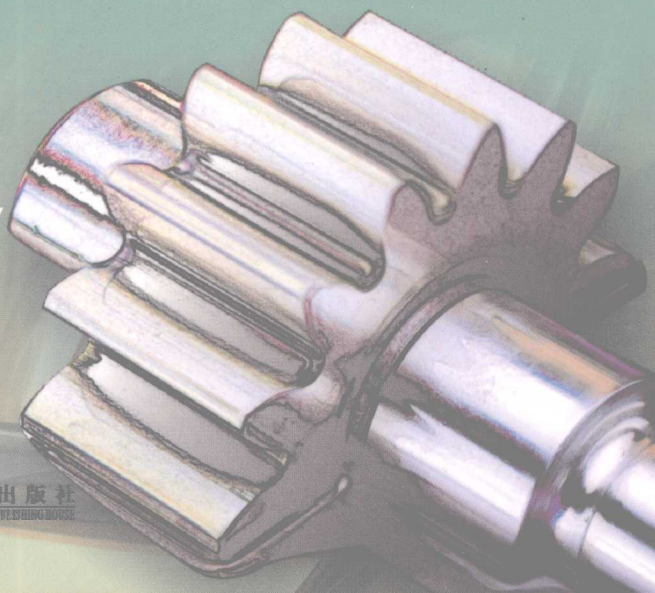


实用铸造技术丛书

# 实用铸铁技术

SHIYONG ZHUTIE JISHU

胡家骥 主编



实用铸造技术丛书

# 实用铸铁技术

胡家骢 主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

**图书在版编目 (CIP) 数据**

实用铸铁技术/胡家骢主编. — 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008. 10

(实用铸造技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5381 - 5386 - 6

I. 实… II. 胡… III. 铸铁件 - 铸造 IV. TG25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097779 号

---

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳全成广告印务有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 17

字 数: 370 千字

印 数: 1 ~ 4000 册

出版时间: 2008 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 秦丽娟

封面设计: 留藏设计工作室

版式设计: 于 浪

责任校对: 王玉宝

---

书 号: ISBN 978 - 7 - 5381 - 5386 - 6

定 价: 32.00 元

联系电话: 024 - 23284360

邮购热线: 024 - 23284502

E-mail: elecom@mail.lnpgc.com.cn

http: //www.lnkj.com.cn

## 作者简介

胡家骢同志 1964 年毕业于浙江大学机械系铸造专业。原中国农业机械化科学研究院铸造研究室主任。从事铸造科研和生产工作 40 多年，负责并参加过多项国家和省部级铸造课题的攻关和研究工作，曾获国家科技进步二等奖一项，省部级科技进步二等奖和三等奖各一项，全国机械系统科学大会奖两项。在专业期刊上发表论文 30 多篇，参与编写著作 3 部。

## 内容简介

本书较全面、通俗地介绍铸铁件的实用生产技术。内容包括各种铸铁件的材质、熔炼、热处理、造型（芯）材料和铸造工艺及铸铁件的生产等。主要读者为在第一线从事铸铁件生产的铸造工程技术人员、技师和高级工，也可供涉及铸造技术的企业管理人员、非铸造专业技术人员参考。

