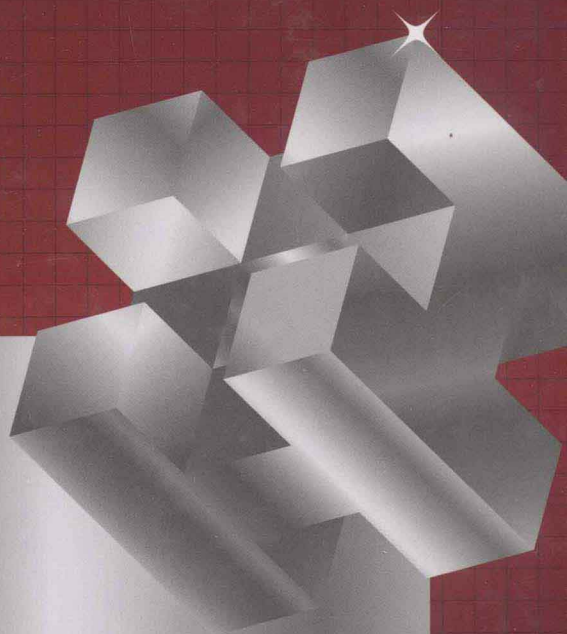


铸钢

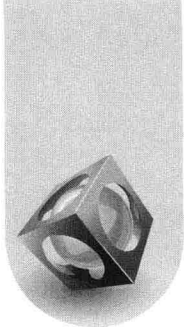
生产实用手册

ZHUGANG SHENGCHAN SHIYONG SHOUC

沈 猛 铁金艳 章 舟 编著



化学工业出版社



铸 钢

生产实用手册

ZHUGANG SHENGCHAN SHIYONG SHOUCHE

沈 猛 铁金艳 章 舟 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

铸钢生产实用手册/沈猛, 铁金艳, 章舟编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-122-17246-4

I. ①铸… II. ①沈…②铁…③章… III. ①铸钢-生产工艺-技术手册 IV. ①TG26-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 091569 号

责任编辑: 刘丽宏
责任校对: 战河红

装帧设计: 刘丽华

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: 北京云浩印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 26 $\frac{3}{4}$ 字数 668 千字 2013 年 10 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: 138.00 元

版权所有 违者必究

铸钢是铸造金属材料中能承受动力负荷最重、工作环境最恶劣的合金材料。铸钢通常指碳钢和合金钢，低合金铸钢有高强度、高韧性及较好的焊接性，而特殊高合金铸钢可满足一些特殊要求，如耐热、耐压、耐蚀、耐低温和抗磨性等。铸钢工业是 20 世纪 40 年代发展起来的，随着机械制造业的发展，铸钢件得到日益广泛的应用。特别是重大装备业的发展使大型铸钢件（单重百吨甚至几百吨）受到极大重视。与工业发达国家相比，我国铸钢业不仅要重视铸钢件产量的增长，更重要的是铸钢件性能、品种的发展。铸钢业建立稳定的铸钢件市场，面临着技术进步、管理进步、经济效益和节能环保等多方面的考验。

为适应我国铸造生产的需要，结合我国铸造企业的技术现状，为众多企业从事铸钢件生产的广大工程技术人员、管理人员以及现场的实际操作者，撰写一本以介绍铸钢件生产基础知识和指导生产应用为主的工具书，是十分必要的。鉴于此，我们编写了这本《铸钢生产实用手册》（以下简称《手册》）。

《手册》内容注重实用，以铸钢生产工艺为线索，涉及铸钢生产的主要方面：工艺、设备、原辅材料、节能环保、质量控制等，全面总结了近年来铸钢生产方面的数据、图表和应用成果，汇集了国内外在铸钢生产技术方面的成熟经验和应用实例，尤其详细介绍了当前铸钢领域正在广泛推广的节能型铸造技术，希望对读者从事铸钢生产实践提供有益的指导。

为了使《手册》内容既贴近生产实际，又具有一定的深度和广度，参加编写的人员都是从事铸钢生产实践多年的学者、企业领导和一线专家。感谢对给《手册》提供技术工艺、设备、仪表仪器、分析检测、原材料有关资料介绍、信息的诸位友人！

