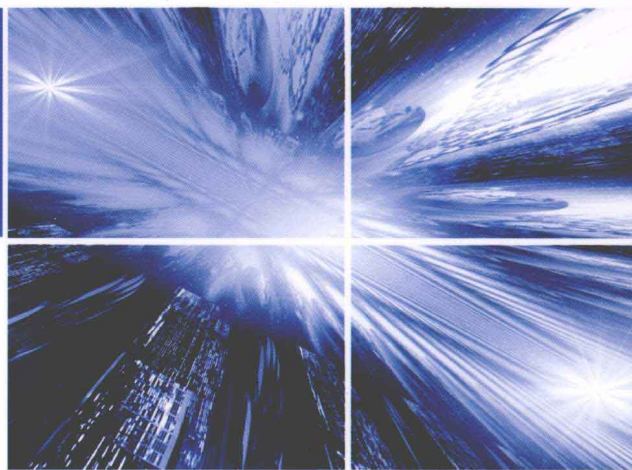


普通高等教育规划教材



工程材料

王正品 李 炳 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

工 程 材 料

王正品 李 炳 编

石崇哲 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书为工科类及综合类院校的机械类、近机类及近材料类专业的专业基础课教材。主要讲述材料科学与工程的基础知识、工程材料学的专业知识以及各种工程材料的特点与应用,即介绍材料的成分、结构、组织与性能之间的关系以及材料的设计、选用、制造、加工、应用等相关知识。具体内容包括材料的力学性能、金属的晶体结构与缺陷、金属的结晶与二元相图、金属的塑性变形及再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及工程材料的选用。

本书的目的是使学生掌握在特定应用环境下正确选择材料所需要的基础知识和专业知识,即弄清楚材料性质——材料内部结构、材料的内部形态——加工工艺与服役环境下材料的使用性能之间的关系,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,正确制定零件的冷、热加工工艺路线的能力。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/王正品,李炳编.—北京:机械工业出版社,2012.2

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-36766-6

I. ①工… II. ①王…②李… 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(2011)第257235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:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·360千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36766-6

定价:29.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

材料是一切产品制造的基础，是保障安全、提高生活质量的核心之一，是人类社会繁荣进步的物质基础和先导，材料的开发和使用能力标志着社会的技术水平和科技前景。

一个产品的设计与选用、制造与加工、质量控制与检测、工程应用及失效分析全过程的每个环节都与材料密切相关，能否既经济又为社会所能接受的控制材料的结构、性能和形状是每个工程师必须具备的基本技能。因此，国内所有工科类院校，几乎所有机械类、材料类、近机类和近材料类专业都开设“工程材料”课程，这些专业涉及重工业、轻工业、航空、航天、航海、国防和民生等领域。

本书的目的是使学生掌握材料的组织、结构、性能、加工及使用性能之间的关系，了解材料在整个工程系统设计中的作用。本书按照知识体系结构由基础到专业、由简单到复杂的顺序编写，便于学生循序渐进地掌握相关知识。

为了激发学生的学习兴趣，每章开篇前都提出了一些与本章专业知识相关的日常生活中的常见问题，通过对这些问题的思考，也有利于提高学生理论与实际相结合的能力。

目前高校的国际合作项目越来越多，与国外高校联合培养学生已成为一种趋势，在校生成有更多的机会去国外大学继续深造。为此，本书引入了专业词汇的英文表述形式，使学生能较早地打下必要的专业英语基础，也有利于学生阅读英文文献及专业资料。

本书由西安工业大学王正品教授和李炳副教授编写。其中第1~6章由王正品编写，第7~12章由李炳编写。特邀西安工业大学严文教授为本书撰写了绪论。西安工业大学对本书的编写和出版给予了大力的支持，另外，本书参考并引用了一些图书、期刊等资料的有关内容。在此，编者对为本书付出辛勤劳动的人员以及援引文献的作者表示衷心的感谢！

西安工业大学石崇哲教授审阅了本书的全部内容，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此，表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1章 材料的力学性能

1.1 材料在静载下的力学性能	7
1.1.1 拉伸试验	7
1.1.2 硬度试验	9
1.2 材料在动载下的力学性能	11
1.2.1 冲击试验	11
1.2.2 材料的疲劳	13
1.3 应力强度因子和断裂韧性	14
1.3.1 应力强度因子	14
1.3.2 断裂韧性	15
思考题与习题	15

第2章 金属的晶体结构与缺陷

2.1 材料的结合方式	17
2.1.1 离子键	17
2.1.2 共价键	18
2.1.3 金属键	18
2.1.4 分子键（范德华键）	19
2.2 晶体结构的基本概念	20
2.2.1 晶体与非晶体	20
2.2.2 晶格与晶胞	20
2.2.3 立方晶系的晶面和晶向表示 方法	21
2.3 纯金属的晶体结构	23
2.3.1 常见的金属晶体结构	23
2.3.2 描述晶胞的指标	24
2.3.3 金属晶格的密排面和密排 方向	25
2.4 金属的实际结构与晶体缺陷	27
2.4.1 点缺陷	27
2.4.2 线缺陷	27
2.4.3 面缺陷	29
2.5 合金的相结构	30
2.5.1 固溶体	30
2.5.2 金属化合物（中间相）	32
思考题与习题	33

