



职工高等工业专科学校教材
机械工业出版社精品教材

第4版

金属材料及热处理

丁仁亮 主编



配电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是为高等职业技术学校 and 高等专科学校的材料、机制及相近专业编写的教材。本书在编写过程中充分突出了职业技术教育的特点,在内容安排上尽量选择与生产实践相关的题材。

本书主要讲授金属学、金属材料及热处理方面的基本知识,并介绍了机械工业常用非金属材料。内容包括金属材料的性能、常见金属的晶体结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、合金的结构与结晶、铁碳合金相图和碳钢、钢的热处理、合金结构钢、特殊性能钢、工具钢、粉末冶金与硬质合金、铸铁、非铁金属、非金属材料、纳米材料简介、机械零件的毛坯选择与质量检验。为加深理解和学用结合,每章都附有思考题和习题。

本书可作为高等职业技术教育和高等专科学校的材料成形、焊接以及机械制造类专业教材,也可作为成人大专、职工培训和继续教育教材,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热处理/丁仁亮主编.—4版.—北京:机械工业出版社,2009.7

职工高等工业专科学校教材.机械工业出版社精品教材
ISBN 978-7-111-27366-0

I. 金… II. 丁… 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. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 089908 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 责任编辑:王海峰 于奇慧

版式设计:张世琴 责任校对:张玉琴

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 8 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·393 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27366-0

定价:27.00 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) 88379757

封面防伪标均为盗版

第4版说明

应机械工业出版社高职教育分社的要求，我们对本书的用户做了广泛的调查和征求意见，根据目前高等专科学校和高职院校的教学改革和工学结合的需要，提出了对本书的修订大纲。

在保持原书第3版结构和基本内容的基础上，编者对书中所采用的标准进行了全面的修订，书中的内容尽量反映最新的国家标准，但为了考虑工程实践中的应用习惯，对部分符号和名词仍保留习惯用法（如：应力 σ 、伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 等），对新的国家标准规定的符号在书中也作了说明。

为反映现代材料的发展和应用，有色金属部分增加了钛合金内容，同时增加了第十四章纳米材料简介；根据目前非金属材料的应用，对第3版中非金属材料的内容作了部分修订。

参加第4版修订的有：辽宁装备制造职业技术学院丁仁亮（第十三、十五章）；辽宁装备制造职业技术学院宋欣颖（绪论及第一、二、三、四章）；沈阳航空职业技术学院赵彬（第八、九、十、十一、十二章）；辽宁装备制造职业技术学院赵云龙（第五、六、七、十四章及附录）。由丁仁亮任主编。

编者在此对原主编赵忠老师在第1版和第2版中所做的大量基础工作深表谢意。

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，共同完善本课程的教材建设工作。

编者

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

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版中的第十一章,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,本书中部分内容采用新、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,对本书的修订提出了很多宝贵意见,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

新旧标准性能名称、符号对照

GB/T 228—2002		GB/T 228—1987	
性能名称	符号	性能名称	符号
—	—	屈服点	σ_s
上屈服强度	R_{eH}	上屈服点	σ_{sU}
下屈服强度	R_{eL}	下屈服点	σ_{sL}
规定非比例延伸强度	R_p	规定非比例伸长应力	σ_p
规定总延伸强度	R_t	规定总伸长应力	σ_t
规定残余延伸强度	R_r	规定残余伸长应力	σ_r
抗拉强度	R_m	抗拉强度	σ_b
屈服点延伸率	A_e	屈服点伸长率	δ_s
最大力总伸长率	A_{gt}	最大力下的总伸长率	δ_{gt}
最大力非比例伸长率	A_g	最大力下的非比例伸长率	δ_g
断裂总伸长率	A_t	—	—
断后伸长率	$A, A_{11.3}, A_{x\max}$	断后伸长率	$\delta_5, \delta_{10}, \delta_{x\max}$
断面收缩率	Z	断面收缩率	ψ

