



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

工程材料学

Engineering Materials

● 刘锦云 主编

哈尔滨工业大学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

工 程 材 料 学

刘锦云 主编



哈爾濱工業大學出版社

内 容 简 介

本书涵盖通用结构材料、专用结构材料和新型结构材料的内容,包括钢的合金化原理以及通用结构钢、专用结构钢、工模具用钢、不锈钢、耐高温钢、铸铁、有色金属及其合金、新型无机非金属材料、高分子材料、现代复合材料的介绍。

本书可作为材料科学与工程专业本科生教材,也可作为冶金及机械类研究生教材,还可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料学/刘锦云主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.11

ISBN 978-7-5603-5773-7

I. ①工… II. ①刘… III. ①工程材料 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 289979 号



责任编辑 张 瑞 刘 瑶

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 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 514 千字

版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5773-7

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

当代文明的三大支柱是信息、能源和材料。而材料又是信息和能源及诸多领域发展的基础。可以认为,材料发展与社会进步有着密切关系,它是衡量人类社会文明程度的标志之一。

按材料的用途和性能特点,材料可以分为功能材料和结构材料两大类。功能材料是以特殊的物理、化学性能要求为主的材料,如要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料。结构材料是以力学性能要求(强度、硬度、塑性、韧性等)为主、兼有一定物理性能和化学性能要求的材料。

工程材料学是研究材料的成分、组织结构与性能之间关系的一门技术基础学科,是一门综合性较强、与工程应用联系紧密的课程。本书的编写目的是为了满足不同工科院校材料科学与工程等专业的相关教学和科技工作者的应用需要。为此,本书涵盖了通用结构材料、专用结构材料和新型结构材料的内容,包括钢的合金化原理以及通用结构钢、专用结构钢、工模具用钢、不锈钢、耐温用钢、铸铁、有色金属及其合金、无机非金属材料、高分子材料、现代复合材料的介绍。

本书在编写上力求做到内容丰富、取材新颖、理论联系实际,并注重工程应用的基本原则。书中给出的各种材料的标准力求引用最新的现行国家标准或行业标准。通过本书的学习,可以掌握材料的合金化原理及材料成分设计依据,了解各类材料成分与制备处理工艺及组织结构与性能之间的关系;能初步从零件的服役条件出发,对材料提出合理的性能要求,并正确地选用材料和合理地制订工艺;基本了解新材料发展的趋势,初步具备研究开发新材料的能力。

全书共分11章,其中绪论、第1章、第3章3.1~3.5节、第5章、第6章、第8章由西华大学刘锦云编写,第2章、第3章3.6节、第9章由太原理工大学马淑芳编写,第4章、第7章由西华大学查五生编写,第10章由清华大学郭文利编写,第11章由清华大学梁彤祥编写。

在本书的编写中,郑州大学、山东大学、西南石油大学等单位的多位老师提出了宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请广大师生和读者批评指正。

编 者

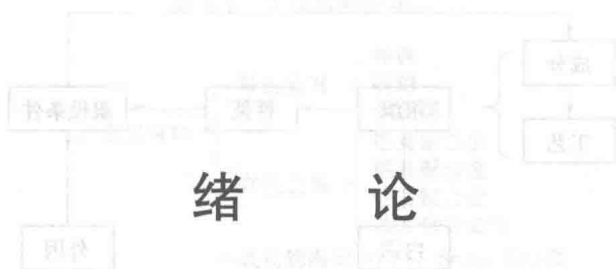
2015年12月

目 录

绪论	1
0.1 本课程的地位和作用	1
0.2 本课程的基本要求	2
0.3 材料的分类及本课程的主要学习内容	2
第1章 钢的合金化原理	4
1.1 钢中的合金元素及合金钢概述	4
1.2 合金元素的分类及其与铁和碳的相互作用	6
1.3 合金元素对钢相变的影响	11
1.4 合金元素对钢的强韧性的影响	20
1.5 合金元素对钢的工艺性能的影响	24
第2章 通用结构钢	27
2.1 工程用结构钢	27
2.2 机器零件用结构钢概述	36
2.3 调质钢	39
2.4 弹簧钢	43
2.5 滚动轴承钢	46
2.6 渗碳钢及氮化用钢	50
2.7 低碳马氏体型结构钢	55
2.8 超高强度结构钢	58
第3章 专用结构钢	60
3.1 铁道用结构钢	60
3.2 汽车车身用结构钢	62
3.3 船体及海洋工程用结构钢	63
3.4 石油套管用结构钢	68
3.5 火炮身管用结构钢	71
3.6 耐磨钢	75
第4章 工模具用钢	77
4.1 概述	77
4.2 刀具用钢	78
4.3 模具用钢	92

