

高等学校教材

# 铸造合金及熔炼

大连理工大学 李隆盛 主编

GAO DENG XUE  
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

## 前 言

本教材是根据原机械工业部热加工教材编审委员会铸造专业教材分编审查委员会 1983 年判定的《铸造合金及熔炼》教材编写大纲编写的。

本教材系统地论述各种铸铁、铸钢及铸造有色合金材料的化学成分、组织和性能,以及各种合金材料的熔炼方法的理论及生产工艺基本知识。在内容上力求作到理论性、先进性和实用性,围绕着提高各类合金铸件的质量,重点地论述一些理论性问题,以使读者能深入理解一些工艺问题的实质。在编写中注意选择近年来国内外一些新的理论和生产技术,以使读者能了解当今世界上在铸造合金材料的开发以及熔炼技术方面的新发展。在教材中还注意引用生产实际中的资料和数据,以求理论与实际结合。

本教材共分十二章,其中第一章至第十一章由大连理工大学李隆盛编写,第十二章由大连理工大学曹兴言编写。本书由李隆盛主编,北京科技大学王兆昌教授为本书主审。

本教材的第一稿及第二稿完成后,曾经召开了两次审稿会,邀请了国内多所高等学校铸造专业富有学术造诣和教学经验的教授和副教授,分别对书稿进行了审查。参加第一稿审稿的有西安交通大学陆文华,陕西机械学院王琥、黄积荣,西北工业大学史正兴,上海工业大学朱振华,福州大学康积行,重庆大学钱翰成等。参加第二稿审稿的有西安交通大学陆文华,陕西机械学院王琥,西北工业大学商宝禄,清华大学吴德海,北京科技大学陈希杰,重庆大学齐孟雕,福州大学康积行,吉林工业大学李道韞,山东工业学校赵建康等。此后,上海交通大学黄良余教授还对铸造有色合金及熔炼部分的教材内容提出了宝贵的意见。主审人王兆昌教授自始至终,非常认真细致地审查了全部教材手稿,提出了大量的修改意见,并为组织教材的审查作了大量的工作。各位审稿人和教材的主审人对本教材的审查和给予的帮助,对保证教材的质量起到了重要的作用。在教材编写过程中,陕西机械学院黄积荣,西安交通大学陆文华,福州大学康积行等教授还惠赠了一部分金相照片。在此,编者谨对兄弟院校教师们的大力支持和热心帮助,表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免会有缺点和不足之处,编者诚恳地希望广大读者给予指正。

编 者

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 铸铁及其熔炼

### 第一章 铸铁的结晶与组织的形成

§ 1-1 铁碳及铁碳硅相图	3
一、Fe-C 合金相图	3
二、Fe-C-Si 合金相图	5
§ 1-2 灰口铸铁的一次结晶	5
一、初生奥氏体的结晶	5
二、初生石墨的结晶	6
三、奥氏体-石墨共晶	9
四、灰口铸铁的形核和孕育	11
§ 1-3 白口铸铁的一次结晶	14
一、初生碳化物的结晶	14
二、奥氏体-碳化物共晶	15
三、白口铸铁的变质	17
§ 1-4 铸铁的凝固方式	18
一、铸铁的灰口或白口凝固	18
二、灰口组织的形成	18
§ 1-5 奥氏体中碳的脱溶	19
一、灰口铸铁中二次高碳相的析出	19
二、白口铸铁中二次高碳相的析出	19
§ 1-6 奥氏体的共析转变和马氏体转变	19
一、灰口铸铁中的转变	20
二、白口铸铁中的转变	21
§ 1-7 合金元素对铸铁结晶过程的影响	21
一、促进铸铁的灰口或白口凝固	22
二、在铸铁的一次结晶过程中,影响结晶相的形核过程和晶体生长方式	24
三、在奥氏体碳的脱溶过程中,促使二次高碳相以石墨或渗碳体形式析出	26
四、在铸铁的共析转变过程中,影	

