

普通高等教育机电类规划教材

# 铸造合金及其熔炼

西安交通大学 陆文华  
大连理工大学 李隆盛 主编  
上海交通大学 黄良余

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

# 铸造合金及其熔炼

陆文华  
主编 李隆盛  
黄良余

主审 杨佳荣

机械工业出版社

本书是根据高等工业学校铸造专业教学指导委员会审定的教学大纲编写的。全书包括铸铁、铸钢及铸造非铁合金三部分，铸铁部分包括铸铁结晶及组织形成的基本知识，灰铸铁、强韧铸铁、特种性能铸铁及其熔铸技术；铸钢部分包括铸造碳钢及低合金钢、铸造高合金钢、电弧炉炼钢以及钢液的炉外精炼技术等；非铁合金部分包括铸造铝合金、铸造铜合金、铸造锌合金、镁合金及其熔炼等内容。

本书为高等工科大学铸造专业用教材，也可供有关科技人员参考。

### 铸造合金及其熔炼

西安交通大学 陆文华  
大连理工大学 李隆盛 主编  
上海交通大学 黄良余

\*

责任编辑：王海峰 版式设计：王颖  
封面设计：方芬 责任校对：韩晶  
责任印制：卢子祥

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）  
邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张25.25·字数615千字

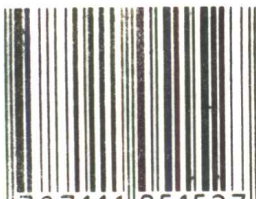
1996年10月第1版第1次印刷

印数 0 001—5 000 定价：26.00元

\*

ISBN 7-111-05152-1/TG·1075（课）

ISBN 7-111-05152-1



9 787111 051527 >

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

## 前 言

本书是根据铸造专业教学指导委员会制订的“铸造合金及其熔炼”教学大纲编写的。在编写过程中，基本上都按大纲的规定并结合近年来铸造合金及其熔炼领域内的发展，进行内容的选取及编排，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，并力求做到言简意赅，便于学习。全书共分三篇，第一篇为铸铁及其熔炼，重点在第一章，主要内容为铸铁的凝固及组织形成的基本理论；熔炼部分的重点为冲天炉熔炼。第二篇为铸钢及其熔炼，重点为铸造低合金钢、电弧炉炼钢及钢液的炉外精炼。第三篇为铸造非铁合金及其熔炼，重点为铸造铝合金及其变质、精炼。本书主要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。

本书第一篇由西安交通大学陆文华教授主编，其中第三章由邢建东教授编写，第四章由方亮副教授编写，第五章由梁工英副教授编写。第二篇由大连理工大学李隆盛教授主编。第三篇由上海交通大学黄良余教授主编。全书由陆文华统稿。浙江大学杨佳荣教授任主审。清华大学吴德海教授、东南大学孙国雄教授、浙江大学石彬成副教授、洛阳工学院陈全德教授、福州大学康积行教授以及教编室王海峰编辑参加审稿，特此致谢。

由于我们水平不高，时间仓促，书中错误和不妥之处一定不少，恳切期望读者批评和指正。

编 者

EA666/09

# 目 录

## 前 言

## 第一篇 铸铁及其熔炼

第一章 铸铁的结晶及组织的形成 .....	3	二、收缩特性及其伴生现象 .....	49
第一节 铁—碳双重相图 .....	3	第五节 灰铸铁的热处理 .....	50
一、铁—碳相图的二重性 .....	3	习题 .....	51
二、铁—碳双重相图及其分析 .....	4	第三章 强韧铸铁 .....	52
三、铁—碳—硅准二元相图 .....	5	第一节 球墨铸铁 .....	52
四、铸铁中常见元素对铁—碳相图上各		一、球墨铸铁的性能特点及应用 .....	52
临界点的影响 .....	6	二、球墨铸铁的生产 .....	54
五、碳当量和共晶度的意义及表达式 .....	7	三、球墨铸铁的铸造性能及常见缺陷 .....	64
第二节 铸铁的一次结晶过程 .....	8	四、球墨铸铁的热处理 .....	68
一、初析石墨的结晶 .....	8	五、球墨铸铁生产中的几个特殊问题 .....	72
二、初析奥氏体的结晶 .....	8	第二节 蠕墨铸铁 .....	74
三、共晶凝固过程 .....	13	一、蠕墨铸铁的组织及性能 .....	74
第三节 铸铁的固态相变（即二次结晶） .....	29	二、蠕墨铸铁的生产及控制 .....	77
一、奥氏体中碳的脱溶 .....	29	第三节 可锻铸铁 .....	82
二、铸铁的共析转变 .....	29	一、可锻铸铁的分类、牌号及用途 .....	82
三、过冷奥氏体的中温及低温转变 .....	30	二、可锻铸铁的制造方法 .....	84
习题 .....	31	三、固态石墨化原理 .....	88
第二章 灰铸铁 .....	32	四、加速可锻铸铁石墨化的措施 .....	90
第一节 金相组织和力学性能的特点 .....	32	五、常见缺陷及防止 .....	94
一、灰铸铁的金相组织特点 .....	32	六、球墨可锻铸铁 .....	96
二、灰铸铁的性能特点 .....	33	习题 .....	97
第二节 影响铸铁铸态组织的因素 .....	35	第四章 特种性能铸铁 .....	98
一、冷却速度的影响 .....	35	第一节 减摩铸铁 .....	98
二、化学成分的影响 .....	36	一、石墨对铸铁减摩性的影响 .....	99
三、铁液的过热和高温静置的影响 .....	40	二、基体组织对铸铁减摩性的影响 .....	100
四、孕育的影响 .....	40	三、常用的减摩铸铁 .....	100
五、气体的影响 .....	41	第二节 冷硬铸铁 .....	103
六、炉料的影响 .....	41	一、冷硬铸铁的化学成分和组织	
第三节 灰铸铁件的生产 .....	41	特点 .....	103
一、灰铸铁的标准 .....	41	二、冷硬铸铁的获得与性能特点 .....	104
二、衡量灰铸铁冶金质量的指标 .....	43	三、冷硬铸铁的应用 .....	108
三、提高灰铸铁性能的主要途径 .....	44	第三节 抗磨铸铁 .....	111
第四节 灰铸铁的铸造性能 .....	48	一、普通白口铸铁 .....	112
一、流动性 .....	49	二、镍硬白口铸铁 .....	114

