

高等学校教材
GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

工程材料

第二版

刘新佳 姜世杭 姜银方 主编
赵永武 审



化学工业出版社

高等学校教材

工程材料

第二版

刘新佳 姜世杭 姜银方 主编
赵永武 审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是为适应高校专业设置的调整和合并而提出的教改要求,根据国家教育部最新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中工程材料课程教学基本内容和要求而编写的。全书引用最新国家标准,主要阐述机械零件在不同工作条件下的性能要求以及机械工程技术人员必备的材料学基本理论和知识,介绍了各类工程材料的成分、组织结构、加工工艺、性能特点和应用范围,结合实例说明了选用材料的原则和方法。全书分为材料力学性能、材料的结构、材料相变基础知识、材料的改性、金属材料、非金属材料 and 复合材料、材料的选用 7 章,各章后均附有分析应用型习题。

本书可作为高等学校机械类、近机械类专业学生教材,也可作为有关专业科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/刘新佳,姜世杭,姜银方主编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2012. 11

高等学校教材

ISBN 978-7-122-15414-9

I. ①工… II. ①刘…②姜…③姜… 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 (2012) 第 231731 号

责任编辑:程树珍

文字编辑:王 琪

责任校对:蒋 宇

装帧设计:杨 北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 314 千字 2013 年 5 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

自《工程材料》教材第一版出版以来,我国高校工程材料及机械制造基础课程教学的条件不断得到改善,课程教学改革也取得了一系列重大进展,与本课程有关的一些技术标准的更新力度也很大,为保持教材活力,反映课程教学改革取得的最新成果,适应本科机械类专业对本课程教学的需求,我们决定对教材按调整、更新、精简的原则进行修订再版。本次修订主要做了以下一些工作。

1. 在教材的内容体系上仍延续第一版,以保持和发扬其已有特色。但对教材内容进行了优化与整合,全书由9章调整为7章,将第一版的第6章高分子材料、第7章陶瓷材料和第8章复合材料调整合并为第二版第6章非金属材料 and 复合材料。为便于学生掌握和巩固已学知识,各章后均附有分析应用型习题。

2. 注意了对教材内容的合理筛选,力求做到与时俱进。根据课程参考学时数和课程教学基本要求,对一些论述过细的基本理论部分和工程上不常用的材料部分进行适当的精简,全书篇幅压缩在20%以上。

3. 鉴于互联网的日趋普及,文字版教材附带光盘已显多余,故取消第一版所附光盘,其内容考虑置于互联网。

4. 进行了严格的标准化审查。跟踪材料方面新的国家标准及行业标准颁布后,一些与本书有关技术内容的更新,使书中基本概念、名词术语、符号、计量单位,均与最新现行标准一致,以保证教学内容上的科学性和先进性。

5. 拓宽了教材的适用性。编写中注意吸收不同类型高校在工程材料及机械制造基础课程教学内容、教学模式和教学方法改革方面的成功经验,使教材适应大多数工科院校非材料类专业的机械工程专业及过程控制与装备、工业工程等近机械类专业本科的教学需要。

本书由江南大学刘新佳、扬州大学姜世杭、江苏大学姜银方任主编,教材编写分工为:刘新佳编写绪论、第1、2、4、7章,姜银方编写第3章,姜世杭编写第5章,南京工程学院王建中编写第6章,此外,江南大学王海彦参与了部分编写工作,邵健萍提供了部分金相图片。江南大学教授、博士生导师赵永武担任主审,并提出了许多宝贵意见,全体编者对此表示衷心的感谢。

在编写过程中,编者参阅了部分国内外相关教材、科技著作、论文(详见参考文献),在此向资料作者表示深切的谢意!

由于编者学识所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2012年10月

第一版前言

本教材是按照高校专业设置调整与合并所提出的教改要求,以国家教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》中工程材料的教学基本内容和要求为依据来编写的。为与目前机械类专业少学时、宽口径、重技能的教学改革要求相适应,在适度、够用的前提下以精简理论、加强基础、注重应用、拓宽知识面、更新教材内容为基本编写原则。

本教材的内容体系是以重点高等工科院校《工程材料及机械制造基础》系列课程改革指南中工程材料课程改革参考方案为依据,在总结近几年工程材料及机械制造基础系列课程改造成果和遵循材料科学与工程体系的基础上,将《工程材料》课程内容进行有机整合并优化,以机械工业广泛使用的工程材料为研究对象,以材料的“化学成分—加工工艺—组织结构—性能—应用”为纲,由浅入深地展开。内容编排上力求在探索教材新结构的同时保证教材内容的科学性、先进性、适用性和相对稳定性。

