

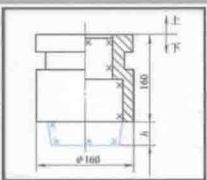
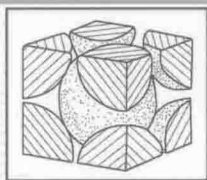
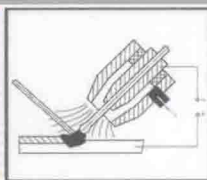
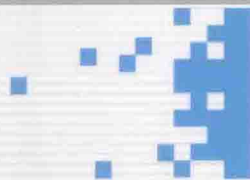
普通高等教育“十二五”规划教材

21世纪高校机电类规划教材

# 工程材料与 成形技术基础

第2版

◎ 庞国星 主编



*Fundamentals of Engineering Materials  
and Forming Technology*



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材  
21世纪高校机电类规划教材

# 工程材料与成形 技术基础

第2版

主 编 庞国星  
副主编 陈祝平 陈富强  
参 编 胡晓珍 郭 会 赵东方  
        张巨成 李艳霞  
主 审 崔占全 逯允海



机械工业出版社

全书共分为四篇十三章，每章后都附有少量的习题与思考题。第一篇为工程材料基础理论，第二篇为常用工程材料，第三篇为工程材料成形技术基础，第四篇为工程材料应用及成形工艺的选择。本书对传统的金属工艺学内容进行了精选，以培养学生使用和选择工程材料及成形工艺的能力为主要目的，去掉了繁冗的细节，保留了必要的理论基础并增加了新材料和新工艺及其发展趋势的介绍。本书对工程材料与成形工艺两部分内容进行了有效的整合，避免了重复。

本书可作为高等工科院校本科机械类及近机类专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与成形技术基础/庞国星主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2014. 6

普通高等教育“十二五”规划教材. 21 世纪高校机电类规划教材  
ISBN 978-7-111-46117-3

I. ①工… II. ①庞… III. ①工程材料—成型—高等学校—教材  
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 046608 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 丁昕祯 责任编辑: 丁昕祯 吕芳

版式设计: 常天培 责任校对: 肖琳

封面设计: 张静 责任印制: 李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2015 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 484 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-46117-3

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

## 21 世纪高校机电类规划教材

### 编审委员会

顾 问：李培根 华中科技大学

主 任：左健民 南京工程学院

副主任：童幸生 江汉大学  
徐格宁 太原科技大学  
党新安 陕西科技大学  
刘全良 浙江海洋学院  
张世亮 广东海洋大学  
邓海平 机械工业出版社

郑 堤 宁波大学  
陈 明 北华航天工业学院  
胡 琳 深圳大学  
马 光 温州大学  
高文龙 机械工业出版社

委 员：（按姓氏笔画排序）

王卫平 东莞理工学院  
方庆瑄 安徽工业大学  
刘小慧 机械工业出版社  
刘镇昌 浙江海洋学院  
李子琼 厦门理工学院  
李洪智 黑龙江工程学院  
赵先仲 北华航天工业学院  
顾晓勤 电子科技大学（中山）

王 华 长春工程学院  
朱志宏 福建工程学院  
刘申全 华北工学院分院  
张 茂 西南石油学院  
李建华 中原工学院  
陈廉清 宁波工程学院  
夏凤芳 上海电机技术高等专科学校  
倪少秋 机械工业出版社

# 序

为了适应我国制造业迅速发展的需要，培养大批素质高、应用能力与实践能力强的应用综合型人才已成为当务之急，同时对高等教育的办学理念、体制、模式、机制和人才培养等方面提出了全新的要求。

为了打通新形势下高等教育和社会需求之间的瓶颈，中国机械工业教育协会机电类学科教学委员会和机械工业出版社联合成立了“21世纪高校机电类规划教材”编审委员会，本着“重基本理论、基本概念，淡化过程推导，突出工程应用”的原则，组织教材编写工作，并力求使本套教材突出以下特点：

