



高等学校教材

工程材料及 加工工艺

GONGCHENG
CAILIAO JI
JIAGONG GONGYI

刘春廷 等主编



化学工业出版社

高等学校教材

工程材料及加工工艺

刘春廷 等主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以材料的性能-结构-组织-成分-工艺这一普遍规律为主线,将理论与工艺融为一体,较全面地介绍了工程材料的基本理论知识、常用工程材料及加工的工艺原理、工艺方法、自身规律等,归纳了选材和选择加工工艺的方法,为理论与实践相结合作一些尝试,适当反映当代科技在工程材料及成形领域的新成就。

全书共分12章,具体内容包括:材料学基础知识(包括材料的性能、结构、平衡组织和热处理工艺等)、金属材料及加工工艺、高分子材料及加工工艺、陶瓷材料及加工工艺、复合材料及加工工艺、新型工程材料和零部件的失效与材料及加工工艺的选用。为配合学习,各章末附有思考与练习,便于读者深入研究。

本书力求语言简洁,信息量大,科学性、实用性强,内容新颖,引入新材料、新技术、新成果和新进展,有利于培养学生的创新意识,拓宽读者专业知识面,便于读者了解当前国内外先进材料技术、加工工艺和方法的发展趋势。

本书作为机械类专业技术基础课程工程材料及机制基础的教学用书,主要面向机械类专本科学学生,也可供近机类专业选用和有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及加工工艺/刘春廷等主编. —北京:化学工业出版社, 2009.9
高等学校教材
ISBN 978-7-122-06522-3

I. 工… II. 刘… III. 工程材料-加工-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 146667 号

责任编辑:杨 菁 程树珍
责任校对:徐贞珍

文字编辑:林 丹
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20½ 字数539千字 2009年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

工程材料及加工工艺是高等院校机械类和近机械类学生的一门重要的专业基础课。随着科学技术的发展,新材料和新技术的不断问世及应用,对工程材料及加工工艺的教学提出了新的要求。本书是根据教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》和《工程材料及机械制造基础系列课程改革》的精神编写的,结合目前教改的基本指导思想和原则,以及实施素质教育和加强技术创新的精神,根据高等学校机械类教学的实际需要,化学工业出版社组织国内部分高等院校编写了本书,作为系列教材之一,供各高等院校使用。

全书以材料的性能-结构-组织-成分-工艺这一普遍规律为主线,将理论与工艺融为一体,较全面地介绍了工程材料的基本理论知识和加工工艺的基本原理、工艺方法和技术要点,适当反映当代科技在工程材料及成型加工领域的新成就。全书共分12章,第1~3章着重阐述材料学基础,包括材料的性能、结构、平衡组织和热处理工艺等;第4章着重阐述金属材料,包括工业用钢、铸铁和有色金属及其合金;第5~7章分别阐述金属材料的加工工艺,即铸造、锻压、焊接;第8~10章着重阐述非金属材料及其成型,包括高分子材料及加工工艺、陶瓷材料及加工工艺和复合材料及加工工艺;第11章介绍了新型工程材料,包括形状记忆合金、非晶态合金、超塑性合金、纳米材料等;第12章分别介绍了零部件的失效、材料及加工工艺的选用。

参加编写本书的编者都是多年从事本行业的教师、科研工作者等,他们分别是:青岛科技大学的刘春廷、马继、李镇江、汪传生、刘俐华、赵海霞、张森、马伯江和林广义。由刘春廷、马继和李镇江担任主编,由马继负责统稿。

在本书的编写过程中,中国科学院金属研究所的胡壮麒院士、管恒荣研究员和孙晓峰研究员提出了许多宝贵的意见,在此谨表示深切的谢意!同时本书在编写过程中参考了已出版的多种教材(见参考文献),并注意吸收各院校、研究所和企业的教学改革经验及科研成果,对此,谨向上述涉及的单位和个人表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中还存在不少不足之处,恳请广大读者和师生批评指正。

编者

2009年6月

目 录

绪论	1	3.2.1 钢在加热时的转变	52
第1章 工程材料的性能	4	3.2.2 钢在冷却时的转变	56
1.1 强度	4	3.2.3 过冷奥氏体的连续冷却转变	67
1.2 硬度	7	3.3 钢的热处理工艺	69
1.3 塑性	9	3.3.1 钢的退火与正火	70
1.4 冲击韧性	10	3.3.2 钢的淬火	73
1.5 断裂韧性	10	3.3.3 钢的回火	81
1.6 其他性能	12	3.3.4 钢的表面淬火	84
1.6.1 物理性能	12	3.3.5 钢的化学热处理	85
1.6.2 化学性能	12	3.3.6 钢的热处理新技术	92
1.6.3 工艺性能	13	思考与练习	95
思考与练习	14	第4章 金属材料	96
第2章 金属材料的结构与凝固	15	4.1 工业用钢	96
2.1 金属的晶体结构	15	4.1.1 钢的分类与牌号	96
2.1.1 典型的金属晶体结构	16	4.1.2 钢中的杂质及合金元素	98
2.1.2 实际金属的晶体结构	19	4.1.3 结构钢	101
2.2 合金的相结构	21	4.1.4 工具钢	109
2.2.1 合金的基本概念	21	4.1.5 特殊性能钢	116
2.2.2 合金的相结构	22	4.2 铸铁	121
2.3 纯金属的结晶	25	4.2.1 概述	121
2.3.1 结晶的基本概念	25	4.2.2 常用铸铁	125
2.3.2 金属的结晶过程	26	4.2.3 合金铸铁	133
2.4 合金的结晶	30	4.3 有色金属及其合金	135
2.4.1 二元相图的建立	30	4.3.1 铝及铝合金	135
2.4.2 二元匀晶相图	32	4.3.2 镁及镁合金	142
2.4.3 二元共晶相图	33	4.3.3 铜及其合金	143
2.4.4 二元包晶相图	35	4.3.4 滑动轴承合金	148
2.4.5 其他类型的二元相图	35	4.3.5 钛及钛合金	151
2.4.6 根据相图判断合金的性能	36	思考与练习	151
2.5 典型铁碳(Fe-Fe ₃ C)合金相图	38	第5章 铸造	154
2.5.1 概述	38	5.1 铸造工艺基本原理	154
2.5.2 Fe-Fe ₃ C相图分析	41	5.1.1 液态合金的充型能力	154
2.5.3 含碳量对Fe-Fe ₃ C合金组织及性能的影响	47	5.1.2 铸件的收缩	156
2.5.4 铁碳相图的应用	49	5.2 砂型铸造	158
思考与练习	50	5.2.1 砂型铸造工艺过程	159
第3章 钢的热处理	52	5.2.2 砂型铸造造型方法	159
3.1 概述	52	5.2.3 砂型铸造工艺分析	162
3.2 钢的热处理原理	52	5.3 特种铸造	167
		5.3.1 熔模铸造	167
		5.3.2 金属型铸造	168