4.4	量具用钢	107
第5章	不锈钢	109
5.1	概述	109
5.2	马氏体不锈钢	114
5.3	铁素体不锈钢	120
5.4	奥氏体不锈钢	123
5.5	奥氏体-铁素体型不锈钢	131
5.6	沉淀硬化型不锈钢	133
第6章	耐温用钢	137
6.1	耐热钢概述	137
6.2	抗氧化钢(热稳定性钢)	140
6.3	珠光体型热强钢	144
6.4	马氏体型热强钢	150
6.5	奥氏体型热强钢	155
6.6	耐热钢	158
6.7	低温用钢	160
第7章	铸铁	162
7.1	概述	162
7.2	灰口铸铁	164
7.3	球墨铸铁	169
7.4	可锻铸铁	175
7.5	蠕墨铸铁	178
7.6	特殊性能铸铁	180
第8章	有色金属及其合金	191
8.1	铝及铝合金	192
8.2	铜及铜合金	217
8.3	镁及镁合金	242
8.4	钛及钛合金	254
8.5	镍基高温合金	268
8.6	滑动轴承合金	274
第9章	新型无机非金属材料	277
9.1	概述	277
9.2	氧化物陶瓷	280
9.3	碳化物陶瓷	285
9.4	氮化物陶瓷	288

9.5 金属陶瓷	290
第 10 章 高分子材料	298
10.1 概述	298
10.2 工程塑料	301
10.3 合成纤维	307
10.4 合成橡胶	310
10.5 胶黏剂	312
第 11 章 现代复合材料	316
11.1 概述	316
11.2 复合材料的复合原则与机制	320
11.3 聚合物基复合材料	329
11.4 陶瓷基复合材料	333
11.5 金属基复合材料及其制备	336
参考文献	341



0.1 本课程的地位和作用

工程材料学是材料科学与工程专业本科生的专业必修课,是研究材料的成分、组织结构与性能之间关系的一门技术基础学科。它将综合运用学生在材料科学基础、材料工程基础、材料性能学、热处理原理及工艺等课程中已经学过的基础知识和专业知识,说明材料的成分、制备及处理工艺、组织结构与性能之间的关系,以及如何根据工件的服役条件,合理地选用材料,因此,它是一门综合性较强的课程。它对材料的生产、使用和发展起着重要的指导作用。

人们选用某种材料制作某个零(部)件,是因为这种材料的性能能够满足这个零(部)件的使用要求。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(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,它们构成了互相紧密联系的系统。

材料化学成分和组织结构是材料性能的内部依据,而材料的性能则是其具有一定化学成分和组织结构的外部表现。材料的组织包括材料的显微组织、晶体缺陷和冶金缺陷,结构是指组成相的原子结构和晶体结构。

以钢为例,钢的化学成分对其强韧性的影响有直接作用和间接作用,且以间接作用为主。一般钢的组成元素与其质量分数的改变,对钢的强韧性作用是通过组织结构的变化来实现的。

当钢的化学成分一定时,通过不同的加工制备工艺和热处理工艺,改变材料的组织结构,可导致材料在性能上出现较大的差异。

因此,材料的成分和加工工艺决定了材料的组织结构状态,材料的组织结构状态决定了材料的性能,具备了一定性能的材料,就能够满足零(部)件的服役条件要求。

实际生产中,人们是根据零(部)件的服役条件对材料性能的要求,选用某一成分的材料,施加一定的加工处理工艺,使所选择的材料获得一定的组织结构,从而得到所要求的性能,满足零(部)件的服役要求。

