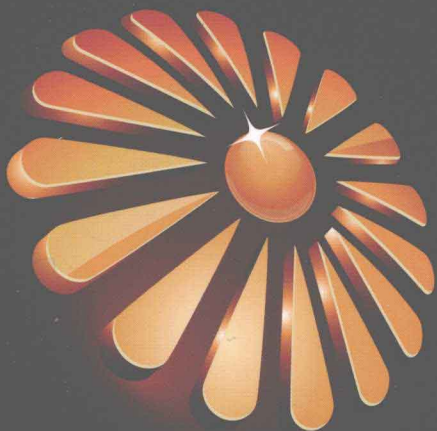


碳钢、 低合金钢 铸件生产 及应用实例

TANGANG DIHEJINGANG
ZHUJIAN SHENGCHAN
JI YINGYONGSHILI

童军 邓宏运 章舟 张广贺 编著



冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

碳钢、低合金钢铸件生产及应用实例/童军等编著.
北京:化学工业出版社,2012.12
ISBN 978-7-122-15535-1

I. ①碳… II. ①童… III. ①碳素钢-铸件-铸造
②低合金钢-铸件-铸造 IV. ①TG26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 241935 号

责任编辑:刘丽宏
责任校对:宋 夏

文字编辑:余纪军
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:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张12½ 字数248千字 2013年1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:48.00 元
京化广临字 2012—28 号

版权所有 违者必究

为了帮助从事碳钢、低合金钢铸件生产、研发、管理的人员掌握高锰钢铸件生产的相关知识和技能，指导他们的生产和实践，我们编写了本书。

本书全面介绍了碳钢、低合金钢的组织、性能特点和铸件生产各环节要求以及典型应用实例。尤其是书中结合作者多年来的生产实践，详细阐述了碳钢、低合金钢电弧炉熔炼、感应电炉熔炼的技术规范和质量控制措施，列举大量生产应用实例，说明了碳钢、低合金钢铸件热处理和铸件生产的注意事项和设计技巧。内容紧密结合碳钢、低合金钢生产实践，有助于读者全面学习碳钢、低合金钢铸件生产工艺知识，提高解决实际问题的能力。

本书主要由童军、邓宏运、章舟、张广贺编写。第5章由西安工业大学王春景、西安理工大学孔令清撰写，全书的撰写得到了西安新东铸业有限公司雷百战高级工程师、西安机电研究所所长颜文非、沈阳恒丰实业有限公司孟昌辉副总经理、郑州君成铸造材料有限公司张晓军总经理的大力帮助，铸造工程师杂志社的编审等诸友人大力支持编辑本书，铸造技术杂志社李晓霞编辑、中冶陕压重工设备有限公司靖林对全书的文字及图表进行计算机标准化处理，同时对西安科技大学、西安工业大学、西安理工大学、铸造工程师杂志社、西安机电研究所、西安中电电炉有限公司、西安泉特科技有限公司、广益矿产集团有限公司、郑州翔宇铸造材料有限公司、长沙环宇耐火材料有限公司、洛阳凯林铸材有限公司、洛阳宝珠砂铸材有限公司等单位在本书出版过程的支持，深表感谢。

本书供从事碳钢、低合金钢铸件生产的企业及铸造工作者参考。

由于编者的水平所限，书中不足在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

1 第1章 铸造碳钢 1

1.1 碳钢的结晶过程和铸态组织	1
1.1.1 碳钢的结晶过程	1
1.1.2 碳钢的铸态组织	4
1.2 铸造碳钢的化学成分和性能	4
1.3 碳钢的铸造性能	9
1.3.1 流动性	10
1.3.2 收缩、缩孔和缩松	11
1.3.3 热裂和冷裂	13
1.4 碳钢铸件热处理	15
1.4.1 热处理的特点	15
1.4.2 铸钢件热处理状态的名称、定义及代号	17

