



普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

实用机械工程 材料及选用

张正贵 牛建平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014061631

TH14
35

普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

实用机械工程材料及选用

主 编 张正贵 牛建平
副主编 金 光 董世柱
参 编 吕树国 肖 旋 赵时璐 闫维耀
主 审 孙振岩



TH14
35

机械工业出版社



北航

C1748106

183130310

本书从机械类卓越工程师培养目标出发,着力工程实践能力和工程创新能力培养,突出培养学生对零件服役条件及材料性能的理解能力,并据此合理选材并正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。全书共分为13章及附录,系统地介绍了金属材料的性能、金属学基础知识、钢的热处理、金属的塑性变形及再结晶、常用的金属材料、非金属材料 and 复合材料、机械制造中零件材料的选择及应用、组织观察分析、材料相关标准等。每章后面都附有小结、习题、知识拓展等内容,进一步帮助学生加深对相关内容的理解,进一步扩大新材料、新工艺及材料应用的知识面。

本书结构清晰,语言简练,实例众多,突出工程背景、工程应用,具有很强的实用性。可作为本科院校、高职高专机械类各专业或近机类专业的通用教材,也可供相关教师、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用机械工程材料及选用/张正贵,牛建平主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 8

普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

ISBN 978-7-111-46813-4

I. ①实… II. ①张…②牛… III. ①机械制造材料—高等学校—教材
IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 151988 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 冯 钹

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔 肖 琳

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.75 印张·529 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46813-4

定价:43.00 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

前 言

本书系普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材。本书从实际工程需求出发,以达到培养学生使用和选择工程材料能力为主要目的,注重理论与工程实践相结合,以必需与够用为度,构建教材内容体系。以实际应用为出发点,着重分析问题、解决问题能力的培养,阐明机械工程材料的基本理论,了解材料的成分、加工工艺、组织、结构与性能之间的关系,介绍常用机械工程材料及其应用等基本知识。

本书分13章,系统介绍了工程材料及其性能指标、材料科学基础知识、钢的热处理、工业用钢、铸铁、有色金属及合金、非金属材料、工程材料的失效分析及合理选用、工程材料在机械等相关行业的应用等。书中列举了大量生产中的应用实例、图片、图表等,每一章后面附有小结、习题及知识拓展阅读,实验部分单列了一章,从而使学生通过学习,巩固教材内容,扩展知识面,具备根据机械零件使用条件和性能要求进行合理选材及制订工艺路线的初步能力,达到培养应用能力的目的。知识拓展中引入了较多的新材料、新技术知识,有利于培养学生的创新意识、扩展知识面。

本书体系合理,内容丰富,注重理论联系实际,实例丰富,材料牌号均采用了最新的国家标准。书末附有常用材料力学性能指标名称和符号对照、国内外常用钢号、金属热处理工艺的分类及代号等,可供读者阅读有关国内外教材或文献时查阅。

本书由沈阳大学张正贵、牛建平、董世柱、赵时璐,沈阳理工大学金光、肖旋、吕树国、闫维耀编写,分工如下:绪论、第1章和第6章由张正贵编写;第2章、第3章、第4章、第13章由金光编写;第5章、第10章由赵时璐编写;第7章、第8章由董世柱编写;第9章知识拓展阅读由肖旋编写,其余部分由闫维耀编写;第11章、附录由牛建平编写;第12章12.1~12.3由肖旋编写,其余部分由吕树国编写。全书由张正贵、牛建平主编,金光和董世柱副主编。

本书由东北大学孙振岩教授主审。孙老师认真仔细地审阅了全书,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考了相关教材、文献及网上资料等,在此一并表示感谢。

由于编者专业水平有限,本书难免有错误和不妥之处,恳请广大同行和读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1章 金属材料的性能	4
-------------------	---