1) 科学定位。本套教材主要面向应用综合型人才的培养，既不同于培养研究型人才的教材，也不同于一般应用型本科的教材；在保持高学术水准的基础上，突出工程应用，强调创新思维。

2) 品种齐全。这套教材设有“力学”、“制图”、“设计”、“数控”、“控制”、“实训”、“材料”、“双语”等模块，方便学校选用。

3) 立体化程度高。教材均配备教学课件和相关的教辅材料，并在网站上为本套教材开设研讨专栏。

机械工业出版社是我国成立最早、规模最大的科技出版社之一，是国家级优秀出版社，是国家高等教育教材出版基地之一，在机电类教材出版领域具有很高的地位。相信这套教材在中国机械工业教育协会机电类学科委员会和机械工业出版社的精心组织下，通过全国几十所学校老师仔细认真的编写，一定能够为我国高等教育应用综合型人才的培养提供更好用、更实用的教材。

教育部·机械工程及自动化专业分教学指导委员会·主任  
中国机械工业教育协会·高等学校机械工程及自动化学科教学委员会·主任

李培根 院士  
于华中科技大学

## 第 2 版前言

本书是在 21 世纪高校机电类规划教材《工程材料与成形技术基础》基础上修订的。第 1 版于 2005 年出版，多次重印，总发行量较大。现为了使教材内容更加符合高等院校本科机械类专业的教学基本要求，以及贯彻近几年来颁布的最新国家标准，特对第 1 版进行修订。

全书共分为四篇十三章，每章后都附有一定量的习题与思考题。第一篇为工程材料基础理论，包括工程材料的分类与性能、金属与合金的晶体结构和二元合金相图、钢的热处理；第二篇为常用工程材料，包括工业用钢、铸铁、非铁金属材料与硬质合金、非金属材料与新型材料；第三篇为工程材料成形技术基础，包括铸造成形、金属压力加工成形、焊接与胶接成形、非金属材料与复合材料的成形；第四篇为工程材料应用及成形工艺的选择，包括机械零件的失效分析与表面处理、材料与成形工艺的选择。本书对传统的金属工艺学内容进行了精选，以培养学生使用和选择工程材料及成形工艺的能力为主要目的，去掉了繁冗的细节，保留了必要的理论基础并增加了新材料和新工艺及其发展趋势的介绍。本书对工程材料与成形工艺两部分内容进行了有效的整合，避免了重复。

本书可作为高等工科院校本科机械类及近机类专业的教材，也可供相关工程技术人员参考。使用本书时，可结合专业的具体情况进行调整，有些内容可供学生自学。

第 1 版作者参加了本书的修订工作。本书由北华航天工业学院庞国星教授任主编；燕山大学崔占全、逯允海两位教授主审。编写分工如下：北华航天工业学院庞国星（前言、绪论、第二、三、八、十三章和第十二章第一节以及第二节部分内容），集美大学陈祝平（第七、十一章以及第十二章第二节部分内容），安徽工业大学陈富强（第九章），浙江海洋工程学院胡晓珍（第十章），北华航天工业学院郭会（第一章），赵东方（第四章），张巨成（第五章），李艳霞（第六章）。本书的编写得到了许多兄弟院校的支持，并参考了大量文献资料，在此一并表示衷心的感谢。

因编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 第 1 版前言

本书是依据国家教育部颁发的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》，以及高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革项目“机械类专业人才培养方案和课程体系改革的研究与实践”的研究成果进行编写的。在编写过程中，又融合了各兄弟院校多年的实际教学经验，根据当前对本科机械类及近机类专业人员材料及成形技术知识的要求，以及学生的接受能力构建出本书的体系和结构。

全书共分为四篇十三章，每章后都附有一定量的习题与思考题。第一篇为工程材料基础理论，包括工程材料的分类与性能、金属与合金的晶体结构和二元合金相图、钢的热处理；第二篇为常用工程材料，包括工业用钢、铸铁、非铁金属材料与硬质合金、非金属材料与新型材料；第三篇为工程材料成形技术基础，包括铸造成形、金属压力加工成形、焊接与胶接成形、非金属材料与复合材料的成形；第四篇为工程材料应用及成形工艺的选择，包括机械零件的失效分析与表面处理、材料与成形工艺的选择。本书对传统的金属工艺学内容进行了精选，以培养学生使用和选择工程材料及成形工艺的能力为主要目的，去掉了繁冗的细节，保留了必要的理论基础并增加了新材料和新工艺及其发展趋势的介绍。教材对工程材料与成形工艺进行了有效的整合，避免了重复。

