



普通高等院校“十三五”规划教材

含微课

# 工程材料及热处理

GONGCHENG CAILIAO  
JI RECHULI

主编 罗军明 谢世坤 杜大明

航空工业出版社



## 内 容 提 要

本书共 10 章, 具体内容包括: 材料的性能, 材料的结构、结晶与相图, 材料塑性变形与再结晶, 热处理原理及工艺, 热处理设备与基本操作, 工业用钢, 铸铁, 有色金属及合金, 非金属材料及成形, 工程材料的选用。

本书可作为各类院校材料类及机械类专业教材, 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

工程材料及热处理 / 罗军明, 谢世坤, 杜大明主编

— 北京: 航空工业出版社, 2018.2

ISBN 978-7-5165-1539-6

I. ①工… II. ①罗… ②谢… ③杜… 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 023952 号

## 工程材料及热处理 Gongcheng Cailiao ji Rechuli

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京市科星印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2018 年 2 月第 1 版

2018 年 2 月第 1 次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 17.5

字数: 404 千字

印数: 1—3000

定价: 49.80 元

# “ 前 言 ”

本书以培养学生创新能力和解决实际问题的能力为出发点，以“材料科学基础理论”“热处理理论与实践”和“常用工程材料”为纲领，有机整合所涉及的各种材料和多学科知识的复杂内容，经过对课程改革的探索，并结合多年的教学经验编写而成。

本书具有以下几个特点。

1. 内容实用，注重能力。本书在编写时，特别注重对学生基本技能的训练和综合能力的培养，使学生在工程材料的成分、组织和性能之间的关系及热处理原理工艺等基本理论知识的同时，获得合理选用工程材料、正确选定热处理工艺方法、妥善安排加工工艺路线等能力。

2. 贯彻标准，知识前沿。本书在编写时，对于各种工程材料的牌号、化学成分和力学性能，均采用了最新的国家标准。本书在编写中注重在内容上的更新，重点吸纳了工程材料及热处理近十年出现的新技术和新工艺，并结合工程实际，以实例突出工程背景。

3. 随堂微课，轻松掌握。本书为配合教学，在部分重点、难点内容旁设置有微课视频二维码，学生可通过移动终端扫描二维码进行观看。随堂微课不但丰富了教学方式，使授课更高效，同时改善了学生的学习渠道，使学习更轻松。

4. 栏目精彩，习题丰富。本书在讲解时，穿插有“提示”“注意”“读一读”等小模块，既便于学习，又能拓宽知识面。此外，在各章节最后附有复习思考题，可供课堂讨论和布置课后作业选用，以帮助学生思考、复习和巩固所学知识，培养分析和解决问题的能力。

本书由南昌航空大学、井冈山大学、九江学院和江西理工大学四所大学联合编写，由罗军明、谢世坤、杜大明担任主编，乔敏、郭秀艳、邓莉萍、张剑平担任副主编，肖寿仁、金曼曼、易荣喜参与编写。全书由罗军明、邓莉萍负责统稿，罗军明负责定稿，鲁世强担任主审。

由于编者水平有限，本书不足之处在所难免，敬请广大读者和师生批评指正。

此外，本书配有丰富的教学资源包，读者可登录北京金企鹅联合出版中心的网站（[www.bjjqe.com](http://www.bjjqe.com)）下载。

编者

2018年1月

# 目 录

## 本书编委会

绪论	1
0.1 材料科学的发展与工程材料	1
0.2 热处理	3
复习思考题	4
第1章 材料的性能	5
1.1 材料的力学性能	5
1.1.1 弹性和刚度	6
1.1.2 强度	6
1.1.3 塑性	7
1.1.4 硬度	8
1.1.5 韧性	10
1.1.6 疲劳强度	12
1.1.7 高温力学性能	13
1.1.8 低温力学性能	14
1.2 材料的物理、化学性能	15
1.2.1 材料的物理性能	15
1.2.2 材料的化学性能	17
1.3 材料的工艺性能	18
复习思考题	19
第2章 材料的结构、结晶与相图	20
2.1 纯金属的结构与结晶	20
2.1.1 纯金属的晶体结构	20
2.1.2 纯金属的结晶	30
2.1.3 同素异构转变	35
2.2 合金的结构	36
2.2.1 固溶体	36