5.3.3 压力铸造	168	7.4.4 有色金属及其合金的焊接	227
5.3.4 低压铸造	169	7.5 焊接检测	228
5.3.5 离心铸造	170	7.5.1 焊接缺陷	228
5.3.6 铸造方法的选择	170	7.5.2 常用检验方法	229
5.4 铸件结构工艺性	171	7.6 焊接技术的新进展	231
5.5 常用合金铸件的铸造	175	思考与练习	233
5.5.1 铸铁件的铸造	175	第8章 高分子材料及加工工艺	235
5.5.2 铸钢件的铸造	178	8.1 概述	235
5.5.3 有色金属及其合金铸件的铸造	179	8.2 高分子材料的结构	235
5.6 铸造技术的新发展	180	8.2.1 高聚物的结构	236
思考与练习	181	8.2.2 高聚物的聚集态结构	237
第6章 锻压	182	8.3 高分子化合物的力学状态	237
6.1 金属的塑性变形	183	8.4 工程塑料及加工工艺	239
6.2 锻造	187	8.4.1 工程塑料的组成	239
6.2.1 自由锻	187	8.4.2 工程塑料的分类	239
6.2.2 模锻	189	8.4.3 常用工程塑料	240
6.3 板料冲压	191	8.4.4 工程塑料的加工工艺	244
6.3.1 板料冲压基本工序	191	8.5 工业橡胶及加工工艺	246
6.3.2 冲压模具	194	8.5.1 工业橡胶制品的组成和工业橡胶的 分类	246
6.4 挤压、轧制、拉拔	195	8.5.2 常用合成橡胶	246
6.4.1 挤压	195	8.5.3 工业橡胶件的加工工艺	249
6.4.2 轧制	196	8.6 合成纤维及加工工艺	251
6.4.3 拉拔	197	8.6.1 常用合成纤维	252
6.5 特种塑性加工方法	198	8.6.2 合成纤维的加工工艺	253
6.5.1 超塑性成型	198	思考与练习	254
6.5.2 高能率成型	199	第9章 陶瓷材料及加工工艺	255
6.5.3 液态模锻	201	9.1 陶瓷材料的组成	255
6.5.4 粉末锻造	202	9.2 陶瓷材料的分类	256
6.6 塑性加工的结构工艺性	202	9.3 陶瓷材料的结构	257
6.6.1 自由锻件的结构工艺性	202	9.3.1 离子型晶体陶瓷	257
6.6.2 冲压件结构工艺性	204	9.3.2 共价型晶体陶瓷	258
6.7 塑性加工技术的新进展	205	9.4 陶瓷材料及加工工艺	258
思考与练习	207	9.4.1 常用陶瓷材料	258
第7章 焊接	208	9.4.2 陶瓷材料的加工工艺	264
7.1 焊接基础知识	208	思考与练习	267
7.2 常用焊接工艺方法	214	第10章 复合材料及加工工艺	268
7.2.1 手工电弧焊	214	10.1 复合材料的分类	268
7.2.2 埋弧自动焊	219	10.2 复合材料的增强机制和复合原则	269
7.2.3 气体保护焊	220	10.2.1 复合材料的增强机制	269
7.2.4 电阻焊	221	10.2.2 复合材料的复合原则	270
7.2.5 钎焊	223	10.3 金属基复合材料	271
7.3 焊接件结构工艺性	224	10.3.1 金属陶瓷	271
7.4 常用金属材料的焊接	225	10.3.2 纤维增强金属基复合材料	272
7.4.1 金属材料的焊接性	225	10.3.3 颗粒和晶须增强金属基复合 材料	274
7.4.2 结构钢的焊接	226		
7.4.3 铸铁件的焊接	227		

10.4 非金属基复合材料	275	11.4.1 纳米材料的特性	298
10.4.1 聚合物基复合材料	275	11.4.2 纳米材料的分类	298
10.4.2 陶瓷基复合材料	279	11.4.3 纳米材料的制备	299
10.4.3 碳-碳复合材料	283	11.4.4 纳米新材料	299
10.5 复合材料的加工工艺	284	11.4.5 纳米复合材料	300
10.5.1 金属基复合材料加工工艺	284	11.4.6 功能纳米复合材料	300
10.5.2 树脂基复合材料加工工艺	287	11.5 纳米材料的应用	300
10.5.3 陶瓷基复合材料加工工艺	289	思考与练习	301
10.5.4 碳-碳基复合材料成型工艺	289		
思考与练习	290	第 12 章 机械零件的失效与材料及加工	
第 11 章 新型工程材料	291	工艺的选用	302
11.1 形状记忆合金	291	12.1 机械零件的失效	302
11.1.1 形状记忆效应	291	12.1.1 失效概念	302
11.1.2 形状记忆效应的机理	291	12.1.2 失效形式	302
11.1.3 形状记忆合金的应用	292	12.1.3 失效原因	304
11.2 非晶态合金	293	12.1.4 失效分析	305
11.2.1 非晶态合金的制备	293	12.2 机械零件材料及加工工艺的选用	308
11.2.2 非晶态合金的特性	293	12.2.1 机械零件材料及加工工艺选用的	
11.2.3 非晶态合金的应用	294	基本原则	308
11.3 超塑性合金	295	12.2.2 典型零件的材料及加工工艺	
11.3.1 超塑性现象	295	选择	312
11.3.2 超塑性合金	296	思考与练习	318
11.3.3 超塑性合金的应用	297	参考文献	320
11.4 纳米材料	297		