2 第2章 铸造低合金钢 19

2.1 铸造低合金钢概述	19
2.1.1 铸造合金钢的分类	19
2.1.2 合金元素在钢中作用	20
2.1.3 稀土元素在铸钢中的应用	24
2.1.4 铸造中、低合金钢(合金结构钢)	27
2.2 低合金钢的铸造性能	34
2.3 低合金结构钢铸件的热处理	36

3 第3章 中高碳低中合金抗磨铸钢 39

3.1 应用情况	39
----------------	----

3.1.1	高碳低合金贝氏体抗磨钢的研制与应用	39
3.1.2	新型超高强度奥-贝钢及其接触疲劳磨损特性	47
3.1.3	高碳中铬合金钢球磨机衬板	50
3.1.4	低合金空冷马氏体/贝氏体钢颚板的研制	54
3.1.5	低合金钢衬板在小型球磨机中的应用	59
3.1.6	低合金钢冲击磨料磨损性能	60
3.1.7	两段淬火生产中碳低合金钢衬板	62
3.1.8	ZG40CrMnSiMoRe 耐磨钢衬板	65
3.1.9	中碳多元合金钢衬板	68
3.1.10	ZG40CrMnSi2MoV 在球磨机衬板上的应用	72
3.1.11	利用钢铁切屑熔铸中碳多元低合金钢铸锻磨球和衬板	76
3.1.12	一种新型铸态中锰钢	77
3.1.13	奥氏体中锰钢及其在齿板上的应用	79
3.2	研磨机衬板用铸造合金的合理选用	84

4

第4章 碳钢及低合金钢的感应电炉熔炼

87

4.1	概述	87
4.2	铸造碳钢、低合金钢熔炼用感应电炉和原材料	89
4.2.1	无芯感应电炉	89
4.2.2	熔炼用原材料	90
4.3	酸性感应电炉炼钢工艺	93
4.4	碱性感应电炉炼钢工艺	95
4.5	中频炉炉衬的筑炉工艺	97
4.5.1	筑炉用石英砂处理和黏结剂的选用	97
4.5.2	筑炉材料的选用及配比	97
4.5.3	炉衬的打结	98
4.5.4	烘烤与烧结规范	99
4.6	影响熔炼铸钢中频炉炉衬使用寿命的因素及解决方案	99
4.6.1	耐火材料的材质对炉衬使用寿命的影响	99
4.6.2	炉衬的制作工艺对炉衬使用寿命的影响	101
4.6.3	炉衬容量对炉衬使用寿命的影响	105
4.6.4	熔炼工艺对炉衬使用寿命的影响	106
4.7	中频感应电炉的试炉及熔炼操作注意的问题	110
4.8	中频感应电炉的维护保养与安全操作及事故处理	112

4.9	中频感应熔炼炉启动时 6 种故障分析及处理	114
4.10	中频感应熔炼炉运行中 14 种故障处理	117
4.11	感应电炉熔炼实例	121
4.11.1	ZG45 的熔炼	121
4.11.2	ZG35CrMnSi 的熔炼	123
4.11.3	ZG1Cr18Ni9Ti 的熔炼	124