# 目 录

|                  |    |
|------------------|----|
| 第一章 铸铁材质和熔炼      | 1  |
| 第一节 铸铁的凝固结晶及组织形成 | 1  |
| 一、铁—碳双重相图        | 1  |
| 二、铸铁的一次结晶        | 6  |
| 三、铸铁的固态相变        | 10 |
| 四、影响铸铁组织和性能的主要因素 | 12 |
| 第二节 灰铸铁          | 21 |
| 一、灰铸铁的组织 and 性能  | 21 |
| 二、灰铸铁的标准和选用      | 32 |
| 三、灰铸铁的冶金质量指标     | 36 |
| 四、提高灰铸铁性能的主要途径   | 38 |
| 第三节 球墨铸铁         | 47 |
| 一、球墨铸铁的组织 and 性能 | 47 |
| 二、球墨铸铁的化学成分      | 55 |
| 三、球化处理 and 孕育处理  | 59 |
| 四、球墨铸铁的标准 and 生产 | 64 |
| 第四节 其他各种常用铸铁     | 69 |
| 一、蠕墨铸铁           | 69 |
| 二、可锻铸铁           | 72 |
| 三、抗磨铸铁           | 77 |
| 四、冷硬铸铁           | 83 |
| 五、耐热铸铁           | 87 |
| 六、耐蚀铸铁           | 95 |
| 第五节 铸铁熔炼         | 99 |
| 一、概述             | 99 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 二、冲天炉熔炼 .....                   | 101 |
| 三、电炉熔炼及双联熔炼 .....               | 122 |
| <b>第二章 造型和造芯用材料及其性能</b> .....   | 130 |
| 一、造型和造芯用原辅材料 .....              | 130 |
| 二、型砂、芯砂及其性能 .....               | 146 |
| 三、涂料及其性能 .....                  | 166 |
| <b>第三章 铸铁件的铸造工艺</b> .....       | 172 |
| <b>第一节 铸铁零件结构的工艺分析</b> .....    | 172 |
| 一、铸铁件质量对零件结构的要求 .....           | 172 |
| 二、铸造工艺对零件结构的要求 .....            | 185 |
| 三、铸铁合金种类对零件结构的要求 .....          | 193 |
| <b>第二节 造型方法和铸造工艺方案的确定</b> ..... | 199 |
| 一、造型方法的分类和特点 .....              | 199 |
| 二、手工造型操作 .....                  | 203 |
| 三、铸造工艺方案的确定 .....               | 206 |
| <b>第三节 铸造工艺参数</b> .....         | 210 |
| <b>第四节 砂芯和铸造工艺设计</b> .....      | 222 |
| 一、砂芯 .....                      | 222 |
| 二、浇注系统 .....                    | 236 |
| 三、冒口 .....                      | 252 |
| 四、出气孔 .....                     | 259 |
| 五、冷铁 .....                      | 263 |
| 六、一般工艺设计举例 .....                | 264 |
| 七、铸件工艺出品率 .....                 | 266 |
| <b>第五节 铸造工艺装备设计</b> .....       | 267 |
| 一、模样 .....                      | 267 |
| 二、模板 .....                      | 270 |
| 三、芯盒 .....                      | 280 |
| 四、砂箱 .....                      | 302 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 五、其他工艺装备 .....                | 320 |
| 六、部分造型机和造芯机规格 .....           | 322 |
| <b>第四章 铸铁热处理</b> .....        | 341 |
| 一、铸铁热处理的基本原理 .....            | 341 |
| 二、灰铸铁热处理 .....                | 347 |
| 三、球墨铸铁热处理 .....               | 353 |
| 四、其他铸铁热处理 .....               | 367 |
| <b>第五章 典型铸铁件及其生产</b> .....    | 373 |
| 一、灰铸铁件 .....                  | 373 |
| 二、球墨铸铁件 .....                 | 391 |
| 三、蠕墨铸铁件 .....                 | 399 |
| 四、可锻铸铁件 .....                 | 405 |
| 五、抗磨铸铁件 .....                 | 409 |
| 六、冷硬铸铁件 .....                 | 413 |
| 七、耐热铸铁件 .....                 | 426 |
| 八、耐蚀铸铁件 .....                 | 431 |
| <b>第六章 铸铁件的质量控制</b> .....     | 438 |
| <b>第一节 生产过程中的质量控制</b> .....   | 438 |
| 一、质量控制因素分析 .....              | 438 |
| 二、铁液质量的控制 .....               | 439 |
| 三、铸铁件的修补 .....                | 446 |
| <b>第二节 铸铁件的质量检验与控制</b> .....  | 448 |
| 一、铸铁件的内在质量 .....              | 448 |
| 二、铸铁件的外观质量 .....              | 451 |
| 三、铸铁件的质量检验 .....              | 454 |
| <b>第三节 铸铁件主要铸造缺陷的分析</b> ..... | 455 |
| <b>附录 有关国外铸铁部分标准</b> .....    | 467 |
| <b>参考文献</b> .....             | 532 |



