

中等专业学校试用教材

合金钢与热处理工艺学

咸阳机器制造学校 主编

机械工业出版社

中等专业学校试用教材

合金钢与热处理工艺学

咸阳机器制造学校 主编



机械工业出版社

合金钢与热处理工艺学

咸阳机器制造学校 主编

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

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 $14 \frac{1}{2}$ · 字数 351 千字

1979年7月北京第一版·1979年7月北京第一次印刷

印数 00,001—28,000 · 定价1.10元

*

统一书号: 15033 · 4820

编 者 的 话

《合金钢及热处理工艺学》的编写系根据一九七八年第一机械工业部系统中等专业学校金属热处理专业教学计划中的培养目标与本课程的教学大纲来编写的。为了在本世纪内实现我国的四个现代化，尽速提高全民族的文化、科学技术水平，我们以辩证唯物主义为指导思想，加强理论基础，力求理论与实际相结合，尽量反映当前生产中应用的新材料、新工艺与新技术，既照顾到现在的生产实际，又考虑到未来的发展方向，以使本书能适应于最近一个时期的实际需要。

本书的中心内容包括合金化原理、结构钢与零件的热处理，工具钢与工具的热处理，特殊性能钢的一般介绍以及热处理工艺设计基础等部分。合金钢材料是根据我国的新标准，热处理工艺尽量采取了生产上的新成就，并使材料与工艺有机地联系起来。

本书适用于中等专业学校金属热处理专业学生的教科书也可供作从事热处理工作的工人和技术人员的参考读物。

本书的主编为咸阳机器制造学校的李作揖同志，协编为南京机器制造学校的萧振荣同志及山东省机械工业学校的李慧芳同志。

在本书编写过程中曾得到第一机械工业部情报所的手册编辑组、北京齿轮厂、洛阳轴承厂以及长春汽车研究所等单位的大力支持和热情协助，在此谨表示衷心的感谢。

由于我们的思想、业务水平不高，深入实际不够，时间仓促，书中一定会有不少的缺点和错误，殷切希望读者给予批评和指正。

编 者

1978. 11.

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 合金钢概论

第一章 合金元素在钢中的作用	3
§ 1-1 合金元素对钢中铁与碳的作用	3
§ 1-2 合金元素对钢热处理过程中组织转变的影响	10
§ 1-3 合金元素在钢中的分布	26
§ 1-4 合金元素对钢机械性能的影响	27
第二章 合金钢的分类及编号	32
§ 2-1 合金钢的分类	32
§ 2-2 合金钢的编号	33
第三章 合金钢的冶金缺陷	37
§ 3-1 影响合金钢冶金缺陷的基本因素	37
§ 3-2 合金钢的主要冶金缺陷	37

第二篇 结构钢与零件的热处理

第四章 调质钢及其典型零件的热处理	43
§ 4-1 调质钢的化学成分与热处理特点	43
§ 4-2 以锰为主加元素的调质钢	46
§ 4-3 以硅锰为主加元素的调质钢	50
§ 4-4 以铬为主加元素的调质钢	53
§ 4-5 以铬镍为主加元素的调质钢	56
§ 4-6 以铬锰为主加元素的调质钢	57
§ 4-7 调质硼钢	59
§ 4-8 低碳马氏体钢	62
§ 4-9 典型调质零件的热处理	62
第五章 渗碳钢及其典型零件热处理	74
§ 5-1 渗碳钢的化学成分及热处理特点	74
§ 5-2 以锰为主加元素的渗碳钢	76
§ 5-3 以铬为主加元素的渗碳钢	78
§ 5-4 以铬锰为主加元素的渗碳钢	80
§ 5-5 以铬镍为主加元素的渗碳钢	82
§ 5-6 渗碳硼钢	83
§ 5-7 典型渗碳零件的热处理	84
第六章 弹簧钢及弹簧的热处理	97
§ 6-1 弹簧钢	97

§ 6-2 弹簧的热处理	100
第七章 滚动轴承钢及滚动轴承工件的热处理	107
§ 7-1 滚动轴承钢	107
§ 7-2 滚动轴承工件的热处理	111

第三篇 工具钢及工具的热处理

第八章 刀具钢及刀具的热处理	117
§ 8-1 刀具的工作条件及性能要求	118
§ 8-2 碳素工具钢及低合金工具钢	119
§ 8-3 碳素工具钢及低合金工具钢刀具的热处理	122
§ 8-4 高速钢	130
§ 8-5 高速钢刀具的热处理	135
§ 8-6 刀具质量检查	150
§ 8-7 刀具热处理缺陷及其防止	153
第九章 模具钢及模具的热处理	156
§ 9-1 冷作模用钢及其热处理	156
§ 9-2 热作模用钢及热作模具的热处理	168
§ 9-3 模具热处理的变形和开裂	176
第十章 量具用钢及量具的热处理	183
§ 10-1 量具用钢	183
§ 10-2 量具的热处理	185

第四篇 特殊性能钢

第十一章 不锈钢	189
§ 11-1 金属腐蚀的基本概念	189
§ 11-2 碳及合金元素对不锈钢组织和性能的影响	190
§ 11-3 铬不锈钢	193
§ 11-4 铬镍奥氏体不锈钢	194
第十二章 耐热钢	197
§ 12-1 钢的热稳定性和抗氧化钢	197
§ 12-2 钢的热强度和热强钢	199
第十三章 高耐磨钢	204
§ 13-1 高锰钢的化学成分	204
§ 13-2 高锰钢的热处理	204
§ 13-3 高锰钢的性能特点	205
§ 13-4 高锰钢的应用举例	205
第十四章 磁钢及磁合金	206
§ 14-1 磁性材料的分类	206
§ 14-2 硬磁材料	206
§ 14-3 软磁材料	209

