

中华人民共和国第一机械工业部统编
机械工人技术培训教材

热 处 理 工 艺 学

(初 级 本)

科学普及出版社

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是个关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

第一机械工业部第一副部长

杨 拯

一九八二年元月

前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要，现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。为此，我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅（局）和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是一机部颁发的《工人技术等级标准》和当前机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工夹具、量具、按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工夹具、量具、结构原理、工艺理论、解决实际问题 and 从事技术革新的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据，这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进。在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排，从专业需要出发，适当地考虑到今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅（局）、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材中还难免存在缺点和错误，我们恳切地希望同志们在进行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

第一机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八一年十二月

目 录

绪论	1
第一章 金属学基础知识	3
第一节 纯金属的结构与结晶	3
第二节 合金的结构	7
第三节 Fe-Fe ₃ C状态图	9
第四节 合金元素在钢中的作用简介	20
第二章 钢在加热时的组织转变	25
第一节 奥氏体的形成	25
第二节 奥氏体的晶粒度	28
第三章 钢在冷却时的组织转变	32
第一节 过冷奥氏体等温转变图	32
第二节 过冷奥氏体转变产物	34
第三节 影响过冷奥氏体等温转变图的因素	38
第四节 过冷奥氏体等温转变图的实际应用	40
第四章 钢的退火与正火	43
第一节 钢的退火	43
第二节 钢的正火	48
第三节 退火与正火的选择	50
第五章 钢的淬火	52
第一节 淬火的目的	52
第二节 淬火加热	52
第三节 钢的淬透性	62
第四节 淬火冷却	65
第五节 钢的冷处理	72
第六节 淬火缺陷及防止补救措施	73
第六章 钢的回火	80
第一节 淬火钢回火的目的	80
第二节 钢在回火时组织和性能的变化	80
第三节 钢的回火工艺	84
第四节 钢的时效	87
第七章 钢的表面淬火	89
第一节 钢的火焰加热表面淬火	89
第二节 钢的感应加热表面淬火	93
第八章 钢的化学热处理	112
第一节 化学热处理的基本过程	112
第二节 钢的渗碳	113
第三节 钢的氮化	133

第四节	钢的碳氮共渗	143
第九章	热处理工件的清理与表面处理	152
第一节	热处理工件的清理和防锈方法	152
第二节	发蓝	154
第三节	磷化	159
第四节	蒸气处理	164
第十章	常用钢的热处理	168
第一节	合金钢与碳钢的热处理工艺比较	168
第二节	结构钢的热处理	169
第三节	工具钢的热处理	178
第十一章	铸铁的热处理	198
第一节	铁碳双重状态图	198
第二节	铸铁的分类及牌号	198
第三节	影响铸铁石墨化的因素	199
第四节	铸铁热处理的一般特点	201
第五节	铸铁热处理工艺	201
第十二章	常用热处理设备	210
第一节	热处理设备分类	210
第二节	筑炉材料	210
第三节	热处理加热炉	217
第四节	冷却设备	234
第五节	辅助设备	247
第六节	附属设备和起重运输设备	252
第七节	热处理常用的工夹具	258
第八节	常用的测温仪表	259
第十三章	热处理安全技术知识	267
第一节	热处理安全操作的防护用品	267
第二节	热处理安全技术的一般要求	267
第三节	热处理安全技术	268
附录1	常用钢的临界点(近似参考值)	276
附录2	常用钢的回火温度与硬度对照表(近似参考值)	277
附录3	温度换算表	278
附录4	常用化学元素名称及符号	280
附录5	希腊字母表	280

绪 论

热处理是使固态金属通过加热、保温、冷却工序改变其内部组织结构，以获得预期性能的工艺过程。

要使金属材料获得优良的机械性能、工艺性能、物理性能和化学性能等，除了在冶炼时保证所要求的化学成分外，往往还需要通过热处理才能实现。正确地进行热处理，可以成倍、以至数十倍地提高零件的使用寿命，使一个零件顶几个用，一吨钢顶几吨用。例如，某厂用软氮化法处理的3Cr2W8V压铸模，使模具变形大为减小，热疲劳强度和耐磨性显著提高——原来每个模具只能生产400个工件提高到可生产30000个工件。在机械产品中多数零件都要进行热处理。例如，在机床中需进行热处理的零件约占60~70%，在汽车、拖拉机中约占70~80%，而在轴承和各种工、模、量具中，则几乎占100%。

热处理在我国有着悠久的历史。早在2000多年前，随着铁器的大量使用，热处理工艺也在生产实践中逐步形成与发展。战国时期，我国人民已经利用淬火来提高剑的硬度，也曾采用柔化处理（即退火处理），将白口生铁变成韧性铸铁（即可锻铸铁）。而在欧洲和美国，则分别在公元十八、十九世纪，才出现韧性铸铁，我国比西方早了两千多年。同时，我国对热处理工艺早有文字记载。例如，在《史记·天官书》中就有“水与火合为淬”之说。公元十七世纪的明代科学家宋应星在其名著《天工开物》中对热处理工艺更有详细的论述。如他在对锉（锉刀）的论述中写道：“凡铁锉，纯钢为之。未健之时，钢性亦软。以已健钢斲划成纵斜文理，……划后烧红，退微冷，入水健。久用乖平，入火退去健性，再用斲划。”这段话的意思是：“锉刀是用纯钢做的。在淬火之前，钢质锉坯比较软。先用经过淬火的钢制小凿在锉坯表面开出纵、斜纹，……凿好后烧红，取出稍冷，入水淬火。锉刀使用久了会变得平滑，应先行退火使钢质变软，然后再用钢斲凿出新的纹沟。”由此可见，当时就曾采用淬火使锉刀硬化，并用退火使久用后变得平滑的锉刀软化，以便重凿纹沟。又如该书关于制针的论述，就提到采用固体渗碳对针进行热处理的方法。

