

现代铸造合金及其熔炼技术丛书



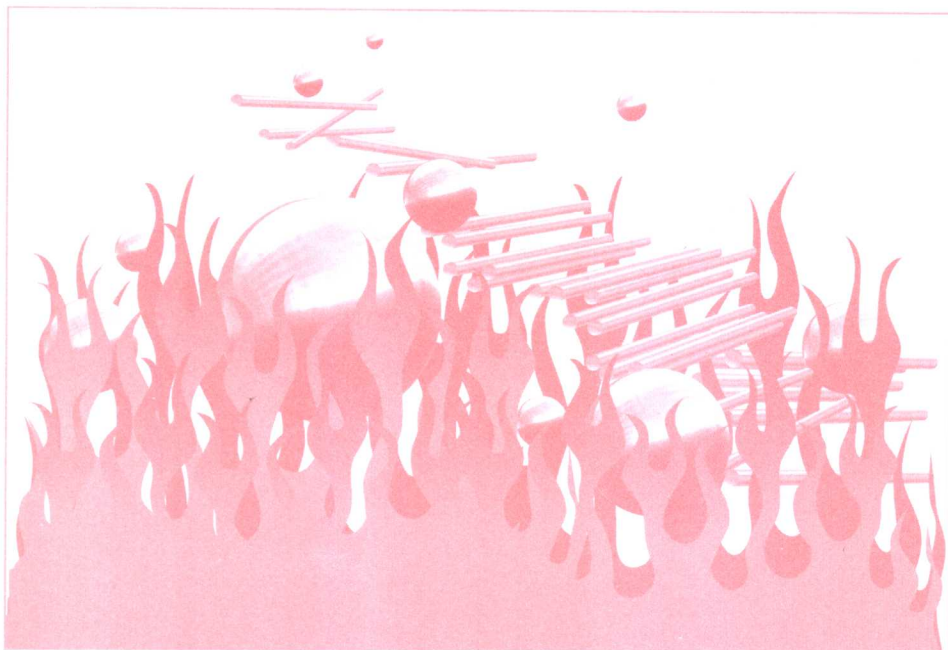
铸 铁

李长龙 赵忠魁 王吉岱 编著



化学工业出版社

现代铸造合金及其熔炼技术丛书



铸 铁

李长龙 赵忠魁 王吉岱 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

铸铁/李长龙, 赵忠魁, 王吉岱编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 8

(现代铸造合金及其熔炼技术丛书)

ISBN 978-7-5025-9856-3

I. 铸… II. ①李…②赵…③王… III. 铸铁-基本知识 IV. TG143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161404 号

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 闫 敏

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 440 千字 2007 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

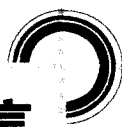
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言



钢铁材料是最基础的工程材料。随着科学技术的进步,基础理论研究的不断深入,特别是近年来出现了许多关于钢铁合金的新技术、新材料和新设备仪器,为研究生产性能和质量优良的钢铁材料奠定了基础。中国加入 WTO 以后,已经成为国际上重要的金属材料及其铸件的生产出口基地,金属材料产业将得到进一步发展,这对铸件质量和性能以及熔炼技术提出了新的和更高的要求。在上述背景下,我们编写了这本书,以期推动我国钢铁材料及铸件的研究及生产的进一步发展。

本书涉及的铸铁合金及其熔炼技术是重要而实用的工程技术。汇集了作者多年来的科研、教学成果和经验,系统、全面地论述了有关铸铁材料及其熔炼技术、热处理技术等方面的知识,介绍了国内外最新的该方面的研究成果和应用实例,提供了来自实践的、丰富的试验和生产数据,加强了实用性,突出了先进性。

本书的特点是重视理论联系实际,编写中力求深入浅出地阐明有关的基础理论和基本概念,将先进性、科学性与实用性相结合,以充分反映国内外当代铸铁的先进技术及发展趋势,因此,本书既有一定的学术价值,又有重要的工程应用价值。

本书可供设计与科研单位中从事相关专业的科技人员使用或参考,也可作为大专院校的材料科学与工程专业、铸造专业、金属材料工程专业和材料成形与控制专业等的教材或参考书。

本书的第 1 章、第 4 章、第 8 章、第 9 章由李长龙(山东建筑大学)编写;第 2 章由王吉岱、孙爱芹(山东科技大学)编写;第 3 章由王吉岱、赵忠魁(山东建筑大学),李长龙和王凤芹(山东科技大学)编写;第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章由赵忠魁编写;第 10 章由李长龙、段金挺、于国华(青岛中智达环保熔炼设备有限公司)编写;第 11 章由李长龙、盛龙海(山东莱州华汽机械有限公司)编写。全书由李长龙总策划、修改和统稿,由初福民(山东建筑大学)主审。参加本书编写和整理的还有李长兵、郭加连、赵瑜、孙海峰、滕平刚、张震、毕思峰、毕京河、杨秋生、谢勇、李维赞、孟令营、张传德、王培培等。

