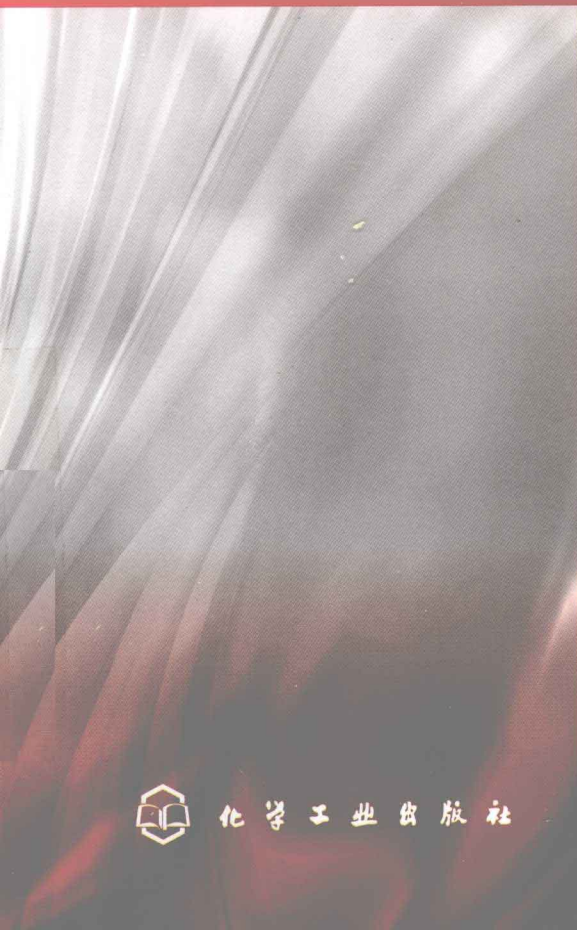
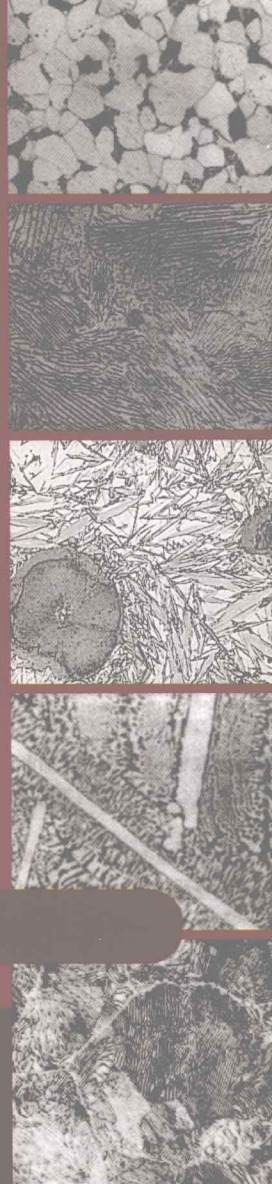




高职高专“十一五”规划教材

# 工程材料 及热加工基础

杜伟 主编 程芳 副主编



GONGCHENG CAILIAO  
JI REJIAGONG JICHU



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

# 工程材料

## 及热加工基础

杜伟 主编 程芳 副主编



化学工业出版社

·北京·

本教材是根据高等职业教育人才培养目标的基本要求,结合参编人员多年教学实践和高等职业教育教学改革成果编写的,主要内容包括金属的力学性能、纯金属与合金的基本知识、铁碳合金相图、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及粉末冶金材料、非金属材料及复合材料、铸造、锻压、焊接、机械零件的选材及毛坯的选材等,每章后均附有复习思考题。

本教材可作为高职高专院校机械类、机电类相关专业的教学用书,也适于职工大学、业余大学、中等专业学校选用,还可作为从事机械制造和设计工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及热加工基础/杜伟主编. —北京:化学工业出版社, 2010.1  
高职高专“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-122-07346-4

I. 工… II. 杜… III. ①工程材料-高等学校: 技术学院-教材②热加工-高等学校: 技术学院-教材  
IV. ①TB3②TG306

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第230210号

---

责任编辑:高钰  
责任校对:宋夏

文字编辑:张绪瑞  
装帧设计:关飞

---

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数421千字 2010年2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

# 前 言

本书是根据教育部制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》、《高职高专教育专业人才培养目标及规格》和《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件对高等职业教育人才培养目标的要求，由工作在本学科教学第一线、有丰富教学及实践经验的教师共同编写的。

本书在编写过程中，认真总结和吸取了机械工程材料及热加工工艺方面多年来的教学改革经验，以高等职业教育人才培养目标为指导思想，实用性为宗旨，强化应用为教学重点的原则，在基础理论知识方面以必需、够用为度，适当删减或淡化了一些理论性较强的内容，做到深入浅出、通俗易懂，力求文字精练、突出重点、理论联系实际，使教材内容层次清晰、实用性强，充分体现高等职业教育的基本特点。全书在名词术语、材料牌号、计量单位等方面引用了最新的国家标准。

全书以机械工程材料及热加工工艺为主线，内容包括金属材料的力学性能、纯金属与合金的基本知识、铁碳合金相图、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及粉末冶金材料、非金属材料及复合材料、铸造、锻压、焊接、机械零件的选材及毛坯的选择等十二章，在每章后均附有复习思考题，教师可以根据具体情况选择布置，使学生能够巩固所学知识，培养分析问题、解决实际问题的能力。在附录中有黑色金属硬度及强度换算表和国内外常用金属材料对照表等内容，可供教学和实践中使用。

本书配有电子教案，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 [cipedu@163.com](mailto:cipedu@163.com) 获取。

参加本书编写的有河南机电高等专科学校的杜伟、程芳、邓想、公永建、崔国明和河南省新乡海滨药业有限公司杜宇。其中杜伟编写前言、绪论、第一章至第六章、第十章；程芳编写第九章；邓想编写第七章、附录；杜宇编写第八章、第十二章；公永建编写第十一章第一节至第三节及本章复习思考题；崔国明编写第十一章第四节至第七节。