然而在旧中国，由于历代封建制度的束缚和近代帝国主义的压迫，我国的科学技术受到很大压制。解放前，我国没有独立完整的冶金和机器制造工业，热处理则一般仅是附属于铸工、锻工的一个工序，没有独立的车间和设备，在管理上没有完整的技术规程和检测手段。

解放以来，在党的领导下，我国的热处理科学技术迅速发展。全国各大、中型工厂几乎都建起了独立的热处理车间，安装了比较近代化的设备，新工艺正在得到大力推广，在热处理理论研究方面也取得了可喜的成果。尽管如此，我国的热处理技术与世界先进水平相比，还存在很大差距，其差距主要表现在：热处理科学技术普及不够，热处理工艺操作盲目性较大；有的工件所采用的热处理工艺比较落后，热处理质量不高，零件使用寿命不长；热处理设备和测试技术也比较落后等。

近百年来，由于工业的不断发展，热处理已经成为一门完整的现代科学和工艺方法。在近代技术中，X射线衍射仪、电镜和扫描电镜等测试设备的出现，深入地揭示了钢的内

部组织结构及其转变规律，从而促进了热处理技术的飞跃发展，出现了许多新工艺、新设备，如低碳马氏体强化、形变热处理、奥氏体晶粒超细化和碳化物超细化等强韧化处理工艺；离子氮化、软氮化、碳化物气相沉积等化学热处理工艺；可控气氛炉、真空热处理炉、激光热处理装置以及各种机械化、自动化设备。这些新工艺、新设备可大幅度地提高钢件的使用性能（如强度、耐磨性等），缩短生产周期，节约能源，降低热处理成本，消除或减轻公害。为了适应四个现代化的需要，并使我国的热处理工作能够尽快赶上世界先进水平，我们广大热处理工必须奋发图强、刻苦学习，努力掌握热处理科学技术。

这套《热处理工艺学》就是为了普及热处理科学技术理论教育，根据第一机械工业部《工人技术等级标准》和教学大纲而编写的。全书分初、中级两册。这本初级教材共十三章，简要地介绍了热处理的基本原理和工艺、常用钢铁材料的热处理方法及常用热处理设备，目的是使学员通过学习具备二、三级热处理工“应知”的热处理知识，提高技术素质，以适应建设四化的需要并为进一步的学习中级教材打下一定基础。

《热处理工艺学》是一门理论性较强的课程，在学习本课程时要着重基本概念的理解，注意掌握规律性的东西。

《热处理工艺学》是从生产实践中发展起来，又直接为生产服务的科学。具有丰富生产经验的在职工人，若能结合生产实际学习、理解书本知识，又注意用所学知识去分析、认识、解决生产中的问题，定能获得比较全面的知识，收到良好的效果。

为了比较系统地、完整地介绍热处理的理论基础，又考虑到热处理工作中要划分更细的工种，在编写本书时力求完整性、通用性，并兼顾不同热处理工人的特殊需要。使用本书的教师或自学者可根据本身的具体情况加以取舍或增添补充材料。

第一章 金属学基础知识

热处理之所以能改变工件的性能，其根本原因就是在热处理过程中金属的内部组织结构发生了变化。本章将简单介绍有关金属学的基础知识。

第一节 纯金属的结构与结晶

一、金属的晶体结构

(一) 晶体与非晶体

自然界的一切物质都是由原子构成的。根据原子在空间排列是否有规则，可将固态物质分为晶体和非晶体两种。原子杂乱无序排列的物质叫非晶体，如玻璃、沥青等。原子有规则排列的物质叫晶体，如盐、冰、铁、金刚石等。所有固态金属都属于晶体。

(二) 晶格和晶胞

晶体中的原子在空间作有规则排列的简单模型见图1-1(a)。为了便于描述原子的排列方式，可以用假想的线将各原子的中心连接起来，这就构成了一个空间格架，见图1-1(b)。这种用以描述原子在晶体中排列方式的空间格架，叫做晶格。

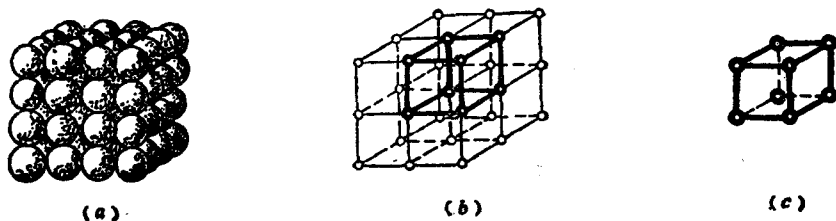


图 1-1 晶体中原子排列形式示意
(a) 原子排列模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

由于晶体中原子排列具有周期性，因此可从晶格中选取一个能完全代表晶格特征的最小几何单元，来描述晶体中原子排列的规律，该最小的几何单元叫做晶胞，见图1-1(c)。图1-1(b)中的粗黑线部分，就是一个晶胞。

