



高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列

结构材料学

Constructure Materials

主 编 刘锦云
副主编 马淑芳
梁彤祥

交叉性 前沿性 融合相关学科 代表材料领域的发展方向
先进性 科学性 院士专家著书 反映材料科学的最新成果
可读性 广交性 内容丰富翔实 促进材料工程的应用实践

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列

结构材料学

主 编 刘锦云
副主编 马淑芳 梁彤祥

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书涵盖通用结构材料、专用结构材料及新型结构材料的内容,包括钢的合金化原理、结构钢、铸铁、有色金属、模具钢、耐腐蚀耐温结构材料、无机非金属结构材料及复合材料等。

本书可作为材料科学与工程类专业本科生教材,也可作为冶金及机械类研究生教材及相关专业工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构材料学/刘锦云主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5603-2270-4

I. 结… II. 刘… III. 结构材料 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 016200 号

策划编辑 张秀华 杨 桦

责任编辑 费佳明

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 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 436 千字

版 次 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2270-4

印 数 1~3 000 册

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

当代科学技术的三大支柱是信息、能源和材料,而材料又是信息和能源及一切领域发展的物质基础。可以认为,材料的发展与社会进步有着密切的联系,是衡量人类社会文明程度的标志之一。

按照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。功能材料是以满足特殊的物理、化学性能要求为主的材料,如具有电、磁、光、声、热等功能和效应的材料。结构材料是以满足力学性能(强度、硬度、塑性和韧性等)为主,兼顾一定的物理和化学性能要求的材料。

结构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实际应用联系紧密的课程。本书主要是为了满足高等工科院校材料科学与工程类专业的学生和科技工作者的需要而编写的。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、结构钢、铸铁、有色金属、模具钢、耐腐蚀用结构材料、耐温用结构材料和其他专用结构材料,以及新型无机非金属材料 and 现代复合材料。在编写上力求作到内容丰富、取材新颖、理论联系实际,并重视工程应用的基本原则。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,了解各类材料的制备处理工艺以及组织与性能之间的关系,还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定工艺,了解新材料的发展趋势,初步具备研究开发新材料的能力。

全书共分 10 章,其中绪论、第 1 章、第 3 章~第 5 章、第 7 章、第 8 章 8.1~8.4 节、8.6 节由西华大学刘锦云编写,第 2 章、第 8 章 8.7 节、第 9 章由太原理工大学马淑芳编写,第 6 章由清华大学郭文利编写,第 8 章 8.5 节、第 10 章由清华大学梁彤祥编写。在本书编写过程中,郑州大学、山东大学、西南石油大学等多位老师提出了许多宝贵的建议,在此表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 10 月

目 录

绪论	1
第一篇 传统(通用)结构材料	
第1章 钢的合金化原理	7
1.1 钢中的合金元素及合金钢概述	7
1.2 合金元素的分类及与铁和碳的相互作用	9
1.3 合金元素对钢相变的影响	13
1.4 合金元素对钢的强韧性的影响	22
1.5 合金元素对钢的工艺性能的影响	26
第2章 结构钢	28
2.1 工程用结构钢	28
2.2 机器零件用结构钢概述	34
2.3 调质钢	37
2.4 弹簧钢	39
2.5 滚动轴承钢	42
2.6 渗碳钢及氮化用钢	46
2.7 低碳马氏体型结构钢	49
2.8 超高强度钢	52
第3章 铸铁	54
3.1 概述	54
3.2 灰口铸铁	56
3.3 球墨铸铁	59
3.4 可锻铸铁	63
3.5 蠕墨铸铁	66
3.6 特殊性能铸铁	68
第4章 有色金属及其合金	78
4.1 铝及铝合金	79
4.2 铜及铜合金	103
4.3 镁及镁合金	121
4.4 钛及钛合金	131

第二篇 专用结构材料

第5章 工模具用钢	145
5.1 概述	145
5.2 刀具用钢	146
5.3 模具用钢	158
5.4 量具用钢	170
第6章 耐腐蚀用结构材料	172
6.1 不锈钢	172
6.2 高分子材料	192
第7章 耐温用结构材料	209
7.1 耐热钢	209
7.2 低温用结构材料	226
第8章 其他专用结构材料	228
8.1 铁道用结构材料	228
8.2 汽车用结构材料	230
8.3 船体用结构材料	231
8.4 石油工业用结构材料	233
8.5 核反应堆结构材料	236
8.6 兵器用结构材料	238
8.7 耐磨钢	241

