

高等专科学校试用教材

合金钢及热处理工艺学

李慧芳 萧振荣 沈济万 编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

合金钢及热处理工艺学

李慧芳 萧振荣 沈济万 编



机械工业出版社

合金钢及热处理工艺学

李慧芳 萧振荣 沈济万 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{1}{4}$ · 字数 370 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—4,600 · 定价 3.20元

*

统一书号: 15033 · 6131

前 言

本书是高等专科学校金属热处理专业的试用教材。是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生、学制为三年的教学大纲组织编写的。

全书主要内容有：钢的合金化基本原理及合金钢的热处理理论；常用结构钢及其零件的热处理；常用工具钢及工具的热处理以及特殊性能钢和热处理工艺设计基础等。

本教材也适用于职工大学、业余大学、中等专业学校学生，并可供热处理专业的工程技术人员参考。

本书的第一、二、三、九、十、十一章由李慧芳编写；第四、五、十五、十六章由萧振荣编写；第六、七、八、十二、十三、十四章由沈济万编写。萧振荣对全书，特别是第二章第四节和第九章作了修改。

本书由南昌航空学院孔德淳主审。

由于我们水平有限，书中难免有不足和错误之处，殷切希望读者提出批评指正。

在编写过程中曾得到各方面同志的热情帮助和支持，在此一并致谢。

编 者

AAK 21/H

目 录

前言

第一篇 合金钢概论

第一章 合金钢的分类及编号	1
§ 1-1 合金钢的分类	1
一、按用途分类	1
二、按化学成分分类	2
三、按金相组织分类	2
四、按质量分类	2
§ 1-2 合金钢的编号	3
一、我国合金钢的编号原则	3
二、其它国家钢的编号简介	4
第二章 合金元素在钢中的作用	5
§ 2-1 合金元素与钢中铁、碳的作用	5
一、合金元素与铁的作用	5
二、合金元素与碳的作用	8
三、合金元素对铁碳相图的影响	10
§ 2-2 合金元素在钢中的存在形式与分布状态	12
一、合金元素在钢中的存在形式	12
二、合金元素在钢中(平衡状态)的分布	12
§ 2-3 合金元素对钢在热处理时组织转变的影响	13
一、合金元素对钢在加热时组织转变的影响	13
二、合金元素对过冷奥氏体转变的影响	14
三、合金元素对淬火钢回火转变的影响	21
§ 2-4 合金元素对钢机械性能的影响	28
一、合金元素对组成相性质的影响	28
二、合金元素对组织状态的影响	29
三、合金钢在淬火、回火状态下的机械性能	30
四、合金元素对钢的冷脆倾向的影响	31
第三章 合金钢的冶金缺陷	32
§ 3-1 影响合金钢冶金缺陷的基本因素	32

§ 3-2 白点	32
一、白点的特征	32
二、白点的危害性	32
三、白点形成的规律	33
四、白点形成的原因	33
五、防止白点的方法	34
§ 3-3 带状组织	35
一、带状组织的特点	35
二、带状组织的危害性	35
三、带状组织的形成原因及改善措施	35
§ 3-4 层状断口	36

第二篇 结构钢及其零件热处理

概述	37
一、对结构钢的基本性能要求	37
二、机器结构钢的分类	37
三、机器结构钢的合金化	38
第四章 调质钢及其典型零件热处理	39
§ 4-1 对调质钢的基本性能要求	39
一、调质零件的服役条件	39
二、对调质钢的基本性能要求	39
§ 4-2 调质钢的化学成分特点与热处理特点	40
一、化学成分特点	40
二、热处理特点	41
§ 4-3 常用调质钢	42
一、低淬透性调质钢	43
二、中淬透性调质钢	51
三、高淬透性调质钢	55
四、含铝渗氮专用钢	57
§ 4-4 典型调质零件热处理	58
一、汽车半轴的热处理	58
二、连杆热处理	65
三、机床主轴的热处理	70
第五章 渗碳钢及其典型零件热处理	74
§ 5-1 对渗碳钢的基本性能要求	74

VI

一、热锻模具用钢及热锻模的热处理	168
二、压铸模具用钢及压铸模的热处理	174
§ 10-3 模具的热处理变形和提高模具寿命的途径	177
一、模具的热处理变形及减小变形的措施	177
二、模具变形的校正	178
三、提高模具使用寿命的途径	179
第十一章 量具用钢及量具的热处理	180
§ 11-1 量具的服役条件及其对用钢的性能要求	180
§ 11-2 量具用钢	180
一、量具用钢的化学成分特点	180
二、量具用钢的选择	181
§ 11-3 量具的热处理	181
一、量具热处理的工艺特点	181
二、典型量具的热处理	181

