

TB3  
020286 4:2

# 工程材料

下 册

郑明新 主编



清华大学出版社

1983

## 编者的话

本书是根据我们几年来讲授《工程材料》课的教学材料编写的。

早先，我们只讲金属材料，但是几年来看到材料科学的迅速发展，考虑到在各类机器制造工业中塑料和陶瓷等非金属材料的应用日益增多，同时意识到在机器零件的选材和用材中失效分析的重要性，我们在传统的《金属材料 and 热处理》课程中增加了上述内容，并把课程改称为《工程材料》。

参照一些工业发达的国家关于《工程材料》著述的许多新写法，我们对过去讲授的材料课感到有必要从体系到内容上都作较大的改动。但是考虑到我国三十多年来业已形成的传统，以及先行课和后续课的配合，我们采取的办法是删减一点关于工艺和材料的某些冗长繁琐的陈述和有关各类转变细节的过多的描写，增加一些新的内容。显然，这只是一种简单的处理。因此这样编出的书的系统性和有机性以及内容的遴选都还需要继续通过实践不断总结提高，以求最后搞出一个适合我国情况的教本。

在本书金属材料部分的编写中，我们主要参考了1978年西安会议的大纲。个别章节的具体内容重点参考了史美堂主编的《金属材料及热处理》、吴培英主编的《金属材料学》和大连工学院编的《金属材料及热处理》。至于非金属材料 and 失效分析等新引进的内容，则是我们根据自己的教学体会主要参考国外的资料编写的。这是我们的第一次尝试，不一定全好，但希望能对课程的革新起到一点抛砖引玉的作用。


这本书主要是各类机器制造和机械设计类专业大学本科学生的机械材料课的教本，也可作选材和用材工作者的参考书。全书用60~64学时讲完，如果配合以实验和课堂讨论，全课需用74~78学时。

本书第一、二、三章由郑明新编写，第四章由张健编写，第五、十一、十二、十三章由梁光启编写，第六、十章由朱张校编写，第七章由田芝瑞编写，第八、十四、十五、十六章由曹维漆编写，第九章由王芸编写。全书由郑明新主编。在编写过程中得到了清华大学机械系金属学教研组和中央广播电视大学机械组的许多同志的指导和帮助，在此一并致谢！

由于编写的时间过于仓促，以及编者的水平不高，书中错误一定不少。恳祈广大读者和专家谅解并提出批评指教。

编者

# 目 录

<b>第一章 概 论</b> .....	1
第一节 工程材料及材料科学发展概况.....	1
第二节 物质的状态.....	2
第三节 固体中原子的结合键.....	5
一、离子键和离子晶体.....	6
二、共价键和共价晶体（原子晶体）.....	6
三、金属键和金属晶体.....	7
四、分子键（范特瓦尔斯力）和分子晶体.....	7
五、氢键及氢键晶体.....	8
第四节 固体材料的分类.....	9
一、金属材料.....	9
二、陶瓷材料.....	11
三、高分子材料.....	11
四、复合材料.....	12
	
<b>第二章 金属的结构</b> .....	13
第一节 金属的特性.....	13
第二节 金属的晶体结构.....	14
一、纯金属的典型晶体结构.....	14
二、金属晶体结构的一些重要概念.....	16
三、金属晶体中晶面和晶向的表示方法.....	19
四、金属晶体的各向异性.....	22
第三节 实际金属中的晶体缺陷.....	23
一、点缺陷.....	23
二、线缺陷.....	25
三、面缺陷.....	26
第四节 金属中的扩散.....	28
一、扩散的概念和机制.....	28
二、扩散定律.....	29
三、影响扩散的主要因素.....	31
<b>第三章 金属的结晶</b> .....	32
第一节 金属结晶的概念.....	32
一、结晶的概念.....	32
二、结晶的条件.....	32