本书可作为高等工科院校本科机械类及近机类专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。使用本书时，可结合专业的具体情况进行调整，有些内容可供学生自学。

本书由北华航天工业学院庞国星教授任主编，集美大学陈祝平教授和安徽工业大学陈富强副教授任副主编。

本书承蒙燕山大学崔占全、逯允海两位教授主审。燕山大学徐瑞、官应平审阅了部分章节。本书编写得到了许多兄弟院校的支持，并参考了大量有关文献资料，在此一并表示衷心的感谢。

本书编写力求适应高等教育的改革和发展，但由于编者水平有限，难免出现错误和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 5 月

# 目 录

序

第2版前言

第1版前言

绪论..... 1

## 第一篇 工程材料基础理论

第一章 工程材料的分类与性能..... 3  
第一节 工程材料的分类..... 3  
第二节 材料的力学性能..... 4  
第三节 材料的其他性能 ..... 12  
习题与思考题 ..... 14

第二章 金属与合金的晶体结构和二元合金相图 ..... 16  
第一节 纯金属的晶体结构 ..... 16  
第二节 金属的结晶与同素异晶转变 ..... 20  
第三节 合金的相结构、结晶与二元相图 ..... 22  
第四节 铁碳合金相图 ..... 28  
习题与思考题 ..... 36

第三章 钢的热处理 ..... 38  
第一节 钢的热处理基础 ..... 38  
第二节 钢的普通热处理 ..... 48  
第三节 钢的表面热处理 ..... 59  
第四节 热处理新技术简介 ..... 61  
第五节 热处理工艺的应用 ..... 62  
习题与思考题 ..... 65

## 第二篇 常用工程材料

第四章 工业用钢 ..... 67



第一节 概述 .....	67
第二节 工程结构用钢 .....	76
第三节 机械结构用钢 .....	81
第四节 滚动轴承钢 .....	92
第五节 工具钢 .....	94
第六节 特殊性能钢 .....	100
习题与思考题 .....	107
第五章 铸铁 .....	109
第一节 概述 .....	109
第二节 铸铁的石墨化 .....	110
第三节 一般工程用铸铁 .....	112
习题与思考题 .....	125
第六章 非铁金属材料与硬质合金 .....	126
第一节 铝及铝合金 .....	126
第二节 铜及铜合金 .....	134
第三节 滑动轴承合金 .....	138
第四节 粉末冶金与硬质合金 .....	140
习题与思考题 .....	143
第七章 非金属材料与新型材料 .....	145
第一节 高聚物材料 .....	145
第二节 陶瓷材料 .....	153
第三节 新型工程材料简介 .....	156
习题与思考题 .....	161
<b>第三篇 工程材料成形技术基础</b>	
第八章 铸造成形 .....	163
第一节 铸造成形理论基础 .....	163
第二节 砂型铸造 .....	172
第三节 特种铸造 .....	183
第四节 铸件的结构设计 .....	194
习题与思考题 .....	200
第九章 金属压力加工成形 .....	203
第一节 压力加工理论基础 .....	204
第二节 自由锻 .....	209
第三节 模锻 .....	216