本教材在内容选择上注意根据材料科学与工程的发展,顺应制造工程的实际需要,阐述了现代机械工程技术人员所应具备的材料学基本理论和知识。在重点剖析结构材料的同时,适当地介绍功能材料;在重点分析工业上广泛使用的金属材料的同时,适量地介绍非金属材料、新型材料以及新技术、新工艺等方面的有关知识,尽可能体现教材内容的先进性。注重理论联系实际,学以致用,加强对学生实际工程技术能力的培养。

近年来,为与国际先进技术接轨,已对许多材料试验方法标准、材料牌号标准、材料技术条件标准进行了修订,有些更新力度还比较大。本教材力求体现这种更新,采用最新的国家标准和行业标准并增加生产实践中广泛应用的相关图表、资料、经验公式和材料设计实例,以增加本教材的实用性。

为培养学生创造性思维和独立分析与解决实际问题的能力,各章末均附有习题,旨在帮助学生及时理解、消化本章内容。

为在少学时的教学条件下,帮助学生尽快掌握教学内容,我们还进行了以下两方面工作。一是在文字版教材的基础上研制了助学版多媒体教学光盘。光盘除包含全部文字教材内容外,对一些教学上的难点、疑点以及工程实际过程,大量运用自制的动画及视频、图片等形式直观表达,还配有约6万字的多种实用附录和助学资料以减少文字教材篇幅。二是配套设置网上在线学习、考核系统(网址:<http://sme.sytu.edu.cn/reviews/index.asp>)。题型以选择题为主,其特点是题干及题支(备选项)具有双随机性,运行时系统随机地从题库中选择题干,对应于每道题干题支的顺序也随机产生。多名学生同时学习或集中考试时,所选到的同一道题题支的顺序是不固定的,以最大限度地保证学生学习到正确的答案内容而不只是记忆备选项的标号,可以较好地防止在集中学习或考试过程中可能的作弊行为。系统还具有自动记录上线时间、答题情况、统计成绩等功能,可作为检查学习效果的辅助工具,进一步帮助学生培养自主学习的能力、正确理解和应用教学内容。

本书由刘新佳(江南大学)任主编,姜银方(江苏大学)、姜世杭(扬州大学)任副主编,王海彦(江南大学)参编;多媒体教学光盘由刘新佳和姜世杭负责制作;在线学习、考

核系统由刘新佳和赵又力（江南大学）负责研制。编写过程中，江苏大学王宏宇老师提出了许多有益的建议。江南大学“太湖学者”特聘教授、博士生导师赵永武教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见，对此，全体编者表示衷心的感谢！

本书可作为高等学校本科机械类、近机类专业学生教材，也可作为高等职业技术学院、高等专科学校相关专业的教材和有关专业人员的参考用书。

编写过程中，编者参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此向资料作者表示深切的谢意！

由于编者学识所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

联系方式：jdjg2006@126.com。

编 者

2005 年 10 月

目 录

绪论	1
0.1 材料及材料科学的发展	1
0.2 工程材料及其分类	2
0.3 材料科学在机械工程中的地位和作用	3
0.4 工程材料课程的基本任务和学习的內容、目的与方法	4
第1章 材料力学性能	5
1.1 材料的静载力学性能	5
1.1.1 材料承受静拉伸时的力学性能指标	5
1.1.2 硬度	8
1.2 材料的动载力学性能	11
1.2.1 冲击韧性	11
1.2.2 疲劳强度	12
1.3 断裂韧度	13
1.4 高、低温力学性能	13
1.4.1 高温力学性能	13
1.4.2 低温力学性能	14
1.5 磨损性能	14
习题	15
第2章 材料的结构	16
2.1 材料中的原子键合方式	16
2.1.1 金属键	16
2.1.2 离子键	16
2.1.3 共价键	17
2.1.4 分子键	17
2.2 金属晶体结构	17
2.2.1 有关晶体结构的基本概念	17
2.2.2 典型的金属晶体结构	18
2.2.3 实际金属的结构	19
2.3 合金相结构	22
2.3.1 固溶体	22
2.3.2 金属化合物	23
2.4 高分子化合物的结构	24