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	211
§ 15-1 热处理工艺设计的基本概念	211
§ 15-2 热处理工艺设计的依据和步骤	213
第十六章 热处理工艺文件及其他	217
§ 16-1 热处理工艺文件	217
§ 16-2 热处理工艺与零件结构设计及其他冷热加工的关系	222

绪 论

机械工业是为所有工业、农业、国防以及交通运输业提供机器和装备的工业。在实现我国四个现代化的过程中,必须贯彻党的总路线精神,不断解决自行设计和制造效能高、寿命长、重量轻、体积小、容量大、成本低的机器和设备的问题。为了完成这一光荣而艰巨的任务,使机械设计与制造能力在短期内赶超世界水平,除了必须解决设计与制造本身的一系列科学技术问题以外,在很大程度上还取决于加速发展金属材料的研究和使用的学科。而机械制造中的材料问题,一部分是属于金属材料本身的成分与质量问题,另一部分是属于材料的选用是否适当,在加工处理的工艺上是否发挥了材料的最大潜力问题。因此,在提高金属材料产量和质量的同时,还要提高和发挥材料的各种性能,充分挖掘潜力,做到既合用又节省,只有这样才能达到多、快、好、省建设社会主义的目的。

解决上述有关材料的问题,必须由金属热处理工作者、冶金工作者和机械设计与制造工作者紧密配合,共同努力才能取得最有效的成果。其中金属热处理工作者在学习本门课程后,所应担负的任务是:

(1) 通过检验与试验,对合金钢的质量进行评定,分析机器零件和工具、模具等在服役过程中的失效原因,并提出解决和改进的途径。

(2) 根据机器零件和工模具的服役条件,分析合金钢材料的使用和工艺性能要求与材料的成分、组织及其工艺历史(包括冶炼、冷热加工工艺和热处理等)之间的关系,并配合机械设计与制造工作者正确地选择和使用合金钢材料,以达到使工件提高效能,减轻重量,延长寿命,降低成本的综合目的。

(3) 制订合理的热处理及表面热处理工艺,以最大限度地发挥金属材料的潜力。

金属材料科学的基本矛盾是科学技术和生产发展对材料提出的性能要求与材料本身所能提供的性能之间的矛盾。这一矛盾的发展始终推动着金属材料科学的发展。金属的冷热加工变形、热处理、合金化及综合强化是强化金属材料的重要手段,其内容是在日益丰富和发展。合金钢的生产和发展是在不断解决碳素钢的缺点的基础上发展起来的。因此在阐述本教材的过程中,所遵循的基本原则是:以金属材料学的基本矛盾为纲,始终抓住这一特点,与碳素钢对比来阐述化学成分对合金钢的组织与性能影响的普遍规律和在各别的具体钢种中的特殊规律。

根据实践、理论、实践的认识规律,学习合金钢及热处理工艺学这门课程,要在前几次专业生产实践的前提下,先从合金化的基本原理入手,在掌握合金元素在钢中作用的普遍规律的基础上,再去掌握或熟悉机器制造业中各种用途的合金结构钢、合金工具钢和特殊性能钢的成分、热处理工艺、组织、性能与用途的特殊规律。这样做不仅有利于培养学者分析问题、解决问题的能力,而且还能够在运用基本理论解决各种不同用途的钢的不同矛盾中,加深对基本原理的理解,并能加强理论与实践的统一。在本门课程中,我们将学习下列内容:

第一篇 合金钢概论。讲述合金元素在钢中的作用,合金钢的分类及编号和合金钢的冶金缺陷等。第二篇 结构钢及零件的热处理;第三篇 工具钢及工具的热处理;第四篇 特殊性能钢;第五篇 热处理工艺设计基础。

本课程是一门实践性较强的技术科学,就其发展的现阶段水平来看,还是比较年青的,人们通过生产斗争和科学实验,虽然已经得到了对本学科若干规律性的认识,但由于认识条件

的限制,有不少现象,还没有完满的解释,尚有待于继续深入地去进行研究。

我们学习这门科学要始终掌握住:合金钢零件的服役条件与失效形式——钢的性能要求——化学成分的作用——热处理——组织与性能——使用范围等这一主要线索。通过综合分析,熟悉和掌握合金钢及热处理的基本知识,为制定零件合理的热处理工艺和进行零件选材及工艺分析奠定必要的基础。

我国解放前合金钢的科学和生产几乎完全是空白点。解放后,我国机器工业的发展速度是世界上前所未见的。与此同时,合金钢等新材料方面的发展也是十分的惊人,不仅数量上有了飞跃的发展,质量与品种也有了很大的提高和增加,为了适应机器产品自行设计与系列化的要求,又在全国范围内展开了有关金属材料的试验研究工作。从我国的实际情况出发,充分利用本国的资源,试制成功了许多新钢种,初步建立了我国自己的合金钢系统,如硅锰基的普通低合金钢,调质和渗碳钢,新弹簧钢,无铬或少铬滚动轴承钢,新模具钢,超硬高速钢和无镍或少镍不锈钢耐热钢等,均已陆续付诸使用。其中仅普通低合金钢的品种比一九六五年就增长了十多倍,使用范围已经遍及国民经济的各主要部门。所有这些成就不仅填补了我国钢铁工业的若干空白,丰富了研究的内容,而且也带来了新的要求,要求对这些新材料给予正确的评价,使之更加完美,并在落实的基础上,有根据地合理使用。