第三篇 新型结构材料

第9章 新型无机非金属材料	245
9.1 概述	245
9.2 氧化物陶瓷	248
9.3 碳化物陶瓷	253
9.4 氮化物陶瓷	256
9.5 金属陶瓷	258
第10章 现代复合材料	266
10.1 概述	266
10.2 复合材料的复合原则与机制	270
10.3 聚合物基复合材料	279
10.4 陶瓷基复合材料	283
10.5 金属基复合材料及其制备	286
附录	291
参考文献	296

绪 论

1. 本课程的地位和作用

结构材料学是材料科学与工程类专业本科生的必修课,是主要专业课程之一,是一门研究材料的成分、组织结构与性能之间关系的,综合性较强的课程。在综合运用材料科学基础、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。本门课程对生产、使用和发展材料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,它们之间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因,材料的组织包括材料的显微组织、晶体缺陷和冶金缺陷,而材料的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。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。

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。

材料成分、组织性能之间的关系见图 0.1。

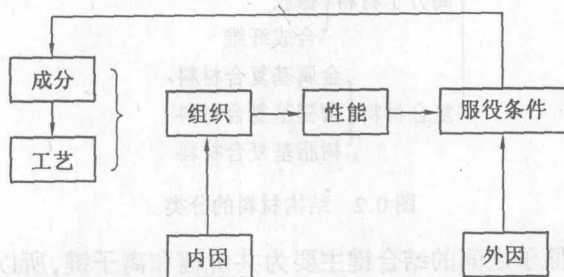


图 0.1 材料成分、组织性能之间的关系

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,以及它们与组织、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和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。

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。以要求力学性能(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。

(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。

结构材料主要应用于机械制造、交通运输、航空航天、化工、建筑等部门。

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、复合材料 4 大类,如图 0.2 所示。

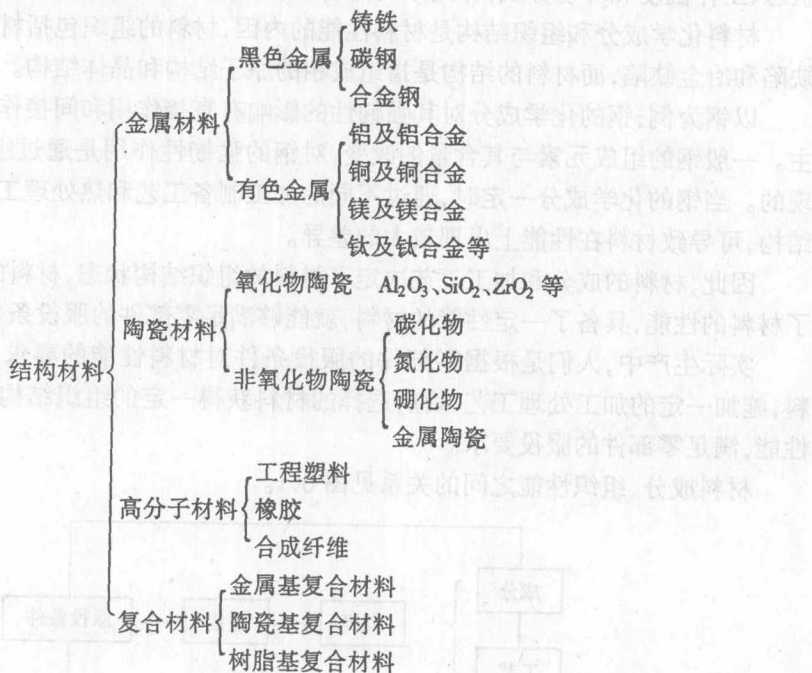


图 0.2 结构材料的分类

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;其最大弱点是脆性大,所以很少在常温下作为受力的结构材料单独使用。

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。

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。

随着人类在航空、航天、海洋等领域的发展,对材料提出了许多新要求,单一材料满足这种高要求的综合指标是非常困难的,有时甚至是不可能的。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。

本课程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,再介绍一些专用材料,最后介绍新型的陶瓷材料及复合材料。