三、过冷度·····	33
第二节 金属的结晶过程·····	34
一、结晶过程·····	34
二、晶核的生成·····	34
三、晶核的长大·····	35
四、晶体的长大方式·····	36
第三节 晶粒大小·····	38
一、晶粒度的概念·····	38
二、晶粒度的控制·····	38
第四节 铸锭的结构·····	39
一、铸锭结构的形成·····	39
二、铸锭结构的特性·····	40
三、铸锭的缺陷·····	40
<b>第四章 金属的塑性变形和再结晶·····</b>	<b>41</b>
第一节 金属的塑性变形·····	41
一、静拉伸试验和应力-应变曲线·····	41
二、金属塑性变形的基本方式·····	44
三、滑移与位错·····	48
四、实际金属的塑性变形·····	50
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响·····	52
一、加工硬化·····	52
二、金属组织和结构的变化·····	53
三、残余内应力·····	55
第三节 变形金属在加热时组织和性能的变化·····	56
一、回复与再结晶·····	56
二、再结晶温度与晶粒度·····	58
第四节 金属的热加工·····	60
一、热加工的概念·····	60
二、金属热加工时组织和性能的变化·····	61
<b>第五章 二元合金·····</b>	<b>63</b>
第一节 合金中的相·····	63
一、相的概念·····	63
二、合金相的形成条件及种类·····	64
三、固溶体·····	64
四、金属化合物·····	67
第二节 二元合金相图·····	68
一、相图概述·····	68
二、二元合金相图的建立·····	69
第三节 匀晶相图·····	70

一、相图特征及形成条件	70
二、合金的结晶过程及杠杆定理	71
三、枝晶偏析的产生与消除	72
第四节 共晶相图	73
一、相图特征及形成条件	73
二、典型合金的结晶过程	74
三、相图与组织组成物	77
第五节 包晶相图	78
一、相图特点及形成条件	78
二、结晶过程及组织特征	79
第六节 其它相图	79
一、形成稳定化合物的相图	79
二、共析相图	80
第七节 合金的性能与相图的关系	81
一、合金的使用性能与相图的关系	81
二、合金的工艺性能与相图的关系	81
<b>第六章 铁碳合金</b>	<b>83</b>
第一节 铁碳相图	83
一、铁碳合金的组元	85
二、铁碳合金中的相	86
三、相图中重要的点和线	86
第二节 典型铁碳合金的平衡结晶过程	88
一、工业纯铁	88
二、共析钢	89
三、亚共析钢	90
四、过共析钢	92
五、共晶白口铸铁	93
六、亚共晶白口铸铁	94
七、过共晶白口铸铁	96
第三节 铁碳合金的成分-组织-性能关系	98
第四节 Fe-Fe <sub>3</sub> C相图的应用和其局限性	100
一、铁碳相图的应用	100
二、铁碳相图的局限性	101
第五节 碳钢	101
一、碳钢中的常存杂质	101
二、碳钢的分类	102
三、碳钢的牌号及用途	103
<b>第七章 钢的热处理</b>	<b>107</b>
第一节 钢在加热时的转变	107

一、转变温度	107
二、奥氏体的形成	108
三、奥氏体晶粒大小及其影响因素	110
第二节 钢在冷却时的转变	113
一、过冷奥氏体的等温转变	113
二、过冷奥氏体的连续冷却转变	122
第三节 钢的退火和正火	124
一、退火	124
二、正火(常化)	127
第四节 钢的淬火	127
一、钢淬火过程中的马氏体转变	127
二、钢的淬火工艺	131
第五节 钢的回火	135
一、钢在回火时的组织转变	135
二、淬火钢回火后的组织和性能	136
三、回火的分类和应用	138
四、回火脆性	138
第六节 钢的淬透性	139
一、工件截面冷却速度和淬透层深度	139
二、影响钢淬透性的因素	141
三、淬透性的测定方法	141
四、淬透性曲线的应用	142
第七节 钢的表面热处理和化学热处理	146
一、钢的表面热处理	146
二、钢的化学热处理	147
三、各种表面热处理和化学热处理的比较	154
第八节 钢的热处理新技术	155
一、可控气氛热处理和真空热处理	155
二、变形热处理	158

二、机床零件的用材分析.....	352
三、汽车零件的用材分析.....	356
四、热能装置的用材分析.....	360
五、轴类零件的选材.....	363
六、齿轮类零件的选材.....	368
<b>主要参考文献</b> .....	<b>373</b>
<b>附录</b> .....	<b>376</b>
录附 I 强度指标换算表.....	376
附录 II 冲击韧性指标换算表.....	376
附录 III 钢热处理工艺的代号与技术条件的表示方法.....	377
附录 IV 有色金属及合金产品状态及其代号.....	377
附录 V 国内外常用钢号对照表.....	378

