



高等教育材料类精品教材

材料工艺学

刘春廷 陈克正 谢广文 编

CAILIAO
GONGYIXUE



化学工业出版社



高等教育材料类精品教材

材料工艺学

刘春廷 陈克正 谢广文 编

CAILIAO
GONGYIXUE



化学工业出版社

· 北 京



本书是建立在金属工艺学的基础上，将陶瓷材料工艺学、高分子材料工艺学和复合材料工艺学联系在一起，既突出工艺共性，又兼顾个性特色的一本教材。

全书共分为 12 章，分别为：材料学基础、热处理工艺、铸造工艺、锻压工艺、焊接工艺、金属切削加工工艺、金属材料、高分子材料工艺、陶瓷材料工艺、复合材料工艺、新型工程材料、机械零件的失效与材料及加工工艺的选用。为配合学习，各章末附有习题和思考题，便于读者深入研究。

本书适用于大专院校材料专业的研究生、本科生、高职生，从事高分子材料科学研究工作及相关专业的教学、科研、设计、生产和应用的人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料工艺学/刘春廷，陈克正，谢广文编. —北京：化学工业出版社，2013. 7

高等教育材料类精品教材

ISBN 978-7-122-17484-0

I. ①材… II. ①刘…②陈…③谢… III. ①工程材料-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 113492 号

责任编辑：杨 菁

责任校对：宋 夏

文字编辑：李 玥

装帧设计：史利平

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 装：三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 22³/₄ 字数 596 千字 2013 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：48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《材料工艺学》是根据教育部最新颁布的课程教学基本要求和有关课程改革的“重点院校材料工艺学课程改革指南”编写的。本书是以现行“材料工艺学”课程标准为依据，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，根据高等学校材料类教学的实际需要，参照国外原版教材和材料工艺研究的最新进展，并结合编者多年来的理论和实践教学经验编写而成的，在内容和形式上有较大的更新。

本书建立在金属工艺学基础上，力图与陶瓷材料工艺学、高分子材料工艺学和复合材料工艺学联系在一起，既突出工艺共性，又兼顾个性特色。本书涉及目前国内外研究的新工艺与新技术，注重学生创新能力和工程应用能力的培养，较全面地介绍了材料基础知识、工艺原理、工艺方法与规律等，可使学生获得材料工艺的基础知识与技能，如热处理技术、铸造、锻压、焊接、金属切削加工、陶瓷材料工艺、高分子材料工艺、复合材料工艺、新型工程材料、零部件的失效以及材料及加工工艺的选用，为进一步学习其他有关课程及以后从事产品设计、工程材料的选材与工艺方面的工作奠定基础。为配合学习，各章末附有习题和思考题，便于读者深入研究。

本书的编写力求取材新颖、联系实际、结构紧凑、语言简练、图文并茂，做到概念清晰、重点突出，科学性、实用性强，内容新颖。引入“三新”的新成果和新进展，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、加工工艺的发展动态与趋势。

本书的编者都是从事本行业多年的教师、科研工作者，具体分工如下：绪论、第3章、第4章、第5章、第12章由青岛科技大学的刘春廷编写，第1章、第9章由谢广文编写，第2章由徐磊编写，第6章由周桂莲编写，第7章、第8章由马继编写，第10章、第11章由陈克正编写。全书由刘春廷、陈克正和谢广文担任主编，刘春廷负责统稿。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多种已出版的教材（见参考文献），并注意吸收各院校的教学改革经验以及多个研究所和企业的科研成果，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，恳请广大读者批评指正。

