

第7章 铸 铁

铸铁是以铁-碳-硅为主的多元铁基合金。

普通铸铁的化学成分一般为2~4%碳，1~3%硅，0.02~0.25%硫，0.05~1.0%磷。

铸铁的铸造性能优良，因而通常采用铸造的方法制造成铸件使用，故称之为铸铁。

工业生产中铸铁的使用量仅次于钢材。

由于铸铁具有优良的**铸造性能**、**可切削加工性**、**耐磨性和吸震性**，**生产工艺简单**，**成本低廉**，因此，被广泛地应用于机械制造、冶金、矿山、石油化工、交通运输、建筑和国防生产部门。

-
- 在各类机械中，铸铁件约占机器总重量的45%—90%，在机床和重型机械中，则占机器总重量的85%~90%。
 - 通过添加合金元素或实施各种热处理，还可获得耐高温、耐热、耐蚀、耐磨、无磁性等各类特殊性能的铸铁。

7.1 铸铁的特点和分类

一、铸铁的特点

1、成分与组织的特点

铸铁与碳钢相比较，除了有较高的碳、硅含量外，还有较高的杂质元素硫和磷。

□ 铸铁中的碳主要有如下三种分布形式：

- ① 溶于铁晶格的间隙中，形成间隙固溶体，如铁素体、奥氏体；
- ② 与Fe生成化合物，如 Fe_3C 碳化物；
- ③ 以游离的石墨形式析出。

-
- 铸铁中的碳**主要是以石墨**的形态存在，所以，铸铁的组织是由**金属基体和石墨**所组成的。
 - 铸铁的金属基体有珠光体、铁素体、铁素体 + 珠光体，经热处理后有马氏体、贝氏体等组织，它们相当于**钢的组织**。

铸铁中石墨的形态可分为六种：

I 型为片状石墨；

II 型为蟹状石墨；

III 型为蠕虫状石墨；

IV 型为聚集状(团絮状)石墨；

V 型为不规则或开裂状石墨；

VI 型为球状石墨。

- 总之，铸铁的组织特点，是在钢的基体上分布着不同形状的石墨，见图7-1。

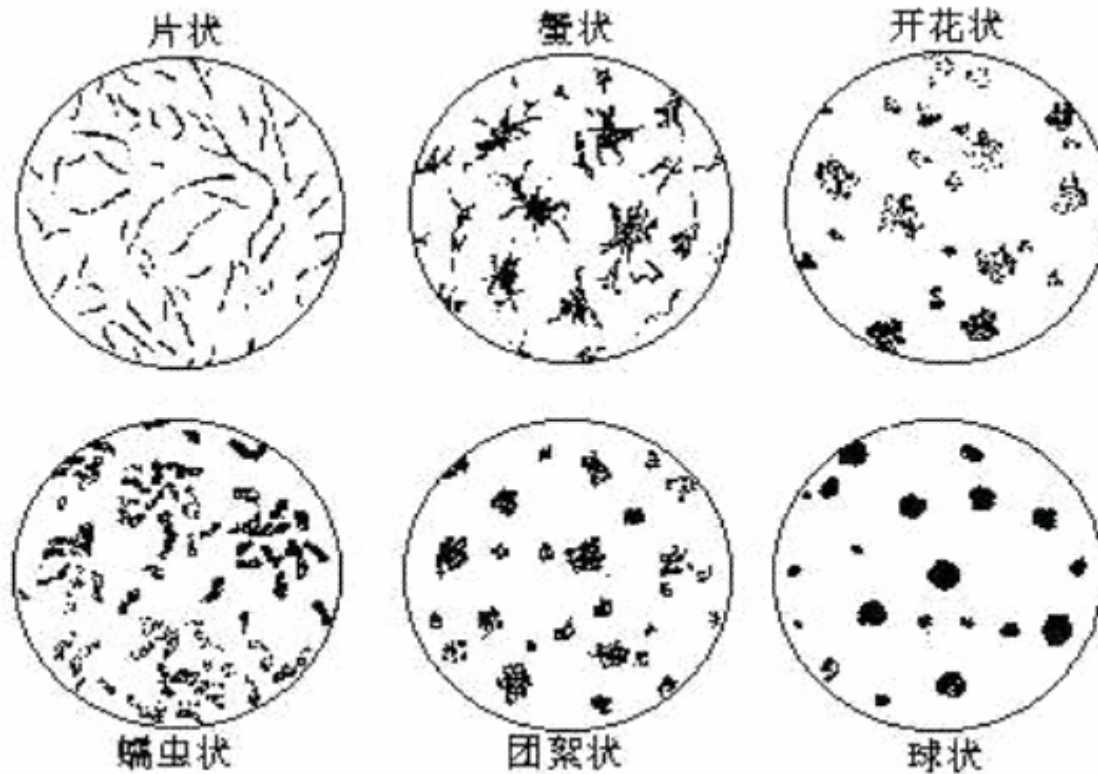


图7-1 铸铁中石墨的六种形态

2、铸铁的性能特点

铸铁的性能取决于铸铁的组织 and 成分。因此，铸铁的机械性能主要取决于铸铁基体组织以及石墨的数量、形状、大小及分布特点。石墨机械性能很低，硬度仅为HB3~5，抗拉强度为20Mpa，延伸率接近零