响奥氏体的稳定性	26
----------	----

五、对共晶含碳量和共析含碳量的影响	28
-------------------	----

思考题	28
-----	----

参考文献	29
------	----

### 第二章 灰铸铁

§ 2-1 概述	30
----------	----

§ 2-2 影响灰铸铁组织形成的基本因素	31
----------------------	----

一、化学成分的影响	31
-----------	----

二、冷却速率的影响	31
-----------	----

三、炉料的影响	32
---------	----

§ 2-3 灰铸铁组织中的石墨和基体	33
--------------------	----

一、石墨	33
------	----

二、基体组织	35
--------	----

§ 2-4 灰铸铁的孕育	36
--------------	----

一、孕育处理的目的	36
-----------	----

二、原铁液的化学成分和温度	36
---------------	----

三、孕育剂的加入量和粒度	37
--------------	----

四、孕育剂作用机理	37
-----------	----

五、孕育剂的选择	38
----------	----

六、孕育处理方法	39
----------	----

§ 2-5 灰铸铁的机械性能和化学成分	39
---------------------	----

一、铸铁的强度和硬度与共晶度的关系	39
-------------------	----

二、灰铸铁的质量指标	40
------------	----

三、灰铸铁的国家标准	41
------------	----

四、灰铸铁的化学成分	41
------------	----

§ 2-6 低合金灰铸铁	43
--------------	----

§ 2-7 灰铸铁的铸造性能	45
----------------	----

一、流动性	45
-------	----

二、缩孔形成倾向	45
----------	----

三、线收缩	46
-------	----

四、铸造应力和冷裂倾向.....46	一、石墨端化机理.....78
§ 2-8 灰铸铁件化学成分的选择 .....47	二、端化剂和端化处理.....78
§ 2-9 灰铸铁件的热处理 .....47	§ 3-11 蠕墨铸铁的孕育处理.....80
一、消除铸造应力热处理(低温退火).....47	§ 3-12 蠕墨铸铁的铸造性能.....80
二、消除局部白口组织热处理(高温退火).....48	§ 3-13 蠕墨铸铁件常见缺陷.....81
思考题.....48	§ 3-14 球墨铸铁件及蠕墨铸铁件化学成分选择举例.....81
参考文献.....48	思考题.....82
第三章 球墨铸铁及蠕墨铸铁 .....49	参考文献.....82
§ 3-1 概述 .....49	第四章 可锻铸铁 .....83
§ 3-2 球墨铸铁的化学成分 .....52	§ 4-1 概述 .....83
一、基本元素.....52	§ 4-2 可锻铸铁中石墨的形成 .....86
二、合金元素.....53	§ 4-3 白口铁固态石墨化动力学 .....88
三、微量元素.....54	一、第一阶段石墨化过程动力学.....88
§ 3-3 石墨的球化 .....54	二、第二阶段石墨化过程动力学.....89
一、石墨球化的评定标准.....54	§ 4-4 可锻铸铁的化学成分和热处理 .....89
二、石墨球化的机理.....55	一、化学成分选择.....89
三、球化元素和反球化(干扰)元素.....57	二、可锻铸铁的退火.....91
四、球化元素的适宜残留量.....57	§ 4-5 加速可锻铸铁退火过程的途径 .....93
五、球化剂.....58	一、铸铁成分的控制.....93
六、球化处理.....60	二、孕育处理.....94
七、球化处理的炉前控制.....63	三、高硅加铈(铈).....94
§ 3-4 球墨铸铁的孕育 .....63	四、预温处理.....95
§ 3-5 球墨铸铁的铸造性能 .....66	§ 4-6 可锻铸铁的铸造性能 .....95
一、流动性.....66	§ 4-7 可锻铸铁件常见缺陷 .....96
二、线收缩.....66	思考题.....97
三、缩孔倾向.....66	参考文献.....97
四、铸件变形和冷裂倾向.....68	第五章 特种铸铁 .....93
§ 3-6 球墨铸铁件常见缺陷 .....68	§ 5-1 概述 .....98
一、夹渣.....68	§ 5-2 抗磨铸铁 .....98
二、石墨漂浮.....69	一、铸铁的抗磨性.....98
三、皮下气孔.....69	二、抗磨用高铬白口铸铁.....99
§ 3-7 球墨铸铁件的热处理 .....69	三、镍硬铸铁 .....101
一、球墨铸铁的热处理基础.....69	四、铈系马氏体白口铸铁 .....102
二、铁素体球墨铸铁件的热处理.....71	五、中锰球墨铸铁 .....103
三、珠光体球墨铸铁件的热处理.....71	§ 5-3 耐热铸铁.....103
四、贝氏体球墨铸铁件的热处理.....71	一、铸铁的耐热性 .....103
五、奥氏体-贝氏体球墨铸铁件的热处理.....72	二、耐热铸铁的化学成分和性能 .....104
§ 3-8 蠕墨铸铁及其组织和性能 .....74	三、高铝耐热铸铁 .....105
§ 3-9 蠕墨铸铁的化学成分 .....77	§ 5-4 耐蚀铸铁.....105
§ 3-10 石墨的端化.....78	一、铸铁的耐蚀性 .....106
	二、高硅铸铁 .....107

§ 5-5 合金元素对特种铸铁铸造性能的影响	108	三、送风量、送风强度及进风速度	119
一、铬的影响	108	四、风口设计	121
二、锰的影响	108	五、预热送风	123
三、硅的影响	108	六、富氧送风	123
四、铝的影响	108	七、改进炉膛形状	126
五、镍的影响	109	§ 6-4 提高冲天炉的热效率	126
思考题	109	§ 6-5 冲天炉内的冶金变化	128
参考文献	109	一、炉料中元素变化的一般规律	128
<b>第六章 铸铁的熔炼</b>	110	二、冲天炉熔炼中炉渣的形成及其作用	128
§ 6-1 概述	110	三、冲天炉熔炼过程中铁液化学成分的变化	129
一、熔炼对保证铸件质量的重要性	110	§ 6-6 冲天炉熔炼过程的检测与铁液质量的炉前控制	135
二、对铁液质量的基本要求	110	§ 6-7 环境污染的控制	137
三、铸铁的熔炼方法及其特点	112	§ 6-8 炉外脱硫	138
§ 6-2 冲天炉中高温的产生及热交换	115	§ 6-9 感应电炉熔炼铸铁	140
一、焦炭的燃烧及炉气温度分布	115	一、无芯感应电炉熔炼	140
二、炉料的熔化及铁液的过热	116	二、有芯感应电炉熔炼	141
三、底焦高度、焦铁比及层焦厚度对冲天炉熔化过程的影响	116	思考题	142
§ 6-3 强化冲天炉熔炼过程的途径	117	参考文献	142
一、焦炭质量	117		
二、焦铁比	118		

## 第二篇 铸钢及其熔炼

<b>第七章 铸造碳钢及低合金钢</b>	143	一、通用铸造低合金钢系列钢种	154
§ 7-1 概述	143	二、具有特殊性能和用途的低合金钢种	159
§ 7-2 铸钢的结晶组织对性能的影响	144	三、热处理对钢的性能的影响	162
一、包晶反应的影响	144	四、合金元素对钢的焊接性能的影响	163
二、奥氏体树枝晶的影响	145	§ 7-5 高强度性铸造合金钢	164
三、奥氏体晶粒度及晶粒形态的影响	145	§ 7-6 碳钢及低合金钢的铸造性能	154
四、宏观偏析的影响	146	一、流动性	165
五、气体的影响	146	二、体积收缩率与缩孔率	166
六、非金属夹杂物的影响	148	三、线收缩率	166
§ 7-3 铸造碳钢的性能	149	四、热裂倾向	166
一、铸造碳钢的标准	149	五、冷裂倾向	167
二、基本化学成分对钢的性能的影响	150	思考题	168
三、热处理对钢的性能的影响	151	参考文献	168
四、铸件壁厚对钢的性能的影响	152	<b>第八章 铸造高合金钢</b>	169
五、先共析铁素体形态对钢的性能的影响	152	§ 8-1 概述	169
六、铸造碳钢的焊接性能	154	§ 8-2 铸造抗磨钢(高锰钢)	170
§ 7-4 铸造低合金钢的性能	154	一、高锰钢的化学成分、热处理及	

