

高等工科院校适用

# 工程材料及 成形工艺基础

杨慧智 主编

KE YUANXIAO SHIYONG



机械工业出版社

TB3  
Y17

高等工科院校适用

# 工程材料及成形工艺基础

主 编 杨慧智  
副主编 李方才 吴海宏 卢志文  
参 编 赵 华 张高君 孙爱芳  
        黄红富 王林鸿 史光远  
主 审 李风云



机械工业出版社

本书内容共分十三章。第一章为材料的力学行为和性能,介绍材料在载荷作用下产生变形和断裂的普遍规律及作为结构材料应用时所涉及的主要力学性能指标的意义和测试方法;第二章至第四章为工程材料的理论基础内容,包括材料的结构、凝固及合金相图;第五章介绍材料的强化、改性及表面技术的应用;第六章至第八章介绍各类常用工程材料,包括以钢铁材料为主的金属材料以及高分子材料、陶瓷材料等非金属材料 and 复合材料;第九章至第十二章介绍工程材料最重要的几类成形工艺,包括金属的铸造、塑性变形加工、焊接或粘接,以及非金属材料的成型工艺;第十三章介绍机械零件用材料及成形工艺选择的知识和方法。全书内容以“大工程材料”为视野,突出技术应用,适应教学改革的要求。

本书可作为高等工科院校机械类各专业或专业方向的教材,也可供成人高校教学及有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成形工艺基础/杨慧智主编. —北京:机械工业出版社, 1999. 2  
高等工科院校适用  
ISBN 7-111-06963-3

I. 工… I. 杨… III. 工程材料-高等学校-教材 IV. T  
B3-43

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第02643号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑: 王海峰 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张莉娟  
封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1999年2月第1版第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·17.25印张·421千字  
0 001—5500册  
定价: 23.50元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

## 前 言

本书是依据原国家教委高教司关于高等工程专科学校专业教学改革的基本指导思想和原则，从高等工程专科机械类专业教学的基本要求出发，结合各参编学校对工程材料及成形工艺课程进行长期教学改革的研究与实践，吸收兄弟院校专业教学改革的成功经验，在机械工业出版社教材编辑室的指导和支持下编写的，是配合机制类专业教学改革的系列教材之一。

本书以有关材料科学技术及其成形工艺“必需、够用”的基本理论知识为基础，以包括金属材料、非金属材料及复合材料在内的“大工程材料”为视野，紧紧围绕结构工程材料的选用及成形工艺技术的应用，注意吸纳有关新材料及材料强化、成形新工艺、新技术的内容，建立了新的内容体系。

全书共分十三章。其中第一、二、三、四章基本属于工程材料的基本知识与基础理论的内容，包括材料的力学行为及性能、材料的结构、凝固及合金相图，旨在为读者建立材料的成分（组分）、结构（组织）、性能（行为）、加工（使用）之间密切关系的概念奠定够用的基础。第五章介绍材料的强化、改性和表面技术的应用，除了重点介绍应用最为广泛的钢铁材料的热处理之外，还包括了金属材料的时效强化、高分子材料与陶瓷材料的改性及材料表面技术的应用。第六、七、八章介绍各类常用工程材料的成分、结构、性能特点及应用，包括工业用钢及铸铁、非铁金属及合金、非金属材料三部分。第九、十、十一、十二章介绍工程材料最重要的几种类型的成形工艺方法，包括金属的铸造、压力加工、焊接与粘接及非金属材料的成型。第十三章介绍机械零件用材及成形工艺方法的选择。通过这部分内容的教学，旨在使读者掌握机械零件材料选用及成形工艺选择的基本方法、基本原则和思路；通过综合应用本书各部分内容于工程技术的实际问题，达到对所学知识融会贯通并落实于工程技术应用能力培养的目的。

本书由郑州工业高等专科学校杨慧智任主编，李方才、吴海宏、卢志文任副主编。参加编写人员为：杨慧智（绪论、第一章、第四章）、李方才（第十三章）、吴海宏（第五章）、卢志文（第十二章）、赵华（第二章第一、二节，第七章）、张鬲君（第二章第三节、第三章、第八章）、孙爱芳（第六章）、黄红富（第九章）、王林鸿（第十章）、史光远（第十一章）。

全书由郑州工业高等专科学校李风云教授担任主审。西安理工大学马泗春教授、郑州工业大学王延久教授、郑州工业高等专科学校王秦生教授均认真审阅了书稿并参加了审稿会，对教材提出了宝贵的意见和建议。在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，且高等工程专科的专业教学改革及教学内容、课程体系的改革仍在全体同仁的积极研究和探索之中，所以，作为一本改革教材将有一个不断完善和改进的过程。在此，恳请各兄弟院校的同仁及读者批评指正，不吝赐教。

