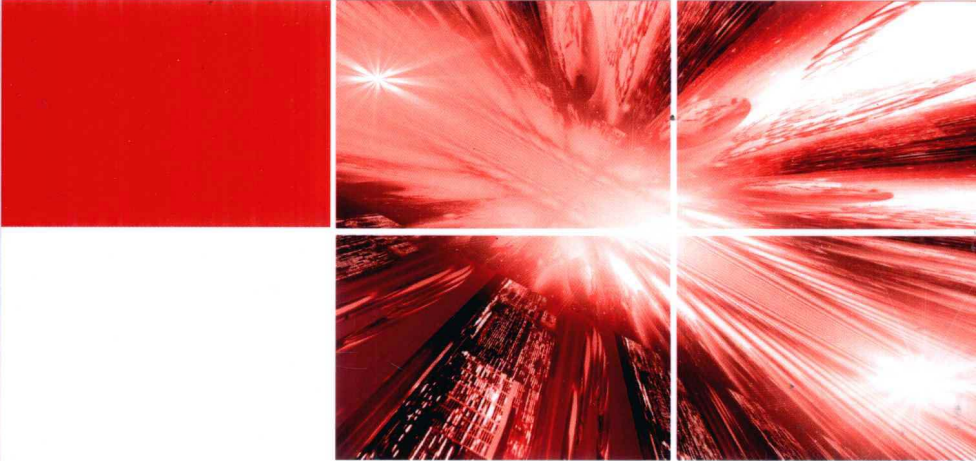
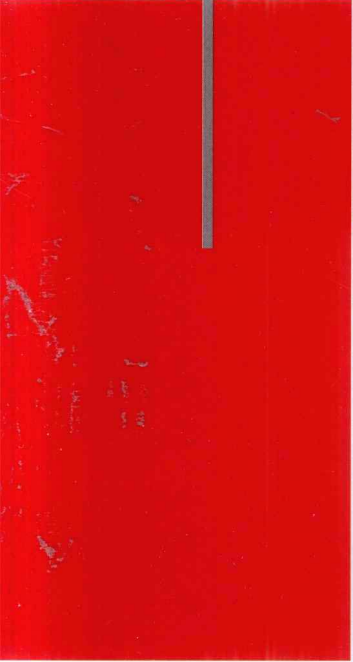


普通高等教育“十二五”规划教材



金属材料学

文九巴 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料学

主 编 文九巴
副主编 马 勤 庞国星
参 编 侯利锋 范 敏
主 审 郑世安



机械工业出版社

本书内容包括钢的合金化基础、合金钢、铸铁、非铁金属及其合金、金属功能材料和新型金属材料等。钢的合金化基础部分着重讨论了钢中的合金元素及其与铁和碳的作用、合金元素在钢的相变中的作用、合金元素对钢的力学性能和工艺性能的影响以及钢中的微量元素；在合金钢、铸铁、非铁金属及其合金部分较全面地介绍了工程构件用钢、机器零件用钢、工具钢、特殊性能钢、铸铁以及工业生产中常用的非铁金属材料的成分、组织结构、热处理工艺与性能之间的关系；在金属功能材料和新型金属材料部分介绍了比较成熟的新型金属材料及其研究成果，如磁性材料、金属基复合材料和纳米金属材料等；本书还通过大量实例介绍了金属材料的选材思路、加工工艺以及工程应用。

本书既可以作为材料类本科专业学生的教材，也可以作为研究生和从事材料工作技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

金属材料学/文九巴主编. —北京：机械工业出版社，2011.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-34229-8

I. ①金… II. ①文… III. ①金属材料—高等学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 099597 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：冯春生 责任编辑：冯春生 白 刚 版式设计：霍永明

责任校对：李秋荣 封面设计：张 静 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.25 印张·473 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-34229-8

定价：38.00 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

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学
朱世根 东华大学
邢建东 西安交通大学
李永堂 太原科技大学
聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学
许并社 太原理工大学
李大勇 哈尔滨理工大学
周 荣 昆明理工大学
葛继平 大连交通大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学
王卫卫 哈尔滨工业大学 (威海)
邓子玉 沈阳理工大学
刘金合 西北工业大学
毕大森 天津理工大学
闫久春 哈尔滨工业大学
张建勋 西安交通大学
李 桓 天津大学
李亚江 山东大学
周文龙 大连理工大学
侯英玮 大连交通大学
赵 军 燕山大学
黄 放 贵州大学
薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学
计伟志 上海工程技术大学
刘永长 天津大学
华 林 武汉理工大学
许映秋 东南大学
何国球 同济大学
李 尧 江汉大学
李 强 福州大学
邹家生 江苏科技大学
武晓雷 中国科学院
姜启川 吉林大学
梁 伟 太原理工大学
蒋百灵 西安理工大学
戴 虹 西南交通大学