材料的成分、组织与性能间的关系如图 0.1 所示。

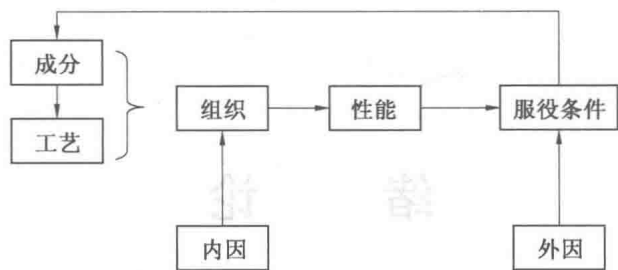


图 0.1 材料的成分、组织与性能间的关系

0.2 本课程的基本要求

- (1)掌握材料的合金化原理,了解材料成分设计的依据。
- (2)掌握各类材料成分、加工处理工艺的特点以及其与组织、性能之间的关系。
- (3)能初步从零(部)件的服役条件出发,对材料的性能提出合理的要求,并能正确地选用材料,合理地制订加工处理工艺。
- (4)了解新材料发展的趋势,初步具备研究开发新材料的能力。

0.3 材料的分类及本课程的主要学习内容

材料的种类繁多,用途广泛。凡是与工程有关的材料均称为工程材料,如机械工程材料、土建工程材料、电子工程材料等。

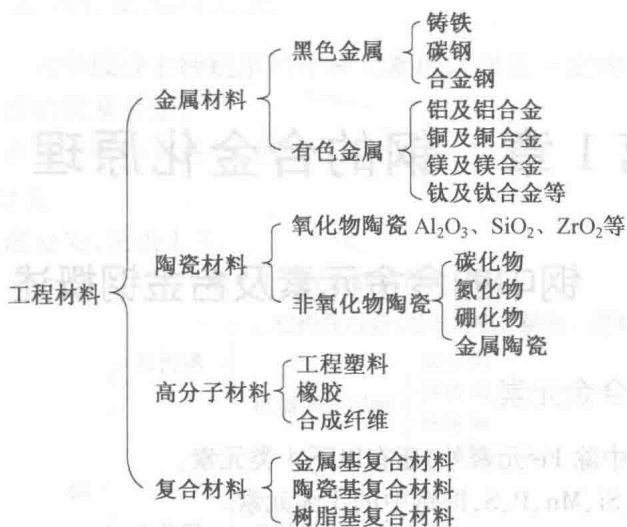
按材料的性能特点,可将材料分为结构材料 and 功能材料两大类。

- (1)结构材料。以力学性能(强度、硬度、塑性、韧性等)要求为主,兼有一定物理性能和化学性能要求的材料。
- (2)功能材料。以特殊的物理、化学性能要求为主的材料,如要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料。一般不在工程材料中讨论。

结构材料主要应用于机械制造、交通运输、航空航天、化工、建筑等领域。

按化学成分特点,结构材料又可分为金属材料、陶瓷材料(无机非金属材料)、(有机)高分子材料及复合材料 4 大类,见表 0.1。

表 0.1 工程材料分类



陶瓷材料由于其原子之间的结合键主要为共价键和离子键,所以陶瓷材料的主要特点是具有高的硬度、高的耐磨性、高的耐蚀性和高的抗氧化能力;其最大弱点是塑性差、太脆,所以很少在常温下作为受力的结构材料。

高分子材料是由相对分子质量很大的大分子组成,大分子链之间的结合键主要是分子键(范德华力),分子键的结合力很小,在外力作用下易产生滑动并造成很大的变形,所以高分子材料的熔点很低、硬度也很低,很少作为受力的结构材料。

金属材料包括金属和以金属为基的合金,其原子间的结合键基本上为金属键。由于金属键的特性,金属具有良好的塑性、较高的强度和硬度,即具有良好的综合力学性能,适合作为受力的结构材料,特别是可通过不同成分配制、不同工艺方法改变其内部组织结构,来满足不同结构及零件的使用性能要求,是应用面最广泛、用量最大、承载能力最高的结构材料,在机械设备中约占所用材料的 90% 以上,其中又以钢铁材料占绝大多数。

航空、航天、海洋等领域的发展对材料提出了许多新的要求,而单一材料无法满足这种高的综合指标要求,但把上述两种或两种以上的材料复合在一起,使之性能互补、互相协调就能满足各种需求,这就是复合材料。