注：GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》已替代原 GB/T 228—1987《金属拉伸试验方法》、GB/T 3076—1982《金属薄板（带）拉伸试验方法》和 GB/T 6397—1986《金属拉伸试验试样》三个标准，且与原标准差异较大。为与国际接轨，性能的定义及符号均按照国际标准重新规定。标准中定义了 12 种可测拉伸性能，其中 10 种性能的名称与原标准 GB/T 228—1987 中的名称、符号有差异。由于原标准已使用十多年，且一些相关的产品标准还未同步修订，因此，本书中仍沿用原标准的名称和符号。

目 录

第4版说明	
第3版说明	
第2版说明	
新旧标准性能名称、符号对照	
绪论	1
第一章 金属材料性能	3
第一节 金属材料的力学性能	3
第二节 金属材料的物理和化学性能	13
思考题和习题	14
第二章 常见金属的晶体结构与结晶	16
第一节 常见金属的晶体结构	16
第二节 实际金属的结构	20
第三节 纯金属的结晶	23
第四节 金属铸锭的组织	26
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 金属材料的塑性变形	28
第二节 冷塑性变形对金属的组织性能的影响	33
第三节 回复与再结晶	36
第四节 金属材料的热变形	40
思考题和习题	42
第四章 合金的结构与结晶	43
第一节 合金的相结构	43
第二节 二元合金相图	45
第三节 合金的力学性能与相图的关系	49
思考题和习题	50
第五章 铁碳合金相图和碳钢	51
第一节 纯铁、铁碳合金的相结构及其性能	51
第二节 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图分析	53
第三节 碳钢	60
思考题和习题	68
第六章 钢的热处理	70
第一节 钢的热处理原理	70
第二节 钢常用的热处理工艺	81
第三节 其它热处理工艺	105
思考题和习题	108
第七章 合金结构钢	110
第一节 概述	110
第二节 合金元素在钢中的作用	110
第三节 低合金结构钢	115
第四节 机械结构用合金钢	118
思考题和习题	128
第八章 特殊性能钢	129
第一节 不锈钢	129
第二节 耐热钢与高温合金	135
第三节 耐磨钢	141
思考题和习题	142
第九章 工具钢	143
第一节 工具钢的分类及编号	143
第二节 刃具钢	143
第三节 模具钢	150
第四节 量具钢	154
思考题和习题	155
第十章 粉末冶金与硬质合金	156
第一节 粉末冶金	156
第二节 硬质合金	158
思考题和习题	162
第十一章 铸铁	163
第一节 概述	163
第二节 铸铁的分类	164
第三节 普通灰铸铁	164
第四节 球墨铸铁	168
第五节 可锻铸铁及蠕墨铸铁	171
第六节 合金铸铁	174
思考题和习题	175
第十二章 非铁金属	176
第一节 铝及其合金	176

第二节 铜及其合金	184	的原则	223
第三节 钛及其合金	188	第三节 典型零件的材料选择与	
第四节 滑动轴承合金	189	制造工艺	228
思考题和习题	192	第四节 金属材料的质量检验	230
第十三章 非金属材料	193	思考题和习题	236
第一节 高分子材料	193	附录 金属材料及热处理实验指导书	
第二节 陶瓷材料	208		237
第三节 复合材料	211	实验一 金相显微镜的使用及磨	
思考题和习题	215	片的制备	237
第十四章 纳米材料简介	216	实验二 铁碳合金平衡组织的显微	
第十五章 机械零件的毛坯选择与		分析	241
质量检验	220	实验三 钢铁热处理操作及硬度测量	242
第一节 机械零件的失效	220	参考文献	246
第二节 机械零件材料及毛坯选择			

绪 论

一、材料的发展与应用

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作与使用工具（设备），从事生产活动，不断改善自身的生存环境和生活质量，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。青铜器时代则是人类使用金属材料的第一个里程碑，它标志着人类在征服自然、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。

据文物考古记载，我国在公元前 6 世纪已掌握了冶铸技术，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技术，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。我国的“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铍和斧等工具，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了光彩夺目的篇章。值得一提的是，我国天然高分子材料——丝绸及其制品的生产也有五千多年的历史 and 辉煌成就。11 世纪，我国丝绸就经海上“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，对钢铁的需求急速增长，才逐渐在化学、物理、力学及冶金等学科基础上产生了一门新学科——金属学，它明确提出了金属的外在性能取决于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。光学显微镜、X 射线技术、电子探针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、信息、能源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速。从 20 世纪 60 年代至 70 年代，人工合成高分子材料的增长率为 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，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，有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。

