

21

世纪普通高等教育规划教材

工程材料与 金属热处理

ENGINEERING MATERIALS AND
HEAT TREATMENT

方勇 王萌萌 许杰 ○ 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育规划教材

工程材料与金属热处理

主 编 方 勇 王萌萌 许 杰
参 编 宋 琪 吴国强 郭国杰
主 审 孟庆东



机械工业出版社

本书以教育部机械基础课程教学指导委员会颁布的《普通高等学校工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》为指导,结合教学改革,联合该课程教学的一线教师编写而成。

本书主要内容包括工程材料的宏观性能、微观结构、钢铁及其合金材料、有色金属材料、金属材料的热处理、非金属材料及复合材料等。全书图文并茂,通俗易懂,注重联系生产实际,突出学生技能的培养。为配合本书的教学,还设计制作了电子课件,使用该书授课的教师可以在 www.cmpedu.com 上下载使用。作者在编写本书时密切关注新材料、新技术的发展,并将其给予适当的介绍。

本书内容较为丰富、简明,具有一定的特色,可作为高等院校机械制造类、材料类、机电类、控制类及自动化类等众多本、专科专业的基础课教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与金属热处理/方勇,王萌萌,许杰主编. —北京:机械工业出版社,2018.12

21世纪普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-61350-3

I. ①工… II. ①方… ②王… ③许… III. ①工程材料-高等学校-教材
②热处理-高等学校-教材 IV. ①TB3②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 280240 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

责任校对:肖琳 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·357千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61350-3

定价:39.80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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

随着我国工业技术的发展和改革开放的不断深入,汽车装备制造业、冶金、铁路、航空航天等行业保持较快的增长,各相关行业如何选择工程材料就显得非常重要,这就需要工程技术人员、管理人员要懂得工程材料及相关知识。

为满足社会不断增长的人才需求,越来越多的高等院校、技师学院、职业技术学院均开设工程材料(含金属材料热处理)及相关课程,本课程是各高校机械类和近机类专业本科生及专科生进入专业领域的专业基础课。

本书以教育部机械基础课程教学指导委员会颁布的《普通高等学校工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》为指导,结合目前教学改革现状编写而成,以培养学生具有合理选择工程材料及金属热处理方法的能力。

本书按照由浅入深、循序渐进、便于教学的思路,首先从工程材料宏观性能的介绍开始,使学生对工程材料有一个初认识;随之深入到材料的微观组织结构和材料热处理过程中的组织结构转变,以了解工程材料的本质并掌握必要的材料基础理论知识和常用金属材料热处理的方法和应用。最后,通过对机械零件的失效分析、合理选材的阐述,培养学生分析问题和解决问题的能力。另外,为了便于实验课程开展,本书附录部分包含有相应的实验内容,供教学选用。

本书由方勇、王萌萌、许杰任主编,由方勇统稿。参加本书编写的单位(人员)有:水利部产品质量标准研究所的方勇(前言、绪论、第1~4章、第11章)和许杰(第8、9章、附录);青岛技师学院的王萌萌(第5、6、7章);中国石油大学的宋琪(第1~7章复习题解答);天津海运职业学院吴国强(第10章,第8章和第9章的电子课件和习题解答)和郭国杰(第1~7章电子课件)。

本书由青岛科技大学孟庆东教授任主审,他对书稿进行了认真、细致的审阅,提出了许多建设性的意见。另外,各编者所在学校领导及主管部门也给予了大力支持,在此一并对上述单位与个人表示衷心感谢。

本书主要作为高等学校机械类、近机械类、机电类等专业的本、专科的工程材料及金属热处理课程的教材,也可供其他相关专业的师生和工程技术人员参考,另外,为了配合本书的教学,还设计制作了电子课件,授课教师可以在 www.cmpedu.com 上下载使用。

