



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高职高专规划教材

工程材料及成形 工艺基础

第3版

杨慧智 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠光盘

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高职高专规划教材

工程材料及成形工艺基础

第3版

主 编 杨慧智
副主编 吴海宏 邓鹏辉
参 编 张世兴
主 审 李风云



机械工业出版社

本书共分12章。第一章为材料的力学行为和性能,介绍材料的主要力学性能指标及其意义。第二章、第三章为工程材料的基础理论,主要包括材料的结构、凝固和合金相图。第四章主要介绍材料的强化、改性及表面处理技术。第五章至第七章介绍常用的各类工程材料及其应用并结合工程实例进行分析。第八章到第十一章介绍工程材料常用的成形方法及其工艺特点,包括金属的铸造、压力加工、焊接与粘接,以及非金属材料成形。第十二章介绍机械零件用材料及成形工艺选择的方法和典型零件的选材分析。全书以“大工程材料”为视角,突出材料及成形工艺的应用,适度增加新材料、新工艺及其应用内容,以适应教学改革和人才培养的要求。本书贯彻执行了最新国家标准。

本书可作为高职高专教育机械类各专业或专业方向的教材,也可供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. —3版. —北京:机械工业出版社, 2006.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-111-06963-3

I. 工... II. 杨... III. 工程材料—成型—工艺—高等学校:技术学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088483号

机械工业出版社(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:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2006年9月第3版第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·496千字

0001—3000册

定价:34.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在机械工业出版社 2000 年出版的《工程材料及成形工艺基础》第 2 版的基础上修订改编而成。该教材在编写的过程中,充分吸收了兄弟院校多年来在培养“技术应用型”人才教学改革中的成功经验,以及高职高专课程改革的研究与实践成果,因此得到了同仁和出版社的肯定和热情鼓励,在此我们表示衷心的感谢。

近几年来,高职高专教育得到了很快的发展,特别是在《国务院关于大力发展职业教育的决定》颁布后,明确提出了以就业为导向,深化职业教育教学改革,加强职业院校学生实践能力和职业技能培养的要求,为深化高职高专的教学改革指出了方向。在此背景下,我们对第 2 版教材进行了认真的修订改编。和原教材相比,本次修订适当删减了部分较深的理论内容,增加了材料和成形工艺的应用及其工程实例分析;适度介绍了新材料、新工艺的应用及其最新发展;采用了最新的国家标准,能够满足高职高专应用型人才培养的要求。

参加本书修订的人员有:杨慧智(绪论、第一、二章);吴海宏(第三、四、五、十二章);邓鹏辉(第八、九、十章);张世兴(第六、七、十一章)。全书由杨慧智教授担任主编,吴海宏、邓鹏辉担任副主编,河南工业大学李凤云教授担任主审。本书在编写过程中得到了李方才教授和张磊君教授的热情指导和帮助,在此表示诚挚的感谢。

由于高职高专教育教学改革在继续探索和不断深化中,加之我们水平有限,书中问题在所难免,仍需在使用过程中不断完善,恳请广大读者继续给予关心和批评指正。

编 者

常用符号名称表

符 号	名 称	单 位
A	奥氏体	
a	1. 晶格常数 2. 裂纹长度	mm
Ac_1	加热下临界点	℃
Ac_3	亚共析钢加热上临界点	℃
Ac_{cm}	过共析钢加热上临界点	℃
A_k	冲击吸收功	J
α_k	冲击韧度	J/cm ²
A'_k	高温冲击吸收功	J
α'_k	高温冲击韧度	J/cm ²
Ar_1	冷却下临界点	
Ar_3	亚共析钢冷却上临界点	℃
Ar_{cm}	过共析钢冷却上临界点	℃
B	贝氏体	℃
$B_{\text{上}}$	上贝氏体	
$B_{\text{下}}$	下贝氏体	
c	晶格常数	
$D (d)$	直径	mm
E	弹性模量	MPa
F	铁素体	N
Fe_3C	渗碳体	
G	切变弹性模量	MPa
G	石墨	
$H (h)$	高度	mm
HBW	布氏硬度	
HRA	洛氏 A 标尺硬度	
HRB	洛氏 B 标尺硬度	
HRC	洛氏 C 标尺硬度	
HV	维氏硬度	
K	应力水平因子	MPa/m ^{3/2}
K_{Ic}	平面应变、断裂韧度	MPa/m ^{3/2}
L	液相	
L	长度	mm
M	马氏体	