第四节 板料冲压·····	221
第五节 其他压力加工成形方法·····	226
习题与思考题·····	228
第十章 焊接与胶接成形·····	230
第一节 焊接工程理论基础·····	231
第二节 常用焊接方法·····	240
第三节 常用金属材料的焊接·····	251
第四节 焊接结构设计·····	255
第五节 焊接质量检验·····	260
第六节 胶接成形·····	263
习题与思考题·····	267
第十一章 非金属材料与复合材料的成形·····	270
第一节 高聚物材料成型·····	270
第二节 陶瓷材料成形·····	271
第三节 复合材料成形·····	273
习题与思考题·····	274
<b>第四篇 工程材料应用及成形工艺的选择</b>	
第十二章 机械零件的失效分析与表面处理·····	275
第一节 机械零件的失效分析·····	275
第二节 材料的表面处理·····	277
习题与思考题·····	285
第十三章 材料与成形工艺的选择·····	286
第一节 材料与成形工艺的选择原则·····	286
第二节 材料与成形工艺选择的步骤与方法·····	290
第三节 典型零件的材料与成形工艺选择·····	296
第四节 计算机在零件材料与成形工艺选择时的应用·····	304
习题与思考题·····	305
附录 常用力学性能指标新、旧标准对照表·····	307
参考文献·····	308

# 绪 论

材料是人类生产和社会发展的重要物质基础，也是我们日常生活基本资源中不可分割的一个组成部分。在人类文明史上还曾以材料作为划分时代的标志，如石器时代、青铜时代、铁器时代等。在当代，材料科学又和制造科学、信息科学与生物科学一起，被认为是促进人类文明与发展的四大关键领域，对国民经济的发展起着重要作用。

工程材料与成形技术是机械制造生产过程的重要组成部分。机械制造的生产过程一般是先用铸造、压力加工或焊接等成形方法将材料制作成零件的毛坯（或半成品），再经切削加工制成尺寸精确的零件，最后将零件装配成机器。为了改善毛坯和工件的性能，常需要在制造过程中穿插进行热处理。

工程材料及成形方法的选用直接影响零件的质量、成本和生产率。要合理选择毛坯的种类和制造方法，必须掌握各种材料的性能、特点、应用及其成形过程，包括各种成形方法的工艺实质、成形特点和选用原则等。

工程材料与成形技术是人类在长期生产实践中发展起来的一门科学。我国在原始社会开始有陶器，早在仰韶文化（距今约 6000 年）和龙山文化时期，制陶技术已经成熟。我国也是发现和应用金属材料最早的国家，远在新石器时代的仰韶文化开始，就已会炼制和应用黄铜。我国的青铜冶炼开始于夏代，在殷商、西周时期，技术已达到当时世界高峰，用青铜制造的工具、食具、兵器和车马饰，得到普遍应用，比较典型的为河南安阳出土的“司母戊”大鼎。在春秋战国时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、麻口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953 年在河北承德兴隆县出土了战国时期浇注农具的铁制模具，说明当时已掌握铁模铸造技术。随后出现了炼钢、锻造、钎焊和热处理技术。直到明朝之前的 2000 多年间，我国的钢铁生产及金属材料成形工艺技术一直在世界上遥遥领先。与此同时，我国劳动人民在长期的生产实践中，总结出一套完整的金属加工经验。明朝宋应星所著《天工开物》是世界上有关金属加工最早的科学著作之一。但是到了 18 世纪以后，长期的封建统治和闭关自守，严重束缚了我国生产力的发展，使我国科学技术处于停滞落后状态。直至 1949 年新中国成立后，我国的科学技术才得到较快发展。

18 世纪 20 年代初在欧美发生的产业革命极大地促进了钢铁工业、煤化学工业和石油化学工业的快速发展，各类新材料不断涌现。20 世纪 80 年代以来，一些新材料如信息材料、新型金属材料、先进复合材料、高性能塑料、纳米材料等的实用化，也给社会生产和人们的生活带来了巨大的变化。近年来，精密成形技术也不断产生，使毛坯形状、尺寸和表面质量更接近零件要求。当今世界，科学技术迅猛发展，微电子、计算机、自动化技术与传统制造工艺和设备相结合，构成了众多的先进制造技术。