绪 论

1. 概述

材料是人们用来制作各种有用器件的物质，是人类生产和生活所必须的物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品，从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人，都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成。纵观人类历史，人类社会的发展伴随着材料的发明和发展，材料的发展推动着人类社会的进步，并成为人类文明发展的里程碑。人类最早使用的材料是石头、兽皮等天然材料，其后，发明了陶器、瓷器、青铜器和铁器。因此，历史学家将人类早期历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代（图 1）。其实，人类文明的发展史，就是一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史，材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志。20 世纪后期，材料作为高技术的三大支柱（能源、材料和信息）之一高速发展，尤其是新材料的不断涌现，非金属人工合成材料的迅猛增长，金属与非金属材料的相互渗透，新型复合材料的异军突起等，如今人类已跨入人工合成材料的崭新时代。新材料对高科技和新技术具有非常关键的作用，掌握新材料是一个国家在科技上处于领先地位的标志之一，没有新材料，也就没有发展高科技的物质基础。如没有半导体材料的工业化生产，就不可能有目前的计算机技术；没有高温高强度的结构材料，就不可能有今天的航空工业和宇航工业；没有低消耗的光导纤维，就没有现代的光纤通信。面向 21 世纪，新型工程材料的发展趋势如下：继续重视对新型金属材料的研究开发，开发非晶合金材料；发展在分子水平设计高分子材料的技术；继续发掘复合材料和半导体硅材料的潜在价值；大力发展纳米材料、信息材料、智能材料、生物材料和高性能陶瓷材料等。



图 1 材料的发展与人类社会简图

中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。早在公元前 6000~5000 年的新石器时代，中华民族的先人就能用黏土烧制成陶器，到东汉时期又出现了瓷器，并流传海外。4000 年前的夏朝我们的祖先已经能够炼铜，到殷、商时期，我国的青铜冶炼和铸



图2 司母戊鼎

造技术已达到很高水平。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎（见图2）重875kg，通高133cm，口长110cm，宽78cm，壁厚6cm，且饰纹优美。司母戊方鼎是我国商代青铜器的代表作，标志着商代青铜器铸造技术的水平，被推为“世界出土青铜器之冠”。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑，长55.6cm，至今锋利异常，是我国青铜器的杰作。我国从春秋战国时期（公元前770~221年）便开始大量使用铁器，明朝科学家宋应星在其所著的《天工开物》一书中就记载了古代的渗碳热处理等工艺，这说明早在欧洲工业革命之前，我国在金属材料及热处理方面就已经有了较高的成就。中华人民共和国成立后，我国先后建起了鞍山、攀枝花、宝钢等大型钢铁

基地，钢产量由1949年的15.8万吨上升到现在的一亿吨，成为世界上钢产量大国之一。原子弹、氢弹的爆炸，卫星、飞船的上天等都说明了我国在材料的开发、研究及应用等方面有了飞跃的发展，达到了一定的水平。但与世界发达国家相比，我们还有一定的差距，需要我们一代代地努力去缩小这些差距。

从简单地利用天然材料、冶铜炼铁到使用热处理工艺，人类对材料的认识是逐步深入的。18世纪欧洲工业革命后，人们对材料的质量和数量的要求越来越高，促进了材料科技的进一步发展。1863年，光学显微镜首次应用于金属材料的研究，诞生了金相学，使人们步入了材料的微观世界，能够将材料的宏观性能与微观组织联系起来，标志着材料研究从经验走向科学。1912年发现了X射线对晶体的衍射作用，随后被用于晶体衍射结构分析，使人们对固体材料微观结构的认识从最初的假想到科学的现实。19世纪末，晶体的230种空间群被确定，至此人们已经可以完全用数学的方法来描述晶体的几何特征。1932年发明了电子显微镜，把人们带到了微观世界的更深层次（ 10^{-7}m ）。1934年位错理论的提出，解决了晶体理论计算强度与实验测得的实际强度之间存在的巨大差别的矛盾，对于人们认识材料的力学性能及设计高强度材料具有划时代的意义。一些与材料有关的基础学科（如固体物理、量子力学、化学等）的发展，有力地促进了材料研究的深化。

2. 工程材料的分类

工程材料主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，用来制造工程构件和机械零件，也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能（如耐蚀、耐高温等）的材料。按照材料的组成、结合键的特点，可将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类（见图3）。

金属材料是以金属键结合为主的材料，具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两大类，铁及钢及其合金称为黑色金属，即钢、铸铁材料，其世界年产量已达10亿吨，在机械产品中的用量已占整个用材的60%以上。黑色金属之外的所有金属及其合金统称为有色金属。有色金属的种类很多，根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属等。

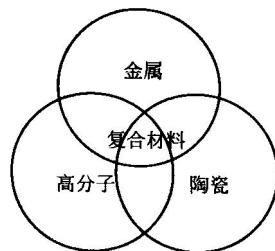


图3 工程材料的分类

高分子材料是以分子键和共价键为主的材料。高分子材料作为结构材料具有塑性、耐腐蚀性、电绝缘性、减振性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等,在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中被广泛应用。

