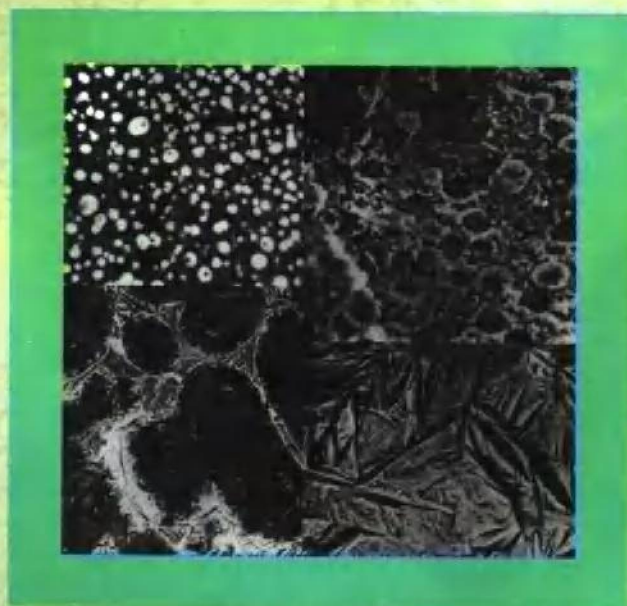


材料科学与工程丛书

工程材料学

王晓敏 编著



哈尔滨工业大学出版社

材料科学与工程丛书

工 程 材 料 学

Gongcheng Cailiao Xue

王晓敏 ~~董高利~~ 周 玉 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

全书共十二章。主要内容有：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、金属材料的加工工艺性能、高分子材料、陶瓷材料、复合材料。

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。

材料科学与工程丛书

工程材料学

Gongcheng Cailiao Xue

王晓敏 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

肇东粮食印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 389 千字

1998 年 5 月第 1 版 1998 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—5 000

ISBN 7-5603-1286-1/TG·39 定价 19.80 元

序

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、焊接四个博士点和一个博士后流动站,拥有三个国家重点学科及两个国家重点实验室,有 24 名博士生导师和一批崭露头角的中青年专家。面对市场经济,面对学科、专业结构的调整与经济、科技、社会发展的要求相比仍相对滞后的局面,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。

这套《材料科学与工程》丛书是具有“总结已有、通向未来”,“面向世界、面向 21 世纪”特色的“优化教材链”,以给培养材料科学与工程人才提供一个捷径为原则,力求简明、深入浅出,既利于教,又利于学。这套丛书包括本科生教材、教辅和研究生学位课教材,且已由 1995 年全国出版局南京会议确定为“九·五”国家重点图书选题。

为了适应跨世纪教学改革的需要,拓宽专业知识面,将“工程材料学”课程列为热处理、铸造、锻压、焊接等热加工专业的技术基础课,但目前,国内尚没有适用的教材。原用于金属材料 and 热处理专业的《金属材料学》教材内容偏多、偏深,且缺少非金属材料 and 材料加工工艺性能等内容。原用于机械类的《工程材料学》及热加工专业用的《金属学与热处理》等教材,由于有较大篇幅是讲述材料的基础知识(如金属学、热处理工艺和热处理原理等知识),而材料只是其中的一部分,因而显得内容偏浅、偏少,满足不了热加工各专业对材料知识的需求。因此,急需编写适用于“材料工程系”本科生教学要求的《工程材料学》教材。正是为了适应这种需求,我们编写了此书。本书既可作为热处理、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,建立整体统一的概念和体系,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。

(3) 由于学时所限,本着精简理论、讲清规律、突出实际应用的原则,对有关章节有所侧重。在讲授金属材料时,紧紧围绕材料的化学成分、组织结构和性能的关系,阐述各类材料的基本特征,改善材料性能的技术途径以及合理选择材料、使用材料的原则和方法;讲授非金属材料