# 目 录

绪论	1
0.1 材料科学的发展与工程材料	1
0.2 热处理	3
复习思考题	4
第1章 材料的性能	5
1.1 材料的力学性能	5
1.1.1 弹性和刚度	6
1.1.2 强度	6
1.1.3 塑性	7
1.1.4 硬度	8
1.1.5 韧性	10
1.1.6 疲劳强度	12
1.1.7 高温力学性能	13
1.1.8 低温力学性能	14
1.2 材料的物理、化学性能	15
1.2.1 材料的物理性能	15
1.2.2 材料的化学性能	17
1.3 材料的工艺性能	18
复习思考题	19
第2章 材料的结构、结晶与相图	20
2.1 纯金属的结构与结晶	20
2.1.1 纯金属的晶体结构	20
2.1.2 纯金属的结晶	30
2.1.3 同素异构转变	35
2.2 合金的结构	36
2.2.1 固溶体	36

2.2.2 金属化合物	38
2.3 二元合金相图	40
2.3.1 二元合金相图的基本类型	40
2.3.2 合金性能与相图的关系	48
2.4 铁碳合金	50
2.4.1 铁碳合金相图	50
2.4.2 典型铁碳合金的结晶过程分析	53
2.4.3 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响	59
2.4.4 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的应用	60
复习思考题	61
第3章 材料塑性变形与再结晶	63
3.1 金属的塑性变形与再结晶	63
3.1.1 塑性变形的基本规律	63
3.1.2 塑性变形对金属组织和性能的影响	67
3.1.3 回复与再结晶	70
3.1.4 金属的热加工与冷加工	73
3.2 高分子材料的变形	75
3.2.1 热塑性高分子材料的变形	75
3.2.2 热固性塑料的变形	76
3.3 陶瓷材料的变形	76
3.3.1 晶体陶瓷的变形	77
3.3.2 非晶体陶瓷的变形	78
复习思考题	78
第4章 热处理原理及工艺	79
4.1 钢在加热时的转变	79
4.1.1 钢的热滞现象	79
4.1.2 奥氏体的形成	80
4.1.3 奥氏体晶粒的长大及控制	82
4.2 钢在冷却时的转变	83
4.2.1 珠光体转变及其组织	84
4.2.2 贝氏体转变及其组织	85
4.2.3 马氏体转变及其组织	86
4.3 过冷奥氏体转变曲线图	90
4.3.1 过冷奥氏体等温转变	90

4.3.2 过冷奥氏体连续冷却转变	92
4.4 钢的退火与正火	94
4.4.1 退火	95
4.4.2 正火	97
4.5 钢的淬火	98
4.5.1 淬火工艺参数的选择	98
4.5.2 钢的淬透性	101
4.6 钢的回火	105
4.6.1 淬火钢回火时的组织转变	105
4.6.2 淬火钢回火后的组织和性能	106
4.7 表面热处理和化学热处理	107
4.7.1 表面淬火	107
4.7.2 化学热处理	110
4.8 热处理新技术简介	115
复习思考题	118
第5章 热处理设备与基本操作	120
5.1 热处理设备	120
5.1.1 加热设备	120
5.1.2 冷却设备	123
5.1.3 测温设备	123
5.2 热处理基本操作与实例	126
5.2.1 退火与正火操作	126
5.2.2 淬火和回火的操作	129
5.3 热处理技术条件及工序位置	135
5.3.1 常见的热处理缺陷及防止	135
5.3.2 热处理技术条件的标注	137
5.3.3 热处理工序位置的安排	137
复习思考题	139
第6章 工业用钢	140
6.1 钢的分类和编号	140
6.1.1 钢的分类	140
6.1.2 钢的牌号	141
6.2 合金元素在钢中的作用	143
6.2.1 合金元素对基本相的影响	144