第一篇

传统(通用)结构材料

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 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。由于矿石或废钢中含有的、在冶炼及工艺操作时带入钢中的元素,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”。同一元素既可能作为杂质,又可能作为添加的合金元素,一般根据其含量而定。如 P、S 一般为杂质元素,其质量分数不大于 0.05%。在易切削钢中,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 的质量分数可达 0.06%~0.15%,可看做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个,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:Er、Nb、Mo

第六周期:W、Ta

第七周期:稀土元素

元素在钢中有 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,如以石墨状态存在的 C。

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。

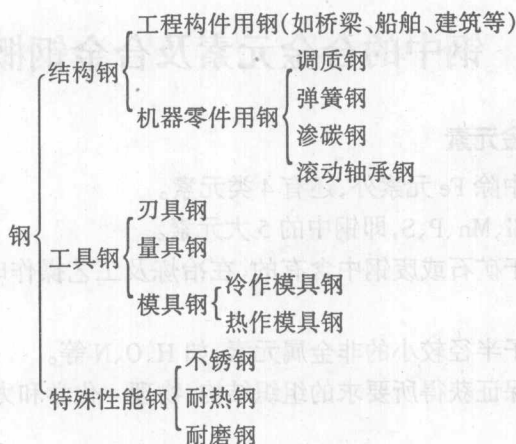
元素以哪种形式存在,主要取决于元素的种类、含量、冶炼方法及热处理工艺等。

1.1.2 合金钢的定义与分类

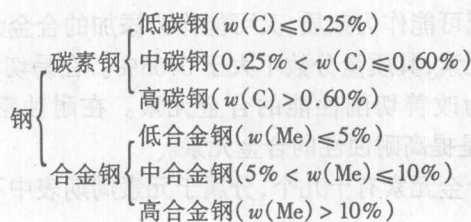
合金钢是指在化学成分上特别添加合金元素,用以保证一定的加工工艺以及所要求的组织与性能的铁基合金。

合金钢的分类方法有很多种,常用的有以下几种。

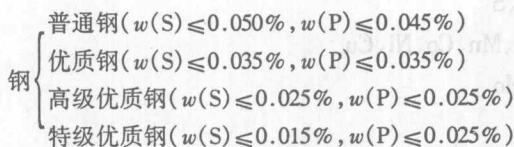
(1)按用途分类



(2)按成分分类



(3)按冶金质量



在给钢产品命名时,往往把成分、质量和用途分类方法结合起来,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 GB 221—2000《钢铁产品牌号表示方法》中给予了规定。

一般原则为

平均碳质量分数 + 合金元素符号 + 合金元素平均质量分数(1%)

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、9SiCr。

滚动轴承钢的编号为特例

GCr××

G——“滚”字汉语拼音的第一个字母,表示专用钢;

Cr——合金元素铬的化学符号;

××——铬质量分数,以0.1%为单位,而碳质量分数不标出。例:GCr15。

1.2 合金元素的分类及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(又称扩大 γ 相区元素或 γ 稳定化元素)

奥氏体形成元素使 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,依扩大 γ 相区的程度可分为两小类。

(1)无限扩大 γ 相区的元素。此类元素有锰(Mn)、镍(Ni)、钴(Co)等。它们不能与 $\gamma - \text{Fe}$ 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。此类元素有碳(C)、氮(N)、铜(Cu)、锌(Zn)、金(Au)。它们与 $\gamma - \text{Fe}$ 形成有限的固溶体,与 $\alpha - \text{Fe}$ 形成更加有限的固溶体,如图 1.1(b)所示。

