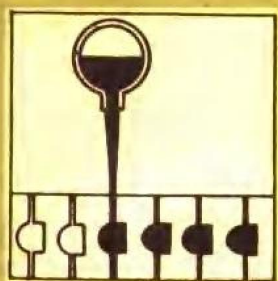
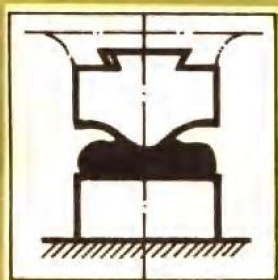
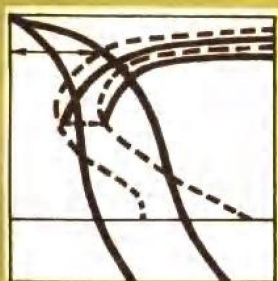


高等学校试用教材



铸铁及其熔炼

西安交通大学陆文华 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

铸铁及其熔炼

西安交通大学陆文华 主编



机械工业出版社

铸铁及其熔炼

西安交通大学陆文华 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 $19 \frac{1}{4}$ · 字数 466 千字

1981 年 4 月北京第一版 · 1981 年 4 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,300 · 定价 2.00 元

*

统一书号: 15033 · 5036

前 言

本书是根据高等学校一机部对口专业座谈会的精神及 1978 年在长沙召开的铸造专业教材大纲讨论会上审定的编写大纲编写的。在编写过程中作了部分更动，力求加强基础理论，阐明基本概念与基本问题，尽可能结合国内实际，反映国内外先进成果，并力求做到言简意明，便于自学。全书共分两篇，第一篇铸铁，重点在第二、三、四章，主要内容为铸铁的组织及其凝固结晶的基本理论，影响铸铁组织的各项工艺因素，随后各章则阐明各种铸铁的基本问题。第二篇铸铁熔炼，重点放在冲天炉熔炼的基本理论部分，并在此基础上对常用的冲天炉及其控制进行分析讨论，最后列出其他熔炼方法。本书可作为高等工业学校铸造专业的教材，也可作为从事铸造工作的工程技术人员的参考书。

本书第一篇主要由西安交通大学铸造教研室陆文华编写，由谭宠予协助（其中第九章的汽缸套、活塞环用减摩铸铁一节由周定远编写，耐热铸铁一节由谭宠予编写）。第二篇由上海工业大学铸造教研室朱振华编写。全书由陆文华主编，东北工学院铸造教研室施廷藻主审，并邀请了吉林工业大学、哈尔滨科技大学、太原重型机械学院等铸工教研室的同志参加审稿。在第一篇的编写过程中得到了郑州工学院、陕西机械学院、清华大学及天津大学铸造教研室有关同志的帮助，书中插图由西安交大印刷厂描图组描绘，书稿由刘真同志誊写，特此致谢。