三、铬系白口铸铁·····	115	第三节 冲天炉熔炼过程中化学成分的变化规律·····	157
第四节 耐热铸铁·····	126	一、冲天炉内冶金反应的基本规律·····	157
一、铸铁在高温下的氧化·····	127	二、冲天炉内炉渣的形成及其作用·····	158
二、铸铁在高温下的生长·····	129	三、冲天炉熔炼过程中铁液化学成分的变化·····	159
三、常用的耐热铸铁·····	130	第四节 铁液的脱硫处理·····	164
第五节 耐腐蚀铸铁·····	133	一、炉内脱硫·····	164
一、提高铸铁耐腐蚀性的途径·····	134	二、炉外脱硫·····	165
二、常用的耐腐蚀铸铁·····	135	三、炉外脱硫方法·····	165
习题·····	139	第五节 冲天炉熔炼过程的参数选择及测量·····	167
<b>第五章 铸铁的熔炼</b> ·····	140	一、冲天炉操作参数的选择与计算·····	167
第一节 冲天炉熔炼的基本原理·····	140	二、冲天炉的配料计算·····	171
一、冲天炉熔炼的基本要求·····	140	三、冲天炉熔炼过程的测试·····	174
二、冲天炉的基本结构·····	140	第六节 感应电炉熔炼·····	179
三、冲天炉内焦炭燃烧的基本规律·····	142	一、工频感应电炉的基本工作原理·····	179
四、冲天炉内炉气及炉温的分布特征·····	145	二、工频感应电炉的基本结构·····	180
五、冲天炉内的热交换·····	145	三、工频感应电炉的熔炼特点·····	182
六、影响铁液温度的主要因素·····	148	四、冲天炉与工频感应电炉双联·····	183
第二节 冲天炉强化熔炼的主要措施·····	152	习题·····	183
一、预热送风·····	152	参考文献·····	183
二、富氧送风·····	155		
三、除湿送风·····	156		

## 第二篇 铸钢及其熔炼

<b>第六章 铸造碳钢</b> ·····	186	第五节 碳钢的铸造性能·····	196
第一节 概述·····	186	一、流动性·····	196
一、铸造碳钢的性能及应用·····	186	二、体积收缩率与缩孔率·····	197
二、铸造碳钢的化学成分·····	186	三、线收缩率·····	197
三、铸造碳钢的使用温度·····	186	四、热裂倾向·····	198
第二节 铸造碳钢的结晶过程和铸态组织·····	187	五、冷裂倾向·····	198
一、结晶过程·····	187	第六节 铸造碳钢的焊接性能·····	199
二、铸态组织·····	188	习题·····	199
第三节 碳钢铸件的热处理、金相组织和力学性能·····	190	<b>第七章 铸造低合金钢</b> ·····	200
一、退火·····	190	第一节 概述·····	200
二、正火·····	191	第二节 锰系铸造低合金钢·····	200
三、正火加回火·····	191	第三节 铬系铸造低合金钢·····	202
第四节 影响铸造碳钢力学性能的主要因素·····	193	第四节 镍系铸造低合金钢·····	203
一、化学成分·····	193	第五节 低合金高强度 (HSLA) 铸钢·····	204
二、气体和非金属夹杂物·····	193	第六节 微量合金化铸钢·····	205
三、铸件壁厚·····	195	一、钒、铌系微量合金化铸钢·····	205
		二、硼系微量合金化铸钢·····	206
		第七节 抗磨用铸造低合金钢·····	207
		一、珠光体—渗碳体抗磨钢·····	207