陶瓷材料是以共价键和离子键为主的材料,其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷和特种陶瓷两大类。传统陶瓷又称普通陶瓷,是以天然材料(如黏土、石英、长石等)为原料的陶瓷,主要用作建筑材料使用。特种陶瓷又称精细陶瓷,是以人工合成材料为原料的陶瓷,常用于工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件。

复合材料是为提高的材料性能,通常把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料。包括金属基复合材料、陶瓷基复合材料和高分子复合材料。如现代航空发动机燃烧室内温度最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高级游艇、赛艇及体育器械等是由碳纤维复合材料制成的,它们具有重量轻,弹性好,强度高等优点。

工程材料及加工工艺是以工程材料及零部件的加工工艺为研究对象的一门综合性技术课程。它以凝聚态物理和物理化学、晶体学为理论基础,结合冶金、机械、化工等科学知识,去探讨材料的结构、组织、成分、工艺及性能之间的内在规律,并联系一个器件或构件的使用功能要求,力求用经济合理的办法制备出一个有效的器件或构件。因此,工程材料及加工工艺是现代机械工程、电子技术和高技术工业发展的基础。它的研究内容包括:材料学基础(包括材料的性能、结构、热处理工艺等)、金属材料及加工(包括铸造、锻压、焊接)、非金属材料及加工(包括高分子材料及加工、陶瓷材料及加工和复合材料及加工)、新型工程材料和零部件的失效与材料及加工工艺的选用,特别是材料的性能与组织结构、成分组成、加工工艺之间的关系是本书研究的重点,也是贯穿全书的主线。

3. 工程材料及加工工艺课程的目的、性质和学习要求

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。

工程材料及加工工艺课是机械类和近机类各专业的技术基础课,课程的目的是使学生获得工程材料的基本理论知识及其性能特点,建立材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系,了解常用材料的应用范围和加工工艺,初步具备合理选用材料与工艺、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线的能力。

工程材料及加工工艺课程是一门理论性和实践性都很强的课程,特点是基本概念多,与实际联系密切。因此要求在学习时注意联系物理、化学、工程力学及金属工艺学等课程的相关内容,并结合生产实际,注重分析、理解前后知识的整体联系和综合应用。

第 1 章 工程材料的性能

工程材料具有许多良好的性能，因此被广泛地应用于制造各种构件、机械零件、工具和日常生活用具等。为了正确地使用工程材料，应充分了解和掌握材料的性能。通常所说工程材料的性能有两个方面的意义，一是材料的使用性能，指材料在使用条件下表现出的性能，如强度、塑性、韧性等力学性能，声、光、电、磁等物理性能以及耐蚀性、耐热性等化学性能；二是材料的工艺性能，指材料在加工工程中表现出的性能，如冷热加工、压力加工性能，焊接性能，铸造性能，切削性能等。工程材料是材料科学的应用部分，主要讨论结构材料的力学性能，阐述结构材料的组织、成分和性能的相互影响规律，解答工程应用问题。

工程材料的力学性能是指材料抵抗各种外加载荷的能力，包括弹性与刚度、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度等。外力即载荷，常见的各种外载荷形式如图 1-1 所示。

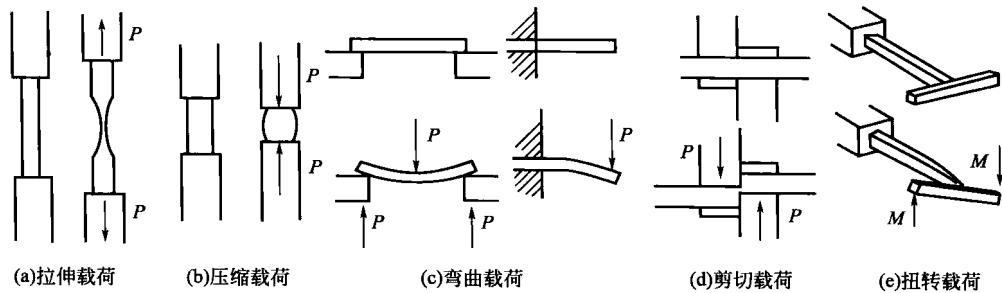


图 1-1 外载荷的形式

1.1 强度

在材料拉伸试验机上对一截面为圆形的低碳钢拉伸试样（图 1-2）进行拉伸试验，可得到应力与应变的关系图，即拉伸图。图 1-3 是低碳钢和铸铁的应力-应变曲线。

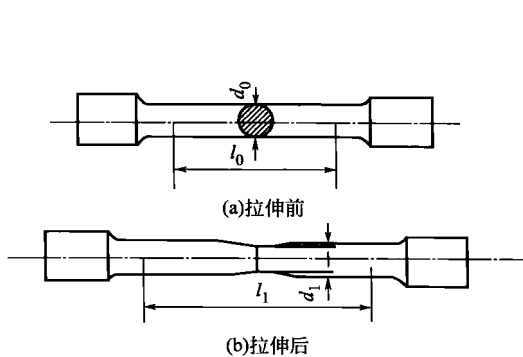


图 1-2 圆形低碳钢拉伸试样

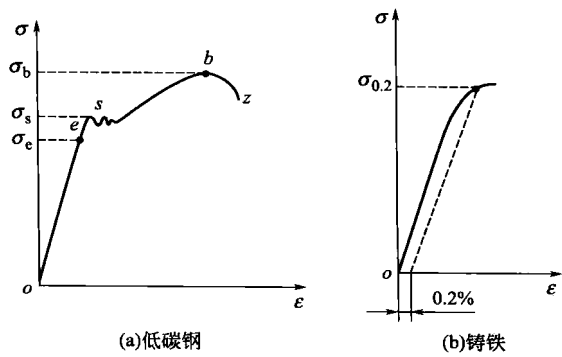


图 1-3 低碳钢和铸铁的 $\sigma\epsilon$ 曲线

图中的纵坐标为应力 σ (MPa)，计算公式为

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

横坐标为应变 ϵ ，计算公式为

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， P 为所加载荷； A_0 为试样原始截面积； l_0 为试样的原始标距长度； l 为试样变形后的标距长度； Δl 为伸长量。