由于我们水平低，经验少，加上时间局促，错误和不妥之处，肯定很多，恳切地期待着同志们特别是任课老师及同学们的批评和指正。

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一篇 铸 铁

第一章 概论	4
--------	---

§ 1-1 各种铸铁及其应用	4
----------------	---

一、白口铸铁	4
--------	---

二、灰铸铁	5
-------	---

三、麻口铸铁	5
--------	---

四、可锻铸铁	5
--------	---

五、球墨铸铁	6
--------	---

§ 1-2 各种铸铁的金相组织和机械性能的特点	7
-------------------------	---

第二章 铁-碳及铁-碳-硅相图	8
-----------------	---

§ 2-1 铁-碳相图的分析	8
----------------	---

一、铁-碳相图的二重性	8
-------------	---

二、铁-碳双重相图的分析	9
--------------	---

三、从一些生产实际问题看铁-碳双重相图的意义	10
------------------------	----

§ 2-2 铁-碳-硅相图的分析	11
------------------	----

一、铁-碳-硅准二元相图	11
--------------	----

二、“碳当量”及“共晶度”的概念	13
------------------	----

§ 2-3 铁-碳-磷系简介	14
----------------	----

第三章 铸铁的结晶过程	15
-------------	----

§ 3-1 白口铸铁的一次结晶过程	15
-------------------	----

§ 3-2 灰铸铁的一次结晶过程	17
------------------	----

一、灰铸铁凝固时的冷却曲线特征	17
-----------------	----

二、灰铸铁的凝固过程及其形成的组织	17
-------------------	----

三、关于灰铸铁中片状石墨的分析	21
-----------------	----

§ 3-3 球墨铸铁的一次结晶过程	25
-------------------	----

一、关于球状石墨的结构及化学成分	25
------------------	----

二、形成球状石墨的条件	27
-------------	----

三、形成球状石墨时的冷却曲线的特征	27
-------------------	----

四、球墨铸铁的一次结晶	28
-------------	----

五、球墨铸铁一次结晶组织的特点	30
-----------------	----

六、关于球墨铸铁中球状石墨形成的机理	31
--------------------	----

§ 3-4 铸铁的二次结晶过程	34
-----------------	----

一、转变过程及基体的形成	34
--------------	----

二、球墨铸铁铸态金属基体组织的特点	36
-------------------	----

§ 3-5 铸铁的结晶转变动力学图	36
-------------------	----

一、过冷液态铸铁的等温转变图	37
----------------	----

二、铸铁的连续冷却转变图	39
--------------	----

第四章 主要工艺因素对铸铁组织的影响	41
--------------------	----

§ 4-1 和冷却速度有密切关系的一些主要工艺因素的影响	41
------------------------------	----

一、铸件壁厚	41
--------	----

二、浇注温度	41
--------	----

三、造型材料	41
--------	----

§ 4-2 化学成分对铸铁的结晶及组织的影响	42
------------------------	----

一、各元素在铸铁中存在的状态与分布	42
-------------------	----

二、常见元素对铁-碳状态图的影响	45
------------------	----

三、化学成分对石墨化的影响	46
---------------	----

四、化学成分对金属基体组织的影响	48
------------------	----

五、几个常用合金元素的具体作用	48
-----------------	----

六、常见微量元素的作用	52
-------------	----

§ 4-3 和预存石墨晶核有关的工艺因素的影响	54
-------------------------	----

一、铁水的过度和静置的影响	54
---------------	----

二、孕育处理的影响	55
-----------	----

三、炉料对铸件组织的影响	59
--------------	----

四、一次结晶组织对二次结晶的影响	59
------------------	----

第五章 灰铸铁	61
---------	----

§ 5-1 普通灰铸铁	62
-------------	----

一、组织和机械性能的特点	62
--------------	----

二、灰铸铁的铸造性能	69
------------	----

三、灰铸铁件的生产	71
-----------	----

四、提高灰铸铁机械性能的途径	73
----------------	----

§ 5-2 经孕育处理的高强度灰铸铁 (孕育铸铁)	74	§ 8-2 可锻铸铁的制造方法	130
一、孕育铸铁生产工艺	74	一、白口铸件的获得	131
二、孕育铸铁的组织和性能特点	79	二、铁素体可锻铸铁的退火处理	134
§ 5-3 低合金高强度灰铸铁	80	三、珠光体可锻铸铁的热处理	135
第六章 球墨铸铁	85	四、铸态可锻铸铁的尝试	136
§ 6-1 球墨铸铁的性能和应用	85	§ 8-3 固态石墨化过程的基本原理	136
一、珠光体球墨铸铁的性能和应用	85	一、石墨核心的形成和长大	136
二、铁素体球墨铸铁的性能和应用	89	二、石墨析出物的形状	137
三、贝氏体球墨铸铁的性能及用途	90	三、影响可锻铸铁石墨化过程的 主要因素	138
§ 6-2 球墨铸铁的生产	91	§ 8-4 加速可锻铸铁石墨化退火的措施	138
一、化学成分的选定	91	一、加速石墨化退火的措施	138
二、球墨铸铁的熔炼要求及处理技术	93	二、孕育处理	139
三、球墨铸铁的炉前控制技术	100	§ 8-5 可锻铸铁常见缺陷及防止	142
§ 6-3 球墨铸铁的凝固特点及铸造性能	102	一、灰点	142
一、球墨铸铁的凝固特点	102	二、缩松及枝状缩松	142
二、球墨铸铁的铸造性能和铸造 工艺特点	105	三、裂纹	143
§ 6-4 常见缺陷及防止方法	107	四、回火脆性	143
一、缩孔及缩松	107	第九章 特殊性能铸铁	144
二、夹渣	108	§ 9-1 耐磨铸铁	144
三、石墨漂浮	110	一、铸铁组织对铸铁减摩性的影响	144
四、皮下气孔	111	二、常用的减摩铸铁	146
五、球化不良及球化衰退	112	三、在磨料磨损条件下工作的 抗磨铸铁	151
§ 6-5 球墨铸铁生产中几个问题的 讨论	114	四、常用的抗磨铸铁	153
一、关于合金化问题	114	§ 9-2 耐热铸铁	156
二、关于铸态球墨铸铁的生产	114	一、概述	156
三、钕基重稀土球墨铸铁	114	二、铸铁在高温时的氧化	157
四、关于大断面球墨铸铁的生产	115	三、铸铁在高温时的生长	159
第七章 蠕虫状石墨铸铁	116	四、常用的耐热铸铁	160
§ 7-1 金相组织及使用性能	116	§ 9-3 耐腐蚀铸铁	164
一、金相组织特点	116	一、腐蚀的概念和过程	164
二、机械性能特点	117	二、提高铸铁耐腐蚀性的途径	165
三、其他性能特点	119	三、常用的耐腐蚀铸铁	166
§ 7-2 蠕虫状石墨铸铁的制造	121	第十章 铸铁热处理	171
一、炉前处理技术	121	§ 10-1 铸铁热处理的特点	171
二、铸造性能及铸型工艺特点	124	一、铸铁的金相学特点	171
三、铸件的质量控制	126	二、加热时铸铁组织的转变	172
§ 7-3 蠕虫状石墨铸铁的应用	127	三、冷却时铸铁组织的转变	173
第八章 可锻铸铁	129	§ 10-2 灰铸铁的热处理	174
§ 8-1 可锻铸铁的牌号和用途	129	一、消除内应力的低温退火	174
		二、降低硬度的高温退火	175