近年来,我国在材料工业的生产和科研方面取得了巨大的成就,在金属材料的生产方面,已经形成了符合我国国情的系列产品,并能够生产具有世界先进水平的产品。目前我国的钢产量已居世界首位。我国的材料工业正蓬勃发展,但应该看到,我国在材料的制造技术、工艺和新材料的开发及应用方面与世界上的发达国家之间还有一定的差距,因此,我们应该努力学习,争取尽快赶超世界材料工业的先进水平。

二、本课程的内容、学习目的和方法

随着经济的飞速发展和科学技术的进步,对材料的要求越来越苛刻。结构材料向高强度、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照和多功能的方向发展,新材料也在不断地涌现。机械工业是材料应用的重要领域,随着机械工业的发展,对产品的要求越来越高。无论是制造机床,还是建造轮船、石油化工设备,都要求产品技术先进、质量高、寿命长、造价低。因此,在产品设计与制造过程中,会遇到越来越多的材料及材料加工方面的问题,这就要求机械工程技术人员掌握必要的材料科学与材料工程知识,具备正确选择材料和加工方法、合理安排加工工艺路线的能力。本课程正是为实现这一目标而设置的。

“金属材料及热处理”这门课程的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)、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的关系、变化规律和改变材料性能的途径等。

学习本课程的目的在于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技术、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,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,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,所以本课程一般应安排在化学、材料力学、金工实习等课程之后。同时,学习中需要改进思维方式,调整和改进学习方法,注重主动学习、自主学习、提高学习效率;还应注意运用已学过的知识,注重分析、理解与应用,特别是注意前后知识的综合运用,把相对分散、孤立的材料科学知识转变为系统而整体的理论体系,培养独立分析问题与解决问题的能力。

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，生产工艺简单且成熟，还因为其某些性能大大优于某些非金属材料。

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。通常所指的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。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 即反映材料在被制成各种零件、构件和工具的过程中，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。

这里主要介绍金属材料的力学性能，并简单介绍其物理及化学性能，金属材料的工艺性能可参见本书第十五章或其它相关教材。

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，甚至断裂。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。

根据载荷的性质和零件的受力情况，载荷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，如机床主轴箱对床身的压力、钢索的拉力、梁的弯矩和剪切力等。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随时间而变化的载荷。

当载荷性质、环境温度以及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

强度是指材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。根据外力的作用方式，有多种强度指标，如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等。其中以拉伸实验所得强度指标的应用最为

广泛。按 GB/T 228—2002 的规定,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)。

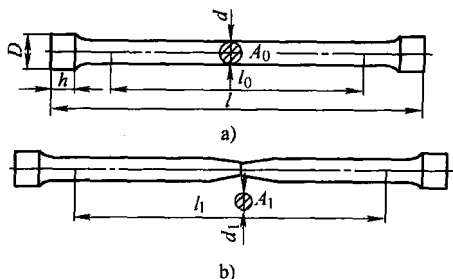


图 1-1 钢的标准拉伸试样

a) 拉伸前 b) 拉伸后

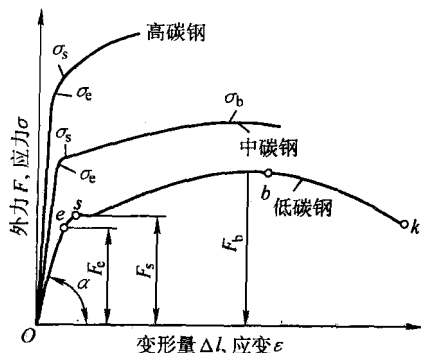


图 1-2 退火低碳、中碳和高碳钢的

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)

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,用 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(卸载后可恢复原来的形状和尺寸)和塑性变形(卸载后不能恢复原来的形状和尺寸)。

1. 弹性极限 (σ_e)

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 Oe 段是直线,这一部分试样变形量 Δl 与外力 F 成正比。当去除外力后,试样恢复到原来尺寸,称这一阶段的变形为弹性变形。外力 F_e 是使试样只产生弹性变形的最大载荷。

