

中等专业学校试用教材

铸造合金及熔炼

山东省机械工业学校 主编

机械工业出版社

中等专业学校试用教材

铸造合金及熔炼

山东省机械工业学校 主编



机械工业出版社

铸造合金及熔炼

山东省机械工业学校 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 $20 \frac{1}{4}$ ·字数 496 千字

1979 年 9 月北京第一版·1979 年 9 月北京第一次印刷

印数 00,001—26,000·定价 1.50 元

*

统一书号: 15033·4825

编 者 的 话

本书根据第一机械工业部 1977 年 12 月中专教材座谈会的教材编写计划和意见，按照 1978 年 4 月一机系统中专铸造专业教材编审会议所拟定的“铸造合金及熔炼”编写提纲进行编写的。

本书包括铸铁及其熔炼，铸造有色金属及其熔炼，铸钢及其熔炼三部分。书中主要叙述了铸铁、铸钢及铸造有色金属的结晶原理、合金性能和熔制工艺，并对冲天炉和各种熔化炉的结构也作一定的介绍。

本书可作为中等专业学校铸造专业教学用书，也可供有关工人和技术人员参考用。

本书由山东省机械工业学校赵建康同志主编，参加编写的有沈阳冶金机械学校温质清同志、黑龙江机械制造学校安永德同志。本书在编写过程中承北京机械学校铸工教研组、无锡柴油机厂球铁研究室、山东机械设计研究院、陕西机械学院金相实验室等单位的同志们大力协助并提供有关资料，特此深表感谢。

因编写时间仓促和编者水平所限，本书中一定存在不少的缺点错误，希读者多加批评指正。

本书常用符号表

符 号	中 文 名 称	备 注	符 号	中 文 名 称	备 注
L	液态相		σ_s	屈服强度	单位: N/mm^2
A	奥氏体		a_K	冲击韧性	单位: J/cm^2
F	铁素体		σ_w	抗弯疲劳强度	单位: N/mm^2
δ	①高温铁素体 ②延伸率 ③厚度	单位: % 单位: mm	HB	布氏硬度	
G	石墨		HRC	洛氏硬度C	
B	贝氏体		t	①时间 ②温度	单位: h, min, s 单位: $^{\circ}C$
M	马氏体		Q	热量	热化学方程式用, 单位: J
σ_b	抗拉强度	单位: N/mm^2	D ϕ	} 直径	单位: mm
			R		半径

注 书中各公式所用符号, 因在引用时都已注明其涵义, 此表就不再列入。

本书所用计测单位表

符 号	中 文 名 称	备 注	符 号	中 文 名 称	备 注
\AA	埃	射线波长单位, $1\text{\AA} = 1 \times 10^{-8} \text{cm}$	J	焦	功、热能单位, 1卡 = 4.186焦
mm	毫米		kW	千瓦	功率单位
cm	厘米		mcl	摩尔, 摩	物质量的单位
m	米		h	小时, 时	
kg	千克, 公斤	质量单位, 公制中是重力 单位, 有的写为 kgf	min	分	
N	牛顿或牛	力的单位, $1\text{kgf}(\text{公制})$ $= 9.807\text{N} \approx 10\text{N}$	s	秒	
N/mm^2	牛/毫米 ²	$1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.807\text{N}/\text{mm}^2 \approx 10\text{N}/\text{mm}^2$			

目 录

编者的话

本书常用符号表

本书所用计测单位表

第一篇 铸铁及其熔炼

第一章 灰铸铁	1
§ 1-1 灰铸铁的性能及其技术要求	1
§ 1-2 铸铁的结晶	4
§ 1-3 铸铁的金相组织及其机械性能的关系	11
§ 1-4 铸铁的化学成分对组织与性能的影响	17
§ 1-5 铸件冷却速度及其它工艺因素对铸铁组织性能的影响。铸件化学成分确定	23
§ 1-6 铸铁的铸造性能	26
§ 1-7 孕育铸铁	40
§ 1-8 稀土灰铸铁	43
第二章 球墨铸铁	46
§ 2-1 球墨铸铁的性能和应用	46
§ 2-2 球墨铸铁的金相组织及其与机械性能的关系	49
§ 2-3 球墨铸铁的结晶	53
§ 2-4 球墨铸铁的化学成分及熔炼要求	54
§ 2-5 球化剂及其制备	57
§ 2-6 球墨铸铁球化和孕育处理工艺	61
§ 2-7 球墨铸铁的铸造性能和铸造缺陷	65
§ 2-8 球墨铸铁的热处理	71
第三章 特种铸铁和可锻铸铁	77
§ 3-1 耐磨铸铁	77
§ 3-2 耐热铸铁和耐蚀铸铁	83
§ 3-3 可锻铸铁	87
第四章 铸铁的熔炼	96
§ 4-1 铸铁熔炼的技术要求	96
§ 4-2 冲天炉熔炼原理	98
§ 4-3 冲天炉熔炼工艺	110
§ 4-4 冲天炉铁料及其配料计算	132
§ 4-5 冲天炉控制用测试技术	138
§ 4-6 冲天炉的结构特点	146
§ 4-7 鼓风机的选用	153
§ 4-8 特种化铁炉	159

第二篇 铸造有色合金

第五章 铸造铝合金及其熔炼	168
§ 5-1 铸造铝合金	168
§ 5-2 铸造铝合金熔炼	190
第六章 铸造铜合金及其熔炼、轴承合金的熔炼	205
§ 6-1 铸造铜合金	205
§ 6-2 铸造铜合金熔炼	222
§ 6-3 轴承合金的熔铸	234
第七章 熔化有色合金的熔炉	239
§ 7-1 坩埚炉	239
§ 7-2 感应电炉	243
§ 7-3 反射炉和电弧炉	247