第3章 金属的结晶与二元相图

3.1 纯金属的结晶	36
3.1.1 结晶的热力学条件	36
3.1.2 纯金属的结晶过程	37
3.1.3 结晶后晶粒的大小及控制	38
3.1.4 金属铸锭（铸件）的宏观组织及 控制	39
3.2 合金的结晶	41
3.2.1 相图的基本知识	41
3.2.2 匀晶相图	43
3.2.3 共晶相图	44
3.2.4 包晶相图	48
3.2.5 其他类型的二元合金相图	50
3.2.6 二元相图的分析方法	53
3.2.7 相图与金属性能之间的关系	53
3.3 铁碳合金的结晶	54
3.3.1 铁碳合金的基本相	55
3.3.2 铁碳相图分析	56
3.3.3 铁碳合金平衡结晶过程	58
3.3.4 碳对铁碳合金的组织与性能 的影响	62
思考题与习题	63

第4章 金属的塑性变形及再结晶

4.1 金属的塑性变形	67
4.1.1 单晶体的塑性变形	67
4.1.2 多晶体的塑性变形	71
4.1.3 塑性变形对金属组织和性能的 影响	73
4.2 冷变形金属在加热时组织和性能的 变化	75
4.2.1 回复	75
4.2.2 再结晶	76
4.2.3 晶粒长大	76
4.2.4 再结晶退火后的晶粒度	76
4.2.5 金属的热加工	78
思考题与习题	79

第5章 钢的热处理

5.1 热处理概述	82	6.5.1 不锈钢	136
5.1.1 热处理的分类	82	6.5.2 耐热钢	138
5.1.2 钢的临界温度	82	思考题与习题	141
5.2 钢在加热时的组织转变	83	第7章 铸铁	144
5.2.1 奥氏体的形成	83	7.1 概述	144
5.2.2 奥氏体的晶粒大小及控制	84	7.1.1 铸铁的特点	144
5.3 钢在冷却时的组织转变	86	7.1.2 铸铁的分类	145
5.3.1 过冷奥氏体的等温转变图和 连续冷却转变图	86	7.1.3 铸铁的石墨化及其影响因素	145
5.3.2 珠光体转变	90	7.2 常用普通铸铁	147
5.3.3 马氏体转变	91	7.2.1 灰铸铁	147
5.3.4 贝氏体转变	93	7.2.2 可锻铸铁	148
5.4 钢的普通热处理	95	7.2.3 球墨铸铁	150
5.4.1 钢的退火与正火	95	7.2.4 蠕墨铸铁	152
5.4.2 钢的淬火	97	7.3 合金铸铁	153
5.4.3 钢的回火	99	7.3.1 耐热铸铁	153
5.5 钢的表面热处理	103	7.3.2 耐磨铸铁	153
5.5.1 钢的表面淬火	103	7.3.3 耐蚀铸铁	154
5.5.2 钢的化学热处理	104	思考题与习题	154
5.5.3 几种常用的表面热处理工艺 比较	108	第8章 有色金属及其合金	157
思考题与习题	109	8.1 铝及铝合金	157
第6章 工业用钢	111	8.1.1 纯铝的基本特性	157
6.1 合金元素在钢中的作用	111	8.1.2 铝的合金化及分类	158
6.1.1 合金元素与铁和碳的相互作用	111	8.1.3 铝合金的时效强化	158
6.1.2 合金元素在钢中的存在形式	113	8.1.4 铝合金的细化组织强化	160
6.1.3 合金元素对钢的相变的影响	113	8.1.5 各类铝合金简介	161
6.2 钢的分类与编号	114	8.2 铜及铜合金	163
6.2.1 钢的分类	114	8.2.1 工业纯铜的基本特性	163
6.2.2 钢的牌号	115	8.2.2 铜的合金化及分类	164
6.3 结构钢	116	8.2.3 各类铜合金简介	164
6.3.1 普通碳素结构钢	116	8.3 钛及钛合金	168
6.3.2 优质碳素结构钢	118	8.3.1 纯钛的基本特性	168
6.3.3 低合金高强度结构钢	119	8.3.2 钛的合金化及热处理原理	170
6.3.4 渗碳钢	121	8.3.3 钛合金类型、牌号及应用	172
6.3.5 调质钢	123	思考题与习题	173
6.3.6 弹簧钢	124	第9章 高分子材料	175
6.3.7 滚动轴承钢	127	9.1 概述	175
6.3.8 耐磨钢	128	9.1.1 高分子材料分类	175
6.4 工具钢	129	9.1.2 高分子材料的命名	176
6.4.1 刀具钢	129	9.1.3 高分子材料的力学状态	176
6.4.2 模具钢	134	9.1.4 常用高分子材料的化学反应	177
6.5 特殊性能钢	136	9.2 常用高分子材料	178
		9.2.1 工程塑料	178