(续)

符 号	名 称	单 位
M_f	马氏体转变终止点	℃
M_s	马氏体转变开始点	℃
N	循环次数	
n	1. 安全系数 2. 聚合度	
P	珠光体	
S	索氏体	
S	面积	mm^2
T	托氏体	K
t	时间	s (min)
w	质量分数	%
δ	断后伸长率	%
ε	应变	%
ρ	密度	g/cm^3
σ	应力	MPa
σ_{-1}	光滑试样对称弯曲疲劳极限	MPa
$\sigma_{0.2}$	屈服强度	MPa
σ_b	抗拉强度	MPa
σ_{bb}	抗弯强度	MPa
σ_{bc}	抗压强度	MPa
σ_e	弹性极限	MPa
σ_N	循环周次为 N 时的疲劳极限	MPa
σ_s	屈服点	MPa
$\sigma_{s/r}^i$	蠕变极限	MPa
σ_s^i	蠕变极限	MPa
σ_r^i	持久强度极限	MPa
τ	1. 切应力 2. 时间	MPa s (min)
ψ	断面收缩率	%

目 录

前言		思考题	119
常用符号名称表		第六章 非铁金属、合金及粉末冶金	
绪论	1	材料	121
第一章 材料的力学行为和性能	5	第一节 铝及其合金	121
第一节 材料在载荷作用下的力学行为	5	第二节 铜及其合金	127
第二节 材料的静态力学性能	6	第三节 轴承合金	131
第三节 材料的动态力学性能	12	第四节 钛及其合金	133
第四节 断裂韧性	14	第五节 粉末冶金	134
第五节 材料的高、低温力学性能	17	思考题	136
思考题	18	第七章 非金属材料及其它材料	137
第二章 材料的结构	19	第一节 高分子材料	137
第一节 结合键	19	第二节 陶瓷材料	147
第二节 材料的晶体结构与非晶体结构	20	第三节 复合材料	152
第三节 材料的同素异构与同分异构	33	第四节 其它工程材料	159
思考题	34	思考题	164
第三章 凝固与二元合金相图	35	第八章 铸造	166
第一节 金属的结晶	35	第一节 铸造成形基础	166
第二节 合金的结晶——二元合金相图	39	第二节 常用的铸造成形方法	171
第三节 铁碳合金相图	42	第三节 铸造成形的工艺与结构设计	179
第四节 合金相图的应用	49	第四节 铸造技术的发展趋势	191
思考题	50	思考题	192
第四章 材料的强化、改性及表面技术	52	第九章 金属塑性成形	194
第一节 钢的热处理	52	第一节 金属塑性成形基础	194
第二节 非铁合金的强化	69	第二节 常用的金属塑性成形方法	198
第三节 高聚物的改性强化	71	第三节 金属塑性成形的工艺与结构设计	208
第四节 材料的复合强化	72	第四节 金属塑性成形技术的发展	221
第五节 材料的表面处理技术	73	思考题	222
思考题	77	第十章 焊接与粘接	223
第五章 工业用钢及铸铁	79	第一节 焊接成形基础	223
第一节 钢中常存元素与合金元素	79	第二节 焊接成形方法	228
第二节 钢的分类与编号	82	第三节 常用金属材料的焊接	238
第三节 结构钢	88	第四节 焊接件的结构与工艺设计	241
第四节 工具钢	99	第五节 粘接简介	249
第五节 不锈钢、耐热钢及耐磨钢	106	第六节 焊接与粘接技术的发展趋势	252
第六节 铸铁	110	思考题	254
		第十一章 非金属材料的成型	256