2.4.1 大分子链结构·····	24
2.4.2 高分子化合物的聚集态结构·····	25
2.5 陶瓷材料的组织结构·····	26
习题·····	26

第3章 材料相变基础知识····· 28

3.1 纯金属的结晶·····	28
3.1.1 结晶的概念及条件·····	28
3.1.2 结晶过程·····	29
3.1.3 结晶晶粒大小及控制·····	30
3.1.4 晶体的同素异构·····	31
3.2 二元合金相图·····	31
3.2.1 合金相图的建立·····	32
3.2.2 二元合金相图的基本类型·····	32
3.2.3 相图与合金性能的关系·····	38
3.3 铁碳合金相图·····	39
3.3.1 铁碳合金中的基本相·····	39
3.3.2 铁碳合金相图分析·····	40
3.3.3 铁碳合金成分、组织与性能的关系·····	46
3.3.4 铁碳相图的应用简介·····	48
3.4 钢的固态相变·····	49
3.4.1 钢在加热时的转变·····	49
3.4.2 钢在冷却时的转变·····	52
习题·····	61

第4章 材料的改性····· 62

4.1 钢的热处理·····	62
4.1.1 钢的整体热处理工艺·····	63
4.1.2 钢的表面淬火和化学热处理·····	72
4.1.3 先进热处理技术·····	78
4.2 金属材料的固溶处理和时效强化·····	82
4.3 金属的形变改性·····	83
4.3.1 塑性变形机理·····	83
4.3.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响·····	86
4.3.3 塑性变形金属在加热时组织与性能的变化·····	88
4.3.4 金属的热塑性变形·····	91
4.4 钢的合金化改性·····	92
4.4.1 钢中常存杂质元素对钢性能的影响·····	93
4.4.2 合金元素在钢中的主要作用·····	93
4.5 高分子材料的改性·····	96

4.5.1	物理改性	96
4.5.2	化学改性	97
4.6	材料表面改性技术	98
4.6.1	高能束表面技术	98
4.6.2	气相沉积技术	98
4.6.3	电镀、电刷镀和化学镀	98
4.6.4	热喷涂技术	98
4.6.5	化学转化膜技术	99
4.6.6	表面形变强化	99
	习题	99

第5章 金属材料 101

5.1	工业用钢	101
5.1.1	钢的分类与牌号	101
5.1.2	结构钢	102
5.1.3	工具钢	116
5.1.4	特殊性能钢	126
5.2	铸铁	131
5.2.1	铸铁的石墨化	131
5.2.2	铸铁的分类与牌号	132
5.2.3	灰铸铁	134
5.2.4	球墨铸铁	136
5.2.5	蠕墨铸铁	139
5.2.6	可锻铸铁	140
5.2.7	合金铸铁	141
5.3	非铁金属材料	142
5.3.1	铝及铝合金	142
5.3.2	铜及铜合金	146
5.3.3	钛及钛合金	149
5.3.4	轴承合金	151
5.4	粉末冶金材料	152
5.4.1	粉末冶金机器零件材料	152
5.4.2	粉末冶金工具材料	153
5.5	金属功能材料	154
5.5.1	形状记忆合金	154
5.5.2	磁性材料	155
5.5.3	超导材料	155
5.5.4	储氢材料	155
5.5.5	智能材料	155
5.5.6	功能梯度材料	156

5.5.7 纳米材料	156
5.5.8 非晶态金属	156
习题	156
第6章 非金属材料 and 复合材料	158
6.1 高分子材料	158
6.1.1 高分子材料的基本概念	158
6.1.2 工程塑料	160
6.1.3 橡胶	163
6.2 陶瓷材料	165
6.2.1 陶瓷材料的性能	165
6.2.2 常用陶瓷材料	166
6.3 复合材料	169
6.3.1 复合材料的性能	169
6.3.2 常用复合材料	170
习题	174
第7章 材料的选用	175
7.1 选材的基本原则、过程和方法	175
7.1.1 选材的基本原则	175
7.1.2 选材的基本过程	179
7.1.3 材料选用的方法	181
7.2 典型机械零件的选材	185
7.2.1 轴类零件的选材	185
7.2.2 齿轮类零件的选材	189
7.2.3 箱体支承类零件的选材	193
习题	194
参考文献	195

绪 论

0.1 材料及材料科学的发展

材料是人们用来制成机器、器件、结构等具有某种特性的物质的实体,人们感触到的任何东西都是由材料组成的。材料和人类社会的关系极为密切,它是人类赖以生活和生存的物质基础。人类所用材料的创新和进步大大推动了社会生产力的发展,它标志着历史发展和人类文明的进程。人类文明的发展史,实际上就是一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史。大约在 25000 年前,人类学会了使用第一种工具材料——石器;公元前 8000 年,人类第一次有意识地创造发明了自然界并没有的新材料——陶器;公元前 2140~前 1711 年,人类炼出了第一种金属材料——铜;公元前 770~前 475 年,人类发明了生铁冶铸技术;1800 多年前,我国掌握了两步炼钢法技术——先炼铁再炼钢,并一直沿用至今;今天随着高纯度、大直径的硅单晶体的研制成功而发展起来的集成电路出现了先进的计算机和电子设备。正因为如此,历史学家根据制造生产工具的材料,将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。当今,人类在发展高性能金属材料的同时,也在迅速发展和应用高性能的非金属材料,并逐渐跨入人工合成材料的新时代。