秘 书 长 袁晓光 沈阳工业大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

金属材料工程专业教材编委会

主任委员 许并社 太原理工大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

文九巴 河南科技大学

何国球 同济大学

武晓雷 中国科学院

刘永长 天津大学

李 强 福州大学

蒋百灵 西安理工大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

卫英慧 太原理工大学

马 勤 兰州理工大学

王章忠 南京工程学院

石巨岩 太原理工大学

刘宗昌 内蒙古科技大学

毕大森 天津理工大学

吴 波 福州大学

张厚安 厦门理工学院

李玉海 沈阳理工大学

陆 兴 大连交通大学

庞国星 北华航天工业学院

俞泽民 哈尔滨理工大学

赵玉涛 江苏大学

栾道成 西华大学

高聿为 燕山大学

马 臣 佳木斯大学

凤 仪 合肥工业大学

叶卫平 武汉理工大学

任凤章 河南科技大学

孙康宁 山东大学

严红革 湖南大学

张 志 河南理工大学

张春华 沈阳工业大学

肖平安 湖南大学

周细应 上海工程技术大学

范爱玲 北京工业大学

赵乃勤 天津大学

徐 江 南京航空航天大学

袁泽喜 武汉科技大学

靳惠明 扬州大学

秘 书 长 梁 伟 太原理工大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

前言

本书是根据 2009 年 4 月在洛阳召开的中国机械工业教育协会金属材料工程（热处理）专业教学委员会专业教材编写会议所确定的教学大纲编写的。

金属材料学是研究金属材料的成分、组织结构与性能之间关系的一门技术科学，它对金属材料的生产、使用和发展起着重要的指导作用。金属材料是工程领域所用材料中用量最大的材料，其发展历史悠久、技术相对成熟、理论和体系也比较完整，因此在整个工程材料应用领域中发挥着主导作用。自 20 世纪 80 年代以来，伴随着科学技术的快速发展，材料科学亦得到迅速发展，产生了许多新的研究成果。一些新的材料，如金属基复合材料、新型功能材料等不断在工程领域得到应用，而且已经形成了材料科学发展的新趋势。

为了适应材料科学的发展，提高教学质量和人才培养质量，本书在借鉴现有教材的基础上，对基本内容进行了必要的充实和更新，并结合作者的教学经验调整了教材的内容体系和框架。在编写时，以材料的“服役条件—失效形式—性能要求—化学成分—加工工艺—组织性能”为主线，围绕金属合金化的基本理论，着重介绍材料的工程应用；通过大量的应用实例，将材料的设计、选材及应用贯穿其中，尽可能地体现材料科学的发展思想；同时注意引导学生将理论用于解决金属材料应用的实际问题，使教材内容体现综合性、适用性和新颖性的特点。该书适合于机械工程领域金属材料工程等材料类专业的学生使用。

本书的主要内容包括：钢的合金化基础、合金钢、铸铁、非铁金属及其合金、金属功能材料和新型金属材料。第 1 章为钢的合金化基础理论部分，着重讨论了钢中的合金元素、合金钢中的相组成和相变、合金元素对钢的力学性能和工艺性能的影响以及钢中的微量元素，其目的是使学生从理论上掌握合金元素在钢中的作用规律，为研究各种用途的钢种奠定理论基础；第 2~7 章对常用钢铁材料和非铁金属材料（包括工程构件用钢、机器零件用钢、工具钢、特殊性能钢、铸铁和非铁金属及其合金）的成分、热处理工艺、组织结构与力学性能之间的关系进行了比较全面的介绍，使学生能够掌握如何根据工件的服役条件和对材料的性能要求来正确地选择材料和合理地制订工艺。第 8、9 章对金属功能材料（包括磁性合金、电性合金、形状记忆合金、储氢合金）以及新型金属材料进行了简要介绍。

为了使学生更好地理解和掌握课程内容及重点知识，培养学生分析问题、解决问题的能力，本书从教学实际出发，内容安排力图更好地满足教学要求，用较浅显的语言阐明概念，用较多的例题加深概念，用较多的图表表达内容。书中涉及的材料牌号、成分和性能采用了新的国家标准，计量单位统一采用国际单位制（SI）；各章最后都作了小节，章节中的主要术语和名词作了中英文对照总结，并安排了一定量的练习题。

本书绪论、第 3 章、第 4 章由河南科技大学文九巴教授编写；第 1 章、第 2 章由兰州理工大学马勤教授编写；第 6 章、第 7 章由北华航天工业学院庞国星教授编写；第 5 章由洛阳理工学院范敏副教授编写；第 8 章、第 9 章由太原理工大学侯利锋副教授编写。河南科技大

学王长生高级工程师为本书提供了部分金相照片。全书由文九巴教授统稿主编，马勤教授、庞国星教授任副主编，河南科技大学郑世安教授任主审。

本书在编写过程中参考了大量的相关文献资料，主要文献列于书后，在此谨向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。同时也得到了许多有关同志的热忱帮助和支持，机械工业出版社对本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