二、马氏体抗磨钢·····	207	第二节 三相电弧炉的构造和工作原理·····	227
三、奥氏体—贝氏体抗磨钢·····	207	第三节 碱性电弧炉氧化法炼钢·····	230
第八节 低合金钢铸件的热处理·····	208	一、炼钢工艺要点·····	230
一、预先退火热处理·····	208	二、炼钢过程的物理化学分析·····	233
二、淬火(正火)温度及保温时间·····	209	三、合金钢冶炼要点·····	238
三、回火后的冷却速度·····	209	第四节 酸性电弧炉氧化法炼钢·····	239
第九节 低合金钢的铸造性能·····	209	第五节 直流电弧炉炼钢·····	240
一、流动性·····	209	习题·····	242
二、热裂倾向·····	210	第十章 感应电炉炼钢·····	243
三、冷裂倾向·····	210	第一节 概述·····	243
第十节 低合金铸钢的焊接性能·····	210	第二节 无芯感应电炉的构造·····	244
习题·····	210	第三节 感应电炉炼钢工艺·····	246
第八章 铸造高合金钢·····	211	一、炉衬材料和筑炉·····	246
第一节 概述·····	211	二、炉料和装料·····	247
第二节 高锰钢·····	212	三、熔化·····	247
一、高锰钢的碳—锰含量、热处理及性能·····	212	四、脱氧和出钢·····	247
二、高锰钢的加工硬化机理·····	213	五、合金钢的冶炼·····	247
三、化学成分对高锰钢性能的影响·····	214	第四节 真空感应电炉炼钢·····	248
四、提高高锰钢性能的途径·····	215	一、电炉的构造和工作原理·····	248
五、高锰钢的铸造性能·····	215	二、真空感应电炉炼钢的优点·····	248
第三节 铸造不锈钢(耐蚀钢)·····	216	三、真空感应电炉炼钢中存在的问题·····	249
一、不锈钢及其耐蚀原理·····	216	习题·····	251
二、铸造铬镍不锈钢的化学成分及性能·····	218	第十一章 钢的炉外精炼·····	252
三、合金元素对钢组织的影响·····	219	第一节 概述·····	252
四、提高铸造不锈钢性能的途径·····	220	一、炉外精炼的重要作用·····	252
五、铬镍不锈钢的铸造性能·····	220	二、炉外精炼技术的发展·····	252
六、铬镍不锈钢的应用范围·····	220	三、炉外精炼技术在铸钢生产中的应用·····	253
第四节 抗磨耐蚀合金铸钢·····	221	第二节 吹氩精炼原理·····	254
一、铬镍钼马氏体铸造不锈钢·····	221	第三节 氩氧脱碳精炼法·····	254
二、析出硬化型铸造不锈钢·····	221	第四节 真空氧氩脱碳精炼法·····	256
第五节 铸造耐热钢·····	222	第五节 真空氧氩脱碳转炉精炼法·····	257
一、钢在高温下的氧化和抗氧化性·····	222	第六节 钢包电弧加热(LF)精炼法·····	258
二、常用的几种铸造耐热钢·····	223	一、精炼装置的构造·····	259
习题·····	225	二、精炼工艺过程·····	259
第九章 电弧炉炼钢·····	226	三、精炼效果·····	260
第一节 概述·····	226	习题·····	260
		参考文献·····	260
<b>第三篇 铸造非铁合金及其熔炼</b>			
第十二章 铸造铝合金·····	262	一、铝硅合金的成分、组织、性能·····	262
第一节 铝硅类合金·····	262		

二、铝硅合金的变质处理	267	三、净化效果检测方法	322
三、Al-Si-Mg 系合金	272	四、铝液内的氢在凝固过程中的 迁移	325
四、Al-Si-Cu 系合金	275	五、铝铸件中一次气孔形成机理	325
五、Al-Si-Cu-Mg 系合金	275	六、铝合金熔炼小结	326
六、活塞合金	276	第四节 铝合金组织控制	327
七、铝硅类合金中的杂质	278	一、第一类变质处理	327
第二节 铝铜类合金	279	二、第二类变质处理：共晶硅变质	330
一、铝铜二元合金	279	第五节 铝合金的炉料	334
二、多元合金	279	一、炉料组成	334
三、耐热铝合金	281	二、配料计算	335
第三节 铝镁类合金	282	第六节 铝合金典型熔炼工艺	336
一、铝镁二元合金	282	一、ZL104 合金	336
二、Al-Mg-Si 系合金	283	二、ZL201 合金	338
三、铝镁锌三元合金	284	三、ZL301 合金	338
第四节 铝锌类合金	284	四、废料、切屑重熔	339
一、Al-Zn 二元相图	284	习题	339
二、Al-Zn-Si-Mg 系合金	284	第十四章 铸造铜合金	340
三、Al-Zn-Mg 系合金	285	第一节 铸造锡青铜	340
四、 $\alpha$ (Al) 初晶的细化	285	一、Cu-Sn 二元合金的成分、组织	340
第五节 回归分析法在铸铝合金成分优化 设计中的应用	287	二、Cu-Sn 二元合金的性能及工艺 特点	345
第六节 铝合金铸造性能	290	三、ZCuSn10P1 锡青铜	346
第七节 铝铸件的热处理	292	四、ZCuSn10Zn2 锡青铜	346
一、热处理目的	292	五、ZCuSn5Pb5Zn5 锡青铜	347
二、热处理常用规范	293	六、锡青铜中的杂质	347
三、热处理常见缺陷及其防止	296	第二节 铸造铝青铜	347
习题	297	一、Cu-Al 二元合金的成分、组织	347
第十三章 铸造铝合金的熔炼	299	二、缓冷脆性	348
第一节 铝合金液的精炼原理	299	三、Cu-Al 二元合金的性能	348
一、铝铸件中气孔的形态及对铸件 性能的影响	299	四、ZCuAl10Fe3 铝青铜	349
二、铝铸件中氧化夹杂的形态及对铸件 性能的影响	301	五、ZCuAl9Mn2 铝青铜	350
三、铝液中气体和氧化夹杂的来源	301	六、ZCuAl8Mn13Fe3Ni2 铝青铜	350
四、氧化铝的形态、性能及对吸氢的 影响	304	七、ZCuAl9Fe4Ni4Mn2 铝青铜	351
五、合金元素对铝液吸氢的影响	306	第三节 铸造铅青铜	351
六、熔炼时间对吸氢的影响	306	第四节 其它青铜	352
七、铝液中析出氢的条件	306	一、铍青铜	352
八、铝液的除氢速度	309	二、Cu-Mn 基高阻尼合金	353
第二节 铝液精炼工艺	310	第五节 铸造黄铜	354
一、吸附精炼	310	一、Cu-Zn 二元黄铜	354
二、非吸附精炼	321	二、多元黄铜	356
		第六节 铜合金成分优化设计	358
		习题	360