第三篇 铸钢及其熔炼

第八章 铸造碳钢	250
§ 8-1 碳钢的结晶过程和铸态组织	250
§ 8-2 化学成分对铸造碳钢机械性能的影响	255
§ 8-3 碳钢铸件的热处理	257
§ 8-4 碳钢的铸造性能	260
第九章 铸造合金钢	266
§ 9-1 铸造低合金结构钢	266
§ 9-2 高合金钢	271
第十章 铸钢的熔炼	284
§ 10-1 炼钢用原材料	285
§ 10-2 三相电弧炉的构造	287
§ 10-3 碱性电弧炉氧化法炼钢	292
§ 10-4 返回法冶炼特点	308
§ 10-5 感应炉炼钢	310
§ 10-6 工频感应电炉炼钢特点	316
§ 10-7 真空感应电炉炼钢	317

第一篇 铸铁及其熔炼

铸铁是应用最广泛的一种铸造合金，它大量用于制造各种机器设备。在一般机器上，铸铁件占比重很大，约为机器总重量的40~90%。因此，铸铁件的生产在机器制造中占有很重要的地位。

铸铁是含碳高于2.06%的铁碳合金，除碳素外，还含有硅、锰、磷、硫等化学成分。

铸铁的种类很多。

1. 按铸铁的金相组织分类，主要可分为：

白口铸铁 碳除少量溶于铁素体外，绝大部分以渗碳体形式存在于铸铁中。

灰口铸铁 碳全部或大部分以片状石墨的形式存在于铸铁中。这类铸铁也称灰铸铁。

球墨铸铁 铸铁中石墨全部或大部分以球状石墨形式存在。

可锻铸铁 铸铁中石墨全部或大部分以团状石墨形式存在。

2. 按铸铁的化学成分分类，可分为：

普通铸铁；

合金铸铁。

所谓合金铸铁是指含钼、钛、钒 $>0.1\%$ ，含镍、铬、铜、铝 $>0.3\%$ ，含锰 $>2.0\%$ ，含硅 $>4\%$ 的铸铁。其中合金元素总量 $<3\%$ 者称低合金铸铁；合金含量在3~10%者为中合金铸铁；合金含量 $>10\%$ 者为高合金铸铁。

3. 按铸铁使用性能来分类，还可分为：

结构用铸铁；

特殊性能铸铁，也称特种铸铁。

特种铸铁包括耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等。

本篇重点介绍灰铸铁和球墨铸铁的结晶原理、组织性能及熔制工艺。其次，对可锻铸铁和特种铸铁进行一般介绍。本篇还对冲天炉的工作原理、炉型结构和熔化工艺也做较详细的讨论。

第一章 灰 铸 铁

§ 1-1 灰铸铁的性能及其技术要求

灰铸铁通常是指具有片状石墨的灰铸铁。它包括普通灰铸铁、孕育铸铁和稀土灰铸铁等。灰铸铁是应用最广泛的一种铸铁。在各类铸铁的总产量中，灰铸铁占80%以上。灰铸铁生产方便，成本低，虽然机械性能较差，但它具有一系列优良的铸造性能和一定的使用性能，而在有些方面如缺口敏感性、吸震性和耐磨性等方面都有独特的优点。因此，在机器制造中灰铸铁占有很重要的地位。