限于编者水平有限,书中恐有许多错误、不妥之处,希望采用本书的广大读者,提出宝贵的意见和建议,以利于今后的修订,使之更趋完善,在此深表感谢。

编 者

目 录

前 言	
第 0 章 绪论	1
0.1 材料科学的发展与应用	1
0.2 工程材料	1
0.3 工程材料与金属热处理课程的教学 目标和基本要求	2
第 1 章 工程材料的分类与性能	4
1.1 工程材料的分类	4
1.1.1 材料	4
1.1.2 工程材料及分类	4
1.2 工程材料的性能	5
1.2.1 物理性能	5
1.2.2 化学性能	5
1.2.3 力学性能	5
复习思考题	13
第 2 章 金属材料的结构	15
2.1 固体材料的结构	15
2.1.1 晶态结构	15
2.1.2 非晶态结构	16
2.2 金属晶体结构	16
2.2.1 常见金属晶体的结构	16
2.2.2 实际金属的结构	17
2.3 纯金属的结晶	17
2.3.1 纯金属的结晶过程	17
2.3.2 细化晶粒的方法	18
2.3.3 金属的同素异构转变	19
2.4 合金的晶体结构	19
2.4.1 固溶体	20
2.4.2 金属化合物	20
2.4.3 机械混合物	20
2.5 匀晶相图	20
2.5.1 相图的建立	21
2.5.2 相图分析	21
2.5.3 合金的平衡结晶过程	21
2.5.4 杠杆定律	21
2.5.5 枝晶偏析	22
2.6 共晶相图	23
2.7 合金的结晶	24
2.7.1 合金的结晶过程	24
2.7.2 合金结晶的冷却曲线	24
复习思考题	25
第 3 章 钢的热处理原理	26
3.1 热处理概述	26
3.2 钢在加热时的转变	26
3.2.1 奥氏体转变温度与 Fe-Fe ₃ C 相图的关系	27
3.2.2 奥氏体的形成	27
3.2.3 影响奥氏体转变速度的因素	28
3.2.4 奥氏体的晶粒度及控制因素	30
3.3 钢在冷却时的转变	31
3.3.1 过冷奥氏体的等温转变图	32
3.3.2 过冷奥氏体的连续冷却转变图	39
3.3.3 过冷奥氏体冷却转变图的应用	39
复习思考题	40
第 4 章 钢的热处理工艺	41
4.1 钢的热处理工艺分类	41
4.2 钢的普通热处理	41
4.2.1 钢的退火与正火	41
4.2.2 钢的淬火与回火	44
4.3 钢的表面热处理	47
4.3.1 钢的表面淬火	47
4.3.2 钢的化学热处理	50
4.4 钢的热处理新技术	54
4.4.1 可控气氛热处理	54
4.4.2 真空热处理	55
4.4.3 离子渗扩热处理	55

4.4.4 形变热处理	56	8.2.2 纯铝的性能、牌号及用途	127
4.4.5 激光淬火和电子束淬火	58	8.2.3 铝合金	128
4.5 热处理工艺的应用	59	8.3 铜及铜合金	135
4.5.1 常见的热处理缺陷	59	8.3.1 概述	135
4.5.2 热处理工件的结构工艺性	59	8.3.2 铜合金的分类及牌号表示方法	136
4.5.3 热处理技术条件的标注及热处理 工序位置安排	60	8.3.3 加工黄铜(黄铜)	137
复习思考题	61	8.3.4 加工白铜	138
第5章 金属材料综述	62	8.3.5 青铜	139
5.1 常用金属材料的种类和用途	62	8.4 钛及钛合金	141
5.1.1 认识金属材料	62	8.4.1 加工钛(纯钛)的性能、牌号及 用途	141
5.1.2 金属材料的分类	63	8.4.2 钛合金	141
5.2 碳素钢与合金钢概述	64	8.5 滑动轴承合金	142
5.3 有色金属概述	64	8.5.1 滑动轴承合金的理想组织	143
复习思考题	65	8.5.2 常用滑动轴承合金	143
第6章 工业用钢	66	8.6 粉末冶金材料和硬质合金	144
6.1 工业用钢的分类	66	8.6.1 常用的粉末冶金材料	144
6.1.1 我国的习惯分类方法	66	8.6.2 硬质合金	146
6.1.2 常存杂质和合金元素在钢中的 作用	68	复习思考题	148
6.2 非合金钢	73	第9章 非金属材料	149
6.2.1 非合金钢的种类、牌号、性能和 用途	73	9.1 非金属材料的概念	149
6.2.2 碳素结构钢	74	9.2 高分子材料	149
6.2.3 碳素工具钢	78	9.2.1 高分子材料的基本知识	149
6.3 合金钢	80	9.2.2 常用高分子材料	151
6.3.1 合金钢的分类方法	80	9.3 陶瓷材料	157
6.3.2 合金结构钢	82	9.3.1 认识陶瓷材料	157
6.3.3 特殊性能钢	95	9.3.2 陶瓷材料的种类及应用	158
6.3.4 合金工具钢	105	9.3.3 陶瓷的基本性能	158
复习思考题	113	9.3.4 陶瓷材料领域的前沿技术	160
第7章 铸铁	115	9.3.5 宝石、钻石和金刚石	161
7.1 概述	115	复习思考题	161
7.1.1 铸铁的特点	115	第10章 新型材料	163
7.1.2 铸铁的分类	115	10.1 问题的提出——新型材料	163
7.2 铸铁的石墨化	116	10.2 复合材料	163
7.3 常用铸铁	118	10.2.1 认识复合材料	163
复习思考题	126	10.2.2 复合材料中各组元的作用	164
第8章 有色金属及合金	127	10.2.3 复合材料的性能特征	165
8.1 有色金属	127	10.2.4 常用的复合材料	166
8.2 铝及铝合金	127	10.3 纳米材料	168
8.2.1 概述	127	10.3.1 纳米材料的分类	169
		10.3.2 纳米材料的特性	169
		10.3.3 纳米材料的应用	170
		10.4 其他新型材料——功能材料	171

