



21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

金属材料学

主 编 伍玉娇

- 精选内容：强化基本概念及基础知识的掌握
- 激发兴趣：导入案例阅读材料有效辅助理解
- 延伸学习：培养自学及独立解决问题的能力

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

金属材料学

主 编 伍玉娇
副主编 周 芳 朱 涛
参 编 马亚琴

 北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是材料类本科专业必修课程的教材。本书较为系统地介绍了金属材料的合金化原理,以及工程结构钢、机械制造结构钢、工模具钢、不锈钢、耐热钢、耐热合金、铸铁、铝合金、镁合金、铜合金和钛合金的成分特点、性能、热处理工艺和用途,全书内容精简、突出核心知识。

本书可作为材料类专业本科生的教材,也可供材料类专业的研究生和从事材料工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学/伍玉娇主编. —北京:北京大学出版社, 2011. 8

(21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-19296-2

I. ①金… II. ①伍… 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 155004 号

书 名: 金属材料学

著作责任者: 伍玉娇 主编

责任编辑: 董君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-19296-2/TG·0019

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 467 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

白培康（中北大学）	陈华辉（中国矿业大学）
崔占全（燕山大学）	杜彦良（石家庄铁道大学）
杜振民（北京科技大学）	耿桂宏（北方民族大学）
关绍康（郑州大学）	胡志强（大连工业大学）
李楠（武汉科技大学）	梁金生（河北工业大学）
林志东（武汉工程大学）	刘爱民（大连理工大学）
刘开平（长安大学）	芦笙（江苏科技大学）
裴坚（北京大学）	时海芳（辽宁工程技术大学）
孙凤莲（哈尔滨理工大学）	孙玉福（郑州大学）
万发荣（北京科技大学）	王春青（哈尔滨工业大学）
王峰（北京化工大学）	王金淑（北京工业大学）
王昆林（清华大学）	卫英慧（太原理工大学）
伍玉娇（贵州大学）	夏华（重庆理工大学）
徐鸿（华北电力大学）	余心宏（西北工业大学）
张朝晖（北京理工大学）	张海涛（安徽工程大学）
张敏刚（太原科技大学）	张锐（郑州航空工业管理学院）
张晓燕（贵州大学）	赵惠忠（武汉科技大学）
赵莉萍（内蒙古科技大学）	赵玉涛（江苏大学）

前 言

“金属材料学”是一门综合性、应用性较强的材料类专业必修课。学习本课程前应修完材料科学基础、固态相变、材料腐蚀与防护、材料力学性能、材料热处理工艺学、性能分析等课程。本书较为系统地介绍金属材料合金化原理,以及工程结构钢、机械制造结构钢、工模具钢、不锈钢、耐热合金、铸铁、铝合金、镁合金、铜合金和钛合金的成分特点、性能、热处理工艺和用途。

通过本课程的学习,学生能初步掌握金属材料合金化原理、合金元素对钢相变、组织、性能影响的一般规律;掌握常用合金钢、合金铸铁、铝合金、镁合金、铜合金和钛合金的牌号、成分、热处理工艺、组织、性能和用途,并能根据工件的具体服役条件和使用性能要求,合理地进行选材和制定热处理工艺,初步具备设计新材料的能力。

根据目前各高等院校对课程学时学分的削减,本书对一些前期课程所涉及的部分内容进行了精简,适用于材料类专业2学分(不含实验教学、36学时)专业课程讲授。全书在教学内容的安排上注意加强基本概念和基础理论知识的学习,突出重点,理论联系实际,注意培养学生的自学能力和独立解决问题的能力。

本书由贵州大学伍玉娇教授(第1章)、周芳副教授(第2~6章)、朱涛副教授(第8~11章)、贵州师范大学马亚琴副教授(第7章)编写,全书由伍玉娇统稿并担任主编。

限于水平和经验不足,书中难免有不足之处,敬请同行和读者指正。

编 者
2011年6月

目 录

第1章 金属材料的合金化原理 1

- 1.1 合金钢发展历程 2
- 1.2 合金元素对铁碳相图的影响 4
 - 1.2.1 基本概念 4
 - 1.2.2 合金元素对铁碳相图的影响 5
- 1.3 钢的合金化 7
 - 1.3.1 合金元素在钢中的存在形式 7
 - 1.3.2 不同热处理态合金元素的分布 9
 - 1.3.3 合金元素的偏聚 10
 - 1.3.4 合金元素对钢的相变影响 11
 - 1.3.5 合金元素对钢的力学性能的影响 19
 - 1.3.6 合金元素对钢的工艺性能的影响 24
- 1.4 合金钢的编号方法 25
 - 1.4.1 合金结构钢的编号 25
 - 1.4.2 合金工具钢的编号 26
 - 1.4.3 特殊性能钢的编号 26
- 习题 26