由于编者学识水平所限,书中不当之处在所难免,竭诚希望读者批评指正。

编著者

2007 年 1 月于济南



目 录

第 1 章 概述	1
1.1 铸铁及其应用	1
1.2 铸铁的金相组织和力学性能的特点	4
第 2 章 铸铁的结晶过程	5
2.1 铁碳双重相图	5
2.1.1 铁碳双重相图分析	5
2.1.2 石墨与渗碳体	7
2.1.3 合金元素对铁碳双重相图的影响	8
2.2 铸铁的一次结晶过程	9
2.2.1 奥氏体的析出	9
2.2.2 铸铁的石墨化过程	11
2.3 灰口铸铁的二次结晶	13
2.4 灰铸铁的金相组织与标准介绍	14
2.4.1 灰铸铁金相标准 GB 7216—1987 介绍	14
2.4.2 灰铸铁的其他组织简介	17
第 3 章 灰铸铁	18
3.1 灰铸铁的分类和特点	18
3.1.1 灰铸铁的分类和应用	18
3.1.2 灰铸铁的使用性能特点	18
3.2 铸铁的化学成分对组织和性能的影响	21
3.2.1 碳和硅对铸铁组织与力学性能的影响	21
3.2.2 硫和锰对铸铁组织与性能的影响	23
3.2.3 磷对铸铁组织与性能的影响	25
3.2.4 铸铁中合金元素对组织与性能的影响	26
3.3 冷却速度及其他工艺因素对铸铁组织性能的影响	27
3.3.1 冷却速度的影响	27
3.3.2 铁液的过热和高温静置的影响	29
3.3.3 孕育的影响	29
3.3.4 炉料的影响	29
3.4 灰铸铁的生产	30
3.4.1 灰铸铁生产的技术要求及措施	30
3.4.2 灰铸铁化学成分的确定	31
3.5 孕育铸铁	33
3.5.1 孕育铸铁的熔制原理	33
3.5.2 孕育处理的目的	34
3.5.3 生产孕育铸铁的主要条件	35
3.5.4 孕育效果的评估	35
3.6 灰铸铁的铸造性能	36
3.6.1 流动性	36
3.6.2 收缩性能及其伴生现象	37
第 4 章 球墨铸铁	39
4.1 球墨铸铁的性能和应用	39
4.1.1 球墨铸铁的性能	39
4.1.2 球墨铸铁的应用	48
4.2 球墨铸铁的金相组织及其与力学性能的关系	49
4.2.1 石墨及其与力学性能的关系	50
4.2.2 基体组织及其与力学性能的关系	52
4.2.3 球墨铸铁的铸态组织	54
4.3 球墨铸铁化学成分及熔炼要求	55
4.3.1 化学成分的确定	55
4.3.2 球墨铸铁对铁液的要求	57
4.4 球化剂、孕育剂及其制备	58

4.4.1 球化元素的性质和作用	58	4.7.4 球墨铸铁的等温淬火处理	79
4.4.2 球化剂的选用	60	4.7.5 球墨铸铁的表面处理	82
4.4.3 孕育剂的选用	60	4.8 球墨铸铁典型缺陷及防止	82
4.4.4 稀土镁合金的熔制	62	4.8.1 球化不良和球化衰退	82
4.5 球墨铸铁的生产	63	4.8.2 缩孔和缩松	83
4.5.1 各种类型球墨铸铁的成分选定	63	4.8.3 皮下气孔	83
4.5.2 球化处理	66	4.8.4 应力变形和裂纹	84
4.5.3 孕育处理	69	4.8.5 夹渣	84
4.5.4 球墨铸铁的质量控制技术	72	4.8.6 石墨漂浮	85
4.6 球墨铸铁凝固特点及铸造性能	74	4.8.7 碎块状石墨	85
4.6.1 球墨铸铁凝固特点	74	4.8.8 反白口	86
4.6.2 球墨铸铁的铸造性能	75	4.9 球墨铸铁的几个问题探讨	86
4.6.3 球墨铸铁的铸造工艺特点	77	4.9.1 大断面球墨铸铁件	86
4.7 球墨铸铁的热处理	78	4.9.2 铸态球墨铸铁件	87
4.7.1 铸铁热处理的特点	78	4.9.3 薄壁铸态球墨铸铁件	87
4.7.2 球墨铸铁的退火处理	78	4.9.4 高强度高韧性球墨铸铁	88
4.7.3 球墨铸铁的正火处理	79		

第5章 蠕墨铸铁 90

5.1 蠕墨铸铁的特点及应用	90	5.2.2 炉前处理技术	96
5.1.1 金相组织特点	90	5.2.3 铸件的质量控制	98
5.1.2 力学性能特点	91	5.3 蠕墨铸铁的铸造性能	98
5.1.3 物理性能特点	94	5.3.1 流动性	98
5.1.4 其他性能特点	95	5.3.2 缩孔倾向	99
5.1.5 蠕墨铸铁的应用	96	5.3.3 夹渣倾向	99
5.2 蠕墨铸铁的生产	96	5.3.4 白口倾向	100
5.2.1 蠕墨铸铁的牌号	96		

第6章 可锻铸铁 101

6.1 可锻铸铁的特点及应用	101	6.3.3 影响可锻铸铁石墨化过程的主要因素	113
6.1.1 可锻铸铁的分类和组织特点	101	6.3.4 加速可锻铸铁石墨化退火的措施	113
6.1.2 性能	102	6.4 可锻铸铁的缺陷及防治	114
6.1.3 应用	104	6.4.1 灰点	114
6.2 可锻铸铁的生产	104	6.4.2 缩松及枝状缩松	114
6.2.1 白口铸件	104	6.4.3 裂纹	114
6.2.2 退火处理	108	6.4.4 回火脆性	114
6.3 固态石墨化过程的基本原理	111	6.4.5 皮下气孔	115
6.3.1 石墨核心的形成和长大	111		
6.3.2 析出石墨的形状	112		