编者

2013年1月

目 录

绪 论	1
0.1 概述	1
0.2 工程材料的分类	2
0.3 材料工艺的分类	3
0.4 材料工艺学课程的目的、性质和学习要求	3
第 1 章 材料学基础	5
1.1 材料的性能	5
1.1.1 材料的使用性能	5
1.1.2 材料的工艺性能	13
1.2 材料的结构	14
1.2.1 材料的结合方式	14
1.2.2 金属材料的结构	17
1.2.3 高分子材料的结构	25
1.2.4 陶瓷材料的结构	27
1.3 金属材料的结晶	28
1.3.1 纯金属的结晶	28
1.3.2 二元相图	30
1.3.3 铁碳相图	38
思考题与习题	48
第 2 章 热处理工艺	49
2.1 钢的热处理原理	49
2.1.1 钢在加热时的转变	49
2.1.2 钢在冷却时的转变	53
2.2 钢的常规热处理	64
2.2.1 钢的退火与正火	64
2.2.2 钢的淬火	68
2.2.3 钢的回火	76
2.3 钢的表面热处理	79
2.3.1 感应加热表面淬火	80
2.3.2 火焰加热表面淬火	81
2.4 钢的化学热处理	81
2.4.1 钢的渗碳	82
2.4.2 钢的渗氮	84
2.4.3 钢的碳氮共渗	86
2.5 钢的热处理新技术	87
2.5.1 可控气氛热处理和真空热处理	87
2.5.2 形变热处理	89
2.5.3 表面热处理新技术	90
思考题与习题	91
第 3 章 铸造工艺	92
3.1 铸造工艺基础	92
3.1.1 液态合金的充型	92
3.1.2 铸件的收缩	94
3.2 砂型铸造工艺	96
3.2.1 砂型铸造工艺过程	96
3.2.2 砂型铸造工艺分析	97
3.3 砂型铸造方法	102
3.3.1 手工造型	102
3.3.2 机器造型	104
3.4 特种铸造	105
3.4.1 熔模铸造	105
3.4.2 金属型铸造	106
3.4.3 压力铸造	107
3.4.4 低压铸造	108
3.4.5 离心铸造	108
3.4.6 铸造方法的选择	108
3.5 铸件结构工艺性	109
3.5.1 从简化铸造工艺过程分析	109
3.5.2 从避免产生铸造缺陷分析	111
3.5.3 铸件结构要便于后续加工	112
3.5.4 组合铸件的应用	113
3.6 常用合金铸件的制造	113

3.6.1 铸铁件的制造	113	3.7 铸造技术的发展	122
3.6.2 铸钢件的制造	119	思考题与习题	123
3.6.3 有色金属或合金铸件的制造	121		
第4章 锻压工艺	124		
4.1 锻造工艺基本原理	125	4.4.3 拉拔	140
4.1.1 金属的塑性变形理论	125	4.5 特种塑性加工方法	141
4.1.2 金属的锻造性能	128	4.5.1 超塑性成型	141
4.2 锻造	130	4.5.2 高能率成型	143
4.2.1 自由锻	130	4.5.3 液态模锻	145
4.2.2 模锻	132	4.5.4 粉末锻造	145
4.3 板料冲压	134	4.6 塑性加工零件的结构工艺性	146
4.3.1 板料冲压基本工序	134	4.6.1 自由锻件结构工艺性	146
4.3.2 冲压模具	136	4.6.2 冲压件结构工艺性	147
4.4 挤压、轧制、拉拔	138	4.7 塑性加工技术新进展	149
4.4.1 挤压	138	思考题与习题	150
4.4.2 轧制	139		
第5章 焊接工艺	151		
5.1 焊接基础知识	151	5.4.3 铸铁件的焊接	170
5.2 常用焊接工艺方法	156	5.4.4 有色金属及其合金的焊接	170
5.2.1 手工电弧焊	156	5.5 焊接质量检测	171
5.2.2 其他焊接方法	161	5.5.1 焊接缺陷	171
5.3 焊接件结构工艺性	167	5.5.2 常用检验方法	172
5.4 常用金属材料的焊接	168	5.6 焊接技术新进展	174
5.4.1 金属材料的焊接性	168	思考题与习题	176
5.4.2 结构钢的焊接	169		
第6章 金属切削加工工艺	178		
6.1 金属切削理论基础	178	6.2.4 拉削加工	200
6.1.1 金属切削变形过程	178	6.2.5 镗削加工	201
6.1.2 切削力	182	6.3 特种加工	201
6.1.3 切削热与切削温度	184	6.3.1 电火花加工	201
6.1.4 工件材料的切削加工性	186	6.3.2 电解加工	210
6.2 金属切削加工	187	6.3.3 超声波加工	214
6.2.1 车削加工	187	6.3.4 高能束加工	217
6.2.2 铣削加工	195	思考题与习题	221
6.2.3 刨削加工	199		
第7章 金属材料	222		
7.1 工业用钢	222	7.1.5 特殊性能钢	242
7.1.1 钢的分类与牌号	222	7.2 铸铁	248
7.1.2 钢中的杂质及合金元素	224	7.2.1 概述	248
7.1.3 结构钢	227	7.2.2 常用铸铁	251
7.1.4 工具钢	235	7.2.3 合金铸铁	259