第2章 工程结构钢 28

- 2.1 工程结构钢的基本要求 29
 - 2.1.1 足够的强度和韧性 29
 - 2.1.2 良好的焊接性和成形工艺性 30
 - 2.1.3 良好的耐蚀性 30
- 2.2 铁素体-珠光体钢 31
 - 2.2.1 碳素工程结构钢 31
 - 2.2.2 低合金高强度钢 31
 - 2.2.3 微合金钢 37

- 2.3 低碳贝氏体型钢、针状铁素体型钢和马氏体钢 39
 - 2.3.1 低碳贝氏体钢 40
 - 2.3.2 针状铁素体 42
 - 2.3.3 低碳马氏体钢 42
- 2.4 双相钢 43
- 2.5 低合金高强度钢发展趋势 44
- 2.6 抗震耐火钢 45
 - 2.6.1 概述 45
 - 2.6.2 抗震耐火钢的性能要求 46
 - 2.6.3 抗震耐火钢的合金化 47
 - 2.6.4 典型抗震耐火钢 48
- 习题 49

第3章 机械制造结构钢 50

- 3.1 概述 51
 - 3.1.1 机械制造结构钢的性能与合金化特点 51
 - 3.1.2 机械制造结构钢的强度和脆性 53
 - 3.1.3 机械制造结构钢的淬透性 57
- 3.2 整体强化态钢 58
 - 3.2.1 调质钢 58
 - 3.2.2 微合金非调质钢 63
 - 3.2.3 弹簧钢 68
 - 3.2.4 轴承钢 71
 - 3.2.5 低碳马氏体钢 78
 - 3.2.6 超高强度钢 80
- 3.3 表面强化态钢 87
 - 3.3.1 渗碳钢 87
 - 3.3.2 氮化钢 90
 - 3.3.3 低淬透性钢 91
- 3.4 其他机械制造结构钢 92



3.4.1 易削钢	92	5.2.2 腐蚀介质对钢耐蚀性的影响	142
3.4.2 高锰钢	93	5.2.3 不锈钢耐酸钢的组织与分类	142
习题	95	5.3 铁素体不锈钢	143
第4章 工模具钢	97	5.3.1 铁素体不锈钢的化学成分及平衡组织	144
4.1 概述	98	5.3.2 铁素体不锈钢的脆性	145
4.2 碳素钢及低合金工具钢	98	5.3.3 铁素体不锈钢的热处理及应用	146
4.2.1 碳素工具钢	98	5.4 马氏体不锈钢	148
4.2.2 低合金工具钢	99	5.4.1 马氏体不锈钢的成分及平衡组织	148
4.3 高速工具钢	101	5.4.2 马氏体不锈钢的热处理	149
4.3.1 高速钢的分类	101	5.5 奥氏体不锈钢	153
4.3.2 高速钢中合金元素的作用	104	5.5.1 奥氏体不锈钢的化学成分及平衡组织	153
4.3.3 高速钢中的碳化物	106	5.5.2 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀	154
4.3.4 高速钢的铸态组织及热加工	106	5.5.3 奥氏体不锈钢的应力腐蚀	155
4.3.5 高速钢的热处理	108	5.5.4 奥氏体不锈钢的热处理	156
4.3.6 粉末冶金高速钢	112	5.5.5 铬锰及铬镍锰奥氏体不锈钢	157
4.4 合金模具钢	113	5.6 双相不锈钢	160
4.4.1 冷作模具钢	113	5.6.1 奥氏体-铁素体双相不锈钢	160
4.4.2 热作模具钢	119	5.6.2 奥氏体-马氏体双相不锈钢	161
4.5 其他类型工具用钢	124	习题	163
4.5.1 耐冲击用钢	124	第6章 耐热钢和耐热合金	165
4.5.2 冷轧辊用钢	125	6.1 概述	166
4.5.3 量具用钢	126	6.1.1 耐热钢及耐热合金的工作条件和性能要求	166
4.5.4 塑料模具用钢	127	6.1.2 金属的抗氧化性	167
4.5.5 硬质合金	130	6.1.3 钢的热强性	169
习题	131	6.1.4 耐热钢的合金化	171
第5章 不锈钢	133	6.2 热强钢	172
5.1 概述	134		
5.1.1 不锈钢的性能要求及分类	135		
5.1.2 金属材料的腐蚀类型	135		
5.1.3 电化学腐蚀的原理	137		
5.1.4 提高金属材料耐腐蚀性的途径	139		
5.2 影响不锈钢组织和性能的因素	139		
5.2.1 合金元素对不锈钢组织和性能的影响	139		