§ 10-3 球墨铸铁的热处理	175	一、燃烧比与焦炭消耗量的关系	208
一、球墨铸铁的退火处理	176	二、冲天炉熔化率与风量和焦耗的 关系	208
二、球墨铸铁的正火处理	176	三、冲天炉风量与炉气成分的关系	209
三、球墨铸铁的淬火与回火	181	四、影响冲天炉内焦炭燃烧的主要 因素	211
四、球墨铸铁的等温淬火	184		
§ 10-4 白口铸铁的热处理	186	第十三章 冲天炉熔炼的基本原理	212
一、消除内应力的退火处理	186	§ 13-1 冲天炉内炉气与温度的分布	212
二、降低硬度的热处理	186	一、冲天炉内炉气的分布	212
三、白口铸铁的淬火与回火	186	二、冲天炉内温度的分布	213
四、白口铸铁的等温淬火	187	§ 13-2 冲天炉内的热交换	214
第二篇 铸铁熔炼		一、冲天炉预热区内的热交换	214
第十一章 概论	188	二、冲天炉熔化区内的热交换	214
§ 11-1 铸铁熔炼发展概况	188	三、冲天炉过热区内的热交换	215
一、我国铸铁熔炼发展概况	188	四、冲天炉炉缸区内的热交换	216
二、国外铸铁熔炼发展概况	189	§ 13-3 影响冲天炉内热交换的主要因素	216
三、铸铁熔炼发展趋向	189	一、送风对冲天炉内热交换的影响	217
§ 11-2 对铸铁熔炼的基本要求	190	二、焦炭对冲天炉内热交换的影响	218
一、铁水质量高	190	三、金属炉料对冲天炉内热交换的 影响	220
二、熔化速度快	190	四、熔炼操作对冲天炉内热交换的 影响	220
三、熔炼耗费少	190	五、冲天炉结构和尺寸对炉内热交换 的影响	221
四、炉衬寿命长	190	§ 13-4 冲天炉内的冶金反应	224
五、操作条件好	190	一、冲天炉内冶金反应的基本规律	224
§ 11-3 冲天炉的结构与操作工艺概述	190	二、冲天炉熔炼过程中铁水含碳量 的变化	230
一、冲天炉结构简介	190	三、冲天炉熔炼过程中金属元素的氧化 烧损	234
二、冲天炉操作工艺概述	193	四、冲天炉熔炼过程中铁水含硫量的 变化	236
三、冲天炉工作的一般过程	194	五、冲天炉熔炼过程中铁水含磷量的 变化	241
第十二章 冲天炉内焦炭燃烧的 基本规律	195	第十四章 常用冲天炉	242
§ 12-1 焦炭的特性和对铸造用焦的 要求	195	§ 14-1 多排小风口冲天炉	242
一、焦炭的成分	195	一、多排小风口冲天炉结构概况	242
二、焦炭的强度与块度	195	二、多排小风口冲天炉的使用效果	243
三、焦炭的反应性与气孔率	196	三、多排小风口冲天炉的主要特点	243
§ 12-2 焦炭的发热量计算与燃烧计算	196	§ 14-2 双层送风冲天炉	245
一、焦炭的发热量计算	196	一、双层送风冲天炉结构概况	246
二、焦炭的燃烧计算	197	二、双层送风冲天炉的使用效果	246
§ 12-3 焦炭层状燃烧的基本规律	201		
一、焦炭层状燃烧的一般过程	201		
二、焦炭层中的氧化带	202		
三、焦炭层中的还原带	205		
四、炉气燃烧比	206		
§ 12-4 冲天炉内焦炭的燃烧	208		

三、双层送风冲天炉的主要特点	247	§ 15-4 冲天炉熔炼的控制	270
§ 14-3 中央送风冲天炉	248	一、铁水化学成分的控制	270
一、中央送风冲天炉结构概况	248	二、铁水温度的控制	271
二、中央送风冲天炉的使用效果	249	三、冲天炉熔炼中的故障及其防止 方法	272
三、中央送风冲天炉的主要特点	249	第十六章 铸铁的其他熔炼方法	274
§ 14-4 卡腰三节炉	250	§ 16-1 煤粉化铁	274
一、卡腰三节炉结构概况	250	一、煤粉化铁炉的基本结构	274
二、卡腰三节炉的使用效果	250	二、煤粉化铁炉的操作工艺	278
三、卡腰三节炉的主要特点	251	三、煤粉化铁炉的工作特点	278
§ 14-5 水冷无炉衬冲天炉	251	§ 16-2 工频感应电炉化铁	280
一、水冷无炉衬冲天炉结构概况	252	一、工频感应电炉的基本工作原理	280
二、水冷无炉衬冲天炉的使用效果	253	二、工频感应电炉的基本结构	281
三、水冷无炉衬冲天炉的主要特点	253	三、工频感应电炉的熔炼特点	283
第十五章 冲天炉熔炼过程的控制	255	§ 16-3 冲天炉与电炉双联熔炼	284
§ 15-1 冲天炉操作参数的选择与计算	255	一、冲天炉附设工频前炉	284
一、冲天炉的网形图	255	二、冲天炉与工频浇注炉双联	284
二、冲天炉风量的计算	256	三、冲天炉与工频感应电炉双联	285
三、冲天炉的层焦量与层铁量的计算	257	铸铁熔炼参考资料	286
四、冲天炉底焦高度的决定	258	一、我国冲天炉的主要尺寸	286
五、冲天炉用熔剂量的计算	258	二、冲天炉热平衡计算	288
§ 15-2 冲天炉的配料计算	258	三、生铁锭的化学成分	291
一、配料计算的原始资料	259	四、铁合金的化学成分	293
二、配料计算	259	五、铁合金比重、堆比重及熔点	296
§ 15-3 冲天炉熔炼过程的测试	261	六、燃料及熔剂	297
一、温度测量	261	七、耐火材料与绝热材料	299
二、风压与风量测量	265		
三、炉气分析	268		

绪 论

铸铁是近代工业生产中应用最为广泛的一种铸造金属材料。在一般机械制造、冶金矿山、石油化工、交通运输和国防工业等各部门中，铸铁件约占整个机器重量的45~90%。所以，学习和研究铸铁技术，对于发展铸造生产，充分发挥铸铁件在国民经济各部门中的作用，是很有意义的。

我国是世界冶铸术的发源地。早在公元前513年，晋国就已铸成了有刑书的大铁鼎，称为铸刑鼎，这是关于我国铸铁技术的最早记载。河南洛阳出土的铸铁铤，与铸刑鼎的时间仅差数十年，并且还发现了可锻铸铁铲。而在欧洲，直至公元十三世纪末至十四世纪初才出现生铁，这比我国要晚一千九百多年。

从春秋战国之交的铁铤、铁铲，至河北省兴隆燕国冶铁遗址出土的大批铁范，相隔约三百年的时间，而铸铁技术却得到了显著的发展。兴隆铁范(金属型)的构造，基本上符合均匀散热、抵抗变形以及结构强度等要求，这标志着战国后期我国铸铁技术已达到了高超的水平。出土文物表明，早在战国初期，我国就已创造了白口铸铁的柔化处理技术，从而显著提高了铸铁的强度和韧性。洛阳出土的战国早期的铁铲，是迄今发现的世界上的最早的可锻铸铁件。