第四篇 特殊性能钢

第十二章 不锈钢耐酸钢	183
§ 12-1 不锈钢耐酸零件的服役条件及其对性能的要求	183
§ 12-2 金属腐蚀的基本概念	183
一、化学腐蚀和电化学腐蚀	184
二、金属腐蚀的类型	185
三、提高金属耐腐蚀性能的一般途径	185
§ 12-3 合金元素对不锈钢组织和性能的影响	186
一、铬的影响	186
二、碳的影响	186
三、镍的影响	186
四、锰和氮的作用	187
五、钛和铌的作用	187
§ 12-4 不锈钢耐酸钢的分类及其热处理	187
一、铁素体不锈钢	188
二、马氏体不锈钢	190
三、奥氏体不锈钢	192
四、奥氏体-铁素体不锈钢	194
第十三章 耐热钢	195

§ 13-1 金属的抗氧化性能和抗氧化钢	195
一、金属的抗氧化性能	195
二、抗氧化钢	196
§ 13-2 金属的高温强度和热强钢	198
一、金属的高温强度	198
二、耐热钢的强化途径	199
三、热强钢	200
第十四章 其它特殊性能钢	204
§ 14-1 超高强度钢	204
一、概述	204
二、超高强度钢及其热处理	204
§ 14-2 高耐磨钢	210
一、高锰钢的成分、性能特点	210
二、高锰钢的热处理及应用举例	211
§ 14-3 磁性合金	212
一、硬磁材料及其热处理特点	213
二、软磁材料及其热处理特点	215

第五篇 热处理工艺设计基础

第十五章 热处理工艺设计的原则和步骤	219
§ 15-1 热处理工艺设计的基本概念	219
一、全厂加工路线与热处理在其中的位置	219
二、热处理工艺的组成	220
三、热处理工艺规程	220
§ 15-2 热处理工艺设计的依据和步骤	221
一、热处理工艺设计的原始资料	221
二、热处理工艺设计的原理	221
三、热处理工艺设计的步骤和方法	222
第十六章 热处理工艺文件及其它	225
§ 16-1 热处理工艺文件	225
一、热处理工艺卡片	225
二、热处理工艺守则	225
§ 16-2 热处理工艺与零件结构设计及其它冷热加工的关系	226
一、热处理工艺与零件结构形状的关系	226
二、热处理与冷热加工和切削加工的关系	226
附录 世界各国钢号表示方法	232

第一篇 合金钢概论

随着工业生产和科学技术的发展，对钢的性能提出越来越高的要求，碳素钢在机械性能、耐热、耐磨、不锈钢耐酸以及某些物理化学性能和工艺性能等方面不能满足使用要求。为了满足使用上的需要，就必须在冶炼过程中特意在钢中加入一定量的某一种或几种元素进行合金化。这种为了合金化目的而加入并且其含量有一定范围的元素称为合金元素，这种钢称为合金钢。

不管加入的元素是具有金属性质的铬、镍，还是具有非金属性质的硅、硼等，也不管加入量是多达20~30%（铬、镍），还是只有1~2%（锰、硅），乃至只有0.005%（硼），只要是作为提高钢的某些性能而特意加入的元素，都属于合金元素。

目前钢中常加入的元素有：硅、锰、铬、镍、钨、钼、钒、钛、铌、锆、铝、钴、氮、硼、稀土元素等。不同国家常用的合金元素与各国的资源条件有很大的关系。例如，钼、钨、钒、硅、锰、硼、稀土元素等是我国的富产元素，因此，目前我国合金钢的生产已建立起符合我国资源条件的独立的合金钢体系。

第一章 合金钢的分类及编号

合金钢的种类很多，为了便于选用、管理和研究，首先应该根据钢种在某一方面具有的共性，把钢种划分为若干类，而每一类钢所包含的每一钢种，都要冠以一定的钢号作为标志。钢号的表示方法与钢种的分类方法有着密切的关系，现分别讨论如下。

§ 1-1 合金钢的分类

合金钢的分类方法很多，最常见的有以下几种。

一、按用途分类

我国合金钢的部颁标准一般都是按用途分类编制的。

按钢的用途可划分为：结构钢、工具钢、特殊用途钢三大类。

（一）结构钢

用于制造各种机器零件及钢铁结构。结构钢可分为：

1. 建筑工程用钢 属于这类钢的有普通碳素钢、普通低合金钢、低合金高强度钢，这类钢很大一部分是做成钢板和型钢。
2. 机器制造用钢 属于这类钢的有调质钢、渗碳钢、渗氮钢、弹簧钢、轴承钢等。