第 7 章 合金铸铁	116
7.1 耐磨铸铁	116
7.1.1 减摩铸铁	116
7.1.2 抗磨铸铁	120
7.2 耐热铸铁	125
7.2.1 铸铁在高温时的氧化	125
7.2.2 常用耐热铸铁	127
7.3 耐腐蚀铸铁	131
7.3.1 铸铁的腐蚀	131
7.3.2 耐腐蚀铸铁	133
第 8 章 铸铁熔炼概述	136
8.1 铸铁熔炼的发展	136
8.1.1 我国铸铁熔炼的发展概况	136
8.1.2 国外铸铁熔炼的发展概况	138
8.1.3 铸铁熔炼的发展趋向	138
8.2 铸铁熔炼的技术要求	138
8.2.1 铁液质量高	139
8.2.2 熔化速度快	141
8.2.3 熔炼耗费少	141
8.2.4 炉衬寿命长	141
8.2.5 操作条件好	142
第 9 章 冲天炉熔炼原理	143
9.1 冲天炉的结构与操作工艺	143
9.1.1 冲天炉的基本结构	143
9.1.2 冲天炉操作工艺概述	146
9.2 冲天炉内焦炭燃烧的基本规律	147
9.2.1 焦炭	147
9.2.2 焦炭的燃烧计算	149
9.2.3 焦炭燃烧的基本规律	154
9.3 冲天炉熔炼的基本原理	159
9.3.1 铁料的熔化	159
9.3.2 冲天炉内炉气及炉温的分布	162
9.3.3 冲天炉炉内热交换	164
9.3.4 影响热交换的主要因素	167
9.3.5 冲天炉内的冶金反应	172
9.4 铁液的脱硫处理	182
9.4.1 炉内脱硫	182
9.4.2 炉外脱硫	183
9.4.3 炉外脱硫方法	183
第 10 章 常用冲天炉	186
10.1 冲天炉的分类和发展	186
10.2 多排小风口冲天炉结构概况	187
10.2.1 多排小风口冲天炉结构	187
10.2.2 多排小风口热风冲天炉的主要特点	189
10.3 双排大间距冲天炉	190
10.3.1 双层送风冲天炉结构概况	190
10.3.2 双层送风冲天炉的主要特点	191
10.4 中央送风冲天炉	192
10.4.1 中央送风冲天炉结构概况	192
10.4.2 中央送风冲天炉的主要特点	193
10.5 水冷长炉龄冲天炉	193
10.5.1 3t/h 水冷长炉龄冲天炉	
10.5.2 15t/h 水冷长炉龄冲天炉(冷风)	195
10.5.3 14t/h 水冷长炉龄冲天炉	
10.5.4 6t/h 水冷长炉龄冲天炉	
(炉胆热风)	194
(炉外热风)	195
(炉顶热风)	196
10.6 温差冲天炉	200
10.6.1 温差炉胆热风冲天炉	200
10.6.2 铸焊组合炉胆热风冲天炉	201
10.7 其他冲天炉	202
10.7.1 蜗螺风箱冷风冲天炉	202
10.7.2 龙卷风口冲天炉	203
第 11 章 冲天炉熔化过程的控制	205
11.1 冲天炉用耐火材料及砌炉工艺	205
11.1.1 冲天炉用耐火材料	205

11.1.2 耐火砖及耐火混合料	206	11.5.4 炉气分析	223
11.1.3 冲天炉修砌的工艺要求	208	11.5.5 化学成分测定	225
11.2 冲天炉基本熔炼工艺参数	208	11.5.6 其他项目检测	225
11.2.1 风量的计算	208	11.6 冲天炉熔炼过程中的故障及其防止	
11.2.2 底焦高度的选择	210	方法	225
11.2.3 层焦量和层铁量的确定	211	11.6.1 棚料	226
11.2.4 熔剂量的确定	211	11.6.2 风口堵塞和炉内冻结	226
11.3 冲天炉网形图	211	11.6.3 铁液严重氧化	227
11.4 冲天炉的配料计算	213	11.6.4 铁液泄漏	228
11.4.1 冲天炉用金属炉料	213	11.6.5 突然停风	228
11.4.2 配料计算	215	11.7 鼓风机的选用	229
11.5 冲天炉熔化过程的测试	219	11.7.1 冲天炉送风阻力分析	229
11.5.1 温度测量	219	11.7.2 鼓风机的选择	230
11.5.2 风压测量	221	11.7.3 HTD 型化铁鼓风机	230
11.5.3 风量测量	222	11.7.4 L 型罗茨鼓风机	230

第 12 章 感应电炉炼铁

12.1 概述	232	12.3.1 工作原理	248
12.1.1 感应电炉加热原理	232	12.3.2 熔沟中液态金属的受力情况	249
12.1.2 感应电炉的分类	232	12.3.3 炉型和机械结构	250
12.1.3 感应电炉炼铁的特点	233	12.3.4 感应器熔沟部位蚀损和阻塞状况	
12.2 坩埚式感应电炉	233	的判断	254
12.2.1 炼铁过程中的电现象	233	12.3.5 沟槽式感应电炉的主要参数	
12.2.2 坩埚式感应电炉的类型和结构	236	确定	257
12.2.3 坩埚式感应电炉的主要参数确定	240	12.3.6 筑炉与烘烤	259
12.2.4 筑炉与修炉	243	12.3.7 熔炼过程	259
12.2.5 铸铁在坩埚式感应电炉中的熔炼	245	12.3.8 结构和熔化特点	260
12.3 沟槽式感应电炉	248		