由于水平有限，时间仓促，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 钢的合金化概论	4
1.1 钢中的合金元素	4
1.1.1 合金元素的定义	4
1.1.2 合金元素的存在形式及其划分	6
1.2 合金元素对铁碳相图及钢热处理的影响	14
1.2.1 合金元素对铁碳相图的影响	14
1.2.2 合金元素对钢热处理的影响	16
1.3 合金元素对钢性能的影响	21
1.3.1 合金元素与钢的强韧化	21
1.3.2 合金元素对钢不同热处理状态下力学性能的影响	27
1.3.3 合金元素对钢工艺性能的影响	34
1.4 微量元素及钢的微合金化	41
1.4.1 钢中的微量元素及其作用	41
1.4.2 钢的微合金化	42
1.5 钢合金化发展的新方向	45
1.5.1 基于生态化设计概念的生态合金化	45
1.5.2 基于多元合金概念的高熵合金化	50
1.6 钢的分类和编号	50
1.6.1 钢的分类	50
1.6.2 钢的编号方法	53
1.6.3 常见国外牌号标准	57
本章小结	58
本章主要名词	61
习题	62
第2章 工程构件用钢	64
2.1 工程构件用钢的基本要求	64
2.1.1 足够的强度和韧性	64
2.1.2 良好的成形工艺性和焊接性	64
2.1.3 良好的耐蚀性	65
2.2 工程构件用钢的合金化	65
2.2.1 合金元素对钢力学性能的影响	65
2.2.2 合金元素对钢焊接性能的影响	66
2.2.3 合金元素对钢耐大气腐蚀性的影响	67
2.3 铁素体-珠光体钢	67
2.3.1 碳素工程结构钢	68
2.3.2 低合金高强度结构钢	70
2.3.3 微合金化低合金高强度结构钢	74
2.4 低碳贝氏体钢、针状铁素体钢及低碳马氏体钢	80
2.4.1 低碳贝氏体钢	80
2.4.2 针状铁素体钢	81
2.4.3 低碳马氏体钢	82
2.5 双相钢	82
2.6 相变诱发塑性 (TRIP) 钢	84
2.7 建筑用抗震耐火钢	84
2.7.1 抗震耐火钢的性能要求	85
2.7.2 抗震耐火钢的合金化原则	85
2.7.3 典型抗震耐火钢	86
2.8 工程构件用钢的发展趋势	86
本章小结	88
本章主要名词	88
习题	88
第3章 机器零件用钢	89

3.1 机器零件用钢的性能要求	89	4.6 典型模具的材料选择举例	161
3.1.1 典型机器零件的服役条件、失效 方式及对性能的要求	89	本章小结	162
3.1.2 成分及热处理对性能的保证	90	本章主要名词	163
3.2 常用机器零件用钢	93	习题	163
3.2.1 调质钢	93	第5章 特殊性能钢	165
3.2.2 弹簧钢	98	5.1 不锈钢	165
3.2.3 滚动轴承钢	101	5.1.1 概述	165
3.2.4 低碳马氏体型结构钢	105	5.1.2 铁素体不锈钢	168
3.2.5 超高强度钢	107	5.1.3 马氏体不锈钢	171
3.2.6 渗碳钢与氮化钢	111	5.1.4 奥氏体不锈钢	171
3.2.7 易切削钢	116	5.1.5 沉淀硬化不锈钢	175
3.3 机器零件用钢的选材思路	117	5.1.6 超高强度不锈钢	176
3.3.1 选择材料的基本原则	117	5.1.7 不锈钢的应用实例	177
3.3.2 选择材料的基本思路及方法	119	5.2 耐热钢	178
本章小结	122	5.2.1 概述	178
本章主要名词	122	5.2.2 抗氧化钢	180
习题	122	5.2.3 热强钢	181
第4章 工具钢	124	5.3 高温合金	185
4.1 工具钢的成分及性能特点	124	5.3.1 铁基高温合金	186
4.1.1 工具钢的化学成分特点	124	5.3.2 镍基高温合金	187
4.1.2 工具钢的热处理性能特点	125	5.4 耐磨钢	187
4.2 刀具用钢	125	5.4.1 高锰钢的性能及成分特点	188
4.2.1 刀具的工作条件和对刀具钢的 性能要求	125	5.4.2 高锰钢的热处理	188
4.2.2 碳素工具钢	126	本章小结	189
4.2.3 低合金工具钢	129	本章主要名词	190
4.2.4 高速钢	133	习题	190
4.3 冷作模具钢	144	第6章 铸铁	191
4.3.1 碳素工具钢和低合金工具钢	145	6.1 铸铁的石墨化及其控制	192
4.3.2 高铬和中铬模具钢	145	6.1.1 铁碳合金双重相图	192
4.3.3 新型冷作模具钢	148	6.1.2 铸铁的石墨化过程	192
4.3.4 基体钢	148	6.1.3 铸铁石墨化的控制	194
4.3.5 硬质合金	150	6.2 灰铸铁	198
4.4 热作模具钢	151	6.2.1 灰铸铁的化学成分与组织	198
4.4.1 热锤锻模具钢	153	6.2.2 灰铸铁的孕育处理	199
4.4.2 热挤压模具钢	154	6.2.3 灰铸铁的牌号、性能及应用	200
4.4.3 压铸模具钢	156	6.2.4 灰铸铁的熔炼	201
4.4.4 塑料模具用钢	157	6.2.5 灰铸铁的热处理	202
4.5 量具用钢	159	6.3 球墨铸铁	203
		6.3.1 球墨铸铁的化学成分与组织	203
		6.3.2 球墨铸铁的牌号、性能及应用	203
		6.3.3 球墨铸铁的熔炼	204
		6.3.4 球墨铸铁的热处理	204