尽管各种新技术、新工艺应运而生，新的制造理念不断形成，但铸造、压力加工、焊接、热处理及机械加工等传统的常规成形工艺至今仍是量大面广、经济适用的技术。因此，

常规工艺的不断改进和提高,并通过各种途径实现成形的高效化、精密化、轻量化和绿色化,具有很大的技术经济意义。本课程也是学习上述基本知识的入门课程。

工程材料与成形技术基础(原“工程材料和热加工”)是机械类专业必修的一门主干技术基础课程,也是近机类和部分非机类专业普遍开设的一门课程。旨在使学生掌握生产过程的基本知识,了解新材料,掌握现代制造和工艺方法,培养学生的工程素质、实践能力和创新能力。本课程的教学目标和基本要求可以归纳如下:

- 1) 建立工程材料和材料成形工艺的完整概念,培养良好的工程意识。
- 2) 掌握必要的材料科学及有关成形技术的基础理论。
- 3) 熟悉各类常用结构工程材料,包括金属材料、高聚物材料、陶瓷材料等的成分、结构、性能、应用特点及牌号表示方法;掌握强化金属材料的基本途径;了解新型材料的发展及应用。
- 4) 掌握各种成形工艺方法的工艺特点及应用范围;掌握零件(毛坯)的结构工艺性,具有设计毛坯和零件结构的初步能力。
- 5) 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,了解表面处理技术的应用;初步具有合理选择材料、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。
- 6) 了解与本课程有关的新材料、新技术、新工艺。

本课程融多种工艺方法为一体,信息量大,实践性强,叙述性内容较多,必须在金工教学实习获得感性认识的基础上进行课堂教学,才能收到预期效果。教学过程中应注意理论联系实际,使学生在掌握理论知识的同时,提高分析问题和解决问题的工程实践能力;学生应注意观察和了解平时接触到的机械装置,按要求完成一定量的作业及复习思考题。

本课程以课堂教学为主,并应采用必要的实验、电化教学、多媒体 CAI、现场教学等教学方法。

# 第一篇 工程材料基础理论

## 第一章 工程材料的分类与性能

### 第一节 工程材料的分类

材料是人类文明和生活的物质基础，是组成所有物体的基本要素。狭义的材料仅指可供人类使用的材料，是指那些能够用于制造结构、零件或其他有用产品的物质。人类使用的材料可以分为天然材料和人造材料。天然材料是所有材料的基础，在科学技术高速发展的今天，仍在大量使用水、空气、土壤、石料、木材、生物、橡胶等天然材料。随着社会的发展，人们开始对天然材料进行各种加工处理，使它们更适合于人类的使用，这就是人造材料。在我们生活、工作所见的材料中，人造材料占有相当大的比例。工程材料属于人造材料，它主要是指用于机械工程、建筑工程以及航空航天等领域的材料，按应用领域，可称为机械工程材料、建筑材料、生物材料、信息材料、航空航天材料等。工程材料按其性能特点可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料以力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能。功能材料以特殊的物理、化学性能为主，如那些要求具有声、光、电、磁、热等功能和效应的材料（本书主要介绍结构材料）。工程材料按其化学组成可分为：金属材料、高聚物材料、无机非金属材料、复合材料等。

金属材料是工业上所使用的金属及合金的总称。金属材料包括钢铁、非铁金属及其合金（有色金属及其合金）。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及加工工艺性能，并能采用比较简单、经济的方法制造零件，因此金属材料是目前应用最广泛的材料。

高聚物材料包括塑料、橡胶、合成纤维、胶粘剂、涂料等。人们将那些力学性能好，可以代替金属材料使用的塑料称为工程塑料。高聚物因其资源丰富、成本低、加工方便等优点，发展极其迅速。高聚物材料已成为国家建设和人民生活中必不可少的重要材料。

无机非金属材料主要指水泥、玻璃、陶瓷材料和耐火材料等。这类材料不可燃，不老化，而且硬度高，耐压性能良好，耐热性和化学稳定性高，且资源丰富。在电力、建筑、机械等行业中有广泛的应用。随着技术的进步，无机非金属材料特别是陶瓷材料在结构和功能方面发生了很大变化，应用领域不断扩展。

复合材料是指由两种或两种以上组分组成、具有明显界面和特殊性能的人工合成的多相固体材料。复合材料的组成包括基体和增强材料两个部分。它能综合金属材料、高聚物材料、无机非金属材料的优点，通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联，从而获得