本书重点介绍通用的结构材料,主要是金属材料,特别是钢铁材料,其次介绍一些专用材料,最后介绍新型的陶瓷材料、高分子材料及复合材料。

第 1 章 钢的合金化原理

1.1 钢中的合金元素及合金钢概述

1.1.1 钢中的合金元素

钢是铁基合金,钢中除 Fe 元素外,还有以下 4 类元素。

(1) 常存元素。C、Si、Mn、P、S,即钢中的 5 大元素。

(2) 偶存元素。矿石、废钢中含有的和在冶炼、工艺操作时带入的元素,如 Cu 等。

(3) 隐存元素。原子半径较小的非金属元素,如 H、O、N 等。

(4) 合金元素。为保证获得所要求的组织结构、物理、化学和力学性能而特别添加到钢中的化学元素。

钢中除基本元素碳以外,相对于合金元素,不是特别添加的元素,又称为杂质或残余元素。同一元素既可能是杂质,又可能是添加的合金元素,一般根据其质量分数而定。例如,P、S 一般看作杂质元素,其质量分数不大于 0.05%。易切削钢中,S 的质量分数可达 0.3%~0.4%,是作为改善切削性能的合金元素。在耐蚀钢中,P 的质量分数如达到 0.06%~0.15%,可看作是提高耐蚀性的合金元素。

目前,钢铁中常用的合金元素有十几种,分属于元素周期表中不同的周期。

第二周期:B、C、N;

第三周期:Al、Si、P、S;

第四周期:Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu;

第五周期:Zr、Nb、Mo;

第六周期:W、Ta;

第七周期:稀土元素。

元素在钢中有以下 4 种存在形态:

(1) 以固溶体的溶质形式存在,可以溶入铁素体、奥氏体和马氏体中。

(2) 形成强化相,如形成碳化物或金属间化合物等。

(3) 形成非金属夹杂物,如氧化物(Al_2O_3 、 SiO_2 等)、氮化物(AlN)和硫化物(MnS 、 FeS 等)。

(4) 以游离态存在,如碳以石墨状态存在。

元素以固溶体的溶质形式和强化相的形式存在,对钢的性能将产生有利的作用。而元素以非金属夹杂物的形式存在,则对钢的性能产生有害作用,应在冶炼时尽量减少钢中的非金属夹杂物。元素以游离态存在,一般也有害,应尽量避免。

元素以哪种形式存在,主要取决于元素的种类、质量分数、冶炼方法及热处理工艺等。

1.1.2 合金钢的定义与分类

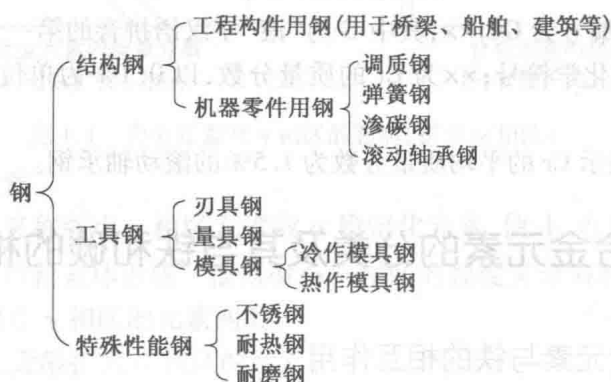
合金钢是指在化学成分上特别添加合金元素用以保证一定的生产、加工工艺以及所要求的组织与性能的铁基合金。

