



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程材料

Engineering Materials 第3版

◎ 燕山大学 崔占全 主编
◎ 江苏科技大学 孙振国



免费电子课件
www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工 程 材 料

第 3 版

主 编 崔占全 孙振国

副主编 王正品 陈 扬

参 编 朱张校 戚 力 张向红

主 审 郑明新 王天生



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，内容分为三篇：第一篇为工程材料的基本理论，包括材料的结构与性能、金属材料组织与性能的控制；第二篇为常用工程材料，包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、其他工程材料（功能材料、纳米材料等）；第三篇为机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

本书建立了以“工程材料”为主的教材体系，精简传统内容，强化非金属材料、新型材料及选材的知识，可作为工科院校机械类及近机类专业教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程材料/崔占全，孙振国主编. —3版. —北京：机械工业出版社，2013.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-41835-1

I. ①工… II. ①崔…②孙… III. ①工程材料—高等学校—教材
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 051688 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：冯春生 责任编辑：冯春生 韩冰

版式设计：潘蕊 责任校对：张莉娟

封面设计：张静 责任印制：张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 5 月第 3 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·449 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-41835-1

定价：35.00 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

第3版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。该教材自2003年第1版问世以来,由于教材体系科学合理,内容取舍得当且深浅度适中,符合当前学时少内容广的教学现状,因此颇受使用院校的师生好评,已多次重印。本书被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材后,自2007年以来,第2版已重印6次。

本次修订是在保持第2版教材体系的基础上,修改了“绪论”,调换了部分图表,增加了“铝及铝合金牌号的编号原则”及“镁及镁合金”等内容,力图使本书的结构与内容更加科学合理,知识更加完善。在修订《工程材料》教材的同时,将配套教材《工程材料学习指导》也进行了修订,并给出了习题参考答案。由崔占全、威力制作了本教材的PPT教学课件,力图打造“工程材料”课程的立体化教材。

本书分为三篇,共9章。绪论、第一章、第二章第六节、第三章第三节中的“镁及镁合金”、第四章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写及修订;第二章第一节和第二节由清华大学朱张校教授编写及修订;第二章第三节和第四节、第三章第二节和第三节由江苏科技大学孙振国教授编写及修订;第二章第五节、第三章第一节由西安工业大学王正品教授编写及修订;第五章由河北建材职业技术学院张向红副教授编写及修订;第七章及第三章所有新标准由燕山大学威力副教授编写及修订;第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬教授编写及修订。全书由崔占全、孙振国担任主编,王正品、陈扬担任副主编,清华大学郑明新教授、燕山大学王天生教授担任主审。

在本书的修订过程中,燕山大学赵品教授、景勤教授、杨庆祥教授、刘文昌教授、高聿为教授等人提出了许多有益建议,书中还引用了部分参考教材的资料,在此一并表示感谢!

由于编者水平所限,错误及不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。该教材第1版自2003年出版以来，由于体系合理，符合当前课时少内容多的教学现状，已多次重印，颇受使用该教材院校的好评。

本次修订，基本保持第1版的教材体系，将知识点的前后顺序进行了调整，增加了“纳米材料的制备与合成”等新知识，力图使本书的结构更加合理，知识更趋于完善。在修订此教材时，将配套的《工程材料学习指导》（含工程材料内容提要及学习重点、习题、课堂讨论、实验等内容）同时进行了修订，并由崔占全、威力制作了相应的教学课件及习题参考答案（光盘中），努力构建“工程材料”课程的立体化教材。

本书分为三篇，共9章。绪论、第一章、第二章第六节、第四章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写；第二章第一节、第二节由清华大学朱张校教授编写；第二章第三节、第四节，第三章第二节、第三节由江苏科技大学孙振国教授编写；第二章第五节、第三章第一节由西安工业学院王正品教授编写；第五章由河北建材职业技术学院张向红讲师编写；第七章由燕山大学威力讲师编写，第三章所有新标准由燕山大学威力修订；第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写。全书由崔占全、孙振国担任主编，王正品、陈扬担任副主编；全书由清华大学郑明新教授、燕山大学王天生教授担任主审。

本书修订过程中，燕山大学荆天辅、赵品、高聿为教授提出了许多有益建议，高聿为协助审阅了部分书稿，在此表示谢意。

由于编者水平有限，错误及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

第1版前言

根据第九届全国“工程材料”课程协作组会议的决议,为适应我国高等教育改革形势下的教学需要,本着加强基础、淡化专业、加强能力和素质教育的宗旨,同时考虑到各高校减少该课程学时的实际情况,组织相关院校的一线教师编写了本书。

《工程材料》是工科院校机械类及近机类专业开设的一门技术基础课教材。本书在编写过程中注意了以下几个问题:

- 1) 建立以工程材料为主的教材体系。
- 2) 精简传统内容,强化非金属材料及选材的内容。
- 3) 编入功能材料、纳米材料、零件失效与强化等新材料、新工艺、新技术。
- 4) 教材体系更符合教学规律。
- 5) 对工程材料的应用作了较详尽的介绍。

编者本着改革的愿望,力图使本教材体系更加符合机械类及近机类专业的培养目标。当然,一个科学、合理的教材体系的建立不是一朝一夕就能完成的,不可能一次性就能完全突破旧的框架,仅以此书作为教材改革的一次尝试。

本教材共分为三篇,计九章。绪论、第二章第六节、第四章、第五章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写;第一章由燕山大学王天生副教授编写;第二章第一节、第二节由清华大学朱张校教授编写;第二章第三节、第四节,第三章第二节、第三节由华东船舶学院孙振国教授编写;第二章第五节、第三章第一节由西安工业学院王正品教授编写;第七章由燕山大学杨庆祥教授编写;第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写。全书由崔占全、孙振国主编,王正品、陈扬副主编;由清华大学郑明新教授主审。

本书在编写过程中,参考和引用了一些文献资料的有关内容,并得到了机械工业出版社教编室的大力支持与指导,在此一并感谢!

由于编者水平有限,错误及不足之处难以避免,敬请读者批评指正。

编者

目 录

第3版前言
第2版前言
第1版前言
绪论..... 1

第一篇 工程材料的基本理论

第一章 材料的结构与性能	5	控制	47
第一节 材料的性能	5	第一节 纯金属的结晶	47
第二节 材料的结合方式及工程材料 的键性	14	第二节 合金的结晶	53
第三节 金属的结构与性能	17	第三节 金属的塑性加工	69
第四节 高分子材料的结构与性能	28	第四节 钢的热处理	77
第五节 陶瓷材料的结构与性能	37	第五节 钢的合金化	96
第二章 金属材料组织与性能的		第六节 表面技术	100

第二篇 常用工程材料

第三章 金属材料	111	第三节 金属陶瓷（硬质合金）	213
第一节 工业用钢	111	第六章 复合材料	217
第二节 铸铁	154	第一节 概述	217
第三节 有色金属及其合金	165	第二节 复合材料的增强机制及 性能	218
第四章 高分子材料	193	第三节 常用复合材料	220
第一节 工程塑料	193	第七章 其他工程材料	227
第二节 橡胶与合成纤维	201	第一节 功能材料	227
第三节 合成胶粘剂和涂料	204	第二节 纳米材料	237
第五章 陶瓷材料	207	第三节 未来材料的发展方向	244
第一节 概述	207		
第二节 常用工程结构陶瓷材料	209		

第三篇 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用

第八章 机械零件的失效与强化	245	第二节 典型零件的选材及工艺 路线设计	254
第一节 零件的失效形式与分 析方法	245	第三节 工程材料的应用	260
第二节 工程材料的强化与强韧化	248	附录 金属热处理工艺分类及代号 (GB/T 12603—2005)	281
第九章 典型零件的选材及工程材 料的应用	251	参考文献	284
第一节 选材的一般原则	251		

绪 论

一、材料科学的重要地位与作用

材料是人类用来制造各种有用物件的物质，它是人类生存与发展、改造自然的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱。因此，历史学家将人类社会的发展分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、水泥时代、钢时代、硅时代和新材料时代。人类使用材料的七个时代的开始时间见表 0-1。

表 0-1 人类使用材料的七个时代的开始时间

公元前 10 万年	石器时代
公元前 3000 年	青铜器时代
公元前 1000 年	铁器时代
公元 0 年	水泥时代
1800 年	钢时代
1950 年	硅时代
1990 年	新材料时代

无论是远古时代，还是生产力高度发达的今天，无论是工业、农业、现代国防，还是日常生活，均离不开材料。同样，20 世纪的四项重大发明，即原子能、半导体、计算机、激光器也离不开材料科学的发展。仅以计算机为例，1946 年由美国研制的埃尼阿克（ENIAC）电子数值积分计算机，共用 18000 多只电子管，质量达 30t 有余，占地 170m²，每小时耗电 150kW，真可谓“庞然大物”。半导体材料出现后，特别是自 1967 年大规模集成电路问世以来，计算机实现了微型化，才使计算机进入了办公室及普通百姓人家。现在一台微型计算机如果其功能和第一台电子管计算机相当，其运行速度却快了几百倍，体积仅为原来的三十万分之一，质量仅为原来的六万分之一。中国的“两弹一星工程”、“航天工程”以及“嫦娥工程”（探月工程）等尖端技术的发展也离不开材料，因此，新材料技术已成为当代技术发展的重要前沿。1981 年，日本的国际贸易和工业部选择了优先发展的三个领域，即新材料、新装置和生物技术。1986 年 3 月，在我国四位著名科学家的倡议下，国家制定了《高技术研究发展计划纲要》，即“863 计划”，新材料属于重点研究领域之一，并命名为“关键新材料和现代材料科学技术”。材料科学的发展及进步已成为衡量一个国家科学技术水平的重要标准。今天人们经已强烈地认识到材料科学对社会发展与进步的作用，无论是专门从事科学研究的材料科技人员，还是经济专家、财政金融界的银行家、企业界巨头，以及作为经济决策人的国家领导阶层，都在密切注意材料研究的动向和发展趋势，以便及时把握时机，做出正确的判断与决策，以便在世界经济发展的竞争中占有一席之地。材料科学的发展在国民经济中占有极其重要的地位，因此，材料、能源、信息被誉为现代经济发展的三大支柱。

