

■ 高等学校“十一五”规划教材



工程材料 及其成形技术



GONGCHENG CAILIAO
JIQI CHENGXING JISHU

赵海霞 刘春廷 主编



化学工业出版社

高等学校“十一五”规划教材

工程材料及其成形技术

赵海霞 刘春廷 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料及其成形技术/赵海霞, 刘春廷主编. —北京:
化学工业出版社, 2010.8
高等学校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-08787-4

I. 工… II. ①赵…②刘… III. 工程材料-成型-高等
学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 119707 号

责任编辑: 王清颖
责任校对: 边 涛

装帧设计: 刘丽华

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: 化学工业出版社印刷厂
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 374 千字 2010 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: 29.00 元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编：赵海霞 刘春廷

副 主 编：王 东 刘 梅

编写人员（按拼音排序）：

刘春廷 刘 梅 王 东

许基清 杨化林 赵海霞

主 审：孟庆东

前 言

工程材料及机械制造基础是各高校机械类和近机类专业本科生及专科生进入专业领域的入门课程，工程材料及其成形技术又是工程材料及机械制造基础的重要部分，它既是引导学生使他们掌握基本原理的理论课程，也是培养学生具有自学能力、独立分析能力的综合训练课程。

本书以教育部最新颁布的《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》为指导，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，以培养学生具有合理选择工程材料及成形方法、制定相应加工工艺的能力为主要目的，打破原来工程材料与热加工工艺各成体系、相互交叉重复的局面，建立了工程材料与成形技术统一的新体系。

本书按照由浅入深、循序渐进、便于教学的思路，首先从工程材料宏观性能的介绍开始，使学生对工程材料有一个初步的感性认识；随之深入到材料的微观组织结构和材料热处理过程中的组织结构转变，让学生了解到材料的本质并掌握必要的材料基础理论知识、材料组织结构转变的机理和材料的微观组织结构对材料宏观性能的影响；在此基础上，通过对金属材料和非金属材料及其成形技术的基本原理、成形方法和加工工艺等的讲解，使学生建立现代机械制造过程中工程材料及其成形工艺的完整概念；最后，通过对机械零件的失效分析、合理选材及加工工艺选择的阐述，培养学生分析问题和解决问题的能力，同时，系统地总结全书知识。本书每章最后都附有思考题，便于学生巩固所学过的知识和培养学生分析问题的能力。

本书由青岛科技大学的赵海霞和刘春廷担任主编，由青岛大学的王东和刘梅担任副主编，由赵海霞负责统稿，参加编写工作的还有青岛科技大学的许基清和杨化林。本书由青岛科技大学孟庆东教授负责主审，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