一、灰铸铁的性能特点

为了更好的控制铸铁质量，首先应对灰铸铁的一些性能特点进一步讨论。

(一) 灰铸铁的抗拉强度和抗弯强度

灰铸铁的抗拉强度较低，一般只有 120~250 牛/毫米²，仅是铸钢的 1/2~1/3，但比白口铁稍高，如图 1-1。

用孕育处理的方法熔制的灰铸铁称为孕育铸铁，其抗拉强度可以提高到 300 牛/毫米²。

按国家标准，抗拉强度是灰铸铁性能检验的一个主要指标，又是灰铸铁机械性能中的薄弱部分。因此，在铸铁生产中，必须首先保证铸铁的抗拉强度达到所要求的指标。

铸铁的抗弯强度也是铸铁强度的一个主要指标。通常灰铸铁多采用弯曲试验，来控制其性能。因为抗弯强度的试验方法较简易，试样一般是铸态的，不需要切削加工就可以进行试验。

普通灰铸铁的抗弯强度为 300~450 牛/毫米²，经孕育处理的灰铸铁抗弯强度可超过 500 牛/毫米²。

(二) 灰铸铁的塑性和韧性

普通灰铸铁塑性很低，其延伸率仅有 0~0.5%，是属于脆性材料。

灰铸铁因是脆性材料，不能用塑性材料常用的延伸率试验测定其塑性，一般就以抗弯试验所测定的挠度值 *f*，来推测和比较铸铁塑性变形能力。

灰铸铁的韧性很低，它的韧性比钢低很多，如铸钢 (ZG35，正火) 冲击韧性约为 35 焦耳/厘米² 左右，而一般灰铸铁仅 2~5 焦耳/厘米²，如图 1-2。

灰铸铁的韧性比白口铁稍高。

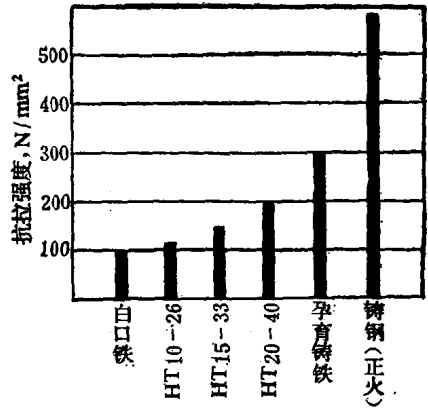


图1-1 灰铸铁与其他金属材料抗拉强度的比较

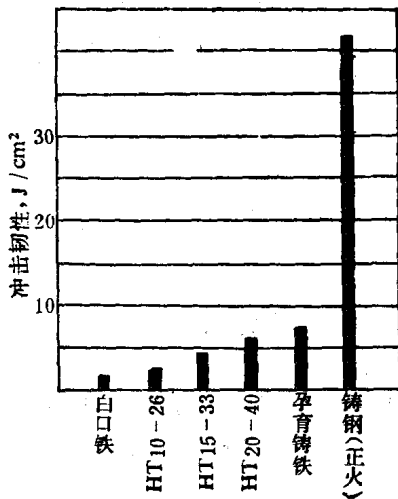


图1-2 灰铸铁与其他金属材料的冲击韧性的比较

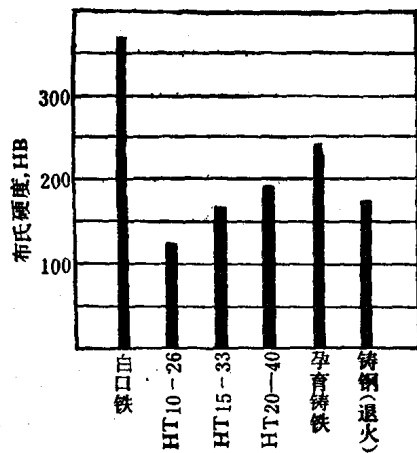


图1-3 灰铸铁与其他金属材料的硬度的比较

白口铁冲击韧性更低，也更脆。

(三) 灰铸铁的硬度

灰铸铁硬度一般在 HB120~270 范围内。若灰铸铁硬度达到 HB170~190 以上时，一般可以满足在有油润滑条件下的铸件表面耐磨的要求，灰铸铁硬度也不应过高，一般要求不超过 HB270 易于切削加工。

白口铁硬度比灰铸铁更高，一般在 HB350 以上，难于切削加工。

(四) 灰铸铁对缺口的敏感性

灰铸铁对零件表面出现缺口的敏感性小，这是灰铸铁的一个很大优点。钢料抗拉强度高，但钢对零件表面缺口的敏感性很大，表 1-1 列出了灰铸铁与钢件的缺口作用系数的数据。由表可知，灰铸铁的抗弯疲劳强度不受缺口的影响，故作用系数为 1；钢件的缺口作用系数是 1.5~1.6；也就是当有缺口时，其抗弯疲劳强度显著下降，只有无缺口的 62~67.5%。这说明钢的性能虽然优于灰铸铁，但当有缺口存在时，灰铸铁反而具有较高的可靠性。

表 1-1 铸铁和钢的抗弯强度(有缺口和无缺口)的比较

材 料	抗拉强度 σ_b 牛/毫米 ²	抗弯疲劳强度 σ_{-1} 牛/毫米 ²		缺口作用系数 $\beta = \frac{\sigma'_{-1}(\text{无缺口})}{\sigma_{-1}(\text{有缺口})}$
		无 缺 口	有 缺 口	
灰 铸 铁	206	88	88	1
灰 铸 铁	265	113	113	1
灰 铸 铁	284	127	127	1
钢	432	225	152	1.5
钢	578	284	176	1.5

(五) 铸铁的减震性

当我们敲击钢棒时，能听到清脆的声音，余音很长，而敲击灰铸铁棒时则声音低沉沙哑。这是由于灰铸铁减震性高的缘故，如图 1-4。

减震性是指材料本身吸收震动的能力。在灰铸铁中，存在着大量的片状石墨，它割裂了基体，对震动起阻滞作用，阻止震动能量的传播，并把震动的能量转化为热能，从而使机件的震动大大地缓和下来，故灰铸铁具有良好的减震性。

一般说，在灰铸铁中，石墨片愈粗大，它的减震性也愈高；因此，对要求减震性高的零件，在强度许可范围内，应优先采用低牌号的灰铸铁。

总之，灰铸铁机械性能的主要特点是：

(1) 抗拉强度比钢低，但仍具有一定的强度，尚能满足许多机械零件对抗拉强度的要求；

(2) 塑性、韧性很低，属于脆性材料；

(3) 对缺口敏感性低；

(4) 减震性高；

(5) 硬度能适合切削加工和零件耐磨的要求。

灰铸铁做为工程材料还有很多优点。

灰铸铁铸造性能大大优于铸钢和其他一些合金。灰铸

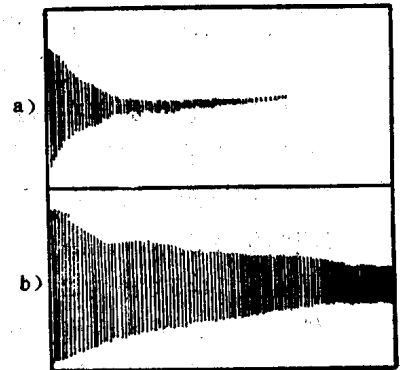


图 1-4 铸铁及钢减震作用示意图

a) 灰铸铁 b) 钢

铁的熔点比钢低，流动性好，可浇注薄壁复杂铸件；灰铸铁收缩小，形成缩孔、裂纹、气孔的倾向较小，易获得“合格”的铸件。

因铸铁熔炼设备的基建费用较低，所用原材物料的成本低，故铸铁件成本也较低。灰铸铁件成本仅是铸钢件的30~50%，是有色金属铸件的15~20%。

由于灰铸铁的许多优点，在各工业部门得到广泛使用。

二、灰铸铁的规格和技术要求

我国国家标准对灰铸铁的牌号、机械性能以及其它一些技术要求都做了统一的规定。

表1-2 灰铸铁件分类及技术条件(国家标准 GB976-67)