本书由杜伟副教授任主编，程芳副教授任副主编，王学让教授主审。

在本书的编审过程中得到了参编单位领导及同仁的支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。对本教材如有建议和意见请寄：[duwl01@163.com](mailto:duwl01@163.com)。

尽管我们在编写过程中已经尽了最大努力，但是由于水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者  
2009年9月

# 目 录

绪论 .....	1	组织 .....	35
一、材料科学的作用与地位 .....	1	五、亚共晶白口铸铁的结晶过程及组织 .....	36
二、工程材料及热加工技术的发展 .....	1	六、过共晶白口铸铁的结晶过程及组织 .....	37
三、本课程的性质、任务和学习方法 .....	2	第四节 铁碳合金成分与组织、性能间的关系 .....	37
<b>第一章 金属材料的力学性能</b> .....	<b>4</b>	一、铁碳合金成分与组织间的关系 .....	37
第一节 强度与塑性 .....	4	二、铁碳合金成分与性能间的关系 .....	38
一、强度 .....	4	第五节 碳素钢 .....	39
二、塑性 .....	6	一、杂质元素对碳钢性能的影响 .....	39
第二节 硬度 .....	6	二、碳钢的分类 .....	40
一、布氏硬度 .....	7	三、碳钢的牌号、性能及用途 .....	40
二、洛氏硬度 .....	8	复习思考题 .....	45
三、维氏硬度 .....	9	<b>第四章 钢的热处理</b> .....	<b>46</b>
第三节 冲击韧性与疲劳强度 .....	9	第一节 钢的热处理原理 .....	46
一、冲击韧性 .....	9	一、钢在加热时的组织转变 .....	46
二、疲劳强度 .....	10	二、钢在冷却时的组织转变 .....	49
复习思考题 .....	12	第二节 钢的普通热处理 .....	56
<b>第二章 纯金属与合金的基本知识</b> .....	<b>13</b>	一、钢的退火和正火 .....	56
第一节 纯金属与合金的晶体结构 .....	13	二、钢的淬火 .....	58
一、纯金属的晶体结构 .....	13	三、钢的回火 .....	62
二、纯金属的实际晶体结构 .....	14	第三节 钢的表面热处理 .....	64
三、合金的晶体结构 .....	16	一、钢的表面淬火 .....	64
第二节 纯金属与合金的结晶 .....	18	二、钢的化学热处理 .....	66
一、纯金属的结晶过程 .....	18	第四节 影响热处理件质量的因素 .....	69
二、合金的结晶与二元合金相图 .....	20	一、常见的热处理缺陷及影响因素 .....	69
三、合金性能与相图间的关系 .....	27	二、热处理工件的结构工艺性 .....	70
复习思考题 .....	28	第五节 热处理技术条件的标注及工序位置安排 .....	71
<b>第三章 铁碳合金相图</b> .....	<b>29</b>	一、热处理技术条件的标注 .....	71
第一节 铁碳合金的基本知识 .....	29	二、热处理工序位置的安排 .....	71
一、纯铁的同素异晶转变 .....	29	复习思考题 .....	72
二、铁碳合金的基本相 .....	29	<b>第五章 合金钢</b> .....	<b>75</b>
第二节 铁碳合金相图 .....	30	第一节 合金元素在钢中的作用 .....	75
一、铁碳合金相图分析 .....	31	一、合金元素在钢中的存在形式 .....	75
二、铁碳合金的分类 .....	32	二、合金元素对 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的影响 .....	76
第三节 典型铁碳合金的结晶过程及组织 .....	33	三、合金元素对钢热处理的影响 .....	77
一、共析钢的结晶过程及组织 .....	33		
二、亚共析钢的结晶过程及组织 .....	34		
三、过共析钢的结晶过程及组织 .....	34		
四、共晶白口铸铁的结晶过程及组织 .....	35		

第二节 合金钢的分类及牌号 .....	79	第四节 粉末冶金材料 .....	125
一、合金钢的分类 .....	79	一、粉末冶金法及其应用 .....	125
二、合金钢牌号的表示方法 .....	80	二、常用的粉末冶金材料 .....	126
第三节 合金结构钢 .....	81	复习思考题 .....	128
一、低合金高强度结构钢 .....	81	<b>第八章 非金属材料及复合材料</b> .....	129
二、合金渗碳钢 .....	81	第一节 高分子材料 .....	129
三、合金调质钢 .....	82	一、高分子材料的合成 .....	129
四、合金弹簧钢 .....	85	二、高分子材料的物理状态 .....	130
五、滚动轴承钢 .....	88	三、常用的高分子材料 .....	130
第四节 合金工具钢 .....	89	第二节 陶瓷材料 .....	134
一、合金刀具钢 .....	89	一、陶瓷材料的分类 .....	134
二、合金模具钢 .....	94	二、陶瓷材料的性能及应用 .....	135
三、合金量具钢 .....	97	第三节 复合材料 .....	135
第五节 特殊性能钢 .....	97	一、复合材料的分类 .....	135
一、不锈钢 .....	97	二、复合材料的性能 .....	136
二、耐热钢 .....	100	三、常用的复合材料 .....	136
三、耐磨钢 .....	101	复习思考题 .....	137
复习思考题 .....	102	<b>第九章 铸造</b> .....	139
<b>第六章 铸铁</b> .....	104	第一节 合金的铸造性能 .....	139
第一节 铸铁的石墨化 .....	104	一、合金的流动性 .....	139
一、铁碳合金双重相图 .....	104	二、合金的收缩 .....	141
二、铸铁的石墨化 .....	104	三、铸造应力 .....	143
三、影响铸铁石墨化的因素 .....	105	第二节 砂型铸造 .....	145
第二节 常用的铸铁 .....	106	一、砂型铸造的造型方法 .....	145
一、灰铸铁 .....	106	二、砂型铸造工艺设计 .....	149
二、球墨铸铁 .....	109	三、铸造实例分析 .....	155
三、可锻铸铁 .....	112	第三节 铸件的结构工艺性 .....	156
四、蠕墨铸铁 .....	112	一、砂型铸造工艺对铸件结构的	
五、合金铸铁 .....	113	要求 .....	156
复习思考题 .....	114	二、合金铸造性能对铸件结构的	
<b>第七章 有色金属及粉末冶金材料</b> ..	115	要求 .....	157
第一节 铝及铝合金 .....	115	第四节 特种铸造 .....	159
一、工业纯铝 .....	115	一、熔模铸造 .....	159
二、铝合金的分类及热处理 .....	115	二、金属型铸造 .....	161
三、变形铝合金 .....	117	三、压力铸造 .....	162
四、铸造铝合金 .....	118	四、低压铸造 .....	163
第二节 铜及铜合金 .....	120	五、离心铸造 .....	164
一、工业纯铜 .....	120	六、实型铸造 .....	164
二、铜合金的分类 .....	120	第五节 铸件中常见的缺陷及产生	
三、黄铜 .....	121	原因 .....	166
四、青铜 .....	121	一、孔洞类缺陷 .....	166
第三节 滑动轴承合金 .....	123	二、形状类缺陷 .....	166
一、轴承合金的性能要求 .....	123	三、夹杂物类缺陷 .....	167
二、轴承合金的组织特征 .....	124	四、裂纹、冷隔类缺陷 .....	167
三、常用的轴承合金 .....	124	第六节 常用铸造方法比较 .....	168