（二）工具钢

用于制造各种工具。工具钢可分为：

1. 刃具钢 属于这类钢的有碳素刃具钢、合金刃具钢和高速钢。
2. 模具钢 有冷变形模具钢和热变形模具钢。
3. 量具钢。

(三) 特殊用途钢

具有各种特殊物理、化学性能。特殊性能钢又可分为：

1. 不锈钢耐酸钢。
2. 耐热钢。
3. 磁钢。
4. 耐磨钢。
5. 超高强度钢。

二、按化学成分分类

(一) 按合金元素的种类可以分为铬钢、锰钢、硼钢、硅锰钢、铬镍钢等。

(二) 按合金元素总含量分为三类

1. 低合金钢 合金元素总含量 $\leq 5\%$ 。
2. 中合金钢 合金元素总含量 $> 5\sim 10\%$ 。
3. 高合金钢 合金元素总含量 $> 10\%$ 。

三、按金相组织分类

(一) 按照平衡状态或退火组织分类，可以分为亚共析钢、共析钢、过共析钢和莱氏体钢。

(二) 按照正火组织分类，可以分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢和奥氏体钢，但由于空冷的速度随钢材尺寸大小而不同，所以这种分类方法不是绝对的。

(三) 按加热及冷却时有无相变和室温时的金相组织分类

1. 铁素体钢 加热和冷却时，始终保持铁素体组织。
2. 奥氏体钢 加热和冷却时，始终保持奥氏体组织。
3. 复相钢 如半铁素体钢或半奥氏体钢。

四、按质量分类

根据钢中所含杂质的多少，工业用钢通常分为普通钢、优质钢和高级优质钢。

(一) 普通钢

含硫量 $\leq 0.05\%$ ；含磷量 $\leq 0.055\%$ 。

(二) 优质钢

在结构钢中，含硫量 $\leq 0.045\%$ ，含磷量 $\leq 0.04\%$ ；在工具钢中，含硫量 $\leq 0.03\%$ ，含磷量 $\leq 0.035\%$ 。

(三) 高级优质钢

钢中含硫量 $\leq 0.02\%$ ，含磷量 $\leq 0.03\%$ ，合金钢一般都属于这类钢。

上述五种分类方法，主要是为了方便和实际需要，因此同一种钢，可以根据其不同方面的特点，划归不同类型。例如：轴承钢，按用途特点可以归于结构钢；按成分分类归于高碳铬钢；按质量分类属高级优质钢；按退火组织分类是过共析钢。

§ 1-2 合金钢的编号

一、我国合金钢的编号原则

我国的合金钢是按钢的含碳量以及所含合金元素的种类和数量来编号的，这种编号方法可以从钢号上直接看出钢种大概的化学成分及质量等级，比较简单醒目，也便于书写识别。

我国国家标准（GB）中，化学元素采用汉字或国际化学符号表示，例如“碳”或“C”“锰”或“Mn”，“铬”或“Cr”……等。

（一）机械制造用合金结构钢的牌号表示方法

1. 钢的含碳量一律以平均含碳量的万分之几表示。钢中主要合金元素含量以百分之几表示。当合金元素的含量小于1.5%时，钢号中只标明元素（汉字名称或化学符号），而不表明含量；当其含量等于或大于1.5%、2.5%、3.5%……等时，在元素后面注出其近似含量，可相应地写为2、3、4等。例如25Mn2V，表示是一种平均含碳量为0.25%，含锰量 $\geq 1.5\%$ ，又含少量钒的合金结构钢。

2. 合金结构钢中的钼、钒、钛、铝、硼、稀土等合金元素，虽然含量很低，但仍应在钢号中标出。例如平均含碳为0.2%，含锰量为1.00~1.3%，含钒量为0.07~0.12%，含硼量为0.001~0.005%的钢，钢号应表示为“20MnVB”。

3. 为区别高级优质钢和优质钢，在高级优质钢的钢号末尾加注“高”或“A”。

（二）合金工具钢的牌号表示方法

1. 合金工具钢平均含碳量大于或等于1.00%时，含碳量不予标出，例如含碳量为1.30~1.50%，含锰量为0.45~0.75%，含铬量为1.30~1.60%的钢，其钢号应为“铬锰”或“CrMn”。当含碳量小于1%时，以千分之几表示。例如9Mn2V钢的含碳量为0.85~0.95%。

2. 合金工具钢中合金元素的表示方法基本上与合金结构钢相同，但对含铬量低的合金工具钢，其含量也以千分之几表示；但在含量之前加个“0”字，例如含铬量为0.6%的合金工具钢，其牌号写为“铬06”或“Cr06”。

3. 高速工具钢的钢号中不必标出含碳量，一般只标出合金元素平均含量的百分之几。例如钢号为“W18Cr4V”的高速钢，其中钨的平均含量为18%；铬的平均含量为4%；而含碳量仅在0.70~0.80%之间。