	石墨	珠光体	铁素体
抗拉强度MPa	20	800~1000	350~400

石墨与基体相比，其强度和塑性都要小得多，石墨减小铸铁件的有效承载截面积，同时石墨尖端易使铸件在承载时产生应力集中，形成脆性断裂。

因此，铸铁的抗拉强度、塑性和韧性要比碳钢低，一般说来，石墨的数量越少，分布越分散，形状越接近球形，则铸铁的强度、塑性和韧性越高。

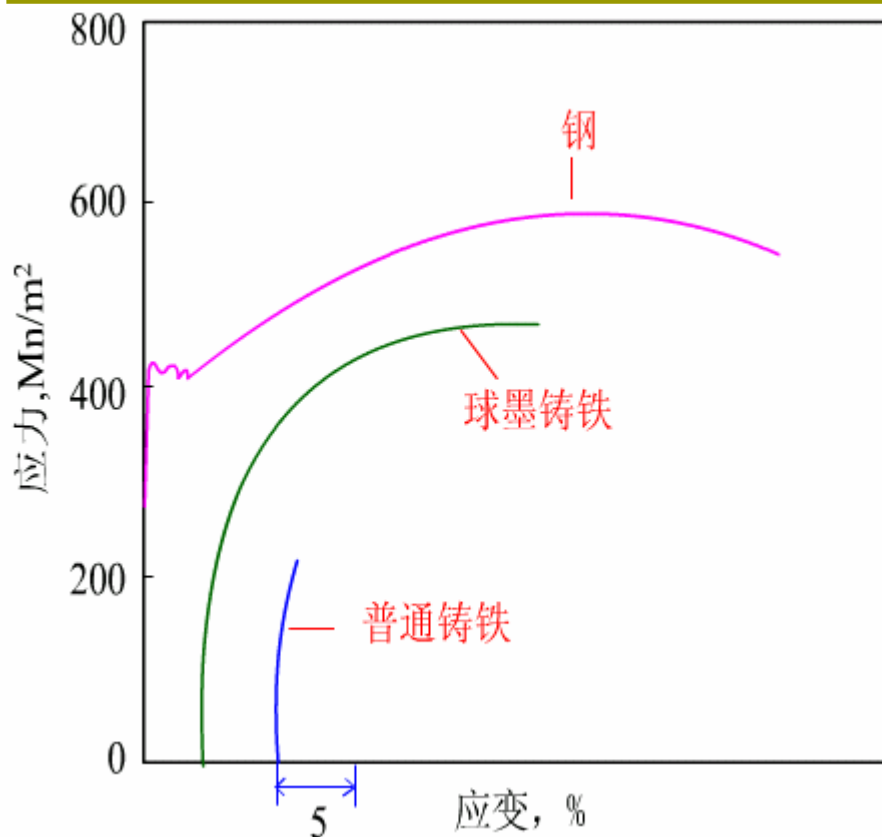


图7-2 铸铁与钢的应力-应变曲线的比较示意图

- 由图可看出钢在断裂前，有明显的屈服阶段，其延伸率较高，而铸铁则没有明显的屈服阶段，铁素体加球状石墨铸铁的延伸率为25%，片状石墨的普通铸铁由于石墨边缘尖端产生应力集中，从而容易造成脆性断裂，延伸率约在1%以下。

-
- 铸铁的机械性能不如钢，但由于石墨的存在，却赋予铸铁许多为钢所不及的性能。如良好的耐磨性、高的消振性、低的缺口敏感性以及优良的切削加工性。此外，铸铁的碳含量高，其成分接近共晶成分，因此，铸铁的熔点低，约为1200℃左右，铁水流动性好；石墨结晶时体积膨胀，所以铸造收缩率小，其铸造性能优于钢。

二、铸铁的分类

铸铁是碳含量大于2.11%的铁碳合金，其中的碳有以化合态的渗碳体 Fe_3C 析出，也有以游离态的石墨析出。根据铸铁中的碳在结晶过程中的析出状态以及凝固后断口颜色的不同，状态可分为三大类：

白口铸铁；麻口铸铁；灰口铸铁

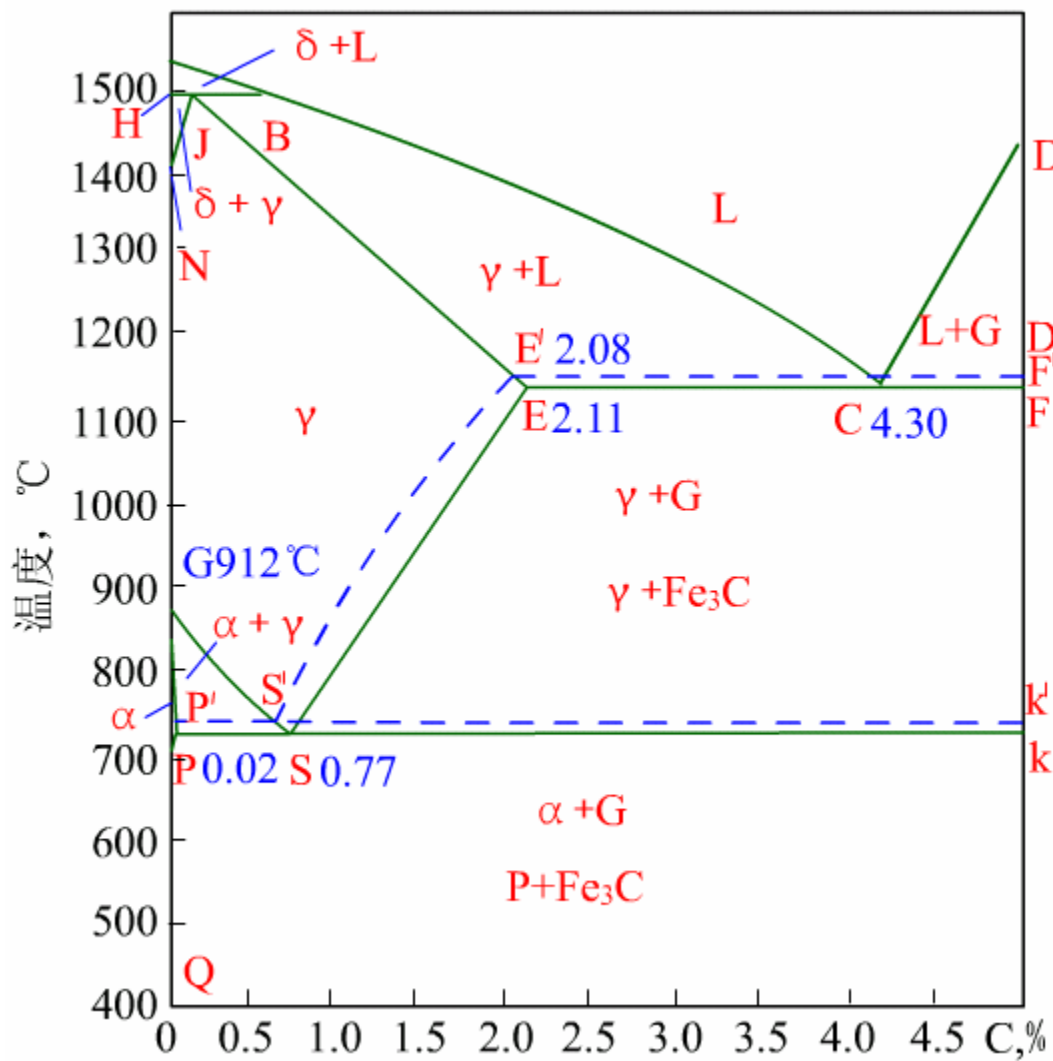
-
- 白口铸铁—碳除少量溶于铁素体外，其余全部以化合物状态的**渗碳体**析出，凝固后断口呈白亮的颜色，故称白口铸铁。白口铸铁的性质硬而脆，所以，工业上应用较少。
 - 麻口铸铁—碳既以化合状态**渗碳体**析出，又以游离状态**石墨**析出。凝固后断口夹杂着白亮的渗碳体和暗灰色的石墨，故称为麻口铸铁。
 - 灰口铸铁—碳**全部或大部分**以游离状态的**石墨**析出，凝固后断口呈灰色，故称为灰口铸铁。