合金钢的分类方法有很多种,常用的有以下几种。

(1)按用途分类。

合金钢按用途分类,见表 1.1。

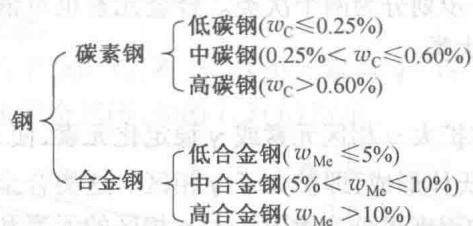
表 1.1 合金钢按用途分类



(2)按成分分类。

合金钢按成分分类,见表 1.2。

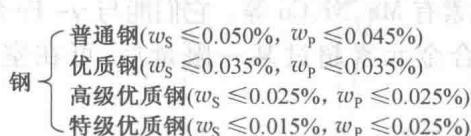
表 1.2 合金钢按成分分类



(3)按冶金质量分类。

合金钢按冶金质量分类,见表 1.3。

表 1.3 合金钢按冶金质量分类



在给钢产品命名时,往往把以上分类方法结合起来。例如,优质碳素结构钢、合金工具钢等。

1.1.3 合金钢的编号原则

合金钢的编号原则在《钢铁产品牌号表示方法》(GB 221—2008)中给予了规定。

合金钢的编号原则为

平均碳质量分数+合金元素符号+合金元素平均质量分数

式中,平均碳质量分数以数字表示,不同种类的钢其单位不同。结构钢以万分之一(0.01%)为一个单位,工具钢以千分之一(0.1%)为一个单位;合金元素符号以汉字或化学元素符号表示;合金元素平均质量分数以1%为一个单位,质量分数不大于1.5%不标出,高级优质钢在钢号尾部加符号“A”,特级优质钢在钢号尾部加符号“E”。

例如,12CrNi3A表示C的平均质量分数为0.12%、Cr的平均质量分数不大于1.5%、Ni的平均质量分数为3%的高级优质结构钢。

例如,9SiCr表示C的平均质量分数为0.9%、Si和Cr的平均质量分数均不大于1.5%的工具钢。

滚动轴承钢的编号为GCr $\times\times$,其中G为“滚”字汉语拼音的第一个字母,表示专用钢;Cr为合金元素铬的化学符号; $\times\times$ 为Cr的质量分数,以0.1%为单位,而碳的质量分数不标出。

例如,GCr15表示Cr的平均质量分数为1.5%的滚动轴承钢。

1.2 合金元素的分类及其与铁和碳的相互作用

1.2.1 合金元素与铁的相互作用

合金元素加入钢中后,可以改变铁的同素异晶转变温度 $A_3(\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe})$ 和 $A_4(\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \delta\text{-Fe})$,从而使“Fe-Me”二元相图出现扩大 γ 相区和缩小 γ 相区两个大类型,每个大类中又可以进一步划分为两个次类。合金元素也可依此类型分为奥氏体形成元素和铁素体形成元素两大类。

1. 奥氏体形成元素

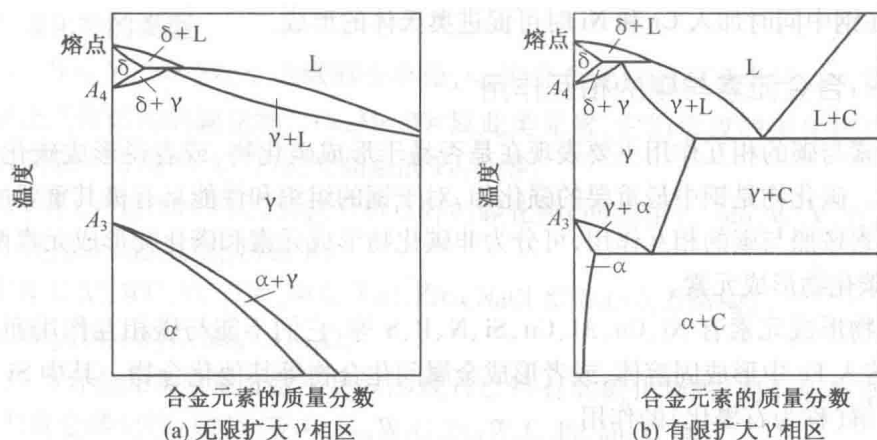
奥氏体形成元素,又称扩大 γ 相区元素或 γ 稳定化元素,使 A_3 点降低, A_4 点升高,在较宽的成分范围内促使奥氏体形成,即扩大了 γ 相区。这类合金元素都能与 $\gamma\text{-Fe}$ 形成固溶体,根据扩大 γ 相区的程度可分为无限扩大 γ 相区的元素和有限扩大 γ 相区的元素两类。

