

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列



高等学校经典畅销教材

工程材料学

(第4版)

主编 王晓敏

ENGINEERING MATERIALS



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术



高等学校经典畅销教材

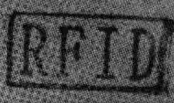
工程材料学

(第4版)

主编 王晓敏

参编 刘 勇 耿 林 贾德昌

ENGINEERING MATERIALS



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

全书共 12 章,主要内容有:绪论、钢的合金化基础、构件用钢、机器零件用钢、工具钢、不锈钢、耐热钢及高温合金、铸铁、有色金属及其合金、先进陶瓷材料、金属基复合材料和新型材料。

本书可作为热处理、铸造、锻压、焊接各专业的本科生教材,也可作为冶金类、机械类研究生的教材,又可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料学/王晓敏主编.—4 版.—哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.7

ISBN 978-7-5603-5724-9

I. ①工… II. ①王… III. ①工程材料 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 280253 号

策划编辑 黄菊英

责任编辑 张 瑞

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 20.25 字数 500 千字

版 次 1997 年 2 月第 1 版 2017 年 7 月第 4 版

2017 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5724-9

定 价 39.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

第 4 序 前言

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院拥有热处理、铸造、锻压、焊接 4 个博士点和一个博士后流动站,拥有 3 个国家重点学科及两个国家重点实验室,有 140 多名博士生导师和一批崭露头角的中青年专家。根据国家教育改革的要求和我校面向 21 世纪教育改革的思路,该院锐意改革,实行了材料加工意义下的宽口径教育,提出了材料加工类人才培养的新模式,把拓宽专业和跟踪科学技术发展趋势结合起来,制定了适应材料加工专业人才培养的教学计划和各门课程的教学大纲,并推出了这套教材和教辅丛书。

本书既可作为热处理专业的本科生教材,也可作为热加工类、机械类各专业的研究生教材和工程技术人员的参考书。

《工程材料学》作为《材料科学与工程》丛书中的一种,需说明以下几点:

(1) 学生在学习工程材料学课程前,应先修“金属力学性能”“金属学与热处理”等课程。因为,学生只有掌握了有关材料的基础和理论知识之后,才能综合论述材料发展的内在规律,进一步加深对材料科学的理解。

(2) 学生学完基础理论课后,头脑中堆满了有关材料科学的概念和现象,但遇到实际问题时又不知从何处下手。“工程材料学”课程则从材料科学和使用出发,根据学生已有的材料科学的基础理论、概念和现象,建立材料科学的整体统一概念和体系,阐明它们之间的内在联系,以帮助学生学会分析问题和解决问题的方法,正确地选择材料和使用材料。

本书特点:

1. 首先从金属材料的合金化基础讲起,为以后各类材料的组织性能的论证奠定理论基础,并为开发新材料提供必备的基础知识;然后论述各类材料的基本特征及选择材料的原则和方法;最后对各类材料的最新发展动向及存在

的问题进行了探索性的介绍,对启发读者思索和解决问题大有裨益。

2. 抓住材料的成分-组织-性能这一主线,阐明它们之间的内在联系及其衍变过程,并进一步揭示发挥材料性能潜力的途径,以达到提高产品质量的目的。

3. 注意典型零件的失效分析,以培养学生分析问题和解决问题的能力。

王晓敏

2017.5.20

第4版前言

本书自1997年出版至今,经过3次修订、10次印刷,共出版发行了3万册,现进行第4次修订。

2013~2014年期间,主编本人亲赴宝钢、武钢、东风汽车制造厂和长春的中国第一汽车制造厂等企业进行实地考察调研,发现实际工程应用对工程材料的需求发生了巨大变化,深感教材的内容应该与时俱进。鉴于此,编者对原教材进行了修订。

在本书编写过程中,主编与参编者(刘勇、贾德昌、耿林)进行了充分的酝酿和讨论,发挥各自特长并承担相应的任务。参编者自本科、硕士和博士研究生阶段,直到毕业留校工作至今,分别长期从事超高强度钢及钛合金的相变行为和热处理技术、金属基复合材料的界面及微观结构与性能之间的关系、先进陶瓷与陶瓷基复合材料的强韧化及其在航天防热上的应用等方向的科研与教学工作,具有丰富的科研和教学经验。