弹性极限是指在产生完全弹性变形时材料所能承受的最大应力。弹性极限用符号 σ_e 表示,单位为 MPa (N/mm^2),即

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

式中 S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2);

F_e ——试样完全弹性变形时所能承受的最大载荷 (N)。

弹性极限 σ_e 是由试验得到的,其值受测量精度影响很大。为了便于实际测量和应用,一般规定以残余应变 (即微量塑性变形量) 为 0.01% 时的应力值 ($\sigma_{0.01}$) 为“规定弹性极限”。

2. 屈服点 (σ_s)

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,这时材料已经失去抵抗外力的能力而屈服了。我们称试样屈服时的应力为材料的屈服点,用 σ_s 表示,单位为 MPa,即

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

式中 F_s ——试样发生屈服时承受的载荷 (N);

S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2)。

很多金属材料,如大多数合金钢、铜合金以及铝合金,其拉伸曲线不出现平台,而脆性材料,如普通铸铁、镁合金等,甚至断裂之前也不发生塑性变形,因此工程上规定试样发生某一微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该材料的屈服强度,即所谓的“条件屈服强度”,记作 $\sigma_{0.2}$ 。

3. 抗拉强度 (σ_b)

试样在屈服时,由于塑性变形而产生加工硬化,所以只有载荷继续增大时变形才能继续增加,直到增至最大载荷 F_b 。拉伸曲线的这一阶段,试样沿整个长度均匀伸长,当载荷达到 F_b 后,试样就在某个薄弱部位形成“缩颈”,如图 1-1b 所示。此时不增加载荷试样也会发生断裂。 F_b 是试样承受的最大外力,相应的应力即为材料的抗拉强度,用 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

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

式中 F_b ——试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大载荷,对于无明显屈服 (连续屈服) 的金属材料的,为试验期间的最大载荷 (N);

S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2)。

抗拉强度是工程上最重要的力学性能指标之一。对于塑性较好的材料, σ_b 表示了对最大均匀变形的抗力。对于塑性较差的材料,一旦达到最大载荷,材料便迅速发生断裂,所以 σ_b 也是材料的断裂抗力 (断裂强度) 指标。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。但由于抗拉强度 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抗拉强度 σ_b ,但需使用较大的安全系数。

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 (σ_{-1})

某些机器零件,如轴、弹簧、齿轮、叶片等,在交变载荷的长期作用下工作,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的载荷。

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,形成裂纹扩展区。当此区达到某一临界尺寸时,零件就会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,要用较多的试样,在不同交变载荷下进行试验,作出疲劳曲线,如图 1-4 所示。由图可以看出,循环次数增加,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。

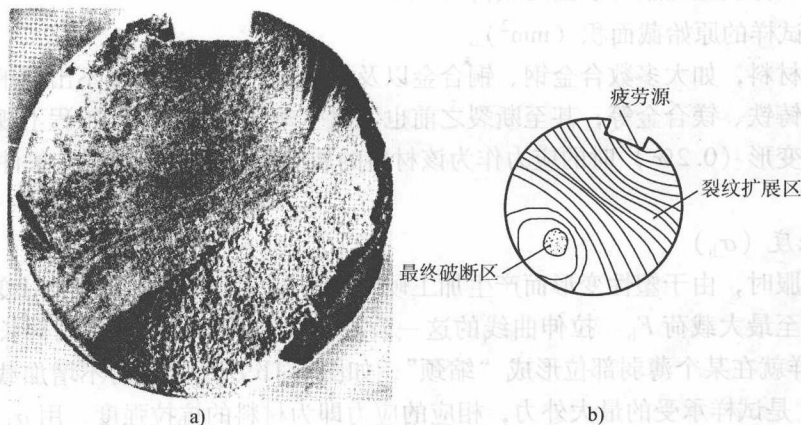


图 1-3 疲劳断口的特征

a) 汽车后轴的断口 b) 断口的示意图

图 1-4 是钢铁材料的疲劳曲线，在试验循环次数达到 $N = 10^7$ 时，出现水平直线。所以对于钢铁材料，把循环数达到 10^7 时的最大应力作为疲劳强度。非铁金属（有色金属）和合金的疲劳曲线不出现水平直线，工程上规定循环次数达到 $N = 10^8$ 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，其关系大约为 $\sigma_{-1} = 0.45 \sim 0.55\sigma_b$ 。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

