

合金元素在铸铁中的应用

梁义田 刘 真 袁 森 编

西安交通大学出版社

封面设计：方 黎



ISBN7-5605-0415-9/TG·18
定价：12.00 元

合金元素在铸铁中的应用

梁义田 刘真 袁森 编

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书论述了各种合金元素在铸铁中的应用。首先介绍了铸铁的基础理论,而后分类详述了各种合金元素的理化性能,对铸铁金相组织、机械性能的影响,以及相应合金铸铁的性能和熔炼方法。最后介绍了合金元素在铸铁中的复合作用及多元合金铸铁的性能。

本书适合于铸造技术人员、工人阅读,并可供铸造专业的教师、学生参考。

(陕)新登字 007 号

合金元素在铸铁中的应用

梁义田 刘真 袁森 编

责任编辑 杨玲

*

西安交通大学出版社出版发行

邮政编码: 710049

《铸造技术》杂志编辑部电脑排版

陕西机械学院印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 271 千字

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~3 000 册

ISBN 7-5605-0415-9/TG·18 定价: 12.00 元

序 言

铸铁是自古以来就使用的材料，它的抗压强度高，铸造性能好，切削性能优良。特种铸铁还具有耐磨、耐热和耐蚀性，灰口铸铁具有吸振性及优良的切削特性。铸铁的这些性能具有耐压新材料的特征。在日本，铸铁产量的 50% 以上用于汽车零部件，预计今后中国的汽车生产量也将激增，因而铸铁需要量的日益增长将是必然的。

目前像本书那样，从铸铁基础理论到广泛的应用都加以论述，就显得合乎时宜。本书的特点可归纳如下。

第一，深入地论述了铸铁的基础理论。铸铁著作的缺点往往是偏重技术而忽视理论，而本书一开始就从铸铁的石墨成长到结晶进行了深入的理论阐述，这是不同于其它著作的一大特点。

第二，对特种铸铁当中的各种合金元素，分别作了详细的论述。类似的有 30 年代出版的德国 E.皮沃瓦尔思根 (E.Piwowsky) 所著《高级铸铁》(Hochwertiges Gubeisen)一书。而本书的论述比上书详尽，且引用了最近的一些研究成果，内容更加丰富。对高合金铸铁的连续铸造及粒化处理等的论述，是本书又一显著特点。

本书对白口铸铁的论述既广又深，对近来的热门话题“铁系渗碳体”也有所探讨，并指明了铸铁材料技术的今后发展方向。

纵观全貌，本书是一本从理论到应用都作了广泛而深入论述的好书，我认为它是铸铁科技工作者案头必备的书籍，谨向大家推荐。

川野 丰 (日本京都大学名誉教授)

前 言

铸铁是现代工业的一种重要工程材料,具有良好的机械加工性、耐磨性、减震性和对缺口的不敏感性。铸铁价格低廉、生产工艺简便,因此它在机械、矿山、冶金、化工等行业得到了广泛的应用。

在铸铁中附加一种或多种合金元素可以十分有效地改善铸铁的机械性能、物理性能和化学性能,可以达到如下目的:①改变凝固条件、组织状况,改善机械性能。有的合金元素可明显地细化铸铁中的珠光体并增加其数量,因而可提高强度和硬度,例如钼、铜、锡、锰等。在普通球墨铸铁中加铜,可使抗拉强度由 600N/mm^2 提高至 800N/mm^2 ,此时,如果再附加钼,通过等温淬火处理,可把抗拉强度提高至 1000N/mm^2 或更高的程度。②改变铸铁的化学成分,使其合金化,使铸铁具有耐磨、耐蚀、耐热性及无磁性等,此时需要加入中、高量的合金元素。

本书在叙述铸铁有关基础知识的基础上,着重论述各种合金元素在铸铁中的作用,并进而介绍各种合金铸铁的性能及应用等。

本书是在青海大学研究课题“铸铁理论及铁合金的应用”的工作基础上撰写的。在搜集大量文献资料和科学实验的基础上,旁征博引,对合金元素采用“散点透视”的描述方法,来表现其在铸铁中的应用这个重大的课题。对某些理论问题持慎重的态度,编者的观点体现在对各家之说的取舍之中。

本书初稿得到中国铸造学会第一届理事长荣科教授和日本京都大学川野 丰教授的高度评价,同时还得到参加课题评审的沈阳铸造研究所王云昭高级工程师、青海省图书馆邓尚元副研究馆员、甘肃省机械研究院院长陈宏规博士、《铸造技术》杂志常务总编辑张珺高级工程师和成都空压机厂杨庆瑞高级工程师的充分肯定。本书由西安交通大学陆文华教授和陕西机械学院王家炘教授主审,本书的出版是和他们的精心斧正分不开的。在本书的出版过程中,《铸造技术》杂志编辑部全体工作人员忘我的工作精神给编者留下了难忘的印象。