-
- 工业上大量使用的是通过控制化学成分与铸造工艺，或者借助于热处理方法，使铸铁中的碳全部或大部分呈游离态的石墨存在的灰口铸铁。
 - 灰口铸铁性能与成分及基体组织有关外，还取决于石墨的形状、大小、数量及分布。
 - 灰口铸铁按石墨的形状和大小又可分为：
 - 灰铸铁 -- 石墨为片状；（常被称为灰口铸铁）
 - 球墨铸铁 -- 石墨为球状；
 - 可锻铸铁 -- 石墨为团絮状；
 - 蠕墨铸铁 -- 石墨为蠕虫状。

7.2 铸铁的石墨化

一、Fe-Fe₃C和Fe-C双重状态图

科学实验表明，Fe₃C是一个介稳定的相，石墨是稳定相。反映铁-碳合金结晶过程和组织转变规律的状态图有两种：即Fe-Fe₃C状态图（亦称为铁-碳合金亚稳定系状态图）和Fe-C状态图（亦称为铁-碳合金稳定系状态图），研究铸铁时，通常把两者叠加在一起，得到铁-碳合金双重状态图，见图7-3。



□ 图中虚线表示铁-石墨系；实线表现铁-渗碳体系；虚线与实线重合的线条以实线表示。

图7-3 铁碳和金双重状态图

二、铸铁石墨化过程热力学和动力学条件

- 铸铁中**石墨的形成过程**称为石墨化过程。铸铁组织形成的基本过程就是铸铁中的石墨的形成过程。
- 现以共晶成分的铁-碳合金为例来说明铸铁的石墨化过程，见图7-4。

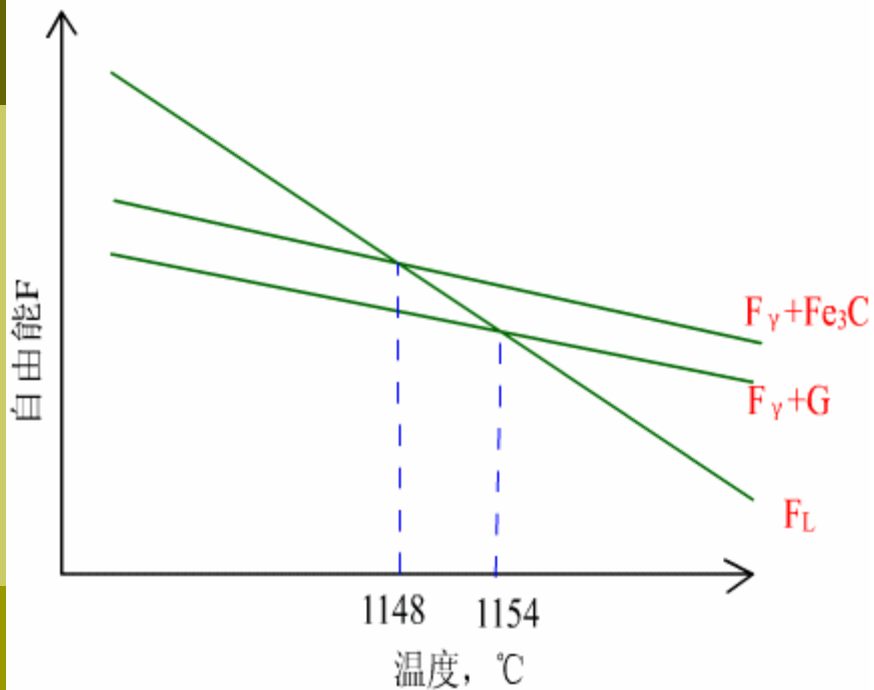


图7-4 各种组织自由能随温度而变化曲线

1 热力学条件

①当温度高于 $T_{c'}$ (1154°C)时，由于共晶液体的自由能值 F_L 最低，因此不会发生任何相变。

②当合金过冷到 $T_{c'}$ (1154°C) ~ T_c (1148°C) 范围时，共晶液体自由能 F_L 高于（奥氏体 - 石墨）共晶体自由能 $F(\gamma+G)$ ，因此发生液体 \rightarrow 奥氏体 + 石墨的共晶转变。

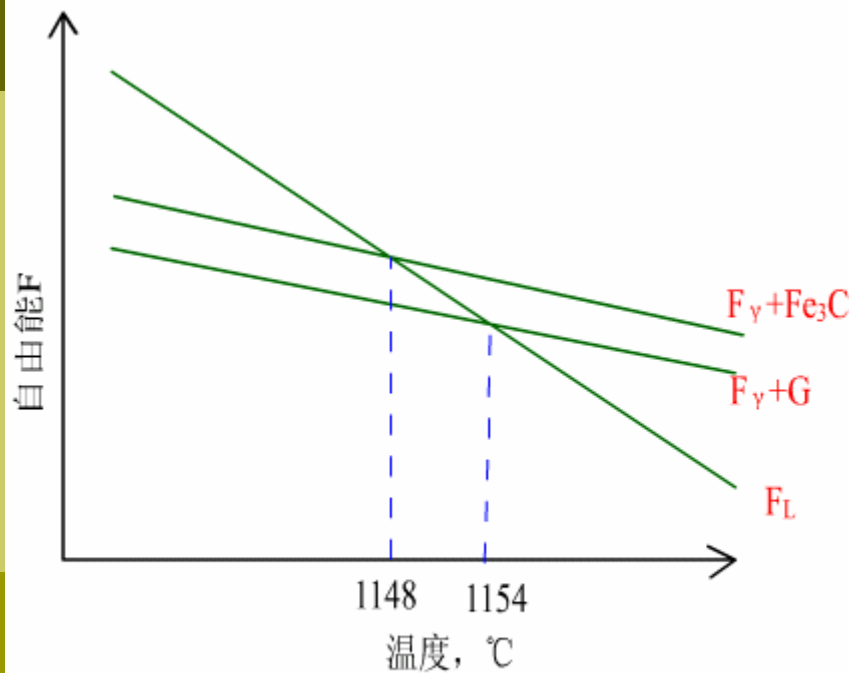


图7-4 各种组织自由能随温度而变化曲线

③当合金过冷到 T_c (1148°C) 温度以下时，共晶液体的自由能 F_L 高于（奥氏体-石墨）共晶体的自由能 $F_{\gamma+G}$ ，也高于（奥氏体-渗碳体）共晶体的自由能 $F_{\gamma+Fe_3C}$ ，而形成奥氏体+石墨，自由能差更大，热力学条件对铸铁石墨化有利。