(1) 无限扩大 γ 相区的元素。

无限扩大 γ 相区的元素有Mn、Ni、Co等。它们能与 $\gamma\text{-Fe}$ 形成无限固溶体,而与 $\alpha\text{-Fe}$ 形成有限固溶体,当合金元素超过某一限量后,可在室温得到稳定的 γ 相,如图1.1(a)所示。

(2) 有限扩大 γ 相区的元素。

有限扩大 γ 相区的元素有C、N、Cu、Zn、Au。它们与 $\gamma\text{-Fe}$ 形成有限固溶体,与 $\alpha\text{-Fe}$ 形成更加有限的固溶体,如图1.1(b)所示。

图 1.1 合金元素对 γ 相区的影响(扩大 γ 相区)

2. 铁素体形成元素

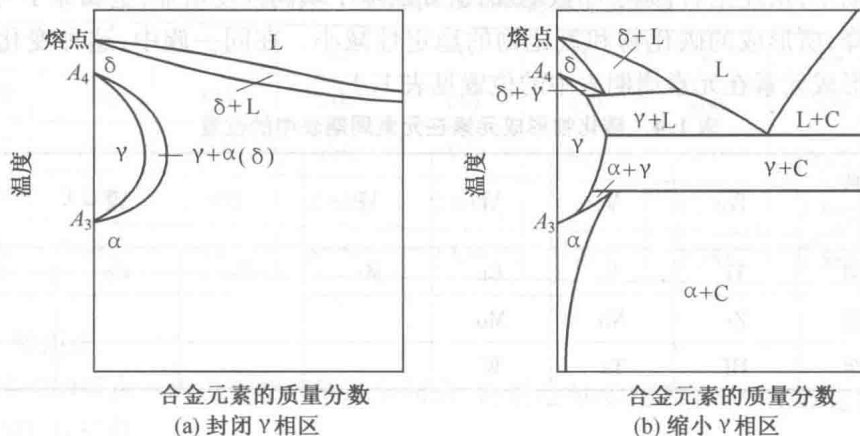
铁素体形成元素又称缩小 γ 相区元素或 α 稳定化元素,使 A_3 点升高, A_4 点降低,在较宽的成分范围内促进铁素体形成。根据缩小 γ 相区的程度又分为封闭 γ 相区、无限扩大 α 相区的元素和缩小 γ 相区的元素两类。

(1) 封闭 γ 相区、无限扩大 α 相区的元素。

封闭 γ 相区、无限扩大 α 相区的元素有 Cr、V、Mo、W、Ti、Si、Al、P、Be, 其中 Cr、V 能与 α -Fe 无限互溶, 其余元素与 α -Fe 有限固溶, 它们使 γ 相区缩小到一个很小的面积, 形成由 $\gamma+\alpha$ 两相区封闭的 γ 相区, 如图 1.2(a) 所示。

(2) 缩小 γ 相区的元素。

缩小 γ 相区的元素有 B、Nb、Ta、Zr 等, 这类元素与 γ -Fe 和 α -Fe 均形成有限固溶体, 使 γ 相区缩小, 但并未完全封闭, 如图 1.2(b) 所示。

图 1.2 合金元素对 γ 相区的影响(缩小 γ 相区)

由于合金元素对 Fe-Me 二元相图的影响不同, 则通过控制钢中合金元素的种类和质量分数可获得所需要的组织。例如, 当发展奥氏体钢时, 需向钢中加入大量的 Ni、Mn、N 等奥氏体形成元素; 当发展铁素体钢时, 需向钢中加入大量的 Cr、Si、Al、Ti 等铁素体形成元素。同时向钢中加入两类元素, 其作用往往相互抵消。但也有例外, 如 Cr 是铁素体

形成元素,在钢中同时加入 Cr 和 Ni 时可促进奥氏体的形成。

1.2.2 合金元素与碳的相互作用

合金元素与碳的相互作用主要表现在是否易于形成碳化物,或者说形成碳化物倾向性的大小上。碳化物是钢中最重要的强化相,对于钢的组织 and 性能具有极其重要的意义。

合金元素按照与碳的相互作用,可分为非碳化物形成元素和碳化物形成元素两类。

(1) 非碳化物形成元素。

非碳化物形成元素有 Ni、Co、Al、Cu、Si、N、P、S 等,它们不能与碳相互作用而形成碳化物,但可溶入 Fe 中形成固溶体,或者形成金属间化合物等其他化合物。其中 Si 能起促进碳化物分解(称为石墨化)的作用。