我们深深地感到要全面、准确、深刻地阐述合金元素在铸铁中的作用是艰巨的,由于我们的理论水平和实践经验有限,本书不妥之处还望广大读者给予指出,对此我们将不胜感激。

作 者

1991年12月

目 录

序 言

前 言

第一章 铸铁的相结构与组织转变

第一节 铁-碳状态图及主要的相结构	1
-------------------------	---

第二节 铸铁的组织转变	4
-------------------	---

第二章 铸铁中石墨的结晶及形态

第一节 铸铁中石墨的结晶	10
--------------------	----

第二节 铸铁中石墨的形态	11
--------------------	----

第三节 过冷态石墨的粒化及应用	17
-----------------------	----

第三章 铸铁材料的组织及性能

第一节 铸铁的性能控制指标	19
---------------------	----

第二节 高强度灰铸铁的质量控制指标	21
-------------------------	----

第三节 常用铸铁的组织及性能	23
----------------------	----

第四章 碳和硅在铸铁中的作用及硅合金铸铁

第一节 铸铁中的碳和硅	30
-------------------	----

第二节 硅合金铸铁的性能	35
--------------------	----

第三节 碳和硅在铸铁熔炼中量的调节	43
-------------------------	----

第五章 锰在铸铁中的作用及锰合金铸铁

第一节 铸铁中的锰	46
-----------------	----

第二节 锰合金铸铁的组织及性能	53
-----------------------	----

第三节 锰铸铁的熔炼	57
------------------	----

第六章 铜在铸铁中的作用及铜合金铸铁

第一节 铸铁中的铜	59
-----------------	----

第二节 铜合金铸铁的耐磨性能	61
----------------------	----

第三节 铜铸铁的熔炼	61
------------------	----

第七章 铬在铸铁中的作用及铬合金铸铁

第一节 铸铁中的铬	62
-----------------	----

第二节 铬合金铸铁的性能	63
--------------------	----

第三节 铬铸铁的熔炼	69
------------------	----

第八章 镍在铸铁中的作用及镍合金铸铁

第一节 铸铁中的镍	71
-----------------	----

第二节 镍合金铸铁的性能	72
--------------------	----

第三节 镍铸铁的熔炼	75
------------------	----

第九章 钼在铸铁中的作用及钼合金铸铁

第一节 铸铁中的钼	76
第二节 钼合金铸铁的性能	80
第三节 钼铸铁的熔炼	82
第十章 钨在铸铁中的作用及钨合金铸铁	
第一节 铸铁中的钨	84
第二节 钨合金铸铁的耐磨性能	86
第三节 钨铸铁的熔炼	87
第十一章 铝在铸铁中的作用及铝合金铸铁	
第一节 铸铁中的铝	88
第二节 铝合金铸铁的耐热性能	90
第三节 铝铸铁的熔炼	92
第十二章 硼在铸铁中的作用及硼合金铸铁	
第一节 铸铁中的硼	95
第二节 硼合金铸铁的耐磨性能	99
第三节 硼铸铁的熔炼	100
第十三章 钒在铸铁中的作用及钒合金铸铁	
第一节 铸铁中的钒	102
第二节 钒合金铸铁的性能及熔炼	105
第十四章 钛在铸铁中的作用及钛合金铸铁	
第一节 铸铁中的钛	107
第二节 钛合金铸铁的性能及熔炼	110
第十五章 硫在铸铁中的作用	
第一节 铸铁中的硫	113
第二节 铸铁熔炼中硫量的控制	116
第十六章 磷在铸铁中的作用及磷合金铸铁	
第一节 铸铁中的磷	118
第二节 磷合金铸铁的性能	122
第三节 磷铸铁的熔炼	124
第十七章 铌在铸铁中的作用及铌合金铸铁	
第一节 铸铁中的铌	125
第二节 铌合金铸铁的性能及熔炼	127
第十八章 锡在铸铁中的作用及锡合金铸铁	
第一节 铸铁中的锡	129
第二节 锡合金铸铁的高温性能及熔炼	132
第十九章 锑在铸铁中的作用及锑合金铸铁	
第一节 铸铁中的锑	133
第二节 锑铸铁的熔炼	136
第二十章 碲在铸铁中的作用及含碲铸铁	
第一节 铸铁中的碲	138

第二节	碲铸铁的性能及熔炼	138
第二十一章	镁在铸铁中的作用及镁球墨铸铁	
第一节	铸铁中的镁	141
第二节	镁球墨铸铁的性能	144
第三节	金属镁处理球墨铸铁	145
第二十二章	稀土元素在铸铁中的作用及稀土铸铁	
第一节	铸铁中的稀土元素	148
第二节	稀土铸铁的组织 and 性能	151
第三节	稀土铸铁的熔炼	154
第二十三章	合金元素的复合作用及多元合金铸铁	
第一节	钒、钛元素的复合作用及铸铁的性能	158
第二节	铬、钼、铜元素的复合作用及铸铁的性能	161
第三节	硅、钼及铝、硅元素的复合作用及铸铁的性能	164
第四节	其它类型多元合金铸铁的性能	166
参考文献		171

第一章 铸铁的相结构与组织转变

铸铁的相结构与碳钢无多大差别，从基体组织方面看，基本上是相同的，只是铸铁中有高碳相石墨或渗碳体存在。研究铸铁的组织转变，要借助于铁-碳状态图，从此可以了解铸铁在凝固过程中所产生的许多现象，从中找出规律性的东西，用于指导生产实践。