编者

1998年7月

# 目 录

前言		
绪论	1	
<b>第一章 材料的力学行为和性能</b>	<b>5</b>	
第一节 材料在载荷作用下的力学行为	5	
第二节 材料的静态力学性能	6	
第三节 材料的动态力学性能	13	
第四节 断裂韧性	14	
第五节 材料的高、低温力学性能	17	
<b>第二章 材料的结构</b>	<b>19</b>	
第一节 结合键	19	
第二节 材料的晶体结构与非晶体结构	20	
第三节 材料的同素异构与同分异构	32	
<b>第三章 凝固</b>	<b>34</b>	
第一节 概述	34	
第二节 金属的结晶	35	
<b>第四章 二元合金相图</b>	<b>39</b>	
第一节 合金的结晶——二元合金相图	39	
第二节 铁碳合金相图	42	
第三节 合金相图的应用	48	
<b>第五章 材料的强化、改性及表面技术</b>	<b>50</b>	
第一节 钢的热处理	50	
第二节 非铁合金的时效强化	65	
第三节 高聚物的改性强化	66	
第四节 材料的复合强化	69	
第五节 材料的表面处理技术	69	
<b>第六章 工业用钢及铸铁</b>	<b>73</b>	
第一节 钢中常存元素与合金元素	73	
第二节 钢的分类与编号	76	
第三节 结构钢	78	
第四节 工具钢	92	
第五节 不锈钢、耐热钢及耐磨钢	98	
第六节 铸铁	101	
<b>第七章 非铁合金及粉末冶金材料</b>	<b>110</b>	
第一节 铝及其合金	110	
第二节 铜及其合金	114	
第三节 轴承合金	117	
第四节 钛及其合金	119	
第五节 粉末冶金	120	
<b>第八章 非金属材料</b>	<b>123</b>	
第一节 高分子材料	123	
第二节 陶瓷材料	134	
第三节 复合材料	139	
<b>第九章 铸造</b>	<b>147</b>	
第一节 铸造工艺基础	147	
第二节 砂型铸造	152	
第三节 铸件结构设计	159	
第四节 特种铸造	164	
第五节 常用合金铸件的生产	170	
<b>第十章 压力加工</b>	<b>174</b>	
第一节 压力加工的基本生产方式	174	
第二节 金属的塑性变形	176	
第三节 自由锻	180	
第四节 锤上模锻	183	
第五节 板料冲压	190	
第六节 其它压力加工方法	196	
<b>第十一章 焊接与粘接</b>	<b>199</b>	
第一节 熔焊过程与焊接质量	199	
第二节 常用焊接方法	205	
第三节 常用金属材料的焊接	210	
第四节 焊接结构设计	214	
第五节 特种焊接	219	
第六节 粘接简介	222	
<b>第十二章 非金属材料的成型</b>	<b>226</b>	
第一节 工程塑料成型	226	
第二节 塑料制品的结构要素与设计原则	231	

第三节	橡胶成型 .....	238	第二节	零件的失效分析 .....	249
第四节	陶瓷成型 .....	239	第三节	材料及成形工艺选择的步骤、 方法及依据 .....	256
第五节	复合材料成型 .....	240	第四节	典型零件的材料及成形工艺 选择 .....	265
<b>第十三章</b>	<b>机械零件用材料及成形工 艺的选择</b> .....	<b>245</b>	<b>参考文献</b> .....	<b>270</b>	
第一节	材料及成形工艺选择的基本 原则 .....	246			

# 绪 论

## 一、工程材料与成形工艺的技术经济地位

材料是人类生产和社会发展的重要物质基础，也是我们日常生活中不可分割的一个组成部分，并与食物、居住空间、能源和信息共同组成人类的基本资源。材料与人类文明的关系是如此密切，以至于它们在人类文明史上曾作为时代的标志，如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。材料对现代社会、经济、技术的影响是如此巨大，所以自本世纪 70 年代以来，人们又把材料与能源、信息并列为现代技术和现代文明的三大支柱。

材料的作用是与材料的加工和使用紧密联系在一起。材料只有经过各种加工，包括材料的制取、改性、成形、连接等，最终形成产品，才能体现其功能和价值。加工工艺技术的突破往往成为新产品能否问世，新技术能否产生的关键。新材料、新工艺、新技术常常是一体的。

为了便于读者更好地理解材料及其成形工艺的有关概念，对其加以概括地介绍是必要的。

所谓材料，是指那些能够用于制造结构、器件或其它有用产品的物质，例如：金属、陶瓷、聚合物、半导体、超导体、介电材料、木材、沙石、复合材料等。由于它们多用于工业、工程领域，故亦称工程材料。广义地讲，食物、药物、生物物质、肥料、矿物燃料、水、空气等都是材料，它们是以消耗自身而完成其功能的，故人们习惯把它们列入生物、生命、农业等领域。

工程材料根据其组成与结构特点，可分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料；根据材料的性能特征，可分为结构材料和功能材料；还可以根据材料的用途分为建筑材料、能源材料、机械工程材料、电子工程材料等。结构材料是以力学性能为主的工程材料的统称，主要用于制造工程建筑中的构件、机械装备中支撑件、连接件、运动件、传动件、紧固件、弹性件及工具、模具等。这些结构零件都是在受力状态下工作，因此力学性能（强度、硬度、塑性、韧性等）是其主要性能指标。功能材料是指以物理性能为主的工程材料，即指在电、磁、声、光、热等方面有特殊性能或在其作用下表现出特殊功能的材料，例如磁性材料、电子材料、信息记录材料、敏感材料、能源材料、生物技术材料等。每一种功能材料都以一定的科学原理为基础，其物理性能往往取决于材料内的电子状态或原子核的结构，因此与材料科学和近代物理有密切的关系。与结构材料不同，功能材料常用于制造各种设备中具有特殊功能的核心部件，起着十分重要的作用，特别是在高新技术领域占有十分重要的地位。

材料的加工主要指材料的成形加工及强化、改性和表面技术的应用等。材料的成形加工应包括如切削加工、铸造、塑性变形、焊接或粘接、粉末冶金、烧结成形等各类将材料（或原料）加工成具有一定形状和尺寸的制品的工艺方法。基于培养目标和课程分工的要求，本教材没有把切削加工包括在成形工艺中。按现代的概念，切削加工是指所有通过去除一部分材料的技术以精确地使工件成形的加工方法，这方面的内容将在其它有关课程中介绍和讨论。材料的强化和改性是挖掘材料性能的潜力和充分发挥材料效能的主要手段，也常成为产品质