10.4.1 功能材料常见的分类方法	171	11.5.2 模具钢的分类及性能要求	180
10.4.2 几种主要功能材料的简介	171	11.5.3 冷作模具钢	180
复习思考题	175	11.5.4 热作模具钢	183
第 11 章 工程材料的应用选择	176	11.5.5 塑料模具材料	187
11.1 机械零件的失效分析及工程材料的选择	176	11.6 化工设备用材选材分析	190
11.1.1 机械零件的失效与分析	176	11.6.1 化工设备用材料	190
11.1.2 工程材料选择的基本原则	177	11.6.2 压力容器用钢	190
11.2 机床零件用材的选择分析	178	复习思考题	193
11.3 汽车零件用材的选择分析	178	附录	195
11.4 仪器仪表用材的选择分析	179	附录 A 试验	195
11.5 模具用材的选择分析	179	附录 B 黑色金属硬度强度换算表 (部分)	222
11.5.1 模具材料选择和使用意义	179	参考文献	225

第0章

绪论

0.1 材料科学的发展与应用

材料是人类用来制作各种有用器件的物质，是人类生产和社会发展的重要物质基础，也是日常生活中不可或缺的组成部分。

自从地球上有了人类，材料的利用和发展就成了人类文明发展史的里程碑。如图 0.1 所示，包括石器时代、陶器时代、青铜器时代和铁器时代等。材料又是发展高科技的先导和基石。一种新材料的出现，往往可以导致一系列新的技术突破，而各种新技术及新兴产业的发展，无不依赖于新材料的研发，如航空航天所需要的轻质高强度材料，医学上的人工脏器、人造骨骼等特殊材料及智能材料、复合材料和纳米材料等。



图 0.1 材料的发展与人类社会的关系简图

材料、能源、信息被称为现代社会的三大支柱，而能源和信息的发展，在一定程度上又依赖于材料的进步。因此许多国家都把材料科学作为重点发展学科之一，使之成为新技术革命坚实的基础。

0.2 工程材料

工程材料是指工程上使用的材料，主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、农业、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域的材料，是生产和生活的物质基础。其种类繁多

多,有许多不同的分类方法。若按材料的化学成分、结合键的特点进行分类,可以分为金属材料、非金属材料 and 新型材料三大类。

1. 金属材料

金属材料是以金属键结合为主的材料,具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽,是目前使用量最大、用途最广的工程材料。

我国是金属材料发现和应用最早的国家,远在新石器时代的仰韶文化开始,就已经会炼制和应用黄铜。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的最高峰,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“后母戊”大鼎。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,当时我国的钢铁生产及金属材料成形技术一直在世界上遥遥领先。但是18世纪后,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,科学技术处于停滞落后状态。直至1949年中华人民共和国成立后,我国的科学技术才得到较快发展。