6.2.2	合金元素对 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的影响	144
6.2.3	合金元素对热处理的影响	145
6.3	结构钢	147
6.3.1	碳素结构钢	147
6.3.2	低合金钢	150
6.3.3	合金渗碳钢	152
6.3.4	合金调质钢	154
6.3.5	合金弹簧钢	156
6.3.6	滚动轴承钢	158
6.4	工具钢	159
6.4.1	碳素工具钢	160
6.4.2	合金工具钢	160
6.5	特殊性能钢	167
6.5.1	不锈钢	167
6.5.2	耐热钢	169
6.5.3	耐磨钢	172
	复习思考题	173
第 7 章	铸铁	175
7.1	概论	175
7.1.1	铸铁的成分、性能和应用特点	175
7.1.2	铸铁的石墨化过程	175
7.1.3	影响铸铁石墨化的因素	176
7.1.4	铸铁的分类	177
7.2	灰口铸铁	177
7.2.1	灰口铸铁的性能特征	178
7.2.2	灰口铸铁的热处理工艺	180
7.3	可锻铸铁	181
7.4	球墨铸铁	182
7.5	蠕墨铸铁	185
7.6	特殊性能铸铁	186
	复习思考题	188
第 8 章	有色金属及合金	190
8.1	铝及铝合金	190
8.1.1	铝及铝合金的性能特点	190

8.1.2 提高铝及铝合金强度的主要途径	191
8.1.3 铝及铝合金的分类及用途	194
8.2 镁及镁合金	198
8.2.1 纯镁	198
8.2.2 镁合金	198
8.3 钛及钛合金	202
8.3.1 钛及钛合金的性能特点	202
8.3.2 钛及钛合金的分类及用途	202
8.4 铜及铜合金	204
8.4.1 铜及铜合金的性能特点	204
8.4.2 铜及铜合金的分类及用途	205
8.5 轴承合金及粉末冶金材料	209
8.5.1 轴承合金	209
8.5.2 粉末冶金材料	211
复习思考题	215
第9章 非金属材料及成形	217
9.1 概述	217
9.1.1 非金属材料的发展	217
9.1.2 非金属材料的分类	218
9.1.3 非金属材料的选择及应用	218
9.2 高分子材料	219
9.2.1 塑料	219
9.2.2 合成纤维	225
9.2.3 橡胶	226
9.3 陶瓷材料	229
9.3.1 概述	229
9.3.2 普通陶瓷(传统陶瓷)	233
9.3.3 特种陶瓷(现代陶瓷)	234
9.4 复合材料	237
9.4.1 概述	237
9.4.2 复合材料的增强机制与性能	239
9.4.3 常用复合材料	242
复习思考题	245



# 绪 论

## 0.1 材料科学的发展与工程材料

材料是科技进步的核心，是人类生产和社会发展的重要物质基础，而且材料与人类文明的关系非常密切。从石器时代开始，人类社会的发展又经历了青铜器时代和铁器时代，直至 18 世纪蒸汽机的发明，带来了工业社会的文明。近百年来，随着科学技术的迅猛发展和社会的切实需求，出现了如高分子材料、半导体材料、先进陶瓷材料、复合材料、人工合成材料和纳米材料等众多新型材料。历史证明，每次新的科学发现、新的技术突破，往往都依赖于新材料的应用和发展。在 20 世纪 60 年代，人们将材料、能源和信息并列为现代技术和现代文明的三大支柱，70 年代又将新型材料、信息技术和生物技术列为新技术革命的主要标志。这都说明，材料的应用和发展与社会文明的进步有着十分密切的关系。

材料科学主要研究材料的化学组成、微观组织与性能之间的关系，它以化学、固体物理和力学等学科为基础，是一门多学科交叉的边缘科学。材料经历了从低级到高级、从简单到复杂、从天然到合成的发展历程。近半个世纪以来，材料的研究和生产以及材料科学理论都得到了迅速的发展。1863 年第一台金相光学显微镜的面世，促进了金相学的研究，使人们步入材料的微观世界。1912 年发现了 X 射线，开始了人们对晶体微观结构的研究。1932 年发明的电子显微镜以及后来出现的各种先进分析工具，将人们带到了微观世界的更深层次。