性能 ..... 170

二、高锰钢的加工硬化机理 ..... 171

三、化学成分对高锰钢性能的影响 ..... 172

四、改善高锰钢性能的途径 ..... 172

五、高锰钢的铸造性能 ..... 173

§ 8-3 铸造耐蚀钢 (不锈钢) ..... 174

一、铬不锈钢 ..... 174

二、铬镍不锈钢 ..... 176

三、提高铸造不锈钢性能的途径 ..... 177

四、铬镍不锈钢的铸造性能 ..... 177

§ 8-4 抗磨耐蚀合金钢 ..... 178

一、铬镍钨马氏体不锈钢 ..... 178

二、析出硬化型铸造不锈钢 ..... 178

§ 8-5 铸造耐热钢 ..... 179

一、铬耐热钢 ..... 179

二、铬镍耐热钢 ..... 180

三、铬钨耐热钢 ..... 180

四、钨钼耐热钢 ..... 180

§ 8-6 铸造热强钢 ..... 181

一、钢在高温下的强度及热强性 ..... 181

二、奥氏体热强钢 ..... 182

思考题 ..... 183

参考文献 ..... 184

第九章 铸钢的熔炼 ..... 185

§ 9-1 概述 ..... 185

一、炼钢的重要性及对钢液质量的要求 ..... 185

二、炼钢的方法、特点和应用 ..... 186

§ 9-2 电弧炉炼钢法 ..... 189

一、三相电弧炉的电气系统 ..... 189

二、碱性电弧炉氧化法炼钢 ..... 192

三、酸性电弧炉氧化法炼钢 ..... 198

§ 9-3 感应电炉炼钢 ..... 199

一、炉衬材料和筑炉 ..... 199

二、炉料和装料 ..... 200

三、熔化 ..... 200

四、脱氧和出钢 ..... 201

五、合金钢的冶炼 ..... 201

§ 9-4 真空感应电炉炼钢 ..... 201

一、电炉的构造和工作原理 ..... 201

二、真空感应电炉炼钢的优点 ..... 201

三、真空感应电炉炼钢中存在尚问题 ..... 203

§ 9-5 氩氧脱碳法和真空氩氧脱碳法炼钢 ..... 204

一、氩氧脱碳法 ..... 204

二、真空氩氧脱碳法 ..... 205

§ 9-6 电渣炉炼钢 ..... 207

一、电渣炉的形式 ..... 207

二、电渣炉炼钢的工艺过程及钢的质量 ..... 207

三、建立高温区的条件 ..... 208

思考题 ..... 209

参考文献 ..... 210

第三篇 铸造有色合金及其熔炼

第十章 铸造铝合金 ..... 211

§ 10-1 概述 ..... 211

§ 10-2 铝硅类合金 ..... 211

一、铝硅合金的组织与性能特点 ..... 211

二、铝硅合金的变质 ..... 214

三、共晶型铝硅二元合金 ..... 222

四、铝硅铜合金 ..... 222

五、铝硅镁合金 ..... 223

六、铝硅铜镁合金 ..... 224

七、过共晶型铝硅合金 ..... 225

八、铝硅合金中的杂质元素 ..... 225

九、铝硅合金的铸造性能 ..... 226

§ 10-3 铝铜类合金 ..... 227

一、铝铜合金的组织与性能特点 ..... 227

二、铝铜合金的时效强化 ..... 228

三、铝铜合金中 $\alpha$ 相晶粒的细化 ..... 230

四、铝铜二元合金 ..... 231

五、铝铜锰合金 ..... 232

六、铝铜类合金中的杂质元素 ..... 232

七、铝铜合金的铸造性能特点 ..... 233

§ 10-4 铝镁类合金 ..... 233

一、铝镁合金的组织与性能特点 ..... 233

二、铝镁二元合金 ..... 234

三、多元铝镁合金 ..... 234

四、铝镁合金中的杂质元素 ..... 234

五、铝镁合金的铸造性能特点 ..... 234

§ 10-5 铝合金铸件的热处理 .....	235	二、锌合金的成分、组织与性能 .....	268
§ 10-6 提高铝合金铸件性能的一些 途径 .....	236	三、锌合金的铸造性能 .....	269
一、过滤净化 .....	236	四、锌合金中的杂质元素 .....	269
二、稀土处理 .....	237	思考题 .....	270
三、机械方法改善结晶组织 .....	238	参考文献 .....	270
思考题 .....	241	第十二章 铸造有色合金的熔炼 .....	271
参考文献 .....	242	§ 12-1 铸造铝合金的精炼 .....	271
第十一章 铸造铜合金及其它有色 合金 .....	243	一、精炼原理 .....	271
§ 11-1 概述 .....	243	二、铸铝合金液的精炼方法 .....	279
§ 11-2 锡青铜 .....	246	三、精炼效果的检验 .....	283
一、二元锡青铜 .....	246	§ 12-2 铸造铝合金组织的控制 .....	285
二、多元铸造锡青铜 .....	248	一、晶粒的细化处理 .....	285
§ 11-3 铝青铜 .....	250	二、铝硅合金中初晶硅的细化处理 .....	286
一、二元铝青铜 .....	250	三、铝硅合金中共晶硅的变质处理 .....	286
二、多元铸造铝青铜 .....	251	四、变质效果的检验 .....	288
§ 11-4 铅青铜 .....	253	§ 12-3 铸造铝合金的炉料及熔炉 .....	290
一、二元铅青铜 .....	253	一、炉料 .....	290
二、多元铸造铅青铜 .....	254	二、铸造铝合金的熔炉 .....	293
§ 11-5 铍青铜 .....	254	§ 12-4 铸造铝合金的熔炼工艺 .....	296
§ 11-6 铸造黄铜 .....	255	一、熔炼工艺要点 .....	296
一、二元黄铜 .....	255	二、碎废料、切屑重熔工艺 .....	297
二、特种(多元)铸造黄铜 .....	257	三、一次投料直接熔炼 .....	297
§ 11-7 铜合金中的杂质元素 .....	260	§ 12-5 铜合金的精炼 .....	298
§ 11-8 铸造镁合金 .....	262	一、铜合金的某些物理化学特性 .....	298
一、镁作为基体金属的特性 .....	262	二、铜合金的精炼 .....	299
二、镁合金的成分、组织与机械性能 .....	262	三、精炼效果的检验 .....	301
三、镁合金的铸造性能 .....	264	§ 12-6 铜合金的熔炼工艺要点 .....	303
四、镁合金中的杂质元素 .....	265	一、锡青铜的熔炼(ZQSn6-6-3) .....	303
§ 11-9 铸造钛合金 .....	265	二、铝青铜的熔炼(ZQA19-4) .....	303
一、钛作为基体金属的特性 .....	265	三、特种青铜的熔炼(ZQA112-8- 3-2) .....	304
二、钛合金的成分、组织与性能 .....	265	四、黄铜的熔炼工艺特点 .....	304
三、钛合金的铸造性能 .....	267	§ 12-7 镁、钛合金熔炼概述 .....	304
四、钛合金中的杂质元素 .....	267	一、镁合金的熔炼特点 .....	304
§ 11-10 铸造锌合金 .....	268	二、钛合金的熔炼特点 .....	305
一、锌作为基体金属的特性 .....	268	思考题 .....	306
		参考文献 .....	306

## 绪 论

机械制造业为工业、农业及科学文化事业提供各种机械设备，因而是国民经济的重要基础之一。在机械制造业中，采用多种合金材料制成大量的铸件，而熔炼出化学成分和温度符合要求、质地纯净的液态合金，则是生产高质量铸件的先决条件。

从世界铸造发展史来看，每种铸造合金的出现都是与当时熔炼合金的技术密切相关的。历史上最早出现的铸造合金是锡青铜。锡青铜的熔点相对较低，而且铜和锡这两种金属元素比较不易被氧化，因而熔炼问题较易解决。我国是最先使用锡青铜的国家，早在夏朝（公元前两千多年前）即已开始制造锡青铜铸件，而在战国时期，已相当普遍地用锡青铜制造兵器（刀、箭簇等）和生活用具（各种酒皿、食器等）。到了秦朝，已经有了相当高的冶炼和铸造锡青铜的技术，已发现的古代文物青铜车马所表现的精湛铸造技术，使世人叹为观止。铸铁由于熔点较高而出现较晚，公元前 513 年左右，我国开始有铸铁件生产。晋朝时已能铸出大型铸件“刑鼎”（上面铸出当时的法律-刑书的条文）。这件文物也表现了当时已有制造大型复杂铸铁件的熔炼和铸造的技术水平，而在欧洲直至公元 13~14 世纪才开始有铸铁件，比我国迟后约 1900 年。钢最早发源于欧洲，由于钢的熔点高，熔炼问题较难解决，故出现较晚，直至 19 世纪下半叶才有真正工业的炼钢技术，而铸钢件的生产则是在 20 世纪初才问世。铝由于极易氧化，不易从矿石中提炼，故铝合金出现较晚，其发展历史不过百余年。