复习思考题 .....	169	五、等离子弧焊 .....	216
<b>第十章 锻压</b> .....	170	第三节 压焊与钎焊 .....	217
第一节 金属的塑性变形 .....	170	一、压焊 .....	217
一、金属塑性变形的实质 .....	170	二、钎焊 .....	219
二、冷塑性变形对金属组织及性能的影响 .....	172	第四节 常用金属材料的焊接 .....	219
三、回复与再结晶 .....	172	一、金属材料的焊接性 .....	219
四、金属的热加工 .....	174	二、碳钢的焊接 .....	221
第二节 金属的锻压性能 .....	175	三、合金钢的焊接 .....	221
一、金属的本质 .....	175	四、铸铁的焊补 .....	222
二、变形条件 .....	175	五、有色金属的焊接 .....	223
第三节 自由锻 .....	176	第五节 焊接件的结构工艺性 .....	225
一、自由锻的特点 .....	176	一、焊接结构材料的选择 .....	225
二、自由锻的基本工序 .....	177	二、焊接接头形式的选择 .....	226
三、自由锻工艺规程的制订 .....	178	三、焊缝的布置 .....	226
四、自由锻锻件的结构工艺性 .....	183	第六节 焊接件中常见的缺陷 .....	228
第四节 模锻 .....	184	一、焊接缺陷概述 .....	228
一、锤上模锻 .....	185	二、常见焊接缺陷的产生原因和防止措施 .....	228
二、胎模锻 .....	188	第七节 焊接方法的选择 .....	231
三、压力机上模锻 .....	189	复习思考题 .....	232
第五节 板料冲压 .....	192	<b>第十二章 机械零件的选材及毛坯的选择</b> .....	234
一、板料冲压的基本工序 .....	192	第一节 机械零件的失效 .....	234
二、冲模的分类及结构 .....	195	一、零件的失效 .....	234
三、冲压件的结构工艺性 .....	196	二、零件失效的形式及原因 .....	234
第六节 其他压力加工方法 .....	198	第二节 机械零件的选材 .....	235
一、挤压成形 .....	198	一、零件选材的一般原则 .....	235
二、轧制成形 .....	199	二、选材的方法及步骤 .....	239
三、拉拔 .....	200	三、典型零件的选材 .....	240
复习思考题 .....	200	第三节 零件毛坯的选择 .....	245
<b>第十一章 焊接</b> .....	201	一、毛坯选择的原则 .....	245
第一节 焊条电弧焊 .....	201	二、常用毛坯的特点及生产成本比较 .....	246
一、焊接电弧 .....	202	三、常用机械零件毛坯的选择 .....	246
二、电弧焊的冶金过程 .....	202	复习思考题 .....	248
三、焊条 .....	203	<b>附录</b> .....	249
四、焊接接头 .....	206	附录 I 黑色金属硬度强度换算表 .....	249
五、焊接应力与变形 .....	207	附录 II 国内外常用材料牌号对照表 .....	253
第二节 其他熔焊方法 .....	210	<b>参考文献</b> .....	257
一、埋弧焊 .....	210		
二、气体保护电弧焊 .....	212		
三、气焊 .....	213		
四、电渣焊 .....	215		

# 绪 论

## 一、材料科学的作用与地位

材料是工业、农业、国防、科学技术以及人民生活赖以生存和发展的物质基础。目前，材料、能源和信息已成为现代化社会生产的三大支柱，而材料又是能源与信息发展的物质基础，材料的品种、数量、性能和质量又是衡量一个国家科学技术和现代化水平发展的重要标志。

材料科学是以材料为研究对象，探讨材料的结构、性能及其加工方法三者之间相互关系和规律的科学，它是以化学、固体物理、力学等为基础多种学科交织在一起的边缘科学，材料科学的发展是人类文明进步的重要标志。根据材料生产和使用水平的不同，将人类的发展史划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代和铁器时代，因此人类文明的发展史实际上是人类对材料认识、制造、使用和发展的历史。随着近代工业生产中产品对材料性能要求的不同，材料科学产生了金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料的分支学科。

金属材料是机械制造中应用范围最广、最重要的机械工程材料，主要包括黑色金属材料（如钢、铸铁和合金钢等）和有色金属材料（如铜、铝、钛及其合金等）。金属材料不仅来源丰富，而且还具有优良的使用性能和工艺性能，可通过配制不同化学成分的合金及不同的成形工艺、热处理来改变其组织和性能，从而进一步扩大了金属材料的使用范围。