1.1 金属材料的物理性能和化学性能	4
--------------------------	---

1.1.1 金属材料的物理性能	4
-----------------------	---

1.1.2 金属材料的化学性能	5
-----------------------	---

1.2 金属材料的力学性能	6
---------------------	---

1.2.1 金属材料所受载荷与力学性能	6
---------------------------	---

1.2.2 强度	7
----------------	---

1.2.3 塑性	10
----------------	----

1.2.4 硬度	10
----------------	----

1.2.5 金属材料的韧性	15
---------------------	----

1.2.6 疲劳强度	18
------------------	----

1.3 金属材料的工艺性能	19
---------------------	----

1.3.1 铸造性能	19
------------------	----

1.3.2 压力加工性能	20
--------------------	----

1.3.3 焊接性能	20
------------------	----

1.3.4 切削加工性	20
-------------------	----

1.3.5 热处理性能	21
-------------------	----

本章小结	21
------------	----

习题	22
----------	----

知识拓展阅读：工程材料性能比较	23
-----------------------	----

第2章 纯金属与合金的晶体结构	26
-----------------------	----

2.1 纯金属的晶体结构	26
--------------------	----

2.1.1 晶体结构	26
------------------	----

2.1.2 常见的晶格类型	27
---------------------	----

2.1.3 金属晶体结构的缺陷	30
-----------------------	----

2.2 合金的晶体结构	33
-------------------	----

2.2.1 合金的基本概念	33
---------------------	----

2.2.2 合金的结构	33
-------------------	----

本章小结	36
------------	----

习题	36
----------	----

知识拓展阅读：钢铁是如何炼成的	38
-----------------------	----

第3章 纯金属与合金的结晶	42
---------------------	----

3.1 纯金属的结晶	42
------------------	----

3.1.1 纯金属的冷却曲线及过冷度	42
--------------------------	----

3.1.2 纯金属的结晶过程	43
----------------------	----

3.1.3 晶粒大小对金属力学性能的影响	45
----------------------------	----

3.2 合金的结晶	45
-----------------	----

3.2.1 二元相图的建立	46
---------------------	----

3.2.2 二元相图的基本类型与分析	47
--------------------------	----

本章小结	53
------------	----

习题	54
----------	----

知识拓展阅读：古代的“宝刀”是如何炼成的	56
----------------------------	----

第4章 铁碳合金相图	58
------------------	----

4.1 铁碳合金的组织	58
-------------------	----

4.1.1 纯铁的同素异构转变	58
-----------------------	----

4.1.2 铁碳合金的基本相	58
----------------------	----

4.2 铁碳合金相图	60
------------------	----

4.2.1 铁碳合金相图的分析	61
-----------------------	----

4.2.2 铁碳合金的分类	62
---------------------	----

4.2.3 典型铁碳合金的平衡结晶过程	62
---------------------------	----

4.2.4 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响	68
------------------------------	----

4.2.5 铁碳合金相图的应用	69
-----------------------	----

4.3 凝固组织及其控制	70
--------------------	----

4.3.1 金属及合金结晶后的晶粒大小及其控制	70
-------------------------------	----

4.3.2 铸锭的组织及其控制	71
-----------------------	----

本章小结	73
------------	----

习题	73
----------	----

知识拓展阅读：钢材的火花鉴别	75
----------------------	----

第5章 金属的塑性变形与再结晶	78
-----------------------	----

5.1 金属的塑性变形	78
-------------------	----

5.1.1 单晶体的塑性变形	78
----------------------	----

5.1.2 多晶体的塑性变形	82
----------------------	----

5.2 冷塑性变形对金属组织与性能的影响	83
----------------------------	----

5.2.1 塑性变形对显微组织和结构的影响	83
-----------------------------	----

5.2.2 塑性变形对性能的影响	84
------------------------	----

5.2.3 残余应力	85
------------------	----

5.3 回复与再结晶	86
5.3.1 回复	86
5.3.2 再结晶	86
5.3.3 晶粒长大	88
5.4 金属的热塑性变形	89
5.4.1 热加工与冷加工的区别	89
5.4.2 热加工对组织和性能的影响	90
本章小结	91
习题	92
知识拓展阅读: 纳米材料	93
第6章 钢的热处理	95
6.1 概述	95
6.2 钢在加热时的转变	96
6.2.1 钢在加热时的组织转变	96
6.2.2 奥氏体晶粒长大	98
6.3 钢在冷却时的转变	99
6.3.1 过冷奥氏体的等温转变	100
6.3.2 过冷奥氏体的连续冷却转变	102
6.3.3 过冷奥氏体冷却转变后的组织及性能	103
6.4 退火与正火	109
6.4.1 退火的目的和工艺	109
6.4.2 正火的目的及工艺	112
6.4.3 退火与正火工艺的选择	113
6.5 淬火	113
6.5.1 淬火工艺	113
6.5.2 淬火冷却介质	114
6.5.3 淬火方法	115
6.5.4 钢的淬透性与淬硬性	117
6.5.5 淬火缺陷	120
6.6 回火	121
6.6.1 回火目的	121
6.6.2 回火对钢性能的影响	122
6.6.3 回火时钢的组织变化	122
6.6.4 回火温度	123
6.7 表面淬火	123
6.7.1 火焰淬火	123
6.7.2 感应淬火	124
6.8 化学热处理	126
6.8.1 渗碳	127
6.8.2 渗氮(氮化)	129
6.8.3 碳氮共渗	131
本章小结	132

习题	132
知识拓展阅读: 超细晶粒钢	134
第7章 工业用钢	138
7.1 钢的分类与编号	138
7.1.1 钢的分类	138
7.1.2 钢的编号	139
7.2 钢中杂质与合金元素	144
7.2.1 钢中常存杂质元素对性能的影响	144
7.2.2 合金元素在钢中的主要作用	145
7.3 结构钢	148
7.3.1 碳素结构钢	148
7.3.2 低合金高强度结构钢	149
7.3.3 优质碳素结构钢	152
7.3.4 渗碳钢	152
7.3.5 调质钢	155
7.3.6 弹簧钢	158
7.3.7 滚动轴承钢	161
7.4 工具钢	163
7.4.1 刀具钢	163
7.4.2 模具钢	168
7.4.3 量具用钢	172
7.5 特殊性能钢	174
7.5.1 不锈钢	174
7.5.2 耐热钢	177
7.5.3 耐磨钢	178
本章小结	180
习题	180
知识拓展阅读: 硬币用金属及合金	182
第8章 铸铁	186
8.1 概述	186
8.1.1 铸铁的成分及性能特点	186
8.1.2 铸铁的石墨化及其影响因素	187
8.1.3 铸铁的分类	189
8.2 灰铸铁	190
8.2.1 灰铸铁的化学成分、组织和性能	190
8.2.2 灰铸铁的孕育处理	191
8.2.3 灰铸铁的牌号及应用	192
8.2.4 灰铸铁的热处理	193
8.3 球墨铸铁	193
8.3.1 球墨铸铁的牌号和化学成分	194
8.3.2 球墨铸铁的组织、性能和用途	194
8.3.3 球墨铸铁的热处理	196