6.2.1 珠光体型热强钢	172	7.5.3 可锻铸铁的石墨化退火	214
6.2.2 马氏体热强钢	177	7.6 特种性能铸铁	215
6.2.3 奥氏体型热强钢	180	7.6.1 耐热铸铁	215
6.3 镍基耐热合金	183	7.6.2 耐磨铸铁	216
6.4 新型耐热合金	186	7.6.3 耐蚀铸铁	218
6.4.1 定向凝固耐热合金	186	习题	220
6.4.2 粉末高温合金	187	第8章 铝及铝合金	221
6.4.3 氧化物弥散强化(ODS)高温材料	188	8.1 纯铝	222
习题	188	8.1.1 铝的性质和用途	222
第7章 铸铁	189	8.1.2 纯铝的种类和牌号	223
7.1 铸铁的石墨化及影响因素	190	8.1.3 纯铝中的杂质元素	224
7.1.1 铸铁的特点和分类	190	8.2 铝合金	226
7.1.2 铸铁的结晶	191	8.2.1 铝合金的热处理及时效强化	226
7.1.3 影响铸态组织的因素	193	8.2.2 铝合金的强化方式	228
7.2 灰口铸铁	195	8.2.3 变形铝合金	231
7.2.1 灰铸铁的化学成分及显微组织	195	8.2.4 铸造铝合金	245
7.2.2 灰铸铁的牌号、性能和热处理	196	习题	255
7.2.3 铸铁的孕育处理	198	第9章 镁及镁合金	256
7.3 球墨铸铁	199	9.1 纯镁	257
7.3.1 球墨铸铁的化学成分及显微组织	199	9.1.1 镁的性质和用途	257
7.3.2 石墨球化机理	201	9.1.2 纯镁的种类和牌号	258
7.3.3 球墨铸铁的牌号、性能和应用	203	9.1.3 纯镁中的杂质元素	259
7.3.4 球墨铸铁的热处理	204	9.2 镁合金	259
7.4 蠕墨铸铁	207	9.2.1 镁合金的分类、成分及牌号表示	260
7.4.1 蠕墨铸铁的化学成分及显微组织	208	9.2.2 镁合金的强化方式	263
7.4.2 蠕状石墨的形成过程	209	9.2.3 变形镁合金	265
7.4.3 蠕墨铸铁性能特点及应用	210	9.2.4 铸造镁合金	273
7.5 可锻铸铁	211	习题	276
7.5.1 可锻铸铁的化学成分及显微组织	211	第10章 铜及铜合金	277
7.5.2 可锻铸铁的牌号、性能和应用	212	10.1 纯铜	278
		10.1.1 铜的性质和用途	278
		10.1.2 铜的分类及牌号	279
		10.1.3 铜中的杂质元素	281
		10.2 铜合金	283



10.2.1 铜的合金化及铜合金的热处理原理	283
10.2.2 黄铜	285
10.2.3 青铜	287
10.2.4 白铜	290
习题	293
第11章 钛及钛合金	295
11.1 纯钛	296
11.1.1 钛的性质和用途	296
11.1.2 钛的分类及牌号	298
11.1.3 钛中的杂质元素	298
11.2 钛合金	301
11.2.1 钛合金的分类及牌号表示	301
11.2.2 钛的合金化原理与热处理基础	302
11.2.3 α 钛合金	305
11.2.4 $(\alpha+\beta)$ 钛合金	305
11.2.5 β 钛合金和近 β 钛合金	305
习题	307
参考文献	308

第 1 章

金属材料的合金化原理



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
金属材料合金化概念	了解碳钢、有色金属合金化概念	铁碳合金、有色金属的有关基本知识
金属材料的合金化原理	掌握合金元素对铁碳相图、铁碳合金相变的影响规律、碳氮化合物的形成规律	纳米复合材料的力学性能、热学性能、阻燃性、阻隔性，及影响性能的相关因素
合金元素对碳钢、有色金属力学性能的影响	了解合金元素对碳钢、有色金属强化途径和强化机理	碳钢、有色金属制备方法
合金元素对金属材料其他性能的影响	了解合金元素对金属材料加工性能和热处理工艺性能的影响规律	碳钢的冷热加工工艺及影响因素