# 目 录

<b>第八章 合金钢</b> .....	161
<b>第一节 概论</b> .....	161
一、合金钢的种类及基本用途.....	161
二、合金钢的编号原则及方法.....	162
三、合金钢的发展趋势.....	163
<b>第二节 合金元素在钢中的作用</b> .....	164
一、合金元素对钢中基本相及其平衡关系的影响.....	164
二、合金元素对钢中相变过程的影响.....	167
三、合金元素对钢的机械和工艺性能的影响.....	170
<b>第三节 合金结构钢</b> .....	180
一、低合金高强度钢.....	180
二、合金调质钢.....	183
三、合金渗碳钢.....	187
四、弹簧钢.....	188
五、滚珠轴承钢.....	190
<b>第四节 合金工具钢</b> .....	193
一、合金刀具钢.....	193
二、合金模具钢.....	197
三、量具钢.....	199
四、其它工具材料.....	201
<b>第五节 特殊性能钢及合金</b> .....	201
一、不锈钢.....	201
二、耐热钢及合金.....	206
<b>第九章 铸铁</b> .....	214
<b>第一节 概论</b> .....	214
一、铸铁中的石墨化过程和组织特点.....	214
二、铸铁的性能特点及其应用.....	216
<b>第二节 常用铸铁</b> .....	220
一、灰口铸铁.....	220
二、球墨铸铁.....	223
三、蠕墨铸铁.....	228
四、可锻铸铁.....	228
五、特殊性能铸铁.....	231
<b>第十章 有色金属及其合金</b> .....	233
<b>第一节 铝及铝合金</b> .....	233



一、纯铝	233
二、铝合金	235
第二节 铜及铜合金	243
一、纯铜	244
二、铜合金	244
第三节 钛及钛合金	255
一、纯钛	255
二、钛合金	255
三、钛及钛合金的热处理	258
第四节 轴承合金	258
一、锡基轴承合金	259
二、铅基轴承合金	260
三、铜基轴承合金	261
四、铝基轴承合金	261

## 第二篇 非金属材料

<b>第十一章 高分子材料</b>	263
第一节 高分子概述	263
一、名词、概念及重要术语	263
二、高分子材料的人工合成	265
三、高聚物的分类和命名	266
第二节 高分子结构的特点	267
一、大分子链的组成	267
二、大分子链中结构单元链接顺序和构型	267
三、大分子链的构象——链的柔性及热运动特点	269
四、高聚物中大分子链间作用力及聚集状态	270
五、高聚物中的填料	272
第三节 高聚物的流变行为	272
一、线型无定型高聚物的三种物理状态	272
二、结晶高聚物的流变行为——结晶度的影响	274
三、交联后高聚物的流变行为——交联密度的影响	274
第四节 高聚物的机械性能	275
一、高弹性	275
二、粘弹性	275
三、强度与断裂	278
第五节 高聚物的其它性能	281
一、高聚物的耐腐蚀性能	282
二、高聚物的老化	282
第六节 工程高聚物材料简介	283

一、塑料	283
二、橡胶	284
三、合成纤维	284
四、胶粘剂	284
<b>第十二章 陶瓷</b>	287
第一节 陶瓷材料概述	287
一、陶瓷的概念	287
二、陶瓷材料的特点	287
三、陶瓷材料的分类	288
第二节 组成陶瓷的基本相及其变化	289
一、晶体相	289
二、玻璃相	293
三、气相	295
第三节 陶瓷的性能	295
一、陶瓷的机械性能	295
二、陶瓷的热性能	297
三、陶瓷的其它性能	297
<b>第十三章 复合材料</b>	299
第一节 概述	299
一、复合材料的概念	299
二、复合材料的种类	300
第二节 复合材料的特点	300
一、比强度和比模量	300
二、抗疲劳性能	301
三、减震性能	301
四、耐高温性能	301
五、断裂安全性	301
第三节 复合理论简介	302

### 第三篇 工程材料的选用

<b>第十四章 材料选用的一般原则</b>	303
一、改锥的选材问题——从实例看选材的基本原则	303
二、材料的使用性能与选材	304
三、材料的工艺性能与选材	307
四、材料的经济性与选材	311
<b>第十五章 零件失效与选材</b>	313
第一节 零件的失效与失效分析	313
一、零件失效的原因	313
二、零件失效方式的分类	314