本世纪中，特别是后半叶以来，在全世界范围内，科学技术和工业生产发展极快。合金的熔炼和铸造的技术也随之有很大的提高。铸铁件、铸钢件及铸造有色合金件不仅在产量上大幅度增加，而且不断出现新的合金品种和新的合金熔炼方法。多年来传统上应用的具有片状石墨的普通灰口铸铁，以其具有良好的导热性、减摩性、减震性和低的切口敏感性，以及熔炼和铸造工艺较为简单容易而至今仍各种机械制造行业中广泛应用，而由于采取了孕育处理等技术，使得铸铁的强度较之过去有了很大的提高，并解决了用高强度灰铸铁生产薄壁铸件的问题。有 100 年以上发展历史的具有团絮状石墨的可锻铸铁也在工业生产中占有一定的地位。1948 年世界上出现了球墨铸铁，在铸铁的强度和韧性方面有了大幅度的提高。我国从 1950 年开始研究球墨铸铁，几十年来在球墨铸铁的研究和生产方面有很大的进展。球墨铸铁因其基体不同而有不同的性能和用途。铁素体球墨铸铁具有高的韧性和较大的变形能力，典型的应用之一是铸管。国际上通用的长度为 6m（内径自 100mm 至 2600mm）的球墨铸铁管能承受高的内部压力（依管径不同一般为  $40\sim 25\times 10^5\text{Pa}$ ），适用于高压远距离输送水或煤气。其优点是埋在地下的管道能在地基下沉或地震灾害条件下产生相应的变形而不致破裂。目前我国已有现代化的用金属型离心铸造法生产的球墨铸铁管生产流水线。珠光体球墨铸铁具有高强度，适用于制造齿轮等铸件。贝氏体球墨铸铁具有高的强度和硬度，耐磨性良好，我国已成功地将这种铸铁代替锻钢生产内燃机车用大功率柴油机的曲轴铸件。奥氏体-贝氏体球墨铸铁兼有高强度和高韧性，适用于制造要求同时具备耐磨及耐冲击疲劳性能的铸件，典型的应用是汽车的差速器大伞齿轮。至于含有高合金元素（主要是镍）的奥氏体球墨铸铁，则因有良好的耐化学腐蚀的性能而适用于制造化工机械设备的某些铸件。近年来



墨铸铁也在国内外生产上得到应用。这种铸铁具有较高的强度、良好的导热性及耐疲劳性能。我国的汽车制造业中已分别采用珠光体蠕墨铸铁和铁素体蠕墨铸铁来生产刹车鼓铸件和发动机进排气歧管铸件。在铸铁材料中还有一些具有特殊使用性能的铸铁,如抗磨料磨损用的高铬白口铸铁,耐腐蚀用的高硅铸铁以及耐热用的高铝铸铁等。在铸钢方面,我国也有较高的技术水平,已成功地铸出重达 315 t 的碳钢铸件轧钢机立柱和重达 43 t 的不锈钢铸件水轮机转子叶片。我国还研制了沉淀强化型铸造不锈钢,由于采用电渣重熔法来进行熔的熔炼,能有效地清除钢液中的夹杂物而使钢液净化,故能使钢兼有很高的强度和高的韧性。此外还采用氩氧脱碳法等炉外精炼手段来熔炼低合金高强度钢,由于能大幅度降低钢液中的气体和夹杂物含量,使得钢的强度有很大程度的提高。在铸造有色合金方面,我国应用多种铸造铝合金和铸造铜合金。在造船工业中生产了重达 25 t 以上的大型铜合金铸件船用推进器(螺旋桨)。钛合金具有很高的比强度,且能耐多种化学介质的腐蚀,特别适用于航空工业和化学工业。但钛的化学性质极为活泼,在熔炼中易被氧化,而且易于与铸型材料产生相互作用而使钛合金被沾污。近年来采用真空自耗电极炉熔炼钛合金,并采用石墨或氧化钨等在高温下具有高化学稳定性的耐火材料制作铸型,成功地生产了各种钛合金铸件。现在我国在铸铁、铸钢及铸造有色合金的品种方面已基本上完成了系列化,并制订了相应的国家标准。

由于铸造合金包括很多的品种和牌号,它们在机械性能、物理-化学性能、熔炼及铸造性能特点各不相同,故应对各种合金材料及合金熔炼的知识有一定的掌握,以便为从事铸造生产和开发研究新的铸造合金材料奠定必要的理论和实际的基础。本教材是为了配合高等工科院校铸造专业的学生学习《铸造合金及熔炼》课程的需要而编写的。教材内容包括“铸铁及熔炼”、“铸钢及熔炼”和“铸造有色合金及熔炼”三个部分,而每一部分中又包括合金材料及合金的熔炼两方面内容。在合金材料方面内容中,以先修课程“金属学及热处理”和“铸件形成理论”中的理论为基础,着重论述各种合金的化学成分、金相组织与其机械性能及特殊使用性能之间的关系以及合金的铸造性能和铸件的热处理。在合金的熔炼方面内容中,以先修课程“铸造合金熔炼原理”中的理论为基础,着重论述各种合金的熔炼方法,以及精炼液态合金的技术。学生应能从本教材中学到上述两个方面的一些基本理论和有关的生产实际知识。

本教材采用法定计量单位制。

# 第一篇 铸铁及其熔炼

## 第一章 铸铁的结晶与组织的形成

### § 1-1 铁碳及铁碳硅相图

铁碳及铁碳硅相图是研究铸铁的结晶过程及铸铁组织形成的重要依据。本节内容是在 Fe-C 二元合金相图的基础上，着重研究 Fe-C-Si 三元合金相图。

#### 一、Fe-C 合金相图

很多铸铁学的书中给出了包括 Fe-Fe<sub>3</sub>C 系和 Fe-石墨系的 Fe-C 合金双重相图，如图 1-1 所示，该图是在本世纪 50 年代初期发表的。1968 年又发表了经过修正的 Fe-C 合金相