7.3 有色金属及其合金	261	7.3.4 钛及钛合金	265
7.3.1 铝及其合金	261	7.3.5 轴承合金	265
7.3.2 铜及其合金	263	思考题与习题	268
7.3.3 镁及镁合金	264		
第8章 高分子材料工艺	269		
8.1 概述	269	8.5 工业橡胶及工艺	280
8.2 高分子材料的结构	269	8.5.1 工业橡胶制品的组成和工业橡胶的 分类	280
8.2.1 高聚物的结构	270	8.5.2 常用合成橡胶	280
8.2.2 高聚物的聚集态结构	271	8.5.3 工业橡胶件的加工工艺	283
8.3 高分子化合物的力学状态	271	8.6 合成纤维及工艺	286
8.4 工程塑料及工艺	273	8.6.1 常用合成纤维	286
8.4.1 工程塑料的组成	273	8.6.2 合成纤维的加工工艺	287
8.4.2 工程塑料的分类	273	思考题与习题	288
8.4.3 常用工程塑料	274		
8.4.4 工程塑料的加工工艺	278		
第9章 陶瓷材料工艺	289		
9.1 陶瓷材料的组成	289	9.4 陶瓷材料及工艺	292
9.2 陶瓷材料的分类	290	9.4.1 常用陶瓷材料	292
9.3 陶瓷材料的结构	291	9.4.2 陶瓷材料的加工工艺	298
9.3.1 离子型晶体陶瓷	291	思考题与习题	300
9.3.2 共价型晶体陶瓷	291		
第10章 复合材料工艺	301		
10.1 复合材料的分类	301	10.4 非金属基复合材料	308
10.2 复合材料的增强机制和复合原则	302	10.4.1 聚合物基复合材料	308
10.2.1 复合材料的增强机制	302	10.4.2 陶瓷基复合材料	312
10.2.2 复合材料的复合原则	303	10.4.3 碳/碳复合材料	316
10.3 金属基复合材料	304	10.5 复合材料的加工工艺	316
10.3.1 金属陶瓷	304	10.5.1 金属基复合材料加工工艺	317
10.3.2 纤维增强金属基复合材料	305	10.5.2 树脂基复合材料加工工艺	319
10.3.3 颗粒和晶须增强金属基复合 材料	307	10.5.3 陶瓷基复合材料加工工艺	321
		思考题与习题	322
第11章 新型工程材料	324		
11.1 形状记忆合金	324	11.3.1 超塑性现象	328
11.1.1 形状记忆效应	324	11.3.2 常见的超塑性合金	329
11.1.2 形状记忆效应的机理	324	11.3.3 超塑性合金的应用	330
11.1.3 形状记忆合金的应用	325	11.4 纳米材料	331
11.2 非晶态合金	326	11.4.1 纳米材料的特性	331
11.2.1 非晶态合金的制备	326	11.4.2 纳米材料的分类	332
11.2.2 非晶态合金的特性	327	11.4.3 纳米材料的制备	332
11.2.3 非晶态合金的应用	327	11.4.4 纳米新材料	332
11.3 超塑性合金	328	11.4.5 纳米复合材料	333