灰 铸 铁 牌 号	抗 拉 强 度 \geq		抗 弯 强 度 \geq	
	公斤/毫米 ²	(牛/毫米 ²)	公斤/毫米 ²	(牛/毫米 ²)
HT 10-26	10	(98)	26	(255)
HT 15-33	15	(147)	33	(323)
HT 20-40	20	(196)	40	(392)
HT 25-47	25	(245)	47	(461)
HT 30-54	30	(294)	54	(529)
HT 35-61	35	(343)	61	(598)
HT 40-68	40	(392)	68	(666)

注：表中括弧内数据按1公斤/毫米²=9.8牛/毫米²计算得出。

标准上所规定的技术条件是指用毛坯直径为30毫米的试样进行试验的结果。因此铸铁检验时，试样毛坯的直径必须按30毫米铸出。检验后，试样的机械性能若能达到标准规定的要求，即为合格。

灰铸铁的机械性能是随铸件壁厚和试样直径的变化而变化的。用同一铁水浇注不同直径的试样，其机械性能也会不同。

表1-3表明了各牌号灰铸铁件壁厚、试样直径和机械性能之间的关系，可以作为控制铸铁性能时的依据。

§ 1-2 铸 铁 的 结 晶

铸铁的机械性能和它的金相组织直接有关。所以要想提高铸铁的机械性能，就必须深刻地了解铸铁的组织是怎样形成的，也就是要认真研究铸铁的结晶过程。

一、碳在铸铁中的存在形式

碳在铸铁中的存在形式，主要有三种：

(一) 碳以溶解状态存在

碳能溶解在铁水和固溶体中。在铁水中，碳的溶解度较大。凝固后，奥氏体中碳的溶解度在共晶温度1145℃时为2.06%；温度下降到723℃时溶解度减低到0.8%左右，当奥氏体转变为铁素体后，碳的溶解度剧烈下降，在723℃时铁素体中最大溶解度也只有0.03%，温度继续下降，溶解度就更低。

在铸铁冷却和相变过程中，只要含碳量超过了碳的溶解度，不论在液态还是固态，则都将析出高碳相。由于结晶条件不同，高碳相可能以结晶碳的形式析出，形成石墨；也有可能以化合碳的形式析出，形成渗碳体。

表1-3 灰铸铁试样直径与机械性能的关系(GB976-67附表)

铸 铁 牌 号	铸 件 主要壁厚 (毫米)	试样毛坯 直径 D (毫米)	抗 拉 强 度		抗 弯 强 度		挠 度 支距 = $10D$ (毫米)	硬 度 (HB)
			公斤/毫米 ²	牛/毫米 ²	公斤/毫米 ²	牛/毫米 ²		
HT10-26	所有尺寸	30	10	98	26	254	2	143~229
HT15-33	4~8	13	28	274	47	461	1.5	170~241
	>8~15	20	20	196	39	381	2	170~241
	>15~30	30	15	147	33	323	2.5	163~229
	>30~50	45	12	118	25	245	3	163~229
	>50	60	10	98	21	206	4	143~229
HT20-40	6~8	13	32	314	53	519	1.8	187~255
	>8~15	20	25	245	45	441	2.5	170~241
	>15~30	30	20	216	40	392	2.5	170~241
	>30~50	45	18	176	34	334	3	170~241
	>50	60	16	157	31	304	4.5	163~229
HT25-47	>8~15	20	29	284	50	490	2.8	187~255
	>15~30	30	25	245	47	461	3	170~241
	>30~50	45	22	216	42	412	4	170~241
	>50	60	20	196	39	381	4.5	163~229
HT30-54	>15~30	30	30	294	54	529	3	187~225
	>30~50	45	27	265	50	490	4	170~241
	>50	60	26	254	48	470	4.5	170~241
HT35-61	>15~30	30	35	343	61	598	3.5	197~269
	>30~50	45	32	314	56	548	4	187~255
	>50	60	31	304	54	530	4.5	170~241
HT40-68	>20~30	30	40	392	68	666	3.5	207~269
	>30~50	45	38	372	65	637	4	197~269
	>50	60	37	363	63	618	4.5	197~269

这两种高碳相在结晶特点和性能上差别是很大的。

(二) 碳以结晶状态(石墨)存在

石墨是一种结晶状态的碳。石墨的晶格属六方晶格,如图1-5。每层基面上,碳原子排列成正六方形,原子间距离为 1.42 \AA ,每个原子与相邻的三个原子由共价键牢固地联结在一起,其结合力为 $290\sim 330$ 千焦/摩分子,基面用(0001)面表示。相邻两层基面之间的距离为 3.40 \AA ,各层之间原子由比较弱的分子力联系着,结合力只有 16.7 千焦/摩分子,所以石墨晶体具有较强的各向异性,机械性能极低。

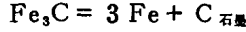
铸铁中的石墨,实际也非纯碳。据实验,石墨中尚溶解有极少量的铁及其他一些元素。铸铁中的石墨是分散度较大的片状结晶,在一定的结晶条件下,如结晶时冷却较慢,铸铁中促进石墨化的元素含量较多时,铸铁中的碳就全部和大部分以石墨的形式存在,这样的铸铁就是灰铸铁。

(三) 碳以化合状态(渗碳体)存在

铸铁中的碳,在一定结晶条件下,如结晶时冷却较快,铸铁中促进石墨化元素较少时,就会与铁化合成金属间化合物——渗碳体(Fe_3C)。渗碳体的结晶属于斜方晶系,每个晶胞