然而,长期以来,人们对材料本质的认识是表面的、肤浅的。每种材料的发现、制造和使用过程都要靠工匠人的经验,如听声音、看火候或者凭借祖传秘方等。后来,随着经验的积累,出现了讲述制造过程和规律的“材料工艺学”。18 世纪后,由于工业迅速发展,对材料特别是钢铁的需求急剧增长。为适应这一需要,在化学、物理、材料力学等学科的基础上,产生了一门新的科学——金属学。它明确地提出了金属的外在性能取决于内部结构的概念,并以探讨和研究金属的组织 and 性能之间的关系为自己的主要任务。1863 年光学显微镜问世,并第一次被用于观察和研究金属材料的内部组织结构,出现了“金相学”。1913 年用 X 射线衍射技术研究固体材料的晶体结构、内部原子排列的规律。1932 年发明的电子显微镜以及后来出现的各种谱仪等分析手段,把人们对微观世界的认识带入了更深的层次。此外,化学、量子力学、固体物理等一些与材料有关的基础学科的进展也大大推动了材料研究的深化。陶瓷学、高分子科学等相关应用学科的发展,为 20 世纪后期跨越多学科的材料科学与工程的形成打下了基础。

材料科学是研究材料化学成分、组织结构和性能之间相互关系及其变化规律的一门科学。它的任务是解决材料的制备问题,合理、有效地利用现有材料及不断研制新材料。其任务的实现实际是一个工程问题,故在材料科学这个名词出现后不久提出了材料科学与工程(MSE)的概念。材料科学与工程包括四个基本要素,即成分和结构、合成和加工、性质、使用表现。任何材料都离不开这四个基本要素,这是几千年来人类对材料驾驭过程的总结。材料的合成与加工着重研究获取材料的手段,以工艺技术的进步为标志;材料的成分(材料所含元素的种类和各元素的相对量)与结构(材料的内部构造)反映材料的本质,是认识材料的理论基础;材料的性质(材料在外界因素作用下表现出来的行为)表征了材料固有的性

能,如力学性能、物理性能、化学性能等,是选用材料的重要依据;使用表现(材料在使用条件下表现出来的行为)可以用材料的加工性(工艺性能)和服役条件(使用性能)相结合来考察,它常常是材料科学与工程的最终目标。

1957年11月,原苏联人造卫星被送入太空,对当时的美国朝野造成极大震动。美国政府的调查表明,主要问题在于材料科学与工程相对落后于原苏联。此后,以美国为代表的西方先进工业国家就十分重视材料的研究与开发。这就逐步促使了该MSE新兴边缘学科的形成。能源、材料、信息是现代科学技术的三大支柱,在我国也形成了相应的三大支柱产业。而能源与信息产业的发展在很大程度上要依赖于材料的发展。所以,全世界工业技术先进的国家都十分重视该领域内的研究与开发。美国的关键技术委员会在1991年确定的22项关键技术中,材料占了5项:①材料的合成与加工;②电子和光电子材料;③陶瓷;④复合材料;⑤高性能金属和合金。日本为开拓21世纪选定的基础技术研究项目中共涉及46个领域,其中有关新材料的基础研究项目就占14项之多。

材料科学与工程的努力目标是按指定性能来进行材料的设计,新材料将建立在“分子设计”基础之上,改变利用化学方法探索和研制新材料的传统做法。将来,新材料的合成,只要通过化学计算,重新组合分子就行了,人类将会完全摆脱对天然材料的依赖,使材料的研究和生产发生根本性变革,人类的物质文明将进入一个令人神往的新时代。

0.2 工程材料及其分类

解决不同工程用途所需要的材料称为工程材料,对本课程而言主要是指固体材料领域中与工程(结构、零件、工具等)有关的材料。

现代工程材料种类繁多。机械工程材料按其化学成分分为金属材料、高分子材料、无机非金属材料(陶瓷)和复合材料四大类。

金属材料是指化学元素周期表B—At线左侧的全部元素和由这些元素构成的合金材料。其主要特征是具有金属光泽、良好的塑性、导电性、导热性、较高的刚度和正的电阻温度系数。这是工程领域中用量最大的一类材料。依据其成分又分为由铁和以铁为基的合金构成的钢铁材料及由除铁以外的其他金属及其合金构成的非铁(有色)金属材料两大类,其中钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低成本等综合优势,占据了主导地位,达金属材料用量的95%,并且这种趋势仍将延续一段时间。