6.4 可锻铸铁	206	本章小结	247
6.4.1 可锻铸铁的化学成分与组织	206	本章主要名词	248
6.4.2 可锻铸铁的牌号、性能及应用	206	习题	248
6.4.3 可锻铸铁的熔炼	207	第8章 金属功能材料	249
6.5 蠕墨铸铁	208	8.1 磁性合金	249
6.5.1 蠕墨铸铁的化学成分与组织	208	8.1.1 磁性的基本知识	249
6.5.2 蠕墨铸铁的牌号、性能及应用	208	8.1.2 金属磁性材料的种类和特性	250
6.6 特殊性能铸铁	209	8.2 电性合金	255
6.6.1 耐磨铸铁	209	8.2.1 电阻合金	255
6.6.2 耐热铸铁	210	8.2.2 电热合金	260
6.6.3 耐蚀铸铁	211	8.2.3 热电偶合金	262
6.7 铸铁应用实例——曲轴	211	8.2.4 电触头材料	263
本章小结	212	8.3 形状记忆合金	266
本章主要名词	213	8.3.1 形状记忆效应	266
习题	213	8.3.2 形状记忆效应的分类	266
第7章 非铁金属及其合金	214	8.3.3 形状记忆效应产生的机理	267
7.1 铝及铝合金	214	8.3.4 形状记忆合金的种类	268
7.1.1 纯铝	214	8.4 储氢合金	269
7.1.2 铝合金的分类	214	8.4.1 金属储氢原理	269
7.1.3 铝合金的热处理	215	8.4.2 储氢合金的分类	270
7.1.4 变形铝合金	218	8.4.3 储氢合金的制备工艺	271
7.1.5 铸造铝合金及其生产	222	8.4.4 储氢合金的应用	271
7.2 铜及铜合金	226	8.5 其它金属功能材料	272
7.2.1 纯铜及铜合金分类	226	8.5.1 超导材料	272
7.2.2 黄铜	226	8.5.2 弹性合金	273
7.2.3 青铜	229	8.5.3 减振合金	274
7.2.4 白铜	231	本章小结	274
7.3 镁及镁合金	232	本章主要名词	275
7.3.1 纯镁及镁合金分类	232	习题	276
7.3.2 镁合金的热处理	233	第9章 新型金属材料	277
7.3.3 常用镁合金	234	9.1 金属基复合材料	277
7.3.4 镁及镁合金的应用	235	9.1.1 金属基复合材料的分类	277
7.4 钛及钛合金	236	9.1.2 金属基复合材料的特点	278
7.4.1 纯钛及钛合金分类	236	9.1.3 金属基复合材料的制造工艺	279
7.4.2 钛合金的热处理	239	9.1.4 金属基复合材料的应用	281
7.4.3 常用钛合金	240	9.1.5 前景展望	282
7.4.4 钛及钛合金的应用	241	9.2 金属间化合物结构材料	283
7.5 其它非铁金属合金	242	9.2.1 金属间化合物的结构特点	283
7.5.1 锌合金	242	9.2.2 金属间化合物的特性	284
7.5.2 滑动轴承合金	243	9.2.3 金属间化合物的制备和加工 工艺	285
7.5.3 粉末冶金材料	245	9.2.4 金属间化合物的分类	285
7.6 非铁金属合金的应用实例	246		



9.2.5 金属间化合物的韧化原理及方法	286	9.3.3 纳米金属材料的应用及发展	292
9.2.6 几种金属间化合物结构材料	287	本章小结	292
9.3 纳米金属材料	288	本章主要名词	293
9.3.1 纳米金属的制备方法	288	习题	293
9.3.2 纳米金属材料的性能	289	参考文献	294

绪 论

人类社会的发展取决于生产力的发展，生产力水平的高低以劳动工具为代表，而劳动工具的进步又离不开材料的发展。人类使用材料的历史已有几万年之久，从远古的石器时代到公元前的青铜器时代和铁器时代，而金属的使用标志着社会生产力的发展，人类开始逐渐进入文明社会。到了18世纪，随着钢时代的来临，社会生产力大幅度地提高，引起了世界范围的工业革命，因而产生了若干个经济发达的强国。继钢时代之后，从20世纪50年代开始进入了硅时代，这是信息技术革命的时代，对人类社会产生了深远影响，促进了世界范围内科学技术的快速发展。从20世纪90年代以后，各种新材料不断产生，人类社会进入了所谓的新材料时代。可见，材料对人类社会文明的进步发挥着重大的作用。