# 第一章 铸铁材质和熔炼

## 第一节 铸铁的凝固结晶及组织形成

### 一、铁—碳双重相图

铸铁是以铁元素为基的含有碳、硅、锰、磷、硫等元素的多元铁合金，碳的质量分数一般在 2.0% ~ 4.0%。为了改善铸铁的某些性能，还经常有目的地向铸铁中加入其他合金元素。其中对铸铁的金相组织起决定作用的主要是铁、碳和硅。

#### 1. 铁—碳双重相图及分析

由于铸铁中的碳能以石墨或渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 两种独立相的形式存在，因而铁碳合金系统存在着  $\text{Fe}-\text{C}$  (石墨)、 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  双重相图，如图 1-1 所示。图中虚线表示  $\text{Fe}-\text{C}$  (石墨) 稳定系相图，实线表示  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  介稳定系相图。在实际生产中，石墨和渗碳体往往会同时出现在一个铸件上，因而必须研究铁—碳合金的双重相图，以及铸铁各种组织的形成。

从热力学观点看，奥氏体加石墨二相系的自由能低 (图 1-2)，在一定的条件下，高温时的渗碳体能自动地分解为奥氏体加石墨。一定成分的铸铁以奥氏体加石墨的状态存在时具有较低的能量，处于稳定平衡的状态。而奥氏体加渗碳体的组织，虽然亦是在某种条件下形成，在转变过程中也是平衡的，但不是最稳定的。

从结晶动力学 (晶核的形成与长大过程) 的观点看，对含 C 质量分数为 4.3% 的共晶成分液体，在液体中形成含 C 6.67% 的渗碳体晶核要比形成含 C 100% 的石墨晶核容易，故容易进行

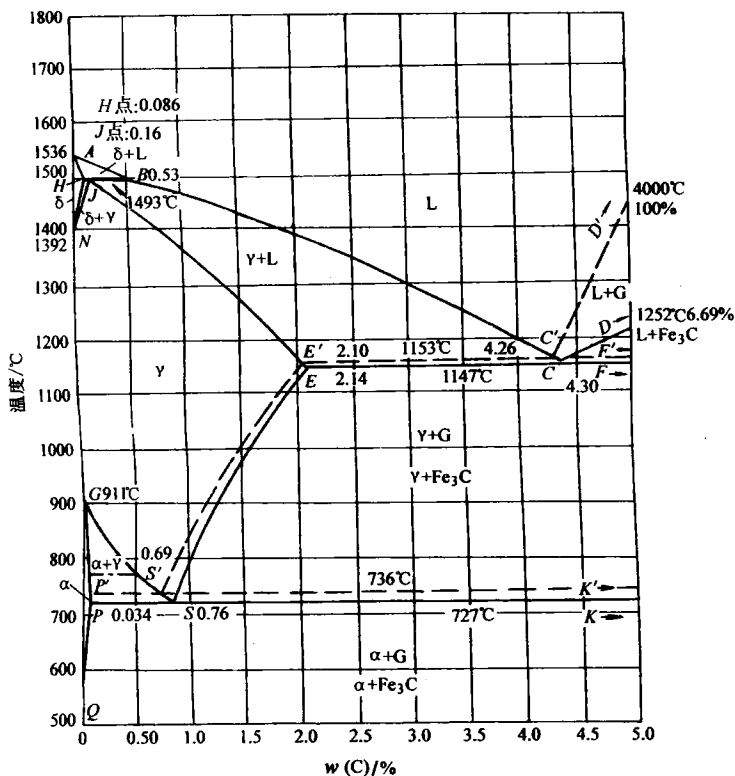


图 1-1 铁—碳双重相图

奥氏体加渗碳体共晶转变。

铸铁的共析转变，也可以从热力学和动力学两个方面分析而得到与上面相似的结论。

由此可见，从热力学观点上看，Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图只是介稳定的，Fe—C（石墨）相图才是稳定的。从动力学观点看，在一定条件下，按 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图转变亦是可能的。因此就出现了铸铁在结晶过程中的铁—碳相图两重性。