5

第 5 章 碳钢及低合金钢的电弧炉冶炼

126

5.1	电弧炉冶炼与碱性电弧炉冶炼的特点	126
5.1.1	电弧炉冶炼工艺特点	126
5.1.2	碱性电弧炉冶炼的工艺特点	127
5.2	电弧炉冶炼熔化期的质量控制	128
5.2.1	熔化期的作业程序及质量控制	129
5.2.2	熔化期的作业技巧	133
5.2.3	熔化期作业异常情况的分析及处理方法	134
5.3	电弧炉冶炼氧化期的质量控制	136
5.3.1	氧化期的作业程序及关键	136
5.3.2	氧化期的作业	139
5.3.3	氧化期作业异常情况的分析及处理技术	143
5.4	电弧炉冶炼还原期的质量控制	146
5.4.1	还原期白渣法作业关键程序	146
5.4.2	还原期作业技巧	148
5.4.3	脱硫作业技术	150
5.4.4	薄渣吹氧操作	151
5.4.5	还原期操作注意事项	151
5.4.6	降低钢中夹杂物的途径	154
5.4.7	钢的合金化技术	154
5.4.8	冶炼作业对合金元素回收率的影响	158
5.4.9	还原期控制化学成分的方法	159
5.4.10	电弧炉冶炼还原期异常情况分析及处理方法	160
5.4.11	电弧炉冶炼还原期质量事故分析及处理方法	163
5.5	碱性电弧炉冶炼技术操作规程	170
5.5.1	成品钢的技术规范	170
5.5.2	原材料的技术规范	171
5.5.3	补炉	174

5.5.4	配料	174
5.5.5	装料和送电	174
5.5.6	碳素钢、低合金钢冶炼要点	175
5.5.7	4Cr9Si2 氧化法冶炼规程	176
5.5.8	铬锰氮钢氧化法冶炼规程	176

6

第 6 章 碳钢及低合金钢铸件缺陷及防止

178

6.1	孔眼	178
6.1.1	气孔	178
6.1.2	砂孔、渣孔	180
6.1.3	缩孔、缩松	181
6.2	表面缺陷	181
6.2.1	粘砂	182
6.2.2	夹砂、结疤	182
6.2.3	皱纹	183
6.2.4	冷隔、浇不足	184
6.3	裂纹	184
6.3.1	热裂纹	184
6.3.2	冷裂纹	185
6.3.3	温裂纹	185
6.4	偏析	186
6.4.1	产生原因	186
6.4.2	偏析的检验方法	186
6.4.3	防止偏析的方法	187
6.5	晶粒粗大	187
6.6	夹杂物	187
6.6.1	特征	188
6.6.2	检验方法	188
6.6.3	防止夹杂物的方法	188

参考文献

189

第1章

铸造碳钢

1.1 碳钢的结晶过程和铸态组织

1.2 铸造碳钢的化学成分和性能

1.3 碳钢的铸造性能

1.4 碳钢铸件热处理

1.1 碳钢的结晶过程和铸态组织

1.1.1 碳钢的结晶过程

含碳量低于 2.06% 的 Fe-C 二元合金称为钢，高于 2.06% 的称为铸铁。在钢中含碳量为 0.8% 的钢称为共析钢，低于 0.8% 的钢称为亚共析钢，高于 0.8% 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，这个过程称为一次结晶，当 γ 体冷却 723℃ 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%~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 (1493℃) 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%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 ($<0.16\%C$) 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 ($>0.16\%C$) 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%~0.8% 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（723℃）温度时，最后剩下的奥氏体的含碳量就达到共析成分（0.8% 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（723℃）时，最后剩下的奥氏体的含碳量就降低到共析成分（0.8% 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-Fe₃C 系结晶（高碳相是 Fe₃C）。而铸铁根据其化学成分和冷却速度等条件不同可按照 Fe-Fe₃C 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 910℃ 以下具有体心立方晶格； γ 铁：在 910~1390℃ 之间具有面心立方晶格； δ 铁：在 1390~1534℃ 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 723℃ 时的溶解度最大约 0.02% 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 768℃ 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溶体，以 δ 表示，碳在 δ 体中最大的溶解度也随着温度而变化，在 1493℃ 时溶解最多约 0.10% C；奥氏体：在 γ （或 A）中的最大溶解度也随着温度而变化，在 1147℃ 时溶解得最多，其值为 2.06% 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