高分子材料和陶瓷材料属于非金属材料，通常具有金属材料所不具备的某些特性，如高分子材料的耐腐蚀性、电绝缘性、隔音、减振、重量轻、原料来源丰富、价廉以及良好的成形工艺性能；陶瓷材料的高熔点、高硬度、耐高温以及特殊的物理性能等，在工业生产中已部分代替金属材料，成为一种重要的、独立的新型工程材料应用在机械产品中。近年来非金属材料发展很快，其中以人工合成高分子材料的发展最为迅速。

复合材料是近年来人们为集中各类材料的优点于一体，充分发挥各类材料的潜力而制成的一类新型材料。这类材料具有高的比强度、比弹性模量，良好的抗疲劳性、减振性和耐高温性，以及密度小、隔音、隔热、减振、阻燃等优良的物理性能和力学性能，复合材料作为一种很有发展前途的材料，已广泛应用于航空航天、建筑、机械、交通运输以及国防工业等部门的产品制造中。

未来新兴产业的发展，无不依赖于新材料的开发和利用，如海洋开发所用的深潜器及各种海底设施需要耐压、耐油的新型结构材料；卫星、宇航等仪器设备需要重量轻、耐高温、强度高的新材料；医学上制造的人工器官、人造骨骼、人造血管等要用与人体相容的新材料等，因此材料科学的发展将有力推动人类文明的进步和现代化水平的提高。

## 二、工程材料及热加工技术的发展

材料的使用及其加工方法的每一次改进和发展都是人类社会发展的一个里程碑，它象征着人类在征服自然、发展社会生产力方面迈出了具有深远意义的一步，促进了整个社会生产力更进一步的发展。人类社会自石器时代进入青铜器时代以后，金属材料在人类生活、生产中的应用就占据了十分重要的地位，特别是大规模生产钢铁工艺的出现，更是促进了科学技



术和社会经济的迅速发展,使人类社会的经济活动和科学技术水平发生了显著变化。

工程材料及热加工工艺是人类在长期生产实践中发展起来的一门学科。我国是世界上使用金属材料最早的国家之一,早在6000年前的新石器时代我国就己会冶炼和使用黄铜。大量出土的青铜器说明在商代(公元前1600~公元前1046年)我国的青铜冶炼、铸造技术就己达到了很高的水平,如在河南省安阳出土的875kg的司母戊鼎,体积庞大、花纹精巧、造型精美,是迄今为止世界上最古老的大型青铜器,在当时的条件下要浇注出这样庞大的金属器物,如果没有科学的劳动分工和先进的铸造技术,是不可能制造出来的。

公元前6世纪的春秋末期,我国就己出现了人工冶炼的铁器,比欧洲出现生铁早1900多年,东汉时期我国就掌握了炼钢技术,比其他国家早1600多年。如1953年在我国河北省兴隆地区发掘出土用来铸造农具的铁模子,说明铁制农具早在我国春秋战国时期就己大量应用于农业生产中;1965年在湖北省江陵出土的越王勾践青铜剑,虽然在地下深埋了2000多年,但是这把剑在出土时却没有一点锈斑,完好如初,锋利无比,说明当时已经掌握了金属的冶炼、锻造、热处理和防腐等先进技术;在河南省辉县出土的玻璃阁战国墓中,殉葬铜器的耳和足是用钎焊方法与本体连接在一起的,说明在战国时期我国就己经采用了焊接技术。

与此同时,我国劳动人民在长期的生产实践中也总结出了一套比较完整的金属材料加工工艺经验,如先秦时代的《考工记》、宋代沈括的《梦溪笔谈》、明代宋应星的《天工开物》等著作中,都有冶炼、铸造、锻造、淬火等各种金属加工方法的记载。

历史事实充分说明,我国古代劳动人民在金属材料及其加工工艺方面取得了辉煌的成就,为世界文明和人类的进步作出了巨大贡献。但是到了近代,由于封建王朝的长期统治和闭关自守政策,严重阻碍和束缚了我国生产力技术的发展,特别是鸦片战争以后的几十年间外国的侵略和剥削,使我国工业和科学技术水平一直处于落后状态。

新中国成立后,我国在金属材料、非金属材料及其加工工艺研究方面有了突飞猛进的发展,推动了机械制造、矿山冶金、交通运输、石油化工、电子仪表、航天航空等现代化工业的发展。原子弹、氢弹、导弹、人造地球卫星、宇宙飞船的发射、超导材料、纳米材料等重大项目的研究与试验成功,都标志着我国在工程材料及其加工工艺方面的发展达到了世界先进水平。

虽然我国在很多方面已经取得了很大的成就,但是与世界发达国家相比,我国的机械工业在产品质量、生产能力、技术水平、经济效益和管理水平等方面还存在一定的差距,不能完全适应国民经济发展的需要,因此,加强材料科学的研究,加快工程材料及热加工工艺技术的发展和应,对我国现代化水平的发展和生产力的提高具有非常重要的意义。

### 三、本课程的性质、任务和学习方法

工程材料及热加工基础课程是一门综合性的技术基础课,是机械类、近机类专业学生的必修课,它由机械工程材料及其零件(或毛坯)成形技术两大部分内容组成。工程材料是构成各种机械产品的基础,也是各种机械加工的对象,它包括金属材料、非金属材料 and 复合材料等,其中金属材料是机械制造的主要材料;热加工基础部分包括各种材料的热处理、铸造、锻压、焊接等加工技术。

通过本课程的学习,应达到以下基本要求:

- ① 了解工程材料及热加工技术在机械制造过程中的作用和地位,熟悉金属材料常用热处理工艺的原理、特点,掌握常用工程材料的牌号、性能、用途和一般选用原则;
- ② 掌握金属材料主要热加工工艺方法和板料冲压的基本原理、特点和应用范围;

③ 了解零件失效的主要形式，熟悉毛坯或零件的结构工艺性，并具有设计毛坯和零件结构的初步能力；

④ 了解与本课程有关的新技术、新工艺、新设备、新材料的发展概况。

本课程具有较强的理论性与实践性，学习中应注重前后知识的衔接、分析、理解与运用。为了提高工作中分析问题、解决问题的能力，在理论学习的同时，要注意联系实验、实习环节的内容；为保证教学质量，本课程应安排在金工实习之后学习，才能达到预期的学习目的和要求。本课程中有些工艺知识方面的内容，尚需在以后有关课程教学、课程设计和毕业设计中反复练习、巩固与提高后，才能达到掌握与熟练应用的要求。