金属材料分为黑色金属和有色金属两大类。

黑色金属是指铁和以铁为基体的合金材料,即钢、铸铁材料,它占金属材料总量的95%以上。由于黑色金属具有力学性能优良、可加工性能好、价格低廉等特点,在工程材料中一直占据主导地位。

除黑色金属之外的所有金属及合金统称为有色金属。有色金属为轻金属(如铝、铜等)。

金属材料一般需要经过“金属热处理”后才能达到所需要的性能,因此在研究金属材料时必须研究金属热处理的理论和实践。

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,各种新材料不断涌现。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。

2. 非金属材料

非金属材料如高分子材料、陶瓷材料等,在本书不作重点介绍。

总之,在日常生活生产和科技各领域都离不开工程材料。工程材料的选用直接影响机械(或工程结构)中零件(或构件)的质量、成本和生产效率,因此,作为工程技术人员必须掌握各种工程材料的性能、特点、应用。

0.3 工程材料与金属热处理课程的教学目标和基本要求

工程材料与金属热处理是机械类专业必修的一门技术基础课,也是近机类和部分非机类专业普遍开设的一门课程。旨在使学生了解并掌握工程材料,培养学生的工程素质、实践能力。本课程的教学目标和基本要求可以归纳为:

- 1) 建立工程材料和金属热处理的完整概念,培养良好的工程意识。
- 2) 掌握必要的材料科学基础理论。

- 3) 熟悉各类常用结构工程材料,包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料等的成分、结构、性能、应用特点及牌号表示方法。
- 4) 掌握强化金属材料的基本途径。
- 5) 了解新型材料的发展及应用。
- 6) 掌握选择零件材料的基本原则和方法步骤,了解失效分析方法及应用,了解表面处理技术的应用;初步具有合理选择材料及强化(或改性、表面技术应用等)方法的能力。
- 7) 了解与本课程有关的成形工艺方法(见附录)。

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,并应采用必要的试验、电化教学、多媒体课件、现场教学等教学方法。

第1章

工程材料的分类与性能

1.1 工程材料的分类

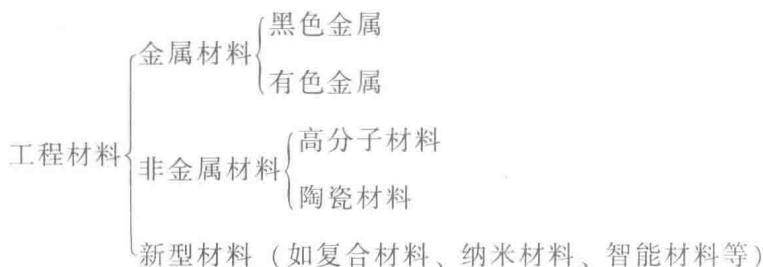
1.1.1 材料

材料是指那些能够用于制造结构、器件或其他有用产品的物质；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、橡胶等天然材料。随着社会的发展，人们对天然材料进行各种加工处理，使它们更适合人类的使用，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。

1.1.2 工程材料及分类

工程材料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，在日常生活生产和科技各领域都离不开工程材料，工程材料属于人造材料。可以按不同的角度进行分类。

1. 按化学性质分



2. 按使用性能分

工程材料 { 结构材料 (指作为承力结构使用的材料, 其使用性能主要是力学性能)
功能材料 (使用性能主要是指光、电、磁、热、声等特殊性能)

3. 按应用领域分

按应用领域, 可分为机械工程材料、信息材料、能源材料、建筑材料、生物材料、航空航天材料等。

1.2 工程材料的性能

工程材料的性能一般可分为两类：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）和力学性能等。其中，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。另一类是工艺性能，是指材料在加工过程中所表现出来的性能，分述如下。

1.2.1 物理性能

(1) 密度 材料的密度就是单位体积的质量，用符号 ρ (g/cm^3 或 kg/m^3)表示。金属材料中，Al、Mg、Ti密度较低，Cu、Fe、Pb、Zn等密度较高；非金属材料中，塑料的密度较低，陶瓷的密度较高。

(2) 熔点 熔点是指缓慢加热时，材料由固态转变为液态的温度 ($^{\circ}\text{C}$ 或K)。金属材料中，Pb、Sn熔点低，Fe、Ni、Cr、Mo等金属熔点高；非金属材料中，陶瓷的熔点高，塑料等材料无熔点，只有软化点。