时,重点讲授材料的分类、性能特点和应用范围,并适当讲授各类材料的强韧化机制。

本书主要内容有:钢的合金化基础、合金钢、铸铁;有色金属材料(Al、Mg、Cu、Ti 及其合金、Ni 基合金);高分子材料(塑料、橡胶、合成纤维);复合材料(金属基复合材料、陶瓷基复合材料、树脂基复合材料);陶瓷材料(氧化物陶瓷、非氧化物陶瓷)等。

全书共十二章,其中绪论、第一章~第七章、第九章、第十章由王晓敏编写,第八章、第十二章由董尚利编写,第十一章由周玉编写,全书由王晓敏主编,李仁顺主审。本书在编写过程中得到杨德庄教授的指导,李仁顺教授对某些内容的取舍提出了宝贵意见,张玉兰提供了书中的照片,在此作者表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中不当之处在所难免,敬请广大师生和读者批评指正。

哈尔滨工业大学出版社

1997 年 10 月

目 录

绪 论	(1)
0.1 材料发展与社会进步	(1)
0.2 生产发展对材料性能提出的要求	(1)
0.3 材料性能与化学成分和组织结构的关系	(3)
0.4 选材的一般原则	(4)
第一章 钢的合金化基础	
1.1 钢中合金元素及其分类依据	(5)
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	(7)
1.3 钢的强化机制	(11)
1.4 改善钢的塑性和韧性的基本途径	(14)
1.5 合金元素对钢相变的影响	(18)
1.6 钢的冶金质量	(23)
第二章 构件用钢	
2.1 构件用钢的力学性能特点	(27)
2.2 构件用钢的工艺性能	(30)
2.3 构件用钢耐大气腐蚀性能	(32)
2.4 碳素构件用钢	(33)
2.5 普通低合金构件用钢	(36)
2.6 进一步提高普低钢力学性能的途径	(38)
第三章 机器零件用钢	
3.1 概述	(42)
3.2 调质钢	(43)
3.3 弹簧钢	(47)
3.4 渗碳钢	(50)
3.5 滚动轴承钢	(53)
3.6 特殊用途钢	(59)
第四章 工具钢	
4.1 概述	(65)
4.2 刀具用钢	(66)
4.3 模具用钢	(80)
4.4 量具用钢	(89)
第五章 不锈钢	
5.1 概述	(91)
5.2 金属腐蚀	(91)
5.3 不锈钢的合金化原理	(93)
5.4 不锈钢的种类和特点	(93)
第六章 耐热钢及高温合金	

6.1	钢的热稳定性和热稳定钢	(101)
6.2	金属的热强性	(103)
6.3	α -Fe 基热强钢	(105)
6.4	γ -Fe 基热强钢	(110)
第七章 铸铁		
7.1	铸铁的特点和分类	(113)
7.2	铸铁的结晶	(115)
7.3	铸铁的石墨化	(119)
7.4	灰铸铁	(121)
7.5	提高铸铁性能的途径	(124)
7.6	可锻铸铁	(127)
7.7	特殊性能铸铁	(129)
7.8	铸铁的热处理	(133)
第八章 有色金属及其合金		
8.1	铝及铝合金	(136)
8.2	镁及镁合金	(155)
8.3	铜及铜合金	(158)
8.4	钛及钛合金	(162)
8.5	镍基高温合金	(171)
第九章 金属材料的加工工艺性能		
9.1	金属材料的铸造性能	(175)
9.2	金属材料的锻造性能	(177)
9.3	金属材料的焊接性能	(178)
9.4	金属材料的可切削性	(180)
9.5	热处理工艺性能	(181)
第十章 高分子材料		
10.1	概述	(182)
10.2	高聚物材料的结构特点	(183)
10.3	高聚物的力学性能	(188)
10.4	高聚物的静电问题	(190)
10.5	常用高分子材料简介	(191)
第十一章 陶瓷材料		
11.1	概述	(199)
11.2	陶瓷材料制备工艺	(201)
11.3	陶瓷的力学性能	(205)
11.4	陶瓷的韧化	(215)
第十二章 复合材料		
12.1	复合材料的分类和特性	(229)
12.2	颗粒及纤维增强复合材料的复合原理	(234)
12.3	树脂基复合材料	(238)
12.4	金属基复合材料	(243)
12.5	其它类型的复合材料	(248)
参考文献		(250)