二、工程材料的分类

工程材料是指具有一定性能，在特定条件下能够承担某种功能，被用来制取零件和元件的材料。工程材料种类繁多，有许多不同的分类方法。

1. 按材料的化学组成分类

(1) 金属材料 是指具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质,是目前应用最为广泛的工程材料。

1) 按金属元素的构成情况不同,可分为金属与合金两种类型。所谓金属,是指由单一元素构成的、具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质;所谓合金,是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属元素构成的、具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质。

2) 金属材料按化学组成不同又可分为黑色金属及有色金属两种类型。黑色金属主要包含钢(碳钢和合金钢)和铸铁,即以铁、碳元素为主的金属材料;有色金属包含除钢铁以外的金属材料,其种类很多,按照它们特性的不同,又可分为轻金属(Al、Mg、Ti)、重金属(Cu、Ir、Pb)、贵金属(Au、Ag、Pt)、稀有金属(Ta、Zr)和放射性金属(Ta)等多种。

(2) 无机非金属材料 是指用天然硅酸盐(粘土、长石、石英等)或人工合成化合物(氮化物、氧化物、碳化物、硅化物、硼化物、氟化物)作为原料,经粉碎、配置、成型和高温烧结而成的硅酸盐材料。无机非金属材料包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等,其主要原料是硅酸盐矿物,因此又称为硅酸盐材料。

(3) 高分子材料 是指以高分子化合物为主要组分材料,又称为高聚物。按材料来源可分为天然高分子材料(蛋白、淀粉、纤维素等)和人工合成高分子材料(合成塑料、合成橡胶、合成纤维);按性能及用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂、涂料等。金属材料、陶瓷材料、高分子材料统称为三大固体材料;合成塑料、合成橡胶、合成纤维统称为三大合成材料。

(4) 复合材料 是指由两种或两种以上不同性质的材料,通过不同的工艺方法人工合成的、各组分间有明显界面且性能优于各组成材料的多相材料。多数金属材料不耐腐蚀,无机非金属材料脆性大,高分子材料不耐高温且易老化,人们将上述两种或两种以上的不同材料组合起来,使之取长补短、相得益彰,就构成了复合材料。复合材料由基体材料和增强材料复合而成,基体材料包括金属、塑料(树脂)、陶瓷等,增强材料包括各种纤维和无机化合物颗粒等。

2. 按材料的使用性能分类

(1) 结构材料 是指以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能为性能指标,用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料。结构材料可以是金属材料、高分子材料、陶瓷材料或复合材料。

(2) 功能材料 是指以声、光、电、磁、热等物理性能为指标,用来制造具有特殊性能的元件的材料,如大规模集成电路材料、信息记录材料、充电材料、激光材料、超导材料、传感器材料、储氢材料等都属于功能材料。目前功能材料在通信、计算机、电子、激光和空间科学等领域扮演着极其重要的角色。

在人类漫长的历史发展过程中,材料一直是社会进步的物质基础与先导。进入21世纪,作为“发明之母”、“产业粮食”的新材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上朝着精细化、高功能化、超高性能化、复杂化(复合化和杂化)、智能化、可再生及生态环境化的方向发展,从而为人类社会的物质文明建设做出更大贡献。

1) 精细化。所谓“精”是指材料的制备技术及加工手段越来越先进;所谓“细”是指

组成、制备材料粒子的尺寸越来越细小,即从微米尺寸细化到纳米尺寸。

2) 高功能化。是指功能材料应向更高功能化方向发展,例如发展高温超导材料等。

3) 超高性能化。是指结构材料应向超高性能化的方向发展,例如发展超高强度钢、金属材料的超塑性等。

4) 复杂化。是指复合化和杂化。所谓复合化是指将两种或两种以上不同性质的材料,通过不同工艺方法形成的各组元间有明显界面且性能优于各组成相的多相材料的一种方法;所谓杂化是指将有机、无机及金属三大类材料在原子和分子水平上混合而构思设想形成性能完全不同于现有材料的一种新材料的制备方法。