公元前119年，西汉武帝刘彻宣布了“盐铁官营”政策，促进了我国历史上铸铁技术又一次大发展。河北满城发掘到的西汉中山靖王刘胜及其妻窦绾两座大型汉墓中，有大量水平相当高的铁器。河南南阳冶铁遗址是一个大型的汉代铸造作坊，面积达十二万平方米，残留有熔炉十七座，有耐火材料、风管和铁质工具等文物。巩县铁生沟冶铁遗址，更是一个比较完善的冶铁工场，有各种熔炉和锻炉共20座，还有配料池和铸造地坑。从其中出土文物中，有一种名叫铁耒的工具，经金相鉴定，发现它的组织中有球状石墨，其外形和结构与近代球墨铸铁中的球状石墨十分相似，但并未发现有球化元素，且铸铁的含硫量也很低。在西汉时期，我国不仅有了质量较高的白口铸铁，而且有了灰口铸铁，例如南阳出土的汉代铁器就是灰口铸铁的。

隋唐以后，钢铁产量有了大幅度的上升，锻、拔、大型铸件的铸造等各种加工工艺都有了进一步的提高和发展。五代周广顺三年(公元953年)，铸造了重十万斤以上，高5.3米，长6.8米，宽3米的沧州大铁狮。宋代在太原晋祠铸有四个大铁人。元代铸造了重达一万六千斤的大铁龟。这说明我国当时的铸铁技术不仅规模大，而且水平高。明朝宋应星在广泛实践的基础上，对我国古代的科学技术，其中包括冶铸技术进行了系统的总结，写出了著名的著作《天工开物》，对我国铸造技术的发展起了很好的促进作用。

由上可见，在世界冶铸技术史上，我国劳动人民曾经写下了光辉的篇章，作出了卓越的贡献。但在解放前，我国的铸铁生产是相当落后的。当时熔炼铸铁的炉子，只是一些容量很小的搀炉和三节炉，几乎没有冲天炉，而且只能生产抗拉强度小于 180牛/毫米^2 的普通灰铸铁，用于制造简单的修配件；为数很少的可锻铸铁，其退火周期竟长达七天以上，基本上没有其余各类铸铁件的生产。

新中国成立后,为铸造生产的发展开辟了广阔的途径。1949年,我国开始生产孕育铸铁,把铸铁的强度提高到 200牛/毫米^2 以上。1950年,我国开始试制球墨铸铁,并于1951年投入了生产。在五十年代后期,我国铸造工作者创造了适合我国焦炭情况的小风口冲天炉,推广了可锻铸铁的快速退火,使退火周期缩短到30~40小时;同时发展了高强度、耐热、耐磨和耐腐蚀等各类铸铁;球墨铸铁经等温淬火后最高抗拉强度可达 $1200\sim 1400\text{牛/毫米}^2$;并进一步试验改进了各类冲天炉;发展了电炉熔炼铸铁技术;修改了各类铸铁件的标准;广泛开展了有关铸铁方面的科学实验及基础理论的研究。

铸铁之所以获得广泛的应用和发展,因为它作为机械制造用的材料,具有其他金属材料所不及的优良性能。

例如,生产成本低,铸造性能好,便于切削加工,减振性及耐磨性好,缺口敏感性低并具有较好的热处理性能等。

至于铸铁的机械性能,和铸钢件相比,一般说来,虽然硬度及抗压强度相差不大,但抗拉强度和塑性、韧性等指标则比较低。但生产实践表明,机械零件对金属材料的要求并不总是强度、韧性越高越好。例如,切削机床的床身铸件,减振性是很重要的。又如钢锭模,其使用寿命并不主要决定于强度及韧性,而主要决定于它抵抗热冲击能力的高低。因此过去常选用一般强度的灰铸铁作为钢锭模的材料,而很少用高强度铸铁的,而近年来则正在广泛地采用蠕虫状石墨铸铁。因此,根据机器零件的实际需要,合理地选定材料,才能得到良好的使用及经济效益。

从一些统计资料^①的数字中,可以更清楚地看到,铸铁在国民经济中的作用和它的发展趋势。

从世界范围来看,自1966年以来,铸件总产量以1973年为最高,达到7716万吨,而其中铸铁件达6230万吨,占80.7%,以后有所下降,但在1975年仍占总铸件产量的76.3%。如果进一步考察一下几种铸铁产量的变化指标^②,则有下列情况,灰铸铁的总产量几乎不变;可锻铸铁有一定程度的增长,其中特别是珠光体可锻铸铁的产量有上升的趋势,例如以日本、美国为例,1970年的产量分别为4.7万吨及24.8万吨,1976年则分别增加至4.95万吨及27.9万吨;另外合金铸铁的产量亦有上升的趋势;特别值得注意的是,球墨铸铁的产量增长最快,近几年来已超出五百万吨的水平;据分析这都与农业机械化程度的提高有关。由于蠕虫状石墨铸铁具有近似于球墨铸铁的机械性能,并兼有灰铸铁那样的铸造性能及导热性能,因而最近几年受到了国内外铸造工作者的普遍重视,发展极为迅速。

全书采用国际单位制(SI),个别情况采用国际单位与工程单位制并用,书中常用单位的换算采用近似值,换算的关系如下:

一、力学单位

1 公斤力 = 10 牛顿(牛)

1 公斤力/毫米² = 10 牛/毫米² = 10 兆帕

1 公斤力/厘米² = 10 牛/厘米²

1 标准大气压 = 1 工程大气压 = 100 千帕 (按规定暂时并用)

1 毫米水柱 = 10 帕

^① 郑州机械研究所:“国外铸造合金基本情况”1978年3月。

1 毫米水银柱 = 133 帕

1 公斤-米 = 10 焦耳(焦)

1 尔格 = 10^{-7} 焦

1 泊 = 0.1 帕·秒

二、热力学单位

1 千卡 = 4.187 千焦

1 千卡/公斤 = 4.187 千焦/公斤

1 千卡/(公斤·°C) = 4.187 千焦/(公斤·°C)

1 千卡/(米·时·°C) = 1.16 瓦/(米·°C)