学习本课程时，应注意课前预习，并根据教学内容完成老师布置的课后复习思考题，以巩固所学知识，培养独立分析问题和解决问题的能力；根据教学要求学生要自己动手做好实验，写出相应的实验报告，以获得一定的实验技能。

# 第一章 金属材料的力学性能

金属材料由于品种多，能够满足各种机械产品不同的性能要求，因此在机械制造中广泛应用。为了合理选择和使用金属材料，充分发挥金属材料的潜力，应充分了解和掌握金属材料的有关性能。金属材料的性能一般分为使用性能和工艺性能。金属的使用性能反映了金属材料在使用过程中所表现出来的特性，包括力学性能、物理性能、化学性能等；金属的工艺性能反映了金属材料在制造加工过程中所表现出来的各种特性，它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等。

金属的力学性能是指材料在外加载荷作用下所表现出来的特性。它取决于材料本身的化学成分和材料的组织结构。当载荷性质、环境温度、介质等外在因素不同时用来衡量材料力学性能的指标也不同。常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。

## 第一节 强度与塑性

### 一、强度

强度是指金属在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。金属材料的强度与塑性指标是通过拉伸试验测得的。

#### 1. 拉伸试验

拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。试验之前，先将被测金属材料按照 GB/T 228—2002 要求制成标准试样。图 1-1(a) 为圆柱形拉伸试样， $d_0$  为试样原始直径， $l_0$  为试样原始标距长度。根据标准规定试样分为长试样和短试样两种。对于圆柱形拉伸试样，长试样  $l_0 = 10d_0$ ；短试样  $l_0 = 5d_0$ 。

试验时，将试样装夹在拉伸试验机上，在试样两端缓慢地施加轴向拉伸载荷，随着载荷不断增加，试样被逐步拉长，直到拉断为止。在拉伸过程中，试验机将自动记录每一瞬间的载荷  $F$  与伸长量  $\Delta l$  之间的变化曲线，即拉伸曲线。

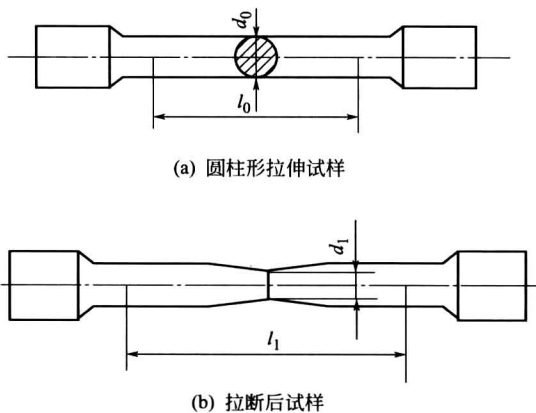


图 1-1 拉伸试样

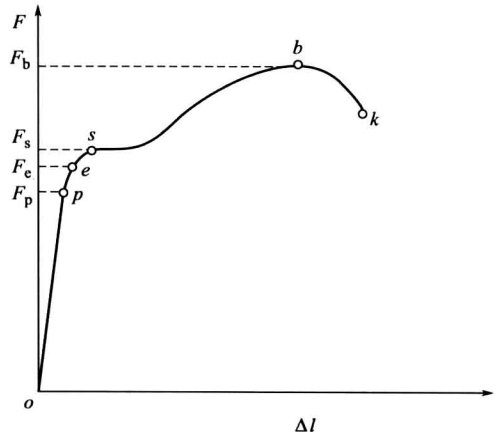


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线。从图中可以看出，低碳钢在拉伸过程中试样伸长量  $\Delta l$  与载荷  $F$  之间有如下关系。

$op$  段：为一条斜线，在此区间试样伸长量  $\Delta l$  与载荷  $F$  成正比关系，完全符合虎克定律。去除载荷，试样能完全恢复到原来的尺寸和形状，属于弹性变形阶段。

$pe$  段：在该区间，拉伸曲线开始偏离直线，伸长量  $\Delta l$  与载荷  $F$  之间不符合虎克定律，但去除载荷后，试样仍能恢复到原来的尺寸和形状，因此该阶段仍属于弹性变形阶段。

$es$  段：该段曲线呈现水平或锯齿形，试样表现为在载荷不增加的情况下，伸长量却继续增加，去除载荷后，试样已不能恢复原状，开始出现塑性变形，这种现象称为屈服。

$sb$  段：当载荷超过屈服点载荷后，试样的伸长量  $\Delta l$  随载荷  $F$  的增加继续伸长直到  $b$  点，该阶段试样为均匀变形阶段。

$bk$  段：在试样的局部开始收缩，产生“缩颈”现象，由于试样局部截面的逐渐减少，其承受载荷的能力也不断下降，直至到达  $k$  点试样被拉断。

## 2. 强度指标

强度是用应力来表示的。当材料受载荷作用而未引起破坏时，其内部会产生一个与载荷相平衡的内力。材料单位面积上的内力称为应力，用  $\sigma$  表示。材料强度的高低是以所能承受的应力大小来表示的，根据拉伸试验可得到金属材料的以下强度指标。

(1) 弹性极限 弹性极限是指试样产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值，用  $\sigma_e$  来表示，单位为 MPa。弹性极限的值可用下式进行计算

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

式中  $F_e$ ——试样产生弹性变形时所能承受的最大载荷，N；

$A_0$ ——试样的原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

(2) 屈服点 屈服点是指试样在拉伸试验过程中，材料开始产生明显塑性变形时的最小应力值。屈服点用符号  $\sigma_s$  表示，单位为 MPa。屈服点的值可用下式进行计算