第一节 工程塑料成型	256	方法	277
第二节 塑料制品的结构要素与设计 原则	261	第三节 典型零件的材料及成形工艺 选择	287
第三节 其它非金属材料成型	269	思考题	292
思考题	271	附录	294
第十二章 机械零件用材料及成形工艺 的选择	272	附录 A 布氏硬度换算表	294
第一节 零件的失效分析	272	附录 B 钢铁材料硬度及强度换算表	301
第二节 材料及成形工艺选择的步骤和		附录 C 国内外常用钢号对照表	307
		参考文献	313

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20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、机械装备中的支撑件、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的，因此力学性能（强度、硬度、塑性、韧性等）是其主要的性能指标。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中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、压力加工、焊接与粘接、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。按现代加工的概念，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进行

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和工艺的前提下,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着密不可分的关系。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,其中有很多成就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，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是指金属的铸造、材料的压力加工以及材料的焊接和粘接。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的内容，在其它专业课或专业基础课中将有专门的介绍，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，例如通过热塑性成形的热固性塑料制件，通过粉末冶金生产的粉末冶金制品，通过烧结合成的陶瓷产品，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。我们着重充实和加强了这部分内容，并努力使读者在对前面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又一个非常重要的特点。

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,包括金属的铸造、材料的压力加工、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、韧性和强度，它们是通过规定条件下的标准力学性能试验来测定的。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、压力加工性能、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。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，但去除外力后又立即恢复到原来的平衡位置，因而宏观变形消失。

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。

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，是指零件在工作过程中承受的温度、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。若是在高温、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, 即材料的高温、低温性能。至于介质环境的影响, 除特殊情况下涉及到电场、磁场、辐射等影响因素外, 一般情况下人们主要关心的是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功能, 承受力的作用, 所以在服役条件中载荷更加引人注目, 需要给予更多的分析讨论。

载荷按其性质可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, 其内部将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。这种内部的作用力称为内力。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 Δl 。

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 σ ——真应力。

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, 还与杆件原始长度 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, $1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN/m}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ 。

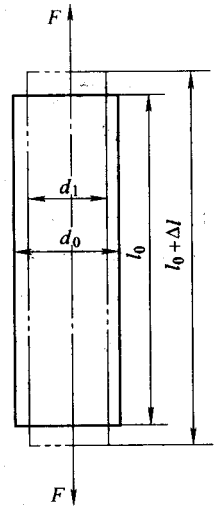


图 1-1 杆件轴向拉伸示意图

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试验测定的, 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 σ 和 ϵ ）的增加，当达到某一临界值或规定值时，材料的力学行为将发生突变（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、静拉伸试验及材料的强度与塑性

如不加特别说明，静拉伸试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。静拉伸试验是应用最为广泛的最基本的力学性能试验方法，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 GB/T228—1999 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）。

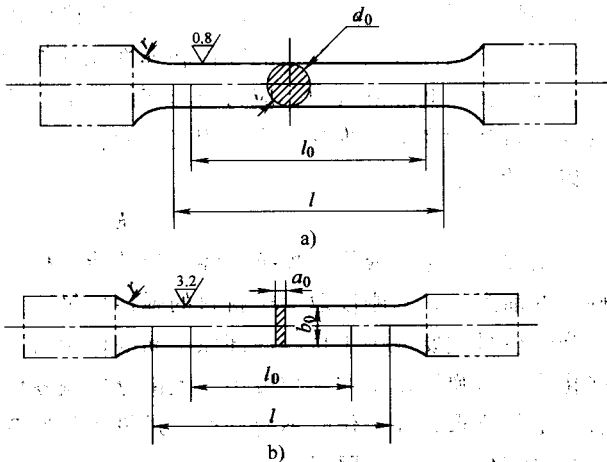


图 1-2 拉伸试样
a) 圆形 b) 板形

在拉伸试验过程中，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 Δl 的关系曲线称为力-伸长曲线，又称拉伸曲线；若经数学计算，可得到表示试样所受应力 σ 和应变 ϵ 的关系曲线，则称为应力-应变曲线。图 1-3a、b 所示分别为低碳钢试样的力-伸长曲线和应力-应变曲线。