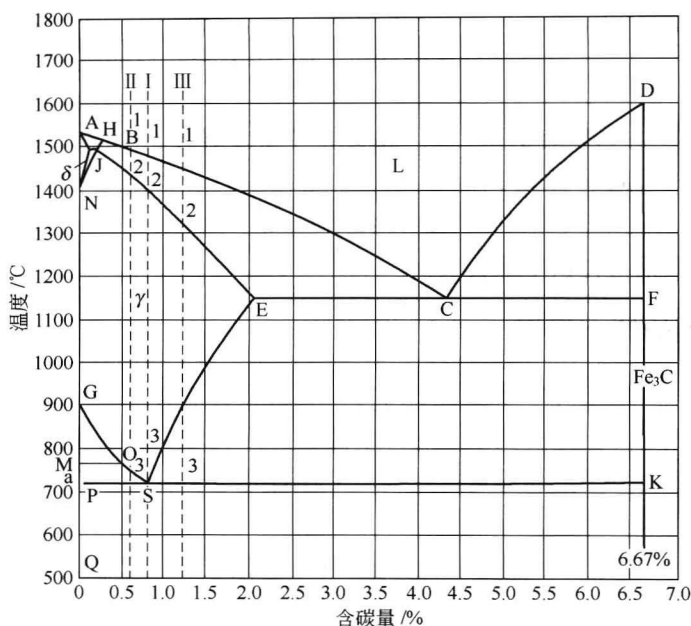


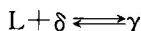
图 1-1 铁-碳状态图，不同含碳量的钢在图上位置

I — 共析钢；II — 亚共析钢；III — 过共析钢

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， $\text{Fe}_3\text{C} + 3\text{Fe} + \text{C}_{\text{石墨}}$ ，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。

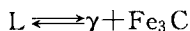
从 Fe- Fe_3C 系状态图中可知这个过程是由三个基本部分所组成：在 HJB 线上进行包晶转化；在 ECF 线上进行共晶转化；在 PSK 线上进行共析转化。

包晶转化：C 含量为 0.51% 的液相与 C 含量为 0.10% 的 δ 固深体在 1493°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：



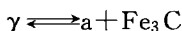
此反应在 $\text{C}\% = 0.10\% \sim 0.51\%$ 的钢中才会发生。

共晶转化：C 含量为 4.3% 的液相在 1147°C 温度下同时结晶为 $\text{C}\% = 2.06\%$ 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：0.8%C 的 γ 在 723℃ 温度下等温分解为 0.02%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。

1.1.2 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，金相显微观察。

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 、 b 。

1.2 铸造碳钢的化学成分和性能

铸造碳钢的化学成分见表 1-1。铸造碳钢的物理力学性能见表 1-2。铸件在使用过程中必须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（延伸率和断面收缩率）

表 1-1 铸造碳钢的化学成分

牌号	元素最高含量/%															
	C	Si	Mn	S	P	残余元素										
						Ni	Cr	Cu	Mo	V						
ZG 200-400	0.20	0.50	0.80	0.04	0.04	0.30	0.35	0.30	0.20	0.05						
ZG 230-450	0.30		0.90													
ZG 270-500	0.40															
ZG 310-570	0.50															
ZG 340-640	0.60															

注：1. 对上限减少 0.01% 的碳，允许增加 0.04% 的锰。对 ZG200-400 的锰最高至 1.00%，其余四个牌号锰高至 1.20%。

2. 残余元素总量不超过 1.00%，如需方无要求，残余元素可不进行分析。

3. 当使用酸性炉生产铸件时，S、P 含量由供需双方商定。

表 1-2 铸造碳钢的力学性能

牌号	最小值					
	屈服强度 /(N/mm ² , kgf/mm ²)	抗拉强度 /(N/mm ² , kgf/mm ²)	延伸率 /%	根据合同选择		
				收缩率 /%	冲击韧性	
					A _{kv} /J	α _k /(J/cm ²)
ZG200-400	200 (20.4)	400 (40.8)	25	40	30	60
ZG230-450	230 (23.5)	450 (45.9)	22	32	25	45
ZG270-500	270 (27.6)	500 (51.0)	18	25	22	35
ZG310-570	310 (31.6)	570 (58.2)	15	21	15	30
ZG340-640	340 (34.6)	640 (65.4)	10	18	10	20