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

式中  $F_s$ ——试样产生屈服现象时的载荷，N；

$A_0$ ——试样的原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

有些材料在拉伸试验过程中由于没有明显的屈服现象，因此无法确定其屈服点的数值。按 GB/T 228—2002 规定，可用屈服强度  $\sigma_{0.2}$  来表示该材料开始产生塑性变形时的应力值。屈服强度是用试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时所对应的应力值来表示的（如图 1-3 所示），即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

式中  $F_{0.2}$ ——试样标距产生 0.2% 残余伸长时的载荷，N；

$A_0$ ——试样的原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

(3) 抗拉强度 抗拉强度是指试样拉断前所能承受的最大应力值，用  $\sigma_b$  来表示，单位为 MPa。抗拉强度可用下式进行计算

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

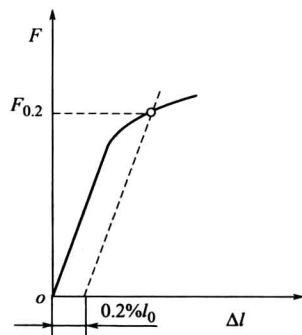


图 1-3 屈服强度的测定

式中  $F_b$ ——试样断裂前承受的最大载荷, N;

$A_0$ ——试样的原始横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

屈服点(或屈服强度)、抗拉强度是金属材料的两个重要力学性能指标,也是大多数机械零件选材和设计的依据。零件在工作过程中所承受的最大应力值不能超过其屈服点(或屈服强度),否则会引起零件的塑性变形;更不能在超过其抗拉强度的条件下工作,否则会导致零件的断裂破坏。

## 二、塑性

塑性是材料在外力的作用下产生塑性变形而不破坏的能力。金属材料的塑性指标可以用试样拉断时的最大相对变形量来表示,常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

### 1. 伸长率(断后伸长率)

伸长率是试样拉断后的标距增长量与原始标距之比,用符号  $\delta$  表示。伸长率可用下式进行计算

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

式中  $l_1$ ——拉断后试样标距的长度, mm;

$l_0$ ——试样的原始标距长度, mm。

材料的伸长率是随原始标距长度的增加而减小的,所以同一材料的短试样要比长试样所测得的伸长率大,对局部集中变形特别明显的材料,甚至可大到 20%~50%。因此长、短两种圆形试样所测得的伸长率分别用  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  表示。

### 2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积之比,用符号  $\psi$  表示。断面收缩率可用下式进行计算

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

式中  $A_0$ ——试样的原始横截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_1$ ——试样断口处的最小横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

材料的塑性指标通常不直接用于工程设计计算,但材料的塑性对零件的加工和使用都具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻压、轧制等塑性变形加工,而且零件在使用过程中偶然超载时,由于产生一定的塑性变形而不至于突然断裂,从而提高了产品的安全性。所以大多数机械零件除要求具有较高的强度外,还必须具有一定的塑性。

## 第二节 硬 度

硬度是指材料抵抗局部变形,特别是塑性变形、压痕或划痕的能力,它是衡量材料软硬程度的指标。硬度试验和拉伸试验都是在静态力下测定材料力学性能的,一般情况下,材料的硬度越高,其强度越高,耐磨性越好。硬度试验由于基本上不损伤试样,简便迅速,不需要单独制作试样,而是在工件上直接进行测试,因而在生产中被广泛应用。

硬度测定方法有多种,其中压入法在生产中的应用最为普遍。压入法是在规定试验力的作用下,将压头压入金属表面,然后根据压痕的面积大小或深度测定其硬度值。目前生产中

应用较多的是布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度试验法。

### 一、布氏硬度

布氏硬度是用一定直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金球，在规定载荷  $F$  的作用下压入被测金属表面，停留一定的时间后卸除载荷，在被测金属表面上留下一直径为  $d$  的压痕，测量压痕直径  $d$ ，并由此计算出压痕的球缺面积  $A$ ，如图 1-4 所示，然后再计算出单位压痕面积上所承受的平均压力，以此作为被测金属的布氏硬度值。布氏硬度值可用下式计算

$$\text{HBS(HBW)} = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

式中  $F$ ——载荷，kgf (1kgf=9.80665N)；

$D$ ——压头的直径，mm；

$d$ ——被测金属的压痕直径，mm。

在进行布氏硬度试验时应根据金属硬软程度、工件厚薄选择不同的压头直径  $D$ 、载荷  $F$  和载荷的保持时间。按 GB/T 231.1—2002 规定，压头直径有 10mm、5mm、2.5mm、2mm 和 1mm 五种规格，载荷（单位为 kgf）与压头直径平方的比值 ( $F/D^2$ ) 有 30、15、10、5、2.5、1.25 和 1 共七种，具体可根据金属材料的种类和布氏硬度范围按表 1-1 选定；载荷的保持时间黑色金属为 10~15s，有色金属为 30s，布氏硬度值小于 35 时为 60s。

表 1-1 布氏硬度试验  $F/D^2$  值的选择

材料	布氏硬度	$F/D^2$
钢及铸铁	<140	10
	>140	30
铜及其合金	<35	5
	35~130	10
	>130	30
轻金属及其合金	<35	2.5(或 1.25)
	35~80	10(或 5,15)
	>80	10(或 15)
铅、锡		1.25(或 1)

注：试验条件允许时，应尽量选用 10mm 压头和无括号的  $F/D^2$  值。

布氏硬度用 HB 表示，一般不标注单位。在使用淬火钢球压头时用 HBS 表示，适合于测定布氏硬度值在 450 以下的材料；使用硬质合金压头时，用 HBW 表示，适合于测定布氏硬度值小于 650 的材料。布氏硬度的标注方法是所测得的硬度值应在硬度符号的前面，硬度符号的后面用相应的数字注明压头直径、试验力大小 (kgf) 和试验力保持的时间（一般试验力保持时间为 10~15s 时不标）。例如：180HBS10/1000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球，在 1000kgf 载荷作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 180；500HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球，在 750kgf 载荷作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500。