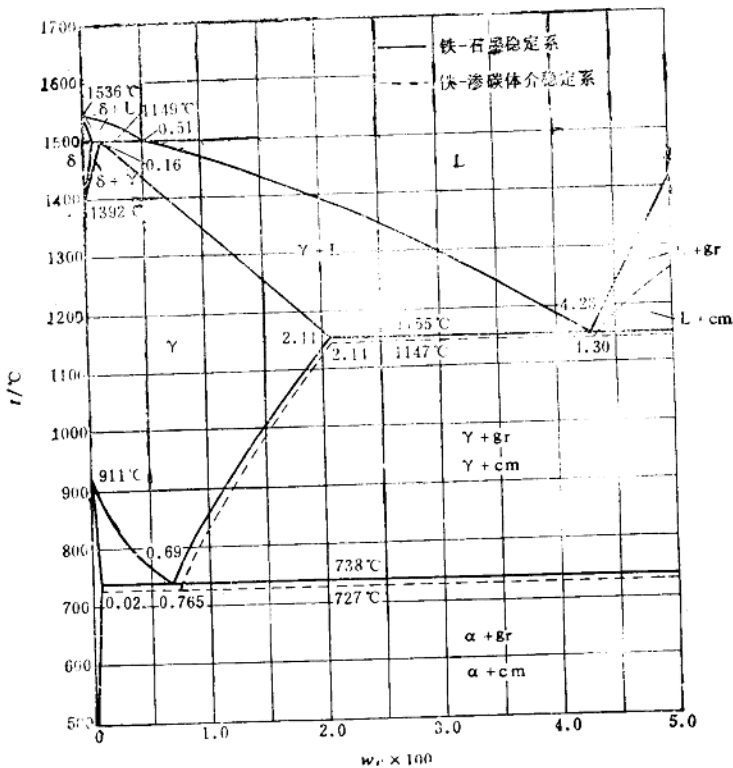


图1-1 Fe-C合金相图（图中实线为Fe-石墨系，虚线为Fe-Fe<sub>3</sub>C系）  
L—液相 δ—高温铁素体 γ—奥氏体 α—铁素体 cm—渗碳体 gr—石墨（也可用G表示）

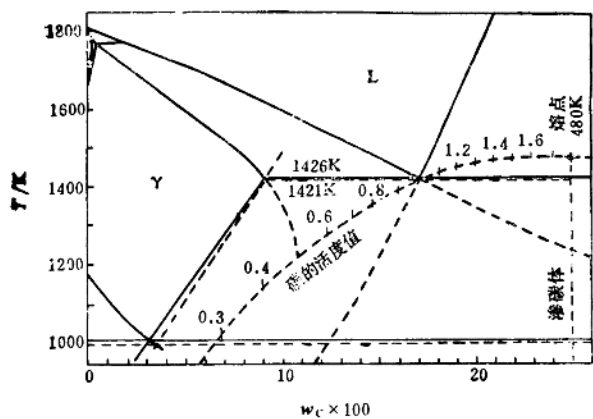


图1-2 Fe-C相图

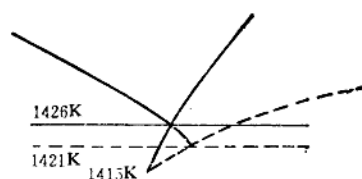


图1-3 图1-2中的共晶区

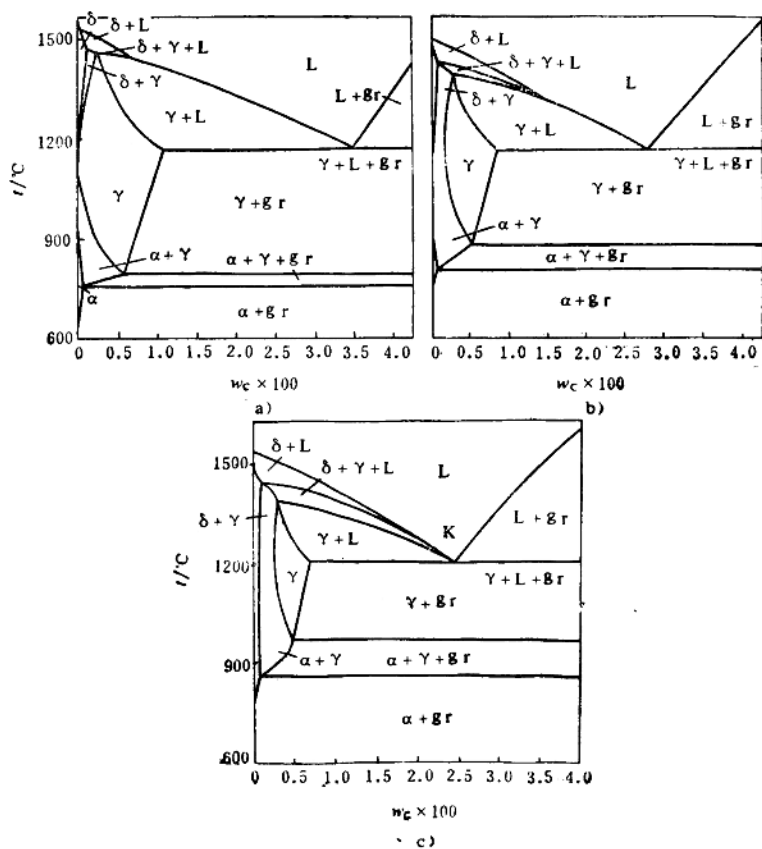


图1-4 Fe-C-Si合金相图的垂直截面 (稳定系)

a)  $w_{Si} = 2.4\%$  b)  $w_{Si} = 4.8\%$  c)  $w_{Si} = 6.0\%$

图, 见图 1-2 和图 1-3。图 1-2 中, Fe-石墨系基本上与图 1-1 相符合, 而 Fe-Fe<sub>3</sub>C 系则有较大的差别。根据图 1-1, Fe<sub>3</sub>C 的熔点为 2100 K (1827°C), 而实际上则为如图 1-2 所给出的, 只有 1480 K (1207°C)。经过修正的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图更符合实际。图 1-3 为共晶部分的详细图形, 图中表明, Fe<sub>3</sub>C 液相线与石墨液相线的交点是在石墨共晶温度之下 11 K, 这表明在激冷条件下熔体易于对渗碳体相过饱和。

## 二、Fe-C-Si 合金相图

铸铁成分中除了 Fe 和 C 之外, 还存在有 Si、Mn、P、S 等多种元素。这些元素也对铸铁的结晶和组织产生影响, 特别是铸铁中 Si 的含量较多, 影响较大, 故应用 Fe-C-Si 三元相图来研究铸铁的结晶和组织, 实属必要。但由于三元相图是立体图形, 应用起来很不方便, 故此常采用 Fe-C-Si 三元相图中某一含硅量的垂直截面图, 如图 1-4 所示。对比不同含硅量的垂直截面可见, 硅对相图的影响表现在以下方面:

(1) 硅使共晶点和共析点左移, 即减小共晶含碳量和共析含碳量。其中对共晶含碳量的影响较为显著。

(2) 硅略为提高共晶转变温度和共析转变温度, 并使转变在一个温度区间中进行。其中硅扩大共析转变温度范围的作用最为显著。

由于使共析转变温度范围显著扩展, 故在研究铸铁的共析转变时, 应当使用相应的 Fe-C-Si 三元相图, 例如图 1-5。该图对应的温度 (1053 K), 刚好低于  $w_{Si} = 2.4\%$  的铸铁中的共析转变开始温度。