第一节 铁-碳状态图及主要的相结构

一、铁-碳状态图

铁-碳状态图是用实验方法测定和绘制的。在绘制状态图时，应使用高纯度的物质，经长时间达到平衡状态，然后在完全冻结的情况下进行观察研究，因此在时间与技术上要求相当严格。目前铁-碳状态图的研究工作还在继续当中。

图 1-1 是铁-碳合金双重状态图^[1]。这个状态图有两个特点：第一，它是一个不完整

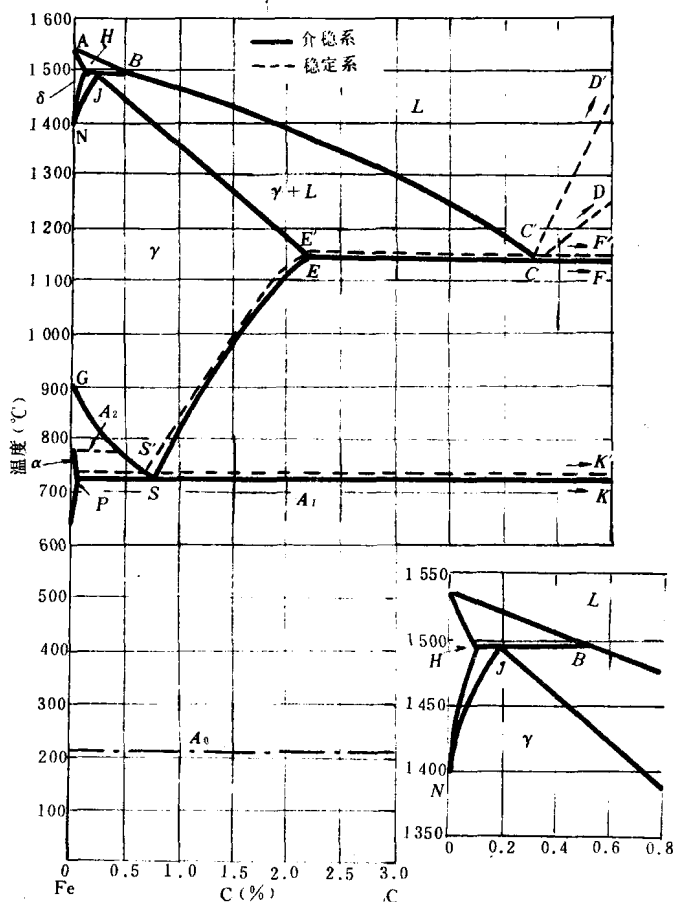


图 1-1 铁-碳合金双重状态图

的状态图。也就是说，横坐标上的含碳量没有达到 100%，而仅为 6.67% (图 1-1 仅取到 5.00%)，这恰好为碳化铁 (Fe_3C) 中的含碳量，这种化合物能够作为独立成分与铁构成 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图，图中用实线表示。第二，这个状态图是用双重线绘制的，同时表示两个状态图，虚线表示 $\text{Fe}-\text{C}$ (石墨) 状态图。

此双重状态图说明在铁碳合金里，碳实际上有时以化合态 (Fe_3C) 出现，有时以游离态 (石墨) 存在，这在铸铁中表现得最为明显。在生产中，有白口铸铁和灰口铸铁，白口铸铁中的碳就是以渗碳体 (Fe_3C) 的形式出现，在灰口铸铁中，碳是以石墨状态存在。铸铁中的碳只有以石墨形式出现，才是完全平衡或稳定的 $\text{Fe}-\text{C}$ 系。若还有渗碳体，则它是不完全稳定的或叫介稳定的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 系。本书着重研究含碳量在 2.11% 以上的铸铁部分。

二、主要相结构

1. 石墨

铁-碳合金中的高碳相，当冷却速度较慢或含碳量很高时，就会以石墨的形态出现。铸铁中的石墨不是非晶态碳的集合体，而是结晶体，不论是片状石墨还是球状石墨，都具有同样的晶格结构 (图 1-2)。石墨是由六方的层状组织集合而成的。这是若干种基本晶体构造中的一种，其晶格常数 $a = 0.2456 \text{ nm}$, $c = 0.6696 \text{ nm}$ ，原子网格的平面由正