(2) 碳化物形成元素。

碳化物形成元素有 Fe、Mn、Cr、W、Mo、V、Zr、Nb、Ti、Ta 等,它们均可与碳作用,在钢中形成碳化物。它们均属于元素周期表中的过渡族元素。

1.2.3 钢中的碳化物

碳化物是钢中的基本强化相,它们的种类、数量、形状、大小及其在基体中的分布情况对钢的力学性能和加工工艺性能有强烈的影响。

1. 形成规律

碳化物属于间隙相,具有金属性,是过渡族金属与碳作用形成的。过渡族金属元素的原子均有一个未填满的次 d 电子层,当形成碳化物时,碳原子首先将其外层电子填充入该次 d 电子层中,产生强的金属键(所以有金属性),也有可能产生部分共价键。d 层越未填满,则金属原子与碳原子的结合力越强,即形成碳化物的能力越强,所形成的碳化物越稳定。同一周期中,从左至右,原子序数增加,次 d 层电子填满程度增加,金属原子与碳原子的结合力下降,所形成的碳化物和氮化物的稳定性减小。在同一族中,这种变化不甚明显。碳化物形成元素在元素周期表中的位置见表 1.4。

表 1.4 碳化物形成元素在元素周期表中的位置

族 周期	IV	V	VI	VII	VIII		
第四周期	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
第五周期	Zr	Nb	Mo				
第六周期	Hf	Ta	W				

按照碳化物形成元素所形成的碳化物稳定程度由强到弱的排序为

Hf、Zr、Ti、Ta、Nb、V、W、Mo、Cr、Mn、Fe

钢中常用的合金元素,按形成碳化物的强弱又可分成以下 3 类。

(1) 强碳化物形成元素:Zr、Ti、Nb、V。

(2) 中等强度碳化物形成元素:W、Mo、Cr。

(3) 弱碳化物形成元素:Mn、Fe,但 Mn 极易溶入 Fe₃C 中,无独立碳化物出现。

2. 碳化物的类型

(1) 当 $r_C/r_{Me} > 0.59$ (r_C 为碳原子半径, r_{Me} 为合金元素的原子半径) 时, 碳与合金元素形成复杂点阵结构的碳化物。Cr、Mn、Fe 属此类元素, 它们形成的碳化物有复杂立方的 $Cr_{23}C_6$ 、复杂六方的 Cr_7C_3 和正交晶系的 Fe_3C 等。

(2) 当 $r_C/r_{Me} < 0.59$ 时, 形成简单点阵的碳化物(间隙相)。Mo、W、V、Ti、Nb、Ta、Zr 均属此类, 它们形成的碳化物如下:

①MeC 型: WC、VC、TiC、NbC、TaC、ZrC(NaCl 型面心立方结构)。

②Me₂C 型: W₂C、Mo₂C、Ta₂C。

(3) 当合金元素质量分数不足以形成自己特有的碳化物时, 则形成复杂六方结构的 Me₆C 型合金碳化物, 如 Fe_3W_3C 、 Fe_4W_2C 、 Fe_2W_4C 、 Fe_3Mo_3C 等。

(4) 当合金元素质量分数很低时, 则只能形成合金渗碳体, 即合金元素置换了 Fe_3C 中的部分 Fe 形成的碳化物, 如 $(FeCr)_3C$ 、 $(FeMn)_3C$ 。

3. 多种碳化物形成元素共存时碳化物的形成规律

(1) 当碳的质量分数较低时, 强碳化物形成元素优先与碳结合, 弱碳化物形成元素只能溶入固溶体中。

(2) 当碳的质量分数较高时, 碳化物形成元素按照从强到弱的顺序形成碳化物。如钢中同时含有 Mo、W、Cr 时, 随碳的质量分数的增加, 将依次形成以下碳化物: Me₆C (Fe_3Mo_3C 或 Fe_3W_3C)、 $Cr_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 Fe_3C 。