（三）特殊用途钢的牌号表示方法

表示方法与合金工具钢相同，含碳量仍以千分之几表示，例如“4Cr9Si2”，其相应含碳量为0.4%。

应该指出，这类钢一般含碳量都很低，通常在牌号中不予表示，仅表示合金元素及其相应含量，如Cr17Ni2，其含碳量为0.11~0.17%，含铬量为16.0~18.0%，含镍量为1.5~2.5%。遇有合金元素含量相同而碳量不同时，则其含碳量仍以千分之几表示。例如“0Cr13”，“1Cr13”，“2Cr13”……等，它们的含碳量相应为 $\leq 0.08\%$ 、 $\leq 0.15\%$ 、0.16~0.24%……等。

某些特殊用途钢在钢号前冠以表示用途的汉字或拼音的第一个字母，以示区别。如磁钢前加“磁”或“C”，焊条钢前加“焊”或“H”，等等，详见有关标准。

（四）滚动轴承钢的牌号表示方法

滚动轴承钢钢号的含碳量不予标出，含铬量以千分之几表示，并冠以用途名称，以“G”表示滚动轴承钢，例如平均含铬量为1.5%的轴承钢，钢号表示为“GCr15”。

二、其它国家钢的编号简介

目前世界各国的钢种编号方法虽然多种多样，但归纳起来，可以大致分为四类：

1. 用本国文字字母代表化学元素名称，钢号中表示出钢中的主要成分和它们的平均含量。如苏联、波兰、朝鲜等国的方法。
2. 用国际化学符号代表化学元素名称，钢号中表示出钢中的主要成分和它们的平均含量，如中国、德意志民主共和国和匈牙利等国的方法。
3. 用数字表示钢号，只表示出钢的部分成分，如美国对结构钢和不锈钢耐热钢的命名方法。
4. 用拉丁字母和顺序号组成钢号，只表示钢的用途而不表明它们的化学成分，如日本和英国的方法。

世界一些主要国家的钢号表示方法见附录一。

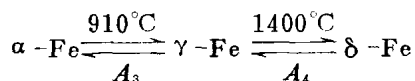
第二章 合金元素在钢中的作用

§ 2-1 合金元素与钢中铁、碳的作用

铁和碳是钢的基本组元。合金元素加入钢中以后，对钢的组织、相变和性能的影响常取决于它与铁、碳的相互作用，因此在研究合金元素在钢中的作用时，首先应当研究合金元素与铁和碳的作用。

一、合金元素与铁的作用

纯铁在加热和冷却过程中具有同素异构转变，并且转变是在恒温下进行的。如：



由于合金元素的加入，使同素异构转变不在恒温下进行，而在一个温度范围内完成，并且使转变温度 A_3 和 A_4 升高或降低。此外，由于 $\alpha\text{-Fe}$ ($\delta\text{-Fe}$) 和 $\gamma\text{-Fe}$ 在晶体结构上有差异，因此合金元素在它们中溶解度也不同。正因为如此，加入不同的合金元素，Fe-Me (Me代表合金元素) 二元状态图的形式便随之而异。按合金元素与铁所组成的二元相图类型，可将合金元素分为两大类。

(一) 扩大 γ 相区的元素

这类元素的共同特点是使 A_3 点下降， A_4 点上升，这就使形成 γ 相区的温度区间扩大了。合金元素含量越多， A_3 和 A_4 的距离越大 (但有例外，钴含量增加时， A_3 点不断上升。至大约