在铸造生产中，经常会碰到这样的问题：用相同成分的铁液浇注不同壁厚的铸件或用不同的冷却速度铸型时，会得到灰口或白口断面的铸件。这是由于冷却速度不同而导致共晶凝固温度的高低不同所致。如在  $T_c$  以下、 $T_c$  以上凝固，一般可得到灰口断面；如过冷至  $T_c$  以下凝固，则有可能进行奥氏体和渗碳体的结晶，形成白口断面。

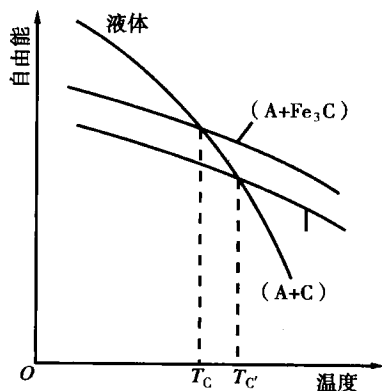


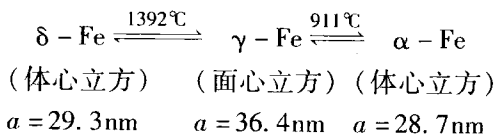
图 1-2 铸铁中各种组成体的自由能随温度而变化的示意图

除冷却速度外，化学成分对铸铁组织的形成亦产生很大的影响，其中以硅（除碳以外）的影响最大。铸铁中硅的质量分数一般在 0.8% ~ 3.5%。

## 2. Fe—C、Fe—Fe<sub>3</sub>C 双重相图中的基本组成

### (1) 纯铁

铁的密度为 7.68g/cm<sup>3</sup>。工业纯铁中含有 0.1% ~ 0.2% 的杂质。纯铁的熔点或凝固点为 1536℃，在 1392℃ 和 911℃ 有两个同素异构变化，经 X 射线结构分析证实，其变化过程为：



纯铁在加热或冷却过程中还有磁性转变。温度高于 770℃ 时无磁性，温度低于 770℃ 时有磁性。

### (2) 渗碳体 (Fe<sub>3</sub>C)

渗碳体是具有复杂晶体结构的间隙化合物。碳与铁的原子半

径比为 0.63。 $\text{Fe}_3\text{C}$  的晶体结构如图 1-3 所示。

在渗碳体中铁与碳原子的比例为 3:1。渗碳体的密度为  $7.67\text{g}/\text{cm}^3$ 。

在渗碳体中，铁原子可以被其他金属原子如 Mn、Cr、W、Mo 等置换，分别形成  $(\text{FeMn})_3\text{C}$  和  $(\text{FeCr})_3\text{C}$  等以  $\text{Fe}_3\text{C}$  为基体的置换固溶体，称为合金渗碳体。 $\text{Fe}_3\text{C}$  中的碳可被硼置换，形成  $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ ，但碳不能被氮置换。渗碳体的显微硬度为 950~1050HV。