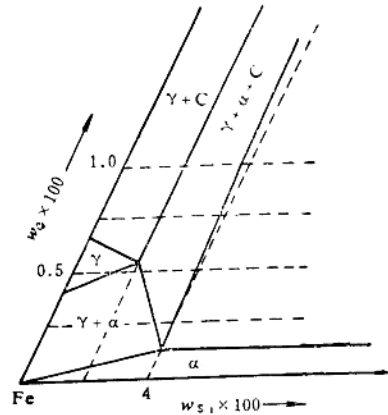


图1-5 Fe-C-Si三元系中1053 K (780°C) 的水平截面图

## § 1-2 灰口铸铁的一次结晶

灰口铸铁是铁液以奥氏体-石墨共晶方式结晶而生成的组织。当铸铁的成分为亚共晶时, 在发生共晶转变之前先结晶出初生奥氏体, 而当成分为过共晶时, 则在发生共晶转变之前先结晶出初生石墨。

### 一、初生奥氏体的结晶

#### (一) 结晶过程热力学

初生奥氏体结晶的自由能变化示如图 1-6 所示, 当亚共晶铁液过冷至液相线  $BC'$  以下, 例如温度  $T_1$  时, 在碳的质量分数为  $X$  的亚共晶铁液中开始结晶出初生奥氏体。在此温度时, 铁液中的铁原子浓度比平衡值偏高 (偏离度为  $X_0 - X$ ), 而成分为  $X$  的铁液的自由能要比成分为  $X_0$  的铁液和成分为  $X_0$  的奥氏体所组成的两相平衡混合体高出  $\Delta G$ , 这就是初生奥氏体结晶的热力学驱动力。

奥氏体的析出导致剩余铁液的增碳。增碳过程首先是在奥氏体的表面附近进行。此处铁液成分接近于平衡成分  $X_0$ , 而在较远区域的铁液则仍维持原成分  $X$ 。这种浓度差使得碳原子由奥氏体晶体表面附近向远处扩散, 这样使得奥氏体的析出过程得以继续进行。在温度保持

恒定的条件下，奥氏体的析出将一直进行到全部铁液成分达到  $X_0$  为止。如进一步将温度降至  $T_2$ ，则将析出成分为  $X_0$  的奥氏体。而在不断降低温度的过程中析出的奥氏体成分将是变化（含碳量由低变高）的，即形成了枝晶偏析。

(二) 初生奥氏体的形态

奥氏体具有面心立方结构，它在结晶过程中常发展成为树枝状分叉形态。产生枝晶叉的过程是，首先在奥氏体晶格中原子排列最密集的 (111) 晶面上常常由于原子的堆砌而形成隆起物，并逐渐长成为角锥体和发展为枝晶叉。这样在初生奥氏体的形成过程中就长成三维树枝状晶，并由于原子扩散而继续生长。而按照生长顺序排列的树枝状晶的主干以及二次、三次晶叉，都是互相垂直并按 [100] 方向生长的晶体。

奥氏体枝晶分叉的程度与冷却速率有关，随着铁液冷却速率的增加，分叉程度有所发展。这是由于冷却速率较快时，奥氏体析出过程中，晶体表面附近的铁液中的碳原子来不及向远处扩散，因而使得奥氏体一次晶轴的长大受到限制，并会促使二次或高次晶轴的生成。

初生奥氏体树枝晶的横截面通常是接近于圆形的（图 1-7），这是由于具有不同原子排列的各个晶面上的表面张力相差不大所致。

二、初生石墨的结晶

(一) 结晶过程热力学

初生石墨结晶的自由能变化见图 1-8，当过共晶铁液过冷至液相线  $C'D'$  以下时，从铁液中析出初生石墨。成分为  $X$  的过冷铁液的自由能要比成分为  $X_0$  的铁液与石墨两相平衡混合物的自由能高  $\Delta G$ ，这就是初生石墨结晶的热力学驱动力。

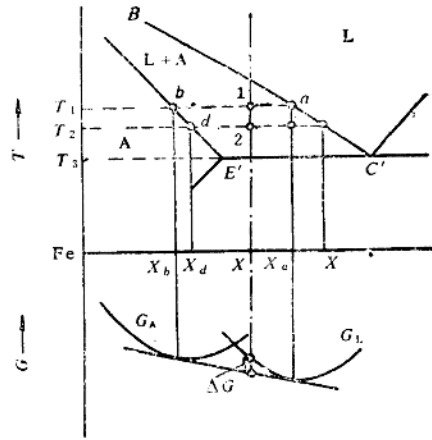


图1-6 亚共晶铸铁中析出初生奥氏体时的自由能变化



图1-7 亚共晶白口铸铁组织中的奥氏体

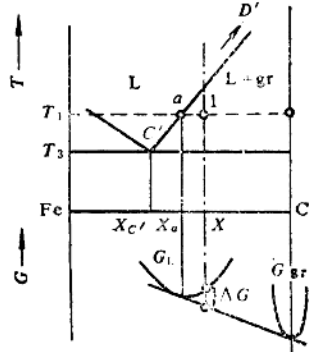


图1-8 过共晶铸铁中析出初生石墨时的自由能变化

## (二) 初生石墨的形态

石墨具有六方晶格，其晶体结构，如图 1-9 所示。在石墨的晶体中，碳原子有两种联结方式：基面上碳原子之间由共价键联结，而基面与基面之间由极性键联结。这两种键的键能不同，共价键的键能很强，而极性键的键能很弱，前者约等于后者的 7 倍。键能大小是结合力强弱的重要标志，也是导致石墨沿不同晶向生长速率不同的重要因素。

初生石墨是在铁液中直接析出，铁液中的碳原子从各个方向以相等的机率扩散到石墨晶核处而使石墨晶体长大，因此石墨晶体的长大方式以及石墨的形态完全受到石墨的晶体结构以及铁液与石墨之间的界面能（主要是相间张力）所决定。从晶体生长理论出发，石墨沿基面（ $a$  向）生长是占优势的。因为在棱柱面的方向上存在着强的未饱和的键，在这些面生长的方向上存在着强的未饱和的键，在这些面生长时不需要再形核，铁液中的碳原子即能直接地结合到未饱和的键上去。而在基面（0001）面上则不同，为了沿  $c$  向生长，需要在（0001）面上形成一定临界尺寸的二维晶核。而实际上，在基面上形成二维晶核的机率是很小的。这即是说，石墨在不同晶向的生长速率与其晶体结构的不对称性有关。