导入案例

1943年,第二次世界大战正在紧张地进行,英国伦敦多次受到德国人的V-2飞弹的袭击,这使英国人吃尽苦头,数十万平民百姓死在这种飞弹之下。

英国人获得了情报,这些飞弹制造的原料是汉堡提供的,不摧毁德国工业基地,就不能断其V-2飞弹的生产。于是英国统帅部要集中空军力量空袭汉堡。英国专家们分析,汉堡防空雷达一定会提前发现机群,那样英国飞机损失可能很大,如何减少飞机的损失呢?专家们认为,最根本的就是要使德国防空雷达瞎眼,使它迷茫,看不清空中机群,然后英国机群再飞临汉堡上空投炸弹。用什么办法弄瞎雷达千里眼呢?无线电专家们发现将金属箔片散发到空中时,将使雷达电波被阻挡或反射,而不能集中到飞机上,这样,雷达就不灵了。7月23日,英国出动10多架飞机,从汉堡高空中向下抛撒250万盒金属箔片,共计有25亿根。这些薄片所反射的电磁脉冲在德国雷达荧光屏上持续了20多分钟。英国790架飞机组成的大机群就趁此机会飞临汉堡上空进行投弹。英国轰炸机群投下数千吨燃烧弹,使汉堡成为一片火海。从此,小小金属箔片在战争中名声大噪。英军首创无源干扰的战例,为无线电对抗的电子战开创了新路。

“泰坦尼克号”邮轮堪称当时世界上最大、最豪华、设计最先进的邮轮,但就是这艘被称为“永不沉没”的海上都城,在与冰山冲撞一次后,产生了90多米长的大裂纹,并在短短3个小时后就沉没了。后来科学家对邮轮的残骸进行分析,认为事故的发生与材料的力学性能有密切的关系。经分析,“泰坦尼克号”邮轮的钢板在极低的温度下发生冷脆,经不起冲击和震动;同时,钢板中含硫量高,韧性很差,最终导致了这场灾难的发生。

1.1 合金钢发展历程

在古代,人类使用的主要工具是石材(石器时代),在随后的制陶过程中发展了炼铜技术并用铜代替了石材(铜器时代),公元前1200年左右,人类开始使用铸铁,自此就进入了铁器时代,到了18世纪后半叶,钢的坩埚冶炼法和钴、镍、锰、钼、钨、铬、铌、钒等元素相继被发现并分离出来,钢的产量及应用范围都得到较大的发展,后来制钢工业迅速发展,成为18世纪产业革命的重要内容和物质基础。材料对社会、经济及科学技术活动的影响面大、带动作用强,既是支撑国民经济发展的基础产业,也是当代科技创新的前沿,更是人类社会进步的里程碑,是社会文明程度的重要标志,是人类文明的基础和标志。早在史前时期,人们就使用铁陨石制造武器、工具和首饰,可以说铁镍合金是人类使用最早的一种合金钢,尽管那时人们并不知道镍的存在。人类社会发展的历史证明,材料是人类生存和发展、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。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看出,每一种重要的新材料的发现和应



阅读材料1-1

1. 合金发展的先驱——法拉第

法拉第在电磁感应及电化学方面的贡献是众所周知的，但他也是合金发展的先驱。早在1820—1822年就对合金钢进行了研究，在钢中加入了镍、铬、铜、金、银、铂等合金元素。他在与Stodart发表的论文“改善钢的合金实验”和“论钢的合金”中阐述到：“在铁和钢与其它金属的合金试验中，我们的目的是双重的：一方面探讨人工配制的合金在制造刀具方面是否比最纯的钢为优；另一方面，这些合金在相同的条件下是否较不容易氧化。还有一个附带的目的就是探讨这些合金用于制造反射镜的可能性”。尽管法拉第在合金钢的研究没有得到实用的合金，但他仍不愧为一位伟大的冶金学家和合金钢研究的前驱。

2. 特殊钢到高速钢的发明人——R. Mushet

R. Mushet在1868年发展出高钨自淬工具钢(见表1-1)，当时称之为R. Mushet特殊钢，开创了高碳合金工具钢的新纪元。

表1-1 从Mushet特殊钢到高速钢

/%

年代		C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Co
1868	Mushet	2.3	1.15	2.51	1.15	6.62	—	—	—
1900	Taylor White	1.85	0.15	0.30	3.8	8.00	—	—	—
1906	—	0.67	0.04	0.11	5.47	18.9	—	0.29	—
1912	—	0.76	—	—	4.38	16.4	0.30	0.62	5.00

3. 现代合金钢的奠基人——Hadfield

Hadfield出生于英国Sheffield的一个钢铁世家，他在1882年试制成功的高锰耐磨钢的成分是：C1.35%，Si0.69%，Mn12.76%。它的特点是在淬火后不但不是硬而脆，反而有良好的韧性，而且是越磨越硬。这些反常现象在冶金界产生很大的震动，Hadfield也因此一举成名。