1 卡/(厘米·秒·°C) = 418.7 瓦/(米·°C)

1 千卡/(米²·时·°C) = 1.16 瓦/(米²·°C)

第一篇 铸 铁

任何一个优质铸件，都必须是外形完好，内部致密，使用性能合乎要求。铸铁件亦不例外。为确保铸铁件达到上述质量指标，就必须了解铸铁的铸造性能和使用性能（包括机械性能和物理性能等），尤其要掌握铸铁的化学成分、金相组织和性能之间的关系。本篇主要讨论普通灰铸铁、高强度灰铸铁、球墨铸铁、蠕虫状石墨铸铁、可锻铸铁以及特殊性能铸铁的性能特点、生产工艺和有关的基本理论。

第一章 概 论

铸铁是含碳量大于2.14%或者组织中具有共晶组织的铁碳合金。工业上所用的铸铁，实际上都不是简单的铁-碳二元合金，而是以铁、碳、硅为主要元素的多元合金。铸铁的成分范围大致为：C 2.4~4.0%，Si 0.6~3.0%，Mn 0.2~1.2%，P 0.1~1.2%，S 0.08~0.15%。有时还加入各种合金元素，以便获得具有各种性能的合金铸铁。

§ 1-1 各种铸铁及其应用

根据碳在铸铁中存在的形态不同，通常可将铸铁分为白口铸铁、灰口铸铁及麻口铸铁。而灰铸铁中又可根据石墨的形态不同而分为普通灰铸铁，蠕虫状石墨铸铁，球墨铸铁以及可锻铸铁。为便于后继各章的学习，对几种常见的铸铁作一简介。

一、白口铸铁

碳除少量溶于铁素体外，绝大部分以碳化物的形式存在于铸铁中，断口呈银白色。

图 1-1 为亚共晶白口铁的组织。

白口铸铁的特点是硬而脆，很难加工，所以一般都不希望出现白口。但是在实际生产中，有时却可以利用白口铸铁的硬度高、抗磨损性能好等优点，制造一些高耐磨性的零件和工具。例如，农具（如犁铧等）、球磨机的内衬及磨球，喷丸机的叶片以及电厂灰渣泵及磨煤机的磨损件等等。

另外还可铸成具有一定深度的白口表面层。而心部则为灰口组织的“冷硬铸铁”件。最常见的冷硬铸铁件有轧辊及矿车车轮等。

为了提高白口铸铁的韧性及耐磨性，常适量地加入一些合金元素如铬、钼、钒、硼和稀土等。

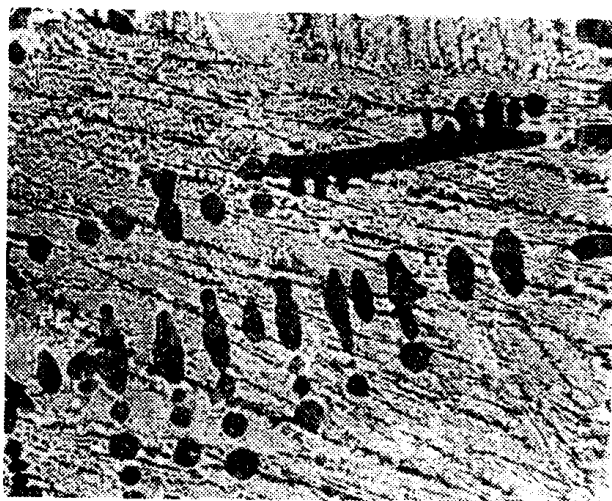


图1-1 亚共晶白口铸铁组织 ×100

二、灰铸铁

碳主要结晶成石墨，并呈片状形式存在于铸铁中，断口为暗灰色。常见的铸铁件多数是灰铸铁。图 1-2 为灰铸铁的金相组织。珠光体的基体上分布着片状石墨。

灰铸铁的化学成分一般为：C 2.6~3.6%，Si 1.2~3.0%，Mn 0.4~1.2%，P ≤ 0.3%，S ≤ 0.15%。

它大量地应用于各种机器零件。是工业上应用得最为广泛的铸造材料。

三、麻口铸铁

具有灰口和白口的混合组织，断口呈灰白色交错。其金相组织见图 1-3。在珠光体的基体上既分布着渗碳体又分布着石墨。



图1-2 灰口铸铁组织 ×250



图1-3 麻口铸铁组织 ×250

这种铸铁由于既不利于机械加工，又无特殊优异的使用性能，故一般应用得较少。

四、可锻铸铁

可锻铸铁因有较高的塑性和韧性而得名，其实是不可锻的。

其生产过程是：先铸成一定成分的白口铸件，而后经过适当的热处理（石墨化退火处理），使其中的渗碳体分解而形成团絮状石墨。由于石墨呈团絮状，故显著地降低了石墨对金属基体的割裂作用，从而使其强度高于一般的灰口铸铁，尤其是具有较高的塑性（延伸率可达 12%）和韧性（无缺口试样的冲击韧性可高达 100 焦耳）。

可锻铸铁除有较高的强度、塑性和韧性外，与球墨铸铁相比，它还具有质量稳定、处理铁水简便以及易于组织流水生产等优点，尤其是适合于大量生产形状复杂的薄壁小件，因而其应用仍非常广泛。

在常用的可锻铸铁中，按热处理条件的不同，有黑心铁素体可锻铸铁和珠光体可锻铸铁两类。前者经完全石墨化退火而得，退火后的组织为在铁素体的基体上分布着团絮状石墨（见图 1-4 a），其断口特征是，中心呈暗绒色，表面层由于有些脱碳而呈灰白色，故名“黑心可锻铸铁”；如果无第二阶段石墨化过程，则退火后的组织为珠光体基体上分布着团絮状石墨（见图 1-4 b），称为珠光体可锻铸铁，其断口呈灰色，但习惯上仍称它为黑心可锻铸铁。