编写该书是在原教材的基础上补充新的内容。

(1)教材的内容体系仍延续第1版,以保持和发挥其已有的特色,但对教材内容进行了优化与整合。

(2)注意对教材内容的合理筛选,力求做到与时俱进。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。

(3)注意以典型零件失效分析为范例,论述材料成分、加工工艺与组织、性能的关系,及分析失效的原因和解决问题的方法、措施,以培养学生分析问题和解决问题的能力。

(4)对于新材料,注意基础性、系统性和前瞻性的紧密结合;力求理论与实际的结合,研发、生产与市场的紧密结合;对每类新材料最后都提出存在的问题、对策和建议,旨在活跃学术思想,交流经验,起到抛砖引玉的作用。

本版教材调整和增加的内容有:重新编写了先进陶瓷材料、金属基复合材料及有色金属(Al及其合金、Mg及其合金、Ti及其合金)材料;增加了中国工程院“十三五”新材料产业发展战略研究报告中提及的六大类材料,如纳米材料、储氢材料、超导材料、航天材料、核能材料及稀土金属材料等内容。

(5)编写了与该教材相匹配的 PPT 课件。

全书共 12 章,其中绪论、第 1~4 章、第 6 章 6.5 节及 11 章 11.2~11.6 节由哈尔滨工业大学王晓敏编写;第 5、7、8 章、第 6 章 6.1~6.4 节和第 11 章 11.1 节由哈尔滨工业大学刘勇副教授编写;第 9 章由哈尔滨工业大学贾德昌教授编写;第 10 章由哈尔滨工业大学耿林教授编写。全书由王晓敏教授担任主编并统稿。

最后需说明一点。全书的内容分为两大类:其一为必修的内容(绪论、第 1~10 章),作为期末考核的内容;其二,新增加的先进材料(第 11 章)作为选修的内容。本书可作为材料、机械、冶金等有关专业本科生和研究生的教材,也可供工程技术人员参考。

作者在编写中参考和引用了有关教材、科研成果和论文,在此特向有关作者致以衷心的感谢。刘侠在收集和整理资料、文字录入等方面给予极大的支持,在此深表感谢。

感谢哈尔滨工业大学图书馆、北京国家图书馆和北京首都图书馆领导和馆员的大力支持和帮助。

宝钢集团有限公司中央研究院特为本书编写的调研工作召开了座谈会,王秀芳等六位教授级高工就金属材料和先进材料的发展趋势、市场需求、生产和应用情况等做了详尽的介绍,在此一并表示感谢。

由于水平所限,书中有不当之处,敬请广大师生和读者批评指正。

编者于哈尔滨工业大学
2015. 5. 20

目 录

(108)	.....	点状珠光体的形成不	4.2
(111)	.....	合金钢高温回火脆性	章 0 录
(111)	.....	合金钢回火脆性的防止	1.0
(121)	.....	合金钢回火脆性的防止	2.0
(123)	.....	合金钢回火脆性的防止	3.0
(128)	.....	合金钢回火脆性的防止	4.0
(130)	.....	合金钢回火脆性的防止	5.0
(131)	.....	合金钢回火脆性的防止	章 7 录
绪 论	.....		(1)
0.1	材料的发展与社会进步	.....	(1)
0.2	生产发展对材料性能提出的要求	.....	(4)
0.3	材料性能与化学成分和组织结构的关系	.....	(5)
0.4	选材的一般原则	.....	(6)
0.5	本书的主要内容	.....	(6)
第 1 章	钢的合金化基础	.....	(7)
1.1	钢中合金元素及其分类依据	.....	(7)
1.2	合金元素与铁和碳的相互作用及其对奥氏体层错能的影响	.....	(9)
1.3	钢的强化机制	.....	(13)
1.4	改善钢的塑性和韧性的基本途径	.....	(17)
1.5	合金元素对钢相变的影响	.....	(21)
1.6	钢的冶金质量	.....	(26)
第 2 章	构件用钢	.....	(30)
2.1	构件用钢的力学性能特点	.....	(30)
2.2	构件用钢的工艺性能	.....	(33)
2.3	构件用钢耐大气腐蚀性能	.....	(35)
2.4	碳素构件用钢	.....	(37)
2.5	普通低合金构件用钢	.....	(40)
2.6	进一步提高普低钢力学性能的途径	.....	(43)
第 3 章	机器零件用钢	.....	(52)
3.1	概述	.....	(52)
3.2	调质钢	.....	(53)
3.3	弹簧钢	.....	(58)
3.4	渗碳钢	.....	(61)
3.5	滚动轴承钢	.....	(64)
3.6	特殊用途钢	.....	(71)
第 4 章	工具钢	.....	(76)
4.1	概述	.....	(76)
4.2	刀具用钢	.....	(77)
4.3	模具用钢	.....	(91)
4.4	量具用钢	.....	(103)
第 5 章	不锈钢	.....	(105)
5.1	概述	.....	(105)
5.2	金属腐蚀	.....	(105)
5.3	不锈钢的合金化原理	.....	(107)