高分子材料由分子量很大的大分子组成,主要含碳、氢、氧、氮、氯、氟等元素。其主要特征是质地轻,比强度高,橡胶高弹态,耐磨耐蚀,易老化,刚性差,高温性能差。工程上使用的高分子材料包括塑料、合成橡胶、合成纤维等。目前全世界每年生产的高分子材料超过了2亿吨,体积是钢铁的2倍,其中塑料占了约75%。高分子材料具备金属材料不具备的某些特性,发展很快,应用日益广泛,已成为工程上不可缺少的甚至不可取代的重要材料。

无机非金属(陶瓷)材料主要由氧和硅或其他金属化合物、碳化物、氮化物等组成,主要特征是耐高温、耐蚀,高硬度,高脆性,无塑性。按照习惯,陶瓷一般分为传统陶瓷和特种陶瓷两大类。传统陶瓷主要用作日用、建筑、卫生以及工业上应用的电器绝缘陶瓷(高压电瓷)、化工耐酸陶瓷和过滤陶瓷等。特种陶瓷具有独特的力学、物理、化学、电学、磁学、光学等性能,能满足工程技术的特殊要求,是发展宇航、原子能和电子等高、精、尖科学技术不可缺少的材料,并已成为高温材料和功能材料的主力军。

复合材料是由两种或两种以上不同化学性质或不同组织结构的物质,通过人工制成的一种多相固体材料。按增强相的性质和形态,可分为颗粒复合材料、纤维复合材料、层叠复合材料、骨架复合材料及涂层复合材料等。最常用的是纤维复合材料,如玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料、硼纤维复合材料、金属纤维复合材料和晶须复合材料等。由于复合材料具有各单纯材料不具备的优点,因此,今后可望得到进一步发展。

当然,上述各种材料之间也存在着交叉关系,如非晶态金属介于金属和非金属之间;复合材料把金属和非金属结合起来。

机械工程材料按其使用功能分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用它们的强度、硬度、韧性、弹性等力学性能,用以制造受力为主的构件,是机械工程、建筑工程、交通运输、能源工程等方面的物质基础。它包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料。功能材料主要是利用它们所具有的电、光、声、磁、热等功能和物理效应而形成的一类材料。它们在电子、红外、激光、能源、计算机、通信、电子、空间等许多新技术的发展中起着十分重要的作用。

机械工程材料按其开发、使用时间的长短及先进性分为传统材料和新型材料两类。传统材料是指那些已经成熟且长期在工程上大量应用的材料,如钢铁、塑料等,其特征是需求量大、生产规模大,但环境污染严重。新型材料是指那些为适应高新技术产业而正在发展且具有优异性能和应用前景的材料,如新型高性能金属材料、特种陶瓷、陶瓷基和金属基复合材料等,其特征是投资强度大、附加值高、更新换代快、风险性大、知识和技术密集程度高,一旦成功,回报率也较高,且不以规模取胜。但两者并无严格的界限。

0.3 材料科学在机械工程中的地位和作用

机械工业作为基础工业,为各行各业提供了大量的机械装备,而各种机械装备都是由性能各异的工程材料加工成各种零件并装配而成的。作为机械科学的重要组成部分,材料科学与工程对机械工业的发展产生了巨大的推动作用。

机械工程正向着大型、微型、高速、耐高温、耐高压、耐低温和耐受恶劣环境等方向发展。要求材料在机械产品规定的服役期内,在保证功能稳定、可靠的同时满足机械加工的各种工艺条件对材料的质量要求。从材料对飞机性能的影响中可以看到材料对提高机械产品质量所起的作用。航空发动机是飞机的核心,自1941年喷气式飞机问世以来,航空发动机的性能不断提高,主要表现在推力的不断提高。由于发动机的工作温度每提高 100°C ,其推力可提高约15%,通过材料与工艺的创新,其关键部件涡轮叶片耐热温度的提高在其中作出了巨大贡献。目前涡轮叶片的耐热温度已在 1093°C 以上,更高耐热温度涡轮叶片已在开发之中。此外,飞机自重的减轻有70%是靠材料实现的。可见,材料科学的发展为保证机械产品质量提供了重要保障。