第十五章 铸造铜合金的熔炼 .....	361	第四节 其它镁合金 .....	383
第一节 铜合金的氧化和脱氧 .....	361	一、耐热镁合金 .....	383
一、铜合金的氧化特性 .....	361	二、镁基阻尼合金 .....	383
二、铜合金的脱氧 .....	362	第五节 镁合金的氢化处理 .....	384
三、磷铜脱氧 .....	363	第六节 镁合金的熔铸特点 .....	385
第二节 铜液的吸气、除气 .....	364	一、纯镁的物理化学特性 .....	385
一、气体在铜液中的溶解特性 .....	364	二、镁合金的精炼 .....	385
二、铜液的除气 .....	367	三、镁合金的变质 .....	386
第三节 铜铸件中气孔形成机理 .....	368	四、镁合金的熔剂 .....	386
第四节 铜合金的熔剂 .....	370	五、镁合金的型砂 .....	386
一、覆盖熔剂 .....	370	习题 .....	387
二、精炼熔剂 .....	370	第十七章 铸造锌合金及其熔炼 .....	388
第五节 铜合金液质量检测 .....	371	第一节 锌合金的成分、组织 .....	388
一、化学成分的检测及控制 .....	371	第二节 锌合金的工艺性能 .....	389
二、含气量检测方法 .....	372	一、铸造性能 .....	389
三、炉前弯曲试验 .....	373	二、焊补性能 .....	389
四、断口检查 .....	374	三、切削加工性能 .....	389
第六节 铜合金熔炼工艺 .....	374	四、锌合金“老化”的原因 .....	389
一、铜合金熔炼一般原则 .....	374	第三节 工业锌合金 .....	390
二、炉料管理及回炉料牌号判断 .....	374	一、砂型或金属型铸造合金——耐磨	
三、铜合金熔炼工艺要点 .....	375	合金 .....	390
习题 .....	377	二、压铸合金——仪表合金 .....	390
第十六章 铸造镁合金及其熔铸 .....	378	三、新型高铝、高强，耐磨锌合金 .....	391
第一节 镁及其合金的基本特性 .....	378	四、锌基阻尼合金简介 .....	392
一、纯镁的性能 .....	378	第四节 熔炼工艺 .....	393
二、镁的合金化 .....	378	一、特点 .....	393
三、镁合金的特点 .....	379	二、ZA 系列合金的变质处理 .....	393
第二节 镁铝锌合金 .....	480	习题 .....	394
第三节 镁锌锆合金 .....	382	参考文献 .....	394

# 第一篇 铸铁及其熔炼

任何一个优质铸件，都必须外形完好，内部致密，使用性能合乎要求。铸铁件亦不例外。为此，就必须了解铸铁的铸造性能和使用性能（包括力学性能和物理性能），尤其要掌握铸铁的化学成分等工艺因素、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，冲天炉熔炼铸铁的基本理论及其工艺。

铸铁是指含碳量<sup>○</sup>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 0.04%~1.2%，S 0.04%~0.20%。有时还可加入各种合金元素，以便获得具有各种性能的合金铸铁。

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质量的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。

我国是世界冶铸技术的发源地。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10年，并且还发现了可锻铸铁铲。而在欧洲，直至公元13世纪末至14世纪初才出现生铁，这比我国要晚1900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300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，是迄今发现的世界最早的可锻铸铁件。

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。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180N/mm<sup>2</sup>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件，其退火周期竟长达7天以上，基本上没有其余各类铸铁件的生产。

新中国成立以后，为铸造生产的发展开辟了广阔的途径。我国目前各种铸铁件的年总产

<sup>○</sup>本书中凡涉及含量时，除特殊情况另行加以注明外，均指质量分数。质量分数表示某物质的质量与混和物的质量之比。

量达 950 万 t 左右 (1992 年统计资料), 品种有各种牌号的灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁, 可锻铸铁以及具有各种特殊性能的特殊铸铁等, 在熔炼技术、炉前处理技术等方面都有了很大的发展, 为提高铸铁件的质量创造了良好的基础。