4. 20世纪初的合金结构钢

中碳合金结构钢的发展是从19世纪末对镍钢进行的研制开始的。1878—1888年法国的冶金学家用锰脱氧成功地冶炼出可锻的铁镍合金及镍钢。在这些试验的启发下，英国和法国的一些钢厂开始生产镍含量低于7%的合金结构钢。1889年Riley在英国钢铁学会报告了他对镍钢机械性能的系统研究。在碳钢中加入4.7%Ni会使屈服强度由16增到28吨/英寸²，抗张强度由30增到40.6吨/英寸²，而面缩及延伸率基本不变。二战期间，克虏伯公司(德国发动两次世界大战的主要军火供应商)的“克虏伯钢”(0.3—0.4%C, 3—4%Ni, 1.75—2.0%Cr)、法国船舶锻造厂的0.4%C, 2%Ni, 1%Cr钢相继问世。

5. 现代合金钢

21世纪，钢铁材料仍然是结构材料中最重要的材料。随着科学技术的发展和社会日益增长的需求，发展了高性能合金钢：从日本的“超级钢”，到现在的“高洁净、均



匀化、超细化”钢、低温钢、新型耐蚀钢、新型工具钢、新型热强钢、易切削非调质机械结构钢、热锻用非调质机械结构钢、抗震耐火钢、金属基梯度复合材料、金属间化合物材料、金属功能材料、金属环境材料等。

金属基梯度复合材料，是一种沿着某一方向其物理、化学、生物、力学等单一或复合性能发生连续变化，以适应不同环境，实现某种特殊功能的先进材料。构成梯度复合材料的组成及显微组织(陶瓷、金属或合金、有机物、纤维等)不仅是连续分布，适应环境，而且是可以控制的，具有普通金属基复合材料没有的性能特点。

金属环境材料指从生产到使用及回收的整个过程中，性能优良、功能良好、对资源和能源消耗少、对环境污染小、循环再生利用率高的材料。例如 Fe-Mn-Si-C 系合金，利用 Si 和 Mn 作为主要的合金元素，化学元素组成简单，这两组元素在地球上的储量相当大，而且易于提取和循环再生利用。

金属功能材料是指在能量与信息的显示、转换、传输、存储等方面具有独特的功能，这些特殊功能是以它们所具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学等物理性能为基础的。金属功能材料往往在能量与信息的功能方面，具有导电性、磁性、导热性、热膨胀特性、弹性等一些特殊的物理性能，如形状记忆特性、储氢特性等，成为一类极为重要的功能材料。

金属间化合物是指金属与金属，金属与类金属间形成的化合物。金属间化合物可以具有特定的组成成分，也可在一定范围内变化，从而形成以化合物为基体的固溶体。金属间化合物是长程有序的，具有特殊的晶体结构、电子结构与能带结构。

资料来源：郭可信，金相学史话：合金钢的早期发展史 [J]，材料科学与工程，2001。

1.2 合金元素对铁碳相图的影响

根据 Fe-C 相图可以将铁碳合金分为工业纯铁($w_c < 0.0218\%$)、钢($w_c = 0.0218\% \sim 2.11\%$)和白口铸铁($w_c = 2.11\% \sim 6.69\%$)3 类。根据合金成分(或组织)的不同又可以将钢分为亚共析钢、共析钢和过共析钢 3 类，将白口铸铁分为亚共晶白口铸铁、共晶白口铸铁和过共晶白口铸铁 3 类。

1.2.1 基本概念

1. 合金元素

合金元素(alloying-element)是指为了使钢获得所需要的组织结构、物理、化学和力学等性能而添加在钢中的元素。这类元素主要有 Si、Mn、Cr、Ni、W、Mo、V、Ti、Nb、Al、Cu、B、Re 等。

2. 杂质元素

杂质元素(impurity element)是指在冶炼时由原料、燃料、耐火材料、大气带入钢中或脱氧时残留于钢中的元素，主要有 Mn、Si、S、P、N、H、O、Sn、Sb、As、Bi 等。

3. 微量元素

微量元素(trace element)是指含量在 0.1% 时就能显著影响钢的组织性能的若干元素, 主要有 Nb、Ti、V、Zr 和 B(0.001%)。

4. 碳化物形成元素

碳化物形成元素是指与碳形成碳化物的元素, 主要有 Hf、Zr、Ti、Ta、Nb、V、W、Mo、Cr、Mn 等, 其中 Hf、Zr、Ti、Ta、Nb、V 只要有足够的碳, 在适当的条件下, 就会形成各自的碳化物, 仅在缺碳或高温的条件下, 才以原子状态进入固溶体中, 称为强碳化物形成元素。W、Mo、Cr 这类元素一部分以原子状态进入固溶体中, 另一部分形成置换式合金渗碳体, 如 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 等, 如果含量超过一定限度, 又将形成各自的碳化物, 如 Cr_7C_3 、 WC 、 MoC 等, 可称为中强碳化物形成元素。Mn 一般可形成 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, 又称为弱碳化物形成元素。