11.4.6	功能纳米复合材料	333	11.5	新能源材料	335
11.4.7	纳米材料的应用	333			
第 12 章 机械零件的失效与材料及加工工艺的选用				337	
12.1	机械零件的失效	337	12.2.1	机械零件材料及加工工艺选用的基本原则	343
12.1.1	失效概念	337	12.2.2	典型零件的材料及加工工艺选择	347
12.1.2	失效形式	337		思考题与习题	353
12.1.3	失效原因	339			
12.1.4	失效分析	340			
12.2	机械零件材料及加工工艺的选用	343			
参考文献				354	

绪 论

0.1 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需的物质基础。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。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。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。

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～前 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。在 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～前 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，钢年产量由 1949 年的 15.8 万吨上升到 2012 年的几亿吨，成为世界上钢产量最多的国家。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，这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。

0.2 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，如图 0-1 所示。

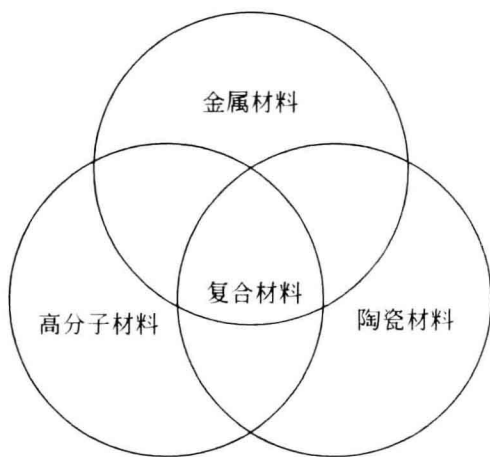


图 0-1 工程材料的分类

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，铁及其合金称为黑色金属，如钢、铸铁材料，其世界年产量已超过 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。

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。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。

0.3 材料工艺的分类

(1) 金属材料的加工工艺

根据加工温度与材料本身的熔点的关系，金属材料的加工工艺可分为冷加工和热加工工艺两类。

金属材料热加工成型包括热处理工艺、铸造、锻压和焊接。

热处理工艺是将固态金属或合金在一定介质中加热、保温和冷却，以改变材料整体或表面组织，从而获得所需性能的工艺。

铸造是将金属或合金熔化成液态后，浇注到与将成型零件的形状和尺寸相适应的铸型型腔中，待其冷却凝固后获得毛坯零件的成型方法。

锻压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成型方法。

焊接是通过加热或加压或两者并用，使用或不使用填充材料，使被焊材料之间达到原子结合，从而形成永久性连接的成型方法。

冷加工工艺是使用切削工具（包括刀具、磨具和磨料），在工具和工件之间的相对运动中，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) 非金属材料的加工工艺

非金属材料的成型加工包括高分子材料的加工工艺、陶瓷材料的加工工艺和复合材料的加工工艺，具体见第 8、第 9 和第 10 章。

0.4 材料工艺学课程的目的、性质和学习要求

随着经济的飞速发展和科学技术的进步，人们对材料的要求越来越苛刻，结构材料向高比强度、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，人们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。

材料工艺学是以材料的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、电子技术和高新技术工业发展的基础。它的研究内容包括：材料学基础（包括材料的性能与结构等）、金属材料工艺（包括热处理工艺、铸造、锻压、焊接、切削加工）、非金属材料工艺（包括高分子材料工艺、陶瓷材料工艺和复合材料工艺）、新型工程材料和零部件的失效与材料及加工工艺的选用，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。

材料工艺学是材料类和机械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。

材料工艺学课程是一门内容广泛、技术性和实践性都较强的课程，在学习时应注意分析、理解和运用，并与生产实际应用相结合。强调整体联系与综合应用，以提高学生发现问题、分析问题和解决问题的独立创新工作的能力。因此要求老师授课时除了注意联系物理与化学、力学性能及工程材料等课程的相关内容，还应尽可能利用现代化多媒体教学手段，把课本知识与工程实践训练等实习课程联系起来，理论与实践相结合，加深学生对课本知识的理解，提高学生感知能力、理解能力、综合分析能力和实践能力。