三、失效分析的一般方法·····	315
第二节 弹性变形失效与选材·····	317
一、定义与分类·····	317
二、力学分析·····	317
三、控制性能指标及其比较·····	318
四、弹性变形失效的鉴别·····	318
五、抗弹性变形失效的选材·····	319
第三节 塑性变形失效与选材·····	320
一、定义·····	320
二、力学分析·····	320
三、控制性能指标及其比较·····	321
四、塑性变形失效的鉴别·····	321
五、抗塑性变形失效的选材·····	322
第四节 快速断裂失效与选材·····	326
一、定义与分类·····	326
二、力学分析·····	326
三、控制性能指标及其比较·····	329
四、低应力脆性断裂的鉴别·····	331
五、抗断裂失效的选材·····	333
第五节 疲劳断裂失效与选材·····	334
一、定义与分类·····	334
二、力学分析·····	334
三、控制性能指标及其比较·····	337
四、疲劳断裂失效的鉴别·····	338
五、抗疲劳失效的选材·····	339
第六节 蠕变失效及选材·····	341
一、定义与分类·····	341
二、力学分析·····	341
三、控制性能指标及其比较·····	342
四、蠕变失效的鉴别·····	344
五、抗蠕变失效的选材·····	344
第七节 表面损伤失效及选材·····	346
一、定义与分类·····	346
二、力学分析·····	347
三、控制性能指标及其比较·····	349
四、表面损伤的鉴别·····	349
五、抗表面损伤失效的选材·····	351
第十六章 典型零件选材分析·····	352
一、工程材料应用概况·····	352

# 第八章 合 金 钢

## 第一节 概 论

合金钢是指在碳钢中有意识地加入各种合金元素所得到的钢种。

合金钢的发展是由于，随着工业及科学技术的发展，碳钢的性能已经满足不了越来越高的要求。

碳钢通过改变它的碳含量和进行适当的热处理，可获得许多工业生产上所要求的性能。它价格低廉，生产、加工方便，至今仍然是工业上应用最广泛的钢铁材料，占钢材总用量的80%以上。但碳钢有几个很大的缺点，限制了它的使用。

1. 淬透性差。对于直径大于20—25mm的零件，即使用水淬也不可能淬透，因此使零件的整个截面不可能获得均匀一致的性能。所以对于要求较高的大型零件，碳钢肯定是不适用的。

2. 不容易获得优异的综合机械性能。例如，采用调质处理来获得良好综合性能时，若保证较高强度，则韧性稍低，欲保证较好的韧性，则强度又偏低。这是因为碳钢回火稳定性差的缘故。对于某些其它钢种，例如不经热处理就使用的工程结构用钢，碳钢所能得到的综合性能远较合金钢差。

3. 对于许多要求具有特殊性能的场所，例如，很高的高温硬度或强度；很高的抗氧化、抗腐蚀性能；特殊的电、磁性能，碳钢就几乎不能使用，或使用性能很差。

为了弥补碳钢的这些缺点，发展了很多种合金钢。合金钢的用量虽较少，但却非常重要。

合金钢有较好的性能，但也有不少缺点。最主要的是：由于含有合金元素，其生产和加工工艺性能比碳钢的差，也较复杂；价格也较昂贵。因此，在应用碳钢能满足要求时，一定不要使用合金钢。

### 一、合金钢的种类及基本用途

为满足不同的性能要求，已定型生产的合金钢有几千种。为了科学的管理和使用的方便，必须有一个比较合理的分类体系。合金钢有许多种分类方法。例如按钢中所含合金元素的多少，分低合金钢（合金元素总量少于5%），中合金钢（合金元素总量在5%—10%之间）和高合金钢（合金元素总量高于10%）。也有按钢中所含的主要合金元素来命的，如镍钢、镍铬钢、镍铬钼钢，等等。此外，还有按正火状态或铸造状态下的组织来划分的，例如马氏体钢、铁素体钢、奥氏体钢、铁素体-珠光体钢以及莱氏体钢，等等。尽管可以按上述方法分类，但其使用并不方便。最方便的方法是按用途分类。可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢等三大类，以及若干小类，现分述于下。