9.2.2 橡胶	185	11.2 复合材料的增强机制及性能	208
9.2.3 合成纤维	189	11.2.1 复合材料的增强机制	208
9.2.4 合成胶粘剂	189	11.2.2 复合材料的性能特点	210
9.2.5 涂料	190	11.3 常用的复合材料	212
思考题与习题	191	11.3.1 纤维增强复合材料	212
第10章 陶瓷材料	194	11.3.2 叠层复合材料	216
10.1 概述	194	11.3.3 粒子增强复合材料	216
10.1.1 陶瓷材料的特点	195	思考题与习题	217
10.1.2 陶瓷的分类	195	第12章 工程材料的选用	219
10.1.3 陶瓷的制造工艺	196	12.1 材料选用时要考虑的因素	219
10.2 常用工程结构陶瓷材料	197	12.1.1 使用性能因素	219
10.2.1 普通陶瓷	197	12.1.2 工艺性能因素	220
10.2.2 特种陶瓷	197	12.1.3 经济性因素	220
10.3 金属陶瓷	201	12.1.4 环境因素	220
10.3.1 粉末冶金方法及其应用	201	12.2 材料的选用内容及方法	221
10.3.2 硬质合金	202	12.2.1 材料的选用内容	221
思考题与习题	204	12.2.2 材料的选用方法	221
第11章 复合材料	206	12.3 典型零件的材料选用举例	223
11.1 概述	206	12.3.1 金属材料的选用举例	223
11.1.1 复合材料的概念	206	12.3.2 高分子材料的选用举例	225
11.1.2 复合材料的分类	206	思考题与习题	225
11.1.3 复合材料的命名	208	参考文献	227

绪 论

1. 材料的重要地位与作用

材料 (Materials) 是人类用来制造各种有用器件的物质 (substances)。它是人类生存与发展、征服自然和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,历史学家将人类发展按照材料的发展划分了七个时代:

石器时代 (Stone Age)	大约开始于公元前 10 万年
青铜时代 (Bronze Age)	大约开始于公元前 3000 年
铁器时代 (Iron Age)	大约开始于公元前 1000 年
水泥时代 (Cement Age)	大约开始于公元 0 年
钢时代 (Steel Age)	大约开始于 1800 年
硅时代 (Silicon Age)	大约开始于 1950 年
新材料时代 (New Materials Age)	大约开始于 1990 年

20 世纪的四大发明——原子能、半导体、计算机、激光器都离不开材料的发展。仅以计算机为例,1946 年由美国研制的现代电子计算机埃尼阿克 (ENIAC, 电子数值积分计算机的简称),共用 18000 多支电子管,重量达 30t,占地 170m²,功率为 150kW。半导体材料出现后,特别是 1967 年大规模集成电路的问世,使计算机微型化,才使计算机这个“旧时王谢堂前燕,飞入寻常百姓家”。

材料、能源与信息是构建现代文明的三大支柱,而材料又是一切现代工程技术的基础和源泉。材料不仅是人类进化的标志,而且是社会现代化的物质基础与先导。自 20 世纪 80 年代以来,人们又把新材料、生物工程和信息作为产业革命的重要标志。材料,尤其是新材料的研究、开发与应用反映一个国家的科学技术与工业水平,它关系到国家的综合国力与安全。因此,各发达国家无不把材料科学与工程的研究与发展放在重要地位。1978 年全国科学大会将材料科学技术列为八个新兴的综合性的科学技术领域之一。此后,各个五年计划中,一直把材料科学技术作为重点发展的领域之一。

无论是为制造某种产品选择合适的材料、选择最佳的加工工艺 (processing)、正确地使用材料,还是改善现有材料 (improve existing materials) 或者研制新材料 (invent new materials),都需要具有材料化学成分、内部结构与各种性能之间相互关系的知识,都需要用材料科学与工程的理论作为指导。特别是新材料的研究与开发,其主要特点是以科学为基础,与新技术、新工艺的发展相互依存、相互促进。

2. 材料科学的发展与进步

“材料科学” (materials science) 这个术语最早出现于 20 世纪 60 年代。实际上,材料科学是自然科学的一个分支。它从事于材料本质的发现、分析和了解,其目的在于提供材料内部结构的统一描绘或模型,以及解释各种结构与性能之间的关系。因此,材料科学的核心问题是结构和性能。为了深入理解和有效地控制材料的结构和性能,需要处理各种过程,如屈服过程、断裂过程、导电过程、磁化过程、相变过程等。材料中各种结构的形成都涉及能

量。因此，外界条件的改变将会引起结构的改变，从而导致性能的改变。过程是理解性能和结构的重要环节；结构是深入理解性能和计算能量的中心环节；能量控制结构和过程的进行。

材料的性能（properties）是由材料的化学成分（compositions）和内部结构（structures）所决定的。材料的结构表明材料的组元及其排列和运动方式。材料的组元指组成材料的物质组元，如原子（atoms）、分子（molecules）和离子（ions）等。材料的排列（arrangement）方式取决于组元间的结合类型，如金属键、离子键、共价键、分子键等。组元不是固定不动的，而是在运动的，如电子的运动、原子的热运动等。材料的结构根据不同的尺度可以分为不同层次，包括原子结构、原子的排列、相结构、显微组织。晶体中的结构缺陷也包括在结构之中，每个层次的结构都以不同方式决定着材料的性能。