④同理，将白口铁在900℃以上长期保温，莱氏体中的渗碳体能自动分解成(奥氏体+石墨)的混合物，也是符合热力学条件的。

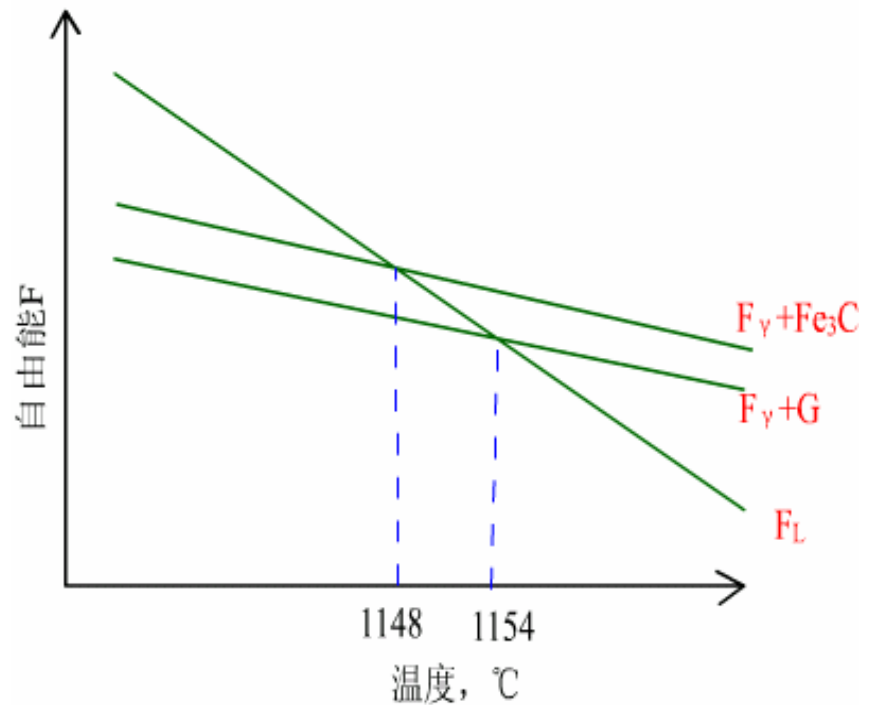


图7-4 各种组织自由能随温度而变化曲线

2、动力学条件

- 铸铁能否进行石墨化除了取决于热力学条件外，还取决于和石墨化有关的**动力学条件**。
- 共晶成分铸铁的液相碳含量为4.3%，渗碳体的碳含量为6.67%，而石墨的碳含量接近于100%，**液相与渗碳体的碳浓度差较小**。
- 从晶体结构的相似程度来分析，**渗碳体的晶体结构比石墨更相近于液相**。因而，液相结晶时有利于**渗碳体晶核**的形成。

-
- 与此相反，石墨的形核和长大时，不仅需要**碳原子**通过扩散而集中，还要求**铁原子**从石墨长大的前沿作相反方向**扩散**，故**石墨**较难长大。
 - 而渗碳体的结晶长大过程，主要依赖于**碳原子**的扩散，并不要求**铁原子**作长距离的迁移，所以长大速度**快**。

可见，从结晶的形核和长大过程的动力学条件来看都是有利的于渗碳体的形成。当结晶冷却速度(过冷度)增大时，动力学条件的影响表现得更为强烈。

三、铸铁的石墨化过程

1. 灰口铸铁的石墨化过程 (按Fe-C状态图进行)