材料在外力作用下抵抗变形与断裂的能力称为强度 (strength)。根据外力作用方式的不同，强度有多种指标，如屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪切强度和抗扭强度等。其中屈服强度和抗拉强度指标应用最为广泛。

(1) 静载时的强度 拉伸变形的几个阶段。

oe ：弹性变形阶段，试样的变形量与外加载荷成正比，载荷卸掉后，试样恢复到原来的尺寸。

es ：屈服阶段，此时不仅有弹性变形，还发生了塑性变形。即载荷卸掉后，一部分形变恢复，还有一部分形变不能恢复，形变不能恢复的形变称为塑性变形。

sb ：强化阶段，为使试样继续变形，载荷必须不断增加，随着塑性变形增大，材料变形抗力也逐渐增加。

bz ：缩颈阶段，当载荷达到最大值时，试样的直径发生局部收缩，称为“缩颈”。此时变形所需的载荷逐渐降低。

z 点：试样断裂，试样在此点发生断裂。

① 弹性 (elasticity) 与刚度 (rigidity 或 stiffness) 在应力-应变曲线上， oe 段为弹性变形阶段，即卸载后试样恢复原状，这种变形称为弹性变形 (elastic deformation)。 e 点的应力 σ_e 称为弹性极限 (elastic limit)。弹性极限值表示材料保持弹性变形，不产生永久变形的最大应力，是弹性零件的设计依据。

材料在弹性范围内，应力与应变的关系符合虎克 (Hooke's Law) 定律：

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

式中， σ 表示外加的应力； ϵ 为相应的应变；称为弹性模量 (elastic modulus)，MPa。上式可改写为 $E = \sigma/\epsilon$ ，所以弹性模量 E 是应力应变曲线上的斜率。斜率越大，弹性模量越大，弹性变形越不易进行。因此，弹性模量 E 表征衡量材料抵抗弹性变形的能力，即表征零件或构件保持原有形状与尺寸的能力，所以也叫做材料的刚度，且材料的弹性模量越大，它的刚度越大。

金属弹性变形时，晶格发生简单的弹性歪曲或拉长，由于所加的外力未超过原子间的结合力，所以外力去除后晶格会自动地恢复到原来的形状。金属弹性模量 E 的大小主要取决于原子间结合力的大小，而原子间结合力的大小又与原子间距有关，所以单晶体的弹性模量 E 是有方向的。对于由许多小单晶体 (晶粒) 杂乱无章排列起来的多晶体，其弹性模量 E 是许多小单晶体在拉伸方向上的弹性模量的平均值，所以多晶体表现出伪方向性。

材料的弹性模量 E 值是一个对组织不敏感的性能指标，主要取决于原子间的结合力，与材料本性、晶格类型、晶格常数有关，而与显微组织无关。因此一些处理方法 (如热处理、冷热加工、合金化等) 对它的影响很小。而零件的刚度大小取决于零件的几何形状和材料的种类 (即材料的弹性模量)。要想提高金属制品的刚度，只能更换金属材料、改变金属制品的结构形式或增加截面积。

② 屈服强度 (yielding strength) σ_s 如图 1-3，当应力超过 σ_e 点时，卸载后试样的伸

长只能部分恢复。这种不随外力去除而消失的变形称为塑性变形。当应力增加到 σ_s 点时，图上出现了平台。这种外力不增加而试样继续发生变形的现象称为屈服。材料开始产生屈服时的最低应力 σ_s 称为屈服强度。

工程上使用的材料多数没有明显的屈服现象。这类材料的屈服强度在国标中规定以试样的塑性变形量为试样标距的 0.2% 时的材料所承受的应力值来表示，并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示 [见图 1-3(b)]，它是 $F_{0.2}$ 与试样原始横截面积 A_0 之比。零（构）件在工程中一般不允许发生塑性变形，所以屈服强度 σ_s 是设计时的主要参数，是材料的重要机械性能指标。

③ 抗拉强度 (tensile strength) σ_b 材料发生屈服后，其应力与应变的关系曲线如图 1-3 的 sb 段，到 b 点应力达最大值 σ_b ， b 点以后，试样的截面产生局限“颈缩”，迅速伸长，这时试样的伸长主要集中在缩颈部位，直至拉断。将材料受拉时所能承受的最大应力值 σ_b 称为抗拉强度。 σ_b 是机械零（构）件评定和选材时的重要强度指标。

σ_s 与 σ_b 的比值叫做屈强比，屈强比愈小，工程构件的可靠性愈高，即万一超载也不至于马上断裂；屈强比太小，则材料强度有效利用率太低。

金属材料的强度与化学成分、工艺过程和冷热加工，尤其是热处理工艺有密切关系，如对于退火状态的三种铁碳合金，碳质量分数分别为 0.2%、0.4%、0.6%，则它们的抗拉强度为 350MPa、500MPa、700MPa。碳质量分数为 0.4% 的铁碳合金淬火和高温回火后，抗拉强度可提高到 700~800MPa。合金钢的抗拉强度可达 1000~1800MPa。但铜合金和铝合金的抗拉强度明显提高。如铜合金的 σ_b 达 600~700MPa，铍铜合金经过固溶时效处理后， σ_b 最高为 1250MPa。铝合金的 σ_b 一般为 400~600MPa。