绪论	1	的变化规律	35
第 1 章 工程材料的力学性能	3	2.5.4 铁-碳合金相图的应用	36
1.1 材料的强度与塑性	3	思考题	37
1.1.1 静载时的强度	4	第 3 章 钢的热处理	38
1.1.2 动载时的强度——疲劳强度	5	3.1 钢在加热时的组织转变	38
1.1.3 高温强度——蠕变极限和持久 强度	6	3.1.1 奥氏体的形成	38
1.1.4 塑性	6	3.1.2 奥氏体晶粒的长大及其控制	40
1.2 材料的硬度	7	3.2 钢在冷却时的组织转变	41
1.2.1 布氏硬度 (Brinell hardness)	7	3.2.1 过冷奥氏体的等温转变	42
1.2.2 洛氏硬度 (Rockwell hardness)	7	3.2.2 过冷奥氏体等温转变产物的组织 和性能	44
1.2.3 维氏硬度 (Vickers hardness)	8	3.2.3 影响过冷奥氏体等温转变曲线的 因素	52
1.3 材料的冲击韧性	9	3.2.4 过冷奥氏体的连续冷却转变	53
1.3.1 摆锤式一次冲击试验	9	3.3 钢的退火与正火	55
1.3.2 小能量多次冲击试验	9	3.3.1 退火与正火的定义、目的和 分类	56
1.4 材料的断裂韧性 (cracking toughness)	9	3.3.2 退火和正火操作及其应用	56
思考题	10	3.4 钢的淬火	59
第 2 章 金属材料的基础知识	11	3.4.1 钢的淬火工艺	59
2.1 金属的晶体结构	11	3.4.2 常用淬火方法	61
2.1.1 晶体与非晶体	11	3.4.3 钢的淬透性 (hardenability)	63
2.1.2 金属的晶体结构	11	3.4.4 钢的淬硬性	67
2.1.3 金属的同素异构转变	13	3.5 钢的回火	67
2.1.4 实际金属的晶体结构	14	3.5.1 淬火钢在回火时的转变	67
2.2 合金的相结构	17	3.5.2 回火种类及应用	69
2.2.1 合金的基本概念	17	3.5.3 回火脆性	70
2.2.2 合金的相结构	17	3.6 钢的表面淬火和化学热处理	70
2.3 纯金属的结晶	18	3.6.1 钢的表面淬火	71
2.3.1 金属结晶的基本概念	18	3.6.2 钢的化学热处理	72
2.3.2 金属的冷却曲线和过冷现象	19	3.7 钢的热处理新技术	78
2.3.3 纯金属的结晶过程	20	3.7.1 可控气氛热处理和真空热处理	78
2.3.4 金属晶粒的大小与控制	21	3.7.2 形变热处理 (ausforming)	80
2.3.5 金属的铸锭组织	22	3.8 表面热处理新技术	81
2.4 合金的结晶	23	3.8.1 热喷涂技术	81
2.4.1 二元合金相图的基本知识	23	3.8.2 气相沉积技术	82
2.4.2 二元相图的基本类型	24	3.8.3 三束表面改性技术	82
2.4.3 相图与合金性能的关系	26	思考题	84
2.5 铁-碳合金相图	27	第 4 章 常用金属材料	85
2.5.1 铁碳合金的基本相和组织	27	4.1 工业用钢	85
2.5.2 铁-碳合金相图分析	29	4.1.1 碳钢中的常存杂质及对性能的 影响	85
2.5.3 铁碳合金的成分、组织和性能			