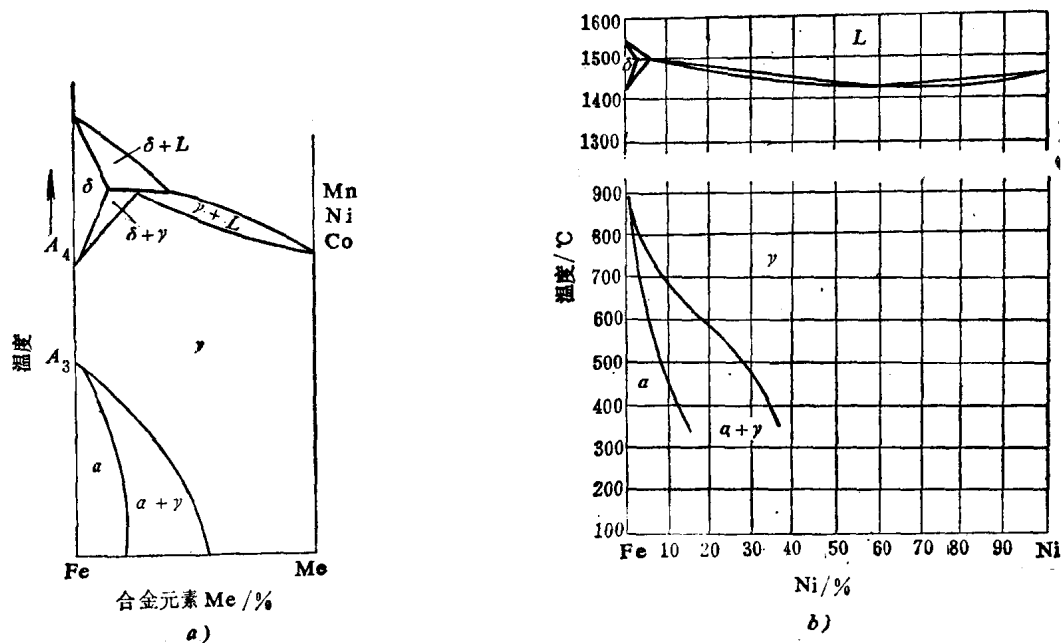


图2-1 开启 γ 相区的Fe-Me相图示意图 a) 及Fe-Ni相图 b)

超过 45% 后, A_3 点开始下降)。根据合金元素扩大 γ 相区的程度不同, 又可分为如下两组:

第一组: 开启 γ 相区, 如镍、锰、钴、铂、铌等, 能与 γ -Fe 形成无限固溶体, 当合金含量超过某一限度后, 可以在室温下得到稳定的 γ 相, 如图 2-1 所示。这类元素被称为开启 γ 相区的合金元素。

第二组: 扩大 γ 相区, 如碳、氮、铜等元素, 它们虽然使 γ 相区扩大, 但与 γ -Fe 是有限溶解。当元素含量较高时, 形成稳定的化合物, 因而限制了 γ 相区向右方向扩展, 不能使之最终完全开启, 如图 2-2 所示。这类元素就称为扩大 γ 相区元素。

(二) 缩小 γ 相区的元素

这类合金元素随着加入量的增加, 使 A_3 点升高, A_4 点下降 (但有例外。例如铬含量 $< 7\%$ 时, A_3 点下降, $> 7\%$ 后 A_3 点上升)。这样形成 γ 相区的温度区间就被缩小了, 根据铁与合金元素构成相图的不同, 同样又可分为两组。

第一组: 封闭 γ 相区, 这类元素使 A_3 升高, A_4 下降, 当含量到达一定量时, A_3 、 A_4 汇合, γ 相区被一个月牙形的 $\gamma + \alpha$ (δ) 两相区所封闭而最后消失, 如图 2-3 所示。属于这类元素有钒、铬、钛、钨、钼、铝、硅、磷等。其中铬、钒与 α -Fe 无限固溶。其余都与 α -Fe 有限溶解。

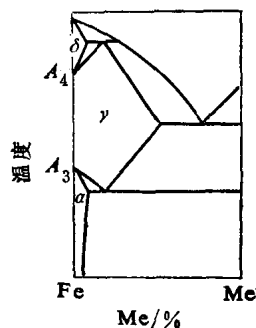


图2-2 扩大 γ 相区的 Fe-Me 相图示意图

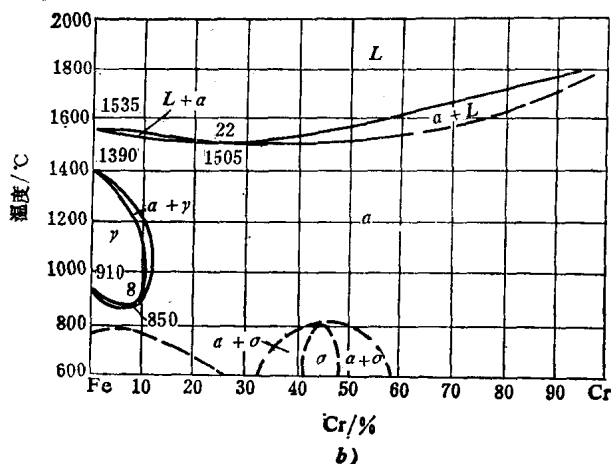
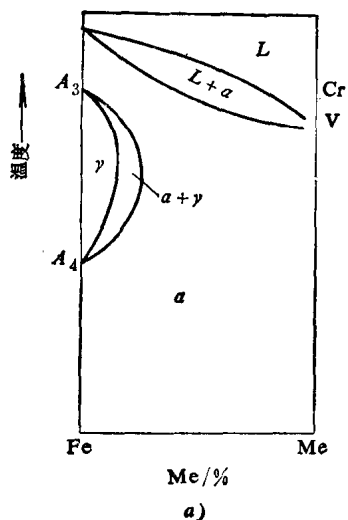


图2-3 封闭 γ 相区并与 α -Fe 无限互溶的 Fe-Me 相图示意图 a) 及 Fe-Cr 相图 b)