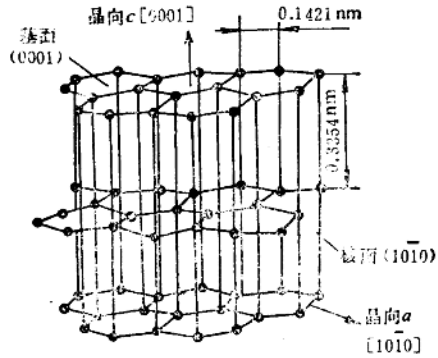


图1-9 石墨的晶体结构

但在另一方面，石墨沿不同晶向的生长速率还在很大程度上受到铁液-石墨之间界面能的影响。石墨晶体要长大必须克服界面张力的作用，而由于石墨晶体结构的不对称性，使得铁液-棱柱面与铁液-基面间的界面张力不相等。在纯净（不含硫、氧等杂质）的铁液条件下，前者远大于后者，这就使得石墨沿  $a$  向生长时，所受到界面张力的约束作用，比沿  $c$  向生长时要大得多，因此在纯净铁液条件下，石墨晶体的长大，主要是沿  $c$  向而并非是沿  $a$  向。但沿  $c$  向的生长并非是一层层的基面叠加上去，而是以在基面上产生螺旋位错的方式长上去的（见图 1-10）。这种生长方式既免除了在基面上形核的困难，在生长时又只受到较小的界面张力的约束。石墨按照这种以  $c$  向为主的方式生长的结果是长成球状。

铁液中的杂质元素（特别是硫）也对石墨的生长方式有重要的影响。硫是表面活性元素，它在石墨晶体表面上进行选择性吸附，优先吸附在（10 $\bar{1}$ 0）晶面上，从而大大降低了铁液-（10 $\bar{1}$ 0）晶面之间的界面能（见表 1-1）。同时，硫原子还吸附在螺旋生长台阶处，将其堵塞，从而阻止了螺旋方式生长。由于硫的这两方面作用，使得含硫铁液中石墨的生长又重新

表1-1 各种铸铁铁液与石墨之间的界面能

铁液类别	石墨晶面	界面能/( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \times 10^{-7}$ )
含硫灰铸铁	棱柱面	845.5
	基面	1269.8
铸球墨铸铁	棱柱面	1726.7
	基面	1459.7
铸球墨铸铁	棱柱面	1578.7
	基面	1322.3

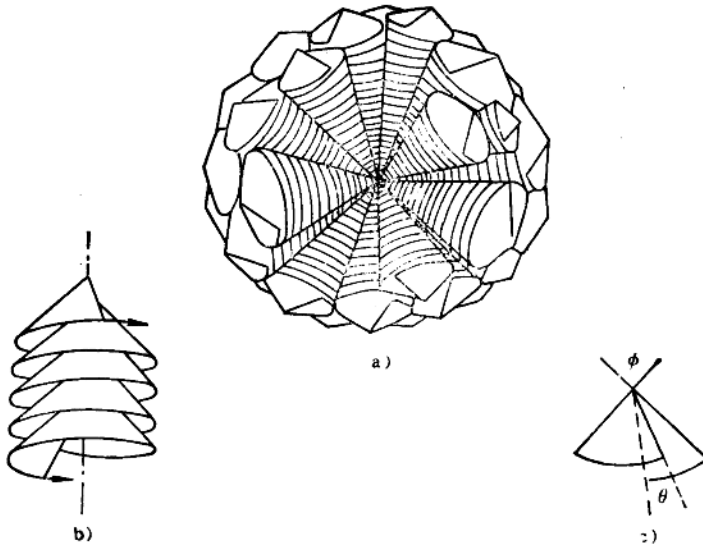


图1-10 石墨的螺旋位错生长方式

$\phi$ —圆锥顶角  $\theta$ —重合角  $\theta = 2\pi \cos(\phi/2)$

成为以  $a$  向为主，而长成为片状石墨，石墨片的长度方向与石墨晶体的基面平行。

当铁液中含有镁、铈等能强力脱硫的元素时，由于消除了硫的表面吸附作用，从而又恢复了石墨沿  $c$  轴方向按螺旋位错的方式生长。同时，由于镁、铈具有强烈的净化铁液的能力，使得铁液-石墨之间的界面能大为提高，因而促使石墨以维持最小表面能的方式生长及存在，而长成为球状。研究表明，球状石墨是起源于同一晶核的多晶体结构，晶体呈角锥状，从石墨球的中心以辐射状向外生长。角锥的生长采取螺旋生长方式（见图 1-11），球状石墨与铁液相接触的面为  $(0001)$  晶面，从而维持了它与铁液之间最小的界面张力。

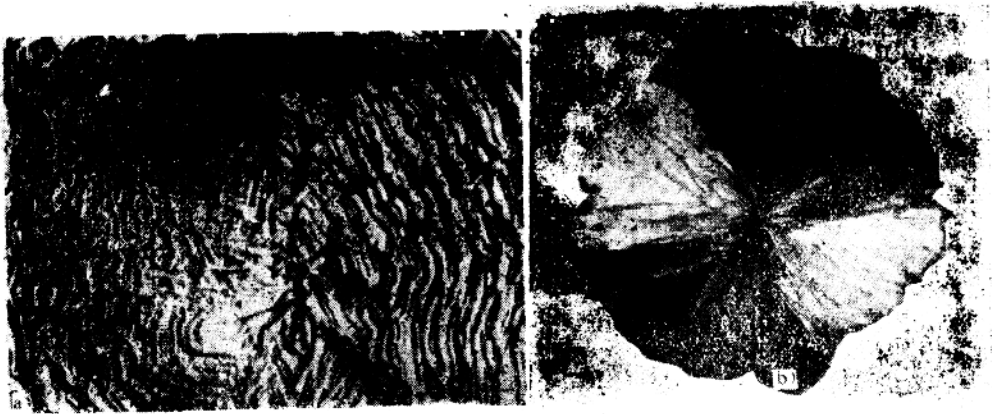


图1-11 球状石墨的结构

a) 石墨断面上的年轮结构 (SEM照片) b) 石墨断面 (偏振光照片)

初晶石墨的生长过程自始至终是在与铁液相接触的条件下进行的。这种情况下铁液中的碳原子的扩散速率快，因而石墨晶体的长大速率快。通常在铁液开始凝固以前就已经长得很 大，在尺寸上与共晶石墨有明显的区别。这一点无论是片状石墨、球状石墨或蠕虫状石墨，都有这样的特征。

### 三、奥氏体-石墨共晶

奥氏体-石墨共晶是灰口铸铁结晶过程中最重要的一部分，它的结晶方式在很大程度上决定了铸铁的组织与性能。

#### (一) 结晶过程热力学

灰口铸铁的共晶结晶是从铁液中同时析出奥氏体和石墨晶体的过程。当铁液过冷至低于共晶线  $E'C'F'$  (图 1-12) 以下的温度  $T_1$  时，成分为  $X_{c'}$  的铁液对奥氏体和石墨同时过饱和 ( $X_{c'} - X_a$  和  $X_b - X_{c'}$  为碳和铁的过饱和度)，铁液的自由能  $G_L$  要比奥氏体与石墨的混合体的自由能高出  $\Delta G$ ，这就是共晶结晶过程的热力学驱动力。