由于时间仓促和编者水平所限，书中难免有遗漏和不当之处，恳请读者批评指正。

编著者

1.1 铸钢的材料特点	1
1.1.1 铸钢的概念	1
1.1.2 铸钢的特点	1
1.2 铸造碳钢	2
1.2.1 碳钢的结晶过程	3
1.2.2 碳钢的铸态组织	6
1.2.3 铸造碳钢的化学成分和性能	6
1.2.4 碳钢的铸造性能	10
1.2.5 碳钢铸件热处理	15
1.3 铸造低合金钢	16
1.3.1 铸造低合金钢的主要类别	17
1.3.2 合金元素在钢中的作用	18
1.3.3 稀土元素在铸钢中的应用	21
1.3.4 铸造中、低合金钢（合金结构钢）	24
1.3.5 铸造低合金钢的铸造性能	30
1.3.6 低合金结构钢铸件的热处理	32
1.3.7 低合金高强度铸钢	33
1.4 铸造高合金钢	35
1.4.1 铸造高锰钢	35
1.4.2 铸造不锈钢	35
1.5 铸钢件常用的铸造方法	36
1.5.1 熔模精密铸造	36
1.5.2 壳型铸造	37
1.5.3 陶瓷型铸造	37
1.5.4 负压造型（V-法）	37
1.5.5 实型铸造	37
1.5.6 磁型铸造	38
1.5.7 离心铸造	38
1.5.8 压力铸造	38

1.5.9 挤压铸造	39
------------------	----

2

第2章 铸钢熔炼

40

2.1 感应电炉熔炼	40
2.1.1 简述	40
2.1.2 无芯感应电炉和原材料	41
2.1.3 酸性感应电炉炼钢工艺	44
2.1.4 碱性感应电炉炼钢工艺	45
2.1.5 中频炉炉衬筑炉工艺	46
2.1.6 中频炉炉衬使用寿命的影响因素及解决方案	48
2.1.7 中频感应电炉熔炼操作注意事项	56
2.1.8 中频感应电炉的维护保养与安全操作及事故处理	58
2.1.9 中频感应熔炼炉启动时6种故障分析及处理	60
2.1.10 中频感应熔炼炉运行中14种故障分析及处理	62
2.1.11 感应电炉熔炼实例	65
2.2 电弧炉炼钢	69
2.2.1 电弧炉冶炼与碱性电弧炉冶炼的特点	69
2.2.2 电弧炉冶炼熔化期的质量控制	70
2.2.3 电弧炉冶炼氧化期的质量控制	76
2.2.4 电弧炉冶炼还原期的质量控制	84
2.2.5 碱性电弧炉冶炼技术操作规程	104
2.3 真空感应电炉炼钢	109
2.4 电渣熔铸	110
2.4.1 电渣重熔与电渣铸造原理	110
2.4.2 电渣铸造的特点	111
2.4.3 电渣铸造的技术进展	112
2.4.4 电渣铸造用自耗电极与合成渣	113
2.4.5 等离子炉炼钢	114
2.5 钢的炉外精炼	115
2.5.1 吹氩精炼法	115
2.5.2 AOD与VOD精炼法	116
2.5.3 LF精炼法	117
2.5.4 钢包喷粉精炼法	117

3

第3章 铸钢件的工艺设计

119

3.1	工艺设计的内容与依据	119
3.2	铸造工艺方案的确定	133
3.2.1	浇注位置的确定	133
3.2.2	分型面的确定	135
3.3	铸钢件铸造工艺参数的确定	137
3.3.1	铸件的尺寸公差	138
3.3.2	机械加工余量与收缩率	139
3.3.3	最小铸出壁厚和铸出孔	141
3.3.4	起模斜度	143
3.3.5	工艺补正量、分型负数和反变形量	144
3.3.6	铸筋	149
3.4	浇注系统	153
3.4.1	铸钢件浇注系统的类型和特点	153
3.4.2	铸钢件浇注系统设计	157
3.5	冒口和出气孔的设计	162
3.5.1	冒口的设计特点	162
3.5.2	冒口的设计与计算	173
3.5.3	出气孔的设计	187
3.5.4	铸钢件凝固顺序的控制	187
3.5.5	铸钢件的冷铁设计	190
3.6	砂芯设计	192
3.6.1	芯头与定位结构的设计	192
3.6.2	砂芯负数	196
3.6.3	芯骨和砂芯的排气	196
3.6.4	芯撑	197
3.7	工艺装备设计制造	198