注：1. 表中 A_{kv}—冲击吸收功（V 型）；α_k—冲击韧性（U 型）。

2. 表中所列的各牌号性能，适应于厚度为 100mm 以下的铸件，当铸件厚度超过 100mm 时，表中规定的屈服强度仅供设计使用。

③ 韧性（冲击韧性，即动负荷下的韧性）

④ 硬度（也可视为物理性能）

⑤ 抗磨性（有时也归物理性能）

⑥ 疲劳强度（在重复交变的负荷下）

⑦ 循环韧性（动负荷下）

⑧ 特殊性能（抗蠕变、耐腐蚀、耐热等）

同时还必须具有一系列的性能，除力学性能外，尚有化学和物理性能，特殊性

能（如抗穿甲性等），将这些性能综合为一起称“使用性能”。

铸造碳钢结晶温度及线收缩见表 1-3。ZG35 的高温力学性能见表 1-4，铸造碳钢的力学性能、应用见表 1-5。

表 1-3 铸造碳钢结晶温度及线收缩

钢号(C%)	液相线/℃	固相线/℃	自由线收缩/%	阻碍线收缩/%
ZG20-25(0.15~0.25)	1525	1490		
ZG30-35(0.25~0.40)	1520	1460	1.8~2.2	1.4~1.8
ZG45(0.40~0.50)	1510	1430		

表 1-4 ZG35 的高温力学性能（含碳量为 0.3%~0.4%的碳钢的高温力学性能）

温度/℃		20	100	200	300	400	450	500
kgf/mm ² (MPa)		43~49	41~46	37~43	38~46	23~35		
		(430~490)	(410~460)	(370~430)	(380~460)	(230~350)		
kgf/mm ² (MPa)		21~26	20~23	17~20	16~20	14~19		
		(210~260)	(200~230)	(170~200)	(160~200)	(140~190)		
		22~23	15~27	16~28	15~28	13~26		
kgf/mm ² (J/cm ²)			9~13 (90~130)	10~16 (100~160)	7~10 (70~100)	6~8 (60~80)		
蠕变极限 /(kgf/mm ²) (MPa)	/1000000					11(110)		8(80)
	/10000000					7(70)		3.6(36)
持久强度 /(kgf/mm ²) (MPa)	/10000					19.5(195)	12.5(125)	7(70)
	/100000					15.3(153)	9.5(95)	4.8(48)

表 1-5 铸造碳钢的力学性能、应用

钢号	热处理	kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	%	kgf·m/mm ²	应用举例
ZG15	退火或正火	20	40	25	40	6.0	机座、变速机壳罩、可焊性良好
ZG25	退火或正火	24	45	20	42	4.5	轧钢机架车辆摇枕侧架、锤座、可焊性良好
ZG35	退火或正火	28	50	16	25	3.5	水压机工作缸、横梁、蒸汽锤、车辆车钩，可焊性尚可
ZG45	退火或正火	32	58	12	20	3.0	联轴器、齿轮、汽缸、轴、机架等
ZG55	退火或正火	35	65	10	18	2.0	车轮、齿轮等

铸造碳钢的基体组织、化学成分决定它的力学性能，同时在不同的使用温度下（常温、高温）也影响它的力学性能。

(1) 铸钢的组织对力学性能的影响

铸钢内部的基体组织（结构）是影响其力学性能的基本因素，其力学性能很大程度上取决于晶粒的大小（其他条件一样），其强度极限和屈服点都随着晶粒的增

大而降低，这是由于在细小晶粒的组织中铸件难以滑移，在晶粒边界上有扭曲的和方向不一的晶格及结晶间的单纯极端联系，细小晶粒具有较大的冲击韧性，加入合金元素不但对加固晶粒有好处，同时也对扭曲晶粒边界上的晶格有着良好的影响，且改变结晶的性质，从而改变了晶粒的大小，分散的加入物（根据孕育原理而起作用）即加入一些分散度高的元素便能起着细化晶粒的作用。