布氏硬度的特点是试验时金属表面压痕面积大，能客观地反映被测金属的平均硬度，试验结果较准确，数据重复性强，但由于其压痕大，不宜测试成品或薄片零件的硬度。

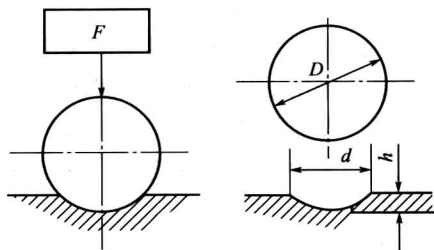


图 1-4 布氏硬度的试验原理

## 二、洛氏硬度

洛氏硬度试验法是用一个顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥或直径为  $1.588\text{mm}$  的淬火钢球，在规定载荷作用下压入被测金属表面，由压头在金属表面所形成的压痕深度来确定其硬度值。试验时，先加初载荷  $10\text{kgf}$  ( $98.07\text{N}$ )，然后再加主载荷，在初载荷+主载荷的压力下保持一段时间之后，去除主载荷，在保留初载荷的情况下，根据试样的压痕深度来衡量金属硬度的大小。

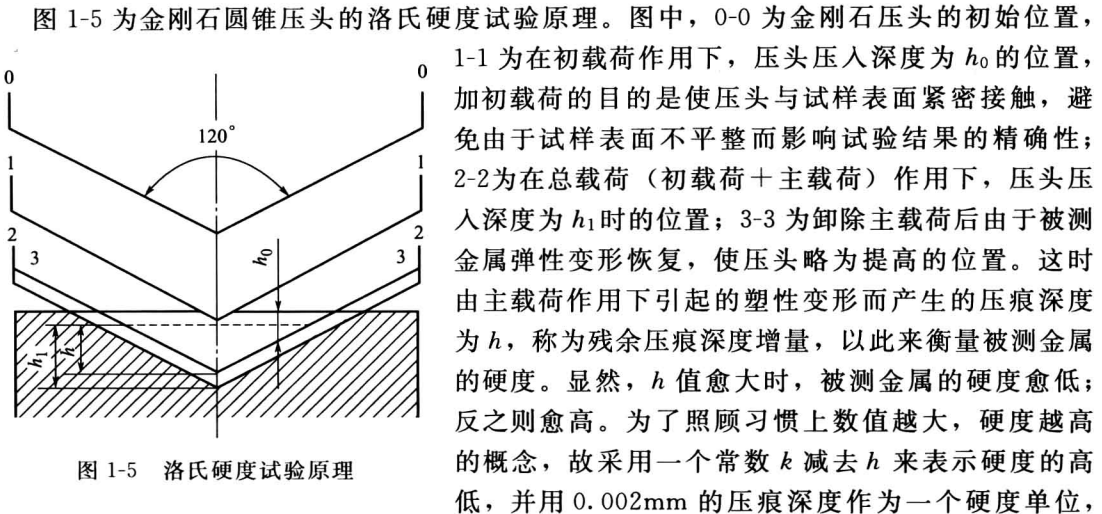


图 1-5 洛氏硬度试验原理

由此获得被测材料的洛氏硬度值，即

$$\text{HR} = \frac{k-h}{0.002}$$

式中， $k$  为常数，压头为金刚石时， $k=0.2\text{mm}$ ；压头为淬火钢球时， $k=0.26\text{mm}$ 。

为了能用同一硬度测试原理测量从极软到极硬材料的硬度，可采用不同的压头和载荷，组成几种不同的洛氏硬度标尺，其中常用的是 A、B、C 三种标尺。表 1-2 为这三种标尺的试验条件和应用范围。

表 1-2 常用洛氏硬度标尺的试验条件和应用范围

标尺	硬度符号	所用压头	总载荷/N(kgf)	硬度值有效范围	应用范围
A	HRA	金刚石圆锥	588.4(60)	70~88	硬质合金、碳化物、浅表面硬化钢
B	HRB	$\phi 1.588$ 淬火钢球	980.7(100)	20~100	热轧钢、退火钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥	1471(150)	20~70	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

洛氏硬度值为一无名数，根据 GB/T 230—1991 规定，硬度数值写在符号 HR 的前面，HR 后面为使用的标尺，如  $60\text{HRC}$  表示用“C”标尺测定的洛氏硬度值为 60。在试验时，洛氏硬度值均由硬度计的刻度盘上直接读出。

洛氏硬度试验是目前生产中应用最为广泛的一种硬度测试方法。其特点是：硬度试验压痕小，对试样表面损伤小，常用来直接检验成品或半成品零件的硬度；试验操作迅速、简便，可以从试验机上直接读出硬度值；当采用不同标尺时，可测量出从极软到极硬材料的硬度。其缺点是由于压痕小，对内部组织和硬度不均匀的材料，所测结果不够准确。因此，在进行洛氏硬度测试时应在被测金属的不同位置测出三点以上的硬度值，再计算其平均值。

### 三、维氏硬度

维氏硬度的测试原理与布氏硬度相同，不同的是维氏硬度采用的是一个对面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥压头，在测试硬度时以规定的载荷  $F$  压入被测金属表面，保持一定时间后卸除载荷，则被测金属表面上会压出一个正四棱锥形的压痕，测量压痕投影的两对角线的平均长度  $d$ ，从而计算出压痕的表面积  $A$ ，如图 1-6 所示。用单位压痕面积上所承受的平均压力作为被测金属的维氏硬度值，维氏硬度值可用下式计算

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中  $F$ ——载荷，kgf；

$d$ ——压痕两条对角线长度算术平均值，mm。

与布氏硬度标注一样，也是只写出硬度数值而不标出单位。在硬度符号 HV 之前的数字为硬度值，HV 后面的数值依次表示载荷和载荷保持的时间（保持时间为 10~15s 时不标注）。如：650HV30 表示在 30kgf 载荷作用下，保持 10~15s 测得的维氏硬度值为 650；800HV30/20 表示在 30kgf 载荷作用下，保持 20s 测得的维氏硬度值为 800。