灰口铸铁中的石墨是通过液态铁水进行**结晶时的石墨化**过程获得的。

(1) 共晶灰口铸铁 (4.26% C) 的石墨化过程。

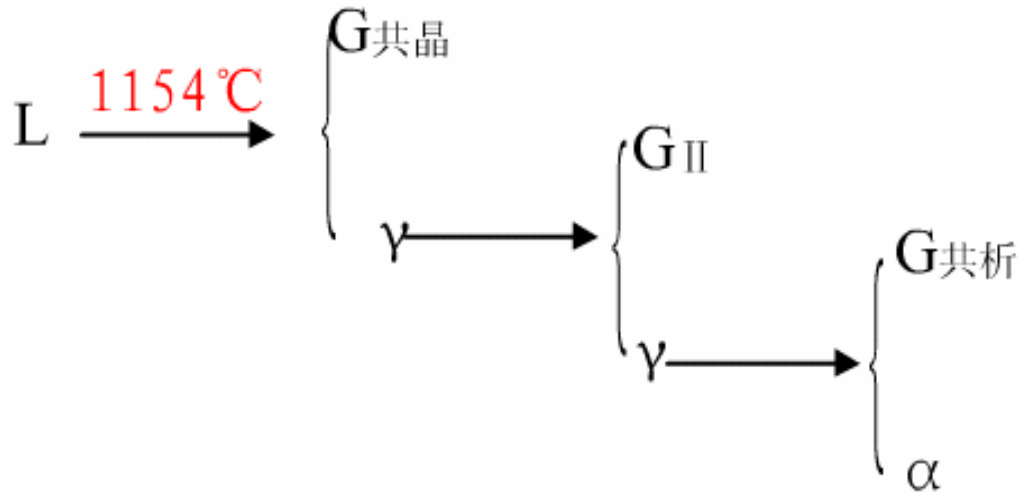


图7-5 共晶灰口铸铁 (4.26% C) 的石墨化过程

(2) 亚共晶灰口铸铁 (3.0% C) 的石墨化过程

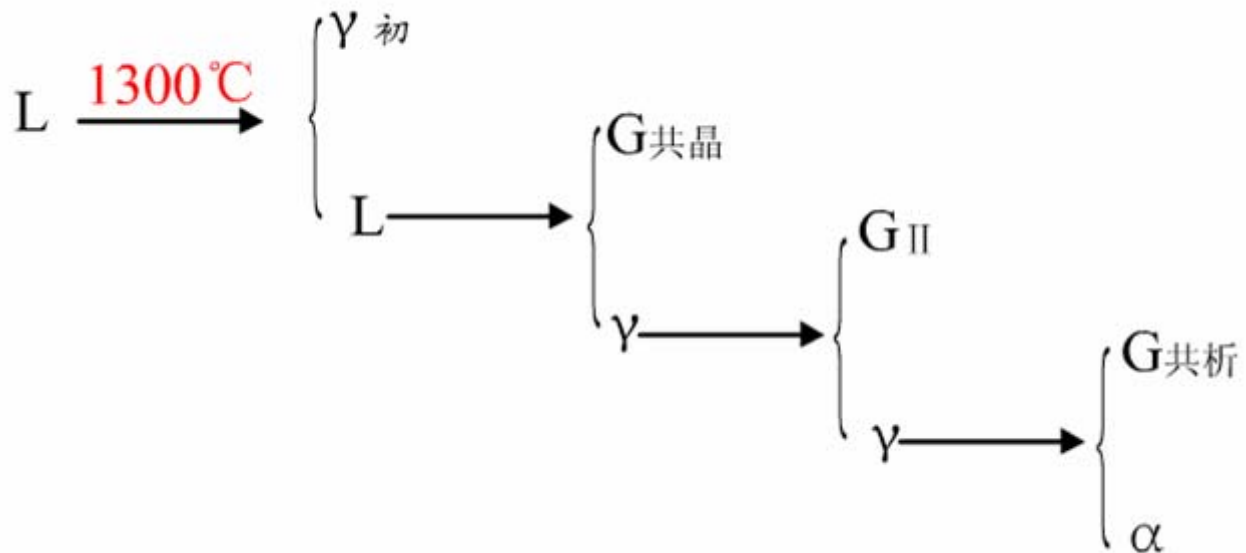


图7-6 亚共晶灰口铸铁 (3.0% C) 的石墨化过程

(3) 过共晶灰口铸铁 (4.5% C) 石墨化过程。

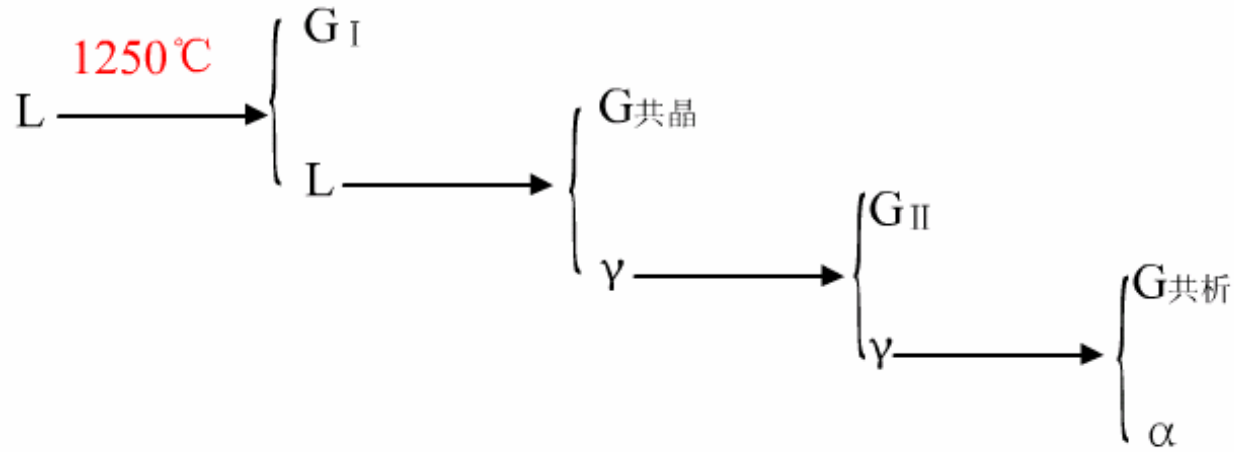


图7-7 过共晶灰口铸铁 (4.5% C) 的石墨化过程

蠕墨铸铁和球墨铸铁的石墨化过程和灰口铸铁的石墨化过程类似，所不同的只是石墨的形态不同而已，**原因——孕育剂。**

2、可锻铸铁的石墨化过程

可锻铸铁是由白口铸铁经石墨化退火后得到，如下图。

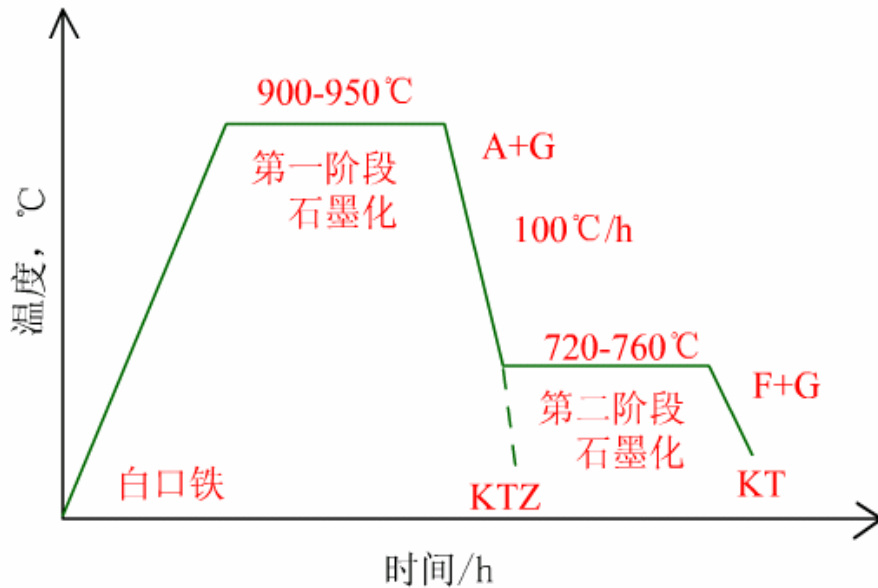


图7-8 可锻铸铁石墨化退火工艺

- 白口铁加热到900~950°C保温时，莱氏体中的渗碳体将分解为(奥氏体+石墨)。
- 若从900~950°C以较快速度冷却，奥氏体转变为珠光体。
- 若在720~760°C进行低温阶段的石墨化，使共析体中的渗碳体也发生分解，形成铁素体和团絮状石墨。

3、铸铁石墨化程度与组织的关系

- 把液相至共晶结晶阶段的石墨化过程，称为**第一阶段石墨化**，决定石墨的形态；
- 把共晶至共析阶段的石墨化过程，称为**第二阶段石墨化**，决定基体的组织。
- 铸铁石墨化程度决定了最终的组织。

四、影响铸铁石墨化的因素

- 铸铁的组织取决于石墨化进行的程度。为了获得所需的组织就必须恰当地控制铸铁的石墨化。
- 实践证明，铸铁的化学成分和结晶时的冷却速度是影响石墨化和铸铁显微组织的主要因素。

1、化学成分的影响

①碳和硅的影响:

- 硅和碳都是强烈促进石墨化的元素。
- 在铸铁生产中，正确控制碳、硅含量是获得所需组织和性能的重要措施之一。
- 石墨来源于碳。碳含量高，铁水中碳浓度和未溶解的石墨微粒增多，有利于石墨形核，从而促进了石墨化。
- 但碳含量过高会促使石墨数量增多而降低铸铁的机械性能。