结构是理解和控制性能的中心环节。结构的最微细的水平是组成材料的原子结构，电子围绕着原子核运动的情况对材料的电学、磁学、热学、光学乃至耐蚀性能都有重大影响，尤其是电子的运动会影响原子的键合，使材料表现出金属、陶瓷和高分子的性质。第二个水平就是原子在空间的排列。金属、许多陶瓷和某些高分子材料在空间均具有非常规则的原子排列，或者说晶体结构。晶体结构会影响到材料的力学性能，如强度、硬度、塑性、韧性等。例如，石墨和金刚石都是由碳原子组成的，但其原子排列方式不同，因此其强度、硬度及其他物理性能差别极大。当材料处于非晶态即玻璃态时，与晶体材料相比，性能差别很大，如呈玻璃态的聚乙烯是透明的，而呈晶态的聚乙烯是半透明的。非晶态金属比晶态金属具有更高的强度和耐蚀性能。在晶体材料中存在的某些排列的不完美性，即晶体结构缺陷，也对材料性能产生重大的影响。第三个水平则是材料的显微组织，显微组织就是在显微镜下所观察到的构成材料的各个相的组合图像，或者说材料的显微组织是材料中各个相的量及形貌所构成的图像。

在研究晶体结构与性能的关系时，除考虑其内部原子排列的规则性以外，还必须考虑其尺寸的影响。从原子尺度看，把在三维方向上尺寸都很大的材料叫做块体材料；在一维、二维或三维方向上尺寸很小的材料叫做低维材料。低维材料具有目前块体材料所不具备的性质。其中，零维的纳米粒子（尺寸小于 100nm）具有很强的表面效应、尺寸效应和量子效应，从而使其具有独特的物理、化学性能。例如，纳米级金属颗粒是电的绝缘体及吸光的黑体；以纳米微粒制成的陶瓷具有较高的韧性和超塑性；纳米级金属铝的硬度为块体金属铝硬度的 8 倍等。作为一维材料的高强度有机纤维、光导纤维，作为二维材料的金刚石薄膜以及超导薄膜都具有特殊的物理性能。

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。材料的性能只有在外界条件下才能表现出来，外界条件是指温度、载荷、电场、磁场和化学介质等。例如，用来表征材料在外力作用下拉伸行为的拉伸力-伸长曲线或应力-应变曲线，采用屈服、颈缩、断裂等行为作为判据，便分别有屈服强度、抗拉强度、断裂强度等力学性能。又例如，用来表征材料在外磁场作用下，磁化及退磁行为的磁滞回线，采用不同的行为判据，便分别有矫顽力、剩余磁感、储藏的磁能等磁学性能。

材料的性能可分为两大类，即简单性能和复杂性能。简单性能包括材料的物理性能、力学性能和化学性能，复杂性能包括复合性能、工艺性能和使用性能等。材料的复杂性能是其不同简单性能的组合。

将异质、异性或异形材料复合所形成的复合材料，可以具备组元材料所不具备的性能，这是“复合”的结果。物理现象之间的转换是相当普遍的，人们利用这些现象制备了一些功能元器件或控制元器件，如光电管、热电偶、电阻应变片、压电晶体等。近年来，对性能的转换与复合进行综合利用，并提出了复合的相乘效应，获得了若干具有新性能的元器件。若对材料甲施加 X 作用，可以得 Y 效果，则这个材料甲具有 X/Y 性能。压电性能中，X 为压力，Y 为电位差，若材料乙具有 Y/Z 性能，则甲与乙复合之后就具有 X/Y/Z 性能。例如，自控发热功能复合材料就是利用相乘效应的一种复合材料，已广泛应用于石油、化工等方面。这种材料由一种导电粉末（如炭粉）分散在高分子树脂中而形成，导电粉末构成导电通道，用这样的材料加上电极制成扁形电缆即可缠在管道外面通电加热。材料发热使高分子膨胀，拉断一些导电粉末通道，从而使材料电阻值增大，降低发热量，温度降低后高分子收缩又使导电通道复原，产生恒温控制的效果。这种热和变形与变形和变阻的相乘效果成为热变阻的方式。

材料科学的形成是科学技术发展的结果。首先，固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展，对物质结构和性能的深入研究，推动了对材料本质的了解；同时，冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展，也使对材料本身的研究大大加强，从而对材料的制备、结构和性能以及它们之间相互关系的研究也越来越深入，为材料科学的形成打下了较坚实的基础。

其次，在材料科学这个名词出现以前，金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系，目前复合材料也正形成学科体系。材料是多种多样的，如金属、陶瓷、高分子和复合材料，但在它们的制备和使用过程中，许多概念、现象和转变都惊人的相似。诸如相变机理（如马氏体相变最先是金属学家提出来的，被广泛地用来作为热处理的理论基础，但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象，并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段）、缺陷行为、平衡热力学、扩散、塑性变形和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系等，在各种材料中都会有所涉及。材料中电子的迁移与禁带、原子聚集体的统计力学与磁自旋等概念，不仅用来说明最早研究过的单一材料的行为，而且也用来说明初看起来毫不相干的其他材料的行为。正是由于各种材料之间的相互有机联系，才使得诞生不久的材料科学成为一门独立的学科。另外，各类材料的研究设备与生产手段也有颇多共同之处。虽然不同类型的材料各有其专用的测试设备与生产装置，但许多方面是相同或相近的，如光学显微镜、电子显微镜、表面测试、物理性能与力学性能的测试设备等。在材料生产中，许多加工装置也是通用的，如挤压机，对金属材料可以用来成形及冷加工以提高强度；而某些高分子材料在采用挤压成丝工艺以后，可使有机纤维的比强度和比刚度大幅度提高。随着粉末成形技术和热致密化技术的发展，粉末冶金技术和现代陶瓷制造技术之间，已经很难找出明显的区别了。研究各种材料研制和测试设备的通用性，不但可以缩短生产周期，节约资金，更重要的是可以相互得到启发和借鉴，加速材料科学学科的发展。发展材料科学，对各种材料有一个更深入的了解，是研究开发各种新材料，以及充分挖掘现有各种材料使用潜力的必要基础。在制备、使用各种材料时获得的丰富经验、对各种材料规律性的认识，使其有可能以统一的观点来对待已经出现的各种材料，形成能够适用于各种材料的材料科学。