量的关键，因而其应用越来越广泛。同时，材料的强化和改性技术也就成为材料使用与加工领域非常引人注目和具有活力的科学技术课题。所谓表面技术，是指通过施加覆盖层或改变表面形貌、化学组分、相组成、微观结构、缺陷状态，达到提高材料抵御环境作用能力或赋予材料表面某种功能特性的材料工艺技术。由于表面技术可以在不改变材料基本组成、工艺前提下，用较少的经费，大幅度地提高材料的性能，取得显著的经济效益，因此，它在国民经济中的地位越来越重要，发展十分迅速。

其实，工程材料及其加工技术的地位和作用，早已超出了技术经济的范畴，而与整个人类社会有密不可分的关系。高新技术的发展、资源和能源的有效利用、通信技术的进步、工业产品质量和环境保护的改善、人民生活水平的提高等都与材料及其加工密切相关。从材料的设计、制备、加工、检测到器件（零件、部件、装备）的制造、使用，直到回收利用，已经形成了一个巨大的社会大循环。这一循环的概念揭示了材料、能源和环境之间的强烈的交互作用。这种作用之所以显得越来越重要，是因为人类在关注经济发展的同时，也不得不面对材料和能源等资源的短缺，以及人类生存环境的破坏和恶化，因此，把自然资源和人类需要、社会发展和人类生存联系在一起的材料循环，必然要引起全社会的高度重视。

在材料的生产和使用方面，我们中华民族有过辉煌的成就，为人类文明做出了巨大的贡献。直到 17 世纪，我国在这方面一直处于世界领先地位。我们的祖先在原始社会末期就开始使用和制作陶器，之后又发展为制作和使用瓷器，对世界文明的发展产生了很大的影响。早在 4000 年以前，我们的祖先已开始生产和使用铜器，到商代已经有了高度发达的青铜冶炼和铸造技术，从河南安阳商代遗址出土的司母戊鼎提供了有力的证明。我国春秋战国时期关于青铜“六齐”的叙述，反映出我们的祖先对青铜的性能和成分之间的关系有了较科学的认识和总结。我国从春秋战国时期开始大量使用铁器，比欧洲早 1800 多年。明代科学家宋应星所著《天工开物》是世界上最早的有关金属加工工艺的科学著作之一。新中国成立之后，特别是改革开放以来的 20 多年来，我国在国民经济的各个领域都取得了令世人瞩目的成就，其中有很多都与工程材料及其加工技术的发展有着密切的关系。

## 二、本教材的内容体系及特点

本书是作为一本教材来编写的。教材主要是为课程教学服务的。所以，教材是课程教学的内容、教学思维方式乃至教学改革方案的载体之一。据此，本教材的内容体系及特点与课程教学的改革和要求密切相关，与我们后面谈到的本课程在专业人才培养中的地位和作用密切相关。

本教材的内容体系是建立在材料科学基础之上，紧紧围绕材料的使用和加工这一主线构建和展开的。当然，基于培养目标和课程教学任务的要求，该内容体系中涉及的材料科学基础是以必需、够用为度的，突出了结构工程材料的选择、使用和加工等工程技术应用的内容。

材料是早已存在的名词，但“材料科学”的提出只是 20 世纪 60 年代的事。材料科学体系的建立，把材料的整体视为自然科学的一个分支，对材料的发展可以说是一次质变。它是科学技术发展的结果，是在人们对材料的制备、成分、结构、性能以及它们之间的关系越来越深入地研究的基础上建立的。它使在此前已经形成的金属材料、高分子材料、陶瓷材料各自的学科体系交叉融合，相互借鉴，加速了材料和材料科学的发展；克服了相互分割、自成体系的障碍，也促成了复合材料的发展。材料科学与工程技术的关系非常密切，所以人们往往把材料科学和工程联系在一起，称之为“材料科学与工程”，又称之为“材料科学技术”。可



以说，材料科学技术就是有关材料成分、组织结构与加工工艺对材料性能与应用的影响规律的知识和技术。

本教材的特点之一，就是将各类工程材料作为一个整体，力图清晰地阐述材料的如下关系：成分、组分 $\leftrightarrow$ 制造、使用 $\leftrightarrow$ 组织、结构 $\leftrightarrow$ 性能、行为。

材料的强化及其改性与表面技术是挖掘材料潜力，发挥材料效能的重要技术措施，其应用的成功与否往往成为产品质量、功能的关键，其技术、经济上的意义是不言而喻的。所以，我们把这一部分内容作为材料科学技术的一个重要组成部分而在教材中予以加强，所包含的内容也不再仅仅是传统教材中的钢的热处理。可以说，这是本教材的第二个明显的特点。

在结构工程材料中，金属材料曾经而且仍在发挥非常重要的作用，而高分子材料、陶瓷材料和复合材料等的发展更显得迅猛，应用日趋广泛，作用也更令人瞩目。作为本教材内容体系的重要组成部分，对常用各种结构工程材料的介绍，我们力求做到详略适当，突出应用，结构合理，既统筹考虑，又突出重点。相信读者不会以其所占篇幅的大小来衡量各自的重要性。

如前所述，在本教材中所谓的成形工艺基础主要指金属的铸造、材料的塑性变形成形、以及材料的焊接及粘接。关于材料的切削加工，包括各种特种加工及装配等工艺技术的应用，在其它专业课或专业基础课中加以专门的介绍，这是人才培养方案和各课程科学分工的要求。

事实上，在很多情况下，材料的成形加工不仅是结构、零件或毛坯的制造工艺方法，也是最终获得具有一定组织结构和性能的材料制取方法。例如：通过热塑性成型的热固性塑料制件，通过粉末冶金生产的粉末冶金制品，通过烧结成型的陶瓷产品，乃至通过铸造生产的金属铸件等。焊接结构的局部也是在焊接生产后具有一定的组织和性能的。所以，在这部分内容的处理上，我们一是注意贯穿材料科学的主线，二是注意吸纳新工艺、新技术的教学内容。强化、改性、表面技术及成形工艺的新技术、新工艺的内容构成本教材的第三个特点。