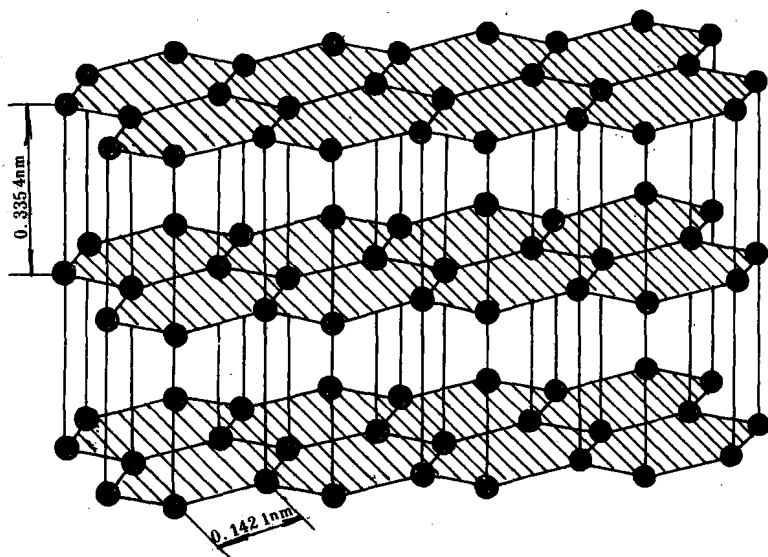


图 1-2 石墨的晶体结构

六角形的环为基本单位相连成片状形式，这些平面平行地堆积起来形成层状结构。碳原子之间的距离在层内为 0.1421 nm，在层间为 0.3354 nm，层内与层间的结合状况有显著的差别。形成石墨晶体的键，在层内是相当牢固的共价键，构成六角形网状单元的复合体。与此相比层间的结合只不过是靠相当弱的分子键来维持的。

由于上述层内与层间结合方式的不同，石墨晶体中在与层相平行的方向 (a 轴方向) 及相垂直的方向 (c 轴方向) 上，各种性质差异很大，即各向异性很显著。例如：①石墨的基面 (0001) 易于滑移；②与基面相比，柱面 (10 $\bar{1}$ 0) 的表面能非常大；③优先生长的方向是与基面平行的方向^{〔1〕}。

因为石墨的各向异性，因此形成共价键的方向，即基面的扩展方向，必须是优先生长的方向。常压下，石墨不易熔化，石墨熔点接近 4000℃。

2. 渗碳体

渗碳体的晶体结构已有许多研究，晶格常数和原子排列方式已经精密地确定了下来。渗碳体的晶格是斜面晶，晶格常数 $a = 0.5089 \text{ nm}$, $b = 0.6744 \text{ nm}$, $c = 0.4524 \text{ nm}$ ^{〔2〕}。渗碳体中铁和碳原子所处的位置如图 1-3^{〔1〕} 所示，碳处在六个铁原子所形成的三棱柱的中心，

Fe-C 间的距离平均为 0.201nm。体积小的碳原子以间隙原子的形式进入铁原子骨架内的最大间隙位置，这时铁原子与碳原子之间的键除了有共价键的特性之外，还有一些金属键的特点，可以说渗碳体具有一些固溶体的性质。

铁原子间的结合是金属键，铁碳原子结合兼有金属键和共价键的性质，但是由于铁与碳的电负性存在差异，使 Fe-C 键的结合力更强一些。因此，渗碳体表现出坚硬和熔点高的特点，这与纯铁、碳二元系不易石墨化也有关系：渗碳体以稳定的三棱柱形式沿 (010) 面按层状堆砌而成，层间的结合力比较弱，因此渗碳体具有各向异性。渗碳体是一种不稳定的组织，它在一定条件下，会分解成铁和石墨。

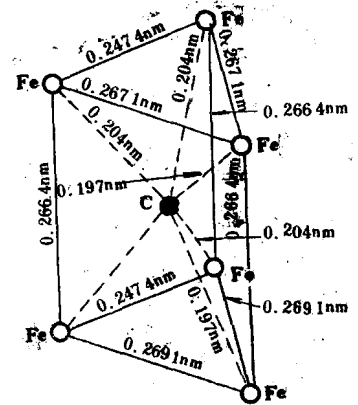


图 1-3 渗碳体中碳原子所处的位置

3. 奥氏体

在铸铁的凝固过程中，奥氏体与石墨何者优先结晶是决定石墨成长方式的重要因素。奥氏体组织形态还对共析转变后的最终组织有很大的影响。

奥氏体的晶格以铁的面心立方晶格为基础，碳原子以间隙方式、硅原子以置换方式固溶于奥氏体之中。纯 γ -Fe 的晶格常数为 $0.3616 + 0.8496 \times 10^{-5} t$ (nm) (t 代表温度，单位 $^{\circ}\text{C}$)，碳与硅进入后 γ -Fe 晶格略有膨胀。

图 1-4^{〔1〕} 表示奥氏体中碳原子溶入的位置，碳原子溶入在面心立方晶格的最大间隙位置 ($1/2, 1/2, 1/2$)。固溶到奥氏体内的碳原子以间隙方式存在，铁原子仍然构成完整的晶格。石墨从奥氏体中析出时，并不是从完整的 γ -Fe 晶体中析出，需要铁原子移动形成空位。

4. 莱氏体

莱氏体是白口铸铁在共晶转变时得到的一种共晶混合组织，它在共析转变后由渗碳体基体与珠光体组成，是一种既硬又脆的组织^{〔2〕}。

5. 铁素体

铁素体是以铁的体心立方晶格为基础形成的，类似于奥氏体的情况，可以允许碳原子间隙固溶，硅原子置换固溶。纯 α -Fe 的晶格常数为 $0.2860 + 0.4252 \times 10^{-5} t$ (nm) (t 代表温度，单位 $^{\circ}\text{C}$)^{〔1〕}，碳与硅溶入时， α -Fe 晶格体积略有膨胀。图 1-5(a) 表示体心立方晶格最大空隙位置为四面体位置 ($1/2, 1/4, 0$)。实际上，在铁素体中碳原子倾向于在更小的空隙半径的位置 ($0, 0, 1/2$) 上间隙固溶 (图 1-5(b))。这可能是碳原子在铁的晶格中固溶时，Fe-C 键的方向性所致。