热处理新工艺及新设备的研制和推广也取得了显著的成绩,对保证和提高机械产品的质量发挥了重要作用。在热处理工艺方面较显著的成果有:我国系统地研究了低碳马氏体钢的组织与性能。按照传统的看法,低碳钢除了作为渗碳钢以外,是不进行淬火的。根据多次冲击试验的结果,预测并证实了低碳钢淬火后所得到的低碳马氏体组织,具有高的强度,同时又具有良好的塑性和韧性,可以作为优良的结构材料。应用这一原理,用国产硅锰系列低碳马氏体钢来制造石油钻井工具“三吊”(吊环、吊卡、吊钳),大幅地减轻了重量,节约了合金钢材料,并减轻了劳动强度。以承重150吨的吊卡为例,苏联的为126公斤,美国的为97.3公斤,我国的仅为60公斤,成为目前世界上最轻吊卡。又如活塞销内孔不渗碳,是长期以来国内外技术标准的规定,但经我国近来的考查与研究证明,活塞销的断裂失效都是内孔表面上的失圆拉应力产生纵向疲劳裂纹引起的。双面渗碳强化了内表面反而大幅度地提高了销子的疲劳强度,生产考验也取得了显著的成效。我国还在表面热处理和化学热处理等方面做了很多工作。过去一般认为,零件的淬硬层越深,强化的效果就越好。为了提高钢材的淬透性,就必须加入各种合金元素。事实上,这种认识是不全面的。经过应用低淬透性钢代替合金渗碳钢,结果证明:低淬透性钢通过适当的热处理后,其机械性能不低于,甚至超过原来的材料和工艺。用这种钢代替合金渗碳钢来制造拖拉机齿轮,寿命大为提高,劳动生产率提高二至四倍,工艺费和耗电量节约三分之二,材料费节约三分之一,还节约了合金材料。仅从以上点滴数例,可以看出,我国热处理技术的发展也是相当可观的。但是就我国的热处理水平而言,距离世界先进水平还有很大差距。一个普遍而突出的问题是:我国机械产品中的许多零件,由于材料选择不当,选用的热处理工艺盲目性较大,强化措施不够有力,使得一些机械产品质量不高,寿命不长。不少零件的平均寿命只有国外同类产品的几分之一到十分之一,造成巨大的浪费和损失。

我们在看到我国已经取得伟大成绩的同时,与世界先进国家相比,差距还是很大的。为了尽快地弥补这一差距,需要我们更加付出光荣而艰巨的劳动,进行新的长征。随着社会主义革命和建设事业迅猛发展,合金钢及热处理工艺学这门技术科学也必将得到不断地发展和完善。

第一篇 合金钢概论

为了提高钢的机械性能,改善钢的工艺性能和得到某些特殊的物理化学性能,有意在冶炼过程中加入到钢中的元素,叫做合金元素。除了基本元素铁碳以外,尚含有这些“有意”加入的合金元素的钢,叫做合金钢。

不管加入的元素是具有非金属性质的硅、硼等,还是具有金属性质的铬、镍等;不管在常温常压下是固态的锰、钨,还是气态的氮;也不管加入量是多达20~30%的铬、镍,还是只有1~2%的锰、硅,乃至只有0.005%的硼,只要是“有意”加入的,能起到改变钢的组织 and 获得所需性能这种作用的元素,都属于合金元素。

通常加入钢中的合金元素有:铬、锰、硅、镍、钼、钨、钒、钛、铌、锆、钴、铝、铜、氮、硼等。随着科学技术的发展和现代工业的需要,稀土元素已在生产合金钢方面得到应用。对于硫和磷等元素的作用,要用一分为二的观点去看待。它们对钢的性能的影响,在大多数情况下是有害的,在合金钢中,一般把硫、磷当做有害的杂质看待,对它们的含量是严格控制的。但在某些材料中却是有利的,如为了提高切削加工性,在易切削钢中又特意把硫的含量提高,有的高达0.33%,并适当地提高锰的含量,使硫以硫化锰存在于钢中;为了提高抗蚀性,在某些普通低合金钢中有意提高其含磷量。在这些特定条件下,硫和磷也可以认为是合金元素了。

从成分上来说,合金钢和碳钢都是铁基合金,它们都含有碳,这是它们的共性。而合金钢还另外含有其它合金元素,这是合金钢的个性。正是因为有其共性,我们可以运用碳钢的基本规律来对合金钢进行分析;正是合金钢还另外含有合金元素这一个性,所以又要认识合金钢本身的特殊规律性。

既然合金钢是在铁碳合金(碳素钢)的基础上加入合金元素而发展起来的,那么要研究合金元素在钢中的作用,就应该主要着眼在合金元素与铁的作用以及合金元素与碳的作用上。

第一章 合金元素在钢中的作用

§ 1-1 合金元素对钢中铁与碳的作用

一、合金元素与铁的作用

所有的合金元素都可以或多或少地溶入铁中组成固溶体,其中,有的与铁形成有限固溶体;有的则形成无限固溶体。有的合金元素的原子直径很小,可间隙溶入铁中,形成间隙固溶体,如碳、氮、硼、氢等;有的则因其原子直径较大,而置换溶入铁中,形成置换固溶体,如锰、镍、钴等。另外,某些合金元素的加入量超过一定量时,还可与铁形成金属间化合物。

合金元素溶入铁中以后,对铁的同素异构转变产生很大影响,这对热处理来说,具有重要的意义。

大家知道, A_3 是铁中 $\alpha \longleftrightarrow \gamma$ 转变的临界温度, A_4 是 $\gamma \longleftrightarrow \delta$ 转变的临界温度。加入合金元素以后, A_3 与 A_4 的位置均将发生变化。根据变化情况的不同,可以把合金元素分为如

下两大类:

(一) 使 A_3 升高, A_4 下降的元素

加入合金元素后使 A_3 升高, A_4 下降。这样, 形成 γ 相的温度区间就被缩小了。根据合金元素与铁构成的相图不同, 又可分为如下两种情况:

1. 封闭 γ 相区 如图 1-1 a) 所示, 随合金元素含量的增多, A_3 不断上升, A_4 不断下降, 甚至二者相遇。也就是说, 当合金含量超过某一限度以后, 无论加热到什么温度, γ 相将永远不出现。这类合金元素称为封闭 γ 相区的合金元素。