5) 智能化。是指材料可以像人类大脑一样,会思考、会判断、能思维,如形状记忆合金。

6) 可再生及生态环境化。可再生是指制备的材料可以重复利用,具有可再生的能力与属性;生态环境化是指生产制备材料时安全、可靠、无毒副作用,且对周围环境无任何污染的性质。只有这样才能使生产制备的材料可以重复利用,对周围环境无污染,使生产制备的新材料与再制造工程联系在一起,与我国发展的大政方针联系在一起,符合我国的经济发展战略方针,即循环经济、可持续发展。

三、工程材料课程的研究对象、内容与任务

工程材料是研究材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能关系及其规律的一门科学。所谓组织,是指用肉眼或在显微镜下能观察到的、金属中具有某种外表特征的组成部分。例如,层片状组织(珠光体)、羽毛状组织(上贝氏体)、针叶状组织(下贝氏体)、板条状组织(低碳马氏体)、片状组织(高碳马氏体)等。所谓结构,是指原子在金属内部的三维空间中的具体排列方式。金属的化学成分不同,虽然加工过程一致,但由于组织结构不同,则性能不同;金属的化学成分相同,但经过不同的加工过程,可以获得不同的组织结构,从而获得不同性能。例如,取 $w_c = 1.0\%$ 的碳钢和 $w_c = 0.45\%$ 的碳钢具有相同尺寸的试样各一块,经过同样的加工处理后,即加热到 780°C 、保温一定时间后空冷(正火),结果两块试样的性能不同。这是由于化学成分不同的两块试样,虽经过相同的工艺处理,但由于其内部组织结构不同,则性能不同;如果取两块相同尺寸具有同样化学成分($w_c = 0.45\%$)的碳钢试样,都加热到 840°C 保温一定时间后,一块取出空冷,一块取出水冷,结果水冷试样的强度、硬度比空冷试样的高,但该试样的塑性、韧性比空冷的低。这是由于两块尺寸相同、化学成分相同的试样经过不同的加工处理后,获得了不同的组织结构,从而获得了不同性能。如果说材料的化学成分、组织结构是决定材料性能的内部因素,材料的加工工艺及制备过程则是决定材料性能的外部因素。内因是本质、是关键、是决定因素,外因则通过内因而起作用。

工程材料和机械设计、机械制造、机械电子工程等机械类及近机械类专业的关系极其密切。机械设计主要包含产品的功能设计、结构设计、材料设计等方面。在设计某一产品时,设计者既要进行功能设计和结构设计,即通过精确的计算和必要的试验确定决定产品功能的技术参数和整机结构及零件的强度、形状、尺寸等,为了保证产品的功能与性能同时还要进行材料设计,即确定材料的化学成分、结构及其加工工艺,也就是通过控制材料的化学成分及加工工艺过程,达到控制材料的组织结构与性能的目的。机械制造是将材料经济地加工成最终产品的过程。为了保证加工工艺过程的顺利进行及经济性,材料必须具备一定的工艺性

能（冶炼性、铸造性、压力加工性、切削加工性、焊接性、热处理性等）；为了满足产品的工作条件及保证产品具有一定的使用寿命，产品必须具备必要的使用性能（力学性能、物理性能、化学性能等）与经济性。材料设计及选材的相关知识需要通过工程材料这门课程获得，因此，工程材料是机械制造、机械设计、机械电子等各冷加工专业一门重要的技术基础课。学习该课程的目的是使学生获得有关工程材料的基础理论知识，并使其初步具备根据零件工作条件和失效方式合理地选择与使用材料，正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力，掌握强化金属材料的途径及方法。

“工程材料”这门课程的内容包括：

（1）金属学基础

1) 材料的结构与性能，包括金属的性能、金属的晶体结构、合金的相结构。

2) 金属材料的组织与性能控制，包括纯金属凝固、二元合金凝固与相图、铁碳相图、金属与合金的塑性变形及再结晶。

3) 钢的热处理原理与工艺，包括：①钢的热处理原理，即钢在加热时的组织转变（奥氏体转变）、钢在冷却时的组织转变（过冷奥氏体转变曲线、珠光体转变、贝氏体转变、马氏体转变）、淬火钢在回火时的转变；②钢的热处理工艺（即五大相变的应用），如普通热处理、表面热处理、特殊热处理等。

（2）常用工程材料

1) 金属材料，包括工业用钢（结构钢、工具钢、特殊性能钢等）、铸铁、有色金属及其合金（铝、铜、钛、镁、轴承合金）。

2) 高分子材料、陶瓷材料、复合材料、其他工程材料等。

（3）机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

工程材料具有“三多一少”的特点，即内容头绪多（含金属材料工程专业的金属学基础、金属热处理原理、金属热处理工艺、金属材料学、金属力学性能等多门课程的内容）、原理规律多（涉及的原理与规律有几十个）、概念定义多（涉及的概念与定义有几百个）、理论计算少（重要的只有相对含量计算），且内容枯燥、抽象，具体的原子排列方式看不见、摸不着。为了学好这门课程，应该联系前面课程所学过的内容，因为工程材料是以数学、化学、物理、理论力学、材料力学、金属工艺学和金工实习为基础的课程，在学习时应联系上述相关基础课程的有关内容，以加深对本课程内容的理解。同时要处理好“两个关系”，即处理好基础课与本课程的关系、处理好专业课与本课程的关系。此外，工程材料是一门从生产实践中发展起来而又直接为生产服务的科学，所以学习该课程时不但要学习好基本理论，而且还要注意理论联系生产实际，并注重与本课程相关的实验课。只有这样才能学好这门课程，为专业课学习打好基础。