新的性能。复合材料范围广，品种多，性能优异，具有很大的发展前景。

材料的性能一般可分为两类：一类是工艺性能，是指材料在加工过程中所表现出来的性能。另一类是使用性能，是指在使用过程中所表现出来的性能，如物理性能（如导电性、导热性、磁性、热膨胀性、密度等）、化学性能（如耐蚀性、抗氧化性等）、力学性能等。力学性能是机械零件在设计选材与制造中应主要考虑的性能。要正确地选择和使用材料必须首先了解材料的性能。

## 第二节 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在承受各种载荷时的行为。载荷类型通常分为：静载荷、动载荷和变载荷。通过不同类型的试验，可以测得材料各种性质的性能判据。

金属的强度、塑性一般是通过金属拉伸试验来测定的。金属拉伸试验是在标准试样两端缓慢地施加拉伸载荷，试样的工作部分受轴向拉力作用产生变形，随着拉力的增大，变形也相应增加，直至断裂。根据试样在拉伸过程中承受的载荷与产生的伸长量之间的关系，可测出该金属的力-伸长曲线，并由此确定该金属的强度及塑性。

以拉伸载荷和试样伸长量为坐标所形成的曲线称为力-伸长曲线。图 1-1 所示为低碳钢的拉伸力-伸长曲线。由图可见，低碳钢试样在拉伸过程中，材料经历了弹性、屈服、强化与缩颈四个阶段，并存在三个特征点。相应的应力依次为比例极限、屈服强度和强度极限。

在线性阶段，材料所发生的变形为弹性变形。弹性变形指卸去载荷后，试样能恢复到原状的变形。

在强化阶段，材料所发生的变形主要是塑性变形。塑性变形指卸去载荷后，试样不能恢复到原状的变形，即留有残余变形。

图 1-1 中， $Oe$  阶段属于弹性变形阶段，其中  $Op$  阶段载荷与伸长量成线性正比关系，而  $pe$  阶段载荷与伸长量已不成正比。当载荷去除后，试样恢复原状。