(3) 导热性 导热性是指材料传导热量的能力。金属材料中，Ag和Cu的导热性最好，Al次之；合金钢的导热性不如非合金钢好；非金属中，金刚石的导热性最好。

(4) 导电性 导电性是材料传导电流的能力。金属具有导电性，Ag最好，其次是Cu、Al。

(5) 热膨胀性 材料因温度变化而引起的体积变化称为热膨胀性，一般用线胀系数表示，即温度每升高 1°C （或K），单位长度的膨胀量。其值越大，材料的尺寸或体积随温度变化的程度越大。因此，在温差变化较大环境下工作的长构件（如火车铁轨），必须考虑热胀冷缩带来的影响。

(6) 磁性 材料在磁场中能被磁化或导磁的能力称为导磁性或磁性，金属材料可分为铁磁性材料、抗磁性材料和顺磁性材料。

1.2.2 化学性能

化学性能是指材料与周围介质接触时抵抗发生化学或电化学反应的能力，主要有耐蚀性和热稳定性等。

(1) 耐蚀性 耐蚀性是指常温下材料抵抗各种介质侵蚀的能力。

(2) 热稳定性 热稳定性是指材料在高温抵抗产生氧化现象的能力。

1.2.3 力学性能

力学性能是指材料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能的性能判据。材料的力学性能指标有强度、刚度、硬度、塑性、冲击韧性、疲劳极限和断裂韧性等。这些指标是极为重要的力学性能指标，可通过试验方法测取。如拉伸试验、压缩试验、疲劳试验、硬度试验、冲击试验等。

下面以工程材料中使用最多的金属材料为例，介绍材料的主要的力学性能。

(1) 强度 材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。按外力作用的性质不同，主要有屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等。工程上常用的是屈服强度和抗拉强度，这两个强度指标可通过试验测出。

1) 静载时的拉伸强度试验。拉伸试验是在材料拉伸试验机上用静拉力对拉伸试样进行轴向拉伸的试验。拉伸试验机如图 1-1 所示，拉伸试样横截面一般为圆形、矩形或多边形等，尺寸按国家标准，分为长试样和短试样。图 1-2 所示为圆柱形试样， d 为试样平行长度的直径， L_0 为试样的原始标距， d_0 为试样断口处的最小直径， L_u 为断后标距。

将试样装在拉伸试验机的上下夹头，开动拉伸试验机，缓慢加载拉伸载荷，随着载荷的增加，试样逐渐伸长直至拉断。试样拉断前后的拉伸试样照片如图 1-3 所示。

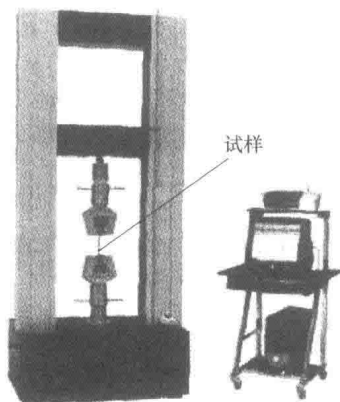


图 1-1 拉伸试验机

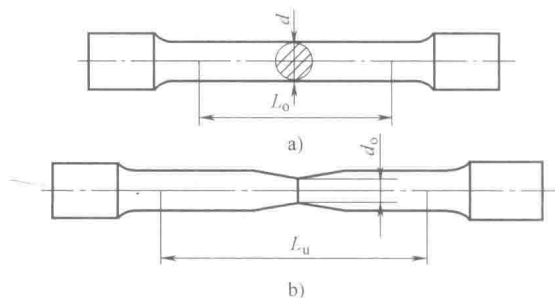


图 1-2 拉伸前及拉断后的拉伸试样

拉伸过程中，试样所受的拉力与延伸量是不断变化的，常用到应力、伸长率的概念。应力是指拉伸过程中任意时刻试样所受的拉力除以试样的原始横截面，伸长率是指标距部分的延伸量与原始标距之比的百分率。