4.1.2 合金元素在钢中的作用	85	6.5.2 轧制成形	170
4.1.3 钢的分类和牌号	88	6.5.3 拉拔成形	171
4.1.4 结构钢	90	6.6 锻压成形技术新进展	173
4.1.5 工具钢	96	思考题	174
4.1.6 特殊性能钢	101	第7章 焊接成形技术	175
4.2 铸铁	107	7.1 熔化焊成形基本原理	175
4.2.1 铸铁的石墨化过程	107	7.1.1 焊接热过程基础	176
4.2.2 铸铁的分类及牌号	109	7.1.2 焊接化学冶金	177
4.2.3 常用铸铁	110	7.1.3 焊接接头的金属组织和性能	179
4.2.4 合金铸铁	119	7.1.4 焊接应力和变形	180
4.3 有色金属及其合金	120	7.2 常用焊接成形方法	183
4.3.1 铝及铝合金	121	7.2.1 手工电弧焊	183
4.3.2 铜及铜合金	126	7.2.2 其他焊接方法	187
4.3.3 钛(titanium)及钛合金	131	7.3 常用金属材料的焊接	192
思考题	132	7.3.1 金属材料的焊接性	192
第5章 铸造成形技术	133	7.3.2 常用金属材料的焊接	193
5.1 铸造成形基本原理	133	7.4 焊接工艺及结构设计	195
5.1.1 流动性及充型能力	133	7.5 焊接缺陷与焊接质量检验	196
5.1.2 铸件的凝固方式	135	思考题	198
5.1.3 铸造合金的收缩	135	第8章 非金属材料及其成形技术	199
5.1.4 铸造应力及铸件的变形和裂纹	137	8.1 高分子材料及其成形技术	199
5.1.5 铸件常见缺陷	139	8.1.1 高分子材料的基本概念	199
5.2 铸造成形方法	140	8.1.2 工程塑料及其成形技术	202
5.2.1 砂型铸造工艺	140	8.1.3 橡胶材料及其成形技术	204
5.2.2 特种铸造	142	8.2 陶瓷材料及其成形技术	205
5.2.3 铸造方法的选择	145	8.2.1 陶瓷的分类与性能	205
5.3 铸件的结构设计	146	8.2.2 常用工业陶瓷	206
思考题	150	8.2.3 陶瓷材料的成形技术	207
第6章 锻压成形技术	151	8.3 复合材料及其成形技术	208
6.1 塑性成形的基本原理	152	思考题	209
6.1.1 金属塑性变形的实质	152	第9章 金属零件的失效、选材及	
6.1.2 塑性变形对金属组织结构及性能的影响	153	加工工艺的选择	210
6.1.3 金属的锻造性能	156	9.1 零件的失效分析	210
6.2 锻造成形技术	158	9.1.1 零件失效的概念和形式	210
6.2.1 自由锻	158	9.1.2 机械零件失效的原因	211
6.2.2 模锻	159	9.1.3 失效分析的一般过程	211
6.3 冲压成形技术	161	9.2 选材的一般原则	212
6.3.1 板料冲压基本工序	161	9.2.1 选用材料的一般原则	212
6.3.2 冲压模具	165	9.2.2 选材的方法与步骤	213
6.4 锻压成形零件的结构工艺性	166	9.3 典型零件的选材与工艺	215
6.4.1 自由锻件的结构工艺性	166	9.3.1 齿轮类与轴类零件的选材分析	215
6.4.2 冲压件结构工艺性	167	9.3.2 典型零件的选材实例	216
6.5 其他塑性成形技术	169	思考题	217
6.5.1 挤压成形	169	参考文献	218

绪 论

1. 材料的发展与应用

材料是人们用来制作各种有用器件的物质，是人类生产和社会发展的重要物质基础，也是日常生活中不可或缺的一个组成部分。

自从地球上有了人类至今，材料的利用和发展就成了人类文明发展史的里程碑。从石器时代开始，在经历了青铜器时代和铁器时代之后，人类进入了农业社会。18 世纪钢铁时代的来临，造就了工业社会的文明。尤其是近百年来，随着科学技术的迅猛发展和社会需求的不断提高，新材料更是层出不穷，出现了“高分子材料时代”、“半导体材料时代”、“先进陶瓷材料时代”、“复合材料时代”、“人工合成材料时代”和即将进入的“纳米材料时代”。目前，能源、信息、生物工程和新材料已成为现代科学技术和现代文明的四大支柱，而在这四者之中，新材料又是最重要的基础。历史证明，每一次重大新技术的发现往往都依赖于新材料的发展，而材料的种类、数量和质量已是衡量一个国家科学技术、国民经济水平以及社会文明的重要标志之一。

早在公元前 2000 年左右的青铜器时代，我国就开始了工程材料的冶炼和加工制造。如在夏代，我国就掌握了青铜冶炼术，到距今 3000 多年前的殷商、西周时期，技术达到当时世界高峰，用青铜制造的生产工具、生活用具、兵器和马饰，得到普遍应用。河南安阳武官村发掘出来的重达 875kg 的祭器司母戊大方鼎，不仅体积庞大，而且花纹精巧，造型美观。湖北江陵楚墓中发现的埋藏 2000 多年的越王勾践的宝剑仍闪闪发光，说明人们已掌握了锻造和热处理技术。春秋时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、灰铸铁和可锻铸铁相继出现。公元 1368 年，明代科学家宋应星编著了闻名世界的《天工开物》，详细记载了冶铁、铸造、锻铁、淬火等各种金属加工制造方法，是最早涉及工程材料及成形技术的著作之一，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。但是，从 18 世纪以后，长期的封建统治和闭关自守，严重地束缚了我国生产力的发展，而此时欧洲发生的工业革命极大地促进了现代工业的快速发展，这时材料的成形加工也从简单的手工操作逐渐过渡到机械化生产。新中国成立后，尤其是改革开放以来，我国的科学技术和各生产领域都取得了举世瞩目的成就，工程材料及其成形技术也得到了飞速的发展。