$e$  点以后，试样开始有塑性变形，当到达  $s$  点时，试样开始产生明显塑性变形，在拉伸曲线上出现了锯齿形的线段，这种现象称为屈服。

$b$  点即载荷最大值，此时试样局部截面开始缩小，产生所谓缩颈现象。

$k$  点为拉伸曲线终点，试样已断裂。

由于拉伸力-伸长曲线上的载荷与伸长量不仅与试验的材料性能有关，还与试样的尺寸有关。为了消除尺寸的影响，应采用应力-应变曲线。

试件拉伸在横截面上所产生的应力（正应力）等于载荷除以试件原始横截面积，用符号  $R$  表示，即

$$R = \frac{F}{S_0}$$

式中  $R$ ——应力，单位为 MPa；

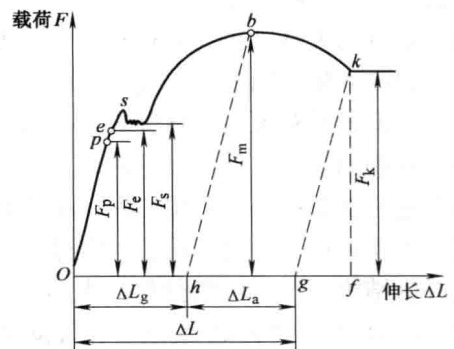


图 1-1 低碳钢的拉伸力-伸长曲线

$F$ ——试样拉伸时所承受的拉力，单位为 N；

$S_0$ ——试样原始横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ 。

拉伸时所产生的应变（正应变）为试样伸长量除以原始长度，用符号  $e$  表示，即

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

式中  $e$ ——应变；

$\Delta L$ ——试样伸长量，单位为 mm；

$L_0$ ——试样原始标距长度，单位为 mm。

以  $R$  与  $e$  为坐标，绘出的曲线为应力-应变曲线，如图 1-2 所示。从图上可以直接获得金属材料的一些力学性能。

### 一、强度

强度是材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。

#### 1. 弹性极限

材料产生完全弹性变形时所承受的最大应力值即为弹性极限，也就是应力-应变曲线中  $e$  点所对应的应力值，用  $\sigma_e$  表示。

#### 2. 屈服强度和规定残余伸长应力

在拉伸过程中，载荷变化不大，试件变形急剧增大的现象称为屈服，此时所对应的应力称为材料的屈服强度，用  $R_e$  表示，单位为 MPa，即

$$R_e = \frac{F_s}{S_0}$$

式中  $F_s$ ——材料屈服时的拉伸力，单位为 N；

$S_0$ ——试样的原始横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ 。

屈服强度是具有屈服现象材料所特有的强度指标。但某些金属材料（如高碳钢或某些经热处理后的钢等）在拉伸试验中并没有明显的屈服现象发生，故无法确定其屈服强度。因此，提出“规定残余延伸强度”作为相应的强度指标。国家标准规定：卸除应力后残余延伸率等于规定的原始标距  $L_0$  或引伸计标距  $L_e$  百分率时对应的应力，作为规定残余延伸强度  $R_r$ 。表示此应力的符号应附以下标说明，例如  $R_{r0.2}$  表示规定残余规定延伸率为 0.2% 时的应力。

$$R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

式中  $F_r$ ——产生规定残余伸长时的拉力，单位为 N。

原标准 GB/T 228—1976（已废止）将  $\sigma_{r0.2}$  称为屈服强度，以  $\sigma_{0.2}$  表示。目前一些技术资料仍沿用这一术语。

#### 3. 抗拉强度

材料在试样拉断前所承受的最大应力值，即

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

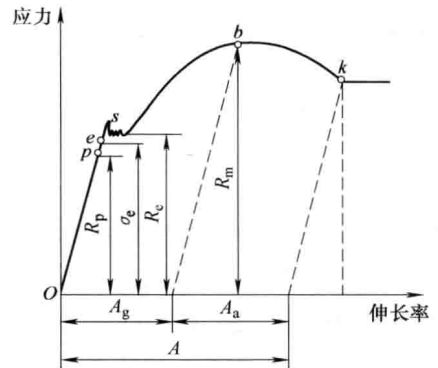


图 1-2 应力-应变曲线

式中  $F_m$ ——试样在断裂前所承受的最大载荷，单位为 N。

抗拉强度是零件设计时的重要依据，同时也是评定金属材料强度的重要指标之一。

## 二、塑性

断裂前材料发生不可逆永久变形的能力称为塑性。常用的塑性判据是材料断裂时的最大相对塑性变形，如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

### 1. 断后伸长率 A

A 是指试样拉断后标距的伸长与原始标距的百分比，即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_u$ ——试样拉断后的标距，单位为 mm；

$L_0$ ——试样原始标距，单位为 mm。

试样标距长度对材料的 A 是有影响的。根据采用标距的不同，可以分为长、短两种试样。长试样标距满足  $L_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$ ，短试样标距满足  $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ 。式中  $S_0$  为试样平行长度的原始横截面积。对于同一材料，长试样伸长率小于短试样伸长率，长试样伸长率用  $A_{11.3}$  表示，短试样伸长率用 A 表示。

### 2. 断面收缩率 Z

Z 是指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，即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中  $S_u$ ——试样断裂处的最小横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ 。

任何零件都要求具有一定的塑性。零件在使用中偶尔会发生过载，但由于有一定的塑性，会产生一定的塑性变形从而防止了零件的突然脆断。另外，塑性变形还有缓和应力集中、削减应力峰的作用，因而在一定程度上保证了零件的工作安全。