材料工程是工程领域，其目的在于经济地而又能为社会所能接受地控制材料的结构、性能和形状。材料科学的核心问题是结构与性能的关系；材料工程则要全面考虑材料的 5 个判

据,“经济”是经济判据,“为社会所能接受”包括资源判据、环保判据、能源判据,“结构、性能和形状”则分别是质量判据中的内在质量和表观质量。

一般地说,科学是研究“为什么”的问题的学问,而工程是解决“怎样做”的问题的学问。材料科学的基础理论为材料工程各方面工作的开展指明了方向,为更好地选择材料、使用材料、发挥现有材料的潜力、发展新材料提供了理论基础,可以节约时间,少走弯路,提高质量,降低成本和能耗,减少对环境的污染。

对材料新的理解往往是新材料实验优化最好的定性指导,现举几例说明。1906年德国工程师威尔姆(Wilm A.)偶然地发现了铝铜合金的自然时效硬化现象。威尔姆把一种铝铜镁合金进行淬火,希望这种合金也能够像钢那样淬硬,然而合金并未淬硬,测量工作被周末打断了,经过一个周末以后,继续测量的结果表明,合金确实硬化了。这种奇特的现象在1919年以前一直得不到解释。1919年麦瑞卡(Merica P. D.)等指出,铜在铝中的固溶度随温度的降低而下降,时效只不过是显微镜所看不见的(在当时)某种新相的延迟沉淀而已。从威尔姆的发现到麦瑞卡的理论出现的这段时间内,再也没有出现新的时效合金,因为谁也不知道应该用什么样的合金成分。可是在麦瑞卡理论之后,在固溶体延迟沉淀理论的指导下,这样的合金就大量涌现了,如Cu-Be、Cu-Co、Al-Zn-Mg等合金,并且还发现了时效早期阶段的过渡相。再如,对马氏体本质和对时效强化的深入了解,使人们发明了一种超高强度钢——马氏体时效钢。还比如,在位错理论的指导下,人们通过消除位错或提高位错密度使材料得到强化。我国某研究所在研究非线性光学晶体(光电子工业的一种基础材料)的过程中,根据实践中的规律得出了非线性光学效应的阴离子基团理论,并用此理论来代替大规模的筛选,先后开发了多种性能优越、具有实用价值的新型紫外线非线性光学晶体。

事实说明,对新材料来说,材料的合成制作已不是单凭经验就能完成的了,“炒菜”式的筛选材料的方法基本上已成为过去,必须十分重视材料科学的基础研究,不重视材料科学的基础研究,是无法步入世界先进行列的。

另一方面,材料科学和材料工程是紧密联系、互相促进的。材料工程不仅为材料科学提出了丰富的研究课题,而且材料工程和技术又为材料科学的发展提供了物质基础。材料科学和材料工程之间的区别主要在于着眼点的不同或者说各自强调的中心不同,它们之间并没有一条明确的分界线。

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:新材料、新装置和生物技术。

材料科学技术的发展趋势是:从均质材料向复合材料发展;材料结构的尺度向越来越小的方向发展;由被动性材料向具有主动性的智能材料的方向发展;高性能结构材料的研究与开发是永恒的主题;生物材料将有很大发展。

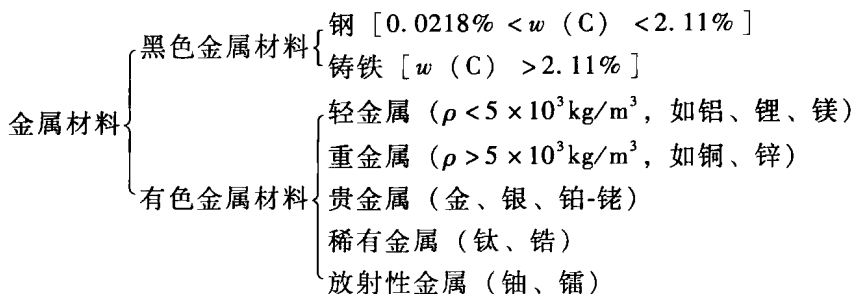
3. 工程材料的分类

工程材料(engineering materials)是指具有一定性能,在特定条件下能够发挥某种功能,被用来制取零件和元器件的材料。

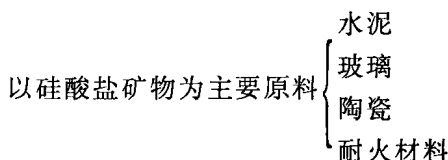
材料的分类方法很多,可按照成分、结合键、性能和用途进行分类。

(1) 按化学成分及结合键分类

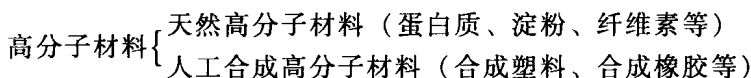
1) 金属材料



2) 无机非金属材料 (硅酸盐材料)