5.4	不锈钢的种类和特点	(108)
第6章	耐热钢及高温合金	(119)
6.1	钢的热稳定性和热稳定钢	(119)
6.2	金属的热强性	(121)
6.3	α -Fe 基热强钢	(123)
6.4	γ -Fe 基热强钢	(128)
6.5	高温合金	(130)
第7章	铸铁	(137)
7.1	铸铁的特点和分类	(137)
7.2	铸铁的结晶	(140)
7.3	铸铁的石墨化	(143)
7.4	灰铸铁	(145)
7.5	提高铸铁性能的途径	(148)
7.6	可锻铸铁	(151)
7.7	特殊性能铸铁	(153)
7.8	铸铁的热处理	(157)
第8章	有色金属及合金	(160)
8.1	铝及其合金	(160)
8.2	钛及其合金	(173)
8.3	铜及其合金	(187)
8.4	镁及其合金	(192)
第9章	先进陶瓷材料	(203)
9.1	先进陶瓷材料概念、分类与特性	(203)
9.2	先进陶瓷材料制备工艺与加工技术	(207)
9.3	先进陶瓷材料性能	(213)
9.4	典型先进结构陶瓷材料	(229)
9.5	先进功能陶瓷概述	(241)
第10章	金属基复合材料	(246)
10.1	概述	(246)
10.2	金属基复合材料的分类	(247)
10.3	金属基复合材料的制备方法	(251)
10.4	金属基复合材料的界面	(257)
10.5	金属基复合材料的性能	(267)
10.6	金属基复合材料的应用	(275)
第11章	新型材料	(279)
11.1	稀土金属材料	(279)
11.2	纳米材料	(291)
11.3	储氢材料	(300)
11.4	航空航天材料	(303)
11.5	超导材料	(308)
11.6	核能材料	(312)
参考文献		(315)

绪 论

0.1 材料的发展与社会进步

材料既是人类社会进步的里程碑,又是社会现代化的物质基础与先导,特别是先进材料的研究、开发与应用反映着一个国家的科学技术与工业水平。

材料是人类用以制成生活和生产的物品、器件、构件、机器和其他产品的那些物质。材料是物质,但并非所有的物质都是材料。只有能够用来制作有用的东西的物质才是材料。

从原料到材料,从材料到零件需经过一系列的工艺过程。工艺性能是指材料经过各种加工工艺,获得规定的使用性能或形状的能力。工艺性能可以分为:铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理工艺性能和切削性能。

“工程材料”指材料科学与工程融为一体,工程离不开材料,材料离不开工程。

材料科学与工程(简称材料工程或称工程材料)是关于材料成分、制备与加工、组织结构、性能及材料服役行为之间相互关系及其应用的科学。材料的所有性能都是其化学成分和内部组织结构在一定外界因素(载荷性质、应力状态、工作温度和环境介质)作用下的综合反映,它们之间有很强的依赖关系,相辅相成而又密不可分,它们是材料科学的核心。

同人类历史一样,工程材料也有一个发展的过程。20世纪40~50年代,材料的发展主要围绕着机械制造业,因此主要发展了以一般力学性能为主的金属材料。

20世纪60年代以后,由于宇航、空间机械和动力机械的发展对材料提出了苛刻的要求,如高温、高压、高的比强度和比模量等,因此发展了陶瓷材料、高分子材料和复合材料。尤其是随着材料的发展,对刀具和模具材料提出了更高的要求,陶瓷材料和复合材料的出现,更好地满足了生产的需要。

