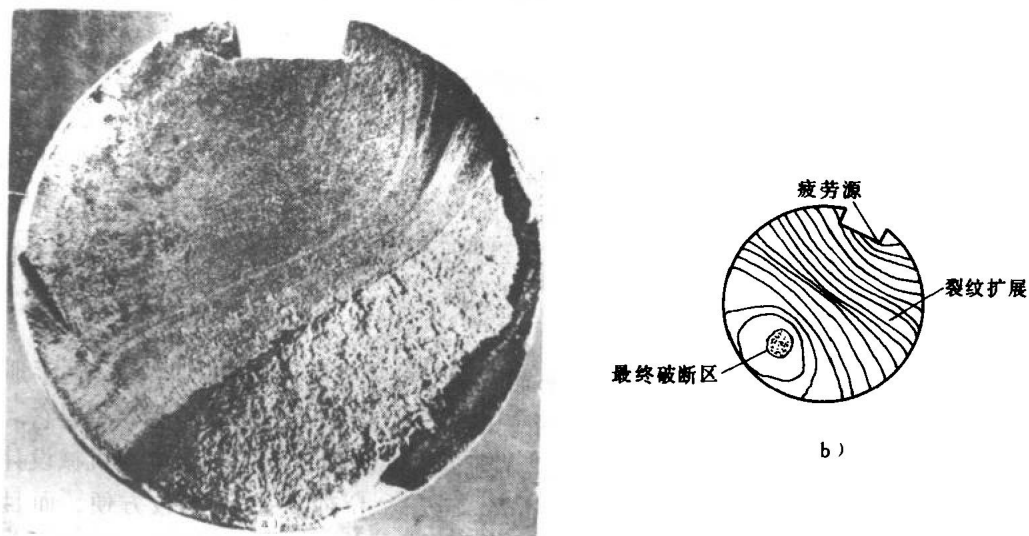


图 1-3 疲劳断口的特征

a) 汽车后轴的断口 b) 断口示意图

零件的疲劳强度除了决定于材料的成分及其内部组织外,与零件的表面状态及其形状也有很大的影响。表面应力集中(划伤、损伤、腐蚀斑点等)会使疲劳寿命大大减低。提高零件疲劳寿命的方法是:①设计上减小应力集中,转接处避免锐角连接,使零件具有较小的表面粗糙度;②强化表面,如渗碳、渗氮、喷丸、表面滚压等,在零件表面造成残余压应力,抵消一部分拉应力,降低零件表面实际拉应力峰值,从而提高零件的疲劳强度。

二、刚度指标

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度,它表示材料弹性变形的难易程度。材料刚度的大小,通常用弹性模量 E 来评价。

材料在弹性范围内,应力 σ 与应变 ϵ 的关系服从虎克定律: $\sigma = E\epsilon$ 或 $\tau = G^\ominus \gamma$ 。式中 σ 和 τ 分别为正应力和切应力, ϵ 和 γ 分别为正应变和切应变。应变为单位长度的变形量,即 $\epsilon = \Delta l / l$ 。

因之 $E = \sigma / \epsilon$ 或 $G = \tau / \gamma$, 相应为弹性模量和切变模量。由图 1-2 可以看出,弹性模量 E 是拉伸曲线上的斜率,即 $\tan \alpha = E$ 。斜率 $\tan \alpha$ 越大,弹性模量 E 也越大,即是说弹性变形

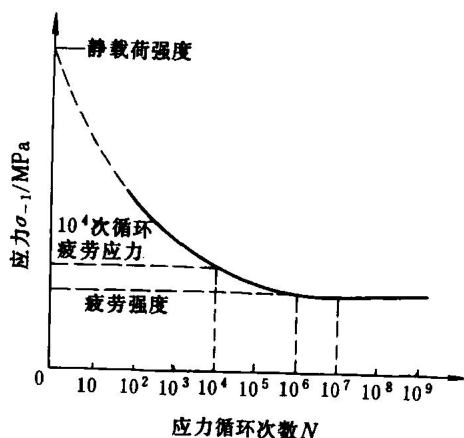


图 1-4 疲劳曲线

⊖ G 是由扭转试验测得,称为切变模量。

越不容易进行。因此 E 、 G 是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大，材料的刚度越大，即具有特定外形尺寸的零件或构件保持其原有形状与尺寸的能力也越大。