4

第4章 造型材料

203

4.1	水玻璃砂	203
4.1.1	型砂	203
4.1.2	铸造用水玻璃	208
4.1.3	CO ₂ 水玻璃砂	208
4.1.4	水玻璃真空置换硬化法 (VRH 法)	209
4.1.5	酯固化水玻璃自硬砂	209
4.1.6	水玻璃自硬流态自硬砂	213
4.2	树脂砂	232

4.2.1	呋喃树脂自硬砂	232
4.2.2	碱性酚醛树脂自硬砂	244
4.2.3	脲烷系树脂自硬砂	248
4.2.4	三种常用自硬砂工艺性能对比	249
4.3	涂料	251
4.3.1	涂料应具有的性能	251
4.3.2	涂料的基本组成	251
4.3.3	涂料性能测试	253
4.3.4	涂料涂敷方法	253
4.4	脱模剂	253

5

第5章 造型与制芯

255

5.1	树脂砂机械设备	255
5.1.1	混砂机	255
5.1.2	振实台	258
5.1.3	砂再生系统及设备	259
5.1.4	混砂机、落砂机操作规程	262
5.2	铸钢件生产对铸型(芯)的要求	269
5.3	常用造型方法及应用	270
5.3.1	造型(芯)前准备	270
5.3.2	黏土砂造型	270
5.3.3	CO ₂ 硬化水玻璃砂造型	275
5.3.4	酯硬化碱性酚醛树脂自硬砂造型(芯)	278
5.3.5	酯固化水玻璃自硬砂造型(芯)	279
5.3.6	呋喃树脂自硬砂造型	280
5.4	砂芯制作	281
5.5	下芯与合箱	284
5.5.1	砂芯的检验与修整	284
5.5.2	砂型检验与修整	284
5.5.3	下芯、合箱	284
5.5.4	砂型紧固	285

6

第6章 铸钢件的浇注、冷却与开箱

287

6.1	浇注前的准备	287
------------	---------------------	------------

6.1.1 钢液的充型能力	287
6.1.2 盛钢桶(浇包)	289
6.1.3 浇注前的准备工作	292
6.1.4 钢水温度的测量	292
6.2 浇注的控制	300
6.2.1 铸钢件浇注温度和浇注时间	300
6.2.2 镇静时间的确定	301
6.2.3 浇注操作要点	302
6.3 型内的冷却与开箱	302
6.3.1 铸钢件的冷却凝固过程	302
6.3.2 铸钢件的凝固时间	305
6.3.3 铸件的开箱	306

7

第7章 铸钢件的后处理

309

7.1 铸件落砂和清理的工艺过程	309
7.1.1 铸件在砂型中的停留时间	309
7.1.2 铸件落砂	309
7.2 浇冒口的切割	313
7.3 铸钢件表面清理	317
7.4 铸钢件的焊补	318
7.4.1 补焊前的准备	318
7.4.2 补焊工艺	320
7.5 铸钢件的精整	325
7.5.1 冷态矫正	325
7.5.2 局部加热矫正	325
7.5.3 火焰矫正	326
7.5.4 整体加热矫正	326
7.5.5 矫正变形常见缺陷及其防止	327
7.5.6 铸钢件精整的目的和方法	327
7.6 铸钢件的热处理	328
7.6.1 热处理的一般知识	328
7.6.2 铸钢件的退火与正火	331
7.6.3 铸钢件的淬火与回火	334
7.6.4 固溶处理	338
7.6.5 时效处理(沉淀硬化处理)、除氢处理	341
7.6.6 铸钢件的表面热处理与化学热处理	342

7.6.7 热处理的主要工艺要素	343
------------------------	-----

8

第8章 铸钢件的质量检测

345

8.1 简述	345
8.2 铸件检测内容	346
8.2.1 工序检测	349
8.2.2 铸件的形状、尺寸的检测	351
8.2.3 铸件的化学成分检验	353
8.2.4 铸钢件热处理质量检验	355
8.2.5 铸钢无损检测方法	357