2. 缩小 γ 相区 如图 1-1 b) 所示, 这类合金元素虽然也能使 γ 相区缩小, 只是由于产生了稳定的化合物, 合金元素与 γ 铁和 α 铁均形成有限固溶体, 不能使之完全封闭, 所以称其为缩小 γ 相区的合金元素。

(二) 使 A_3 下降、 A_4 升高的元素

加入合金元素后使 A_3 下降、 A_4 升高。这样, 就使形成 γ 相的温度区间扩大了。同样也存在着两种情况:

1. 开启 γ 相区 如图 1-1 c) 所示, α 相及 δ 相分别处于被封闭的区域内, 当合金含量超过某一限度后, 可以在室温得到稳定的 γ 相。这类合金元素就称为开启 γ 相区的合金元素。

2. 扩大 γ 相区 如图 1-1 d) 所示, 虽然 γ 相区也随合金元素的加入而扩大, 但由于形成了稳定的化合物而限制了 γ 相区向相图右方扩展, 不能使它最终完全开启, 所以称其为扩大 γ 相区的合金元素。

根据上述合金元素对铁同素异构转变的不同影响, 可将常用的合金元素分为缩小 γ 相区的和扩大 γ 相区的两大类, 每一类又根据影响程度不同, 又可分为两组, 列于表 1-1 中, 并举例说明如下:

铬和锰是合金钢中应用最广泛的合金元素, 它们与铁的状态图如图 1-2 所示。铬属于封闭 γ 相区的元素, 但当其含量不超过 7% 时, 可使 A_4 及 A_3 同时下降; 超过 8% 以后才使 A_3 上升, 最终可封闭 γ 相区, 如图 1-2 a)。锰则属于开启 γ 相区的元素, 随着含锰量的增多, 使 A_4 上升 A_3 下降。所以, 高锰合金钢在室温下可以得到稳定的奥氏体组织, 如图 1-2 b)。

(三) 元素对铁同素异构转变影响的理论解释

关于合金元素何以对铁的同素异构转变有许多不同的影响, 曾有过许多理论, 但还没有那一种理论能给以满意的解释。一般认为下列一些因素是显然起作用的:

1. 合金元素的点阵类型 凡具有体心立方点阵结构的元素, 多属于封闭或缩小 γ 相区

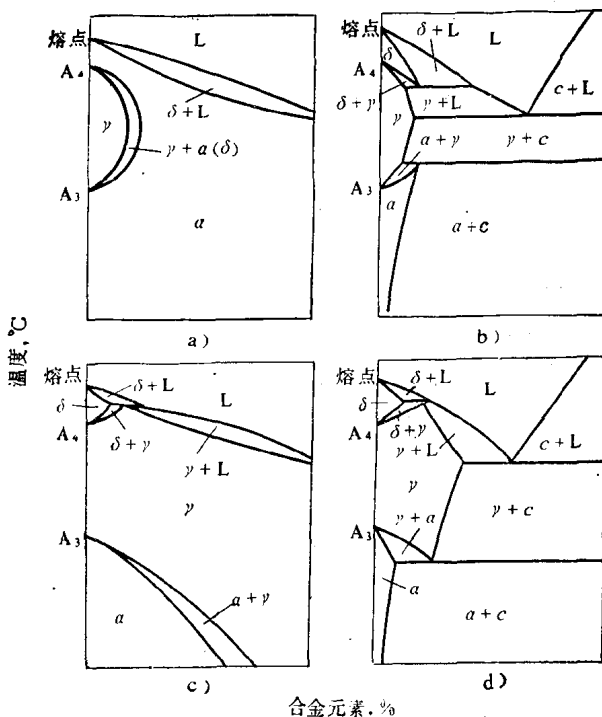


图 1-1 铁与合金元素组成的二元状态图的四种类型
L—液相, α 、 γ 、 δ —固溶体, c—化合物

表1-1 常用合金元素对 γ 相区的影响

缩小 γ 相区的元素	完全封闭	Cr, V, Mo, W, Ti, Si, Al
	部分缩小	Nb, Ta, Zr, B, Ce
扩大 γ 相区的元素	完全开启	Mn, Ni, Co
	部分扩大	C, N, Cu