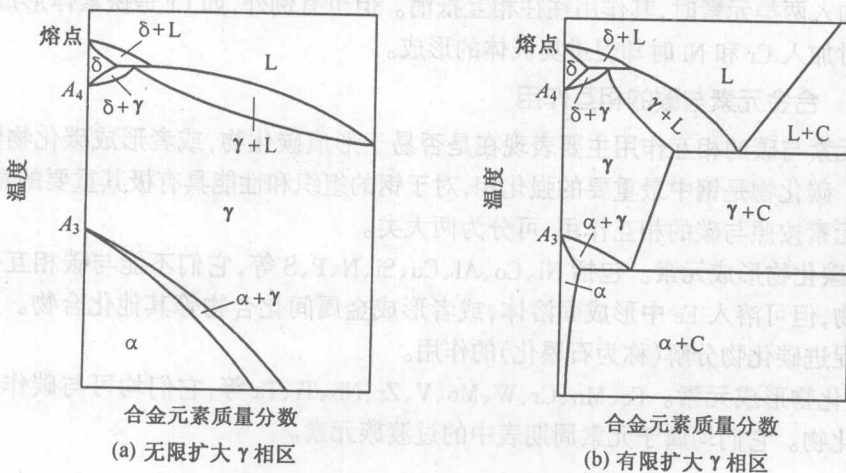


图 1.1 合金元素对 γ 相区的影响(扩大 γ 相区)

2. 铁素体形成元素(又称缩小 γ 相区元素或 α 稳定化元素)

铁素体形成元素使 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,依缩小 γ 相区的程度又分为两大类。

(1) 封闭 γ 相区,无限扩大 α 相区的元素。此类元素有铬(Cr)、钒(V)、钼(Mo)、钨(W)、钛(Ti)、硅(Si)、铝(Al)、磷(P)、铍(Be)。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 相圈,如图1.2(a)所示。

(2) 缩小 γ 相区的元素。此类元素有硼(B)、铌(Nb)、钽(Ta)、锆(Zr)等。它们与 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。

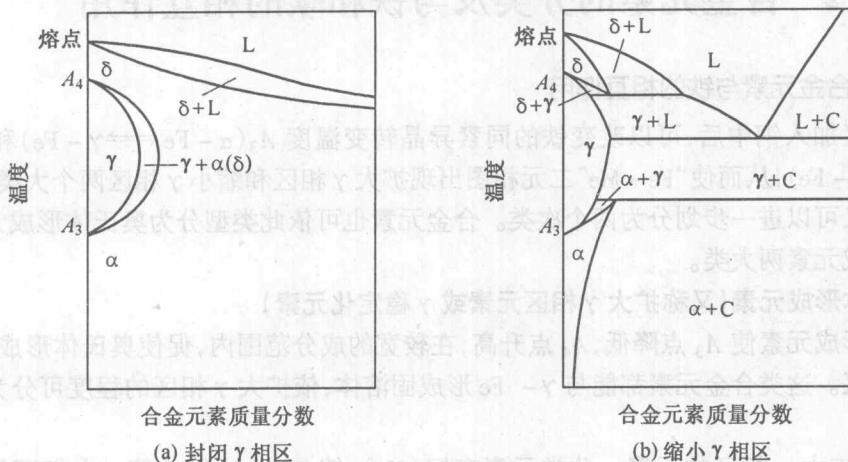


图 1.2 合金元素对 γ 相区的影响(缩小 γ 相区)

由于合金元素对Fe-Me二元相图的影响不同,通过控制钢中合金元素的种类和含量可获得所需要的组织。如欲发展奥氏体钢时,需向钢中加入大量的Ni、Mn、N等奥氏体形成元素;欲发展铁素体钢时,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时,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时却促进奥氏体的形成。

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,可分为两大类。

(1) 非碳化物形成元素。包括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反而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。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,则金属与碳的结合力越强,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 C、N 化物的稳定性减小。同一族中,这种变化不甚明显,见表 1.1。

表 1.1 碳化物形成元素在元素周期表中的位置

族 周期	族						
	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,又常分成以下 3 类。

(1) Zr、Ti、Nb、V——强碳化物形成元素。

(2) W、Mo、Cr——中等强度碳化物形成元素。

(3) Mn、Fe——弱碳化物形成元素,但 Mn 极易溶入 Fe_3C 中,无独立碳化物出现。

2. 碳化物的类型

(1) 当 $r_{\text{C}}/r_{\text{Me}} > 0.59$ (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 $r_{\text{C}}/r_{\text{Me}} < 0.59$ 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。

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

Me_2C 型: W_2C 、 Mo_2C 、 Ta_2C 。

(3) 当合金元素含量不足以形成自己特有的碳化物时,则形成复杂六方结构的 Me_6C 型的合金碳化物,如 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 等。

(4) 当合金元素含量很少时,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 $(\text{FeCr})_3\text{C}$ 、 $(\text{FeMn})_3\text{C}$ 。

3. 多种碳化物形成元素共存时碳化物的形成规律

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