9

第9章 铸钢件缺陷的分析与防止

362

9.1 砂型铸造	362
9.1.1 孔眼	363
9.1.2 表面缺陷	369
9.1.3 裂纹	372
9.1.4 偏析	373
9.1.5 晶粒粗大	374
9.1.6 夹杂物	374
9.1.7 实例	375
9.2 熔模精密铸造	379
9.2.1 铸件尺寸超差	379
9.2.2 铸件表面粗糙	384
9.2.3 表面缺陷	387
9.2.4 孔洞类	392
9.2.5 裂纹冷隔类	395
9.2.6 残缺类	397
9.2.7 夹杂类缺陷	400
9.3 消失模（实型）铸造	402
9.3.1 产生原因	402
9.3.2 防止措施	403

10

第10章 典型铸钢件生产应用实例

405

10.1	炉喉钢砖——水玻璃砂生产工艺	405
10.2	炉喉钢砖——消失模生产工艺	409
10.3	铸钢冷却壁	411

参考文献	416
------	-----

第1章

铸钢件概述

1.1 铸钢的材料特点

1.3 铸造低合金钢

1.5 铸钢件常用的铸造方法

1.2 铸造碳钢

1.4 铸造高合金钢

1.1 铸钢的材料特点

1.1.1 铸钢的概念

钢是铁与碳的合金，以铁碳状态图上看，含碳量小于2.11%的铁碳合金称为钢。由于钢具有良好的综合力学性能和物理化学性能，其强度、塑性、韧性都很高，并且具有良好的加工性能和较好的可焊性；还可以通过热处理在很大的范围内调整 and 选择性能，通过某些合金元素的加入还会得到一些耐热、耐磨、耐蚀、耐低温的特殊性能和特殊用途的专用钢，因此钢成为目前最重要的工程结构材料。

当前，钢的生产方式主要有三种。

① 把冶炼好的钢液浇注成钢锭再用轧机轧制或连铸连轧成为不同规格的板、带、棒、丝、管等型材。这是由冶金企业完成的，规模一般很大，是钢最主要的生产方式。

② 把冶炼好的钢液浇注成钢锭后，再用锻压设备去开坯锻造，使之成为机械加工的毛坯，即锻造生产。

③ 铸钢生产，把一定成分的铁碳合金，在熔炼设备中冶炼成为合格的钢液后，再浇注到已经制备好的铸型中去，冷却后得到金属制品——铸件。

把适宜浇注成型的钢称为铸钢，得到的金属制品称为铸钢件，这个过程称为铸钢生产。

由于铸钢生产既保留了钢材质上的优良性能，又充分发挥了液态成型的特点和优势，对大多数铸钢件来说，其组织是等轴晶，各向同性，不存在轧制、锻造制品的各向异性问题，并能按设计者的需要铸造出各种形状复杂的构件，因此，铸钢件在现代机械制造业有极为广泛的应用。如：在采矿和矿石加工业中大量使用耐磨性能良好的高锰钢铸件；由于有足够的强度和韧性既可靠又耐用，轧钢、锻压设备的机架、轧辊，钢厂设备上许多构件都是铸钢件；铁路和机车上的辙岔铸件、整体制动架、摇枕等。

1.1.2 铸钢的特点

与铸铁材料相比，铸钢材料具有以下特点。

① 具有较好的力学性能。铸钢材料一般具有较高的强度、塑性和韧性，因而在机械工

业中较多地用于制造承受重载荷与冲击、振动的铸件。一些合金钢还用来制造具有特殊要求(如耐磨、耐蚀、耐高温等)的铸件。

② 具有良好的焊接性能。铸钢材料一般均具有良好的焊接性能,因而可以用焊补的方法修复铸造缺陷,获得更加完美、优良的铸件。还可利用这一特点采用铸-焊结合的工艺制造结构更加复杂的大型铸件。

③ 生产成本较高。铸钢材料的铸造性能较差,工艺出品率较低,而且其熔炼过程比较复杂,对造型材料的品质要求也较高,所以铸钢件的生产成本比较高。

铸钢材料的熔炼方法受到铸造其他工序过程的制约,较多地采用三相电弧炉和感应电炉炼钢。电弧炉炼钢质量较高,且冶炼周期适中,便于组织生产;感应电炉炼钢工艺简单,而且随着废钢质量的精细化,其炼钢质量也能得到保证,多用于生产中、小铸件。以往在一些重型机器厂,常使用平炉炼钢来生产重型铸件。现在随着对环保、节能的要求越来越高,平炉的应用受到限制,而电弧炉设备也在向大型化发展,所以平炉已逐步被电弧炉所取代。随着科学技术的发展,炉外精炼技术得到了进一步的发展与推广,使钢液中的含气量和非金属夹杂物含量大大减少,为生产高强度铸钢和超高强度铸钢创造了条件。