能源、信息和材料是当代文明的三大支柱,而材料又是前两者的基础。因此,自20世纪80年代以来,能源材料和信息材料得到迅速的发展。随着科学技术的发展,新材料的领域不断扩大,如光电子材料、低维材料、薄膜材料和生物材料不断受到重视。

进入21世纪以后,先进材料进一步受到人们的重视。众所周知,当今是高技术飞速发展的社会,高技术既能促进社会发展,又是国防安全和建设的保证,而先进材料又是高技术的先导和基础,所以必须高度重视研究和发 展先进材料。下面简要介绍国内外先进材料的研究和发展状况。

0.1.1 信息功能材料得到高度重视

所谓信息功能材料,是指信息的产生、获取、存储、传输、转换、处理、显示所需的材料。主要用于计算机、通信和控制,称为3C(Computer、Communication、Control)所需材料。例如,软磁盘、卷弹簧、硅片切割机用极薄不锈钢系列;电磁阀、磁敏元件用软磁不锈钢系列;形状记忆钢铁材料;隔音防震钢铁材料;半导体制造、真空装置及印刷电路用超高清洁度不锈钢等。

0.1.2 先进结构材料有广阔的应用领域

1. 国防和现代化用的结构材料

钛合金大量应用在新概念武器和装备上,主要包括:高温钛合金、阻燃钛合金、钛基复合材料、Ti-Al金属间化合物等高性能钛合金应用于高推重比航空发动机;损伤容限钛合金、超高强钛合金等高性能钛合金应用于新型飞机;高强耐蚀钛合金等应用于新一代舰船;低成本化技术制备的钛合金材料广泛应用于民用领域。

例如,钛合金在飞机结构上从战斗机扩展到大型轰炸机和运输机;波音787大型客机的强度级别可达1240 MPa。美国第四代战斗机F/A-22应用Ti量已经占到飞机结构质量的38%;水星号宇宙飞船用钛量占座舱总质量的80%。俄罗斯在钛合金核潜艇研究和制造技术上处于国际领先地位,也是最先用钛合金建造耐压壳体的国家。钛在船舶上使用的典型例子是俄罗斯台风级核潜艇,它拥有钛合金制造的外壳,从而具有无磁性、下潜深、航速快、噪声小、维修次数少等优点;航行速度为50 km/h,最大下潜深度500 m,持续潜航时间达到120 d;该艇于1977年开始建造,1981年服役,在俄罗斯海军中具有举足轻重的地位。我国首台自主设计、自主制造的载人潜水器“蛟龙”号潜水深度已达7000 m,居世界第一,工作范围覆盖全球海洋区域的99.8%。

总之,钛合金被人们称为太空金属和海洋金属,在国防和国民经济建设中获得广泛的应用,其用量占整个钛合金总质量的50%。

钢铁材料主要研究内容为:工艺性能良好的沉淀硬化船体钢;航母用高强高韧、良好抗层状撕裂性能的宽厚钢板;舰艇用高效、减振、隔音钢板;电磁力船用超低温、无磁、高强不锈钢。

2. 兵器用先进材料

兵器材料的总体发展方向是高强高韧化、轻型化和经济化。主要研究内容为:长寿命大型厚壁火炮射管用高强高韧耐烧蚀钢;长寿命、小口径、连射武器射管用钢;高防护能力的复合装甲板;冲击硬化、纳米强化、织构强化装甲板。

0.1.3 能源材料有广阔的应用前景

能源的利用是人类进步的标志之一。人类开发的能量只占太阳能辐射于地表总能量的1/10000,开发光电转化效率高而又廉价、寿命长的材料是当务之急。

海水中氢的同位素氘可谓取之不尽、用之不竭,是人类的最终能源。科学家已采用多

种方法(如等离子、激光)点火,实现可控热核聚变,用聚变能发电,预测 21 世纪内可实现商业化,其中抗辐射、耐高温、耐氢脆材料开发是关键之一。

节能也十分重要,如超导材料的利用:超导输电,可以减少线路损失;超导储电,可以显著提高效率;超导电机,功率大、体积小、损耗低。目前正在探索室温超导,一旦有所突破,前途更是无量。另外超导体的完全抗磁性可制成无摩擦磁悬浮轴承和磁悬浮列车等,在日本和我国已经使用磁悬浮列车。