对于机械工程技术人员,在进行产品设计和选材及不可避免地考虑后续加工时,面临着许多种可能的选择。事实上一个好的材料的选用,应是设计—材料—工艺—用户(效果)最佳组合的结果。材料设计作为机械设计过程的核心内容,对机械装备技术功能的发挥具有举足轻重的作用。设计是以材料的性能数据为依据的。材料科学的发展,使人类对材料的性能随化学组成、内部微观组织结构和在使用条件变化的规律的认识逐步深入,材料微观组织及缺陷和材料宏观性能之间定量和半定量关系的建立,为高水平的机械设计提供了重要依据。

在机械制造中,材料的工艺性能在很大程度上决定着适宜的加工方法,也直接影响到生产效率。如机械制造中有约70%的零件最后需经刀具切削加工,机床的切削速度往往取决于刀具材料的性能。刀具由高碳钢到高速钢、硬质合金、金属陶瓷的变化,使切削速度从不 10m/min 提高到 200m/min 甚至 500m/min 。新材料的应用还使一些传统工艺发生了革命性的变化。因此,材料科学的发展极大地推进了机械制造工艺的进步。

材料科学的发展,新材料的不断涌现,使机械制造中一些合金资源消耗大、成形困难等材料的消耗比例不断下降,非金属材料特别是高分子材料部分替代了钢铁和非铁金属材料,改善了机械工业的用材结构。

0.4 工程材料课程的基本任务和学习的內容、目的与方法

工程材料的成分不同,它们当然就具有不同的性能。例如,纯铁非常软、强度低,而在纯铁中加入一定量的碳,便成了钢,它的硬度高、强度大。但是成分相同的工程材料,通过不同的改性处理,性能也会随之改变。例如,钳工用锯条硬而脆、易折断,但加热烧红后缓慢冷却下来时会变得软而韧。这表明化学成分并不是工程材料性能上产生差异的唯一原因,工程材料的性能还与它的内部构造即组织结构有关。锯条在使用状态下内部是高硬度的组织,而加热缓冷后形成的则是一种硬度较低的内部组织。可见,成分是决定材料组织结构的内因,而加工工艺是决定组织结构的外因。成分和工艺的改变,将会引起材料组织结构的变化,从而引起性能的变化。对于金属材料,最常用的改性工艺是热处理,即通过在固态下加热、保温、冷却的过程使金属内部组织发生变化,从而得到所要求的性能的工艺。本课程作为材料科学的应用部分,其基本任务就是建立材料的成分、内部组织、加工(改性处理)工艺与性能之间的关系,找出其相互影响规律,以便通过控制材料的成分和加工过程来控制其组织,提高材料的性能,充分发挥材料的性能潜力。此外,在解决工程应用问题时,机械工程技术人員必须了解工程材料的分类、性能以及选材因素、选材原则和选材方法等。所以,本课程的学习內容主要有:材料科学和工程的基础知识,包括材料性能、材料结构、材料相变基础知识和材料改性等;工程材料学的基础知识,包括各类常用材料的成分、组织、性能特征及选用等。

通过上述内容的学习,期望能达到以下目的:熟悉常用工程材料的成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系及其变化规律;初步掌握常用材料的性能与应用范围,具备选用常用材料的初步能力,正确合理地选材、用材;对一般简单机械零件初步具备选定加工处理方法特别是确定金属材料热处理工艺方法的能力,能正确地制定热处理工艺技术要求及妥善安排加工工艺路线;对失效机件,能运用材料科学的基础知识进行初步的分析,判断大致的失效原因,为机械设计提供依据。

工程材料课程是一门理论性和实践性都很强的技术基础课,与已修过的其他一些课程相比,本课程有不同于这些课程的一些特点,如它的公式和计算不多,但概念很多,叙述性內容多,需要理解、记忆的內容多。因此学习中需要改变思维方式,调整和改进学习方法,注重主动学习、自主学习,提高学习效率。应注意运用已学过的知识,注重于分析、理解与应用,特别是注意前后知识的综合运用,把相对分散、孤立的材料科学知识转变为系统而整体的印象,培养独立分析问题与解决问题的能力,从而真正达到上述学习的目的。

第 1 章 材料力学性能

材料的力学性能是材料在一定环境因素下承受外加载荷时所表现出的行为,通常表现为变形与断裂。材料用于结构零件时,其力学性能是工程设计的重要依据。当材料以其他性能如物理、化学性能为主要使用要求时,其力学性能同样是设计的主要参考依据。在不同使用条件下,材料所承受的外力的性质和环境条件是各种各样的,对材料力学性能的要求也是各不相同的,本章主要讨论几种常用力学性能指标的意义和应用。