试验装置可记录拉伸过程中应力与伸长率的关系曲线，即应力-伸长率曲线。图 1-4 所示为低碳钢的应力-伸长率曲线。

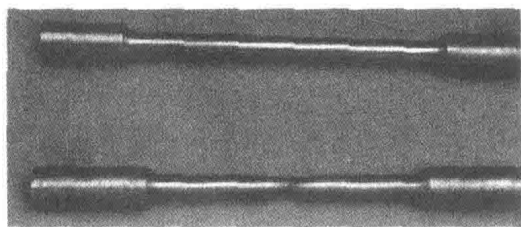


图 1-3 拉伸前及拉断后的拉伸试样照片

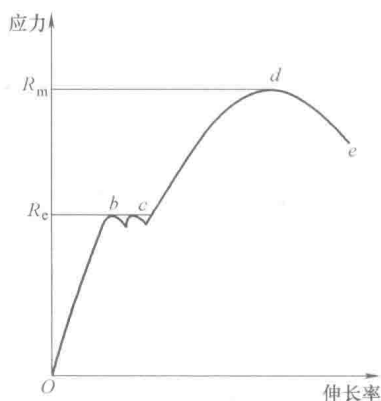


图 1-4 低碳钢的应力-伸长率曲线

由应力-伸长率曲线可知, 应力为 0 时伸长率为 0, 应力增大到 R_e 的过程中, 试样的应变与伸长率之间成正比例关系, 在应力-伸长率曲线上表现为一条斜直线 Ob 。在此范围内卸除载荷, 试样能完全恢复到原来的形状与尺寸, 即试样处于弹性变形阶段。图中 R_e 是试样保持弹性变形的最大拉应力。

当应力增加到 R_e 时, 曲线在 $b-c$ 间出现水平或锯齿形线段, 表示拉力不再增加的情况下, 试样也会继续延伸, 这种现象称为“屈服”, 水平段称为屈服阶段。此阶段试样将产生塑性变形, 卸载后变形不能完全恢复, 塑性变形将被保留下来。

当应力超过 R_e 后, 曲线表现为一段上升曲线, 表示随着塑性变形量的增大, 试样变形抗力也逐渐增大, 即试样抵抗变形的能力将增强。此阶段称为冷变形强化阶段, 此阶段试样平行长度段产生大量均匀塑性变形。

当应力增至最大值 R_m 时, 试样伸长量迅速增大且集中于试样的局部长度段, 使局部面积迅速减小, 出现“缩颈”现象。由于缩颈处面积急剧缩小, 单位面积承载大大增加, 最后到 e 点试样被拉断。此阶段为局部塑性变形与断裂阶段。

2) 强度指标。强度是指材料抵抗塑性变形或断裂的能力。常用的强度指标有屈服强度与抗拉强度等, 可由应力-伸长率曲线直接得出。

① 屈服强度。屈服强度是指材料对塑性变形的抵抗能力, 是试样在拉伸试验期间产生塑性变形而力不增加的应力点, 即 R_e , 单位为 MPa。

工业上使用的一些金属材料, 如高碳钢、铝合金等, 进行拉伸试验时, 屈服现象不明显, 也不会产生缩颈现象, 测定 R_e 很困难, 因此规定一个相当于屈服强度的强度指标, 以标距延伸率为 0.2% 时的应力值定为其屈服强度, 称为规定非比例延伸强度, 用 $R_{p0.2}$ 表示。

金属零件和结构在工作中一般是不允许产生塑性变形的, 所以设计零件、结构时, 屈服强度 R_e 是重要的设计依据。

② 抗拉强度。抗拉强度是指材料对断裂的抵抗能力, 是试样断裂前能承受的最大应力值, 即 R_m , 单位为 MPa。

R_m 是材料由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值, 也是材料在静拉伸条件下的最大承载能力。由于测试数据较准确, 有关手册和资料提供的设计、选材的强度指标都是抗拉强度 R_m 。

③ 刚度。刚度是指材料对弹性变形的抵抗能力, 是试样产生单位弹性变形所需的应力。对应于应力-伸长率曲线上的弹性变形阶段, 应力与伸长量的比值, 即直线 Ob 的斜率。刚度也称为弹性模量, 用 E 表示。有些精密零件对变形要求较高, 甚至连弹性变形都不允许, 设计零件时需考虑材料的刚度。

(2) 塑性 塑性是指断裂前材料产生塑性变形的能力。塑性也是通过拉伸试验测试的, 用拉伸试样断裂时的最大相对伸长量来表示金属的塑性指标, 常用断后伸长率和断面收缩率表示。