0.1.4 高分子材料有更大的发展空间

高分子聚合物不仅是重要的结构材料,而且正在发展成为重要的功能材料。从半导体到超导体都有发展前景,作为电导体,其电导率可与铜相比;高分子材料也具有铁磁性,这些都是 21 世纪要开展研究与开发的重要领域。但是高分子材料的某些缺点也是必须下大力气才能得到解决的,如稳定性、抗老化性能及阻燃性。

0.1.5 生物材料将受到更大的重视

生物医用材料已成为人们非常关注的领域,人体的器官更换、药物缓释剂组织工程的发展将逐步深入。生物材料的更长远发展目标是使生物技术用于工业化生产,改变高温、高压及耗能高的生产方式,催化剂已迈出第一步。例如,光合作用使水和 CO_2 合成碳水化合物,人类正在寻求利用生物技术,通过像催化剂效应那样以工厂方式合成粮食,如此可以解决世界粮食问题,同时 CO_2 过剩问题也可以得到解决。当然,这是个很长的历史过程。

0.1.6 纳米材料及制备技术的研究与开发迫在眉睫

当物质到纳米尺度时,由于尺寸效应、晶界效应和量子效应等,材料显示出奇特的物理、化学性能,或其生物性能有明显改变,利用这些效应可大幅度提高结构材料的强度,改善其脆性。有人认为纳米技术像信息技术或生物技术一样,将导致下一代工业革命。

进入 21 世纪,各国都把纳米技术作为未来政治、经济中最富有挑战性的关键技术之一,广泛应用于国防军工、信息技术、复合材料、半导体、生物医学、微型器件等领域。例如,在军工方面,纳米材料用于固体火箭推进剂和纳米隐身材料等;在能源和环境及生物医疗方面获得了一定的实用价值,一定程度上进入了产业化阶段。

本课程主要讨论工程材料。凡与工程有关的材料均称为工程材料。工程材料按其性能特点,可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料以力学性能为主,兼有一定的物理、化学性能。功能材料以特殊的物理、化学性能为主。另外,那些要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料,一般不在工程材料中讨论。