有 12 个铁原子和 4 个碳原子，含碳量 6.67%，铸铁中渗碳体也溶入其他一些元素，形成了以渗碳体 Fe_3C 为基础的固溶体，渗碳体色白，极硬（HB700 以上）而脆，若铸铁中碳全部形成渗碳体，这种铸铁就是白口铁。

铸铁中的渗碳体在一定条件下，如在高温时又可解析出石墨



渗碳体的分解现象，在一次和二次结晶时都可能出现。

铸铁中的碳也常与其他合金元素形成一些复杂的碳化物存在于铸铁中。

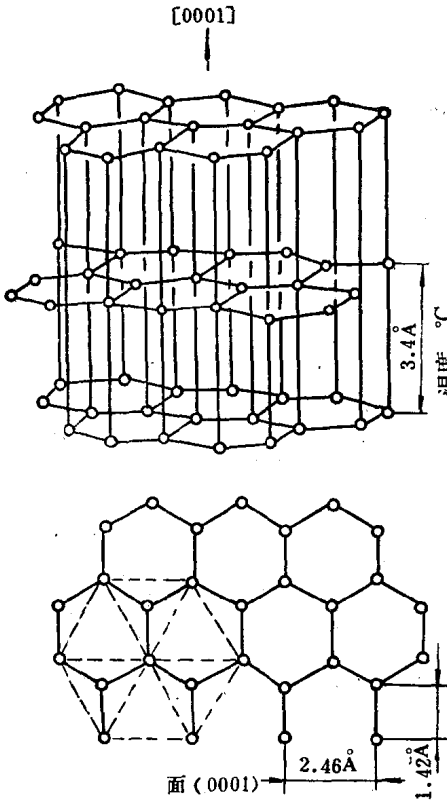


图1-5 石墨晶格

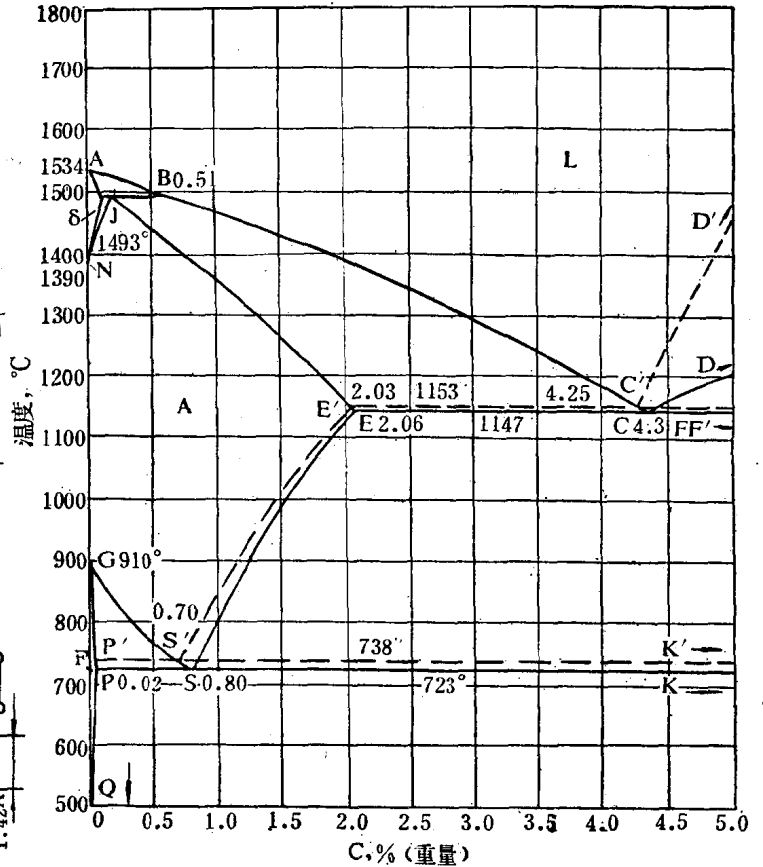


图1-6 铁碳合金双重状态图

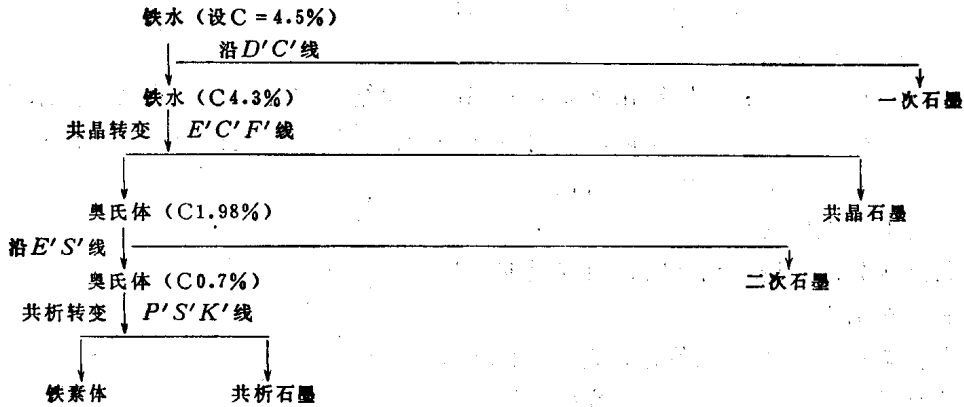
二、铁碳二元双重状态图

铸铁中高碳相是以两种不同形式出现——石墨和渗碳体。在铸铁结晶过程中，根据结晶条件不同，就会出现铁——石墨和铁——渗碳体两种不同的结晶系统。其中铁——石墨系统称为稳定结晶系统，铁——渗碳体系统称为介稳定结晶系统。铁碳二元合金平衡状态图有两种状态图，即：铁——石墨稳定状态图和铁——渗碳体介稳定状态图。为了使用方便，铁碳合金这二个系统的状态图绘在同一个坐标系中，如图 1-6，这就是铁碳合金双重状态图。图中实线表示介稳定平衡即 $Fe-Fe_3C$ 状态图。虚线表示稳定平衡即 $Fe-C_{石墨}$ 状态图。虽然铸铁成分复杂，但基本上仍是一种铁碳合金。所以，可以借助铁碳状态图来分析铸铁各成分（共晶、亚共晶和过共晶成分）的结晶过程。