-
- 硅与铁原子的结合力大于碳与铁原子之间的结合力。硅溶于铁水和铁的固溶体中，由于削弱了铁和碳原子之间的结合力，而促使石墨化。
 - 硅还降低铸铁的共晶成分和共析成分的碳浓度，铸铁中加入硅可代替一部分碳，又不至于引起过多的石墨，硅促进石墨化的作用约相当于三分之一碳的作用。

□ 综合考虑碳和硅的影响，常用**碳当量 (CE)**和**共晶度 (SC)**表示。

□ 碳当量是将硅含量折合成相当的碳量与实际碳含量之和，即

$$CE=C\%+1/3Si\%$$

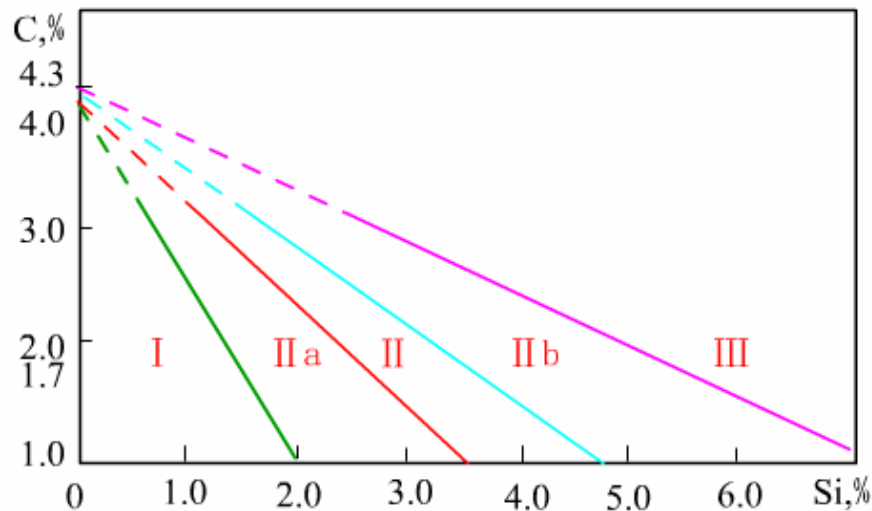
□ **共晶度**是指铸铁的碳含量与其共晶点碳含量的比值。在Fe-C-Si状态图中，共晶度随硅含量的变化而改变，即

$$SC=C\% / (4.3\% - 1/3Si\%)$$

共晶度表示铸铁的碳含量接近共晶点碳浓度的程度，当 $Sc = 1$ 时，铸铁为共晶组织； $Sc < 1$ 时，铸铁为亚共晶组织； $Sc > 1$ 时，铸铁为过共晶组织。铸铁的共晶度越接近于1，铸造性能越好。

随共晶度 Sc 值的增加，铸铁组织中的石墨数量增多，其抗拉强度、抗弯强度、硬度皆呈线性下降趋势。

- 碳、硅含量与铸铁组织如图7-9所示。随着碳、硅含量的增加组织由白口变为珠光体甚至铁素体基体灰口铸铁。??



I : 白口铸铁 IIa: 麻口铸铁 II: 珠光体铸铁

IIb: 珠光体-铁素体铁 III : 铁素体铁

(试样直径75mm)

图7-9 碳、硅含量对组织的影响

② 锰的影响:

- 锰是一个阻碍石墨化的元素。
- 锰能溶于铁素体和渗碳体，起固定碳的作用，从而阻碍石墨化。
- Mn能与S结合生成MnS，消除硫的有害影响。
- 普通灰口铸铁锰含量一般在0.5-1.4%范围内，
- 若要获得铁素体基体，则取下限。
- 若要获得珠光体基体，则取上限。
- 过高的锰含量易产生游离渗碳体，增加铸铁的脆性。

③硫的影响:

硫阻碍碳原子的扩散，是一个促进白口铸铁元素，而且降低铁水的流动性，恶化铸造性能，增加铸件缩松缺陷。因此，硫是一个有害元素，其含量应控制在0.15%以下。

④磷的影响:

磷是一个促进石墨化不十分强烈的元素。磷在奥氏体和铁素体中的固溶度很小，且随铸铁中碳含量的增加而减小。当P含量大于0.2%后，就会出现化合物 Fe_3P ，它常以二元磷共晶(a+ Fe_3P)或三元磷共晶(a+ Fe_3P + Fe_3C)的形态存在。磷共晶的性质硬而脆，在铸铁组织中呈孤立、细小、均匀分布时，可以提高铸铁件的耐磨性。反之，若以粗大连续网状分布时，将降低铸件的强度，增加铸件的脆性。通常灰口铸铁的含P量应控制在0.2%以下。图7-10为铸铁中的磷共晶。