绪 论

0.1 材料发展与社会进步

材料在人类历史进程中的地位人所共知。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。因此，历史学家根据人类使用的材料，将历史时代划分为石器、青铜器和铁器时代。

同人类历史发展一样，工程材料也有一个发展过程。在 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。

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更苛刻的要求，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，只有陶瓷材料和复合材料的出现，才能更好地满足生产的需要。

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 80 年代以来，信息材料和能源材料得到了迅速的发展。

随着科学技术的发展，新材料的领域不断扩展，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。预计在不久的将来，人们就可以利用计算机从原子、分子的尺度进行材料设计，还有可能实现根据要求设计出符合一定用途的最佳成分和最佳生产工艺的新型材料。

本课程主要讨论工程材料。

凡与工程有关的材料均谓之工程材料。工程材料按其性能特点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。如那些要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料，一般不在工程材料中讨论。

工程材料主要应用于机械制造、航空、航天、化工、建筑和交通运输等部门。

工程材料种类繁多，用途广泛，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(见图 0.1)。

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，然后才是材料的加工工艺性能。

一、使用性能

使用性能是指材料在使用过程中能够安全可靠地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。

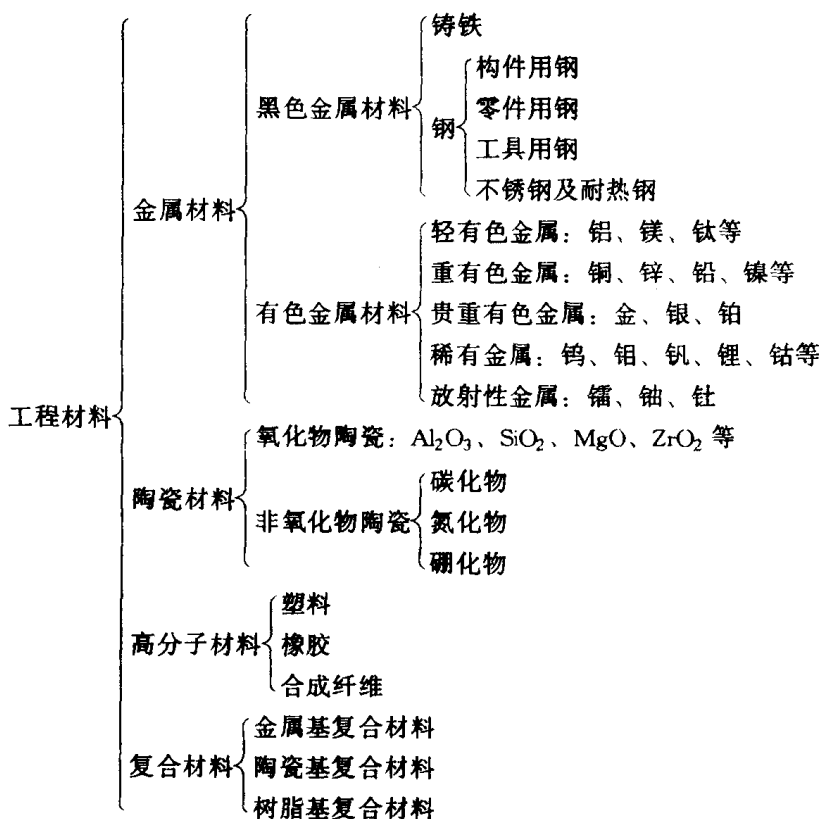


图 0.1 工程材料的分类

力学性能是指材料受到各种不同的性质及大小的载荷作用时所反映出来的性能。它是衡量材料性能极其重要的指标。绝大多数机器零件或构件都是不同在不同载荷（静载荷、冲击载荷、交变载荷）性质、不同应力状态（拉、压、弯、扭及各种复合应力）与环境（温度、环境介质）条件下服役的。当零件失去应有的功能时，则称该零件失效。