铸钢主要包括铸造碳钢、铸造低合金钢和铸造高合金钢。

1.2 铸造碳钢

铸造碳钢是铸钢材料的基础。在工业生产中,碳钢铸件在重量方面占铸钢件应用的近70%,是一种量大面广的钢种。

铸造碳钢是以碳为主加合金元素的钢种,其含碳量为0.10%~0.60%,属于亚共析钢。其中含碳量小于0.20%的属于低碳铸钢,含碳量在0.20%~0.50%的属于中碳铸钢,含碳量大于0.50%的属于高碳铸钢。

铸造碳钢中的化学元素除铁、碳外,主要还包括硅、锰、磷和硫。其中起主要作用的是碳,它直接影响钢的金相组织和力学性能;硅、锰在一定程度上对钢起强化作用。但在铸造碳钢的规格范围内,硅、锰对力学性能的影响不显著,不过,它们作为脱氧剂在钢中起到脱氧的作用,可以降低氧的有害影响,锰还可以通过与硫化合而消除硫的有害作用,所以硅和锰是钢中的有益元素;磷、硫是钢中的有害元素,降低钢的力学性能,而且硫易促使铸钢件产生热裂,磷使钢的韧性降低,促使铸钢件产生冷裂,所以其含量越低越好。

此外,钢中还或多或少地存在一些气体和非金属夹杂物。它们对钢的性能都是有害的。钢中的气体主要是氢、氧和氮。它们溶解在钢液中,浇注以后在铸件的冷却、凝固过程中,它们或直接析出或通过化学反应产生气体,在铸件中形成气孔。钢中溶解的少量氢、氧还会显著降低钢的塑性和韧性;少量的氮对钢有细化晶粒、提高力学性能的作用,但当含氮量增多时,它也显著降低钢的塑性和冲击韧性。

根据现行的铸造碳钢国家标准 GB/T 11352—2009,铸造碳钢按其力学性能的不同要求规定出5种牌号(见表1-1)。牌号中“ZG”表示铸钢,紧随其后的一组数字表示最小屈服强度,横线后的一组数字表示最小抗拉强度。如ZG 230-450,表示该种牌号碳钢的最小屈服强度是230MPa,最小抗拉强度是450MPa。

表 1-1 一般工程用铸造碳钢的力学性能

铸钢牌号	最 小 值					
	屈服强度 θ_s 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 θ_b /MPa	伸长率 δ /%	断面收缩率 ψ /%	冲击韧度	
					A_{kv} /J	α_K /J · cm ⁻²
ZG200-400	200	400	25	40	30	60
ZG230-450	230	450	22	32	25	45
ZG270-500	270	500	18	25	22	35
ZG310-570	310	570	15	21	15	30
ZG340-640	340	640	10	18	10	20

注：A_{kv}—冲击吸收功（V形缺口试样）。α_K—冲击韧度（U形缺口试样）。

在标准中对各牌号铸造碳钢的化学成分要求只给出了上限值，这说明对碳钢材料的品质要求已经从偏重于化学成分转向偏重于力学性能。由于化学成分对碳钢的力学性能存在必然的影响，而且碳、硅、锰含量过低时碳钢也有过氧化的危险，所以建议在实际生产中仍然要确定一个合理的下限值。表 1-2 中所给出的下限值供参考（上限与 GB/T 11352—2009 的要求相同）。

表 1-2 一般工程用铸造碳钢的化学成分

单位：%

铸钢牌号	C	Si	Mn	S,P≤	残余元素≤																	
					Ni	Cr	Cu	Mo	V													
ZG200-400	0.10~0.20	0.20~0.50	0.45~0.80	0.035	0.30	0.35	0.30	0.20	0.05													
ZG230-450	0.20~0.30		0.50~0.90																			
ZG270-500	0.30~0.40																					
ZG310-570	0.40~0.50	0.25~0.60																				
ZG340-640	0.50~0.60																					

注：1. 对上限每减少 C 0.01%，允许增加 Mn 0.04%。

2. 残余元素总含量≤1.00%。

与铸铁相比，铸造碳钢的铸造性能较差。由于碳钢的熔点较高，结晶温度区间较宽，收缩量较大，所以铸造碳钢的流动性比较低，钢液容易氧化，形成夹杂，铸件易产生热裂和冷裂，缩孔和缩松的倾向以及产生气孔的可能性都比较大。铸造碳钢的主要性能特点和应用情况见表 1-3。