在近代科学技术的推动下，材料科学发展迅速，材料的品种日益增多，不同效能的新材料不断涌现，原有材料的性能得到不断的改善与提高，以满足各种使用要求，故材料科学是科学技术的发展基础，也是工业生产的支柱。

工程材料是指工程上使用的各种材料。工程材料按其属性可分为两大类，即金属材料和非金属材料。金属材料又分为钢铁（黑色金属）材料和非铁金属及其合金（有色金属）材料两大类；非金属材料通常又分为无机非金属材料 and 有机高分子材料两大类。随着材料学的发展，单一金属或非金属材料无法实现的性能又可通过复合材料得以实现。

从应用的角度来区分，人们习惯将材料分为两大类。一类是以力学性能为主要使用性能并兼具一定物理、化学性能的“结构材料”；另一类叫做“功能材料”。所谓“功能材料”，是指具有特异物理化学性质的材料，如超导材料、激光材料、半导体材料、储能材料、形状记忆材料等。机械工程领域使用的主要是结构材料。

在机械工程领域中，农业机械、交通设备、电工设备、化工和纺织机械等的钢铁材料使用量占90%左右，非铁金属约占5%。近些年来，工程材料发展迅速，许多新型非金属材料不断地产生并得到应用，金属材料的统治地位已受到挑战，开始出现了金属材料、陶瓷材料和有机高分子材料“三足鼎立”的新局面。

陶瓷材料已远远超出其作为建筑材料（以粘土、石英、长石等为主要成分）使用的范围。近20年中，以研究工程陶瓷（以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要成分）用于工程结构件或机械构件（如陶瓷轴承、陶瓷发动机等）为目标，在世界范围内兴起了陶瓷热。现在，陶瓷功能材料、陶瓷轴承、陶瓷刀具等许多陶瓷产品已投入工业应用。可见，陶瓷材料具有良好的发展和应用前景。

高分子材料（包括工程塑料、橡胶、合成纤维等）正在以前所未有的速度发展。通过各种合成或制备技术，其产量和性能均不断提高。可以预测，汽车的车身不久将大部分采用工程塑料，每千克工程塑料可代替4~5kg的钢铁，而且可以整体成型，因而其成本和油耗将进一步降低。由于高分子材料由人工合成，且原料充足，可以设计、制造出无穷的新产

品，因此前景十分广阔。

以上两类材料的发展速度虽然很快，但还不可能全面取代传统的金属材料，目前金属材料在工业中，特别是在机械工业中，仍然占有主导地位。

金属材料学是研究金属材料的成分、组织结构、加工工艺与性能之间关系的一门技术科学，它对生产、使用和发展金属材料起着重要的指导作用。材料的成分是指材料的化学组成，是决定材料性能的最本质因素；组织结构是指材料的显微组织和相组成，包括各种相的晶体结构，它主要是由材料的化学成分和加工工艺决定的；材料的加工是指如何使材料成为具有一定性能、满足工程需求的有用的构件，它是使材料成为工业产品的“桥梁”。材料科学家和工程师的主要任务是确立材料或构件的性能与微观组织和结构之间的关系、材料的成分与加工工艺之间的关系。材料科学主要研究材料的设计与制备、结构与材料性能的基础关系，而材料工程是研究如何将材料加工成构件。金属材料学是材料科学与材料工程相结合的应用技术科学，因此，全面了解和掌握金属材料学的基础知识是材料工作者的基础所在。

我国是金属材料生产和使用的大国，我国的钢铁生产工业仍在高速发展。1999 年我国钢产量为 12400 万 t，2000 年达到 13000 万 t，2005 年突破 30000 万 t，2008 年上升为 50116 万 t，可见我国钢铁工业发展速度之快，但我国现在仍然是一个钢铁大国，而不是一个钢铁强国，我国的特殊钢生产仍然供不应求，每年要花大量的外汇进口合金钢材。近年来，由于我国已明确提出要加速发展汽车工业，要使汽车工业与钢铁、石油、化工和建筑业一样形成国民经济的支柱产业。因此我国汽车工业发展很快，1998 年产量为 162.78 万辆，2005 年为 560 万辆，2009 年达到 1379 万辆，已经超过日本成为世界第一大汽车生产国。预计到 2020 年将达到 2000 万辆，成为全世界最大的汽车生产国。仅就汽车工业的发展而言，钢材的需求量（占全国钢材生产量的 20% 左右）也将持续上升。

钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低的成本，使其在 21 世纪中仍将占有重要地位，其它种类的材料如高分子材料、陶瓷材料或复合材料等，可能会少量地代替金属材料，但钢铁材料的应用不可能大幅度地衰减。正如材料科学家柯垂尔（Cottrell）教授所说：“我们将继续使用金属及合金，特别是钢。我们的孩子和孙子也将会这样”。虽然其它种类材料已经兴起，钢铁材料也走过了它最辉煌的年代，但它绝不是“夕阳工业”。