第一篇 工程材料的基本理论

第一章 材料的结构与性能

工程材料的性能主要取决于其化学成分、组织结构及加工工艺过程。在制造、使用、研究和发展工程材料时，材料的内部结构是非常重要的研究对象。所谓结构，是指物质内部原子在空间的分布及排列规律。本章将重点讨论常用工程材料即金属材料、高分子材料、陶瓷材料等三大固体材料的结构与性能。

第一节 材料的性能

工程材料是目前应用最为广泛的材料，它之所以被广泛使用，主要原因是其具有优良的使用性能和工艺性能。所谓使用性能，是指材料制成零件或构件后为了保证正常工作及一定使用寿命应具备的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。所谓工艺性能，是指材料在加工成零件或构件的过程中应具备的适应加工的性能，包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能、焊接性能及热处理工艺性能。

一、材料的使用性能

(一) 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在外加载荷作用时所表现出来的性能，包括强度、硬度、塑性、韧性及疲劳强度等。

1. 强度与塑性

GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》规定了金属材料的强度和塑性拉伸试验的测定方法与要求。

将如图 1-1 所示拉伸试样在拉伸试验机上加载，试样在载荷作用下发生弹性变形和塑性变形，直至最后断裂。在拉伸过程中，试验机自动记录每一瞬间的载荷和伸长量之间的关系，并绘出拉伸曲线图（纵坐标为载荷，横坐标为伸长量）或应力-应变曲线图。由计算机控制的具有数据采集系统的试验机可直接获得强度和塑性的试验数据。

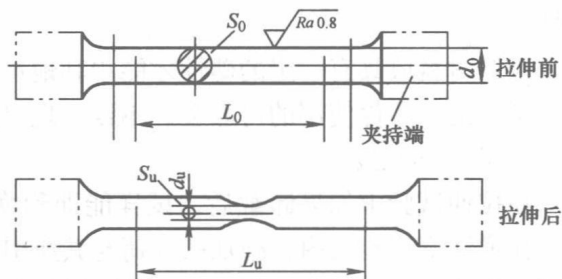


图 1-1 拉伸试样图

图 1-2 所示为退火低碳钢单向静载拉伸的应力-应变曲线。其中 $abcd$ 段为屈服变形阶段， db 为均匀塑性变形阶段， B 为试样屈服后所能承受的最大受力 (R_m) 点， Bk 是缩颈阶段。该曲线图可直接反映出材料的强度与塑性的性能高低。

(1) 强度 强度是材料抵抗塑性变形和破坏的能力。

按外力的作用方式不同, 可将强度分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。当承受拉力时, 强度特性指标主要是屈服强度和抗拉强度。

1) 屈服强度。屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时, 在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点。应区分上屈服强度和下屈服强度。

测定上屈服强度所用的力是指试验时在拉伸曲线上读取的曲线首次下降前的最大力。测定下屈服强度所用的力是指试样屈服时, 不计初始瞬时效应时的最小力(图 1-2)。

上屈服强度和下屈服强度都是用载荷(力)除以试样原始横截面积(S_0)得到的应力值表示, 其符号分别为 R_{eH} 和 R_{eL} (图 1-2)。

有些金属材料的拉伸曲线上没有明显的屈服现象, 如高碳钢和脆性材料等, 可采用规定非比例延伸强度 R_p , 如常规定非比例延伸率为 0.2% 时对应的应力值作为规定非比例延伸强度, 用符号 $R_{p0.2}$ 表示。

2) 抗拉强度。抗拉强度是指试样被拉断前的最大承载能力(F_m)除以试样原始横截面积(S_0)得到的应力值, 用符号 R_m 表示(图 1-2)。

屈服强度、抗拉强度是在选定金属材料及机械零件强度设计时的重要依据。

(2) 塑性 材料在外力作用下, 产生塑性变形而不断裂的性能称为塑性。塑性大小常用断后伸长率(A)和断面收缩率(Z)表示, 即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样拉断后的标距长度(图 1-1);

S_u ——试样拉断后的最小横截面积。

A 和 Z 的值越大, 材料的塑性越好。应该说明的是: 仅当试样的标距长度、横截面的形状和面积均相同时, 或当选取的比例试样的比例系数 k 相同时, 断后伸长率的数值才具有可比性。