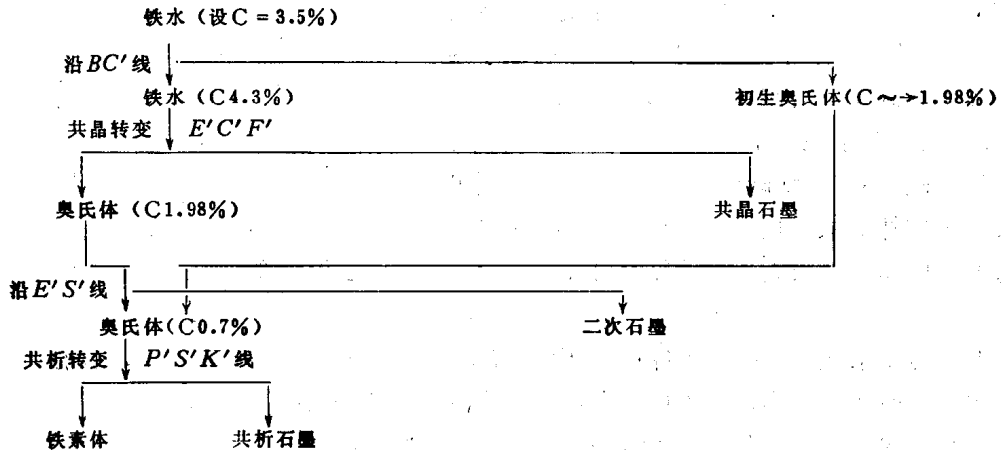
现以稳定结晶系统的过共晶铸铁和亚共晶铸铁成分为例，来说明铸铁结晶过程。

1. 过共晶灰铸铁的结晶过程 (稳定结晶系统)

表 1-4



2. 亚共晶灰铸铁的结晶过程 (稳定结晶系统)



以上列出了铸铁稳定结晶系统的结晶过程。铸铁的介稳定结晶过程与稳定结晶过程基本相似，只是高碳相不再是石墨而是渗碳体。当然介稳定结晶的临界点（临界温度和成分）也与稳定结晶时不同。

铸铁在实际结晶时，是按稳定系统，还是按介稳定系统呢？这要看结晶条件，要看铸铁实际结晶时结晶过冷度的大小。从状态图可以看出，稳定平衡的共晶转变温度是 1153°C ，介稳定平衡的共晶转变温度是 1147°C 。进行共晶结晶，若铁水过冷到 1153°C 以下，但在 1147°C 以上时，铁水只能按稳定系统结晶，析出奥氏体和石墨，而不能按介稳定系统结晶。若铁水过冷到 1147°C 以下时，这时铁水是按那一个结晶系统结晶呢？从热力学分析，按稳定系统结晶总是比按介稳定引起自由能的更大降低，因此铁水也总是趋向稳定结晶的。但从结晶动力学进行分析，形成渗碳体却比较有利。因为渗碳体含碳量为 6.67%，与铁水的碳浓度差就比石墨 ($C \approx 100\%$) 与铁水的碳浓度差小得多，从渗碳体和石墨的结晶结构来看，渗碳体比石墨更接近于铁的结构，因而从铁水中产生渗碳体晶核就比产生石墨晶核更容易些。从晶体成长速度来分析，石墨的长大，不但需要碳原子扩散聚集，而且要铁原子向外扩散让出空位来，故石墨长大较慢；而渗碳体长大则不要求铁原子做长距离的扩散移动，而碳原子扩散距离也较近，故渗碳体晶体的长大也远比石墨容易。

总之，当铁水在 1147°C 以上进行结晶时，铁水是按稳定系统进行的。随着铁水结晶过冷度的增大，铁水的结晶就从稳定系统逐渐转向介稳定系统，以至全部按介稳定系统结晶。铁水结晶时急冷，使结晶过冷度增大，就可以得到白口铁。

三、灰铸铁的一次结晶

灰铸铁的一次结晶，是指铸铁由液态到固态的凝固结晶过程，对亚共晶铸铁来说，包括初生奥氏体的结晶和共晶结晶二个阶段；对过共晶铸铁来说，则包括初生（一次）石墨的结晶和共晶的二个阶段，下面分别加以讨论。

（一）初生奥氏体的结晶

在亚共晶成分的灰铸铁结晶时，首先是初生奥氏体的结晶，如图 1-7。

设铁水含碳量为 $C_x\%$ 。当铁水冷却到液相线温度以下的时候，铁水已有一定的过冷度，铁水在 t_2 便开始结晶。

在 t_2 时，因铁水的碳浓度 C_x 低于此时铁水平衡浓度 C_0 ，故从铁水中开始析出初生奥氏体。初生奥氏体中含碳少（含碳量为 C_b ），它的析出，使 A/L 界面附近铁水中碳浓度上升为 C_0 。因 C_0 高于铁水平均含碳量 C_x ，则碳由 A/L 界面开始向外扩散。碳原子向外扩散，使 A/L 的界面的铁水中碳浓度减小，铁的含量又相对提高。这样就可促初生奥氏体继续长大。如此循环往复，直到整个铁水含碳量都达到 C_0 时，奥氏体才停止结晶。