除了钢铁材料以外，其它金属材料统称为非铁金属材料。在非铁金属材料中，铝及其合金用得最多，这主要是因为：①质量轻，只有钢的 $1/3$ ，虽然铝合金的力学性能不如钢，但如果设计要求把减轻质量放在性能要求的首位时，最合适的就是铝合金，例如波音 767 飞机所用材料的 81% 都是由铝合金制成的；②有良好的导热性和导电性，在远距离输送的电缆中多用铝材料；③耐大气腐蚀，因此，美国 25% 的铝用来制作容器和包装品，20% 的铝用作建筑结构，还有 10% 的铝用作导电材料。钛合金的高温强度比铝合金高，也是金属材料中迄今发现的最好的耐蚀材料。但钛合金由于价格昂贵，主要应用于航空航天领域。

金属材料学是金属材料工程等材料类专业的核心课程，属于专业技术课，在金属材料工程专业的知识结构中占有十分重要的位置，是学生走上工作岗位后应用知识最多最直接的课程。该课程具有综合性、实践性和经验性等特点。综合性意味着该课程内容涉及的知识范围比较宽泛，涵盖金属学、热处理、设备及控制以及材料的力学性能等课程的知识；实践性意味着它是应用科学，课程所涉及的内容是生产或科研领域广泛使用的，甚至可以将生产或科研中使用的技术或工艺直接引用过来；经验性是指某些内容是长期生产经验的总结和概括，



在实际应用中可塑性还比较大。

本课程的任务是从金属材料的应用角度出发,阐明金属材料的基本理论,介绍金属材料的合金化原理、设计准则及化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系;介绍常用金属材料及其工程应用等基本知识;同时介绍新型金属材料的发展及应用。

本课程的目的是使学生了解金属材料的物理冶金知识,掌握金属及合金中的化学成分、组织结构、加工工艺、应用环境对金属材料各种性能影响的基本规律,并用来分析各种金属材料的化学成分设计、生产、热处理和应用中的问题。通过学习,在掌握金属材料科学基本理论及基本知识的基础上,具备分析材料的成分与制备和加工之间的关系、材料组织结构与力学性能之间的关系的能力,并能够根据工程构件的使用条件和性能要求,具备对工程构件进行合理选材及制订构件加工工艺路线的初步能力。

本课程的内容由钢的合金化基础、合金钢、铸铁、非铁金属及其合金、金属功能材料和新型金属材料组成,其基本要求如下:

(1) 合金化基础方面 合金化基础是金属材料学的核心。应了解钢中合金化常用的合金元素及其在钢中的作用规律,包括合金元素对相变过程的影响、对碳化合物的影响、对工艺性的影响、对力学性能的影响等,为材料的设计、选材、应用以及热处理工艺的制订打下基础。

(2) 合金钢方面 应了解工程构件用钢、机器零件用钢、工具钢以及特殊性能钢的服役条件、失效方式及性能要求,还应了解材料的化学成分、组织结构、热处理工艺与性能之间的关系,学会正确地选择材料和合理地制订热处理工艺。

(3) 铸铁方面 应了解铸铁及其种类,各种铸铁的形成过程,各种铸铁的成分、热处理工艺、组织结构与力学性能之间的关系,学会正确地选择铸铁材料。

(4) 非铁金属及其合金方面 应了解工业生产中常用的非铁金属及其合金,如铝、铜、镁、钛等的生产过程,了解其成分、组织结构、加工工艺与力学性能之间的关系,学会正确地选择非铁金属材料。

(5) 金属功能材料和新型金属材料方面 应了解比较成熟的金属功能材料及新型金属材料(包括纳米金属材料、金属基复合材料、金属间化合物结构材料等)的成分、性能特点,这些材料的开发、应用情况以及它们的发展前景。

在学习本课程前,学生应该已经完成材料力学、材料科学基础、金属热处理等课程的学习,参加过金工实习、生产实习,对材料及其工艺过程及应用具有一定的知识基础。

第 1 章 钢的合金化概论

1.1 钢中的合金元素

1.1.1 合金元素的定义

钢铁材料具有资源丰富、生产规模大、易于加工、性能多样可靠等优点，是所有材料特别是结构材料中使用量最大的一类金属材料。一般来讲，钢铁材料分为碳的质量分数低于 2.11% 的钢和高于 2.11% 的铸铁两大类。根据化学组成的不同，钢又可分为碳素钢和合金钢两大类。

1. 碳素钢与杂质元素

碳素钢是指碳的质量分数为 0.0218% ~ 2.11% 的铁碳合金。一般来讲，把碳的质量分数为 0.77% 的碳钢称为共析钢；把碳的质量分数为 0.0218% ~ 0.77% 和 0.77% ~ 2.11% 的碳钢又分别称为亚共析钢和过共析钢。