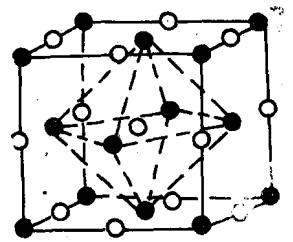


图 1-4 奥氏体中碳原子的间隙位置

6. 珠光体

珠光体是奥氏体在共析转变时的产物，它是铁素体和渗碳体的混合组织。随着共析转变时过冷度大小的不同，铁素体片与渗碳体片之间的距离也不一样。过冷度大，则片间距小，反之，则片间距大。片间距的大小称作珠光体的分散度，片间距越小，它的分散度就越大，强度与硬度就越高。反之，片间距越大，分散度越小，强度与硬度越低。对于形成珠光体来

说, 共析转变温度越低越有利。加入铜、钴、镍等元素时, 虽然使渗碳体不稳定, 但降低了共析转变点, 有利于形成分散度较高的珠光体(图 1-6)。

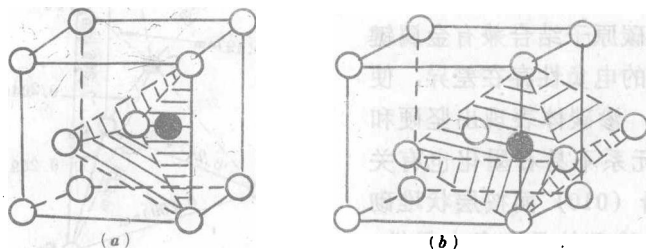


图 1-5 铁素体(体心立方晶格)中碳原子的间隙固溶位置

(a) 四面体位置, 间隙半径为 0.036nm

(b) 八面体位置, 间隙半径为 0.019nm

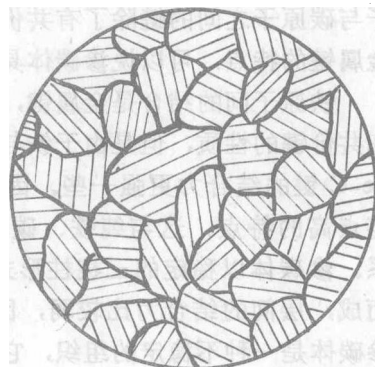


图 1-6 珠光体示意图

第二节 铸铁的组织转变

一、铸铁的一次结晶过程

由铁-碳状态图可知, 铸铁的凝固过程有稳定和介稳定两个体系, 白口铸铁的结晶过程应按 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图来描述。灰口铸铁、球墨铸铁等的一次结晶过程应按 $\text{Fe}-\text{C}$ 状态图来描述。铸铁的实际结晶过程常常是在不平衡的条件下进行的, 下面研究几种典型铸铁的结晶过程和组织转变。

1. 白口铸铁的一次结晶过程及组织转变

(1) 共晶白口铸铁

碳当量为 4.3% 的铁水冷却到 1148°C 时, 在恒温条件下, 就要发生共晶转变。冷却速度较快时, 共晶转变的产物为莱氏体, 它是奥氏体和渗碳体的混合物, 此时奥氏体的含碳量为 2.14%。当温度继续下降时, 其中的渗碳体不再发生变化, 而奥氏体的成分将沿 ES 线变化, 并有二次渗碳体出现。当冷却至 727°C 时, 奥氏体的含碳量相当于共析点的成分 (0.77% C)。继续冷却时, 含碳量为 0.77% 的奥氏体变为珠光体, 室温下所看到的共晶白口铸铁由渗碳体和珠光体组成, 这种组织亦可称作莱氏体⁽²⁾。共晶白口铸铁的显微组织如图 1-7 所示。

(2) 亚共晶白口铸铁

含碳量大于 2.11% 而碳当量小于 4.30% 的铁水为亚共晶铁水。它冷却到结晶温度后, 先从液态中结晶出一部分树枝状的初生奥氏体。随后不断地析出奥氏体, 其成分沿 JE 线变化, 液相成分沿 BC 线变化。当温度降到 1148°C 时, 奥氏体的含碳量达到 2.04%, 剩余液相的成分相当于共晶成分。此时剩余的液相就发生共晶转变, 形成莱氏体。在以后的继续冷却过程中, 初生奥氏体和莱氏体中的奥氏体都要析出二次渗碳体。奥氏体的含碳量沿 ES 线变化, 当冷却到 727°C 时, 含碳量相当于共析点成分, 接着就发生共析转变, 形成珠光体⁽²⁾。亚共晶白口铸铁在室温下的显微组织如图 1-8 所示。