以上就是铁水在 t_2 温度时的初生奥氏体结晶过程。当然，在 t_2 温度下，仍存在着大量铁水，如果要使初生奥氏体的不断结晶，铁水成分沿 BC' 线不断变化。当冷却到共晶温度 t_3 时，剩余铁水的成分为共晶成分 C' ，这部分铁水则发生共晶转变。

铸铁中的初生奥氏体一般都形成三维树枝状晶体，因奥氏体是面心立方晶格，故这些晶枝也都相互垂直生长。在实际结晶时，一些枝晶的生长常和邻近的枝晶相互干扰，也有一些晶体长到了一起。

（二）初生（一次）石墨的结晶

过共晶铸铁，如图 1-8 中的 x 成分铸铁，在一定过冷度下（如 t_2 ），铁水中的含碳量 C_x 超过铁水平衡浓度 C_0 ，则初生石墨开始结晶。石墨的析出就使靠近石墨界面的铁水中碳浓度降低，引起了铁水中碳原子向石墨界面扩散，因而促使石墨继续结晶。直到铁水成分都达到 C_0 时，初生石墨的结晶才停止。当然在 t_2 点还有大量 C_0 成分的铁水存在，要使初生石墨不断析出，必须断续冷却。随着铁水温度下降，初生石墨不断析出，使铁水的含碳量沿 $D'C'$ 线不断的变化。当铁水温度下降到共晶温度 t_3 ，并有一定过冷时，成分为 C 的剩余的铁水就发生共晶转变。

初生石墨是在铁水中结晶出来的，故能够自由

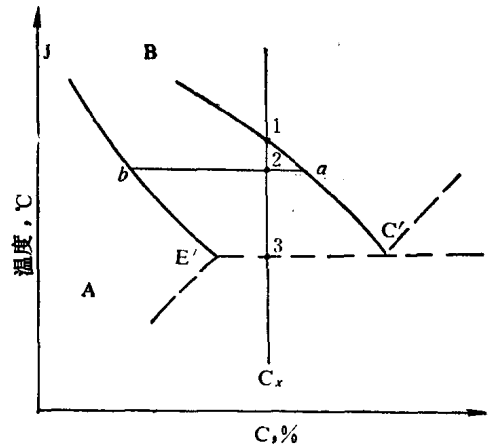


图1-7 Fe₃C 状态图一部分(亚共晶部分)

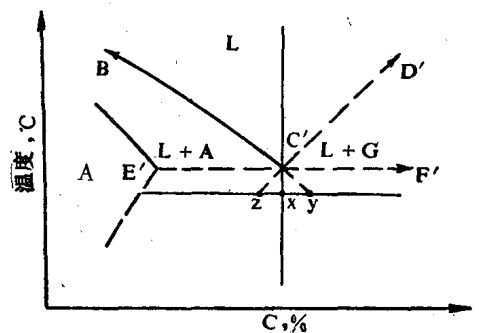


图1-8 Fe-C 状态图一部分(过共晶部分)

生长。石墨在结晶时，它的基面边缘的碳原子由于键不饱和，吸引附近碳原子能力很强，使石墨沿基面方向长得很快；但石墨各基面之间的结合能却很小，而且原子距离又很大，故垂直于石墨基面的方面就长得很慢。因此，石墨若在铁水中自由生长，它必然长成片状的。

石墨分叉生长是石墨结晶的一个重要现象。其分叉原因，众说不一。比较普遍的认为石墨侧面都按螺旋位错的方式长大。石墨片的分叉是螺旋位错后又沿基面长大的结果。如图1-9。

石墨的结晶是由结晶核心开始，象一朵花一样，围绕一个中心生长出许多片状石墨的花瓣来。在金相显微镜下观察石墨，虽只看到互相不相连的石墨片，但通过细致研究得知，这些石墨片实际是由一个结晶中心分叉成长出来的，如图1-10。

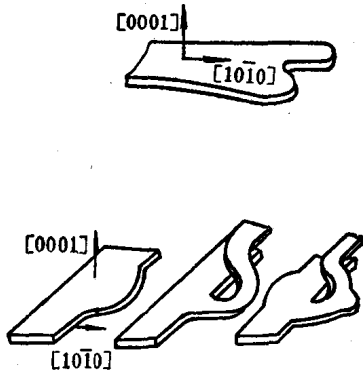


图1-9 石墨分叉示意图

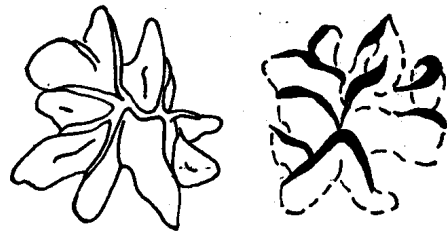


图1-10 石墨形状示意图

(三) 灰铸铁的共晶结晶

共晶铸铁的成分为 C' ，亚共晶铸铁析出一次奥氏体后剩余的铁水和过共晶铸铁析出一次石墨后所剩余的铁水它们的成分都是 C' ，如图1-11。

当铁水过冷到 x 点时，铁水 x 点的碳浓度大于石墨——铁液的平衡点 z 点的含碳量，而铁水 x 点的铁浓度也高于奥氏体——铁液的平衡点 y 点的含碳量，使铁水碳和铁同时处于过饱和状态，因此有条件使奥氏体和石墨同时结晶，形成共晶团。