但是，碳素钢绝非是仅含有铁和碳两种元素。由于冶炼时所用原料以及冶炼方法和工艺操作等原因，钢中总不免有少量的其它元素存在，如 Si、Mn、S、P、Cu、Cr、Ni 等。然而，这些元素一般并不作为合金元素看待，而被看成是杂质或残留元素。

杂质元素的存在往往会影响钢的性能，为了保证钢材的质量，在国家标准中对各类钢的化学成分都作了严格的规定。碳素钢中杂质元素的含量一般限制在下列范围： $w_{Mn} \leq 0.5\%$ ， $w_{Si} \leq 0.4\%$ ， $w_{Cr} \leq 0.3\%$ ， $w_{Ni} \leq 0.3\%$ ， $w_{Cu} \leq 0.3\%$ ， $w_{Mo} \leq 0.1\%$ ， $w_W \leq 0.2\%$ ， $w_P \leq 0.025 \sim 0.040\%$ ， $w_S \leq 0.015 \sim 0.050\%$ 。

此外，H、O、Sn、Sb、As、Bi 也可能作为气体或杂质元素存在于钢中。

最典型的杂质元素是 S、P、H，其中，S 容易与 Fe 结合形成 FeS，会导致钢产生热脆；P 和 Fe 结合形成硬脆相 Fe_3P ，使钢在冷加工中产生冷脆性；H 可能残留在钢中，形成“白点”，可导致钢的氢脆。

2. 合金钢与合金元素

碳素钢在力学性能和工艺性能方面可以满足大部分机械工程的需求，且价格较低，因此，碳素钢是产量很大、应用广泛的金属材料。但是，由于碳素钢存在淬透性低、耐回火软化性较差、屈强比低、耐腐蚀和耐磨损性能不佳、高温下强度低等不足之处，使得碳素钢的强度潜力虽经热处理但仍不能充分地发挥。因此，需要开发满足上述要求的合金钢及其它特种钢（特殊性能钢）。

合金钢可以定义为，在化学成分上特别添加一些合金元素，用以保证一定的生产和加工工艺以及所要求的组织与性能的铁基合金。因此，只有那些为了提高钢的某些性能，有目的



地加入钢中的、含量在一定范围内的化学元素，才被认为是合金元素。

尽管合金元素是指特意添加到钢中的，为了保证获得所要求的组织结构和性能的化学元素，而杂质元素是指由冶炼时所用原材料以及冶炼方法和工艺操作等所带入钢中的化学元素，但是，这种分类方法并不是绝对的。例如硫元素，它在钢中易形成夹杂物，降低钢的韧性，一般认为是杂质元素而加以控制，但是硫元素又能提高钢的切削加工性，因此在易切削钢中又把硫看做是合金元素。这样，同一合金元素既可能是杂质元素，又可能是添加元素。若属于前者，则影响钢的质量；若属于后者，则决定钢的组织与性能。

为了合金化目的而加入钢中的元素，常见的有以下几种（依其在元素周期表中的顺序排列）：B、N、Al、Si、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zr、Nb、Mo、W。其中，Si、Mn、Mo、W、V、B 等是我国的富产元素。我国 Ni、Cr 的资源比较少，如何在合金钢中节约 Ni 和 Cr，并根据我国的资源特点来建立符合国情的合金钢系统，是一个重要的问题。目前，结合各个机械工业部门的需要，发展了锰钢、硅锰钢以及硼钢等合金钢系统。在机械制造用结构钢、弹簧钢、轴承钢、工具钢、超高强度结构钢以及建筑用钢等方面研制了几十个新钢种，有的在推广使用，有的在推荐试用，这些钢种在性能上分别达到了同类型的镍铬钢的水平。值得指出的是，我国发展了独特的 Si-Mn-Mo-V 合金钢系统，建立了由低碳到高碳的一系列钢种。

当钢中合金元素的总含量（质量分数）小于或等于 5% 时，称为低合金钢；合金元素总含量为 5% ~ 10% 时，称为中合金钢；合金元素总含量超过 10% 时，称为高合金钢。不过，这种划分并没有严格的规定。

合金钢与碳素钢相比具有下列优点：①具有较高的力学性能；②具有良好的热处理工艺性能；③具有特殊的物理、化学性能。不过，合金钢性能虽好，但由于需要加入合金元素，其冶炼、铸造、锻造、焊接及热处理工艺都比碳素钢复杂，成本较高。因此，当碳素钢能满足要求时，应尽量使用碳素钢。

3. 宏合金化与微合金化

这里需要指出的是，一般钢中合金元素的质量分数大于或等于 1% 时，这种合金化可称为宏合金化。

有时，合金钢中所添加的个别元素的含量将高于这种元素被视为杂质时的含量。这些合金元素（如 V、Nb、Ti、Zr、Ta 和 B）当其质量分数达到 0.1%（B 为 0.001%）时，可能会显著地影响钢的组织与性能，这种合金化称为微合金化，这类钢则称为微合金化钢。钢的微合金化技术将在本章 1.4 节中另行讨论。