工程材料及其成形工艺的选择是一个非常复杂的问题，却又是我们培养的工程技术人员所必须解决的一个问题。所以使学生得到这方面的训练是本课程的主要任务之一，也是本教材一个重要的落脚点。

与有关的传统教材不同，我们着重充实和加强了这部分内容，并努力使读者在对前边各部分知识融会贯通的基础上，能够在综合分析和统筹考虑材料及成形工艺选择的问题上理清思路，掌握基本原则和方法。长期以来，将材料的选择与成形工艺的选择割裂开来的做法显然是不科学的，也不利于对学生工程技术应用能力的培养。因此，这部分内容也就成为本教材非常重要的特点。

### 三、本课程在机械类专业人才培养中的地位和作用

工程材料及成形工艺基础是机械类专业一门重要的技术基础课。

在机械工程领域，作为一名工程技术人员，无论其工作是侧重设计或是制造、运行、调试、维护等，都必然要面对工程材料的选择、加工、使用等问题并需要进行科学分析，予以全面的解决。

就设计而言，其过程包括确定产品及各种零部件的结构、候选材料和可能的制造方法在内的几种方案，并在预先确定的范围内将这些方案进行比较。在结构和以一定方法进行加工、处理的材料之间的关系方面，则每一种结构都要把一定的要求置于对材料的依赖上，即这些材料具有一定的性能来满足这些要求。但材料的性能不是一成不变的，它又取决于材料的组

织结构，凡改变组织结构的加工和使用过程，也必然改变材料的性能。各种加工工艺方法对不同的材料和结构有不同的适应性；反之，不同的结构和材料的零件又对不同的加工方法有不同的适应性。这样，结构的设计、材料的选择、加工工艺方法的选择就成了相互关联的综合性的技术问题，不可能把它们割裂开来，孤立地一个个加以解决，更何况还有经济的、社会的因素。

就加工制造而言，其过程常常是复杂的和漫长的。成形、连接、切削加工、特种加工、装配、检测、调试等，其间又可能穿插不同的强化、改性处理和表面技术应用等加工工序。合理选择不同的加工工艺方法并安排好工艺路线，成为使产品最终达到技术经济指标要求的重要因素之一。其中，工程材料的成形工艺，包括金属铸造、材料的塑性变形加工、材料的焊接与粘接等通常是零件制造过程中最基本的，并且对材料性能影响最大的加工工艺。

当然要达到上述要求，决非靠一门课程能够实现的，很多相关的知识的学习和能力培养还需要通过其它课程的学习来共同完成。综上所述，本课程的教学目标和要求可以归纳为：

(1) 以应用为目的，掌握必需的材料科学及有关成形技术的理论基础；在重点建立对材料成分、组织结构、加工使用、性能行为之间关系及规律的认识的同时，也为以后进一步学习各种新材料提供一定的基础。

(2) 熟悉各类常用结构工程材料，包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料的成分、结构、性能、应用特点及牌号表示方法；了解新型材料的发展及应用；了解各类结构工程材料的强化、改性及表面技术的知识。

(3) 熟悉常用成形工艺方法的工艺特点及应用范围；了解成形新技术、新工艺的发展动态及应用；基本掌握机械设计中零件结构工艺性的要求。

(4) 掌握选择零件材料及成形工艺的基本原则和方法步骤，了解失效分析方法及其应用，综合应用本课程和相关课程的知识，强化综合训练，初步具备合理选择材料、成形工艺（毛坯类型）及强化（或改性、表面技术应用等）方法并正确安排工艺路线（工序位置）的能力。

本课程在理论与实践紧密结合方面具有突出特点，特别是实践性、应用性很强，一般应在基本工艺操作实习以后进行教学，并在教学过程中穿插必要的工厂参观实习。为强化综合训练，在教学过程中安排相应的课程设计及大型作业等也是必要的。

# 第一章 材料的力学行为和性能

材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能又分为物理性能、化学性能和力学性能。物理性能包括材料的密度、熔点、热膨胀性、导电性、导热性及磁性等。化学性能是指材料在不同条件下抵抗各种化学作用的性能，如化学稳定性、抗氧化性、耐腐蚀性等。力学性能是指材料在力的作用下表现出来的各种性能，主要是弹性、塑性和强度，它们是通过规定条件下的标准实验来测定的。工艺性能是指材料对某种加工工艺的适应性，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理工艺性和切削加工性等。

工程构件、机械零件在使用过程中的主要功能是传递各种力和能，承受各种力的作用。因此，在进行各种工艺设计、选材和工艺评定时，工程上最关心的是材料在受力时的行为，其主要判据是材料的力学性能。材料的力学性能是本章讨论的主要内容。至于材料的工艺性能将在有关强化和成形工艺等章节中讨论。

## 第一节 材料在载荷作用下的力学行为

### 一、弹性变形、塑性变形和断裂的普遍性

材料在载荷（外力）作用下的表现（反应），人们习惯称之为力学行为。当外力作用在固体物质上时，随外力增加，物体会逐渐改变其原始形状和尺寸而发生变形；外力增加到一定数值后，物体发生断裂而被破坏成几个部分。所以，变形和断裂是固体物质承受外力作用时随外力增加所必然产生的普遍现象。

当物体所受外力不大而变形处于开始阶段时，若去除外力，物体发生的变形会完全消失，并恢复到原始状态，这种变形称为弹性变形。弹性变形的物理本质是晶体材料（如金属）中的原子（或离子）在外力的作用下偏离其平衡位置建立新的平衡，但去除外力后又立即恢复到原来的平衡位置，宏观变形因而消失。因此，弹性变形是晶体材料所独具的特点，非晶体材料则无确切的弹性变形性质。