金属材料应具有一定的塑性才能顺利地承受各种变形加工, 并且具有一定塑性的金属零件, 可以提高零件使用的可靠性, 不致出现突然断裂。

2. 弹性与刚度

在拉伸试验中如果卸载后, 试样能即刻恢复原状, 这种不产生永久变形的性能称为弹性。在弹性变形范围内, 施加的载荷与所引起的变形量成正比关系, 其比例常数称为弹性模量, 用 E 表示。弹性模量 E 是衡量材料产生弹性变形难易的指标, E 值越大, 材料抵抗弹性变形的应力也越大。

刚度表达材料弹性变形抗力的大小。材料的刚度主要取决于结合键和原子间的结合力, 材料的成分和组织对它的影响不大。金属键的弹性模量适中, 但由于各种金属原子结合力的不同, 也会有很大的差别。例如, 铁(钢)的弹性模量为 210GPa, 是铝(铝合金)的 3

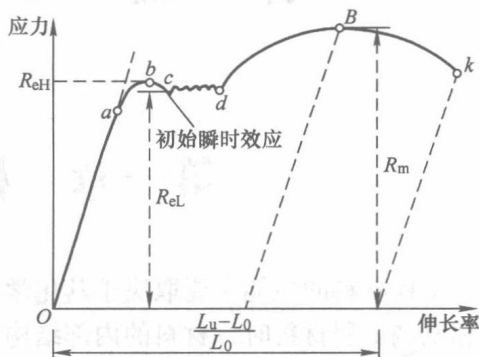


图 1-2 退火低碳钢的应力-应变曲线图

倍。聚合物材料具有高弹性，但弹性模量较低，在较小的应力作用下就可以发生很大的弹性变形，除去外力后，变形可迅速消失。

3. 硬度

硬度是金属表面抵抗其他硬物压入的能力，或者说是材料对局部塑性变形的抗力。测定硬度的方法有很多，常用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度测定法等。

(1) 布氏硬度 测定布氏硬度的原理如图 1-3 所示，用直径为 D 的硬质合金球作压头，在规定载荷的作用下，压入被测金属表面，按规定的保持时间卸载后，用刻度放大镜测量被测试金属表面上形成的压痕直径 d ，用载荷与压痕球形表面积的比值作为布氏硬度值，用符号 HBW 表示。在实际应用中，布氏硬度不标注单位，也不计算，测出压痕平均直径 d 后，通过查布氏硬度表得出相应的 HBW 值。

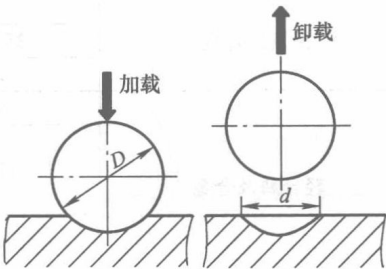


图 1-3 测定布氏硬度的原理

布氏硬度的试验规范见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 不同条件下的试验力

硬度符号	球直径 D/mm	试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$	试验力 F/N
HBW 10/3000	10	30	29420
HBW 10/1500	10	15	14710
HBW 10/1000	10	10	9807
HBW 10/500	10	5	4903
HBW 10/250	10	2.5	2452
HBW 10/100	10	1	980.7
HBW 5/750	5	30	7355
HBW 5/250	5	10	2452
HBW 5/125	5	5	1226
HBW 5/62.5	5	2.5	612.9
HBW 5/25	5	1	245.2
HBW 2.5/187.5	2.5	30	1839
HBW 2.5/62.5	2.5	10	612.9
HBW 2.5/31.25	2.5	5	306.5
HBW 2.5/15.625	2.5	2.5	153.2
HBW 2.5/6.25	2.5	1	61.29
HBW 1/30	1	30	294.2
HBW 1/10	1	10	98.07
HBW 1/5	1	5	49.03
HBW 1/2.5	1	2.5	24.52
HBW 1/1	1	1	9.807

表 1-2 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-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$
钢、镍合金、钛合金		30
铸铁 ^①	<140	10
	≥140	30
铜及铜合金	<35	5
	35 ~ 200	10
	>200	30
轻金属及合金	<35	2.5
	35 ~ 80	5
		10
		15
	>80	10
		15
铅、锡		1

① 对于铸铁试验，压头球直径一般为 2.5mm、5mm 和 10mm。

布氏硬度的优点是具有较高的测量精度，因其压痕面积大，能够比较真实地反映出材料的平均性能。另外，由于布氏硬度与 R_m 之间存在一定的经验关系，如热轧钢的 $R_m = (3.4 \sim 3.6)HBW$ ，冷变形铜合金 $R_m \approx 4.0HBW$ ，灰铸铁的 $R_m \approx 1.7(HBW - 40)$ ，因此得到广泛的应用。但是，布氏硬度不能测定高硬度材料。