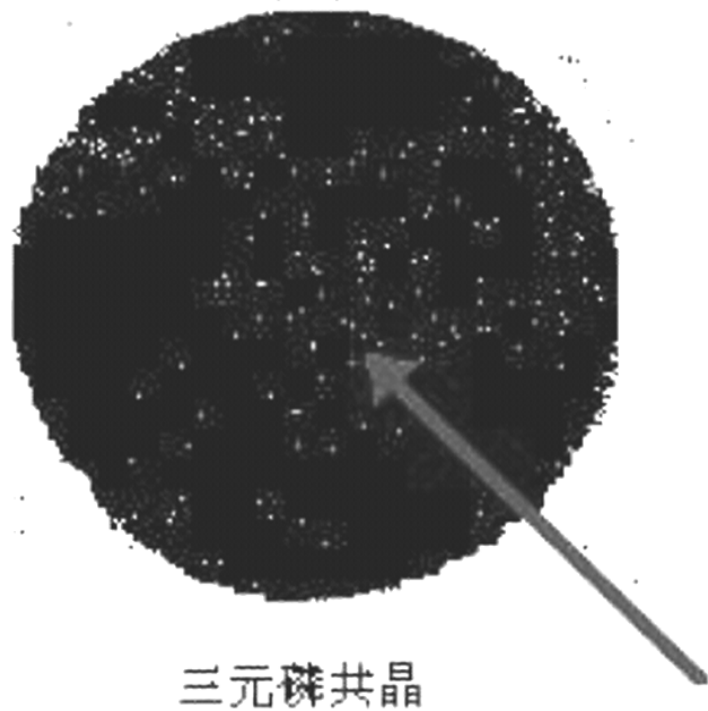
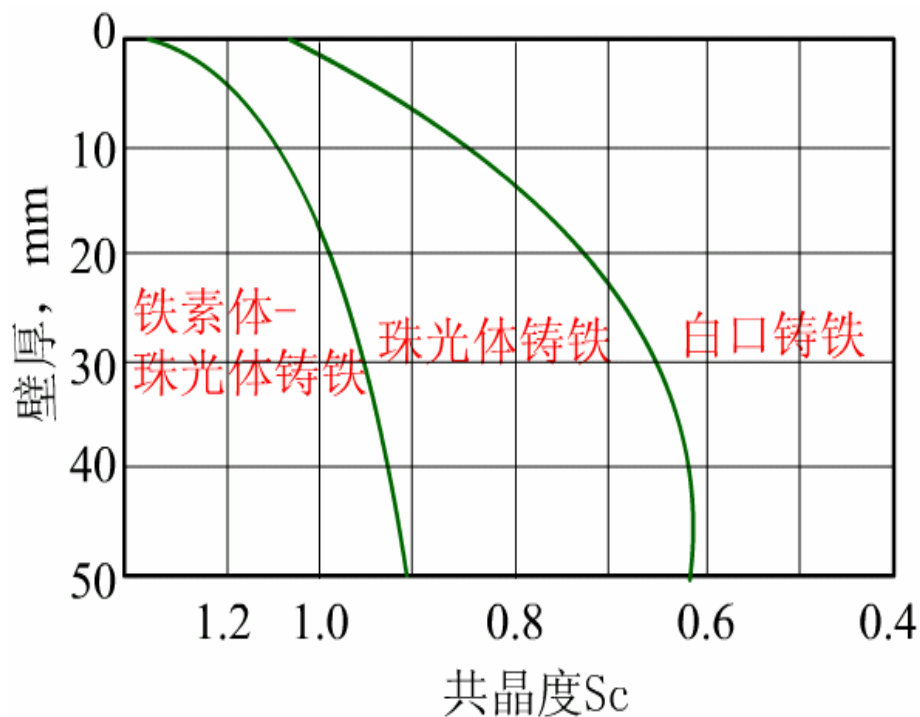


图7-10 铸铁中的磷共晶。

2. 冷却速度对铸件石墨化的影响

铸件的冷却速度对石墨化过程也有明显的影响。一般来说，铸件冷却速度越缓慢，即过冷度较小时，越有利于按照Fe-C系状态图进行结晶和转变，即越有利于石墨化过程的充分进行。反之，铸件冷却速度快，就不利于石墨化的进行。在共析阶段，由于温度低，冷却速度增大，原子扩散更加困难，所以在通常情况下，共析阶段的石墨化（即第二阶段的石墨化）难以完全进行。



■ 铸件冷却速度是一个综合的因素，它与浇注温度、造型材料、铸造方法和铸件壁厚都有关系。其中**铸件壁厚**是影响铸件冷却速度的主要因素。图7-11为铸铁的共晶度和铸件壁厚对铸铁组织的影响。

图7-11 铸铁的共晶度与壁厚对组织的影响

7.3 灰铸铁

灰铸铁（或称灰口铸铁）是石墨呈片状分布的铸铁，它是应用最广的一类铸铁。在各类铸铁的总产量中，灰铸铁所占的比重最大，约占80%以上。

1、灰铸铁的组织

灰铸铁的组织是由片状石墨和金属基体所组成的。金属基体依照共析阶段石墨化进行的程度不同可分为铁素体，铁素体+珠光体和珠光体三种。相应地便有三种不同基体组织的灰铸铁，它们的显微组织如图所示。



铁素体灰口铸铁



铁素体 + 珠光体灰口铸铁



珠光体灰口铸铁

图7-12 不同基体的灰口铸铁

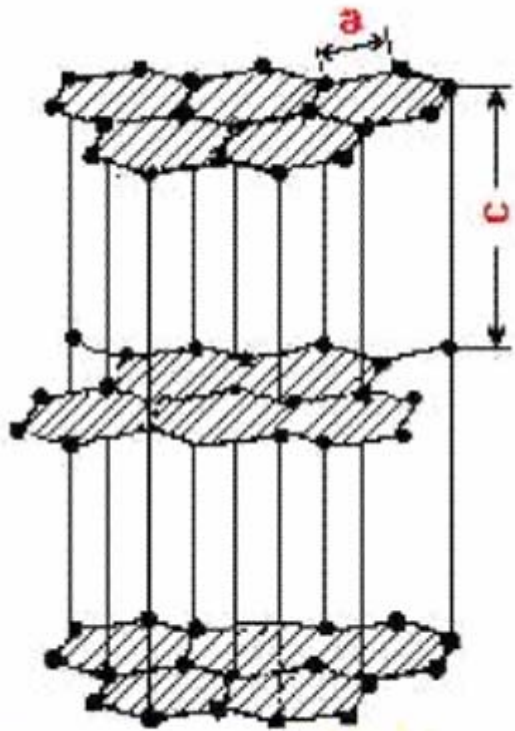


图7-13 石墨的晶体结构

石墨的晶体结构为**六方点阵和层状结晶** (如图7-13所示)。在同一层晶面上碳原子间距比较小 (0.142nm), 故石墨沿着层面的生长速度比较快; 而层与层之间碳原子的距离比较大 (0.340nm), 原子间的作用力比较弱, 因此沿着垂直于层面, 即C轴方向, 石墨的生长速度较慢, 这就是石墨生长成**片状的内在原因**。

-
- 灰铸铁中的石墨并不是单晶体，而是呈花瓣状的多晶集合体。

在金相显微镜下，花瓣状的石墨呈细条状，每一细条石墨就是石墨多晶集合体的一片石墨，由于铸铁化学成分和冷却条件的不同，从而改变了石墨化过程的动力学条件，导致石墨类型、大小与分布不同。

- 通常在铸铁件中的石墨分布不是单一的类型，而往往是几种类型的石墨同时出现。

灰铸铁件的机械性能与石墨片的分布、类型、大小有关。

灰铸铁片状石墨的大小分为8级，以1级为最粗，8级为最细。石墨片越粗，其机械性能越差。为了获得细片状的石墨，通常采用孕育处理。称为孕育铸铁。

灰铸铁的金属基体和碳钢的组织相似，依化学成分、工艺条件和热处理状态不同，可以分别获得铁素体、珠光体、索氏体、屈氏体、马氏体等组织。其性能也和钢的组织类似。

2、灰铸铁的牌号

灰铸铁的牌号用“灰铁”二字的汉语拼音的第一个大写字母“HT”和一组数字来表示，HT100表示**抗拉强度100MPa**。（GB967-67）

分类	牌号	铸件尺寸	σ_b (MPa)	σ_{bb} (MPa)	基体	石墨	应用
普通灰铸铁	HT100	任意	100	260	铁素体	粗片	机床座
普通灰铸铁	HT200	15~30	200	400	珠光体	中等	汽缸、飞轮
孕育铸铁	HT300	15~30	300	540	珠光体	较细	重荷机床床身
孕育铸铁	HT400	15~30	400	680	索氏体	细小	齿轮、高压泵壳