第 1 章 材料学基础

1.1 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，耐蚀性、耐热性等化学性能以及声、光、电、磁等物理性能；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、压力加工性能，焊接性能、铸造性能、切削性能等等。工程材料是材料科学的应用部分，本节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亦称为机械性能，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。外力即载荷，常见的各种载荷形式如图 1-1 所示。

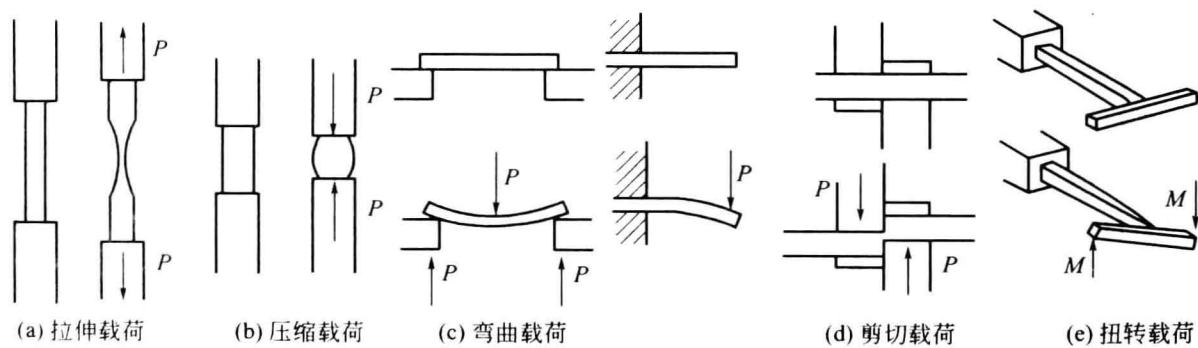


图 1-1 各种载荷的形式

1.1.1 材料的使用性能

1.1.1.1 力学性能

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。图中的纵坐标为应力 σ （单位为 MPa），计算公式为

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \tag{1-1}$$

横坐标为应变 ϵ ，计算公式为

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

式中， P 为所加载荷，N； A_0 为试样原始截面积， m^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。

(1) 强度

材料在外力作用下抵抗变形与断裂的能力称为强度。根据外力作用方式的不同，强度有

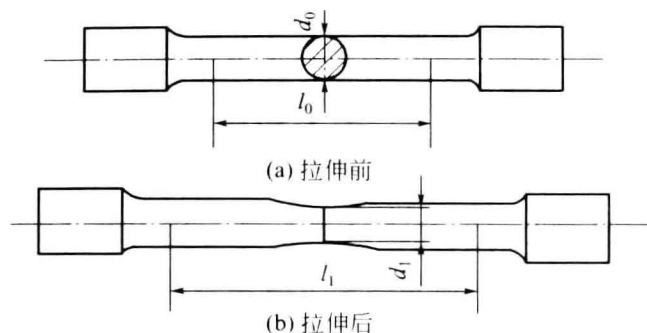


图 1-2 圆形拉伸试样

多种指标，如拉伸强度、压缩强度、弯曲强度、剪切强度和扭转强度等。其中拉伸强度和屈服强度指标应用最为广泛。

① 静载荷时的强度 拉伸变形的几个阶段如下。

弹性变形阶段（*oe* 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。

屈服阶段（*es* 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（*plastic deformation*）。