1. **合金结构钢** 指用来制造各种工程结构（船舶、桥梁、车辆、压力容器等）和各种机器零件（轴、齿轮、各种联接件等）的钢种，包括：

**低合金高强度钢**——是一种低碳的、含合金元素量较少的，用于制造各种工程结构的钢种。由于其合金元素含量不高，而强度却比用于制造工程结构的碳钢高得多，因此可以大大减轻工程结构的自重，有很大的经济价值。

**合金调质钢**——是一种含碳量中等、主要用来制造要求高强度、高韧性的机器零件的合金钢。由于经过调质处理后才能获得良好的综合性能，因此这类钢的最终热处理主要是调质处理，并称为调质钢。

**合金渗碳钢**——是专门用来制造各种渗碳零件的钢种。

**弹簧钢**——专门用来制造各种弹性元件，尤其是弹簧的钢种。

**轴承钢**——专门用来制造各种滚动轴承零件的钢种。

**易切削钢**——指加入了特殊合金元素，使可切削性特别好的一类钢。主要用于自动切削机床加工。

**超高强度钢**——指拉伸强度超过 $150\text{kg/mm}^2$ ，又有足够韧性的合金钢。主要用于制作一些要求强度非常高、重量轻的结构，如飞机、航天器等。

**低温钢**——专门用于制作低温或超低温环境中工作的结构，这种钢具有优良的低温韧性。

**2. 合金工具钢** 用于制造各种加工工具，如金属切削刀具，加工各种金属或塑料的模具等的钢种。包括：

**刀具钢**——用于制造各种金属切削刀具的钢。

**模具钢**——用于制造加工冷态、热态，甚至液态金属或塑料的各种模具的钢。

**量具钢**——制造各种量规的钢。

**3. 特殊性能钢** 指具有某种特殊的物理或化学性能的钢种。包括：

**不锈钢**——具有优良的抗腐蚀性能的钢。主要用于制造有耐腐蚀性的零件，例如化工装置、热能装置中的某些零件。

**耐热钢**——具有优良的抗氧化性能和高温强度的钢。主要用于制造在高温下工作的零件。

**耐磨钢**——具有优良的耐磨性的钢。主要用于制造拖拉机履带板、破碎机颚板之类要求较耐磨的零件。

**电工钢**——指具有优异的磁性，用于电器工业的钢，包括有较高导磁能力的软磁钢与较高剩磁和矫顽力的硬磁钢等。

还有许多具有特殊性能的钢种，此处不一一叙述。

## 二、合金钢的编号原则及方法

为了管理和使用的方便，每一种合金钢都应该有一个简明的编号。世界各国合金钢的编号方法不一样。附录中给出了各国常用钢号的对照表。合金钢编号的原则主要有两条：

(1) 根据编号可大致看出该钢的成分。

(2) 根据编号可大致看出该钢的用途。

从这两条原则来看，我国的编号方法具有明显的优点。具体的编号方法如下。

**1. 专用钢** 以其用途名称的汉语拼音第一个字母表明该钢的类型，阿拉伯数字表明其含碳量；化学元素符号表明钢中含有的合金元素，其后的数字标明合金元素的大致含量。

例如滚珠轴承钢在编号前标以“G”字。GCr15表示含碳量约1.0%，含铬约1.5%的滚珠轴承钢。易切削钢前标以“Y”字。Y40Mn表示含碳量约0.40%，含锰量小于1.5%的易切削钢。要注意，这种编号方法所表示的钢的用途非常清楚，但化学成分的表示比较杂乱。

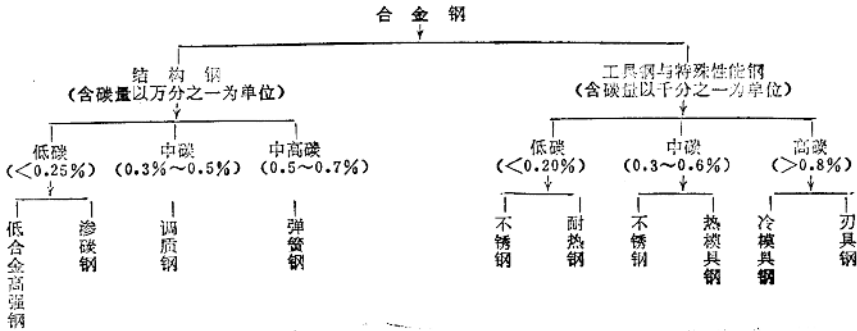
**2. 其它钢种按下列方法编号** 首先用数字标明钢的含碳量。为了能从含碳量的表示上区分钢的用途，规定结构钢的含碳量以万分之一为单位，工具钢的含碳量以千分之一为单位（与碳钢编号是一致的）。为了避免与结构钢混淆，又规定工具钢等的含碳量超过1.0%时，含碳量略去不写。然后，在表示含碳量的数字后面，用化学元素符号表示钢中所含的主要合金元素，其后用数字标明其含量。平均含量少于1.5%时不标数；平均含量在1.5%~2.4%之间时标以2；平均含量在2.5%~3.49%之间时标以3，依此类推。按这种方法编号，不同类钢的编号可表示如下：