第二组: 缩小 γ 相区, 这类元素虽然也使 A_3 点上升, A_4 点下降, 但由于出现了金属间化合物, 不能使 γ 相区呈封闭状态, 只是使其缩小。属于这类元素的有硼、锆、铌、钽、锶等, 如图 2-4 所示。

按照合金元素对铁同素异构转变的影响及其在 α -Fe 和 γ -Fe 中的溶解能力, 将常用的合金元素分类列于表 2-1。

应该指出的是, 在上述各铁基二元合金中, 元素除溶于 γ -Fe 或 α -Fe 以外, 当合金元素的含量超过形成固溶体的溶解限度时, 则常与铁形成金属间化合物。此问题将在后续有

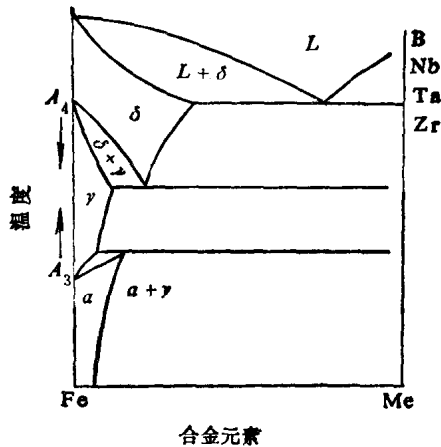
图2-4 缩小 γ 相区的Fe-Me相图示意图

表2-1 按元素与铁的相互作用分类

		与 γ -Fe 完全互溶	与 γ -Fe 部分互溶	与 α -Fe 完全互溶	与 α -Fe 部分互溶
扩大 γ	完全开启	Mn, Ni, Co	—	—	Mn, Ni, Co
相区	部分扩大	—	C, N, Cu	—	C, N, Cu
缩小 γ	完全封闭	—	Si, Al, BeMo, W, Ti, Cr, V	Cr, V	Si, Al, MoTi, W
相区	部分缩小	—	B, Zr, Nb	—	B, Zr, Nb, Ta

关章节中阐述。

(三) 合金元素与铁作用的规律及解释

关于合金元素与铁之间的各种作用，一般认为是由于合金元素的点阵类型、尺寸因素（合金元素与铁的原子半径之比）和电化学因素（原子的电子层结构及其相互作用）共同作用的结果。

1. 点阵类型 具有面心立方点阵结构的元素，一般都能扩大 γ 相区；具有体心立方点阵结构的元素，一般都封闭或缩小 γ 相区。

2. 尺寸因素 一般说来，合金元素与铁的原子直径之差在8%以下时，才可能形成无限置换固溶体（这一条只是必要的，而不是充分的）；差值在8~15%时形成有限置换固溶体；差值大于20%时，则不相溶。

3. 电化学因素 从对铁的 γ 相区的作用看，在同一周期，随着元素的原子序数的增高，由缩小 γ 相区类型变化到扩大 γ 相区类型。一般说来，3d层电子数 ≤ 5 的元素是缩小 γ 相区的，而3d层电子数 ≥ 5 的元素是扩大 γ 相区的。

例如镍、钴、锰不仅与 γ -Fe的晶体点阵相同，同时电化学性质很接近（在周期表中位置很靠近），而且原子半径与 γ -Fe的原子半径相差很小。因此它们与 γ -Fe可以形成无限固溶体，具有开启或扩大 γ 相区的作用。但也有例外，比如铜虽然具有面心立方点阵，且原子半径又与 γ -Fe相近，但却不能无限溶于 γ -Fe。

碳和氮的原子半径特别小，可与铁形成间隙固溶体，但铁的晶体点阵中的间隙是有限的，故均为有限固溶体。由于 γ -Fe的间隙尺寸比 α -Fe的大，碳、氮元素在 γ -Fe中的溶解度均大于在 α -Fe中的溶解度，故起着扩大 γ 相区的作用。

在缩小 γ 相区的元素中，除铝和硅外均为体心立方点阵，与 α -Fe相同，但由于大多数元素的原子直径与铁原子的差别较大，故多形成有限固溶体。只有铬、钒不但与 α -Fe的点阵相同而且原子半径也很接近，故与 α -Fe形成无限固溶体，起着封闭或缩小 γ 相区的作用。

硼溶于铁中形成间隙固溶体或置换固溶体时都会使点阵发生很大的畸变。形成间隙固溶体（硼在 γ -Fe中可形成间隙固溶体）时，它将引起点阵很大的膨胀；形成置换固溶体（硼在 γ -Fe或 α -Fe中都可形成置换固溶体）时，点阵有很大的收缩，所以硼不论在 γ -Fe或 α -

-Fe中都只有较小的溶解度。

应当指出,目前有些问题还尚未了解清楚,例如,铝具有面心立方点阵,但它却缩小 γ 相区,而在 α -Fe中却有较大的溶解度,这说明有些因素的影响相当复杂,还有待于进一步研究。