特别应该指出的是，我国富产的稀土元素在合金钢中的作用，近年来无论在国内还是国外都受到了极大的重视，已成为合金钢发展中的重要课题之一。稀土合金的大致成分见表 1-1。

表 1-1 稀土合金的大致成分

元素名称	Ce	La	Nd	Pr	其它稀土	其它杂质
质量分数（%）	50 ~ 55	23 ~ 27	10.8 ~ 14.0	4.5 ~ 7.0	1.0 ~ 1.5	余量

近年来的研究表明，稀土元素不仅对冶炼和铸造性能有着良好的作用，而且作为微合金化元素加入钢中，在很多方面亦有独特的效应。其主要作用包括：①降低钢中的有害杂质含量，如 O、N、H、S 以及 Pb、Bi、Sn 等，从而净化了晶界；②细化晶粒；③强化固溶

体,同时形成新的强化相。实践证明,钢中加入微量稀土元素,对于提高钢的冲击性能,降低钢的冷脆温度,提高钢的高温塑性和强度,改善钢的特殊性能(如耐热性、耐蚀性及抗氧化性)等方面都有良好的作用。

1.1.2 合金元素的存在形式及其划分

钢中的合金元素不仅与铁和碳相互作用形成铁基固溶体和各类碳化物,同时它们之间以及与非金属元素还可以形成金属间化合物和非金属夹杂物。为此,通过探讨合金元素的这些相互作用并依此对它们进行分类,可以明确钢中合金元素的存在形式、分布状态以及合金钢中的组成相类型。

1. 合金元素与铁的相互作用

钢中的合金元素对 α -Fe、 γ -Fe 和 δ -Fe 的相对稳定性以及同素异构转变温度 A_3 和 A_4 均有极大的影响。在 γ -Fe 中有较大溶解度并稳定 γ 相的元素称为奥氏体形成元素;在 α -Fe 中有较大溶解度并使 α 相稳定的元素称为铁素体形成元素。它们对铁的多晶型转变的影响可分为两大类。

(1) 扩大 γ 相区—— γ 相稳定化元素 Mn、Ni、Co、C、N、Cu 等合金元素使 A_3 温度降低, A_4 温度上升,即扩大了 γ 相区。合金元素的这种作用包括以下两种情况:

1) 开启 γ 相区。与 γ -Fe 无限互溶,这类元素有 Ni、Mn、Co。图 1-1 所示为这几种元素与铁形成的二元合金相图。可以看出,随着合金元素 Ni、Mn、Co 含量的增加,某一定成分的铁基合金不仅在高温和低温出现了 $\delta + \gamma$ 和 $\alpha + \gamma$ 两个两相区,同时 γ 相的存在温度区间扩大,即使 γ 相区扩大;甚至当 Ni、Mn、Co 等元素加入到一定量后, γ 相区扩大到室温以下,使 α 相区消失。这类合金元素被称为(完全)开启 γ 相区的元素。

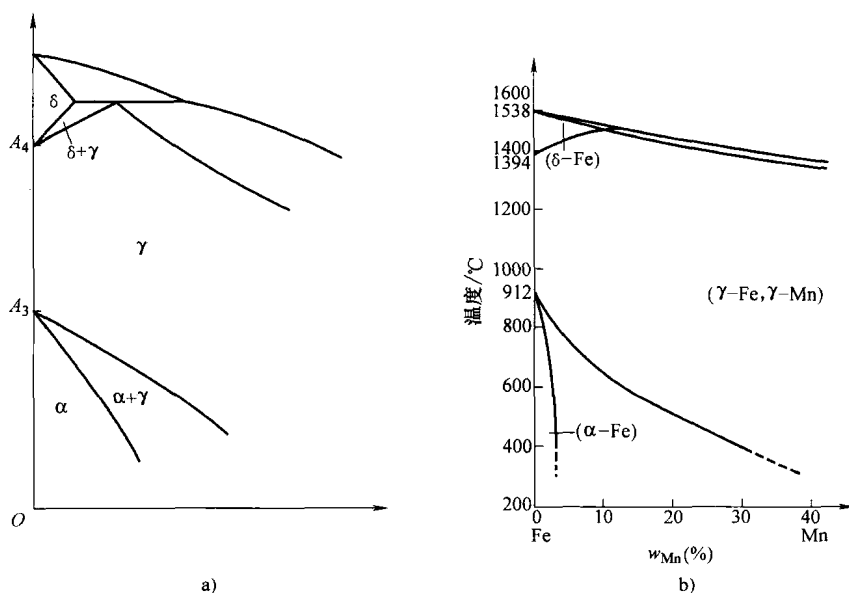


图 1-1 合金元素开启 γ 相区类型

a) Fe-Me 示意图 b) Fe-Mn 二元相图

2) 扩展 γ 相区。与 γ -Fe 有限互溶,这类元素有 C、N、Cu 等,其作用是扩展 γ 相区,如图 1-2 所示。C、N、Cu、Zn 等虽然扩大了 γ 相区,但因为它们与铁之间能形成稳定的化