**结构钢** 两位数字+元素符号+数字，例如40CrNiMo，表示钢的平均含碳量为0.40%，含有Cr，Ni，Mo三种主要的合金元素，其含量都在1.5%以下。

**工具钢与特殊性能钢** 一位数字+元素符号+数字。例如5CrMnMo，表示钢的平均含碳量为0.50%，含有Cr，Mn，Mo三种主要合金元素，其含量都在1.5%以下。又如CrWMn，表示钢的平均含碳量大于1.0%（因此不标出，若用千分之一为单位的数字标出，则容易误认为结构钢），另外，钢中还含有少于1.5%的Cr、W、Mn等元素。

为了从钢号上反映出钢的质量好坏（主要是指杂质含量的多少），高质量的钢在钢号的末尾加以“A”字，如38CrMoA1A，即属于高级优质钢。

根据钢的编号方法，再加上对各类钢含碳量及所含合金元素种类的了解，我们从钢的编号上可以方便地确定它的成分与大致用途，现将这一规律总结如下：



要比较精确地鉴别，还需要对每种钢所含合金元素的特点有所了解。例如，以两位数字开头编号的低碳结构钢，可能是渗碳钢，也可能是低合金高强度钢。后面会看到，渗碳钢是以Cr，Mn，Ni等再配以Ti，V等元素来合金化的；而低合金高强度钢是以Mn为主再配以V，Nb等元素来合金化的。因此，20CrMnTi是渗碳钢，16Mn则应是低合金高强度钢。

当然，有些钢单凭编号是难以准确断定的，同时有些钢的编号也有例外。例如，珠光体耐热钢的编号方法就与结构钢的相同，如12Cr1MoV等。这些地方应特别注意。不过，这种情况很少。

### 三、合金钢的发展趋势

目前合金钢的发展趋势有以下特点

1. 为适应工业和科学技术的发展对合金钢提出的日益增高的要求, 不断创造出具有某些特殊性能的新钢种。因此合金钢的种类在不断增加。

2. 大量使用的成熟钢种, 为了生产、管理和使用的方便, 又在不断减少, 集中生产使用效果较好的通用性强的少数钢种。

3. 在发展新钢种的同时, 集中力量改进合金钢的生产工艺, 提高现有合金钢的质量。例如, 在钢的冶炼上采用真空熔炼, 电渣重熔, 或真空去气等技术, 大大减少钢中的有害杂质和气体, 提高钢的性能。因此对于同一种钢, 由于生产工艺的改进, 性能也不断在提高。

## 第二节 合金元素在钢中的作用

为了深入地了解、正确地使用合金钢, 必须对合金元素在钢中的作用有一个比较清楚的认识。

### 一、合金元素对钢中基本相及其平衡关系的影响

1. 合金元素的种类及我国的资源情况 为了使钢获得预期的性能, 有目的地向钢中加入不同的合金元素。在一般合金化理论中, 按与碳的亲合力的大小, 可将合金元素分为碳化物形成元素与非碳化物形成元素两大类。常用的合金元素有以下几种。

非碳化物形成元素: Ni, Co, Cu, Si, Al, N, B;

碳化物形成元素: Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, Zr。

此外, 还有稀土元素, 一般用符号Re表示。

钢中不可避免地还有一些由原材料和冶炼过程带来的元素, 例如少量的 Si, Mn, 以及 S, P, N, O, H 等杂质元素。还有由原料 (如废钢) 带入的其它偶存元素, 如 Ni, Cr, Mo 等。尽管这些元素中许多可以作为合金元素, 但在这里它们并不是有意被加入的, 因此不能算作合金元素, 只能作为杂质元素或偶存元素看待。后面我们将看到, 他们对钢的性能可能有很大的影响, 在合金钢中必须严格将其含量控制在规定的范围之内。

按照资源情况, 各国常用的主要合金元素不同, 因此各国都力图建立适合自己国情的合金钢体系。我国是有色金属资源非常丰富的国家, 除少数合金元素 (主要是 Co) 外, 绝大多数都很富有。过去认为我国缺 Ni, 而且 Cr 的储量也一般。但近年来发现, 我国有丰富的 Ni 矿资源, 对于 Ni 钢的使用可以放宽一些了。