5. 非碳化物形成元素

非碳化物形成元素是指不形成碳化物的元素, 如 Si、Al、Cu、Ni、Co 等。这类元素一般以原子状态存在于奥氏体、铁素体等固溶体中。

6. 合金钢

合金元素含量 $< 5\%$ 的称为低合金钢; 合金元素含量在 $5\% \sim 10\%$ 的称为中合金钢; 合金元素含量 $> 10\%$ 的称为高合金钢。

1.2.2 合金元素对铁碳相图的影响

1. 铁基合金

合金元素对 Fe 的同素异构转变有很大的影响, 主要是通过合金元素在 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶度以及对 $\gamma\text{-Fe}$ 存在的温度区间的影响表现出来。

1) 扩大或开启 γ 相区的元素

合金元素与 $\gamma\text{-Fe}$ 形成无限固溶体, 与 $\alpha\text{-Fe}$ 形成有限固溶体。它们均使 A_3 (GS 线) 降低, A_4 (JN 线) 升高, 如图 1.1 所示。这类合金元素主要有 Mn、Ni、Co 等。如果加入足够量的 Ni 或 Mn, 可完全使体心立方的 α 相从相图上消失, γ 相保持到室温(开启 γ 相区, 图 1.1(a))。合金元素 C、N、Cu、Zn、Au 等, 与 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe}$ 均形成有限固溶体, 也会使 A_3 (GS 线) 降低, A_4 (JN 线) 升高, 扩大 γ 相区(图 1.1(b))。上述元素又称为 γ 相稳定化元素。

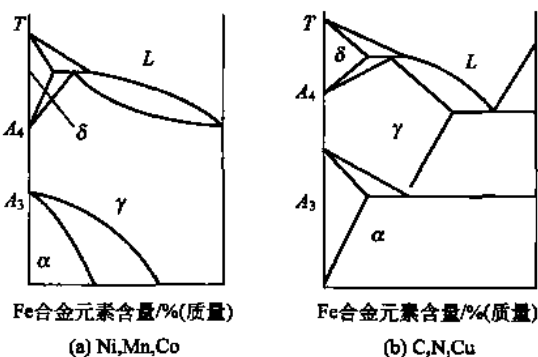
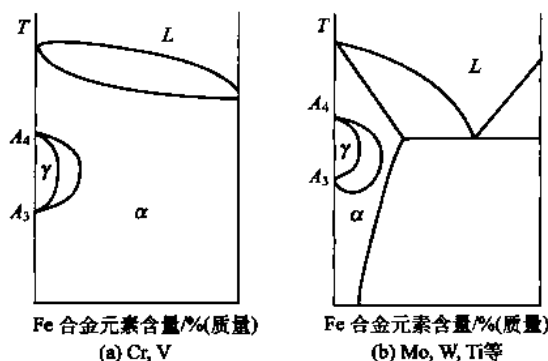


图 1.1 开启 γ 相区和扩大 γ 相区

2) 封闭或缩小 γ 相区的元素

合金元素 Cr、V 使 A_3 升高, A_4 下降, 甚至当达到某一含量时, A_3 与 A_4 重合, γ 相区被封闭, 当合金元素超过一定含量时, 合金不再有 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变, 与 $\alpha\text{-Fe}$ 形成无限固溶

图 1.2 封闭和缩小 γ 相区

体,如图 1.2(a)所示。W、Mo、Ti 等将使 A_3 升高, A_4 下降, 缩小 γ 相区, 如图 1.2(b)所示。

根据上述情形, 可将合金元素分为两大类: 将扩大或开启 γ 相区的元素称为奥氏体形成元素; 将缩小或封闭 γ 相区的元素称为铁素体的形成元素。例如为了保证钢具有良好的耐蚀性, 需要在室温下获得单相组织, 就可以运用上述合金元素与铁的相互作用规律, 通过控制钢中合金元素的种类和含量, 使钢在室温下获得单相组织。

2. 合金元素对 Fe-Fe₃C 相图的影响

1) 合金元素对奥氏体相区、铁素体相区的影响

合金元素对 Fe-Fe₃C 相图的影响与对纯铁的影响类似, 凡是扩大或开启 γ 相区的合金元素(如 Ni、Co、Mn 等)也会扩大铁碳相图中的奥氏相区(图 1.3(a))。合金元素 Ni 或 Mn 的含量高时, 可使钢在室温下得到单相奥氏体组织, 如 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢、Mn13 高锰耐磨钢等。