工程上常见的失效形式主要有三种：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，往往造成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并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在某种意义上说来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（ $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 σ_{-1} ）、刚度（ E ）、硬度、塑性（ δ 、 ψ ）、韧性（ α_k 、 K_{IC} 、 T_k ）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（蠕变极限、持久强度）和在环境介质下工作产生的滞后断裂（ K_{ISCC} 、 K_{TH} ）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。

物理性能是指材料的密度、熔点、热膨胀性、导热性和导电性等。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的区别。

化学性能是指材料在室温或高温时抵抗各种介质化学侵蚀的能力。主要的化学性能有抗氧化性和抗腐蚀性。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。

二、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来的特性，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，难以成形或废品太多，这种材料的应用也会受到限制。所以，评价一种材料的优劣，既要看到其使用性能，也要看到其工艺性能。

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（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。

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，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。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，可通过不同的热处理工艺改变材料的组织结构，而导致材料在力学性能上有较大的差异。

冷、热塑性加工变形也可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，并使性能带有方向性。这是其它加工方法所不能实现的。

另一个影响钢性能的因素是冶金质量。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。它们之间的联系如图0.2所示。

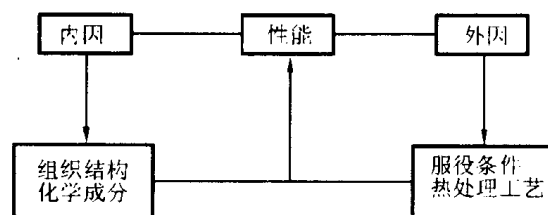


图0.2

总之，从微观本质上去认识材料，并掌握它们与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。

0.4 选材的一般原则

正确合理的选材应考虑以下三项基本原则：

(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等。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等情况，以降低产品成本。

第一章 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叫做合金化。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。这种钢叫合金钢。

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,结构钢中美国多含 Ni 元素,前苏联多含 Cr 元素,西德多含 Cr、Mn 元素,日本则多含 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。我国目前富产 Mn、Si、Mo、W、V、B 及稀土元素等。过去认为我国缺 Cr 少 Ni,但近几年已发现了许多 Cr、Ni 矿。

当钢中的合金元素总含量小于或等于 5% 时,称为低合金钢。合金元素总含量在 5% ~ 10% 范围内称为中合金钢。合金元素总含量超过 10% 的称为高合金钢。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不很全面。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,本章将从以下四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

一、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: B、C、N;

第三周期: Al、Si;

第四周期: Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu;

第五周期：Zr、Nb、Mo；

第六周期：W；

第七周期：稀土元素。

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、渗碳体等）中，或是形成新相。概括来讲，它们有如下四种存在形式：

（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、Cu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，主要决定于合金元素的种类、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。

二、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、Al、P等；

（2）碳化物形成元素，如Cr、Mo、V、Ti、Zr、Nb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的侧面反映了合金元素的特性。以上三种分类方法很好地揭示了钢中合金元素三个方面的基本特性，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。

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

合金元素加入钢中之后,对钢的相变、组织和性能的影响一般取决于合金元素与铁和碳的相互作用。

一、合金元素与铁的相互作用

合金元素对 Fe 的同素异构转变有很大的影响,这一影响主要通过合金元素在 α -Fe 和 γ -Fe 中的固溶度以及对 γ -Fe 存在温度区间的影响表现出来。而这两者又取决于合金元素与铁所构成的二元合金状态图。为此可以将合金元素分为两大类型。

1. 无限扩大 γ 区型(见图 1.1)

合金元素使 γ 区扩展,与 γ -Fe 形成无限固溶体,与 α -Fe 形成有限固溶体。它们均使 A_3 点降低, A_4 点升高。这类元素有 Mn、Ni、Co 等。

2. 有限扩大 γ 区型(见图 1.2)