弹性模量的大小主要决定于金属键，与显微组织的关系不大。合金化、热处理、冷变形等对它的影响很小。生产中一般不考虑也不检验它的大小，基体金属一经确定，其弹性模量值就基本上定了。在材料不变的情况下，只有改变零件的截面尺寸或结构，才能改变它的刚度。

在设计机械零件时，要求刚度大的零件，应选用具有高弹性模量的材料。钢铁材料的弹性模量较大，所以对要求刚度大的零件，通常选用钢铁材料，例如镗床的镗杆应有足够的刚度，如果刚度不足，当进刀量大时镗杆的弹性变形就会大，镗出的孔就会偏小，因而影响加工精度。

要求在弹性范围内对能量有很大吸收能力的零件（如仪表弹簧），一般使用软弹簧材料铍青铜、磷青铜制造，应具有极高的弹性极限和低的弹性模量。

在表 1-1 中列出的是常用金属的弹性模量。

表 1-1 常见金属的弹性模量

金 属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
铁	214 000	84 000
镍	210 000	84 000
钛	118 010	44 670
铝	72 000	27 000
铜	132 400	49 270
镁	45 000	18 000

三、塑性指标

塑性是指金属材料在载荷作用下断裂前发生不可逆永久变形的能力，评定材料塑性的指标通常是伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率 δ 伸长率可用下式确定：

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

式中 l_0 ——试棒原标距长度；

l_1 ——拉断后试棒的标距长度（图 1-1）。

在材料手册中常常可以看到 δ_5 和 δ_{10} 两种符号，它分别表示用 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ （ d 为试棒直径）两种不同长度试棒测定的伸长率。 l_1 是试棒的均匀伸长和产生缩颈后伸长的总和。很明显，短试棒中缩颈的伸长量所占的比例大，故同一材料所测得的 δ_5 和 δ_{10} 值是不同的， δ_5 的值较大，而 δ_{10} 值较小，例如钢材的 δ_5 大约为 δ_{10} 的 1.2 倍。所以相同符号的伸长率才能进行相互比较。

2. 断面收缩率 ψ 断面收缩率用下式求得：

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

式中 A_0 ——试棒原来的截面；

A_1 ——试棒拉断后缩颈处的截面积（图 1-1）。

断面收缩率不受试棒标距长度的影响，因此能更可靠地反映材料的塑性。

对必须承受强烈变形的材料，塑性指标具有重要的意义。塑性优良的材料冷压成形性好。此外，重要的受力零件也要求具有一定塑性，以防止超载时发生断裂。

伸长率和收缩率也表明材料在静载或缓慢增加的拉伸应力下的韧性。不过在很多情况下，具有高收缩率的材料可承受高的冲击吸收功。

必须指出，塑性指标不能直接用于零件的设计计算，只能根据经验来选定材料的塑性。一般来说，伸长率达 5% 或断面收缩率达 10% 的材料，即可满足绝大多数零件的要求。

但对各种具体形状、尺寸和应力集中系数的零件来说，对塑性的要求是有一定限度的，并不是越大越好，否则会限制材料强度使用水平的提高，不能发挥材料强度的潜力，造成产品粗大笨重、浪费材料和使用寿命不长。

四、硬度指标

硬度是材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度是材料的一个重要指标，试验方法简便、迅速，不需要破坏试件，设备也比较简单，而且对大多数金属材料，可以从硬度值估算出它的抗拉强度，因此在设计图样的技术条件中大多规定材料的硬度值。检验材料或工艺是否合格有时也需用硬度。因此，硬度试验在生产中广泛应用。