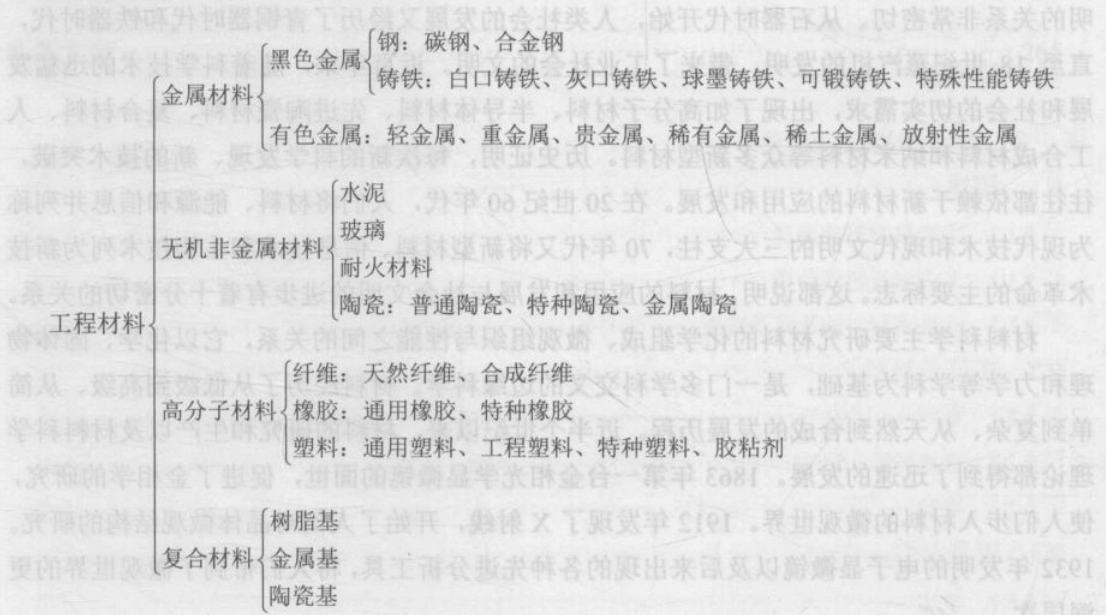
X 光技术、电子显微镜技术和同位素技术等 在材料科学中的成功应用，使材料科学进入了新的时代，推出了像“位错”“断裂物理”等一系列新的理论。与此同时，一些与材料有关的基础学科的发展，又更有力地推动了材料科学的深入研究。

随着金属材料的发展，一些非金属材料、复合材料也迅速地发展起来，弥补了金属材料性能上的某些不足。在众多制造产业中，这些新型材料的使用份额在逐渐增加。20 世纪 60 年代到 70 年代，有机合成材料每年以 14% 的速度增长，而金属材料的年增长率仅为 4%；到了 70 年代中期，全世界有机合成材料的体积产量已经和钢铁相等。有机合成材料不仅

可用作结构材料代替钢铁,目前还正在研究和开发具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。陶瓷材料的发展同样引人注目,它除了具有许多特殊性能可作为重要的功能材料(制造光导纤维、激光晶体等)以外,其脆性和热振性正在逐步获得改善,是最有前途的高温结构材料。复合材料具备的优异性能使得其广泛应用于航空航天领域和交通运输领域中,常用于制造卫星壳体、飞机机身、螺旋桨、发动机叶轮和汽车车身等。未来材料的发展趋势将是金属、非金属、复合材料这“三驾马车”齐驱,相互渗透、相互融合、相互促进。

材料按使用范围的不同,主要分为功能材料和工程材料。功能材料包括高温超导材料、激光材料、磁性材料、电子材料、光电材料和形状记忆材料等;工程材料包括用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表和航空航天等工程领域中的材料,以及用来制造工程构件、机械装备、机械零件、工具、模具和具有特殊性能(如耐腐蚀、耐高温等)的材料。

其中,工程材料是人类生产和社会发展的重要物质基础,通常用强度、硬度、韧性和塑性等力学性能指标来衡量其使用性能。工程材料种类多、用途广,因此分类方法繁多,通常按其组成可进行如下分类。



1) 金属材料 金属材料是最重要的工程材料,包括钢铁、有色金属及其合金。它具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能,能采用比较简便和经济的工艺方法制成零件,是目前应用最广泛的材料。

2) 无机非金属材料 无机非金属材料主要包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等。它具有不可燃性、高耐热性、高化学稳定性、不老性,以及高硬度和良好的耐压性,且原料丰富,受到材料工作

者和特殊行业的广泛关注。

陶瓷可作为各种无机非金属材料的通称，是人类应用最早的材料，它坚硬、稳定，可以制造工具、用具，也可作为结构材料。陶瓷是一种或多种金属元素与一种非金属元素组成的化合物（主要为金属氧化物和金属非氧化物），其硬度很高，但脆性大。工业陶瓷材料按照成分和用途可分为以下三大类。