8.4 蠕墨铸铁	198	10.1.5 常用高分子材料	236
8.4.1 蠕墨铸铁的牌号和化学成分	198	10.2 陶瓷材料	239
8.4.2 蠕墨铸铁的组织、性能及应用	198	10.2.1 陶瓷材料概述	239
8.5 可锻铸铁	199	10.2.2 陶瓷材料的结构特点	239
8.5.1 可锻铸铁的化学成分和组织	199	10.2.3 陶瓷材料的性能特点	240
8.5.2 可锻铸铁的牌号、性能及用途	199	10.2.4 常用工程陶瓷材料	241
8.6 合金铸铁	200	10.3 复合材料	242
8.6.1 耐磨铸铁	200	10.3.1 复合材料概述	242
8.6.2 耐热铸铁	201	10.3.2 纤维增强复合材料	245
8.6.3 耐蚀铸铁	201	10.3.3 层状复合材料	248
本章小结	202	10.3.4 颗粒增强复合材料	248
习题	202	本章小结	250
知识拓展阅读: 高温结构材料	204	习题	251
第9章 有色金属及合金	208	知识拓展阅读: 碳纤维材料	252
9.1 铝及铝合金	208	第11章 机械制造中零件材料的选择	255
9.1.1 工业纯铝	208	11.1 机械零件的失效概述	255
9.1.2 铝合金分类及时效强化	209	11.1.1 失效的概念	255
9.1.3 变形铝合金	210	11.1.2 零件的失效形式	255
9.1.4 铸造铝合金	212	11.1.3 零件的失效原因	256
9.2 铜及铜合金	215	11.1.4 零件失效分析的一般方法	257
9.2.1 工业纯铜	215	11.2 机械零件的材料选择	257
9.2.2 铜合金的分类及牌号表示方法	215	11.2.1 选材的一般原则	257
9.2.3 黄铜	216	11.2.2 选材的步骤和方法	260
9.2.4 青铜	218	11.3 典型零部件选材及工艺分析	262
9.3 镁及镁合金	220	11.3.1 齿轮选材	262
9.3.1 变形镁合金	220	11.3.2 轴类零件选材	267
9.3.2 铸造镁合金	221	11.3.3 弹簧选材	271
9.4 滑动轴承合金	222	11.3.4 箱体支承类零件材料选择	274
9.4.1 对轴承合金性能的要求	222	11.3.5 常用刀具选材	275
9.4.2 轴承合金的组织特征	222	本章小结	278
9.4.3 常用的轴承合金	223	习题	279
9.5 其他有色金属及合金	224	知识拓展阅读: 绿色材料与可持续发展	281
9.5.1 钛及钛合金	224	第12章 工程材料的应用	285
9.5.2 锌基合金	225	12.1 工程材料在机床上的应用	285
本章小结	226	12.1.1 床身、机床底座、齿轮箱体、	
习题	226	轴承座、导轨用材	285
知识拓展阅读: 铝的冶炼	228	12.1.2 齿轮用材	286
第10章 其他常用工程材料	231	12.1.3 轴类零件用材	286
10.1 高分子材料	231	12.1.4 螺纹联接件用材	287
10.1.1 高分子材料的基本概念	231	12.1.5 螺旋传动件用材	287
10.1.2 高分子材料的构象	233	12.1.6 蜗轮与蜗杆用材	287
10.1.3 高聚物的聚集态和物理状态	234	12.1.7 滑动轴承用材	288
10.1.4 高分子材料的性能	236	12.2 汽车用材	288

12.2.1 汽车用金属材料	289	12.6.3 海洋平台及船舶用材	310
12.2.2 汽车用塑料	293	本章小结	315
12.2.3 汽车用橡胶	295	习题	315
12.2.4 汽车用陶瓷材料	295	第13章 实验指导书	316
12.2.5 汽车新材料发展趋势	296	实验1 金属材料硬度测试	316
12.3 热能设备用材	296	实验2 铁碳合金平衡组织的观察与 分析	318
12.3.1 锅炉主要设备用钢	296	实验3 钢的非平衡显微组织观察与 分析	321
12.3.2 汽轮机主要零件用钢	297	实验4 铸铁的显微组织观察与分析	324
12.3.3 发电机转子用材	299	附录	328
12.4 化工设备用材	299	附录A 黑色金属硬度及强度换算表	328
12.4.1 化工设备用钢	300	附录B 国内外部分钢号对照表	329
12.4.2 有色金属与合金	302	附录C 金属热处理工艺的分类及代号 (摘自 GT/T 12603—2005)	331
12.4.3 非金属材料	303	附录D 常用钢种的临界温度	334
12.4.4 复合材料	304	附录E 钢铁及合金牌号统一数字代号体系 (摘自 GT/T 17616—1998)	335
12.5 航空航天器用材	304	附录F 常用材料力学性能指标名称和符号 对照	336
12.5.1 机翼、机体和防热层用材	304	参考文献	338
12.5.2 航空发动机和火箭发动机典型 零件用材	305		
12.6 石油工程材料	307		
12.6.1 管线钢	307		
12.6.2 油井管材	308		

绪 论

1. 材料与材料的性能

(1) 材料的概念与分类

1) 材料的概念。材料是人类社会所能接受的、经济地制造有用器件的物质。作为材料的物质,必须具备以下特点:

① 一定的组成与配比 产品的使用性能主要取决于材料组成的化学成分及各成分之间的配比,因此必须控制其组成和配比。

② 成形加工性 各种产品都有一定的形状和结构,这需要通过成形加工来获得。因此,作为材料必须在一定温度和一定压力下对其进行成形加工。不具备成形加工性,就不能成为有用的材料。

③ 形状保持性 任何产品都是以一定的形状出现的,并在该形状下使用,因此,应具备在使用条件下保持既定形状并可供实际使用的能力。

④ 经济学 获得的产品应质优价廉,富有竞争性,必须在经济上易于为社会和人们所接受。

⑤ 回收和再生性 这是作为绿色产品、符合人类持续发展战略所必需的,并应满足已经确定的社会规范、法律等。随着资源的枯竭、环境的破坏,对材料的回收并再利用是必需的。

机械工程材料是构成机械设备的基础,也是各种机械加工的对象。

2) 材料的分类。目前,世界上的材料已有几十万种,而材料的新品种正以每年5%的速率在增长。由于材料的多样性,其分类方法也没有统一的标准。通常,材料是按化学组成和结构特点进行分类的,包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料。金属材料包括黑色金属和有色金属;高分子材料包括合成塑料、合成纤维、合成橡胶;无机非金属材料包括玻璃、陶瓷、水泥和耐火材料;复合材料是指由两种及两种以上材料组成的,即由基体材料与增强材料复合而成的材料。基体材料有金属、陶瓷、塑料等,增强材料有各种纤维和无机化合物等。

目前,机械工业生产中应用最广泛的仍是金属材料。这是由于金属材料不仅来源丰富,而且还具有优良的使用性能和工艺性能。金属材料还可以通过不同成分配制、不同加工和热处理方法来改变其组织和性能,从而扩大其使用范围。

(2) 材料的性能 材料科学与工程是研究材料在组成、结构、生产过程、工艺性能与使用性能以及它们之间关系的学科。因而常把组成/结构、合成/加工、性质及使用效能称为材料科学与工程的四个要素。材料的成分与结构是指材料的原子类型和排列方式;合成与加工是指实现特定原子排列的演变过程;材料的性质是指对材料功能特性和效用(如电、磁、光、热、力学等性质)的定量度量和描述;使用效能是指材料性质在使用条件(如受力状态、气氛、介质和温度等)下的表现。材料的理论和设计就是通过理论模型进行材料设计或工艺设计,即通过优化材料配方,采用最佳工艺,制备出符合要求的材料或器件,以达到

提高材料性能或使用效能的目标。

材料的性能是一种参量,用于表征材料在给定外界条件下的行为。即作为材料最基本条件的性能必须量化;需要从行为的过程去深入理解材料性能;重视环境对性能的影响。行为是指从一个状态到另一状态的过程。材料的性能有些只和状态有关,而与达到这个状态的过程无关。而另一些性能则与达到这个状态的过程有关。通过对材料行为的研究,可以理解材料的性能,定义材料的性能指标。外界条件是指在不同外界条件(应力、温度、化学介质、磁场、辐照等)下,同一材料会有不同的性能。性能必须参量化,即材料的性能需要定量地加以表述。多数性能都有单位,通过对单位的分析,可以加深对性能的理解。

各种材料之所以为人们所用,就是因为它具有人们所需要的性能,如物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能等。

2. 材料发展与社会进步

材料是人类社会物质文明的基础,在人类历史发展进程中,材料一直占有十分重要的地位。历史学家曾用材料来划分时代,如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代以及聚合物时代、半导体时代、复合材料时代等。中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。大约二三百万年前,最先使用的工具材料是天然石头。到了原始社会的末期(约六七千年之前),开始人工制作陶器,由此发展到东汉时期又出现了瓷器,并流传海外,对世界文明产生了很大的影响。4000年前的夏朝,我们的祖先已经能够炼铜,到殷、商时期,我国的青铜冶炼和铸造技术已达到很高水平。从出土的大量青铜礼器、生活用具、武器、工具,特别是重875kg的后母戊鼎,其体积庞大、花纹精巧、造型精美,都说明了当时已具备高超的冶铸技术和艺术造诣。钢铁是目前应用最广的金属材料,我国早在周代就已开始了冶铁,这比欧洲最早使用生铁的时间早了2000年。而且当时的技术也很发达,如河北武安出土的战国时期的铁锹,经金相检验证明,该材料就是今天的可锻铸铁。

在科学技术迅猛发展的今天,材料仍然是现代文明的一个重要标志。20世纪70年代,人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80年代以高技术为代表的新技术革命,又把材料、信息技术和生物技术并列新技术革命的重要标志。可以说,人类生活在材料的世界里,无论是经济活动、科学技术、国防建设,还是人们的衣食住行,都离不开材料。如果没有半导体材料,就不会有今天的信息社会;没有高温、高比强(刚)度的材料,就不会有今天的航空航天技术等。

总之,材料对社会发展的作用和重要性,任何时候都不会下降;相反,随着科学技术的不断发展,材料的种类越来越丰富,材料的性能逐渐得到提高,材料的应用越来越广,因此可以说人类进入了一个材料革命的新时代。