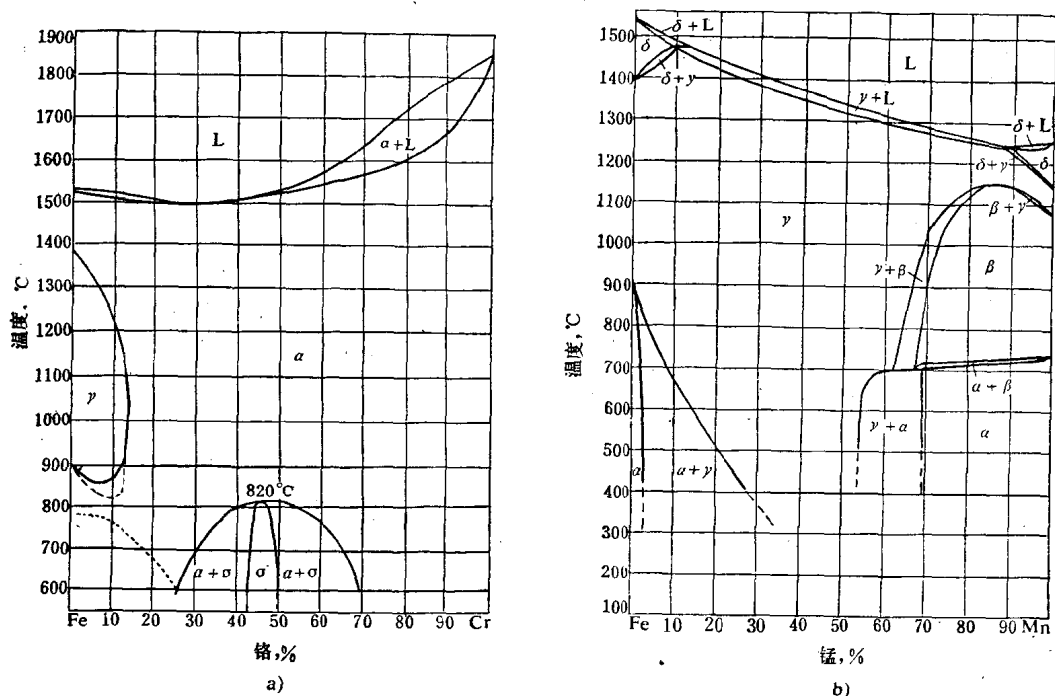


图1-2 Fe-Cr a)、Fe-Mn b) 状态图

的元素，如铬、钒、铌等；凡具有面心立方点阵结构的元素，多属于开启或扩大 γ 相区的元素，如锰、镍、钴等。

2. 尺寸因素 当形成置换固溶体时，合金元素的原子半径与铁原子半径相比相差愈大，则溶解度愈小，这在元素周期表同一周期内看得比较明显，如从钼到铌到锆，溶解度逐渐减小；当原子半径很大时，则完全不溶解，如铝。合金元素的原子半径很小时，将形成间隙固溶体，如碳、氮等；它们在 γ 铁中的溶解度大于在 α 铁中的溶解度（因 γ 铁的间隙尺寸较大），故为扩大 γ 相区的元素。

3. 原子的电子层结构及其相互作用 实验证明，合金元素对铁的同素异构转变的影响与其原子中的电子层结构有密切联系，一般来说，当填满的 d 层电子数与外层 s 层电子数之和不少于7时，合金元素将扩大 γ 相区，否则将缩小 γ 相区。如铜虽然具有面心立方点阵，且原子半径又与 γ 铁相近，但却不能无限溶于 γ 铁，这是因为铜原子的电子层结构与铁原子的电子层结构有较大的差别所致。

4. 合金元素改变了系统能量状态 对纯铁来说，自由能差 $\Delta F = F_\gamma - F_\alpha$ 在 A_3 以下和 A_1 以上均为正值，在其间为负值，如果加入合金元素，将使其发生变化，减少 ΔF 者，使 γ 铁稳定，将扩大 γ 相区，增加 ΔF 者，使 α 铁稳定，将缩小 γ 相区。

(四) 合金元素对铁同素异构转变影响的实际意义

合金元素同铁的相互作用所产生的上述结果，具有下列重要的实际意义：

1. 利用合金元素能够扩大或缩小 γ 相区的作用, 在钢中加入大量扩大 γ 相区的元素, 如镍、锰、氮等, 可以获得具有特殊性能的单一奥氏体组织, 如 1Cr18Ni9、1Cr18Mn8Ni5N 奥氏体型不锈钢等。而在钢中加入大量缩小 γ 相区的元素, 如铬、硅、铝等, 则可获得具有特殊性能的单一铁素体组织, 如 1Cr13SiAl 耐热钢等。

2. 在多元的珠光体型、贝氏体型或马氏体型合金钢中, 常根据单个合金元素扩大或缩小 γ 相区的特点, 来调整钢的组织, 改善钢的性能。例如: 在 1Cr13 不锈钢中加入 1~2% 的镍, 就可以改型为 Cr12 系的热强钢, 如 12Cr11W2NiMoV、13Cr12NiWMoV 等钢种, 从而扩大了 γ 相区, 改善了钢的锻造性能, 提高了冲击韧性和高温强度。

3. 合金元素对纯铁临界点 A_3 的影响, 同碳一起决定着钢的临界点 A_3 和 A_1 , 而临界点 A_3 和 A_1 的高低与确定钢的热处理工艺规范, 有着直接的关系。因此, 合金元素对 A_3 、 A_1 的影响, 是制定合金钢热处理工艺的重要依据。

4. 合金元素同 α 铁的相互作用, 也直接对钢的机械性能产生影响。因为大多数钢的组织是由铁素体和碳化物两相组成的, 合金元素溶入铁素体中后, 产生固溶强化作用, 这就必然使钢的机械性能发生一系列变化, 这种性能的变化, 是机械设计时, 选择钢材的依据。

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作用, 可将合金元素分为两大类。

1. 非碳化物形成元素 一般合金元素如镍、钴、铝、铜、硅、氮等在钢中不能与碳形成碳化物, 它们常溶入铁中形成固溶体。或者有时形成金属间化合物, 其中硅还具有能促进碳化物分解 (石墨化) 的作用, 这类合金元素被称为非碳化物形成元素

2. 碳化物形成元素 另一类合金元素, 按照它们与碳的亲合力由强到弱的顺序有钛、锆、铌、钒、钼、钨、铬、锰及铁等, 能与碳形成碳化物, 所以被称为碳化物形成元素。这些元素都是元素周期表中的过渡族元素, 有一个未填满的次 d 电子层, 它与碳作用时, 碳原子将其价电子填入此层, 产生强的金属键, 也有可能产生部分共价键。其中铁的碳化物 (Fe_3C) 稳定性最小, 钛的碳化物 (TiC) 稳定性最大。钛、锆、铌、钒称为强碳化物形成元素, 铬、锰、铁为弱碳化物形成元素。

(二) 碳化物的结构

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) 与合金元素原子半径 (r_m) 的比值小于 0.59 时, 形成简单点阵的间隙相碳化物。这类碳化物有 TiC 、 ZrC 、 VC (V_4C_3)、 WC 、 MoC 、 NbC 以及 W_2C 、 Mo_2C 等。它们具有简单的晶格, 一般属于立方晶格或六方晶格, 是由金属离子按金属键结合的方式构成。因为碳原子存在于简单晶格的间隙中, 致使碳化物具有金属键和金属性质。这类碳化物具有很高的熔点 (达 3000°C 以上), 稳定性高, 加热时不易溶入奥氏体中, 对相变的影响较小。