工程材料及其成形技术主要研究机械制造过程中的工程材料的应用以及零件毛坯的热加工成形工艺。

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的材料，其种类繁多，有许多不同的分类方法。若按材料的化学成分、结合键的特点进行分类，可以分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。

(1) 金属材料

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，是目前使用量最大、用途最广的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两大类。

黑色金属主要指铁和以铁为基体的合金材料，即钢、铸铁材料，它占金属材料总量的 95% 以上。由于黑色金属具有力学性能优良、可加工性能好、价格低廉等特点，在工程材料中一直占据着主导地位。

除黑色金属之外的所有金属及其合金材料统称为有色金属。有色金属为轻金属（如铝、

镁、钛)、重金属(如铅、锡)、贵金属(如金、银、镍、铂)和稀有金属等,其中以铝、铜及其合金用途最广。

(2) 高分子材料

高分子材料又称聚合物材料,是以分子键和共价键为主的材料,主要成分为碳和氢。作为结构材料的高分子材料,具有塑性好、耐蚀性好、减振性好及密度小等特点。按其用途和使用状态,高分子材料又分为橡胶、塑料、合成纤维和胶黏剂等四大类型,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。

(3) 陶瓷材料

陶瓷材料是以共价键和离子键结合为主的材料,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、特种陶瓷和金属陶瓷三大类。传统陶瓷又称为普通陶瓷,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。特种陶瓷又称精细陶瓷,是以人工合成材料为原料的陶瓷,常用于制作工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件。金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体,主要用作工程模具。

(4) 复合材料

复合材料是指把两种或两种以上具有不同性质或不同组织结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而构成的新型材料。它不仅保留了组成材料各自的优点,而且还具有单一材料所没有的优良性能。复合材料通常分为三大类:树脂基复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料。如很多高级游艇、赛艇及体育器械等都是由碳纤维复合材料制成的,它们具有质量轻、弹性好、强度高等优点。

3. 金属材料成形技术的分类

金属材料的成形加工基本可以分为冷加工成形和热加工成形两大类。

(1) 冷加工成形

冷加工成形是使用切削工具(包括刀具、磨具和磨料),通过工具与工件之间的相对运动,把工件上多余的材料层切除,使工件获得规定的尺寸、形状和表面质量的加工方法。

(2) 热加工成形

金属材料热加工成形包括铸造成形、锻压成形和焊接成形。

① 铸造成形 是将金属熔化成液态后,浇注到与成形零件的形状及尺寸相适应的铸型型腔中,待其冷却凝固后获得零件毛坯的生产方法。

② 锻压成形 是指将具有塑性的金属材料,在热态或冷态下借助锻锤的冲击力或压力机的压力,使其产生塑性变形,以获得所需形状、尺寸及力学性能的毛坯或零件的加工方法。锻压是锻造和冲压的总称,有时也称其为金属压力加工。

③ 焊接成形 是一种通过加热或加压或两者并用,用或不用填充材料,使被焊材料之间达到原子结合而形成的永久性连接的工艺方法。

4. 本课程的课程性质和主要任务

工程材料及其成形技术是机械类和近机类专业本科生进入专业领域的入门课程,本课程系统地介绍了从工程材料到成形技术,包括铸造、锻压、焊接和热处理等工艺在内的机械产品生产过程。它既具有高度浓缩的基础理论知识,更具有实践性很强的应用技术知识。它既是引导学生掌握基本原理的理论课程,也是培养学生具有自学能力、独立分析能力的综合训练课程。