#### (二) 结晶方式和共晶体的形态

在共晶结晶过程中，一般情况下其主导相是石墨，它从共晶成分的铁液中首先析出，并如同初晶石墨那样长成片状或球状晶体。与石墨相邻的铁液贫碳，因而在石墨的局部表面产生奥氏体。两相随后的生长机理和共晶体的最终形态则取决于石墨晶体的生长方式以及石墨与奥氏体在生长速率方面的比较。

在石墨长成片状的情况下，它在铁液中长得很快的枝又前沿超过其侧面的奥氏体，从而自始至终能保持这两相互相伴生的生长方式而成为石墨-奥氏体共晶团。这种共晶属于正常的共晶结晶方式。在共晶结晶过程中，石墨的长大并不是象初生石墨那样经常是沿着一个固定的平面方向生长下去，而是经常产生分枝和弯曲。具有空间形状类似花朵状的石墨 (图 1-13) 即是分枝和弯曲的结果。由于正在生长中的石墨晶体内经常产生晶格变形或晶体缺陷，因而导致石墨片发生弯曲、分裂和分枝，并常引起石墨的旋转层错生长和分枝螺旋生长台阶的形成。图 1-14 表示片状石墨的几种生长模型。

在石墨长成球状的情况下，由于石墨球的生长速率低于其相邻奥氏体的生长速率，因此当石墨球晶体形成之后，随即被奥氏体所包围，即形成奥氏体外壳。此后铁液中的碳原子以扩散方式经由奥氏体壳进入到奥氏体-石墨界面，而石墨球继续沿  $c$  轴方向以螺旋位错方式生长，而奥氏体壳则向外生长。此过程一直进行到共晶过程结束。

根据晶体学的基本原理，晶体的生长速率  $R$  与结晶过冷度  $\Delta T$  有关。石墨晶体的生长速率对过冷度的依赖性比奥氏体大：石墨的生长速率与结晶过冷度成指数关系，而奥氏体的生

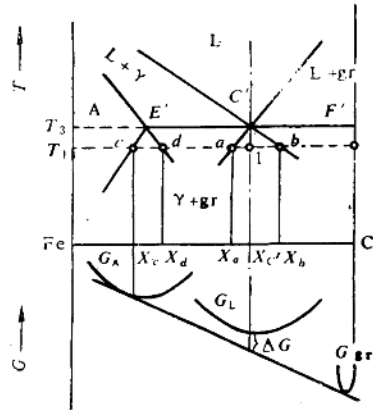


图1-12 共晶结晶中的自由能变化

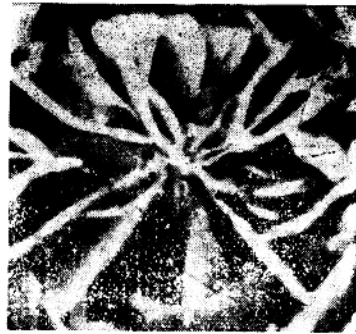


图1-13 片状石墨的空间形态



长速率与结晶过冷度成抛物线关系，如图 1-15 a 所示。由图可见，只有当共晶成分铁液的过冷度超过一定值（两曲线交点对应的  $\Delta T$ ）时，石墨的生长速率才会大于奥氏体的生长速率，这时才会发生正常的共晶结晶过程。

图 1-15 b 上绘出石墨作为结晶的主导相，亦即石墨与奥氏体共生的区域（图上影线部分）。图上  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  以及交界线上其它诸点表示奥氏体与石墨具有相同生长速率的过冷度。当铁液在  $PQR$  界线左方进行结晶时，奥氏体的生长速率将大于石墨的生长速率，在这种情况下不可能形成两相共晶形态的组织。而在  $PQR$  界线以右的影线区内结晶时，石墨的生长速率将大于奥氏体的生长速率，标志着奥氏体-石墨共晶结晶的进行。

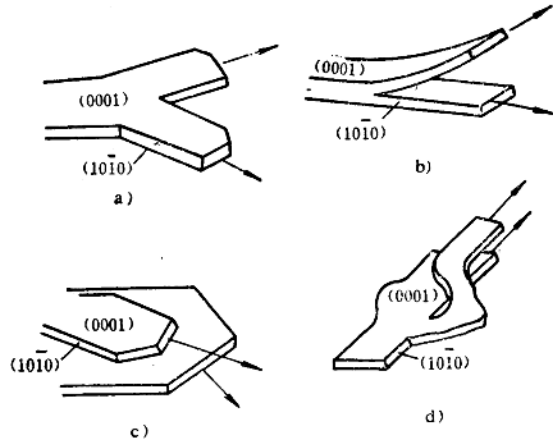


图1-14 片状石墨的几种生长模型

a) 分枝 b) 分裂 c) 旋转层错 d) 分枝螺旋

图 1-16 是一个关于石墨以螺旋位错方式生长的生长速率曲线。曲线的特性表明，在小的过冷度下，石墨的生长速率小，呈抛物线形式。而在大的过冷度下，生长速率呈直线关系。如果奥氏体的生长速率是由扩散机制控制，而以螺旋位错方式生长的石墨的生长速率曲线与之不相交，则奥氏体的生长速率将始终高于石墨。这样就不会存在有协同生长的区域。这种情况下，奥氏体的形核和长大与石墨无关，而铁液成分将发生变化，于是石墨能够形核。其后奥氏体将再一次随着石墨而形成，但这并不属于两相协同生长。这是一种离异共晶方式，即两相各自以其本身的机制，彼此独立地生长。

在石墨长成蠕虫状的情况下，石墨与奥氏体之间在生长速率对比方面与片状石墨和球状

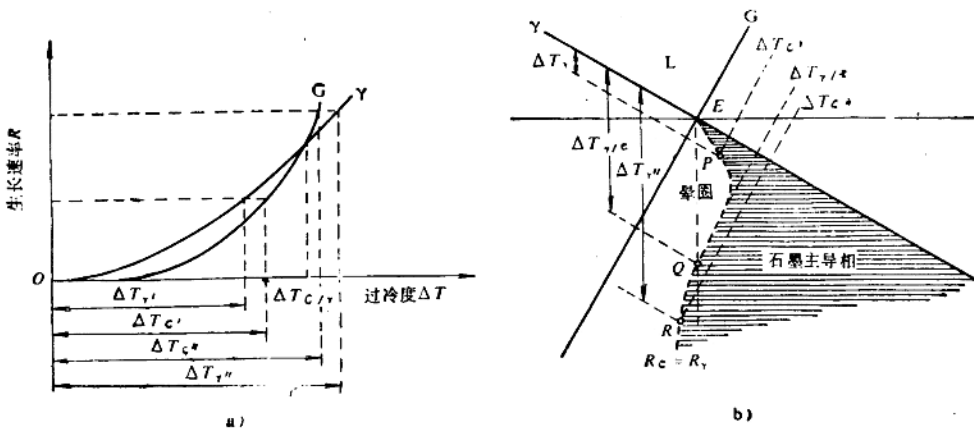


图1-15 石墨-奥氏体的共生区域图

a)  $\gamma$ -石墨的生长速率曲线 b)  $\gamma$ -石墨共生区域