铁素体可锻铸铁具有一定的强度和较高的韧性，多用于制造承受冲击和振动的零件，例如，汽车拖拉机的后桥外壳、转向机构、弹簧钢板支座、机床上用的把手、低压阀门、管件

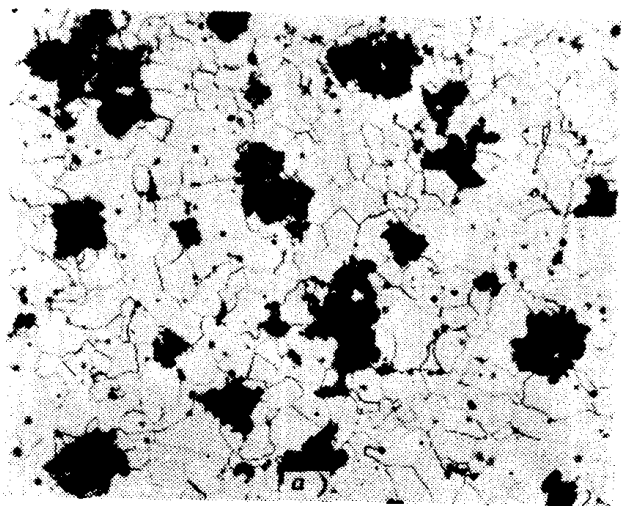


图1-4 a 铁素体可锻铸铁 ×100

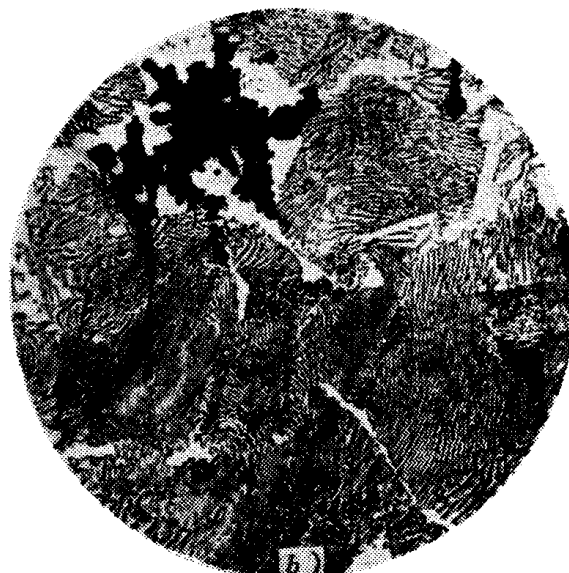


图1-4 b 珠光体可锻铸铁 ×500

以及纺织机械和农机零件、农具等。珠光体可锻铸铁的强度、硬度高，耐磨性好，常用来铸造曲轴、凸轮轴、连杆及齿轮等重要零件。

五、球墨铸铁

铁水在浇注前，经球化和孕育处理，碳主要以球状石墨的形态存在于铸铁中。

球墨铸铁到本世纪四十年代末（1947年）才发展起来，而真正用于工业则是从1950年前后才开始的。我国在解放初期就掌握了球墨铸铁的生产技术，它的生产过程是：熔炼出一定化学成分的高温铁水，然后进行球化处理及孕育处理（加入球化剂及孕育剂），就能得到球状石墨的铸铁。图1-5，1-6分别为经退火处理（铁素体基体加球墨）及铸态（珠光体加牛眼状铁素体加球墨）的球墨铸铁的金相组织。

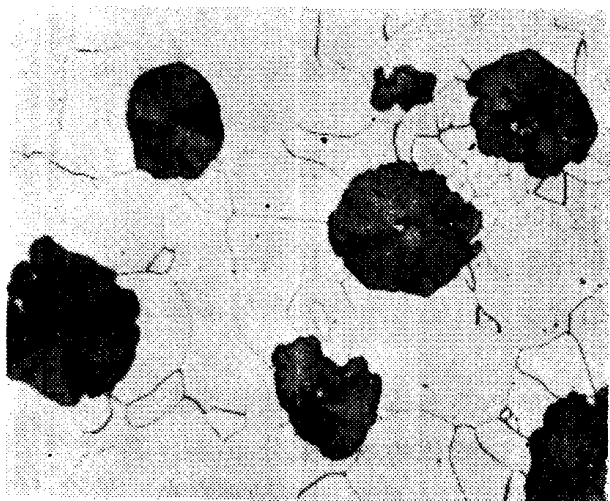


图1-5 铁素体球墨铸铁 ×250

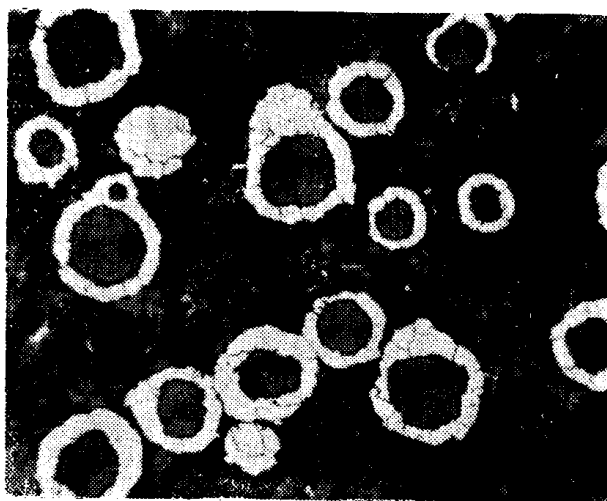


图1-6 铸态球墨铸铁 ×200

与其他铸造合金相比，球墨铸铁亦有类似于灰口铸铁的优点（如耐磨、减振、优良的切削加工性和铸造工艺性能等），还具有比普通灰铸铁高得多的强度、塑性和韧性。

球墨铸铁的优良机械性能是和其组织特点有关。在球墨铸铁中，石墨结晶成球状，它对基体的割裂作用很小，基体强度的利用率可达70~90%，因而其抗拉强度不仅高于所有的

其他铸铁，甚至还高于碳钢。

球墨铸铁已成功用于铸造一些受力复杂，强度、韧性、耐磨性要求较高的零件，如柴油机、汽车及拖拉机的曲轴、凸轮轴、中压阀门、汽车及拖拉机的某些齿轮、压缩机的曲轴、连杆以及农机、农具等零件。