下表是较为常用的铸铁分类及其应用举例。

铸铁的分类及用途

类别	组织特征	断口特征	成分特征	性能特征	用途	
工程结构件用铸铁	1. 灰铸铁 (普通灰铸铁、高强度灰铸铁)	基体+片状石墨	灰口	仅含 C、Si、Mn、P、S 五元素或外加少量合金元素	$\sigma_b = 150 \sim 400$ MPa, 基本上无塑性	大量地应用于各种机器零件, 如机床、内燃机、汽车、农用机械等
	2. 球墨铸铁	基体+球状石墨	灰口(银白色断口)	1. 普通五元素或外加不同量的合金元素 2. $Mg_{总} \geq 0.03\%$ 、 $RE_{总} \geq 0.02\%$	$\sigma_b = 400 \sim 900$ MPa $\delta = 2\% \sim 20\%$ $\alpha_K = 15 \sim 120$ J/cm <sup>2</sup>	应用于受力复杂, 强度、韧性、耐磨性要求较高的零件, 如曲轴、齿轮、连杆等
	3. 蠕墨铸铁	基体+蠕虫状石墨(往往伴有少量球状石墨)	灰口(斑点状断口)	同球墨铸铁, 但 $Mg_{总}$ 及 $RE_{总}$ 量可稍低	$\sigma_b$ 、 $\delta$ 比球墨铸铁低, 但高于灰铸铁	高强度零件, 如机床零件等, 耐热零件, 如汽缸盖, 小型钢锭模, 发动机排气管等
	4. 可锻铸铁 (黑心)	生坯: 珠光体+莱氏体 退火后: 基体+团絮状石墨	生坯: 白口 退火后: 灰口(黑色绒状断口)	低碳、低硅、铬 < 0.06%	$\sigma_b = 300 \sim 700$ MPa $\delta = 2\% \sim 12\%$	用于受冲击、振动的零件, 如汽车后桥外壳、弹簧、钢板支座、机床把手等, 亦可用于阀门、管件、农机零件、线路金具等
特殊用途铸铁	5. 抗磨铸铁	基体+不同类型的渗碳体	白口(中锰铸铁及冷硬铸铁例外)	除五元素外, 可加入低、中、高量合金元素	主要有高的抗磨性能, 但韧度较低	农机磨擦件、球磨机磨球、衬板、抛丸机叶片、电厂灰渣泵零件、磨煤机易损部件、冷硬铸件等
	6. 耐热铸铁	基体+片状或球状石墨	灰口	有 Si、Al、Cr 系(中硅、高铝、中硅高铝、高铬等铸铁)	有高的耐热性及抗氧化性能, 但强度较低、较脆	锅炉配件, 石油化工、冶金设备、加热炉中的耐热零件
	7. 耐腐蚀铸铁	基体+片状或球状石墨	灰口	主要合金元素 Si、Ni 含量高	主要有高的耐腐蚀性能	化工工业中的各种抗酸、碱、氯、海水、盐等零件

# 第一章 铸铁的结晶及组织的形成

## 第一节 铁—碳双重相图

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。本节主要讨论分析 Fe-C 相图和 Fe-C-Si 相图的等硅切面图。

### 一、铁—碳相图的双重性

金属学中已经学习了 Fe-Fe<sub>3</sub>C 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℃ 以上保温，莱氏体中的渗碳体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 Fe<sub>3</sub>C）而将转变成成为铁素体加石墨。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。

从结晶动力学（晶核的形成与长大过程）的观点看，以含 C 4.3% 的共晶成分液体在低于共晶温度的凝固为例：在液体中形成含 C 6.67% 的渗碳体晶核要比形成含 C 100% 的石墨晶核容易，而且渗碳体是间隙型的金属间化合物，并

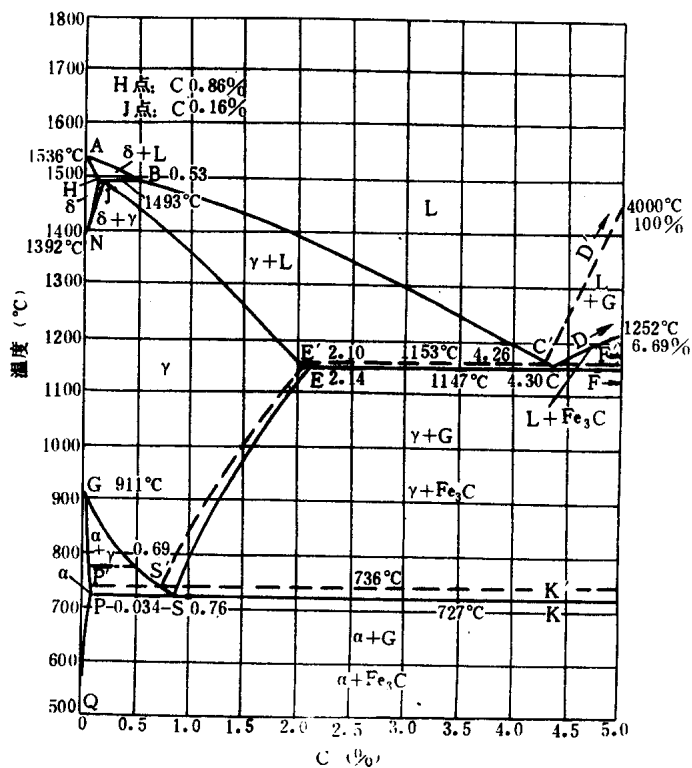


图 1-1 铁—碳相图

G—石墨 Fe<sub>3</sub>C—渗碳体

不要求铁原子从晶核中扩散出去。因此，在某种条件下，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，也可从热力学、动力学两方面去分析而得到和上面相似的结论。

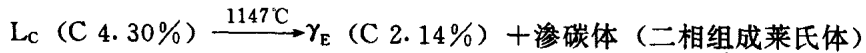
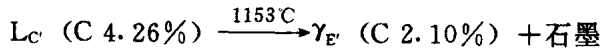
由此可见，从热力学观点上看，Fe-Fe<sub>3</sub>C相图只是介稳定的，Fe-C（石墨）相图才是稳定的。从动力学观点看，在一定条件下，按Fe-Fe<sub>3</sub>C相图转变亦是可能的，因此就出现了二重性。