1) 断后伸长率。拉伸试样在进行拉伸试验时, 在拉力的作用下产生不断伸长的塑性变形。试样拉断后的伸长量与试样原始长度的百分比称为断后伸长率, 用符号 A 表示 =

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中, L_u ——试样断后标距 (mm);

L_0 ——试样原始标距 (mm)。

使用长试样测定的断后伸长率用符号 $A_{11.3}$ 表示, 使用短试样测定的断后伸长率用符号 A 表示。同一种材料的断后伸长率 $A_{11.3}$ 和 A 数值是不相等的, 一般短试样 A 都大于长试样 $A_{11.3}$ 。不同材料进行比较时, 必须是相同标准试样测定的数值才有意义。

2) 断面收缩率。断面收缩率是指试样拉断后横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比。断面收缩率用符号 Z 表示。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2);

S_u ——试样拉断后断口的横截面积 (mm^2)。

机械零件工作时突然超载, 如果材料塑性好, 就能先产生塑性变形而不会突然发生断裂破坏。所以, 大多数机械零件除满足强度要求外, 还必须有一定的塑性。但是, 铸铁、陶瓷等脆性材料的塑性极低, 拉伸时几乎不产生明显的塑性变形, 超载时会突然断裂, 使用时必须注意。

(3) 硬度 硬度表示材料抵抗局部变形的能力, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力, 它是衡量材料软硬的指标。其值的大小能够反映材料在化学成分和组织结构及处理方法上的差异, 在一定程度上反映了材料的综合力学性能指标, 是检验产品质量、确定合理加工工艺不可缺少的检测性能之一。

材料的硬度是通过硬度试验测得。硬度试验简单易行, 又无损于零件, 且可以近似推算出材料的其他力学性能 (如强度、耐磨性、切削加工性、可焊性等), 因此在生产和科研中应用广泛。

常用硬度测定方法有压入法、划痕法等, 其中压入法最为普遍。压入法是在规定的静态试验力作用下, 将压头压入材料表面层, 然后根据压痕的面积大小或深度测定其硬度值。用压入法测材料硬度, 常用的有布氏硬度 (HBW)、洛氏硬度 (HRA、HRB、HRC) 和维氏硬变 (HV) 试验法。

1) 布氏硬度。布氏硬度试验机如图 1-5 所示, 其试验原理如图 1-6 所示。用一定直径 D 的硬质合金球, 以规定的试验力 F 压入试样表面, 保持规定的时间, 去除试验力, 测量试样表面的压痕平均直径 d , 然后根据压痕平均直径 d 计算硬度值。布氏硬度值是指压痕球冠面积上所产生的平均抵抗力, 用符号 HBW 表示。布氏硬度值可用下式计算

$$\text{HBW} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-3)$$

式中 F ——试验力 (N, 单位用 kgf 时, 去掉 0.102);

D ——硬质合金球直径 (mm);

d ——压痕平均直径 (mm)。

式中, 只有 d 是变量, 因此试验时只要测量出压痕直径, 就可通过计算或查布氏硬度表得出 HBW 值。布氏硬度数值一般不用计算, 查布氏硬度表得出。

为适应各种硬度级别及各种厚度的金属材料的硬度测试, GB/T 231.1—2009 《金属材

料布氏硬度试验第1部分：试验方法》规定了各种材料的试验条件，见表1-1。进行布氏硬度试验时，硬质合金球直径 D 、试验力 F 和保持时间应根据被测金属种类和厚度进行选择。



图 1-5 布氏硬度试验机

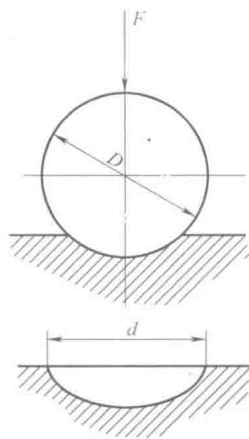


图 1-6 布氏硬度试验原理

表 1-1 金属布氏硬度试验规范

金属种类	布氏硬度值范围 HBW	试样厚度 /mm	$0.102F/D^2$	硬质合金球 直径 D /mm	试验力 /kN (kgf)	试验力保持时间 /s
黑色 金属	≥ 140	6~3	30	10.0	29.42 (3000)	12
		4~2		5.0	7.355 (750)	
<2	2.5	1839 (187.5)				
	<140	>6	10	10.0	9.807 (1000)	12
		6~3		5.0	2.452 (250)	
有色金属	>200	6~3	30	10.0	29.42 (3000)	30
		4~2		5.0	7.355 (750)	
		<2		2.5	1.839 (187.5)	
	35~200	9~3	10	10.0	9.807 (1000)	30
		6~3		5.0	2.452 (250)	
	<35	>6	2.5	10.0	2.452 (250)	60