掌握和发展球墨铸铁的生产技术，研究其基本理论，对于机械工业尤其是对于促进我国实现农业机械化，将有很重要的意义。

随着我国农机、石油、冶金、化工等工业的飞速发展，对于耐磨、耐热及耐腐蚀等特殊性能的铸铁的需要也日益增长，将在第九章讨论。

§ 1-2 各种铸铁的金相组织和机械性能的特点

从上面对几种铸铁的介绍可见它们的金相组织是各有特点的，因而导致了机械性能上的很大差别，例如白口铸铁硬而脆，强度性能较低；灰铸铁具有一定的强度性能，但变化范围很大，如可从最低一级的 HT10-26（抗拉强度为 100牛/毫米^2 ，抗弯强度为 260牛/毫米^2 ）到最高一级的 HT40-68（抗拉强度为 400牛/毫米^2 ，抗弯强度为 680牛/毫米^2 ），延伸率和冲击韧性几乎皆接近于零；可锻铸铁则具有较一般灰铸铁高的强度性能，而且同时具有较高的塑性（延伸率可高达 12%）及韧性（有较高的冲击值），如果处理成珠光体基体时，则强度性能可更高，接近于球墨铸铁，塑性及韧性则较低；球墨铸铁的性能更高而且变动范围也更大。为什么同样是铸铁而机械性能的变化却如此之大呢？而且从灰铸铁至可锻铸铁和球墨铸铁之间，发生了一个质变，由原来的延伸率和冲击韧性几乎为零至有一定的数值，它们之间有化学成分的不同；有铸造时冷却速度的影响；有炉前处理方法的差异；还有热处理制度的区别等等。而这些工艺因素对铸铁性能的影响主要是通过其金相组织的差异表现出来的。因此从这个观点出发，研究铸铁的组织特点及其形成过程；研究各种铸铁的工艺因素、金相组织和其机械性能及其他性能之间的关系；制订和控制各项工艺因素，从而获得满意的金相组织和各种性能，这便是研究“铸铁合金”的主要任务。

在研究铸铁的组织及其形成过程，以及各种因素的影响时，我们应以什么为重点，这是值得注意的。

分析上述各种铸铁的组织特点后，可以归纳出：一、铸铁中的碳可以以渗碳体的形式存在，也可以石墨形式存在，这就需要我们在学习 Fe-Fe₃C 系相图的基础上再进一步研究 Fe-C（石墨）系相图；二、铸铁中的金属基体都是由珠光体、铁素体或珠光体加铁素体组成，基本上与共析钢或亚共析钢的基体组织相同，但铸铁的强度比钢低得多，特别是灰铸铁，而各种铸铁的强度变化范围又相当大，原因何在？这显然是铸铁中存在有石墨以及石墨以不同形态存在的缘故。例如，灰铸铁中的石墨呈片状，而且分布及大小各不相同；可锻铸铁中的石墨呈团絮状；球墨铸铁中的石墨则呈球状。这些不同形态、大小及分布的石墨，对基体的削弱作用很不相同，其最终表现出的强度性能就必然有显著的差别。因此我们对铸铁中石墨组织的形态，对石墨组织的形成规律，各项工艺因素对形成石墨的影响等必须给以充分的注意，这是本课程的重点。

第二章 铁-碳及铁-碳-硅相图

合金相图是分析合金金相组织的有用工具。

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，但其中对铸铁的金相组织起决定作用的主要是铁、碳和硅，所以除根据铁-碳相图来分析铸铁的金相组织外，还必须研究铁-碳-硅三元合金的相图。

本章主要讨论分析 Fe-C 相图和 Fe-C-Si 相图的等硅切面图，再附带讨论其他元素的作用。

§ 2-1 铁-碳相图的分析

一、铁-碳相图的双重性

金属学中已经学习了 Fe-Fe₃C 相图，讨论了碳钢及白口铸铁的结晶过程和所得的组织。但生产实践指出：在适当的条件下，含 C 2.14% 以上的铁碳合金可以结晶出石墨来；白口铸铁在 900°C 以上保温，莱氏体中的渗碳体能分解成奥氏体和石墨；如果在共析温度上下保温或者缓慢冷却，奥氏体不再共析转变成珠光体（铁素体加 Fe₃C）而将转变成铁素体加石墨。这些现象究竟说明了什么？

从热力学观点看，在一定的条件下高温时的渗碳体能自动分解为奥氏体加石墨，这表明渗碳体的自由能较高；亦即在这个条件下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，是处于稳定平衡的状态。说明了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。从图 2-1 可见在温度稍低于共晶温度时，石墨的自由能 g 比渗碳体的自由能 n 要低得多（ mno 表示渗碳体的自由能随成分而变的曲线）。 $ayxb$ 是奥氏体的自由能随含碳量而变的曲线。根据体系自由能的计算方法：从 g 向 $ayxb$ 作切线 gy ，则含碳量在 $g-y$ 之间的 c 点的铁碳合金，以石墨和奥氏体二相共存时，其体系自由能可由成分 c 的纵坐标线和切线 gy 的交点 u 表示。在这个温度如果体系以渗碳体和奥氏体二相共存时，其体系自由能则由 nx （由 n 向 $ayxb$ 所作的切线）和成分 c 的纵坐标的交点 v 表示。由于 nx 线整个处于 gy 线之上，这就表明在这个温度奥氏体加渗碳体二相系的自由能要比奥氏体加石墨二相系的自由能高些，亦就是说后者要比前者