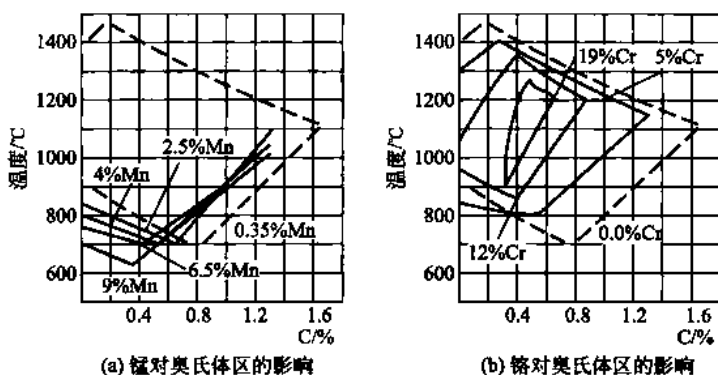


图 1.3 合金元素扩大奥氏体相区(a)和缩小奥氏体相区(b)

缩小或封闭 γ 相区的合金元素(如 Cr、W、Mo、V、Ti、Si 等)同样会缩小铁碳相图中的奥氏体相区(图 1.3(b))。如 Cr、Ti、Si 等完全封闭 γ 相区, 元素超过一定含量后, 可获得单相铁素钢, 例如 1Cr17Ti 高铬铁素体不锈钢。

2) 合金元素对临界点、共析点和共晶点的影响

奥氏体形成元素均使 S、E 点向左下方移动; 铁素体形成元素使 S、E 点向左上方移动。S 点左移意味着共析碳量减小, 如 Cr 为 12% 时, 共析碳含量为 0.4%。合金元素对共析点(S 点)的影响如图 1.4 所示, E 点左移意味着出现莱氏体的 C 量降低, 如高速钢中含

C 量仅为 0.8%，但已有莱氏体组织。奥氏体形成元素 Ni、Mn 等使 A_1 线向下移动；铁素体形成元素 Cr、Si 等使 A_1 线向上移动。合金元素对 A_1 线的影响如图 1.5 所示。

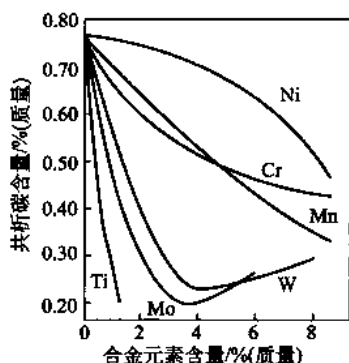


图 1.4 合金元素对共析含碳量的影响

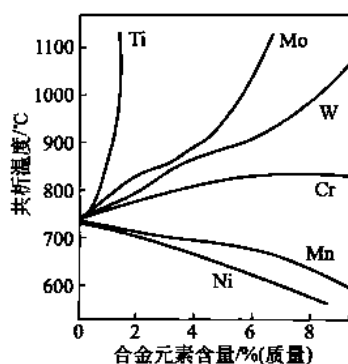


图 1.5 合金元素对共析温度的影响

1.3 钢的合金化

1.3.1 合金元素在钢中的存在形式

1. 形成铁基固溶体

1) 形成置换固溶体(substitutional solution)

Ni、Co、Mn、Cr、V 的原子尺寸与点阵相同的 Fe 晶体的原子尺寸差 $\Delta R \leq \pm 8\%$ ，因此这些元素可与 Fe 形成无限固溶体。其中 Ni、Co 和 Mn 形成以 γ -Fe 为基的无限固溶体，Cr 和 V 形成以 α -Fe 为基的无限固溶体；Mo 和 W 具有的原子尺寸因素超过 8%（分别为 10% 和 11%），因此只能形成较宽溶解度的有限固溶体；原子尺寸差 $\leq \pm 15\%$ 的元素(Ti、Nb、Ta)只能形成具有较窄溶解度的有限固溶体；原子尺寸差 $\Delta R > \pm 15\%$ 的元素(Zr、Hf、Pb)在 Fe 中具有很小的溶解度。

2) 形成铁基间隙固溶体(interstitial solution)

间隙固溶体的形成条件是 $r_x/r_{Me} \leq 0.59$ 。间隙固溶体总是有限固溶体，并且间隙原子仅占据溶剂金属的部分间隙位置，即总有部分间隙没有被填满，对于 α -Fe，间隙原子优先占据的位置是八面体间隙。对 γ -Fe，间隙原子优先占据的位置是八面体或四面体间隙，且其溶解度随间隙原子尺寸的减小而增加，即按 B、C、N、O、H 顺序而增加。