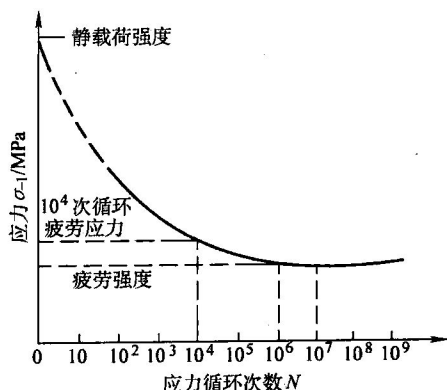


图 1-4 疲劳曲线图

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。零件的疲劳强度除了取决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关系。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；②使零件具有较小的表面粗糙度；③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

材料在弹性范围内，应力 σ 与应变 ε 的关系服从胡克定律： $\sigma = E\varepsilon$ （或 $\tau = G\gamma$ ）。 ε （或 γ ）为应变，即单位长度的变形量， $\varepsilon = \Delta l/l$ 。

材料的刚度通常用弹性模量 E 来衡量。弹性模量是指在应力 - 应变曲线上完全弹性变形阶段，应力与应变的比值。即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

刚度是指材料在受力时抵抗弹性变形的能力，它表征了材料弹性变形的难易程度。

由图 1-2 可以看出，弹性模量是拉伸曲线上的斜率，即 $\tan\alpha = E$ 。斜率越大，弹性模量越大，弹性变形越不容易进行。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取决于金属键，与显微组织的关系不大。合金化、热处理、冷变形等对刚度的影响很小，生产中一般不考虑也不检验它的大小，金属的弹性模量值基本上是一个定值。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，当进给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 常用金属的弹性模量

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恢复的永久变形的能力。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)

伸长率可用下式表示

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

式中 l_0 ——试样原标距长度 (mm)；

l_1 ——拉断后试样的标距长度 (mm) (图 1-1)。

材料伸长率的大小与试样原始标距 l_0 和原始截面积 S_0 密切相关。在 S_0 相同的情况下， l_0 越长则 δ 越小，反之亦然。对于同一材料，具有不同长度或截面积的试样要得到比较一致的 δ 值，必须使比值 $l_0/\sqrt{S_0^2}$ 为一常数。国家标准规定，当此值为 11.3 时，($l_0 = 10d_0$ 的试棒)，所得的伸长率用 δ_{10} 表示。当此值为 5.65 时，($l_0 = 5d_0$ 的试棒)，所得的伸长率用 δ_5

表示。同种材料的 δ_5 为 δ_{10} 的 1.2 ~ 1.5 倍。所以只有相同符号的伸长率才能相互进行比较。

2. 断面收缩率 (ψ)

断面收缩率用下式求得

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

式中 S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2);

S_1 ——试样拉断后缩颈处的截面积 (mm^2) (图 1-1)。

断面收缩率不受试样标距长度的影响, 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的塑性, 以防止超载时发生断裂。

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% 的具有高收缩率的材料可承受高的冲击吸收功。

但对各种具体形状、尺寸和应力集中的零件来说, 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、浪费材料和缩短使用寿命。

四、韧性指标

1. 冲击韧度 (α_k)

机械零部件在使用过程中不仅受到静载荷或动载荷作用, 而且受到不同程度的冲击载荷作用, 如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时, 必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验, 其试验原理如图 1-5 所示。