(三) 晶格常数

晶胞棱边的长度称作晶格常数，其度量单位为 $\text{\AA}$ (读作“埃”， $1\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米)。三棱相等的立方晶格的晶格常数，以棱长 a 表示；三棱各不相等的非立方晶格的晶格常数，以三个不同的棱长 a 、 b 、 c 表示。

(四) 三种常见的晶格类型

各种晶体原子排列的方式不同，便构成了不同类型的晶格。

金属中最常见的晶格有三种：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1. 体心立方晶格 其晶胞是一个立方体，在立方体的八个角和中心各有一个原子，见图

1-2(a)。具有这种晶格的金属有： α -Cr、W、Mo、V、 α -Fe等。

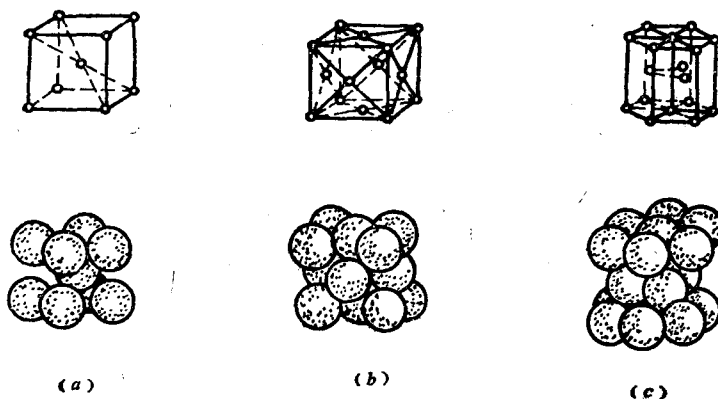


图 1-2 常见的金属晶格模型

(a) 体心立方晶格；(b) 面心立方晶格；(c) 密排六方晶格

2. 面心立方晶格 其晶胞是一个立方体，在立方体的八个角和六个面的中心各有一个原子，见图1-2(b)。具有这种晶格的金属有：Ni、Cu、Al、Ag、 γ -Fe等。

3. 密排六方晶格 其晶胞是一个六方柱体，在柱体的十二个角和上、下底面的中心各有一个原子，在柱体中间还有三个原子，见图1-2(c)。具有这种晶格的金属有：Zn、Mg、Cd、Be、 α -Ti等。

上述三种晶格中，原子排列的紧密程度是不一样的。原子在面心立方晶格和密排六方晶格中排列的紧密程度比在体心立方晶格中大。通过计算可知：在体心立方晶格中，原子所占据的实际体积为68%，其余32%为空隙；在面心立方晶格和密排六方晶格中，原子所占据的实际体积则为74%，空隙仅占26%。这就是在热处理过程中，由一种晶格转变为另一种晶格时，产生体积变化的原因。

二、纯金属的结晶过程

液态金属冷却到一定温度时会变成晶体状态(固体状态)，这一过程称为金属的结晶。从物质内部结构来看，结晶就是原子从不规则排列状态过渡到规则排列状态的过程。

(一) 冷却曲线

1. 纯金属的冷却曲线 在金属冷却过程中温度和时间关系曲线，叫冷却曲线。图1-3为纯金属结晶时的冷却曲线示意图。

由于结晶时放出的热量(结晶潜热)补偿了液态金属向周围散失的热量，所以在图1-3的冷却曲线上有一水平线段。该水平线段对应的温度就是金属的结晶温度。这就说明，纯金属的结晶过程是在恒温下进行的。同样，纯金属在固态下发生的结构变化，也是在恒温下进行的。

2. 过冷度 图1-3中的温度 T_0 是无限缓慢冷却时的结晶温度，称做理论结晶温度。在实际冷却条件下，冷却到 T_0 时是不会结晶的，只有在低于 T_0 的某一温度 T_1 才能结晶。这

种实际结晶温度总是低于理论结晶温度的现象称为过冷。理论结晶温度与实际结晶温度之差值称为过冷度 ($\Delta T = T_0 - T_1$)。过冷度与冷却速度有关,冷却速度愈大,过冷度也就越大。

金属不仅在结晶时有过冷现象,而且在固态下结构发生变化时也有过冷现象,同时后者往往比前者的过冷度更大。

与过冷相反,金属在加热时,实际转变温度将高于理论转变温度,这种现象称为过热,转变温度之差值叫做过热度。

(二) 结晶过程

液态金属原子的活动能力随着温度下降而降低。

当冷却到结晶温度时,某些局部区域便出现一些原子呈相对稳定的有规则排列的小晶体。在进一步冷却的

过程中,就以这些小晶体为结晶核心——晶核,在液态金属中逐渐长大。换言之,液体原子逐渐添加到结晶核心上去,这就是晶核的长大。在晶核长大的过程中,又不断有新的晶核形成并长大,一直进行到全部液体转变为固态金属时为止。金属的结晶过程见图1-4。