2. 形成碳(氮)化物

1) 碳化物

碳化物(carbide)是过渡族金属与碳作用形成的。过渡族金属与碳的亲合力、碳化物的强度(或稳定性)按下列规律递减：Hf、Zr、Ti、Ta、Nb、V、W、Mo、Cr、Mn、Fe。



其中Ⅳ、Ⅴ族金属的碳化物具有简单的点阵结构,如 TiC 、 VC 、 TiN 、 TaC 等,Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ族金属的碳化物具有复杂的点阵结构,如 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、 W_2C 、 Mo_2C 、 $(\text{W}, \text{Mo})_6\text{C}$ 等。与合金碳化物相比,铁的碳化物是最不稳定的。渗碳体中 Fe 的原子可以被若干合金元素的原子所取代,如 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ 等。

从周期表中的位置来看,碳化物形成元素(Ti 、 V 、 Cr 、 Mn 、 Zr 、 Nb 、 W 、 Mo 等)均位于 Fe 的左侧,而非碳化物形成元素(Ni 、 Si 、 Co 、 Al 、 Cu)等均处于周期表 Fe 的右侧。尽管 Ni 和 Co 也可形成独立的碳化物,但其稳定性很差(比 Fe_3C 还小),所以在钢中不会出现,故通常被当做非碳化物形成元素看待。 Mn 是碳化物形成元素,但 Mn 极易溶入渗碳体中,故钢中没有发现 Mn 的独立碳化物。

碳化物形成元素均有一个未填满的 d 电子层,当形成碳化物时,碳首先将其外层电子填入合金元素的 d 电子层,从而使形成的碳化物具有金属键结合的性质,因此,具有金属的特性。合金元素与 Fe 原子比较 d 电子越是不满,形成碳化物的能力就越强,即与碳的亲和力越大,所形成的碳化物也就越稳定。

然而,碳化物的稳定性并不是单纯地由 d 电子层的未填满程度所决定的。如金属元素与碳结合生成碳化物时的热效应亦会影响所生成的碳化物的稳定性,一般说来,碳化物的生成热越大,其稳定性就越高。

在钢中常见的碳化物有以下几种。

(1) M_3C : 渗碳体,复杂正交点阵。

(2) M_7C_3 : 如 Cr_7C_3 , 复杂六方点阵,可形成复合 $(\text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mo}, \dots)_7\text{C}_3$ 。

(3) M_{23}C_6 : 如 Cr_{23}C_6 , 复杂立方, $(\text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mo}, \dots)_{23}\text{C}_6$ 。

(4) M_2C : 如 Mo_2C 、 W_2C , 密排六方点阵。

(5) MC : 如 VC 、 TiC 、 NbC , 一般为简单面心立方点阵, MoC 、 WC 是简单六方点阵。一般式: MC_X , $X \leq 1$ 。如 V_4C_3 , $X = 0.75$ 。也就是说,碳化物也有空位存在。

(6) M_6C : 不是一种金属碳化物,是复杂六方点阵。常在含 W 、 Mo 的合金钢中出现。一般式: $(\text{W}, \text{Mo}, \text{Fe})_6\text{C}$ 。

复杂点阵结构: M_{23}C_6 、 M_7C_3 、 M_3C 。其特点是硬度较低,熔点较低,稳定性较差。

简单点阵结构: M_2C 、 MC 。硬度高,熔点高(可达 3000°C),分解温度高(可达 1200°C),稳定性好,又称为间隙相。

M_6C 是复杂结构,性能特点接近简单点阵结构。

2) 氮化物(Nitride)

氮化物具有高硬度、高熔点、高脆性的性能特点。氮化物的 r_N/r_{Me} 均小于 0.59,所以一般都形成简单间隙结构相。

简单立方结构的氮化物(NaCl 型)有: TiN 、 NbN 、 VN 、 CrN 等。

密排六方结构的氮化物有: WN 、 Nb_2N 、 MoN 等。 AlN 不是间隙相, N 原子不在 Al 点阵的间隙位置,是 ZnS 型密排六方结构)。

氮化物形成规律与碳化物相似。氮也可以溶入碳化物,形成 $\text{C}-\text{N}$ 复合化合物,如 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6 \rightarrow (\text{Cr}, \text{Fe})_{23}(\text{C}, \text{N})_6$ 。

3. 形成金属间化合物

金属化合物通常分为正常价化合物、电子化合物及间隙化合物 3 类。金属间化合物通