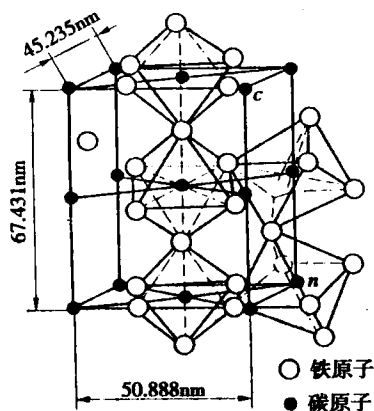


图 1-3  $\text{Fe}_3\text{C}$  的晶体结构

### (3) 石墨

石墨是碳的一种同素异形体，属六方晶系。石墨的晶体结构如图 1-4 所示。石墨的密度为  $2.25\text{g}/\text{cm}^3$ 。石墨晶体中的碳原子是层状排列的，在同层原子之间是以共价键结合，其结合力较

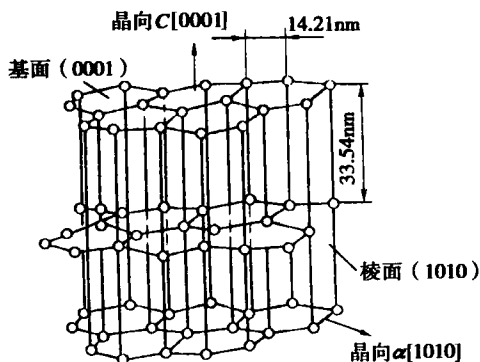


图 1-4 石墨的晶体结构

强；而层与层之间则以极性键结合，其结合力较弱。因此，石墨极易分层剥离，强度极低。由于石墨晶体具有这样的结构特点，在铁液中长大时就容易长成片状结构。

### 3. Fe—C、Fe—Fe<sub>3</sub>C 双重相图中的组成相

Fe—C、Fe—Fe<sub>3</sub>C 双重相图中的各组成相情况见表 1-1。

表 1-1 Fe—C、Fe—Fe<sub>3</sub>C 双重相图中的组成相

| 组成相                      | 说 明                                                                                     |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 液溶体 L                    | 即液相，为碳或其他元素在铁中的无限液溶体，存在于液相线之上                                                           |
| δ 铁素体、<br>α 铁素体          | 即 δ 相、α 相，为碳在铁中的间隙固溶体，体心立方晶格，δ 相存在于 1392 ~ 1536℃ 之间，α 相存在于 911℃ 以下                      |
| 奥氏体 A                    | 即 γ 相，为碳在 γ-Fe 中的间隙固溶体，面心立方晶格，存在于 727 ~ 1493℃ 之间                                        |
| 石墨 C                     | 铸铁中以游离状态存在的碳，按稳定态转变时的高碳相，有初生石墨、共晶石墨、二次石墨和共析石墨，其形态主要有片状、蠕虫状、团絮状及球状                       |
| 渗碳体<br>Fe <sub>3</sub> C | 铁和碳的间隙化合物，具有复杂的正交晶格。按介稳定态转变时的高碳相。有初生渗碳体（一次渗碳体）、共晶渗碳体、二次渗碳体及共析渗碳体，渗碳体的形状有大片状、莱氏体型、板条状及网状 |
| 莱氏体<br>L <sub>d</sub>    | 为按介稳定态转变时的共晶组织，由奥氏体与渗碳体组成的机械混合物，冷却到 A <sub>r1</sub> 以下温度时，则由珠光体与渗碳体组成                   |
| 珠光体 P                    | 是过冷奥氏体在共析温度时形成的机械混合物，由铁素体和渗碳体按层片状交替排列的层状组织，有片状珠光体、细片状珠光体（索氏体）及极细珠光体（托氏体）                |

#### 4. 碳当量和共晶度的意义及表达式

根据各元素对共晶点实际碳量的影响, 将这些元素的量折算成碳量的增减, 称为碳当量, 以  $w(\text{CE})$  表示。为简化计算, 一般只考虑 Si、P 的影响, 因而:

$$w(\text{CE}) = w(\text{C}) + \frac{1}{3}w(\text{Si} + \text{P}) \quad (1-1)$$

将  $w(\text{CE})$  值与  $C'$  点  $w(\text{C}) = 4.26\%$  相比, 即可判断某一成分的铸铁偏离共晶点的程度, 如  $w(\text{CE}) > 4.26\%$  为过共晶成分,  $w(\text{CE}) = 4.26\%$  为共晶成分,  $w(\text{CE}) < 4.26\%$  为亚共晶成分。