当外力增加到一定数值后再去除时，物体发生的变形不能完全消失而一部分被保留下来，这时材料进入塑性变形阶段，所保留的变形称为塑性变形或残余变形。塑性变形的物理本质因不同材料和外力等条件而异，这里不作讨论。但都是由于微观上材料内部各部分产生较大的相对位移而表现出的宏观现象。

当塑性变形进行到一定程度时，材料内部出现裂纹。在外力作用下裂纹以某种形式扩展，最终会导致断裂。断裂前出现明显宏观塑性变形的断裂称为韧性断裂；反之，在断裂前没有宏观塑性变形的断裂行为称为脆性断裂。韧性断裂和脆性断裂的概念是相对的。

综上所述，对所有工程材料而言，在外力作用下随外力增加而变形和断裂是普遍规律；而对金属等晶体材料而言，该过程总是由弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段组成的。

### 二、材料的服役条件及应力与应变的概念

工程材料制成的零件或构件，总是在一定的服役条件下工作，并表现出一定的力学行为。

所谓服役条件，是指温度、介质环境、加载速率和载荷作用方式等。

多数零部件是在常温下工作。若是在高、低温下工作，就需要认真考虑材料在高、低温下的特殊力学行为，涉及材料的高、低温性能。至于介质环境的影响，除特殊情况涉及电场、磁场、辐射等影响因素外，一般情况下人们主要是关心腐蚀介质对材料力学行为的影响，即外力和腐蚀的共同作用。由于零件在使用的过程中主要承担传递力和能的作用，承受力的作用，所以在服役条件中载荷更加引人注目并需要给予更多的分析讨论。

按照施加载荷的速率，可将载荷分为静载荷和动载荷。静载荷是指加载方式不影响材料的变形行为，加载速率较为缓慢的载荷；动载荷则是指突加的、冲击性的及大小、方向随时间而变化的载荷。动载荷主要有冲击载荷和交变载荷两种类型。所谓载荷作用方式，即加载方式，主要指拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切等不同的作用方式。在这些不同的加载方式的作用下，材料会产生不同的力学行为，即不同的变形和断裂过程与方式。实际零、构件的受载方式往往是复杂的，不像用试样进行测试时仅仅是拉伸、压缩、扭转等，而常常是几种加载方式的复合。

材料在外力的作用下，其内部就会产生相应的作用力以抵抗变形，并在整体上与外力达到平衡。这种作用力称为内力。实践证明，材料抵抗变形和破坏的能力与材料内部单位面积上分布的内力有密切的关系，这些分布在单位面积上的内力称为应力。

下面我们以对一截面沿轴向处处均匀、相等的杆件施加轴向拉伸载荷的情况为例，来说明应力的概念并引入应变的概念。

如图 1-1 所示，在一长度为  $l_0$ ，直径为  $d_0$  的杆件两端沿轴向施加大小相等、方向相反的外力  $F$ ，杆件在外力  $F$  的作用下产生轴向伸长，伸长量为  $\Delta l$ 。

杆件在拉伸时，由于截面积不断减小，因此，杆件中的应力应以杆件瞬时直径  $d_1$  所对应的横截面积  $S_1$  来计算，即

$$\sigma = F/S_1 \quad (1-1)$$

式中， $\sigma$  为真实应力。

在工程中常用杆件的原始横截面积  $S_0$  来计算应力，这种应力称为工程应力，即

$$\sigma = F/S_0 \quad (1-2)$$

杆件在力  $F$  作用下产生的伸长量不仅与力  $F$  的大小有关，还与杆件长度  $l_0$  有关。为了说明材料在拉伸过程中的变形程度，常用单位长度的伸长量来表示，这种单位长度的伸长量称为应变，即

$$\varepsilon = \Delta l/l_0 \quad (1-3)$$

由于上述是用杆件的原始长度  $l_0$  来计算的应变，故也称工程应变。

按国际单位，应力的单位常用 MPa（兆帕）表示， $1\text{MPa} = 1\text{MN}/\text{m}^2 = 1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

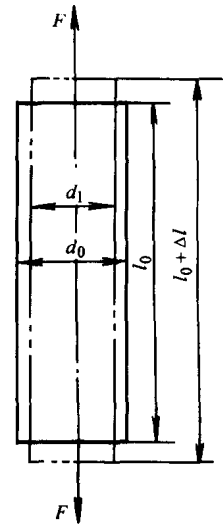


图 1-1 杆件轴向拉伸示意图

## 第二节 材料的静态力学性能

材料在外力作用下的力学行为由温度、介质环境、加载速率、加载方式等外界条件及材料自身的力学性能等内在因素所决定。评定材料的力学性能的各项指标是依据国家标准通过

力学性能实验测定的，即材料在规定的一系列强加条件下力学行为的反映。在材料力学性能的测试过程中，随着力学参量（如 $\sigma$ 、 $\epsilon$ ）的增加，当达到某一临界值或规定值时，材料的力学行为发生突变（如屈服、断裂），人们常常将表征材料力学行为的力学参量的临界值作为材料的力学性能指标。

### 一、静拉伸实验及材料的强度与塑性

如不加特别说明，静拉伸实验是指在室温大气环境中，光滑试样在静载荷作用下，测定材料力学性能的方法。静拉伸实验是应用最为广泛的最基本的力学性能实验方法，可以测定材料的弹性、强度、塑性等许多重要力学性能指标，并可以通过这些性能指标预测材料的其它力学性能，如抗疲劳和抗断裂的性能等。

按 GB6397—86 的规定，标准拉伸试样可制成圆形试样和板形试样两种，如图 1-2 所示。原材料为板材或带材时一般应用板形试样；其它情况下，由于圆形试样夹紧时易于对中，故应优先使用。圆形试样有长试样和短试样两种。长试样  $l_0 = 10d_0$ ，短试样  $l_0 = 5d_0$ 。（ $l_0$  为试样标距， $d_0$  为试样直径）。