二、合金元素与碳的作用

(一) 非碳化物形成元素与碳化物形成元素

根据合金元素在钢中与碳的相互作用,可将合金元素分为两大类。

1. 非碳化物形成元素 包括镍、硅、钴、铝、铜、氮等。它们在钢中不能与碳形成碳化物,只能溶于铁中形成固溶体,或者形成其它化合物,如氮可与铁或钢中其它元素形成氮化物;又如硅不仅不能与碳形成碳化物,反而在碳含量高的钢中能促进碳化物分解为石墨,即有所谓石墨化作用。这类元素被称为“非碳化物形成元素”。

2. 碳化物形成元素 包括钛、锆、铌、钒、钼、钨、铬、锰及铁等。它们在钢中均可与碳作用形成碳化物,被称为“碳化物形成元素”。这类元素都是过渡族元素,分别属于第4、5、6长周期的IVB、VB、VIB族,如表2-2所示。

表2-2 过渡族元素原子的d层电子数

族 周 期	IV B	VB	VIB	VIB	VII		
4	Ti(钛) $3d^2 4s^2$	V(钒) $3d^3 4s^2$	Cr(铬) $3d^5 4s^1$	Mn(锰) $3d^5 4s^2$	Fe(铁) $3d^6 4s^2$	Co(钴) $3d^7 4s^2$	Ni(镍) $3d^8 4s^2$
5	Zr(锆) $4d^2 5s^2$	Nb(铌) $4d^4 5s^1$	Mo(钼) $4d^5 5s^1$	Tc(锝) $4d^5 5s^2$			
6	Hf(铪) $5d^2 6s^2$	Ta(钽) $5d^3 6s^2$	W(钨) $5d^4 6s^2$	Re(铼) $5d^5 6s^2$			

过渡族元素所以能与碳形成相当稳定的碳化物,是因为它们的原子都有一个未填满的d电子层,当金属和碳结合时,碳首先将其价电子填入金属原子未填满的d电子层,形成碳化物。在周期表中,铁左边的过渡族金属,凡离开铁越远的,则d层电子越不满,因而与碳的亲合力越强,愈容易形成碳化物,而且形成的碳化物愈稳定。根据形成的碳化物的稳定程度,可将它们由强至弱的顺序排列如下:



一般认为钛、锆、铌、钒是强碳化物形成元素;钨、钼、铬是中强碳化物形成元素;锰和铁则属弱碳化物形成元素。在合金钢中若有多种碳化物形成元素同时存在,一般强碳化物形成元素优先与碳结合形成相应的碳化物。

(二) 碳化物的结构

合金元素与碳形成的碳化物种类很多,按照晶体点阵型式不同可将碳化物分为两大类。

1. 简单点阵碳化物 碳原子半径(r_c)/金属原子半径(r_m) <0.59 时,形成简单点阵的碳化物,即间隙相。这类碳化物有简单立方点阵的TiC、ZrC、VC、NbC、TaC等以及六方点阵的W₂C、Mo₂C、WC、MoC等。碳原子半径很小,能存在于金属原子的间隙中。

间隙相的特点是稳定性高,与其它碳化物相比,在热处理时不易溶于奥氏体而难于参加

相变。它们的熔点及分解温度都很高，硬度也很高，如表 2-3 所示。

表2-3 钢中常见的碳化物的结构与性能

金属	原子半径比 r_c/r_{Me}	碳化物	点阵类型	点阵常数/ 10^{-10}m	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	显微硬度(50 g)
Fe	0.61	Fe_3C	正交晶系	$a = 4.518$ $b = 5.069$ $c = 6.736$	1650	$\sim 860(\text{HB})$
Mn	0.6	Mn_3C	正交晶系	$a = 4.519$ $b = 5.08$ $c = 6.734$	1520	—
Cr	0.6	Cr_7C_3	复杂六方	$a = 13.98$ $c = 4.532$	1665	2100
V	0.57	Cr_{23}C_6	复杂立方	$a = 10.6$	1550(分解)	1650
Mo	0.56	VC	面心立方	$a = 4.13$	2830	2100
		Mo_2C	密集立方	$a = 3.0$ $c = 4.72$	2700	1480
		MoC	简单六方	$a = 2.898$ $c = 2.809$	2700	—
W	0.55	$\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$	复杂立方	$a = 11.05$	—	—
		W_2C	密集六方	$a = 2.98$ $c = 4.71$	2570	3000
		WC	简单六方	$a = 2.90$ $c = 2.831$	2600(分解)	1730
		$\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$	复杂立方	$a = 11.04$	—	~ 1000
Ti	0.53	TiC	面心立方	$a = 4.32$	3200	2850
Nb	0.53	NbC	面心立方	$a = 4.461$	3500	2055
Ta	0.52	TaC	面心立方	$a = 4.445$	3875	1800
Zr	0.48	ZrC	面心立方	$a = 4.687$	3550	2700