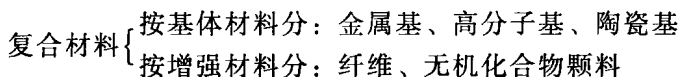


3) 高分子材料



按性能及用途又可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂、涂料。

4) 复合材料 (composite materials)。把两种 (或两种以上) 的不同材料组合起来、使之取长补短、相得益彰构成的材料。



(2) 按材料的使用性能分类

1) 结构材料 (structural materials)。以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能 (mechanical properties) 为指标, 用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料 (如工字梁、汽车主轴、钢结构桥梁、手动工具)。

2) 功能材料 (functional materials)。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器件的材料, 一般不承受或承受很小的力 (如电线、测温热电偶、形状记忆合金)。

(3) 按照材料的物理形态分类

1) 晶体材料。原子或分子在三维空间有规律、周期性排列。

2) 非晶态材料。原子或分子在三维空间无规排列。

3) 纳米材料。至少有一维尺寸处于 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 范围内的固体物质。

(4) 按照材料的几何形态分类 按照材料的几何形态分为三维材料、二维材料、一维材料和零维材料。

(5) 按照材料的发展分类 按照材料的发展分为传统材料 (钢铁、铜、铝、水泥、塑料、陶瓷……) 和新材料 (金属间化合物、高温超导材料、非晶态合金、纳米材料……)。

4. 本课程的任务与内容

工程材料是机械类和近机类各专业重要的专业基础课, 通过学习可以使获得工程材料的基本理论知识, 掌握材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系, 了解常用材料的应用范围和加工工艺, 初步具备合理选用材料、正确确定加工方法、妥善安排加工

工艺路线的能力。

本课程主要分为以下三大部分。

- 1) 材料的基本理论，主要讲材料的结构与性能、金属材料的组织与性能控制。
- 2) 常用材料，金属、高分子、复合材料、纳米材料、新型功能材料。
- 3) 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

第 1 章 材料的力学性能

曾经思考过这些问题吗？

1. 与材料相关的导致泰坦尼克号沉没的主要原因是什么？
2. 1986 年挑战者号航天飞机失事的主要原因是什么？
3. 为什么有些金属和塑料在低温下会变脆？
4. 为什么不同长度的玻璃纤维具有不同的性能？
5. 为什么飞机、汽车上的零部件都有使用期限？

在选用材料时，首先必须考虑材料的有关性能，使之与构件的使用要求匹配。材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在使用过程中所表现的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能，包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削加工性能等。由于力学性能是结构件选材的主要依据，因此本章主要介绍材料的力学性能，对材料的物理性能、化学性能及工艺性能作简单介绍。

材料的力学性能（mechanical properties）是工程材料在外力的作用下所表现出来的性能，主要有强度、塑性、硬度、冲击韧度、疲劳强度和断裂韧度等，可通过各种不同的标准试验来测定。材料的力学性能可用来判断材料在实际服役环境下将表现出来的具体效能（performance）。因此，了解材料的力学性能可为工件的选材提供依据。

1.1 材料在静载下的力学性能

1.1.1 拉伸试验^①

圆形拉伸试样如图 1-1 所示。对试样沿轴向缓慢施加拉伸力，会得到拉伸力 F -伸长量 ΔL 的关系曲线。为了消除试样尺寸的影响，可用拉伸力 F 除以试样的原始截面积 A_0 得到拉应力 σ ，用试样的伸长量 ΔL 除以试样原始长度 L_0 得到应变 ε ，即可得到工程应力-应变曲线图（engineering stress-strain curve）。从工程应力-应变曲线图中可以直接获得材料的一些力学性能。如图 1-2 所示为退火低碳钢和铸铁的工程应力-应变曲线图。

1. 弹性与刚度

如图 1-2a 所示，若加载后的应力不超过 σ_e ，则卸载后试样会恢复原状，这种变形被称为弹性变形（elastic deformation）。 σ_e 为材料在弹性变形阶段所能承受的最大应力，被称为弹性极限（elastic limit）。在弹性变形阶段，应力与应变成正比关系，其比值 $E = \sigma/\varepsilon$ 为材料的弹性模量（modulus of elasticity）。 E 越大，产生一定量的弹性变形所需要的应力越大，

① 金属材料室温拉伸试验方法中，新旧标准中名称和符号差异比较大，本书采用了旧标准。按照 GB/T 6397—1986 制作试样，名称和符号符合 GB/T 228—1987 的规定。

因此,弹性模量 E 是衡量材料弹性变形难易程度的指标,工程上称为材料的刚度 (stiffness),表征材料对弹性变形的抗力。

弹性模量 E 与原子间的作用力有关,决定于金属原子的本性和晶格类型。合金化、热处理、冷塑性变形、加载速率等对其影响都不大。提高零件刚度的方法是增大横截面积或改变截面形状。

2. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力称为强度 (strength)。根据外力的作用方式,有多种强度指标,如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度、抗扭强度等。其中拉伸试验所得的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 的应用最为广泛。材料的强度越高,材料所能承受的外力越大,使用越安全。

如图 1-2a 所示,若加载应力超过 σ_s ,则卸载后,试样不会完全恢复原状,会留下一部分永久变形,这种永久变形被称为塑性变形 (plastic deformation)。塑性变形分为三个阶段:屈服阶段、均匀塑性变形阶段和不均匀塑性变形阶段。

(1) 屈服强度 在图 1-2a 中,当应力值到达 s 点时,曲线上出现了水平的波折线,表明即使外力不增加试样仍能继续伸

长,这就是屈服现象。发生屈服所对应的应力值即为屈服强度 (yield strength),用 σ_s 表示。

许多具有连续屈服特征的材料,在拉伸试验时看不到明显的屈服现象,对于这类材料用规定微量塑性伸长应力表征材料对微量塑性变形的抗力。例如规定微量塑性伸长率为 0.2% 时所对应的应力 $\sigma_{0.2}$,生产上把 $\sigma_{0.2}$ 称为条件屈服强度 (offset yield strength)。屈服强度反映材料抵抗永久变形的能力,是最重要的零件设计指标之一。

(2) 抗拉强度 图 1-2a 中的 b 点是拉伸曲线的最高点,对应的应力是材料在破断前所能承受的最大应力,称为抗拉强度 (tensile strength),用 σ_b 表示。应力到达 b 点时,试样开始出现“缩颈” (necking) 现象,即塑性变形集中在试样的局部位置发生,因此 b 点也是均匀塑性变形和非均匀塑性变形的分界点, σ_b 可看成是材料产生最大均匀塑性变形的抗力,也反映材料抵抗断裂破坏的能力。它也是零件设计和材料评定时的指标。

(3) 断裂强度 超过 b 点后,缩颈处迅速伸长,应力明显下降,在 k 点处断裂。所对应的应力值为断裂强度 (fracture strength),用 σ_k 表示。对于脆性材料,如图 1-2b 所示,拉伸过程中没有缩颈现象,此时材料的抗拉强度就是脆性材料在静载下抵抗断裂的能力,相当于

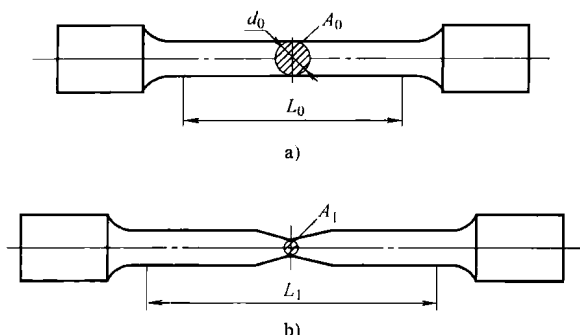


图 1-1 圆形拉伸试样

a) 拉伸前 b) 拉伸后

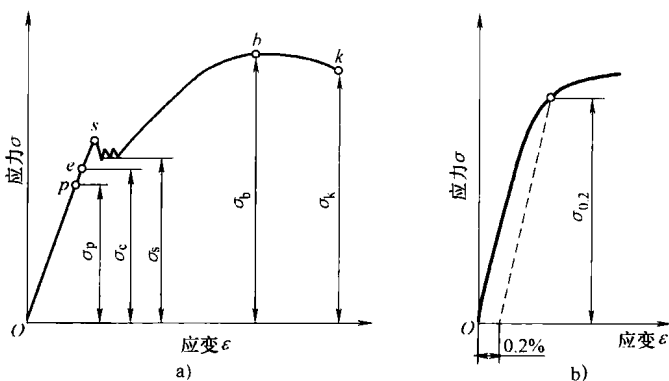


图 1-2 低碳钢和铸铁的应力-应变曲线

a) 低碳钢 b) 铸铁

断裂强度。

3. 塑性

塑性 (ductility) 是指金属材料断裂前发生永久变形的能力。常用的塑性指标为断后伸长率 (percentage elongation) 和断面收缩率 (percentage reduction of area)。

断后伸长率为试样被拉断后, 标距部分的残余伸长与原始标距之比的百分率, 用 δ 表示:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中, L_0 为原始标距长度; L_1 为断裂后标距长度。

断面收缩率为试样断裂后, 横截面积最大缩减量与原始横截面积之比的百分率, 用 ψ 表示:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_0 为试样的原始截面积; A_1 为断口处的截面积。

材料的断后伸长率和断面收缩率越大, 材料的塑性越好, 越有利于进行压力加工; 也能起到通过塑性变形消耗能量, 防止一旦超载材料产生断裂。但是塑性好的材料其强度通常会较低, 使用过程中容易发生变形, 导致失效。因此, 对材料的强度和塑性的要求要综合考虑, 不能顾此失彼。