通过本课程的学习,使学生在获得工程材料及其技术一般知识的基础上,了解常用材料的成分、组织、性能、加工方法、加工工艺以及用途等之间的关系,从而使学生初步具备合理选择材料、正确选择加工方法以及制定相应加工工艺的能力,也为后继有关课程的学习奠定必要的材料科学基础。

第 1 章 工程材料的力学性能

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（performance 或 property）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，指材料在加工过程中表现出的性能，如冷热加工性能、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、刚度、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度等。常见的各种外加载荷形式如图 1-1 所示。

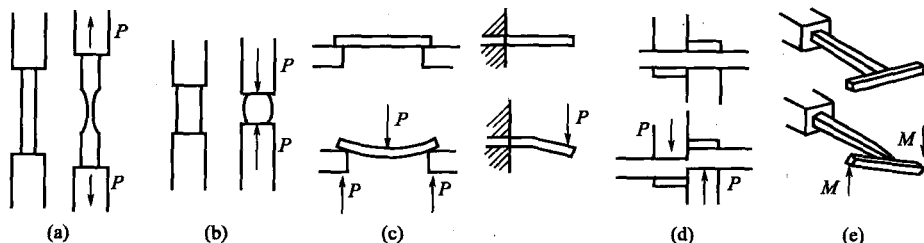


图 1-1 外加载荷的形式

(a) 拉伸载荷；(b) 压缩载荷；(c) 弯曲载荷；(d) 剪切载荷；(e) 扭转载荷

1.1 材料的强度与塑性

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 所示是低碳钢和铸铁的应力-应变曲线。

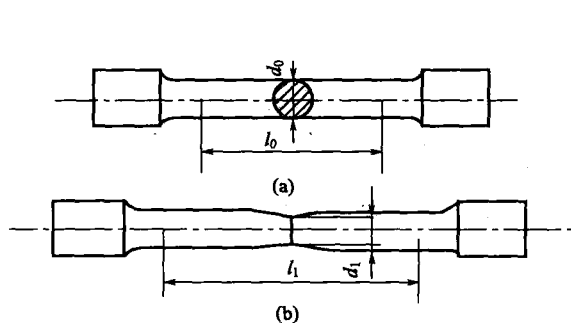


图 1-2 圆形拉伸试样

(a) 拉伸前；(b) 拉伸后

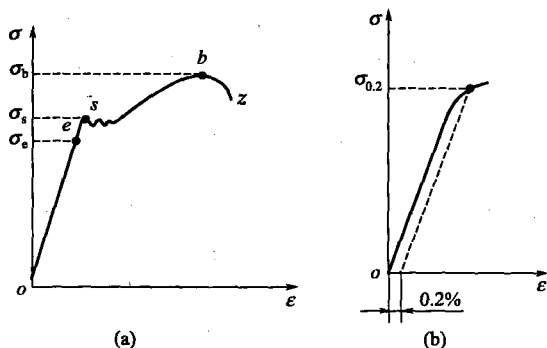


图 1-3 低碳钢和铸铁的 σ - ϵ 曲线

(a) 低碳钢；(b) 铸铁

图中的纵坐标为应力 σ (单位为 MPa)，计算公式为

$$\sigma = P/A_0 \quad (1-1)$$

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，N； A_0 为试样原始截面积， mm^2 ； l_0 为试样的原始标距长度，mm； l 为试样变形后的标距长度，mm； Δl 为伸长量，mm。

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。

1.1.1 静载时的强度

如图 1-3(a) 所示，拉伸变形的几个阶段如下。

① 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。

② 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，不能恢复的形变称为塑性变形。

③ 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。

④ 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。

⑤ 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 为外加的应力，MPa； ϵ 为相应的应变； E 为弹性模量 (elastic modulus)，MPa。

式(1-3)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 是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。

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面积。

(2) 屈服强度 (yielding strength) σ_s

如图 1-3 所示，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 $F_{0.1}$ 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, 是材料的重要力学性能指标。