2. 复杂点阵碳化物 当 $r_c/r_{Me} > 0.59$ 时，不形成间隙相，而形成一种晶格复杂的碳化物，这种晶格是由按照严格规律定位的金属离子和碳离子所构成的。铁、锰、铬属于这类元素，它们形成下列形式的碳化物： Fe_3C （正交点阵）， Cr_7C_3 （三角点阵）， Cr_{23}C_6 （复杂立方点阵）等。这类碳化物的特点是：熔点和硬度，较简单点阵碳化物为低，稳定性也较差，易于参与奥氏体相变（加热时溶入奥氏体，增加了奥氏体的稳定性），见表 2-3。

碳化物的结构与金属元素在周期表中的位置有密切的联系，如图 2-5 所示。第 IV 族和 V 族元素形成稳定的立方晶系 MeC 型碳化物。VI 族的铬、钼、钨主要形成六方晶系的碳化物。VII 和 VIII 族元素主要形成正交晶系的碳化物。其中铬、锰处于过渡型，其碳化物三种晶系均有。

应当指出：

(1) 以上讨论的是合金元素与碳形成二元碳化物的情况。当钢中有多种碳化物形成元素同时存在时，可形成含有多种元素的复合碳化物。如：含钨的钢中出现 Me_3C 型的三元碳化物 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ （或 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ ）；在高碳的含有锰、铬的钢中出现渗碳体型的碳化物（ Fe 、 Mn 、 Cr ） $_3\text{C}$ ，这种碳化物叫合金渗碳体。

(2) 钢中各种碳化物之间可以相互溶解。影响其溶解度的因素仍然是点阵类型、尺寸

族	IVB	VB	VB	VIB	VIII
周期					
4	TiC	VC	$Cr_{23}C_6$	$Mn_{23}C_6$	Fe_3C
			Cr_7C_3	Mn_7C_3	
			Cr_3C_2	Mn_3C	
5	ZrC	NbC	MoC		
			Mo_2C		
6	HfC	TaC	WC		
		Ta_2C	W_2C		

— 立方点阵

— 正交点阵

— 六方点阵

图2-5 碳化物的结构和其组成元素在周期表中位置的关系

因素和电化性质。

若两种碳化物点阵类型相同，碳化物中金属原子的外层电子结构相近、原子直径之差在8%以下，碳化物之间就能完全互溶，金属原子之间就可以任意置换。例如在含锰的钢中， Fe_3C 中的铁原子可以任意被锰原子置换而形成 $(Fe, Mn)_3C$ 。又如TiC与VC可无限互溶成 $(Ti, V)C$ ，等等。若上述三个因素中有一个不能满足，则碳化物之间就只能有限互溶。例如在 Fe_3C 中只能有限溶解铬、钼、钨、钒等元素。又如在 $Cr_{23}C_6$ 中也只能有限地溶解铁、钼、钨、锰等元素。

(3) 一种元素能在钢中形成几种碳化物时，则在钢中出现的碳化物类型取决于该元素与碳的原子数量比（在亚稳定状态时，还与热处理的规范有关）。例如在铁-铬-碳系合金中，对于不同含铬量和含碳量，可形成 $(Fe, Cr)_3C$ 、 $(Fe, Cr)_7C_3$ 或 $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 等类型的碳化物。

三、合金元素对铁碳相图的影响

了解合金元素对铁碳相图的影响对于我们分析合金钢在热处理过程中的组织变化和制订热处理工艺是很重要的。实际上合金钢系三元或多元合金，应该建立三元或多元状态图作为研究合金钢中组织和相变的基础，但由于三元或多元相图较为复杂，而分析Fe-Fe₃C平衡图的变化最为直观。因此通常以铁碳相图出发点，分析合金元素对它的影响，来粗略地了解合金元素的作用。

(一) 对奥氏体相区的影响

铁碳相图中的奥氏体相区即NJESG区，合金元素加入以后，可使其扩大或缩小，锰与镍属于前者，铬、钨、钒、钛、硅等属于后者。如图2-6所示。值得注意的是，缩小奥氏体相区的合金元素当其含量超过某一临界值后，可使奥氏体相区完全消失。由图2-6a)可见铬的这一临界值约为19%。除铬外，钨约为12%；硅约为4.5%；钛约为1.0%。

(二) 对铁碳相图中S点和E点成分的影响

总的说来，凡能扩大γ相区的元素随其含量的增加，均将使S点及E点向左下方移动（如锰、镍等）；凡能缩小γ相区的合金元素随其含量的增加均将使S点及E点向左上方移