## 二、铁—碳双重相图及其分析

对铸铁合金长期使用与研究的结果，人们得到了如图 1-1 所示的铁碳合金双重相图，即 Fe-Fe<sub>3</sub>C 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。表 1-1 为图中各临界点的温度及含碳量。

Fe-C（石墨）相图和 Fe-Fe<sub>3</sub>C 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



2) 稳定平衡的共析点 S' 的成分和温度与 S 点不同

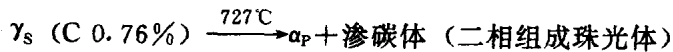
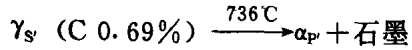


表 1-1 铁碳相图各临界点的温度、成分

点	温度 (°C)	碳 量 (%)		点	温度 (°C)	碳 量 (%)	
		质 量 (%)	原 子 (%)			质 量 (%)	原 子 (%)
A	1536	0.00	0.00	J	1493	0.16	0.74
B	1493	0.53	2.43	K	727	6.689	25.00
C	1147	4.30	17.29	K'	736	6.689	25.00
C'	1153	4.26	17.13	N	1392	0.00	0.00
D	1252	6.689	25.00	P	727	0.034	0.16
D'	4000	1.00	1.00	P'	736	0.032	0.15
E	1147	2.14	9.23	Q	0	0.00	0.00
E'	1153	2.10	9.06	S	727	0.76	3.43
F	1147	6.689	25.00	S'	736	0.69	3.12
F'	1153	6.689	25.00				
G	911	0.00	0.00				
H	1493	0.086	0.40				

从这里看出在稳定平衡的 Fe-C 相图中的共晶温度和共析温度都比介稳定平衡的高一些。共晶温度高出 6°C，共析温度高出 9°C，这是容易理解的。如图 1-2 的示意图所示，共晶成分

的液体的自由能和共晶莱氏体（奥氏体加渗碳体）的自由能都是随着温度的上升而减低的，这两条曲线的交点就是共晶温度  $T_c$ 。已知稳定平衡的奥氏体加石墨两相组织的自由能总是比莱氏体的低些，即这条曲线一定在莱氏体曲线的下方，因而它和液体曲线的交点  $T_c'$ （表示稳定系的共晶温度）就一定比  $T_c$  高些。关于共析转变温度问题，亦与共晶温度的讨论相似。

由于共晶转变和共析转变都是恒温转变，所以稳定平衡相图中的共晶线  $E'C'F'$  要和  $BC$  线交于  $C'$ ，与  $JE$  线交于  $E'$ 。显然  $C'$  和  $E'$  的含碳量（分别为 4.26% 及 2.10%）就要比  $C$ 、 $E$  的（分别为 4.30% 及 2.14%）低些；稳定平衡共析线  $P'S'K'$  要和  $GS$  线交于  $S'$ ，其含碳量（0.69%）要比  $S$ （0.760%）低些，和  $GP$  线交于  $P'$ ，其含碳量比  $P$  点（0.034%）略低，可以略而不计。因此， $E'C'F'$ 、 $E'S'$ 、 $P'S'K'$  各线由于转变温度较高，含碳量较低，就分别落在  $ECF$ 、 $ES$  和  $PSK$  的上方或左上方。石墨的熔点  $D'$  高达 4000°C 左右，所以  $C'D'$  线亦在  $CD$  线的左上方。分别把这些线段画在  $Fe-Fe_3C$  相图上，就构成了双重相图。

在共晶温度时和石墨平衡的奥氏体中的含碳量（相当于  $E'$ ）比和渗碳体平衡的奥氏体中的含碳量（相当于  $E$ ）亦要低些。

在铸造生产实际中，经常会碰到这样的问题：用相同化学成分的铁液，浇注不同壁厚的铸件时，或用冷却速度不同的铸型时，会得到灰口或白口断面的铸件，这和双重相图有何联系？简要地说，这是由于冷却速度不同而导致共晶凝固温度的高、低不同所致，如在  $T_c$  以下， $T_c$  以上凝固时，一般可得灰口，如过冷至  $T_c$  以下凝固时，则有可能进行奥氏体加渗碳体的结晶（形成白口断面）。这样就把双重相图和生产实际问题联系起来。

另外，除冷却速度外，化学成分对铸铁组织的形成亦会发生很大的影响，其中尤以硅（除碳以外）的影响为最大，因此，必须要使用  $Fe-C-Si$  三元相图才能解释，但为简便计，常用三元相图的等硅切面图分析问题。

### 三、铁—碳—硅准二元相图

铸铁中硅的含量一般在 0.8%~3.5% 的范围内变动（特殊铸铁除外）。目前还是常用一定含硅量的铁—碳—硅三元垂直截面图来分析铸铁中碳、硅含量对结晶过程和组织的影响。

在铁—碳—硅三元合金中，高碳相亦有可能以石墨和渗碳体两种形式出现，相应地就有铁—石墨—硅和铁—渗碳体—硅两种准二元相图。

图 1-3 为不同硅量的铁—石墨—硅准二元相图。对比  $Fe-G$  和  $Fe-G-Si$  准二元相图，硅的作用有如下各点：

1) 共晶点和共析点含碳量随硅量的增加而减少。铁—石墨二元共晶合金含 C 4.26%，共析合金含 C 0.69%，在三元系中含 Si 2.08% 时其共晶和共析点含碳量则相应为 3.65% 及 0.65% 左右；含 Si 4.2% 时则相应为 3.15% 及 0.6% 左右。 $E'$  点的含碳量也随着硅的增高而减