3. 本课程的内容和任务

目前,机械工业正朝着高速、自动、精密的方向发展,在机械产品设计、制造与维修过程中,所遇到的工程材料问题将越来越多,使机械工业的发展与工程材料学科之间的关系更加密切。故机械技术人员不仅要了解传统的机械工程材料,也要了解高分子材料、陶瓷材料和复合材料的基本知识,以提高我国机械工业中材料的利用率和机械产品的质量。

本课程的主要内容包括工程材料的基本理论,即材料的结构与性能、金属材料的组织与性能控制(纯金属凝固、金属塑性变形与再结晶、钢的热处理);常用工程材料,即金属材料(工业用钢、铸铁、有色金属及合金)、高分子材料、陶瓷材料、复合材料等;机械零件

的失效、强化、选材及工程材料的应用等。

本课程的主要任务是使学生获得有关工程结构和机械零件常用的金属材料和非金属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选择与使用材料的能力,以及正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

本课程具有知识面广、综合性和实用性强的特点。本课程不对材料科学的基础理论深入开展讨论,许多问题只是点到为止,重结果而不在过程。学习中应注重分析、理解与运用,并要注意归纳、总结,加强知识的衔接与综合应用。要理论联系实际,通过实验、实训和生产实践,开拓思路,提高材料方面的理论水平和应用能力。

第1章 绪论 1.1

1.1.1 绪论 1.1.1

1.1.1.1 绪论 1.1.1.1

1.1.1.1.1 绪论 1.1.1.1.1

1.1.1.1.1.1 绪论 1.1.1.1.1.1

1.1.1.1.1.1.1 绪论 1.1.1.1.1.1.1

第1章 金属材料的性能

机电产品大多是由种类繁多、性能各异的工程材料通过加工制成的零件构成的。工程材料分金属材料和非金属材料，其中金属材料是工程中应用最广泛的。本章主要介绍金属材料的性能。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。

使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能，它包括力学性能（强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等）、物理性能（密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等）、化学性能（耐蚀性、抗氧化性等）。

工艺性能是指金属材料从冶炼到成品的生产过程中，为适应各种加工工艺（如冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等）应具备的性能。

金属材料的力学性能是指材料在各种载荷的作用下所表现出来的抵抗变形和断裂的能力。这些性能是机械设计、材料选择、工艺评定及材料检验的主要依据。

1.1 金属材料的物理性能和化学性能

1.1.1 金属材料的物理性能

金属材料在固态时所表现出来的一系列物理现象的性能称为物理性能，包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。

1. 密度

单位体积的质量称为该物质的密度，用符号 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。机械工程中，通常用密度来计算材料或零件的质量（ $m = \rho V$ ）。体积相同的不同金属，密度越大质量也越大，密度越小质量也越小。密度小于 $5 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属，如铝、镁、钛及其合金。轻金属多用于航天航空器上。密度大于 $5 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属，如铁、铅、钨等。

2. 熔点

金属从固态向液态转变时的温度称为熔点。纯金属都有固定的熔点。熔点高的金属称为难熔金属，如钨、钼、钒等，可以用来制造耐高温零件，如工业高温炉、火箭、导弹、燃气轮机、喷气飞机等某些零部件必须使用耐高温的难熔材料。熔点低的金属称为易熔金属，如锡、铅等，可用于制造熔丝和防火安全阀零件等。陶瓷的熔点一般都显著高于金属及合金的熔点。而高分子材料一般不是晶体，所以没有固定的熔点。

3. 热膨胀性

金属材料随温度升高而产生体积膨胀的性能称为热膨胀性。衡量热膨胀性的指标称为热膨胀系数，通常以线膨胀系数“ α ”表示。原子（或分子）受热后平均振幅增加，结合键越强，则原子间作用力越大，原子离开平衡位置所需的能量越高，则膨胀系数越小。由膨胀系数大的材料制造的零件，在温度变化时，尺寸和形状变化都较大。例如轴和轴瓦之间要根

据其膨胀系数值的大小来控制其间隙尺寸；铺设铁轨时，两钢轨衔接处应留有一定的空隙，使钢轨在长度方向有伸缩的余量；在热加工和热处理时也要考虑材料热膨胀的影响，以减少工件的变形和开裂。不同金属材料的零件在焊接时要考虑它们的热膨胀性是否相近，如相差太大，被焊工件由于受热不均匀而产生不均匀的热膨胀，就会导致焊件的变形和焊接应力；利用材料的热膨胀性，可使过盈配合的两个零件紧固在一起或使原来紧配的两零件加热松弛而卸下。

4. 导热性

金属材料传导热量的能力称为导热性。导热性通常用热导率来衡量，用符号 λ 表示，单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，即单位温度梯度下单位时间内通过单位垂直面积的热量。金属材料的导热率越大，说明导热性越好。金属的导热性以银为最好，铜、铝次之，合金的导热性比纯金属差。在制订焊接、铸造、锻造和热处理工艺时，必须考虑材料的导热性，防止材料在加热或冷却过程中形成过大的内应力而造成变形与开裂。

5. 导电性

金属材料传导电流的能力称为导电性，用电阻率来衡量，符号为 ρ ，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。超导体的电阻率 $\rho=0$ ，导体的电阻率 $\rho=10^{-8} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ ，半导体的电阻率 $\rho=10^{-5} \sim 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ，绝缘体的电阻率 $\rho=10^7 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小，金属材料导电性越好。金属及其合金具有良好的导电性能。但合金的导电性比纯金属差。金属材料以银的导电性能最好，铜、铝次之。但银较贵，故工业上常用铜、铝及其合金作为导电材料，如电线、电缆、电器元件等。导电性差、电阻率高的金属（如钨、钼、铁、铬、铝）用来制造电阻器和电热元件。