强化阶段（*sb* 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。

缩颈阶段（*bz* 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。

试样断裂（*z* 点）：试样在此点发生断裂。

a. 弹性与刚度

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定律：

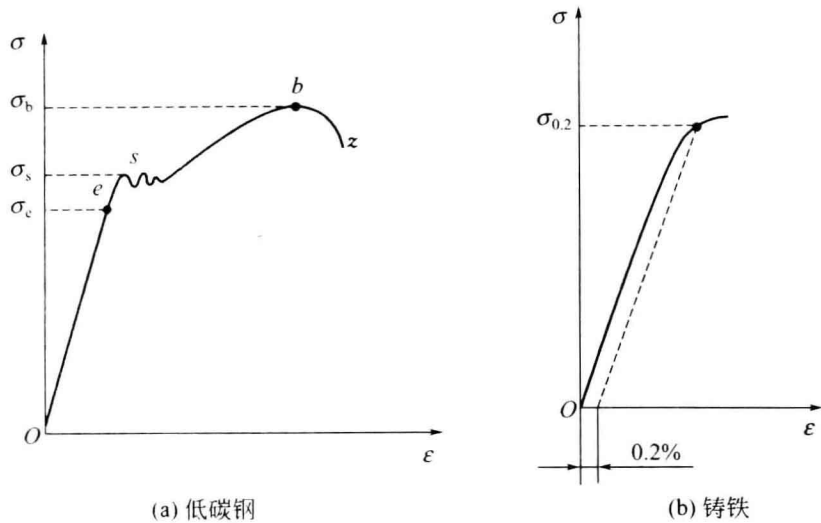
$$\sigma = E\epsilon \quad (1-3)$$

式中， σ 为外加的应力； ϵ 为相应的应变； E 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 *oe* 直线的斜率。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，它的刚度就越大。

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。

b. 屈服强度

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

图 1-3 低碳钢和铸铁的 σ - ϵ 曲线

(yielding strength)。

工程上使用的材料多数没有明显的屈服现象。国标规定这类材料的屈服强度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 [图 1-3(b)]，它是 $F_{0.2}$ 与试样原始横截面积 A_0 之比。在工程中一般不允许零（构）件发生塑性变形，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。

c. 拉伸强度

材料发生屈服后，其应力与应变的关系曲线见图 1-3 的 sb 小段，到 b 点时应力达最大值 σ_b 。 b 点以后，试样的横截面产生局部“缩颈”，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 称为拉伸强度 (tensile strength)。 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% 和 0.6%，则它们的拉伸强度分别为 350MPa、500MPa 和 700MPa。碳质量分数为 0.4% 的铁碳合金淬火和高温回火后，拉伸强度可提高到 700~800MPa。合金钢的拉伸强度可达 1000~1800MPa。但铜合金和铝合金的拉伸强度明显提高，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 动载荷时的强度 最常用的是疲劳强度 (fracture 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也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。

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 σ - N 疲劳曲线， σ 为产生失效的应力， N 为应力循环次数。

图 1-4 为中碳钢和高强度铝合金的典型 σ - 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

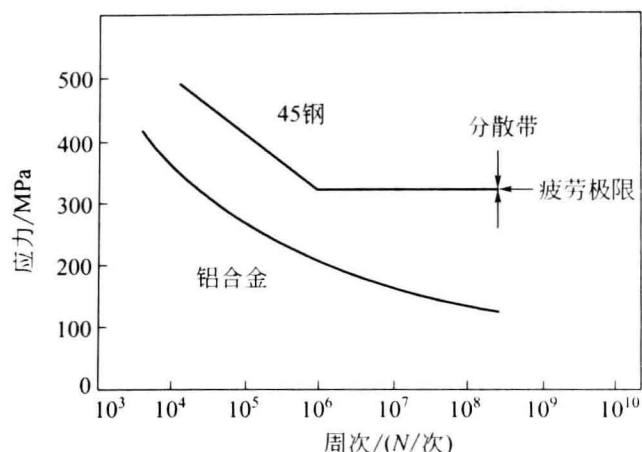


图 1-4 中碳钢和铝合金的 σ - N 曲线

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。当应力低于一定值时, 试样可经受无限个周期循环而不被破坏, σ - N 曲线出现水平部分所对应的定值称为疲劳强度 (疲劳极限), 用 σ_r 表示。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拉伸强度的一半, 有色合金 (如铝合