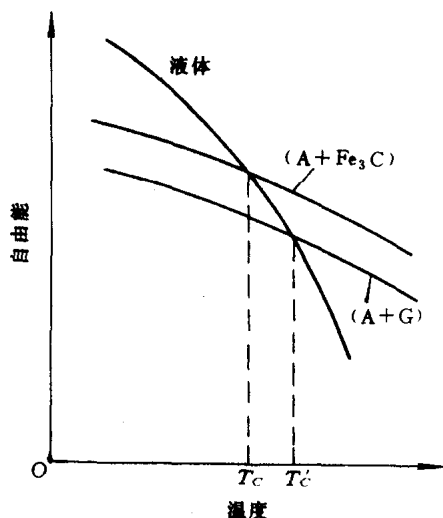


图 1-2 铸铁中各种组成体的自由能随温度而变的示意图

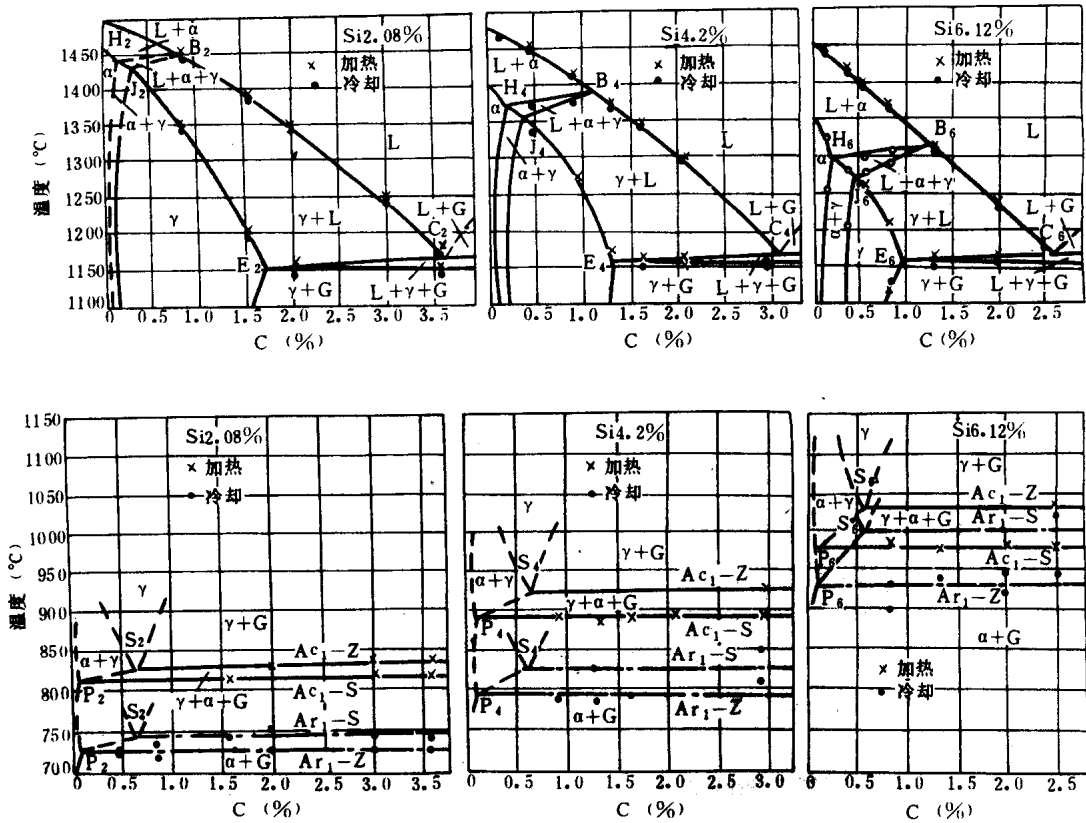


图 1-3 铁—石墨—硅准二元相图

“Ac<sub>1</sub>-S” “Ac<sub>1</sub>-Z” 分别表示加热时临界温度范围的开始及终了  
 “Ar<sub>1</sub>-S” “Ar<sub>1</sub>-Z” 分别表示冷却时临界温度范围的开始及终了

少，亦就是碳在液体共晶合金以及奥氏体固溶体中的溶解度减少了。

2) 硅的加入使相图上出现了共晶和共析转变的三相共存区（共晶区：液相、奥氏体加石墨；共析区：奥氏体、铁素体加石墨）。这说明铁—碳—硅三元合金的共析和共晶转变，不象铁碳二元合金那样在一个恒定的温度完成，而是在一个温度范围内进行，并且共析转变温度范围随着硅量的增加而扩大。

3) 共晶和共析温度范围改变了，硅对稳定系和介稳定系的共晶温度的影响是不同的。随着含硅量的增加，两个共晶温度的差别扩大，即含硅量越高，奥氏体加石墨的共晶温度高出奥氏体加渗碳体的共晶温度越多。由于硅的增高，共析转变的温度提高更多，因此有利于铁素体基体的获得。