**例题：**有一钢试样，原来长度为 200mm，直径为 20mm，进行拉伸试验。当外力增大到 104624N 时，开始产生塑性变形。试样拉断前的外力最大值为 184632N。拉断后的长度为 232mm，断口处直径为 15.5mm，求钢的  $R_e$ 、 $R_m$ 、A 和 Z。

$$\text{解：} R_e = \frac{F_s}{S_0} = \frac{104624}{3.14 \times 10^2} \text{MPa} = 333 \text{MPa}$$

$$R_m = \frac{F_b}{S_0} = \frac{184632}{3.14 \times 10^2} \text{MPa} = 588 \text{MPa}$$

$$A = \frac{232 - 200}{200} \times 100\% = \frac{32}{200} \times 100\% = 16\%$$

$$Z = \frac{3.14 \times 10^2 - 3.14 \times 7.75^2}{3.14 \times 10^2} \times 100\% = \frac{10^2 - 7.75^2}{10^2} \times 100\% = 40\%$$

## 三、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。它是表征材料强度与塑性的一个综合判据。

硬度试验设备简单，操作迅速方便，又可直接地、非破坏性地在零件或工具上进行试



验。根据所测硬度值可近似估计出材料的抗拉强度和耐磨性。此外，硬度与材料的切削加工性、焊接性、冷成形性能间存在着一定的联系，可作为选择加工工艺时的参考。因此，在工程上被广泛地用于检验原材料和热处理件的质量，鉴定热处理工艺的合理性以及作为评定工艺性能的参考。

硬度试验方法很多，一般可分为三类：压力法，如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度、超声波硬度；划痕法，如莫氏硬度、锉刀硬度；回跳法，如肖氏硬度等。目前在机械制造生产中应用最广泛的是布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

### 1. 布氏硬度

用一定大小的试验力  $F$ ，把直径为  $D$  的硬质合金球压入被测金属表面，如图 1-3 所示，保持规定时间后卸除试验力，测量试样表面的压痕直径  $d$ ，并计算出压痕球缺表面积  $S$  所承受的平均应力值，此值即为布氏硬度值，以 HBW 表示。

当试验力  $F$  单位为 N 时，有

$$\text{HBW} = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

布氏硬度的单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ，习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。硬度值位于符号前面，符号后面的数值依次为压头直径、载荷大小及载荷保持时间（10 ~ 15s 不标注）。例如：500HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球在 7360N（750kgf）载荷作用下保持 10 ~ 15s，布氏硬度值为 500。

由于金属材料有硬有软，被测工件有厚有薄、有大有小，如果只采用一种标准的试验力  $F$  和压头直径  $D$ ，就会出现对某些材料不适应的现象。因此在生产中进行布氏硬度试验时，要求使用不同大小的试验力和压头直径。对同一种材料采用不同的  $F$  和  $D$  进行试验时，能否得到同一布氏硬度值，关键在于压痕几何形状的相似，即建立  $F$  和  $D$  的某种选配关系，以保证布氏硬度的不变性。

国家标准（GB/T 231.1—2009）规定，可根据金属材料的种类和布氏硬度范围，按表 1-1 选定  $F/D^2$  值。从而确定出  $D$  值、 $F$  值和保持时间。

由硬度计算公式可见，当载荷  $F$  与球体直径  $D$  选定时，硬度值只与压痕直径  $d$  有关。实际工作中，一般用刻度放大镜测出压痕直径  $d$ ，然后根据  $d$  值查表，即可求得所测材料的硬度值。

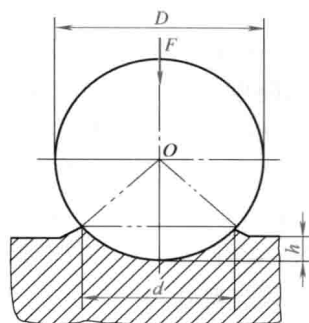


图 1-3 布氏硬度试验原理

表 1-1 不同材料的试验力-压头球直径平方的比率

材 料	布氏硬度 HBW	试验力-球直径平方的比率 $0.102 \times F/D^2 / (\text{N}/\text{mm}^2)$
钢、镍基合金、钛合金		30
铸铁 <sup>①</sup>	< 140	10
	≥ 140	30
铜和铜合金	< 35	5
	35 ~ 200	10
	> 200	30
轻金属及其合金	< 35	2.5
	35 ~ 80	5
		10
		15
	> 80	10
	15	
铅、锡		1

① 对于铸铁试验，压头的名义直径应为 2.5mm、5mm 或 10mm。