1.1 材料的静载力学性能

静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。材料的静载力学性能指标主要有强度、塑性和硬度等。

1.1.1 材料承受静拉伸时的力学性能指标

材料承受静拉伸时的力学性能指标是通过拉伸试验测定的。其过程为:将被测材料按 GB/T 228.1—2010 要求制成标准拉伸试样(图 1-1),在拉伸试验机上夹紧试样两端,缓慢地对试样施加轴向拉伸力,使试样被逐渐拉长,最后被拉断。通过试验可以得到拉伸力 F 与试样伸长量 ΔL 之间的关系曲线,称为拉伸曲线。为消除试样几何尺寸对试验结果的影响,将拉伸试验过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位面积上所受的力,称为应力,用 R 表示,即 $R=F/S_0$,单位为 MPa;试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量,称为应变,用 ϵ 表示,即 $\epsilon=\Delta L/L_0$,从而得到 $R-\epsilon$ 曲线(图 1-1),其形状与 $F-\Delta L$ 曲线完全一致。

在拉伸曲线中, Op 段为直线,即在应力不超过 R_p 时,应力与应变成正比关系,此时,将外力去除后,试样将恢复到原来的长度。这种能够完全恢复的变形称为弹性变形;当应力超过 R_p 后,试样的变形不能完全恢复而产生永久变形,这种永久变形称为塑性变形。当应力增大至 H 点后,曲线呈近似水平直线状,即应力不增大而试样伸长量在增加,这种现象称为屈服。屈服后试样产生均匀的塑性变形,应力增大到 m 点后,试样产生不均匀的塑性变形,即试样发生局部直径变细的“颈缩”现象。至 k 点时,试样在颈缩处被拉断。

通过对拉伸曲线的分析,可以直接在曲线上读出一系列强度指标,并可根据试验结果计算出塑性指标值。

1.1.1.1 弹性和刚性

材料的弹性指标主要是指弹性极限,刚性指标则是指材料的弹性模量。

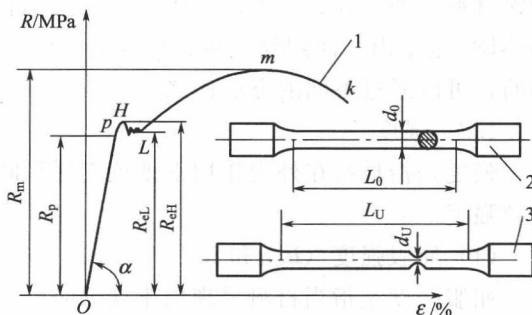


图 1-1 拉伸试样与拉伸曲线

1—低碳钢拉伸曲线; 2—拉伸试样;

3—拉断后的试样

(1) 弹性极限 (R_p)

弹性极限是指在产生完全弹性变形时材料所能承受的最大应力。

实际上弹性极限只是一个理论上的物理定义,对于实际使用的工程材料,用普通的测量方法很难测出准确而唯一的弹性极限数值,因此,为了便于实际测量和应用,一般规定以塑性延伸率为 0.01% 时的应力值作为“规定弹性极限”(或称“条件弹性极限”),记为 $R_{p0.01}$ 。工程上,对于服役条件不允许产生微量塑性变形的弹性元件(如汽车板簧、仪表弹簧等)均是按弹性极限来进行设计选材的。

(2) 弹性模量 (E)

弹性模量是指在应力-应变曲线上的完全弹性变形阶段,应力与应变的比值。

在工程上 E (单位为 MPa) 称为材料的刚度,是材料的重要力学性能指标之一,它表征对弹性变形的抗力。其值越大,材料产生一定量的弹性变形所需要的应力越大,表明材料不容易产生弹性变形,即材料的刚度大。在机械工程上的一些零件或构件,除了满足强度要求外,还应严格控制弹性变形量,如锻模、镗床的镗杆,若没有足够的刚度,所加工的零件尺寸就不精确。

实际工件的刚度首先取决于其材料的弹性模量 E ,不同的材料,其刚度差异很大。陶瓷材料的刚度最大,金属材料与复合材料次之,而高分子材料最低。常用的金属材料中,钢铁材料最好,铜及铜合金次之(为钢铁材料的 $2/3$ 左右),铝及铝合金最差(为钢铁材料的 $1/3$ 左右)。实际工件的刚度除取决于材料的弹性模量外,还与工件的形状和尺寸有关。