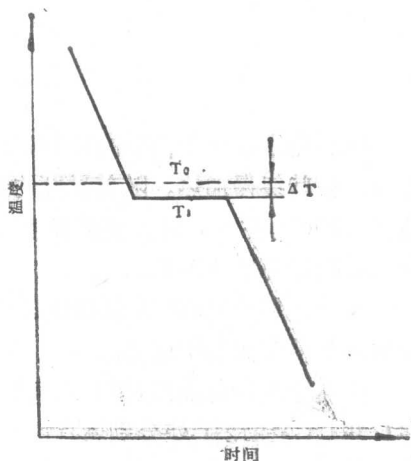


图 1-3 纯金属结晶时的冷却曲线示意图

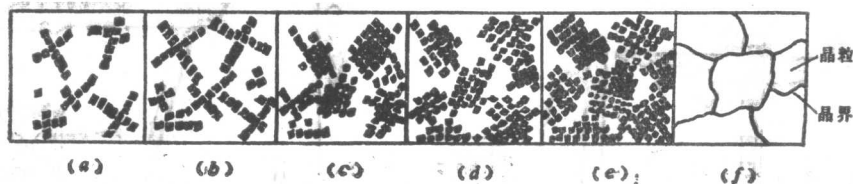


图-1-4 金属结晶过程示意图

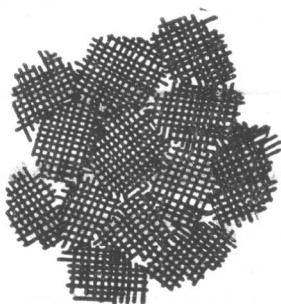


图 1-5 多晶体结构示意图

综上所述,金属的结晶是由结晶核心的形成(简称生核)和晶核长大两个基本过程组成的。这是一切金属结晶所遵循的基本规律。在热处理时固态金属发生的结构转变,也遵循这一基本规律。

结晶初期,各个小晶体可以自由地生长,其形状是规则的。但当成长着的晶体彼此接触后,它们便只能向仍与液体接触的方向长去,因而最后得到许多外形不规则的晶体。这种由一个晶核长成的外形不规则的晶体称为晶粒,晶粒与晶粒之间的分界面称为晶界,见图1-4(f)。只由一个晶粒构成的晶体

叫单晶体,由许多晶粒组成的晶体叫多晶体。多晶体结构见图1-5。

由于晶界位于两个取向不同的晶粒之间,因此晶界处的原子排列是不规则的。这对金属的塑性变形、结构变化和性能有很大的影响。一般说来,细晶粒金属的综合机械性能,特别是冲击韧性总是优于粗晶粒金属。此外,细晶粒金属在热处理时引起变形与开裂的倾向也较小。

三、纯铁的同素异构转变

我们先来做一个简单的实验(见图1-6)。把一根铁丝拉直,且两端固定在支架上,通以电流,使其缓慢加热。随着温度的升高,铁丝受热膨胀而逐渐下垂。当铁丝被加热到呈橙色(约900°C左右)时,突然发生回升现象,这表明此时铁丝产生收缩。若再继续升温,则又重新出现下垂现象。

为什么加热到900°C左右铁丝会突然收缩呢?显然,这是由于在900°C左右,铁丝内部发生某种变化而引起的。

由纯铁的冷却曲线(图1-7)可以看到,除在1538°C纯铁结晶时曲线上出现一平台外,在1394°C及912°C处分别还有两个平台。这表明纯铁在结晶完毕后继续冷却的过程中,有两次晶体结构的变化。其变化过程如下:

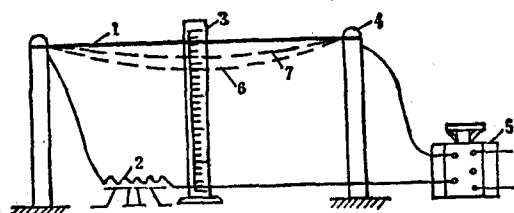
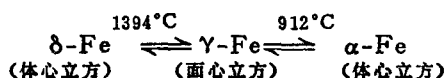


图 1-6 铁丝加热实验的示意图

1—铁丝原始位置; 2—电阻器; 3—标尺; 4—支架;
5—自耦变压器; 6—铁丝下垂位置; 7—铁丝回升位置

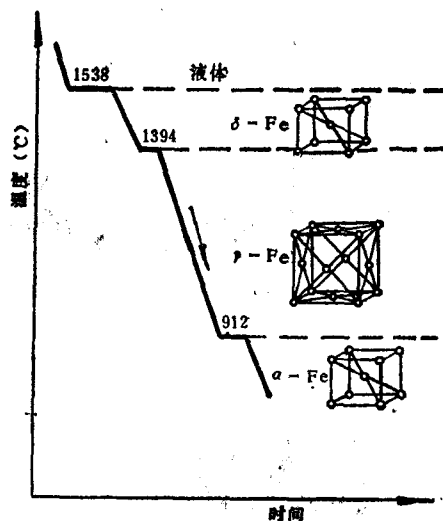


图 1-7 纯铁的冷却曲线及晶体结构的变化

纯铁在912°C以下及在1394~1538°C之间呈体心立方晶格,分别用 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\delta\text{-Fe}$ (或高温 $\alpha\text{-Fe}$)表示;在912~1394°C之间呈面心立方晶格,用 $\gamma\text{-Fe}$ 表示。