(2) 洛氏硬度 试验原理如图 1-4 所示。它是以一定尺寸的淬火钢球或硬质合金球或以顶角为 120°的金刚石圆锥压入试样表面。试验时，先加初试验力，然后再加主试验力，压入试样表面之后经规定时间去除主试验力。在保留初试验力的情况下，根据试样表面的压痕深度 ($h = h_1 - h_0$) 确定被测材料的洛氏硬度。为了能用一种硬度计测定较大范围的硬度，常用三种硬度标尺，见表 1-3。

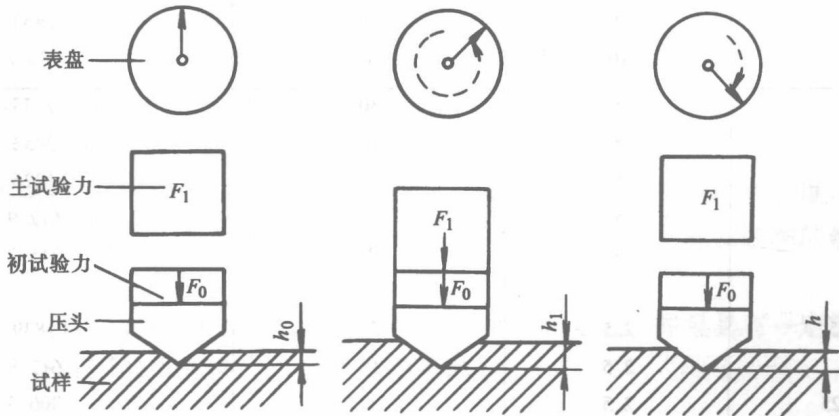


图 1-4 洛氏硬度测量原理图

表 1-3 常用洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度标尺	压头类型	总试验力/N	硬度值有效范围	应用举例
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.0	20 ~ 70HRC	一般淬火钢件
HRB	φ1.588mm 球 ^①	980.7	20 ~ 100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4	20 ~ 88HRA	硬质合金、表面淬火钢等

① 钢球或硬质合金球。

洛氏硬度试验的优点是操作迅速、简便，可由表盘上直接读出硬度值。由于其压痕很小，故可测量较薄工件的硬度。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，取平均值作为该材料的硬度值。

(3) 维氏硬度 布氏硬度不适于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。而维氏硬度可用统一标尺来测定从极软到极硬的材料。

维氏硬度的试验原理与布氏硬度的相似，也是以压痕单位表面积所承受试验力的大小来计算硬度值。它是用对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体，在一定试验力作用下，在试样试验面上压出一个正方形压痕，如图 1-5 所示。通过设在维氏硬度计上的显微镜来测量压痕两条对角线的长度，根据对角线的平均长度，从相应表中查出维氏硬度值。

维氏硬度试验所用试验力可根据试样的大小、厚薄等条件来选择。试验力按标准规定有 49N、98N、196N、294N、490N、980N 等。试验力保持时间为黑色金属 10 ~ 15s、有色金属 $(30 \pm 2)s$ 。

维氏硬度可测定从很软到很硬的各种材料，由于所加试验力小，压入深度较浅，故可测定较薄材料和各种表面渗层的硬度，且准确度高。但维氏硬度试验时需测量压痕对角线的长度，测试过程比较烦琐，不如洛氏硬度试验法那样简单、迅速。除此之外，还有努氏硬度、肖氏硬度、里氏硬度等。

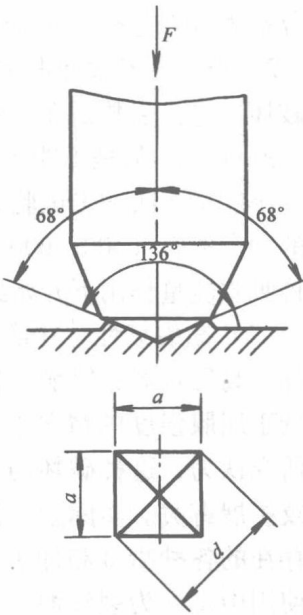


图 1-5 维氏硬度试验原理图

4. 韧性

(1) 冲击韧性 许多机械零件在工作中往往受到冲击载荷的作用，如活塞销、锤杆、冲模和锻模等。制造这类零件所用的材料不能单用在静载荷作用下的指标来衡量，而必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性。为了评定材料的冲击韧性，需进行冲击试验。

1) 摆锤式一次冲击试验。冲击试样的类型较多，常用的标准试样如图 1-6 所示。

一次冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的。试验时将带缺口的试样安放在试验机的机架上，使试样的缺口位于两支架中间，并背向摆锤的冲击方向。摆锤从一定的高度落下，将试样冲断。冲断时，在试样横截面的单位面积上所消耗的功效称为冲击韧度，用符号 a_K 表示。由于