- 普通陶瓷（又称传统陶瓷）：主要为硅和铝氧化物的硅酸盐材料。
- 特种陶瓷（又称新型陶瓷）：主要为高熔点的氧化物、碳化物、氮化物和硅化物等的烧结材料。
- 金属陶瓷：主要是指用陶瓷生产方法制取的金属与碳化物或其他化合物的粉末制品。

3) 高分子材料

高分子材料具有原料丰富、成本低，加工方便等优点，发展极其迅速，目前已在工业上得到广泛应用。工程上通常根据高分子材料机械性能和使用状态的不同，分为以下三大类。

- 纤维：纤维中的合成纤维是由单体聚合而成的、强度很高的聚合物，是通过机械处理所获得的纤维材料。
- 橡胶：通常指经硫化处理的、弹性优良的聚合物，有通用橡胶和特种橡胶两种。
- 塑料：主要指强度、韧性和耐磨性较好的、可制造某些机器零件或构件的工程塑料，分为热塑性塑料和热固性塑料两种。

4) 复合材料

复合材料即两种或两种以上不同材料的组合材料，它的结合键非常复杂，其性能是它的组成材料所不具备的。复合材料通常是由基体材料（树脂、金属、陶瓷）和增强剂（颗粒、纤维、晶须）复合而成的。它既可保持所组成材料各自的特性，又具有组合后的新特性，其在强度、刚度和耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越，且力学性能和功能可以根据使用需要进行设计、制造。自 1940 年玻璃钢问世以来，复合材料的应用领域在迅速扩大，其品种、数量和质量都有了飞速地发展，具有广阔的发展前景。

## 0.2 热处理

热处理对于充分发挥金属材料的性能潜力，提高产品的内在质量，节约材料，减少能耗，延长产品的使用寿命，提高经济效益等具有十分重要的意义。热处理是机械工业的一项重要且基础的技术，通常像轴、轴承、齿轮和连杆等重要的机械零件和工模具都是要经过热处理的，而且只要选材合适，热处理得当，就能使机械零件和工模具的使用寿命成倍、甚至十几倍的提高，实现“搞好热处理，零件一顶几”的目标，达到事半功倍的效果。

热处理技术具有悠久的历史，早在公元前 770—前 222 年，中国人在生产实践中就已发现，钢铁的性能会因温度和加压变形的影响而变化。例如，白口铸铁的柔化处理就是制造农具的重要工艺。公元前 6 世纪，钢铁兵器逐渐被采用，为了提高钢的硬度，淬火工艺得到迅速发展。中国河北省易县燕下都出土的两把剑和一把戟，其显微组织中都有马氏体存在，说明是经过淬火的。随着淬火技术的发展，人们逐渐发现冷却剂对淬火质量的影响。三国蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制 3 000 把刀，相传是派人到成都取水淬火的。这说明中国在古代就注意到不同水质的冷却能力了，同时也注意了油和尿的冷却能力。中国出土的西汉时期（公元前 206—公元 25 年）中山靖王墓中的宝剑，心部含碳量为 0.15%~0.4%，而表面含碳量却达 0.6% 以上，说明已应用了渗碳工艺，但当时作为个人“手艺”的秘密而不外传，因此发展缓慢。

1863 年，英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织，证明了钢在加热和冷却时，内部会发生组织改变，钢中高温时的相在急冷时转变为一种较硬的相。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论，以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图，为现代热处理工艺初步奠定了理论基础。与此同时，人们还研究了在金属热处理的加热过程中对金属的保护方法，以避免加热过程中金属的氧化和脱碳等。1850—1880 年，对于应用各种气体（诸如氢气、煤气、一氧化碳等）进行保护加热曾有一系列专利。1889—1890 年英国人莱克获得多种金属光亮热处理的专利。1901—1925 年，在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳。20 世纪 30 年代出现了露点电位差计，使炉内气氛的碳势达到可控，以后又研究出用二氧化碳红外仪、氧探头等进一步控制炉内气氛碳势的方法。20 世纪 60 年代以来，热处理技术运用等离子场，发展了离子渗氮、渗碳工艺。激光、电子束技术的应用，又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。

近 20 年来，涌现出了大量先进的热处理技术，主要的表现为：以保护气氛和控制气氛的少无氧化和少无脱碳方面的热处理技术越来越普及和日趋完善；低压渗碳、可控渗氮、表面改性等新技术不断涌现；真空热处理和高压气淬应用日益扩大，发展清洁生产大大改善环境；节能热处理和绿色热处理技术获得发展；热处理产品质量及精确生产愈益严格；重视可持续发展，环保和治理；计算机应用和控制技术进步；热处理作业的自动化水平不断提高。