(2) 动载时的强度 最常用的是疲劳强度 (fatigue strength)，它是指在大小和方向重复循环变化的载荷作用下材料抵抗断裂的能力。

许多机械零件，如曲轴、齿轮、轴承、叶片和弹簧等，在工作中各点承受的应力随时间做周期性的变化，这种随时间作周期性变化的应力称为交变应力。在周期交变应力作用下，零件所承受的应力虽然低于其屈服强度，但经过较长时间的工作会产生裂纹或突然断裂，这种现象称为材料的疲劳。据统计，大约有 80% 以上的机械零件失效是由疲劳失效造成的。

测定材料疲劳寿命的试验有许多种，最常用的一种是旋转梁试验，试样在旋转时交替承受大小相等的交变拉压应力。试验所得数据可绘成 $\sigma-N$ 疲劳曲线 (图 1-4)， σ 为产生失效的应力， N 为应力循环次数。

图 1-5 所示为中碳钢和高强度铝合金的典型 $\sigma-N$ 曲线 (疲劳曲线)。对于碳钢，随着承受的交变应力越大，则断裂时应循环次数越少。反之，则循环次数越大。随着应力循环次数的增加，疲劳强度逐渐降低，以后曲线逐渐变平，即循环次数再增加时，疲劳强度也不降低。

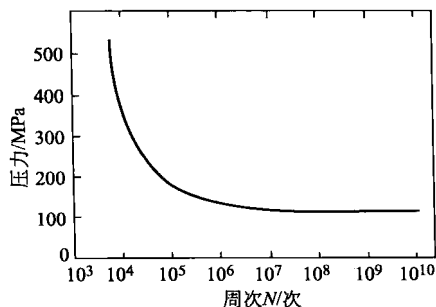


图 1-4 材料的 $\sigma-N$ 曲线

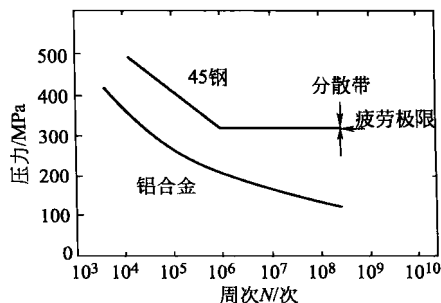


图 1-5 中碳钢和高强度铝合金的 $\sigma-N$ 曲线

材料在规定次数应力循环后仍不发生断裂时的最大应力称为疲劳强度（疲劳极限），用 σ_r 表示，也就是 $\sigma-N$ 曲线出现水平部分所对应的定值。对于应力对称循环的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实际上，材料不可能作无限次交变应力试验。对于黑色金属，一般规定应力循环 10^7 周次而不断裂的最大应力称为疲劳极限，有色金属、不锈钢等取 10^8 周次时的最大应力。许多铁合金的疲劳极限约为其抗拉强度的一半，有色合金（如铝合金）没有疲劳极限，它的疲劳强度可以低于抗拉强度的 $1/3$ 。

（3）高温强度 金属材料在高于一定温度长时间的工作，承受的应力即使低于屈服点 σ_s ，也会出现缓慢塑性变形，这就是“蠕变”（creep）。所以，高温下材料的强度就不能完全用室温下的强度（ σ_s 或 σ_b ）来代替，此时必须考虑温度和时间的影响，材料的高温强度要用蠕变极限和持久强度来表示。蠕变极限是指金属在给定温度下和规定时间内产生一定变形量的应力。例如 $\sigma_{0.1/1000}^{600} = 88\text{MPa}$ ，表示在 600°C 下，1000h 内，引起 0.1% 变形量的应力值为 88MPa。而持久强度是指金属在给定温度 and 规定时间内，使材料发生断裂的应力。例如 $\sigma_{100}^{800} = 186\text{MPa}$ ，表示工作温度为 800°C 时，承受 186MPa 的应力作用，约 100h 后断裂。工程塑料在室温下受到应力作用就可能发生蠕变，这在使用塑料受力件时应予以注意。

1.2 硬度

硬度（hardness）是材料抵抗另一硬物体压入其内而产生局部塑性变形的能力。通常，材料越硬，其耐磨性越好。同时通过硬度值可估计材料的近似 σ_b 值。硬度试验方法比较简单、迅速，可直接在原材料或零件表面上测试，因此被广泛应用。常用的硬度测量方法是压入法，主要有布氏硬度（HB）、洛氏硬度（HR）、维氏硬度（HV）等。陶瓷等材料还常用克努普氏显微硬度（HK）和莫氏硬度（划痕比较法）作为硬度指标。

（1）布氏硬度（Brinell hardness） 图 1-6 为布氏硬度测试原理图。即用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，以一定载荷作用下压入试样表面，保持规定的时间后卸除载荷，在试样表面留下球形压痕。测量其压痕直径，计算硬度值。布氏硬度值用球冠压痕单位面积上所承受的平均压力来表示，符号为 HBS（当用钢球压头时）或 HBW（当用硬质合金时）。

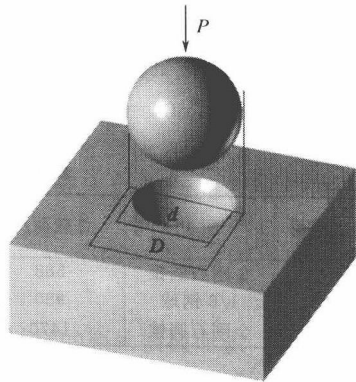


图 1-6 布氏硬度测试原理图

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-4)$$

式中， P 为荷载，N； D 为球体直径，mm； d 为压痕平均直径，mm。

在试验中，硬度值不需计算，是用刻度放大镜测出压痕直径 d ，然后对照有关附录查出相应的布氏硬度值。

布氏硬度记为 200HBS10/1000/30，表示用直径为 10mm 的钢球，在 9800N（1000kgf）的载荷下保持 30s 时测得布氏硬度值为 200。如果钢球直径为 10mm，载荷为 29400N（3000kgf），保持 10s，硬度值为 200，可简单表示为 200HBS。