6. 磁性

物质放入磁场中会表现出不同的磁性特性，称此为物质的磁性。金属材料按磁性可分为三类：

(1) 铁磁性材料 在外磁场中能强烈地被磁化的材料，如铁、钴、镍等，可用于制造变压器、电动机、测量仪表等。铁磁性材料在温度升高到一定数值时，其磁畴被破坏，变为顺磁体，这个转变温度称为居里点，如铁的居里点是 770°C 。

(2) 顺磁性材料 在外磁场中只能微弱地被磁化的材料，如锰、铬、铂等。

(3) 抗磁性材料 能抗拒或削弱外磁场对材料本身的磁化作用的材料，如铜、锌、铋、银等，用于制造要求避免电磁场干扰的零件和结构，如航海罗盘等。

1.1.2 金属材料的化学性能

金属材料的化学性能是指金属在室温或高温下抵抗外界化学介质侵蚀的能力。根据服役条件与环境的不同，金属材料不仅要有一定的力学性能（强度、韧性、塑性、硬度）、物理性能（磁、光、声、电），同时要求金属材料具有一定的化学稳定性能，即耐蚀性和抗氧化性。

1. 耐蚀性

金属材料在常温下抵抗周围介质（如大气、燃气、水、酸和盐等）腐蚀破坏作用的能力称为耐蚀性，这种性能是由材料的成分、组织结构等因素决定的。碳钢、铸铁的耐蚀性较差，如常见的钢铁生锈现象。铝合金和铜合金有较好的耐蚀性。当钢中加入可以形成保护膜的铬、镍、铝、钛等合金元素时，可以提高耐蚀性，如不锈钢具有好的耐蚀性。一定含量的

铬镍能大幅度提高钢的电极电位, 提高抗电化学腐蚀的能力。

2. 抗氧化性

金属材料在高温时抵抗氧化性气氛腐蚀作用的能力称为抗氧化性, 又称为热稳定性。在高温条件下工作的设备, 如锅炉、汽轮机、喷气发动机等零部件应选择热稳定性好的材料来制造。在钢中加入 Cr、Si、Al 等元素, 会形成连续致密的 Cr_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 膜, 以阻止容易氧化的基体金属发生氧化, 从而提高抗氧化性, 另外还具有较好的剪切、冲压和焊接性能。在 Cr 钢中加入 La、Ce 等稀土元素, 既可以降低 Cr_2O_3 的挥发, 形成更稳定的 $(\text{Cr}, \text{La})_2\text{O}_3$; 又能促进铬的扩散, 有利于形成 Cr_2O_3 , 进一步提高抗氧化性。一般采用固溶处理, 得到均匀的奥氏体组织, 可用于工作温度高达 1000°C 的零件。如 $4\text{Cr}9\text{Si}2$ 可制造内燃机排气阀及加热炉炉底板、料盘等。

1.2 金属材料的力学性能

1.2.1 金属材料所载荷与力学性能

1. 金属材料所载荷

金属材料在加工和使用过程中所受到的外力称为载荷。按外力的作用性质, 常分为静载荷、冲击载荷和变动载荷三种。

(1) 静载荷 静载荷是指大小不变或变化很慢的载荷。如机床的主轴箱对机床床身的压力等。

(2) 冲击载荷 冲击载荷是指在很短的时间内 (或突然) 施加在构件上的载荷, 其特点是加载速度快、作用时间短。许多机器零件在服役时往往受到冲击载荷的作用, 如汽车行驶通过道路上的凹坑, 空气锤锤头下落时锤杆所承受的载荷, 飞机起飞和降落, 金属压力加工 (锻造、模锻) 以及冲压时压力机对冲模的冲击作用等。

(3) 变动载荷 变动载荷是指载荷大小甚至方向均随时间变化的载荷。工程中很多机件都是在变动载荷下工作的, 如曲轴、连杆、齿轮、弹簧及桥梁等。

根据作用形式的不同, 载荷又可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和扭转载荷等, 如图 1-1 所示。

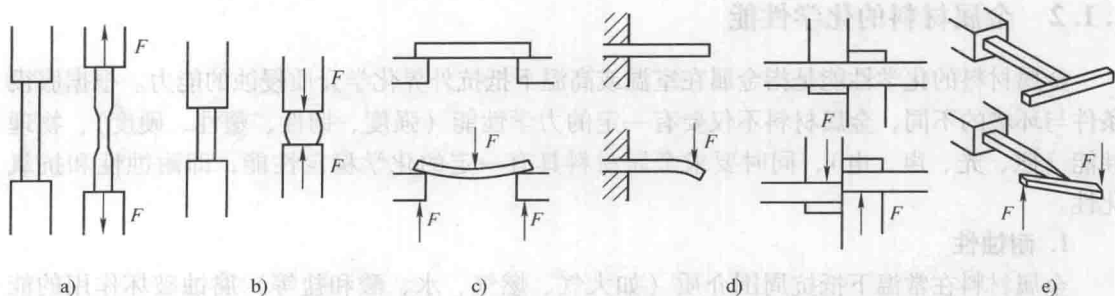


图 1-1 载荷的作用形式

a) 拉伸载荷 b) 压缩载荷 c) 弯曲载荷 d) 剪切载荷 e) 扭转载荷

2. 内力与内应力

材料受外力作用时，为保持自身形状尺寸不变，在材料内部作用着与外力相对抗的力，称为内力。内力的大小与外力相等，方向则与外力相反，和外力保持平衡。单位面积上的内力称为内应力。