结晶开始，一般最先析出的结晶核心是石墨。由于石墨的析出，使石墨核心周围铁液中碳的浓度降低为 z ，这样就有可能在该处产生奥氏体晶核。当奥氏体长大时，在奥氏体附近铁水中含碳量增至 y ，形成了碳的浓度差，因而碳原子便会自 L/A 界面向 L/G 界面扩散。而这时 L/G 界面上的铁原子也向 L/A 界面扩散，留出一定空间以便石墨成长。

共晶转变时，如图1-12。石墨一般是主导相，其尖端部分伸向铁水，因为石墨的(0001)面和奥氏体的(111)面晶格结构相近，石墨两侧容易附着奥氏体结晶。这样石墨的尖端部分就可快速生长，而石墨的侧面因有奥氏体附着，而使碳原子扩散比较困难，所以石墨垂直基面的生长速度很慢。共晶石墨的结晶也是花朵状，是由更多细小分叉的石墨片组成。共晶石墨的形状如图1-13。

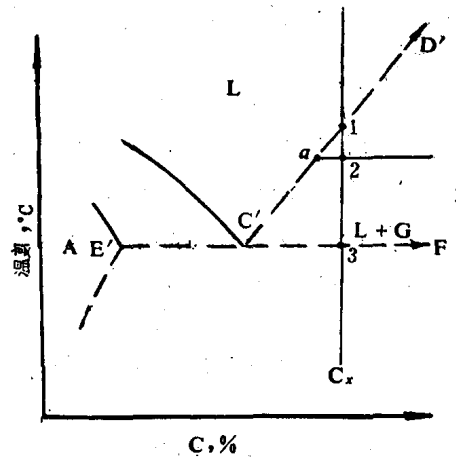


图1-11 铁碳状态图一部分(共晶部分)



图1-12 共晶石墨的结晶



图1-13 共晶石墨结晶的形状

小结:

灰铸铁的一次结晶过程是随铁液中含碳量不同而不同，亚共晶铸铁的第一阶段为初生奥氏体的析出，第二阶段是剩余铁水的共晶结晶，如图1-14 a)。而过共晶铸铁第一阶段为一次石墨，第二阶段是剩余铁水的共晶结晶，如图1-14 b)。

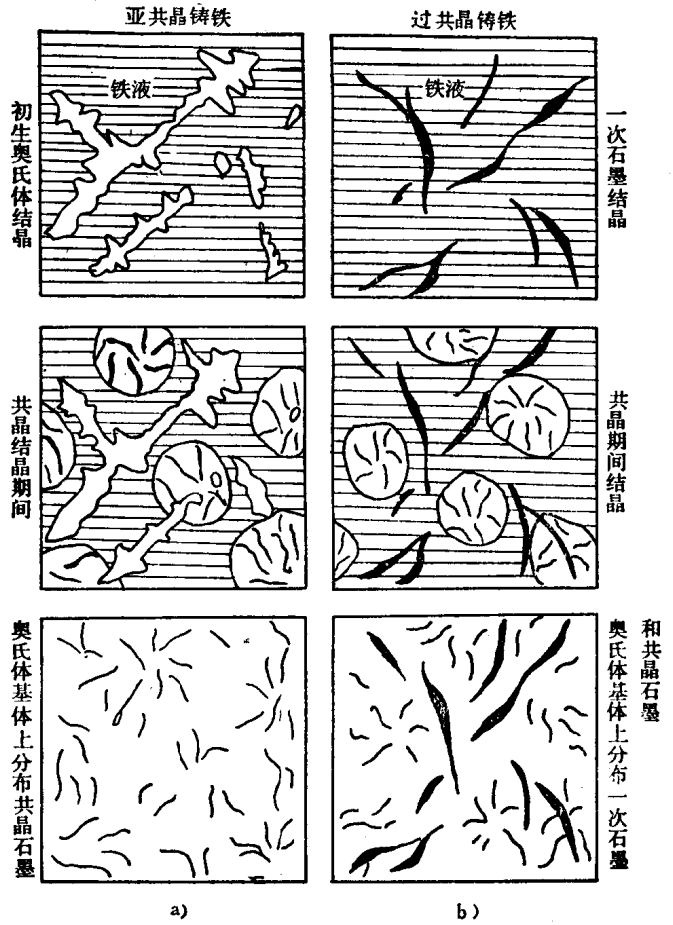


图1-14 灰铸铁一次结晶示意图

共晶成分灰铸铁结晶时，只有共晶结晶，形成奥氏体和石墨组成的共晶团。

以上讨论了灰铸铁的一次结晶，即铁—石墨稳定结晶系统的一次结晶，其一次结晶凝固后的结晶组织为奥氏体和石墨。

白口铁的结晶是属于铁—渗碳体介稳定结晶系统。其一次结晶后的组织为奥氏体和渗碳体。

若结晶条件使铸铁的结晶介于稳定与介稳定结晶系统之间，则一次结晶所得组织为奥氏体加石墨和渗碳体。这种铸铁就是麻口铁。

四、灰铸铁的二次结晶

铸铁的二次结晶是指铸铁凝固后在固态发生的相变，它一般包括析出二次石墨、奥氏体的共析转变以及渗碳体分解等相变过程。

(一) 二次石墨的析出

灰铸铁一次结晶完毕后，其结晶组织是奥氏体和石墨。奥氏体中含碳量为铁碳状态图上的 E' 点。温度若继续下降，奥氏体碳的溶解度沿 E' S' 线继续下降。这时奥氏体中碳呈过饱和状态，若条件许可，从奥氏体中便析出二次石墨。

随着温度的降低，二次石墨继续析出，当冷却到共析转变温度，并具有一定过冷度时，