在拉伸实验过程中，通过自动记录或绘图装置得到的表示试样所受载荷  $F$  和伸长量  $\Delta l$  的关系曲线称为拉伸曲线；若经数学计算，可得到表示试样所受应力  $\sigma$  和应变  $\epsilon$  的关系曲线，称为应力-应变曲线。图 1-3 中 a、b 所示分别为低碳钢试样的拉伸曲线和应力-应变曲线。

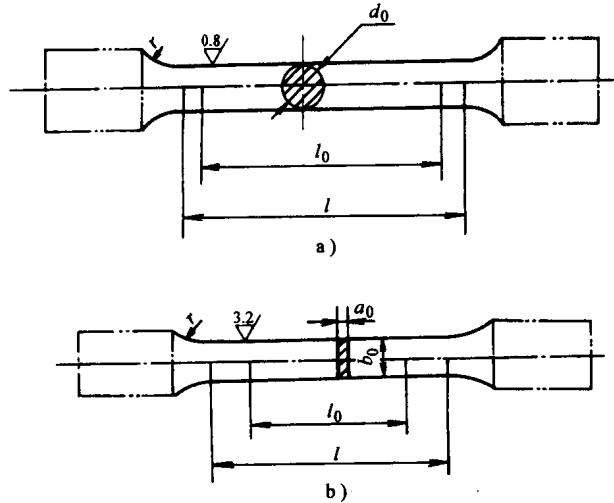


图 1-2 拉伸试样

a) 圆形 b) 板形

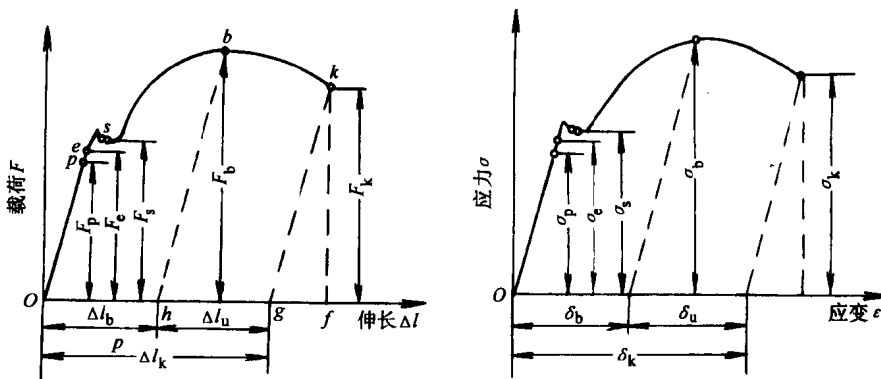


图 1-3 低碳钢试样的拉伸曲线图 a) 和应力-应变曲线图 b)

由图 1-3 可知，在载荷较小的  $Oe$  段，试样的伸长量随载荷增加而增加，外力去除后试样恢复原状，故  $Oe$  段为弹性变形阶段。超过  $e$  点后，试样进入弹性-塑性变形阶段，在这一阶段若去除外力，试样不能完全恢复原状。当载荷（应力）增加到  $F_s$ （ $\sigma_s$ ）时，拉伸曲线（应力-

应变曲线)在 $s$ 点后出现近于水平阶段,表示载荷不变时,试样仍明显继续伸长,这种现象称为屈服。屈服现象之后,试样又随载荷的增加而伸长,产生比较均匀的塑性变形,称为均匀塑性变形阶段;由于较大的塑性变形伴随着形变强化现象,故又称强化阶段。当载荷(应力)增加到 $F_b$ ( $\sigma_b$ )时,试样出现局部变细的缩颈现象。之后,所需载荷逐渐减小(由于缩颈处直径明显减小,所以真实应力还是增加),变形主要集中于缩颈处。当载荷(应力)达到 $F_k$ ( $\sigma_k$ )时,试样在缩颈处断裂。

材料因成分和组织结构不同,在相同的标准实验条件下会显示出不同的应力-应变特征。图1-4列出了与低碳钢试样不同的典型的应力-应变曲线。

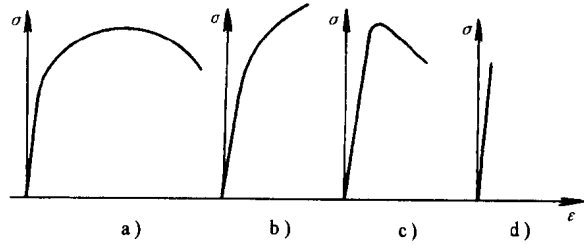


图1-4 几种典型的应力-应变曲线

如图1-4a所示,非铁金属、冷变形钢、淬火回火钢等材料,在拉伸断裂前不仅产生大量的均匀塑性变形,而且产生缩颈现象。

与低碳钢应力-应变曲线不同的是,并不具有明显的屈服阶段。这类材料与低碳钢同属高塑性材料。如图1-4b所示,若在拉伸断裂前只发生均匀伸长,或弹性变形后只有缩颈处集中的塑性变形,且塑性变形量很小,则这类材料可认为是低塑性材料;高锰钢、铝青铜等材料的应力-应变曲线均属此类。这类材料经弹性变形、小量均匀塑性变形后断裂。图1-4c所示为冷拔钢丝等经强烈变形强化的材料的应力-应变曲线,这类材料经弹性变形及缩颈处的小量塑性变形后断裂。在断裂前不发生塑性变形的材料可以认为是脆性材料;如图1-4d所示为这类材料的应力-应变曲线,玻璃、陶瓷、淬火高碳钢及一些处于低温下的金属均属这类材料。