4. 碳化物的特性

(1) 硬度高。

碳化物的硬度比相应的纯金属要高出数十倍甚至上百倍。纯金属与碳化物的硬度及熔点见表 1.5。

表 1.5 纯金属与碳化物的硬度及熔点

纯金属	Ti	Nb	Zr	V	Mo	W	Cr	α-Fe
硬度(HV)	230	300	300	140	350	400	220	80
碳化物	TiC	NbC	ZrC	VC	Mo ₂ C	WC	Cr ₂₃ C ₆	Fe ₃ C
硬度(HV)	3 200	2 055	2 840	2 094	1 480	1 730	1 650	860
熔点/℃	3 140	3 480	3 550	2 830	2 410	2 755	1 580	1 227

(2) 熔点高。

碳化物的熔点一般也较相应的纯金属高, 特别是 MeC 型和 Me₂C 型碳化物的熔点, 一般在 3 000 ℃ 左右。

碳化物硬度越高, 熔点越高, 则稳定性越强。碳化物的稳定性由弱到强的顺序是 Fe_3C 、 $(FeMe)_3C$ 、 $Me_{23}C_6$ 、 Me_6C 、 Me_2C 、MeC。

5. 碳化物稳定性对钢性能的意义

(1) 碳化物稳定性高, 可使钢在高温下工作并保持其较高的强度和硬度, 则钢的红硬性、热强性好。

(2) 在相同硬度条件下, 碳化物稳定性高的钢, 可在更高温度下回火, 使钢的塑性、韧

性更好。因此,合金钢较相同硬度的碳钢综合力学性能好。

(3)碳化物的稳定性高,在高温和应力作用下不易聚集长大,也不易因原子扩散作用而发生合金元素的再分配,故钢的抗扩散蠕变性能好。

6. 碳化物在钢的热处理中的重要意义

(1)合金碳化物稳定性高,为使碳化物溶入奥氏体中,合金钢奥氏体化的温度要提高,保温时间要延长。

(2)碳化物的稳定性过高,加热时不溶于奥氏体,随后冷却时加速奥氏体的分解,降低钢的淬透性;碳化物的稳定性较低,加热时溶于奥氏体中,增大过冷奥氏体的稳定性,可提高淬透性。

(3)碳化物的稳定性高,淬火钢的回火稳定性高。

1.2.4 合金元素对奥氏体层错能的影响

1. 合金元素的分类

奥氏体的层错能对钢的组织 and 性能都有很大影响。按照对奥氏体层错能的影响,合金元素可分为提高奥氏体层错能的元素和降低奥氏体层错能的元素两类。

(1)提高奥氏体层错能的元素,如 Ni、Cu、C,它们使奥氏体层错能提高。

(2)降低奥氏体层错能的元素,如 Mn、Cr、Ru、Ir,它们使奥氏体层错能降低。

2. 奥氏体层错能对钢的力学性能的影响

一般认为,金属的层错能低,则在金属中形成层错的概率大,扩展位错宽度宽,难束集,增大位错滑移的阻力,使位错的滑移困难,则使金属的加工硬化趋势增大。所以,奥氏体层错能的高低将直接影响到奥氏体钢的力学行为。典型的例子是高镍钢和高锰钢在性能上的差异。高镍钢,层错能高,冷变形性能优异,易于变形加工;而高锰钢层错能低,冷变形性能很差,有很高的加工硬化率,难加工。

3. 奥氏体层错能对钢的相变行为的影响

由于奥氏体是钢中相变产物的母相,改变奥氏体层错能必然会影响到钢的相变行为。降低奥氏体层错能,能相应地提高马氏体的层错能,使马氏体中层错形成概率变小,扩展位错宽度变小,使位错易束集,不易分解,导致不均匀切变时易发生滑移变形,形成具有位错型亚结构的片状马氏体。反之,提高奥氏体的层错能,相应地降低马氏体的层错能,使马氏体相变时,易于形成孪晶亚结构的片状马氏体。奥氏体层错能的高低对 Fe-Ni-C 合金中马氏体的形态影响见表 1.6。

表 1.6 奥氏体层错能对 Fe-Ni-C 合金中马氏体的形态影响

奥氏体层错能	低 → 高			
	板条 M	蝴蝶状 M	透镜状 M	薄片状 M
马氏体形态				