第 13 章 电弧炉熔炼

13.1 电弧炉熔炼的优缺点	261	13.2.6 电气设备	265
13.2 三相电弧炉的结构	261	13.2.7 水冷装置	267
13.2.1 炉体	261	13.3 修炉与烘炉	267
13.2.2 炉盖	262	13.3.1 修筑炉材料	267
13.2.3 装料机构	263	13.3.2 砌砖与打结炉衬	268
13.2.4 电极升降与夹持机构	263	13.3.3 烘炉	269
13.2.5 倾炉机构	264	13.4 电弧炉熔炼的特性	270

第 14 章 冲天炉与电炉双联熔炼

14.1 概述	271	14.2 常用的双联熔炼的形式	272
---------------	-----	-----------------------	-----

14.2.1	冲天炉-感应电炉双联熔炼	272	14.3.1	坩埚式感应保温电炉的特点	276
14.2.2	感应熔化炉-感应保温炉双联 熔炼	273	14.3.2	沟槽式感应保温电炉的特点	276
14.2.3	电弧炉-感应电炉双联熔炼	273	14.4	双联熔炼形式的选择	277
14.2.4	感应双联熔炼铸铁合金的特点 ...	274	14.4.1	选择的主要依据	277
14.3	对感应保温炉的要求	276	14.4.2	保温电炉容量和功率的选择	277
			14.5	双联熔炼中金属液的防漏	279

第 1 章

概 述

铸铁是应用最为广泛的一种铸造合金，铸铁的产量约占铸造合金总产量的 75% 以上。

铸铁是以铸造生铁为主要原料，经配料、化铁炉熔化，并浇注成形的高碳系铁碳合金，是一种以铁、碳、硅、锰为主要元素的多元合金。铸铁的成分范围大致为：2.4%~4.0% C，0.6%~3.0% Si，0.2%~1.2% Mn，0.1%~1.2% P，0.08%~0.15% S。有时还加入各种合金元素，以获得具有各种性能的合金铸铁。

1.1 铸铁及其应用

根据碳在铸铁中的存在形态不同，可将铸铁分为白口铸铁、麻口铸铁和灰口铸铁，而灰口铸铁中根据石墨的形态不同分为灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁，现对各种铸铁作一简单介绍。

(1) 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，金相组织为珠光体+莱氏体。图 1.1 为亚共晶白口铸铁金相组织。

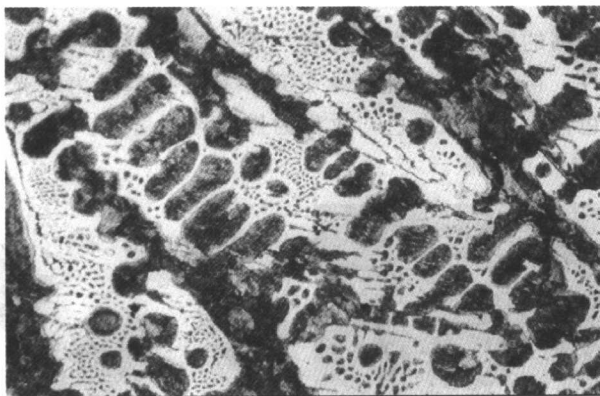


图 1.1 亚共晶白口铸铁金相组织 (100×)

白口铸铁的特点是硬而脆，很难加工。在实际生产中，可利用白口铸铁硬度高的特点，制造一些高耐磨性的零件和工具。例如：农具（如犁铧等），球磨机的衬板和磨球，抛丸机的叶片以及电厂灰渣泵及磨煤机的磨损件等。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和矿车车轮等。

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

普通白口铸铁的化学成分一般为： $2.8\% \sim 3.6\% \text{C}$ ， $0.5\% \sim 1.3\% \text{Si}$ ， $0.4\% \sim 0.9\% \text{Mn}$ ，它在白口铸铁的发展中被认为是第一代。

在白口铸铁发展中的重要里程碑是在 1928 年研制成功的镍硬铸铁，它是白口铸铁发展中的第二代。由于镍、铬合金化的作用，得到马氏体基体和大约 50% 游离渗碳体的组织，这种白口铸铁含 5%Ni、3%Cr，由于硬度增高，抗磨性有了很大的改善，但是，这种铸铁仍呈现其固有的脆性。

随着技术的进步，对白口铸铁的力学性能提出了更高的要求，出现了不同合金元素、不同组合的合金白口铸铁，如中锰铸铁、低合金白口铸铁、中合金白口铸铁、高合金白口铸铁等。

(2) 麻口铸铁

麻口铸铁具有白口和灰口的混合组织，断口呈灰、白色交错。其金相组织为珠光体+铁素体+石墨+渗碳体。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，故一般很少使用。

(3) 灰铸铁

在铸铁的金相组织中，碳主要以石墨的形式存在，这种铸铁称为灰口铸铁。石墨呈片状形式存在于基体组织中，断口呈暗灰色，这种灰口铸铁称为灰铸铁，其金相组织为珠光体+片状石墨，见图 1.2。