维氏硬度适用范围广，从极软到极硬的材料都可以进行测量，且连续性好，可测量较薄或表面硬度值较大的材料硬度。尤其适用于零件表层硬度的测量，如化学热处理的渗层硬度测量。但维氏硬度测试时对试样表面质量要求较高，测试过程比较麻烦，效率较低，没有洛氏硬度方便，因此不适用于生产现场的常规检验，且因所施加的试验载荷小，压入深度较浅，所测数据精确度不高。

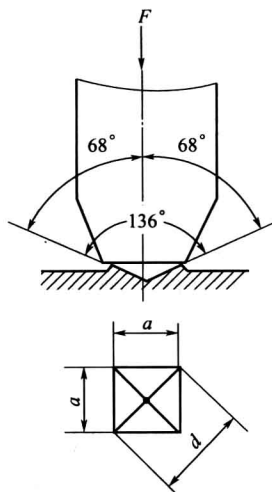


图 1-6 维氏硬度试验原理图

## 第三节 冲击韧性与疲劳强度

强度、塑性、硬度等力学性能指标都是在静载荷的作用下测定的，但实际上使用的大多数零件和工具在工作过程中往往受到的是冲击力或变动载荷的作用，如锻锤的锤杆、冲床的冲头等，这些工件除要求强度、塑性、硬度外，还必须具有足够抵抗冲击载荷和变动载荷的能力，即需要材料具有足够高的韧性。

### 一、冲击韧性

冲击韧性是指金属材料抵抗冲击力而不破坏的能力。为了评定金属材料的冲击韧性，需进行一次冲击试验。一次冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的，为了使试验结果能进行相互比较，需要将金属按 GB/T 229—1994 规定加工成图 1-7 所示的夏比 U 形缺口

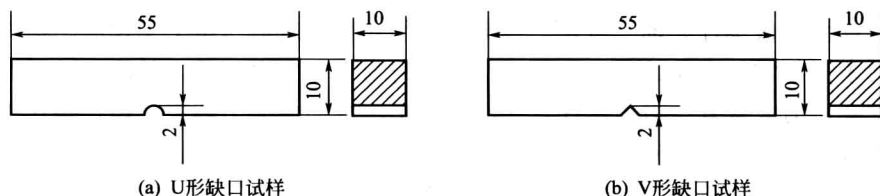


图 1-7 冲击试样



试样和夏比 V 形缺口试样两种。

试验时将冲击试样放在试验机两支座 1 处，使质量为  $m$  的摆锤自高度  $h_1$  自由落下，冲断试样后摆锤升高到  $h_2$  高度（见图 1-8），则摆锤在冲断试样过程中所消耗的能量即为试样在一次冲击力作用下折断时所吸收的功，称为冲击功，用符号  $A_K$  表示，即

$$A_K = mg(h_1 - h_2)$$

根据两种试样缺口形状不同，冲击功分别用  $A_{KU}$  和  $A_{KV}$  表示，单位为焦耳（J）。冲击功不需计算，可由冲击试验机的刻度盘上直接读出。

试样缺口处单位截面积所吸收的冲击功，称为冲击韧度，用符号  $a_K$  表示，单位为  $J/cm^2$ ，即

$$a_K = \frac{A_K}{A}$$

式中  $A$ ——试样缺口处的截面积， $cm^2$ 。

冲击功愈大，材料的韧性愈好。一般把冲击功低的金属材料称为脆性材料，冲击功高的称为韧性材料。脆性材料在断裂前无明显的塑性变形，断口较平整、呈晶状或瓷状，有金属光泽；韧性材料在断裂前有明显的塑性变形，断口呈纤维状，无光泽。

冲击功  $A_K$  的大小与试验温度有关。有些材料在室温（ $20^\circ C$ ）左右试验时不显示脆性，而在较低温度下可能发生脆性断裂，从图 1-9 可以看出，在某一温度处，冲击功会急剧下降，金属材料由韧性断裂转变为脆性断裂，这一温度区域称为韧脆转变温度。材料的韧脆转变温度越低，材料的低温抗冲击性能越好。

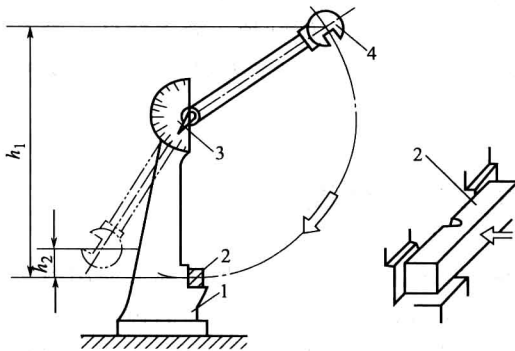


图 1-8 冲击试验原理

1—固定支座；2—带缺口的试样；3—指针；4—摆锤

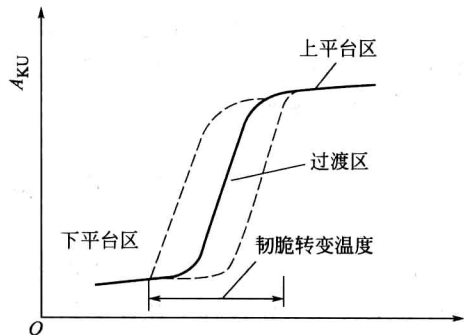


图 1-9 冲击吸收功-温度曲线

冲击功的高低还与试样形状、尺寸、表面粗糙度、内部组织和缺陷有关，因此，冲击功一般作为选材的参考，而不能直接用于强度计算。

## 二、疲劳强度

### 1. 疲劳现象

工程上许多机械零件如轴、齿轮、弹簧等都是 在变动载荷作用下工作的。根据变动载荷的作用方式不同，零件承受的应力可分为交变应力与重复应力两种，如图 1-10 所示。

承受交变应力或重复应力的零件，在经过一定次数的应力循环后，往往会在工作应力低于其屈服强度的情况下突然发生断裂，这种现象称为疲劳断裂。

疲劳断裂与在静载荷作用下的断裂不同，不管是脆性材料还是韧性材料，疲劳断裂都是突然发生的，事先均无明显的塑性变形的预兆，很难事先觉察，因此具有很大的危险性。据