材料的硬度值，是按一定方法测出的数据，不同方法在不同条件下测量的硬度值，因含意不同，其数据也不同，因此一般不能进行相互比较。工业生产中经常采用的硬度试验方法有以下几种。

（一）布氏硬度

布氏硬度试验方法是把规定直径的淬火钢球或硬质合金球以一定的试验力压入所测材料表面（图 1-5），保持规定时间后，测量表面压痕直径（图 1-6），然后按下式计算硬度：

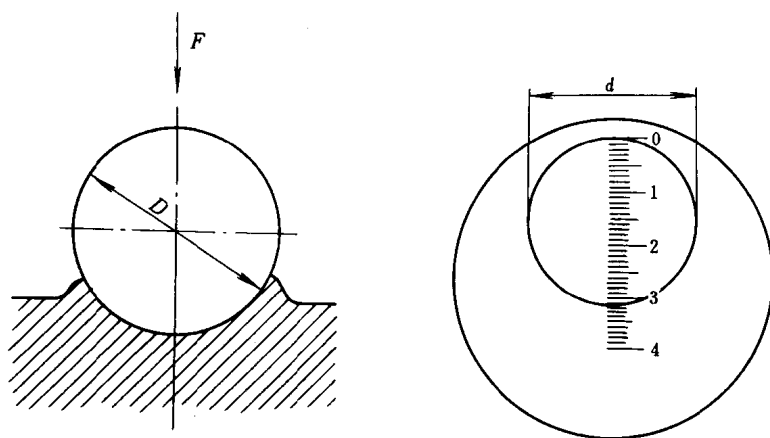


图 1-5 布氏硬度测量示意图

图 1-6 用读数显微镜测量压痕直径

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

式中 HBS (HBW) ——S 表示用钢球 (W 表示硬质合金球) 试验时的布氏硬度值；

F ——试验力 (N);

A ——压痕表面积 (mm^2);

D ——球体直径 (mm);

d ——压痕平均直径 (mm)。

由于金属材料有软有硬, 被测工件有薄有厚, 尺寸有大有小, 如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D , 就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此, 在进行布氏硬度试验时要求使用不同的试验力和压头直径, 建立 F 和 D 的某种选配关系, 以保证布氏硬度的不变性。

根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同, 按照表 1-2 的规范选择试验压头 (钢球) 直径 D 、试验力 F 及保持时间。

淬火钢球作压头测得的硬度值用符号 HBS 表示; 硬质合金球作压头时用 HBW 表示。符号 HBS 和 HBW 之前用数字标注硬度值, 符号后面依次用数字注明压头直径 (mm)、试验力 (0.102N) 及试验力保持时间 (s) (10~15s 不标注)。例如, 500HBW5/750, 表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10~15s, 测得的布氏硬度值为 500。

目前, 布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材。

表 1-2 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围 (HBS)	球直径 D/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F/N	试验力保持时间 /s	注
钢、铸件	≥ 140	10 5 2.5	30	29420 7355 1839	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍。 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍。 试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。试验后, 试样支撑面应无可见变形痕迹
	< 140	10 5 2.5	10	9807 2452 613	10~15	
非铁金属材料	≥ 130	10 5 2.5	30	29420 7355 1839	30	
	35~130	10 5 2.5	10	9807 2452 613	30	
	< 35	10 5 2.5	2.5	2452 613 153	60	

(二) 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的硬度试验方法, 它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 1-7 所示。它是用顶角为 120° 金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16 英寸) 的淬火钢球作压头, 先施加的初始试验力 F_1 (98N), 再加上主试验力 F_2 , 其总试验力为 $F = F_1 + F_2$ (588N、980N、1471N)。图中 1 为压头受到初始试验力 F_1 后压入试样的位置; 2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置且经规定的保持时间, 卸除主试验力 F_2 , 仍保留初试验力 F_1 , 试样弹性变形的恢复使压头上升到 3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为 h , 即 1 位置至 3 位置。金属越硬, h 值越小。为适应人们习惯上数