灰铸铁的化学成分一般为： $2.8\% \sim 3.6\% \text{C}$ ， $1.2\% \sim 3.0\% \text{Si}$ ， $0.4\% \sim 1.2\% \text{Mn}$ ，P 含量不超过 0.3%，S 含量不超过 0.15%。它大量地应用于各种机械零件，是应用最广泛的铸造材料。

(4) 可锻铸铁

可锻铸铁因具有较高的塑性和韧性而得名，其实是不可锻的。可锻铸铁的生产过程为：

先铸成全白口铸件，再进行石墨化退火处理。其金相组织为珠光体+铁素体+絮状石墨，断口中心呈暗灰色，表层呈灰白色，故称为黑心可锻铸铁。图 1.3 为铁素体可锻铸铁，图 1.4 为珠光体-铁素体可锻铸铁。

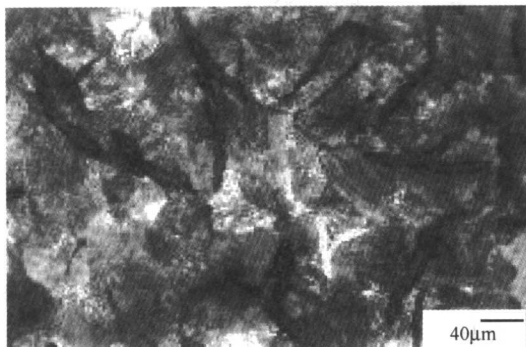


图 1.2 灰铸铁金相组织

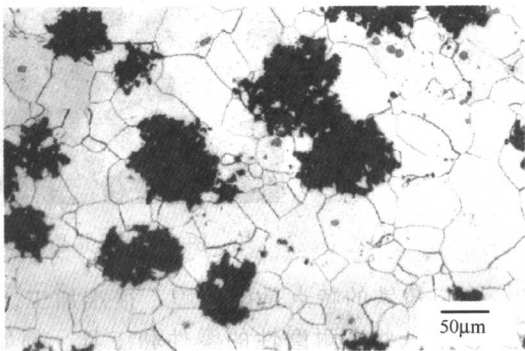


图 1.3 铁素体可锻铸铁

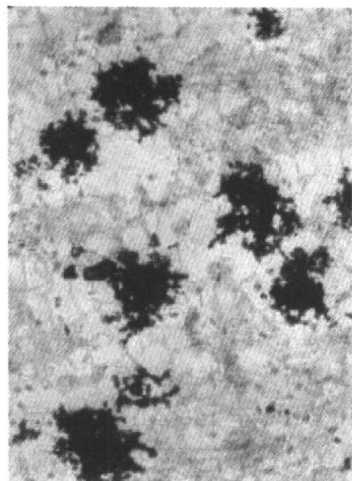


图 1.4 珠光体-铁素体可锻铸铁 (100×)

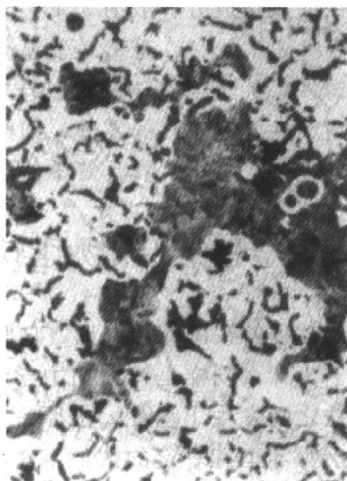


图 1.5 蠕墨铸铁金相组织 (100×)

可锻铸铁的化学成分一般为：2.2%~2.8%C，0.7%~1.4%Si，0.5%~0.7%Mn，P含量不超过0.3%，S含量不超过0.15%。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，如汽车拖拉机的后桥外壳、转向机构、弹簧钢板支座、机床上的把手、低压阀门、管件以及纺织机械和农机零件、农具等。珠光体可锻铸铁的强度高、韧性高，耐磨性好，常用来制造曲轴、凸轮轴、连杆及齿轮等重要零件。

(5) 蠕墨铸铁

铁液在浇注之前，经蠕化处理和孕育处理，碳主要以蠕虫状石墨的形态存在于铸铁中。断口呈银白色，图1.5为蠕墨铸铁的金相组织。

蠕墨铸铁的化学成分一般为3.4%~3.8%C，2.4%~2.8%Si，0.5%~0.8%Mn，P含量不超过0.08%，S含量不超过0.06%。蠕墨铸铁强度较高，致密性好，耐急冷急热性能好，可用来代替孕育铸铁件、发动机汽缸盖、排气管、钢锭模等零件。

(6) 球墨铸铁

铁液在浇注之前，经球化处理和孕育处理，碳主要以球状石墨的形态存在于铸铁中。断口呈银白色，图1.6为铁素体球墨铸铁，图1.7为铸态球墨铸铁。

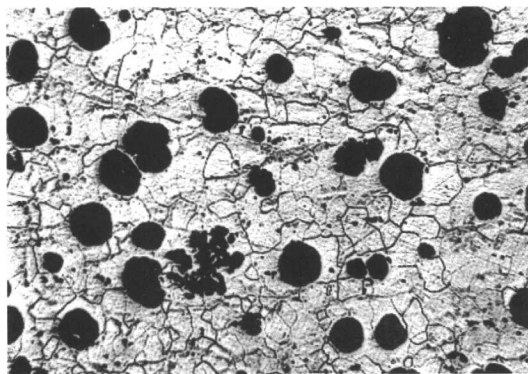


图 1.6 铁素体球墨铸铁 (100×)