2. 复杂点阵碳化物 碳原子半径与合金元素原子半径的比值大于 0.59 时, 形成复杂点阵的碳化物。这类碳化物有 Fe_3C (正交点阵)、 Mn_3C (正交点阵)、 Cr_7C_3 (三角点阵)、 $Cr_{23}C_6$ (复杂立方点阵)。它们主要是铁、锰、铬的碳化物, 熔点和稳定性都较低, 加热时易溶入奥氏体和参与奥氏体相变, 故对相变过程影响较大。

(三) 复合碳化物

在有的合金钢中还可以形成三元或多元的复合碳化物。例如 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ ，其中铁同钨或钼的比例可以改变（ $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}_4\text{C}$ ； $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{Mo}_4\text{C}$ ），但铁和金属原子的总和同碳的比例是固定不变的，为六比一，这两种碳化物的晶体结构均为复杂立方点阵。

此外，具有相同点阵的碳化物可以彼此无限互溶。如 Fe_3C 与 Mn_3C 可组成 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ ； TiC 与 VC 可组成 $(\text{Ti}, \text{V})\text{C}$ ； TiC 与 NbC 可组成 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ ，等等。

合金元素可以部分地置换 Fe_3C 点阵中的铁原子而形成合金渗碳体 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ ，例如在室温下 Fe_3C 中可以溶入18~20%的铬，1~2%的钼或钨，0.4~0.5%的钒，0.15~0.25%的钛等。合金渗碳体较渗碳体稳定，是一般低合金钢中碳化物的主要形式。

（四）钢中碳化物的基本形成规律

钢中同时含有多种形成碳化物的合金元素时，将依据它们与碳亲和力的强弱，按照由强到弱的顺序形成碳化物。

当钢中含碳量较低时，强碳化物形成元素将优先与碳结合，弱碳化物形成元素只能溶入固溶体中。当钢中含碳量较高时，碳化物形成元素按照从强到弱的次序形成碳化物。譬如钢中含有钼、钨和铬时，随含碳量的增加将依次形成 M_6C （ $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 或 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ）、 Cr_7C_3 、 Fe_3C 。

（五）掌握碳化物形成规律的实际意义

掌握碳化物的形成规律，对于阐明钢的合金化原理及通过正确的热处理以充分发挥合金元素的作用，都具有重要的意义。碳化物在钢热处理生产中的重要意义可归纳为以下几点：

1. 合金钢中的渗碳体常常溶入一些强碳化物形成元素而形成合金渗碳体，它溶入奥氏体的温度比碳钢中的纯渗碳体要高。为了保证所需要的奥氏体的合金度及成分的均匀化，必须提高奥氏体化温度和延长保温时间，以使碳及合金元素得以较充分地溶入奥氏体中。合金钢中的特殊碳化物稳定性更高，为了使它充分溶入奥氏体中，需要更高的奥氏体化温度和更长的保温时间。这些都是制定合金钢热处理工艺时的依据。

2. 如果在钢中单一加钒（或钛、铌、锆），则形成非常稳定的 VC （或 TiC 、 NbC 、 ZrC ）。钢加热至900~1000℃，这类碳化物也不溶于奥氏体，在随后冷却过程中不溶的碳化物即可做结晶核心起加速奥氏体分解的作用，使钢的淬透性降低。但如果在含有这类元素的钢中再加入约2%的锰，则由于锰能部分地溶入这类碳化物（如 VC ）中，降低了它们的原子键合力，因此再加热至900~1000℃时，这类碳化物将能部分地溶入奥氏体中，从而能增大过冷奥氏体的稳定性及钢的淬透性。铬也有此作用，但影响的程度不如锰。故在低淬透性的结构钢（例如55Tid）中往往利用钒、钛、铌等元素进行合金化，而在要求高淬透性的结构钢中就要额外多加入锰、铬、钼等元素来克服钒、钛、铌等的不良影响。可见碳化物稳定性的大小乃是影响淬透性大小的一个重要因素。

3. 碳化物稳定性的大小，也直接影响到淬火钢回火时碳化物从马氏体中析出和聚集的速度。例如在高速钢中加有强的及中等强的碳化物形成元素钒、钨、钼等，它们能够显著地提高淬火钢的回火稳定性，并在高温回火时导致特殊碳化物对马氏体基体产生沉淀硬化作用（二次硬化），从而保证钢具有高的热硬性。

4. 在渗碳结构钢中常加入钒、钛、钼、钨等元素，由于它们形成的稳定碳化物，在渗碳加热时难于溶解，起着阻碍奥氏体晶粒长大的作用，使钢在较高温度渗碳也不易产生过热。上述元素既能加速渗碳过程，又能保证渗碳零件对强度、特别是对塑性和韧性的要求，还使

钢有可能实现渗碳后的直接淬火。例如 20CrMnTi 钢就具有这些优点。

5. 在珠光体型热强钢如 20Cr3MoWVA 中, 加入约四倍于碳的钒, 可显著提高钢的热强性和组织稳定性。这是因为钒属强碳化物形成元素, 它首先与碳形成 VC, 驱使其他碳化物形成元素铬、钼、钨更多地溶于铁素体中, 使铬、钼、钨得以产生固溶强化作用, 同时 VC 不易在高温下聚集长大和球化、石墨化的缘故。

三、合金元素对 Fe-Fe₃C 状态图的影响

为了了解合金元素在合金钢中的存在状态, 应该建立三元或多元状态图。如 Fe-Mn-C、Fe-Cr-C 状态图等, 它们是研究合金钢组织和相变的基础。但由于三元状态图, 尤其是多元状态图的研究还很不充分, 分析起来也很复杂。所以实际上, 通常以铁碳状态图为出发点, 再考虑合金元素对它的影响, 来粗略地了解合金元素的作用。