1.1.2 硬度试验

材料抵抗表面局部塑性变形的能力称为硬度 (hardness), 是表征材料软硬程度的一个指标。

硬度试验与轴向拉伸试验同是应用最广泛的力学性能试验。硬度试验方法很多, 大体上可分为弹性回跳法 (如肖氏硬度)、压入法 (如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等) 和划痕法 (如莫氏硬度) 三类。硬度测试获得广泛应用和其优点是分不开的: 仅在金属表面产生很小的压痕, 因此很多机件可在成品上试验, 不需专门加工试样; 易于检查金属表面层的质量 (如脱碳)、表面淬火和化学热处理后的表面性能; 设备简单, 操作方便迅速; 材料的硬度值与其他的力学性能及工艺性能有密切的关系。

1. 布氏硬度 (HBW)

如图 1-3 所示, 用直径为 $D = 10\text{mm}$ 、 5mm 、 2.5mm 、 1mm 的硬质合金球, 施加试验力 F 将其压入试样表面, 经过规定的保持时间后卸除试验力, 在试样表面留下球形压痕。测量压痕平均直径, 求出球形面积, 用试验力除以球冠面积, 求得单位面积上所承受的平均应力值, 即为布氏硬度 (Brinell hardness)。实际测试时, 根据载荷 F 及测出的压痕直径 d 查表, 即可得到硬度值。

硬度试验时, 其硬度值用 HBW 表示, 测量范围为小于 650HBW。如 600HBW1/30/20 表示用直径为 1mm 的硬质合金球在 30kgf ($1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$)

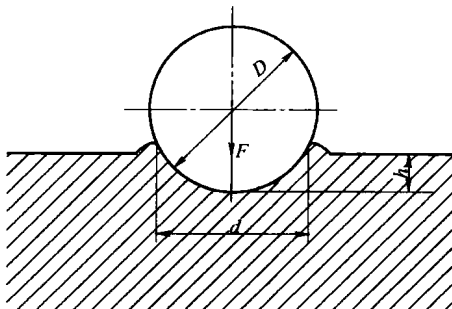


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600HBW。

由于布氏硬度试验方法的压痕面积大，其硬度值能反映金属在较大范围内各组成相的平均性能，而不受个别组成相及微小不均匀性的影响，试验数据稳定，重复性强。其缺点是压痕面积大，不能用于薄片件（试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍）、成品件及硬度大于 650HBW 的材料；此外，由于测试过程较繁琐，不宜用于大批量检验。布氏硬度试验法主要用于测定铸铁，有色金属及其合金，低合金结构钢，各种退火、正火及调质钢的硬度。

2. 洛氏硬度（HR）

如图 1-4 所示，洛氏硬度（Rockwell hardness）不是以测定压痕的面积来计算硬度值，而是以测量压痕深度来表示材料的硬度。压头有两种：一种是圆锥角 α 为 120° 的金刚石圆锥体，用于测试较硬的材料；另一种是一定直径的小淬火钢或硬质合金球，用于测试较软的材料。

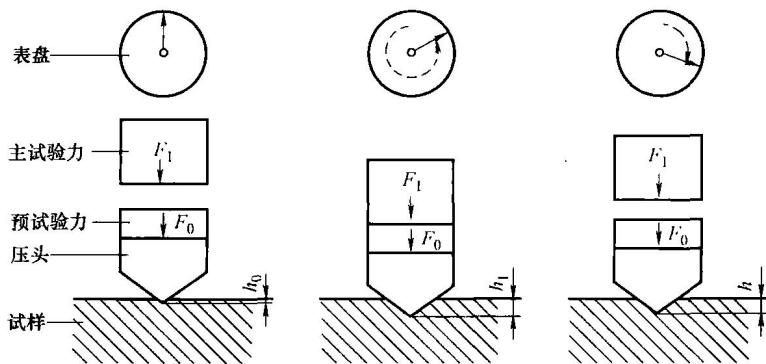


图 1-4 洛氏硬度试验原理

测量时，为保证压头与试样表面接触良好，先加初始试验力，在试样表面得到一个压痕，此时测量压痕深度的指针在表盘上指零。然后加主试验力，随着弹性变形的恢复，指针顺时针方向转动，转动停止时所指的数值就是压痕深度 h 。实际使用时，压痕深度已经换算成硬度值，可以直接在表盘上读出。根据不同的压头和试验力，洛氏硬度可分为 HRA、HRB、HRC 等 15 种。常用的为 HRA、HRB 和 HRC 三种。其试验规范及应用见表 1-1。

表 1-1 常用洛氏硬度试验的标尺、试验规范和应用

标尺	硬度符号	压头类型	初始试验力 F_0/N	主试验力 F_1/N	总试验力 F/N	测量硬度范围	应用举例
A	HRA	120° 金刚石圆锥	98.7	490.3	588.4	20 ~ 88HRA	硬质合金、硬化薄钢板、表面薄层硬化钢
B	HRB	$\phi 1.588\text{mm}$ 球		882.6	980.7	20 ~ 100HRB	低碳钢、铜合金、铁素体可锻铸铁
C	HRC	120° 金刚石圆锥		1373	1471	20 ~ 70HRC	淬火钢、高硬度铸件、珠光体可锻铸铁

洛氏硬度试验法的优点是操作简便迅速，硬度值可直接读出；压痕面积较小，不会损伤零件表面，可在工件上进行测试；采用不同的标尺，可测出从极软到极硬的材料硬度。其缺点是由于压痕小，其结果代表性差，所测硬度值重复性差，分散度大。