3. 变形

变形是指材料在受外力作用时发生的尺寸和形状的变化，通常包括弹性变形和塑性变形。

(1) 弹性变形 材料在载荷作用下发生变形，而当载荷卸除后，变形也完全消失。这种随载荷的卸除而消失的变形称为弹性变形。

(2) 塑性变形 材料在外力作用下产生而在外力去除后不能回复的那部分变形称为塑性变形。当作用在材料上的载荷超过某一限度，此时若卸除载荷，弹性变形部分随之消失，但还留下了不能消失的变形。

4. 常用的力学性能指标

常用的力学性能指标有：强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等，它们是衡量材料性能和决定材料应用范围的重要指标。

1.2.2 强度

金属材料在静载荷作用下抵抗永久塑性变形和断裂的能力，称为强度。材料强度越高，可承受的载荷越大。不同金属材料的强度指标可通过拉伸试验和其他力学性能试验方法测定。

1. 拉伸试验

拉伸试验用于测定材料的一些主要力学性能，是工业上广泛应用的金属力学性能试验方法之一。其特点是试验温度、应力状态及应变速率是恒定的。试样的形状和尺寸往往由此材料所制造的最终产品形状而定，可以用标准或非标准试样。一般情况下，如果是锻件或铸件等产品，采用光滑圆棒试样；若最终产品为薄板，则采用平板试样，如图 1-2 所示。若采用光滑圆棒试样，试样的标距长度 $L_0 = 5d_0$ 或 $L_0 = 10d_0$ ， d_0 为原始直径。当采用板状试样时，试样的标距长度应该满足

$$L_0 = 11.3 \sqrt{S_0} \text{ 或 } L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$$

式中， S_0 为原始横截面积。

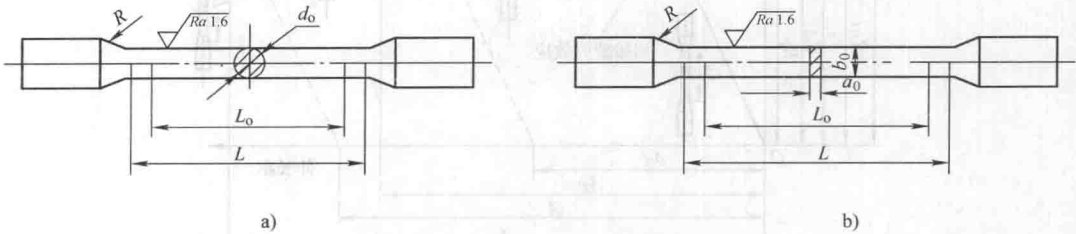


图 1-2 拉伸试样

a) 标准圆棒拉伸试样 b) 板状拉伸试样

拉伸试验是在拉伸试验机上完成的。图 1-3 所示为某型号拉伸试验机。试验时,将标准试样装夹在拉伸试验机上。在试验过程中,由载荷传感器测出作用在试样上的载荷。试样长度方向或横向应变是由安装在工作标距上的轴向引伸计或径向引伸计来测定的。然后对其逐渐施加拉伸载荷 F , 同时连续测量力和试样相应的伸长,直至试样被拉断,可得到拉力 F 与伸长量 ΔL 的关系曲线图,如图 1-4 所示,即 $F-\Delta L$ 拉伸曲线。纵坐标表示力 F , 单位为 N; 横坐标表示绝对伸长量 ΔL , 单位为 mm。 $F-\Delta L$ 拉伸曲线反映了金属材料在拉伸过程中从弹性变形到断裂的全部力学特性。载荷除以试样的原始截面积即得工程应力 σ , $\sigma = F/S_0$; 伸长量除以原始标距长度即得工程应变 ε , $\varepsilon = \Delta L/L_0$ 。图 1-5 表示工程应力—应变曲线,简称应力—应变曲线。比较图 1-4 和图 1-5 可以看出,两者具有相同或相似的形状,但坐标刻度不同,意义不同。

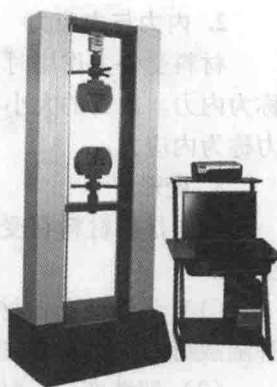


图 1-3 拉伸试验机

由图 1-4 可知,拉伸过程可分为如下几个阶段:

(1) Oe (弹性变形阶段) 试样在外力作用下均匀伸长,伸长量与拉力大小保持正比关系, e 点所对应的应力 σ_e 称为弹性强度或弹性极限。

(2) AB (屈服阶段) 试样所受的载荷大小超过 e 点后,材料除产生弹性变形外,开始出现塑性变形,拉力与伸长量之间不再保持正比关系,拉力达到图形中 A 点后,即使拉力不再增加,材料仍会伸长一定距离,即 A 点右侧接近水平或锯齿状的线段,此现象称为屈服,标志着材料丧失抵抗塑性变形的能力,并会产生微量的塑性变形。