钢的塑性取决于滑移面的多少，滑移面愈多，则延伸率（%）和断面收缩率（%）愈大，即钢的塑性随着其晶粒的增大而增高。

铸造碳钢基体组织与力学性能的关系见表 1-6。

表 1-6 铸造碳钢基体组织和力学性能的关系

基体组织	强度极限/(kgf/mm ²)	延伸率/%
纯铁体	23	40
珠光杯	53	20
索氏体	70	15

钢的硬度、耐磨性、冲击韧性、疲劳强度（耐抗性）循环韧性，在很大程度上取决于组织中具有哪些组成物，及其中哪一种占多数，如奥氏体，纯铁体的钢比素氏体或珠光体或马氏体的钢具有较高的冲击韧性，塑性和韧性是两种不同力学性能，有时它们之间有粗略的关系，一般地说，影响铸钢冲击韧性的因素也就能影响其塑性的因素。

对在重复交变的应力作用下工作的铸钢件来说，最好其基体中含有最少量的非金属夹杂物的索氏体。

循环韧性与其基体组织的关系很大，珠光体的钢具有最大的循环韧性，而其内部组织含有球状组织的素氏体、屈氏体，即具有最小的循环韧性。

钢的硬度和耐磨性随着其组织内部化合碳（Fe₃C）的增加而增高，钢的耐磨性在于耐磨的条件下与其组织有着较复杂的关系。

总之，在使用时，不同的力学性能要求，选择相应基体组织的铸钢，使矛盾得到综合和统一。

（2）铸造碳钢化学成分对力学性能的影响

钢的化学成分对钢铸件的力学性能的影响是很大的，改变其化学成分，就可以改变钢铸件的组织，从而改变其力学性能。

铸造碳钢中其主要化学成分的影响如下。

① 碳：对铸钢的力学性能影响最大，随着含碳量的增加，铸钢的强度会提高，而塑性则降低，而抗拉强度极限则随 C 含量的增加而增加，但延伸率则随 C 含量的增加而下降。

硬度 HB 随着 C 含量的增加而增加，冲击韧性（%）和比值则随 C 含量的上升而下降。

钢的含碳量，对耐磨性、耐久性和循环性的影响非常复杂，这是由于影响它们各性能的各种因素，随着 C 含量的变化而引起不同的变化，彼此交织在一起，故其相互作用产生的后果也比较复杂。

② 锰：铸造碳钢中随着 Mn 的含量改变，可以在很大范围内改变其力学性能，不仅是 Mn 的绝对含量（值），而且它熔化过程中的变化的特性对钢的力学性能都有影响。

随着 Mn% 的增加，当稍微降低一些钢的塑性和韧性时，就可以使强度极限和硬度有所提高，Mn 含量对屈服极限的影响更为显著，随着 Mn% 从 0.50% 增至 1.20% 其屈服点极限值呈直线上升。

Mn 的含量对铸钢的其他力学性能的影响很为复杂，Mn 是通过它对其他因素的复杂作用（对基体组织、晶粒度，对有害元素的中和作用，钢中非金属夹杂物多少及其他等）而影响力学性能，所以 Mn% 在铸钢中影响是多方面，多因素的综合影响。

③ 硅：在铸钢中当作脱氧剂来运用，在 0.4% 的范围内改变 Si 的含量，对力学性能没有多大的单独影响，如果 Si% 降低到很小的含量，就会使钢不能充分地脱氧，从而引起氧化物夹杂的存在间接地降低了某些力学性能，当 Si% > 0.4% 时它的影响很显著；增加 Si% 的含量能提高钢的强度，弹性及其他性能。