工程材料主要用于机械制造、航空、航天、化工、建筑和交通运输等领域。

工程材料种类繁多,用途极广,有许多不同的分类方法,工程上通常按化学分类法对工程材料进行分类,如图 0.1 所示。

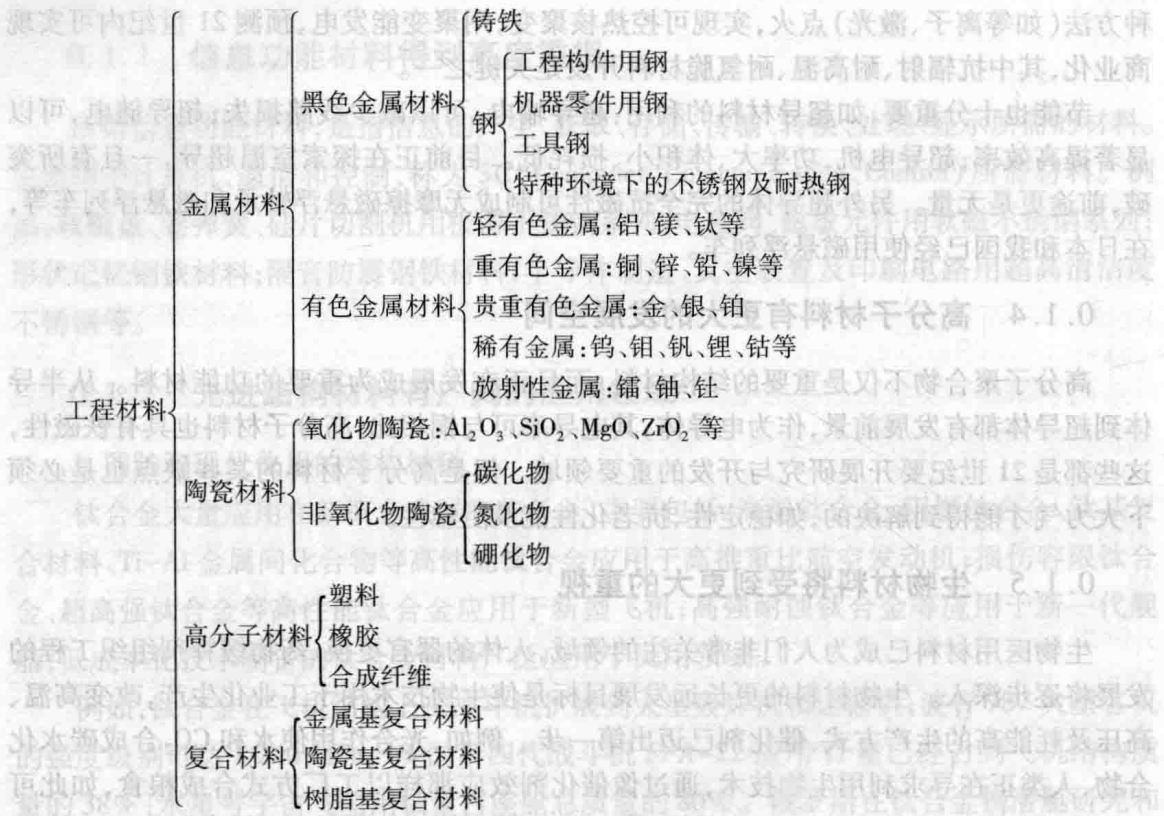


图 0.1 工程材料的分类

0.2 生产发展对材料性能提出的要求

在人类生产生活中,使用最多的是金属材料,故以金属材料为例说明。

为满足生产上的需要,人们在选材时,首先考虑的是材料的使用性能,然后才是材料的工艺性能。

0.2.1 使用性能

使用性能是指材料在使用过程中能够安全可靠工作所必须具备的性能,它包含材料的力学性能、物理性能和化学性能。

(1) 力学性能。力学性能是指材料受到各种不同性质及大小的载荷作用时所反映的性能,它是衡量材料性能极其重要的指标。绝大部分机器零件或构件都是在不同性质载荷、不同应力状态与环境条件下服役的。当零件失去应有的功能时,称该零件失效。

工程上常见的失效形式有 3 种:变形、断裂和磨损。其中,断裂特别是脆性断裂是最危险的失效形式,往往会造成巨大的经济损失和重大人身伤亡事故,因此正确的失效分析是防止零件失效、提高零件承载能力和使用寿命的基本环节。

金属材料的力学性能从某种意义上,又可称为金属材料的失效抗力。金属材料的力学性能包括强度、刚度、硬度、塑性、韧性和耐磨性等。强度表征材料抵抗塑性变形和断裂的能力;塑性表征在外力作用下产生塑性变形而不断裂的能力,韧性则是材料强度和塑性的综合体现。

另外,高温下的蠕变性能和环境介质工作产生的滞后断裂等是材料在特殊条件下的行为。上述力学性能指标均是通过实验测得的。

(2)物理性能。物理性能是指材料的密度、熔点、热膨胀性、导热性与导电性等。材料的物理性能对制造工艺有一定的影响。如高合金钢导热性差,所以在锻造或热处理时,加热速度要缓慢些,否则会产生裂纹。又如铁和铝的熔点不同,所以它们的熔炼工艺有较大区别。

(3)化学性能。化学性能是指材料在室温或高温时抵抗各种化学介质侵蚀的能力。主要的化学性能有抗氧化和抗腐蚀性能。例如,化工设备通常用不锈钢来制造,就是利用了不锈钢的抗腐蚀性能。

0.2.2 工艺性能

工艺性能是指金属材料对各种加工工艺手段所表现出的特性,即指材料的可加工性。其中包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。一种材料的优劣当然要看使用性能,但若工艺性能不好,难以成型或废品太多,这种材料的应用也会受到限制。所以,评价一种材料的优劣,既要看其使用性能,又要看其工艺性能。

0.3 材料性能与化学成分和组织结构的关系

材料的所有性能都是其化学成分和组织结构在一定外界因素下的综合反映,它们构成了相互联系的系统。

因此,可以说材料化学成分和组织结构是其力学性能的内部依据,而力学性能则是具有一定化学成分和组织结构的外部表现。所谓结构系指组成相的原子结构和晶体结构。组织状态包括显微组织、晶体缺陷和冶金缺陷等。