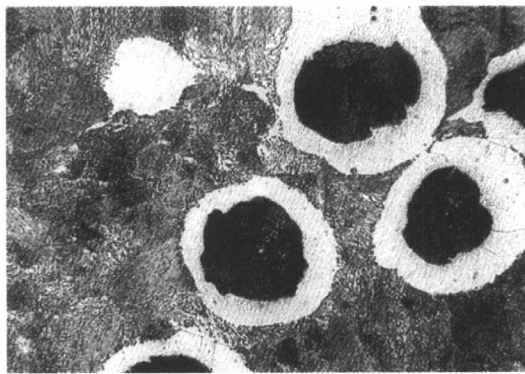


图 1.7 铸态球墨铸铁 (500×)

球墨铸铁的化学成分一般为 $3.4\% \sim 4.0\% \text{C}$, $2.4\% \sim 2.8\% \text{Si}$, $0.2\% \sim 0.8\% \text{Mn}$, P 和 S 的含量均不超过 0.06% 。球墨铸铁基体强度的利用率可达 $70\% \sim 90\%$, 因而抗拉强度不仅高于其他铸铁, 甚至还高于碳钢。球墨铸铁已成功地用于制造一些受力复杂, 强度、硬度、韧性、耐磨性要求较高的零件, 如柴油机、汽车拖拉机及压缩机的曲轴、凸轮轴、中压阀门、齿轮、连杆、农机、农具等零件。

1.2 铸铁的金相组织和力学性能的特点

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, 因而导致了力学性能上的很大差别。为什么同样是铸铁而力学性能的变化却如此之大呢? 而且从灰铸铁到可锻铸铁、球墨铸铁之间发生了质变, 由原来的强度为 100MPa 至 1200MPa , 由原来的伸长率和冲击韧度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。而这些工艺因素对铸铁力学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, 研究铸铁的金相组织特点及其形成过程; 研究各种铸铁的工艺因素、金相组织和其力学性能及其他性能之间的关系; 制定和控制各种工艺因素, 从而获得满意的金相组织和各种性能, 这是研究铸造合金的主要任务。

分析上述铸铁的金相组织特点后, 可以归纳出: ①铸铁中的碳可以以渗碳体的形式存在, 也可以以石墨的形式存在, 这就需要认真研究铁碳双重相图; ②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, 基本上与铸造碳钢的基体组织相同。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? 这显然是铸铁中石墨形态、多少(大小)、分布不同造成的。因此对铸铁中石墨的形态, 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。



第 2 章

铸铁的结晶过程

通过金属学的学习已经知道, 铸铁的结晶过程和组织转变依化学成分和铸造工艺条件不同, 碳可能以化合状态 (Fe_3C) 或自由状态 (石墨) 两种形态存在。铸铁组织结晶的基本过程就是铸铁中石墨的形成过程。因此, 了解石墨化过程的条件与影响因素对掌握铸铁材料的组织与性能是十分重要的。

2.1 铁碳双重相图

普通铸铁中虽然含有一定量的硅, 但基本上是 Fe-C 系合金。在 Fe-C 系中富碳相有石墨和渗碳体两种存在形式, 在 Fe-C 系相图中分别用虚线和实线表示 Fe-C (石墨) 系和 Fe- Fe_3C 系, 前者称为稳定态, 后者称为介稳定态。把这两种状态同时表现出来的相图就称为双重相图, 如图 2.1 所示。一般认为, 冷却速度低时按 Fe-C (石墨) 系结晶, 而冷却速度快时按 Fe- Fe_3C 系结晶。

2.1.1 铁碳双重相图分析

在铁碳双重相图中, 稳定系 (Fe-石墨系) 的 $ABC'D'$ 或介稳定系 (Fe- Fe_3C 系) 的 $AB-CD$ 线表示结晶的开始温度线, 而 $AHJE'C'F'$ 和 $AHJECF$ 线则分别表示稳定系和介稳定系的结晶终了温度线。

铁液中的石墨溶解度曲线 $C'D'$ 有多种测定结果。石墨的溶解度 C 与温度 T 之间存在着下列近似的直线关系式:

$$C = 1.52 + 2.39 \times 10^{-3} T \quad (\%) \quad (1150^\circ\text{C} < T < 1450^\circ\text{C}) \quad (2.1)$$

关于渗碳体在铁液中的溶解度曲线 CD , 直到目前为止可以说还没有一个可以完全信赖的测定值。图 2.1 所示的渗碳体溶解度曲线 CD , 是假定以渗碳体共晶点 ($4.30\%C$) 为起点, 向比石墨的溶解度曲线含碳量高的一侧所引出的曲线, 可以把它理解为表示了两者的相对位置。

表 2.1 列入了图 2.1 的双重相图中稳定系和介稳定系的各主要点的温度和含碳量。

图 2.1 中, 水平线 HJB 表示 1493°C 时进行 $L + \delta \leftrightarrow \gamma$ 的包晶转变。共晶转变在稳定系中为 $L(C') \leftrightarrow \gamma(E') + \text{石墨}(F')$, 而在介稳定系中共晶转变为 $L(C) \leftrightarrow \gamma(E) + \text{Fe}_3\text{C}(F)$, 其凝固温度分别为 1153°C 和 1147°C 。在介稳定系中产生的共晶组织称为莱氏体。