(一) 合金元素对铁碳状态图的影响

1. 改变了共析温度 (A_1) 共析反应包括 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 的同素异构转变和碳化物的析出或溶解。合金元素对共析温度的影响, 多半与对铁的同素异构转变温度的影响相一致, 即降低 A_3 的元素如锰、镍等同时也降低 A_1 。升高 A_3 的元素如铬、钼、硅等也使共析温度 A_1 升高 (参看图 1-3)。

2. 改变了共析含碳量 所有合金元素均使共析含碳量减少, 也就是说使铁碳状态图中的 S 点向左侧移动。如图 1-4 所示。

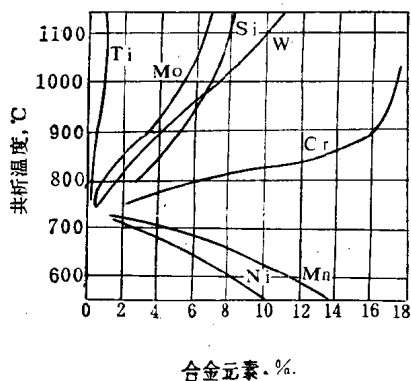


图1-3 合金元素对共析温度的影响

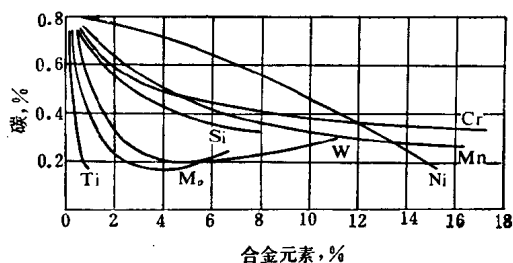


图1-4 合金元素对共析含碳的影响

合金元素的这一作用, 就意味着, 原来是亚共析组织的碳钢, 由于合金元素的加入, 而会变成共析或过共析组织。例如 40 钢, 本来是亚共析组织, 而当加入铬 13%、成为 4Cr13 合金钢以后, 就变成过共析钢了。这是因为铬使共析点的含碳量降低的结果。

3. 改变了奥氏体的最大溶碳量 奥氏体的最大溶碳量也就是铁碳状态图中的 E 点 (2.11% C)。在含有铬、钨、钒、硅等合金元素的钢中, 奥氏体的最大溶碳量显著降低, 从而在高碳高合金钢中, 有可能出现莱氏体组织 (如高速钢、高铬工具钢等)。

为了说明合金元素对铁碳状态图的影响, 引用了图 1-5。图中的 a) 和 b) 分别表示铬及锰两种合金元素对铁碳状态图中奥氏体区域的影响。铬是封闭 γ 相区的合金元素, 随着钢中含铬量的增多, 奥氏体相区逐渐缩小, 以至消失, 如含 Cr20% 时可完全封闭 γ 相区 (参阅图 1-5 a)。钨、钼、硅、钒等是封闭或缩小 γ 相区的合金元素, 在铁碳状态图中的作用与铬相似。锰是开启 γ 相区的合金元素, 锰含量对铁碳合金相图中奥氏体相区的影响如图 1-5 b)

所示。镍的作用与锰基本相同。

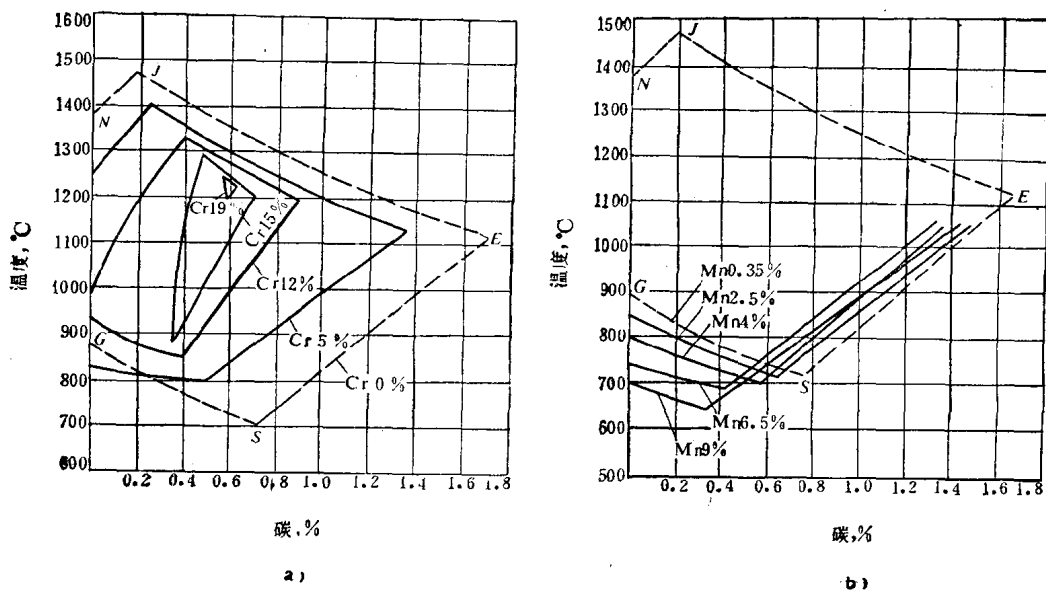


图1-5 合金元素对铁碳状态图中奥氏体相区的作用

a) 铬的作用 b) 锰的作用

综上所述，扩大 γ 相区的合金元素降低铁碳相图中的 A_1 温度，缩小 γ 相区的合金元素提高 A_1 温度，而绝大部分合金元素均程度不同的使铁碳相图中的S点和E点向左移动。