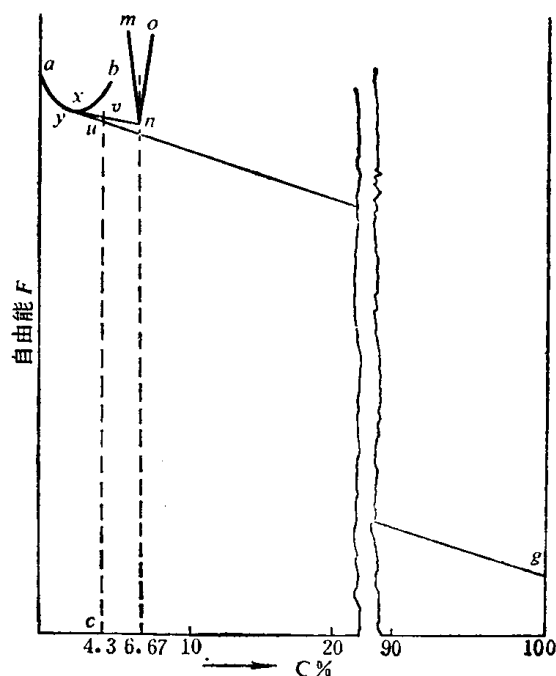


图2-1 铁碳合金中各组成体自由能的示意图（稍低于共晶温度）

更稳定一些。

需要说明一点：例如 c 成分的铁碳合金液体在稍低于共晶温度时，转变为奥氏体加石墨二相组织比起转变为奥氏体加渗碳体二相组织，其自由能的下降要大。那么根据自由能减小原理，就应该进行前一种转变，为什么只有在特定的条件下（例如在缓慢冷却、过冷不大以及一定的碳、硅含量等条件下）才能进行这种转变，而在某种情况下则进行自由能下降较少的奥氏体加渗碳体的转变呢？这要从结晶动力学（晶核的形成与长大过程）的观点来说明。以含 C 4.3% 的共晶成分液体在低于共晶温度的凝固为例：在含 C 4.3% 的液体中形成含 C 6.67% 的渗碳体晶核，此时晶核中含碳量比液体的平均含碳量只高出 50%；而且渗碳体是间隙型的金属间化合物，碳原子只是在铁原子的间隙处存在，不需要铁原子从晶核中扩散出去，这样形成渗碳体晶核是比较容易的。要形成石墨的晶核可就困难得多：要求的浓度起伏很大——从 4.3% 集中到 100%；而且在形成晶核时要将铁原子从晶核中全部排出去。因此虽然结晶出奥氏体加石墨的自由能差较大，但阻力也大（困难较多）。因此，在某些条件下，奥氏体加石墨的共晶转变的进行还不如莱氏体共晶转变那样顺利。

至于共析转变，可能转变成珠光体，也可能转变成铁素体加石墨，也可从热力学和动力学两个方面去分析，得到和上面相似的结论。

由此可见，从热力学观点上看， $Fe-Fe_3C$ 相图只是介稳定的，只有 $Fe-C$ （石墨）相图才是热力学稳定的。从动力学观点看，在一定条件下，按 $Fe-Fe_3C$ 相图转变亦有可能，因此就出现了二重性。

二、铁-碳双重相图的分析

对铸铁合金长期使用与研究的结果，人们得到了如图 2-2 所示的铁碳合金双重相图，即 $Fe-Fe_3C$ 介稳定系相图与 $Fe-C$ （石墨）稳定系相图，分别以实线和虚线表示。

$Fe-C$ （石墨）相图和 $Fe-Fe_3C$ 相图的主要不同处在于：

1) 稳定平衡的共晶点 C' 的成分和温度与 C 点不同：

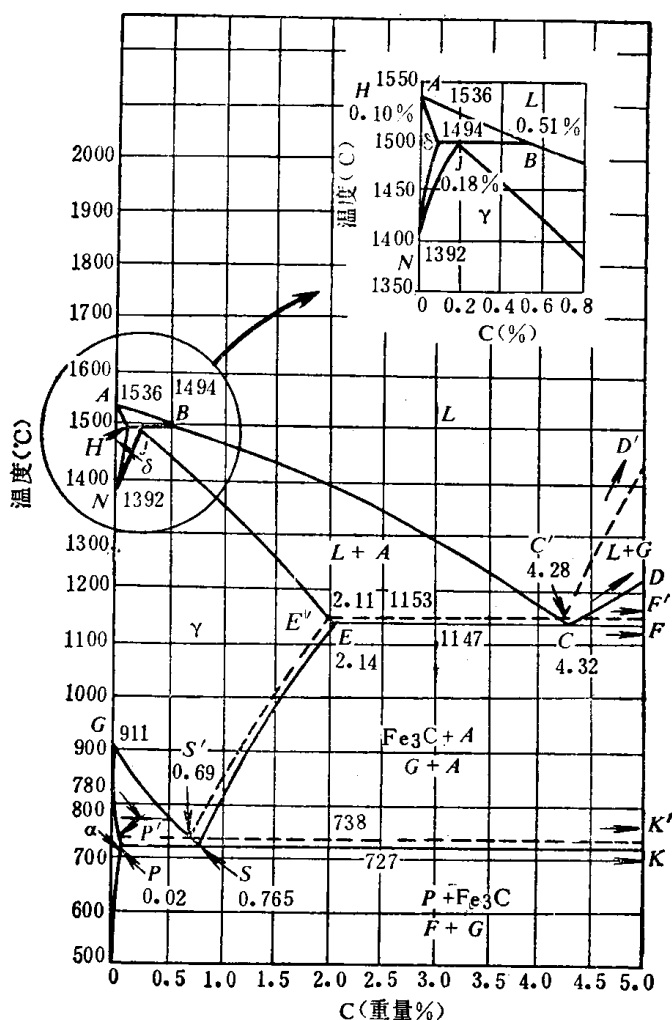
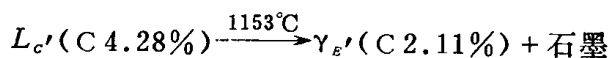


图2-2 铁碳合金双重相图