淬火钢球用以测定硬度 $\text{HB} < 450$ 的金属材料，如灰铸铁、有色金属及经退火、正火和调质处理的钢材，其硬度值以 HBS 表示。布氏硬度在 450~650 之间的材料，压头用硬质合金球，其硬度值用 HBW 表示。

布氏硬度的优点是具有较高的测量精度，因其压痕面积大，比较真实地反映出材料的平均性能。另外，由于布氏硬度与 σ_b 之间存在一定的经验关系，如热轧钢的 $\sigma_b = (3.4 \sim 3.6)$ HBS，冷变形铜合金 $\sigma_b \approx 4.0$ HBS，灰铸铁 $\sigma_b \approx (2.7 \sim 4.0)$ HBS，因此得到广泛的应用。缺点是不能测定高硬度材料。

(2) 洛氏硬度 (Rockwell hardness) 图 1-7 为洛氏硬度测量原理图。将金刚石压头(或钢球压头)在先后施加两个载荷(预载荷 P_0 和总载荷 P)的作用下压入金属表面。总载荷 P 为预载荷 P_0 和主载荷 P_1 之和。卸去主载荷 P_1 后，测量其残余压入深度 h 来计算洛氏硬度值。残余压入深度 h 越大，表示材料硬度越低，实际测量时硬度可直接从洛氏硬度计表盘上读得。根据压头的种类和总载荷的大小，洛氏硬度常用的表示方式有 HRA、HRB、HRC 三种(见表 1-1)。如洛氏硬度表示为 62HRC，表示用金刚石圆锥压头，总载荷为 1470N 测得的洛氏硬度值。

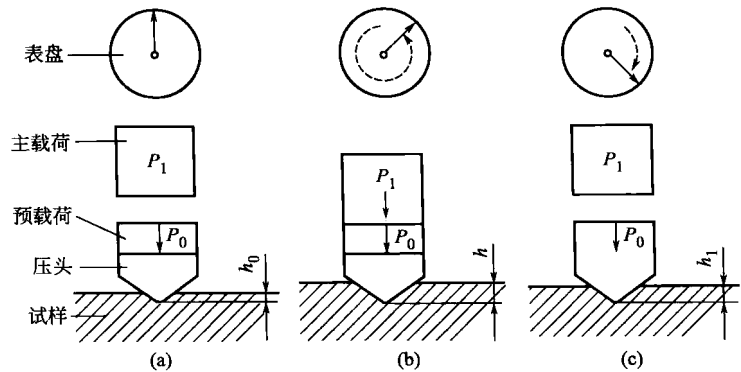


图 1-7 洛氏硬度测量原理图

表 1-1 常用洛氏硬度的符号、试验条件与应用

标度符号	压头	总载荷/N	表盘上刻度颜色	常用硬度示值范围	应用实例
HRA	金刚石圆锥	588	黑线	70~85	碳化物、硬质合金、表面硬化工件等
HRB	1/6 钢球	980	红线	25~100	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	金刚石圆锥	1470	黑线	20~67	淬火钢、调质钢等

用于试验各种钢铁原材料、有色金属，经淬火后工件、表面热处理工件及硬质合金等。

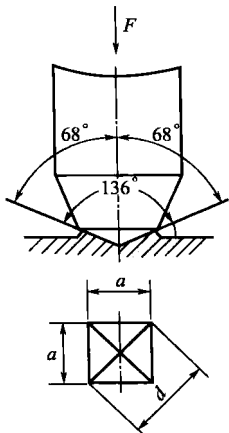


图 1-8 维氏硬度试验原理图

洛氏硬度试验的优点是压痕小、直接读数，操作方便，可测量较薄工件的硬度，还可测低硬度、高硬度材料，应用最广泛；其缺点是精度较差，硬度值波动较大，通常应在试样不同部位测量数次，取平均值为该材料的硬度值。

(3) 维氏硬度 (Vickers hardness) 布氏硬度不适用检测较高硬度的材料。洛氏硬度虽可检测不同硬度的材料，但不同标尺的硬度值不能相互直接比较。而维氏硬度可用同一标尺来测定从极软到极硬的材料。

维氏硬度试验原理与布氏法相似，也是以压痕单位表面积所承受压力大小来计算硬度值的。它是用对面夹角为 136°的金刚石四棱锥体，在一定压力作用下，在试样试验面上压出一个正方形压痕，如图 1-8 所示。通过设在维氏硬度计上的显微镜来测量压痕两条对角线的长度，根据对角线的平均长度，从相应表中查出维氏硬度值。

维氏硬度试验所用压力可根据试样的大小、厚薄等条件来选择。压力按标准规定有 49N、98N、196N、294N、490N、980N 等。压力保持时间：黑色金属 10~15s，有色金属为 (30 ± 2) s。

维氏硬度可测定很软到很硬的各种材料。由于所加压力小，压入深度较浅，故可测定较薄材料和各种表面渗层，且准确度高。但维氏硬度试验时需测量压痕对角线的长度，测试手续较繁，不如洛氏硬度试验法那样简单、迅速。

各种不同方法测得的硬度值之间可通过查表的方法进行互换。如 $61\text{HRC} = 82\text{HRA} = 627\text{HBW} = 803\text{HV}30$ 。

铝合金和铜合金的硬度较低，铝合金的硬度一般低于 150HBS，铜合金的硬度范围大致为 70~200HBS。退火态的低碳钢、中碳钢、高碳钢的硬度大致为 120~180HBS、180~250HBS、250~350HBS。中碳钢淬火后硬度可达 50~58HRC，高碳钢淬火后可达 60~65HRC。

1.3 塑性

材料在外力作用下，产生永久变形而不破坏的性能称为塑性（plasticity 或 ductility）。常用的塑性指标有延伸率（ δ ）和断面收缩率（ ψ ）。

在拉伸试验中，试样拉断后，标距的伸长与原始标距的百分比称为延伸率（elongation percentage）。用符号 δ 表示，即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中， l_0 为试样的原始标距长度，mm； l_1 为试样拉断后的标距长度，mm。