(3) 过共晶白口铸铁

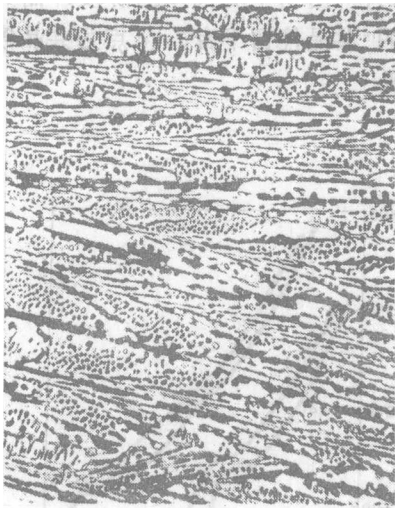


图 1-7 共晶白口铸铁的显微组织, $\times 100$



图 1-8 亚共晶白口铸铁的显微组织, $\times 100$

碳当量大于 4.3% 的铁水为过共晶铁水。冷却到开始结晶温度以后, 首先从液相中析出初生渗碳体。这种直接由液相中析出的渗碳体呈粗大的片状, 称为一次渗碳体 (Fe_3C)。随着温度的下降, 它不断析出, 液相成分沿 CD 线变化。冷却到共晶温度 1148°C 时, 剩余液相达到了共晶成分, 发生共晶转变而生成莱氏体。继续冷却时, 其组织转变就与共晶白口铸铁相同, 莱氏体中的奥氏体析出二次渗碳体而使奥氏体成分沿 ES 线变化, 到共析转变温度 727°C 时, 含碳量为 0.77% 的奥氏体转变为珠光体。图 1-9 为过共晶白口铸铁的显微组织。

文献[3]认为, 过共晶白口铸铁在正常的条件下结晶出的一次渗碳体以带有锯齿状边缘的板状方式生长, 正常的莱氏体组织为奥氏体形成的一个个长圆形的“芯子”, 位于连续的渗碳体之中, 构成的蜂窝状共晶体。上述图 1-7、图 1-8、图 1-9 的组织是正常状态下的组织, 而在某些情况下则形成离异的莱氏体和板状渗碳体型莱氏体。这可能是由于剩余共晶液体的量太少, 共晶奥氏体不易形核, 引起了共晶的离异。由图 1-10^[3] 可见, 板条状的渗碳体形成时的过冷度比正常莱氏体要大, 其冷却曲线的特点是达到最大的过冷度后, 有较大的温度回升 (20°C 以上), 之后以较快的速度下降。其原因是由于过热使 c 、 d 试样中的非均质晶核受到破坏, 从而达到了较大的过冷度。

2. 灰口铸铁的一次结晶过程及组织转变^[3]

(1) 灰口铸铁凝固时的冷却曲线特征

生产实践证明, 使用最多的是亚共晶灰口铸铁。因此, 在讨论凝固结晶过程之前, 考察一下亚共晶铸铁在一次结晶期间的热分析曲线 (冷却曲线) 是有益的, 因为它反映了结晶过程中各个阶段的情况。图 1-11 是一条实测的热分析曲线。从图上可以看出, 当铁水温度下降到平衡液相线温度以下的 a 点时, 冷却曲线上出现转折点, 这表示初生奥氏体开始析出。在温度持续下降至 b 点的过程中, 奥氏体继续析出, b 点为共晶转变的开始点。在共晶转变的起始阶段, 温度降至 c 点, 由于共晶转变中晶核的大量形成和生长, 放出结晶潜热的速度超过了散热速度, 故 c 点后温度又有回升 (即过冷度自动减少)。至 d 点, 由于过冷度自动

减少，结晶速度以及与之相适应的结晶潜热放出的速度放慢，故温度开始重新下降，至 e 点整个共晶转变结束，亦即一次结晶终了。可见， ab 间为析出初生奥氏体的阶段，而共晶转变则是在 b 至 e 间完成的。 be 线段常称为冷却曲线上的“共晶停留平台”， c 点为共晶停留的最低温度，它决定了共晶转变期间所达到的最大过冷度。