值得注意的是，铸造碳钢是在自然温度条件和不太高的加热温度条件下使用的钢种，其正常使用的温度范围在－40～400℃。当环境温度低于－40℃时，钢的韧性大幅度降低，易使铸件产生裂纹；当环境温度超过 400℃时，钢的强度会下降，即发生“软化”。

1.2.1 碳钢的结晶过程

含碳量低于 2.11%的 Fe-C 二元合金称为钢，高于 2.11%的称为铸铁。在钢中含碳量为 0.77%的钢称为共析钢，低于 0.77%的钢称为亚共析钢，高于 0.77%的钢称为过共析钢。

（1）共析钢的结晶过程 如图 1-1 为不同含碳量的钢在状态图上的位置。合金 I：当冷却到点 1 的温度时，由液相中析出 γ 体，到点 2 的温度时结晶完了而形成单一的 γ 体，这个

表 1-3 铸造碳钢的性能特点与应用

牌号	主要性能特点	应用举例
ZG200-400	有良好的塑性、韧性和焊接性	用于受力不大,要求韧性的各种机械零件,如机座、变速箱壳等
ZG230-450	有一定的强度和较好的塑性、韧性,良好的焊接性,被切削性尚好	用于受力不大,要求韧性的各种机械零件,如砧座、轴承盖、外壳、犁柱、底板、阀体等
ZG270-500	有较好的塑性和强度,良好的铸造性能,焊接性能尚好	应用广泛,用于轧钢机机架、轴承座、连杆、箱体、横梁、曲拐、缸体等
ZG310-570	强度和被切削性良好	用于制造负荷较高的耐磨零件,如辊子、缸体、制动轮、大齿轮等
ZG340-640	有较高的强度、硬度和耐磨性,被切削性中等,焊接性较差,流动性好,裂纹敏感性较差	用作齿轮、棘轮、叉头 etc

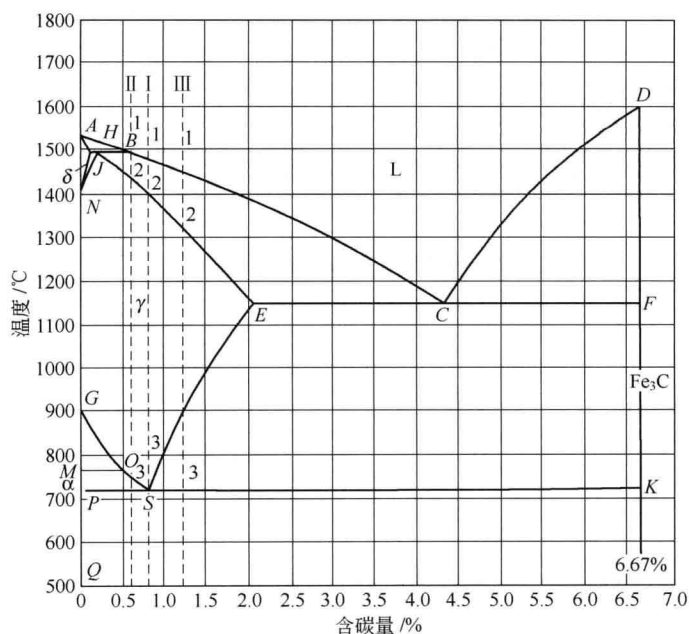


图 1-1 铁-碳状态图,不同含碳量的钢在图上的位置

I—共析钢; II—亚共析钢; III—过共析钢

过程称为一次结晶,当 γ 体冷却 727°C 时发生共析转化,形成珠光体,这个过程为二次结晶。在常温下共析钢的金相组织是单一的珠光体。

(2) 亚共析钢的结晶过程 对于 C 含量在 $0.1\% \sim 0.5\%$ 范围的所有亚共析钢,在冷却过程中当温度降到液相线温度时就开始析出 δ 体,随着 δ 体的析出,剩余液相的含碳量沿 AB 线逐渐增加,直到温度降到 HJB 线温度 (1495°C) 时,最后剩下的液相的含碳量已增加到 B 点成分,这时发生包晶转化,生成 γ 体,又分为 3 种情况:

第一种是 C 含量正好是 J 点成分 ($0.16\%\text{C}$) 的钢,包晶转化的结果形成单一的奥氏体;

第二种是 C 含量低于 J 点成分 ($<0.16\%\text{C}$) 的钢,包晶转化的结果有剩余的 δ 体,因此形成 $\delta + \gamma$;

第三种是 C 含量高于 J 点成分 ($>0.16\%\text{C}$) 的钢,包晶转化的结果有剩余的液相,因

此形成 γ +液相。

不论哪一种情况，当温度继续下降到 NJ 线或 JE 线以下的温度时都转变成单一的奥氏体。

对于 C 含量在 0.51%~0.77% 范围内的所有的亚共析钢（例如图 1-1 中的合金 II），在冷却过程中，不发生包晶转化，结晶过程中在点 1 到点 2 的温度区间中析出奥氏体。当冷却到点 2 以下的温度时形成单一的奥氏体。

上述过程通常称为一次结晶过程。

对于所有的亚共析钢来说，当一次结晶中生成的奥氏体继续冷却直到达到 GS 线温度（例如图 1-1 中合金 II 的点 3）时开始析出铁素体，由于铁素体含碳量低，因此，随着铁素体的析出，剩余的奥氏体中含碳量沿 GS 线逐渐增加，当温度下降至 PSK 线（727℃）温度时，最后剩下的奥氏体的含碳量就达到共析成分（0.77%C），这时就发生共析转化，奥氏体转化为珠光体，这个过程称为二次结晶过程。这样，亚共析钢的金相组织就是由铁素体和珠光体组成的。

（3）过共析钢的结晶过程 如图 1-1 中的合金 III：它的一次结晶过程与共析钢相同，在点 2 以下的温度形成单一的奥氏体。而当冷却到点 3 的温度时，则从奥氏体中析出渗碳体（这种在二次结晶过程中析出的渗碳体称为二次渗碳体，以 C_{II} 表示，以与在过共晶白口铸铁中从液相中直接析出的一次渗碳体 C_I 相区别），由于渗碳体的含碳量高，因而，随着渗碳体的析出，剩下奥氏体中的含碳量沿 ES 线逐渐减少，直到当温度降到点 3（727℃）时，最后剩下的奥氏体的含碳量就降低到共析成分（0.77%C），发生共析转化，奥氏体转变为珠光体，这是二次结晶过程。这样，过共析钢的金相组织就是由珠光体和二次渗碳体组成的。

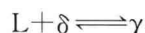
铸造用的碳钢绝大部分是亚共析钢，其含碳量范围一般在 0.12%~0.62%C，其金相组织是具有不同比例的铁素体和珠光体。含碳较低的钢中铁素体较多，珠光体较少；含碳较高的钢中铁素体较少，珠光体较多。

如图 1-1 铁碳状态图中不同含碳量的钢在图上的位置。碳钢是按 $Fe-Fe_3C$ 系结晶（高碳相是 Fe_3C ）。而铸铁根据其化学成分和冷却速度等条件不同可按照 $Fe-Fe_3C$ 系结晶（生成白口铁），也可能按照 $Fe-C$ 系结晶（高碳相是石墨，生成灰口铁）。其中， α 铁：它在 912℃ 以下具有体心立方晶格； γ 铁：在 912~1394℃ 之间具有面心立方晶格； δ 铁：在 1394~1538℃ 之间又具有体心立方晶格。铁素体：在 α 铁中溶解少量碳形成固溶体，以 α 或 F 表示，碳在 α 体中最大溶解度随温度而变，在 727℃ 时的溶解度最大约 0.0218%C。它具有较低的强度和硬度，较高的塑性和韧性，是具有铁磁性的相，在加热到 770℃ 以上失去磁性；高温铁素体：在 δ 铁中溶解有少量碳所形成的固液体，以 δ 表示，碳在 δ 体中最大的溶解度也随着温度而变化，在 1495℃ 时溶解最多约 0.09% C；奥氏体：在 γ （或 A ）中的最大溶解度也随着温度而变化，在 1148℃ 时溶解得最多，其值为 2.11%C，从溶解碳的能力来看， γ 要比 δ 和 α 大，这是因为它具有面心晶格的 γ 铁的晶格空隙尺寸比具有体心晶格的 α 铁的晶格间隙尺寸大得多，能够容纳更多的碳原子。 γ 是一个高温相，在室温下并不存在（指在 $Fe-C$ 二元合金中的情况，加其他合金元素除外）， γ 具有很高塑性和韧性，没有铁磁性；渗碳体是铁与碳形成的化合物，它的化学式为 Fe_3C ，具有复杂的晶格， Fe_3C 是一个介稳定化合物， $Fe_3C+3Fe+C_{石墨}$ ，可以分解为铁素体和石墨，这种趋势始终是存在的，只不过在室温下，原子（ Fe 、 C 原子）的活动能力太小，不能进行扩散过程，不能进行这种分解，只