需要指出的是,金属材料的弹性模量 E 主要取决于基体金属的性质,当基体金属确定时,难以通过合金化、热处理、冷热加工等方法使之改变,即 E 是结构不敏感性参数,如钢铁材料是铁基合金,不论其成分和组织结构如何变化,室温下的 E 值均在 $(20 \sim 21.4) \times 10^4$ MPa 范围内。而陶瓷材料、高分子材料、复合材料的弹性模量对其成分和组织结构是敏感的,可以通过不同的方法使之改变。

1.1.1.2 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。常用的材料强度指标有屈服强度和抗拉强度等。

(1) 屈服强度 (R_{eH} 和 R_{eL})

屈服强度是指当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,区分为上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度 (R_{eH}) 是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力;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。

对于无明显屈服现象的材料,则以规定塑性延伸强度如塑性延伸率为 0.2% 时的应力 $R_{p0.2}$ 替代,即所谓的“条件屈服强度”。

屈服强度是工程上最重要的力学性能指标之一。其工程意义在于以下两个方面。

① 绝大多数零件,如紧固螺栓、汽车连杆、机床丝杠等,在工作时都不允许有明显的塑性变形,否则将丧失其自身精度或与其他零件的相对配合受影响,因此屈服强度(一般为下屈服强度)是防止材料因过量塑性变形而导致机件失效的设计和选材依据。

② 根据屈服强度与抗拉强度之比(屈强比)的大小,衡量材料进一步产生塑性变形的倾向,作为金属材料冷塑性变形加工和确定机件缓解应力集中防止脆性断裂的参考依据。因为提高材料的屈服强度,虽然可以减轻机件重量,不易使机件产生塑性变形失效,但如果材料屈服强度与抗拉强度的比值增大,则不利于某些应力集中部位通过局部塑性变形使应力重

新分布、缓解应力集中，从而可能导致脆性断裂。因此，对于具体机件，应根据其形状、尺寸及服役条件而定，不宜一味追求高的屈服强度。

(2) 抗拉强度 (R_m)

抗拉强度是指材料在拉伸过程中，相应最大力的应力。

抗拉强度是工程上最重要的力学性能指标之一，对塑性较好的材料， R_m 表示了材料对最大均匀变形的抗力；而对塑性较差的材料，一旦达到最大载荷，材料迅即发生断裂，故 R_m 也是其断裂抗力（断裂强度）指标。不论何种材料， R_m 均是标志其在承受拉伸载荷时的实际承载能力，是高分子材料和陶瓷材料选材的重要依据。对塑性变形要求不严而仅要求不发生断裂的金属零件，如钢丝绳、建筑结构件等，为减轻自重， R_m 也常作为其设计与选材依据。此外，因 R_m 易于测定，适合于作为产品规格说明或质量控制标志，故广泛出现在标准、合同、质量证明等文件资料中。

1.1.1.3 塑性

塑性是指材料在外力作用下能够产生永久变形而不破坏的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

(1) 断后伸长率 (A)

断后伸长率是指断裂后试样标距伸长量与原始标距之比的百分率。即：

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

式中 L_u ——试样断裂后的标距，mm；

L_0 ——试样的原始标距，mm。

材料的伸长率大小与试样原始标距 L_0 和原始截面积 S_0 密切相关，在 S_0 相同的情况下， L_0 越长则 A 越小，反之亦然。因此，对于同一材料而具有不同长度或截面积的试样要得到比较一致的 A 值，或者对于不同材料的试样要得到可比较的 A 值，必须使 $L_0/\sqrt{S_0}$ 的比值为—常数。国家标准规定，此值为 11.3（相当于 $L_0=10d_0$ 的试棒）或 5.65（相当于 $L_0=5d_0$ 的试棒），所得的伸长率以 $A_{11.3}$ 或 $A_{5.65}$ （省去脚注 5.65）表示。同种材料的 A 为 $A_{11.3}$ 的 1.2~1.5 倍，所以，对不同材料，只有 $A_{11.3}$ 与 $A_{11.3}$ 比较或者 A 与 A 比较才是正确的。

(2) 断面收缩率 (Z)

断面收缩率是指断裂后试样横截面积的最大缩减量与原始横截面积之比的百分率。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，mm²；

S_0 ——试样的原始横截面积，mm²。

断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 越大，材料的塑性越好，一般认为， $A<5\%$ 时的材料为脆性材料。

材料的塑性指标一般不直接用于机械设计计算，但材料具有一定的塑性，当零件遭受意外过载或冲击时，通过塑性变形和应变硬化的配合可避免发生突然断裂；当零件因存在台阶、沟槽、油孔及表面粗糙不平滑的现象而出现应力集中时，通过塑性变形可削减应力峰、缓和应力集中的作用，从而防止零件出现早期破坏；材料具有一定的塑性可保证某些成形工