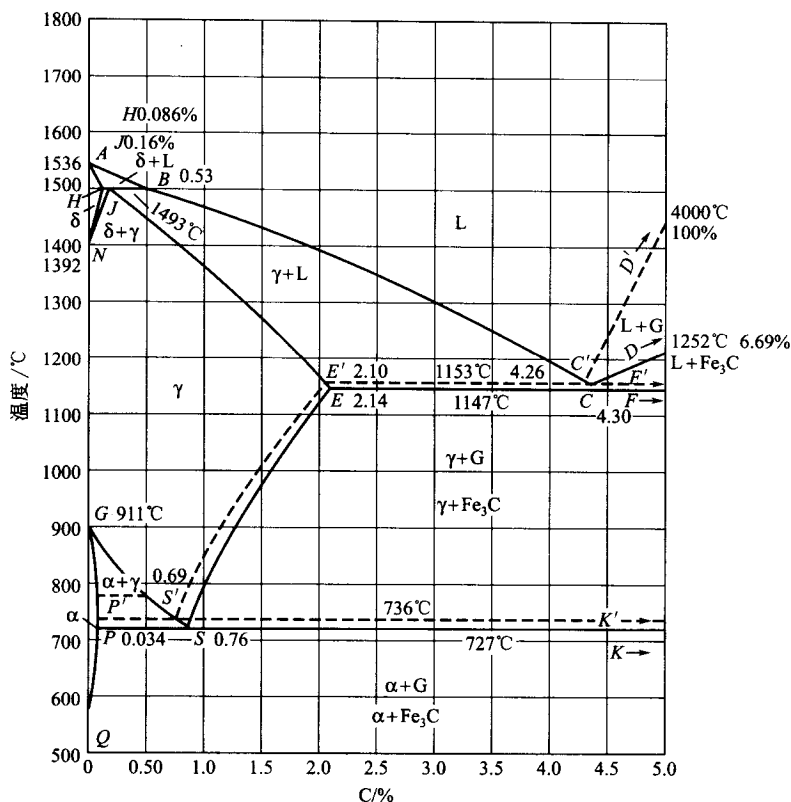


图 2.1 铁碳双重相图

表 2.1 铁碳相图各临界点的温度和成分

点	温度/℃	含碳量/%	点	温度/℃	含碳量/%	点	温度/℃	含碳量/%
A	1536	0.00	E'	1153	2.10	K'	736	6.69
B	1493	0.53	F	1147	6.69	N	1392	0.00
C	1147	4.30	F'	1153	6.69	P	727	0.034
C'	1153	4.26	G	911	0.00	P'	736	0.032
D	1252	6.69	H	1493	0.086	Q	0	0.00
D'	4000	100.00	J	1493	0.16	S	727	0.76
E	1147	2.14	K	727	6.69	S'	736	0.69

共晶转变后， γ 相的成分沿 $E'S'$ 或 ES 线变化。也就是说在介稳定系中成分为 S 点的 γ 相，在 727°C 时将分解为成分为 P 的 α （铁素体）相和成分为 K 的 Fe_3C 相，由这一共析转变而生成的组织称为珠光体。而在稳定系中，成分为 S' 的 γ 相在 736°C 时将析出成分为 P' 的 α 相和 K' 的石墨。

含碳量大于 2.14% 者，即处在图 2.1 中 γ 相的极限固溶碳量 E 点的右方者，称为铸铁，并以这一点来区分铸铁和钢。实际上，铸铁除碳之外还含有硅、锰、磷、硫以及其他多种微量元素，但其相图基本上没有变化。铁碳双重相图中的组成相见表 2.2。



表 2.2 铁碳双重相图中的组成相

组成相	说 明
液溶体	即液相,符号 L,为碳或其他元素在铁中的无限液溶体,存在于液相线之上,二相区内也有液溶体存在,但成分随温度变化
δ 铁素体 α 铁素体	即 δ 相、 α 相或 F,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,1493℃ 时最大溶碳量为 0.086%, α 相存在于 911℃ 以下,727℃ 时最大溶碳量为 0.034%
奥氏体	即 γ 相,符号 γ 或 A,为碳在 γ 铁中的间隙固溶体,面心立方晶格,存在于 727~1493℃ 之间,1147℃ 时的最大溶碳量为 2.14%
石墨	符号为 G,铸铁中以游离状态存在的碳,按稳定态转变时的高碳相,在铸铁中取决于化学成分及析出的时间不同,有初析石墨、共晶石墨、二次石墨和共析石墨,其形态主要有片状、蠕虫状、团絮状以及球状
渗碳体	符号为 Fe_3C ,铁和碳的间隙化合物,具有复杂的正交晶格,含碳量为 6.69%,按介稳定转变时的高碳相,取决于化学成分及析出的时间,有初析渗碳体(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、板条状以及网状
莱氏体	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两相机械混合物,冷却到 A_1 温度以下时,则由珠光体与渗碳体组成
珠光体	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。根据珠光体转变时的过冷度大小,可形成正常片状珠光体、细片状珠光体(索氏体)及极细珠光体(托氏体),还可通过热处理,使珠光体中的渗碳体粒状化而得到粒状珠光体