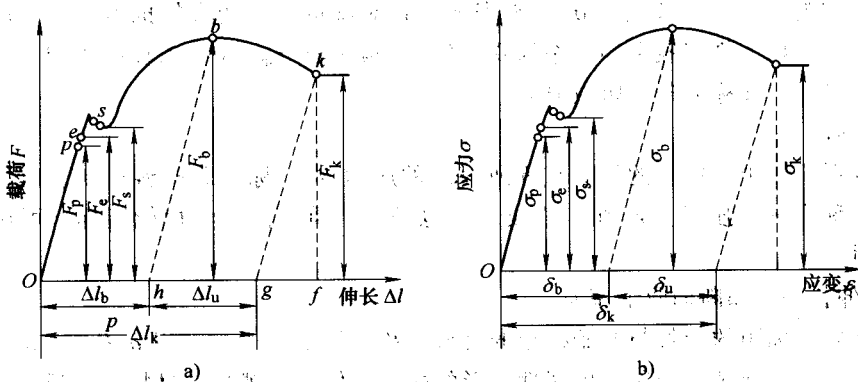


图 1-3 低碳钢试样的力-伸长曲线图（图 a）和应力-应变曲线图（图 b）

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 (σ_s) 时, 力-伸长曲线(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, 标志着宏观塑性变形的开始。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 (σ_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 (σ_k) 时, 试样在缩颈处断裂。

静拉伸试验条件下材料的主要力学性能指标如下(参看图 1-3):

1. 弹性极限 σ_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 σ_e 表示。对一些工作中不允许有微量变形的零件和弹性元件如精密弹簧等, σ_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

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

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, 其刚度取决于材料的弹性模量。

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 σ_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 σ_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 σ_s 为依据。

很多材料在拉伸过程中没有明显的屈服现象, 按照 GB/T228—1999 中的工程定义, 在工程上常采用“规定残余伸长应力 σ_r ”来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 $\sigma_{0.2}$ (在工程应用中, 习惯上简化为 $\sigma_{0.2}$) 来表示, 又称为条件屈服强度。

3. 抗拉强度 σ_b

在塑性变形阶段中, 曲线的最高点 b 所对应的应力 R_m , 标志着材料在断裂前所能承受的最大应力, 称为抗拉强度。 σ_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 δ 和断面收缩率 ψ

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 δ 表示。 δ 是材料的一种塑性指标, 反映断裂前金属发生塑性变形的能力。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 ψ 表示。 ψ 也是材料常数, 是材料塑性指标之一。 ψ 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。

用长试样测得的断后伸长率以 δ_{10} 表示；用短试样测得的断后伸长率以 δ_5 表示。

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 δ 达 5%、 ψ 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的。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较高的材料，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，需通过扭转试验、弯曲试验、剪切试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变形，特别是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、压痕面积或压痕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 1-4 所示。

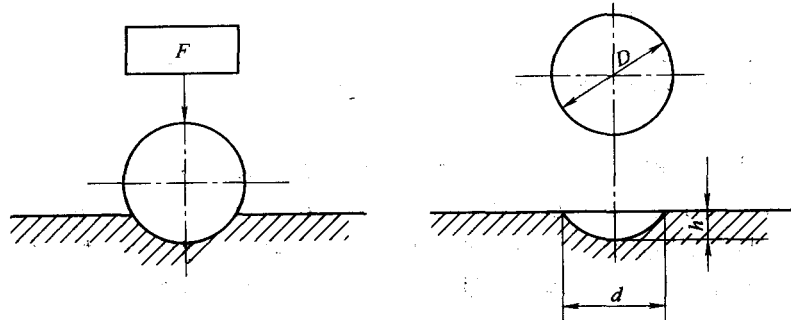


图 1-4 布氏硬度测量原理示意图