4) 硅量的增加，还缩小了相图上的奥氏体区。硅量超过 10% 以后，奥氏体区趋于消失，这对研究高硅耐酸铸铁的凝固过程及组织有参考意义。

以上各点，对分析铸铁的凝固过程、组织形成以及制定热处理工艺，都有实际意义。

#### 四、铸铁中常见元素对铁—碳相图上各临界点的影响

表 1-2 定性地列举了一些常见元素在一般含量范围内对双重相图上各临界点的影响趋

势。

表 1-2 元素对铁碳相图的影响

项目 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 (C)	共析 温度	共晶点 碳量 (%)	奥氏体 饱和 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
Sb	-					-					+	-	珠光体
Mg	-					-						-	珠光体、渗碳体
Nb											-	-	-
RE												-	珠光体、渗碳体
B												-	珠光体、渗碳体
Te												-	珠光体、渗碳体

注：1. “+”代表增加、提高、促进；“-”代表降低、阻碍。

2. 数字代表加入1%合金时的波动值。

### 五、碳当量和共晶度的意义及表达式

根据各元素对共晶点实际碳量的影响（表 1-2），将这些元素的量折算成碳量的增减，谓之碳当量，以 CE 表示，为简化计算，一般只考虑 Si、P 的影响，因而  $CE = C + 1/3 (Si + P)$ ，将 CE 值和 C' 点碳量（4.26%）相比，即可判断某一成分的铸铁偏离共晶点的程度，如  $CE > 4.26\%$  为过共晶成分， $CE = 4.26\%$  为共晶成分， $CE < 4.26\%$  为亚共晶成分。

铸铁偏离共晶点的程度还可用铸铁的实际含碳量和共晶点的实际含碳量的比值来表示，这个比值称为共晶度，以  $S_c$  表示。

$$S_c = C_{\text{铁}} / C'_c = \frac{C_{\text{铁}}}{4.26\% - 1/3 (Si + P)}$$

式中  $C_{\text{铁}}$ ——铸铁实际含碳量（%）；

$C'_c$ ——稳定态共晶点的含碳量（%）；



Si、P——铸铁中硅、磷含量（%）

如  $S_c > 1$  为过共晶、 $S_c = 1$  为共晶、 $S_c < 1$  为亚共晶成分铸铁。

根据 CE 的高低、 $S_c$  的大小还能间接地推断出铸铁铸造性能的好坏以及石墨化能力的大小，因此是一个较重要的参数。

## 第二节 铸铁的一次结晶过程

铸铁从液态转变成固态的一次结晶过程，包括初析和共晶凝固两个阶段。具体的内容有：初析石墨或初析奥氏体的形成及其形貌；共晶凝固，共晶团以及共晶后期组织的形成；碳化物的形成及其特征。

### 一、初析石墨的结晶

当过共晶成分的铁液冷却时，先遇到液相线，在一定的过冷下便会析出初析石墨的晶核，并在铁液中逐渐长大。由于结晶时的温度较高，成长的时间较长，又是在铁液中自由地长大，因而常常长成分枝较少的粗大片状（这便是石墨分类标准中的 C 型石墨，严格地说，C 型石墨不应包括在随后共晶凝固时形成的正常的共晶石墨，但在国内的不少手册，甚至标准中都没有把这个问题说清楚，本教材在此按国际文献中的资料加以澄清）。

### 二、初析奥氏体的结晶

初析奥氏体树枝晶对铸铁的组织及力学性能有间接或直接的影响，它在灰铸铁中的作用与钢筋在钢筋混凝土中的作用一样，能起到骨架的加固作用，并能阻止裂纹的扩展。

#### （一）初析奥氏体枝晶的凝固过程

当凝固在平衡条件下进行时，只有当化学成分为亚共晶时才会析出初析奥氏体。其实在非平衡条件下，铸铁中存在一个共生生长区，而且偏向石墨的一方，因而在实际情况下，往往共晶成分，甚至过共晶成分的铸铁在凝固过程中亦会析出初析奥氏体。

通常用连续液淬的方法研究初析奥氏体枝晶的凝固过程，观察在液淬温度下所得到的金相组织，即可窥其全貌（图 1-4）。图中初析奥氏体已转变成马氏体，尚未凝固的液体经液淬后直接转变成细小的莱氏体。可把过程描述如下：在液相线温度以上，铁液处于全液态，当液体冷却到液相线温度以下时，奥氏体枝晶便开始析出并长大（图 1-4a），当进入共晶阶段后，液体中开始形成共晶团（图 1-4b），此时初析奥氏体还会继续长大，数量也有增加。从图 1-4b 可见，初析奥氏体枝晶和共晶团的生长实际上有一个重叠的生长温度区间。由于工艺条件不同时，共晶转变开始的温度会有高低，因而重叠的温度区间亦会有改变。在组织上就可能出现虽然成分相同，但初析奥氏体枝晶的百分比不一样的情况。

#### （二）初生奥氏体的形态

奥氏体为面心立方体，其原子密排面为 (111) 面，当奥氏体直接从熔体中形核、成长时，只有按密排面生长，其表面能最小，析出的奥氏体才稳定，由原子密排面 {111} 构成的晶体外形是八面体。八面体的生长方向必然是八面体的轴线，也即 [100] 方向，由于八面体尖端的快速生长，便形成了奥氏体的一次晶枝，在一次晶枝上长起微小的突起，以此为基础长出二次晶枝，进而长出三次晶枝，最后长成三维树枝晶。奥氏体枝晶生长的特点之一是晶枝的生长程度不同，有的晶枝生长快，有的晶枝因前沿有溶质元素的富集而生长受到阻碍，因而生长较慢，故铸铁中的奥氏体枝晶往往具有不对称、不完整的特征，加上奥氏体枝晶的二维形