铸铁偏离共晶点的程度还可由铸铁的实际含碳量与共晶点的实际含碳量的比值来表示, 称为共晶度, 以  $Sc$  表示:

$$Sc = \frac{C_{\text{铁}}}{C_{C'}} = \frac{C_{\text{铁}}}{4.26 - \frac{1}{3}(\text{Si} + \text{P})} \quad (1-2)$$

式中  $C_{\text{铁}}$ ——铸铁实际碳的质量分数, %;

$C_{C'}$ ——稳定态共晶点碳的质量分数, %;

Si、P——铸铁中硅、磷的质量分数, %。

如  $Sc > 1$  为过共晶、 $Sc = 1$  为共晶、 $Sc < 1$  为亚共晶成分铸铁。

根据 CE 的高低、 $Sc$  的大小还能间接地推断出铸铁铸造性能的好坏以及石墨化能力的大小, 因此它是一个比较重要的参数。

## 二、铸铁的一次结晶

铸铁从液态转变成固态的一次结晶过程, 包括初析和共晶凝固两个阶段, 具体有初析石墨或初析奥氏体的形成; 共晶凝固以及共晶后期组织的形成; 碳化物的形成等。

### 1. 铸铁熔液

铸铁熔液在结构上是近程有序的, 并伴随着温度起伏, 存在

着结构起伏和浓度起伏。铸铁在熔融状态下并非单相液体，而是存在着未溶解石墨分子和渗碳体分子的多相体。

可用离心分离的方法证明铸铁熔液中存在碳原子集团。碳原子集团的存在是铁液浓度起伏的结果。

铁液的遗传性对铸铁的组织形成和各种性能影响很大。提高铁液的过热温度是改善炉料遗传性最有效的措施。当铁液温度提高到  $1550^{\circ}\text{C}$  时，熔体结构发生明显变化，微观均匀性明显提高。

## **2. 石墨的结晶**

### **(1) 初析石墨**

当过共晶成分的铁液冷却时，先遇到液相线，在一定的过冷度下便会析出初析石墨的晶核，并在铁液中逐渐长大。由于结晶时温度较高，成长时间较长，又是在铁液中自由地长大，根据石墨的结构特点，石墨常生长成分枝较少的片状。

### **(2) 片状石墨**

从图 1-4 石墨的六方晶格结构特点可以看出，石墨的正常生长方式应是沿基面的择优生长，最后形成片状石墨。

在实际的石墨晶体中存在着旋转晶界、螺旋位错和倾斜孪晶等缺陷，它们对石墨的长大有很大的影响。因此铁液的化学成分、过冷度，以及对其处理方法的不同，都影响了从铁液中析出的石墨形貌。