静拉伸实验条件下材料的主要力学性能指标有以下几个(参看图1-3):

### 1. 弹性极限 $\sigma_e$ 和弹性模量 $E$

在弹性变形阶段, $e$ 点对应了弹性变形阶段的极限值,称为弹性极限,以 $\sigma_e$ 表示。对一些弹性元件如精密弹簧等, $\sigma_e$ 是主要的性能指标。

材料在弹性变形阶段内,应力与应变的比值表征了材料抵抗弹性变形的能力,其数值大小反映材料弹性变形的难易程度,相当于使材料产生单位弹性应变所需的应力,称为弹性模量,以 $E$ 表示,即

$$E = \sigma / \epsilon \quad (1-4)$$

在工程上,零件或构件抵抗弹性变形的能力称为刚度。显而易见,在零件的结构、尺寸已确定的前提下,其刚度决定于材料的弹性模量。

弹性模量主要取决于材料内部原子间的作用力,如晶体材料的晶格类型、原子间距,其它强化手段对弹性模量的影响极小。大部分机械零件和工程构件都在弹性状态下工作,对刚度有一定的要求,即工作时不允许产生过量的弹性变形。

### 2. 屈服点 $\sigma_s$ 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$

在屈服阶段,材料产生屈服现象时的应力称为屈服点,以 $\sigma_s$ 表示。屈服点标志着材料对起始塑性变形的抗力,是工程技术上最重要的力学性能指标之一。一般机械零件或工程构件在使用中不允许产生过量的塑性变形,因而在设计和选材时常以 $\sigma_s$ 为依据。

很多材料在拉伸过程中没有明显的拉伸平台,按照GB228—87中的工程定义,在工程上常采用“规定微量塑性伸长应力”,简称为“规定伸长应力”,用以表征材料对微量塑性变形

的抗力指标,反映材料抗屈服的性能。例如,规定残余伸长率为0.2%时的应力以 $\sigma_{0.2}$ 来表示,又称为屈服强度。

### 3. 抗拉强度 $\sigma_b$

在塑性变性阶段中,曲线的最高点**b**所对应的应力 $\sigma_b$ ,标志着材料在断裂前所能承受的最大应力,称为抗拉强度。 $\sigma_b$ 在工程技术上也是一个重要的力学性能指标,可用于零件的设计和选材。

### 4. 断后伸长率 $\sigma$ 和断面收缩率 $\psi$

试样拉断后,标距的伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,以 $\delta$ 表示。 $\delta$ 是材料常数,是材料的一种塑性指标。伸长率越高,材料塑性越好。它实际上是断裂时的工程应变。

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,以 $\psi$ 表示。 $\psi$ 也是材料常数,是材料塑性指标之一。 $\psi$ 越高,材料的塑性越好。

$$\delta = [(l_1 - l_0) / l_0] \times 100\% \quad (1-5)$$

$$\psi = [(S_0 - S_1) / S_0] \times 100\% \quad (1-6)$$

式中  $l_0$ ——试样的原始标距;

$l_1$ ——试样拉断后标距;

$S_0$ ——试样原始横截面积;

$S_1$ ——试样断裂处的横截面积。

塑性指标在工程技术中具有重要的意义。良好的塑性可使材料顺利地实现成形,还可在一定程度上保证零件或构件的安全性。一般 $\delta$ 达5%, $\psi$ 达10%即可满足绝大多数零构件的使用要求。

很多零件或构件是在扭矩、弯矩或轴向压力的作用下服役。此时零、构件的力学状态是与静拉伸条件不同的,特别是对高碳钢、铸造合金及结构陶瓷等脆性材料,若不充分考虑服役条件、力学状态等因素,简单地采用静拉伸条件下测定的力学性能指标来评价和使用材料,很有可能造成零、构件的早期失效。因此,需通过扭转实验、弯曲实验、剪切实验等方法来测定材料在扭转、弯曲、压缩等其它静载荷条件下的力学性能,对此,本教材不再介绍。

## 二、硬度

硬度是指材料的软硬程度,它表征了材料抵抗表面局部弹性变形、塑性变形及破坏的能力,即抵抗硬物压入或划伤的能力。硬度值的大小不仅取决于材料的成分和组织结构,而且还取决于测定方法和条件。用不同的方法测定的硬度具有不同的物理意义,所以并不存在统一的关于硬度的物理意义。由于硬度测试简便,造成表面损伤小,基本上属于无损检测的范围,可直接用于零件的测定,而且,硬度与其它性能指标之间有一定的经验关系,因而得到了广泛的应用。

测定硬度的方法很多,主要有压入法、刻划法、回跳法等。在机械制造中主要采用压入法。

常用的硬度测试方法有布氏硬度(HB),洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)等,均属压入法,即用一定的压力将压头压入材料表层,然后根据压力的大小,压痕面积或深度确定其硬度值的大小。

### 1. 布氏硬度(HB)

布氏硬度试验是用一定直径的钢球或硬质合金球，以相应的试验力压入试样表面，经规定保持时间后，卸除试验力，测量试样表面的压痕直径，如图 1-5 所示。

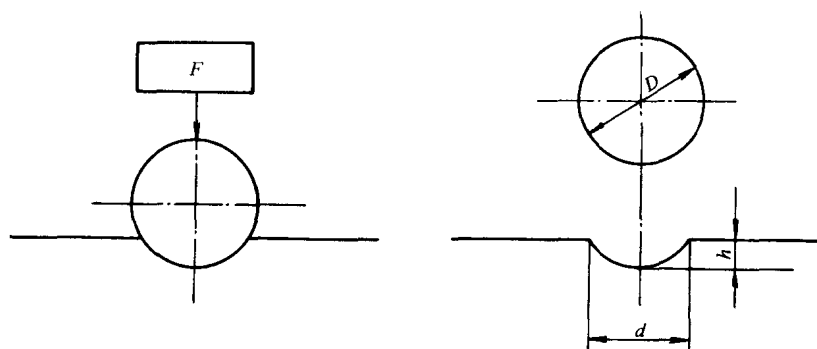


图 1-5 布氏硬度测量原理示意图

布氏硬度值是试验力除以压痕球形表面积所得的商。

计算公式如下：

$$HB = F/S = 2F/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (1-7)$$

式中  $D$ ——压头的直径，单位为 mm；

$d$ ——压痕的直径，单位为 mm；

$F$ ——外加载荷，单位为  $\text{kgf}^{\ominus}$ 。

当试验力单位用牛顿时，计算公式应修正为

$$HB = 0.102 \times F/S = 0.102 \times 2F/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (1-8)$$