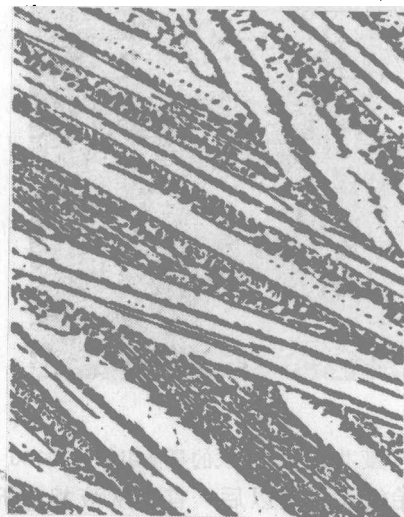


图 1-9 过共晶白口铸铁的显微组织， $\times 100$

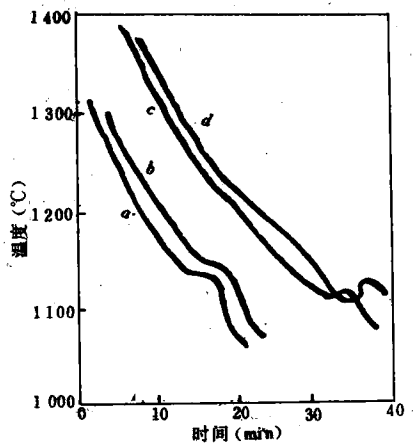


图 1-10 正常莱氏体和板条状渗碳体型莱氏体组织的白口铸铁冷却曲线

a 、 b —过热至 1300°C 的正常莱氏体

c 、 d —过热至 1500°C 的板条状渗碳体型莱氏体

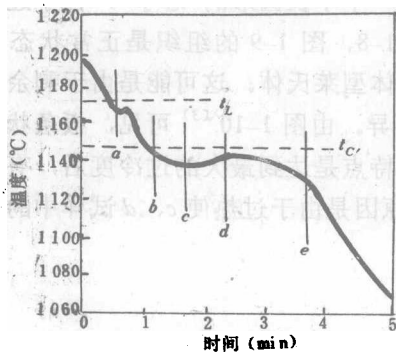


图 1-11 亚共晶灰口铸铁的冷却曲线

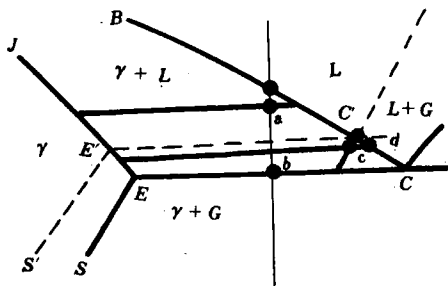


图 1-12 铁-碳状态图一角

对于共晶成分的铸铁，冷却曲线上则没有 a 转折点，也就不会有 ab 段的初生组织。如果为过共晶铸铁，则初生组织为初生石墨，在冷却曲线上会出现相应的转折点，但温度有所不同。

冷却曲线显示冷却过程中的相变情况，以下讨论灰口铸铁的凝固过程及形成的组织。

(2) 亚共晶灰口铸铁的凝固过程及组织转变

2) 当亚共晶成分的铁水冷却到液相线温度以下，达到某个过冷度时（图 1-12 上的 a 点），从液体中开始析出初生奥氏体枝晶。据资料分析，可以说金属性较强的组成相在其本身成分的液体中（例如奥氏体钢液中）结晶，一般以树枝状生长，亚共晶的铁水中奥氏体的结晶便是如此。随着温度的继续下降，奥氏体枝晶不断形成和长大，残留熔体逐渐减少，同时碳的浓度不断增加。当冷却速度比较缓慢，结晶过程接近于平衡条件时，初生奥氏体的含碳量大体上沿 JE' 线向 E' 点变化，残留熔体的含碳量则大体上沿 BC' 线向 C' 点变化。而当冷却速度较快，扩散过程来不及充分进行时，初生奥氏体及熔体的成分将偏离平衡状态，在奥氏体枝晶内形成碳、硅、锰等元素的晶内偏析。

当温度降低到略低于稳定系共晶平衡温度（普通灰铸铁约在 1150°C 以下）时（图 1-12 上 b 点），奥氏体枝晶之间的熔体含碳量（图 1-12 上 d 点）已变得过饱和了。此时，如果石墨晶核能够形成和生长，则石墨与熔体界面的熔体含碳量又会减少（图 1-12 上 c 点），这为奥氏体的析出创造了条件，奥氏体的析出反过来又促使了石墨的继续生长，从这时开始，出现了熔体同时转变为奥氏体和石墨的条件，即进入到了共晶转变的阶段。

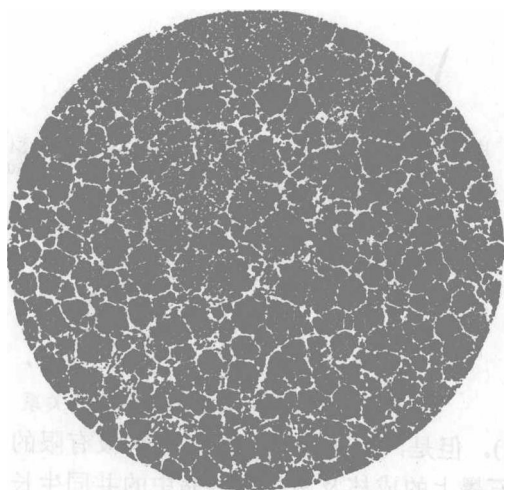


图 1-13 灰口铸铁中的共晶团， $\times 10$

通常，在不太大的过冷度下，共晶转变时石墨为领先相，首批石墨晶核的形成标志着共晶转变的开始。铸铁熔体中存在着的亚微观石墨聚集体、未熔的微细石墨颗粒，某些高熔点的夹杂物颗粒（硫化物、碳化物、氮化物及氧化物等）都可能成为石墨的非均质晶核。石墨晶核在其生长过程中很快形成片状分枝，邻近石墨的熔体发生贫碳，促使奥氏体以石墨片的(0001)面为基础，在石墨片之间析出。奥氏体的生长反过来又引起邻近熔体的富碳，促进了石墨片的继续生长。就这样，由石墨领先，石墨与奥氏体从晶核出发，相互促进，同时向四周熔体内生长。石墨在生长过程中不断发生分枝，奥氏体便不断在石墨片分枝之间析出，形成大致接近于球形的结晶前沿，石墨片的(0001)面有奥氏体包围，碳原子扩散困难，故进一步有利于石墨呈片状发展。在结晶前沿，石墨和奥氏体两相与熔体接触的界面并不是平滑的，石墨片的端部始终凸出伸向熔体之中，保持着领先向熔体内生长和分枝的势态。以每个石墨晶核为中心所形成的这样一个石墨-奥氏体两相共生生长的共晶晶粒称为共晶团（见图 1-13）。共晶转变开始阶段，初生奥氏体枝晶间的熔体内开始形成首批的细小共晶团，之后，各个共晶团在熔体中生长，但在熔体凝固完毕之前，多数共晶团均被残留的少量熔体所隔离。当共晶凝固结束之时，各个共晶团之间以及初生奥氏体枝晶之间相互衔接。共晶团晶界上常聚集着较多的夹杂物，有些元素（如磷）组成的低熔点共晶体也在共晶团之间最后析出。各个共晶团中的奥氏体和初生的奥氏体枝晶构成连续