金) 没有疲劳极限, 它的疲劳强度可以低于拉伸强度的 $1/3$ 。

③ 高温强度 蠕变 (creep) 是指在高温下长时间工作的金属材料或在常温使用的高聚物, 承受的应力即使低于屈服点 σ_s 也可能出现明显缓慢的塑性变形直至断裂, 导致零件的最终失效。若金属材料在高于一定温度长时间工作, 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注意。

金属材料发生蠕变的主要原因是由于温度高, 晶内和晶界的缺陷 (如位错等) 的活动能力显著增大, 导致晶内滑移和晶界移动。而高聚物蠕变是由于分子链发生了构象变化或位移而引起的。

(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 (Brinell hardness, HB)、洛氏硬度 (Rockwell hardness, HR)、维氏硬度 (Vickers hardness, 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 图 1-5 为布氏硬度测试原理。用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球, 在一定载荷 P 的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)。

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

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, 是用刻度放大镜测出压痕直

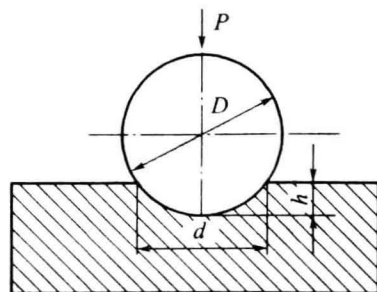


图 1-5 布氏硬度测试原理

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 $HB<450$ 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 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 $\sigma_b=3.4\sim3.6$ HBS，冷变形铜合金 $\sigma_b\approx4.0$ HBS，灰铸铁 $\sigma_b\approx2.7\sim4.0$ HBS，因此得到广泛的应用。布氏硬度的缺点是不能测定高硬度材料。

② 洛氏硬度 图 1-6 为洛氏硬度测量原理。将金刚石压头（或钢球压头）在先后施加的两个载荷（预载荷 P_0 和主载荷 P_1 ）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。保持一段时间后，卸去主载荷 P_1 ，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。

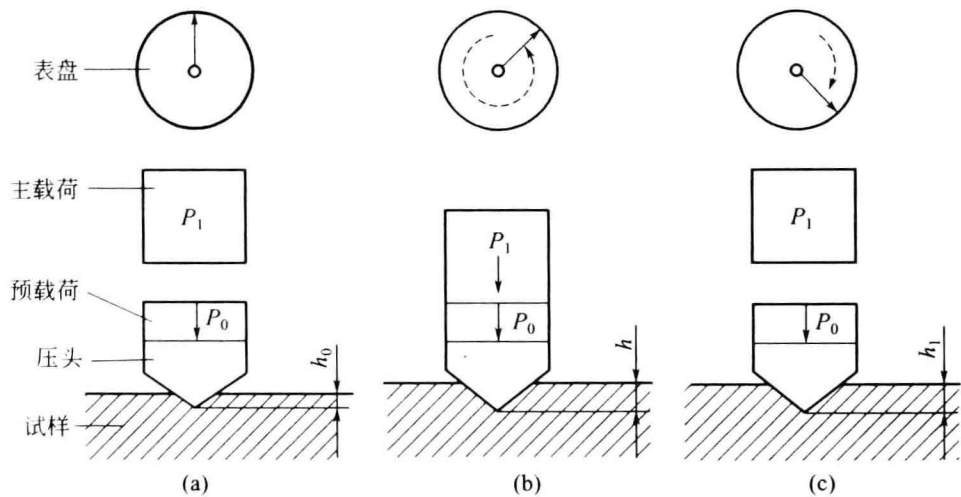


图 1-6 洛氏硬度测量原理

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

洛氏硬度用于测量各种钢铁原材料、有色金属、经淬火后工件、表面热处理工件及硬质合金等的硬度。洛氏硬度的优点是压痕小，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 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