④ 硫：在铸钢中几乎对所有力学性能都起不良的影响，尤其是对钢的塑性，硫使钢产生红脆性，S% 达到 0.02% ~ 0.03% S 时钢就趋向红脆，因为，S 形成非金属夹杂物，而起很不良的影响，尽管 Mn 及其他一些元素能降低 S 的含量，形成 MnS 作为结晶中心或入渣，但钢中的非金属夹杂物总是随着硫含量的增加而对钢的力学性能起有害的作用。

⑤ 磷：P 对钢的塑性和韧性起坏的影响，它使钢具有冷脆性提高硬度，随着 C% 的增加，在钢中的影响更显著，在 C% 较低的钢中 P 可以不起坏的作用，而起良好的影响，使得钢具有较高的强度和塑性，如果进行正确的熔炼和热处理，则由磷化物的局部集中而产生的有害作用，可以大大地被中和或改善。

（3）熔炼工艺对造碳力学性能的影响

铸造碳钢其熔炼工艺方法对非金属夹杂物和气体的特性有着显著的影响，从而影响着其力学性能，比如转炉比平炉的力学性能低，酸性电炉钢比碱性电炉钢的韧性小，以及诸此等。

即使熔炼的方法相同，随着不同的工艺过程特性，钢的力学性能也有所不同，如碳的烧损多少直接影响其力学性能，锰的烧损和情况也会影响钢的力学性能，Mn 还原量愈多，则钢的屈服点愈高，用不同的铝含量，进行脱氧钢中的氧量对其塑性有很大的影响等。

铸件的凝固速度和非金属夹杂物在钢中的含量对力学性能影响亦很大。提高铸件凝固速度可以提高其强度，因此，金属型铸出的铸件强度高于砂型浇出的铸件强

度。非金属夹杂物对钢的强度极限起着不良的作用，同时直接影响其力学性能，均使其降低。

变质处理对铸造碳钢的力学性能起着良好的提高作用。获得紧密的铸件（通过充分的补缩、振动结晶，以及其他）是提高其强度和塑性的有力措施，钢的强度和塑性随着其基体中孔洞量的增加而大大地降低，铸件的力学性能随着铸件收缩受阻的增大而降低（因为某内应力增大）。

热处理可以在很大的范围内改变钢的强度，塑性以及其他力学性能，甚至于减低内应力的简单退火也能促进其力学性能的提高；采取各种热处理的方法，可以按照我们的需要改变其性能，故热处理在铸钢生产上得到广泛应用。

除了工艺和力学性能以外，在铸钢中物理和化学性能还会有很大的变化，常用的其他性能有：

传热性：碳钢的传热性随着 C%、Si% 和 Mn% 的增加而降低。

电阻：碳钢的电阻随着 C% 和其他元素的含量以及非金属夹杂物和针孔的增加而增加，但随着其基体组织中的纯铁体和奥氏体的增加而提高。

磁性：碳钢的磁性会在很大的范围内变化，磁性的大小决定于很多因素：化学成分、基体组织、内部结构的方向性，非磁性钢（潜水艇塔、磁性仪器罩子等所用钢）一定要具有奥氏体组织，而要获得这种组织只有采用大量合金元素时才能得到，因此非磁性钢属于特殊用途合金钢（详后述）。

腐蚀：铸钢零件在工作中几乎都要受到腐蚀，有时腐蚀可达到破坏的程度，使得铸件不能继续使用。腐蚀就是钢在各种介质中受到化学或电化学破坏的一种现象。

化学腐蚀：铸件在化学反应的作用下发生损坏的现象（即形成氧化皮的速度等）。金属内部扩散速度愈大，则它对腐蚀的抗力就愈小。抗腐蚀性能很好铸钢，属于特种钢，几乎都是合金钢。