2. 合金元素对钢中基本相的影响 合金元素在钢中可以两种形式存在: 一是溶解于碳钢中原有的相中; 另一种是形成某些碳钢中没有的新相。

碳钢中有三个基本相, 即铁素体、奥氏体及渗碳体。合金元素可溶于此三相中形成合金铁素体、合金奥氏体及合金渗碳体。所有的非碳化物形成元素, 由于不能形成碳化物, 除了在少数高合金钢中可形成金属间化合物外, 几乎都溶解在铁素体或奥氏体中。碳化物形成元素中, 有些元素 (如 Mn) 与碳的亲合力较弱, 除少量可溶于渗碳体中形成合金渗碳体外, 大部分仍溶于铁素体或奥氏体中。与碳亲合力较强的一些元素 (如 Cr, Mo, W), 当其含量较少时, 多半溶于渗碳体中, 形成合金渗碳体; 当其含量较高时, 则可能形成特殊的合金碳化物。与碳亲和力很强的元素 (如 Nb, Ti, Zr), 几乎总是与碳形成特殊

的碳化物。除此以外，总有一部分强碳化物形成元素会溶解在铁素体或奥氏体基体中。

合金渗碳体是渗碳体中一部分铁被碳化物形成元素置换后所得到的产物，其晶体结构与渗碳体相同，可表达为  $(Fe, Me)_3C$  (Me代表Mn, Cr, Mo, W等合金元素)。渗碳体中溶入碳化物形成元素后，硬度有明显增加，因而可提高钢的耐磨性。同时它们在加热时也较难溶于奥氏体中，因此热处理时加热温度应该高些。

当钢中合金元素含量超过一定限度时，可以生成一些碳钢中没有的新相。其中最重要的是由强碳化物形成元素生成的各种合金碳化物。它们的熔点高、硬度高，加热时很难溶于奥氏体中，因此对钢的机械性能及工艺性能有很大影响。表8-1中列出了合金钢中常见碳化物的类型及基本性质。

表 8-1 钢中常见碳化物的类型及基本性质

碳化物类型	M <sub>3</sub> C		M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	M <sub>2</sub> C		M <sub>6</sub> C		MC		
	Fe <sub>3</sub> C	(Fe, Me) <sub>3</sub> C*	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	W <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> C	Fe <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C	Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C	VC	NbC	TiC
硬度, HV	900~1050	稍大于900~1050	1000~1100	1500~1800	—	—	1200~1300		1800~2200		
熔点℃	~1690℃		1550℃	1670℃	2700℃	2750℃			2750℃	3500℃	3200℃
在钢中溶解的温度范围	A <sub>1</sub> 至950~1000℃	A <sub>c1</sub> 至1050~1200℃	950℃至1100℃	大于950℃, 可直到熔点	回火时析出, 大于650~700℃时转变为M <sub>6</sub> C		1150℃至1300℃		大于1100℃~1150℃		几乎不溶解
含有此类碳化物的钢种	碳钢	低合金钢	高合金工具钢及不锈钢耐热钢	少数高合金工具钢	高合金工具钢, 如高速钢Cr12MoV, 3Cr2W8V等		同左		含钢大于0.3%的所有含钒合金钢		几乎所有含铌、钛的钢种

\* Me可以是Mn, Cr, W, Mo, V等碳化物形成元素。

**3. 合金元素对相平衡的影响** 合金元素对碳钢中的相平衡关系有很大的影响，加入合金元素后Fe-Fe<sub>3</sub>C相图要发生变化。实际钢中往往含有不止一种合金元素，因此影响非常复杂。为了便于理解合金元素的影响规律，我们仅限于讨论在钢中加入一种合金元素时的变化规律。当有多种元素加入时，每一种元素的影响趋势大致是不变的。为了方便，我们首先讨论单一合金元素对纯铁中相平衡的影响，然后再讨论对碳钢中相平衡的影响。

纯铁中加入合金元素，可使 $\alpha$ -Fe与 $\gamma$ -Fe存在的温度范围变化。按照对 $\alpha$ -Fe或 $\gamma$ -Fe的作用，可将合金元素分为两大类。

**$\gamma$ 相稳定化元素**——亦称奥氏体稳定化元素。它扩大 $\gamma$ 相存在的范围，使奥氏体稳定区域扩大。即使A<sub>3</sub>下降，A<sub>4</sub>上升，见图8-1(a)。有些元素，当含量高到一定程度后，可使A<sub>3</sub>降到室温，使 $\alpha$ 相完全消失，称为完全扩大 $\gamma$ 区元素，例如Mn, Ni, Co等。其相图以图8-2Fe-Ni相图为代表。另外一些元素，尽管可使 $\gamma$ 相存在区域扩大，但不能使其扩大到室温，最典型的例子是碳（见Fe-Fe<sub>3</sub>C相图）。类似的元素还有N与Cu。这类元素为部分扩大 $\gamma$ 区的元素