合金元素使 A_3 点降低, A_4 点升高,与 α -Fe 和 γ -Fe 均形成有限固溶体,这类元素有 C、N、Cu、Zn、Au 等。

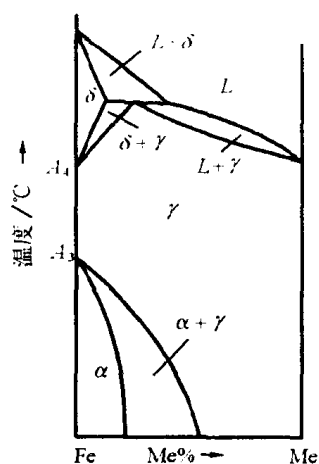


图 1.1 扩大 γ 区并与 γ -Fe 无限互溶的 Fe-Me 状态图

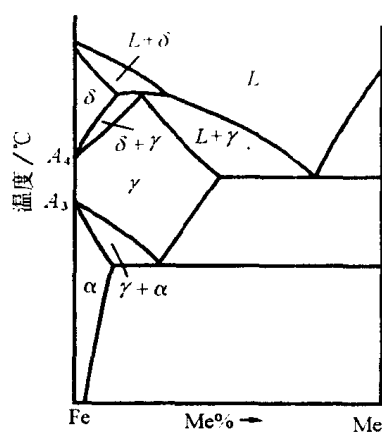


图 1.2 扩大 γ 区, 并与 γ -Fe 有限互溶的 Fe-Me 状态图

3. 封闭 γ 区, 无限扩大 α 区型(见图 1.3)

合金元素使 A_3 点上升, A_4 点下降, 以至达到某一含量时, A_3 点与 A_4 点重合, γ 区被封闭, 超过此含量, 合金不再有 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变, 与 α -Fe 形成无限固溶体。这类合金元素有: Si、Cr、W、Mo、P、V、Ti、Al、Be 等。但应指出, 含 Cr 量小于 7% 时, A_3 点下降; 含 Cr 量大于 7% 时, A_3 点才上升。

4. 缩小 γ 区, 但不使 γ 区封闭型(见图 1.4)

合金元素使 A_3 点上升, A_4 点下降, 使 γ 区缩小但不封闭。这类元素有 B、Nb、Ta、Zr 等。

应当指出的是, 在上述各种铁基二元合金中, 合金元素除溶于 γ -Fe 或 α -Fe 以外,

当元素含量高时，还可能形成金属间化合物。例如在 Fe-Cr、Fe-V、Fe-Mo 等体系中，当条件合适时，可能产生分子式分别相当于 FeCr、FeV、FeMo 等的金属间化合物，一般称之为 σ 相。此问题在特殊钢中将会遇到。

综上所述，可将合金元素分为两大类：将扩大 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形成元素。显然，这种分类法对生产实践有重要的指导意义，这在以后讲的不锈钢中将会遇到。为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相互作用的规律，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。如欲发展奥氏体钢时，需要往钢中加入 Ni、Mn、N 等奥氏体形成元素；欲发展铁素体钢时，需要往钢中加入大量的 Cr、Si、Al、Mo、Ti 等铁素体形成元素。