2.1.2 石墨与渗碳体

灰铸铁中的石墨具有特殊的简单六方晶格,是碳的一种结晶形式。在铸铁中存在的石墨含杂质很少,几乎是由 100% 的碳所构成的。它的晶体结构如图 2.2 所示。由图可见,石墨具有六角形层状结构,在层内原子排列相当紧密,原子间距为 0.142nm。每个原子以其三个价电子和邻近的三个碳原子构成共价键,故原子间结合力很强(418~501.6kJ/mol),而第四个价电子则为该层所有的碳原子共有。层与层之间距离比较大,为 0.340nm,它们之间结合力很弱(4.18~12.54kJ/mol)。由于这种结晶特性,所以石墨晶体有着很强的各向异性,这从石墨晶体的力学性质和电学性质上都能表现出来。层与层之间由于结合力弱,很容易分层开裂滑移,故在这个方向(垂直于层的方向,称为柱面方向)硬度及强度明显低于层的方向(称为基面方向)。从电阻率看更为明显,由于层内有共同的价电子存在,故基面方向电阻率很低,有良好的导电能力;而和它垂直的柱面方向的电阻率要比它高几千倍。石墨晶体的这种各向异性决定了石墨的形貌。

渗碳体是铸铁中最常见的一种碳化物形式。根据近年的研究,渗碳体实际上是一种金属间化合物,它的晶格结构如图 2.3 所示。其中碳原子组成斜方晶格,每个碳原子周围有六个铁原子,它们构成一个包围碳原子的八面体,而每个铁原子又为两个相邻的八面体所共有。在所构成的渗碳体晶格中,铁、碳原子数目之比为 3:1,故写成 Fe_3C 。它的密度是 7.82g/cm³,强度很低(0~35MPa),塑性几乎等于零,但硬度很高,可达 800HBS。

从热力学角度来看,渗碳体是不稳定的,它有进行以下反应的可能性:



这也说明渗碳体比石墨具有较高的自由能。但是并不能以此来断定铁液结晶时所获得的高碳相一定是石墨。铸铁结晶时所获得的高碳相是石墨还是渗碳体,还要看一些其他的因素(即动力学条件)。

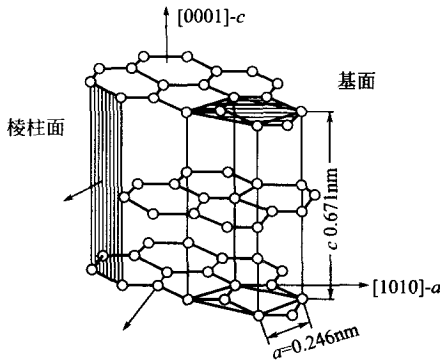


图 2.2 石墨的晶体结构

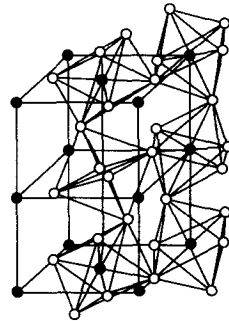


图 2.3 渗碳体的晶格结构

2.1.3 合金元素对铁碳双重相图的影响

铸铁中除碳以外，还含有一定量的硅、锰等合金元素，它们对铁碳双重相图的影响各不相同。因而，在分析铸铁的实际结晶过程及组织时，还必须考虑各元素对相图中各临界点的影响，表 2.3 给出了一些元素对铁碳双重相图各临界点的温度和成分影响的趋势。

表 2.3 元素对铁碳相图的影响

元 素	铁-石墨系					铁-渗碳体系					碳 的 活 度	石 墨 化	元素含量增加时， 促进形成的组织
	共晶 温度	共析 温度	共晶点 碳量	奥氏 体饱 和点 碳量	共析点 碳量	共晶 温度	共析 温度	共晶点 碳量	奥氏 体饱 和点 碳量	共析点 碳量			
S	—	+	-0.36	+	—	—	+	—	+	—	+	—	珠光体、渗碳体
Si	+14	++	-0.31	—	—	—	+	—	—	—	+	+	铁素体
Mn	-8	—	-0.027	+	—	—	—	+	+	—	—	—	珠光体、碳化物
P	-21	+	-0.33	—	—	—	+	—	—	—	+	+-	珠光体
Cr	-6	+	+0.063	+	—	+	+	—	+	—	—	—	珠光体、碳化物
Ni	+3	—	+0.053	—	—	—	—	—	—	—	+	+	珠光体，并细化
Cu	+3	—	-0.074	—	—	—	—	—	—	—	+	+	珠光体
Co	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	—
V	—	+	+0.135	—	—	+	—	—	—	—	—	—	碳化物、珠光体
Ti	—	+	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	铁素体
Al	+	+	-0.25	—	—	+	—	—	—	—	+	+	铁素体
Mo	-10	+	+0.025	—	—	—	—	—	—	—	—	—	铁素体，细化珠光体
W	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+-	珠光体

注：1. “+”代表增加、提高、促进；“-”代表减少、降低、阻碍。

2. 数字代表加入 1% 合金时的波动值。

根据各元素对共晶点实际碳量的影响（表 2.3），将这些元素的量折算成碳量的增减，称为碳当量，以 CE 表示，为简化计算，一般只考虑 Si、P 的影响。有

$$CE = C + \frac{1}{3}(Si + P) \quad (2.3)$$

将 CE 值和 C' 点碳量（4.26%）相比，即可判断某一具体成分的铸铁偏离共晶点的程