**$\alpha$ 相稳定化元素**——也称铁素体稳定化元素。它缩小 $\gamma$ 相存在的范围，使铁素体稳定区域扩大，即使A<sub>3</sub>上升，A<sub>4</sub>下降，见图8-1(b)。同样地存在有完全封闭 $\gamma$ 区元素，如Cr, Mo, W, V, Ti, Al, Si等。和部分缩小 $\gamma$ 区元素，如B, Nb, Zr等，前者超过一定含量时，可使合金从室温直到熔化温度都只有 $\alpha$ 相存在。典型的例子如图8-3中的Fe-Cr相图所示。由图可见，当Cr量较低时，加入Cr除使A<sub>4</sub>下降外，还使A<sub>3</sub>稍有降低。这是一种



例外情况。当Cr高于一定量后， $A_3$ 迅速上升，在Cr量大于12.5%时，合金中则只有 $\alpha$ 相存在。

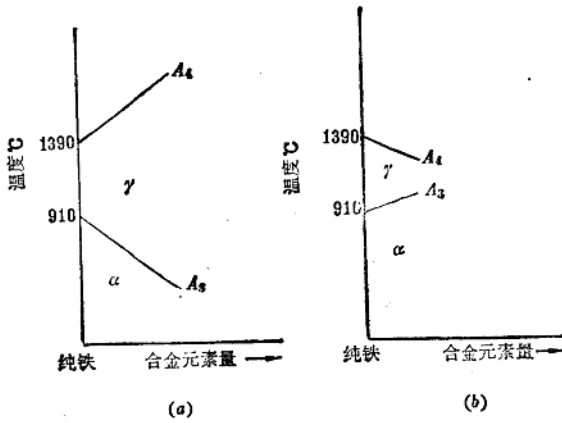


图 8-1 合金元素对纯铁相平衡影响的示意图  
(a) 扩大 $\gamma$ 区；(b) 缩小 $\gamma$ 区

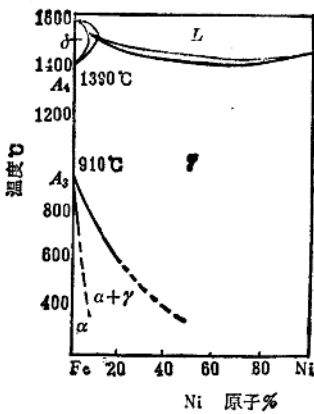


图 8-2 Fe-Ni相图

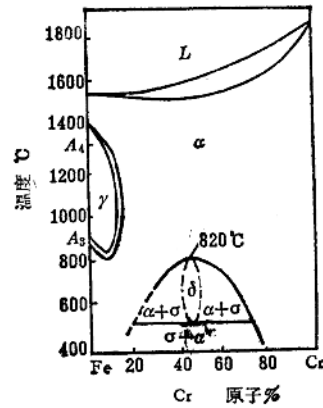


图 8-3 Fe-Cr相图

合金元素在铁碳合金中所起的作用，与在纯铁中的作用类似，但更复杂一些。其作用可从两方面理解。

一方面是对奥氏体与铁素体存在范围的影响。所有的奥氏体稳定化元素，均扩大奥氏体存在的范围。完全扩大 $\gamma$ 区元素，超过一定量后，可使钢在室温下得到奥氏体组织。典型的钢是高镍钢与高锰钢，这对不锈钢、耐热钢和耐磨钢很重要。所有的铁素体稳定化元素，均缩小奥氏体存在的范围，完全封闭 $\gamma$ 区的元素超过一定量后，可使钢在所有温度下均为铁素体组织。典型的钢是高铬钢，它对不锈钢等也很重要。

扩大或缩小奥氏体区的直接结果，是使共析转变温度下降或上升，并使共析反应在一个温度范围内进行。图 8-4 表示出几种主要元素对共析温度的影响。Ni, Mn等奥氏体稳定化元素使 $A_1$ 下降，尤以Mn的作用最强烈。Cr, Si等铁素体稳定化元素则使 $A_1$ 上升。