钢的化学成分对其强韧性的影响有直接作用和间接作用,以间接作用为主。一般钢的组成元素与其含量的改变对钢的强韧性作用是通过组织结构的改变来实现的,所以钢的化学成分是其组织结构的主要决定因素之一。

当钢的化学成分一定时,可以通过不同的热处理工艺改变材料的组织结构,从而使材料在力学性能上有较大的差异。

冷、热塑性加工变形也可以改变材料的组织结构,进而改变材料的性能。如冷变形可使钢获得纤维状组织,甚至产生一定的变形组织,从而使材料产生加工硬化,并使材料变形性能带有方向性,这是其他加工方法所不能实现的。

另一个影响性能的因素是冶金因素。

由上述可知,材料能否提供生产上所需的性能,取决于材料的化学成分、组织结构和各种外界因素的作用,它们之间的作用关系如图0.2所示。

总之,从微观本质上去认识材料,并掌握它们和外界条件之间的规律性联系,才能合理地使用材料,这就是人们研究材料的主要目的。

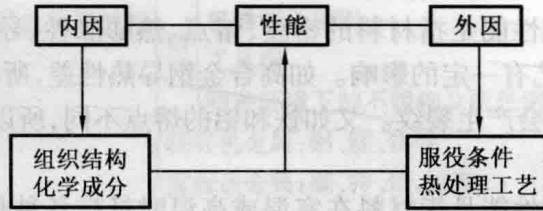


图 0.2 材料的化学成分、组织结构和各种外界因素的作用关系

0.4 选材的一般原则

正确合理的选材应考虑以下 3 项基本原则：

(1)使用性能。材料的使用性能是选材时首先应考虑的问题。对所选用材料使用性能的要求是在对零件工作条件及失效分析的基础上提出的,这样才可以达到提高产品质量的目的。

(2)工艺性能。对零件加工的主要方法有铸造、锻造、焊接、热处理及切削加工等。工艺性能的好坏直接影响生产效率和产品合格率,因此选用的材料应具有良好的工艺性能。

(3)经济性。选材时应考虑材料的价格、加工费用和国家资源情况,以降低产品的成本。

0.5 本书的主要内容

本书以材料成分-组织-性能关系为主线,按零件的使用条件和失效分析为线索探讨与研究,以材料成分、工艺、组织和性能关系为主要思路组织本书内容。主要内容包括钢的合金化基础、构件用钢、零件用钢、工具钢、特殊用钢(不锈钢耐热钢)、铸铁、有色金属、陶瓷材料、复合材料,另外还根据新型工程材料发展的特点,增加了稀土金属材料、纳米材料、航空航天材料、储氢材料、超导材料及核能材料等。通过本书的学习,力争建立起材料学科的统一整体概念和体系,明确材料科学与工程各因素之间的内在联系,掌握各类材料的基本特征、改善材料性能的技术途径以及使用材料的原则和方法;达到合理选择材料和使用材料与提高分析问题和解决问题能力的目的;培养学生在今后工作中自学新材料知识的能力,并起到“授之以鱼,不如授之以渔”的作用。

第1章 钢的合金化基础

随着工业和科学技术的发展,碳钢的性能已不能满足越来越高的使用要求。为了弥补碳钢的某些不足,发展了合金钢。合金钢的性能较好,但价格昂贵。因此,在碳钢能满足要求时,一般不用合金钢。

加入适当化学元素改变金属性能的方法称为合金化。为了合金化的目的而特定在钢中加入含量在一定范围的化学元素称为合金元素,这种钢称为合金钢。

钢中常用的合金元素种类很多,不同的国家所使用的合金元素与各国的资源条件有很大关系。例如,美国的合金钢中多含 Ni 元素,苏联的合金钢中多含 Cr 元素,德国的合金钢中多含 Cr、Mn 元素,日本的合金钢中则多含 Cr、Mn、Mo 等元素。我国是有色金属资源非常丰富的国家,除少数合金元素(如 Co)外,绝大多数有色金属的含量都很丰富。

当钢中的总 $w(\text{合金元素}) \textcircled{1} \leq 5\%$ 时,称为低合金钢;总 $w(\text{合金元素}) = 5\% \sim 10\%$ 时,称为中合金钢; $w(\text{合金元素}) > 10\%$ 时,称为高合金钢。不过这种区别并没有严格的规定。