的金属基体。每个共晶团内的石墨连续构成一簇立体状，分布于金属基体之中。

灰口铸铁中共晶团的尺寸（或单位体积、面积、长度内共晶团的数目）取决于共晶凝固时的成核及生长条件。冷却速度及过冷度愈大，非均质晶核愈多，生长速度愈慢，整个共晶

转变期间实际形成的晶核数目就愈多，共晶团的尺寸也愈小。

(3) 共晶灰口铸铁的凝固过程及组织转变

如果铸铁的成分十分接近或正好是共晶成分，则此种共晶灰口铸铁的一次结晶无初生相析出，共晶转变就是它的全部内容。其共晶转变同样是晶核的形成及共晶团的生长，最后形成的一次结晶组织完全由共晶团所组成。

(4) 过共晶灰口铸铁的凝固过程及组织转变

过共晶灰口铸铁的一次结晶由初生石墨开始。初生石墨呈粗大的分枝很少的片状，它是在熔体中自由长大的。随着温度的继续下降，初生石墨不断生长的同时，残留熔体逐渐贫碳，其成分大致沿液相线 $D'C'$ 向 C' 点变化，当温度进一步下降至稳定共晶平衡温度以下时，如果过冷度不很大，则共晶石墨可在初生石墨的基础上析出，随后进行共晶反应，其一次结晶组织与共晶灰口铸铁或接近共晶的亚共晶灰口铸铁相类似。所不同的是，有粗大的初生石墨片存在。当过共晶灰口铸铁进行共晶转变的过冷度较大时，除有部分共晶石墨沉积在初生石墨上进行共晶转变外，在熔体中的其它部分还会形成新的共晶晶核。此时形成的石墨在共晶团内呈较细的片状形式。

3. 球墨铸铁的一次结晶过程

目前生产中所使用的球墨铸铁，其碳当量多属于共晶或稍过共晶成分的铸铁，其一次结晶过程主要是共晶转变。有关球墨铸铁共晶转变的理论很多，文献[3]综合了大多数试验研究结果，将球墨铸铁的共晶转变过程描述如下。根据条件的不同，球墨铸铁的共晶转变可高于或稍低于共晶平衡温度，从熔体中形成一批细小球状石墨开始（在过共晶球墨铸铁中，无疑在石墨液相线温度以下，

即冷却曲线上 T_{GL} 的拐点处已有球状石墨析出）。但是，石墨晶核形成并得到极有限的生长以后，并不像灰口铸铁那样立即引起奥氏体在石墨上的成核及两相在共晶中的共同生长，而是球状石墨在四周与熔体直接接触的条件下，可以单独生长到相当的尺寸。随着球状石墨的生长，周围的熔体中发生贫碳，这部分低碳熔体就会转变为奥氏体，形成包围球状石墨一圈的奥氏体外壳。奥氏体外壳一旦形成，其中球状石墨的生长速度便急剧下降。因为碳原子的扩散受到了奥氏体外壳的强烈阻碍。此后，如果铁水未曾得到良好的孕育，不能继续形成大量晶核的话，往往在凝固后期会按亚稳定系结晶而形成自由渗碳体。由于结晶速度的降低，使得单位时间内放出的结晶潜热相应减少，致使结晶温度发生显著的持续下降，在冷却曲线上则表现为过冷持续地进入亚稳系共晶区间。如果铁水不但经过球化处理，而且还得到良好的孕育的话，则在某些球状石墨的生长受到奥氏体外壳包围的同时，又不断出现新的晶核，结晶过程仍能顺利进行，过冷度的持续加大不会得到很大的发展，从而表现出不同的温度回升。

图 1-14^{〔1〕} 显示出石墨形状与热分析曲线的关系特征。从中可以看出，球墨铸铁铁水热分析曲线上的所谓共晶终点比片状石墨铸铁的共晶终点低，而且其停顿表现得不很明显，这就意味着球墨铸铁的生长过程是非平衡过程。与此相反，蠕虫状石墨铸铁铁水的共晶转变终

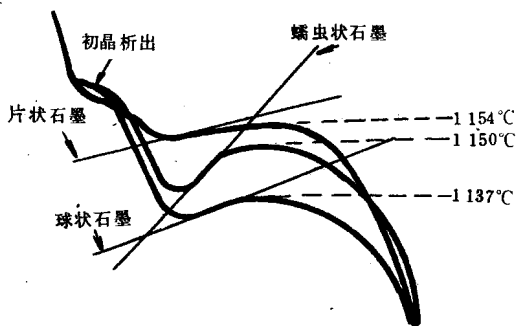


图 1-14 石墨形状与热分析曲线的关系