有当给它创造一定的温度条件 ($>600^{\circ}\text{C}$ 以上) 时, 原子具有了活动能力, 这个分解过程才有可能实现, 以 C 表示或 Fe_3C 表示, 具有很高的硬度, 但它的塑性接近于零, 是一种硬而脆的相; 珠光体: 铁素体与渗碳体的共析混合物通常是相互间隔的片状 (α 与 C 片互相间隔着), 具有珍珠光泽, 以 P 表示, 共析转化, 在钢与铸铁中都会发生。

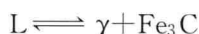
从 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 系状态图中可知这个过程是由三个基本部分所组成: 在 HJB 线上进行包晶转化; 在 ECF 线上进行共晶转化; 在 PSK 线上进行共析转化。

包晶转化: C 含量为 0.51% 的液相与 C 含量为 0.09% 的 δ 固溶体在 1495°C 温度下发生相互作用而生成 C 含量为 0.16% 的奥氏体。其反应式为:



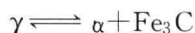
此反应在 $\text{C}\% = 0.09\% \sim 0.51\%$ 的钢中才会发生。

共晶转化: C 含量为 4.3% 的液相在 1148°C 温度下同时结晶为 $\text{C}\% = 2.11\%$ 的奥氏体与渗碳体的混合物, 其反应式为:



所形成的 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 的混合物称莱氏体, 以 Le 表示, 共晶反应只有在铸铁中才能发生。

共析转化: $0.77\% \text{C}$ 的 γ 在 727°C 温度下等温分解为 $0.0218\% \text{C}$ 的铁素体和渗碳体的二相混合物, 其反应式为:



共析转化在钢与铸铁中都会发生。

1.2.2 碳钢的铸态组织

特点: 铸钢件由于冷却缓慢而不均匀, 形状尺寸复杂, 没有压力加工过程, 故组织较粗大, 极易产生偏析夹杂, 对力学性能, 特别是对韧性、塑性影响很大, 因而铸钢件的生产对其冶金和铸造质量提出了较高的要求, 且常常用热处理和合金化等方法来改善组织和性能。

铸态下常见组织: 一般指砂型铸造条件下碳钢的常见组织, 现将它们形成原因、检验方法以及后果简述如下。

粗晶组织 (晶粒粗大): 铸件壁厚较大, 凝固冷却较慢。金相显微镜观察。

条状组织 (魏氏组织): 网状组织, 铸件壁厚较大而且厚薄不均匀, 凝固冷却慢而不均匀, 成分偏析。金相显微镜观察。至于出现的树枝状组织, 用低倍放大镜即可观察。

柱状组织: 由于凝固冷却的方向性, 使结晶在其散热方向长大较快。金相显微镜观察。

上述铸态下的各种组织可降低力学性能, 尤其是降低韧性、塑性, 严重时形成疏松。

凝固速度的影响: 凝固速度对碳钢的铸态组织有着很大影响, 可以影响树枝状结晶的枝晶尺寸与枝间距离; 可以影响其致密度; 可以影响其氧化夹杂物数量与尺寸大小和硫化夹杂物数量与尺寸, 从而影响力学性能, 特别是 α_K 、 σ_b 。

1.2.3 铸造碳钢的化学成分和性能

铸造碳钢的化学成分见表 1-2。铸造碳钢的物理力学性能见表 1-1。铸件在使用过程中必然承受静载负荷和动载负荷, 或两种负荷都要承受, 故钢铸件的力学性能也可分为静力性能和动力性能, 常确定的是 8 种力学性能。

① 静力强度 (抗拉强度极限, 比例极限和其他);

② 塑性 (伸长率和断面收缩率);