人们对合金元素在钢中所起作用的认识是经过长期的生产实践和科学研究逐步积累起来的,但是,迄今为止人们对这方面的认识还很不全面。因此,本章所阐述的合金元素在钢中作用的种种解释,很可能是不全面的或仅能适合某种特定的条件,甚至某些论述可能会被今后的实践所推翻,所以,我们应该用辩证唯物主义认识论的观点来看待这个问题。应当指出的是:合金元素不一定直接影响钢性能的改善,而大部分是由于它们影响到相变的过程,从而间接发生作用的。

为了从理论上掌握合金元素在钢中作用的基本规律,提供研究其在各种用途的钢中的特殊规律的基础,本章将从以下 4 个方面分析讨论合金元素在钢中所起的作用:

- (1) 钢中合金元素及其分类依据。
- (2) 钢的强化机制。
- (3) 改善钢塑性和韧性的途径。
- (4) 合金元素对钢中相变及热处理的影响。

1.1 钢中合金元素及其分类依据

1.1.1 合金元素在钢中的分布

在钢中常常加入的合金元素有:

第二周期元素: B、C、N;

① $w(\text{合金元素})$ 表示合金元素的质量分数,下同。

第三周期元素:Al、Si;

第四周期元素:Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu;

第五周期元素:Zr、Nb、Mo;

第六周期元素:W;

第七周期元素:稀土元素、Ta。

S、P 等元素通常作为有害元素看待,但有时也可用作合金元素(如在易切削钢中 S 被用来改善切削性能)。这些元素加入钢中之后究竟以什么状态存在呢?一般说来,它们或是溶于钢中原有的相(铁素体、奥氏体、渗碳体)中,或是形成新相。概括来讲,它们有如下 4 种存在形式:

- (1) 溶入铁素体、奥氏体和马氏体中,以固溶体的溶质形式存在。
- (2) 形成强化相,如溶入渗碳体形成合金渗碳体,形成特殊碳化物或金属间化合物等。
- (3) 形成非金属夹杂物,如合金元素与 O、N、S 作用形成氧化物、氮化物和硫化物。
- (4) 有些元素如 Pb、Ag 等既不溶于铁,也不形成化合物,而是在钢中以游离状态存在,碳钢中碳有时也以自由状态(石墨)存在。

合金元素究竟以哪种形式存在,主要取决于合金元素的种类、含量、冶炼方法及热处理工艺等;此外还取决于合金元素本身的特性。合金元素的特性首先表现在与钢中的两个主要元素铁和碳的相互作用上,其次还表现在对奥氏体层错能的影响上,因此一般常将钢中的合金元素按下述方法分类。

1.1.2 合金元素的分类

1. 按照与铁相互作用的特点分类

(1) 奥氏体形成元素,如 C、N、Cu、Mn、Ni、Co 等;

(2) 铁素体形成元素,如 Cr、V、Si、Al、Ti、Mo、W 等。

一般情况下,奥氏体形成元素易于优先分布在奥氏体中,铁素体形成元素易于优先分布在铁素体中。而合金元素的实际分布状态还与加入量和热处理条件有关。

2. 按照与碳相互作用的特点分类

(1) 非碳化物形成元素,如 Ni、Cu、Si、Co、Al、N、P(Co 和 Ni 虽然能形成独立碳化物,但其稳定性很差,所以在钢中不出现 Ni 和 Co 的碳化物);

(2) 碳化物形成元素,如 Hf、Zr、Ti、Ta、Nb、V、W、Mo、Cr、Mn、Fe 等。

虽然非碳化物形成元素易溶入铁素体或奥氏体中,而碳化物形成元素易存在于碳化物中,但当加入数量较少时,碳化物形成元素也可溶入固溶体或渗碳体,当加入数量较多时,可形成特殊碳化物。

3. 按照对奥氏体层错能的影响分类

(1) 提高奥氏体层错能的元素,如 Ni、Cu、C 等;

(2) 降低奥氏体层错能的元素,如 Mn、Cr、Ru、Ir 等。

实际上,每种分类方法都是从不同侧面反映了合金元素的特性。以上 3 种分类方法很好地揭示了钢中合金元素 3 个方面的基本特性,对深入了解合金元素在钢中的基本作用有一定的指导意义。