(二) 伪铁碳二元状态图

在不同含碳量的铁碳合金中加入同一含量的合金元素测定的铁碳状态图，称为“伪铁碳二元状态图”，如图1-6所示，实际上它是Fe-Cr-C三元状态图在含Cr12%成分线上的纵截面，形似二元实为三元，故称之为“伪二元”。

这种合金成分固定的伪铁碳二元状态图，反映了合金元素对铁碳状态图的影响规律，分析起来得心应手，用以进行热处理工艺的分析，很有实际意义，但必须注意，当合金含量改变时，就不能普遍运用了。

这里必须指出，伪二元状态图中的共析转变是在一个温度范围内进行的，共析成分的合金在冷却时发生共析转变开始的温度，称之为共析转变的上限温度，而共析转变结束时的温度，称之为共析转变的下限温度。而非共析成分的合金，其共析转变的温度范围则不同于共析成分的合金，当合金含量一定时，它还与含碳量有关，应根据相应的伪铁碳二元相图来确定其共析转变的温度范

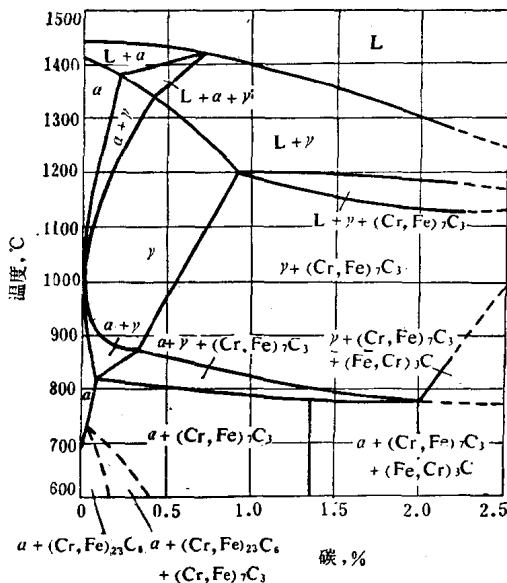


图1-6 Fe-Cr-C系伪二元状态图(含铬12%)

围。如图 1-6 所示, 为一含铬 12% 的伪二元状态图, 其共析合金成分为铬 12%, 碳 0.35%, 共析转变温度为 870~810°C。而含铬 12%, 含碳 1.0% 的成分则为过共析合金, 其共析转变温度为 820~790°C。

由此可见, 要判断一个合金钢是亚共析钢还是过共析钢, 它们的共析转变温度如何, 不能单纯根据铁碳相图来考虑, 而应根据 Fe-C-M (M 代表某一合金元素) 三元相图或伪铁碳二元相图 and 实际金相分析才能确定。

§ 1-2 合金元素对钢热处理过程中组织转变的影响

如上节所述, 钢中的合金元素既然对固溶体、碳化物和铁碳状态图都有很大的影响, 那么合金元素对钢在热处理过程中组织转变的影响就是必然的了。这无论对钢的临界转变温度、碳化物的稳定程度以及铁、碳与合金元素的扩散速度等都无例外。

一、合金元素对钢中扩散速度的影响

这里应该充分重视合金元素对扩散速度的影响, 所有与铁组成置换固溶体的合金元素, 在固溶体中的扩散速度都是很慢的, 比碳的扩散速度要小得多。这样, 需要通过合金元素的扩散而进行的相变, 其过程就要比碳素钢慢得多。

(一) 合金元素对碳的扩散速度的影响

合金元素对碳在奥氏体中扩散系数的影响如图 1-7 所示。由图可知: 形成碳化物的元素铬、钼、钨等减小扩散系数, 非碳化物形成元素镍、钴等增大扩散系数; 而硅是

例外, 它减小扩散系数。由于形成碳化物的元素提高了碳在奥氏体中的结合力, 因而使碳的扩散系数减小。非碳化物形成元素却降低了碳在奥氏体中的结合力, 因而使碳的扩散系数增大。造成硅例外的原因, 是由于硅虽然降低碳的结合力, 但同时增加了铁在固溶体中的结合力, 从而得到与镍、钴相反的结果, 使碳的扩散系数减小。

(二) 合金元素对 γ 铁的自扩散速度的影响

合金元素铬、锰、钼、钛、铌等均减慢 γ 铁的自扩散速度, 而碳则升高 γ 铁的自扩散速度。这是由于合金元素均能增加铁原子间的结合力, 从而使 γ 铁的自扩散速度下降。而碳的存在, 却削弱 γ 铁的结合力, 因而升高 γ 铁的扩散速度。

(三) 晶界对铁扩散速度的效应

沿晶界铁的扩散速度大于晶内, 这是由于晶界层原子点阵不完整, 缺陷较多, 容易引起扩散移动, 特别是碳在晶界的内吸附, 使铁的自扩散系数增大所致。因此, 在热处理相变和以后工件服役过程中, 晶界的作用应特别给以注意。

下面分别讨论合金元素对钢在加热、冷却及淬火后回火时组织转变的影响

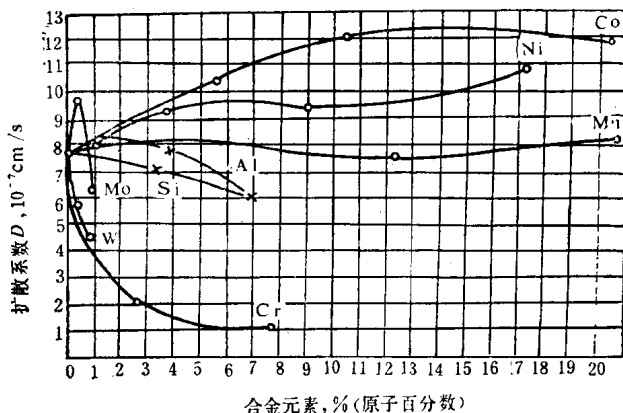


图1-7 合金元素对碳在奥氏体中扩散系数的影响