最后应该指出：同时向钢中加入两类合金元素时，其作用往往相互有所抵消。但也

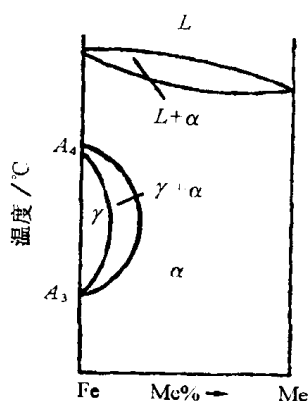


图 1.3 封闭 γ 区并与 α -Fe 无限互溶的 Fe-Me 状态图

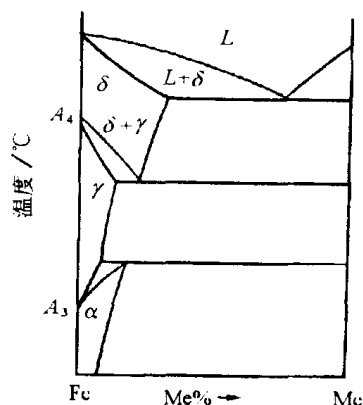


图 1.4 缩小 γ 区的 Fe-Me 状态图

有例外，例如 Cr 是铁素体形成元素，在 Cr18% 与 Ni 同时加入时却促进了奥氏体的形成。

二、合金元素与碳的相互作用

合金元素与钢中碳的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。碳化物是钢中最重要的强化相，对于决定钢的组织 and 性能具有极其重要的意义。

合金元素按照它们与碳的相互作用，可分为两大类：

1. 非碳化物形成元素

非碳化物形成元素包括 Ni、Si、Co、Al、Cu、N、P、S 等。它们与碳不形成碳化物，但可固溶于 Fe 中形成固溶体，或者形成其它化合物，如氮可形成氮化物。

2. 碳化物形成元素

碳化物形成元素包括 Fe、Mn、Cr、W、Mo、V、Nb、Zr、Ti 等。它们都是过渡族元素。碳化物是钢中主要的强化相，故重点讨论之。

(1) 形成碳化物的规律性。从周期表中的位置来看，碳化物形成元素 (Ti、V、Cr、

Cr、Mn、Zr、Nb、Ti、W、Mo等)均位于Fe的左侧,而非碳化物形成元素(Ni、Si、Co、Al、Cu)等均处于周期表的右侧。本来Ni和Co也可形成独立的碳化物,但由于其稳定性很差(比 Fe_3C 还小),在钢中不会出现,故通常被当作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电子愈是不满,形成碳化物的能力就愈强,即与碳的亲合力愈大,所形成的碳化物也就愈稳定。

应该指出,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。例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稳定性。一般说来,碳化物的生成热愈大,其稳定性就愈高。

按照碳化物形成元素所生成的碳化物稳定程度由强到弱的顺序,可将这些元素依次排列为:Ti、Zr、Nb、V、Mo、W、Cr、Mn、Fe。

按照碳化物晶格类型的不同,碳化物可分为两类:

① 当 $r_{\text{C}}/r_{\text{Me}} > 0.59$ (其中 r_{C} 为碳原子半径, r_{Me} 为合金元素的原子半径) 时,碳与合金元素形成一种复杂点阵结构的碳化物。Cr、Mn、Fe 属于这类元素,它们形成下列形式的碳化物: Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 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 均属于此类元素,它们形成的碳化物是:

MeX 型: WC、VC、TiC、NbC、TaC、ZrC。

Me_2X 型: W_2C 、 Mo_2C 、 Ta_2C 。

此类碳化物具有下列特点:碳化物硬度大、熔点高(可高达 3000°C),分解温度高(可高达 1200°C);间隙相碳化物虽含有 $50\% \sim 60\%$ 的非金属原子,但仍具有明显的金属特性;可以溶入各类金属原子,呈缺位溶入固溶体形式,在合金钢中常遇到这类碳化物。

实际上钢中的碳化物,除上述两种类型以外,在某些条件下,还可出现下述两种情况:一种是当合金元素含量很少时,合金元素将不能形成自己特有的碳化物,只能置换渗碳体中的Fe原子,常以合金渗碳体的形式出现,如: $(\text{FeCr})_3$ 、 $(\text{FeMn})_3\text{C}$ 等;另一种是合金元素含量有所升高,但仍不足以生成自己特有的碳化物,这时将生成具有复杂结构的合金碳化物,如: $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 等。