同一材料的试样长短不同，测得的延伸率略有不同。长试样（ $l_0 = 10d_0$ ， d_0 为试样原始横截面积）和短试样（ $l_0 = 5d_0$ ）测得的延伸率分别记作 δ_{10} （也常写成 δ ）和 δ_5 。

试样拉断后，缩颈处截面积的最大缩减量与原横截面积的百分比称为断面收缩率（contraction of cross sectional area），用符号 ψ 表示，即

$$\psi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中， A_1 为试样拉断后细颈处最小横截面积， mm^2 ； A_0 为试样的原始横截面积， mm^2 。

金属材料的延伸率（ δ ）和断面收缩率（ ψ ）数值越大，表示材料的塑性越好。塑性好的金属可以发生大量塑性变形而不破坏，便于通过各种压力加工获得形状复杂的零件。铜、铝、铁的塑性很好。如工业纯铁的 δ 可达 50%， ψ 可达 80%，可以拉成细丝、压成薄板，进行深冲成型。铸铁塑性很差， δ 和 ψ 几乎为零，不能进行塑性变形加工。塑性好的材料，在受力过大时，由于首先产生塑性变形而不致发生突然断裂，因此比较安全。

金属最重要的特性之一就是具有优良的塑性。塑性为金属零件的成形提供了经济而有效的途径，各种金属的板材、棒材、线材和型材都是通过轧制、锻造、挤压、冷拔、冲压等压力加工方法制造而成的，这些加工方法的特点是金属材料在外力的作用下按一定的形状和尺寸发生永久性的塑性变形。塑性金属经塑性变形后，不仅改变了外观和尺寸，内部组织和结构也发生了变化，而且通过塑性变形所伴随的硬化过程还使材料强度获得提高。因此，塑性变形也是改善金属材料性能的一个重要手段。此外，金属的常规力学性能，如强度、塑性等，也是根据其变形行为来评定的。但是，在工程上也常常要求消除塑件变形给金属造成的不良影响，也就是说必须在加工过程中及加工后对金属进行加热，使其发生再结晶，恢复塑性变形以前的性能。

因此，研究金属塑性变形以及变形金属在加热过程中所发生的变化，对充分发挥金属材料

料的力学性能具有非常重要的理论和实际意义。它一方面可以揭示金属材料强度和塑性的本质，并由此探索强化金属材料的方法和途径；另一方面对处理生产上各种有关的塑性变形问题提供重要的线索和参考，或作为改进加工工艺和提高加工质量的依据。

1.4 冲击韧性

许多机械零件在工件中往往受到冲击载荷的作用，如活塞销、锤杆、冲模和锻模等。制造这类零件所用的材料不能单用在静载荷作用下的指标来衡量，而必须考虑材料抵抗冲击载

荷的能力。材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性（impact toughness）。为了评定材料的冲击韧性，需进行冲击试验。

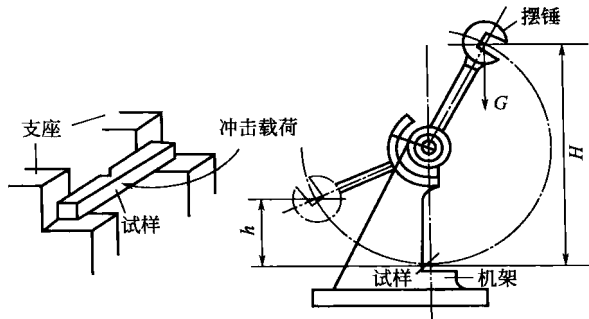


图 1-9 摆锤式一次冲击试验原理图

于两支架中间，并背向摆锤的冲击方向，如图 1-9 所示。

摆锤从一定的高度落下，将试样冲断。冲断时，在试样横截面的单位面积上所消耗的功称为冲击韧性值，即冲击韧度，用符号 α_k 表示。由于冲击试验采用的是标准试样，目前一般也用冲击功 A_k 表示冲击韧性值。

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S_0} \tag{1-7}$$

式中， α_k 为冲击韧度，J/m²； A_k 为冲击吸收功，J； S_0 为试样缺口处截面积，m²。 A_k 值越大或 α_k 值越大，则材料的韧性越好。使用不同类型的试样（U 形缺口或 V 形缺口）进行试验时，其冲击吸收功分别为 A_{kU} 或 A_{kV} ，冲击韧度则分别为 α_{kU} 或 α_{kV} 。

（2）小能量多次冲击试验 实践表明，承受冲击载荷的机械零件很少用一次能量冲击而遭破坏，绝大多数是小能量多次冲击作用下而破坏的，如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等。所以上述的 α_k 值不能代表这种零件抵抗多次小能量冲击的能力。

小能量多次冲击试验是在落锤式试验机上进行的。如图 1-10 所示，带有双冲点的锤头以一定的冲击频率（400 周次/min、600 周次/min）冲击试样，直至冲断为止。多次冲击抗力指标一般是以某冲击功 A 作用下，开始出现裂纹和最后断裂的冲击次数来表示的。

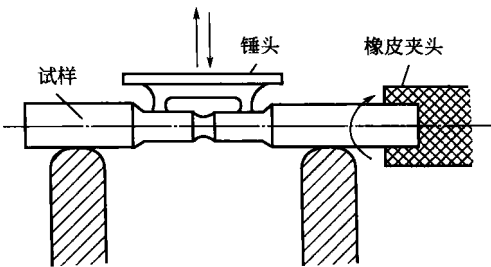


图 1-10 多次冲击弯曲试验示意图

1.5 断裂韧性

桥梁、船舶、大型轧辊、转子等有时会发生低应力脆断，这种断裂的名义断裂应力低于