Fe在不同温度下具有不同的晶体结构。这种在固态下晶体结构随温度变化而改变的过程,叫做同素异构转变。除Fe以外, Mn、Co、Ti、Sn等金属,在固态下也将发生这种转变。

现在我们用纯铁的同素异构转变来解释前面的实验结果。由于面心立方的 $\gamma\text{-Fe}$ 比体心立方的 $\alpha\text{-Fe}$ 原子排列紧密,也就是说 $\gamma\text{-Fe}$ 的比容(单位质量的体积)比 $\alpha\text{-Fe}$ 小,因此当铁丝加热至900°C左右由 $\alpha\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$ 时,必然产生收缩。

同素异构转变是原子重新排列的过程,实质上也是一个结晶过程。为了与液体结晶相区别,通常把它叫做重结晶。它同样遵循生核和核长大的基本规律。

同素异构转变过程见图1-8。由该图可见，新晶格的晶体核心往往在旧晶粒的晶界处形成。显然这与晶界处的原子排列不规则、原子的活动能力较高、有利于重新改组晶格有关；此外，晶界处的某些杂质微粒，也能起新晶体晶核的基底作用。至于新晶核的长大，则是通过新、旧晶粒的分界面逐渐向旧晶粒迁移的方式进行的。这一过程一直进行到相邻的新晶粒互相接触，旧晶体全部消失为止。最后，旧晶粒全被新的晶粒所代替。

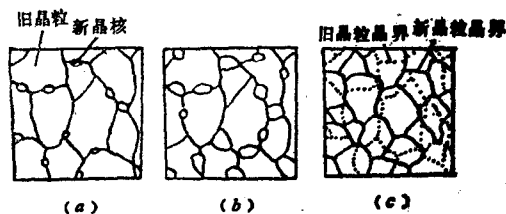


图 1-8 同素异构转变过程中组织变化示意图

同素异构转变具有十分重要的意义。它使钢和铸铁等金属材料有可能通过热处理改变其组织和性能。

第二节 合金的结构

纯金属虽然具有某些特殊性能（如铜、铝具有良好的导电、导热性），在工业上获得了一定的应用，但由于其性能上的局限性（如其强度和硬度一般很低），远不能满足各方面的要求。因此工业上使用的金属材料，绝大多数不是纯金属，而是合金。

一、合金的几个基本概念

下面我们介绍有关合金的几个最基本的概念：合金、组元、相。

（一）合金

合金是由一种金属元素加上一种或多种其它元素（金属或非金属）所构成的具有金属特性的物质。例如：普通黄铜是铜和锌组成的合金，碳钢是铁和碳组成的合金，硬铝是铝、铜、镁等元素组成的合金。

（二）组元

组成合金的最基本的、独立的物质叫组元。一般说来，组元就是组成合金的元素，如组成黄铜的组元是铜和锌。但稳定的化合物也可作为组元，如铁碳合金中的 Fe_3C 。合金可以用其组元的个数命名，如由两个组元组成的合金称二元合金，三个组元组成的则称三元合金，依此类推。

（三）相

合金中成分、结构和性能都相同的部分称为相。相与相之间具有明显的界面，称为相界面。为便于理解，可用纯铁为例加以说明：纯铁在 1538°C 以上为均匀的液体，只存在一个液相；缓慢冷却到 1538°C 以下时，将不断从液相中结晶出 $\delta\text{-Fe}$ ，在整个结晶过程中为液相和 $\delta\text{-Fe}$ 固相两相共存，此时两相之间由相界面分开，结晶终了就成为单一的 $\delta\text{-Fe}$ 固相。

二、合金的基本组织

合金中各组元的原子也和纯金属一样，在空间按一定规则排列。但合金的晶体结构与

纯金属相比要复杂得多。合金有三种基本组织：固溶体、金属化合物和机械混合物。

(一) 固溶体

我们将糖溶于水，可得到糖的水溶液——糖水。糖水也称为糖在水中的液溶体。其中水是溶剂，糖是溶质。如果糖水结成冰，便得到糖在固态水中的固溶体。合金中因溶体的含义与此相似，所谓固溶体，就是合金中一个组元的原子溶解在另一组元的晶格中所形成的固态溶体。组成固溶体的组元也有溶剂与溶质之分。固溶体中，含量较多的元素称为溶剂，含量较少的元素称为溶质。溶剂总是保持其原有的晶体结构。

根据溶质原子在溶剂晶格中分布的情况，固溶体可分为置换式固溶体和间隙式固溶体两种基本类型。

1. 置换式固溶体 溶剂晶格中的部分原子被溶质原子所替换而形成的固溶体称为置换式固溶体，见图1-9(a)。例如，在合金钢中，溶于 γ -Fe或 α -Fe的大多数合金元素，象Si、Mn、Cr、W等，其原子都是以置换铁晶格中的铁原子而形成的。只有两组元的原子大小相差不太多，原子的性质也比较相近时，才能形成置换式固溶体。