(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 所示的 sb 小段, 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颈缩部位, 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, 屈强比越小, 工程构件的可靠性越高, 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。

1.1.2 动载时的强度——疲劳强度

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, 这种随时间做周期性变化的应力称为交变应力。在交变应力作用下, 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则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。

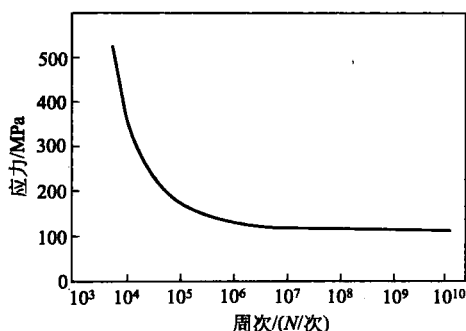


图 1-4 材料的 $\sigma-N$ 疲劳曲线

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, 承受的交变应力越大, 则断裂时循环次数越少。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。

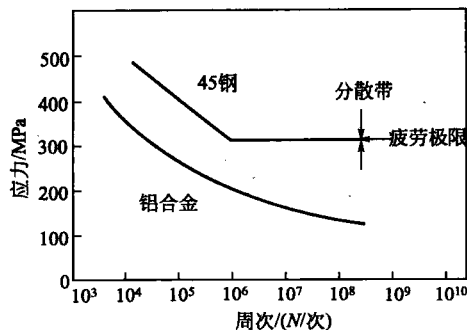


图 1-5 中碳钢和铝合金的 $\sigma-N$ 曲线

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, 材料不可能做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, 有色金属 (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。

1.1.3 高温强度——蠕变极限和持久强度

金属材料在高于一定温度下长时间地工作,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下和规定时间内,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。

1.1.4 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)。常用的塑性指标有伸长率(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伸长率(elongation percentage)。用符号 δ 表示,即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

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,测得的伸长率略有不同。长试样($l_0 = 10d_0$, d_0 为试样原始横截面积)和短试样($l_0 = 5d_0$)测得的伸长率分别记作 δ_{10} (也常写成 δ) 和 δ_5 。

试样拉断后,颈缩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

$$\psi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

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 。

金属材料的伸长率(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,进行深冲成形。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性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的力学性能具有非常重要的理论意义和实际意义。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;另一方面为处理生产上各种有关的塑性变形问题提供了重要的线索和参考,或作为改进加工工艺和提高加工质量的依据。

1.2 材料的硬度

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。

1.2.1 布氏硬度 (Brinell hardness)

图1-6所示为布氏硬度测量原理。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。布氏硬度值是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)。

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-6)$$

式中, P 为载荷,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,而是用刻度放大镜测出压痕直径 d ,然后对照有关表格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 $HB < 450$ 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。

1.2.2 洛氏硬度 (Rockwell hardness)

图1-7所示为洛氏硬度测量原理。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。

洛氏硬度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。

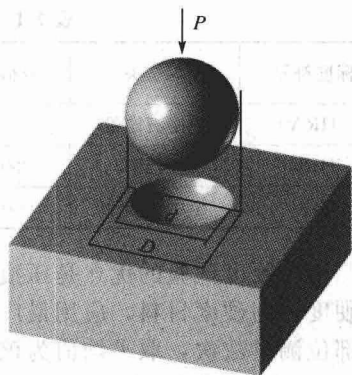


图1-6 布氏硬度测量原理

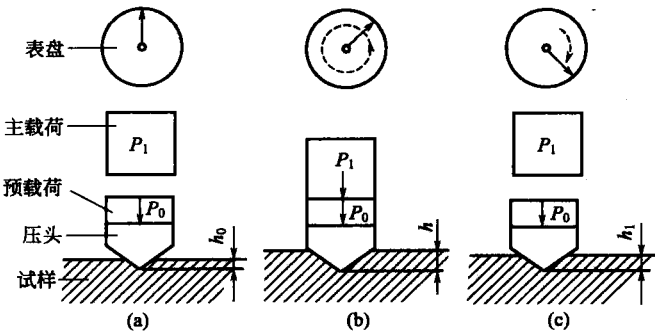


图 1-7 洛氏硬度测量原理

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、表面硬化合金工件等
HRB	1/16 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