布氏硬度的标注方法是，硬度值标注在硬度符号前面，在硬度符号后面用相应的数字注明硬质合金球直径、试验力大小和试验力保持时间。例如，500HBW5/750 表示：用直径为 5mm 的硬质合金球，在 750kgf (7.355kN) 试验力的作用下保持 10~15s (可不标出) 测得的布氏硬度值为 500。

由于布氏硬度测定的是较大压痕面积上的平均受力，因此不受材料内部组成物细微不均匀性的影响，测得的硬度值比较准确，数据重复性强。由于布氏硬度压痕大，对材料表面的损伤也较大，硬度高的材料、薄壁工件和表面要求高的工件，不宜用布氏硬度测试。布氏硬度测定通常适用于有色金属、低碳钢、灰铸铁和经退火、正火和调质处理的中碳钢等。

2) 洛氏硬度。洛氏硬度试验机如图 1-7 所示，试验原理图如图 1-8 所示。以锥角为 120°

的金刚石圆锥体或直径为 1.5875mm 的淬火钢球作为压头压入试样表面，先加初试验力 F_0 (98N)，使压头接触试样表面，此时有一个微小压入深度 h_0 ；再加上主试验力 F_1 ，压入试样表面后经规定的保持时间，去除主试验力，在保留初试验力 F_0 的情况下，根据试样压入的深度 h 来衡量金属的硬度大小。

材料越硬， h 值越小。为适应人们习惯数值越大硬度越高的观念，故人为地规定一个常数 K 减去压痕深度 h 作为洛氏硬度指标，并规定每一个洛氏硬度试验单位为 0.002mm。则洛氏硬度值为

$$HR = \frac{K-h}{0.002} \quad (1-4)$$

式中 h ——压痕深度 (mm)；

K ——常数，使用金刚石圆锥体压头时常数 K 为 0.2，使用淬火钢球压头时，常数 K 为 0.26。

由压痕深度可换算出硬度的数值，从洛氏硬度计表盘上可直接读出硬度值。

洛氏硬度根据试验时选用的压头类型和试验力大小的不同，分别采用不同的标尺进行标注。常采用的标尺有 A、B、C，试验条件及应用范围见表 1-2。洛氏硬度的标注方法为：硬度数值写在硬度符号 HR 的前面，后面写使用的标尺，如 52HRC 表示用“C”标尺测定的洛氏硬度值为 52。

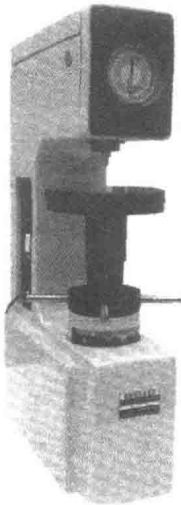


图 1-7 洛氏硬度试验机

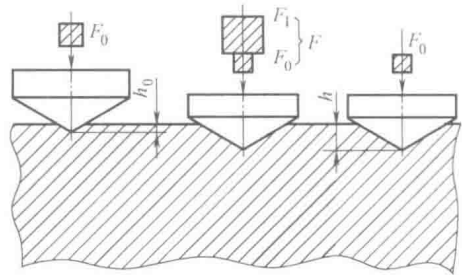


图 1-8 洛氏硬度试验原理图

表 1-2 洛氏硬度试验规范

符号	压头类型	总试验力 F_B (kgf) (N)	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	60 (588.4)	60~88	硬质合金, 表面淬火、渗碳钢等
HRB	直径 1.5875mm 淬火钢球	100 (980.7)	20—100	有色金属, 退火钢、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥	150 (1471.1)	20~70	淬火钢, 调质钢等

洛氏硬度测定方便快捷，测量的硬度范围大，对试样表面损伤小，广泛应用于各种材料