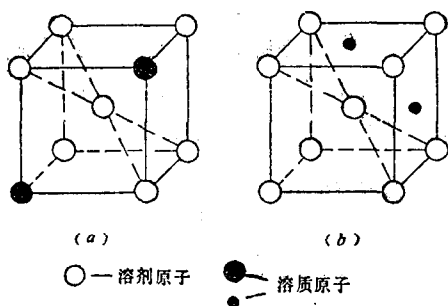


图 1-9 固溶体的结构示意图
(a) 置换式固溶体；(b) 间隙式固溶体

2. 间隙式固溶体 溶质原子位于溶剂晶格的间隙处而形成的固溶体称为间隙式固溶体，见图1-9(b)。如碳溶于 α -Fe和 γ -Fe中的固溶体，都是间隙式固溶体。形成间隙式固溶体时，溶质原子必须远小于溶剂原子，溶质组元一般都是原子直径较小的元素，如C、H、B、N等。

根据溶质在溶剂中的溶解情况，固溶体又可分为无限固溶体和有限固溶体两类。两组元能够以任意比例相互溶解的固溶体，称为无限固溶体；反之，若溶质在溶剂中的溶解度有一定限度，则这种固溶体称为有限固溶体。显然，只有置换式固溶体，才有可能为无限固溶体；而间隙式固溶体只能是有限固溶体。在大多数情况下，溶质在溶剂中的溶解度随温度的升高而增大。因此，凡在高温下达到饱和的有限固溶体，当其自高温冷却时，由于溶解度的降低，通常都会自固溶体中析出其它结构的新相。

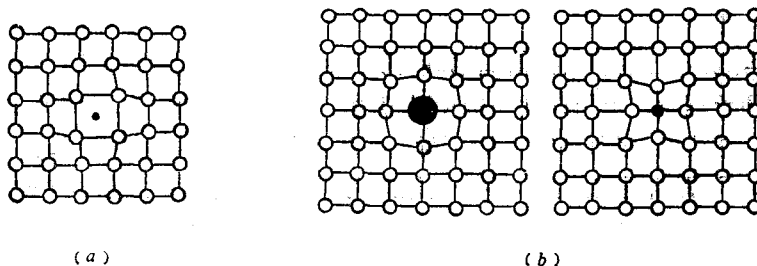


图 1-10 形成固溶体时的晶格歪扭示意图
(a) 形成间隙式固溶体时的晶格歪扭；(b) 形成置换式固溶体时的晶格歪扭

由于各种元素的原子大小不一，性质也不尽相同，因此，无论形成哪种固溶体，都会使固溶体的晶格发生歪扭(见图1-10)，从而使合金塑性变形的阻力增大，表现为固溶体的强度和硬度要比纯金属高。这种因形成固溶体而引起合金强度、硬度升高的现象，称为固溶强化。普通黄铜的强度高于纯铜，铁中溶入碳和合金元素后硬度高于纯铁，就是固溶强化的结果。固溶强化的效果与溶质原子的大小及数量有关。一般说，溶质与溶剂原子的差别越大，溶质数量越多，则形成的固溶体强度越高。在实际应用中，固溶强化已成为提高金属强度的主要方法之一。

(二) 金属化合物

合金中的两种或两种以上元素，按一定原子数目的比值相互化合而形成的一种新相，称为金属化合物。金属化合物的晶格不同于任一组成元素的晶格。例如，由50%Cu原子和50%Zn原子组成的化合物CuZn是体心立方晶格，它既不同于铜的面心立方晶格，也不同于锌的密排六方晶格。

金属化合物种类很多。需要说明的是：虽然一些金属化合物的组成元素之间按正常化合价化合，如 Mg_2Pb 、 Mg_2Si 等，但还有不少金属化合物的组成并不遵守原子价的规律，而是按其它规律形成的。

金属化合物的性质完全不同于组成它的各元素，其最显著的特征是：硬度高、脆性大、有的熔点也很高。例如，由铁和碳组成的金属化合物 Fe_3C 的硬度高达HB800，而纯铁的硬度为HB80，碳的硬度只有HB3。人们利用金属化合物的高硬度特性，创制了以碳化钨(WC)和碳化钛(TiC)为原料的硬质合金，用它制成的刀具，在800~1 000°C时仍能保持切削加工所需要的硬度。在许多合金中，金属化合物作为强化相，可以大大提高合金的强度、硬度和耐磨性。但金属化合物很脆，这就是它们至今还不能单独用来制作机器零件和工程结构的缘故。

(三) 机械混合物

由两种或两种以上具有不同晶体结构的相(纯金属、固溶体或金属化合物)机械地混合在一起而得到的组织叫机械混合物。在机械混合物中，各组成相仍保持其原有的晶体结构和性能。机械混合物的性能主要取决于各组成相的性能和相对量。例如，若一个组成相的硬度较高，且这个组成相越多，则机械混合物的硬度也就越高。此外，机械混合物的性能还与组成相的形状、大小及分布有很大关系。

这里我们必须把相和组织这两个概念加以区别。组织既可能是单相的，也可能是由几种相组合而成的集合体。在上述合金的三种基本组织中，固溶体和金属化合物都是单相的，而机械混合物则是相的集合体。

第三节 Fe-Fe₃C状态图

工程上应用最广泛的金属材料——钢和铸铁，都是以铁与碳两种元素为主组成的合金。要掌握各种钢和铸铁的组织、性能以及热处理原理，首先必须了解铁碳二元合金中的成分、组织与性能之间的关系。Fe-Fe₃C状态图就是研究铁碳合金的理论基础。在讨论它之前，先介绍铁碳合金在平衡状态下(即无限缓慢加热或冷却情况下)的组织类型。