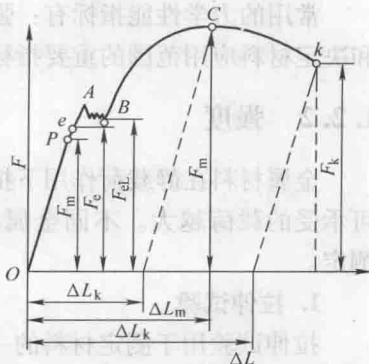


图 1-4 退火低碳钢的拉伸图

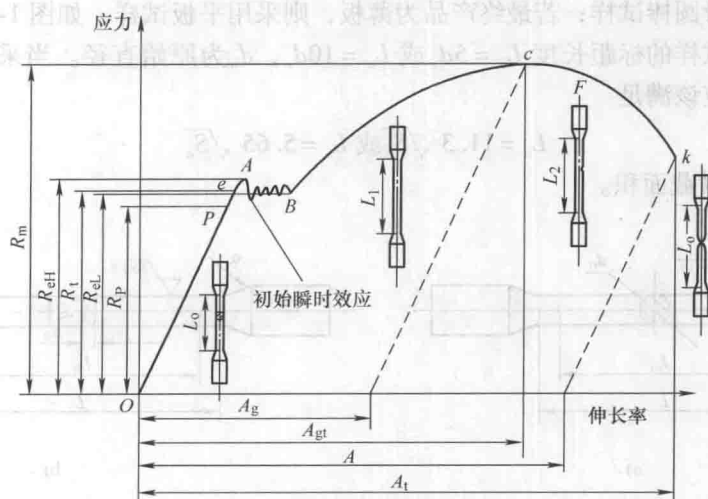


图 1-5 工程应力—应变曲线

(3) *BC* (强化阶段) 试样所受的载荷大小超过 *B* 点后, 试样的变形随拉力的增大而逐渐增大, 试样发生均匀而明显的塑性变形。

(4) *CK* (缩颈阶段) 当试样所受的力达到 *C* 点后, 试样在标距长度内直径明显地出现局部变细, 即“缩颈”现象。由于截面积的减小, 变形集中在缩颈处, 试样保持持续拉长到断裂所需的拉力逐渐下降, 在 *k* 点处试样断裂。

工程上使用的金属材料, 在拉伸时并不是都有明显的四个阶段, 有的没有明显的屈服现象, 如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等。有些脆性材料, 不仅没有屈服现象, 而且也不产生缩颈, 如铸铁等。

2. 强度指标

根据外力作用方式的不同, 强度有多种指标, 如屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。常用的强度指标有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, 在试验期间发生塑性变形而力不增加的应力点。分上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度 (R_{eH}) 是指试样发生屈服而力首次下降前的最高应力 (图 1-6); 下屈服强度 (R_{eL}) 是指在屈服期间不计初始瞬时效应时的最低应力 (图 1-6)。

低碳钢的屈服阶段 (*AB* 段) 常呈水平状的锯齿形, 在该阶段中, 与最高点 *A* 对应的应力称为上屈服极限。由于它受到变形速度和试样形状的影响较大, 故一般不将其作为屈服强度的指标。同样, 载荷首次下降的最低点 (初始瞬间效应) 也不作为强度指标, 一般把初始效应之后的最低载荷 F_{eL} 对应的应力作为屈服强度。以试样的初始横截面积 S_0 除 F_{eL} , 即得屈服强度, 是机械设计的主要依据, 也是评定金属材料优劣的重要指标, 计算公式为

$$R_{eL} = F_{eL} / S_0$$

式中, R_{eL} 为下屈服强度 (MPa); F_{eL} 为试样屈服阶段的下屈服力 (N); S_0 为试样标距部分的原始截面积 (mm^2)。

无明显屈服现象的材料, 用试样标距长度产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为屈服强度, 用 $R_{p0.2}$ 表示, 称为规定非比例延伸强度。

(2) 抗拉强度 抗拉强度是指材料抵抗外力而不致断裂的最大应力值。抗拉强度是机械零件评定和选材时的重要强度指标。随着载荷的加大, 拉伸曲线开始上升, 当载荷达到最大值 F_m 后, 可以看到试样局部开始出现缩颈现象, 而且发展很快, 随后, 载荷减小加速, 直至 *F* 点试样拉断。根据测得的 F_m , 可按下式计算出抗拉强度。

$$R_m = F_m / S_0$$

式中, R_m 为抗拉强度 (MPa); F_m 为试样在断裂前所受的最大外力 (N); S_0 为试样原始截面积 (mm^2)。

R_{eL} / R_m 的值称为屈强比。屈强比越小, 工程构件的可靠性越高, 即万一超载也不至于马

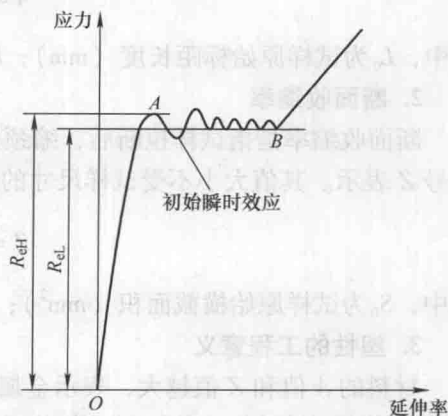


图 1-6 上屈服强度和下屈服强度 (R_{eH} 和 R_{eL})