很显然，这是由于  $1\text{N} = 0.102\text{kgf}$ 。

当压头为淬火钢球时，布氏硬度值以 HBS 表示；当压头为硬质合金时，布氏硬度值以 HBW 表示。采用淬火钢球压头，适合于测定布氏硬度值在 450 以下的材料；采用硬质合金压头，适合于测定布氏硬度值在 450 以上的材料，最高可测 650HBW 的材料。符号 HBS 或 HBW 之前为硬度值，符号后面按以下顺序用数值表示试验条件：

- 1) 球体直径；
- 2) 试验力；
- 3) 试验力保持时间（10~15s 不标注）。

例如，120HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的钢球在 1000kgf 试验力作用下保持 30s 测得的硬度值。

在布氏硬度实验时，只要  $F/D^2$  ( $F$  以  $\text{kgf}$  为单位) 相同，所得结果就有可比性。在 GB231—84 中规定了 30、15、10、5、2.5、2 和 1 共七种  $F/D^2$  值，以满足对不同硬度的材料测试的需要。对  $F/D^2$  值的选择可参照表 1-1 进行。

<sup>⊖</sup> 力的单位应是牛顿 (N)，千克力 (kgf) 为非法定计量单位，这里因沿用了以前的实验条件和标准，故作了保留。



布氏硬度试验测量压痕面积较大,受测量不均匀度影响较小,故测量误差较小,结果较真实、准确,因而,具有代表性和重复性,适合于测量组织粗大且不均匀的金属材料的硬度,如铸铁、铸钢、非铁金属及合金及各种经退火、正火或调质处理后的钢材。但由于测试比较费事,不宜用于大批量的生产检验;测量太硬材料时,压头可能产生变形,故不宜采用布氏硬度;另外,由于布氏硬度测试留下较大的压痕,对于成品,特别是有较高精度要求的配合面的零件及小件也不宜采用此方法。

## 2. 洛氏硬度 (HR)

洛氏硬度是在初始试验力及总试验力的先后作用下,将压头(金刚石圆锥体或钢球)压入试样表面,经规定保持时间后,卸除主试验力,用测量的残余压痕深度增量计算硬度值,如图 1-6 所示。

洛氏硬度用符号 HR 表示,HR 前面为硬度数值,HR 后面为使用的标尺。

根据被测材料的硬度和厚度等条件的不同,可选用不同的实验载荷和压头类型而得到 15 种不同的洛氏硬度的标尺。每一种标尺用一个规定的字母附在洛氏硬度符号后面加以注明,最常用的是: HRA、HRB、HRC 三种,其洛氏硬度值可在洛氏硬度计的表盘上直接读出。表 1-2 给出了这三种标尺的主要实验条件及应用实例。

表 1-1 布氏硬度实验  $F/D^2$  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 (1.25)
	35~80	10 (5 或 15)
	>80	10 (15)
铅、锡		1.25 (1)

注:当有关标准没有明确规定时,应优先选用无括号的  $F/D^2$  值。

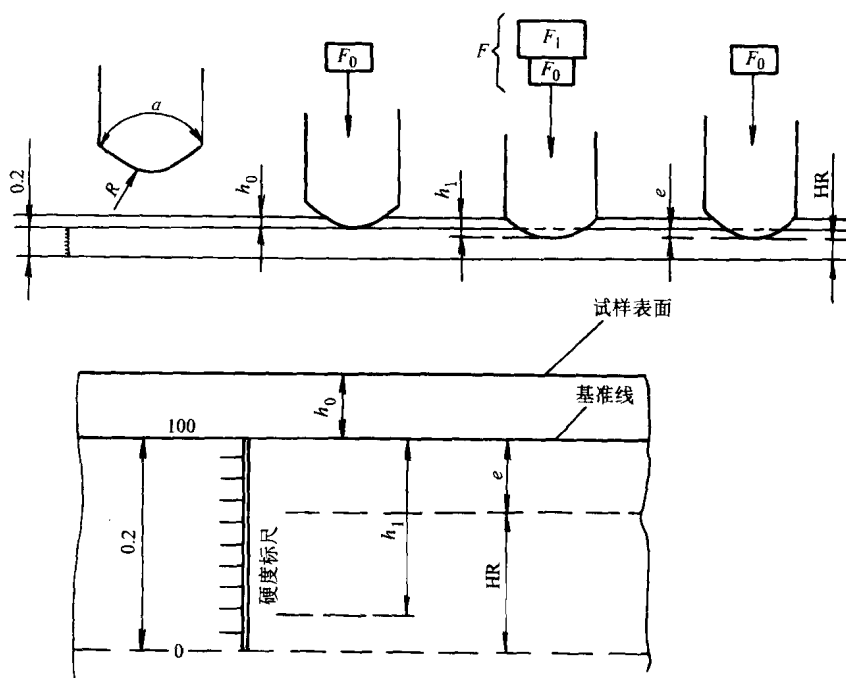


图 1-6 洛氏硬度测量原理示意图