一、铁碳合金的基本组织

(一) 铁素体

碳溶于 α -Fe中的间隙式固溶体称为铁素体,常用F表示。因为体心立方晶格的 α -Fe总的空隙量虽较大(占晶格体积的32%),但空隙半径却很小,所以碳在 α -Fe中的溶解度极小,室温下不超过0.005%,随着温度升高,溶解度略有增加,在727°C时达到最大值,也仅有0.0218%。

铁素体含碳量很低,其性能接近纯铁,是一种塑性、韧性高和强度、硬度低的组织。

铁素体在低于770°C时具有铁磁性,但高于此温度时磁性消失。

(二) 奥氏体

碳溶于 γ -Fe中的间隙式固溶体称为奥氏体,常用A表示。因为面心立方晶格的 γ -Fe总的空隙量虽较 α -Fe的小(占晶格体积的26%),但空隙半径却比 α -Fe的大,所以能溶解较多的碳。碳在 γ -Fe中的溶解度随温度升高而增加,在727°C时为0.77%,在1148°C时达到最大值2.11%。

奥氏体塑性很好,强度和硬度比铁素体高。

(三) 渗碳体

渗碳体是铁与碳形成的化合物,化学式为 Fe_3C 。

渗碳体的含碳量为6.69%,熔点约为1227°C,晶体结构复杂,硬度很高,脆性极大,几乎没有塑性。

一般说来,在铁碳合金中,渗碳体越多,合金就越硬、越脆。例如,在退火状态下,高碳钢由于所含的渗碳体比低碳钢和中碳钢多,所以硬度较高。

(四) 珠光体

铁素体和渗碳体组成的机械混合物(共析体)叫珠光体,常用P表示。珠光体的平均含碳量为0.77%。其性能介于铁素体和渗碳体之间。

一般情况下,珠光体中铁素体和渗碳体呈片层状交替分布,称为片状珠光体。通过热处理可以使渗碳体呈颗粒状分布在铁素体基体上,这种组织叫做球状珠光体或粒状珠光体。对高碳钢来说,因为球状珠光体不仅切削加工性能较好,而且在淬火加热或冷却时引起变形与开裂的倾向也较小,所以高碳工具钢在淬火前的原始组织,一般都要求为球状珠光体。

(五) 莱氏体

由奥氏体和渗碳体组成的机械混合物(共晶体)叫莱氏体,常用Ld表示。

莱氏体的平均含碳量为4.3%,因它以渗碳体为基体,故其性能特点是硬而脆。

当冷却到727°C时,莱氏体中的奥氏体将转变为珠光体。因此,在727°C以下,莱氏体由珠光体和渗碳体组成,叫做低温莱氏体(或变态莱氏体),用L'd表示,以区别于高温莱氏体Ld。铁碳合金的基本组织的机械性能见表1-1。