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。

1.2.3 维氏硬度 (Vickers hardness)

布氏硬度不适于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。

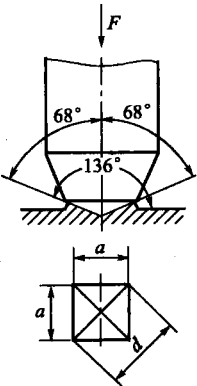


图 1-8 维氏硬度
试验原理

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的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，测试手续较烦琐，不如洛氏硬度试验法简单、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 61HRC=82HRA=627HBW=803HV₃₀。

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 材料的冲击韧性

许多机械零件在工作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。

1.3.1 摆锤式一次冲击试验

冲击试样的类型较多,常用开 U 形或 V 形缺口 (脆性材料不开缺口) 的标准试样。一次冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的。试验时将带缺口的试样安放在试验机的机架上,使试样的缺口位于两支架中间,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。

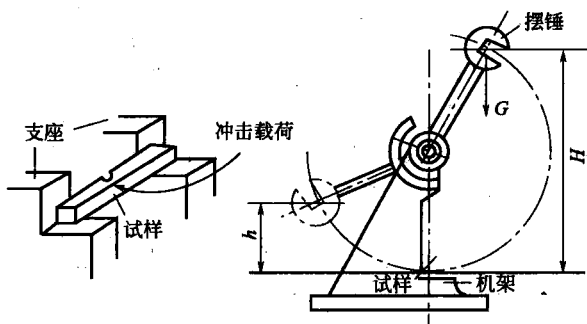


图 1-9 摆锤式一次冲击试验原理

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S_0} \quad (1-7)$$

式中, α_k 为冲击韧度, J/m^2 ; A_k 为冲击吸收功, J ; S_0 为试样缺口处截面积, m^2 。

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} 。

1.3.2 小能量多次冲击试验

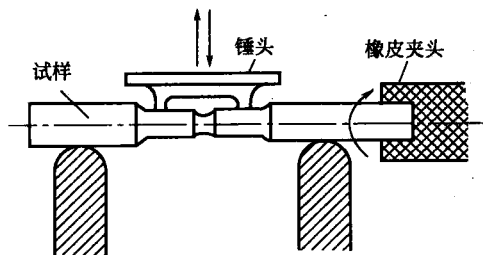


图 1-10 多次冲击弯曲试验示意

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,绝大多数是在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 值是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_k 作用下,开始出现裂纹和最后断裂的冲击次数来表示的。

1.4 材料的断裂韧性 (cracking toughness)

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材料的屈服强度。尽管在设计时保证了足够的伸长率、韧性和屈服强度,但仍不免破坏。其原因是构件或零件内部存在着或大或小、或多或少的裂纹和类似裂纹的缺陷造成的。因为