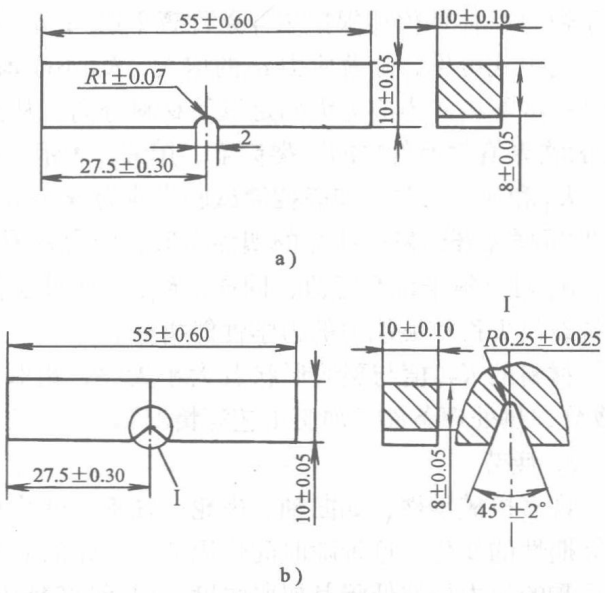


图 1-6 标准冲击试样
a) U 型缺口试样 b) V 型缺口试样

冲击试验采用的是标准试样，目前一般用吸收能量 K 表示。

需要说明的是，使用不同类型的试样（U 型缺口或 V 型缺口）进行试验时，其吸收能量分别为 KU 或 KV ，冲击韧度则分别为 a_{KU} 或 a_{KV} 。

2) 小能量多次冲击试验。实践表明，承受冲击载荷的机械零件很少因一次能量冲击而致破坏，绝大多数是在小能量多次冲击作用下破坏的，如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等。所以， a_K 值是不能代表这种零件抵抗多次小能量冲击的能力的。

小能量多次冲击试验是在落锤试验机上进行的。如图 1-7 所示，带有双冲点的锤头以一定的冲击频率（400、600 次/min）冲击试样，直至冲断为止。多次冲击抗力指标一般是以某种吸收能量作用下开始出现裂纹和最后断裂的冲击次数来表示的。

(2) 断裂韧性 在实际生产中，有的大型转动零件、高压容器、船舶、桥梁等，常在其工作应力远低于屈服强度的情况下突然发生低应力脆断。大量研究认为，这种破坏与零件制作本身存在裂纹和裂纹扩展有关。实际上，制件及其材料本身不可避免存在的各种冶金和加工缺陷，都相当于裂纹源或在使用中发展为裂纹源。在应力作用下，这些裂纹源进行扩展，一旦达到失稳扩展状态，便会发生低应力脆断。

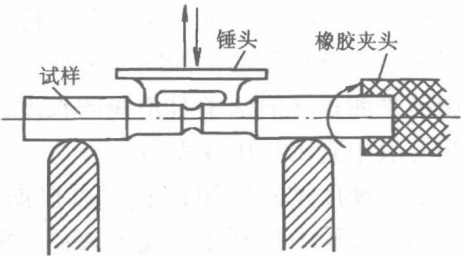


图 1-7 多次冲击弯曲试验示意图

实验研究指出，材料中存在裂纹时，裂纹尖端就是一个应力集中点，而形成应力分布特殊的应力场。断裂力学分析指出，这一应力场的强弱程度可用应力场强度因子 K_I 来描述。 K_I 值的大小与裂纹尺寸（ $2a$ ）和外加应力（ σ ）具有以下关系

$$K_I = Y\sigma \sqrt{a}$$

式中， Y 为裂纹形状系数，它是与裂纹形状、加载方式和试样几何形状有关的一个量纲为 1 的系数（具体数值可根据试样条件查手册）； σ 为外加应力； a 为裂纹的半长。

由上式可见，随着应力 σ 的增大， K_I 不断增大，当 K_I 增大到某一定值时，可使裂纹前沿某一区域内的内应力大到足以使材料分离，从而导致裂纹突然失稳扩展而发生断裂。这个 K_I 的临界值称为材料的断裂韧度，用 K_{Ic} 表示，单位是 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

K_I 和 K_{Ic} 的关系和静拉伸试验中应力 σ 与 σ_s 的关系一样，当试样应力 σ 增加到材料的 σ_s 时试样才开始发生明显的塑性变形。应力 σ 是不断变化的值，同样， K_I 也是不断变化的值； σ_s 对材料来说有定值，同样， K_{Ic} 对材料也有定值。换言之，断裂韧度 K_{Ic} 是表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标。

材料的 K_{Ic} 值与裂纹形状及大小无关，也和外加应力无关，只决定于材料本身的特性（成分、热处理条件、加工工艺等情况）。

5. 疲劳

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作周期性的变化，这种随时间作周期性变化的应力称为变动应力。在变动应力作用下，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会产生裂纹或突然断裂，这种现象称为材料的疲劳。据统计，在机械零件的失效中有 80% 以上是属于疲劳破坏。

机械零件之所以产生疲劳断裂，是由于在材料表面或内部存在缺陷（夹杂、划痕、尖