电腐蚀：由很多因素起决定作用，如金属的化学成分、基体组织、非金属夹杂物的含量，均匀性、密度等位能高于铁的金属能增加对腐蚀的抗力，碳化物和纯铁体的存在促进钢的腐蚀。钢对电腐蚀的抗力随着非金属夹杂物含量和组织不均匀性的增加和密度的减小而降低。

浸蚀：钢的浸蚀在机械和化学作用的综合作用下所产生的破坏现象，决定于钢的化学成分、组织及其他因素，其抗浸蚀阻力随着钢中 C% 的增加而增加。

1.3 碳钢的铸造性能

铸造碳钢与铸铁相比，其铸造性能是比较差的。流动性较低；钢液容易氧化，形成夹渣；体收缩和线收缩都比较大；因而缩孔、缩松、热裂和冷裂的倾向都比较

大；比铸铁更容易产生气孔。所以这些在铸钢的铸造工艺上应充分予以考虑和解决。

1.3.1 流动性

流动性是体现充填铸型的能力，影响铸件完整性和清晰度。流动性好，就能保证钢液很好地充满铸型、获得尺寸准确、轮廓清晰的铸件。流动性好还有利于钢液中气体和非金属夹杂物的排渣，改善补缩条件，提高铸件致密度，并在一定程度上减少缩松和热裂的产生。

影响流动性的因素很多，但主要有：

(1) 钢液状态的影响

① 钢液过热度的影响。过热度越高，钢液黏度越低，钢液在铸型腔中流动的速度就越大；同时钢液在冷却过程中给予铸型的热量也越多，铸型被加热的温度也就越高，使钢在液态下可流动时间就越长，对 C% 为一定值的碳钢来讲其开始凝固温度为一定值。因此，钢液温度越高（即浇注温度越高），过热度越大，钢液流动性越好。

② 钢液中非金属夹杂物对其流动性影响也很大。由于整个冶金熔炼过程中，钢液中存在着许多种类非金属夹杂，因而，提高其黏度，且机械地阻碍钢液在型腔中的流动，降低钢液的流动性，数量越多，其流动性也就越差。如果是夹杂物呈多角形难熔的细小质点存在，则其流动性更差。如碳钢脱氧时所用脱氧剂的各类和加入次序对流动性影响也很大。其正确脱氧工艺应为：先加锰铁，后加硅铁或者直接加硅锰铁，此时脱氧产物主要是低熔点硅酸盐，因而钢液流动性好，若先加硅铁后加锰铁，脱氧产物主要是高熔点尖角形的 SiO_2 其尺寸极为细小，数量也较先加锰铁，后加硅铁时约多一倍多，因而流动性差。若用复合脱氧剂（Al-Mn-Si 或 Si-Ca 等），则形成低熔点脱氧产物，能很快地凝聚上浮，则其流动性更好。但如用 Al 脱氧过度，生成 Al_2O_3 夹杂物，尺寸小，钢液中不易上浮，量多时，使钢液变成黏稠，流动性大为降低。

(2) 化学成分的影响

碳：对钢液的实际流动性影响最大，当在一定的浇注温度时，钢液的流动性随 C% 的增加而增加，这是因为碳降低钢的液相温度，相应地增加了钢液的过热度（从图 1-1 铁-碳状态图中即可知）。碳还能降低钢的导热性，使钢液降温缓慢，有利于流动性的提高。如果浇注温度不变，那么，低碳钢的流动性比中、高碳钢差。

在同样过热温度下，钢液 C% 结晶温度间隔与钢液流动性之间存在着明显对应关系。当 C% 从 0 增至 0.1% 时（图 1-1A 至 H 间）。结晶温度间隔逐渐增大，钢液流动性相应降低；C% 从 0.1% 至 0.18% 时（H 至 J 间）。结晶温度间隔逐渐缩小，钢液流动性则相应地增加；当 C% 由 0.18% 至 0.51% 时（J 至 B 间），结晶温度间