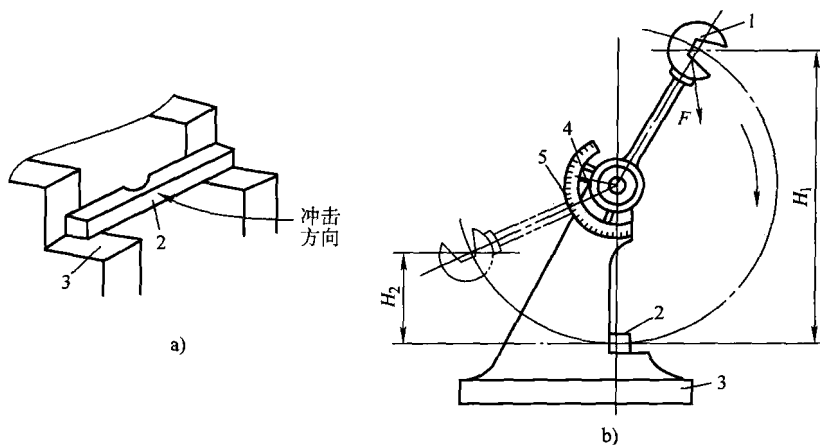


图 1-5 冲击试验原理图

1—摆锤 2—试样 3—机架 4—指针 5—刻度盘

欲测定的材料先加工成标准试样, 然后放在试验机的机架上, 试样缺口背向摆锤冲击方向 (图 1-5), 将具有一定重力 F 的摆锤举至一定高度 H_1 , 使其具有势能 (FH_1), 然后摆锤落下冲击试样; 试样断裂后摆锤上摆到 H_2 高度。在忽略摩擦和阻力等条件下, 摆锤冲断

试样所做的功,称为冲击吸收功,用 A_K (单位J)表示,则有 $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在GB/T 229—2007中,仅规定了冲击吸收功的概念。用试样的断口处截面积 S_N (单位 cm^2)与 A_K 的比值定义为冲击韧度,用 α_K 表示,单位为 J/cm^2 ,即

$$\alpha_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功 A_K 越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功 A_K 的组成比较复杂,所以有时测得的 A_K 值及计算出来的 α_K 值不能真正反映材料的韧脆性质。

长期生产实践证明, A_K 、 α_K 值对材料的组织缺陷十分敏感,能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大,为了确定出材料由韧性状态向脆性状态的转化趋势,可分别在一系列不同温度下进行冲击试验,测定出 A_K 值随试验温度的变化。实验表明, A_K 随温度的降低而减小,在某一温度范围,材料的 A_K 值急剧下降,表明材料由韧性状态向脆性状态转变,此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件,其韧脆转变温度的确定有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

2. 断裂韧度(K_{IC})

前面讨论的力学性能,都是假定材料是均匀、连续、各向同性的。以这些假设为依据的设计方法称为常规设计方法。根据常规设计方法分析认为是安全的设计,有时会发生意外断裂事故。在研究这种在高强度金属材料中发生的低应力脆性断裂的过程中,发现前述假设是不成立的。实际上,材料的组织远非是均匀、各向同性的,组织中有微裂纹,还会有夹杂、气孔等宏观缺陷,这些缺陷可看成是材料中的裂纹。当材料受外力作用时,这些裂纹的尖端附近便出现应力集中,形成一个裂纹尖端的应力场。根据断裂力学对裂纹尖端应力场的分析,裂纹前端附近应力场的强弱主要取决于一个力学参数,即应力强度因子 K_I ,单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。即

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中 Y ——与裂纹形状、加载方式及试样尺寸有关的量,是个无量纲的系数;

σ ——外加拉应力(MPa);

a ——裂纹长度的一半(m)。

对某一个有裂纹的试样(或机件),在拉伸外力作用下, Y 值是一定的。当外加拉应力逐渐增大,或裂纹逐渐扩展时,裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之增大;当 K_I 增大到某一临界值时,试样(或机件)中的裂纹会产生突然失稳扩展,导致断裂。这个应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧度,用 K_{IC} 表示。

断裂韧度是用来反映材料抵抗裂纹失稳扩展,即抵抗脆性断裂能力的性能指标。当 $K_I < K_{IC}$ 时,裂纹扩展很慢或不扩展;当 $K_I \geq K_{IC}$ 时,则材料发生失稳脆断。这是一项重要的判断依据,可用来分析和计算一些实际问题。例如,若已知材料的断裂韧度和裂纹尺寸,便可以计算出裂纹扩展以致断裂的临界应力,即机件的承载能力;或者已知材料的断裂韧度和工作应力,就能确定材料中允许存在的最大裂纹尺寸。

断裂韧度是材料固有的力学性能指标,是强度和韧性的综合体现。它与裂纹的大小、形状、外加应力等无关,主要取决于材料的成分、内部组织和结构。