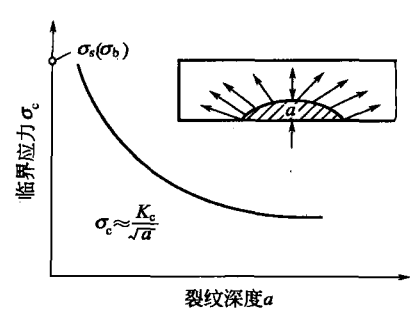


图 1-11 脆断时临界应力 σ_c 与裂纹深度（半径） a 之间的关系

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma_p}{\pi a}} \tag{1-8}$$

所以 $\sigma_c \sqrt{\pi a} = \sqrt{E\gamma_p} = K_c$

对于一定的金属材料，其单位体积内的塑性功 γ_p 和正弹性模量 E 是常数，故其乘积 K 也是常数，即 $K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a}$ 成立。该式表明，引起脆断时的临界应力 σ_c 与裂纹深度（半径） a 的平方根成反比（图 1-11）。各种材料的 K_c 值不同，在裂纹尺寸一定的条件下，材料 K_c 值越大，则裂纹扩展所需的临界应力 σ_c 就越大。因此，常数 K_c 表示材料阻止裂纹扩展的能力，是材料抵抗脆性断裂的韧性指标， K_c 值与应力、裂纹的形状和尺寸等有关。

含有裂纹的材料在外力作用下，裂纹的扩展方式一般有三种（I张开型，II滑开型和III撕开型），其中张开型裂纹扩展是材料脆性断裂最常见的情况，其中 K_c 值用 K_{Ic} 表示，工程上多采用 K_{Ic} 作为断裂韧性指标来表征材料在应力作用下抵抗裂纹失稳扩展破断的能力，将 K_{Ic} 称为断裂韧性。常见工程材料的断裂韧性 K_{Ic} 值见表 1-2。

表 1-2 常见工程材料的断裂韧性 K_{Ic} 值 /MP · m^{1/2}

材 料	K_{Ic}	材 料	K_{Ic}	材 料	K_{Ic}
纯塑性金属(Cu、Ni、Al 等)	100~350	铸铁	6~20	有机玻璃	0.9~2.4
转子钢	192~211	高碳工具钢	~19	聚酯	~0.5
压力容器钢	~155	钢筋混凝土	9~16	木材(横向)	0.5~0.9
高强钢	47~149	硬质合金	12~16	Si ₃ N ₄	3.7~4.7
低碳钢	~140	木材(纵向)	11~13	SiC	~3
钛合金(Ti6Al4V)	50~118	聚丙烯	~3	MgO 陶瓷	~3
玻璃纤维复合材料	42~60	聚乙烯	0.9~2.9	Al ₂ O ₃ 陶瓷	3~4.7
铝合金	23~45	尼龙	~2.9	水泥	~0.1
碳纤维复合材料	32~45	聚苯乙烯	~2	钠玻璃	0.6~0.8
中碳钢	~50	聚碳酸酯	0.9~2.8		

有了表示材料特性的 K_{Ic} 断裂韧性指标以后，出现了新的设计思想，即不再单纯从防止过量塑性变形出发，盲目提高过载安全系数而选用过高的材料强度值。因为如果材料内部有不可避免的、一定尺度大小的宏观裂纹，即使具有很高的强度，其断裂韧性值也不会很高，所以未必绝对可靠。因为对于塑性材料来说，裂纹扩展时不仅要消耗表面能，而且还要做大量的塑性功，所以不易断裂。设计时要全面考虑材料的各项力学性能指标，才能做到既安全可靠，又节省材料。

思考题

- 1-1 解释下列名词。
抗拉强度、屈服强度、刚度、疲劳强度、冲击韧性、断裂韧性。
- 1-2 什么是材料的力学性能？力学性能主要包括哪些指标？
- 1-3 设计刚度好的零件，应根据何种指标选择材料？材料的弹性模量 E 越大，则材料的塑性越差。这种说法是否正确？为什么？
- 1-4 什么是硬度？常用的硬度测试方法有几种？这些方法测出的硬度值能否进行比较？
- 1-5 下列几种工件应该采用何种硬度试验法测定其硬度？
(1) 锉刀； (2) 黄铜轴套； (3) 供应状态的各种碳钢材材；
(4) 硬质合金刀片； (5) 耐磨工件的表面硬化层。
- 1-6 反映材料受冲击载荷的性能指标是什么？不同条件下测得的这种指标能否进行比较？怎样应用这种性能指标？
- 1-7 断裂韧性是表示材料何种性能的指标？为什么在设计中要考虑这种指标？