除去含量条件以外,保证元素在钢中的扩散也是形成碳化物的必要条件。因此,碳化物的形成过程与热处理工艺有着极为密切的关系。

(2) 碳化物的特性。如果将纯金属和碳化物的硬度作比较,便可看出碳化物的强化能力是很大的,如表 1.1 所示。形成碳化物倾向性愈强的元素,其碳化物硬度也愈高。

另外,碳化物是一种很重要的强化相,形成碳化物能力愈强的元素,其碳化物稳定性愈高。稳定的碳化物具有高熔点、高分解温度,难于溶入固溶体,因而也难以聚集长大。其碳化物稳定性由弱到强的顺序是: Fe_3C 、 M_{23}C_6 、 M_6C 、MC。

表 1.1 纯金属与碳化物的硬度 (HV)

Ti	Nb	Zr	V	Mo	W	Cr	α -Fe	
230	300	300	140	350	400	220	80	
TiC	NbC	ZrC	VC	MO ₂ C	WC	Cr ₂₃ C ₆	Fe ₃ C	
3 200	2 055	2 840	2 094	1 480	1 730	1 650	860	

如果碳化物稳定性高, 在温度和应力长期作用下不易聚集长大, 则可大大提高材料的性能和使用寿命。稳定性的另一个含义是指碳化物和固溶体(基体)之间不易在高温下因原子扩散作用而发生合金元素的再分配。

碳化物的稳定性对于钢的热强性也很重要。首先碳化物可使钢在更高的温度下工作并保持其较高的强度和硬度。其次在达到相同硬度的条件下, 碳化物稳定性高的钢可以在更高的温度下回火, 使钢的塑性、韧性更好。所以合金钢的综合性能比碳钢好。

各种碳化物虽然像一般化合物一样, 可以写成元素间有一定配比的分子式, 但是正因为碳化物具有金属的特性, 所以并不像普通的酸、碱、盐那样在成分上很固定, 而是常常以其分子式所代表的化合物为基底, 固溶入各种合金元素, 即合金元素在碳化物中有一定的溶解度。例如 Fe_3C 能溶解大量的合金元素。据报导, Fe_3C 中可溶解的 Cr 量达 25%。而 Mn 在 Fe_3C 中的溶解度是无限的, 即随 Mn 含量的不断增加, 可由 Fe_3C 变为 $(\text{FeMn})_3\text{C}$, 直到 Mn_3C 。 $(\text{FeW})_3\text{C}$ 的成分随 W 量增加可变为 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 。即使是间隙型碳化物的成分也不是很固定的。

合金元素与碳的相互作用具有重大的实际意义。一方面它关系到所形成碳化物的种类、性质和在钢中的分布。而所有这些都会直接影响到钢的性能, 如钢的强度、硬度、耐磨性、塑性、韧性、红硬性和某些特殊性能。同时对钢的热处理亦有较大影响, 如奥氏体(A)化温度和时间, A 晶粒的长大等。另一方面由于合金元素与碳有着不同的亲和力, 对相变过程中碳的扩散速度亦有较大影响; 强碳化物形成元素阻碍碳的扩散, 降低碳原子的扩散速度; 弱碳化物形成元素 Mn 以及大多数非碳化物形成元素则无此作用, 甚至某些元素如 Co 还有增大碳原子扩散的作用。因而合金元素与碳的作用对钢的相变有重要的影响。对此后叙章节有专门讨论, 这里不再叙述。

三、合金元素对奥氏体(A)层错能的影响

奥氏体层错能是一个很重要的参量。有关层错能的概念在金属学中已有介绍, 这里不再赘述。

奥氏体层错能对于钢的组织 and 性能有重大影响。一般认为层错能愈低, 愈有利于位错扩展和形成层错, 使滑移困难, 导致钢的加工硬化趋势增大。例如高 Mn 钢和高 Ni 钢都是奥氏体型钢, 但加工硬化趋势相差很大。高 Ni 钢易于变形加工, 而高 Mn 钢难于变形加工。造成这种性能差异的原因乃是由于 Ni 和 Mn 对奥氏体层错能的影响不同所致。

目前有关合金元素对奥氏体层错能的影响规律尚不完全清楚。但对以下几种合金元素的影响趋势的看法是一致的。Ni、Cu 和 C 等元素使奥氏体层错能提高, 而 Mn、Cr、