## 复习思考题

1. 常用的机械工程材料按化学组成可分为哪几大类？什么是结构材料、功能材料和复合材料？
2. 热处理技术对工程材料有何作用？其发展趋势如何？

# 第 1 章

## 材料的性能

材料的性能通常包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在特定的条件下，能保证安全可靠工作所必需的性能，如力学性能、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反映出来的性能，如铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

### 1.1 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在各种载荷作用下，抵抗变形和断裂的能力，包括弹性、刚度、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度和高温力学性能等。

材料的弹性、刚度、强度及塑性一般是通过金属拉伸试验来测定的。它是在标准试样的两端缓慢施加拉伸载荷，试样在工作部分受轴向拉力作用产生变形，随着拉力的增大，变形也相应增加，直至断裂。拉伸试样如图 1-1 所示，根据国家标准 GB/T 228.1—2010，拉伸试样通常有  $l_0 = 10d_0$ （长试样）和  $l_0 = 5d_0$ （短试样）两种。通常以应力  $R$ （试样单位横截面上的拉力）与应变  $e$ （试样单位长度的伸长量）为坐标绘出应力—应变曲线（ $R-e$  曲线）。如图 1-2 所示为低碳钢的应力—应变曲线，低碳钢试样在拉伸过程中，可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

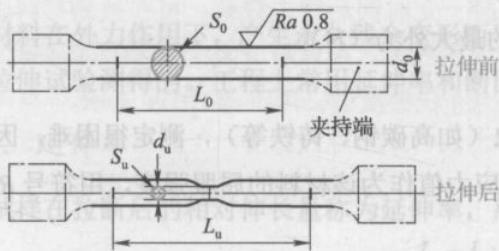


图 1-1 拉伸试样

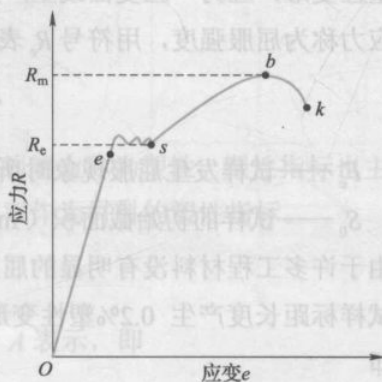


图 1-2 低碳钢的应力—应变曲线

## 1.1.1 弹性和刚度

### 1. 弹性

在低碳钢的应力—应变曲线上,  $Oe$  段为弹性阶段, 若在此阶段卸去载荷, 则试样伸长量消失, 试样恢复原状。材料的这种不产生永久残余变形的能力称为弹性。 $e$  点对应的应力值称为弹性极限, 用符号  $R_p$  表示。

### 2. 刚度

材料在弹性范围内应力与应变的比值称为弹性模量, 也就是应力—应变曲线中  $Oe$  直线的斜率, 用符号  $E$  表示, 即

$$E = \frac{R}{e} \quad (\text{MPa})$$

弹性模量  $E$  反映了材料抵抗弹性变形的能力, 又称为刚度。 $E$  值主要取决于材料内部原子间的作用力, 如晶体材料的晶格类型、原子间距等, 某些处理方法 (如热处理、冷热加工、合金化等) 对它影响很小。

## 1.1.2 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗塑性变形和破坏的能力。根据外力的作用方式, 有多种强度指标, 如抗拉强度、抗弯强度和抗剪强度等。当材料承受拉力时, 强度性能指标主要是屈服强度和抗拉强度。

### 1. 屈服强度

在低碳钢的应力—应变曲线上,  $e \sim s$  段试样所承受的载荷虽不再增加, 但试样仍继续产生塑性变形, 应力—应变曲线上产生了近似水平段, 这种现象称为材料的屈服。 $s$  点对应的应力称为屈服强度, 用符号  $R_e$  表示, 即

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中:  $F_e$  —— 试样发生屈服现象时所承受的最大外力 (N);

$S_0$  —— 试样的初始截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

由于许多工程材料没有明显的屈服现象 (如高碳钢、铸铁等), 测定很困难, 因此规定用试样标距长度产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为该材料的屈服强度, 用符号  $R_{p0.2}$  表示, 即