3、灰铸铁的性能

1)、灰铸铁的组织对性能的影响

- 灰铸铁的组织由**金属基体和片状石墨**组成。其性能取决于金属基体和片状石墨的数量、大小和分布。
- 石墨的强度极低，在铸铁中相当于裂缝或空洞，减少铸铁基体的有效承载面积，片状石墨端部易引起应力集中，因此，**灰铸铁的抗拉强度、塑性、韧性和反弹性都低于碳素铸钢，特别是塑性、韧性几乎等于零。**
- 但灰铸铁中石墨的存在具有比铸钢优良的**减振性，小的缺口敏感性和高的耐磨性。**

灰铸铁的金属基体组织分为3种。

- **铁素体**的强度、硬度低，而塑性、韧性高。铁素体基体灰铸铁机械强度低；而塑性、韧性由于石墨片割裂金属基体，致使延伸率和冲击韧性均很低。
- **珠光体**具有高的强度、硬度和耐磨性。珠光体基体灰铸铁的强度、硬度和耐磨性均优于铁素体基体灰铸铁，而塑性、韧性相差无几，所以珠光体基体灰铸铁获得了广泛的使用。
- 实际生产中，获得百分之百珠光体基体组织的灰铸铁是比较困难的。故通常在灰铸铁铸态的基体组织都是**珠光体加铁素体组织**。

2、灰铸铁的机械性能

①抗拉强度:

- 灰口铸铁的抗拉强度比同样基体的钢要低得多。一般说来，石墨数量越多，石墨“共晶团”越粗大，石墨片的长度越长，石墨的两端越尖锐，则抗拉强度降低的数值越大。灰铸铁的金属基体中珠光体数量越多，珠光体中 Fe_3C 片层越细密，则抗拉强度值越高。
- 灰铸铁经孕育处理，细化组织，可提高抗拉强度。随着共晶度SC的增加，试棒直径（相当于壁厚）增加，铸铁的石墨数量和石墨化倾向加大，抗拉强度就随之下降。

②抗压强度:

抗压强度 σ_{bc} 约为抗拉强度 σ_b 的 2.5-4.0 倍。灰铸铁的抗压强度显著地大于抗拉强度，这是灰铸铁的一种特性。因此，灰铸铁广泛地被用作机床底座、床身和支柱等耐压零件。

③硬度:

铸铁的硬度随其成分和组织的变化而变化，一般在 HB130 ~ 270 范围内变化。随着共晶度增加，石墨增加，铸铁的硬度降低。

④冲击韧性:

铸铁是一种脆性材料，冲击韧性很差，对于缺口试样，冲击值为 $2 \sim 8 \text{J/cm}^2$ 。灰铸铁中碳、硅总量越低，石墨数量越少，石墨片愈细小，冲击韧性值越高；反之，冲击韧性值越低。

⑤耐磨性:

- 铸铁的耐磨性比钢好。这是因为铸铁件中有石墨的存在，也就是说铸件工作表面的石墨易脱落而成为滑动面的**润滑剂**，从而能起减磨作用。
- 此外，石墨脱落后所形成的显微孔洞能**贮存润滑油**，而且显微孔洞还是磨耗后所产生的微小磨粒的**收容所**。所以铸铁的耐磨性比钢好。

⑥减振性:

- 物体吸收振动能的能力称为减振性。灰铸铁的减振性比钢约大6~10倍。
- 抗拉强度越低，减振性越好。
- 所以，灰铸铁适宜用作减振材料，用于机床床身有利于提高被加工零件的精度。

3、灰铸铁的铸造性能

灰铸铁具有熔点低(约为 1200°C)、流动性好、铸造收缩率小(一般从铁水注入铸型凝固冷却至室温其收缩率约为 $0.5-1\%$)、铸件内应力小、易于铸造成型并有适当的机械性能且成本低廉等特点,故灰铸铁获得广泛应用。

4、灰铸铁的热处理

- 热处理只能改变灰铸铁的基体组织，不能改善石墨的形状和分布。灰铸铁经热处理的强化效果不如钢和球墨铸铁那样显著。

到目前为止，灰铸铁热处理的目的主要局限于消除内应力和改变铸件硬度两方面。灰铸铁的热处理主要是退火、正火和表面热处理。

1)、消除内应力退火

消除内应力退火，通常是将铸件以 $60 \sim 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度缓慢加热到弹-塑性转变温度区（ $350 \sim 450^{\circ}\text{C}$ ）以上，经适当保温，使铸件各部位和表里温度均匀，残余应力在此加热温度下得到松弛和稳定化。然后以 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的冷却速度缓冷至 200°C 左右出炉空冷。

2)、石墨化退火

石墨化退火的目的：消除白口、降低硬度，改善缺陷加工性能。

石墨化退火工艺：见本章第二节。

3)、正火

□ 灰铸铁正火的目的：

是增加铸铁基体的珠光体组织，提高铸件的强度、硬度和耐磨性，并可作为表面热处理的预先热处理，改善基体组织。

灰铸铁正火的工艺：

通常把铸件加热到 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，若有游离渗碳体时应加热到 $900 \sim 960^{\circ}\text{C}$ 。

- 保温时间根据加热温度、铸铁化学成分和铸件大小而定，一般为1~3小时。
- 冷却方式一般采用空冷、风冷或喷雾冷却。冷却速度越快，基体组织中珠光体量越多，组织越弥散，强度、硬度越高，耐磨性越好。

4)、表面淬火

□ 表面淬火的目的是:

改变铸件表层的基体组织，提高强度、硬度、耐磨性和疲劳强度。

□ 表面淬火的工艺:

采用高、中频淬火法，把铸件表面快速加热到 $900 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 高温，然后进行喷水冷却。结果表面层获得一层淬硬层，其组织为马氏体 + 石墨。

7.4 可锻铸铁

- 可锻铸铁是先将铁水浇铸成白口铸铁，然后经石墨化退火，使游离渗碳体发生分解形成团絮状石墨的一种高强度灰口铸铁。
- 由于团絮状石墨对铸铁金属基体的割裂和引起的应力集中作用比灰铸铁小得多，因此，可锻铸铁具有较高的强度，特别是塑性（延伸率 δ 可达~12%）比灰铸铁高得多，有一定的塑性变形能力，因而得名可锻铸铁（或展性铸铁，又称为马铁）。