铁碳合金在平衡状态下的五个基本组织中,铁素体、奥氏体和渗碳体是铁碳合金的三个基本相,而珠光体和莱氏体则为基本相组成的机械混合物。

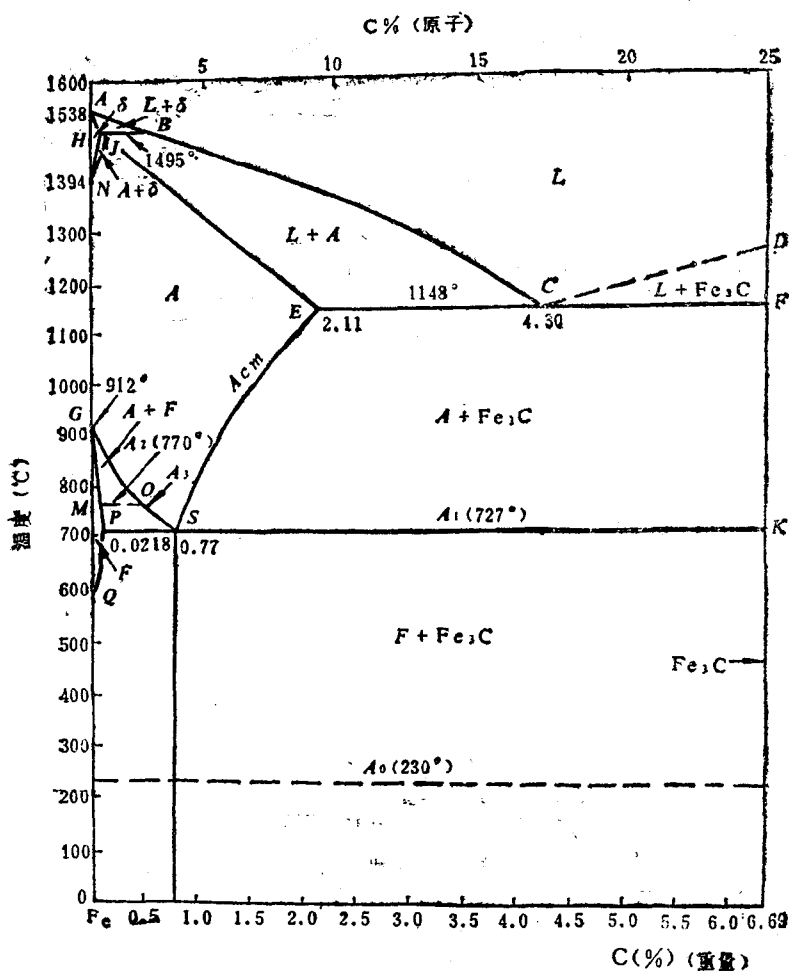
铁碳合金基本组织的机械性能

表 1-1

组 织 名 称	代 号	机 械 性 能			
		HB	σ_b (公斤力/毫米 ²)	δ (%)	a_k (公斤力·米/厘米 ²)
铁 素 体	<i>F</i>	80~100	25~30	50	30
奥 氏 体	<i>A</i>	170~220	40~80	40~60	—
渗 碳 体	Fe_3C	≈ 800	3.5	≈ 0	≈ 0
珠光体(片状)	<i>P</i>	200~280	80~85	15	—
珠光体(球状)	<i>P</i>	160~190	60~65	20~25	—
莱 氏 体	<i>Ld</i>	>700	—	—	—

二、Fe-Fe₃C状态图

Fe-Fe₃C状态图见图 1-11①。它又叫Fe-Fe₃C平衡图或Fe-Fe₃C相图,是表示铁碳

图 1-11 Fe-Fe₃C状态图

① Fe-Fe₃C状态图中的点均采用固定的字母表示。由于各点的成分、温度数据是随被测材料纯度的提高和测试技术的进步而不断趋于精确的,所以图中各点的位置在各种资料中往往略有不同。

合金（钢和铸铁）的成分、温度和组织三者之间在平衡条件下相互关系的图形。它反映了不同成分的铁碳合金在无限缓慢加热或冷却时的组织转变规律，是认识铁碳合金的性能和制定铁碳合金的热加工工艺（如浇注、锻压、热处理温度）的重要依据。

（一）Fe-Fe₃C状态图的建立

合金状态图是用实验方法测定的。测定状态图的具体方法很多，一般多以热分析法为主，再配合以其它方法。现以Fe-Fe₃C状态图的左下部分为例，说明用热分析法建立Fe-Fe₃C状态图的过程。

1. 配制不同成分的铁碳合金

合金 I：0% C（纯铁）

合金 II：0.2% C

合金 III：0.4% C

合金 IV：0.77% C

合金 V：1.2% C

合金 VI：1.6% C

配制的合金愈多，试验数据之间间隔愈小，测定出来的合金状态图就愈精确。

2. 将各合金加热至1100°C左右，保温一定时间，然后以极缓慢的速度冷却，测绘出各合金的冷却曲线，见图1-12(a)中的曲线I、II、III、IV和图1-12(c)中的曲线V、VI。

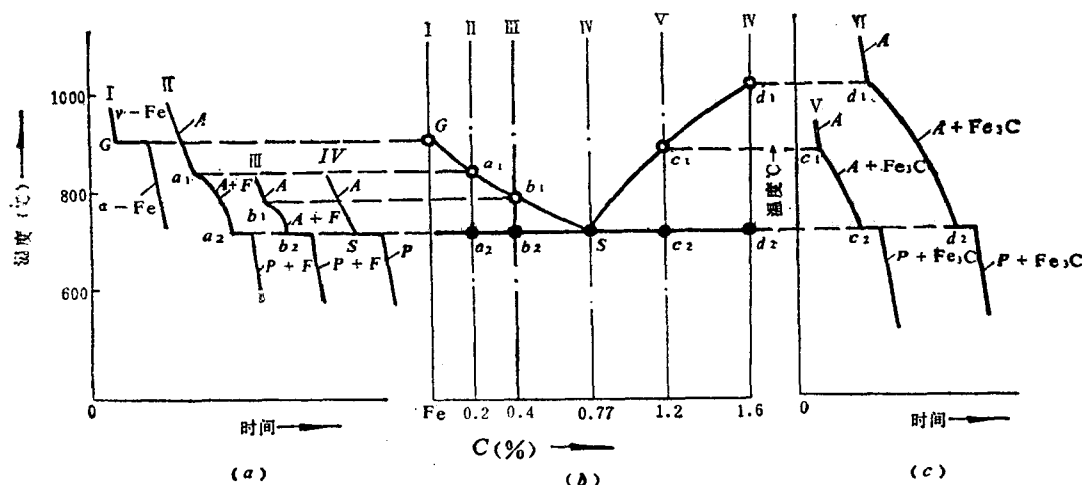


图 1-12 Fe-Fe₃C状态图的建立方法

在冷却过程中，用高温金相显微镜观察（或用其它方法），可知各合金的组织变化情况（见图1-12）。例如，合金 III 在 b_1 点以上为奥氏体（A）； $b_1 \sim b_2$ 间将从奥氏体中析出铁素体（F），组织为 $A + F$ ；在 b_2 点时，奥氏体转变为珠光体（P）， b_2 点以下组织为 $P + F$ 。

冷却曲线上的停歇温度（冷却曲线上的水平线段表示的温度）和折点温度，是合金冷却时其相结构发生转变的开始（或终了）温度，叫做临界温度或临界点。

3. 将测得的各临界点画在温度-成分坐标系中的相应位置上，见图1-12(b)。