### **(3) 球状石墨**

一定成分的铁液，经过球化处理，使铁液中硫和氧的含量显著下降，此时球化元素在铁液中有一定的残留量，这种铸铁在共晶凝固中将形成球状石墨。

用显微镜低倍观察时，球状石墨接近球形；高倍观察时，球状石墨则呈多边形轮廓，内部呈现放射状。球状石墨的形貌见图 1-5 和图 1-6。

球状石墨可以从铁液中直接析出。无论是在亚共晶或是共晶成分的球墨铸铁中，小石墨球在远高于平衡共晶转变温度时就已

形成。随着温度的降低，石墨球在铁液中长大。球墨铸铁的凝固过程在比灰铸铁更大的过冷度下才能完成，它所跨越的凝固温度范围也就比灰铸铁要宽，呈现出“粥样凝固”的特点。

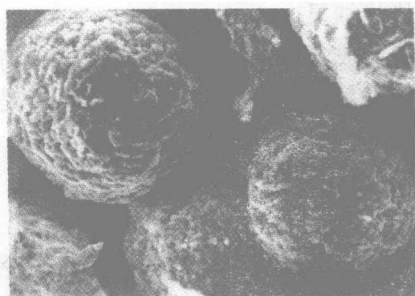


图 1-5 球状石墨的扫描电子显微镜照片  
1500 ×

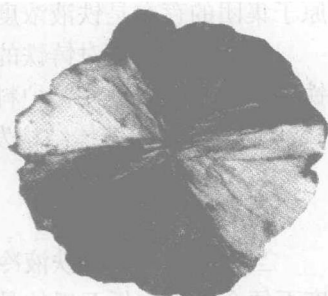


图 1-6 球状石墨的偏振光照片  
1000 ×

### 3. 初析奥氏体

初析奥氏体树枝晶在灰铸铁中的作用与钢筋在钢筋混凝土中的作用一样，能起到骨架的加固作用，并能阻止裂纹的扩展。

当铁液温度降低到液相线，并有一定的过冷度时，就要析出奥氏体。在非平衡条件下，往往共晶成分的铸铁，甚至过共晶成分的铸铁，在凝固过程中亦会析出初析奥氏体。

在铁液的实际凝固过程中，会产生奥氏体枝晶中的化学成分不均匀性（或称成分偏析）。按照铁—碳相图，先析出的奥氏体枝晶心部碳量较低，在逐渐长大的以后各层奥氏体中的碳量沿着图 1-1 中  $JE'$  线变化，即碳量逐渐增高，形成所谓“芯状组织”。

对奥氏体枝晶及其结晶前沿的微观分析表明，在初析奥氏体中有硅的富集，锰则较低，而在枝晶间的残存液体中则是碳高、锰高、硅低。这样在奥氏体的生长过程中，在结晶前沿就有不同元素的富集或贫乏，如形成了硅的反偏析和锰的正偏析，即存在



着较大的浓度不均匀性。在铸铁中，各元素在各相之间和相内的分布皆有这样的现象。

#### 4. 铸铁的共晶凝固过程

根据化学成分和冷却条件的不同，铸铁有两种共晶凝固转变方式：稳定系共晶转变和介稳定系共晶转变。前者转变产物为奥氏体加石墨，形成灰口断面的铸铁；后者转变产物为奥氏体加渗碳体，形成白口断面的铸铁。当然还可能有混合型的，断面呈麻口。

##### (1) 稳定系的共晶转变

图 1-7 说明了亚共晶灰铸铁共晶转变的全过程。

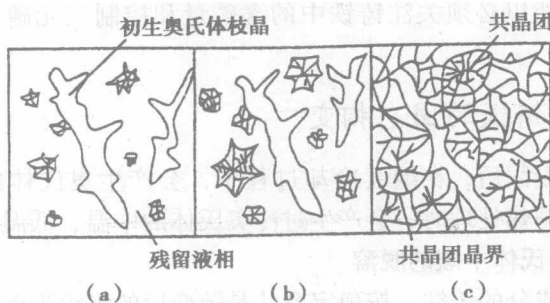


图 1-7 亚共晶灰铸铁共晶转变过程示意图

(a) 共晶转变开始阶段 (b) 转变中期 (c) 共晶转变終了

至共晶凝固结束时，各个共晶团内的奥氏体和初析奥氏体枝晶构成连续的金属基体，每个共晶团内的石墨构成连续的分枝立体形状，分布于金属基体之中。一些晶间夹杂物或硬化相则分散分布于共晶团或共晶集团之间。

##### (2) 介稳定系的共晶转变

当铸铁的化学成分和冷却速度变化时，铸铁的凝固现象也会发生变化。当共晶转变进入介稳定区域时，原共晶转变时的液相—奥氏体—石墨将改变成液相—奥氏体—渗碳体的三相平衡，